

牧草对重金属污染土壤的植物修复综述*

张杏锋^{1,2} 夏汉平^{1,*} 李志安¹ 李海防¹ 熊燕梅¹

(¹ 中国科学院华南植物园, 广州 510650; ² 中国科学院研究生院, 北京 10049)

摘要 综述了土壤重金属污染的危害, 牧草作为修复植物的优势, 以及主要牧草对重金属污染土壤的修复效果。提出了进一步筛选重金属富集能力强的牧草品种, 寻找各种改良措施提高牧草的修复能力将是今后的研究热点。同时, 人们应该更加关注植物修复的后期处理, 尤其是解决从植物体内回收重金属的生产工艺问题。

关键词 植物修复; 富集植物; 生物量; 生产工艺

中图分类号 X171.5 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)08-1640-07

Forage grass in phytoremediation of heavy metals-contaminated soils: A review. ZHANG Xing-feng^{1,2}, XIA Han-ping¹, LI Zhi-an¹, LI Hai-fang¹, XIONG Yan-mei¹(¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1640-1646.

Abstract: This paper summarized the harms of soil heavy metals pollution, the advantages of using forage grass as remediation plant, and the effects of main forage grass species in phytoremediation of heavy metals-contaminated soils. To select the forage grass species with strong capability in accumulating heavy metals and to search for various kinds of measures to raise the phytoremediation capability of forage grasses would be the research hotspots, and the post-processing of phytoremediation, especially the production techniques of recycling the heavy metals from plants, should be more concerned with.

Key words: phytoremediation; accumulator plant; biomass; production techniques.

随着环境质量的恶化和对农艺化学品依赖的增加, 土壤重金属污染问题成为世界各地关注的热点 (Wong *et al.* 2002; Schuenger *et al.* 2003)。据美国环境保护局统计, 由美国政府管理的企业、矿山等所导致的污染点就有 19000 处, 其中含有重金属污染的占 38% (Henry 2000)。美国东南部地区牧草生产中由于长期大量施用禽粪, 导致 Cu、Zn 在土壤中大量积累 (Pederson *et al.* 2002)。法国北部, 由于 20 世纪的冶金工业发展, 使土壤遭到严重的重金属污染 (Nahmani & Lavelle 2002)。据报道, 中国受污染的耕地面积达 2000 万 hm^2 , 约占耕地总面积的 1/5, 其中重金属污染 (主要是 Pb、Zn、Cd) 约占污染面积的 30%~40% (韦朝阳和陈同斌 2001)。农业部 1995 年对我国污灌区的调查显示, 全国有 140 万

hm^2 的污灌面积, 遭受重金属污染的土地面积占污灌区总面积的 64.8%, 其中 8.4%、9.7%、46.7% 的面积分别受到重金属的重度、中度和轻度污染。我国每年因土壤污染而减少的粮食产量高达 1000 万 t, 直接经济损失达 100 多亿元 (卢良恕 1995)。近 10 多年来, 珠江三角洲地区的重金属含量也逐年递增并成为严重的污染问题 (Ip *et al.* 2004)。

重金属离子可以在细胞表面和细胞内取代其他金属离子与蛋白质、核酸、多糖等大分子物质结合, 导致各种代谢紊乱, 对生物体造成严重危害 (Seregin & Ivanov 2001)。土壤受到重金属污染后, 会危害植物生长。高浓度重金属污染会导致植物叶绿素含量与光合速率的下降, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 的活性下降, 细胞膜被破坏, 种子发芽率降低, 生长迟缓, 产量降低, 叶片黄化, 花期推迟, 根系受到抑制, 严重时植株死亡 (孙晋伟等 2008; Xia 2004)。此外, 重金属大都

* 国家自然科学基金项目 (30670393 和 40871221) 和广东省科技计划资助项目 (2006A36703004)。

* * 通讯作者 E-mail: xiahnp@scib.ac.cn

收稿日期: 2008-12-07 接受日期: 2009-03-25

可通过食物链影响到动物进而影响人类。重金属在动物和人体过量积累会导致各种疾病,如癌症(Cr、Ni)、生殖障碍(Cd、Hg、Ni、Zn)、肾脏功能受损(Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、U)、骨质疏松(Cd)、生长阻滞和贫血(Zn)等(McIntyre 2003)。1995年我国北方的河套平原由于地下水和土壤受到As污染,致使井水严重超标,引发区域性人群As中毒事件,受威胁人数达180000人(Zhang 2004)。因此,对重金属污染环境进行治理是人类面临的共同任务。

1 植物修复技术

目前国内外科学家都在对重金属污染土地的修复技术进行研究,其中植物修复技术具有治理效果的永久性、治理过程的原位性、治理成本的低廉性、环境美学的兼容性、后期处理的简易性等优点,使其成为重金属污染治理的研究热点(McIntyre 2003; Alkorta *et al.* 2004)。而该技术对重金属修复成功与否的关键在于修复植物品种的选择和改良措施的应用。

1.1 修复植物的选择

选择修复植物时,首先是筛选对重金属富集能力强的植物,尤其是超富集植物,然后根据污染区的具体情况选择适合的富集植物进行修复。至今普遍认为的超富集植物是指植株体内地上部的Cd含量在 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,Cr、Co、Ni、Cu、Pb含量在 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,Mn、Zn含量在 $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,而且在重金属污染地区生长未受明显毒害的植物(Brooks 1998; McGrath & Zhao 2003)。目前发现的超富集植物400多种(Brooks 1998),但这数百种超富集植物普遍存在生物量小,生长慢,在低浓度重金属污染土壤上生长与乡土植物相比缺乏竞争力,不利于机械化收获,对重金属的富集具有专一性等缺点,要净化一块污染土地需要很长时间。因此,近来国内外把研究焦点放在利用拥有高生物量或者生长快速的非超富集植物来修复污染土壤(Deram *et al.* 2007)。许多高生物量的树种如银合欢(*Leucaena leucocephala*)(Gardezi *et al.* 2005)、蒿柳(*Salix viminalis*)(Greger 1999);经济作物如玉米(*Zea mays*)(Wang *et al.* 2007)、向日葵(*Helianthus annuus*)(Szabó & Fodor 2006);牧草如杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)(Xia 2004)、细弱翦股颖(*Agrostis tenuis*)(石汝杰和陆引罡 2007);杂草如羽叶鬼针草(*Bidens maximoviczi-*

ana)(王红旗等 2005)、皱叶酸模(*Rumex crispus*)(Zhuang *et al.* 2007)成为研究者的关注热点。

1.2 改良措施的应用

单纯依靠植物本身对重金属的富集特性,一般情况下很难达到理想的修复效果。所以人们通过采取施肥、水分管理、栽培措施、添加植物修复剂、利用生物技术等措施来提高植物的修复能力。研究发现,施肥可以增加土壤肥力,提高植物的生物量从而提高植物吸收重金属总量(Xia 2004),这种措施尤其在贫瘠土壤上更为适用。向土壤添加螯合剂EDTA和DTPA是目前研究最多、相对较为成熟的技术(Hsiao 2007),但由于存在着螯合剂在土壤中的不易降解、残留期长、重金属被螯合剂活化后向深层土壤和地下水迁移造成二次污染、螯合剂价格较昂贵等缺点,这项技术存在一定的环境风险和推广利用的难度。因此,人们在深入研究提高螯合剂的利用价值的同时,也在努力寻找更加安全、经济、容易得到的、尤其是可以变废为宝的物质作为植物修复剂。有研究表明,向土壤中添加城市污泥(Mosquera-Losada *et al.* 2001)、橄榄油提取后的废渣(Clemente *et al.* 2007)对提高植物修复潜力均有显著效果。另外,微生物对土壤有改良效果,给植物接种微生物,如真菌、细菌(Gardezi *et al.* 2005; Sheng *et al.* 2008)等,能提高植物对重金属的吸收能力;利用转基因技术把重金属耐性基因或者有利于重金属富集的基因转入植物体内(Dhankher *et al.* 2002);人工选择杂交品种(Deram *et al.* 2007)等也是当前的研究热点。

近年来,在大量的理论研究的基础上,人们开始把植物修复技术与工程实践结合在一起。美国的一些植物修复公司积极的进行研究开发,并使其商业化、产业化,例如Edenspace公司已成功地开展了As、Pb、U、Cr等污染物的植物修复工作(Edenspace 2008)。我国的陈同斌带领重金属污染土壤植物修复团队于2001年在湖南郴州建立了世界上第一个As污染修复基地,随后又在广西和云南建立了As、Pb等重金属污染及酸化土壤修复的示范工程,建立了超富集植物与经济作物间作的修复模式,实现了边修复污染土壤、边开展农业生产(俞铮 2008)。

2 主要牧草对重金属的富集

近几年,将牧草作为重金属修复植物越来越受到人们的青睐。迄今,国内外至少有数十种牧草开

始用于重金属污染土壤的植物修复或金属矿山的生态恢复,其中代表性的种类如下:

紫花苜蓿(*Medicago sativa*):豆科多年生草本,株高0.3~1.0 m,是世界上栽培最广泛、最重要,也是我国分布最广、栽培历史最久、经济价值最高的豆科牧草,被誉为“牧草之王”。紫花苜蓿是Cd的超富集植物,对Pb、Ni有较强的富集能力,是土壤Cd、Pb、Ni污染的理想修复植物。Peralta-Videa等(2002)研究发现紫花苜蓿在Cd、Cu、Ni、Zn浓度均为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的复合污染土壤上生长,地上部Ni和Cd的浓度分别达到437和 $202 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。叶春和(2002)以 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理紫花苜蓿幼苗10 d,紫花苜蓿叶和根部的Pb浓度分别达到342和 $12134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

红三叶(*Trifolium pratense*):豆科多年生草本,株高0.3~0.8 m。原产小亚细亚和西南欧,在欧洲各国及俄罗斯、新西兰等海洋性气候地区广泛栽培。对Zn有较强的耐性和一定的富集能力,可修复Zn污染地区。红三叶可在Zn浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤上正常生长,地上部和根部可富集Zn 1266和 $629 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Li & Christie 2001)。

菊苣(*Cichorium intybus*):菊科多年生草本,株高0.4~1.7 m,原产欧洲,广泛分布于亚洲、美洲、非洲,在我国北方广泛栽培。Simon等(1996)研究发现菊苣在Cd浓度为 $0.5 \sim 50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液中生长,地上部富集Cd $10 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根部富集Cd $10 \sim 890 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,指出菊苣可成为Cd污染的生物监视器。Sekara等(2005)通过野外实验发现菊苣的叶片中含有高浓度的Cd、Pb。

香根草(*Vetiveria zizanioides*):禾本科多年生草本,株高2~2.5 m,原产印度与非洲大陆,由于香根草对很多重金属都有较强的耐性,加之其生物量很大,因而成为全球热带亚热带地区使用最广的牧草之一,主要用于矿山恢复。香根草可在Pb浓度为 $5000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤上正常生长,当向土壤添加 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA时,地上部和根部分别富集Pb 243和 $2280 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Chen et al. 2004)。当用 $\text{Cr} 623 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu} 190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} 621 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn} 653 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 复合重金属溶液处理香根草30 d,其地上部富集Pb $4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和Zn $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根部富集Pb $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和Zn $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现出Pb、Zn的超富集特性(Antiochia et al. 2007)。

多花黑麦草(*Lolium multiflorum*):禾本科1年生或短寿多年生草本,株高0.8~1.2 m,原产于欧洲南部,非洲北部及小亚细亚等地,在中国、英国、美国、新西兰、澳大利亚等国家广泛栽培。多花黑麦草是Cd的超富集植物,对Cu、Zn均有较强的富集特性,常用作Pb/Zn尾矿修复的先锋植物。多花黑麦草在Zn、Cd浓度分别为8和 $2 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的复合污染土壤上生长70 d,其地上部Zn、Cd浓度分别达到3108和 $74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (徐卫红等,2006);在 $\text{Cu} 1086 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn} 2978 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} 830 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cd} 7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的复合污染下,向土壤添加 $0.35 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$,多花黑麦草地上部可富集Cu $950 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (杨强等,2005);用 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd溶液培养多花黑麦草15 d,其地上部能富集Cd $116 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Shamima & Sugiyama 2008)。

花叶燕麦草(*Arrhenatherum elatius*):禾本科多年生草本,株高1.0~1.5 m,原产欧洲和地中海一带,各国均引种栽培。对Cd、Zn有极强的耐性和较强的富集能力。Deram等(2007)研究分别来自重污染区、中等程度污染区和清洁区的9个品种在Zn、Cd浓度分别为3000和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 复合污染土壤下生长,发现所有品种在各处理中生长良好,来自重污染区的品种地上部Zn和Cd浓度分别为325和 $52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,来自中等程度污染区的品种Zn和Cd浓度分别为482和 $123 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,来自非污染区的品种Zn和Cd浓度分别为524和 $83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

百喜草(*Paspalum notatum*):禾本科多年生草本,株高0.3~0.6 m,原产南美,现在热带亚热带地区广泛引种栽培。百喜草对Zn、Pb、Cd的耐性极强,且有较强的富集能力,在含Cd $56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} 2534 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn} 11060 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu} 1626 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的尾矿上生长良好,植物体内可富集Cd $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} 217 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn} 331 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu} 65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是金属尾矿植被修复的先锋植物(龙健等,2004)。

高羊茅(*Festuca arundinacea*):禾本科多年生草本,株高0.5~0.9 m,原产西欧,广泛分布于世界各地。由于其快速生长且可耐高浓度的Zn、Pb,可用于修复Zn、Pb污染土壤。高羊茅在土壤Pb浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 并添加醋酸和EDTA时,生长未受抑制且地上部和根部Pb浓度分别达4500和 $1500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Begonia et al. 2005)。在上层土壤(0~5 cm)重金属浓度为Zn $337 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} 61 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1} 、Cd $2.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cu $275 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下层土壤(5~27 cm)重金属浓度为 Zn $41000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb $1850 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd $138 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cu $275 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤上生长未受毒害,地上部富集 Zn $1553 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Palazzo *et al.* 2003)。

高丹草(*Sorghum vulgare* × *S. sudanense*):禾本科1年生草本,高2.5~2.8 m,是目前世界上栽培最普遍的1年生暖季型禾本科牧草之一,在阿根廷、美国等美洲国家使用极其广泛,目前我国正在推广利用。当土壤中Cd浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,高丹草叶、茎、根Cd浓度分别为42、108、149 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,由于高丹草具有极高的生物量且对Cd有较强的富集能力,具有修复Cd污染土壤的潜力(汪建飞等,2005)。

披碱草(*Elymus dahuricus*):禾本科多年生草本,高0.7~1.6 m,主要分布于北半球寒温带的蒙古、俄罗斯、日本、朝鲜、印度等国。董艺婷等(2003)通过砂培盆栽实验发现,当溶液Pb浓度为 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,披碱草地上部分Pb含量达到1345 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,具有修复Pb污染土壤的潜力。

3 牧草修复重金属污染土壤的优势

3.1 生长快、生物量大,重金属吸收量多

牧草拥有适应性强、生长快速、生物量大、抵抗力和固土力强的特点,是废弃地和矿区良好的植被恢复物种,尤其是在高温多雨的热带和亚热带地区(Xia *et al.* 1999)。高生物量的牧草,虽然其富集能力比不上很多超富集植物,但是由于它们的生物量大,生长快,能同时吸收多种金属,所以植物体内的重金属总量和超富集植物相比相差不大,有些甚至比超富集植物的还高。Zhuang等(2007)研究发现,收获一季(种植140 d)高生物量的皱叶酸模可清除污染土壤中Zn $26.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和Cd $0.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;同等条件下,Zn的超富集植物东南景天(*Sedum alfredii*)收获一季(种植140 d)可清除污染土壤中Zn $32.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,Cd的超富集植物宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)收获一季(种植140 d)可清除污染土壤中Cd $0.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.2 具有更好的生态恢复与水土保持功能

很多超富集植物在对重金属污染区进行修复时都会受到土壤基质的影响,植物不能正常生长甚至无法生长,达不到理想的修复效果,但牧草则可以克服土壤贫瘠、干旱、盐渍化等恶劣环境而正常生长。

与其他植物相比,牧草往往在生态恢复、水土保持、防治土地沙漠化、盐渍化等方面发挥着更为重要的作用。

在生态恢复方面,用于矿地恢复的植物通常应该是抗逆性强、生长迅速、改土效果好和生态功能明显的种类,禾草与豆科植物往往是首选物种(夏汉平和蔡锡安,2002)。例如,Xia(2004)在广东茂名北排土场试种香根草、百喜草、杂交狼尾草等具有较强抗逆性和广泛适应性的草种,辅以肥料的施用,恢复效果较好。在水土保持方面,赵明坤和陈瑞祥(2006)于2003—2005年在退耕坡地种植苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)和鸭茅(*Dactylis glomerata*)2种牧草,发现它们具有良好的水土保持特性,比较适宜在退耕坡地还草中利用。著名的香根草是国内外推广应用最多的水土保持草,越南用其保护河岸和围堤,澳大利亚用其保护图固拉瓦湿地,中国大别山区利用香根草系统对小流域进行有效管理(Chomchalow 2008),广东用其治理公路滑坡的棘手难题(夏汉平等,1998)均取得令人满意的结果。在防治土地沙漠化方面,旱生牧草拥有强大的根系和顽强的生命力,应该成为治理荒漠化植被恢复的首选品种。秦嘉海(2004)用紫花苜蓿改良河西走廊荒漠化土壤,效果显著。在防治土地盐渍化方面,在可溶性盐含量高的盐渍化土地上,普通植物不能扎根生长,但耐盐牧草则例外。李志丹等(2004)在盐渍化土壤种植耐盐牧草后,土壤理化性质发生明显改变,土壤结构趋于好转,土壤表层盐分含量逐渐降低,养分含量逐渐增加。澳大利亚南部温带草原引进各种耐盐牧草以改善干旱地的盐渍化,效果显著(Hughes *et al.* 2008)。

3.3 易于栽培管理

在应用富集植物修复污染土壤时,栽培管理要先后经过育苗、翻耕、种植、除虫、除草、收割等程序。苗源问题是植物修复工程应用所面临的首要问题,超富集植物往往存在育苗难或育苗周期过长等问题(廖晓勇等,2007)。由于大多数超富集植物植株矮小,有的超富集植物还存在种子难收获,发芽和授粉困难,容易染病的缺点(McIntyre,2003),在植物修复过程中,常常竞争不过本土杂草,影响修复植物的生长和修复效果。与此相比,牧草大多直接向土壤播种,竞争能力强,病虫害少,在与乡土植物竞争时占据优势,大多数牧草是多年生草本,再生能力强,可以通过相对频繁地刈割来提高其生物量,无须每

年重复栽植,降低工序和成本。此外,牧草机械化收割方便经济等,这些优势都是其他植物不具备的。

3.4 修复 Cu/Zn 专性尾矿时,收获的植物可做饲料

修复植物的后期处理仍是个重大问题,若收获的植物得不到妥善处理,则很可能产生二次污染。目前常用的方法是焚烧,利用底灰回收重金属,但此项技术还不成熟,亦可能造成二次污染。例如,邢前国和潘伟斌(2004)采用富含 Cd、Pb 的野生植物铁芒萁(*Dicranopteris linearis*),在 450 °C、650 °C、850 °C 不同温度下进行了焚烧模拟试验,发现铁芒萁的灰分残留量可以降到 10% 以下,Cd、Pb 在灰化过程中均有很大损失,Cd、Pb 通过烟气散到了空中。因此,直接利用底灰来进行 Cd、Pb 的冶炼回收不可行,必须寻找新的处理方法。

Cu、Zn 是动物的必须元素,由于植物性饲料中 Cu、Zn 含量较低,不能满足动物的营养需要,所以通常在饲料中额外补充 Cu、Zn 化合物(李佳和解鹏,2006;周晓明等,2007)。牧草在 Cu/Zn 专性尾矿种植一段时间后,吸收了 Cu、Zn 元素,在食品安全规定的浓度范围内制成饲料,这样既可降低饲料的成本,也可解决修复植物的后期处理问题,为修复植物的后期处理提供一个新的渠道,充分体现牧草在重金属污染区的经济价值。

牧草作为土壤重金属污染的修复植物虽然拥有以上种种优点,但也有不足之处,如容易被动物尤其是禽畜取食进而进入人体而造成食物链污染。因此,使用牧草用于修复重金属污染土壤时,必须加以注意。

4 展望

应用牧草修复重金属污染土壤或恢复金属矿山已经越来越受到人们的关注,有关的研究报道也越来越多。可以肯定,今后的发展会越来越快。为了使牧草的植物修复与生态恢复更有效,更安全,今后加强以下几方面的研究:

1) 全世界的牧草品种数以千计,但目前已被测试的仅百余种,因而继续筛选对重金属耐性强且有较强富集能力的牧草新品种仍是今后土壤重金属修复的研究热点。

2) 牧草虽然拥有生长快速、生物量大等优势,但大多数牧草的富集能力不如超富集植物,应该寻找各种改良措施提高其修复能力,如用转基因技术

改善植物生长特性,促进植物根系与土壤接触的机会,接种真菌和细菌调节植物根系微生物的种类、数量和活性;添加螯合剂 EDTA、DTPA、柠檬酸、苹果酸和土壤改良剂铵肥等(孙琴等,2005;屈冉等,2008)。

3) 目前人们对植物修复的后期处理关注较少,各种技术尚未成熟。至于如何处理修复后富集有重金属的植物还有待进一步研究。

如果用超富集植物回收重金属的工艺问题得到解决,人们在治理重金属污染土壤的同时还能从种植的植物中回收一定量的重金属,如美国 Viridian 环境修复公司用植物修复技术净化 Ni 污染土壤,每年可以从 Ni 的回收中获取 2500 美元·hm⁻²的收益(殷学波,2008)。同时,人们还可以把从 Cu、Zn 专性尾矿上收获的植物制成微肥和饲料,如吴龙华等(2006)发明了利用 Cu 修复植物海州香薷(*Elsholtzia splendens*)制作含铜有机肥料的方法,然后加以利用,尤其是施用于土壤缺铜的地区,从而达到变废为宝的目的。因此,如何妥善处理利用植物修复技术中收获的植物,解决生产工艺问题应成为今后进一步加强研究的课题。

参考文献

- 董艺婷,崔岩山,王庆仁. 2003. 单一与复合污染条件下两种敏感性植物对 Cd、Zn、Pb 的吸收效应. 生态学报, 23(5): 1019-1024.
- 李佳,解鹏. 2006. 饲料添加高铜的利弊及取代高铜的策略. 中国畜牧兽医, 33(1): 6-9.
- 李志丹,干友民,泽柏,等. 2004. 牧草改良盐渍化土壤理化性质研究进展. 草业科学, 21(6): 17-21.
- 廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等. 2007. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施. 环境科学学报, 27(6): 881-893.
- 龙健,黄昌勇,滕应,等. 2004. 几种牧草对铜尾矿重金属的抗性及其微生物效应. 环境科学学报, 24(1): 159-164.
- 卢良恕. 1995. 中国农业持续发展和综合生产力研究. 济南: 山东科技出版社.
- 秦嘉海. 2004. 河西走廊荒漠化土壤资源及生物改土培肥的效应. 农村生态环境, 20(1): 34-36.
- 屈冉,孟伟,李俊生,等. 2008. 土壤重金属污染的植物修复. 生态学杂志, 27(4): 626-631.
- 石汝杰,陆引罡. 2007. 4 种草本植物对酸性黄壤中铅的吸收特性研究. 水土保持学报, 21(3): 73-76.
- 孙琴,王晓蓉,丁士明. 2005. 超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展. 生态学杂志, 24(1): 30-36.
- 孙晋伟,黄益宗,石孟春,等. 2008. 土壤重金属生物毒性研究进展. 生态学报, 28(6): 2861-2869.

- 汪建飞,邢素芝,段立珍,等. 2005. 镉在杂交苏丹草中的积累和毒害效应. *南京农业大学学报*, **28**(2):64-68.
- 王红旗,李华,陆泗进. 2005. 羽叶鬼针草对Pb的吸收特性及修复潜力. *环境科学*, **26**(6):143-147.
- 韦朝阳,陈同斌. 2001. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. *生态学报*, **21**(7):1196-1204.
- 吴龙华,李宁,骆永明,等. 2006. 利用修复植物海州香薷制作含铜有机肥料的方法. 中国. 专利号:200610037757.3.
- 夏汉平,敖惠修,刘世忠. 1998. 香根草生态工程-实现可持续发展的生物技术. *生态学杂志*, **17**(6):44-50.
- 夏汉平,蔡锡安. 2002. 采矿地的生态恢复技术. *应用生态学报*, **13**(11):1141-1147.
- 邢前国,潘伟斌. 2004. 富含Cd、Pb植物焚烧处理方法的探讨. *生态环境*, **13**(4):585-586,600.
- 徐卫红,王宏信,王正银,等. 2006. 重金属富集植物黑麦草对锌、镉复合污染响应. *中国农学通报*, **22**(6):365-368.
- 杨强,林琦,王兆炜,等. 2005. 重金属污染土壤H₂O₂预处理的植物修复技术研究. *浙江大学学报*, **31**(3):315-320.
- 叶春和. 2002. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究. *土壤与环境*, **11**(4):331-334.
- 殷学波. 2008. “植物修复污染土壤”之十六:植物修复好,回收重金属[EB/OL]. [2008-12-17]. <http://www.bjkgp.gov.cn/bjkgpzc/tszr/zwdg/zwyxf/161398.shtml>.
- 俞铮. 2008. 陈同斌小组利用超富集植物修复重金属污染土地[EB/OL]. [2008-12-17]. <http://www.sciencenet.cn/htmlnews/2008519154623850206856.html>
- 赵明坤,陈瑞祥. 2006. 苇状羊茅和鸭茅的水土保持效果. *贵州农业科学*, **34**(4):92-94.
- 周晓明,廖蔚峰,陈志传,等. 2007. 微量元素锌饲料添加剂的应用与发展. *饲料研究*, (5):14-15.
- Alkorta I, Hernández-Allica J, Becerril JM, et al. 2004. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **3**:71-90.
- Antiochia R, Campanella L, Ghezzi P, et al. 2007. The use of vetiver for remediation of heavy metal soil contamination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **388**:947-956.
- Begonia MT, Begonia GB, Igboavodha M, et al. 2005. Lead accumulation by tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) grown on a lead-contaminated soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2**:228-33.
- Brooks RR. 1998. Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals: Their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archeology, Mineral Exploration and Phytomining. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chen YH, Shen ZG, Li XD. 2004. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Applied Geochemistry*, **19**:1553-1565.
- Chomchalow N. 2008. 香根草系统:将香根草与人联系到一起的全球性技术以便加强乡村社区和保护自然资源//徐礼煜和夏汉平. 香根草系统的理论与实践. 北京:中国广播电视出版社:14-19.
- Clemente R, Paredes C, Bernal MP. 2007. A field experiment investigating the effects of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia (Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **118**:319-326.
- Deram A, Denayer FO, Dubourgier HC, et al. 2007. Zinc and cadmium accumulation among and within populations of the pseudometallophytic species *Arrhenatherum elatius*: Implications for phytoextraction. *Science of the Total Environment*, **372**:372-381.
- Dhankher OP, Li YJ, Rosen BP, et al. 2002. Engineering tolerance and hyperaccumulation of arsenic in plants by combining arsenate reductase and γ -glutamylcysteine synthetase expression. *Nature Biotechnology*, **20**:1140-1145.
- Edenspace. 2008. Growing a clean environment(tm) [EB/OL]. [2008-12-17]. <http://www.edenspace.com/products/envirosolutions.html?expandable=1>
- Gardezi AK, Barcelo-Quintal ID, Cetina-Alcala VM, et al. 2005. Phytoremediation by *Leucaena leucocephala* in association with arbuscular endomycorrhiza and rhizobium in soil polluted by Cr// 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. *WMSCI*, **7**:289-298.
- Greger M. 1999. *Salix* as phytoextractor// Proceedings of 5th International Conference on the Biogeochemical of Trace Elements. Vienna, Austria:872-876.
- Henry JR. 2000. An overview of the phytoremediation of lead and mercury. United States Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.
- Hsiao KH, Kao PH, Hsueh ZY. 2007. Effects of chelators on chromium and nickel uptake by *Brassica juncea* on serpentine-mine tailings for phytoextraction. *Journal of Hazardous Materials*, **148**:366-376.
- Hughes SJ, Snowball R, Reed KFM, et al. 2008. The systematic collection and characterisation of herbaceous forage species for recharge and discharge environments in southern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **48**:397-408.
- Ip CCM, Li XD, Zhang G, et al. 2004. Over one hundred years of trace metal fluxes in the sediments of the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution*, **132**:157-172.
- Li XL, Christie P. 2001. Changes in soil solution Zn and pH and uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal red clover in Zn-contaminated soil. *Chemosphere*, **42**:201-207.
- McGrath SP, Zhao FJ. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, **14**:277-282.
- McIntyre T. 2003. Phytoremediation of heavy metals from soils. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, **78**:

- 97-123.
- Mosquera-Losada MR , López-Díaz L , Rigueiro-Rodríguez A. 2001. Sewage sludge fertilisation of a silvopastoral system with pines in northwestern Spain. *Agroforestry Systems* ,**53** : 1-10.
- Nahmani J , Lavelle P. 2002. Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France. *European Journal of Soil Biology* ,**38** :297-300.
- Palazzo AJ , Cary TJ , Hardy SE , et al. 2003. Root growth and metal uptake in four grasses grown on zinc-contaminated soils. *Journal of Environmental Quality* ,**32** :834-840.
- Pederson GA , Brink GE , Fairbrother TE. 2002. Nutrient uptake in plant parts of sixteen forages fertilized with poultry litter : Nitrogen , phosphorus , potassium , copper , and zinc. *Agronomy Journal* ,**94** :895-904.
- Peralta-Videa JR , Gardea-Torresdey JL , Gomez E , et al. 2002. Effect of mixed cadmium , copper , nickel and zinc at different pHs upon alfalfa growth and heavy metal uptake. *Advances in Environmental Research* ,**119** :291-301.
- Schuerger AC , Capelle GA , di Benedetto JA , et al. 2003. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in bahia grass(*Paspalum notatum* Flugge.). *Remote Sensing of Environment* ,**84** :572-588.
- Sekara A , Poniedzialek M , Ciura J , et al. 2005. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops : Implications for phytoremediation. *Polish Journal of Environmental Studies* ,**14** :509-516.
- Seregin IV , Ivanov VB. 2001. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology* ,**48** :523-544.
- Shamima S , Sugiyama SI. 2008. Cadmium phytoextraction capacity in eight C-3 herbage grass species. *Grassland Science* ,**54** :27-32.
- Sheng XF , He LY , Wang QY , et al. 2008. Effects of inoculation of biosurfactant-producing *Bacillus* sp. J119 on plant growth and cadmium uptake in a cadmium-amended soil. *Journal of Hazardous Materials* ,**155** :17-22.
- Simon L , Martin HW , Adriano DC. 1996. Chicory (*Cichorium intybus* L.) and dandelion (*Taraxacum officinale* Web.) as phytoindicators of cadmium contamination. *Water , Air , and Soil Pollution* ,**91** :351-362.
- Szabó L , Fodor L. 2006. Uptake of microelements by crops grown on heavy metal-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* ,**37** :2679-2689.
- Wang M , Zou JH , Duan XC , et al. 2007. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). *Bioresource Technology* ,**98** :82-88.
- Wong SC , Li XD , Zhang G , et al. 2002. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta , South China , *Environmental Pollution* ,**119** :33-44.
- Xia HP , Ao HX , Liu SZ , et al. 1999. Application of the vetiver eco-engineering for the prevention of highway slippage in South China// Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering Erosion Control and Slope Stabilization. Manila , The Philippines :522-527.
- Xia HP. 2004. Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land. *Chemosphere* ,**54** :345-353.
- Zhang H. 2004. Heavy-metal pollution and arseniasis in Hetao region , China. *Ambio* ,**33** :138-140.
- Zhuang P , Yang QW , Wang HB , et al. 2007. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. *Water , Air , and Soil Pollution* ,**184** :235-242.

作者简介 张杏锋 ,女,1982年生,博士研究生。主要从事重金属污染土地的植物修复研究。E-mail : zhangxingfeng06@scbg.ac.cn

责任编辑 魏中青
