

引文格式: 陈默, 陈璐, 黄晓雅, 等. PEG 模拟干旱胁迫下苗期木薯的生长生理响应[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(4): 15–22. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202403043](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202403043)

PEG 模拟干旱胁迫下苗期木薯的生长生理响应*

陈默¹, 陈璐¹, 黄晓雅¹, 谢海弘¹, 李双江¹,
左紫琳¹, 盛浩^{2,3**}, 宋勇^{1,2,4,5,6**}

(1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128; 2. 岳麓山实验室, 湖南长沙 401128;
3. 湖南农业大学资源学院, 湖南长沙 410128; 4. 湖南省马铃薯工程技术研究中心, 湖南长沙 410128;
5. 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 湖南长沙 410128;
6. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128)

摘要:【目的】研究聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG) 模拟干旱胁迫对木薯生长生理的影响。【方法】以木薯品种 NZ199 为试验材料, 将其根系浸入质量分数分别为 0%、5%、10%、15% 和 20% 的 PEG 溶液中, 进行为期 9 d 的模拟干旱胁迫试验, 并分别于第 3、6、9 天测量其生长、光合和生理各项指标。【结果】随着 PEG 质量分数的升高, 同一时期 NZ199 的各项生长指标整体呈先升高后降低的趋势; 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率在低质量分数下被促进, 而在高质量分数下受到抑制, 处理前期 (≤ 3 d) 以 10% PEG 处理最高, 后期 (≥ 6 d) 以 5% PEG 处理最高; 可溶性蛋白含量呈先升高后降低的趋势, 在 10% PEG 处理 6 和 9 d 时最高; 15% 和 20% PEG 处理的脯氨酸含量显著高于其他处理; 过氧化物酶活性呈先升高后降低的趋势, 以 10% PEG 处理 6 d 时最高; 过氧化氢酶活性逐渐升高, 以 20% PEG 处理 9 d 时最高; 丙二醛含量逐渐增加, 以 20% PEG 处理 9 d 时最高, 表明木薯受到的胁迫最为严重。【结论】在 NZ199 苗期, 适当的 PEG 质量分数和时间模拟干旱胁迫可以促进植株的光合作用, 有利于积累同化物, 但 PEG 质量分数过高会对植株产生反作用, 叶片光合作用降低, 脯氨酸含量、过氧化氢酶活性和丙二醛含量升高, 即对其生长生理造成了胁迫, 使其抗逆性减弱。

关键词: 木薯; 干旱胁迫; 聚乙二醇; 渗透调节物质; 抗氧化酶系统

中图分类号: S533.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2024) 04-0015-08

Growth and Physiological Response of Seedling Cassava under Drought Stress Simulated by PEG

CHEN Mo¹, CHEN Lu¹, HUANG Xiaoya¹, XIE Haihong¹, LI Shuangjiang¹,
ZUO Zilin¹, SHENG Hao^{2,3**}, SONG Yong^{1,2,4,5,6**}

(1. Horticulture College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Yuelushan Laboratory, Changsha 401128, China; 3. College of Resources of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
4. Engineering Research Center of Potato in Hunan Province, Changsha 410128, China; 5. Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha 410128, China; 6. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha 410128, China)

收稿日期: 2024-03-23

修回日期: 2024-08-19

网络首发日期: 2024-09-04

*基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设项目 (CARS-11-HNSY)。

作者简介: 陈默 (2001—), 女, 安徽亳州人, 在读硕士研究生, 主要从事薯类栽培生理研究。

E-mail: 13805684311@163.com

**通信作者 Corresponding authors: 盛浩 (1982—), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事土壤资源利用与肥力研究。E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn; 宋勇 (1968—), 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 主要从事蔬菜和薯类作物栽培育种研究。E-mail: songyong1117@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240903.1642.007>



Abstract: [**Purpose**] To study the effects of polyethylene glycol (PEG) simulation of drought stress on the growth and physiological conditions of cassava. [**Methods**] Cassava NZ199 was used as the experimental material, and its root was immersed in PEG solutions with mass fraction of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% for a nine-day simulated drought stress experiment. Its growth, photosynthesis and physiological indexes were measured on the 3rd, 6th and 9th day, respectively. [**Results**] With the increase of PEG mass fraction, the growth indexes of NZ199 showed a trend of increasing and then decreasing in the same period. The net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate showed the promotion by low mass fraction and inhibition by high mass fraction, which was the highest in 10% PEG treatment at the early stage of the treatment (≤ 3 d), and 5% PEG treatment at the late stage (≥ 6 d). The soluble protein content showed a trend of increasing and then decreasing, and the highest content was found in 10% PEG treatment for the 6th and 9th day. The proline content of 15% and 20% PEG treatments was significantly higher than other treatments. The peroxidase activity showed a tendency of increasing and then decreasing, and was highest at the 6th day of 10% PEG treatment. The catalase activity gradually increased, and was highest at the 9th day of 20% PEG treatment. The malondialdehyde content gradually increased, and was highest at the 9th day of 20% PEG treatment, indicating that the stress level was the highest. [**Conclusion**] At the seedling stage of NZ199, PEG simulated drought stress with appropriate mass fraction and duration can promote photosynthesis and facilitate assimilate accumulation in plants, but excessively high mass fraction will have a reverse effect on plants, showing that leaf photosynthesis decreases, and proline content, catalase activity and malondialdehyde content increase, that is, stress is caused to their growth physiology and stress resistance is weakened.

Keywords: cassava; drought stress; polyethylene glycol; osmoregulatory substances; antioxidant enzyme system

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 又名树薯、木番薯, 属大戟科 (Euphorbiaceae) 木薯属 (*Manihot*), 可作为重要的粮食、饲料、工业原料等^[1]。木薯主要分布于热带和部分亚热带地区, 与马铃薯、甘薯并列为世界 3 大薯类作物, 具有种植粗放、不与粮争地等优点^[2]。木薯在土地瘠薄和长期干旱的地区仍能生长, 被称为“饥荒储备作物”, 在应对全球气候变暖方面具有很大潜力。随着木薯产业的不断壮大, 对于木薯的研究不再局限于产量品质, 提高木薯抗逆性尤其是抗旱性的相关研究逐渐增多。

木薯的耐旱性较强, 但长期干旱条件下木薯块根木质化严重, 淀粉含量降低, 氢氰酸含量增加, 导致木薯品质下降; 幼苗期若遭遇干旱胁迫, 轻则影响产量品质, 重则导致干枯死亡^[3]。王泽平等^[4]对华南 205 号木薯的干旱胁迫研究发现: 重度干旱胁迫下木薯叶片的脯氨酸 (proline, Pro) 和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量以及

过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性等均显著增加; 王树昌等^[5]研究干旱胁迫对 SC5 木薯的影响发现: SC5 心叶中 POD 活性随干旱程度的提高而呈先上升后下降的趋势, 而 Pro 含量显著增加。在干旱胁迫初期, 木薯植株体内会产生活性氧, 导致膜脂过氧化, 同时产生较多膜脂过氧化物, 破坏膜的完整性, 当其含量达到一定水平时就会激活植株内的保护酶系统, 从而抑制活性氧继续产生, 起到保护植物细胞的作用, 降低其膜脂过氧化程度。随着干旱胁迫时间延长或干旱程度加重, 植株保护酶活性受到抑制, 酶活性下降, 无法使植株维持健康状态, 胁迫造成的伤害就会继续加重^[6]。但也有研究发现: 经历一定程度干旱后, 木薯的抗旱能力增强, 干旱对其具有补偿作用, 即适当干旱对于木薯有增产增收的作用^[7-8]。可见, 目前对木薯抗旱机制缺乏全面的研究, 通过干旱胁迫试验探究木薯在干旱环境中的生长生理响应规律, 可为进一步探索木薯种植规

律提供试验和理论依据^[9-10]。

PEG-6000 分子质量较大, 无法进入植物细胞内, 而且具有良好的亲水性, 添加到水中会使溶液水势下降, 妨碍植物根系吸水, 从而导致干旱胁迫发生^[11]。利用 PEG 模拟干旱胁迫, 较直接控水具有条件可控、易操作、周期短、效果显著等优点。KAUFMANN 等^[12]对干红辣椒的研究显示: PEG-6000 诱导的干旱胁迫与土壤控水逐步干旱所得的控制效果一致。PEG 可以诱导均匀的水分胁迫, 且不会造成直接的生理损伤, 已被广泛用于研究作物在萌发期对干旱胁迫的响应。干旱胁迫对种子萌发、根系生长和幼苗生长的不利影响在花生、甘薯、小麦等多种作物中已有报道^[13-15], 但关于 PEG 模拟干旱胁迫对木薯幼苗期的影响还知之甚少。本研究利用不同质量分数的 PEG-6000 溶液对木薯幼苗进行模拟干旱试验, 探究不同程度干旱胁迫对木薯生长、光合、叶片渗透调节物质含量、MDA 含量及抗氧化酶活性的影响, 以期为木薯抗旱育种提供科学的理论支撑, 并为木薯的种植及水分管理策略提供试验和理论支持。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试木薯品种南植 199 (NZ199) 为中国主栽品种, 于 2011 年引种到湖南, 其茎直立, 早熟低毒^[16]。

1.2 试验环境

试验在湖南农业大学园艺学院培养室内进行, 设置日间温度/光强为 28 ℃/7 500 lx, 夜间温度/光强为 20 ℃/0 lx, 湿度为 40%。

1.3 试验设计

选取高约 20 cm 的木薯种茎茎段直插入 PVC 盆钵 (直径 15 cm, 高 14 cm), 每盆装入育苗基质 400 g, 定植 90 株, 每盆 1 株, 使其土壤相对含水量维持在 50%~60%, 在 2~3 片真叶完全展开后用日本园试营养液 (表 1) 进行水肥管理。

待茎秆第 5~6 片真叶完全展开时, 选取生长健康、状态一致且无病虫害的木薯苗 45 株, 用清水冲去花盆中的基质, 完整取出种茎, 小心冲洗干净根系后, 将种茎固定在浮板 (长 60 cm, 宽 40 cm, 厚 30 mm) 上, 移入到水培箱 (长 60 cm, 宽 40 cm, 高 13 cm) 中并接通增氧泵。每块浮板

种植 9 根种茎, 每孔固定 1 株, 种茎基部离设备底部 4~5 cm, 培养箱中分别装入营养液 20 L 进行缓苗, 按常规管理。

表 1 日本园试营养液配方
Tab. 1 Nutrient solution formula for Japanese garden trial

肥料 fertilizer		$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
大量元素 macroelement	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	950.00
	KNO_3	810.00
	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	155.00
	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	500.00
微量元素 microelement	Fe-EDTA	15.00~25.00
	$\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.00
	H_3BO_3	3.00
	$\text{ZnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.22
	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.05
	$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02

待茎秆第 8~9 片真叶完全展开时, 将质量分数为 0%、5%、10%、15% 和 20%^[17]的 PEG-6000 溶液分别添加至营养液中, 对木薯种茎进行为期 9 d 的模拟干旱胁迫处理, 每个处理重复 9 次, 5 个处理共 45 株。水培期间用电磁式空气泵充氧, 每小时供氧 30 min; 后期植株生长旺盛或气温太高时将供氧时间延长至 30~40 min, 每隔 5 d 换 1 次水^[18]。

1.4 测定指标及方法

在 PEG-6000 处理第 0、3、6、9 天的 9:00—11:00 对植株的株高和茎粗进行测定; 在处理第 3、6、9 天的 9:00—11:00 对植株的侧根数、根质量、SPAD、光合参数指标和生理生化指标进行测定。

1.4.1 生长指标

(1) 株高增长量: 用卷尺测量木薯植株茎基部到顶端生长点的距离, 取平均值作为株高, 并与 PEG 处理 0 d 的差值作为株高增长量; (2) 茎粗增长量: 用游标卡尺测量木薯植株离芽点 1 cm 高处的木薯茎秆直径, 取平均值作为茎粗, 并与 PEG 处理 0 d 的差值作为茎粗增长量; (3) 侧根数: 以肉眼可见直径超过 0.1 cm 的根计数, 即为侧根数; (4) 根质量: 将洗净的木薯幼苗根表面的水分吸干, 称其质量; (5) SPAD 值: 选取植株第 3 或 4 片完全展开叶, 使用 SPAD 仪测定叶片相对叶绿素含量 (SPAD 值) 和氮含量, 测定点位于叶片中脉两侧, 取平均值。

1.4.2 光合参数指标

选取植株由上至下第 3 片完全展开叶, 采用 LI-6400XT 光合测定仪测定净光合速率 (net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度 (stomatal conductance, G_s) 和蒸腾速率 (transpiration rate, T_r)。各处理重复测定 5 次, 取平均值。

1.4.3 生理生化指标

各处理选取 3 株植株, 由上往下摘取第 3 或 4 片完全叶, 去除较粗叶脉后用液氮进行研磨, 并置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存, 测定时各处理取混样测 3 次重复。可溶性蛋白 (soluble protein, SP) 含量采用考马斯亮蓝比色法测定^[19]; Pro 含量采用酸性茚三酮法测定^[19]; MDA 含量采用硫代巴比妥酸比色法测定^[20]; POD 活性采用愈创木酚比色法测定^[20]; 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性采用紫外吸收法测定^[19]。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2019 对数据进行初步录入、计算

和作图; 采用 SPSS 27.0.1 对数据进行单因素方差分析 (ANOVA); 采用邓肯法 (Duncan) 多重比较对数据进行显著性检验 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同 PEG 处理对 NZ199 生长的影响

由表 2 可知: 各时期 NZ199 株高和茎粗增长量、根质量、侧根数、SPAD 值和氮含量均随 PEG 质量分数的增加总体呈先升高后降低的趋势。

处理 3 d 时, 5%~20% PEG 处理的株高增长量均显著高于 CK, 较 CK 分别显著提高 35.42%、56.25%、56.25% 和 10.42%; 处理 6 和 9 d 时, 5% PEG 处理的株高增长量显著高于 10% PEG 处理, 且二者又显著高于其他处理; 处理 6 d 时, 5% 和 10% PEG 处理的株高增长量较 CK 分别显著提高 194.12% 和 105.88%; 处理 9 d 时, 二者较 CK 分别显著提高 277.78% 和 133.33% (表 2)。

表 2 不同 PEG 处理对 NZ199 生长指标的影响

Tab. 2 Effects of different PEG treatments on the growth indexes of NZ199

指标 indexes	处理时间/d treatment time	$w_{\text{PEG}}/\%$				
		0	5	10	15	20
株高增长量/cm growth rate of plant height	3	0.48±0.05 c	0.65±0.06 ab	0.75±0.10 a	0.75±0.10 a	0.53±0.06 ab
	6	0.85±0.06 c	2.50±0.17 a	1.75±0.18 b	0.78±0.11 c	0.83±0.05 c
	9	1.08±0.19 c	4.08±0.25 a	2.52±0.20 b	0.93±0.10 c	1.13±0.15 c
茎粗增长量/cm growth rate of stem diameter	3	0.12±0.02 b	0.24±0.03 a	0.11±0.01 b	0.08±0.01 b	0.08±0.01 b
	6	0.53±0.03 b	0.73±0.03 a	0.16±0.02 c	0.13±0.02 c	0.12±0.02 c
	9	1.35±0.09 a	1.16±0.10 a	0.56±0.01 b	0.45±0.04 b	0.24±0.02 c
根质量/g root weight	3	1.27±0.09 b	1.53±0.09 b	1.53±0.03 b	2.07±0.09 a	1.50±0.12 b
	6	2.63±0.15 c	4.40±0.23 b	6.70±0.12 a	2.83±0.20 c	3.00±0.58 c
	9	5.03±0.20 c	12.70±0.06 a	9.70±0.12 b	5.33±0.20 c	4.10±0.17 d
侧根数 number of lateral roots	3	31.00±0.58 ab	36.67±0.88 a	26.33±0.33 bc	26.33±1.45 bc	20.33±3.76 c
	6	36.33±0.88 b	43.33±0.88 a	33.33±2.03 bc	29.33±0.88 d	32.00±0.58 cd
	9	55.33±1.45 c	70.33±2.60 a	63.00±1.73 b	42.33±1.45 d	37.33±2.03 d
SPAD	3	49.90±0.54 ab	50.60±1.45 ab	51.27±0.80 a	50.27±0.51 ab	48.20±0.66 b
	6	48.98±1.15 abc	51.18±0.90 a	50.00±0.45 ab	47.65±0.63 bc	46.85±0.68 c
	9	48.83±0.59 ab	52.20±1.01 a	49.15±0.72 ab	46.90±1.33 b	42.77±1.86 c
氮含量/(mg·g ⁻¹) nitrogen content	3	18.43±0.17 ab	18.68±0.46 ab	18.80±0.32 a	18.58±0.16 ab	17.77±0.26 b
	6	18.47±0.28 a	18.83±0.30 a	18.45±0.15 a	17.67±0.22 b	17.45±0.20 b
	9	18.10±0.20 ab	19.13±0.34 a	18.20±0.23 ab	17.48±0.42 b	16.15±0.58 c

注: 同行不同小写字母表示相同处理时间不同 PEG-6000 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant differences among different PEG-6000 treatments in the same treatment time ($P<0.05$).

5% PEG 处理 3 和 6 d 时, 茎粗增长量显著高于其他处理, 较 CK 分别显著提高 100.00% 和 37.74%; 处理 6 d 时, 10%、15% 和 20% PEG 处理的茎粗增长量较 CK 分别显著降低 69.81%、75.47% 和 77.36%; 处理 9 d 时, 5% PEG 处理的

茎粗增长量与 CK 无显著性差异, 且二者均显著高于其他处理 (表 2)。

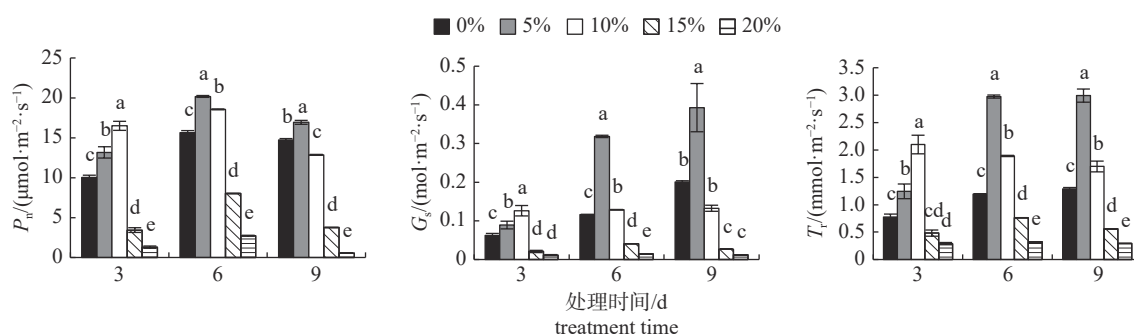
NZ199 幼苗的根质量和侧根数随 PEG 质量分数的升高呈先升高后降低的趋势 (表 2)。20% PEG 处理 9 d 对根质量有显著的抑制作用, 5%

PEG 处理 9 d 时根质量达到最大, 为 12.70 g; 5% PEG 处理 3、6 和 9 d 对侧根数有显著的促进作用, 其中处理 9 d 时侧根数达到最高。

各时期木薯叶片的 SPAD 值和氮含量均随 PEG 质量分数的升高呈先升高后降低的趋势 (表 2)。处理 3 d 时, 10% PEG 处理的含量达到最大值, 较 CK 分别提高 2.75% 和 2.01%; 处理 6 和 9 d 时, 5% PEG 处理的含量达到最大值; SPAD 值在 20% PEG 处理 9 d 时较 CK 显著降低 12.41%; 氮含量在 20% PEG 处理 6 和 9 d 时最低, 且较 CK 分别显著降低 5.52% 和 10.77%。

2.2 不同 PEG 处理对 NZ199 光合作用的影响

由图 1 可知: 随着 PEG 质量分数的升高, 各时期 NZ199 叶片的 P_n 、 G_s 和 T_r 均呈先升高后降低的趋势。处理 3 d 时, 10% PEG 处理组的 P_n 、 G_s 和 T_r 显著高于其他处理, 较 CK 分别提高 64.51%、101.92% 和 169.79%; 处理 6 和 9 d 时, 5% PEG 处理组的 P_n 、 G_s 和 T_r 显著高于其他处理。说明 PEG-6000 胁迫处理会使 NZ199 幼苗的光合作用减弱, 且随着胁迫程度的增加, 光合作用减弱的幅度增大。



注: 不同小写字母表示相同处理时间不同 PEG-6000 处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different PEG-6000 treatments in the same treatment time ($P < 0.05$); the same as below.

图 1 不同 PEG 处理对 NZ199 净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 的影响

Fig. 1 Effects of different PEG treatments on the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and transpiration rate (T_r) of NZ199

2.3 不同 PEG 处理对 NZ199 渗透调节物质含量的影响

2.3.1 对可溶性蛋白 (SP) 含量的影响

由图 2 可知: 随着 PEG 质量分数的升高, 各时期 NZ199 叶片的 SP 含量总体呈先上升后下降的趋势。处理 3 d 时, 15% PEG 处理的 SP 含量显著高于其他处理, 较 CK 显著提高 28.99%; 5% PEG 处理的 SP 含量显著低于其他处理, 较 CK 显著降低 6.97%。处理 6 d 时, 10% PEG 处理的 SP 含量显著高于其他处理组, 较 CK 提高 37.05%; 5% PEG 处理的 SP 含量显著低于其他处理, 较 CK 显著降低 8.39%。处理 9 d 时, 10% PEG 处理的 SP 含量较 CK 显著提高 38.47%。当 PEG 质量分数为 10% 时, SP 含量在第 6~9 天时下降, 此时蛋白质分解加速, 合成减少; 当 PEG 质量分数为 15% 时, SP 在第 3~9 天时下降, 说明 NZ199 幼苗可在一定程度上消耗 SP 来调节适应 PEG-6000 胁迫, 但需要一定的胁迫程度和时间。

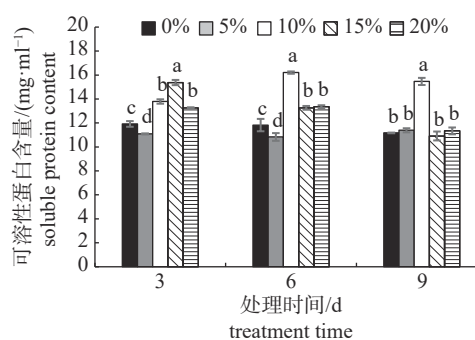


图 2 不同 PEG 处理对 NZ199 可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effects of different PEG treatments on the soluble protein content of NZ199

2.3.2 对脯氨酸 (Pro) 含量的影响

由图 3 可知: 随着 PEG-6000 质量分数的升高, 各时期 Pro 含量总体呈上升趋势。处理 3、6、9 d 时, 5% 和 10% PEG 处理的 Pro 含量与 CK 无显著差异, 且均在 20% PEG 处理达到最大值, 较 CK 分别显著提高 135.88%、142.30% 和 272.81%。

2.4 不同 PEG 处理对 NZ199 抗氧化酶活性的影响

2.4.1 对过氧化物酶 (POD) 活性的影响

由图 4 可知: PEG 胁迫诱导植株 POD 活性上升, 在 PEG 处理下, NZ199 幼苗的 POD 活性均有所提高, 随着处理时间和胁迫程度的增加, POD 活性总体呈先增强后减弱的变化趋势。处理 3 d 时, 5%~20% PEG 处理的 POD 活性显著高于 CK, 较 CK 分别提高 69.94%、95.71%、73.93% 和 91.72%; 处理 6 d 时, 10% PEG 处理的 POD 活性达到最高, 较 CK 显著提高 321.84%, 15% 和 20% PEG 处理的 POD 活性较 CK 分别显著提高 159.00% 和 106.90%; 处理 9 d 时, 5%、10% 和 15% PEG 处理的 POD 活性较 CK 分别显著提高 69.31%、116.40% 和 161.48%。说明 PEG 处理 3 和 6 d 时, POD 活性对 10% PEG 胁迫的响应程度更高、更敏感; PEG 处理 9 d 时, POD 活性对 15% PEG 胁迫的响应程度更高、更敏感。

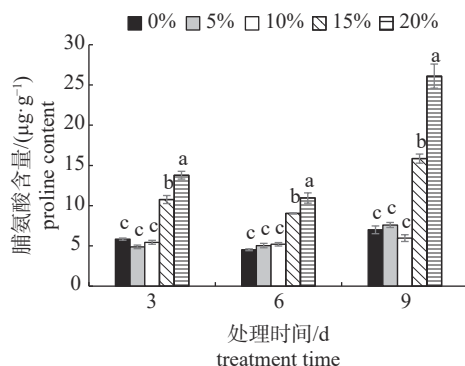


图 3 不同 PEG 处理对 NZ199 脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effects of different PEG treatments on the proline content of NZ199

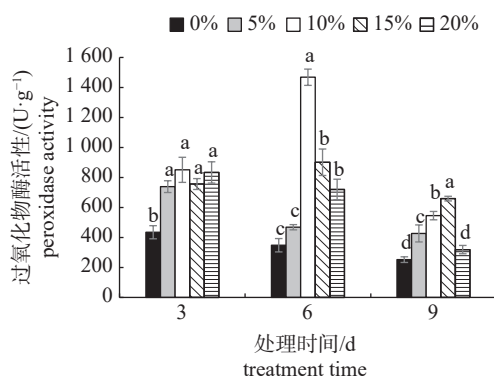


图 4 不同 PEG 处理对 NZ199 过氧化物酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different PEG treatments on the peroxidase activity of NZ199

2.4.2 对过氧化物氢酶 (CAT) 活性的影响

由图 5 可知: 相同 PEG 处理下, CAT 活性随处理时间的延长呈上升趋势, 且各时期 PEG 处理的 CAT 活性均较 CK 有所增强。处理 3 d 时, 10%~20% PEG 处理的 CAT 活性较 CK 分别显著提高 24.88%、11.74% 和 23.91%; 处理 6 d 时, 10%~20% PEG 处理的 CAT 活性较 CK 分别显著提高 22.71%、19.99% 和 30.24%; 处理 9 d 时, 5%~20% PEG 处理的 CAT 活性较 CK 分别显著提高 26.25%、29.00%、31.87% 和 43.02%。

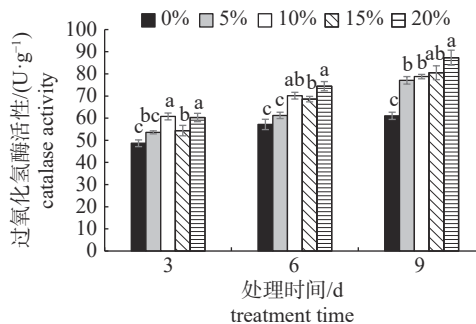


图 5 不同 PEG 处理对 NZ199 过氧化物氢酶活性的影响

Fig. 5 Effects of different PEG treatments on the catalase activity of NZ199

2.5 不同 PEG 处理对 NZ199 丙二醛 (MDA) 含量的影响

由图 6 可知: 处理 3 d 时, 15% PEG 处理的 MDA 含量高于其他处理; 处理 6 和 9 d 时, PEG 处理的 MDA 含量均显著高于 CK, 其中, 20% PEG 处理的 MDA 含量显著高于其他处理, 较 CK 分别提高 146.63% 和 155.43%。随着 PEG 处理时间的延长, 5%~20% PEG 处理的 MDA 含量均呈上升趋势, 且均在第 9 天达到最大值, 较 CK 分别提高 71.18%、66.90%、66.83% 和 155.43%。说明随着 PEG-6000 质量分数的升高, NZ199 受到的胁迫程度加剧, MDA 含量可直接反映 NZ199 苗期干旱胁迫的程度。

3 讨论

3.1 不同 PEG 处理对 NZ199 生长的影响

根是植株吸收水分和矿质元素的主要器官, 植物伸长根部吸取水分, 以便提高植株株高和茎粗, 增加生命力和活性^[21]。本研究表明: NZ199 的根质量和侧根数对 PEG 的响应为短期低质量分数促进、长期高质量分数抑制, 这与周萌等^[22]对

香果树幼苗的研究结果一致。段元杰等^[23]对木薯 SC9 干旱胁迫的研究发现:随着 PEG 浓度的升高,SC9 的株高增长量逐渐降低,低浓度胁迫时与 CK 处理无显著差异,该结果与本研究略有不同。本研究表明:NZ199 株高增长量随 PEG 质量分数的升高呈先升高后降低的趋势,这可能是由于木薯品种不同,NZ199 的耐旱性略高于 SC9,故低质量分数 PEG 促进了植株生长。

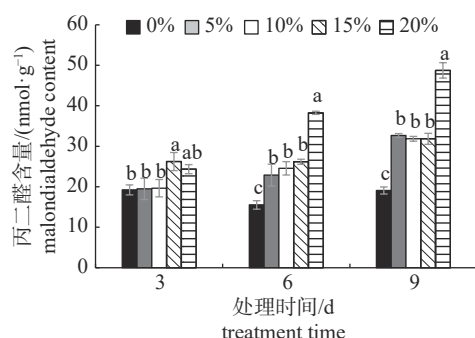


图6 不同 PEG 处理对 NZ199 丙二醛含量的影响

Fig. 6 Effects of different PEG treatments on the malondialdehyde content of NZ199

3.2 不同 PEG 处理对 NZ199 光合作用的影响

干旱胁迫下,植物叶片气孔开度减小,CO₂ 进入细胞的阻力变大,导致光合作用减弱。王胜永等^[24]对葡萄进行不同质量分数 PEG 处理,发现低质量分数 PEG (5% 和 10%) 处理下葡萄幼苗的 P_n 、 G_s 和 T_r 提高,高质量分数 PEG (15% 和 20%) 处理下幼苗的 P_n 、 G_s 和 T_r 降低;张淑勇等^[25]研究表明:适当水分胁迫可以提高玉米的相对叶绿素含量。以上研究结论与本研究结果一致,说明适当质量分数的 PEG 处理可以促进植物的光合作用。

3.3 不同 PEG 处理对 NZ199 渗透调节物质含量的影响

SP 和 Pro 作为渗透调节物质在植物体内发挥重要作用。植株经历干旱时,核酸酶活性增强,ATP 合成受阻,蛋白质合成减少,因此,干旱胁迫引起氮代谢失常,游离氨基酸增多^[26-28]。司诚等^[29]对鹰嘴豆进行不同浓度 PEG 模拟干旱胁迫,发现随着 PEG 浓度的增加,鹰嘴豆芽苗的 Pro 含量逐渐增多,重度胁迫时与对照呈显著差异。这与本研究结果一致。各处理期,低质量分数 PEG 处理的 SP 含量逐渐积累,高质量分数 PEG 处理的 SP 含量逐渐降低,与 Pro 形成互补,Pro 含量在高质量分数 PEG 处理下迅速增加,以降低渗透势。

3.4 不同 PEG 处理对 NZ199 抗氧化酶活性的影响

正常状态下,植物体内氧自由基 (O₂⁻、OH⁻、H₂O₂) 和活性氧 (O₂⁻) 与其在细胞内的清除过程保持动态平衡,但逆境中这种平衡遭到破坏,过量的活性氧会破坏细胞的正常结构,此时植物自身的抗氧化酶被激活。逆境初期,POD 负责清除 H₂O₂,对植物起保护作用,同时,POD 也可清除细胞内有害自由基并催化有毒物质,对植物有双重作用^[30];而 CAT 负责专一的将 H₂O₂ 分解为 H₂O。NAIR 等^[31]研究表明:干旱胁迫引起脂质过氧化,植物通过建立较强的抗氧化系统耐受干旱胁迫,CAT 和 POD 活性变化可以抵御缺水期活性氧引起的细胞损伤。

本研究表明:PEG 处理下,木薯 NZ199 的 POD 活性先升高,有利于维持正常的膜结构和生命活性;随着处理时间的延长,活性氧清除系统受到破坏,无法抵御过量活性氧对植株造成的危害,POD 活性受到抑制,活性下降,这与杨洁等^[32]和孙亚瑞等^[33]的研究结果一致。说明 NZ199 受到 PEG 胁迫尤其是较低质量分数的 PEG 胁迫时能够正常生存,POD 起到了重要的保护作用。CAT 活性随 PEG 处理时间的延长而逐渐升高,这与张爱慧等^[34]对茄子的研究结果一致。CAT 在胁迫后期活性较高,说明 CAT 和 POD 在清除活性氧时发生作用的时期不同,POD 比 CAT 更早响应 PEG 胁迫。

3.5 不同 PEG 处理对 NZ199 MDA 含量的影响

干旱对植物最核心的伤害是引起原生质脱水,主要表现为膜透性和膜结构的改变,植物细胞膜脂过氧化程度可以用 MDA 含量来衡量^[35-36]。本研究中,NZ199 幼苗的 MDA 含量随 PEG 质量分数和处理时间不同而存在差异。短期 (≤3 d) PEG 处理后,NZ199 幼苗的 MDA 含量与 CK 差异不显著,说明此时对叶片细胞膜影响较小;而长期 (≥6 d) 处理后,MDA 含量急剧增加,且 PEG 质量分数越高,MDA 含量越高。这与赵平娟^[37]对木薯 SC124 和 Arg7 号的研究结果一致。因此,长期高质量分数 PEG 胁迫会使木薯细胞膜脂过氧化程度增大,导致细胞膜受到极大的伤害。

4 结论

本研究明晰了木薯 NZ199 幼苗生长时抵制渗透胁迫的生理响应机制,发现适度 (5%~10%

PEG) 的干旱胁迫可以促进木薯植株的生长, 为木薯的抗性研究、灌溉栽培等奠定了研究基础, 也为其抵御干旱逆境、抗旱育种以及引种等提供了理论依据。

[参考文献]

- [1] 张箭. 木薯发展史初论[J]. 中国农史, 2011, 30(2): 19.
- [2] 谭砚文, 李丛希, 曾华盛. 中国木薯生产和贸易发展分析[J]. 世界农业, 2018(10): 163. DOI: 10.13856/j.cn11-1097/s.2018.10.024.
- [3] 卢赛清, 吴勇, 雷开文, 等. 广西主要气象灾害对木薯种植的影响及防灾减灾措施[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(2): 62. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3305.2022.02.021.
- [4] 王泽平, 罗兴录, 孟丽萍, 等. 不同水分处理对木薯叶片生理特性的影响[J]. 广西农业科学, 2010, 41(5): 419. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2010.05.005.
- [5] 王树昌, 于晓玲, 阮孟斌, 等. 干旱胁迫对木薯SC5抗性生理指标的影响[J]. 分子植物育种, 2018, 16(4): 1294. DOI: 10.13271/j.mpb.016.001294.
- [6] 马福林, 马玉花. 干旱胁迫对植物的影响及植物的响应机制[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 391. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2328.2022.04.013.
- [7] 单忠英, 罗兴录, 樊吴静, 等. 灌水量与灌溉方法对木薯新选048产量和土壤理化性状的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(3): 493. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2016.03.011.
- [8] COCK J H, 叶开富. 木薯植株耐旱性的机理[J]. 广西热作科技, 1988(2): 47.
- [9] 陈璐, 陈默, 吴志鹏, 等. 水分胁迫下木薯(NZ199)苗期生理响应分析[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4): 855. DOI: 10.13836/j.jjau.2023079.
- [10] ALICE E H, ARABACI G. Determination of SOD, POD, PPO and CAT enzyme activities in *Rumex obtusifolius* L.[J]. Annual Research & Review in Biology, 2016, 11(3): 1. DOI: 10.14941/grass.19.313.
- [11] 宋依璇. PEG-6000模拟干旱胁迫下菊芋幼苗的生理响应[J]. 辽宁林业科技, 2023(3): 28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1714.2023.03.008.
- [12] KAUFMANN M R, ECKARD A N. Evaluation of water stress control with polyethylene glycols by analysis of guttation[J]. Plant Physiology, 1971, 47(4): 453. DOI: 10.1104/pp.47.4.453.
- [13] 贺鸿雁, 孙存华, 杜伟, 等. PEG 6000胁迫对花生幼苗渗透调节物质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1): 76. DOI: 10.3321/j.issn:1007-9084.2006.01.017.
- [14] 陈京, 周启贵, 张启堂. PEG处理对甘薯叶片渗透调节物质的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1995(1): 73. DOI: 10.13718/j.cnki.xsxb.1995.01.014.
- [15] 尤燕聪, 王宏凯, 艾明军, 等. PEG模拟干旱胁迫对南疆小麦发芽和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 98. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2023.21.016.
- [16] 邓玉萍. 湖南木薯引种及栽培技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [17] 魏云霞, 王晓庆, 黄洁. PEG胁迫对木薯叶片形态、生理及根系解剖结构的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 292. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2016.02.013.
- [18] 罗秀芹, 薛晶晶, 蔡杰, 等. GA₃处理对木薯类胡萝卜素生物合成的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 346. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2022.02.015.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] 刘璐, 武志博, 李晓佳, 等. 干旱胁迫对千屈菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(3): 139. DOI: 10.13817/j.cnki.cyyyp.2022.03.017.
- [22] 周萌, 罗洋, 郭连金, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫对香果树种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 耕作与栽培, 2022, 42(1): 18. DOI: 10.13605/j.cnki.52-1065/s.2022.01.037.
- [23] 段元杰, 孟富宣, 杨玉皎, 等. PEG模拟干旱对鲜食木薯华南9号幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(4): 42. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2020.04.008.
- [24] 王胜永, 张瑞君, 陈国良. 酿酒葡萄叶片光合特性对干旱胁迫的响应[J]. 中国南方果树, 2022, 51(6): 170. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20220149.
- [25] 张淑勇, 国静, 刘炜, 等. 玉米苗期叶片主要生理生化指标对土壤水分的响应[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 68. DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.2011.05.006.
- [26] 喻方圆, 徐锡增. 植物逆境生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4241.2003.05.002.
- [27] HAYASHI T, HARADA A, SAKAI T, et al. Ca²⁺ transient induced by extracellular changes in osmotic pressure in *Arabidopsis* leaves: differential involvement of cell wall-plasma membrane adhesion[J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(4): 661. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2005.01447.x.
- [28] 代崇雯, 刘亚敏, 刘玉民, 等. 3种外源物质对干旱胁迫下红椿生理特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 48. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.02.006.
- [29] 司诚, 李宗仁, 沈宁东. PEG-6000模拟干旱胁迫及复水对鹰嘴豆种子萌发和芽苗生长的影响[J]. 青海大学学报, 2021, 39(3): 41. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2021.03.006.
- [30] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 活性氧清除系统对干旱胁迫的响应机制[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 413. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2005.02.034.
- [31] NAIR A S, ABRAHAM T K, JAYA D S. Studies on the changes in lipid peroxidation and antioxidant in drought stress induced cowpea (*Vigna unguiculata* L.) varieties[J]. Journal of Environmental Biology, 2008, 29(5): 689. DOI: 10.2112/08A-0006.1.
- [32] 杨洁, 徐建欣, 范武波, 等. 水分胁迫对木薯苗期抗氧化酶系统的影响[J]. 中国热带农业, 2017(2): 5. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0658.2017.02.016.
- [33] 孙亚瑞, 张峰程, 许彬, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫对弥勒苣荬生长的影响[J]. 西部林业科学, 2022, 51(1): 89. DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2022.01.014.
- [34] 张爱慧, 崔群香, 杨梦娴, 等. 聚乙二醇-6000胁迫对茄子幼苗生长及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 138. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.022.
- [35] 温琦, 赵文博, 张幽静, 等. 植物干旱胁迫响应的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 11. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.003.
- [36] 杨晓燕, 熊炆, 宫雪, 等. 亚热带地区主要阔叶用材树种的非生物胁迫研究进展[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(3): 191. DOI: 10.11929/j.swfu.202109042.
- [37] 赵平娟. 两种木薯应答干旱胁迫不同策略的研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.

责任编辑: 何馨成