

镧对镉胁迫下菜豆 (*Phaseolus vulgaris*) 幼苗生长的影响

周青^{1,2}, 张辉¹, 黄晓华^{3,4*}, 陆敢超¹, 梁婵娟¹, 陆天虹⁴ (1. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214036, E-mail: zqeco@citiz.net; 2. 南京师范大学生命科学学院, 南京 210097; 3. 江南大学化学系, 无锡 214036; 4. 南京师范大学化学与环境科学学院, 南京 210097)

摘要: 以菜豆 (*Phaseolus vulgaris*) 为实验材料, 以水培方法研究了 La 对 Cd 抑制对菜豆幼苗生长与代谢的影响。结果表明, 在 $30\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 剂量伤害下, 菜豆的生长受到严重抑制, 主要表现为株高、主根长下降 31.1 % 和 39.2 %, 叶面积、叶、茎、根的鲜重、干重分别降低 48.0 %, 42.7 %, 29.6 %, 25.0 %, 26.7 %, 61.3 %, 49.4 %。在 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 剂量伤害下, 其生理生化特性发生变化, 叶绿素含量、根系活力下降 23.5 % 和 28.7 %, 质膜透性、MDA 含量、CAT 和 POD 活性增加 5.58 %, 28.6 %, 0.6 % 和 7.0 %, 且随 Cd 处理时间的延长, 伤害加重。叶面喷施 $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ La 1 次, 对镉污染下的菜豆幼苗的生长与代谢有一定的缓解效应, 可减轻镉对幼苗的伤害程度。这与 La 能提高菜豆幼苗叶绿素含量 (30.0 %), 降低细胞膜透性 (0.87 %) 和 MDA 含量 (9.5 %), 维持 CAT (0.1 %) 和 POD 活性 (1.6 %) 等多重作用相关。

关键词: 镧; 菜豆幼苗; 镉; 防护效应

中图分类号: X173; Q949.751.905; O614.33 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)04-06-0048

Effects of La on the Growth of Kidney Bean Seedling under Cd Stress

Zhou Qing^{1,2}, Zhang Hui¹, Huang Xiaohua^{3,4*}, Lu Ganchao¹, Liang Chanjuan¹, Lu Tianhong⁴ (1. The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China E-mail: zqeco@citiz.net; 2. College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3. Department of Chemistry, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 4. College of Chemistry and Environment Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: In this study, kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) was used as experiment material, and effects of lanthanum on growth and metabolism of kidney bean seedling under cadmium stress was studied by water culture. The results showed that kidney bean seedling was chronically harmed by $30\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} , however, its height and main root were reduced about 31.1 % and 39.2 %, meanwhile, leaf area, fresh and dry weight of leaf, stem and root were decreased 48.0 %, 42.7 %, 29.6 %, 61.3 % and 49.4 % respectively. With acute damage of $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} , physiological and biochemical characteristics of seedling changed greatly, eg, chlorophyll content and root activity were decreased about 23.5 % and 28.7 %, cell membrane permeability, the malonyldialdehyde (MDA) content, activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD) were increased 5.58 %, 28.6 %, 0.6 % and 7.0 % respectively. And with longer treatment time, the damage became more serious. When $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ La was used to spray on kidney bean seedling under cadmium stress one time, growth and metabolism of seedling was obviously reconditioned and the damage of Cd pollution was reduced. It is proved, by the experiment, that La can improve chlorophyll content (30.0 %) and reduce cell membrane permeability (0.87 %) and content of MDA (9.5 %), and keep the activities of CAT (0.1 %) and POD (1.6 %) of kidney bean seedling.

Key words: lanthanum; kidney bean seedling; cadmium; protective effect

Cd是生物非必需的重金属元素,其在环境中含量达到或超过伤害阈值时,可引起植物生理生化代谢紊乱,品质趋劣,生物量降低,生长受阻,乃至死亡.近年来稀土农用研究发现,适当与适量的稀土,在促进作物优质增产的同时,尚有诱导植物抗性,进而提高植物耐酸雨、臭氧及重金属污染胁迫的能力^[1~6].为进一步了解稀土诱导植物抗逆性是否存在种内、种间与生活型差异,本文在前期工作的基础上,以菜豆为试材,采用模拟 Cd 污染的水培实验法,选择作物生活史中感知环境胁迫较为敏感的苗期作为实验时段,研究了 Cd 对菜豆幼苗生长与代谢的影响,并同步考察了稀土镧(La)诱导植物抗逆性,进而缓解 Cd 污染胁迫的生物学效应.目的旨在客观评价稀土环境植物学效应及稀土应用的价值取向提供参考.

1 材料与方法

1.1 试材培养

菜豆(*P. vulgaris*)品种“无锡 816”的种子经 10% H₂O₂ 消毒 30 min,蒸馏水冲洗 6 次,置于 20℃ 蒸馏水中吸胀 6 h,之后将种子放入铺有 4 层湿润纱布的白瓷盘中,于恒温培养箱(26℃)中培养.待种子长出胚根后转到塑杯(φ=10 cm)中,蒸馏水培养,每杯 3 株,置光照培养箱中(26℃),每天光照 12 h,光强 6 klx,每日向杯中通气 2 次.待 2 枚真叶长出后,移栽于 1/2 Hoagland 培养液中,转至自然光照下培养,室温 25℃~30℃,光强 8 klx,早晚通气各一次,并用去离子水维持溶液的体积,每 3 d 换 1 次营养液,待第 3 枚真叶展开后,进行 LaCl₃ 和 CdCl₂ 污染实验.

1.2 试材处理

配制 5、10、15 mg·L⁻¹ (纯 La 计) LaCl₃ 梯度溶液,用喷雾器均匀喷布菜豆叶片,滴液为限,对照(CK)植株喷等量蒸馏水,各处理与 CK 均 3 杯,3 次重复.24 h 后,以质膜透性为指标,进行 La 效应浓度筛选.La 预处理 24 h 后,进行 Cd(30 μmol·L⁻¹ Cd 的 1/2 Hoagland 培养液,每杯 200 mL)胁迫处理,CK 为等量 1/2 Hoagland 营养液,各处理与 CK 均 3 杯,3 次重复,培养方

法同前,10 d 后测其生长指标.选择 50 μmol·L⁻¹ Cd 的 1/2 Hoagland 培养液作为生理指标测定的培养条件,在 Cd 胁迫 24 h 后,测其静态生理指标,并于此后每 12 h 测其动态生理指标.

1.3 生长与生理指标测定

细胞质膜透性(E%),叶绿素(Chl)、丙二醛(MDA)含量,过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性,根系活力的测定参考文献[7,8]提供方法进行.生长指标测定,用直尺量出株高及主根长;以单株为单位,分别测出每株菜豆幼苗叶片鲜重,茎鲜重,根鲜重.之后,于恒温干燥箱中,100℃杀青 0.5 h,80℃烘 12 h 至恒重,分别测其干重.叶面积测定用称重法^[5].植株 Cd 含量用原子吸收分光光度法测定.

2 实验结果

2.1 LaCl₃ 最适浓度的筛选

为确定 LaCl₃ 对菜豆幼苗生理功能的最佳效应浓度,实验中设置了 5、10、15 mg·L⁻¹ LaCl₃ 3 种浓度的等差梯度溶液,并辅以植物抗性生理中的通用指标——质膜透性进行 LaCl₃ 最佳浓度的筛选,结果列于图 1.由图 1 可见,在所设定的 3 个浓度范围内,LaCl₃ 均有降低菜豆幼苗叶片细胞质膜透性的作用.在不同浓度处理中,以 10 mg·L⁻¹ 效果最佳,其效应序列为:10>15>5 mg·L⁻¹ LaCl₃.有鉴于此,以下关于 LaCl₃ 对 Cd 污染伤害菜豆幼苗的影响实验,皆采用此浓度的 LaCl₃ (以下简称 La).

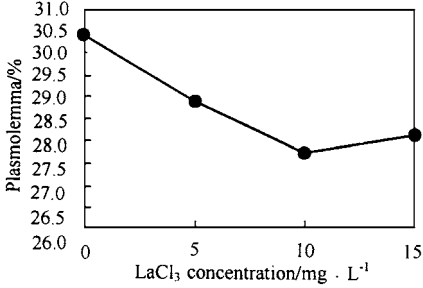


图 1 La 对菜豆幼苗细胞质膜透性的影响

Fig.1 Effect of La on plasmolymma of kidney bean seedling under Cd stress

2.2 La 对 Cd 胁迫下的菜豆生长的影响

表 1 数据显示,La 处理的正常菜豆幼苗,在株高、叶面积、叶鲜重、茎鲜重、叶干重、茎干重、主根长、根鲜重、根干重 9 项生长指标中,除株高外,其余 8 项均高于 CK,增幅为 0.6 % ~ 34.6 %;La 处理的 Cd 污染植株,9 项指标中除茎干重略高于 CK 外,其它 8 项都低于 CK,降幅在 5.5 % ~ 41.4 % 之间; $30\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 污染胁迫的菜豆幼苗,9 项指标皆低于 CK,下降幅度为 16.7 % ~ 61.3 %,降幅明显高于前者.表明在本实验条件下,La 对 Cd 污染伤害菜豆幼苗具有一定的缓解作用,此与已有报道相吻合^[4,5].进一步比较 9 项指标降幅得知,Cd 污染

对菜豆地下器官生长的抑制作用(39.2 % ~ 61.3 %) 强于地上器官(17.0 % ~ 48.0 %),La 之调节作用则是地上部(降幅 5.4 % ~ 31.9 %) 强于地下部(降幅 19.3 % ~ 41.4 %),因其可能与 Cd 的摄入途径和富集部位有关.即 Cd 是由根系摄入,首先在地下器官富集,然后逐渐向地上器官迁移,由此造成地下部吸收与富集量大于地上部(参见表 3),胁迫高于地上部,这种伤害程度差异或许是导致 La 调节效果分异的原因.

2.3 La 对 Cd 胁迫下的菜豆生理生化代谢的影响

表 1 La 对 Cd 胁迫下的菜豆生长的影响
Table 1 Effects of La on the growth of kidney bean seedling under Cd stress

指标	处理			
	CK	La	Cd	Cd + La
株高/cm	70.3 ± 8.5	69.6 ± 11.4	48.4 ± 7.2	57.8 ± 11.0
相对值	100.0	99.0	68.9	82.2
叶面积/cm ²	237.3 ± 38.6	269.0 ± 47.8	123.3 ± 22.0	167.5 ± 18.2
相对值	100.0	113.3	52.0	70.6
叶鲜重/g	2.744 ± 0.21	3.315 ± 0.88	1.572 ± 0.13	1.870 ± 0.10
相对值	100.0	120.8	57.3	68.1
叶干重/g	0.257 ± 0.10	0.287 ± 0.09	0.181 ± 0.02	0.237 ± 0.04
相对值	100.0	111.5	70.4	92.1
茎鲜重/g	2.047 ± 0.21	2.340 ± 0.19	1.536 ± 0.09	1.943 ± 0.36
相对值	100.0	114.3	75.0	94.5
茎干重/g	0.230 ± 0.09	0.256 ± 0.05	0.191 ± 0.07	0.243 ± 0.07
相对值	100.0	111.2	83.3	105.7
主根长/cm	11.8 ± 2.8	13.9 ± 2.3	7.2 ± 2.0	9.5 ± 2.9
相对值	100.0	117.8	60.8	80.7
根鲜重/g	0.509 ± 0.15	0.685 ± 0.24	0.197 ± 0.06	0.298 ± 0.10
相对值	100.0	134.6	38.3	58.6
根干重/g	0.038 ± 0.01	0.038 ± 0.009	0.019 ± 0.004	0.025 ± 0.010
相对值	100.0	100.0	50.6	65.8

2.3.1 对质膜透性与保护酶的影响

CAT 和 POD 是植物体内重要的活性氧清除酶系,可防止细胞内过量活性氧对生物大分子与质膜的破坏.MDA 是细胞膜脂过氧化产物,可与质膜透性一起表征植物受逆境伤害的程度.表 2 数据说明,在 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 污染胁迫下 48 h,菜豆叶片 CAT、POD 活性发生变化,MDA 含量与质膜透性增加,4 项指标增幅在

0.6 % ~ 28.6 % 之间,预示此时菜豆体内虽已产生应激反应,但仍不足以抵抗活性氧触发的膜脂过氧化作用对质膜伤害.La 处理的 Cd 污染菜豆植株,脂膜透性低于 CK 0.87 %,其余 3 项指标的变幅为 0.1 % ~ 19.1 %,明显低于 Cd 污染植株.表明由 Cd 引发的自由基反应趋弱,膜损伤减轻,显示出 La 对 Cd 造成的植株伤害具有一定缓解作用.与以往报道^[1,4,10]不尽一致的

是 Cd 胁迫下, CAT、POD 的应激反应强度较低, 这是是否同 Cd 浓度或实验材料的敏感性差异有关, 还需探究.

2.3.2 对叶绿素含量及根系活力的影响

表 2 La 对 Cd 污染下的菜豆质膜透性、MDA 含量及保护酶活性的影响

处理	质膜透性/ %	MDA 含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	POD 活性/ $\Delta A_{470}\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$	CAT 活性(H_2O_2)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
CK	13.56 ± 1.66 (-) ¹⁾	0.0105 ± 0.0011 (100) ²⁾	0.122 ± 0.04 (100) ²⁾	96.3 ± 9.5 (100.0) ²⁾
Cd	19.23 ± 2.43 (5.58)	0.0135 ± 0.0014 (128.6)	0.131 ± 0.03 (107.0)	96.8 ± 10.1 (100.6)
Cd + La	12.69 ± 1.01 (-0.87)	0.0125 ± 0.0011 (119.1)	0.120 ± 0.07 (98.4)	96.4 ± 8.9 (100.1)

1) 括号内为差值 2) 括号内为相对值

Chl 是植物进行光合作用的功能物质, 根系则是植物吸收养分和水分的重要器官, 其吸收功效(根系活力)与总吸收面积和活跃吸收面积相关, 两者主导着植物空气、矿质营养及水分代谢, 由此影响植物生长发育. 由图 2 可知, La 处理的菜豆幼苗, 叶片 Chl 含量, 根系总吸收面积和活跃吸收面积 3 项指标分别较 CK 提高 30.0 %、49.7 % 与 15.8 %, 壮苗效果显著; La 处理的 Cd 污染菜豆幼苗, 3 项指标分别比 CK 下降 0.8 %、10.1 % 和 16.7 %, 降幅为 0.8 % ~ 16.7 %; Cd 污染胁迫的菜豆幼苗, 3 项指标比 CK 下降 23.5 %、26.8 %、28.7 %, 降幅(23.5 % ~ 28.7 %) 明显高于前者. 表明在本实验条件下, La 可以缓解 Cd 胁迫对菜豆幼苗组织与功能造成的伤害.

为了解 Cd 对菜豆幼苗生理过程的动态影响与 La 诱导抗逆性、缓解 Cd 伤害的动态效应, 实验中以叶片 Chl 与 MDA 含量为指标, 以 60 h 为 1 周期(间隔 12 h), 考察了 La 与 Cd 对菜豆幼苗动态生理生化过程影响, 结果见图 3、4. 由图 3 可知, 随着时间推移, CK 的 Chl 含量变化较为平稳, Cd 处理菜豆幼苗, Chl 含量则不断下降, 至 48 h 与 60 h 时分别低于 CK 37.0 % 与 42.8 %. 此时叶片表面出现退绿伤斑, 乃不可见伤害发生的直观反映. 反观 La 处理的 Cd 胁迫植株, 虽然 Chl 含量动态变化规律与 Cd 胁迫植株近同, 但降幅明显小于前者, 第 48 h 和 60 h 的 Chl 含量分别低于 CK 24.2 % 与 23.8 %, 降幅小于前者. 表明 La 对维持污染胁迫下, 菜豆 Chl 含量稳定具有积极作用. 图 4 则反映了 Cd 胁迫下, La 处理和未处理的菜豆幼苗 MDA 消长变化规律. 随着 Cd 胁迫时间延长, 植株 MDA

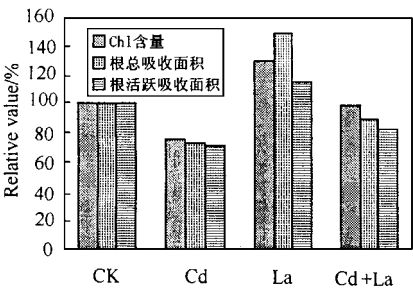


图 2 La 对 Cd 胁迫下叶绿素含量及根系活力的影响

Fig.2 Effect of La on the roots activity and chlorophyll content of kidney bean seedling under Cd stress

2.4 La 对 Cd 胁迫下菜豆动态生理生化过程影响

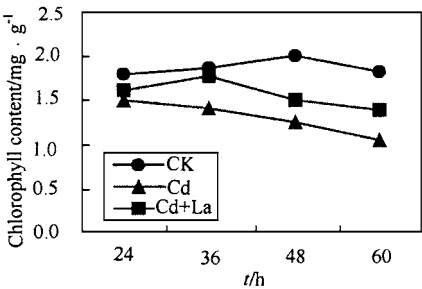


图 3 Chl 含量的动态变化

Fig.3 Dynamic change of chlorophyll content in kidney seedling

含量不断增加,48 h 与 60 h 含量高于 CK 28.4 %和 59.8 %,表明由 Cd 污染导致的菜豆膜脂过氧化伤害,随时间进程而逐渐加重.La 处理的菜豆幼苗,体内 MDA 含量虽也增加,但其增幅却始终低于前者,48 h 与 60 h 含量高于 CK 9.1 %和 27.8 %,升幅小于前者.说明 La 减轻了 Cd 对菜豆幼苗的伤害.

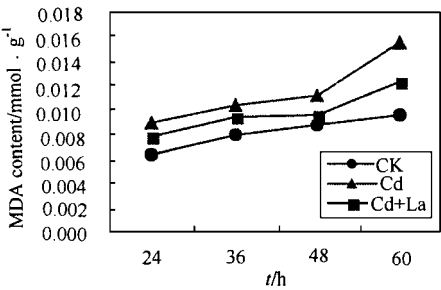


图 4 MDA 含量的动态变化
Fig.4 Dynamic change of MDA content
in kidney bean seedling

2.5 La 对 Cd 胁迫下菜豆植株 Cd 富集量影响

Cd 污染胁迫下,菜豆幼苗各器官中 Cd 富集状况列于表 3.在 Cd 胁迫下的 16 d 中,植株体内 Cd 含量显著增高,其中,地下器官 Cd 含量高于 CK1897.5 %,地上器官高于 CK 859.6 %,其富集规律是:地下器官 > 地上器官,同前人报道基本一致^[4~6].La 处理的 Cd 污染菜豆植株,与前两项相对应的指标分别为 657.2 %和 293.6 %,明显低于 Cd 污染植株.表明 La 能有效降低菜豆幼苗 Cd 含量,与已有的报道近同^[4~6].

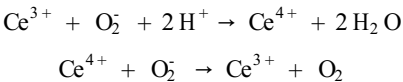
表 3 La 对 Cd 胁迫下菜豆幼苗 Cd 富集量的影响

Table 3 Effect of La on Cd content of kidney bean seedling under Cd stress				
处理	茎叶/ μg·g ⁻¹	相对值 / %	根 / μg·g ⁻¹	相对值 / %
CK	0.94 ± 0.09	100.0	2.01 ± 0.16	100.0
Cd	8.08 ± 1.64	859.6	38.14 ± 8.83	1897.5
La + Cd	2.76 ± 0.15	293.6	13.21 ± 2.86	657.2

3 讨论

与前期工作相比^[4],本实验发现 La 同样能

诱导菜豆抗逆性,继而缓解 Cd 污染对株高、叶面积、主根长、CAT 活性、质膜透性、Chl 与 Cd 含量的影响,反映出 La 在物种效应上的广谱性;其次,证明 La 能维持菜豆 POD 活性,降低 MDA 含量,减小根表(活跃吸收)面积、根与茎、叶干(鲜)重的降幅等(表 1,图 2).La 诱导植物抗性机理缘于 La 对生长与生理生化 2 个层面调控.就生长而言,研究证明^[9~12],La 能促进根系生长发育,叶面积扩展,优化苗期素质,齐苗壮苗.苗壮则植物抗逆能力增强,从而减轻 Cd 污染造成的环境压力,乃至 Cd 对菜豆直接损伤.依生理生化而论,La 有助根系生长的原因是促进 IAA、GA 向生长旺盛部位运输^[10,11],刺激根细胞增殖;在提高光合作用同时,加速光合产物向地(根)运输,为根系生长提供物质保障.La 减缓 Chl 降解之机理可能与 La 阻滞 Cd²⁺进入植体,从而减少叶绿体表面 Cd 富集量及由此引发的伤害;代替 Mg 形成 La-卟啉双层夹心结构^[13],在提高光合效率同时,增强 Chl 结构稳定性,补偿 Ca²⁺流失对 Chl 合成的抑制作用,减缓 Chl 降解有关.La 对质膜保护作用可能缘于以下几点:①La 作用位点.Smith 等^[14]认为,稀土生物效应的原初位点是细胞膜,即首先影响细胞膜结构,进而影响膜功能.②金属离子化合物配位数是 6 时,La 的离子半径虽与 Ca 相近,但其电荷数高于 Ca,能够嵌入质膜中,取代 Ca 与膜脂大分子形成复杂交联,或改变膜孔半径与膜分子构型,使细胞膜结构更趋稳定,最终影响到物质吸收与能量代谢^[15].③稀土对自由基的淬灭作用.Wang^[16]等人证实,铈(Ce)可清除超氧阴离子自由基(O₂⁻),其反应模式为:



王春霞^[17]等人也以脉冲辐解法证实,La 能有效抑制 O₂⁻ 生成.由此推断,在细胞体系中存在类似化学机制,进而控制细胞内自由基生成量,减轻后者对膜系统伤害.④调节 CAT、POD 活性.在微过氧化物酶(MP-11,POD、CAT 的活性中心)实验中发现,La 与 MP-11 键合使后者平

面结构更加扭曲,三维结构中 α 螺旋、 β 转角数增加,无规卷曲数下降,电化活性升高,催化 H_2O_2 分解能力增强^[18]。由此推断,La 提高植物保护酶清除自由基能力的机制与此相关。

La 降低 Cd 在菜豆体内富集量(表 3),或许是 La 减轻 Cd 伤害植株的最直接原因。机理可以是直接的离子拮抗,其依据是 La 离子势大于 Cd,竞争结合能力强于 Cd,通过与 Cd 竞争根系细胞表面离子载体或离子通道而抑制植物对 Cd 吸收。此外,也不排除 La 诱导细胞内生物大分子(蛋白质、糖、脂肪、氨基酸)合成,并以络和解毒方式降低植物体内 Cd 毒性,进而减轻其对植物伤害,抑或兼而有之,还需深入研究。

4 小结

(1) $30 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 使菜豆生长受到抑制,主要表现为株高、主根长度下降,叶面积锐减,叶、茎、根鲜重和干重明显降低。

(2) $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 使菜豆质膜透性、MDA 含量、CAT 和 POD 活性增加,Chl 含量、根系活力下降,且随 Cd 处理时间延长,伤害加重。

(3) La 可减轻 Cd 对菜豆幼苗的伤害程度。这与 La 提高菜豆幼苗 Chl 含量,降低细胞膜透性和 MDA 含量,维持 CAT 与 POD 活性等多重作用相关。

参考文献:

- 1 严重玲,李瑞智,钟章成.酸雨胁迫下稀土元素对小麦的生物学效应.中国农业科学,1998,31(3):89~91.
- 2 安黎哲,王勋陵.臭氧对春小麦生长的影响及稀土的防护作用.生态学报,1994,14(1):95~98.
- 3 贾棚等.稻抗重金属污染实验.中国稀土学报,1997,15(专辑):401~404.
- 4 Zhou Q et al. Mitigative effect of La on *Glycine max* seedling under Pb-Cd compound pollution. J. Rare Earths, 1999,17(4):303~307.
- 5 马建军,朱京涛.镉、铈、铈、铈、铈浸种处理对油菜吸收铬量及生物产量的影响.河北农业技术师范学院学报,2000,14(2):45~47.
- 6 胡忻等.稀土元素铈对小麦幼苗镉伤害的防护效应.南京大学学报(自然科学),2001,37(6):671~676.
- 7 陈建勋,王晓峰.主编.植物生理学实验指导.广州:华南理工大学出版社,2002.35,115,119,124.
- 8 邹奇.主编.植物生理生化实验指导.北京:中国农业出版社,1997.30.
- 9 熊炳昆.稀土生物功能化合物的应用研究.中国稀土学报,1994,12(4):354~365.
- 10 胡勤海,叶兆杰.稀土元素的植物生理效应.植物生理通讯,1996,32(4):296~300.
- 11 郑海雷等.稀土生物效应机理研究进展.稀土,2000,21(4):55~60.
- 12 周青等.La 对桃树优质增产的生物学效应.应用与环境生物学报,1999,4(4):360~363.
- 13 王秋泉等.叶绿素中镉的含量及其存在结构.中国稀土科技进展.北京:冶金工业出版社,2000.351~356.
- 14 Smith JC, Mikiten TM. Speciation of yttrium and lanthanides in natural water by inductively coupled plasma mass spectrometry after preconcentration by ultrafiltration and with a chelating resin. Analysis, 1998,123(5):773~783.
- 15 Piyasiri AJ. Changes of some membrane associated enzyme activities and degradation of membrane phospholipids in cucumber roots due to Ca starvation. Plant Cell Physiol, 1986, 23:223~239.
- 16 Wang JS, Guo CR, Cheng YX. Mechanism of cerium ions scavenging superoxide radical. J. Rare Earths, 1997,15(2):46~50.
- 17 王春霞等.稀土硝酸对生成超氧自由基的抑制作用.中国稀土学报,2000,18(3):286~288.
- 18 Jiang HJ et al. Effect of Lanthanum Ion on Peroxidase in Plant. J. Rare Earths, 2002, 20(5):445~450.