王松峰,王永霞,郭　瑞. 小麦耐热性研究进展[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):1-7. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.001.

小麦耐热性研究进展

王松峰,王永霞,郭　瑞*
(河南省作物分子育种研究院/农业部黄淮中部小麦生物学与遗传育种重点实验室/河南省麦类种质资源创新与改良重点实验室,河南 郑州 450002)

摘要:随着全球平均气温持续攀升,高温胁迫日益成为小麦生产的限制因素。综述了高温胁迫对小麦产量和品质的影响、高温胁迫下小麦生理生化的变化以及小麦耐热性的遗传研究。通过常规育种手段与高通量分子标记辅助选择等现代生物育种技术的融合,培育耐热、高产的小麦新品种,保障全球粮食安全。

关键词:小麦;高温胁迫;耐热性;生理生化;遗传研究
中图分类号:S512.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20240073

小麦(*Triticum aestivum*)是全球范围重要的谷类作物,也是我国北方主要的食用细粮。伴随全球气候变暖的趋势,平均气温持续攀升,极端高温事件愈发频繁,这对小麦的生长构成了严峻挑战,高温胁迫正日益成为影响小麦生长发育的关键因素之一。小麦是喜凉的农作物,异常高温迫使小麦生长势减弱、育性降低并缩短籽粒灌浆时间,减少淀粉的积累,导致产量下降,品质变劣。据预测,平均气温每升高 1 ℃,全球小麦将减产约 6%[1]。干热风是黄淮麦区频繁出现的农业气象灾害,主要发生在小麦籽粒灌浆时期,温度超过 30 ℃是诱发干热风的主要因素。干热风对小麦各种生理功能造成损伤,降低产量,其危害面积可达小麦种植面积的 2/3,导致减产 10%~20%[2]。可见,高温已成为我国小麦生产面临的重大气象灾害之一。因此,鉴定并筛选小麦耐热品种,发掘优异基因与等位变异,对培育小麦耐热品种具有重要理论和实际应用意义。

1　高温胁迫对小麦产量与品质的影响

高温胁迫影响小麦的整个生长发育阶段,小麦在开花期和灌浆期等关键生育期对高温尤为敏感。据研究发现,当小麦分蘖期遭受高温时会降低分蘖数;拔节期遭受高温时会降低植株的株高,使得干物质的积累减少;开花期和灌浆期遭受高温会使小麦开花提前,减少单株穗数和穗粒数,缩短灌浆时间,降低粒质量,最终导致减产,品质下降[3-5]。Wardlaw等研究发现,小麦灌浆期遭受高温,一定温度范围内,温度每升高 1 ℃,其灌浆时间缩短约 3.1 d,千粒质量下降 2.8 g[6]。Fischer 等报道,利用小麦品种 Yecora 在拔节至开花期间进行高温处理,平均温度每升高 1 ℃,籽粒产量下降 3%~4%[7]。封超年等研究发现,小麦灌浆期遭受高温使籽粒胚乳细胞分裂时间缩短,从而降低粒质量[8]。郑飞等研究发现,高温能够抑制小麦灌浆期的光合作用以及同化物的转运、分配,导致小麦韧皮部和籽粒蔗糖积累减少,灌浆强度和千粒质量降低,最终产量下降[9]。

高温胁迫对小麦品质相关指标的影响不同。李永庚等研究发现,小麦灌浆前期遭受高温使麦谷蛋白/醇溶蛋白的比值以及麦谷蛋白大聚合体(GMP)含量增加,其蛋白质和淀粉的膨胀势、高峰黏度、湿面筋含量和沉降值升高,中期下降,灌浆后期遭受高温影响淀粉的积累,使蛋白质相对含量提高[10]。Hurkman 等研究发现,高温胁迫能够提高小麦籽粒淀粉含量,影响面条的加工品质,并通过改变面筋蛋白的稳定性影响湿面条的质地结构[11-12]。Sofield 等研究表明,当小麦灌浆期的温度 > 30 ℃时,由于淀粉的合成对高温更加敏感,蛋白质相对含量提

收稿日期:2024-07-31;修回日期:2024-09-27。
基金项目:农业生物育种重大专项(2023ZD04023);黄淮南片超高产广适小麦新品种培育(2023ZD040230304)。
作者简介:王松峰(1994—),男,硕士,研究实习员,主要从事小麦遗传育种研究。Email: 1014369049@qq.com。
* 通信作者:郭　瑞(1976—),男,硕士,副研究员,主要从事小麦新品种选育与示范。Email: guorui320@163.com。

高，并且热敏感品种蛋白质含量增加的幅度显著高于耐热品种[13]。闫素辉等研究发现，小麦花后遭受高温，其籽粒淀粉的含量、积累量及支链淀粉含量显著降低，由于支链淀粉的合成更易受高温抑制，其直链淀粉相对含量提高，直 / 支链淀粉含量的比例也相应提高[14]。

2　小麦在高温胁迫下生理生化的响应

2.1　高温胁迫对光合作用的影响

光合作用是植物物质转换和能量代谢的关键，是植物产量形成的基础，它对高温极其敏感。在遭遇高温环境时，小麦的叶绿体结构及其光合系统各个组成部分的稳定性均会受到显著的影响，这直接关系到植物的光合作用效率和整体生长状况。随着叶绿体的降解，位于类囊体膜上的光系统Ⅱ（PSⅡ）酶的活性降低，导致光合作用速率降低，缩短生长周期，降低产量[15]。研究发现，高温胁迫不仅会造成 PSⅡ损伤，也会抑制 PSⅡ的修复[16]，还会降低 Rubisco（核酮糖 -1,5- 二磷酸羧化酶 / 加氧酶）对 CO_2 的亲和力以及使 PEP（磷酸烯醇式丙酮酸）羧化酶和丙酮酸羧激酶活性下降[17]；当小麦叶片处于约 40 ℃的高温环境时，无论昼夜，均会导致 Rubisco 及 Rubisco 活化酶发生显著的结构与功能变化[18]。尤为关键的是，这些变化在黑暗条件下无法得到逆转，从而对光合作用的长期效能构成严重挑战[19]。据报道，Rubisco 活化酶是小麦进行光合反应的关键酶，高温胁迫下其酶活性下降，导致小麦光合能力降低[20]。高温刺激 Rubisco 活性抑制剂的合成，如 XuBP（木酮糖 -1，5- 二磷酸），它结合在 Rubisco 的催化位点并阻断该位点，而 Rubisco 激活酶是可从 Rubisco 催化位点去除紧密结合的抑制剂[21]。在高温胁迫的环境下，尤其是在日间气孔趋于关闭的条件下，保持 RCA（核酮糖 -1,5- 二磷酸羧化酶 / 加氧酶活化酶）结构的稳定性和 Rubisco 的活性，可确保卡尔文循环正常运行，从而在不利的温度条件下维持植物的基本代谢活动[22-23]。与耐热品种相比，热敏感品种因活性氧和丙二醛的积累，光合器官受损更为严重[24]。

2.2　高温胁迫对呼吸作用的影响

呼吸作用是所有植物生命的基础，将碳水化合物和其他富含能量的有机物氧化，释放能量维持植物生长和输出细胞产物，同时为生物合成提供碳骨架，维持细胞氧化还原平衡[25]。在一定的温度范围内呼吸速率随着温度升高而加快，但当温度提高到阈值后，植物体内酶蛋白变性甚至失活，促使呼吸速率迅速下降，影响能量供应[26]。对线粒体的超微结构观察发现，热胁迫导致抗逆性差的品种有更严重的嵴损伤和线粒体功能障碍[27]。Almeselmani 等研究发现，高温胁迫下植物叶片呼吸速率提高，热敏感品种的呼吸速率明显高于耐热品种[28]。呼吸作用能够通过降解和清除高温胁迫下积累在植物体内的一些有害物质，一定程度减轻高温给植物带来的危害[29]。

2.3　高温对细胞膜透性的影响

细胞膜是一种具有选择透过性的半透膜，能选择性地控制透过细胞所需的各种物质进出，以此稳定细胞内环境的稳态[30]。高温胁迫首先会破坏细胞膜的结构和功能，导致细胞膜的通透性增加，进而导致生物膜的疏水键断裂和膜选择性吸收功能丧失，使细胞内电解质大量泄露、细胞外溶液的电导率增加，通过电解质外渗量可直接测量相对电导率的变化从而判定生物膜受到的伤害[31]。在高温胁迫环境下，那些能够保持其膜系统功能完整性的植物展现出了更强的高温适应能力[32]。因此，植物对于高温胁迫的耐受性，在很大程度上取决于维持细胞膜结构完整性和功能效率的能力[33]。在高温胁迫的作用下，膜的热稳定性发生改变，附着在膜上的酶的活性也随之受到影响，使呼吸作用、光合反应和光呼吸等依赖膜上酶催化的反应受到阻碍，影响植物的生长发育[34]。若小麦籽粒灌浆发生在高温胁迫条件下，膜热稳定性高的品系比热稳定性低的品系产量更高[35]。

2.4　高温对蒸腾作用的影响

蒸腾作用是植物对水分和无机盐等物质吸收的动力源泉，能维持植物进行光合作用的适宜温度，是植物重要的生理活动[36]。温度是影响植物蒸腾速率的重要因素，一定的温度范围内，叶片气孔张开程度随着大气温度升高而变大，使蒸腾作用增强，加快水分子向外扩散的速率，起到降温的效果，防止叶片被灼伤[37]。当温度对植物构成胁迫时，叶片气孔张开程度逐渐下降，蒸腾速率下降，影响植物水分和无机盐等物质运输，难以维持有利于生长的温度，从而影响植株的发育[38]。研究表明，蒸腾作用与植物的耐热性具有一定的相关性，耐热品种在高温条件下维持较高的蒸腾速率[39]。

2.5　高温下抗氧化防御系统的反应

植物在高温胁迫下为避免细胞受到伤害，植物会启动抗氧化防御系统，其中活性氧（ROS）单线态氧、超氧自由基和过氧化氢反应是热应激下细胞常见事件[40]。在高温胁迫下，不同途径的抗氧化剂会积累于植物体内[41]。小麦抗氧化防御系统主要分为酶和非酶 2 种类型[42]。过氧化氢酶（CAT）、过氧化物酶（APX）、超氧化物歧化酶（SOD）、单脱氢抗坏血酸还原酶（MDHAR）、谷胱甘肽还原酶（GR）、脱氢抗坏血酸还原酶（DHAR）、谷胱甘肽 –S– 转移酶（GST）、愈创木酚过氧化物酶（GPX）构成酶抗氧化系统，而抗坏血酸（AsA）、谷胱甘肽（GHS）和生育酚构成非酶抗氧化系统[43]。SOD 是主要的抗氧化剂之一，有助于将抗氧化物转化为 H_2O_2；另一方面，ROS 的消除由 APX、GPX 和 CAT 控制[44]。为了消除 H_2O_2，APX 需要 AsA 和通过 AsA– 谷胱甘肽循环产生的还原型谷胱甘肽（GSH），在 AsA 氧化成单脱氢抗坏血酸（MDHA）的帮助下将 H_2O_2 转化为 H_2O，MDHA 再次歧化为脱氢抗坏血酸（DHA）[45]。高温胁迫下，耐热小麦品种的酶促抗氧化剂显著增加，过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性增加使小麦获得耐热性[46-47]。也有研究证明，抗干热风的小麦品种以较强的活性氧清除能力来维持植株正常生长和代谢[48]。

3　高温胁迫下热激转录因子的表达与调控

热激转录因子（Hsfs）广泛存在于植物中，对植物的生长发育调控、信号网络和非生物胁迫等过程发挥重要作用，是植物响应热应激中鉴定的主要转录因子之一[49]。Hsfs 通过与下游基因启动子中存在的热休克元件（HSE）结合，调节热激蛋白（HSP）基因的转录[50]。Hsfs 根据结构特征分为 A、B 和 C 类，其中 A 类结构的研究进展较多[51]。在小麦耐热研究中，也存在众多热激转录因子，将基因转到拟南芥中进行高温处理并被诱导，维持植株体内稳定。*TaHSFA1* 在高温条件下起作用，并与泛素结合蛋白相互作用改变 *TaHSFA1* 的活性[52]。将 *TaHsfA2d* 和 *TaHsfA6f* 转到拟南芥中过表达，增加了植株对高温、干旱和盐胁迫的耐受性[53]。在拟南芥中过表达 *AtHsfA2* 也显著增强植物对高温、氧化和盐胁迫的耐受性[54]。*TaHsfA2e–5D* 在拟南芥中的过表达也增加了耐热性和耐旱性，还有众多小麦热激转录因子 TaHsfA1–1、TaHsfA2–1、TaHsfA2–7、TaHsfA2–9、TaHsfA2–10、TaHsfA2–12 和 TaHsfA2–13 在拟南芥中的过表达也增强了植物耐热性[49,55-59]。研究证明，小麦的多数 Hsf 基因在拟南芥中高温处理，都能被诱导，并在耐热中发挥重要作用[60]。

4　小麦耐热性遗传改良研究进展

运用遗传改良技术培育具备耐热特性的小麦品种，无疑是应对高温胁迫、保障作物产量与品质的有力策略。Sun 等利用硬粒小麦（Langdon）进行耐热相关基因定位，用膜热稳定测定法在染色体 3A、3B、4A、4B 和 5A 定位到多个耐热位点[61]。Mason 等利用重组自交系（RIL）对热敏感指数进行遗传分析，得到 5 个分布在 1A、2A、2B 和 3B 上稳定表达的数量性状基因位点（QTL）[62]。Yang 等利用耐热品种（Ventnor）和热敏感品种（Karl92）构建的 $F_{2:3}$ 家系，以灌浆持续时间为指标鉴定出 2 个 QTL，解释了 11%和 12%的表型变异[63]。Vijayalakshmi等以 Ventnor 和 Karl92 构建 RIL 群体，在 2A、3A、3B、6A、6B 和 7A 染色体上定位出与热胁迫下叶片持绿性相关基因[64]。Paliwal 等利用 NW1014 和 HUW468 构建 RIL 群体，鉴定到 4 个与耐热相关的 QTL，分布在 2B、7B 和 7D 染色体上，能够解释 7.21% ~ 25.39%的表型变异[65]。陈希勇等以中国春和小麦 HOPE 染色体代换系为材料，以膜热稳定性为指标，检测到 HOPE 在 2A、3A、2B、3B 和 4B 染色体上具有耐热相关基因位点，显著提高中国春的耐热性[66]。李世平等以旱选 10 号和鲁麦 14 为亲本，利用单倍体技术快速构建群体，在灌浆时期以生理性状和千粒质量耐热指数进行定位，检测到染色体 1B、2D、5A、5B、6A、6B 和 7A 中存在与灌浆期耐热相关的位点，其中有 12 个加性效应 QTL 表型变异贡献率为 2.64% ~ 11.41%，17 对上位性效应 QTL 表型变异贡献率为 2.45% ~ 8.84%[67]。Kumar 等利用 205 个晚播小麦品种进行全基因组关联分析（GWAS），共鉴定出 69 个潜在热响应的 QTL[68]。Wang 等用 688 份冬小麦材料，以千粒质量和热胁迫敏感指数为指标进行 GWAS 分析，发现在 5A 染色体存在同时调控粒质量和耐热性的优良等位基因[69]。

在挖掘小麦耐热基因的同时，也有许多耐热基因通过转基因进行了验证。Xue 等在小麦中过表达 TaHsfA6f 显著提高其耐热性[70]。小麦耐热相关的基因 *TaMBF1c*、*TaFER–5B*、*TaOEP16–2–5B*、*TaB2* 和

TaGASR1 在拟南芥中异源表达，可以提高拟南芥的耐热性[71-75]。表 1 为经转基因研究证实在耐热性中发挥作用的基因。通过对小麦耐热遗传研究，可为小麦未来进行分子标记辅助选择提供基础，加快培育小麦耐热品种。

表 1　通过转基因研究证实具有耐热功能的基因

基因	受体	功能	参考
TaHsfA6f	普通小麦	过表达 *TaHsfA6f* 的转基因植物显示出更好的耐热性	Xue 等[70]
TaFER-5B	普通小麦	转基因植物表现出增强的耐热性	Zang 等[72]
TaGASR1	普通小麦	过表达 *TaGASR1* 的植物提高了对热应激和氧化应激的耐受性	Zhang 等[74]
TaHsfC2a	普通小麦	过表达 *TaHsfC2a* 的小麦表现出更好的耐热性	Hu 等[76]
TamiR159	水稻	相对于野生型，过表达 *TamiR159* 的植株对热胁迫更敏感	Wang 等[77]
TaMBF1c	水稻	过表达 *TaMBF1c* 在幼苗和生殖阶段均表现出比对照植物更高的耐热性	Qin 等[71]
TaOEP16-2-5B	拟南芥	过表达 *TaOEP16-2-5B* 基因的转基因植物表现出更强的热胁迫耐受性	Zang 等[73]
TaB2	拟南芥	拟南芥中过表达 *TaB2* 增强对热应激的耐受性	Singh 等[75]
TaWRKY33	拟南芥	*TaWRKY33* 转基因株系对热应激的耐受性增强	He 等[78]
TaNAC2L	拟南芥	过表达 *TaNAC2L* 通过激活热相关基因的表达增强耐热性	Guo 等[79]
TaHsfA2d	拟南芥	过表达 *TaHsfA2d* 的转基因植物表现出更好的耐热性	Chauhan 等[53]

5　总结与展望

高温胁迫已经成为限制小麦生产的重大灾害气候之一，选育耐热和高产的品种是有效提高我国小麦生产水平的重要途径。高温会破坏植物细胞膜的结构和功能，导致细胞膜的通透性增加，降低附在膜上的酶的活性，影响光合作用和呼吸作用，并缩短灌浆时间，从而影响小麦的产量。而耐热品种的膜热稳定性更高，能够快速启动抗氧化剂防御系统，显著提高酶促抗氧化剂；也能在高温条件下保持较高的蒸腾速率，从而增强小麦的耐热性，提高产量。

目前，已经挖掘了多个小麦耐热性位点或基因，并通过转基因方法在小麦和拟南芥中进行了验证，如现已发表关于小麦耐热相关的基因 *TaMBF1c*、*TaFER-5B*、*TaOEP16-2-5B*、*TaB2* 和 *TaGASR1* 异源表达可以提高拟南芥的耐热性，进而开发相应的分子标记[69-73]。小麦在高温胁迫下的生理响应和耐热遗传方面的研究成果，以及基因芯片技术、转基因技术及基因编辑的开发和利用，为培育小麦耐热品种提供了相应的理论基础和参考依据。因此，确立小麦耐热性指标，建立小麦耐热性指标评价体系，筛选鉴定耐热性小麦种质资源，通过常规育种手段与高通量分子标记辅助选择等现代生物育种技术的融合，选育耐热、高产小麦新品种，是应对全球气温变暖、保障全球粮食安全的重要举措之一。

参考文献：

[1] LIPIEC J,DOUSSAN C,NOSALEWICZ A,et al. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield:a review[J]. International Agrophysics,2013,27(4):463-477.

[2] 中国农业科学院品种资源研究所麦类研究室. 中国小麦品种资源的系谱及其特性[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982.

[3] 徐如强,孙其信,张树榛. 小麦耐热性研究现状与展望(综述) [J]. 中国农业大学学报,1998,3(3):33-40.

[4] WARRINGTON I J,DUNSTONE R L,GREEN L M. Temperature effects at three development stages on the yield of the wheat ear[J]. Australian Journal of Agricultural Research,1977,28(1):11-27.

[5] JOHNSON R C,KANEMASU E T. Yield and development of winter wheat at elevated temperatures[J]. Agronomy Journal, 1983,75(3):561-565.

[6] WARDLAW I F,SOFIELD I,CARTWRIGHT P M. Factors limiting the rate of dry matter accumulation in the grain of wheat grown at high temperature[J]. Functional Plant Biology, 1980,7(4):387.

[7] FISCHER R A, MAURER O R. Crop temperature modification and yield potential in a dwarf spring wheat[J]. Crop Science, 1976,16(6):855-859.

[8] 封超年,郭文善,施劲松,等. 小麦花后高温对籽粒胚乳细胞

发育及粒重的影响[J]. 作物学报,2000,26(4):399-405.
[9] 郑　飞,何钟佩. 高温胁迫对冬小麦灌浆期物质运输与分配的影响[J]. 中国农业大学学报,1999,4(1):73-76.
[10] 李永庚,于振文,张秀杰,等. 小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J]. 植物生态学报,2005,29(3):461-466.
[11] HURKMAN W J,MCCUE K F,ALTENBACH S B,et al. Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosynthesis in developing wheat endosperm[J]. Plant Science,2003,164(5):873-881.
[12] KOVACS M I P,FU B X,WOODS S M,et al. Thermal stability of wheat gluten protein:its effect on dough properties and noodle texture[J]. Journal of Cereal Science,2004,39(1):9-19.
[13] SOFIELD I,EVANS L T,COOK M G,et al. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat[J]. Functional Plant Biology,1977,4(5):785-797.
[14] 闫素辉,尹燕枰,李文阳,等. 花后高温对不同耐热性小麦品种籽粒淀粉形成的影响[J]. 生态学报,2008,28(12):6138-6147.
[15] KUMAR T A,CHARAN T B. Temperature-stress-induced impairment of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat[J]. Plant Physiology,1998,117(3):851-858.
[16] ALLAKHVERDIEV S I. Recent perspectives of photosystem II:structure, function and dynamics[J]. Photosynthesis Research, 2008,98(1/2/3):1-5.
[17] LADJAL M,EPRON D,DUCREY M. Effects of drought preconditioning on thermotolerance of photosystem II and susceptibility of photosynthesis to heat stress in cedar seedlings[J]. Tree Physiology,2000,20(18):1235-1241.
[18] MOHAN N,JHANDAI S,BHADU S,et al. Acclimation response and management strategies to combat heat stress in wheat for sustainable agriculture: a state-of-the-art review[J]. Plant Science,2023,336:111834.
[19] MATHUR S,JAJOO A,MEHTA P,et al. Analysis of elevated temperature-induced inhibition of photosystem II using chlorophyll a fluorescence induction kinetics in wheat leaves (*Triticum aestivum*)[J]. Plant Biology,2011,13(1):1-6.
[20] RAINES C A. Increasing photosynthetic carbon assimilation in C3 plants to improve crop yield:current and future strategies[J]. Plant Physiology,2011,155(1):36-42.
[21] PARRY M A J,KEYS A J,MADGWICK P J,et al. Rubisco regulation: a role for inhibitors[J]. Journal of Experimental Botany,2008,59(7):1569-1580.
[22] CHEN Y,WANG X M,ZHOU L,et al. Rubisco activase is also a multiple responder to abiotic stresses in rice[J]. PLoS One, 2015,10(10):e0140934.
[23] SHIVHARE D,MUELLER-CAJAR O. *In vitro* characterization of thermostable CAM Rubisco activase reveals a Rubisco interacting surface loop[J]. Plant Physiology,2017,174:1505-1516.
[24] ZOU M Q,YUAN L Y,ZHU S D,et al. Effects of heat stress on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of a heat-sensitive and heat-tolerant cultivar of Wucai (*Brassica campestris* L.)[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2016,39(1):30.
[25] O'LEARY A K,BLACKBUM J. The importance of the phosphatase PRL family sub-cellular localization during the cellular cycle[J]. Cancer Research,2019,79 (13Supp):1789-1789.
[26] HU L T,ZHU B L,LAI Y J,et al. $HMGCS_2$ promotes autophagic degradation of the amyloid-β precursor protein through ketone body-mediated mechanisms[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications,2017,486(2):492-498.
[27] GRIGOROVA B,VASEVA I,DEMIREVSKA K,et al. Combined drought and heat stress in wheat: changes in some heat shock proteins[J]. Biologia Plantarum,2011,55(1):105-111.
[28] ALMESELMANI M,DESHMUKH P S,CHINNUSAMY V. Effects of prolonged high temperature stress on respiration, photosynthesis and gene expression in wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties differing in their thermotolerance[J]. Global Science Books,2012,6(1):25-32.
[29] 屠小菊,汪启明,饶力群. 高温胁迫对植物生理生化的影响[J]. 湖南农业科学,2013(13):28-30.
[30] 夏莹莹,叶　航,马锦林,等. 4 个油茶品种的半致死温度与耐热性研究[J]. 中国农学通报,2012,28(4):58-61.
[31] AHMAD S,WAHID A,RASUL E,et al. Comparative morphological and physiological responses of green gram genotypes to salinity applied at different growth stages[J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica,2005,46(2):135-142.
[32] 胡海洲. 基于脂质组学的小麦响应高温胁迫的生理机制[D]. 郑州:河南农业大学,2023.
[33] ALMESELMANI M,ABDULLAH F,HARERI F,et al. Effect of drought on different physiological characters and yield component in different varieties of Syrian durum wheat[J]. Journal of Agricultural Science,2011,3(3):127-133.
[34] SOKOLOV M,LYUBARSKY A L,STRISSEL K J,et al. Massive light-driven translocation of transducin between the two major compartments of rod cells:a novel mechanism of light adaptation[J]. Neuron,2002,34(1):95-106.
[35] KHATOON S,MAJID S A,BIBI A,et al. Yield stability evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivated on different environments of district Poonch (AJK) Pakistan based upon water-related parameters[J]. International Journal of Agronomy and Agricultural Research,2016,8(4):2225-3610.
[36] 万长建,郑有飞,张建军. 小麦蒸腾速率规律分析及其计

算[J]. 中国农业气象,1998,19(6):12-15,20.
[37] 李　倩,谭雪莲. 旱地植物蒸腾作用研究进展[J]. 甘肃农业科技,2006(10):18-20.
[38] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学 [M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,1995.
[39] 王衍安,龚维红. 植物与植物生理[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
[40] SUZUKI N,RIVERO R M,SHULAEV V,et al. Abiotic and biotic stress combinations[J]. New Phytologist,2014,203(1):32-43.
[41] BOKSZCZANIN K L, SPOT-ITN CONSORTIUM, FRAGKOSTEFANAKIS S. Perspectives on deciphering mechanisms underlying plant heat stress response and thermotolerance[J]. Frontiers in Plant Science,2013,4:315.
[42] SATTAR A,SHER A,IJAZ M,et al. Terminal drought and heat stress alter physiological and biochemical attributes in flag leaf of bread wheat[J]. PLoS One,2020,15(5):e0232974.
[43] NOCTOR G,FOYER C H. Ascorbate and glutathione:keeping active oxygen under control[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,1998,49:249-279.
[44] BUTTAR Z A,WU S N,ARNAO M B,et al. Melatonin suppressed the heat stress-induced damage in wheat seedlings by modulating the antioxidant machinery[J]. Plants,2020,9(7):809.
[45] ASTHIR B. Protective mechanisms of heat tolerance in crop plants[J]. Journal of Plant Interactions,2015,10(1):202-210.
[46] BALLA K,BENCZE S,JANDA T,et al. Analysis of heat stress tolerance in winter wheat[J]. Acta Agronomica Hungarica,2009,57(4):437-444.
[47] ALMESELMANI M,DESHMUKH P S,SAIRAM R K. High temperature stress tolerance in wheat genotypes: role of antioxidant defence enzymes[J]. Acta Agronomica Hungarica,2009,57(1):1-14.
[48] 郭晓丽,白丽荣,吕亚慈,等. 抗干热风小麦新种质生理特性分析[J]. 种子,2018,37(12):89-91.
[49] BI H H,ZHAO Y,LI H H,et al. Wheat heat shock factor TaHsfA6f increases ABA levels and enhances tolerance to multiple abiotic stresses in transgenic plants[J]. International Journal of Molecular Sciences,2020,21(9):3121.
[50] ANDRÁSI N,PETTKÓ-SZANDTNER A,SZABADOS L. Diversity of plant heat shock factors:regulation,interactions, and functions[J]. Journal of Experimental Botany,2021,72(5):1558-1575.
[51] BANIWAL S K,BHARTI K,CHAN K Y,et al. Heat stress response in plants:a complex game with chaperones and more than twenty heat stress transcription factors[J]. Journal of Biosciences,2004,29(4):471-487.
[52] WANG H R,FENG M,JIANG Y J,et al. Thermosensitive SUMOylation of TaHsfA1 defines a dynamic ON/OFF molecular switch for the heat stress response in wheat[J]. The Plant Cell,2023,35(10):3889-3910.
[53] CHAUHAN H,KHURANA N,AGARWAL P,et al. A seed preferential heat shock transcription factor from wheat provides abiotic stress tolerance and yield enhancement in transgenic *Arabidopsis* under heat stress environment[J]. PLoS One,2013,8(11):e79577.
[54] OGAWA D,YAMAGUCHI K,NISHIUCHI T. High-level overexpression of the *Arabidopsis HsfA2* gene confers not only increased themotolerance but also salt/osmotic stress tolerance and enhanced callus growth[J]. Journal of Experimental Botany,2007,58(12):3373-3383.
[55] MENG X Z,ZHAO B H,LI M Y,et al. Characteristics and regulating roles of wheat *TaHsfA2-13* in abiotic stresses[J]. Frontiers in Plant Science,2022,13:922561.
[56] ZHANG Y J,ZHANG Y Y,ZHANG H N,et al. Characterization and regulatory roles in thermotolerance of wheat heat shock transcription factor gene *TaHsfA2e*[J]. Acta Agronomica Sinica,2018,44(12):1818.
[57] MA Z Y,LI M Y,ZHANG H N,et al. Alternative splicing of *TaHsfA2-7* is involved in the improvement of thermotolerance in wheat[J]. International Journal of Molecular Sciences,2023,24(2):1014.
[58] GUO X L,YUAN S N,ZHANG H N,et al. Heat-response patterns of the heat shock transcription factor family in advanced development stages of wheat (*Triticum aestivum* L.) and thermotolerance-regulation by TaHsfA2-10 [J]. BMC Plant Biology,2020,20(1):364.
[59] LIU Z H,LI G L,ZHANG H N,et al. *TaHsfA2-1*,a new gene for thermotolerance in wheat seedlings: characterization and functional roles[J]. Journal of Plant Physiology,2020,246/247:153135.
[60] DUAN S N,LIU B H,ZHANG Y Y,et al. Genome-wide identification and abiotic stress-responsive pattern of heat shock transcription factor family in *Triticum aestivum* L.[J]. BMC Genomics,2019,20(1):257.
[61] SUN Q X,QUICK J S. Chromosomal locations of genes for heat tolerance in tetraploid wheat[J]. Cereal Research Communications,1991,19(4):431-437.
[62] MASON R E,MONDAL S,BEECHER F W,et al. QTL associated with heat susceptibility index in wheat (*Triticum aestivum* L.) under short-term reproductive stage heat stress[J]. Euphytica,2010,174(3):423-436.
[63] YANG J,SEARS R G,GILL B S,et al. Quantitative and molecular characterization of heat tolerance in hexaploid wheat[J]. Euphytica,2002,126(2):275-282.
[64] VIJAYALAKSHMI K,FRITZ A K,PAULSEN G M,et al. Modeling and mapping QTL for senescence-related traits in

winter wheat under high temperature[J]. Molecular Breeding, 2010,26(2):163-175.

[65] PALIWAL R,RODER M S,KUMAR U,et al. QTL mapping of terminal heat tolerance in hexaploid wheat (*T. aestivum* L.)[J]. Theoretical and Applied Genetics,2012,125(3):561-575.

[66] 陈希勇,赵爱菊,李亚军,等. 小麦耐热性基因的染色体定位和遗传效应分析[J]. 华北农学报,2007,22(增刊 2):1-5.

[67] 李世平,昌小平,王成社,等. 小麦灌浆期耐热性 QTL 定位分析[J]. 中国农业科学,2013,46(10):2119-2129.

[68] KUMAR S,KUMARI J,BHUSAL N, et al. Genome-wide association study reveals genomic regions associated with ten agronomical traits in wheat under late-sown conditions [J]. Frontiers in Plant Science,2020,11:549743.

[69] WANG X B,GUAN P F,XIN M M, et al. Genome-wide association study identifies QTL for thousand grain weight in winter wheat under normal- and late-sown stressed environments[J]. Theoretical and Applied Genetics,2020,134 (1):143-157.

[70] XUE G P, DRENTH J, MCINTYRE C L, et al. TaHsfA6f is a transcriptional activator that regulates a suite of heat stress protection genes in wheat (*Triticum aestivum* L.) including previously unknown Hsf targets [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(3): 1025-1039.

[71] QIN D D,WANG F,GENG X L, et al. Overexpression of heat stress-responsive *TaMBF1c*,a wheat (*Triticum aestivum* L.) Multiprotein Bridging Factor,confers heat tolerance in both yeast and rice[J]. Plant Molecular Biology,2015,87(1):31-45.

[72] ZANG X S,GENG X L,WANG F,et al. Overexpression of wheat ferritin gene *TaFER-5B* enhances tolerance to heat stress and other abiotic stresses associated with the ROS scavenging[J]. BMC Plant Biology,2017,17(1):14.

[73] ZANG X S,GENG X L,LIU K L,et al. Ectopic expression of *TaOEP16-2-5B*,a wheat plastid outer envelope protein gene, enhances heat and drought stress tolerance in transgenic *Arabidopsis* plants[J]. Plant Science,2017,258:1-11.

[74] ZHANG L Y,GENG X L,ZHANG H Y,et al. Isolation and characterization of heat-responsive gene *TaGASR1* from wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Plant Biology, 2017,60(1):57-65.

[75] SINGH A,KHURANA P. Molecular and functional characterization of a wheat B2 protein imparting adverse temperature tolerance and influencing plant growth[J]. Frontiers in Plant Science,2016,7:642.

[76] HU X J , CHEN D D, MCLNTYRE C L,et al. Heat shock factor C2a serves as a proactive mechanism for heat protection in developing grains in wheat via an ABA-mediated regulatory pathway[J]. Plant Cell & Environment,2018,41(1):79-98.

[77] WANG Y,SUN FL,CAO H,et al. *TamiR159* directed wheat *TaGAMYB* cleavage and its involvement in anther development and heat response[J]. PLoS One,2012,7(11):e48445.

[78] HE G H, XU J Y, WANG Y X, et al. Drought-responsive WRKY transcription factor genes *TaWRKY1* and *TaWRKY33* from wheat confer drought and/or heat resistance in *Arabidopsis*[J]. BMC Plant Biology,2016,16:1-16.

[79] GUO W W,ZHANG J Z,ZHANG N,et al. The wheat NAC transcription factor *TaNAC2L* is regulated at the transcriptional and post-translational levels and promotes heat stress tolerance in transgenic *Arabidopsis*[J]. PLoS One,2015,10(8): e0135667.

Research Progress in Heat Tolerance of Wheat

WANG Songfeng, WANG Yongxia, GUO Rui

(Institute of Crop Molecular Breeding, Henan Academy of Agricultural Science / Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in Central Huanghuai Area, Ministry of Agriculture / Henan Key Laboratory of Wheat Germplasm Resources Innovation and Improvement, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: As the global average temperature continues to rise, heat stress has increasingly become a limiting factor for wheat production. The paper reviews the physiological and biochemical changes of wheat under heat stress, the impact of heat stress on the yield and quality of wheat, and the genetic research on heat tolerance of wheat. Integrating conventional breeding methods with modern biotechnological breeding techniques such as high-throughput molecular marker-assisted selection to cultivate new wheat varieties that are heat-tolerant and high-yield is an important measure to ensure global food security.

Key Words: Wheat; High-temperature stress; Heat tolerance; Physiology and biochemistry; Genetic research

李宇星,梁志浩,郭爱奎,等. 基于 Web of Science 的啤酒大麦产量和品质文献计量分析[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):8-15,20. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.002.

基于 Web of Science 的啤酒大麦产量和品质文献计量分析

李宇星,梁志浩,郭爱奎,乔海龙,徐　肖,张英虎,杨红燕,程怡璠,汪　强,薛　松,于文青,沈会权*
(江苏沿海地区农业科学研究所,江苏 盐城 224002)

摘要:采用 R 语言 Bibliometrix 软件包,以 Web of Science 核心数据库为数据源,从大麦产量和品质研究的发文量、高产国家、高产期刊、高被引文章、高产作者和高频关键词等方面进行计量分析,基于文献计量学的角度分析近 20 年(1997—2023 年)来大麦产量和品质研究的发展状况,构建了包括文献关键词共现和关键词聚类分析的图谱,进而研究啤酒大麦产量和品质的最新研究动态、研究热点和发展趋势。研究发现:论文高产国家中,美国的发文数量最多,其次是加拿大和澳大利亚。这一领域的学术论文主要发表在 *Journal of the Institute of Brewing* 和 *Agronomy Journal* 期刊。通过关键词的共现和聚类分析,目前关于啤酒大麦产量和品质的研究主要聚焦于啤酒大麦的麦芽品质,以及大麦的生长发育和产量的影响等方面。

关键词:啤酒大麦;Web of Science;产量;品质;文献计量分析;R 语言
中图分类号:S513　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20240067

在全球谷物种植面积中,大麦排名第 4,有高产、稳产和适应性强等优点[1-2]。大麦是啤酒制作的主要材料,随着我国啤酒酿造行业的快速发展,国内对啤酒大麦的需求量正逐渐增加[3-4]。同时,啤酒消费及生产的变化,对优质大麦的需求也在不断地增加。啤酒的品质受酿造技术的影响很大,而啤酒大麦的自身品质也是一个必须考虑的因素,这也直接关系到啤酒大麦的种植效益[5-7]。如何平衡并提高啤酒大麦的产量和品质,是当前亟待解决的主要问题。

文献计量学的研究对象是文献计量特征和文献体系,通过对文献情报进行分析,可进一步评价该科学领域的发展状态、水平和未来趋势[8-9]。Web of Science(WOS)核心数据库是一个跨库平台,它覆盖了包括自然科学、工程技术以及社会科学等多个领域[10-12]。Bibliometrix 是一款专为 R 语言运行环境设计的科学文献计量软件,该软件能够导入 Web of Science 核心数据库内的文献数据,并且能够对相关的科学文献指数进行统计分析[13-14]。

目前,虽然有许多关于啤酒大麦产量和品质的研究,但是针对当前研究中的热门问题、研究动态和发展趋势等的计量分析较少。本研究基于 Web of Science 核心数据库和 R 语言 Bibliometrix 软件包,对 1997—2023 年间发表的有关啤酒大麦产量和品质的研究文献进行计量分析,旨在探索啤酒大麦所在学术领域的研究趋势,并追踪最新的学术动态。

1　材料与方法

1.1　数据来源

本文以 WOS 数据库作为数据源,以主题 Topic Search =("malting barley"OR"beer barley" OR "malt barley")AND Topic Search =(yield OR production OR output OR yields)AND Topic Search = (quality OR "grain quality"OR qualities)作为检索式,于 2024 年 5 月 27 日检索到发表于 1997—2023 年有关啤酒大麦产量和品质的研究文献 363 篇,筛选剔除重复后,导入 Bibliometrix 软件包共 354 篇。

1.2　统计方法

采用 R 语言 Bibliometrix 软件包,以 Web of Science 核心数据库为数据源,对 1997—2023 年发表的有关啤酒大麦产量和品质的文献从高被引文

收稿日期:2024-07-18;修回日期:2024-09-26。
基金项目:盐城市科技局项目(YCBK2023023);国家大麦青稞产业技术体系盐城综合试验站(CARS-5-5B);江苏省特粮特经产业技术体系盐城示范基地[JATS(2023)214];农业重大技术协同推广计划(2022-ZYXT-04-2);江苏沿海地区农业科学研究所基金(YCBK2023065)。
作者简介:李宇星(1997—),男,硕士,研究实习员,研究方向为大小麦遗传育种与高产栽培。Email: 18702289708@163.com。
* 通信作者:沈会权(1975—),男,硕士,研究员,研究方向为大小麦遗传育种与高产栽培。Email: 980266228@qq.com。

章、高产作者、高频关键词和国家等方面进行计量分析，利用 Citespace 构建关键词共现及关键词聚类分析图谱。

2　结果与分析

2.1　发文量情况

经检索，共获得 1997—2023 年 354 篇文献，其中正式发表的期刊论文为 312 篇。在本文所述的研究时段有 1 242 位作者在 144 个期刊上发表了 312 篇论文，引用的参考文献达 9 705 篇，每篇论文年平均引用量为 11.84 次。独立完成论文的作者有 13 位，每篇论文平均有 5.01 个共同作者完成（表 1）。

1997—2023 年，啤酒大麦产量和品质的研究受到了不少学者的关注，年发文量整体呈增加趋势，其中 2021 年论文发表数最多（图 1）。

表 1　所选文献信息

项目	数量
发表论文数量 / 篇	312
出现的作者数 / 个	1 242
所发表期刊的数量 / 个	144
参考文献 / 篇	9 705
年份	1997—2023
年均引用量 / 次	11.84
独立完成论文的作者数 / 个	13
平均每篇论文中的作者数 / 个	5.01

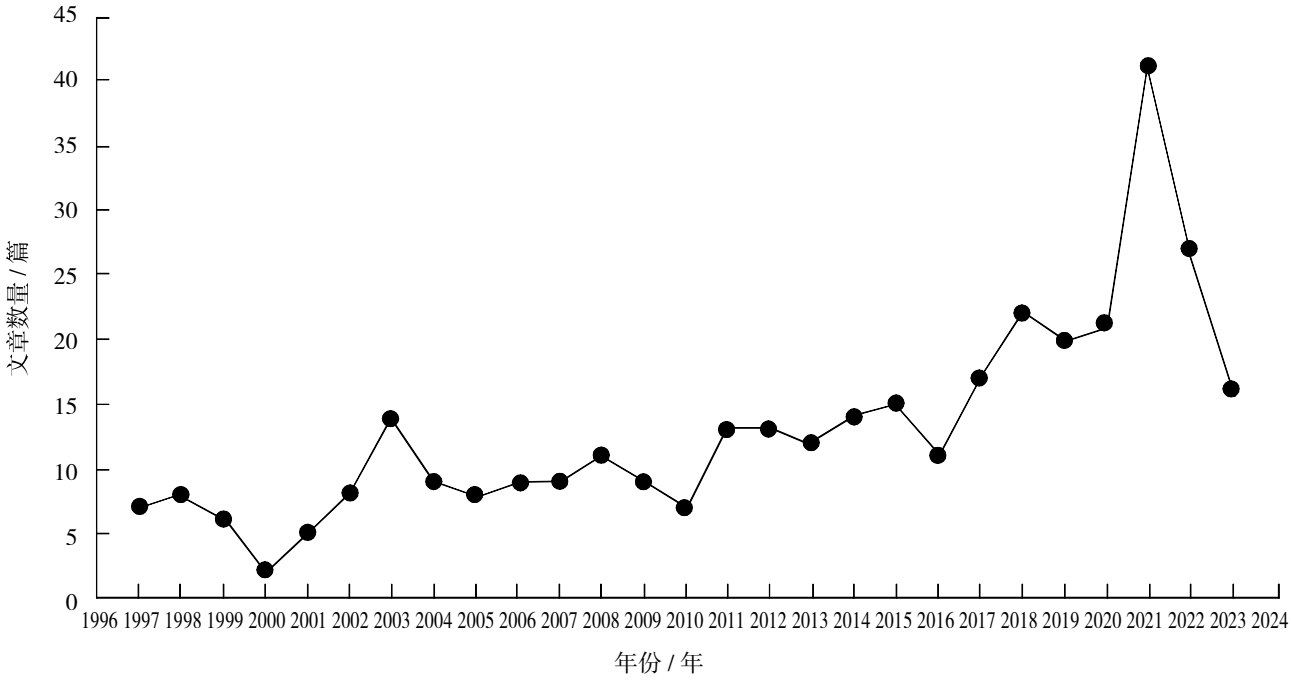


图 1　所选文献信息

2.2　TOP 10 发文国家

根据获取的信息，对 1997—2023 年间各个国家的公开信息进行了研究，并将研究成果展现在表 2 中。在展现各领域间的交叉联系、实际体现论文的应用价值以及提升期刊的品质、衡量个体的贡献等多种层面，发表文章的数目与其被引述的频率都起到了至关重要的作用，这也是衡量国家及个人在科学领域影响力的有效指标[15]。

表 2　TOP 10 发文高产国家

排名	国家	文章数 / 篇	发文频率 /%
1	美国	60	16.95
2	加拿大	35	9.89
3	澳大利亚	23	6.50
4	捷克	22	6.21
5	英国	18	5.08
6	阿根廷	16	4.52
7	中国	12	3.39
8	德国	12	3.39
9	埃塞俄比亚	11	3.11
10	日本	11	3.11

研究发现，发文量最大的国家是美国，占 16.95%。从区域上看，北美国家在啤酒大麦的研究中拥有重要地位，加拿大和美国的发文总量为 95 篇，占 26.84%；澳大利亚发文量为 23 篇，位居第 3 位，占 6.50%。发文量排名在前 10 的欧洲国家有 2 个，分别是捷克和英国，分别占 6.21%和 5.08%。大洋洲、北美洲和欧洲，为世界三大啤酒大麦产地，啤酒大麦由于这三大产地独特的地理位置和自然条件，赢得了广大消费者的喜爱[16]。而中国的发文量为 12 篇，作为发展中国家，人口众多且对粮食需求量大，基础科学研究和生产实际不匹配，加大农业科技投入来提高粮食产量至关重要[17]。随着我国经济迅速发展，对啤酒大麦的产量和品质需求日益提高，如何提高啤酒大麦产量和品质成为我国当前需要解决的问题。目前，国内外啤酒大麦产量和品质研究发表相关论文数量排名前 10 的国家均为外国，其中美国居多，这表明我国在此方向研究还有十分广阔的发展空间。

2.3　发文量 TOP 10 期刊

对特定研究领域的学术期刊进行评估，能够找出这个领域 SCI（Science Citation Index）收录的主要学术期刊[18]。影响因子是衡量期刊影响力的通用指标，它表示某期刊前 2 年发表的论文在统计当年的被引用总次数除以该期刊在前 2 年内发表的论文总数[19]。对 1997—2023 年啤酒大麦产量和品质的相关文献进行计量分析，发现来自英国的 *Journal of the Institute of Brewing* 上发表的文章最多，为 23 篇，该刊 2022—2023 年影响因子为 2.6。其次为来自美国的 *Agronomy Journal*，为 17 篇，该刊 2022—2023 年影响因子为 2.1。紧随其后的是加拿大的 *Canadian Journal of Plant Science* 和英国的 *Journal of Cereal Science*，文章数分别是 17、14 篇，2022—2023 年期刊影响因子分别为 1.2、3.8（表 3）。Elsevier、Wiley 和 Springer 是发文量 TOP 10 期刊的主要出版商。

对 1997—2023 年间发表的文献进行被引频次的分析，*Journal of the Institute of Brewing*，*Crop Science*，*Agronomy Journal* 和 *Journal of Cereal Science* 被引频次较多，分别为 542、395、368、360 次（图 2）。

表 3　发文量 TOP 10 期刊

排名	期刊	发文量 / 篇	2022—2023 年影响因子	科睿唯安分区
1	*Journal of the Institute of Brewing*	23	2.6	Q2
2	*Agronomy Journal*	17	2.1	Q2
3	*Canadian Journal of Plant Science*	17	1.2	Q3
4	*Journal of Cereal Science*	14	3.8	Q1
5	*Crop Science*	12	2.3	Q1
6	*Theoretical and Applied Genetics*	11	5.4	Q1
7	*Journal of the American Society of Brewing Chemists*	10	2.0	Q2
8	*Journal of Plant Registrations*	9	0.8	Q3
9	*Euphytica*	8	1.9	Q2
10	*European Journal of Agronomy*	8	5.2	Q1

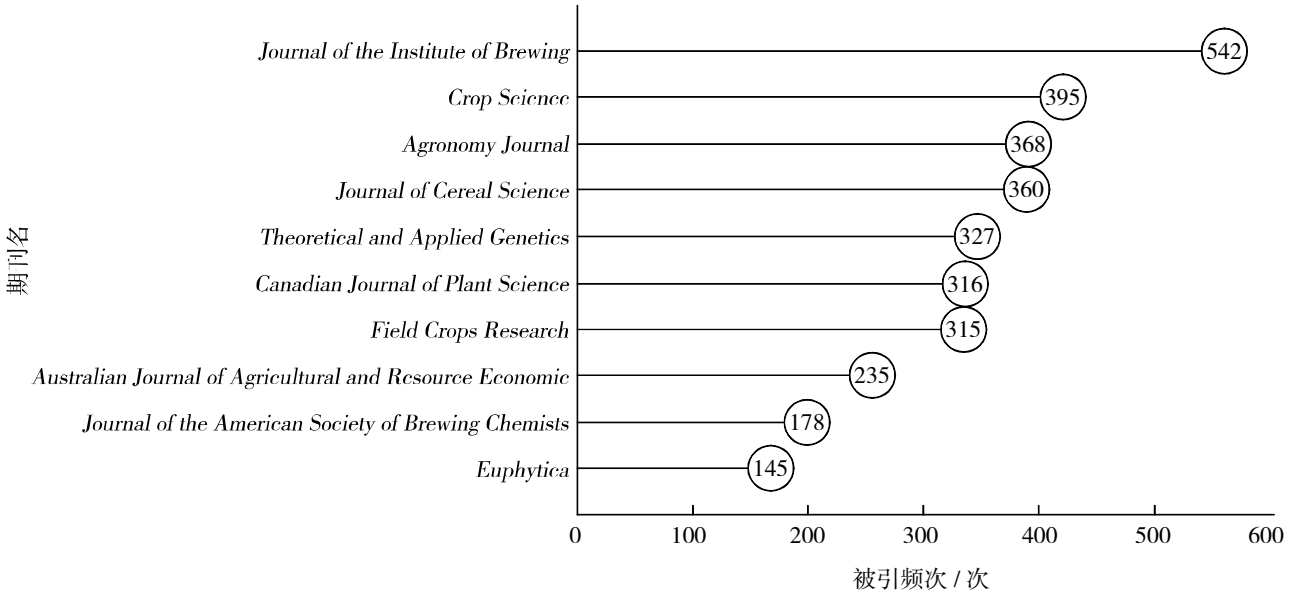


图 2　TOP 10 被引期刊

2.4　TOP 10 高被引文章

论文的被引频次揭示了一篇论文的科研实力和影响力，同时也在一定层面上展示了公众对特定研究项目的关心程度，这能够评估科学论文在科研活动中的应用和受到的重视[10,15]。在目前的研究评价中，被引频次是一个关键的指标。在 Web of Science 核心数据库中，中国、美国、加拿大、澳大利亚、英国和阿根廷等国家发表了有关啤酒大麦产量和品质的研究论文。基于已有的数据，对 1997—2023 年发表的文献进行分析（表 4），可发现 TOP 10 高被引文章中，被引次数最高的是澳大利亚詹姆斯·库克大学的 Agegnehu G 于 2016 年在 *Science of the Total Environment* 上发表的“The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia”。该文作者发现，与最高氮肥施用量相比，施用有机改良剂和氮肥显著提高了大麦产量，增加了 54% ~ 60%。该论文发表之后引用次数达到了 113 次。紧随其后的是丹麦 Ris 国家实验室的 Hansen P M 于 2002 年在 *Journal of Agricultural Science* 上发表的“Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression”，该文章利用作物模型预测大麦的产量和品质，结果表明，所有模型均能较好地预测大麦的产量，但无法准确预测大麦蛋白质含量。该文章的被引频次为 106 次。

表 4　TOP 10 高被引文章

排名	著文作者与期刊	论文 DOI	总被引频次 / 次
1	Agegnehu G,et al. 2016, *Science of the Total Environment*	10.1016/j.scitotenv.2016.05.033	113
2	Hansen P M,et al. 2002, *Journal of Agricultural Science*	10.1017/S0021859602002320	106
3	Ostergaard O,et al. 2002, *Proteomics*	10.1002/1615-9861(200206)2:63.0.CO;2-E	83
4	Muurinen S,et al. 2006, *Crop Science*	10.2135/cropsci2005-05-0046	82
5	Nielsen L K,et al. 2014, *International Journal of Food Microbiology*	10.1016/j.ijfoodmicro.2014.03.023	80
6	Abeledo L G,et al. 2003, *Euphytica*	10.1023/A:1023089421426	77
7	Blasco L,et al. 2011, *International Microbiology*	10.2436/20.1501.01.136	69
8	Kihara M,et al. 1998, *Plant Breeding*	10.1111/j.1439-0523.1998.tb01967.x	67
9	Garcia G A,et al. 2016, *Field Crops Research*	10.1016/j.fcr.2016.06.002	65
10	Mckenzie R H,et al. 2005, *Canadian Journal of Plant Science*	10.4141/P04-152	61

2.5　TOP 10 高产作者

通过对作者的深入分析，结合发文数量、被引频次能够快速定位该领域的重要作者，并能够找到该领域的高产出研究人员[10]。从图 3 可以看出，TOP 10 高产作者中，最高产作者是 Turkington T K，发文数量是 15 篇，O'Donovan J T 次之，发文数量是 13 篇，Edney M J、Harker K N 和 Juskiw P E 发文数量相同，并列第 3。

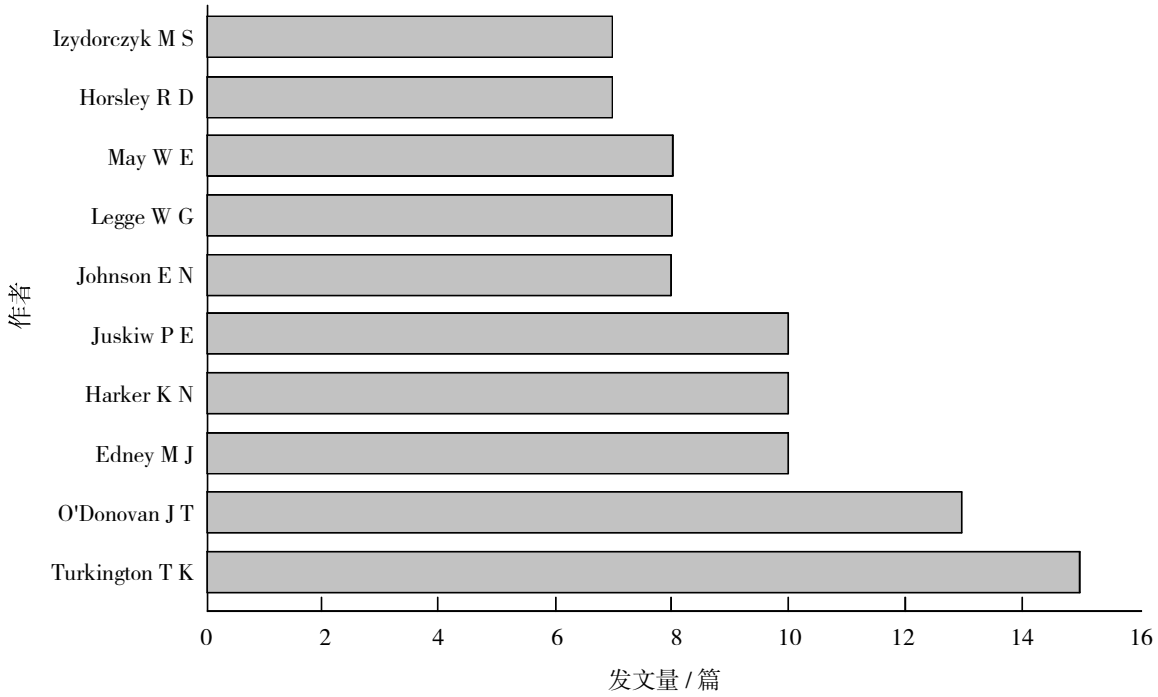


图 3　TOP 10 高产作者

2.6　高频关键词及 TOP 10 关键词共现和聚类分析

关键词是对文章的深入总结和精炼，从众多文章中抽取的高频核心词汇在某种程度上能够反映出该领域的研究热点[20]，在文献中找到这些核心词汇能帮助人们快速地找到与此学科相关的文献信息。对文献关键词进行分析，结果如图 4 所示。

图 4　高频关键词词云图

高频词中 Quality（品质）、Wheat（小麦）、Yield（产量）、Growth（生长）和 Nitrogen（氮）是排在前 5 的关键词。余下的关键词还有 Cultivar（栽培品种）、Malting barley（啤酒大麦）、Spring barley（春性大麦）、Cultivars（品种）、Grain-yield（籽粒产量）、Management（管理）、Winter-wheat（冬小麦）、Seeding rate（播种量）、Soil（土壤）和 Protein（蛋白质）等，表明研究热点集中在大、小麦产量和品质的研究、氮素和品种对啤酒大麦籽粒产量和品质的影响以及播种量和田间管理等对啤酒大麦品质、蛋白质和产量的影响等方面。

共词分析法作为一种文献评估技术，它能够针对特定的学术领域的核心概念和趋势，在相同的文章内部进行深入的解读，从而推测出这些领域内不同的趋势和实体之间的联系[21-22]。该方法目前已被多个研究领域所应用，旨在了解不同领域或学科的当前研究动态、研究热点和历史发展进程[23-24]。通过 Bibliometrix 软件包，可将关键词的共词分析结果进行可视化呈现，这样能够明确地指出在特定的研究领域内，哪些关键词经常被同时使用，并且这种使

用频率的增加意味着这个领域的研究热点更为突出[25-26]。关键词用节点表示，节点越大，意味着该关键词和其他词的共现次数越多，节点间的连接线粗细则反映了 2 个节点共现的次数[24]。图 5 中 Quality（品质）、Wheat（小麦）、Yield（产量）、*Hordeum vulgare*（大麦）、Malting quality（麦芽品质）、Malting barley（啤酒大麦）、Growth（生长）等词的节点较大，节点之间的连线较粗。表明啤酒大麦麦芽品质和大麦生长发育及产量的影响等是目前啤酒大麦产量和品质研究的主要方向。

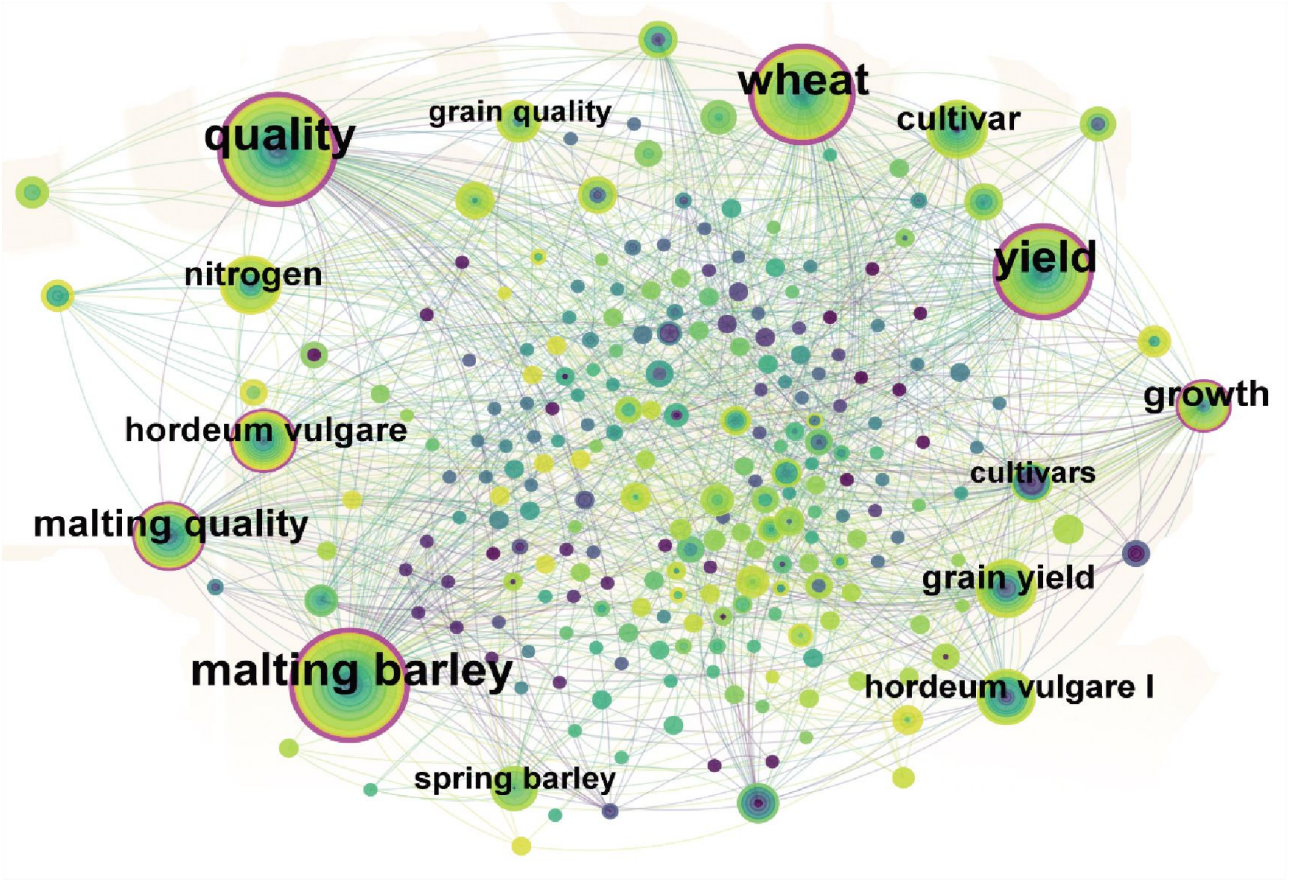


图 5　关键词共现的网络图谱

聚类分析是一种常用的文献计量技术，它在统计学领域被广泛应用于研究“物以类聚”的多元统计分析问题[27-28]。这种分析方法的核心理念是将每个关键词视为一个类别，然后根据预先设定的方式来计算聚类统计量，最后将 2 个类别合并，接着重新计算每个类别之间的距离，并继续将距离最近的 2 个类别合并[29-31]。通过反复的操作，可以将每个关键词都归类到预设的类别中，从而确定关键词之间的亲疏关系[32-33]。如图 6 所示，S（聚类评价值）为 0.92，大于 0.50，聚类效果好。关键词分为 17 个聚类，聚类 0 为Quantitative trait loci（数量性状位点），聚类 1 为 Protein content（蛋白质含量），聚类 2 为 Malting barley quality（啤酒大麦品质），聚类 3 为 Barley（大麦），其他聚类分别为 Principal component analysis（主成分分析）、Mycotoxin（真菌毒素）、Genetic improvement（遗传改良）、diastatic power（糖化力）、Malt modification（麦芽降解作用）、Rate（速率）、Disease resistance（抗病性）、Proteome analysis（蛋白质组学分析）、Agro-meteorological indices（农业气象指标）、Crop rotation（轮作）、Zone drying irrigation（区域干旱灌溉）、Grain size（籽粒大小）、Barley Mutants（大麦突变体）、Sparkling wine（起泡酒）。由图 6 可知，研究者的研究方向主要涉及耕作制度、蛋白质组学、气象、遗传性状和啤酒大麦品质等。

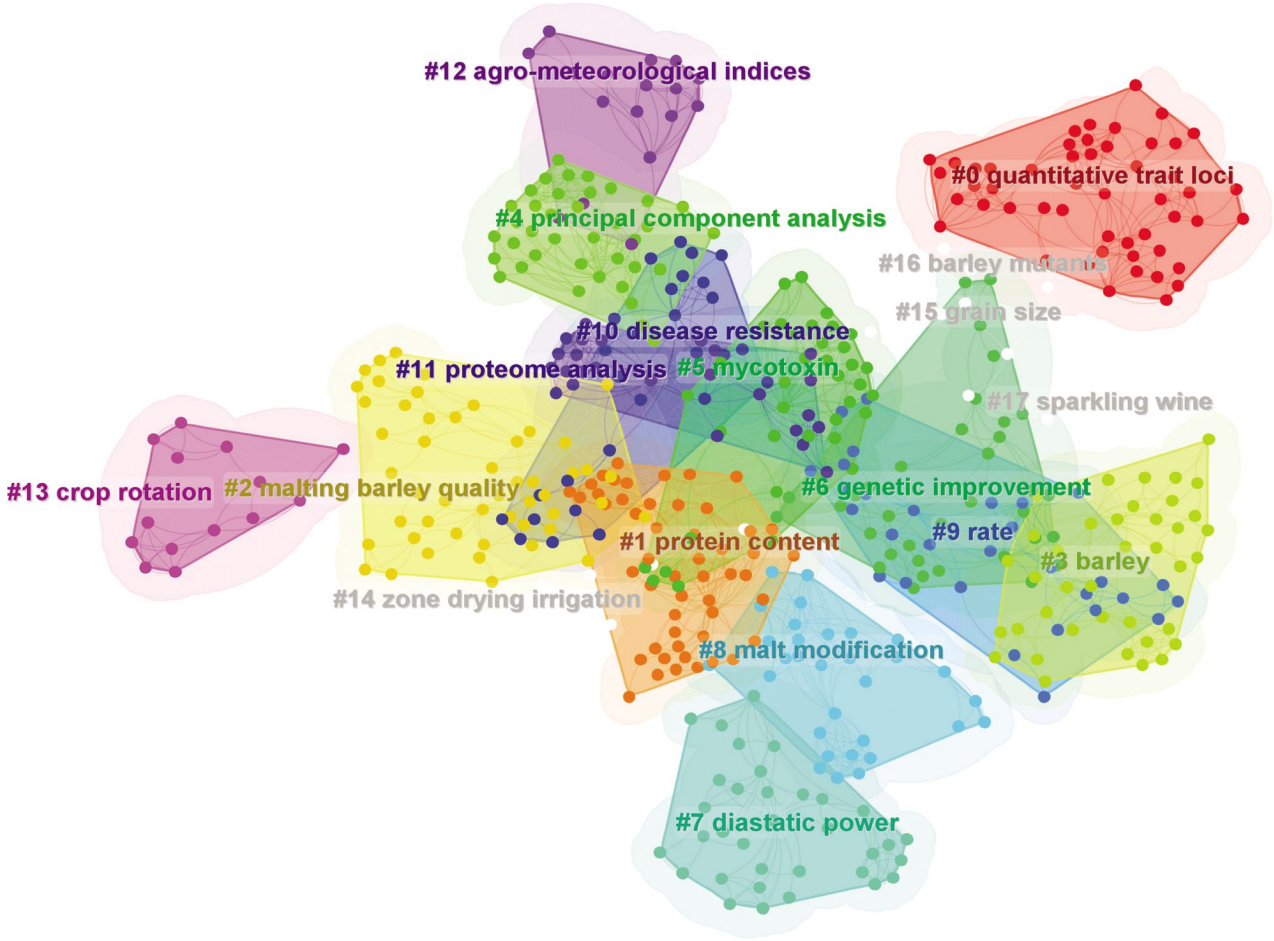


图 6　关键词的聚类概念图

3　结论与展望

由于检索方法的设定以及时间范围的约束，能够被应用到文献计量分析中的文献较少，这导致我们的研究受到一定限制。另一方面，本文的检索文献主要是从 Web of Science 数据库获取，而没有包含中文数据库中关于啤酒大麦产量与品质相关文献的计量分析。本研究只是基于文献计量的视角来探讨啤酒大麦的产量与品质相关的研究情况，没有深入探讨它在何种程度上会受到某些因素的影响：比如不同耕作制度对啤酒大麦产量的影响，不同品种对啤酒大麦品质的影响，气象因子对啤酒大麦产量和品质的影响等。同时，本研究在对高被引文章的分析时也发现，利用氮素和模型来研究啤酒大麦产量的研究较多，但对啤酒大麦品质的研究较为缺乏。

全球对于啤酒大麦产量和品质的关注和重视正在逐渐提高，在这一研究领域发文较多的有美国、加拿大、澳大利亚和捷克等国家；该领域 TOP 10 的高产作者中，Turkington T K 最高产；该领域论文主要发表在 *Journal of the Institute of Brewing*，*Agronomy Journal*。在 *Science of the Total Environment* 上发表的“The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia”为高被引文章的第 1 位，其次是 *Journal of Agricultural Science* 上发表的“Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression”。目前对啤酒大麦产量和品质的研究主要集中在啤酒大麦麦芽品质、生长发育及产量的影响等方面。本研究可为初学者提供关于该领域的研究方向、发展动态以及研究热点的重要指引。

参考文献：

[1] 于家华. 大麦镉积累基因型差异及全基因组关联分析[D].

杭州:浙江大学,2019.
[2] NELSON K. Barley basics[J]. Food Product Design,2010,20(7):18,20.
[3] PEJIN J D, RADOSAVLJEVIĆ M S,GRUJIĆ O S,et al. Possible application of brewer's spent grain in biotechnology[J]. Hemijska Industrija,2013,67(2):277-291.
[4] 宋展树,曹　东,任盼荣,等. 种植密度对啤酒大麦品质和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2015,35(11):1597-1602.
[5] 王中军,林晶晶,王　凯. 滨海地区中低肥力沙质土氮磷配施对啤酒大麦产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):120-123.
[6] LIU Z R,ZHANG G Y,SUN Y P. Mutagenizing brewing yeast strain for improving fermentation property of beer[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering,2008,106(1):33-38.
[7] BRIGGS D E,BOULTON C A,BROOKES P A,et al. Brewing: science and practice[M]. England:Woodhead Publishing,2004.
[8] 陆　伟,钱　坤,唐祥彬. 文献下载频次与被引频次的相关性研究:以图书情报领域为例[J]. 情报科学,2016,34(1):3-8.
[9] LI B C,PONGTORNKULPANICH A,CHANKOSON T. Knowledge mapping to understand corporate value:literature review and bibliometrics[J]. Journal of Risk and Financial Management,2024,17(2):1-19.
[10] 刘秋霞,吴汉卿,黄正来. 基于全球文献计量的小麦响应气候变暖的研究[J]. 中国农学通报,2019,35(23):142-151.
[11] HE Q H,WANG G,LUO L,et al. Mapping the managerial areas of Building Information Modeling (BIM) using scientometric analysis[J]. International Journal of Project Management,2017,35(4):670-685.
[12] DIMAS DE CASTRO E SILVA N,CARLOS OLIVEIRA C,FERNANDA R,et al. Bibliometric analysis of PPP and PFI literature: overview of 25 years of research[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2016,142(10):1-8.
[13] 李　昊,潘宇光,王　磊. Bibliometrix:一款新的基于 R 语言的文献计量软件介绍与评价[J]. 大学图书情报学刊,2018,36(4):93-104.
[14] 王　娜,田金徽. PD-1/PD-L1 抑制剂在癌症治疗领域研究主题分析[J]. 中国药物评价,2022,39(3):241-247.
[15] 胡远妹,周　俊,刘海龙,等. 基于 Web of Science 对土壤重金属污染修复研究的计量分析[J]. 土壤学报,2018,55(3):707-720.
[16] 顾自奋,黄志仁,许如根,等. 近 10 年世界大麦生产概况[J]. 大麦科学,2001(1):1-4.
[17] 卜风贤,周　煊,柯艳娜. 乡村振兴:以粮食安全为根基的逻辑机理与实现路径[J]. 安徽乡村振兴研究,2023(6):5-14.
[18] 邓　颖,岳　瑞,郭焕芳,等. 利用 Web of Science 分析未被 SCI 收录的药学学术期刊的引用情况[J]. 中国科技期刊研究,2011,22(5):714-716.
[19] ABRAMO G,D'ANGELO C A. The relationship between the number of authors of a publication, its citations and the impact factor of the publishing journal:evidence from Italy[J]. Journal of Informetrics,2015,9(4):746-761.
[20] 谢冬凌,郑　菲. 我国新闻出版行业智库研究热点及趋势展望:基于 CiteSpace 知识图谱分析[J]. 传播与版权,2024(4):57-62.
[21] 高劲松,彭　博. 关键词频度演化视角下的研究热点挖掘方法研究[J]. 图书与情报,2020(3):61-70.
[22] 李秋云,韩国圣,张爱平,等. 1979—2012 年中国旅游地理学文献计量与内容分析[J]. 旅游学刊,2014,29(9):110-119.
[23] 巴志超,李　纲,朱世伟. 共现分析中的关键词选择与语义度量方法研究[J]. 情报学报,2016,35(2):197-207.
[24] 刘　堃. 中国应对气候变化政策热点研究[J]. 河南大学学报(社会科学版),2023,63(1):27-32,153.
[25] 李　昊,潘宇光,王　磊. Bibliometrix:一款新的基于 R 语言的文献计量软件介绍与评价[J]. 大学图书情报学刊,2018,36(4):93-104
[26] 黄东晶,毛竹君. 基于 CiteSpace 文献计量的国内体认语言学研究进展与热点可视化分析[J]. 外语学刊,2023(6):107-114.
[27] KLOTZ S,LINDERMEIR A. Multivariate credit portfolio management using cluster analysis[J]. Journal of Risk Finance,2015,16(2):145-163.
[28] 潘艳花,王卫成,汤　玲,等. 基于文献计量学分析的牡丹化学成分及其功能研究进展[J]. 寒旱农业科学,2023,2(10):962-974.
[29] FRALEY C,RAFTERY A E. Model-based clustering, discriminant analysis,and density estimation[J]. Journal of the American Statistical Association,2002,97(458):611-631.
[30] KETTENRING J R. The practice of cluster analysis[J]. Journal of Classification,2006,23(1):3-30.
[31] KOSTOFF R N,SHLESINGER M F,TSHITEYA R,et al. Nonlinear dynamics text mining using bibliometrics and database tomography[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos,2004,14(1):61-92.
[32] 曹永强,李维佳,袁立婷. 基于文献计量学的我国水资源优化配置研究现状分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(5):63-69.
[33] 王宏伟,郑　爽,曹永强. 基于文献计量分析的国内山洪灾害现状研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(1):29-36.

(下转第 20 页)

崔小平,田胜营,张善磊,等. 小麦生产应用现状及制曲小麦育种思路[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):16-20. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.003.

小麦生产应用现状及制曲小麦育种思路

崔小平,田胜营,张善磊,王卫军,赖尚科
(宿迁市农业科学研究院,江苏 宿迁 223800)

摘要:小麦是我国第 2 大主粮作物,除用于制作食品外,制曲酿酒、石油化工等轻重工业消费也是重要的应用领域。随着社会的发展,小麦消费结构也在不断改变,多样化的产业需求促进了小麦品种迭代更新,供给侧的小麦生产改革升级对保障我国粮食安全和市场需求具有重要作用。基于我国小麦生产应用现状,总结了制曲用小麦的特点和要求,分析了当前市场上主要制曲小麦的优缺点,并对今后制曲小麦的多样性育种研究进行了探讨。

关键词:制曲小麦;品质;籽粒硬度;育种
中图分类号:S512.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20240041

小麦硬度指数是反映小麦加工和应用性能的重要指标,按照我国现行标准,硬度指数≤45 的小麦为软质麦,硬度指数≥60 的为硬质麦,介于二者之间的为混合麦。软质麦因其面粉颗粒度小、破损淀粉含量低、面粉吸水率低等特性,更适宜用于糕点、饼干的制作。随着小麦硬度指数的增加,小麦的加工变得困难,但加工出的面食更适用于制作较高筋度和黏性的面制食品。在近些年提高面粉质量、增加面筋和蛋白质含量的需求下,小麦品种不断改良,产量逐步增加,小麦硬度指数也显著提升,软质小麦占比则逐渐下降,造成了市场上适宜制曲的软质麦严重短缺,仅占商品麦总量的 7%[1]。

小麦是制作酒曲的主要原料,对酿酒产业来说,大曲的质量直接决定了成酒的品质,而小麦的硬度则关乎酒曲的质量。在制曲阶段,硬质小麦不易形成面浆,制成的曲坯升温快且易松散变形,曲块不仅成熟慢,成品曲块感官和理化质量也远逊于软质麦曲块,软质小麦所提供的微生物生长环境也是硬质麦无法达到的。董永梅等进行的不同硬度小麦制曲试验表明,硬质麦制曲时,成品曲感官指标、理化指标均低于软质麦曲,造成制酒时出酒率和优质酒率低[2]。陈泽军等的制曲试验表明,软质麦较硬质麦能更好地为微生物的生长提供营养物质和生长条件,从而使酿酒有益微生物生长旺盛,成品大曲的感官和理化指标有明显的改善,明显提高原酒的优级率和原料出酒率[3]。

软质小麦的短缺在一定程度上限制了我国白酒产业的发展,且随着我国白酒产业创新和技术升级的推进,白酒企业对软质麦的需求更加迫切,进一步要求我们加快制曲小麦的育种研究,为调整小麦产业结构、推动酒企产业转型提供重要动力。本文简述了目前小麦生产和消费现状,总结了制曲用小麦的特点和要求,分析了当前市场上主要制曲小麦的优缺点,并对今后制曲小麦的多样性育种研究进行了探讨,以期为软质小麦的产业发展提供一定的理论支撑。

1　小麦产业现状

1.1　小麦生产现状

小麦是世界第 1 大口粮作物,全球有 35%~40%的人口以小麦为主要粮食。2016 年,世界上小麦种植总面积约为 22 000 万 hm^2,约占全球谷物种植面积的 30.7%,远超过玉米、水稻、大豆等农作物,居世界谷物种植面积之首[4]。2020 年,我国小麦种植面积为 2 400 万 hm^2,产量达 13 500 万 t,占世界小麦总产量的 1/6,是当时仅次于水稻和玉米的第 3 大粮食作物[5]。改革开放以来,得益于育种科技及栽培管理水平的提升,我国小麦单产从 1949 年的

收稿日期:2024-04-11;修回日期:2024-09-26。
基金项目:宿迁市农业科技自主创新资金(SQCX202302);江苏省种业振兴揭榜挂帅项目[JBGS(2021)046]。
作者简介:崔小平(1974—),女,硕士,研究员,主要从事小麦遗传育种研究。Email: 445218818@qq.com。

641.9 kg/hm^2 增长到 5 834.2 kg/hm^2[6]，小麦总产相较改革开放初期增长了近 9 倍[7]，单产和总产仍呈逐步增长趋势。

1.2　小麦消费现状

我国小麦的年消费量在 12 000 万 t 左右，按用途可以分为口粮消费、饲料消费、工业消费、种子消费和损耗消费等[8]。其中，口粮消费也称作直接消费，饲料、种子、工业及损耗消费则统称间接消费。国内小麦的主要用途是制作面食，长期以来，制粉消费一直占据我国小麦消费的主导地位，比重约占 59%；饲用消费、工业消费、种用消费比重分别为 30%、7%和 4%[9]。小麦的工业消费主要集中在淀粉、酿酒、工业酒精、麦芽糖和调味品等食品工业领域[10]。

从供需平衡状态来看，近年来我国小麦多数年份产不抵消，需进口小麦来缓解国内部分供给压力。2022 年，我国进口各类小麦 1 210 万 t，同比增长 21.5%，特别是软质小麦几乎完全靠进口才能满足国内市场需求[11]。我国作为全球第一大粮食生产国，随着科学技术的不断进步和经济的高速发展，小麦消费结构不断发生变化，普通小麦的消费量由增到减，特质性小麦的需求逐渐上升，过去大众化的“标准麦”已满足不了市场需求[12]。制粉、种子及损耗消费等用途的小麦用量和所占比例日益下降，饲用消费与工业消费用量及其所占比例稳步提高。不同的应用方式对小麦的品质要求差异较大，例如：制作面包需要面筋含量高且筋力强的硬质小麦；蛋糕和饼干则需要面筋含量低、筋力弱的软质小麦。在酿酒业上，制曲阶段则希望采用蛋白质含量略偏高的低籽粒硬度小麦，以利于制曲及曲块中微生物的生长，提高酒曲质量；酿酒发酵过程中大多采用淀粉含量高的小麦，以提高出酒率[13]。

1.3　小麦育种现状

酿酒小麦应用于制曲和酿酒 2 个方面，我国每年制曲和白酒酿造用软质小麦约为 770 万 t，其中大部分是作为制曲原料用于酒曲发酵[14]。小麦还作为主要原料用于制作饼干、蛋糕、休闲食品等。随着人们生活水平的提高，软质小麦消费量继续增加，带动了小麦价格的不断攀升，提振了软质小麦的育种生产与市场需求信心。

科研院所一直是我国小麦选育队伍的主力军。近年来，随着国家小麦商业化育种的提出、一系列优惠政策的出台以及审定渠道的拓展，部分企业和个人也着力开展小麦育种研究，并陆续培育出众多小麦新品种。随着人们对优质高档、食用方便的精致食品（如面包等）需求的增长，粮食和食品加工企业对强筋小麦的需求增加，促使国内育种团队加大强筋小麦研发力度，弱化了软质麦品种创新，导致硬质麦品种冗余、软质麦品种和产量严重短缺。

相较软质小麦，硬质小麦的晶状体淀粉颗粒很难被微生物所利用，淀粉利用率低下，微生物吸收消化慢，导致成品曲中的微生物种类和数量少，制成的曲块感官和理化质量均比软质麦要差很多[15]。但当前市场环境下软质麦的匮乏迫使酿酒企业只能采用 2 类小麦混合制曲，造成不同批次间小麦混合比例模糊，成曲质量差异较大，白酒品质不稳。为了提升核心产品竞争力，形成生态化全产业链，国内酒企纷纷推动自有化酿酒原粮基地建设。这对原粮品种的需求愈发突显，也对各小麦育种家的育种目标提出了更高的要求。只有不断培育出新的适宜性广、制曲相关指标优良的小麦品种，才能适应企业的个性化需求，优化小麦品种结构，并在最大范围内被利用。

2　制曲小麦要求和主要品种分析

用曲酿酒是我国的独创，具有鲜明的民族特色。在白酒酿造中，不同类型的小麦均可制曲，但出曲率、优质品率以及呈香、呈味物质的含量差异显著。长期实践证明，软质白皮小麦是制曲的最好原料，对酿酒微生物的生长繁殖、酶的产生、香味物质及香味前体物质等生成有相当好的促进作用。近年来，由于消费者对白酒产品质量、风格、风味的要求越来越高，各大酒企广寻软质麦品种，并在安徽、河南、江苏、湖北等地建立体量庞大的软质小麦生产基地，也促使育种家在软质小麦方面的育种思路更加明确。

2.1　制曲小麦品种要求

结合近几年农业生产和酒企要求，本文总结出制曲小麦品种推广应用应满足以下条件：在小麦品质方面，制曲用软质小麦应符合国家 2 级麦以上标准，小麦外表应颗粒坚实、饱满、皮薄，无霉变，容重≥750 g，不完善粒≤6%；籽粒硬度须在 45 以下，但不能太低，否则感官和理化质量差[16]；蛋白质的含量不能过低或过高，以 12.1%左右为宜[17]；小麦淀粉含量要高，总淀粉含量应 > 60%，其中支链淀粉的含量应占总淀粉含量的 70%以上[18]。符合这些条件的

小麦制出的曲块通透性和柔韧性佳，曲胚易成型且不易碎，也使得曲香更好，成酒品质更佳[19]。在实际生产上，首先是产量不低于当前生产应用品种，其次是抗寒性好，再次是综合抗病性强，同时穗发芽在中抗或以上，抗干热风等。近年来气候反常，秋冬季节温度过高、寒冬时节又过低导致麦苗冻害严重。

2.2　主流制曲小麦品种分析

国内市场小麦品种繁多，但能够满足制曲小麦要求的软质小麦品种和供给均较匮乏，尤其是硬度指数≤45 的条件就过滤了市面上 93%的小麦品种[1]。其余 7%的软质麦中熟品种占大部，但植株大都偏高，极易倒伏。俗谚说“麦倒一把草”，近几年清明后雨水偏多，雨水过于充沛导致小麦倒伏严重，赤霉病重，白粉病重，穗发芽重，加上气候反常，冬季抗寒性差，春季倒春寒冻害重，出现不抽穗或抽穗后穗茎扭曲枯黄不能正常授粉，严重影响产量。

当前生产上软质白皮小麦的代表品种泛麦 8 号于 2008 年通过河南省审定，迄今已逾 15 年，由于其支链淀粉高、黏性高的特性，制作的曲块具有通透性好、曲胚易成型且不易碎等优点，深受原浆白酒企业的青睐。但该品种产量和抗性已远不及当前审定品种，且抗寒性差，株叶下披略松散，穗粒数少，由于没有提纯复壮，品质也远不及从前。2018 审定的小麦品种荃麦 725 也是软质白皮小麦，是古井酒业的专用制曲小麦品种，该品种种皮薄、分蘖强、容重高、硬度低，但田间白粉病发病重，且会分离出蜡质色和非蜡 2 种类型。

此外，富麦 666 作为近 2 年新兴的软质白皮小麦品种，种皮薄，出粉率高，分蘖力强，植株矮（68 cm 左右），抗倒抗寒性好，因其硬度指数低、蛋白质含量高、制曲品质佳等优点深受酒企的喜好，目前已在安徽审定，江苏引种备案。

3　制曲小麦育种思路探讨

制曲用软质小麦培育在亲本遴选上尽量选择中筋或弱筋的抗病资源作为父本材料，以当地推广或自主培育的优质中筋材料作为母本配组，杂交 1 代利用缺点互补再相互复交（图 1）。世代选择上应注重提高软质小麦的农艺性状，在保持品质的前提下，提高综合抗逆性以回归品种的生产应用能力。品比鉴定阶段，在栽培方面注意将氮肥全部集中在麦苗前期施用，中后期尽量不再施用氮肥，否则会拉高小麦蛋白质比例和硬度指数[20]。总之，制曲小麦在材料筛选、鉴定上应考量以下 4 个关键点。

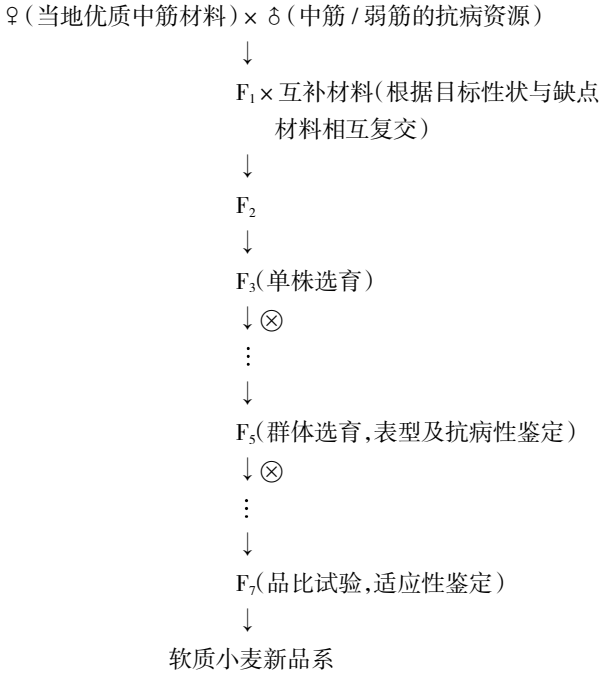


图 1　杂交技术路线图

3.1　株高叶型

紧凑株型有利于增加穗数。植株过高会引起倒伏，直接导致产量下降；株高过矮则冠层叶片拥挤，不利通风透光，影响光合速率且病害也会加重发生，导致生物量过低，产量潜力难以充分发挥[21]。

3.2　早熟

为确保小麦安全生产，保障粮食安全，尽量选育早熟品种。目前小麦生产上多以稻麦轮作为主，从周年统筹上看，小麦收获时间要求在 5 月下旬至 6 月上中旬完成，若收获过晚，会影响到下季水稻的播种或移栽，从而影响秋粮产量。早熟小麦生育期短可提早收获，能消除水稻直播、移栽等时空对小麦生育期的限制，以保证茬口衔接，从而获得周年高产。

3.3　抗病性

黄淮南片麦区主要病害是条锈病、叶锈病、白粉病、赤霉病、纹枯病等。在亲本选择上可用高产耐病的当地品种作母本，抗病的品种（系）作父本进行杂交与复交；分离世代的处理上，切勿盲目追求高抗所有病害，规避育成品种抗性突出而产量低或软质率不高的现象。

3.4　抗逆性

近年来，黄淮南片麦区冬春季频繁出现寒潮和

升温交替的过山车般不稳定气象，而当前弱筋小麦品种大多抗寒能力一般或较差，极易发生冻害。此外，小麦生育后期雨水较多，弱筋白皮小麦遇雨极易穗发芽。因此，制曲小麦在品种培育中要注重选择越冬期苗色青紫泛亮，生育后期麦粒颖壳紧闭、不易脱粒的品系，以增强育成品种的抗寒性和抗穗发芽能力。耐肥抗倒伏性的选择应从株高、茎壁厚度、各节间长度配置、根系发达程度 4 个方面考虑，选择茎秆粗壮、壁厚韧性好、下部节间短、根系发育好、活力强、不早衰的材料。干旱胁迫会显著影响植株器官建成，是小麦安全生产的主要自然灾害之一。受全球变暖等因素影响，黄淮南片极端气候频发，干旱时有发生，故育成品种还必须具有较好的抗旱能力。抗病性和抗逆性最终都综合表现在千粒质量和穗粒数的稳定上[22]，因此，要注意对千粒质量和穗粒数稳定的选择。

4　总结与展望

小麦是生活中不可或缺的主粮作物，在追求高产和高品质宗旨的导向下，软质小麦的品种日渐减少，此前审定的软质麦品种也已不再适应当下多变的气候状况，在市场和环境的双重压力下软质麦产出量逐渐减少。但随着我国人民生活水平的日益提高和休闲产业的发展，当前小麦的消费结构已满足不了市场和大众的个性化需求，软质小麦作为食品和轻工业的重要原料，国内的供需已严重失衡，每年要靠大量进口才能满足国内消费。因此，在育种上，我们亟需重视软质小麦品种研发工作，结合各生态区的环境特性，重点关注小麦产量、抗性等其他重要性状，选育出适合各小麦产区的软质麦新品种。在生产上，软质小麦与其他小麦在施肥运筹和管理上也有较大差异，也要根据各区域特性，加强软质小麦标准化配套栽培技术研究，为软质麦的生产提供有力的技术支撑。在政策上，相关部门应加大软质麦宣传和推广力度，一方面举办有关软质麦栽培管理技术培训，另一方面给予适当的种植补贴或引导企业与农户构建产销一体的订单模式，促进农民增收，充分调动农户生产积极性，进一步实现“研企农”的三位一体协同发展。

参考文献：

[1] 孙　辉，吴存荣，杨中建，等. 我国小麦硬度质量状况和硬度分类的研究[J]. 中国粮油学报，2008，23(3)：38-42.

[2] 董永梅，吴海敏. 小麦品种对大曲质量影响的初探[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊)，2012(10)：317-318.

[3] 陈泽军，周瑞平，尹礼国，等. 酿酒专用小麦在多粮浓香型酒厂的应用[J]. 酿酒科技，2008(5)：65-67，70.

[4] 史建荣，刘　馨，仇剑波，等. 小麦中镰刀菌毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染现状与防控研究进展[J]. 中国农业科学，2014，47(18)：3641-3654.

[5] 封志明，孙　通，杨艳昭. 2003—2013 年中国粮食增产格局及其贡献因素研究[J]. 自然资源学报，2016，31(6)：895-907.

[6] 程加省，郑树东，乔祥梅，等. 宽窄行中耕促茎节长根超高产麦类栽培技术[J]. 种子科技，2024，42(5)：55-57.

[7] 刘录祥. 我国小麦产业科技创新发展现状与展望[J]. 寒旱农业科学，2024，3(6)：491-494.

[8] 王光正，周　洋，卢勇莉，等. 小麦过敏原脱敏技术研究进展[J]. 现代面粉工业，2021，35(3)：36-39.

[9] 石自忠，李俊茹，胡向东，等. 自然灾害对中国粮食市场供需的影响[J]. 灾害学，2023，38(3)：17-24.

[10] 王秀丽，孙君茂. 中国小麦消费分析与未来展望[J]. 麦类作物学报，2015，35(5)：655-661.

[11] 张　明. 2023 年小麦市场走势内在逻辑分析及后市展望[J]. 粮油科学与工程，2024，38(2)：52-56.

[12] 李哲清，高　翔. 优质专用小麦生产现状与产业化前景分析[J]. 陕西农业科学，2009，55(3)：74-77，105.

[13] 陈　珊，汤有宏，李　兰. 硬质小麦对中高温大曲质量的影响[J]. 酿酒，2023，50(5)：86-88.

[14] 邹凤亮，何员江，朱自忠，等. 酿酒专用小麦研究进展[J]. 麦类作物学报，2023，43(10)：1351-1360.

[15] 陈　珊，汤有宏，李　兰. 不同硬度指数小麦制曲对高温大曲质量的影响研究[J]. 酿酒，2023，50(4)：47-49.

[16] 阳广成，周泽友，孙世涛，等. 高温大曲制备技术研究与应用[EB/OL]. (2023-08-07)[2024-04-11]. https://kjt.hunan.gov.cn/kjt/xxgk/kjcg/yyjscg/202308/t20230807_29455031.html.

[17] 王海容，王永锋，朱国军，等. 酿酒专用小麦籽粒品质特性研究[J]. 麦类作物学报，2024，44(3)：352-359.

[18] 王海容，王永锋，朱国军，等. 酿酒制曲专用小麦淀粉品质特性研究[J]. 中国酿造，2023，42(11)：230-236.

[19] CHEN X M. Epidemiology and control of stripe rust[*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*]on wheat[J]. Canadian Journal of Plant Pathology，2005，27(3)：314-337.

[20] 孙　梦，冯昊翔，张晓燕，等. 不同土壤肥力下施氮量对小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报，2022，42(7)：826-834.

[21] 赵广才. 小麦优质高产栽培理论与技术[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2018.

[22] 赵宗武，马华平，杨丽娟，等. 强筋小麦育种实践与探讨[J]. 河南农业科学，2012，41(11)：35-38.

Application Status of Wheat Production and Breeding Ideas of Koji-making Wheat

CUI Xiaoping, TIAN Shengying, ZHANG Shanlei, WANG Weijun, LAI Shangke
(Suqian Academy of Agricultural Sciences, Suqian 223800, China)

Abstract: Wheat is the second largest staple crop in China. In addition to food production, the consumption of light and heavy industries such as koji-making, wine-making and petrochemical industry is also an important application direction. With the development of society, the consumption structure of wheat is also changing, and the diversified industrial demand also promotes the iterative update of wheat varieties. The reform and upgrading of wheat production on the supply side plays an important role in ensuring China's food security and market demand. This paper expounds the current situation of wheat production and application in China, summarizes the characteristics and requirements of koji-making wheat, analyzes the advantages and disadvantages of the main koji-making wheat in the current market, and discusses the diversity breeding of koji-making wheat in the future.

Key Words: Koji-making wheat; Quality; Seed hardness; Breeding

(上接第 15 页)

Bibliometric Analysis of Beer Barley Yield and Quality Based on Web of Science

LI Yuxing, LIANG Zhihao, GUO Aikui, QIAO Hailong, XU Xiao, ZHANG Yinghu, YANG Hongyan, CHENG Yifan, WANG Qiang, XUE Song, YU Wenqing, SHEN Huiquan
(Jiangsu Coastal Area Institute of Agricultural Sciences, Yancheng 224002, China)

Abstract: The R language Bibliometrix software package and the Web of Science core collection database were used to make the bibliometric analysis from the aspects of the number of publications, high-yield countries, high-yield journals, high-cited articles, high-yield authors and high-frequency keywords of barley yield and quality research. From the perspective of bibliometrics, the development of barley yield and quality research in the past 20 years (1997–2023) was analyzed, and a map including literature keyword co-occurrence and keyword cluster analysis was constructed. Furthermore, the latest research trends, research hotspots and development trends of beer barley yield and quality were studied. The results showed that among the high-yield countries, the United States has the largest number of publications, followed by Canada and Australia. The academic papers in this field are mainly published in *Journal of the Institute of Brewing* and *Agronomy Journal*. Through the co-occurrence and cluster analysis of keywords, the current research on the yield and quality of beer barley mainly focuses on the malt quality of beer barley, as well as the effects of barley growth and yield.

Key Words: Beer barley; Web of Science; Yield; Quality; Bibliometric analysis; R language

本刊加入有关数据库的特别声明

为了适应我国期刊信息化建设的需要和扩大作者学术交流渠道，实现期刊编辑、出版工作的网络化与数字化，提高作者所发表论文的被引频次与影响力，本刊已加入《中国学术期刊(光盘)》、"中国期刊网""万方数据—数字化期刊群"、重庆维普"中文期刊数据库"、超星期刊"域出版"平台和国家科技学术期刊开放平台等。作者无需另外支付网络编审费。作者著作权使用费与本刊稿酬由本刊编辑部一次性给付作者。如作者不同意编入上述数据库，请务必提供书面说明。所刊载文献被以各种形式转载时请注明来源于本刊。

《大麦与谷类科学》杂志编辑部

马佳星,李庆华,刘玉海,等. 裸燕麦成熟胚组织培养体系的优化及创伤胚转化体系的初探[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):21-28,36. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.004.

裸燕麦成熟胚组织培养体系的优化及创伤胚转化体系的初探

马佳星[1],李庆华[1],刘玉海[2],南金生[1],融晓萍[3],路素香[4],韩　冰[1*]

(1. 内蒙古农业大学/麦类种质创新利用自治区高等学校重点实验室/草地资源教育部重点实验室/内蒙古自治区生物制造重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;2. 内蒙古自治区乌兰察布市农业技术推广中心,内蒙古 乌兰察布 012000;3. 内蒙古自治区农牧业技术推广中心,内蒙古 呼和浩特 010020;4. 河北省张家口市万全区农业农村局,河北 张家口 076250)

摘要:对 8 个裸燕麦品种的成熟胚进行诱导愈伤和分化培养,选用出愈率最高的品种裸燕麦 1 号,进一步对培养基进行优化。结果表明:在 ML2 诱导培养基中裸燕麦 1 号出愈率为 87.33%,在 DM1 分化培养基中分化率较高。最佳培养体系为:使用 ML2 诱导培养基诱导愈伤,约 15 d 后进行继代培养,继代 2 次后转移至 DM1 分化培养基,待分化出叶片后转移至生根培养基。通过农杆菌介导法,使用带有绿色荧光蛋白 GFP 基因的 pBI121 质粒对裸燕麦 1 号创伤胚进行侵染,探究菌液浓度、选择剂浓度及移栽时间对转化率的影响。结果表明,裸燕麦创伤胚转化高效组合培养体系包括:农杆菌菌液 OD600 为 0.8 时进行侵染,卡那霉素选择剂的最适浓度为 40 mg/L,创伤胚转化培养 10 d 后进行移栽。本试验以农杆菌侵染裸燕麦创伤胚建立的遗传转化体系具有可行性,为以后裸燕麦再生体系建立提供借鉴。

关键词:裸燕麦;组织培养;遗传转化;农杆菌介导

中图分类号:S511　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20240053

燕麦属于禾本科燕麦属（*Avena* L.）1 年生草本植物,是优质的粮饲兼用作物,世界 8 大粮食作物之一[1-2]。燕麦各营养元素均衡,富含丰富的膳食纤维，在抗癌早期可以发挥比较积极健康的作用;另外,得益于富含 β-葡聚糖[3-6],燕麦还可以减弱淀粉消化性,降低糖尿病患者的血糖浓度[7-9]。燕麦的蛋白质与必需氨基酸含量较高,具有很高的饲用价值[10]。燕麦茎秆柔软,粗纤维含量较少,性价比优势明显,是奶牛等家畜的优质饲料[11-14]。随着燕麦营养保健以及饲用价值的普及,市场对优质燕麦需求大幅增加[15-16]。燕麦具有防风抗寒、耐旱抗蚀、耐盐碱等优良特性，可以有效提高土壤养分和保肥能力,对生态恢复也有一定的积极作用[17-18]。利用基因工程的手段培育燕麦新品种，能够达到提高产量、缩短育种时间等目标,是提供优质燕麦的有效方法之一[19]。早在 1995 年,范银燕等通过对裸燕麦的愈伤组织进行组织培养,发现其农艺性状的变化出现双向性,但总的来说有益的变异高于不良变异,认为通过组织培养技术获得具有优良性状的新品种是可行的[20]。在组织培养过程当中,转化体系的再生频率是转化效率的关键因素。合适的外植体可以提高愈伤组织的诱导率,常用的外植体有幼穗、幼胚、成熟胚 3 种。王迅婧等研究表明,成熟胚的愈伤组织诱导率高,且分化时间早[21]。利用成熟胚作为外植体获得再生植株已经有较多成功案例[22-26],成熟胚还具有不受季节限制,在 1 年中可以随时取材培养的优点[27]。

本试验探究了不同裸燕麦品种对愈伤效率的影响,对筛选出具有较高出愈率的裸燕麦 1 号建立了组织培养再生体系。利用农杆菌侵染裸燕麦 1 号的创伤胚,探究选择剂浓度、菌液浓度、移栽时间对创伤胚转化的影响,以期为后续裸燕麦新品种(系)创制提供借鉴。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料为麦类种质创新利用自治区高等学校重点实验室保存的 8 份裸燕麦材料(表 1)。对裸燕

收稿日期:2024-05-28;修回日期:2024-09-27。

基金项目:国家重点研发计划(2022YFE0119800);内蒙古农业大学学院创新团队建设项目(TD202103)。

作者简介:马佳星(1998—),女,硕士研究生,主要从事燕麦育种研究。Email: mjx1758382957@qq.com。

* 通信作者:韩　冰(1970—),女,博士,教授,主要从事植物种质资源及燕麦育种研究工作。Email: hb_nmg@163.com。

麦 1 号的成熟胚进行创伤处理，经培养后作为转化受体[26,28]，转化用带有筛选标记绿色荧光蛋白（GFP）和卡那霉素抗性基因的质粒载体 pBI121（图 1）。根瘤农杆菌菌株为 LBA4404。

表 1　8 份不同裸燕麦材料的信息

品种序号	资源库编号	生育期 /d	株高 /cm	千粒质量 /g
1	B010034	108	116	26.5
2	B010045	106	128	21.0
3	B010002	100	130	24.7
4	B010036	103	136	30.1
5	B010025	96	75	20.5
6	B020074	100	144	27.7
7	B010050	90	96	20.4
8	B010056	92	110	21.6

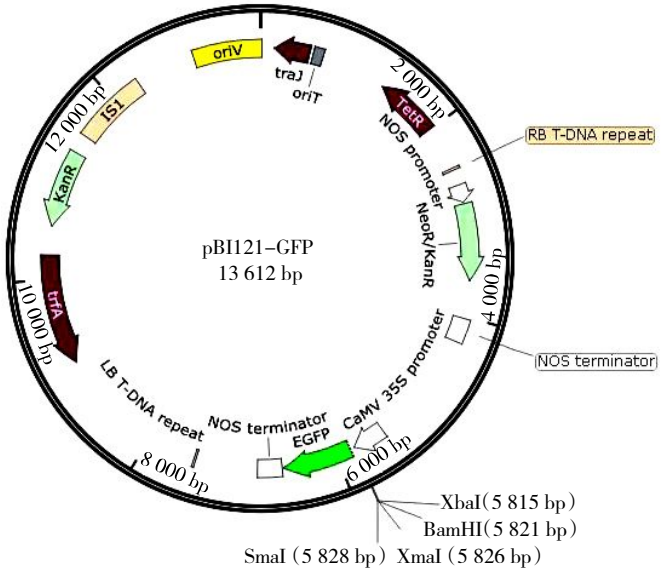


图 1　植物表达载体 pBI121 构建

1.2　培养基的配制

通过借鉴已有的研究，对 MS 基础培养基加以改进，设计 4 种培养基[22,24,26,29]，主要配比如表 2 所示。

1.3　试验方法

1.3.1　裸燕麦组织培养最佳体系的确定。从种质资源库中挑选出颗粒饱满的成熟种子，经 4℃低温处理 4 d 后，冲洗 3 ~ 5 min。在超净工作台内使用 75% 乙醇消毒 5 min，无菌水冲洗 3 ~ 5 次；10%次氯酸钠消毒 15 min，无菌水冲洗 3 ~ 5 次后浸泡。浸泡 12 h 后取出，置于无菌滤纸上吸干水分后剥下成熟胚，接种于不同的愈伤组织诱导培养基 ML1—ML4 中。每份材料接种 5 个培养皿，每个培养皿内放置 20 个成熟胚，3 次重复。接种后置于 25 ℃下黑暗培养，每隔 3 d 统计 1 次形成的愈伤组织数和愈伤组织直径大小。3 周后将形成的愈伤组织转移至继代培养基，继代 2 次后接种至 3 种不同的分化培养基 DM1—DM3 进行诱导分化。待分化出叶片后移至生根培养基中，筛选出长势良好的燕麦再生苗，炼苗处理后移栽。

1.3.2　裸燕麦创伤胚转化培养体系。使用带有 pBI121 质粒的农杆菌侵染裸燕麦 1 号创伤胚。

本试验的选择剂为卡那霉素，观察不同质量浓度卡那霉素下裸燕麦成熟胚的出芽率，浓度分别为 0、20、40、60、80、100 mg/L。

配置 OD600 分别为 0.6、0.8、1.0 的农杆菌菌液，分别侵染裸燕麦创伤胚，加入浓度为 200 μmol/L 的 AS（乙酰丁香酮），侵染 1 h 后进行共培养 1 d，洗掉残余菌液后在 MS 培养基中培养。记录培养不同时间后转移至土壤的创伤胚的出芽率和成活率，检测转化率。

1.3.3　转化植株的鉴定。在荧光倒置显微镜下观察燕麦转化植株的根尖，筛选散发绿色荧光的植株，初步证明已成功转化。

采用 CTAB 法[30]提取燕麦叶片 DNA。根据设计的 GFP 引物（引物 1：5’-GTGGTCAGTCCCTTATGGTG-3’；引物 2：5’-CACCAGTCAGGGAATACCAC-3’）进行 PCR 检测，以质粒 pBI121 作为阳性对照模板，非转化植株 DNA 作为阴性对照模板，具有目的条带的为阳性植株。

1.4　数据分析统计

使用 Excel 2012 软件完成试验数据初期的统计与处理，使用 Origin 2021 软件绘制图片，使用 SPSS 19.0 软件完成差异性分析。

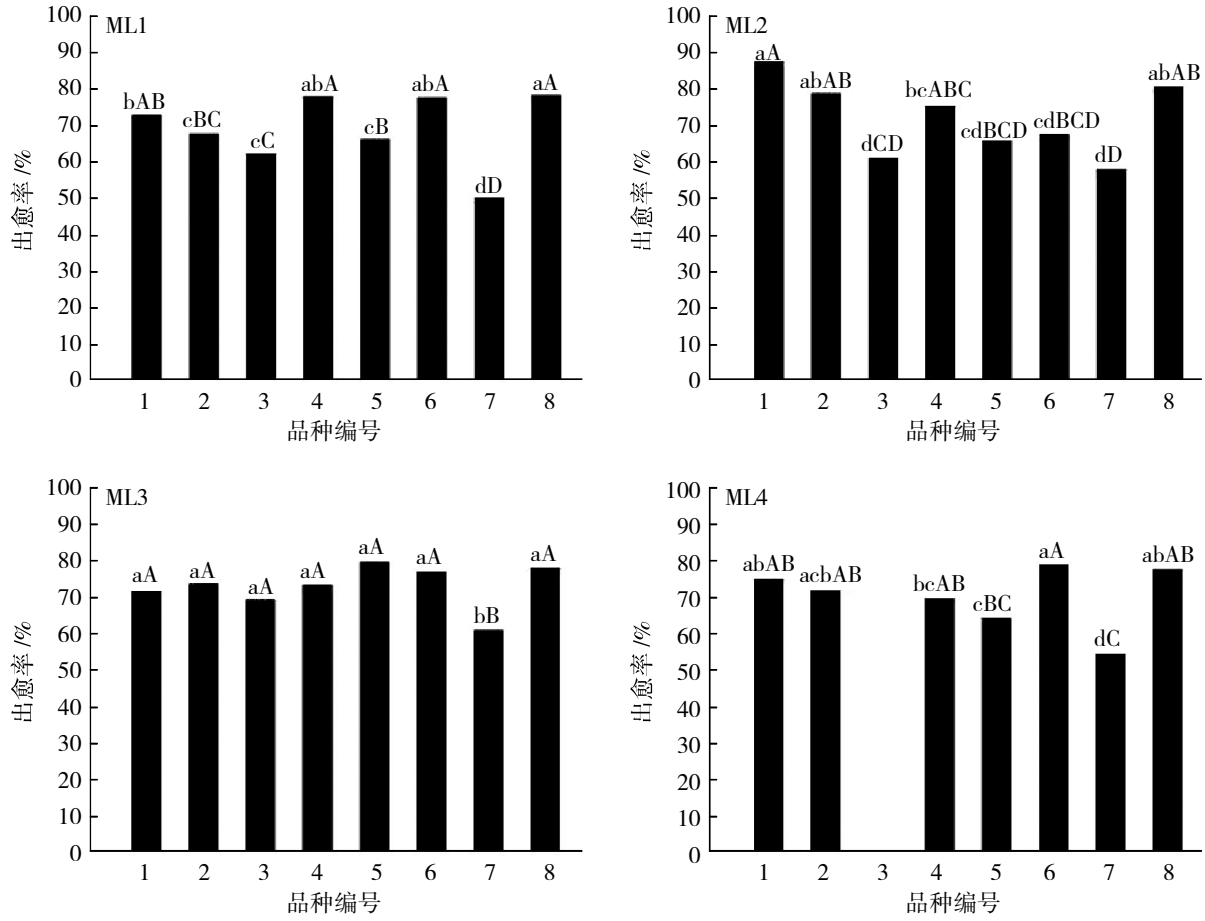
表 2　裸燕麦愈伤组织培养所用培养基

培养基类型	编号	成分
诱导培养基	ML1	MS + 4.0 mg/L 2,4–D + 1.0 mg/L NAA + 5.0 mg/L 肌醇 + 30.0 g/L 蔗糖
	ML2	MS + 2.0 mg/L 2,4–D + 1.0 mg/L NAA + 1.0 mg/L IAA + 25.0 g/L 蔗糖
	ML3	MS + 4.0 mg/L 2,4–D + 1.0 mg/L NAA + 25.0 g/L 蔗糖
	ML4	MS + 4.0 mg/L 2,4–D + 1.0 mg/L NAA + 0.5 g/L 水解酪蛋白 + 3.0 g/L 蔗糖
继代培养基	JD	MS + 1.5 mg/L 2,4–D + 1.0 mg/L NAA +1.0 mg/L 6–BA + 30.0 g/L 蔗糖
分化培养基	DM1	MS + 1.5 mg/L 6–BA + 0.5 mg/L NAA + 0.5 mg/L IAA
	DM2	MS + 1.0 mg/L 6–BA + 0.5 mg/L NAA
	DM3	MS + 3.0 mg/L 2,4–D + 1.0 mg/L 6–BA + 1.0 mg/L NAA
生根培养基	SG	1/2MS + 0.5 mg/LNAA + 0.1%生根粉

2　结果与分析

2.1　裸燕麦组织培养最佳体系的确定

2.1.1 不同裸燕麦品种对愈伤组织诱导的影响。本研究将 8 个不同品种的裸燕麦成熟胚接种到 4 种愈伤组织诱导培养基上，在同一培养基上不同品种的出愈率显示较大差异（图 2、图 3）。在 ML1 培养基中出愈率最高的品种是裸燕麦 8 号，出愈率为 78.00%；在 ML2 培养基中出愈率最高的是裸燕麦 1 号，出愈率为 87.33%；在 ML3 培养基中出愈率最高的是裸燕麦 5 号，出愈率为 79.00%；在 ML4 培养基中出愈率最高的是裸燕麦 6 号，出愈率为78.33%。



不同小写字母表示品种间差异具统计意义（$P<0.05$），不同大写字母表示品种间差异具高度统计学意义（$P<0.01$）。图 3 至图 5 同

图 2　不同培养基中参试裸燕麦出愈率

裸燕麦 3 号在 ML4 培养基中诱导的愈伤组织全为水渍状，无法进一步培养，但在其他 3 种培养基中的愈伤组织均正常生长。裸燕麦 8 号的平均出愈率最高，为 78.17%；裸燕麦 1 号次之，平均出愈率为 76.33%；裸燕麦 7 号出愈率最低，平均出愈率只有 55.49%。可见，不同裸燕麦品种对愈伤组织的出愈率有较大影响（图 3）。

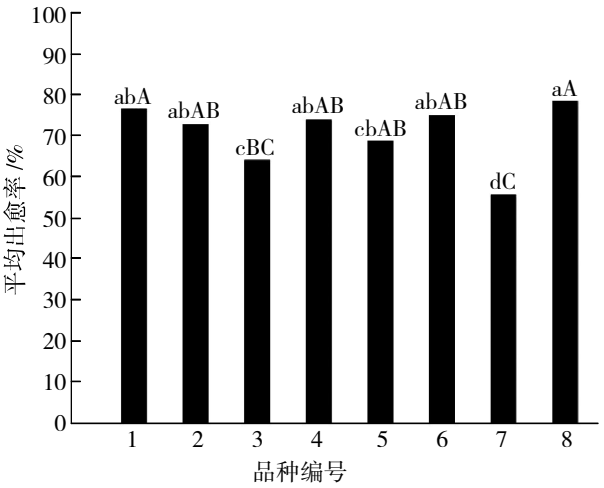


图 3　参试裸燕麦的平均出愈率

2.1.2　诱导培养基的筛选。将 8 个裸燕麦品种的成熟胚接种到 4 种不同培养基上，3 d 后开始出现愈伤组织。由图 2 可以看出，在 ML2 培养基中，除裸燕麦 7 号之外其他 7 个品种的出愈率均达到了 60% 以上，裸燕麦 1 号、2 号和 8 号出愈率均达到了最高值，分别为 87.33%、78.60%、80.33%，裸燕麦 1 号的出愈率更是显著高于其他 5 个品种。记录裸燕麦 1 号在 4 种培养基中的出愈率及愈伤直径。结果表明，在诱导第 3 天时 ML2 培养基出愈率已经高于其他培养基，愈伤直径的大小与其他培养基中的愈伤大小差异不明显，但一直保持着最高的出愈率（图 4）。在 ML2 培养基中培养的裸燕麦 1 号在 8 个品种、4 种培养基中出愈率最高，愈伤组织状态良好，选用该组合进行后续研究。

2.1.3　分化培养基的筛选。在添加了不同浓度激素的 3 种分化培养基中，诱导分化经过 2 次继代培养的裸燕麦 1 号愈伤组织。从图 5 可以看出，添加 IAA 的 DM1 培养基分化率最高，达到了 37.78%；在没有添加 IAA 并降低 6–BA 浓度的 DM2 培养基中，分化率出现了下降，只有 31.11%；在增加 NAA 浓度并添加一定浓度 2,4–D 的 DM3 培养基中，分化率最低，仅有 24.44%。

2.2　裸燕麦创伤胚转化体系

2.2.1　选择剂浓度的筛选。转化成功的成熟胚含有携带卡那霉素抗性选择标记基因的质粒。由图 6 可以看出，随着卡那霉素浓度的增加，裸燕麦 1 号的出芽率和出苗成活率都在下降。在卡那霉素浓度为 60 mg/L 时，出芽率已经不足 50%，出苗成活率只有 15%且白化苗率达到了 75%；当卡那霉素浓度为 20 mg/L 时，出芽率虽然有 80%但是白化苗率为 0，不能起到较好的筛选目的；当卡那霉素浓度为 40 mg/L 时，不仅有 63%的出芽率且白化苗率只有 40%，成活率也达到了 60%。因此，选择剂卡那霉素的最适浓度为 40 mg/L。

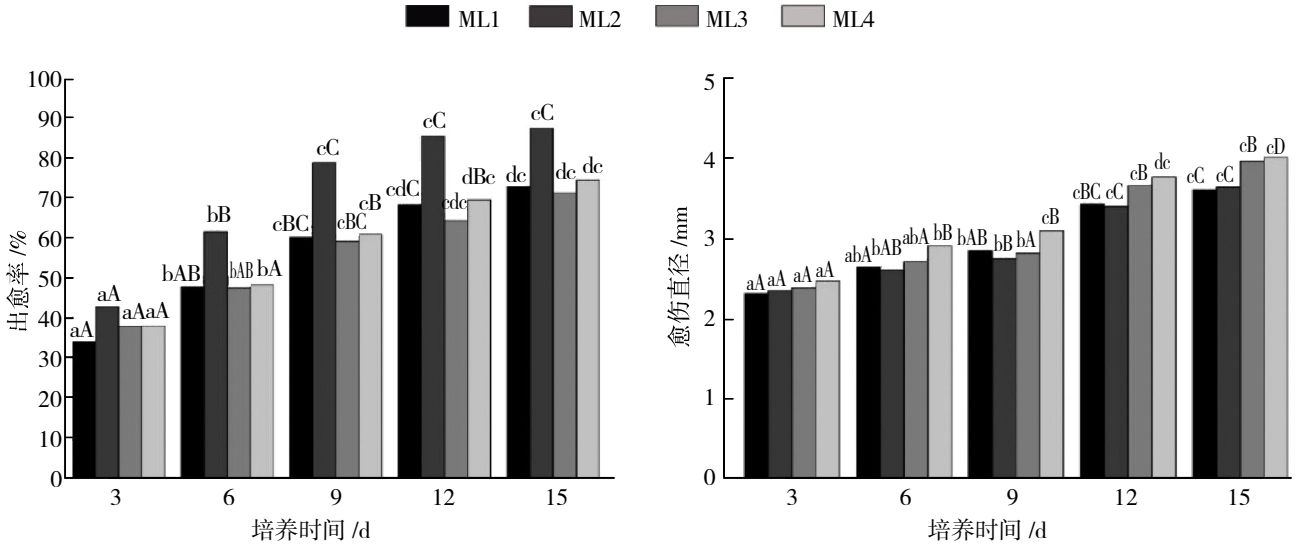


图 4　裸燕麦 1 号不同培养时间下在 4 种培养基中的出愈率和愈伤直径

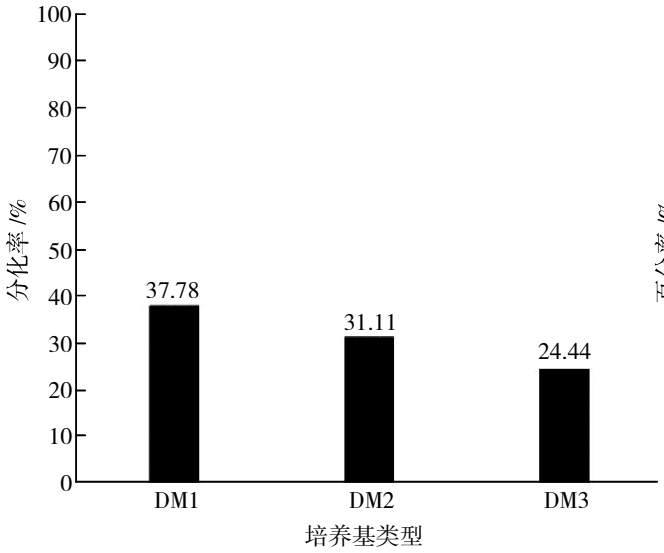


图 5　不同培养基下愈伤组织分化率

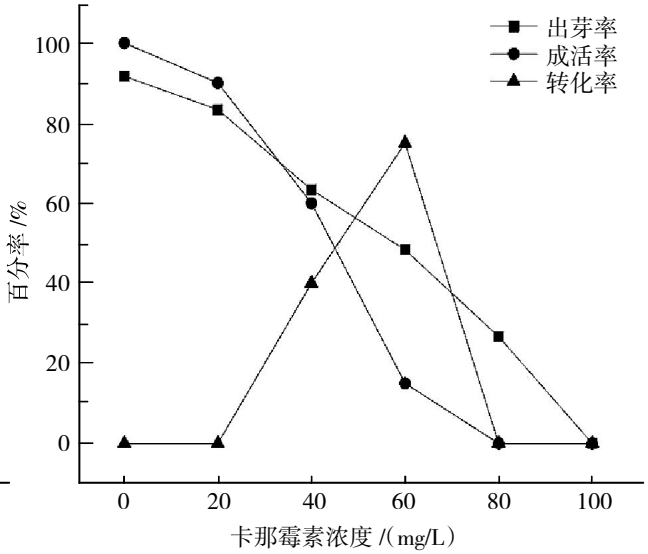


图 6　不同卡那霉素浓度下裸燕麦 1 号创伤胚出芽率、成活率、转化率

2.2.2　菌液浓度的确定。农杆菌的浓度对基因的转化率有一定的影响，因此确定合适的侵染浓度非常关键。从图 7 可以看出，在农杆菌菌液OD600 为 0.6 时，创伤胚成活率较高但转化率为 0，不能达到试验目的；当菌液 OD600 达到 1.0 时，创伤胚的出芽率及苗的成活率都呈现降低趋势，且转化率只有 1.10%；当菌液 OD600 为 0.8 时，出芽率为 50%，成活率为 72%且转化率为 3.17%。因此，可以确定在侵染菌液 OD600 为 0.8 时转化效率最高。

2.2.3　移栽时间对胚出芽率、成活率的确定。分别观察记录在转化培养不同时间后进行移栽的创伤胚的出芽率和成活率，结果见图 8。可以看出，在转化培养后的前 2 d 移栽，出芽率为 0，在第 3 天时，出芽率仅有 30.00%；但在第 8 天之后，出芽率和成活率都比较稳定，均超过了 50%（图 8）。因此，可以在转化培养 8 d 后将创伤胚移至土壤。

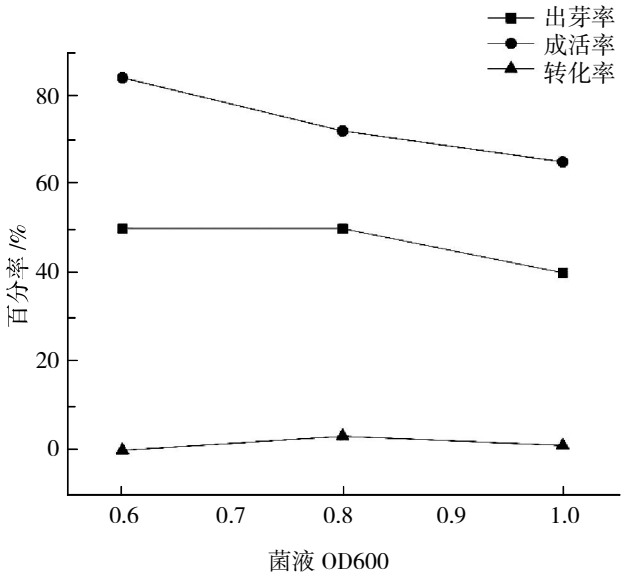


图 7　不同农杆菌浓度下裸燕麦 1 号创伤胚出芽率、成活率、转化率

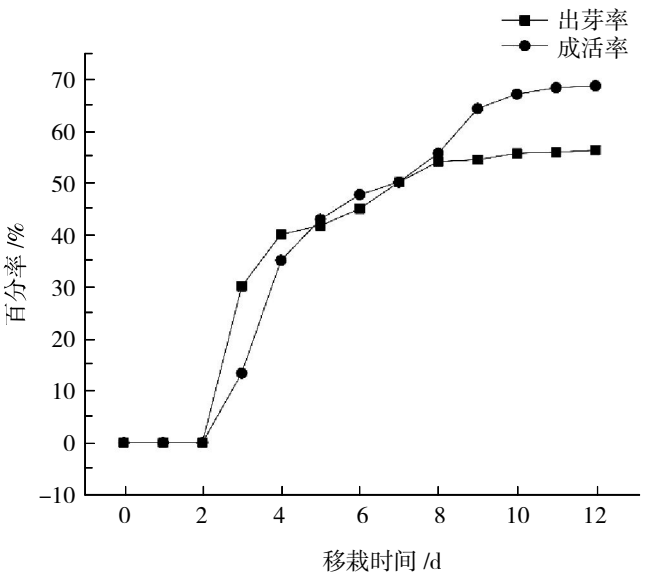
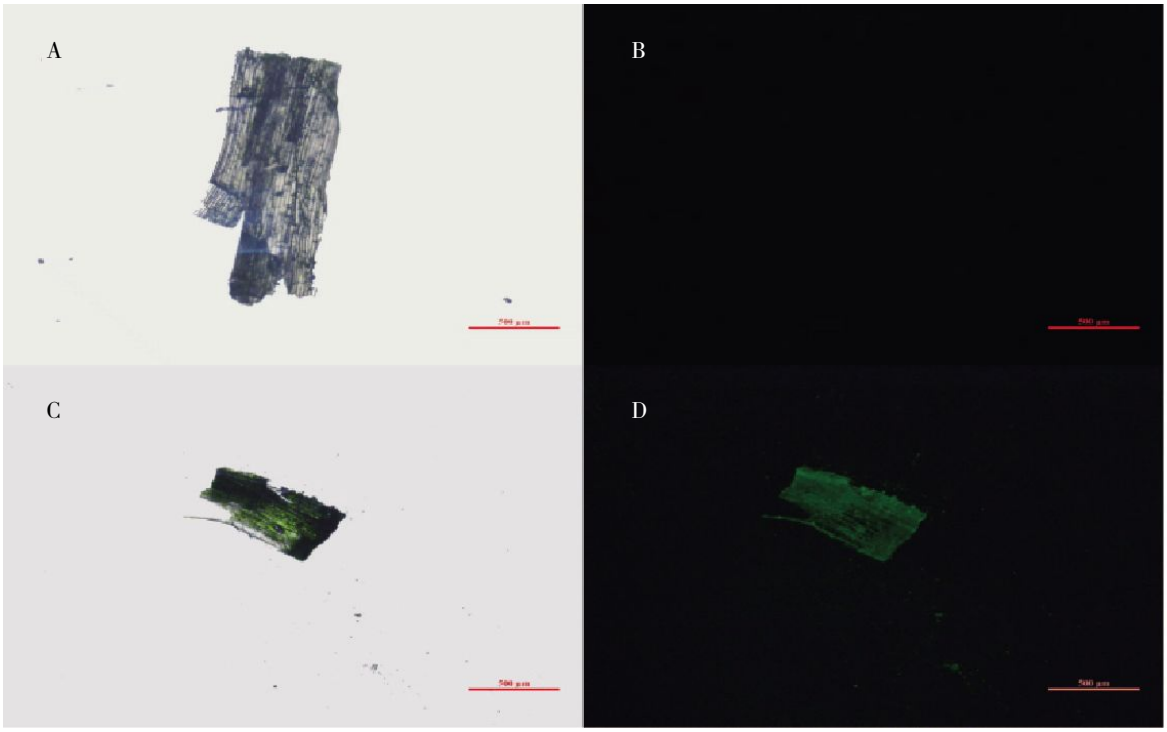


图 8　不同移栽时间下创伤胚的出芽率、成活率

2.3　转化植株的鉴定

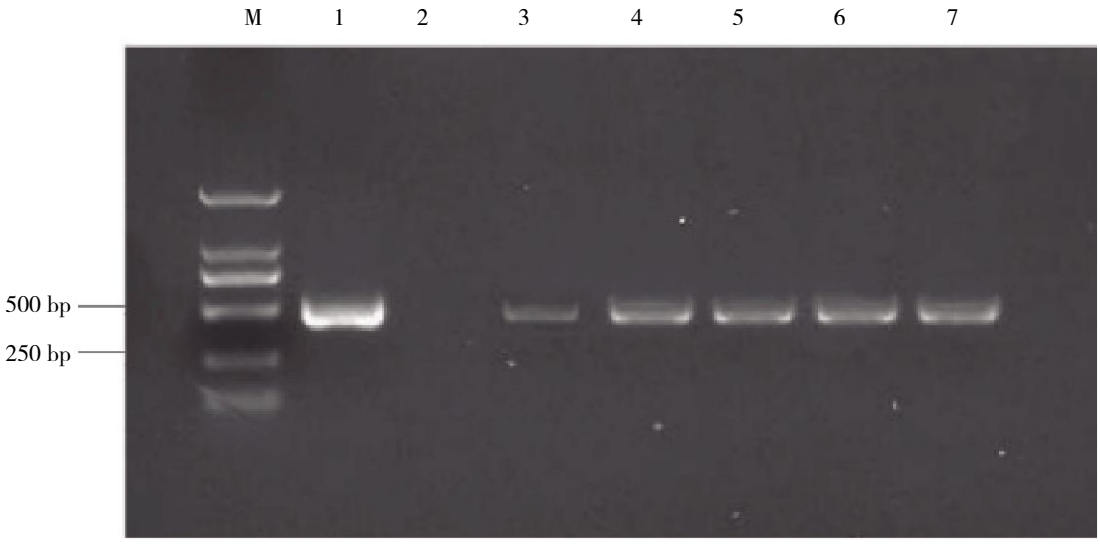
2.3.1　荧光鉴定。分别在光学显微镜和荧光显微镜下观察裸燕麦 1 号的根尖。由图 9 可以看出，非转化的燕麦根尖在荧光显微镜下并未显示绿色荧光（图 9–B），而转化成功的燕麦根尖发出了绿色荧光（图 9–D），初步证明含 *GFP* 基因的载体已成功转入燕麦。对裸燕麦 1 号 126 株再生植株进行检测，只有 4 株携带 GFP 的质粒成功转化创伤胚，转化率为 3.17%。

2.3.2　分子鉴定。提取阳性再生植株的 DNA，经 PCR 检测，扩增出一条与阳性对照相同、500 bp 左右的条带（图 10），证明带有筛选标记 GFP 的质粒 pBI121 已成功转入裸燕麦 1 号。



A、C 为光学显微镜下根尖观察；B、D 为荧光显微镜下根尖观察

图 9　GFP 荧光检测结果



M—DL2000 Marker；1—阳性对照；2—阴性对照；3—7 为检测的转化植株

图 10　转基因植株的 PCR 检测

3　讨论与结论

3.1　基因型对裸燕麦诱导与分化的影响

植物组织培养过程中，能够明确的是基因型对愈伤组织的诱导、分化等有很大的影响，但作用机制始终没有统一定论[31-32]。本试验对 8 个品种的裸燕麦在不同培养基上进行愈伤组织诱导，发现都能诱导出愈伤组织，但不同裸燕麦品种的诱导能力有显著差异。有研究表明，品种、外植体的取材部位、培养基的不同都会影响愈伤组织的诱导[33-34]。这可能是因为不同品种的遗传特性不同，外界的培养条件只有满足内在的生长机制，才能提高愈伤组织出愈率和质量[35]。在后期的研究中，我们可以充分考虑以上条件，试着建立更加稳定且能够适应大多品种的裸燕麦诱导体系。

3.2　裸燕麦 1 号愈伤组织最佳培养基的探索

细胞分化受多重因素影响，培养基、激素和浓度配比都是影响愈伤组织诱导及分化的主要因素[22,36]。在诱导愈伤组织时，裸燕麦 1 号在 ML2 培养基中出愈率最高，在 ML3 培养基中出愈率最低。相较于 ML3 培养基，其他 3 种培养基都添加了外源激素。但 ML1 培养基添加的肌醇对出愈率和愈伤组织的生长并没有显著作用。ML2 培养基降低 2,4-D 浓度并增加 IAA，出愈率较高但愈伤组织的大小不及添加水解酪蛋白的 ML4 培养基。推测适当降低 2,4-D 浓度并添加水解酪蛋白有可能提升裸燕麦 1 号的愈伤组织质量。

分化培养采用 DM1 培养基的分化率最高，与 DM2 培养基相比，它增加了 6-BA 的浓度并添加了 IAA，证明它们能够促进芽的分化。DM3 培养基中同时添加了 2,4-D 和 6-BA，分化率最低。推测这 2 种激素对愈伤组织的分化有拮抗作用，或是 2,4-D 浓度较高抑制了愈伤组织的分化。

本试验通过添加不同类型和浓度的外源激素探索裸燕麦 1 号愈伤组织的最佳培养基，但本文对外源添加物的浓度研究不够精细，后续可以进行更深入的研究。

3.3　裸燕麦创伤胚转化体系

本试验以卡那霉素作为选择剂，确定最适合的卡那霉素的浓度为 40 mg/L。此外，在进行裸燕麦创伤胚转化过程中会有部分农杆菌残留于胚表面，往往会污染培养基、降低植株成活率[38-39]。本试验通过调整菌液浓度来抑制农杆菌生长，最终确定当菌液 OD600 为 0.8 时，可有效抑制创伤胚中农杆菌的生长。本试验对裸燕麦 1 号进行转化，筛选培养后获得 126 株再生植株，经 PCR 检测，有 4 株阳性植株，转化率 3.17%。高荧利用小麦幼胚愈伤组织进行转化的再生率为 21.67%，转化率为 4.16%[40]。金鑫鑫在利用农杆菌侵染后对再生植株进行检测，转基因再生率为 27.2%，转化率为 1.92%[41]。张艳敏等对石 4185 及石 6365 号小麦进行农杆菌转化，转化效率为 3.85%[42]。何道一等使用农杆菌侵染小麦小穗，转化率为 3.2%[43]。Ye 等对 3 种易被农杆菌侵染的小麦进行侵染，分别得到了 3.3%、2.0%、1.1%的转化率[44]。Wang 等对小麦成熟胚进行农杆菌侵染，转化率为 1.79%[45]。张艺使用成熟胚诱导出的愈伤组织进行遗传转化，但并未得到再生植株，只对愈伤组织分化的幼叶进行了 PCR 鉴定，证明转基因成功[23]。张丽君等对品燕 2 号燕麦创伤胚的转化体系研究中，转基因再生率为 32%，但存在假阳性植株[26]。王迅婧利用农杆菌对白燕 10 号愈伤组织进行转化，转化率达 60%[24]。以上结果说明，不同品种之间的转化率存在较大差异。本试验用来建立转化体系的裸燕麦 1 号在参试品种中愈伤诱导率表现较好，且有 4 株携带 GFP 的质粒成功转化创伤胚，转化率为 3.17%。本研究中裸燕麦 1 号虽成功转化，但转化率还须进一步提高。

参考文献：

[1] 刘　青，刘　欢，林　磊. 燕麦属系统学研究进展[J]. 热带亚热带植物学报，2014，22(5)：516-524.

[2] 郑殿升，张宗文. 大粒裸燕麦（莜麦）(*Avena nuda* L.)起源及分类问题的探讨[J]. 植物遗传资源学报，2011，12(5)：667-670.

[3] CHOROMANSKA A，KULBACKA J，REMBIALKOWSKA N，et al. Anticancer properties of low molecular weight oat *beta*-glucan-an *in vitro* study[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2015，80：23-28.

[4] GLEI M，ZETZMANN S，LORKOWSKI S，et al. Chemopreventive effects of raw and roasted oat flakes after *in vitro* fermentation with human faecal microbiota[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition，2021，72(1)：57-69.

[5] HU R T，CHANTANA W，PITCHAKARN P，et al. Ficus dubia latex extract prevent DMH-induced rat early colorectal carcinogenesis through the regulation of xenobiotic metabolism，inflammation，cell proliferation and apoptosis[J]. Scientific Reports，2022，12(1)：15472.

[6] SHEN R L，WANG Z，DONG J L，et al. Effects of oat soluble and insoluble β-glucan on 1，2-dimethylhydrazine-induced

early colon carcinogenesis in mice[J]. Food and Agricultural Immunology,2016,27(5):657–666.
[7] 谷少涵,孙冰华,马　森,等. 谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展[J]. 食品工业科技,2024,45(13):326–332.
[8] 朱　婷,谢　晶,邵则淮,等. 燕麦 β– 葡聚糖降血糖性能研究进展[J]. 麦类作物学报,2020,40(3):381–386.
[9] 孟彦彤,张东杰,薛　勇,等. 燕麦 β– 葡聚糖的功效研究进展[J]. 中国粮油学报,2024,39(2):196–205.
[10] 张　晶,杨金生,赵　云,等. 非常规饲料原料燕麦在饲料中的应用[J]. 饲料研究,2023,46(21):140–144.
[11] 赵得明. 燕麦草生产利用现状及发展趋势[J]. 黑龙江畜牧兽医(下半月),2016(22):177–179.
[12] 熊　乙,许庆方,玉　柱,等. 不同产地燕麦干草养分及饲用价值[J]. 草业科学,2018,35(10):2457–2462.
[13] 闫庆忠. 燕麦草的饲用价值及加工方式[J]. 特种经济动植物,2022,25(12):138–140.
[14] 郭志强,李钰莹,邝良德,等. 燕麦干草饲喂肉兔的营养价值评定[J]. 动物营养学报,2024,36(1):498–506.
[15] 董　锐,李　亮,胡新中,等. 我国燕麦产品特点及消费需求分析[J]. 粮油食品科技,2021,29(6):146–155.
[16] 石　泉,蔡　婷,刘鹰昊,等. 内蒙古饲草饲料产业发展现状分析及对策建议[J]. 畜牧与饲料科学,2023,44(2):103–112.
[17] 梁国玲. I–D 品系燕麦生态适应性及其遗传学特性研究[D]. 西宁:青海大学,2017.
[18] 徐长林. 高寒牧区不同燕麦品种生长特性比较研究[J]. 草业学报,2012,21(2):280–285.
[19] 叶雪玲,甘　圳,万　燕,等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. 草业学报,2023,32(2):160–177.
[20] 范银燕,崔　林. 裸燕麦体细胞无性系的农艺性状变异[J]. 华北农学报,1995,10(4):49–53.
[21] 王迅婧,修　谨,倪秀珍. 燕麦组织培养体系的建立与优化[J]. 湖北农业科学,2014,53(16):3936–3938.
[22] 罗志娜,赵桂琴,刘　欢. 燕麦成熟胚的组织培养及植株再生[J]. 甘肃农业大学学报,2012,47(5):60–68.
[23] 张　艺. 燕麦遗传转化体系的建立和披碱草再生体系的建立[D]. 成都:四川大学,2007.
[24] 王迅婧. 燕麦组织培养和农杆菌介导的燕麦遗传转化体系的建立[D]. 长春:东北师范大学,2012.
[25] 宋秀芳,倪汉文. 燕麦愈伤组织的诱导[J]. 作物杂志,2010(3):56–59.
[26] 张丽君,刘龙龙,马名川,等. 燕麦成熟胚组织培养体系的优化及其影响因素[J]. 山西农业科学,2015,43(3):269–272.
[27] 崔　林,范银燕. 裸燕麦不同外植体愈伤组织诱导及再生植株变异研究[J]. 内蒙古农业科技,1995(6):9–12.
[28] 梁雪莲. 农杆菌组培及三种非组培法在小麦和玉米上转化外源 Bar 基因研究[D]. 晋中:山西农业大学,2002.
[29] 胡晓旭. 燕麦成熟胚组织培养植株再生体系的建立与优化[D]. 福州:福建农林大学,2017.
[30] 赵云云,周小梅,杨　才. 四倍体大燕麦 × 六倍体裸燕麦的杂种 F_1 的产生及鉴定[J]. 植物学通报,2003,20(3):302–306.
[31] 贾利敏. 燕麦成熟胚组织培养及植株再生体系建立[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
[32] 徐齐君,王玉林,原红军,等. 青稞再生体系的建立及优良受体基因型筛选[J]. 大麦与谷类科学,2019,36(4):1–10,38.
[33] 范银燕,崔　林. 裸燕麦幼穗愈伤组织诱导及植株再生技术[J]. 山西农业科学,1996(1):14–17.
[34] 田　娟,张　曼,孙墨可,等. 不同基因型及培养基在燕麦花药组织培养中的应用[J]. 江苏农业科学,2021,49(9):49–53.
[35] 王晓玲,彭定祥. 不同基因型对苎麻愈伤组织诱导及分化的影响[J]. 长江大学学报(自科版),2005,2(8):64–66.
[36] 王晶晶,陈耀锋,张月琴,等. 小麦幼胚愈伤组织分化和继代分化特性的影响因素[J]. 麦类作物学报,2015,35(6):731–736.
[37] 刘建霞,代旭瑶,冯时静,等. 正交试验优化藜麦(*Chenopodium quinoa*)离体再生体系[J]. 分子植物育种,2023,21(10):3356–3363.
[38] 魏林艳,连　玲,魏毅东,等. 籼稻明恢 86 多基因遗传转化体系的研究[J]. 福建农业学报,2019,34(6):621–629.
[39] 李朝炜,冯　丹,翟会青,等. 农杆菌介导的旱稻遗传转化主要影响因素[J]. 湖北农业科学,2014,53(15):3482–3487.
[40] 高　荧. 农杆菌介导小麦幼胚愈伤组织转化体系的建立[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
[41] 金鑫鑫. 农杆菌介导的小麦愈伤组织遗传转化及再生体系研究[D]. 济南:山东大学,2012.
[42] 张艳敏,郭北海,丁占生,等. 小麦农杆菌转化系统的建立与转基因植株的获得[J]. 华北农学报,2003,18(3):1–3.
[43] 何道一,李中存,王洪刚. 农杆菌介导的小麦活体转化[J]. 中国农业科学,2003,36(12):1437–1441.
[44] YE X,WANG Y L,KANG L,et al. Screening of wheat genotypes sensitive to *Agrobacterium tumefaciens* infection and transformation[J]. Acta Agronomica Sinica,2005,31:1552–1556.
[45] WANG Y L,XU M X,YIN G X,et al. Transgenic wheat plants derived from *Agrobacterium*–mediated transformation of mature embryo tissues[J]. Cereal Research Communications,2009,37(1):1–12.

(下转第 36 页)

吕二锁,马　宇,徐广祥,等. 37 份大麦新品种(系)主要农艺性状分析与评价[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):29-36. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.005.

37 份大麦新品种(系)主要农艺性状分析与评价

吕二锁[1],马　宇[1],徐广祥[2],巴　图[1],渠佳慧[1],李　涛[1],刘志萍[1*]
(1. 内蒙古自治区农牧业科学院,内蒙古 呼和浩特 010031;2. 巴彦淖尔市农牧业科学研究所,内蒙古 临河 015000)

摘要:为更好地选育适宜内蒙古地区种植推广的大麦新品种,以 37 份大麦新品种(系)为试验材料,对其株高、主穗长、单株穗数等 9 个性状进行主成分、相关性及聚类分析。结果表明,各性状的变异系数在 8.54%~30.52%,从大到小依次为单株粒质量、主穗粒数、单株粒数、单株穗数、主穗粒质量等,株高的变异系数最小,为 8.54%。说明大麦农艺性状和产量性状的差异主要由单株粒质量、主穗粒数、单株粒数、单株穗数、主穗粒质量等因素决定,故这些性状的改良对提高大麦产量具有重要意义。主成分分析表明,大麦新品种(系)农艺性状的多数信息包含在前 4 个主成分因子,累计贡献率为 83.468%,主要因子为单株粒数、主穗粒数、主穗粒质量、单株粒质量。相关分析结果显示,产量与主穗粒数相关性强,达到显著水平(相关系数为 0.307),与主穗粒质量、单株粒数、单株粒质量均呈正相关关系,产量与株高、单株穗数、千粒质量均相关性不大,与主穗长呈现显著负相关性。聚类分析结果显示,37 份大麦新品种(系)在卡方距离 3.0 处可聚为 3 大类群,第Ⅰ类为小粒多棱高产组,第Ⅱ类为高秆大粒组,第Ⅲ类为长穗低产组。

关键词:大麦;农艺性状;主成分分析;相关分析;聚类分析
中图分类号:S512.3;S31　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20240056

大麦(*Hordeum vulgare* L.)是仅次于水稻、小麦、玉米的世界第 4 大禾谷类作物[1],具有耐旱、耐瘠薄、生育期短、适应性广的特性,在全球不同的地区、纬度、海拔及生态条件下均可正常生长[2]。大麦主要用作饲草料、食用和酿造原料[3]。大麦籽粒中含有丰富的营养物质,且为高蛋白、高维生素、高膳食纤维、低脂肪[4],人类长期食用大麦能够增强肠胃功能,提高免疫力,可有效预防高脂血症、糖尿病等疾病。因此,大麦作为保健食品具有很大的潜在价值[5]。未来大麦产业发展前景广阔。

目前,我国大麦新品种培育仍以杂交常规育种为主。通过优异种质资源的筛选和利用,可以有效解决育种过程中遗传基础狭窄、育种手段单一等问题[6]。关于大麦农艺性状研究的报道较多,朱昊华等分析了不同生态类型大麦品种的主要农艺性状,发现通过降低株高,加强对影响单株产量的目标性状进行选择,对培育矮秆高产品种的选育效果较好[7]。牛小霞等对 97 份大麦种质资源进行农艺性状分析,筛选出矮秆、早熟、千粒质量高、分蘖力强的不同优异资源材料[2]。李赢等对江苏裸大麦品种的主要农艺性状及营养品质进行分析研究,结果表明,不同品种间可溶性膳食纤维、β-葡聚糖、粗纤维含量等均存在较大差异,在大麦品质育种中可加以利用[8]。郜战宁等对六棱大麦品种主要农艺性状进行聚类分析,筛选出 17 份矮秆多穗型、2 份高秆大穗型和 8 份中秆中穗型大麦品种[9]。汪军妹等对 73 份优异啤酒大麦种质资源进行遗传多样性及聚类分析,筛选出酿造品质好、高蛋白和糖化力较低的不同大麦资源材料[10]。为了更好地筛选和培育适应北方春麦区的高产大麦新品种,本研究采用主成分分析、相关分析及聚类分析等方法对 37 份大麦新品种(系)的主要农艺性状和产量相关性状进行分析评价,筛选出符合不同育种目标的新材料,以期为内蒙古地区的大麦新品种(系)培育及改良提供理论与品种支撑。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试材料为内蒙古农牧业科学院作物科学研究所大麦研究室提供的 36 份自育大麦新品系及 1 个自育品种(蒙啤麦 5 号),具体见表 1。

收稿日期:2024-06-12;修回日期:2024-09-06。
基金项目:内蒙古农牧业创新基金(2023CXJJN04)。
作者简介:吕二锁(1986—),男,博士,副研究员,主要从事大麦遗传育种研究。Email: lversuo198249@163.com。
* 通信作者:刘志萍(1969—),女,硕士,研究员,主要从事大麦遗传育种及栽培技术研究。Email: lllzp2004@126.com。

表 1　37 份大麦新品种(系)信息

序号	品种(系)	棱型	类型	来 源
1	22PJ–011	二棱	啤酒大麦	内蒙古自治区农牧业科学院
2	22PJ–027	二棱	啤酒大麦	
3	22PJ–063	二棱	啤酒大麦	
4	22PJ–087	二棱	啤酒大麦	
5	22PJ–006	二棱	啤酒大麦	
6	22PJ–009	二棱	啤酒大麦	
7	22PJ–114	二棱	啤酒大麦	
8	22PJ–004	二棱	啤酒大麦	
9	22PJ–095	二棱	啤酒大麦	
10	22PJ–103	二棱	啤酒大麦	
11	22PJ–005	二棱	啤酒大麦	
12	22PJ–002	二棱	啤酒大麦	
13	22PJ–088	二棱	啤酒大麦	
14	22PJ–112	二棱	啤酒大麦	
15	22PJ–097	二棱	啤酒大麦	
16	22PJ–008	二棱	啤酒大麦	
17	22PJ–065	二棱	啤酒大麦	
18	22PJ–066	二棱	啤酒大麦	
19	22PJ–113	二棱	啤酒大麦	
20	22PJ–091	二棱	啤酒大麦	
21	22PJ–068	二棱	啤酒大麦	
22	22PJ–108	二棱	啤酒大麦	
23	22PJ–115	二棱	啤酒大麦	
24	22PJ–111	六棱	啤酒大麦	
25	22PJ–001	二棱	啤酒大麦	
26	22PJ–057	二棱	啤酒大麦	
27	22PJ–083	二棱	啤酒大麦	
28	22PJ–003	二棱	啤酒大麦	
29	22PJ–107	二棱	啤酒大麦	
30	22PJ–105	二棱	啤酒大麦	
31	22PJ–094	二棱	啤酒大麦	
32	22PJ–062	二棱	啤酒大麦	
33	22PJ–036	六棱	啤酒大麦	
34	22PJ–086	二棱	啤酒大麦	
35	22PJ–064	二棱	啤酒大麦	
36	22PJ–058	二棱	啤酒大麦	
37	蒙啤麦 5 号	二棱	啤酒大麦	

1.2　试验地基本情况

试验地设在内蒙古农牧业科学院内(111°67′ E、40°75′ N)。试验地前茬为小麦,土质为壤土,肥力中等，有灌溉条件,2023 年 3 月 10—12 日浇春水、汇地,3 月 20 日精细整地、耙耱平整,并施入磷酸二铵 20.0 kg/667 m^2、微生物菌肥 4.0 kg/667 m^2 作基肥,结合分蘖水追施尿素 12.0 kg/667 m^2。

1.3　试验方法

试验采用随机区组排列,3 次重复。行长 6 m,行距 0.15 m,10 行区，区间距离 0.3 m，观察步道 0.8 ~ 1.0 m。采用机械播种,收获时不去边行全收计产。收获期各品系取样 10 株考种,测定株高、主穗长、单株穗数、主穗粒数、单株粒数、主穗粒质量、单株粒质量及千粒质量等指标,将考种的植株籽粒质

量计入小区产量。

1.4　数据分析

使用 Excel 2007 换算基础数据，采用 DPS 9.05 进行主成分、相关性及聚类分析。

2　结果与分析

2.1　大麦新品系主要性状表现及变异范围

通过对 37 份大麦新品系各性状的最大值、最小值、平均数等指标（表 2）分析，发现 22PJ-091 的株高最低，为 75.8 cm，22PJ-105 的株高最高，为 110.1 cm；蒙啤麦 5 号的主穗长最小，为 6.5 cm，22PJ-105 的主穗长最大，为 9.6 cm；22PJ-111 的单株穗数最少，为 2.5 个，22PJ-097 的单株穗数最多，为 6.7 个；蒙啤麦 5 号的主穗粒数最少，为 17.9 粒 / 穗，22PJ-036 的主穗粒数最多，为 54.0 粒 / 穗；22PJ-094 的主穗粒质量最小，为 0.96 g/ 穗，22PJ-036 的主穗粒质量最大，为 2.37 g/ 穗；蒙啤麦 5 号的单株粒数最少，为 65.7 粒，22PJ-036 的单株粒数最多，为 175.4 粒；22PJ-094 的单株粒质量最小，为 1.69 g，22PJ-097 的单株粒质量最大，为 8.88 g；22PJ-036 的千粒质量最小，为 37.75 g，22PJ-105 的千粒质量最大，为 61.05 g；22PJ-115 的产量最低，为 377.69 kg/667 m^2，22PJ-111 的产量最高，为 717.10 kg/667 m^2。供试材料各主要农艺、产量性状的标准差、变异系数均有较大差异（表 3），农艺、产量性状的变异系数为 8.54%～30.52%，其中：单株粒质量最大，为 30.52%，其次为主穗粒数、单株粒数、单株穗数、主穗粒质量，分别为 26.77%、25.95%、21.43%、20.90%，株高的变异系数最小，为 8.54%。说明大麦农艺性状和产量性状的差异主要是由单株粒质量、主穗粒数、单株粒数、单株穗数、主穗粒质量等因素决定的，故这些性状的改良对提高大麦产量具有重要意义。

表 2　37 份大麦新品种（系）考种汇总表

品种（系）	株高 / cm	主穗长 / cm	单株穗数 / 个	主穗粒数 /（粒 / 穗）	主穗粒质量 /（g/ 穗）	单株粒数 / 粒	单株粒质量 / g	千粒质量 / g	产量 /（kg/667 m^2）
22PJ-011	91.7	6.7	4.7	22.1	1.03	105.0	5.01	47.50	550.28
22PJ-027	85.8	7.8	4.2	25.5	1.27	106.0	5.23	49.35	518.86
22PJ-063	94.2	8.0	3.6	22.6	1.28	83.0	2.19	52.70	556.64
22PJ-087	108.4	7.1	3.4	22.6	1.15	81.7	3.76	46.30	536.84
22PJ-006	84.5	9.4	4.6	25.4	1.34	122.4	5.97	48.85	491.34
22PJ-009	86.1	7.7	4.2	24.4	1.20	97.2	4.64	47.70	474.17
22PJ-114	81.5	7.1	4.0	23.3	1.30	84.7	4.94	58.30	466.88
22PJ-004	91.3	8.0	4.8	23.0	1.26	112.0	2.88	51.60	460.56
22PJ-095	82.9	7.7	4.0	22.0	1.34	89.3	5.03	56.30	555.84
22PJ-103	99.4	9.0	4.6	23.4	1.52	150.0	4.38	58.40	505.58
22PJ-005	95.6	7.4	3.9	25.4	1.43	97.5	5.13	52.25	472.50
22PJ-002	93.7	7.8	4.9	24.4	1.13	111.9	5.21	46.34	472.54
22PJ-088	95.6	7.9	3.9	25.5	1.26	86.9	3.97	45.80	631.41
22PJ-112	92.0	9.2	4.8	26.8	1.32	109.8	5.68	52.55	467.15
22PJ-097	89.2	8.7	6.7	24.9	1.34	163.5	8.88	53.55	572.09
22PJ-008	91.0	8.8	4.6	25.2	1.44	110.0	2.95	53.80	540.25
22PJ-065	95.9	8.0	5.5	21.4	1.17	120.4	6.00	49.95	563.61
22PJ-066	98.1	7.5	3.1	21.8	1.10	72.9	3.35	46.05	479.26
22PJ-113	95.2	8.3	3.1	23.7	1.23	68.2	3.40	49.90	488.54
22PJ-091	75.8	7.6	5.9	30.2	1.37	155.6	7.80	52.00	504.99
22PJ-068	87.1	7.2	4.4	24.9	1.26	104.0	5.09	48.90	513.25

（续表）

品种（系）	株高 / cm	主穗长 / cm	单株穗数 / 个	主穗粒数 /（粒 / 穗）	主穗粒质量 /（g/ 穗）	单株粒数 / 粒	单株粒质量 / g	千粒质量 / g	产量 /（kg/667 m²）
22PJ-108	100.2	7.8	3.1	23.3	1.47	66.7	4.02	60.29	511.00
22PJ-115	109.3	9.2	3.6	24.4	1.41	82.2	4.26	51.75	377.69
22PJ-111	83.9	7.0	2.5	49.6	2.23	111.6	5.19	46.45	717.10
22PJ-001	99.6	8.0	4.2	26.0	1.21	126.0	2.74	43.50	480.88
22PJ-057	99.6	8.2	4.2	22.0	1.22	91.4	4.77	52.15	533.51
22PJ-083	103.8	7.0	4.0	23.0	1.27	108.3	5.24	49.15	502.19
22PJ-003	102.0	9.5	5.1	27.9	1.47	148.2	6.91	46.70	491.69
22PJ-107	91.7	8.5	4.5	25.7	1.49	122.9	6.65	53.85	484.18
22PJ-105	110.1	9.6	2.8	26.0	1.71	76.6	4.69	61.05	524.22
22PJ-094	83.3	7.1	3.8	18.0	0.96	67.1	1.69	50.40	486.05
22PJ-062	94.7	8.5	4.3	24.0	1.31	96.5	5.23	54.05	550.36
22PJ-036	86.2	7.3	3.2	54.0	2.37	175.4	6.56	37.75	513.80
22PJ-086	90.8	8.3	4.6	25.5	1.30	110.8	5.37	48.50	515.21
22PJ-064	93.5	6.8	5.7	20.7	1.12	116.1	5.80	50.25	502.40
22PJ-058	101.1	8.4	4.3	24.8	1.24	108.6	5.18	47.70	539.22
蒙啤麦 5 号	100.8	6.5	4.0	17.9	1.08	65.7	3.75	56.98	596.13

表 3　大麦核心种质材料主要农艺性状表现

性状	株高 / cm	主穗长 / cm	单株穗数 / 个	主穗粒数 /（粒 / 穗）	主穗粒质量 /（g/ 穗）	单株粒数 / 粒	单株粒质量 / g	千粒质量 / g	产量 /（kg/667 m²）
最大值	110.1	9.6	6.7	54.0	2.37	175.4	8.88	61.05	717.10
最小值	75.8	6.5	2.5	17.9	0.96	65.7	1.69	37.75	377.69
平均值	93.7	8.0	4.2	25.4	1.34	105.6	4.85	50.77	517.52
标准差	8.0	0.8	0.9	6.8	0.28	27.4	1.48	4.78	55.94
变异系数 /%	8.54	10.00	21.43	26.77	20.90	25.95	30.52	9.42	10.81

2.2　不同大麦新品种（系）农艺性状的主成分分析

通过对 37 份大麦新品种（系）主要性状的降维因子分析，参照累计贡献率≥80%的标准（表 4），提取特征值均大于 1 的前 4 个主成分，基本体现大麦新品种（系）的多数信息。从表 4 可知，大麦新品种（系）农艺性状的多数信息包含在前 4 个主成分因子中，累计贡献率为 83.468%。第 1 主成分贡献率为 33.070%，更多地包含了原有观察值数据信息，且对总遗传贡献率最大，其特征向量中主要因子为单株粒数（0.489）、主穗粒数（0.486）、主穗粒质量（0.421）、单株粒质量（0.411），它们主要反映了产量性状指标，可综合为产量因子，特征向量中千粒质量（-0.246）和株高（-0.259）为负值性状。第 2 主成分对应特征向量中最大为单株穗数（0.625）和单株粒质量（0.338），综合为单株穗数因子。负值性状是主穗粒数（-0.349）、主穗粒质量（-0.338），说明适当增加单株穗数，可以减少主穗粒数和降低主穗粒质量。第 3 主成分中特征向量最大的是主穗长（0.679），可综合为穗长因子，负值绝对值最大的是产量（-0.260）。在第 4 主成分中特征向量最大的为千粒质量（0.743），综合为千粒质量因子，负值绝对值最大的为株高（-0.197）。由上述结果分析表明，各主成分所体现出的性状差异大，但在一定程度上仍具有相关性。在大麦育种和选择过程中协调各农艺性状的参数，对大麦单产的提高具有重要意义。

表 4　6 个主成分的特征向量统计

性状	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
株高	–0.259	–0.073	0.483	–0.197	0.685	0.367
主穗长	0.043	0.255	0.679	0.028	–0.020	–0.625
单株穗数	0.147	0.625	–0.207	0.042	0.172	–0.094
主穗粒数	0.486	–0.349	0.103	–0.076	–0.106	0.032
主穗粒质量	0.421	–0.338	0.340	0.153	–0.157	0.138
单株粒数	0.489	0.283	0.046	–0.140	0.094	–0.039
单株粒质量	0.411	0.338	0.038	0.178	0.143	0.496
千粒质量	–0.246	0.163	0.255	0.743	–0.281	0.255
产量	0.162	–0.287	–0.260	0.571	0.597	–0.365
特征值	2.976	2.077	1.443	1.016	0.733	0.443
贡献率 /%	33.070	23.077	16.028	11.293	8.145	4.922
累计百分率 /%	33.070	56.147	72.175	83.468	91.613	96.535

2.3　不同大麦新品种(系)农艺性状的相关性分析

由表 5 可知，大麦产量与主穗粒数的相关性强，达到显著水平，相关系数为 0.307，与主穗粒质量、单株粒质量、单株粒数均呈正相关关系，这表明增加主穗粒数、主穗粒质量、单株粒数及单株粒质量均可提高大麦产量；大麦产量与主穗长呈显著负相关关系，其系数为 –0.276，同时与株高、单株穗数、千粒质量均呈负相关关系，这表明高秆、粒大、大穗等对产量的影响较小。单株粒质量与单株穗数、单株粒数、主穗粒数、主穗粒质量均达到极显著或显著正相关，相关系数分别为 0.567、0.690、0.333、0.304，与株高呈负相关关系，相关系数为 0.255，这表明单株穗数、单株粒数、主穗粒数、主穗粒质量等对单株粒质量的影响较大。其他性状之间的相关关系表现为株高与单株穗数、主穗粒数及单株粒数均为显著负相关，且千粒质量与主穗粒数和单株粒数也呈显著负相关，与主穗粒质量、单株粒质量呈负相关。综合考虑，大麦新品系各主要性状间存在相互关联、相互影响和相互制约现象。

2.4　不同大麦新品种(系)农艺性状的聚类分析

采用系统聚类法对 37 份大麦新品系进行聚类分析，在卡方距离 3.0 处可聚为 3 大类群(图 1)：第Ⅰ类包含 2 份新品系，第Ⅱ类包含 10 份新品系，第Ⅲ类包含 25 份新品系。由表 1 和表 2 综合分析可知，3 大类中第Ⅰ类表现出矮秆、穗长一般、千粒质量低、穗粒数多，定义为小粒多棱高产组；第Ⅱ类表现出高秆、穗中等、千粒质量高、产量中等，定义为高秆大粒组；第Ⅲ类表现出株高中等、长穗、穗粒数中等、千粒质量中等、单产低，定义为长穗低产组，这与相关分析结果相对应。因此，在今后的种质后代、新品系的选育工作中，可依据育种目标性状，选择矮杆抗倒的多棱高产大麦新品系。

表 5　大麦核心种质材料各性状相关分析

因子	株高	主穗长	单株穗数	主穗粒数	主穗粒质量	单株粒数	单株粒质量	千粒质量	产量
株高	1								
主穗长	0.271	1							
单株穗数	–0.275*	0.154	1						
主穗粒数	–0.280*	–0.032	–0.275*	1					
主穗粒质量	–0.113	0.161	–0.356*	0.907**	1				
单株粒数	–0.296*	0.224	0.594**	0.506**	0.425**	1			
单株粒质量	–0.255	0.179	0.567**	0.333*	0.304*	0.690**	1		
千粒质量	0.108	0.238	0.031	–0.466**	–0.122	–0.335*	–0.058	1	
产量	–0.139	–0.276*	–0.114	0.307*	0.272	0.013	0.075	–0.048	1

注：* 和 ** 表示相关分别达 0.05 和 0.01 显著水平。

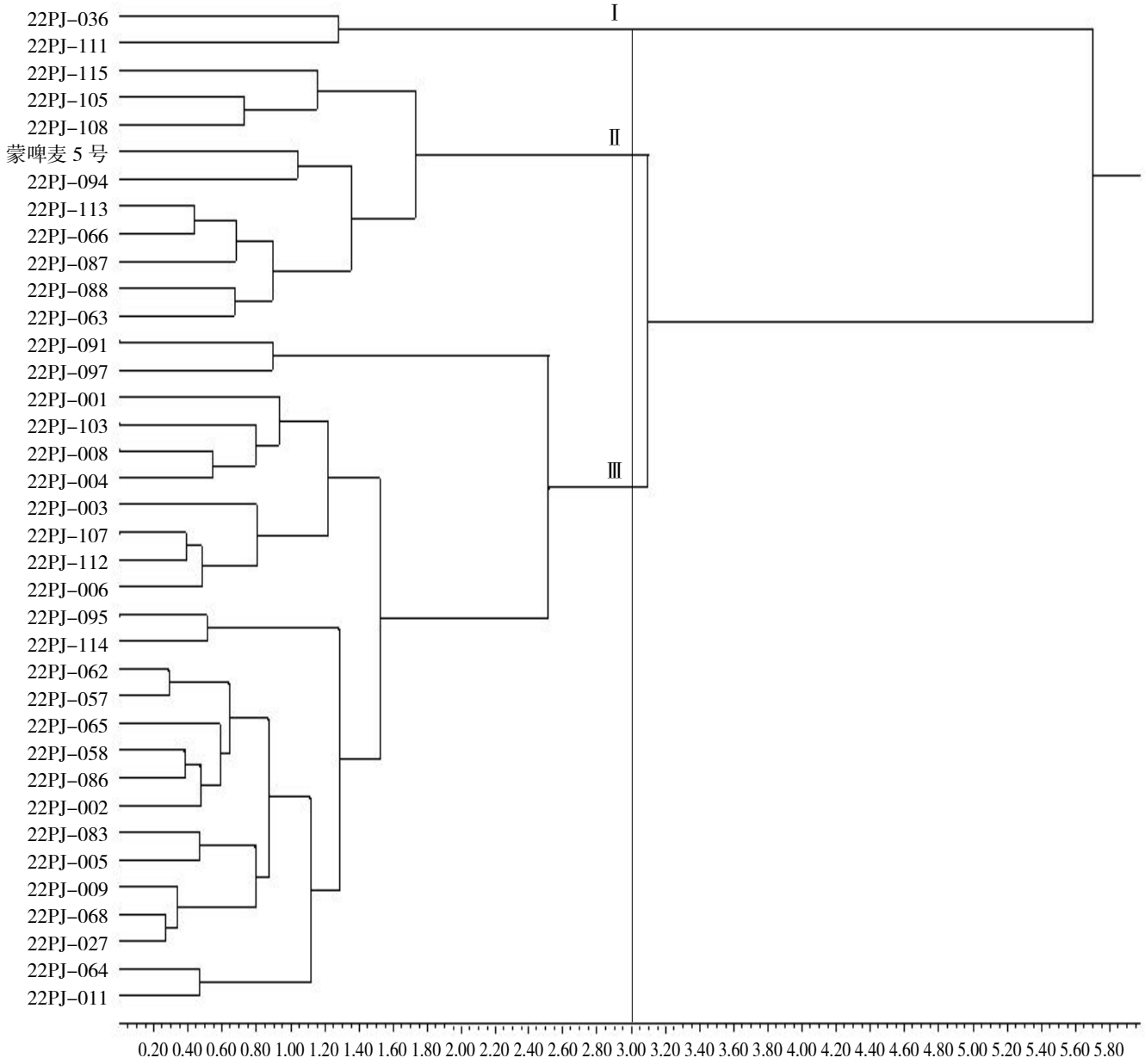


图 1　37 份大麦供试材料农艺性状聚类

3　讨论与结论

提高单产是作物育种的主要目标之一。通过对作物产量相关性状的评价鉴定研究，找出高产育种的目标性状以及重点培育方向，在新品种的选育和性状改良方面均具有重要意义[11]。目前在水稻[12]、小麦[13]、棉花[14]等不同农作物中，涉及表型性状遗传多样性的鉴定评价研究报道较多。赵盟等对我国 155 份大麦育成品种进行产量相关性状评价研究，发现啤麦的株高、穗长及穗节数等农艺性状之间均呈显著正相关关系；而啤麦和青稞的穗密度与千粒质量呈显著负相关关系[11]。夏腾飞等对 267 份核心青稞种质的农艺和产量性状进行鉴定分析，发现株高、穗长和千粒质量之间均呈极显著正相关关系[15]。本研究表明，产量与主穗粒数相关性强，达到显著水平，相关系数为 0.307，与主穗粒质量、单株粒质量、单株粒数均呈正相关关系，这表明在育种实践中可增加主穗粒数、主穗粒质量、单株粒质量和单株粒数来提高大麦单产；产量与主穗长呈显著负相关，相关系数为 –0.276，并与株高、单株穗数、千粒质量均呈负相关关系，这表明高秆、粒大、大穗等对产量的影响较小。在育种实践中仅考虑某一要素的

提高，将会使其他性状降低，最终影响产量的增加，这一观点与前人的研究结果[16]基本一致。因此，应在大麦育种过程中综合考虑性状间的相互影响和相互促进作用，进而培育高产、多抗的新品种。

本文对 37 份新品种（系）的主要性状进行聚类分析，结果表明，新品种（系）可分为 3 大类群：第Ⅰ类为小粒多棱高产组，第Ⅱ类为高秆大粒组，第Ⅲ类为长穗低产组。对不同类群的划分、判别，受到单株粒数、单株粒质量、千粒质量以及株高等主要性状的影响和关联，这与郜战宁等的研究[9,17]基本一致。主成分分析（PCA）法是将线性变换降低数据维数、多个变量化为少数几个重要变量的一种多元分析方法[18]。主成分分析法目前广泛应用在小麦、大豆、燕麦等不同农作物的品种比较、资源评价鉴定研究中[19]。本文采用主成分分析法对 37 份新品种（系）进行分析，结果表明，前 4 个主成分因子累计贡献率为 83.468%，主要因子为单株粒数、主穗粒数、主穗粒质量、单株粒质量。前人研究表明，大麦株高与千粒质量呈一定的正相关关系[20]，株高高、千粒质量大、啤用品质优，但随着大麦株高的增加，抗倒性会减弱，发生倒伏致千粒质量下降，籽粒外观品质和麦芽品质变差，为此，选育矮秆抗倒的优质、高产大麦新品种，对发展内蒙古大麦产业十分重要。

通过对大麦新品系性状进行综合分析评价，可培育、筛选出不同类型的优良新材料，有效地加快大麦育种进程，对育成适合内蒙古及北方春麦区的高产、优质、广适的大麦新品种具有重要意义。

参考文献：

[1] 陈明贤，张国平. 全球大麦发展现状及中国大麦产业发展分析[J]. 大麦与谷类科学，2010(4):1-4.

[2] 牛小霞，柳小宁，潘永东，等. 97 份大麦种质资源农艺性状分析与评价[J]. 种子，2021,40(8):68-72,77.

[3] 杨东群，李先德. 中国大麦生产格局变化及其决定因素[J]. 中国农学通报，2013,29(32):105-111.

[4] 段琼辉，李　永，张　龙，等. 分光光度法测定大麦苗粉中维生素 C 的含量[J]. 黑龙江畜牧兽医(上半月)，2014(5):211-213.

[5] 姚琦馥，魏佳泰，李水琴，等. 大麦旗叶长和宽的 QTL 分析[J]. 麦类作物学报，2021,41(11):1365-1373.

[6] 孟　霞，卓　嘎，大次卓嘎，等. 西藏部分青稞主要农艺性状分析[J]. 麦类作物学报，2010,30(6):1043-1047.

[7] 朱昊华，范　超，王俊仁，等. 不同生态类型大麦品种(系)杂交后代主要农艺性状的分析[J]. 大麦与谷类科学，2022,39(1):1-7.

[8] 李　赢，刘海翠，石晓旭，等. 江苏裸大麦品种农艺及营养品质性状分析[J]. 分子植物育种，2022,20(9):3044-3052.

[9] 郜战宁，王树杰，冯　辉，等. 六棱大麦品种(系)主要农艺性状分析[J]. 陕西农业科学，2022,68(5):1-6.

[10] 汪军妹，张新忠，林　峰，等. 73 份优异啤酒大麦种质资源主要麦芽品质性状的评价[J]. 浙江农业学报，2012,24(1):1-6.

[11] 赵　盟，王春超，张仁旭，等. 中国大麦育成品种产量相关性状鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报，2022,23(5):1371-1382.

[12] 胡标林，万　勇，李　霞，等. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报，2012,38(5):829-839.

[13] 郭鹏燕，任杰成，赵吉平，等. 不同基因型冬小麦种质资源的遗传多样性研究[J]. 种子，2021,40(8):25-29,38.

[14] 董承光，王　娟，周小凤，等. 基于表型性状的陆地棉种质资源遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报，2016,17(3):438-446.

[15] 夏腾飞，王　蕾，徐金青，等. 267 份青藏高原青稞种质材料的表型多样性分析[J]. 西北农业学报，2018,27(2):182-193.

[16] 刘亚楠，朱　娟，吕　超，等. 二棱大麦种质的综合评价[J]. 麦类作物学报，2018,38(4):430-439.

[17] 刘亚楠，潘雨涵，郭　晖，等. 六棱大麦种质表型遗传多样性评价[J]. 植物遗传资源学报，2018,19(5):846-856.

[18] 贾志锋，马　祥，雷生春，等. 燕麦种质资源在青海生态区的形态多样性评价[J]. 种子，2019,38(12):58-63.

[19] 刘亚楠. 大麦种质资源遗传多样性研究及种质的评价与筛选[D]. 扬州：扬州大学，2017.

[20] 张　纪. 引进大麦种质资源籽粒性状间关系研究与评价利用[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2020.

本刊常用计量单位符号简介

为执行国务院发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》的规定，根据中华人民共和国“量和单位”系列国家标准（GB3100—1993、GB/T3101—1993 和 GB/T3102.1~3102.13—1993），现将本刊常用的计量单位符号介绍如下，希广大作者遵照执行。

时间：日(天)—d；表格中(月 / 日)应用(月 - 日)，如 2/30 应用 02-30；时—h；分—min；秒—s。质量：吨—t；公斤(千克)—kg；克—g；毫克—mg；微克—μg；纳克—ng。体积：升—L；毫升—mL；微升—μL。浓度：通常指物质的量浓度，克分子浓度(M)废用，改为 mol/L；当量浓度(N)废用，换算成相应的 mol/L；质量浓度单位为 kg/L；质量摩尔浓度单位为 mol/kg；ppm 换算为相应的 mg/kg(质量分数)、μL/L(体积分数)、μmol/mol(摩尔分数)等。面积：亩—667 m^2，万亩换算为万 hm^2 等。

Analysis and Evaluation of Main Agronomic Traits of 37 New Barley Varieties (Lines)

LYU Ersuo[1], MA Yu[1], XU Guangxiang[2], BA Tu[1], QU Jiahui[1], LI Tao[1], LIU Zhiping[1]
(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 2. Bayannur Institute of Agricultural and Animal Husbandry Science, Linhe 015000, China)

Abstract: In order to better breed new barley varieties suitable for planting and promotion in Inner Mongolia, 9 traits of 37 new barley lines were compared by principal component, correlation and cluster analysis. The results showed that the coefficient of variation of each trait was between 8.54% and 30.52%, and the order from the largest to the smallest was single grain weight, number grains per spike, number grains per plant, number of spikes per plant, and grain weight main spike. The minimum coefficient of variation of plant height was 8.54%. The difference in agronomic traits and yield traits of barley was mainly determined by the factors such as grain weight per plant, number grains per main spike, number of grains per plant, number spikes per plant, and grain weight main spike. Therefore, the improvement of these traits is of great significance to increase the yield of barley. Principal component analysis showed that most of the information of agronomic traits of new barley lines was contained in the first four principal component factors, and the cumulative contribution rate was 83.468%. The main factors were grain number per plant, grain number per main spike, grain weight per main spike and grain weight per plant. The results of correlation analysis showed that there was a strong correlation between yield and grain number per main spike, reaching a significant level (0.307). There was a positive correlation between yield and grain weight per main spike, grain weight per plant. There was no significant correlation between yield and plant height, spike number per plant and 1 000-grain weight. There was a significant negative correlation between yield and main spike length. The results of cluster analysis showed that 37 varieties (lines) could be clustered into three groups at the chi-square distance of 3.0, the first group was the small grain and multi-edge high yield group, the second group was the high stem and large grain group, and the third group was the long ear and low yield group.

Key Words: Barley; Agronomic trait; Principal component analysis; Correlation analysis; Cluster analysis

(上接第 28 页)

Optimization of Mature Embryo Culture System of Naked Oat and Preliminary Study on Transformation System of Traumatized Embryo

MA Jiaxing[1], LI Qinghua[1], LIU Yuhai[2], NAN Jinsheng[1], RONG Xiaoping[3], LU Suxiang[4], HAN Bing[1]
(1. Inner Mongolia Agricultural University / Key Laboratory of Wheat Germplasm lnnovation and Utilization Autonomous Region Higher School / Key Laboratory of Grassland Resources of Education Ministry / Key Laboratory of Biological Manufacturing of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China; 2. Ulanqab Agricultural Technology Extension Center, Ulanqab 012000, China; 3. Inner Mongolia Technology Promotion Center of Agricultural & Animal Husbandry, Hohhot 010020, China; 4. Agricultural and Rural Bureau of Wanquan District, Zhangjiakou 076250, China)

Abstract: Callus induction and differentiation culture in the mature embryos of 8 naked oat varieties were performed. Naked Oat No.1 was selected as the variety with the highest healing rate, and the medium was further optimized. The results showed that No.1 oat had the healing rate of 87.33% in ML2 induction medium and higher differentiation rate in DM1 differentiation medium. The optimal culture system was as follows: ML2 induction medium was used to induce callus, subculture was carried out after about 15 days, followed by two subcultures and then transferred to DM1 differentiation medium, and then transferred to rooting medium after differentiation of leaves. The pBI121 plasmid with GFP gene was used to infect the callus embryos of naked Oat No.1 by *Agrobacterium*-mediated method, and the effects of concentration of bacterial solution, concentration of selective agent and transplanting time on the transformation rate were investigated. The results showed that the efficient combined culture system for callus embryo transformation of naked oats included *Agrobacterium* solution (OD600) of 0.8 for infection, the optimal concentration of kanamycin selective agent was 40 mg/L, and the callus embryo was transplanted after 10 days of transformation culture. The *Agrobacterium*-mediated genetic transformation system of callus embryos of naked oats preliminarily established in this experiment is feasible, which provides a reference for the establishment of the regeneration system of naked oats in the future.

Key Words: Naked oat; Tissue culture; Genetic transformation; *Agrobacterium*-mediated transformation

李振姣,井　苗,李海录,等. 榆林市谷子资源核心种质构建[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):37–42. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32–1769/s. 2024.05.006.

榆林市谷子资源核心种质构建

李振姣,井　苗,李海录,强羽竹,白晶晶,王小英,付治忠,王　孟*
(榆林市农业科学研究院,陕西 榆林 719000)

摘要:为了更好地利用榆林市谷子种质资源,采用多次聚类随机取样法,从 200 份原种质资源中抽取 10%作为核心种质。结果显示,核心种质与原种质表型性状均值差异为 0%,极差符合率为 86.77%,方差差异为 8.33%,变异系数变化率为 109.29%。核心种质与原种质 12 个表型性状平均值 *t* 检验不显著,2 组多样性指数 *t* 检验不显著,表明本研究所构建的核心种质具有代表性。

关键词:谷子;核心种质;原种质
中图分类号:S515　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673–6486–20240063

谷子是榆林的传统种植作物，其生育期短、耐旱、耐瘠薄,对恶劣生产环境条件有着特殊适应性[1],是榆林市不可或缺的环境友好型作物,对平衡榆林市粮食结构具有重要的支撑作用。谷子在促进榆林市贫困地区社会稳定与增产增收中处于不可或缺的地位。发展谷子生产,对于保障陕西省粮食安全、维持社会稳定、满足市场需求、调整人们膳食结构、提高人们健康水平、促进农民增收、实现粮食持续增产具有重要作用。

Franke 认为,核心资源是以最小的材料数量最大程度地代表原始资源的遗传多样性[2–3]。建立核心种质可以提高种质资源的利用效率,同时减轻日益增长的资源数量给研究者带来的工作压力,进而提高整个种质库资源的管理和利用水平[4]。温琪汾等对山西省收集保存的 5 000 余份谷子地方品种进行初步筛选,去除同名同种、异名同种等种质后保留其中 3 761 份作为筛选种质并进行了田间抗旱鉴定,筛选出 58 份抗旱且丰产的优异种质[5]。王海岗等依据农艺性状通过聚类后随机抽取结合多样性指数检测的方法，从 5 600 余份山西谷子地方种质资源中筛选出 638 份作为初选核心种质,初选核心种质与原始种质的极差符合率为 87.4%，变异系数变化率为 102.0%,能够较好地代表原始种质[6]。榆林市同样作为谷子的主产区,目前未有对该地区收集保存的谷子种质资源进行核心种质构建的报道,因此研究榆林市谷子资源核心种质构建显得尤为迫切及重要。

本研究对榆林市 200 份谷子资源进行核心种质构建。核心种质既能代表原种质的遗传多样性,又缩小了资源的鉴定数量。榆林市谷子资源核心库的构建,将对提高该市育种效率和推动谷子产业发展起到积极作用。

1　材料与方法

1.1　供试材料

参试材料为我国不同地理来源的 200 份谷子品种,这些品种包括地方品种和育成品种,均能够适应当地气候环境,具体见表 1。试验于 2022—2023 年在榆林市农业科学研究院试验基地实施,2 年重复。每份品种种植 3 行,行长 1 m,行距 50 cm,3 次重复,人工开沟,人工撒种,于每年的 5 月 12 日播种。试验地前茬为绿豆，土质为砂壤土,生育期内除草 3 次,灌溉 6 次,同大田常规管理。主要农艺性状参照《国家谷子区域鉴定试验调查记载项目及标准》。

收稿日期:2024–07–08;修回日期:2024–10–11。
基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS–06–14.5–B27);陕西省重点研发计划(2023–YBNY–015、2023–YBNY–012)。
作者简介:李振姣(1989—),女,硕士,助理农艺师,主要从事谷子育种及技术推广工作。Email: 1282353840@qq.com。
* 通信作者:王　孟(1980—),男,高级农艺师,主要从事小杂粮研究工作。Email: wangmeng3214@126.com。

表 1　200 份谷子品种(系)名称及来源

编号	品种(系)	来源	编号	品种(系)	来源	编号	品种(系)	来源
1	晋谷 21	山西	68	冀谷 41	河北	135	公矮 5	黑龙江
2	晋品谷 5 号	山西	69	承 12–1024	河北	136	公矮 88	黑龙江
3	晋谷 60	山西	70	承谷 9	河北	137	龙谷 29	黑龙江
4	改良晋谷 21	山西	71	保 1801	河北	138	龙谷 38	黑龙江
5	晋汾 110	山西	72	烟 11	河北	139	龙谷 26	黑龙江
6	大同 29	山西	73	坝谷 2 号	河北	140	龙谷 25	黑龙江
7	大同 48	山西	74	坝谷 245	河北	141	公谷 11	黑龙江
8	大同 34	山西	75	黄旗皇	河北	142	嫩选 15	黑龙江
9	沁州黄	山西	76	承 11–727	河北	143	嫩选 18	黑龙江
10	保 928	山西	77	冀张谷 2 号	河北	144	野生谷子	陕西
11	同谷 30 号	山西	78	冀谷 42	河北	145	大红谷	内蒙
12	长农 39	山西	79	保 008	河北	146	东路阴天旱	山东
13	汾选 8 号	山西	80	冀谷 22	河北	147	竹叶青	山西
14	大同 45	山西	81	安 17–4567	河南	148	蜡烛台	河北
15	山西农家品种	山西	82	S744	河南	149	红苗青谷	河北
16	太选谷 27	山西	83	安 5150	河南	150	耧里莠谷	甘肃
17	长生 07	山西	84	安 6178	河南	151	红十里香	河南
18	山西红谷	山西	85	安 5415	河南	152	镇原谷子	甘肃
19	长谷 1501	山西	86	豫谷 38	河南	153	固原糯	宁夏
20	晋汾 107	山西	87	豫谷 9 号	河南	154	黄九根齐	陕西
21	晋谷 29	山西	88	郑 18–1792	河南	155	黑九根齐	陕西
22	晋谷 36	山西	89	安 5162	河南	156	黑九枝	陕西
23	晋谷 1 号	山西	90	安 15h × 062	河南	157	岚县红酒谷	山西
24	晋汾 109	山西	91	豫谷 18 号	河南	158	磨里谷	陕西
25	大同 30	山西	92	豫谷 1 号	河南	159	小绿谷	陕西
26	晋汾 4 号	山西	93	S757	河南	160	小黑谷	陕西
27	晋谷 34	山西	94	豫谷 8 号	河南	161	白梁谷	陕西
28	汾特 6 号	山西	95	S754	河南	162	冀谷 139	河北
29	晋汾 103	山西	96	豫谷 11 号	河南	163	冀谷 45	河北
30	大同 41	山西	97	S780	河南	164	冀张谷 7 号	河北
31	长生 13	山西	98	安 18h–d076	河南	165	冀杂金谷	河北
32	晋谷 45	山西	99	安 16h–8366	河南	166	H081	陕西
33	晋谷 40	山西	100	豫谷 19 号	河南	167	金谷 2 号	内蒙
34	太选 19 号	山西	101	豫谷 31	河南	168	yf20	陕西
35	太选谷 24	山西	102	安 17H–8162	河南	169	GR09	陕西
36	长生 13	山西	103	豫谷 32	河南	170	GQ16	陕西
37	长农 35	山西	104	榆谷抗 1	陕西	171	荣龙红谷	山东
38	晋谷 44	山西	105	神木黄沙谷	陕西	172	农谷 15	内蒙

（续表）

编号	品种（系）	来源	编号	品种（系）	来源	编号	品种（系）	来源
39	大同 39	山西	106	秦谷 5 号	陕西	173	18CF454	陕西
40	晋谷 40	山西	107	榆谷抗 2	陕西	174	T125	陕西
41	汾选 3 号	山西	108	子洲毛酒谷	陕西	175	朝谷 58	辽宁
42	长农 47	山西	109	陕谷 1 号	陕西	176	yg46	陕西
43	赤谷 19	内蒙	110	陕谷 1702	陕西	177	C23	河南
44	峰红 24	内蒙	111	榆谷 6 号	陕西	178	济谷 22	山东
45	赤峰红谷	内蒙	112	陕豫谷 3 号	陕西	179	中谷 2(可能是)	北京
46	峰红 4 号	内蒙	113	神木石炮谷	陕西	180	刁资源红谷	北京
47	敖谷 8	内蒙	114	红酒谷	陕西	181	中谷 9	北京
48	赤峰糯谷子	内蒙	115	龙爪酒谷	陕西	182	保谷 18	河北
49	赤优谷 1 号	内蒙	116	神木红酒谷	陕西	183	保谷 19	河北
50	峰红谷	内蒙	117	榆谷 1 号	陕西	184	保谷 27	河北
51	峰红 24	内蒙	118	陇谷 16 号	甘肃	185	吉杂谷 5 号	吉林
52	黄金谷	内蒙	119	022-4-1-1-1	甘肃	186	公矮 88	吉林
53	大金苗	内蒙	120	陇谷 8 号	甘肃	187	冀谷 168	河北
54	金苗谷	内蒙	121	9725-4-1-1	甘肃	188	沧 k281	河北
55	黄金谷	内蒙	122	2021FQ219-1-1	甘肃	189	中谷 15	北京
56	金苗 K2	内蒙	123	陇谷 7 号	甘肃	190	冀杂金苗 3 号	河北
57	峰优谷 4 号	内蒙	124	陇谷 6 号	甘肃	191	同谷 55 号	山西
58	赤 K21	内蒙	125	陇谷 13	甘肃	192	济 21F6091	山东
59	赤谷 K2	内蒙	126	陇谷 5 号	甘肃	193	海南 59	内蒙
60	峰黑谷	内蒙	127	陇谷 25	甘肃	194	13-119-2	甘肃
61	呼市农家红谷	内蒙	128	陇谷 11 号	甘肃	195	05-33-2	甘肃
62	赤谷 26	内蒙	129	0412-1-2-1	甘肃	196	衡 2022-1	河北
63	赤谷 K1	内蒙	130	陇谷 17 号	甘肃	197	榆谷 11	陕西
64	K32H	河北	131	032-1-1-1	甘肃	198	榆谷 9	陕西
65	冀谷 168	河北	132	029-5-5-3	甘肃	199	榆谷 8	陕西
66	冀谷 40	河北	133	黑 19-12	黑龙江	200	赤 2113	内蒙
67	冀创 1 号	河北	134	黑 19-11	黑龙江			

1.2　核心种质构建方法

以 2 年 12 个表型数据为基础，通过 QGAStation 软件运用欧氏遗传距离、多次聚类随机取样法、类平均聚类法对 200 份谷子资源分别进行 5%、10%、15%的比率筛选，最后得出每个压缩群体与原种质资源的均值差异（MD）百分率、方差差异（VD）百分率、极差（CR）符合率、变异系数（VR）变化率。当均值差异百分率 < 20%，且极差符合率 > 80%时，则可认为这套核心种质可代表原种质资源的遗传多样性[7-10]。

1.3　数据分析

生育期间及收获后共考察 12 个农艺性状，包括叶鞘色、穗松紧、穗型、刚毛长度、谷粒颜色 5 个质量性状和株高、穗长、穗粗、单穗质量、穗粒质量、出谷率、千粒质量 7 个数量性状。质量性状予以赋值（表 2），将代码数除以代码总数，最终转化为 0~1 间的数值。通过 QGAStation 和 SPSS 25.0 对原种质和核心种质进行变异分析、*t* 检验，多样性评价采用 Shannon-Wiener's 多样性指数（H′）进行分析。利用 SAS 8.1 对原种质和核心种质进行主成分分析。

2　结果与分析

2.1　核心种质构建

通过多次随机聚类取样法，以原始种质的 5%、10%、15%的抽样比例进行核心种质筛选，结果见表 3。当核心种质与原始种质的均值差异百分率 < 20%，且极差符合率 > 80%，该套核心种质则可代表原种质的遗传差异性，且考虑核心种质的数量应尽可能少，所以初步确定抽样比例为 10%的候选种质为核心种质，具体品种名称见表 4。

表 2　谷子资源质量性状赋值

性状	赋值
叶鞘色	绿 =1；浅紫 =2；中等紫 =3
穗型	纺锤 =1；棍棒 =2；猫爪 =3；圆筒 =4；圆锥 =5
穗松紧	紧 =1；中 =2；松 =3
刚毛长度	短 =1；中 =2；长 =3
谷粒颜色	白 =1；黄 =2；黑 =3；红 =4；绿 =5

表 3　候选种质与原种质的差异百分率

抽样比例 /%	均值差异百分率(MD)/%	极差符合率(CR)/%	变异系数变化率(VR)/%
5	0	75.52	107.49
10	0	86.77	109.29
15	0	89.08	106.89

表 4　核心种质品种(系)名称

序号	品种(系)
1	晋品谷 5 号
2	长农 39
3	晋谷 1 号
4	太选 19 号
5	大同 39
6	承 11-727
7	S744
8	安 6178
9	安 18h-d076
10	红酒谷
11	022-4-1-1-1
12	0412-1-2-1
13	公矮 88
14	黑九枝
15	小绿谷
16	小黑谷
17	yg46
18	冀谷 168
19	中谷 15
20	海南 59

2.2　核心种质代表性检验

原种质中各农艺性状的变异系数变化较大，只有出谷率的变异系数没有超过 10%，叶鞘色、刚毛长度、谷粒颜色的变异系数均超过 40%，说明榆林谷子资源的遗传变异丰富，适合构建核心种质。12 个表型性状平均值 *t* 检验显示，核心种质与原种质的所有性状差异均无统计学意义，说明所选核心种质保留了大部分遗传信息，能较好地代表原种质(表 5)。

2.3　原种质与核心种质多样性指数比较分析

对原种质与核心种质的 12 个表型性状进行计算，结果见表 6。核心种质除了叶鞘色与穗型的多样性指数与原种质差异较大，其他性状核心种质与原种质的多样性指数接近，2 者多样性指数最高的均为穗粗，分别为 1.96、2.06。2 组数据的 *t* 检验显示，原种质与核心种质的多样性指数未达到显著水平，表明核心种质涵盖原种质的大部分遗传信息。

2.4　原始种质与核心种质主成分分析

分别对原始种质与核心种质进行主成分分析，结果见表 7。当特征值大于 1 时，原始种质与核心种质均划分为 5 个主成分，第 1 个主成分的特征值分别为 2.83、3.10，贡献率分别为 23.59%、25.22%，结果较为接近。前 5 个主成分的累计贡献率分别为 66.77%、73.46%，故构建核心种质可有效减少相关性状的遗传冗余，提高原种质群体的累计贡献率。

表 5　原种质与核心种质 12 个表型性状参数的均值、极差、方差、变异系数

性状	原始种质				核心种质				*t* 值
	平均值	极差	方差	变异系数 /%	平均值	极差	方差	变异系数 /%	
叶鞘色	0.25	0.33	0.14	47.58	0.27	0.33	0.02	54.15	−1.185
穗型	0.29	0.26	0.01	29.24	0.30	0.26	0.01	26.62	1.083
穗松紧	0.29	0.33	0.01	30.78	0.30	0.33	0.01	28.45	−1.487
刚毛长度	0.25	0.33	0.01	46.86	0.26	0.33	0.02	47.98	0.325
谷粒颜色	0.14	0.26	0.003	41.60	0.15	0.26	0.01	49.31	0.058
株高 /cm	135.52	87.50	319.18	13.20	129.58	80.67	503.35	17.32	−0.509
穗长 /cm	24.99	24.58	14.38	15.17	26.52	23.75	39.76	23.77	−0.245
穗粗 /cm	2.72	2.58	0.22	17.15	2.58	1.46	0.15	14.86	0.569
单穗质量 /g	28.00	32.75	31.83	20.30	28.45	26.50	37.97	21.66	0.614
穗粒质量 /g	21.34	24.48	18.45	20.38	21.40	19.29	20.25	21.04	0.448
出谷率 /%	0.760	0.330	0.003	6.67	0.750	0.170	0.002	6.29	0.341
千粒质量 /g	3.64	2.60	0.33	15.92	3.61	2.20	0.40	17.69	0.688

表 6　核心种质与原种质 12 个表型性状遗传多样性指数比较

性状	原种质多样性指数	核心种质多样性指数	*t*
叶鞘色	0.28	0.86	1.131
穗型	1.18	0.52	
穗松紧	0.82	0.75	
刚毛长度	0.90	0.94	
谷粒颜色	0.69	1.09	
株高	2.04	1.79	
穗长	1.96	1.71	
穗粗	2.06	1.96	
单穗质量	2.06	1.92	
穗粒质量	2.03	1.85	
出谷率	2.01	1.71	
千粒质量	2.05	1.68	

表 7　原始种质与核心种质主成分分析的特征值、贡献率、累计贡献率

主成分	原始种质			核心种质		
	特征值	贡献率 /%	累计贡献率 /%	特征值	贡献率 /%	累计贡献率 /%
1	2.83	23.59	23.59	3.10	25.22	25.22
2	1.60	13.32	36.91	1.92	16.00	41.22
3	1.37	11.42	48.33	1.50	12.51	53.73
4	1.16	9.65	57.98	1.25	10.46	64.19
5	1.05	8.79	66.77	1.11	9.27	73..46

3　讨论与结论

3.1　榆林市谷子资源构建核心种质的必要性

榆林市位于陕西省最北部，地处毛乌素沙漠南缘，北部为风沙滩区，南部为丘陵沟壑区，属于半干旱地区。榆林市种植的谷子生育期间光照强，昼夜温差大，干物质积累多，生产出的谷子品质优，小米适口性好。榆林谷子常年播种面积 6 万 hm^2 左右，

年产谷子 10 万 t。谷子种质资源是培育优质、高产谷子品种的物质基础，也是谷子高产的重要保证。核心种质作为全部资源的简单样本，不仅优化了资源数量，同时也方便了谷子研究者深入系统挖掘榆林市谷子的遗传潜力。目前，水稻、小麦、大豆等许多作物均已构建了核心种质，并在此基础上开展了研究工作，充分有效地利用了优异种质资源[11-15]。榆林市是谷子的主产区和合适生态区，通过构建谷子核心种质，可为当地谷子育种和产业发展奠定基础。

3.2　核心种质的代表性

核心种质是用最小数量的资源群体最大限度地代表原种质的遗传多样性。前人研究表明，如果核心种质的均值差异百分率 < 20%，且满足极差符合率 > 80%，便可代表原有种质资源的遗传差异性[8-9]。本试验构建的核心种质共 20 份，占原种质的 10%，均值差异为 0%，极差符合率和变异系数变化率分别为 86.77%和 109.29%，说明该套核心种质能够有效代表原种质。对原种质与核心种质各个性状的均值及遗传多样性指数的 *t* 检验均表明，构建的核心种质可以较好地代表原种质的遗传变异。同时，主成分分析的结果可反映出群体间的相似程度，进一步确认了核心种质的代表性，且减少了性状相关间的遗传冗余。为了最大程度地利用核心种质，科研工作者还需要继续深入研究，挖掘特异性基因，进而满足人们的需求。

参考文献：

[1] 侯　森,秦慧彬,李　萌,等. 山西谷子地方品种微核心种质构建[J]. 山西农业科学,2024,52(1):19-26.

[2] FRANKEL O H. Genetic perspectives of germplasm conservation [M]//ARBER W,LIMENSEE K,PEACOCK W J,et al. Genetic manipulation:impact on man and society. Cambridge,UK: Cambridge University Press,1984:16-170.

[3] FRANKEL O H, BROWN A H D. Plant genetic resources today:a critical appraisal [M]//Holden J H W,Williams J T. Crop genetic resources: conservation and evalution. London: George Allen & Urwin Ltd,1984:249-257.

[4] 李自超,张洪亮,孙传清,等. 植物遗传资源核心种质研究现状与展望[J]. 中国农业大学学报,1999,4(5):51-62.

[5] 温琪汾,刘润堂,王　纶,等. 山西省谷子品种资源的抗旱性和丰产性研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2004,24(3):224-226.

[6] 王海岗,温琪汾,乔治军,等. 山西谷子地方品种初选核心种质构建[J]. 农学学报,2019,9(4):26-31.

[7] WANG J C,HU J,ZHANG C F,et al. Assessment on evaluating parameters of rice core collections constructed by genotypic values and molecular marker information[J]. Rice Science,2007,14(2):101-110.

[8] 魏兴华,应存山,颜启传,等. 浙江地方籼稻资源核心样品的构建方法研究[J]. 浙江农业学报,1999,11(5):223-228.

[9] 魏兴华,汤圣祥,余汉勇,等. 浙江粳稻地方品种核心样品的构建方法[J]. 作物学报,2001,27(3):324-328.

[10] 李振姣. 宁夏外引水稻种质资源的遗传多样性研究及核心种质构建[D]. 银川:宁夏大学,2016.

[11] 李自超,张洪亮,曾亚文,等. 云南地方稻种资源核心种质取样方案研究[J]. 中国农业科学,2000,33(5):1-7.

[12] 张冬玲,张洪亮,魏兴华,等. 贵州栽培稻的遗传结构及其遗传多样性[J]. 科学通报,2006,51(23):2747-2754.

[13] 李丹婷,夏秀忠,农保选,等. 广西地方稻种资源核心种质构建和遗传多样性分析[J]. 广西植物,2012,32(1):94-100.

[14] 陈　雨,潘大建,刘　斌,等. 华南地方稻种资源初级核心种质构建[J]. 植物遗传资源学报,2008(3):322-327.

[15] 方先文,汤陵华,王艳平,等. 太湖流域部分粳稻品种核心种质库的构建[J]. 江西农业学报,2008(2):4-5.

Core Collection Construction of Millet Germplasm Resources in Yulin City

LI Zhenjiao, JING Miao, LI Hailu, JIANG Yuzhu, BAI Jingjing, WANG Xiaoying, FU Zhizhong, WANG Meng

(Yulin Academy of Agricultural Sciences, Yulin 719000, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of millet germplasm resource utilization in Yulin City, 10% of the genetic resources of the 200 original germplasm were selected as the core collection by multiple clustering random sampling method. The results showed that the average percentage difference of phenotypic traits between core collection and total collection was 0%, the range coincidence rate was 86.77%, the variance difference rate was 8.33%, and the variation rate of coefficient of variation was 109.29%. The average values of 12 phenotypic traits of core collection and total collection were not significant, and the diversity index of the two groups was not significant, indicating that the selected core collection had good representation.

Key Words: Millet; Core collection; Protoplasm

时学双,韩　婧,范晓通,等. 青稞苗期耐低氮特性鉴定与筛选[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):43–48. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32–1769/s.2024.05.007.

青稞苗期耐低氮特性鉴定与筛选

时学双[2],韩　婧[1],范晓通[1],孔凡美[1],张小村[1*]
(1. 山东农业大学资源与环境学院,山东 泰安 271018;2. 日喀则市农牧业科学研究推广中心,西藏 日喀则 857000)

摘要:为研究青稞苗期耐低氮特性,以 98 份青稞品种(系)为材料,设置低氮(0.1 mmol/L)和正常氮(1.0 mmol/L)2 个处理,分析低氮和正常氮水平下青稞苗期叶绿素 SPAD 值、植株鲜质量、根系长度、养分质量分数等指标的变化。结果表明,相比正常氮处理,低氮处理的 98 份青稞根系平均长度从 25.04 cm 增加到 29.51 cm,根冠比从 0.48 增加到 0.79,根系平均鲜质量从 0.23 g/ 株增加到 0.28 g/ 株;单株地上部平均长度从 34.18 cm 降低到 28.64 cm,地上部平均鲜质量从 0.61 g/ 株降低到 0.30 g/ 株,叶绿素 SPAD 值从 23.41 降低到 21.26,氮质量分数从 29.11 g/kg 降低到 15.50 g/kg。黑青稞、Jiangse、喜马拉 23 这 3 个青稞材料在低氮处理下的氮效率为 8.14,高于该试验条件下其他青稞品种(系),为该试验条件青稞苗期低氮高效品种(系)。

关键词:青稞;低氮;苗期;农艺性状
中图分类号:S512.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673–6486–20240068

青稞(*Hordeum vulgare* L. *var. nudum* Hook. f.)又称裸大麦,是青藏高原地区的主要粮食和饲料作物[1]。青稞高产稳产对于保障西藏地区粮食安全和维护西藏社会稳定具有重大意义[2–3]。氮肥是肥料 3 要素之一,是青稞高产稳产的关键因素之一[4]。研究表明,青稞对氮肥比较敏感,氮、磷、钾 3 要素中,影响青稞产量最大的因素是氮[5]。氮肥施用不足会导致青稞产量降低,而过多施用氮肥会使青稞苗期徒长[6],降低氮肥利用效率[7]。

土壤缺氮是我国高原冷凉地区作物低产的主要原因之一[6],青稞作为高原地区主要粮食作物[8–10],筛选耐低氮青稞种质材料是解决土壤缺氮的重要途径。扎桑等利用来自西藏的 1 029 份青稞种质材料,对 2 叶期的青稞幼苗进行耐低氮材料筛选,筛选出“ZDM4700”“藏 1446”“ZDM5713”和“ZDM5766”4 份耐低氮种质材料[11]。刘列等研究了 48 份云南大麦品种的氮效率,将这些材料分为高产氮高效型、高产氮低效型、低产氮高效型和低产氮低效型 4 类,其中高产氮高效型的大麦品种最多[12]。尽管目前已开展了耐低氮青稞种质材料筛选,这些材料主要来源于西藏和云南,还需要对更多地区来源的青稞种质材料进行筛选,以获得更多耐低氮青稞材料。

本研究利用来源于西藏、青海、新疆等地的 98 份青稞材料,采用苗期营养液培养的方法,设置低氮和常规氮 2 个处理,分析青稞苗期生物量、氮质量分数等指标,筛选青稞苗期耐低氮材料,为青稞耐低氮育种奠定材料基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

98 份青稞品种(系)见表 1,材料由日喀则市农牧业科学研究推广中心、中国科学院西北高原生物研究所、新疆农业科学院、中国农业科学院作物科学研究所提供。

1.2　试验设计及实施

试验设正常氮(1 mmol/L)和低氮(0.1 mmol/L)2 个处理,每个处理 3 次重复。氮素的供应形态为 $(NH_4)_2SO_4·H_2O$ 与 $Ca(NO_3)_2·4H_2O$,用 $CaCl_2$ 补充低氮处理的 Ca^{2+} 浓度与正常氮处理一致。

采用基质培养,基质为蛭石、珍珠岩,其体积比为 3∶1。取饱满均匀无病虫害的种子,播种到 98 孔育苗盘中,育苗盘每孔直径 4 cm,高度 20 cm。每穴播种 10 粒,播后正常供应水分。出苗后每穴留均匀一致的苗 3 棵,每 3 d 浇灌一次改良的 Hoagland 营养液(表 2),每孔浇 10 mL 营养液,处理 25 d 后(3 叶

收稿日期:2024–07–21;修回日期:2024–10–11。
基金项目:日喀则市科技计划(RKZ2021KJ05)。
作者简介:时学双(1975—),男,博士,讲师,主要从事青稞育种及其加工研究。Email: 645278900@qq.com。
* 通信作者:张小村(1978—),男,博士,副教授,主要从事植物营养机理与调控研究。Email: xczhang@sdau.edu.cn。

1 心期)收获并测定相关指标。

试验在智能人工培养箱(宁波江南 RXZ500c 系列智能人工气候箱)内完成,温度 25 ℃,湿度 70%,光照强度 300 μmol/(m²·s),光照时间 12 h/d。试验时间为 2024 年 3 月 13—4 月 7 日,共 25 d。

表 1　青稞编号及品种(系)名称

编号	材料名称	编号	材料名称	编号	材料名称
1	6927	34	QK043	67	XDZM3952
2	04-2894-1	35	QK045	68	XDZM3955
3	09-5024-13	36	Qudui	69	Zhegui
4	13-5171-3	37	Relong	70	阿青 5
5	13-5171-7	38	Puru	71	阿青 6
6	14-3492	39	Sadengmu	72	青北 7 号
7	14-712	40	T15	73	北青 8 号
8	2013-715	41	Tajie	74	藏青 25
9	Baiding	42	Wangxue	75	藏青 85
10	Chimu	43	XialomgS	76	短白青稞
11	CQK-02	44	Xiangpu	77	甘青 4 号
12	CQK-05	45	Xiongmai	78	黑青稞
13	Duikang	46	Xixin	79	黄青稞
14	Duoqing	47	XZDM3781	80	吉隆蓝
15	Gacun	48	XDZM3787	81	康青 7 号
16	Galanu	49	XDZM3834	82	康青 8 号
17	Jiangga	50	XDZM3855	83	康青 9 号
18	Jiangse	51	XDZM3856	84	昆仑 12
19	Kaga	52	XDZM3858	85	昆仑 13
20	Kangbu	53	XDZM3867	86	龙稞 8 号
21	Kecun	54	XDZM3871	87	新稞 2 号
22	Liucun	55	XDZM3874	88	长黑青稞
23	Lunzhuding	56	XDZM3881	89	藏青 13
24	Naisa	57	XDZM3885	90	藏青 17
25	Pugui	58	XDZM3892	91	藏青 20
26	Puxia	59	XDZM389	92	藏青 2000
27	QK0402	60	XDZM3908	93	藏青 3000
28	QK04077	61	XDZM3910	94	藏青 320
29	QK04073	62	XDZM3911	95	藏青 690
30	QK0408	63	XDZM3920	96	喜马拉 19
31	QK0412	64	XDZM3929	97	喜马拉 22
32	QK0414	65	XDZM3937	98	喜马拉 23
33	QK0417	66	XDZM3943		

表 2　营养液配方

大量元素	浓度 /（mmol/L）	微量元素	浓度 /（μmol/L）
KH_2PO_4	0.2	H_3BO_3	1.0
$MgSO_4·7H_2O$	0.5	$(NH_4)_6Mo_7O_{24}·4H_2O$	0.1
KCl	1.5	$CuSO_4·5H_2O$	0.5
$CaCl_2$	1.5	$ZnSO_4·7H_2O$	1.0
$(NH_4)_2SO_4·H_2O$	1.0	$MnSO_4·H_2O$	1.0
$Ca(NO_3)_2·4H_2O$	1.0	FeEDTA	100.0

1.3　测定指标及方法

叶绿素值：收获时，使用便携式叶绿素仪（SPAD–502）测定 3 片完全展开叶的叶绿素值。

苗高、根系长度：青稞幼苗洗净后用吸水纸擦干，用直尺测量苗高与根系长度，每个重复均取 3 株材料的平均值。苗高从茎基部测到叶片最高处，根长从茎基部测到最长根的根尖。

生物量：收获后的样品用蒸馏水冲洗干净，滤纸擦干，从茎基部剪开，分别称取地上部和地下部鲜质量，计算平均值。每个重复均单独测量。

根冠比 = 地下部鲜质量 / 地上部鲜质量。

氮、磷、钾质量分数：称完质量后将幼苗地上部、地下部放入信封袋中，烘箱调节至 105 ℃，杀青 30 min 后调至 65 ℃ 烘干至恒质量，冷却至室温后，整株样品烘干磨细，H_2SO_4–H_2O_2 消煮，凯氏定氮法测氮质量分数，火焰光度计法测钾质量分数，钼锑抗比色法测定磷质量分数。每个重复单独测量。

1.4　数据计算与处理

耐低氮系数 =（低氮处理下测定值 / 正常氮处理下测定值）× 100%；氮效率（NUE）= 植株干质量 / 植株氮含量。

利用 SPSS 22.0 软件，采用 K– 均值聚类法进行聚类分析。数据采用 Excel 2010 软件整理，用 Origin 2018 作图，采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析。

2　结果与分析

2.1　低氮处理对青稞根系长度、地上部长度和叶绿素 SPAD 值的影响

由图 1–A 可知，正常氮处理的根系长度最小值为 16.33 cm，最大值为 42.00 cm，平均值为 25.04 cm；低氮处理的根系长度最小值为 18.33 cm，最大值为 48.33 cm，平均值为 29.51 cm；相比正常氮处理，低氮处理的 98 份青稞材料根系平均长度显著增大。

由图 1–B 可知，正常氮处理的地上部长度最小值为 18.33 cm，最大值为 50.33 cm，平均值为 34.18 cm；低氮处理的地上部长度最小值为 18.00 cm，最大值为 41.33 cm，平均值为 28.64 cm；相比正常氮处理，低氮处理青稞地上部平均长度显著降低。

由图 1–C 可知，正常氮处理的 98 份青稞材料的叶绿素 SPAD 值为 23.41，显著高于低氮处理的 21.26。进一步计算叶绿素值的变异系数发现，正常氮处理下 SPAD 值的变异系数为 78.09%，低氮处理下 SPAD 值的变异系数为 16.56%，正常氮处理下青稞 SPAD 值变异幅度更大。

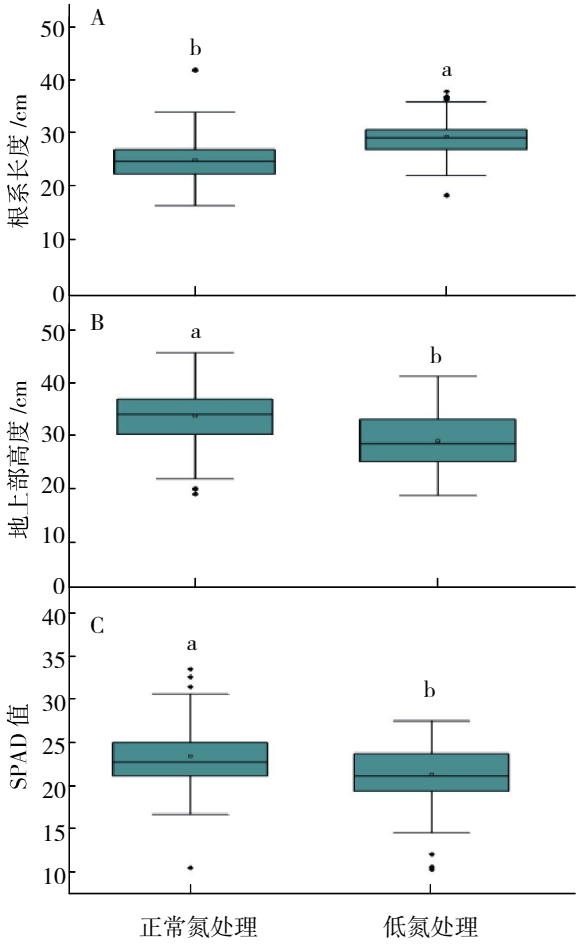


图 1　青稞根系长度、地上部高度、叶绿素 SPAD 值箱线图

2.2　不同氮处理下青稞生物量差异

由表 3 可知，正常氮处理的 98 份青稞地上部鲜质量平均值为 0.61 g/ 株，变异系数 26.54%；低氮处理的地上部鲜质量平均值为 0.30 g/ 株，变异系数 29.25%。

表 3　不同氮处理下青稞苗期生物量差异

性状	处理	平均值	最小值	最大值	变异系数 /%	显著性（$P<0.05$）
地上部鲜质量 /（g/ 株）	NN	0.61	0.17	1.15	26.54	a
	LN	0.30	0.07	0.50	29.25	b
根系鲜质量 /（g/ 株）	NN	0.23	0.07	0.84	57.37	b
	LN	0.28	0.04	0.90	55.58	a
根冠比	NN	0.48	0.13	1.81	56.45	b
	LN	0.79	0.07	4.85	75.56	a

注：NN 表示正常氮处理，LN 表示低氮处理。

低氮处理的地上部鲜质量显著低于正常氮处理。正常氮处理的 98 份青稞根系鲜质量平均值为 0.23 g/ 株，变异系数 57.37%；低氮处理的根系鲜质量平均值为 0.28 g/ 株，变异系数 55.58%。正常氮处理的根系鲜质量显著低于低氮处理。正常氮处理下，98 份青稞根冠比平均值为 0.48，变异系数 56.45%；低氮处理根冠比平均值为 0.79，变异系数 75.56%。低氮处理下根冠比显著高于正常氮处理。

2.3　低氮处理对青稞氮磷钾质量分数的影响

正常氮处理下 98 份青稞全株（干质量）氮质量分数平均值为 29.11 g/kg，低氮处理下全株氮质量分数平均值为 15.50 g/kg。相较正常氮处理，低氮处理青稞全株氮质量分数显著降低。正常氮处理全株氮质量分数变异系数为 42.86%，而低氮处理全株氮质量分数变异系数为 19.84%（图 2-A）。

正常氮处理下 98 份青稞全株（干质量）磷质量分数平均为 0.42 g/kg，低氮处理全株磷质量分数平均值为 0.47 g/kg，两者差异无统计学意义。正常氮处理全株磷质量分数的变异系数为 52.95%，低氮处理下的全株磷质量分数变异系数为 35.81%（图 2-B）。

低氮处理 98 份青稞全株（干质量）钾质量分数平均值为 1.71 g/kg，正常氮处理下青稞全株钾质量分数为 1.57 g/kg，两者差异无统计学意义（图 2-C）。

2.4　耐低氮青稞品种（系）筛选

根据低氮处理下 NUE 值对 98 份青稞品种（系）K- 均值聚类，将 98 份青稞品种（系）分为 6 类，其中，黑青稞、Jiangse、喜马拉 23 NUE 均值达到 8.14（表 4），为该试验条件下耐低氮高效材料。

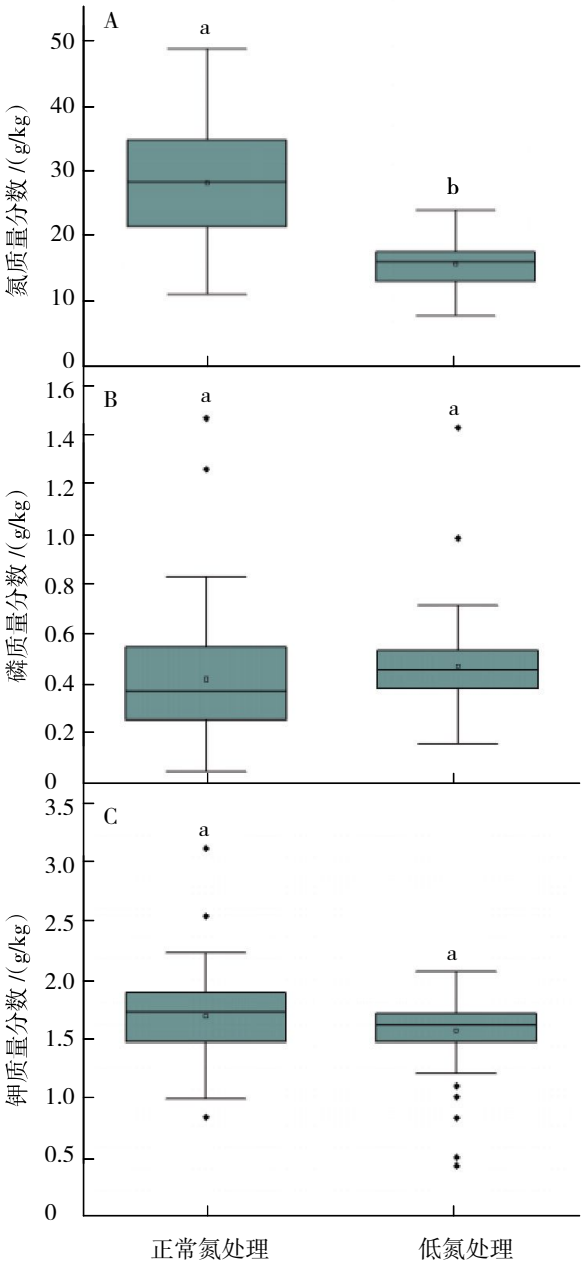


图 2　青稞全株氮、磷、钾质量分数箱线图

表 4　聚类分析结果

类别	氮效率	品种(系)
1	8.14	黑青稞、Jiangse、喜马拉 23
2	6.07	藏青 2000、北青 8 号、康青 7 号、藏青 17、藏青 3000、藏青 320、喜马拉 19
3	4.74	14-712、QK043、Relong、XDZM3908、XDZM3937、藏青 85、短白青稞、甘青 4 号、吉隆蓝、康青 8 号、康青 9 号、昆仑 12、长黑青稞、藏青 20、藏青 690
4	3.69	13-5171-3、13-5171-7、Baiding、Chimu、CQK-02、Duikang、Gacun、Kangbu、Kecun、Naisa、QK0402、QK0408、Puru、Sadengmu、Tajie、Wangxue、XDZM3885、XDZM3892、XDZM3893、XDZM3910、XDZM3911、XDZM3920、XDZM3929、Zhegui、阿青 6、青北 7 号、藏青 25
5	2.64	14-3492、2013-715、CQK-05、Duoqing、Galanu、Jiangga、Kaga、Liucun、Puxia、QK04077、QK04073、QK0412、QK0414、QK045、Qudui、Xiongmai、XDZM3834、XDZM3858、XDZM3881、XDZM3943、阿青 5、黄青稞、新稞 2 号、藏青 13、喜马拉 22
6	1.70	6927、04-2894-1、09-5024-13、Lunzhuding、Pugui、QK0417、T15、XialomgS、Xiangpu、Xixin、XZDM3781、XDZM3787、XDZM3855、XDZM3856、XDZM3867、XDZM3871、XDZM3874、XDZM3952、XDZM3955、昆仑 13、龙稞 8 号

2.5　耐低氮系数

由表 5 可知，Jiangse 和黑青稞 2 个材料的根长、整株磷含量以及氮效率的耐低氮系数均 > 1.0，表明这个材料在低氮处理下，根长、磷含量和氮效率比正常氮条件下表现好；喜马拉 23 的地上部长度、地上部鲜质量和氮效率的耐低氮系数均 > 1.0，表明这个材料在低氮处理下，地上部长度、地上部鲜质量和氮效率比正常氮处理表现好。尽管这 3 个材料在低氮处理下氮利用效率都是较高的材料，但其不同指标的耐低氮系数并不尽相同。这说明这些材料适应低氮的机理可能不同，仍需要进一步深入研究。

表 5　相关指标的耐低氮系数

	耐低氮系数								
	叶绿素 SPAD 值	地上部长度	根长	地上部鲜质量	根系鲜质量	整株氮含量	整株磷含量	整株钾含量	氮效率
群体平均值	0.91	0.86	1.19	1.47	0.53	0.63	1.58	0.97	1.79
Jiangse	0.87	0.90	1.31	0.77	0.55	0.46	1.89	0.90	1.42
黑青稞	1.00	0.80	1.01	0.89	0.66	0.35	1.13	0.93	2.19
喜马拉 23	0.93	1.20	0.98	1.26	0.85	0.24	0.36	0.36	3.97

3　讨论

氮高效青稞品种筛选对青稞育种及青稞养分利用效率的研究有重要意义，合适的筛选指标是筛选鉴定氮高效材料的前提。植物地上部和根系对氮素敏感，是影响作物丰产性和抗逆性的重要指标。一般情况下，作物地上部和根系生物量对缺氮表现敏感，表现为缺氮条件下作物根长和根系干质量增加，而地上部株高和生物量降低。然而，在筛选耐低氮品种时，还没有一套完整的被认可的品种耐低氮筛选评价体系，多参考苗期生物量、产量等指标[12]，或采用脯氨酸、叶绿素 SPAD 值等生理指标来筛选耐低氮品种[11]。氮利用效率(NUE)体现了作物在等量氮条件下的干物质生产能力，是作物氮利用效率的直接指标。本试验以氮利用效率为参考指标，通过聚类分析，筛选出黑青稞、Jiangse、喜马拉 23 这 3 个低氮条件下氮高效青稞品种(系)。这 3 个材料氮利用效率的耐低氮系数均 > 1.0(表 5)，表明这 3 个材料在低氮条件下氮利用效率更高。可见，以氮利用效率为指标筛选耐低氮青稞材料是行之有效的办法。

4　结论

相比正常氮处理，低氮处理显著提高了青稞根系长度、根系鲜质量和根冠比，显著降低了青稞地上部长度、地上部鲜质量、叶绿素 SPAD 值和全株氮质量分数。筛选出 3 个低氮高效青稞品种（系）：黑青稞、Jiangse、喜马拉 23。

致谢

感谢日喀则市农牧业科学研究推广中心、中国科学院西北高原生物研究所、新疆农业科学院、中国农业科学院作物科学研究所提供种质材料。

参考文献：

[1] ZENG X Q,GUO Y,XU Q J,et al. Origin and evolution of Qingke barley in Tibet[J]. Nature Communications,2018,9(1):5433.

[2] 韩昕丽,梁丹辉. 我国青稞产业经济分析[J]. 中国食物与营养,2024,30(1):14-18.

[3] 洛桑次仁,巴桑玉珍,顿珠加布,等. 藏西南高海拔地区青稞产业发展现状与前景[J]. 农业展望,2023,19(7):87-91.

[4] 马瑞萍,韦泽秀,卓　玛,等. 氮磷配施对青稞生长发育及产量的影响[J]. 西南农业学报,2015,28(6):2577-2585.

[5] 张建青,李　猛,丁桃群,等. 不同施肥量对青稞产量的影响试验研究[J]. 农业科技通讯,2019(7):149-151.

[6] 刘国一,尼玛扎西,尼玛扎西,等. 不同施氮量对青稞产量的影响[J]. 西藏农业科技,2013,35(3):17-20.

[7] 谈建鑫,同　坚,贠民政,等. 过量施氮对西藏河谷农区青稞生长发育的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(4):6-13.

[8] POURKHEIRANDISH M,HENSEL G,KILIAN B,et al. Evolution of the grain dispersal system in barley[J]. Cell,2015,162(3):527-539.

[9] D'ALPOIM GUEDES J A,LU H L,HEIN A M,et al. Early evidence for the use of wheat and barley as staple crops on the margins of the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(18):5625-5630.

[10] DAI F,NEVO E,WU D Z,et al. Tibet is one of the centers of domestication of cultivated barley[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2012,109(42):16969-16973.

[11] 扎　桑,旺　姆,徐齐君. 西藏青稞种质资源苗期耐低氮鉴定与筛选[J]. 西藏农业科技,2021,43(2):11-17.

[12] 刘　列,王志伟,乔祥梅,等. 48 份云南大麦品种(系)氮高效鉴定及分析[J/OL]. 分子植物育种,2023:1-18(2023-12-12)[2024-07-21]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231212.1029.002.

Identification and Screening of Low Nitrogen Tolerance Characteristics of Highland Barley at Seedling Stage

SHI Xueshuang[2], HAN Jing[1], FAN Xiaotong[1], KONG Fanmei[1], ZHANG Xiaocun[1]

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Shigatse Agricultural and Animal Husbandry Scientific Research and Extension Center, Shigatse 857000, China)

Abstract: To explore the low nitrogen tolerance traits of highland barley at seedling stage, 98 varieties (lines) were used as the materials, and 2 treatments of low nitrogen (0.1 mmol/L) and normal nitrogen (1.0 mmol/L) were set up. The variations of chlorophyll levels, fresh plant weight, root length, and nutrient mass fraction at the seedling stage under both nitrogen conditions were analyzed. The results showed that compared with the normal nitrogen treatment, the average root length of 98 barley samples under low nitrogen conditions increased from 25.04 cm to 29.51 cm. The root-shoot ratio rose from 0.48 to 0.79, and the average fresh root weight increased from 0.23 g/plant to 0.28 g/plant. The average aboveground length of single plant reduced from 34.18 cm to 28.64 cm. The average aboveground fresh weight reduced from 0.61 g/plant to 0.30 g/plant. The SPAD value decreased from 23.41 to 21.26, and the nitrogen mass fraction decreased from 29.11 g/kg to 15.50 g/kg. Notably, the nitrogen efficiency of Heiqingke, Jiangse, and Ximara 23 under low nitrogen conditions was 8.14, which was higher than that of other varieties tested. Thus, they are high-efficiency varieties (lines) under low nitrogen conditions at the seedling stage.

Key Words: Highland barley; Low nitrogen; Seedling stage; Agronomic trait

张本昌,朱靖环,范　敏,等. 稻茬麦种植模式下小麦品种浙华 1 号适宜的氮肥施肥模式[J/OL]. 大麦与谷类科学, 2024,41(5):49-53. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.008.

稻茬麦种植模式下小麦品种浙华 1 号适宜的氮肥施肥模式

张本昌[1,2],朱靖环[2],范　敏[2],华　为[2*]
(1. 浙江农林大学,浙江 杭州 311300;2. 浙江省农业科学院,浙江 杭州 310021)

摘要: 为研究浙江省新审定小麦品种浙华 1 号在浙江省稻茬麦种植模式下适宜的氮肥施用模式,2022 年在浙江省小麦主产区嘉兴市平湖设置了 3 个氮肥梯度(0、180、210 kg/hm²)和 2 种肥料类型(常规肥料和缓释肥),对浙华 1 号进行产量和相关农艺性状调查。结果表明,在 N 180 kg/hm² 条件下,不管是常规肥料还是缓释肥,浙华 1 号都能达到较高的产量水平,分别是 6.20、5.68 t/hm²,比对照 N 0 kg/hm²(3.26 t/ hm²)分别高 2.94、2.42 t/hm²,其中常规肥 N 180 kg/hm² 基追肥用量比为 7∶3 时,浙华 1 号产量最高,是适宜的施肥模式。

关键词: 小麦;浙华 1 号;氮肥;农艺性状;产量
中图分类号: S512.1　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1673-6486-20240050

小麦是世界上总产量仅次于玉米的第 2 大粮食作物,全球约 40%的人口以小麦为主食,小麦提供了人类营养所需的 20%热量和蛋白质[1]。我国是世界上最大的小麦生产国和消费国,分别占全球小麦生产和消费总量的 17%和 16%,小麦生产对保障我国粮食安全具有重要作用[2]。浙江省小麦一直是仅次于水稻的第 2 大口粮作物,但是由于 20 世纪 90 年代种植结构调整,小麦种植面积急剧下降,从 1990 年的年种植面积 31.8 万 hm² 下降到 2008 年的 5.3 万 hm²,小麦育种工作也一度中断[3]。近年来,由于浙江省对粮食安全的重视,政府出台了各项激励政策,浙江省小麦播种面积出现恢复性增长,近 3 年年播种面积稳定在 13 万 hm² 左右。但是,目前种植的小麦 90%以上是来自江苏等省培育的小麦品种,品种繁多,由于生态条件和耕作方式的差异,一些品种的增产潜力难以发挥。浙华 1 号是浙江省农业科学院和华中农业大学联合培育的小麦新品种,2021 年通过浙江省主要农作物品种审定(审定编号:浙审麦 2021001)。该品种分蘖力强,籽粒饱满,丰产性好,品质弱筋。从 2022 年开始,浙华 1 号连续 3 年在浙江省累计推广面积约 3.6 万 hm²,2024 年被列为浙江省主导品种。针对浙江省稻茬麦种植模式,2022 年浙江省颁布了小麦区域施肥用量的地方标准(DB 33/T 2521—2022《水稻、小麦、油菜区域施肥用量要求》)。该标准指出,小麦目标产量 3.0 ~ 4.5 t/hm²,肥料总养分的投入量为 255 ~ 270 kg/hm²,其中氮肥(N)150 kg/hm²、磷肥(P_2O_5)45 ~ 52.5 kg/hm²、钾肥 90 ~ 120 kg/hm²。如果超出目标产量,需要适当增加总养分的投入量,主要是氮肥的投入量。因此,为了更好地发挥浙华 1 号增产潜力,需要明确浙华 1 号适宜的施肥模式,以进一步提高浙华 1 号的单产水平,增加农户的种植效益。

肥料的施用方式和施用量是影响小麦产量和品质的关键因素,其中氮肥作为重要的大量营养元素对小麦生长具有非常重要的作用,适量的氮肥能促进小麦植株的生长,提高小麦产量。氮肥供应不足,导致小麦植株矮小,分蘖减少,穗数和穗粒数减少,降低小麦产量。氮肥供应过量也不利于小麦生长,容易引发多种危害,产生分蘖量过大、贪青晚熟和抗病、抗逆能力减弱等问题,导致小麦减产;同时,氮肥供应过量也会导致土壤元素失衡、地下水污染等问题[4-5]。研究表明,弱筋小麦适宜的施氮量应在 105 ~ 210 kg/hm² 范围内[7-8]。缓释肥是一种对养分释放速率进行调节的新型肥料,缓释肥一次性施肥技术可满足农户轻简化施肥的需求,有效降低劳动成本。相关研究表明,缓释肥一次性施用在提

收稿日期:2024-05-16;修回日期:2024-09-29。
基金项目:国家自然科学基金面上项目(32272078);浙江省农业新品种选育重大科技专项(2021C02064-3-3);浙江省"三农九方"科技协作项目(2023SNJF033)。
作者简介:张本昌(1997—),男,硕士研究生,主要从事小麦抗逆性研究。Email: ZBenChang@163.com。
* 通信作者:华　为(1980—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事小麦种质创制和新品种选育。Email: huaweicau@hotmail.com。

高肥料利用率和减少环境污染方面也具有明显的效果[9-10]。目前在粮食作物中，缓释肥研究主要集中在水稻上，何阳等总结前人研究结果发现，在等氮条件下，施用缓释肥的水稻产量为 8.77 t/hm²，而施用常规肥的水稻产量为 8.42 t/hm²[11]。总体上，缓释肥与常规肥相比，水稻产量无显著差异。在小麦上关于缓释肥的试验和应用还较少。

本研究以浙江省新审定小麦品种浙华 1 号为研究对象，探索不同肥料类型和氮肥施用量对浙华 1 号农艺性状和产量的影响，旨在明确浙华 1 号适宜的施肥模式，充分发挥浙华 1 号的增产潜力，以提高农户的种植效益。

1　材料与方法

1.1　供试材料与试验地点

供试材料为弱筋小麦浙华 1 号，试验于 2022—2023 年在浙江省小麦主产区嘉兴市平湖钟埭街道试验田（121°1′E、30°40′N）进行，试验田前茬为单季水稻，土壤含水量（质量分数）22%，pH 值 6.19，有机质含量（质量分数，下同）35.3 g/kg，全氮含量 2.19 g/kg，碱解氮含量 1.01 mg/kg，速效磷含量 31.46 mg/kg，速效钾含量 17.48 mg/kg。2022 年 11 月 15 日收割后稻草秸秆切碎全量还田。

供试肥料有 2 种类型：常规肥料、缓释肥。常规复合肥（N、P_2O_5、K_2O 质量分数均为 15%），尿素（N 质量分数≥46%）和钾肥（K_2O 质量分数≥52%）；缓释肥是茂施农业科技有限公司生产的缓释掺混肥料（N、P_2O_5、K_2O 质量分数分别为 25%、10%、14%）。

1.2　试验设计

试验采用条区设计，常规肥和缓释肥分别设 N 180 kg/hm² 和 N 210 kg/hm² 2 个氮肥水平，不施氮肥作为对照处理（CK），具体信息见表 1。常规肥料磷肥和钾肥作为基肥一次性施用，氮肥施用量基追肥比为 7∶3；缓释肥作为基肥一次性施用。每个处理小区面积参照小麦品种审定区域试验标准，小区面积为 12.50 m²（2.00 m × 6.25 m），行距 0.25 m，每个小区 26 行，每个处理 3 次重复，播种量为 180 kg/hm²，基本苗达 24 万株 /hm² 左右，于 2022 年 11 月 20 日播种。

表 1　不同处理下试验地施肥量

肥料类型	处理	基肥 /（kg/hm²）			追肥 /（kg/hm²）
		氮肥（N）	磷肥	钾肥	氮肥（N）
不施肥	CK	0	90	118	0
常规肥料（N180）	T1	126	90	118	54
常规肥料(N210)	T2	147	90	118	63
缓释肥（N180）	T3	180	90	118	0
缓释肥（N210）	T4	210	90	118	0

1.3　性状调查

基本苗、最高苗、有效穗数、株高、穗长、穗粒数、千粒质量和生育期等农艺性状的调查参考《小麦种质资源描述规范和数据标准》[12]。基本苗、最高苗和有效穗数在田间选取每个处理的第 12 和第 13 行进行调查；小麦成熟后随机选取每个处理的 10 个单株进行株高、穗长和穗粒数的测定；每个小区全部收获，自然晾干测千粒质量和小区产量；成穗率 = 有效穗数 / 最高总茎数 × 100%。

1.4　田间管理

小麦 2 叶 1 心期和 5 叶期各除草 1 次，使用异丙隆和苯磺隆按照说明书对水，除去单子叶和双子叶杂草。在小麦扬花初期（5%扬花）使用麦甜 + 戊唑醇，按说明书用量进行赤霉病防治，6 ~ 7 d 后，再同法防治 1 次。

1.5　数据分析

使用 SPSS 27.0 和 Excel 2021 软件对试验数据进行方差分析和相关性分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理对浙华 1 号生长发育的影响

由表 2 可以看出，不同处理对基本苗和成穗率影响不大，不同处理间基本苗的变幅在 24.0 万 ~ 24.7 万株 /hm²，而成穗率在 59.4% ~ 68.3%，各处理间差异均无统计学意义。最高苗和有效穗数的变幅分别

在 39.9 万～51.7 万株 /hm² 和 23.7 万～35.3 万个 /hm²，其中对照不施氮（CK）的最高苗和有效穗数最低，分别为 39.9 万株 /hm² 和 23.7 万个 /hm²，其他处理间最高苗和有效穗数差异无统计学意义。常规施肥 N 180 kg/hm²（T_1）的穗粒数和千粒质量在各处理中最高，分别达到了 47.43 个和 50.00 g，CK 处理的穗粒数和千粒质量最少，但穗粒数与其他处理差异无统计学意义（除 T_1 外），千粒质量与其他处理间的差异具统计学意义。不同处理间穗长存在显著差异，其中缓释肥 N 210 kg/hm²（T_4）的穗最长，达到了 10.37 cm，CK 处理穗长最短，只有 8.37 cm。常规施肥 N 210 kg/hm²（T_2）的株高最高，达到 82.83 cm，CK 处理株高最低，只有 79.00 cm，两者差异具统计学意义（$P<0.05$）；其他处理的株高在 80.33～81.33 cm，与 CK 处理相比差异无统计学意义。不同处理间生育期差异具统计学意义（$P<0.05$），其中 T_2 处理的生育期最长，有 206.67 d，比 CK 处理的最短生育期（200.33 d）长 6.34 d。总的说来，不同处理对穗长、千粒质量和生育期影响较大，对基本苗和成穗率影响较小。

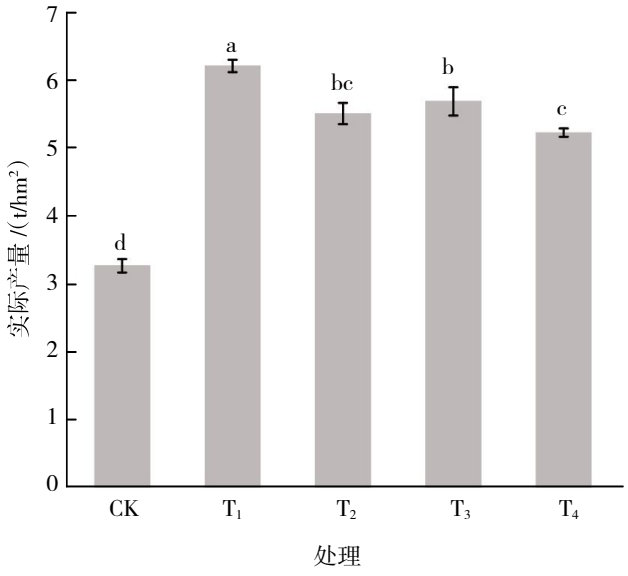
表 2　不同处理对浙华 1 号农艺性状的影响

处理	基本苗 /（万株 /hm²）	最高苗 /（万株 /hm²）	有效穗数 /（万个 /hm²）	穗长 / cm	穗粒数 /（粒 / 穗）	千粒质量 / g	株高 / cm	生育期 / d	成穗率 / %
CK	24.1 a	39.9 b	23.7 b	8.37 c	38.53 b	40.50 d	79.00 b	200.33 d	59.4 a
T_1	24.2 a	51.6 a	35.3 a	9.83 ab	47.43 a	50.00 a	80.50 ab	202.33 c	68.3 a
T_2	24.1 a	51.7 a	31.5 a	9.43 b	42.43 b	49.00 ab	82.83 a	206.67 a	60.8 a
T_3	24.0 a	50.2 a	33.9 a	9.73 ab	41.77 b	45.50 c	80.33 ab	201.00 d	67.7 a
T_4	24.7 a	51.0 a	32.2 a	10.37 a	42.00 b	47.50 bc	81.33 ab	205.67 b	62.9 a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异有统计学意义（$P<0.05$）。

2.2　不同处理对浙华 1 号产量的影响

从图 1 可以看出，各处理间平均产量存在显著差异，变幅为 3.26～6.20 t/hm²。其中 T1 处理的产量最高，达到了 6.20 t/hm²，比对照 CK 增产近 1 倍；其次为 T_3 和 T_2 处理，产量分别为 5.68、5.50 t/hm²，但两者差异无统计学意义。



不同小写字母表示处理间差异有统计学意义（$P<0.05$）

图 1　不同处理浙华 1 号产量比较

2.3　浙华 1 号各性状间相关性分析

通过相关性分析可以看出（表 3），不同性状之间呈显著或极显著相关的共 13 对，占总数的 36.11%，这 13 对性状均呈正相关关系。产量与最高苗、有效穗数、株高、穗长、穗粒数、千粒质量、成穗率和生育期均呈正相关关系，其中与有效穗数、穗粒数和成穗率达到了显著水平，与千粒质量达到了极显著水平。由此可见，千粒质量、有效穗数、穗粒数和成穗率在浙华 1 号产量形成中发挥了重要作用。

3　讨论与结论

小麦产量除受品种本身遗传性状的影响外，还受到肥料、光照、温度和栽培方式等多种因素的影响，其中施氮量是决定小麦产量和品质的关键因素[13]。研究表明，郑麦 113 和扬麦 15 在 157.5、180.0 kg/hm² 氮肥条件下，产量最高，品质最佳[13]；豫麦 18 和豫麦 34 在 225 kg/hm² 氮肥条件下产量最高；郑麦 9023 和豫麦 50 在 300 kg/hm² 氮肥条件下产量最高[14]；弱筋小麦品种鄂麦 580 在施氮量为 180 kg/hm² 且基追比为 7∶3 时，是其产量、品质及氮肥利用效率协同最佳的氮肥运筹模式[15]。

表 3　浙华 1 号的主要农艺性状及产量间的相关系数

	实际产量	最高苗	有效穗数	株高	穗长	穗粒数	千粒质量	成穗率	生育期
实际产量									
最高苗	0.238								
有效穗数	0.486*	0.600**							
株高	0.146	0.333	−0.083						
穗长	0.232	0.271	0.425*	0.243					
穗粒数	0.471*	0.337	0.394*	0.231	0.312				
千粒质量	0.598**	0.402*	0.383	0.343	0.338	0.564**			
成穗率	0.410*	0.333	0.733**	−0.333	0.271	0.298	0.265		
生育期	0.111	0.455*	0.192	0.542*	0.329	0.317	0.479*	−0.030	

注：*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

本研究设置了 3 种氮素水平（N 0 kg/hm^2、N 180 kg/hm^2 和 N 210 kg/hm^2），结果表明，弱筋小麦品种浙华 1 号在常规施肥 N 180 kg/hm^2 且基追比为 7∶3 的条件下产量最高，是适宜的氮肥施用量。李宏等研究表明，不同施肥方式影响小麦的抗倒性，增加施氮量可显著提高小麦株高，而株高与小麦的倒伏指数呈显著正相关关系，植株越高，越易发生倒伏[16]。另外，增加施氮量会使小麦叶片、茎秆等组织变嫩，延长小麦的生育期，容易引发白粉病、锈病和赤霉病等多种病害[4]。本研究结果也显示，在常规施肥 N 210 kg/hm^2 水平下，浙华 1 号的平均株高最高，比对照不施氮株高增加 3.83 cm，在灌浆后期，部分小区出现倒伏现象；而且浙华 1 号的生育期延长，比对照不施氮生育期长 6.34 d，出现贪青晚熟，白粉病和赤霉病发病率高于其他处理；这些可能是导致 N 210 kg/hm^2 水平下，浙华 1 号产量减少的主要因素。

小麦基肥施用缓释肥，肥效平稳释放且能持续供肥，满足前期发苗，中期苗情平缓，可控制最高苗数，有利于建立合理群体，但由于小麦生育期较长，后期肥力跟不上，易出现后期缺肥，籽粒灌浆不充分，影响小麦产量[17−18]。本研究结果也显示，施缓释肥的小麦千粒质量明显低于常规施肥，可能是施缓释肥小麦产量低于常规施肥小麦产量的主要原因。

参考文献：

[1] 刘志勇,王道文,张爱民,等. 小麦育种行业创新现状与发展趋势[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(3):430−434.

[2] 吴海彬,朱志锋,谭　城,等. 基于产业链视角的小麦品种品质需求调研分析[J]. 中国种业,2024(1):1−8.

[3] 怀　燕,任永源,许剑锋. 浙江省小麦生产历史、现状及发展潜力思考[J]. 浙江农业科学,2015,56(10):1535−1537,1541.

[4] 彭龙腾. 氮肥对小麦生长的影响[J]. 安徽农学通报(下半月刊),2012,18(22):51,63.

[5] 袁新民,杨学云,同延安,等. 不同施氮量对土壤 NO_3^-−N 累积的影响[J]. 干旱地区农业研究,2001,19(1):8−13,39.

[6] 曹承富,孔令聪,汪建来,等. 施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(1):46−50.

[7] 吴培金,闫素辉,邵庆勤,等. 施氮量对弱筋小麦籽粒品质形成的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(10):1232−1238.

[8] 蒋　进,李小雨,王淑荣,等. 不同施氮量对弱筋小麦产量和品质的影响[J]. 作物研究,2022,36(1):9−13.

[9] 张运红,孙克刚,和爱玲,等. 缓控释肥增产机制及其施用技术研究进展[J]. 磷肥与复肥,2015,30(4):47−50.

[10] 魏海燕,李宏亮,程金秋,等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报,2017,43(5):730−740.

[11] 何　阳,王秀荣,陈新平. 缓 / 控释肥料研究进展及其对农田氮素流失的防控效果[J]. 安徽农业科学,2021,49(21):7−10,14.

[12] 李立会,李秀全. 小麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[13] 申冠宇,谢旭东,陈真真,等. 不同施氮量对豫南小麦产量、品质的影响[J]. 浙江农业科学,2023,64(9):2152−2155.

[14] 马新明,张娟娟,熊淑萍,等. 氮肥用量对不同品质类型小麦品种籽粒灌浆特征和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2005,25(6):72−77.

[15] 张子豪,李想成,吴昊天,等. 氮肥运筹对弱筋小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 华北农学报,2022,37(增刊 1):214−220.

[16] 李　宏,陈卫国,杨进文,等. 不同施肥方式对小麦倒伏性状的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(5):

35–42.
[17] 辛海滨,杨绪清,徐瑞衡,等. 3 种缓控释肥不同施肥模式对小麦产量及经济效益的影响[J]. 浙江农业科学,2024,65(3):505–512.
[18] 怀　燕,潘建清,张　慧. 缓释肥对稻茬小麦产量与养分利用的影响[J]. 浙江农业科学,2019,60(7):1109–1110,1114.

Suitable Nitrogen Fertilization Mode of Wheat Cultivar Zhehua No.1 Under Rice Stubble and Wheat Planting Mode

ZHANG Benchang[1,2], ZHU Jinghuan[2], FAN Min[2], HUA Wei[2]
(1. Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In order to study the suitable nitrogen fertilizer application mode of the newly approved wheat variety Zhehua No.1 in Zhejiang Province under the rice stubble and wheat planting mode in Zhejiang Province, three nitrogen fertilizer gradients (0, 180 and 210 kg/hm^2) and two fertilizer types (conventional fertilizer and slow-release fertilizer) were set up in Pinghu, Jiaxing City, the main wheat producing area of Zhejiang Province, in 2022 to investigate the yield and related agronomic traits of Zhehua No.1, so as to explore the suitable fertilization mode of Zhehua No.1. The results showed that under the condition of N 180 kg/hm^2, both conventional fertilizer and slow-release fertilizer, Zhehua No.1 can achieve relatively high yield levels of 6.20 t/hm^2 and 5.68 t/hm^2, respectively, which were 2.94 t/hm^2 and 2.42 t/hm^2 higher than the control under N 0 kg/hm^2 (3.26 t/hm^2), respectively. Among them, under the fertilization mode of conventional fertilizer at N 180 kg/hm^2 with the base topdressing ratio of 7∶3, Zhehua No.1 achieved the highest yield, indicating this is a suitable fertilization mode.

Key Words: Wheat; Zhehua No.1; Nitrogen fertilizer; Agronomic trait; Yield

欢迎订阅 2025 年《大麦与谷类科学》

《大麦与谷类科学》是《中国期刊全文数据库》《中文科技期刊数据库》《中国核心期刊(遴选)数据库》全文收录期刊、超星域出版平台全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、国家科技学术期刊开放平台全文收录期刊、原国家新闻出版广电总局首次认定 A 类学术期刊。江苏省一级期刊、2017 年度江苏省精品科技期刊,CACJ 中国应用型扩展期刊(2023 版)。

《大麦与谷类科学》由江苏省农业科学院主管、江苏沿海地区农业科学研究所主办,是中国作物学会大麦专业委员会与江苏省农学会学术性期刊,内容具有创新性、应用性、系统性、导向性,主要报道大麦、小麦、水稻、玉米、高粱、谷子等谷类作物的研究动态和科研成果,内设栏目有:综述与报告(专家视点)、生理与生态、栽培与育种、土肥与植保、贮藏与加工、资源与环境、种业创新、现代大农业、乡村振兴、简讯与信息、人物介绍等。主要作者与读者为从事农业科研与农技推广的科技人员、农业企业经营管理人员、农业大中专院校师生等。

本刊为双月刊,大 16 开本。国内外公开发行,中国标准连续出版物号 CN32–1769/S、ISSN 1673–6486。国内每期定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元,自办发行。

欢迎赐稿,欢迎订阅。可随时直接与本编辑部联系。

电　话:0515–88330625
电子信箱:damkx@163.com
邮局汇款:《大麦与谷类科学》杂志编辑部
银行汇款:江苏沿海地区农业科学研究所
账　号:10–400901040004637
网　址:http://dmkx.cbpt.cnki.net
邮　编:224002
地　址:江苏省盐城市开放大道北路 9 号
开户行:盐城市农行建中支行
用　途:订阅费或编审费

车飞伟,崔士友,陈澎军,等. 叶面喷施硅肥对沿海滩涂水稻茎秆形态、力学性状、抗倒伏能力和产量的影响[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):54-67. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.009.

叶面喷施硅肥对沿海滩涂水稻茎秆形态、力学性状、抗倒伏能力和产量的影响

车飞伟[1],崔士友[1],陈澎军[2],韩继军[2],张　瑞[1]
(1. 江苏沿江地区农业科学研究所,江苏 南通 226012;2. 江苏省地质局 / 自然资源部滨海盐碱地生态改良与可持续利用工程技术创新中心,江苏 南京 210007)

摘要:为明晰喷施硅肥对沿海滩涂水稻茎秆形态、力学性状、抗倒伏能力和产量的影响,选取海洋院 1 号(V1)和南粳 5055(V2)为试验材料,设置 12 种处理,即清水处理(CK)、矿源 HA 络合硅肥(T1)、糖醇硅肥(T2)、高活性离子态液体硅肥(T3)、液体硅锌肥(T4)、自制硅肥(T5),每种硅肥设置 2 个喷施模式:喷施 2 次,于分蘖期和拔节抽穗期施肥;喷施 3 次,前 2 次同前,第 3 次于灌浆期追加施肥。结果表明:1)喷施硅肥能降低水稻株高和节间长度,提高节间粗度、茎壁厚度和抗折力,进而提升茎秆抗倒伏能力,V1 喷施 T4 和 T5 抗折力较大,倒伏指数较低,而 V2 喷施 T3 和 T5 显示抗倒伏能力较强,且 2 个品种均表现出喷施 3 次比 2 次效果好。2)喷施硅肥能显著提升水稻产量及其构成因素,与 CK 相比,V1 喷施 2 次和 3 次 T1,水稻产量增幅分别为 3.02%、5.13%,T2 产量增幅分别为 5.05%、7.58%,T3 产量增幅分别为 2.03%、2.26%,T4 产量增幅分别为 6.20%、8.44%,T5 产量增幅分别为 4.88%、9.47%;V2 喷施 2 次和 3 次 T1,水稻产量增幅分别为 8.57%、9.46%,T2 产量增幅分别为 3.48%、3.62%,T3 产量增幅分别为 6.08%、8.28%,T4 产量增幅分别为 4.02%、5.12%,T5 产量增幅分别为 2.97%、3.18%。产量增加主要由穗数和穗实粒数共同影响,其中穗实粒数影响较大;喷施 3 次比 2 次产量增幅提高,主要是在灌浆期喷施硅肥提高了千粒质量和结实率。3)喷施硅肥降低了水稻穗长并提高了着粒密度、单穴产量和生物量,V1 喷施 2 次和 3 次 T4 的单穴产量最高,而 V2 表现出 T1 最高,且喷施 3 次效果优于 2 次,2 个品种的收获指数均有小幅提升但无统计学意义。4)喷施硅肥对滩涂水稻一二次枝梗性状的影响因品种不同具有差异性,特别是提高了二次枝梗数、总粒数和实粒数,V1 喷施 T5 效果较好,V2 喷施 T2 肥效较高。综上,不同硅肥对不同品种水稻的促进效果存在差异,喷施 T5 对于二者提升抗倒伏能力效果均最好,同时使 V1 显著增产,而 V2 喷施 T1 增产效果最好。

关键词:滩涂水稻;喷施硅肥;力学性状;抗倒伏;产量
中图分类号:S511;S-3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20240069

“仓禀实,天下安”。当前我国正面临着耕地面积日益减少、人均耕地严重不足、盐碱胁迫危害粮食生产安全等各项严峻挑战[1-2]。我国沿海滩涂面积占全国土地总面积的 1/10 左右,为潜在的耕地重要后备资源,因此,研究如何将重度盐碱地转变为轻度盐碱地并开发利用,对于保障粮食安全具有重大潜在价值,可实现“变废为宝”[3-6]。水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要粮食作物之一,种植水稻可以有效改良和利用盐碱地[7-12]。江苏沿海滩涂由于土壤盐分含量较高且分布不均匀,土壤肥力差,氮、磷和有机质等营养元素匮乏,海岸带风沙较大等原因,会抑制幼苗生长,影响干物质积累进而导致水稻减产[13-14]。朱明霞等研究表明,土壤盐分质量分数在 1.1 ~ 2.2 g/kg 时对水稻产量的影响不显著,超过 2.2 g/kg 会显著减产[15]。罗成科等研究发现,盐分质量分数在 2.0 ~ 4.0 g/kg 时水稻减产严重[16]。如何缓解江苏沿海滩涂上各类胁迫造成的水稻减产现象,受到众多学者的关注和研究[15-19]。

硅元素被列为第 4 类元素,仅次于氮、磷、钾,虽然其含量在地壳中排名第 2,但大部分无法被植物直接吸收利用,单硅酸形态才是有效养分,显著影响农作物的产量和品质[20-23]。水稻是典型的喜硅作物,施用硅肥能够提升滩涂水稻茎秆强度和抗倒伏能力,有助于抵抗沿海滩涂各类胁迫作用,也可提高水稻分蘖数和产量及其构成因素,因此,合理施硅对于滩涂水稻栽培意义重大[24-27]。前人研究主要集中在土施硅肥[24,26,28-29],对于叶面施硅的研究较少。因此,本研究以水稻海洋院 1 号和南粳 5055 为

收稿日期:2024-07-23;修回日期:2024-09-30。
基金项目:江苏沿江地区农业科学研究所青年科技基金[YJ(2023)007]。
作者简介:车飞伟(1996—),男,硕士,研究实习员,研究方向为滩涂土壤资源开发利用。Email: 314052763@qq.com。

供试材料，选取 5 种适合滩涂水稻生长的叶面硅肥并设置不同的喷施次数，探究它们对沿海滩涂水稻茎秆形态、力学特征、抗倒伏能力和产量及其构成因素的影响，以期为沿海滩涂水稻高产高效栽培提供理论指导和技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于江苏省南通市如东县自然资源部海岸带野外科学观测研究站——掘苴垦区盐碱地改良示范基地（121°10′11″E、32°29′52″N），气候类型为亚热带海洋性季风气候，全年平均气温 15.3 ℃，无霜期 227 d，降水量 1 048 mm，夏季炎热，雨水相对集中，降水量为全年的 70% ~ 85%，冬季寒冷，雨水相对较少。土壤质地为砂壤土，土壤类型为滨海盐土，盐分离子以 Na^+ 和 Cl^- 为主，以 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、HCO_3^-、CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 为辅。水稻全生育期灌溉微咸水和淡水，盐分含量（质量分数，下同）范围为 0.738 ~ 1.237 g/kg，土壤盐分变化规律类似，含量范围为 1.21 ~ 2.39 g/kg。试验田第 5 年种植耐盐水稻，种植前土壤基本理化性质如下：pH 值 8.31，盐分含量 2.39 g/kg，有机碳含量 2.72 g/kg，有机质含量 4.68 g/kg，全氮含量 0.42 g/kg，全碳含量 10.52 g/kg，C/N 为 25.22，碱解氮含量 30.24 mg/kg，有效磷含量 16.62 mg/kg，速效钾含量 137.10 mg/kg。

供试材料为海洋院 1 号（由江苏省地质局海洋院技术团队育成，属耐盐水稻品种）和南粳 5055（由江苏省农业科学院粮食作物研究所育成，属早熟晚粳稻品种），硅肥为矿源 HA 络合硅肥（陕西博洛米尼农业科技有限公司生产）、糖醇硅肥（山东神农氏生物技术有限公司生产）、高活性离子态液体硅肥（美国太瑞科技国际有限公司生产）、液体硅锌肥（永济市禾丰源肥业有限公司生产）和自制硅肥。

1.2　试验设计

试验采用大田试验，选取海洋院 1 号（V1）和南粳 5055（V2）作为试验材料。设置 12 种处理，即清水处理（CK）、矿源 HA 络合硅肥（T1）、糖醇硅肥（T2）、高活性离子态液体硅肥（T3）、液体硅锌肥（T4）、自制硅肥（T5），每种硅肥设置 2 个喷施模式：喷施 2 次，即于分蘖期和拔节抽穗期施肥；喷施 3 次，即于分蘖期、拔节抽穗期和灌浆期施肥。叶面肥施肥量参照各产品推荐用量，对照在同时期喷施等量清水。各处理的化肥施用量完全相同，基肥为聚能珍珠复合肥（N、P_2O_5 和 K_2O 的质量比为 27∶5∶8，聚谷氨酸含量≥70 mg/kg，由山东三方化工集团有限公司生产），施肥量 600 kg/hm^2，氮肥运筹为返青肥、分蘖肥、穗肥的质量比为 1∶1∶1，每次施用尿素 150 kg/hm^2，基肥一次性全量施入，穗肥分别在倒 4 叶龄和倒 2 叶龄期等量施入（表 1）。每个处理设置 4 个重复，随机区组排列，共计 96 个小区，小区面积为 50 m^2，小区之间设置隔离行，隔离行长宽均为 30 cm。供试水稻于 2023 年 6 月 6 日落谷，6 月 28 日移栽，10 月 28—29 日收获，田间为机插秧，株距 15 cm，行距 30 cm，每穴 4 棵苗，灌溉、杀虫、除草等其他管理措施按照当地水稻高产栽培模式管理。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　水稻茎秆形态、力学特性和倒伏相关性状测定。在水稻齐穗期 30 d 取样，每个小区选择 15 穴长势良好、无病虫害的代表性植株，每穴选择代表性主茎 1 条，共 15 条主茎作为 1 个样本，用于测定茎秆形态特征及倒伏相关指标。将茎秆从节点处剪断并分成若干节间，将基部向上第 1 伸长节间称为第 1 节间（I1），依次向上为第 2 节间（I2）和第 3 节间（I3），分别测定株高、单茎鲜质量、节间长度、节间粗度、茎壁厚度、节间抗折力、节间干质量，计算节间体积、单位长度和单位体积节间干质量、弯曲力矩和倒伏指数，其中：弯曲力矩 = 节间基部至穗顶长度（cm）× 该节间基部至穗顶鲜质量（g）；倒伏指数 = 弯曲力矩 / 抗折力（N）× 100%。其他指标参照李国辉等的测定方法[30]。

1.3.2　水稻产量及其构成因素测定。在水稻成熟期每个小区选择 5 个 1 m^2 样方调查并计算单位面积有效穗数，同时选择连续 10 穴进行考种，测定每穗粒数、每穗实粒数、千粒质量、穗长、穗质量、单穴产量、单穴生物量、一二次枝梗数和总粒数、实粒数等产量构成因素，计算结实率、着粒密度和收获指数。水稻收获后测定各小区实际产量，脱粒晒干后称质量，按照 14%含水量折算稻谷质量。

1.4　数据处理

采用 Excel 2010 进行数据处理，DPS 7.05 软件进行方差分析，采用 LSD 多重比较法对各处理水稻茎秆形态、力学性状、抗倒伏能力和产量及其构成因素进行显著性和相关性分析，显著水平设定为 $\alpha = 0.05$。

表 1　试验设计

处理		叶面肥施用方式	肥料类型	主要技术指标
T1	T1–1	稀释 800~1 000 倍，2 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 11.5 mL/667 m^2	矿源 HA 络合硅肥	矿源 FA 螯合硅（SiO_2）$\rho \geq 200$ g/L，氮磷钾（$N+P_2O_5+K_2O$）$\rho \geq 200$ g/L，FA（富里酸）$\rho \geq 30$ g/L，褐藻提取液 $\rho \geq 200$ g/L，海藻酸 + 腐植酸（有机质计）$\rho \geq 65$ g/L
	T1–2	稀释 800~1 000 倍，3 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 11.5 mL/667 m^2；灌浆期 17.0 mL/667 m^2		
T2	T2–1	稀释 800~1 500 倍，2 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 8.5 mL/667 m^2	糖醇硅肥	$\rho(SiO_2) \geq 210$ g/L
	T2–2	稀释 800~1 500 倍，3 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 8.5 mL/667 m^2；灌浆期 13.0 mL/667 m^2		
T3	T3–1	稀释 1 000 倍，2 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 15.0 mL/667 m^2	融地美高活性离子态液体硅肥	$\rho(Si) \geq 100$ g/L，$\rho(Na) \leq 90$ g/L，ρ（水不溶物）≤ 10 g/L
	T3–2	稀释 1 000 倍，3 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 15.0 mL/667 m^2；灌浆期 22.5 mL/667 m^2		
T4	T4–1	稀释 300 倍，2 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 33.5 mL/667 m^2	液体硅锌肥	氨基酸 $\rho \geq 100$ g/L，$\rho(Zn+B) \geq 20$ g/L，$\rho(Si+Ca+Fe+K) \geq 38\%$
	T4–2	稀释 300 倍，3 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 33.5 mL/667 m^2；灌浆期 50.0 mL/667 m^2		
T5	T5–1	稀释 1 000~1 500 倍，2 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 20.0 mL/667 m^2	自制硅肥	$\rho(Si) \geq 120$ g/L，$\rho(K_2O) \geq 120$ g/L
	T5–2	稀释 1 000~1 500 倍，3 次：分蘖 + 拔节期喷施，计 20.0 mL/667 m^2；灌浆期 30.0 mL/667 m^2		
CK	CK–1、CK–2	喷施等量清水		纯净水

2　结果与分析

2.1　不同叶面硅肥对滩涂水稻茎秆形态性状的影响

由表 2 可知，不同叶面肥处理的水稻株高，海洋院 1 号 T1–2、T4–2 和 CK–2 显著高于 T2–2；南粳 5055 T4–1 显著高于 CK–1，T2–2 和 T4–2 较 CK–2 分别增长了 9.86%和 12.22%。基部节间长度随着水稻拔节依次增加，南粳 5055 I1 节间 T3–1 较 CK–1 增长了 47.92%（$P<0.05$）。基部节间粗度随着水稻拔节依次降低，海洋院 1 号 I1 节间 T4–1 较 CK–1 增长了 10.64%（$P<0.05$）。基部节间茎壁厚度随着水稻拔节依次降低，海洋院 1 号 I3 节间 T1–1 显著高于 T2–1 和 T3–1，3 个节间 T2–2 和 T4–2 均显著高于 T3–2 和 CK–2；南粳 5055 I1 节间 T1–1 显著高于 T3–1，I2 节间 T5–1 显著高于 T3–1，3 个节间 T1–2 都显著高于 T5–2。

表 2　不同硅肥处理对滩涂水稻株高、基部节间长度、节间粗度和茎壁厚度的影响

品种	叶面肥处理	株高 /cm	节间长度 /cm			节间粗度 /mm			茎壁厚度 /mm		
			I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
海洋院 1 号	T1–1	96.4 ± 2.0 a	5.7 ± 1.2 a	11.8 ± 0.6 a	15.1 ± 0.3 a	5.89 ± 0.13 ab	5.81 ± 0.06 a	5.52 ± 0.15 a	1.03 ± 0.04 a	0.90 ± 0.04 ab	0.86 ± 0.05 a
	T2–1	92.5 ± 2.4 a	7.5 ± 1.0 a	13.1 ± 1.0 a	16.6 ± 0.8 a	5.61 ± 0.32 ab	5.87 ± 0.33 a	5.31 ± 0.24 a	1.00 ± 0.08 a	0.84 ± 0.03 b	0.76 ± 0.06 b
	T3–1	94.4 ± 4.6 a	6.2 ± 0.7 a	11.3 ± 0.8 a	16.3 ± 1.4 a	5.53 ± 0.09 b	5.79 ± 0.04 a	5.19 ± 0.05 a	0.88 ± 0.04 b	0.81 ± 0.04 b	0.69 ± 0.01 b
	T4–1	94.2 ± 1.9 a	7.0 ± 0.7 a	11.5 ± 0.4 a	15.9 ± 0.6 a	6.03 ± 0.09 a	6.09 ± 0.40 a	5.57 ± 0.34 a	1.04 ± 0.03 a	0.97 ± 0.03 a	0.84 ± 0.03 ab
	T5–1	95.6 ± 4.5 a	7.2 ± 1.5 a	12.3 ± 1.5 a	17.0 ± 2.5 a	5.86 ± 0.19 ab	5.88 ± 0.02 a	5.23 ± 0.09 a	0.97 ± 0.03 ab	0.92 ± 0.03 ab	0.81 ± 0.04 ab
	CK–1	96.6 ± 3.5 a	6.9 ± 1.4 a	11.8 ± 0.7 a	17.2 ± 1.8 a	5.45 ± 0.30 b	5.62 ± 0.36 a	5.25 ± 0.44 a	0.88 ± 0.04 b	0.89 ± 0.06 ab	0.77 ± 0.04 ab
	T1–2	97.7 ± 1.5 a	6.3 ± 1.0 a	11.1 ± 0.5 a	14.0 ± 0.4 a	5.70 ± 0.04 a	5.72 ± 0.06 b	5.27 ± 0.25 b	1.02 ± 0.02 a	0.89 ± 0.03 ab	0.85 ± 0.02 ab
	T2–2	91.0 ± 1.7 b	6.0 ± 0.3 a	11.8 ± 0.3 a	16.5 ± 0.5 a	6.24 ± 0.34 a	6.26 ± 0.30 a	5.68 ± 0.10 a	1.02 ± 0.06 a	0.94 ± 0.04 a	0.86 ± 0.05 a
	T3–2	94.5 ± 3.3 ab	8.4 ± 0.9 a	12.4 ± 1.2 a	17.0 ± 2.2 a	5.63 ± 0.19 a	5.84 ± 0.35 ab	5.10 ± 0.19 b	0.90 ± 0.04 b	0.85 ± 0.06 b	0.77 ± 0.07 b
	T4–2	97.0 ± 2.3 a	6.4 ± 1.1 a	11.0 ± 1.2 a	15.5 ± 1.0 a	5.95 ± 0.50 a	5.95 ± 0.18 ab	5.57 ± 0.14 ab	1.03 ± 0.01 a	0.94 ± 0.02 a	0.87 ± 0.02 a
	T5–2	95.3 ± 2.3 ab	6.3 ± 2.0 a	10.3 ± 1.4 a	16.0 ± 2.5 a	5.98 ± 0.17 a	5.99 ± 0.04 ab	5.46 ± 0.17 ab	0.93 ± 0.03 b	0.93 ± 0.03 a	0.79 ± 0.02 ab
	CK–2	96.2 ± 0.9 a	7.2 ± 0.8 a	11.8 ± 0.7 a	16.0 ± 0.8 a	5.80 ± 0.31 a	6.01 ± 0.26 ab	5.35 ± 0.14 ab	0.90 ± 0.03 b	0.86 ± 0.01 b	0.75 ± 0.04 b
南粳 5055	T1–1	77.1 ± 2.5 b	5.4 ± 0.8 ab	12.5 ± 0.8 a	18.5 ± 0.5 ab	4.83 ± 0.34 a	4.18 ± 0.19 ab	3.42 ± 0.17 b	0.99 ± 0.09 a	0.77 ± 0.06 ab	0.67 ± 0.04 a
	T2–1	78.8 ± 2.7 ab	5.1 ± 0 b	11.5 ± 0.7 a	17.9 ± 0.9 b	4.51 ± 0.16 ab	4.07 ± 0.35 b	3.76 ± 0.01 ab	0.93 ± 0.05 ab	0.74 ± 0.08 ab	0.62 ± 0.04 a
	T3–1	73.6 ± 0.6 bc	7.1 ± 0.5 a	12.2 ± 0.6 a	16.8 ± 0.5 bc	4.35 ± 0.06 b	4.00 ± 0.15 b	3.32 ± 0.11 b	0.87 ± 0.04 b	0.69 ± 0.04 b	0.62 ± 0.06 a
	T4–1	82.2 ± 1.8 a	5.8 ± 1.0 ab	12.0 ± 0.3 a	19.6 ± 0.9 a	4.65 ± 0.22 ab	4.49 ± 0.09 a	3.92 ± 0.16 a	0.96 ± 0.03 ab	0.71 ± 0.05 ab	0.62 ± 0.06 a
	T5–1	72.6 ± 2.1 c	5.9 ± 1.3 ab	11.9 ± 0.6 a	16.1 ± 0.8 c	4.68 ± 0.11 ab	4.08 ± 0.08 ab	3.46 ± 0.07 b	0.90 ± 0.01 ab	0.81 ± 0.05 a	0.66 ± 0.01 a
	CK–1	74.6 ± 0.5 bc	4.8 ± 0.4 b	12.5 ± 0.4 a	17.2 ± 0.4 bc	4.71 ± 0.04 ab	4.16 ± 0.12 ab	3.53 ± 0.04 b	1.00 ± 0.02 a	0.76 ± 0.03 ab	0.71 ± 0.04 a
	T1–2	78.5 ± 0.8 ab	5.2 ± 1.2 b	12.3 ± 0.8 a	17.2 ± 0.9 a	5.02 ± 0.11 a	4.42 ± 0.20 ab	3.78 ± 0.10 a	1.02 ± 0.03 a	0.83 ± 0.03 a	0.73 ± 0.05 a
	T2–2	79.1 ± 0.4 a	7.2 ± 0.3 ab	12.6 ± 0.6 a	18.6 ± 0.4 a	4.71 ± 0.32 a	4.19 ± 0.20 ab	3.58 ± 0.20 a	0.92 ± 0 ab	0.70 ± 0.05 b	0.57 ± 0.04 b
	T3–2	73.4 ± 2.1 b	4.9 ± 0.2 b	12.4 ± 0.9 a	17.2 ± 1.6 a	4.88 ± 0.04 a	4.15 ± 0.16 b	3.68 ± 0.08 a	0.99 ± 0.06 ab	0.78 ± 0.03 ab	0.60 ± 0 b
	T4–2	80.8 ± 3.1 a	7.6 ± 0.3 a	13.1 ± 0.6 a	18.2 ± 0.8 a	5.04 ± 0.02 a	4.60 ± 0.01 a	3.81 ± 0.09 a	0.93 ± 0.07 ab	0.74 ± 0.06 ab	0.67 ± 0.03 ab
	T5–2	74.5 ± 1.9 b	5.9 ± 0.7 b	12.9 ± 1.6 a	17.3 ± 1.0 a	4.77 ± 0.30 a	4.29 ± 0.29 ab	3.60 ± 0.23 a	0.81 ± 0.07 b	0.71 ± 0.07 b	0.58 ± 0.05 b
	CK–2	72.0 ± 2.0 b	5.0 ± 0.8 b	11.5 ± 0 a	17.4 ± 0.8 a	5.05 ± 0.24 a	4.38 ± 0.22 ab	3.55 ± 0.15 a	0.92 ± 0.03 b	0.79 ± 0.04 ab	0.64 ± 0.02 b

注：同列数据后不同小写字母表示同一品种、相同喷施次数和节间、不同叶面肥处理下差异具有统计学意义（$P<0.05$）。表 3、表 5、表 7 至表 9 同。

由表 3 可知，节间干质量随着水稻拔节依次增加，海洋院 1 号 I3 节间 T4–2 显著高于 T3–2 和 T5–2；南粳 5055 I1 节间 T4–2 显著高于除 T2–2 外的所有处理，I3 节间 T4–1 显著高于 T3–1 和 CK–1。单位长度节间干质量随着水稻拔节依次降低，海洋院 1 号 I1 节间 T1–1 显著高于 T2–1，且较 CK–1 增长了 26.07%，T1–2、T2–2 和 T4–2 显著高于 T3–2；I2 节间 T1–1 和 T4–1 显著高于 T2–1，T4–2 显著高于 T3–2，比 CK–2 高 18.54%；I3 节间 T4–2 比 CK–2 增长了 23.94%，且差异具有统计学意义。南粳 5055 I1 节间 T3–1 显著低于除 T1–1 外的所有处理，T1–2 显著高于 T2–2、T4–2 和 T5–2；I3 节间 T3–2 显著高

于 T2–2。对于单位体积节间干质量而言，海洋院 1 号 I1 节间 T3–1 显著高于 T2–1、T4–1 和 T5–1，且比 CK–1 高 5.46%；南粳 5055 I3 节间 T3–2 和 T5–2 显著高于 T4–2，二者比 CK–2 分别高 14.71% 和 15.97%。

由表 4 可知，2 个水稻品种 3 个节间的倒伏指数与株高、节间长度、节间粗度呈正相关，与茎壁厚度、节间干质量、单位长度节间干质量、单位体积节间干质量大多呈负相关关系，其中与株高的相关性都达到显著水平。海洋院 1 号喷施 2 次 I1 和 I2 的节间长度和单位体积节间干质量、I2 和 I3 的单位长度节间干质量以及喷施 3 次 I1 和 I3 的节间长度、I2 的单位体积节间干质量均达到极显著水平；南粳 5055 喷施 2 次 I1 和 I2 的节间长度、I2 的单位长度节间干质量以及喷施 3 次 I2 的节间长度也都呈极显著相关关系。

表 3　不同硅肥处理对滩涂水稻节间干质量、单位长度和单位体积节间干质量的影响

品种	叶面肥处理	节间干质量 /g			单位长度节间干质量 /(mg/cm)			单位体积节间干质量 /(mg/cm³)		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
海洋院 1 号	T1–1	0.164 ± 0.022 a	0.251 ± 0.030 a	0.294 ± 0.009 a	29.79 ± 2.33 a	21.28 ± 1.53 a	19.57 ± 0.49 a	190.43 ± 23.08 ab	154.44 ± 14.21 a	156.91 ± 10.21 a
	T2–1	0.167 ± 0.007 a	0.235 ± 0.010 a	0.280 ± 0.026 a	22.48 ± 2.70 b	17.96 ± 1.24 b	17.00 ± 2.35 a	155.53 ± 8.38 b	136.50 ± 3.63 a	155.33 ± 6.03 a
	T3–1	0.152 ± 0.008 a	0.225 ± 0.009 a	0.280 ± 0.020 a	25.02 ± 1.78 ab	20.18 ± 1.67 ab	17.77 ± 1.93 a	194.58 ± 7.02 a	159.86 ± 8.50 a	181.24 ± 21.77 a
	T4–1	0.178 ± 0.011 a	0.238 ± 0.003 a	0.312 ± 0.004 a	25.84 ± 2.24 ab	20.78 ± 0.56 a	19.75 ± 0.65 a	159.50 ± 7.64 b	136.95 ± 9.94 a	160.98 ± 13.05 a
	T5–1	0.168 ± 0.020 a	0.232 ± 0.021 a	0.292 ± 0.017 a	23.88 ± 2.76 ab	18.90 ± 1.49 ab	17.42 ± 1.53 a	160.48 ± 14.99 b	133.94 ± 13.22 a	156.44 ± 12.71 a
	CK–1	0.155 ± 0.009 a	0.227 ± 0.018 a	0.301 ± 0.046 a	23.63 ± 4.37 b	19.33 ± 0.74 ab	17.45 ± 0.89 a	184.51 ± 15.71 ab	148.57 ± 18.96 a	164.46 ± 23.04 a
	T1–2	0.188 ± 0.020 a	0.252 ± 0.026 a	0.302 ± 0.014 ab	30.00 ± 3.23 a	22.66 ± 1.44 ab	21.54 ± 1.33 ab	201.30 ± 15.34 a	167.99 ± 10.87 a	183.43 ± 6.63 a
	T2–2	0.177 ± 0.013 a	0.260 ± 0.021 a	0.323 ± 0.027 ab	30.26 ± 3.36 a	22.24 ± 1.76 ab	19.78 ± 1.94 ab	184.04 ± 16.14 a	142.99 ± 15.47 a	153.93 ± 18.06 a
	T3–2	0.189 ± 0.024 a	0.241 ± 0.028 a	0.288 ± 0.010 b	22.44 ± 2.03 b	19.63 ± 2.50 b	17.31 ± 2.61 b	169.06 ± 16.66 a	146.77 ± 11.62 a	166.35 ± 21.73 a
	T4–2	0.207 ± 0.035 a	0.276 ± 0.058 a	0.365 ± 0.058 a	32.17 ± 0.45 a	24.87 ± 2.28 a	23.09 ± 2.60 a	199.23 ± 18.45 a	166.86 ± 17.77 a	172.02 ± 19.34 a
	T5–2	0.163 ± 0.027 a	0.213 ± 0.025 a	0.277 ± 0.042 b	27.48 ± 4.77 ab	20.73 ± 0.56 ab	17.64 ± 0.31 b	185.00 ± 25.46 a	140.90 ± 1.13 a	153.82 ± 5.79 a
	CK–2	0.182 ± 0.020 a	0.247 ± 0.022 a	0.295 ± 0.008 ab	25.46 ± 3.55 ab	20.98 ± 2.80 ab	18.63 ± 1.60 b	183.40 ± 18.92 a	152.08 ± 16.34 a	171.32 ± 1.47 a
南粳 5055	T1–1	0.094 ± 0.012 a	0.160 ± 0.008 a	0.181 ± 0.013 ab	17.59 ± 1.41 ab	12.85 ± 0.75 a	9.71 ± 0.49 a	152.10 ± 18.69 a	158.26 ± 11.20 a	168.47 ± 7.16 a
	T2–1	0.095 ± 0.008 a	0.152 ± 0.025 a	0.184 ± 0.025 ab	18.73 ± 1.76 a	13.12 ± 1.65 a	10.32 ± 1.53 a	187.16 ± 29.45 a	176.20 ± 31.79 a	169.52 ± 30.61 a
	T3–1	0.109 ± 0.004 a	0.147 ± 0.006 a	0.155 ± 0.005 b	15.38 ± 0.55 b	12.12 ± 0.08 a	9.22 ± 0.21 a	163.48 ± 9.05 a	171.70 ± 15.37 a	177.95 ± 9.71 a
	T4–1	0.105 ± 0.017 a	0.152 ± 0.005 a	0.193 ± 0.010 a	18.22 ± 0.27 a	12.67 ± 0.23 a	9.82 ± 0.10 a	168.04 ± 15.62 a	152.10 ± 13.32 a	155.95 ± 16.39 a
	T5–1	0.109 ± 0.018 a	0.151 ± 0.012 a	0.163 ± 0.012 ab	18.92 ± 1.53 a	12.94 ± 0.64 a	10.23 ± 0.36 a	177.98 ± 8.93 a	157.88 ± 11.38 a	178.18 ± 2.09 a
	CK–1	0.092 ± 0.013 a	0.154 ± 0.019 a	0.156 ± 0.022 b	19.37 ± 1.20 a	12.41 ± 1.31 a	9.06 ± 1.12 a	169.45 ± 15.17 a	152.43 ± 14.35 a	146.37 ± 10.84 a
	T1–2	0.106 ± 0.012 b	0.164 ± 0.007 a	0.176 ± 0.025 a	22.78 ± 2.93 a	13.68 ± 1.05 a	10.27 ± 0.98 ab	175.47 ± 30.28 a	148.33 ± 20.66 a	150.15 ± 24.11 ab
	T2–2	0.115 ± 0.011 ab	0.144 ± 0.012 a	0.164 ± 0.023 a	16.05 ± 2.11 b	11.56 ± 1.48 a	8.77 ± 1.01 b	147.33 ± 7.22 a	150.84 ± 9.34 a	162.34 ± 9.25 ab
	T3–2	0.099 ± 0.007 b	0.156 ± 0.014 a	0.182 ± 0.004 a	20.11 ± 0.89 ab	12.74 ± 0.49 a	10.66 ± 0.87 a	169.20 ± 13.55 a	154.74 ± 8.83 a	184.28 ± 14.98 a
	T4–2	0.128 ± 0.011 a	0.159 ± 0.013 a	0.171 ± 0.017 a	18.50 ± 0.35 b	12.40 ± 1.42 a	9.50 ± 1.08 ab	152.00 ± 12.30 a	140.88 ± 19.14 a	143.25 ± 20.50 b
	T5–2	0.097 ± 0.003 b	0.147 ± 0.013 a	0.172 ± 0.020 a	16.74 ± 1.82 b	11.77 ± 2.19 a	9.95 ± 0.68 ab	166.02 ± 7.14 a	147.34 ± 10.85 a	186.30 ± 19.10 a
	CK–2	0.094 ± 0.012 b	0.147 ± 0.005 a	0.163 ± 0.007 a	19.19 ± 1.00 ab	12.86 ± 0.54 a	9.39 ± 0.18 ab	162.67 ± 11.05 a	145.65 ± 9.41 a	160.65 ± 4.83 ab

表 4　倒伏指数与形态性状的相关系数

品种	指标	喷施 2 次			喷施 3 次		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
海洋院 1 号	株高	0.599**	0.555*	0.687**	0.624**	0.492*	0.608**
	节间长度	0.630**	0.598**	0.497*	0.676**	0.320	0.711**
	节间粗度	0.469*	0.175	0.167	0.118	0.225	0.061
	茎壁厚度	–0.473*	–0.311	–0.034	–0.489*	–0.573*	–0.280
	节间干质量	0.024	–0.250	–0.166	–0.108	0.065	–0.114
	单位长度节间干质量	–0.552*	–0.675**	–0.779**	–0.477*	–0.450*	–0.352
	单位体积节间干质量	–0.623**	–0.784**	–0.555*	–0.525*	–0.716**	–0.458
南粳 5055	株高	0.464*	0.560*	0.495*	0.541*	0.537*	0.606**
	节间长度	0.749**	0.607**	0.487*	0.523*	0.689**	0.574*
	节间粗度	0.092	0.133	0.314	0.187	0.408	0.204
	茎壁厚度	–0.325	–0.182	–0.226	–0.037	0.180	–0.302
	节间干质量	–0.184	0.146	–0.127	–0.051	–0.117	–0.073
	单位长度节间干质量	–0.509*	–0.681**	–0.533*	–0.511*	–0.534*	–0.196
	单位体积节间干质量	–0.489*	–0.564*	–0.551*	–0.476*	–0.226	–0.501*

注:*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关、极显著相关。表 6 同。

2.2　不同叶面硅肥对滩涂水稻茎秆力学性状的影响

由表 5 可知,茎秆基部各节间弯曲力矩和抗折力随着水稻拔节依次降低。就弯曲力矩而言,海洋院 1 号 I3 节间 T1–1 和 T5–1 显著高于 T4–1 和 CK–1,I1 节间各处理均显著高于 CK–2,I2 节间 T1–2、T3–2、T4–2 和 I3 节间 T1–2、T3–2 较 CK–2 均显著提升;南粳 5055 I1 节间 T3–1 和 T5–1 显著低于 CK–1,T2–2 和 T4–2 显著高于 CK–2,I2 节间 T3–1 显著低于 CK–1,I3 节间 T1–1、T2–1 和 T4–1 较 CK–1 均显著提升,T4–2 显著高于 T5–2 和 CK–2。对于茎秆抗折力,海洋院 1 号各节间 T5–1 均显著高于 T2–1 和 T3–1,T4–2 和 T5–2 均显著高于 T2–2 和 T3–2;南粳 5055 抗折力 I1 节间 T1–1、T4–1、T5–1 处理均显著高于 CK–1,分别提高了 32.73%、41.82%、47.27%,T3–2 显著高于 T1–2 和 T2–2,I2 节间喷施 2 次所有处理均显著提升,T3–2 显著高于 T1–2,I3 节间 T4–1 和 T5–1 显著高于 T3–1,T4–2 显著高于 T2–2。综上所述,海洋院 1 号喷施 2 次和 3 次及南粳 5055 喷施 2 次 T4 和 T5 的抗折力较大,其次是 T1 和 T2,T3 略小;南粳 5055 喷施 3 次后 T3、T4 和 T5 的抗折力较大,T1 次之,T2 略小,且施肥后各节间抗折力均显著高于 CK。因此,T4 和 T5 对于提升水稻抗折力效果较好,T1 和 T3 次之,T2 效果一般。

由表 6 可知,倒伏指数与弯曲力矩呈正相关关系,其中与海洋院 1 号喷施 3 次 I1 节间达到显著水平,与南粳 5055 喷施 2 次各节间也均达到显著水平。倒伏指数与茎秆基部抗折力呈负相关关系,且相关系数全部达到显著水平。可见,提高基部各个节间的抗折力是提升水稻抗倒伏能力的关键。

2.3　不同叶面硅肥对滩涂水稻茎秆抗倒伏能力的影响

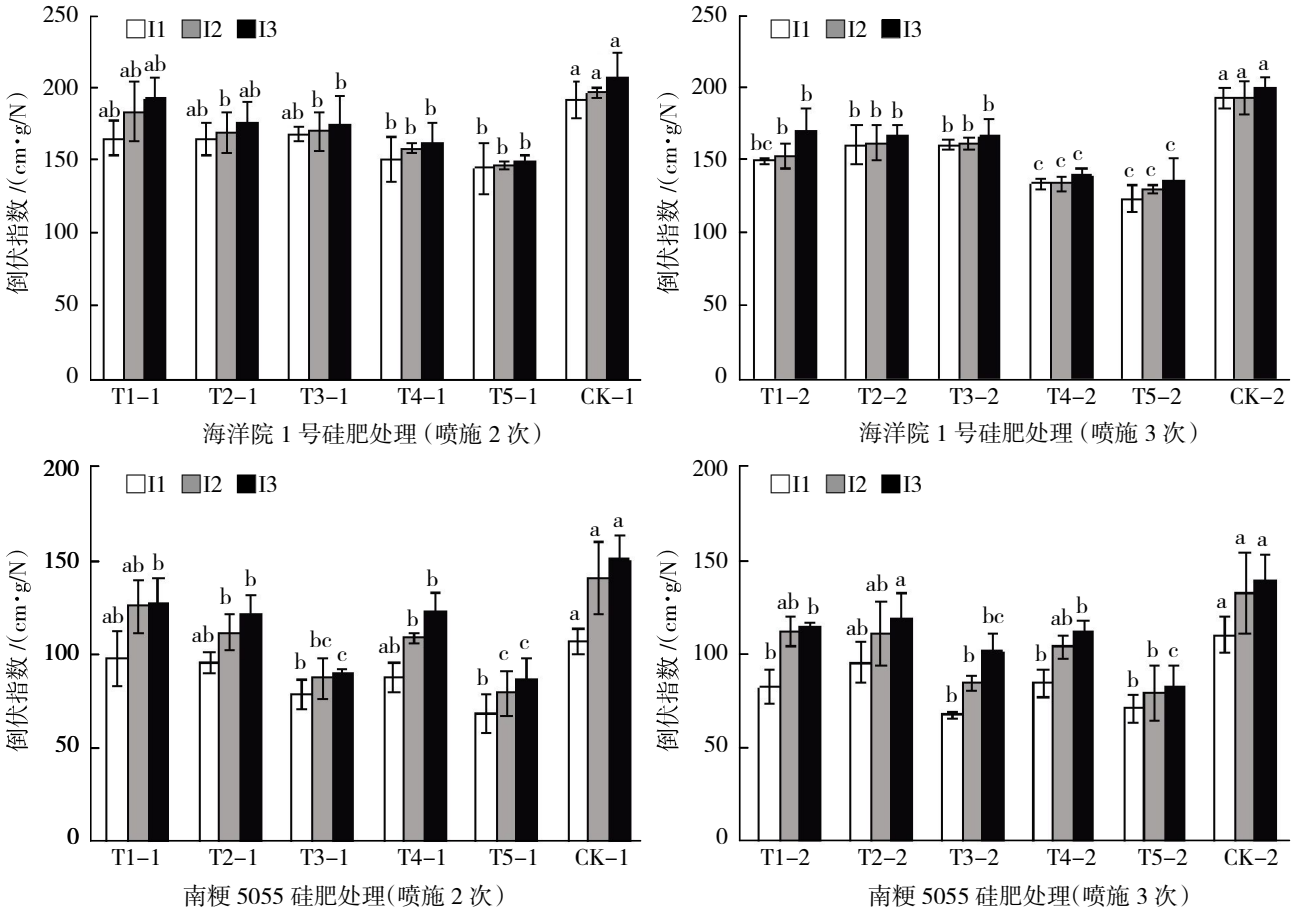
由图 1 可见,茎秆基部各节间倒伏指数随着水稻拔节依次增高。海洋院 1 号 I1 节间 T4–1 和 T5–1 显著低于 CK–1,I2 节间除 T1–1 外均显著降低,I3 节间 T3–1、T4–1 和 T5–1 比 CK–1 分别低 15.74%、22.00%、28.04%,喷施 3 次各节间倒伏指数均显著低于 CK–2。南粳 5055 I1 节间 T3–1 和 T5–1 显著低于 CK–1,I2 节间除 T1–1 外均有降低趋势,且 T3–2 和T5–2 仅分别为 CK–2 的 64.00%和 60.25%,I3 节间除 T2–2 外均显著低于 CK–2。综上所述,海洋院 1 号 T4 和 T5 的倒伏指数整体较低,肥效较好,T3 次之,T1 和 T2 效果一般;南粳 5055 T3 和 T5 的肥效较好,T4 次之,T1 和 T2 效果一般,且 2 个品种的倒伏指数均表现出喷施 3 次比喷施 2 次小。

表 5　不同硅肥处理对滩涂水稻茎秆弯曲力矩和抗折力的影响

品种	叶面肥处理	弯曲力矩 /(cm·g)			抗折力 /N		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
海洋院 1 号	T1–1	1 958.2 ± 40.0 a	1 670.3 ± 72.3 a	1 345.1 ± 29.4 a	11.9 ± 0.7 ab	9.2 ± 0.6 b	7.1 ± 0.7 b
	T2–1	1 897.6 ± 35.1 a	1 616.0 ± 96.6 a	1 294.0 ± 31.6 ab	11.7 ± 0.9 b	9.6 ± 0.5 b	7.4 ± 0.5 b
	T3–1	1 917.9 ± 59.7 a	1 616.0 ± 37.2 a	1 281.5 ± 64.6 ab	11.4 ± 0.2 b	9.6 ± 0.5 b	7.4 ± 0.5 b
	T4–1	1 937.5 ± 91.3 a	1 646.9 ± 96.7 a	1 171.3 ± 83.5 b	12.9 ± 0.7 ab	10.4 ± 0.4 ab	7.3 ± 0.3 b
	T5–1	1 911.7 ± 47.1 a	1 637.2 ± 38.9 a	1 347.2 ± 53.8 a	13.4 ± 1.2 a	11.2 ± 0.5 a	9.0 ± 0.2 a
	CK–1	1 855.5 ± 31.9 a	1 537.2 ± 92.1 a	1 106.0 ± 80.8 b	9.7 ± 0.5 c	7.8 ± 0.6 c	5.6 ± 0.3 c
	T1–2	2 023.6 ± 78.7 a	1 707.4 ± 37.0 a	1 358.2 ± 74.4 a	13.6 ± 0.7 ab	11.2 ± 0.8 b	8.0 ± 0.4 b
	T2–2	1 917.6 ± 25.0 b	1 635.5 ± 90.5 ab	1 240.1 ± 20.8 b	12.2 ± 1.1 b	10.1 ± 0.2 c	7.4 ± 0.2 b
	T3–2	1 918.4 ± 14.1 b	1 751.9 ± 37.5 a	1 364.3 ± 32.8 a	12.2 ± 0.2 b	10.9 ± 0.5 bc	8.3 ± 0.5 b
	T4–2	1 970.3 ± 17.9 ab	1 696.4 ± 38.6 a	1 302.1 ± 65.4 ab	14.8 ± 0.5 a	12.7 ± 0.3 a	9.3 ± 0.2 a
	T5–2	2 014.8 ± 33.3 a	1 639.9 ± 35.5 ab	1 272.5 ± 46.5 ab	14.9 ± 0.9 a	12.7 ± 0.1 a	9.5 ± 0.8 a
	CK–2	1 831.3 ± 22.4 c	1 562.1 ± 70.7 b	1 192.4 ± 22.4 b	9.7 ± 0.5 c	8.1 ± 0.2 d	5.9 ± 0.1 c
南粳 5055	T1–1	668.1 ± 35.9 a	550.0 ± 27.5 a	393.9 ± 12.0 a	7.3 ± 0.7 a	4.5 ± 0.5 b	3.3 ± 0.2 ab
	T2–1	635.5 ± 44.2 ab	537.4 ± 33.4 ab	374.5 ± 26.4 a	6.7 ± 0.9 ab	5.0 ± 0.6 ab	3.1 ± 0.2 ab
	T3–1	525.6 ± 17.3 b	407.5 ± 14.8 c	269.0 ± 14.8 b	6.9 ± 0.8 ab	4.9 ± 0.8 ab	3.0 ± 0.1 b
	T4–1	673.1 ± 43.2 a	544.0 ± 16.0 a	411.3 ± 38.3 a	7.8 ± 0.6 a	5.0 ± 0.1 ab	3.4 ± 0.1 a
	T5–1	542.9 ± 44.7 b	434.2 ± 34.0 bc	288.8 ± 32.6 b	8.1 ± 0.8 a	5.9 ± 0.5 a	3.4 ± 0.1 a
	CK–1	583.1 ± 14.7 a	485.4 ± 14.7 b	317.6 ± 13.3 b	5.5 ± 0.3 b	3.6 ± 0.5 c	2.2 ± 0.1 c
	T1–2	627.9 ± 36.1 ab	526.4 ± 43.0 a	372.8 ± 39.1 ab	7.8 ± 0.5 b	4.9 ± 0.5 b	3.2 ± 0.3 ab
	T2–2	695.9 ± 47.9 a	546.7 ± 41.7 a	369.4 ± 33.6 ab	7.3 ± 0.6 b	5.1 ± 0.9 ab	3.1 ± 0.3 b
	T3–2	591.4 ± 35.5 ab	492.9 ± 30.9 a	335.9 ± 24.6 ab	9.2 ± 0.7 a	6.0 ± 0.2 a	3.5 ± 0.2 ab
	T4–2	686.6 ± 11.4 a	548.3 ± 46.9 a	412.4 ± 28.2 a	8.1 ± 0.6 ab	5.3 ± 0.2 ab	3.7 ± 0.1 a
	T5–2	568.1 ± 80.3 b	458.8 ± 76.5 a	300.1 ± 62.9 b	8.2 ± 0.8 ab	5.8 ± 0.2 ab	3.6 ± 0.4 ab
	CK–2	570.3 ± 49.7 b	474.5 ± 55.6 a	298.0 ± 23.3 b	5.2 ± 0.4 c	3.6 ± 0.4 c	2.1 ± 0.1 c

表 6　倒伏指数与力学性状的相关系数

品种	指标	喷施 2 次			喷施 3 次		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
海洋院 1 号	弯曲力矩	0.142	0.083	0.184	0.733**	0.184	0.052
	抗折力	–0.971**	–0.899**	–0.862**	–0.912**	–0.955**	–0.947**
南粳 5055	弯曲力矩	0.502*	0.510*	0.550*	0.305	0.387	0.236
	抗折力	–0.740**	–0.857**	–0.604**	–0.850**	–0.844**	–0.683**



相同节间不同字母表示差异具有统计学意义（$P<0.05$）。I1、I2 和 I3 分别表示从基部向上数第 1、第 2 和第 3 伸长节间

图 1　不同硅肥处理对滩涂水稻基部节间倒伏指数的影响

2.4　不同叶面硅肥对滩涂水稻生长、产量及其构成因素的影响

由表 7 可知，海洋院 1 号每穗实粒数 T5–1 较 CK–1 增长 16.24%，T3–1、T4–1 和 T5–1 的结实率显著提升，除 T1–1 外各处理千粒质量均显著提高；产量除 T3–1 外均显著提升，各处理较 CK–1 增幅为 T4–1（6.20%）> T2–1（5.05%）> T5–1（4.88%）> T1–1(3.02%) > T3–1(2.03%)；T4–2 和 T5–2 穗数均显著高于 CK–2，T1–2 和 T4–2 的穗粒数较 CK–2 分别增长了 15.42%和 14.12%，各处理穗实粒数均有显著提高，T3–2、T4–2 和 T5–2 的结实率显著高于 CK–2；产量增幅较喷施 2 次有所提高，分别为 T5–2（9.47%）> T4–2（8.44%）> T2–2（7.58%）> T1–2（5.13%）> T3–2(2.26%)。南粳 5055 除 T5–1 外各处理穗数均显著高于 CK–1，T2–1 穗粒数增长了 20.78%，实粒数增长了 29.23%，结实率提高 6.11 百分点，T1–1、T3–1 和 T4–1 的千粒质量显著提高；产量除 T5–1 外均显著提升，各处理增幅为 T1–1（8.57%）> T3–1（6.08%）> T4–1（4.02%）> T2–1（3.48%）> T5–1(2.97%)；穗数除 T5–2 外均显著提高，T1–2 的穗粒数较 CK 增长了 14.88%，各处理穗实粒数除 T5–2 外均显著高于 CK，T5–2 结实率比 CK–2 高 5.70 百分点；各处理均显著增产，分别为 T1–2(9.46%) > T3–2(8.28%) > T4–2(5.12%) > T2–2(3.62%) > T5–2(3.18%)。综上所述，海洋院 1 号喷施 2 次 T4 效果最好，T2 和 T5 次之；喷施 3 次 T5 肥效最好，T4 和 T2 次之；T1 和 T3 肥效均一般。南粳 5055 喷施 2 次和 3 次均为 T1 效果最好，T3 和 T4 次之，T2 和 T5 一般。产量增加主要是由穗数和每穗实粒数共同影响，其中每穗实粒数影响较大，喷施 3 次比 2 次产量增幅提高，主要是在灌浆期喷施硅肥提高了千粒质量和结实率。

表 7　不同硅肥处理对滩涂水稻产量及其构成因素的影响

品种	叶面肥处理	穗数 /（万穗 /hm²）	穗粒数 /（粒 / 穗）	穗实粒数 /（粒 / 穗）	结实率 /%	千粒质量 /g	产量 /（kg/hm²）
海洋院 1 号	T1–1	146.67 ± 23.73 a	206.11 ± 8.68 a	171.57 ± 17.53 ab	83.24 ± 1.14 b	26.28 ± 0.11 ab	6 447.4 ± 96.0 a
	T2–1	142.78 ± 27.95 a	197.94 ± 10.93 a	173.64 ± 13.51 ab	87.72 ± 0.90 b	26.49 ± 0.22 a	6 574.5 ± 105.9 a
	T3–1	145.56 ± 23.01 a	201.77 ± 12.42 a	182.46 ± 16.09 ab	90.43 ± 2.21 a	26.30 ± 0.10 a	6 385.5 ± 125.6 ab
	T4–1	140.56 ± 26.36 a	204.48 ± 10.44 a	181.45 ± 16.50 ab	90.21 ± 1.25 a	26.35 ± 0.26 a	6 646.9 ± 177.7 a
	T5–1	141.67 ± 21.62 a	209.25 ± 24.26 a	188.92 ± 6.27 a	88.74 ± 1.73 a	26.41 ± 0.23 a	6 564.0 ± 164.4 a
	CK–1	135.00 ± 25.65 a	187.17 ± 3.18 a	162.52 ± 8.21 b	86.83 ± 0.53 b	25.98 ± 0.06 b	6 258.7 ± 62.0 b
	T1–2	152.22 ± 27.01 ab	218.31 ± 14.33 a	193.88 ± 7.46 a	88.81 ± 1.03 b	26.38 ± 0.17 a	6 604.3 ± 176.7 b
	T2–2	143.33 ± 22.19 b	210.52 ± 14.96 ab	190.30 ± 12.50 a	90.40 ± 2.71 ab	26.60 ± 0.25 a	6 758.8 ± 194.3 ab
	T3–2	151.67 ± 18.68 ab	205.78 ± 22.11 ab	195.98 ± 11.65 a	95.24 ± 2.06 a	26.39 ± 0.38 a	6 424.3 ± 62.6 bc
	T4–2	161.11 ± 22.36 a	215.84 ± 18.04 a	198.95 ± 9.62 a	92.17 ± 1.21 a	26.51 ± 0.16 a	6 812.3 ± 130.2 ab
	T5–2	159.44 ± 22.57 a	214.45 ± 13.53 ab	195.04 ± 6.39 a	90.95 ± 1.37 a	26.43 ± 0.16 a	6 877.2 ± 132.1 a
	CK–2	138.33 ± 14.69 b	189.14 ± 4.56 b	165.19 ± 7.37 b	87.34 ± 1.46 b	25.91 ± 0.14 b	6 282.3 ± 54.2 c
南粳 5055	T1–1	356.67 ± 25.31 a	102.04 ± 1.84 b	92.04 ± 7.19 b	90.20 ± 1.58 ab	26.53 ± 0.28 a	8 526.3 ± 292.7 a
	T2–1	340.56 ± 27.28 a	115.59 ± 8.93 a	108.14 ± 10.92 a	93.55 ± 2.38 a	26.22 ± 0.08 ab	8 126.6 ± 105.6 b
	T3–1	353.33 ± 20.96 a	99.94 ± 4.95 b	91.39 ± 8.78 b	91.44 ± 1.73 ab	26.50 ± 0.16 a	8 330.8 ± 121.9 ab
	T4–1	350.56 ± 24.21 a	111.27 ± 8.00 ab	101.56 ± 6.30 ab	91.27 ± 1.39 ab	26.41 ± 0.16 a	8 169.5 ± 119.4 b
	T5–1	331.67 ± 22.02 ab	97.31 ± 5.07 b	90.51 ± 4.90 b	93.01 ± 1.09 ab	26.00 ± 0.33 b	8 086.5 ± 55.3 bc
	CK–1	322.22 ± 20.18 b	95.70 ± 2.10 b	83.68 ± 6.26 b	87.44 ± 1.90 b	25.78 ± 0.18 b	7 853.5 ± 123.3 c
	T1–2	359.44 ± 35.36 a	110.58 ± 6.01 a	99.45 ± 2.89 a	89.93 ± 0.31 ab	26.62 ± 0.19 a	8 618.5 ± 230.8 a
	T2–2	347.78 ± 27.69 a	108.21 ± 6.72 ab	97.83 ± 7.38 a	90.41 ± 3.09 ab	26.48 ± 0.23 a	8 158.2 ± 131.1 b
	T3–2	351.11 ± 25.43 a	107.16 ± 1.87 ab	98.52 ± 4.52 a	91.94 ± 3.09 ab	26.65 ± 0.16 a	8 525.3 ± 159.9 a
	T4–2	345.56 ± 26.03 a	106.63 ± 3.83 ab	97.48 ± 12.23 a	91.42 ± 3.90 ab	26.46 ± 0.27 a	8 276.2 ± 107.2 b
	T5–2	326.11 ± 19.01 b	100.45 ± 4.61 b	93.28 ± 6.98 ab	92.86 ± 2.63 a	26.21 ± 0.33 ab	8 124.0 ± 83.9 b
	CK–2	320.56 ± 27.95 b	96.26 ± 4.22 b	83.90 ± 5.24 b	87.16 ± 1.48 b	25.80 ± 0.34 b	7 873.3 ± 83.6 c

由表 8 可知，海洋院 1 号 T2–1、T4–1 和 T5–1 的单穴产量分别比 CK 提高了 5.76%、6.92%、5.61%，T4–1 的单穴生物量显著提高；喷施 3 次各处理穗长均有降低趋势，T1–2、T2–2 和 T4–2 达到显著水平，除 T2–2 外各处理着粒密度均显著提升；各处理单穴产量均显著高于 CK–2，增幅为 T4–2（10.01%）> T5–2（9.83%）> T2–2（9.10%）> T1–2（6.70%）> T3–2（3.90%）。南粳 5055 穗长 CK–1 显著高于 T5–1，各处理着粒密度均有增加，T1–1、T3–1 和 T4–1 单穴产量分别比 CK 增长了 10.74%、8.71%和 4.65%，且前两者的单穴生物量显著提升；喷施 3 次单穴产量较喷施 2 次有所提升，增幅为 T1–2（11.86%）> T3–2（9.71%）> T4–2（6.19%）> T2–2（5.69%）> T5–2（3.78%）。综上所述，喷施硅肥降低了穗长并提高了着粒密度，海洋院 1 号喷施 2 次和 3 次 T4 的单穴产量最高，T2 和 T5 次之；而南粳 5055 表现出 T1 的单穴产量最高，T3 和 T4 次之，且喷施 3 次单穴产量和生物量普遍高于 2 次。2 个品种的收获指数均有小幅提升但差异均无统计学意义。

表 8　不同硅肥处理对滩涂水稻穗部及收获性状的影响

品种	叶面肥处理	穗长 /cm	着粒密度 /（粒 /cm）	单穴产量 /g	单穴生物量 /g	收获指数 /%
海洋院 1 号	T1–1	17.43 ± 0.42 a	11.32 ± 1.01 a	34.03 ± 2.21 ab	65.03 ± 4.77 ab	52.41 ± 2.25 a
	T2–1	17.17 ± 0.18 a	10.95 ± 0.27 a	34.70 ± 2.37 a	65.61 ± 5.15 ab	52.98 ± 2.32 a
	T3–1	17.72 ± 0.49 a	11.44 ± 1.64 a	33.79 ± 2.02 ab	64.05 ± 4.76 ab	52.86 ± 2.12 a
	T4–1	17.30 ± 0.43 a	11.82 ± 0.32 a	35.08 ± 1.91 a	66.65 ± 3.94 a	52.69 ± 1.95 a
	T5–1	17.09 ± 0.23 a	11.82 ± 1.20 a	34.65 ± 2.31 a	66.25 ± 5.13 ab	52.40 ± 2.41 a
	CK–1	17.44 ± 0.66 a	10.86 ± 0.57 a	32.81 ± 2.02 b	63.38 ± 4.71 b	51.88 ± 2.85 a
	T1–2	16.11 ± 0.69 b	12.49 ± 0.86 a	35.06 ± 1.73 ab	66.59 ± 4.22 ab	52.74 ± 2.06 a
	T2–2	17.18 ± 0.35 b	11.86 ± 0.50 ab	35.85 ± 1.77 a	67.60 ± 3.80 a	53.11 ± 2.18 a
	T3–2	17.33 ± 1.05 ab	12.20 ± 0.65 a	34.14 ± 2.08 b	64.31 ± 4.20 b	53.15 ± 2.18 a
	T4–2	17.17 ± 0.52 b	12.36 ± 0.20 a	36.15 ± 2.18 a	68.55 ± 4.85 a	52.82 ± 2.32 a
	T5–2	17.41 ± 0.52 ab	12.49 ± 0.72 a	36.09 ± 2.06 a	68.18 ± 5.64 a	53.09 ± 2.60 a
	CK–2	18.27 ± 0.31 a	11.07 ± 0.81 b	32.86 ± 1.82 c	63.55 ± 4.24 b	51.78 ± 1.86 a
南粳 5055	T1–1	15.15 ± 0.23 a	6.82 ± 0.13 b	46.18 ± 1.99 a	85.61 ± 2.72 a	53.98 ± 2.72 a
	T2–1	15.14 ± 0.49 a	7.58 ± 0.38 a	43.05 ± 3.12 bc	81.07 ± 5.65 b	53.12 ± 1.89 a
	T3–1	14.45 ± 0.38 ab	6.84 ± 0.16 b	45.33 ± 2.96 a	84.98 ± 4.63 a	53.38 ± 2.85 a
	T4–1	14.81 ± 0.47 ab	7.46 ± 0.35 a	43.64 ± 2.97 b	82.20 ± 4.27 ab	53.09 ± 2.18 a
	T5–1	14.11 ± 0.11 b	6.84 ± 0.34 b	42.65 ± 1.38 bc	80.14 ± 5.45 b	53.38 ± 2.43 a
	CK–1	14.98 ± 0.86 a	6.56 ± 0.14 b	41.70 ± 1.64 c	79.56 ± 4.08 b	52.47 ± 1.70 a
	T1–2	15.10 ± 0.26 a	7.20 ± 0.38 a	46.77 ± 1.98 a	86.05 ± 2.23 a	54.36 ± 1.99 a
	T2–2	14.69 ± 0.45 a	7.24 ± 0.21 a	44.19 ± 2.93 b	82.99 ± 4.92 b	53.26 ± 1.97 a
	T3–2	14.73 ± 0.28 a	7.52 ± 0.65 a	45.87 ± 1.69 ab	85.29 ± 3.75 ab	53.87 ± 2.79 a
	T4–2	14.84 ± 0.80 a	7.11 ± 0.48 a	44.40 ± 2.08 b	83.50 ± 4.07 ab	53.21 ± 1.93 a
	T5–2	14.51 ± 0.27 a	6.89 ± 0.25 a	43.39 ± 1.25 b	80.83 ± 2.85 b	53.73 ± 2.05 a
	CK–2	15.04 ± 0.71 a	6.85 ± 0.51 a	41.81 ± 2.30 c	79.78 ± 6.32 b	52.53 ± 1.93 a

2.5　不同叶面硅肥对滩涂水稻一二次枝梗性状的影响

由表 9 可知，海洋院 1 号 T1–1、T3–1 和 T5–1 的一次枝梗数显著高于 T2–1，T5–1 总粒数较 CK–1 显著提升，各处理间实粒数和结实率差异无统计学意义，各处理间二次枝梗数差异无统计学意义，T3–1 和 T5–1 的实粒数显著高于 CK–1，除 T2–1 外各处理总粒数均显著提升，T5–1 的结实率显著高于 CK–1，喷施 3 次的处理一次枝梗数差异无统计学意义；T1–2、T2–2 和 T3–2 的实粒数较 CK–2 显著提高，T1–2 的总粒数、T2–2 和 T3–2 的结实率显著高于 CK–2，二次枝梗数差异无统计学意义，各处理实粒数和总粒数均显著高于 CK–2，T3–2、T4–2 和 T5–2 的结实率显著提高。南粳 5055 喷施 2 次的处理一次枝梗数 T2–1 显著高于 T1–1、T3–1 和 T5–1，T2–1 和 T4–1 的实粒数、总粒数均显著高于 CK–1，结实率差异无统计学意义，二次枝梗数 T2–1 显著高于 CK–1，T2–1 的实粒数和总粒数均显著提升，T4–1 的实粒数显著高于 CK–1，结实率均有显著提高；喷施 3 次的处理一次枝梗数和结实率差异均无统计学意义，T4–2 的实粒数和总粒数均有显著提升，二次枝梗数差异无统计学意义，各处理实粒数均显著高于 CK–2，T1–2 和 T3–2 的总粒数显著提高，结实率均显著高于 CK–2。综上所述，喷施硅肥对滩涂水稻一二次枝梗性状的影响随着品种的不同具有一定的差异性，特别是提高了二次枝梗数、总粒数和实粒数；海洋院 1 号喷施 T5 效果较好，而南粳 5055 喷施 T2 肥效较高，且喷施 3 次整体效果优于 2 次。

表 9　不同硅肥处理对滩涂水稻一二次枝梗性状的影响

品种	叶面肥处理	一次枝梗性状				二次枝梗性状			
		枝梗数 / 个	实粒数 / 粒	总粒数 / 粒	结实率 /%	枝梗数 / 个	实粒数 / 粒	总粒数 / 粒	结实率 /%
海洋院 1 号	T1–1	14.06 ± 0.93 a	75.43 ± 9.22 a	86.95 ± 0.54 ab	86.88 ± 4.41 a	40.34 ± 3.97 a	96.43 ± 6.70 b	119.99 ± 3.53 a	84.46 ± 2.80 b
	T2–1	12.66 ± 0.49 b	76.66 ± 3.92 a	84.63 ± 2.36 ab	90.69 ± 1.14 a	39.90 ± 2.87 a	96.63 ± 6.89 b	113.39 ± 6.96 ab	85.33 ± 1.18 b
	T3–1	14.09 ± 0.87 a	73.62 ± 4.19 a	82.57 ± 5.84 b	89.27 ± 1.28 a	40.54 ± 5.15 a	109.94 ± 5.13 a	119.20 ± 4.38 a	92.10 ± 2.15 ab
	T4–1	13.52 ± 0.25 ab	75.92 ± 4.75 a	85.53 ± 4.05 ab	88.56 ± 3.54 a	41.34 ± 2.52 a	105.92 ± 6.71 ab	118.95 ± 8.31 a	89.20 ± 3.43 b
	T5–1	14.05 ± 0.32 a	76.33 ± 2.14 a	89.38 ± 3.07 a	86.12 ± 2.97 a	42.11 ± 7.22 a	112.59 ± 6.26 a	119.58 ± 4.68 a	94.17 ± 2.17 a
	CK–1	13.13 ± 0.67 ab	71.36 ± 1.87 a	81.62 ± 1.39 b	86.10 ± 1.46 a	39.21 ± 1.17 a	90.55 ± 6.59 b	105.06 ± 5.03 b	84.39 ± 4.27 b
	T1–2	12.27 ± 1.32 a	82.46 ± 7.86 a	95.00 ± 3.44 a	86.94 ± 3.62 b	42.19 ± 1.71 a	111.13 ± 4.91 a	123.32 ± 6.89 a	90.48 ± 1.00 ab
	T2–2	12.42 ± 0.42 a	84.17 ± 4.78 a	88.26 ± 3.84 b	95.30 ± 1.12 a	40.83 ± 2.31 a	106.88 ± 9.70 a	121.02 ± 3.93 a	88.39 ± 2.17 b
	T3–2	12.92 ± 1.77 a	80.26 ± 2.58 a	84.69 ± 6.12 b	94.40 ± 1.98 a	42.65 ± 4.68 a	115.08 ± 6.73 a	121.78 ± 4.61 a	94.34 ± 1.79 a
	T4–2	13.53 ± 0.48 a	78.24 ± 4.82 ab	87.60 ± 3.43 b	89.16 ± 0.90 b	43.16 ± 2.37 a	120.53 ± 2.96 a	128.37 ± 6.31 a	93.27 ± 3.50 a
	T5–2	13.26 ± 1.12 a	76.56 ± 3.32 ab	88.01 ± 2.32 b	86.93 ± 2.00 b	43.26 ± 3.16 a	118.48 ± 5.42 a	126.44 ± 7.19 a	93.54 ± 1.94 a
	CK–2	13.29 ± 0.65 a	72.02 ± 3.60 b	81.97 ± 1.41 b	86.12 ± 3.12 b	39.42 ± 1.13 a	93.79 ± 2.44 b	108.17 ± 2.42 b	84.44 ± 3.26 b
南粳 5055	T1–1	6.21 ± 0.21 b	62.46 ± 1.17 b	65.60 ± 1.67 b	95.20 ± 0.30 a	14.42 ± 0.55 b	28.83 ± 3.75 bc	35.57 ± 3.05 b	81.22 ± 2.16 b
	T2–1	7.26 ± 0.65 a	68.61 ± 2.02 a	70.73 ± 1.64 a	96.90 ± 0.88 a	17.43 ± 2.04 a	39.54 ± 2.99 a	44.85 ± 5.51 a	88.15 ± 2.31 a
	T3–1	5.83 ± 0.55 b	63.33 ± 2.63 b	66.78 ± 2.37 b	94.73 ± 1.28 a	12.84 ± 1.47 b	27.96 ± 3.32 bc	33.02 ± 2.62 b	85.74 ± 2.43 ab
	T4–1	6.76 ± 0.48 ab	68.82 ± 2.91 a	71.35 ± 3.16 a	96.48 ± 0.60 a	16.37 ± 1.65 ab	32.74 ± 3.01 b	39.92 ± 5.52 ab	82.42 ± 2.78 b
	T5–1	6.17 ± 0.61 b	64.01 ± 2.25 b	66.41 ± 2.12 b	96.39 ± 0.56 a	12.75 ± 1.57 b	26.50 ± 3.12 c	30.90 ± 1.61 b	86.18 ± 1.60 ab
	CK–1	6.76 ± 0.61 ab	61.11 ± 2.88 b	64.25 ± 1.13 b	95.12 ± 1.50 a	12.72 ± 2.11 b	22.57 ± 2.98 c	30.45 ± 1.86 b	74.46 ± 2.84 c
	T1–2	6.90 ± 0.54 a	64.95 ± 1.05 ab	67.93 ± 0.38 ab	95.44 ± 0.99 a	15.93 ± 1.55 a	34.75 ± 3.15 a	42.73 ± 4.21 a	81.56 ± 2.73 b
	T2–2	6.41 ± 0.58 a	65.97 ± 0.71 ab	69.38 ± 0.98 ab	95.04 ± 1.57 a	14.99 ± 1.68 a	31.97 ± 2.79 a	38.92 ± 2.74 ab	81.78 ± 1.84 b
	T3–2	6.61 ± 0.14 a	64.41 ± 0.87 ab	67.08 ± 0.68 b	95.96 ± 1.10 a	15.00 ± 0.60 a	34.11 ± 3.85 a	40.08 ± 1.55 a	84.57 ± 2.39 ab
	T4–2	6.22 ± 0.82 a	67.73 ± 3.18 a	71.01 ± 2.50 a	95.44 ± 1.53 a	14.80 ± 2.52 a	29.75 ± 2.90 a	35.62 ± 1.47 b	83.74 ± 2.75 ab
	T5–2	5.97 ± 0.48 a	62.67 ± 1.28 b	65.25 ± 1.22 b	95.98 ± 1.31 a	13.30 ± 1.44 a	30.98 ± 3.32 a	35.13 ± 1.79 b	86.96 ± 2.76 a
	CK–2	6.09 ± 0.57 a	61.31 ± 3.34 b	64.40 ± 3.38 b	95.06 ± 0.86 a	13.16 ± 1.90 a	22.84 ± 1.81 b	31.61 ± 2.09 b	72.72 ± 2.67 c

3　讨论

3.1　沿海滩涂水稻茎秆抗倒伏能力的影响因素

倒伏是影响水稻产量的关键因素之一。沿海滩涂由于土壤盐分含量较高且分布不均匀，土壤肥力差，氮、磷和有机质等营养元素匮乏，海岸带风沙较大等原因，导致倒伏现象更容易发生。滩涂水稻倒伏大多发生在灌浆中后期，基部第 1 和第 2 节间最容易出现倒伏现象[31–32]。目前，国内外对于水稻抗倒伏能力与茎秆形态特征的研究已有不少。赵建明等选取国内外 31 个广泛种植且性状表现优良的水稻品种为试验材料，发现水稻株高和重心高度越高，基部节间越长越容易发生倒伏现象，且具有显著负相关关系[33]。董明辉等选取了 17 个水稻品种，也发现倒伏指数和株高、重心高度和节间长度呈显著正相关关系[34]。杨惠杰等以 16 个水稻品种作为试验材料，结果也表明水稻株高越高，倒伏现象越明显[35]。本研究的试验结果也表明，滩涂水稻倒伏指数、株高和 3 个节间长度均呈正相关关系，且与株高都达到显著水平，这与前人的研究结果一致。对于节间粗度和茎壁厚度，许多研究结果表明，株高越矮，茎秆和节间越粗，茎壁越厚，水稻倒伏指数越小[30,36–38]。本研究的结果表明，滩涂水稻倒伏指数和节间粗度、茎壁厚度呈负相关关系，且有些节间差异具统计学意义。本研究还发现，倒伏指数与节间干质量、单位长度和体积节间干质量大多呈负相关关系，由于二者是反映滩涂水稻茎秆充实度的指标，表明节间越充实，水稻抗倒伏能力越强。茎秆力学特征也对水稻抗倒伏能力具有显著影响，本研究结果表明，倒伏指数与弯曲力矩呈正相关关系，有些节间达到显

著水平，与抗折力呈显著负相关关系。这说明提升滩涂水稻茎秆抗折力是提高水稻抗倒伏能力最关键的因素，这也与先前学者的研究结果[35,39-40]一致。

3.2　施用硅肥对沿海滩涂水稻茎秆抗倒伏能力的影响

水稻茎秆形态特征与其抗倒伏能力息息相关。形态特征主要包括株高、节间粗度和茎壁厚度等[41]，通常情况下株高与倒伏指数呈正相关关系[42]，而与节间粗度和茎壁厚度呈负相关关系[43]。研究表明，施用硅肥可以调节水稻茎秆形态特征，硅肥可以通过降低株高、减少基部节间长度、增加节间粗度和茎壁厚度等方式增强水稻抗倒伏能力[26,43,44-45]。也有研究表明，硅素累积可以使水稻维管束细胞壁加厚，从而提升水稻茎秆强度[46]。本研究在沿海滩涂上选取海洋院 1 号和南粳 5055 为试验材料，设置 5 种常见叶面硅肥分别喷施 2 次和 3 次，结果表明：施用硅肥后 2 个品种各节间的抗折力均显著高于CK，不同品种的茎秆抗折力和倒伏指数差异均有统计学意义；海洋院 1 号抗折力整体比南粳 5055 高，但倒伏指数也高，这是因为海洋院 1 号株高较高，节间鲜质量大，弯曲力矩较大；同一种叶面肥喷施 3 次整体而言比 2 次效果更好，海洋院 1 号喷施 T4 和 T5 后各节间抗折力较大，而南粳 5055 喷施 T3 和 T5 后效果更好，这说明不同品种对于不同硅肥的敏感性有差异，在实际生产中可以根据品种的差异合理选择叶面硅肥。

3.3　施用硅肥对沿海滩涂水稻产量及其构成因素的影响

水稻产量与盐分含量密切相关，盐胁迫会影响水稻生长发育状况，进而造成减产甚至死亡[47]。周根友等研究发现，盐胁迫会显著减产，主要原因为每穗粒数和千粒质量显著降低[48]。胡文博等研究表明，盐胁迫下水稻穗数、每穗粒数、千粒质量和结实率均有所降低[49]。施用硅肥能有效促进水稻生长发育，韦海敏等研究表明，施用硅肥能显著提升水稻养分吸收能力，进而提高其干物质量和产量[50]。龚金龙等研究发现，在水稻分蘖期追施硅肥能显著提升穗数和每穗粒数，而抽穗灌浆期施硅显著增加了千粒质量和结实率[51]。韩晓楠等研究发现，微咸水灌溉下施加硅肥能在一定程度上缓解盐分胁迫，施硅比对照产量可提高 6.15%~14.62%[52]。何文丽等研究表明，外源硅处理能够减缓盐分胁迫，显著提高水稻产量及其构成因素[53]。韦海敏等研究表明，硅素穗肥促进抽穗期植株养分吸收，提高成熟期干物质量和产量，SiO_2 60 kg/hm^2 平均增产 4.3%，SiO_2 100 kg/hm^2 平均增产 8.6%[54]。本研究结果表明，施用硅肥能有效缓解沿海滩涂各类胁迫造成的不良影响，有效提升沿海滩涂水稻穗数、每穗粒数、千粒质量和结实率，其中对每穗粒数的影响最显著。喷施 3 次相较于 2 次而言水稻产量更高，其原因是灌浆期喷施叶面硅肥进一步提高了千粒质量和结实率，这与上述学者的研究结果均一致。

4　结论

1）喷施硅肥能改善滩涂水稻茎秆形态和力学性状，降低滩涂水稻株高和节间长度，提高节间粗度、节间干质量、茎壁厚度和抗折力，进而显著提升茎秆抗倒伏能力。海洋院 1 号喷施 T4 和 T5 抗折力较大，倒伏指数较低，而南粳 5055 喷施 T3 和 T5 抗倒伏能力较强，且 2 个品种均表现出喷施 3 次比 2 次效果好。倒伏指数与抗折力的相关系数全部达到显著水平，因此，提高基部各节间抗折力是提升水稻抗倒伏能力最有效的方式。

2）喷施硅肥能显著提升滩涂水稻产量及其构成因素。与 CK 相比，海洋院 1 号喷施 2 次和 3 次硅肥，水稻产量 T1 增幅分别为 3.02%、5.13%，T2 增幅分别为 5.05%、7.58%，T3 增幅分别为 2.03%、2.26%，T4 增幅分别为 6.20%、8.44%，T5 增幅分别为 4.88%、9.47%；南粳 5055 产量 T1 增幅分别为 8.57%、9.46%，T2 增幅分别为 3.48%、3.62%，T3 增幅分别为 6.08%、8.28%，T4 增幅分别为 4.02%、5.12%，T5 增幅分别为 2.97%、3.18%。产量增加主要由穗数和穗实粒数共同影响，其中穗实粒数影响较大，喷施 3 次比 2 次产量增幅提高，主要是在灌浆期喷施硅肥提高了千粒质量和结实率。

3）喷施硅肥降低了滩涂水稻穗长并提高了着粒密度、单穴产量和生物量。海洋院 1 号喷施 2 次和 3 次 T4 的单穴产量最高，而南粳 5055 表现出 T1 最高，且喷施 3 次效果优于 2 次，2 个品种的收获指数均有小幅提升但无统计学意义。

4）喷施硅肥对滩涂水稻一二次枝梗性状的影响随着品种不同具有差异性，特别是提高了二次枝梗数、总粒数和实粒数。海洋院 1 号喷施 T5 效果较好，南粳 5055 喷施 T2 肥效较高。

参考文献：

[1] 李　彬，王志春，孙志高，等. 中国盐碱地资源与可持续利用

研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):154–158.
[2] JULKOWSKA M M,TESTERINK C. Tuning plant signaling and growth to survive salt[J]. Trends in Plant Science,2015,20(9):586–594.
[3] 韩　笑,卢　磊. 根际促生菌提高水稻对非生物胁迫耐受性的研究进展[J]. 生命科学,2019,31(3):289–295.
[4] 朱建峰,崔振荣,吴春红,等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. 世界林业研究,2018,31(4):70–75.
[5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5):837–845.
[6] 王才林,张亚东,赵　凌,等. 耐盐碱水稻研究现状、问题与建议[J]. 中国稻米,2019,25(1):1–6.
[7] 颜佳倩,顾逸彪,薛张逸,等. 耐盐性不同水稻品种对盐胁迫的响应差异及其机制[J]. 作物学报,2022,48(6):1463–1475.
[8] 韦还和,张徐彬,葛佳琳,等. 盐胁迫对水稻颖花形成及籽粒充实的影响[J]. 作物学报,2021,47(12):2471–2480.
[9] 凌启鸿. 盐碱地种稻有关问题的讨论[J]. 中国稻米,2018,24(4):1–2.
[10] 王相平,杨劲松,姚荣江,等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报,2014,30(7):54–63.
[11] 严　凯,蒋玉兰,唐纪元,等. 盐碱地条件下施氮量和栽插密度对水稻产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2018(2):67–74.
[12] 向　镜,张义凯,朱德峰,等. 盐碱地耕作和洗盐方式对水稻生长及产量的影响[J]. 中国稻米,2018,24(4):68–71.
[13] KANAWAPEE N,SANITCHON J,SRIHABAN P,et al. Physiological changes during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salt tolerance under saline field condition[J]. Plant and Soil,2013,370(1):89–101.
[14] ABBAS G,SAQIB M,AKHTAR J,et al. Physiological and biochemical characterization of *Acacia stenophylla* and *Acacia albida* exposed to salinity under hydroponic conditions [J]. Canadian Journal of Forest Research,2017,47(9):1293–1301.
[15] 朱明霞,高显颖,邵玺文,等. 不同浓度盐碱胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学,2014,39(6):12–16.
[16] 罗成科,肖国举,张峰举,等. 不同浓度复合盐胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(1):137–141.
[17] 张　蛟,翟彩娇,崔士友. 微咸水灌溉滩涂稻田盐分动态及其水稻产量表现[J]. 江苏农业学报,2018,34(4):799–803.
[18] SHRIVASTAVA P,KUMAR R. Soil salinity:a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences,2015,22(2):123–131.
[19] NUMAN M,BASHIR S,KHAN Y,et al. Plant growth promoting bacteria as an alternative strategy for salt tolerance in plants:a review[J]. Microbiological Research,2018,209:21–32.
[20] 徐呈祥,刘兆普,刘友良. 硅在植物中的生理功能[J]. 植物生理学通讯,2004(6):753–757.
[21] RODRIGUES F Á,VALE F X R,KORNDÖRFER G H,et al. Influence of silicon on sheath blight of rice in Brazil[J]. Crop Protection,2003,22(1):23–29.
[22] SEEBOLD K W,KUCHAREK T A,DATNOFF L E,et al. The influence of silicon on components of resistance to blast in susceptible, partially resistant, and resistant cultivars of rice[J]. Phytopathology,2001,91(1):63–69.
[23] KLOTZBÜCHER T,MARXEN A,JAHN R,et al. Silicon cycle in rice paddy fields: insights provided by relations between silicon forms in topsoils and plant silicon uptake [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2016,105(2):157–168.
[24] 于成山. 水稻施硅肥效果研究[J]. 辽宁农业职业技术学院学报,2016,18(2):3–4.
[25] TRIPATHI D K,SINGH V P,GANGWAR S,et al. Role of silicon in enrichment of plant nutrients and protection from biotic and abiotic stresses[M]//Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes. New York:Springer,2013:39–56.
[26] 曾仁杰. 硅肥对水稻产量、品质及抗倒伏特性的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(22):1–4.
[27] 刘春成,李中阳,胡　超,等. 逆境条件下硅肥调控效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2021(4):337–346.
[28] 罗来杨,吴晓峰,刘凯丽,等. 硅肥对优质稻产量、品质及抗倒伏性的影响[J]. 杂交水稻,2023,38(2):149–153.
[29] 吕烈武,郭玉莲,龙笛笛,等. 海南岛典型水稻土施硅肥对水稻产量与品质的影响[J]. 热带作物学报,2024,45(1):87–96.
[30] 李国辉,钟旭华,田　卡,等. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理[J]. 中国农业科学,2013,46(7):1323–1334.
[31] 金正勋,郑冠龙,朱立楠,等. 不同氮钾肥施用方法对水稻产量及抗倒伏性的影响[J]. 东北农业大学学报,2015,46(3):9–14.
[32] 郭相平,黄双双,王振昌,等.不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(5):1–5.
[33] 赵建明,姜兴强,胡　宁. 水稻抗倒伏的材料学特性[J]. 北方水稻,2007,37(3):69–73.
[34] 董明辉,张洪程,戴其根,等. 不同粳稻品种倒伏指数及其相关农艺性状的分析[J]. 吉林农业大学学报,2003,25(2):120–123.
[35] 杨惠杰,杨仁崔,李义珍,等. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系[J]. 福建农业学报,2000,15(2):1–7.
[36] 申广勒,石英尧,黄艳玲,等. 水稻抗倒伏特性及其与茎秆性状的相关性研究[J]. 中国农学通报,2007,23(12):58–62.
[37] 李红娇,张喜娟,李伟娟,等. 超高产粳稻品种抗倒伏性的初步研究[J]. 北方水稻,2008,38(2):22–27.
[38] 张忠旭,陈温福,杨振玉,等. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报,1999,30(2):81–85.
[39] 王秀凤,党立华,都　华,等. 水稻茎秆抗倒性构成因素的研究[J]. 北方水稻,2008,38(2):16–21,39.
[40] 李　杰,张洪程,龚金龙,等. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(11):2234–2243.

[41] 罗茂春,田翠婷,李晓娟,等. 水稻茎秆形态结构特征和化学成分与抗倒伏关系综述[J]. 西北植物学报,2007,27(11):2346–2353.
[42] 孙旭初. 水稻茎秆抗倒性的研究[J]. 中国农业科学,1987,20(4):32–37.
[43] 段传人,王伯初,王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(11):38–40.
[44] 刘红芳,宋阿琳,范分良,等. 高供氮水平下不同硅肥对水稻茎秆特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(3):758–768.
[45] 陈健晓,屠乃美,易镇邪,等. 硅肥对超级早稻茎叶形态与抗倒伏特性的影响[J]. 作物研究,2011,25(3):209–212.
[46] 徐宏书,高　臣,刘俊渤,等. 二氧化硅溶胶制剂对水稻增产的生理效应研究[J]. 中国土壤与肥料,2010(2):59–62.
[47] 郑英杰. 盐胁迫对水稻的影响及水稻耐盐育种研究[J]. 北方水稻,2013,43(5):71–74,80.
[48] 周根友,翟彩娇,邓先亮,等. 盐逆境对水稻产量、光合特性及品质的影响[J]. 中国水稻科学,2018,32(2):146–154.
[49] 胡博文,谷娇娇,贾　琰,等. 盐胁迫对寒地粳稻籽粒淀粉形成积累及产量的影响[J]. 华北农学报,2019,34(1):115–123.
[50] 韦海敏,陶伟科,周　燕,等. 硅素穗肥优化滨海盐碱地水稻矿质元素吸收分配提高耐盐性[J]. 作物学报,2023,49(5):1339–1349.
[51] 龚金龙,胡雅杰,龙厚元,等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(8):1475–1488.
[52] 韩晓楠,孙书洪,马文慧,等.微咸水灌溉下硅肥对水稻生长性状的影响研究[J].节水灌溉,2022(1):74–79,84.
[53] 何文丽,张玉烛,魏中伟.海水胁迫下外源硅对优质高产杂交稻产量及生理特性的影响[J].江苏农业科学,2024,52(12):105–114.
[54] 韦海敏,陶伟科,周　燕,等.硅素穗肥优化滨海盐碱地水稻矿质元素吸收分配提高耐盐性[J].作物学报,2023,49(5):1339–1349.

Effects of Foliar Silicon Fertilizer Application on Stem Morphology, Mechanical Properties, Lodging Resistance and Yield of Rice in Coastal Mudflat

CHE Feiwei[1], CUI Shiyou[1], CHEN Pengjun[2], HAN Jijun[2], ZHANG Rui[1]

(1. Jiangsu Yanjiang Area Institute of Agricultural Sciences, Nantong 226012, China; 2. Jiangsu Geological Bureau / Coastal Saline-alkali Land Ecological Rehabilitation and Sustainable Utilization Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210007, China)

Abstract: The effects of foliar silicon fertilizer application on stem morphology, mechanical properties, lodging resistance and yield of rice in tidal flat were studied. Haiyangyuan No.1(V1) and Nangeng 5055(V2) were used as experimental materials, and 12 treatments were established, including clear water(CK), mineral HA complex silicon fertilizer(T1), sugar alcohol silicon fertilizer(T2), highly active ionic liquid silicon fertilizer(T3), liquid silicon zinc fertilizer(T4), and custom-made silicon fertilizer(T5). Each treatment had two models, involving two applications during the tillering and jointing-heading stages, and three applications during the tillering, jointing-heading, and grain filling stages. The results showed that: 1) Spraying silicon fertilizer can reduce rice plant height and internode length, improve internode roughness, stem wall thickness, and bending resistance, thereby enhancing stem lodging resistance. V1 treated with T4 and T5 has higher bending resistance and lower lodging index, while V2 treated with T3 and T5 on has stronger lodging resistance, and the effect of 3 applications was better than that of 2 applications. 2) Spraying silicon fertilizer can significantly improve rice yield and its constituent factors. Compared with CK, V1 treated with twice and three times increased yield by 3.02% and 5.13%(T1), 5.05% and 7.58%(T2), 2.03% and 2.26%(T3), 6.20% and 8.44%(T4), and 4.88% and 9.47%(T5) respectively, while V2 treated with twice and three times increased yield by 8.57% and 9.46%(T1), 3.48% and 3.62%(T2), 6.08% and 8.28%(T3), 4.02% and 5.12%(T4), and 2.97% and 3.18%(T5) respectively. The increase in yield was mainly due to the combined number of panicles and the number of grains per panicle, among which the number of grains per panicle had a greater effect. The increase of yield was higher after three times of spraying than that after two times of spraying, mainly due to the increase in thousand grain weight and seed setting rate caused by the application of silicon fertilizer during the filling period. 3) Spraying silicon fertilizer reduced rice panicle length and increased grain density, single plant yield, and biomass. V1 sprayed twice and three times with T4, resulting in the highest single plant yield, while V2 sprayed with T1 showed the highest, and the effect of spraying three times was better than twice. The harvest index of both varieties was slightly improved but did not reach a significant level. 4) The effect of spraying silicon fertilizer on the primary and secondary branch traits of rice in mudflat is different with different varieties, especially the number of secondary branches, total grains and full grains. V1 sprayed with T5 was better, V2 sprayed with T2 was better. In summary, there are differences in the promotion effects of different silicon fertilizers on different varieties of rice. Spraying T5 has the best effect on improving the lodging resistance of both varieties, and significantly increases the yield of Haiyangyuan No.1(V1). Nanjing 5055(V2) Sprayed with T1 has the best yield increasing effect.

Key Words: Rice in tidal flat; Application of silicon fertilizer; Morphological and mechanical properties; Lodging resistance; Yield

丁翊东,赖上坤,于居龙,等. 氯虫苯甲酰胺和印楝素配伍对亚洲玉米螟防效和酿酒高粱安全性评价[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):68-72. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.010.

氯虫苯甲酰胺和印楝素配伍对亚洲玉米螟防效和酿酒高粱安全性评价

丁翊东[1],赖上坤[1],于居龙[2],王卫军[1],潘明泉[1],刘晓飞[1],金　倩[1*]
(1. 江苏省农业科学院宿迁农科所,江苏 宿迁 223800;2. 江苏丘陵地区镇江农业科学研究所,江苏 句容 212400)

摘要:化学-生物农药复配已经成为农业上防治作物病虫害的重要手段,但化学农药氯虫苯甲酰胺和生物农药印楝素配伍对亚洲玉米螟防治效果和酿酒高粱安全性的影响尚未明确。通过盆栽试验,比较不同氯虫苯甲酰胺-印楝素组合对亚洲玉米螟防效和酿酒高粱生长情况的影响。结果表明:1)200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂(75 mL/hm²)+0.3%印楝素乳油(1 200 mL/hm²)对亚洲玉米螟的防效最佳,第 1、第 3 和第 7 天的防效与单一施用 200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂(150 mL/hm²)的防效差异均无统计学意义;2)氯虫苯甲酰胺和印楝素单独施用、联合配伍对酿酒高粱的生长均无影响(与对照处理差异无统计学意义)。综上,氯虫苯甲酰胺与印楝素配伍可减少化学农药氯虫苯甲酰胺的使用量,且对高粱植株相对安全。

关键词:生物农药;化学农药;农药联合复配;酿酒高粱
中图分类号:S513　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673-6486-20240060

高粱(*Sorghunm bicolor*)是全球第 5 大粮食作物,与黍稷、谷子和大豆一同构成了我国传统旱作农耕生态农业体系,具有悠久的栽培历史[1-2]。近年来,我国高粱播种面积超过 70 万 hm²,在保障我国粮食安全方面起着不可忽略的作用[2]。除此之外,高粱还被广泛应用于白酒酿造、化工材料和生物能源等产业[3-4]。江苏省在我国白酒产业中占据重要地位,拥有巨大的酿酒高粱种植和消费潜力[4]。然而,亚洲玉米螟(*Ostrinia furnacalis* Guenee)作为酿酒高粱的主要害虫[5-6],其幼虫常蛀食高粱叶片、茎秆和穗柄等部位,使高粱光合效率降低和茎杆倒折率增加,严重降低酿酒高粱的产量和品质[7]。

氯虫苯甲酰胺独特的化学结构能够高效激活鳞翅目昆虫鱼尼汀(肌肉)受体(ryanodine receptor,RyR),促进细胞钙库中的钙离子过度释放致使昆虫瘫痪死亡,而且它还具有药效持效期长和耐雨水冲刷的优势,因而被广泛应用于亚洲玉米螟的防治[8-9]。然而,杀虫剂的不合理使用易造成害虫抗药性增加、作物药剂残留超标及环境污染等一系列问题[10-11]。如:支昊宇等在新疆发现亚洲玉米螟对双酰胺类农药产生了低至中等水平的抗性[9];另有研究表明,氯虫苯甲酰胺在高粱籽粒中的检出率为 25%,最大残留量为 726 μg/kg,影响白酒食品安全[12]。印楝素(Azadirachtin)作为一种植物来源的柠檬苦素类活性物质,可通过抑制昆虫取食、生长发育和诱导细胞自噬凋亡等途径对鳞翅目、膜翅目和鞘翅目等多种农林害虫进行有效防杀[13-14]。夏丽娟等指出,印楝素在高粱上对亚洲玉米螟有良好的防治效果和较长的持效期[15],但生物源农药普遍存在时效差和用量大的弊端[16]。

化学农药与生物农药复配可以兼具 2 种药剂速效性、持久性和生态安全性的优势[17],同时能减少化学药剂的使用量[18-19]。为推动科学用药,合理降低高粱生产中氯虫苯甲酰胺使用量,有效消除农药的负面作用,本研究对化学农药氯虫苯甲酰胺和生物农药印楝素进行不同比例配伍施用,并评估其对亚洲玉米螟的防治效果和酿酒高粱生长安全性的影响,旨在探究氯虫苯甲酰胺和印楝素防治亚洲玉米螟的最佳配伍组合,筛选出氯虫苯甲酰胺用量减半后印楝素的使用量,为化学-生物农药复配理论提供数据支持,并为酿酒高粱绿色防控提供技术指导。

1　材料与方法

1.1　供试药剂

化学农药:200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂(SC),

收稿日期:2024-06-22;修回日期:2024-09-24。
基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2023345);江苏省 333 人才工程项目;"宿迁英才"群英计划青年项目。
作者简介:丁翊东(1997—),男,硕士,研究实习员,主要从事植物保护与作物栽培技术研究。Email: dyd0606888@163.com。
* 通信作者:金　倩(1987—),女,博士,副研究员,主要从事农业昆虫与害虫防治研究。Email: jinhongyu2001@163.com。

美国富美实公司生产；生物农药：0.3%印楝素乳油（EC），成都绿金生物科技有限责任公司生产。上述药剂均为市售获得。

1.2　供试材料

亚洲玉米螟虫卵购于河南省济源白云实业有限公司，室内饲养至 2～3 龄幼虫，饲养条件：昼 / 夜光照时间为 14 h/10 h，温度为（25 ± 1）℃。

试验高粱品种为迁酿（粱）1 号，是由江苏省农业科学院宿迁农科所与江苏洋河酒厂股份有限公司联合选育的酿酒专用糯高粱新品种。

1.3　试验设计及方法

1.3.1　药剂组合。本试验共设计 7 个药剂组合处理和 1 个清水对照处理。药剂用药量详见表 1。

表 1　印楝素与氯虫苯甲酰胺药剂组合配伍表

处理	药剂组合	用量 /（mL/hm²）	备注
T1	200 g/L 氯虫苯甲酰胺 SC	75	药剂减量 50%
T2		150	防治推荐用量
T3	0.3%印楝素 EC	900	药剂减量 25%
T4		1 200	防治推荐用量
T5	200 g/L 氯虫苯甲酰胺 SC+0.3%印楝素 EC	75 + 600	—
T6		75 + 900	—
T7		75 + 1 200	—
T8	清水	—	—

1.3.2　试验方法。本研究盆栽试验设置在江苏省农业科学院宿迁农科所运河湾基地大棚内（118.32°E、33.97°N，海拔 17 m）。酿酒高粱于 2023 年 4 月 3 日播种，20 d 后将幼苗移栽至面积为 0.2 m² 的圆形盆钵内，每盆钵中移植 8 株，共计 32 盆。在酿酒高粱生育过程中，2—4 龄的亚洲玉米螟幼虫通常潜藏于心叶啃食叶片，甚至蛀入茎秆，对酿酒高粱造成严重危害，因此本试验将形态大小一致的 2 龄亚洲玉米螟幼虫接种至每株高粱叶片上，待其达到稳定状态后确保每株保留 2 只亚洲玉米螟幼虫，并用 40 目的纱网罩住盆钵。

参考于居龙等定量喷雾法[20]进行施药并加以改进：根据盆钵面积及表 1 中药剂用量，精准称量药剂后分别装入喷壶，加入清水定量至 15 mL（以田间施药量 750 L/hm² 进行换算）。每个处理 4 次重复，其他栽培管理均保持一致。在喷药后的 1、3、7 d 进行调查，统计每个盆钵中的死虫数，并依据对照处理计算杀虫防效。

评价本试验药剂组合对酿酒高粱安全性的影响，在施药前和施药后 14 d，每个处理中随机测量 8 株高粱株高，计算株高生长速率和株高生长抑制率；在喷药后的 1、7、14 d 分别于每个处理中随机选取 20 株酿酒高粱调查出现枯黄、萎蔫和畸形等药害症状及受害株数。

1.4　数据处理

本研究所有数据均使用 Excel 2019 和 R 语言软件进行统计分析，使用 Origin 2018 软件进行制图。利用 R 语言函数 bartlett.test 对原始数据进行方差齐性检验。采用单因素方差分析和 Tukey–HSD 法比较不同试验处理间虫防效、酿酒高粱植株生长速率和生长抑制率的差异，结果通过 R 语言 aov 函数和 multcomp 包的 glht 函数实现。本研究图表中数据为平均值 ± 标准误，统计分析的显著性水平设定为 $P < 0.05$。本研究所用计算公式如下：

死亡率 = 死亡虫数 / 总虫数 × 100%；

校正杀虫防效 =（处理死亡率 – 对照死亡率）/（100– 对照存活率）× 100%；

株高生长速率 =（施药后株高 – 施药前株高）/ 施药前株高 × 100%；

株高生长速率抑制率 =（对照株高生长速率 – 处理株高生长速率）/ 对照株高生长速率 × 100%。

2　结果与分析

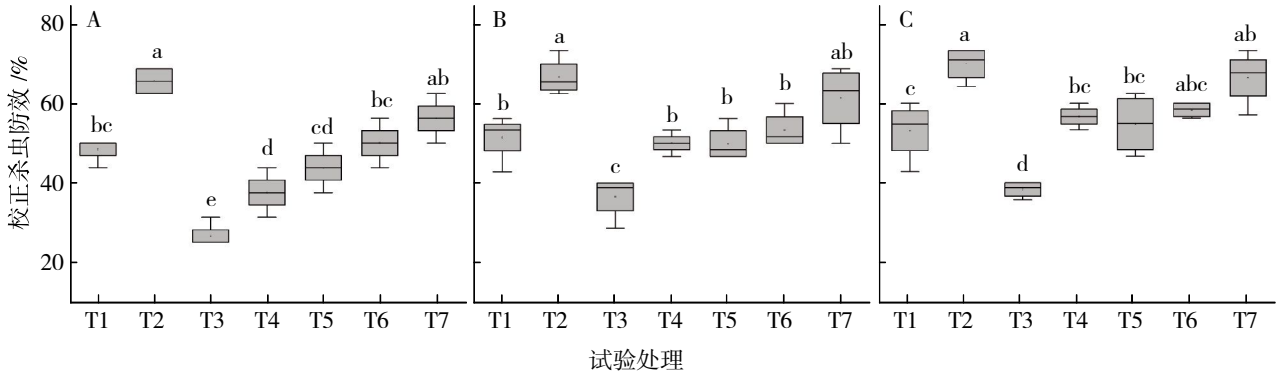
2.1　氯虫苯甲酰胺 – 印楝素配伍对亚洲玉米螟防效的影响

由图 1 可知，各试验处理对亚洲玉米螟均具有一定的杀虫效果。药后 1 d，氯虫苯甲酰胺或印楝素

单用处理防效随着用量增加而增加，其中氯虫苯甲酰胺推荐用量（150 mL/hm²）处理时杀虫防效最高，为 65.63%，显著高于氯虫苯甲酰胺用量减半（75 mL/hm²）处理（48.44%）及单用印楝素处理（900、1 200 mL/hm²）；氯虫苯甲酰胺用量减半并与印楝素配伍使用后，随着印楝素用量增加杀虫防效也在增加，当氯虫苯甲酰胺 + 印楝素用量为 75+1 200 mL/hm² 时，其杀虫效果与氯虫苯甲酰胺 150 mL/hm² 差异无统计学意义（图 1–A）。

药后 3 d，推荐用量下的氯虫苯甲酰胺 150 mL/hm² 处理校正杀虫防效最高，为 66.70%，3 种氯虫苯甲酰胺 + 印楝素组合（75+600、75+900、75+1 200 mL/hm²）间的校正杀虫防效差异无统计学意义，但 75+1 200 mL/hm² 的氯虫苯甲酰胺 – 印楝素组合与氯虫苯甲酰胺 150 mL/hm² 处理校正杀虫防效相当（图 1–B）。

药后 7 d，推荐用量下的氯虫苯甲酰胺 150 mL/hm² 处理校正杀虫防效仍然最高，达到 69.93%，氯虫苯甲酰胺与印楝素配伍使用的 3 种用量下校正杀虫防效分别为 54.79%、58.35%、66.47%，差异无统计学意义，但 75+900、75+1 200 mL/hm² 的氯虫苯甲酰胺 – 印楝素组合与氯虫苯甲酰胺 150 mL/hm² 处理校正杀虫防效之间差异无统计学意义（图 1–C）。



A.药后 1 d；B.药后 3 d；C.药后 7 d。图中不同小写字母表示处理间差异有统计学意义（$P < 0.05$）

图 1　不同试验处理对亚洲玉米螟的防治效果

由表 2 可知，试验 14 d 后高粱株高为 43.38 ~ 46.63 cm，但不同试验处理间植株株高差异无统计学意义。然而，无论是氯虫苯甲酰胺和印楝素单用还是混合施用均对高粱生长产生一定程度的抑制效果，氯虫苯甲酰胺（75、150 mL/hm²）、印楝素（900、1 200 mL/hm²）和氯虫苯甲酰胺 – 印楝素组合（75+600、75+900、75+1 200 mL/hm²）7 个处理对迁酿（粱）1 号的株高生长速率抑制率分别为 10.46%、12.06%、9.03%、10.50%、11.22%、10.55%、12.07%，但影响程度较低且均与对照处理差异无统计学意义。尽管如此，高粱植株株高生长速率抑制率普遍随着药剂用量的增加而呈现增加趋势。另外，施药后 1、7、14 d，未观测到各试验处理高粱植株幼苗出现枯黄、萎蔫和畸形等药害症状，表明氯虫苯甲酰胺与印楝素配伍对酿酒高粱植株无药害影响。

表 2　不同试验处理对高粱植株生长的影响

处理	株高 /cm	株高生长速率 /%	株高生长速率抑制率 /%	药害株数 / 药害级别		
	14 d			1 d	7 d	14 d
T1	43.38 ± 4.50 a	10.18 ± 1.11 a	10.46 ± 7.70 a	0/–	0/–	0/–
T2	45.13 ± 1.46 a	9.77 ± 0.73 a	12.06 ± 7.85 a	0/–	0/–	0/–
T3	45.13 ± 2.59 a	10.11 ± 0.63 a	9.03 ± 6.10 a	0/–	0/–	0/–
T4	46.38 ± 2.88 a	10.07 ± 0.66 a	10.50 ± 3.54 a	0/–	0/–	0/–
T5	44.63 ± 1.85 a	9.86 ± 0.66 a	11.22 ± 6.48 a	0/–	0/–	0/–
T6	44.63 ± 3.50 a	9.85 ± 0.73 a	10.55 ± 8.85 a	0/–	0/–	0/–
T7	44.00 ± 2.67 a	10.03 ± 1.08 a	12.07 ± 6.50 a	0/–	0/–	0/–
T8（CK）	46.63 ± 2.13 a	11.37 ± 0.94 a		0/–	0/–	0/–

注：“–”表示植株生长正常。表中同列数据后不同小写字母表示处理间差异有统计学意义（$P < 0.05$）。

3　讨论

化学－生物农药配伍可提高对农作物病虫害的防治效果，是减少化学药剂使用量的重要途径[17,21]。例如，沈登荣等发现多杀菌素与毒死蜱复配对西花蓟马的防治表现出明显增效[22]，谢明惠等认为药量减半的生物农药（白僵菌和绿僵菌）和化学杀虫剂（吡虫啉和辛硫磷）混用对花生蛴螬的防治效果与常规剂量化学药剂施用无显著性差异[23]。本研究发现，氯虫苯甲酰胺（75 mL/hm^2）和印楝素（1 200 mL/hm^2）联合配伍可在减少 50%化学药剂使用量的条件下对玉米螟产生与氯虫苯甲酰胺（150 mL/hm^2）单一施用相当的防虫效果（图 1）。一定剂量的化学杀虫剂可以降低害虫自身的防御能力，加速生物药剂对目标害虫组织器官的侵染，进而对靶标病虫害产生协防增效的效果[24]。以往研究发现，化学－生物农药复配后毒力增效系数或共毒系数分别可高达几十倍和上千数量级[25-26]。因此，这种协同增效机制可能是本研究氯虫苯甲酰胺－印楝素配伍后可使化学药剂使用量减半而虫防效不减的重要原因，化学和生物农药的协同使用能够充分发挥各自的作用机理和优势[22]，在保证治虫效果的同时降低化学药剂的使用剂量和解决生物农药杀虫时效差的问题[17,19,23]。

以往研究已经证实，印楝素和氯虫苯甲酰胺单独施用均不会影响农作物的生长发育[8,15]。本研究结果也发现，无论是氯虫苯甲酰胺和印楝素单独施用还是两者配伍联用仅对高粱植株生长速率产生不显著的抑制作用（表 2）。然而，不可忽视的是，高粱植株株高生长抑制率普遍随着氯虫苯甲酰胺和 / 或印楝素使用剂量的增加而升高（表 2）。因此，从高粱安全性角度考虑，应尽可能在保持优良防虫效果的同时减少 2 种农药的使用剂量。综合考虑生态效益和社会效益，1 200 mL/hm^2 印楝素（0.3%乳油）+ 75 mL/hm^2 氯虫苯甲酰胺（200 g/L 悬浮剂）组合既满足优良防虫效果要求，又可保证对高粱的安全性，因此，我们推荐在酿酒高粱病虫害防治过程应用此组合。

4　结论

氯虫苯甲酰胺（200 g/L 悬浮剂）与印楝素（0.3%乳油）联合配伍能够在减少 50%氯虫苯甲酰胺使用剂量的同时对亚洲玉米螟产生良好的防治效果，而且两者的配伍联用不会对酿酒高粱植株的生长发育产生威胁。本试验 75 mL/hm^2 氯虫苯甲酰胺和 1 200 mL/hm^2 印楝素配伍组合对玉米螟的防治效果最佳，可以替代高剂量单一氯虫苯甲酰胺的施用。

综上，本研究可为科学合理地筛选化学－生物农药配伍提供数据参考，降低酿酒高粱化学药剂使用量，为绿色防控技术提供理论依据。

参考文献：

[1] 刁现民. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展[J]. 中国农业科学,2019,52(22):3943-3949.

[2] 李顺国,刘　猛,刘　斐,等. 中国高粱产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学,2021,54(3):471-482.

[3] 邹剑秋,王艳秋,柯福来. 高粱产业发展现状及前景展望[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(3):1-8.

[4] 徐　鹏,李春宏,左文霞,等. 江苏省酿酒高粱产业现状与发展趋势[J]. 江苏农业科学,2022,50(9):17-20.

[5] 袁志华,王文强,王振营,等. 亚洲玉米螟的寄主植物种类[J]. 植物保护学报,2015,42(6):957-964.

[6] 黎国翰,张明清,王泽民,等. 玉米螟严重危害杂交高粱[J]. 植物保护,2000,26(2):51-52.

[7] 王振营,鲁　新,何康来,等. 我国研究亚洲玉米螟历史、现状与展望[J]. 沈阳农业大学学报,2000,31(5):402-412.

[8] 董怀玉,侯志研,卢　峰,等. 几种药剂对辽宁高粱主要病虫害的防控效果评价[J]. 农药,2018,57(5):387-390.

[9] 支昊宇,王智慧,王兴仔,等. 亚洲玉米螟的抗药性监测及双酰胺类药剂抗性靶标分子检测[J]. 新疆农业科学,2021,58(4):690-699.

[10] SHARMA A,SHUKLA A,ATTRI K,et al. Global trends in pesticides:a looming threat and viable alternatives[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2020,201:110812.

[11] GOULD F,BROWN Z S,KUZMA J. Wicked evolution: can we address the sociobiological dilemma of pesticide resistance?[J]. Science,2018,360(6390):728-732.

[12] 王金萍,杜瑞恒,籍贵苏,等. 河北酿造高粱籽粒中 7 种常用农药的残留与安全评价[J]. 现代食品科技,2020,36(7):282-288,320.

[13] MORGAN E D. Azadirachtin, a scientific gold mine[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry,2009,17(12):4096-4105.

[14] 徐汉虹,赖　多,张志祥. 植物源农药印楝素的研究与应用[J]. 华南农业大学学报,2017,38(4):1-11.

[15] 夏丽娟,李　靖,梁竟宇,等. 印楝素对亚洲玉米螟的毒力与防效及对寄主作物高粱的安全性评价[J]. 南京农业大学学报,2022,45(3):539-544.

[16] 郭　荣. 我国生物农药的推广应用现状及发展策略[J]. 中国生物防治学报,2011,27(1):124-127.

[17] 徐重新,张江兆,胡晓丹,等. 农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(4):8-15.

[18] 张国彦,郝　瑞,徐永伟,等. 生物农药与减量化学农药联用对草地贪夜蛾的防控效果[J]. 中国植保导刊,2024,44(1):87-89.
[19] 胡　飞,徐婷婷,胡本进,等. 苏云金杆菌 G033A 对化学农药防治草地贪夜蛾的减量效应[J]. 中国生物防治学报,2021,37(6):1103-1110.
[20] 于居龙,缪　康,赵来成,等. 氰氟虫腙与醚菊酯复配对稻飞虱的控制效果及其安全性评价[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):181-185.
[21] 向礼波,石　磊,徐　东,等. 3 种新型生物产品及复配杀菌剂防治小麦赤霉病的研究[J]. 植物保护,2021,47(4):276-281.
[22] 沈登荣,何　超,赵远艳,等. 多杀菌素与 4 种杀虫剂复配对西花蓟马的联合毒力[J]. 江苏农业科学,2017,45(23):91-93.
[23] 谢明惠,陈浩梁,林璐璐,等. 生物农药与化学农药混用对花生蛴螬的减药防控效果[J]. 花生学报,2020,49(2):77-81.
[24] 曹伟平,宋　健,冯书亮,等. 球孢白僵菌与低剂量化学杀虫剂对小菜蛾的协同增效作用[J]. 中国生物防治学报,2018,34(3):370-376.
[25] JIA M,CAO G C,LI Y B,et al. Biochemical basis of synergism between pathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* and insecticide chlorantraniliprole in *Locusta migratoria* (Meyen)[J]. Scientific Reports,2016,6:28424.
[26] 高汝佳,尤春梅,黄沈鑫,等. 不同生物农药及与化学农药复配对桃流胶病菌的毒力[J]. 农药,2016,55(7):536-538,543.

Control Effect of Chlorantraniliprole Combined with Azadirachtin on *Ostrinia furnacalis* and Safety Evaluation for Brewed Sorghum

DING Yidong[1], LAI Shangkun[1], YU Julong[2], WANG Weijun[1], PAN Mingquan[1], LIU Xiaofei[1], JIN Qian[1]
(1. Suqian Institute of Agricultural Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Suqian 223800, China; 2. Jiangsu Hilly Area Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences, Jurong 212400, China)

Abstract: The combination of chemical and biological pesticides has become an important means to control crop diseases and pests in agriculture, but the control effects of chlorantraniliprole combined with azadirachtin on *Ostrinia furnacalis* Guenee and the sasfety for brewed sorghum is still unclear. In this study, we compared the effects of different combinations of chlorantraniliprole-azadirachtin on *Ostrinia furnacalis* Guenee control and the growth of brewed sorghum through a pot experiment. The results showed that: 1) The control effect of 200 g/L chlorantraniliprole (75 mL/hm^2) and 0.3% azadirachtin (1 200 mL/hm^2) combination was the best, and was consistent with that of 200 g/L chlorantraniliprole (150 mL/hm^2) alone at 1, 3, and 7 days after application. 2) The effect of azadirachtin and chlorantraniliprole alone or in combination on sorghum growth were negligible (no significant difference compared with control). Therefore, the combination of chlorantraniliprole and azadirachtin could reduce the amount of chlorantraniliprole, and was safety for brewed sorghum.

Key Words: Biological pesticide; Chemical pesticide; Combination of pesticides; Brewed sorghum

全国优秀农业期刊　CACJ 中国应用型核心期刊

欢迎订阅 2025 年《中国种业》

《中国种业》是由农业农村部主管,中国农业科学院作物科学研究所和中国种子协会共同主办的全国性、专业性、技术性种业科技期刊。

刊物目标定位:以行业导刊的面目出现,并做到权威性、真实性和及时性。主要栏目有:种业论坛、专题综述、种业管理、研究论文、种业研究、品种选育、良种良法等。报道内容范围:最新种业政策、各地种业管理经验、种业企业经营之道、新品种新技术等。信息量大,技术实用。

欢迎投稿、刊登广告

读者对象:各级种子管理、经营企业的领导和技术人员,各级农业科研、推广部门人员,大中专农业院校师生,农村专业户和广大农业生产经营者。

月刊,大 16 开,每期 20 元,全年 240 元。国内统一连续出版物号:CN 11-4413/S,国际标准连续出版物号:ISSN 1671-895X,全国各地邮局均可订阅,亦可直接汇款至编辑部订阅,挂号需每期另加 3 元。

邮发代号:82-132

地　址:(100081)北京市海淀区学院南路 80 号 中国种业编辑部
电　话:010-82105796(编辑部) 010-82105795(广告发行部)　　网　址:https://www.chinaseedqks.cn
E-mail: chinaseedqks@163.com　　微信公众号:中国种业　中国种业资讯
中国种业编辑部 QQ 群:115872093、956938503、247694434　　中国种业读者 QQ 群:289113905

何　龙,陈明佳,何梓彬,等. 优质抗病三系杂交稻新组合福农优 163 的选育及特征特性[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):73-76. https:// doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.011.

优质抗病三系杂交稻新组合福农优 163 的选育及特征特性

何　龙[1],陈明佳[2],何梓彬[1],陈智涛[1],李丽慧[1],赵建文[1*]
(1. 漳州市农业科学研究所,福建 漳州 363000;2. 南安市农业科学研究所,福建 南安 362300)

摘要:福农优 163 是漳州市农业科学研究所利用自育恢复系漳恢 163 与福建省农业科学院选育的三系不育系福农 A 组配育成的三系杂交水稻新组合,于 2020 年 6 月通过福建省农作物品种审定委员会审定(审定编号:闽审稻 20200061)。该品种具有米质优(米质达部颁 2 级米标准)、抗病等特点,适宜在福建省内作晚稻种植。本文主要阐述了该组合的选育经过、主要特征特性、高产栽培要点及杂交种制种技术要点,以期为育种家提供选育思路及品种推广应用提供参考。

关键词:杂交水稻;福农优 163;抗病;优质;新品种选育
中图分类号:S511　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673-6486-20240044

水稻是福建省最主要的粮食作物,随着全省粮食消费量的节节攀升,预计到 2025 年,全省粮食需求将达 1 243 万 t[1],因此,水稻产业发展攸关粮食安全[2]。现今,人们生活水平在提高,物质需求在增长,农业劳动人口在下降,耕地在减少,种植成本在提高,这一系列变局对水稻产业发展提出了更高要求[3]。这意味着不仅需要在有限的耕地里提升水稻产量,还要兼顾品质和抗病性[4],从而提高种粮经济效益和保障粮食安全。面对产业新形势,漳州市农业科学研究所采用“低世代出糙单粒筛选技术”[5]以及施加稻瘟病筛选压力相结合的方法经多代系谱选育出优质抗病恢复系漳恢 163,而后与福建省农业科学院选育的三系不育系福农 A[6]组配,育成米质优(米质达部颁 2 级米标准)、抗病等特点的三系杂交水稻新品种福农优 163,于 2020 年 6 月通过福建省农作物品种审定委员会审定(审定编号:闽审稻 20200061)。

1　福农优 163 选育经过

1.1　不育系福农 A

2008—2013 年期间,福建省农业科学院水稻研究所利用优质抗病水稻品种华航丝苗与三系保持系 福稻 B 进行杂交,从后代中选择株叶形态优良的单株与三系不育系谷丰 A 回交转育,并经田间稻瘟病抗性鉴定,最终于 2013 年选育出株叶形态好、育性稳定、米质优良、抗病的三系不育系福农 A[6]。

1.2　恢复系漳恢 163

恢复系漳恢 163 是漳州市农业科学研究所 2010 年晚季在漳州用漳恢 106(多系 1 号 /06)作母本,与抗病、强恢复力、高配合力的恢复系明恢 63 杂交,从杂交后代 F_2 开始,采用“低世代出糙单粒筛选技术”,即收获穗大粒多且株叶形态优良的单株进行脱粒,取部分脱壳出糙米,淘汰垩白粒数多且垩白度大的单株,选取垩白少的单株脱壳糙米粒进行传代,后在漳州市南靖县船场镇(117°14′E、24°37′N)自然稻瘟病区进行高代株系稻瘟病抗性鉴定筛选,选择稳定、理想株叶型态、优质、抗稻瘟病的株系。2015 年早季选择不同高代株系与龙特浦 A、福农 A 等多个不育系进行测配,同年经过测产与考种,最终筛选出抗稻瘟病、米质优、株叶形态好、茎秆粗壮、制种花粉量大、耐肥等特点的恢复系,定名漳恢 163。2020 年申请植物新品种权保护,申请公告号:CNA039393E。

1.3　组合福农优 163

三系杂交稻新组合福农优 163 的父本恢复系漳恢 163 由漳州市农业科学研究所独立选育,测配母本为福建省农业科学院水稻研究所培育的优质三系不育系福农 A(表 1),该组合是集高产、优质、抗病于一体的三系杂交水稻新品种。2016—2017 年,该

收稿日期:2024-04-25;修回日期:2024-08-14。
基金项目:福建省科技计划引导性项目(2017N0045)。
作者简介:何　龙(1996—),男,硕士,研究实习员,主要从事水稻遗传育种研究。Email: 806676575@qq.com。
* 通信作者:赵建文(1965—),男,高级农艺师,主要从事水稻遗传育种研究。Email: zhaojw1688@qq.com。

组合在龙海区海澄镇、漳浦县石榴镇、诏安县四都镇等地进行品比试验，田间群体表现整齐，大穗大粒，高产稳产，熟期转色好，全生育期无稻瘟和矮缩病发生。2018 年参加福建省科研联合体晚稻品种区域试验，表现高产、优质、抗病；2019 年续试，米质因达到部颁 2 级而破格参加同年福建省科研联合体晚稻生产试验。经过 2 年区域试验和 1 年生产试验，于 2020 年 6 月通过福建省审定（审定编号：闽审稻 20200061）。

表 1　福农优 163 的选育经过

年份及地点	选育经过
2010 年晚季福建漳州	漳恢 106（多系 1 号 /06）× 明恢 63
2011 年早季福建漳州	F_1（自交，混收）
2011 年晚季福建漳州	F_2（自交，选择优良单株，结合“低世代出糙单粒筛选”技术传代）
2012 年早季福建漳州	F_3（自交，选择优良单株，结合“低世代出糙单粒筛选”技术传代）
2012 年晚季福建漳州	F_4（自交，选择优良单株，结合“低世代出糙单粒筛选”技术传代）
2013 年早季福建漳州	F_5（自交，选择优良单株，结合“低世代出糙单粒筛选”技术传代）
2013 年晚季福建漳州	F_6（自交，选择优良稳定株系）
2014 年早季福建漳州南靖	F_7（株系稻瘟病抗性鉴定）
2014 年晚季福建漳州南靖	F_8（株系稻瘟病抗性鉴定）
2015 年早季福建漳州	F_9（与不育系龙特浦 A、福农 A 等测交，进行恢复能力与杂种优势鉴定，编号 R276 入选，定名为‘漳恢 163’）
2015 年晚季福建漳州	漳恢 163 与龙特浦 A、福农 A 等小量制种
2016 年早季福建漳州	组合小区品比试验
2016 年晚季福建漳州	漳恢 163 与福农 A 大面积制种
2017 年福建漳州	进行多地品比试验
2018 年福建	参加福建省区域试验
2019 年福建	同时参加福建省区域试验与生产试验
2020 年福建	通过审定，定名为‘福农优 163’（审定编号：闽审稻 20200061）

2　福农优 163 产量表现

由表 2 可知，2018 年，福农优 163 通过福建省科研联合体晚稻品种区域试验初试，平均产量为 8.00 t/hm^2，比对照宜优 673 增产 4.30%，达极显著水平（$P<0.01$）；2019 年，区域试验与生产试验同步进行，区域试验平均产量 8.42 t/hm^2，比对照增产但不显著；生产试验平均产量为 8.33 t/hm^2，比对照宜优 673 增产 5.31%，达极显著水平（$P<0.01$）。综上，2 年区域试验平均产量为 8.21 t/hm^2，1 年生产试验产量为 8.33 t/hm^2。

表 2　福农优 163 产量表现

年份	试验类型	品种	平均产量 /（t/hm^2）	比 CK 增产 /（t/hm^2）	比 CK 增产 /%
2018	区域试验	福农优 163	8.00**	0.33	4.30
		宜优 673（CK）	7.67	0	0
2019	区域试验	福农优 163	8.42	0.13	1.57
		宜优 673（CK）	8.29	0	0
2019	生产试验	福农优 163	8.33**	0.42	5.31
		宜优 673（CK）	7.91	0	0

注：** 表示较同年对照增产极显著（$P<0.01$）。

3　福农优 163 主要特征性状

3.1　农艺性状

福农优 163 全生育期 125.8 d，比对照宜优 673 早熟 1.2 d，适宜在福建省作晚稻种植。该组合田间群体整齐，植株较高，株型适中，茎粗抗倒，叶色浓绿不早衰，叶姿挺直，穗长粒多，成熟期转色好。有效穗数 205.5 万个 /hm^2，穗长 25.5 cm，每穗总粒数 212.7 粒，结实率 80.99%，千粒质量 26.3 g。

3.2　稻米品质

米样取自福建省农业科学院组织的福建省区域试验点（福建连城），米质检测单位为农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心。2018 年福农优 163 米质检验报告显示：整精米率为 61.2%，糙米率为 82.2%，精米率为 71.1%，粒长为 7.4 mm，长、宽比为 3.3，垩白度为 2.4%，透明度为 1 级，垩白粒率为 13%，胶稠度为 76 mm，碱消值为 6.5 级，直链淀粉含量（质量分数，下同）为 16.5%，蛋白质含量为 6.6%；2019 年米质检验报告显示：整精米率为 59.1%，糙米率为 81.9%，精米率为 72.5%，粒长为 7.2 mm，长、宽比为 3.3，垩白度为 6.4%，透明度为 1 级，垩白粒率为 49%，胶稠度为 78 mm，碱消值为 7.0 级，直链淀粉含量为 19.1%，蛋白质含量为 6.6%。福农优 163 经鉴定达部颁 2 等优质食用稻品种品质标准。

3.3　稻瘟病抗性

田间稻瘟病抗性鉴定在上杭、建阳、宁化、将乐等福建省科研联合体区域试验稻瘟病抗性鉴定点进行，室内苗期抗性鉴定由福建省农业科学院植物保护研究所承担。2018、2019 年，大田抗性均表现为抗（R）叶稻瘟，中抗（MR）穗颈瘟；苗期抗性鉴定均表现为中抗（MR）稻瘟病。最终，福农优 163 鉴定为中抗（MR）稻瘟病。

4　福农优 163 栽培技术要点

4.1　适宜种植区域

福农优 163 适宜在福建省作迟熟晚稻种植。

4.2　适时播种与合理密植

福农优 163 作晚稻种植，在福建省内根据不同纬度和海拔差异，播种时间以 6 月下旬至 7 月中旬为宜。

采取湿润育秧，秧田播种量为 250 ~ 300 kg/hm^2，大田用种量为 19.5 kg/hm^2 左右。播种前要选晴天提前晒种，增强种子活力；使用 25% 咪鲜胺或强氯精浸种消毒，减少种传病害。适宜温、湿度催芽催根；适当稀播，培育多蘖壮秧，秧龄不超过 20 d。

福农优 163 分蘖力弱，基本苗应遵循“靠栽不靠发”的原则，插足基本苗，每穴插 3 粒种子苗，使基本苗保证在 75 万 ~ 90 万株 /hm^2。合理密植，采用 20 cm × 20 cm 或 20 cm × 23 cm 插植规格为宜，更有利于通风透光，提高植株抗逆性，减少病虫害发生，为高产打下坚实基础。

4.3　科学肥水管理

秧田施用含氮量不少于 15% 的复合肥 375 kg/hm^2 作基肥，离乳期（2 叶 1 心期）补充尿素和氯化钾肥各 45 kg/hm^2，送嫁肥于移栽前 4 ~ 5 d 按尿素 120 kg/hm^2 施用。

多年多点的栽培研究结果表明，福农优 163的粒质量和结实率相对稳定，而穗数与穗粒数变幅较大，因此栽培上主攻穗数，兼顾大穗。施肥按照“攻前促蘖，保尾增重”的原则，施足基肥，迟施分蘖肥，巧施穗粒肥。移栽前，本田施尿素 120 ~ 150 kg/hm^2、过磷酸钙 225 ~ 375 kg/hm^2 作基肥，移栽后 12 ~ 15 d，施尿素 75 ~ 105 kg/hm^2，氯化钾 75 ~ 90 kg/hm^2；重施穗肥，移栽后 30 ~ 35 d，施用尿素 90 ~ 120 kg/hm^2，氯化钾 75 ~ 90 kg/hm^2。看苗补施粒肥，破口期，叶色偏淡且天气好，施尿素 30 ~ 45 kg/hm^2，叶色偏绿或天气不好不施。构建水稻合理群体结构，控制最高茎蘖数 525 万个 /hm^2，争取有效穗数达 270 万 ~ 300 万穗 /hm^2，每穗粒数 160 粒以上。

在前期水分管理上，浅水促蘖，湿润稳长；中期够苗搁田，保证理想群体结构；后期复水孕穗，灌浆期采用干湿交替，收割前 5 ~ 7 d 断水，防止早衰，增加粒质量，提高结实率，提高产量。

4.4　病虫害防治

病虫害首要是防，其次是治。福建省病虫害主要是稻飞虱、稻纵卷叶螟、纹枯病、稻瘟病、稻曲病和水稻病毒病等。播种前，秧田消毒采用 90% 三氯异氰尿酸可湿性粉剂 30 g/667 m^2 对水 50 kg 进行喷雾；移栽前，秧田采用 12% 虱螨脲·虫螨腈悬乳剂 120 g/667 m^2、30% 甲霜·恶霉灵水剂 30 g/667 m^2 对水 50 kg 喷施作送嫁药；在孕穗期，稻田采用 40% 稻瘟灵乳油 350 mL/667 m^2 或 25% 咪鲜胺乳油 250 mL/667 m^2 对水 50 kg 喷雾预防稻曲病、穗腐病等；在破口至齐穗阶段，注重螟虫、纹枯病、稻飞虱等防控，采用 12% 甲维·虫螨腈悬乳剂 130 g/667 m^2、5% 阿维菌素水分散粒剂 300 g/667 m^2、240g/L 噻呋酰胺悬乳剂 50 g/667 m^2、30% 烯啶虫胺水分散粒剂 40 g/667 m^2 对水 50 kg 喷雾防治。

5　福农优 163 制种技术要点

5.1　父母本播种差期安排

在福建省漳州市进行早季制种，父本漳恢 163 分 2 期播种，2 期间隔 10 d，第 I 期和第 II 期分别安排在 1 月 10 日左右、1 月 20 日左右播种，母本播期与第 I 期父本日差 55 d 左右，叶差在 5.5 片左右为宜；中季制种，父本第 I 期和第 II 期分别安排在 5 月 20 日、5 月 25 日左右播种，母本播期与 I 期父本日差 30 d 左右，叶差在 3.5 叶左右。

5.2　科学种植与管理

母本的基本苗数关系到群体穗数，而有效穗数主要靠主穗和低位强势蘖成穗，因此，要在一定基本苗范围内尽可能增加穗数并且提高成穗率，从而获取高的制种产量。坚持母本“靠栽不靠发”的原则，秧田培育多蘖壮秧，同时插足基本苗。母本 6 叶左右移栽，父母本同时插秧，父母本行比 2∶(14～16)，行距为 40 cm；父本为大双行栽插，株、行距分别为 20、40 cm，每蔸 2 株栽插；母本株、行距分别为 10、13.3 cm，每蔸插 3 株带蘖秧。

根据苗情，进行水肥动态管理。制种田纯氮用量在 195 kg/hm^2，氮、磷、钾比例以 2∶1∶2 为宜，施肥以“重施底肥、中控、后补”为原则；水分的管理上，应插后露田以促根保叶，苗足晒田以促根保蘖，提高成穗率，种子收获前 1 周断水搁田。

制种田特别要注意稻粒黑粉病，在始花期和盛花期喷施戊唑醇等杀菌剂进行防治，其他常见病虫害根据虫情、病情针对性防控。

5.3　科学喷施赤霉素及人工辅助授粉

科学喷施赤霉素对提升制种产量有显著作用[7]。在母本群体见穗 10%～15%、35%及 55%时各喷施 1 次，喷施时间选择在晴天上午扬花授粉前，各次等量喷施 50～60 g/hm^2，可有效解除母本包茎，提高母本穗粒外露率。采用人工拉绳方式赶粉，见母本盛花时开始赶粉，父本从有粉赶到无粉为止。

5.4　制种田防杂保纯

采用时空隔离法防杂保纯。选择有良好空间隔离、排灌方便的田块进行制种，确保在制种前抽穗扬花前后 25～30 d、附近 100 m 内无其他水稻品种抽穗扬花。秧田、制种田要反复多次去杂，秧田期去除株叶形态不同的杂株，制种田去除抽穗早、花药饱满金黄的保持系和杂株，坚持每天上午扬花前去杂，至盛穗期前彻底去杂干净。母本抽穗完 20 d 左右即可收获，应先收母本、后收父本，同时避免机械混杂。

参考文献：

[1] 白丽月. 福建省粮食需求量预测研究[J]. 农学学报,2016,6(11): 85-89.
[2] 莫伊凡,吴伊宁,余四斌. 绿色超级稻品种培育及其发展[J]. 中国稻米,2022,28(5):7-13.
[3] 徐春春,闻军清,纪　龙,等. 中国水稻种业发展现状、问题与展望[J]. 中国稻米,2022,28(5):74-78.
[4] 郑菲艳,毛莹莹,洪永河,等. 基于高密度基因芯片的福恢 2165 重要农艺性状分子基础解析[J]. 四川农业大学学报,2024,42(3):499-505.
[5] 郭福泰. 优质高产“特优系列”杂交水稻新组合选育及应用[J]. 中国稻米,2012,18(2):69-71.
[6] 涂诗航,连　玲,洪永河,等. 籼型三系不育系‘福农 A’的选育及其综合农艺性状分析[J]. 农业生物技术学报,2024,32(3):701-711.
[7] 王福军,张喜娇,李曙光,等. 优质杂交水稻新组合泰优 305 的高产制种技术[J]. 杂交水稻,2023,38(6):118-121.

Breeding and Characteristics of New Three-line Hybrid Rice Variety Funongyou 163 with High Quality and Disease Resistance

HE Long[1], CHEN Mingjia[2], HE Zibin[1], CHEN Zhitao[1], LI Lihui[1], ZHAO Jianwen[1]
(1. Zhangzhou Institute of Agricultural Sciences, Zhangzhou 363000, China;
2. Nan'an Institute of Agricultural Sciences, Nan'an 362300, China)

Abstract: Funongou 163 is a new three-line hybrid rice combination bred by Zhangzhou Institute of Agricultural Sciences by combining self-bred restorer line Zhanghui 163 with Funong A, a three-line sterile line bred by Fujian Academy of Agricultural Sciences. It was approved by Fujian Crop Variety Appraisal Committee in June 2020 (Approval number: Minshendao 20200061). This variety is characterized by excellent rice quality (2nd grade of high-quality rice standards issued by the Ministry of Agriculture), disease resistance and other characteristics, which is suitable for late rice cultivation in Fujian Province. This paper mainly describes breeding process, the main characteristics, high-yield cultivation points and hybrid seed production technology, in order to provide reference for breeding ideas and varieties popularization and application for breeders.

Key Words: Hybrid rice; Funongyou 163; Disease resistance; High quality; New variety breeding

马　宇,吕二锁,李建波,等. 优质丰产饲草大麦内农科饲用大麦 1 号[J/OL]. 大麦与谷类科学,2024,41(5):77-80. https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2024.05.012.

优质丰产饲草大麦内农科饲用大麦 1 号

马　宇[1],吕二锁[1],李建波[2],巴　图[1],李　涛[1],渠佳慧[1],徐广祥[3],刘　英[4],邢丽伟[5],刘志萍[1*]
(1. 内蒙古自治区农牧业科学院,内蒙古 呼和浩特 010031;2. 内蒙古民族大学,内蒙古 通辽 028043;
3. 巴彦淖尔市农牧业科学研究院,内蒙古 临河区 015000;4. 呼伦贝尔农垦特泥河农牧场有限公司,内蒙古 特泥河 021024;
5. 呼伦贝尔市海拉尔区农牧技术推广中心,内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:内农科饲用大麦 1 号是由内蒙古自治区农牧业科学院于 2006 年以母本蒙啤麦 1 号和父本 99(19)进行有性杂交,通过系谱法多年选育而成的优质饲草大麦新品种(原代号 12PJ-007)。该品种分蘖力强、茎叶茂盛、草产量高,2020、2021 年同时参加了内蒙古自治区大麦新品系区域试验及生产示范,生产示范中鲜草产量平均 2 577.16 kg/667 m^2,营养价值较为丰富,乳熟期全株粗蛋白含量(质量分数,下同)9.91%、粗脂肪含量 2.4%、粗灰分含量 6.5%、中性洗涤纤维含量 41.3%、酸性洗涤纤维含量 29.6%、可溶性总糖含量 1.39%。2022 年通过内蒙古自治区草品种审定委员会审定,审定编号:蒙审 -051-2022。主要介绍了内农科饲用大麦 1 号的选育过程、品种特性以及栽培技术要点,为该品种的大面积推广提供数据支撑。

关键词:饲草大麦;内农科饲用大麦 1 号;优质;丰产
中图分类号:S512.3　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673-6486-20240057

大麦(*Hordeum vulgare* L.)属于禾本科、大麦属,是世界上最早被驯化利用的粮食作物和饲料作物之一,至今已有数千年栽培历史[1-2]。内蒙古自治区是我国畜牧产业发展大省,近年来畜牧产业发展迅速,随着放牧量的增加,天然草地面积持续下降,生态环境恶化,天然草场退化已经成为制约畜牧业发展的重要因素[3]。在以生态优先、绿色发展为导向的新发展理念视域下,大面积发展饲草作物,建植人工草地,是保护天然草场、保护我国生态环境天然屏障和解决畜牧业发展矛盾的重要举措[4]。

作为国际上重要的饲料作物,大麦含有丰富的营养成分,具有较高的饲用价值及综合利用价值,其麦苗、叶片、秸秆、麦芽等均是优质饲料来源[5]。将大麦作为饲料组成成分,既可减轻当前饲料来源不足的问题,又可推进大麦产业经济发展[6]。针对自治区专用型饲草大麦品种缺乏的现状,以培育抗旱、耐瘠薄、适应性强、品质优为主要育种目标,通过有性杂交,利用系谱法选育出了适应性强、产量高、适口性强的大麦新品种——内农科饲用大麦 1 号。作为中性洗涤纤维低于 42%、酸性洗涤纤维低于 30%的优良饲草,它填补了自治区饲草大麦品种空白,缓解了自治区春夏之交优质牧草短缺现状,为自治区畜牧业的稳步发展提供了品种支撑。

1　内农科饲用大麦 1 号选育经过

内农科饲用大麦 1 号,原代号 12PJ-007,是用母本蒙啤麦 1 号和父本 99(19)进行有性杂交,通过系谱法经多年选育而成的优质饲草大麦新品种,选育过程如图 1 所示。

2　内农科饲用大麦 1 号品种特性

由表 1 可知,内农科饲用大麦 1 号为禾本科大麦属 1 年生草本植物,春性,二棱皮大麦,须根系,幼苗直立,分蘖数 2 ~ 5 个 / 株;成熟期株高平均 80.5 ~ 105.7 cm,株型松散,穗层一致;叶条形,下垂,叶色深绿,旗叶长 12.0 ~ 16.8 cm,旗叶宽 0.85 ~ 1.05 cm,倒 2 叶长 22.5 ~ 26.0 cm,倒 2 叶宽 1.4 ~ 1.6 cm,全株叶片数 5 片;穗长 8.0 ~ 9.2 cm,穗姿直立,齿芒,单株穗数 2 ~ 5 个,穗粒数 24 ~ 28 粒 / 穗,千粒质量43 ~ 49 g;

收稿日期:2024-06-12;修回日期:2024-09-10。
基金项目:内蒙古农牧业青年创新基金(2023QNJJN04);国家大麦青稞产业技术体系(CARS-05)。
作者简介:马　宇(1993—),女,硕士,助理研究员,主要从事大麦遗传育种研究。Email: mayu3991@163.om。
* 通信作者:刘志萍(1962—),女,硕士,研究员,主要从事大麦育种与栽培技术研究。Email: lllzp2004@126.om。

籽粒椭圆型，粒色淡黄，种皮薄，腹沟深；全生育期 80 ~ 99 d，中晚熟，刈割期（乳熟期）65 d 左右。

2006 年　蒙啤麦 1 号 × 99（19）
↓
2007 年　F_1，鉴定真假杂种，淘汰伪劣株，选择单株 5 株
↓
2008 年　F_2（5 行），选择各类型优良单株 11 株
↓
2009 年　F_3（11 行），决选 3 行，选择株高较高、分蘖多、穗长、叶量大的优良单株 18 株
↓
2010 年　F_4（18 行），选择株高较高、分蘖多、穗长、叶量大的优良的株行 1 行，筛选优良单株 5 株
↓
2011 年　F_5（5 行），选优去劣，决选 2 行，株行混合收获出圃
↓
2012 年　F_6，进入到高代品系产量鉴定试验，形成性状稳定的新品系
↓
2014 年　F_7，加代繁种
↓
2016 年　F_8，加代繁种
↓
2018—2019 年　F_9—F_{10}，参加内蒙古自治区大麦新品系比较试验，综合性状较好
↓
2020—2021 年　F_{11}—F_{12}，参加内蒙古自治区大麦新品系区域试验及生产示范，综合性状较好

图 1　内农科饲用大麦 1 号选育系谱图

表 1　内农科饲用大麦 1 号特征特性

特征特性	内农科饲用大麦 1 号
生育期 /d	80 ~ 99
幼苗形态	直立
株高 /cm	80.5 ~ 105.7
株型	松散
分蘖力	强
分蘖数 /（个 / 株）	2 ~ 5
叶片数 /（片 / 株）	5
旗叶长 /cm	12.0 ~ 16.8
旗叶宽 /cm	0.85 ~ 1.05
倒 2 叶长 /cm	22.5 ~ 26.0
倒 2 叶宽 /cm	1.4 ~ 1.6
穗长 /cm	8.0 ~ 9.2
芒性	齿芒
单株穗数 / 个	2 ~ 5
穗粒数 /（粒 / 穗）	24 ~ 28
千粒质量 /g	43 ~ 49

3　内农科饲用大麦 1 号生产性能

如表 2 所示，区域试验（通辽市、乌兰察布市、巴彦淖尔市、呼和浩特市）中内农科饲用大麦 1 号鲜草产量平均为 2 775.6 kg/667 m^2，较对照蒙啤麦 4 号增产 11.68%，较母本蒙啤麦 1 号增产 5.91%；干草产量为 833.44 kg/667 m^2，较对照蒙啤麦 4 号增产 8.77%，较母本蒙啤麦 1 号增产 4.71%；种子产量为 401.04 kg/667 m^2，较对照蒙啤麦 4 号增产 7.82%，较母本蒙啤麦 1 号增产 5.13%。

由表 3 可知，生产试验（通辽市、丰镇市、巴彦淖尔市）中内农科饲用大麦 1 号鲜草产量、干草产量及种子产量较对照品种均具有统计学意义或高度统计学意义，其中鲜草产量平均为 2 577.16 kg/667 m^2，较对照蒙啤麦 4 号增产 13.44%，较母本蒙啤麦 1 号增产 10.20%；干草产量为 703.38 kg/667 m^2，较对照蒙啤麦 4 号增产 9.43%，较母本蒙啤麦 1 号增产 7.72%；种子产量为 345.71 kg/667 m^2，较对照蒙啤麦 4 号增产 9.49%，较母本蒙啤麦 1 号增产 7.93%。

4　内农科饲用大麦 1 号营养品质分析

为保证饲草品质及产量双优，在乳熟期对饲草样品进行取样（留茬高度为 6 cm 左右），委托内蒙古自治区农产品质量安全综合检测中心对大麦全株的粗蛋白、水分、粗脂肪、粗灰分、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性总糖质量分数等进行检测。由表 4 可知，内农科饲用大麦 1 号粗蛋白质量分数为

9.91%，粗脂肪质量分数为 2.4%，粗灰分质量分数为 6.5%，中性洗涤纤维质量分数为 41.3%，酸性洗涤纤维质量分数为 29.6%，可溶性总糖质量分数为 1.39%，其中中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维质量分数明显低于对照蒙啤麦 4 号、蒙啤麦 1 号，更有助于提高动物消化机能，增加采食量。

表 2　内农科饲用大麦 1 号品种区域试验产量

试验地点	项目	产量 /(kg/667 m²)			较 CK 增 /%
		内农科饲用大麦 1 号	蒙啤麦 4 号(CK)	蒙啤麦 1 号(母本)	
呼和浩特市	鲜草	2 893.10 aA	2 630.27 cB	2 737.77 bB	9.99
	干草	923.49 aA	898.29 aA	927.07 aA	2.81
	种子	440.16 aA	434.95 aAB	411.10 bB	1.20
巴彦淖尔市	鲜草	2 910.75 aA	2 531.26 cC	2 741.77 bB	14.99
	干草	837.74 aA	748.86 bB	820.53 aA	11.87
	种子	479.83 aA	452.87 cB	464.73 bAB	5.95
通辽市	鲜草	2 699.82 aA	2 388.25 cB	2 559.92 bA	13.05
	干草	861.92 aA	756.67 cB	814.84 bAB	13.91
	种子	362.07 aA	305.81 cC	345.52 bB	18.40
乌兰察布市	鲜草	2 598.75 aA	2 391.31 bB	2 443.55 bB	8.67
	干草	710.61 aA	661.05 bAB	621.40 cB	7.50
	种子	322.10 aA	294.24 bA	304.49 abA	9.47
平均	鲜草	2 775.60 aA	2 485.28 cC	2 620.75 bB	11.68
	干草	833.44 aA	766.22 bB	795.96 bAB	8.77
	种子	401.04 aA	371.97 cC	381.46 bB	7.82

注：表中同行数据后不同小写字母表示差异有统计学意义（$P<0.05$），不同大写字母表示差异有高度统计学意义（$P<0.01$）。下同。

表 3　内农科饲用大麦 1 号品种生产试验产量结果

试验地点	项目	产量 /(kg/667 m²)			较 CK 增 /%
		内农科饲用大麦 1 号	蒙啤麦 4 号(CK)	蒙啤麦 1 号(母本)	
通辽市	鲜草	2 578.74 aA	2 307.79 cC	2 424.97 bB	11.74
	干草	665.46 aA	634.04 bA	650.56 abA	4.96
	种子	319.66 aA	303.44 cC	307.56 bB	5.34
丰镇市	鲜草	2 516.97 aA	2 278.33 bB	2 337.98 bB	10.47
	干草	679.21 aA	649.15 bA	643.65 bA	4.63
	种子	303.41 aA	278.14 cB	289.54 bAB	9.09
巴彦淖尔市	鲜草	2 635.77 aA	2 229.22 bB	2 252.65 bB	18.24
	干草	765.47 aA	645.18 cB	664.67 bB	18.65
	种子	414.08 aA	365.68 bB	363.84 bB	13.24
平均	鲜草	2 577.16 aA	2 271.78 cB	2 338.53 bB	13.44
	干草	703.38 aA	642.79 bB	652.96 bB	9.43
	种子	345.71 aA	315.75 cB	320.31 bB	9.49

表 4　乳熟期内农科饲用大麦 1 号全株营养品质

品种	内农科饲用大麦 1 号	蒙啤麦 4 号(CK)	蒙啤麦 1 号(母本)
粗蛋白质量分数 /%	9.91	10.41	10.03
水分质量分数 /%	10.1	18.2	18.2
粗脂肪质量分数 /%	2.4	2.8	2.3
粗灰分质量分数 /%	6.5	6.4	7.6
中性洗涤纤维质量分数 /%	41.3	47.3	45.2
酸性洗涤纤维质量分数 /%	29.6	35.2	34.2
可溶性总糖质量分数 /%	1.39	3.06	1.36

5　内农科饲用大麦 1 号栽培技术要点

内农科饲用大麦 1 号一般在 3 月中旬至 5 月中旬播种,播种方法为条播,行距 10 ~ 15 cm,播种量 14 ~ 17 kg/667 m^2,播种深度 3 ~ 5 cm。播前需精细整地,施入适量底肥,精选种子并进行药剂拌种。2 叶 1 心至 3 叶 1 心浇第 1 水,并追施尿素 7.5 ~ 10.0 kg/667 m^2,孕穗至灌浆期根据降雨情况浇水 1 ~ 2 次,分蘖期进行化学除草,乳熟期收获饲草。如要进行种子生产,需选择无霜期 100 d 以上的地区。

参考文献:

[1] 吕二锁,巴　图,郭呈宇,等. 内蒙古东部旱区大麦新品种蒙啤麦 5 号播期与密度效应分析[J]. 大麦与谷类科学,2018,35(6):17-20.

[2] 王勇生,王　博,雷　恒. 大麦的营养价值与提高其畜禽利用率的措施[J]. 中国饲料,2014(4):18-22.

[3] 文　明,永　海. 内蒙古畜牧业高质量发展现状、面临的挑战及对策研究[J]. 内蒙古社会科学,2022,43(2):205-213.

[4] 王亦菲,张述伟,宗营杰,等. 优良饲草大麦 DH 株系的创制及品质评价[J]. 中国草地学报,2022,44(11):39-46.

[5] 赵　斌,季昌好,孙　皓,等. 大麦茎、叶、穗对饲草产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(7):865-870.

[6] 段琼辉,秦　枫,李　永. 大麦的营养价值及其在畜禽饲料中的应用[J]. 畜牧与饲料科学,2019,40(7):48-49.

Neinongke Forage Barley No.1, A New Forage Barley Variety with High Quality and Yield

MA Yu[1], LYU Ersuo[1], LI Jianbo[2], BA Tu[1], LI Tao[1], QU Jiahui[1], XU Guangxiang[3], LIU Ying[4], XING Liwei[5], LIU Zhiping[1]

(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 2. Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028043, China; 3. Bayannur Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Linhe 015000, China; 4. Hulunbuir Agricultural Reclamation Tenihe Farm Co., Ltd., Tenihe 021024, China; 5. Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center of Hailaer District in Hulunbuir City, Hulunbuir 021000, China)

Abstract: Neinongke forage barley No.1 is a new high-quality forage barley variety (original code: 12PJ-007), which was bred by the Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences using Mengpi mai No.1 as the maternal parent and 99 (19) as the paternal parent through sexual hybridization and pedigree selection in 2006. This variety has advantages such as strong tillering ability, lush stems and leaves, and high grass yield. Regional trials and production demonstrations of new barley lines in Inner Mongolia Autonomous Region were conducted simultaneously in 2021 and 2022. In the production demonstrations, the average fresh grass yield was 2 577.16 kg/667 m^2, and the nutritional value was relatively rich. During the milk ripening period, the whole plant had a crude protein content of 9.91% (mass fraction, the same below), a crude fat content of 2.4%, a crude ash content of 6.5%, a neutral detergent fiber content of 41.3%, an acidic detergent fiber content of 29.6%, and a soluble total sugar content of 1.39%. It was approved by the Inner Mongolia Autonomous Region Grass Variety Approval Committee in 2022, and approval number is Mengshen-051-2022.This article mainly introduces the breeding process, variety characteristics, and cultivation techniques of Neinongke forage barley No.1, so as to provide strong data support for the large-scale promotion of this variety.

Key Words: Forage barley; Neinongke forage barley No.1; High quality; High yield