

氮肥与涝渍胁迫时间对抽雄期夏玉米叶片生理特性的影响

王 帅, 孙明馨, 朱国良, 秦粮朋, 王凤文*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要: 为了探究氮肥与涝渍胁迫时间对抽雄期夏玉米生理特性的影响, 选用裕丰 333 为试验材料, 采用盆栽试验, 施氮量设置 3 个水平处理, 分别为 0、180 和 300 kg·hm⁻², 记为 N0、N1 和 N2。共设置 3 个胁迫时长处理, 分别为 3 d、5 d 和 7 d, 记作 S3、S5 和 S7; 3 个胁迫恢复时长 2 d、4 d 和 6 d, 记作 R2、R4 和 R6。在涝渍胁迫-恢复期间分别测定夏玉米叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)的活性, 丙二醛(MDA)以及叶绿素含量。研究表明, 在涝渍胁迫期间, 高氮素水平下, 涝渍胁迫时长增加会减少 SOD 活性但会增加 CAT 活性。相同的施氮水平下, MDA 和叶绿素含量没有显著性变化, 说明涝渍胁迫对于玉米叶片 MDA 和叶绿素的含量影响较小。在涝渍胁迫与恢复期间, 抗氧化酶活性随着氮素水平的提高而显著增大。在高氮素水平下, 叶绿素含量在淹水 3 d 达到最大。高氮素水平有利于改善抽雄期夏玉米生理特性。

关键词: 夏玉米; 氮肥; 涝渍胁迫与恢复; 抗氧化酶活性; 叶片生理特性

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)01-0006-05

Effects of nitrogen fertilizer and waterlogging stress time on physiological characteristics of summer maize leaves at tasseling stage

WANG Shuai, SUN Mingxin, ZHU Guoliang, QIN Liangpeng, WANG Fengwen

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In order to explore the effects of nitrogen fertilizer and waterlogging stress time on the physiological characteristics of summer maize in the asphyxiating stage, a pot experiment was adopted, selecting Yufeng 333 as the experimental material. Three levels of nitrogen application were set as 0, 180 and 300 kg·hm⁻², named as N0, N1 and N2, respectively. Three stress duration treatments were set, which were 3, 5 and 7 days, respectively, denoted as S3, S5 and S7, and three stress recovery durations were set as 2, 4 and 6 days, denoted as R2, R4 and R6, correspondingly. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD), malondialdehyde (MDA) and chlorophyll contents in the leaves of summer maize were measured during the waterlogging stress-recovery period. The results showed that during waterlogging stress, under high nitrogen level, the increase of waterlogging stress duration would reduce SOD activity, but it increased CAT activity. Under the same nitrogen application level, MDA and chlorophyll contents had no significant changes, indicating that waterlogging stress had little effect on MDA and chlorophyll contents in maize leaves. During the period of waterlogging stress and recovery, the activities of antioxidant enzymes increased significantly with the increase of nitrogen level. Under high nitrogen level, chlorophyll content reached the maximum at flooded day 3. High nitrogen level is beneficial to the improvement of the physiological characteristics of summer maize at tasseling stage.

Key words: summer maize; nitrogen fertilizer; waterlogging stress and recovery; activity of antioxidant enzyme; physiological characteristics of leaves

涝渍灾害是玉米生育期经常发生的一种自然灾害。玉米受涝渍胁迫后, 茎叶与根系生长缓慢, 叶

片气孔暂时关闭, 影响玉米的光合与呼吸作用^[1]。抽雄期是玉米生长发育的关键时期, 此阶段玉米开始

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300205-3)和公益性行业(农业)科研专项(201503121-02)共同资助。

作者简介: 王 帅, 硕士研究生。E-mail: 492629908@qq.com

* 通信作者: 王凤文, 博士, 讲师。E-mail: 1922146451@qq.com

由营养生长转向生殖生长,对光照、温度、水分和肥料的需求很大^[2]。目前关于玉米涝渍胁迫和干旱胁迫复水的研究有很多,但是对于涝渍胁迫恢复的研究却鲜有报道。何静丹等研究广西不同玉米品种在抽雄期对干旱胁迫及早后复水的响应,表明干旱胁迫对根、冠生长所受影响较小,且在复水后植株能够有效地恢复生长^[3]。柳燕兰等以探讨在干旱胁迫及早后复水的条件下,玉米生长发育及抗氧化酶的影响机制,干旱胁迫时具有较高的 SOD 活性来减弱活性氧伤害,而复水后通过较高的 SOD、POD 协同作用有效清除活性氧,避免对细胞膜造成伤害^[4]。本试验以抽雄期夏玉米为研究对象,通过人工模拟涝渍胁迫试验,研究不同氮素水平、不同涝渍胁迫时长下,抽雄期夏玉米的适应性以及生理特性,探究氮肥和胁迫时长对抽雄期夏玉米生理特性的影响,以揭示抽雄期夏玉米在氮肥胁迫和涝渍胁迫下的抗逆性,为玉米的逆境生长提供一定理论依据和技术支持^[5]。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020 年 8 月在安徽省合肥市安徽农业大学农翠园(31°52' N, 117°15' E)内进行。该研究区处于亚热带季风气候区,多年平均气温在 15.0 ~ 16.0 °C 之间,多年平均降水量为 900 ~ 1 000 mm 之间,梅雨显著。试验小区土壤类型为黄褐土,面积 500 m²,0 ~ 20 cm 土壤全氮为 1.8 g·kg⁻¹,有机质 21.0 g·kg⁻¹,全钾 21.2 g·kg⁻¹,全磷 0.4 g·kg⁻¹。

1.2 供试材料及试验设置

试验玉米品种为裕丰 333,播种株距 30 cm,行距 60 cm,种植密度为 30 000 株·hm⁻²。本试验设置涝渍胁迫-恢复组(YS)和空白对照组(CK),CK 保证正常供水。施氮量设置 3 个水平处理,分别为不施氮(0 kg·hm⁻²)、中等氮素水平(180 kg·hm⁻²)和高氮素水平(300 kg·hm⁻²),记为 N0、N1 和 N2。共设置 3 个胁迫时长处理,分别为 3、5 和 7 d,记作 S3、S5 和 S7;3 个胁迫恢复时长 2、4 和 6 d,记作 R2、R4 和 R6。按照基肥比 3:7 施肥,在玉米的大喇叭口期进行追肥。玉米追肥后移栽至盆钵中(盆钵直径 26 cm,高 21 cm)培养至抽雄期进行淹水-恢复试验。2020 年 6 月 8 日播种,抽雄期涝渍胁迫-恢复处理于 8 月 3 日开始,8 月 15 日结束。涝渍胁迫期间,将盆钵置于遮雨棚内,每隔 12 h,不停的对涝渍胁迫组进行补水,保证处理组土壤表面始终有 3~5 cm 的水层。淹水 7 d 结束后,将处理组土壤表层水分排出,解除涝渍胁迫,与空白对照组保持正常的土壤含水量。

1.3 测试项目与方法

分别在胁迫第 3、第 5 和第 7 天及恢复第 2、第 4 和第 6 天随机选取玉米植株顶端第 4 片叶片(完全展开叶),测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)、叶绿素等生化指标的含量。超氧化物歧化酶活性测定采用氮蓝四唑光化还原法^[6],过氧化物酶活性测定采用愈创木酚法^[7],CAT 活性测定采用紫外吸收法^[8],MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸比色法^[9],叶绿素含量测定采用乙醇浸泡法^[10]。

采用 Excel 2007 对本试验的所有数据进行录入与整理,使用 SPSS 25 对试验数据进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对玉米 SOD 活性的影响

SOD 是清除活性氧过程中的第一种抗氧化酶,将涝渍胁迫中产生的超氧阴离子转化为 O₂ 和 H₂O₂。由表 1 可知,涝渍胁迫期间,YS 处理组的施氮量为 N0、N1 时,SOD 活性随着涝渍胁迫时间的增加而呈现先增加后减小的趋势,淹水 5 d 时 SOD 的活性最高。当 YS 处理组的施氮量为 N2 时,SOD 活性随着涝渍胁迫时间的增加而增加。在涝渍胁迫 7 d 时,SOD 活性随着氮素水平的提高而显著增加,并且中低氮素水平下(N0、N1),YS 处理组的 SOD 活性显著低于 CK 对照组,说明长时间的涝渍胁迫会使 SOD 活性降低,高氮素水平可以缓解涝渍胁迫对 SOD 活性下降的影响。

2.2 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对玉米 POD 活性的影响

POD 可在涝渍胁迫过程中清除 SOD 产生的 H₂O₂,将 H₂O₂ 还原为 H₂O。由表 2 可知,涝渍胁迫-恢复过程中(除去 S3),处理组 YS 的 POD 活性随着氮素水平的提高而显著增大。淹水 5 d 以及恢复 4 d 的高氮素水平组 POD 活性显著增加,比 CK 对照组高 27.1%,其余组之间无显著性差异,高氮素水平可以有效提高胁迫以及恢复后的 POD 活性。

2.3 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对玉米 CAT 活性的影响

CAT 的生理作用是协助 SOD 清除活性氧代谢过程中产生的 H₂O₂。由表 3 可知,涝渍胁迫-恢复过程中(除去 S3),处理组 YS 的 CAT 活性随着氮素水平的提高而显著增大。其中淹水 7 d 与淹水 5 d 经过对比发现,N0、N1、N2 的 CAT 活性分别上升 137.8%、

24.7%和 118.7%。高氮素水平 N2 下, 涝渍胁迫 7 d, YS 处理组的 CAT 活性显著高 CK 对照组, 高氮素水平可以有效提高胁迫时 CAT 活性。恢复 6 d 时, 较

低氮素水平下 (N0、N1), YS 处理组的 CAT 活性显著低于 CK 对照组, 表明低氮素水平下抗涝渍的能力较弱, CAT 活性降低, 不利于植物细胞的生长。

表 1 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期夏玉米超氧化物歧化酶 (SOD) 活性

Table 1 Effects of waterlogging stress-recovery on superoxide dismutase (SOD) activity in summer maize at tasseling stage under different water and nitrogen treatments

处理	施氮量	S3	S5	S7	R2	R4	R6
YS	N0	347.2 ± 75.4 ^{ab}	539.4 ± 57.2 ^a	123.7 ± 23.6 ^c	326.1 ± 67.2 ^{bc}	341.3 ± 48.6 ^{ab}	388.0 ± 66.7 ^b
	N1	358.5 ± 140.6 ^{ab}	550.0 ± 10.5 ^a	165.6 ± 57.7 ^{bc}	461.7 ± 25.8 ^a	220.0 ± 53.3 ^b	470.0 ± 50.1 ^a
	N2	168.9 ± 6.7 ^c	261.6 ± 68.9 ^b	297.9 ± 40.8 ^a	228.4 ± 40.6 ^c	379.7 ± 59.7 ^a	335.8 ± 98.2 ^b
CK	N0	415.7 ± 38.2 ^a	567.7 ± 44.8 ^a	260.8 ± 83.1 ^{ab}	233.7 ± 65.3 ^c	225.0 ± 76.5 ^b	386.9 ± 34.4 ^{ab}
	N1	108.2 ± 56.0 ^c	500.9 ± 131.2 ^a	281.4 ± 52.0 ^a	371.2 ± 66.1 ^{ab}	359.7 ± 33.0 ^a	380.3 ± 59.3 ^{ab}
	N2	213.8 ± 42.1 ^{bc}	355.7 ± 44.3 ^b	345.4 ± 33.4 ^a	239.1 ± 34.9 ^c	295.2 ± 69.8 ^{ab}	362.1 ± 59.6 ^{ab}

注: 同列数字后不同小写字母表示相同涝渍胁迫时长时不同氮素胁迫强度间差异性达 0.05 显著水平。S3: 胁迫 3 d; S5: 胁迫 5 d; S7: 胁迫 7 d; R2: 恢复 2 d; R4: 恢复 4 d; R6: 恢复 6 d。下同。

表 2 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期夏玉米过氧化物酶 (POD) 活性

Table 2 Effects of waterlogging stress-recovery on peroxidase (POD) activity in summer maize at tasseling stage under different water and nitrogen treatments

处理	施氮量	S3	S5	S7	R2	R4	R6
YS	N0	9 080.0±1 769.5 ^a	6 226.7±310.7 ^d	9 346.7±488.8 ^b	9 973.3±847.9 ^c	9 453.3±855.4 ^c	10 733.3±1 686.3 ^d
	N1	11 440.0±1 837.0 ^a	13 386.7±1 780.9 ^b	13 280.0±2 086.5 ^{ab}	19 800.0±226.3 ^a	14 660.0±84.9 ^b	15 053.3±4 723.8 ^a
	N2	11 600.0±1 736.2 ^a	17 580.0±3 365.8 ^a	16 000.0±3 450.7 ^a	18 186.7±960.3 ^{ab}	17 500.0±1 442.5 ^a	13 826.7±3 150.7 ^a
CK	N0	9 080.0±1 423.8 ^a	9 360.0±1547.6 ^{cd}	10 666.7±2 321.8 ^b	12 573.3±3 086.1 ^{bc}	9 506.7±622.7 ^c	11 880.0±2 713.8 ^a
	N1	11 573.3±1 713.2 ^a	12 293.3±2 126.5 ^{bc}	12 813.3±2 229.4 ^{ab}	13 600.0±174.4 ^{bc}	14 440.0±346.4 ^b	14 933.3±2 358.8 ^a
	N2	10 120.0±940.6 ^a	13 826.7±1 081.0 ^b	13 960.0±2 772.4 ^{ab}	20 226.7±5 920.1 ^a	13 346.7±197.3 ^b	15 173.3±1 268.9 ^a

表 3 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期夏玉米过氧化氢酶 (CAT) 活性

Table 3 Effects of waterlogging stress-recovery on catalase (CAT) activity in summer maize at tasseling stage under different water and nitrogen treatments

处理	施氮量	S3	S5	S7	R2	R4	R6
YS	N0	105.3 ± 25.7 ^a	42.7 ± 22.0 ^c	93.3 ± 14.0 ^b	86.7 ± 27.2 ^b	77.3 ± 12.9 ^c	64.0 ± 14.4 ^c
	N1	121.3 ± 52.2 ^a	108.0 ± 22.3 ^{ab}	134.7 ± 18.0 ^b	150.0 ± 19.8 ^{ab}	130.0 ± 48.1 ^{ab}	84.0 ± 4.0 ^{bc}
	N2	149.3 ± 16.1 ^a	106.0 ± 8.4 ^{ab}	252.0 ± 39.6 ^a	209.3 ± 25.7 ^a	166.0 ± 19.8 ^a	101.3 ± 15.1 ^b
CK	N0	133.3 ± 66.0 ^a	68.0 ± 22.6 ^{bc}	113.3 ± 12.2 ^b	122.7 ± 40.1 ^b	93.3 ± 12.2 ^{bc}	97.3 ± 9.2 ^b
	N1	162.7 ± 26.0 ^a	82.7 ± 15.1 ^{abc}	169.3 ± 65.0 ^b	145.3 ± 59.4 ^{ab}	130.7 ± 2.3 ^{ab}	136.0 ± 14.4 ^a
	N2	132.0 ± 56.0 ^a	112.0 ± 21.1 ^a	168.0 ± 52.0 ^b	156.0 ± 52.0 ^{ab}	165.3 ± 27.2 ^a	97.3 ± 23.4 ^b

表 4 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期夏玉米丙二醛 (MDA) 含量的影响

Table 4 Effects of waterlogging stress-recovery on malondialdehyde (MDA) content in summer maize at tasseling stage under different water and nitrogen treatments

处理	施氮量	S3	S5	S7	R2	R4	R6
YS	N0	0.012 9±0.005 4 ^a	0.018 2±0.003 4 ^a	0.015 3±0.003 8 ^a	0.013 4±0.001 6 ^a	0.010 3±0.003 3 ^b	0.019 8±0.006 3 ^a
	N1	0.011 5±0.002 6 ^a	0.012 2±0.004 6 ^a	0.014 9±0.002 5 ^a	0.011 0±0.002 4 ^a	0.014 1±0.000 9 ^{ab}	0.014 3±0.001 5 ^{ab}
	N2	0.009 2±0.001 8 ^a	0.012 5±0.005 8 ^a	0.012 4±0.002 5 ^a	0.011 2±0.003 6 ^a	0.016 1±0.000 7 ^a	0.012 8±0.003 8 ^b
CK	N0	0.007 7±0.000 9 ^a	0.015 9±0.000 2 ^a	0.011 9±0.001 1 ^a	0.009 7±0.001 1 ^a	0.011 0±0.001 4 ^b	0.016 3±0.001 0 ^{ab}
	N1	0.010 4±0.001 3 ^a	0.011 6±0.002 7 ^a	0.010 3±0.004 3 ^a	0.011 0±0.001 9 ^a	0.011 8±0.003 5 ^{ab}	0.014 4±0.000 8 ^{ab}
	N2	0.011 7±0.001 1 ^a	0.012 1±0.003 3 ^a	0.013 1±0.001 0 ^a	0.013 5±0.002 2 ^a	0.011 9±0.000 9 ^{ab}	0.011 6±0.003 0 ^b

2.4 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期玉米叶片 MDA 含量的影响

植物器官衰老或在逆境条件下, 会发生膜脂过氧化作用, MDA 是其产物之一, 通常可用它作为膜脂过氧化指标, 反映细胞膜脂过氧化程度和植物逆境条件反应的强弱。由表 4 可知, 在涝渍胁迫-

恢复期间, 同一氮素水平下, YS 处理组与 CK 对照组比较, MDA 含量无显著性变化, 说明涝渍胁迫及恢复过程中 MDA 含量没有显著性增加或减少。YS 处理组在恢复 4 d 时, MDA 含量随着氮素水平的提高而显著增加。在恢复 6 d 时, MDA 含量随着氮素水平的提高而显著减少。

表 5 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期夏玉米叶绿素含量的影响

Table 5 Effects of waterlogging stress-recovery on chlorophyll content of summer maize at tasseling stage under different water and nitrogen treatments

处理	施氮量	S3	S5	S7	R2	R4	R6
YS	N0	1.87 ± 0.18 ^c	2.12 ± 0.43 ^a	1.36 ± 0.14 ^b	1.29 ± 0.09 ^a	1.41 ± 0.21 ^a	1.05 ± 0.11 ^b
	N1	2.28 ± 0.03 ^a	1.84 ± 0.27 ^a	1.60 ± 0.17 ^{ab}	1.05 ± 0.01 ^a	1.47 ± 0.38 ^a	1.37 ± 0.48 ^{ab}
	N2	2.38 ± 0.13 ^a	1.66 ± 0.09 ^a	2.07 ± 0.08 ^a	1.16 ± 0.19 ^a	1.90 ± 0.14 ^a	1.26 ± 0.12 ^{ab}
CK	N0	1.99 ± 0.05 ^{bc}	1.51 ± 0.22 ^a	1.63 ± 0.33 ^{ab}	1.64 ± 0.04 ^a	1.41 ± 0.45 ^a	1.48 ± 0.39 ^{ab}
	N1	2.12 ± 0.18 ^{abc}	1.62 ± 0.29 ^a	1.95 ± 0.21 ^a	1.25 ± 0.92 ^a	1.31 ± 0.17 ^a	1.88 ± 0.35 ^a
	N2	2.16 ± 0.16 ^{ab}	1.88 ± 0.57 ^a	1.85 ± 0.31 ^a	1.79 ± 0.17 ^a	1.82 ± 0.18 ^a	1.57 ± 0.36 ^{ab}

表 6 不同水氮处理涝渍胁迫-恢复下抽雄期玉米叶片各项生理指标相关系数

Table 6 Correlation coefficient of physiological indexes of maize leaves at tasseling stage under waterlogging stress and recovery and different water and nitrogen treatments

指标	超氧化物歧化酶 SOD	过氧化物酶 POD	过氧化氢酶 CAT	丙二醛 MDA	叶绿素
超氧化物歧化酶 SOD	1				
过氧化物酶 POD	-0.058	1			
过氧化氢酶 CAT	-0.247 ^{**}	0.569 ^{**}	1		
丙二醛 MDA	0.180 [*]	-0.094	-0.191 [*]	1	
叶绿素	0.019	-0.113	0.151	0.098	1

注: **表示 0.01 水平 (双侧) 上显著相关 ($P < 0.01$), *表示 0.05 水平 (双侧) 上显著相关 ($P < 0.05$)。

2.5 不同水氮处理下涝渍胁迫-恢复对抽雄期玉米叶片叶绿素含量的影响

叶绿素存在于植物细胞中, 是光合作用中最重要一种色素, 其含量一定程度上可以用来表征植物体合成有机物的能力。由表 5 可知, 在涝渍胁迫期间, 中高氮素水平下 (N1、N2), YS 处理组的叶绿素含量在 S3 时达到最大, 较 CK 对照组分别增加 12.8% 和 13.8%, 无氮素水平下 N0, YS 处理组叶绿素含量在 S5 达到最大, 较 CK 对照组增加了 45.5%。这表明短时间适度过量的水分供应有利于玉米叶片叶绿素的合成。在恢复之后, 叶绿素的含量 YS 处理组与 CK 对照组无显著性, 此时涝渍胁迫对于玉米叶片叶绿素的含量影响较小。

2.6 不同水氮处理涝渍胁迫-恢复下抽雄期玉米叶片各项生理指标间的相关性

由表 6 可知, 涝渍胁迫-恢复后, 玉米叶片中 CAT 活性与 SOD 活性呈极显著负相关, 与 POD 活性呈极显著正相关, MDA 含量与 SOD 活性呈显著负相关, 与 CAT 活性显著负相关。说明抗氧化酶活性、MDA、叶绿素含量都是评价植物体抗涝渍能力的重要指标, 它们之间相互关联, 共同影响玉米叶片的生理特性。

3 讨论与结论

在不同水氮处理涝渍胁迫-恢复下, 对抽雄期玉米叶片进行各项生理生化指标的测定。结果表明, 在涝渍胁迫期间, SOD 活性随着涝渍胁迫时间的增加而呈现先增加后减小的趋势。马丽峰等^[11]研究不

同程度淹水对水稻生长及抗氧化酶活性的影响, 结果显示随着涝渍胁迫时间的增加, SOD 活性呈先增大后减小的趋势。姬静华等^[12]对抽雄吐丝期玉米进行淹水处理, 研究表明超氧化物歧化酶 SOD 活性升高, 在恢复之后有明显的回升。晏斌等^[13]研究表明, 在涝渍胁迫下玉米体内超氧自由基的增加, 导致正常的活性氧代谢平衡破坏。本研究中, 在涝渍胁迫 7 d 时, SOD 活性随着氮素水平的提高而显著增加, 说明高氮素水平可以缓解涝渍胁迫对 SOD 活性下降的影响; 涝渍胁迫-恢复过程中 (除去 S3), POD 与 CAT 活性都随着氮素水平的提高而显著增大; 高氮素水平下, 淹水 5 d 以及恢复 4 d 时, POD 活性显著增加, 比 CK 对照组高 27.1%, 高氮素水平可以有效提高胁迫以及恢复后的 POD 活性。甄城等^[14]在研究拔节期淹水与不同施氮量对春玉米生长和产量的影响也得到相同的结论。涝渍胁迫过程中, 淹水 7 d 比淹水 5 d 的 CAT 活性分别上升 137.8%、24.7% 和 118.7%; 涝渍胁迫 7 d, YS 处理组的 CAT 活性显著高 CK 对照组, 说明涝渍胁迫会使 CAT 活性升高; 恢复 6 d 时, 较低氮素水平下, 玉米叶片的 CAT 的活性更低, 抗涝渍的能力较弱, 不利于植物细胞的生长。李映乐等^[15]对青竹复叶槭扦插苗人工水淹胁迫的研究中表明, CAT 的活性也有先上升后下降的规律。郝玉兰等^[16]认为涝渍胁迫下, 细胞内的抗氧化酶使得活性氧的产生和清除处于动态平衡状态, 缓解因细胞内活性氧过多积累对生物膜造成的破坏。这也间接说明玉米叶片内发生的抗氧化酶反应是有一定相关性, 共同参与调节植物的抗逆性。

前人研究显示,在涝渍胁迫下,MDA含量增加,会引起蛋白质、核酸分子的变性与失活,从而破坏细胞膜的渗透性,MDA含量快速累积,加快了细胞的衰老^[17]。恢复4d和6d时MDA含量的变化,是由于氮肥胁迫造成的。低氮素水平下,在恢复6d时,玉米体内MDA含量超过植物体自身的抗逆反应的限度,细胞膜脂过氧化程度不断地加深,使得MDA的含量增加。这表明长时间的低氮素水平胁迫会使玉米细胞膜脂过氧化,细胞结构和功能受到损害,影响叶片正常的生理功能。叶绿素含量在涝渍胁迫期间,随着涝渍胁迫时间的增加,叶绿素含量呈现先上升后下降的趋势,在涝渍胁迫期间,中高氮素水平下(N1、N2),YS处理组的叶绿素含量在S3时达到最大,较CK对照组分别增加12.8%和13.8%,无氮素水平下N0,YS处理组叶绿素含量在S5达到最大,较CK对照组增加45.5%。这表明短时间适度过量的水分供应有利于玉米叶片叶绿素的合成。在恢复之后,叶绿素的含量对比YS处理组与CK对照组无显著性,涝渍胁迫7d对于叶绿素含量影响很小,这与张晓平等研究鹅掌楸属植物叶片叶绿素的含量关系是一致的。叶绿素的合成和分解之间是动态平衡的关系,如果关系被打破,则光合能力会下降,这说明叶绿素含量的下降可以作为逆境伤害的指标之一来研究,用来反应植物的受损程度^[18]。陈军等研究涝渍胁迫后玉米叶片光合色素含量的降低的原因可能是CAT、SOD和POD三者的活性显著下降,保护酶系统遭到破坏,MDA含量升高,加剧膜脂过氧化作用,进而导致叶绿素被降解,叶片失绿,叶片衰老加速^[19]。

在涝渍胁迫期间,高氮素水平下SOD活性显著低于CK对照组,说明涝渍胁迫时长增加会减少SOD活性;CAT活性显著高于CK对照组,说明涝渍胁迫时长增加会增加CAT活性,两者表现为显著负相关($P < 0.01$) (表6)。相同的施氮水平下,MDA含量没有显著性变化,说明涝渍胁迫下MDA含量没有显著性增加或减少。叶绿素的含量YS处理组与CK对照组无显著性差异,此时涝渍胁迫对于玉米叶片叶绿素的含量影响较小。在涝渍胁迫与恢复期间,抗氧化酶活性随着氮素水平的提高而显著增大,其原因可能是抽雄期涝渍胁迫后,在恢复排水的过程中,有一部分的土壤表层氮素同水一起排出,使土壤肥力减弱,此外,玉米根系可吸收和利用的养分大大减少,导致无氮素处理下土壤氮供应能力进一步降低,削弱作物对逆境胁迫的抗性^[20]。在高氮素水平下,叶绿素含量在淹水3d达到最大,可见一定的施氮量可提高涝渍胁迫下植株叶片数、叶面积和SPAD

值,从而使玉米光合能力的增加^[21]。高氮素水平有利于改善抽雄期夏玉米生理特性。

参考文献:

- [1] REDDY A M, KUMAR S G, JYOTHSNAKUMARI G et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. Chemosphere, 2005, 60(1): 97-104.
- [2] 陈国平, 赵仕孝, 刘志文. 玉米的涝害及其防御措施的研究: II. 玉米在不同生育期对涝害的反应[J]. 华北农学报, 1989, 4(1): 16-22.
- [3] 何静丹, 文仁来, 田树云, 等. 抽雄期干旱胁迫与复水对不同玉米品种生长及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 18(7): 1145-1151, 1157.
- [4] 柳燕兰, 马明生, 郭贤仕. 苗期干旱胁迫及复水对玉米植株生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 甘肃农业科技, 2017(12): 60-63.
- [5] 李纪元. 涝渍胁迫对枫杨幼苗保护酶活性及膜脂过氧化物的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(4): 450-453.
- [6] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 119-120.
- [7] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 172-173.
- [8] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008: 182-188.
- [9] 施海涛. 植物逆境生理学实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 57-58.
- [10] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. 光谱实验室, 2002, 19(4): 478-481.
- [11] 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.
- [12] 姬静华, 霍治国, 唐力生, 等. 鲜食玉米形态特征、生理特性及产量对淹水的响应[J]. 玉米科学, 2016, 24(3): 85-91.
- [13] 晏斌, 戴秋杰, 刘晓忠, 等. 玉米叶片涝渍伤害过程中超氧自由基的积累[J]. 植物学报, 1995, 37(9): 738-744.
- [14] 甄城, 漆栋良, 徐茵, 等. 拔节期淹水与施氮量互作对春玉米生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S1): 1-5.
- [15] 李乐乐, 孔维鹤, 尚忠海, 等. 水淹胁迫对青竹复叶槭叶片部分生理指标的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(1): 32-34.
- [16] 郝玉兰, 潘金豹, 张秋芝, 等. 不同生育时期水淹胁迫对玉米生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2003, 19(6): 58-60, 63.
- [17] 王晓维, 黄国勤, 徐健程, 等. 铜胁迫和间作对玉米抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1890-1896.
- [18] 张晓平, 方炎明, 陈永江. 淹涝胁迫对鹅掌楸属植物叶片部分生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(1): 41-44.
- [19] 陈军, 戴俊英. 干旱对不同耐性玉米品种光合作用及产量的影响[J]. 作物学报, 1996, 22(6): 757-762, 774.
- [20] 范亚宁, 李世清, 李生秀. 半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 799-806.
- [21] 武文明, 李金才, 陈洪俭, 等. 氮肥运筹方式对孕穗期受渍小麦穗部结实特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1888-1896.