

氮肥形态对伴矿景天生长和锌镉吸收性的影响研究

汪洁^{1,2}, 沈丽波¹, 李柱¹, 吴龙华^{1*}, 骆永明^{1,3}

(1.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国科学院海岸带环境过程重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东 烟台 264003)

摘要:以锌镉超积累植物伴矿景天为供试植物,采用单边根袋法盆栽试验研究了铵态氮肥和硝态氮肥施用对植物根际和非根际土壤中 Zn、Cd 的化学行为,以及伴矿景天生物量和 Zn、Cd 吸收性的影响。结果表明,施用硝态氮肥更能提高根际土壤 Zn 和 Cd 的生物有效性,显著增大植物体内 Zn 和 Cd 浓度($P<0.05$),增率分别为 38.2%和 110%,但施用铵态氮肥更有利于促进伴矿景天的生长,增率为 49.4%;氮肥形态对伴矿景天生物量的影响显著大于对植物地上部 Zn、Cd 浓度的效应,施用铵态氮肥显著提高 Zn 和 Cd 总吸收量,增率分别为 53.3%和 123%,施用硝态氮肥对其则无显著影响。施用铵态氮肥较硝态氮肥更能提高伴矿景天的污染土壤 Zn、Cd 吸收修复效率。

关键词:氮肥形态;伴矿景天;Zn;Cd;吸收性

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)11-2118-07 doi:10.11654/jaes.2014.11.007

Effects of Nitrogen Forms on Growth and Zn/Cd Uptake of *Sedum Plumbizincicola*

WANG Jie^{1,2}, SHEN Li-bo¹, LI Zhu¹, WU Long-hua^{1*}, LUO Yong-ming^{1,3}

(1.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Different forms of nitrogen affect not only plant growth and metabolism, but also heavy metal absorption by plants. A pot experiment was conducted to study the effects of different nitrogen forms (either NO_3^- or NH_4^+) on soil solution Zn and Cd concentrations in rhizospheric and bulk soils, and biomass and Zn and Cd uptake of metal hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* using a unilateral root bag method. Application of NO_3^- increased bio-availability of Zn and Cd in rhizospheric soil and thus the concentrations of Zn and Cd in *Sedum plumbizincicola*. In NO_3^- treatment, plant Zn and Cd concentrations were respectively 38.2% and 110% greater than the control. However, NH_4^+ treatment had no effects on bioavailability and plant concentrations of Zn and Cd, but enhanced plant biomass by 49.4%. Different nitrogen forms showed greater effects on the biomass than on plant Zn and Cd concentrations. Treatment with NH_4^+ significantly increased total amount of plant Zn and Cd uptake by 53.3% and 123%, respectively, but NO_3^- did not. These results indicate that applying ammonium fertilizer would enhance phytoextraction efficiency of Zn and Cd contaminated soils by *Sedum plumbizincicola*.

Keywords: nitrogen forms; *Sedum plumbizincicola*; Zn and Cd; plant uptake

近年来,土地的开发利用和经济的快速发展导致我国土壤重金属污染日益严重。土壤重金属污染不仅破坏了生态系统的稳定性^[1],重金属元素在食物链中的传递与富集也对人类的健康产生危害^[2]。因此,从土地资源保护和生态可持续发展方面考虑,重金属污染土壤的治理技术在环境科学领域受到了广泛

的关注。与物理化学修复技术比较,以重金属超积累植物为主的植物吸取修复技术以其低成本、绿色环保等优势被广泛认可及应用^[3-5]。于浙江矿区发现的 Zn、Cd 超积累植物伴矿景天(*Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou ex L. H. Wu)能有效地修复不同程度 Zn、Cd 污染的土壤,且其以富集能力强、生物量大、适于刈割等特性在污染土壤修复方面显现出广阔的应用前景^[6-9]。

施肥是提高农田土壤肥力和增加农作物产量的重要农艺措施之一^[10-11]。Fayiga 等^[12]的研究表明,施肥也是提高超积累植物修复污染土壤效率的重要辅助

收稿日期:2014-04-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)课题(2012AA06A204);国家自然科学基金项目(41325003)

作者简介:汪洁(1990—),女,浙江奉化人,硕士研究生,从事重金属污染土壤与植物修复研究。E-mail:jiewang@issas.ac.cn

*通信作者:吴龙华 E-mail:lhwu@issas.ac.cn

措施。氮作为植物生长发育最主要的必需营养元素之一,在田间也常是植物生长首要的限制性营养元素。已有研究表明,施用氮肥可极大地促进重金属超积累植物天蓝遏蓝菜(*Nocca caerulea*)的生长和对重金属 Zn、Cd 的吸收^[13-14]。重金属胁迫条件下,不同形态的氮素可影响植物的生长代谢及重金属吸收能力。Willaert 等^[15]发现 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 能促进菠菜对 Cd 的吸收,水培条件下莴苣经 NH_4^+-N 处理比 NO_3^--N 处理更能富集 Cd。对印度芥菜和 Cd 高积累油菜的研究结果表明, NH_4^+-N 处理下植物对 Cd 的吸收量显著高于 NO_3^--N 处理^[16-17]。伴矿景天作为 Zn、Cd 污染土壤修复的一种重要超积累植物,目前研究更多地集中于肥料品种筛选及某一元素施用量的探索上^[16,18-21],多数以水培或砂培形式研究不同形态氮肥对植物生长和重金属吸收性的影响^[22-25],盆栽条件下的研究较少^[26],且不同形态氮肥对其 Zn、Cd 污染土壤修复效率的影响尚未有研究。

因此,本文通过开展盆栽试验,采用单边根袋法研究铵态氮肥和硝态氮肥施用对伴矿景天根际和非根际土壤中 Zn、Cd 的化学行为、伴矿景天生物量以及 Zn、Cd 吸收量的影响,以期对伴矿景天在 Zn、Cd 污染土壤上的修复实践提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试 Zn、Cd 超积累植物伴矿景天采自浙江杭州郊区某矿区,采用种子育苗,蛭石做培养基,营养液为 Hoagland 全营养液,于中国科学院南京土壤研究所植物生长室进行培养。培养条件为:温度 25℃(光照)/20℃(黑暗),相对湿度 65%~70%,光照时间 14 h,光强 $1.5 \times 10^4 \text{ lx}$ 。待幼苗长出根系后选择大小相近、长势一致的幼苗移栽,每盆定植幼苗 4 株。幼苗成活后通过称重法每天浇去离子水,保持土壤含水量为最大田间持水量的 70%。

供试土壤为普通筒育水耕人为土(Typic Hapli-Stagnic Anthrosols),采自浙江杭州郊区某重金属污染农田,该区土壤因大量重金属以粉尘的形式释放到大气,再沉降到附近农田而受重金属污染严重。土壤样品装袋运回实验室,风干、过 2 mm 尼龙筛,测定其含水量、待用。其土壤 pH 为 6.47、有机质 $35.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、阳离子交换量(CEC) $12.9 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $15.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $91.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $9.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $42.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土

壤重金属全量分别为 Cu $56.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd $0.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb $62.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Zn $223 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用单边根袋法^[27]开展根际试验,共设 3 个处理: N0P1K2(记为 CK,只施磷钾肥,不施氮肥), N1P1K2- NH_4^+ (记为 NH_4^+-N ,施铵态氮肥), N1P1K2- NO_3^- (记为 NO_3^--N ,施硝态氮肥),每处理 5 次重复。根盒尺寸为 $90 \times 70 \times 70$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高,单位 mm,下同),根袋尺寸为 $70 \times 10 \times 70$ 。每盆装土 360 g(烘干基),每个根袋内种植景天 4 株。根袋内部以及距根袋 5 cm 处分别安装土壤溶液取样器(荷兰产)。氮肥用量均为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮肥用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,硝态氮肥为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$;磷肥用 KH_2PO_4 ,用量为 P 素 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;钾肥用 K_2SO_4 ,用量为 K 素 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。磷肥作基肥全部施入,氮钾肥 1/2 作基肥施入、1/2 在植物培养一个月后作追肥施入。

盆栽试验于中国科学院南京土壤研究所植物生长室进行,试验采用随机排列方式,并定时交换位置以减小因光照强度不同带来的误差。每天浇去离子水,保持土壤含水量为最大田间持水量的 70%。伴矿景天培养第 70、75 d 时分别抽取土壤溶液,测定土壤溶液中可溶性有机碳(DOC)、 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 及 Cd、Zn 浓度。第 80 d 时收获,采集根际和非根际土壤样品和伴矿景天地上部样品。

1.3 样品处理与分析

将收获后的伴矿景天地上部用自来水洗净,随后用去离子水润洗 3 次,105℃杀青 30 min,70℃烘至恒重,记录干物重。植物样品通过不锈钢粉碎机粉碎后采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消化,原子吸收光谱法[Varian SpectrAA 220FS(火焰)、220Z(石墨炉)]测定消化液中 Zn、Cd 浓度。分析过程所用试剂均为优级纯,试验所用水为超纯水。植物分析过程加入国家标准参比物质(GSV-2),测定结果均符合质量控制要求。植物全氮测定参照土壤农化分析^[28]。

盆栽试验采集的土壤溶液中 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度用连续流动分析仪[Skalar San++System(荷兰 Skalar 仪器公司)]测定;Zn、Cd 采用 X7 ICP-MS(DZ/T0223-2001)测定;DOC 采用 Multi N/C 2100 TOC 仪[德国耶拿(Jena)公司生产]测定。将收获植物后的土壤样品与 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ (pH 7)按 1:5 的土液比连续振荡 16 h,3000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,将上清液过滤,用火焰原子吸收法测定 NH_4OAc 提取态 Zn、Cd;收获植物时采集根际及非根际(距离根袋 5 cm)土壤,与 2

mol·L⁻¹ KCl 浸提液按 1:5 的土液比振荡 1 h, 取出静置后收集滤液, 测定土壤 KCl 提取态 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N。

1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 及 SPSS 13.0 软件进行数据统计分析, 不同处理间的差异性分析通过一元方差分析(LSD)实现, 显著性水平定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 对土壤溶液 DOC、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 Zn、Cd 浓度的影响

根际环境下, 施氮处理对土壤 DOC 浓度无显著影响(表 1)。NO₃⁻-N 处理显著提高了土壤溶液中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度, 且 NO₃⁻-N 浓度为 NH₄⁺-N 处理的 29.2 倍; 非根际环境下, 施氮处理显著降低了土壤溶液中 DOC 浓度, 提高了 NO₃⁻-N 浓度, 但对 NH₄⁺-N 浓度无显著影响。两种形态氮肥对非根际土壤溶液中 NH₄⁺-N 浓度均无显著性影响, 但 NO₃⁻-N 处理下根际土壤溶液中 NH₄⁺-N 浓度显著高于 NH₄⁺-N 处理, 可能与不同氮肥处理影响了土壤氮素的转化有关, 有待深入探讨; 两种形态氮肥处理, 无论根际或非根际, 其土壤溶液中均表现为 NO₃⁻-N 浓度远高于 NH₄⁺-N 浓度, 与常规现象一致。

表 2 中给出了不同氮肥处理下根际和非根际土壤溶液中 Zn 和 Cd 的浓度。与 CK 处理比较, NH₄⁺-N 处理对根际土壤溶液 Zn 和 Cd 浓度均无显著影响, NO₃⁻-N 处理下土壤溶液中 Zn 和 Cd 浓度则分别显著增加 291% 和 61.9%。非根际环境下, 施氮处理均显著提高了土壤溶液中 Zn 和 Cd 的浓度, 但 Zn 和 Cd 的浓度在 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 处理间无显著性差异。

2.2 对土壤可提取态 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度的影响

与 CK 处理比较, NO₃⁻-N 处理下土壤可提取态 NO₃⁻-N 浓度显著增加, 但 NH₄⁺-N 处理对土壤可提取态 NO₃⁻-N 浓度无显著影响(图 1)。不同施肥处理条

表 2 不同氮肥处理下伴矿景天根际与非根际土壤溶液中 Zn、Cd 浓度变化

Table 2 Concentrations of Zn and Cd in soil solution from rhizospheric and bulk soils of *Sedum plumbizincicola* in different N treatments

处理 Treatment	Zn 浓度/mg·L ⁻¹ Concentrations of Zn/mg·L ⁻¹		Cd 浓度/μg·L ⁻¹ Concentrations of Cd/μg·L ⁻¹	
	根际 Rhizosphere	非根际 Bulk	根际 Rhizosphere	非根际 Bulk
CK	7.70±0.50b	19.2±1.8b	63±2b	28±2b
NH ₄ ⁺ -N	12.0±1.0b	31.6±2.4a	87±1ab	56±7a
NO ₃ ⁻ -N	30.1±5.0a	26.5±2.6ab	102±8a	55±8a

件下, 土壤可提取态 NH₄⁺-N 浓度与 CK 处理均无显著性差异。

2.3 对土壤 NH₄OAc 提取态 Zn、Cd 浓度的影响

从图 2 可以看出, 除 NO₃⁻-N 处理根际与非根际的土壤提取态 Zn 浓度无显著差异外, 其余处理均存在 Zn 和 Cd 的根际富集效应。与 CK 处理比较, 施氮处理根际土壤可提取态 Zn 和 Cd 浓度无显著差异; 非根际条件下, NO₃⁻-N 处理土壤可提取态 Zn 浓度显著高于 NH₄⁺-N 处理, 为其 1.32 倍。

2.4 对植物体 Zn、Cd 浓度及吸收量的影响

CK、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 处理下, 伴矿景天的生物量分别为 (0.83±0.06)、(1.24±0.04)、(0.64±0.04) g·pot⁻¹, 三者之间差异达到显著性水平。与 CK 处理比较, 伴矿景天地上部生物量在 NH₄⁺-N 处理下显著增加 49.4%, 但在 NO₃⁻-N 处理下显著下降 22.9%。施肥处理影响伴矿景天体内的 Zn、Cd 浓度(图 3)。NO₃⁻-N 处理显著增加植物体内 Zn 和 Cd 浓度, 增加率分别为 38.2% 和 110%, NH₄⁺-N 处理则对 Zn 和 Cd 浓度无显著影响。因为两种不同氮肥对伴矿景天生物量、Zn 和 Cd 浓度的影响表现出相反的规律, 所以进一步通过 Zn 和 Cd 总吸收量评价氮肥形态对污染土壤 Zn 和 Cd 修复效率的影响。与 CK 处理比较, NH₄⁺-N 处理显著提高 Zn 和 Cd 总吸收量, 增率为 53.3% 和 123%, NO₃⁻-N 处理则对两种重金属元素的总吸收量无显著

表 1 不同氮肥处理下伴矿景天根际与非根际土壤溶液中 DOC、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度(mg·L⁻¹)

Table 1 Concentrations of DOC, nitrate and ammonium in soil solution from rhizospheric and bulk soils of *Sedum plumbizincicola* in different N treatments(mg·L⁻¹)

处理 Treatment	DOC		NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N	
	根际 Rhizosphere	非根际 Bulk	根际 Rhizosphere	非根际 Bulk	根际 Rhizosphere	非根际 Bulk
CK	66.3±2.0a	51.9±1.7a	1.66±0.48b	25.5±7.6c	0.45±0.11b	0.76±0.06a
NH ₄ ⁺ -N	56.1±6.4a	42.7±1.6b	8.90±4.47b	118±23b	0.40±0.05b	0.84±0.06a
NO ₃ ⁻ -N	59.8±5.9a	38.7±2.5b	269±25a	298±33a	1.50±0.05a	0.92±0.13a

注: 同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters within a column indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same below.

影响。

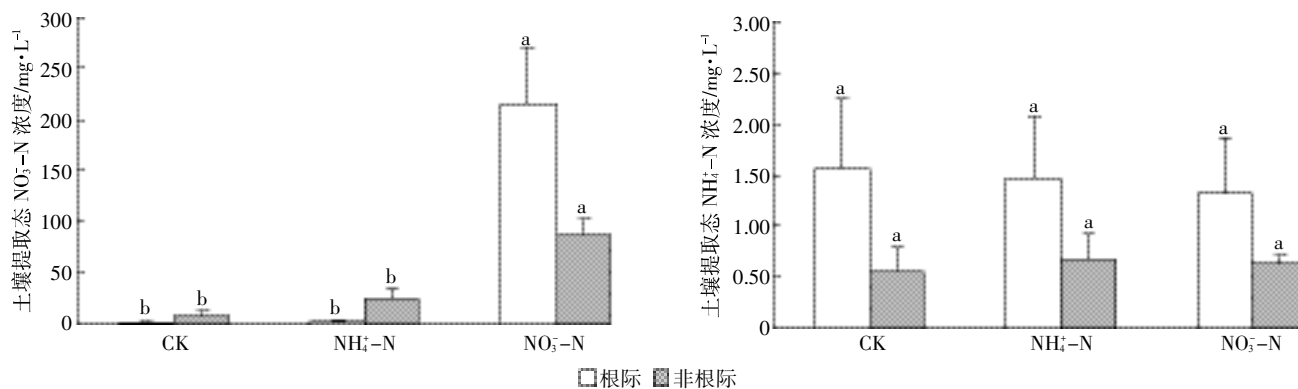
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理下, 土壤中 Zn、Cd 总量分别减少 (3.45 ± 0.24) 、 $(0.069\pm0.002)\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$, 土壤 Zn、Cd 去除率分别为 4.30%、24.0%; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 处理下, 土壤中 Zn、Cd 总量分别减少 (2.24 ± 0.49) 、 (0.052 ± 0.007)

$\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$, 土壤 Zn、Cd 去除率分别为 2.79%、18.1%。

3 讨论

3.1 氮肥形态对伴矿景天地上部生物量的影响

本研究结果显示, 不同形态氮肥显著影响伴矿



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 indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments. The same below.

图 1 不同氮肥处理下伴矿景天根际与非根际土壤提取态中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

Figure 1 Concentrations of KCl extractable nitrate and ammonium in rhizosphere and bulk soils of *Sedum plumbizincicola* in different N treatments

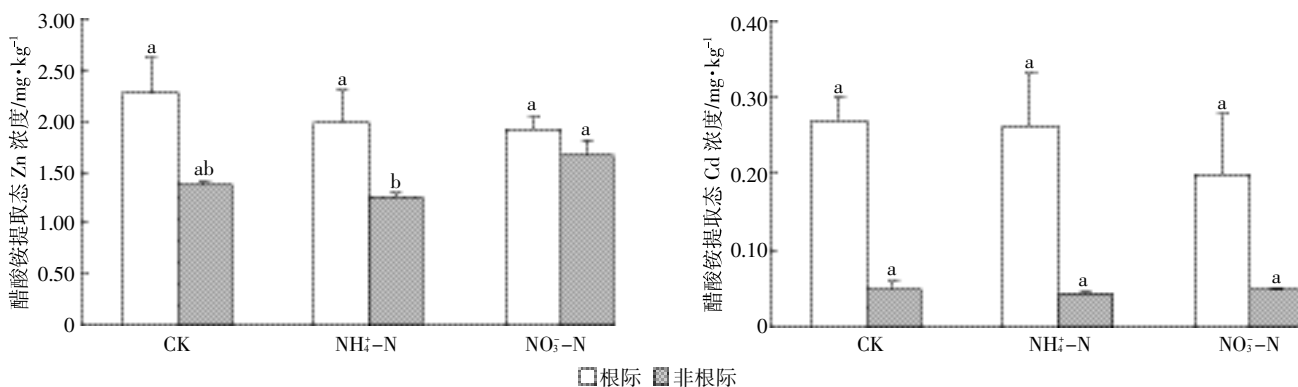


图 2 不同氮肥处理下伴矿景天根际与非根际土壤 NH_4OAc 提取态中 Zn、Cd 浓度

Figure 2 Concentrations of NH_4OAc extractable Zn and Cd in rhizospheric and bulk soils of *Sedum plumbizincicola* in different N treatments

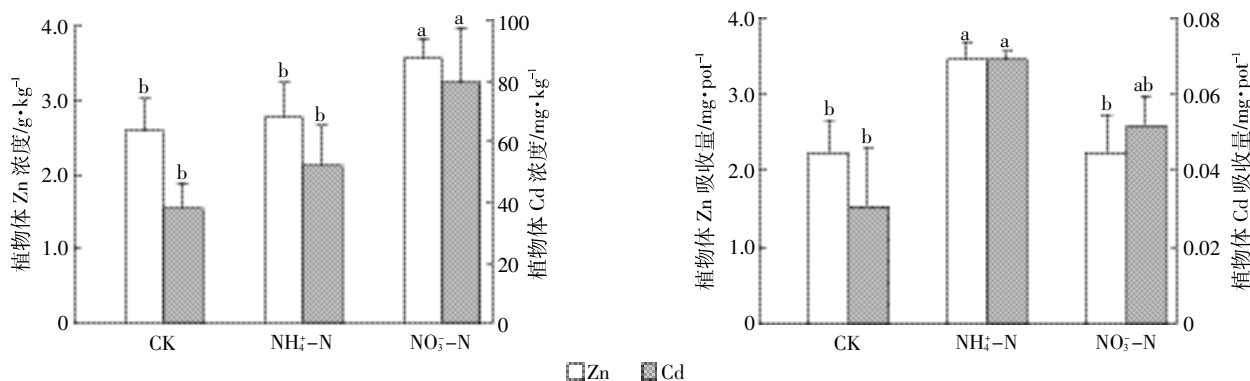


图 3 不同氮肥处理下伴矿景天体内 Zn、Cd 浓度及吸收性

Figure 3 Concentrations and uptake of Zn and Cd in *Sedum plumbizincicola* in different N treatments

景天地上部生物量。Bloom 等^[25]发现,水培或砂培条件下植物吸收 NH_4^+-N 需要较少的能量,较 NO_3^--N 更能促进植物根细胞和根系生长。此外, NH_4^+-N 以 NH_3 的形态可通过快速扩散形式穿过细胞膜进入植物细胞与有机酸结合形成氨基酸或酰胺,从而被植物直接利用^[29]。有研究发现 NH_4^+-N 比 NO_3^--N 更能促进玉米根系生长^[25],且叶片叶绿素高于 NO_3^--N 处理^[24],并使生物量增加;李继光等^[30-31]研究发现 NH_4^+-N 处理下东南景天地上部生物量高于 NO_3^--N 处理。本试验中, NH_4^+-N 处理下土壤溶液和提取态 NO_3^--N 及根际土壤溶液中 NH_4^+-N 浓度均显著低于 NO_3^--N 处理。这说明 NH_4^+-N 处理下土壤中含有适量能被植物快速吸收利用的 NH_4^+-N 以及大量硝化而得的 NO_3^--N ,更能促进植物生长和生物量的增加。 NO_3^--N 处理下土壤中可能是因为 NO_3^--N 浓度过高,在供给植物地上部生长的同时抑制了氮素向根部的转移,从而使根系发育不良、影响了植物生长^[32]。这与王西娜等^[33]过量施氮对作物无显著增产效果的结果相似。

3.2 氮肥形态对伴矿景天 Zn、Cd 吸收浓度的影响

土壤养分可通过对重金属在土壤中的存在形态、迁移和吸附解吸等过程的影响改变其生物有效性^[34-38]。不同形态氮肥在土壤中的转化同样会对重金属的生物有效性产生显著影响,进而影响植物对重金属的吸收^[16-17, 39-42]。本研究结果显示, NO_3^--N 处理下伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度显著高于 NH_4^+-N 处理。与对照比较,施肥处理均显著提高了非根际土壤溶液中 Zn 和 Cd 浓度,但 NO_3^--N 处理均显著提高了根际土壤溶液中 Zn 和 Cd 浓度,而 NH_4^+-N 则无显著影响。以上结果说明, NO_3^--N 处理更利于根际土壤重金属的活化,从而利于植物根系对 Zn 和 Cd 的吸收及向地上部的转运。与对照处理比较, NO_3^--N 和 NH_4^+-N 处理对土壤可提取态 Zn 和 Cd 浓度无显著影响。此外, NO_3^--N 处理下根际土壤溶液中 NH_4^+-N 浓度显著高于 NH_4^+-N 处理, NH_4^+ 在土壤中能短暂增加重金属 Zn 和 Cd 的活性^[43]。因此,在本研究中,与土壤水溶态 Zn 和 Cd 比较,用土壤可提取态浓度评价植物对 Zn 和 Cd 的吸收特性存在一定局限性,可能与盆栽条件下复杂的土壤环境有关。

3.3 氮肥形态对伴矿景天 Zn、Cd 吸收量的影响

不同氮肥类型会影响重金属超积累植物的生长以及对重金属的吸收,且 NH_4^+-N 比 NO_3^--N 更能促进植物对重金属的吸收与积累^[14, 29-30, 44-45],如烟草^[46]、莴苣

类植物^[47]、油菜^[16-17]、芥菜^[48]、龙葵^[49]等。李继光等^[30-31]发现 NH_4^+-N 处理的超积累植物东南景天地上部 Cd 积累量显著高于 NO_3^--N 处理。 NH_4^+-N 虽不能显著提高龙葵地上部 Cd 浓度,但可显著提高地上部干重,因而显著提高龙葵地上部 Cd 的积累量,最大可提高 2.8 倍^[49]。也有研究表明,植物在 NH_4^+-N 溶液中吸 Cd 量比在 NO_3^--N 溶液中大^[50]。本研究中,盆栽条件下施用 NH_4^+-N 肥比 NO_3^--N 肥更能促进伴矿景天的生长,更能增加地上部生物量,但植物体内 Zn、Cd 浓度在 NO_3^--N 处理下高于 NH_4^+-N 处理。这与 Hu 等^[22]的研究结果一致,认为 NO_3^--N 虽能提高 Cd 的有效性但对伴矿景天的生长不利。本研究结果显示,伴矿景天对 Zn 和 Cd 吸收量与植物地上部干重规律一致。由此可见,与 NO_3^--N 处理相比,伴矿景天对 Zn、Cd 吸收性的增加是因为 NH_4^+-N 处理下其生物量的增长率高于地上部 Zn、Cd 浓度的降低量。

4 结论

本研究结果表明,在盆栽条件下施用硝态氮肥更能提高根际土壤 Zn、Cd 的生物有效性,但施用铵态氮肥更有利于促进伴矿景天的生长和生物量的快速增加。铵态氮肥处理下,伴矿景天生物量增长率显著大于其地上部 Zn、Cd 浓度的下降幅度,因而总体表现为 Zn、Cd 吸收量高于硝态氮肥处理,即施用铵态氮肥更能提高伴矿景天对 Zn、Cd 污染土壤的修复效率。

参考文献:

- [1] 郑喜坤,鲁安怀,高翔,等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79-84.
ZHENG Xi-shen, LU An-huai, GAO Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 79-84.
- [2] 崔玉静,赵中秋,刘文菊,等. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因素[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2133-2143.
CUI Yu-jing, ZHAO Zhong-qiu, LIU Wen-ju, et al. Transfer of cadmium through soil-plant-human continuum and its affecting factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2133-2143.
- [3] Nouri J, Khorasani N, Lorestani B, et al. Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59: 315-323.
- [4] 刘晓冰,邢宝山,周克琴,等. 污染土壤植物修复技术及其机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1): 134-138.
LIU Xiao-bing, XING Bao-shan, ZHOU Ke-qin, et al. Phytoremediation and its mechanisms for contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(1): 134-138.

- [5] Ye H B, Yang X E, He B, et al. Growth response and metal accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn complex-polluted ion levels[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1030-1036.
- [6] Wu L H, Liu Y J, Zhou S B, et al. *Sedum plumbizincicola*: A new species from Zhejiang Province, China[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2013, 299(3): 487-498.
- [7] 吴龙华, 周守标, 毕德, 等. 中国景天科植物一新种: 伴矿景天[J]. 土壤, 2006, 38(5): 632-633.
WU Long-hua, ZHOU Shou-biao, BI De, et al. *Sedum plumbizincicola*: A new species of the *Crassulaceae* from Zhejiang[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 632-633.
- [8] 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3422-3426.
LIU Ling, WU Long-hua, LI Na, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environment Science*, 2009, 30(11): 3422-3426.
- [9] 吴龙华, 李娜, 毕德, 等. 锌镉复合污染土壤的植物修复方法: 中国, 20071002038015[P]. 2007-08-15.
WU Long-hua, LI Na, BI De, et al. Method of phytoremediation for Zn-Cd compound contaminated soils: China, 20071002038015[P]. 2007-08-15.
- [10] Wu L H, Li H, Luo Y M. Nutrients can enhance phytoremediation of copper-polluted soil by Indian mustard[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26: 331-335.
- [11] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻锌镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2952-2958.
SHEN Li-bo, WU Long-hua, TAN Wei-na, et al. Effects of *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2952-2958.
- [12] Fayiga A O, Ma L Q, Rathinasabapathi B. Effects of nutrients on arsenic accumulation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62: 231-237.
- [13] Sirguey C, Schwartz C, Morel J L. Response of *Thlaspi caerulescens* to nitrogen, phosphorus and sulfur fertilization[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2006, 8: 149-161.
- [14] Schwartz C, Echevarria G, Morel J L. Phytoremediation of cadmium with *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant Soil*, 2003, 249: 27-35.
- [15] Willaert G, Verloo M. Effect of various nitrogen fertilizers on the chemical and biological activity of major and trace elements in a cadmium contaminated soil[J]. *Pedologie*, 1992, 43: 83-91.
- [16] 张洪, 赖凡, 吕家格, 等. 氮肥对油菜根-土界面镉迁移及镉组分变化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 169-172.
ZHANG Hong, LAI Fan, LÜ Jia-ke, et al. Effect of nitrogen fertilizer on Cd translocation and changes of Cd fractions at soil root interface of rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 169-172.
- [17] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 氮肥形态和螯合剂对印度芥菜和高积累镉油菜吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 625-629.
WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Effects of nitrogen fertilizers and chelators on absorption of cadmium by Indian mustard and oilseed rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 625-629.
- [18] 赵冰, 沈丽波, 程苗苗, 等. 麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及锌镉吸收性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2725-2731.
ZHAO Bing, SHEN Li-bo, CHENG Miao-miao, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2725-2731.
- [19] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 221-225.
SHEN Li-bo, WU Long-hua, HAN Xiao-ri, et al. Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 221-225.
- [20] 孙琴, 倪吾钟, 杨肖娥, 等. 磷对超积累植物——东南景天生长和积累镉的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 818-824.
SUN Qin, NI Wu-zhong, YANG Xiao-e, et al. Effects of phosphorus on the growth, zinc absorption and accumulation in hyperaccumulator: *Sedum alfredii* Hance[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 818-824.
- [21] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 280-286.
YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Effects of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(2): 280-286.
- [22] Hu P J, Yin Y G, Ishikawa S, et al. Nitrate facilitates cadmium uptake, transport and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20: 6306-6316.
- [23] 张圆圆, 窦春英, 姚芳, 等. 氮素营养对重金属超积累植物东南景天吸收积累镉和锌的影响[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(6): 831-838.
ZHANG Yuan-yuan, DOU Chun-ying, YAO Fang, et al. Nitrogen application to enhance zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(6): 831-838.
- [24] 王正瑞, 芮玉奎, 申建波, 等. 氮肥施肥量和形态对玉米苗期叶绿素含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(2): 410-412.
WANG Zheng-rui, RUI Yu-kui, SHEN Jian-bo, et al. Effects of forms and level of nitrogen fertilizer on the content of chlorophyll in leaves of maize seedling[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(2): 410-412.
- [25] Bloom A J, Frensch J, Taylor A. Influence of inorganic nitrogen and pH on the elongation of maize seminal roots[J]. *Annals of Botany*, 2006, 97: 867-873.
- [26] 王艳红, 艾绍英, 李盟军, 等. 氮肥对污染农田土壤中铅的调控效应[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(7): 39-42, 46.
WANG Yan-hong, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of using nitrogen fertilizer on distribution of Pb in the soil[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(7): 39-42, 46.
- [27] 刘芷宇, 李良谟, 施卫明. 根际研究法[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1997: 325.
LIU Zhi-yu, LI Liang-mo, SHI Wei-ming. Method of rhizosphere research[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1997: 325.
- [28] 鲍士旦. 农业化学分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [29] 王宇通, 邵新庆, 黄欣颖, 等. 植物根系氮吸收过程的研究进展[J]. 草业科学, 2010, 7: 105-111.
- WANG Yu-tong, SHAO Xin-qing, HUANG Xin-ying, et al. Research progress on nitrogen uptake by plant roots[J]. *Pratacultural Science*, 2010, 7: 105-111.
- [30] 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 Ji-guang, LI Ting-qiang, ZHU En, et al. Effect of different nitrogen forms on cadmium accumulation of *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science*, 2008, 34(3): 327-333.
- [31] 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. Effect 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.
- [32] Li S X. Ways and strategies for increasing fertilizer nitrogen efficiency in dryland soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 36: 56-76.
- [33] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 197-204.
- WANG Xi-na, WANG Zhao-hui, LI Sheng-xiu. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water nitrogen dynamics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 197-204.
- [34] Wangstrand H, Eriksson J, Oborn I. Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26: 209-214.
- [35] Zhao B Z, Maeda M, Zhang J B, et al. Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in andisols after a different, 6-year fertilization management (8pp)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, 13(2): 90-97.
- [36] 李波, 青长乐, 周正宾. 肥料中氮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.
- LI Bo, QING Chang-le, ZHOU Zheng-bin, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and organic matter on heavy metal behavior in soils and its application of controlling pollution[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(6): 375-377.
- [37] 徐明岗, 刘平, 宋正国. 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 Ming-gang, LIU Ping, SONG Zheng-guo. Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 328-333.
- [38] 徐明岗, 张茜, 孙楠, 等. 不同养分对磷酸盐固定的污染土壤中铜锌生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 2053-2058.
- XU Ming-gang, ZHANG Xi, SUN Nan, et al. Changes in bio-availability of immobilized Cu and Zn bound to phosphate in contaminated soils with different nutrient addition[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 30(7): 2053-2058.
- [39] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 133-138.
- [40] 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.
- [41] 梁旭晖. 氮对土壤-植物系统中重金属的影响研究[J]. 佛山科学技术学院学报: 自然科学版, 2011, 29(3): 44-48.
- LIANG Xu-hui. Effect of nitrogen on behavior of heavy metals in soil-plant system[J]. *Journal of Foshan University: Natural Science Edition*, 2011, 29(3): 44-48.
- [42] 尹彩霞, 左竹, 李桂花. 不同形态氮肥对玉米产量和土壤浸提性有机质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, 03: 27-30, 86.
- YIN Cai-xia, ZUO Zhu, LI Gui-hua. Effect of nitrogen forms on maize yield and soil extractable organic matter[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2011, 03: 27-30, 86.
- [43] 曾清如, 周细红, 毛小云. 不同氮肥对铅锌矿尾矿污染土壤中重金属的溶出及水稻苗吸收的影响[J]. 土壤肥料, 1997(3): 7-11.
- ZENG Qing-ru, ZHOU Xi-hong, MAO Xiao-yun. Effect of varied nitrogen fertilizer on heavy metal digestion in contaminated soil of lead and zinc gangue and rice seedling take-up[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1997(3): 7-11.
- [44] Xie H L, Jiang R F, Zhang F S, et al. Effect of nitrogen from the rhizosphere dynamics and uptake of cadmium and zinc by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant Soil*, 2009, 318(1/2): 205-215.
- [45] 杨刚, 伍钧, 唐亚, 等. 不同形态氮肥施用对鱼腥草吸收转运Pb的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1380-1385.
- YANG Gang, WU Jun, TANG Ya, et al. Effects of nitrogenous fertilizers on accumulation and transfer of lead by *Houttuynia cordata* thumb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1380-1385.
- [46] Tsadilas C D, Karaivazoglou N A, Sotsolis C T, et al. Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, N form, and year of cultivation[J]. *Soil Science Society of America*, 2004, 68: 1885-1889.
- [47] Florijn P J, Nelemans J A, Van Beusichem M L. The influence of the form of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, 15: 2405-2416.
- [48] 王艳红, 艾绍英, 李盟军, 等. 氮肥对镉在土壤-芥菜系统中迁移转化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 649-653.
- WANG Yan-hong, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of nitrogen fertilization on cadmium translocation in soil-mustard system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 649-653.
- [49] 王林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 915-920.
- WANG Lin, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing. Intensification of *Solanum nigrum* L. remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fertilizers[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(10): 915-920.
- [50] 熊礼明. 施肥与作物重金属的吸收[J]. 农业环境保护, 1993, 12(5): 217-222.
- XIONG Li-ming. Fertilization and crop absorption of heavy metals[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(5): 217-222.