

干旱胁迫对豌豆根系形态及产量的影响

录亚丹, 郭丽琢, 李春春

(甘肃农业大学/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用盆栽方法, 研究了 55% 的土壤相对含水量在分枝期、孕蕾期、花荚期进行 15 d 历时的干旱胁迫对豌豆干物质累积、根系生长及产量的影响。结果表明, 与全生育期正常供水(75%)相比, 三种干旱胁迫处理均降低了豌豆的干物质累积量, 胁迫时期越早, 复水对豌豆地上部干物质累积的补偿效果越好, 分枝期干旱胁迫在成熟期达到了等量补偿; 干旱胁迫均显著抑制了根系的生长, 分枝期干旱胁迫对根系生长的抑制具有滞后效应, 胁迫结束时与对照间差异不显著, 在花荚盛期显著低于对照, 孕蕾期干旱胁迫根系的复水补偿生长作用较好, 各根系形态指标在成熟期均达到了超越补偿; 三种胁迫方式均抑制了根瘤的形成及其生长, 且复水后均产生了不足补偿, 胁迫时期越早, 补偿效果越差; 花荚初期干旱胁迫对豌豆产量的抑制作用最大, 比对照低 20.41%, 其次为孕蕾期, 比对照低 6.63%, 分枝期干旱胁迫不影响子粒产量。

关键词: 豌豆; 干旱胁迫; 根系形态; 干物质质量; 产量

中图分类号: S529; Q945.79 **文献标志码:** A

Effect of drought stress on root morphology and yield of pea

LU Ya-dan, GUO Li-zhuo, LI Chun-chun

(Gansu Agricultural University/Gansu Provincial Key Lab of Arid Land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effect of drought stress (55% relative water content for 15 days) on dry matter accumulation, root system growth and yield of pea, with three treatments for timing at branching stage, budding stage and early flowering stage. The results showed that dry matter accumulation under three drought treatments was significantly reduced compared with that under the normal water supply (75%) during the whole growth stages. Besides, root growth was also significantly inhibited by drought stress, and the inhibition caused by stress at branching stage had hysteresis effect. Positive effect of re-watering on root growth was detected for drought stress at budding stage. Furthermore, all the three drought treatments inhibited the formation and growth of root nodules, and the compensation was inadequate after re-watering. In addition, the inhibition effect of stress at early flowering period on pea yield was the largest, with a reduction of 20.41% in comparison with that of CK, followed by budding stage (6.63% reduction), while that at branching stage was not significant.

Keywords: pea; drought stress; root morphology; dry matter; yield

水分亏缺是当今社会人类面临的首要生态问题, 在制约农业生产的各种逆境因子中, 干旱对产量的影响位居首位^[1]。根系是作物吸收水分的主要器官, 当土壤干旱时, 根系首先感受到胁迫, 并迅速发出信号, 使整个植株对干旱做出反应。干旱胁迫下根系会产生形态、生理等方面的变化来维持其功能行为^[2]; 根系形态性状对干旱胁迫的响应因胁迫时期、程度及植物种类而异^[3-4]。干旱胁迫会增加花生、水稻等作物深层土壤中的根系分布^[5-6], 但对大豆根系的垂直分布没有影响^[7]。土壤相对含水量在

60%~70%之间时比较适宜小麦次生根的发生, 而低于 60% 时次生根数目显著减少^[8]。玉米拔节期水分亏缺促进了根系向深层次延伸发育, 而后期灌水则延缓了表层根系衰老, 产生了补偿效应^[9]。作物受到阈值内的干旱胁迫后复水, 根系一般都会出现快速生长现象, 即补偿生长。干旱复水后根系生长的补偿效应是节水和集水农作发展的生物学基础, 干旱条件下根系形态特征的研究也因此而显得极为重要^[10]。

豌豆 (*Pisum sativum* L.) 作为人类食品和动物饲

料,已经成为世界第四大豆类作物。因其良好的固氮性能,豌豆对旱地农业生态系统的氮素平衡起着重要作用,是旱作农业中主要的倒茬养地作物^[11]。豌豆适宜凉爽而湿润的气候,有“喜湿不耐旱”之说。在我国,52.5%的豌豆生产区为山区或干旱、半干旱地区,这些地区主要以天然降水为主,水分亏缺是限制豌豆生产和降低其产量的主要因素^[12]。明确干旱胁迫对豌豆根系生长及产量形成的影响,可为旱农区豌豆的生长调控提供理论依据。干旱胁迫及复水对豌豆根系生长影响的前期研究,初步比较了短期复水历时条件下胁迫时期对根系生长的相对补偿效应^[13],分析了根系干物质积累对连续干旱胁迫及干湿交替的响应差异^[14]。干旱胁迫及复水补偿均有一定的滞后效应,复水后短期内根系的生长状况难以准确显现干湿交替的累积效应。本研究拟通过盆栽试验,在分枝期、孕蕾期、花荚期进行历时15 d的土壤相对含水量55%的干旱胁迫,探讨胁迫时期对根系形态特征、根瘤生长影响的短期及长期效果,以及由此产生的产量调控效应,以充实豌豆干旱胁迫的理论,为提高干旱地区豌豆的水分高效利用及抗旱能力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2015年4—7月在甘肃农业大学防雨棚内进行,防雨棚通气良好,光照充足。供试作物为陇豌1号;供试菌株为ACCC16101(引自中国农业科学院农业微生物菌种保藏中心);供试土壤为砂壤土,土壤有机质为 $9.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤全氮、全磷、全钾含量分别为 0.589 、 0.636 、 $15.502 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤碱解氮为 $35.087 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤速效磷、速效钾分别为 16.875 、 $81.945 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,试验因素为干旱胁迫。土壤水分设4个水平(以土壤相对含水量表示),分别为无胁迫(W_1 , CK),全生育期的土壤含水量为 $75\% \pm 5\%$;分枝初期开始胁迫(W_2),孕蕾初期开始胁迫(W_3),花荚初期开始胁迫(W_4),胁迫期间的土壤含水量均为 $55\% \pm 5\%$,胁迫历时均为15 d;每个处理设6个重复。试验用 $30 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ 的PVC盆钵,每盆装过筛土壤13 kg,装完土后浇水沉实。每盆施氮 $0.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,氮肥以基肥的形式与土壤混匀后一次性施入。采用穴播法播种豌豆,播种量均为定苗数的3倍,每盆最后定苗为10株豌豆,生育期间土壤含水量依设计水平供给并用称重法进行调节。随机摆放盆钵,定期调换位置。生育期内所有处理除水

分管理不同外,其它栽培措施均保持一致。水分胁迫结束后及花荚盛期、成熟期采样。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 根系指标 采样后将根系用流水缓缓冲洗干净,冲洗时在根系下面放置100目筛网以防止脱落的根系被水冲走。用根系扫描分析系统(WinRhizo, Regent Instruments Canada Inc, Nepean, ON, USA)对其进行扫描。扫描时将根系放入特制的透明托盘内,加入3~5 mL水以避免根系分支的互相缠绕。扫描后采用WinRhizo Pro Vision 5.0a分析程序对图像进行分析得到根长、根系表面积、根系直径和根系体积。

1.3.2 根系结瘤状况 待测定完根系形态指标后把根瘤全部摘下,分类(以粉红色、粉色和浅粉色为有效根瘤,其它颜色为无效根瘤)、计数、称重。

1.3.3 生物量 将地上部分植株和根系于 105°C 下杀青0.5 h,之后置于 75°C 下烘干至恒重,用1/10000电子天平称量。

1.3.4 子粒产量 收获后进行室内考种,记录每株荚数和每荚粒数,子粒风干后测定子粒产量。

1.3.5 收获指数计算 收获指数(HI):子粒生物量/地上部生物量。

1.4 数据处理及分析

利用Excel 2010及SPSS 17.0进行数据处理及方差分析。

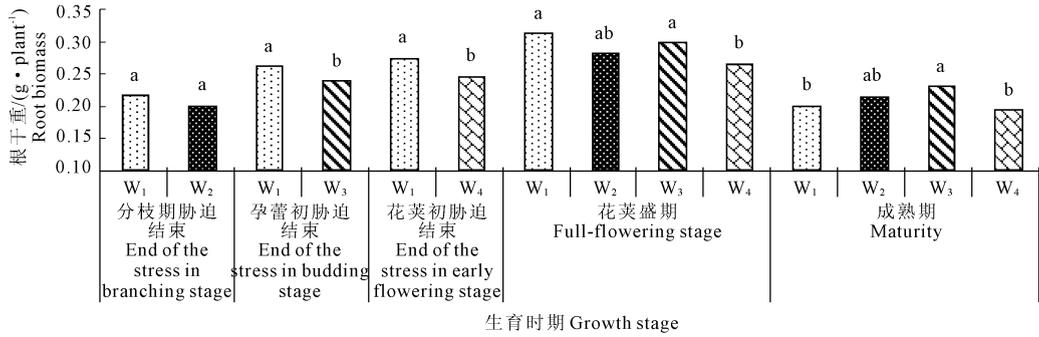
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对豌豆生物量的影响

2.1.1 不同生育时期干旱胁迫对根重的影响 从图1可以看出,干旱胁迫结束时, W_3 、 W_4 的根干重分别比CK降低了8.59%和10.28%, W_2 与CK间无显著差异,表明分枝期的干旱胁迫不影响胁迫期间根系的干物质累积,花荚初期干旱胁迫对处理期间根系生长的抑制作用大于孕蕾期。复水后,至花荚盛期, W_3 由胁迫结束时显著低于CK变为无显著差异,表明 W_3 复水产生了等量补偿效应,而 W_4 的胁迫影响较大致使复水不能补偿胁迫对根系干物质积累的抑制作用;对根系干物质的影响,胁迫越早,抑制作用越小;复水越早,补偿作用越大。至成熟期, W_2 与CK间无显著差异, W_3 与 W_4 分别由花荚盛期与CK间无显著差异及降低14.91%变为增加15.12%及无显著差异,即分别产生了超越补偿及等量补偿。花荚盛期至成熟期,根系逐渐进入衰败时期,干物质积累显著降低(图1),但生殖生长时期的干旱胁迫使根系产生了一定程度的抗逆“锻炼”,衰败相对较慢,从而产生了相对的生长补偿作用。

2.1.2 不同生育时期干旱胁迫对地上部分干物质积累的影响 干旱胁迫显著抑制了豌豆地上部的干物质积累(图 2),胁迫结束时,W₂、W₃及 W₄ 分别比 CK 降低了 11.43%、11.36% 和 9.55%,表明胁迫时间越早,抑制作用越大。复水后,至花荚盛期,W₂、W₃、W₄ 仍分别比 CK 降低了 10.51%、13.82% 和 15.16%,与胁迫结束时相比,W₂ 与 CK 间的差异缩

小,而 W₃ 和 W₄ 与 CK 间的差异程度增加,表明此期间的复水,三胁迫处理均未产生显著的补偿作用,即均为不足补偿,且生殖生长期的干旱胁迫对地上部干物质积累的抑制效应在持续放大。至成熟期,与 CK 相比,W₃、W₄ 处理仍分别降低了 8.15% 和 13.95%,但降幅比花荚盛期缩小;W₂ 与 CK 间由花荚盛期的显著降低变为无显著差异。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level. The same as below.

图 1 干旱胁迫对豌豆根干重的影响

Fig.1 Effect of drought stress on root biomass of pea

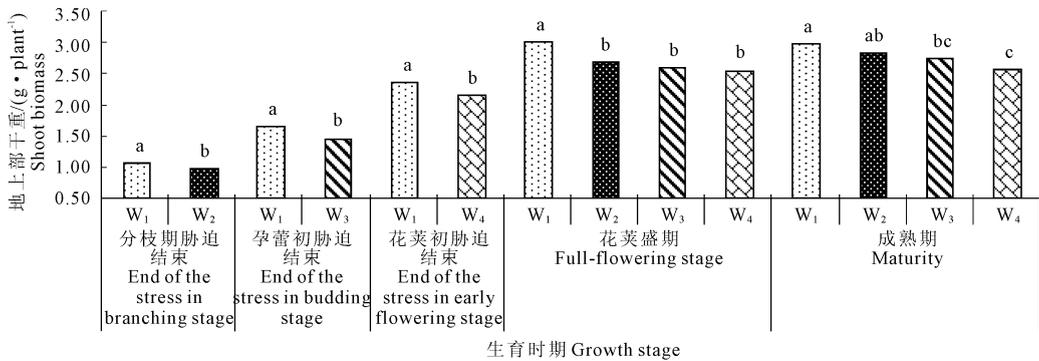


图 2 干旱胁迫对豌豆地上部生物量的影响

Fig.2 Effect of drought stress on shoot biomass of pea

2.2 干旱胁迫对豌豆根系生长的影响

由图 3~图 6 可知,根长与根表面积对不同生育时期干旱胁迫的响应相似,而根直径与根体积对各干旱胁迫的响应相似。胁迫结束时,W₃ 的根长、根表面积分别比 CK 降低了 16.29% 和 16.02%,W₄ 的根表面积和根体积分别比 CK 降低了 9.87% 和 12.26%。复水后,在花荚盛期,W₂、W₃ 的根长、根表面积均显著低于 CK;而在成熟期,W₂、W₃ 的根长、根表面积均显著高于 CK,且 W₃ 的根直径与根体积也显著高于其它三个水分处理,表明分枝期和孕蕾期的干旱胁迫主要抑制了豌豆根系的伸长生长,进而降低了豌豆的根表面积和体积,且分枝期干旱胁迫对豌豆根系形态性状的影响具有滞后效应。W₄ 不影响花荚期根系的伸长生长,主要降低了根系的

直径、表面积及体积,且对根系增粗生长的抑制作用大于 W₂ 及 W₃,表明后期干旱胁迫主要抑制了根系的横向生长而显著降低了根系的表面积和体积。

2.3 干旱胁迫对豌豆结瘤状况的影响

干旱胁迫显著抑制了豌豆根瘤的形成及其生长(图 7),胁迫结束时,各胁迫处理的根瘤总数、有效根瘤数、根瘤鲜重均显著低于 CK。复水后,在花荚盛期,W₂、W₃、W₄ 的总根瘤数比 CK 降低了 21.05%~45.11%,有效根瘤数比 CK 降低了 41.27%~48.21%,根瘤鲜重比 CK 降低了 44.19%~51.71%。成熟期,胁迫处理的总根瘤数、有效根瘤数和根瘤重分别比 CK 降低了 25.35%~43.78%、34.14%~47.41% 和 38.44%~53.87%。干旱胁迫均显著抑制结瘤,分枝期的影响最大,孕蕾期与花荚初阶次之;

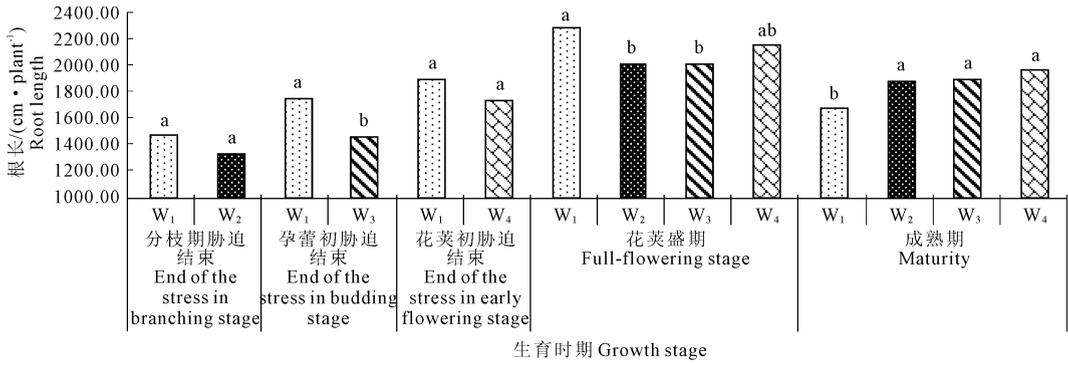


图 3 干旱胁迫对豌豆根长的影响

Fig.3 Effect of drought stress on root length of pea

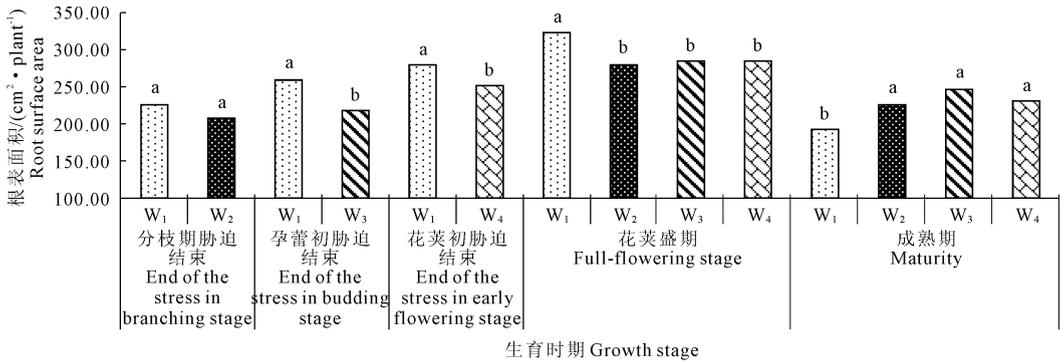


图 4 干旱胁迫对豌豆根表面积的影响

Fig.4 Effect of drought stress on root surface area of pea

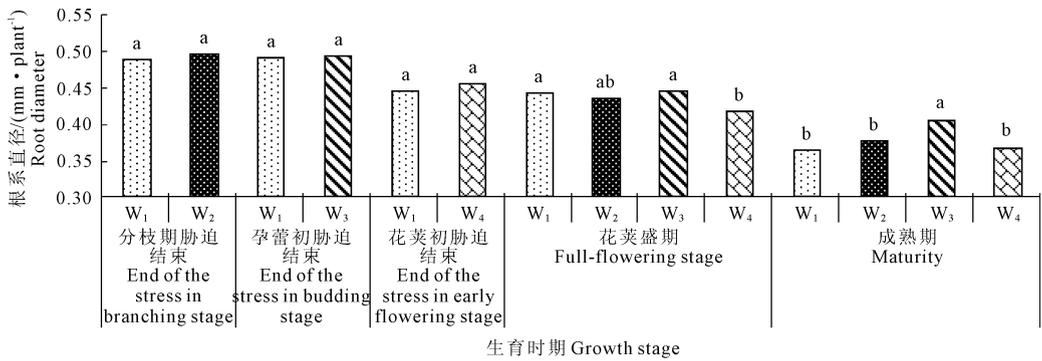


图 5 干旱胁迫对豌豆根系直径的影响

Fig.5 Effect of drought stress on root diameter of pea

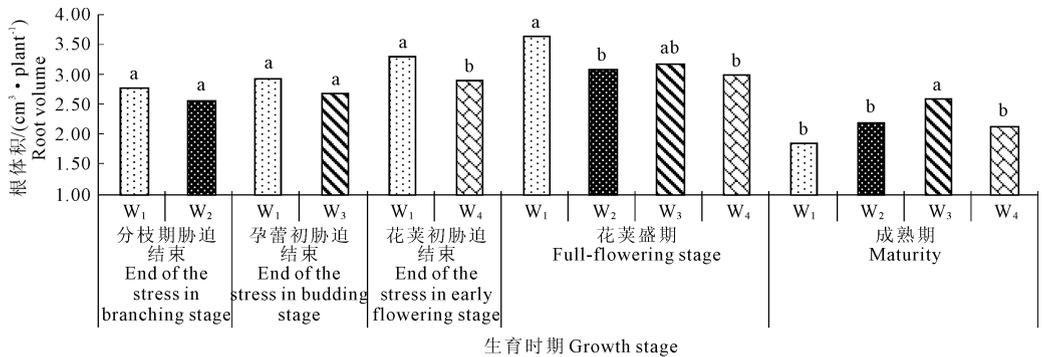


图 6 干旱胁迫对豌豆根体积的影响

Fig.6 Effect of drought stress on root volume of pea

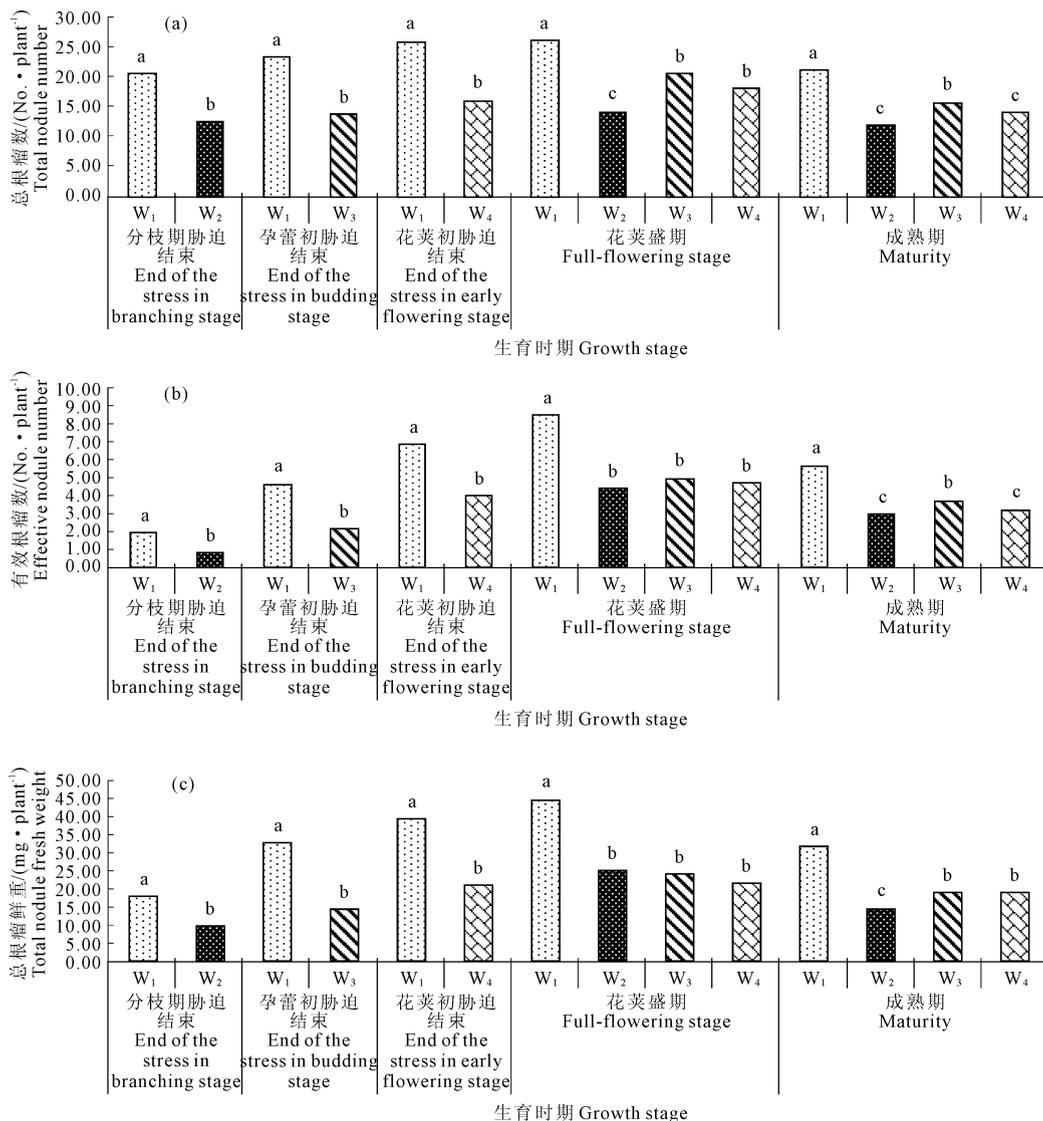


图 7 干旱胁迫对豌豆结瘤状况的影响

Fig. 7 Effect of drought stress on nodulation status of pea

复水后产生的补偿作用均为不足补偿。这表明分枝期是豌豆根瘤形成与生长的关键时期,此期干旱胁迫对结瘤的抑制最大,复水的相对补偿效果也最差。

2.4 干旱胁迫对豌豆子粒产量及其构成因子的影响

干旱胁迫对豌豆子粒产量及产量构成因子的影响因干旱胁迫时期而有较大差异(表 1)。与 CK 相比,三种胁迫方式下, W₂ 的收获指数及子粒产量均无显著变化; W₃ 收获指数虽未显著降低,但子粒产量降低了 6.63%; W₄ 的收获指数仅为 CK 的 92.71%,子粒产量降低了 20.41%。可见,胁迫时期越早,对干物质向子粒转运及子粒产量形成的抑制作用越小,分枝期胁迫尚能产生子粒产量的等量补偿作用,花荚期胁迫的子粒产量不仅显著低于 CK,而且分别比分枝期胁迫和孕蕾期胁迫降低了 18.26%和 14.76%。

胁迫时期对产量构成因素的影响也因时期不同

而有较大差异。与 CK 相比, W₂ 不影响产量的各构成因子; W₃ 的产量降低主要源于单荚粒数的显著降低,其降低幅度为 16.55%; W₄ 的产量构成因子中,单株荚数、单荚粒数和单荚粒重分别降低了 4.68%、25.40%和 16.57%。可见,孕蕾期胁迫对子粒产量形成的抑制作用具有一定滞后效应;花荚期胁迫影响荚果、子粒的形成及子粒的充实,且对子粒生长的抑制作用大于荚果形成。

3 结论与讨论

干旱并非对植物仅有伤害等负面效应,在一定范围的干旱胁迫后复水,植物在生理生化代谢和生长发育等方面会产生等量补偿或超补偿效应的正面效应,以弥补干旱胁迫期间对植物造成的伤害和损失^[15-17],作物受旱后复水的补偿生长贯穿于整个生育期。旱后复水补偿有三种类型^[18],即水分条件改

表1 不同生育时期干旱胁迫对豌豆子粒产量及产量构成因子的影响

Table 1 Effect of drought stress on yield and yield components of pea

处理 Treatment	单株荚数 Pod number per plant /(No·plant ⁻¹)	单荚粒数 Seed number per pod (seed·pod ⁻¹)	单荚粒重 Grain weight per pod/(g·pod ⁻¹)	单株粒数 Seed number per plant /(seed·plant ⁻¹)	单株产量 Grain yield /(g·plant ⁻¹)	收获指数 Harvest index
W ₁	2.500a	3.347a	0.700a	8.367a	1.749a	0.576a
W ₂	2.400ab	3.188a	0.710a	7.650b	1.703ab	0.595a
W ₃	2.417ab	2.793b	0.676a	6.750c	1.633b	0.587a
W ₄	2.383b	2.497c	0.584b	5.950d	1.392c	0.534b

注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different letters in the same column mean significant differences among different treatments at 5% level.

善后作物生长与正常供水的作物生长比值大于 1 时的超越补偿、等于 1 时的等量补偿以及小于 1 时的不足补偿。干旱胁迫及复水补偿具有一定的滞后性^[19],某阶段缺水不仅影响本阶段,还会影响其后的生长发育,而复水也要隔一段时间后才能观察到对作物生长发育的补偿作用,即干旱胁迫与复水对作物生长及生理指标变化影响的延后作用。

不同生育时期干旱胁迫后复水对豌豆地上部干物质积累的补偿作用均为不足补偿;且胁迫时期越早,对胁迫期间地上部干物质累积的抑制作用越大,复水后产生的补偿效果越好,胁迫结束时,W₂、W₃及 W₄ 分别比 CK 降低了 11.43%、11.36% 和 9.55%,至花荚盛期,W₂、W₃、W₄ 仍分别比 CK 低 10.51%、13.82% 和 15.16%;花荚初期干旱胁迫对根干重的抑制作用最大,胁迫结束时比 CK 降低了 10.28%,而孕蕾期干旱胁迫后复水产生的补偿效果最好,花荚盛期为等量补偿,成熟期达到了超越补偿,为 CK 的 15.12%,分枝期和花荚初期干旱胁迫在成熟期也产生了等量补偿。大豆上也有类似的研究结论^[17],即:大豆开花前期遭受干旱胁迫显著降低了根、茎、叶、豆粒和总生物量,但复水后大豆植株生长速率加快,已部分弥补干旱胁迫造成的损失。

不同生育时期干旱胁迫对豌豆根系形态性状的影响不同,孕蕾期与花荚初期干旱胁迫对根系生长的抑制作用最大,胁迫结束时,W₃ 的根长、根表面积分别比 CK 降低了 16.29% 和 16.02%,W₄ 的根表面积和根体积分别比 CK 降低了 9.87% 和 12.26%,其它性状与 CK 间差异不显著,说明孕蕾期干旱胁迫主要抑制了根系的伸长生长,而花荚初期干旱胁迫主要抑制了根系的增粗生长;分枝期干旱胁迫对豌豆根系的影响具有滞后效应,在胁迫结束时与 CK 间差异不显著,至花荚盛期,W₂ 的根长、根表面积比 CK 低 12.11%、12.98%。王利彬等^[20]研究认为,干旱胁迫后复水产生补偿效应是有条件的,长时间重度胁迫会减小补偿效应甚至造成伤害。本试验胁迫

程度虽不是太严重,但由于胁迫历时较长,在花荚盛期产生的补偿效应均为不足补偿,但成熟期达到了等量补偿或超额补偿。成熟期根系已经开始衰败,干旱胁迫下豌豆各项根系形态性状的改善是由于干旱胁迫降低了成熟期根系的衰败速率,延缓了根系的衰老,这与 Wenker^[21]的观点相一致。

分枝、孕蕾及花荚期的干旱胁迫均显著抑制了豌豆结瘤及根瘤生长,分枝期干旱胁迫后复水产生的补偿作用最小,孕蕾期和花荚初期次之,在花荚盛期,W₂ 的总根瘤数比 W₃、W₄ 低 30.48%、21.08%,成熟期,W₂ 仍比 W₃ 低 24.69%,这是由于分枝期是根瘤形成与生长的关键时期,是根瘤数量增加最快的时期,此时的干旱胁迫显著抑制了正常根毛的生长以及根瘤菌的繁殖,导致根瘤菌对寄主的侵染受到抑制,进一步抑制了根瘤的形成与生长^[22-23]。干旱胁迫对豌豆结瘤的影响因胁迫方式而有所差异,闫志利等^[12]试验结果表明,不同生育时期水分胁迫均抑制了豌豆结瘤,但复水后在一定时间内根瘤数都可达到等量补偿,这与本试验结果不同,主要是由于胁迫历时及程度的差异所致。

不同生育时期受旱对作物产量的影响不同,最终的产量损失不仅与胁迫强度有关,还与作物的生长阶段有关^[24-25]。当大豆遭受干旱胁迫时,开花期干旱主要降低了荚数和粒数,而结荚期干旱不仅降低了荚数和粒数,还显著降低了产量,对最终产量的影响大于开花期^[26]。本试验结果表明,胁迫时期越早,对豌豆子粒产量及产量构成因子的影响越小,分枝期干旱胁迫只降低了单株粒数,孕蕾期干旱胁迫降低了粒数及产量,花荚初期干旱胁迫对豌豆产量及其各构成因子均产生了抑制作用,且对产量的影响最大,比 CK 降低了 20.41%,这与我们前期的研究结果相一致^[13]。

参考文献:

[1] 山 仑,邓西平,张岐岐.生物节水研究现状及展望[J].中国科

- 学基金, 2006, (2): 66-71.
- [2] 李文绕, 张岁岐, 丁彦彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [3] Kato Y, Okami M. Root growth dynamics and stomatal behaviour of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions [J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(1): 9-17.
- [4] Songsri P, Jogloy S, Vorasoot N, et al. Root distribution of drought-resistant peanut genotypes in response to drought[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(2): 92-103.
- [5] Jongrungrklanga N, Toomsana B, Vorasoota N, et al. Rooting traits of peanut genotypes with different yield responses to pre-flowering drought stress[J]. *Field Crops Research*, 2011, 120(2): 262-270.
- [6] Benjamin J G, Nielsen D C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea[J]. *Field Crops Research*, 2006, 97(2/3): 248-253.
- [7] 王晨阳. 不同土壤水分条件下小麦根系生态生理效应的研究[J]. 华北农学报, 1992, 7(4): 1-8.
- [8] 张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 1-6.
- [9] 轩春香. 干旱胁迫及复水对豌豆根系生长及内源激素含量的影响和补偿效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [10] 连荣芳, 王梅春, 墨金萍. 半干旱地区豌豆高产栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2008, (9): 52-53.
- [11] 施积炎, 袁小凤, 丁贵杰. 作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状[J]. 山地农业学报, 2000, 19(3): 226-233.
- [12] 闫志利, 牛俊义. 豌豆对干旱胁迫的响应机制研究[C]//中国农业科学博士论丛, 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012.
- [13] 张 维. 不同生育时期干旱胁迫对豌豆干物质积累及其产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(1): 48-52.
- [14] 刘洪展, 郑 伟, 郑风荣, 等. 复水对海水浇灌的玉米幼苗根系补偿效应的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 101-106.
- [15] 郝树荣, 郭相平, 王文娟. 不同时期水分胁迫对玉米生长的后效性影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 71-75.
- [16] 薛惠云, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫与复水对棉花叶片光谱、光合和荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2386-2393.
- [17] 张恒月, 郭屹立, 王磊, 等. 干旱和复水对大豆叶片光合生理特征及产量的影响[J]. 河南大学学报, 2009, 39(2): 183-188.
- [18] 胡展育. 植物受虫害后的补偿作用[J]. 文山师范高等专科学校学报, 2007, 20(4): 106-109.
- [19] 刘晓英, 罗远培, 等. 考虑水分胁迫滞后影响的作物生长模型[J]. 水利学报, 2002, (6): 32-37.
- [20] 王利彬, 祖 伟, 董守坤, 等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 150-155.
- [21] Wenkert W, Lemon W E, Sinclair T R. Leaf elongation an dturgor pressure in field-grown soybean[J]. *Agron J*, 1978, 70: 761-764.
- [22] 鲍思伟. 水分胁迫对蚕豆(*Vicia faba* L.) 叶片水分状况的影响[J]. 西南民族学院学报, 2001, 27(4): 446-449.
- [23] 周利平, 刘文杰, 马焕成, 等. 根瘤菌菌株和接种根瘤菌植株的耐旱性研究进展[J]. 安徽农业科技, 2010, 38(22): 11978-11980, 11983.
- [24] Cakir R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn[J]. *Field Crops Research*, 2004, 89(1): 1-16.
- [25] 王晨阳, 郭天财, 彭 羽, 等. 花后灌水对小麦子粒品质性状及产量的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1031-1035.
- [26] 赵宏伟, 李秋祝, 魏永霞. 不同生育时期干旱对大豆主要生理参数及产量的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 329-332.

(上接第 137 页)

- [12] 邹 琦, 赵世杰, 王 忠, 等. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, (7): 161-162.
- [13] 李寒暝, 白灯莎·买买提艾力, 等. 新疆棉花品种的耐盐性综合评价[J]. 核农学报, 2010, 24(1): 160-165.
- [14] 李 彦, 张英鹏, 孙 明, 等. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 258-263.
- [15] 罗庆云, 於丙军, 刘友良. 大豆苗期耐盐性鉴定指标的检验[J]. 大豆科学, 2001, 20(3): 177-182.
- [16] 裴怀弟, 李忠旺, 张艳萍, 等. 马铃薯转 *GhABF2* 转录因子苗耐盐性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 90-95.
- [17] 王素平, 李 娟, 郭世荣, 等. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗植株生长和光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 455-461.
- [18] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59: 206-216.
- [19] Demral T, Turkan I. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing salt tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53: 247-257.
- [20] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1378-1382.
- [21] 李 源, 刘贵波, 高洪文, 等. 紫花苜蓿种质资源耐盐性综合评价及盐胁迫下的生理反应[J]. 草业学报, 2010, 19(1): 79-86.
- [22] 汪月霞, 孙国荣, 王建波, 等. NaCl 胁迫下星星草幼苗 MDA 含量与膜透性及叶绿素荧光参数之间的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 122-129.
- [23] 汪本勤. 植物 SOD 的研究进展[J]. 河北农业科学, 2008, 12(3): 6-9.
- [24] 董 亮, 何永志, 王远亮, 等. 超氧化物歧化酶(SOD)的应用研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(5): 53-55.
- [25] 张 欣. 超氧化物歧化酶(SOD)及其研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 2013(16): 14-15.
- [26] 夏民旋, 王 维, 袁 瑞, 等. 超氧化物歧化酶与植物抗逆性[J]. 分子植物育种, 2015, 13(11): 2633-2646.
- [27] 丁在松, 王春艳, 关东明, 等. 早稻×稗草杂交后代 YF2-1 光合气体交换、叶绿素荧光和抗氧化酶系统对渗透胁迫的响应[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 876-881.
- [28] 刘海卿, 孙万仓, 刘自刚, 等. 北方寒旱区白菜型冬油菜抗寒性与抗旱性评价及其关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3743-3756.
- [29] 段九菊, 张 超, 郑梅梅, 等. 万寿菊不同品种的耐盐性综合评价[J]. 核农学报, 2015, 29(7): 1406-1418.