

矿产与粮食复合主产区土壤污染的生物修复与生态重建对策

Strategies of Bioremediation and Ecological Reconstruction on Contaminated Soils in the Overlapped Areas between Mining Industries and Food Production

彭红云 / PENG Hong-yun, 杨肖娥 / YANG Xiao-e

浙江大学环境与资源学院环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310029

Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecological Health, School of Natural Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

[摘要] 讨论了矿产与粮食复合主产区环境质量特征, 复合区环境修复特异生物资源挖掘与利用, 复合区环境生物修复与生态重建原理与技术, 复合区生态修复工程产品开发技术及其经济与生态效益等, 提出了复合区土壤环境污染的实用修复技术研发及粮食数量与质量安全生产的控制策略。

[关键词] 矿产与粮食复合主产区; 土壤污染; 生物修复; 生态重建

[中图分类号] X171.4, TD167

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857 (2006) 03-0025-04

Abstract: In the overlapped areas between mining industries and food production, soil contamination is widespread. In this paper, characterization of the environmental quality in these regions, utilization of identified environmental biological resources and searching for new environmental biological resources, development of principles and techniques for environmental remediation and ecological reconstruction, full post-utilization of remediation biological products for economic and ecological values were discussed. Strengthen should be given for the investigation on the development of practical remediation techniques for contaminated soils in the overlapped areas, and the strategy of controlling food quantity and quality in the food production areas.

Key Words: overlapped area between mining industries and food production; soil contamination; bio-remediation; ecological reconstruction

CLC Numbers: X171.4, TD167

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)03-0025-04

1 引言

随着经济发展对矿产资源的需求, 采矿活动日益增强, 新老矿山产生的环境问题的叠加, 将使矿产及其周边复合区域生态环境的治理和恢复难度增大, 尤其是煤炭矿山的环境问题突出, 一些井下采煤区因大规模开发, 使地表变形面积随采空区沉陷范围逐年加大, 治理难度和成本不断提高。众多的非金属和建材矿山、黑色金属和有色金属矿山, 由于点多面广, 其影响范围较大。在这些相关矿产工业发展的同时, 如不及时采取防范措施, 矿产及其周边土地资源的破坏、水体和土壤环境的

污染, 导致土壤质量下降、生态系统退化、生物多样性丧失等, 将是突出的生态环境问题。矿产与粮食复合主产区, 是指既属于粮食主产区, 又是矿产资源主产区的复合区域。既要保证复合区矿产资源开采活动的正常进行, 又要保证复合区粮食生产的产量及质量。因此, 治理和修复矿产及其周边复合区生态环境, 确保复合区粮食安全生产急需提上议事日程。本文就矿产与粮食复合主产区环境质量特征、复合区环境修复特异生物资源的挖掘与利用、复合区环境生物修复与生态重建原理与技术、复合区生态修复工程产品开发技术及

其经济与生态效益等 4 个方面展开讨论。

2 矿产与粮食复合区环境质量特征

长期以来, 由于在矿产资源开发利用中忽视环境保护, 我国矿山环境恶化趋势尚未得到有效遏制, 矿产与粮食复合主产区环境污染严重, 主要表现在以下几个方面。① 采矿业占地面积大。采矿过程中产生大量的尾矿、废石土、矿渣、煤矸石、煤灰等废弃物, 随意堆置排放, 既占用了大量的土地资源, 且破坏了堆置场地植被等原有生态环境。② 矿产“三废”造成的环境复合污染突显, 复合区的重金属污染

收稿日期: 2005-12-05

基金项目: 科技部“973 计划”项目(2002CB410804), 科技部“863 计划”项目(2004AA649050-1), 上海市农委重点攻关项目(2004SA)

作者简介: 彭红云, 女, 浙江省杭州市凯旋路 258 号浙江大学环境与资源学院资源科学系, 副教授, 主要从事污染物环境行为及其生态健康效应研究; E-mail: penghongyun@zju.edu.cn

问题突出,有机污染也不容忽视。由于废气、粉尘及废渣的排放,引起矿产及周边大气环境受到不同程度的复合污染,以硫化汞和煤炭最为严重。煤炭采矿业中工业废气排放多为烟尘、二氧化硫、氮氧化物和一氧化碳。通常炼1 t硫磺要排放10 000 m³有害气体,并产生大量废水及汞、砷等有害物质。此外,废渣极为有害,对大气的污染也相当严重。矿业活动产生的各种废水主要包括矿坑水、选矿、冶炼废水及尾矿池水等。其中煤矿、金属、非金属矿业的废水以酸性为主,并含有大量重金属及有毒、有害元素(如铜、铅、锌、砷、汞、六价铬、汞、氰化物)以及COD、BOD、悬浮物等;石油、石化业的废水中含挥发酚类、石油类、苯类、多环芳烃等物质。这些污染环境中的废水会污染土壤或地表水体,同时在污水迁移过程中污染地下水。③ 矿产与粮食复合主产区的粮食安全问题严重。矿产资源的开采、冶炼及加工对矿粮复合区土壤、水体和大气带来了严重的环境复合污染,威胁农业生产、粮食安全和人身健康;再者,矿产资源的开发利用对环境的破坏最明显的是土地,尤其是耕地的破坏和减少,直接影响了粮食的安全生产。

3 复合区环境修复特异生物资源的挖掘与利用

1992年,联合国在巴西召开开发大会签署国际性《生物多样性公约》,强调所有国家必须进一步充分认识所拥有遗传资源的重要性和潜在价值。我国政府对此也予以了高度重视,在2001年的国家“863”计划中明确提出,在“污染土壤修复方面筛选和培育一批适应我国污染特点的重金属超积累或耐性植物和石油降解特异微生物,拥有我国自主知识产权”。国外已经开始了这方面的研究工作,如澳大利亚政府和矿业环境研究中心积极资助矿区环境中原生植物种子资源的挖掘,墨尔本大学与牛津大学建立了全欧洲最大的重金属超积累植物种子库,以及英国设菲尔德大学环境中心建立的METALS。加拿大的PHYTOREM库收集了对19种重金属具超积累或耐性能力的800种不同植物;加拿大建立的PhytoPet种质库,收集了100种对石油污染土壤具有修复能力的不同植物。

开展矿粮复合区污染环境的生物修复和生态重建,必须进行全国范围内的环境

特异种质资源的筛选和收集工作。

3.1 收集已有的矿山植物种质资源

已大量报道的我国原生重金属超积累植物有:超积累植物——蜈蚣草^[1];超积累植物——东南景天^[2];超积累植物——商陆^[3],铜耐性/富集植物——海州香薷^[4,5]。这些富集或超积累植物主要来自于金属矿区,是矿区的优势植物种群,如东南景天为铅/锌矿的超积累植物,商陆为锰矿的超积累植物,铜耐性植物主要来自于铜矿;有的植物来自非金属矿区,如砷超积累植物蜈蚣草来自湖南雄黄矿区。收集这些环境修复特异种质资源,为复垦矿山重金属污染地提供了极好的植物修复材料。矿山复垦地与附近农田和绿地相比,环境因子变化很大,其土层薄、土质差、微生物活性差。因此,抗逆性强和速生是矿山复垦地植被品种筛选的首要原则,而根系发达、培肥矿土和保持水土效果好也是十分重要的。故在采矿区复垦初期,应大量增施有机肥和化肥,迅速播种牧草,提高土壤肥力。在重金属污染的土壤上,可种植海州香薷、东南景天、蜈蚣草等重金属耐性/富集植物和超积累植物,以净化土壤中的重金属。

3.2 征集和筛选粮食主产区重要农作物突变体库和特异种质资源

矿粮复合区是因为矿产活动造成的特殊环境系统,矿粮复合区耕地土壤的破坏和减少,直接影响到粮食生产的数量和质量。矿粮复合区的土、水、气复合污染及重金属、有机物复合污染,直接影响粮食生产的安全性。应在粮食主产区收集与创建并举,构建重要的农作物各类突变体,征集和鉴定具有环境污染修复功能的特异农作物种质材料,建立相应的突变体指纹图谱数据库。① 征集和筛选具有环境修复功能的特异农作物种质资源。在“973”项目的资助下,我们对长三角和珠三角地区主栽水稻40个品种分别在Cd、Pb、Cu、Hg三级污染2倍的土壤大田栽培,收获后测定作物可食部中重金属含量,结果表明,除Cu外,供试29~35个品种中,糙米Cd含量超标率达90%,Pb和Hg的超标率均达100%。通过对在同一土壤条件下生长的200多种水稻品种的筛选,选出了籽粒镉低积累和镉高积累水稻基因型品种,初步鉴定出精米镉低积累水稻品种5个^[6];收集到长三角和珠三角青菜和芥菜45种、萝卜23种、番茄28种,已经开始在复合污染土壤中进行大田安全生产评估,

从100个油菜品种中初筛到镉低积累和镉高积累油菜品种,已经开展镉污染农田土壤的边修复、边生产盆栽试验^[7]。② 在矿粮复合区中的粮食主产区筛选适合于粮食主产区耕地的重金属等污染物低积累特异农作物品种,实现粮食主产区耕地农产品安全生产。

4 复合区环境生物修复与生态重建原理与技术

矿产资源开发对生态环境造成的破坏,治理难度大、成本高,即所谓的破坏容易治理难。因此,矿粮复合区环境防治主要在于少破坏,对已经产生的破坏要及时治理,这就必须坚持以防为主、防治结合的原则。对我国目前存在的主要矿粮复合区环境问题,可探索一种有效而实用的技术——矿粮复合区土地生物修复和生态重建技术,以减轻污染和恢复环境。

复合区环境生物修复与生态重建的核心问题是:构建退化的矿粮复合区土壤植被系统恢复与重建的新体系与新技术,建立矿粮复合区生态系统恢复后良性循环的修复示范基地。矿山植物材料海州香薷、东南景天、蜈蚣草、商陆等均可以用作矿粮复合区复垦和生物修复的先锋材料。污染环境生物修复的基本含义是:以特异生物(植物、微生物等)优化组合而成的对污染物高效净化和胁迫环境高度适应的强化生态系统为中心,以物理和化学的调控为辅助,修复已污染的环境,使其成为安全和持续健康的生态环境。要加强矿粮复合区耕地的修复技术,恢复粮食主产区的粮食正常生产功能。针对因矿业活动和复垦活动造成的复合区耕地重、中、轻度重金属污染的状况,可以采用如下不同的修复模式。

4.1 低积累农作物品种及其农产品安全生产

对重金属轻度污染的复合区耕地,采用直接种植重金属低积累农作物品种的农业生产模式,如种植重金属低积累水稻、油菜等,进行农作物生产,评价其安全生产指标。随着重金属对农田土壤污染的日益加剧,重金属低积累农作物品种日益受到重视。重金属低积累农作物,具备重金属耐性植物的特性,将大量的重金属钝化在根部,限制其向地上部转运,使作物可食部中重金属含量控制在食品安全范围之内。它将在重金属轻度污染农田土壤的农作物安全生产上,发挥重要作用。

4.2 低积累农作物与超积累植物的“边修复边生产”

对重金属中、轻度污染的复合区耕地, 也可以采用低积累农作物品种与超积累植物东南景天的“边修复边生产”(图1)。已经证明, 东南景天与玉米共栽培, 可以有效地降低污染土壤玉米籽粒中重金属含量^[6], 达到玉米安全生产的目的, 同时实现了污染土壤中玉米的“边修复边生产”。也可以采用超积累的农作物品种和低积累农作物品种之间的套种技术, 开展“边修复边生产”^[7]。

4.3 富集/超积累植物的化学-植物提取修复模式

对重金属重度污染的复合区耕地, 采用富集/超积累植物的化学-植物提取的修复模式。目前, 超积累植物东南景天和蜈蚣草在国内重金属污染土壤的植物修复原理及修复技术中已得到广泛的研究和应用, 是极有开发前景的砷、镉污染土壤植物提取的好材料。东南景天能够忍耐高浓度的铜、铅、锌、镉污染, 体内能够积累一定量的铜、铅、锌、镉污染物。种植东南景天于铜、铅、锌、镉浓度高达1.43 mg/kg、1.50 mg/kg、2.00 mg/kg、0.021 mg/kg的污染土壤上, 一季收获后, 地上部生物量可达4~5 t/hm², 可以带走污染土壤中的铜、铅、锌、镉分别高达0.5 kg/hm²、0.5 kg/hm²、70.6 kg/hm²、0.5 kg/hm², 是重金属复合污染土壤植物修复的极好材料(图2)。海州香薷已被报道为矿区土壤复垦的先锋植物, 在我国铜等重金属污染土壤的修复原理及

修复技术推广中已经得到很好的应用。盆栽试验表明, 2.5 mmol/kg EDTA 能有效地增加土壤水提取态 Cu 含量及植物地上部分 Cu 含量, 而柠檬酸对土壤提取态 Cu 和植物地上部分 Cu 吸收积累并无显著影响, 施用适量 EDTA 能够明显提高海州香薷对污染土壤铜植物提取修复效应。施用有机肥料可促进矿山土壤 Cu 从提取态向残余态转化, 使农业污染土壤中的 Cu 从氧化物结合态向有机结合态转化。施用 1.0% 以上的有机肥料, 能够显著提高 Cu 农业污染土壤植物提取修复效率^[9]。在铜、铅、锌、镉浓度分别高达 1.43 mg/kg、1.50 mg/kg、2.00 mg/kg、0.021 mg/kg 的污染土壤上(图2), 种植海州香薷一季, 地上部分生物量可达 9.2~13 t/hm², 可以带走污染土壤中的铜、铅、锌、镉分别为 0.798 kg/hm²、0.363 kg/hm²、2.426 kg/hm²、0.029 kg/hm²^[10]。采用海州香薷进行土壤重金属复合污染植物修复工作, 已由理论和实验基础研究转向示范推广和技术应用阶段^[11]。

5 复合区生态修复工程产品开发技术及其经济与生态效益

在矿粮复合区生态植被的重建及生物修复工程示范的同时, 必须加强复合区修复工程产品的产后开发技术, 获得复合区生态重建和生物修复的生态环境效益、社会效益和经济效应。对粮食主产区中低积累农作物突变体及“边修复边生产”的农作物品种, 必须进行粮食产量和质量评估。并开展修复植物材料的产后处置和资

源化利用。已经证实, 污染大田修复基地的海州香薷, 植物各器官中挥发油量表现为花>叶>茎, 海州香薷花中挥发油量可达到 2.08%, 远远高于茎中的挥发油量(0.13%)。大田修复基地海州香薷地上部分生物量高达 9~13 t/hm², 其中, 茎、花、叶的最大生物量分别可达 60%、22%、18%。因此, 海州香薷茎、花、叶中的最大挥发油量分别可达到 1.014 kg/hm²、59.488 kg/hm²、26.442 kg/hm², 开发海州香薷的花和叶中挥发油具有现实意义, 且海州香薷挥发油中的大部分组分为富含双键的有机化合物, 经过适当处理、改性(如进行自由基交联聚合), 可以得到高附加值的、具有一定功能的绿色环保型涂料。另外, 挥发油中的主要成分为脱氢香薷酮, 含有一个可以聚合的双键, 因而可能在一定条件下聚合得到新型热塑性高分子材料; 如将此双键环氧化, 则可以和二氧化碳在一定条件下发生共聚反应, 从而可能实现不依赖有限石化资源、从可再生资源中获取高分子材料的目的, 降低海州香薷植物修复的成本, 可加快海州香薷对重金属复合污染土壤的修复进程和产业化推广。

矿粮复合区环境的生物修复及生态重建是个全新的课题, 必须集合来自矿业、农业、环境、化学、植物、土壤、生态、土地等领域的专家共同探索、实施和解决。面对矿粮复合区生态环境及粮食安全生产的日益恶化, 必须加强研究矿产与粮食复合主产区及其周边地区的环境复合污染机制, 利用已有的矿区植物资源及已经筛选出的特异农作物品种, 研发复合区土壤环



图1 农田重金属污染的“边修复边生产”

Fig. 1 Phytoremediation of metal contaminated soils during crop production



图2 海州香薷和东南景天对农田重金属污染的修复

Fig. 2 Phytoremediation of heavy metal contaminated agricultural soils using *Elsholtzia splendens* and *Sedum alfredii* Hance

境污染的实用修复技术及修复标准, 提出粮食数量与质量安全生产的有效控制策略。

参考文献 (References)

- [1] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 神超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特性[J]. 科学通报. 2002, 47(3): 207-286.
- [2] YANG X E, LONG X X, YE H B, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species [J]. Plant and Soil. 2004, 259 (1-2): 181-189.
- [3] 薛生国, 陈英旭, 林琦. 中国首次发现的蜈蚣超积累植物——商陆[J]. 生态学报. 2003, 23(5): 935-937.
- [4] JIANG LY, YANG X E, HE Z L. Growth response and phytoextraction of copper at different levels in soils by *Elsholtzia splendens*

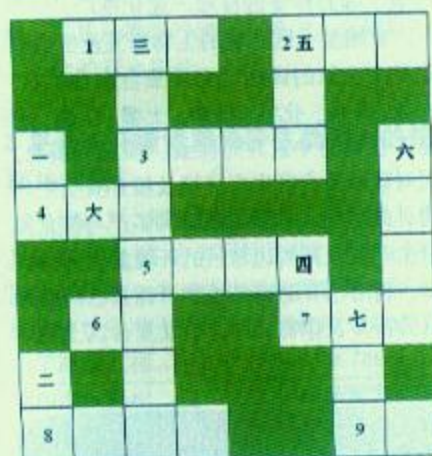
- [J]. Chemosphere. 2004, 55: 179-87.
- [5] TANG S R, WILK B M, BROOKS RR. Heavy-metal uptake by metal-tolerant *Elsholtzia haichowensis* and *Cammelia communis* from China[J]. Communication Soil Science and Plant Analysis. 2001, 32(5&6): 895-906.
- [6] DIAO W P, NI W Z, MA H Y, YANG X E. Cadmium pollution in paddy soil as affected by different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2005, 75 (4): 731-738.
- [7] WANG J Q, SU D C. Distribution of cadmium in oilseed rape and Indian mustard grown on cadmium contaminated soil[J]. Journal of Environmental Sciences-China 2005, 17 (4): 572-575.
- [8] LIU X M, WU Q T, BANKS M K. Effect of simultaneous establishment of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on heavy metal accumulation

- in plants[J]. International Journal of Phytoremediation. 2005, 7(1): 43-53.
- [9] YANG X E, PENG H Y, JIANG LY, et al. Phytoextraction of copper from contaminated soil by *Elsholtzia splendens* as affected by EDTA, citric acid and compost[J]. International Journal of Phytoremediation. 2005, 7 (1): 69-83.
- [10] PENG H Y, YANG X E. Distribution and accumulation of copper, lead, zinc and cadmium contaminants in *Elsholtzia splendens* grown in the metal contaminated soil—a field trial study[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2005, 75 (6): 1115-1122.
- [11] 彭红云, 杨肖娥. 香薷植物修复铜污染土壤的研究进展[J]. 水土保持学报. 2005, 19(5): 193-199.

(责任编辑 王 笠)

· 科技智力游戏 ·

轻松一刻——填空补白



“科技智力游戏”栏目增设的“轻松一刻——填空补白”游戏, 供读者读刊闲暇之余自娱自乐, 并获取一些与科技有关的小知识。读者可根据右边“横”行、“纵”列的文字提示, 分别填上相应的文字。提示文字取自于科技小常识、近期新闻媒体报道和《科技导报》近期内容。

答案请见下期。

横

1. 2005 年中国年度经济人物。他创建并率领中国芯片设计公司中星微电子首次成功将“星光中国芯”全面打入国际市场, 在美国纳斯达克成功上市。

2. 一种眼科疾病。该病导致平行光线进入眼内后在视网膜之后形成焦点, 外界物体在视网膜不能形成清晰的影像。

3. 2005 年我国首次组织横跨三大洋的远洋考察船船名。

4. 哥伦布发现的美洲的习惯称谓。

5. 中国科学技术协会会刊, 力争办成中国的《Science》和《Nature》。

6. 美国著名的学术杂志之一, 英文名为《Science》。

7. 媒体宣传报道的引导作用。也是近年来世界教育领域里迅速发展起来的一种新的学习理念、学习方式和方法, 个体自身引发的以评价自己学习需要、形成自己的学习目标、寻求学习的人力和物质资源、选择适当的学习策略和评鉴学习结果的过程。

8. 人类对未知外层空间的探寻活动, 2005 年美国和欧空局为此发射了多枚飞行器。

9. 自然科学的学科之一, 主要研究通常尺寸的物体在受力下的形变, 以及

速度远低于光速的运动过程。

纵

一、科学研究者应具备的最重要素养之一, 也是当前强调得最多的科研精神之一。

二、一个物理学历史上的名词, 曾被作为光波的荷载物同光的波动学说联系起来, 随后又被认为是电磁波的传播媒质, 但后来被证实并不存在。

三、2005 年可以和神六载人航天工程相提并论的重用科技进展之一。2005 年 4 月 18 日, 该工程在江苏省东海县北村成功深入钻探到地下 5 158 m, 标志着历时近 4 年的该项工程圆满竣工。

四、通过报纸、杂志、广播或其它形式把事件介绍给受众的一种行为。

五、在神六载人航天工程中立下汗马功劳的一探测船名称, 承担了外测、遥测、遥控、通信 4 项任务的测控任务。

六、2005 年倍受瞩目的禽流感病毒的特点。

七、根据力的作用效果命名的一种力, 总是指向圆心, 常用来形容团队的凝聚精神。

(供稿 李建才 责任编辑 李向荣)