文章编号: 1672 - 3317 (2022) 09 - 0061 - 10

淹水胁迫及恢复对樱桃番茄苗期根系和

叶片细胞膜稳定性的影响

刘聪聪¹, 兰超杰², 李 欢³, 李长江^{2*}, 邱 尧², 玉香伦² (1.贵州省生物技术研究所, 贵阳 550000; 2.海南大学 热带作物学院, 海口 570228; 3.贵州省农作物品种资源研究所, 贵阳 550000)

摘 要:【目的】明确淹水天数和恢复天数对樱桃番茄苗期生长发育和生理生化指标的影响,为热带地区樱桃番茄 优化栽培提供参考。【方法】以"红妃6号"(HF)和"千禧"(QX)为试验材料,设置6个不同淹水天数:淹水 Od(CK)、淹水2d(W2)、4d(W4)、6d(W6)、10d(W10)和14d(W14);5个不同恢复天数:恢复2、 4、6、10 d和14 d,探究淹水胁迫下不同樱桃番茄苗期恢复的响应规律。【结果】淹水天数和恢复天数均可显著影 响樱桃番茄苗期根系生长、抗氧化酶活性及膜脂过氧化程度。在淹水2d时解除胁迫并恢复14 d,千禧品种的超氧化 物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性均较CK高,丙二醛(MDA)量较CK降低;而红妃6号品种在淹水 6d时解除胁迫并恢复14 d,其过氧化氢酶(CAT)和POD活性、MDA量和超氧阴离子自由基(O₂⁻⁻)产生速率较 CK仍能恢复至正常水平,淹水时间相同时,红妃6号品种在恢复2~4 d时的根系活力、CAT和POD活性较CK升高,而千禧品种多在恢复6d时CAT活性较CK提高,随着淹水天数的延长,千禧品种恢复能力逐渐减弱。【结论】 不同品种对淹水胁迫及恢复的相应规律不同,淹水2~6d时解除胁迫,红妃6号恢复效果较好,且在2~6d后恢复能 力逐渐趋于稳定。

关键词:淹水;恢复;樱桃番茄;生理生化特性
 中图分类号:S431.191
 文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022219

OSID

刘聪聪, 兰超杰, 李欢, 等. 淹水胁迫及恢复对樱桃番茄苗期根系和叶片细胞膜稳定性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 61-70.

LIU Congcong, LAN Chaojie, LI Huan, et al. Effects of Flooding Stress and Recovery on Root and Leaf Cell Membrane Stability at Cherry Tomato Seedlings[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 61-70.

0 引 言

【研究意义】樱桃番茄(Solanum lycopersicum Mill.)为茄科番茄属植物,已成为世界上最主要的经 济蔬菜作物之一^[1]。近年来,樱桃番茄在我国热带地 区作为反季节果蔬被大面积推广种植,热带地区通常 在每年 8—10月进行育苗,育苗期正值雨季,降水集 中且强度大^[2-3],农田涝害时有发生,严重影响樱桃 番茄苗期生长和产量的提升^[4]。因此,研究淹水胁迫 下不同樱桃番茄苗期恢复的响应规律十分必要。【研 究进展】樱桃番茄是番茄最重要的品种之一^[5],由于 其口味和营养俱佳,且对于多种疾病、衰老有预防作 用^[6-7],现已成为广泛销售的鲜食或轻烹食物,经济 价值日益增长^[8-9],也是研究茄科作物遗传物质及逆 境抗性的模式植物^[10]。涝害是作物生长过程中遭受的

主要非生物胁迫之一[11],会对作物的生长、产量以及 品质等多方面造成不利影响^[8-9]。涝害可抑制作物根 系生长,降低根系活力^[12];使细胞膜遭到破坏,胞体 内丙二醛(Malondialdehyde, MDA)量增加;叶片抗 氧化酶活性下降^[13],活性氧代谢失衡,造成活性氧的 大量积累[11]。植物体内渗透调节物质是重要的保护机 制,其量会因淹水胁迫发生变化,调控体内代谢过程 以适应淹水环境[14]。淹水环境导致土壤缺氧,作物根 系有氧呼吸受阻, 进而影响根系与地上部之间的物质 运输以及叶片的光合作用[15]。不同作物、不同品种在 淹水胁迫后的表现不同,恢复能力也存在较大差异。 以往对多种作物在淹水条件下的生理变化及产量研 究较多,试验表明,水稻在淹水胁迫下,随着淹水程 度加深,地上部中的游离脯氨酸量先降低后升高,而 可溶性蛋白量则表现为先升高后下降[16];在对玉米的 研究中发现,淹水后叶片中脯氨酸量上升,可溶性蛋 白量下降[17]; 甜瓜在淹水处理和恢复后, 可溶性糖量 下降, MDA 量、超氧阴离子自由基 (superoxide anion radical, $O_2^{(-)}$ 产生速率提高, 淹水胁迫对植株生长的 抑制作用在胁迫解除后具有不同程度的恢复[14]。【切

收稿日期: 2022-04-20

基金项目:海南省自然科学基金项目(318QN201);国家自然科学基金 项目(31860130)

作者简介:刘聪聪(1993-),女,河南焦作人。研究实习员,硕士研究 生,主要从事作物抗逆生理研究。E-mail:1205879453@qq.com

通信作者: 李长江(1989-),男,河南安阳人。教授,博士研究生,主要从事作物高产高效研究。E-mail:lichangjiang99@163.com

入点】目前,对樱桃番茄的研究多集中于病害防控和 优化施肥模式等方面,而对于淹水胁迫的研究较少, 其中对淹水胁迫解除后的恢复效应更是鲜有报道。因 此樱桃番茄在不同品种、不同淹水时间及淹水胁迫解 除后恢复能力的研究十分必要。【拟解决的关键问题】 鉴于此,本研究拟探究不同品种樱桃番茄苗期经过不 同淹水时间处理并解除淹水胁迫后的恢复效应,为樱 桃番茄的抗逆性研究及热带地区农业的发展提供理 论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2018 年 9—12 月在海南省海口市海南大 学热带农林学院农学基地温室(20 3℃N,110 99E) 进行,根据前期研究结果^[18],选取淹水不敏感型品种 红妃 6 号(HF)和淹水敏感型品种千禧(QX),于 2018 年 9 月育苗,至三叶一心时选取长势一致的幼苗 移栽入花盆中(直径×高度:15 cm×15 cm),每盆 1 株;采用盆栽试验,供试土壤为海南大学农学基地番 茄农田 0~20 cm 土层的砖红壤,风干后过 2 mm 筛,每 盆装土 2.5 kg,待幼苗发育至四叶一心时开始试验。试 验期间,温室昼/夜温度分别设定为当地 9—10 月多年 平均值 28/23 ℃,湿度为 82%。盆栽土壤基础理化特 性为 pH 值 6.75、有机质量 2.89%、碱解氮量 122.90 mg/kg、速效磷量 39.89 mg/kg、速效钾量 0.19 g/kg。 1.2 试验设计

淹水处理设置为淹水 0 d (CK) 、 2 d (W2) 、 4 d (W4)、6d (W6)、10d (W10) 和 14d (W14), 解除淹水胁迫分别恢复2、4、6、10d和14d。试验 中,CK 条件下的土壤含水率为田间最大持水率的 70%~75%; 淹水处理采用双套盘法, 即将花盆放入上 口径×底径×高为 20 cm×17 cm×19 cm 的大盆中进行 淹水,每天控制水面高于土面 2 cm, 且每天及时对蒸 发失水进行补充。正常水分处理通过称盆法每2天补 水1次,使得土壤含水率保持在最大持水率的75%左 右。当淹水时间达到后,迅速将花盆从大盆中取出, 放置 3~5 h,待培养钵中无积水渗出并最终使得培养 钵中土壤含水率逐渐达到并保持在土壤最大持水率 的 70%~75%。每个处理重复 3 次,每盆栽种 6 株。 在恢复生长的第0、2、4、6、10天和第14天取样, 每个重复取2株,取各植株功能叶(由下至上计数第4 片完全展开叶)和根系,于-80 ℃冰箱中保存,分别用 于各项生理生化指标的测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生理生化指标的测定

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的测定采用氮蓝四

唑(NBT)光还原法;过氧化氢酶(CAT)活性的测 定采用紫外吸收法;过氧化物酶(POD)活性的测定 采用愈创木酚显色法。丙二醛的测定采用硫代巴比妥 酸(TBA)比色法;超氧阴离子的测定参照 Lin 等^[15] 的方法进行;游离脯氨酸(Pro)量的测定采用酸性茚 三酮显色法;可溶性糖量的测定采用硫酸-蒽酮比色法。 1.3.2 数据处理与分析

利用 Microsoft Office Excel 2010 整理数据,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行方差分析和主成分分析,各处理间的显著性差异通过 ANOVA 进行分析,利用 Duncan 检测进行多重比较,*p*<0.05 时表明差异显著。利用 Graphpad Prism 6.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同淹水时间对樱桃番茄根系形态恢复的影响

由表1可知,相同淹水恢复时间,红妃品种经淹 水处理4、6d和10d的总平均直径均比CK高,淹 水处理2d和14d的总平均直径则低于CK,各处理 与CK之间均无显著差异。相同的淹水解除时间,千 禧品种经淹水处理2d和4d的总平均直径均比CK 高,经淹水处理6、10d和14d的总平均直径则比 CK低。其中,淹水6d处理的总平均直径仅为CK 的43.1%,与CK差异显著。

相同淹水解除时间, 红妃品种经淹水处理 4 d 和 10 d 的总体积均比 CK 高, 淹水处理 2、6 d 和 14 d 的总体积则比 CK 低。其中, 经淹水处理 4 d 和 14 d 的根系总体积与 CK 有显著差异,淹水处理 4 d 的总 体积约为 CK 的 5 倍,淹水处理 14 d 的根系总体积比 CK 的低 80.1%。相同淹水解除时间, 千禧品种只有 经淹水处理 4 d 的总体积比 CK 高,而经淹水处理 2、 6、10 d 和 14 d 的总体积均比 CK 低。其中,淹水处 理 6、10 d 和 14 d 的根系总体积比 CK 低 71.5%,淹水处 理 10 d 的根系总体积比 CK 高 27.9%,淹水处理 14 d 的根系总体积比 CK 的低 79.9%。

相同淹水解除时间, 红妃品种经淹水处理 2 d 和 4 d 的总表面积均比 CK 高, 淹水处理 6、10 d 和 14 d 的总表面积则比 CK 低。其中, 在经淹水处理 14 d 的 根系表面积与 CK 有显著差异, 比 CK 低 79.6%。在相 同的淹水解除时间下, 千禧品种只有经淹水处理 4 d 的总表面积比 CK 高, 而经淹水处理 2、6、10 d 和 14 d 的总表面积均比 CK 低。其中, 在经淹水处理 14 d 的与 CK 有显著差异, 比 CK 低 71.7%。

相同淹水解除时间, 红妃品种经淹水处理 2、4 d 和 6 d 的根系总长度均比 CK 高, 淹水处理 10 d 和 14 d 的根系总长度则比 CK 低。其中, 经淹水处理 14 d 的 根系表面积与 CK 有显著差异,淹水处理比 CK 低 64.5%。相同淹水解除时间,千禧品种经淹水处理 4、 6 d 和 10 d 的根系总长度均比 CK 长,在经淹水处理

2 d 和 14 d 的根系总长度则比 CK 短。其中,经淹水 处理 4 d 的根系表面积与 CK 有显著差异,为 CK 的 3 倍。

|--|

Table 1	Changes of root	morphology	during r	estoration o	f cherry	tomato aft	er flooding

形大北左	品种	5 5 1田	淹水时长/d					
形态指怀		处理	2	4	6	10	14	
	HF	CK	0.65±0.04a	0.55±0.11a	0.72±0.17b	1.33±0.01a	0.81 ±0.09a	
相乏当亚均古尔		W	0.54 ±0.08a	0.80±0.12a	0.74±0.19b	1.55±0.38a	0.58±0.15a	
恨东总干均且任	QX	СК	0.42±0.01a	0.43 ±0.20a	1.58±0.18a	1.27±0.12a	1.05 ±0.06a	
		W	0.51 ±0.19a	0.53 ±0.19a	0.68±0.14b	1.04±0.13a	0.68±0.16a	
	HF	СК	3.56±0.32a	0.91 ±0.42b	3.68±1.66a	13.84±0.01a	13.91±0.21a	
相亥首体和		W	2.77 ±1.08a	4.45 ±0.93a	3.09±2.40a	15.66±0.28a	2.76±0.09b	
低尔芯仲怀	QX	СК	1.01 ±0.46a	0.61 ±0.53b	8.32±0.02a	12.90±1.26a	11.22±0.31a	
		W	0.39±0.17a	1.22±0.57a	2.37±1.20b	9.32±1.77b	2.26±0.91b	
	HF	СК	217.95±5.36a	75.11±5.40a	194.36±16.85a	415.21±0.01b	419.68±12.79a	
相乏芭丰而和		W	285.06±14.44a	226.79±14.45a	156.5±9.06a	370.32±32.04b	85.78±8.69b	
低东心衣田桥	QX	CK	97.83±4.35a	42.79±2.79b	213.1±25.12a	604.50±12.71a	457.97±10.46a	
		W	31.03±2.10b	102.44±2.98a	130.5±15.36a	344.11±13.39b	129.66±4.89b	
	HF	СК	1 067.84±43.65a	954.97±38.52a	863.4±3.27a	973.73±17.49a	1 591.72±48.18a	
相亥肖七府		W	1 715.39±76.64a	1 144.69±26.63a	921.6±6.44a	984.38±27.16a	$563.87 \pm 19.79b$	
低尔芯 以反	QX	СК	751.03±43.98a	323.61±24.92b	440.0±11.15a	433.04±10.29a	1 324.09±45.47a	
		W	290.52±8.79b	1 005.00±41.34a	591.4±86.09a	1 024.99±22.91a	672.58±19.26a	

注 不同小写字母表示在同一处理时间 2 个品种不同处理间差异显著(p<

2.2 不同淹水时间对樱桃番茄抗氧化酶系统恢复的 影响

由图 1 可知, 红妃 6 号在淹水解除后恢复 14 d 时,除 W4 处理与 CK 相近外,其他处理的 CAT 活 性均高于 CK。W2 处理和 W4 处理在恢复期间的变 化趋势与 CK 极为相近,但 W2 处理在恢复 10~14 d时,其 CAT 活性较 CK 上升,其中在恢复 4、10 d和 14 d时差异显著;W6 处理和 W14 处理的 CAT 活性整体呈升高-下降-升高趋势,W10 处理的 CAT 活性整体呈先下降后升高趋势。



图1 樱桃番茄红妃6号苗期淹水后恢复期间过氧化氢酶活性的变化

Fig.1 Changes of CAT activity during restoration of cherry tomato Hongfei 6 after flooding

由图 2 可知, 千禧品种在淹水解除后恢复 14 d 时, 除 W6 处理和 W10 处理的 CAT 活性与 CK 水平 相近外, 其他处理均低于 CK。W2、W6 处理和 W14

处理在恢复期间,CAT 活性整体呈升高-下降-升高的 趋势,在整个恢复期与CK 无显著差异。W10 处理在 恢复第0天显著高于CK,其余时间与CK 无显著差异。

灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com



Fig.2 Changes of CAT activity during restoration of cherry tomato Qianxi after flooding

由图 3 可知, 红妃 6 号品种 W2 处理和 W6 处理的 SOD 活性在恢复期间较 CK 先升高后下降。其中W2 处理在恢复 14 d 高于 CK, 而 W6 处理在恢复 14 d 低于 CK; W4 处理在恢复 4 d 后均与 CK 变化趋势

一致,且二者无显著差异;W10处理和W14处理则 与CK的SOD活性差异较为明显,其中除W10处理 在恢复4d时略高于CK外,W10处理和W14处理 在恢复2~14d始终低于CK。

图3 樱桃番茄红妃6号苗期淹水后恢复期间超氧化物歧化酶活性的变化

Fig.3 Changes of SOD activity during restoration of cherry tomato Hongfei 6 after flooding

由图4可知,千禧品种W2处理和W6处理的SOD 活性在恢复期间较CK先升高后下降,并在恢复后期 保持在较为平稳的水平,其中W6处理在恢复6~14 d 显著低于CK;W4处理则整个恢复期间均与CK变化 趋势一致,但自恢复2d起低于CK;W10处理和W14 处理则与CK的SOD活性变化趋势有所不同,均较 CK呈下降-上升-下降的趋势,二者除在恢复6d达到 最高点并较CK上升外,在恢复2~14d始终低于CK。

刘聪聪 等:淹水胁迫及恢复对樱桃番茄苗期根系和叶片细胞膜稳定性的影响

图4 樱桃番茄千禧苗期淹水后恢复期间超氧化物歧化酶活性的变化

Fig.4 Changes of SOD activity during restoration of cherry tomato Qianxi after flooding 由图 5 可知, 红妃 6 号品种除 W2 处理外, 其他 处理的 POD 活性在恢复期间均较 CK 升高。W2 处理 在恢复前期也相比 CK 呈上升趋势,但在恢复 6 d 时

和 W6 处理与 CK 变化趋势相近。其中, W6 处理在恢 复4d时与CK差异最显著;W10处理和W14处理则 与CK 差异较大。

图5 樱桃番茄红妃6号苗期淹水后恢复期间过氧化物酶活性的变化

Fig.5 Changes of POD activity during restoration of cherry tomato Hongfei 6 after flooding

由图 6 可知, 千禧品种 W2、W4 处理和 W6 处 理的POD活性在恢复期间较CK呈下降-升高-下降的 趋势, 其中 W2 处理在恢复 14 d 时略高于 CK, 而

W4 处理和 W6 处理则均低于 CK; W10 处理和 W14 处理则较 CK 表现为降低-升高-降低-升高,并在恢复 14 d 高于 CK。

Fig.6 Changes of POD activity during restoration of cherry tomato Qianxi after flooding

2.3 不同淹水时间对樱桃番茄丙二醛恢复的影响

由图 7 可知, 红妃 6 号品种 W2 处理的 MDA 量 在恢复第0、2天和第10天时低于CK,其中恢复2d 时具有显著差异,其余时间则高于 CK; W4 处理下 MDA 量在恢复第0天显著低于CK,在恢复第4、6、

14 天高于 CK, 但无显著差异。W6 处理的 MDA 量 在恢复 2、4、6 d 低于 CK,在恢复 10 d 显著高于 CK。 W10 处理 MDA 量在恢复第 10 天显著高于 CK, 在恢 复第2天显著低于CK,W14处理MDA量在恢复2d 显著高于 CK,其余时间与 CK 无显著差异。

图7 樱桃番茄红妃6号苗期淹水后恢复期间丙二醛量的变化

Fig.7 Changes of MDA content during restoration of cherry tomato Hongfei 6 after flooding 由图 8 可知, 千禧品种 W2 处理下的 MDA 量在 恢复第2、10天和第14天显著低于CK;W4处理在 恢复第0天和第4天时, MDA 量显著高于 CK, 其余 时间与 CK 无显著差异。W6 处理的恢复趋势与 CK

相似; W10 处理在整个恢复期均高于 CK, 其中恢复 2d时差异显著; W14处理呈先降低后升高的趋势, 在恢复中期(4~6d)显著高于CK。

刘聪聪 等:淹水胁迫及恢复对樱桃番茄苗期根系和叶片细胞膜稳定性的影响

图8 樱桃番茄千禧苗期淹水后恢复期间丙二醛量的变化

Fig.8 Changes of MDA during restoration of cherry tomato Qianxi after flooding 2.4 不同淹水时间对樱桃番茄超氧阴离子自由基恢复 的影响

由图 9 可知, 红妃 6 号品种 W2 处理下 O2 产生 速率在恢复第4天时显著高于 CK, 其余时间与 CK 无显著差异。W4、W6处理和W14处理的O2 产生 速率在恢复期间呈先升高后下降趋势,其中W4处理 恢复期始终与 CK 无显著差异, 而 W6 处理的 O₂. 产生速率在恢复第 4 天显著高于 CK, W14 处理的 O2[·]产生速率在恢复第4天和第6天显著高于CK, 其余时间与 CK 无显著差异。W10 处理的 O2-产生速 率在恢复期变化趋势与 CK 相似, 始终与 CK 无显著 差异。

图9 樱桃番茄红妃6号苗期淹水后恢复期间超氧阴离子产生速率的变化

Fig.9 Changes of O2 production rate during restoration of cherry tomato Hongfei 6 after flooding 由图 10 可知, 千禧品种 W2 处理和 W4 处理的 O2^{··}产生速率在整个恢复期变化趋势与 CK 相似且与 CK 无显著差异。W6 处理和 W14 处理的 O_2 产生速 率在恢复期的变化趋势呈升高-下降-升高-下降。其中,

W6 处理在恢复第 4 天时显著高于 CK, W14 处理的 O2[·]产生速率在恢复4天和14天显著高于CK,其余 时间与 CK 无显著差异。W10 处理的 O2 产生速率在 恢复0天显著高于CK,随后逐渐与CK 趋近。

图10 樱桃番茄千禧苗期淹水后恢复期间超氧阴离子产生速率的变化

Fig.10 Changes of O2 production rate during restoration of cherry tomato Qianxi after flooding

3 讨论

根系形态可直观的体现植株根系的生长状态,根 系活力也将影响植物代谢、吸收和物质转运的能力[19]。 植物为了适应淹水环境及 ROS 的诱导作用,通过调 节根系形态结构和大量生理生化过程从而增加存活 率^[20]。本研究发现,经过不同淹水时间的处理,红妃 6号在淹水2d时解除淹水胁迫并恢复14d时,根系 总平均直径和根系总体积较 CK 均有所下降, 而根系 总表面积和根系总长度较 CK 均升高,可能是由于在 淹水初期,红妃6号的根系纵向生长得到促进,横向 生长受到抑制。而千禧在同样条件下,根系总平均直 径较 CK 增大。本研究结果与 Omary 等^[21]对淹水胁 迫下番茄根系的研究相似,原因可能是淹水胁迫下植 物会生成直径较大的不定根,用于吸收水面上方的 O₂,便于植物根系有氧呼吸的正常进行,这也表明 千禧品种对淹水十分敏感,在淹水初期便迅速通过 不定根对胁迫做出反应。在淹水 6d 时解除胁迫并恢 复 14 d 时,千禧的根系形态除根系总长度外其他指 标均低于 CK; 而红妃 6 号在淹水 10 d 后恢复 14 d, 根系形态较 CK 均提高。根据前人在白菜^[22]和番茄^[23] 上的研究,可能是由于红妃 6 号在淹水胁迫解除后, 可更快清除根系无氧呼吸产生的有害物质,促使根系 更有效的恢复生长^[24]。红妃6号对淹水胁迫适应性强, 根系生长和功能保持较好。

抗氧化酶保护系统对植物十分重要,不仅可参与 植物胞间多种生理变化,还可清除植物在逆境胁迫下 产生的有毒物质^[25]。红妃 6 号品种在淹水 4 d 时解除 胁迫并恢复2d时,其CAT 活性就表现为升高,随后 下降,但在恢复14d时与CK 接近;在淹水6、10d 和14d时解除胁迫后恢复的期间,CAT 活性几乎均 高于CK。红妃6号品种在中长期(4~14d)淹水胁 迫并解除后,其POD 活性较CK 均呈升高趋势。赵 旭等^[26]的研究表明,随着根际O₂量的下降,植株叶 片中CAT 活性和SOD 量均有所升高。此现象表明抗 氧化酶活性的升高,可清除植物细胞中积累的活性氧 物质,降低细胞膜脂过氧化程度^[27],从而使MDA 量 和O₂⁻⁻产生速率下降。

淹水会影响植物的代谢系统,导致植株体内活性 氧物质如 O2⁻⁻的积累,进而引起细胞膜脂过氧化,其 中 MDA 可作为判断细胞膜受损程度的依据^[28-29]。本 试验结果显示, 红妃 6 号品种在淹水胁迫解除后, MDA 量总体呈下降趋势,且在中长期淹水(6~14 d) 条件下,经过恢复后 MDA 的量较 CK 降低或呈接近 水平。淹水 14 d 时解除胁迫, MDA 量先较 CK 大幅 度升高,随后又下降并逐渐趋于 CK 水平,可能是由 于长期淹水胁迫下, 红妃 6 号叶片细胞膜严重受损, 体内积累了较多的 MDA,在胁迫解除初期(2d)MDA 仍在生成,随着淹水胁迫解除时间的延长,植株代谢 能力提升进而清除大部分的 MDA; 而千禧品种在淹 水 2~6 d 时胁迫解除, MDA 量呈先升高后下降趋势, 长期淹水(10~14 d)时则在恢复期间几乎均较CK表 现为升高。这可能是由于千禧品种在长期淹水胁迫下 膜脂过氧化程度过高, 使细胞中的蛋白质分子失活, 所以在胁迫解除后 MDA 量仍无法下降。这与前人在 关于滴水观音^[30]的研究结果相似,另外黄花忍冬在盐

胁迫下 MDA 量也表现为上升^[31],可见红妃 6 号品种 具备更强的抗逆能力,在长期淹水后仍能使 MDA 量 恢复至 CK 水平,维持体内代谢的相对平衡。红妃 6 号品种在淹水 4、6 d 及 14 d 时解除胁迫,恢复 4 d 或 6 d 后 O₂⁻⁻产生速率呈下降趋势,可能是通过调节 抗氧化酶系统来清除活性氧物质,减轻 O₂⁻⁻对植物造 成的氧化损伤^[32]。而千禧品种在淹水 4、6 d 及 14 d 时解除胁迫,恢复期间的 O₂⁻⁻产生速率基本均较 CK 有所提高,可能是由于千禧品种清除活性氧物质的能 力不足,在淹水胁迫解除后仍无法减缓 O₂⁻⁻产生速率。 2 个品种 MDA 量和 O₂⁻⁻产生速率变化趋势不同,说 明淹水胁迫解除并恢复期间各指标变化在品种和时 间上均具有特异性^[33]。

4 结 论

1)分别在淹水2d和淹水6d时解除胁迫并恢复, 千禧品种和红妃6号品种的抗氧化酶活力水平、丙二 醛量和O,⁻⁻产生速率各指标较CK表现更好或持平。

2)淹水胁迫解除后的恢复时间对植株各指标也 有影响,红妃6号品种在恢复2~4d时多数指标较CK 表现出显著改善,而千禧品种在恢复6d时多个指标 才得到改善。

3)随着淹水天数的延长,红妃 6 号品种的根系 活力、抗氧化酶活性等指标仍然能在胁迫解除后 2~6 d 期间得到恢复,而千禧品种在长期淹水胁迫下各指标 恢复能力减弱,且恢复时间也逐渐延长,因此淹水后 应尽快排水从而减轻对樱桃番茄幼苗的损伤。

参考文献:

- ZHAN B H, CAO N, WANG K N, et al. Detection and characterization of an isolate of Tomato mottle mosaic virus infecting tomato in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(5): 1 207-1 212.
- [2] 何绍浪, 郭小君, 李凤英, 等. 中国南方地区近60 a 来降雨量与降雨侵 蚀力时空变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1 406-1 416.
 HE Shaolang, GUO Xiaojun, LI Fengying, et al. Spatiotemporal variation of rainfall and rainfall erosivity in Southern China in recent 60 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1 406-1 416.
- [3] 李建平,任荣彩,齐义泉,等. 亚洲区域海-陆-气相互作用对全球和 亚洲气候变化的作用研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 518-538.
 LI Jianping, REN Rongcai, QI Yiquan, et al. Progress in air-land-sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change[J].
 Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 518-538.
- [4] LI C Y, JIANG D, WOLLENWEBER B, et al. Waterlogging pretreatment during vegetative growth improves tolerance to waterlogging after anthesis in wheat[J]. Plant Science, 2011, 180(5): 672-678.
- [5] RAFFO A, LEONARDI C, FOGLIANO V, et al. Nutritional value of cherry tomatoes (Lycopersicon esculentum Cv. Naomi F1) harvested at different ripening stages[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(22): 6 550-6 556.
- [6] BEECHER G R. Nutrient content of tomatoes and tomato products[J].

Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N Y), 1998, 218(2): 98-100.

- [7] VECCHIA C L. Mediterranean epidemiological evidence on tomatoes and the prevention of digestive-tract cancers[J]. Experimental Biology and Medicine, 1998, 218(2): 125-128.
- [8] BUGIANESI R, SALUCCI M, LEONARDI C, et al. Effect of domestic cooking on human bioavailability of naringenin, chlorogenic acid, lycopene and beta-carotene in cherry tomatoes[J]. European Journal of Nutrition, 2004, 43(6): 360-366.
- [9] FERRO-LUZZI A, CIALFA E, LECLERCQ C, et al. The Mediterranean diet revisited. Focus on fruit and vegetables[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 1994, 45(4): 291-300.
- [10] ZHANG Y, SHI Y, GONG H J, et al. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(10): 2 151-2 159.
- [11] IPCC Climate Change 2007: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge University Press Cambridge, 2007.
- [12] SETTER T L, WATERS I. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats[J]. Plant and Soil, 2003, 253(1): 1-34.
- [13] RASHEED R, IQBAL M, ASHRAF M A, et al. Glycine betaine counteracts the inhibitory effects of waterlogging on growth, photosynthetic pigments, oxidative defence system, nutrient composition, and fruit quality in tomato[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2018, 93(4): 385-391.
- [14] 刁倩楠, 蒋雪君, 顾海峰, 等. 淹水胁迫及恢复对不同品种甜瓜幼苗 生长及其生理生化指标的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36(1): 44-52. DIAO Qian'nan, JIANG Xuejun, GU Haifeng, et al. Effects of waterlogging stress and recovery on growth, physiological and biochemical indexes on different varieties of melon seedlings[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020, 36(1): 44-52.
- [15] LIN H H, LIN K H, SYU J Y, et al. Physiological and proteomic analysis in two wild tomato lines under waterlogging and high temperature stress[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2016, 25(1): 87-96.
- [16] 罗昊文,孔雷蕾,钟卓君,等.淹水胁迫对水稻玉香油占秧苗生长和 生理特性的影响[J].作物杂志,2017(1):135-139.
 LUO Haowen, KONG Leilei, ZHONG Zhuojun, et al. Effects of waterlogging stress on the rice Yuxiang youzhan growth and physiological characteristics of seedlings[J]. Crops, 2017(1): 135-139.
- [17] YORDANOVA R Y, POPOVA L P. Flooding-induced changes in photosynthesis and oxidative status in maize plants[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2007, 29(6): 535-541.
- [18] 刘聪聪, 兰超杰, 李欢, 等. 樱桃番茄苗期对淹水胁迫的响应及其耐 涝性评价[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 650-660.
 LIU Congcong, LAN Chaojie, LI Huan, et al. Responses of waterlogging stress and evaluation of waterlogging tolerance in cherry tomato at seedling stage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3): 650-660.
- [19] 葛建坤, 平盈璐, 龚雪文, 等. 水分亏缺对温室覆膜滴灌番茄根系生长及吸水量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 1-9. GE Jiankun, PING Yinglu, GONG Xuewen, et al. The effects of water deficit on root growth and water uptake of mulched greenhouse tomato under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(3): 1-9.
- [20] QI X H, LI Q Q, MA X T, et al. Waterlogging-induced adventitious root formation in cucumber is regulated by ethylene and auxin through reactive oxygen species signalling[J]. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(5): 1 458-1 470.
- [21] OMARY M, GIL-YAROM N, YAHAV C, et al. A conserved

superlocus regulates above- and belowground root initiation[J]. Science, 2022, 375(6 584): 4 368.

- [22] 郭欣欣. 淹水胁迫对不结球白菜光合特性及根系生长的影响[D].
 南京:南京农业大学, 2015.
 GUO Xinxin. Effects of waterlogging stress on photosynthetic characteristics and roots growth of non-heading Chinese cabbage[D].
 Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [23] COLMER T D, VOESENEK L A C J. Flooding tolerance: Suites of plant traits in variable environments[J]. Functional Plant Biology: FPB, 2009, 36(8): 665-681.
- [24] WU Q S, ZOU Y N, HUANG Y M. The arbuscular mycorrhizal fungus Diversispora spurca ameliorates effects of waterlogging on growth, root system architecture and antioxidant enzyme activities of citrus seedlings[J]. Fungal Ecology, 2013, 6(1): 37-43.
- [25] 靖建国,李有芳,贾妹萍,等.花后高温胁迫下外施多胺对小麦干物 质转运及籽粒生理特性影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 8-14. JING Jianguo, LI Youfang, JIA Shuping, et al. Effects of applied polyamines on wheat assimilates transport and grain physiological characteristics under high temperature stress after anthesis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 8-14.
- [26] 赵旭,姚慧敏,杨洁.长期不同根际 O₂浓度处理对雾培番茄植株抗 氧化酶系统的影响[J].北方园艺,2020(17):1-7.
 ZHAO Xu, YAO Huimin, YANG Jie. Effects of long-term different rhizosphere O₂ concentrations on antioxidant system of tomato plants in aeroponic culture[J]. Northern Horticulture, 2020(17): 1-7.
- [27] TIAN L X, BI W S, LIU X, et al. Effects of waterlogging stress on the physiological response and grain-filling characteristics of spring maize

(Zea mays L.) under field conditions[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2019, 41(5): 1-14.

- [28] YIU J C, LIU C W, YI-TAN FANG D, et al. Waterlogging tolerance of Welsh onion (Allium fistulosum L.) enhanced by exogenous spermidine and spermine[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(8): 710-716.
- [29] WEI W L, LI D H, WANG L H, et al. Morpho-anatomical and physiological responses to waterlogging of sesame (Sesamum indicum L.)[J]. Plant Science, 2013, 208: 102-111.
- [31] 程淑娟. 盐胁迫下三种藤本忍冬的生理特性研究[D]. 南京: 南京林 业大学, 2012.
 CHENG Shujuan. Research of physiological characteristics to salt stress on three climbing honeysuckle (lonicera)[D]. Nanjing: Nanjing Forestry
- University, 2012.
 [32] 梁哲军,陶洪斌,王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征 恢复[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3 977-3 986.
 LIANG Zhejun, TAO Hongbin, WANG Pu. Recovery effects of morphology and photosynthetic characteristics of maize (*Zey mays* L.) seedlings after water-logging[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3 977-3 986.
- [33] JIA L T, QIN X, LYU D G, et al. ROS production and scavenging in three cherry rootsto CKs under short-term waterlogging conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 257(4): 108 647.

Effects of Flooding Stress and Recovery on Root and Leaf Cell Membrane Stability at Cherry Tomato Seedlings

LIU Congcong¹, LAN Chaojie², LI Huan³, LI Changjiang^{2*}, QIU Yao², YU Xianglun²

(1. Guizhou Institute of Biotechnology, Guiyang 550006, China; 2. College of Tropical Crops,

Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Guizhou Institute of Crop Varieties Resources, Guiyang 550006, China)

Abstract: (Objective) To clarify the effects of flooding days and recovery days on the growth, physiological and biochemical indices of cherry tomato, and to provide a reference for the optimal cultivation of cherry tomato in tropical [Method] Five flooding days were set up: 2 days (W2), 4 days (W4), 6 days (W6), 10 days (W10) and 14 days areas. (W14), and five recovery days: 2, 4, 10 and 14 days, and the response law of different cherry tomato seedling stage recovery under flooding stress was explored. [Result] Flooding days and recovery days significantly affected the root growth, antioxidant enzyme activity and membrane lipid peroxidation of cherry tomato at seedling stage. The superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities of QX were higher than those of CK, and the content of malondialdehyde (MDA) was lower than that of CK; The catalase (CAT) and POD activity, MDA content and superoxide anion free radical (O_2) production rate of HF varieties can still return to the normal level compared with CK after 6 days of flooding. When the flooding time is the same, the CAT and POD activity of HF varieties are higher than CK after 2 to 4 days of recovery, while the CAT activity of QX varieties are higher than CK after 6 days of recovery, With the extension of flooding days, the recovery ability of QX varieties decreased gradually. [Conclusion] The corresponding laws of flooding stress and recovery of different varieties are different, and the recovery effect of cherry tomato is better when the flooding is relieved for 2 to 6 days, and the recovery ability gradually stabilizes after 2 to 6 days of recovery. Key words: flooding; restoration; cherry tomatoes; physiological and biochemical characteristics