

氮肥对小花南芥生理和 Pb、Zn 累积特征的影响

李元, 魏巧, 祖艳群*

(云南农业大学资源环境学院, 昆明 650201)

摘要:采用盆栽试验方法,在模拟 Pb 和 Zn 胁迫 ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)条件下,研究不同用量的氮肥(0、0.1、0.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理对小花南芥(*Arabis alpina* var. *parviflora* Franch)生长、土壤 pH 值、土壤 Pb 和 Zn 的不同形态以及小花南芥的生物量、叶绿素、脯氨酸、质膜透性、Pb 和 Zn 累积特征的影响。结果表明:施用氮肥导致土壤 pH 值呈下降趋势,施 N 导致土壤中 Pb 水溶态和可交换态含量从 3.9%显著增加到 11.5%~13.7%,Zn 水溶态和可交换态含量从 13.4%显著增加到 19.3%~23.5%。施 N 处理使小花南芥叶绿素含量和生物量显著增加。低 N(0.1~0.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理时,小花南芥叶片脯氨酸含量和相对电导率上升;小花南芥地上部和地下部 Pb 和 Zn 含量和累积量随着 N 素的施入而增加。施 N(0.1~0.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理时,Pb 和 Zn 的富集系数、转移系数均大于 1。因此,适量施 N(0.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)能促进小花南芥对土壤中 Pb 和 Zn 的吸收和提高小花南芥对 Pb 和 Zn 污染土壤的修复效率。

关键词:小花南芥;Pb;Zn;累积特征;N 素

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)08-1507-07 doi:10.11654/jaes.2013.08.003

Effects of N Application on Physiological Properties and Accumulation Characteristic of Pb and Zn in *Arabis alpina* var. *parviflora* Franch

LI Yuan, WEI Qiao, ZU Yan-qun*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of N application on soil pH value, forms of Pb and Zn, biomass, contents of chlorophyll and proline, membrane permeability, and accumulation characteristics of Pb and Zn under Pb and Zn stress ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that soil pH value decreased with N application. Percentage of bio-available Pb and Zn in soil reached the maximum under N 0.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 0.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ comparing with other treatments, respectively. With N application, water soluble Pb contents and exchangeable Pb contents increased from 3.9% to 11.5%~13.7% and water soluble Zn contents and exchangeable Zn contents increased from 13.4% to 19.3%~23.5%. Chlorophyll contents and biomass increased with increase in rates of N application. Proline content and membrane permeability in leaves of *A. alpina* increased with N 0.1~0.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ application. Contents and accumulation of Pb and Zn in shoot and root of *A. alpina* increased with increase in rates of N application. Bioaccumulation factor and transfer factor of Pb and Zn were more than 1. Therefore, adsorption of Pb and Zn of *A. alpina* should be promoted and remediation efficiency of *A. alpina* to soil contaminated by Pb and Zn could be improved by suitable N application (0.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Keywords: *Arabis alpina* var. *parviflora* Franch; Pb; Zn; accumulation characteristic; N

植物修复技术主要是通过超富集植物根系吸收固定重金属,并转移到地面部分,采用收割植物的方式去除土壤中重金属。超富集植物是能超量吸收重

金属并将其运移到地上部的植物^[1]。而大多数超富集植物生物量小,生长缓慢,生长受到土壤肥力等限制。同时重金属的胁迫会导致植物矿质营养的缺乏,引起它们参与代谢和物质组成过程的紊乱失调,成为植物氮、磷、钾等营养元素缺乏或有效性降低的主要原因^[2]。因此,采取适宜的施肥措施促进超富集植物的生长和重金属吸收是值得研究的重要问题。已经有研究表明,适宜的 N 素施用促进 Pb 超富集植物绿叶

收稿日期:2013-04-20

基金项目:国家自然科学基金-云南联合基金(U1202236);国家自然科学基金(41261096)

作者简介:李元(1964—),男,云南大姚人,博士,教授,主要从事环境污染生态修复研究。

* 通信作者:祖艳群 E-mail: zuyanqun@ynau.edu.cn

苋菜、紫穗槐和羽叶鬼针草叶片叶绿素含量、生物量和 Pb 吸收的增加^[3]。N 肥能促进香根草地上部生长,显著提高地上部特别是叶的 Cd 和 Zn 含量,导致其修复效率显著增加^[4]。研究施肥对重金属胁迫条件下超富集植物的重金属富集特征及生长的影响,对探讨植物对重金属吸收、累积,提高重金属污染土壤的植物修复效率,构建通过适宜的施肥措施促进超富集植物的生长和重金属吸收、累积,促进土壤重金属污染的植物修复是十分必要的。

小花南芥(*Arabis alpina* var. *parviflora* Franch)是我们前期研究报道的对重金属 Pb、Zn 具有较强的富集能力的植物^[5]。小花南芥对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征^[6]、根际微生物与植物重金属耐性关系^[7-8]、硫营养和表面活性剂对小花南芥吸收累积铅锌的影响的研究^[9-10]已有报道。然而,氮肥对小花南芥生物量、生理和 Pb、Zn 累积特征的影响未见报道。本文研究 N 肥施用对小花南芥对 Pb、Zn 富集特征及生长的影响,探讨小花南芥对 Pb、Zn 污染土壤的修复效率,完善 Pb、Zn 污染土壤的植物修复的理论与技术,具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小花南芥(*Arabis alpina* var. *parviflora* Franch)属于十字花科,南芥属。一年生至多年生草本,少数半灌木状,有单毛、2~3 叉毛、星状毛或分枝毛。基生叶丛生,有时大头羽裂,全缘或有齿;茎生叶有柄或无柄,有时具叶耳,抱茎或不抱茎;总状花序;萼片直立,基部囊状,花瓣白色、紫色,倒卵形或楔形,具爪;花柱短,柱头截形;长角果线形,扁平,直立或下垂,果瓣有中脉及侧脉;种子 1 行,圆形或椭圆形,有翅或无翅。

小花南芥种子采于云南省会泽地区老公山铅锌矿区,东经 103°42'43"、北纬 26°38'49",海拔 2500 m。小花南芥采用种子播种的方式育苗,将种子先用水浸泡,于培养箱里培养 2~3 d 后(28℃左右)播于土壤,室温(22~27℃),6~7 d 后开始萌发。

1.2 试验设计

盆栽试验土壤的基本理化性质为:pH 值 7.43,全氮 0.9 g·kg⁻¹,全磷 1.6 g·kg⁻¹,全钾 6.2 g·kg⁻¹,速效磷 39.7 mg·kg⁻¹,速效钾 232.42 mg·kg⁻¹,碱解氮 52.87 mg·kg⁻¹,有机质 17.9 g·kg⁻¹,Pb 37.04 mg·kg⁻¹。每盆(300 mm×250 mm)装 4 kg 土壤,Pb(C₄H₆O₄Pb)和 Zn(ZnSO₄·7H₂O)都以溶液的形式按照 1000 mg·kg⁻¹ 均

匀混入土壤中,重金属混入土壤后,平衡一周时间再施肥和种植作物。氮肥(尿素)处理设 4 个梯度,以纯 N 计,分别为 0、0.1、0.3 g·kg⁻¹ 和 0.5 g·kg⁻¹;同时施 P 肥 0.3 g·kg⁻¹ 和 K 肥 0.1 g·kg⁻¹ (即磷肥 100 kg·hm⁻²,钾肥 60 kg·hm⁻²)作基肥施入土壤并混合均匀。各处理设 3 次重复。

选择生长一致的小花南芥幼苗移栽,每盆 8 株,于移栽后 60 d 测量土壤 pH 值和土壤中重金属不同形态(水溶态及可交换态、铁锰氧化物结合态、有机质结合态和残渣态)的含量、小花南芥的地上部分的生物量、地下部分的生物量和小花南芥对重金属 Pb、Zn 的累积量。

1.3 指标测定

植物收获后洗净,将地上部分和地下部分分开,105℃杀青 30 min,然后 65~70℃烘干、磨碎待用。同时采集土壤,制 0.25、1 mm 和 2 mm 的土样待用。

土壤中总 Pb、Zn 含量的测定采用王水-高氯酸消煮-原子吸收光谱法;土壤 pH 值采用 pH 计测定。土壤中 Pb、Zn 的不同形态的含量采用连续浸提-原子吸收分光光度法测定(TAS-990 原子吸收分光光度计,北京)。植物样中 Pb、Zn 的测定采用双硫脲比色法。叶绿素含量:按张宪政方法测定(722 型分光光度计,北京)^[11]。细胞质膜透性采用电导仪测定电导率(DDS-307 型电导仪,上海)。脯氨酸含量测定采用 80%的乙醇提取,722 型分光光度法测定^[11]。

富集系数=植物地上部某元素的含量/该元素在土壤含量。

转移系数=植物地上部某种元素含量/植物根部该元素含量。

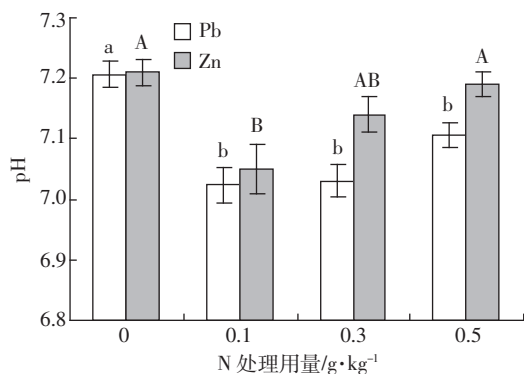
1.4 统计分析方法

数据分析采用 DPS(Version3.11)数据处理系统进行方差分析和多重比较,采用 SPSS(11.0) 数据处理进行相关性分析,用 Excel 2000 软件对数据进行统计分析,均值的比较采用 LSD(Least-significant difference)多重比较方法,运用 *t* 检验分析处理和对照之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮素处理对土壤 pH 值和 Pb、Zn 的不同形态含量的影响

Pb、Zn 胁迫条件下,施入氮肥后,土壤 pH 比对照显著下降(图 1)。不同用量的氮肥处理之间土壤 pH 值没有显著的差异。



不同小写字母表示 Pb 胁迫条件下的不同 N 处理之间的差异显著;不同大写字母表示 Zn 胁迫条件下的不同 N 处理之间的差异显著, $P < 0.05$ 。下同

图 1 氮素处理对土壤 pH 值的影响

Figure 1 Soil pH value of *A. alpinal* under Pb and Zn stress with N application

施 N 处理条件下,土壤 Pb 的不同形态所占的比例发生一定的变化,特别是水溶态和可交换态含量显著增加,从 3.9%增加到 11.5%~13.7%,增加了 3.2~3.7 倍(表 1)。铁锰氧化物结合态含量从 2.5%增加到 5.3%~6.6%,增加了 1.3~1.7 倍。有机物结合态含量也有显著增加。土壤残渣态 Pb 含量以对照最高,占 83.2%,施用 N 素显著降低残渣态含量及其比例。除残渣态外,其他各形态含量及所占比例均有一定的上升,施 N 导致土壤中 Pb 以小花南芥易于吸收的形态存在,说明施用 N 素可能导致 Pb 生物有效性增加。

其中,施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理,小花南芥土壤中 Pb 的生物有效态含量所占比例最高。

施 N 处理条件下,土壤 Zn 水溶态和可交换态含量显著增加,从 13.4%增加到 19.3%~23.5%。各施 N 量处理之间土壤 Zn 水溶态和可交换态含量也具有一定的差异,施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理,小花南芥土壤中 Zn 的水溶态和可交换态含量所占比例最高。铁锰氧化物结合态含量从 2.9%增加到 6.5%。小花南芥土壤中 Zn 有机物结合态含量也有所增加。残渣态 Zn 含量以对照最高,残渣态所占比例也最高。即施用 N 素 60 d 后,除残渣态外,其他各形态含量及所占比例均有一定的上升,有效性有增加的趋势,施 N 导致土壤中 Zn 以小花南芥易于吸收的形态存在,说明施 N 素可能导致 Zn 生物有效性增加。其中,施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理,小花南芥土壤中 Zn 的生物有效态含量所占比例最高。

2.2 氮素处理对小花南芥叶绿素、脯氨酸和膜透性的影响

对照的小花南芥叶片叶绿素含量最低(图 2)。施肥处理后的小花南芥叶绿素含量均高于对照。且随施肥水平的增高而增加。其中叶绿素含量最高为施 N $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理。小花南芥叶片叶绿素含量在 N $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理之间没有显著差异。

Pb 或 Zn 胁迫的小花南芥叶片内脯氨酸含量在 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时比对照高,但是施 N $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降。Pb 胁迫条件下,施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$

表 1 氮素处理对土壤中重金属 Pb 的不同形态含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)及比例(%)的影响

Table 1 Contents of different form Pb in soil and its percentage with N application

N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	水溶态及可交换态	铁锰氧化物结合态	有机物结合态	残渣态
0	30.0±1.0c(3.9)	19.2±1.4c(2.5)	82.0±7.9c(10.5)	648.2±17.9a(83.2)
0.1	109.1±0.8a(13.7)	52.5±1.7a(6.6)	128.9±5.1a(16.2)	506.4±14.1d(63.6)
0.3	96.8±1.1b(11.9)	46.3±2.1b(5.7)	112.7±5.1b(13.8)	558.4±17.0c(68.6)
0.5	95.5±1.3b(11.5)	43.6±2.0b(5.3)	109.4±5.6b(13.2)	581.6±12.2b(70.1)

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P < 0.05$);括号内数据为比例。

表 2 氮素处理对土壤中重金属 Zn 的不同形态含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)及比例(%)的影响

Table 2 Contents of different form Zn in soil and its percentage with N application

N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	水溶态及可交换态	铁锰氧化物结合态	有机物结合态	残渣态
0	107.8±0.6c(13.4)	23.4±0.9b(2.9)	47.1±0.6b(5.9)	622.8±0.6a(77.7)
0.1	192.8±1.3a(23.5)	53.3±1.2a(6.5)	98.9±0.9a(12.0)	475.1±0.9c(57.9)
0.3	175.1±0.9b(23.4)	56.3±1.4a(6.5)	103.7±0.7a(12.1)	524.9±0.7b(61.0)
0.5	173.7±1.0b(19.3)	58.1±1.6a(6.5)	98.5±1.0a(11.0)	568.7±1.0b(63.3)

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P < 0.05$);括号内数据为比例。

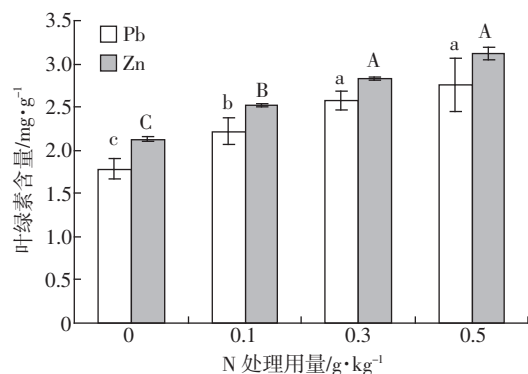


图 2 氮素处理对小花南芥叶片叶绿素含量的影响

Figure 2 Chlorophyll contents in leaves of *A. alpinal* under Pb and Zn stress with N application

的处理时小花南芥叶片内脯氨酸含量最高, 为 $40.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 3)。Zn 胁迫条件下, 在施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理脯氨酸含量之间没有显著差异, 其中 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时最高, 为 $47.18 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

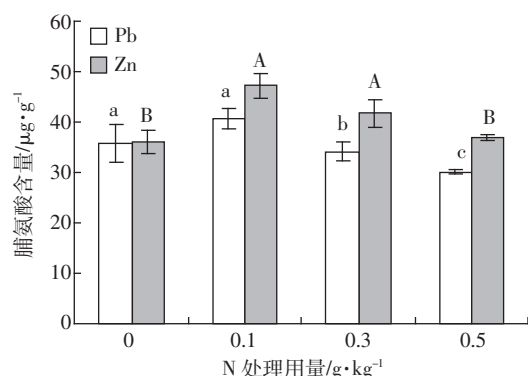


图 3 氮素处理对小花南芥叶片脯氨酸含量的影响

Figure 3 Proline contents in leaves of *A. alpinal* under Pb and Zn stress with N application

对照的小花南芥叶片相对电导率值较低(图 4)。施肥处理后的小花南芥叶片相对电导率值除 Zn 胁迫下施 N $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理外, 均高于对照。且随施肥水平的增高而增加。其中 Pb 胁迫下叶片相对电导率值最高为施 N $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理, Zn 胁迫下叶片相对电导率值最高为施 N $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理。

2.3 氮素处理对小花南芥生物量和 Pb 累积特征的影响

Pb 或 Zn 胁迫条件下, 小花南芥生物量随施 N 水平的增高而增加。施 N $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理小花南芥生物量显著高于施 N $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理(图 5)。

小花南芥地上部和地下部 Pb 含量随着 N 素的施入而增加, 但随着施 N 量的增加而显著下降。从累

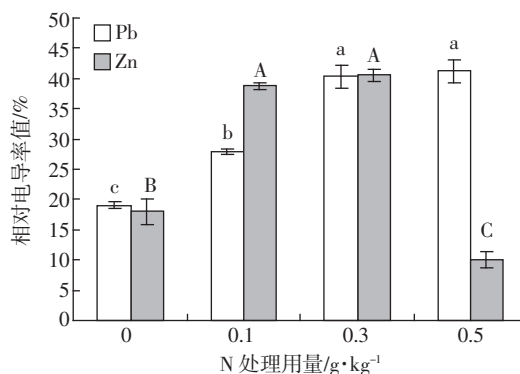
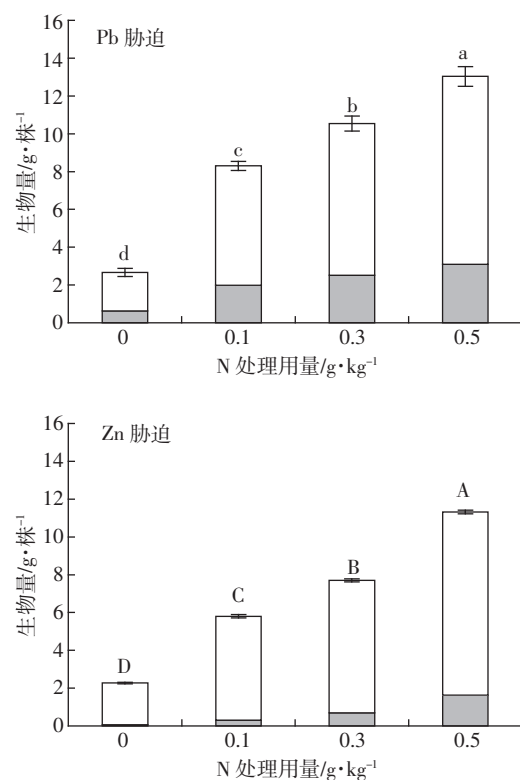


图 4 氮素处理对小花南芥叶片相对电导率值的影响

Figure 4 Membrane permeability in leaves of *A. alpinal* under Pb and Zn stress with N application



□ 地上部分生物量 ■ 地下部分生物量

图 5 氮素处理对小花南芥生物量的影响

Figure 5 Biomass of *A. alpinal* under Pb and Zn stress with N application

积量来看, Pb 在小花南芥地上部和地下部的累积量的变化趋势与 Pb 含量一致, 即施 N 促进了 Pb 的累积, 但随施 N 量的增加而显著下降, 其中施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时小花南芥地上部和地下部 Pb 累积量最高(表 3)。Pb 胁迫下, 施 N 使富集系数和转移系数增加, 但是随着施 N 量的增加而下降。施 N $0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理小花南芥对 Pb 的富集系数、转移系数均大于 1。

表 3 氮素处理对小花南芥对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征

Table 3 Pb and Zn accumulation characteristic of *A. alpinal* with N application

N/g·kg ⁻¹	地上部含量/mg·kg ⁻¹		地下部含量/mg·kg ⁻¹		富集系数		转移系数	
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
0	129.9±9.0d(0.26)	568.8±10.0c(1.26)	323.1±11.8c(0.20)	562.6±15.5c(0.03)	0.17±0.04d	0.71±0.03c	0.40±0.02c	1.01±0.02b
0.1	824.2±25.1a(5.20)	1 043.7±19.0a(5.73)	743.2±32.0a(1.74)	840.3±23.5a(0.23)	1.04±0.05a	1.27±0.04a	1.11±0.04a	1.24±0.03a
0.3	637.3±21.3b(5.12)	737.9±20.2b(5.17)	794.6±21.2a(1.99)	889.0±21.1a(0.61)	0.78±0.03b	0.86±0.02b	0.80±0.03b	0.83±0.04b
0.5	254.7±12.1c(2.53)	491.7±22.0d(4.76)	541.8±15.6b(1.68)	793.0±18.6b(1.29)	0.31±0.01c	0.55±0.02d	0.47±0.02d	0.62±0.02b

注:同列数据后的不同字母表示差异显著($P<0.05$);括号内数据为累积量(mg·株⁻¹)。

其余各处理的富集系数、转移系数均小于 1。

小花南芥地上部和地下部 Zn 含量随着 N 素的施入而增加,施 N 0.1 g·kg⁻¹ 时 Zn 含量在小花南芥地上部和施 N 0.3 g·kg⁻¹ 在地下部均达到最高。从累积量来看,Zn 在小花南芥地上部和地下部的累积量的变化趋势与 Zn 含量一致,即施 N 促进了 Zn 的累积,施 N 0.1 g·kg⁻¹ 时 Zn 在小花南芥地上部的累积量最高,地下部 Zn 的累积量随着 N 素的增加而增加。Zn 胁迫下,施 N 0.1 g·kg⁻¹ 时 Zn 富集系数和转移系数有所增加,施 N 0.5 g·kg⁻¹ 导致富集系数和转移系数下降。

3 讨论

尿素为酰胺态氮肥,施入土壤后,在脲酶的作用下产生 NH₄⁺,植物吸收 NH₄⁺时引起 H⁺的分泌,造成根际周围酸化,使土壤中重金属的有效性增加,土壤对重金属吸附减少,提高了超富集植物对重金属的积累量^[12-13]。Young 等发现仅 NH₄⁺-N 的硝化作用可使表土不同土层 pH 下降 0.2~1.4 单位^[14]。楼玉兰等施用 NH₄⁺-N 处理的玉米根系和地上部 Cu、Zn 和 Pb 的含量均显著高于 NO₃⁻-N 处理,其增幅均在 20% 左右^[15]。施入铵态氮肥或酰胺态氮肥将增加植物组织中的重金属含量。pH 值与小花南芥根系中 Pb($Y=17\ 695.7-2\ 410.3X$, $F=83.91$, $r=0.988\ 4$, $P<0.05$, $n=4$)和小花南芥地上部分 Zn 含量($Y=24\ 505.5-3\ 329.1X$, $F=32.35$, $r=0.970\ 6$, $P<0.05$, $n=4$)呈显著负相关。

土壤中重金属对植物的生物有效性和植物对重金属的吸收在很大程度上取决于它在土壤中的形态。氮肥对重金属在土壤中吸附、解吸、形态转变、迁移率大小有很显著的影响^[13]。土壤中以有效态形式存在的重金属容易被植物吸收,而土壤 pH 值的降低能够显著增加土壤中重金属的有效态含量,从而促进植物对重金属的吸收。水溶态和可交换态重金属在施 N 的条件下增加显著,能被植物吸收。本试验中 Pb 和 Zn 胁迫条件下,pH 值与 Pb 的铁锰氧化物结合态含

量呈显著负相关性($Y=1\ 162.76-158.25X$, $F=19.94$, $r=0.953\ 4$, $P<0.05$, $n=4$)。铁锰氧化物结合态重金属一般是以矿物的外囊物和细粉散颗粒存在,活性的铁锰氧化物比表面积大,吸附或共沉淀阴离子^[16]。

小花南芥的叶绿素含量和生物量随施肥水平的增加而增加,且均高于未施肥的对照。施肥有利于作物的生长,促进植物体的正常代谢,施 N 量与植物的叶绿素含量呈显著正相关(Pb 胁迫条件下, $Y=1.92+1.86X$, $F=20.73$, $r=0.955\ 0$, $P<0.05$, $n=4$; Zn 胁迫条件下, $Y=2.22+1.86X$, $F=50.54$, $r=0.979\ 8$, $P<0.05$, $n=4$)。适当施加 N 肥(尿素)显著促进东南景天的生长,提高其干物质产量^[17]。可能由于一方面氮肥的施用能减轻重金属离子的毒害作用,减轻重金属胁迫的毒害程度;另一方面,氮对植物生长的促进作用,导致植物对重金属的稀释效应。脯氨酸是含 N 的化合物,脯氨酸与植物对金属的耐性、金属通过木质部的运输、液泡对金属的隔离等有关。重金属进入根细胞质后,以游离金属离子形态存在,但细胞质中游离金属离子过多,对细胞产生毒害作用,干扰细胞的正常代谢,细胞质中金属可能与细胞质中的有机酸、氨基酸、多肽和无机物等结合,通过液泡膜上的运输体或通道蛋白转入液泡中。脯氨酸是含 N 的化合物,其与植物金属的耐性有关。氮肥能减轻重金属离子对植物的毒害作用。在蚕豆的绿色组织中,As、Cu 和 Zn 等金属与其他非生物胁迫能够诱导富含脯氨酸的蛋白基因编码的表达^[18]。低 N(0.1~0.3 g·kg⁻¹)处理时,小花南芥的叶片脯氨酸含量上升,在一定程度上促进了植物抗性的提高,但是高 N(0.5 g·kg⁻¹)处理时,小花南芥的叶片脯氨酸含量下降的原因可能与植物由于生物量的显著增加而出现的稀释效应有关。N、脯氨酸与植物金属的耐性的联系。

施 N 导致小花南芥的叶片相对电导率上升的原因还可能是植物对体内重金属含量上升的一种直接的效应。施 N 促进了植物对重金属的吸收和累积,小

花南芥叶片的相对电导率表现出比抗性的产生更快的效应,即使植物能够通过相关酶表达产生脯氨酸,增强对重金属的抗性。但是,重金属对膜系统的影响仍然存在^[19],因此对小花南芥的代谢和物质迁移的潜在影响需要进一步的深入探讨。而 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 锌胁迫时电导率异常低的结果可能与盆栽控制条件不严格有关,还需要进一步研究。

小花南芥地上部和地下部 Pb 和 Zn 含量和累积量随着 N 素的施入而增加,说明 N 素特别是尿素的施用在一定程度上增加了重金属在土壤中的有效性和植物对重金属吸收的能力^[20],同时,由于生物量的增加,也促进了小花南芥对土壤中 Pb 和 Zn 的去除效率。因此,施用 N 肥,特别是铵态 N 的施用对于提高小花南芥修复 Pb 和 Zn 污染土壤的效率是一条有效的途径。施 N $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时,植物地上部分 Pb 和 Zn 含量和累积量最高,而施 N $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时,植物根 Zn 累积量最高。说明 Pb 和 Zn 对 N 素的效应具有一定的差异,对于不同重金属污染土壤的修复施用 N 素的水平需要具体分析和对待。施 N $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时,植物 Pb 和 Zn 含量和累积量比其他氮素处理低,可见过高的 N 的施用,也可能成为植物生长的胁迫因子^[21],限制和降低小花南芥的修复效率。

Pb 胁迫下,施 N 使小花南芥富集系数和转移系数增加,但是随着施 N 量的增加而下降。Pb 胁迫条件下,氮肥(尿素) $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理时最高,可见施 N 能促进 Pb 在小花南芥地上部分的富集和从地下部分向地上部分的迁移^[19]。李继光等研究表明,适当施加 N 肥(尿素)促进了东南景天对 Cd 的吸收及向地上部分的转运^[17]。Zn 胁迫下,施 N $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 导致富集系数和转移系数最大。Zn 在小花南芥中的行为和植物的中 N 和 Zn 的交互作用需要进一步深入研究。

4 结论

适量施 N 能促进小花南芥对土壤中 Pb 和 Zn 的吸收、累积,提高小花南芥对 Pb 和 Zn 污染土壤的修复效率。氮素的施用能够促进小花南芥的生长、叶绿素含量和生物量的提高,导致脯氨酸含量的改变和相对电导率的增加,Pb 和 Zn 对小花南芥的胁迫能够在一定程度上得到缓冲。施 N $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 能显著提高小花南芥对 Pb 和 Zn 的含量和累积量,促进了小花南芥对土壤中 Pb 和 Zn 的吸收和净化,在一定程度上为促进小花南芥对 Pb 和 Zn 污染土壤的修复提供了有效的途径。

参考文献:

- [1] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the *Denus silence* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. *Plant and Soil*, 1983, 73:377-385.
- [2] 祖艳群,李元, Bock L, 等. 重金属与植物 N 素营养之间的交互作用及其生态学效应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):7-14.
ZU Yan-qun, LI Yuan, Bock L, et al. Interactions between heavy metals and nitrogen and their ecological effects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):7-14.
- [3] 聂俊华,刘秀梅,王庆仁. Pb 超富集植物对营养元素 N、P、K 的响应[J]. 生态环境, 2004, 13(3):306-309.
NIE Jun-hua, LIU Xiu-mei, WANG Qing-ren. Effects of nutrient elements on the lead uptake by hyperaccumulators[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3):306-309.
- [4] 郑小林,朱照宇,黄伟雄,等. N、P、K 肥对香根草修复土壤镉、锌污染效率的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3):560-564.
ZHENG Xiao-lin, ZHU Zhao-yu, HUANG Wei-xiong, et al. Effects of N, P, K fertilizer on phytoremediation effectiveness of cadmium and zinc pollution in *Vetiver grass*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(3):560-564.
- [5] Zu Y Q, Li Y, Chen J J, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5):755-762.
- [6] 方其仙,祖艳群,湛方栋,等. 小花南芥 (*Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch) 对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):433-437.
FANG Qi-xian, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Accumulation characteristic of *Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch to Pb and Zn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):433-437.
- [7] 湛方栋,何永美,李元,等. 云南废弃铅锌矿区和非矿区小花南芥根际真菌的分离及其铅耐性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3):599-604.
ZHAN Fang-dong, HE Yong-mei, LI Yuan, et al. Isolation and Pb tolerance of rhizosphere fungi of *Arabis alpina* in abandoned lead-zinc mining and non-mining area[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(3):599-604.
- [8] 湛方栋,何永美,李元,等. 云南会泽废弃铅锌矿区和非矿区小花南芥根际真菌的耐镉性[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(4):572-576.
ZHAN Fang-dong, HE Yong-mei, LI Yuan, et al. Isolation and Cd tolerance of rhizosphere fungi of *Arabis alpina* in abandoned lead-zinc mining and non-mining area[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(4):572-576.
- [9] 王吉秀,祖艳群,陈海燕,等. 表面活性剂对小花南芥(*Arabis alpina* var. *parviflora* France)累积铅锌的促进作用[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8):1923-1929.
WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, CHEN Hai-yan, et al. Effects of surfactants on accumulate of lead and zinc in *Arabis alpina* var. *parviflora* Franch[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(8):1923-1929.
- [10] 王吉秀,太光冲,祖艳群,等. 硫营养对小花南芥(*Arabis alpinal* var.

- parviflora* France) 累积铅锌的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1064–1069.
- WANG Ji-xiu, TAI Guang-chong, ZU Yan-qun, et al. Effects of sulfur application on growth and lead and zinc accumulation contents in *Ara-bis alpina* var. *parviflora* Franch[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1064–1069.
- [11] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 57–59.
- ZHANG Xian-zheng. Crop physiological research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1992: 57–59.
- [12] Dalong F, Baffle J, Haerdi W. Study of the influence of fulvic substances on the adsorption for copper on the kaolinite surface[J]. *Environmental Science and Technology*, 1984, 18: 135–141.
- [13] 李波, 青长乐, 周正宾, 等. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在治污中的应用[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(6): 37–40.
- LI Bo, QING Chang-le, ZHOU Zheng-bin, et al. Effects of N, P and organic matter on behavior of heavy metals in soils and its application[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(6): 37–40.
- [14] Young S R, Black A S, Conyers M K. Distribution of nitrification with in surface soils under pasture[J]. *Community of Soil Science and Plant Analysis*, 2002; 33(9–10): 1507–1518.
- [15] 楼玉兰, 章永松, 林咸永. 氮肥形态对污泥农用土壤中重金属活性及玉米对其吸收的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(4): 392–398.
- LOU Yu-lan, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong. Effects of forms of nitrogen fertilizer on the bioavailability of heavy metals in the soils amended with biosolids and their uptake by corn plant[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences)*, 2005, 31(4): 392–398.
- [16] 魏俊峰, 人清, 金莲, 等. 广州城市水体沉积物中重金属形态分布研究[J]. 土壤与环境, 1999(20): 10–14.
- WEI Jun-feng, REN Qing, JIN Lian, et al. Study on distribution of heavy metal formation in water sediments in Guangzhou City[J]. *Soil and Environment*, 1999(20): 10–14.
- [17] 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 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.
- [18] Chai T Y, Didierjean L, Burkard G, et al. Expression of a green tissue-specific 11 kDa proline-rich protein gene in bean in response to heavy metals[J]. *Plant Science*, 1998, 133(1): 47–56.
- [19] 朱佳文, 邹冬生, 向言词, 等. 铅锌尾矿重金属胁迫下秸秆对蓖麻生理特性和重金属积累的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(3): 325–329.
- ZHU Jia-wen, ZOU Dong-sheng, XIANG Yan-ci, et al. Effects of straw addition on physiological parameters and uptake of heavy metals in *Ricinus communis* under the stress of Pb/Zn mine tailing[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Nature Science)*, 2012, 38(3): 325–329.
- [20] Eriksson J E. Effect of nitrogen-containing fertilizer on solubility and plant uptake of cadmium, water[J]. *Air and Soils Pollution*, 1990, 9: 335–368.
- [21] 贺帆. 不同氮肥水平对水稻冠层小气候和群体健康的影响[J]. 安徽农业科学, 2010(5): 2285–2287, 2338.
- HE Fan. Effects of N rates on canopy microclimate and community health in irrigated rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010(5): 2285–2287, 2338.