

镧对菹草活性氧清除酶活性及叶细胞超微结构的影响

胡金朝

(西昌学院 农业科学学院, 四川 西昌 615013)

摘要: 在菹草培养液中施用 $\text{LaCl}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 培养菹草,研究了稀土镧对菹草活性氧清除酶活性及叶细胞超微结构的影响。结果表明,菹草在含适宜浓度 La^{3+} 的培养液中长势均好于对照。较低浓度 La^{3+} 处理时,菹草叶绿素含量、叶片自发荧光强度、硝酸还原酶(NRase)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性及可溶性蛋白质含量均升高,而超氧化物歧化酶(SOD)活性、细胞膜透性、 O_2^- 产生速率及丙二醛(MDA)含量则呈降低趋势,电镜观察结果为 La^{3+} 对菹草生长的影响提供了细胞学证据。实验认为促进菹草生长的最适 La^{3+} 浓度为 $5\sim 10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

关键词: 镧; 菹草; 活性氧清除酶; 超微结构

中图分类号: Q946 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2012)03-0377-05

Effects of lanthanum on the active oxygen-scavenging enzyme activities and ultrastructure in *Potamogeton crispus* leaves

HU Jin-Zhao

(School of Agriculture Sciences, Xichang College, Xichang 615013, China)

Abstract: The ultrastructural and physiological effects of lanthanum on *Potamogeton crispus* were studied in present hydroponic experiment. It was found that the foliage grew better in $\text{LaCl}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ than in the medium without $\text{LaCl}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. The chlorophyll content, average auto-fluorescent intensity, nitric acid reductase(NRase) activity, peroxidase(POD) activity, catalase(CAT) activity and soluble protein content increased when the plants were treated with lower La^{3+} concentration, whereas superoxide dismutase(SOD) activity, membrane permeability, O_2^- generation rate and malondialdehyde(MDA) content decreased. The TEM results provided an ultrastructural evidence for the effect of La^{3+} on *P. crispus*. The optimum La^{3+} concentrations which promote *P. crispus* growth were suggested to range from 10 to 15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Key words: lanthanum; *P. crispus*; active oxygen-scavenging enzyme; ultrastructure

适宜浓度的稀土元素处理能增加植物抗寒、盐、水、旱、酸雨及重金属等胁迫(郭伯生等,1993;王金胜等,1999;张小兰等,2003),对植物生长有一定的调节或刺激作用(郭伯生,1984),因此稀土元素通常被认为是可以促进植物生长和防治植物病害的有益

元素。目前对粮食作物、蔬菜、果树等植物虽已开展较多有关稀土的应用研究(向丽等,2009;于永明等,2011),但稀土对植物作用的机理至今尚未清楚。本文将稀土化合物氯化镧加入菹草(*Potamogeton crispus*)培养液中,研究镧对菹草硝酸还原酶、活性

* 收稿日期: 2011-09-31 修回日期: 2012-01-04

基金项目: 河南省科技攻关项目(92102310130); 四川省环境保护厅课题(2011HB005)[Supported by Key Project of Science and Technology of Henan Province(92102310130); Sichuan Provincial Research Project of the Department of Environmental Protection(2011HB005)]

作者简介: 胡金朝(1972-),男,河南兰考人,博士,副教授,主要研究高等植物细胞结构与功能,(E-mail)hujinzhao@hotmail.com。

氧清除酶及超微结构的影响,旨在探讨单一稀土对水生植物的生理生化效应,为稀土对植物的作用机理提供证据。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

菹草(*Potamogeton crispus*)为眼子菜科多年生沉水草本植物,在我国广为分布。菹草样品采集后,先在实验室中用自来水驯化培养7 d以上。选取长势一致的植株分别移入盛有5% Hoagland培养液(去除 KH_2PO_4 , pH=6.5)的玻璃缸中,然后往各缸中一次性加入 $\text{LaCl}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (Lanthanum chloride, 中国医药上海化学试剂公司, AR), La^{3+} 浓度梯度为0、1、5、10、15和20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以纯 La^{3+} 计)。全部材料于Forma Scientific-3774全封闭光照培养箱中培养,光照周期为14 h/10 h,光暗温度为25 $^{\circ}\text{C}$ /18 $^{\circ}\text{C}$ 。处理3 d后,取植株倒数第3片叶的相同部位作电镜观察和自发荧光强度测定;取植株倒数第3片至第8片叶进行生理指标测定。

1.2 实验方法

1.2.1 叶绿素含量测定 参照张志良(1990)和徐勤松等(2001)的方法,用754型紫外可见分光光度计测定,单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW。

1.2.2 自发荧光强度测定 参照Paddock(1999)的方法,用像素荧光强度表示平均自发荧光强度。

1.2.3 酶活性测定 CAT活性用南京建成生物工程研究所的CAT试剂盒测定,以每1 g植物材料每1 s分解1 μmol H_2O_2 的CAT量为一个活力单位,记为 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ FW;SOD活性用南京建成生物工程研究所的SOD试剂盒测定,以每1 mL反应液中SOD抑制率达50%时所对应的SOD量为一个亚硝酸盐单位,用 $\text{NU} \cdot \text{g}^{-1}$ FW表示;POD活性用徐勤松等(2000)的方法测定,以每1 min吸光度的变化值表示酶活大小,单位 $\text{A}_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$;NRase活性用磺胺比色法测定,以 NO_2^- 含量(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)的增加表示酶活大小。

1.2.4 O_2^- 产生速率测定 用吴国荣等(2000)的方法,单位: $\text{A}_{530 \text{ nm}} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ FW。

1.2.5 MDA含量测定 参照Heath & Parck(1968)的硫代巴比妥酸(TBA)比色法,略有改进,单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.2.6 可溶性蛋白含量测定 用Bradford(1976)的

考马斯亮蓝G-250法,以牛血清蛋白为标准蛋白,用754型紫外可见分光光度计测定620 nm时的光吸收值,单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW。

1.2.7 质膜透性测定 按照谢田等(1986)的方法,用754型紫外可见分光光度计测定264 nm时的光吸收值,单位: $\text{OD}_{264} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.2.8 超微结构观察 取 $\text{LaCl}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 培养3 d的菹草植株倒数第3片叶的相同部位作材料,用2.5%戊二醛($0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液配制, pH7.3)和1%锇酸4 $^{\circ}\text{C}$ 双重固定,系列浓度的丙酮脱水,Epon 812浸透包埋,LKB超薄切片机(奥的利生产)切片,厚度为70 nm,切片经醋酸双氧铀和柠檬酸铅双重染色后,于Hitachi600-A-2透射电镜(日本生产)下观察并拍照。

各实验数据重复3次,取平均值作相关性分析。

2 实验结果

2.1 La^{3+} 对菹草叶绿素及叶片自发荧光强度的影响

菹草叶绿素含量及叶绿体的平均自发荧光强度随 La^{3+} 浓度增大先升后降,且均在5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 时达最大值,分别为对照的2.2倍(图1)和1.58倍(图2)。

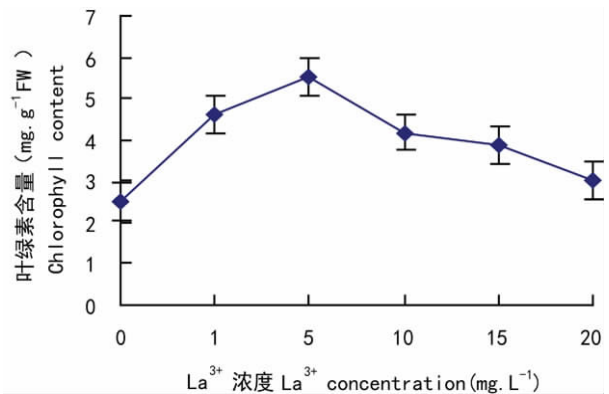


图1 La^{3+} 对菹草叶绿素含量的影响
Fig.1 Effects of La^{3+} on chlorophyll contents of *P. crispus*

2.2 La^{3+} 对菹草叶活性氧清除酶及硝酸还原酶(NRase)活性的影响

菹草叶的SOD活性随 La^{3+} 浓度增大持续下降($r=-0.965$, ** $P<0.01$);CAT活性和POD活性则先升后降,在10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时分别达到峰值,是对照的3.4倍和1.7倍;NRase活性先缓慢升高,5~10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时

NRase 活性迅速升高, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达最大值, 是对照的 1.1 倍, La^{3+} 浓度超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 NRase 活性迅速下降(表 1)。

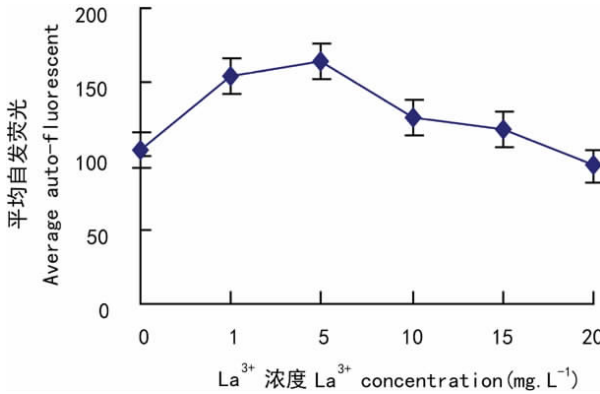


图 2 La^{3+} 对菹草叶自发荧光强度的影响

Fig. 2 Effects of La^{3+} on average auto-fluorescent intensity of *P. crispus*

表 1 La^{3+} 对菹草叶活性氧清除酶及硝酸还原酶活性的影响

Table 1 Effects of La^{3+} on the activities of active oxygen-scavenging enzyme and NRase in *P. crispus* leaves

La^{3+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	CAT activity ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)	SOD activity ($\text{NU} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)	POD activity ($\text{A}_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	NRase activity ($\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)
0	37.82	1895.47	1027.21	80.60
1	49.27	1763.29	1256.32	81.95
5	72.75	1617.72	1729.93	83.53
10	129.40	1628.65	1394.59	92.30
15	109.57	1212.83	840.26	89.48
20	86.32	988.42	427.03	82.14

2.3 La^{3+} 对菹草叶 O_2^- 产生速率的影响

菹草叶 O_2^- 产生速率随 La^{3+} 浓度增大先迅速减小, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 时最小, 是对照的 57.8% ($r = -0.998, P < 0.01$), 随后缓慢上升, $15 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 时出现较快增长 ($r = 0.892, P < 0.05$) (图 3)。

2.4 La^{3+} 对菹草叶 MDA 含量的影响

低浓度 ($1 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) La^{3+} 处理时, 菹草叶中 MDA 含量随浓度增大而降低, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时, MDA 含量最低, 是对照的 80.7%。 La^{3+} 浓度超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, MDA 积累显著增多, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时增加到对照的 1.93 倍(图 4)。

2.5 La^{3+} 对菹草叶可溶性蛋白质含量的影响

随着 La^{3+} 浓度增大, 菹草叶的可溶性蛋白质含量先剧烈升高, $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时可溶性蛋白质含量最高, 随后含量降低, 在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时为对照的 64.3% (图 5)。

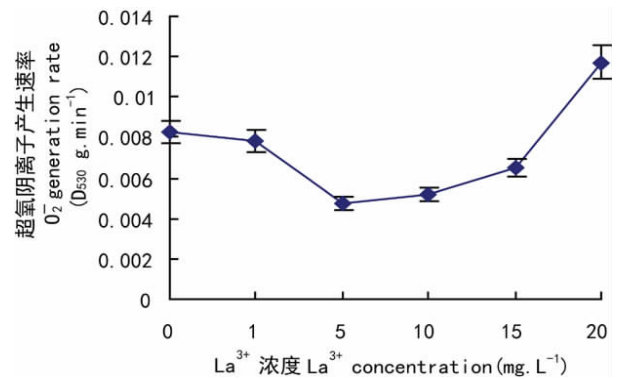


图 3 La^{3+} 对菹草叶 O_2^- 产生速率的影响

Fig. 3 Effects of La^{3+} on O_2^- generation rate of *P. crispus* leaves

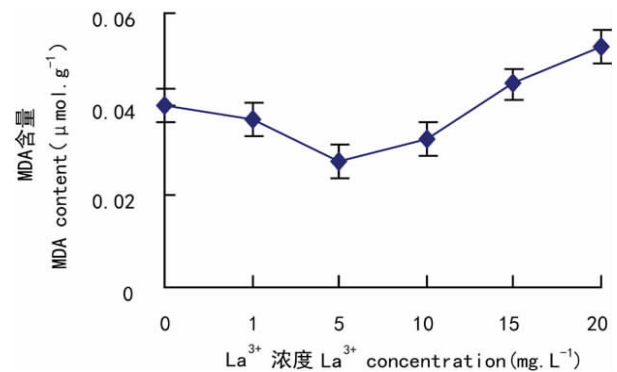


图 4 La^{3+} 对菹草叶 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of La^{3+} on MDA contents of *P. crispus* leaves

2.6 La^{3+} 对菹草叶细胞质膜透性的影响

菹草叶细胞质膜透性随 La^{3+} 浓度增大而持续下降, 下降水平与 La^{3+} 浓度呈极显著负相关 ($r = -0.965, ** P < 0.01$), 而 $15 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理的菹草叶细胞相对膜透性几乎无明显变化(图 6)。

2.7 La^{3+} 对菹草叶细胞超微结构的影响

电镜结果表明, La^{3+} 对菹草叶细胞超微结构的影响很小, 对叶绿体、线粒体、细胞核等的影响都不明显。对照菹草的叶细胞在透射电镜下结构完整, 含有丰富的细胞器, 其中叶绿体扁长呈梭形, 基质浓密, 被膜清楚, 基粒类囊体片层堆叠规则; 线粒体椭圆形, 脊突分布均匀; 细胞核双层核膜清晰, 核仁致密与核质界限明显, 显示出良好的结构与功能状态(图 7:a, b)。用浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 La^{3+} 处理 3 d 的菹草, 叶细胞的叶绿体与对照叶中叶绿体无明显差异, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的叶绿体出现膨大、变形和类囊体排列紊乱等现象(图 7:d)。与叶绿体相比, 线粒体对 La^{3+} 处理更敏感些, 而细胞核受 La^{3+} 的

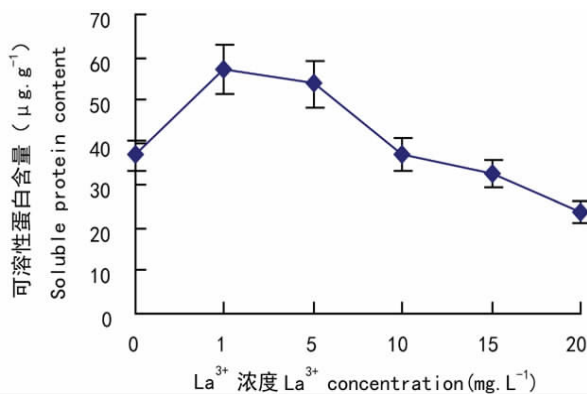


图5 La^{3+} 对茺草叶可溶性蛋白质含量的影响
Fig. 5 Effects of La^{3+} on soluble protein contents of *P. crispus* leaves

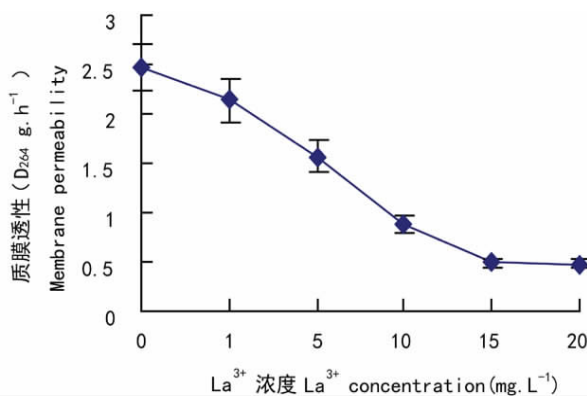


图6 La^{3+} 对茺草细胞质膜透性的影响
Fig. 6 Effects of La^{3+} on membrane permeability of *P. crispus* leaves

影响较小, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理 3 d 的样品, 其线粒体脊突分布不均匀(图 7:c), $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下浓度的 La^{3+} 处理对细胞核均无显著影响。

3 结论与讨论

镧通常被认为是促进植物生长和防治植物病害的有益元素。我们在实验中发现, La^{3+} 处理可明显改变茺草叶中活性氧清除酶活性, 抑制 SOD 而增加 CAT 和 POD 活性(表 1)。

SOD 是催化 O_2^- 发生歧化反应的重要酶, 低浓度 La^{3+} 使茺草叶中 O_2^- 产生速率下降(图 3), 可能是降低 SOD 活性的直接原因。镧降低茺草 O_2^- 产生速率(图 3)和 MDA 含量(图 4), 减小细胞质膜透性(图 6), 可降低细胞内含物质外渗, 表明较低浓度 La^{3+} 处理能降低植物细胞膜脂过氧化作用, 减轻茺草衰老过程中活性氧造成的膜伤害, 提高膜系统的

稳定性, 一定程度上保护了植物细胞膜, 这是镧增强植物抗逆境胁迫的机理之一。

叶绿素含量是衡量叶片衰老、植物光合器官生理状况的重要指标。实验表明, 用单一 La^{3+} 处理茺草, 茺草叶绿素含量随着 La^{3+} 浓度增大出现先升后降现象(图 1), 表明适宜浓度的 La^{3+} 能刺激叶绿素合成, 提高光合作用能力, 这与耿晓东等(2007)、周正朝等(2004)的实验结果相一致。激光显微术(LSCM)观察发现, La^{3+} 浓度超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后茺草叶片相关组分自发荧光强度范围变窄, 峰值变小和平均自发荧光强度下降(图 2), 这与高浓度 La^{3+} 处理时茺草叶绿素含量降低相一致。与彭倩等(2008)在大豆中的研究结果不同, 高浓度 La^{3+} ($>10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理使茺草叶绿体膨大、变形, 并出现类囊体排列紊乱等现象(图 7:c, d), 说明水生植物茺草与大豆在应答外源 La^{3+} 处理时存在差异, 笔者认为茺草叶绿体类囊体排列紊乱等结构变化是叶绿素含量降低、自发荧光强度变窄、峰值变小的结构基础。

硝酸还原酶(NRase)是植物氮代谢作用的关键酶(陈愚等, 1998)。随着 La^{3+} 处理浓度增大, 茺草 NRase 活性先缓慢增高, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时活性最高, 继而 NRase 活性快速下降, 但 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理时 NRase 活性仍高于对照(表 1)。说明 La^{3+} 加快了茺草氮代谢水平, 这与 La^{3+} 对茺草可溶性蛋白含量的影响结果一致(图 5)。杨燕生等(1997)认为镧通过某种机制将信号传递到细胞内促进 CaM 基因表达, 激活了依赖于 CaM 的各种酶的活性, 导致了蛋白质含量上升, 保护酶活性提高, 从而减小了自由基对膜伤害的可能性。当 La^{3+} 浓度较高时, 进入细胞后的 La^{3+} 促进了蛋白水解酶的活性, 加强了原有蛋白质的分解, 可溶性蛋白含量开始降低; 这种现象与 La^{3+} 浓度较高时, 茺草细胞内酶活性失调, 质膜过氧化加剧, 膜透性加大, 对矿质元素吸收不平衡引起细胞的氮代谢紊乱有关。本实验还发现在 La^{3+} 作用下, 茺草 NRase 活性的变化趋势与叶绿素含量、POD 活性的变化趋势相同, 推测叶绿素含量高时, 形成较多的光合作用产物运送到细胞质中, 通过酵解反应, 生成更多 NADH, 给 NRase 所催化的反应提供了更多电子供体, 所以其活性相应上升, 而当叶绿素含量降低时电子供体减少, 其活性则降低。综上所述, 笔者认为适宜浓度的 La^{3+} 可促进茺草生长(茺草生长的最适 La^{3+} 浓度为 $5 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

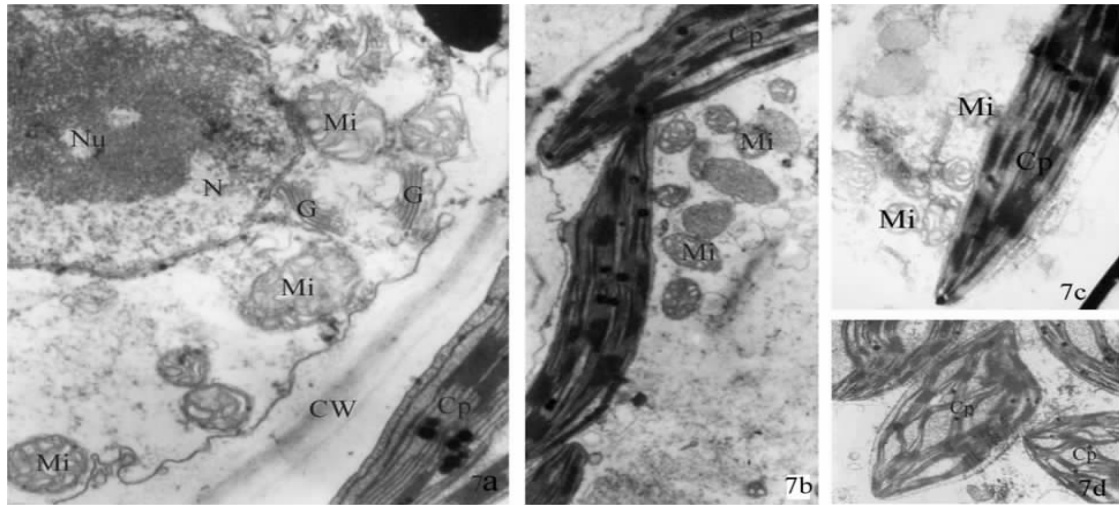


图 7 La^{3+} 对菹草叶细胞超微机构的影响 a. 对照叶细胞, 示细胞核(N)、线粒体(Mi)、叶绿体(Cp)、高尔基体(G)和细胞壁(CW)等, $\times 20\ 000$; b. 对照叶细胞, 示叶绿体(Cp)和线粒体(Mi), $\times 8\ 000$; c. $10\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理 3 d 的叶细胞, 示叶绿体(Cp)和脊突不均匀分布的线粒体(Mi), $\times 15\ 000$; d. $20\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} 处理 3 d 的叶细胞, 示肿胀的叶绿体(Cp), $\times 12\ 000$ 。

Fig. 7 Effects of La^{3+} on ultrastructure of *P. crispus* leaf cells a. Control of leaf cells, showing the normal nucleus, mitochondria, chloroplast, golgi bodies and cell wall, $\times 20\ 000$; b. Control of leaf cells, showing the normal chloroplast and mitochondria, $\times 8\ 000$; c. Leaf cells treated with $10\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} for 3 days, showing chloroplast and mitochondrion with asymmetric cristae, $\times 15\ 000$; d. Leaf cells treated with $20\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La^{3+} for 3 days, showing swollen chloroplast, $\times 12\ 000$.

参考文献:

- 张志良. 1990. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社: 88
- 耿晓东, 文斌. 2007. 稀土对红叶石楠幼苗光合效率及相关生理特性的影响[J]. 现代农业科技, (10): 12-13
- 郭伯生, 熊炳昆, 胡朝浦, 等. 1993. 稀土在农牧业中的应用概况和研究工作的最新进展[J]. 稀土, 15(6): 37-43
- 郭伯生. 1984. 处于领先地位的我国稀土农用研究与示范[J]. 稀有金属(稀土农用专辑 4), 14: 1-9
- Bradford MA. 1976. Rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Anal Biochem, 72: 248-254
- Chen Y(陈愚), Ren JC(任久长), Cai XM(蔡晓明). 1998. Effects of cadmium on nitrate reductase and superoxide dismutase of submerged macrophytes(镉对沉水植物硝酸还原酶和超氧化物歧化酶活性的影响)[J]. Acta Sci Circumst(环境科学学报), 18(3): 313-317
- Heath RL, Parker L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. Arch Biochem Biophys, 125(1): 189-198
- Paddock SW. 1999. Confocal microscopy methods and protocols [M]. Totowa; New Jersey: Humana Press: 103-130
- Peng Q(彭倩), Zhou Q(周青), Ye YX(叶亚新). 2008. Influence of La and ultraviolet-B stress on chloroplast ultrastructure of soybean leaves(La 与 UV-B 辐射胁迫对大豆叶片细胞叶绿体超微结构的影响)[J]. Chin J Agrometeorol(中国农业气象), 29(1): 33-36
- Sechenbater(斯琴巴特尔), Wu N(乌云). 2003. Study of biological effects of rare earth on *Linum usitatissimum*(稀土对胡麻的生物学效应研究)[J]. Chin Rare Earths(稀土), 24(1): 33-36
- Wang JS(王金胜), Ji MX(冀满祥), Zhao RY(赵如意), et al. 1999. Protective effect of cerium on mitochondria wheat under salinity stress(盐胁迫时铈保护小麦线粒体功能的研究)[J]. Chin Rare Earth Soc(中国稀土学报), 17(2): 187-190
- Wu GY(吴国荣), Lu CM(陆长梅), Tao MX(陶明焯), et al. 2000. Enhancement of *Spirulina subsalsa* tolerance to Pb by pretreatment of paraquat and H_2O_2 (百草枯和 H_2O_2 预处理提高盐泽螺旋藻对铅的耐受性)[J]. J Lake Sci(湖泊科学), 12(3): 240-246
- Xiang L(向丽), Zhou Q(周青), Ye YX(叶亚新). 2009. Effect of lanthanum on flavonoid restraining free radical in soybean seedling under Ultraviolet-B stress(La(III)对 UV-2B 辐射胁迫下大豆幼苗类黄酮清除自由基影响)[J]. Chin Rare Earths(稀土), 30(1): 86-89
- Xie T(谢田), Xu ZJ(徐中际). 1986. Ultraviolet absorption method for determination of cell membrane permeability(测定细胞膜透性的紫外吸收法)[J]. Plant Physiol Comm(植物生理学通讯), (1): 45-46
- Xu QS(徐勤松), Shi GX(施国新), Hao HQ(郝怀庆). 2001. Effects of Cd, Cr(VI) single and combined pollution on chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of *Potamogeton crispus*(Cd, Cr(IV) 单一及复合污染对菹草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响)[J]. Guihaia(广西植物), 21(1): 87-90
- Xu QS(徐勤松), Shi GX(施国新), Gu GP(谷葵平), et al. 2000. Study of toxic effect of Hg^{2+} on *Nymphaea tetragona* Georgi(不同浓度 Hg^{2+} 对睡莲的毒害影响研究)[J]. Acta Bot Bor-Occid Sin(西北植物学报), 5: 784-789
- Yang YS(杨燕生), Liu DL(刘德龙), Bai J(白娟), et al. 1997. Effect of lanthanide(III) on wheat seedling growth and its Protein and calmodulin levels(镧对小麦幼苗素质、蛋白质及钙调素水平的影响)[J]. Chin Rare Earths(稀土), 18(2): 61-63
- Yu YM(于永明), Wang JH(王军辉), Ma JW(马建伟), et al. 2011. Effect of lanthanum chloride on growth of *in vitro* culture of *Catalpa bungei*(LaCl_3 对楸树无性系试管苗生长的影响)[J]. J Northeast Fore Univ(东北林业大学学报), 39(1): 31-33
- Zhang XL(张小兰), Shi GX(施国新), Xu QS(徐勤松), et al. 2003. Detoxication of lanthanum against nickel in *Hydrocharis dubia* leaves(镧缓解镍对水鳖叶片的毒害效应研究)[J]. Chin Rare Earth Soc(中国稀土学报), 21(1): 81-84
- Zhou ZC(周正朝), Zhang XB(张希彪), Shanguan ZP(上官周平). 2004. The plant ecophysiological effect of the rare earth element(植物对稀土元素的生理生态响应)[J]. Acta Agric Bor-Occid Sin(西北农业学报), 13(2): 119-123