

网络出版时间:2017-08-21 13:50

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.10.005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170821.1350.010.html>

# 不同胁迫时长后玉米幼苗对局部复水的响应

王 丽,牛晓丽,杨硕欢,洪 霞,姚德龙,高 繁,张保成,胡田田

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院/旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**【摘 要】**【目的】揭示前期不同水分胁迫条件下局部恢复供水时玉米生长及水分吸收的动态变化,了解玉米生长对土壤水分条件变化的响应特征。【方法】以 PEG 6000 模拟水分胁迫,采用分根方法,以玉米幼苗整个根系均持续正常供水为对照(CK),在全部根系经受 $-0.4$  MPa 预水分胁迫 0,1,3 和 6 d 后,对 1/2 根区恢复正常供水,另 1/2 根区维持 $-0.4$  MPa 胁迫水平,在局部供应 0,0.25,0.5,1,3,5,7 和 9 d 后,测定幼苗各部分的生长及水分吸收状况。【结果】胁迫 0 d,即前期正常供应后局部 $-0.4$  MPa 胁迫,会在一定时间内刺激供应区根系导水率与根干物质质量的补偿效应;局部供应 3 d 内维持玉米幼苗地上部干物质质量与 CK 持平,继续局部亏水会使地上部干物质质量及根系导水率、尤其胁迫侧的根系导水率、根长和根干物质质量明显降低,而对供应区根干物质质量、根长、根面积无显著影响。对于 $-0.4$  MPa 胁迫 1,3,6 d,玉米叶片相对含水量分别在局部复水 3,5,5 d 时恢复至 CK 水平(胁迫 0 d 始终与 CK 持平);地上部干物质质量不能完全恢复,但其占 CK 的相对比例最终趋于稳定;复水侧根系导水率、根干物质质量、根长与根面积会有一定的恢复,但复水 9 d 时仍不能恢复到 CK 水平,恢复程度均随胁迫时长的增大而减小;持续胁迫侧根系仍持续下降。根冠比有所不同:胁迫时间越长根冠比越大,局部复水后各处理根冠比均呈增大趋势,胁迫 0,1,3,6 d 各处理显著大于对照的时间分别为局部复水后 7,3,1 和 1 d,增幅随局部复水时间延长而减缓(除胁迫 0 d 外)。【结论】作物对局部复水的响应与前期亏水持续时间有关,适当的亏水可通过局部复水得到恢复。

**【关键词】** 玉米幼苗;胁迫时长;局部复水;根系导水率;叶片水分状况;干物质累积分配

**【中图分类号】** S274.1

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2017)10-0030-11

## Response of maize seedling to partial rewatering after varying stress time

WANG Li, NIU Xiaoli, YANG Shuohuan, HONG Xia, YAO Delong,  
GAO Fan, ZHANG Baocheng, HU Tiantian

(College of Water Resources and Architectural Engineering/Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to reveal the dynamic changes and influencing factors of maize growth and absorption capacity under partial water resupply after different previous water stresses. 【Method】 Maize seedlings were prepared using split-root hydroponic technique, with PEG 6000 simulating water stress. All roots with normal water supply were used as control treatment, and 4 previous stress times (0, 1, 3 and 6 d) under  $-0.4$  MPa were treatment levels. All roots were treated with uniform water stress each day before half roots were treated with normal water level while half roots were treated with water stress. The growth and absorption status of each part of seedling was monitored continuously and dynamically at different hours after treatments (0, 0.25, 0.5, 1, 3, 5, 7 and 9 d). 【Result】 After previous stress time of 0 d,

**【收稿日期】** 2016-08-31

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(51079124);中央高校基本科研业务费专项(QN2011067)

**【作者简介】** 王 丽(1988—),女,河北保定人,在读硕士,主要从事农业节水理论与技术研究。

E-mail: wangli584521@nwsuaf.edu.cn

**【通信作者】** 胡田田(1966—),女,陕西礼泉人,教授,博士,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: hutiantian@nwsuaf.edu.cn

partial water supply stimulated the compensation effect of the hydraulic conductivity and the root try weight at the non-stressed sub-root zone within a certain period of time. The dry weights of corn seedlings maintained the same as the CK in 3 days, while the root dry weight,  $L_R$  and root hydraulic conductivity with continuous local water deficit decreased significantly. But it had no significant influence on root dry weight,  $L_R$  and  $A_R$  of normal water supply parts. By controlling  $-0.4$  MPa water stress level for 1, 3, and 6 d and rewatering afterwards, the relative leaf water content recovered to CK after 3, 5, and 5 d, respectively. Aboveground dry matter quantity was not fully recovered, but the relative proportion of CK eventually stabilized. The hydraulic conductivity, root try weight,  $L_R$  and  $A_R$  of non-stressed sub-root had certain recovery, but not to CK 9 days after partial resupply. The degree of recovery decreased with the increase of stress duration. The non-stressed sub-root continued to decline. The root-shoot ratio showed a trend of increase after water resupply, the root-shoot ratios at 0, 1, 3 and 6 d previous stress treatments were significantly higher than CK 7, 3, 1 and 1 d after partial resupply. The increase of root-shoot ratio slowed down with the increase of water recovery time (except 0 d). 【Conclusion】 Response of crops to partial water resupply was related to pre-stress duration, and the effects of appropriate stress duration can be recovered through partial water resupply.

**Key words:** maize seedling; previous stress duration; partial rewatering; root hydraulic conductance; leaf water status; accumulation and allocation of biomass

局部灌溉是有效提高水分利用效率的节水灌溉技术,既能提高水分从水源到植物根区土壤的运输转化效率,也可以增加植物本身的水分利用效率,将农业灌溉技术与植物生理生化的研究很好地统一起来,因此,得到了广泛的研究和应用。研究表明,在局部灌溉条件下,玉米用水量减少 34.4%~36.8%,叶片含水量不受影响,而生物量仅下降 6%~12%<sup>[1]</sup>,水分利用效率可提高 24.3%<sup>[2]</sup>,且能够协调作物营养生长与生殖生长之间的关系,优化根冠分配比例<sup>[3]</sup>。与均匀供水相比,局部根区供水可使玉米叶片蒸腾速率降低 17.5%~19.0%,净光合速率提高 8.9%~18.3%<sup>[4]</sup>,同时提高根系的水分传导能力,调动根系生长和吸收的补偿作用<sup>[5]</sup>。根系均匀供水条件下的研究表明,旱后复水激发了不同程度干旱胁迫处理下侧根的发生和延伸<sup>[6]</sup>,株高和地上部分干质量可以恢复至接近充分供水处理<sup>[7-8]</sup>,根冠比和根系的平均长度增加<sup>[9]</sup>,叶片的伸展速率大大增加<sup>[10]</sup>,但是重度胁迫条件下这种补偿效应会消失。Acevedo 等<sup>[11]</sup>使玉米植株遭受 6 h 的干旱胁迫,当胁迫至  $-0.05 \sim -0.02$  MPa 时复水,生长速率在复水 15 h 后完全恢复;但当胁迫至  $-0.3 \sim -0.6$  MPa 时,则生长速率在复水后 15 h 不能完全恢复。Xu 等<sup>[12]</sup>指出,受胁迫高粱复水 1 d 后,苗期遭受 26 和 39 d 胁迫的高粱根系吸水为对照的 63.5% 和 29.4%,胁迫持续的时间越长,根系功能恢复越缓慢。可见,植物对旱后复水的响应与

前期水分状况有关。截至目前,前人研究主要是集中在对整个根系局部供水或水分胁迫后均匀供水的情况,而关于植物对干旱后局部复水的响应研究尚鲜见报道。本研究以水培玉米进行分根试验,以 PEG 6000 模拟水分胁迫,研究玉米苗期遭受不同水分胁迫历时后局部复水对玉米生理生长变化规律的影响,不仅有助于了解玉米生长对土壤水分条件变化的响应特征,还为充分发挥根系局部灌溉提高玉米抗旱性能及节水效应奠定了理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料和处理

采用分根法进行玉米水培试验,供试玉米品种为“奥玉 3007”。玉米种子播种在沙盘中,在恒温培养箱中催芽(25 °C,每天适量浇水,黑暗中培养),出苗后继续在室内培育(25~28 °C,每天适量浇水,接受光照时间为 06:00—20:00)。待玉米幼苗第 3 片真叶长出时,选取长势基本一致的幼苗,剪掉种子根,将其余根系均分为 2 部分,移栽至自制的分根装置(长 14.8 cm、宽 7.7 cm、高 11.4 cm,中间隔开,每部分盛液 0.5 L)中,每个容器移植 1 株,用完全营养液培养,持续 24 h 通气。试验用营养液组成:  $K_2SO_4$  0.75 mmol/L,  $KH_2PO_4$  0.25 mmol/L, KCl 0.1 mmol/L,  $Ca(NO_3)_2$  4 mmol/L,  $MgSO_4$  0.6 mmol/L, Fe-EDTA 0.1 mmol/L,  $ZnSO_4$  1.0  $\mu$ mol/L,  $H_3BO_3$  1.0  $\mu$ mol/L,  $MnSO_4$  1.0  $\mu$ mol/L,  $CuSO_4$

0.1  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  0.35  $\mu\text{mol/L}$ , pH 值用 NaOH 和 HCl 调至 5.7~6.0。营养液每隔 3 d 换 1 次。缓苗 6 d 后,进行试验预处理。

## 1.2 试验方案

采用聚乙二醇 PEG 6000 控制营养液的渗透势以模拟水分胁迫。试验处理分为前期两边根系均匀胁迫和后期局部复水两个阶段。在处理的前期阶段,玉米幼苗两侧根系均经受 -0.4 MPa 的水分胁迫,设置 0,1,3,6 d 4 个胁迫时间,之后进入局部复水阶段,即 1/2 根区恢复正常供应,另 1/2 根区维持原来的胁迫水平。同时,针对每个胁迫时间设置相应的 CK,即两侧根区均持续正常供应水分(无 PEG)。每个胁迫时间下对应 16 株处理幼苗和 16 株对照,每次育苗 128 株。在局部复水 0,0.25,0.5,1,3,5,7,9 d 后,分别连续动态取样(2 株处理,2 株对照)监测玉米各部分生长及水分吸收情况。试验重复 3 次。

## 1.3 测定项目及方法

在局部复水 0,0.25,0.5,1,3,5,7,9 d 时,动态采集各处理的植株样品,将玉米植株分为地上部和两侧根系 3 部分,测定叶片相对含水量和地上部干物质质量,并从茎基部剪掉另一半根区的根系,留下将要测定的一半,分别测定供水侧和胁迫侧根系导水率。之后,用去离子水冲洗根系,洗去黏液,用于根长、根面积以及根干物质质量的测定。

叶片相对含水量。在局部复水 0,0.25,0.5,1,3,5,7,9 d,采集玉米顶部第 1 张完全展开的叶片,称取鲜物质量(初始鲜物质量)后,迅速放入清水中浸泡 5 h 后,从水中取出,擦掉叶片表面多余水分称取饱和鲜物质量。在 105  $^{\circ}\text{C}$  下杀青 30 min,然后在 75  $^{\circ}\text{C}$  下烘干至恒质量,称质量,获取叶片干物质质量后计算叶片相对含水量<sup>[15]</sup>:

$$\text{叶片相对含水量} = \frac{\text{初始鲜物质量} - \text{干物质质量}}{\text{饱和鲜物质量} - \text{干物质质量}} \times 100\%$$

根系导水率。采用 Model 600 型压力室(PMS 公司,美国)进行测定,步骤如下:将玉米植株从茎基部 5 cm 处剪断,装入压力室中,根系浸入纯水中。用高压氮气缓慢加压,观察切口处刚有液汁渗出时的压力作为与根系水势相平衡的压力,在此基础上逐渐增压 0.2 MPa,共加压 5 次,每次等渗出液流速稳定时(约需 2 min),用装有吸水纸的微型 EP(Eppendorf)管收集液汁,每次收集 2 min,计算其每次压力水平下单位时间流出的水量<sup>[5]</sup>。根系总导水

率( $\text{m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{s})$ )即为水流通量与压力差关系曲线上的斜率<sup>[13]</sup>。为了尽可能消除温度等<sup>[14]</sup>非试验因素的影响,测定在(25 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$  的室温下进行。

根系长度和面积。将不同根区的根系小心地分散在根系盒中,用 V700 型爱普生扫描仪(EPSON 公司,日本)进行扫描后,用 WinRHIZO 软件计算根系的长度(cm)和面积( $\text{cm}^2$ )。

地上部和根系干物质质量及根冠比。将玉米地上部及两根区根系,杀青并烘干(方法同上)至恒质量,获得植株干物质质量。

根冠比 = 根干物质质量 / 地上部干物质质量。

## 1.4 数据统计与分析

为消除幼苗大小对不同胁迫时间试验结果的影响,对每个局部供应时间的各项指标,分别求出其相对于 CK 的相对值。用 SPSS 17.0 统计分析软件的 one-way analysis of variance 对试验数据进行方差分析。用 Origin 8.5 软件和 Microsoft Excel 2010 进行图和表的制作。

## 2 结果与分析

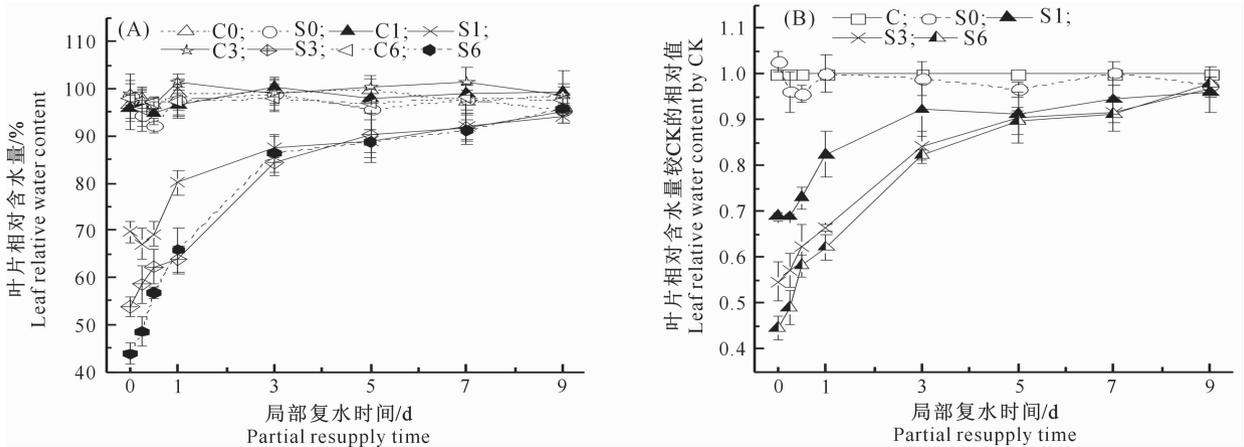
### 2.1 胁迫时长对局部复水玉米叶片水分状况的影响

从图 1-A 可以看出,在局部复水 0 h 时(即胁迫结束),4 个胁迫时长的叶片相对含水量(RWC)之间存在显著差异,胁迫 1,3,6 d 较胁迫 0 d 分别减小 31.1%,45.3%,60.6%,后者与 CK 之间无显著差异。表明水分胁迫使植物叶片相对含水量明显降低,且随着胁迫时间的延长,叶片水分状况降低幅度增大。

从局部复水后的动态监测结果(图 1)可以看出,胁迫 0 d 下玉米叶片 RWC 始终与 CK 基本持平,表明 1/2 根系经受 -0.4 MPa 的水分胁迫不会影响玉米叶片水分状况。其他 3 个处理(图 1-B),在局部复水 0.25~7 d 内,均显著小于 CK 和胁迫 0 d,胁迫 3,6 d 之间无显著差异,但二者均较胁迫 1 d 明显减小,局部复水 5 d 后才恢复到胁迫 1 d 水平;局部复水 9 d 时,各处理均与 CK 无显著差异。可见,前期 -0.4 MPa 胁迫不同时间后局部复水,叶片 RWC 均明显增大,最终恢复到 CK 水平,区别在于较前一时间点增大的幅度因恢复供应的时间而异。从图 1 还可以看出,在局部复水 0~3 d 内,胁迫 1,3,6 d 玉米叶片 RWC 均快速增大。其中,局部复水 0~0.25 d 时,胁迫 3,6 d 较 0 d 分别明显增长 4.0%,9.9%,而胁迫 1 d 则变化不大;在局部复水

0.5~1 d 时胁迫 1 d 增幅为 12.9%, 达到最高水平; 在局部复水 1~3 d 时胁迫 3, 6 d 才达到最大增幅, 分别为 26.7% 和 28.4%; 之后, 各处理增幅明显减缓, 局部复水 3~5 d 时, 胁迫 1 d 变化不明显, 胁迫 3, 6 d 的增幅分别为 7.7%, 9.2%; 局部复水 7~9 d

时, 3 个处理增幅分别为 1.8%, 5.3%, 7.2%。表明在 -0.4 MPa 胁迫下局部复水可使叶片水分状况迅速恢复, 且前期经受胁迫时间越短, 后期恢复越快, 但胁迫时间超过一定范围时影响减小。



C 表示 CK; S 表示 -0.4 MPa 胁迫水平; 0, 1, 3, 6 表示胁迫时间分别为 0, 1, 3, 6 d; 图 5, 6 同

C. Control treatment; S. -0.4 MPa water stress degrees; 0, 1, 3, 6. Previous stress durations are 0, 1, 3, 6 d. The same as Fig. 5 and 6

图 1 胁迫时长对局部复水玉米叶片相对含水量的影响

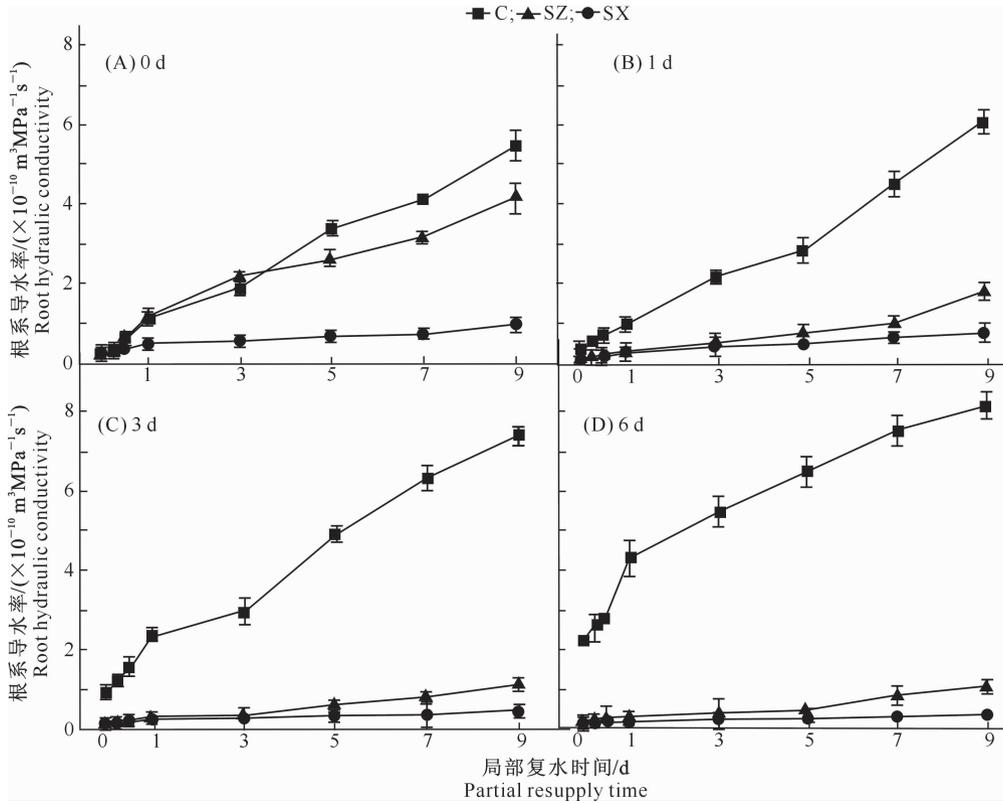
Fig. 1 Effect of previous stress duration on relative leaf water content under water resupply to partial root system

## 2.2 胁迫时长对局部复水玉米各根区根系导水率的影响

图 2 表明, 随复水时间推移, 玉米幼苗的根系导水率 ( $L_p$ ) 呈不断增大趋势, 且胁迫后局部恢复复水侧  $L_p$  较持续胁迫侧显著增大, 各根区  $L_p$  的变化趋势也因胁迫时长有明显不同。复水侧  $L_p$  表现为: 胁迫时间为 0 d 时, 局部供应 0.25 d 后即快速增大 (图 2-A); 胁迫 1 d 时, 局部复水 0.5 d 后快速增大, 5 d 后增加速率再次明显增大, 但增大幅度远小于胁迫时间为 0 d 的处理 (图 2-B); 胁迫 3 d 时, 局部复水 3 d 后快速增大 (图 2-C); 胁迫 6 d 时, 局部恢复供应 5 d 后快速增长 (图 2-D)。而且, 各时段  $L_p$  的增加幅度, 均随胁迫时长增大而急剧减小。各处理持续胁迫侧的  $L_p$  均表现为: 随局部复水时间延长缓慢增大, 且增大幅度也随胁迫时长的增大而减小。这表明前期胁迫时长的增大对局部复水后各根区  $L_p$  的恢复均会产生抑制作用, 对复水侧  $L_p$  的影响远大于持续胁迫侧, 而且, 复水侧  $L_p$  开始快速增大的时间点随胁迫时长的增大而延迟, 增幅也急剧减小。

表 1 表明, 局部复水 0 d 时, 同一处理两个 1/2 根系间  $L_p$  相对值均无显著差异, 且胁迫 1, 3, 6 d 根系的  $L_p$  (两侧根系的平均值) 较 CK 分别下降

74.4%, 86.5%, 93.7%。可见, 延长水分胁迫时间明显影响根系吸水能力。局部复水后, 各根区  $L_p$  的相对值较 CK 的变化情况随胁迫时长有明显不同。复水侧  $L_p$  表现为: 局部复水 0.5 d 时, 胁迫 0 d (即前期正常供应的处理) 与 CK 无显著差异, 胁迫 1, 3, 6 d 的  $L_p$  较 CK 分别减小 72.2%, 85.5%, 90.7%; 局部复水 1 d 时规律与 0.5 d 时类似; 局部复水 3 d 时, 胁迫 0 d 的  $L_p$  较 CK 增大 6.9%, 胁迫 1, 3, 6 d 较 CK 分别减小 76.5%, 86.8%, 93.3%; 局部复水 5 d 时, 4 个处理较 CK 分别减小 22.5%, 72.9%, 88.3%, 92.6%; 局部复水 9 d 时, 4 个处理较 CK 分别减小 24%, 69.8%, 84.5%, 86.8%。由此可以看出, 随局部复水时间的延长, 胁迫 1, 3, 6 d 复水侧根系导水率较 CK 的降低幅度减小, 且胁迫 3, 6 d 间的差距越来越小。可见, 在前期正常供应条件下, 对局部根系进行亏水胁迫会在一段时间内刺激供应区根系吸水的补偿效应, 但不能持续存在。而且, 其根系导水率随着局部亏水时间的延长明显减小。胁迫后局部复水条件下, 复水侧根系导水率会有一定的恢复, 但在局部复水 9 d 时复水侧根系导水率仍不能恢复到 CK 水平, 恢复程度随胁迫时间延长而减小。



C 表示 CK;SZ,SX 分别表示  $-0.4$  MPa 胁迫水平下的复水侧和持续胁迫侧  
C. Control;SZ,SX. Non-stressed root zone and stressed root zone at  $-0.4$  MPa

图 2 不同胁迫时长下玉米各根区根系导水率随局部复水时间的动态变化

Fig. 2 Root hydraulic conductance of different supply sides at different previous stress time

表 1 胁迫时长对局部复水根系导水率相对值的影响

Table 1 Effect of previous stress duration on relative  $L_p$  of each sub-root under water resupply

局部复水 时间/d Partial resupply time	对照		胁迫 0 d		胁迫 1 d		胁迫 3 d		胁迫 6 d	
	Control		Previous stress time 0 d		Previous stress time 1 d		Previous stress time 3 d		Previous stress time 6 d	
	供水侧 Supply side	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	
0	1 a	0.984 a	1.023 a	0.262 b	0.250 b	0.134 c	0.137 c	0.064 d	0.063 d	
0.25	1 a	0.973 a	0.958 a	0.254 b	0.174 c	0.162 c	0.137 cd	0.087 de	0.060 e	
0.5	1 a	1.069 a	0.523 b	0.278 c	0.255 cd	0.145 cd	0.136 cd	0.093 cd	0.059 d	
1	1 a	1.044 a	0.418 b	0.300 c	0.236 d	0.128 e	0.116 e	0.070 e	0.043 e	
3	1 b	1.142 a	0.289 c	0.235 d	0.213 d	0.132 e	0.102 f	0.067 g	0.045 g	
5	1 a	0.775 b	0.200 d	0.271 c	0.179 d	0.117 de	0.075 e	0.074 e	0.040 e	
7	1 a	0.765 b	0.179 cd	0.225 c	0.149 de	0.130 de	0.061 fg	0.110 ef	0.040 g	
9	1 a	0.760 b	0.180 d	0.302 c	0.129 d	0.155 d	0.067 e	0.132 d	0.044 e	

注:同行数据后不同字母表示各处理不同根区间差异显著( $P < 0.05$ )。表 2 同。

Note: Different letters in same line mean significant difference ( $P < 0.05$ ). The same as Table 2.

由表 1 还可以看出,持续胁迫侧  $L_p$  表现为:局部复水 0.25 d 时,胁迫 0 d 与 CK 差异不显著,而胁迫 1, 3, 6 d 较 CK 显著减小,减小幅度分别为 82.6%, 86.3%, 94%;局部复水 9 d 时,4 个处理较 CK 减小幅度分别为 82%, 87.1%, 93.3%, 95.6%。可见,随局部胁迫时间的延长,胁迫 0 d 胁迫侧根系导水率较 CK 的减小幅度显著增大,而胁迫 1, 3, 6 d 的减小幅度缓慢增大,甚至有维持稳定的趋势。各

处理之间,胁迫 0 d 持续胁迫侧的  $L_p$  在局部复水 0~3 d 内持续显著大于胁迫 1 d,局部复水 5 d 后二者无显著差异;胁迫 1 d 时  $L_p$  在局部复水 0.5 d 后明显大于胁迫 3 d;而胁迫 3, 6 d 在局部复水 0.5 d 后差距消失。表明在前期正常供应条件下,对局部根系进行亏水胁迫可使其胁迫区根系导水率显著降低;而前期胁迫条件下,即使局部恢复供应,持续胁迫侧根系导水率仍持续下降,且始终较 CK 大幅度

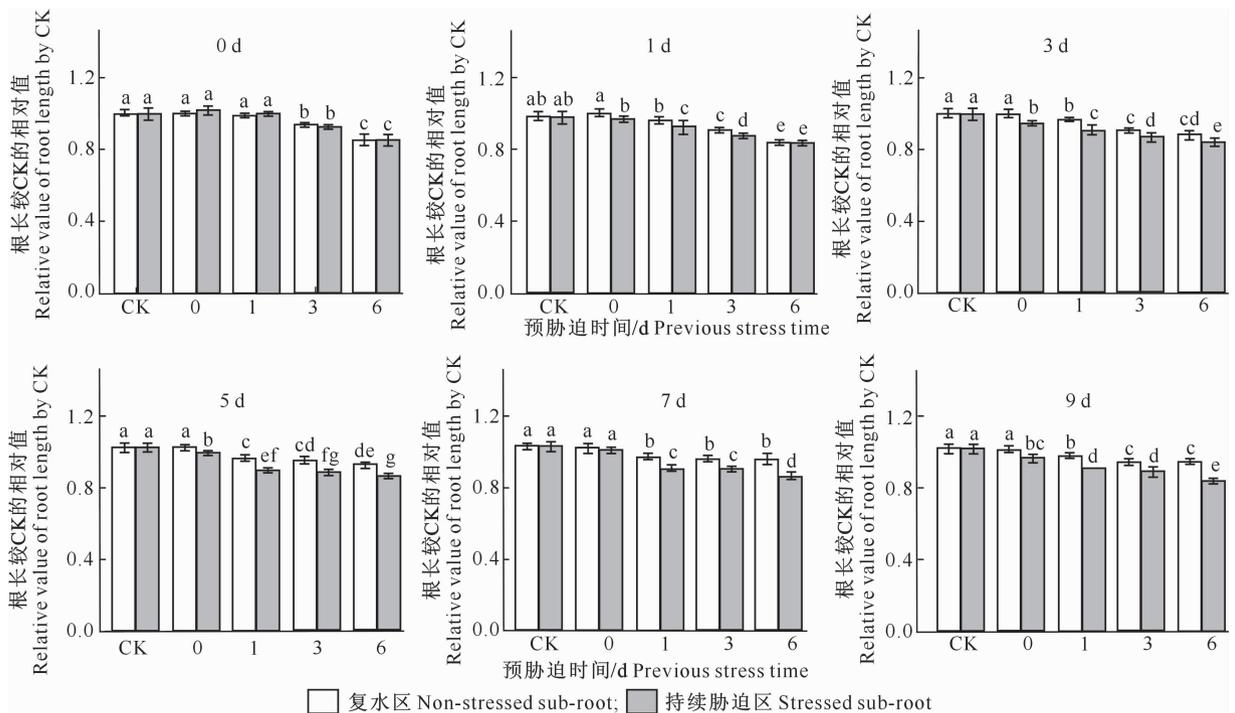
降低,且其降低幅度随胁迫时长增大到一定程度时不再持续增加,其影响也随胁迫时长推移趋于稳定。

各处理两个 1/2 根区之间  $L_p$  分别在局部复水 0.5, 1, 3, 7 d 时表现出显著性差异(表 1):复水侧较持续胁迫侧显著增大。进一步表明胁迫时长对局部复水后根系导水率的恢复有明显影响,胁迫时长越短,复水侧根系导水率恢复速度越快。

### 2.3 胁迫时长对局部复水后玉米各根区根系形态特征的影响

从图 3 和图 4 可以看出,胁迫时间为 0 d 时,随局部供应时间延长,复水侧根长( $L_R$ )、根面积( $A_R$ )相对值始终接近“1.0”,与 CK 无显著差异;其持续胁迫区  $L_R$  随着局部胁迫时间延长相对值偶有降低,而  $A_R$  较 CK 有增加趋势,但差异不明显。胁迫

1, 3, 6 d 条件下,在局部复水 0 d 时,各处理两个 1/2 根区  $L_R$  和  $A_R$  相对值均无明显差异;随着局部复水时间延长,持续胁迫侧  $L_R$ 、 $A_R$  相对值较复水侧降低幅度增大,且二者的  $L_R$  和  $A_R$  都低于 CK,规律与根系导水率类似。表明一定时间胁迫后局部复水不能使各根区根长与根面积得到完全恢复,且使持续胁迫区继续减小。前期正常供应时,局部供水对供应侧根系生长无显著影响,对胁迫侧的影响也远小于前期胁迫供应处理。局部复水 0 d 时,胁迫 0, 1, 3, 6 d 的 4 个处理根系的  $L_R$  均值较 CK 分别下降 0.4%, 1.1%, 7.1%, 14.8%,  $A_R$  均值较 CK 分别下降 0.1%, 2.22%, 16.84%, 21.21%, 且胁迫 0, 1 d 与 CK 无明显差异。可见,延长水分胁迫时间可明显抑制根系生长。



图柱上不同字母表示各处理不同根区间差异显著( $P < 0.05$ )。图 4 同  
Different letters mean significant difference( $P < 0.05$ ). The same as Fig. 4

图 3 胁迫时长对局部复水后玉米各根区根长相对值的影响

Fig. 3 Effect of previous stress duration on relative root length under water resupply to partial root system

由图 3 还可以看出,复水侧  $L_R$  表现为:在局部复水 1 d 时,胁迫 0 d 与 CK 无明显差异;胁迫 1, 3, 6 d 均显著小于 CK 和胁迫 0 d, 分别较 CK 减小 1.4%, 7.1%, 14.8%。局部复水 3, 5, 7, 9 d 时,与局部复水 1 d 表现出相似的规律。但胁迫 1, 3, 6 d 之间差异性的变化因局部复水时间而异:局部复水 3~9 d 时,胁迫 3 d 和 6 d 之间差异始终不显著;局部复水 3 d 和 9 d 时,胁迫 1 d 显著大于胁迫 3 d 和

6 d;局部复水 5 d 时,胁迫 1 d 显著大于胁迫 6 d,但与胁迫 3 d 无明显差异;局部复水 7 d 时,3 个处理之间差异不显著。可见,前期胁迫 1, 3, 6 d 后局部复水条件下,复水侧根长始终无法恢复到 CK 水平。持续胁迫侧  $L_R$  表现为:局部复水 1, 3, 5, 7, 9 d 时,胁迫 0, 1, 3, 6 d 较 CK 明显减小,1 d 时较 CK 减小幅度分别为 1.8%, 5.8%, 10.9%, 15.2%;9 d 时分别为 4.3%, 10.5%, 12.7%, 17.7%, 降低幅度随局

部复水时长增加而增大。可见,延长胁迫时间以及 局部复水时间均抑制持续胁迫侧根长的增长。

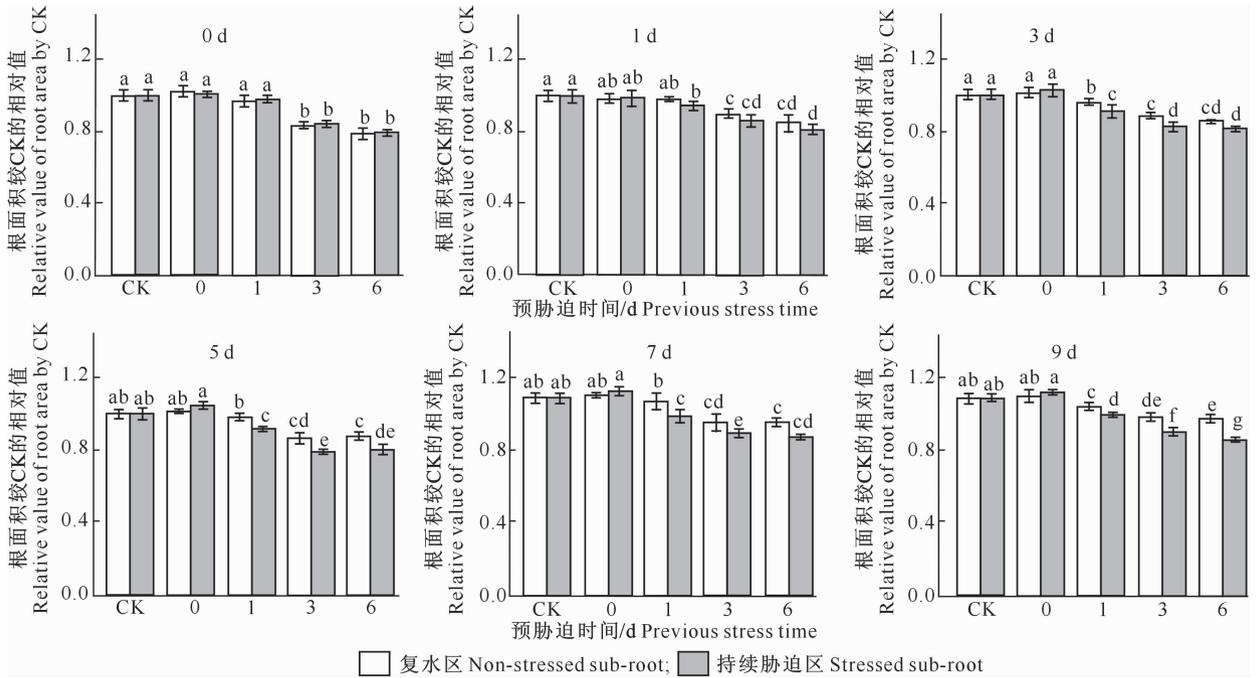


图 4 胁迫时长对局部复水后玉米根面积相对值的影响

Fig. 4 Effect of previous stress duration on relative root area under water resupply to partial root system

由图 4 可以看出,复水侧  $A_R$  表现为:胁迫 3 d, 6 d 的  $A_R$  随复水时间延长而增加,两处理之间始终差异不显著,但均显著小于其他处理。胁迫 1 与 0 d 和 CK 之间的差异因局部复水时间变化而异,胁迫 1 d,在局部复水 7 d 后显著小于 0 d 和 CK。在局部复水 5 d 时,胁迫 3 和 6 d 的  $A_R$  较 CK 显著减小,减小幅度为 13.51% 和 12.56%;局部复水 9 d 时,胁迫 1, 3 和 6 d 显著小于 CK,减小幅度分别为 1.31%, 9.04%, 10.22%。可见,复水侧  $A_R$  (除胁迫 0 d 外)与  $L_R$  相似,均不能恢复到 CK 水平。持续胁迫侧  $A_R$  表现为:胁迫 1 d,在局部复水 3 d 后显著小于胁迫 0 d 和 CK。在处理时间内,胁迫 3, 6 d 始终小于胁迫 0 d, 1 d 和 CK 处理,且在局部复水 7 d 后胁迫 3 d 显著大于 6 d。在局部复水 1 d 时,胁迫 1, 3 和 6 d 的  $A_R$  较 CK 分别减小 5.96%, 14.44%, 19.01%;局部复水 5 d 时,  $A_R$  较 CK 分别减小 8.3%, 20.43%, 19.1%;局部复水 9 d 时,  $A_R$  较 CK 分别减小 7.94%, 16.3%, 20.89%, 即胁迫 1 和 3 d 的  $A_R$  降幅表现出先增加(1~5 d)后减小(5~9 d)的趋势,胁迫 6 d 的  $A_R$  降幅逐渐增大。可见,胁迫 1, 3 d 后局部复水会使胁迫侧根系生长得到一定程度的恢复,而胁迫 6 d 则持续抑制胁迫侧根系生长。

从根长相对值(图 3)来看,胁迫 0, 1 和 3 d 时,局部复水 1 d 后复水区  $L_R$  显著大于胁迫区,且两个根区均表现为胁迫 3 d < 1 d < 0 d;胁迫 6 d 时,在局

部复水 3 d 后两个 1/2 根区  $L_R$  表现出显著性差异。从根面积相对值(图 4)来看,胁迫 1, 3, 6 d 时,复水区  $A_R$  在局部复水 3, 5 d 后显著大于胁迫区。进一步表明胁迫时间对后期根系生长的恢复有明显影响,胁迫时间越短,复水侧根系生长恢复越快。

## 2.4 胁迫时长对局部复水玉米干物质累积和分配的影响

### 2.4.1 根系干物质质量

由表 2 可以看出,局部复水 0 d 时,胁迫 0, 1, 3 和 6 d 的玉米根干物质质量较 CK 分别下降 1.20%, 16.08%, 27.52%, 36.54%, 且胁迫 0 d 与 CK 间无显著差异,4 个胁迫时长间差异显著。局部复水后,复水侧根干物质质量表现为:胁迫 0 d 时,根干物质质量在局部复水 9 d 时较 CK 显著增大 8.30%;胁迫 1 和 3 d 时,根干物质质量较 CK 明显减小,但减小幅度随局部复水时间延长逐渐减小,在局部复水 0.25 d 时,减小幅度分别为 15.89% 和 25.51%;9 d 时分别为 7.12% 和 15.98%;胁迫 6 d 时根干物质质量始终显著小于 CK,且减小幅度随局部复水时间延长而缓慢增大,0.25 d 时减小幅度为 31.43%, 9 d 时减小幅度为 41.95%。可见,胁迫时间越长,复水侧根干物质质量的恢复越慢,甚至在胁迫 6 d 条件下,明显影响复水侧根系生长。持续胁迫侧表现为,胁迫 0 d 时,根干物质质量在局部胁迫 3 d 后显著小于 CK;胁迫 1, 3 和 6 d 时,根干物质质量始终显著小于 CK,且胁迫 3 d 显著大于 6 d(局部复水 1

d 时除外)。其他处理之间的差异随着复水时间而变化,局部复水 0~0.5 d 内,4 个处理间差异显著,在局部复水 0.25 d 时,较 CK 降低幅度分别为 4.10%,13.15%,30.16%,38.55%,根系干物质随胁迫时间延长而降低,局部复水 9 d 时,降幅分别为 17.90%,30.27%,32.32%,42.24%,各处理较 CK 的降幅均随局部复水时间延长而增大。

综上所述,胁迫时长对复水侧根干物质质量的恢

表 2 胁迫时长对局部复水时玉米根干物质质量相对值的影响

Table 2 Effect of previous stress duration on relative root dry weight under water resupply to partial root system

局部复水时间/d Partial resupply time	CK	胁迫 0 d		胁迫 1 d		胁迫 3 d		胁迫 6 d	
	供水侧 Supply side	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed	复水侧 Non-stressed	胁迫侧 Stressed
0	1 a	0.988 a	1.034 a	0.839 2 b	0.819 1 b	0.724 8 c	0.716 3 c	0.6346 d	0.600 6 d
0.25	1 a	0.991 a	0.980 a	0.841 1 b	0.868 5 b	0.744 9 c	0.698 4 cd	0.655 7 de	0.614 5 e
0.5	1 a	0.993 a	1.021 a	0.840 5 b	0.879 0 b	0.792 3 c	0.748 2 c	0.638 3 d	0.609 6 d
1	1 a	1.008 a	1.011 a	0.859 9 b	0.779 3 cd	0.779 5 c	0.732 9 cd	0.739 5 cd	0.661 3 d
3	1 a	0.985 a	0.959 ab	0.877 2 b	0.756 7 b	0.791 4 c	0.700 5 d	0.655 5 de	0.583 7 e
5	1 a	0.997 a	0.823 b	0.890 1 b	0.754 4 c	0.839 2 b	0.695 5 c	0.633 8 cd	0.548 8 d
7	1 a	1.012 a	0.861 b	0.891 1 b	0.708 0 d	0.831 2 c	0.697 5 e	0.578 5 f	0.486 9 g
9	1 b	1.083 a	0.821 c	0.928 8 b	0.697 3 d	0.840 2 c	0.676 8 d	0.580 5 e	0.477 6 f

2.4.2 地上部干物质质量 从图 5 可以看出,局部复水 0 d 时,地上部干物质质量较 CK 分别下降 1.6%,4.8%,19.8%,31.9%。胁迫 0 d 时,地上部干物质质量在局部供水 3 d 后显著小于 CK,随着局部供水时间延长,其较前一时间点的降幅减缓,3~5 d 时降幅为 8.03%,7~9 d 时降幅为 4.75%。胁迫 1,3,6 d 的地上部干物质质量在局部复水 1 d 后差异显著,在局部复水 0~5 d 内降幅均明显增大,局部复水 0~1 d 内,分别下降 10.19%,7.73%,2.58%;3~5 d 达到最大降幅,分别下降到 12.16%,17.97%,13.23%;5 d 后降幅明显减小,5~9 d 变化不大。可见,前期正常供应条件下,局部亏水可在一定时间

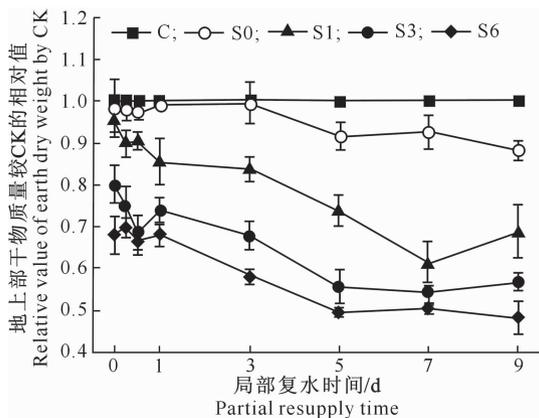


图 5 胁迫时长对局部复水时玉米地上部分干物质质量的影响  
Fig. 5 Effect of previous stress duration on dry matter quantity under water resupply to partial root system

复起到抑制作用,且胁迫后局部复水后,对复水侧根干物质质量的影响明显大于持续胁迫侧,与对根系导水率的影响类似。

从表 2 还可以看出,胁迫 1,3 和 6 d 时,分别在局部复水 1,3,7 d 后,两个 1/2 根区出现显著性差异。表明,前期胁迫时长越短,处理内各 1/2 根区出现差异越早。

内维持地上部干物质质量不受影响,但继续亏水会使其明显降低。前期水分胁迫条件下,局部复水可使地上部干物质质量下降的速度先增加后明显减小,致使地上部干物质质量的相对值维持在一个稳定水平,但各处理间始终存在显著性差异,地上部干物质质量随胁迫时长的增大而减小。表明遭受-0.4 MPa 胁迫 1~6 d 的玉米幼苗经局部根系复水后,地上部干物质质量不能完全恢复,且胁迫时间越长,恢复程度越低,但延长局部复水的时间可延缓其下降速度。

2.4.3 根冠比 植物对缺水的生长反应还表现在根冠比的变化上,胁迫时长对局部复水时玉米根冠比的影响见图 6。

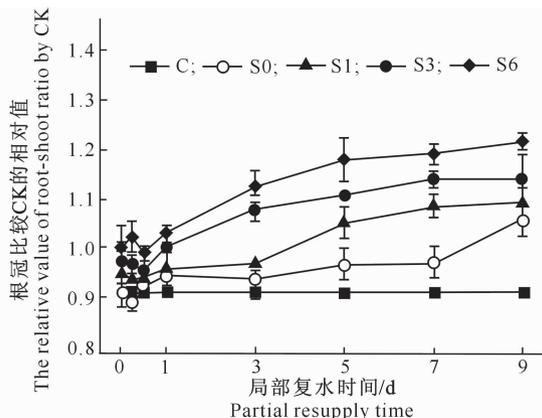


图 6 胁迫时长对局部复水时玉米根冠比的影响  
Fig. 6 Effect of previous stress duration on root-shoot ratio under water resupply to partial root system

从图 6 可以看出,胁迫结束(即局部复水 0 h)时,除胁迫 0 d 处理与 CK 持平外,胁迫 1, 3, 6 d 的根冠比相对值分别增加 2.8%, 4.8%, 7%, 说明水分胁迫抑制了地上部分的相对干物质质量,增加了根系的相对干物质质量,从而使根冠比升高,且胁迫历时越长,根冠比越大。局部复水后,根冠比仍表现为上升趋势,局部复水 3 d 时,4 个处理的玉米根冠比分别较 CK 增大 2.1%, 4.5%, 13.7%, 17.3%;局部复水 9 d 时,4 个处理的玉米根冠比较 CK 增大 11.9%, 14.7%, 18.5%, 24.8%。胁迫 0 d 时,玉米根冠比随局部胁迫时间延长逐渐增大,局部复水 7 d 后显著大于 CK;胁迫 1 d 的玉米根冠比在局部复水 3 d 后显著大于胁迫 0 d 和 CK 处理,局部复水 5 d 后增幅减缓;胁迫 3 d 和 6 d 的玉米根冠比始终无显著性差异,局部复水 1 d 后显著大于胁迫 0, 1 d 和 CK 处理,分别在局部复水 7 和 5 d 后增幅减缓。说明局部胁迫会使玉米干物质向根系的分配增多,胁迫后局部复水会得到一定程度的缓解,同化物向冠部相对转移,进而影响根冠比的分配比例,其缓解程度与胁迫时间有关。

### 3 讨论

前人研究表明,胁迫后复水时植株生长的恢复与胁迫程度和胁迫持续时间相关,水分或养分胁迫后恢复供应,根系吸收能力也较恢复供应前明显增大<sup>[16-17]</sup>。程汉亭<sup>[6]</sup>研究发现,在用 PEG 6000 模拟干旱胁迫条件下,轻度(-0.4 MPa)胁迫能够促进玉米侧根的发生;中、重度(-0.8 MPa 和 -1.2 MPa)胁迫抑制了侧根的发生;复水激发了不同程度干旱胁迫下侧根的发生和延伸,其中在轻、中度干旱胁迫复水后促进玉米侧根发育最为显著,而且胁迫时间越短,复水后促进玉米侧根发生越显著。杨贵羽等<sup>[18]</sup>比较不同胁迫程度和胁迫持续时间处理的复水响应发现,根系对复水的响应随前期胁迫程度的增大而推迟,随胁迫时间的延长,激发性补偿生长减小。本试验通过-0.4 MPa 胁迫后局部复水的研究发现,叶片相对含水量表现为:胁迫 1 d 处理在局部复水 3 d 时恢复到 CK 水平;胁迫 3, 6 d 则在局部复水 7~9 d 时接近 CK 水平。根系指标指出,胁迫 0, 1, 3, 6 d 的 4 个处理间两个 1/2 根区根系导水率和根长分别在局部复水 0.5, 1, 3 和 7 d 及 1, 1, 1 和 3 d 时表现出显著性差异;胁迫 1, 3, 6 d 的复水侧玉米根面积和根干物质质量相对值分别在局部复水 3, 3, 5 d 和 1, 3, 7 d 时显著大于胁迫侧。胁迫后局部

复水时,复水侧根系吸水及生长活动开始明显增大,各根区出现差异的时间随胁迫时长增大而延迟,根系吸水恢复的程度也随之降低,而胁迫侧则持续受到抑制。这与前人关于均匀供水的研究结果有相似之处,胁迫期间根系吸水能力虽受到抑制,但复水能重新激发根系活性<sup>[19]</sup>,随着复水时间的推移,诱发出大量的新侧根和根毛,代谢功能增强,补偿或部分补偿了干旱胁迫造成的危害<sup>[20]</sup>,这些结果在一定程度上解释了不同胁迫时长后复水对作物根系吸水恢复存在的差异。其内部的生理机制有待进一步试验研究。

前人对于干旱胁迫的研究表明,旱长根水长冠<sup>[21]</sup>。在干旱情况下,常常会使根系大量生长以有效抵御干旱胁迫<sup>[22]</sup>,降低叶冠发育,增加干物质分配到根系的比例<sup>[23-25]</sup>,使根冠比增大。本研究在旱后局部复水发现,-0.4 MPa 胁迫结束时,除胁迫 0 d 处理与 CK 持平外,胁迫 1, 3, 6 d 的根冠比较 CK 分别增加 2.8%, 4.8%, 7%;局部复水后,各处理根冠比仍不断增大,各处理出现显著差异的时间分别为局部复水后 7, 3, 1 和 1 d,随着局部复水时间延长根冠比增加趋势减缓(除胁迫 0 d 外),这与前人研究相似,水分胁迫不仅降低了干物质生产总量,而且还促使有限同化产物向根系分配,根冠比(R/S)增大,胁迫后复水,根、冠生长发育可部分得到恢复<sup>[26]</sup>。可见,减少水分供应对根冠比的影响,并不是单方向的促进作用,这可能与水分供应状况有关。前期水分胁迫导致根冠比增加的原因在于:胁迫阶段,水分的减少,使根系到处延伸,追逐水源,根冠竞争碳水化合物<sup>[27]</sup>,而为了避免水分胁迫,土壤中有限的水分优先保证了根系的生长发育,使同化物向根系分配较多,因此冠层在此时受害程度重于地下部分<sup>[23]</sup>,使得根冠比增大;随着玉米生育进程的推进,尽管局部恢复供水,但玉米幼苗尚有一半的根系处于干旱胁迫状态,植物为了获得更多水源而使地上部向根部运输的同化物增加,使植株将有限的同化物分配到可吸收最多水分的地方,缓减植株由于缺水造成的损失,使根冠比持续增大<sup>[28]</sup>,同时由于玉米局部恢复供应水分,根系受到的胁迫程度相对减小,同化物也会向冠层相对转移,所以其根冠比增加幅度逐渐减缓,根冠分配比例也得到一定缓解。植物在遇到水分逆境时,能自动调整根部与冠部的生长速率,使根冠比发生变化,借以维持植物体的水分平衡与个体生长<sup>[29]</sup>。可见,根系可以通过自身形态和生理生化特征的调整来适应变化后的水分环

境<sup>[30]</sup>。进一步说明了根系和冠层构成相互依赖、相互制约的有机整体。在环境变化时,二者在其追求整体结构功能动态平衡的过程中,根系、冠层间出现了此消彼长的不同响应关系,不同生育期的作用关系随着土壤含水量及生育进程的变化而改变<sup>[31]</sup>。本研究是对玉米幼苗进行的营养液培养试验,是模拟干旱胁迫试验。田间条件下,由于土层深厚,土壤往往有一定的蓄水量,而且作物根系延伸范围深且广。因此,田间条件下,局部灌水前作物供水情况可能产生的影响会不同,这有待进一步深入研究。

## 4 结 论

(1) -0.4 MPa 水分均匀胁迫 0, 1, 3, 6 d 后局部复水可使叶片水分状况恢复,只是前期影响不同,后期恢复速度也不同。

(2) 地上部干物质与叶片水分状况不同,干物质累积不能恢复:随着局部复水时间的延续,一段时间内持续下降,但最终可以使其基本稳定在(5 d 后)某个水平,而不是持续下降。不同胁迫时间的差异在于,最终稳定的干物质量不同。

(3) 水分胁迫使根冠比增大,胁迫时间越长根冠比越大。局部复水后,胁迫 0 d,根冠比一直持续增加,其他各处理根冠比增幅随局部复水时间延长而减缓。

(4) 胁迫时间对后期根系的恢复有明显影响,胁迫时间越短,复水侧根系导水率、根长、根面积恢复速度越快,且胁迫时长对复水侧的影响远大于持续胁迫侧,复水侧根系各指标开始明显增长和各根区出现差异的时间随胁迫时长增大而延迟。

## [参考文献]

- [1] 梁宗锁,康绍忠,胡 炜. 控制性分根交替灌水的节水效应[J]. 农业工程学报,1997,13(4):63-68.  
Liang Z S, Kang S Z, Hu W. Effect of controlled roots-divided alternative irrigation on water use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 63-68.
- [2] 梁继华,李伏生,唐 梅,等. 分根区交替灌溉对盆栽甜玉米水分及氮素利用的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(10):68-72.  
Liang J H, Li F S, Tang M, et al. Effects of alternate partial root-zone irrigation on water and nitrogen utilization of pot-grown sweet corn [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10):68-72.
- [3] 杜太生,康绍忠,张建华. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应[J]. 中国农业科学,2007,40(11):2546-2555.  
Du T S, Kang S Z, Zhang J H. Response of cotton growth and

- water use to different partial root zone irrigation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2546-2555.
- [4] 黄春燕,李伏生,覃秋兰,等. 两种施肥水平下根区局部灌溉对甜玉米水分利用的效应[J]. 节水灌溉,2004,8(6):8-11.  
Huang C Y, Li F S, Tan Q L, et al. Effect of partial root-zone irrigation on the growth and water use of sweet corn under two fertilization level [J]. Water Saving Irrigation, 2004, 8(6): 8-11.
- [5] 牛晓丽,胡田田,刘亭亭,等. 适度局部水分胁迫提高玉米根系吸水能力[J]. 农业工程学报,2014,30(22):80-86.  
Niu X L, Hu T T, Liu T T, et al. Appropriate partial water stress improving maize root absorbing capacity [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 80-86.
- [6] 程汉亭. 干旱-复水条件下玉米侧根发育的可塑性及其调控机制[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.  
Cheng H T. The lateral root developmental plasticity and regulation mechanism by re-watering after draught stress [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009.
- [7] 苏 珮,山 仑. 拔节期复水对玉米苗期受旱胁迫的补偿效应[J]. 植物生理学通讯,1995,31(5):341-344.  
Su P, Shan L. Compensatory effects of water-recovery during jointing stage on maize threatened by water stress at seedling period [J]. Plant Physiology Communications, 1995, 31(5): 341-344.
- [8] 陈晓远,高志红,罗远培,等. 水分胁迫效应对冬小麦生长发育的影响研究[J]. 华北农学报,2004,19(3):43-46.  
Chen X Y, Gao Z H, Luo Y P, et al. Research on water stress effects on growth and development of winter wheat [J]. Acta Agricultural Boreali-Sinica, 2004, 19(3): 43-46.
- [9] 郭相平,王 琴,刘展鹏,等. 旱后复水对玉米后继新生叶片生理特性的影响[J]. 农业科学研究,2006,27(2):20-22.  
Guo X P, Wang Q, Liu Z P, et al. Effect of water recovery on physiological characteristics of newly-growing leaves of maize during and after stress period [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2006, 27(2): 20-22.
- [10] 郝树荣,郭相平,王为木,等. 胁迫后复水对水稻叶面积的补偿效应[J]. 灌溉排水学报,2005,24(4):19-21.  
Hao S R, Guo X P, Wang W M, et al. The compensation effect of rewatering in subjecting to water stress on leaf area of rice [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 19-21.
- [11] Acevedo E, Hsiao T, Henderson D. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status [J]. Plant Physiol, 1971, 48: 631-633.
- [12] Xu X, Bland W L. Resumption of water uptake by sorghum after water stress [J]. Agronomy, 1993, 85: 697-702.
- [13] 胡田田,康绍忠. 局部灌水方式对玉米不同根区土-根系统水分传导的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(2):11-16.  
Hu T T, Kang S Z. Effects of localized irrigation model on hydraulic conductivity in soil-root system for different root-zones of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 11-16.
- [14] 康绍忠,张建华. 不同土壤水分与温度条件下土根系统中水分传导的变化及其相对重要性[J]. 农业工程学报,1997,13(2):76-81.  
Kang S Z, Zhang J H. Hydraulic conductivities in soil-root

- system and relative importance at different soil water potential and temperature [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(2):76-81.
- [15] 王纪华,赵春江,黄文江,等. 土壤水分对小麦叶片含水量及生理功能的影响 [J]. 麦类作物学报, 2001, 21(4):42-47.  
Wang J H, Zhao C J, Huang W J, et al. Effect of soil water content on the wheat leaf water content and the physiological function [J]. Journal of Triticeae Crops, 2001, 21(4):42-47.
- [16] 牛晓丽,胡田田,张富仓,等. 局部恢复水氮供应对玉米根系氮素吸收与分配的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(14):2737-2750.  
Niu X L, Hu T T, Zhang F C, et al. Effects of partial water and nitrogen resupplies on maize root nitrogen absorbing capacity and distribution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14):2737-2750.
- [17] Siemens J A, Zwiazek J J. Effects of water deficit stress and recovery on the root water relations of trembling aspen (*Populus tremuloides*) seedlings [J]. Plant Science, 2003, 165(1):113-120.
- [18] 杨贵羽,罗远培,李保国,等. 水分胁迫持续时间对冬小麦根冠生物量累积的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4):95-98.  
Yang G Y, Luo Y P, Li B G, et al. The effect of sustaining time of watering stress on root and shoot weight accumulation in winter wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(4):95-98.
- [19] 刘晓英, 罗远培. 水分胁迫后复水冬小麦根系吸水的恢复 [J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4):17-20.  
Liu X Y, Luo Y P. Recovery of root water uptake of winter wheat after water stress [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(4):17-20.
- [20] 梁爱华,马富裕,梁宗锁,等. 旱后复水激发玉米根系功能补偿效应的生理学机制研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(4):59-63.  
Liang A H, Ma F Y, Liang Z S, et al. studies on the physiological mechanism of functional compensation effect in maize root system induced by re-watering after draught stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2008, 36(4):59-63.
- [21] 刘水,李伏生,韦翔华,等. 分根区交替灌溉对玉米水分利用和土壤微生物量碳的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):71-77.  
Liu S, Li F S, Wei X H, et al. Effects of alternate partial root-zone irrigation on maize water use and soil microbial biomass carbon [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8):71-77.
- [22] 王晓凌,董普辉. 根冠生长不均衡对玉米苗期旱后复水补偿性生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2):654-656.  
Wang X L, Dong P H. Effect of uneven growth of root and shoot of maize on its compensatory growth after re-watering after drought [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(2):654-656.
- [23] 轩春香,牛俊义,张红萍,等. 水分胁迫对豌豆根系生长及产量的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(5):45-49.  
Xuan C X, Niu J Y, Zhang H P, et al. Effect of water stress on the growth of pea root system and yield [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2008, 43(5):45-49.
- [24] 袁佐清. 水分胁迫对玉米萌芽期和苗期生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(20):6036-6037.  
Yuan Z Q. Effect of water stress on growth of maize in germination and seedling stages [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(20):6036-6037.
- [25] Passioura J B. Roots and drought resistance [J]. Agricultural Water Management, 1983, 7(1/2/3):265-280.
- [26] 冯广龙,罗远培,刘建利,等. 不同水分条件下冬小麦根与冠生长及功能间的动态消长关系 [J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2):76-82.  
Feng G L, Luo Y P, Liu J L, et al. Dynamic relationship of function and growth between winter wheat root and shoot under different soil water conditions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(2):76-82.
- [27] 杨鑫光,傅华,张洪荣,等. 水分胁迫对霸王苗期叶水势和生物量的影响 [J]. 草业学报, 2006, 15(2):37-41.  
Yang X G, Fu H, Zhang H R, et al. Effect of soil water stress on leaf water potential and biomass of *Zygophyllum xanthoxylum* during seedling stage [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(2):37-41.
- [28] 管建慧. 玉米根系生长发育特性及与地上部关系的研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2007.  
Guan J H. Study on characteristics of root system growth and relationship between root and upland parts of maize [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007.
- [29] 王沙生,高荣孚,吴贯明. 植物生理学 [M]. 北京:中国林业出版社, 1991:363-366.  
Wang S S, Gao R F, Wu G M. Plant physiology [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1991:363-366.
- [30] 赵伟洁,李翠,周达,等. 水分胁迫后复水对糜子根冠功能的补偿效应 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(1):45-52.  
Zhao W J, Li C, Zhou D, et al. Compensation effects of re-watering on root and shoot function of broomcorn millet after stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2016, 44(1):45-52.
- [31] 杨贵羽,罗远培,李保国,等. 不同土壤水分处理对冬小麦根冠生长的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3):104-109.  
Yang G Y, Luo Y P, Li B G, et al. Effect of different soil water conditions on growth of root and shoot of winter wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3):104-109.