

不同生长调节剂对东南景天镉积累的影响

何冰, 陆覃昱, 李彦彦, 陈小勤, 王学礼, 顾明华*

(广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要: 为了提高镉(Cd)超积累植物东南景天的植物修复效率, 对不同植物生长调节剂调控东南景天 Cd 积累的作用进行了研究。在水培条件下, 采用脱落酸(ABA)、生长素(IAA)、细胞分裂素(6-BA)、乙烯利(ETH)四种生长调节剂对 0.1 mmol·L⁻¹ Cd 处理下的东南景天进行叶面喷施处理, 对其生物量、Cd 含量、Cd 积累量、SOD 和 POD 活性进行了分析。结果表明: ABA 处理通过提高地上部生物量和 Cd 含量、促进 Cd 向上运输, 从而增加东南景天地上部对 Cd 的积累; IAA 处理通过提高生物量、缓解 Cd 对叶片的毒害, 从而增加东南景天地上部对 Cd 的积累; 6-BA 处理通过提高东南景天地上部生物量和 Cd 含量、缓解 Cd 对叶片的毒害, 从而增加东南景天地上部对 Cd 的积累; ETH 处理则通过抑制生长和 Cd 向上转运进而降低东南景天地上部对 Cd 的积累。在重金属污染土壤植物修复中, 适量施用 ABA、IAA、6-BA 可提高东南景天对镉污染土壤的修复效率。

关键词: 东南景天; 镉积累量; 植物生长调节剂; 植物修复

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)08-1538-08 doi:10.11654/jaes.2014.08.011

Effects of Different Growth Regulators on Cadmium Accumulation by *Sedum alfredii* H.

HE Bing, LU Qin-yu, LI Yan-yan, CHEN Xiao-qin, WANG Xue-li, GU Ming-hua*

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Enhancing heavy metal accumulation in hyperaccumulator has been a hot topic. In the present study, the impact of plant growth regulators (PGRs) on growth and Cd accumulation of *Sedum alfredii* H., a Cd hyperaccumulator, was investigated under hydroponic condition with 0.10 mmol·L⁻¹ Cd. Four kinds of PGRs were sprayed on leaves. Application of abscisic acid (ABA) increased shoot biomass and Cd concentration, thus enhancing Cd accumulation in shoots. Supplying indole-3-acetic acid (IAA) increased shoot biomass and improved leaf Cd detoxiation, thus promoting shoot Cd accumulation. Similarly, the treatment of 6-benzylaminopurine (6-BA) also enhanced shoot Cd accumulation due to improved shoot biomass and leaf detoxification. However, addition of ethylene (ETH) decreased shoot Cd accumulation as a result of suppression of both shoot growth and Cd upward transport. The results of present study indicate that proper applications of ABA, IAA, and 6-BA could improve Cd phytoextraction efficiency of heavy metal hyperaccumulators.

Keywords: *Sedum alfredii* H; cadmium accumulation; plant growth regulators; phytoremediation

截至 2011 年, 被发现的 Cd 超积累植物仅 5 种^[1]。东南景天 (*Sedum alfredii* H.) 作为 Zn、Cd 的超积累植物^[2-3], 在土壤重金属植物修复中已得到广泛的应用。叶海波等^[4]通过盆栽实验证明在 Pb、Zn 和 Cd 三种元素复合污染条件下, 东南景天的叶中 Cd 最大含量可达 12 100 mg·kg⁻¹。熊应辉等^[5]研究发现水培条件下东南景天对 Cd 的耐受临界浓度高达 500 μmol·L⁻¹。

提高植物修复效率一直是研究的热点。目前认为, 改善农艺措施、添加植物修复剂 (包括修复剂、微生物菌剂和生长调节剂) 以及植物基因改良是提高植物修复效率的主要技术途径^[6], 其中的部分途径已在东南景天上进行了相应的研究。有研究证明, 适当的施用氮、磷和钾肥可促进东南景天生长, 提高地上部对重金属的积累, 重金属复合污染条件下, NH₄HCO₃、Ca(H₂PO₄)₂ 和 K₂SO₄ 均能提高东南景天地上部 Pb、Zn 和 Cd 含量^[7]。添加石灰和有机肥可以改良土壤条件, 有利于促进东南景天的生长及其对 Cd 的吸收^[8]。化学活化剂 SDBS 和 EDTA 可增加东南景天对 Cd 的吸收^[9]。外源施用柠檬酸或琥珀酸可促进东南景天对

收稿日期: 2013-12-27

基金项目: 农业部重金属污染治理项目“广西刁江流域农产品产地重金属污染修复示范”

作者简介: 何冰 (1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事重金属污染土壤生态治理及植物化控研究。E-mail: hebing@gxu.edu.cn

* 通信作者: 顾明华 E-mail: gumh@gxu.edu.cn

Cd的吸收^[10]。添加植物生长调节剂以其相对较低的成本及较为明显的效果成为本文研究的重点。

植物生长调节剂(Plant growth regulator, PGR)参与了植物生长、发育以及植物应对逆境胁迫等各个过程的调控,其在强化植物修复作用上具有极大的潜力,在此方面国内外进行了许多相关的研究。Tassi等^[11]研究表明外施细胞分裂素类激素可以提升向日葵(*Helianthus annuus*)的生物量及其重金属积累量。研究表明使用生长素(IAA)可以促进玉米(*Zea mays*)、滇苦菜(*Picris divaricata*)、向日葵、东南景天对Pb或Zn的吸收^[12-15];研究认为IAA通过减缓重金属的毒害、促进根系生长、提高生物量、增强呼吸作用来调节营养水平等方面,进而促进植物对Pb的吸收^[12-15];外施脱落酸(ABA)、乙烯利(ETH)等生长调节剂可以增强印度芥菜(*Brassica juncea*)抵抗Cd等重金属胁迫的能力^[16-17]。因此,生长调节剂在一定条件下具有促进植物吸收重金属的效应,而这一效应主要集中在生长调节剂提高植物抗逆性、维持正常生理代谢等方面^[11-17]。超积累植物对重金属具有超富集的作用,其地上部积累的重金属可达普通植物的100倍以上,内源激素是否直接调控超积累植物吸收、运输和积累重金属的过程,目前未见有关报道。

本文以超积累植物东南景天为材料,在Cd处理条件下:(1)比较生长素(IAA)、细胞分裂素(6-BA)、乙烯利(ETH)及脱落酸(ABA)在调控生长和Cd吸收两个方面的不同效应,初步探讨哪类激素具有直接调控植物吸收Cd的作用;(2)比较生长素、细胞分裂素、乙烯利及脱落酸对东南景天SOD和POD活性的影响差异,分析哪类激素主要通过提高抗性而间接调控植物对重金属的吸收,为进一步探索内源激素对植物超积累重金属的调控机制奠定基础。此外,明确可促进东南景天Cd积累的生长调节剂,提高东南景天土壤修复效率,也可为调控东南景天在Cd污染土壤植物修复中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验材料东南景天采自浙江省衢州市某古老铅锌矿区。选取生长一致的带顶芽的东南景天茎段用自来水洗净,剪成大小一致的枝条,培养室培养,全天恒温(24±2)℃,湿度75%±5%,日均正午光强8722 lx。清水培养至生根后,改用完全培养液培养,培养液组成为:Ca(NO₃)₂·4H₂O 2.0 mmol·L⁻¹、KH₂PO₄ 0.1 mmol·

L⁻¹、MgSO₄·7H₂O 0.5 mmol·L⁻¹、KCl 0.1 mmol·L⁻¹、K₂SO₄ 0.7 mmol·L⁻¹、H₃BO₃ 10 μmol·L⁻¹、MnSO₄·H₂O 0.5 μmol·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 1.0 μmol·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 0.2 μmol·L⁻¹、(NH₄)₆Mo₇O₂₄ 0.01 μmol·L⁻¹、Fe-EDTA 100 μmol·L⁻¹。连续24 h通气,每天使用0.1 mol·L⁻¹ NaOH和0.1 mol·L⁻¹ HCl调节培养液pH至5.8,每3 d更换一次培养液。待长出茂盛根系后,加入0.10 mmol·L⁻¹ CdCl₂进行处理。3 d后叶面喷施生长调节剂,叶尖滴水为限,其处理种类与浓度见表1。共喷施3次,每3 d喷1次,所有处理完成后继续培养10 d收获。每个处理重复4次。

表1 生长调节剂处理浓度

Table 1 Concentrations of plant growth regulators used in study		
处理号 No.	植物生长调节剂 PGR	处理浓度 Treatment/mg·L ⁻¹
CK	清水	—
1	脱落酸(ABA)	0.05
2		0.20
3	生长素(IAA)	0.05
4		0.20
5	细胞分裂素(6-BA)	0.05
6		0.20
7	乙烯利(ETH)	0.05
8		0.20

1.2 测定项目及方法

1.2.1 植株干重

植株收获后用自来水冲洗干净,20 mmol·L⁻¹ EDTA-Na₂浸泡根部20 min。去离子水反复冲洗,吸水纸擦干。将植株根、茎、叶分离,分别置于烘箱中105℃杀青,65℃烘干至恒重,称重。

1.2.2 植株Cd含量

样品粉碎、过筛,称取0.300 g用8 mL HCl:HNO₃=3:1(V:V)湿灰法微波消解,火焰原子吸收法测定Cd含量(ZEEnit 700P)。

1.2.3 SOD、POD活性

分别称取0.50 g新鲜样品,液氮研磨,加入磷酸缓冲液(pH 6.0)5 mL,离心(10 000×g)10 min后取上清液,按陈建勋等^[18]的方法测定SOD和POD活性。

1.2.4 植株其他指标

地上部Cd总量(mg·plant⁻¹)=地上部生物量×地上部Cd含量

根部Cd总量(mg·plant⁻¹)=根部生物量×根部Cd含量

转运系数=地上部分Cd含量/根部Cd含量

1.2.5 数据分析

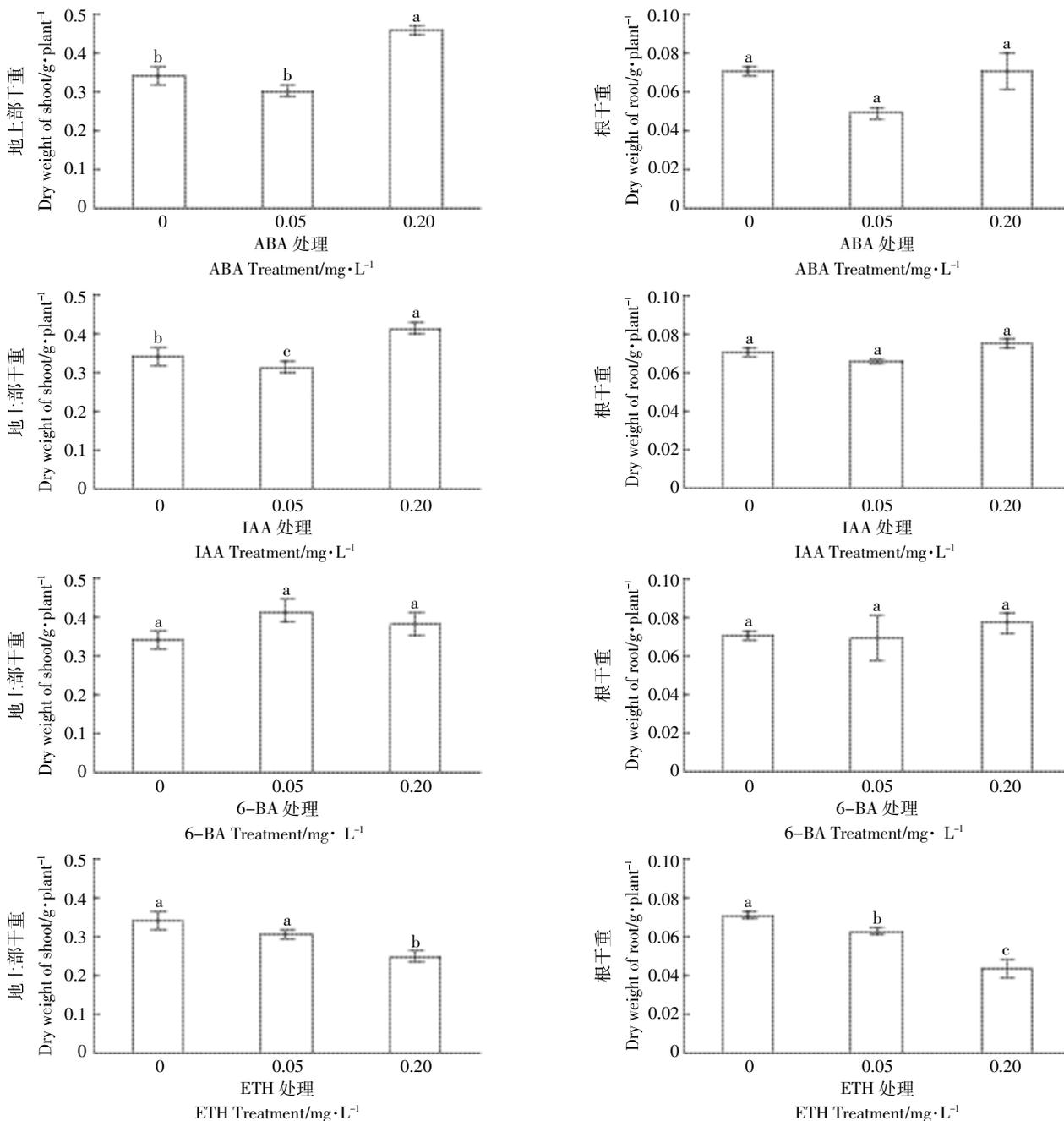
使用 SPSS 进行方差分析(ANOVON)、多重比较(Duncan)。

2 结果分析

2.1 不同生长调节剂对东南景天生长的影响

如图 1 所示,0.20 mg·L⁻¹ ABA 及 0.20 mg·L⁻¹ IAA

处理的地上部干重显著高于对照,其中以 0.20 mg·L⁻¹ ABA 处理最为显著,较对照增加了 35.0%。6-BA 处理的地上部干重与对照相比无显著差异。ETH 处理抑制了东南景天生长,其中 0.20 mg·L⁻¹ ETH 处理地上部干重显著低于对照。说明适量浓度的 ABA 和 IAA 均能促进东南景天地上部生长,而 ETH 在供试浓度范围内未能起到相类似的效应。除 ETH 处理显



数值为平均值±标准误(n=4),柱上方不同字母表示差异达到显著水平(P<0.05)。下同

Values are means±S.E.(n=4).Different letters represent significant difference between treatments (P<0.05). The same below

图 1 植物生长调节剂对东南景天生长的影响

Figure 1 Effects of plant growth regulators on dry biomass of shoots and roots of *S. alfredii*

著降低东南景天根干重以外,其余不同生长调节剂处理的根干重与对照差异不显著。说明在供试浓度范围内,ABA、IAA和6-BA对东南景天根系生长均无显著影响,而ETH显著抑制根系生长。

2.2 不同生长调节剂对东南景天Cd含量的影响

由图2可知,0.20 mg·L⁻¹的ABA处理显著提高了东南景天地上部Cd含量,比对照增加了19%。而0.20 mg·L⁻¹的ETH处理显著降低东南景天地上部Cd含量,其他各处理的地上部和根部Cd含量与对照

差异不显著。

重金属转运系数是评估植物根系向地上部转运重金属的能力的重要指标。各个处理的Cd转运系数如表2。其中0.20 mg·L⁻¹ ABA处理的Cd转运系数最高,是对照的1.65倍。0.20 mg·L⁻¹ ABA处理条件下地上部Cd含量增加而根系Cd含量下降,说明ABA提高地上部Cd的积累可能与促进根系向地上部的转运有关。此外,0.02 mg·L⁻¹ IAA处理的Cd转运系数比对照增加49%。而6-BA处理的Cd转运系数与对照

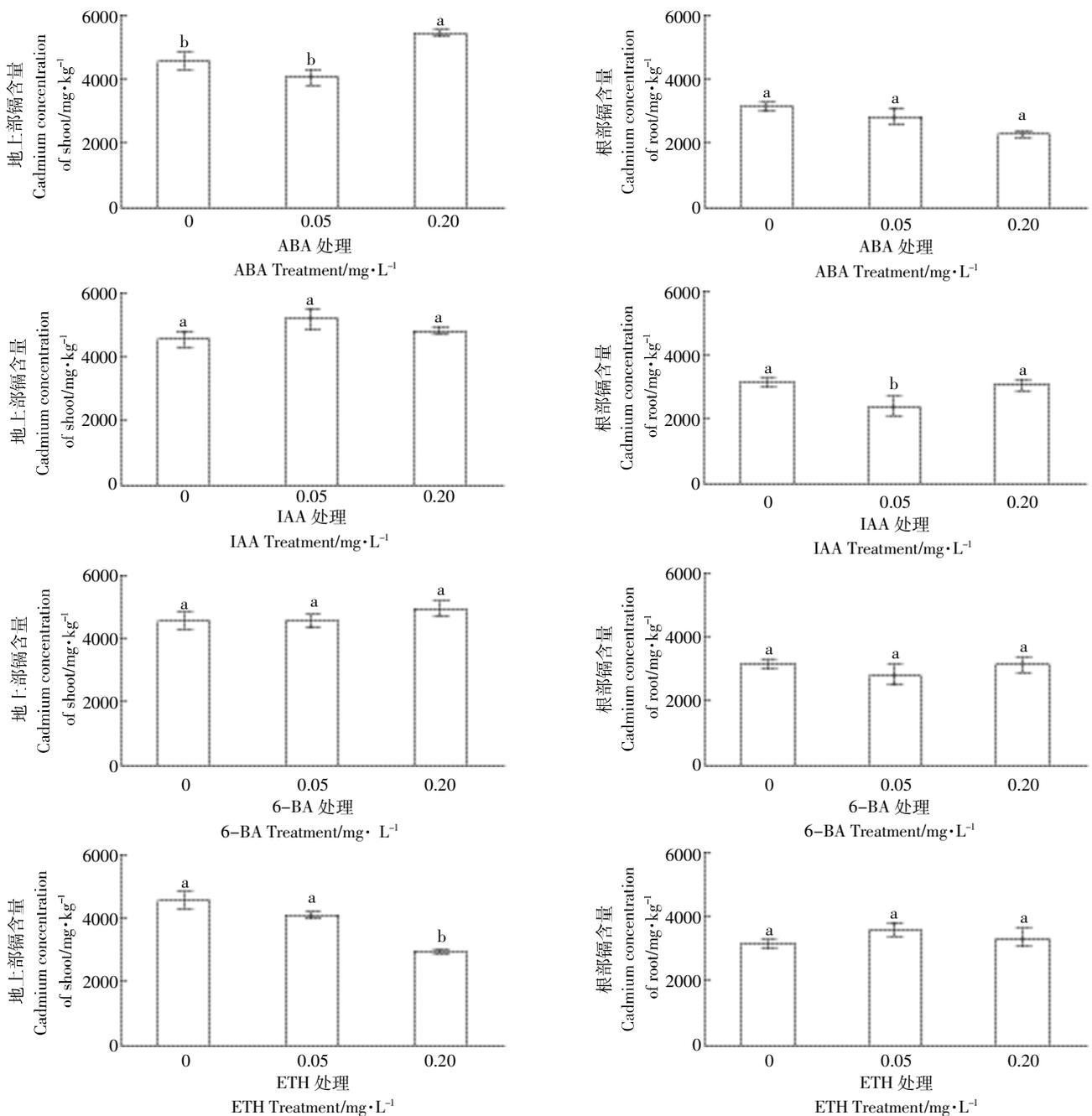


图2 植物生长调节剂处理对东南景天地上部及根Cd含量的影响

Figure 2 Effects of plant growth regulators on Cd concentrations in shoots and roots of *S. alfredii*

表2 不同植物生长调节剂对东南景天 Cd 转运系数的影响

Table 2 Effects of plant growth regulators on Cd transport index of *S. alfredii*

处理 Treatments/ mg·L ⁻¹	CK	ABA		IAA		6-BA		ETH	
		0.05	0.20	0.05	0.20	0.05	0.20	0.05	0.20
转运系数 Transport index	1.44	1.43	2.38	2.15	1.56	1.63	1.59	1.14	0.89

差异不大,ETH处理的Cd转运系数明显下降。说明合适浓度的ABA和IAA均可促进东南景天Cd从根系向地上部的转运,而供试浓度范围内的6-BA无此作用,ETH则限制了Cd向地上的转运。

2.3 不同生长调节剂对东南景天 Cd 积累量的影响

重金属积累总量与植物吸收重金属的能力和生物量密切相关。地上部Cd积累量远远高于根系Cd积累量(图3),说明东南景天吸收的Cd主要积累于

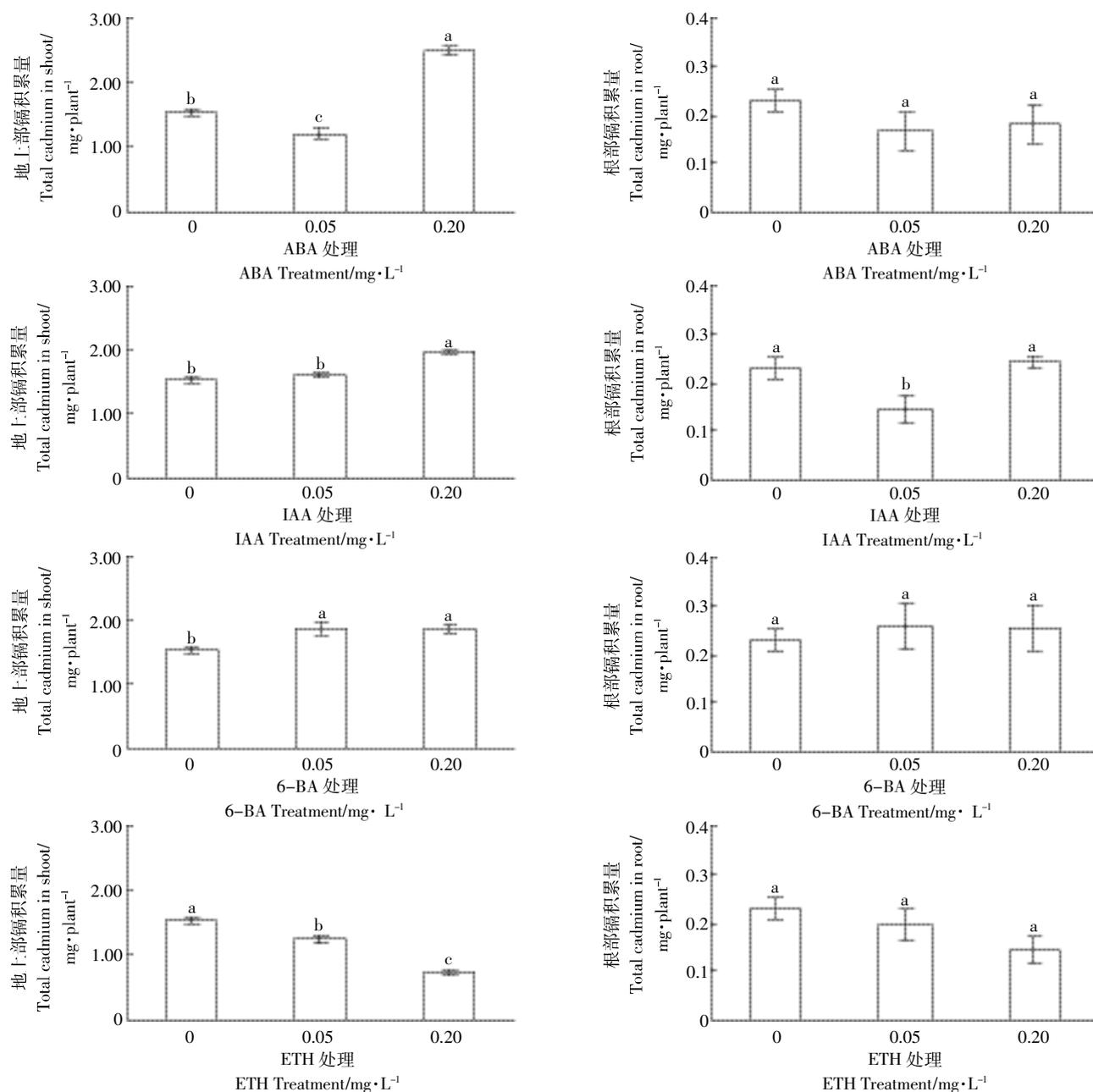


图3 不同生长调节剂对东南景天根及地上部 Cd 积累量的影响

Figure 3 Effects of plant growth regulators on Cd accumulation in shoot and root of *S. alfredii*

地上部。与对照相比,0.20 mg·L⁻¹ ABA、0.20 mg·L⁻¹ IAA、0.20 mg·L⁻¹ 6-BA 和 0.05 mg·L⁻¹ 6-BA 处理的地地上部Cd 积累量均显著增加,其中 0.20 mg·L⁻¹ ABA 促进地上部 Cd 积累的效应最大。两种浓度 ETH 处理均降低了东南景天地上部的 Cd 积累量。除 0.05 mg·L⁻¹ IAA 处理根部 Cd 积量显著低于对照外,其他各处理与对照无显著差异。

2.4 不同生长调节剂对东南景天 SOD 和 POD 活性的影响

生长调节剂的处理浓度对不同部位的 SOD 和 POD 活性的影响并不相同(表 3)。0.20 mg·L⁻¹ ABA 处理仅使根部 POD 活性增加,叶片 POD 活性以及叶片和根部 SOD 活性均与对照无显著性差异。对于 IAA 来说,除叶片 POD 活性随着 IAA 处理浓度增加而增加以外,其余根部 POD、叶片 SOD 和根部 SOD 活性水平均无显著变化。在供试浓度范围内,6-BA 的处理并不影响叶部和根部 SOD 和 POD 活性水平。对于 ETH,叶部 SOD 和根部 POD 活性均表现出随着 ETH 处理浓度增加而下降的趋势,但叶部 POD 和根部 SOD 活性无变化。

3 讨论

在 Cd 处理条件下,4 种生长调节剂调控东南景天生长、吸收 Cd 以及抗氧化酶系统等方面的效应并不相同。

地上部 Cd 积累量是不同生长调节剂促进东南

景天吸收 Cd 的直接和间接效应的综合结果。四种生长调节剂中,0.20 mg·L⁻¹ ABA 的地上部 Cd 积累量最高。有研究表明,ABA 在促进生长的同时,通过提高营养元素的吸收水平以维持植物体内各元素的稳态平衡^[19]。实验结果表明,适当浓度的外源 ABA(0.20 mg·L⁻¹)不仅促进 Cd 处理下东南景天地上部生长,同时提高地上部 Cd 含量。这说明提高东南景天地上部 Cd 含量的效应是 ABA 的直接调控机制,不能仅用促进地上部生长、维持细胞内元素平衡从而间接促进 Cd 吸收来解释。此外,从表 2 可看出,0.02 mg·L⁻¹ ABA 处理的 Cd 转运系数为 2.38,比对照增加 49%,说明 ABA 提高地上部 Cd 含量可能与其促进根部向上转运 Cd 至地上部(图 2)密切相关。ABA 处理可提高水稻(*Oryza sativa*)对 Cd 的抗性^[20]和白术(*Atractylodes macrocephala*)对 Pb 的耐性^[21]。Zhao 等^[22]研究发现,ABA 预处理水稻幼苗可通过增加 APX 和 CAT 活性、降低 SOD 活性以缓解 Pb 胁迫导致的生长抑制。已知 SOD 和 POD 是细胞内的抗氧化酶系统,逆境条件下活性氧水平上升往往伴随 SOD 和 POD 活性的增加^[23]。本研究结果表明,除根部 POD 活性外,ABA (0.20 mg·L⁻¹)处理的叶片 SOD 活性和 POD 活性与对照均无显著差异,而 ABA(0.20 mg·L⁻¹)处理的东南景天地上部 Cd 含量和生物量均高于对照,由此推测在 0.10 mmol·L⁻¹ Cd 处理条件下,通过提高细胞抗氧化酶系统、增强植物抗性并不是 ABA 促进东南景天地上部对 Cd 的吸收以及生长的主要调控途径。

表 3 不同生长调节剂对 Cd 处理下东南景天叶片 SOD 和 POD 活性的影响

Table 3 Effects of plant growth regulators on activities of SOD and POD in leaves and roots of *S. alfredii*

处理 Treatments/ mg·L ⁻¹	叶 Leaves		根 Roots		
	SOD 活性 SOD activity/ U·g ⁻¹ FW	POD 活性 POD activity/ U·g ⁻¹ FW	SOD 活性 SOD activity/ U·g ⁻¹ FW	POD 活性 POD activity/ U·g ⁻¹ FW	
ABA	0.00	38.46±1.33a	10.66±1.17a	67.56±4.34b	49.59±3.85b
	0.05	19.89±2.86b	7.60±0.47a	93.24±3.27a	34.24±2.43b
	0.20	41.58±1.57a	8.08±0.67a	48.48±4.34b	83.56±6.85a
IAA	0.00	38.46±1.33b	10.66±1.17ab	67.56±4.34a	49.59±3.85a
	0.05	55.71±2.57a	7.19±1.18b	43.42±2.66b	36.17±2.79a
	0.20	65.42±1.42a	15.01±1.31a	48.48±4.34b	49.35±10.4a
6-BA	0.00	38.46±1.33b	10.66±1.17a	67.56±4.34a	49.59±3.85a
	0.05	54.53±2.53a	12.55±0.09a	50.03±2.45a	24.63±3.86b
	0.20	57.81±1.90a	8.66±0.14a	49.17±3.30a	43.53±2.97ab
ETH	0.00	38.46±1.33b	10.66±1.17a	67.56±4.34a	49.59±3.85b
	0.05	64.68±3.54a	5.91±0.52b	50.03±3.95a	68.74±3.66a
	0.20	42.13±1.11b	6.87±0.38ab	51.06±4.59a	17.8±0.94c

注:数值为平均值±标准误(n=4),每列同一处理不同字母表示差异达到显著水平(P<0.05)。

Note: Values are means±S.E.(n=4). Different letters within one category represent significant difference between treatments(P<0.05).

适当浓度的 IAA 和 6-BA 均具有促进植物生长的效应。Hadi 等^[2]的研究表明施用 IAA 可以增加玉米的生物量进而提高玉米对 Pb 的积累; Fässle 等^[4]研究表明施用 IAA 可缓解 Zn、Pb 对向日葵的毒害。Tassi 等^[11]研究发现, Zn、Pb 胁迫下施用 Cytokinin(一种混合了多种自然细胞分裂素的商用生长调节剂), 可大幅提高向日葵叶片的生物量, 而这一效应与刺激细胞分裂及促进光合作用及干物质的积累相关。本实验结果表明, 适当浓度的 IAA 处理可促进东南景天地上部的生长(图 1), IAA 处理的地上部 Cd 积累量均高于对照(图 3), 说明 IAA 具有增强东南景天积累 Cd 的效应。但这一效应主要与 IAA 促进生长、提高生物量有关, 因为 IAA 处理的叶片 Cd 含量与对照相比并未增加(图 2)。必须指出的是 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ IAA 处理的 Cd 转运系数高达 2.15, 是对照的 1.49 倍, 因此 IAA 提高东南景天根系向上转运 Cd 的效率, 可能是 IAA 促进东南景天地上部积累 Cd 的另一个重要原因。已知 IAA 可以通过调节“源-库”关系, 引导营养元素向地上部生长快速的部位转移, 由此推测 IAA 可能通过这一方式促进东南景天根系中 Cd 的向上转运。在 6-BA 处理中虽然地上部 Cd 含量与生物量均与对照无显著差异, 但其地上部 Cd 积累量比对照有所增加, 这可能是在供试浓度范围内 6-BA 促进东南景天生长和 Cd 吸收效应的共同结果。 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ IAA 和 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA 处理条件下的东南景天地上部 Cd 含量最高, 对应的叶片 SOD 活性增加, 说明 IAA 和 6-BA 有可能通过增强 SOD 活性来提高叶片细胞对 Cd 的抗性, 从而维持相对正常的代谢活动和较高的生长速率, 进而提高东南景天地上部对 Cd 的累积。

$0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ETH 处理对东南景天地上部和根系生长有一定的抑制作用, 而且 ETH 的 Cd 转运系数显著下降, 根系 Cd 含量与对照无差异。由此认为 ETH 并不减少根系对 Cd 的吸收, 但抑制 Cd 从根部向地上部的转运, 从而减少 Cd 在地上部的积累, 导致地上部 Cd 含量明显下降(图 2)。在多数情况下, ABA 和 ETH 对植物生长发育的调控效应相类似, 都具有促进衰老的作用, 但在 Cd 处理下外源 ABA 与 ETH 处理对东南景天生长及 Cd 积累能力的效应正好相反, 值得进一步研究。

4 结论

实验结果表明, 在供试的 4 种生长调节剂中, 适

当浓度的 ABA、IAA 及 6-BA 处理均提高了东南景天的地上部 Cd 积累总量, 但不同生长调节剂促进东南景天地上部 Cd 积累效应的机制并不相同: ABA 通过促进生长同时增加地上部 Cd 转运能力、提高地上部 Cd 的含量, 达到促进东南景天地上部 Cd 积累的作用; 而 IAA 和 6-BA 则通过促进东南景天生长来提高生物量, 从而增强东南景天对 Cd 的积累。供试浓度范围内的 ETH 则存在明显的抑制作用。

不同植物生长调节剂对重金属积累能力的影响差异很大, 这对探讨东南景天重金属积累机制有重要的意义。在今后以东南景天为材料的植物修复实践中可以使用植物生长调节剂提高其修复效率, 但应注意把握植物生长调节剂施用浓度, 以达到最好的效果。

参考文献:

- [1] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?[J]. *Plant Science*, 2011, 180(2):169-181.
- [2] Xiong Y H, Yang X E, Ye Z Q, et al. Characteristics of cadmium uptake and accumulation by two contrasting ecotypes of *Sedum alfredii* Hance [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2004, 39(11-12):2925-2940.
- [3] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天(*Sedum alfredii* H): 一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13):1003-1006.
YANG Xiao-e, LONG Xin-xian, NI Wu-zhong, et al. *Sedum alfredii* H: A new ecotype of Zn-hyperaccumulator plant species native to China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(13):1003-1006.
- [4] 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):513-518.
YE Hai-bo, YANG Xiao-e, HE Bing, et al. Response of *Sedum alfredii* Hance towards Cd/Zn complex-pollution and accumulation of the heavy metals[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(5):513-518.
- [5] 熊愈辉, 杨肖娥, 叶正钱, 等. 东南景天对镉、铅的生长反应与积累特性比较[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(6):101-106.
XIONG Yu-hui, YANG Xiao-e, YE Zheng-qian, et al. Comparing the characteristics of growth response and accumulation of cadmium and lead by *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2004, 32(6):101-106.
- [6] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6):881-893.
LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, YAN Xiu-lan, et al. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6):881-893.
- [7] 高鹏. 施肥对东南景天修复土壤重金属——十溴联苯醚复合污染的影响[D]. 广州:暨南大学, 2011.

- [8] 何冰,陈莉,邓金群,等. 氮肥类型对东南景天生长及重金属积累的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(5): 797-801.
HE Bing, CHEN Li, Deng Jin-qun, et al. Effect of different N fertilizers on the growth of *Sedum alfredii* and heavy metal accumulation[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(5): 797-801.
- [9] 邹星. 化学强化东南景天修复土壤重金属——十溴联苯醚复合污染的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [10] Lu L L, Tian S K, Yang X E, et al. Improved cadmium uptake and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum alfredii*: The impact of citric acid and tartaric acid[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2013, 14(2): 106-114.
- [11] Tassi E, Pouget J E L, Petruzzelli G, et al. The effects of exogenous plant growth regulators in the phytoextraction of heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(1): 66-73.
- [12] Hadi F, Bano A, Fuller M P. The improved phytoextraction of lead(Pb) and the growth of maize(*Zea mays* L.): The role of plant growth regulators(GA3 and IAA) and EDTA alone and in combinations[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(4): 457-462.
- [13] Du R J, He E K, Tang Y T, et al. How Phytohormone IAA and Chelator EDTA affect lead uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *picris divaricata* [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(10): 1024-1036.
- [14] Fässler E, Evangelou M W, Robinson B H, et al. Effects of indole-3-acetic acid(IAA) on sunflower growth and heavy metal uptake in combination with ethylene diamine disuccinic acid(EDDS)[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(8): 901-907.
- [15] Liu D, Li T, Yang X, et al. Enhancement of lead uptake by hyperaccumulator plant species *Sedum alfredii* Hance using EDTA and IAA[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 78(3-4): 280-283.
- [16] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(4): 1427-1433.
- [17] Stearns J C, Shah S, Greenberg B M, et al. Tolerance of transgenic canola expressing 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase to growth inhibition by nickel[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, 43(7): 701-708.
- [18] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 68-73.
CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Plant physiology experiment instruction[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006: 68-73.
- [19] Galvan-Ampudia C S, Testerink C. Salt stress signals shape the plant root[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14(3): 296-302.
- [20] Hsu Y T, Kao C H. Abscisic acid accumulation and cadmium tolerance in rice seedlings[J]. *Physiologia Plantarum*, 2005, 124(1): 71-80.
- [21] Wang J, Chen J, Pan K. Effect of exogenous abscisic acid on the level of antioxidants in *Atractylodes Macrocephala* Koidz under lead stress[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(3): 1441-1449.
- [22] Zhao L, Xiong J, Li L P, et al. Low concentration of exogenous abscisic acid increases lead tolerance in rice seedlings[J]. *Biologia Plantarum*, 2009, 53(4): 728-732.
- [23] 吴顺, 萧浪涛. 植物体内活性氧代谢及其信号传导[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版). 2003, 29(5): 450-456.
WU Shun, XIAO Lang-tao. Metabolism and signaling conduction of the reactive oxygen species in plant[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2003, 29(5): 450-456.