

## 重金属矿山生态治理与环境修复技术进展

晏闻博, 柳丹, 彭丹莉, 李松, 陈俊任, 叶正钱, 吴家森, 王海龙

(浙江农林大学 浙江省污染土壤生物修复重点实验室, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 在重金属矿山长期开发过程中, 由于长期忽视生态环境保护与恢复治理, 使矿山植被、景观、土地、水体均遭受不同程度污染破坏。基于重金属矿山治理目标, 采用文献综述的方式, 通过对国内外最新矿山重金属污染生态治理技术的梳理, 凝练出地质地貌工程、植被修复、土壤基质修复等3个大方向, 并进一步确定出7个技术大类和18种治理技术手段; 同时, 基于此基础, 提出重金属矿山的生态环境治理, 需要在治理开始阶段、初步修复阶段以及基本修复完成与后续等3个不同的阶段中, 分别针对性的采用矿山生态破坏及环境污染现状的调查、修复技术应用以及后续的维护管理及开发等技术管理手段。结论认为, 矿山重金属污染生态环境修复治理, 需要针对其不同所处阶段, 建立相应的修复模型, 同时要通过可持续性的修复技术和生态维护平台, 加强其前期分析和后续风险评估和综合利用的研究, 从而达到重金属矿山有效修复的目标。图2表1参63

**关键词:** 生态学; 重金属; 矿山; 生态恢复; 环境修复; 综述

**中图分类号:** S714; X171      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2015)03-0467-11

## Technology advances of ecological restoration and environmental remediation of heavy metal mines

YAN Wenbo, LIU Dan, PENG Danli, LI Song, CHEN Junren, YE Zhengqian, WU Jiasen, WANG Hailong

(Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** During the process of the exploitation of heavy metals mines in China, both vegetation, landscape, land and water are all destroyed in varying degrees due to long-term neglect of ecological environmental protection and restoration. Heavy metal pollution result in soil quality degeneration which seriously threatens human health and the natural ecological system. In this article, the ecological restoration technology of heavy metal mines area was reviewed. Three major repair measures involving geological engineering, vegetation restoration and soil remediation were covered, and seven technology categories and eighteen control techniques were put forward. Furthermore, the technical process scheme for the heavy metal pollution of mining ecological restoration is established, which is used to provide reference for mine ecological environment management including the investigation of pollution situation, the application of remediation techniques, and subsequent maintenance and development in the early stages of repair, preliminary stage as well as the later stage. In conclusion, the heavy metal pollution of mining requires building different fix models according to its status. Meanwhile, it also needs to strengthen the research of analysis in early stage, risk assessment in later period and comprehensive utilization. Accordingly, we are able meet the goal to restore the mine effectively. [Ch, 2 fig. 1 tab. 63 ref.]

**Key words:** ecology; heavy metal; mining; ecological restoration; environmental remediation; review

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2015-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31300520); 浙江省科学科学技术公益项目(2014C33043)

作者简介: 晏闻博, 从事生态环境修复研究。E-mail: 184435348@qq.com。通信作者: 柳丹, 副教授, 博士, 从事土壤污染修复等研究。E-mail: liudan7812@aliyun.com

矿产资源是人类生产和生活的基本源泉之一,但矿产资源的开发在对国民经济发展起重要推动作用的同时,也带来了严峻的环境问题<sup>[1]</sup>。采矿造成的水土流失、土地压占和毁损、次生地质灾害、矿山废水和重金属污染等,影响面广,范围大,性质严重<sup>[2]</sup>。矿区乃至矿业城市周边土壤重金属污染问题已成为环境污染的热点问题之一<sup>[3-4]</sup>。矿山开采产生的废石、选矿产生的尾矿和冶炼废渣经风化淋滤等使有害元素转移到土壤中,造成土壤质量下降的同时污染农作物,最后通过食物链进入人体,危害人类健康<sup>[5]</sup>。恢复生态学理论认为,依靠自然恢复或通过人工措施,采用适当的工程方法和植被重建,可恢复退化的生态系统<sup>[6]</sup>。在采矿废弃地上植被的自然恢复是十分缓慢的,经过20~30 a,木本植物的盖度才能达到14%~35%<sup>[7]</sup>,50~100 a才能渐渐恢复,而土壤系统的恢复可能要持续100~1 000 a<sup>[8]</sup>。目前,部分矿区生态修复中大都依然使用传统方法与技术模式,造成生态治理效果单一而不全面、效果缓慢而不可持续、经济投入大而生态效益低等问题。因此,本文主要对矿山生态污染环境问题进行分析,对主要的生态环境治理修复技术进行归纳,通过对生态治理技术与应用的梳理,构建一个完整的生态恢复体系,为矿山重金属污染环境下的生态治理研究提供参考。

## 1 矿山开采的生态和环境污染问题

据统计,全国113 108座矿山中,采空区面积约为134.9万hm<sup>2</sup>,占矿区面积的26%;采矿活动占用或破坏的土地面积238.3万hm<sup>2</sup>,占矿区面积的47%;采矿引发的矿山次生地质灾害累计12 366起,造成直接经济损失166.3亿元<sup>[9]</sup>。矿山开发造成的环境污染实质是矿山资源开采对区域环境中水、空气、土壤和噪声的污染以及对生态产生的一系列问题(表1)。以浙江省为例:截至2008年底,矿产量达到4.4亿t·a<sup>-1</sup>,矿山数量2 700多家,大部分是开采建筑石料和水泥灰岩的山坡露天矿山<sup>[10]</sup>。同时有废弃矿山近1万个,亟待治理的有1 615个。例如浙江省诸暨市湮浦铜矿区周围土壤中更是发现砷、铜、锌、镍、铅等5种重金属,同时存在明显积累并严重污染周边环境的现象<sup>[11]</sup>。

表1 矿山生态及环境污染问题

Table 1 Ecological and environmental problems in mine pollution

环境问题	生态问题
1. 矿山活动水污染; 2. 河道地下水污染; 3. 开采排放有害气体污染; 4. 废石风化颗粒物粉尘污染; 5. 土地破坏及土地污染。	1. 破坏山体植物; 2. 地面塌陷灾害严重; 3. 矿坑废水污染严重; 4. 过量开采地下水引发的地面沉降; 5. 大量废石尾矿造成污染。

金属矿山开发主要包括对自然景观、地质结构、生态环境等的影响和破坏。金属矿山的露天开采直接破坏地表土层和植被,对区域生态环境的影响非常直观,主要表现在占用林地、农田,掩埋地面植被,造成水土流失;地下开采对生态环境的影响相对较小,但废石堆场、矿石堆场、运输道路等也将占用林地和农田<sup>[12]</sup>。例如,浙江省遂昌金矿在3.6 km<sup>2</sup>的矿区范围内,地表分布有废石渣场10多处,尾矿库4个,采石场和其他废弃工业场地多处,还有大量未经治理的酸性废石堆,这些废弃的废石堆和矿坑经多年的雨水淋滤产生大量酸性重金属废水<sup>[13]</sup>。粤北大宝山的矿山开发引起重金属暴露于地表环境,致使11 000人受到严重的矿山污染威胁<sup>[14]</sup>。

## 2 矿山生态治理技术类型分析

中国历来重视矿山生态修复技术工作的研究,在矿山生态环境的各个方向修复领域都有一定的经验成果。通过对国内外的研究进行梳理,发现恢复矿山生态环境的治理技术主要有3个方面(图1)。

### 2.1 地质地貌工程保护修复技术

2.1.1 地质修复技术 ①回填整平技术:在地质修复中,回填整平技术最为常见。赵爱军等<sup>[15]</sup>在三江源区矿山复坑平整中利用大型宣推土机进行回填整平,使得采区内不再有大的坡度和沟坎。周惠荣等<sup>[16]</sup>针对滇池流域采矿废弃地特点,采取削坡、护坡、场地整治等工程措施以维持地表基底稳定;唐伟等<sup>[17]</sup>通过复坑整平将裸地整理成具有极小平缓坡度的平整地面,使矿区的较大的坡度和沟坎减少或消失。②坡面加固排危技术:矿山造成的坡面及裸露地表的状态极不稳定,需要通过坡面加固排危技术处理缓解地

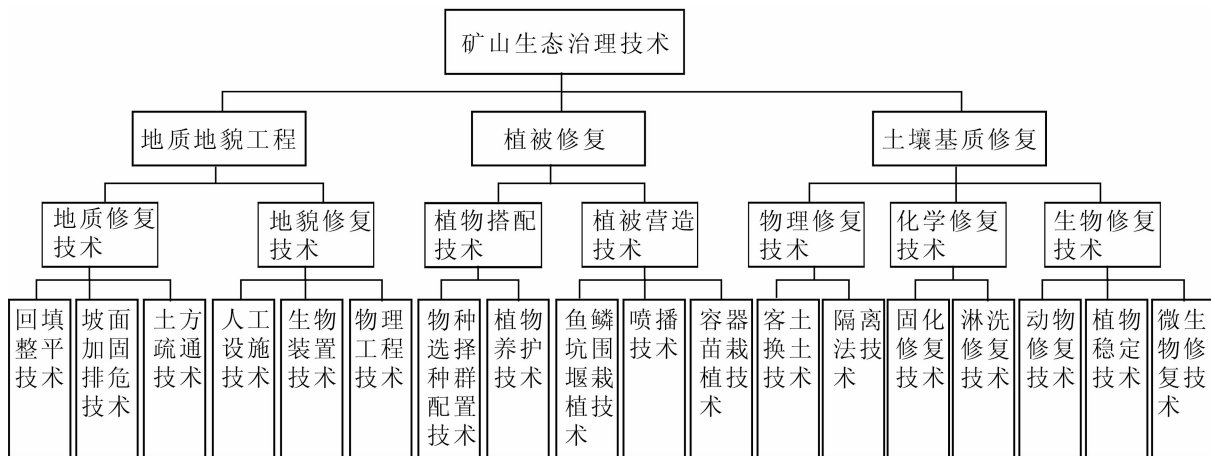


图 1 矿山生态治理修复技术

Figure 1 Repair technology of mine ecological governance

质隐患稳定地质环境。张洪生等<sup>[18]</sup>在太行山区矿区修复中将矿区划分为若干区段，利用大型铲运机将剥离的条带岩石和表土“剥皮式”分开铲装，在复垦条带分别按顺序“铺洒式”排放沿等高线平整矿区剥离物堆放场及边坡土地，改造成环形宽条带水平梯田或梯田绿化带。③土方疏通技术：土方疏通是根据地质破坏的具体状况，在土方作业尽可能小的情况下，进行场地疏通恢复。苑鑫等<sup>[19]</sup>在对古交市采煤区的生态修复中对塌陷地的缓坡地段进行地质修复，通过开挖沟渠形成有效的水利系统达到将塌陷地复垦成良田的目的，同时将无污染或污染可以经济有效防治的充填物充填塌陷地。

2.1.2 地貌修复技术 在矿山污染环境下除了对地质地形的修复治理，进一步的地貌地表环境治理尤为关键，地貌基本特征的恢复决定了生态修复中动植物等生态系统恢复的基础<sup>[20]</sup>。地貌修复技术经过十几年的发展，如浆砌片石骨架、土工网、土工格室等手段，已在中国各地的废旧矿山和垃圾填埋场治理中广泛采用。①物理工程技术：有浆砌片石骨架、钢筋混凝土框架、预应力锚索地梁等技术。李健等<sup>[21]</sup>在妙峰山镇杨岭废弃矿山生态恢复中采用铺砌护坡连锁砖整治坡面。在削坡整理的基础上，铺设了 10 万余孔护坡连锁砖，利用连锁砖的六边形结构形成相互咬合的网状结构，再用钢质柳杆纵向间隔 10 m 横向连续钉制钢性支撑，有效地促进了长坡面的稳定性，固土护坡、涵养水源。②生物装置技术：应用最为广泛的是植生卷铺盖法、喷混植生、客土喷播技术等。其中植生卷铺盖法主要适用于较缓的低矮的需要迅速得到防护或绿化的土质边坡。在福州市的废弃矿山地貌治理中<sup>[22]</sup>，针对实际情况，采用植藤和生命力强的草类等方法，并在基部栽植巨尾桉 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* 等速生树木作为屏障，结合实际采取有利于植物生产的辅助工程措施，如砌护坡、排水沟、回填客土等进行生态恢复，较好地完成了治理工程、施工和植树绿化工作。③人工装置技术：利用人工装置帮助地貌条件的稳定。如挂三维网植草适用于较缓的土质及部分沙石土边坡，可使坡面的基质更加稳固。在江苏省宜兴市林场废弃矿中采用挂网客土喷播复绿<sup>[23]</sup>，将削坡降坡及清坡施工结束后，在露采坡面上进行挂网客土喷播复绿施工。在稳定坡面防止水土流失的同时，为坡面的地貌植被恢复提供了条件。同时，在实际技术应用中，人工装置技术与工程技术以及生物技术经常搭配使用。例如陈芳孝等<sup>[24]</sup>在龙凤岭废弃采石场治理模式中对开采岩质坡面采用了简易植被恢复基材喷附、挂双向格栅+植被恢复基材喷附+生态植被毯、生态植被袋生态防护、岩面容器苗垂直绿化等技术进行植被恢复。

## 2.2 生态植被恢复技术

2.2.1 植物配置养护技术 ①物种选择与种群配置：在植物的搭配设置上，主要从生态性、经济性、美观性等方面考虑，例如在云南省大红山矿区植被恢复的过程中<sup>[25]</sup>，考虑到植被恢复后将移交地方管理，植被配置首先以植被快速恢复为主，结合附近农村林业产业发展需求，采用乔灌结合、竹灌结合，选用芒果树 *Mangifera indica* 与三叶豆 *Campylotropis rockii* 混植、竹子 *Bambusoideae* 与车桑子 *Dodonaea viscosa* 混植 2 种配置方式布局在大面积的平地或平缓地；榕树 *Ficus microcarpa*，构树 *Broussonetia papyrifera* 等或榕树、凤凰树 *Delonix regia* 与车桑子、三叶豆混植 2 种配置方式布局在坡地、台面、陡坡地、零碎地块。在浙江省矿山坡面植被森林化过程成中发现，矿山边坡植被森林化构建的物种配置宜以



美丽胡枝子 *Lespedeza bicolor* 为优势树种, 同时伴生映山红 *Rhododendron simsii*, 野桐 *Mallotus japonicus* var. *floccosus* 等树种<sup>[26]</sup>。②植物养护: 在不同自然条件下植物的养护技术也需要具有更强的应用性。例如在北京, 大部分矿区自然条件差, 水资源缺乏, 植物措施成活率、保存率低, 给生态环境建设增大了难度。因此, 在生态植被恢复工程中, 必须考虑耐旱性水土保持林栽植技术, 在春季、雨季通过综合运用集水技术、保水剂、地膜或植物材料覆盖技术、营养袋容器苗技术、生根粉处理技术等生态植被恢复<sup>[24]</sup>。在三江源区的治多县松莫茸砂金矿区, 采用播种当年追施磷酸二铵或尿素 225~300 kg·hm<sup>-2</sup>, 不采种, 不刈割, 不放牧, 次年可采种并刈割1次, 效果是在播种第3年其覆盖度可达到70%以上<sup>[15]</sup>。因此, 在植物的配置与养护管中, 应加强技术与实际经验的结合, 利用有利的技术维护搭配植物群的建立和恢复。

2.2.2 植被营造技术 ①喷播: 是生产上最经济的造林方法, 在喷播草种的同时, 夹杂木本种子一起喷播在具有植生基质附着的边坡上<sup>[27]</sup>。例如: 浙江省海宁县鼠尾山露采废弃矿山利用喷播技术, 在第1年植物种类都是由人工喷播的物种组成, 即美丽胡枝子 *Lespedeza Formosa*, 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*, 马棘 *Indigofera pseudotinctoria*, 高羊茅 *Festuca elata*, 狗牙根 *Cynodon dactylon*, 紫花苜蓿 *Medicago sativa* 和白三叶 *Trifolium repens* 等<sup>[28]</sup>。在舟山的矿山坡地利用喷播技术使得高羊茅、紫穗槐、紫花苜蓿等分布较均匀且对各种坡面的适应性良好<sup>[29]</sup>。②鱼鳞坑、围堰栽植: 利用边坡特殊的有利微地形特点, 采用挖鱼鳞坑或围堰砌筑或用植生袋叠置燕窝状栽植槽, 然后在坑内或槽内栽植目的树种进行矿山边坡森林化构建的点缀式营造。海宁县鼠尾山露采废弃矿山边坡采用植生袋围堰造坑植树等植被修复技术, 已形成乔木盖度31%, 灌木盖度52%, 草本盖度59%的乔木、灌木和草本复合的森林植物群落<sup>[28]</sup>。③容器苗栽植: 在种子由于发芽迟缓或生化他感影响而不适宜直播的情况下, 可利用容器苗栽植。试验证明, 采用容器苗造林, 具有缓苗快、成活率高的显著特点。王蓉丽等<sup>[30]</sup>在浙江省金华地区矿山的修复研究中选用特制的木箱、塑料花柱、玻璃钢花盆或用砖石砌成一定大小的花盆, 基质苗选用伞房决明 *Cassia corymbosa*, 夹竹桃 *Nerium indicum*, 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*, 多花木兰 *Indigofera amblyatha*, 刺槐 *Robinia pseudoacacia* 等乔、灌木树种等进行容器苗栽植。可见, 研究生产适合矿山边坡专用的容器苗是今后矿山边坡植被森林化构建的一种行之有效的方法, 可以弥补喷播的不足<sup>[26]</sup>。

### 2.3 土壤基质修复技术

2.3.1 物理修复技术 ①客土换土技术: 主要针对立地条件极差, 土层极薄甚至没有土层的废弃矿山。例如在北京的矿山治理中<sup>[7]</sup>, 从建筑工地购买其挖出的基土, 运送到项目区在满足条件的区域覆土60~80 cm。购买菌剂添加到土壤中, 调节土壤微生物生存环境促进其生长以改良土壤理化性质加速植物生长, 这样有利于快速改良土壤基质, 提供适宜植物生长的环境条件, 但缺点是客土源难以保障、成本较高。②隔离法技术: 物理修复中的隔离法主要使用各种防渗材料如水泥、黏土、石板塑料板等, 把污染土壤就地与未污染土壤或水体分开, 以减少或阻止污染物扩散到其他土壤或水体。常用的有振动淤泥浆墙、平板墙、薄膜墙等<sup>[31]</sup>。该法常应用于污染严重并易于扩散且污染物又可在一段时间后分解的情况, 使用范围较为有限。为减少地表水下渗, 还可在污染土壤上覆盖一层合成膜或在污染土壤下面铺一层水泥和石块混合层<sup>[32]</sup>。

2.3.2 化学修复技术 ①固化修复技术: 土壤固化通常用于重金属和放射性物质污染土壤的无害化处理, 将污染物转化为不易溶解, 迁移能力或毒性变小的状态和形式。朱佳文等<sup>[33]</sup>在对湘西花垣铅锌尾矿砂中镉、铅、锌使用石灰和磷酸一铵等钝化剂后, 发现对镉、铅、锌的移动性和生物有效性有明显的影 响和固化效果。同时有研究表明, 向土壤中加入不同形式的磷改良剂, 能有效地将土壤中的铅从非残渣态转化成为残渣态的形式存在, 从而降低土壤中铅的移动性与生物有效性<sup>[34]</sup>。②淋洗修复技术: 化学淋洗技术修复污染土壤是通过解吸附、反络合及溶解作用, 使重金属从固相的土壤转移到液相淋洗液中, 淋洗液进行循环利用或处理, 重金属回收或处置<sup>[35]</sup>。黄细花等<sup>[36]</sup>研究发现可以利用P&T技术处理污染淋出液, 在深层土壤添加固定剂、能有效固定从耕作层淋下来的重金属, 且被固定的重金属很少被后期的降水等再淋洗出来, 能很好地控制对地下水的环境风险。常用的土壤重金属萃取剂有螯合剂和无机酸、有机酸等<sup>[37]</sup>。例如, 许超等<sup>[38]</sup>选用粤北大宝山矿区下游受酸性矿山废水污染的土壤为供试样品, 采用0.05 mol·L<sup>-1</sup>的柠檬酸对污染土壤中重金属进行淋洗动力学研究, 发现柠檬酸适合用于受酸性矿山废

水污染的中等污染程度土壤中重金属的淋洗去除。朱光旭等<sup>[39]</sup>在云南省个旧古山选矿厂尾砂库的研究发现, 基于综合毒性消减指数和经济成本, 选择在 1:6 土水比 2 次淋洗 3 h 的技术条件下  $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的乙二胺四乙酸(EDTA)是适合的高效淋洗剂; 许超等<sup>[40]</sup>利用 EDTA 对矿山的重金属污染土壤进行淋洗研究, 发现 EDTA 能有效从土壤中淋洗出铅、锌、铜和镉等重金属离子。

**2.3.3 生物修复技术** ①植物稳定技术: 矿山废弃地尾矿的采空区、剥离表土堆放地分布相对比较集中, 各个区域土壤的肥力以及重金属的含量存在明显的差异, 植物吸收转移的量相对有限, 针对植物提取技术的不足, 选择耐性植物尽快恢复植被, 通过植物稳定技术则相对简单而且容易实现, 一方面可以减少水土流失, 另一方面可以降低重金属的迁移扩散<sup>[41]</sup>。刘茜等<sup>[42]</sup>对湖南省湘潭锰矿业废弃地土壤上的自然定居植物研究发现商陆 *Phytolacca acinosa*, 灯心草 *Juncus effusus*, 土荆芥 *Chenopodium ambrosioides*, 狗牙根 *Cynodon dactylon*, 野苘蒿 *Crassocephalum crepidioides*, 一年蓬 *Erigeron annuus* 等草本植物对重金属的稳定吸收有很好的作用。王学礼等<sup>[43]</sup>在福建三明典型金属矿区受到重金属污染土壤中, 发现笔管草 *Equisetum ramosissimum*, 一年蓬和五节芒 *Miscanthus floridulus* 等对重金属具有较大的地上部富集量稳定作用, 对修复铅、镉污染的土壤具有潜在的应用价值。乌蕨 *Stenoloma chusanum*, 千金子 *Euphorbia lathyris*, 二歧飘拂草 *Fimbristylis dichotoma*, 柔枝莠竹 *Microstegium vimineum*, 短叶水蜈蚣 *Kyllinga brevifolia* 等适用于污染程度较高且植物萃取技术难实施的矿业废弃地的稳定控制。同时, 田胜利<sup>[44]</sup>通过与鹅冠草 *Roegneria kamoji* 的比较, 认为香根草 *Vetiveria zizanioides* 无论是对铜、铅、锌单一污染还是复合污染都有较好的对土壤基质的修复功能。②微生物修复技术: 主要通过微生物对重金属的溶解、转化与固定来实现修复。如 Chanmugathas 等<sup>[45]</sup>发现土壤微生物能够利用有效的营养和能源, 在土壤滤液过程中通过分泌有机酸络合并溶解土壤中的重金属。张一修等<sup>[46]</sup>研究认为运用基因工程培育具有积累重金属、降毒能力及加速植被吸收重金属的微生物研究是土壤环境治理的关键手段之一。③动物修复技术: 是在污染土壤中生长、繁殖、穿插等活动过程中对污染物进行破碎、分解、消化和富集作用, 从而使污染物降低或消除的一种生物修复技术。邓继福等<sup>[47]</sup>发现土壤中的蚯蚓 *Pheretima* 和蜘蛛对重金属元素有很强的富集能力, 其体内镉、铅、锌与土壤中相应元素含量呈明显的正相关。张成梁等<sup>[48]</sup>在研究美国新墨西哥州西北部 Farminton 的 LaPlata 煤矿生态修复时发现在生态相对稳定的土壤中加入腐生波豆虫 *Bodo putrinus*, 蚯蚓等土壤动物有利于土壤的生态恢复。

### 3 矿山重金属污染生态治理技术流程构建与评估研究

#### 3.1 生态治理技术流程构建

在矿山生态恢复过程中加入人为因素的干扰以加快其演替的过程, 可以大大加速植被系统的建立以至于最后到整个生态系统功能的恢复, 实现这一系统的自我维系从而进入良好的发展阶段<sup>[49]</sup>。因此, 在已经被人为破坏污染的矿山土壤生态环境中除了利用合适的修复技术, 合理科学的矿山土壤重金属污染生态修复理论分析构建与评价也极其重要。生态环境治理技术框架的构建主要利用 3 个技术阶段配合 3 种矿山生态治理状态的协同综合治理, 3 个阶段的生态环境治理状态包括治理开始阶段、初步修复阶段以及基本修复完成与后续阶段。针对的 3 个技术阶段是矿山生态破坏及环境污染现状的调查、使用具体修复技术以及后续与维护管理及开发等(图 2)。

在矿山重金属污染生态治理中主要技术包括: 管理技术、宏观规划设计技术、工程绿化修复技术、土壤修复技术、监管、预测与风险评估技术等。其中①监管、预测与风险评估技术是通过通过对矿山污染环境动态的污染检测和监管, 对它们进行风险评估, 监控污染程度、范围以及其规律分布<sup>[50]</sup>, 为矿山污染的生态治理技术提供数据和技术标准制定依据。②宏观规划设计技术要求, 对于任何工程都要有前期细致的规划设计, 应在详细的调查、测量的基础上, 运用现代的地理信息电脑技术, 进行矿山生态修复的规划设计<sup>[51]</sup>。③管理技术是对受污染的环境资源进行科学管理, 建立健全的矿山环境保护管理体系与环境保护监督制度, 同时要有规划设计、工程实施及修复改善后的宏观管理以及矿山整个生命周期的环境修复管理<sup>[31]</sup>。

#### 3.2 评估方法

**3.2.1 传统土壤统计方法** 传统土壤统计常常采用 Fisher<sup>[52]</sup>创立的经典统计方法。其统计原理是假设研

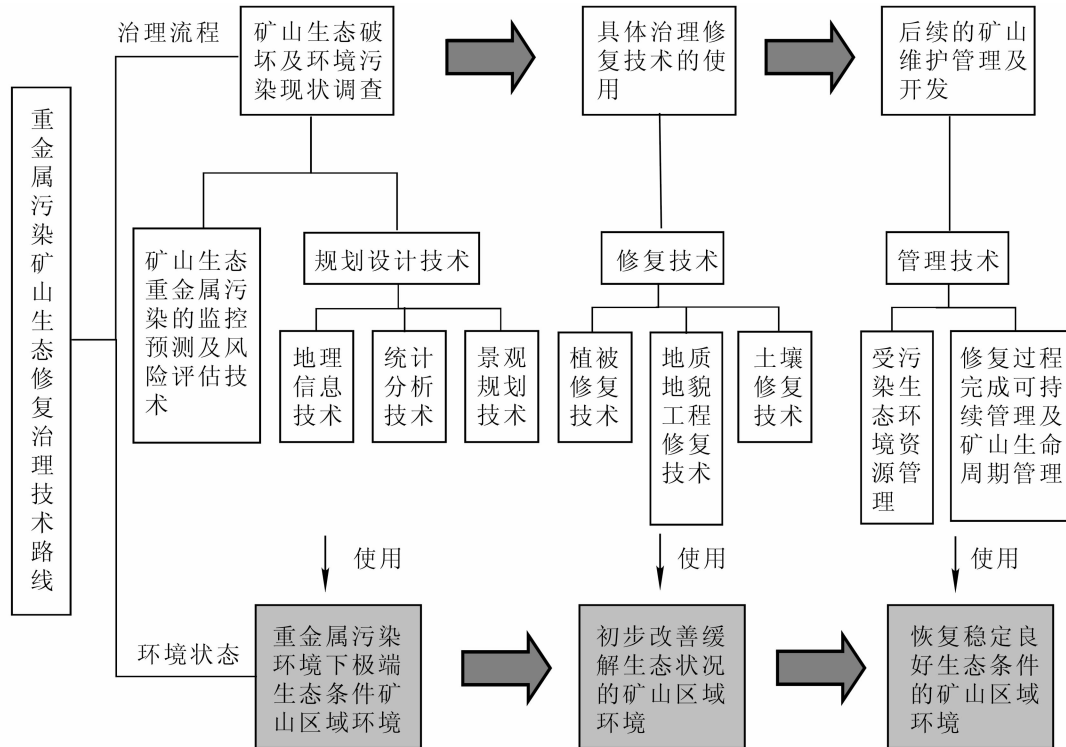


图2 重金属矿山生态修复治理体系构建技术框架

Figure 2 Framework construction of heavy metal mine ecological restoration system

究变量为纯随机变量，样本之间是完全独立且服从已知概率分布。其统计方法是按质地将土壤在平面上划分为若干均一区域，在深度上划分为不同土层，通过计算土壤样本数据的均值、标准差、方差、变异系数以及进行显著性检验，来描述土壤特性的空间变异<sup>[53]</sup>。该方法可以在样本小、材料多样和环境多变等条件下获取最多的信息，被大量的土壤工作者所采用<sup>[54]</sup>。随着对土壤特性研究的深入，人们发现土壤性质的变化并非完全随机，而是在特定时空区域内彼此相关，普遍具有空间自相关特点<sup>[55-56]</sup>。

3.2.2 土壤空间分布研究方法 ①空间自相关(spatial autocorrelation)是区域化变量的基本属性之一。空间自相关分析是对某一地理变量空间分布相邻位置间的相关性进行检验的一种统计方法。它通过检测一个位置上的变异是否依赖于邻近位置的变异，来判断该变异是否存在空间自相关性，即是否存在空间结构。空间自相关分析作为一种多尺度分析方法，可以用来反映空间邻近区域某一变量属性值的相似程度和空间分布的聚集特征。空间自相关分析包括全程空间自相关和局部空间自相关2个部分<sup>[57]</sup>。全程空间自相关分析用来研究整个范围内指定属性是否具有自相关性。局部空间自相关则用来分析在特定局部地点指定属性是否具有自相关性。空间自相关分析的结果可用来解释和寻找存在的空间聚集性或“焦点”。这种分析所需要的空间数据类型是点或面数据，分析对象是具有点面分布特征的特定属性。具有正相关属性，其相邻位置与当前位置的值具有较高一致性。常用的定量指标主要有 Moran’s I 系数，Geray’s I 系数，以及 G 统计量<sup>[58]</sup>。②分形理论(fractal theory)是在 20 世纪 70 年代由数学家 Mandelbrot 首次提出的，后被广泛应用到自然生态和环境科学领域，并进一步被应用到土壤、地质等其他领域。所谓分形，是指在形态或结构上存在着相似性几何现象，分形现象的科学称为分形几何学<sup>[59]</sup>。土壤属性数据一般具有空间自相关性，点对间距离越近，元素含量的差异就越小，反之亦然。当距离达到一定程度后，空间自相关性消失，其差异趋于稳定，不再随距离变化而变化，变异函数随距离稳定增长的范围正是自相关的范围，这种自相关是由在各种尺度上分形结构的自相似性所产生的，该范围又反映了分形存在的尺度。所以，地统计中变程就是分形存在的范围，反映出这两种空间结构研究方法间的内在联系。由于土壤是一个不均匀的复合体，它与气候、水文、农田灌排等诸多因素相互作用，往往导致土壤特性参数值在空间上呈现出不规则性和随机性，这种情形适于用分数维布朗运动或随机分形来量度<sup>[60]</sup>。③Journel 和 Huijbregts<sup>[61]</sup>认为，地统计学是指对自然现象的统计学研究，这些自然现象一个最明显的特征就是研究变量的实测值是空间分布并且相关。地统计学通过假设相邻数据空间相关，并假定表达这种相关程度的关



系可以用一个函数来进行分析和统计,从而对这些变量的空间关系进行研究。地统计学具有确认数据间空间关系的能力,由于它能定量描述这种空间关系,因此可以解决一些问题,例如对未采样点进行预测<sup>[62]</sup>。国内的一些地统计工作者认为<sup>[63]</sup>：“地统计学是以区域化理论为依据,以变异函数为主要工具,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性,或空间相关性和依赖性的自然现象的一门科学。”其中主要会用到区域化变量、半方差函数、克里格插值等。

**3.2.3 重金属土壤环境污染风险评估方法** 析取克里格法:进一步的研究土壤重金属的污染状况,采用析取克里格法对已有污染超标的元素进行污染概率分析。概率克里格是一种风险估值方法,可在一定风险条件下给出未知点可能达到某一水平值的概率及空间分布。采用概率克里格,能直观地反映出研究区内受重金属污染的风险性程度,在环境污染风险评价方面具有较好的应用前景。潜在生态危害指数法:Hakanson 潜在生态危害指数法作为国际上土壤(沉积物)重金属研究的常用方法之一,它结合环境化学、生物毒理学、生态学等方面内容,以定量的方法划分出重金属潜在危害程度,是目前此类研究中应用较为广泛的一种。

## 4 展望

矿山重金属污染生态环境修复治理作为一个现实而紧迫的问题,其修复方法手段的研究与生态治理评价构建的研究领域依然有很大的发展空间和领域,其中有很多创新的研究方向值得扩展。

在不同矿山的修复中,应建立不同的修复手段从而达到最佳修复效果,因此,需要在对污染环境的前期勘察与分析中使用更加有效的技术手段方法,评估中利用传统土壤统计方法、空间分布方法、风险评估手段等不同专业知识,为生态修复提供更加科学的前期分析参考。

在矿山重金属污染环境治理的工程技术正在向实用化、组合化、多功能化等方向发展,同时修复技术的开发原则也越来越生态化,尽量采用自然生态手段进行修复治理。

污染土壤的生态修复并非单一的土壤修复,而是根据矿山生态系统的修复,构建土壤生态修复系统。利用现代统计学理论,结合地理信息技术构建科学评价体系与景观生态规划方案成为完善有效的修复平台。

在生态修复后的维护与处理中,可持续性的修复技术和生态维护成为重点,通过植物修复的重金属污染土壤,其中修复重金属后的植物处理主要是借鉴废弃物的处置方法,较少有针对修复植物特性的处理技术,还需更系统、深入地开展植物回收的技术原理研究,从而进一步避免二次污染的产生。

## 5 参考文献

- [1] 张雷. 中国矿产资源持续开发与区域开发战略调整[J]. 自然资源学报, 2002, **17**(2): 162 - 167.  
ZHANG Lei. Mineral sustainable supply and its spatial reorganization in China [J]. *J Nat Resour*, 2002, **17**(2): 162 - 167.
- [2] 邹长新, 沈渭寿, 刘发民. 矿山生态环境质量评价指标体系初探[J]. 中国矿业, 2011, **20**(8): 56 - 59.  
ZOU Changxin, SHEN Weishou, LIU Famin. Preliminary research on evaluation index system of mine ecological environment quality [J]. *China Min Mag*, 2011, **20**(8): 56 - 59.
- [3] NATARAJAN K A, SUBRAMANIAN S, BRAUN J. Environmental impact of metal mining—biotechnological aspects of water pollution and remediation—an Indian experience [J]. *J Geochem Explor*, 2006, **88**(1/3): 45 - 48.
- [4] LIM T T, CHUI P C, GOH K H. Process evaluation for optimization of EDTA use and recovery for heavy metal removal from a contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(8): 1031 - 1040.
- [5] 张溪, 周爱国, 甘义群, 等. 金属矿山土壤重金属污染生物修复研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(3): 106 - 112.  
ZHANG Xi, ZHOU Aiguo, GAN Yiqun, et al. Advances in bioremediation technologies of contaminated soils by heavy metal in metallic mines [J]. *Environ Sci & Technol*, 2010, **33**(3): 106 - 112.
- [6] 王英辉, 陈学军. 金属矿山废弃地生态恢复技术[J]. 金属矿山, 2007(6): 4 - 7.  
WANG Yinghui, CHEN Xuejun. Ecological restoration technology for metal mine wastland [J]. *Metal Mine*, 2007(6): 4 - 7.

- [7] 沈维明, 张星辉. 浅谈北京市废弃矿山生态修复技术与措施[J]. 水利水电技术, 2011, **42**(1): 24 – 26.  
SHEN Weiming, ZHANG Xinghui. Discussion on technologies and measures for ecorestoration of abandoned mines in Beijing [J]. *Water Resour Hydropower Eng*, 2011, **42**(1): 24 – 26.
- [8] 张文波, 孙楠, 李洪远. 多层次生态修复实践模式及其理论探讨[J]. 自然资源学报, 2009, **24**(11): 2014 – 2034.  
ZHANG Wenbo, SUN Nan, LI Hongyuan. Application and theory of models of multi-approach ecological restoration [J]. *J Nat Resour*, 2009, **24**(11): 2014 – 2034.
- [9] 林庞锟. 矿山污染及环境破坏问题的思考[J]. 中国资源综合利用, 2011, **29**(1): 58 – 59.  
LIN Pangkun. Thinking of mine pollution and environmental damage [J]. *China Resour Comprehens Util*, 2011, **29**(1): 58 – 59.
- [10] 邱郁双, 钱俊锋, 柯朝晖. 浙江省露天开采矿山土地资源开发利用初探[J]. 科技通报, 2012, **28**(3): 148 – 153.  
QIU Yueshuang, QIAN Junfeng, KE Zhaohui. Opening mine exploitation and utilization of land resources in Zhejiang Province [J]. *Bull Sci Technol*, **28**(3): 148 – 153.
- [11] 孙华, 毛小军. 诸暨理浦铜矿区土壤重金属空间变异分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(6): 2178 – 2182.  
SUN Hua, MAO Xiaojun. The heavy metal's spatial variation of Zhuji Lipu copper mining area [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2008, **27**(6): 2178 – 2182.
- [12] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究( I ) [J]. 生态科学, 2000, **19**(2): 24 – 29.  
SU Wensheng, ZHANG Zhiquan, LAN Chongyu. Strategies for restoration of mining wastelands in China ( I ) [J]. *Ecol Sci*, 2000, **19**(2): 24 – 29.
- [13] 齐岩辛, 邹霞. 浙江遂昌局下古代银矿遗址特征及综合保护[J]. 科技通报, 2011, **27**(3): 352 – 358.  
QI Yanxin, ZOU Xia. Characteristic and comprehensive protection of the Juxia ancient silver site in Suichang County, Zhejiang Province [J]. *Bull Sci Technol*, 2011, **27**(3): 352 – 358.
- [14] 周永章, 付善明, 张澄博, 等. 华南地区含硫化物金属矿山生态环境中的重金属元素地球化学迁移模型: 重点对粤北大宝山铁铜多金属矿山的观察[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 248 – 255.  
ZHOU Yongzhang, FU Shanming, ZHANG Chengbo, et al. Geochemical migration model of heavy metallic elements in eco-environmental system of sulfide-bearing metallic mines in South China—with specific discussion on Dabaoshan Fe-Cu-polymetallic mine, Guangdong Province [J]. *Earth Sci Front*, 2008, **15**(5): 248 – 255.
- [15] 赵爱军, 高忠咏, 马建青, 等. 人工生态恢复技术在三江源区矿山环境治理工作中的应用[J]. 青海环境, 2009, **19**(2): 58 – 60.  
ZHAO Aijun, GAO Zhongyong, MA Jianqing, et al. Application of technology in environmental governance of Sanjiang source region of mine in the artificial ecological restoration [J]. *J Qinghai Environ*, 2009, **19**(2): 58 – 60.
- [16] 周惠荣. 滇池流域采矿废弃地生态恢复技术[J]. 林业调查规划, 2012, **37**(1): 72 – 77.  
ZHOU Huirong. Ecological restoration techniques for mining wasteland in Dianchi Basin [J]. *For Inv Plan*, 2012, **37**(1): 72 – 77.
- [17] 唐伟, 韩菲. 我国矿山废弃地受损生态环境的恢复探讨: 以唐山石灰石矿为例[J]. 绿色科技, 2013(8): 199 – 200.  
TANG Wei, HAN Fei. Application of 454 high: throughput sequencing method in soil microorganism [J]. *J Green Sci Technol*, 2013(8): 199 – 200.
- [18] 张洪生, 刘金铜, 刘慧涛, 等. 河北省太行山区石灰石矿区生态环境问题与生态复垦工程技术分析[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(3): 236 – 239.  
ZHANG Hongsheng, LIU Jintong, LIU Huitao, et al. The analysis of environmental problems and ecological reclamation engineering in the limestone region in Taihang Mountain in Hebei [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, **25**(3): 236 – 239.
- [19] 苑鑫, 刘育萍. 采煤影响区生态恢复技术路线研究: 以古交市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(3): 146 – 149.  
YUAN Xin, LIU Yuping. Technological rout of ecological restoration in the caol-mining effected area taking Gujiao as an example [J]. *China Popul Resour Environ*, 2010, **20**(3): 146 – 149.
- [20] 刘刚. 矿山自然生态环境治理技术与治理方案[J]. 西部探矿工程, 2009(6): 122 – 126.



- LIU Gang. The mine ecological environment control technology and management program [J]. *West China Expl Eng*, 2009(6): 122 - 126.
- [21] 李建. 妙峰山镇杨岭废弃矿山生态恢复技术研究[J]. 林业实用技术, 2009(7): 14 - 17.  
LI Jian. Ecological restoration technology of Yangling abandoned mines in Miaofengshan Town [J]. *Pract For Technol*, 2009(6): 122 - 126.
- [22] 李欣. 福州市废弃矿山生态环境存在的问题及对策[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(3): 264 - 267.  
LI Xin. Problems and countermeasures of ecological environment at disused mines in Fuzhou City [J]. *Resour Environ & Eng*, 2006, 20(3): 264 - 267.
- [23] 朱红霞, 张家洋, 朱晓勇. 废弃矿山植被恢复技术方案设计初探[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(13): 2698 - 2700.  
ZHU Hongxia, ZHANG Jiayang, ZHU Xiaoyong. Preliminary study on vegetation restoration technology scheme design of abandoned mines [J]. *Hubei Agric Sci*, 2012, 51(13): 2698 - 2700.
- [24] 陈芳孝. 北京市矿山生态治理主要技术与典型模式[J]. 中国水土保持, 2007(7): 25 - 26.  
CHEN Fangxiao. Beijing's main technology of mining ecological governance and typical models [J]. *Soil Water Conserv China*, 2007(7): 25 - 26.
- [25] 倪应才. 大红山矿区植被恢复措施[J]. 林业调查规划, 2012, 37(5): 95 - 99.  
NI Yingcai. Vegetation restoration measures of Dahongshan mining area [J]. *For Inv Plann*, 2012, 37(5): 95 - 99.
- [26] 刘本同, 王志明. 矿山边坡植被森林化恢复目标和方法探讨: 以浙江矿山边坡植被修复为例[J]. 浙江林业科技, 2005, 25(4): 45 - 49.  
LIU Bentong, WANG Zhiming. Target and method of vegetation recovery at abandoned mine slope [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2005, 25(4): 45 - 49.
- [27] 黄敬军. 废弃采石场岩质边坡绿化技术及废弃地开发利用探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 69 - 72.  
HUANG Jingjun. Application of bio-engineering on abandoned rock-quarry slopes and utilization of abandoned land [J]. *Chin J Geol Hazard Control*, 2006, 17(3): 69 - 72.
- [28] 何志华, 柏明娥, 高立旦, 等. 浙江海宁鼠尾山露采废弃矿山植被修复的群落结构和持水效应研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(4): 576 - 581.  
HE Zhihua, BAI Ming'e, GAO Lidan, et al. Community structure and water-holding effects of restoring vegetation on opencast-abandoned quarry in Shuwei Mountain in Haining Zhejiang Province [J]. *For Res*, 2008, 21(4): 576 - 581.
- [29] 许小娟, 朱凯华, 尹金珠, 等. 海岛矿山生态修复边坡植物多样性分析[J]. 北方园艺, 2011(7): 106 - 109.  
XUE Xiaojuan, ZHU Kaihua, YIN Jinzhu, et al. Plant diversity analysis on repaired side-slope of mine in islands [J]. *Northern Hortic*, 2011(7): 106 - 109.
- [30] 王蓉丽, 朱宝琦, 李绍龙, 等. 浙中地区废弃矿山复绿技术研究[J]. 黑龙江农业科学, 2011(9): 72 - 74.  
WANG Rongli, ZHU Baoqi, LI Shaolong, et al. Study on reclamation of the deserted quarries in central area of Zhejiang Province [J]. *Heilongjiang Agric Sci*, 2011(9): 72 - 74.
- [31] 胡振琪, 杨秀红, 鲍艳, 等. 论矿区生态环境修复[J]. 科技导报, 2005, 23(1): 38 - 41.  
HU Zhenqi, YANG Xiuhong, BAO Yan, et al. On the restoration of mine ecoenvironment [J]. *Sci & Technol Rev*, 2005, 23(1): 38 - 41.
- [32] 胡振琪, 凌海明. 金属矿山污染土地修复技术及实例研究[J]. 金属矿山, 2003(6): 53 - 56.  
HU Zhenqi, LING Haiming, et al. Investigation of remediation technology of contaminated land in metal mines [J]. *Metal Mine*, 2003(6): 53 - 56.
- [33] 朱佳文, 邹冬生, 向言词, 等. 钝化剂对铅锌尾矿砂中重金属的固化作用[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 920 - 925.  
ZHU Jiawen, ZOU Dongsheng, XIANG Yanci, et al. Effects of passivators on stabilization of Pb, Zn and Cd in lead and zinc mine tailings [J]. *J Agro Environ Sci*, 2012, 31(5): 920 - 925.
- [34] CHEN Ming, MA L Q, SINGH S P, et al. Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using P amendments [J]. *Adv Environ Res*, 2003, 8(1): 93 - 102.
- [35] 孙涛, 陆扣萍, 王海龙. 不同淋洗剂和淋洗条件下重金属污染土壤淋洗修复研究进展[J]. 浙江农林大学学报

- 报, 2015, **32**(1): 140 – 149.
- SUN Tao, LU Kouping, WANG Hailong. Advance in washing technology for remediation of metal contaminated soils: effects of eluants and washing conditions [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(1): 140 – 149.
- [36] 黄细花, 卫泽斌, 郭晓方, 等. 套种和化学淋洗联合技术修复重金属污染土壤[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 3067 – 3074.
- HUANG Xinhua, WEI Zebing, GUO Xiaofang, *et al.* Metal removal from contaminated soil by co-planting phytoextraction and soil washing [J]. *Chin J Environ Sci*, 2010, **31**(12): 3067 – 3074.
- [37] ELLIOTT H A, BROWN G A. Comparative evaluation of NTA and EDTA for extractive decontamination of Pb-polluted soils [J]. *Water Air Soil Poll*, 1989, **45**(3/4): 361 – 369.
- [38] 许超, 夏北城, 林颖. 柠檬酸对中低污染土壤中重金属的淋洗动力学[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(2): 507 – 510.
- XU Chao, XIA Beicheng, LIN Ying. Kinetics of heavy metals in medium and slight pollution load soils under effects of citric washing [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18**(2): 507 – 510.
- [39] 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 等. 淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3690 – 3696.
- ZHU Guangxue, GUO Qingjun, YANG Junxing, *et al.* Research on the effect and technique of remediation for multi-metal contaminated tailing soils [J]. *Environ Sci*, 2013, **34**(9): 3690 – 3696.
- [40] 许超, 夏北成, 林颖. EDTA 对中低污染土壤中重金属的解吸动力学[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(8): 1585 – 1589.
- XU Chao, XIA Beicheng, LIN Ying. Desorption kinetics of heavy metals in medium and slight pollution loaded soils with EDTA [J]. *J Agro Environ Sci*, 2009, **28**(8): 1585 – 1589.
- [41] 敖子强, 熊继海, 王顺发, 等. 植物稳定技术在金属矿山废弃地修复中的利用[J]. 广东农业科学, 2011, **38**(20): 139 – 141, 147.
- AO Ziqiang, XIONG Jihai, WANG Shunfa, *et al.* Using phytostabilization technology for the remediation of the metal mine wasteland [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2011, **38**(20): 139 – 141, 147.
- [42] 刘茜, 闫文德, 项文化. 湘潭锰矿业废弃地土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, **29**(2): 25 – 29.
- LIU Qian, YAN Wende, XIANG Wenhua. Heavy-metal contents and absorption characteristics of plants in the soil of Xiangtan manganese mine wasteland [J]. *J Cent South Univ For & Technol*, 2009, **29**(2): 25 – 29.
- [43] 王学礼, 常青山, 侯晓龙, 等. 三明铅锌矿区植物对重金属的富集特征[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(1): 108 – 112.
- WANG Xueli, CHANG Qingshan, HOU Xiaolong, *et al.* Heavy metal enrichment of plants at lead-zinc mines in south China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(1): 108 – 112.
- [44] 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 等. 香根草和鹅观草对 Cu, Pb, Zn 及其复合重金属的耐性研究[J]. 生物学杂志, 2004, **21**(3): 15 – 19, 26.
- TIAN Shengni, LIU Yideng, PENG Shaolin, *et al.* Biological effect of low energy nitrogen ion implantation on *E. coli* [J]. *J Biol*, 2004, **21**(3): 15 – 19, 26.
- [45] CHANMUGATHAS P, BOLLAG J M. A column study of the biological mobilization and speciation of cadmium in soil [J]. *Arch Environ Contamin Toxicol*, 1988, **17**(2): 229 – 237.
- [46] 张一修, 王济, 张浩. 贵州喀斯特矿区废弃地土壤环境问题的现状及治理对策[J]. 中国岩溶, 2010, **29**(2): 128 – 133.
- ZHANG Yixiu, WANG Qi, ZHANG Hao. Actuality and countermeasures of the edatope problem in Karst mining derelict land in Guizhou Province [J]. *Carsol Sini*, 2010, **29**(2): 128 – 133.
- [47] 邓继福, 王振中, 张友梅, 等. 重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. 环境科学, 1996, **17**(2): 1 – 5.
- DENG Jifu, WANG Zenzhong, ZHANG Youmei, *et al.* A research on ecological effect of the soil animals community by heavy metal pollution [J]. *Environ Sci*, 1996, **17**(2): 1 – 5.
- [48] 张成梁, LI B L. 美国煤矿废弃地的生态修复[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 276 – 285.
- ZHANG Chengliang, LI B L. Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(1): 276 – 285.

- [49] 谭绿贵, 陆三明, 王本伟, 等. 矿山生态环境破坏与生态修复: 以六安市矿山为例[J]. 皖西学院学报, 2004, **20**(2): 45 - 48.  
TAN Lvgui, LU Sanming, WANG Benwei, *et al.* The destruction of the ecological environment and ecological restoration of mine: taking Lu'an mine as an example [J]. *J West Anhui Univ*, 2004, **20**(2): 45 - 48.
- [50] 吴超. 金属矿山的安全与环境科技发展问题研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, **3**(5): 1 - 7.  
WU Chao. Safety and environment technology development of metallic mines [J]. *Nonferrous Metals Sci Eng*, 2012, **3**(5): 1 - 7.
- [51] 钱丽萍. 遥感技术在矿山环境动态监测中的应用研究[J]. 安全与环境工程, 2008, **15**(4): 5 - 9.  
QIAN Liping. Application of remote sensing technology to the dynamic monitoring of mine environment [J]. *Saf Environ Eng*, 2008, **15**(4): 5 - 9.
- [52] FISHER R A. *Statistical Methods and Scientific Inference* [M]. 2ed. Oxford: Oliver and Boyd, 1956.
- [53] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 乡(镇)级区域土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 资源科学, 2002, **24**(2): 76 - 82.  
HUANG Shaowen, JIN Jiyun, YANG Liping, *et al.* Spatial variability and regionalized management technology of soil nutrients: the case of Hongqiao township [J]. *Resour Sci*, 2002, **24**(2): 76 - 82.
- [54] 王学锋. 土壤特性时空变异性研究方法的评述与展望[J]. 土壤学进展, 1993, **21**(4): 42 - 49.  
WANG Xuefeng. Review and prospect of research on spatial and temporal variability of soil properties in method [J]. *Progress Soil Sci*, 1993, **21**(4): 42 - 49.
- [55] BURGESS J, LIMB M, HARRISON C M. Exploring environmental values through the medium of small groups ( I ) theory and practice [J]. *Environ Plan A*, 1988, **20**(3): 309 - 326.
- [56] WEBSTER R. Quantitative spatial analysis of soil in the field [G]//STEWART B A. *Advances in Soil Science*. New York: Springer, 1985: 1 - 70.
- [57] GETIS A, ORD J K. Local spatial statistics: an overview [C]//LONGLEY B, BATTY M. *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*, 1996: 261 - 277.
- [58] 韦玉春, 陈锁忠. 地理建模原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 4 - 18
- [59] 鲁植雄, 张维强, 潘君拯. 分形理论及其在农业土壤中的应用[J]. 土壤学进展, 1994, **22**(5): 40 - 45.  
LU Zhixiong, ZHANG Weiqiang, PAN Junzheng. Fractal theory and its application in agricultural soil [J]. *Progress Soil Sci*, 1994, **22**(5): 40 - 45.
- [60] BURROUGH P A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation [J]. *Europ J Soil Sci*, 1989, **40**(3): 477 - 492.
- [61] JOURNEL A G, HUIJBREGTS Ch J. *Mining Geostatistics* [M]. London: Academic Press, 1978: 10 - 12.
- [62] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 5 - 7.
- [63] 侯景儒, 郭光裕. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 37 - 45.