

镉胁迫下稀土镧对蚕豆幼苗根尖细胞分裂和 吲哚乙酸氧化酶的影响

汪承润, 卢 韪, 李月云, 姜传军, 田刘敏, 王勤英

(淮南师范学院生命科学系, 安徽 淮南 232001)

摘 要:重金属胁迫下稀土调节植物细胞分裂与增殖的生理机制至今尚不完全清楚。为此,将蚕豆幼苗分别培养于营养液、 $6\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化镉(CdCl_2)以及 $6\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 与 $2\sim 480\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸镧 $[\text{La}(\text{NO}_3)_3]$ 的复合溶液,14 d 后检测与根尖细胞分裂和生长相关的部分生理指标。结果表明,添加 $2\sim 120\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源 La 减少了根部组织对 Cd 的吸收,超过此剂量范围则促进了 Cd 的积累。同时,K、Zn、Fe 等矿质元素含量,以及吲哚乙酸氧化酶同功酶及其活性呈现“U”型剂量效应的变化,而根尖细胞分裂指数和根长则呈现类似倒“U”型的剂量效应变化趋势。因此,矿质元素和吲哚乙酸氧化酶活性的失衡和干扰是 La 调节 Cd 胁迫下蚕豆幼苗根尖细胞分裂与生长的重要生理机制。

关键词:稀土;镉;吲哚乙酸氧化酶;分裂指数;Hormesis 效应

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0679-06

Effects of Rare Earth Lanthanum on Root Tip Cell Mitosis and Indole Acetic Acid Oxidases in Roots of *Vicia faba* L. Seedlings Under Cadmium Stress

WANG Cheng-run, LU Yun, LI Yue-yun, JIANG Chuan-jun, TIAN Liu-min, WANG Qin-ying

(School of Life Science, Huainan Normal University, Huainan 232001, China)

Abstract: Physiological mechanisms of rare earth element(s) on regulating plant cell mitosis and growth under heavy metal stress are not completely understood. In the present work, *Vicia faba* L. seedlings were hydroponically cultured for 14 days in nutrient solution, containing single treatment of $6\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 , and combination of $6\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 and $2\sim 480\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of La, respectively. Some physiological parameters concerning cell mitosis and growth were then determined. The results showed that the addition of $2\sim 120\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of extraneous La contributed to decline of contents of Cd in the roots compared with the single Cd treatment, followed by Cd enhancement with the increase of La. The increase of La also led to nearly “U”-shaped enrichment of K, Zn, Fe or other mineral elements, and “U”-shaped alteration of indole acetic acid (IAA) oxidase isozymes and activities in the roots. However, root tip cell mitosis and root lengths changed like an inverted “U”-shaped dose response curve. In brief, the regulation mechanisms of La on the cell mitosis and growth of *V. faba* seedlings are attributed to unbalance and disturbance of some mineral elements and IAA oxidase under Cd oxidative stress.

Keywords: rare earth elements (REEs); cadmium; indole acetic acid oxidase; mitotic index; hormetic effects

随着工农业的快速发展,土壤和水体重金属污染面积和污染程度呈现上升趋势。重金属污染不仅能够导致重金属在植物体内的富集,干扰植物体营养元素

的平衡和光合作用,破坏细胞膜结构,进而抑制植物的生长^[1-2],还能够导致农作物产量下降,并通过食物链的放大作用进一步危害人类生命安全^[3-4]。因此,加强重金属污染的防治、修复与监测,减少重金属在农作物中的积累,进而提高粮食作物的安全性,具有极为重要的理论意义和应用价值。重金属污染土壤的传统修复技术是客土深翻、植物吸附净化等方法,而利用金属离子间的拮抗作用减少农作物对有害重金属离子的吸附和积累水平,进而减轻其植物毒性及其对

收稿日期:2011-10-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(20877032);污染控制与资源
化研究国家重点实验室开放基金项目(PCRRF10020);安徽省
自然科学基金面上项目(1208085MB17);安徽高校省级
自然科学研究重点项目(KJ2012Z381)

作者简介:汪承润(1966—),男,博士,副教授,从事环境污染物的毒理学与健康风险评估研究。E-mail:chengrunwang@163.com

生命健康的危害,可为重金属污染治理提供新的方法参考^[5-6]。

大量研究结果表明,稀土元素对动、植物和人具有广泛的生物学活性^[7]。30 多年以来,稀土元素因其特有的物理化学性质已被证明能够提高农作物的产量和品质^[8-9],而且可显著增强植物对盐、水、旱、酸雨和重金属等胁迫的抗性^[10-12]。稀土还被发现能够降低农作物中铅和镉的含量,在一定程度上缓解了铅和镉的植物毒性^[11,13]。但是,稀土对高浓度重金属的缓解效应不够明显,甚至会加剧其毒性效应^[14-15]。

稀土对植物生长具有“低促高抑”的 Hormesis 效应^[16]。关于重金属胁迫下稀土调节植物包括农作物幼苗生长的研究已有相关报道^[11-15],但其作用机理有待进一步探讨。镉(Cd)是典型的有害重金属,污染面积广,而且易被农作物吸收和富集。镧(La)是稀土微肥或添加剂的主要元素之一,其生理、生化和毒理学效应也被广泛研究^[17-19]。因此,本文拟探讨 CdCl₂ 与梯度 La(NO₃)₃ 复合暴露条件下,蚕豆幼苗根尖分生组织细胞的分裂指数及其影响因素,为进一步理解稀土与重金属元素的互作关系,以及应用稀土缓解重金属植物毒性提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

普通蚕豆种子(*Vicia faba* L.),淮南当地习见品种。

1.2 染毒处理

蚕豆种子应用 0.1%(M/V)次氯酸钠溶液浸泡 10 min 后,立即用自来水冲洗干净,然后置于 23 ℃条件下催芽。待根尖生长至 2 cm 时转移到盛有 Hoagland 营养液^[20]的水槽中,每个水槽悬浮培养 8 颗种子。1 d 后添加 CdCl₂(Sigma-Aldrich)和 La(NO₃)₃(上海国药)配制的单一或复合溶液(营养液稀释而成)染毒培养,每处理组设置 3 个水槽。外源浓度分别为 0(营养液)、Cd 6 μmol·L⁻¹ 以及 Cd 6 μmol·L⁻¹+ La 2、8、30、60、120、240、480 μmol·L⁻¹,pH 值范围测定为 5.8~6.1。水槽置于光照培养箱内,连续曝气,每 3 d 更换 1 次培养液。光照周期设定 15 h 光照/9 h 黑暗,白天 23 ℃,黑夜 20 ℃,光照强度 220 mol·m⁻²·s⁻¹,相对湿度 75%,连续染毒 14 d 后检测相关生物指标。为防止磷酸根与 La³⁺ 形成磷酸盐沉淀,配置 Hoagland 营养液时省略了磷酸二氢铵,每日则直接向幼苗叶片喷施等量的 0.5 mmol·L⁻¹ 磷酸二氢铵溶液。染毒 14 d 后取根

部组织开展下列实验。

1.3 镧和矿质元素含量的测定

样品的处理参照 Wang 等^[21]方法进行。用 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液和去离子水先后洗涤新鲜根部组织,60 ℃烘干,称重,浓 HNO₃ 浸没过夜,再用 HNO₃-HClO₄ (1:1,体积比)加热消解。选用地矿部物化探研究所提供的灌木枝叶样品(GBW07603,GSV-2)作为质控样品。应用 ICP-OES 测定 La、Cd 和其他元素含量,检测限为 0.02 μg·L⁻¹,以 μg·g⁻¹ 干重表示各元素含量。

1.4 根尖分裂指数和根长的测定

蚕豆根尖分生组织细胞的压片参照曹佳等^[22]方法进行。根尖细胞分裂指数(MI/%)=分裂细胞数/观察细胞总数×100%,分裂细胞包括前、中、后和末期细胞。每剂量组制备 4 张压片,统计每张片的 2 000 个左右细胞中的分裂细胞数及其比例。以主根根尖与茎基部之间的长度作为根长,每水槽测定 8 棵幼苗的主根长度。

1.5 根部吲哚乙酸(IAA)氧化酶同工酶图谱及相对酶活性的分析

吲哚乙酸氧化酶同工酶的检测参照 de Forchetti 和 Tigier 方法^[23]进行,略加改进。应用高通量凝胶电泳系统(Mini-PROTEIN 3,Bio-Rad)和变性凝胶电泳[8%(M/V)分离胶,5%(M/V)积层胶]技术检测同工酶图谱的变化。每孔上样可溶性蛋白为 78.0 μg 的粗酶液;电泳液为 30 mmol·L⁻¹ β-丙氨酸醋酸缓冲液(pH 4.5),恒压 120 V,电泳至溴酚蓝指示剂到达凝胶底部。取出胶片,用去离子水清洗后转移至显色溶液(0.66 mmol·L⁻¹ 吲哚乙酸、0.1 mmol·L⁻¹ 对香豆酸、1 mmol·L⁻¹ MnCl₂、1 mmol·L⁻¹ 草酸、7 μmol·L⁻¹ H₂O₂、0.1%(M/V) 固蓝 BB 盐、25 mmol·L⁻¹ 醋酸钠,pH4.0)中孵育 60 min。同工酶显示为灰白色背景下的棕色带。每个处理组 3 个平行,同时电泳和显色。应用 Canon 照相机拍摄照片,应用 Image J 软件对同工酶带型的整合光密度进行统计,以阴性对照组整合光密度的平均值作为“1”,计算各处理组相对酶活性的变化水平。

1.6 统计分析

应用 SPSS 13.0 统计软件进行统计,采用 one-way ANOVA 和 Duncan 检验方法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 根部组织 La、Cd 和矿质营养元素含量的影响

根部组织样品的 ICP-OES 检测结果表明(表 1),

根部 La 的含量随着外源 La 剂量的增加而呈现上升趋势,当外源 La 增长至 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以后,与空白对照组和 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组比较,根部 La 含量显著性升高($P<0.05$, $P<0.01$)。当外源 La 浓度为 $2\sim 120 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根部 Cd 含量呈现递减趋势,并下降至 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组之下,其中 $60\sim 120 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源 La 诱导了根部 Cd 的积累水平显著性下降($P<0.05$)。

同时发现,当外源 La 为 $2\sim 30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根部 Ca、Zn 和 Cu 的含量呈现下降趋势并低于 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组,而后随着 La 的增加而趋于升高。当外源 La 为 $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,Mg 和 K 的含量升高至 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组以上,当外源 La 增加至 $8\sim 30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,Mg 和 K 的含量下降至 Cd 的单一处理组之下,但无显著性差异,而后又随着 La 的增加而趋于升高。另外还发现,在 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液中添加 $2\sim 480 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源 La 之后,根部 Fe 的含量下降至 Cd 的单一处理组以下(表 1)。

2.2 蚕豆幼苗根尖分裂指数(MI)和根长的变化

由图 1a 可知,Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的根尖 MI 显著性下降至对照组以下;而 $8\sim 30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ La 的添加则诱导了 MI 值升

高至 Cd 的单一处理组之上。然后随着外源 La 的递增,MI 值又呈现下降趋势,其中在 $240\sim 480 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ La 作用下,MI 值显著性下降至空白对照组之下。

蚕豆幼苗主根长度检测结果表明(图 1b),随着外源 La 的增加,根长基本呈现下降趋势,在 $480 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ La 作用下根长显著性下降至空白对照组以下($P<0.05$)。

2.3 蚕豆幼苗根部组织 IAA 氧化酶同功酶及其相对酶活性的变化

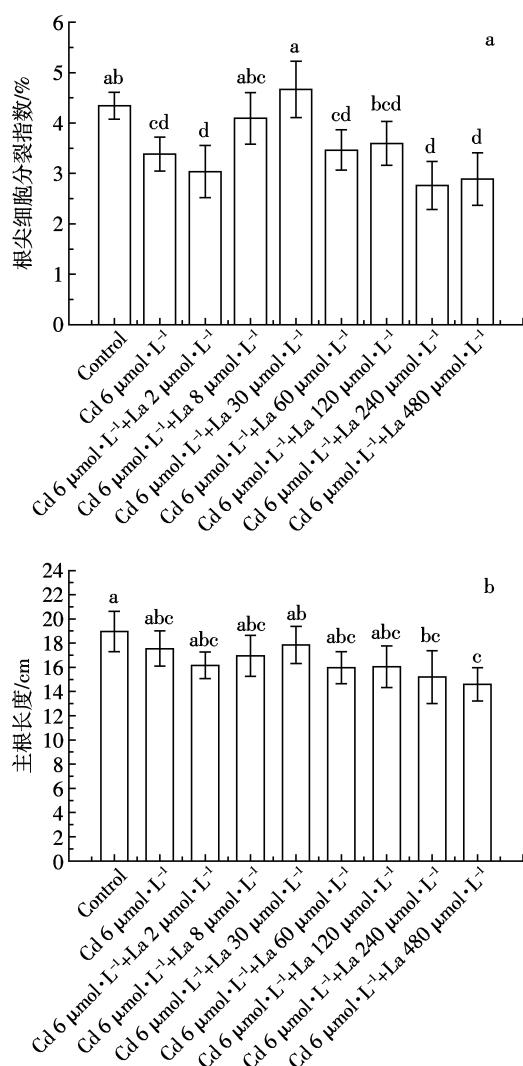
为了探讨 Cd 胁迫下 La 对蚕豆幼苗根部组织细胞生长激素代谢水平的影响,本实验检测了 IAA 氧化酶同功酶及其相对酶活性的变化。结果表明,Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 单一以及梯度外源 La 的复合处理组诱导了 IAA 氧化酶同功酶带型光密度的变化,但均未发生带型数量上的变化(图 2a)。与对照组比较,Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组诱导了 IAA 氧化酶活性的升高,其中后者显著性高于空白对照组($P<0.05$)。而后随着 La 的递增,IAA 氧化酶活性呈现先下降再升高的变化趋势,其中在 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ La 作用下该酶活性显著性下降至 Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组以下(图 2b)。

表 1 蚕豆幼苗根部 La、Cd 和一些矿质元素含量的测定($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)

Table 1 Contents of La, Cd and some mineral nutrients in roots of *V. faba* seedlings($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)

Treatments	La contents	Cd contents	Mg contents	K contents
Control	1.1 $\pm$ 0.1f	0.2 $\pm$ 0f	828.2 $\pm$ 98.5a	16 289 $\pm$ 1 821ab
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	1.2 $\pm$ 0.2f	136.9 $\pm$ 13.5abc	851.9 $\pm$ 105.3a	10 093 $\pm$ 1 219e
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	28.7 $\pm$ 3.8f	127.7 $\pm$ 18.8bcd	911.4 $\pm$ 113.9a	11 189 $\pm$ 1 598cd
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $8 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	62.6 $\pm$ 7.6ef	120.3 $\pm$ 19.6bcd	830.6 $\pm$ 109.5a	10 012 $\pm$ 1 309de
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	150.3 $\pm$ 19.5de	113.3 $\pm$ 18.2cde	721.6 $\pm$ 103.5a	8 998 $\pm$ 1 609de
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	185.6 $\pm$ 22.3d	110.7 $\pm$ 15.7de	788.9 $\pm$ 109.2a	9 925 $\pm$ 1 488e
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $120 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	355.0 $\pm$ 41.2c	101.5 $\pm$ 17.8e	811.8 $\pm$ 99.3a	12 989 $\pm$ 1 950bcd
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $240 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	778.2 $\pm$ 53.8b	137.8 $\pm$ 21.9ab	839.6 $\pm$ 121.7a	15 523 $\pm$ 2 962a
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $480 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	1 121.9 $\pm$ 139.1a	153.2 $\pm$ 29.1a	850.1 $\pm$ 134.9a	14 198 $\pm$ 1 809abc
Treatments	Ca contents	Zn contents	Cu contents	Fe contents
Control	2 196.2 $\pm$ 208.5b	56.9 $\pm$ 8.3bc	19.7 $\pm$ 3.2b	240.7 $\pm$ 16.5a
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 419.7 $\pm$ 211.8ab	70.8 $\pm$ 8.2ab	24.1 $\pm$ 2.9b	231.8 $\pm$ 30.9a
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 309.5 $\pm$ 283.1b	67.6 $\pm$ 8.3ab	23.1 $\pm$ 3.2b	228.8 $\pm$ 16.1a
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $8 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 265.9 $\pm$ 302.9b	63.9 $\pm$ 7.9bc	20.9 $\pm$ 2.3b	211.5 $\pm$ 25.8ab
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 005.1 $\pm$ 201.9b	50.9 $\pm$ 9.7c	17.9 $\pm$ 2.8b	169.3 $\pm$ 18.3c
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 109.8 $\pm$ 263.7b	60.5 $\pm$ 9.3bc	19.6 $\pm$ 3.5b	171.4 $\pm$ 18.5c
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $120 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 204.4 $\pm$ 291.2ab	63.8 $\pm$ 8.5bc	22.9 $\pm$ 2.1b	182.8 $\pm$ 21.6bc
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $240 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 698.3 $\pm$ 266.8a	75.9 $\pm$ 11.7a	30.8 $\pm$ 5.1a	220.9 $\pm$ 19.8a
Cd $6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ +La $480 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	2 491.3 $\pm$ 301.9b	66.5 $\pm$ 9.2bc	25.1 $\pm$ 4.1b	190.2 $\pm$ 20.2c

注:含量数值为 3 次重复的平均值,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。



3 次重复平均值,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

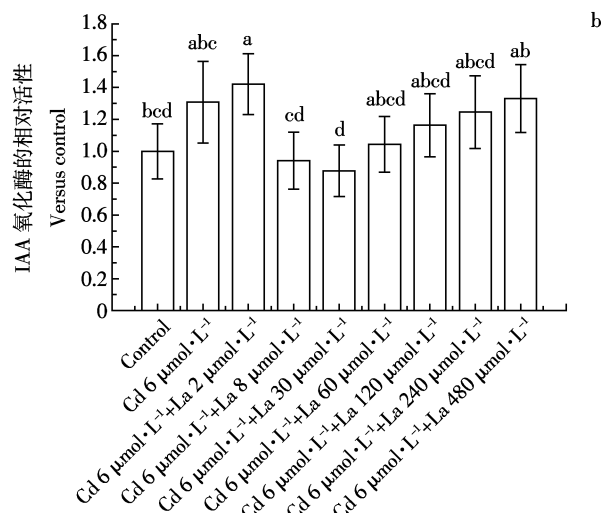
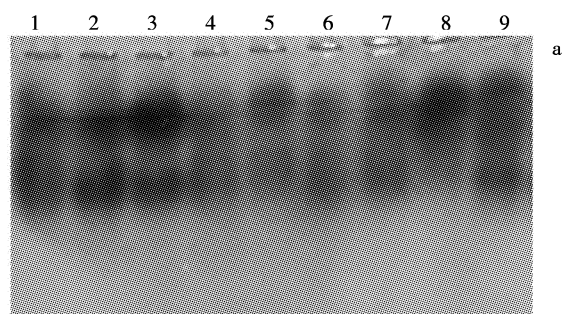
图 1 La 对 Cd 胁迫下蚕豆幼苗根尖分裂指数(a)和根长(b)变化的影响

Figure 1 Effects of La on mitotic indexes(a) and root length(b) of *V. faba* seedlings under Cd stress

3 讨论

3.1 稀土 La 拮抗 Cd 和诱导矿质元素含量失衡的可能机制

稀土农用是我国科技工作者多年努力获得的具有我国特色的科研成果。研究表明,稀土对盐、涝、干旱、酸雨以及重金属诱导植物的胁迫均具有一定的抗性^[12,17]。据报道,La 能够提高植物对重金属的抗性,且在一定程度上能够缓解重金属的植物毒性^[10-11]。另有相反的报道,植物体中重金属含量随着外源稀土的增加而升高,而矿质元素含量则呈现下降趋势^[24-25]。因此,有待进一步证实。



1~9 分别代表空白对照组(Hoagland 营养液)、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 8 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 60 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 120 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 240 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ + La 480 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。n=3, $P<0.05$

图 2 La 对 Cd 胁迫下蚕豆幼苗根部组织 IAA 氧化酶同功酶(a)及其相对酶活性(b)的影响

Figure 2 Effects of La on indoleacetic acid oxidase isozymes(a) and their relative activities(b) in roots of *V. faba* seedlings under Cd stress

本实验结果表明,向 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 溶液中分别添加 2~120 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源 La,蚕豆幼苗根部组织 Cd 的含量呈现递减趋势,并下降至 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理组以下,超过此剂量范围,外源 La 则促进了根部组织对 Cd 的吸收,Cd 的含量增至 Cd 的单一处理组之上。由此可见,低浓度外源 La 拮抗了根部组织对 Cd 的吸收,而超过一定剂量则促进了幼苗对 Cd 的吸收和富集。同时发现,向 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 溶液中添加适宜浓度的外源 La (2~30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 还导致了根部 Ca、Zn、Cu、Mg、K 和 Fe 含量的下降,部分元素甚至显著性低于 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理组。而随着外源 La 的增加,这些矿质元素含量又呈现上升趋势(表 1)。本实验结果

与相关的报道存在一定差异^[24-25]。我们发现,若随着外源稀土浓度的继续增加($>480\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),本实验结果也可能出现下降的变化趋势。因此,上述差异可能与他们应用的稀土浓度过高有关。

La^{3+} 与 Ca^{2+} 半径相近,低剂量 La^{3+} 已被证明是 Ca^{2+} 的拮抗剂^[26]。 La^{3+} 能够结合于细胞膜上的 Ca^{2+} 通道,干扰其他矿质元素进入细胞膜^[27-28]。我们已经发现,低剂量 La^{3+} 不仅降低了叶片组织中 Ca 的含量,还拮抗了叶片细胞对 Mg 、 Fe 、 K 、 Cu 、 Zn 等矿质元素的吸收^[19]。据此推测,低剂量 La^{3+} 结合于根部组织细胞膜上的 Ca^{2+} 通道后,不仅阻碍了细胞对 Ca^{2+} 的吸收,还抑制了 Cd 、 Mg 、 Fe 、 K 等金属元素的跨膜运输。随着外源 La 的增加, Cd 和一些矿质元素含量又呈现上升趋势。这可能与高剂量 La^{3+} 破坏了细胞膜的离子通道,从而增加了根部细胞膜的离子通透性有关,相关机制有待进一步研究^[29]。

随着外源 La 的增加,根部上述矿质元素的含量呈现“U”型剂量效应曲线的变化趋势,其中 Fe 和 K 的含量均下降至空白对照组之下。矿质元素缺失或者不足都能够干扰植物体的正常生长,甚至导致植物体的死亡^[30-31]。因此,营养元素含量的失衡,尤其是 Fe 和 K 含量的不足,可能是高剂量 La 与 Cd 复合后影响蚕豆幼苗生长的重要因素之一。

3.2 矿质元素的失衡与吲哚乙酸氧化酶活性变化之间的关系

比较表1和图2不难发现,在梯度 La 分别与 $6\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 的复合处理组,矿质元素的含量与 IAA 氧化酶同功酶活性之间存在基本一致的变化趋势。因此,外源 La 在诱导蚕豆幼苗根部组织矿质元素含量的“U”型剂量效应变化的同时,伴随着或进一步诱导了吲哚乙酸氧化酶活性发生相似的“U”型曲线变化。这可能与其中的一种或几种金属元素参与该酶活性中心的调节有关。

3.3 吲哚乙酸氧化酶与根尖细胞分裂指数和根长变化之间的关系

吲哚乙酸是最重要的植物生长素,能够促进植物根尖和顶叶分生组织细胞的分裂和生长^[32]。吲哚乙酸氧化酶能够通过特异性分解吲哚乙酸来控制吲哚乙酸的含量,该酶活性的大小通常与植物体吲哚乙酸含量之间呈现相反的变化趋势。在本实验中,当梯度 La 分别与 $6\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 复合后,吲哚乙酸氧化酶活性随着外源 La 的递增而呈现“U”型剂量效应曲线的变化(图2)。与此同时,根尖分裂指数和根长则呈现倒“U”型变化趋势(图1)。相关性分析结果也表明,在上

述复合处理组,吲哚乙酸氧化酶活性分别与根尖分裂指数($r=-0.889$, $P<0.01$)和根长($r=-0.757$, $P<0.05$)之间呈显著性负相关。据此推测,梯度 La 通过诱导蚕豆根部组织细胞吲哚乙酸氧化酶同功酶及其活性的“U”型剂量效应,控制根部组织吲哚乙酸的合成与分解水平,进一步介导根尖分生组织细胞的分裂和生长速率的变化。

4 结论

在 Cd 污染溶液中添加适量的外源稀土 La 能够抑制或者拮抗蚕豆幼苗根部组织对 Cd 的吸收, La 超过一定剂量($>120\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)则能促进幼苗对 Cd 的吸收和富集。同时,梯度外源 La 还导致了根部组织 Ca 、 Zn 、 Cu 、 Mg 、 K 和 Fe 等矿质元素含量的“U”型剂量效应,并伴随或进一步诱导了吲哚乙酸氧化酶同功酶及其活性的“U”型剂量效应。吲哚乙酸氧化酶通过控制吲哚乙酸的合成与分解水平,进一步介导了根尖分生组织细胞的分裂和生长的变化。这可能是稀土调节重金属胁迫下的植物分生组织细胞分裂增殖与生长的生理机制之一。

参考文献:

- [1] Pietrini F, Iannelli M A, Pasqualini S, et al. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis*[J]. *Plant Physiology*, 2003, 133:829-837.
- [2] Scebbba F, Arduini I, Ercoli L, et al. Cadmium effects on growth and antioxidant enzymes activities in *Miscanthus sinensis*[J]. *Biologia Plantarum*, 2006, 50:688-692.
- [3] Duruibe J O, Ogwogebu M O C, Ekwurugwu J N. Heavy metal pollution and human biotoxic effects[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2007, 2:112-118.
- [4] Thijssen S, Cuypers A, Maringa J, et al. Low cadmium exposure triggers a biphasic oxidative stress response in mice kidneys[J]. *Toxicology*, 2007, 236(1-2):29-41.
- [5] 李花粉, 郑志宇, 张福锁, 等. 铁对小麦吸收不同形态镉的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(2):170-173.
LI Hua-fen, ZHENG Zhi-yu, ZHANG Fu-suo, et al. Effect of iron nutritional status on the uptake of Cd from different compounds by wheat plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2):170-173.
- [6] 周正朝, 张希彪, 上官周平. 植物对稀土元素的生理生态响应[J]. 西北农业学报, 2004, 13(2):119-123.
ZHOU Zheng-chao, ZHANG Xi-biao, SHANGGUAN Zhou-ping. The plant ecophysiological effect of the rare earth element[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2004, 13(2):119-123.
- [7] Qiu G M, Li W, Li X K, et al. Biological intelligence of rare earth elements in animal cells[J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, 23:554-573.
- [8] Liu X S, Wang J C, Yang J, et al. Application of rare earth phosphate

- fertilizer in western area of China[J]. *Journal of Rare Earths*, 2006, 24(1):423-426.
- [9] Wang D F, Sun J P, Du D H, et al. Degradation of extraction from seaweed and its complex with rare earths for organophosphorous pesticides[J]. *Journal of Rare Earths*, 2007, 25(1):93-99.
- [10] Choi Y E, Harada E, Wada M, et al. Detoxification of cadmium in tobacco plants: Formation and active excretion of crystals containing cadmium and calcium through trichomes[J]. *Planta*, 2001, 213:45-50.
- [11] 庞欣, 王东红, 邢晓燕, 等. 镧胁迫下 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 中国稀土学报, 2002, 20(2):159-163.
- PANG Xin, WANG Dong-hong, XING Xiao-yan, et al. Effect of La^{3+} on activities of antioxidant enzymes in wheat seedlings under mercury stress[J]. *Journal of Rare Earths*, 2002, 20(2):159-163.
- [12] He Z Y, Li J C, Zhang H Y, et al. Different effects of calcium and lanthanum on the expression of phytochelatin synthase gene and cadmium absorption in *Lactuca sativa*[J]. *Plant Science*, 2005, 168:309-318.
- [13] 周青, 黄晓华, 屠昆岗, 等. La 对 Cd 伤害大豆幼苗的生态生理作用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5):442-445.
- ZHOU Qing, HUANG Xiao-hua, TU Kun-gang, et al. Ecophysiological effect of La on *Glycine max* seedling under Cd stress[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(5):442-445.
- [14] 张小兰, 施国新, 徐勤松, 等. 镧缓解镍对水鳖叶片的毒害效应研究[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(1):81-84.
- ZHANG Xiao-lan, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Detoxification of lanthanum against nickel in *Hydrocharis dubia* BL. backer leaves[J]. *Journal of Rare Earths*, 2003, 21(1):81-84.
- [15] 刘冰, 梁婵娟, 徐雪松, 等. La 对 Cd 胁迫下大豆膜脂过氧化及 POD 活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):214-216.
- LIU Bing, LIANG Chan-juan, XU Xue-song, et al. Effects of lanthanum(La) on membrane lipid peroxidation(POD) and its activity in soybean seedling under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):214-216.
- [16] Wang C R, Shi C E, Liu L, et al. Lanthanum element induced imbalance of mineral nutrients, HSP 70 production and DNA-protein crosslink, leading to hormetic response of cell cycle progression in root tips of *Vicia faba* L. seedlings[J]. *Dose-Response*, 2012, 10:96-107.
- [17] 倪嘉缙. 稀土生物无机化学[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- NI Jia-zan. Inorganic biochemistry of rare earth elements[M]. Beijing: Science press, 1995.
- [18] Wang C R, He M, Shi W, et al. Toxicological effects involved in risk assessment of rare earth lanthanum on roots of *Vicia faba* L. seedlings[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(10):1721-1728.
- [19] Wang C R, Lu X W, Tian Y, et al. Lanthanum resulted in unbalance of nutrient elements and disturbance of cell proliferation cycles in *V. faba* L. seedlings [J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 143:1174-1181.
- [20] Lucetti S, Nardi L, Nisini P T, et al. Bivariate flow cytometry DNA/Br-dUrd analysis of plant cell cycle[J]. *Methods in Cell Science*, 1999, 21:155-166.
- [21] Wang C R, Tian Y, Wang X R, et al. Hormesis effects and implicative application in assessment of lead-contaminated soils in roots of *Vicia faba* seedlings[J]. *Chemosphere*, 2010, 80:965-971.
- [22] 曹佳, 林真(日本), 余争平, 等. 微核试验原理、方法及其在人群监测和毒性评价中的应用 [M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2000.
- [23] de Forchetti S M, Tigier H A. Effect of dicarboxylic acids on the peroxidase-IAA oxidase isozymes of soybean callus[J]. *Physiologia Plantarum*, 1983, 59:355-358.
- [24] 丁士明, 张自立, 梁涛, 等. 外源稀土对根际稀土和重金属地球化学行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1):13-17.
- DING Shi-ming, ZHANG Zi-li, LIANG Tao, et al. Influence of extraneous rare earth elements(REEs) on biogeochemical behaviors of the elements and several other metals in rhizosphere[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(1):13-17.
- [25] Wang L H, Huang X H, Zhou Q. Effects of rare earth elements on the distribution of mineral elements and heavy metals in horseradish[J]. *Chemosphere*, 2008, 73:314-319.
- [26] Das T, Sharma A, Talukder G. Effects of lanthanum in cellular systems: A review[J]. *Biological Trace Element Research*, 1988, 18(3):201-228.
- [27] 薛绍武, 杨频. 镧对蚕豆叶肉细胞质膜外向钾通道作用研究[J]. 高等学校化学学报, 2005, 26:16-18.
- XUE Shao-wu, YANG Pin. Effects of La^{3+} on outward K^+ channels at plasma membrane in *Vicia mesophyll* cells[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2005, 26:16-18.
- [28] Hu X, Wang X R, Wang C. Bioaccumulation of lanthanum and its effect on growth of maize seedlings in a red loamy soil[J]. *Pedosphere*, 2006, 16:799-805.
- [29] Shtangeeva I, Ayrault S. Effects of Eu and Ca on yield and mineral nutrition of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59:49-58.
- [30] Kochian L V. Molecular physiology of mineral nutrient acquisition, transport and utilization.//Buchanan B B, Gruissem W, Jones R L(Eds) Biochemistry and molecular biology of plants[M]. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000.
- [31] Hayes D P. Adverse effects of nutritional inadequacy and excess: A hormetic model[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2008, 88:578S-581S.
- [32] Woodward A W, Bartel B. Auxin: Regulation, action and interaction[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95:707-735.