

土壤重金属污染及其植物修复研究综述

马彦

(甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 综述土壤了镉、镍、铜、砷、汞、铅污染, 及利用超富集植物修复重金属污染土壤研究的最新进展, 分析了植物修复技术的研究方向。

关键词: 土壤; 重金属污染; 植物修复

中图分类号: X131.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-1463(2016)02-0069-07

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2016.02.021

Research Summary on Soil Heavy Metal Pollution and Its Phytoremediation

MA Yan

(Gansu Academy of Agriculture Science, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: This paper summarizes the present situation of heavy metal contaminated soil by Cadmium, Nickel, Copper, Arsenic, Mercury and Plumbum, also illustrates the latest study on the hyperaccumulator plant and the hyperaccumulator plants used phytoremediation in our country, and put forwards the application potential of phytoremediation technology in the future.

Key words: Soil; Heavy metal pollution; Phytoremediation

土壤重金属污染是国内外普遍关注的环境问题, 2014年4月17日国家环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤总的超标率为16.1%, 其中, 镉、镍、铜、砷、汞、铅6种无机污染物点位超标率分别为7.0%、4.8%、2.1%、2.7%、1.6%、1.5%。重金属污染土壤亟待修复治理, 也成为环境、土壤科学家们的研究热点问题。传统的修复重金属污染土壤的方法主要有客土、填埋、土壤清洗及通过物理化学作用固化、提取等, 这些方法都不同程度地存在着处理效率低、运行成本高、破坏土壤原有生物环境等缺陷^[1]。土壤重金属污染的植物修复技术是利用植物对重金属的富集作用来降低土壤和水体中重金属浓度或毒性的环境友好型方法^[2], 其原理是利用某些对重金属具有超富集能

力的植物, 将土壤中的重金属元素大量地转移到植株体内(特别是地上部分), 从而达到修复土壤的目的^[3-4]。这种途径修复潜力大, 不仅可维持土壤肥力, 而且不易造成“二次污染”, 能够很好的保持土壤结构和区系生物群落免遭破坏。笔者对土壤镉、镍、铜、砷、汞、铅污染现状和植物修复技术研究进展进行综述, 以期土壤重金属污染修复治理提供参考。

1 土壤镉、镍、铜、砷、汞、铅污染现状

1.1 土壤镉污染

镉是一个相当稀少且分布十分分散的元素, 未污染土壤中的镉主要来源于成土母质, 污染土壤中的镉主要来自于工业废渣、废气中镉的扩散和沉积, 以及含镉废水灌溉农田等。土壤镉含量一般为0.01~2.00 mg/kg, 我国土壤镉背景值0.097

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 甘肃省土壤环境保护和综合治理方案研究部分内容

作者简介: 马彦(1965—), 男, 甘肃静宁人, 高级农艺师, 主要从事生态修复和面源污染研究工作。联系电话: (0)13893313919。

由之路[N]. 中国经济时报, 2012-11-05(02).

2013-01-11(03).

[9] 夏喜平. 城市低碳转型与绿色发展的路径选择[N]. 湖北日报, 2010-11-19(04).

[11] 全国主体功能区规划[N]. 人民日报, 2011-06-08(06).

[10] 李文. 中国企业绿色发展路线图[N]. 证券时报.

(本文责编: 陈伟)

mg/kg, 略低于日本和英国^[5]。镉是生物毒性最强的重金属元素, 在环境中的化学活性强, 移动性大, 毒性持久, 容易通过食物链的富集作用危及人类健康, 对人体具有致病、致癌、致突变作用, 能诱发肾衰变、关节炎、癌症等病。我国约有 1.3 万 hm^2 耕地受镉污染, 涉及 11 个省市的 25 个地区^[6], 如江西省某县多达 44% 的耕地受污染, 形成 670 hm^2 的“镉米”区; 沈阳某污灌区农田土壤中镉高达 130 mg/kg; 成都东郊污灌区的稻米含镉高达 1.65 mg/kg^[7]。根据农业部的监测, 污灌区土壤的镉污染最为严重, 约占重金属超标面积的 60%, 而农产品镉超标率已达 10% 以上^[8]。

1.2 土壤镍污染

土壤中的镍主要来源于岩石风化、大气降尘、灌溉用水(包括含镍废水)、农田施肥, 植物和动物残体的腐烂等。镍是某些低等生物和植物的必需微量营养元素之一, 但镍也是一种致癌的毒性元素^[9]。全国表层土壤中镍的平均含量为 24.9 mg/kg, 高于美国(20 mg/kg)、加拿大(20 mg/kg), 低于意大利(28 mg/kg)和日本(28.5 mg/kg), 呈对数正态分布。极大值 627.5 mg/kg, 极小值 0.28 mg/kg, 均方差 21.38, 变差系数 0.75, 均小于日本(日本极大值 3 800.8 mg/kg, 极小值 1.30 mg/kg, 均方差 39.92, 变差系数 1.4), 异常值(均值加或减三个标准差以外的值)不多^[10]。中国地域辽阔, 元素背景含量变化范围较大, 如 A 层土壤中镍的质量分数背景值为 7.7 ~ 71.0 mg/kg, 其中位值、75 分位值及 90 分位值分别为 24.9、33.0 及 42.4 mg/kg^[11]。土壤镍污染在部分工矿地区周围相当严重, 如我国“镍都”甘肃省金昌市, 土壤样品镍的含量与《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的三级标准比较, 其超标率为 70%, 污染面积达 26 km^2 ^[12]。杨国义等对珠江三角洲典型农业区域土壤中镍含量的调查表明: 24.9% 土壤样品中镍含量超过《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)的二级标准, 镍已成为仅次于汞的重要污染物^[13]。罗磊等依据大量科学数据对我国农业土壤中镍的输出输入进行了测算, 表明我国农业土壤中镍积累有增加的趋势, 其主要来源依次为大气沉降、畜禽粪便、肥料、污水、污泥^[14]。由于大气沉降面积较广, 畜禽粪便成为农田土壤中镍的重要污染源。

畜禽粪便的不合理施用使得农田镍污染由点源污染(污废水灌溉和污泥)向面源污染演化, 土壤镍污染的控制难度也逐渐加大。

1.3 土壤铜污染

我国土壤铜背景值为 7.3 ~ 55.1 mg/kg^[15], A 层土壤中铜的质量分数背景值为 7.3 ~ 55.1 mg/kg, 其中位值、75 分位值及 90 分位值分别为 20.7、27.3、36.6 mg/kg^[11]; 土壤含铜量是 3 ~ 300 mg/kg, 平均值为 22 mg/kg。铜可在土壤中富集并被农作物吸收, 靠近铜冶炼厂附近的土壤含有高浓度的铜。土壤铜主要污染来源是铜锌矿的开采和冶炼、金属加工、机械制造、钢铁生产、污灌、农药等^[16]。在农业土壤中, 尤其是蔬菜及果园土壤, 有关铜污染的报道逐年增多。卢树昌等对天津市郊区果园土壤铜积累状况的调查分析表明, 葡萄园土壤表层(0 ~ 10 cm)全铜含量为 216.7 mg/kg, 已发生轻度污染, 桃园、梨园土壤表层全铜亦有潜在风险, 喷施含铜杀菌剂和施用畜禽养殖粪便等外源铜的输入是果园土壤铜积累的重要原因^[17]。土壤铜污染已经导致部分地区, 如北京、天津、西安、沈阳、济南、长春、郑州、宁波、武汉、成都和上海等地的农产品铜含量超过国家食品卫生标准^[18]。我国农业土壤中铜来源依次为畜禽粪便、大气沉降、污水、污泥^[14]。我国 2003 年畜禽粪便产量已经达到 27 亿 t, 68 个集约化养殖场的猪粪含铜量平均为 467.0 mg/kg (变化范围为 10.2 ~ 1 742.0 mg/kg)^[19], 相比于 20 世纪 90 年代初, 我国鸡粪中铜含量由 52.4 mg/kg 增加至 97.0 mg/kg, 增加了近 1 倍; 猪粪中铜含量由 37.6 mg/kg 增加到 467.0 mg/kg, 增加了 11.4 倍^[20-21]。

1.4 土壤砷污染

土壤砷污染主要来自大气沉降、污水灌溉和含砷农药的喷洒。全国 A 层土壤中砷的质量分数背景值为 2.5 ~ 33.5 mg/kg, 土壤砷含量呈南北向地域分布, 海拔较高地区的土壤砷含量高于海拔较低处, 由青藏高原区、西南区、华南区向东北区递减, 与上游被侵蚀物之间存在着地球化学联系, 其中在局部区域内, 随着地形从高到低, 土壤中砷的含量也具有由高到低的分布特征^[22-23]。石英质岩石对土壤砷含量起着控制作用, 碳酸盐类岩石对土壤中砷含量的控制作用介于石英与土壤二者之间, 并且土壤 pH、有机质、黏土组成及氧化

铁含量对土壤砷的背景值也有不同程度的影响^[24]。中国是砷污染最为严重的国家之一, 在新疆、内蒙古、湖南、广东和云南等地, 因砷污染出现了典型的地方砷中毒现象^[25]。在湖南省石门县雄黄矿附近的3个村调查发现, 其土壤含砷量为84~296 mg/kg, 表明土壤已受到不同程度的砷污染^[26]。贵州省的某些地区, 煤中的砷含量高达100~9 000 mg/kg。我国自1956—1984年共发生30余起砷污染事件, 在我国因污灌引起的土壤污染中, 砷居第5位^[27]。2008年5月, 云南阳宗海发生的砷污染事件, 水土中的砷含量平均达0.117 mg/L, 按湖泊库容6.9亿 m³的水量计, 入湖砷量高达77 t^[28]。

1.5 土壤汞污染

汞具有很强的神经毒性和致畸作用, 且积累效应和遗传毒性明显, 已被EPA(美国环保署)列为优先控制污染物之一。土壤汞的来源主要源于土壤母质、大气中汞的干湿沉降、工业污染源、农业污染源和含汞废弃物。全国土壤A层汞的质量分数背景值为0.006~0.272 mg/kg。土壤中的汞如果通过食物链进入人体, 会对人体机能产生损害作用, 其中主要对人体产生毒害作用的是无机汞和有机汞。常见的无机汞有HgS、HgCl等, 可通过食物或者呼吸进入人体, 虽然不易被吸收, 但是对消化道有腐蚀作用, 也会造成肾脏损伤。中国是世界第一煤炭消费大国, 能源结构中煤的比例高达75%, 煤炭平均含汞约为0.15~0.20 ug/g, 高于世界平均含量(0.13 ug/g^[29])。史贵涛等研究表明, 黄浦江上游周边土壤及道路灰尘中汞的平均含量均超过集中式生活饮用水源地土壤质量标准^[30]。陈政池等研究发现, 粤北地区稻田土中汞含量高出未污染土壤4.2倍^[31]。李平等发现贵州务川汞矿区大气汞浓度超出正常大气1~4个数量级, 土壤总汞量也远高于对照区^[32]。苏静等研析, 兰州市调查区各点土壤未达到汞污染水平, 但表层土壤汞含量超出兰州市汞的背景浓度, 有逐渐富集趋势^[33]。

1.6 土壤铅污染

铅污染主要来自冶炼排放和汽车废气沉降铅对环境的污染, 一是由冶炼、制造和使用铅制品的工矿企业, 尤其是来自有色金属冶炼过程中所排出的含铅废水、废气和废渣造成的。二是由汽

车排出的含铅废气造成的。全国土壤铅A层土壤中的质量分数背景值为10.0~56.1 mg/kg, 其中中位值、75分位值及90分位值分别为23.5、30.5及43.0 mg/kg。铅中毒是一种蓄积性中毒, 随着人体内铅蓄积量的增加可引起造血、肾脏及神经系统损伤^[34]。我国的铅消费领域集中在蓄电池、电缆护套、铅材等行业, 然而被回收再利用的铅仅占约25%, 剩余大部分铅通过三废等各种形式排放至环境中, 导致大面积的环境铅污染^[35-38]。近年来, 我国铅污染现象时有发生, 例如在陕西凤翔、江苏大丰、湖南武冈、甘肃陇南等地发生的“血铅事件”, 一次次警示在我国很多地区都存在铅污染问题, 人类生命健康安全遭受危害。其中, 土壤铅污染最为普遍。

目前, 全世界平均每年排放约500万t铅, 过去50a间, 排放到全球环境中的铅约有78.3万t, 其中大部分进入土壤, 致使世界各国土壤出现不同程度的重金属污染^[39]。我国24个省(市)城郊污水灌溉区、工矿等经济发展较快地区的320个重点污染区中, 重金属含量超标的农产品产量与面积约占污染物超标农产品总量与总面积的80%以上, 其中铅是最严重的污染元素之一^[40]。据统计我国大中城市郊区蔬菜、粮食、水果、肉类与畜产品中铅的超标率分别为38.6%、28.0%、27.6%、41.9%和71.1%。以沈阳市为例, 环境中铅的暴露普遍, 市区土壤全铅含量范围为26~2 910 mg/kg, 污染程度较高^[41]。

2 镉、镍、铜、砷、汞、铅污染土壤的植物修复

2.1 研究概况

近年来, 国内外专家对重金属富集植物的研究与探索较多。Baker在欧洲中西部发现了能富集镉高达2 130 mg/kg的十字花科植物天蓝褐蓝菜^[42]。Salt发现印度芥菜对镉有一定的忍耐和积累能力, 而且生物量较大, 吸镉总量很高^[43], 但印度芥菜有很强的地域性, 我国很难大面积种植。刘云国等发现, 观赏花卉中, 月季对重金属镉的富集作用很强。在实验观察时间范围内, 植物体平均每天吸收镉1.757 6 mg/L, 且生长发育较好, 可作为土壤镉污染生物整治的植物^[44]。赵爱山等的试验表明, 刺儿菜对重金属镉污染有一定的修复能力^[45]。严理等的实验表明, 苎麻是强吸镉性经济作物, 对土壤镉污染修复有很高的应用价

值^[46]。

目前,世界范围内报道的镍超富集植物约有 318 种,约占所有重金属超富集植物的 75%,如位于热带地区的叶下珠属和大戟属植物、抗旱的木根草科植物、堇菜属植物、十字花科植物天蓝遏蓝菜、菊科植物向日葵,还有一些蕨类植物,如蜈蚣草等^[47]。张学洪等研究表明,李氏禾对镍表现出很强的富集能力,是一种镍超富集植物^[48]。Kramer 等报导,香芥菜属(*Alyssum*)植物的叶片含镍量可以高达 3%^[49]。

姜理英等研究表明,海州香薷是长江中下游地区废铜矿石堆上常见的优势植物,对铜有较高的耐性和强蓄积能力^[50];廖斌等通过水培试验证明,鸭跖草对铜有富集作用^[51];康薇等在铜矿区的调查和营养液实验表明,蓖麻是一种新的铜超积累植物^[52]。Visoottivseth 等在砷污染严重的尾矿中发现,蒙塔那菊(*Jasione montana*)、细弱翦股颖(*Agrostis tenuis*)、匍茎翦股颖(*Agrostis stolonifera*)和狗牙草(*Cynodon dactylon*)等为耐砷性植物^[53];韦朝阳等也在矿区发现,耐砷植物苧麻(*Boehmerianivea*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)的地上部砷浓度较高(分别为 536 mg/kg 和 760 mg/kg)^[54]。陈同斌等研究发现,蜈蚣草对砷有很强的富集作用^[55]。

龙育堂等研究发现,土壤含汞量在 5~130 mg/kg 范围内时,汞对苧麻产量和品质不会造成显著影响,且土壤汞的年净化率高达 41%,土壤自净恢复年限比种植水稻缩短 8.5 倍^[56]。刘德绍等发现,在气汞浓度为 (57.6 ± 14.7) ng/m³ 条件下,辣椒、四季豆、莴苣、红萝卜均对汞有一定的富集作用,且辣椒富集汞的能力最强,莴苣最低^[57]。王明勇等在贵州省万山特区废弃汞矿区首次发现一种汞富集植物——乳浆大戟^[58]。

目前,铅的超富集植物被发现的并不多^[59]。国外报道的几种典型铅超积累植物有 *Brassica nigra*、*Brassica pekinensis*、*Brassica juncea*、*T. rotundifolium*、*America martitima*、var. *balleri*、*Minuartia-verna*、*Thlaspi rotundifolium* 等^[60-65]。张富运等研究分析,铅超富集、富集及耐性植物种类分布在藜科、禾本科等 22 个科中^[66],禾本科、莎草科、十字花科、菊科、唇形科、豆科、石竹科、凤尾蕨科的植物种类较其他几个科多,尤其

是禾本科植物。东南景天、圆叶遏蓝菜、苧麻、蜈蚣蕨、土荆芥、铺地黍、杨梅、木贼、香附子、东方香蒲、委陵菜、紫花苜蓿、小鳞苔草、香根草、圆锥南芥、西风轮菜、蔗茅、凤尾蕨为铅超富集植物。

2.2 修复植物的选取原则及常用超富集植物

2014 年环境保护部印发了《农用地污染土壤植物萃取技术指南(试行)》的通知(环办[2014]114 号),指出了修复植物选取原则和超富集植物名录。修复植物一般选取富集系数大于 1、根系长度大于 15 cm 的超富集植物。镉、汞修复植物地上部生物量干重不少于 1.5 t/(a·hm²),镉、汞浓度分别不低于 100 mg/kg 和 10 mg/kg;砷、铅、铬、镍修复植物地上部生物量干重不少于 5 t/a·hm²,砷、铅、铬、镍浓度不低于 1 000 mg/kg。存在多种重金属污染的农用地,应采用可同时富集多种重金属的超富集植物,或采用不同的超富集植物进行轮作、间作,同时要做好修复植物的回收处理,避免二次污染。

目前常用的重金属超富集植物较多,其中镉的超富集植物有东南景天(*Sedum alfredii* Hance)、伴矿景天(*Sedum plumbizincicola* X.H.Guo et S.B. Zhou sp. nov.)、遏蓝菜(*Thlaspi caerules J. & C. Presl*);镍的超富集植物有布氏香芥(*Alyssum bertonlonii* L.)、*Berkheya condidii* L. (暂无中文名);砷超富集植物蜈蚣草(*Pteris vitatta* L.);汞的超富集植物为乳浆大戟(*Euphorbia esula* L.)、白车轴草(*Tifolium repens* L.);铅超富集植物有圆叶遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens J. & C. Presl*)、小鳞苔草(*Carex gentilis* Franch.)、印度芥菜(*Brassica juncea* L.)。另外根据研究报导,铜的超富集植物有海州香薷(*Elsholtzia solandens*)、鸭跖草(*Commelina communis*)、蓖麻(*Ricinus communis*)。

3 结束语

目前我国重金属污染土壤植物修复仍处于研究和小规模示范阶段,同时植物修复也有存在修复时间长、重金属超积累植物种类有限、较难满足高浓度污染治理等问题。如何提高修复效率、降低修复成本等问题,也面临着严峻的挑战。尽管如此,因我国耕地相对短缺,污染耕地修复后仍需继续进行农业生产,这就决定了工程物理措施不适用于耕地污染修复,随着研究的深入,集

众多优点的植物修复技术将有广阔的应用前景。

根据目前国内外植物修复技术研究现状,应加强以下几方面的研究。一是加强对重金属污染植物修复机理的研究工作,筛选出超富集植物。二是开展利用根圈固定及低积累农作物阻隔、降低重金属食物链风险的植物研究。三是开展多种植物联合修复、修复植物与农作物进行间套作-轮作等的边生产边修复模式的研究。四是研究植物根际微生物对植物修复的影响,提高植物对土壤重金属污染的修复作用。五是开展对超富集植物回收处理和安全填埋及资源化利用方面的研究。

参考文献:

- [1] 刘平,仇广乐,商立海. 汞污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 933-937.
- [2] 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[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1 196-1 203.
- [3] MOFFAT A S. Plants proving their worth in toxic metal clean up[J]. Science, 1995, 269: 302-303.
- [4] 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[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1994, 11: 41-49.
- [5] 许嘉琳,杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995: 24-36.
- [6] 冉烈,李会合. 土壤镉污染现状及危害研究进展[J]. 重庆文理学院学报(自然学版), 2011, 30(4): 69-73.
- [7] 陈怀满. 土壤圈物质循环系列专著: 土坡-植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [8] 任琼美. 镉污染土壤的植物修复探析[J]. 绿色科技, 2013(4): 162-163.
- [9] 刘艳. 重金属镍污染土壤的生态风险评价[D]. 北京:北京林业大学, 2007.
- [10] 吴殿廷,张东威. 中国表层土壤镍背景值分异规律的研究[J]. 中国环境监测, 1992, 8(3): 49-53.
- [11] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境出版社, 1990: 86-87.
- [12] 廖晓勇,陈同斌,武斌,等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 843-851.
- [13] 杨国义,罗薇,张天彬,等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 818-821.
- [14] LUO L, MA Y B, ZHANG S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. Journal of Environmental Management. 2009, 90(8): 2 524-2 530.
- [15] 魏复胜,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-20.
- [16] 姜理英,杨肖娥,叶海波,等. 炼铜厂对周边土壤和作物体内重金属含量及其空间分布的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 28: 689-693.
- [17] 卢树昌,高悦. 天津市郊区果园土壤重金属铜积累状况调查分析[J]. 天津农业科学, 2009, 15: 41-44.
- [18] 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.
- [19] 谷洁,高华,李鸣雷,等. 养殖业废弃物对环境的污染及肥料化资源利用[J]. 西北农业学报, 2004, 13(1): 132-135.
- [20] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.
- [21] 张树清,张夫道,刘秀梅,等. 规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
- [22] 杨胜科,王文科,张威,等. 砷污染生态效应及水土体系中砷的治理对策研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 69-73.
- [23] 翁焕新,张宵宇,邹乐君,等. 中国土壤中砷的自然状况及其成因分析[J]. 浙江大学学报, 2000, 34(1): 88-92.
- [24] 杨胜科,王文科,张威,等. 砷污染生态效应及水土体系中砷的治理对策研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 69-73.
- [25] 蔡保松,陈同斌,廖晓勇,等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 711-717.
- [26] 王振刚,河海燕,严于伦,等. 石门雄黄矿地区居民砷暴露研究[J]. 卫生研究, 1999, 28(1): 12-14.
- [27] 杨国定. 污水灌溉与农业环境污染[J]. 农业环境保护, 1984(5): 21-23.
- [28] 赵娟. 阳宗海和滇池污染的比较研究[J]. 法制与社会, 2009(13): 219-220.
- [29] 党民团,刘娟. 中国汞污染的现状与防治对策[J]. 应用化工, 2005, 34(7): 394-396.
- [30] 史贵涛,陈振楼,张翠,等. 黄浦江上游周边农田土壤、蔬菜及道路灰尘中汞的累积[J]. 环境化学, 2008, 27(1): 100-104.
- [31] 陈政池,林汉国. 粤北地区稻田土及稻米中汞、铅、砷、镉污染现状研究[J]. 广东卫生防疫, 1995, 21(2): 19-21.

- [32] 李平, 冯新斌, 仇广乐. 贵州省务川汞矿区汞污染的初步研究[J]. 环境化学, 2008, 27(1): 96-99.
- [33] 苏静, 程金平, 王文华. 兰州市土壤汞污染的现状及其成因分析[J]. 能源与环境, 2006(1): 69-72.
- [34] 游勇, 鞠荣. 重金属对食品的污染及其危害[J]. 学术交流, 2007, 6(2): 102-103.
- [35] 蔡佑振. 环境铅污染影响人体健康[J]. 安全与健康, 2004, 15: 50-51.
- [36] 蔡苇, 何正浩, 刘红瑛. 黄石市郊主要蔬菜地土壤重金属污染状况分析[J]. 黄石理工学院学报, 2006(3): 69-76.
- [37] 李淑, 顾泳洁, 朱育. 上海境内苏州河铅污染研究[J]. 科技资讯, 2006(9): 192-193.
- [38] 阴雷鹏, 赵景波. 西安市主要功能区表层土壤重金属污染现状评价[J]. 陕西师范大学学报, 自然科学版, 2006(3): 109-112.
- [39] SINGH OV LANGANA S, PANDEY G, et al. Phytoremediation: an overview of metal ion decontamination from soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003(61): 492-405.
- [40] 薛美香. 土壤重金属污染现状及修复技术[J]. 广东化工, 2007, 34(172): 73-75.
- [41] 王金达, 刘景权, 于君宝, 等. 沈阳市城区土壤和灰尘中铅的分布特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(3): 300-304.
- [42] BAKER A J M. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery, 1989, 1: 81-126.
- [43] SALT D E, PRINCE R C, PICKERING I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard[J]. Plant Physiol, 1995, 109: 1427-1433.
- [44] 刘云国, 尹志平. 土壤镉污染生物整治研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2000, 27(3): 34-38.
- [45] 赵爱山, 俞春花. 外源镉在刺儿菜中的富集及其对其生长的影响[J]. 甘肃农业科技, 2015(9): 42-45.
- [46] 严理, 彭源德, 杨喜爱, 等. 苎麻对镉污染土壤功能修复的初步研究[J]. 湖南农业科学, 2007(6): 125-127; 130.
- [47] 王锐, 于宗灵, 关畅. 土壤镍污染植物修复的研究概况[J]. 环境科学与管理, 2013, (38)8: 111-114.
- [48] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生镉超积累植物—李氏禾 (Leersia hexandra Swartl)[J]. 生态学报, 2009, 26(3): 951-953.
- [49] KRAMER U, COTTER-HOWELLS J D, CHARNOEK J M, et al. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel[J]. Nature, 1996, 379(6566): 635-638.
- [50] 姜理英, 石伟勇, 杨肖娥, 等. 铜矿区超量积累 Cu 植物的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 906-908.
- [51] 廖斌, 邓冬梅, 杨兵, 等. 鸭跖草 (Commelina communis) 对铜的耐性和积累研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 797-801.
- [52] 康薇, 郑进. 蓖麻—一种新的铜超积累植物[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1449-1451; 1466.
- [53] VISOOTIVISETH P, FRANCESONIK, SRIDOKCHAN W. The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land[J]. Environ. Pollut, 2002, 118: 453-461.
- [54] 韦朝阳, 陈同斌. 高砷区植物的生态与化学特征[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 695-700.
- [55] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 47(3): 207-210.
- [56] 龙育堂, 刘世凡, 熊建平, 等. 苎麻对稻田土壤汞净化效果研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(1): 30-33.
- [57] 刘德绍, 青长乐. 大气和土壤对蔬菜汞的贡献[J]. 应用生态学报, 2002(3): 315-318.
- [58] 王明勇, 乙引. 一种新发现的汞富集植物——乳浆大戟[J]. 江苏农业科学, 2010(2): 354-356.
- [59] REEVES R D, BAKER A J M. Metal-accumulating plants. In: Raskin I. ed. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000: 193-229.
- [60] MC GRATJ S P. Plant that hyper-accumulate heavy metals[J]. UK: Brooks R R(ed) CAB international, Wallingford, 1998: 261-287.
- [61] ANDERSON T A, GUTHIE E A, WALTON B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environ. Sci. Technol., 1993, 27(13): 2630-2636.
- [62] ANDERSON TA, GUTHIE EA, WALTON B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environ. Sci. Technol., 1993, 27(13): 2630-2636.
- [63] SALT D E, SMITH R D, RASKIN I. Phytoremediation [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1998, 49: 643-648.
- [64] XIONG Z T. Lead uptake and effects on seed germination and plant growth in a Pb hyperaccumulator Brassica pekinensis Rupr [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1998, 60(2): 285-291.
- [65] KUMAR P B AN, DUSJEMPLV V, MOTTO H, et al.

高台县水资源开发利用现状及建议

李一波, 王 平

(甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 从高台县水资源开发利用现状入手, 分析了高台县水资源开发利用中存在的问题, 提出了实施节水工程, 建设节水型社会; 科学优化配置水资源; 实行最严格的水资源管理制度等对策建议。

关键词: 水资源; 利用现状; 问题; 对策建议; 高台县

中图分类号: X144

文献标识码: A

文章编号: 1001-1463(2016)02-0075-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2016.02.022

水是重要的自然资源, 也是人类赖以生存的基本条件和影响经济社会可持续发展的重要因素。长期以来, 水资源短缺一直是制约高台县经济社会发展的“瓶颈”。因此, 调查了解水资源状况, 研究实现水资源可持续发展的对策, 对促进经济社会的发展具有十分重要的意义。水资源问题是当今世界热门的话题之一, 随着人口的增长和经济的快速发展, 水资源危机正与日俱增, 尤其是一些干旱地区和大中型城市, 解决水荒问题已成燃眉之急。可持续发展是指既满足当代人的需要, 又不危害后代人满足其自身需要能力的发展, 已成为许多学科的一个研究方向。在世界水资源短缺的今天, 水资源可持续开发、利用及其定量评价已成为众多学者研究的重点。

1 水资源开发利用现状

高台县位于河西走廊中部, 黑河下游, 地势南高北低。随着海拔高度的降低, 降水量由大到小, 年均降水量 104 mm 左右, 年蒸发量为 1 765 mm 左右, 蒸发量是降水量的 17 倍。境内水流均属黑河水系, 发源于祁连山北麓^[1]。川区引黑河水灌溉, 多年平均过境水量为 11.62 亿 m³, 可利用水量为 2.291 m³。山区有水库调蓄灌溉, 多年平

均引蓄水量 0.77 亿 m³。地下水资源主要是在平原川区, 全县地下水资源量为 2.6 亿 m³, 允许开采量为 1.2 亿 m³。截至目前, 高台县已建成万亩以上灌区 5 个, 其中大型灌区 1 个, 中型灌区 4 个, 中小型水库 19 座, 总库容 500 万 m³; 兴修干支渠 116 条, 514 km; 现有配套机井 1 772 眼。国民经济各行业用水总量 4.82 亿 m³。其中农业用水 4.46 亿 m³, 工业用水 0.08 亿 m³, 生活用水 0.05 亿 m³, 生态林草用水量 0.23 亿 m³。

2 存在的问题

2.1 水资源利用效率低, 浪费严重

城镇生活和工农业用水存在大量的浪费。由于管理不善、工程配套标准低和工艺技术落后, 城镇管网漏失率达 20% 以上。农田灌溉采用大水漫灌, 灌溉质量低、成本高、效益低, 水的利用率更低, 灌溉水利用率仅在 40% 左右, 个别灌溉渠道, 特别是斗农级渠道仅为 30%^[2]。工业需水量大, 重复利用率低, 用水量大, 产值低。生活方面, 由于节水意识不强, 节水器具推广力度不大, 生活用水浪费严重。

2.2 农业用水管理体制与运行机制尚需完善

一是适应农村经济发展的三级农业节水服务

收稿日期: 2015-09-25

作者简介: 李一波(1988—), 男, 甘肃高台人, 在读硕士, 主要从事农业水资源利用与研究。联系电话: (0)13830680971。

通讯作者: 王 平(1966—), 男, 甘肃成县人, 教授, 博士, 主要从事农业资源与环境、植物营养学、生态学等方面的教学和科研工作。联系电话: (0)18293116829。

Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soil[J]. Environ. Sci. Technol., 1995, 29: 1 232-1 238.

耐性植物筛选研究进展[J]. 中国林业科技大学学报, 2012, 32(12): 92-96.

[66] 张富运, 陈永华, 吴晓芙, 等. 铅锌超富集植物及

(本文责编: 陈 珩)