秦思敏,徐雯钰,雷芫芫,等. 植物 C2 结构域蛋白在玉米非生物逆境胁迫中的功能研究进展[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):1-7(2026-09-29). DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.001.

植物 C2 结构域蛋白在玉米非生物逆境胁迫中的功能研究进展

秦思敏,徐雯钰,雷芫芫,丁双成*,王宏伟*
[农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室(部省共建)/ 长江大学农学院,湖北 荆州 434025]

摘要:C2 结构域蛋白(C2DPs)是植物响应环境变化的重要调节因子。基于结构域组成、序列同源性及功能特化结构,玉米 C2 结构域蛋白可分为 ZmC2s、ZmMCTP、ZmSRC2L 和 ZmCAR 四个非酶类家族。已有研究证明,在玉米(*Zea mays*)中,C2DPs 通过其保守的 C2 结构域感知胞内 Ca^{2+} 信号并转移至质膜,作为支架蛋白招募核心信号组分以应对干旱、高温和盐碱等胁迫。本文系统综述了玉米 C2 结构域蛋白的结构特征、分类及在非生物逆境胁迫中的功能研究进展,为深入解析其信号传导网络及作物抗逆遗传改良提供理论参考。

关键词:C2 结构域蛋白;生长发育;逆境胁迫;钙信号
中图分类号:S513　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20260065

C2 结构域蛋白 (C2 domain proteins,C2DPs)是真核生物中一类依赖钙离子实现膜结合的蛋白家族,其核心特征是由约 130 个氨基酸残基折叠而成的 C2 结构域。该结构域首次在哺乳动物蛋白激酶 C(PKC)中被发现,其得名原因在于它是该酶四个保守结构域中的第二个。C2 结构域通过其保守的天冬氨酸残基,在钙离子参与下与膜磷脂特异性结合,使蛋白锚定至膜系统并且启动下游信号转导,因而它是连接钙信号以及膜功能的关键分子开关。在植物中,C2 结构域蛋白广泛参与囊泡运输、信号转导及逆境响应等多种生理过程,是植物细胞信号网络中的重要功能模块[1]。相较于拟南芥、水稻等模式植物,玉米 C2 结构域蛋白的研究起步较晚。直到 2023 年,黄钰杰等首次从玉米参考基因组 B73 中系统鉴定出 95 个 *ZmC2s* 基因,并根据其物理坐标的先后顺序命名为 *ZmC2-1* 至 *ZmC2-95*,由此揭开了玉米 C2 结构域蛋白家族系统性研究的序幕[2]。在此基础上,玉米 C2 结构域蛋白的功能解析也取得了重要进展:*ZmC2-15* 被证实通过激活抗氧化酶系统调控玉米耐热性[2];Liu 等对 ZmSRC2L(*Zea mays* suppressor of regulator of cell death 1 2 like)家族进行了系统分析,发现 *ZmSRC2L2* 特异性调控抗旱性,而 *ZmSRC2L5* 和 *ZmSRC2L8* 则对高温和冷胁迫均有响应[3];有学者鉴定出 *ZmMIK2-ZmC2DP1* 负调控模块,揭示了受体激酶与 C2 蛋白协同调控玉米抗旱耐盐的新机制[4]。这些研究表明,玉米 C2 结构域蛋白家族成员在非生物胁迫响应中已发生功能分化,成为玉米抗逆遗传改良的重要靶点。

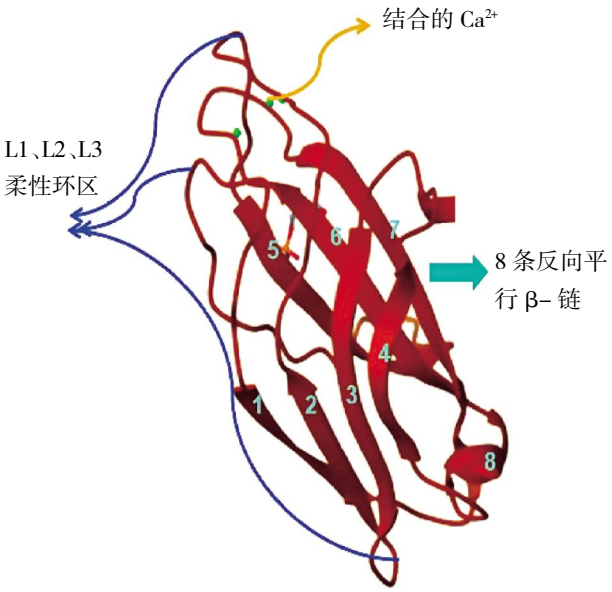
尽管上述研究取得了重要进展,但与拟南芥、水稻等物种相比,玉米 C2 结构域蛋白的系统性功能研究仍较为薄弱,尤其在高温、低温、盐碱等多重非生物胁迫中的调控网络尚不清晰。为此,本文将从玉米 C2 结构域蛋白的结构特征、分类以及非生物逆境胁迫响应功能来阐述其研究进展。

1　玉米 C2 结构域蛋白的结构特征

C2 结构域蛋白广泛存在于真核生物,且核心由约 130 个氨基酸折叠为八条反向平行 β-链构成[5]。L1、L2、L3 三个柔性环区位于 β-链顶端且是其功能核心,而 L1 和 L3 富含保守天冬氨酸残基并且共同构成 Ca^{2+} 结合腔(图 1)。胞质 Ca^{2+} 浓度升高使得 Ca^{2+} 与天冬氨酸发生配位结合,继而导致蛋白表面静电势重排并暴露疏水和正电荷残基,从而驱动蛋白识别,结合带负电荷的磷脂酰丝氨酸和磷脂酰肌醇磷酸,最终实现可逆膜定位[6]。另外,部分 C2 结构

收稿日期:2026-06-22;修回日期:2026-09-10。
基金项目:国家自然科学基金(32372060)。
作者简介:秦思敏(2002—),女,硕士生,主要从事玉米逆境胁迫分子研究。Email: 2638249771@qq.com。
* 通信作者:丁双成(1988—),女,博士,教授,主要从事玉米逆境胁迫分子研究,Email: shchding@yangtzeu.edu.cn;王宏伟(1985—),男,博士,副教授,主要从事玉米耐非生物胁迫的遗传机理研究,Email: wanghw@yangtzeu.edu.cn。

域还能通过环区碱性氨基酸簇直接与膜磷脂极性头部静电结合，以不依赖 Ca^{2+} 的方式完成膜锚定，并且对磷脂酰肌醇磷酸具有一定选择性[7]。两种膜结合模式并存，使得 C2 结构域蛋白能够灵活响应不同信号且动态调控膜 – 质穿梭。



以 PDB ID: 1RSY 为例，展示其由 8 条反向平行的 β – 链折叠形成的核心拓扑结构，以及顶端由 L1、L2、L3 柔性环构成的 Ca^{2+} 结合口袋，紫色小球代表结合的钙离子。该图通过 RCSB PDB 在线工具渲染生成

图 1　典型的 C2 结构域三维空间结构

2　玉米 C2 结构域蛋白的分类

基于结构域组成、序列同源性及功能特化结构，玉米 C2 结构域蛋白可分为 ZmC2s、ZmMCTP（*Zea mays* multiple C2 domain and transmembrane region proteins）、ZmSRC2L 和 ZmCAR（*Zea mays* C2–domain abscisic acid–related protein）四个非酶类家族[8]。由于结构域组成、跨膜特征及功能特化结构的差异（图 2），玉米 C2 结构域蛋白各家族在表达模式与功能调控上表现出明显的分化。ZmC2s 家族成员数量最多，共 95 个，同时其结构域组成涵盖单 C2 到多 C2 等不同类型。家族成员 *ZmC2–15* 定位于细胞质、核膜以及内质网，其抗氧化酶系统被激活进而导致玉米耐热性受到正调控[2]。ZmMCTP 家族包含 17 个成员，为多 C2 结构域，且是跨膜结构域类型，同时因多数成员缺乏内含子的特点，可能赋予其快速响应环境信号的能力，其主要功能是参与细胞内、外信号的跨膜转导[9]。ZmSRC2L 家族含有 15 个成员，拥有特化的 C2_SRC2_like 结构域，其启动子区富含胁迫响应元件且家族成员功能发生分化，如 *ZmSRC2L2* 是特异性调控抗旱性的成员[10]。同时 *ZmSRC2L5* 和 *ZmSRC2L8* 则是对高温以及冷胁迫均有响应的成员。ZmCAR 蛋白则因在 C2 结构域之外含有一个植物特有的“sig 结构域”而功能特化，属于单 C2 结构域蛋白中的特化亚类[11]。该结构域使其能够作为膜支架招募 ABA 信号通路组分，在 ABA 信号转导、蓝光响应和铁营养吸收中发挥核心作用。

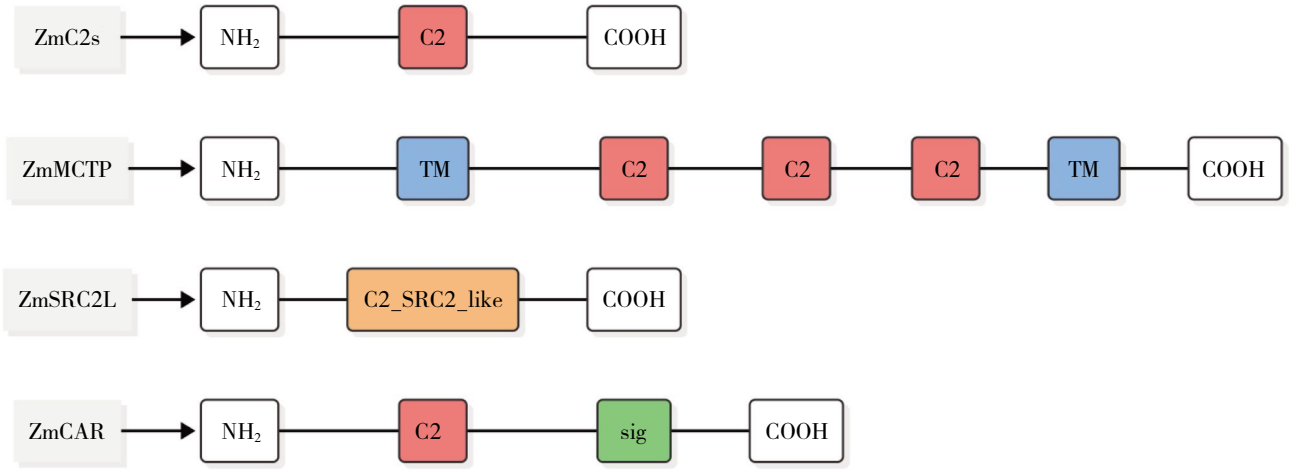


图 2　玉米 C2 结构域蛋白的分类结构

3　玉米 C2 结构域蛋白在非生物胁迫中的功能

3.1　C2 结构域蛋白在高温胁迫中的功能

高温胁迫严重影响玉米的生长发育，尤其在开花授粉期最为敏感[12]。C2 结构域蛋白在植物耐热性调控中发挥重要作用。ZmC2s 家族是玉米 C2 结构域蛋白中成员数量最多（95 个）、结构多样性最丰富的家族。候选基因关联分析表明，*ZmC2-15*、*ZmC2-60* 和 *ZmC2-91* 是玉米苗期耐热性的重要候选基因，并且 *ZmC2-15* 是与耐热性关联最为显著的成员。此项发现，首次将玉米 C2 结构域蛋白与高温胁迫响应直接关联[2]。后续研究显示，*ZmC2-15* 在高温胁迫下显著上调表达，其编码蛋白定位于细胞质、核膜以及内质网，这种亚细胞定位模式暗示该蛋白可能参与多个亚细胞区室间的信号转导，研究者通过构建过表达 *ZmC2-15* 转基因株系和 *zmc2-15* 插入突变体，并进行高温表型试验，证实 *ZmC2-15* 是玉米耐热性的正调控因子；它可能通过激活抗氧化酶系统清除活性氧、减轻氧化损伤，从而维持细胞稳态与光合功能[13]。

MCTP 家族的典型特征是含有多个 C2 结构域和跨膜结构域。该家族成员多为 *intronless* 基因，这种结构特征可能赋予其快速响应环境信号的能力。转录组表达分析显示，17 个 *ZmMCTP* 基因在高温胁迫下呈现差异化的表达模式，部分成员在热胁迫处理后显著上调表达，提示其可能参与高温信号的感知与转导[14]。由于 ZmMCTP 蛋白含有跨膜结构域，其可能定位于质膜，作为膜受体或膜相关信号分子，将胞外高温信号转化为胞内钙信号，进而启动下游热激响应基因的表达。

SRC2-like 家族是玉米中另一类含有 C2 结构域的蛋白家族。全基因组水平上已鉴定出 15 个 *ZmSRC2L* 基因，热胁迫处理使得 *ZmSRC2L5* 和 *ZmSRC2L8* 显著上调表达，但 *ZmSRC2L2* 对高温无显著响应[3]。此研究说明该家族成员在进化过程中发生功能分化。*ZmSRC2L* 基因启动子区富含热激响应元件（HSE），同时预测该启动子受 ERF 和 MYB 等转录因子调控，因而可能参与热激蛋白（HSPs）的协同调控[15]。不过 *ZmSRC2L5* 和 *ZmSRC2L8* 调控耐热性的具体机制仍有待试验验证。

ZmCAR 蛋白是与拟南芥 CAR 同源的玉米 C2 结构域蛋白家族成员，属于单 C2 结构域蛋白中的特化亚类，其核心特征是在 C2 结构域之外含有植物特有的“sig 结构域”，该结构域赋予其独特的信号整合能力[16]。目前尚没有直接证据证明 ZmCAR 参与玉米高温胁迫响应，不过在拟南芥中，同源蛋白 AtCAR1/AtCAR9 是 ABA 信号通路的核心膜支架，这些蛋白通过招募 ABA 受体以及下游 PP2C 和 SnRK2 激酶至质膜微域形成信号模块，从而正向调控 ABA 敏感性[17-18]。

综上所述，ZmC2s 家族成员 ZmC2-15 是一个正调控因子，该蛋白在高温胁迫下显著上调表达，它通过激活抗氧化酶系统，使得过量活性氧被清除，且光系统Ⅱ恢复功能被强化，进而减轻氧化损伤并维持细胞稳态与光合效率[2]。SRC2-like 家族成员在高温胁迫下功能分化明显，如 *ZmSRC2L5* 和 *ZmSRC2L8* 在热胁迫后显著上调表达，其启动子区富含热激响应元件 HSE，提示它们受 ERF 和 MYB 等转录因子调控，参与热激蛋白协同调控[3]，但具体机制有待试验验证。MCTP 家族部分成员在高温胁迫下表达上调，这些成员可能定位于质膜，参与高温信号感知与转导，将胞外信号转化为胞内钙信号并且启动下游热激响应基因表达[14]。ZmCAR 蛋白尚无直接证据参与玉米高温胁迫响应，不过该蛋白是 ABA 信号通路的核心膜支架，并且在拟南芥同源蛋白中通过招募 ABA 受体及下游 PP2C 和 SnRK2 激酶至质膜微域形成信号模块，进而正向调控 ABA 敏感性[18]，故推测 ZmCAR 通过调控 ABA 信号传递效率间接影响热胁迫适应能力。上述研究揭示了玉米 C2 结构域蛋白四大家族在高温胁迫响应中的功能多样性，为进一步解析其分子机制及耐热遗传改良提供了重要依据。

3.2　C2 结构域蛋白在干旱胁迫中的功能

干旱是制约玉米生产的主要非生物胁迫因子之一。近年来的研究揭示了 C2 结构域蛋白在玉米抗旱性调控中的关键作用。河南省农业科学院刘文峰研究员团队共识别出 15 个 *ZmSRC2L* 基因，并对其进行启动子分析，结果表明 *ZmSRC2L* 基因启动子区是富含 ABA 响应元件（ABRE）、干旱响应元件（DRE）以及 MYB 结合位点等胁迫相关顺式作用元件的区域，同时该团队关于 *ZmSRC2L* 的亚细胞定位结果表明，ZmSRC2L 蛋白分布于多个细胞区室故而可能参与复杂的信号转导网络[3]。Ds 转座子插入突变体分析的结果显示，*ZmSRC2L2* 的功能缺失特异性损害玉米抗旱性，突变体在干旱胁迫下存活率显著降低且失水速率加快，不过其对高温和冷胁迫无显著响应[19]。

ZmC2DP1 是 ZmC2s 家族的重要成员并且是玉米干旱胁迫响应中的关键负调控因子。中国农业大学团队鉴定出由 LRR（leucine-rich repeat）受体激酶 ZmMIK2 与 C2 结构域蛋白 ZmC2DP1 组成的负调控模块，首次在玉米中揭示 ZmC2s 家族参与干旱胁迫响应的分子机制；Y2H、BiFC 和 CoIP 证实二者体

内互作，ZmMIK2 胞内激酶结构域介导 ZmC2DP1 磷酸化并可能增强其稳定性，且二者均在根中高表达，同时构建 ZmMIK2 过表达株系；结果表明 ZmMIK2显著增加干旱敏感性，而 ZmMIK2 和 ZmC2DP1 敲除株系均增强抗旱性，后者还表现为存活率更高、生长状态更好和失水速率更低[20]。上述结果证实，ZmMIK2 与 ZmC2DP1 形成的信号模块作为负调控因子，共同参与玉米干旱胁迫响应。值得注意的是，该模块同时也参与盐胁迫响应，表明 ZmC2DP1 可能在多重非生物胁迫中发挥功能，这与 C2 结构域蛋白作为逆境信号“转接器”的保守功能相一致。

CAR 蛋白是 C2 结构域蛋白家族 I 亚组中的特化成员，由于其含有植物特有的“sig 结构域”而具备独特的信号整合能力[21]。Shi 等发现，玉米 ZmCAR11 与NAC 转录因子 ZmSNAC1、ZmNAC19 形成蛋白复合物，协同正向调控玉米耐旱性。为解析其机制，他们用RNA-Seq 和 ChIP-Seq 鉴定出 ZmSNAC1 直接结合下游靶基因 *ZmATL2C* 和 *ZmGPT2*，并证明干旱下 *ZmATL2C* 显著上调、过表达可增强抗旱性；又用 Y2H、BiFC 和 CoIP 证实三者发生物理互作，形成转录复合物协同激活 ZmATL2C，进而优化根系发育、提高水分吸收，最终增强玉米干旱适应能力[16]。该研究不仅首次揭示了 ZmCAR11 作为正调控因子参与玉米抗旱性的分子机制，还构建了 ZmSNAC1-ZmNAC19-ZmCAR11 协同调控网络，为理解 C2 结构域蛋白在转录调控层面的功能提供了新视角。

相较于 ZmSRC2L 和 ZmCAR 家族，ZmC2s 家族和 MCTP 家族在玉米干旱胁迫中的功能研究仍较为有限。虽有研究系统鉴定了 95 个 *ZmC2s* 基因，但其研究主要聚焦于高温胁迫响应，ZmC2s 家族成员在干旱胁迫中的功能仍有待深入探索[2]。另外，在玉米中鉴定出 17 个 *ZmMCTP* 基因，其特征是含有多个 C2 结构域和跨膜结构域，但其具体功能及作用机制尚未通过遗传学手段验证[22]。

综上所述，玉米 C2 结构域蛋白四大家族在干旱胁迫响应中呈现出差异化的功能特征。ZmSRC2L2是一个特异性正调控因子，其功能缺失损害抗旱性却不妨碍热 / 冷胁迫响应；同时 ZmMIK2-ZmC2DP1 模块是一个负调控因子，该模块通过受体激酶介导的磷酸化修饰，调控干旱以及盐胁迫抗性；ZmCAR11 通过与 NAC 转录因子形成复合物，协同激活下游靶基因表达并正向调控根系发育以及水分吸收。Yang 等研究表明，玉米 C2 结构域蛋白在干旱胁迫响应中功能多样且调控网络复杂，ZmC2DP1 是负调控因子，而 ZmSRC2L2 和 ZmCAR11 是正调控因子[20]。未来研究应进一步探索 ZmMCTP 以及 ZmC2s 家族成员在干旱胁迫中的功能，并且结合蛋白互作组学及翻译后修饰组学，进而系统解析 C2 结构域蛋白在干旱信号网络中的精细调控机制。

3.3　C2 结构域蛋白在高盐胁迫中的功能

盐碱胁迫通过离子毒害和渗透胁迫抑制玉米生长。Yang 等研究表明，ZmC2s 家族成员 ZmC2DP1 负调控玉米耐盐性，预测该模块同时参与干旱和盐胁迫响应，故 C2 结构域蛋白在植物耐盐碱调控中发挥重要作用[20]。后有研究者证实 ZmMIK2 与 ZmC2DP1 在体内直接互作且均在根中高表达，提示二者参与根系离子感知与信号转导；为验证这一推测，研究者进一步开展耐盐性表型分析，发现过表达 ZmMIK2 增强盐敏感，而敲除 *ZmMIK2* 或 *ZmC2DP1* 均提高耐盐性，表现为存活率更高、生长更好、地上部 Na^+ 积累更低，说明该负调控模块通过影响 Na^+ 积累与分布参与玉米盐胁迫响应[23]。上述结果证实，ZmMIK2 与 ZmC2DP1 形成的信号模块作为负调控因子，共同参与玉米高盐胁迫响应。值得注意的是，该模块同时也参与干旱胁迫响应，表明 ZmC2DP1 可能在多重非生物胁迫中发挥保守功能。

对于 MCTP 家族，研究者通过转录组表达分析发现 17 个 *ZmMCTP* 基因在 NaCl 胁迫下呈现出差异化的表达模式，部分成员在盐胁迫处理后显著上调表达；进一步用 qRT-PCR 验证表明，多个 *ZmMCTP* 基因在盐胁迫处理下表达水平发生显著变化，其中部分成员表现出快速响应特征[24]。由于 ZmMCTP 蛋白含有跨膜结构域，其可能定位于质膜，作为膜受体或膜相关信号分子，将胞外高盐信号转化为胞内钙信号，进而启动下游耐盐响应基因的表达[25]。

玉米中另一类含有 C2 结构域的蛋白家族是 SRC2-like。鉴定出 15 个 *ZmSRC2L* 基因，并系统分析了其在非生物胁迫下的表达模式，发现该家族成员在盐胁迫下表现出差异化的表达模式，部分成员在高盐处理后显著上调表达[3]。启动子分析显示，*ZmSRC2L* 基因启动子区富含盐胁迫响应相关的顺式作用元件，且预测受多种转录因子调控，暗示其可能参与盐胁迫响应[26]。

最后，ZmCAR 蛋白在盐胁迫中可能存在功能。可是目前没有直接证据证明它参与玉米高盐胁迫响应，不过基于其在 ABA 信号通路中的核心功能，推测它通过调控 ABA 信号传递效率间接影响耐盐性，并且 ABA 信号通路在植物盐胁迫适应中发挥重要作用，同时 ABA 处理可诱导耐盐基因表达并且调节气孔关闭以及维持离子平衡比如植物耐盐性得到提高[27]。作为 ABA 信号通路的膜支架蛋白，CAR 蛋白通过招募 ABA 受体及下游 PP2C 和 SnRK2 激酶至

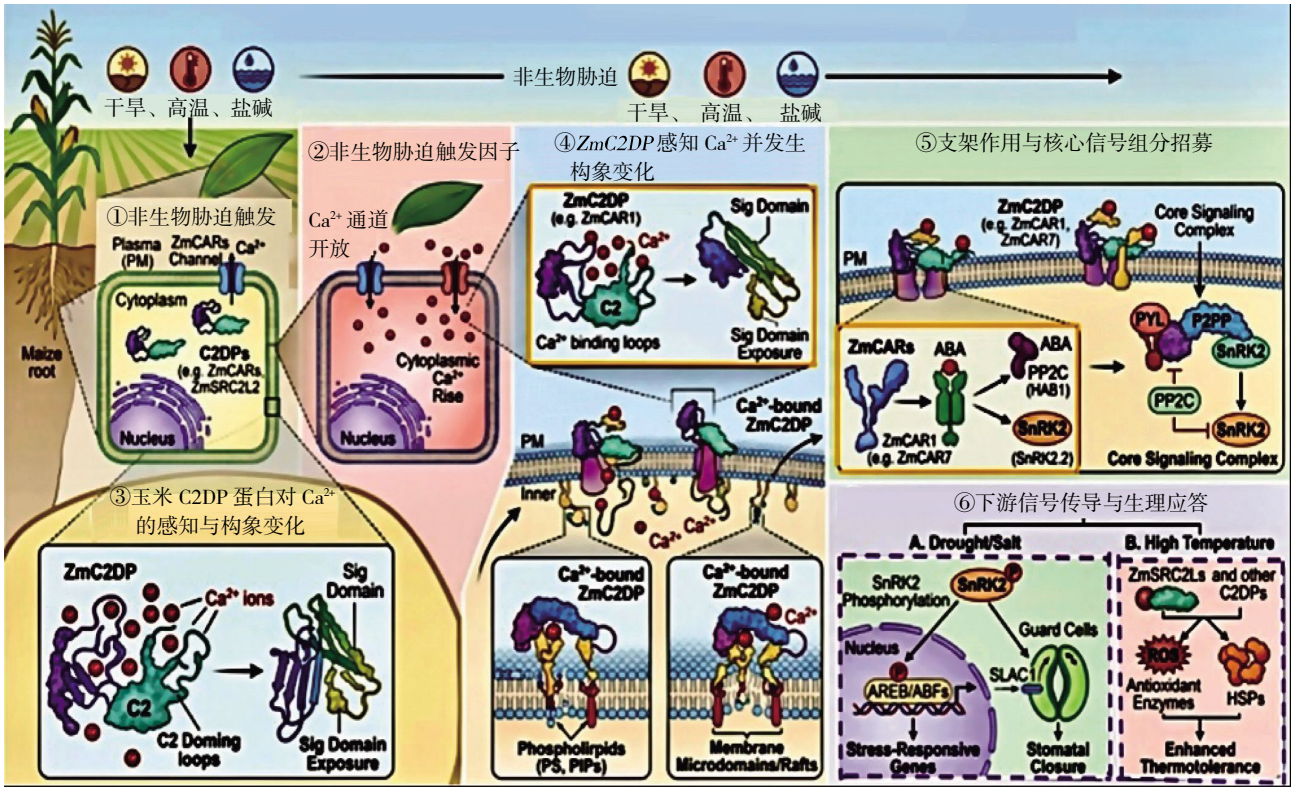
质膜微域，形成完整的信号传导模块[28-29]。因此，ZmCAR 蛋白可能通过调控 ABA 信号的传递效率，影响玉米对高盐胁迫的适应能力。

综上所述，ZmC2s 家族成员 ZmC2DP1 是一个负调控因子，其与 LRR 受体激酶 ZmMIK2 形成信号模块，该模块通过磷酸化修饰调控蛋白稳定性，影响 Na^+ 积累与分布，参与玉米高盐胁迫响应。同时，MCTP 家族和 SRC2-like 家族部分成员在盐胁迫下表达上调，不过其具体功能机制尚待验证。而 ZmCAR 蛋白是否参与尚无直接证据，不过它在 ABA 信号通路中的核心地位，暗示其潜在的耐盐调控功能，未来研究应结合基因编辑、多组学分析以及分子生物学手段，系统解析各家族成员的耐盐功能及分子机制，为玉米耐盐遗传改良提供理论依据和基因资源。

3.4　C2 结构域蛋白在低温胁迫中的功能

低温胁迫限制玉米的生长发育和地理分布，C2 结构域蛋白在植物耐冷性调控中同样发挥重要作用。虽然在玉米中 C2 结构域蛋白的研究甚少，但在拟南芥中已经有了一些研究。Qin 等研究证明 LOT1 与 CAR9 通过相互作用调控 CAR9 的稳定性以及核质穿梭，同时低温胁迫下 LOT1 抑制 CAR9 的泛素化降解并且促进 CAR9 从细胞核转位至细胞膜，进而增强 ABA 敏感性和耐旱性[30]。不过，该研究主要聚焦于抗旱性，但揭示了 C2 蛋白在低温响应中的调控机制。在番茄中的研究发现，含 C2 结构域的 SlFBN11 与铁氧还蛋白还原酶 SlFNR2 相互作用，它们共同影响低温下光合电子传递效率，而 SlFBN11 缺失导致 PSI 反应中心受损以及电子传递速率降低，说明该蛋白是低温光保护中的关键角色[31-32]。小麦中过表达 FBN 同源蛋白 TaPAP6L 显著增强转基因植株的耐寒性，其表现是相对电解质渗漏率降低以及茉莉酸含量升高[33]。

目前，对玉米 C2 结构域蛋白在低温胁迫中的功能研究仍较为有限。有报道显示，ZmSRC2L5 和 ZmSRC2L8 对冷胁迫有响应，但其具体功能尚未得到验证[3]。玉米中是否存在类似拟南芥 CAR9 或番茄 SlFBN11 的冷响应机制，有待深入研究。基于上述，将玉米 C2 结构域蛋白（C2DPs）响应非生物胁迫的分子机制汇总如图 3 所示。



非生物胁迫（干旱、高温、盐碱）通过质膜钙通道触发 Ca^{2+} 内流。升高的细胞质和细胞核内 Ca^{2+} 随后被 C2DPs 通过其 C2 结构域感知，引起构象变化，进而启动下游逆境响应。在此模型中，橙色实线框表示经试验验证的相互作用的蛋白（如 ZmCAR1 和 ZmSRC2L2），紫色虚线框表示预测的或未经验证的成员 / 通路（如大部分 ZmSRC2L），尚待功能鉴定。本图的机制框架参考文献[30-31]；示意图草稿借助 GPT-4.0 辅助构思，并由 Microsoft PowerPoint 完成最终制图与中文标注

图 3　玉米 C2 结构域蛋白（C2DPs）响应非生物胁迫的机制模式

4　小结与展望

虽然近年来玉米 C2 结构域蛋白的研究取得初步进展，不过与拟南芥、水稻等物种相比仍存在诸多空白以及挑战。

1）在玉米 C2 蛋白家族的系统功能鉴定方面，目前玉米中已鉴定出 95 个 *ZmC2s* 基因，不过仅有少数成员像 *ZmC2-15*、*ZmSRC2L2* 以及 *ZmC2DP1* 的功能获得验证。利用 CRISPR-Cas9 基因编辑技术与高通量表型分析，对 C2 蛋白家族成员进行系统敲除与功能解析是未来研究的重要方向。

2）C2 蛋白参与逆境响应的分子机制解析：C2 蛋白通过膜定位及蛋白互作调控 ABA 信号、ROS 稳态和离子平衡等过程，但其上游调控因子和下游靶标仍不清楚；同时，玉米在田间常面临高温、干旱等多重胁迫，C2 蛋白在复合胁迫中的调控机制尚不明确。今后可综合运用酵母双杂交、免疫共沉淀-质谱、ChIP-seq 等技术，系统鉴定 C2 蛋白的互作蛋白和转录调控网络，并结合多胁迫处理平台及转录组、代谢组等多组学分析，解析 C2 蛋白在单一及复合逆境胁迫中的核心功能。

3）C2 蛋白的翻译后修饰调控。C2 蛋白的磷酸化可影响其膜结合活性，其泛素化水平受 LOT1 调控。玉米 C2 蛋白是否存在类似的翻译后修饰调控，以及这些修饰如何响应环境信号，值得深入探索。

在育种应用方面，C2 结构域蛋白基因具有重要的分子育种潜力。*ZmC2-15* 的过表达可提高耐热性，*ZmC2DP1* 的敲除增强抗旱耐盐性，这些基因可作为分子标记辅助选择（MAS）或基因编辑的靶点，用于创制抗逆玉米新种质。此外，玉米 C2 蛋白基因启动子区的自然变异可能与其表达水平和抗逆性相关，通过全基因组关联分析（GWAS）挖掘优异等位变异，将为玉米抗逆育种提供重要的基因资源。

参考文献：

[1] Rizo J,Südhof T C. C2-domains,structure and function of a universal Ca^{2+}-binding domain[J]. Journal of Biological Chemistry,1998,273(26):15879-15882.

[2] 黄钰杰,张啸天,陈会丽,等. 玉米 *ZmC2s* 基因家族鉴定及 *ZmC2-15* 耐热功能分析[J]. 作物学报,2023,49(9):2331-2343.

[3] Liu H F,Zhang Q J,Lu Z H,et al. Integrated genomic and transcriptomic analysis of maize SRC2-like genes highlights divergent roles in abiotic stress responses[J]. Frontiers in Plant Science,2026,17:1779434.

[4] Zhao Y J,Qin Q Q,Chen L,et al. Characterization and phylogenetic analysis of multiple C2 domain and transmembrane region proteins in maize[J]. BMC Plant Biology,2022,22(1):388.

[5] Cho W,Stahelin R V. Membrane-protein interactions in cell signaling and membrane trafficking[J]. Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure,2005,34:119-151.

[6] Nalefski E A,Falke J J. The C2 domain calcium-binding motif: structural and functional diversity[J]. Protein Science,1996,5(12):2375-2390.

[7] Corbalán-García S, Gómez-Fernández J C. Signaling through C2 domains: more than one lipid target[J]. Biochimica et Biophysica Acta(BBA) - Biomembranes,2014,1838(6):1536-1547.

[8] 闫琪琪,卜芋芬,张小欣,等. 植物 C2 结构域脱落酸相关蛋白的研究进展[J]. 生物技术通报,2026,42(4):17-25.

[9] Brault M L,Petit J D,Immel F,et al. Multiple C2 domains and transmembrane region proteins (MCTPs) tether membranes at plasmodesmata[J]. EMBO Reports,2019,20(8): EMBR201847182.

[10] Kim Y C,Kim S Y,Choi D,et al. Molecular characterization of a pepper C2 domain-containing SRC2 protein implicated in resistance against host and non-host pathogens and abiotic stresses[J]. Planta,2008,227(5):1169-1179.

[11] Cui M M,Gupta S K,Bauer P. Role of the plant-specific calcium-binding C2-DOMAIN ABSCISIC ACID-RELATED (CAR) protein family in environmental signaling[J]. European Journal of Cell Biology,2023,102(2):151322.

[12] 王　涛,冯敬磊,张　翠. 高温胁迫影响玉米生长发育的分子机制研究进展[J]. 植物学报,2024,59(6):963-977.

[13] 黄钰杰. 玉米 *ZmC2-15* 耐热功能解析[D]. 荆州:长江大学,2023:28-50.

[14] Lv G H,Li F J,Chen J J,et al. Genome-wide identification and phylogenetic characterization of the FTIP gene family in maize (*Zea mays*)[J]. Genes,2025,16(5):539.

[15] Li Z X,Howell S H. Heat stress responses and thermotolerance in maize[J]. International Journal of Molecular Sciences,2021,22(2):948.

[16] Shi W T,Sun Q P,Zhao Y,et al. ZmSNAC1 cooperates with its interaction partner ZmNAC19 and ZmCAR11 to regulate drought tolerance in maize[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2026,231:110985.

[17] Rodriguez L,Gonzalez-Guzman M,Diaz M,et al. C2-domain abscisic acid-related proteins mediate the interaction of PYR/PYL/RCAR abscisic acid receptors with the plasma membrane and regulate abscisic acid sensitivity in *Arabidopsis*[J]. The Plant Cell,2014,26(12):4802-4820.

[18] Guo A Y,Wu W Q,Bai D,et al. Recruitment of HAB1 and $SnRK_{2.2}$ by C2-domain protein CAR1 in plasma membrane

ABA signaling[J]. The Plant Journal,2024,119(1):237-251.
[19] Zhang H J,Zeng Y T,Seo J,et al. Global identification and characterization of C2 domain-containing proteins associated with abiotic stress response in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. International Journal of Molecular Sciences,2022,23(4):2221.
[20] Yang Z R,Wang C,Zhu T F,et al. An LRR-RLK protein modulates drought-and salt-stress responses in maize[J]. Journal of Genetics and Genomics,2025,52(3):388-399.
[21] Liu X Y,Zhang Y H,Su H,et al. Genome-wide identification of the C2-domain abscisic acid-related (CAR) protein family in Rosaceae and functional characterization of *PbrCAR1* in pear pollen tube growth[J]. Planta,2025,262(3):55.
[22] Téllez-Arreola J L,Martínez-Torres A,Flores-Moran A E,et al. Analysis of the MCTP amino acid sequence reveals the conservation of putative calcium- and lipid-binding pockets within the C2 domains in silico[J]. Journal of Molecular Evolution, 2022,90(3):271-282.
[23] Van der Does D,Boutrot F, Engelsdorf T,et al. The Arabidopsis leucine-rich repeat receptor kinase MIK2/LRR-KISS connects cell wall integrity sensing,root growth and response to abiotic and biotic stresses[J]. PLoS Genetics,2017,13(6):e1006832.
[24] Chen X,Lesniewska B,Boikine R,et al. Arabidopsis MCTP family member QUIRKY regulates the formation of the STRUBBELIG receptor kinase complex [J]. Plant Physiology,2023,193(4):2538-2554.
[25] Shin O H, Han W P, Wang Y, et al. Evolutionarily conserved multiple C2 domain proteins with two transmembrane regions (MCTPs) and unusual Ca^{2+} binding properties [J]. Journal of Biological Chemistry,2005,280(2):1641-1651.
[26] Heneghan A F,Connaghan-Jones K D,Miura M T,et al. Coactivator assembly at the promoter: efficient recruitment of SRC2 is coupled to cooperative DNA binding by the progesterone receptor [J]. Biochemistry,2007,46(39):11023-11032.
[27] Yang X,Jia Z C,Pu Q,et al. ABA mediates plant development and abiotic stress *via* alternative splicing[J]. International Journal of Molecular Sciences,2022,23(7):3796.
[28] You C, Li C, Ma M, et al. A C2-domain abscisic acid-related gene, *IbCAR1*, positively enhances salt tolerance in sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) lam.) [J]. International Journal of Molecular Sciences,2022,23(17):9680.
[29] Diaz M,Sanchez-Barrena M J,Gonzalez-Rubio J M,et al. Calcium-dependent oligomerization of CAR proteins at cell membrane modulates ABA signaling[J]. PNAS,2016,113(3): E396-E405.
[30] Qin T,Tian Q Z,Wang G F,et al. LOWER TEMPERATURE 1 enhances ABA responses and plant drought tolerance by modulating the stability and localization of C2-domain ABA-related proteins in *Arabidopsis*[J]. Molecular Plant,2019, 12(9):1243-1258.
[31] Liu J M,Zhang Y,Shen Q,et al. Identification of the FBN gene family in tomato and functional analysis of *SlFBN11* in the electron transport under low night temperature[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,283:137181.
[32] Sun H R, Ren M, Zhang J N. Genome-wide identification and expression analysis of fibrillin (FBN) gene family in tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. PeerJ,2022,10:e13414.
[33] Jiang Y,Hu H C,Ma Y H,et al. Genome-wide identification and characterization of the fibrillin gene family in *Triticum aestivum*[J]. PeerJ,2020,8:e9225.

Research Progress in Functions of Plant C2 Domain Proteins in Maize Under Abiotic Stress

Qin Simin, Xu Wenyu, Lei Yuanyuan, Ding Shuangcheng, Wang Hongwei

[Key Laboratory of Sustainable Crop Production in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Co-construction by Ministry and Province) / College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China]

Abstract: C2 domain proteins (C2DPs) serve as crucial regulators in plant responses to environmental changes. Based on domain composition, sequence homology, and functionally specialized structures, maize C2 domain proteins can be classified into four non-enzymatic families: ZmC2s, ZmMCTP, ZmSRC2L, and ZmCAR. Studies have demonstrated that in maize (Zea mays), C2DPs sense intracellular Ca^{2+} signals through their conserved C2 domains and subsequently translocate to the plasma membrane, where they act as scaffold proteins to recruit core signaling components in response to stresses such as drought, heat, and salinity. This review systematically summarizes recent advances in understanding the structural characteristics, classification, and functional roles of maize C2 domain proteins under abiotic stresses, providing a theoretical basis for dissecting their signaling networks and the genetic improvement of crop stress tolerance.

Key Words: C2 domain protein; Growth and development; Adversity stress; Calcium signaling

徐　鹏,谢昊涵,赵振程,等. 盐碱地对水稻稻米品质的影响及其调控研究进展[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):8-12,20(2026-10-16). DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.002.

盐碱地对水稻稻米品质的影响及其调控研究进展

徐　鹏[1],谢昊涵[1],赵振程[2],吕晨阳[2],戴其根[2],陈英龙[2],柳聚阁[1*]
[1. 扬州大学食品科学与工程学院,江苏 扬州 225127;
2. 扬州大学 / 农业农村部盐碱土改良与利用(滨海盐碱地)重点实验室 / 农学院,江苏 扬州 225009]

摘要:盐碱地水稻种植是保障我国粮食安全、推进耕地资源扩容与生态改良盐碱地的重要途径。本文系统梳理了盐胁迫对稻米主要品质指标(加工品质、外观品质、营养品质、蒸煮食味品质)的差异化影响,并从耐盐优质品种选育、密肥水协同优化和综合农艺调控三方面总结了盐碱地稻米品质调优的技术路径,为推动盐碱地水稻优质高产栽培提供理论依据。现阶段该领域仍存在盐胁迫调控稻米品质深层机理尚不明确、不同盐碱类型适配栽培技术缺乏、产量与优质难以同步提升等突出问题。未来应重点解析盐胁迫下稻米品质形成的分子生理机制,研发分区适配、轻简化优质丰产调控技术,助力盐碱地可持续开发利用与粮食稳产提质。

关键词:盐碱地;水稻;品质;调控
中图分类号:S511　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20260083

我国耕地资源紧张、淡水资源短缺,粮食供需长期处于紧平衡状态,“人-地-粮”矛盾持续凸显[1];伴随居民生活水平提升,稻米消费需求由“足量供给”逐渐转向“优质适口”,稻米品质已成为水稻生产核心评价指标[2]。稻米品质由遗传基因型、气候条件、土壤环境共同决定[3],盐胁迫会抑制水稻植株生长发育和正常生理代谢,导致水稻生长迟缓、分蘖减少、灌浆受阻,最终影响产量和品质[4]。不同盐分浓度、不同生育时期的盐胁迫对水稻产量构成因素和品质性状的影响存在显著差异,加之盐碱地基础地力薄弱,传统水稻栽培模式难以适配盐碱特殊水土环境,稻米优质化生产难度更大[5]。

水稻是盐碱地生物改良先锋粮食作物,以水稻为中心的种植模式,可巧妙实现“洗、改、养”结合的降盐改土培肥与产能提升相协同的良性循环[6]。现有盐胁迫相关研究多聚焦水稻产量形成,针对稻米品质系统解析、配套提质调控技术的综述类报道相对较少[7]。厘清盐胁迫对稻米核心品质指标的影响特征,提出适配盐碱环境的品质优化栽培体系,既能阐明盐逆境下稻米品质劣变机理,又可为盐碱稻区优质稻米生产提供实用方案,对盘活后备耕地、提升粮食品质、修复盐碱生态具备重要的理论与现实意义。

1　盐碱地对水稻稻米品质的影响

稻米品质主要包括加工品质、外观品质、营养品质和蒸煮食味品质等指标,盐胁迫通过限制水稻养分吸收、碳氮代谢、淀粉合成过程,对不同品质指标产生差异化影响。总体来看,低浓度盐胁迫对部分稻米品质指标存在正向调控作用,而中高浓度盐胁迫则显著降低各品质指标,且作用效果受盐分浓度、胁迫时期、土壤盐碱类型、品种耐盐特性调控。

1.1　对加工品质的影响

稻米的加工品质一般是指稻米在出糙、碾米等过程中表现出来的加工性能,衡量的指标主要有糙米率、精米率、整精米率[8],其核心影响因素为籽粒饱满度与籽粒强度。罗成科等开展了不同盐梯度的盆栽试验,试验盐梯度由宁夏银北西大滩核心试验站盐分质量分数为0.05%(后续所提浓度不做特殊申明均为质量分数)的耕层盐碱土(pH值8.46)进行盐分添加形成,研究发现盐碱胁迫对加工品质的

收稿日期:2026-08-04;修回日期:2026-10-08。
基金项目:扬州大学大学生科技创新基金(XCX20251089);农业农村部盐碱土改良与利用(滨海盐碱地)重点实验室开放课题(2025YB02)。
作者简介:徐　鹏(2005—),男,主要从事水稻优质高产栽培与逆境生理研究。Email: 2842297996@qq.com。
* 通信作者:柳聚阁(1988—),女,博士,讲师,主要从事水稻优质高产栽培与逆境生理研究。Email: liujuge@yzu.edu.cn。

影响呈现浓度依赖性特征：低浓度盐胁迫（土壤盐分 0.1%左右）可适度促进水稻干物质转运与积累，小幅提高精米率和整精米率，吉粳 105 在 0.1%盐处理下所得稻米整精米率较无盐（空白）对照提高 1.6%；中高浓度盐胁迫（≥0.2%）则显著抑制稻米籽粒发育，降低加工品质，且随盐浓度升高，精米率和整精米率下降幅度增大，其中整精米率对盐胁迫敏感度更高，在 0.4%盐浓度下，吉粳 105 的整精米率较无盐（空白）对照下降 8.9%[9]。

盐胁迫发生时期决定加工品质受损程度，返青期至幼穗分化期是稻米籽粒分化奠基阶段，此时遭受盐胁迫对整精米率的负面影响最大，如超优千号（CY1000）的整精米率较扬花至成熟期盐胁迫处理平均降低 11.3%，龙两优 506（LY506）的整精米率较扬花至成熟期盐胁迫处理平均降低 8.1%[5]。加工品质对盐胁迫的响应存在显著的品种间差异，如盐稻 12 号在 0.35%盐浓度下的精米率和整精米率显著高于南粳 9108；盐籼 156 在 0.45%盐胁迫下整精米率下降幅度（33.47%）高于盐粳 456（12.33%）与盐丰 47（14.50%）[10-11]。此外，土壤盐碱类型存在特异性调控作用，苏打盐碱土可显著提高龙粳 21 和垦粳 5 号的整精米率，较常规土壤下分别提高 6.1%和 13.6%，体现了土壤盐碱类型的特异性影响[12]。

上述研究以精米率与整精米率为重要指标，明晰了盐胁迫对稻米加工品质的表观变化规律，但盐分调控籽粒充实、胚乳结构建成的生理通路仍有待深入解析。

1.2　对外观品质的影响

外观品质是最直观的品质性状，是指糙米或精米籽粒的外表物理特性，是稻米商品价值的重要体现，其形成与籽粒灌浆过程密切相关，主要指标包括粒型、垩白和透明度等外表物理特性[13]。在苏打盐胁迫下，籽粒灌浆期 Q- 酶、淀粉合成酶、腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸酶等淀粉合成关键酶活性会受到显著影响，导致淀粉合成不足或加速淀粉降解，使胚乳淀粉颗粒间隙增大、空气填充，致使垩白度上升、透明度下降[14]。

盐胁迫浓度是决定外观品质优劣的核心因素：中高浓度（≥0.2%）盐胁迫普遍增加垩白粒率和垩白度，罗成科等研究发现 0.2%～0.4%盐浓度下，吉粳 105 的垩白粒率和垩白度显著升高，主要因盐胁迫导致籽粒灌浆不充分，胚乳结构疏松[9]；李雨生研究表明，水稻在返青期—幼穗分化期遭受盐胁迫下，稻米垩白粒率较灌溉淡水对照组增加 92.6%～155.9%，且胁迫程度越强增幅越大[5]。然而，部分研究显示低浓度盐胁迫或特定耐盐品种可呈现相反趋势，肖丹丹等发现南粳 9108 和盐稻 12 号的垩白粒率和垩白度随盐浓度增加呈降低趋势，推测与在盐胁迫下水稻籽粒变小变短、灌浆速度加快有关[10]；盐籼 156 在 0.45%盐胁迫下垩白度虽较对照增加 97.81%，但仍低于盐粳 456 和盐丰 47 同期水平[11]。粒型方面，盐胁迫显著降低米粒长宽比，耐盐品种在 0.21%盐浓度下即出现显著下降，而盐敏感品种在粒型上的耐受阈值更高[15]。综上，垩白度、透光度对盐胁迫响应敏感，受盐胁迫影响较重，而粒型受遗传因素主导，因此在水稻品质形成的关键时期（如灌浆期）研发盐分消减技术对改善稻米外观品质具有重大意义。

1.3　对营养品质的影响

稻米营养品质指稻米中的营养成分的含量，主要包括蛋白质、维生素、矿物质和氨基酸及酚类等[16]。盐胁迫通过重塑水稻氮代谢、碳水化合物分配过程，改变籽粒营养组分积累水平。盐胁迫下，籽粒蛋白质和氨基酸整体表现为促进积累的趋势：0.2%～0.4%盐分下稻米蛋白质含量较无盐（空白）对照提升 27%～53%[9]；0.6%盐胁迫下杂交稻 Y 两优 957 总氨基酸含量增幅达 90.67%，必需、非必需氨基酸含量也同步提升[17]。盐分上调了籽粒蛋白质合成相关酶活性，加速根系氨基酸转运与谷蛋白、球蛋白合成，是蛋白含量上升的主要原因[18]。但该规律存在品种阈值差异，翟彩娇等研究发现 6.0 g/kg 高浓度盐胁迫下，常农粳 8 号、南粳 9108 的蛋白质含量显著降低，表现出显著的品种特异性[19]。

直链淀粉含量同时影响营养与蒸煮品质，对盐胁迫的响应规律更为复杂：0.10%～0.15%低盐胁迫可显著降低直链淀粉含量，有利于提升米饭适口性[10]；0.20%～0.40%中高盐浓度对直链淀粉含量的影响存在品种间差异，部分品种直链淀粉含量升高，而有的品种直链淀粉含量则随盐分浓度升高而降低，这可能与品种遗传特性、盐胁迫类型有关[15,20]。此外，盐碱地种稻年限会同步调控土壤与稻米矿质营养，影响土壤微量元素含量，连续种稻 5 年可显著提高土壤 Fe、Mn、Zn 等元素积累，提升籽粒矿质元素积累水平[18,21]。

1.4　对蒸煮食味品质的影响

蒸煮食味品质主要包括米饭的色、香、味及适口性（如黏弹性、柔软性等），反映了稻米的食用特性，该特性主要由直链淀粉含量、胶稠度、淀粉黏滞特性[（Rapid Visco Analyzer）谱特征值]等决定。盐碱

胁迫对蒸煮食味品质的影响以负面效应为主：中高浓度盐胁迫下，水稻叶片叶绿素含量显著降低，光合速率下降，光合产物合成不足，使灌浆期籽粒存储的物质供应不足，显著降低峰值黏度、热浆黏度和最终黏度，消减值上升，米饭硬度升高、黏性降低、食味变差[10-11,22]；周根友等也发现盐胁迫下稻米胶稠度显著降低，食味评价等级下降[20]。低浓度盐胁迫则可能产生积极效应，肖丹丹等指出 0.10%～0.15% 盐浓度下，稻米 RVA 谱的峰值黏度、热浆黏度显著增加，米饭外观、黏度及平衡度优于无盐（空白）对照[10]。

品种间蒸煮食味品质对盐胁迫的响应差异突出，盐籼 156 在盐胁迫下表现出高崩解值、低消减值的特性，食味品质显著优于盐粳 456 和盐丰 47[11]；而施氮量与移栽密度的增加会导致直链淀粉含量与胶稠度下降，米饭硬度增加，进一步加剧盐碱地条件下蒸煮食味品质的劣化[1]。

近年来越来越多的研究人员开始关注稻米的香味，稻米的香味类型有多种，根据人们的感官评价进行分类，主要有爆米花香、山核桃香、紫罗兰香和茉莉花香等。不同香气是由多种化合物组合形成的，其中 2- 乙酰 -1- 吡咯啉（2-AP）是主要香气物质[23]。2-AP 作为第一个被发现的形成水稻香气的重要化合物，国内外学者对其展开了多方面研究。盐胁迫对 2-AP 的合成具有显著影响，研究认为盐胁迫可使叶片前体化合物如脯氨酸等含量增加进而使籽粒中 2-AP 含量上升[24]。完整生理过程为盐胁迫诱导脯氨酸大量积累的同时使甜菜碱醛脱氢酶 2（BADH2）活性降低，导致 γ- 氨基丁醛向 γ- 氨基丁酸（GABA）转化的竞争路线受阻，最终脯氨酸与 γ- 氨基丁醛均转化为 1- 吡咯啉，进而前体物质定向流向合成 2-AP 方向，而不被 GABA 流向消耗[25]。

2　盐碱地水稻稻米品质的调控研究

2.1　耐盐优质品种筛选与培育

耐盐品种选育是盐碱地稻米品质调控最经济、长效的基础手段，通过鉴定不同品种在盐碱环境下的产量和品质表现，筛选出兼具耐盐与优质的品种。部分耐盐品种筛选结果表明，盐籼 156 在 0.45% 盐胁迫下仍保持较低的垩白粒率和较高的整精米率，食味品质优于盐丰 47 和盐粳 456[11]；盐稻 12 号的糙米率、精米率在 0.35% 盐浓度下显著高于南粳 9108[10]。

2.2　密度、施肥、水分协同栽培优化管理

密度、施肥与水分是调控盐碱地水稻群体建成、盐害缓解和籽粒品质形成的核心农艺因子，开展密度、施肥、水分协同栽培优化管理，通过适宜栽插密度构建稳健群体，优化肥料配比与运筹模式平衡植株营养，辅以调水控盐、科学水层管理减轻盐分胁迫伤害，可改善冠层光合生产，协调籽粒淀粉与蛋白质代谢，改良加工品质、外观品质与蒸煮食味特性，为盐碱地水稻优质丰产提供栽培理论与技术支撑。

2.2.1　移栽密度调控。种植密度调控群体通风透光条件，间接影响灌浆与品质形成。盐碱滩涂环境下，采用移栽密度 33.4 万穴 /hm^2，配合氮肥用量 300 kg/hm^2，可实现淮稻 5 号产量与品质的协同提升，密度过高则会导致田间通风透光不良，增加垩白粒率、降低整精米率[1]；比空栽培模式可促进盐丰 47 成穗率提高，改善稻米外观品质，株距 14 cm 时外观品质与产量表现最优[26]。

2.2.2　肥料优化配施。在水稻生产中，肥料用量直接影响水稻产量与稻米品质。在盐碱滩涂环境下，300 kg/hm^2 施氮量可在保证产量的同时，平衡加工品质与营养品质，过量施氮会导致垩白率增加、食味值下降[1]。增施磷钾肥可改善水稻离子平衡，缓解盐胁迫对稻米品质的不利影响[27]。近年来，新型功能性肥料提质效果显著：盐碱土中增施微纳米硅肥可提高糙米率、精米率及整精米率[17]；纳米二氧化硅可通过降低叶片 Na^+ 含量、增加 K^+ 含量，优化淀粉黏滞特性，改善盐胁迫下稻米蒸煮食味品质[17]；海藻有机肥与微纳米硅配施处理的稻米食味评分较常规化肥提高 5.3 分[28]。

2.2.3　水分调控。水分调控是降低土壤盐分、缓解盐胁迫的重要措施。其中返青期至幼穗分化期是籽粒发育关键期，此阶段保证土壤的含盐量处于阈值以下（≤0.3%），有利于稻米的优质。在淡水资源相对丰富的滨海盐碱稻区，通过保证灌溉水层，可大幅度降低垩白粒率、提高整精米率；扬花期后适当利用低浓度盐水灌溉，对品质影响较小且可节约淡水资源[5]；干旱盐碱区采用滴灌旱作模式，维持 80% 田间持水量，在≤3.0 g/kg 含盐量土壤下可维持较好的稻米品质水平[6]，若土壤含盐量超过该阈值，则需增加淡水灌溉量。

2.3　其他农艺调控技术

除密度、施肥、水分管理外，秸秆还田、微生物

改良、种稻年限等也可实现长效改良盐碱地，优化稻米品质。小麦、油菜秸秆还田可降低土壤胶体电导率，提高土壤有机质含量，显著提高盐胁迫下稻米糙米率、精米率及整精米率，降低垩白率与直链淀粉含量；秸秆还田结合有机无机肥料配施，可通过增加光合速率、改善渗透调节物质含量，进一步提升稻米品质[29]。除传统生长调节剂的使用外，促生菌结合生长调节剂处理也可缓解盐胁迫，促生菌浸种 + 喷施碧护组合可同步增产，优化稻米蛋白质、直链淀粉配比与含量[4]；盐碱地施用耐盐微生物土壤改良剂，可提升土壤养分，改善加工品质、外观品质及蒸煮食味品质[17]。另有研究表明，种稻年限有利于土壤改良与稻米品质调优，5 ~ 10 年水稻种植年限下土壤 pH 值、全盐量显著下降，有机质与微量元素积累充足，稻米整精米率提高、垩白度降低，品质达到 2 级标准；不过，种稻超过 10 年需补充 Cu、Zn、B 等微量元素，避免品质劣化[21]。

3　现有研究不足与展望

3.1　当前研究存在的不足

1）生理分子机制解析不完整：现有研究多集中于盐胁迫下稻米品质表观指标变化，盐分调控淀粉合成、蛋白积累、离子转运的核心通路、关键基因调控网络尚未系统阐明，不同盐碱类型（苏打盐碱土、氯化物滩涂盐土）品质响应差异机理缺乏对比研究。

2）区域适配栽培技术体系缺失：内陆苏打盐碱、滨海滩涂、干旱盐碱区盐分组成、pH 值、水资源条件差异巨大，现有调控技术研究多为单一试验条件结论，缺乏分区、标准化、轻简化配套栽培方案，技术落地适配性不足。

3）产量与优质协同提升难度大：多数耐盐品种存在高产不优质、优质不耐盐的矛盾，现有水肥调控措施往往侧重增产，难以同步实现加工、外观、食味多维度品质同步优化，产量品质协同调控机制有待突破。

4）数据来源单一：当前多数研究结论来源于单点盆栽或小区试验，多年大尺度田间定位试验数据相对较少，导致部分调控技术在大田规模化应用时效果波动幅度可能偏大，严重影响技术的实用性和推广效果。

3.2　未来研究重点方向

1）深层解析盐胁迫品质形成机理：依托转录组、代谢组等多组学技术，对比不同盐分类型、生育期胁迫下水稻碳氮代谢、淀粉合成、离子平衡调控通路，挖掘耐盐优质关键基因，阐明盐分诱导稻米垩白、食味劣变分子生理机制。

2）分区构建盐碱地水稻优质丰产技术体系：针对内陆苏打盐碱、滨海滩涂、西北干旱盐碱等不同区域水土特征，研发适配水肥、微生物改良、秸秆还田、节水灌溉集成技术，形成分区标准化轻简化栽培规程。

3）培育耐盐优质水稻新品种：利用分子标记辅助育种，聚合耐盐、低垩白、适宜直链淀粉、高整精米率优良性状，打破“耐盐与优质”性状连锁负相关，培育专用盐碱优质稻品种。

4）推进盐碱地稻作绿色可持续发展：结合秸秆资源化、微生物改良、节水咸淡轮灌技术，构建“土壤改良 – 稳产提质 – 生态修复”一体化模式，在保障粮食安全前提下实现盐碱地可持续开发利用。

4　结语

盐胁迫从加工、外观、营养、蒸煮食味多维度改变稻米品质，且胁迫效应受盐分浓度、胁迫时期、品种、土壤类型等影响。通过耐盐优质品种选育、密肥水精准管控、秸秆与微生物改良等综合农艺措施，可有效消减盐胁迫负面效应，实现盐碱稻田稻米提质增产。但当前该领域仍存在机理不清、技术区域适配性差、产量品质难以协同等问题，后续需从基础机理解析、分区技术集成、优质种质创新三方面持续攻关，为我国盐碱地粮食高质量生产提供理论与技术支撑。

参考文献：

[1] 董士琦,葛佳琳,韦还和,等. 施氮量和密度对盐碱滩涂水稻产量和品质的影响[J]. 核农学报,2022,36(4):820–828.

[2] Zhou H,Xia D,He Y Q. Rice grain quality:traditional traits for high quality rice and health–plus substances[J]. Molecular Breeding,2020,40(1):1–17.

[3] 李　然,钱　前,高振宇. 水稻品质的遗传与育种改良研究进展[J]. 生物技术通报,2022,38(4):4–19.

[4] 张　蛟,陈澎军,崔士友,等. 不同促生菌配合生长调节剂处理对滩涂稻田盐分变化、水稻产量及品质的影响[J]. 核农学报,2024,38(1):160–168.

[5] 李雨生. 不同生育时期盐胁迫及胁迫程度对水稻产量、品

质和氮素利用效率的影响[D]. 海口:海南大学,2023:3-40.
[6] 何进宇,刘飞杨,杨佳鹤,等. 干旱地区水盐胁迫对水稻产量构成及稻谷品质的影响研究[J]. 节水灌溉,2024(1):33-43.
[7] 王树玉,张佳麒,程梓峻,等. 苏打盐碱地稻米品质研究进展与展望[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(4):856-867.
[8] 矫　江,王伯伦,寇洪萍. 东北地区稻米碾磨品质区域变化规律研究[J]. 中国粮油学报,2003,18(3):10-12.
[9] 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.
[10] 肖丹丹,李　军,邓先亮,等. 不同品种稻米品质形成对盐胁迫的响应[J]. 核农学报,2020,34(8):1840-1847.
[11] 张　玮,赵新辉,周梦瑶,等. 盐胁迫对海水稻抗逆生理及产量和品质的影响[J/OL]. 分子植物育种,2023:1-12(2023-03-02) [2026-08-04]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230301.1422.019.
[12] 赫　臣,郑桂萍,李红宇,等. 苏打盐碱土对水稻品质的影响[J]. 黑龙江农业科学,2018(1):37-40.
[13] Zhou J P,Xin X H,He Y,et al. Multiplex QTL editing of grain-related genes improves yield in elite rice varieties[J]. Plant Cell Reports,2019,38(4):475-485.
[14] Fan P,Xu J,Wei H Y,et al. Recent research advances in the development of chalkiness and transparency in rice[J]. Agriculture,2022,12(8):1123.
[15] Rao P S,Mishra B,Gupta S R. Effects of soil salinity and alkalinity on grain quality of tolerant,semi-tolerant and sensitive rice genotypes[J]. Rice Science,2013,20(4):284-291.
[16] Li P,Chen Y H,Lu J,et al. Genes and their molecular functions determining seed structure,components,and quality of Rice[J]. Rice,2022,15(1):1-27.
[17] 金文雨. 盐胁迫对高产优质杂交稻产量和稻米品质形成的影响及调控[D]. 海口:海南大学,2025:3-151.
[18] 李景鹏,陈艳辉,张　鑫,等. 盐碱胁迫对稻米部分理化指标的影响[J]. 北方水稻,2020,50(6):5-8.
[19] 翟彩娇,邓先亮,张　蛟,等. 盐分胁迫对稻米品质性状的影响[J]. 中国稻米,2020,26(2):44-48.
[20] 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.
[21] 罗成科,田　蕾,毕江涛,等. 种稻年限对盐碱土微量元素及水稻产量和品质的影响[J]. 生态环境学报,2019,28(8):1577-1584.
[22] 朱宗臣,陈　丽,马　静,等. 不同浓度盐胁迫对水稻生理生化特性及品质性状的影响[J]. 宁夏农林科技,2025,66(10):24-29.
[23] 魏晓东,张亚东,赵　凌,等. 稻米香味物质 2- 乙酰 -1- 吡咯啉的形成及其影响因素[J]. 中国水稻科学,2022,36(2):131-138.
[24] 李　林. 盐胁迫对香稻产量与香气的影响及其调控机制研究[D]. 海口:海南大学,2025:15-16.
[25] Renuka N,Barvkar V T,Ansari Z,et al. Co-functioning of 2AP precursor amino acids enhances 2-acetyl-1-pyrroline under salt stress in aromatic rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. Scientific Reports,2022,12:3911.
[26] 陈　盈,孟　野,孙世光,等. 比空栽培对滨海盐碱稻区水稻产量和品质影响分析[J]. 北方水稻,2023,53(4):14-18.
[27] 陈桂葵,骆世明,贺鸿志,等. 高氯酸盐胁迫对水稻生长发育和养分吸收的影响[J]. 生态学报,2014,34(19):5460-5469.
[28] 陈立强,赵海成,赫　臣,等. “雷力海補 1 号”和“微纳米硅”肥料对盐碱土和白浆土上水稻产量品质的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2018,30(5):7-13.
[29] 周　舟. 作物秸秆还田与有机无机配施对盐胁迫水稻产量和品质的影响[D]. 扬州:扬州大学,2024:7-56.

(下转第 20 页)

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。

郭龙平,杜志喧,黄　万,等. 基于 SLYm1R 芯片的“井冈软粘”品种功能基因鉴定与综合分析[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):13-20(2026-09-30). DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.003.

基于 SLYm1R 芯片的“井冈软粘”品种功能基因鉴定与综合分析

郭龙平[1],杜志喧[2],黄　万[1],胡泽生[1],徐　嫣[1],郑　伟[3],樊啊宇[3],王　亮[3]
(1. 吉安市农业科学研究所 / 江西省水稻产业技术体系赣中综合试验站,江西 吉安 343100;
2. 井冈山大学,江西 吉安 343100; 3. 吉安市农业产业发展服务中心,江西 吉安 343100)

摘要:利用 SLYm1R 高密度水稻全基因组 SNP 芯片对井冈软粘生产用种样品 JGRZ-SCYZ 进行全基因组分型,系统鉴定该品种在产量、品质、抗逆性等方面的功能基因型。结果表明:样品有效分型位点 31 055 个,纯合度达 99.82%,具有高度纯合的遗传背景;携带多个产量相关的有利等位基因,包括籽粒大小调控基因 *GE/CYP78A13/BG2*、*OsSPL13/GLW7*、*GW8/OsSPL16*,穗粒数调控基因 *Gn1a/OsCKX2*、*NOG1*,以及氮高效利用基因 *qNGR2/GRF4* 等;*Waxy* 基因型为 Wx^{b} 型,预测直链淀粉含量(质量分数)15%~20%,胶稠度 80~81 mm,糊化温度 71 ℃,具有较软的米饭质地和良好的食味品质;同时携带褐飞虱抗性基因 *Bph3*、稻瘟病抗性基因 *bsd-1*、*LHCB5*、*Pi9*、*Pita*、*Pi2* 以及白叶枯病抗性基因 *Xa23*、*xa13*、*Xa7* 等多个抗性基因。基于 SNP 芯片全基因组分型鉴定技术为井冈软粘的分子育种、种质资源保护和品种改良提供了重要的技术手段。

关键词:井冈软粘;SLYm1R 芯片;功能基因;米质;产量性状;抗性基因
中图分类号:S330　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20260099

水稻(*Oryza sativa* L.)是世界上最重要的粮食作物之一,全球超过一半的人口以水稻为主食。我国作为水稻种植和消费大国,培育和推广优质、高产、多抗的水稻品种对于保障国家粮食安全具有重要意义[1-2]。近年来,随着分子生物学和基因组学技术的快速发展,基于 SNP 芯片的全基因组分型技术已成为水稻品种鉴定、功能基因分析和分子育种的重要手段[3]。

井冈软粘是江西省吉安市种子管理局和吉安市农业科学研究所从当地多年引进种植的“中二软占”品种自然变异植株中,经系统选育而成的优质常规晚籼稻品种[4]。该品种于 2019 年 5 月通过江西省农作物品种审定委员会审定(审定编号:赣审稻 20190047),2021 年通过早稻审定(审定编号:赣审稻 20210008),具有米质优、食味好、适应性广等特点[5-6]。井冈软粘出糙率 80.7%、整精米率 60.0%、直链淀粉含量 15.0%、胶稠度 60.0 mm,米质达部标 3 级,米粒晶莹剔透、米形纤细,入口绵软胶稠、香软甘甜。目前,井冈软粘已成为“井冈山”农产品区域公用品牌主推品种之一,仅吉安区域订单种植面积即突破 1.3 万 hm^2,永丰县计划到 2025 年使井冈软粘种植面积达 3 000 hm^2 以上,吉水县落实了 33 hm^2 以上规模化基地 14 个,拉动了井冈山大米全产业链发展[7-8]。然而,关于井冈软粘在分子水平的遗传背景和功能基因组成尚缺乏系统研究,制约了该品种的分子标记辅助育种和种质资源保护工作。

分子标记技术是水稻品种鉴定和功能基因分析的重要工具。第一代分子标记 RFLP(限制性片段长度多态性)操作繁琐,需大量 DNA 和同位素标记;第二代 SSR 标记(简单重复序列)虽操作相对简便,但通常仅检测数十个位点,覆盖度和通量有限。SNP(单核苷酸多态性)作为第三代分子标记,在基因组中密度最高、遗传稳定性最强且几乎都是二等位多态性[6]。SLYm1R 高密度水稻全基因组 SNP 芯片基于 Infinium 技术,采用 50 mer 寡核苷酸探针退火,全基因组扩增无需 PCR,利用特异荧光基团判定基因型,共包含 31 753 个高质量 SNP 位点,其中 31 704 个位点具有明确的物理位置信息,均匀覆盖水稻 12 条染色体[9]。与 SSR 标记相比,SLYm1R 芯片的位点密度提高了 2~3 个数量级,可一次性实现品种纯度检测、真实性鉴定、功能基因分析和遗传背景评估,检测准确率高、重复性好,已成为水稻

收稿日期:2026-08-31;修回日期:2026-09-23。
基金项目:吉安市科技包干项目;江西省水稻产业技术体系项目(JXARS-01-赣中片)。
作者简介:郭龙平(1983—),男,硕士,高级农艺师,主要从事水稻、油料作物遗传育种与优质高产栽培技术研究。Email:369896086@qq.com。

分子育种的重要平台。

本研究利用 SLYm1R 芯片对井冈软粘生产用种进行全基因组分型，结合 2019—2025 年江西省区域试验和多年多点生产试验的农艺性状与米质数据，系统分析该品种在产量、品质、抗逆性等方面的功能基因型，并开展基因型 – 表型关联分析，旨在为井冈软粘的分子标记辅助育种、种质资源保护和品种持续改良提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料为井冈软粘生产用种样品（编号 JGRZ–SCYZ），由吉安市农业科学研究所提供。该样品来源于 2023—2025 年井冈山大米地方特色品种提纯复壮项目的原种繁殖田，经田间株行比较（2023 年，300 个株行）和株系鉴定（2024 年，50 个株系）后入选。对照品种为亲本品种“中二软占”及江西省区域试验对照品种“天优华占”。所有种子均在吉安市农业科学研究所试验基地（江西省吉安市吉州区，海拔 75 m，亚热带湿润季风气候，年均温 18.3 ℃，年降水量 1 480 mm）繁殖保存。

1.2　田间试验设计与农艺性状调查

田间试验于 2019—2025 年在吉安市农业科学研究所试验基地进行。2019—2020 年该品种参加江西省晚籼稻区域试验，试点包括吉安、赣州、抚州等 6 个点，随机区组排列，3 次重复，小区面积 13.3 m^2，栽插规格 16.7 cm × 20.0 cm，每穴插 4 ~ 5 粒谷苗。2023—2025 年在吉安市吉州区、青原区、吉安县 3 个点开展生产试验和提纯复壮株系比较试验，大区对比法，面积 333.3 m^2，不设重复。田间管理按当地高产栽培规程执行，施纯氮 10 ~ 11 kg/667m^2，氮、磷、钾的质量比为 1∶0.6∶1，水分管理采用浅水移栽、够苗晒田、干湿交替模式。农艺性状调查按《水稻品种试验技术规程》进行，每小区取样 5 穴考察株高、穗长、每穗总粒数、实粒数、结实率、千粒质量等性状，实割测产。

1.3　基因组 DNA 提取与质检

采用改良 CTAB 法提取水稻三叶期幼苗叶片基因组 DNA。使用 NanoDrop 2000 超微量分光光度计检测 DNA 浓度和纯度，要求 DNA 浓度≥50 ng/μL，A_{260}/A_{280} 比值在 1.8 ~ 2.0。通过 1.0%琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 完整性，要求主带清晰且大于 5 kb。

1.4　SLYm1R 芯片检测

采用 SLYm1R 高密度水稻全基因组 SNP 芯片检测。芯片检测由中国农业科学院授权实验室完成，每样品设置技术重复 2 次。采用 GenomeStudio软件进行基因型 calling 数据分析，质控标准包括：GenTrain Score > 0.6、单点缺失率 < 20%（Indel 标记除外）、亲本纯合（允许杂合率 < 5%）及分型正确率高。

1.5　功能基因分析

基于文献报道的功能基因位点信息，对样品进行非生物胁迫抗性、生物胁迫抗性和产量品质相关性状的系统鉴定。分析内容包括：1）非生物胁迫抗性基因：耐盐基因（*Os–HKT1;5*、*OsHKT1;1*）、抗旱基因（*OsPP15*、*DRO1*）、耐寒基因（*bZIP73*、*HAN1*）、耐硼毒基因（*BET1*）、镉积累基因（*qGMN7.1/OsNRAMP5*）等[10–11]；2）生物胁迫抗性基因：褐飞虱抗性基因（*Bph3*）、稻瘟病抗性基因（*bsd–1*、*LHCB5*、*Pi9*、*Pita*、*Pi2*、*Pik*）、白叶枯病抗性基因（*Xa23*、*xa13*、*Xa21*、*xa5*、*Xa7*）等[12–13]；3）产量品质相关基因：籽粒大小调控基因（*GE/CYP78A13/BG2*、*OsSPL13/GLW7*、*GW8/OsSPL16*、*GS5*、*GL3.2/CYP78A5*）、穗粒数调控基因（*Gn1a/OsCKX2*、*NOG1*）、结实率调控基因（*PTB1*）、氮高效利用基因（*qNGR2/GRF4*）等[14–19]；4）品质基因：*Waxy* 基因型鉴定和 S5 位点籼粳属性分析[20]。同时结合田间表型数据开展基因型 – 表型关联分析。

1.6　米质测定

米质分析委托农业农村部食品质量监督检验测试中心（武汉）进行，测定指标包括出糙率、精米率、整精米率、粒长、粒型长宽比、垩白粒率、垩白度、透明度、直链淀粉含量、胶稠度、碱消值等，按照 NY/T 83—2017《米质测定方法》执行。2019—2020 年区域试验各试点均取样测定，2023—2025 年提纯复壮株系取代表株系 3 个进行验证。

2　结果与分析

2.1　样品基因组 DNA 质量与芯片分型概况

SLYm1R 芯片检测如图 1 所示，样品 DNA 质检结果显示，DNA 浓度大于 50 ng/μL，A_{260}/A_{280} 比值为 1.87，琼脂糖凝胶电泳主带清晰且大于 5 kb，满足芯片检测要求。芯片分型统计结果（表 1）显示，样品 JGRZ–SCYZ 的有效分型位点数为 31 055 个，缺失

标记数为 618 个，缺失率为 1.95%；在有效分型位点中，杂合标记数仅为 55 个，纯合标记数为 31 000 个，纯合度达 99.82%。技术重复 2 次的结果一致率为 99.97%，表明分型结果可靠。

与提纯复壮前田间调查数据对比，提纯前（2022 年）井冈软粘大田杂株率为 3.2%～5.8%（主要表现为株高和生育期分离），经 2023—2024 年株行比较和株系鉴定后，2025 年田间杂株率降至 0.18%，与芯片检测的 99.82%纯合度结果一致，表明提纯复壮效果显著。

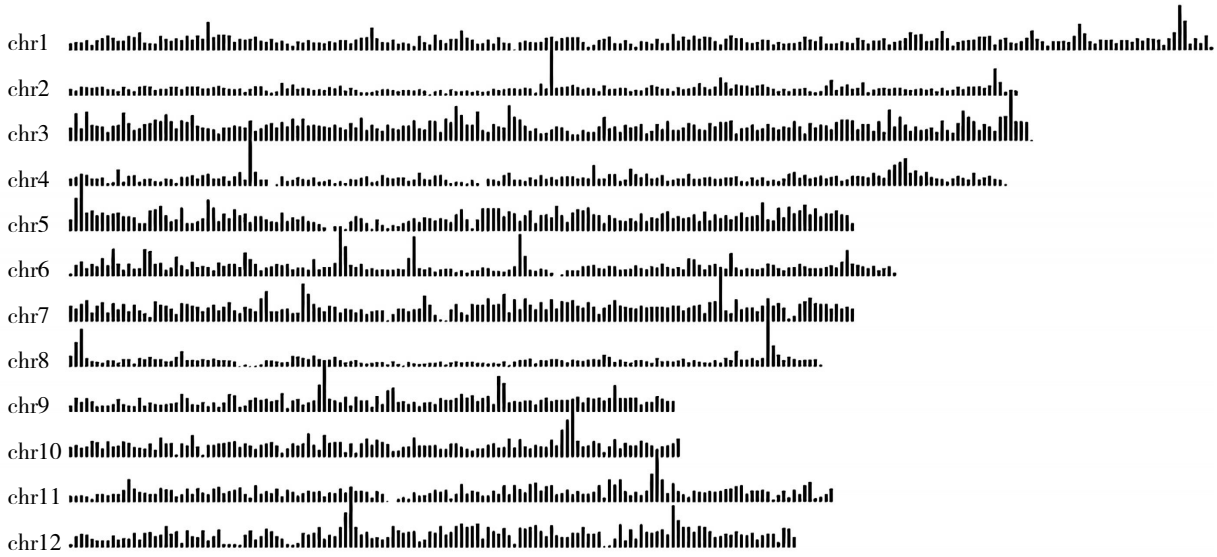


图 1　SLYm1R 所有位点在全基因组上的分布

表 1　样品芯片分型统计结果

项目	统计值
总 SNP 位点数 / 个	31 753
有效分型位点数 / 个	31 055
缺失标记数 / 个	618
缺失率 /%	1.95
杂合标记数 / 个	55
纯合标记数 / 个	31 000
纯合度 /%	99.82
技术重复一致率 /%	99.97

2.2　全基因组纯合度分布

全基因组杂合位点分布如图 2 所示，结果显示，样品 JGRZ-SCYZ 在全基因组范围内仅检测到 55 个杂合位点，分布极为稀疏。在 12 条染色体中，杂合位点无明显聚集现象，各染色体上的杂合位点数量均处于较低水平。其中 1 号染色体杂合位点相对较多（约占总杂合位点的 16.4%），其次为 2 号（约 14.5%）和 3 号染色体（约 12.7%），而 10 号和 11 号染色体的杂合位点极少（均约占总杂合位点的 3.6%）。全基因组杂合位点的稀疏分布与 99.82%的高纯合度结果高度一致，表明经过系统选育和提纯复壮后的井冈软粘生产用种遗传背景高度纯合，品种内一致性优良。

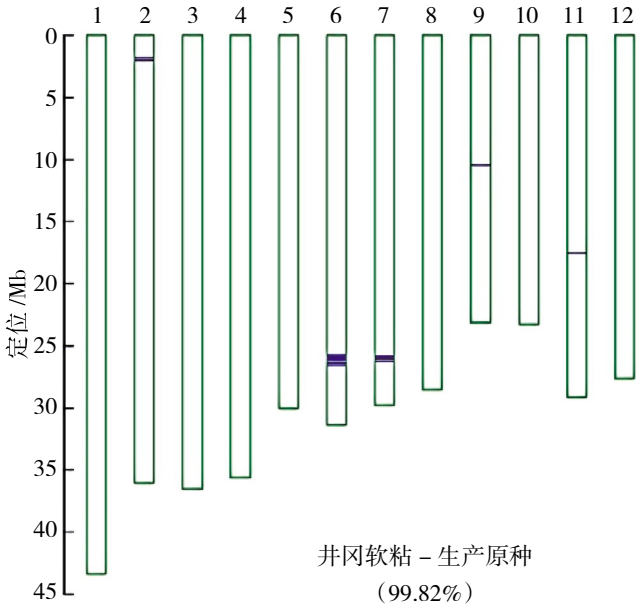


图 2　样品纯合度

2.3　农艺性状与产量表现

井冈软粘作为常规晚籼稻品种，全生育期 111.0 d，较对照天优华占（115.8 d）早熟 4.8 d。2019—2020 年江西省区域试验和 2023—2025 年生

产试验的多年多点数据（表 2）表明，井冈软粘平均株高 104.2 ~ 105.0 cm，穗长 19.7 ~ 21.0 cm，有效穗数 21.5 万 ~ 23.9 万个 /667 m²，每穗总粒数 162.3 ~ 200.0 粒，结实率 85.8% ~ 87.7%，千粒质量 15.0 ~ 16.9 g，平均产量 449.6 ~ 491.3 kg/667 m²。与亲本品种“中二软占”（产量 412.0 kg/667 m²，千粒质量 18.5 g，直链淀粉含量 22.0%）相比，井冈软粘在保持优良食味品质的同时，产量提高 9.1%，直链淀粉含量降低 7.0 百分点，食味品质显著改善。田间表现整齐一致，株型紧凑，分蘖力强，茎秆较粗壮，叶片窄、短、挺直，稃尖无色，穗大粒多，着粒密，结实率较高。多年多点数据变异系数均小于 8%，表明品种性状稳定。

表 2　井冈软粘与对照品种主要农艺性状比较（2019—2025 年多年多点试验）

性状	井冈软粘	中二软占（亲本）	天优华占（CK）
全生育期 /d	111.0	115.0	115.8
株高 /cm	104.2 ~ 105.0	108.5	112.3
穗长 /cm	19.7 ~ 21.0	18.5	20.1
有效穗数 /（万个 /667 m²）	21.5 ~ 23.9	19.8	20.5
每穗总粒数 / 粒	162.3 ~ 200.0	155.6	168.2
结实率 /%	85.8 ~ 87.7	82.3	83.5
千粒质量 /g	15.0 ~ 16.9	18.5	23.5
产量 /（kg/667 m²）	449.6 ~ 491.3	412.0	468.5
直链淀粉含量 /%	15.0	22.0	21.5

2.4　米质分析

经农业农村部食品质量监督检验测试中心（武汉）多年米质分析，井冈软粘米质稳定达部标 3 级（表 3）。2019—2020 年区域试验和 2023—2025 年提纯复壮株系验证结果一致：井冈软粘出糙率 80.7%，精米率 70.7%，整精米率 60.0%，粒长 5.9 mm，粒型长宽比 3.2，垩白粒率 9.0%，垩白度 3.6%，透明度 1 级，直链淀粉含量 15.0%，胶稠度 60.0 mm，碱消值 6.3 级。各指标年际间变异系数均小于 5%，表明品种米质性状稳定。根据吉安市绿色农产品促进会团体标准 T/JALNCP 1101—2023《井冈软粘》规定，特级品品尝评分值≥90 分，直链淀粉含量 13.0% ~ 22.0%，胶稠度 60 ~ 78 mm，碱消值≥6.3 级，垩白度≤2.0%。井冈软粘直链淀粉含量和胶稠度均符合特级品标准。

表 3　井冈软粘米质分析结果（2019—2025 年多年验证）

指标	测定值	变异系数 /%	指标	测定值	变异系数 /%
出糙率 /%	80.7	1.2	精米率 /%	70.7	1.5
整精米率 /%	60.0	3.2	粒长 /mm	5.9	0.8
长宽比	3.2	1.0	垩白粒率 /%	9.0	4.5
垩白度 /%	3.6	3.8	透明度 / 级	1	—
直链淀粉含量 /%	15.0	2.1	胶稠度 /mm	60.0	2.8
碱消值 / 级	6.3	1.5	米质等级	部标 3 级	—

2.5　功能基因分析

2.5.1　非生物胁迫抗性相关基因。基于文献报道的功能基因位点，对样品 JGRZ-SCYZ 进行了系统的非生物胁迫抗性相关基因型鉴定（表 4）。在耐盐性方面，*Os-HKT1;5*（SKC1）位点为“N”基因型（无信号），*OsHKT1;1*（4 号染色体）为水稻耐盐性的正调控基因。在抗旱性方面，*OsPP15*（1 号染色体）为携带增强抗旱性基因，*DRO1*（9 号染色体）为浅根基因型。在耐寒性方面，*bZIP73*（9 号染色体）为参考基因型（低温敏感），*HAN1*（11 号染色体）为携带降低耐寒性等位基因，与井冈软粘在赣中地区耐寒性一般的生产表现一致。此外，*BET1*（4 号染色体）为携带耐硼毒害有利等位基因。需关注的是，*qGMN7.1/OsNRAMP5*（7 号染色体）为高镉积累基因型，在镉污染风险田块种植时需采取农艺调控措施；*OsJAZ1*（4 号染色体）为根部长度与重量减小基因型。

2.5.2　生物胁迫抗性相关基因。在病虫害抗性方面（表 4），*Bph3*（4 号染色体）检测为阳性，具有褐飞虱

抗性遗传基础。稻瘟病抗性方面，*bsd-1*（3 号染色体）和 *LHCB5*（11 号染色体）为携带抗性等位基因，*Pi9*（6 号染色体）、*Pita*（12 号染色体）和 *Pi2*（6 号染色体）均为阳性，*Pik*（11 号染色体）芯片返回 PC，属未明确分型。白叶枯病抗性方面，*Xa23*（11 号染色体）、*xa13*（8 号染色体）和 *Xa7*（6 号染色体）均为阳性，*Xa21*（11 号染色体）和 *xa5*（5 号染色体）为“N”基因型。值得注意的是，尽管井冈软粘携带多个稻瘟病抗性基因，但区域试验田间自然诱发鉴定穗颈瘟为 9 级（高感）。这一现象可能与当地优势生理小种不匹配有关：2006—2018 年江西省监测显示，稻瘟病菌以 ZA、ZB 群为绝对优势（合计占比 >80%，部分年份超 87%），ZB13 为第一优势小种，赣中地区菌群构成与此一致。在此背景下，阳性基因与当地 ZA/ZB 小种的匹配度不足，加之 *Pik* 等关键位点未明确分型，最终导致基因型 – 表型差异显著。

2.5.3　产量与品质相关基因。在产量相关性状方面（表 4），*GE/CYP78A13/BG2*（7 号染色体）和 *OsSPL13/GLW7*（7 号染色体）为携带增加籽粒大小的有利等位基因，*GW8/OsSPL16*（8 号染色体）为携带增加粒宽的有利基因型。*Gn1a/OsCKX2*（1 号染色体）和 *NOG1*（1 号染色体）均携带增加穗粒数的有利等位基因，*PTB1*（5 号染色体）为提高结实率的有利基因型，*qNGR2/GRF4*（2 号染色体）为携带增大籽粒和提高氮利用效率的有利等位基因。在粒型与千粒质量调控方面，*GS5*（5 号染色体）和 *GL3.2/CYP78A5*（3 号染色体）均为籽粒大小正调控基因；本样品在两个位点均携带功能缺失 / 减效非参考等位（Alt），分别抑制粒宽与粒长，是限制籽粒增大的主导遗传因素。尽管 *GE/CYP78A13/BG2* 与 *OsSPL13/GLW7* 携带增加籽粒大小的有利等位，但其正向效应被 *GS5* 与 *GL3.2* 的减效效应所抵消，最终千粒质量仅 15.0 ~ 16.9 g，粒形偏窄长（长宽比 3.2）。此外，*DPL2*、*HSA1b*、*S7* 位点均表现为广亲和型。

表 4　功能基因检测结果汇总

基因名称	功能类别	基因型	效应	表型验证
Os-HKT1;5	耐盐	N	无信号	—
OsHKT1;1	耐盐	+	耐盐性增加	—
OsPP15	抗旱	+	抗旱性增加	—
DRO1	抗旱	–	浅根基因型	—
bZIP73	耐寒	Ref	低温敏感	耐寒性一般
HAN1	耐寒	+	降低耐寒性	耐寒性一般
BET1	耐硼毒	+	耐硼毒增加	—
qGMN7.1/OsNRAMP5	镉积累	–	镉积累	需农艺调控
Bph3	褐飞虱	+	增强抗性	—
bsd-1	稻瘟病	+	携带抗性等位基因	田间 9 级（高感）
LHCB5	稻瘟病	+	携带抗性等位基因	田间 9 级（高感）
Pi9/Pita/Pi2	稻瘟病	+	携带抗性等位基因	田间 9 级（高感）
Xa23/xa13/Xa7	白叶枯	+	携带抗性等位基因	—
GE/CYP78A13/BG2	籽粒大小	+	增加籽粒大小	—
OsSPL13/GLW7	籽粒大小	+	增加籽粒大小	—
GW8/OsSPL16	粒宽	+	增加粒宽	—
Gn1a/OsCKX2	穗粒数	+	增加穗粒数	162.3 ~ 200.0 粒
NOG1	穗粒数	+	增加穗粒数	162.3 ~ 200.0 粒
PTB1	结实率	+	提高结实率	85.8% ~ 87.7%
qNGR2/GRF4	氮效率	+	粒大、氮高效	—
GS5	粒宽	–	粒宽减小	长宽比 3.2
GL3.2/CYP78A5	粒长	–	粒长减小	粒长 5.9 mm
DPL2/HSA1b/S7	杂交亲和	+	广亲和型	—

注：+ 为携带有利等位基因 / 显性抗性基因，– 为携带不利等位基因 / 感病基因型，Ref 为日本晴参考基因型。

2.6　*Waxy* 基因型与直链淀粉含量预测

Waxy 基因型分析结果(表 5)显示,样品 JGRZ-SCYZ 的 *Waxy* 基因型为 Wx^{b} 型。该基因型对应的直链淀粉含量预测值为 15% ~ 20%,胶稠度为 80 ~ 81 mm,糊化温度为 71 ℃。6 个鉴定位点的分型结果均一致为纯合,表明品质性状遗传稳定性良好。Wx^{b} 型是我国南方优质籼稻中最常见的基因型之一,其直链淀粉含量中等偏低,米饭质地较软,食味品质好。胶稠度实测值显著低于基于 *Wx* 基因型的预测值,这主要与胶稠度受 *Wx* 位点之外的 *ALK/SSIIa*、*SSI*、*BEIIb* 等多个淀粉合成相关基因共同调控有关,仅依据 *Wx* 基因型预测胶稠度存在明显局限性;而直链淀粉含量作为 *Wx* 基因的主效靶标性状,预测值与实测值一致性较高。

表 5　*Waxy* 基因型分析结果

项目	预测值	实测值
Waxy 基因型	Wx^{b}	—
直链淀粉含量 /%	15 ~ 20	15.0
胶稠度 /mm	80 ~ 81	60
糊化温度 /℃	71	—
位点纯合度	6/6(100%)	—

2.7　S5 位点籼粳属性分析

S5 位点基因型分析结果显示,样品 JGRZ-SCYZ 在 S5 位点的 *ORF3*、*ORF4* 和 *ORF5* 基因上表现为“+-+”基因型组合,为典型籼稻 S5 位点基因型,确认该样品属于籼稻类型,与其品种审定信息和形态特征完全一致。

3　讨论

本研究利用 SLYm1R 高密度 SNP 芯片对井冈软粘生产用种进行了全基因组功能基因鉴定,并结合多年多点田间试验数据开展了基因型 - 表型关联分析,主要发现与讨论如下。

3.1　基因组纯度与提纯复壮效果

样品纯合度达 99.82%,杂合位点在全基因组分布稀疏无聚集,与田间杂株率从提纯前的 3.2% ~ 5.8%降至 0.18%的结果一致。高纯合度为品种稳定生产和品牌一致性提供了遗传保障。与 SSR 标记通常仅检测数十个位点相比,SLYm1R 芯片覆盖 31 753 个位点,可更全面、精准地评估品种纯度,为提纯复壮效果评价提供了更可靠的分子证据。

3.2　产量基因与高产潜力的分子基础

井冈软粘同时携带 *GE/CYP78A13/BG2*、*OsSPL13/GLW7*、*GW8/OsSPL16*、*Gn1a/OsCKX2*、*NOG1*、*PTB1* 和 *qNGR2/GRF4* 等多个产量有利等位基因。其中,*Gn1a/OsCKX2* 和 *NOG1* 增加穗粒数的基因型与每穗总粒数 162.3 ~ 200.0 粒的表型高度吻合;*PTB1*提高结实率的基因型与 85.8% ~ 87.7%的结实率一致。*OsSPL13/GLW7*(编码 SBP-box 转录因子)和 *GW8/OsSPL16* 分别通过调控穗粒数和细胞增殖促进粒长与粒宽,为高产潜力提供了分子基础。然而,*GS5* 和 *GL3.2/CYP78A5* 位点携带的功能缺失 / 减效非参考等位分别抑制粒宽与粒长,其减效效应叠加并抵消了上述籽粒增大有利等位的正向贡献,其中 *GS5* 对粒宽的减效作用更显著,导致千粒质量仅 15.0 ~ 16.9 g、粒宽减小幅度大于粒长,塑造了籽粒小且偏窄长的粒形特征(长宽比 3.2)。后续育种中可通过分子标记辅助选择,将 *GS5* 和 *GL3.2* 的减效等位替换为增效等位,同时聚合更多籽粒增大有利单倍型,以期在保持窄长粒形的同时提升千粒质量,实现产量与外观品质的协同改良。

3.3　品质基因与“软粘”特性的分子机制

Waxy 基因型为 Wx^{b} 型,该基因型通过影响 *Wx* 基因第一内含子剪接效率,降低 GBSS(颗粒结合淀粉合成酶)的表达量,从而降低直链淀粉含量。井冈软粘直链淀粉含量实测值 15.0%,属中等偏低类型,胶稠度 60.0 mm,这些特性共同决定了其较软的米饭质地和良好的食味品质,与“软粘”品种名称高度吻合。Wx^{b} 背景下胶稠度实测值(60.0 mm)低于芯片预测值(80 ~ 81 mm),这与胶稠度受 *Wx* 之外的 *ALK/SSIIa* 等多基因共同调控有关。广亲和性位点(*DPL2*、*HSA1b*、*S7*)为其作为杂交亲本提供了有利条件,可利用其优良食味品质与不同抗性基因品种杂交配组,培育兼具优质、高产、多抗的新品种。

3.4　抗性基因与田间表现的基因型 - 表型差异

井冈软粘携带 *Bph3*(褐飞虱)、*bsd-1*、*LHCB5*、*Pi9*、*Pita*、*Pi2*(稻瘟病)及 *Xa23*、*xa13*、*Xa7*(白叶枯病)等多个抗性基因,但区域试验田间稻瘟病自然诱发鉴定为 9 级(高感)。这一基因型与表型的差异可从以下机制解释:1)*Pi9*、*Pi2*、*Pita* 虽为稻瘟病广谱抗性基因,抗谱较宽,但 2006—2018 年江西省监测显示,稻瘟病菌以 ZA、ZB 群为绝对优势(合计占比 >80%,部分年份超 87%),ZB13 为第一优势小

种，赣中地区菌群构成与此一致。在此背景下，上述广谱基因对本地优势小种（尤其是 ZB13）的田间抗性可能已被部分克服，导致实际保护效果有限。2）*bsd-1* 和 *LHCB5* 为非 R 基因途径的稻瘟病广谱抗性相关基因，其抗性效应可能受遗传背景和环境因素调控，未必在田间充分表达。3）*Xa21* 和 *xa5* 两个白叶枯抗性基因缺失，可能影响该品种对白叶枯病的整体抗性水平。此外，*qGMN7.1/OsNRAMP5* 不利等位基因所致镉积累、*HAN1* 高表达等位削弱的耐寒性及 *bZIP73* 籼型等位所致的低温敏感等不利基因型将是后续回交改良的重点方向。

4　结论

1）井冈软粘生产用种纯合度达 99.82%，与田间杂株率 0.18%一致，提纯复壮效果显著。

2）该品种携带 *GE/CYP78A13/BG2*、*OsSPL13/GLW7*、*GW8/OsSPL16*、*Gn1a/OsCKX2*、*NOG1*、*PTB1*、*qNGR2/GRF4* 等多个产量有利等位基因，*Gln1a/NOG1* 与穗粒数、*PTB1* 与结实率的基因型 – 表型关联明确。但 *GS5* 和 *GL3.2* 减效等位抑制粒宽与粒长，致千粒质量仅 15.0 ~ 16.9 g，塑造长宽比 3.2 的窄长粒形。

3）*Waxy* 基因型为 Wx^{b} 型，直链淀粉含量 15.0%，基因型与“软粘”品质表型高度一致；胶稠度实测值（60.0 mm）低于芯片预测值（80 ~ 81 mm），这与胶稠度受 *Wx* 之外的 *ALK/SSIIa* 等多基因共同调控有关。

4）井冈软粘携带 *Bph3*、*Pi9/Pita/Pi2*、*Xa23/xa13/Xa7* 等多抗性基因，但田间稻瘟病 9 级高感，原因在于本地优势小种（ZA/ZB 群）对抗性基因的克服。*qGMN7.1/OsNRAMP5* 不利等位基因所致镉积累、*HAN1* 高表达等位削弱的耐寒性及 *bZIP73* 籼型等位所致的低温敏感等不利基因为后续改良重点。在江西酸性稻田，可通过硅钙镁肥调酸至 pH 值 6.5 以上、氮肥后移配施硅钾肥、破口期药剂预防及灌浆期控水降镉等农艺措施，在基因改良过渡期内有效缓解上述缺陷，提升材料的田间适应性与生产应用潜力。

5）S5 位点确认属典型籼稻，广亲和性位点有利于作为杂交亲本进行品种改良。

参考文献：

[1] 陈温福,徐正进,张龙步. 水稻超高产育种生理基础[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1995:45–48.

[2] 程式华. 中国超级稻育种[M]. 北京:科学出版社,2009:1–3.

[3] 徐　群,王　珊,袁筱萍,等. 用于水稻品种真实性验证的 SNP 位点评价[J]. 中国水稻科学,2025,39(5):635–642.

[4] 肖　武,王根发,刘福恩,等. 优质常规晚籼稻新品种井冈软粘的选育与栽培技术[J]. 种子科技,2019,37(7):77.

[5] 江西省农业农村厅. 井冈软粘品种审定公告:赣审稻 20190047[R]. 南昌:江西省农业农村厅,2019.

[6] 江西省农业农村厅. 井冈软粘（早稻）品种审定公告:赣审稻 20210008[R]. 南昌:江西省农业农村厅,2021.

[7] T/JALNCP 1101—2023 井冈软粘[S].

[8] T/JALNCP 1201—2023 井冈软粘种植技术规程[S].

[9] 彭永彬,刘梓烨,郑崇珂,等. 基于基因芯片的辐射诱变水稻新品种重要性状分析[J]. 核农学报,2026,40(7):1281–1289.

[10] Gong Z Z,Xiong L M,Shi H Z,et al. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency[J]. Science China Life Sciences,2020,63(5):635–674.

[11] 于江辉,李焱瑶,秦冠男,等. 水稻 *OsNRAMP5* 基因低镉积累突变位点功能标记的开发与验证[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):289–295.

[12] 易小平,朱　祯,周开达. 水稻抗性基因定位及相关分子标记研究进展[J]. 生物工程进展,1998(5):40–44.

[13] 韩雪琴,沈文娟,张振海,等. 水稻稻瘟病抗性基因在抗性育种中的研究进展[J]. 新疆农业科学,2021,58(3):483–492.

[14] Wang S K,Li S,Liu Q,et al. The *OsSPL16–GW7* regulatory module determines grain shape and simultaneously improves rice yield and grain quality[J]. Nature Genetics,2015,47(8):949–954.

[15] 李潜龙,王　慧,方　玉,等. 我国水稻重要农艺性状分子遗传研究进展及在育种上的应用[J]. 中国稻米,2021,27(2):21–27.

[16] 康艺维,陈玉宇,张迎信. 水稻粒型基因克隆研究进展及育种应用展望[J]. 中国水稻科学,2020,34(6):479–490.

[17] 刘智超,常龙学,艾　鑫,等. 水稻穗粒数基因 *Gn1a* 的等位基因挖掘与育种应用[J]. 中国水稻科学,2025,39(2):220–230.

[18] 叶书梅. 水稻结实率控制基因 *PTB1* 的自然变异和驯化分析[D]. 雅安:四川农业大学,2015:9–10.

[19] Sun P Y,Zhang W H,Wang Y H,et al. *OsGRF4* controls grain shape,panicle length and seed shattering in rice[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2016,58(10):836–847.

[20] 朱霁晖,张昌泉,顾铭洪,等. 水稻 *Wx* 基因的等位变异及育种利用研究进展[J]. 中国水稻科学,2015,29(4):431–438.

Identification and Comprehensive Analysis of Functional Genes in Rice Cultivar "Jinggangruanzhan" Based on the SLYm1R Chip

Guo Longping[1], Du Zhixuan[2], Huang Wan[1], Hu Zesheng[1], Xu Yan[1], Zheng Wei[3], Fan Ayu[3], Wang Liang[3]
(1. Ji'an Institute of Agricultural Sciences / Central Jiangxi Comprehensive Experimental Station, Jiangxi Rice Industry Technology System, Ji'an 343100, China; 2. Jinggangshan University, Ji'an 343100, China; 3. Ji'an Agricultural Industry Development Service Center, Ji'an 343100, China)

Abstract: This study used the high-density SLYm1R whole-genome SNP chip for rice to genotype the production-use seed sample JGRZ-SCYZ of rice cultivar "Jinggangruanzhan"and systematically identified functional genotypes associated with yield, quality, and stress tolerance. The results showed that the sample had 31 055 effectively genotyped loci and a homozygosity of 99.82%, indicating a highly homozygous genetic background. The cultivar carried multiple favorable yield-related alleles, including alleles at grain-size-regulating genes *GE/CYP78A13/BG2*, *OsSPL13/GLW7* and *GW8/OsSPL16*; genes regulating grains per panicle, such as *Gn1a/OsCKX2* and *NOG1*; and the nitrogen-use-efficiency gene *qNGR2/GRF4*. The *Waxy* genotype was Wx^b, with a predicted amylose content of 15%-20%, gel consistency of 80-81 mm, and gelatinization temperature of 71℃, suggesting a soft texture in cooked rice and good eating quality. In addition, the cultivar carried multiple resistance genes, including the brown planthopper resistance gene *Bph3*; rice blast resistance genes *bsd-1*, *LHCB5*, *Pi9*, *Pita*, and *Pi2*; and bacterial blight resistance genes *Xa23*, *xa13*, and *Xa7*. This study provides an important theoretical basis for molecular breeding, germplasm conservation, and cultivar improvement of "Jinggangruanzhan".

Key Words: Jinggangruanzhan; SLYm1R chip; Functional gene; Rice grain quality; Yield traits; Resistance gene

(上接第 12 页)

Research Progress on the Effects of Saline–Alkali Land on Rice Grain Quality and Its Regulation

Xu Peng[1], Xie Haohan[1], Zhao Zhencheng[2], Lyu Chenyang[2], Dai Qigen[2], Chen Yinglong[2], Liu Juge[1]
[1. School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Coastal Saline-Alkali Land), Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China]

Abstract: Rice cultivation on saline-alkali land is an important approach to safeguarding China's food security, expanding the cultivated land resource base, and promoting the ecological amelioration of saline-alkali land. This review systematically summarizes the differential effects of salt stress on major rice grain quality indicators, including processing quality, appearance quality, nutritional quality, and cooking and eating quality. It also presents technical pathways for optimizing rice grain quality on saline-alkali land from three aspects: breeding of salt-tolerant and high-quality varieties, coordinated optimization of planting density, fertilization, and water management, and comprehensive agronomic regulation. The review provides a theoretical basis for promoting high-yield and high-quality rice cultivation on saline-alkali land. However, several prominent problems remain in this field: the molecular and physiological mechanisms by which salt stress regulates rice grain quality are still unclear, cultivation techniques suitable for different saline-alkali soil types are lacking, and it remains difficult to improve rice yield and quality simultaneously. Future studies should focus on elucidating the molecular and physiological mechanisms underlying rice grain quality formation under salt stress and developing region-specific, simplified techniques for improving both yield and quality. These efforts will support the sustainable development and utilization of saline-alkali land, as well as stable grain production and improved grain quality.

Key Words: Saline-alkali land; Rice; Rice grain quality; Regulation

崔连瑞,翟广源,马　泉,等. 新疆冬小麦与春小麦干热风时空变化与防控差异研究进展[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):21-30(2026-09-29). DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.004.

新疆冬小麦与春小麦干热风时空变化与防控差异研究进展

崔连瑞[1],翟广源[1],马　泉[1],朱　敏[1],朱新开[1,2*]
(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/扬州大学小麦研究中心,江苏 扬州 225009;
2. 教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室,江苏 扬州 225009)

摘要:全球变暖使极端高温和干旱事件增多,干热风已成为威胁新疆小麦稳产的重要农业气象灾害。受复杂地形和干旱气候影响,冬小麦与春小麦均面临较高风险,但因生育期、群体结构和生理特性不同,受灾时段及损失程度存在明显差异。本文汇总分析了近年来新疆地区冬小麦与春小麦干热风的时空变化、致灾机制与防控措施差异。结果表明,新疆干热风总体呈频率上升、持续期延长和强度增加的趋势,东疆风险最高,南疆和北疆次之,吐鲁番盆地、哈密盆地及塔里木盆地边缘尤为突出。冬小麦灌浆期常与灾害高发期重合,易出现高温逼熟、灌浆提前终止和千粒质量下降的现象;春小麦灌浆期较短,对高温更敏感,强干热风可降低结实率并造成籽粒充实不足。其危害生理机制主要体现为植株水分失衡、气孔关闭、光合能力下降、活性氧积累、膜系统受损及碳氮代谢紊乱,最终破坏源库关系并导致减产。因此,应因地制宜选择品种,合理调整播期,加强水肥管理、气象预警和"一喷三防",未来还需融合遥感、数字农业与智能预警技术,构建适应气候变化的综合防控体系,为新疆粮食安全提供支撑。

关键词:新疆小麦;干热风;时空变化;生理机制;防控措施
中图分类号:S512.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20260080

气候变化背景下,全球极端高温、强降水、寒潮等事件频次与强度持续攀升,气象灾害已成为制约干旱区生态稳定与高质量发展的关键风险[1]。新疆地处西北干旱核心区,"三山夹两盆"特殊地形导致天气系统复杂多变,干旱、洪水、风雹、低温冻害、沙尘暴等多类气象灾害交替发生、叠加致灾[2],使得该区域农业气象灾害呈现"种类多、分布广、危害大"的显著特点,干旱、高温、干热风、霜冻等多灾种叠加频发,每年受灾面积超过 6.7 万 hm^2[3]。

新疆是我国干热风危害较严重的地区之一,也是春小麦主产区和冬小麦北移种植的重要区域。干热风通过高温低湿和伴生大风导致小麦灌浆受阻、青枯早衰、颗粒不饱满甚至空粒现象[4]。新疆麦区包括南疆冬麦区、北疆冬麦区和春麦区,独特的气候地理格局与耕作制度,造成冬小麦与春小麦生育期差异显著,面临的气象灾害风险窗口和影响机制有所不同,干热风对冬小麦和春小麦的影响呈现出鲜明的区域特色。科学认知新疆冬小麦与春小麦干热风灾害的时空演变规律,是构建适应性防灾体系的基础。近年来,数字农业技术的兴起为干热风灾害防控提供了新路径,推动防灾模式从"被动应对"向"主动防控"转变[5]。

本文旨在整合历史灾害数据与前沿防控技术,系统分析新疆小麦干热风灾害发生特征及其对冬小麦和春小麦的差异化(表 1)影响,并据此提出针对气候韧性智慧性防控建议。

1　新疆冬小麦与春小麦的干热风等级指标

干热风是春末夏初少雨、高温天气时出现的农业气象灾害,主要发生在小麦开花、灌浆到乳熟期[5]。新疆干热风主要分为高温低湿型和旱风型两类。现有文献普遍基于国家气象行业标准 QX/T 82—2019《小麦干热风灾害等级》[6],为新疆冬、春小麦设立了相同的干热风气象等级阈值,并认为不同品种的灌浆速度下降值差异不显著,因此用同一套指标是可行的,差异主要体现在危害发生的生育期和空间区域不同,而非指标数值本身。其中高温低湿型干热风等级划分为轻度(日最高气温≥32 ℃,14:00 相

收稿日期:2026-07-31;修回日期:2026-09-24。
基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2026QY21);农业农村部农业农村科技研发与推广服务项目(072502008)。
作者简介:崔连瑞(2001—),女,硕士生,主要从事作物栽培学与耕作学新技术。Email: 1914750863@qq.com。
* 通信作者:朱新开(1968—),男,教授,主要从事麦类作物遗传与栽培生理的应用基础研究与推广。Email: xkzhu@yzu.edu.cn。

对湿度≤30%，14:00 风速≥3 m/s）、中度（日最高气温≥34 ℃，14:00 相对湿度≤25%，14:00 风速≥3 m/s）、重度（日最高气温≥35 ℃，14:00 相对湿度≤25%，14:00 风速≥3 m/s），以及新疆多风地区的旱风型干热风的指标，其指标为日最高气温＞25 ℃，14:00 相对湿度＜30%，14:00 风速＞14 m/s，同等风速湿度下，春小麦受害程度重于冬小麦。但南疆、北疆、东疆各有不同的生态条件，其干热风的实际发生频率和主要类型有明显差异，对春小麦和冬小麦的影响各不相同。

2　冬小麦与春小麦干热风灾害的时空变化

2.1　时间维度变化

新疆地区干热风灾害在时间上的变化体现在三个方面。

一是历史纬度上的变化。研究认为，1961—2020 年间新疆干热风的发生频率总体呈显著增加趋势，尤其在 1990 年代以后增幅明显，这与全球变暖背景下新疆地区气温升高、相对湿度下降密切相关[7]，但年际波动幅度较大，如巴州地区近43 年来干热风呈波动上升趋势，趋势倾向率分别为10 年2.2 d 和1.2 次，2011 年后明显增多，2017、2022 年为高发年份[8]。

二是冬小麦与春小麦生育时期节律与干热风胁迫发生期的“错配”效应。干热风主要发生在 5—8 月，其中 6 月下旬至 7 月中旬为高峰期，近年来，干热风的初日提前、终日推迟，导致灾害影响期延长[9]及冬小麦与春小麦干热风发生的时段与影响程度不同（表 2）。

表 1　冬小麦与春小麦差异比较

比较维度	冬小麦	春小麦
播种季节	秋季播种，苗期或分蘖期越冬	春季土壤解冻后播种
生育特性	秋播，需经历低温春化和越冬生长，生育期长，一般超过 210 d，因种植区域差异较大	春播，春化温度偏高，无越冬生长阶段，生育期短，90～120 d
品种类型	春性、半冬性、冬性	春性
收获季节	次年春末至夏季成熟收获	当年夏季至夏末、初秋成熟收获
主要分布区域	长城以南，包括华北平原、黄淮海地区及秦岭－淮河以南部分地区	长城以北的东北平原、内蒙古、甘肃、新疆等地，青藏高原高寒地区

表 2　不同区域小麦类型及干热风影响

区域	小麦类型	致灾窗口期	生育阶段	干热风特征	年干热风日数
东疆	春小麦	5 月上旬—7 月上旬	全生育期	5 月即可达到重型干热风标准，全疆干热风最重	18～28 d
南疆	冬小麦	5 月中旬—6 月上旬	灌浆期	7 月无冬小麦，无干热风风险	无
	晚春麦	6 月下旬—7 月中旬	乳熟期—蜡熟期	小花败育＋灌浆不足	3～9 d
北疆	冬小麦	5 月下旬—6 月上旬	灌浆期	6 月中旬全部收割，干热风影响有限	3～9 d
	春小麦	6 月中旬—7 月下旬	抽穗期—乳熟期	抽穗开花期结实障碍＋灌浆不足复合影响	1～5 d
海拔＞1 700 m 山区	所有小麦	无	无	无	0 d

注：根据张祖莲等[4]、霍治国[6]、霍锦等[8]、陈颖等[9]文献汇总。

三是春小麦与冬小麦植株发育形态上的差异。干旱胁迫下，春小麦因根系分布较浅、生育期短而更依赖即时水分供给，水分亏缺对产量的负面效应更为突出，后期遭遇干热风时影响会比较显著；冬小麦因秋冬季较长营养生长期，根系发育相对充分，对阶段性干旱具有一定缓冲能力，应对干热风的能力也有所提升。研究显示，干热风对冬小麦生育后期的危害程度表现为灌浆中期＞灌浆前期＞灌浆后期，灌浆中期发生干热风的站次占总站次的50%，为全年最高峰[9]。冬小麦灌浆期长（35～40 d），5 月中下旬正值籽粒快速充实阶段，此时遭遇干热风，高温低湿导致叶片蒸腾加剧、光合能力下降，灌浆进程被迫中断，粒质量损失最为严重。春小麦的生育节律则不同，春小麦在拔节至抽穗阶段对高温亦较敏感，但此阶段干热风发生频次低于 5 月高峰期，且干热风 6 月后整体呈波动下降趋势，即生殖生

长阶段干旱较轻[10]，因此，春小麦受干热风危害的窗口较冬小麦窄，但若遭遇，因灌浆期短（仅 25～30 d），进程紧凑，恢复余地小，且春小麦灌浆期对高温更为敏感，此时高温低湿加剧蒸腾失水，根系吸水难以及时补充，造成成穗数和穗粒数下降，损失同样严重。

造成上述差异的核心机制在于两类小麦生育期节律与胁迫发生时序的错配。冬小麦与春小麦最本质的区别在于春化特性的差异，这决定了二者截然不同的生育进程。冬小麦秋播夏收，需经历低温春化阶段，在新疆通常 9 月底至 10 月初播种，次年 3 月底返青，幼穗分化始于头年秋季，幼穗分化进程缓慢，历经漫长的营养生长后于 5 月上中旬抽穗，5 月中下旬至 6 月上旬灌浆，生育期长达 260 d 以上。春小麦春播夏收，无需春化，在新疆北疆 4 月初播种、南疆 2 月底至 3 月初播种，出苗后约 20 d 即进入幼穗分化，各生育阶段进度均快于冬小麦，6 月中旬至 7 月上旬抽穗灌浆，生育期仅 100～120 d。新疆干热风最早出现在 4 月中旬至 5 月上旬，这意味着冬小麦更早暴露于干热风威胁，而春小麦灌浆期恰逢干热风高发时段。

2.2　空间分布变化

新疆干热风的分布具有显著的地域差异，空间分布呈东疆最高、北疆和南疆次之的格局，东疆和南疆发生高温低湿型重度干热风的概率显著高于北疆[11]。吐鲁番盆地、哈密盆地及塔里木盆地边缘的绿洲农业区是干热风的高发区[8-9,11-12]，其中旱风型干热风主要集中在吐鲁番市、哈密市等区域，淖毛湖和托克逊县为干热风重灾区[11]，而北疆沿天山一带及伊犁河谷地区发生频率相对较低[12]。具体而言，南疆地区的干热风发生强度与频率均高于北疆，这与南疆夏季受副热带高压控制、下沉气流强、地形闭塞导致高温低湿有关[13]。结合小麦生态类型可以看出不同区域干热风对冬、春小麦的影响不同。

2.3　灾害结构变化

有资料表明，20 世纪 80 年代中后期至 90 年代气温明显增高，降水量显著增多但分布不匀，干旱指数增加，1997 年以后随着温度增高，潜在蒸散量加剧，而降水量增加趋势减缓甚至微弱减少，导致较明显的暖干化趋势[2]。该变化在吐鲁番－哈密等干热风高发区表现突出：1991—2020 年吐鲁番高昌、鄯善和托克逊年平均气温较 1981—2010 年升高 0.4～0.6 ℃，≥40 ℃高温日数增加 3～8 d，其中高昌和鄯善降水略有减少；哈密 1961—2019 年极端高温事件频率和强度亦显著增加，暖指数在 20 世纪 90 年代末发生突变[14]。干热风监测进一步表明，吐鲁番盆地和哈密长期属于新疆干热风高发区，2020 年 CLDAS（中国气象局陆面数据同化系统）小时资料显示，旱风型干热风主要集中于吐鲁番“三十里风区”和哈密“百里风区”，若羌、哈密和吐鲁番盆地均为干热风日数、持续时间和综合强度高值区[9]，反映出新疆干热风发生类型产生了变化，高温低湿型呈显著下降趋势，旱风型干热风呈显著上升趋势，灾害程度逐步加重[11,15]，且成灾天数总体有所减少，但致灾强度在增强，对小麦生产的威胁呈现上升态势。

综上所述，干旱与干热风通过不同途径影响小麦产量，其差异受小麦类型与胁迫发生期的耦合关系调控，在气候变暖背景下，两类胁迫的交互作用趋于加剧，但体现在春小麦与冬小麦上的效应有差异。

3　干热风灾害对冬小麦与春小麦的影响及机制

在新疆独特的气候格局下，干热风对冬小麦与春小麦的影响存在显著差异，其根源在于两类小麦生育时期与干热风发生期的时序关系不同，以及由此引发的生理响应机制的分异。

3.1　干热风灾害对冬小麦的影响

冬小麦灌浆期集中在 5 月下旬至 6 月中旬，与南疆干热风高发期高度重叠[11,15]，造成高温逼熟，导致千粒质量下降、籽粒饱满度差；北疆冬小麦灌浆期较晚（6 月中下旬），则更多受重度干热风影响[13]。干热风对冬小麦的危害表现为高温低湿环境加剧蒸腾作用，根系吸水速度赶不上水分散失速度，导致灌浆期缩短、籽粒质量降低、品质下降[5]。若部分麦区叠加土壤缺墒，可能导致小麦早衰[16]。田间实践表明，灌浆期冬小麦受干热风影响后，千粒质量明显下降，直接造成产量损失。成林等[17]研究表明，中度干热风造成冬小麦减产 5%～15%，重度干热风可导致减产 20%以上，且对品质（如蛋白质含量、面筋强度）也有负面影响。

3.2　干热风灾害对春小麦的影响

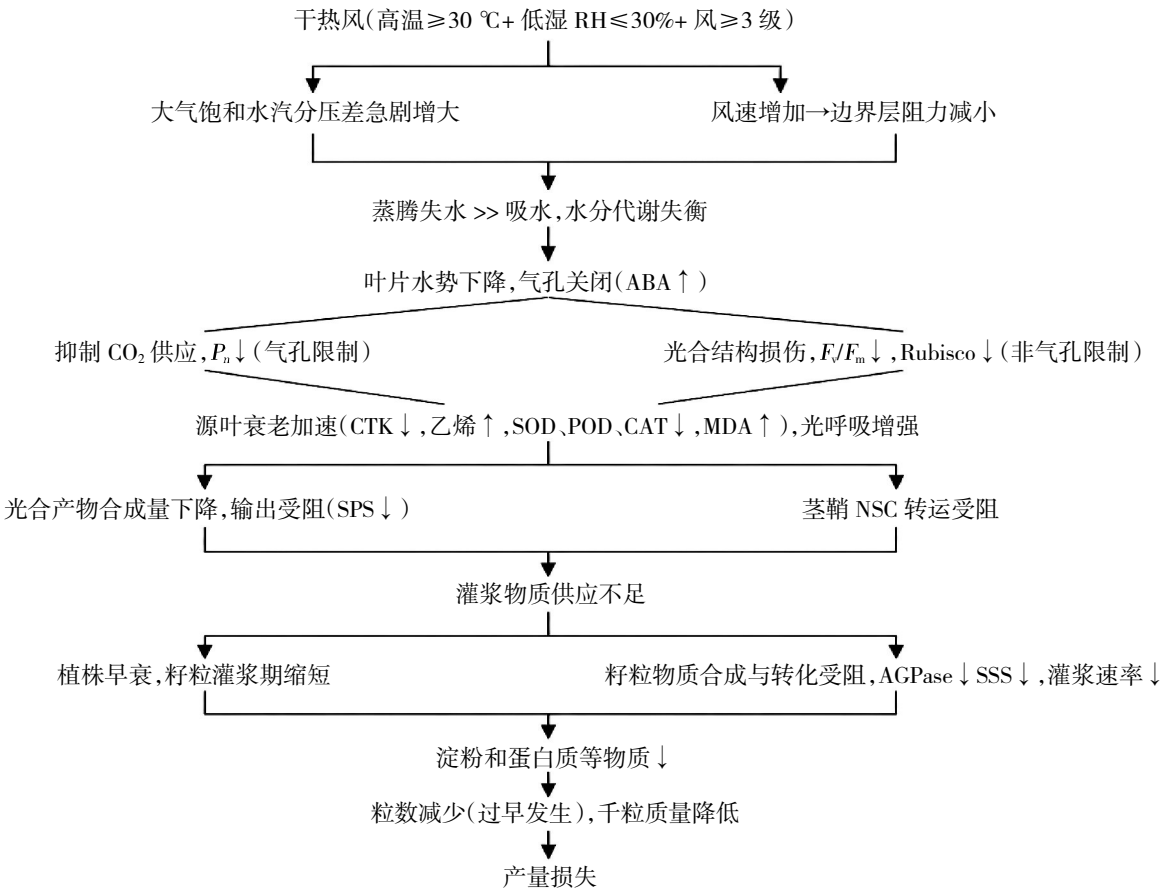
春小麦灌浆期同样面临干热风威胁，干热风导致灌浆不充分，籽粒饱满度下降，是造成春小麦减产的重要因素之一[18]。春小麦抽穗期至开花期对温度较为敏感，抽穗期至开花期的低温有利于增加穗粒数，而高温干热风则会导致花粉活力下降、结实率降低[19]。北疆春小麦抽穗开花期集中在 6 月上旬，正值北疆干热风多发时段[5]，此时遭遇干热风会导致叶片蒸腾加剧，光合作用受阻，籽粒灌浆提前终

止，造成粒质量下降、瘪粒增多，减产幅度可达 10%～30%[17,20]。

3.3　干热风灾害影响春小麦和冬小麦生产的生理机制

干热风是一种以高温（日最高气温≥32 ℃）、低湿（相对湿度≤30%）和一定风力（风速≥3 m/s）为特征的复合型灾害，是一个多系统、多层次级联放大的过程，具有“高温 + 低湿 + 风”三要素协同作用的特点，其生理伤害并非高温与干旱效应的简单叠加，对小麦的危害通过水分代谢、光合系统、呼吸代谢、抗氧化系统、内源激素及碳氮代谢等多条途径共同扰乱小麦正常生理过程，且通路间存在明显正反馈调控，其本质是水分胁迫→光合受阻→源库失衡→灌浆终止的协同致害链。各通路以活性氧膜脂过氧化为核心形成正向反馈恶性循环，最终阻碍籽粒灌浆并造成小麦减产[21-22]。核心致灾机制可概括为：1）水分平衡被打破。叶片失水速度超过根系供水能力，启动胁迫反应。2）光合双重受限。从气孔限制转向非气孔限制，碳源供应断崖式下降。3）灌浆受双重打击。时间缩短（灌浆期提前终止）+ 效率降低（淀粉合成酶失活）。4）激素主导衰落。ABA（脱落酸）和乙烯高表达，加速全株衰老（图 1）。其中叶片水势下降引发的 ABA– 乙烯激素串扰是决定源叶衰老速度的核心信号，籽粒中淀粉合成酶的耐热性是决定灌浆能否继续的关键。

3.3.1　根系吸水能力减弱与水分代谢失衡。干热风造成危害的直接原因是在高温（≥30 ℃）和低湿（相对湿度≤30%）环境下，急剧提升了大气饱和水汽分压差，显著提升叶片蒸腾速率，而根系吸水能力无法同步增强，造成大气蒸发需求超过根系供水能力，根系吸水速率无法匹配叶面散失水量，导致植株体内水分失衡，植株快速形成生理性干旱[23-24]。短期胁迫下保卫细胞合成脱落酸诱导气孔关闭，长期持续干热风会造成保卫细胞失水失活，气孔被动张开或丧失调节能力，叶片气孔蒸腾速率急剧上升，进一步加剧水分流失，叶肉与穗部细胞膨压持续降低，细胞器外部原生质失水皱缩[25]。



Rubisco—核酮糖 –1,5– 二磷酸羧化酶 / 加氧酶，SPS—蔗糖磷酸合成酶，NSC—非结构性碳水化合物，SSS—可溶性淀粉合酶，AGPase—腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶，ABA—脱落酸，CTK—细胞分裂素，SOD—超氧化物歧化酶，POD—过氧化物酶，CAT—过氧化氢酶，MDA—丙二醛，F_v/F_m—最大光化学效率

图 1　小麦干热风灾害生理影响机制

冬小麦因秋冬季漫长的营养生长期，根系发育充分，次生根多、下扎深，具备更强的土壤水分摄取潜力。然而，干热风发生时，土壤并不一定缺水，问题在于根系吸水速率无法匹配叶片蒸腾速率。冬小麦地上部生物量大，蒸腾总面积远大于春小麦，当大气蒸发力骤增时，即使根系发达，仍可能出现供水滞后，叶片水势迅速下降，气孔关闭，光合骤减。春小麦根系发育期短，根量少、分布浅，在土壤水分有限的情况下确实更为脆弱。但干热风是急性大气干旱胁迫而非渐进式土壤干旱，春小麦较低的蒸腾总面积使根系供水压力相对较小，其叶片水势下降速率可能慢于冬小麦。这解释了为何在干热风灾害调查中，春小麦群体萎蔫程度往往轻于相邻地块的冬小麦。

3.3.2　光合系统不可逆损伤与碳同化能力下降。干热风对光合作用的抑制是导致籽粒碳源不足、产量损失的首要生理原因。干热风胁迫初期，叶片通过 ABA 信号诱导气孔关闭以减少水分散失，但同时导致胞间 CO_2 浓度降低，从而导致 CO_2 供应不足，表现为气孔限制值（L_s）升高，净光合速率（P_n）下降[26]。干热风持续胁迫直接破坏叶绿体超微结构，类囊体片层松散、基粒解体，叶绿素 a、叶绿素 b 被叶绿素酶快速降解，叶片外观黄化早衰[22]；核酮糖 -1,5- 二磷酸羧化酶 / 加氧酶（Rubisco）空间构象改变、催化活性丧失，加氧活性相对升高，光呼吸速率增加，进一步消耗已固定的碳；同时光系统Ⅱ（PSⅡ）发生严重光抑制，D1 蛋白降解、光合电子传递链中断，导致最大光化学效率（F_v/F_m）下降，此时光合作用进入“非气孔限制主导”阶段[27]，光合能力进一步丧失，净光合速率（P_n）大幅降低[28-29]；同时蔗糖磷酸合成酶（SPS）活性受抑，蔗糖向籽粒的韧皮部转运受阻，叶片中光合产物输出速率减慢，导致光合产物滞留在源叶中，无法及时转运至籽粒，并会造成可溶性糖在叶片中积累，反馈抑制光合作用[7]，致使灌浆原料供给不足[19]。

冬小麦灌浆期叶面积指数大、群体繁茂，蒸腾失水总量高。干热风来袭时，叶片相对含水量急剧下降，气孔导度迅速降低，胞间 CO_2 浓度下降，净光合速率显著降低。测定表明，干热风胁迫下冬小麦旗叶光合速率降幅可达 30%～40%，且高温促进膜脂过氧化，丙二醛含量升高，细胞膜结构受损，光合功能难以恢复。

春小麦由于生育期短、株型相对紧凑，叶面积指数低于冬小麦，群体蒸腾总量较小。在干热风急性胁迫下，春小麦单位叶面积分摊的失水负担相对较轻。然而，春小麦灌浆期温度适宜性范围较窄，对高温更为敏感。当干热风发生时，高温直接抑制春小麦叶绿体类囊体膜上的光合电子传递，使光合速率在短时间内大幅下降，且因其生育进程快、叶片寿命短，受胁迫后恢复能力弱于冬小麦。

3.3.3　物质转运受限与灌浆异常，源库失调。干热风对小麦产量形成的核心生理伤害体现在籽粒灌浆过程的异常终止，涉及“源”与“库”两个方面。一方面，干热风降低了旗叶等源器官光合产物的输出速率，同时抑制了茎鞘中临时储存的非结构性碳水化合物（non-structural carbohydrate，NSC）向籽粒的转运，使光合“源”提前衰竭，导致灌浆物质供应不足[30]。另一方面，高温（特别是夜温升高）加速籽粒细胞分化与成熟过程，导致有效灌浆期缩短（通常缩短 5～10 d），即便灌浆速率有所提升，也难以弥补时间上的损失，籽粒无法获得足够的同化物，千粒质量显著下降[31]。再次，干热风胁迫下籽粒中关键淀粉合成酶（如 ADP- 葡萄糖焦磷酸化酶 AGPase、可溶性淀粉合成酶 SSS 等）活性显著下降，使“库”的接纳能力下降，同化物向籽粒的转运提前终止，直接导致淀粉积累量减少，籽粒充实不良[32]，千粒质量降低。

冬小麦灌浆期长，源库协调更依赖于光合产物持续供给，干热风在灌浆中期来袭时，正值籽粒淀粉快速积累阶段，高温对淀粉合成酶的抑制效应被放大，加之“源”端光合供应不足，形成“源库双重打击”，千粒质量下降幅度最大可达 10%～15%[19]。春小麦灌浆期短，灌浆速率本身较快，对高温的敏感窗口更集中，但因其群体相对稀疏、个体间竞争较弱，受干热风影响时单穗粒质量下降的绝对幅度可能小于冬小麦[33]。

3.3.4　氧化应激异常，能量供给紊乱。氧化损伤是逆境导致的共有伤害特征。干热风胁迫后数小时内，叶片水势可降至 -2.0 MPa 以下，线粒体有氧呼吸酶被高温激活，呼吸速率异常升高，光合固定的碳水化合物被大量内源呼吸消耗[34]，并开始触发细胞膜脂过氧化，超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）等抗氧化酶活性略有上升；持续胁迫后植株因缺氧诱导无氧呼吸启动，SOD、POD、CAT 等抗氧化酶活性则开始下降，抗坏血酸（AsA）、谷胱甘肽（GSH）等非酶抗氧化物质被

快速消耗[35],且高温与脱水协同作用引发线粒体和叶绿体中活性氧(超氧阴离子 O_2^-、过氧化氢 H_2O_2)的大量产生,超出抗氧化酶系统的清除能力,造成氧化损伤,过剩 ROS 攻击细胞膜不饱和脂肪酸,引发膜脂过氧化,丙二醛(MDA)含量显著升高,细胞膜通透性上升、胞内电解质外渗,叶绿体膜、线粒体膜、液泡膜结构受损[36],细胞区室化结构瓦解,甚至导致籽粒发育中的细胞程序性死亡[36]。伴随膜损伤,叶片叶绿素降解加速,功能叶寿命缩短 10 ~ 15 d;同时线粒体膜电位失衡,氧化磷酸化解偶联,ATP 合成效率下降,籽粒灌浆的能量供给持续匮乏[37-39]。

3.3.5 内源激素失调,诱发提早成熟。遭受干热风胁迫后,小麦根系受旱大量合成脱落酸(ABA)并向上运输,一方面叶片中脱落酸(ABA)急剧增加,诱导气孔关闭缓解失水,另一方面长期高浓度 ABA 直接抑制籽粒伸长与灌浆进程[40]。而促进生长的赤霉素(GA)、细胞分裂素(CTK)和生长素(IAA)含量显著降低,叶片保绿能力下降,加速功能叶衰老[41],同化物转运与籽粒膨大受阻。同时干热风胁迫会诱导籽粒中乙烯合成关键酶基因(如 ACS、ACO 等)表达上调,乙烯释放量增加,会促进旗叶与穗轴衰老,籽粒提前成熟,导致灌浆未充分即终止[42],加速诱发青枯逼熟现象[43-44]。

3.3.6 碳氮代谢与同化物转运受阻,抑制灌浆充实。遭受干热风胁迫后,小麦叶片硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)等活性降低,植株氮同化能力下降,光合结构的蛋白修复受阻[45-46]。同时蔗糖转运蛋白基因(SUT)表达下调,旗叶蔗糖无法高效向籽粒转运,茎、叶糖分滞留,籽粒淀粉合成底物不足,最终限制灌浆充实[47]。

这几条生理通路相互交联、正向反馈叠加,最终导致小麦灌浆期缩短、穗部青枯,千粒质量与穗粒数下降,产量显著损失。

4　冬小麦与春小麦应对干热风的管理措施

新疆干热风的加剧与气温升高、降水减少、大气干燥度增加密切相关,尤其与西风带环流异常及青藏高原热力作用有关[48]。无论冬小麦还是春小麦,其干热风的评价指标是一致的,一些共性措施均有助于减轻干热风危害,但因冬、春小麦的生理反应与生育进程不同,应对措施也有其特殊性。基于上述差异,新疆冬、春小麦干热风防控应采取“因类型施策、因时期施策”的差异化策略,其中灌溉与化控是共性基石,但冬小麦侧重“抗性培育”,春小麦侧重“应急保护”[15]。

4.1　共性措施

4.1.1 加强气象监测与预警。在不同区域合理布局气象传感器、智能报警装置、视频监控等智能化气象要素自动采集设备,建立包括数据采集、通信传输、云平台等,结合通用分组无线业务(general packet radio service,GPRS)、5G 等先进的无线传输方式,实现气象要素实时上传、存储分析、超限报警、远程管控等环节的数据采集与传输,依托组网运行的 X 波段相控阵雷达、精细化雨量预报等多源数据,研发最优面雨量预报产品,融合水文模型,构建智能化的气象监测与灾害预警平台,提升气象部门干热风预报的精度与准度,为在干热风来临前提前采取灌溉(以水调温)、喷施叶面肥、抗蒸腾剂等应急措施[18,49]提供决策参考,也为后续应对提供预案保证。

4.1.2 改善农田生态环境。西北风大,在麦田主风向(西北 – 东南向)营造网格状农田防护林带(杨树、新疆杨等),网格面积 20 ~ 40 hm^2/ 格,能有效降低风速 20% ~ 30%,提高湿度,减轻干热风直接吹袭[50];同时加强田间排水系统建设,防止雨后高温高湿诱发病害[51]。

4.1.3 合理调控水肥。推广滴灌、秸秆覆盖等保墒技术,减少土壤蒸发,降低地温,改善田间小气候。灌水调控是应急关键,干热风来临前 3 ~ 5 d 进行“热风前灌水”,采用滴灌、喷灌等节水技术,浇灌 150 ~ 225 m^3/hm^2,持续 2—3 次,可增加土壤湿度和田间小气候湿度而不积水,有效降低冠层温度、延缓叶片衰老;结合测土配方施肥,能提高水分利用效率,减少后期水分胁迫[52-53]。切忌大水漫灌,否则易导致地温骤降、根系缺氧、倒伏。

4.1.4 推广一喷三防。推广一喷三防(喷施杀菌剂 + 杀虫剂 + 植物生长调节剂 / 叶面肥)综合作业技术,防病治虫的同时增强抗逆性,如喷施 0.2% ~ 0.3%磷酸二氢钾溶液和芸苔素内酯可增强叶片保水能力,维持光合功能;喷施 6–BA(6 – 苄氨基嘌呤)可延缓叶片衰老,维持灌浆后期同化物供应。在干热风来临前 1 ~ 2 d,全田喷施聚丙烯酰胺(PAM,0.2% ~ 0.3%溶液)或黄腐酸,形成叶片保护膜,亦能降低叶片蒸腾速率 30% ~ 50%,延缓叶片枯死[54]。

4.1.5 适时收获。干热风可能加速成熟,需根据籽粒色泽和含水量及时调整收获期,避免过度失水导

致减产。

4.2　个性化措施

4.2.1　品种选择。郭晓丽等[55]研究表明，选育和推广根系发达、叶片蜡质层厚、蒸腾强度低、灌浆速度快的冬小麦品种，是减轻干热风危害的根本途径。针对春小麦生育期短、根系浅、恢复能力弱的特点，核心策略是“全程抗逆”与“窗口严防”，早熟品种因能部分避开干热风高峰期，损失相对较轻；而晚熟品种受害风险更高[56]，因而春麦区则应选用抗旱耐热型的早熟、灌浆速度快、叶片持绿性强的春小麦品种，避开干热风高发期[57]，如新春 6 号、新春 43 号等在新疆表现优异的品种。

4.2.2　合理耕管，构建健壮群体。针对冬小麦灌浆盛期与干热风高峰期高度重合的特点，核心策略是“前移避灾”与“功能保源”。

冬小麦通过控制播期和播量，避免群体过大导致后期郁闭、蒸腾加剧，减轻干热风危害。现阶段极晚播（10 月底播种、冬前不灌水）模式已获成功，春性品种在此模式下出苗率和产量表现优异[58]。春小麦则适当晚播可使小麦幼穗分化和灌浆进程整体后移，使灌浆期避开干热风多发时段，亦是有效避灾措施之一[59]。

合理肥水运筹也是一项重要的措施。通过有机肥与无机肥搭配，平衡施用氮、磷、钾肥，可培育健壮个体，增强茎秆抗倒伏能力和叶片保水能力[54]，提升植株抗逆性；返青后针对春季多风、土壤水分蒸发极快的特征，应及时进行顶凌耙耱或镇压，切断土壤毛细管，以减少土表水分蒸发，促进根系下扎[53]，能有效提高冬小麦植株深层吸水和抗风能力；拔节前后采取控水、蹲苗等措施，可促进小麦拔节后根系深扎，并增强茎秆机械强度，防止群体过旺、茎秆纤细，增强抗倒性；干热风来临前 2 ~ 3 d 适度灌水，可显著提高土壤和空气湿度，降低地表温度，能降低干热风胁迫程度[60]。

春小麦在播种前进行深松（深松 35 ~ 40 cm）或深耕，打破犁底层，结合秸秆覆盖或地膜覆盖，可有效提升土壤蓄水能力，显著减少地表蒸发，提高土壤深层水分储存，为后期水分供应提供保障[61-62]。适当早播（提前 5 ~ 7 d），播期应尽可能提前（3 月上旬至 4 月初），利用早春土壤解冻后的墒情播种，可使抽穗—灌浆期提前 5 ~ 7 d，避开 7 月上旬干热风高发期[63]。部分区域研发的“春小麦冬播”模式可使生育期提前、灌浆期前移，有效避开干热风高发时段，同时水分利用效率提高 24.0%、产量提高 8.7%，是在新疆极具推广价值的策略[64]。群体调控方面，适当降低播种密度可使群体通透性改善，减少株间湿热郁积，降低干热风危害；水肥一体化需在拔节至抽穗期保证水分供应，促进根系下扎和穗分化完成；灌浆期遇干热风预警，及时进行“热风前灌水”和叶面喷肥，由于春小麦灌浆期短且集中，应急措施的时效性要求更高。

4.2.3　适时化调化保，提升植株抗性。冬小麦抽穗至灌浆期，喷施磷酸二氢钾（0.2% ~ 0.3%）、黄腐酸或芸苔素内酯等，可增强叶片保水能力，延缓衰老，提高光合效率[65]。此外，氯化钙溶液（0.1%）喷施可降低气孔导度，减少蒸腾失水。

春小麦三叶期至拔节前，喷施多效唑（100 ~ 200 mg/L）或矮壮素，控制基部节间伸长，防止后期倒伏；同时，适度控水炼苗（蹲苗），促进根系发育，提高细胞质浓度和渗透调节能力[66]，这是西北干旱区特有的“抗旱锻炼”策略。在干热风预警发布前 1 ~ 2 d，喷施蒸腾抑制剂（如 FA 旱地龙、聚丙烯酰胺）或黄腐酸类抗蒸剂，可显著降低叶片气孔导度，减少水分损失[67]。

5　结语

新疆干热风灾害总体呈“东疆最重、北疆南疆次之”的空间格局，且重度干热风占比呈上升态势。冬小麦和春小麦由于生育进程、根系发育及灌浆期不同，与干热风高发时段的重叠程度也存在差异。冬小麦受害主要集中在 5 月中下旬至 6 月上旬的灌浆期，高温、低湿和大风会加快植株失水，抑制光合作用和籽粒灌浆，最终导致粒质量下降，由于灌浆盛期与干热风年际高峰期完全重叠，受害窗口长、程度重。春小麦生育期相对较短，抽穗、开花和灌浆期多处于 6—7 月，虽然灌浆期与干热风多发期部分重叠，但因生育期紧凑、群体蒸腾总量较小，单次灾害的绝对损失可能低于冬小麦；但一旦遇到强干热风，后期恢复和产量补偿空间较小，损失同样不可小觑。

播期优化与应急调控相结合，使小麦灌浆敏感期避开干热风峰值时段，是新疆小麦干热风综合防控的科学路径。两类小麦在采用气象预警、合理灌溉和“一喷三防”等共同措施的同时，还应根据自身的特点进行针对性防控。冬小麦应重点培育简单群

体和根系，防止群体过旺，并在抽穗灌浆期通过适时灌水、叶面施肥等方式维持叶片功能和籽粒灌浆；春小麦则更应重视早熟耐热品种、适期早播和土壤保墒，使关键生育期尽量避开干热风高峰，并加强抽穗至灌浆阶段的应急灌溉和抗蒸腾调控。今后还需结合不同麦区生态条件、小麦品种生态类型和灾害类型，进一步提高干热风监测预警和分类防控的针对性。

参考文献：

[1] 张　强,黄建平,杨金虎,等. 中国干旱、半干旱区气候变化及影响研究百年进展[J]. 气象学报,2025,83(3):699-715.

[2] 杨　涛,张晋茹,杨莲梅,等. 近 60 年新疆主要气象灾害变化特征及其防灾减灾对策建议[J]. 气象科技进展,2022,12(6):129-134.

[3] 苏　芳,刘　钰,汪三贵,等. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(8):140-152.

[4] 张祖莲,毛炜峄,姚艳丽,等. 2020 年新疆南部区域干热风精细化特征分析[J]. 干旱区研究,2022,39(1):84-93.

[5] 吉春容,李　琼. 新疆首次开展中长期农业气象灾害风险预警业务[N]. 中国气象报,2025-07-17(02).

[6] 霍治国.《小麦干热风灾害等级》(QX/T 82—2019)解读[J]. 气象标准化,2021(3):24-29.

[7] 王文静,延军平,刘永林. 新疆旱涝气候的南北差异性分析[J]. 干旱区研究,2016,33(3):609-618.

[8] 霍　锦,余惠乔,张仕明,等. 新疆巴州地区小麦干热风时空变化特征及风险区划[J]. 中国农学通报,2024,40(32):135-142.

[9] 陈　颖,邵伟玲,曹　萌,等. 新疆夏季高温日数的变化特征及其影响因子[J]. 干旱区研究,2020,37(1):58-66.

[10] 祁嘉郁,巴特尔·巴克. 基于水分亏缺指数的北疆春小麦不同生育阶段干旱时空特征[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(4):171-178.

[11] 赵　毅,武红旗,范燕敏,等. 近 60 a 来新疆小麦干热风灾害时空变化的特征分析[J]. 新疆农业科学,2025,62(3):600-608.

[12] Li Q,Yan J J,Cheng J H,et al.A study on the optimization of ecological spatial structure based on landscape risk assessment:a case study of Wensu County,Xinjiang,China[J]. Land,2025,14(7):1323.

[13] 元慧慧,滕　军,李　杰,等. 南疆夏季高温干旱时空变化特征及环流异常形势分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(12):73-79.

[14] 康丽娟,巴特尔·巴克,罗那那,等. 1961—2013 年新疆气温和降水的时空变化特征分析[J]. 新疆农业科学,2018,55(1):123-133.

[15] 来有鹏. 我国干热风研究进展[J]. 青海农林科技,2022(3):57-60,81.

[16] 郑昌玲,郭安红,赵晓凤,等. 2023 年夏收粮油作物生育期气象条件及其影响分析[J]. 中国农业气象,2023,44(10):964-969.

[17] 成　林,张志红,方文松. 干热风对冬小麦灌浆速率和千粒重的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):248-254.

[18] 霍治国,尚　莹,邬定荣,等. 中国小麦干热风灾害研究进展[J]. 应用气象学报,2019,30(2):129-141.

[19] 罗文凡,唐志勇. 焉耆垦区不同气象条件下新春 6 号农艺性状对比分析[J]. 新疆农垦科技,2014,37(5):11-13.

[20] 赵　鸿,李凤民,熊友才,等. 土壤干旱对作物生长过程和产量影响的研究进展[J]. 干旱气象,2008,26(3):67-71.

[21] 张嵩午,王长发,冯佰利,等. 冷型小麦对干旱和阴雨的双重适应性[J]. 生态学报, 2004,24(4):680-685.

[22] 胡吉帮,王晨阳,郭天财,等. 灌浆期高温和干旱对小麦灌浆特性的影响[J]. 河南农业大学学报,2008,42(6):597-601,608.

[23] Jin Y R,Chen G J,Qiu X D, et al. Genome-wide linkage mapping of root system architecture-related traits under drought stress in common wheat(*Triticum aestivum* L.)[J]. Plants,2025,14(19):3023-3023.

[24] 马富举,李丹丹,蔡　剑,等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(3):724-730.

[25] Jannat R,Senba T,Muroyama D,et al. Interaction of intracellular hydrogen peroxide accumulation with nitric oxide production in abscisic acid signaling in guard cells[J]. Bioscience,Biotechnology, and Biochemistry,2020,84(7):1418-1426.

[26] Del Pozo A,Perez P,Morcuende R,et al. Acclimatory responses of stomatal conductance and photosynthesis to elevated CO_2 and temperature in wheat crops grown at varying levels of N supply in a Mediterranean environment[J]. Plant Science,2005,169(5):908-916.

[27] 罗春梅,李艳君,陈根云,等. 作物高遗传力光合性状分析与高光效基因挖掘[J]. 生物技术通报,2025,41(10):6-19.

[28] Xu Z Z,Zhou G S. Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis,nitrogen metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass *Leymus chinensis*[J]. Planta,2006,224(5):1080-1090.

[29] 马培芳,李利红,杨亚军,等. 水杨酸对高温强光胁迫下小麦叶绿体 D1 蛋白磷酸化及光系统Ⅱ功能的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(12):2632-2636.

[30] Plaut Z,Butow B J,Blumenthal C S,et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature[J]. Field Crops Research,2004,86(2/3):185-198.

[31] Wardlaw I F. Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment[J]. Annals of Botany,2002,90(4):469–476.

[32] Zhang T T,Zhang Y,Ding Y,et al. Research on the regulation mechanism of drought tolerance in wheat[J]. Plant Cell Reports, 2025,44(4):77.

[33]李剑峰,樊哲儒,张跃强,等. 新疆春小麦籽粒灌浆动态差异[J]. 新疆农业科学,2021,58(3):393–400.

[34] Vassileva V,Simova–Stoilova L,Demirevska K,et al. Variety–specific response of wheat (*Triticum aestivum* L.) leaf mitochondria to drought stress[J]. Journal of Plant Research,2009,122(4):445–454.

[35] 傅爱根,王爱国,罗广华. 铜锌超氧物歧化酶与过氧化氢反应中羟自由基的形成[J]. 热带亚热带植物学报,1998,6(2):111–116.

[36] Suzuki N,Mittler R. Reactive oxygen species and temperature stresses:a delicate balance between signaling and destruction[J]. Physiologia Plantarum,2006,126(1):45–51.

[37] Blokhina O,Virolainen E,Fagerstedt K V. Antioxidants,oxidative damage and oxygen deprivation stress:a review[J]. Annals of Botany,2003,91 (2):179–194.

[38] Suzuki N,Koussevitzky S,Mittler R,et al. ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress [J]. Plant,Cell & Environment,2012,35(2):259–270.

[39] Suliman M S E, Elradi S B M,Zhou G S,et al. Exogenous glutathione protected wheat seedling from high temperature and water deficit damages [J]. Scientific Reports,2024,14 (1): 5304.

[40] Davies W J,Zhang J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,1991,42:55–76.

[41]Yang J C,Zhang J H,Wang Z Q,et al. Hormonal changes in the grains of rice subjected to water stress during grain filling[J]. Plant Physiology,2001,127(1):315–323.

[42] Hays D B,Do J H ,Mason R E,et al. Heat stress induced ethylene production in developing wheat grains induces kernel abortion and increased maturation in a susceptible cultivar[J]. Plant Science,2007,172(6):1113–1123.

[43] Yang J C,Zhang J H,Liu K,et al. Abscisic acid and ethylene interact in wheat grains in response to soil drying during grain filling[J]. The New Phytologist,2006,171(2):293–303.

[44] 杨东清,王振林,尹燕枰,等. 外源 ABA 和6–BA 对不同持绿型小麦旗叶衰老的影响及其生理机制[J]. 作物学报,2013,39(6):1096–1104.

[45] 马冬云,郭天财,宋　晓,等. 施氮对冬小麦旗叶 RuBP 羧化酶活性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报,2010, 30(11):2197–2202.

[46] 刘秀坤,韩　冉,李晓明,等. 灌浆期小麦旗叶在高温胁迫下的转录组分析[J]. 山东农业科学,2022,54(10):1–10,16.

[47] Zarea M J, Karimi N. Zinc–regulated P5CS and sucrose transporters SUT1B expression to enhance drought stress tolerance in wheat[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2023, 42(9):5831–5841.

[48] Zhang X L,Miao J P,Wang X X,et al. Interannual variation of summer compound hot and drought events in Xinjiang and its relationship with the north Atlantic Sea surface temperature[J]. Journal of Climate,2024,37(18):4949–4960.

[49] 王春乙,王石立,霍治国,等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报,2005, 63(5):659–671.

[50] 王葆芳,赵英铭,王志刚,等. 干旱区人工绿洲不同农田防护林模式防护效应及相关性[J]. 林业科学研究,2008,21(5):707–712.

[51] 陈怀亮,徐祥德,杜子璇,等. 黄淮海地区植被活动对气候变化的响应特征[J]. 应用气象学报,2009,20(5):513–520.

[52] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 农业隐性灾害对小麦生产的影响与对策[J]. 作物杂志, 2011(5):1–7.

[53] 戴海燕,依　航,张　黎. 农业生产中气象信息服务的应用策略[J]. 农业科技与装备,2021(2):67–68.

[54] 周心易,田晨光,陆啸飞,等. 大气环境与陆地植被生态系统相互作用研究进展[J/OL]. 科学通报,2026:1–14(2026–07–15)[2026–07–31]. https://link.cnki.net/urlid/11.1784.N.20260715.1120.008.

[55] 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.

[56] 马光旭. 新疆焉耆回族自治县春小麦种植的气候条件分析[J]. 农业灾害研究,2020,10(3):97–98.

[57] 贾永红,魏海鹏,侯殿亮,等. 新疆自育春小麦品种抗旱性及农艺性状相关性评价[J]. 新疆农业科学,2023,60(12):2940–2948.

[58] 李　磊,王　铜,汪晓东,等.北疆超晚播小麦品种生育特性及产量比较[J].麦类作物学报,2020,40(7):826–831.

[59] 王艳云,檀　宁,王颜海. 小麦干热风气象因素分析及应对措施[J]. 中国农技推广,2023,39(4):95–97.

[60] 赵花荣,任三学,齐　月,等. 不同时期灌水对冬小麦干热风的防御效应[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(4):58–65.

[61] 孙婷婷,唐　甜,王鲁振,等. 不同耕作措施对旱地小麦水分利用及生长发育的影响[J]. 新疆农业科技,2022,44(3):4–6.

[62] 贾正雷. 农业耕作措施对水土保持效果的影响研究[J]. 现代农业研究,2025,31(3):59–62.

[63] 王　健,许爱玲,杨　娜,等. 运城盆地不同播期小麦干热风发生风险评价[J]. 作物杂志,2022(2):104–112.

[64] 赵鑫琳,邢俊刚,薛丽华,等. 播种模式对新疆小麦干物质积累和产量及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(5):639–647.

[65] 李好中. 小麦田喷施不同类型叶面肥对缓解干热风危害的效果研究[J]. 农业科技通讯,2016(2):55–56.
[66] 杨　倩,袁飞敏,王海庆,等. 西北旱地农家小麦品种抗旱生理机制探究[J]. 分子植物育种,2018,16(18):6105–6111.
[67] 杨培岭,廖人宽,任树梅,等. 化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展[J]. 农业机械学报,2013,44(6):100–109.

Research Progress on Spatiotemporal Variations and Differences in Dry–hot Wind Prevention and Control Between Winter and Spring Wheat in Xinjiang

Cui Lianrui[1], Zhai Guangyuan[1], Ma Quan[1], Zhu Min[1], Zhu Xinkai[1,2]
(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Wheat Research Center, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety, Ministry of Education, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Global warming has increased the frequency of extreme heat and drought events, making dry-hot wind one of the major agrometeorological hazards threatening stable wheat production in Xinjiang. Affected by complex terrain and an arid climate, both winter wheat and spring wheat are at considerable risk. However, differences in growth stages, canopy structure, and physiological characteristics lead to clear differences in the timing and severity of damage. This review summarizes recent studies and compares the spatiotemporal variations, hazard mechanisms, and mitigation strategies for dry-hot wind between winter wheat and spring wheat in Xinjiang. Overall, dry-hot wind events in Xinjiang are becoming more frequent, longer in duration, and increasing in intensity. Eastern Xinjiang faces the highest risk, followed by southern and northern Xinjiang. Turpan Basin, Hami Basin, and the marginal areas of the Tarim Basin are particularly vulnerable. For winter wheat, the grain-filling stage often overlaps with the peak occurrence period of dry-hot wind, which may induce premature ripening, terminate grain filling prematurely, and reduce thousand-kernel weight. Spring wheat has a shorter grain-filling period and is generally more sensitive to high temperatures; severe dry-hot wind may reduce kernel set and impair grain filling. The physiological mechanisms underlying the damage mainly involve plant water imbalance, stomatal closure, reduced photosynthetic capacity, excessive accumulation of reactive oxygen species, damage to the membrane system, and disturbances in carbon and nitrogen metabolism, ultimately disrupting the source-sink relationship and reducing yield. Therefore, cultivars suitable for local conditions should be selected, sowing dates should be adjusted appropriately, and water and fertilizer management, meteorological monitoring, early-warning services, and integrated foliar spraying practices such as the “one spray, three protections” strategy should be strengthened. Future research needs to integrate remote sensing, digital agriculture, and intelligent early-warning technologies to establish an integrated prevention and control system adapted to climate change and to support food security in Xinjiang.

Key Words: Xinjiang wheat; Hot-dry wind; Spatiotemporal variation; Physiological mechanisms; Prevention and control measures

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

罗招等,谭美林,王庆伟,等. 126 份水稻种质资源孕穗期耐冷性评价与鉴定[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):31–43(2026–10–26). DOI:10.14069/j.cnki.32–1769/s.2026.05.005.

126 份水稻种质资源孕穗期耐冷性评价与鉴定

罗招等,谭美林,王庆伟,张家洪 *
(安顺市农业科学院,贵州 安顺 561000)

摘要:从近年新创制及引进的 126 份水稻育种中间材料筛选耐冷性强的优良材料,为耐冷性水稻育种提供优质种质资源亲本。利用安顺市 8—9 月秋风低温的自然低温条件,采用分期晚播同期移植的方法,对 126 份材料进行孕穗扬花期的耐冷性初步评价与鉴定。结果显示,在 126 份水稻育种中间材料中,孕穗扬花期耐冷性表现为强及以上(R—HR)的材料共 21 个,占比仅 16.67%;弱及极弱(S—HS)的材料共 54 个,占比 42.86%;较强和较弱(MR+MS)的中间等级材料共 51 个,占比 40.47%;其中极弱(HS)等级材料 41 个,占比 32.54%。因此,利用自然低温条件并参考当地准确的气象资料,可准确简便地鉴定出大批量水稻种质材料的耐冷性强弱。

关键词:水稻;孕穗期;耐冷性鉴定;种质资源;冷敏指数
中图分类号:S511　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:673–6486–20260063

水稻作为喜温作物,最适生长温度为 25 ~ 30 ℃,适宜在热带、亚热带等区域生长,低温地带种植水稻极易出现冷害。低温冷害是水稻生产中全球性的气象灾害,在我国所有水稻种植区均有发生,每 4 ~ 5 年发生一次较大规模冷害事件,使我国稻谷损失 50 亿 ~ 100 亿 kg[1]。贵州位于云贵高原东斜坡上,属于低纬度高海拔山区,在 900 m 以上海拔的稻作面积占全省稻作面积的 50%,这部分区域的水稻生产容易遭受低温危害[2]。根据低温冷害发生的时期,将水稻遭受的冷害划分为芽期冷害、苗期冷害、孕穗期冷害、开花期冷害和灌浆期冷害[3]。低温不但影响水稻的高产、稳产,而且限制了水稻生产面积的扩大,在贵州大部分地区,水稻在抽穗扬花期受秋风低温影响最严重,可能造成大面积的损失或绝收[4–5]。开展水稻耐冷性研究,选育强耐冷性水稻新品种用于生产,是解决低温危害水稻生产的有效途径。筛选鉴定出强耐冷性的水稻种质资源,挖掘并利用耐冷种质,是耐冷性育种的前提和基础。早期水稻耐冷性鉴定主要包括田间自然鉴定、人工气候室鉴定和间接鉴定三种方法[6]。日本学者在研究耐冷性评价方法时,通过人工气候室模拟 12 ℃低温环境,使用显微镜观察技术检测花粉粒中淀粉的异常分布特征,同时对生理活性指标进行测定,以此形成了一套水稻耐冷性微观评价模式[7]。随着分子育种技术的发展,国际学者通过建立重组自交系群体遗传图谱,结合 QTL 定位技术,在水稻第 8 条染色体上找到了调控抽穗期耐冷性的主要位点 *qCTS8*,该发现为后续耐冷相关基因的克隆提供了主要的遗传学依据[8]。刘广林等采用早播早植和晚播晚植的田间自然鉴定方法结合人工气候室精准复鉴的方法,从 458 个水稻种质中筛选鉴定出 7 份抽穗扬花期耐冷性极强(1 级)的资源[9–10]。阮仁超等采用自然低温胁迫的方法,鉴定出了孕穗期耐冷性表现为抗 – 高抗的水稻种质资源 35 份[11]。1950—2002 年贵州每年秋风低温在时间轴上出现的概率从 8 月上旬的 8.8%上升到 9 月上旬的 48.5%;在地区分布上西部重、东部轻,高海拔(1 500 m 以上)地区重、低海拔轻;贵州中部、西部等中高海拔(900 m 以上)地区秋风低温危害频繁,程度也较重,如 2002 年全省因秋风危害,水稻减产了 134 万 t[12]。贵州水稻安全生产的形势严峻,虽然关于水稻苗期耐冷性研究有较多的报道,但目前有关水稻的孕穗期耐冷性鉴定筛选,以及高产、耐冷水稻品种育成的报道较少。本次鉴定采用分期延迟播种的方式,让参试的材料错期抽穗扬花,利用安顺市 8—9 月频发的自然低温作用于待鉴定的材料,以期准确地

收稿日期:2026–06–11;修回日期:2026–09–27。
基金项目:贵州省中高海拔水稻优异材料创制及中早熟优质杂交水稻选育应用创新能力建设(黔科合服企〔2022〕011);贵州省粮油作物优质高效增产全省重点实验室(黔科合平台 ZSYS〔2025〕037)。
作者简介:罗招等(1981—),男,高级农艺师,主要从事水稻遗传育种与栽培研究。Email: 58607791@qq.com。
* 通信作者:张家洪(1966—),男,正高级农艺师,主要从事水稻育种栽培及研究工作。Email: asrice@163.com。

筛选出耐冷性强的优良种质，发掘利用水稻耐冷新基因，为水稻耐冷育种提供优良亲本。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料为安顺市农业科学院收集、具有地方特色的常规水稻品种、新创制和引进的优异种质材料，包括粳稻资源、糯稻资源、优质籼稻及创制的优异恢复系、保持系及少量的杂交种，具有高度稳定性和明确遗传背景。所有材料从 1—126 号统一编号登记（表 1）。

表 1　供试品种（系）编号与名称

编号	品种（系）名称	编号	品种（系）名称	编号	品种（系）名称
1	X2024–6	43	B2024–1742	85	贵定红糯
2	X2024–26	44	安恢 990	86	太和香糯
3	X2024–62	45	安恢 554	87	遵义红糯
4	X2024–74	46	文恢 18	88	紫香糯
5	X2024–78	47	R3149	89	粤金丝苗 2 号
6	X2024–85	48	R3348	90	旱糯谷（紫云）
7	X2024–88	49	R3050	91	黄叶稻
8	X2024–100	50	R2875	92	滇杂 58
9	X2024–117	51	R2781	93	汉中黑优粘
10	X2024–122	52	R1244	94	湘东 321
11	X2024–128	53	安恢 1090	95	云恢 290
12	X2024–130	54	成恢 727	96	金农丝苗
13	X2024–163	55	雅恢 2115	97	本地红毛糯
14	X2024–170	56	华占	98	象牙香粘
15	X2024–228	57	贵银香 131	99	杨稻 6 号
16	X2024–247	58	巨人稻	100	长红米
17	X2024–248	59	安粳 319	101	沪旱 3 号
18	X2024–260	60	农香 40	102	旱稻早香禾
19	X2024–342	61	紫标 S–1	103	华润 2 号
20	X2024–371	62	黑糯 1485	104	安粳 698
21	X2024–397	63	中花香糯	105	黄华粘
22	X2024–454	64	安糯 2 号	106	三穗糯谷
23	J2024–1300	65	安徽晚粳香稻 –2	107	虾稻 1 号
24	J2024–1319	66	南粳 9108	108	19 香
25	J2024–1324	67	越光	109	玉珍香
26	J2024–1328	68	浙科优 288–3–4–1	110	宜香 1B
27	J2024–1333	69	云南软香稻	111	泸香 90B
28	J2024–1362	70	本地毛毛糯（关岭）	112	野香 B
29	J2024–1422	71	响壳稻（关岭）	113	农丰 B
30	J2024–1430	72	本地糯谷（平坝羊昌）	114	泰丰 B
31	J2024–1438	73	粮发香丝	115	中 9B
32	J2024–1457	74	滇屯 502	116	广 8B
33	J2024–1482	75	旱稻（黔西）	117	长粒 B
34	J2024–1508	76	多年生稻 107	118	丝香优 1920
35	J2024–1534	77	湘晚 2 号	119	宜香优 1090
36	J2024–1558	78	夜红 841	120	宜香优 1520
37	J2024–1601	79	莽稻（大黑村）	121	丝香优 1090
38	J2024–1603	80	玉免香	122	早丰优 1090
39	B2024–1638	81	粤禾丝苗	123	广帝优 1920
40	B2024–1675	82	五山丝苗	124	广源占 15 号（抗稻瘟病）
41	B2024–1696	83	大粒香	125	粤农占（特级米）
42	B2024–1703	84	香白糯	126	丰中占(中抗稻瘟病）

1.2　试验试点概况

安顺市农业科学院试验田位于贵州省普定县白岩镇(105°45′E、26°23′N),海拔 1 400 m。试验田土壤为黄壤,肥力中上等,有机质含量(质量分数,下同)36.3 g/kg、全氮含量 1.14 g/kg、有效磷含量 23.4 mg/kg、速效钾含量 179 mg/kg、缓效钾含量 139 mg/kg、全磷含量 0.91 g/kg、全钾含量 19 g/kg,前作绿肥。2025 年 7 月和 8 月平均气温分别为 21.7、20.4 ℃,9 月中旬以后平均温度降到 19.3 ℃。据 1981—2010 年安顺市 6 个观测站的平均气温资料,全市在 1981—2010 年共出现 122 次秋风天气过程[13];根据安顺市气象局提供的 2020—2025 年 8 月上旬—9 月中旬气象资料,6 年间共出现连续 2 d 以上低于 21 ℃的秋风低温天气 16 次,平均每年出现 2.7 次,自然气候条件完全符合耐冷性自然鉴定所需的环境要求。

1.3　试验设计

以抽穗期低温胁迫下的结实率(或空秕率)作为评价水稻耐冷性强弱的指标时,必须满足适当的低温胁迫的条件[11]。水稻可能受到低温影响的界限温度与品种类型(籼稻、粳稻)、遗传背景及原产地生态环境(纬度及海拔)密切相关;依据前人的研究成果[9,11,14-16],结合安顺市水稻生产实际,本次试验以日平均气温≤21 ℃持续 2 d 及以上,作为判断水稻孕穗期遭受低温影响的界限温度。

根据安顺市秋风低温出现的规律[13],采用分期晚播、同期移栽的方法种植所有参试材料。每个材料分 3 期播种,每期间隔 10 d。第Ⅰ期于 2025 年 4 月 15 日播种、第Ⅱ期于 2025 年 4 月 25 日播种、第Ⅲ期于 2025 年 5 月 5 日播种,2025 年 6 月 5 日三期同时移栽大田。每个材料每期种植 4 行,每行 6 穴,每穴种植 2 粒谷秧。所有材料按编号顺序排列种植。大田管理与当地生产管理水平相同。田间记录各材料各播种期的主要生育期。

成熟后,考察每个材料各播期的结实率。根据田间记录的始穗期、齐穗期,比对 2025 年 8—9 月的气象资料,如果某个材料某一播期的始穗—齐穗这段时间处于日平均气温≤21 ℃并持续 2 d 及以上时,它成熟后的最低结实率记作低温结实率,没有受到低温连续影响的最高结实率记作正常结实率。用单株结实率计算冷敏指数(I_{CR}),以此作为主要指标评价各个材料孕穗期耐冷性的强弱;结合“水稻耐冷性自然低温鉴定评价标准表”中的低温结实率、三期结实率标准差评判各个材料孕穗期耐冷性的强弱。

1.4　气象数据收集

利用安顺市气象局自动气象站网络,收集试验期间 8—9 月的气温、极端温度、降水量和日照时长等重要气象指标。

1.5　冷敏指数计算

冷敏指数(I_{CR})是评价水稻对低温冷敏程度的核心指标,其计算公式参照《贵州省杂交籼稻耐冷性鉴定与评价技术规范》,如下所示:

$$I_{CR}=\frac{\text{正常结实率}-\text{低温结实率}}{\text{正常结实率}}\times 100\%。$$

冷敏指数直观反映了水稻在低温环境下的结实能力。一般来说,冷敏指数越低,说明水稻对低温的敏感性越低,其耐冷性也就越强。

1.6　耐冷性评价标准

按照贵州省农业科学院和贵州省种子站联合编写的《贵州省杂交籼稻耐冷性鉴定与评价技术规范》,水稻耐冷性分为 6 个等级(表 2)。本次试验将《贵州省杂交籼稻耐冷性鉴定与评价技术规范》拓展应用到粳稻和糯稻的耐冷性鉴定与评价,并在评判方法上做了如下补充:

1)直接根据冷敏指数的计算公式,计算各种质材料的冷敏指数,判断它们的耐冷性强弱。

2)三个播期都没有遭遇低温或三期都遭遇秋风低温危害的情况,以最低结实率代替低温结实率,最高结实率为正常结实率计算冷敏指数。

表 2　水稻耐冷性自然低温鉴定评价标准及等级

等级评价指标	1 级极强(HR)	3 级强(R)	4 级较强(MR)	6 级较弱(MS)	7 级弱(S)	9 级极弱(HS)	备注
低温结实率/%	≥75.1	70.1 ~ 75.0	65.1 ~ 70.0	55.1 ~ 65.0	45.1 ~ 55.0	≤45.0	数值越高耐冷性越强
三期结实率标准差(s)	≤10.0	≤15.0	≤15.0	≤20.0	≤20.0	≥20.1	降幅越小耐冷性越好
冷敏指数 I_{CR}/%	≤10.0	≤15.0	≤20.0	≤25.0	≤30.0	≥30.1	水稻孕穗开花期耐冷结实能力
叶赤枯度(目测)	无赤枯	轻微黄化	轻度赤枯	明显赤枯	变赤褐色	变褐色	作为耐冷性参考辅助鉴定指标

3）低温结实率高于正常结实时，用三期结实率标准差和最低结实率综合判断它们的耐冷性强弱，取耐冷性最弱的一项作为最终评价标准。

4）三期结实率都很低时，直接判定为极弱。

1.7　数据处理与分析

所有试验数据采用 Excel 2019 进行整理、统计计算各项指标的平均值、标准差、占比等（结果均保留小数点后两位）。

2　结果与分析

2.1　参试材料不同播期下生育期的变化

春分过后，北半球自南向北气温逐步回升，日气温的总体回升趋势中常伴有剧烈冷暖波动，但总体呈上升趋势。理论上随着气温的升高，各个作物的生长发育也变快，播始历期的有效积温所需时间缩短，但由于每年 4—5 月气温的回升趋势常有剧烈波动，又因为活动积温的原因和不同品种（系）特征特性不一致，导致本次试验材料每一期播种的播始历期变化范围较大。

从表 3 可以看出，播种期推迟会显著延迟大多数参试材料的始穗期和齐穗期，间隔 10 d 播种，始穗期最高会推迟 27 d；但有个别材料（编号 61）Ⅲ期播种的始穗期比Ⅱ期的提前 2 d，62 号材料在Ⅰ期和Ⅱ期播种的始穗期没有变化，24、45 和 50 号材料在Ⅱ期和Ⅲ期播种的始穗期没有变化，可能是这几个材料对温度升高比较敏感，整体生育进程提前；也可能是有效积温的原因，晚播种的材料当有效积温满足后就开始抽穗扬花。

Ⅰ期于 4 月 15 日播种，其始穗期集中在 8 月上旬至中旬，齐穗期在 8 月中下旬。Ⅱ期于 4 月 25 日播种，始穗期相应推迟至 8 月中下旬，齐穗期延至 8 月下旬至 9 月上旬。Ⅲ期于 5 月 5 日播种，始穗期进一步推迟至 8 月下旬至 9 月上旬，齐穗期集中在 9 月上旬至中旬。表明调节播期可有效调控水稻生育进程。利用这一规律，能够增加各参试材料在孕穗扬花期遭遇自然温度的概率，从而为耐冷性鉴定提供必要的低温处理条件。

2.2　秋风出现的时间及对各种质材料的影响

表 4 显示，2025 年 8 月 12 日，安顺第一次迎来降温，8 月 15—16 日出现第一次强度较小秋风，但持续时间较短。第一次秋风结束后，8 月 19 日又迎来了第二次秋风，此次秋风低温天气持续 5 d，温度也较低；本次秋风过后至 8 月 31 日，期间气温起伏较大，出现了一次连续 2 d 的秋风危害。9 月上旬，安顺市气温较高，到 9 月中下旬再次出现秋风低温天气，此次低温持续时间最长，平均温度也最低，对处在这段时间抽穗扬花和灌浆结实的水稻影响较大。将每个材料三期播种的始穗期和齐穗期与安顺市普定县 8—9 月的气温比对，可清楚地观察到 47、100、108 号这 3 个材料各播期在孕穗扬花时都没有遭遇秋风低温的危害。其余材料在孕穗扬花期都受秋风低温的影响，有的材料甚至在三个播种期都遭遇了秋风低温。

2.3　参试材料不同播种期结实率的变化

影响水稻结实率的因素可分为内在的遗传、生理因素与外部的生态环境因素。同一品种在同一地点相同水平下分期播种种植，造成不同播期结实率相差较大的主要原因是分期播种导致抽穗扬花期处于不同时间段的温差、降雨量变化；低温会影响水稻小孢子的分化发育，也会影响颖花的展开和花药裂开，导致结实率下降；降水会影响散粉受精，使空秕率增加。各期结实率详见表 5。

参试的绝大多数材料，从始穗到齐穗这个时间段遭遇过低温胁迫，它们的结实率明显比相同品系未遭遇低温胁迫的结实率要高；根据胁迫低温的强度和时间长短不同，同一材料的结实率有明显的差异。其中有 3 个材料的三个播期在孕穗扬花时都没有遭遇低温胁迫，但它们的结实率都表现出随播种期推迟结实率下降的情况。如编号 100、108 这两个材料，第Ⅰ期播种的始穗期在 8 月上旬，第Ⅲ期播种的始穗期在 8 月 30 日，Ⅰ期和Ⅲ期的结实率相差明显。从气象资料上分析，虽然Ⅲ期在抽穗扬花时没有遭遇低温的危害，但它们齐穗后一周遭遇时间更长、强度更大的低温阴雨天气，影响了它们的灌浆结实，导致这两个材料在第Ⅲ期播种情况下结实率明显低于前两期；第 47 号材料，它的三个播期始穗时间都在 8 月上旬，每个播期两两间的结实率平均相差 7%左右，也都是随播期的推迟而下降，造成Ⅱ和Ⅲ结实率下降的原因可能也是它们在齐穗后很快就遭遇低温阴雨天气。这 3 个材料在本次鉴定过程中，因为没有遭遇秋风低温的影响，需再做鉴定以明确其耐冷特性。

表 3　参试种质资源各播种期的始穗期、齐穗期

编号	I		II		III		编号	I		II		III		编号	I		II		III	
	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）		始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）		始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）
1	08-12	08-25	08-23	09-05	09-03	09-08	43	08-11	08-18	08-16	08-22	08-20	08-30	85	07-28	08-04	08-09	08-16	08-19	08-26
2	08-04	08-16	08-14	08-26	08-27	09-07	44	08-04	08-08	08-12	08-17	08-18	08-25	86	08-09	08-15	08-22	08-27	08-27	09-01
3	08-01	08-06	08-09	08-17	08-26	09-01	45	08-05	08-08	08-11	08-16	08-11	08-16	87	08-03	08-08	08-17	08-23	08-20	08-26
4	08-05	08-13	08-20	08-27	09-02	09-08	46	08-02	08-11	08-16	08-23	08-24	08-27	88	08-08	08-14	08-19	08-25	08-28	09-02
5	08-06	08-14	08-22	09-01	08-30	09-09	47	07-31	08-06	08-08	08-11	08-08	08-12	89	08-08	08-14	08-16	08-23	08-27	09-01
6	08-04	08-11	08-15	08-20	08-27	09-07	48	08-10	08-15	08-18	08-23	08-24	08-31	90	08-16	08-23	08-25	08-30	08-26	09-01
7	07-27	08-16	08-08	08-11	08-11	08-19	49	08-15	08-20	08-24	08-31	08-28	09-02	91	08-10	08-16	08-24	08-29	08-28	09-04
8	07-24	07-29	08-20	09-04	08-24	09-01	50	08-26	09-05	08-29	09-07	08-29	09-05	92	08-03	08-09	08-10	08-16	08-21	08-25
9	08-13	08-24	08-26	09-04	09-01	09-10	51	08-12	08-18	08-19	08-27	08-27	08-31	93	08-09	08-16	08-20	08-27	08-24	08-27
10	07-25	07-30	08-06	08-16	08-10	08-20	52	08-08	08-15	08-18	08-26	08-24	09-01	94	08-06	08-13	08-17	08-24	08-24	09-04
11	08-07	08-14	08-19	08-29	08-25	09-01	53	08-10	08-16	08-24	09-02	08-26	09-01	95	07-30	08-11	08-04	08-15	08-10	08-16
12	08-06	08-11	08-20	08-28	08-24	09-05	54	07-31	08-09	08-05	08-12	08-24	09-01	96	08-06	08-14	08-14	08-21	08-27	09-02
13	08-02	08-08	08-11	08-20	08-20	08-31	55	08-08	08-13	08-22	08-29	08-28	09-04	97	08-13	08-17	08-24	08-29	08-28	09-02
14	07-28	08-05	08-13	08-26	08-26	09-03	56	08-01	08-07	08-16	08-24	08-20	08-26	98	08-10	08-16	08-22	08-28	08-30	09-02
15	07-23	07-28	08-07	08-13	08-12	08-17	57	08-07	08-16	08-19	08-29	08-26	09-02	99	08-11	08-16	08-28	09-03	09-04	09-09
16	08-03	08-11	08-13	08-21	08-20	08-29	58	08-17	08-21	08-24	08-31	08-26	09-01	100	08-03	08-11	08-28	09-03	08-30	09-05
17	07-28	07-30	08-09	08-14	08-13	08-17	59	08-06	08-15	08-16	08-25	08-23	09-02	101	08-01	08-11	08-18	08-27	08-21	08-28
18	08-01	08-08	08-14	08-18	08-19	08-26	60	08-06	08-15	08-16	08-22	08-17	08-25	102	08-20	08-27	09-02	09-07	09-05	09-09
19	08-04	08-08	08-10	08-20	08-19	09-02	61	08-10	08-16	08-26	08-31	08-24	09-04	103	08-19	08-26	09-03	09-08	09-05	09-12
20	08-05	08-15	08-09	08-16	08-12	08-20	62	08-11	08-18	08-11	08-18	08-19	08-26	104	08-04	08-09	08-18	08-28	08-30	09-04
21	08-06	08-09	08-10	08-15	08-24	09-01	63	08-08	08-15	08-11	08-17	08-19	08-28	105	08-10	08-16	08-26	09-03	08-31	09-05

（续表 3）

编号	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ		编号	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ		编号	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ	
	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）		始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）		始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）	始穗期（月－日）	齐穗期（月－日）
22	08–06	08–17	08–17	08–21	08–22	08–30	64	08–08	08–14	08–13	08–20	08–21	08–30	106	08–10	08–16	08–28	09–04	08–30	09–05
23	08–06	08–15	08–24	09–04	08–26	09–05	65	08–13	08–18	08–24	09–01	08–26	09–04	107	08–09	08–14	08–16	08–24	08–25	09–02
24	08–04	08–13	08–13	08–18	08–13	08–18	66	08–03	08–12	08–21	08–29	08–27	09–01	108	08–06	08–14	08–27	09–03	08–30	09–05
25	07–30	08–05	08–08	08–17	08–13	08–18	67	08–11	08–16	08–20	08–28	08–28	09–01	109	08–07	08–10	08–21	08–28	08–26	09–01
26	08–09	08–17	08–18	08–29	08–28	09–03	68	08–09	08–14	08–20	08–28	08–28	09–03	110	08–04	08–11	08–16	08–25	08–24	09–02
27	08–01	08–08	08–13	08–18	08–21	08–28	69	08–25	08–29	09–01	09–10	09–04	09–11	111	08–25	08–28	09–01	09–07	09–05	09–12
28	08–12	08–17	08–24	08–29	08–27	09–01	70	08–08	08–13	08–11	08–16	08–16	08–24	112	08–13	08–20	08–31	09–09	09–06	09–10
29	08–06	08–10	08–18	08–29	08–24	08–31	71	08–04	08–09	08–10	08–16	08–17	08–24	113	08–08	08–15	08–24	08–31	08–30	09–04
30	07–30	08–04	08–08	08–17	08–17	08–25	72	08–08	08–13	08–09	08–15	08–24	08–28	114	08–07	08–11	08–22	08–27	08–28	09–01
31	08–02	08–11	08–11	08–20	08–15	08–26	73	08–07	08–14	08–14	08–22	08–22	08–27	115	08–15	08–20	08–25	09–01	08–30	09–05
32	08–02	08–07	08–11	08–16	08–18	08–26	74	08–07	08–14	08–19	08–23	08–24	08–30	116	07–30	08–06	08–11	08–20	08–22	08–29
33	07–31	08–08	08–15	08–19	08–21	08–28	75	08–08	08–15	08–20	08–25	08–25	08–30	117	08–04	08–08	08–25	09–01	08–27	09–03
34	08–04	08–13	08–16	08–25	08–23	08–28	76	08–17	08–24	08–26	09–01	08–29	09–04	118	08–31	08–04	08–09	08–15	08–14	08–18
35	08–07	08–16	08–20	08–24	08–27	09–01	77	08–06	08–16	08–10	08–26	08–28	09–06	119	07–30	08–04	08–08	08–15	08–13	08–18
36	08–06	08–10	08–17	08–22	08–24	08–28	78	07–24	07–30	08–10	08–17	08–05	08–10	120	08–01	08–06	08–08	08–15	08–12	08–20
37	08–02	08–06	08–07	08–14	08–18	08–24	79	07–28	08–09	08–19	08–23	08–27	09–02	121	07–24	07–28	08–02	08–06	08–08	08–15
38	08–18	08–24	08–27	09–01	08–29	09–01	80	08–06	08–10	08–18	08–25	08–26	09–03	122	08–04	08–09	08–15	08–20	08–24	09–01
39	08–04	08–07	08–18	08–26	08–27	08–30	81	08–04	08–11	08–13	08–18	08–22	08–27	123	08–08	08–12	08–19	08–25	08–30	09–04
40	08–17	08–24	08–26	08–31	09–01	09–05	82	08–09	08–17	08–24	08–31	08–28	09–04	124	10–01	10–06	10–05	10–08	10–07	10–10
41	08–06	08–15	08–17	08–25	08–25	09–03	83	08–14	08–20	08–26	08–31	08–31	09–05	125	10–02	10–06	10–05	10–09	10–06	10–10
42	08–06	08–11	08–20	08–30	08–30	09–04	84	08–04	08–14	08–21	08–23	08–24	09–04	126	10–02	10–06	10–04	10–08	10–06	10–10

注：绿色底纹表示三期都没有受低温影响的种质材料编号；橙色底纹表示在始穗至齐穗内这段时间内至少遭遇连续了 2 d 以上≤21 ℃低温的影响。

表 4　安顺市普定县 8—9 月气象资料

日期	8 月					9 月				
	日平均气温 /℃	日最高气温 /℃	日最低气温 /℃	日降水量 /mm	日照时数 / h	日平均气温 /℃	日最高气温 /℃	日最低气温 /℃	日降水量 /mm	日照时数 / h
1	24.2	28.9	19.8		10.0	22.1	27.3	18.4		11.0
2	24.3	29.5	19.2		10.5	22.3	27.8	19.0		6.6
3	24.2	29.9	19.8		6.7	22.7	27.3	20.0		5.6
4	23.7	29.6	21.3	2.9	2.2	23.0	28.1	20.1		5.2
5	23.5	30.2	20.2	7.4	6.0	23.0	27.6	20.8		3.5
6	21.9	28.3	19.8	17.6	4.4	22.2	25.5	20.3	0	0.1
7	22.2	27.7	19.8		3.7	22.2	27.7	18.3		7.0
8	22.7	27.6	19.9		4.7	22.6	28.8	19.2	0	3.5
9	23.8	28.4	20.7		7.1	21.8	28.7	18.5	0	4.9
10	23.5	27.8	21.3	0	5.3	20.5	24.3	18.5	0	0.3
11	22.4	26.9	19.1	3.8	1.2	21.6	26.3	19.1	0	3.2
12	21.0	25.5	17.7	1.1	0.7	21.5	26.8	19.8	0	0.6
13	22.4	27.8	19.4	0	6.8	19.4	21.9	17.9	34.0	0
14	23.6	29.4	19.8		9.0	20.1	24.3	18.5	37.8	2.4
15	20.8	25.9	18.3	26.3	1.1	19.7	24.5	17.8	16.7	3.0
16	19.1	23.9	16.9	8.9	1.3	20.5	25.3	18.0	1.0	5.6
17	21.7	27.8	17.9		9.2	21.2	26.2	18.4		5.8
18	22.1	27.9	18.5		6.0	19.9	23.7	17.9	2.0	4.6
19	19.3	24.1	18.1	6.6	1.4	21.3	26.8	18.4	0	6.6
20	19.5	22.3	18.1	2.5	0.1	21.6	27.6	18.1	0	7.3
21	19.1	20.9	17.8	37.7	0	20.0	24.8	18.2	2.5	1.9
22	18.3	19.4	18.1	31.4	0	19.2	23.3	17.3	0	0.6
23	20.2	24.0	18.1	1.0	1.5	17.6	20.9	16.5	5.0	0
24	21.6	27.4	18.5	0	6.3	17.7	22.5	15.9	0	2.3
25	21.1	26.5	17.2	1.7	6.7	15.8	17.9	15.2	25.8	0
26	20.8	25.5	17.4		6.7	16.1	18.4	14.8	20.4	0
27	21.0	26.3	17.4		8.4	19.2	23.9	17.1	1.3	1.1
28	21.2	25.7	18.3		5.5	20.2	26.1	17.5		7.1
29	20.3	25.9	17.7	1.0	3.6	18.1	21.6	15.7	1.6	0.2
30	21.2	25.8	17.6	2.0	6.2	17.8	18.9	17.2	20.8	0
31	22.1	27.3	17.6	0	5.4					
平均 / 累计	21.7	26.6	18.8	151.9	147.7	20.4	24.8	18.1	168.9	100.0
月极值		30.2	16.9	37.7	10.5		28.8	14.8	37.8	11.0

注：红色底纹表示日平均气温≤21 ℃。“0”表示微量降水，小于 0.01，测不到降水值。空白表示全天没有降水。

部分材料，如 95、111 号，它们的结实率可能受遗传和生理因素的影响，本身结实率就差；124、125、126 号引种种植后生态环境变化导致生育期变长、结实变差，分析时根据结实率判断，将这 5 个材料统计为耐冷性极弱。这类材料需经驯化改造后再用于水稻精准育种。

表 5　参试种质资源各播种期的结实率

编号	各播种期结实率 /%			编号	各播种期结实率 /%			编号	各播种期结实率 /%		
	I	II	III		I	II	III		I	II	III
1	75.08	59.18	58.94	43	71.33	68.67	46.95	85	82.07	81.48	70.85
2	64.24	67.13	58.25	44	85.21	83.51	77.69	86	90.46	81.74	71.06
3	55.21	71.73	59.33	45	85.74	80.19	69.24	87	82.34	73.60	67.41
4	79.44	68.64	66.45	46	78.40	71.20	63.61	88	73.17	49.13	44.42
5	80.07	71.36	58.67	47	77.67	70.99	63.73	89	82.85	83.60	58.07
6	76.26	65.88	39.49	48	93.67	74.35	62.54	90	69.76	63.00	57.73
7	70.77	90.56	79.41	49	90.29	54.27	57.02	91	85.29	48.56	56.44
8	76.15	69.65	56.51	50	69.04	64.82	58.29	92	87.39	86.07	62.57
9	63.52	69.64	71.12	51	56.33	74.50	71.50	93	82.65	61.35	52.49
10	82.87	75.83	82.47	52	86.03	70.49	67.63	94	89.37	61.17	52.51
11	88.20	81.65	69.77	53	83.55	62.33	60.40	95	62.99	55.11	44.48
12	78.66	64.41	68.05	54	73.66	66.50	57.33	96	91.46	78.24	61.20
13	73.24	62.72	59.42	55	74.31	63.63	57.18	97	80.06	71.04	61.62
14	75.78	69.02	63.54	56	68.42	67.10	60.77	98	69.22	68.27	48.63
15	86.63	77.14	80.21	57	86.68	67.16	60.04	99	67.68	59.66	52.67
16	81.03	68.11	82.29	58	67.11	69.28	54.40	100	76.91	66.18	62.05
17	82.37	62.51	74.82	59	55.36	65.40	59.29	101	84.09	67.03	70.42
18	87.40	77.63	76.06	60	78.28	85.63	72.03	102	59.73	53.71	51.54
19	85.52	87.01	76.38	61	67.85	52.53	56.78	103	58.30	51.46	41.36
20	86.49	80.14	78.69	62	62.99	66.32	76.41	104	83.02	74.87	75.39
21	88.35	83.50	82.72	63	85.91	90.56	79.74	105	66.81	65.55	57.52
22	89.42	63.39	54.26	64	88.00	89.29	70.29	106	77.51	65.82	58.29
23	88.96	45.32	51.14	65	85.90	73.60	51.40	107	82.96	79.80	66.08
24	88.69	72.58	80.09	66	85.46	85.14	65.29	108	74.43	45.59	46.39
25	85.98	70.30	57.85	67	80.58	66.80	58.89	109	79.43	60.25	45.89
26	97.70	49.73	52.48	68	75.59	66.46	52.05	110	82.36	68.59	63.33
27	73.78	82.13	58.21	69	82.27	64.65	43.28	111	39.79	16.30	15.94
28	65.00	80.08	61.60	70	75.95	76.12	63.89	112	91.10	60.50	70.77
29	75.49	75.37	67.28	71	73.01	62.03	68.72	113	81.20	64.12	45.84
30	82.55	80.99	79.59	72	83.04	78.46	79.85	114	83.32	79.38	73.31
31	84.07	74.16	43.53	73	76.95	66.57	48.54	115	65.37	45.85	53.04
32	78.80	69.54	77.65	74	61.43	56.87	61.54	116	86.41	87.16	55.82
33	84.78	71.58	70.22	75	73.46	59.15	62.64	117	85.86	57.79	67.88
34	81.21	64.18	55.80	76	77.07	63.01	53.57	118	90.95	77.14	72.97
35	93.03	65.49	49.35	77	68.16	63.74	42.55	119	93.39	80.04	80.14
36	85.99	71.54	61.81	78	88.74	83.24	77.38	120	80.23	87.22	82.34
37	79.57	76.90	58.56	79	89.45	77.33	59.89	121	84.89	78.76	71.12
38	93.51	86.79	55.64	80	89.81	68.68	57.14	122	89.62	68.29	57.80
39	72.40	74.90	71.39	81	92.29	67.62	64.03	123	90.69	75.54	57.01
40	68.72	53.39	55.25	82	69.29	66.95	54.53	124	10.68	1.14	2.99
41	60.44	71.52	69.38	83	58.75	51.66	42.60	125	8.21	10.03	2.13
42	35.22	58.75	53.15	84	69.62	56.50	51.32	126	0.41	1.05	0.81

注：绿色底纹为三期都未遭遇秋风低温危害。

2.4　参试材料的耐冷性评定结果及分布

以相对冷敏指数为主要评判指标，结合三期结实率的标准差及低温结实率，按照“极强（HR）、强（R）、较强（MR）、较弱（MS）、弱（S）和极弱（HS）”6 个等级（表 1），对参试材料耐冷性进行评价。

按上述方法评价本次 126 份水稻种质材料，筛选出耐冷性极强（HR）的种质资源 11 份，强（R）的种质资源 10 份，较强 23 份，耐冷性极弱的种质材料最多，共有 41 份（表 6、表 7）。

鉴定结果说明，耐冷性等级属于“较弱”及以下的材料所占比例将近三分之二，这些种质材料不具备抵御秋风低温的能力。耐冷性极弱的材料占比最高，与之相对，拥有强耐冷性的种质资源数量最少（表 6、表 7）。弱多强少的分布特征表明安顺地区水稻育种工作比较缺乏强耐冷性种质资源，大部分水稻品种（系）在孕穗扬花期受到低温危害的风险较大。

从分类占比来看，耐冷性强及以上（HR+R）的材料共 21 个，占比仅 16.67%；弱及极弱（S+HS）的材料共 54 个，占比 42.86%；较强和较弱（MR+MS）的中间等级材料共 51 个，占比 40.47%；其中极弱（HS）等级材料就达 41 个，占比 32.54%，表明本次参试的种质材料整体耐冷性表现较差，仍需进一步加强耐冷性材料的创制及收集。弱（S）等级材料 13 个，占比 10.32%，该类材料在低温条件下结实率极低，无法适应贵州省中高海拔水稻种植区的气候条件，不宜在该区域推广种植或不适宜作为选育耐冷种质的亲本资源。如 124、125、126 号这三个材料出现贪青晚熟结实率差的问题，可能是由于从低海拔高温地区（广东）引种到高海拔低温地区（贵州安顺市普定县）导致的；极强（HR）等级材料 11 个，占比 8.73%，这类材料在低温条件下结实率高、冷敏指数低，是贵州省中高海拔水稻种植区水稻品种布局和耐冷育种的优异品系或资源。

表 6　参试材料耐冷性评定结果

编号	正常结实率/%	平均结实率/%	低温结实率/%	I_{CH}/%	评价等级	编号	正常结实率/%	平均结实率/%	低温结实率/%	I_{CH}/%	评价等级
1	75.08	64.40 ± 9.25	58.94	21.50	MS	64	89.29	82.53 ± 10.61	70.29	—	MR
2	67.13	63.21 ± 4.53	58.25	13.23	R	65	85.90	70.30 ± 17.49	51.40	40.16	HS
3	71.73	62.09 ± 8.60	55.21	23.03	MS	66	85.46	78.63 ± 11.55	65.29	23.60	MS
4	79.44	71.51 ± 16.26	66.45	16.35	MR	67	80.58	68.76 ± 10.98	58.89	26.92	S
5	80.07	70.03 ± 10.76	58.67	26.73	S	68	75.59	64.70 ± 11.87	52.05	31.14	HS
6	76.26	60.54 ± 18.96	39.49	48.22	HS	69	82.27	63.40 ± 19.52	43.28	47.39	HS
7	90.56	80.25 ± 9.92	70.77	21.86	MS	70	76.12	71.99 ± 7.01	63.89	—	MS
8	76.15	67.44 ± 10.00	56.51	25.79	S	71	73.01	67.92 ± 5.53	62.03	15.03	MR
9	71.12	68.09 ± 4.03	63.52	10.69	R	72	83.04	80.45 ± 2.35	78.46	5.52	HR
10	82.87	80.39 ± 3.95	75.83	8.49	HR	73	76.95	64.02 ± 14.38	48.54	36.93	HS
11	88.20	79.87 ± 9.34	69.77	20.90	MS	74	61.54	59.95 ± 2.66	56.87	—	MS
12	78.66	70.37 ± 7.40	64.41	18.11	MR	75	73.46	65.08 ± 7.46	59.15	19.47	MR
13	73.24	65.13 ± 7.22	59.42	18.87	MR	76	77.07	64.55 ± 11.83	53.57	30.50	HS
14	75.78	69.45 ± 6.13	63.54	16.14	MR	77	68.16	58.15 ± 13.69	42.55	37.58	HS
15	86.63	81.33 ± 4.84	77.14	—	HR	78	88.74	83.12 ± 5.68	77.38	12.80	HR
16	82.29	77.14 ± 7.85	68.11	—	MR	79	89.45	75.56 ± 14.86	59.89	33.05	HS
17	82.37	73.23 ± 10.02	62.51	—	MS	80	89.81	71.88 ± 16.57	57.14	36.38	HS
18	87.40	80.36 ± 6.14	76.06	12.98	R	81	92.29	74.65 ± 15.38	64.03	30.62	HS
19	87.01	82.97 ± 5.76	76.38	12.22	R	82	69.29	63.59 ± 7.93	54.53	21.30	MS
20	86.49	81.77 ± 4.15	78.69	9.02	HR	83	58.75	51.00 ± 8.09	42.60	27.48	S
21	88.35	84.86 ± 3.05	82.72	6.37	HR	84	69.62	59.15 ± 9.43	51.32	26.29	S
22	89.42	69.02 ± 18.24	54.26	39.31	HS	85	82.07	78.13 ± 6.31	70.85	13.67	R

（续表 6）

编号	正常结实率 / %	平均结实率 / %	低温结实率 / %	I_{CH}/ %	评价等级	编号	正常结实率 / %	平均结实率 / %	低温结实率 / %	I_{CH}/ %	评价等级
23	88.96	61.81 ± 23.70	45.32	49.06	HS	86	90.46	81.09 ± 9.72	71.06	21.45	MS
24	88.69	80.45 ± 8.06	72.58	18.17	MR	87	82.34	74.45 ± 7.50	67.41	18.14	MR
25	85.98	71.38 ± 14.10	57.85	32.72	HS	88	73.17	55.57 ± 15.42	44.42	39.29	HS
26	97.70	66.64 ± 26.94	49.73	49.10	HS	89	83.60	74.84 ± 14.53	58.07	30.54	HS
27	82.13	71.37 ± 12.14	58.21	29.12	S	90	69.76	63.50 ± 6.03	57.73	17.25	MR
28	80.08	68.89 ± 9.84	61.60	23.09	MS	91	85.29	63.43 ± 19.34	48.56	43.06	HS
29	75.49	72.71 ± 4.70	67.28	10.87	R	92	87.39	78.68 ± 13.97	62.57	28.41	S
30	82.55	81.04 ± 1.48	79.59	3.58	HR	93	82.65	65.50 ± 15.50	52.49	36.49	HS
31	84.07	67.25 ± 21.13	43.53	48.22	HS	94	89.37	67.68 ± 19.27	52.51	41.24	HS
32	78.80	75.33 ± 5.05	69.54	11.75	R	95	62.99	54.19 ± 9.29	44.48	29.38	HS
33	84.78	75.53 ± 8.04	70.22	17.17	MR	96	91.46	76.97 ± 15.17	61.20	33.09	HS
34	81.21	67.06 ± 12.95	55.80	31.28	HS	97	80.06	70.91 ± 9.22	61.62	—	MS
35	93.03	69.29 ± 22.08	49.35	46.95	HS	98	69.22	62.04 ± 11.63	48.63	—	S
36	85.99	73.11 ± 12.16	61.81	28.11	S	99	67.68	60.00 ± 7.51	52.67	—	MS
37	79.57	71.68 ± 11.44	58.56	26.40	S	100	76.91	68.38 ± 7.67	62.05	19.32	MR
38	93.51	78.65 ± 20.20	55.64	40.49	HS	101	84.09	73.85 ± 9.03	67.03	20.29	MS
39	74.90	72.90 ± 1.81	71.39	—	R	102	59.73	54.99 ± 4.24	51.54	—	S
40	68.72	59.12 ± 8.37	53.39	22.31	MS	103	58.30	50.37 ± 8.52	41.36	—	HS
41	71.52	67.11 ± 5.87	60.44	15.48	MR	104	83.02	77.76 ± 4.56	74.87	9.81	HR
42	58.75	49.04 ± 12.29	35.22	40.05	HS	105	66.81	63.29 ± 5.04	57.52	—	MS
43	71.33	62.32 ± 13.38	46.95	34.19	HS	106	77.51	67.21 ± 9.68	58.29	—	MS
44	85.21	82.14 ± 3.95	77.69	8.83	HR	107	82.96	76.28 ± 8.97	66.08	20.34	MS
45	85.74	78.39 ± 8.39	69.24	19.24	MR	108	74.43	55.47 ± 16.43	45.59	38.75	HS
46	78.40	71.07 ± 7.39	63.61	18.86	MR	109	79.43	61.86 ± 16.83	45.89	42.22	HS
47	77.67	70.80 ± 6.97	63.73	17.95	MR	110	82.36	71.43 ± 9.82	63.33	23.10	MS
48	93.67	76.85 ± 15.71	62.54	33.23	HS	111	39.79	24.01 ± 13.66	15.94	59.93	HS
49	90.29	67.19 ± 20.05	54.27	39.90	HS	112	91.10	74.12 ± 15.57	60.50	—	MS
50	69.04	64.05 ± 5.42	58.29	—	MS	113	81.20	63.72 ± 17.68	45.84	43.54	HS
51	74.50	67.44 ± 9.74	56.33	—	MS	114	83.32	78.67 ± 5.04	73.31	12.01	R
52	86.03	74.72 ± 9.90	67.63	21.39	MS	115	65.37	54.75 ± 9.88	45.85	29.87	S
53	83.55	68.76 ± 12.84	60.40	27.71	S	116	87.16	76.46 ± 17.88	55.82	—	MS
54	73.66	65.83 ± 8.19	57.33	22.17	MS	117	85.86	70.51 ± 14.22	57.79	32.69	HS
55	74.31	65.04 ± 8.65	57.18	23.06	MS	118	90.95	80.35 ± 9.41	72.97	19.77	MR
56	68.42	65.43 ± 4.09	60.77	11.18	MR	119	93.39	84.52 ± 7.68	80.04	14.30	R
57	86.68	71.29 ± 13.80	60.04	30.74	HS	120	87.22	83.26 ± 3.58	80.23	8.01	HR
58	69.28	63.60 ± 8.03	54.40	21.47	MS	121	84.89	78.26 ± 6.90	71.12	16.22	MR
59	65.40	60.02 ± 5.06	55.36	15.35	MR	122	89.62	71.90 ± 16.21	57.80	35.50	HS
60	85.63	78.65 ± 6.80	72.03	15.88	MR	123	90.69	74.41 ± 16.86	57.01	37.13	HS
61	67.85	59.05 ± 7.91	52.53	22.58	MS	124	10.68	4.94 ± 5.06	1.14	89.30	HS
62	76.41	68.57 ± 6.99	62.99	17.57	MR	125	10.03	6.79 ± 4.14	2.13	78.77	HS
63	90.56	85.40 ± 5.43	79.74	—	HR	126	1.05	0.76 ± 0.32	0.41	60.75	HS

表 7　参试材料耐冷性强弱等级比例

耐冷性等级	数量 / 个	占比 /%	强弱占比
极强（HR）	11	8.73	
强（ R）	10	7.94	较强及以上比例 34.92%
较强（MR）	23	18.25	
较弱（MS）	28	22.22	
弱（S）	13	10.32	较弱及以下比例 65.08%
极弱（HS）	41	32.54	

3　讨论

用自然低温条件鉴定水稻孕穗扬花期耐冷性的方法，是比较适合于大批量水稻种质资源或品种（系）的简便筛选和初步鉴定的方法[9]。相较于人工气候室法、冷水串灌法鉴定，自然低温鉴定的方法操作更简便，鉴定的群体更多，但其可靠性又相对较差；不过在低温频发的地区或年景，自然鉴定法的准确性还是比较可靠的[6]。参考 2025 年安顺市气象局提供的准确气象数据，8 月和 9 月共发生了 4 次不同程度的秋风低温天气，大部分材料遭遇了至少一次低温影响，可知本次鉴定结果的可信度较高。

在一定范围内，温度越高，作物生长发育越快，它在某个发育阶段内每日温度的累加值是一个相对稳定的数值；水稻同一品种在不同年份间播始历期的有效积温是稳定的[17]。在大批量开展孕穗期耐冷性自然低温鉴定试验时，我们利用植物生长的这个规律，通过晚播晚植或晚播同期移栽的方式，调节水稻抽穗时间，使待鉴定的水稻在孕穗扬花时增大遭遇秋风低温的概率，提高鉴定结果的可靠性。本次试验中，有 3 个材料完全没有遭遇秋风低温胁迫，与刘广林等开展的鉴定[9]相似，反映了田间自然低温鉴定结果的不确定性和不完整性。在没有低温胁迫的情况下，本次试验仍然采取替代的方法估计冷敏指数并评判这 3 个材料的耐冷性，其真实性还需要作进一步的验证。参考戴陆园等研究的水稻耐冷性鉴定评价方法[18]，本次试验将《贵州省杂交籼稻耐冷性鉴定与评价技术规范》评判方法拓展应用到粳稻和糯稻的耐冷性鉴定与评价中，并在评判方法上做了补充。同一组试验，有的试验材料用冷敏指数作为评判标准，有的试验材料用结实率或结实率转化后的标准差作为评判标准，虽然都能判断水稻孕穗扬花期的耐冷性，但评判指标的不统一，必然导致不同材料评定为同一耐冷等级时，它们真实的耐冷特性会有差异。为此，有必要连续开展耐冷性不同评判方法相关性的研究，使评价鉴定结果更加科学、准确。

为准确鉴定水稻耐冷性，孙建昌等采用冷水胁迫法结合自然低温鉴定的方法，准确地鉴定出 8 份适合做耐冷亲本的材料[19]。同时采用两种方法鉴定水稻的耐冷性虽然结果精准，然而简便易行、成本低、效果好的鉴定方法更适合耐冷育种的要求。因此，很多学者仅采用人工气候箱法鉴定水稻苗期的耐冷性，如王代鑫等用人工气候箱法培养水稻幼苗，通过测定常温和低温下 MDA 含量，精准地鉴定出 5 个耐冷性较强的品种[20]；郭辉等用同样的方法从 983 份材料中鉴定出 1 级耐冷材料 113 份[21]。说明人工气候箱的方法不仅能准确地鉴定水稻苗期耐冷性，还能大规模地开展鉴定工作。但用人工气候箱开展水稻孕穗期耐冷性鉴定的工作难度大且不能大批量鉴定，可操作性不强，所以鲜有采用人工气候箱做水稻孕穗扬花期耐冷性鉴定研究的报道。

随着分子生物学的发展，耐冷基因分子检测已经广泛地应用于水稻及各个作物耐冷性的精准鉴定。越来越多的水稻耐冷基因已经被准确定位和克隆。基因的分子标记检测效率不断提高，成本不断下降，越来越多的育种者已经利用该项技术开展耐冷性育种研究。水稻孕穗期耐冷性是一个复杂的数量性状，受多个基因调控，它的基因位点几乎分布于所有 12 条染色体上，目前，一些孕穗期耐冷QTL被精细定位[22]。挖掘更多的孕穗期耐冷基因，明确其加性效应、互作效应及显性遗传的影响，通过现代育种技术，创制具有耐冷性强且高产优质高抗的水稻新品种应用于大田生产，对推进水稻耐冷性育种工作具有重要的实际意义。

4　结论

本研究采用田间自然鉴定方法，在易受低温影响的地区——贵州普定进行试验，利用低温结实率计算冷敏指数（I_{CR}），快速鉴定供测水稻种质资源的耐冷性，从 126 个地方种质资源或自育材料中，鉴定筛选出耐冷性强及以上（HR+R）的材料共 21 个，占比仅 16.67%，极弱和弱（HS+S）等级材料 54 个，占比 42.86%，表明安顺市农业科学院现有水稻种质材料在孕穗期还是容易受到低温危害，仍需进一步加强耐冷性材料的创制及收集工作。

参考文献：

[1] 黄力士,刘凌峰,刘之熙. 水稻耐冷性研究进展与前景[J]. 湖南农业科学,2008(1):3-6.

[2] 余显权,邓加省. 水稻孕穗开花期遇秋风秋雨对产量的影响[J]. 种子,2003,22(1):64-67.

[3] 陈慧珍,江卫平,谢　蔚,等. 水稻耐冷性研究进展及建议[J]. 湖北农业科学,2015,54(2):257-261.

[4] 殷绪明,徐庆国,李海林,等. 影响水稻抗寒性的生理因素研究进展[J]. 作物研究,2006,20(5):413-416.

[5] 阳标仁,余显权,赵福胜,等. 水稻孕穗期抗冷鉴定指标选择[J]. 山地农业生物学报,2008,27(2):101-104,122.

[6] 科　文. 几种水稻抗寒性鉴定方法评述[J]. 贵州农业科学,1985,13(2):13-16,20.

[7] Koike S,Satake T. Sterility caused by cooling treatment at the flowering stage in rice plants.II. The abnormal digestion of starch in pollen grain and metabolic changes in anthers following cooling treatment[J]. Japanese Journal of Crop Science,1987,56(4):666-672.

[8] Zhou S Q,Wu T,Li X,et al. Identification of candidate genes controlling cold tolerance at the early seedling stage from Dongxiang wild rice by QTL mapping,BSA-Seq and RNA-Seq[J]. BMC Plant Biology,2024,24(1):649.

[9] 刘广林,陈传华,罗群昌,等. 2009 年自然低温下优质稻种质资源耐冷性初步鉴定评价[J]. 南方农业学报,2012,43(4):407-412.

[10] 刘广林,罗群昌,陈远孟,等. 水稻种质资源抽穗扬花期耐冷性鉴定评价[J]. 西南农业学报,2013,26(2):395-398.

[11] 阮仁超,陈惠查,游俊梅,等. 贵州稻种遗传资源耐冷性鉴定与利用评价[J]. 贵州农业科学,2004,32(1):10-13.

[12] 郑小波,陈　静. 贵州秋风的时空分布规律及其对水稻产量的影响[J]. 贵州农业科学,2003,31(5):39-42.

[13] 胡秋红,李启芬,胡　伟,等. 安顺市秋风气候概况分析[J]. 吉林农业,2019(21):101.

[14] 韩龙植,张三元. 水稻耐冷性鉴定评价方法[J]. 植物遗传资源学报,2004,5(1):75-80.

[15] 杨志奇,杨春刚,汤翠凤,等. 中国粳稻地方品种孕穗期耐冷性评价及聚类分析[J]. 植物遗传资源学报,2008,9(4):485-491,496.

[16] 王连喜,左　晋,谷晓平,等. 贵州水稻抽穗开花期秋风灾害指标初探[J]. 中国农业气象,2013,34(2):215-220.

[17] 符策强,吴清海. 有效积温在杂交稻春季制种中的应用研究[J]. 海南农业科技,1996(3):1-4.

[18] 戴陆园,叶昌荣,余腾琼,等. 水稻耐冷性研究Ⅰ.稻冷害类型及耐冷性鉴定评价方法概述[J]. 西南农业学报,2002,15(1):41-45.

[19] 孙建昌,安永平,杨生龙,等. 宁夏水稻孕穗开花期耐冷性鉴定[J]. 种子,2013,32(3):14-18.

[20] 王代鑫,徐　升,程　哲,等. 吉林省中晚熟水稻品种耐冷性鉴定结果与分析[J]. 中国稻米,2020,26(3):48-53.

[21] 郭　辉,陈　灿,张晓丽,等. 广西野生稻耐冷性鉴定与遗传纯合研究[J]. 西南农业学报,2017,30(6):1245-1250.

[22] 随晶晶,赵桂龙,金　欣,等. 水稻孕穗期耐冷调控的分子及生理机制研究进展[J]. 中国水稻科学,2025,39(1):1-10.

Identification and Evaluation of Cold Tolerance of 126 Rice Germplasm Resources at Booting Stage

Luo Zhaodeng, Tan Meilin, Wang Qingwei, Zhang Jiahong
(Anshun Academy of Agricultural Sciences, Anshun 561000, China)

Abstract: We screened 126 rice intermediate breeding lines (newly developed or introduced by our institute in recent years) to identify materials with strong cold tolerance for use as parental germplasm in cold-tolerant rice breeding. Using staggered late sowing with synchronous transplanting, these materials were evaluated for cold tolerance during the booting and flowering stages under natural low-temperature conditions (autumn cold winds from August to September). The results showed that 21 materials (16.67%) exhibited strong or higher cold tolerance (R-HR), 51 (40.47%) were intermediate (MR+MS), and 54 (42.86%) were weaker (HS), including 41 (32.54%) rated as highly susceptible (HS). Thus, by leveraging natural low-temperature conditions combined with accurate local meteorological data, large-scale identification of cold tolerance in rice germplasm can be conducted efficiently.

Key Words: Rice; Booting stage; Identification of cold tolerance; Germplasm resources; Cold relative index

欢迎订阅 2027 年《大麦与谷类科学》杂志

《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、2025 版),OA 开放获取典范期刊(维普资讯)。

《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

王梓怡,张雅婷,童　潇,等. 分蘖期淹水对水稻根系和后期光合特性及产量的影响[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):44–51(2026–08–26). DOI:10.14069/j.cnki.32–1769/s. 2026.05.006.

分蘖期淹水对水稻根系和后期光合特性及产量的影响

王梓怡,张雅婷,童　潇,张亚洁*
(扬州大学,江苏 扬州 225009)

摘要:为探究分蘖期淹水深度和时长对水稻生长及产量的影响,以江苏省主栽粳稻品种南粳 9108 为材料开展模拟淹水试验,设置淹腰(1/2 株高)、淹颈(2/3 株高)、全淹(全株高)3 种深度,分别处理 1、3、5、7 d,以常规干湿交替灌溉为对照,测定根系形态、光合参数及产量构成。结果表明,随淹水胁迫加剧,根体积、不定根数和最长根长显著下降;净光合速率、胞间 CO_2 浓度和 SPAD 值降低。除全淹 1 d 处理因穗数增加而增产 5.63%(与对照差异无统计学意义)外,其余处理每穗粒数、千粒质量和结实率均极显著下降,减产 9.86%~45.07%($P<0.01$)。相关性分析显示,净光合速率与根宽、根体积、根质量和根冠比呈显著或极显著正相关($r=0.59\sim0.81$)。分蘖期短期(1 d)全淹提高了有效穗数,使产量呈现超补偿增长趋势,但较对照增产仍不显著,当淹水深度超过 1/2 株高(淹腰)且持续 3 d 以上将导致显著减产。

关键词:水稻分蘖期;淹水胁迫;根系形态;光合特性;产量;江苏地区
中图分类号:S511　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673–6486–20260066

江苏省是我国重要的粳稻主产区,水稻种植面积常年稳定在 220 万 hm^2 以上,约占全省粮食播种面积的 40%[1]。然而,江苏地处长江中下游,6 月下旬至 7 月上旬的梅雨期与水稻分蘖盛期高度重叠,集中降水频繁,常导致稻田淹涝灾害,对水稻生产构成持续威胁[2]。里下河地区、沿江及苏南地区因地势低洼,淹涝风险尤为突出[3]。淹水胁迫造成的低氧环境会抑制根系正常生长发育[4–5]。分蘖期是水稻产量形成的关键时期,前人研究表明,淹水胁迫会显著抑制水稻根系生长,导致根长缩短、根体积减小[6–7];同时造成光合速率下降,严重时产量损失可达 30%~50%[8–9]。

水稻为沼生植物,根系适宜水田表层湿润、间歇缺氧的土壤环境,生产上常规干湿交替灌溉可满足其正常生长水分需求;分蘖期植株地上部遭受持续静水淹没时,则形成淹涝胁迫。现有研究多集中于淹水单一因素的效应分析,缺乏对不同淹水深度与时长交互作用的系统比较;淹水时间与产量损失的定量关系尚不明确,根系与地上部响应机制的关联性研究仍待深入。为此,本研究以江苏省主栽粳稻品种南粳 9108 为材料,在扬州大学土培池进行模拟淹水试验,设置 3 种淹水深度(1/2 株高、2/3 株高、全株高)和 4 种淹水时长(1、3、5、7 d),系统分析分蘖期淹水对水稻根系形态、光合特性及产量形成的影响,以期为江苏稻区水稻抗涝栽培和灾后补救提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料与地点

试验于 2025 年在江苏省扬州大学农学院土培池(119°41′58″E,32°39′18″N)进行。供试品种为长江中下游地区主栽粳稻品种南粳 9108,该品种由江苏省农业科学院粮食作物研究所利用武香粳 4 号×关东 94 杂交选育,2009 年育成,属迟熟中粳稻。该品种株型较紧凑,长势较旺,分蘖力较强,叶色淡绿,叶姿较挺,抗倒性较强,后期熟相佳。

1.2　试验设计

采用盘育秧方式育苗,选取长势整齐、大小均一的 5.0 左右叶龄秧苗移栽,栽插行、株距分别为 25、12 cm,每穴 2 苗。试验以单体水池作为独立小区,小区面积 3 m×2 m,3 次重复。于水稻分蘖期(6.0 叶龄),对应长江中下游梅雨高峰期,该时段扬州多持续性阴雨、阵雨及雷雨,空气湿度高,在天气闷热、阴天多、晴天少时进行淹水处理。淹水深度设

收稿日期:2026–06–25;修回日期:2026–08–12。
作者简介:王梓怡(2001—),女,硕士生,研究方向为作物逆境生理。Email: 2251072697@qq.com。
* 通信作者:张亚洁(1968—),女,博士,教授,主要从事作物逆境栽培生理研究。Email: yjzhang@yzu.edu.cn。

置 3 个水平：淹腰（1/2 株高）、淹颈（2/3 株高）、全淹（全株高）；淹水时间设置 4 个水平：1、3、5、7 d。以常规干湿交替灌溉为对照（CK）。本试验为二因素试验，淹水深度 3 个水平、淹水时长 4 个水平，外加对照（CK），共 13 个处理；每个处理设置 3 次生物学重复，总计 39 个小区。各小区独立配备上部进水管道与底部排水管道，淹涝处理阶段通过上部管道缓慢补水，精准维持各梯度目标淹水深度；待各处理达到设定的 1、3、5、7 d 淹涝时长后，开启底部管道匀速排水，解除淹涝胁迫。淹涝处理期间遇降雨，开启电动大棚遮雨；仅分蘖期水分处理存在差异，其余生育时期田间管理与 CK 保持一致。对照所采用的干湿交替灌溉属于节水高产灌溉模式，通过调控水层协调水稻水分供给与土壤通气状况，利于根系生长，遵循“浅水灌溉、自然落干、见湿复水、后水不见前水”的操作原则。具体操作为：田间保持 3 ~ 4 cm 浅水层，待田面自然落干、土壤表层湿润无发白开裂现象时再次复水，循环进行干湿交替灌溉。

分蘖期是水稻光合系统构建、根系建成与分蘖发生的关键敏感时期，短时淹涝胁迫会产生显著的后遗生长效应，胁迫解除后植株生理与生长差异可长期留存。田间观测发现：1 ~ 3 d 短时淹涝处理植株仅出现叶片短暂褪绿、生长暂缓现象，排水复水后可快速恢复正常生长，以可逆性生理胁迫为主；5 ~ 7 d 中长时长淹涝处理植株出现下部叶片枯黄、分蘖萌发受阻等症状，形成一定程度的不可逆生理损伤与生长抑制。本试验中后期测定的光合特性等各项指标，能够真实、客观反映水稻分蘖期短时淹涝胁迫的残留效应与持续影响。

移栽前统一基施尿素 450 kg/hm^2、过磷酸钙 375 kg/hm^2、氯化钾 300 kg/hm^2，各小区其他农艺管理措施保持一致。

1.3　测定指标与方法

淹水处理结束后第 7 天测定根系伤流量、根系形态及干物质积累相关指标。根系伤流量于清晨 6:00—8:00 测定。每小区选取代表性稻株 3 穴，在距泥面 8 ~ 10 cm 处快速剪去地上部，擦净切口表面渗出汁液；采用预先称重的脱脂棉包裹茎切口，外层以保鲜膜密封、铝箔遮光，持续收集伤流液 2 h。收集完成后立即取下脱脂棉称重，根据收集前后脱脂棉质量差值计算根系伤流量。

伤流测定完成后，尽量完整挖出植株根系，清水冲洗干净，分离地上部与根系。采用计数法统计根数，直尺测量最长根长，排水法测定根体积。样品地上部与地下部先于 105℃烘箱杀青 30 min，随后调至 80℃烘干至恒质量后称量，计算根冠比。

叶片 SPAD 值：于开花后每隔 6 d 测定剑叶 SPAD 值（SPAD–502 叶绿素计），每个处理重复 10 次。

光合参数：于齐穗期晴朗上午，采用 LI–6800 光合仪测定剑叶净光合速率（P_n）和胞间 CO_2 浓度（C_i），每小区重复测定 5 张叶片。

产量及构成因素：成熟期每小区选取代表性 3 穴稻株进行考种，测定穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量，计算理论产量。剩余稻株收割测定实产。

1.4　数据处理

采用 Excel 2024 进行数据整理与作图，SPSS 25.0 软件进行方差分析和相关性分析。利用两因素随机区组方差分析解析淹水深度、淹水时长及其交互作用（仅纳入 12 个淹水处理，不含 CK）；包含 CK 在内共 13 个处理进行单因素随机区组方差分析，采用 Duncan’s 新复极差法进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　分蘖期淹水对水稻根系特性的影响

由表 1 可知，淹水胁迫对水稻根系形态具有显著影响。随淹水深度增加和时间延长，根数和根体积持续下降，最长根长在淹水深度超过 1/2 株高时开始受抑制，根宽则始终无显著变化。具体而言，1/2 株高淹水 1 ~ 7 d 处理下，根数和根体积较对照分别下降 5.60% ~ 33.33% 和 11.17% ~ 31.38%；2/3 株高下，根数降幅达 27.43% ~ 48.08%，最长根长下降 6.73% ~ 17.94%，根体积下降 17.55% ~ 39.36%；全淹条件下，根数下降 3.83% ~ 37.76%，最长根长下降 12.56% ~ 35.87%，根体积下降 10.64% ~ 47.34%。上述结果表明，根数和根体积对淹水胁迫最为敏感，根宽耐胁迫能力较强。

方差分析（表 2）表明，区组对水稻各根系形态指标均无显著影响。淹水深度显著影响不定根数、最长根长与根体积，对根直径无显著效应；淹水时长显著影响不定根数、最长根长和根体积，同样不显著改变根直径。淹水深度与淹水时长交互作用对 4 项根系指标均达到显著或极显著水平，表明不同淹水深度下，水稻根系形态随淹水持续时间的响应规律存在明显差异。

表 1　分蘖期淹水对水稻根系形态的影响

淹水深度	淹水时长 /d	不定根数 / 株	最长根长 /cm	根宽 /(mm/ 条)	根体积 /(cm³/ 株)
淹腰(1/2 株高)	1	160 AB	22.1 A	0.915 aA	8.4 A
	3	154 AB	22.0 A	0.955 aA	7.1 AB
	5	135 B	21.5 A	0.935 aA	6.7 B
	7	113 C	21.2 A	0.910 aA	6.5 B
淹颈(2/3 株高)	1	123 BC	20.8 AB	0.965 aA	7.8 AB
	3	120 BC	19.1 B	0.950 aA	7.3 AB
	5	112 C	18.6 BC	0.925 aA	6.8 B
	7	88 E	18.3 BC	0.915 aA	5.7 C
全淹(全株高)	1	163 A	19.5 B	0.945 aA	8.4 A
	3	157 AB	18.6 BC	0.925 aA	6.8 B
	5	123 BC	16.7 C	0.910 aA	5.1 C
	7	106 D	14.3 D	0.890 aA	5.0 C
CK		170 A	22.3 A	0.945 aA	9.4 A

注:同列数据后不同小写字母、大写字母分别表示处理间差异具统计学意义($P<0.05$)、高度统计学意义($P<0.01$)。表 3 同。

表 2　淹水深度、淹水时长及其交互作用对水稻根系形态指标的方差分析

变异来源	自由度 df	不定根数	最长根长	根直径	根体积
区组	8	0.59 ns	0.37 ns	0.18 ns	1.58 ns
淹水深度(D)	2	6.22**	3.43*	2.25 ns	4.09*
淹水时长(T)	3	263.87**	3.28*	1.17 ns	11.65**
$D\times T$	6	38.56**	8.20**	3.00*	15.73**

注:"*、**"分别表示差异具统计学意义($P<0.05$)、高度统计学意义($P<0.01$),ns 表示差异无统计学意义($P>0.05$)。表 4 同。

由图 1 可知,各淹水处理根伤流量均随胁迫程度加重和处理时间延长而显著下降。1/2 株高、2/3 株高和全淹处理下,伤流强度较对照分别下降 19.47% ~62.67% 、25.85% ~66.07% 和 44.08% ~65.96%,表明淹水胁迫严重抑制根系代谢活性。

根冠比的变化对胁迫的响应各异:1/2 株高淹水 1 d 时根冠比显著升高,3 ~7 d 后转为下降;2/3 株高下仅 1 d 处理略有提升,随后与地上部同步下降;全淹条件下 3 ~5 d 根冠比呈上升趋势,7 d 后则显著降低。

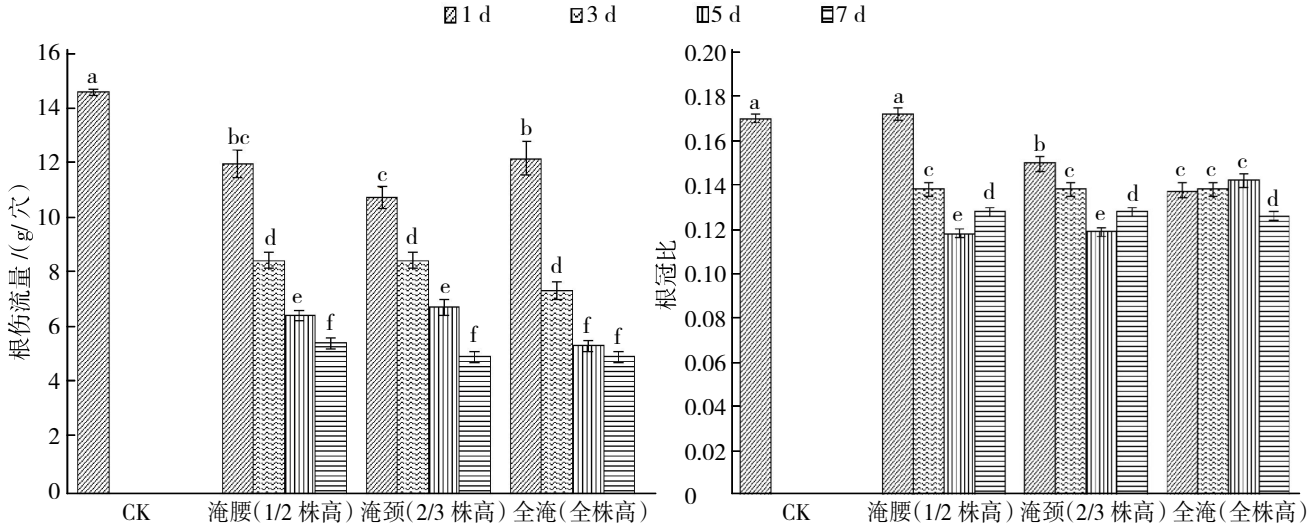


图 1　分蘖期淹涝对水稻根伤流量和根冠比的影响

2.2　分蘖期淹水对水稻光合特性的影响

淹水胁迫显著抑制水稻剑叶净光合速率(图 2),且抑制程度随淹水深度和时间的增加而加剧。与对照相比,1/2 株高淹水 1 ~ 7 d 处理净光合速率下降 5.25% ~ 13.96%,2/3 株高淹水 5 d 和 7 d 处理分别下降 7.42%和 14.34%,全淹 5 d 和 7 d 处理分别下降 11.50%和 23.65%。胞间 CO_2 浓度亦呈相似下降趋势,表明淹水胁迫影响了叶片气孔导度和气体交换能力[10]。

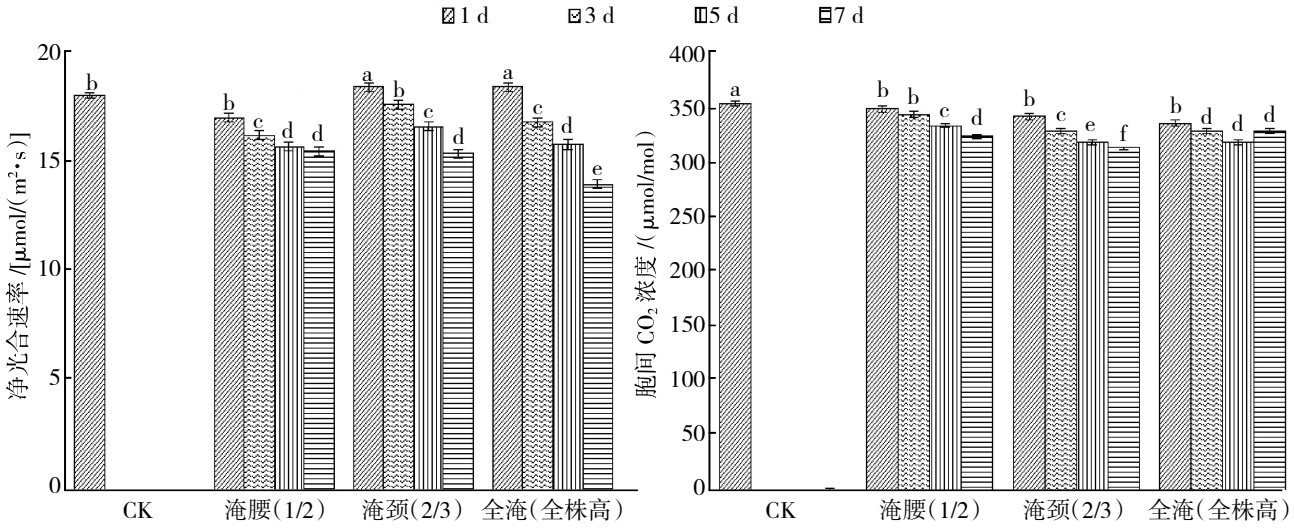
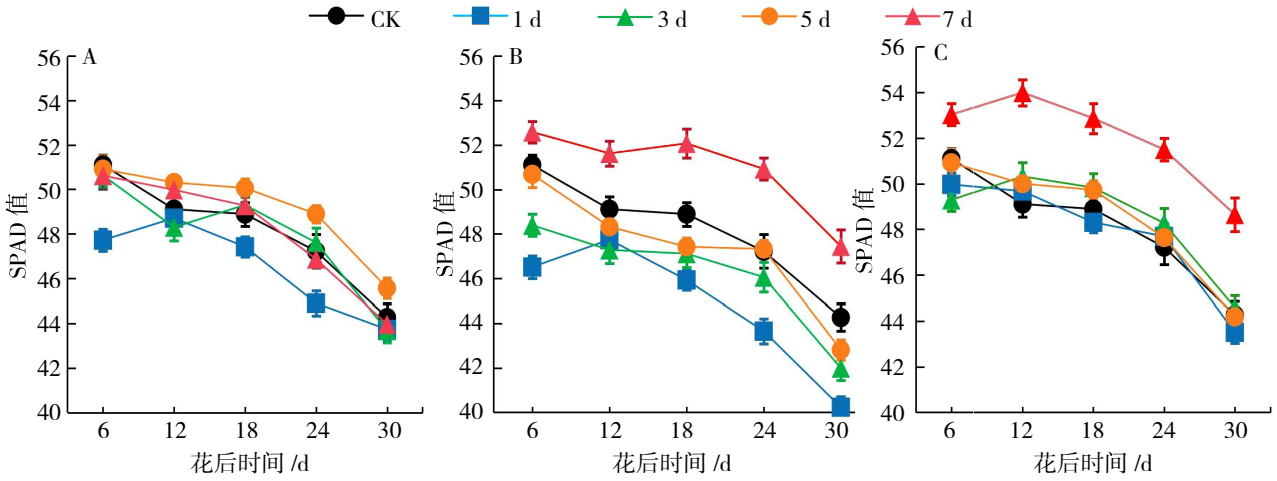


图 2　分蘖期淹涝对后期水稻剑叶净光合速率和胞间 CO_2 浓度的影响

由图 3 可知,对照(CK)花后 SPAD 值随生育进程逐渐下降。1/2 株高淹水下:各处理 SPAD 值与对照总体相近或略高,影响较小。2/3 株高淹水下:1 d 处理 SPAD 值多低于对照;3 d 和 5 d 处理与对照相当;7 d 处理在所有时期均高于或接近对照。全淹(全株高)下:1、3、5 d 处理与对照差异不大;7 d处理 SPAD 值持续显著高于对照,花后 12 d 达最高值 54.0,花后 30 d 仍保持 48.7。综上,分蘖期淹水 7 d(无论 2/3 株高或全淹)均显著提升花后剑叶 SPAD 值,而短期或轻度淹水影响不大。



A:淹腰(1/2 株高);B:淹颈(2/3 株高);C:全淹(全株高)

图 3　分蘖期淹涝对水稻花后剑叶 SPAD 值的影响

2.3　分蘖期淹水对水稻产量及产量构成的影响

方差分析显示(表 3),区组对水稻产量及其构成因素均无显著影响,试验条件可控。淹水深度显著或极显著影响穗数、每穗粒数、结实率、千粒质量与产量;淹水时长对千粒质量无显著作用,但显著影响每穗粒数、结实率,并极显著影响穗数和产量。淹水深度与淹水时长交互作用对所有产量构成因子及产量均达到显著或极显著水平。

由表 4 可知,除全淹 1 d 处理外,其余淹水处理均导致水稻明显减产。1/2 株高淹水 1 ~ 7 d 处理减产 9.86% ~ 38.03%;2/3 株高处理减产 16.90% ~ 45.07%;全淹 3 ~ 7 d 处理减产 18.31% ~ 45.07%。值

得注意的是，全淹 1 d 处理因穗数显著增加（较对照增加 11.10%），同时每穗粒数、结实率和千粒质量维持正常水平，最终产量较对照提升 5.63%。

从产量构成因素看，各淹水处理穗数普遍增加或保持稳定，但每穗粒数、结实率和千粒质量随淹水胁迫加重而显著下降，这是导致减产的主要原因[11]。全淹 1 d 处理各构成因素协调良好，实现了增产。

表 3　淹水深度、淹水时长及其交互作用对水稻产量及其构成因素的方差分析

变异来源	df	穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量	产量
区组	8	2.37 ns	1.66 ns	1.24 ns	0.09 ns	2.45 ns
淹水深度（*D*）	2	29.18**	91.81**	4.62*	6.96**	28.60**
淹水时长（*T*）	3	5.09**	4.95*	4.98*	1.51 ns	19.66**
D×*T*	6	3.26*	6.38**	2.94*	2.72*	9.05**

表 4　分蘖期淹水对水稻产量及产量构成的影响

淹水深度	淹水时长 /d	穗数 /（万个 /hm²）	穗粒数 /（粒 / 穗）	结实率 /%	千粒质量 /g	产量 /（t/hm²）
淹腰（1/2 株高）	1	203.3 B	148.2 A	84.62 A	25.0 AB	6.4 AB
	3	206.7 B	145.2 AB	82.87 AB	23.7 BC	5.6 BC
	5	210.0 B	142.5 B	79.82 BC	22.1 C	4.9 C
	7	206.7 B	141.7 B	77.15 C	21.4 D	4.4 CD
淹颈（2/3 株高）	1	196.7 BC	145.8 AB	81.63 AB	25.3 AB	5.9 B
	3	200.0 BC	144.4 B	78.21 BC	25.1 AB	5.6 BC
	5	223.3 A	140.5 BC	75.30 CD	24.2 B	4.9 C
	7	226.7 A	131.6 D	69.80 E	22.9 BC	3.9 D
全淹（全株高）	1	233.3 A	151.4 A	85.26 A	25.5 AB	7.5 A
	3	203.3 B	147.5 A	79.85 BC	24.2 B	5.8 B
	5	210.0 B	137.7 C	75.67 CD	23.0 BC	4.7 C
	7	220.0 AB	133.4 D	72.08 DE	22.1 C	3.9 D
CK		210.0 B	150.0 A	86.69 A	26.0 A	7.1 A

2.4　根系、光合特性与产量的相关性

相关性分析（表 5 和表 6）表明，净光合速率与根宽、根体积、根质量和根冠比呈显著或极显著正相关（r = 0.593 ~ 0.812），胞间 CO_2 浓度与根数、最长根长、根体积、根质量和根冠比呈显著或极显著正相关（r = 0.664 ~ 0.822）。产量与根数、根宽、根体积、根质量、净光合速率和胞间 CO_2 浓度亦呈显著或极显著正相关（r =0.622 ~ 0.867）。

表 5　根系特性与光合特性的相关性（*n* =12）

指标	根数	最长根长	根宽	根体积	根质量	根冠比
净光合速率	0.575	0.532	0.795**	0.665*	0.812**	0.593*
胞间 CO_2 浓度	0.822**	0.664*	0.449	0.746**	0.695*	0.692*

注：* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。表 6 同。

表 6　根系和光合特性与产量及产量构成的相关性(n =12)

指标	穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量	产量
根数	–0.196	0.888**	0.923**	0.591*	0.867**
最长根长	–0.399	0.668*	0.734**	0.339	0.533
根宽	–0.317	0.641*	0.628*	0.649*	0.622*
根体积	–0.393	0.674*	0.742	0.673*	0.654*
根质量	–0.211	0.710**	0.743	0.907**	0.830**
根冠比	–0.400	0.622*	0.688	0.573*	0.571
净光合速率	–0.209	0.815**	0.741**	0.894**	0.863**
胞间 CO_2 浓度	–0.439	0.746**	0.891**	0.535	0.729**

3　讨论

3.1　分蘖期淹水对水稻根系特性的影响

根系是水稻最先感知淹水胁迫的器官。本研究表明,分蘖期淹水胁迫对根系形态和活力具有显著抑制作用,且抑制程度与淹水深度和时间呈正相关[11-12]。值得注意的是,短期轻度淹水(1/2 株高 1 d、2/3 株高 1 d)对根系生长有一定促进作用,表现为根质量增加、根冠比提升[15],可能与适度缺氧诱导的适应性反应有关(如通气组织形成加速)[14]。伤流强度随淹水时间延长而持续下降,可作为评价根系受淹程度的重要指标。

3.2　分蘖期淹水对产量形成的影响及超补偿效应机制

除全淹 1 d 处理外，其余淹水处理均导致水稻明显减产,且减产幅度随胁迫增强而增大。分蘖期虽较孕穗期和抽穗期耐淹,但重度淹水仍会造成严重产量损失[15-16]。

与 CK 相比，全淹 1 d 处理产量提升 5.63%,但二者差异未达统计学显著水平。该处理穗数显著增加,而每穗粒数、结实率和千粒质量保持正常,表现出典型的超补偿效应[17-18]。其机制可能包括:1)刺激分蘖芽萌发,增加有效穗数;2)诱导通气组织发育,提高复水后养分吸收效率;3)复水后光合产物向籽粒分配增加。该现象的重现性和机制尚需进一步验证。

需要强调的是,上述增产结论主要基于 2025 年单一年度的土培池试验,受试验环境限制,该响应规律目前仅能代表特定气候与栽培条件下水稻对短期全淹胁迫的响应特征。因此,未来还需开展连续 2 年及以上大田定位试验,进一步验证该超补偿效应的稳定性；同时开展分蘖芽萌发动态观测,明确淹水胁迫下被特异性激活的分蘖节位,从而完善水稻受淹后超补偿效应的理论机制。

值得注意的是,分蘖期淹水 7 d(2/3 株高或全淹)处理下,花后剑叶 SPAD 值显著高于对照,但并未带来产量提升。这一看似矛盾的现象提示,SPAD 值反映的叶绿素含量升高,并不等同于光合生产力的实质性增强。为厘清其内在逻辑,本研究进一步分析了该处理下的气体交换参数。结果显示,尽管剑叶叶绿素合成可能被逆境诱导而升高,但其净光合速率(P_n)实际仍显著低于对照。淹涝逆境易引发叶片气孔活动受抑,胞间 CO_2 供应受限;同时植株易产生光抑制,叶片内部碳同化过程受到抑制。在此情况下,高 SPAD 值仅表征了“光合潜势”的维持,而气孔限制与非气孔限制的共同作用,使该潜势无法转化为有效的光合同化产物。最终,光合产物积累的不足,叠加淹水期间群体有效穗数减少、穗粒结构恶化的不可逆损伤,共同导致了产量构成要素指标的全面下滑。

3.3　分蘖期淹水对江苏稻区水稻生产的启示

江苏省是我国粳稻主产区，南粳 9108 是省内主栽品种之一[19]。江苏地处长江中下游,6 月下旬至 7 月上旬的梅雨期与水稻分蘖盛期高度重叠，稻田淹涝灾害频发,对水稻生产构成严重威胁[20]。

本研究表明,分蘖期短期(1 d)全淹处理主要通过增加 11.10%有效穗数来实现增产,而淹水超过 3 d 则导致每穗粒数和结实率显著下降，减产幅度达 18.31% ~ 45.07%。这一结果与宣守丽等在江苏地区的研究结论[9]基本一致,他们发现分蘖期淹水 7 d 后水稻地上部干物质积累量显著降低。王斌等研究也表明，分蘖期淹水时间与中稻产量呈显著负相关,淹水 5 d 以上减产风险急剧增大[12]。从本试验

不同淹水深度与持续时间的产量响应趋势来看，淹水深度≥2/3 株高且持续 3 d 以上时水稻出现显著减产，淹水深度和淹水时长存在明显交互效应。不过本试验仅设置离散梯度，未能构建连续产量响应模型，尚无法精准量化产量显著下降的临界阈值。结果表明淹水深度超过 1/2 株高、持续 3 d 以上涝害风险明显上升；后续可通过增设梯度试验，定量解析淹水深度与时长的交互临界条件。

从生产应用角度看，江苏稻区在梅雨期间应密切关注天气预报，提前疏通沟渠，确保雨后 24 h 内田间积水能够及时排出，争取全淹时间不超过 1 d，以充分利用适度淹水刺激分蘖的正面效应。对于已受淹的稻田，可参照江苏省农业技术推广部门的建议，在排水后及时追施速效氮肥（尿素 3～5 kg/667 m^2）促进恢复[21]。对于淹水超过 5 d、群体严重受损的田块，可考虑割苗蓄留再生稻或改种短季作物，以最大程度降低损失。

相关性分析表明，根系形态指标与净光合速率、产量均呈显著正相关，维持根系健壮生长是保障光合功能和产量形成的基础[22]。因此，在江苏稻区抗涝栽培管理中，应注重增施有机肥和硅钾肥，改善土壤通透性，促进根系深扎，提高植株整体耐涝能力。

综上所述，南粳 9108 在江苏稻区具有较好的耐涝潜力，生产中应重点防范分蘖期梅雨淹涝，把握“全淹不超过 1 d”的排水关键期。

4　结论

1）分蘖期淹水胁迫显著抑制水稻根系发育，根数和根体积随淹水深度增加和时间延长而下降，伤流强度下降 62.67%以上。

2）淹水胁迫使净光合速率下降 5.25%～23.65%，胞间 CO_2 浓度下降 1%～11%，加速功能叶衰老。

3）除全淹 1 d 处理增产 5.63%（与对照差异无统计学意义）外，其余淹水处理均导致减产，幅度为 9.86%～45.07%，减产主要源于每穗粒数和结实率的下降。

4）根系特性、光合参数与产量呈显著正相关（r=0.62～0.87），维持根系活力是保障水稻耐涝能力的关键。

5）江苏稻区梅雨期间应注重分蘖期排水降渍，争取全淹时间不超过 1 d，以减轻淹涝危害；对已受淹稻田，可根据淹水程度和时间评估灾损，采取相应补救措施。

参考文献：

[1] 江苏省统计局,国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2024[M]. 北京:中国统计出版社,2024:172-176.

[2] 王　超,李　浩,叶秀辉,等. 长江流域未来气候变化预估研究[J]. 人民珠江,2024,45(9):11-18.

[3] 施　宇. 极端天气事件对粮食生产的影响及其缓解途径:不同经济发展水平国家的案例分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023:6-10.

[4] 李继军,陈雅慧,周志华,等. 植物对涝渍胁迫的适应机制研究进展[J]. 植物科学学报,2023,41(6):835-846.

[5] Kuanar S R,Ray A,Sethi S K,et al. Physiological basis of stagnant flooding tolerance in rice[J]. Rice Science,2017,24(2):73-84.

[6] 陈永华. 水稻耐淹涝生理与分子机理研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2006:6-8.

[7] Panda D,Barik J. Flooding tolerance in rice: focus on mechanisms and approaches[J]. Rice Science,2021,28(1):43-57.

[8] 成　添,胡继超,李映雪,等. 淹涝胁迫对水稻植株叶片光合性能的影响[J]. 气象与环境科学,2019,42(1):26-33.

[9] 宣守丽,石春林,张建华,等. 分蘖期淹水胁迫对水稻地上部物质分配及产量构成的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(6):1199-1204.

[10] 陆魁东,宁金花,解　娜,等. 淹涝胁迫对水稻形态的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(1):18-23.

[11] 陈宇眺,闫　川,洪晓富,等. 分蘖期淹水对常规粳稻生长特性、产量形成与钾素吸收的影响[J]. 浙江农业学报,2024,36(9):1990-1999.

[12] 刘　健,殷新华,顾爱民,等. 分蘖期淹水胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):225-229.

[13] 马丽峰,李佐同,杨克军,等. 没顶淹水对敏感性水稻幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 植物生理学报,2015,51(7):1082-1090.

[14] 刘　磊,张斯梅,张　勇,等. 作物根通气组织形成机理及与抗逆境胁迫关系的研究进展[J]. 植物科学学报,2025,43(3):404-414.

[15] 杨海超. 极端降水对水稻生长发育及产量的影响 [D]. 南京:南京信息工程大学,2024:7-12.

[16] Dwivedi S K,Kumar S,Bhakta N,et al. Physiological mechanism and nutrient management strategies for flood tolerance in rice grown in lowland flood prone ecosystem[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology,2018,21(4):321-331.

[17] 冉茂林,方　文,熊　洪,等. 杂交水稻受淹后产量损失程

度及救灾措施研究[J]. 绵阳农专学报,1992,9(1):23-29.
[18] 王　斌,周永进,许有尊,等. 不同淹水时间对分蘖期中稻生育动态及产量的影响[J]. 中国稻米,2014,20(1):68-72,75.
[19] 王　勋,朱练峰,张连胜,等. 江苏省 1982—2023 年审定水稻品种分析[J]. 中国稻米,2024,30(3):88-90,97.
[20] 仇欣悦,孙晓文,代金汕,等. 气候变化背景下江苏省年降水量时空演变特征与趋势[J]. 中国防汛抗旱,2025,35(5):27-34.
[21] 白凯华,韩　冰,罗玉峰. 气候变化对江苏省未来水稻灌溉需水量的影响[J]. 中国农村水利水电,2016(6):29-33.
[22] 王晓忠,苏　锐,邹梦思,等. 水稻耐淹性研究进展[J]. 杂交水稻,2024,39(3):12-19.

Effects of Flooding at Tillering Stage on Root Characteristics, Photosynthetic Characteristics and Yield of Rice

Wang Ziyi, Zhang Yating, Tong Xiao, Zhang Yajie
(Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: To investigate the effects of flooding depth and duration at the tillering stage on rice growth and grain yield, a simulated flooding experiment was conducted using Nangeng 9108, a major geng (*japonica*) rice cultivar in Jiangsu Province. Three flooding depths—mid-height (1/2 plant height), neck-level (2/3 plant height), and full submergence (full plant height)—were imposed for 1, 3, 5, or 7 d, with conventional alternate wetting and drying irrigation serving as the control. Root morphology, photosynthetic parameters, and yield components were measured. The results showed that with increasing flooding stress, root volume, adventitious root number, and maximum root length decreased significantly; net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, and SPAD value were also reduced. Except for the 1 day full submergence treatment, which produced a numerical 5.63% yield increase due to higher effective panicle numbers (statistically non-significant versus the control), all other treatments showed significant reductions in grains per panicle, 1 000 grain weight, and seed setting rate, with yield losses ranging from 9.86% to 45.07% ($P < 0.01$). Correlation analysis indicated that net photosynthetic rate was significantly to highly significantly positively correlated with root width, root volume, root weight, and root shoot ratio ($r = 0.59$-0.81). Short term full submergence at the tillering stage increased effective panicle number and induced a trend of over compensatory yield increase, yet no statistically significant yield enhancement was observed relative to the control. Significant yield loss occurred when flooding depth exceeded 1/2 of plant height and duration exceeded 3 d.

Key Words: Rice tillering stage; Flooding stress; Root morphology; Photosynthetic characteristics; Yield; Jiangsu Province

欢迎订阅 2027 年《农业科技通讯》杂志

农业农村部主管 中国农业科学院主办
国家新闻广电总局认定的第一批学术期刊(2014)
刊号:ISSN1000-6400 CN11-2395/S　　邮发代号:2-602 月刊 每月 17 日出版
单价:30.00 元　　全年:360.00 元　　全国各地邮局及本刊编辑部均可订阅

荟萃科技成果
展示优良品种
聚合实用技术

本刊及时报道种植业研究成果,尤其是种子方面的新品种、新技术,侧重大田,兼顾园艺,是种植业者优选刊物。

主要栏目有专题论述、试验研究、经验交流、粮食作物、经济作物、蔬菜、果树、西甜瓜、林木花卉等。内容丰富翔实、信息量大、技术实用。

地址:100081 北京市海淀区中关村南大街 12 号《农业科技通讯》编辑部
电话:010-82109665 82109664 82106276　　E-mail:tongxun@caas.cn

杜　军,次丹卓玛,袁　雷,等. 1981—2025 年极端气候事件变化对西藏青稞产量的影响[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):52-61(2026-10-08). DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.007.

1981—2025 年极端气候事件变化对西藏青稞产量的影响

杜　军[1,2,3],次丹卓玛[1],袁　雷[4],拉　巴[2,4],刘建栋[5*]

(1. 西藏自治区气候中心,西藏 拉萨 850001;2. 拉萨市青稞气象重点实验室,西藏 拉萨 850001;
3. 墨脱大气水分循环西藏自治区野外科学观测研究站 / 中国气象局墨脱大气水分循环综合观测野外科学试验基地 / 墨脱国家气候观象台,西藏 墨脱 860700;4. 西藏自治区高原生态与农业气象中心,西藏 拉萨 850001;5. 中国气象科学研究院,北京 100086)

摘要:为评价极端气候事件对高原青稞产量的影响,基于 1981—2025 年西藏青稞种植区 31 个气象站逐日最高气温、最低气温和降水量以及青稞单产数据,利用 RClimDex 软件计算了 10 种极端气候指数,采用线性倾向估计法、Pearson 相关系数和逐步回归法,分析近 45 年极端气候指数的时空分布特征及对青稞产量的影响。结果表明:青稞生长季所有站的 TNx、TX90P 和 TN90P 显著增加,TN10P 和 CSDI 显著减少;94%站 TXx、61%站 R10mm、65%站 R20mm、74%站 R95pTOT 趋于增加,65%站 CWD 为减少。西藏青稞生长季 TXx、TNx 呈极显著升高趋势,以 TNx 升温最明显;TX90P 和 TN90P 为极显著增加趋势,后者增速约为前者的 1.8 倍;R10mm、R20mm 和 R95pTOT 趋于不显著增加;TN10P 和 CSDI 呈极显著减少,CWD 为不显著减少。1980 年代至 2010 年代青稞生长季 TXx、TNx、TX90P 和 TN90P 呈逐年代递增,TN10P 和 CSDI 呈逐年代递减;R10mm、CWD 在 20 世纪 90 年代偏多,其他 3 个年代偏少。青稞气象产量主要受 TXx、R20mm 和 R95pTOT 共同影响,其中 R95pTOT 的贡献率最大。

关键词:青稞;产量;极端气候指数;变化趋势;主导因子
中图分类号:S162.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-6486-20260068

在全球气候变暖持续的背景下，气温升高、极端高温增加以及水循环极端性增强等变化,已被证实可通过影响作物光合作用、蒸腾作用和生长周期等,进而改变全球农业生产和粮食产量格局[1]。Lesk 等研究表明,极端天气事件对全球粮食产量冲击尤为显著,1964—2007 年的极端干旱和热浪导致作物产量平均下降 9% ~ 10%[2];全球三大主要粮食产量年际波动中有 32% ~ 39%是因气候变化引起的,而影响南亚、中国和美国大部分地区粮食产量的决定因素是极端降水[3]。2024 年全球平均气温比工业革命前水平偏高 1.50 ℃,最近 10 年(2015—2024 年)是有观测记录以来最暖的 10 年。1961—2024 年中国地表年平均气温呈显著上升趋势，平均每 10 年升高 0.31 ℃[4]。青藏高原是我国气候变化的“启动区”,不仅在全球气候变化中起着“驱动器”和“放大器”的作用[5-6],而且也是气候变化的敏感区和脆弱区[7],增温趋势尤为突出[8-9],是同期全球平均水平的 2 倍[10]。气候变暖使得大气环流的不稳定性、气候的波动性和极端性显著增强,极端气候事件发生强度和频率也趋于显著上升，加大了对农作物生产的影响[11]。青稞作为青藏高原主要粮食作物，具有生育期短、耐寒耐旱等特点[12-14]。它作为当地农牧民的特需口粮,在高原粮食生产中占有非常重要的地位。因此,探讨极端气候事件对青稞产量的影响,对促进区域农业高质量发展、保障粮食安全和传承民族文化等意义重大。

目前,已有学者研究了气候变化对青藏高原青稞产量的影响,认为气候变暖有利于青稞产量的增加[15-17]。侯亚红等研究认为,气温升高造成青稞棵间蒸发量加大,水分胁迫风险增大,而降水量增加会降低风险、增加产量[18]。Yin 等分析表明,西藏地区青稞产量与最低气温呈显著正相关,且最低气温是影响青稞产量的主要因子[19]。杜军等基于 WOFOST 作物模型，模拟 SRES A2 情景下 2011—2050 年西藏青稞产量变化,大部分县(区)为增产[12]。Ding 等分析指出，气候趋势对西藏粮食产量的影响为正向,增幅为 1.5% ~ 4.8%[20]。总体上,随着西藏高原气候

收稿日期:2026-06-30;修回日期:2026-09-06。
基金项目:西藏自治区科技计划(XZ202502ZD0006、XZ202502ZD0006-02、XZ202501ZY0065);西藏自治区气象局重点创新团队(XZ-ZD-CX04);日喀则市中央引导地方科技发展资金项目(RKZ2026ZYYD-02)。
作者简介:杜　军(1969—),男,高级工程师,研究方向为高原气候与气候变化、生态与农业气候。Email: dujun0891@163.com。
* 通信作者:刘建栋(1969—),男,博士,研究员,研究方向为农业气象灾害、作物模型。Email: liujd2001@263.net。

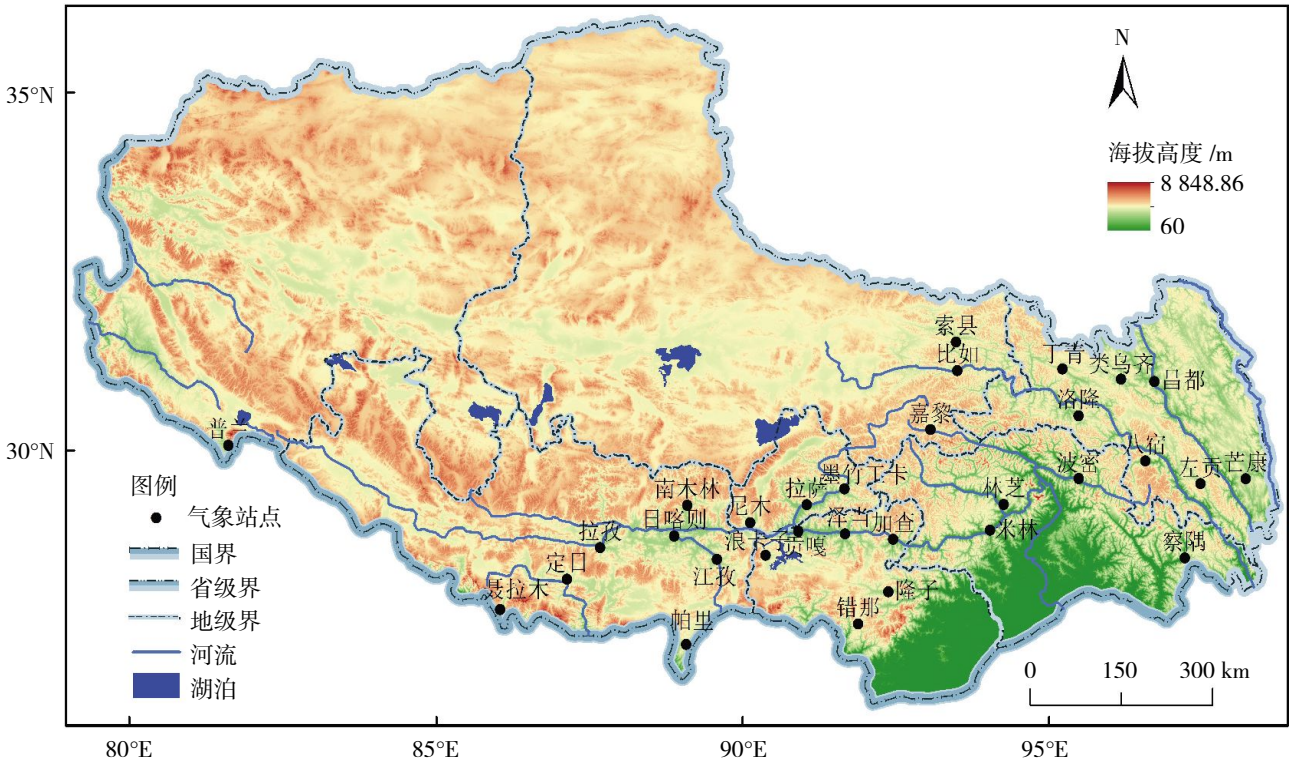
暖湿化趋势的持续，青稞生长季降水增多、气温显著升高且未达到生长的最适宜温度，有利于青稞产量的增加。

西藏青稞主要分布在藏东三江流域上游、雅鲁藏布江上中游、拉萨河、年楚河、尼洋河、隆子河流域河谷等地，以高原季风半干旱和干旱气候为主[21]。2025 年全自治区青稞播种面积为 15.56 万 hm^2，占粮食播种面积的 77.2%；总产量为 90.53 万 t，占粮食总产量的 78.7%[22]，已成为西藏粮食第一大作物。自20 世纪 60 年代以来，西藏气候呈暖湿化趋势[23–26]，1961—2024 年地表年平均气温以每 10 年升高 0.33 ℃的速度呈显著升高，年降水量增速为每 10 年增加 5.24 mm[27]。气温升高、降水增加将改变青稞种植区域光热水气候资源，进而影响生长期和产量等。目前国内学者主要聚焦极端气候事件的时空变化[28–31]，其成果为区域气候风险评估、生态保护及防灾减灾等气候变化适应决策提供了重要支撑，但对西藏青稞产量影响的研究还存在空白。因此，探究在气候变暖背景下青稞产量对极端气候事件的响应，是保障西藏粮食安全与农业高质量发展的关键科学问题，也是落实国家“藏粮于地、藏粮于技”的战略举措。本研究基于西藏青稞种植区 31 个气象站 1981—2025 年气象观测资料和青稞产量数据，分析青稞生长季极端气候指数时空变化特征，探究对产量的影响，可为西藏农业生产适应气候变化、保障区域粮食安全和生态安全提供科技支撑。

1　数据与方法

1.1　数据来源

采用由西藏自治区气象数据中心提供的 1981—2025 年西藏自治区青稞种植区 31 个气象站点（图 1）逐日平均最高气温、最低气温和降水量数据。多年平均值为 1991—2020 年基准气候期的平均值。1981—2025 年西藏青稞实际单产数据来源于《西藏自治区统计年鉴 2025》[22]。



西藏底图为西藏自治区自然资源厅服务网站下载的标准地图[审图号为藏 S(2026)041 号]，底图边界无修改。图 3、图 4 同

图 1　西藏自治区青稞种植区气象站点分布

1.2　研究方法

1.2.1　气象产量。作物产量是在各种自然和非自然因素综合影响下形成的，通常可分解为趋势产量、气象产量和随机“噪声”3 部分，计算公式如下：

$$Y = Y_i + Y_w + e。 \quad (1)$$

式中：Y 为作物产量（kg/hm^2）；Y_i 为趋势产量（kg/hm^2）；Y_w 为气象产量（kg/hm^2）；e 为随机因素造成的单产波动，其影响较小可忽略不计。

趋势产量是由作物品种改良、社会经济发展、农业生产技术进步等因素决定，一般呈上升趋势，可通过线性拟合、滑动平均、正交多项式等方法计算获得，不同方法分离出的趋势产量存在差异[32]。气象产量为实际产量和趋势产量的差值，即：

$$Y_w = Y - Y_i。\quad (2)$$

本研究采用 GM(1,1)灰色模型方法[33]，该方法拟合率最高可达 98.75%，以此法拟合得到 1981—2025 年青稞单产的趋势产量和气象产量(图 2)。

1.2.2 极端气候指数。基于气候变化检测和指数联合专家组（Expert Team on Climate Change Detection and Indices，ETCCDI)定义的 27 个极端气候指数[34]，利用 Pearson 相关系数分析法和线性趋势方法，计算青稞实际单产与生长季(4—9 月)极端气候指数的相关性，选取通过 0.05 显著性检验的 10 个指数(表 1)，各站极端气候指数利用 RClimDex 软件[35]计算。

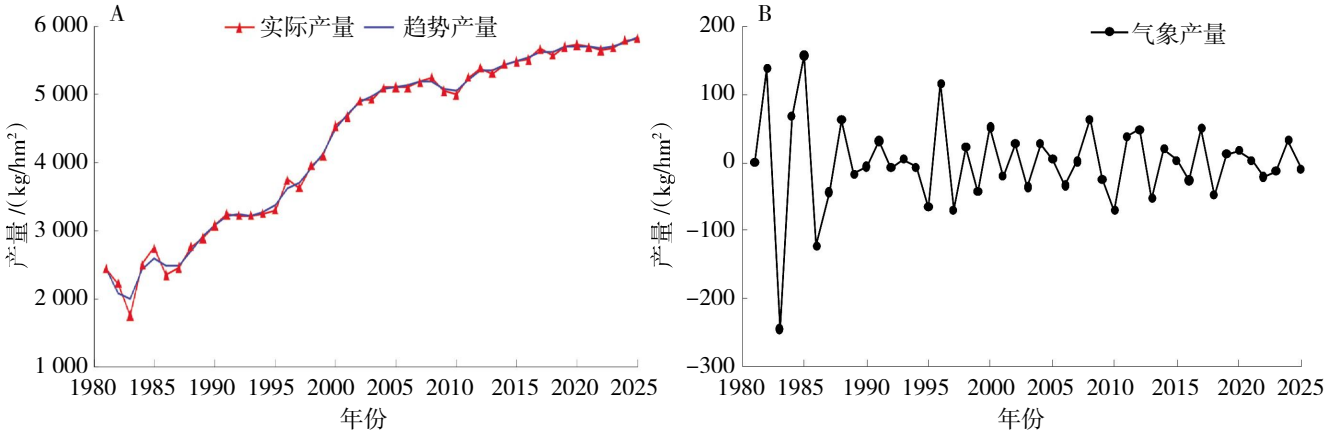


图 2　1981—2025 年西藏青稞单产的趋势产量(A)和气象产量(B)

表 1　极端气候指数及其定义

指数	代码	定义
极端最高气温 /℃	TXx	一年内日最高气温最大值
最低气温极大值 /℃	TNx	一年内日最高气温最小值
暖昼日数 /d	TX90P	日最高气温 > 历史同期第 90%分位值的日数
冷夜日数 /d	TN10P	日最低气温 < 历史同期第 10%分位值的日数
暖夜日数 /d	TN90P	日最低气温 > 历史同期第 90%分位值的日数
冷持续指数 /d	CSDI	连续 6 日最低温度 < 10%分位值日数
中雨日数 /d	R10mm	每年日降水量≥10 mm 且 <20 mm 日数
大雨日数 /d	R20mm	每年日降水量≥20 mm 日数
连续湿润日数 /d	CWD	日降水量≥1mm 的最长连续日数
强降水量 /mm	R95pTOT	日降水量 R 大于同期第 95%分位值的总降水量

1.2.3 变化趋势。极端气候指数的变化趋势，采用线性倾向估计法[36]来定量评估，即：

$$\hat{X}_i = a + bt_i,\ i = 1, 2, \cdots, n。\quad (3)$$

式中：$\hat{X}_i$ 为极端气候指数；t_i 为时间；n 为样本数；a 为回归常数；b 为回归系数，把 $b \times 10$ 称为极端气候指数每 10 年的变化趋势，其显著性可利用 t 与 x 之间的相关系数进行检验。

1.2.4 影响因子分析。首先采用逐步回归法[33,36]建立极端气候指数与作物产量的逐步回归方程，再按标准回归系数大小计算相应的贡献率，分析影响产量的主导极端气候指数，具体方法[37]如下：

$$Y = A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + \cdots + A_iX_i;\quad (4)$$

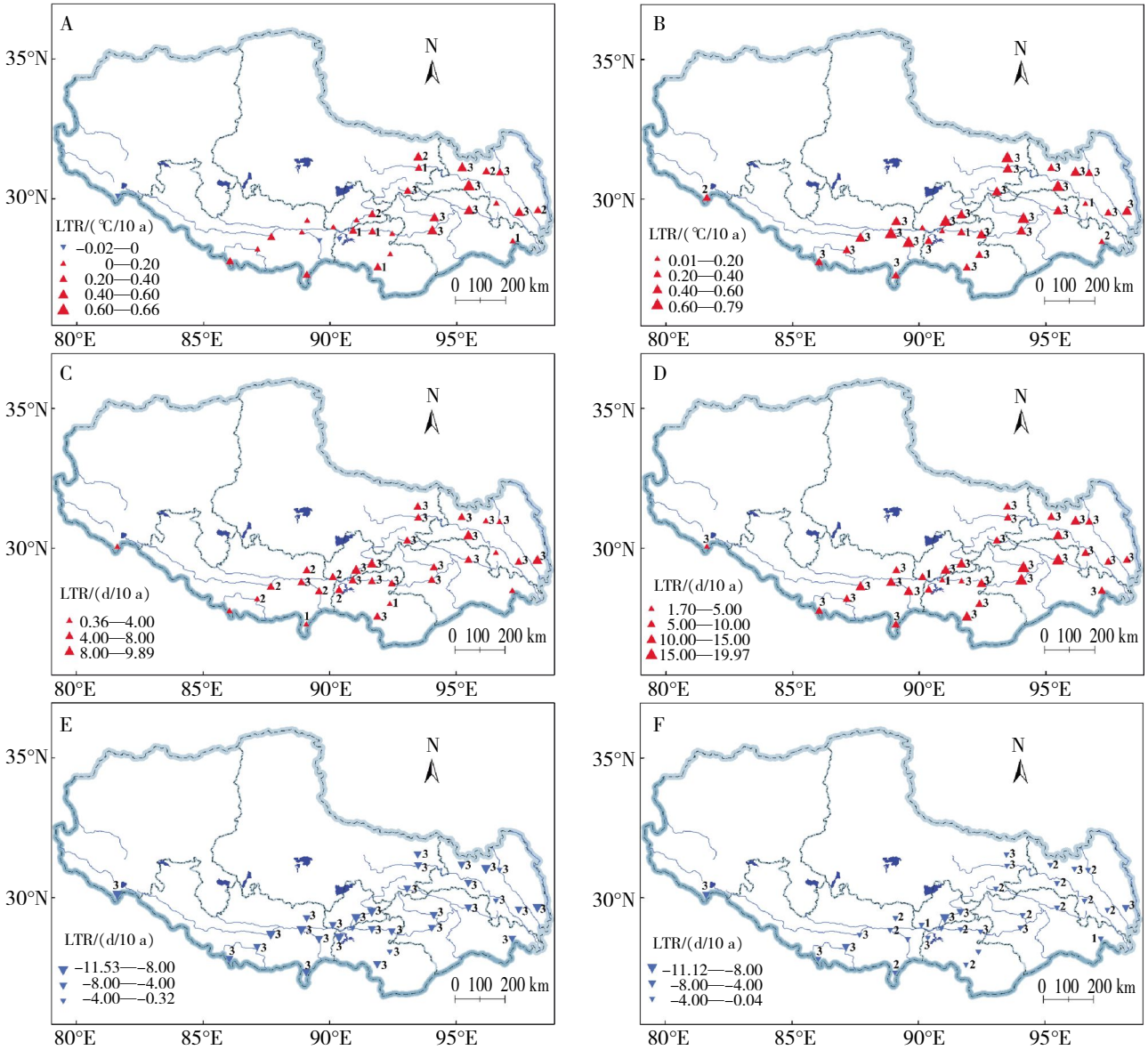
$$G_1 = \frac{|A_1|}{|A_1| + |A_2| + |A_3| + \cdots + |A_i|}。\quad (5)$$

式中：Y 代表作物产量，X_i 代表极端气候指数，A_i 为 X_i 相对应的标准回归系数，G_1 为影响因子 X_1 对产量的相对贡献率，以此类推。

2　结果与分析

2.1　青稞生长季极端气候指数的空间变化

2.1.1　极端气温指数。从 1981—2025 年青稞生长季极端气候指数的变化趋势来看（图 3），TXx 只在江孜、浪卡子表现为略降低（每 10 年减少 0.02 ℃）外，其他各站均呈升高趋势，平均每 10 年升高 0.01 ~ 0.66 ℃（16 个站 $P<0.05$），以洛隆最大、普兰最小。各站 TNx 均呈升高趋势，每 10 年增加 0.01 ~ 0.79 ℃（29 个站 $P<0.05$），其中拉萨升幅最大（$P<0.001$），尼木最小。所有站的 TX90P 和 TN90P 均呈增加趋势，平均每 10 年分别增加 0.36 ~ 9.89 d（27 个站 $P<0.05$，以洛隆最大、普兰最小）和 1.70 ~ 19.97 d（所有站 $P<0.05$ 且 29 个站 $P<0.001$，以波密最大，贡嘎最小）。各站 TN10P 都趋于减少，每 10 年减少 0.32 ~ 11.53 d（29 个站 $P<0.01$），减幅以拉萨最大、贡嘎最小。同样，CSDI 在所有站上皆呈现出减少趋势，平均每 10 年减少 0.04 ~ 11.12 d（27 个站 $P<0.05$），以拉萨减速最快（$P<0.001$），隆子最慢。



A. TXx；B. TNx；C.TX90P；D. TN90P；E. TN10P；F.CSDI。加粗数字 1、2、3 分别表示 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$，未标数字的站点未通过显著性检验；LTR 为变化趋势。下同

图 3　1981—2025 年西藏青稞生长季极端气温指数的变化趋势及其显著性分布

采用 Pearson 相关系数法，计算青稞生长季极端气候指数变化趋势与地理参数（经纬度、海拔）的相关系数，结果见表 2。大部分极端气温指数与经纬度、海拔的相关性不显著，只有 TXx 与经纬度呈显著的相关性（$P<0.01$），尤其是与经度有着极为显著的相关关系（$P<0.001$），若经度每增加 10° E，TXx

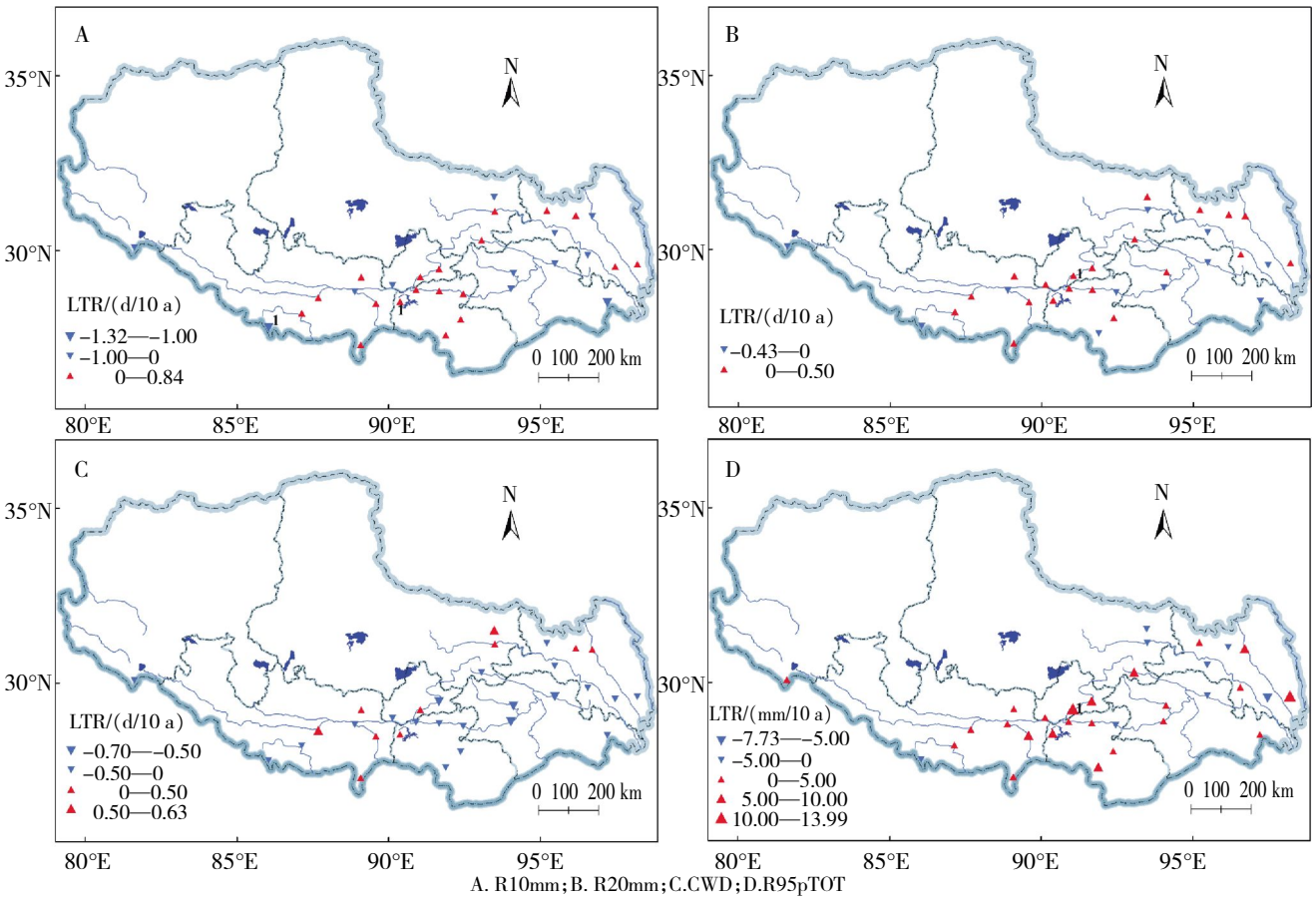
升温率将每 10 年增加 0.27℃；TN10P 与海拔存在显著的负相关（$P<0.05$），若海拔每升高 100 m，TN10P 减幅将每 10 年增大 0.2 d。

表 2　1981—2025 年西藏青稞生长季极端气候指数与地理参数(经纬度、海拔)的相关系数

	TXx	TNx	TX90P	TN10P	TN90P	CSDI	R10mm	R20mm	CWD	R95PTOT
经度	0.608***	0.122	0.312	0.235	0.148	0.124	−0.104	0.033	−0.224	−0.087
纬度	0.458**	0.297	0.160	−0.055	−0.029	0.008	0.023	0.199	0.224	−0.138
海拔	−0.273	−0.019	0.077	−0.359*	−0.267	−0.134	0.499**	0.299	0.504**	0.249

注：*、**、*** 分别表示 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$。表 4 同。

2.1.2　极端降水指数。由图 4 可知，近 45 年青稞生长季有 61%的站点 R10mm 表现为增加趋势，平均每 10 年增加 0.04 ~ 0.84 d，仅浪卡子站 $P<0.05$ 且增速最快，丁青增速最慢；呈减少趋势的站点主要分布在林芝市、昌都市、聂拉木和普兰，平均每 10 年减少 0.01 ~ 1.32 d，减幅以聂拉木最大、波密最小。65%的站点 R20mm 趋于增加，平均每 10 年增加 0.02 ~ 0.50 d，只有拉萨站 $P<0.05$ 且增幅最大，类乌齐增幅最小；其余站点每 10 年减少 0.02 ~ 0.43 d，其中聂拉木减速最大、米林减速最小。CWD 以减少为主，占 65%，平均每 10 年减少 0.03 ~ 0.70 d（$P>0.05$），减速以林芝最快、隆子最慢；其他站点每 10 年增加 0.02 ~ 0.63 d，以索县最大、帕里最小。R95pTOT 趋于增加的站点居多，占比达 74%，平均每 10 年增加 0.36 ~ 13.99 mm，仅拉萨 $P<0.05$ 且最大，芒康次之（每 10 年增加 11.16 mm），八宿最小；其余站以每 10 年 0.03 ~ 7.73 mm 的速度在减少（$P>0.05$），减幅以左贡最大，索县最小。



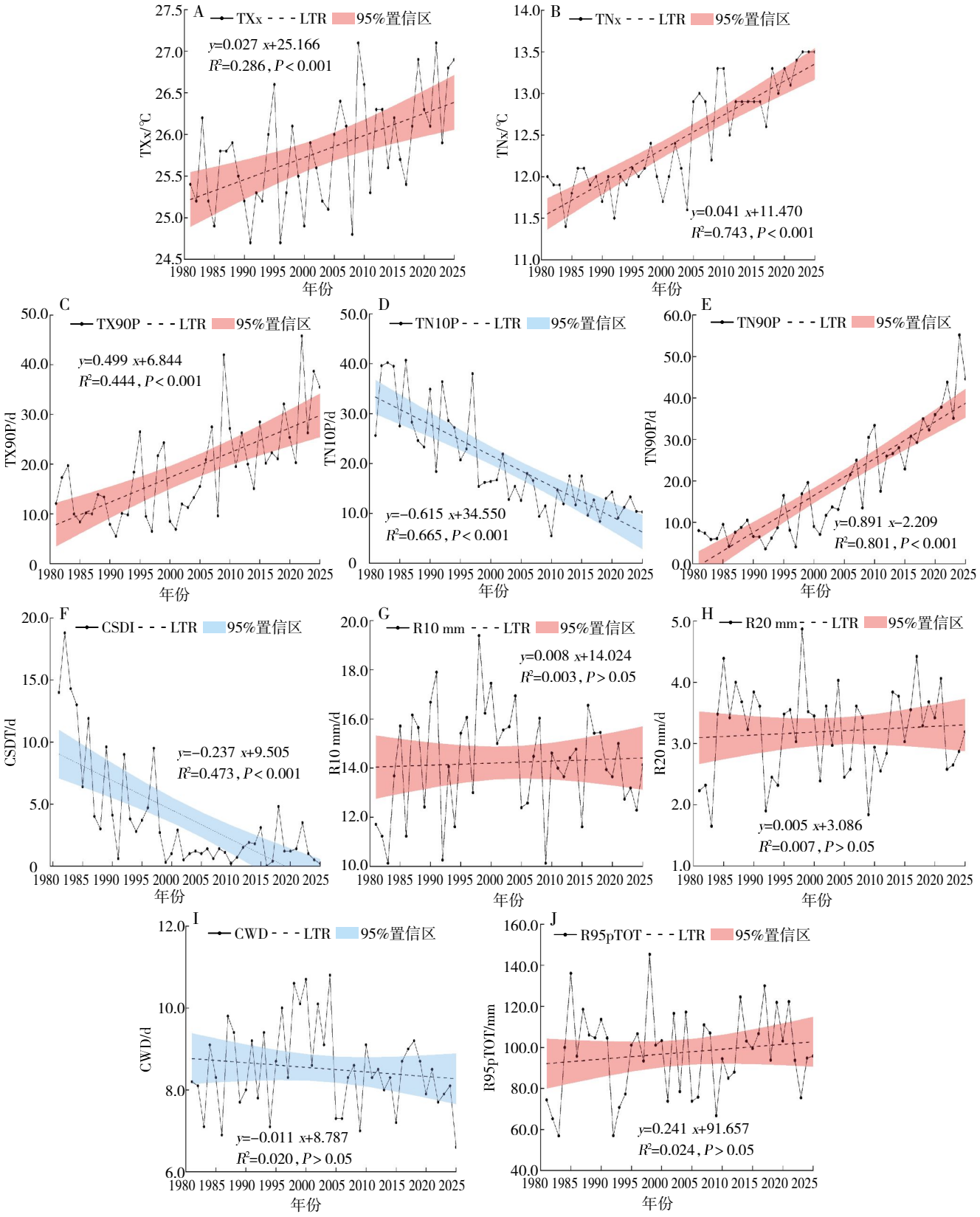
A. R10mm；B. R20mm；C.CWD；D.R95pTOT

图 4　1981—2025 年西藏青稞生长季极端降水指数的变化趋势及其显著性分布

从表 2 可看出，只有 R10mm、CWD 变化趋势与海拔存在显著的正相关关系（$P<0.01$），若海拔每上升 100 m，R10mm、CWD 的变幅每 10 年分别增大 0.05、0.03 d。

2.2　青稞生长季极端气候指数的时间变化

2.2.1　年际变化趋势。极端气候指数的变化如图 5 所示。



A.TXx；B. TNx；C.TX90P；D. TN10P；E.TN90P；F. CSDI；G.R10mm；H.R20mm；I.CWD；J.R95pTOT

图 5　1981—2025 年西藏青稞生长季极端气候指数变化

近 45 年西藏青稞生长季 TXx、TNx 分别以每 10 年 0.27、0.41 ℃的速度呈极显著升高趋势（$P<0.001$），以 TNx 升温最明显；TX90P 和 TN90P 表现为极显著增加趋势，平均每 10 年分别增加 4.99、8.91 d（$P<0.001$）；R10mm、R20mm 和 R95pTOT 也趋于增加，但不显著，平均每 10 年分别增加 0.08 d、0.05 d 和 2.41 mm。TN10P、CSDI 和 CWD 均呈现出减少趋势，平均每 10 年分别减少 6.15（$P<0.001$）、2.37（$P<0.001$）和 0.11 d（$P>0.05$）。

2.2.2 年代际变化。如表 3 所示，20 世纪 80—90 年代青稞生长季 TXx 和 TNx 偏低，TX90P、TN10P 和 R95pTOT 偏少，R20mm 正常，TN10P 和 CSDI 偏多。进入 21 世纪初 10 年，TXx 和 TNx 略偏高，TX90P 正常，其他极端气候指数均为负距平，以 R95pTOT 最为明显，为近 40 年最低的 10 年。21 世纪 10 年代，TN10P、CSDI、R10mm 和 CWD 为负距平，其余极端气候指数为正距平。总体来看，近 40 年青稞生长季 TXx、TNx、TX90P 和 TN90P 表现为递增的年代际变化特征；TN10P 和 CSDI 呈逐年代递减趋势；R95pTOT 在前 30 年偏少且呈明显的递减态势，近 10 年明显增多；R10mm 和 CWD 在 20 世纪 90 年代偏多，其他 3 个年代均偏少。

表 3　1981—2020 年西藏青稞生长季极端气候指数距平的年代际变化

年代	TXx/℃	TNx/℃	TX90P/d	TN10P/d	TN90P/d	CSDI/d	R10mm/d	R20mm/d	CWD/d	R95pTOT/mm
20 世纪 80 年代	−0.3	−0.6	−6.3	15.3	−11.5	7.7	−1.1	0	−0.4	−0.6
20 世纪 90 年代	−0.4	−0.5	−4.5	6.9	−9.1	1.6	0.5	0	0.5	−1.6
21 世纪初 10 年	0.1	0.1	0	−3.1	−0.2	−1.1	−0.3	−0.2	−0.1	−6.2
21 世纪 10 年代	0.2	0.4	4.5	−4.0	9.4	−0.5	−0.3	0.2	−0.3	7.9

注：距平为各年代平均值与 1991—2020 年的差值。

2.3 极端气候指数对青稞单产的影响

利用 Pearson 相关系数方法，计算近 45 年西藏青稞气象产量与生长季极端气候指数的相关系数，结果见表 4。由表可知，青稞气象产量不仅与 TXx 呈显著的负相关（$P<0.05$），还与极端降水指数（R10mm、R20mm、CWD、R95pTOT）存在显著的正相关关系（$P<0.05$）。

通过逐步回归方法，建立青稞气象产量与极端气候指数的回归方程，即：

$$\hat{Y}_W = 1\,048.763 - 44.012\,TXx - 38.704\,R20mm + 2.166\,R95pTOT。$$

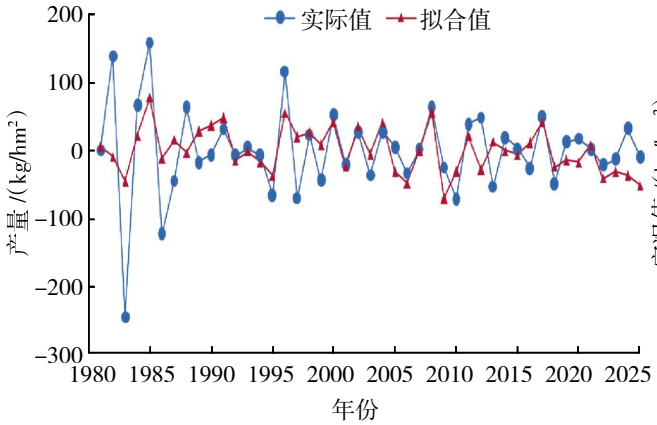
式中：$\hat{Y}_W$为青稞拟合气象产量（kg/hm²），$F = 4.766$（$P<0.01$），调整相关系数 $R^2 = 0.259$，剩余标准差 SSE = 1.296。如图 6 所示，青稞拟合气象产量（$\hat{Y}_W$）与实际气象产量（$\hat{Y}_W$）基本吻合，最大拟合误差出现在 1983 年（−200.15 kg/hm²，因当年发生严重干旱），平均相对误差为 −6.5%，说明回归方程能较好地诠释气象产量随时间变化的趋势与波动。

经计算极端气候指数对气象产量的贡献率，发现 R95pTOT 贡献率最高，为 44.2%，TXx、R20mm 的贡献率分别为 28.3%、27.5%。以上分析表明，青稞气象产量主要受 TXx、R20mm 和 R95pTOT 的共同影响，其中 R95pTOT 的影响程度最大。

表 4　1981—2025 年西藏青稞气象产量与生长季极端气候指数的相关系数

极端气候指数	TXx	TNx	TX90P	TN10P	TN90P	CSDI	R10mm	R20mm	CWD	R95pTOT
相关系数	−0.346*	−0.125	−0.116	−0.079	−0.036	−0.084	0.304*	0.346*	0.351*	0.337*

根据 GM(1,1)灰色模型方法得到的趋势产量和回归方程拟合的气象产量，计算得到 1981—2025 年拟合青稞单产，分析表明：拟合单产与实际单产十分接近（图 7），两者的决定系数 R^2 达 0.998（$P<0.001$），这说明该拟合模型能很好地反映实际单产的变化，预测精度很高。



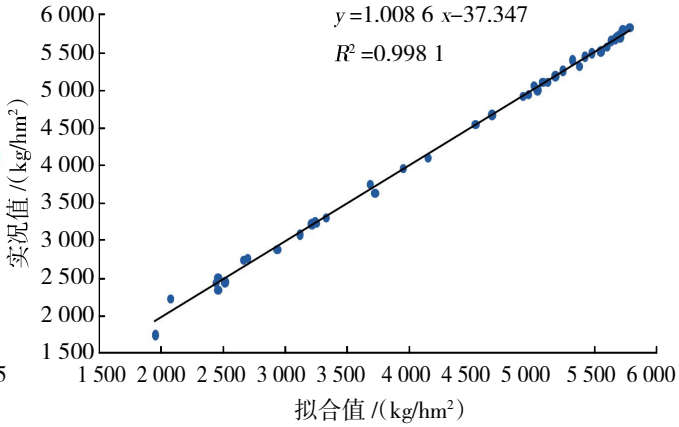


图 6　1981—2025 年西藏青稞气象产量实际值(Y_w)与拟合值($\hat{Y}_w$)　　图 7　1981—2025 年西藏青稞实际和拟合单产的点聚图

3　讨论

在全球范围内大部分极端气候事件呈增长趋势[38]；全球最大日降水量、连续 5 d 最大降水量和强降水量分别增加 5%、4%和 20%[39]。中国气温极值呈上升趋势，极端高温（低温）事件的频率和持续性不断增大（减小），极端降雨的量级指数和强度指数呈增大趋势[40]。青藏高原极端高温事件显著增加，极端低温事件显著减少；极端降水总体呈增加趋势，极端降水量和极端降水日数均明显上升[41]。本研究分析表明，西藏青稞生长季极端气温暖指数、中雨日数、大雨日数和极端降水量也趋于增长，而极端气温冷指数和连续湿润日呈降低趋势，这与上述结论基本相同。

全球小麦主产区发生复合干热事件的频率和强度均有所增加，已对小麦产量形成严重负面影响，预计未来将进一步增强[42]。极端高温、极端低温和极端降水都对中国粮食生产有显著的负影响，尤其对粮食主产区的负影响最大[43]。不同极端气候事件对中国北方冬小麦产量均产生负面影响，其中高温胁迫的影响总体强于冻害[44]。目前，有关极端气候事件对高原青稞产量影响的研究未见报道，主要聚焦光温水常规气象要素对青稞产量的影响：Tsechoe 等研究表明，青藏高原温度变化对作物产量呈负向影响[45]；万运帆等指出西藏地区最低气温对青稞产量呈显著的正向影响[46]；马伟东也认为月平均最低气温对青稞单产的影响最大且为正贡献[47]；陈鲁鹏等研究表明，青稞产量与月平均最低温度呈显著的负向影响[48]。本研究分析指出，极端最高气温与青稞气象产量呈显著的负相关，与极端降水指数有着显著的正相关，其中极端强降水量的正影响最大。但多数研究认为，气温升高有利于青稞增产，但这种正面影响是相对的，气温持续升高一旦超过青稞发育的最适温度，不利于青稞增产。尤其在夏季，是青稞对温度胁迫最敏感的时期，高温天气强度和频率的增加可能会使青稞产量减少[49]。本研究认为，青稞作为一种喜凉作物，在高寒地区生长，对低温、干旱、强日照有很强的适应性。它在生长过程中还需要一定的低温才能完成春化阶段，而且对夜间低温有要求。虽然气温升高有利于青稞增产，但这是相对的，是有条件限制的，需要从多个角度考虑。第一，未来气温升高到最适温度下限，确实能促进生长，延长有效生长期，从而获得增产。若持续升高，超过最适温度范围就会导致生育期缩短，光能利用时间变短，产量反而下降。第二，还必须与“水资源”协同考虑，气温升高会显著改变水循环过程，导致土壤和植物体水分蒸发蒸腾速率加快，增加干旱风险；青稞主产区多为雨养农业，降水变率增大，可能带来局地降水增加，极端降水事件（暴雨、冰雹）增加易带来洪涝风险。第三，升温可能使病虫害的发生范围和频率增加。原本在低海拔、温暖地区流行的病虫害（如条锈病、蚜虫等）会向高海拔的青稞种植区扩散，越冬基数增加，危害加重。而且青稞品种对某些病害抗性有限，遇到新的病虫害可能会减产。第四，存在品质下降的风险。气温升高使得灌浆加速，淀粉积累相对增加，而蛋白质等营养物质的积累减少，导致青稞品质下降。总之，不能简单地把“升温”等同于“增产”，这个正面影响是有前提条件的，必须考虑到气候变化对农业系统的综合影响。

4　结论

1）在空间分布上，近 45 年青稞生长季所有站 TNx、TX90P 和 TN90P 均呈显著增加趋势，TN10P 和 CSDI 均呈显著减少趋势，以拉萨最明显；94%站

TXx、61%站 R10mm、65%站 R20mm、74%站 R95pTOT 趋于增加，65%站 CWD 倾向于减少。

2）在时间分布上，近 45 年西藏青稞生长季平均 TXx、TNx、TX90P 和 TN90P 表现为极显著增长趋势；R10mm、R20mm 和 R95pTOT 也趋于增加，但不显著；TN10P 和 CSDI 呈极显著减少，CWD 减少不显著。1981—2020 年青稞生长季 TXx、TNx、TX90P 和 TN90P 呈逐年代递增，TN10P 和 CSDI 呈逐年代递减；R95pTOT 在前 30 年偏少且呈递减趋势，近 10 年明显偏多；R10mm、CWD 除在 20 世纪 90 年代偏多外，其他 3 个年代偏少。

3）近 45 年青稞气象产量与 TXx 呈显著的负相关，与 R10mm、R20mm、CWD、R95pTOT 存在显著的正相关；TXx、R20mm 和 R95pTOT 是影响青稞气象产量的主要极端气候因子。

参考文献：

[1] Hultgren A,Carleton T,Delgado M,et al. Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation [J]. Nature,2025,642(8068):644–652.

[2] Lesk C,Rowhani P,Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature,2016,529(7584):84–87.

[3] Vogel E, Donat M G, Alexander L V, et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(5): 054010.

[4] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2025)[M]. 北京:科学出版社,2025:1–15.

[5] 潘保田,李吉均. 青藏高原:全球气候变化的驱动机与放大器:Ⅲ.青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1996,32(1):108–115.

[6] 冯　松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,1998,43(6):633–636.

[7] 秦大河,丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究:现状、趋势及关键问题[J]. 气候变化研究进展,2009,5(4):187–195.

[8] 吴芳营,游庆龙,蔡子怡,等. 青藏高原变暖的季节不对称性特征及其机理研究进展[J]. 地球科学进展,2025,40(7):672–683.

[9] 韩熠哲,廖　捷,赵煜飞,等. 青藏高原多圈层观测网络与气候暖湿化研究的现状与展望[J]. 高原气象,2026,45(2):305–323.

[10] 陈德亮,徐柏青,姚檀栋,等. 青藏高原环境变化科学评估:过去、现在与未来[J]. 科学通报,2015,60(32):3025–3035.

[11] 陈亚宁,沈彦俊,姜　明. 气候变化对我国农业生产的影响及对策建议[J]. 中国科学院院刊,2026,41(4):636–643.

[12] 杜　军,刘依兰,建　军,等. 气候变化对西藏青稞种植的影响研究[M]. 北京:气象出版社,2017:104–116.

[13] 强小林,顿珠次仁,次　珍,等. 西藏青稞产业发展现状分析[J]. 西藏农业科技,2011,33(1):1–3.

[14] 刘国一,普布贵吉,甘雅文,等. 2010—2019 年西藏粮食增产的贡献因素[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(4):931–934.

[15] Zhang J J,Jiang F,Li G Y,et al. Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park,China[J]. Ecology and Evolution,2019,9(11):6643–6654.

[16] 郝　帅,宋艳玲,孙　爽,等. 气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究综述[J]. 中国农业气象,2023,44(5):398–409.

[17] 赵雪雁,王伟军,万文玉,等. 近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(10):1329–1338.

[18] 侯亚红,强小林. 西藏河谷农区灌水和中后期降雨对高产青稞耗水量与产量的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(26):170–175.

[19] Yin Y Y,Wang J A,Leng G Y,et al. Future potential distribution and expansion trends of highland barley under climate change in the Qinghai–Tibet plateau (QTP)[J]. Ecological Indicators,2022,136:108702.

[20] Ding R,Shi W J. Contributions of climate change to cereal yields in Tibet,1993—2017[J]. Journal of Geographical Sciences,2022,32(1):101–116.

[21] 胡颂杰. 西藏农业概论[M]. 成都:四川科学技术出版社,1995:145–147.

[22] 西藏自治区统计局,国家统计局西藏调查总队. 西藏统计年鉴 2025[M]. 北京:中国统计出版社,2025:110–113.

[23] 王顺久,唐信英,邓　彪,等. 珠峰地区近 50 年极端降水变化特征分析[J]. 高原山地气象研究,2023,43(1):1–7,16.

[24] 周秉荣,袁佳双,乔　斌,等. 青藏高原气候与冰冻圈变化研究进展[J]. 环境科学研究,2024,37(9):1885–1896.

[25] 姚檀栋,刘晓东,王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报,2000,45(1):98–106.

[26] 余忠水,王美蓉,刘明竑,等. 1980—2024 年西藏大气总水含量时空变化[J]. 干旱区研究,2026,43(1):1–12.

[27] 杜　军,次旺顿珠,扎西欧珠,等. 西藏气候变化评估报告:2024 年[M]. 北京:气象出版社,2025:6–20.

[28] 李桂华,周玉科,范俊甫,等. 青藏高原极端气温指数时空格局及可持续性分析[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(12):51–54.

[29] 杜　军,路红亚,建　军. 1961—2012 年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报,2014,29(6):990–1002.

[30] 边　多,黄晓清,陈　涛,等. 西藏气候变化评估报告:2023 年[M]. 北京:气象出版社,2024:38–49.

[31] Zhou Y K. Characterizing the spatio–temporal dynamics and variability in climate extremes over the Tibetan Plateau during 1960—2012 [J]. Journal of Resources and Ecology,2019,10(4):397–414.

[32] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J]. 自然灾

害学报,2011,20(6):13–18.
[33] 唐启义. DPS 数据处理系统:实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2010:959–1080.
[34] Kiktev D,Caesar J,Alexander L V,et al. Comparison of observed and multimodeled trends in annual extremes of temperature and precipitation[J]. Geophysical Research Letters,2007,34(10): L10702.
[35] Zhang X B,Hogg W D,Mekise. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada[J]. Journal of Climate, 2001,14(9):1923–1936.
[36] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京:气象出版社,2007:36–70.
[37] 袁瑞瑞,黄萧霖,郝　璐. 近 40 年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析[J]. 气候与环境研究,2021,26(4): 413–424.
[38] Song S,Li F D,Lu Y L,et al. Spatio–temporal characteristics of the extreme climate events and their potential effects on crop yield in Ethiopia[J]. Journal of Resources and Ecology,2018,9(3): 290–301.
[39] Rosenzweig C,Karoly D,Vicarelli M,et al. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change[J]. Nature,2008,453(7193):353–357.
[40] 曹　晴,郝振纯,傅晓洁,等. 1960—2017 年中国极端气候要素时空变化分析[J]. 人民黄河,2020,42(2):11–17.
[41] 包　文,马婷婷,刘艳婕,等. 青藏高原对极端天气气候影响:回顾与展望[J]. 气候变化研究进展,2026,22(3):271–287.
[42] 胡金鹏,何　研,史培军. 复合干热事件对小麦产量影响的研究进展与展望[J]. 气候变化研究进展,2025,21(5): 625–640.
[43] 郭　珊,蒋　博,吉雪强. 极端气候对粮食生产的影响及其作用机制:兼论农地流转的调节与门槛效应[J]. 生态学报,2025,45(7): 3169–3182.
[44] Zeng R Y,Lin X M,Sassenrath G F,et al. Current and projected impacts of extreme climate events on winter wheat yield in Northern China[J]. Communications Earth & Environment,2026, 7:100.
[45] Dorji T,Piao S L,Wang X H,et al. Emerging negative warming impacts on Tibetan crop yield[J]. Engineering,2022,14:163–168.
[46] 万运帆,李玉娥,高清竹,等. 西藏气候变化趋势及其对青稞产量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(4):374–380.
[47] 马伟东. 气候变化对青藏高原青稞种植的影响评估[D]. 西宁:青海师范大学,2022:80–86.
[48] 陈鲁鹏,姚晓华,姚有华,等. 基于气候和青稞产量形成关键指标的青藏高原生态区划分析[J]. 麦类作物学报,2023, 43(9):1197–1205.
[49] Porter J R,Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review [J]. European Journal of Agronomy, 1999,10(1):23–36.

Effect of Extreme Climate Event Change on Yield of Highland Barley in Xizang from 1981 to 2025

Du Jun[1,2,3], Tsetendolma[1], Yuan Lei[4], Lhakpa[2,4], Liu Jiandong[5]

(1. Xizang Autonomous Region Climatic Center, Lhasa 850001, China; 2. Lhasa Key Laboratory of Highland Barley Meteorology, Lhasa 850001, China; 3. Xizang Mêdog Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Water Cycle / CMA Mêdog Field Science Experiment Base for Atmospheric Water Cycle / Mêdog National Climate Observatory, Mêdog 860700, China; 4. Xizang Autonomous Region Plateau Ecology and Agrometeorology Center, Lhasa 850001, China; 5. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: To evaluate the impacts of extreme climate events on highland barley yield, daily meteorological data (maximum and minimum air temperatures and precipitation) from 31 stations in the Tibetan highland barley planting area during 1981 2025 were collected, combined with yield records. Ten extreme climate indices were calculated using RClimDex software, and their spatiotemporal variations during the barley growing season and effects on yield over the past 45 years were analyzed using linear tendency estimation, Pearson's correlation coefficient, and stepwise regression. The results showed that TNx, TX90P, and TN90P increased significantly, while TN10P and CSDI decreased significantly at all stations during the growing season. TXx increased at 94% of stations, R10mm at 61%, R20mm at 65%, and R95pTOT at 74%, whereas CWD decreased at 65% of stations. TXx and TNx exhibited highly significant upward trends, with TNx showing the greatest increase. TX90P and TN90P also increased highly significantly, with the latter increasing at approximately 1.8 times the rate of the former. R10mm, R20mm, and R95pTOT showed no significant trends. TN10P and CSDI decreased highly significantly, while CWD showed no significant decrease. From the 1980s to the 2010s, TXx, TNx, TX90P, and TN90P increased decade by decade, while TN10P and CSDI decreased; R10mm and CWD were higher in the 1990s and lower in the other three decades. Climate-driven yield variation was jointly influenced by TXx, R20mm, and R95pTOT, with R95pTOT making the largest contribution.

Key Words: Highland barley; Yield; Extreme climate index; Change trend; Dominant factor

周　建,王永勤,季　岩,等. 不同气象年型下稻茬小麦病虫草危害损失评估与验证[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):62-67(2026-08-20). DOI:10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.008.

不同气象年型下稻茬小麦病虫草危害损失评估与验证

周　建,王永勤,季　岩,梁红娟,周云龙
(镇江市丹徒区农业技术推广中心,江苏 镇江 212100)

摘要:为量化不同气象年型下稻茬小麦病虫草害造成的产量损失,明确杂草、病虫害对小麦产量的影响权重,2024—2026 年在江苏省镇江市丹徒区开展定点田间验证试验,设置常规防治、完全不防病虫害、完全不防病虫草害 3 个处理,通过实收测产计算各类危害损失率。结果表明:2024 年为暖湿多雨年型,病虫危害损失率为 12.84%,病虫草危害损失率达 51.75%;2025 年为干暖年型,病虫危害损失率仅 0.81%,病虫草危害损失率达 5.38%;2026 年为暖湿少雨年型,病虫危害损失率为 2.65%,病虫草危害损失率达 9.81%。杂草是当地稻茬小麦减产的主要基础因素,暖湿气候会加重小麦赤霉病等病害发生,并进一步扩大病虫害造成的产量损失。

关键词:稻茬小麦;病虫草危害损失率;气象年型;产量损失;丹徒区
中图分类号:S435.121;S512.1　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673-6486-20260064

江苏省镇江市丹徒区地处长江下游南岸,属典型北亚热带季风气候,小麦为当地主要粮食作物,常年种植面积 7 000 hm^2 以上,稻 - 麦轮作为区域主流种植制度。当地麦田常发生小麦赤霉病、纹枯病、麦蚜及各类杂草危害。随着秸秆全量还田技术大面积推广,田间病原菌、杂草种子不断累积,叠加气候变暖引发的暖冬、春季连阴雨等异常天气,稻茬小麦病虫草害发生规律与危害程度呈现明显年际差异[1-2]。长江中下游麦区一直是赤霉病高发区域,作为穗部病害,赤霉病会造成小麦严重减产,一旦发生流行,其造成的产量损失通常在 10% ~ 30%,严重时可导致绝收[3-4]。气候变暖引发暖冬,小麦抽穗扬花期连阴雨天气频发,使沿江、沿淮麦区赤霉病流行风险持续上升,该病害已成为制约小麦产量与品质提升的主要病害[1-2]。同时,纹枯病菌在田间不断累积,受气候条件影响,该病在江苏境内发生范围持续扩大、危害逐年加重。异常多变的气候也是导致病虫发生种类此消彼长和某些种类暴发流行的关键因素[5]。当前小麦生产逐步走向机械化与轻简化栽培,田间除草主要依赖化学药剂,长期单一用药导致杂草产生抗药性,田间优势杂草种群逐年扩增[6]。江苏稻茬麦田杂草群落亦呈现禾本科杂草发生面积和优势度有升高趋势[7],草相亦有趋于复杂的演替趋势。稻茬麦田杂草发生基数普遍偏高,麦田杂草单独危害造成的小麦产量损失率往往超过病虫害危害损失[8]。

国内多地已开展小麦病虫草害损失相关监测与研究[9-11],但针对江苏省镇江市丹徒区稻茬小麦病虫草害自然危害损失的连续多年定点系统监测尚未见报道。传统经验式防控模式已无法满足小麦稳产增效的生产需求。为此,本研究连续 3 年开展定点田间比较验证试验,量化不同气象年型下病虫草害的产量损失特征,旨在为长江下游同类麦区植保工作开展、防灾减灾政策制定提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

验证试验于 2024—2026 年在江苏省镇江市丹徒区辛丰镇黄墟村(119°36′ E,32°05′ N)稻麦轮作田进行。该区域属北亚热带季风气候,年均气温 15.4 ℃,年均降水量 1 070 mm,无霜期 235 d 左右。供试田块地势平坦,排灌条件良好,前茬均为水稻,实行秸秆全量还田。供试土壤为由下蜀黄土母质发育的马肝土(潴育型水稻土),耕层(0 ~ 20 cm)土壤基本理化性质为:pH 值 6.81,有机质质量分数 19.5 g/kg、全氮质量分数 2.27 g/kg、有效磷质量分数 11.84 mg/kg、速效钾质量分数 117.7 mg/kg。质地为粉砂质黏壤土,

收稿日期:2026-06-16;修回日期:2026-07-22。
作者简介:周　建(1989—),男,硕士,农艺师,主要从事农作物病虫草害监测预警与综合防控研究。Email: 375810332@qq.com。

保水保肥性能较强，但耕性偏黏，适耕期较短。

本试验所用 2024—2026 年小麦生育期气温、降水量、空气相对湿度等气象数据，均来源于国家气象科学数据中心镇江市丹徒国家基本气象站（区站号：58252）的地面常规观测资料。文中气温、降水距平百分率等评价指标，统一以该站 1991 年 12 月—2021 年 5 月（共 30 个小麦冬春生育期）的气候平均值为基准；其中大气相对湿度为站点 2 m 百叶箱标准观测值，与麦田冠层田间微环境湿度存在一定差值，仅用于不同年份干湿背景的横向对比分析。

1.2　供试材料

2024—2026 年供试小麦品种分别为扬麦 28、扬辐麦 12 和镇麦 18。年度更替品种贴合当地小麦生产实际，逐年选用区域主流推广品种，能够真实还原大田生产现状，提升研究结论的生产指导价值。本研究不开展跨年份、跨品种的绝对产量比对，仅在同年度同一品种内对各处理进行横向测算，依据相对产量计算病虫草害损失率，消除品种固有产量潜力差异带来的干扰。3 个品种均为长江下游沿江麦区主推春性中熟小麦，赤霉病抗性均为中抗，品种自身特性差异不会对各年份病虫草危害损失分析产生明显影响，可客观反映不同气候年型下产量损失程度的差异。

各年度播期、基本苗数、肥料施用总量及运筹方式均严格参照丹徒区稻茬小麦高产栽培技术规程执行，保证各处理除病虫草防控措施外，其余田间管理完全一致。

防控用药按照丹徒区植保植检站技术方案适期施用：苗前封闭除草选用异丙隆 + 吡氟酰草胺等，苗后茎叶除草选用甲基二磺隆 + 炔草酯等；防治病害选用丙硫菌唑·戊唑醇、氰烯菌酯、氟唑菌酰羟胺等杀菌剂；防治虫害选用吡蚜酮、噻虫嗪等杀虫剂。

1.3　试验设计

本验证性试验依托江苏省植保植检站部署的全省粮食作物病虫草害损失率监测任务开展，严格按省级监测规范布设。试验采用大区对比设计，共设置 3 个处理，每个处理面积 0.1 hm^2，不设重复，具体处理方案详见表 1。各处理之间筑埂并覆盖薄膜隔离，独立排灌，杜绝药剂漂移、水肥串流影响试验结果。

2024 年小麦播种前，分别采集了各处理 0 ~ 20 cm 耕层土壤，测定有机质、全氮、有效磷、速效钾含量（质量分数，下同）4 项主要土壤肥力指标。A、B、C 大区土壤养分检测结果依次为：有机质含量 19.1 g/kg、全氮含量 2.32 g/kg、有效磷含量 11.90 mg/kg、速效钾含量 114.8 mg/kg；有机质含量 19.7 g/kg、全氮含量 2.24 g/kg、有效磷含量 11.58 mg/kg、速效钾含量 121.0 mg/kg；有机质含量 19.7 g/kg、全氮含量 2.25 g/kg、有效磷含量 12.03 mg/kg、速效钾含量 117.2 mg/kg。各区土壤肥力指标变异系数均小于 5%，试验地块养分空间差异微弱，基础地力整体均衡；加之田块地势平坦，全生育期内 3 个大区耕作、基肥施用、秸秆还田等田间管理措施完全统一，试验基底条件一致性较好。

试验通过大区内部多点系统开展病虫草害调查实现数据内部质控，均衡地力与标准化田间管理，以保障处理间横向对比结果稳定可靠。本研究结论主要适用于长江下游沿江、土壤类型为马肝土（潴育型水稻土）的同类型稻茬麦田，可作为区域化病虫草害精准防控的实证参考，不作为普适性统计推断的依据。

表 1　试验处理设计

编号	处理	用药方法
A	常规处理	全生育期按照丹徒区植保技术方案，正常开展除草、防病、防虫作业
B	完全不防病虫害	正常施用除草剂防控杂草，全生育期不喷施杀菌剂、杀虫剂
C	完全不防病虫草害	全生育期不使用除草剂、杀菌剂、杀虫剂，无任何病虫草防控措施

1.4　调查内容与统计方法

1.4.1　草害发生程度调查。在小麦拔节期开展草害基数调查，灌浆初期复核最终草害等级。各处理均采用五点对角线取样法，每点放置 0.25 m^2 标准样方框，统计框内杂草株数，换算为单位面积杂草密度（株 /m^2），依据杂草密度进行五级分级：0 级，0 株 /m^2，田间无杂草；1 级，1 ~ 20 株 /m^2，轻度草害；2 级，21 ~ 50 株 /m^2，中度偏轻草害；3 级，51 ~ 100 株 /m^2，中度草害；4 级，101 ~ 200 株 /m^2，重度草害；5 级 > 200 株 /m^2，极重草害。

1.4.2　赤霉病调查与统计。小麦乳熟期开展赤霉病调查，采用五点取样法，每点随机调查 100 穗小麦，记录病穗数量、发病严重度，计算病穗率与病情指数。参照 GB/T 15796—2011《小麦赤霉病测报技术规范》，对单穗发病严重度分级：0 级，无病；1 级，病小穗数占全部小穗的 1/4 及以下；2 级，病小穗数占全部小穗的 > 1/4 ~ 1/2；3 级，病小穗数占全部小穗的 > 1/2 ~ 3/4；4 级，病小穗数占全部小穗的 3/4 以上。

病穗率计算公式：

$$病穗率 = \frac{病穗数}{调查总穗数} \times 100\%。 \quad (1)$$

病情指数计算公式：

$$病情指数 = \frac{\sum(各级病穗数 \times 相应病级数)}{调查总穗数 \times 4} \times 100。 \quad (2)$$

1.4.3　纹枯病调查与统计。于小麦灌浆期开展纹枯病系统调查，采用五点取样法，每点随机连续调查 50 株小麦，逐株检查茎基部发病情况，记录发病株数和严重程度，计算病株率与病情指数。参照农业行业标准 NY/T 614—2002《小麦纹枯病测报调查规范》进行分级，每处理合计调查 250 株。

病株率计算公式：

$$病株率 = \frac{发病株数}{调查点总株数} \times 100\%。 \quad (3)$$

病情指数计算公式：

$$病情指数 = \frac{\sum(各级病株数 \times 各级代表值)}{调查总株数 \times 5} \times 100。 \quad (4)$$

1.4.4　实收测产。各处理在同一天进行清仓收割，测定实际产量，按照 GB 1351—2023《小麦》规定，将籽粒含水量折算至丹徒区当地小麦安全水分 13.0% 后计算标准产量。

1.4.5　调查对象说明。综合 3 年田间系统观察，试验区小麦蚜虫仅在局部植株零星出现，种群密度远达不到危害阈值，对小麦产量无明显影响。因此本试验以小麦赤霉病、纹枯病及田间杂草为核心调查对象。

1.5　损失率计算与杂草危害相对贡献值估算

病虫危害损失率 =（常规防治区的单产 – 完全不防病虫害的单产）/ 常规防治区的单产 × 100%；(5)

病虫草危害损失率 =（常规防治区的单产 – 完全不防病虫草害的单产）/ 常规防治区的单产 × 100%。 (6)

采用差值法推算杂草危害相对贡献值 = 病虫草损失率 – 病虫损失率。李春广等提出多处理对照分割损失的评估思路[12]；联合国粮食及农业组织（FAO）提出的病虫草损失线性叠加模型可用于粗略估算[13]；Oerke 在全球作物损失评估中提出病、虫、草分项损失加和模型，同时指出该类模型未考虑有害生物交互作用，存在估算偏差[14]。本研究综合上述思路开展估算，所得数值仅表征杂草在总产量损失中的相对权重，并非杂草单独危害损失率。

2　结果与分析

2.1　各处理赤霉病、纹枯病发生情况及杂草危害等级

不同年份各处理赤霉病发生情况、杂草危害等级详见表 2。2024 年为暖湿多雨年型，扬花期降水偏多导致未防病虫田块赤霉病中等发生，纹枯病偏轻发生；同时长期饱和土壤墒情大幅延长杂草出苗窗口期，完全不防控的 C 处理杂草达到 4 级重度危害。2025 年为干暖年型，整体温湿度条件不利于病害发生和杂草种子萌发，各处理赤霉病发生极轻，且各处理均未查见纹枯病，完全不防控的 C 处理出现 2 级中度偏轻草害。2026 年为暖湿少雨年型，未防病田块赤霉病、纹枯病轻度发生，整体病害发生程度介于 2024 与 2025 年之间。该年全生育期总降水偏少但相对湿度持续偏高，前期零星小雨频繁，表层土壤墒情适宜，刺激杂草分批萌发，形成冬前、春季双出草峰，后期分散性降雨和高湿条件进一步利于杂草快速生长，杂草发生潜力仅次于 2024 年暖湿多雨年；C 处理全程未实施除草措施，冬前、春季两批次杂草叠加累积，杂草危害等级达 3 级；对杂草进行防治的 A、B 处理实施了苗前封闭和茎叶补防的措施，有效压低双峰杂草基数，杂草仅 1 级轻度发生。常规处理三年杂草均为 1 级轻度危害，防控效果良好。

表 2　各处理赤霉病、纹枯病发生情况及杂草危害等级

年份	处理	赤霉病病穗率 / %	赤霉病病情指数	纹枯病病株率 / %	纹枯病病情指数	杂草发生级数 / 级
2024	A(常规处理)	0.80	0.20	4.00	0.80	1
	B(完全不防病虫害)	14.00	5.50	16.00	4.32	2
	C(完全不防病虫草害)	16.00	6.35	22.00	6.24	4
2025	A(常规处理)	0	0	0	0	1
	B(完全不防病虫害)	0.60	0.15	0	0	1
	C(完全不防病虫草害)	0.60	0.15	0	0	2
2026	A(常规处理)	0.20	0.05	0	0	1
	B(完全不防病虫害)	1.60	0.60	2.40	0.56	1
	C(完全不防病虫草害)	2.00	0.65	2.40	0.72	3

2.2　不同气象年型下各处理产量及病虫草危害损失特征

不同气象年型下各处理小麦单产、病虫及病虫草损失率见表 3。

2.2.1　2024 年(暖湿多雨型,2023 年 12 月—2024 年 5 月)。2024 年小麦生育期平均气温 10.28 ℃,气温距平 $\triangle T$ = +0.10 ℃,整体略偏暖,但春季关键期 3、4 月气温较常年分别偏高 1.29、1.56 ℃,呈平均略暖、春季明显偏暖态势;生育期平均相对湿度为 71.37%,较常年(69.37%)相对偏高 2.89%;生育期总降水量 487.8 mm,降水量距平百分率 R_p = +25.2%,越冬期 2 月降水量达 150.5 mm(较常年偏多 187.1%),扬花期 4 月降水 111.5 mm(较常年偏多 50.4%)。综合温湿条件与降水特征,判定为暖湿多雨年型。长时间温暖高湿多雨环境,既有利于看麦娘(*Alopecurus aequalis*)、菌草(*Beckmannia syzigachne*)等喜湿禾本科杂草大量萌发、生长,也有利于赤霉病等病原菌侵染与流行,形成杂草与病害协同发生的趋势。当年病虫危害损失率 12.84%,病虫草危害损失率达 51.75%。经估算,杂草造成的产量损失约 38.91%,是小麦减产的核心因素。该年份需同时强化杂草与穗部病害防控,才能保障小麦产量。

表 3　不同年份稻茬小麦各处理单产及危害损失率(镇江市丹徒区)

年份	小麦生育期气象特征	常规防治单产 /(kg/667 m²)	完全不防病虫害单产 /(kg/667 m²)	完全不防病虫草害单产 /(kg/667 m²)	病虫危害损失率 / %	病虫草危害损失率 / %
2024	暖湿多雨型	498.58	434.56	240.56	12.84	51.75
2025	干暖型	479.30	475.40	453.50	0.81	5.38
2026	暖湿少雨型	453.50	441.50	409.00	2.65	9.81

2.2.2　2025 年(干暖型,2024 年 12 月—2025 年 5 月)。2025 年小麦生育期平均气温 11.08 ℃,气温距平 $\triangle T$ = +0.90 ℃,生育期总降水量仅 170.8 mm,降水量距平百分率 R_p = 56.1%,1 月降水仅 3.3 mm(较常年偏少 94.0%),越冬期 2 月降水 8.4 mm(较常年偏少 84.0%),扬花期 4 月降水仅 4.5 mm(较常年偏少 93.9%),加之全生育期平均大气相对湿度仅 60.4%,综合判定为干暖年型。大气水汽条件匮乏,冬春连旱导致土壤墒情严重不足,抑制了杂草种子萌发与幼苗生长;扬花期无持续高湿条件,赤霉病侵染受阻,田间全程未监测到纹枯病,整体病害发生基数低。当年病虫危害损失率 0.81%,病虫草危害损失率 5.38%,差值法估算杂草带来的产量损失约 4.57%。结果表明,即使在干旱、病虫害轻发年份,杂草依旧是稻茬小麦不可忽视的减产因素,适期化学除草仍是稳产的必要举措。

2.2.3　2026 年(暖湿少雨型,2025 年 12 月—2026 年 5 月)。2026 年小麦生育期平均气温 10.97 ℃(距平 $\triangle T$ = +0.79 ℃),总降水量 269.0 mm(R_p=31.0%),降水强度介于 2024 年暖湿多雨型(+25.2%)与 2025 年干暖型(56.1%)之间。3 月降水量 81.7 mm,较常年偏高 5.8%,降雨分散全月;4 月降水偏少 18.1%,但

降雨日数较多，月均相对湿度达 78.1%，为三年同期最高。全生育期平均相对湿度 72.73%，较常年（69.37%）相对偏高 4.84%，为三年最高值。综合来看，2026 年呈温度偏高、相对湿度偏高而总降水偏少的特征，判定为暖湿少雨年型。受该年度气象条件调控，病虫草发生水平整体居中，病害发生程度明显弱于 2024 年，杂草发生规模介于 2024 和 2025 年之间。未开展病虫害防控的田块，赤霉病、纹枯病均呈轻度发生，发病程度高于常规防治田。本年度病虫危害损失率 2.65%，病虫草危害损失率 9.81%，杂草仍为主要减产因子。

3　讨论

本次连续 3 年定点监测试验，明确了丹徒区稻茬小麦病虫草害的危害特征与产量损失规律。结果显示，镇江市丹徒区稻茬小麦病虫草危害损失率年际变幅为 5.38%～51.75%，其中杂草危害相对贡献值（差值法估算）占综合损失的 70%以上，是稻茬小麦减产的主导因素，该结论与黄淮、长江中下游麦区相关研究结论[8]一致。刘万才等在安徽等稻麦轮作区的监测试验同样指出，杂草危害常造成小麦 10%～30%的产量损失，重发田块可达 50%以上[9-10]。高密度杂草会与小麦争夺水肥、光照等资源，直接抑制小麦生长[15-16]，且杂草密度与小麦产量呈显著负相关[17]，这也是丹徒区禾本科杂草常年造成严重减产的主要原因。

气象条件对小麦真菌病害影响明显。2024 年暖冬叠加扬花期连续阴雨、高湿环境，病虫损失率明显升高；2025 年干暖少雨的环境则有效抑制病害发展，病虫损失率不足 1%。赤霉病属于典型气候型病害，长江中下游麦区暖冬天气导致田间稻桩带菌量提升，扬花期遇连阴雨天气会大幅增加病菌侵染概率[18]。2026 年分散阴雨环境下病害轻度发生，进一步证明阶段性降水与田间菌源结合，仍会造成一定产量损失。本试验中麦蚜未达防治指标，说明在试验期间的品种布局与田间生态条件下，蚜虫对当地小麦产量影响相对有限，生产中蚜虫防治药剂的使用可结合田间监测和预警信息动态调整，避免固定化施药。

本研究采用差值法估算杂草危害的相对贡献值，因存在病虫草协同效应，故测算结果不宜等同于杂草独立危害损失率，仅用于表征杂草因素在总产量损失中的相对权重。本验证试验采用大区试验，未设置重复。同时本次试验未系统测定有效穗数、穗粒数、千粒质量等产量构成因子，难以深入解析病虫草害对小麦生长发育的差异化影响机制，高密度杂草主要通过争夺光温水肥抑制小麦分蘖发生与成穗，明显降低有效穗数；而赤霉病、纹枯病等真菌性病害主要破坏输导组织、影响光合产物运输与籽粒灌浆，进而导致千粒质量与穗粒数下降。后续研究将在此基础上，增设“仅防控杂草、不开展病虫防治”处理，实现病害、虫害、杂草单类危害损失与多类有害生物协同交互损失的有效拆分；增设多重复小区试验，同步监测不同防控处理下的产量构成三要素动态变化，明确杂草与病害对产量形成的时序影响特征；同时结合籽粒真菌毒素（如 DON 毒素）含量检测，综合评价病虫草害对小麦产量与品质的协同影响，为长江下游麦区稻茬小麦的减损增效提供更全面的理论支撑。

4　结论

2024—2026 年镇江市丹徒区稻茬小麦病虫草危害损失率区间为 5.38%～51.75%，不同气象年型下波动较大，杂草为首要致害因子。暖湿多雨年份病虫损失高达 12.84%，暖湿少雨年份降至 2.65%，干暖年份仅 0.81%；暖湿多雨年份实施病虫草一体化防控可挽回 50%以上的产量损失，是保障小麦稳产的关键举措。生产上应匹配气象年型分类施策：暖湿多雨年统筹杂草封闭与穗期病害防控，干暖及暖湿少雨年以杂草常态化防除为核心，病虫害按监测预警结果达标施药。

参考文献：

[1] 段亚冰,周明国. 我国小麦赤霉病流行与化学防控现状及控病降毒关键技术理论创新与应用[J]. 现代农药,2024,23(2):13-21.

[2] 任义方,吴佳文,翟伶俐. 江苏省小麦赤霉病气象适宜度等级动态预测技术[J]. 中国农业气象, 2025,46(9):1371-1381.

[3] 徐　晴,许甫超,秦丹丹,等. 矮秆基因在中国不同麦区小麦品种中的分布及其对赤霉病抗性的影响[J]. 麦类作物学报,2022,42(7):790-798.

[4] 马鸿翔,周明国,陈怀谷,等. 小麦赤霉病[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社,2019:38-39.

[5] 曾　娟,姜玉英,霍治国. 小麦重大病虫害发生流行的气候

影响评价[J]. 科技导报,2011,29(20):68–72.
[6] 姚有梅. 稻茬麦田杂草发生与防除措施分析[J]. 安徽农学通报,2024,30(20):81–84.
[7] 黄红娟,黄兆峰,姜翠兰,等. 长江中下游小麦田杂草发生组成及群落特征[J]. 植物保护,2021,47(1):203–211.
[8] 张小龙,张艳刚,李虎群,等. 小麦主要病虫草害田间危害自然损失率试验[J]. 中国农学通报,2017,33(31):117–121.
[9] 刘万才,李　跃,赵中华,等. 2022 年全国小麦病虫害防控植保贡献率评价报告[J]. 植物医学,2022,1(5):1–7.
[10] 刘万才,李　跃,彭　红,等. 2023 年全国小麦病虫害防控植保贡献率评价研究报告[J]. 中国植保导刊,2023,43(8):49–53.
[11] 刘宝发,孙春来,孟爱中,等. 小麦病虫草害自然损失率估计试验[J]. 现代农业科技,2009(12):104,107.
[12] 李春广,刘梦泽. 农作物病虫草危害损失评估与分解方法[J]. 中国植保导刊,2013,33(12):51–56.
[13] FAO. Crop loss assessment methodology[R]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations,1999:8.
[14] Oerke E C. Crop losses to pests [J]. Journal of Agricultural Science, 2006,144:31–43.
[15] 康国强. 麦田杂草的发生规律及化除技术[J]. 现代农业,2019(11):38–39.
[16] 张　帅. 我国主要农作物田杂草防控技术[J]. 杂草学报,2020,38(2):50–55.
[17] 陈　军,郭英芬,高　潮,等. 不同密度杂草对小麦产量损失的影响研究[J]. 陕西农业科学,2026,72(4):101–105,112.
[18] 程怡璠,沈会权,张英虎,等. 小麦 – 赤霉病菌互作研究进展[J]. 大麦与谷类科学,2023,40(5):1–7,17.

Evaluation and Verification of Damage Losses of Rice–stubble Wheat Caused by Diseases, Pests and Weeds Under Different Meteorological Years

Zhou Jian, Wang Yongqin, Ji Yan, Liang Hongjuan, Zhou Yunlong
(Dantu District Agricultural Technology Extension Center, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: To quantify yield losses in rice-stubble wheat caused by diseases, pests, and weeds under different meteorological year types, and to clarify the relative contributions of weeds versus diseases and pests to yield reduction, field experiments were conducted in Dantu District, Zhenjiang City, from 2024 to 2026. Three treatments were established: conventional integrated control, no control against diseases and pests, and no control against diseases, pests, and weeds. Yield loss rates were calculated based on actual harvest measurements. The results showed that in the warm-humid rainy year of 2024, yield losses from diseases and insect pests reached 12.84%, while combined losses from diseases, pests, and weeds were 51.75%. In the dry-warm year of 2025, corresponding losses were only 0.81% and 5.38%, respectively. In the warm-humid but rain-deficient year of 2026, losses were 2.65% and 9.81%, respectively. Weeds were the primary factor underlying yield reduction in local rice-stubble wheat. Warm and humid conditions exacerbated the incidence of wheat scab and other diseases, further amplifying yield losses from diseases and pests. These findings provide a reference for disaster loss assessment, estimation of plant protection contribution rates, and targeted pest and weed management strategies in the lower Yangtze River wheat production region.

Key Words: Rice-stubble wheat; Yield loss rate from diseases, pests and weeds; Meteorological year type; Yield loss; Dantu District

党俊华,赵胜利,莫　丹,等. 汉中大米订单模式现状、问题及对策[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):68-75,80(2026-07-20). DOI: 10.14069/j.cnki.32-1769/s.2026.05.009.

汉中大米订单模式现状、问题及对策

党俊华,赵胜利,莫　丹*,尤　强,王　冉,肖　飞
(汉中市农业技术推广与培训中心,陕西 汉中 723000)

摘要:汉中是陕西省最核心的水稻主产区,稻米产业对区域粮食安全与农民增收具有重要支撑作用。近年来,汉中积极推进稻米订单农业发展,形成传统订单模式与"六方联动"全产业链创新订单模式协同发展的格局。本文以汉中大米订单农业为研究对象,从订单模式发展现状、存在问题及发展对策展开探讨,旨在健全汉中大米订单模式运行机制,强化主体带动,完善利益联结,提升标准化与品牌化水平,推动汉中大米订单农业水平高质量发展,促进乡村产业振兴。

关键词:汉中大米;订单模式;六方联动;发展研究
中图分类号:S511　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673-6486-20260039

订单农业(contract farming)指的是农产品生产主体与收购主体在农产品生产之前,通过签订生产与销售合同,将分散经营的农户与现代市场经济中的龙头企业连接起来,约定农产品的品种、数量、质量标准、价格及收购方式等条款,用于安排组织生产和销售的一种现代化的农业经营模式,所以又称合同农业或者契约农业。订单农业能有效解决农业生产的盲目性,规避市场风险和稳定农产品供销关系。目前国内大米产业的订单农业发展已经趋于成熟,规模化种植模式得到了广泛普及,国内各个地区大多依托当地的农业龙头企业整合零散耕地,打造出成片标准化的订单种植基地,能够稳定区域内的粮食供应来源;数字技术逐步融入大米产业发展的各个环节,通过大数据分析预判市场需求,物联网设备管控田间种植全过程以及将区块链溯源技术应用在产销流程中;农业金融保障体系在不断完善,另外商超直接采购、个性化定制订单等新型产销模式,也在持续拓展大米订单农业的发展范围。

汉中大米资源优势显著,但当地订单发展水平与国内主产区存在明显差距。本文系统梳理汉中水稻订单农业发展历程,分析传统订单模式与"六方联动"创新订单模式运行特征,结合2025年汉中优质水稻订单相关统计数据,综合评估订单农业发展效益,全面呈现汉中大米订单农业发展现状与实施成效。

收稿日期:2026-04-21;修回日期:2026-07-13。
作者简介:党俊华(1976—),男,农艺师,主要从事农业技术推广工作。Email: 513635234@qq.com。
* 通信作者:莫　丹(1981—),女,高级农艺师,主要从事农业技术研究与推广工作。Email: 513635234@qq.com。

1　汉中大米订单农业发展现状

汉中是陕西省水稻主产区、陕南重要粮油生产基地[1],稻米产业是汉中市农业农村经济的重要支柱,也是保障区域粮食安全、促进农民持续增收增效的基础产业[2-3]。近年来,汉中市严格落实粮食安全各项决策部署,积极创新稻米产销衔接机制,订单农业实现从无到有、从散到聚、从传统到创新的稳步发展。

1.1　汉中大米订单模式的发展历程

汉中大米订单模式的发展经历了三个阶段,从最初的自发尝试到逐步规范,再到多元化发展,每个阶段都与当地农业生产水平、市场化程度相适应,也反映了农户与市场对接方式的不断升级(图1)。

1.1.1　自发萌芽阶段(2000年以前)。2000年以前,汉中水稻生产种植以家庭联产承包责任制为基础,种植农户分散种植、自主销售,订单模式处于自发萌芽状态。此时,部分小型粮食收购商或加工企业为保障原料供应,会与周边农户口头约定收购事宜,主要以当地常规水稻品种为主,约定收购价格参照市场行情,无明确的合同条款和履约保障机制。

这一阶段的订单模式具有明显的随意性和不稳定性,农户种植仍以"经验型"为主,缺乏对市场需求的精准把握,收购商常因市场价格波动随意压价或拒收,农户利益难以得到保障。未形成规模化、规范化的合作模式[4-5]。

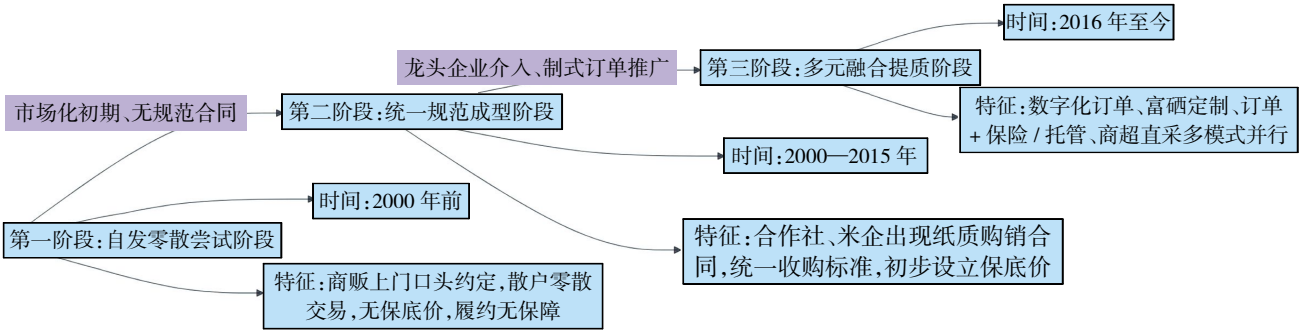


图 1　汉中大米订单模式发展历程

1.1.2　初步规范阶段(2000—2015 年)。2000 年以后,随着我国农业市场化进程加快,汉中市逐步重视水稻产业规模化发展,政府开始引导企业与农户建立规范化的订单合作关系。这一阶段,订单模式以“企业 + 农户”为主要形式,通过企业与农户签订书面收购合同,明确约定水稻品种、种植面积、收购价格、质量标准和履约责任,部分企业还会为农户提供种子、化肥等生产资料支持和简单的技术指导。

在这个发展阶段,汉中市各县区的农民专业合作社承担起了连接农户与市场的纽带作用,统一和农产品企业签订大批量的收购订单,让农户可以抱团开展农业生产,不仅提高了普通农户的市场议价水平,也提高了农户应对各类农业经营风险的能力。汉中水稻的订单合作模式出现了明显转变,以往依靠口头约定的合作方式,慢慢转变成了正式的书面合同合作模式,以往随意化的粮食收购方式,也逐步换成了标准化的收购方式,水稻订单的覆盖范围也在持续扩大。

1.1.3　多元发展阶段(2015 年至今)。2015 年以来,政府持续推进乡村振兴相关战略,同时也在不断深化农业供给侧结构性改革,汉中市的水稻订单农业模式进入了多元化的发展阶段。在订单合作主体方面,参与合作的主体类型变得越来越丰富,当地形成了多种农业合作模式,其中包含“企业 + 合作社 + 农户”的基础模式,还打造出了“米业企业 + 种业企业 + 农技中心 + 合作社 + 农业服务公司 + 农业保险”共同参与的六方联动发展模式,除此之外,“家庭农场 + 企业”的合作形式也得到了推广,这些合作模式基本覆盖了水稻种植、粮食加工、农业服务、产品销售、风险保障的全部产业链环节。

2025 年,农业相关部门和合作主体也同步签订了农业托管服务、农业风险保障的相关协议。在订单合作内容方面,合作的范围也在不断拓展,订单合作逐步延伸到水稻品种筛选培育、农户种植技术培训、田间病虫害防控、粮食加工与产品销售等全产业链环节。地方政府也加大了对水稻订单产业的政策扶持力度,农业技术相关部门也主动开展工作,精准对接农业企业和种植农户,当地的农业行业协会也充分发挥桥梁作用,持续推进汉中大米区域品牌的建设工作,让汉中水稻订单模式的规范化程度、规模化发展水平都得到了明显提升。

1.2　汉中大米订单农业主要模式

依托当地坚实的农业产业基础,在国家政策引导与市场经济的驱动下,汉中大米订单农业从初步探索到规范发展,逐步形成传统订单模式与六方联动创新订单模式并行的发展态势,各类模式适应不同生产经营场景,在实践中不断优化完善。

1.2.1　传统订单模式。目前汉中大米传统订单农业主要有三种类型:一是“企业 + 农户”基础模式,由企业与小农户、种植大户直接签订稻谷购销订单,企业统一提供稻种与基础技术指导,实行保价兜底收购,订单约定收购价整体较市场均价溢价 10% ~ 15%。不过这种发展模式还存在很多不足,主要依靠企业和种植散户一对一直接合作的方式开展生产对接,合作双方的绑定关系不够紧密,签订的合作契约约束力度也比较弱;水稻种植的统一标准很难落实,企业和农户双方都存在违约的可能性,企业对接零散农户开展合作的运营成本也相对更高,这也导致该模式对水稻产业的长期带动作用受到了很大限制。二是“企业 + 合作社 + 农户”升级优化的订单模式,该模式是以合作社为纽带整合分散农户资源,在南郑、城固、西乡等水稻主产区广泛推行,实现小农户与大市场的初步衔接。但其局限较为突出,部分合作社规范化水平低,仅发挥中介作用,利益联结机制单一,农户无法共享产业链增值收益,规模化标准化生产推进不足。三是“政府 + 企业 + 农户”引导型订单模式,该模式由市县农业农村部门、农技推广机构牵头搭建产销对接平台,统筹组织企业与农户集中签约。但该模式过度依托行政力量主导对接,缺乏市场化自主合作机制,难以形成常态化长效运营

机制，脱离行政统筹后的运营稳定性不足。

1.2.2　创新订单模式。汉中市在传统水稻订单农业的发展基础之上，创新推出了全新的“六方联动”全产业链订单升级模式（表 1），有效解决传统订单农业生产中的主体单一、产业链条脱节、市场运行机制不完善等长期存在的问题。2025 年由汉中市农业技术推广与培训中心、市大米产业协会等市级稻米技术及行业服务机构负责，搭建了一套全新的合作架构，整体包括“米业企业 + 种业企业 + 技术与行业服务机构 + 合作社 + 农业服务公司 + 农业保险”六大参与主体。新模式依靠集中签约、多方协议联动的方式，把水稻品种供应、田间技术指导、农业生产托管、粮食加工收购、种植风险保障等关键生产环节，全部整合到统一的发展体系当中。这种全新订单模式制定了标准化的运行规则，农业生产中全程实行统一供种、统一技术指导、统一农业服务、统一粮食收购以及统一农业保险的管理方式，能够对水稻种植到粮食加工的整个产业链条进行全面管控，搭建起产业结构更完整、各方权责更清晰、整体运行更稳定的新型水稻订单农业发展体系。

表 1　2025 年汉中市各区县优质水稻订单统计

区县	水稻品种	订单种植面积 /hm²	订单模式
汉台区	奥富有 287	120.1	混合型（合作社 + 农户）
	野香优	193.4	混合型（合作社 + 农户）
	川优 6203	2 164.4	六方联动模式
南郑区	川优 6203	1 207.3	六方联动模式
	华夏香丝	66.7	农户主导
	株两优 5298	66.7	农户主导
	钰香优 2025	3.3	合作社主导
城固县	美香两优晶丝	33.4	农户主导
	华浙优系列	667.0	六方联动模式
	粒立香臻占	66.7	混合型（合作社 + 农户）
	黄华占	967.2	六方联动模式
	野香优 959	1 667.5	六方联动模式
	桂朝 2 号	200.1	合作社主导
	黄华占	266.8	合作社主导
洋县	浙 1500	133.4	农户主导
	黑帅	53.4	农户主导
	双亚黑一号	615.6	六方联动模式
	红香一号	80.0	合作社主导
	双亚香 4 号	74.7	混合型（合作社 + 农户）
西乡县	野香优 959	1 127.2	六方联动模式
	叶香优系列	33.4	农户主导
勉县	金龙优 2018	213.4	农户主导
	香龙优 2018	227.8	六方联动模式
	美香两优晶丝	192.1	农户主导
	川优 6203	334.8	六方联动模式
	香龙优 2018、金龙优 2018	150.1	农户主导
	香龙优 2018、金龙优 263	178.8	农户主导
	野香优	133.4	合作社主导
	常规杂交	200.1	六方联动模式
略阳县	美香占 2 号	20.0	混合型（合作社 + 农户）
	韶香 100	80.0	六方联动模式
	滇禾 615	33.4	混合型（合作社 + 农户）
	黄华占	33.4	混合型（合作社 + 农户）
	农香 39	20.0	混合型（合作社 + 农户）

与以往的传统订单农业模式相比，全新的“六方联动”订单模式完成了汉中大米生产全方位的体系升级，自身具备的发展优势也更加突出。首先，在该模式主导下的多方协同合作能力有了明显提升，新模式引入了种业机构、农技部门、社会化服务主体和保险机构，有效弥补了传统模式在稻种品质、种植技术、田间服务、风险保障等方面的短板。其次，模式的市场化运行程度更高，相关政府部门主要负责整体统筹和平台搭建，同时充分放开市场权限，让企业、合作社和各类服务机构自主开展合作对接，减少了产业发展对行政力量的过度依赖，也让订单农业拥有了更持久的内生发展动力。再次，模式的标准化管控要求更加严格，相关主体从水稻品种挑选的源头开始把控，统一规范种植技术和粮食收购品质，有效提升了本地水稻原粮的品质稳定性，实现粮食生产的全程溯源。全新升级的订单模式的风险分担体系更加完善，农业保险机构和各类农业服务主体全程参与产业发展，形成了风险共担、利益共享的合作格局，极大地提升了汉中大米订单生产的履约稳定性和长期发展潜能。

1.3　2025 年汉中市优质水稻订单生产情况统计

随着汉中市水稻订单农业的不断推广，以及规模化种植布局的持续推进，全市优质水稻订单的覆盖范围，已从南郑、城固、汉台等传统水稻主产区，拓展到洋县、勉县、略阳等各个区县，基本实现了全市区域范围的覆盖；参与订单种植的主体也十分丰富多样，不仅有大规模种粮农户、家庭农场和农民专业合作社，也包含普通的小种植农户，整体呈现多种经营主体共同参与的发展局面，全市水稻订单的整体结构也在不断优化。2025 年，汉中市新签订的优质水稻订单种植面积达到 11 625.6 hm^2（表 1），根据汉中市大米协会调查统计，目前全市累计落地的优质稻订单总面积已经突破 33 350 hm^2。

从各区县统计数据来看，全市订单农业发展呈现三大鲜明特征：一是主产区集聚效应突出，传统主产区平川三县区南郑、城固、汉台订单面积合计 7 690.6 hm^2，占全市订单总量的 66.15%，是全市种植规模核心支撑；川优 6203、黄华占、野香优 959 等优质品种以合作社为主要载体实现连片种植，构成订单面积的核心品种支撑；二是特色产区差异化发展态势明显，洋县以双亚黑一号等特色稻品种为重点，勉县、略阳县以立足区域资源发展优质、香型系列及特色常规稻，形成“主产区保规模 + 特色区提品质”的互补发展格局；三是汉中大米订单模式合作方式日趋多元和规范，各区县普遍采用“合作社 + 农户”模式，部分区域探索整村推进、村集体牵头等实施形式，有效提升小农户组织化程度，而“六方联动”订单模式推广种植优质稻面积逐年增加，为汉中大米标准化生产、品牌化运营提供了坚实支撑。

1.4　汉中大米订单农业效益分析

为量化评估不同模式的成效，下面从经济与社会效益两个维度进行对比分析。

1.4.1　经济效益分析。为系统对比不同订单模式对产业链各主体的经济效益影响，从农户生产收益与企业经营效益两个维度，对无订单自主种植、传统订单模式、“六方联动”创新订单模式开展综合比较分析。相关数据调查结果表明（表 2），三种汉中大米订单模式在生产产量、产品售价、经营收益、生产成本以及配套服务保障等方面，都表现出逐步向好的特点。

从农户的生产经营角度来看，无订单种植模式的整体生产产量偏低，种植投入的成本更高，农户能够获得的收益也较少，该模式也没有完善的配套服务支撑；传统订单模式只是利用保底收购加基础技术指导，仅做到了产量提高、成本降低，收益也有所增加，但全新升级的“六方联动”汉中大米订单模式为农户统一提供种子、全程跟进种植技术服务、配套农业保险服务，还落实生产托管相关工作，该模式下的农作物单产水平在三种模式里最高，农户的生产种植成本最低，同时模式采用了保底收购、溢价增收、年底分红相结合的定价方式，农户得到的综合收益比前两种模式高。

从企业的经营发展角度来看，无订单模式存在原料供应特别不稳定、农产品品质合格率低、企业原料采购成本高、农产品附加值低、企业整体经营风险大等问题；传统订单模式靠签合同锁定供应，经营企业能够通过签订合作订单锁定原料供应渠道，各项经营问题都得到了一定的改善；当企业采用“六方联动”全新订单模式时，能够形成完整的产业链闭环供销体系，农产品生产的全程标准化管理，原料供应稳定、农产品品质达标率高、采购成本低，产品附加值和抗风险能力都有明显提高。因此，“六方联动”的创新订单模式，能同时做到帮农户增收和让企业增效，是更有优势的农业产业化组织方式。综合以上各项对比内容能够看出，“六方联动”的新型订单经营模式，既能帮助农户提高种植收入，也能提高企业提升经营效益，是整体优势更为突出的农业产业化经营组织模式。

表 2　不同订单模式下农户与加工企业经济效益比较

类别	比较维度	无订单自主种植	传统订单模式	“六方联动”订单模式
农户端效益	平均产量 /（kg/667 m²）	500 ~ 550	500 ~ 600	600 ~ 650
	市场溢价情况	随行就市	高于市场价 10% ~ 15%（保底收购）	保底 + 溢价 + 分红（高于市场价 20% ~ 30%）
	平均综合收益 /（元 /667 m²）	1 500 ~ 1 800	2 000 ~ 2 300	2 300 ~ 2 600
	平均生产成本 /（元 / 667 m²）	1 300 ~ 1 400	1 200 ~ 1 300	1 100 ~ 1 200
	技术 / 保险 / 服务	无	种植技术指导	统一供种 + 全程技术 + 农业保险 + 生产托管
企业端效益	原料供应稳定性	极不稳定（断供率 > 30%）	稳定（签约锁定）	全产业链闭环供应（零断供）
	原粮品质达标率	低（品质混杂）	中（按标收购）	高（全程标准化管控）
	原料采购成本	高（市场散收溢价）	中（批量采购优惠）	低（基地直供 + 成本分摊）
	产品附加值水平	低（原粮销售为主）	中（普通加工销售）	高（品牌溢价 + 高端产品）
	综合经营风险	高（市场 + 原料双波动）	中（原料风险降低）	低（风险共担）

注：数据来源为对汉中市 2025 年各县区水稻种植主产区的合作社、农户及加工企业进行实地调研、问卷统计与案例访谈整理所得。

1.4.2　社会效益分析。汉中大米推行的“六方联动”全新升级订单农业发展模式，为当地带来了较为积极的社会促进作用；农户自主开展无订单生产种植的传统方式存在较多弊端，而传统订单农业模式能够有效减少农户面临的市场经营风险，也能提高当地农业统一生产的水平，对稳固区域粮食生产总量、保障农户的基本种植收入都起到了一定的推动效果。在传统订单模式的基础上，全新升级的“六方联动”模式进一步放大了农业发展的社会价值，该模式依靠全产业环节的协同配合和完善的风险保障机制，不仅可以稳固当地水稻产业的整体种植面积，切实保障区域的粮食生产安全；该模式还能把零散经营的小农户统一纳入标准化的产业发展体系之中，带动当地农业生产朝着规范化、现代化方向发展，也能创造更多就业岗位、拓宽农户的增收渠道，能够为乡村产业发展和农村社会的平稳发展提供有力的基础保障。

2　汉中大米订单模式存在的问题

2.1　订单履约率不足，运行稳定性偏弱

当前汉中大米订单农业整体履约稳定性不足，供需双方双向违约现象较为突出。从农户端来看，多数农户契约意识较为薄弱，对订单合同的法律约束力认知不足，在稻谷市场价格高于订单约定收购价时，存在私自转售、不按合同履约的情况，尤其在粮价上行周期，农户违约现象更为频发[6]。从企业端来看，当市场粮价下行、企业收购成本压力增大时，部分企业存在压级压价、变相拒收、拖延收购等违约行为，损害农户种粮收益。同时，订单合同的标准化建设仍需完善，在权责划分、质量标准、违约处置等方面的界定仍不够细致，对市场价格波动、自然灾害、病虫害等统筹考虑不够充分，风险分担与保障机制有待进一步健全，难以形成更强有力的履约保障，一定程度上影响了订单运行的稳定性。

2.2　经营主体带动不足，订单模式零散化

当地相关经营主体的带动效果不够理想，订单式生产还存在较为突出的零散化问题；受到各类外界条件的制约，汉中大米订单农业的规模化、统一化生产水平比较低。首先是地理地形条件，汉中整体处于秦巴山区范围内，平川少山地多，大部分土地都是零散分布的坡地和梯田，耕地地块整体细碎且不集中，区域内很难开展连片的大规模种植工作，这也让参与订单种植的农户分布较为零散，农业生产的组织程度偏低，给后续的统一管理、标准化种植工作带来了不小的阻碍。其次是本地龙头企业和农业合作社的带动能力偏弱；汉中本地的大部分稻米加工企业整体规模较小，自身综合实力不足，能够辐射带动的农户和种植区域十分有限；部分农村合作社的规范运营程度不高，合作社大多只承担了简单的对接中介工作，对于农户的生产组织、技术服务、产业带动能力都比较薄弱，没办法有

效整合区域内零散的农户种植资源。最后是新型发展模式的普及覆盖范围不足；虽然汉中地区已经试点推行了“六方联动”全产业链订单种植模式，但该模式的整体种植覆盖面积依旧偏小，全市主流的订单农业还是以传统的“企业 + 农户”“企业 + 合作社 +农户”模式为主，大部分农户依旧采用老旧的分散种植方式，当地大米订单生产的零散化问题依旧突出。

2.3　利益联结机制松散，农户增值收益不足

当前汉中大米订单农业利益联结机制仍较为松散，农户难以充分共享产业链增值收益。现有汉中大米无订单自主种植、传统订单两类模式普遍存在利益联结松散、收益分配失衡问题，传统订单多为短期购销契约，契约仅约定保底收购价，缺乏产业链利润分红、溢价返还等长效分配设计，产业链增值收益集中留存于加工销售环节，小农户被隔离在大米精深加工、品牌销售的增值环节之外，难以分享全链条红利[7]。一是订单联结形式单一。多数订单以短期保底价收购为核心，仅实现简单产销对接，缺乏分红、返利、股权等长效利益绑定机制，农户与企业之间多为一次性买卖关系，利益联结紧密度不足。二是产业链增值收益分配失衡。稻米加工、品牌溢价等产业链高附加值环节主要集中在企业端，农户仅能获取种植环节的基础收益，难以分享加工、销售环节的增值利润，增收空间受限。三是产业链条偏短，附加值挖掘不足。本地稻米加工多以初级加工为主，精深加工环节发展滞后，米糠、米胚等副产品综合利用率偏低，产业链整体附加值不高，进一步压缩了农户的增值收益空间。

2.4　生产配套服务薄弱，标准化生产水平不高

订单农业对标准化生产要求较高，但当前汉中大米生产配套服务体系仍不完善，标准化管控水平有待提升，具体主要体现在两大方面：一是产后基础设施建设滞后。部分产区仓储、烘干等基础设施仍存在短板，尤其是山区县，烘干能力不足、仓储条件有限，难以满足订单农业集中收储、保质保鲜的需求；同时，高产栽培、病虫害绿色防控、全程机械化作业等先进技术推广应用不足，生产环节标准化程度不高。二是优质品种与绿色技术推广不到位。部分订单农户仍沿用传统种植品种与技术，优质专用品种、绿色生产技术覆盖范围有限，难以满足订单农业统一品种、统一品质的核心要求，导致原粮品质参差不齐，影响订单履约质量与品牌建设[8]。

2.5　品牌建设滞后，市场竞争力薄弱

“汉中大米”于 2025 年 10 月经国家知识产权局第 646 号公告批准，由原农产品地理标志转化为国家地理标志保护产品。汉中大米在区域公共品牌打造方面，本身拥有不错的发展基础；但当地的品牌建设工作整体推进速度较慢，产品的市场竞争能力还有很大的提升空间。首先“汉中大米”区域品牌缺少统一的运营方案和规范的管理制度，品牌本身的核心引领作用没有被充分发挥出来，经营主体各自打造品牌、独立开展生产经营，没有形成统一的汉中大米发展合力，造成区域品牌的市场影响力较弱，品牌增值空间也相对较低，品质优良的本地大米无法卖出更高的价格，很难为当地订单农业的发展提供有力的支撑。其次是品牌的文化内容挖掘程度不足，完整统一的品牌发展体系没有正式建立；没有全面、系统地挖掘梳理“汉中大米”自带的地域生态优势和本土农耕文化特色，没能打造出专属的特色品牌文化，使得本地大米产品和同类产品相比，差异化优势并不明显；同时产业全流程的质量溯源体系不够完善，品牌的产品品质保障能力和市场公信力也因此受到了一定影响。品牌的推广宣传和权益保护力度不足，市场主体抱团发展的运行机制不够完善；各类经营主体都是独立投放宣传资源，零散开展推广工作，无法汇聚成统一的宣传合力，线下的实体销售渠道布局数量有限，线上的电商销售渠道开发进度偏慢，让产品的市场流通覆盖范围受到了限制；同时区域品牌的日常管理、打假维权相关机制不够健全，市场上仿冒、盗用“汉中大米”地理标志的问题无法得到有效整治，很难形成以“汉中大米”品牌统筹引领、各类市场主体协同发展的成熟模式，严重限制了汉中大米整体品牌实力的提升。

3　汉中大米订单模式发展对策措施

3.1　构建契约风险共担机制，促进履约订单稳定性

传统的汉中大米订单合作模式，普遍存在履约成本偏高、合作违约风险大、合同约束力度弱等各类问题，需要依托基础的契约治理理论和风险共担相关理念，构建一套更加稳定、规范的订单履约运行体系。首先，可以建立价格兜底和风险缓解的相关机制，合作各方可以依托六方联动模式确定统一的粮食收购基准价格，同时在合作中加入农业保险

和各类可以降低市场风险的辅助手段，能够有效缓解市场价格波动对订单合作带来的冲击，从根源上减少合作双方出现违约情况的可能性。其次，可以完善信用约束和口碑治理的相关机制，相关农业生产管理部门可以搭建订单合作主体的信用评价体系，对坚守合作约定的主体给予相应扶持，对违约失信的主体进行相应惩戒，能够进一步强化各方的合同履约意识，稳定各方长期合作的发展预期。最后，可以规范统一合作契约内容和全过程监督管理制度，行业可以推行标准统一、权责清晰的订单合作合同范本，明确合作双方的权利、义务以及纠纷处理方式，对合同签订、执行、收尾的全过程进行规范管理和闭环监督，依规处理订单合作过程中产生的各类矛盾纠纷，切实保障产业链上所有参与主体的合法权益。

3.2　培育规模化经营主体，推进订单生产组织化与集约化

围绕订单生产的规模不经济、组织化程度低等突出问题，以主体培育—资源整合—服务嵌入为主线，提升订单生产整体性。一是优化区域布局与专业化分工，依托平川灌区推进优质稻集中连片种植，实现品种、技术、标准统一化；山区立足资源禀赋发展专用稻定向生产，形成差异化、特色化订单供给格局。二是强化龙头企业与合作社的纽带作用，支持加工企业建设专属原料基地，推动合作社开展土地托管与集中经营，将分散小农户整合进入订单体系，降低交易成本与组织成本。三是推动“六方联动”机制常态化嵌入，将良种、农技、保险、托管等服务一体化供给，实现订单生产从松散联结向紧密型组织化转变。因地制宜优化种植布局，实现平川与山区差异化协调发展。依托汉台、南郑、城固、西乡等平川区域连片耕作优势，集中选育优质稻品种，统一落实生产技术、田间管理与收购标准，推进规模化标准化订单种植；针对镇巴、宁强、留坝等山区县区坡地固有种植条件，贴合本地面皮产业原料刚需，定向选育面皮专用稻开展定制化种植，形成平川优质规模化、山区特色差异化的有序发展格局。

3.3　健全长效利益联结制度，拓展农户增值增收空间

目前汉中大米产业存在利益绑定不够紧密的问题，种植农户很难分到产业链延伸带来的额外收益，针对这一核心问题，可以从合作绑定方式、收益分配方式、产业链拓展三个角度制定对策，能够进一步稳固农户持续增收的基础。首先，可以创新多种长期订单合作模式，让经营主体和农户的利益关系变得更加稳固；产业发展可以打破以往短期、单一的底价收购合作方式，合作双方可以签订长期的种植收购订单，落实保底价收购、优质粮食优价售卖的规则，让农户能够同时拿到土地租金、入股分红、务工薪资等多类收入，以此建立更加紧密、稳定的产业合作关系。其次，可以优化全产业链的收益分配方式，让农户也能分享到产业增值带来的利润；相关主体可以依靠“六方联动”发展体系，整合产业内所有参与经营的主体，改变农户只能赚取基础种植收益的单一局面，清晰划分产业链各个环节的收益分配比例，让大米加工、品牌销售等盈利较高环节的部分收益，适当向前端种植农户倾斜，打通农户参与全产业链分红的渠道，实实在在拓宽农户的增收途径。最后，可以延长稻米相关的产业链条，充分挖掘产业的综合经济效益；当地可以重点发展面皮专用稻、富硒特色大米等特色品类，推动稻米加工从简单的初级处理，升级为深度精细加工；同时可以推广“稻鱼共养”“稻鳖共养”的生态种植模式，有效提升土地的整体产出效益，还可以对米糠、米胚、稻壳等稻米加工副产品进行高效利用，通过多种方式拓宽农户的增值增收渠道。

3.4　补齐生产服务短板，全域推进标准化种植落地

为夯实稻米生产硬件支撑，从设施补齐与良种技术管控两大维度优化服务体系。以农业标准化理论与社会化服务体系为支撑，解决订单生产中品质不稳、产后损耗高、技术供给不足等问题。一是补齐产后配套设施短板，筑牢粮食安全底线、降低产后粮食损耗。以村集体、村级合作社为核心主体，盘活村内闲置校舍、空旷场地等资源，改造建设集中晾晒场区、小型烘干站点、便民临时仓储库房，满足山区稻谷晾晒、烘干、暂存需求，依托设施配套保障储粮安全，切实减少产后粮食浪费。二是强化良种技术推广与生产管控，统一种植标准。定向推广适配汉中水土条件、契合订单要求的优质专用稻种，实现品种规范化统一种植；普及绿色防控、测土配方施肥等先进种养技术，组建农技队伍下沉田间开展常态化指导培训，同步制定统一标准化生产规程引导农户精细化管理，保障稻谷品质整齐稳定，全面适配订单收购标准与长期订单合作需求。

3.5　强化品牌体系建设，提升“汉中大米”市场核心竞争力

为补齐品牌建设短板，提升“汉中大米”市场核

心竞争力，统筹推进品牌规范管理、内涵塑造与市场拓展各项工作。一是强化品牌标准管控，依托优质优价赋能订单农业发展。严格执行“汉中大米”团体标准，统一规范地理标志产品全流程生产经营要求，规范标志使用授权管理秩序，整治市场无序竞争与低价倾销乱象。构建标准、订单、品牌联动运行机制，严格对标统一团体标准落实优价收购，释放地理标志应有品牌溢价，扭转优质稻米售价偏低现状，稳固支撑“六方联动”订单体系提质增效。二是深挖“汉中大米”地域品牌内核，健全溯源监管体系，稳固品牌公信根基；相关农业生产管理部门可以依托汉中当地的生态资源优势和传统农耕特点，提炼出属于“汉中大米”的独有品牌特色，能够塑造出特色突出、容易被市场识别的区域公共品牌样貌；搭建覆盖稻米产业全流程的质量追溯系统，记录水稻种植、粮食加工、仓储存放、产品销售等各个环节的相关信息，实现全流程信息可查询、可追踪；相关监管岗位人员会长期开展产品质量抽查和日常监管工作，对市场上盗用、仿冒“汉中大米”地理标志的违规行为进行严肃处理，持续维护好该品牌的市场评价，提升品牌在行业内的可信程度。三是统筹资源拓展宣传流通渠道，凝聚主体协同发展合力。整合线上线下平台开展系统化品牌推介，充分彰显“汉中大米”生态特质、优良品质与本土农耕特色；线下布设“汉中大米”形象专柜做实终端展示直营，线上依托电商平台强化全域品牌宣传引流，配套完善仓储物流体系，构建经营主体抱团发展的流通格局，稳步提升品牌整体市场认可度与占有率[9]。

4　总结与展望

汉中大米订单农业生产经过多年的摸索与发展，已逐步形成了传统订单模式和“六方联动”全产业链创新模式共同推进的发展局面，该产业发展模式可以稳定当地的粮食生产工作，能够带动种植农户增加经济收入，也能有效提高农业产业的组织化、标准化水平，整体取得了较为良好的发展成果；进一步推动汉中大米订单农业朝着规范化、规模化、市场化、全链条化的高质量方向稳步发展，能够持续筑牢区域粮食安全生产的基础，也能为当地的乡村产业振兴工作提供坚实的发展保障。从长远的行业发展角度来看，当前消费市场不断升级、数字技术持续革新、农产品对外流通的整体格局也在不断变化，汉中大米订单农业需要主动抓住这些发展机遇，提前做好后续的发展规划。在未来的发展过程中，汉中大米订单农业只有持续结合数字技术、电商销售渠道、金融保障服务和品牌运营工作，不断优化和升级订单合作的商业模式，才能充分发挥本地生态稻米产业的发展价值，探索出一条适合秦巴山区发展、贴合本地特色的订单农业可持续发展路径。

参考文献：

[1] 张文明. 水稻[M]. 西安:三秦出版社,2014:5-6.
[2] 葛　茜,崔月贞,王亚梁,等. 汉中市水稻大面积提产增效技术路径[J]. 中国稻米,2026,32(3):5-8.
[3] 潘光大,姚永成,朱　菲,等. 浅论汉中优质稻米产业化开发[J]. 农业科技通讯,2023(1):4-6.
[4] 周　娟. 订单农业中企业与小农户对接的中间网络机制研究:以福建建宁的水稻制种产业为例[J]. 南京工业大学学报(社会科学版),2026,24(1):150-160.
[5] 吕　硕,姜光飞,高　林. 订单式农业的实践探索与路径优化:以西盟县永业村为例[J]. 现代农业科技,2024(21):165-167,172.
[6] 余金凤. 我国订单农业履约难的经济学分析[J]. 科技广场,2009(6):43-46.
[7] 于乐荣. 产业振兴中小农户与现代农业衔接的路径、机制及条件:以订单农业为例[J]. 贵州社会科学,2021(2):156-162.
[8] 吴连翠,张震威. 水稻规模种植户持续种植意愿影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(3):95-102.
[9] 李福夺,尹昌斌. 激发粮农增收活力:订单模式运作机制的多案例扎根分析[J]. 农业经济与管理,2024(4):1-12.

（下转第 80 页）

王文鑫,高海涛,张世鲍,等. 抗病耐旱稳产小麦新品种文麦 18 号的选育及栽培技术要点[J/OL]. 大麦与谷类科学,2026,43(5):76–80(2026–09–29). DOI:10.14069/j.cnki.32–1769/s.2026.05.010.

抗病耐旱稳产小麦新品种文麦 18 号的选育及栽培技术要点

王文鑫[1],高海涛[1],张世鲍[1],刘海燕[2],何金宝[1],农明英[1*]
(1. 文山壮族苗族自治州农业科学院,云南 文山 663099;2. 文山州农业技术推广中心,云南 文山 663099)

摘要:文麦 18 号是文山州农业科学院自主选育的小麦新品种,亲本组合为:文麦 14 号 / 文麦 11 号。该品种抗性较强,中抗条锈病和叶锈病,感白粉病,抗倒伏;籽粒白色,半硬质,千粒质量 47.5 g,湿面筋含量 31.4%,商品性较好;产量稳定,两年度云南省区域试验平均产量 335.9 kg/667 m²,较对照云麦 56 增产 4.7%,生产试验平均产量 264.9 kg/667 m²,较对照云麦 56 增产 8.6%,适宜在云南省海拔 1 260 ~ 1 830 m 旱地麦区种植。该品种于 2024 年 10 月通过云南省农作物品种审定委员会审定,审定编号为滇审麦 2024009 号。

关键词:小麦;新品种;选育;栽培技术
中图分类号:S512.1　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1673–6486–20260069

小麦(*Triticum aestivum* L.)是禾本科小麦属一年生或越年生草本植物,是一种适应性强、分布广泛的世界性主要粮食作物,为人类提供约 21%的热量和 20%的蛋白质[1–2]。小麦是我国三大粮食作物之一,在国家粮食安全战略中占据举足轻重的地位,总产量对保障口粮供应、稳定市场粮价至关重要[2–6]。云南省具有复杂的地理环境和多变的气候条件[7–8],平均海拔较高,具有气候多变、土壤条件较差、季节性干旱频发等特点,导致小麦单产长期低于全国平均水平[9–11]。为适应气候条件,在不同地区小麦品种选育过程的侧重点又有所不同,云南省文山壮族苗族自治州属于长江冬麦区,是冬季小春生产的主要粮食作物,“十四五”以来全州每年播种面积稳定在 3.33 万 hm² 左右[12]。土壤以壤土为主,壤土中又以砂壤土为主[13–14],肥力较差、冬春干旱少雨、倒春寒频发[12]、小麦生育后期气温骤升,容易出现高温逼熟现象,全州小麦平均产量仅 100 kg/667 m² 左右,产量水平低于云南省平均水平,远低于全国平均水平。品种单产低、稳产性较差、优质小麦品种缺乏是云南省小麦育种工作面临的难题之一[15],更是文山州小麦育种工作和农业生产的困境,因此需要加大高产稳产、耐旱抗逆小麦新品种的选育力度,促进小麦生产发展。

文麦 18 号是文山州农业科学院麦类课题组采用杂交组配、系统选育方法选育出的小麦新品种,于 2024 年 10 月通过云南省农作物品种审定委员会审定。本文概述了文麦 18 号的选育过程、品种特征特性、产量表现和种植技术要点,以期为文麦 18 号的大面积推广和应用提供理论支撑,积极推动自主选育新品种转化为现实生产力。

1　文麦 18 号亲本来源及选育过程

1.1　亲本来源

1.1.1　母本文麦 14 号(098–14)。文麦 14 号是用云麦 39 号和云麦 420 号杂交而成的春性常规小麦新品种。该品种平均生育期 167 d,株高 75.5 cm,方形穗,长芒,白壳,粒色琥珀色,半硬质;穗粒数 38 粒 / 穗,千粒质量 46.0 g;蛋白质含量(质量分数,下同)为 16.5%,沉降值 27.2 mL,吸水率 61.0%,湿面筋含量 35.6%,容重 814 g/L,中抗条锈病和白粉病,耐寒、耐旱、抗倒伏。该品种籽粒饱满,熟相好,易落粒。2012—2013 年该品种参加云南省小麦品种区域试验(地麦组),两年区域试验该品种平均产量 288.1 kg/667 m²,居第 1 位,较宜麦一号(CK)增产 20.3%,增产点率 90.0%。2014 年生产试验该品种平均产量 282.2 kg/667 m²,居第 3 位,较对照云麦 54 增产 9.4%,增产点率 80.0%。

1.1.2　父本文麦 11 号。文麦 11 号是以文山本地白麦作母本、文麦 5 号作父本经过 7 年系统选育而成

收稿日期:2026–06–30;修回日期:2026–09–18。
基金项目:云南省重大科技专项计划(202502AE090011);文山州州级财政资金项目(2026WSCZ02)。
作者简介:王文鑫(1991—),女,硕士,农艺师,主要从事麦类作物遗传育种及示范推广。Email: 295217220@qq.com。
* 通信作者:农明英(1987—),女,硕士,高级农艺师,主要从事麦类作物遗传育种及示范推广。Email: 651475357@qq.com。

的春性常规小麦品种。该品种平均生育期 143 d，株高 95 ~ 100 cm，穗长 8 ~ 10 cm，穗粒数 45.5 粒 / 穗，千粒质量 46.1 g，穗锥型、长芒、白壳、白粒、半角质，蛋白质含量 12.4%，总淀粉含量 61.58%，湿面筋含量 14.6%，容重为 765 g/L，中抗条锈病。2010—2011 年该品种参加文山州小麦区域试验，平均单产 348.2 kg/667 m^2，较对照文麦 7 号（296.6 kg/667 m^2）增 51.6 kg/667 m^2，增幅 17.4%。2011 年文山州小麦生产试验该品种平均产量 333.4 kg/667 m^2，较对照文麦 7 号增产 64.5 kg/667 m^2，增幅 24.0%。文麦 11 号幼苗直立、叶色深绿，叶片直立，株型紧凑，茎秆粗壮，耐肥抗倒伏。

1.2　选育过程

文麦 18 号是 2011 年冬季以文麦 14 号作母本、文麦 11 号作父本进行杂交组配，编号 098，共收获 F_0 种子 30 粒；2012—2013 年度种植 F_1—F_2，成熟时去除杂种、假种，种子混收。2014 年种植 F_3，成熟时选择优良单株 29 份，按“组合和单株号”顺序编号：098-1—098-29，2015 年分别对 29 个单株进行增代种植（种成株行），各株行分别混收，2016 年种植各株行混收的种子并单粒播种，进行观察、考种、综合比较，098-1、098-11、098-14、098-19、098-20、098-21 这 6 个株系表现较好，从中选择单株收获，2017—2018 年继续种植 F_6—F_7，进一步观察鉴定其抗病性、丰产性和稳定性，筛选出综合性状最好的株系 098-11，2019—2020 年在文山、砚山、广南、丘北、马关进行多点试验，2021—2022 年参加云南省小麦品种区域试验（地麦组），2022 年同步进行生产试验。2024 年 10 月该品种通过云南省农作物品种审定委员会审定，审定编号为滇审麦 2024009 号。文麦 18 号系谱图详见图 1。

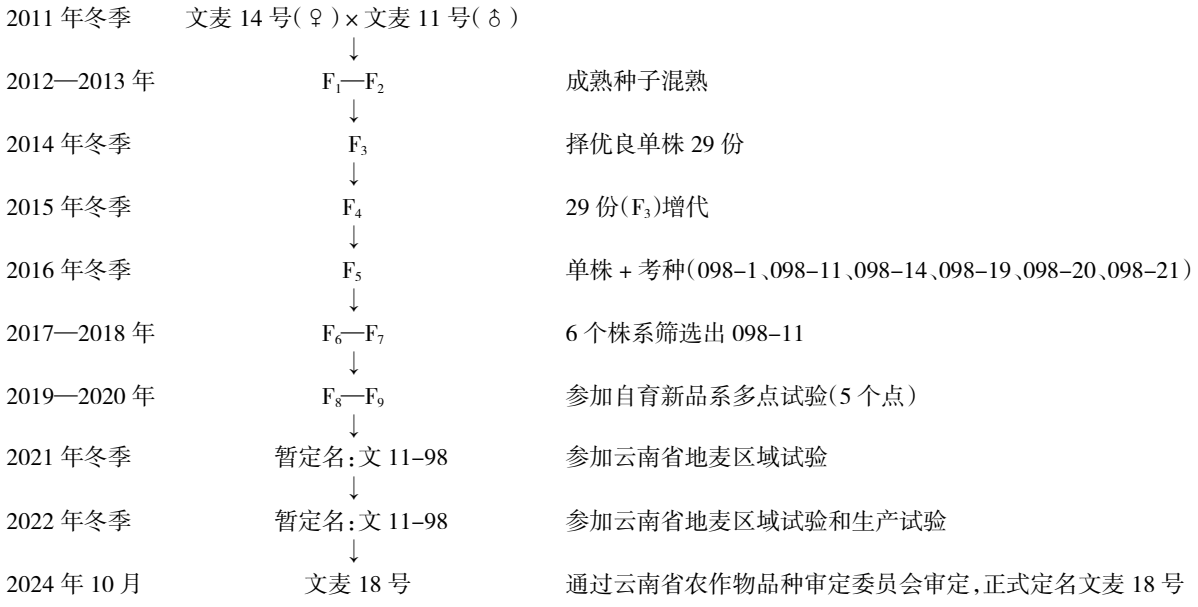


图 1　文麦 18 号选育过程

2　文麦 18 号特征特性

2.1　主要农艺性状

文麦 18 号植株整体紧凑直立，茎秆粗壮，幼苗直立，全生育期 160 d，株高 93 cm，最高分蘖数 39.9 万个 /667 m^2，有效穗数 23 万个 /667 m^2，穗粒数 48 粒 / 穗，千粒质量 47.5 g，方形穗，长芒，白壳，白粒，半硬质，籽粒较饱满，易脱粒（图 2）。

2.2　品种抗性

2.2.1　品种抗病性。2021 年，云南省农作物品种抗性鉴定站（寻甸点、巍山点、云南农业大学点）对文麦 18 号进行白粉病、条锈病、叶锈病抗性鉴定，鉴定点分别设在寻甸县塘子镇、巍山县庙街镇和云南农业大学点，均选择历年种植小麦、当地品种发病较重的老病区重发田块，采用田间诱发病圃法和人工混合接种法同步进行。田间诱发病圃法：选择小麦常年种植且发病较重的区域，在适宜发病的气候环境和时期种植待鉴定小麦品种，每 2 个品种间隔种植高感品种，借助感病品种自然产生的菌源接种诱发，观察鉴定各小麦品种的发病程度。人工混合接种：采集鉴定区域感病品种小麦田的白粉病、条锈病、叶锈病发病样本，经鉴定均具有致病力，按病害分别制取混合菌液，按标准方法接种。鉴定结果：文麦 18 号中抗条锈病和叶锈病，感白粉病。

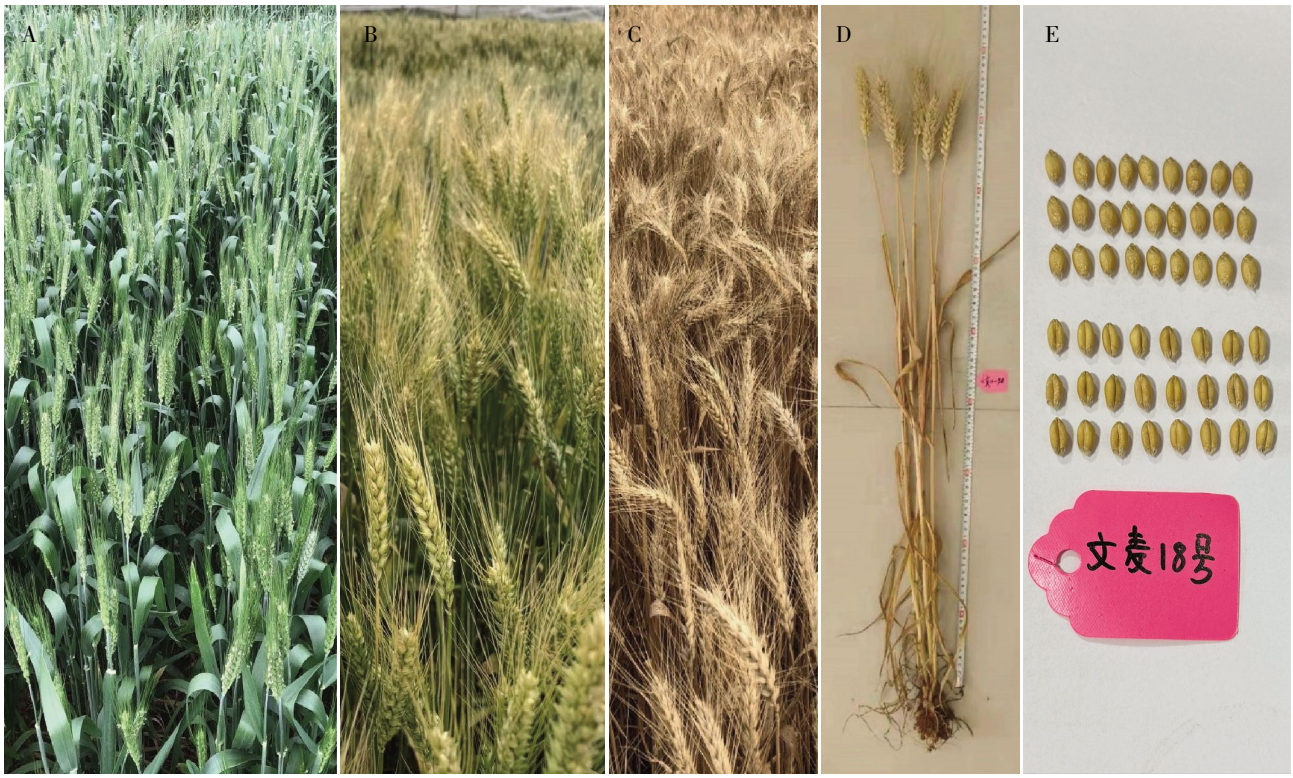


图 2　文麦 18 号(文 11-98)开花期(A)、灌浆期(B)、成熟期(C)、成熟全株(D)与籽粒(E)

2.2.2　品种抗旱性。根据小麦抗旱性鉴定评价技术规范,2021—2022 年冬季区域试验文麦 18 号除弥渡点有轻微叶片萎缩的情况,其试验点均无受害症状,2022—2023 年冬季所有区域试验点及生产试验点均无受害症状。两年区域试验和生产试验表明,文麦 18 号具有较高的抗旱性。

2.3　品质分析

2022 年经农业农村部谷物及制品质量监督检验测试中心(哈尔滨)测定,文麦 18 号容重 782 g/L,蛋白质含量 14.76%,湿面筋含量 31.4%,稳定时间 1.2 min。

3　文麦 18 号产量表现

2021—2022 年文麦 18 号参加云南省小麦品种区域试验(地麦组,表 1),平均产量 391.3 kg/667 m^2,较对照(云麦 56)增产 10.5%,增产点率 66.67%,居地麦第 2 组 12 个品种第 3 位(表 1),有效穗数 25.45 万穗 /667 m^2,穗粒数 38 粒 / 穗,千粒质量 49.38 g。2022—2023 年续试,文麦 18 号平均产量 280.4 kg/667 m^2,较对照(云麦 56)增产 3.1%,居地麦第 2 组 12 个品种第 5 位,增产点率 71.143%(表 2),有效穗数 20.50 万穗 /667 m^2,穗粒数 37 粒 / 穗,千粒质量 45.90 g。两年度区域试验文麦 18 号平均产量 335.9 kg/667 m^2,较对照增产 4.7%,增产点率 69.23%。

2022—2023 年度进行生产试验(表 3),5 个试验点文麦 18 号平均产量 264.9 kg/667 m^2,居 9 个参试品种第 7 位,较对照云麦 56 增产 8.6%,增产点率 80.00%。

表 1　2021—2022 年文麦 18 号参加云南省地麦区域试验产量表现

试验地点	产量 /(kg/667 m^2)	较 CK 增产 /%	位次
弥渡	426.4	-0.4	10
临翔	382.9	-3.5	8
镇雄	306.7	4.6	5
蒙自	396.9	17.4	1
师宗	419.2	48.9	4
文山	415.6	7.4	4
平均	391.3	10.5	3

注:“较 CK 增产 /%”表示文麦 18 号较对照品种云麦 56 的增产率;“位次”为文麦 18 号在各试验点参试品种中的产量位次;平均行数据为各试验点文麦 18 号的平均产量及与各试验点对照平均产量的增产率,位次为该品种在当年度(轮次)参试品种中的总位次。下表同。

表 2　2022—2023 年文麦 18 号参加云南省地麦区域试验产量表现

试验地点	产量 /（kg/667 m²）	较 CK 增产 /%	位次
弥渡	304.0	−12.1	9
楚雄	319.6	13.4	2
临翔	436.0	4.8	5
蒙自	263.0	51.7	1
师宗	152.3	1.6	8
易门	318.6	−16.4	2
文山	169.4	8.1	10
平均	280.4	3.1	5

表 3　2022—2023 年文麦 18 号参加云南省地麦生产试验产量表现

试验地点	产量 /（kg/667 m²）	较 CK 增产 /%	位次
弥渡	216.9	−8.2	8
楚雄	286.5	1.1	7
临翔	355.5	7.0	6
师宗	142.7	0.9	9
文山	323.1	43.1	3
平均	264.9	8.6	7

4　文麦 18 号栽培技术要点

4.1　播种

文麦 18 号适宜在云南省海拔 1 260 ~ 1 830 m 地麦区种植。播种时间在 10 月下旬至 11 月中旬，种子进行包衣或拌种处理，可以有效预防病虫害的发生[16-17]。用种量为 12 ~ 13 kg/667 m²，可根据种植地块肥力状况和灌溉条件适当调整播种量，保证基本苗在 18 万株 /667 m² 左右。

4.2　水肥管理

播种前进行土地翻耕和耙犁，可用腐熟农家肥 1 000 ~ 1 500 kg/667 m²、尿素 10 ~ 15 kg/667 m²、普钙 30 ~ 50 kg/667 m² 作为底肥，也可施用复合肥（N、P_2O_5、K_2O 的质量比例为 15∶15∶15）25 kg/667 m² 作为底肥。分蘖盛期、孕穗期分别用 15、10 kg/667 m² 尿素作为追肥，促进小麦分蘖及花芽分化，提高小麦的产量。在出苗期、分蘖期、拔节期及抽穗期根据降水情况适当浇水，保障小麦生长用水。

4.3　病虫害防治

文麦 18 号中抗条锈病、叶锈病，应重点防治白粉病和蚜虫。白粉病防治可用 15%三唑酮可湿性粉剂 60 ~ 80 g/667 m²（或 25%三唑酮可湿性粉剂25 ~ 35 g/667 m²）喷雾；蚜虫防治可用 10%吡虫啉可湿性粉剂 10 ~ 20 g/667 m² 或 10%联苯菊酯乳油 20 mL/667 m² 喷雾。

4.4　收获

蜡熟末期收获，做到“九黄十收”，减少机械损失。收获后及时摊开晾晒至含水量低于 13%，去杂后进仓储存。仓储环境要求阴凉、干燥、通风，并做好防虫、防鼠措施。

5　文麦 18 号品种突出亮点与应用前景

文麦 18 号生育期适中，粒大饱满，熟相好，产量表现较稳定，湿面筋含量 31.4%，商品性较好。该品种抗病性好，抗旱性高，可缓解文山州因冬春干旱少雨、土壤墒情不良对小麦产量的制约，适于云南大部分旱地麦区种植。文麦 18 号的选育为云南冬季小春作物种植提供了新的选择，也为云南优质小麦育种研究提供了新的种质资源。2025 年 3 月，文山州农业科学院与云南文研种苗科技有限公司进行科企合作，建设良种繁育体系，示范推广约 1 733 hm²。

参考文献：

[1] 何中虎,庄巧生,程顺和,等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. 农学学报,2018,8(1):99-106.

[2] 高艳梅,景茂雅,陈薇薇,等. 近 20 年来中国小麦品种产量和品质性状变化分析[J]. 麦类作物学报,2024,44(9):1152-1160.

[3] 石振华,孙明涛,宋凤鸣,等. 小麦新品种昌丰 1 号的选育[J]. 中国种业,2026(2):143-145.

[4] 吴海彬,孙　辉,洪　宇,等. 2022 年我国小麦品质分析[J]. 粮油食品科技,2024,32(2):92-99.

[5] 李海泳,殷贵鸿. 从国家粮食安全角度探讨我国小麦育种发展趋势[J]. 江苏农业科学,2022,50(18):36-41.

[6] 王延训,田纪春,杨　明,等. 高产多抗强筋小麦新品种山农 1695 的选育[J]. 中国种业,2023(4):122-124.

[7] 胡顺盼,谭　鑫. 新质生产力背景下云南高原特色农业发展路径研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学),2025,9(3):17-22.

[8] 宁发金,鲁茸拉木,杜发春. 云南省县域农业生态效率时空分异及其影响因素[J]. 中国农业资源与区划,2024,45(2):49-61.

[9] 鲁永新,邹　萍,张中平,等. 云南小麦种植气候生态类型区划[J]. 贵州农业科学,2012,40(12):191–194.
[10] 陈　华,张勤斌,桂玉莲,等. 云南旱地小麦养分丰缺指标建立及施肥推荐[J]. 中国农学通报,2022,38(36):17–22.
[11] 黄廷芝,乔祥梅,王志龙,等. 丰产抗锈病小麦新品种云麦 93 的选育[J]. 作物研究,2025,39(6):556–560.
[12] 文山州统计局. 文山统计年鉴(2023)[M]. 北京:中国统计出版社有限公司,2023:88–89.
[13] 王瑞清,何　莎,骆　庆,等. 文山州耕地质量等级及其土壤性状评价[J]. 云南农业科技,2025(2):37–39.
[14] 茹瑞红,农全东,李在辉,等. 文山州土壤质地构成与肥力特征[J]. 贵州农业科学,2024,52(6):54–60.
[15] 丁明亮,刘　琨,杨忠慧,等. 云南省小麦育种策略与思考[J]. 云南农业科技,2023(2):4–7.
[16] 靖金莲,安晓东,宋立红,等. 小麦新品种临研 151 选育及应用[J]. 山西农业科学,2021,49(8):908–911.
[17] 王天坤,李　雪,温辉芹,等. 小麦新品种晋太 1508 的选育与体会[J]. 中国种业,2023(8):91–93.

Breeding and Cultivation Techniques of New Disease–resistant, Drought–tolerant and Stable–yield Wheat Variety Wenmai No.18

Wang Wenxin[1], Gao Haitao[1], Zhang Shibao[1], Liu Haiyan[2], He Jinbao[1], Nong Mingying[1]
(1. Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture Academy of Agricultural Sciences, Wenshan 663099, China;
2. Wenshan Agricultural Technology Extension Center, Wenshan 663099, China)

Abstract: Wenmai No.18 is a new wheat variety independently developed by Wenshan Academy of Agricultural Sciences, derived from the cross Wenmai No.14 × Wenmai No.11. This variety is lodging-resistant and moderately resistant to stripe rust and leaf rust, though susceptible to powdery mildew. The grain is white and semi-hard, with a 1 000-grain weight of 47.5 g and a wet gluten content of 31.4%, exhibiting good end-use quality. Yield performance was stable: the two-year average in Yunnan provincial regional trials was 335.9 kg/667 m^2 (4.7% higher than the control Yunmai 56), and the production trial average was 264.9 kg/667 m^2 (8.6% higher than the control). It is suitable for cultivation in dryland wheat areas at elevations of 1 260-1 830 m in Yunnan Province. The variety was approved by the Yunnan Provincial Crop Variety Approval Committee in October 2024 (Variety Approval No.Dianshenmai 2024009).

Key Words: Wheat; New variety; Breeding; Cultivation technique

（上接第 75 页）

Current Situation, Problems and Countermeasures of Hanzhong Rice Contract Farming Model

Dang Junhua, Zhao Shengli, Mo Dan, You Qiang, Wang Ran, Xiao Fei
(Hanzhong Agricultural Technology Promotion and Training Center, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Hanzhong is the core rice-producing region of Shaanxi Province, where the rice industry plays a crucial role in regional food security and farmers' income growth. In recent years, Hanzhong has actively promoted rice contract farming, fostering a synergistic pattern that combines traditional contract models with an innovative “six-party linkage” approach integrating the entire industrial chain. This study examines rice contract farming in Hanzhong from four perspectives: current development status, mainstream models, existing challenges, and optimization strategies. The aim is to improve operational mechanisms, strengthen the leading role of key market entities, refine benefit-sharing mechanisms, and enhance standardization and branding, thereby advancing high-quality, sustainable development of rice contract farming and contributing to rural industrial revitalization.

Key Words: Hanzhong rice; Contract farming model; Six-party linkage; Development study