

废弃铅锌矿区综合治理和生态修复技术研究

夏明强 (浙江煤炭地质局勘探一队, 浙江湖州 313004)

摘要 我国是铅锌矿产大国, 2013 年铅锌总量共计 987 万 t, 全国有 2 347 处铅锌矿产地, 几乎遍及全国。铅锌矿产的开采利用带来了大量的物质财富, 同时也给生态环境造成了较大影响, 不仅森林植被遭到破坏, 景观破碎, 还造成重金属污染和诱发塌陷等地质灾害问题。因此, 废弃铅锌矿的综合治理和生态修复具有重要意义。该研究以浙江省庆元县废弃铅锌矿为例, 开展废弃矿区治理和生态修复技术研究, 为我国废弃铅锌矿山综合治理提供了参考资料。

关键词 废弃铅锌矿井; 重金属污染; 地质灾害; 生态修复

中图分类号 X 171.4 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)08-0207-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.08.052

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research on Comprehensive Treatment and Ecological Restoration Technology of Abandoned Lead-Zinc Mine

XIA Ming-qiang (Zhejiang Administration of Coal Geology The First Team of Exploration, Huzhou, Zhejiang 313004)

Abstract China is a major country in lead-zinc mine. In 2013, the total amount of lead-zinc was 9.87 million tons, and there were 2 347 lead-zinc mines in the country, almost all over the country. The exploitation and utilization of lead and zinc minerals have brought a lot of material wealth, and at the same time they have caused a great impact on the ecological environment. Not only the forest vegetation was damaged, the landscape was broken, but also caused heavy metal pollution, induced collapse and other geological disasters. Therefore, comprehensive management and ecological restoration of abandoned lead-zinc mines are of great significance. This study took the abandoned lead-zinc mine in Qingyuan County, Zhejiang Province as an example to carry out research on the treatment of abandoned mines and ecological restoration technology, which provided a reference for the comprehensive treatment of abandoned lead-zinc mines in China.

Key words Abandoned lead-zinc mine; Heavy metal pollution; Geological disasters; Ecological restoration

全国有 2 347 处铅锌矿产地, 主要分布在河南、湖南、云南、湖北和江西 5 省, 浙江、福建、海南、广东、广西、贵州、四川、辽宁、甘肃等省区也有分布^[1-5]。铅锌矿产的开采利用给国民经济和社会发展提供了大量的物质财富, 同时也给生态环境带来了较大影响, 不仅森林植被遭到破坏, 景观破碎, 还造成重金属环境污染和诱发塌陷等地质灾害问题^[6-9]。研究废弃铅锌矿综合治理和生态修复技术对于引导我国实现铅锌矿山开发利用与生态环境保护相协调发展具有普遍的参考意义^[10]。

浙江省共有各类废弃矿井 2 806 个, 涉及废弃地下开采矿山数 838 座, 其中废弃铅锌矿井共有 28 座 61 个。该研究以浙江省庆元县废弃铅锌矿为例, 开展了废弃矿区综合治理和生态修复技术研究, 包括废弃铅锌矿区的地质环境调查、土壤植被调查、水土体重金属污染测试分析、边坡绿化限制因子及可行性分析、废弃矿山稳定性综合治理设计和生态修复及绿化提升技术设计等内容^[11-13]。

1 研究背景

1.1 研究区概况 庆元县废弃铅锌矿位于浙江省西南部的庆元县城北西方向 2.5 km 处海拔 500 m 左右城郊低山丘陵地段, 中心地理位置 119°02'18" E, 27°37'59" N。矿区属亚热带季风气候区, 年平均气温 17.4 ℃, 极端最高气温 41.1 ℃, 极端最低气温 -9.2 ℃, 无霜期 247 d, 年降水量 1 673 mm, 蒸发量 1 313 mm。区内降雨主要集中在 4—6 月的梅汛期和 7—10 月的台汛期, 11 月—翌年 3 月为非汛期, 雨量较少。

1.2 调查、检测与设计

1.2.1 地质环境调查。调查项目区气象水文、地形地貌、地层岩性、区域地质构造和矿山不良地质环境问题。

1.2.2 土壤植被调查。采用剖面法调查测定周边原生土壤的物理和化学性; 采用样方法调查分析周边植被类型及其结构组成。

1.2.3 水土体重金属污染测试分析。选择典型地段取样测试水土体铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铁(Fe)重金属污染状况和 pH。

1.2.4 检索国内外重金属污染植物修复技术。针对矿区水土体重金属污染状况, 检索并分析国内外有关重金属污染植物修复的技术现状, 分析影响边坡绿化限制因子。

1.2.5 废弃矿山稳定性综合治理设计。根据气象水文、地形地貌、地层岩性、地质构造和矿山不良地质环境问题, 设计庆元县废弃铅锌矿稳定性治理技术。

1.2.6 废弃矿山生态修复及绿化提升技术设计。调查以往植被修复情况, 分析失败原因, 研究设计生态修复绿化提升技术。

1.3 矿区原生土壤理化性质 由表 1 可知, 矿区原生土壤 pH 为 4.66~4.75, 平均为 4.71, 为酸性土, 而浙江省公益林 pH 平均为 5.10。矿区土壤吸湿水为 2.12%~3.43%, 平均为 2.57%, 有一定的持水能力; 土壤有机质为 19.32 g/kg, 低于浙江省公益林 29.19 g/kg 的平均值, 即有机质含量偏低; 全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾的平均值分别为 0.930 g/kg、0.062 g/kg、101.45 mg/kg、1.61 mg/kg、65.66 mg/kg, 接近于浙江省公益林平均值^[14], 说明肥力一般。

1.4 矿区原生土体重金属污染状况 矿区原生土体重金属测定结果如下: Pb 1313.4 mg/kg、Zn 490.8 mg/kg、Cd

作者简介 夏明强(1971—), 男, 青海西宁人, 高级工程师, 从事资源勘查、矿山生态修复研究。

收稿日期 2019-12-03

0.009 mg/kg、Cr 20.5 mg/kg、Cu 103.7 mg/kg、Fe 824.1 mg/g。

表 1 矿区原生土壤主要理化性质

项目 Project	全氮 Total nitrogen g/kg	全磷 Total phosphorus g/kg	速效氮 Available nitrogen mg/kg	速效磷 Available phosphorus mg/kg	速效钾 Available potassium mg/kg	有机质 Organic matter g/kg	pH	吸湿水 Hygroscopic water %
矿区 Mining area	0.93	0.062	101.45	1.61	65.66	19.32	4.71	2.57
浙江省公益林 Public welfare forest in Zhejiang Province	1.07	0.082	113.01	1.37	68.03	29.19	5.10	2.63

根据矿区原生土样的测定结果表明,除 Ni 未检出外,其他均检测到不同程度的含量。与国家土壤环境质量标准 GB15618—1995 比较,Fe 含量没有列入限值,Cd 和 Cr 含量均在国家一级限值内,Cu 含量在国家二级限值内,Zn 含量刚好处在三级限值内,Pb 含量远远超过国家三级限值,是国家 Pb 含量三级限值的 2 倍以上,说明矿区内原生土壤已存在极高的 Pb 污染和较高的 Zn 污染。

2 研究方法

矿山于 2006 年结合稳定性治理进行全面绿化,对采坑边坡进行复绿,在采坑回填区种植胸径为 3~4 cm 的乔木树种和冠幅为 40~50 cm 的灌木树种,在挡坝前排水沟两侧种植高大松树,堆碴边坡按 2 m 间距种植胸径为 3~4 cm 的乔木树种和冠幅为 40~50 cm 的灌木树种,包括黑松、夹竹桃等,并撒播草籽复绿。但由于技术方法和立地条件及树种选择等各种原因,直至 2017 年矿区的生态环境仍然十分脆弱,种植的乔灌木几乎全部死亡,废弃的堆碴边坡草木难生。2018 年,针对矿区地质环境和立地条件,专门进行了绿化提升设计研究。

2.1 采坑北侧边坡 坡面绿化采用厚层基材喷播+植生袋围堰造坑植树+顺坡沟种植+容器苗种植绿化方法。主要技术工序包括清坡顺坡和围堰造坑、厚层基材喷播、围堰坑种植和坡面容器苗种植等技术内容,播附厚度≥15 cm。

2.1.1 基质配比。喷播基质由泥炭、种植土、草纤维、砗糠、复合肥、黏结剂和保水剂按一定比例配制,各基质材料的配比如表 2。其种植土需要过筛,筛除粒径≥2 cm 的土粒和石砾。同时在基质中添加 1 kg 周边山体 A 层表土,以掺合自然植被的种子。

表 2 植生基质配比

序号 No.	基质材料 Matrix material	配比 Proportion
1	泥炭	16 kg
2	种植土	80 kg
3	周边山体 A 层表土	1 kg
4	草纤维	3 kg
5	砗糠	1 kg
6	复合肥	60 g
7	黏结剂	8 g
8	保水剂	12 g

2.1.2 喷播植物种子配比。喷播植物种子采用木本和草本

植物种子混合方式。其中木本植物种子选用美丽胡枝子、马棘、伞房决明、臭椿、盐肤木,草本植物种子选用狗牙根、高羊茅、紫花苜蓿、金鸡菊。各种种子材料配比如表 3。

表 3 植物种子配比

Table 3 Proportion of plant seed		g/m ²	
习性 Habit	植物名称 Plant name	配比 Proportion	小计 Subtotal
木本植物 Woody plant	美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>	6.0	21.0
	马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	4.5	
	伞房决明 <i>Cassia corymbosa</i>	4.5	
	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	3.0	
	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	3.0	
草本植物 Herbaceous plant	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	4.5	15.0
	高羊茅 <i>Festuca arundinaces</i>	4.5	
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	3.0	
	金鸡菊 <i>Coreopsis drummondii</i>	3.0	
合计 Total			36.0

2.1.3 植生袋围堰造坑。充分利用坡面上的局部小平台,采用装有种植土的绿色编织植生土袋围堰造坑,每坑围堰植生土袋不少于 15 袋。围堰后及时用具有 10% 体积比以上商品有机肥种植土进行客土回填至平顺(图 1)。

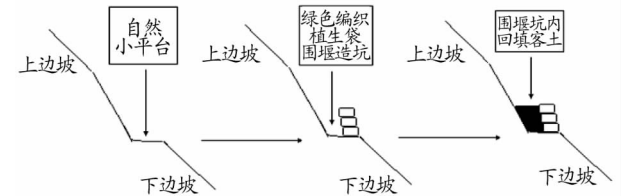


图 1 局部小平台植生袋围堰造坑回填客土示意

Fig.1 Backfilling with soil for planting sack cofferdam on a local small platform

2.1.4 围堰坑种植和坡面容器苗种植。当喷播植物苗高 3~4 cm 时,拆除遮阳网,并在围堰坑内种植高 1.2~1.5 m 带缩土的全冠型女贞,再按左右水平距 2.0 m、上下坡面距 2.5 m 的株行距种植苗高 40~45 cm 的红叶石楠容器苗。

2.2 采坑南侧边坡 为保留采坑遗址,在边坡上部和边坡下部,分别采用穴播灌木种和种子袋埋置 2 种方式进行边坡绿化。

2.2.1 边坡上部。在上部强风化边坡 3 152 m² 面积的区域采用美丽胡枝子点播绿化方法进行边坡绿化。在边坡面上,按左右间距 1.0 m、上下间距 1.2 m 的穴间距,挖穴点播美丽胡枝子种子,穴直径 10 cm、深 5 cm,每穴置放 6~8 粒种子,

拌合 50 g 钙镁磷肥,播后及时覆盖客土。

2.2.2 边坡下部。在下部中风化岩面 2 707 m² 面积边坡区域,采用厚美丽胡枝子种子袋埋置绿化方法。在边坡面上,利用局部小凹坑、节理面和破碎面,用可降解的无纺布制作高 8 cm、直径 6 cm 种子袋,袋内充填泥炭土和 50 g 钙镁磷肥并在袋口下 3 cm 处置放 10 粒左右的美丽胡枝子种子,按每 1.5 m²/袋原则埋置边坡面凹陷面或节理面上,用长 12~15 cm 的水泥钉将种子袋固定在工作面上(图 2),共计种子袋1 805袋。

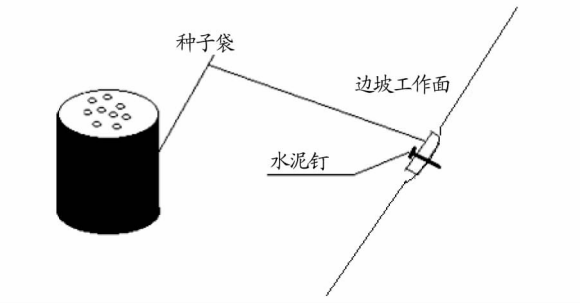


图 2 美丽胡枝子种子袋在边坡面上绿化示意
Fig.2 Greening of *L. formosa* seed bag on side slope

2.3 东侧和西侧堆碴边坡 采用开凿小平台植生袋围堰造坑种植+厚层基材喷播+容器苗种植绿化方法。

首先,在平台上按间距 2 m 开挖长 1 m、宽 1 m、深 60 cm 的定植穴。穴内按泥炭 10%:种植土80%:商品有机肥10%比例配制的功能客土回填至平顺,并插上小竹标签作标识。

然后,在坡面上按左右间距 2.0 m、上下斜面间距 2.5 m 开挖种植小平台(相当于每个台阶坡面上开挖 3 行)。小平台宽 1 m、底盘 60 cm 呈座坑形。并在外缘叠置高 40 cm 的植生袋围堰种植坑。植生袋用绿色编织物制作,袋内装入具有 10%以上商品有机肥的种植土。坑内按泥炭 10%:种植土 80%:商品有机肥10%比例配制的功能客土回填(图 3),共计围堰造坑 800 穴。

再后,包括平台,全坡面进行厚层基材喷播,喷播厚度 12 cm 以上,基质配比同表 2,种子配比如表 3。

最后,当喷播植物苗高 3~4 cm 时,及时去除遮阳网,在围堰的种植坑内剪除网片。其中东侧堆碴边坡在围堰坑内:从台阶至下边坡,自上而下分别带缩土种植木荷、女贞、小蜡、红叶石楠,其中木荷高 1.5~1.6 m,全冠开放型;女贞高 1.5~1.6 m,全冠开放型;小蜡高 1.0~1.2 m,蓬径 0.8~1.2 m,全冠开放型;红叶石楠高 1.5~1.6 m,全冠开放型(图 4)。在西侧堆碴边坡围堰种植高 1.2~1.5 m 带缩土的全冠型女贞。同时在边坡面上按左右水平距 2.0 m、上下坡面距 2.5 m 的株行距种植苗高 40~45 cm 的红叶石楠容器苗。

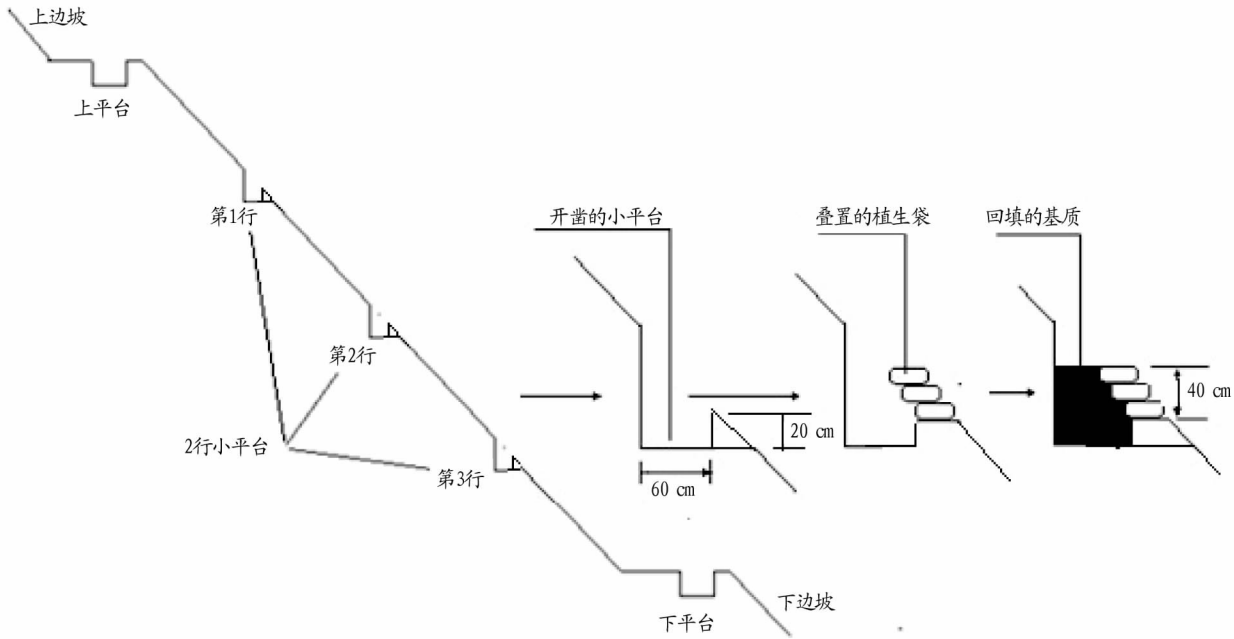


图 3 开凿小平台、植生袋围堰至回填功能客土示意
Fig.3 Excavating small platform,planting bag cofferdam and backfilling functional guest soil

2.4 478 平硐口堆碴边坡 在坡面,采用开凿小平台植生袋围堰造坑种植+开凿条带小平台埋置植生袋种植类芦+厚层基材喷播+容器苗种植绿化方法。在坡脚,在挡墙内侧采用回填种植土种植绿化。

2.4.1 坡面绿化。坡面采用开凿小平台植生袋围堰造坑种植+开凿条带小平台植生袋找平种植类芦+厚层基材喷播+容器苗种植绿化方法。技术工序包括开凿平台、厚层基材喷

播、绿化苗木种植。

2.4.1.1 开凿平台。在坡面上开凿小平台植生袋围堰造坑。自上而下按左右水平距离 2.0 m、上下水平距离 2.0 m 的密度开挖宽 1 m、底盘 60 cm 呈座坑形的小平台,并在外缘叠置高 40 cm 的植生袋围堰种植坑。植生袋用绿色编织物制作,袋内装入具有 10%以上商品有机肥的种植土。坑内按泥炭 10%:种植土 80%:商品有机肥10%比例配制的功能客土回

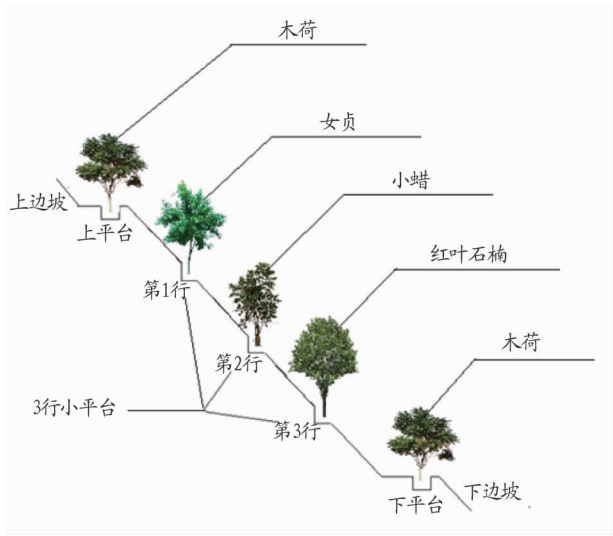


图 4 东侧堆碴边坡挖定植穴围堰造坑种植树种配置
Fig.4 Allocation of planting trees and cofferdams for digging and planting holes on the east side of the pile-up slope

填(图 5)。

2.4.1.2 开凿条带小平台植生袋找平。自上而下,横向,在植生袋围堰坑之间,纵向按垂直距离 1 m 之间,开凿宽 30 cm 的条带式平台(图 6)。在开凿的 30 cm 条带平台上用装有具 10%以上商品有机肥种植土的绿色编织物袋找平。计条带平台总长度(17 条×40 m)680 m。

2.4.1.3 厚层基材喷播。全坡面进行厚层基材喷播。喷附厚度 ≥ 15 cm,基质配比同表 2,种子配比如表 3。

2.4.1.4 种植绿化苗木。当喷播植物苗高 3~4 cm 时,及时揭除遮阳网,进行绿化苗木种植。在围堰坑内,种植高 1.5~1.6 m、地径 >2.0 cm 的全冠型女贞。在条带植生袋上,按株距 1 m 种植类芦。类芦为丛植,一丛 5~6 个植株,离基 30 cm 处截干种植。在边坡面上按左右水平距 2.0 m、上下坡面距 2.5 m 的株行距种植苗高 40~45 cm 的红叶石楠容器苗。

2.4.2 坡脚绿化。在坡脚挡墙内侧回填具 10%以上商品有机肥的有机种植土至离挡墙顶 30 cm 高处,并按 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 斜坡进行顺坡回填,回填至坡面宽度 4.5 m 左右。回填有机客土量计 540 t。自内向外(挡墙)分别种植小叶青冈、山樱花、茶花、紫藤和常春油麻藤(图 7)。小叶青冈高 3.0~3.5 m、胸径 >4.0 cm,山樱花高 2.5~3.0 m、胸径 3.0~3.5 cm,茶花高 1.5~1.8 m、蓬径 1.2~1.5 m,紫藤和常春油麻藤为 3 年生苗。小叶青冈株间距 2.5 m、山樱花株间距 2.5 m、茶花株间距 2.5 m,交叉种植。紫藤和常春油麻藤相间种植,株间距 1.0 m。

3 研究结果

研究表明,庆元县废弃铅锌矿区的不良地质环境问题主要是露天采场边坡崩塌,以及裸露边坡和堆碴边坡造成的植被破坏,地下采空区存在地面塌陷隐患,大量堆碴场及其边坡可能引起的泥石流危害,原生常绿阔叶林植被已被破坏殆尽,并且水土体重金属污染非常严重,特别是堆碴边坡,Pb、Zn、Cd 含量分别是国家三级限值的 20.03 倍、11.60 倍和 72.91 倍,坡面植物易遭重金属的毒害,草木难生,矿区生态

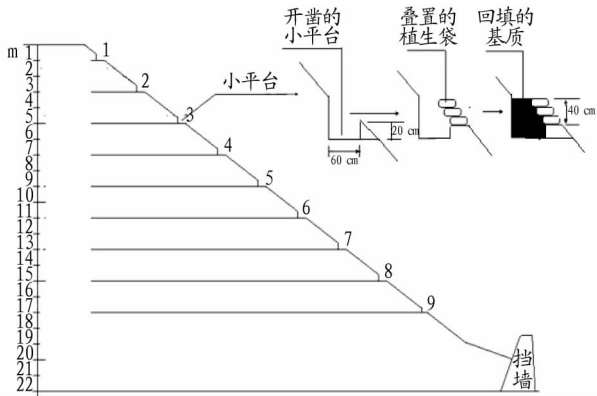


图 5 478 平硐口堆碴边坡开凿小平台、植生袋围堰至回填客土示意
Fig.5 Excavating small platform, planting bag cofferdam and backfilling guest soil on the 478 Pingdongkou piled slope

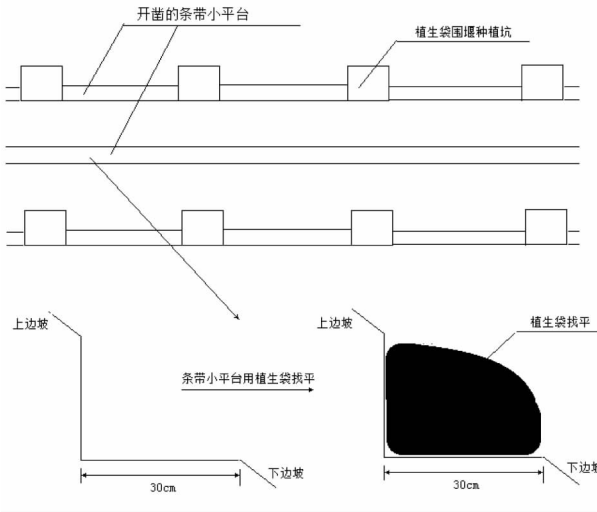


图 6 开凿条带小平台埋置植生袋找平示意
Fig.6 Slicing the planting bag with a small platform

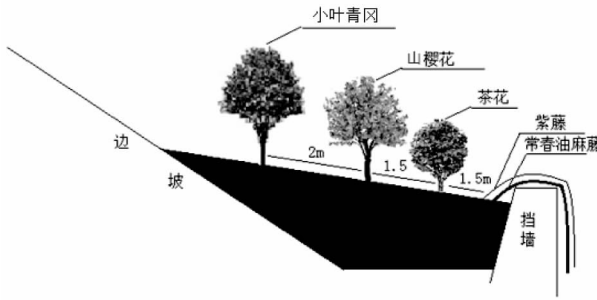


图 7 478 平硐口堆碴边坡脚绿化树种配置(侧面)
Fig.7 Configuration of greening tree species at the foot of the 478 Pingdongkou piled slope (profile)

环境十分脆弱。

根据工程勘查,针对矿山不良地质环境问题,设计采用削坡、填方、挡墙、挡坝、截排水沟等技术措施进行废弃铅锌矿山的稳定性综合治理。根据矿山边坡类型和立地环境条件及水土体重金属污染状况,设计主体采用挖定植穴植生袋围堰造坑回填功能性客土+厚层基材喷播绿化+种植女贞和红叶石楠及点播美丽胡枝子或种子袋埋置等乔灌木绿化技

术工艺,使受损的并且重金属污染严重的山体坡达到森林化生态修复的目的。

项目于 2006 年 10 月实施,重点进行废弃铅锌矿山的稳定性治理,矿山绿化也曾同时全面展开,至今矿山稳定,无崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害发生,修筑的截排水沟和砌筑

的挡坝完好有效,但植被仍然得不到有效修复,因此,于 2017 年重点进行绿化提升专项行动,并以城郊型森林公园的建设目标进行生态修复,项目自 2018 年 10 月开始按设计施工,目前已基本完工,昔日满目疮痍的废弃矿区已成为庆元县城郊森林公园的雏形(图 8)。

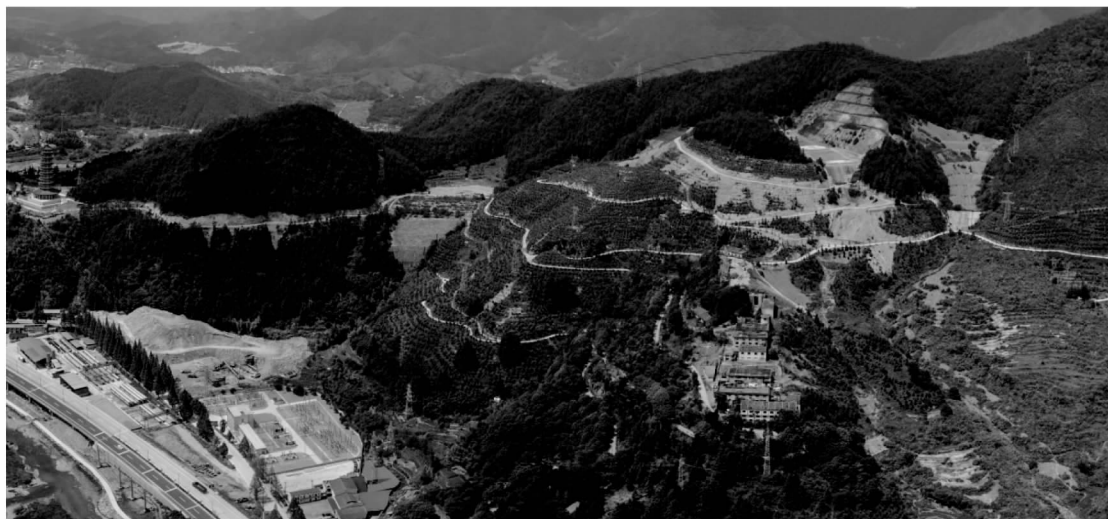


图 8 庆元废弃铅锌矿山(红线内)绿化生态修复提升改造森林公园雏形

Fig.8 The greening of the Qingyuan abandoned lead-zinc mine (inside the red line) for ecological restoration and upgrading

4 结论

对于废弃矿井大量土地被破坏和长期荒废的现状,应根据具体条件,因地制宜地选择确定生态修复方法。该研究结合生态修复进行废弃矿井综合治理,在消除地质灾害隐患基础上将废弃铅锌矿山打造提升成城郊型森林公园,特别是重金属污染区域的植物修复技术为我国废弃铅锌矿山综合治理创立了一种示范模式,值得同类研究推广与应用。

参考文献

- [1] 陈丽,黎良财,王昆,等.基于 TM 影像的泗顶铅锌矿区森林景观动态分析[J].广东农业科学,2012(9):144-147.
- [2] 何绪文,王宇翔,房增强,等.铅锌矿区土壤重金属污染特征及污染风险评价[J].环境工程技术学报,2016,6(5):476-483.
- [3] 姚柏华,唐名富,周洁军,等.广西某铅锌矿区水文地质及地下水重金属污染途径分析[J].矿产与地质,2015,29(1):110-113.
- [4] 杨立辉,柯钊跃,谢志宜,等.广东某铅锌矿周边地区大气颗粒物重金属水平及人群暴露风险评价[J].中国环境监测,2015,31(4):48-53.

- [5] 熊万胜.凡口铅锌矿地质环境综合治理方法[J].现代矿业,2014(12):145-146,151.
- [6] 王志国.庆元县铅锌矿“废弃”矿山地质环境综合治理方法初探[J].中国水运,2012,12(Z1):36-38.
- [7] 郑绍金,蒋林,滕维超,等.刨花润楠对硝酸铅胁迫的生长和生理响应机制[J].林业科技开发,2015,29(3):25-30.
- [8] 胡仲义,李修鹏.铅胁迫对全缘冬青幼苗生长与生理的影响[J].浙江林业科技,2008,28(1):19-22.
- [9] 吴若菁,庄捷,陈清松,等.铅胁迫下马尾松微核率与生理指标变化的相关分析[J].林业科学,2010,46(8):78-83.
- [10] 姜永刚,彭涛.铅锌工业喜中有忧[J].中国有色金属,2014(9):75-77.
- [11] 王妙媛,李达,于晓英.铅胁迫对红花檵木生理特性的影响[J].安徽农业科学,2011,39(15):8938-8939.
- [12] 吴际友,王旭军,程勇,等.铅胁迫对 4 种苗木叶片过氧化物酶和超氧化物歧化酶的影响[J].中国城市林业,2011,9(5):9-12,16.
- [13] 杨晋.土壤铅胁迫对核桃幼苗生长的影响[J].绿色科技,2015(2):73-75.
- [14] 葛永金,袁位高,江波,等.浙江省生态公益林土壤理化性质的初步研究[J].江西农业大学学报,2006,28(6):828-832.

(上接第 206 页)

其结果进行对比分析。结果表明:ArcGIS 方法与传统方法相比,ArcGIS 方法精度高、简单易行、快速方便,可以三维可视化,真实地反映地形信息,形象逼真;ArcGIS 方法可以将空间数据与属性数据有机地结合起来,能更加有效处理数据,提高信息化和自动化水平。因此,ArcGIS 方法在工程建设和城市规划等领域有更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 刘美娥,乐晶,夏昆,等.土地整治项目土方工程量计算方法研究[J].广东土地科学,2011,10(5):33-39.
- [2] 吴清海.基于 CASS 的土方量计算精度分析[J].工程勘察,2017(2):61-63.

- [3] 陈朝霞,吴向南,朱记伟,等.基于 ArcGIS 的土地开发整理挖填土方量计算研究及应用[J].测绘与空间地理信息,2015,38(2):63-65,68.
- [4] 刘天成,史常青.基于 ArcGIS 的土地整治项目土方量计算方法研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,3(9):16-19.
- [5] 赵瑞.利用 ArcGIS 进行土地平整土方量计算的应用[J].安徽农业科学,2018,46(33):170-171,192.
- [6] 李春梅,景海涛.基于 ArcGIS 的土方量计算及可视化[J].测绘科学,2010,35(2):186-187,116.
- [7] 陈勇.利用 ArcGIS 地统计分析进行土地平整土方量计算的研究[J].安徽农业科学,2007,35(1):70-71,103.
- [8] 潘红飞,赵翠薇.基于 TIN 模型较高精度土方量计算方法[J].价值工程,2012(5):63-65.
- [9] 杨仲吕,李亮,向虹宇.基于 ArcGIS 的场平工程土方量计算及可视化[J].安徽建筑大学学报,2017,25(5):16-20.
- [10] 王晨旭,胡引翠,王崇倡,等.基于 TIN 的露天矿区地形精细模型构建研究[J].金属矿山,2019(9):147-153.