

利用能源植物治理土壤重金属污染*

贾伟涛¹ 吕素莲¹ 冯娟娟¹ 李银心^{1**} 李纪红^{2,3} 李十中^{2,3**}

(1 中国科学院植物研究所 植物分子生理学重点实验室 北京 100093 2 清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

(3 清华大学北京市生物燃料工程技术研究中心 北京 100084)

摘要 随着工农业的发展,土壤重金属污染日益加剧,严重威胁着粮食生产和人类健康。植物修复因其成本低、环境友好以及可大规模原位修复等优点备受关注,成为近年来迅速发展的重金属污染土壤治理技术。在介绍国内外植物修复技术发展与应用现状的基础上,提倡大力发展能源植物修复重金属污染土地,并结合湖南重金属污染田间试验结果,重点对甜高粱(*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench)用于重金属污染土壤修复的优势、可行性及提高修复效率的措施进行了深入分析与探讨。利用甜高粱治理土壤重金属污染,能将土壤修复与生物能源生产有机结合,使重金属从粮食链转入能源链,同时兼顾了生态和经济效益,具有广阔的应用前景。

关键词 重金属污染土壤 修复 能源植物 甜高粱 能源利用

中图分类号 Q819

随着工业技术的飞速发展和人类活动的加剧,土壤重金属污染日趋严重,已成为当今世界最严重的环境问题之一。Morton-Bermea 等^[1]对墨西哥城的城市土壤研究表明,Pb(铅)、Zn(锌)、Cu(铜)的污染指数分别达到了23.8、21.6、12.4。Nahmani 和 Lavelle^[2]的报告也指出一个世纪以来的金属冶炼活动对法国北部的土壤造成了严重的污染。近年来,我国工业化和城市化进程不断加快,大量污染物随意排放,加之缺乏有效的防治措施,使得土壤重金属污染日益加剧,污染面积也在逐年扩大。2014年4月17日,国家环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,在所有调查的点位中,有16.1%的点位土壤遭受了不同程度的污染,而以Cd(镉)、Hg(汞)、As(砷)、Cu、Pb、Cr(铬)、Zn、Ni(镍)为代表的无机污染类型占全部超标点位的82.8%。2005年以来,我国已发生百余起重大重金属污染事故,其中As、Cd、Pb等重金属污染事故达30多起,如云南阳宗海砷污染事件、湖南浏阳镉污染事件、湖南郴州儿童血铅超标事件等。为此,2014

年,国家启动了重金属污染耕地修复综合治理工作,按照“因地制宜、政府引导、农民自愿、收益不减”的原则,先期在湖南省长株潭地区开展试点,旨在通过加强耕地质量建设和污染修复治理,实现重金属污染耕地的农产品达标生产。

目前国内外对于重金属污染土壤的治理和修复仍以传统的物理(如换土、深耕翻土、土壤淋洗和电动修复等)和化学(如化学沉淀法、氧化还原法和化学浮选法等)方法为主。这类方法虽然治理速度快,效果较好,但成本高,对土壤结构有损害,易造成二次污染^[3],只适合小面积污染土壤的治理。近年来土壤污染逐渐由原来局部污染发展为区域性的污染,并且存在多重污染源,给土壤治理工作带来了新的挑战。植物修复因其成本低、环境友好以及可大规模原位修复等优点而备受欢迎,成为近年来迅速发展的土壤重金属污染治理技术^[4]。本文在介绍国内外植物修复技术发展与应用现状的基础上,提倡大力发展能源植物进行重金属污染土壤修复,并结合湖南重金属污染田间试验结果重点对甜高粱用于重金属污染土壤修复的优势、可行性及提高修复效率的措施进行了深入分析与探讨。

1 植物修复技术的发展及应用现状

植物修复(phytoremediation)是利用绿色植物来固

收稿日期:2014-08-12 修回日期:2014-11-20

* 国家国际科技合作专项(2012DFG61720),北京市科技专项(Z131109002813080)资助项目

**通讯作者,电子信箱:yxli@ibcas.ac.cn; szli@tsinghua.edu.cn

定、吸收、转移、转化和降解土壤中污染物的过程^[5,6]。重金属污染土壤的植物修复技术主要包括植物提取、植物固定和植物挥发三种类型。植物提取(phytoextraction)是利用植物从污染土壤中吸收重金属并在地上部分积累,然后通过收获地上部分去除土壤污染物,如一些超富集植物对重金属元素的吸收。植物固定(phytostabilization)是指利用植物根系活动固定重金属的过程,如根系分泌物中有机酸可以螯合重金属离子。植物挥发(phytovolatilization)是指利用植物根系分泌物使土壤中的重金属 Se(硒)、Hg、As 等挥发出来的过程^[7]。

1.1 利用超富集植物修复重金属污染土壤

1977 年, Brooks 等^[8]提出了重金属超富集植物(hyperaccumulator)的概念。1997 年, Chaney 等^[9]首次提出了利用超富集植物清除土壤中重金属污染物的思想。此后,随着有关研究的增多以及人们对超富集植物认识的加深,植物修复作为一种治理污染土壤的技术被提出并显示出巨大的应用前景。目前用于土壤修复的植物仍多为超富集植物。超富集植物一般应满足两个条件:植物叶片或地上部(干重)中 Cd 含量达到 100 $\mu\text{g/g}$, Co(钴)、Cu、Ni、Pb 含量达到 1 000 $\mu\text{g/g}$, Mn(锰)、Zn 含量达到 10 000 $\mu\text{g/g}$; 植物转运系数 TF(translocation factor, 植物地上部分和根部重金属含量之比)大于 1^[10-11]。全世界范围内已发现对 Zn、Ni、Mn、Cu、Co、Cd、As 和 Se 有超富集作用的植物 500 余种,其中 Ni 超富集植物约占 75%。我国发现的超富集植物有 10 种以上,如 As 的超富集植物蜈蚣草(*Pteris vittata* L.), Cd 的超富集植物宝山堇菜(*Viola baoshaensis*), Cr 的超富集植物李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz), Mn 的超富集植物商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb.), Zn 的超富集植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance)等^[6, 12-13]。部分超富集植物已经应用于重金属污染土壤的修复实践。如 Baker 等^[14]通过田间试验研究发现超富集植物遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)对污染土壤中的重金属尤其是 Zn 具有良好的吸收效果。另有研究发现 As 的超富集植物蜈蚣草同时对 Pb 有很强的富集能力,通过原位试验证明蜈蚣草对重金属 As、Pb 污染土壤有良好的修复效果^[15]。

虽然超富集植物能够忍受和吸收较高浓度的重金属,但大部分生长缓慢、植株矮小、生物量低,严重限制了其对土壤重金属的移除效率,而且不利于大面积的机械化操作,再加上经济效益低,难以大规模推广应

用^[16]。因此有人提出可用高生物量的一般植物修复重金属污染的土地,虽然其吸收重金属的量较少,但因生物量高,最后吸收的重金属总量可能会更多。杨勇等^[17]比较了超富集植物遏蓝菜和 3 种高生物量植物印度芥菜(*Brassica juncea*)、烟草(*Nicotiana tabacum* L.)和向日葵(*Helianthus annuus* L.)提取 Cd 效率的差异,结果表明烟草对 Cd 的提取量最多,是印度芥菜和超富集植物遏蓝菜对 Cd 提取量的 4 倍左右,是向日葵对 Cd 提取量的 13 倍,从而证明了一些高生物量植物可以用于重金属污染土壤的修复。

1.2 能源植物在重金属污染土壤修复中的应用

化石能源的日益短缺以及生态环境的持续恶化已危及全球,寻找可再生的清洁能源、治理环境污染成为人类亟待解决的两大重要问题。生物质能以其绿色环保、清洁、可再生等优势成为一种重要的替代能源,而能源植物是生物质能的主要来源之一。能源植物种类繁多,通常具有很高生物量,近年来,关于其吸收重金属的研究已经有一些报道。

柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)为多年生草本 C4 能源植物,生物产量可达 20 t/hm²。研究发现柳枝稷对 Cd 有一定的耐受性和吸收能力,在 60 mg/kg 的 Cd 浓度下仍能生长^[18]。Cd 在柳枝稷根、茎、叶中的分布不同,而且不同生态型的柳枝稷对 Cd 的吸收能力也存在差异^[19]。Reed 等^[20]发现土壤 pH 呈酸性时更有利于柳枝稷对 Cd 的积累,在接近中性的条件下对 Cd 的积累量相对较少,因此可以通过改变土壤环境提高对污染土壤的修复效率。

芒草为禾本科高粱族能源植物,全世界约有 17 个种,其中一个种“奇岗”(*Miscanthus × giganteus*)的生物量可高达 61 t/hm²,“奇岗”在 As、Sb(锑)和 Pb 含量高的污染土地上仍可正常生长,并且在根部积累较多的 As、Sb 和 Pb^[21]。Ezaki 等^[22]研究发现须芒草(*Andropogon virginicus* L.)和芒草对 Al(铝)有很强的耐受性,可能与诱导产生的超氧化物酶、过氧化氢酶增多以及根对 Al³⁺的排斥作用增强有关。

不同能源植物吸收重金属的能力也存在很大差异。Liu 等^[23]研究发现象草(*Pennisetum purpureum* Schumach)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)和芦苇(*Phragmites australis*)对 Cu 具有较强的耐受性。当土壤中的 Cu 含量达到 1 500 mg/kg 时,三种植物的干重仍没有明显下降,其中以象草对 Cu 的耐受性最强。侯新村等^[24]在轻度污染土地上开展了四种草本能源植物

柳枝稷、荻 (*Triarrhena sacchariflor*)、芦竹 (*Arundo donax*) 和杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) 对 As、Hg、Cu、Cr、Pb、Cd 的吸收能力对比试验,发现它们的生长受重金属的影响较小,并且以杂交狼尾草对污染土地的修复潜力最大,芦竹、荻、柳枝稷次之。从以上研究可以看出,能源植物具备用于修复重金属污染土壤的潜力。

柳枝稷、芒草等能源植物主要利用纤维素为原料生产乙醇,目前利用纤维素生产乙醇的成本很高,在实际生产中应用不多。而利用玉米、甜菜等富含淀粉、糖分的作物生产乙醇的技术虽然比较成熟,但其种植占用大量耕地,依据国家确定的能源植物开发“不与粮争地,不与粮争地”的原则,原料的选择越来越成为乙醇生产的限制因素。甜高粱以其茎秆含糖量高,生长周期短,生物量大,抗逆性强,适应面广,能够充分利用边际土地等优势成为最具应用前景的能源植物之一。

2 利用能源植物甜高粱治理重金属污染土壤

2.1 甜高粱治理重金属污染土壤的优势

甜高粱 (*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench) 是禾本科, C4 植物, 为粒用高粱的一个变种。其株高可达 4 m 以上, 最高接近 6 m, 每公顷能收获 3 ~ 6 t 种子和 45 ~ 75 t 茎秆, 茎秆糖锤度一般为 16% ~ 22%, 可产糖约 6 ~ 9 t/hm², 纤维素含量为 12% ~ 20%, 折合产纤维 9 ~ 15 t/hm² [25-28]。除了生物产量及茎秆含糖量高之外, 甜高粱还具有以下几个重要特质: 生育期短, 可一年收获两季甚至多季; 抗逆性强, 可充分利用边际土地; 茎秆、籽粒可以通过生物发酵技术生产燃料乙醇, 进而替代石油减少雾霾污染; 发酵后的酒糟可以用来燃烧发电, 产生的废弃物极少; 甜高粱茎秆高大, 适合机械化操作, 人力成本低, 因此甜高粱是优良的生物质能源植物。鉴于其自身的特点, 结合现阶段植物修复应用现状, 如果甜高粱在作为能源植物栽培的同时能够吸收土壤重金属, 其体内吸收的重金属元素将在生物发酵后集中在酒糟中, 后者燃烧成灰烬使重金属高度富集, 灰烬继续处理后可用于工业生产 [29] (见图 1)。因此, 利用甜高粱修复重金属污染土壤具有很大的潜力。

已有研究表明高粱是一种能有效吸收重金属的作物 [30], 而且与其它作物和能源植物相比, 高粱 (甜高粱) 在吸收重金属方面具有很大的优势。Metwali [31] 等研究了 Cu 和 Cd 两种重金属在单独施加或混施的条件下对三种粮食作物小麦、玉米、高粱的影响, 发现在三

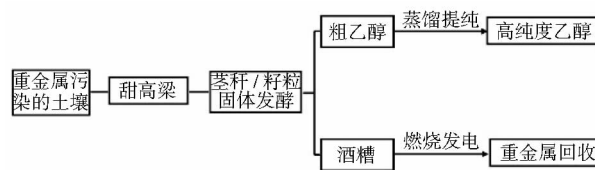


图 1 甜高粱修复重金属污染土壤流程图

Fig. 1 The flow chart of remediation of heavy metal contaminated soils by using sweet sorghum

种作物中高粱对重金属的耐受性最强, 在单独 Cd 处理下高粱对 Cd 的吸收量也最高。余海波等 [32] 在典型复合污染农田开展了能源植物甜高粱、甘蔗 (*Saccharum* spp.), 香根草 (*Vetiveria zizanioides* L.) 和盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.) 种植示范研究, 发现在经石灰和磷矿粉改良后的重金属污染农田, 甜高粱, 甘蔗, 香根草的生物量有所降低, 但甜高粱和甘蔗汁液总糖和还原糖含量并没有明显变化, 并且整个示范区甜高粱平均单产为 63.5 t/hm², 甘蔗的平均单产为 45 t/hm²。经估算, 单位面积甜高粱生物乙醇产量为甘蔗的 2 倍, 说明在重金属污染的土地上种植甜高粱具有更大的经济效益。

2.2 高粱 (甜高粱) 吸收重金属研究进展

目前, 国内外已有一些高粱 (甜高粱) 吸收重金属的研究报道, 但大多集中在生理水平。Kuriakose 等 [33] 研究发现酸性磷酸酶、蛋白酶、α-淀粉酶等水解酶活性的降低可能是 Cd 处理引起高粱萌发及幼苗生长受到抑制的重要因素。高粱在高浓度的 Cd 和 Zn 处理下生长受阻, 叶绿素含量下降, 出现黄萎病, 过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶的活性降低等现象 [34], 但有研究发现 1 mg/L 以下的低浓度 Cd 处理反而刺激了高粱的生长和对 Fe 的运输, 生物量与对照相比也有所增加, 并且没有明显的毒害症状, 在 10 mg/L 的 Cd 处理下生物量则出现比较明显的下降 [35]。高粱可通过增加体内能结合金属离子的多肽含量, 与金属离子形成螯合物等内部机制来排除金属离子的毒害 [36]。高粱吸收 Cd 后主要积累在根部, 随着处理浓度的提高 Cd 从根到地上部分的转移也有所增加。通过外施有机物的方法可以减少溶液中有效 Cd 的含量, 从而降低根部 Cd 的浓度; 另一方面有机物的存在增加了高粱内部的可溶性 Cd 含量, 促进 Cd 向地上部分的转移 [35]。不过也有研究表明在 Cd 浓度高达 500 μmol/L 时添加有机物谷胱甘肽能同时提高高粱根和地上部分 Cd 的积累量 [36]。关于高

梁(甜高粱)应对金属离子胁迫的分子机制研究还比较少。有研究发现在拟南芥中过表达甜高粱的 β -1, 3-葡聚糖酶基因能够降低胼胝质的积累,提高拟南芥对 Al 毒害的耐受性^[37]。另外来自高粱的一种含有亮氨酸重复单位的 SbLRR2 蛋白能够介导拟南芥对 Pb 的耐受性,在转 *SbLRR2* 基因的拟南芥中,编码膜上 ABC 家族转运蛋白基因 *AtPDR12* 的表达量升高,促进了对 Pb 的解毒作用^[38]。

不同高粱(甜高粱)品系吸收重金属的能力有很大差异^[39-41],选择对重金属富集和转移能力强的品系是利用高粱(甜高粱)修复重金属污染土壤的关键。2013年7~12月,中国科学院植物研究所与清华大学合作在湖南省 Cd 污染程度不同的四个地点(益阳市赫山区、衡阳市衡阳县、株洲市天元区以及郴州市桂阳县)开展了8个甜高粱品系吸收重金属能力对比试验(图2),发现甜高粱植株中 Cd 浓度随着土壤 Cd 浓度的升高而升高,这与实验室的盆栽试验结果一致,而且不同品系的 Cd 吸收能力存在很大差异。同时在衡阳进行了229个甜高粱品系的 Cd 吸收能力对比试验,已筛选到了15个高吸收 Cd 的品系(图3)。在土壤 Cd 含量最高的桂阳(11.86 mg/kg),经推算甜高粱单株吸收 Cd 总量最高可达2.8 mg,每亩甜高粱可吸收约18 g 的 Cd (以6 667 株/亩计)。更重要的是,通过筛选,获得高吸收量的品系能显著提高甜高粱对土壤中镉的提取量。如我们已经筛选到的两个甜高粱品系即使在 Cd 浓度很低的衡阳(0.27 mg/kg),其整株 Cd 吸收量也分别达到约3.65 和 3.35 mg,可以推断其在 Cd 浓度高的土壤中,这一指标还会升高。因此筛选和培育重金属吸收能力强的甜高粱品系在重金属污染土壤的修复中具有重大意义,此次试验也证实了利用能源植物甜高粱修复重金属污染土地的可行性。

综上所述,甜高粱吸收重金属的能力与超富集植物相比有一定差距,但比小麦、玉米等其他禾本科作物更强,并且具有非常可观的经济效益。根据实验数据测算,如果改造4 000 万亩重金属(如 Cd)污染农田(每年种植两季甜高粱),大约可生产乙醇2 000 万吨、发电1 000 万千瓦,回收重金属(Cd)3 800 吨,既解决污染土地治理的经济效益问题,又起到生产清洁能源,回收重金属,确保食品安全的作用,可以达到一举多得的效果^[29]。

2.3 提高甜高粱修复效率的措施

重金属污染土壤植物修复效率一方面取决于植物



图2 湖南省桂阳县甜高粱吸收重金属试验

Fig.2 The trial of sweet sorghum on absorbing heavy metal in Guiyang County, Hunan Province



图3 湖南省衡阳县甜高粱吸收重金属试验

Fig.3 The trial of sweet sorghum on absorbing heavy metal in Hengyang County, Hunan Province

对重金属的富集水平,另一方面取决于植物自身的生物量。尽管前期试验结果已经表明甜高粱在修复重金属污染土壤方面有相当大的优势,但仍可以通过养分管理措施,化学措施,微生物措施和品种选育等手段进一步提高其修复效率。

2.3.1 养分管理措施 施肥是传统农艺措施的重要组成部分,合理施肥可促进植物生长,提高植物生物量,进而增加植物对重金属的积累。如很多研究表明增加氮素供应能促进植物对 Cd 或 Pb 的吸收^[42-45]。

2.3.2 化学措施 向土壤中施加化学螯合剂,可以改变土壤重金属的形态,提高植物可利用重金属的含量,从而提高植物对重金属的吸收。如 Piechalak 等^[46]通过向土壤中添加 EDTA,使豌豆对 Pb 的富集量增加了67%以上。

2.3.3 生物措施 微生物修复可与植物修复相结合

提高修复效率。植物内生细菌(endophytic bacteria)是指从表面消毒的植物组织中分离得到或从植物内部获得的,能够定殖在健康植物各种组织和器官内,并未使植物的表型特征和功能发生改变的细菌^[47]。Sheng等^[48]发现从油菜(*Brassica napus*)根中分离出的内生菌G16能够提高油菜的生物量并增加其对Pb的吸收。Ma等^[49]将从条叶庭芥(*Alyssum serpyllifolium*)组织中分离出的内生菌A3R3接种到新的条叶庭芥中,能显著增加条叶庭芥对Ni的吸收量。而从Pb、Zn尾矿生长的鸭跖草(*Commelina communis* L.)分离出的两种内生菌Q2BJ2和Q2BG1能够促进油菜的生长和对Pb的吸收^[50]。Luo等^[51]发现植物内生菌SLS18在接种甜高粱、商陆和龙葵(*Solanum nigrum* L.)一段时间后对Mn/Cd的吸附可分别提高65.2%/40.0%,55.2%/31.1%和18.6%/25.6%,具有很大的应用前景。植物根际促生细菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)是指依附在植物根际表面,能够显著地促进植物生长的一类细菌的总称^[52]。Sheng等^[53]从重金属污染土壤中分离出两株抗性菌*Pseudomonas* sp. RJ10和*Bacillus* sp. RJ16,接种油菜后其地上部分和根中Cd的吸收量与对照相比都有显著增加。Ma等^[54]发现从铜矿山土壤中分离出的一种菌株Ax10能促进芥菜的生长,提高其对Cu的吸收量。Jing等^[55]研究发现从伏毛蓼(*Polygonum pubescens*)根际分离的出两种菌株,对高浓度Cd、Pb、Zn具有较强的抗性,并且能增加Cd、Pb、Zn的溶解,将菌株与欧洲油菜在土壤中共培养发现能显著提高欧洲油菜的干重,提高地上部分和根部对Cd、Pb、Zn的吸收。

动物修复与植物修复相结合也能提高植物对重金属土壤的修复效率,研究发现蚯蚓的活动能显著增加甜高粱的生物量,提高其对Cd的吸收^[56]。在Zn污染的土壤中,蚯蚓的引入能使黑麦草(*Lolium multiflorum*)和印度芥菜地上部分生物量分别增加29~83%和11~42%,并且显著提高了印度芥菜中Zn的含量^[57]。水培实验也表明添加蚯蚓黏液能够提高番茄叶绿素含量,增强其抗氧化酶的活性,促进对必需元素的吸收和运输,从而提高番茄幼苗的生长和Cd的积累^[58]。

2.3.4 遗传改良 通过前期试验我们发现不同甜高粱品系对重金属吸收能力差异很大,因此可以通过品种筛选寻找重金属吸收能力强及生物量高的品种应用于土壤重金属污染修复实践。进一步通过深入研究甜高粱重金属吸收转运机理,利用基因工程 and 传统育种

相结合的技术培育对重金属吸收能力强的新品种,从而提高其对重金属污染土壤的修复效率。在其他植物中已有通过转基因提高植物对重金属吸收量的研究。如Shukla等^[59]将金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)的植物螯合肽合成酶基因转移到烟草里,发现与野生型相比转基因株系对Cd的吸收能力显著提高。而过表达水稻质膜上的*OsIRT1*基因发现,与对照相比,过表达植株的株高有少许降低,但根和地上部分Cd的含量却有显著提高^[60]。Park等^[61]过表达拟南芥液泡膜上的*AtABCC1*转运体基因后发现拟南芥的地上部分鲜重与对照相比有明显增加,同时地上部分和根的Cd含量也得到提升。这些研究为培育重金属吸收能力强的优良甜高粱品种提供了基因资源与信息参考。

3 结论与展望

植物修复是新兴高效的生物修复技术,有良好的经济和生态等综合效益。利用能源植物(例如甜高粱)修复重金属污染土壤同时生产清洁能源产品为人们提供了一条崭新的思路,使得土壤修复与生物能源生产有机结合,将重金属从粮食链转入能源链,有效保障了食品安全,是实现绿色、生态、环保可持续发展道路的有效手段。未来的研究应综合运用生物化学、环境科学、植物生理学、土壤科学和生物工程等多学科的方法和成果为植物修复提供技术支持,降低修复成本,最大限度提高对重金属污染土壤的修复效率。

参考文献

- [1] Morton-Bermea O, Hernández-Álvarez E, González-Hernández G, et al. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101(3): 218-224.
- [2] Nahmani J, Lavelle P. Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38(3): 297-300.
- [3] 王海慧, 邹恒福, 罗瑛, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术. *中国农学通报*, 2009, 25(11): 210-214.
Wang H H, Huan H F, Luo Y, et al. Soil contaminated by heavy metals and its phytoremediation technology. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(11): 210-214.
- [4] Carlos G, Itzia A. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 2001, 77(3): 229-236.
- [5] 王兆胡, 王鸣刚, 骆焕涛. 植物修复技术在重金属污染土壤治理中的应用. *甘肃科技*, 2010, 26(5): 73-76.

- Wang Z H, Wang M G, Luo H T. The application of phytoremediation technology in the heavy metal contaminated soil. *Gansu Science and Technology*, 2010, 26(5): 73-76.
- [6] 郑君健, 刘杰, 张学洪, 等. 重金属污染土壤植物修复及强化措施研究进展. *广东农业科学*, 2013, (18): 159-164.
- Zheng J J, Liu J, Zhang X H, et al. Research progress of phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, (18): 159-164.
- [7] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 409-417.
- Huang Y Z, Hao X W, Lei M, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 409-417.
- [8] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 49-57.
- [9] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279-284.
- [10] 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 genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire. *Plant and Soil*, 1983, 73(3): 377-385.
- [11] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. *生态学报*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- Wei C Y, Chen T B. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [12] 薛生国, 叶晟, 周非, 等. 锰超富集植物垂序商陆(*Phytolacca americana* L.)的认定. *生态学报*, 2008, 28: 6344-6347.
- Xue S G, Ye S, Zhou F, et al. Identity of *Phytolacca americana* L. (phytolaccaceae), pokeweed: a manganese hyperaccumulator plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28: 6344-6347.
- [13] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*, 2009, 181(4): 759-776.
- [14] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possibility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 1994, 11(1): 41-49.
- [15] 谢景千, 雷梅, 陈同斌, 等. 蜈蚣草对污染土壤中 As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果. *环境科学学报*, 2010, 30(1): 165-171.
- Xie J Q, Lei M, Chen T B, et al. Phytoremediation of soil co-contaminated with arsenic, lead, zinc and copper using *Pteris vittata* L.: a field study. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 30(1): 165-171.
- [16] 李长阁, 于涛, 傅桦, 等. 转基因植物修复重金属污染土壤研究进展. *土壤*, 2007, 39: 181-189.
- Li C G, Yu T, Fu H, et al. Phytoremediation of heavy metal polluted soils with transgenic plants. *Soils*, 2007, 39: 181-189.
- [17] 杨勇, 王巍, 江荣凤, 等. 超累积植物与高生物量植物提取 Cd 效率的比较. *生态学报*, 2009, 29(5): 2732-2737.
- Yang Y, Wang W, Jiang R F, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2732-2737.
- [18] Chen B C, Lai H Y, Lee D Y, et al. Using chemical fractionation to evaluate the phytoextraction of cadmium by switchgrass from Cd-contaminated soils. *Ecotoxicology*, 2011, 20(2): 409-418.
- [19] Reed R L, Sanderson M A, Allen V G, et al. Growth and cadmium accumulation in selected switchgrass cultivars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(19-20): 2655-2667.
- [20] Reed R L, Sanderson M A, Allen V G, et al. Cadmium application and pH effects on growth and cadmium accumulation in switchgrass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(7-8): 1187-1203.
- [21] Wanat N, Austruy A, Joussein E, et al. Potentials of *Miscanthus × giganteus* grown on highly contaminated Technosols. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 126-127: 78-84.
- [22] Ezaki B, Nagao E, Yamamoto Y, et al. Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses. *Plant Cell Reports*, 2008, 27(5): 951-961.
- [23] Liu X H, Shen Y X, Lou L Q, et al. Copper tolerance of the biomass crops Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach), Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) and the upland reed (*Phragmites australis*) in soil culture. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(5): 633-640.
- [24] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力. *中国草地学报*, 2012, 34(1): 59-64, 76.
- Hou X C, Fan X F, Wu J Y, et al. Potentiality of herbaceous bioenergy plants in remediation of soil contaminated by heavy metals. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(1): 59-64, 76.
- [25] 黎大爵, 廖馥荪. 甜高粱及其利用. 北京: 科学出版社, 1992: 1-5.
- Li D J, Liao F S. Sweet Sorghum and Its Use. Beijing: Science Press, 1992: 1-5.
- [26] 卢庆善, 朱翠云, 宋仁本, 等. 甜高粱及其产业化问题和方略. *辽宁农业科学*, 1998, (5): 24-28.
- Lu Q S, Zhu C Y, Song R B, et al. The industrialization problems and strategies of sweet sorghum. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1998, (5): 24-28.
- [27] 康志河, 杨国红, 杨晓平, 等. 发展甜高粱生产开创农业能源新时代. *中国农学通报*, 2005, 21(1): 340-341, 348.
- Kang Z H, Yang G H, Yang X P, et al. Developing sweet sorghum production, inaugurating the new age of energy

- agriculture. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21 (1): 340-341, 348.
- [28] 谢光辉, 郭兴强, 王鑫, 等. 能源作物资源现状与发展前景. 资源科学, 2007, 29(5): 74-80.
- Xie G H, Guo X Q, Wang X, et al. An overview and perspectives of energy crop resources. Resources Science, 2007, 29(5): 74-80.
- [29] 李十中. 发展多功能农业, 建设绿色“油田”和“粮仓”. 中国农业科技. 2014, 66-69.
- Li S Z. Developing multifunctional agriculture, building a green “oil field” and “granary”. China Rural Science and Technology. 2014, 66-69.
- [30] Salman M, Athar M, Farooq U, et al. Insight to rapid removal of Pb (II), Cd (II), and Cu (II) from aqueous solution using an agro-based adsorbent *Sorghum bicolor* L. biomass. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(22-24): 4390-4401.
- [31] Metwali M R, Gowayed S M H, Al-Maghrabi O A, et al. Evaluation of toxic effect of copper and cadmium on growth, physiological traits and protein profile of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L.), World Applied Sciences Journal, 2013, 21(3): 301-314.
- [32] 余海波, 宋静, 骆永明, 等. 典型重金属污染农田能源植物示范种植研究. 环境监测与技术, 2011, 23(2): 71-76.
- Yu H B, Song J, Luo Y M, et al. Field demonstration of energy plants production on heavy metal contaminated farm land. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23(2): 71-76.
- [33] Kuriakose S V, Prasad M N V. Cadmium stress affects seed germination and seedling growth in *Sorghum bicolor* L. Moench by changing the activities of hydrolyzing enzymes. Plant Growth Regulation, 2008, 54(2): 143-156.
- [34] Soudek P, Petrová Š, Vaňková R, et al. Accumulation of heavy metals using *Sorghum sp.*. Chemosphere, 2013, 104: 15-24.
- [35] Pinto A P, Mota A M, De Varennes A, et al. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. Science of the Total Environment, 2004, 326(1): 239-247.
- [36] Pinto A P, de Varennes A, Gonçalves M L S, et al. Sorghum detoxification mechanisms. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(7): 1229-1242.
- [37] Zhang H, Shi W L, You J F, et al. Transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a β -1, 3-glucanase from sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) show reduced callose deposition and increased tolerance to aluminium toxicity. Plant, Cell and Environment, 2014, doi: 10. 1111/pce. 12472.
- [38] Zhu F Y, Li L, Lam P Y, et al. Sorghum extracellular leucine-rich repeat protein SbLRR2 mediates lead tolerance in transgenic *Arabidopsis*. Plant and Cell Physiology, 2013, 54(9): 1549-1559.
- [39] 籍贵苏, 严永路, 吕芃, 等. 不同高粱种质对污染土壤中重金属的吸附研究. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 185-192.
- Ji G S, Yan Y L, Lv P, et al. Absorption of different sorghum accessions on heavy metals in polluted soil. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 185-192.
- [40] 再吐尼古丽·库尔班, 吐尔逊·吐尔洪, 阿不都热依木·卡德尔, 等. 甜高粱对土壤重金属 Cd 的吸收规律. 西北农林科技大学学报, 2012, 40(12): 162-156.
- Zaituniguli K, Tuerxun T, Abudureyimu K, et al. Accumulation of heavy metal Cd in sweet sorghum. Journal of Northwest A&F University, 2013, 40(12): 162-156.
- [41] Angelova V R, Ivanova R V, Delibaltova V A, et al. Use of sorghum crops for *in situ* phytoremediation of polluted soils. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 1(5): 693-702.
- [42] Zaccheo P, Crippa L, Pasta V D M. Ammonium nutrition as a strategy for cadmium mobilisation in the rhizosphere of sunflower. Plant and Soil, 2006, 283(1-2): 43-56.
- [43] Xie H L, Jiang R F, Zhang F S, et al. Effect of nitrogen form on the rhizosphere dynamics and uptake of cadmium and zinc by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. Plant and Soil, 2009, 318(1-2): 205-215.
- [44] Zhuang P, Shu W, Li Z, et al. Removal of metals by sorghum plants from contaminated land. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(10): 1432-1437.
- [45] Luo B F, Du S T, Lu K X, et al. Iron uptake system mediates nitrate-facilitated cadmium accumulation in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(8): 3127-3136.
- [46] Piechalak A, Tomaszewska B, Kiewicz B D. Enhancing phytoremediative ability of *Pisum sativum* by EDTA application. Phytochemistry, 2003, 64(7): 1239-1251.
- [47] 马莹, 骆永明, 滕应, 等. 内生菌强化重金属污染土壤植物修复研究进展. 土壤学报, 2013, 50(1): 195-202.
- Ma Y, Luo Y M, Teng Y, et al. Effects of endophytic enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 195-202.
- [48] Sheng X F, Xia J J, Jiang C Y, et al. Characterization of heavy metal-resistant endophytic bacteria from rape (*Brassica napus*) roots and their potential in promoting the growth and lead accumulation of rape. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 1164-1170.
- [49] Ma Y, Rajkumar M, Luo Y M, et al. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants-Effects on plant growth and Ni uptake. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195: 230-237.
- [50] Zhang Y, He L, Chen Z, et al. Characterization of lead-resistant and ACC deaminase-producing endophytic bacteria and their

- potential in promoting lead accumulation of rape. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2): 1720-1725.
- [51] Luo S L, Xu T Y, Chen L, et al. Endophyte-assisted promotion of biomass production and metal-uptake of energy crop sweet sorghum by plant-growth-promoting endophyte *Bacillus* sp. SLS18. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 93(4): 1745-1753.
- [52] 能凤娇, 刘鸿雁, 马莹, 等. 根际促生菌在植物修复重金属污染土壤中的应用研究进展. *中国农学通报*, 2013, 29(5): 187-191.
- Neng F J, Liu H Y, Ma Y, et al. Research progress on the applications of plant growth-promoting rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(5): 187-191.
- [53] Sheng X F, Xia J J. Improvement of rape (*Brassica napus*) plant growth and cadmium uptake by cadmium-resistant bacteria. *Chemosphere*, 2006, 64(6): 1036-1042.
- [54] Ma Y, Rajkumar M, Freitas H. Inoculation of plant growth promoting bacterium *Achromobacter xylosoxidans* strain Ax10 for the improvement of copper phytoextraction by *Brassica juncea*. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 831-837.
- [55] Jing Y X, Yan J L, He H D, et al. Characterization of bacteria in the rhizosphere soils of *polygonum pubescens* and their potential in promoting growth and Cd, Pb, Zn uptake by *Brassica napus*. *International Journal of Phytoremediation*, 2014, 16(4): 321-333.
- [56] 马淑敏, 孙振钧, 王冲. 蚯蚓-甜高粱复合系统对土壤镉污染的修复作用及机理初探. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 133-138.
- Ma S M, Sun Z J, Wang C. Remediation of Cd contaminated soil and its mechanism by earthworm-sweet broomcorn system. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 133-138.
- [57] Wang D, Li H, Wei Z, et al. Effect of earthworms on the phytoremediation of zinc-polluted soil by ryegrass and Indian mustard. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(1): 120-123.
- [58] Zhang S, Hu F, Li H, et al. Influence of earthworm mucus and amino acids on tomato seedling growth and cadmium accumulation. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2737-2742.
- [59] Shukla D, Kesari R, Mishra S, et al. Expression of phytochelatin synthase from aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. enhances cadmium and arsenic accumulation in tobacco. *Plant Cell Reports*, 2009, 31(9): 1687-1699.
- [60] Lee S, An G. Over-expression of *OsIRT1* leads to increased iron and zinc accumulations in rice. *Plant, Cell and Environment*, 2009, 32(4): 408-416.
- [61] Park J, Song W Y, Ko D, et al. The phytochelatin transporters AtABCC1 and AtABCC2 mediate tolerance to cadmium and mercury. *The Plant Journal*, 2012, 69(2): 278-288.

Restore Heavy Metal Contaminated Soil with Energy Plants

JIA Wei-tao¹ LV Su-lian¹ FENG Juan-juan¹ LI Yin-xin¹ LI Ji-hong^{2,3} LI Shi-zhong^{2,3}

(1 Key Laboratory of Plant Molecular Physiology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3 Beijing Engineering Research Center for Biofuels, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract With the development of industry and agriculture, heavy metal pollution in soil is increasingly aggravated, which seriously threatens food production as well as human health. Because of its low cost, eco-friendliness and advantages on large-scale *in situ* remediation, phytoremediation has become an effective technology for the remediation of heavy metal contaminated soil in recent years. In this paper, the research and application progress of phytoremediation both in China and abroad is reviewed, and the soil remediation using energy plants especially sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench) is highlighted for its great potential. Based on our research in Hunan Province, China, the advantages and feasibility of sweet sorghum in remediation of heavy metal contaminated soils is further discussed, and also the possible measures adopted to improve remediation efficiency is suggested. The plantation of sweet sorghum in heavy metal contaminated soils not only combine soil remediation with bio-energy production, but also transfer the heavy metals from the food chain into the energy chain, which shows broad application prospects.

Key words Heavy metal contaminated soil Remediation Energy plant Sweet sorghum Energy use