



外源 Ca^{2+} 连续喷施时间对辣椒淹水胁迫的缓解效应研究

欧立军¹, 刘周斌^{1,2}, 杨博智^{1,2}, 马艳青¹, 张竹青¹, 周书栋¹, 邹学校^{1,2*}

(1 湖南省蔬菜研究所, 长沙 410125; 2 中南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125)

摘要:以‘博辣红牛’辣椒为材料, 研究外源 Ca^{2+} 连续喷施不同天数对淹水胁迫下辣椒幼苗农艺性状和生理指标的影响, 探讨 Ca^{2+} 对辣椒淹水胁迫伤害的缓解作用和适宜的喷施处理天数。结果显示: (1) 辣椒幼苗生物量、壮苗指数、叶绿素、根系活力、脯氨酸、可溶性糖以及 CAT 和 SOD 活性随施 Ca^{2+} 天数的增加呈先升高后下降的趋势, MDA 含量随施 Ca^{2+} 天数的增加呈先下降后上升的趋势。 (2) 施 Ca^{2+} 1 d (T_{1d}) 处理对辣椒淹水胁迫伤害无明显缓解作用, 连续施 Ca^{2+} 3 d (T_{3d}) 和 6 d (T_{6d}) 处理的缓解效果不断增强, 至连续施 Ca^{2+} 9 d (T_{9d}) 时缓解效果达到最佳, 随后连续施 Ca^{2+} 12 d (T_{12d}) 和 20 d (T_{20d}) 处理的缓解效果又逐渐减弱, 但仍显著优于 T_{1d} 处理。研究表明, 外源 Ca^{2+} 可以诱导增加淹水胁迫下辣椒幼苗渗透调节物质含量, 上调抗氧化酶活性, 降低叶绿素的降解, 大幅提高根系活力, 从而缓解淹水胁迫所造成的各种伤害, 增强其忍耐淹水胁迫能力, 并以连续施钙 9 d 对淹水胁迫的缓解效果最佳。

关键词: 辣椒; 淹水胁迫; Ca^{2+} ; 喷施天数

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Alleviative Effects of Different Spraying Days of Ca^{2+} on Pepper Injury under Waterlogging Stress

OU Lijun¹, LIU Zhoubin^{1,2}, YANG Bozhi^{1,2}, MA Yanqing¹,
ZHANG Zhuqing¹, ZHOU Shudong¹, ZOU Xuexiao^{1,2,*}

(1 Vegetable Institution of Hunan Academy of Agricultural Science, Hunan 410125; 2 Longping Branch of Graduate School, Central South University, Hunan, 410125)

Abstract: The mitigation effects of exogenous Ca^{2+} on waterlogging-induced damages to agronomic and physiological indexes of pepper cultivar Bolahongniu were investigated by spraying Ca^{2+} on leave's surface at different days. The results showed that: (1) the biomass, seedling index, chlorophyll contents, root activity, proline, soluble sugar, SOD and CAT activities of pepper seedlings showed a trend of increasing firstly, then decreasing with spraying days increase. MDA content showed a trend of decreasing firstly, then increasing with spraying days increase. (2) Spraying calcium one day treatment (T_{1d}) showed no significant mitigation effect under waterlogging damage for pepper. Spraying calcium 3 days treatment (T_{3d}) and spraying calcium 6 day treatment (T_{6d}) showed the increased mitigation effect gradually. Spraying calcium 9 days treatment (T_{9d}) achieved the best results, while the mitigation effect gradually weakened with

收稿日期: 2015-12-22; 修改稿收到日期: 2016-10-26

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助 (CARS-25-A-8)

作者简介: 欧立军 (1976—), 男, 副教授, 主要从事植物生理生化和分子生物学研究。E-mail: ou9572@126.com

* 通信作者: 邹学校, 研究员, 主要从事蔬菜育种研究。E-mail: zouxuexiao428@163.com

spraying calcium 12 days treatment(T_{12d}) and spraying calcium 20 days treatment(T_{20d}), but still significantly better than that of T_{1d} treatment. Overall, the results suggested that Ca^{2+} might mitigate waterlogging-induced damages to pepper and achieves better alleviation effects by spraying 9 days.

Key words: pepper; waterlogging stress; Ca^{2+} ; spraying days

近年来,环境问题日益严重,气候条件不断恶化,导致中国洪涝灾害明显增多^[1]。辣椒是中国最重要的蔬菜种类之一,其年种植面积达 130 万 hm^2 以上^[2]。辣椒具有较强的耐旱能力^[3],但耐水涝能力较弱^[4],涝渍灾害频繁发生严重影响了春季和夏秋露地栽培辣椒的产量和质量,而中国种植的辣椒 60%~70%为露地栽培。因此,为解决洪涝灾害导致的辣椒产量和品质下降的问题,有关辣椒抗涝性机理的研究正日益受到重视。

钙作为偶联胞外信号和胞内生理反应的第二信使参与植物对外界的反应和适应,是植物抵抗环境胁迫的一个重要因素,自 1976 年钙调素(CaM)被发现以来,在生物学中有关钙的研究日益活跃^[5]。已有研究表明,钙在提高多种作物对干旱^[6]、低温^[7]、盐碱^[8]、涝渍^[9]等逆境胁迫的耐性方面具有一定调节作用。但是, Ca^{2+} 同时又是一种细胞毒害剂,如果胞内 Ca^{2+} 浓度过高,将会同磷酸反应形成沉淀而扰乱以磷酸为基础的能量代谢^[10]。任媛媛等^[11]对辣椒的研究发现钙素的调控作用具有两面性,一定浓度范围内能促进植株生长,增强植物抵抗逆境胁迫的能力,浓度过高则表现为负效应,贾文庆等^[12]对木槿花粉的相关研究中也得到类似结论。目前,相关钙的研究主要集中在植物所能承受的即时处理浓度上,并已探索出不同作物外源 Ca^{2+} 喷施时的最佳浓度^[11]和喷施时期^[13],但外源 Ca^{2+} 对植物逆境调节的长效喷施过程中的累积喷施量,即累积喷施毒害尚未有相关报道。因此,本试验通过分析 Ca^{2+} 喷施不同天数后辣椒农艺性状和生理生化指标,探索栽培辣椒的较佳钙离子喷施积累天数,为深入探讨辣椒抗涝性机理提供资料。

1 材料和方法

1.1 材料培养及处理

本实验选用辣椒品种‘博辣红牛’为材料,于 2014 年 8~11 月在湖南省蔬菜研究所温室中进行。供试辣椒种子经催芽后于穴盘中育苗,在 5 叶 1 心期时取生长健壮、长势一致的幼苗移至 9 cm×9 cm 育苗钵中,每钵 1 株,装土到距钵缘 1cm,土壤配比为田园土 60%+堆肥 20%+河泥 20%。待幼苗长

至 6 叶 1 心期时进行处理,淹水处理采用双套盆法,将育苗钵放入 15 cm×40 cm 大盆中,每盆随机放置 4 钵,以水面保持在育苗钵表面 2 cm 以上为淹水程度,定期补水。温室中控制昼温(28 ± 2)℃、夜温(18 ± 2)℃、湿度 60%。以 $CaCl_2$ 为外源 Ca^{2+} 来源,每株辣椒苗进行全株叶面喷施至叶面有液体下滴为止。

试验采用随机区组设计,共设 8 个不同处理。其中 T_{1d} 处理为淹水当天叶面喷施 10 mmol/L $CaCl_2$; T_{3d} 、 T_{6d} 、 T_{9d} 、 T_{12d} 、 T_{20d} 处理分别为淹水当天开始连续喷施 10 mmol/L $CaCl_2$ 3 d、6 d、9 d、12 d 和 20 d; W_{CK} 为单纯淹水对照,与各喷钙处理淹水高度一致;CK 为正常对照,正常水分管理,定期浇水维持土壤含水量为田间持水量的 75%左右。同时, W_{CK} 和 CK 在各处理喷施 $CaCl_2$ 时喷施等量清水。每个处理放置 2 盆共 8 株辣椒苗,重复 3 次。喷施 $CaCl_2$ 第 21 天停止处理,取样测定相关指标。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 生长指标 各处理随机抽取 4 株辣椒苗测定生长指标,均重复 3 次。用直尺测量株高和根长,用游标卡尺测量植株中部茎粗,再剪取植株的地上部与地下部,分别用去离子水洗净擦干水分,测定鲜重后,105℃杀青 30 min,然后 75℃烘干至恒重,测定干重。壮苗指数的测定参考韩素芹^[14]的方法:壮苗指数=(茎粗/株高+地下部干重/地上部干重)×全株干重。

1.2.2 生理生化指标 处理结束后取各处理植株倒 3~4 叶进行叶绿素、脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)、可溶性糖含量、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)活性测定,取根系进行根系活力测定,均重复 3 次。其中,叶绿素含量采用紫外分光光度法^[15-16]测定,Pro 含量采用酸性茚三酮法^[17]测定,MDA 含量采用硫代巴比妥酸法^[18]测定,可溶性糖含量采用蒽酮法^[17]测定,CAT 和 SOD 活性采用试剂盒法(南京建成生物工程研究所)测定,根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定。

1.3 数据处理

实验结果采用“平均值±标准误差”的方式表达,采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据分析,

用 Duncan’s 检验法进行多重比较,检测处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 Ca²⁺喷施天数对淹水辣椒幼苗生长的影响

淹水胁迫后,辣椒幼苗不定根干重比正常水分对照(CK)不同程度增加,其余生长指标显著降低,且在不同处理之间存在差异;随施Ca²⁺时间的延长,幼苗生长指标均呈先上升后下降的变化趋势,但大多不同程度地高于淹水对照(W_{CK}),且在T_{9d}处理下达到较大值(表1)。首先,与W_{CK}相比,幼苗的茎粗、株高和植株干重在T_{9d}处理下分别显著提高15.47%、20.25%和68.75%(*P* < 0.05),而在其余施Ca²⁺处理下无显著变化;与T_{9d}处理相比,其余施Ca²⁺处理幼苗茎粗均无显著差异,它们株高仅T_{1d}处理显著降低18.39%,而其植株干重仅在T_{1d}、T_{3d}、T_{20d}处理下显著降低25.93%~37.04%。其次,淹水各处理幼苗根系生长均受到明显影响,主根生长受抑,发黑腐烂,茎间不定根大量生成。与W_{CK}相比,幼苗根长在各施Ca²⁺处理下均无显著变化,且处理间也无显著差异(*P* > 0.05)。主根干重仅在T_{6d}和T_{12d}处理下分别比W_{CK}显著增加23.16%和25.26%(*P* < 0.05),但各施Ca²⁺处理间无显著差异。施Ca²⁺处理幼苗不定根生成量(根干重)比W_{CK}增加8.54%~295.12%,且除T_{1d}外均达到显著水平;不定根生成量最大的T_{9d}处理显著高于其余各施Ca²⁺处理,其后依次是T_{12d}、T_{6d}、T_{20d}和T_{3d}

处理,最小的是T_{1d}处理。另外,各施Ca²⁺处理壮苗指数较W_{CK}升高13.64%~109.09%,切除T_{1d}处理外均达到显著水平(*P* < 0.05)。壮苗指数最大的T_{9d}处理显著高于其余各施Ca²⁺处理,其后依次是T_{12d}、T_{6d}、T_{20d}和T_{3d}处理,T_{3d}与最小的T_{1d}处理无显著差异。可见,淹水处理促进了辣椒幼苗茎间不定根大量发生,且显著抑制了其余生长指标的增长;持续叶面喷施适宜浓度Ca²⁺能有效缓解淹水胁迫的伤害,增强幼苗的耐淹水能力,并以淹水后连续喷施9d处理效果最好。

2.2 Ca²⁺喷施天数对淹水辣椒幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

淹水胁迫后,各处理辣椒幼苗叶绿素含量均比CK不同程度地降低,且各施Ca²⁺处理间也存在显著差异;随施Ca²⁺天数的延长,幼苗叶绿素含量均呈先上升后下降的变化趋势,但大都不同程度地高于W_{CK},且均在T_{9d}处理下达到较大值(表2)。其中,施Ca²⁺处理幼苗叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量分别比W_{CK}提高9.26%~32.10%、7.02%~36.84%和9.63%~33.94%,且叶绿素a和总叶绿素含量增幅除T_{1d}处理外均达到显著水平,叶绿素b含量增幅除T_{1d}和T_{3d}处理外也均达到显著水平;同时,叶绿素含量在T_{6d}、T_{9d}、T_{12d}和T_{20d}处理间均无显著差异。另外,与CK相比,幼苗根系活力在淹水胁迫后的W_{CK}及T_{1d}、T_{3d}处理下显著降低,在T_{6d}处理下稍低,而在T_{9d}、T_{12d}和T_{20d}处理下显著升高;随施Ca²⁺天数的延长,幼苗根系活力呈先升高后下

表1 施Ca²⁺处理对淹水胁迫下辣椒幼苗生长的影响
Table 1 Effect of Ca²⁺ treatment in different days on growth of pepper seedlings under waterlogging stress

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter/mm	株高 Plant height/cm	植株干重 Dry weight/g	根长 Root length/cm	主根干重 Root dry weight/mg	不定根干重 Adventitious root dry weight/mg	壮苗指数 Seedling index
CK	2.79±0.13a	15.30±0.30a	0.45±0.04a	12.85±2.16a	68.3±1.4a	7.6±1.6d	0.174±0.0028a
W _{CK}	1.81±0.06c	11.85±0.46c	0.16±0.02c	4.60±0.37b	9.5±0.8c	8.2±0.9d	0.044±0.0026f
T _{1d}	1.86±0.05bc	11.63±0.42c	0.17±0.01c	4.85±0.20b	11.5±0.4bc	8.9±1.5d	0.050±0.0021ef
T _{3d}	1.91±0.03bc	13.10±0.83bc	0.19±0.02c	5.03±0.34b	11.6±0.5bc	15.8±1.4c	0.058±0.0013de
T _{6d}	2.01±0.08bc	13.45±0.81bc	0.21±0.01bc	4.73±0.32b	11.7±0.4b	19.9±1.2b	0.069±0.0014c
T _{9d}	2.09±0.06b	14.25±0.59ab	0.27±0.02b	5.63±0.36b	11.5±0.1bc	32.4±1.0a	0.092±0.0057b
T _{12d}	2.00±0.07bc	13.35±0.68bc	0.22±0.01bc	5.20±1.11b	11.9±0.2b	20.9±1.5b	0.071±0.0016c
T _{20d}	1.95±0.04bc	13.43±0.39bc	0.20±0.01c	5.02±0.39b	11.2±0.2bc	18.3±0.7bc	0.062±0.0052cd

注:T_{1d}、T_{3d}、T_{6d}、T_{9d}、T_{12d}和T_{20d}分别代表淹水当天开始连续1、3、6、9、12和20d叶面喷施10mmol/LCaCl₂,W_{CK}代表单纯淹水处理,CK代表正常水分对照。同列不同字母表示处理间在0.05水平上差异显著;下同

Note:T_{1d}、T_{3d}、T_{6d}、T_{9d}、T_{12d} and T_{20d} represent different treatments by spraying 10 mmol/L Ca²⁺ on leaf surface for 1,3,6,9,12 and 20 days, respectively, while W_{CK} represents waterlogging control, CK represents control. Different letters within the same column indicate significant differences at 0.05 level. The same as below

表 2 施 Ca^{2+} 处理对淹水胁迫下辣椒幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

Table 2 Effect of Ca^{2+} treatment in different days on chlorophyll contents and root activity of pepper seedlings under waterlogging stress

处理 Treatment	叶绿素 a Chl. a /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 b Chl. b /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总叶绿素 Chl. (a+b) /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	根系活力 Root activity /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
CK	2.45±0.10a	0.88±0.06a	3.33±0.16a	227.63±5.09d
W _{CK}	1.62±0.06e	0.57±0.01d	2.18±0.06e	107.30±3.45f
T _{1d}	1.77±0.05de	0.61±0.02cd	2.39±0.06de	115.95±2.61f
T _{3d}	1.92±0.05cd	0.66±0.03cd	2.58±0.08cd	161.52±3.64e
T _{6d}	1.98±0.08bc	0.71±0.05bc	2.68±0.13bcd	219.63±5.22d
T _{9d}	2.14±0.04b	0.78±0.04ab	2.92±0.08b	293.95±6.05a
T _{12d}	2.01±0.07bc	0.73±0.03bc	2.75±0.10bc	276.32±3.42b
T _{20d}	1.94±0.05bcd	0.71±0.03bc	2.65±0.08bcd	239.16±2.04c

降的变化趋势,并在 T_{9d}处理下达到最大值,所有施 Ca^{2+} 处理均高于 W_{CK},增幅为 8.06%~173.95%,且除 T_{1d}外均达到显著水平;各施 Ca^{2+} 处理间根系活力均存在显著差异,从低到高依次为 T_{1d}、T_{3d}和 T_{6d}、T_{20d}、T_{12d}和 T_{9d}。可见,淹水处理显著降低了辣椒幼苗的叶绿素含量和根系活力,持续叶面喷施适宜浓度的 Ca^{2+} 有效缓解淹水胁迫的伤害,并以淹水后连续喷施 9 d 处理效果最好,且对根系活力的促进效果尤为显著,甚至优于正常水分处理的幼苗。

2.3 Ca^{2+} 喷施天数对淹水辣椒幼苗渗透调节物质含量的影响

与 CK 相比较,辣椒幼苗的可溶性糖含量淹水胁迫后均显著升高($P<0.05$),而各淹水处理组可溶性糖含量升高幅度存在显著差异;随施用 Ca^{2+} 天数的延长,幼苗的可溶性糖含量呈先升高后下降的变化趋势,并在 T_{9d}处理下达到最大值(图 1,A);与 W_{CK} 相比较,幼苗可溶性糖含量在 T_{1d}处理小幅下降 7.41%,而在其余施 Ca^{2+} 处理下显著升高 27.62%~45.89%,其中的 T_{20d}处理显著较低,其余 4 个处理间无显著差异。同时,与可溶性糖含量变化规律相似,幼苗 Pro 含量在淹水胁迫后也均较 CK 显著上升($P<0.05$),并随施用 Ca^{2+} 天数的延长也呈先升后降的变化趋势,在 T_{12d}处理下达到最大值;与 W_{CK} 相比,T_{1d}处理 Pro 含量无显著变化,T_{3d}~T_{20d}处理则显著增加 20.46%~62.00%,且 T_{6d}、T_{9d}与 T_{12d}处理间差异不显著,而 T_{3d}和 T_{20d}处理则较 T_{12d}处理显著下降(图 1,B)。可见,淹水胁迫能显著诱导辣椒幼苗渗透调节物质含量上调,持续叶面喷施适宜浓度 Ca^{2+} 能进一步加强这种上调趋势,从而有效提高幼苗淹水胁迫下的渗透调节能力,并以淹水

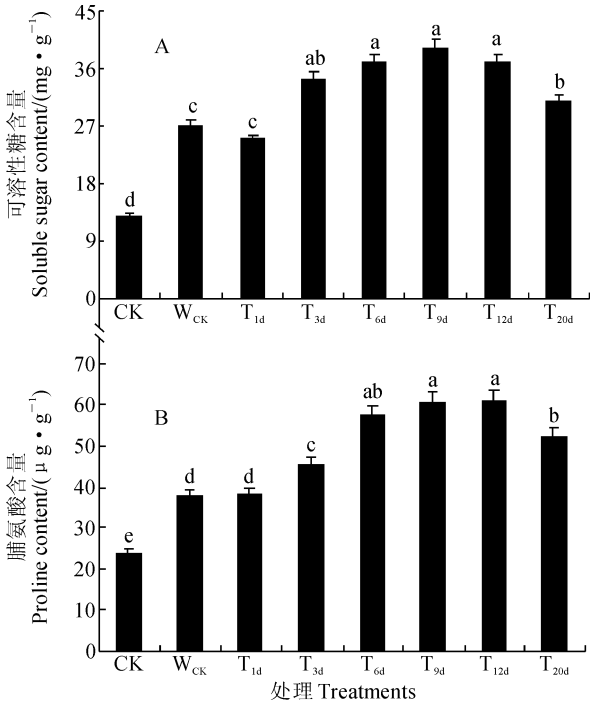


图 1 Ca^{2+} 喷施天数对淹水辣椒幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig. 1 Effect of Ca^{2+} treatment in different days on osmolytes content of pepper seedlings under waterlogging stress

胁迫后连续喷施 9 和 12 d Ca^{2+} 处理效果较佳。

2.4 Ca^{2+} 喷施天数对淹水辣椒幼苗 CAT 和 SOD 活性和丙二醛含量的影响

图 2,A、B 显示,辣椒幼苗 CAT 和 SOD 活性在 W_{CK} 处理下均比正常水分对照(CK)显著降低,而在各施 Ca^{2+} 处理下均比 CK 不同程度增强,且 T_{6d}、T_{9d}和 T_{12d}处理增幅均达到显著水平;随 Ca^{2+} 施用天数的延长,辣椒幼苗 CAT 和 SOD 活性均呈先升

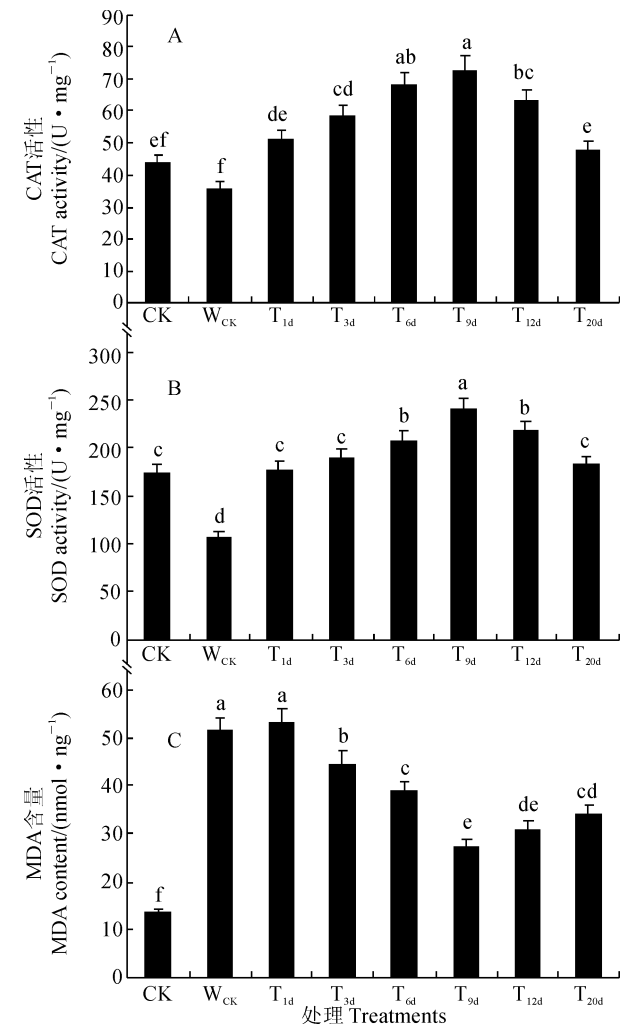


图 2 Ca^{2+} 不同喷施天数对淹水胁迫下辣椒幼苗 CAT 和 SOD 活性及丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effect of Ca^{2+} treatment in different days on CAT and SOD activities and MDA content of pepper seedlings under waterlogging stress

高后下降的变化趋势,且均在 T_{9d} 处理下达到最大值;与 W_{CK} 处理相比较,幼苗 CAT 和 SOD 活性分别显著提高 43.17%~103.42% 和 65.53%~124.77%; T_{9d} 处理 CAT 活性仅与 T_{6d} 处理无显著差异,而其 SOD 活性则显著高于其余处理。同时,所有淹水处理幼苗 MDA 含量均大幅显著高于 CK;随施 Ca^{2+} 天数的延长,幼苗 MDA 含量呈先下降后升高的变化趋势,并在 T_{9d} 处理下达到最低值;与 W_{CK} 相比较,幼苗 MDA 含量在 T_{1d} 处理下略有升高 (3.61%),而在其余施 Ca^{2+} 处理下显著降低 13.04% 和 24.12%~46.63%;施 Ca^{2+} 处理间比较,MDA 含量分别在 T_{1d} 和 T_{9d} 处理下达到最高和最低值,但仅 T_{12d} 与 T_{9d} 处理无显著差异,其余则显著高于 T_{9d} 处理,而低于 T_{1d} 处理(图 2,C)。可见,淹水

处理抑制了辣椒幼苗的保护酶活性,而持续叶面喷施适宜浓度的外源 Ca^{2+} 能不同程度促进淹水胁迫下保护酶活性上调,增强幼苗自身清除活性氧能力,降低膜脂过氧化程度,并以连续喷施 9 d 的效果最好。

3 讨 论

植物在淹水胁迫下,根系氧气供应受阻导致线粒体 ATP 合成及 NADH 的氧化受阻^[19],无法通过正常的有氧呼吸维持能量代谢,转而进行无氧呼吸,但此过程有机物质损耗大,能量生成少,同时产生乙醇等有害代谢产物^[20],导致植物代谢紊乱,生长受抑。本试验中,单纯淹水胁迫使辣椒幼苗茎粗、株高、干重和壮苗指数等生长指标较正常水分对照显著下降,细胞质膜伤害指标丙二醛含量显著升高,根系活力、保护酶等生理代谢指标下降。这表明淹水胁迫对辣椒幼苗伤害显著,与任佰朝等^[21]对夏玉米的相关研究结果一致。

Ca 能够在减轻逆境对植物的伤害方面起到一定的作用。遭受逆境胁迫时,植物会通过改变质膜透性并开启 Ca 通道来提高细胞质内游离 Ca^{2+} 浓度,作用于靶酶或参与蛋白磷酸化调控,启动相应的生理生化反应^[10]。本试验中施 Ca^{2+} 处理使辣椒幼苗茎粗、株高、干重和壮苗指数等生长指标较单纯淹水处理有所上升,而丙二醛积累量减少,根系活力、CAT 和 SOD 活性升高。这表明施 Ca^{2+} 能够有效缓解淹水胁迫对辣椒幼苗的伤害,与逆境胁迫下对花生^[22]、马铃薯^[23] 和黄瓜^[24] 的研究结果一致。

钙对植物逆境胁迫下的正效应已有诸多报道,但其对植物的负效应也已有相关报道^[11-13]。因此,在外源 Ca^{2+} 喷施对植物产生的两面性作用中探索一个最佳正效应点,成为发挥钙素最大效用的关键问题。相关研究表明^[25-27],钙过量会导致茶树根系表面附着一层白色黏膜抑制新根生长,促进吸收根衰亡;同时在一定程度上引起光合系统膜结构破坏,导致电子传递链受阻,拮抗其他元素(如镁、钾)的吸收,而钾肥是作物必须营养元素,植物根系中的镁则不仅影响氮素的同化,同时还影响同化产物进一步合成氨基酸,从而对植物代谢产生影响。本试验中通过淹水胁迫下外源 Ca^{2+} 不同喷施天数的设定,发现各处理间外源 Ca^{2+} 对淹水胁迫的缓解效应具有显著差异,其缓解效果随喷施天数的增加呈先升高后下降的变化趋势。 T_{1d} 处理除 CAT 和 SOD 活性显著高于单纯淹水处理外,其余各指标均与单纯淹

水处理无显著差异,这可能是由于 Ca^{2+} 喷施积累量过低,不足以作用于植物体引起相关生理生化反应。随后, $\text{T}_{3\text{d}}$ 和 $\text{T}_{6\text{d}}$ 处理缓解效应不断升高,到 $\text{T}_{9\text{d}}$ 处理时达到各处理中最佳缓解效果。这可能是由于随着喷施时间的延长, Ca^{2+} 逐渐积累,促使植物体内 Ca 离子通道打开, Ca^{2+} 进入细胞参与胞内信号转导,诱导植株进行各种生理生化反应应对淹水胁迫。之后, $\text{T}_{12\text{d}}$ 和 $\text{T}_{20\text{d}}$ 处理的缓解效果开始逐渐下降。表明在连续喷施 9 d 后再继续喷施外源 Ca^{2+} , 出现 Ca^{2+} 过量富集现象,对辣椒幼苗产生 Ca^{2+} 毒害作用,导致其对淹水胁迫的缓解作用降低,这与前人在枇杷^[28] 和番茄^[29] 上的研究结果一致。但 $\text{T}_{20\text{d}}$ 处理的缓解效果虽然较 $\text{T}_{9\text{d}}$ 处理显著降低,但仍优于单纯淹水处理,可能是由于 Ca^{2+} 过量富集的程度并未达到造成辣椒反向伤害的临界值,因而只造成缓解

淹水胁迫的效果减弱而未产生明显的反向伤害作用。因此,关于淹水胁迫下钙离子缓解效应的临界值可以成为下一步的研究方向,通过喷施天数、单次喷施剂量和总喷施量协同探索缓解效应临界值,以期生产中应用钙离子缓解逆境胁迫奠定更为全面的理论基础。

综上所述,本试验表明淹水胁迫对辣椒幼苗农艺性状和生理指标均有显著影响,严重伤害辣椒幼苗正常生长;而喷施外源钙则能诱导淹水胁迫下幼苗自身渗透调节物质含量增加,上调抗氧化酶活性,降低叶绿素降解,大幅提高根系活力,从而缓解淹水胁迫所造成的各种伤害,增强其忍耐淹水胁迫能力,其中以连续施钙 9 d 为最佳喷施天数,其次为 12 d 和 6 d,而喷施 1 d 对辣椒幼苗无明显缓解效果。

参考文献:

[1] 时明芝,周保松. 植物涝害和耐涝机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, **34**(2): 209-210.
SHI M Z, ZHOU B S. Research advance in physiological damage of flood and water-logging resistance[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, **34**(2): 209-210.

[2] 邹学校. 辣椒遗传育种学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[3] OU L J, DAI X Z, ZHANG Z Q, *et al.* Responses of pepper to waterlogging stress[J]. *Photosynthetica*, 2011, **49**(49): 339-345.

[4] OU L J, ZOU X X. The photosynthetic stress responses of five pepper species are consistent with their genetic variability[J]. *Photosynthetica*, 2012, **50**(1): 49-55.

[5] 何龙飞,沈振国,刘友良. 铝胁迫下钙对小麦液泡膜功能和膜脂组成的影响[J]. 南京农业大学学报, 2000, **23**(1): 10-13.
HE L F, SHEN Z G, LIU Y L. Effects of calcium on the function and lipid composition of tonoplast from roots of two wheat cultivars under aluminium stress[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, **23**(1): 10-13.

[6] 陈莹,王普昶,赵丽丽,等. 外源钙对干旱胁迫下木豆种苗生理特性的影响[J]. 草地学报, 2014, **22**(5): 1 051-1 055.
CHEN Y, WANG P C, ZHAO L L, *et al.* Effects of exogenous calcium on the physiological characters of *Cajanus cajan* under drought stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, **22**(5): 1 051-1 055.

[7] 陈贵林,高洪波,乜兰春,尚庆茂,刘中笑. 钙对茄子嫁接苗生长和抗冷性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(4): 478-482.
CHEN G L, GAO H B, NIE L C, *et al.* Effect of calcium on growth and cold resistance of grafted eggplant seedlings[J]. *Plant Nutrition & Fertilizing Science*, 2002, **8**(4): 478-482.

[8] 杨风军,李天来,臧忠婧,等. 外源钙施用时期对缓解盐胁迫番茄幼苗伤害的作用[J]. 中国农业科学, 2010, **43**(6): 1 181-1 188.
YANG F J, LI T L, ZANG Z J, *et al.* Effects of timing of exogenous calcium application on the alleviation of salt stress in the tomato seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, **43**(6): 1 181-1 188.

[9] 张恩让,任媛媛,胡华群,等. 钙对淹水胁迫下辣椒幼苗根系生长和呼吸代谢的影响[J]. 园艺学报, 2009, **36**(12): 1 749-1 754.
ZHANG E R, REN Y Y, HU H Q, *et al.* Effects of calcium on growth and respiratory metabolism of hot pepper seedling roots under flood stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, **36**(12): 1 749-1 754.

[10] 龚明,李英,曹宗巽. 植物体内的钙信使系统[J]. 植物学通报, 1990, **7**(8): 19-29.
GONG M, LI Y, CAO Z X. Calcium messenger system in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1990, **7**(8): 19-29.

[11] 任媛媛,张恩让. 钙对水淹胁迫下辣椒幼苗生长的影响[J]. 种子, 2009, **28**(5): 43-48.
REN Y Y, ZHANG E R. Effect of calcium on growth of pepper seedlings under root-zone flood stress[J]. *Seed*, 2009, **28**(5): 43-48.

[12] 贾文庆,刘会超,郭丽娟. 外源钙对木槿花粉萌发的影响[J]. 山西农业科学, 2007, **35**(6): 56-58.
JIA W Q, LIU H C, GUO L J. Effects of calcium treatment to characteristics of germination and tube growth of pollen in *Hibiscus syriacus*[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, **35**(6): 56-58.

[13] 刘周斌,杨博智,欧立军,等. 不同时期外源 Ca^{2+} 缓解辣椒淹水胁迫伤害的研究[J]. 园艺学报, 2015, **42**(8): 1 487-1 494.
LIU Z B, YANG B Z, OU L J, *et al.* The impact of different

- Ca^{2+} spraying period on alleviating pepper injury under the waterlogging stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, **42**(8):1 487-1 494.
- [14] 韩素芹,王秀峰,魏 珉,等. 甜椒穴盘苗壮苗指数及其与苗期性状的相关性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2004, **35**(2):187-190.
HAN S Q, WANG X F, WEI M, *et al.* Study of plug seedling index of sweet pepper and relationship between seedling index and characters[J]. *Journal of Shandong Agricultural University* (Nat. Sci. Edi.), 2004, **35**(2):187-190.
- [15] AMON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Phenoloxidases in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949. **24**(1):1-15.
- [16] LICHTENTHALER H K. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes[J]. *Methods in Enzymology*, 1987, **148**:349-382.
- [17] 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.
- [18] 上海植物生理学会. 植物生理学实验手册[M]. 上海:上海科技出版社,1985.
- [19] PRADET A, BOMSEL J L. Energy metabolism in plants under hypoxia and anoxia. Plant life in anaerobic environments [J]. *Ann. Arbor Sci. Publication*,1978: 89-118.
- [20] JACKSON M B, RICARD B. Biochemistry and molecular biology of plant root systems subjected to flooding of the soil [M]. // KROON H, VISSER E J W. Root Ecology. Berlin: Springer. Cermany, 2003:193-213.
- [21] 任佰朝,张吉旺,李 霞,等. 淹水胁迫对夏玉米籽粒灌浆特性和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, (21):4 435-4 445.
WU B C, ZHANG J W, LI X, *et al.* Effect of waterlogging on grain filling and quality of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, (21):4 435-4 445.
- [22] 顾学花,孙莲强,张佳蕾,等. 施钙对干旱胁迫下花生生理特性及产量的影响[J]. 花生学报, 2013, **42**(2):1-8.
GU X H, SUN L Q, ZHANG J L, *et al.* Effects of calcium fertilizer application on peanut physiological characteristics and yield under drought stress[J]. *Journal of Peanut Science*, 2013, **42**(2):1-8.
- [23] 魏翠果,陈有君,蒙美莲,等. 钙对 NaCl 胁迫下马铃薯脱毒苗离子吸收、分布的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, **21**(4):993-1 005.
WEI C G, CHEN Y J, MENG M L, *et al.* Effects of calcium on ion absorption and distribution of virus-free potato seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(4):993-1 005.
- [24] 严 蓓,孙 锦,束 胜,等. 外源钙对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗叶片光合特性及碳水化合物代谢的影响[J]. 南京农业大学学报, 2014, **37**(1):31-36.
YAN B, SUN J, SHU S, *et al.* Effects of exogenous calcium on photosynthetic characteristics and carbohydrate metabolism in leaves of cucumber(*Cucumis sativus* L.) seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, **37**(1):31-36.
- [25] 申加枝,张新富,胡建辉. 钙过量对茶树新梢品质成分及根系生长的动态影响[J]. 湖北农业科学, 2014, **53**(17):4 108-4 112.
SHEN J Z, ZHANG X F, HU J H. Dynamic effects of excessive calcium on biochemical components in young shoots and root growth of tea[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, **53**(17):4 108-4 112.
- [26] 王跃华,张丽霞,孙其远. 钙过量对茶树光合特性及叶绿体超微结构的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2010, **16**(2):432-438.
WANG Y H, ZHANG L X, SUN Q Y. Effects of excessive calcium fertilization on photosynthetic characteristics and chloroplast ultra-structure of tea tree[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2010, **16**(2):432-438.
- [27] 杨亚军. 中国茶树栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2005.
- [28] 廖汝玉,金 光,尹兰香,等. 钙胁迫对枇杷小苗叶片若干氮代谢指标的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, **31**(10):43-47.
LIAO R Y, JIN G, YIN L X, *et al.* Effects of calcium stress on some nitrogen metabolism indexes in loquat seedling leaves [J]. *Journal of Southwest University* (Nat. Sci. Edi.), 2009, **31**(10):43-47.
- [29] 黄守程,黄 萍,陆晓民. 硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄叶片抗氧化酶活性及光合性能的影响[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(9):1 823-1 828.
HUANG S C, HUANG P, LU X M. Effects of cerium sulfate foliar spray on antioxidant activities and photosynthesis of tomato seedling leaves under calcium nitrate stress[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2015, **35**(9):1 823-1 828.

(编辑:裴阿卫)