

有机和无机氮对东南景天生长和镉积累的影响比较

李继光^{1,2}, 林国林³, 杨春文¹, 柳 丹⁴, 李廷强², 杨肖娥²

(1. 牡丹江师范学院生物系, 黑龙江 牡丹江 157012; 2. 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029; 3. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110161; 4. 浙江林学院旅游与健康学院, 浙江 临安 311300)

摘 要:通过水培试验,研究了有机和无机形态氮对两种生态型东南景天生长和镉积累的影响。结果表明,无论在低镉($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)还是高镉($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下,与对照(T1)相比,外加无机形态氮(尿素)均能显著提高两种生态型东南景天地上部的生物量和叶绿素含量($P < 0.05$);在低镉条件下,外加无机形态氮只能显著提高超积累生态型东南景天地上部镉积累量和非超积累生态型东南景天根部镉积累量($P < 0.05$),在高镉条件下,外加无机形态氮对两种生态型东南景天体内镉积累量没有显著影响($P > 0.05$)。而无论在低镉还是高镉条件下,与对照(T1)相比,外加有机形态氮(精氨酸)能显著降低超积累生态型东南景天根系的生物量和叶绿素含量($P < 0.05$);在低镉条件下,外加有机形态氮能显著提高两种生态型东南景天体内镉含量($P < 0.05$),在高镉条件下,外加有机形态氮对两种生态型东南景天体内镉含量没有显著影响($P > 0.05$)。

关键词:有机氮; 无机氮; 超积累; 东南景天; 镉; 植物修复

中图分类号: X503.233 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)01-0099-06

Effects of Organic and Inorganic Nitrogen on Growth and Cadmium accumulation of *Sedum alfredii* Hance

LI Ji-guang^{1,2}, LIN Guo-lin³, YANG Chun-wen¹, LIU Dan⁴, LI Ting-qiang², YANG Xiao-e²

(1. Biology Department, Mudanjiang Teachers College, Mudanjiang 157012, China; 2. College of Environmental and Resources Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 3. College of Land and Environmental Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 4. School of Tourism and Health, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, China)

Abstract: The effects of organic and inorganic nitrogen on plant growth and cadmium absorbability and accumulation in two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance were investigated using hydroponic culture. Compared with the control (T1), the application of inorganic nitrogen (urea) markedly increased the biomass (dry weight) of shoot and root and chlorophyll a, b content of two ecotype *Sedum alfredii* Hance under both low cadmium ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) and high cadmium ($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) treatments ($P < 0.05$). At low cadmium, only Cd concentration in hyperaccumulating ecotype (HE) shoot and non-hyperaccumulating ecotype (NHE) root increased markedly under the treatment with inorganic nitrogen ($P < 0.05$). At high cadmium, the application of inorganic nitrogen had no significant effect on the concentration of Cd in two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance ($P > 0.05$). While at both low cadmium and high cadmium, compared with the control, the biomass (dry weight) of shoot and root and chlorophyll content of HE declined markedly when applied with organic nitrogen (arginine) ($P < 0.05$). At low cadmium, the application of organic nitrogen increased markedly the concentration of Cd in two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance ($P < 0.05$), but had no significant effect on concentration of Cd in two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance at high cadmium ($P > 0.05$).

Keywords: organic nitrogen; inorganic nitrogen; hyperaccumulation; *Sedum alfredii* Hance; cadmium; phytoremediation

有机肥和无机肥的配合施用能发挥肥料的交互作用来增加产量^[1-3]。以往的施肥研究中通常采用不

等养分设计,即在无肥区施用有机肥,或在施用有机肥的基础上增施化肥。这难以说明是有机肥自身的作用还是其所含的氮、磷、钾养分的作用^[4,5]。黄德明建议把有机肥料的应用技术纳入推荐施肥的内容^[6]。

近年来,重金属超积累植物已引起国内外诸多学者的浓厚兴趣,并认为超积累植物在重金属污染土壤的植物修复(phytoremediation)^[7,8]和植物采矿(phytomining)^[9,10]等方面具有广阔的前景。植物提取修复

收稿日期: 2007-02-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2002CB410804); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0536); 上海市农委攻关项目(2004SA)

作者简介: 李继光(1981—),男,辽宁沈阳人,硕士,助教,主要从事环境生态、污染环境控制和生物修复等方面研究。

E-mail: lijiguangljg@163.com

(phytoremediation)技术是近年来国际上兴起的一种治理重金属污染土壤的新技术^[11,12],并有望成为一项具有广阔应用前景的治理重金属污染土壤的全新技术^[13-15]。目前,推广和应用植物提取修复技术的主要障碍是超积累植物生长慢、生物量小和修复效率偏低^[12,16]。为此,各国学者就提高超积累植物的生物产量和积累重金属的能力作了大量研究,其中通过采取有效的辅助农艺措施,改良土壤环境提高超积累植物的生长速度和生物产量以及地上部的重金属积累量,是达到提高修复效率的有效手段。土壤中的氮素大多不能满足作物对氮素养分的需求,这就要靠施肥来予以补充和调节,氮肥适宜用量的确定,在施用中至关重要,氮肥推荐是推荐施肥的核心^[17]。

东南景天(*Sedum alfredii* Hance)是在我国境内新发现的一种Cd超积累植物^[18]。这种植物不仅生物量较大、对Cd具有超积累,而且具有多年生、无性繁殖、适于刈割的特点,是实施植物修复和研究超积累机制的良好材料^[12,18]。但是,目前对优化东南景天修复效率的农艺措施研究不多,而氮肥对其生物产量以及地上部Cd积累量的影响尚未开展研究。Cd超积累植物在施加Cd处理后,体内会积累高浓度的Cd,外源性施加氮肥可能会对Cd的吸收、转运和植物体内的分布产生一定影响。本文通过水培试验,在比较不同的氮形态对不同Cd水平下东南景天的生物产量以及地上部的重金属Cd积累量的影响,为Cd超积累植物东南景天的进一步开发和利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试植物

两种生态型东南景天(*Sedum alfredii* Hance),一种取自浙江省衢州市的一个古老铅镉矿,称为超积累生态型(hyperaccumulating ecotype HE);另一种取自浙江省杭州市郊茶园地,称为非超积累生态型(non-hyper-accumulating ecotype NHE)。

1.1.2 植物培养与处理

本实验在人工气候室进行,完全营养液的基本组成为:Ca(NO₃)₂·4H₂O 2.00 mmol·L⁻¹,KH₂PO₄ 0.10 mmol·L⁻¹,MgSO₄·7H₂O 0.50 mmol·L⁻¹,KCl 0.10 mmol·L⁻¹,K₂SO₄ 0.70 mmol·L⁻¹,H₃BO₃ 10.00 mmol·L⁻¹,MnSO₄·H₂O 0.50 mmol·L⁻¹,ZnSO₄·7H₂O 1.0 μmol·L⁻¹,CuSO₄·5H₂O 0.20 μmol·L⁻¹,(NH₄)₆Mo₇O₂₄ 0.01 μmol·L⁻¹,Fe-EDTA 100 μmol·L⁻¹。

将两种生态型东南景天用自来水冲洗干净,剪成2~3 cm大小均匀一致的枝条,用营养液预培养18 d左右(长出比较旺盛的根系),开始进行不同形态氮及高、低镉处理。氮分为4个处理即营养液本底(T1)、尿素CO(NH₂)₂(T2)、精氨酸C₆H₁₄N₄O₂(T3)、精氨酸C₆H₁₄N₄O₂+尿素CO(NH₂)₂(T4),施加浓度为笔者上一个实验结果所得的最适氮素浓度为16 mmol·L⁻¹^[19];低镉水平为10 μmol·L⁻¹、高镉水平100 μmol·L⁻¹,镉以CdCl₂·2.5H₂O水溶液加入,另设一对不施加镉的对照处理CK(营养液本底值)。每处理重复3次。处理营养液除氮、镉浓度变化外其他营养元素和浓度均保持不变。生长期间观察植物的长势和症状表现。每天测定营养液的pH值,并用0.1 mmol·L⁻¹NaOH或0.1 mmol·L⁻¹HCl调节营养液pH值至5.5,保持24 h连续通气,每3 d更换营养液一次。处理16 d后收获,分别于处理前和结束时取样,先反复用自来水将根冲洗干净,再用20 mmol·L⁻¹Na-EDTA交换15 min,去除根系表面吸附的Cd²⁺,最后用去离子水冲洗干净,用吸水纸将植株根表水吸干,将鲜样分为地上部和根系两部分。称取一定量植物鲜样先在105℃下杀青30 min,然后在70℃下烘干恒重,测定其干物重。再用不锈钢粉碎机磨碎,过60目尼龙网筛后,供分析测定。

1.2 测定方法与数据分析

植株中Cd的分析测定:称取0.100 g烘干磨碎样,用硫酸:硝酸:高氯酸(V/V,1:8:1)消煮植物样品,定容,过滤,采用原子吸收分光光度计(岛津AA-6800型)测定Cd。叶绿素:叶片叶绿素含量参考张志良的方法^[20]。根系长度、根系表面积、根系直径、根系体积等采用全自动根系扫描分析仪测定,分析软件为Regent instruments公司提供的WinRHIZO。所有数据采用SPSS10.0分析软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 有机和无机氮对高、低镉处理下两种生态型东南景天生长发育的影响

镉处理的超积累生态型东南景天正常生长,未表现任何的异常毒害症状,且随镉水平的增加东南景天趋于旺盛生长,侧根发达,尤其是在高镉(100 μmol·L⁻¹)水平下效果更为显著。非超积累生态型东南景天表现不同,无氮有镉处理条件下,其出现明显的镉毒害症状:低镉(10 μmol·L⁻¹)处理条件下,植株矮小,根系发黑腐烂,叶片失水萎蔫以及严重失绿等植株生长受抑现象,出现了叶子脱落现象,表现出明显的镉

毒害症状,并在高镉($100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理下,毒害症状越趋明显,叶子脱落现象较严重,甚至出现部分植株死亡的现象。外界供无机氮能明显地减轻镉毒害症状,叶色转绿,生长期延长,但长势不如对照,仍有镉毒害症状;而外界供有机氮确明显地加强镉毒害症状。

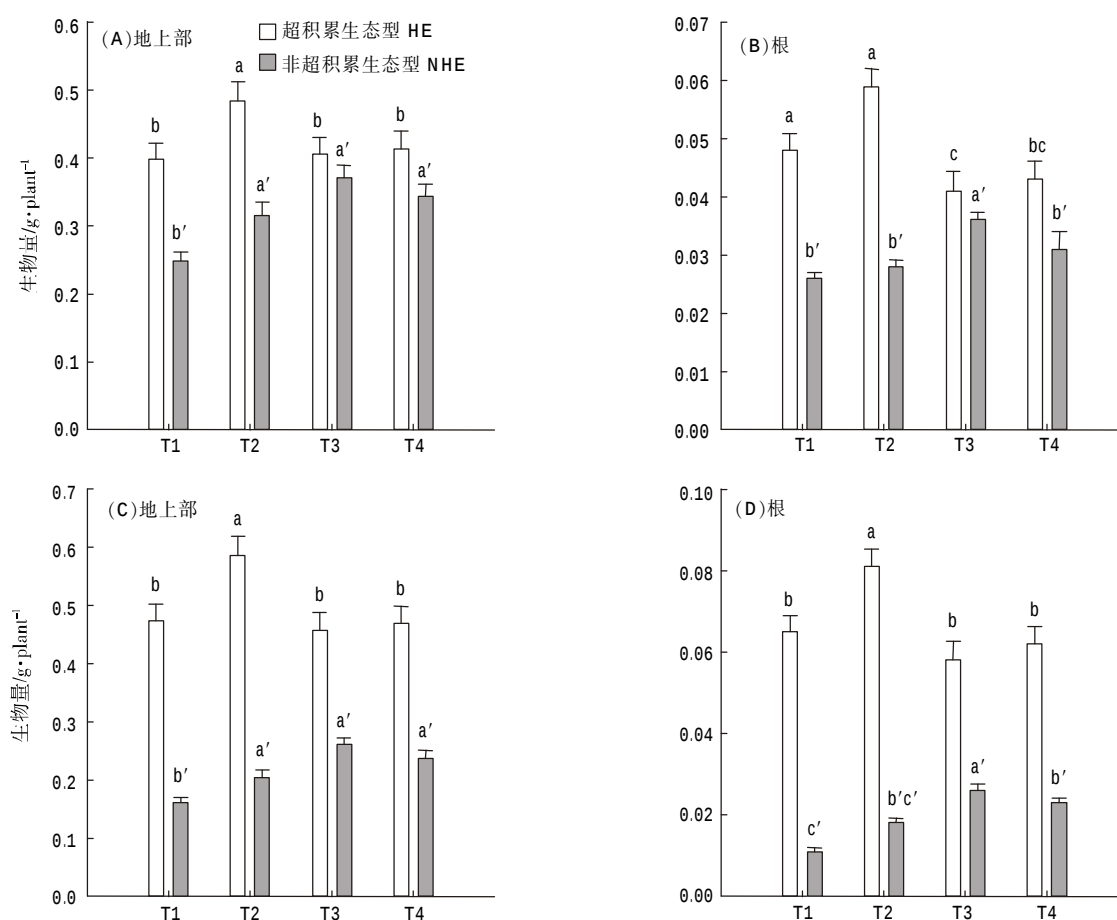
2.1.1 有机和无机形态氮对高、低镉处理下东南景天生物量的影响

在 T2、T3、T4 供氮条件下,3 种氮形态处理对两种生态型东南景天各部位生物量(以干物重计)均有明显的影响(见图 1)。在低镉($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下,与对照相比超积累生态型东南景天地上部生物量分别增加了 8.8%、1.8%、3.5%,其中 T2 处理达到显著水平($P<0.05$)。在高镉($100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下,与对照相比超积累生态型东南景天地上部生物量 T2 处理增加了 8.9%,T3、T4 处理分别降低了 3.6%、1.2%,其中 T2 处理达到显著水平($P<0.05$)。且无论在何种镉水平下,T2

处理的超积累生态型东南景天地上部生物量均高于 T3、T4 处理。非超积累生态型东南景天生物量的变化趋势虽然没有超积累生态型东南景天规律,但不同氮形态处理也明显提高非超积累生态型东南景天地上部和根的生物量。增加镉浓度降低了非超积累生态型东南景天地上部和根部生物量,3 种氮形态处理均明显增加了非超积累生态型东南景天地上部和根部生物量,但均未达到无镉处理(CK)的生物量(见图 1)。

2.1.2 有机和无机形态氮对高、低镉处理下东南景天根系形态的影响

在低镉($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和高镉($100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下,T2 氮处理与 T1 氮处理比超积累生态型东南景天各项根系形态指标,如根系长度、根系表面积、根系直径、根系体积等均达到显著水平($P<0.05$),而在 T3 和 T4 处理时,各项根系形态指标均呈下降趋势。不同氮镉水平处理对非超积累生态型东南景天各项根系形态指标也产生了显著影响,与超积累生态型东南景天



A、B 图为低镉处理,C、D 图为高镉处理;a,b,c 表示(在一种生态型之间比较)在 $P\leq 0.05$ 的水平上差异显著;下同。

图 1 有机和无机形态氮对高、低镉处理下东南景天生物量的影响

Figure 1 Effects of organic and inorganic nitrogen on biomass of *Sedum alfredii* Hance treated with low and high cadmium

不同的是, T2、T3、T4 氮处理与 T1 氮处理相比, 非超积累生态型东南景天的各项根系形态指标均呈上升趋势; 增加镉浓度降低了非超积累生态型东南景天各项根系形态的指标, 施氮则显著增加了非超积累生态型东南景天各项根系形态的指标(见表 1)。在不同形态的氮对不同镉水平处理东南景天条件下, 各项根系形态的指标的变化趋势基本上与根部生物量的变化趋势保持一致, 且高镉处理比低镉处理的变化趋势更明显; 而根系长度和根系表面积的变化趋势较根系体积明显, 根系体积的变化趋势较根系直径明显。

2.2 有机和无机氮对高、低镉处理下两种生态型东南景天叶绿素含量的影响

植物氮源的有效性与其氮的利用率有关, 且氮的利用率影响植物的光合作用和呼吸作用^[24]。而植物经 Cd 处理会导致其光合速率下降。在 T2 供氮条件下, 3 种氮形态处理对两种超积累生态型东南景天叶绿素含量有明显的提高(见表 2), 在低镉($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下, 与对照(T1)相比, 超积累生态型东南景天叶绿素 a 含量 T2 处理增加了 8.1%, T3、T4 处理分别降低了 8.6%、4.9%, 其中 T2、T3 处理均达到显著水平 ($P < 0.05$); 叶绿素 b 含量 T2、T4 处理分别增加了 17.1%、3.9%, T3 降低了 8.8%, 其中 T2、T3 处理均达

到显著水平 ($P < 0.05$)。在高镉($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下, 与对照(T1)相比, 超积累生态型东南景天叶绿素 a 含量 T2 处理增加了 11.1%, T3、T4 处理分别降低了 8.8%、4.7%, 其中 T2、T3 处理均达到显著水平 ($P < 0.05$); 叶绿素 b 含量 T2、T4 处理分别增加了 18.5%、0.7%, T3 降低了 9.3%, 其中 T2、T3 处理均达到显著水平 ($P < 0.05$)。且无论在何种镉水平下, T2 处理的超积累生态型东南景天叶绿素 a、b 含量均高于 T3、T4 处理, 这与超积累生态型东南景天地上部生物量的变化趋势保持一致。而非超积累生态型东南景天叶绿素含量的变化趋势没有超积累生态型东南景天的规律性好, 但不同氮形态处理对非超积累生态型东南景天叶绿素含量的提高也很明显。在低镉处理时, 在 T2、T3、T4 供氮条件下, 不同的氮处理其叶绿素含量有所提高, 其中 T2 处理达到显著水平 ($P < 0.05$); 在高镉处理时, 在 T2、T3、T4 供氮条件下, 不同的氮处理其叶绿素含量有所提高, 其中 T2 处理达到显著水平 ($P < 0.05$)。增加镉浓度降低了非超积累生态型东南景天叶绿素含量, 3 种氮形态处理均明显增加了非超积累生态型东南景天叶绿素含量, 但均未达到无镉处理(CK)的水平, 仍有镉毒害症状表现(见表 2)。结果表明, 不同的氮镉处理对超积累生态型东南景天和超积累生态型东

表 1 不同形态氮对高、低镉处理下东南景天根系形态的影响

Table 1 Effect of different nitrogen forms on the root morphology of *Sedum alfredii* Hance under low and high Cd treatments

镉水平/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	氮处理	根系长度/cm · 株 ⁻¹		根系表面积/ $\text{cm}^2 \cdot \text{株}^{-1}$		根系直径/mm		根系体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{株}^{-1}$	
		超积累生态型	非超积累生态型	超积累生态型	非超积累生态型	超积累生态型	非超积累生态型	超积累生态型	非超积累生态型
10	T1	231b	115b	45b	21b	0.65b	0.33b	0.68b	0.35b
	T2	285a	123b	62a	22b	0.91a	0.36b	0.96a	0.38b
	T3	186c	145a	35c	28a	0.52c	0.48a	0.55c	0.51a
	T4	193bc	132ab	38bc	25ab	0.56bc	0.41ab	0.58bc	0.43ab
100	T1	333b	52c	66b	11c	0.89b	0.15c	0.96b	0.18c
	T2	498a	88b	85a	18b	1.15a	0.26b	1.18a	0.29b
	T3	299b	115a	60b	26a	0.81b	0.38a	0.88b	0.41a
	T4	313b	101a	63b	23a	0.86b	0.35a	0.93b	0.37a

表 2 有机和无机形态氮对高、低镉处理下东南景天叶绿素含量的影响($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 2 Chlorophyll content of *Sedum alfredii* Hance applied with organic and inorganic nitrogen under low and high cadmium treatment

镉水平/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	氮处理	叶绿素a		叶绿素b		叶绿素(a+b)	
		超积累生态型	非超积累生态型	超积累生态型	非超积累生态型	超积累生态型	非超积累生态型
10	T1	0.433ab	0.323b	0.181b	0.141b	0.615b	0.463c
	T2	0.468a	0.338ab	0.212a	0.145b	0.681a	0.483b
	T3	0.396b	0.353a	0.165c	0.168a	0.561c	0.521a
	T4	0.412b	0.342a	0.188b	0.152ab	0.601bc	0.493b
100	T1	0.408b	0.271b	0.151ab	0.119b	0.559b	0.391b
	T2	0.453a	0.276b	0.179a	0.126b	0.632a	0.402b
	T3	0.372b	0.298a	0.137b	0.141a	0.509c	0.439a
	T4	0.389b	0.285ab	0.152ab	0.135ab	0.541b	0.421ab

南景天产生明显不同的生物学效应。

2.3 有机和无机氮对高、低镉处理下两种生态型东南景天吸收和积累镉的影响

通过生物量和镉含量可以计算两种生态型东南景天对镉的积累量(表 3)。超积累生态型东南景天地上部对镉的积累能力很强,其积累量占植株的总镉积累量的 88.5%~92.6%,远高于非超积累生态型东南景天。不同的氮镉处理条件对超积累生态型东南景天不同部位积累镉的能力产生显著影响。在低镉($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下,3 种氮形态的供应均可显著提高两种生态型东南景天地上部的镉积累量($P < 0.05$);在高镉($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下,T2 处理对超积累生态型东南景天镉地上部吸收积累的效果要明显好于 T3、T4 处理,达到显著水平($P < 0.05$)。非超积累生态型东南景天地上部和根部的镉积累量的变化趋势没有超积累生态型东南景天的规律性好,在低镉($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下,T2、T4 处理对非超积累生态型东南景天地上部镉吸收积累的效果要略好于 T3 处理;在高镉($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下,T2 处理对非超积累生态型东南景天镉吸收积累的效果要略好于 T3、T4 处理,但均未达到显著水平。

表 3 有机和无机形态氮对高、低镉处理下东南景天镉积累量的影响($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)

Table 3 Cadmium accumulation of *Sedum alfredii* Hance amplified with organic and inorganic nitrogen under low and high cadmium treatment

处理		超积累生态型		非超积累生态型	
镉水平/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	氮处理	地上部	根部	地上部	根部
10	T1	0.499b	0.074bc	0.007a	0.011b
	T2	0.571a	0.096b	0.008a	0.014b
	T3	0.565a	0.125a	0.007a	0.018a
	T4	0.555a	0.109ab	0.008a	0.013b
100	T1	1.809b	0.169c	0.028a	0.017b
	T2	2.117a	0.225bc	0.033a	0.029b
	T3	1.893b	0.293a	0.026a	0.044a
	T4	1.843b	0.247ab	0.027a	0.038a

3 讨论与结论

改良土壤环境、增加土壤肥力的材料很广泛,包括表土、化学肥料、有机废弃物、绿肥和固氮植物等^[22]。关于通过有机和无机氮肥施加提高东南景天生物量以及地上部的重金属镉积累量,提高其对镉污染土壤的修复效率的研究,国内外至今还尚未见报道。氮肥是我国农业生产中最重要的增产因子之一,目前我国

氮肥用量占化肥总用量的 60% 以上^[23]。从本试验结果看,3 种氮处理均可明显地影响东南景天的生物产量;各项根系形态指标,如根系长度、根系表面积、根系直径、根系体积等和叶绿素含量,表明有机、无机形态氮肥对超积累植物东南景天的生物产量以及地上部的重金属镉积累量均有一定影响作用,且影响机制存在很大差异。无论在何种镉水平下,T2 处理的超积累生态型东南景天地上部生物量和叶绿素 a、b 含量均显著高于 T3、T4 处理(图 1、表 2),对此仍需要进行更深入的研究和探讨。

本研究表明,有机氮肥(尿素)显著促进超积累生态型东南景天的生长,提高其干物质产量,同时促进了东南景天对镉的积累;而无论在低镉还是高镉条件下,与对照(T1)相比,外加有机形态氮(精氨酸)能显著降低超积累生态型东南景天根系的生物量和叶绿素含量;且在高镉条件下,无机氮对超积累生态型东南景天吸收和积累镉的促进作用显著好于有机形态氮。因此,通过有机肥和无机肥的配合施用,发挥肥料的交互作用来增加产量虽然在一般的模式植物上具有一定的可行性,但对超积累植物东南景天却不具有可操作性。

参考文献:

- [1] 吴建繁,王运华.无公害蔬菜营养与施肥研究进展[J].植物学通报,2000,17(6):402-503.
- [2] 李庆逵,朱兆良,于天仁.中国农业发展中的肥料问题[M].南昌:江西科学技术出版社,1998.112-127.
- [3] Sneh Goyal K, Chander M C, Mundra, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(2):196-200.
- [4] 刘杏兰,高宗.有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J].土壤学报,1996,33(2):138-147.
- [5] 张兰松,马永安.有机无机配合施用对小麦的增产作用[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):503-505.
- [6] 黄德叨.十年来我国测土施肥进展[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):495-499.
- [7] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J & C (Brassicaceae)[J]. New Phytol, 1994, 127:61-68.
- [8] McGrath S P, Shen Z G, Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical change in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils [J]. Plant and Soil, 1997, 188:153-159.
- [9] Brooks R R, Chambers M F, Nicks L J, et al. Phyto-mining[J]. Trends in Plant Sci, 1998, 3:359-362.
- [10] Robinson B H, Brooks R R, Howes A W, et al. The potential of the high-

- biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytoremediation and phytomining[J]. *J of Geochem Explor*, 1997, 60: 115-126.
- [11] Watanabe M E. Phytoremediation on the brink of commercialization[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31: 182-186.
- [12] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天(*Sedum alfredii* H)——一种新的镉超积累植物[J]. *科学通报*, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [13] Salt D E, Blaylock M, Kumar N, et al. A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. *Bio Technology*, 1995, 13: 468-474.
- [14] Raskin I, Kumar P B A N, Dushenkov S, et al. Phytoremediation of metals: Using plants to remove pollutants from the environment[J]. *Curr Opin Biotechnol*, 1997, 8: 221-226.
- [15] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2003, 14: 277-282.
- [16] Ebbs S D, Kochian LV. Toxicity of zinc to Brassica species: Implication for phytoremediation[J]. *Environ Qual*, 1997, 26: 776-781.
- [17] 陈新平, 周金池, 张福锁, 等. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的
- 选择-经济、环境效益分析[J]. *土壤学报*, 2000, 37(3): 346-354.
- [18] Yang X E, Long X X, Ye H B, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance)[J]. *Plant and Soil*, 2004, 259: 181-189.
- [19] 李继光, 李廷强, 朱 恩, 等. 氮对超积累植物东南景天生长和镉积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 54-58.
- [20] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社出版, 1990. 88-91.
- [21] Villora G, Diego A M, Romero L. Potassium supply influences molybdenum, nitrate and nitrate reductase activity in eggplant [J]. *J P Nutr*, 2003, 26(3): 659-669.
- [22] 李廷强, 杨肖娥, 龙新宪. 东南景天提取污染土壤中镉的潜力研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 79-83.
- [23] 李 波, 青长乐, 周正宾. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在土壤治污中的应用[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(6): 375-377.