

酸雨胁迫下 La(Ⅲ)对水稻种子萌发及 POD 活性影响

吴遥琪¹, 彭莹¹, 唐璐¹, 邱琳¹, 周青^{1,2}

(1.江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214122; 2.江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

摘要: 为揭示酸雨影响种子萌发机理及减轻酸雨抑制种子萌发的途径, 以 pH2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 模拟酸雨溶液和稀土 La(Ⅲ)复合处理水稻种子, 探讨 La(Ⅲ)对酸雨胁迫下水稻种子萌发、过氧化物酶(POD)活性和可溶性蛋白含量的影响。结果表明, 高强度酸雨(pH≤2.5)胁迫下, 经 La(Ⅲ)处理和单一酸雨处理的水稻种子萌发均受到不可逆性伤害:发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数皆为零, 部分种子异状发芽, POD 活性及可溶性蛋白含量显著下降, La(Ⅲ)对种子的保护作用不明显。酸雨强度在 pH≥3.0 时, 经 La(Ⅲ)处理种子各项指标均高于单一酸雨处理种子, 且指标变化曲线的拐点向酸度加大的地方推进, 加强了种子对 pH 的耐受限度, 说明 La(Ⅲ)在缓解酸雨对水稻种子的伤害过程中具有重要意义。

关键词: La(Ⅲ); 酸雨; 水稻种子; 萌发; POD

中图分类号: X517; X503.231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)05-1901-06

Effect of Lanthanum on the Germination of Rice Seeds and POD Activity Under Acid Rain Stress

WU Yao-qi¹, PENG Ying¹, TANG Lu¹, QIU Lin¹, ZHOU Qing^{1,2}

(1.The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The effect of lanthanum on rice (*Oryza. Sativa*) seed germination under acid rain stress was investigated to reveal the mechanism of seed germination and the way of alleviating the seed germination inhibition by acid rain. Rice seeds soaked with LaCl₃ solution (0.5, 1, 5, 10, 15, 20 and 30 mg·L⁻¹) were placed in culture dishes with filter sheets to germinate in a culture container kept at constant temperature of 30 °C, in which each treatment involved three dishes and each dish received 30 seeds, and the germination percentage, germination energy, germination index and vigor index were determined. After soaked with 1 mg·L⁻¹, the germination indexes of rice seeds were the highest. So, rice seeds after soaked with 1 mg·L⁻¹ LaCl₃ solution were exposed to simulated acid rain pH 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, pH6.5 as the control group (CK) that was replaced everyday. Seed germination, activity of peroxidase and content of soluble protein were investigated. The results showed that the rice seed germination was irreversibly inhibited by acid rain and La(Ⅲ)+acid rain under severe acid rain stress (pH≤2.5), and germination percentage, germination energy, germination index, vigor index were all zero, some seeds were abnormally germinated, both the POD activity and soluble protein content were obviously decreased, indicating that the protective effect of La(Ⅲ) was not obvious. At pH≥3.0, the above indexes of seeds pretreated with La(Ⅲ) were higher than those of acid rain group, strengthening the tolerance of seed germination to pH, suggesting that lanthanum could alleviate the damage of acid rain to rice seed germination.

Keywords: lanthanum; acid rain; rice seed; germination; POD

酸雨是指由于空气中 SO₂ 和氮氧化物等酸性污染物引起的 pH<5.6 的酸性降水。我国占国土总面积 40% 的地区受到酸雨的危害, 农作物生长受到影响^[1]。

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要粮食作物, 种植面积与酸雨区重叠近 94%^[2], 如何缓解酸雨对我国主要粮食作物水稻的产量和品质的影响是目前的研究热点之一。稀土镧[La(Ⅲ)]能改善植物的抗逆能力, 调节植物体内钙代谢, 提高细胞膜的保护功能等^[3-8]。同时, La(Ⅲ)还能提高植物种子的活力, 使种子在吸涨和萌发初期的吸水量和细胞质膜透性增加, 提高了细胞的

收稿日期: 2007-08-29

基金课题: 江苏省教育厅“江苏省高等学校大学生实践创新训练”项目

作者简介: 吴遥琪(1987—), 男, 学士。

通讯作者: 周青 E-mail: zhouqeco@yahoo.com.cn

吸氧能力,提高了种子萌动及生长相关的酶活性,从而促进了种子萌发^[9-11]。本实验以水稻(宁粳 1 号)种子为对象,对不同强度酸雨胁迫下 La(Ⅲ)对种子萌发能力、过氧化物酶(POD)活性及可溶性蛋白含量进行了研究,试图考察 La(Ⅲ)对酸雨胁迫下种子萌发及膜保护系统的影响,为寻求减轻酸雨对作物影响的农业措施提供了理论依据和实践经验。

1 材料与方法

1.1 La(Ⅲ)显效剂量选择

选取均匀饱满的水稻(宁粳 1 号)种子,用 0.1% HgCl₂ 溶液消毒 15 min,去离子水洗净,均匀排列在直径 12 cm、垫有两层滤纸的培养皿中,每皿 30 粒。设置 0、0.5、1、5、10、15、20、30 mg·L⁻¹ 的 LaCl₃ 溶液进行最佳剂量选择,(28±1)℃浸种 24 h,(30±1)℃恒温培养,测试种子萌发指标,进行最佳剂量选择。

1.2 酸雨配制与试材处理

模拟酸雨配制:先配制 pH1.0 模拟酸雨母液,硫酸和硝酸体积比为 4.7:1,将母液分别调配成 pH 为 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 的模拟酸雨溶液,并经 pH S-29A 酸度计(上海精密科学仪器有限公司)校准。对照(CK)为与母液离子成分类似的中性溶液。种子处理方法同前,设置 7 个处理组(pH 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0)和 1 个对照处理(CK,pH 6.5),在 8 个酸雨处理组的基础上,设 1 mg·L⁻¹ LaCl₃ 溶液(由 1.1 显效剂量选择后得出)浸种处理,每处理 3 皿。(28±1)℃浸种 24 h,浸种结束后换不同强度模拟酸雨溶液胁迫培养,(30±1)℃恒温培养,每天更换相应酸液(15 mL·皿⁻¹),统计发芽数。萌发 1 周结束,测定 POD 活性及可溶性蛋白含量,对数据统计处理。

1.3 指标测定

种子发芽指标测定按《种子检验原理和技术》^[12]进行。发芽率(GR):指种子发芽实验终期(规定日期内)正常发芽种子数占供试种子百分率;发芽势(GE):指种子发芽初期(本实验 3 d)正常发芽种子数占供试种子百分率;发芽指数(GI): $GI=\sum(Gt/Dt)$,式中:Gt 为不同时间发芽数,Dt 为相应发芽日数;活力指数(VI): $VI=S\times\sum(Gt/Dt)$,式中:S 为一定时期内幼苗生长势,以每株苗平均鲜重(Fw)表示;异状发芽率(AGR):指子叶先长出的发芽种子占发芽种子数的百分率,实验结束时测定;POD 活性、可溶性蛋白含量的测定分别参照文献[13、14]。

2 实验结果

2.1 La(Ⅲ)剂量效应关系确定

实验设 7 个 La(Ⅲ)剂量,以萌发指标、POD 活性确定 La 效应剂量。表 1 数据可见,随 LaCl₃ 处理浓度的增加,各项指标均表现为先升后降,当处理浓度为 1 mg·L⁻¹ 时,种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、POD 活性均达到最高值且与 CK 差异显著,表明该浓度对种子萌发的促进作用明显。鉴此,本实验采用 1 mg·L⁻¹ LaCl₃ 溶液浸种处理。

2.2 酸雨胁迫对水稻种子萌发指标的影响

2.2.1 对种子发芽率的影响

发芽率是反映种子品质优劣的重要指标^[15]。从图 1 结果可得,pH≥4.0 时单一酸雨和经 La(Ⅲ)处理的种子发芽率均处在较高水平,其中 pH5.0 和 pH4.5 处理下发芽率达到 100%,且发芽整齐。pH4.0 时,发芽率开始下降,从图中可见,单一酸雨处理发芽率下降显著,经 La(Ⅲ)处理则下降幅度较缓。pH3.0~4.0 时,

表 1 稀土对水稻种子萌发的影响
Table 1 Effect of Lacl₃ on seed germination

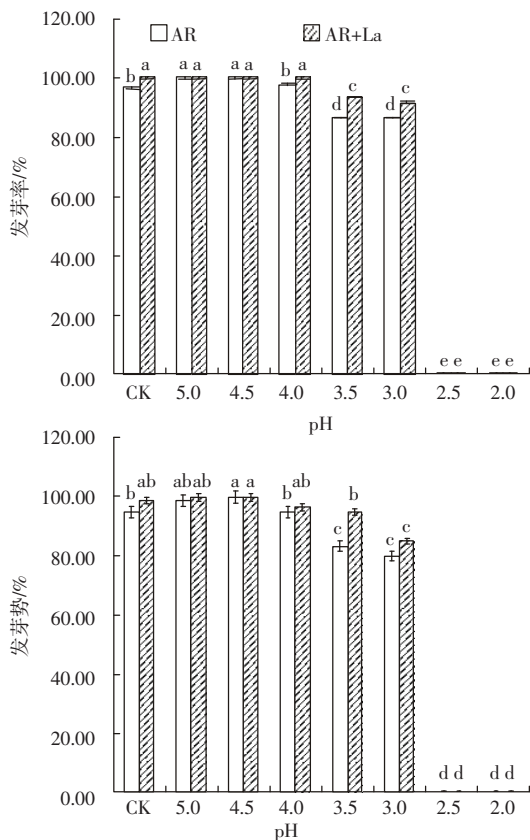
LaCl ₃ /mg·L ⁻¹	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数/%	活力指数/%	POD/△A470·min ⁻¹ ·g ⁻¹ FW
CK	97.333b	93.33c	39.46(100.00)cd	2.84(100.00)cd	17.32c
0.5	100.00a	95.33b	42.02(106.51)ab	3.16(111.44)ab	21.36a
1	100.00a	96.67a	43.32(109.80)a	3.25(114.55)a	22.35a
5	99.33ab	95.33b	40.57(102.82)bc	2.94(103.80)bc	21.02a
10	97.67b	95.00b	40.28(102.08)bc	2.68(94.41)d	19.60b
15	96.17b	94.00bc	40.29(102.11)bc	2.26(79.54)e	19.60b
20	92.50c	94.00bc	39.73(100.70)bc	2.24(78.94)e	17.02c
30	90.11c	90d	37.19(94.26)d	1.79(63.26)f	16.25c

注:表中括号内为相对值;不同字母为不同处理间差异显著性统计(P<0.05);下同。
Note: Values in the table are relative values, different letters in the same column mean significant difference (P<0.05), the same below.

经 La 处理后较酸雨单一处理下发芽率分别提高了 2.22%、6.67% 和 5.0%，均达到差异显著性。当酸雨强度增强到 pH2.5 时，种子表现为不发芽或异状发芽（见图 3），发芽率在 pH2.5、pH2.0 时均为零，过高的酸雨强度严重抑制了种子萌发，此时 La（Ⅲ）对种子发芽率的影响不明显。

2.2.2 对种子发芽势的影响

发芽势是表征种子活力的指标^[15]。单一酸雨处理和 La（Ⅲ）处理的种子发芽势从 CK 到 pH4.0 基本保持较高值（≥95%），其中 pH4.5 时发芽势最高（均为 100%），经 La（Ⅲ）处理的种子发芽势都有所增加（图 1）。当酸雨强度增至 pH3.5 时，与 CK 相比发芽势开始下降，单一酸雨处理的种子发芽势为 83.3%，La（Ⅲ）处理种子发芽势为 95%，达显著差异性。pH≤2.5 时，种子发芽势降为零。说明低强度酸雨对种子发芽率影响不大，pH4.5 时发芽率（势）均达到最大值，pH4.0 开始种子萌发受到影响，La（Ⅲ）对水稻种子发芽势有一



注：AR 为单一酸雨处理；AR+La 为酸雨和 La（Ⅲ）复合处理。不同字母为不同处理间差异显著性统计（ $P<0.05$ ）；下同。

Note: AR=Acid rain; AR+La=Acid rain and Rare earths element La; different letters mean significant difference ($P<0.05$), the same below.

图 1 酸雨胁迫对水稻种子发芽率和发芽势的影响

Figure 1 Effect of LaCl_3 on germination percentage and germination energy of rice seeds under acid rain stress

定提高，但高强度酸雨胁迫下 La（Ⅲ）作用不明显。

2.2.3 对种子发芽指数的影响

发芽指数是反映种子活力的综合指标。图 2 显示，单一酸雨和经 La（Ⅲ）处理的种子发芽指数峰值分别在 pH5.0 与 pH4.5 处，说明 La（Ⅲ）使发芽指数变化曲线峰值后延，暗示 La（Ⅲ）加强了水稻种子抗酸雨能力。当强度达到 $\text{pH}\leq 2.5$ 时，种子发芽指数为零，萌发受到完全抑制。

2.2.4 对种子活力指数的影响

活力指数是显示种子发芽、生长潜力的重要指标。活力指数与发芽指数变化趋势基本一致（图 2），在 pH4.5 时达最大值，随 pH 加大，活力指数渐降。单一酸雨处理从 pH4.0 开始活力指数降低，与 CK 差异显著。经 La（Ⅲ）处理，活力指数在 pH3.5 时与 CK 达差异显著，间接说明 La（Ⅲ）使水稻种子的酸雨伤害阈值向 pH 强度增强方向推移。同时， $\text{pH}\leq 3.5$ 时，单一酸雨处理种子活力指数下降变化幅度大，经 La（Ⅲ）处理后下降幅度较缓，且活力指数较相应单一酸雨处理均有提高，其中 pH3.5 提高最明显（0.86%）。

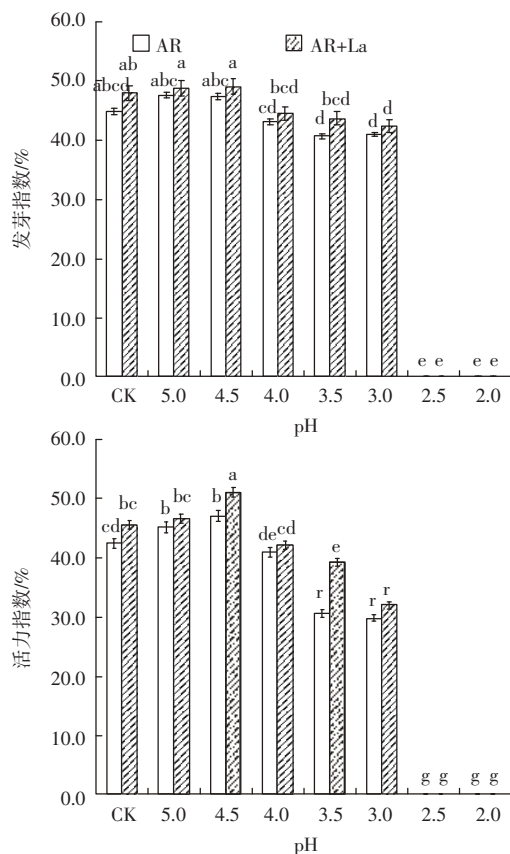


图 2 酸雨胁迫下水稻种子发芽指数和活力指数的影响

Figure 2 Effect of LaCl_3 on germination index and vigor index of rice seeds under acid rain stress

2.2.5 对种子异状发芽率的影响

异状发芽率指“只长出胚芽而无胚根的种子数占供试种子数之百分比”，表示逆境对种子萌发伤害效应^[10]。图 3 可见,CK、pH4.0~5.5 种子异状发芽率均为零,结合图 1 中 pH4.0~5.5 下发芽率情况,说明种子在低强度酸雨下正常发芽。当强度达到 pH3.5 时,单一酸雨和经 La(Ⅲ)处理的种子均出现异状发芽,分别为 11.11%和 13.33%。pH2.5 时异状发芽率达最大,为 93.33%与 96.67%,该强度下种子发芽率均为零(图 1),表明此时种子虽难正常萌发,但并未完全失去萌发活力,故有异状发芽,该强度下 La(Ⅲ)处理种子异状发芽率略高于单一酸雨处理。pH2.0 时异状发芽率下降(发芽率均为零),说明该强度下部分种子萌发活力完全丧失(不发芽),La(Ⅲ)处理种子异状发芽率较单一酸雨处理提高 8.33%,表明 La(Ⅲ)缓解强酸雨对种子伤害。

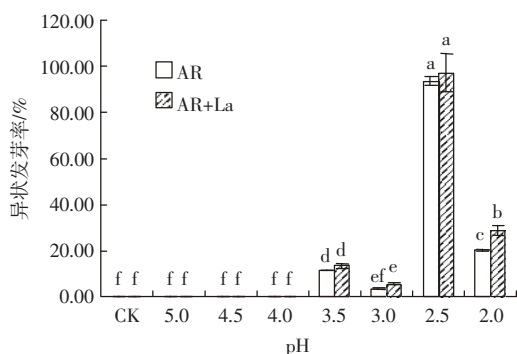


图 3 酸雨胁迫下对水稻种子异状发芽率的影响

Figure 3 Effect of LaCl₃ on abnormal germination percentage of rice seeds under acid rain stress

2.3 酸雨胁迫对水稻种子 POD 和可溶性蛋白的影响

2.3.1 对 POD 酶活性影响

POD 是植物清除自由基酶促防御系统的关键酶^[17,18]。图 4 显示,随酸雨强度增强,POD 酶活的总体变化趋势为升-降,La(Ⅲ)处理种子 POD 酶活始终高于单一酸雨处理种子。从 CK(pH6.5)到 pH4.5,POD 活性呈上升趋势,单一酸雨和 La(Ⅲ)处理在 pH4.5 与 pH4.0 处各有一峰值,表明 La(Ⅲ)使种子抗酸性增强。pH3.0~5.5 范围内 POD 活性与 CK 差异不显著,经 La(Ⅲ)处理后 POD 活性都相应提高。pH2.5 时,单一酸雨处理和 La(Ⅲ)处理种子 POD 均显著下降,与 CK 相比差异显著。酸雨胁迫下种子体内活性氧增加,POD 活性相应增加是种子对逆境作出的适应性调整,维持活性氧产生和消除间的平衡。pH 为

2.0 时,酶活性显著下降,或许是 H₂O₂ 等自由基积累增加,细胞代谢受阻,部分生理功能丧失,无法适应高强度酸雨胁迫的缘故。随胁迫强度逐渐加强,活性氧积累逐渐增大,代谢进一步受抑制^[19]。经 La(Ⅲ)处理后,POD 活性相对增加,说明 La(Ⅲ)在一定程度上提高了种子适应酸雨胁迫的能力,缓解酸雨伤害。

2.3.2 对可溶性蛋白的影响

植物体内可溶性蛋白质大多数是参与各种代谢的酶类,测其含量是了解植物体总代谢及检测植物蛋白质损伤的重要指标。酸雨胁迫能打破植物活性氧产生与清除系统间的平衡,积累大量活性氧对植物可溶性蛋白造成严重损伤^[20]。实验表明,受酸雨胁迫的种子,可溶性蛋白含量总体呈升-降趋势。pH≥3.5 时,各处理可溶性蛋白含量均高于 CK,且 La(Ⅲ)处理种子可溶性蛋白含量始终高于单一酸雨处理种子,这可能与合成耐酸雨胁迫,活性更强的同工酶有关^[21]。说明低强度酸雨胁迫下,种子自身对酸雨胁迫进行适应性调整,La(Ⅲ)提高了种子适应能力。pH≤3.0 时,可

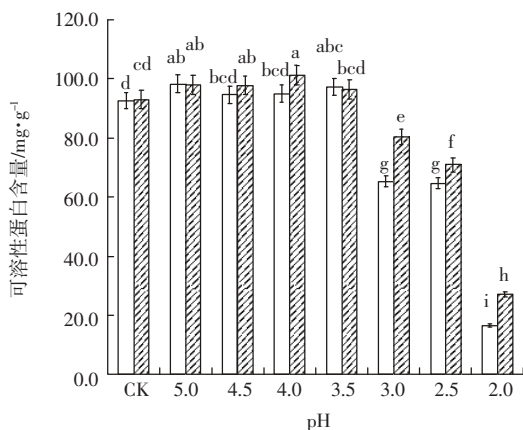
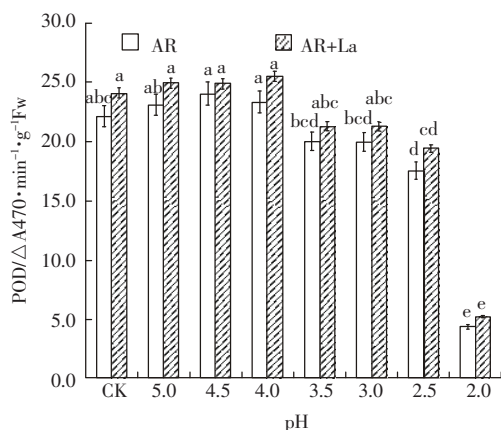


图 4 酸雨胁迫下对水稻种子 POD 和可溶性蛋白的影响

Figure 4 Effect of LaCl₃ on POD activity and soluble protein contents in rice seeds under acid rain stress

溶性蛋白含量迅速下降,单一酸雨处理下降幅度大,与 CK 相比 pH3.0 处理降幅为 $27.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$,La(Ⅲ)处理种子下降幅度较缓。此时,酸雨强度超过了种子的耐受限度,无法适应胁迫,蛋白质合成受抑,此时 La(Ⅲ)也无法消除高强度酸雨的伤害,可溶性蛋白含量下降。但 pH2.0~3.0 酸雨胁迫下,La(Ⅲ)处理种子可溶性蛋白含量分别较单一酸雨处理提高 15.09、6.30、10.60 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$,均达差异显著。表明 La(Ⅲ)虽无法维持种子正常的蛋白合成,但对酸雨伤害仍起到缓解作用。

3 讨论

研究发现,当 $\text{pH} \leq 2.5$ 时,水稻种子皆不萌发,表现为发芽(率)势、发芽与活力指数均为 0,表明高强度酸雨显著抑制水稻种子正常萌发,此时 La(Ⅲ)处理作用不明显,这可能与直接伤害了种子胚细胞有关^[20],部分种子出现发霉及异状发芽现象。 $\text{pH} \geq 3.0$ 时,随着酸雨强度增强,种子生长出现升-降变化趋势,结果发现 pH5.0~4.5 时水稻种子生长处于最佳状态,表现为各项指标均优于 CK,同时发现 La(Ⅲ)处理后能使种子对酸雨的敏感性降低;POD 是生物体内酶促防御系统非常重要的保护酶,它催化 H_2O_2 形成 H_2O 而阻止了 H_2O_2 在体内累积,减少 $\cdot\text{OH}$ 在形成部位直接攻击细胞内核酸蛋白质等大分子的可能性,从而对细胞起保护作用^[23]。研究表明,酸雨能打破植物体内活性氧代谢系统的平衡,破坏和降低活性氧清除酶系(SOD、CAT、POD)活性^[24,25]。本实验表明低强度酸雨胁迫时 POD 活性增加,至 $\text{pH} < 4.5$ 时,种子膜脂过氧化程度剧烈,POD 活性受到抑制,La(Ⅲ)处理一定程度上对 POD 活性起到保护作用,提高细胞质膜稳定性,稀土所起的抗逆作用与清除活性氧自由基的机制有关^[26];多种逆境胁迫下植物体内正常蛋白质合成常受到抑制,但往往会有一些诱导出的新蛋白出现或原有蛋白质含量明显增加^[21]。La(Ⅲ)对酸雨胁迫下水稻种子内部可溶性蛋白合成起保护作用,使蛋白含量变化曲线峰值向酸度强的方向推移,但高强度酸雨下($\text{pH} < 2.5$)种子生理受到很大伤害,蛋白质合成受阻(见图 4)。

综合分析可得,低强度酸雨胁迫下,La(Ⅲ)对水稻种子萌发起一定促进作用,稳定 POD 酶活性,提高质膜稳定性,维持种子内部可溶性蛋白正常合成,增强种子抗酸雨能力。高强度酸雨($\text{pH} \leq 2.5$)对种子伤害

明显,POD 活性及可溶性蛋白含量受到显著抑制,La(Ⅲ)缓解作用不明显。

参考文献:

- [1] 燕惠刚,陈欣欣,铁柏清,等.模拟酸雨对水稻、玉米和绿豆萌发及生长影响[J].农业环境与发展,1998,15(2):13-16.
YAN Hui-gang, CHEN Xin-xin, TIE Bo-qing, et al. Effects of simulated acid rain on the germination and the growth of rice, maize and mung bean[J]. *Agro-Environment and Development*, 1998, 15(2):13-16.
- [2] 冯宗炜.中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J].中国工程科学,2000,21(9):5-11.
FENG Zong-wei. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China [J]. *Engineering Science*, 2000, 21(9):5-11.
- [3] 李永裕,潘腾飞,邱栋梁,等.稀土元素对植物生物学作用机制的研究进展[J].土壤肥料科学,2005,21(12):217-220.
LI Yong-yu, PAN Teng-fei, QIU Dong-liang, et al. Advances of studies on the biological mechanism of rare earth elements in plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(12):217-220.
- [4] 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.
HE Yue-jun, XUE Li. Biological effects of rare earth elements and their Action mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10):1983-1989.
- [5] 陈远孟,白厚义,李杨瑞.镧在主要农作物上的应用及其生理生化作用[J].广西农业科学,2003,(6):14-17.
CHEN Yuan-meng, BAI Hou-yi, LI Yang-rui. Application of lanthanum in major crops and its physiological and biochemical roles[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2003,6:14-17.
- [6] 黄晓华,陆天虹,周青,等.酸雨伤害植物机理与稀土调控研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):116-118.
HUANG Xiao-hua, LU Tian-hong, ZHOU Qing, et al. Injury mechanism of acid rain on plant and its rare earths control[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004,12(3):116-118.
- [7] KANG Hyesoon, LEE Woong-Sang. Responses of maternal siblings of *Pinus densiflora* to simulated acid rain[J]. *Plant Biology*, 2001,44(3):131-140.
- [8] PARK Jong-bum, LEE Suk-chan. Growth responses of arabidopsis thaliana exposed to simulated acid rain [J]. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 1999, 40(1):146-151.
- [9] 白世红,徐元春,周琨.硝酸稀土浸种对侧柏种子萌发时呼吸强度的影响[J].山东林业科技,2004,6:32-33.
BAI Shi-hong, XU Yuan-chun, ZHOU Kun. Effects of seed soaking with nitric-acid rare earths on respiratory rate of oriental arborvitae seed at germination time[J]. *Journal of Shangdong Forestry Science and Technology*, 2004, (6):32-33.
- [10] 方能虎,洪法水,赵贵文.稀土元素对水稻种子萌发初期的酶活性和内源激素含量的动态影响[J].稀土,2001,22(1):31-34.
FANG Neng-hu, HONG Fa-shui, ZHAO Gui-wen. Effect of rare earth on dynamic change of enzyme activity and hormone contents of rice

- during Its early germination [J]. *Chinese Rare Earths*, 2001,22 (1):31–34.
- [11] 高永生,陈集双.盐胁迫下镧对小麦幼苗叶片抗氧化系统活性的影响[J].中国稀土学报,2005,23(4):490–495.
- GAO Yong–sheng, CHEN Ji–shuang. Effects of La³⁺ on antioxidant system in wheat seedling leaves under salt stress [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2005, 23(4):490–495.
- [12] 颜启传. 种子检验原理和技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.66.102.
- YAN Qi–chuan. Principles of seed testing and technology [M]. Hang Zhou:Zhejiang University Press,2001.66,102.
- [13] 张志良.植物生理学实验指导[M].(第二版)北京: 高等教育出版社, 1990.154.
- ZHANG Zhi–liang. Experimental guide of plant physiology [M].Beijing: Higher Education Press, 1990.154.
- [14] 李 娟,张耀庭.应用考马斯亮蓝法测定总蛋白含量[J].中国生物制品学杂志,2000,13(2):118–120.
- LI Juan, ZHANG Yao–ting. Determination of protein contents using coomassie brilliant blue method [J]. *Chinese Journal of Biologicals*, 2000,13(2):118–120.
- [15] 周 青,曾庆玲,黄晓华等.三类抗性种子萌发对酸雨胁迫响应[J].生态学报,2004,24(9):2030–2035.
- ZHOU Qing, ZENG Qing–ling, HUANG Xiao–hua, et al. Effects of acid rain on seed germination of various acid–fast plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9):2030–2035.
- [16] 曾庆玲,张光生,沈东兴,等.水稻与油菜种子萌发对酸雨的胁迫反应[J]. 农业环境科学学报,2004,23(5):921–925.
- ZENG Qing–ling, ZHANG Guang–sheng, SHEN Dong–xing, et al. Effect of acid rain on germination of rice and rape[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2004, 23(5):921–925.
- [17] ANUPA Singh, MADHOOLIKA Agrawal. Response of two cultivars of *Triticum aestivum* L. to simulated acid rain [J]. *Environmental Pollution*, 1996, 91(2):161–167.
- [18] 胡勤海, 叶兆杰. 稀土元素的植物生理效应 [J]. 植物生理学通讯, 1996 , 32 (4) :296–300.
- HU Qin–hai, YE Zhao–jie. Physiological effects of rare–earth elements on plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 1996, 32(4):296–300.
- [19] 陈 钰,郭爱华,姚月俊,等.低温胁迫下杏花器官内 POD、相对电导率和可溶性蛋白含量的变化[J].山西农业科学,2007,35(3):30–32.
- CHEN Yu, GUO Ai–hua, YAO Yue–jun, et al. The change of POD enzymes, relative conductivities and soluble proteins in flower of almond under cold stress [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, 35 (3):30–32.
- [20] MARK S.Baker, JANUSZ M.Gebicki. The effect of pH on the conversion of superoxide to hydroxyl free radicals[J]. *Archives of Biochemistry Biophysics*, 1984,234(1):258–264.
- [21] 袁建军,李裕红.木麻黄幼苗渗透调节物对酸雨胁迫的响应研究[J].中国生态农业学报,2005,13(2):82–83.
- YUAN Jian–Jun, LI Yu–Hong. Osmoregulation changes in casuarina equisetifolia seedlings under acid rain stress [J]. *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 2005, 13(2):82–83.
- [22] 陶丽华,杨国栋,周 青.不同水稻品种种子萌发对酸雨胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):566–569.
- TAO Li–hua, YANG Guo–dong, ZHOU Qing. Responses of seed germination of different varieties of rice to the acid rain stress [J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2006, 25(3):566–569.
- [23] 严重玲,洪业汤,王世杰,等. 稀土元素对酸雨胁迫小麦活性氧清除系统响应的作用[J].作物学报,1999,25(4):504–507.
- YAN CHONG–ling, HONG Ye–tang, WANG Shi–jie, et al. Effect of rare earth elements on the response of the activated oxygen scavenging system in leaves of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 504–507.
- [24] 周 青,黄晓华,曾庆玲,等. 植物酸致损伤机理与化控减灾研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003,22(5):632–635.
- ZHOU Qing, HUANG Xiao–hua, ZENG Qing–ling, et al. Injury mechanism of acid rain on vegetation and its chemicals control [J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2003,22(5):632–635.
- [25] MISAKO Kato, SEKI Shimizu. Chlorophyll metabolism in higher plants VI. involvement of peroxidase in chlorophyll degradation [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1985,26(7):1291–1301.
- [26] 彭 安,庞 欣.稀土对植物抗逆作用的自由基机制[J].环境化学, 2002, 21(4):313–317.
- PENG An, PANG Xin. The free radical mechanism of rare earth elements in anti–adversity for plants [J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(4):313–317.