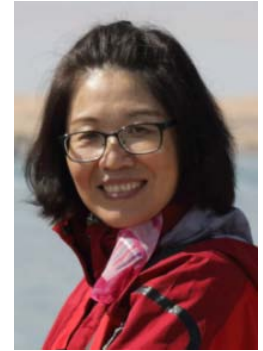


· 综述 ·

李银心 研究员，博士生导师。先后就读于北京大学生物系植物生理生化专业、北京林业大学园林植物遗传育种专业和中国科学院植物研究所植物学专业，获学士、硕士和博士学位。1985至1987年任南京农业大学园艺系助教；1990年至今历任中科院植物所研究实习员、助理研究员、副研究员和研究员。1999至2000年加拿大多伦多大学植物系访问学者。2007至2010年任天津大学兼职教授。现任中国农业生物技术学会常务理事、中国农业生物技术学会作物生物技术分会理事，《生物工程学报》编委。在 *Molecular Plant*、*Plant Biotechnol J*、*Plant Cell Environ* 等国内外学术期刊上发表论文70余篇，申请专利46项，其中已授权专利36项。主要从事以抗盐为主线的植物抗逆机理及抗逆植物应用研究，包括：植物耐高盐的分子机理；盐生植物的筛选驯化；抗盐耐海水蔬菜新品种选育和滩涂海水栽培集成应用；盐碱及重金属污染土壤的植物修复。



高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展

贾伟涛^{1,2}，吕素莲¹，林康祺¹，马茂华²，吴胜军²，汤叶涛³，仇荣亮³，李银心¹

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 中国科学院重庆绿色智能技术研究院，重庆 400714

3 中山大学环境科学与工程学院 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室，广东 广州 510006

贾伟涛，吕素莲，林康祺，等. 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展. 生物工程学报, 2020, 36(3): 416-425.

Jia WT, Lü SL, Lin KQ, et al. Research progress in phytoremediation of heavy-metal contaminated soils with high-biomass economic plants. Chin J Biotech, 2020, 36(3): 416-425.

摘要：植物修复是重金属污染土壤修复的重要方法之一。利用高生物量经济植物修复重金属污染土壤，能够兼顾生态和经济效益，具有很大的应用前景。本文系统分析了植物修复现状及存在的问题，提出利用高生物量经济植物修复重金属污染土壤的优势，总结了近年来利用高生物量经济植物吸收重金属的研究进展，探讨了改善高生物量经济植物修复重金属污染土壤效率的方法，以期为提高植物修复经济效益、促进植物修复广泛应用提供参考。

关键词：高生物量经济植物，植物修复，重金属，土壤

Received: March 18, 2020; **Accepted:** March 20, 2020

Supported by: National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0800700).

Corresponding author: Yinxin Li. E-mail: yxli@ibcas.ac.cn

国家重点研发计划 (No. 2018YFD0800700) 资助。

Research progress in phytoremediation of heavy-metal contaminated soils with high-biomass economic plants

Weitao Jia^{1,2}, Sulian Lü¹, Kangqi Lin¹, Maohua Ma², Shengjun Wu², Yetao Tang³, Rongliang Qiu³, and Yinxin Li¹

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

² Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

³ Guangdong Provincial Key Lab for Environmental Pollution Control and Remediation Technology, School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, Guangdong, China

Abstract: Phytoremediation is one of the important methods for restoring heavy-metal contaminated soils. Using high-biomass economic plants to restore heavy-metal contaminated soils can have both ecological and economic benefits, with great application prospects. Based on the analysis of current situation and existing problems of phytoremediation, we propose the advantages of high-biomass economic plants in contaminated soil remediation, and summarize the recent advances and mechanisms involved in absorbing heavy metals in high-biomass economic plants. Furthermore, the possible methods for improving the remediation efficiency of high-biomass economic plants are also discussed, to provide insights for improving the economic benefits of phytoremediation and promoting its widespread application in the future.

Keywords: high-biomass economic plants, phytoremediation, heavy metals, soil

随着近年来我国工业化进程的不断加快,重金属污染已经成为土壤污染中备受关注的公共问题之一。2005–2013年,国家环境保护部和国土资源部联合开展的全国土壤污染状况调查显示,在所有抽查的点位中,有16.1%的点位土壤遭受了不同程度的污染,而以镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、锌(Zn)和镍(Ni)8种重金属污染为代表的无机污染类型,占全部超标点位的82.8%^[1]。Zhang等^[2]总结已发表的465篇涉及全国农业用地重金属污染率的文献发现,农用地的Cd污染率最高,达7.75%,其余依次为Hg(3.65%)、Cu(3.01%)、Ni(2.88%)、Zn(2.09%)、As(1.54%)、Pb(0.96%)和Cr(0.60%);进一步分析认为采矿、冶炼、工业、污水灌溉、城市化发展和化肥的大量使用是导致农业用地重金属污染的主要原因,总计造成约10.18%的耕地遭受重金属污染,最终导致约13.86%的粮食生产受到影响。Yang等^[3]分析前人文献涉及的全国402个工业用地和1041个农业用地重金属污染状况,认为Cd、Pb和As污染相对严重,是需要优先控制的3种重金属,矿区和作物种植区分别是工业用地和农业用

地中首要控制重金属污染的地区。据估计,我国农用地镉含量将以平均每年0.004 mg/kg的速度增加,远高于欧洲0.00033 mg/kg的增速^[4-5]。有调查显示,产自湖南矿区污染土地的水稻籽粒中Cd、As和Pb的含量均超过了国家食品标准;来自贵州汞矿区和冶炼区的水稻,籽粒中也含有非常高的甲基汞(高毒性汞的存在形式)^[6-7]。由以上可以看出,我国依然面临比较严重的重金属污染,如何有效治理重金属污染土壤是一个亟待解决的问题。

传统的重金属污染土壤治理方法主要以物理和化学方法为主。物理方法是利用工程手段,将土壤中的重金属稀释、去除和分离,以降低其对土壤环境的毒害作用。物理修复技术主要包括客土、换土、深耕翻土、土壤淋洗和电动修复等方法^[8-10]。化学方法一般是通过加入化学试剂或材料改变重金属的赋存形态,降低重金属的有效性,但实质上并未将其从土壤中去掉。如化学沉淀法、氧化还原法和化学浮选法等^[8-10]。这些方法成本高,易造成二次污染,对土壤结构也有损害,比较适合小面积污染土壤的治理^[11]。近年来,植物修复作为一种相对新兴的土壤污染治理技术,因

其成本低、对环境友好以及可大规模原位修复等优点,在实际中得到了越来越广泛的应用^[8]。本文在总结植物修复研究进展的基础上,重点介绍了高生物量经济植物在重金属污染土壤修复中的研究进展,并提出改善重金属污染土壤修复效率的可能途径,为利用高生物量经济植物修复重金属污染土壤提供参考。

1 植物修复技术研究进展

植物修复是指利用植物去除大气、水体和土壤中污染物的过程^[12]。根据植物对污染物的作用方式,可分为植物固定(Phytostabilization)、植物挥发(Phytovolatilization)、植物过滤(Phytofiltration)和植物提取(Phytoextraction)等类型^[11]。植物固定主要针对一些重金属污染的土壤,利用植物降低土壤中有毒金属的迁移率,从而使重金属迁移到地下水或食物链的可能性降低。如印度芥菜和香根草可以使Pb从有效态向残渣态转化,降低土壤中Pb的有效性,减少重金属Pb对土壤的危害^[13]。植物挥发是利用植物吸收土壤中的污染物,然后将其转化成挥发性物质释放至大气中。如土壤中的硒、汞和有机溶剂如四氯化碳和三氯乙烯可以使用植物挥发去除^[14]。植物过滤主要是指利用植物吸收、沉淀和富集水体中的污染物的过程。如水马齿*Callitriche stagnalis*、浮叶眼子菜*Potamogeton natans*、篦齿眼子菜*Potamogeton pectinatus*可以从水中过滤铀^[15]。植物提取是利用植物提取重金属污染土壤或水体中重金属,进而通过收获植株达到去除土壤中重金属的目的。如蜈蚣草*Pteris vittata* L.可以富集As,龙葵*Solanum nigrum* L.和东南景天*Sedum alfredii* Hance可以富集Cd等^[16-18]。利用植物修复重金属污染土壤具备很多优势:原位修复,对环境友好,能彻底清除土壤中重金属,改良土壤;对土壤理化性质扰动小,减少二次污染;成本低,操作简单,适合大规模应用等^[19]。

目前用于重金属污染土壤修复的植物多为超富集植物。根据Baker等在1983年提出的超富集

植物(Hyper-accumulator)判定标准,把植物叶片或地上部干重含Mn、Zn达到10 000 μg/g, Cd达到100 μg/g, Pb、Cu、Cr、Co和Ni等达到1 000 μg/g及以上,且转移系数大于1的植物称为相应元素的超富集植物^[20]。如Cd和Zn的超富集植物东南景天,As的超富集植物蜈蚣草等。虽然超富集植物吸收重金属的能力很强,但在实际应用中仍然存在很多问题。如超富集植物生长速度慢、生物量小、不利于机械化作业;超富集植物多为野生植物,对环境条件要求高,适应性较差,在不同区域引种应用困难;经济效益低,难以调动农户积极性^[21-22]。近年来有人提出用生物量高的非超富集植物来修复重金属污染的土壤。与生物量小的超富集植物相比,这些植物虽然吸收重金属的能力比较低,但生物量高,总体从土壤中提取重金属的能力可能会更强。已有研究表明,在同等条件下,高生物量的非超富集植物烟草对镉的提取量,是印度芥菜和超富集植物遏蓝菜对镉提取量的4倍左右,是向日葵对镉提取量的13倍,从而说明利用高生物量非超富集植物修复重金属污染的土壤的可行性^[23]。

2 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展

高生物量的经济植物一般指一些生物量高并具有经济效益的非超富集植物。该类植物一般具有生长速度快、生物量大和经济效益高等特点。主要包括一些能源植物、经济作物和木本植物。如甜高粱*Sorghum bicolor* (L.) Moench、麻疯树*Jatropha curcas* L.、柳枝稷*Panicum virgatum* L.、芒草、麻类作物、杨树*Populus* L.和构树*Broussonetia papyrifera*等。

甜高粱属于禾本科C4植物,为粒用高粱的一个变种。甜高粱株高可达2-5 m,每公顷收获3 000-6 000 kg种子,45 000-75 000 kg茎秆。甜高粱茎秆含糖量丰富,糖锤度一般为16%-22%,每公顷产糖量约6 000-9 000 kg;纤维素含量为12%-

20% ,折合每公顷产纤维量为 9 000–15 000 kg^[24-27]。甜高粱生育期短,抗逆性强,是优良的生物质能源植物。已有研究表明高粱是一种能有效吸收重金属的作物^[28]。在小麦、玉米和高粱 3 种粮食作物中,高粱对重金属 Cu 和 Cd 的耐受性最强,在单独 Cd 处理下高粱对 Cd 的吸收量也最高^[29]。余海波等^[30]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. 的种植示范研究,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 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,表明甜高粱在修复重金属污染土壤中具有很大优势。研究表明,(甜)高粱积累镉的部位主要在根部,因此促进镉从根向地上部分转移是提高(甜)高粱对镉吸收能力的关键^[31]。此外,不同(甜)高粱品系对镉的耐受、吸收和转运能力存在很大差异,而根的吸收、细胞壁的结合、内皮层的阻隔以及木质部装载等可能在甜高粱吸收和转运镉的过程中发挥重要作用^[32-33],可考虑作为今后重点关注的方向。利用能源植物甜高粱修复重金属污染土壤,其茎秆可用于发酵生产燃料乙醇,酒糟用于燃烧发电,重金属从燃烧后的灰烬中加以回收^[34],同时实现了重金属污染土壤修复和后期材料的资源化处理,具有很大的应用潜力。

麻疯树属于大戟科油料植物,广泛分布于热带和亚热带地区,种子含油量约 40%–60%,可用于生产生物柴油,具有较高的经济价值^[35]。麻疯树适应性强,能够耐受干旱、贫瘠和强酸性土壤,同时对重金属 Cd、Pb、Cr、Ni、Zn、铯(Cs)和锶(Sr)等均具有一定的耐受性和吸收能力^[35-38]。研究发现,麻疯树在 Cd 浓度为 50 mg/kg 的土壤中生长未受到明显影响,随土壤 Cd 污染程度加剧,麻疯树根、茎和叶中 Cd 含量也有所增加,不同器

官中 Cd 含量依次为根>茎>叶,其中麻疯树根部重金属含量最高可达 347.1 mg/kg^[35]。此外,Marrugo-Negrete 等^[39]研究发现麻疯树对 Hg 的富集系数也比较高,具备修复 Hg 污染土壤的潜力。

柳枝稷是一种多年生草本能源植物,生长迅速,植株常超过 2 m;生物质产量高,纤维素含量丰富;根系发达,抗旱能力强,适宜在边际土地上生长^[40]。Juang 等^[41]研究表明,柳枝稷对 Cu 具有一定的耐受性和吸收能力。胡冰钰等^[42]评价了 14 个柳枝稷品种对 Cd 的耐受性,发现‘Kanlow’对 Cd 的耐受性最强,根和地上部分 Cd 积累量也最高,可作为植物修复的备选材料。另有研究报道,柳枝稷‘Alamo’能够从污染土壤中积累 ¹³⁷Cs 和 ⁹⁰Sr^[43],并且在 pH 低的土壤中积累 Cd 的能力更强^[44]。此外,与生态型‘Blackwell’相比,‘Alamo’能从 Cd 污染土壤中移除更多的 Cd^[45]。

芒草是一类多年生的 C4 草本植物,生长快且生物量大,被认为是理想的第二代生物质能源材料。芒草生态适应性强,具有较强的耐热、耐寒、耐旱、耐盐碱性,广泛分布于热带、亚热带和温带地区。Wilkins^[46]通过盆栽试验发现,芒属植物‘奇岗’在 Cu、As 和 Zn 污染严重的土壤上仍可正常生长。韦朝阳等^[47]调查两个中国典型砷矿区后发现,‘中国芒’对 As 具有很强的耐性,地上部分 As 积累量可达 760 mg/kg。库文珍等^[48]通过调查矿区 5 种优势植物淡竹叶、苕麻、芒草、狗尾草和白背叶对锑(Sb)、As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 的吸收和积累能力,发现芒草对 Cd 的富集系数和转运系数均大于 1,并且对 Sb、As 具有较强的运输能力,可作为矿区土壤污染物修复的后备物种。Bang 等^[49]考察了芒草‘Goedae-Uksae 1’用于植物修复的潜力,发现其对 As、Cu、Pb、Ni、Cd 和 Zn 均具有很好的吸收能力,其中对 As 的去除能力最强,达 97.7%。从以上实验可以看出,芒草主要对 Cd 和 As 具有比较强的吸收能力,可考虑用于 Cd 和 As 污染土壤的修复。

麻是传统的纤维类作物,主要包括大麻、苕麻、黄麻、亚麻、红麻、剑麻和青麻等,在纺织业和造纸业中具有广泛应用^[50]。研究表明,麻类作物对重金属有比较好的耐受性和吸收能力,在重金属污染土壤修复中具有很大的应用潜力。Bjelková 等^[51]考察了 6 个纤维用和 4 个油用类型的亚麻品种在 Cd 胁迫下的表现,发现所有亚麻品种在 Cd 含量为 1 000 mg/kg 的土壤中生几乎未受影响。Guo 等^[52]研究发现亚麻对 Cd 的吸收量与其生物量具有显著的正相关,在调查的 18 个亚麻栽培种中,有 3 个品种 (Zhongya 1、Y2I329 和 Y2I330) 对土壤中的 Cd 提取量达 60 g/hm²。苕麻能在 Hg 含量为 5–130 mg/kg 的土壤中生,并且产量和品质未受明显影响,水稻田改种苕麻后,土壤 Hg 的年净化率高达 41%,土壤的自净恢复年限比种植水稻缩短 8.5 倍,表明改种苕麻是 Hg 污染稻田合理利用的有效途径之一^[53]。曹德菊等^[54]对苕麻的 Cd 耐受性以及积累效应进行研究,发现低浓度的 Cd (50–200 mg/kg) 对苕麻生长有一定的促进作用。林匡飞等^[55]研究表明,将 Cd 污染稻田改种苕麻 5 年后,土壤 Cd 含量降低率为 27.6%,年平均降低率 5.5%。总体来看,苕麻对 Hg 和 Cd 污染土壤具有良好的修复效果。

杨树是杨柳科杨属木本植物,适应性强,在世界范围内分布广泛,具有生长速度快、根系深、耐性强、生物量大等特点^[56]。王新等^[57]调查了杨树和落叶松对重金属污染土壤的修复能力,发现杨树对 Cd、Cu 和 Zn 的吸收系数均高于落叶松,说明杨树对 Cd、Cu 和 Zn 的迁移能力大于落叶松。He 等^[58]调查了 6 个杨树品种对 Cd 的耐受性,发现与其他杨树品种相比,‘zhonghua 1’根、木材、树皮和叶片中 Cd 的含量、Cd 富集系数和转运系数均是最高,表明其具有修复 Cd 污染土壤的潜力。Zacchini 等^[59]研究了 10 个杨树无性系对 Cd 的吸收和转运能力,发现欧洲黑杨 *Populus nigra* L. 无性系 58–861 的根中 Cd 浓度和富集系数均是最高,可考虑用于 Cd 污染土壤修复。

Chandra 等^[60]考察了 4 个杨树杂交种在复合重金属污染 (Cd、Cu、Cr 和 Zn) 土壤中的表现,结果显示 Hybrid 1 (Eco 28) 对复合重金属污染的耐受能力最强,可优先用于复合污染土壤的修复。

构树属于桑科构属的落叶乔木,具有速生、适应性强、分布广和易繁殖等特点,其叶片可用作饲料,韧皮纤维可用于造纸,具有很高的经济价值。栾以玲等^[61]对南京栖霞山矿区木本植物研究表明,构树、泡桐和白榆对 Pb、Zn 和 Cd 均具有较强的富集能力。童方平等^[62]研究发现,构树具有较强的累积多种重金属 (如 Sb、Zn、Pb 和 As 等) 的能力,其中 85% 的重金属累积在构树的地上部分,主要分布在叶和枝部,由此认为构树是铋矿区重金属污染地较为理想的生态修复植物。邵慧琪等^[63]对钒矿冶炼厂区域植物调查显示,构树具有很强的富集 As 的能力。Zhao 等^[64]通过调查湖南水口山矿区 18 种木本植物对 Pb、Zn、Cd 和 Cu 的富集情况后,发现构树的综合生物富集系数最高,表明其对多种重金属具有较强的富集与转移能力。

此外,也有研究表明油菜 *Brassica napus* L.、向日葵 *Helianthus annuus* L. 和蓖麻 *Ricinus communis* L. 等经济作物对重金属 Cd 和 Pb 等具有一定的耐受性和吸收能力,可考虑用于重金属污染土壤的修复。如南帅帅等^[65]通过盆栽实验发现,油菜对土壤 Pb 和 Cd 污染具有一定的耐受性,在土壤 Pb 浓度 0–200 mg/kg、Cd 浓度 0–5 mg/kg 范围内,对油菜的生长有促进作用;与根部和籽粒相比,油菜茎叶对 Pb、Cd 的富集能力最强。同样地,向日葵也具有从污染土壤吸收 Pb 和 Cd 的能力,并且对 Cd 的富集能力更强^[66]。蓖麻对 Cd 有较强的耐性,在含 Cd 的尾矿土壤种植蓖麻,30 d 内修复率达到 1.36%,施肥强化后可达 3.83%^[67]。

3 提高高生物量经济植物修复效率的措施

植物修复虽然具有原位、经济、绿色等优点,但修复效率偏低,在实际中少有大规模应用的案

例。同样地,对于高生物量经济植物,如何改善其修复效果也是当前亟待解决的问题。通常可采用基因工程、遗传育种和综合运用多种修复技术等手段提高高生物量经济植物的修复效率。

3.1 基因工程

加强高生物量经济植物吸收和耐受重金属的机制研究,寻找调控植物吸收和耐受重金属的关键基因(包括其自身或外源的),通过基因工程手段提高高生物量经济植物对重金属污染土壤的修复效率。如将小麦 *TaPCS1* 基因转入烟草体内,其重金属积累量是野生种的 2 倍^[68]。

3.2 遗传育种

广泛开展高生物量经济植物种质资源收集、筛选和评价工作,通过杂交育种等方法培育对重金属吸收、耐受能力强、生长周期短和生物量大的新品种,提高植物修复效率。

3.3 联合修复

土壤修复治理的复杂性预示着单一的修复方法很难达到目标,应综合运用多种修复技术,提高重金属污染土壤修复效果。一方面可将植物修复与微生物修复相结合。已有研究表明添加特定微生物能够增强植物修复效果。如假单胞菌 *Pseudomonas adaceae* Lk9 能使龙葵地上部积累的 Cd、Zn、Cu 分别提高 46.6%、16.4%、16.0%^[69]。另一方面通过添加一些外源物质也能增强植物修复效率。如在土壤中加入 EDTA (乙二胺四乙酸)能促进玉米根中 Pb 的积累及从根向地上部分的转运能力^[70]。

4 展望

利用高生物量经济植物治理重金属污染土壤,能够将土壤修复与经济植物生产联合起来,具有很大的应用潜力。但就目前而言,仍然存在很多问题。如在实际修复中会产生大量携带重金属的植物材料,如果处置不当,将再次进入环境中造成二次污染物。因此,在对经济型修复植物

材料开展资源化利用的同时,应加强处置过程中重金属的迁移规律研究,降低发生二次污染的风险。此外,高生物量经济型植物对重金属的提取能力还有待于进一步提高,应综合运用植物生理学、分子生物学、微生物学、化学、生态学和环境科学等多学科知识,改善高生物量经济型植物修复重金属污染土壤效率。

REFERENCES

- [1] The Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land and Resources of People's Republic of China, the nationwide survey of soil pollution bulletin, 2014. 中华人民共和国环境保护部和国土资源部,全国土壤污染状况调查公报, 2014.
- [2] Zhang XY, Zhong TY, Liu L, et al. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China. PLoS ONE, 2015, 10(8): e0135182. doi:10.1371/journal.pone.0135182.
- [3] Yang QQ, Li ZY, Lu XN, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. Sci Total Environ, 2018, 642: 690–700.
- [4] Luo L, Ma YB, Zhang SZ, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. J Environ Manage, 2009, 90(8): 2524–2530.
- [5] Smolders E, Mertens J. Chapter 10. Cadmium//Alloway BJ, Ed. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Netherlands: Springer Science+Business Media, 2013: 283–311.
- [6] Williams PN, Lei M, Sun GX, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China. Environ Sci Technol, 2009, 43(3): 637–642.
- [7] Feng XB, Li P, Qiu GL, et al. Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou province, China. Environ Sci Technol, 2008, 42(1): 326–332.
- [8] Wang HH, Huan HF, Luo Y, et al. Soil contaminated by heavy metals and its phytoremediation technology. Chin Agric Sci Bull, 2009, 25(11): 210–214 (in Chinese).

- 王海慧, 郇恒福, 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.
- [9] An J, Gong XS, Wei SH. Research progress on technologies of phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chin J Ecol*, 2015, 34(11): 3261-3270 (in Chinese).
安婧, 宫晓双, 魏树和. 重金属污染土壤超积累植物修复关键技术的发展. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3261-3270.
- [10] Xie H, Zhao XM, Xie Z, et al. Phytoremediation efficiency of *Pennisetum hybridum* for acid- and cadmium-polluted soil and its safe utilization. *J Agro-Environ Sci*, 2016, 35(3): 478-484 (in Chinese).
谢华, 赵雪梅, 谢洲, 等. 皇竹草对酸与 Cd 污染农田土壤的治理效果及安全应用分析. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 478-484.
- [11] Wang WH, Lei LH, Yang QL, et al. Research progress on phytoremediation of soil contaminated by heavy metals. *J Kunming Univ Sci Technol: Nat Sci Ed*, 2015, 40(2): 114-122 (in Chinese).
王卫华, 雷龙海, 杨启良, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2015, 40(2): 114-122.
- [12] Shi R, Wu XF, Li Y, et al. Plant species applied in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *J Central South Univ For Technol*, 2015, 35(4): 139-146 (in Chinese).
石润, 吴晓芙, 李芸, 等. 应用于重金属污染土壤植物修复中的植物种类. 中南林业科学大学学报, 2015, 35(4): 139-146.
- [13] Chen YY, Lu S, Hui HX, et al. Remediation efficiency and pathways of *Brassica juncea* and *Vetiveria zizanioides* L. for Pb-contaminated soil. *Res Environ Sci*, 2017, 30(9): 1365-1372 (in Chinese).
陈友媛, 卢爽, 惠红霞, 等. 印度芥菜和香根草对 Pb 污染土壤的修复效能及作用途径. 环境科学研究, 2017, 30(9): 1365-1372.
- [14] Zhang M, Ouyang Y, Cao XZ. Research progress on phytoremediation of soil contaminated by heavy metals//Proceedings of the annual academic conference of the Chinese Society for Environmental Sciences. Xiamen: Chinese Society for Environmental Science, 2017: 1884-1892 (in Chinese).
张明, 欧阳琰, 曹学章. 土壤重金属污染植物修复研究进展//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第二卷). 厦门: 中国环境科学学会, 2017: 1884 - 1892.
- [15] Pratas J, Paulo C, Favas PJC, et al. Potential of aquatic plants for phytoremediation of uranium-contaminated waters in laboratory conditions. *Ecol Eng*, 2014, 69: 170-176.
- [16] Zhao FJ, Dunham SJ, Mcgrath SP. Arsenic hyperaccumulation by different fern species. *New Phytol*, 2002, 156(1): 27-31.
- [17] Sun RL, Zhou QX, Jin CX. 2006. Cadmium accumulation in relation to organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. *Plant Soil*, 285(1): 125-134.
- [18] Yang XE, Long XX, Ye HB, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant Soil*, 2004, 259(1): 181-189.
- [19] Wang QH, Ruan PP, Li J. Environmental protection application strategy of phytoremediation technology in soil pollution control. *China Resources Comprehens Utilizat*, 2020, 38(1): 156-158 (in Chinese).
王巧红, 阮朋朋, 李君. 植物修复技术在土壤污染治理中的环保应用策略. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 156-158.
- [20] Baker AJM, Brooks RR, Pease AJ, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (*Caryophyllaceae*) from Zaïre. *Plant Soil*, 1983, 73: 377-385.
- [21] Douchiche O, Chaïbi W, Morvan C. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of mature flax, cv. Hermes: contribution of the basal stem compared to the root. *J Hazard Mater*, 2012, 235/236: 101-107.
- [22] He JL, Li H, Luo J, et al. A transcriptomic network underlies microstructural and physiological responses to cadmium in *Populus × canescens*. *Plant Physiol*, 2013, 162(1): 424-439.
- [23] Yang Y, Wang W, Jiang RF, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(5):

- 2732–2737 (in Chinese).
杨勇, 王巍, 江荣风, 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.
- [24] Li DJ, Liao FX. Sweet Sorghum and Its Use. Beijing: Science Press, 1992: 1–5 (in Chinese).
黎大爵, 廖馥荪. 甜高粱及其利用. 北京: 科学出版社, 1992: 1–5.
- [25] Lu QS, Zhu CY, Song RB, et al. The industrialization problems and strategies of sweet sorghum. Liaoning Agric Sci, 1998, (5): 24–28 (in Chinese).
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.
- [26] Kang ZH, Yang GH, Yang XP, et al. Developing sweet sorghum production, inaugurating the new age of the energy agriculture. Chin Agric Sci Bull, 2005, 21(1): 340–341, 348 (in Chinese).
康志河, 杨国红, 杨晓平, 等. 发展甜高粱生产开创农业能源农业新时代. 中国农学通报, 2005, 21(1): 340–341, 348.
- [27] Xie GH, Guo XQ, Wang X, et al. An overview and perspectives of energy crop resources. Resour Sci, 2007, 29(5): 74–80 (in Chinese).
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.
- [28] 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. Desalin Water Treat, 2013, 51(22/24): 4390–4401.
- [29] Metwali MR, Gowayed SMH, Al-Maghrabi OA, 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 Appl Sci J, 2013, 21(3): 301–314.
- [30] Yu HB, Song J, Luo YM, et al. Field demonstration of energy plants production on heavy metal contaminated farmland. Admin Techn Environ Monitor, 2011, 23(3): 71–76 (in Chinese).
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(3): 71–76.
- [31] Jia WT, Lv SL, Feng JJ, et al. 2016. Morphophysiological characteristic analysis demonstrated the potential of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils. Environ Sci Pollut Res, 23(18): 18823–18831.
- [32] Jia WT, Miao FF, Lv SL, et al. Identification for the capability of Cd-tolerance, accumulation and translocation of 96 sorghum genotypes. Ecotox Environ Safe, 2017, 145: 391–397.
- [33] Feng JJ, Jia WT, Lv SL, et al. Comparative transcriptome combined with morpho-physiological analyses revealed key factors for differential cadmium accumulation in two contrasting sweet sorghum genotypes. Plant Biotechnol J, 2018, 16(2): 558–571.
- [34] Developing multifunctional agriculture, building a green “oil field” and “granary”. China Rural Sci Technol, 2014: 66–69 (in Chinese).
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, (4): 66–69.
- [35] Li QF, Qiu RL. Cadmium physiological tolerance and accumulation characteristics of *Jatropha curcas* L.. J Agro-Environ Sci, 2012, 31(1): 42–47 (in Chinese).
李清飞, 仇荣亮. 麻疯树对镉胁迫的生理耐性及富集特征研究. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 42–47.
- [36] Li QF. Physiological tolerance of *Jatropha curcas* to lead stress. J Ecol Rural Environ, 2012, 28(1): 72–76 (in Chinese).
李清飞. 麻疯树对铅胁迫的生理耐性研究. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 72–76.
- [37] Chang FC, Ko CH, Tsai MJ, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by *Jatropha curcas*. Ecotoxicology, 2014, 23(10): 1969–1978.
- [38] Jia XQ. Physio-biochemical responses and bioaccumulation of *Jatropha curcas* L. to caesium and strontium stress[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2012 (in Chinese).
贾秀芹. 麻疯树对铯、锶胁迫的生理生化响应及富集[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.
- [39] Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Pinedo-Hernández J, et al. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*.

- Chemosphere, 2015, 127: 58–63.
- [40] Hu SM, Gong ZX, Jiang DS. Brief introduction of a bio-energy crop-*Panicum virgatum*. Pratac Sci, 2008, 25(6): 29–33 (in Chinese).
胡松梅, 龚泽修, 蒋道松. 生物能源植物柳枝稷简介. 草业科学, 2008, 25(6): 29–33.
- [41] Juang KW, Lai HY, Chen BC. Coupling bioaccumulation and phytotoxicity to predict copper removal by switchgrass grown hydroponically. Ecotoxicology, 2011, 20(4): 827–835.
- [42] Hu BY, Fang ZG, Lou LQ, et al. Comprehensive evaluation of cadmium tolerance of 14 switchgrass (*Panicum virgatum*) cultivars in the seedling stage. Acta Pratac Sin, 2019, 28(1): 27–36 (in Chinese).
胡冰钰, 方志刚, 娄来清, 等. 14 份柳枝稷种质资源苗期耐镉性综合评价. 草业学报, 2019, 28(1): 27–36.
- [43] Entry JA, Watrud LS. Potential remediation of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr contaminated soil by accumulation in ‘Alamo’ switchgrass. Water Air Soil Pollut, 1998, 104(3/4): 339–352.
- [44] Reed RL, Sanderson MA, Allen VG et al. Cadmium application and pH effects on growth and cadmium accumulation in switchgrass. Commun Soil Sci Plant Anal, 2002, 33(7/8): 1187–1203.
- [45] Chen BC, Lai HY, Lee DY, et al. Using chemical fractionation to evaluate the phytoextraction of cadmium by switchgrass from Cd-contaminated soils. Ecotoxicology, 2011, 20(2): 409–418.
- [46] Wilkins C. The uptake of copper, arsenic and zinc by *Miscanthus*-environmental implications for use as an energy crop. Aspects Appl Biol, 1997, 49: 335–340.
- [47] Wei CY, Chen TB. The ecological and chemical characteristics of plants in the areas of high arsenic levels. Acta Phytoecol Sin, 2002, 26(6): 695–700 (in Chinese).
韦朝阳, 陈同斌. 高砷区植物的生态与化学特征. 植物生态学报, 2002, 26(6): 695–700.
- [48] Ku WZ, Zhao YL, Lei CX, et al. Heavy metal pollution in soils and characteristics of heavy metal accumulation of dominant plants in antimony mining area. Chin J Environ Eng, 2012, 6(10): 3774–3780 (in Chinese).
库文珍, 赵运林, 雷存喜, 等. 锑矿区土壤重金属污染及优势植物对重金属的富集特征. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3774–3780.
- [49] Bang JY, Kamala-kannan S, Lee KJ, et al. Phytoremediation of heavy metals in contaminated water and soil using *Miscanthus* sp. Goedae-Uksae 1. Int J Phytoremediation, 2015, 17(6): 515–520.
- [50] Hao DM, Qiu CS, Long SH, et al. Study progress in bast and leaf fiber crop remediation of farmland contaminated by heavy metals. Plant Fiber Sci China, 2019, 49(1): 36–41 (in Chinese).
郝冬梅, 邱财生, 龙松华, 等. 麻类作物在重金属污染耕地修复中的应用研究进展. 中国麻业科学, 2019, 49(1): 36–41.
- [51] Bjelková M, Genčurová V, Griga M. Accumulation of cadmium by flax and linseed cultivars in field-simulated conditions: A potential for phytoremediation of Cd-contaminated soils. Ind Crop Prod, 2011, 33(3): 761–774.
- [52] Guo Y, Qiu CS, Long SH, et al. Cadmium accumulation, translocation, and assessment of eighteen *Linum usitatissimum* L. cultivars growing in heavy metal contaminated soil. Int J Phytoremediation, 2019: 1–7.
- [53] Long YT, Liu SF, Xiong JP, et al. Study on the mercury purification of ramie in paddy soil. Agro-environ Prot, 1994, 13(1): 30–33 (in Chinese).
龙育堂, 刘世凡, 熊建平, 等. 苧麻对稻田土壤汞净化效果研究. 农业环境保护, 1994, 13(1): 30–33.
- [54] Cao DJ, Zhou SB, Xiang J. Ramie tolerance to Cd in soil and its accumulation effect. Plant Fibers Prod, 2004, 26(6): 272–274 (in Chinese).
曹德菊, 周世杯, 项剑. 苧麻对土壤中镉的耐受和积累效应研究. 中国麻业, 2004, 26(6): 272–274.
- [55] Lin KF, Zhang DM, Li QH, et al. Cadmium absorption characteristics of ramie and improving trails on soil contamination with cadmium. Agro-environ Prot, 1996, 15(1): 1–4, 8 (in Chinese).
林匡飞, 张大明, 李秋洪, 等. 苧麻吸镉特性及镉土的改良试验. 农业环境保护, 1996, 15(1): 1–4, 8.
- [56] Lonardo SD, Capuana M, Arnetoli M, et al. Exploring the metal phytoremediation potential of three *Populus alba* L. clones using an in vitro screening. Environ Sci Pollut Res, 2011, 18(1): 82–90.

- [57] Wang X, Jia YF. Study on absorption and remediation by Poplar and Larch in the soil contaminated with heavy metals. *Ecol Environ*, 2007, 16(2): 432–436 (in Chinese).
王新, 贾永锋. 杨树、落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究. *生态环境*, 2007, 16(2): 432–436.
- [58] He JL, Ma CF, Ma YL, et al. Cadmium tolerance in six poplar species. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20(1): 163–174.
- [59] Zacchini M, Pietrini F, Mugnozza GS, et al. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water Air Soil Poll*, 2009, 197(1-4): 23–34 .
- [60] Chandra R, Kang H. Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate, and chlorophyll content in poplar hybrids. *Forest Sci Technol*, 2016, 12(2): 55–61.
- [61] Luan YL, Jiang ZL, Wu YG. Study on heavy metal accumulation ability of plant in Qixia mountain. *J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed*, 2008, 32(6): 69–72 (in Chinese).
栾以玲, 姜志林, 吴永刚. 栖霞山矿区植物对重金属元素富集能力的探讨. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(6): 69–72.
- [62] Tong FP, Long YZ, Yang WX, et al. Study on the characteristics of heavy metal accumulation in *Broussonetia papyrifera* in an antimony mine. *Chin Agri Sci Bull*, 2010, 26(14): 328–331 (in Chinese).
童方平, 龙应忠, 杨勿享. 锑矿区构树富集重金属的特性研究. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 328–331.
- [63] Shao HQ, Zhang YW, Qu C, et al. Analysis of heavy metal contamination in the soil and enrichment capabilities of terrestrial plants around a typical vanadium smelter area. *Chin J Eng*, doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.23.001 (in Chinese).
邵慧琪, 张又文, 曲琛, 等. 典型钒矿冶炼厂区域土壤重金属污染及陆生植物富集能力. *工程科学学报*, doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.23.001.
- [64] Zhao XL, Liu JF, Xia XL, et al. The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China. *Environ Sci Pollut Res*, 2014, 21(7): 5076–5085.
- [65] Nan SS, Wang Y, Liu Q, et al. Study on remediation effect of rape on lead and cadmium contaminated soil. *Environ Res Monitor*, 2017, 31(1): 5–8 (in Chinese).
南帅帅, 王亚, 刘强, 等. 油菜对铅镉污染土壤的修复效果研究. *环境研究与检测*, 2017, 31(1): 5–8.
- [66] Alaboudi KA, Ahmed B, Brodie G. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Ann Agr Sci*, 2018, 63(1): 123–127.
- [67] Liu YF, Mao KM. Investigation and analysis on Cd contamination of soils and plants in some mine areas and tailings in Yunnan. *Chin J Soil Sci*, 2011, 42(6): 1486–1490 (in Chinese).
刘义富, 毛昆明. 云南部分矿区及尾矿土壤和植物 Cd 污染调查分析. *土壤通报*, 2011, 42(6): 1486–1490.
- [68] Gisbert C, Ros R, de Haro A, et al. A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochem Bioph Res Communicat*, 2003, 303(2): 440–445.
- [69] Chen L, Luo SL, Li XJ, et al. Interaction of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and functional endophyte *Pseudomonas* sp. Lk9 on soil heavy metals uptake. *Soil Biol Biochem*, 2014, 68: 300–308.
- [70] Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(3): 860–865.

(本文责编 郝丽芳)