

种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响

刘玲^{1,2}, 吴龙华^{2*}, 李娜^{1,2}, 崔立强³, 李柱^{1,2}, 蒋金平², 蒋玉根⁴, 裘希雅⁴, 骆永明^{2*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 4. 浙江省富阳市农业技术推广中心土壤肥料工作站, 富阳 311400)

摘要: 田间微区试验研究了不同种植密度对伴矿景天生长和地上部重金属吸收量的影响。结果表明, 适度增大种植密度可促进伴矿景天的生长, 显著提高其地上部生物量, 但过分密植对植物地上部增产无显著贡献。种植密度由 11 万株/hm² 上升到 44 万株/hm² 时, 伴矿景天地上部 Cd、Zn 吸取量显著上升, 分别由 0.208 kg·hm⁻² 上升至 0.631 kg·hm⁻²、13.2 kg·hm⁻² 上升至 58.7 kg·hm⁻²; 但种植密度从 44 万株/hm² 增大到 100 万株/hm² 时, 植物地上部重金属吸取量并无显著提高。伴矿景天种植密度为 44 万株/hm² 时, 在 Cd、Zn 分别为(3.04±0.11) mg·kg⁻¹和(1299±96) mg·kg⁻¹的污染土壤上种植 1 a, 对镉锌的修复效率分别达 21.1% 和 4.60%, 表明选择适宜的密度种植伴矿景天有利于增大植物地上部 Cd、Zn 吸取量, 从而缩短修复时限。

关键词: 伴矿景天; 植物修复; 种植密度; 镉; 锌

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3422-05

Effect of Planting Densities on Yields and Zinc and Cadmium Uptake by *Sedum plumbizincicola*

LIU Ling^{1,2}, WU Long-hua², LI Na^{1,2}, CUI Li-qiang³, LI Zhu^{1,2}, JIANG Jin-ping², JIANG Yu-gen⁴, QIU Xi-ya⁴, LUO Yong-ming²

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. Faculty of Soil and Fertilizers, Fuyang Bureau of Agriculture, Fuyang 311400, China)

Abstract: A field plot experiment was conducted to study the effects of planting densities on the growth and heavy metals uptake by *Sedum plumbizincicola*. The results showed that yields of *Sedum plumbizincicola* were enhanced with the increase of planting density; however, there was no further increase when planting density was too high. With planting density increasing from 1.1 × 10⁵ plants per hm² to 4.4 × 10⁵ plants per hm², Cd and Zn uptake of aboveground *Sedum plumbizincicola* increased from 0.208 kg·hm⁻² to 0.631 kg·hm⁻², from 13.2 kg·hm⁻² to 58.7 kg·hm⁻², respectively; yet, there was no significant enhancement between the planting density of 4.4 × 10⁵ plants per hm² and 1.0 × 10⁶ plants per hm². When planting density was 4.4 × 10⁵ plants per hm², the Cd and Zn removal rates in contaminated soil were 21.1%, 4.60%, respectively. Appropriate planting density would benefit Cd and Zn uptake of aboveground *Sedum plumbizincicola*, and shorten phytoremediation period.

Key words: *Sedum plumbizincicola*; phytoremediation; planting density; cadmium; zinc

由于采矿、冶炼工业的发展, 重金属污染日趋严重。重金属污染不仅会导致作物减产、品质下降, 还会影响大气、水体的质量, 甚至可以积累在有机生物体内、通过食物链威胁人类以及动物的健康与生命^[1-4]。由于农田污染土壤面积较大^[5-9], 利用物理、化学等传统修复技术去除土壤中的重金属可行性较小。

植物修复费用低, 不产生二次污染, 已成为世界土壤修复的研究热点^[10-14], 如蜈蚣草已被成功用于砷污染土壤的植物修复技术中^[15, 16]。超积累植物生物量低, 且往往只对某种特定重金属表现出超积累, 专一性强^[17]。农艺调控措施是一种有效增产途径^[18]。但是通过密度种植这一措施来调控植物修复

效率却鲜有报道。不同种植密度可能导致地上部产量存在差异从而造成地上部重金属吸取量的差别, 但是地上部重金属浓度是否存在差异, 植物地上部吸取量是否有差异, 还有待进一步探讨。

伴矿景天是在浙江省发现的景天科植物新种^[19], 是一种镉锌超积累植物^[20]。伴矿景天生物量较大, 生长速度快, 被认为在修复 Cd、Zn 污染土壤方面具有广泛的应用前景。将伴矿景天应用到田间试验当中, 首先要考虑的是种植密度, 如何选择最优种

收稿日期: 2008-12-29; 修订日期: 2009-04-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-404); 国家科技支撑计划项目(2006BAD17B04)

作者简介: 刘玲(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属有效性及修复, E-mail: lliu@issas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: ymluo@issas.ac.cn, lhwu@issas.ac.cn

植密度使植物地上部重金属吸取量达到最大, 提高植物修复效率, 是亟待解决的问题. 但生物量增大是否会产生“稀释效应”, 从而导致植物地上部重金属吸取量降低, 有待进一步探索.

本研究旨在通过田间微区试验探明不同种植密度对伴矿景天植物地上部产量以及重金属吸取量的影响, 并筛选出适于当地条件的最优密度种植方案.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于浙江省杭州郊区, 属于亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候, 全年温暖湿润, 年平均温度 16℃, 年平均降水量 1 425 mm, 集中于 5 月和 6 月. 试验地为农田土壤, 由于上风向金属冶炼厂长期大气沉降和污水灌溉, 导致土壤多种重金属超标, Cd、Zn 浓度分别为 $(3.04 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(1 299 \pm 96) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过国家土壤环境质量三级标准 (Cd $1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 204%、160%, 为严重污染土壤.

1.2 试验设计与实施

试验设 4 个种植密度处理: 株距分别为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 即 11.1 万株/ hm^2 (D11); $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 即 25 万株/ hm^2 (D25); $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, 即 44.4 万株/ hm^2 (D44); $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 即 100 万株/ hm^2 (D100). 试验设 3 次重复, 每小区面积为 $6 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 随机排列. 土壤 pH(H₂O) 为 7.24, 有机碳含量为 $29.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 (CEC) 为 $11.8 \text{ cmol} (+) \cdot \text{kg}^{-1}$, 全量 N、P、K 分别为 $2.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $22.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮、Olsen 磷和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 提取态钾分别为 $105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $6.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 2007 年 5 月 14 日翻耕后移栽伴矿景天, 2008 年 6 月 28 日收获.

1.3 取样与分析

2007 年试验前和 2008 年收获时采集土样, 每小区取 5 个样点土壤, 充分混匀, 风干. 每小区收获 10 株伴矿景天, 用自来水、去离子水洗净, 烘干, 称重, 粉碎, 备用.

土壤样品采用王水-高氯酸消煮, 植物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮^[21], Cd、Zn 浓度采用原子吸收分光光度计 [Varian SpectrAA 220FS (火焰)、220Z (石墨炉)] 测定. 测定过程中分别采用国家标准参比物质 (土壤: GBW 07401; 植物: GBW 07603) 进行质量控制, 所用试剂均为优级纯, 标准样品测定结果在允许误差范围内.

1.4 数据分析与统计

试验数据用 Excel 和 SPSS 13.0 统计软件 LSD 法进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 不同种植密度下伴矿景天地上部产量及构成因素

不同种植密度对伴矿景天地上部生长有显著的影响. 随着种植密度的增大, 植物地上部生物量呈显著增长趋势 (图 1).

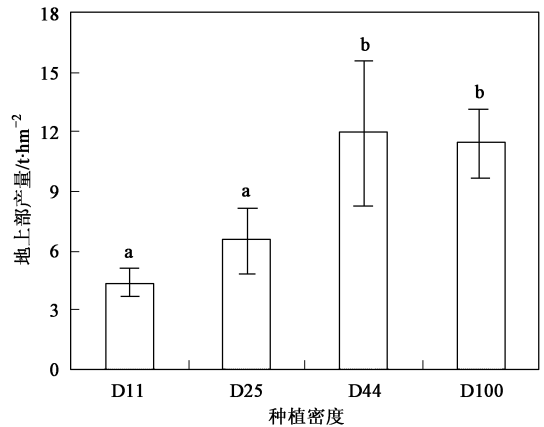


图 1 不同种植密度下伴矿景天地上部产量

Fig. 1 Shoot biomass of *Sedum plumbizincicola* at different planting densities

每 hm^2 种植 11.1、25、44.4 和 100 万株时, 地上部产量为 4.5、6.6、12.0 和 11.5 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 过分密植时, 伴矿景天地上部生物量不再增大.

表 1 显示了不同种植密度下伴矿景天分枝数、单株生物量及株高. 植物分枝数差异显著, 即种植密度越大, 所种植的每株伴矿景天的分枝数越少, 但分支数的降低量明显低于种植密度的增率, 即伴矿景

表 1 不同种植密度下伴矿景天地上部产量构成因素¹⁾

Table 1 Shoot biomass component in *Sedum plumbizincicola* at different planting densities

种植密度	分枝数	单株生物量/g	株高/cm
D11	37±4 a	40.2±6.4 a	42.1±2.4
D25	29±3 b	26.4±6.5 b	42.7±1.7
D44	27±4 b	27.0±8.2 b	41.8±3.9
D100	23±4 b	11.5±1.7 c	41.4±4.4

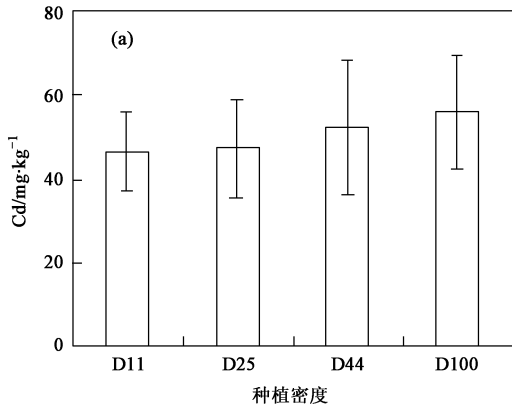
1) 表中数值为平均值±标准差, 多重比较采用 LSD 法, 同列数据中具有相同字母的数据无显著性差异 ($p < 0.05$)

天的总分枝数随着种植密度的增大而显著增大, 可能是其总生物量显著升高的原因之一. 从单株生物量可见, 种植密度由 11.1 万株/ hm^2 增大到 25 万株/ hm^2 时, 单株生物量降为前者的 65.6%, 但是种植密

度增大到 44.4 万株/hm² 时,伴矿景天的单株生物量不再降低;种植密度继续增大,其单株生物量急剧下降,这可能与养分供应、光照等条件的限制有关,有待进一步探讨.种植密度对伴矿景天的株高差异影响不显著.

2.2 不同种植密度下伴矿景天地上部重金属浓度

种植密度由低到高,植物地上部 Cd 浓度依次为



46.6、47.0、52.6 和 56.2 mg·kg⁻¹,即种植密度变化对伴矿景天地上部 Cd 浓度没有显著影响[图 2(a)]. D11 密度条件下,植物地上部 Zn 浓度最低,为 2968 mg·kg⁻¹,与其它密度处理下植物地上部 Zn 浓度差异显著,这可能与较低密度下单株生物量大而造成的“稀释效应”有关. D44 密度条件下伴矿景天地上部重金属 Zn 浓度最高可达 4899 mg·kg⁻¹[图 2(b)].

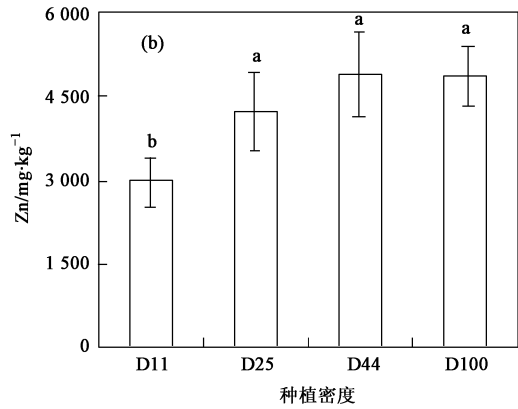


图 2 不同种植密度下伴矿景天地上部重金属浓度

Fig. 2 Zinc and cadmium concentrations in shoots of *Sedum plumbizincicola* at different planting densities

2.3 不同种植密度下伴矿景天地上部重金属吸取量

图 3 显示随着种植密度增大,伴矿景天地上部重金属吸取量逐渐增加. D44 处理时,伴矿景天地上部 Zn 吸取量达最大值,为 55.9 kg·hm⁻²,是 D11 处理的 4.4 倍;在 D100 处理中,伴矿景天地上部重金属 Cd 吸取量达到最大值 646 g·hm⁻²,而 D11 处理仅为 208 g·hm⁻².

当种植密度 < 44 万株/hm² 时,伴矿景天地上部的 Cd、Zn 吸取量随种植密度的增加而增大.当种植密度分别为 44.4 万株/hm²、100 万株/hm² 时,地上部 Cd、Zn 吸取量显著高于其它密度处理,但这 2 种密度条件下伴矿景天地上部 Cd、Zn 吸取量没有显著差异.

2.4 不同种植密度种植伴矿景天对土壤中重金属浓度的影响

种植伴矿景天进行修复后,不同种植密度下土壤中 Cd、Zn 浓度均比试验前有明显下降.密度处理为 D11、D25、D44 和 D100 时,土壤 Zn 含量依次下降了 11、27、59 和 50 mg·kg⁻¹,土壤 Cd 浓度由试验前 3.04 mg·kg⁻¹ 分别下降到种植后的 2.94、2.67、2.40 和 2.61 mg·kg⁻¹.

由统计分析知, D44 处理土壤醋酸铵提取态 Cd 浓度低于其它 3 个种植密度处理,但是差异不显著

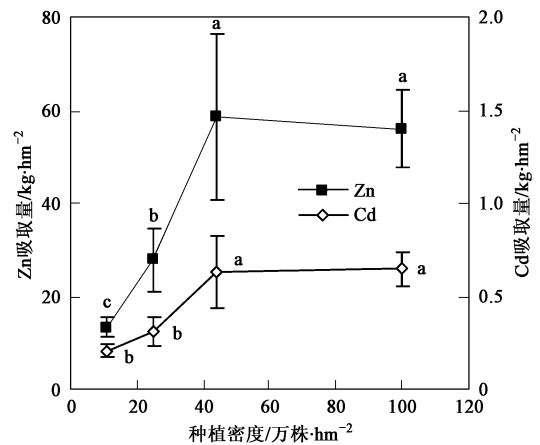


图 3 不同种植密度下伴矿景天地上部重金属吸取量

Fig. 3 Zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* at different planting densities

[图 4(a)];种植密度对土壤醋酸铵提取态 Zn 浓度的影响不大[图 4(b)].

由表 2 可看出, D44 密度处理下土壤 Zn 污染修复效率为 D11 时的 4.5 倍.每 hm² 种植 44.4 万株伴矿景天时,对土壤 Cd 污染修复效率达 21.1%.由伴矿景天植物地上部重金属吸取量计算得出的污染土壤 Cd、Zn 修复效率与土壤测定的结果具有相似的规律(表 2).

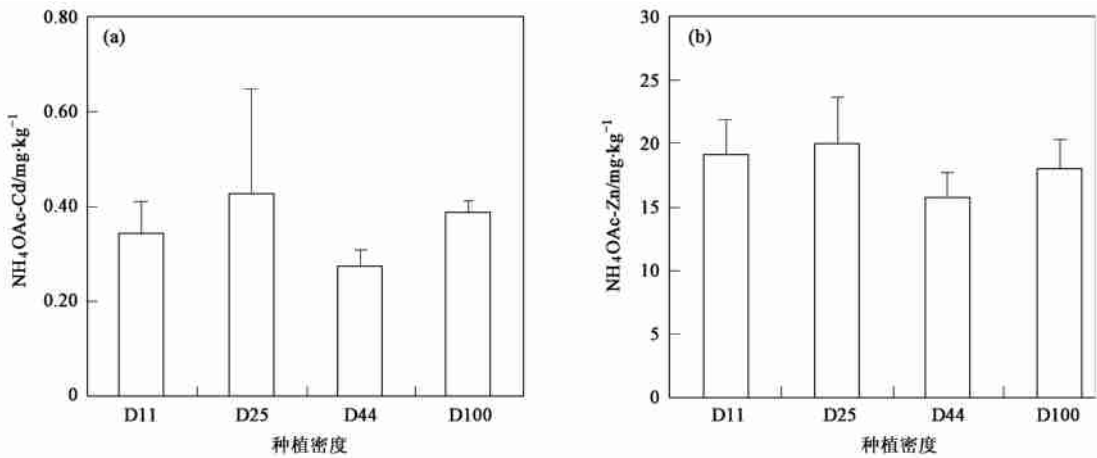


图4 不同种植密度下土壤重金属 Cd、Zn 醋酸铵提取态浓度

Fig.4 Zinc and cadmium concentrations in ammonium acetate fraction at different planting densities

表2 不同种植密度下土壤污染修复效率¹⁾ %Table 2 Cadmium and zinc removal rate in contaminated soil at different planting densities¹⁾ %

种植密度	修复效率 I		修复效率 II	
	Cd	Zn	Cd	Zn
D11	3.46	0.86	5.94	0.89
D25	12.1	2.14	8.86	1.87
D44	21.1	4.60	18.0	3.93
D100	14.2	3.86	18.5	3.74

1) 修复效率 I 由土壤表层 0~10 cm 伴矿景天根系生长范围内重金属浓度变化计算, 修复效率 II 由植物吸取量计算得到

3 讨论

伴矿景天生长周期为每年的春季至初夏、秋季至次年春季。本试验时间为 2007 年 5 月~2008 年 6 月, 2007 年夏季, 伴矿景天植物进入生长停滞期, 直至 2007 年 10 月伴矿景天地上部生物量无明显增大, 故延迟收获时间至 2008 年 6 月。2008 年春季后, 环境气候条件较适宜伴矿景天植物生长。在田间试验条件下, 伴矿景天在重金属严重超标的长期污染农田土壤上生长良好。选择合适的种植密度可以提高环境资源如光、水和热的利用率, 达到增加伴矿景天地上部产量的目的, 从而缩短植物修复时限。每 hm^2 种植 100 万株伴矿景天时产量构成因素与每 hm^2 种植 44.4 万株伴矿景天时产量构成因素差异不显著, 这说明过分密植条件下, 由于养分、光照等条件的竞争产生了不良影响, 不利于伴矿景天植物的生长。

修复植物的生物量和生长周期会限制植物修复效率^[22,23]。有研究者^[24]建议用于植物修复的植物年生产量(干重)应不低于 $3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在本次田间试验

中, D11 密度条件下, 伴矿景天地上部产量已超过这一建议值, 这说明伴矿景天用于农田污染土壤的植物修复工程具有可行性。

不同种植密度对伴矿景天地上部重金属 Cd 浓度影响不显著, 对 D11 密度条件下植物地上部重金属 Zn 浓度影响显著, 这可能是由“稀释效应”造成。植物体内重金属浓度没有显著差异时, 植物地上部产量越高, 其地上部重金属吸取量越少。随种植密度的增加, 伴矿景天植物地上部 Cd、Zn 吸取量呈显著上升趋势, 但种植密度为 100 万株/ hm^2 时, 伴矿景天地上部的 Cd、Zn 吸取量没有显著提高。

不同种植密度条件下, 土壤中醋酸铵提取态 Zn 浓度差异不大; 每 hm^2 种植 44.4 万株时土壤醋酸铵提取态 Cd 浓度低于其它 3 种植植密度条件下土壤中醋酸铵提取态 Cd 浓度, 但各密度条件下土壤醋酸铵提取态 Cd 浓度变化幅度大。

有研究发现^[25], 污染土壤经东南景天修复 2a 后, 土壤 Cd 浓度由 $21.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $20.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 下降了 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验的土壤污染修复效率与该结果较接近。污染土壤经伴矿景天修复 1 a 后, 土壤 Cd 浓度有所下降, 降幅最小的是 D11, 下降了 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大降幅为 D44, 达 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由土壤中重金属浓度变化计算得出的修复效率高于由植物地上部吸取量计算得出的结果, 这可能是由于: 土壤样品采集的不均匀性; 收获伴矿景天植物时采集的土壤样品为表层 0~10 cm 土壤, 而伴矿景天植物为浅根系植物, 植物地上部吸取的重金属可能集中于 0~10 cm 层, 从而导致表层土壤重金属浓度降低幅度较大, 但这仅是推测, 还有待试验证实。

4 结论

田间微区试验表明,适当提高种植密度能够增加伴矿景天地上部产量,增大植物地上部重金属吸取量,有利于Cd、Zn污染农田土壤的植物修复;过分密植对伴矿景天地上部产量以及植物体内Cd、Zn浓度没有显著影响。在本田间试验4个种植密度条件下,土壤污染修复效率在种植密度为44.4万株/hm²时最大,对Cd、Zn的吸取修复效率分别达到21.1%和4.60%,但过分密植时污染土壤的重金属吸取修复效率无显著上升。

参考文献:

- [1] Tiller K G. Heavy metals in soils and their environmental significance [J]. *Adv Soil Sci*, 1989, **9**: 113-142.
- [2] Kumar G P, Yadav S K, Thavale P R, *et al.* Growth of *Jatropha curcas* on heavy metal contaminated soil amended with industrial wastes and *Azotobacter* - A greenhouse study [J]. *Bioresour Technol*, 2008, **99**(6): 2078-2082.
- [3] Flathman P E, Lanza G R. Phytoremediation: current views on an emerging green technology [J]. *J Soil Contam*, 1998, **7**(4): 415-432.
- [4] 白中科, 赵景达, 朱荫涓. 试论矿区生态重建[J]. *自然资源学报*, 1999, **14**(1): 35-41.
- [5] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 775-780.
- [6] Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice [J]. *Environ Pollut*, 2006, **357**(1-3): 38-53.
- [7] Boekhold A E, Van der Zee Seasm. Field scale variability of cadmium and zinc in soil and barley [J]. *Environ Monit Assess*, 1994, **29**(1): 1-15.
- [8] Degryse F, Smolders E. Mobility of Cd and Zn in polluted and unpolluted spodosols [J]. *Eur J Soil Sci*, 2006, **57**: 122-133.
- [9] Madrid F, Barriants D E, Madrid L. Availability and bio-accessibility of metals in the clay fraction of urban soils of Sevilla [J]. *Environ Pollut*, 2008, **156**: 605-610.
- [10] McGrath S P, Zhao F J, Lombi E. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils [J]. *Plant Soil*, 2001, **232**: 207-214.
- [11] 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展[J]. *土壤*, 2005, **37**(3): 258-264.
- [12] Wang X S, Qin Y. Relationships between heavy metals and iron oxides, fulvic acids, particle size fractions in urban roadside soils [J]. *Environ Geol*, 2007, **52**: 63-69.
- [13] Hamlin R L, Barker A V. Influence of ammonium and nitrate nutrition on plant growth and zinc accumulation by Indian mustard [J]. *J Plant Nutr*, 2006, **29**: 1523-1541.
- [14] Wei S H, Zhou Q X, Kovl P V. Flowering stage characteristics of cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their significance to phytoremediation [J]. *Sci Total Environ*, 2006, **369**: 441-446.
- [15] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. *科学通报*, 2002, **47**(3): 207-210.
- [16] 廖晓勇, 陈同斌, 谢华, 等. 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 455-462.
- [17] 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(5): 513-518.
- [18] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, *et al.* Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* [J]. *Environ Pollut*, 2006, **141**: 115-125.
- [19] 吴龙华, 周守标, 毕德. 中国景天科植物一新种-伴矿景天[J]. *土壤*, 2006, **38**(5): 632-633.
- [20] 吴龙华, 李娜, 毕德, 等. 锌镉复合污染土壤的植物修复方法[P]. 发明专利受理号: 200710020380.5.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.
- [22] Chaney R L, Malikz M, Li Y M, *et al.* Phytoremediation of soil metals [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 1997, **8**: 279-284.
- [23] Terry M. Phytoremediation of heavy metals from soils [J]. *Adv Biochem Eng Biotechnol*, 2003, **78**: 97-123.
- [24] Schnoor J L. Phytoremediation. Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRFAC) Series - Technology Evaluation Report [M]. TE-98-01, 1998 1-43.
- [25] 熊愈辉. 东南景天对镉的耐性生理机制及其对土壤镉的提取与修复作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005 89-91.