

水分胁迫对裸果木幼苗根系和叶片 抗氧化特性的影响

王永伟, 史阳军

(甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过探究水分胁迫对裸果木幼苗根系和叶片抗氧化特性的影响, 为提高裸果木的抗旱能力提供参考。以裸果木幼苗为试材, 通过盆栽控制实验, 设置了轻度干旱胁迫、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫处理, 研究在水分胁迫下裸果木幼苗根系和叶片抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量的变化。结果表明, 在水分胁迫下, 裸果木叶片中的MDA含量在中度和重度水分胁迫下显著增加, 根系中的MDA含量在所有胁迫处理下均增加明显, 根系对水分胁迫较为敏感; SOD酶活性在根系和叶片中均有明显变化, 对膜系统起到一定的保护作用; 叶片中POD酶的抗氧化作用较根系明显; 叶片和根系的CAT和APX酶的抗氧化作用均明显, 但APX酶的作用不明显。综合分析表明, 在水分胁迫下, 叶片中能够清除活性氧效果显著的酶是CAT和POD, 而根系中SOD酶的抗氧化作用较强, 叶片和根系对APX酶的作用差异较小。

关键词: 裸果木; 根系; 叶片; 水分胁迫; 抗氧化特性

中图分类号: Q945.78; S793.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)10-0927-05

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.10.008

Effects of Water Stress on Antioxidant Characteristics in Roots and Leavs of *Gymnocarpus przewalskii* Seedlings

WANG Yongwei, SHI Yangjun

(The Third Institute of Geology and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral
Exploration and Development, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: To provide insights for improving the drought resistance of *Gymnocarpus przewalskii*, this study investigated the effects of water stress on the antioxidative characteristics of *G. przewalskii* seedling roots and leaves. Using potted seedlings as materials, treatments were established as mild, moderate, and severe drought stress. The activities of ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and peroxidase (POD), as well as the malondialdehyde (MDA) content, were measured under different water stress levels. Results showed that under water stress, the MDA content in leaves significantly increased under moderate and severe drought conditions, while the MDA content in roots increased markedly across all treatments, indicating that roots were more sensitive to water stress. SOD activity in both roots and leaves changed significantly, providing protection for the membrane system. The antioxidative role of POD was more pronounced in leaves than in roots. CAT and APX in both roots and leaves exhibited antioxidative activity, although APX activity was relatively less significant. Overall, CAT and POD were the key enzymes responsible for reactive oxygen species scavenging in leaves, while SOD played a major antioxidative role in roots, and APX activity showed little difference between the two organs.

Key words: *Gymnocarpus przewalskii* Maxim.; Root; Blade; Water stress; Antioxidant property

裸果木(*Gymnocarpus przewalskii* Maxim.)是石竹科裸果木属的亚灌木植物^[1]。株高一般20~80 cm, 主要分布在中国西北的沙漠区。该物种耐寒冷、抗风能力强, 耐干旱, 喜光, 是荒漠植被的重要建群种之一, 能够作为固沙植物^[2], 起源可追溯至古地中海^[3-4], 对研究中国西北荒漠区旱生

植物的起源、气候的变化和发展具有重要的价值。但由于裸果木主要生长在沙漠、盆地、峡谷等地域^[5], 生境脆弱, 裸果木幼苗不但面临着自然繁殖困难和更新困难, 还遭受动物和人类严重破坏, 种群数量快速下降, 分布区的面积已经逐渐减小^[6-9]。

收稿日期: 2024-12-18; 修订日期: 2025-06-08

作者简介: 王永伟(1993—), 男, 甘肃定西人, 工程师, 硕士, 主要从事森林培育研究工作。Email: 3041478414@qq.com。

幼苗阶段是裸果木生长发育的关键而又脆弱的阶段,植物的生长最主要的器官是叶片和根系,叶片和根系能够吸收大量的水分和营养物质来维持植物的生长和繁衍,水分因子对植物的生长起关键作用^[10]。已有研究表明,水分胁迫下裸果木叶片中的超氧化物歧化酶(SOD)清除活性氧的能力弱于根系,叶片中过氧化物酶(POD)的抗氧化作用和过氧化氢酶(CAT)清除活性氧的作用比根系明显,而叶片和根系中抗坏血酸过氧化物酶(APX)的抗氧化能力接近^[11]。在长期的干旱条件下,裸果木在体内形成相应的抗氧化系统,消除体内剩余的活性氧,使膜系统得到进一步保护,并且叶片和根系会减少体内的活性氧,从而保护细胞膜不受到伤害。但当幼苗体内的水分不足时,苗木的 POD 活性和 SOD 活性比较高,活性在一定的范围之内细胞膜损害程度小,但超过一定的范围,持续缺水会导致细胞内的酶活性显著下降,导致细胞膜大损害程度严重。尽管裸果木分布范围较广,但多数种群仍生长于荒漠或草场生产力低下的区域^[12],种群衰减态势持续加剧^[12]。迄今,关于裸果木抗氧化特性方面的研究国内外鲜见报道。基于此,我们探究在干旱胁迫下,裸果木幼苗根系和叶片丙二醛(MDA)含量、SOD、CAT、POD、APX 活性的变化规律,以期为裸果木在干旱胁迫下抗氧化特性的研究和提高裸果木的抗旱能力提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

裸果木种子采集于甘肃安西县极端干旱荒漠国家级自然保护区。在人工气候箱进行育苗,当幼苗株高长至 6 cm 左右时(约 90 d 后),将幼苗移栽于装有基质(珍珠岩:蛭石:泥炭土=1:2:2)的口径为 24 cm、高为 35 cm 花盆内,之后在基质表面覆上 1 层 2~3 cm 厚的大田土,每盆 3 株,重复 3 次。为了幼苗成活,幼苗放在育苗室内生长 60 d 后在防雨棚内进行水分管理,并挑选 1 株生长最佳的幼苗,作为试验材料。

1.2 试验设计

试验共设 4 个水分梯度处理,分别为对照(CK),保持土壤相对含水量在该领域持水能力的 45%~50%;轻度干旱胁迫(LS),保持土壤水分含

量在该区域持水能力的 30%~35%;中度干旱胁迫(MS),保持土壤水分含量在该区域持水能力的 15%~20%;重度干旱胁迫(SS),保持土壤水分含量在该区域持水能力的 5%~10%。每个处理指标设置 10 个重复。在进行干旱胁迫处理之前正常灌水,以保证苗木的成活和生长,苗木成活之后待土壤中的水分在自然条件下消耗到设定的土壤含水量后,均于 6 月中旬进行水分处理,通过称重补水法对幼苗进行控水^[13],9 月底采集叶片和根系进行裸果木幼苗根系和叶片抗氧化特性各项指标的测定。

1.3 测定内容及方法

在实验室中将幼苗的叶片和根系切掉,用蒸馏水冲洗后,保存于超低温冰箱,用于指标的测定。采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性、用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量、用紫外分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性、用氮蓝四唑还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[14],按照张以顺^[15]的方法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。

1.4 数据处理和分析

用 Excel 2007 制作图表及实验数据的整理;利用 SPSS13.0 软件进行单因素方差分析,多重比较采用 Duncan 法^[16]。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对叶片和根系丙二醛(MDA)含量的影响

由图 1 可知,随着胁迫程度的加剧裸果木幼苗 MDA 含量持续增加,各胁迫处理叶片和根系 MDA 含量均高于 CK。与 CK 相比,LS、MS、SS 处理的叶片 MDA 含量分别增加了 21.00%、40.81%、50.55%,SS 处理的 MDA 含量显著高于 LS 处理和

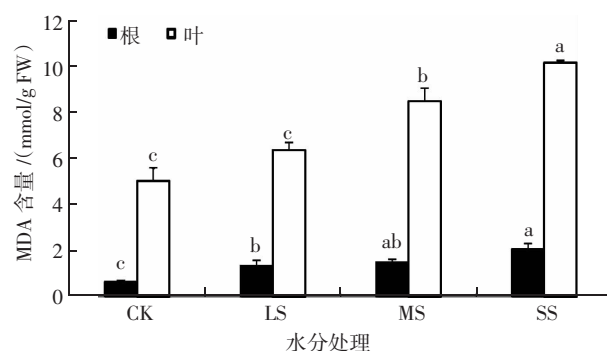


图 1 水分胁迫对裸果木幼苗 MDA 含量的影响

MS 处理; LS 处理与 MS 处理差异显著, 与 CK 差异不显著。LS、MS、SS 处理的根系 MDA 含量较 CK 分别增加了 51.68%、56.76%、68.67%, SS 处理的 MDA 含量显著高于 LS 处理, 与 MS 处理差异不显著; LS 处理和 MS 处理间差异不显著。与 CK 相比, 在相同的水分处理下 MDA 含量的变化在根系中较明显, 说明在水分胁迫处理下, 根系的过氧化作用表现最明显。

2.2 水分胁迫对叶片和根系超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

从图 2 可知, 随着胁迫程度加剧, 裸果木幼苗 SOD 活性呈先增加后减少的趋势。其中 LS 处理和 MS 处理的叶片 SOD 活性均显著高于 CK, 分别增加了 36.73%、45.50%, 而 SS 处理的 SOD 活性显著低于 CK, 减少了 46.37%。MS 处理和 LS 处理间差异不显著, 均与 SS 处理差异显著。各胁迫处理根系 SOD 活性均显著高于 CK, MS、SS、LS 处理较 CK 分别增加了 77.53%、65.18%、55.82%, MS 处理的活性显著高于 LS 处理和 SS 处理, LS 和 SS 处理间差异不显著。与 CK 相比, 相同的水分处理下根系中 SOD 活性的增幅大于叶片, 表明水分胁迫下根系中的 SOD 抗氧化作用较强。

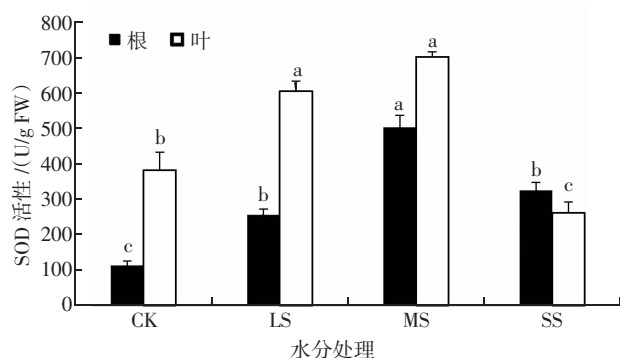


图2 水分胁迫对裸果木幼苗 SOD 活性的影响

2.3 水分胁迫对叶片和根系过氧化物酶(POD)活性的影响

图 3 表明, 随着胁迫程度的加剧, 裸果木幼苗叶片的 POD 活性显著增加, LS、MS、SS 处理分别较 CK 增加了 34.48%、47.99%、62.75%, 各处理间 POD 活性的差异均显著。根系的 POD 活性也发生了明显的变化, 表现为随着胁迫程度的加剧先减少后增加的趋势, LS、MS、SS 处理的 POD 活性均显著低于 CK, 分别较 CK 减少了 35.61%、

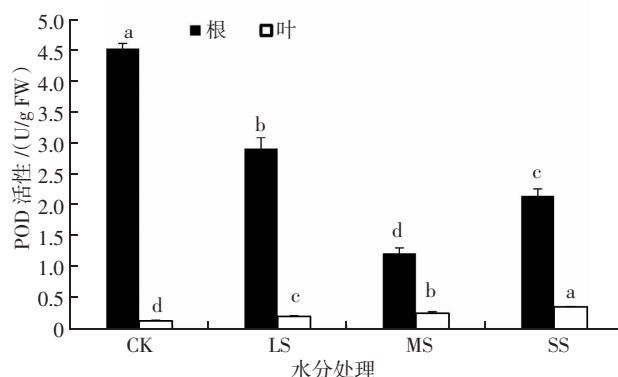


图3 水分胁迫对裸果木幼苗 POD 活性的影响

72.97%、52.53%, LS 处理的 POD 活性显著高于 MS 处理和 SS 处理, SS 处理显著高于 MS 处理。与 CK 相比, 相同的水分处理下根系 POD 活性整体下降, 而叶片中 POD 活性升高, 表明水分胁迫下叶片中 POD 清除活性氧的能力较强。

2.4 水分胁迫对叶片和根系过氧化氢酶(CAT)活性的影响

由图 4 可知, 裸果木幼苗 CAT 活性随着水分胁迫程度的加剧持续增加, 各胁迫处理叶片和根系 CAT 活性均显著高于 CK。其中 LS、MS、SS 处理的叶片 CAT 活性分别较 CK 增加了 43.39%、44.05%、53.73%, SS 处理的 CAT 活性显著高于 LS 处理和 MS 处理, LS 处理和 MS 处理差异不显著。LS、MS、SS 处理的根系 CAT 活性分别较 CK 增加了 26.39%、38.54%、43.89%, SS 处理显著高于 LS 处理, 与 MS 处理差异不显著。与 CK 相比, 同一条件处理下 CAT 活性的增幅表现为叶片大于根系, 说明叶片中的 CAT 清除活性氧的作用更为明显。

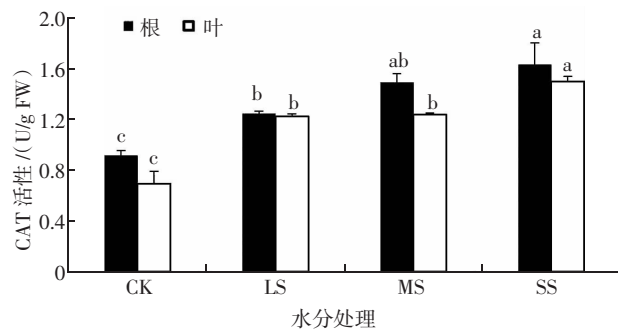


图4 水分胁迫对裸果木幼苗 CAT 活性的影响

2.5 水分胁迫对叶片和根系抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的影响

由图 5 可知, 随着胁迫程度的加剧, 裸果木

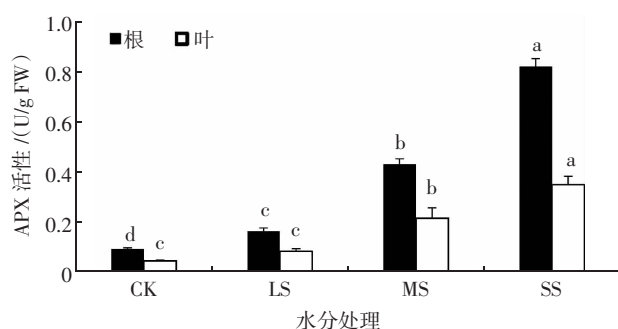


图5 水分胁迫对裸果木幼苗 APX 活性的影响

幼苗根系和叶片的 APX 活性持续增加。在水分胁迫下, SS、MS 处理的叶片 APX 活性分别较 CK 显著增加 79.23%、87.20%; LS 处理较 CK 增加 46.27%, 与 CK 差异不显著。各胁迫处理的根系 APX 活性均显著大于 CK, LS、MS、SS 处理分别较 CK 增加了 43.30%、78.60%、88.76%, SS 处理的 APX 活性显著高于 MS 处理和 LS 处理, MS 处理也显著高于 LS 处理。与 CK 相比, 在相同的水分处理下叶片和根系中 APX 活性的增幅相差不大, 表明水分胁迫下叶片和根系中 APX 的抗氧化能力接近。

3 结论与讨论

丙二醛(MDA)是衡量氧化胁迫程度的常用指标之一, 能反映植物膜脂过氧化的程度, 也是膜脂过氧化最重要的产物之一, 它的产生还能加剧膜的损伤^[17]。它的含量越多对植物的受害程度和过氧化作用越严重, 细胞内自由基的清除与产生处于平衡状态, 但 MDA 含量的增加会破坏这种平衡, MDA 含量越多, 细胞膜脂质过氧化程度越严重^[18-19]。在水分胁迫下, 裸果木叶片中的 MDA 含量在中度和重度水分胁迫下显著增加, 根系中的 MDA 含量在所有胁迫处理下均增加明显, 说明根系对水分胁迫较为敏感。孙宗国^[20]也发现, 根系对水分胁迫比叶片较敏感, 在干旱胁迫下 MDA 含量的增加会导致了裸果木的细胞膜脂过氧化。超氧化物歧化酶(SOD)在降低膜脂过氧化方面发挥着重要的作用, 一方面能把活性氧的中间物质清除, 另一方面还能预防细胞功能、细胞组成和细胞结构的伤害, 进一步减少细胞的氧化损伤^[21]。研究发现在水分胁迫下, 根中有较多的 SOD, 会产生膜脂过氧化的作用, 增强裸果木的抗氧化作用, 周红兵等^[22]也发现, 在干旱胁迫下, 四合木

和霸王也能够通过增强酶活性来提高抗氧化作用, 保护膜系统。在水分胁迫下, 过氧化物酶(POD)活性在裸果木幼苗叶片中发生了明显的变化, 表现为随胁迫程度的显著增加, POD 活性也显著增加, 而根系的 POD 活性先降后升, 叶片和根系过氧化氢酶(CAT)活性随着水分胁迫程度的加剧持续增加, 表明水分胁迫下叶片中 POD 的抗氧化作用和 CAT 清除活性氧的作用更为明显, 这与崔鹏等^[23]的研究相似; 根系 POD 活性下降的原因有可能是水分胁迫超过其清除能力范围, 导致其抗氧化作用减弱^[24-25]。抗坏血酸过氧化物酶(APX)是植物细胞内重要的组成成分, 并且具有重要的生理功能^[26-27], 本研究发现, 裸果木幼苗根系和叶片的 APX 活性随着胁迫程度的加剧持续增加, 表明 APX 的抗氧化能力较强, 并且叶片和根系中 APX 活性的增幅相差不大, 说明叶片和根系中 APX 在水分胁迫下的抗氧化能力接近。因此在干旱胁迫下抗氧化特性的研究, 为今后提高裸果木的抗旱能力提供参考。

本试验表明, 在水分胁迫下, 裸果木叶片中的 MDA 含量在中度和重度水分胁迫下显著增加, 而根系中的 MDA 含量在所有胁迫处理下均增加明显, 在相同的水分处理下, MDA 含量的变化在根系中表现为最明显, 说明根系对水分胁迫较为敏感。SOD 活性在根系和叶片中有显著的变化, 表现为胁迫程度逐渐增加, SOD 活性增加后减小, 对膜系统起到了一定的保护作用; 根系中 POD 活性整体下降, 叶片的 POD 活性显著增加, 表明叶片中 POD 的抗氧化作用比较明显; 叶片和根系的 CAT 活性和 APX 活性随水分胁迫程度的加重连续增加, 发挥了重要的抗氧化作用。综上所述, 在水分胁迫下, 叶片中能够清除活性氧效果显著的酶是 CAT 和 POD, 而根系中 SOD 的抗氧化作用较强, 叶片和根系 APX 的作用差异较小。

参考文献:

- [1] 黄海霞, 杨琦琦, 崔 鹏, 等. 裸果木幼苗根系形态和生理特征对水分胁迫的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 197-207.
- [2] 柴永青, 曹致中, 蔡卓山, 等. 肃北地区稀有植物裸果木种群的空间分布格局[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 239-249.

- [3] 刘永生, 徐怀寿, 孙继周. 对国家二级保护植物裸果木的调查与研究[J]. 宁夏农林科技, 2008(1): 16; 26.
- [4] 周禧琳, 柴学平, 梁继业, 等. 西北荒漠区孑遗植物裸果木居群的土壤养分特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(5): 114–121.
- [5] 王 亮. 安西极旱荒漠区裸果木分布现状调查及保护研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [6] 徐振朋. 荒漠区裸果木种群分布与性状适应特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [7] LI X R, ZHANG Z S, TAN H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sandhazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert[J]. Science China Life Sciences, 2014, 57(5): 539–548.
- [8] 刘生龙, 郭志中, 王理德, 等. 裸果木引种栽培试验研究[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 88–91.
- [9] 汪之波, 高清祥, 孙继周, 等. 珍稀濒危植物裸果木生物学特性研究[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(6): 481–483; 509.
- [10] 陈 骥, 曹军骥, 魏永林, 等. 青海湖鸟岛水分梯度下草地生物量分配格局初步研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 202–208.
- [11] 季 杨, 张新全, 彭 燕, 等. 干旱胁迫对鸭茅根、叶保护酶活性、渗透物质含量及膜质过氧化作用的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 144–151.
- [12] 巴哈尔古丽, 汪志军, 郭仲军. 珍稀濒危植物裸果木地理分布与资源现状[J]. 中国野生植物资源, 2005, 24(5): 42–43.
- [13] 范海兰, 陈 灿, 谢安强, 等. 短葶山麦冬块根发育期光合日变化特征对水分胁迫的响应[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(1): 87–93.
- [14] 孟宣辰. 黄土高原旱作区种植结构分析和紫花苜蓿覆膜施肥效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [15] 张以顺. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] 张君霞, 何 静, 苏世平, 等. 几种寒旱区适生植物的镍耐性评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(2): 164–171.
- [17] 白锐琴. 2, 4-表油菜素内酯对干旱胁迫下辣椒叶片生理指标及果实品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(2): 141–145.
- [18] 郭海燕, 段 婧, 刘金平, 等. 温度对雌雄蕻草生理代谢及保护酶系统影响的性别差异[J]. 草业学报, 2017, 26(10): 198–206.
- [19] 殷 彬, 林仪彤, 迟淑艳, 等. 四种锌源对珍珠龙胆幼鱼生长性能、抗氧化能力以及矿物元素沉积的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(7): 1111–1123.
- [20] 孙宗国. PEG-6000 模拟干旱胁迫下裸果木幼苗的生理响应[J]. 甘肃农业科技, 2014(12): 41–44.
- [21] 陈 瑞, 童方平, 李 贵, 等. 石漠化区枫香抗逆性研究[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(5): 16–19.
- [22] 周红兵, 王迎春, 石松利, 等. 四合木和霸王幼苗抗氧化系统对干旱胁迫的响应差异[J]. 西北植物学报, 2011, 31(6): 1188–1194.
- [23] 崔 鹏, 黄海霞, 杨琦琦. 裸果木幼苗生物量和抗氧化酶活性对土壤干旱胁迫的响应[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(5): 112–118.
- [24] 梁新华, 史大刚. 干旱胁迫对光果甘草幼苗根系MDA 含量及保护酶 POD、CAT 活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006(3): 108–110.
- [25] MA S M, ZHANG M G, CHEN X. Predicting the potential distribution patterns of the rare plant *Gymnocarpus przewalskii* under present and future climate change [C]. Xianning: IEEE, 2011.
- [26] 高宝云, 张 军. 干旱胁迫下不同基因型小麦苗期的抗氧化保护响应研究[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(2): 27–30.
- [27] 孔维萍, 唐桃霞, 任凯丽, 等. 镉胁迫下甜瓜幼苗叶片抗氧化酶活性及根系活力变化差异研究[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(12): 1147–1152.