

## 矿山废弃地生态重建研究进展

李永庚, 蒋高明\*

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

**摘要:**提出了今后需要加强研究的几个问题:(1) 加强干旱半干旱地区矿山废弃地生态重建的理论与实践研究;(2) 筛选与培育耐重金属污染和超富集重金属的植物物种;(3) 加强西部矿山废弃地共性问题的研究与探讨,即如何根据植物与土壤的关系将矿业废弃地划分为不同的类型,并在此基础上研究不同类型的废弃地与植物的相互关系,进而探讨出必要的人工辅助措施,这将是今后矿山废弃地生态重建机制研究的重点。

**关键词:**矿山废弃地;复垦;恢复生态学;生态恢复;植物修复;中国

### Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: an over review

LI Yong-Geng, JIANG Gao-Ming (*Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093*), *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 95~100.

**Abstract:** Mining wasteland is an inevitable byproduct because of strong land turnover, with a great mass of soils being squandered away and yielding ecological environmental crisis. The restoration of mining wasteland plays a crucial role in ecological environmental protection and social sustainable development. However, before 1980, such problems had never been taken for consideration in the developing or under developing countries. In China, such eco-environmental crisis had not been seriously considered until 1995. Advances in ecological reconstruction researches of mining wasteland associate with the development of Restoration Ecology are reviewed in this paper.

The authors concluded that the ecological reconstruction of mining wasteland has driven the development of subject of Restoration Ecology, e. g., the development of Restoration Ecology was mainly due to the researches in the reconstruction of mining wasteland. For the restoration of mining wasteland, the limiting factors for revegetation can be sorted as: disturbing of soil surface, limiting substance for plant growth, lacking nutrition and decreasing in biodiversity. It is unable and unnecessary indeed to reconstruct the former ecosystem, however, it is essential to rebuild certain plant community structures and realize ecological functions of the wasteland through the process of restoration. Towards this, approaches for mining wasteland revegetation are: covering the wasteland with appropriate soil, physical or chemical treatment, adding more nutrient matters, wiping of baneful substance, adding more species. In the past decades, it has been tested successful in the restoration of mining wasteland by utilizing those multi-methods.

Researches in mining wasteland in China have been mainly focused on the reclamation of soils, phytoremediation, nutrienting the soil and succession of plant community especially. Such kind of the investigations were conducted extensively in the middle or east China, with a few cases being noted in arid and semi-arid regions. There is nearly 40,000 km<sup>2</sup> wasteland in

**基金项目:**中国科学院知识创新工程重大资助项目(KSCX1-08-02);国家自然科学基金资助项目(30200165)

**收稿日期:**2002-10-24; **修订日期:**2003-05-13

**作者简介:**李永庚(1970~),男,山东成武人,博士,主要从事植物生理生态学方面的研究。E-mail: liyonggeng@ns. ibcas. ac. cn

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: jgm@ht. rol. cn. net

**Foundation item:** Sciential Innovation Key Project of Chinese Academy of Sciences (No. KSCX1-08-02) and National Natural Science Foundation of China (No. 30200165)

**Received date:** 2002-10-24; **Accepted date:** 2003-05-13

**Biography:** LI Yong-Geng, Ph. D., major in plant eco-physiology. E-mail: liyonggeng@ns. ibcas. ac. cn

China, with a rate of 330 km<sup>2</sup>/a. More seriously, the environmental crisis in arid and semi-arid is taken little attention. Based on all-around analysis, the following problems are suggested for further research by us: (1) studies on the restoration of mining wasteland in the semi-arid region from both academic and practical point of views; (2) screening out the heavy metal tolerant by seeking more enrichment plant species; (3) studies on mutual problems of mining wasteland in west China regions. At last, the mining wasteland should be investigated and classified carefully based on the study of plant-soil relationship.

**Key words:** mining wasteland; revegetation; restoration ecology

文章编号: 1000-0933(2004)01-0095-06 中图分类号: Q14, X171.4 文献标识码: A

矿山开采过程中,露天采矿场、排土场、尾矿场、塌陷区以及受重金属污染而失去经济利用价值的土地称为矿山废弃地。煤矿的矸石山、电厂粉煤灰、金属矿山尾矿等矿山固体废弃物是矿区的一大公害,侵占了大量土地并造成环境污染。

我国西部地区有十分丰富的煤炭、石油、天然气、铜、铁、锌、锰、金、银、铂、钾、磷等矿产资源。我国西部大开发战略的实施,对于促进全国的经济将起着重要的战略作用。但是,我国西部生态系统较为脆弱,由矿山开采所引发的生态环境问题已经引起了社会各界的重视。然而,我国对矿山废弃地恢复重建的研究落后于欧、美发达国家。其中,对西部干旱、半干旱地区矿山废弃地生态重建的研究和实验示范尚属空白,进行这方面的研究不仅具有重要的科学意义,还对保护我国西部地区的生态环境、保障国民经济健康发展具有重要实际意义。

## 1 国外研究现状及发展趋势

英、美、澳等发达国家有悠久的开矿历史,他们最初在恢复生态学方面的工作主要集中在开矿后废弃地植被的恢复。“恢复生态学”一词最初即缘于此。国外矿山废弃地生态重建研究推动了恢复生态学的发展。

### 1.1 生态重建理论的发展

20世纪80年代以来,随着各类生态系统的退化以及相继引发的环境问题加剧,国外开始注重对不同退化生态系统(主要是采矿废弃地)的恢复重建的研究。

**1.1.1 恢复生态学发展的建立阶段** 1973年3月,在美国弗吉尼亚理工大学召开了题为“受害生态系统的恢复”国际会议,第一次专门讨论了受害生态系统的恢复和重建等重要的生态学问题。日本人宫胁昭通过改造土壤,利用乡土树种,在较短时间内建立起顶级群落类型,其方法被称为“Miyawaki method”。

**1.1.2 恢复生态学的发展阶段** 1980年,Bradshaw和Chdwick出版了《The Restoration of Land, The Ecology and Reclamation of Derelict and Degraded Land》<sup>[1]</sup>,从不同角度总结了生态恢复过程中理论和应用问题。

1987年,Jordan等人出版了《Restoration Ecology, A Synthetic Approach to Ecological Research》,认为恢复生态学是从生态系统层次上考虑和解决问题,恢复过程是人工设计的;在人的参与下,一些生态系统可以恢复、改建和重建<sup>[2]</sup>。

**1.1.3 恢复生态学的成熟阶段** 1993年,《Restoration Ecology》杂志创刊,标志着恢复生态学走向成熟。1995年,美国生态恢复学会提出,恢复是一个概括性的术语,包含改建(rehabilitation)、重建(reconstruction)、改造(reclamation)、再植(revegetation)等含义。生态重建(reconstruction)并不意味着在所有场合下恢复原有的生态系统;生态恢复的关键是恢复生态系统必要的结构和功能,并使系统能够自我维持。1996年在美国召开了国际恢复生态学会议,专门探讨了矿山废弃地的生态恢复问题。

### 1.2 矿山废弃地生态重建的实践

#### 1.2.1 矿山废弃地生态重建所面临的主要生态学问题

- (1) 表土层破坏 导致缺乏植物能够自然生根和伸展的介质、水分缺乏、营养物质不足、毒性物质含量过高<sup>[3]</sup>。
- (2) 存在限制植物生长的物质 如重金属含量过高<sup>[3~5]</sup>、pH值太低或盐碱化等<sup>[6,7]</sup>。
- (3) 缺乏必要的营养元素 如有效磷浓度低、含氮量极低<sup>[8,9]</sup>。
- (4) 生物因素 除了上述土壤条件变劣外,生物种类的减少或丧失给矿区废弃地恢复带来了更加不利的影[10]。

上述4个问题基本上是各种类型矿山所面临的共同问题。

#### 1.2.2 矿山废弃地的主要恢复技术

(1) 覆盖土壤 对于任何类型的矿山废弃地来讲,最简单的办法就是覆盖土壤,这种办法能够解决上述所面临的各种问题。但覆盖土壤的费用很高,因此在具体实践中恢复的程度取决于投入的费用,在经济条件较好、生态环保意识较强的矿山较容易使用<sup>[10]</sup>。

(2) 物理处理和化学处理 一般情况下,土壤是很难引进或更换的,因为费用太高。在废弃地恢复中克服物理因子的不足常在实践中应用,如挖松紧实的土壤、整理土壤表面的措施是较为有效的措施<sup>[3]</sup>。废弃地存在pH值太低的问题时,向土壤中添加

碱性物质以调整土壤的 pH 值也是非常有效的<sup>[7]</sup>。

(3) 添加营养物质 大部分矿山废弃物和类土壤物质缺乏氮、磷等营养物质,是植物生长的限制因子之一,解决这类问题的办法是添加肥料或利用豆科植物的固氮能力<sup>[11]</sup>。

早在 1881 年,英国科学家达尔文曾经进行了“蚯蚓与土壤形成”的关系研究,认为蚯蚓在改良土壤结构和肥力方面有重要作用,称它为“农业的犁手”和“改良土壤的能手”<sup>[12]</sup>。近年来,有关蚯蚓生物学、生态学有大量研究报告<sup>[13]</sup>, Curry 系统地报道了蚯蚓在退化土壤生态恢复中的作用<sup>[14]</sup>。“蚯蚓繁殖盒”技术的成功应用,更好地将蚯蚓应用到退化土壤恢复之中<sup>[15]</sup>。研究结果表明,蚯蚓对土壤的机械翻动起到疏松、拌和土壤效应,改造了土壤结构性、通气性和透水性,使土壤迅速熟化;同时排出的粪便,不但含有丰富的有机质和微生物群落,而且具有很好的团粒结构,保水保肥能力强,促进了植物的生长发育,是目前很好的土壤改良剂之一<sup>[16]</sup>。但有关蚯蚓在矿山废弃地生态恢复中的作用鲜见有报道。

(4) 去除有害物质 在废弃地恢复过程中,有害物质的毒性起着严重的阻碍作用,如在重金属污染严重的地区,所能生长的植物仅仅是那些耐重金属污染的物种,如绊根草(*Cynodon dactylon*)、水烛香蒲(*Typha latifolia*)、蜈蚣草(*Pteris vittata*)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)、黄花稔(*Sida rhombifolia*)和银合欢(*Leucaena glauca*)等。因此,这类废弃地生态重建的前提是先锋植物必须是重金属忍耐种并施加肥料。近年来耐重金属污染植物物种的筛选及其蕴藏的基因资源受到科学界的普遍关注,人们开始利用现代生物技术克隆耐重金属污染的基因,试图培育出适于在重金属污染土壤上生长的植物种类<sup>[17]</sup>。

(5) 添加物种 在矿山废弃地恢复过程中,通过人工选择物种,使土壤的物理化学性质得到改良,从而缩短植被演替的进程,加快矿山废弃地的生态重建进程<sup>[18~20]</sup>。在添加物种时,最先添加的物种往往是按照草本-灌木-木本植物的顺序进行的,其中豆科植物的添加起着关键性的作用<sup>[21]</sup>。

通常,上述 5 种措施是因时、因地配合使用的。在英国、美国、德国的矿山废弃地生态重建中已经取得了显著效果<sup>[22]</sup>。

## 2 我国的研究现状与发展趋势

### 2.1 恢复生态学研究

我国的恢复生态学研究,前期主要是以土地退化,尤其是土壤退化为主,并且土地退化和土壤退化往往交织在一起<sup>[23]</sup>。主要针对水土流失、风蚀沙化,草场退化及盐渍化、土地污染及肥力贫瘠化,研究了森林生态系统的退化与恢复、草地生态系统的恢复改良、湿地的恢复重建等。20 世纪 90 年代以来,对矿山废弃地复垦和植被对于重金属污染的修复的研究也逐渐增多<sup>[24~26]</sup>。

### 2.2 矿山废弃地生态重建的实践

2.2.1 矿山废弃地复垦 我国人多地少,土地资源严重不足,在经济较发达的东部地区,矿山废弃地的复垦利用已经受到了普遍关注。矿山废弃地分布广,环境污染严重,它在区域可持续发展研究和实践中具有特殊的重要性。根据中国国情,深入研究不同类型废弃地复垦的技术体系和模式、促成理论研究和实践的结合是中国矿山废弃地复垦工作的当务之急。矿山废弃地生态环境恢复与重建的关键是在正确评价废弃地类型和特征的基础上进行植被的恢复与重建,进而使生态系统实现自行恢复并达到良性循环<sup>[27]</sup>。

矿山废弃地隶属各种尺度的景观类型,不同类型矿山废弃地具有不同的生态重建途径。只有按照景观生态学原理,在宏观上设计出合理的景观格局,在微观上创造出适合的生态条件,依靠景观生态规划与设计,才能实现生态重建目标<sup>[28]</sup>。何书金和苏光全(2000)筛选出了影响矿山废弃地复垦潜力的自然和社会经济条件方面的 4 类 14 个亚类因子,并划分为 6 个等级,为全国矿山废弃地复垦潜力的评价及矿山废弃地有效合理利用提供了参考<sup>[29]</sup>。孙泰森和白中科对平朔安太堡露天煤矿土地复垦系统开展了以下几个方面的研究:① 矿区生态系统演变的阶段、类型、过程对效益的影响;② 矿区土地利用结构调整及耕地总量动态平衡;③ 矿区未来空间待复垦土地适宜性评价单元类型的划分;④ 矿区时空变动地貌的水土保持布局模式;⑤ 矿区土地复垦与生态重建规划的方法<sup>[30]</sup>。

在废弃地上铺盖厚约 20cm 垃圾及 20 kg/m<sup>2</sup>石灰提高了尾矿 pH 值并降低了电导率,而且较有效地防止了下层尾矿的酸化,植物生长也较好<sup>[31]</sup>。煤矿煤矸石可作为废弃地的充填复垦材料,风化煤矸石的矿物化学组成与矿区黄土相近,煤矸石的汞、镉、铅、砷、氟等有毒元素的含量不超标,可利用进行复垦,治理废弃地恶化的生态环境<sup>[32]</sup>。

2.2.2 矿山废弃地重金属的植物修复 在铅锌尾矿上定居的雀稗(*Paspalum thunbergii*)、双穗雀稗(*P. distichum*)、黄花稔(*Sida rhombifolia*)和银合欢(*Leucaena glauca*)对铅(Pb)的吸收表现出不同的模式:雀稗所吸收的 Pb 大部分被滞留在根部,使之较少影响到地上部茎叶的光合作用功能及生长,从而使植物对重金属 Pb 环境更具耐性;双穗雀稗和黄花稔所吸收的 Pb 较多地被转移到便于收获移走的地上部分,因而具有较大的植物修复潜力(Phytoremediation potential);木本植物银合欢所吸收的重金属 Pb 总量的 80% 以上是积累在根、茎的皮和木质部及枝条部分,只有 15% 左右分布在叶片中。因此,在利用植物修复重金属污染土壤的实践中,这是一个特别值得利用的优点<sup>[33]</sup>。重金属 Pb、Zn、Cu 和 Cd 的全量和有效态重金属含量都随土壤深度

的增加而递减。宽叶香蒲(*Typha latifolia*)等四种植物都具有较强的吸收和富集重金属的能力,且主要富集在植物的地下部分<sup>[34]</sup>。

在废弃 3000 余年的湖北铜绿山古冶炼渣已形成了以草本植物为主体的植被,其中,鸭跖草(*Commelina communis*)是 Cu 的超富集植物,可用于 Cu 污染土壤的植物修复与重建<sup>[35]</sup>。戈峰等发现蚯蚓对铜矿中的铜元素富集能力很强,可达体内组织的 82.5~1218.4 mg/kg;由此,还进一步讨论了矿山废弃地生态恢复的生物(蚯蚓)技术理论和方法<sup>[26]</sup>。研究表明,大叶相思(*Acacia auriculiformis*)根瘤菌对 Zn<sup>2+</sup> 离子的耐受性较美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)强,可以耐受 Zn<sup>2+</sup> < 0.80mmol/L 的离子浓度<sup>[35]</sup>,蜈蚣草对砷有超富集能力<sup>[36]</sup>。

利用现代生物技术探索解决矿山废弃地重金属污染我国也取得了新的进展。王剑虹和麻密已构建了紫羊茅(*Festuca rubra*)重金属抗性品种 Merlin 的 cDNA 文库,筛选出了在重金属胁迫下表达的两个基因 *mcMT1* 和 *mc733*。构建了 *mcMT1* 的酵母表达载体,通过转化酵母基因组单一基因突变株 ABDE1(对重金属敏感)及互补实验对 *mcMT1* 的功能进行了分析,证实了该基因具有重金属抗性功能。利用 RACE 方法从大蒜(*Allium sativum*)中克隆了植物络合素合酶的全长 cDNA,通过对镉敏感裂殖酵母 M379 和砷敏感裂殖酵母的转化,证实该基因的表达可以提高酵母对重金属镉和砷的抗性<sup>[17]</sup>。

**2.2.3 矿山废弃地的土壤肥力** 我国矿区常见废弃地进行植被恢复与重建工程中的首要问题,在于立地条件的分析评价与改良<sup>[37]</sup>。阳承胜等发现土壤生物肥力水平是成功地进行矿业废弃地土地管理的关键因素之一,是矿业废弃地生态恢复和治理的重要指标。他们系统地介绍了矿业废弃地的土壤生物群落组成及功能,矿业废弃地特殊的生境对土壤生物群落的影响,并讨论了矿业废弃地生态恢复中的土壤生物的管理问题<sup>[25]</sup>。

戈峰等探讨蚯蚓对铜离子富集区植物生长影响时发现:铜矿尾砂土和复垦土中加入蚯蚓和蚓粪后,西红柿的茎长、根长和干重均明显高于对照<sup>[26]</sup>。龙健等通过对浙江哩铺铜矿废弃地复垦土壤的微生物特征的观察发现,矿区复垦土壤微生物区系发生明显改变。矿区土壤在重金属胁迫下,土壤中 C、N 营养元素循环速率和能量流动被削弱了<sup>[38]</sup>。

**2.2.4 矿山废弃地的植被演替** 陈芳清等发现,磷矿废弃地演替植物群落的形成是先锋植物种类入侵、定居、群聚和竞争的结果。在植物群落形成与演替的过程中,各种类成分的种群数量及综合优势比呈动态变化。废弃地植物群落形成与演替的过程按演替序列可分为 3 个阶段。植物群落形成与演替还与环境因子有关,废弃地高浓度的土壤速效磷是影响植物生长与分布的胁迫因子。伴随着群落的形成与演替,植物群落的物种多样性呈逐渐增加的趋势<sup>[39]</sup>。白中科等研究了平朔安太堡大型露天矿区生态系统演变的阶段、类型和过程<sup>[40]</sup>。

刘世忠等研究了名北排油页岩废渣堆放场 670 hm<sup>2</sup> 次生裸地的自然恢复的植被演替后发现,20 多年里入侵定居植物只有 24 科 59 属 66 种,且大多数均为禾本科、莎草科、菊科等科的草本植物种类;草本植物有 13 科 38 属 44 种,占总种数的 67%,占总覆盖度的 80%以上。群落结构及组成种类简单,处于群落次生演替的前期阶段,表明废渣场次生裸地的植被为一些抗逆性强的先锋植物<sup>[41]</sup>。因此,矿业废弃地必须辅以人工措施加速植被的恢复进程<sup>[42]</sup>。

### 3 我国进行矿业废弃地生态重建的紧迫性

我国共有大中型矿山 9000 多座,26 万小型矿山,因采矿侵占土地面积已接近 40,000 km<sup>2</sup>,由此而废弃土地面积达 330 km<sup>2</sup>/a。我国西部大开发战略的实施,对于促进我国经济的发展具有伟大的战略意义。然而,西部生态较为脆弱,矿山开采不仅形成大量的废弃地,而且废弃地的自然恢复时间长,并容易引发一些生态环境问题,影响经济的可持续发展。

2001 年底,国务院发布《全国生态环境保护纲要》,首次明确提出了“维护国家生态环境安全”的目标。我国西部地区不仅是矿产资源富集的地区,也是具有重要生态屏障功能的生态服务区。如神华东胜煤田地处晋陕蒙接壤区毛乌素沙地与黄土高原丘陵沟壑区的过渡地带,年风蚀强度大于 2500 t/km<sup>2</sup> 的土地占总面积的 90%,沙漠化土地每年自然增长率为 0.5%;水土流失严重,年水蚀强度大于 500 t/km<sup>2</sup> 的土地占总面积的 85%;年均降雨量仅 360mm,干旱多灾,水土流失严重。矿山废弃地如得不到及时的生态重建,将可能引发一系列的环境问题,造成水土流失、沙尘暴等环境灾难。另外,矿山土地资源破坏还会引发其它次生环境问题,如水资源污染、水量减少、矿区固体废弃物污染等,将直接影响社会、经济与生态环境的可持续发展。

### 4 展望

总而言之,生态重建并不意味着在所有条件下恢复原有的生态系统,生态恢复的关键是恢复生态系统必要的结构和功能,这是矿山废弃地生态重建的指导思想。我国目前有矿山废弃地近 40,000 km<sup>2</sup>,有关矿山废弃地的复垦理论与实践已经取得了一些成绩。但从整体上来分析,与世界发达国家相比并根据我国社会经济发展的实际情况,下列研究应当加强:

(1)大量的研究与实践在水分条件相对较好(年降雨量 500mm 以上)的地区进行,对生态系统脆弱的干旱半干旱(年降雨量低于 400mm)地区的研究与实践较少。事实上,干旱与半干旱地区正面临着大量矿山被开采问题,大面积的土地沦为矿山废弃地,更容易引发一些生态环境问题,如果让其自然恢复需要更长的时间,恢复重建的难度较大。因此,加强干旱半干旱地区矿山废弃地生态重建的理论与实践研究,将成为一个新的研究热点。

(2) 矿山废弃地重金属污染一般较重, 常见植物的生长发育尤其是农作物对重金属污染敏感, 但目前发现的耐重金属污染的植物种类较少, 因而筛选新的耐重金属污染或超富集重金属的植物物种, 具有重要的理论意义和实践价值。

(3) 和国外的研究特点相似, 国内对单个矿山的案例研究较多, 且多集中在我国中东部地区, 而对矿山废弃地生态重建所共同面临的问题研究较少, 特别是西部地区矿山废弃地的共性问题。如何根据植物与土壤的关系将矿业废弃地划分为不同的类型, 并在此基础上研究不同类型的废弃地与植物的相互关系, 进而探讨出必要的人工辅助措施, 这将是今后矿山废弃地生态重建机制研究的重点。

#### References:

- [ 1 ] Bradshaw A D and Chadwick M J. *The Restoration of Land*. Berraley: University of California Press, 1980.
- [ 2 ] Jordan W, Gilpin M E and Aber J D. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge university Press, 1987.
- [ 3 ] Smith R A H, Bradshaw A D. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes. *Journal of Applied Ecology*, 1979, **16**:595~612.
- [ 4 ] Leisman A. A vegetation and soil chronosequence on the Masabi Iron Range Spoil Banks Minnesota. *Ecology Monographs*, 1957, **27**: 221~245.
- [ 5 ] Jiang G M, Putwain P D, Bradshaw A D. An experimental study on the revegetation of colliery spoils of Bold Moss Tip, St. Helens, England. *Acta Botanic Sinica*, 1993, **35**(12): 951~962.
- [ 6 ] Dacey P W, Colbourn P. An assessment of method for the determination of pyrite in colliery spoil. *Reclamation Review*, 1979, **2**:113~121.
- [ 7 ] Costigan P A, Bradshaw A D, Gemmell R. The reclamation of acidic colliery spoil waste I. Acid production potential. *Journal of Applied Ecology*, 1981, **18**:865~878.
- [ 8 ] Cornwell S M, Jackson M L. The availability of nitrogen to plant in acid coal-mine spoil, *Nature*, 1968, **217**:768~769.
- [ 9 ] Dancer W S, Handley J F, Bradshaw A D. Nitrogen accumulation in Kaolin mining wastes in Cornwall I. Natural communities. *Plant and Soil*, 1977, **48**:153~167.
- [ 10 ] Jiang G M, Putwain P D, Bradshaw A D. Response of *Agrostis stolonifera* to limestone and nutritional factors in the reclamation of colliery spoils. *Chinese Journal of Botany*, 1994, **6**(2): 155~162.
- [ 11 ] Marrs R H, Bradshaw A D. Nitrogen accumulation, cycling and the reclamation of China clay wastes. *Journal of Environmental Management*, 1982, **15**:139~157.
- [ 12 ] Edwards C A, Bohlen P J. *Biology and Ecology of Earthworm*. London: Chapman Hall, 1996.
- [ 13 ] Edwards C A. *Earthworm Ecology*. St. Lucie Press, 1998.
- [ 14 ] Curry J P. *The ecology of earthworms in reclaimed soils and their influence on soil fertility*. In: Edwards C A, ed. *Earthworm Ecology*. London: St. Lucie Press, 1998. 253~261.
- [ 15 ] Butt K R, Rederickson J F, Morris R M. An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration. *Ecological Engineering*, 1993, **4**:1~9.
- [ 16 ] Edwards C A, Abe T, Striganova B R. *Structure and Function of Soil Community*. Kyoto: Kyoto University Press, 1995.
- [ 17 ] Wang J H, Ma M. Biological mechanisms of phytoremediation. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, **17**(6):504~510.
- [ 18 ] Crocker R, Major J. Soil development in relation to vegetation and surface age of Glacier Bay, Alaska. *Journal of Ecology*, 1955, **43**:427~428.
- [ 19 ] Hall I G. The ecology of disused pit heaps in England. *Journal of Ecology*, 1957, **45**:689~720.
- [ 20 ] Jansen I J. Reconstructing soil after surface mining of prime agricultural land. *Mining Engineering*, 1981, **6**:312~314.
- [ 21 ] Jiang G M. Theory and practice in revegetation of mining wasteland. In: *The researches on degraded ecosystem in China*. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 1996. 193~204.
- [ 22 ] Virendra S. Utilization of medicinal plants for wasteland. *Journal of Economic and Taxonomic Botany*, 2000, **24**(1):99~103.
- [ 23 ] Zhu Z D and Liu S. *Desertification and Revegetation in China*. Beijing: Science Press, 1989.
- [ 24 ] Shu W S, Yang K Y, Zhang B, et al. Flora and heavy metals in dominant plants growing on an ancient copper spoil heap on Tonglushan in Hubei Province, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2001, **7** (1): 7~13.
- [ 25 ] Yang X, Gao L. A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing Copper Mine. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(11):1932~1941.
- [ 26 ] Ge F, Liu X L, Pan W D, et al. The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing Copper Mine in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(11):1790~1795.
- [ 27 ] Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y. Strategies for Restoration of Mining Wastelands in China. *Ecologic Science*, 2002, **19**(2):24~30.
- [ 28 ] Wang Y L, Han D. The landscape ecological planning and design of depleted mined land. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(5):455~463.

- [29] He S J, Su G J. Evaluation method and its application to the potentiality of wasteland reclamation of China's abandoned mining areas. *Geographical Research*, 2000, **19**(2): 165~172.
- [30] Sun T S, Bai Z K. Theories and Methods of Ecological Rehabilitation of Abandoned Land from Large-scale Opencast Coal Mine. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(5): 56~60.
- [31] Hu H W, Jiang B L, Lan C Y, et al. Effects of different improvements on controlling acidification of Pb/Zn tailings. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1999, **3**: 68~71.
- [32] Chen L Q, Guo D Z, Zhang M, et al. Research on material and technique of filling reclamation of wasteland induced by excavation in earth's surface in mining areas. *Journal of China University of Mining Technology*, 2002, **31**(1): 59~64.
- [33] Zhang Z Q, Huang M H. Uptake and translocation of heavy metals in dominant plants of soil seed banks introduced to a Lead/Zinc mine tailings pond. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(3): 306~311.
- [34] Yang C S, Lan C Y, Shu W S. Soil biologic fertility for revegetation on mining wasteland. *Ecologic Science*, 2000, **19**(3): 73~79.
- [35] Nie X P, Lan C Y, Zhang Z Q, et al. Effects of copper on rhizobia — *Acacia auriculaeformis* symbiotic association. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(3): 264~268.
- [36] Chen T B, Wei Z Y, Huang Z C, et al. As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its Arsenic accumulating characteristics. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(3): 207~210.
- [37] Bai Z K, Zhao J K. Some problem about reclamation and reconstruction of opencast coal mine. *Metal Mine Design & Construction*, 2000, **32**(1): 33~38.
- [38] Long J, Huang C Y, Teng Y, et al. Characteristics of soil microbes of reclaimed mine soil in red soil area, Southern China. *Journal of soil and water conservation*, 2002, **16**(2): 126~129.
- [39] Chen F Q, Lu B, Wang X R. Formation and succession of plant community on phosphate mining wasteland in Zhangcunping, Southwest, Hubei Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(8): 1347~1354.
- [40] Bai Z K, Li J C, Wang W Y. Study on ecological rehabilitation of abandoned land from Antaibao large-scale opencast coal mine in Pingshuo Shanxi, China. *China Land Science*, 2000, **14**(4): 1~4.
- [41] Liu S Z, Xia H P, Kong G H, et al. The soil and vegetation of oil shale dump in Maomingcity, Guangdong Province. *Ecologic Science*, 2002, **21**(1): 25~29.
- [42] Sun Q Y. Natural colonized plants on tailings of Lead-Zinc mine. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(9): 1457~1463.

#### 参考文献:

- [5] 蒋高明, Putwain P D, Bradshaw A D. 英国圣·海伦斯 Bold Moss Tip 煤矿废弃地植被恢复实验研究. *植物学报*, 1993, **35**(12): 951~962.
- [17] 王剑虹, 麻密. 植物修复的生物学机制. *植物学通报*, 2000, **17**(6): 504~510.
- [21] 蒋高明. 矿业废弃地植被恢复的理论与实践, 见: 陈灵芝等主编. 中国退化生态系统研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 193~204.
- [23] 朱震达, 刘恕. 中国的沙漠化及其治理. 北京: 科学出版社, 1989.
- [24] 束文圣, 杨开颜, 杨兵, 等. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究. *应用与环境生物学报*, 2001, **7**(1): 7~13.
- [25] 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究. *生态学报*, 2001, **21**(11): 1932~1941.
- [26] 戈峰, 刘向辉, 潘卫东, 等. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用. *生态学报*, 2001, **21**(11): 1790~1795.
- [27] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究. *生态科学*, 2002, **19**(2): 24~30.
- [28] 王仰麟, 韩荡. 矿区废弃地复垦的景观生态规划与设计. *生态学报*, 1998, **19**(5): 455~463.
- [29] 何书金, 苏光全. 矿区废弃土地复垦潜力评价方法与应用实例. *地理研究*, 2000, **19**(2): 165~172.
- [30] 孙泰森, 白中科. 大型露天煤矿废弃地生态重建的理论与方法. *水土保持学报*, 2001, **15**(5): 56~60.
- [31] 胡宏伟, 姜必亮, 蓝崇钰, 等. 广东乐昌铅锌尾矿废弃地酸化控制研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 1999, **3**: 68~71.
- [32] 陈龙乾, 郭达志, 张明, 等. 矿区地表采掘废弃地充填复垦材料及技术研究. *中国矿业大学学报*, 2002, **31**(1): 59~64.
- [33] 张志权, 黄铭洪. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究: 定居植物对重金属的吸收和再分配. *植物生态学报*, 2001, **25**(3): 306~311.
- [34] 阳承胜, 蓝崇钰, 束文圣. 矿业废弃地生态恢复的土壤生物肥力. *生态科学*, 2000, **19**(3): 73~79.
- [35] 聂湘平, 蓝崇钰, 张志权, 等. 锌对大叶相思——根瘤菌共生固氮体系的影响. *植物生态学报*, 2002, **26**(3): 264~268.
- [36] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. *科学通报*, 2002, **47**: 207~210.
- [37] 白中科, 吴梅秀. 矿区废弃地复垦中的土壤学与植物营养学问题. *煤矿环境保护*, 1996, **10**(5): 39~42.
- [38] 龙健, 黄昌勇, 腾应, 等. 我国南方红壤矿山复垦土壤的微生物特征研究. *水土保持学报*, 2002, **16**(2): 126~129.
- [39] 陈芳清, 卢斌, 王祥荣. 村坪磷矿废弃地植物群落的形成与演替. *生态学报*, 2001, **21**(8): 1347~1354.
- [40] 白中科, 李晋川, 王文英. 中国山西朔州安太堡大型露天煤矿退化土地生态重建研究. *中国土地科学*, 2000, **14**(4): 1~4.
- [41] 刘世忠, 夏汉平, 孔国辉, 等. 茂名北排油页岩废渣场的土壤与植被特性研究. *生态科学*, 2002, **21**(1): 25~29.
- [42] 孙庆业. 铅锌尾矿上自然定居植物. *生态学报*, 2001, **21**(9): 1457~1463.