

## 氮素营养对重金属超积累植物东南景天吸收 积累锌和镉的影响

张圆圆<sup>1,2</sup>, 窦春英<sup>1,2,3</sup>, 姚芳<sup>1</sup>, 叶正钱<sup>1,2</sup>

(1. 浙江农林大学 环境科技学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江大学 环境与资源学院 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江 杭州 310029; 3. 安徽省宁国市农业委员会, 安徽 宁国 242300)

**摘要:** 以重金属锌、镉超积累植物东南景天 *Sedum alfredii* 为研究材料, 采用营养液培养法研究了氮素营养对东南景天生长及对重金属锌、镉吸收、积累和转运能力的影响。结果表明: 适当的氮素营养能够促进东南景天的生长, 提高东南景天地上部富集重金属的能力, 在供氮 2.50 ~ 5.00 mmol·L<sup>-1</sup> 时, 东南景天地上部生长和重金属吸收、积累最佳, 锌和镉质量分数分别达 12.00 g·kg<sup>-1</sup> 和 2.00 g·kg<sup>-1</sup>。在应用东南景天重金属超积累植物进行土壤重金属污染修复时需要合理施用氮肥, 从而提高植物修复土壤重金属污染的效率。图 1 表 4 参 15

**关键词:** 土壤学; 氮; 东南景天; 重金属超积累植物; 锌; 镉

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)06-0831-08

## Nitrogen application to enhance zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Sedum alfredii*

ZHANG Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, DOU Chun-ying<sup>1,3</sup>, YAO Fang<sup>1</sup>, YE Zheng-qian<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;  
2. Key Laboratory of Polluted Environment Remediation and Ecological Health of the Ministry of Education, College of Natural Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, Zhejiang, China; 3. Agricultural Council of Ningguo City, Ningguo 242300, Anhui, China)

**Abstract:** Two hydroponic culture experiments were conducted in a glasshouse to understand the effect of nitrogen (N) nutrition on growth and the zinc and cadmium (Zn/Cd) uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii*. Results showed that both low ( $\leq 0.50$  mmol·L<sup>-1</sup>) and excessive ( $> 5.00$  mmol·L<sup>-1</sup>) supply of N impaired growth of plant dry matter and reduced plant uptake of Zn and Cd. By contrast, 2.50 - 5.00 mmol·L<sup>-1</sup> of N improved plant growth, increased concentrations of Zn (to 12.00 g·kg<sup>-1</sup>) and Cd (to 2.00 g·kg<sup>-1</sup>) in the shoots, and enhanced partitioning of Zn and Cd from roots to shoots. Thus, to maximize heavy metal phytoremediation efficacy for Zn/Cd contaminated soils in the field, optimal N fertilization of *S. alfredii* is required. [Ch, 1 fig, 4 tab. 15 ref.]

**Key words:** soil science; nitrogen; *Sedum alfredii*; hyperaccumulator; zinc (Zn); cadmium (Cd)

施肥的主要作用是改善土壤养分状况, 促进植物对养分的吸收, 以达到高产优质的目的。将施肥用于强化重金属污染土壤的植物修复也具有类似的作用, 特别是利用重金属超积累植物比一般的植物更具有重金属耐性, 并且体内重金属质量分数也高出许多的特点, 可以起到更有效地降低土壤中重金

收稿日期: 2010-01-14; 修回日期: 2010-04-01

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Z5080203); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(EREH0711); 浙江农林大学科学研究发展基金资助项目(2005FR053)

作者简介: 张圆圆, 从事土壤学研究。E-mail: zhangqiuqiu860226@163.com。通信作者: 叶正钱, 教授, 博士, 从事土壤与植物营养环境生态等研究。E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

属质量分数的作用<sup>[1]</sup>。施肥不仅可以促进植物生长,提高植物生物量,进而提高植物积累重金属总量;通过肥料和重金属的相互作用,施肥还可以影响土壤对重金属的吸附解吸等作用,改变土壤重金属的形态,进而改变重金属在土壤中的行为和活性,影响植物对其吸收和积累<sup>[2-3]</sup>。如已有研究报告<sup>[4-5]</sup>表明,施用氮肥可以极大地促进重金属超积累植物天蓝遏蓝菜 *Thlaspi caerulescens* 的生长和对重金属锌(Zn)和镉(Cd)的吸收。东南景天 *Sedum alfredii* 是在中国境内发现的一种锌、镉超积累植物,这种植物不仅生物量大,对锌、镉具有超积累特性,而且具有多年生,可无性繁殖,适于刈割等特点,是实施植物修复和研究超积累机制的良好材料<sup>[6-7]</sup>。我们在野外调查中发现,生长于被废弃古老矿山土壤上的东南景天,土壤肥力瘠薄,生长势较差,而在临近较肥沃的土壤上长势好,其生物量为前者的数十倍。目前,对优化东南景天修复土壤重金属污染效率的农艺措施研究还很少。氮是植物生长发育最主要的必需营养元素之一,在田间也常常是植物生长首要的限制性营养元素。为此,在已有研究的基础上<sup>[7]</sup>,本研究通过水培试验,比较不同供氮水平对东南景天生物产量以及重金属锌、镉积累量的影响,为合理施肥,提高东南景天的重金属修复效率提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物

供试植物为重金属超积累植物东南景天,取自浙江省一个古老铅锌矿<sup>[7]</sup>,经人工繁殖培育后,选用长约5 cm,大小均匀,带顶芽和叶片的植株作为供试材料。

### 1.2 植物培养与处理

试验在温室大棚内进行。完全营养液的基本组成如下。大量元素( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ):氯化钙 1.00,硝酸铵 2.00,磷酸二氢钾 0.10,硫酸镁 0.50,氯化钾 0.10,硫酸钾 0.70;微量元素( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ):硼酸 10.00,硫酸锰 0.50,硫酸铜 0.20,钼酸铵 0.01,乙二胺四乙酸铁 50.00;锌采用东南景天最适浓度(硫酸锌  $500.00\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>。将长约5 cm,大小均匀一致的枝条,用营养液预培养18 d左右,待长出比较旺盛的根系时,开始进行不同水平的氮、镉处理。本研究前后进行2次试验,试验时间分别为2006年7-9月和2007年4月。在2006年7-9月进行的试验中,氮处理水平为0.50, 1.00, 2.50, 5.00, 10.00  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,镉处理水平为0, 100.00  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,共10个处理;2007年4月进行的试验,氮处理水平为0.10, 1.00, 10.00  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,镉处理水平为0, 100.00  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,共6个处理。氮以分析纯硝酸铵形式加入,镉以分析纯氯化镉形式加入。重复3次·处理<sup>-1</sup>。每天用pH计测定营养液的pH值,并用0.10  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠或0.10  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸调节营养液为pH 5.8,保持24 h连续通气,5 d更换营养液1次。处理期间观察植物的长势和症状表现,2006年的试验于植株处理2个月后收获;2007年的试验目的主要在于验证植物生长和锌、镉吸收对供氮处理的快速反应,因此,基于2006年的试验结果以及氮在植物体内的再利用性,设置低、轻度低和高(0.10, 1.00, 10.00  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )3个氮处理水平,并且在处理之间植物生长表现出差异时(16 d)即收获。收获时,先用自来水将根冲洗干净,再用20.00  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙酸二钠交换15 min,去除根系表面吸附的锌、镉等离子,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。将植物新鲜样品在70℃下烘干至恒量,测定其干物质质量。然后,用玛瑙研钵磨碎,过60目尼龙网筛后,供分析测定。

### 1.3 测定方法与数据分析

样品的消化、分析测定:称取0.200 g植物样品,用硫酸-双氧水法消煮植物样品,定容,过滤。消煮液中的氮采用靛酚蓝比色法测定;磷用钼蓝比色法测定;钾用火焰光度法测定;锌、镉用高频电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测定。试验所得数据采用DPS分析软件进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同氮、镉处理水平对东南景天生长的影响

氮是植物生长必需的三要素之一,是氨基酸、蛋白质的重要组成部分,也是其他重要生命物质如

核酸、各种酶类等的组成成分, 因而对植物生长影响巨大。在本研究中, 2 次试验结果都表明, 不同质量分数的氮处理对东南景天地上部和根系生物量有极显著的影响, 特别是 2006 年试验。当氮素供应不足或过高皆导致植物特别是地上部生物量下降(表 1, 图 1)。在 2006 年的试验中, 东南景天地上部生物量变化范围为  $0.02 \sim 0.30 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 根系生物量变化范围为  $0.01 \sim 0.04 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ (图 1)。氮对东南景天生长的影响还受镉处理的影响, 因而氮、镉交互作用达到极显著水平。但在 2007 年的试验中, 镉及氮  $\times$  镉交互作用对地上部生物量的影响不明显, 不同质量分数的氮、镉处理间东南景天生物量变化幅度也不大, 其地上部生物量变化范围为  $0.29 \sim 0.37 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 根系生物量变化范围为  $0.04 \sim 0.05 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 这可能主要与处理时间较短有关。

表 1 东南景天各测定值处理因素间的显著性水平 ( $F$  检验)

Table 1 ANNOVA analysis of different parameters

处理		生物量		氮质量分数		磷质量分数		钾质量分数	
试验年份	处理因素	地上部	根系	地上部	根系	地上部	根系	地上部	根系
2006	氮	**	**	**	**	**	**	**	**
	镉	**	**	ns	**	**	ns	*	**
	氮 $\times$ 镉	**	**	**	**	**	**	**	**
2007	氮	**	**	**	**	**	**	**	**
	镉	**	ns	**	**	ns	ns	**	**
	氮 $\times$ 镉	ns	**	**	**	**	**	**	**

说明: \* 表示 5% 显著水平; \*\* 表示 1% 显著水平; ns 表示不显著。

在无镉处理的条件下, 当氮处理为  $2.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时东南景天地上部生物量最大, 以后随着氮浓度的提高反而抑制东南景天地上部的生长; 根系的生长状况与有镉处理的条件下表现趋势相同。本研究与李继光等<sup>[8]</sup>在人工气候室条件下的研究结果稍有不同。他们的研究发现, 在一定范围内供氮( $4.00 \sim 16.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 能明显促进东南景天的生长, 随着氮素水平的升高, 地上部和根系的生物量也提高, 在供氮水平为  $16.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时达到最大值, 而当供氮水平  $\geq 32.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 东南景天的生长受到严重的抑制。这可能与试验的环境条件不同有关。

在有镉处理的条件下, 东南景天地上部干物质在  $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的供氮水平下达到最大值; 根系干物质在  $2.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的供氮水平下达到最大值(图 1)。在相同氮处理水平下, 无镉处理的根系生物量均比有镉处理的高, 说明镉抑制了根系的生长, 这与我们已有研究结果一致<sup>[6,9-10]</sup>。在镉处理为  $100.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 供氮水平为  $10.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时对东南景天地上部和根系生长的抑制作用最大。作为毒性很强的重金属元素, 虽然低水平镉促进植物生长, 而且我们的已有研究显示在镉  $100.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  供应水平时对东南景天地上部生长作用最佳, 但是此时根系生长已经明显受阻<sup>[9-10]</sup>。

## 2.2 氮、镉处理对东南景天植株氮、磷、钾质量分数的影响

总的来看, 氮营养水平对东南景天植株体内氮、磷、钾质量分数的影响, 在 2 次试验中的结果基本一致。但是, 2 次试验结果显示, 植株体内氮、磷、钾质量分数因季节不同而有较大差异, 显示光照、温度等环境条件的影响作用较大。在无镉处理时, 随着供氮水平的提高东南景天植株体内氮质量分数也增加, 但随着供氮水平进一步提高根中氮质量分数下降, 在  $10.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时根系含氮质量分数最低 ( $10.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )(表 2)。东南景天植株体内氮质量分数对供氮处理水平的反应还受镉处理的影响, 表现出氮、镉显著性的交互作用(表 1)。在镉处理为  $100.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, 在  $2.50 \sim 5.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  供氮水平时, 东南景天地上部氮质量分数为  $14.40 \sim 20.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 当氮浓度为  $2.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时地上部氮质量分数达到最大值, 这可能与植物对镉胁迫的反应有关, 在最佳供氮水平下, 更有利于植物通过氮吸收、代谢、合成含氮解毒物质<sup>[11]</sup>。

与东南景天植株体内氮质量分数变化类似, 植株地上部体内磷质量分数也呈现出随着供氮水平的

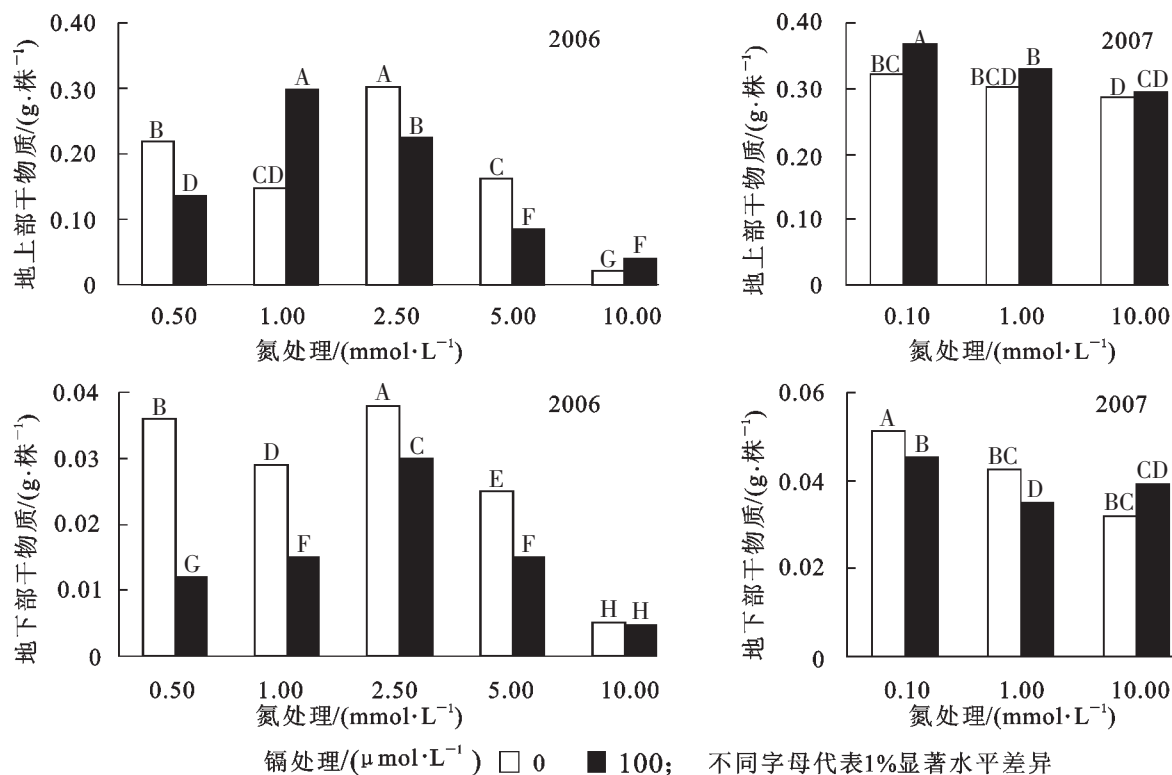


图1 氮、镉处理水平对东南景天植株生长的影响

Figure 1 Effect of N and Cd on shoot and root biomass

表2 不同氮、镉处理水平对东南景天植株体内氮、磷、钾质量分数的影响

Table 2 Effect of N and Cd on concentrations of N, P and K in *Sedum alfredii*

试验年份	处理		氮质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )		磷质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )		钾质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	
	镉/(μmol·L <sup>-1</sup> )	氮/(μmol·L <sup>-1</sup> )	地上部	根	地上部	根	地上部	根
2006	0	0.50	9.02 H	13.22 F	3.58 D	27.07 C	13.63 E	9.42 EF
		1.00	16.50 DE	16.48 D	4.70 B	24.97 CD	22.45 BC	18.30 B
		2.50	19.43 BC	17.91 C	5.32 A	24.58 CDE	28.95 A	11.80 D
		5.00	20.55 B	15.80 DE	5.27 A	26.88 C	27.93 A	10.09 E
		10.00	23.12 A	10.25 G	3.54 DE	21.46 EFG	15.45 DE	8.07 F
	100.00	0.50	20.32 B	18.50 BC	4.22 C	31.78 B	21.68 BC	4.12 G
		1.00	14.93 EF	22.24 A	3.01 F	19.35 G	13.69 E	12.56 D
		2.50	20.64 B	23.03 A	5.15 A	20.21 FG	28.90 A	20.13 A
		5.00	14.39 F	19.35 B	3.14 EF	23.40 DEF	18.63 CD	3.54 G
		10.00	17.66 CD	12.09 G	3.82 CD	35.00 A	19.48 CD	3.53 G
2007	0	0.10	10.50 B	14.55 C	2.39 CD	9.86 D	10.50 B	19.62 A
		1.00	13.98 A	16.04 B	2.98 A	13.09 A	13.75 A	15.69 B
		10.00	13.99 A	17.31 A	2.52 BC	11.95 ABC	7.85 C	11.60 C
	100.00	0.10	9.59 B	12.23 D	2.36 D	11.38 BCD	12.33 AB	18.08 A
		1.00	13.61 A	15.73 B	2.66 B	12.54 AB	11.14 B	9.56 D
		10.00	10.80 B	15.26 BC	2.91 A	10.67 CD	14.08 A	12.09 C

说明: 系按各年份试验的结果单独统计; 不同字母代表1%显著水平差异。

提高而增加的趋势, 但过高的氮水平供应导致体内磷质量分数的下降, 但地下部根系磷质量分数仅在高氮水平( $10.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )处理时显著下降(表 2), 并且体内磷状况受镉处理因素的影响(表 1)。在无镉处理的条件下, 2006 年试验结果表明, 供氮水平为  $2.50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时东南景天地上部磷质量分数都较高( $5.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 2 个处理之间无显著性差别; 供氮水平过低或过高氮皆导致地上部磷质量分数下降。在有镉处理的条件下, 植株体内磷质量分数对氮素供应的反应比较复杂, 在严重低氮( $0.50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )和高氮( $10.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )处理时, 镉  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  处理会导致植株体内磷的积累, 比相同供氮水平下无镉处理的植株体内磷质量分数高; 而在供氮  $1.00 \sim 5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  有镉处理则使植株体内磷质量分数下降, 在最佳供氮水平( $2.50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )时, 不仅植株生长最佳(图 1), 镉处理对地上部磷质量分数没有显著影响。在镉处理为  $100.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氮浓度为  $5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 地上部磷质量分数达到最大值( $5.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

氮营养水平对东南景天植株体内钾质量分数也有显著地影响, 氮素水平供应过低或过高都引起植株体内钾质量分数明显下降。植株钾质量分数对氮营养水平的反应也受镉处理的影响, 当有镉处理( $100.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )时, 2006 年试验结果显示, 东南景天地上部和根系钾质量分数均在供氮水平为  $2.50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时最高; 2007 年试验地上部钾质量分数在氮浓度为  $10.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时较高, 根系钾质量分数在氮浓度为  $0.10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时较高。

上述研究结果显示, 适宜的氮素供应, 有利于植株体内磷、钾素代谢的正常进行, 以供氮水平为  $2.50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时最佳, 从而有利于植物生长和提高植物对镉的胁迫。

### 2.3 氮、镉处理对东南景天植株锌、镉质量分数的影响

2 次盆栽试验的结果基本一致, 都显示氮营养水平对东南景天锌、镉的吸收和积累有极显著的影响(表 3~4), 东南景天植株锌、镉质量分数与锌、镉积累量呈相同的变化规律。处理时间较长(2 个月)的 2006 年试验, 地上部锌、镉质量分数显著高于试验处理时间较短(16 d)的 2007 年。这一结果与我们以前的研究一致<sup>[7,10]</sup>, 显示 2007 年的试验中植株体内锌、镉吸收尚未达到平衡。

表 3 表明低氮( $1.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  以下)和高氮( $10.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )都降低了地上部锌的质量分数和积累量以及锌向地上部的分配。2006 年试验数据显示, 当无镉处理时, 随着氮水平升高东南景天地上部锌质量分数增大, 当供氮水平为  $5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时地上部锌质量分数超过  $12.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。当供氮水平为  $2.50 \sim 5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 地上部锌积累量占全株的  $94.8\% \sim 96.6\%$ , 说明适宜的供氮条件下能显著促进锌向地上部的运转。当有镉处理时, 在最佳供氮水平下, 东南景天地上部锌质量分数及积累量和转移率都有所下降。植物对锌、镉的吸收具有拮抗作用, 因而在供氮适宜的条件下, 镉处理降低了体内锌的质量分数<sup>[6]</sup>。

在无镉处理的条件下, 东南景天植株靠原有植株(处理开始前小苗)体内的镉进行体内转运, 氮处理对东南景天地上部与根系镉质量分数无明显影响(表 4)。镉处理( $100.00 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )后, 植株体内镉质量分数显著提高。与体内锌变化类似, 在处理时间较短的 2007 年试验中, 植株地上部镉质量分数不及处理时间长的 2006 年试验。2006 年试验数据显示, 当氮  $\leq 5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 随着氮处理浓度升高地上部镉质量分数升高, 高氮处理水平( $10.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )时, 地上部镉质量分数下降。地上部镉积累量在氮处理浓度为  $2.50 \sim 10.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时无明显差别, 积累量最大。

氮锌之间关系的研究报道显示, 在不同植物及同一植物不同器官上结论不一, 在一定供氮量范围时表现出协同, 超过一定用量则表现出拮抗。在较低水平时, 施氮促进了根系发育和植物生长, 从而利于吸收较多的锌; 相反, 氮过高对锌吸收有降低的趋势<sup>[12]</sup>; 氮镉之间也有类似的关系<sup>[4,8]</sup>。因而, 当土壤肥力水平较高时, 氮肥施用对重金属超积累植物天蓝遏蓝菜吸收锌、镉作用不明显。

本研究显示, 由于东南景天植物地上部生长的生物量和锌、镉吸收对氮营养水平反应的最佳浓度范围有所不同, 并且受镉处理的影响, 地上部锌、镉积累量综合了植物生长及植物对锌、镉吸收、转运的情况, 因此, 考虑重金属超积累植物对重金属吸收修复的效率, 以供氮  $2.50 \sim 5.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  最有利于东南景天地上部对锌、镉的积累。此外, 不仅供氮水平影响重金属超积累植物生长, 与普通植物一样, 氮素营养形态及不同氮形态比例都会影响其生长, 以及对重金属在地上部的积累, 而且不同

表3 氮、镉不同处理水平对东南景天植株锌质量分数的影响

Table 3 Effect of N and Cd on Zn uptake by *Sedum alfredii*

试验年份	处理		锌质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )		锌积累量/(mg·株 <sup>-1</sup> )		锌转移率/%
	镉/(μmol·L <sup>-1</sup> )	氮/(μmol·L <sup>-1</sup> )	地上部	根系	地上部	根系	
2006	0	0.50	5 071 F	10 881 CD	1.41 E	0.30 C	82.3
		1.00	8 245 D	9 993 DE	0.87 F	0.27 CD	76.0
		2.50	10 091 C	11 887 C	3.24 A	0.18 DEF	94.8
		5.00	12 492 A	10 595 D	2.70 B	0.10 F	96.6
		10.00	6 173 EF	15 538 A	0.26 G	0.07 F	78.8
	100.00	0.50	8 567 D	13 736 B	1.17 EF	0.42 B	73.7
		1.00	5 224 F	9 190 EF	1.79 D	0.28 CD	86.6
		2.50	9 660 C	8 963 F	2.08 CD	0.21 CDE	90.9
		5.00	10 776 BC	10 889 CD	1.99 CD	0.14 EF	93.5
		10.00	6 458 E	15 082 A	1.02 F	0.09 F	92.1
2007	0	0.10	4 060 BC	4 857 A	1.19 B	0.24 A	83.3
		1.00	4 728 A	4 781 A	1.40 A	0.19 B	88.2
		10.00	3 732 D	4 823 A	1.12 B	0.17 B	86.6
	100.00	0.10	4 031 BC	4 103 C	1.47 A	0.21 AB	87.8
		1.00	3 974 C	4 095 C	1.22 B	0.17 B	87.8
		10.00	4 182 B	4 425 B	1.19 B	0.20 AB	85.5
<i>F</i> 检验							
2006	氮	**	**	**	**	**	**
	镉	**	ns	**	**	**	**
	氮 × 镉	**	**	**	**	**	**
2007	氮	**	**	**	**	**	**
	镉	**	**	ns	ns	ns	ns
	氮 × 镉	**	**	**	**	**	**

说明: 1. 在数据表中, 系按各年份试验的结果单独统计; 不同字母代表达到 1% 显著水平差异。2. *F* 检验结果中, ns, \*, \*\* 分别表示没有差异和达到 5% 和 1% 显著水平差异。

氮形态肥料在土壤中的转化对土壤重金属活性的影响也有差异<sup>[4-5, 13-15]</sup>, 因此, 需要进一步开展大田条件下东南景天氮肥促进东南景天修复重金属效率的研究。

### 3 结论

从本研究结果来看, 适宜的氮素供应有利于植株体内磷、钾素等生理代谢的正常进行, 从而有利于植物生长和提高植物对镉的胁迫。在一定范围内施加氮肥能显著或者极显著地提高重金属超积累植物东南景天的生物产量, 并且促进重金属锌、镉的吸收和向地上部积累, 以氮素营养供应水平在 2.50 ~ 5.00 mmol·L<sup>-1</sup> 之间最佳。从植物修复角度考虑, 借助农艺施肥措施, 适当施加氮肥提高重金属污染土壤中有效氮的供应水平, 对提高超积累植物生物量以及吸收、积累重金属的能力具有重要作用, 从而提高重金属超积累植物修复土壤重金属污染的效率。

表 4 不同水平氮、镉处理对东南景天植株镉质量分数的影响

Table 4 Effect of N and Cd on Cd uptake by *Sedum alfredii*

试验年份	处理		镉质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )		镉积累量/(mg·株 <sup>-1</sup> )		镉转移率/%
	镉/(μmol·L <sup>-1</sup> )	氮/(μmol·L <sup>-1</sup> )	地上部	根系	地上部	根系	
2006	0	0.50	65 D	40 F	12 E	2 G	88.8
		1.00	53 D	37 F	46 D	1 G	97.8
		2.50	58 D	46 F	45 D	1 G	96.8
		5.00	59 D	64 F	16 E	2 G	91.0
		10.00	61 D	44 F	26 DE	1 G	94.9
	100.00	0.50	1 827 B	2 857 A	255 B	31 C	89.1
		1.00	1 898 B	1 440 D	209 C	25 D	89.5
		2.50	2 034 A	1 221 E	324 A	52 A	86.1
		5.00	2 068 A	2 933 A	320 A	48 C	87.0
		10.00	1 648 C	2 211 b	304 A	8 F	97.5
2007	0	0.10	116 E	102 D	39 C	5 C	88.2
		1.00	180 D	143 D	56 C	6 C	90.7
		10.00	124 DE	117 D	36 C	4 C	89.3
	100.00	0.10	980 B	2 270 C	330 A	125 AB	72.5
		1.00	593 C	4 589 A	200 B	112 B	64.1
		10.00	1223 A	2 720 B	344 A	130 A	72.5
F 检验							
2006	氮	**	**	**	**	**	**
	镉	**	**	**	**	**	**
	氮 × 镉	**	**	**	**	**	**
2007	氮	**	**	**	**	ns	ns
	镉	**	**	**	**	**	**
	氮 × 镉	**	**	**	**	**	**

说明: 1. 在数据表中, 系按各年份试验的结果单独统计; 不同字母代表达到 1% 显著水平差异。2. F 检验结果中, ns, \*, \*\* 分别表示没有差异和达到 5% 和 1% 显著水平差异。

#### 参考文献:

- [1] 孙约兵, 周启星, 郭观林. 植物修复重金属污染土壤的强化措施[J]. 环境工程学报, 2007, 1 (3): 103 - 110.  
SUN Yuebing, ZHOU Qixing, GUO Guanlin. Phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals [J]. *Chin J Environ Eng*, 2007, 1 (3): 103 - 110.
- [2] 徐明岗, 刘平, 宋正国, 等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (增刊): 328 - 333.  
XU Minggang, LIU Ping, SONG Zhengguo, et al. Progress in fertilization on behavior of metals in contaminated soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2006, 25 (supp): 328 - 333.
- [3] WEI Shuhe, TEIXEIRA DA SILVA J A, ZHOU Qixing. Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 150: 662 - 668.
- [4] SCHWARTZ C, ECHEVARRIA G, MOREL J L. Phytoremediation of cadmium with *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant Soil*, 2003, 249: 27 - 35.

- [5] SIRGUEY C, SCHWARTZ C, MOREL J L. Response of *Thlaspi caerulescens* to nitrogen, phosphorus and sulfur fertilization [J]. *Int J Phytoremediat*, 2006, **8**: 149 – 161.
- [6] YE Haibo, YANG Xiaoe, HE Bing, *et al.* Growth response and metal accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn complex-polluted ion levels [J]. *Acta Bot Sin*, 2003, **45** (9): 1030 – 1036.
- [7] 龙新宪, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 超积累生态型东南景天吸收镉的特性[J]. 生态学报, 2006, **26** (2): 334 – 340.  
LONG Xinxian, NI Wuzhong, YE Zhengqian, *et al.* The characteristic of Zn uptake by the hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (2): 334 – 340.
- [8] 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.  
LI Jiguang, LI Tingqiang, ZHU En, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on growth and cadmium accumulation in hyperaccumulator of *Sedum alfredii* Hance [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **21** (1): 54 – 58.
- [9] 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 Yuhui, YANG Xiao'e, YE Zhengqian, *et al.* Comparing the characteristics of growth response and accumulation of Cadmium and lead by *Sedum alfredii* Hance [J]. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For*, 2004, **32** (6): 101 – 106.
- [10] XIONG Yuhui, YANG Xiao'e, YE Zhengqian, *et al.* Characteristics of cadmium uptake and accumulation by two contrasting ecotypes of *Sedum alfredii* Hance [J]. *Environ Sci Health Part A Toxic/Hazard Subst & Environ Eng*, 2004, **39** (11/12): 2925 – 2940.
- [11] 于方明, 仇荣亮, 周小勇, 等. 镉对超富集植物圆锥南芥氮素代谢的影响研究[J]. 土壤学报, 2008, **45** (3): 497 – 502.  
YU Fangming, QIU Rongliang, ZHOU Xiaoyong, *et al.* Effects of cadmium on activities of key nitrogen metabolism enzymes in leaves of *Arabispiani culata* franch [J]. *Acta Pedol Sin*, 2008, **45** (3): 497 – 502.
- [12] 何忠俊, 华路, 白玲玉, 等. 土壤-植物系统中氮锌交互作用研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, **10** (2): 133 – 137.  
HE Zhongjun, HUA Luo, BAI Lingyu, *et al.* Research progress of interaction between nitrogen and Zinc in plant-soil system [J]. *Soil Environ Sci*, 2001, **10** (2): 133 – 137.
- [13] HAMLIN R L, BARKER A V. Influence of ammonium and nitrate nutrition on plant growth and zinc accumulation by Indian mustard [J]. *Plant Nutr*, 2006, **29**: 1523 – 1541.
- [14] 李继光, 李廷强, 朱恩, 等. 不同氮形态对东南景天镉积累的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2008, **34** (3): 327 – 333.  
LI Jiguang, LI Tingqiang, ZHU En, *et al.* Effects of different nitrogen forms on Cadmium accumulation of *Sedum alfredii* Hance [J]. *J Zhejiang Univ Agric & Life Sci*, 2008, **34** (3): 327 – 333.
- [15] XIE H L, JIANG Rongfeng, ZHANG Fusuo, *et al.* Effect of nitrogen form on the rhizosphere dynamics and uptake of Cadmium and Zinc by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant Soil*, 2009, **318** (1/2): 205 – 215.