

# 不同硼浓度对三种超富集植物吸收硼及重金属的影响

刘登彪<sup>1</sup>, 蒋成爱<sup>1\*</sup>, 张嘉慧<sup>2</sup>, 赵 涛<sup>1</sup>

(1.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2.华南农业大学兽医学院 农业部畜禽产品质量监督检验测试中心, 广州 510642)

**摘要:**通过水培试验研究了 0~15 mg·L<sup>-1</sup> 的硼(B)对 Zn/Cd 超富集植物东南景天(*Sedum alfredii*)、Zn/Cd/Ni 超富集植物遏蓝菜(*Noccaea caerulescens*)和 Ni 超富集植物庭荠属(*Alyssum murale*)在 20 mg Zn·L<sup>-1</sup> 及 18 mg Ni·L<sup>-1</sup> 胁迫下生长和吸收重金属的影响。试验结果显示:较低浓度的硼促进三种超富集植物的生长和重金属吸收,而高浓度的硼则表现出抑制作用;三种植物在硼处理浓度为 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 时都开始表现中毒的症状,三种植物地上部分的硼含量随硼处理浓度的增加而增大,*S.alfredii* 叶部、*N.caerulescens*、*A.murale* 地上部分的硼浓度范围分别为 40.2~880、115~744、156~922 mg·kg<sup>-1</sup> 干重;当硼处理的浓度为 2.0、0.5 mg·L<sup>-1</sup> 时,*S.alfredii* 和 *N.caerulescens* 地上部分的重金属吸收达最大值,*A.murale* 地上部 Zn 和 Ni 的含量则分别在硼处理浓度为 2.0、5 mg·L<sup>-1</sup> 时达到最大。

**关键词:**硼;超富集植物;锌;镍

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)06-1106-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.06.008

## Effects of Boron Concentrations on Uptake of Boron and Heavy Metals by Three Hyperaccumulators

LIU Deng-biao<sup>1</sup>, JIANG Cheng-ai<sup>1\*</sup>, ZHANG Jia-hui<sup>2</sup>, ZHAO Tao<sup>1</sup>

(1.College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Animal and Poultry Products Quality Control, Inspection and Testing Center, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Boron(B) is an essential micronutrient for the growth of higher plants. This research was aimed to investigate the effects of different concentrations of boron(0~15 mg B·L<sup>-1</sup>) on the growth of and B, Zn and Ni uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii*, Zn/Cd/Ni hyperaccumulator *Noccaea caerulescens* and Ni hyperaccumulator *Alyssum murale*. The growth and metal uptake of three hyperaccumulators were enhanced by B at low concentrations in the nutrient solution, but inhibited at higher concentrations. These hyperaccumulators showed toxic symptoms at B concentrations greater than 10.0 mg B·L<sup>-1</sup>. The accumulation of B in the shoots of three hyperaccumulators increased with increasing solution B concentrations. It ranged from 40.2~880 mg·kg<sup>-1</sup>, 115~744 mg·kg<sup>-1</sup>, and 156~922 mg·kg<sup>-1</sup> (in dry weight) for *S. alfredii* leaves, *N.caerulescens* shoots and *A. murale* shoots, respectively. Metal accumulations in the shoots of *S. alfredii* and *N. caerulescens* were greatest, respectively, at 2.0 mg B·L<sup>-1</sup> and 0.5 mg B·L<sup>-1</sup> of solution B concentrations. *Alyssum murale* accumulated greatest Zn and Ni in the shoots at 2.0 mg B·L<sup>-1</sup> and 5.0 mg B·L<sup>-1</sup>, respectively.

**Keywords:** boron; hyperaccumulator; zinc; nickel

为了保障农产品安全,我国大面积被重金属污染的土壤亟待修复。用超富集植物进行的植物提取技术因为成本相对低廉、可大面积原位进行、不破坏土壤结构并带来景观美化效应、还可部分回收重金属等优势而受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。但用于修复的超富集植物,大多数是在重金属胁迫环境下,长期诱导和驯化形成的

适应性突变体,往往生长缓慢、植株矮小、生物量低,影响了提取效率,导致修复过程历时比较长<sup>[2]</sup>。通过合理施肥和其他农艺措施对超富集植物的生长和重金属吸收进行优化调控,是提高植物提取效率的重要举措之一。人们已经研究过多种大量元素(如 N、P、S 等)对不同超富集植物生长和吸收重金属的影响,结果表明这些措施能显著影响这些超富集植物的生物量及重金属的吸收<sup>[3-6]</sup>。

硼(B)是维管植物必需的微量营养元素,对于细胞壁的合成、增强光合作用、促进碳水化合物合成和运输,促进繁殖器官和分生组织的发育等方面都有

收稿日期:2013-12-04

基金项目:国家自然科学基金(31270675);国家自然科学基金(410713061)

作者简介:刘登彪(1989—),男,湖南娄底人,硕士研究生,主要研究方向为环境化学和环境污染的治理与修复。

E-mail: xhyzldb11@126.com

\* 通信作者:蒋成爱 E-mail: chajiang@scau.edu.cn

不可替代的重要作用,缺硼可导致细胞壁弹性减弱,机械强度和伸展能力降低。不同的植物对硼的需求量差异比较大,双子叶植物因具有较大数量的形成层和分生组织比禾本科植物需硼要多,同一种作物的不同品种对硼的需求量也不同,例如甘蓝型油菜比白菜型油菜需硼要多;硼需求量不同的植物缺硼的临界值也不同<sup>[7-9]</sup>。前人关注硼与其他营养元素的交互作用及硼对普通植物重金属毒害的缓解作用研究<sup>[10-17]</sup>,刘金萍<sup>[12]</sup>研究过酸性紫色土茼蒿的钙、锌、硼的复合效应及机理,结果表明硼对提高茼蒿吸收钙有一定的效应:低钙和硼对锌浓度有协同作用;钙、锌与硼均存在拮抗作用,使植株中硼的浓度下降。拉飞克等<sup>[13]</sup>研究指出添加  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的硼可显著提高槐叶萍抗氧化能力,从而提高其对槐叶萍抵抗镉、汞、铜、铬和锌胁迫的能力。与此相似,王学<sup>[14]</sup>报道添加  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的硼可缓解高浓度 Pb 对蜈蚣萍的毒害作用。张敏等<sup>[15]</sup>指出硼镉之间存在交互作用,且目前一般认为二者之间是拮抗作用,增加硼能够减少植物对镉的吸收,而镉含量的增加也同样抑制植物对硼的吸收,但具体剂量需要进一步的研究。牛静等<sup>[16]</sup>研究了硼对油菜吸收 Cd 的影响,结果表明施硼量不同没有对苗期的油菜吸收积累 Cd 产生显著影响,但施硼量的增加却显著地降低了花期油菜地上部对 Cd 的吸收累积。张敏<sup>[17]</sup>研究了硼镉交互作用对花生生长和吸收硼镉的影响,结果显示不同含量的组合及对不同的指标表现出拮抗、协同以及无影响的复杂交互作用,并且硼元素的添加使镉元素向花生非食用部分转移。但目前鲜见硼对超富集植物生长及重金属吸收影响的报道。

本文旨在研究不同浓度的硼处理对三种 Zn/Cd/Ni 的超富集植物生长及吸收 Zn 和 Ni 的影响,为这些超富集植物的生长优化调控提供应用基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本研究选取的三种超富集植物分别是:2002年在浙江衢州古老的铅锌矿区发现的一种本土 Zn/Cd 超富集植物矿山生态型东南景天(*Sedum alfredii*)<sup>[18]</sup>;生长在法国东北部孚日山蛇纹岩土壤的能超富集 Zn/Ni/Cd 等多种重金属的遏蓝菜(*Nocca caerulescens*)<sup>[19]</sup>;来自于希腊的十字花科庭荠属 Ni 的超富集植物(*Alyssum murale*)<sup>[20]</sup>。*S. alfredii* 的种苗取自浙江省铅锌矿山上,于2012年9月移至温室繁殖,用石英砂和完全营养液预培育两个月后,开始盆栽试

验;*N. caerulescens*、*A. murale* 的种子于2011年分别取自法国和希腊。

### 1.2 试验处理设计和水培实验

水培试验在华南农业大学的网室内进行。营养液采用华南农业大学叶菜配方<sup>[21]</sup>,其组成为:  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $472 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KNO}_3$   $202 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $246 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$   $174 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$   $2.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $2.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$   $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$   $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $27.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{EDTA}-2\text{Na}$   $37.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。种子用石英砂和稀释的营养液育苗后,选取大小、长短一致的各种植物苗。根据盆栽容器的大小和植株的大小与长势,按每盆装营养液 1.2 L 种植 *S. alfredii* 2 棵、*N. caerulescens* 3 棵或 *A. murale* 5 棵。用完全的营养液培养一个月后,将营养液中的硼和 Zn 去掉,进行不同浓度硼处理和添加重金属,硼处理水平设计为 0、0.5、2、5、10、15  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , *N. caerulescens* 和 *A. murale* 均加入  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Zn 和  $18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Ni, *S. alfredii* 因不超富集 Ni, 只加入  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Zn。B、Zn、Ni 分别以  $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的形态加入。每个处理设 4 个重复。

预培养和处理期间均 24 h 连续通气,每 3 d 更换 1 次营养液,处理 40 d 后,每盆 *S. alfredii* 按根、茎、叶分开收获植物,每盆 *N. caerulescens* 和 *A. murale* 按地上部分和根部分开收获植物;根系先反复用自来水冲洗干净,再用  $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDTA-2Na 交换 15 min,去除根系表面吸附的  $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ ,最后用去离子水冲洗干净,用吸水纸将植株根表水吸干,测量植株的根长、株高。然后将各植物样品置于  $105^\circ\text{C}$  烘箱中杀青 30 min,于  $75^\circ\text{C}$  连续烘干 48 h 至恒重、冷却、称量植物体的根、茎和叶的重量,得干生物量。研磨后供元素分析用。

### 1.3 样品的分析测定

研磨后的植物样品,炭化、在马福炉  $550^\circ\text{C}$  干灰化 8 h,用 1:1(V:V)HCl 溶解、过滤、定容,用原子吸收光度法测定 Zn、Ni 和 Fe 含量。干灰化-稀盐酸溶解-姜黄素比色法测定全硼的含量。*S. alfredii* 的根系生物量仅够分析硼的含量,另外关于根系 Zn 的含量已多有研究报道,所以只测定其根系中硼的含量。而 *N. caerulescens* 和 *A. murale* 根系的生物量都太少,故未能进行硼及重金属元素的分析。

数据采用 SPSS 18.0 软件进行相关的统计分析,

设定 5% 的显著性水平,运用单因素随机排列方差分析,并用 Duncan 氏法进行平均值间的多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度硼处理对超富集植物生长及生物量的影响

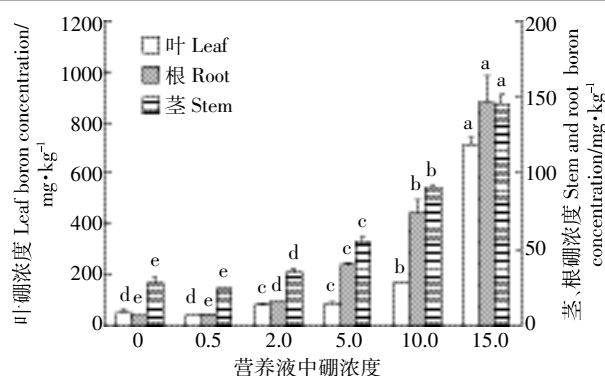
当硼处理浓度在  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上时,三种超富集植物均表现出叶片发黄失绿萎焉的症状,且 *N. caerulescens* 和 *A. murale* 的症状比较严重,植株矮小,根系发黑腐烂,部分植株枯萎死亡;而 *S. alfredii* 则表现出了相对较强的耐受性,其侧根仍然生长发育。

不同浓度硼处理下三种植物的生物量(以干物重计)如表 1 所示。绝大多数硼浓度处理并没有对 *S. alfredii* 各器官的生物量产生显著差异,只有当硼浓度处理达到  $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,其地上部的生物量显著下降;*N. caerulescens* 在  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度硼处理下,获得最大地上部的生物量并显著高于其他浓度处理;*A. murale* 在  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度硼处理下,获得最大地上部的生物量,但与其他浓度处理没有显著差异。

### 2.2 不同浓度硼处理下超富集植物对硼的吸收

不同硼处理水平下 *S. alfredii* 根、茎、叶中硼的含量如图 1 所示。随着营养液中硼处理浓度的升高,植物各器官中硼的含量也相应增加;当硼处理浓度分别为  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,叶片和茎的硼含量均接近  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。*S. alfredii* 根、茎、叶中硼含量的范围分别为  $6.73 \sim 118$ 、 $29.8 \sim 145$ 、 $40.2 \sim 880 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  干重,且叶  $\gg$  茎  $>$  根。

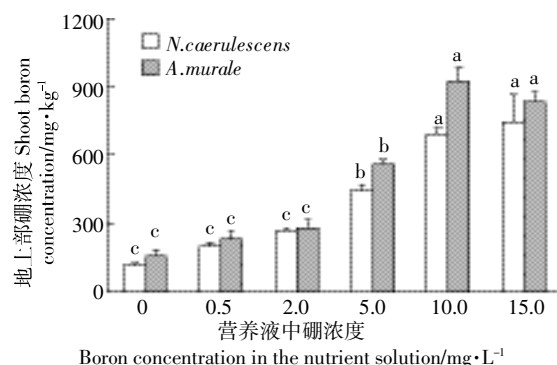
不同浓度硼处理下 *N. caerulescens* 和 *A. murale* 地上部中硼含量范围分别为  $115 \sim 744$ 、 $156 \sim 922 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (图 2)。与 *S. alfredii* 相似,这两种超富集植物地上部硼含量随着硼处理浓度的增加而升高,且对 *A. murale* 地上部硼含量增加幅度影响更大。当硼处理浓度不超



Boron concentration in the nutrient solution/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同  
Different lowercase letters indicates significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). The same below

图 1 不同浓度硼处理下 *S. alfredii* 根、茎、叶中硼的含量  
Figure 1 Boron concentrations in roots, stems and leaves of *S. alfredii* in different boron concentrations treatments



Boron concentration in the nutrient solution/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图 2 不同浓度硼处理下 *N. caerulescens* 和 *A. murale* 叶中硼的含量

Figure 2 Boron concentrations in shoots of *N. caerulescens* and *A. murale* grown in solution of different boron concentrations

过  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,三种植物地上部分硼含量依次为 *A. murale*  $>$  *N. caerulescens*  $>$  *S. alfredii*; 在开始出现中毒症状时 ( $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  硼浓度处理下),*S. alfredii* 叶和 *N. caerulescens*、*A. murale* 地上部的硼含量分别为  $446$ 、 $696$ 、 $922 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  干重;但在  $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的硼浓

表 1 不同硼处理水平下三种超富集植物的生物量

Table 1 Biomass of three hyperaccumulators at different boron concentrations

| 硼处理浓度<br>Concentration/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | <i>S. alfredii</i> |                  |                   | <i>N. caerulescens</i> | <i>A. murale</i> |
|---------------------------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------------|
|                                                         | 根 Root/g           | 茎 Stem/g         | 叶 Leaf/g          | 地上部 Shoot/g            | 地上部 Shoot/g      |
| 0                                                       | $0.13 \pm 0.02$    | $0.35 \pm 0.02a$ | $0.66 \pm 0.12a$  | $0.19 \pm 0.01b$       | $0.20 \pm 0.04$  |
| 0.5                                                     | $0.11 \pm 0.01$    | $0.35 \pm 0.01a$ | $0.57 \pm 0.10ab$ | $0.19 \pm 0.02b$       | $0.19 \pm 0.03$  |
| 2.0                                                     | $0.14 \pm 0.03$    | $0.36 \pm 0.02a$ | $0.71 \pm 0.07a$  | $0.20 \pm 0.01b$       | $0.34 \pm 0.16$  |
| 5.0                                                     | $0.14 \pm 0.01$    | $0.35 \pm 0.02a$ | $0.68 \pm 0.04a$  | $0.30 \pm 0.03a$       | $0.31 \pm 0.08$  |
| 10.0                                                    | $0.13 \pm 0.02$    | $0.32 \pm 0.02a$ | $0.54 \pm 0.11ab$ | $0.21 \pm 0.02b$       | $0.24 \pm 0.03$  |
| 15.0                                                    | $0.12 \pm 0.03$    | $0.27 \pm 0.01b$ | $0.40 \pm 0.12b$  | $0.15 \pm 0.04b$       | $0.21 \pm 0.08$  |

注:字母“abc”代表同一列的差异显著性 ( $P < 0.05$ );没有标注字母的列表示数据之间无显著性差异。下同。

Note: Different letters within a column indicate significant difference at  $P < 0.05$ ; There is no significant difference between data without letters in the same column. The same below.

度处理下, *S.alfredii* 的叶部与另两种植物的地上部分含量很接近。

### 2.3 不同浓度硼处理对超富集植物吸收锌、镍的影响

不同浓度硼处理对三种植物吸收 Zn 和 Ni 的影响分别如图 3、图 4 和图 5 所示。*S.alfredii* 叶和茎 Zn 的含量范围分别为 8.2~11.9、13.7~17.8 g·kg<sup>-1</sup>;低浓度的硼处理促进了 *S.alfredii* 对 Zn 的吸收,而高浓度则表现出抑制效应。硼处理的浓度不超过 10.0 mg·L<sup>-1</sup>

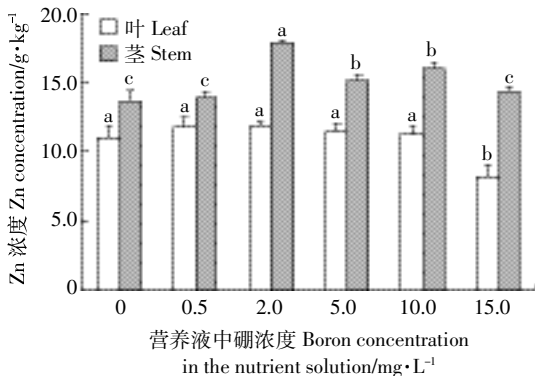


图 3 不同浓度硼处理下 *S.alfredii* 茎、叶中锌的含量

Figure 3 Zn concentrations of stems and leaves of *S. alfredii* in different boron concentration treatments

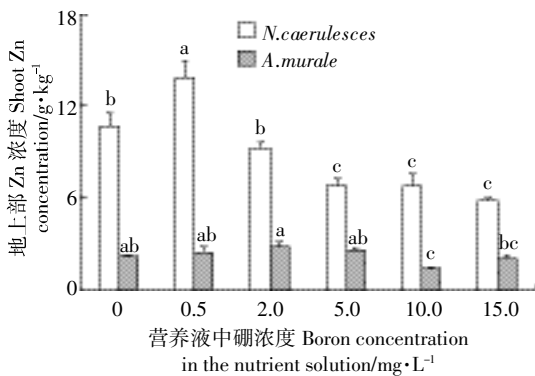


图 4 不同浓度硼处理下 *N. caerulea* 和 *A. murale* 地上部植株锌含量

Figure 4 Zinc concentrations of shoots of *N. caerulea* and *A. murale* treated with different boron concentrations

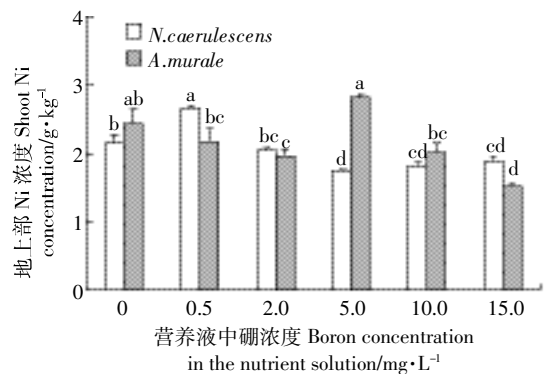


图 5 不同浓度硼处理下 *N. caerulea* 和 *A. murale* 地上部植株镍含量

Figure 5 Nickel concentrations of shoots of *N. caerulea* and *A. murale* treated by different boron concentrations

时,各处理间 *S.alfredii* 叶部锌含量没有显著差异,当硼处理的浓度为 2.0 mg·L<sup>-1</sup> 时, *S.alfredii* 叶片和茎都分别获得最大的 Zn 含量。当硼浓度增至 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 时, *S.alfredii* 茎部 Zn 含量开始显著地降低。

*N. caerulea* 地上部 Zn 和 Ni 含量范围分别为 5.8~13.9 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.7~2.7 g·kg<sup>-1</sup>, 其地上部 Zn 和 Ni 含量在 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 处理时就已经达到最大值,当硼浓度增至 5.0 mg·L<sup>-1</sup>, 该植物地上部 Zn 和 Ni 的含量分别只有其最大值的 49% 和 65%, 然后硼浓度再增加时, Zn 和 Ni 仍有进一步降低的趋势, 但抑制作用已不显著变化。*A. murale* 地上部 Zn 和 Ni 含量范围分别为 1.4~2.8 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.5~2.8 g·kg<sup>-1</sup>, 与 *S. alfredii* 和 *N. caerulea* 相似, 低浓度的硼促进了植物对重金属的吸收, 高浓度的硼表现了抑制作用, 但地上部 Zn 与 Ni 含量在硼处理浓度分别为 2.0 mg·L<sup>-1</sup> 与 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 时达到最大值。

### 2.4 不同硼处理水平对超富集植物不同部位铁含量的影响

很多重金属引起植物中毒出现黄化或枯萎的现象都与重金属抑制其对铁的吸收有关<sup>[2]</sup>, 所以本研究分析了各处理植物地上部的铁含量, 结果显示 (表

表 2 不同硼浓度处理下三种超富集植物地上部的铁含量 (mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Total Fe concentrations of shoots of three hyperaccumulators treated by different boron concentrations (mg·kg<sup>-1</sup>)

| 硼处理浓度<br>B application/mg·L <sup>-1</sup> | <i>S. alfredii</i> |               | <i>N. caerulea</i> | <i>A. murale</i> |
|-------------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|------------------|
|                                           | 茎 Stem             | 叶 Leaves      | 地上部 Shoot          | 地上部 Shoot        |
| 0                                         | 144.6±10.9a        | 245.4±10.6ab  | 624.3±61.3a        | 832.8±178.1a     |
| 0.5                                       | 118.8±24.1ab       | 219.8±4.0d    | 654.0±56.9a        | 805.2±154.6a     |
| 2.0                                       | 143.7±12.4a        | 228.7±9.6bcd  | 490.8±27.2b        | 824.0±18.3a      |
| 5.0                                       | 116.2±13.9b        | 250.4±6.6a    | 464.0±13.6b        | 825.2±16.0a      |
| 10.0                                      | 98.99±12.52bc      | 239.2±10.1abc | 407.3±28.2bc       | 459.1±55.9b      |
| 15.0                                      | 77.27±8.16c        | 220.2±10.9cd  | 359.0±23.2c        | 253.9±8.6b       |

2), 供试的三种超富集植物中, *S.alfredii* 地上部铁含量最低, 其茎和叶的全铁含量范围分别为 77.27~144.6 mg·kg<sup>-1</sup>、220.2~250.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 全铁含量均在 251 mg·kg<sup>-1</sup> 以下; *N.caerulescens* 和 *A.murale* 地上部全铁含量显著高于 *S.alfredii* 的地上部, 分别为 359.0~654.0 mg·kg<sup>-1</sup> 和 253.9~832.8 mg·kg<sup>-1</sup>。高浓度的硼处理抑制了这些超富集植物对 Fe 的吸收。当硼处理浓度达到 2.0、10.0、20.0 mg·L<sup>-1</sup> 时, 分别显著地降低了 *N.caerulescens* 地上部、*A.murale* 地上部和 *S.alfredii* 叶中 Fe 含量; 在 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 的硼浓度处理时, *S.alfredii* 茎部、*N.caerulescens*、*A.murale* 地上部 Fe 含量分别只有各自最大值的 69%、62%、55%。不断增加的硼浓度对 *N.caerulescens* 地上部铁含量影响最显著, 在硼浓度不超过 5 mg·L<sup>-1</sup> 时 *A.murale* 地上部 Fe 含量没有显著差异, 而在整个硼处理浓度范围内, *S.alfredii* 铁含量相对接近。

## 3 讨论

### 3.1 超富集植物对硼的耐性与累积

对一般植物生长有利的生长介质中有效态硼的浓度范围是 0.5~2.0 mg·L<sup>-1</sup>, 超过 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 时会对大多数植物产生毒性, 植物缺硼与硼中毒的浓度范围很窄, 敏感植物和耐性植物分别能耐受 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 和 4 mg·L<sup>-1</sup> 的硼; 一般植物体内含硼量为 10~50 mg·kg<sup>-1</sup>, 很多植物地上部分硼含量超过 50 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 便会出现典型的中毒症状<sup>[7-9]</sup>。本研究 *S.alfredii*、*N.caerulescens*、*A.murale* 地上部分别在 2.0~7.0、5.0、2.0 mg·L<sup>-1</sup> 的硼处理下获得最大的生物量, 三种重金属超富集植物在 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 浓度的硼处理时开始出现中毒现象, 他们对硼表现出了一定的耐性。随着营养液中硼处理浓度的增加, 三种超富集植物地上部硼含量也在不断增加, 其中 *S.alfredii* 的增幅最大; 另外, 这些植物地上部分硼含量高于根部, *S.alfredii* 的叶部硼含量又远远高于茎部, 而且叶比根更早出现中毒的症状。这些与普通植物对硼的吸收相似<sup>[7-9]</sup>, 再一次验证了硼这种元素很容易通过蒸腾作用从木质部转运到地上部分。本研究中, 在 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理下, 三种植物开始出现中毒症状时, *S.alfredii* 叶片、*N.caerulescens*、*A.murale* 的地上部分分别获得 446、696、922 mg·kg<sup>-1</sup> 的硼含量, 这些超富集植物对硼表现了一定的富集作用; 而 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 处理下, *S.alfredii* 茎部、*N.caerulescens*、*A.murale* 地上部 Fe 含量分别只有各自最大值的 68%、62%、55%, 三种植物中

*S.alfredii* 的铁含量最低, 缺 Fe 可能是这些植物出现黄化中毒症状的原因之一。高硼胁迫下的植物面临巨大的氧化压力, 影响某些酶的活性及营养物质的输送等<sup>[19]</sup>; 高等植物细胞内有 60%~98% 的硼与顺式二元醇结合形成稳定的复合物贮存在细胞壁中, 但通过这种途径解毒可以使植物体内的硼累积到 300 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>。这些重金属超富集植物如何贮存和解毒体内远高于这个含量的硼, 具体机制有待进一步研究。

### 3.2 硼对植物吸收重金属的影响

本研究的试验结果中, 不同浓度的硼处理对三种超富集植物吸收重金属锌和镍都表现出低浓度促进高浓度抑制的一致效应, 与刘金萍<sup>[12]</sup>报道的低浓度的硼对莴苣吸收锌表现出协同作用是相似的。已有的报道表明, 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 的硼可以增强一些普通植物如槐叶萍、蜈蚣萍对 Cd、Pb 等重金属胁迫的抵抗能力, 减少它们对重金属的吸收<sup>[13-15]</sup>, 但硼与重金属的拮抗作用会因植物的生长期不同而表现出差异<sup>[16]</sup>。本研究中, 当硼处理的浓度为 2.0、0.5 mg·L<sup>-1</sup> 时, *S.alfredii* 和 *N.caerulescens* 分别获得最大的重金属吸收, *A.murale* 地上部 Zn 和 Ni 的含量则分别在硼处理浓度为 2.0、5.0 mg·L<sup>-1</sup> 时达到最大。正常营养液配方中硼的浓度是 0.5 mg·L<sup>-1</sup>, 而这些超富集植物能够在这个浓度甚至更高的 2.0、5.0 mg·L<sup>-1</sup> 硼浓度处理时, 获得最大的地上部锌或镍的累积, 可能是因为锌和镍是植物必需的微量元素, 而且超富集植物对于这些重金属有着不同于普通植物的吸收累积机制, 因此通过适当增加生长基质中硼浓度来提高超富集植物的提取效率是可能的。另一方面, 与张敏<sup>[17]</sup>报道的不同含量的硼组合以及对花生不同的指标表现出拮抗、协同和无影响的复杂交互作用相似, 本研究结果显示三种超富集植物在不同硼浓度的胁迫下表现了不同的反应, 重金属吸收的最佳硼浓度因植物种类和重金属种类而异, 所以在修复实践中需要进一步进行具体研究。

## 4 结论

*S.alfredii*、*N.caerulescens* 和 *A.murale* 三种超富集植物对硼表现出了一定的耐性和积累能力, 其中 *S.alfredii* 耐性最强; 不同浓度的硼处理对三种超富集植物吸收锌和镍都表现出低浓度促进高浓度抑制的一致效应; 但三种超富集植物在不同硼浓度的胁迫下表现了不同的反应, 重金属吸收的最佳硼浓度因植物和

重金属种类不同而异。

# 参考文献:

- [1] McGrath S P, Zhao F J, Lombi E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides[J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 75: 1-56.
- [2] Meers E, Tack F M G, Van Slycken S, et al. Chemically assisted phytoextraction: A review of potential soil amendments for increasing plant uptake of heavy metals[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2008, 10(5): 390-414.
- [3] Sirguey C, Schwartz C, Morel J L. Response of *Thlaspi caerulescens* to nitrogen, phosphorus, and sulfur fertilization[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2006, 8(2): 149-161.
- [4] 李继光, 李廷强, 朱恩, 等. 氮对超积累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 Ji-guang, LI Ting-qiang, ZHU En, et al. Effects of nitrogen fertilizer on growth and cadmium accumulation in hyperaccumulator of *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 54-58.
- [5] Li Y M, Chaney R, Brewer E, et al. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: Economic and technical considerations[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(1): 107-115.
- [6] Bani A, Echevarria G, Sulçe S, et al. In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramafic site (Albania) [J]. *Plant and Soil*, 2007, 293(1-2): 79-89.
- [7] 陈钢, 易妍睿, 周漠兵, 等. 植物硼营养研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(16): 4060-4066.  
CHEN Gang, YI Yan-rui, ZHOU Mo-bing, et al. Research advance in the B nutrient application in plant[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2006, 34(16): 4060-4066.
- [8] 张晓博. 硼对植物营养与生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11962-11963.  
ZHANG Xiao-bo. Effect of boron on plant nutrition and growth[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(22): 11962-11963.
- [9] Ozturk M, Sakcali S, Gucel S, et al. Boron and Plants[M]//Ashraf M, Ozturk M, Ahmad M S A. Plant Adaptation and Phytoremediation. Springer, 2010, 275-301.
- [10] 安志装, 王校常, 施卫明, 等. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 392-396.  
AN Zhi-zhuang, WANG Xiao-chang, SHI Wei-ming, et al. Plant physiological responses to the interactions between heavy metal and nutrients[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 392-396.
- [11] 刘宇庆, 刘燕, 范红梅. 硼对植物细胞的影响及与其他元素关系的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009(5): 1-9.  
LIU Yu-qing, LIU Yan, FAN Hong-mei. Review of boron and plant cells and its relationship with other elements[J]. *China Soil and Fertilizer*, 2009(5): 1-9.
- [12] 刘金萍. 酸性紫色土钙、锌、硼的复合效应及机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2001.  
LIU Jin-ping. Effects of calcium-zinc-boron interactions on plant and their chemical behavior in acid purple soil and the mechanisms[D]. Chongqing: Southwest China Agricultural University, 2001.
- [13] 拉飞克, 施国新, 王学, 等. 硼对镉胁迫下槐叶萍生理生化特性的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2003, 26(3): 72-75.  
LA Fei-ke, SHI Guo-xin, WANG Xue, et al. The effects of boron on the physiological properties of *Salvinia natans* (L.) All. leaves under the stress of the Cd[J]. *Journal of Nanjing Normal University*, 2003, 26(3): 72-75.
- [14] 王学. 外源硼缓解铅对蜈蚣萍毒害作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(23): 9861-9862.  
WANG Xue. Toxic effects of Pb on *Salvinia natans* alleviated by exogenous boron[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(23): 9861-9862.
- [15] 张敏, 谢运球. 硼、镉元素及其交互作用与油菜产量和品质[J]. 生态科学, 2007, 26(4): 367-373.  
ZHANG Min, XIE Yun-qiu. Effects of boron and cadmium and B-Cd interaction on seed yield and quality of canola[J]. *Ecological Science*, 2007, 26(4): 367-373.
- [16] 牛静, 曹燕红, 耿明建. 硼对不同油菜品种镉吸收分配的影响[C]//中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集(上). 北京: 中国土壤学会, 2008: 298-303.  
NIU Jing, CAO Yan-hong, GENG Ming-jian. Effect of boron on cadmium and distribution in two rape varieties[C]//In Proceedings of the Eleventh National Members Congress of China Soil Science Society and the Seventh Cross Strait Academic Exchange Seminar of soil and fertilizer (the first half part). Beijing: Soil Science Society of China. 2008: 298-303.
- [17] 张敏. 土壤-植物体系硼镉交互作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.  
ZHANG Min. The study on interaction between boron and cadmium in soil-plant system[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [18] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天: 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*: A new zinc-hyperaccumulator[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [19] Chardot V, Echevarria G, Gury M, et al. Nickel bioavailability in an ultramafic toposequence in the Vosges Mountains (France) [J]. *Plant and Soil*, 2007, 293(1-2): 7-21.
- [20] Bani A, Pavlova D, Echevarria G, et al. Nickel hyperaccumulation by the species of *Alyssum* and *Thlaspi* (Brassicaceae) from the ultramafic soils of the Balkans[J]. *Botanica Serbica*, 2010, 34(1): 3-14.
- [21] 刘士哲. 现代实用无土栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 124.  
LIU Shi-zhe. The modern practical soilless cultivation technique[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 124.
- [22] Robinson B H, Green S R, Chancerel B. Poplar for the phytomanagement of boron contaminated sites[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150(2): 225-233.