第**39**卷第**12**期 扌\*危刘学5衣\*'

2**016** 年 **12** 月 **Environmental Science & Technology Dec. 2016**

僮祥英，邓锋，文竹.毕节煤矸石污染地优势木本植物土壤修复能力研究J].环境科学与技术,016,9(12 ：73-177. Tong Xiangying, Deng Feng, Wen Zhu. Study on phytoremediation potential of dominant woody plants for the soil contaminated by coal gangue in Bijie[J]. Environmental Science & Technology,2016,39(12)：173-177.

毕节煤矸石污染地优势木本植物土壤修复能力研究

僮祥英 1，2， 邓锋 1， 文竹 1

(1.贵州工程应用技术学院 煤化工协同创新中心,贵州 毕节 551700； 2.西南大学化学化工学院,重庆 400700)

摘 要：采用 Nemerow 污染指数法对毕节市煤矿区植物根系土壤进行质量评价,并使用富集系数和转移系数分析矿区优势木本植 物对土壤中重金属元素的修复潜力。结果表明：研究区土壤已经受到 Cd、V、Cu、Co、Cr 的污染,其中 Cd 污染尤为严重。单个元素修复能 力上,亮叶桦对 Cd 的修复能力最强,其次为白杨,对 Cu 吸收富集能力最强的是白杨,对 Co 有吸收累积能力只有白杨,所有植物对 V 和 Cr 的富集系数均<1,达不到富集修复的要求；当生长年限相接近时,研究区优势木本植物对 Cd、V、Cu、Co、Cr 的综合修复能力从大到小 排序为白杨、亮叶桦、青冈、柳杉。白杨和亮叶桦可作为研究区土壤修复木本植物。

关键词：煤矸石； 土壤污染； 植物； 修复

中图分类号:X53；X825 文献标志码:A doi： 10.3969/j.issn.1003—6504.2016.12.029 文章编号：1003—6504(2016)12—0173—05

Study on Phytoremediation Potential of Dominant Woody Plants  
for the Soil Contaminated by Coal Gangue in Bijie  
TONG Xiangying1,2, DENG Feng1, WEN Zhu1

(1.Joint Innovative Centre for Coal Chemical Industry ,Guizhou University of Engineering Science,Bijie 551700,  
China；2.School of Chemistry and Chemical Engineering ,Southwest University,Chongqing 400700,China)

**Abstract**：Environmental quality of the soils in coal mining area of Bijie ,Guizhou Province were evaluated by single factor pollution index and Nemerow composite index ,the ability of phytoremediation of its dominant woody plants for the soil contaminated by heavy metals was analyzed with biological accumulating coefficient and biological transfer coefficient. The results showed that the soil had been contaminated by heavy metals such as Cd ,V,Cu,Co,Cr in study area,and the most serious was Cd. Phytoremediation for single element showed that enrichment capacity of Betula luminifera H. Winkl. for Cd was the strongest,followed with Populus tomentosa Carr. The enrichment capacity of Populus yunnanensis Dode for Cu was the strongest, and Populus yunnanensis Dode was the only one that had enrichment capacity for Co. The biological accumulating coefficients of V and Cr in four tree species failed to reach 1 ,dissatisfied the demand of phytoremediation. Meanwhile,the order of comprehensive phytoremediation for above 5 heavy metal elements of dominant woody plants was shown as Populus yunnanensis Dode > Betula luminifera H. Winkl.> Cyclobalanopsis glauca (Thunb.) Oerst. > Cryptomeria fortunei Hooibrenk ex Otto et Dietr in the case of nearly growth ages of plants. Populus yunnanensis Dode and Betula luminifera H. Winkl. could be selected as phytoremediation for contaminated soil.

**Key words**：coal gangue；contaminated soil；dominant woody plants；phytoremediation

《环境科学与技术》编辑部：（网址 <http://fjks.chinajournal.net.cn> （电话）027-87643502 （电子信箱）[hjkxyjs@vip.126.com](mailto:hjkxyjs@vip.126.com) 收稿日期：2016-08-05；修回 2016－10－17

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助（XDJK2013C040 ；贵州省科学技术厅、毕节市科学技术局、毕节学院联合基金资金资助（黔科合J 字 LKB[2013]10 号）

作者简介:僮祥英（1981-，女,副教授，硕士，主要从事环境与安全研究，（电子信箱mntxying@126.com。

煤炭开采、运输、洗选及加工过程中会排放约占 煤炭产量 10%~20%的煤矸石,矸石若长期堆置不仅占 用土地,其中大量有害成分（如重金属元素）在雨雪淋 溶及风化的作用下还会从煤矸石中释放出来迁移到

大气、水体、土壤中,引起矿区环境污染、生态系统退 化、景观遭受破坏等一系列问题,对此,中外学者都作 了相关研究介绍[1-4]。研究表明[5-8],经过自然恢复,一些 矿地由于自然演替会有少量耐受性较强的植被逐渐

侵入而生长于其上，这些植被不仅可以改善煤矸石风 化物的理化性状，还可以吸收矸石释放的有毒元素， 净化土壤。因此，对这些植被群落进行系统地研究， 探究它们对有毒元素的吸收富集潜力，是矿区土壤 进行植物修复的基础。毕节市位于中国贵州省西北 部，是贵州省主要优质无烟煤产地之一，全市含煤面 积达12 000 km2,占其国土面积的45%,随着毕节市煤 炭产量的增加，当地煤矸石的量也越来越大，经现场 调查,该市的煤矸石采出后除少部分被利用外,其余 大多处于露天堆放状态,严重污染当地生态环境。研 究通过调查毕节市郊煤矿排矸场堆放特点及其周围 自然定居植物,测定主要优势木本植物及其所在土壤 的重金属元素含量,评价矿区土壤质量状况并分析不 同植物对污染元素的富集转移特征,筛选出修复潜力 强的植物,以期为当地煤矿区污染地的生态恢复提供 一定的参考。

1. 材料与方法

1.1 样品采集与分析

研究区为毕节市郊的长春堡镇、撒拉溪镇以及文 阁乡的煤矿排矸场,该区煤矸石主要以沿山坡倒下或 填埋等方式堆放,矿区排矸年限最长的 50 年以上,最 短的 7年左右,排矸场周围的木本植物群落主要有亮 叶桦*（Betula luminifera* H. Winkl）、柳杉*（Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietd、青冈*（Cycloba - lanopsis* glauca（Thunb） Oerst）、白杨*（Populus yun - nanensis* Dode 等,亮叶桦、柳杉、白杨都是适应性强, 成材早的速生树种,青冈则耐干燥和耐瘠薄,幼年生 长较慢, 5 年后生长加快,据现场调查,这几个树种 的生物量占排矸场周围木本植物的 60%以上。选取 排矸场周围自然植被相对丰富的区域为采样区 （按矿区 KQ1、KQ2、KQ3 编号 ,土壤的采样根据 “森林土壤样品的采集与制备”标准（LY/T 1210- 1999），按“S”形布点（20~25 个），采样深度0~60 cm，剔除植物根系、石砾等杂质后，用四分法将样地 中分点分层的混合样品留至1 kg左右带回实验室自 然风干、研磨过120 pm筛后密封备用。植物采集对 象主要为矿区生长相对旺盛的优势木本植物，采集 部位集中在枝干、茎叶及根部，样品采集完成后带 回实验室先用自来水洗净泥土和污物，再用去离子 水冲洗2~3次，置于105 °C烘箱烘干后磨碎，并移 至电炉上燃烧炭化，再移入马弗炉中高温（500~600 **C** 灰化后密封备用。

土壤及植物样品的元素分析均由中国科学院 地球化学研究所完成，除砷采用原子荧光光谱法 atomic fluorescence spectrometry， AFS 测定外，其余 均使用电感耦合等离子体质谱仪（inductively coupled plasma mass spectrometry， ICP-MS 测定。

1.2 评价方法

采用单因子污染指数和Nemerow综合指数回对 土壤进行重金属综合污染评价。

单因子污染指数（1

*Si*

式（1中,P,为土壤中第*i*种污染物的污染指数， *C*为第*i*种污染物的实测含量mg/kg，*S’*为土壤的第*i* 种污染物的背景值或对照值或标准值,mg/kg。

V

-2 2

~~Pave-Pimax~~ （2

式1中,P是采样点的综合污染指数;Pmx为*i*采样 点重会属污染物单项污染指数中的最大值;Pave =丄X *Pi*

*n i* = 1 为单因子指数平均值。 各污染指数和污染等级的对应 关系见表 1 。

表 1 土壤重金属污染等级划分标准

Table 1 Standard grade of pollution for soil heavy metals

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 污染等级 | 单因子污染指数分级标准 | | 综合污染指数分级标准 | |
| 污染指数 | 污染等级 | 污染指数 | 污染等级 |
| 1级 | *Pi* <1 | 清洁 | PW0.7 | 安全 |
| 2级 | 1WPV | 轻度污染 | 0.7WP<1 | 警戒线 |
| 3级 | 2詁<3 | 中度污染 | 1WP<2 | 轻度污染 |
| 4级 | *Pi* M3 | 重度污染 | 2WP<3 | 中度污染 |
| 5级 |  |  | *P*M 3 | 重度污染 |

植物对重金属元素的富集能力与转移能力使用 富集系数 BAC（biological accumulating coefficient 和 转移系数 BTC（biological transfer coefficient 来 表 征［10］，计算方法如下：

BAC=植物体（或器官内污染物浓度/土壤内污 染浓度 （3

富集系数越大，说明植物富集重金属的能力越强;

BTC =地上部分重金属含量/根部重金属含量（4 转移系数越大，说明植物从根部向地上部分运输 重金属的能力越强，对植物的提取修复越有利。

1. 结果与分析

2.1 矿区土壤质量评价

根据本次样品理化测试结果和前期矿区煤矸石 微量元素的研究数据［11］,选取As、Cd、Cr、Pb、V、Ni、Cu、 Zn、Co 9个元素进行分析，含量如表2。

表 2 中土壤对照值参照国家二级标准［12］，可看 出，随着各矿区占地面积及排矸年限的不同，各元素 在土壤中的含量也不尽相同。 将表2中数据代入公式 1 ~（2 ，得各矿区重金属污染指数如表3。

表 2 不同采样区土壤重金属含量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Table 2 Heavy metals concentration of soil in different sampling areas | | | | (mg/kg |
| 采样区 | KQ1：面积约3.99 km2,排矸年限12 a | KQ2:面积约2.68 km2,排矸年限8 a | KQ3:面积约0.69 km2,排矸年限30 a | 土壤对照值 |
| As | 3.00±0.07 | 3.11±0.16 | 5.03±0.38 | 40 |
| Cd | 1.07±0.07 | 1.01±0.06 | 1.21±0.04 | 0.3 |
| Cr | 164.21±15.95 | 51.24±1.79 | 124.90±17.95 | 150 |
| Pb | 17.70±6.31 | 22.39±2.54 | 18.07±3.68 | 80 |
| V | 235.76±34.86 | 222.03±40.07 | 259.06±13.35 | 130 |
| Ni | 71.21±7.89 | 19.44±5.92 | 38.03±11.43 | 80 |
| Cu | 93.04±4.31 | 69.27±4.77 | 90.05±16.07 | 50 |
| Zn | 128.48±32.63 | 91.43±31.14 | 88.69±19.18 | 200 |
| Co | 54.74±6.97 | 37.85±8.16 | 33.91±4.30 | 40 |

表 3 不同采样区土壤重金属污染指数

Table 3 The comprehensive contamination index of soil heavy metals in different sampling areas

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 矿区 | 排矸年限  /a | Pi | | | | | | | | | P |
| As | Cd | Cr | Pb | V | Ni | Cu | Zn | Co |
| KQ1 | 12 | 0.075 | 3.567 | 1.095 | 0.221 | 1.814 | 0.890 | 1.861 | 0.642 | 1.369 | 2.677 |
| KQ2 | 8 | 0.078 | 3.367 | 0.342 | 0.280 | 1.708 | 0.243 | 1.385 | 0.457 | 0.946 | 2.480 |
| KQ3 | 30 | 0.126 | 4.033 | 0.833 | 0.226 | 1.993 | 0.475 | 1.801 | 0.443 | 0.848 | 2.984 |

从表 3 可看出,若以国家土壤二级标准值作为安 全阈值,各矿区土壤受到不同程度的污染,其中以 Cd 污染尤为严重，所有矿地均达重度污染,Cd污染的修 复显得刻不容缓;其次是V和Cu,所有矿地均为轻度 污染;Co元素和Cr元素在矿区KQ1属轻度污染，其 余情况属尚清洁；此外、矿地未受到 As、Pb、Ni、Zn 的 污染。考虑各元素的综合交叉污染,虽然所有矿区的 综合污染指数均在中度污染等级内,但矿区 KQ3 的 综合污染指数值为 2.984,已接近重度污染。将矿区排 矸年限和综合污染指数做 Pearson 相关性分析,相关 系数为 0.974,呈高度正相关,可认为随着排矸年限的 增加,煤矸石风化程度的加剧,重金属综合污染的程 度可能还会越来越严重。

2.2 矿区优势木本植物土壤修复潜力分析 因采样矿地 As、Pb、Ni、Zn 的单因子污染指数都 在清洁等级内,矿区优势木本植物对元素的富集转移 能力分析只选取 Cd、V、Cu、Co、Cr 进行分析,各植物 不同部位的重金属元素含量如表 4。

表 4 不同矿区木本植物重金属含量

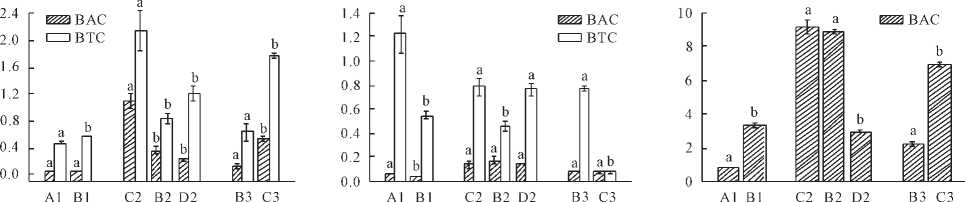
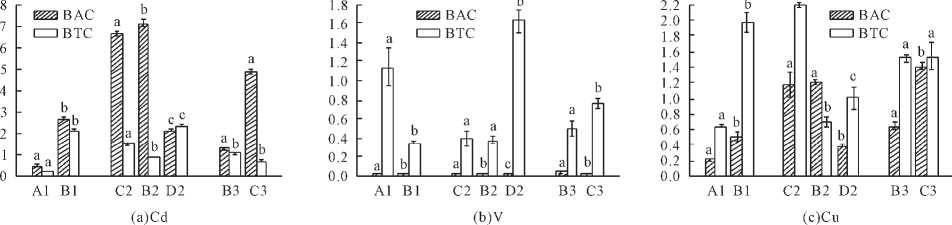
Table 4 Content of heavy metals in different plants from different sampling areas

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 采样区 | 植物 | | 含量/mg\* kg-1 | | | | |
| Cd | V | Cu | Co | Cr |
| KQ1 | 柳杉 | B | 0.54±0.03 | 5.64±0.55 | 19.77±2.59 | 1.94±0.34 | 9.87±0.85 |
|  |  | R | 2.21±0.10 | 5.07±1.25 | 30.53±3.61 | 4.09±0.80 | 8.23±1.62 |
|  | 亮叶桦 | B | 2.91±0.22 | 3.44±0.36 | 46.02±8.01 | 2.00±0.20 | 6.58±1.01 |
|  |  | R | 1.35±0.04 | 10.04±0.69 | 23.37±4.60 | 3.42±0.37 | 12.02±1.76 |
| KQ2 | 白杨 | B | 6.69±0.50 | 4.72±0.54 | 82.29±16.11 | 1.94±0.34 | 7.07±1.33 |
|  |  | R | 4.33±0.21 | 12.26±3.19 | 37.33±6.91 | 40.80±5.60 | 9.00±0.94 |
|  | 亮叶桦 | B | 7.15±0.33 | 3.68±0.55 | 84.30±7.30 | 19.48±4.90 | 8.84±2.16 |
|  |  | R | 8.03±0.22 | 9.75±0.91 | 121.25±22.54 | 13.35±1.13 | 19.01±3.33 |
|  | 青冈 | B | 2.15±0.15 | 7.40±1.09 | 26.60±0.74 | 15.83±1.76 | 7.55±0.56 |
|  |  | R | 0.90±0.04 | 4.58±0.78 | 26.78±4.57 | 8.45±1.68 | 9.97±1.30 |
| KQ3 | 亮叶桦 | B | 1.55±0.11 | 9.30±0.98 | 58.32±10.05 | 4.49±1.30 | 10.83±2.28 |
|  |  | R | 1.46±0.08 | 19.12±3.83 | 38.46±6.54 | 6.94±0.66 | 19.77±3.65 |
|  | 白杨 | B | 5.88±0.11 | 5.86±1.08 | 126.73±21.92 | 18.84±3.59 | 9.62±1.58 |
|  |  | R | 8.45±0.67 | 7.62±1.11 | 82.09±8.14 | 10.65±1.94 | 9.27±1.11 |

注：表中 B 表示植物枝叶部分, R 表示植物根系部分。

将 表 4 中 的 数 据和 表 2 中对应矿区土壤元 素含量值代入公式(3 ~(4 ,并使用单侧方差进 行分析统计,得各植物对不同元素的 BAC、BTC 如图 1 。

由图 1 知,不同植物对同一种污染物质积累能力 不同;同一种植物对不同污染物质及同一种植物的不 同器官对同一种污染物质的积累能力也不同,而且积 累部位表现出不均一性。

(1 Cd。矿区KQ1的柳杉的富集系数＜1,对Cd 缺乏富集能力；矿区KQ2的青冈富集系数为2.14,富 集吸收能力比柳杉强；白杨在矿区KQ2和矿区KQ3 的富集系数分别为6.65和4.84,对Cd元素的吸收累 积能力明显；亮叶桦在矿区KQ1、KQ2、矿区KQ3的 富集系数分别为2.71,7.12和1.28,对Cd元素的富集 能力波动较大，结合表2中各矿地根系土壤中Cd兀 素的含量，说明亮叶桦对Cd的富集累积能力随该元 素在土壤中的浓度的增加而减弱，通过观察，在矿区 KQ1 和矿区 KQ3 采集的亮叶桦植株样品基本上是生 长1~2 a的幼苗，根系较细小，而矿区KQ2采集的样 品则都是生长10 a以上的壮树，根系和枝干发育相 对粗壮，说明植物根系越完善对污染元素的吸收越有 利。生长年限接近时，对Cd的吸收富集能力亮叶桦〉 白杨＞青冈＞柳杉。

(d)Co (e)Cr (f)Cd+V+Cii+Co+Cr

图中横坐标A、B、C、D分别代表植物类别为柳杉、亮叶桦、门杨、青冈；横坐标1、2、3分别代表植物的根系上壤为矿区为KQ1、KQ2、KQ3；

(f)图代表的是不冋植物对重金屈元素的的综合富集系数。不冋字母代表亦冋一矿区不冋植物对同一元素的富集转移能力有显苦差异性(戶＜0.05)。 图1.各矿区不同植物可重金属元素卑富集至智和转整昂数

Fig. 1 Biological accumulating coefficient and biological transfer coefficient of different plants to heavy metals

(2 V、Co、Cr。 所有矿区的木本植物对 V 元素和 Cr元素的富集系数均＜1,对其缺乏富集能力。除矿区 KQ2 的白杨树对 Co 元素有些微的富集能力外 BAC=1.09 ，其余的富集系数均不超过0.60，对其缺 乏富集吸收能力。

(3 Cu。 矿区 KQ1 的柳杉和矿区 KQ2 的青冈富 集系数均＜1,对Cu缺乏富集能力;矿区KQ2的亮叶桦 和白杨对该矿区Cu元素的富集能力没有显著性差异, 富集系数在1.18~1.22之间，但二者对Cu元素的转 移运输能力有显著性差异，白杨的转移系数BTC＞2, 而亮叶桦的转移系数BTC＜1,说明白杨将Cu元素由 根部向茎叶部分转移运输的能力强于亮叶桦，对Cu元 素的吸收富集更有利;矿区KQ3的亮叶桦和白杨对该 矿区Cu元素的富集能力有显著性差异，亮叶桦的富 集系数＜1，没有富集能力，白杨的富集系数为 1.41，有 一定的富集吸收潜力。对Cu元素的吸收转移能力白 杨优于亮叶桦。

(4 所有元素。 综合富集系数是植物体各重金属 元素富集系数之和［13］，它体现了植物对污染重金属元 素的综合富集能力。由图1知，矿区KQ2的亮叶桦和 白杨对所有污染元素的吸收富集效果最好，没有显著 差异性，综合富集系数在 9.0左右，其次是青冈，综合 富集系数为 2.93，柳杉最弱，综合富集系数在1.0以下， 说明柳杉对污染元素只有耐受性却缺乏富集吸收能 力，排序大小为白杨＞亮叶桦＞青冈＞柳杉。

1. 讨论

除自身遗传机制外，植物对污染物质的吸收能力 还与土壤理化性质、根际圈微生物数量和活性、污染 物质在土壤中浓度大小等因素有关［13-16］。 本次研究结 果中，当生长年限接近时，对所有污染元素的综合富 集能力最强的是亮叶桦和白杨，而对处于重度污染的 Cd元素，吸收能力较强的也是亮叶桦和白杨,说明这 两种植物的遗传特性已经适应了矿区土壤污染元素 的高浓度机制，不仅对污染元素有耐受性，更有吸收 转移性。另外,研究结果还显示不同矿区亮叶桦对Cd 元素的吸收能力波动较大，说明植物对污染元素的吸 收能力不仅与污染元素在土壤中含量有关，还与植物 自身的根系状况有关。发达、粗壮、密集的根系是植物 对染土壤有效修复的前提[14],植物根系在新陈代谢过 程中会向周围环境(包括土壤、大气和水体 中的释放 根分泌物,一方面,根分泌物中的某些物质与土壤溶 液中游离的重金属离子络合,形成稳定的植物难以吸 收的螯合态物质,从而降低该种重金属活度,减少它 的可移动性,将其稳定在污染土壤中,防止其在土壤 中大范围迁移和扩散,或经空气而进入其他生态系统, 进而起到植物稳定的作用;另一方面,根分泌物中大 量的有机酸和酚类化合物对土壤中难溶态重金属能 起到活化作用,增加 Cd 的生物有效性,促进植物对它 的吸收富集,提高修复效率。前已述及,亮叶桦和白杨 都是适应性较强的速生树种,若以当地的这两种优势 植物为扩种树源,不仅能遗传当地污染元素的耐受能 力和吸收能力,还能在较短的年限内形成稳定繁密的 根际圈。

1. 结论

以国家土壤二级标准为参照,按 Nemerow 污染 指数评价法,毕节市郊煤矿区排矸场的土壤受到 Cd、 V、C、Co、Cr 的污染,其中以 Cd 元素尤为严重,达到 重度污染,其余 4 个元素处于轻度污染;若考虑各重 金属元素的综合交叉污染,所有矿地属中度污染,但个 别矿区趋近重度污染。且随着排矸年限的增加,综合 污染的程度有越来越加重的趋势。

优势木本植物中,对 Cd 修复能力最强的是亮叶桦, 其次是白杨;对 Cu 修复能力最强的是白杨;对 Co 有 修复能力的只有白杨;所有植物对 V、Cr 均无吸收富 集能力,矿区以后可考虑引种一些对 V、Cr 吸收富集 能力强的植物。生长年限相接近时,矿区优势木本植 物对 Cd、V、Cu、Co、Cr 综合修复能力从大到小排序为 白杨、亮叶桦、青冈、柳杉。白杨或亮叶桦可作为污染 区土壤修复的优选木本植物。

[参考文献]

1. 阿不都艾尼•阿不里，塔西甫拉提•特依拜,侯艳军，等.煤 矸石堆场周围土壤重金属污染特征分析与评价J].中国矿 业, 2015, 24(12 ：60-65.

Abdughheni Abliz, Tashpolat tiyip, Hou Yanjun, et al. Analysis of pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surrounding of gangue piling site [J]. China Mining Industry, 2015, 24(12 ：60-65(. in Chinese

1. Teixeira E, Ortiz L, Alves M, et al. Distribution of selected heavy metals in fluvial sediments of the coal mining region of

Baixo JacuA, RS, Brazil[J]. Environmental Geology, 2001,1 (1/2 ：145-154.

1. 庞文品,秦樊鑫,吕亚超,等. 贵州兴仁煤矿区农田土壤重 金属化学形态及风险评估[J].应用生态学报，2016,7⑸： 1468-1478.

Pang Wenpin, Qin Fanxin, Lyu Yachao, et al. Chemical speciation of heavy metals and their risk assessment in agri－ cultural soils in a coal mining area from Xingren County, Guizhou Province [J] . Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (5 ：1468-1478(. in Chinese

1. Dowdall M, Vicat K, Frearson I, et al. Assessment of the ra－ diological impacts of historical coal mining operations on the environment of Ny-A lesund, Svalbard [J]. Journal of En­vironmental Radioactivity, 2004, 71(2 ： 101-114.
2. 王元. 东北地区煤矸石废弃地生态园林景观重建的研究 [D]. 哈尔滨：东北农业大学, 2012.

Wang Yuan. Study of Ecological Landscape Reconstruction of Northeast Coal Gangue Waste Land[D]. Harbin： Northeast Agricultural University, 2012(. in Chinese

1. Mani D, Kumar C, Patel NK. Integrated micro -biochemical approach for phytoremediation of cadmium and zinc contam­inated soils [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015(111 ： 86-95.
2. 陆海波,刘方,朱健,等. 煤矸石堆场自然植被优势植物根际有 效态重金属含量[J].生态学杂志，2012,1(12 ：3207-3212.

Lu Haibo, Liu Fang, Zhu Jian, et al. Available heavy metal concentrations in dominant species rhizospheres of natural vegetations in coal gangue dumps [J]. Journal of Ecology, 2012, 31(12 ： 3207-3212(. in Chinese

1. 郭俊兵,狄晓艳,李素清. 山西大同矿区煤矸石山自然定 居植物群落优势种种间关系[J].生态学杂志，2015,4(12 :

3327-3332.

Guo Junbing, Di Xiaoyan, Li Suqing. Interspecific associa­tions among dominant species in naturally colonized plant communities on coal gangue piles of Datong mining area in Shanxi, China[J]. Journal of Ecology, 2015, 34(12 ：3327- 3332(. in Chinese

1. Nemerow N L. Scientific Stream Pollution Analysis[M]. New York：Script Book Co., 1974： 210-231.
2. 杨期和,何彦君,李姣清,等. 煤矸石废弃地中胜红蓟的重金 属富集研究[J].生态环境学报，2012,1 (10 : 1749-1755.

Yang Qihe, He Yanjun, Li Jiaoqing, et al. Study on heavy metal enrichment of Ageratum conyzoides in gangue waste land[J]. Ecology and Environmental Science, 2012, 21(10 ： 1749-1755(. in Chinese

1. 僮祥英,梁杰. 贵州毕节市煤矸石中微量元素的综合利用 潜力及其环境影响研究[J].安全与环境学报，2013,3(6 : 148-152.

Tong Xiangying, Liang Jie. Study on the potential compre­hensive utilization of trace elements in the coal gangue of Bijie, Guizhou[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(6 ： 148-152(. in Chinese

(下转第 193 页)

商用车全生命周期环境排放差异评价J].中国机械工程，

2013，24(11 ：1525-1530.

Tu Xiaoyue， Yang Yanping， Xu Jianquan， et al. Evaluation of difference between LNG and diesel heavy -duty commer － cial vehicle's life cycle environmental emission [J]. China Mechanical Engineering， 2013， 24(11 ：1525-1530(. in Chin­ese

1. 涂小岳，徐建全，陈轶嵩，等. 液化天然气商用车与柴油商 用车生命周期能耗差异评价[J].中国机械工程，2013(23): 3211-3215.

Tu Xiaoyue， Xu Jianquan， Chen Yisong， et al. An evalua－ tion of difference between the LNG and diesel commercial vehicle's life cycle energy consumption[J]. China Mechani－ cal Engineering， 2013， 24(23 :3211-3215(. in Chinese

1. 刘夏璐，王洪涛，陈建，等.中国生命周期参考数据库的建 立方法与基础模型[J].环境科学学报，2010,0(10 ：136- 2144.

Liu Xialu， Wang Hongtao， Chen Jian， et al. Method and basic

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

上接第177 页)

1. GB 15618-2008，中华人民共和国土壤环境质量标准(修

订 [S].

GB 15618-2008， Environmental Quality Standard for Soils (Amended [S](. in Chinese

1. 闫宝环，李凯荣，时亚坤. 铜川市三里洞煤矸石堆积地风化 土壤重金属污染及植物富集特征[J].水土保持通报，2012, 32(3 : 47-50， 122.

Yan Baohuan， Li Kairong， Shi Yakun. Heavy metal con－ tamination of weathered soil and enrichment characteristics of plants at Sanlidong coal gangue site in Tongchuan City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation， 2012， 32(3 : 47- 50， 122(. in Chinese

1. 周启星，宋玉芳.污染土壤修复原理与方法[M].北京：科学 model for development of Chinese reference life cycle database [J ] . Journal of Environmental Science ， 2010， 30 (10 : 2136-2144(. in Chinese
2. 黄娜，王洪涛，范辞冬，等. 基于不确定度和敏感度分析的

LCA数据质量评估与控制方法[J].环境科学学报，2012,32 (6 :1529-1536.

Huang Na， Wang Hongtao， Fan Cidong， et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sen－ sitivity analysis [J]. Journal of Environmental Science， 2012，32(6 :1529-1536(. in Chinese

1. Wang H T， Hou P. A novel weighting method in LCIA and its application in Chinese policy context[J]. Matthias Finkbein－ er， Towards Life Cycle Sustainability Management， Berlin: Springer.
2. Jeroen B Guinee. Handbook on Life Cycle Assessment： Op­erational Guide to the ISO Standards [M] . Berlin: Springer， 2002， 156.

出版社， 2004.

Zhou Qixing， Song Yufang. Remediation of Contaminated Soils ： Principles and Methods[M]. Beijing ： Science Press， 2004(. in Chinese

1. 叶文玲，陈增，徐晓燕.铜陵铜尾矿库优势植物对重金属富 集特征研究[J].环境科学与技术，2015,38(5 ： 11-14.

Ye Wenling， Chen Zeng， Xu Xiaoyan. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in copper mine tailings in Tongling of Anhui Province[J]. Environmen­tal Science & Technology， 2015， 38(5 ： 11-14(. in Chinese

1. Liu D， Li S， Islam E， et al. Lead accumulation and tolerance

of Moso bamboo (Phyllostachys pubescens seedlings： ap­plications of phytoremediation[J] . Journal of Zhejiang Uni- versity：Science B， 2015， 16(2 ： 123-130.