

硝酸镧对脐橙叶片 2 种膜透性物质含量及 PPO 活性的影响

张小丽^{1,2}, 陈璐^{1,2}, 高柱¹, 卢玉鹏¹, 王小玲^{1*}

(1. 江西省科学院生物资源研究所, 江西南昌 330096; 2. 井冈山生物技术研究院, 江西吉安 343016)

摘要 以 2 年生纽荷尔脐橙嫁接苗为材料, 通过喷施 50、150、300 mg/L 的硝酸镧 [La(NO₃)₃] 溶液, 清水作为对照 (CK), 测定喷施前 (0 h) 和喷施后 (2、4、8、12、24 h) 脐橙叶片中 2 种膜透性物质过氧化氢 (H₂O₂) 与丙二醛 (MDA) 含量及多酚氧化酶 (PPO) 活性的变化特性, 阐明硝酸镧对脐橙叶片 H₂O₂ 和 MDA 含量及 PPO 活性的影响。结果表明, 硝酸镧处理后, 脐橙叶片 H₂O₂ 含量和 PPO 活性呈“先升高, 后降低”的变化趋势。150 和 300 mg/L 硝酸镧处理不仅明显降低了脐橙叶片 H₂O₂ 含量增加速度, 延缓了 H₂O₂ 含量峰值出现时间, 而且明显提高了脐橙叶片 PPO 活性, 其中 150 mg/L 的效果较好。另外, 50 mg/L 硝酸镧处理后脐橙叶片 MDA 含量峰值与 CK 出现的时间相同, 处理后 24 h, 脐橙叶片 MDA 含量比 CK 降低了 30%, 而 150 和 300 mg/L 处理则明显促进了脐橙叶片 MDA 含量的积累。因此, 硝酸镧对脐橙叶片中 H₂O₂、MDA 和 PPO 的影响符合“低促高抑”的效应, 适宜的处理浓度为 50~150 mg/L。

关键词 硝酸镧; 纽荷尔脐橙; 过氧化氢; 丙二醛; 多酚氧化酶

中图分类号 S666 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)23-0043-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.23.013



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Effect of Lanthanum Nitrate on the Content of Two Osmoregulatory Substances and PPO Activity in Navel Orange Leaves

ZHANG Xiao-li^{1,2}, CHEN Lu^{1,2}, GAO Zhu¹ et al (1. Institute of Biological Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang, Jiangxi 330096; 2. Jinggangshan Institute of Biotechnology, Ji'an, Jiangxi 343016)

Abstract The 2-year-old 'Newhall' navel oranges grafted seedlings were sprayed with 50, 150, 300 mg/L La(NO₃)₃ solution, and water was used as control (CK). The content of hydrogen peroxide (H₂O₂), malondialdehyde (MDA) and the activity of polyphenol oxidase (PPO) in leaves were measured at different times (0, 2, 4, 8, 12 and 24 h), to clarify the effect of lanthanum nitrate on the H₂O₂ and MDA content and PPO activity of navel orange leaves. The results showed that after being treated with La(NO₃)₃, the H₂O₂ content and PPO activity increased first and then decreased. The treatments of 150 and 300 mg/L not only significantly reduced the increase rate and delayed the peak time of H₂O₂ content, but also significantly improved the PPO activity, of which 150 mg/L had a better effect. After lanthanum nitrate treatment with 50 mg/L, the peak MDA content appeared at the same time as CK. 24 h after treatment, the MDA content decreased by 30% compared with CK, while 150 and 300 mg/L treatment significantly promoted the accumulation of MDA content. Therefore, the effect of lanthanum nitrate on H₂O₂, MDA and PPO in navel orange leaves conformed to the effect of "low promotion and high inhibition", and the appropriate treatment concentration ranged from 50 to 150 mg/L.

Key words Lanthanum nitrate; 'Newhall' navel oranges; H₂O₂; MDA; PPO

稀土元素是元素周期表中原子序数为 55~71 的镧系元素和与镧系密切相关的 21 号钪 (Sc)、39 号钇 (Y) 共 17 种元素的统称。稀土元素按其性质分为轻稀土和重稀土。我国稀土农用始于 1972 年, 已有近 50 年的发展历程^[1]。柑橘类水果种植面积和产量位居我国水果第一, 其中脐橙是重要的柑橘类水果之一, 栽培面积占柑橘总面积的 18.6%^[2]。江西赣州是全国最大的脐橙主产区, 脐橙种植面积世界第一、年产量世界第三, 占全国脐橙主产量的 40% 以上, 其主栽品种纽荷尔脐橙 (*Citrus sinensis* Osbeck 'Newhall') 占总面积的 90% 左右^[3]。研究表明, 稀土元素具有多种生理活性, 不仅可以促进果树生长发育, 而且能够提高果园产量和果实品质^[4-6]。董素钦^[7] 研究表明, 喷施稀土能够明显提高柑橘单果重、坐果率和果实品质, 与对照相比, 柑橘单果重增加 19.07 g, 坐果率提高 31.99%, 果实可溶性固形物含量提高 10.31%。焦云等^[8] 研究表明, 喷施稀土与硅肥叶面肥后, 不同品种的桃果实中可溶性固形物含量提高 8.93%~15.73%, 可滴定酸降低 8.75%~29.13%, 与对照具有显著差异。汪振

立等^[9] 研究表明, 自然土壤环境中稀土含量较高有利于脐橙有机营养物质的形成与提高, 主要表现为轻稀土与脐橙品质相关程度高。镧 (La) 是重要农用稀土元素之一, 具有水合离子半径最小、生物活性最高、副作用最小的性质, 故常用在农业生产实践中^[10]。另外, 稀土 La 在不同浓度作用下能够产生“低促高抑”的 Hormesis 效应。赵依杰等^[11] 研究表明, 200 mg/L 的 La(NO₃)₃ 溶液喷施处理, 甜瓜中 PPO 活性最高, MDA 含量最低, 果实品质最佳; 而 250 mg/L 以上浓度处理, 抑制甜瓜生长, 降低产量和品质。即适当浓度的稀土 La 处理能够增强逆境胁迫下作物酶的活性, 降低膜脂过氧化作用产生的有害物质, 提高作物对逆境的抵抗能力^[12-15], 而稀土 La 处理浓度过高时, 则会抑制植株的生长, 进而产生毒害作用^[16-17]。

植物在干旱、盐渍等逆境条件下, 体内产生大量的 O²⁺、OH⁻、H₂O₂ 等活性氧自由基, 引起膜的过氧化和蛋白质破坏, 使膜系统受损, 造成植物受伤甚至死亡^[18]。MDA 是细胞膜过氧化最重要的产物之一, 其含量可以反映细胞膜过氧化及受伤程度。PPO 是位于叶绿体类囊体上的一种氧化还原酶, 逆境条件下, 活性增加, 参与植物体内酚类物质氧化形成醌的保卫反应^[19]。研究表明在龙眼苗期喷施 20 和 30 mg/L 的 La(NO₃)₃ 溶液能明显消除叶片中 O²⁺ 和 H₂O₂, 减少 MDA 生成量, 显著提高叶片部分酶活性^[20]; 在大豆苗期喷施低浓度

基金项目 国家自然科学基金项目 (31760551)。

作者简介 张小丽 (1995—), 女, 江西吉安人, 助理研究员, 硕士, 从事园艺植物生物防治研究。* 通信作者, 研究员, 博士, 从事园艺植物高值利用研究。

收稿日期 2021-03-22

LaCl₃ 能降低叶片的膜透性^[21];在油菜幼苗三叶期喷施 0.3 mg/L 的 LaCl₃ 溶液能提高叶片 PPO 活性,降低 MDA 含量^[19]。

由于稀土元素在作物中的作用机制较为复杂,不同作物促进生长需要的最适浓度不尽相同。笔者以 2 年生纽荷尔脐橙嫁接苗为试材,研究喷施不同浓度的 La(NO₃)₃ 溶液 24 h 对脐橙叶片 H₂O₂ 和 MDA 含量及 PPO 活性变化的动态规律,旨在阐明硝酸镧对脐橙生长影响的生理机制,探寻促进脐橙生长的适宜硝酸镧浓度,为稀土 La 在脐橙上的合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 试验材料为 2 年生纽荷尔脐橙嫁接苗,于 2020 年 2 月移栽至直径 45 cm、高 40 cm 的花钵中,每盆栽土 10 kg,栽植 1 棵幼苗。供试盆栽土壤采自江西省宜春市奉新县江西省科学院园艺植物高值利用研究基地(海拔 64.35 m, 115°18′31″E, 28°40′17″N)。

1.2 试验方法 2020 年 7 月中旬,选择晴朗天气,08:00 对脐橙叶片分别喷施 50、150、300 mg/L 的 La(NO₃)₃ 溶液,直至植株滴液,喷施等量清水作为对照(CK)。每个处理喷施 5 棵幼苗,3 次重复。喷施 0、2、4、8、12、24 h 后采集植株中上部当年生嫩叶,叶片剪碎混匀后用液氮迅速冷冻,带回实验室,于 -80 °C 超低温保存,待测。

1.3 生理指标测定方法 H₂O₂ 含量测定采用紫外分光光度法,于 415 nm 测定其吸光值;丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法并有所改进^[22];多酚氧化酶(PPO)活性测定采用邻苯二酚法^[23]。

1.4 数据分析 利用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理和绘图,SPSS 16.0 软件进行数据统计分析和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 硝酸镧对脐橙叶片 2 种膜透性物质含量的影响 由图 1 可知,3 种浓度的硝酸镧处理后脐橙叶片的 H₂O₂ 含量在 0~24 h 呈先升高后降低的趋势,且 3 种浓度处理后的脐橙叶片 H₂O₂ 平均含量均较 CK 有所增加。其中,50 mg/L 处理后 4 h 脐橙叶片 H₂O₂ 含量达到峰值 90.50 mmol/g,相比 CK 增加了 13.10%;150 mg/L 处理后脐橙叶片 H₂O₂ 含量较 CK 先降低后增加,处理 2、4 h 后的降幅分别为 4.65%、6.94%,8 h 时达到峰值 85.69 mmol/g,较 CK 增加了 33.48%,8 h 后其含量均高于 CK;300 mg/L 处理后脐橙叶片的 H₂O₂ 含量较 CK 先降低后增加,处理 2、4 h 后降幅分别为 11.63%、12.65%,处理后 8 h, H₂O₂ 含量达到最大值 76.33 mmol/g,较 CK 增加了 18.91%,8 h 后其含量均高于 CK。由此可见,150 和 300 mg/L 的硝酸镧处理有利于脐橙叶片 H₂O₂ 含量缓慢增加,4 h 之前明显低于 CK,4 h 之后高于 CK,并延缓了 H₂O₂ 含量峰值出现的时间。

MDA 是膜脂氧化的主要产物之一,可作为衡量细胞膜脂氧化的指标,其含量越高,表明细胞膜脂过氧化程度越严重^[24]。由图 2 可知,硝酸镧处理可以影响脐橙叶片 MDA 含量峰值出现的时间。50 mg/L 的硝酸镧处理后,脐橙

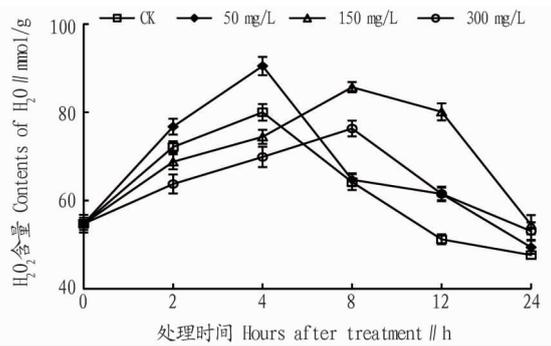


图 1 不同浓度的硝酸镧对脐橙叶片 H₂O₂ 含量的影响

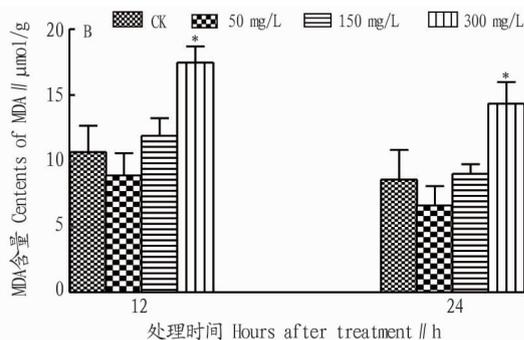
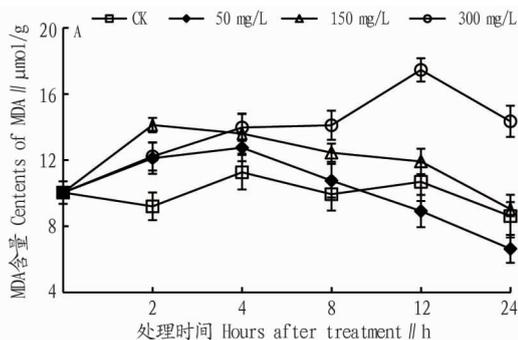
Fig. 1 Effects of different concentrations of lanthanum nitrate on H₂O₂ in navel orange leaves

叶片 MDA 含量于 4 h 出现峰值,与 CK 表现一致;处理 4 h 后,脐橙叶片 MDA 含量迅速降低,24 h 时降低至 6.64 μmol/g,相比 CK 降低了 30%;150 和 300 mg/L 处理后,显著提高了脐橙叶片 MDA 含量。其中 150 mg/L 处理后,脐橙叶片 MDA 含量于 2 h 时迅速达到峰值;300 mg/L 处理后,脐橙叶片 MDA 含量持续增加,于处理后 12 h 达到峰值 17.47 μmol/g,显著高于其他处理,24 h 时,300 mg/L 处理显著高于其他处理。可见,硝酸镧处理对脐橙叶片 MDA 含量的影响符合“低促高抑”效应。50 mg/L 硝酸镧溶液处理 12 h 后能减轻膜脂过氧化程度,减轻逆境中活性氧造成的膜伤害,提高膜系统的稳定性。

2.2 硝酸镧对脐橙叶片 PPO 活性的影响 由图 3 可知,不同浓度硝酸镧处理后脐橙叶片中的 PPO 活性呈先升高后降低的趋势,且处理后 PPO 活性均高于 CK。50 mg/L 硝酸镧处理 2、4、8 和 12 h 时,PPO 活性较 CK 分别增加了 29.67%、43.10%、20.15% 和 17.12%,其中处理 4 h 时,PPO 活性达到峰值 9.43 U/g。150 mg/L 硝酸镧处理后 2 h,PPO 活性迅速升高达到峰值 8.02 U/g,相比 CK 增加了 66.39%,随着处理时间的延长,PPO 活性逐渐降低,处理后 24 h 达到最低值 5.32 U/g,但仍高于 CK。300 mg/L 硝酸镧处理后 2、4 h,PPO 活性分别较 CK 增加了 13.43% 和 9.13%,处理 8 h 后,PPO 活性达到最大值 7.28 U/g,随着处理时间的延长,PPO 活性逐渐降低,但始终高于 CK。可见,硝酸镧处理可明显提高脐橙叶片不同时期的 PPO 活性,其中 150 mg/L 硝酸镧处理效果最为明显。

3 结论与讨论

3.1 硝酸镧对脐橙叶片 2 种膜透性物质的影响 在逆境胁迫下,植物通常会产生 O²⁺、OH⁻、H₂O₂ 等活性氧(reactive oxygen species, ROS),ROS 对植物细胞有明显的毒害作用,可引起细胞膜的过氧化,造成叶绿体与线粒体等细胞器的功能受损,最终导致细胞凋亡。细胞内约 90% 的 ROS 在线粒体中产生^[25],O²⁻ 作为副产物从呼吸链中释放出来,在 SOD 作用下歧化为 H₂O₂,H₂O₂ 在抗氧化酶的作用下进一步转化成 H₂O^[26]。研究表明,稀土离子有利于清除植物体内的自由基^[27-28]。李永裕等^[20] 研究表明,10~50 mg/L 的 La(NO₃)₃ 溶液处理可以显著清除龙眼叶片中的 O²⁻ 和 H₂O₂,而刘会雪



注:A 为硝酸镧处理 24 h 之内,脐橙叶片中 MDA 含量变化;B 为硝酸镧处理 12 和 24 h 脐橙叶片中 MDA 的含量

Note:A is the change of MDA content in navel orange leaves treated with lanthanum nitrate within 24 hours;B is change of MDA content in navel orange leaves treated with lanthanum nitrate for 12 hours and 24 hours

图 2 不同浓度的硝酸镧对脐橙叶片 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of lanthanum nitrate on MDA content in navel orange leaves

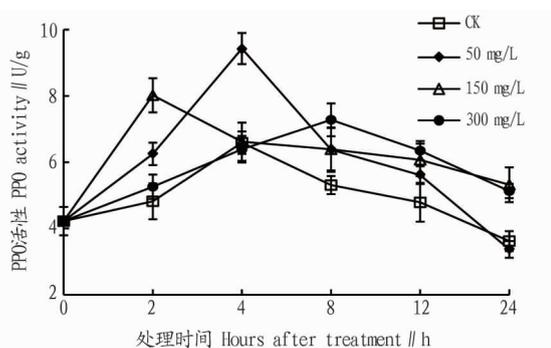


图 3 不同浓度的硝酸镧对脐橙叶片 PPO 活性的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of lanthanum nitrate on PPO activity in navel orange leaves

等^[26]研究表明,稀土离子对线粒体的 O_2^- 存在直接清除作用,对 H_2O_2 则基本不表现出直接作用。不同稀土离子清除植物体内自由基的作用机制已有报道,但对于镧清除超氧阴离子和 H_2O_2 的作用机制尚不清楚。该研究结果显示,3 种浓度的硝酸镧处理后脐橙叶片的 H_2O_2 含量在 24 h 内呈先升高后降低的趋势,且不同浓度处理后,脐橙叶片 H_2O_2 平均含量均较 CK 有所增加。其中,150、300 mg/L 处理后脐橙叶片 H_2O_2 含量较 CK 先降低后增加,处理 8 h 时达到峰值,较 CK 延缓了 H_2O_2 含量峰值出现的时间。以往的研究结果都是建立于处理 10 d 以上生理指标的变化,24 h 之内的变化均未见报道。该研究 3 种浓度下, H_2O_2 含量在 24 h 内呈不同幅度的变化,镧对 H_2O_2 不表现出直接的清理作用,但 150、300 mg/L 的硝酸镧处理有利于脐橙叶片 H_2O_2 含量的缓慢增加,且延缓了峰值的出现时间。近年来, H_2O_2 作为活性氧伤害植物细胞质膜系统的研究较多,然而, H_2O_2 也是植物细胞内信号分子,在增强植物的抗病防御反应、调控植物的生长发育、诱导保卫细胞气孔关闭、激活酶及转录因子、促进细胞外信号对基因表达的调控等方面发挥重要作用^[29]。 H_2O_2 与质膜氧化还原系统的关系还需深入研究。

植物体内活性氧积累所引发的膜脂过氧化强度与 MDA 积累量有密切的关系,MDA 的积累量越多,细胞的膜脂过氧

化程度越高,植物膜系统的受损程度越高^[30]。研究表明,50 mg/L 的硝酸镧处理后,脐橙叶片 MDA 含量于 4 h 出现峰值,与 CK 表现一致,处理 4 h 之后,MDA 含量迅速降低。而 150 和 300 mg/L 处理显著提高了脐橙叶片 MDA 含量,且 300 mg/L 处理的增幅更大。研究表明,稀土 La 在不同浓度作用下能够产生“低促高抑”效应,低浓度 La 处理的植物 MDA 含量低,果实品质佳,高浓度则抑制生长,降低产量和品质^[11],与该研究结果相同。50 mg/L 硝酸镧溶液处理能减轻膜脂过氧化程度,提高膜系统的稳定性。150 mg/L 以上浓度的硝酸镧处理增加了脐橙叶片 MDA 含量的积累量,且积累量与浓度成正比。

3.2 硝酸镧对脐橙叶片 PPO 活性的影响 多酚氧化酶是呼吸的末端氧化酶之一,参与植物体内酚类物质氧化成醌,再与其他物质交联形成保护植物组织的物理屏障^[31],以此防卫病菌对植物的侵染。曾青等^[19]在油菜上的研究表明,喷施 0.3 mg/L 的 $LaCl_3$ 溶液可以提高 PPO 活性;赵杰杰等^[11]在甜瓜上的试验表明 100、150、200、250 mg/L 的 $La(NO_3)_3$ 处理均明显提高了叶片中 PPO 活性,其中 200 mg/L 的硝酸镧处理效果最明显。该研究表明,50、150、300 mg/L 硝酸镧处理后脐橙叶片中的 PPO 活性均高于 CK,其中 150 mg/L 处理对提高脐橙叶片 PPO 活性的作用最大,处理后 2 h, PPO 活性迅速增加达到峰值,比 CK 增加了 66.39%。这与前人的研究结果类似。可见,3 种浓度硝酸镧处理下的脐橙叶片 PPO 活性均提高,其中 150 mg/L 硝酸镧处理下脐橙的抗病效果最好。

参考文献

- [1] 杨军,刘向生,王甲辰,等.我国稀土农用现状、发展趋势及对策[J]. 稀土信息,2009(4):29-31.
- [2] 梁珊珊.我国柑橘主产区氮磷钾肥施用现状及减施潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
- [3] 王小玲,田晓娟,高柱.赣南典型脐橙园土壤-脐橙系统中轻稀土元素相关性研究[J]. 江西农业大学学报,2018,40(1):32-39.
- [4] 姚艳丽,张秀梅,刘忠华,等.硝酸镧和硝酸铈对菠萝产量品质和抗氧化酶系统的影响[J]. 热带作物学报,2010,31(8):1372-1376.
- [5] 何跃君,薛立.稀土元素对植物的生物效应及其作用机理[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1983-1989.

影响,但对浮游植物细胞密度和生物量的影响很大,二者总体上呈负相关性。高碑店湖水体中秋季有大量沮草、篦齿眼子菜、浮萍生长,它们与浮游植物争夺养分和阳光,抑制浮游植物生长,导致秋季浮游植物密度低于春季和夏季,仅为春季浮游植物密度的1.71%。

4 结论

调查中,从高碑店湖水体共鉴定出浮游植物6门49属95种(含变种),水体中浮游植物群落结构不同季节具有不同特征。水体按浮游植物种类丰度与生物量依次为春、夏、秋。春季和夏季以蓝藻、绿藻为优势门类,秋季以蓝藻、绿藻、硅藻为优势门类。通过综合营养指数值计算分析,高碑店湖春季和夏季为重度富营养状态,秋季为严重富营养状态,秋季TN和Chla浓度高于春季和夏季。影响高碑店湖浮游植物群落结构季节动态的主要水环境因子为温度、透明度、生化需氧量、总磷,同时受水环境生物因子的影响。

参考文献

- [1] 李黎,王瑜,林启璇,等. 河流生态系统指示生物与生物监测:概念、方法及发展趋势[J]. 中国环境监测,2018,34(6):26-36.
- [2] 杨玉霞,沈强,胡俊,等. 石头河水库浮游生物群落结构及水生态评价[J]. 水生态学杂志,2019,40(6):24-29.
- [3] 蔡国俊,周晨,林艳红,等. 贵州草海高原湿地浮游动物群落结构与水质评价[J]. 生态环境学报,2016,25(2):279-285.
- [4] 张荣辉,方先金,杭世珺,等. 北京市城市污水资源化的成功探索与启示[J]. 中国给水排水,2006,22(Z1):134-137.
- [5] 周律,霍振远,甘一萍,等. 以二级出水作为景观补水和冷却水水源效益分析[J]. 环境工程,2006,24(5):16-18.
- [6] 吴佳梦,徐娜娜,张文璐,等. 浙江舟山定海护城河浮游植物优势种生态位与种间联结性季节性分析[J]. 湖泊科学,2019,31(2):429-439.
- [7] 魏志兵,柴毅,罗静波,等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析[J]. 水生生物学报,2020,44(3):612-621.
- [8] MARGALEF D R. Information theory in ecology[J]. General systems,

1958,3:36-71.

- [9] SHANNON C E,WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana IL:University of Illinois Press,1949.
- [10] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York: Wiley-Interscience,1969.
- [11] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京:中国环境科学出版社,1990:239-244.
- [12] 陈晓江,杨劼,杜桂森,等. 海子水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子[J]. 水资源保护,2015,31(6):122-127.
- [13] 刘正文,张修峰,陈非洲,等. 浅水湖泊底栖-敞水生境耦合对富营养化的响应与稳态转换机理:对湖泊修复的启示[J]. 湖泊科学,2020,32(1):1-10.
- [14] 胡月敏,李秋华,朱冲冲,等. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学,2018,30(2):403-416.
- [15] 赵秀侠,卢文轩,李静,等. 安徽城东湖浮游植物群落结构与水质评价[J]. 生态科学,2020,39(5):187-196.
- [16] 白宁静,陈丽,蒋伊能,等. 阳宗海磷污染背景下浮游植物的时空分布特征及其驱动因子解析[J]. 湖泊科学,2019,31(1):147-158.
- [17] 朱荣,张玉荣,严峻. 浙江三门湾秋季浮游植物群落结构特征及其影响因子分析[J]. 安徽农业科学,2020,48(22):90-93,131.
- [18] 聂雪,胡旭仁,刘观华,等. 鄱阳湖“过程”型湖泊“过程中水位变化对浮游动物群落结构的影响[J]. 水生生物学报,2019,43(2):402-414.
- [19] 杨晓红,常艳春,蔡植,等. 老虎潭水库浮游植物群落组成及多样性变化[J]. 环境科学与技术,2013,36(S1):66-68.
- [20] 徐勇斌,郭爱环,贺文芳,等. 小型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系:以上高塘水库为例[J]. 湖北农业科学,2020,59(10):69-74.
- [21] 赵思琪,范志城,代嫣然,等. 水体富营养化改善过程中浮游植物群落对非生物环境因子的响应:以武汉东湖为例[J]. 湖泊科学,2019,31(5):1310-1319.
- [22] 陈红,刘清,潘建雄,等. 瀾河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,2019,39(1):173-184.
- [23] JONES R C. The effect of submersed aquatic vegetation on phytoplankton and water quality in the tidal freshwater Potomac river[J]. Journal of freshwater ecology,1990,5(3):279-288.
- [24] 况琪军,夏宜葛,吴振斌,等. 人工模拟生态系统中水生植物与藻类的相关性研究[J]. 水生生物学报,1997,21(1):90-93.

(上接第45页)

- [6] 解惠光. 中国稀土元素在农业上应用研究进展[J]. 科学通报,1991,36(8):561-564.
- [7] 董素钦. 喷施微量元素和稀土对柑桔经济性状和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2007(4):71-72.
- [8] 焦云,舒巧云,赵秀花. 稀土与硅叶面肥对桃果实品质的影响[J]. 浙江农业科学,2019,60(6):997-999.
- [9] 汪振立,邓通德,胡正义,等. 脐橙品质与自然土壤中稀土元素相关性分析[J]. 土壤,2010,42(3):459-466.
- [10] NIUYEN T. Biological activities of some complexes of rare earth element with L-asparity acid[J]. Tap Chi Hoa Hoc,1992,90:38-41.
- [11] 赵依杰,张小红,林航,等. 硝酸镧对甜瓜叶片生理指标和果实品质的影响[J]. 云南农业大学学报,2010,25(1):95-101.
- [12] 王蕊. 镧、铈对棚架下豌豆种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2013.
- [13] 朱晓鑫. 镧和铈对大豆产量、品质和生理特性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.
- [14] 郜红建,常江,张自立,等. 稀土在植物抗逆中的生理作用[J]. 中国稀土学报,2003,21(5):487-490.
- [15] RENTELE M C,KNIGHT M R. Oxidative stress-induced calcium signaling in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiol,2004,135(3):1471-1479.
- [16] 吴家燕,夏增禄,巴音,等. 土壤重金属污染的酶学诊断:紫色土中的镉、铜、铅、砷对水稻根系过氧化物酶的影响[J]. 环境科学学报,1990,10(1):73-77.
- [17] WITITSUWANNAKUL R, WITITSUWANNAKUL D, SATTAISEVANA B, et al. Peroxidase from *Hevea brasiliensis* bark: Purification and properties[J]. Phytochemistry,1997,44(2):237-241.
- [18] DAT J, VANDENABEELE S, VRANOVÁ E, et al. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses[J]. Cell Mol Life Sci,2000,57(5):779-795.

- [19] 曾青,朱建国,谢祖彬,等. 镧对油菜抗病性相关酶活性的影响[J]. 中国稀土学报,2003,21(3):331-333.
- [20] 李永裕,潘鹏飞,余东,等. 龙胆叶片活性氧代谢和抗氧化系统对La³⁺的响应[J]. 中国稀土学报,2012,30(5):612-619.
- [21] 孙彦坤,于越,任红玉,等. 不同生育期喷施稀土镧和铈对大豆膜透性的Hormesis效应[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):88-90.
- [22] 王小玲,高柱,余发新,等. 外源水杨酸对观赏羽扇豆高温胁迫的生理响应[J]. 中国农学通报,2011,27(25):89-93.
- [23] 萧浪涛,王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- [24] 金璐,叶亚新,许明霞,等. 镧对铅胁迫下小麦生理指标的影响[J]. 安徽农业科学,2005,33(12):2260-2262.
- [25] FORMAN H J, TORRES M. Reactive oxygen species and cell signaling: Respiratory burst in macrophage signaling[J]. Am J Respir Crit Care Med,2002,166:54-58.
- [26] 刘会雪,杨晓达,王夔. 稀土离子(La³⁺, Gd³⁺, Yb³⁺)对线粒体产生活性氧的影响[J]. 高等学校化学学报,2006,27(6):999-1002.
- [27] BABU S, VELEZ A, WOZNIAK K, et al. Electron paramagnetic study on radical scavenging properties of ceria nanoparticles[J]. Chem Phys Lett,2007,442(4/5/6):405-408.
- [28] 王金胜,郭春绒,程玉香. 铈离子清除超氧化物自由基的机理[J]. 中国稀土学报,1997,15(2):151-154.
- [29] 宋喜贵,余小平. 植物体内过氧化氢的产生及其生理作用[J]. 连云港师范高等专科学校学报,2010,27(4):99-103.
- [30] 张永清,刘凤兰,贾蕊,等. La(NO₃)₃ 浸种对盐碱胁迫下红小豆幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(4):12-18.
- [31] TARANTO F, PASQUALONE A, MANGINI G, et al. Polyphenol oxidases in crops: Biochemical, physiological and genetic aspects[J]. Int J Mol Sci,2017,18(2):1-16.