

多生育期不同程度受旱对大豆蒸发蒸腾和产量的影响

章忠鑫¹, 周玉良^{1,2}, 周平¹, 崔毅^{1,2}, 金菊良^{1,2}, 蒋尚明³

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009; 2.合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所,安徽 合肥 230009; 3.

安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院 安徽省水利水资源重点实验室,安徽 合肥 230088)

摘要:为提高大豆节水效率和降低旱灾减产风险提供数据支撑。2023 年在安徽新马桥农水综合实验站开展夏大豆受旱盆栽试验,在分枝期、花荚期、鼓粒期组合设置无旱、轻旱和重旱 3 个灌溉水平下限,总计 27 种处理,分析多生育期受旱对夏大豆蒸发蒸腾、产量及水分利用效率的影响。结果表明:①全生育期无旱的大豆(CK)全生育期蒸发蒸腾量最大,每株平均为 351.0 mm;花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受重旱或轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量最小,每株平均为 150.0 mm。仅分枝期受轻旱的大豆产量最高,每盆平均为 54.2 g;花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受重旱或轻旱的大豆产量最低,每盆平均为 11.5 g。②单生育期受旱时:仅花荚期受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量比其他时期受同等程度干旱胁迫的少,且同一生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量小于受轻旱的。多生育期受旱的对照试验中:花荚期受轻旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱时,分枝期受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比分枝期不受旱的多 4.2%~13.2%,产量比分枝期不受旱的增加 10.2%~36.7%。③部分处理组的产量和水分利用效率相较于 CK 的有所增加。分枝期均受轻旱、鼓粒期均不受旱时,花荚期不受旱或受轻旱的大豆产量分别比 CK 的增加 14.2%和 10.1%。花荚期和鼓粒期未受重旱的受旱大豆(共 11 种)水分利用效率相较于 CK 的提升 0.4%~29.5%,其中花荚期和鼓粒期均受轻旱、分枝期受轻旱或重旱的大豆水分利用效率最高。

关键词:大豆受旱试验;多生育期;蒸发蒸腾;产量;水分利用效率;新马桥农水综合实验站

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

近年来,全球气温的持续上升增加了干旱发生的持续时间、强度和频率^[1]。受此影响,中国在粮食生产方面的损失也不断加重^[2]。安徽省淮北平原是中国重要的粮食生产基地,干旱脆弱性等级高,作物生产易受干旱影响^[3-4]。大豆是淮北平原区的主要农作物之一,7月下旬的高温天气及9月上旬的秋季干旱是大豆产量的重要限制因素^[5],明确大豆蒸发蒸腾量和产量在不同干旱胁迫下的变化规律,对淮北平原节约农业用水和减灾稳产有着重要意义。

为探明作物的蒸发蒸腾量和产量受旱响应机制,众多学者通过精确控制土壤中的水分来模拟干旱发生情景。段伟娜等^[6]探究两个生育期连续受旱对夏玉米蒸发蒸腾量的影响,得出不同亏缺灌溉处理的夏玉米全生育期蒸发蒸腾量相对于充分灌溉的减少 9.3%~28.7%,部分处理组受旱复水后的蒸发蒸腾量基本可以恢复至正常水平。刘佳等^[7]研究了单生育期受旱对冬小麦蒸发蒸

腾量和产量的影响,得出不同生育期受旱对冬小麦的蒸发蒸腾量影响不同,同一干旱程度下拔节孕穗期受旱对冬小麦的蒸发蒸腾量影响最大。王兴荣等^[8]通过全生育期受旱的大豆试验,得出随着干旱胁迫程度的加重,大豆光合和产量等生理指标呈下降趋势,在重旱胁迫下,产量降幅最大达到 56.7%。然而,干旱导致作物产量的下降并非绝对化结果,有研究发现^[9]在生育前期施加短期干旱胁迫,能够提高作物在关键生育时期的抗逆性,复水后产生一定程度的补偿和超补偿效应^[10],从而提高作物的产量和水分利用效率,该结果在两个生育期连续受旱的作物研究中也体现^[11-13]。

目前,大部分作物研究在试验设计上未能全面涵盖多生育期不同程度受旱的情形,且淮北平原大豆受旱对蒸发蒸腾量和产量的影响研究主要集中在单生育期^[14-16]。因此,探究多生育期不同程度受旱可进一步完善淮北平原大豆受旱胁迫的响应研究,更全面地反映大豆

收稿日期:2024-10-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3206604-02,2023YFC3006605);国家自然科学基金项目(52379006,42271084);安徽省自然科学基金(230808US13)。

第一作者:章忠鑫(1999—),男,硕士研究生,从事水文水资源方面的研究。E-mail:Zhangzhongxin0318@163.com。

通信作者:周玉良(1982—),男,教授,博导,博士,从事水文水资源方面的研究。E-mail:ZYL54600@163.com。

的旱灾脆弱性，为科学地定量评估大豆的旱灾风险、节水效率等提供数据和理论支撑。为此，本文基于 2023 年在新马桥农水综合实验站设置不同灌溉水平下限的夏大豆盆栽试验，探究多生育期受旱对大豆蒸发蒸腾、产量和水分利用效率的影响，为该地区大豆旱灾风险定量评估中的脆弱性函数构建、灌溉制度优化确定等提供技术支持。

1 试验与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 6 月至 9 月在安徽省水科院新马桥农水综合实验站进行，该站位于淮北平原中南部(33°09' N, 117°22' E, 海拔 19.7 m)。试验区属暖温带半湿润季风气候区，降水时空分布极不均衡，多年平均降水量为 917 mm，多年平均蒸发皿蒸发量为 916 mm，多年平均气温为 14.0~15.0 ℃，无霜期 195~217 d。盆栽土壤

来自于试验站大田 0~20 cm 土层，为安徽省淮北平原地区典型的砂姜黑土，土壤容重为 1.36 g/cm³，田间持水量为 28%（重量含水量），凋萎含水量为 9.3%（重量含水量），土壤质地粘重，保水性差，易干旱。

1.2 试验设计

试验以盆栽种植大豆为研究对象，品种为“中黄 13”。为探究多生育期不同程度受旱对大豆生长发育的影响，结合《农业干旱等级》标准和试验站多年盆栽作物受旱试验设计^[17-18]，在大豆主要的需水生育期（苗期因需水量小不做干旱处理）设置不同受旱情形，每种受旱情形以不同的土壤含水量下限来对应：即在大豆的分枝期、花荚期、鼓粒期组合设置 3 个灌溉水平下限，分别为田间持水量的 75%（无旱）、55%（轻旱）、35%（重旱）。试验共设置 27 种处理，每种处理 3 个重复，具体设计见表 1。

表 1 2023 年大豆水分亏缺试验设计方案和指标数据

处理	各生育期土壤含水量下限				全生育期蒸发蒸腾量/ (mm·株 ⁻¹)	产量/ (g·盆 ⁻¹)
	苗期	分枝期	花荚期	鼓粒期		
CK	0	0	0	0	351.00±5.44	47.46±4.70
A1	0	1	0	0	330.34±16.99	54.18±10.26
A2	0	2	0	0	304.04±30.36	41.53±10.34
A3	0	0	1	0	279.33±6.72	38.21±2.41
A4	0	0	2	0	212.77±19.93	22.84±3.85
A5	0	0	0	1	287.68±28.94	44.12±1.99
A6	0	0	0	2	229.46±26.42	26.56±6.45
A7	0	1	1	0	316.11±9.18	52.25±0.82
A8	0	2	1	0	260.66±11.99	43.90±4.28
A9	0	1	2	0	211.52±13.82	27.28±4.85
A10	0	2	2	0	211.61±14.57	28.12±4.50
A11	0	1	0	1	266.01±6.85	42.77±5.19
A12	0	2	0	1	245.60±22.82	40.78±7.97
A13	0	1	0	2	236.22±28.81	26.54±5.13
A14	0	2	0	2	230.72±12.72	27.14±4.21
A15	0	0	1	1	254.35±19.53	41.13±3.44
A16	0	0	2	1	186.10±8.69	18.72±0.73
A17	0	0	1	2	195.23±16.21	17.59±4.67
A18	0	0	2	2	183.72±26.09	17.13±3.90
A19	0	1	1	1	269.36±28.45	46.59±9.10
A20	0	2	1	1	237.38±5.37	41.35±2.39
A21	0	1	2	1	210.34±3.14	25.16±3.19
A22	0	1	1	2	203.45±21.13	19.37±4.72
A23	0	2	2	1	184.63±31.39	24.41±7.95
A24	0	2	1	2	190.87±18.23	20.80±5.21
A25	0	1	2	2	149.15±10.89	10.61±2.18
A26	0	2	2	2	150.51±9.06	12.26±3.70

注：表中 0、1 和 2 分别表示土壤田间持水量下限的 75%、55%和 35%，数据为“平均值±标准差”。

盆栽上部内径 31 cm，底部内径 23 cm，高 27 cm，试验开始前每桶装入干土 16 kg，定苗长势均匀的大豆幼苗 3 株，并在播种时每桶施复合肥 4 g。试验开始后，仅于每天下午 17:00 左右对所有盆栽进行称重计算，若当天计算得到的盆栽土壤含水量高于试验设定下限值时，第 2 天不进行灌溉；低于试验设定下限值时，则于

第 2 天 8:00 使用量筒将盆栽的土壤含水量灌溉至田间持水量的 90%，以贴近当地实际大田种植灌溉模式并保证连续受旱的植株存活。试验盆栽放置在布设有移动雨棚的开放环境中，试验过程中盆栽的土壤水分完全由人工控制，无降水时打开雨棚以保证大豆按自然条件生长，试验现场见图 1。



图 1 试验现场图

大豆于 2023 年 6 月 22 日播种，6 月 29 日出苗整齐，开始执行试验方案，记录数据。观察到花荚期受重旱的大豆相较于花荚期不受旱或轻旱的大豆籽粒发育

明显迟缓，故将所有花荚期受重旱的大豆推迟 3 d 收获，至 9 月 21 日大豆全部收获完毕，试验生育期划分见表 2。

表 2 2023 年大豆水分亏缺试验生育阶段划分

生育期	划分依据	受旱情形	起止日期	历时/d
苗期	从幼苗出土至植株拥有 5 片完整叶	当期不受旱	6.29—7.13	15
分枝期	从植株拥有 5 片完整叶至第 1 朵花出现	当期不受旱或轻旱或重旱	7.14—7.28	15
花荚期	从第 1 朵花出现至豆荚开始膨大	当期不受旱或轻旱	7.29—8.15	18
		当期重旱	7.29—8.18	21
鼓粒期	从豆荚开始膨大至植株成熟	花荚期不受旱或轻旱、当期不受旱或轻旱或重旱	8.16—9.18	34
		花荚期重旱、当期不受旱或轻旱或重旱	8.19—9.21	34

1.3 测量指标及方法

1.3.1 土壤含水量

大豆各盆栽土壤含水量 θ_j 由型号为 YP30KN（精度为 1 g）的电子秤称重所得^[19]：

$$\theta_j = (W_j - W_s - W_t - W_p) / W_s \quad (1)$$

式中： W_j 为第 j 天的盆栽总质量，kg； W_s 为干土的质量，为常数 16 kg； W_t 为空桶质量，为常数 0.501 kg； W_p 为大豆在上一个生育期破坏测得的平均湿重，kg。

1.3.2 灌水量

试验开始后大豆盆栽第 j 天的灌水量 I_j (kg) 由前一日计算所得土壤含水量和方案中制定的灌水定额下限共同确定^[20]：

$$I_j = \begin{cases} 0 & \theta_{j-1} > \theta_m \\ (0.9\theta_{FC} - \theta_{j-1}) \times W_s & \theta_{j-1} < \theta_m \end{cases} \quad (2)$$

式中： θ_{FC} 为土壤田间持水量(重量含水量)，为常数 28%； θ_{j-1} 为第 $j-1$ 天计算所得的土壤含水量； θ_m 为试验方案设定的土壤含水量下限。

1.3.3 实际蒸发蒸腾量

盆栽大豆实际日蒸发蒸腾量 $ET_{c,j}$ (mm) 由盆栽重

量和灌水量确定^[21]：

$$ET_{c,j} = 10^4 (W_{j-1} + I_j - W_j) / (\rho \cdot S_{soil}) \quad (3)$$

式中： ρ 为水的密度，g/cm³； S_{soil} 为暴露土体表面积，本试验中为常数 730.6 cm²。

1.3.4 产量与水分利用效率

产量为大豆成熟后摘取的籽粒烘干之后的质量^[22]。

水分利用效率 WUE (g/mm)^[23]为：

$$WUE = Y / ET_c \quad (4)$$

式中： Y 为单个盆栽大豆籽粒产量，g； ET_c 为该盆栽全生育期实际蒸发蒸腾量，mm。

1.3.5 数据显著性差异分析

试验应用 T 检验方法分析两组对照处理数据间的显著性差异^[24]：

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{S_w^* \sqrt{1/m + 1/n}} \quad (5)$$

其中

$$S_w^* = \sqrt{\frac{(m-1)S_x^2 + (n-1)S_y^2}{m+n-2}} \quad (6)$$

式中： $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别为两组数据 x 和 y 的均值； S_x^2 与 S_y^2

分别为 x 和 y 的方差; m 和 n 分别为 x 和 y 的样本数量, $m=n=3$ 。计算结果与置信水平为 95%的进行对比, 若 $P<0.05$, 两组数据间存在显著差异; 反之, 差异不显著。

2 结果与分析

2.1 多生育期不同程度受旱对大豆全生育期蒸发蒸腾量的影响

2023 年多生育期不同程度干旱胁迫下的大豆全生育期蒸发蒸腾量见表 1。由表 1 可知, 本次试验全生育期无旱的大豆 (CK) 全生育期蒸发蒸腾量最大, 株均为 351.0 mm。花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受重旱或轻旱的大豆 (A25、A26) 全生育期蒸发蒸腾量最小, 株均为 150.0 mm。

由表 1 可知, 大豆单生育期的受旱试验中: 仅一个生育期受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量与 CK 的对照比较, 共有 6 种。仅分枝期受轻旱 (A1)、仅花荚期受轻

旱 (A3) 和仅鼓粒期受轻旱的大豆 (A5) 全生育期蒸发蒸腾量相比 CK 的分别减少 5.9%、20.4%和 18.0%; 仅分枝期受重旱 (A2)、仅花荚期受重旱 (A4) 和仅鼓粒期受重旱的大豆 (A6) 全生育期蒸发蒸腾量相比 CK 的分别减少 13.4%、39.4%和 34.6%。可知, 单生育期不同程度受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量相比 CK 的均显著减少 ($P<0.05$); 仅花荚期受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比其他时期受同等程度干旱胁迫的大豆全生育期蒸发蒸腾量少, 且同一生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量小于受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量。

大豆两个和 3 个生育期受旱试验中两组对照处理的全生育期蒸发蒸腾量比较, 见表 3, RE 表示在仅有一个生育期不同程度受旱、其他生育期受旱情形相同的两组对照处理中, 受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量相比受轻旱的减少的百分比。

表 3 大豆两个和 3 个生育期受旱试验中两组对照处理的全生育期蒸发蒸腾量比较

序号	两个生育期受旱试验				3 个生育期受旱试验			
	受旱的两个生育期	受旱相同的生育期及程度	另一个生育期重旱和轻旱的试验编号	RE/%	受旱相同的生育期及程度	另一个生育期重旱和轻旱的试验编号	RE/%	
1		分枝期轻旱	A9 A7	33.1*	分枝期轻旱、花荚期轻旱	A22 A19	24.5*	
2	分枝期	分枝期重旱	A10 A8	18.8*	分枝期重旱、花荚期轻旱	A24 A20	19.6*	
3	花荚期	花荚期轻旱	A8 A7	17.5*	分枝期轻旱、花荚期重旱	A25 A21	29.1*	
4		花荚期重旱	A10 A9	0.0	分枝期重旱、花荚期重旱	A26 A23	18.5*	
5		分枝期轻旱	A13 A11	11.2*	分枝期轻旱、鼓粒期轻旱	A21 A19	21.9*	
6	分枝期	分枝期重旱	A14 A12	6.1	分枝期重旱、鼓粒期轻旱	A23 A20	22.2*	
7	鼓粒期	鼓粒期轻旱	A12 A11	7.7	分枝期轻旱、鼓粒期重旱	A25 A22	26.7*	
8		鼓粒期重旱	A14 A13	2.3	分枝期重旱、鼓粒期重旱	A26 A24	21.1*	
9		花荚期轻旱	A17 A15	23.2*	花荚期轻旱、鼓粒期轻旱	A20 A19	11.9*	
10	花荚期	花荚期重旱	A18 A16	1.3	花荚期重旱、鼓粒期轻旱	A23 A21	12.2	
11	鼓粒期	鼓粒期轻旱	A16 A15	26.8*	花荚期轻旱、鼓粒期重旱	A24 A22	6.2	
12		鼓粒期重旱	A18 A17	5.9	花荚期重旱、鼓粒期重旱	A26 A25	0.0	

注: *表示两组对照处理在 0.05 水平上差异显著。

大豆双生育期的受旱试验中: 比较全生育过程中有两个相同的生育期受旱, 其中一个生育期受旱程度相同, 另一生育期受轻旱或重旱的两组对照处理的全生育期蒸发蒸腾量, 共有 12 种, 见表 3。由表 3 可知, 两个相同的生育期受旱, 其中一个生育期受旱程度相同的两组对照处理中, 另一个生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量少; 花荚期均受重旱、鼓粒期均不受旱, 分枝期受重旱 (A10) 和受轻旱的 (A9) 大豆全生育期蒸发蒸腾量非常接近, 约为 212 mm。

大豆三生育期受旱的试验中: 比较 3 个生育期均受旱, 其中两个生育期受旱程度相同, 另一生育期受轻旱

或重旱的两组对照处理的全生育期蒸发蒸腾量, 共有 12 种, 见表 3。由表 3 可知, 3 个生育期均受旱, 其中两个生育期受旱程度相同的两组对照处理中, 另一个生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量少; 花荚期和鼓粒期均受重旱, 分枝期受重旱 (A26) 和受轻旱的 (A25) 大豆全生育期蒸发蒸腾量非常接近, 约为 150 mm。

花荚期受轻旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱的两组对照处理中, 分枝期受轻旱或重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量与分枝期不受旱的比较, 共有 6 种, 见表 1。

1) 花荚期均受轻旱、鼓粒期均不受旱: ①分枝期受轻旱 (A7) 比不受旱的 (A3) 显著多 13.2% ($P<0.05$);

②分枝期受重旱（A8）比不受旱的（A3）减少 6.7%。

2）花荚期和鼓粒期均受轻旱：①分枝期受轻旱（A19）比不受旱的（A15）多 5.9%；②分枝期受重旱（A20）比不受旱的（A15）减少 6.7%。

3）花荚期均受轻旱、鼓粒期均受重旱：①分枝期受轻旱（A22）比不受旱的（A17）多 4.2%；②分枝期受重旱（A24）比不受旱的（A17）减少 2.2%。可知，花荚期受轻旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱的两组对照处理中，分枝期受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比分枝期不受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量多，分枝期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比分枝期受轻旱或不受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量少。表明，分枝期受轻旱增强了大豆对水分亏缺的适应能力。

由表 1 可知，花荚期和鼓粒期未受重旱的大豆（CK、A1、A2、A3、A5、A7、A8、A11、A12、A15、A19、A20，共 12 种），株均全生育期蒸发蒸腾量为 237.4~351.0 mm。花荚期或鼓粒期受重旱的大豆（A4、A6、A9、A10、A13、A14、A16、A17、A18、A21、A22、A23、A24、A25、A26，共 15 种），株均全生育期蒸发蒸腾量为 149.2~236.2 mm。表明，花荚期或鼓粒期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量低于花荚期和鼓粒期未受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量。

2.2 多生育期不同程度受旱对大豆产量的影响

多生育期不同程度干旱胁迫下的大豆产量见表 1。

表 4 大豆两个和 3 个生育期受旱试验中两组对照处理的产量比较

序号	两个生育期受旱试验				3 个生育期受旱试验			
	受旱的两个生育期	受旱相同的生育期及程度	另一个生育期重旱和轻旱的试验编号	RE/%	受旱相同的生育期及程度	另一个生育期重旱和轻旱的试验编号	RE/%	
1		分枝期轻旱	A9 A7	47.8*	分枝期轻旱、花荚期轻旱	A22 A19	58.4*	
2	分枝期	分枝期重旱	A10 A8	35.9*	分枝期重旱、花荚期轻旱	A24 A20	49.7*	
3	花荚期	花荚期轻旱	A8 A7	16.0*	分枝期轻旱、花荚期重旱	A25 A21	57.8*	
4		花荚期重旱	A10 A9	-3.0	分枝期重旱、花荚期重旱	A26 A23	49.8*	
5		分枝期轻旱	A13 A11	38.0*	分枝期轻旱、鼓粒期轻旱	A21 A19	46.0*	
6	分枝期	分枝期重旱	A14 A12	33.4*	分枝期重旱、鼓粒期轻旱	A23 A20	41.0*	
7	鼓粒期	鼓粒期轻旱	A12 A11	4.7	分枝期轻旱、鼓粒期重旱	A25 A22	45.2*	
8		鼓粒期重旱	A14 A13	-2.3	分枝期重旱、鼓粒期重旱	A26 A24	41.1*	
9		花荚期轻旱	A17 A15	57.3*	花荚期轻旱、鼓粒期轻旱	A20 A19	11.2	
10	花荚期	花荚期重旱	A18 A16	8.5	花荚期重旱、鼓粒期轻旱	A23 A21	3.0	
11	鼓粒期	鼓粒期轻旱	A16 A15	54.5*	花荚期轻旱、鼓粒期重旱	A24 A22	-7.4	
12		鼓粒期重旱	A18 A17	2.5	花荚期重旱、鼓粒期重旱	A26 A25	-15.6	

注：*表示两组对照处理在 0.05 水平上差异显著。

大豆双生育期受旱的试验中：比较全生育过程中有两个相同的生育期受旱，其中一个生育期受旱程度相同，另一生育期受轻旱或重旱的两组对照处理的产量，共有 12 种（表 4）。由表 4 可知，两个相同的生育期受旱，

由表 1 可知，部分处理组受轻旱能够提升大豆的产量，分枝期均受轻旱、鼓粒期不受旱时，花荚期不受旱（A1）和花荚期受轻旱的大豆（A7）产量最高，盆均分别为 54.2 g 和 52.3 g，比全生育期无旱的（CK）增加 14.2% 和 10.1%（ $P<0.05$ ）。花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受重旱或轻旱的大豆（A25、A26）产量最低，盆均为 11.5 g。

大豆单生育期受旱的试验中：仅一个生育期受旱的大豆产量与 CK 的对照比较，共有 6 种。仅分枝期受轻旱的大豆产量比 CK 的增加 14.2%，仅花荚期受轻旱（A3）和仅鼓粒期受轻旱的大豆（A5）产量相比 CK 的分别减少 19.6%和 7.0%，仅分枝期受重旱（A2）、仅花荚期受重旱（A4）和仅鼓粒期受重旱的大豆（A6）产量相比 CK 的分别减少 12.5%、51.9%和 44.0%。可知，单生育期受旱试验中，A3、A4 和 A6 的大豆产量相比 CK 的显著减少（ $P<0.05$ ）；仅花荚期受旱的大豆产量比其他生育期受同等程度干旱的大豆产量少，同一生育期受重旱的大豆产量小于受轻旱的大豆产量。

大豆两个和 3 个生育期受旱试验中两组对照处理的产量比较，见表 4，RE 表示在仅有一个生育期不同程度受旱、其他生育期受旱情形相同的两组对照处理中，受重旱的大豆产量相比受轻旱的减少的百分比。

其中一个生育期受旱程度相同的两组对照处理中，另一个生育期受重旱的大豆产量比受轻旱的大豆产量少；结合表 1 可知，花荚期或鼓粒期的其中一个均受重旱、另一个均不受旱的两组对照处理，无论分枝期受轻旱或重

旱,大豆的产量非常接近,差异不显著,共有2种。

大豆三生育期受旱的试验中:比较3个生育期均受旱,其中两个生育期受旱程度相同、另一生育期受轻旱或重旱的两组对照处理的产量,共有12种,见表4。由表4可知,3个生育期均受旱时,其中两个生育期受旱程度相同的两组对照处理中,另一个生育期受重旱的大豆产量比受轻旱的大豆产量少;结合表1可知,花荚期和鼓粒期受旱组合相同、且其中至少一个生育期受重旱,无论分枝期受轻旱或重旱,大豆的产量非常接近,差异不显著,共有3种。

花荚期受轻旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱的两组对照处理中,分枝期受轻旱的大豆产量与分枝期不受旱的比较,共有3种,见表1。①花荚期均受轻旱、鼓粒期均不受旱:分枝期受轻旱(A7)比不受旱的(A3)显著高36.7% ($P<0.05$);②花荚期和鼓粒期均受轻旱:分枝期受轻旱(A19)比不受旱的(A15)高13.3%;③花荚期均受轻旱、鼓粒期均受重旱:分枝期受轻旱(A22)比不受旱的(A17)高10.2%。可知,花荚期受轻旱、鼓粒期受相同程度干旱或不受旱的两组对照处理中,分枝期受轻旱的大豆产量比分枝期不受旱的大豆产量高。上述结果从产量方面验证了分枝期受轻旱能够加强大豆对水分亏缺的适应能力。

由表1可知,花荚期和鼓粒期未受重旱的大豆(CK、A1、A2、A3、A5、A7、A8、A11、A12、A15、A19、A20,共12种),盆均产量为38.2~54.2 g。花荚期或鼓粒期受重旱的大豆(A4、A6、A9、A10、A13、A14、

A16、A17、A18、A21、A22、A23、A24、A25、A26,共15种),盆均产量为10.6~28.1 g。表明,花荚期或鼓粒期受重旱的大豆产量低于花荚期和鼓粒期未受重旱的大豆产量。

2.3 多生育期不同程度受旱对大豆水分利用效率的影响

多生育期不同程度干旱胁迫下的大豆水分利用效率如图2所示。由图2可知,本次试验的水分利用效率为0.024~0.058 g/mm,其中花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受轻旱的大豆(A25)水分利用效率最低。花荚期和鼓粒期未受重旱的受旱大豆(A1、A2、A3、A5、A7、A8、A11、A12、A15、A19、A20,共11种)水分利用效率相较于CK的提升0.4%~29.5%,其中分枝期受重旱的大豆(A2、A8、A12和A20)水分利用效率相较于CK的仍有所增加,这与分枝期在受旱时具有较强的抗旱能力有关^[25],对水分亏缺的敏感程度也明显低于花荚期和鼓粒期^[26],因此即便遭受重旱后也不会显著降低大豆的水分利用效率。

所有试验处理组中,花荚期和鼓粒期均受轻旱、分枝期受轻旱或重旱的两组处理(A19、A20)水分利用效率最高,相较于CK的水分利用效率分别显著提升28.2%和29.5% ($P<0.05$)。表明,从分枝期开始适度受旱,并将花荚期和鼓粒期保持在轻度受旱水平,可在大豆亏水灌溉时,为实现保产和节水的的目标提供理论依据。

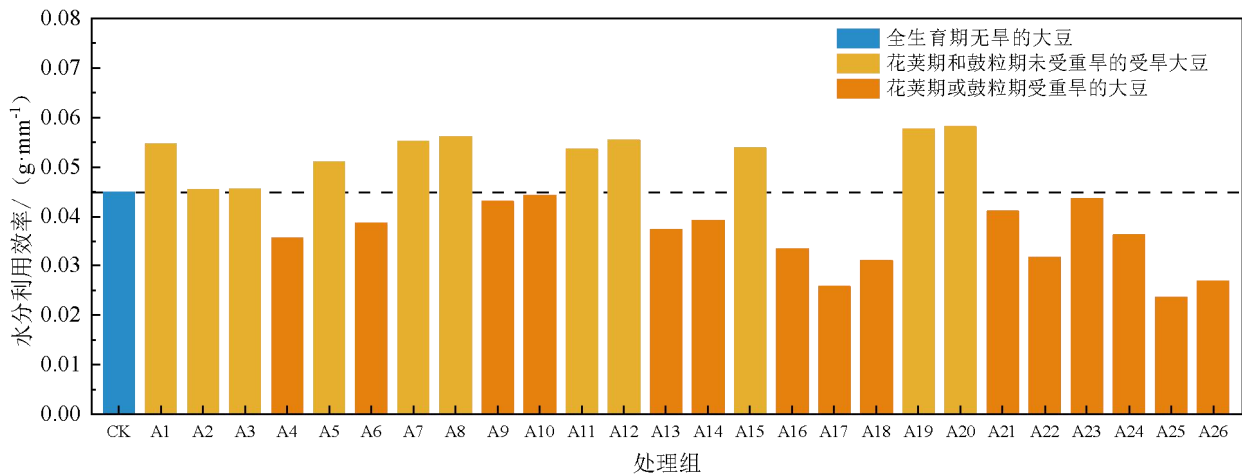


图2 多生育期不同程度干旱胁迫下的大豆水分利用效率

3 讨论

侯志强等^[15]在2016年淮北平原夏大豆单生育期受旱试验中得到,不同受旱胁迫下每株大豆的平均全生育期蒸发蒸腾量为175.8~333.5 mm,盆均产量为17.0~63.2 g。本次试验单生育期不同受旱胁迫下每株大豆的

平均全生育期蒸发蒸腾量为212.8~351.0 mm,盆均产量为22.8~54.2 g,与上述文献结果相近。前人研究得出^[27],与营养生长阶段相比,大豆的生殖生长阶段对水分胁迫的敏感程度更高,某些生殖生长阶段可能比其他生殖生长阶段更脆弱。单生育期受旱显示,仅花荚期受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比其他时期受同等程度

干旱胁迫的大豆全生育期蒸发蒸腾量少,这是因为花荚期受旱不仅降低了当期的蒸发蒸腾量,也显著降低了复水后鼓粒期的蒸发蒸腾量^[28]。此外,鼓粒期因生长持续时间较长,受旱后也会显著降低大豆的全生育期蒸发蒸腾量。

本研究发现,大豆的蒸发蒸腾量和产量并不一定随着受旱期数的增加而减少:各处理大豆在花荚期受轻旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱的两组对照处理中,分枝期受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量比分枝期不受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量多,表明分枝期受轻旱能够加强大豆对水分亏缺的适应能力。这一现象与 HE 等^[29]分析得到的大豆花前节水可以提高产量和抗旱能力的观点相符。但随着其中某一生育期受旱程度加重,特别是花荚期和鼓粒期受重旱可能严重影响大豆的调节恢复机制^[30],致使分枝期受轻旱增强大豆的抗旱能力无法完全体现,因此在花荚期受重旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱的两组对照处理中,没有统一出现分枝期受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量比分枝期不受旱高的现象。

有研究表明,早期适度水分亏缺及复水有利于提升大豆的产量^[31]。本次试验分枝期均受轻旱、鼓粒期均不受旱的两组处理中,花荚期不受旱(A1)和花荚期受轻旱的大豆(A7)产量也超过 CK 的。A1 和 A7 的大豆在鼓粒期的株均蒸发蒸腾量分别为 177.3 mm 和 178.4 mm,CK 的大豆在鼓粒期的株均蒸发蒸腾量为 184.3 mm,上述受旱大豆在复水后的鼓粒期蒸发蒸腾量与 CK 的非常接近,推测在轻度受旱及复水后出现了超补偿效应^[32],从而提高了大豆产量。莫若男等^[33]试验得出,花荚期受轻旱不仅能够提升大豆的水分利用效率,还能促进鼓粒期水分利用效率的提升。本次大豆受旱试验,表明花荚期和鼓粒期未受重旱的受旱大豆(共 11 种)水分利用效率相较于 CK 的有所提升,其中花荚期和鼓粒期均受轻旱、分枝期受轻旱或重旱的水分利用效率最高。从分枝期便开始适度受旱的大豆,历经连续且长期的水分亏缺锻炼,对此类胁迫形成一定的抗性,全生育期蒸发蒸腾量虽有所减少,产量却并未明显降低,从而显著提升了大豆的水分利用效率。

4 结论

1) 全生育期无旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量最大,株均为 351.0 mm,花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受重旱或轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量最小,株均为 150.0 mm。仅分枝期受轻旱的大豆产量最高,盆均为 54.2 g,花荚期和鼓粒期均受重旱、分枝期受重旱或轻旱的大豆产量最低,盆均为 11.5 g。

2) 单生育期受旱时:仅花荚期受旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量比其他时期受同等程度干旱胁迫的少,且同一生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量小于受轻旱的。

两个生育期受旱的对照试验:其中一个生育期受旱程度相同,另一个生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量比受轻旱的少;花荚期或鼓粒期中的一个均受重旱、另一个均不受旱,无论分枝期受轻旱或重旱,大豆的产量非常接近,差异不显著。

3 个生育期受旱的对照试验:其中两个生育期受旱程度相同,另一个生育期受重旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量和产量比受轻旱的少;花荚期和鼓粒期受旱组合相同、且其中至少一个生育期受重旱,无论分枝期受轻旱或重旱,大豆的产量非常接近,差异不显著。

3) 花荚期受轻旱、鼓粒期受旱程度一致或不受旱的两组对照试验中,分枝期受轻旱的大豆全生育期蒸发蒸腾量比分枝期不受旱的多 4.2%~13.2%,产量增加 10.2%~36.7%,分枝期受轻旱加强了大豆对水分亏缺的适应能力。水分利用效率中,花荚期和鼓粒期均受轻旱、分枝期受轻旱或重旱的大豆水分利用效率最高,相较于 CK 的分别显著提升 28.2%和 29.5%。综合认为,从分枝期开始适度受旱,并将花荚期和鼓粒期保持在轻度受旱水平,能够实现大豆节水和保产的双重目标。

参考文献

- [1] ZHOU Z Q, WANG P, LI L, et al. Recent development on drought propagation: a comprehensive review[J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132196.
- [2] SU B, HUANG J L, FISCHER T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(42): 10600-10605.
- [3] XING W Q, YANG L L, WANG W G, et al. Environmental controls on carbon and water fluxes of a wheat-maize rotation cropland over the Huaibei Plain of China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 283: 108310.
- [4] 张诗琪, 金菊良, 崔毅, 等. 基于差异优化减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价与诊断研究[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 1-10[2024-12-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240522.1814.002.html>.
- [5] 胡国玉, 夏英萍, 杜祥备, 等. 安徽省夏大豆产量及限制因素分析[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(4): 793-802.
- [6] 段伟娜, 徐家屯, 曹玉鑫, 等. 夏玉米不同生育期亏缺-复水对蒸发蒸腾和产量的影响[J]. 灌溉排水学

- 报,2022,41(2):18-26.
- [7] 刘佳,袁宏伟,杨继伟.不同气候条件下不同生育期干旱胁迫对冬小麦耗水量和水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2020(12):22-27,31.
- [8] 王兴荣,张彦军,陈光荣,等.干旱胁迫对大豆光合、产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(2):150-159.
- [9] 张乾惠,霍一帆,董梦琪,等.冬小麦不同程度、频率干旱锻炼效果及对水分生产力的影响[J/OL].麦类作物学报,1-13[2024-11-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20241031.1054.004.html>.
- [10] 李彦彬,程智超,高世凯,等.旱涝急转对夏玉米光合特性与产量的影响[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版),1-8[2024-12-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.tv.20240613.1901.002.html>.
- [11] CUI Y,TANG H Y,ZHOU Y L,et al.Accumulative and adaptive responses of maize transpiration, biomass, and yield under continuous drought stress[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*,2024,8:1444246.
- [12] 韩金朝,冯俊杰,翟国亮,等.生育期连续水分亏缺对秋冬茬辣椒生长特性和品质的影响[J].灌溉排水学报,2024,43(3):11-18.
- [13] ZHANG J X,WANG Q Q,XIA G M,et al.Continuous regulated deficit irrigation enhances peanut water use efficiency and drought resistance[J].*Agricultural Water Management*,2021,255:106997.
- [14] 高佩,吕海深,王怡宁,等.淮北平原干旱胁迫对夏大豆土壤耗水量及产量的影响[J].节水灌溉,2024(5):88-93.
- [15] 侯志强,蒋尚明,金菊良,等.不同生育期干旱胁迫对夏大豆耗水量和水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(5):19-24.
- [16] 崔毅,金菊良,蒋尚明,等.不同受旱胁迫下大豆蒸发蒸腾与地上部生长物质之间响应关系研究[J].灾害学,2021,36(4):79-87.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.中华人民共和国国家标准:GB/T 32136-2015 农业干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [18] 侯志强.基于受旱试验的淮北平原夏大豆水分生产函数研究[D].合肥:合肥工业大学,2018.
- [19] 蒋尚明,袁宏伟,崔毅,等.基于相对增长率的大豆旱灾系统敏感性定量评估研究[J].大豆科学,2018,37(1):92-100.
- [20] 陈志鹏.基于受旱试验和 BP 神经网络的淮北平原夏大豆旱灾脆弱性研究[D].合肥:合肥工业大学,2018.
- [21] 卢争光.冬小麦连续干旱复水效应及复水补偿阈值研究[D].郑州:华北水利水电大学,2022.
- [22] 曹秀清,蒋尚明.干旱胁迫对大豆品质及产量的影响[J].现代农业科技,2017(16):3-4,7.
- [23] TOLIMIR M,GAJIC B,KRESOVIC B, et al. Impact of deficit irrigation and planting density on grain yield and water productivity of maize grown under temperate continental climatic conditions[J]. *Agricultural Water Management*,2024,302:109009.
- [24] 凌能祥,李声闻,宁荣健.数理统计[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2014.
- [25] 贾斯淳,王娜,郝兴宇,等.不同干旱胁迫处理对大豆品种生长及逆境生理的影响[J].华北农学报,2019,34(5):137-144.
- [26] 崔毅,蒋尚明,金菊良,等.基于水分亏缺试验的大豆旱灾损失敏感性评估[J].水力发电学报,2017,36(11):50-61.
- [27] SANDHU R, IRMAK S. Effects of subsurface drip-irrigated soybean seeding rates on grain yield, evapotranspiration and water productivity under limited and full irrigation and rainfed conditions[J]. *Agricultural Water Management*,2022,267:107614.
- [28] 崔毅.基于试验的作物受旱胁迫响应机制及定量评估研究[D].天津:天津大学,2019.
- [29] HE J, DU Y L, WANG T, et al. Conserved water use improves the yield performance of soybean under drought[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 236-245.
- [30] 刘江,朱丽杰,张开,等.不同生育期干旱胁迫/复水对大豆光合特性及产量的影响[J].生态环境学报,2022,31(2):286-296.
- [31] 周旭,何晓蕾,曹亮,等.苗期不同程度水分胁迫及复水处理对大豆抗氧化特性及产量的影响[J].作物杂志,2023(6):135-142.
- [32] 许浒,袁宏伟,张辉,等.分枝期旱涝急转对大豆生长发育的影响[J].节水灌溉,2021(12):70-74,80.
- [33] 莫若男.花荚期干旱胁迫对大豆光合特性及产量影响的研究[D].合肥:安徽农业大学,2018.

Effects of different degree drought stress in multiple growth stages on evapotranspiration and yield of soybean

ZHANG Zhongxin¹, ZHOU Yuliang^{1,2}, ZHOU Ping¹, CUI Yi^{1,2}, JIN Juliang^{1,2}, JIANG Shangming³

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of water resources and environmental system engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Water Resources Research Institute of the Huaihe River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources of Anhui Province Key Laboratory of Water Resources and Water Resources, Hefei 230088, China)

Abstract: To provide data support for improving water-saving efficiency and reducing drought-induced yield losses in soybean cultivation, a potted drought stress experiment on summer soybeans was conducted in 2023 at the Xinmaqiao Agricultural Water Experimental Station, Anhui Province. A total of 27 treatments were designed by combining three irrigation levels—non-drought, mild drought, and severe drought—applied at branching, flowering-podding, and seed-filling stages. The effects of drought stress at multiple growth stages on evapotranspiration, yield and WUE of summer soybean were analyzed. The results show that: ①Soybeans without drought stress throughout the entire growth period (CK) had the highest evapotranspiration, averaging 351.0 mm per plant. In contrast, soybeans experiencing severe drought during both flowering-podding and seed-filling stages, or during branching (severe or mild), had the lowest evapotranspiration, averaging 150.0 mm per plant. The highest yield soybeans (54.2 g per pot) was recorded under mild drought stress only during the branching stage, while the lowest yield (11.5 g per pot) occurred under severe drought during flowering-podding and seed-filling stages, or severe or mild drought during branching. ②Among single-stage drought treatments, only drought stress during the flowering-podding stage caused the greatest reductions in evapotranspiration and yield compared to other growth stages under similar drought severity. For the same growth stage, severe drought resulted in lower evapotranspiration and yield than mild drought. In multi-stage drought treatments, mild drought during the branching and flowering-podding stage followed by consistent drought levels or no drought during the seed-filling stage increased evapotranspiration by 4.2%~13.2% and yield by 10.2%~36.7% compared to non-drought conditions during branching. ③Some treatments showed higher yield and WUE compared to CK. In two groups with mild drought during branching and no drought during seed-filling, soybean yield under no drought or mild drought during the flowering-podding stage increased by 14.2% and 10.1%, respectively, relative to CK. WUE improved by 0.4%~29.5% in 11 treatments without severe drought during flowering-podding and seed-filling stages. The highest WUE was observed under mild drought during both flowering-podding and seed-filling stages, combined with mild or severe drought during branching.

Keywords: soybean drought test; multiple growth periods; evapotranspiration; yield; water use efficiency; Xinmaqiao Agricultural and Water Resources Integrated Experimental Station