

夏玉米苗期对不同时长干旱-复水的生理响应机制

肖 钢^{1,2}, 蔡焕杰^{1,2}, 沐 青^{1,2}, 赵 龙^{1,2}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究干旱-复水环境下夏玉米苗期的生理调节机制,采用桶栽的方式,设置 3 个水分处理:正常处理(CK):75%~85% θ_f (田间持水量),轻度胁迫(W_1):60%~70% θ_f ,中度胁迫(W_2):50%~60% θ_f ;设置 3 个胁迫时长,7 d(T_1)、10 d(T_2)、13 d(T_3);于胁迫与复水期间测定夏玉米苗期叶片的渗透调节物质、抗氧化酶及光合指标。结果表明:在轻度和中度胁迫下,脯氨酸(Pro)含量呈先增大后减小趋势,第 3 天达到峰值,相较于 CK 分别提高 32.7%、44.1%;复水后,胁迫 10 d 处理的 Pro 累积量高于胁迫 7 d 的处理,而胁迫 13 d 无明显累积效应。超氧化物歧化酶(SOD)活性在胁迫期间呈先增大后减小趋势,第 3 天达到峰值,相较于 CK 分别提高 22.0%、12.4%;复水后活性增强,且胁迫 13 d 处理的 SOD 活性高于胁迫 10 d 和胁迫 7 d 处理。过氧化物酶(POD)活性在轻度胁迫处理下呈先增大后减少趋势,在第 3 天达到峰值,相较于 CK 提高 28.5%,而在中度胁迫处理下 POD 活性呈减小趋势,且低于 CK;复水后酶活性均恢复至正常处理水平。丙二醛(MDA)含量在胁迫期间呈增高趋势,且胁迫时长越长,增幅越大,在胁迫 13 d 处理下,中度和轻度胁迫下的 MDA 含量相较于 CK 分别提高 140%和 281%;复水后胁迫缓解,所有处理组的 MDA 含量均恢复至正常处理水平。在轻度和中度胁迫下,夏玉米的净光合速率、气孔导度以及蒸腾速率分别为 CK 的 92.5%和 77.7%、93.9%和 74.3%、87.9%和 74.5%,光合作用受到限制;复水后,中度胁迫处理表现出光合补偿效应,光合指标值均高于其他处理。研究表明,持续 10 d 维持土壤 50%~60% θ_f 较利于夏玉米生长,其复水后出现显著的光合补偿效应。

关键词:夏玉米;苗期;干旱-复水处理;抗逆生理;光合

中图分类号:S513;Q945.78 **文献标志码:**A

Physiological response mechanism of summer maize seedlings to drought-rewatering of different durations

XIAO Gang^{1,2}, CAI Huanjie^{1,2}, MU Qing^{1,2}, ZHAO Long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering, Ministry of Education,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To investigate the physiological regulation mechanism of summer maize seedlings under drought-rewatering conditions, this experiment adopted a method of barrel planting by using three water stress treatments: normal treatment 75%~85% of θ_f (θ_f is field moisture capacity) (CK), mild (W_1) at 60%~70% of θ_f , moderate (W_2) at 50%~60% of θ_f , and three stress durations: 7 days (T_1), 10 days (T_2), and 13 days (T_3). Osmotic adjustment substances, antioxidant enzymes and photosynthetic indexes in leaves of summer maize seedlings during stress and rewatering were determined. The results showed that under mild and moderate stresses, the content of proline (Pro) showed a trend of increasing first and then decreasing. It peaked on the third day and increased by 32.7% and 44.1%, respectively, compared with the normal treatment. After rewatering, the cumulative amount of 10 day stress treatment was higher than that on 7 day stress treatment, but no significant cumulative effect on 13

day stress treatment. The activity of superoxide dismutase (SOD) increased first and then decreased during the stress period, and peaked on the third day, which increased by 22.0% and 12.4%, respectively, compared with the normal treatment. The activity was enhanced after rewatering, and the activity of 13 day stress treatment was higher than that of 10 day stress and 7 day stress. The activity of peroxidase (POD) increased first and then decreased under mild stress treatment, and peaked on the third day, which was 28.5% higher than that of normal treatment. But, under moderate stress treatment, POD activity showed a decreasing trend and was lower than normal treatment, and after rewatering, the enzyme activity returned to normal level. The content of malondialdehyde (MDA) increased during the stress period, and the longer the stress duration, the greater the increase was. Under the 13 day stress treatment, the MDA content under moderate and mild stresses increased by 140% and 281% compared with the normal treatment. After rewatering, the stress was relieved and the MDA content of all treatment groups returned to normal level. Under mild and moderate stresses, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of summer maize were 92.5% and 77.7%, 93.9% and 74.3%, 87.9% and 74.5% of normal treatment, respectively, and photosynthesis was restricted. After rewatering, the photosynthesis compensation effect appeared in the moderate stress treatment, and the photosynthesis indicators were higher than other treatments. This study indicated that maintaining soil water holding capacity of 50% to 60% in the field for 10 days was more suitable for the growth of the summer maize. After rewatering, it had a significant photosynthesis compensation effect.

Keywords: summer maize; seedling stage; drought-rewatering treatment; stress resistance physiology; photosynthesis

干旱是限制农业生产的主要非生物因素之一,提高作物抗旱性是实现农业增产的重要举措^[1]。近年来研究发现,干旱并非只对植物产生负面影响,一定程度的干旱胁迫能诱导对植物的生长发育以及后期产量的补偿效应,以弥补干旱胁迫期间作物遭受到的伤害和损失^[2]。玉米是三大栽培作物之一,在干旱半干旱地区,有限的水资源不足以达到夏玉米正常灌溉需求^[3-4]。而夏玉米苗期是适合进行水分调控的生育期之一^[5-6]。因此,研究干旱-复水对夏玉米苗期的生理调节机制对探索作物生理活动有着重要意义。渗透调节是植物适应干旱的关键过程,可以维持组织的代谢活动。脯氨酸的亲水性极强,能稳定原生质胶体及组织内的代谢过程^[7]。在干旱胁迫下,叶片和茎的脯氨酸含量明显增加,以维持细胞膨压,但随着胁迫时间的延长而有所下降^[8-9]。这种调节不是无限制的,在受胁迫程度大于一定范围时,植物组织的渗透调节能力下降^[10-11]。干旱胁迫下植物细胞积累的活性氧破坏细胞功能,对作物生长和产量造成负面影响^[12-13]。在正常条件下,植物细胞中产生的活性氧与其清除系统能够保持平衡,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)以及过氧化氢酶(CAT)等抗氧化保护酶在清除活性氧的过程中发挥重要的作用^[13-14]。而当环境胁迫长期作用于植株,产生的活性氧超出了活性氧清除系统的清除能力时,便引起活性氧累

积产生氧化伤害,从而使细胞功能失常^[15-16]。研究表明,丙二醛(MDA)含量在作物受到胁迫后会逐渐增大,且随着胁迫程度的加剧,丙二醛含量上升趋势更加明显^[17-18]。叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及胞间 CO₂ 浓度反映了植株的光合能力^[19-20]。研究表明,干旱胁迫在较短的时间里能够造成部分气孔的关闭,导致光合、蒸腾速率在胁迫初期就有了较大幅度的降低,随着胁迫时间的延长,干旱胁迫可能引起光合结构的异常,从而导致光合能力以及气体交换参数的持续下降^[21-22];复水后,作物的光合以及气体交换能力逐步恢复,而重度干旱胁迫将对作物光合能力产生不可逆影响^[23]。

本研究在夏玉米苗期进行不同时长和程度的干旱处理,以期进一步阐明夏玉米在苗期干旱-复水环境下的生理调控机制,探讨作物在干旱胁迫下光合、渗透调节以及抗氧化酶系统的动态变化过程,为实现农业生产高用水提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院农田水分转化试验场(108°04'E, 34°18'N)遮雨棚下进行。试验区为大陆性暖温带季风气候,海拔 506 m,多年平均温度 12.5℃,多年平均降水量 609 mm,多年平均蒸发量 1 500 mm,全年无霜期

210 d。2018 年夏玉米苗期内(7 月)最高气温与平均气温动态变化如图 1。

1.2 试验设计

供试玉米品种为吉祥 1 号,试验采用桶栽方式,土壤类型为中壤土,取自西北农林科技大学附近耕地 0~20 cm 土层。土壤砂粒(0.05~1.00 mm)、粉砂颗粒(0.05~0.005 mm)和粘粒(≤ 0.005 mm)分别占 23.0%、30.0%和 47.0%。1 m 土层内的田间持水量为 24%,土壤干容重为 $1.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验采用长 \times 宽 \times 深度=30 cm \times 30 cm \times 40 cm 的试验方桶,每桶种植 2 株玉米,于出苗后选取长势相同的定苗 1 株。为保证根部通气性良好,在桶底打 5 个直径为 1 cm 的小孔,铺 1 cm 的砂过滤层来保证透气性,为避免夏季桶内土壤温度过高,在桶四周包裹一层隔热膜;每桶装干土 52.10 kg,在土的最上层铺 1 cm 珍珠岩以减少水分蒸发。按 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施氮量、 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施磷量,换算出每桶施尿素 2.37 g,磷酸二铵 4.75 g。

本试验一共 7 个处理,每个处理有 5 个重复,于 2018 年 6 月 20 日播种,五叶期开始进行干旱-复水处理。水分处理分别为:轻度干旱胁迫(W_1):60%~70% θ_f (田间持水量);中度干旱胁迫(W_2):50%~60% θ_f ; W_1 和 W_2 处理各设 3 个胁迫时长处理,分别是 7 d(T_1),10 d(T_2),13 d(T_3),其余时间充分供水。以正常供水(75%~85% θ_f)作为对照(CK)。控水方法为称重法,每次在早上 8:00 进行灌水,具体灌水量见表 1,其中 CK 为总灌水量。分别在胁迫前、胁迫期间每 3 d 取 1 次叶片样品,在复水第 3 天、第 6 天取 1 次叶片样品进行测定。

1.3 测定指标与方法

叶片光合参数:选择气候稳定的晴天,于上午 10:00 进行观测,采用 Li-6400 便携式光合仪测定

光合参数,主要包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)。

胁迫生理指标:脯氨酸(Pro)含量使用磺基水杨酸法测定^[24];丙二醛(MDA)含量使用硫代巴比妥酸法测定^[25];超氧化物歧化酶(SOD)活性使用 NBT 光还原法测定^[26];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定^[27]。

采用 SPSS 22、Microsoft Excel 2007 和 DPS 7.05 进行数据处理分析,并且采用 Origin 85 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫-复水对夏玉米 Pro 含量的影响

如图 2 所示,相较于 CK 处理,所有干旱处理组叶片中 Pro 含量均增高,在胁迫第 3 天达到峰值, W_1 和 W_2 相较于 CK 分别提高 32.7%和 44.1%,且差异显著。随着胁迫时长增加胁迫的程度加剧,Pro 含量逐渐减少,均在胁迫周期结束降低至 CK 水平。复水后,胁迫 7 d 和胁迫 10 d 的处理更有利于夏玉米 Pro 的累积, T_1 处理组在复水后呈先增后减趋势,第 3 天累积含量最高; T_2 处理组在复水后呈增长趋势,第 6 天累积量最高;而 T_3 处理组在复水后的累积量无明显变化。说明 10 d 胁迫时长更有利于刺激复水后的夏玉米提高渗透调节能力。

2.2 干旱胁迫-复水对夏玉米 SOD 和 POD 活性的影响

SOD 是作物抗氧化系统抵御伤害的第一道防线,将胁迫产生的超氧阴离子反应生成 O_2 和 H_2O_2 。如图 3 所示,胁迫期间,所有处理的 SOD 活性均呈先增后减趋势,在胁迫 3 d 达到峰值, W_1 和 W_2 相较于 CK 分别提高 22.0%、12.4%,且差异显著。随着胁迫时长增加,胁迫程度加剧, T_1 处理组在第 7 天 SOD 活性降为最小值; T_2 处理组在第 10 天 SOD 活性降为最小值;而 T_3 处理组在第 10 天 SOD 活性最小,到胁迫 13 d 便开始回升。复水后,SOD 活性回升, T_1 处理组在第 6 天恢复至 CK 处理的活性水平; T_2 处理组在第 6 天 W_1 和 W_2 的 SOD 活性分别是 CK 处理的 1.21 倍和 1.62 倍; T_3 处理组在复水 3 d 活

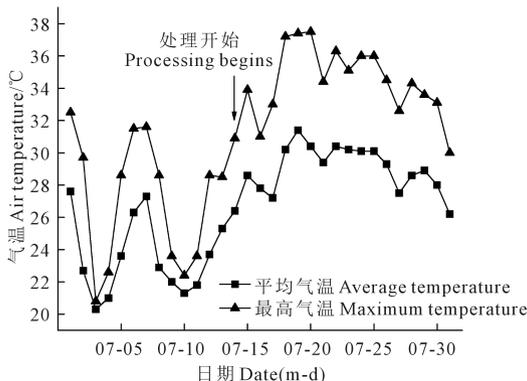


图 1 2018 年 7 月夏玉米苗期最高气温与平均气温变化

Fig.1 Variation of maximum temperature and average temperature in summer maize seedling in July 2018

表 1 夏玉米苗期灌水量统计表/kg

Table 1 Statistics of irrigation amount in summer maize seedling stage

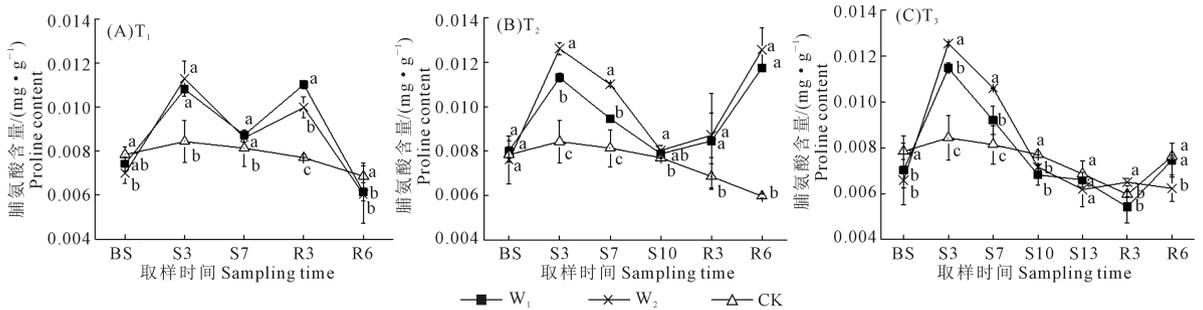
处理 Treatment	T_1	T_2	T_3
W_1	23.08	24.23	24.25
W_2	22.87	23.33	21.86
CK		24.83	

性最高, W_1 和 W_2 分别是 CK 处理的 1.47 倍和 1.88 倍, 之后呈下降趋势。长时间的水分胁迫加剧作物受到的胁迫程度, 复水后 SOD 活性的升高也体现出作物的补偿效应。

POD 可以将 SOD 产生的 H_2O_2 还原成为 H_2O , 清除细胞内 H_2O_2 。由图 4 可见, 叶片 POD 活性在轻度胁迫下有一定上升, 在第 3 天相较于 CK 提高了 28.5%, 3 d 之后便呈下降趋势。而 W_2 的 POD 活性呈下降趋势, 且低于 CK 水平。各处理下的 POD 活性均在胁迫周期结束降低至最小值; 且胁迫时间越长, 胁迫程度越大, POD 酶的活性越低。复水后, POD 活性均有回升, 除 W_1T_1 处理下的玉米有显著的升高, 在复水第 3 天达到 $567.60 \text{ ug} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 之外, 其他处理均基本恢复至与 CK 处理相同的水平。

2.3 干旱胁迫-复水对夏玉米 MDA 含量的影响

MDA 是植物细胞膜酯化最重要的产物之一, 其大小可用来反映植物膜系统的受损程度。由图 5 可得知, 胁迫 0~3 d, MDA 含量基本不变, 从 3 d 之后随着胁迫时长和胁迫程度的加大, MDA 累积量逐渐增多, 3 个试验组均于胁迫最后 1 d 达到峰值, 此时 T_1 处理组的 W_1 和 W_2 处理分别为 CK 处理的 1.5 倍和 2.02 倍(图 5A), T_2 处理组的 W_1 和 W_2 处理分别为 CK 处理的 1.47 倍和 2.2 倍(图 5B), T_3 处理组的 W_1 和 W_2 处理分别为 CK 处理的 2.4 倍和 3.81 倍(图 5C), 且均达显著性差异。复水后 MDA 含量迅速降低, 逐渐恢复至与 CK 处理相同的水平。水分胁迫处理下, W_2 的 MDA 含量高于 W_1 , 且胁迫时间越长, MDA 含量越高, 细胞膜酯化程度更为严重。



注: BS: 胁迫前; S3: 胁迫 3 d; S7: 胁迫 7 d; S10: 胁迫 10 d; S13: 胁迫 13 d; R3: 复水 3 d; R6: 复水 6 d。下同。

Note: BS: Before stress; S3: Stress for 3 days; S7: Stress for 7 days; S10: Stress for 10 days; S13: Stress for 13 days; R3: Rehydration for 3 days; R6: Rehydration for 6 days. The same below.

图 2 干旱胁迫-复水对夏玉米苗期脯氨酸(Pro)含量的影响

Fig.2 Effects of drought stress and rewatering on proline content of maize in seedling stage

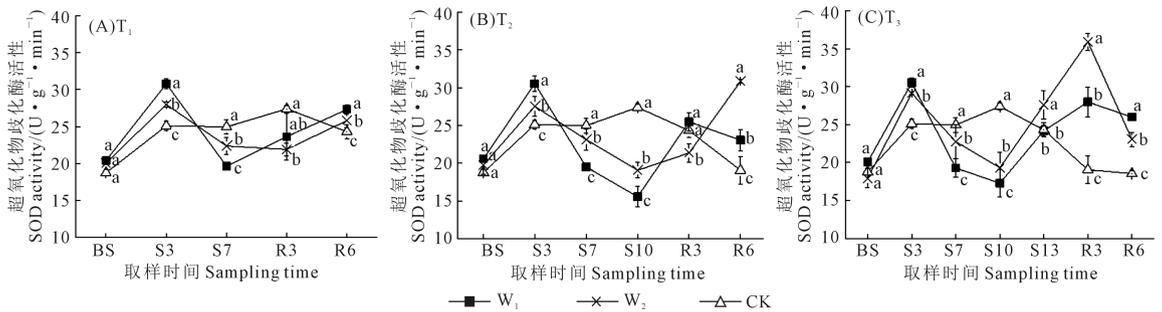


图 3 干旱胁迫-复水对夏玉米苗期超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig.3 Effects of drought stress and rewatering on SOD activities of maize in seedling stage

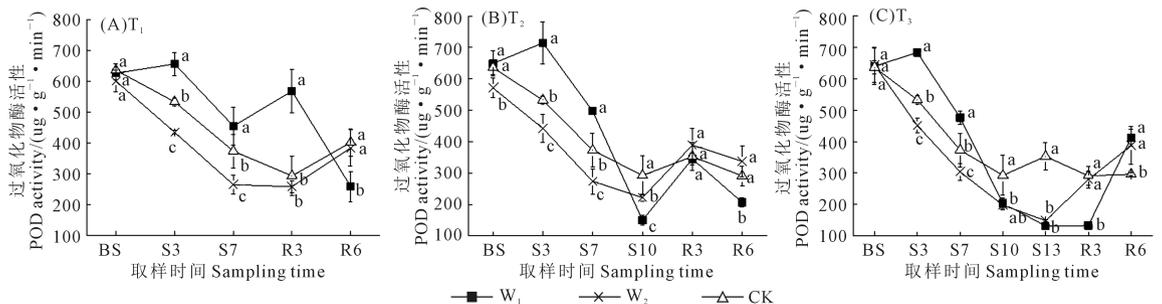


图 4 干旱胁迫-复水对夏玉米苗期过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig.4 Effects of drought stress and rewatering on POD activities of maize in seedling stage

2.4 干旱胁迫-复水对夏玉米苗期叶片光合参数的影响

由图 6 可见,干旱胁迫期间,夏玉米在不同胁迫水平下的 P_n 、 G_s 、 T_r 大小均表现为:CK > W_1 > W_2 ,复水后各处理各参数值均高于其胁迫期间,且存在光合补偿效应, P_n 表现为: W_2 > W_1 > CK。复水后 T_1 处理组 P_n 、 G_s 、 T_r 均表现为 W_2 > W_1 > CK, W_1 、 W_2 显著高于 CK; T_2 处理组除 P_n 的 W_2 外,其余指标在处理间无显著性差异;而 T_3 处理组各指标大小均表现为 W_2 最高,且显著高于 W_1 及 CK 处理。由此可知,经过中度水分胁迫锻炼的夏玉米复水后的光合补偿

效应更显著,代谢能力更强。

2.5 夏玉米苗期抗性生理指标及光合参数的相关性分析

由表 2 可知,不同的干旱-复水处理下,Pro 含量与 SOD、POD 活性呈极显著正相关,POD 活性与 MDA 含量呈极显著负相关;SOD 活性与 P_n 、 G_s 和 T_r 呈极显著正相关,MDA 和 Pro 含量与 P_n 、 G_s 和 T_r 呈极显著负相关,POD 活性与净光合速率、气孔导度和蒸腾速率无显著相关关系;净光合速率、气孔导度和蒸腾速率 3 个光合指标之间均呈现极显著正相关。

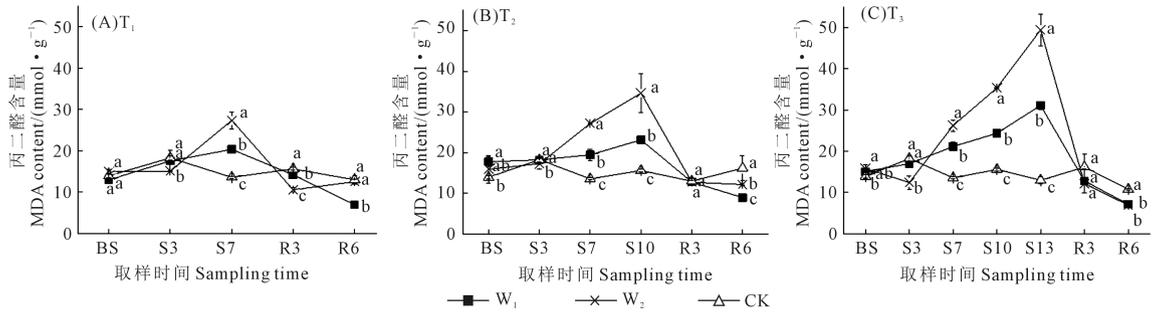
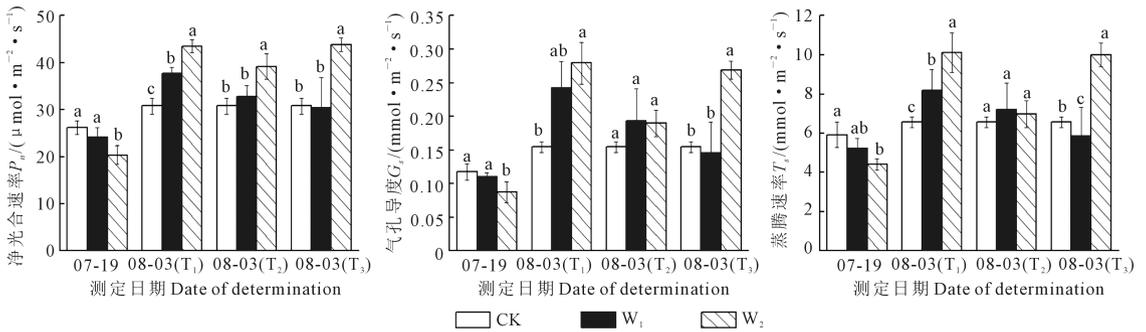


图 5 干旱胁迫-复水对夏玉米苗期丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.5 Effects of drought stress and rewatering on MDA content of maize in seedling stage



注:8月3日(T_1)、8月3日(T_2)、8月3日(T_3)分别表示7 d、10 d、13 d 试验组在8月3日(复水期间)测定。

Note: August 3 (T_1), August 3 (T_2), and August 3 (T_3) indicate the 7 d, 10 d, and 13 d test groups that were measured on August 3 (during rewatering).

图 6 干旱胁迫-复水对夏玉米苗期叶片光合参数的影响

Fig.6 Effects of drought stress and rewatering on leaf photosynthetic parameters of maize in seedling stage

表 2 夏玉米苗期抗氧化系统、脯氨酸以及光合参数的相关关系

Table 2 Correlation of antioxidant system, proline and photosynthetic parameters of summer maize in seedling stage

指标 Index	超氧化物歧化酶 SOD	过氧化物酶 POD	丙二醛 MDA	脯氨酸 Pro	净光合速率 P_n	气孔导度 G_s	蒸腾速率 T_r
超氧化物歧化酶 SOD	1						
过氧化物酶 POD	0.046	1					
丙二醛 MDA	-0.13	-0.257 **	1				
脯氨酸 Pro	0.329 **	0.279 **	0.006	1			
净光合速率 P_n	0.432 **	-0.005	-0.700 **	-0.609 **	1		
气孔导度 G_s	0.538 **	-0.083	-0.726 **	-0.623 **	0.927 **	1	
蒸腾速率 T_r	0.507 **	-0.002	-0.744 **	-0.600 **	0.945 **	0.978 **	1

注: ** 表示 0.01 水平(双侧)上显著相关($P < 0.01$)。

Note: ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level (both sides).

3 讨 论

本试验结果表明,夏玉米苗期受到不同水平、不同时间的干旱胁迫时,植株体内脯氨酸(Pro)含量在胁迫期间先增大后减小,且 $W_2 > W_1 > CK$;随着胁迫时长增加,胁迫程度加剧,Pro 含量降低明显,胁迫 13 d 的累积量显著低于胁迫 10 d 和胁迫 7 d 的累积量。说明在胁迫初期,水分亏缺可诱导植株提高体内渗透调节能力,避免对自身产生伤害,但随着胁迫程度的加剧,植物自身的渗透调节能力随之降低;复水后,前期遭受伤害的植株进一步提高渗透调节能力,维持系统与胁迫伤害的平衡,产生补偿累积效应。本试验胁迫 10 d 复水后的脯氨酸含量呈上升趋势,可能此时已达峰值,后期还是会回落。 T_1 胁迫时间短,因此峰值出现在复水第 3 天, T_2 峰值可能出现在复水第 6 天。由此可见,高强度的水分胁迫尤其是长时间胁迫后,夏玉米的补偿效应会减弱,甚至造成伤害。

超氧化物歧化酶(SOD)活性在胁迫期间呈先增大后减小的趋势,在胁迫最后一天表现为 $CK > W_2 > W_1$,复水之后有明显回升,且胁迫时间越长,复水后的 SOD 活性越高。刘佳等^[28]对辣椒的研究中,随着水分胁迫时间的延长,SOD 活性也呈先增大后减小趋势,而郝舒雪等^[29]对番茄幼苗的研究中发现 SOD 活性在水分胁迫下呈持续升高趋势。过氧化物酶(POD)活性在轻度胁迫下 0~3 d 有所提高,但在 7 d 之后呈下降趋势,而遭受中度胁迫的植株 POD 活性持续呈下降趋势,复水后虽有回升,但也仅达到与 CK 基本相同的水平。丙二醛(MDA)在胁迫期间呈增大趋势,且 $W_2 > W_1 > CK$,复水后迅速下降。杜彩艳等^[30]在夏玉米苗期的研究中也得到相同结论。对比 SOD 和 POD 与 MDA 的变化趋势,本研究发现,SOD、POD(W_1)从胁迫前到胁迫 3 d 呈增大趋势,有效抑制胁迫伤害(MDA 基本保持不变);随着胁迫程度加剧,植物体内保护酶系统活力和平衡遭到破坏,MDA 含量增加,酶活性和 Pro 含量开始降低,复水后 MDA 含量回到正常水平。由此也可进一步证明上述结论。

结合对比气温变化和 SOD、POD 活性以及 Pro、MDA 含量变化,CK 处理下 Pro、MDA 含量基本保持不变,而 SOD 活性表现为先增大后减小的趋势,POD 活性表现为持续减小趋势。施春晖等^[31]在对猕猴桃的研究中表明,SOD 活性对温度比较敏感,且与温度呈正相关;方芳等^[32]对夏玉米幼苗的研究表明,在高温胁迫下,SOD 活性存在先上升后下降

的现象,而 POD 活性在高温处理中呈下降趋势。本试验发现,SOD 在 T_3 试验组中胁迫第 10 天后活性开始增大,且基本达到与 CK 处理相同的水平;推测是因为胁迫第 10 天到胁迫第 13 天之间(7月 24 日至 7 月 27 日)气温降低,最高气温由 36℃ 降低至 32.6℃,平均气温由 30.1℃ 降低至 27.5℃。在水分胁迫和温度的双重影响下,气温降低减少温度对作物的胁迫,减缓对 SOD 活性的抑制,故 SOD 活性有增高趋势,复水后 SOD 的高活性仍在修复细胞膜所受到的损伤。

本试验发现,水分胁迫下,夏玉米叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 均小于 CK,且 $W_1 > W_2$ 。其原因是水分胁迫影响气孔的开张度,进而影响细胞内外的气体交换,导致进入细胞的 CO_2 受阻,光合原料不足,光合能力下降。毕建杰等^[21]也得出叶片净光合速率随着叶片含水量的下降而减小的结论。在复水过后,叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 均高于胁迫期间,且 $W_2 > W_1$,可见中度胁迫处理后夏玉米光合的补偿作用相较于轻度胁迫处理更加明显。

由表 2 可看出,SOD 活性和 Pro 含量呈极显著正相关,且在胁迫 13 d 的处理下,Pro 的累积含量无明显变化,SOD 活性出现上升趋势。由此可推测在胁迫 10 d 夏玉米能承受的干旱胁迫达到阈值,可对此作进一步研究,探索夏玉米生理调节响应机制所对应的干旱阈值。

4 结 论

在苗期进行水分胁迫处理,夏玉米体内 Pro 含量呈先增大后减少的趋势,复水后回升,存在累积效应,胁迫 10 d 的累积量最大,且中度胁迫的累积量大于轻度胁迫;SOD 在胁迫期间呈先增大后减小趋势,复水后有轻微增长,而且 T_1 处理的 SOD 活性在复水 6 d 仍有明显升高;POD 在 W_1 处理下呈先增大后减小趋势,在第 3 天达到峰值,而 W_2 处理下 POD 活性呈减少趋势;MDA 在胁迫期间呈上升趋势,胁迫时长越长,MDA 含量越高,复水后含量下降至正常水平。通过 MDA 的变化可以了解植物的受损情况,也能从侧面验证植物的渗透调节与抗氧化系统的调控机制。结合夏玉米的光合参数,中度胁迫(W_1)处理下试验组在复水后 P_n 、 G_s 、 T_r 均高于 W_1 组和 CK 对照组。故在灌溉水量受到限制的条件下,从植物生理的角度来看,维持 10 d 土壤 50%~60% 田间持水量的灌水量较利于作物生长,作物在复水后的光合补偿效果更加显著,有利于实现农业高效用水。

致谢:感谢徐家屯、李亮、丁怡博等在试验中以及论文写作中给予我的支持与帮助。

参考文献:

- [1] 康绍忠,霍再林,李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金,2016,30(3): 208-212.
- [2] Song H, Li Y B, Zhou L, et al. Maize leaf functional responses to drought episode and rewatering [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 57-70.
- [3] 吴泽新,王永久,李蔓华,等. 干旱胁迫对鲁西北夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 817-821.
- [4] Çakir 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.
- [5] 宋利兵,姚宁,冯浩,等. 不同生育阶段受旱对旱区夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学,2016,24(1): 63-73.
- [6] 刘树堂,东先旺,孙朝辉,等. 水分胁迫对夏玉米生长发育和产量形成的影响[J]. 莱阳农学院学报,2003,20(2): 98-100.
- [7] 李玲,余光辉,曾富华. 水分胁迫下植物脯氨酸累积的分子机理[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2003,(1): 126-134.
- [8] 赵利,党占海,牛俊义,等. 水分胁迫下不同抗旱类型胡麻苗期生理生化指标变化[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(4): 206-211.
- [9] 刘彬彬. 水分胁迫对玉米幼苗形态建成、生理代谢及根系吸水的影响[D]. 咸阳:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2008.
- [10] 刘永辉. 夏玉米不同生育期对水分胁迫的生理反应与适应[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(2): 171-175.
- [11] Sun C X, Gao X X, Chen X, et al. Metabolic and growth responses of maize to successive drought and re-watering cycles [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 172: 62-73.
- [12] 麻雪艳. 夏玉米干旱发生发展过程及其定量研究[D]. 南京:中国气象科学研究院,2017.
- [13] Wang J G, Chen G C, Zhang C L. The effects of water stress on soluble protein content, the activity of SOD, POD and CAT of two ecotypes of reeds (*Phragmites communis*) [J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2002, 22(3): 561-565.
- [14] 葛体达,隋方功,白莉萍,等. 长期水分胁迫对夏玉米根叶保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(3): 18-23.
- [15] 杨舒怡,陈晓阳,惠文凯,等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(5): 481-489.
- [16] 李璇,岳红,王升,等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志,2013,38(7): 973-978.
- [17] 葛体达,隋方功,白莉萍,等. 水分胁迫下夏玉米根叶保护酶活性变化及其对膜脂过氧化作用的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(5): 922-928.
- [18] Hao Y L, Pan J B. The effect of water stress on CAT & MDA at different growth stages in maize seedling [J]. *Journal of Beijing Agricultural College*, 2003, 18(3): 1002-3186.
- [19] Rahman M U, Gul S, Ahmad I. Effects of water stress on growth and photosynthetic pigments of corn (*Zea mays* L.) cultivars [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2004, 68(4): 652-655.
- [20] Xin L F, Zheng H F, Yang Z J. Physiological and proteomic analysis of maize seedling response to water deficiency stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 228: 29-38.
- [21] 毕建杰,刘建栋,叶宝兴,等. 干旱胁迫对夏玉米叶片光合及叶绿素荧光的影响[J]. 气象与环境科学,2008,31(1): 10-15.
- [22] Liu J W, Zhang R H, Zhang G C, et al. Effects of soil drought on photosynthetic traits and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* seedlings [J]. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(2): 255-263.
- [23] 许耀照,张芬琴,陈修斌,等. 水分胁迫对彩椒幼苗生长及光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(2): 182-189.
- [24] 刘亚丽. 植物生理学部分实验材料的选择与培养[J]. 实验技术与管理,2012,29(7): 1002-4956.
- [25] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯,1994,30(3): 207-210.
- [26] 王爱国,罗广华,邵从本,等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. 植物生理学报,1983,9(1): 77-84.
- [27] 曲东,王保莉,山仑,等. 干旱条件下磷对玉米叶 SOD 和 POD 活性的影响[J]. 西北农业大学学报,1996,24(3): 50-54.
- [28] 刘佳,郁继华,徐秉良,等. 干旱气候条件下水分胁迫对辣椒叶片生理特性的影响[J]. 核农学报,2012,26(8): 1197-1203.
- [29] 郝舒雪,曹红霞,王虎兵,等. 水分胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10): 943-947.
- [30] 杜彩艳,段宗颜,潘艳华,等. 干旱胁迫对玉米苗期植株生长和保护酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3): 124-129.
- [31] 施春晖,王晓庆,骆军. 高温下猕猴桃抗氧化生理响应及日灼伤害阈值温度[J]. 上海农业学报,2017,33(4): 72-76.
- [32] 方芳,何序晨,张志豪,等. 玉米自交系苗期对高温胁迫的响应机制及其抗逆性[J]. 浙江农业学报,2019,31(7): 1045-1056.