

不同植被配置模式对福建紫金山金铜矿 废弃地土壤质量的恢复效果

侯晓龙¹, 庄 凯², 刘爱琴^{1*}, 蔡丽平¹

(1.福建农林大学林学院, 福州 350002; 2.福州市环境保护宣教处, 福州 350003)

摘 要:为了了解植物治理措施对福建紫金山金铜矿矿山废弃地土壤质量的恢复效果,设置不同植被治理模式:马尾松+胡枝子(模式 A)、马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)、马尾松+本地河滩草(模式 C)、枫香+本地河滩草(模式 D)、桉树+本地河滩草(模式 E)和马尾松+桉树+本地河滩草(模式 F),同时设置矿区周边未经开采的对照样地,通过对不同配置模式下土壤理化性质的分析测定,比较其对矿山废弃地土壤质量恢复效果的差异。结果表明:恢复 5 a 后,不同植被配置模式土壤理化性质均有较大改善,除模式 B 和模式 C 外,其他模式土壤含水率均超过了对照,模式 A、模式 D、模式 E 和模式 F 分别达到对照的 1.99、1.78、1.34 倍和 1.66 倍;模式 B、模式 C 和模式 F 可较快改善土壤团聚体结构,提高土壤抗蚀性;模式 D 可较快提高土壤各养分含量,有利于土壤营养状况的改善,恢复 5 a 后全 N、水解 N、全 P 和速效 K 分别为对照的 54.98%、78.17%、63.18%和 85.19%;模式 F 对土壤重金属 Pb、Cd、Cr、Ni、Zn、Mn 和 Cu 均有较好的修复效果;在植被配置模式中加入本地河滩草,可较大提高废弃地土壤的抗蚀能力。结合聚类分析结果可以得出,马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)、枫香+本地河滩草(模式 D)和马尾松+桉树+本地河滩草(模式 F)3 种模式较适合应用于紫金山矿山废弃地的植被恢复。

关键词:福建;矿山废弃地;植被配置模式;土壤性质;重金属;恢复效果

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)08-1505-07

Restoration of Soil Quality After Mixed-species Planting on Mining Wasteland at Zijinshan Gold-Copper Mine, Fujian Province, China

HOU Xiao-long¹, ZHUANG Kai², LIU Ai-qin^{1*}, CAI Li-ping¹

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2.Office for Environmental Education & Communications of Environmental Protection of Fuzhou, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: The aim of this study is to examine the recovery of soil physico-chemical properties on a mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine in Fujian Province, China, planted with a set of mixed species. The sets of mixed-species planted were *Pinus massoniana* + *Lespedeza bicolor* (mixture A), *P. massoniana* + *L. bicolor* + *Vetiveria zizanioides* (mixture B), *P. massoniana* + local flood turf (mixture C), *Liquidambar formosana* + local flood turf (mixture D), *Eucalyptus robusta* + local flood turf (mixture E), and *P. massoniana* + *E. robusta* + local flood turf (mixture F), and the undisturbed vegetation close to the mining area served as control. After five years, soil moisture content, aggregate structure, nutrient and heavy metal contents and soil erosion were measured. The result showed that the soil moisture content were 1.99, 1.78, 1.34 times and 1.66 times higher on mining wastelands planted with mixtures A, D, E and F, respectively than the control; while no significant difference was observed between the control and planting mixtures B and C. The soil water stability aggregate were better on mining wasteland planted with mixtures B, C and F than others, which in turn increased resistance to soil erosion. Planting mixture D resulted in significantly higher soil nutrient content of the mining wasteland than other mixtures; total N, hydrolysable N, total P and available K contents were 54.98%, 78.17%, 63.18% and 85.19% of the control, respectively. Soil Pb, Cd, Cr, Ni, Zn, Mn and Cu contents were lower in mixture F than other mixtures. It can be concluded that planting a mixture of *P. massoniana*, *L. bicolor*, *V. zizanioides* (mixture B), a mixture of *L. formosana*, local flood turf (mixture D) and a mixture of *P. massoniana*, *E. robusta*, local flood turf (mixture F) are desirable to readily restore soil physical and chemical properties on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine.

Keywords: Fujian; mining wasteland; mixed-species; soil properties; heavy metal; restoration

收稿日期:2012-02-02

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201111020-2);福建省自然科学基金项目(2012J01072)

作者简介:侯晓龙(1981—),男,山西永济人,博士研究生,讲师,主要从事土壤侵蚀及生态修复研究。E-mail:lxylxyl@126.com

* 通讯作者:刘爱琴 E-mail:fjlaq@126.com

矿产资源是社会发展的支柱,是国家经济发展的物资基础,但矿产资源开发也是迄今为止最大规模破坏地表生态系统的人类活动^[1-2]。由于长期对矿产资源重利润轻保护的掠夺式开采,引发了诸如土壤流失、空气和水的污染、地质环境灾害、生物多样性丧失等诸多问题。矿山废弃地的生态恢复已成为世界各国迫切需要解决的环境问题^[3-4]。

自然生态系统的恢复与重建均是以植被恢复为前提的^[5-7],植被恢复不仅起着构建退化生态系统初始植被群落的作用,还能促进土壤结构、肥力、微生物和动物的恢复,从而加快整个生态系统结构与功能的恢复与重建^[8]。大量研究表明,植物治理措施可以快速恢复土壤性质,Reid等^[9]对冻土区金伯利岩尾矿的植被恢复研究表明,采取植物措施后尾矿土壤的理化特性均得到不同程度的提高。Harris等^[10]认为,在废弃地植被恢复中种植豆科植物可为废弃地提供大量的土壤有机物质,有效地增加土壤中N素的累积。印度学者的研究也证实豆科的固氮落叶树种能相对较快增加矿山废弃地土壤中的N素^[11-12]。李冰等^[13]研究稀土矿废弃地土壤环境质量发现,经过香根草(*Vetiveria zizanioides*)群落恢复并与其他植物群落演替发展后,土壤有机质含量达到原生态环境下的62.5%。

福建紫金山金铜矿是中国著名的金矿,多年来对矿产资源的大量开采给当地生态环境造成了极大破坏。有关学者对紫金山金铜矿废弃地治理进行了大量研究,并采取了一系列不同的措施进行治理^[14-18],但因缺少不同治理措施对废弃地土壤质量的恢复效果研究,限制了其推广应用。鉴于此,本文通过对紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式土壤含水率、团聚体组成、养分含量、重金属污染及水土流失状况等进行调查分析,研究不同植物治理措施对矿山废弃地土壤理化性质的恢复效果及其规律,从中筛选出可快速改善废弃地土壤质量的植被恢复模式,研究结果可为金属矿山废弃地的生态恢复提供科学依据。

1 研究地概况

紫金山金铜矿地处东经116°24'~116°25',北纬25°10'~25°12',位于福建省上杭县境内,地貌属武夷山南段东坡玳瑁山延伸的低山丘陵地带,地势较为陡峭,坡度30°~40°,海拔220~700 m。年平均气温19.9℃,极端最高气温38.1℃,极端最低气温-7℃,年日照2043 h,年降水量1604 mm,无霜期285 d。矿山废弃地主要是由金矿渣堆积而成的,主体为各种已矿化

及氧化的中、细粒花岗岩,矿渣结构松散,强度低,含砂石多,土粒所占比例极少,土壤贫瘠,持水、抗软化及抗剪切能力差,透水能力强。

2 研究方法

2.1 植被配置模式设置

在2003年对紫金山金矿废弃地边坡采取一系列工程稳固措施后进行植被治理。恢复植物种类选择本地耐旱、耐寒、耐贫瘠、抗风性强的植物,其中本地河滩草的主要草种有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、小蓬草(*Conyza canadensis*)、藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)、胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)。乔灌木选择马尾松(*Pinus massoniana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、桉树(*Eucalyptus robusta*)。不同植被配置模式样地设置在紫金山金铜矿“一选厂”和“风车斗”废弃地的阳坡上,坡度和坡位基本保持一致(坡度15°~25°,海拔645~700 m),植被配置模式见表1。虽然本地河滩草中已有少量的香根草,为进一步验证香根草对废弃地的恢复效果,在模式B植被配种中增加了香根草。为了比较不同植被配置模式对矿山废弃地的恢复效果,在矿区周边选择有代表性的自然植被地段设置未经开采的对照样地(CK)。在2008年对土壤质量恢复效果进行调查。

表1 紫金山金铜矿废弃地植被恢复模式

Table 1 Mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine

配置模式	位置
模式A:马尾松+胡枝子	一选厂
模式B:马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草	一选厂
模式C:马尾松+本地河滩草	一选厂
模式D:枫香+本地河滩草	风车斗
模式E:桉树+本地河滩草	风车斗
模式F:马尾松+桉树+本地河滩草	风车斗

注:一选厂、风车斗为紫金山金铜矿区的地名。

2.2 土壤样品采集及测定方法

2.2.1 土壤样品的采集和处理

在每种植被配置模式样地内设3个10 m×10 m的样方,在样方内用梅花形法,用容重圈及铝盒采集0~10 cm的原状土,用于土壤含水率及水稳性团聚体组成测定;采集0~10 cm表层土壤,每个样方5个点共采集1 kg土壤样品,首先将土壤样品自然风干除去植物残体及砂砾等杂物,然后用瓷研钵研磨分别过

20目及100目尼龙筛,用于土壤养分、pH和重金属含量的测定。

2.2.2 土壤样品的测定

土壤含水率采用烘干法测定;水稳性团聚体组成采用干湿筛法测定^[9];pH值采用电位法测定;全磷采用碱熔-钼锑抗比色法测定;全钾采用碱熔-火焰光度法测定;全氮采用半微量凯氏法测定;速效磷采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;水解氮采用碱解-扩散法测定;有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[10];重金属采用 HNO_3 -HF-HClO₄法^[20]消煮,然后用北京瑞利分析仪器公司的原子吸收分光光度计(WFX-136)测定Cu、Pb、Zn、Mn、Cd、Cr和Ni的含量。

2.2.3 土壤侵蚀量的测定

采用侵蚀沟法^[21]调查不同恢复阶段样地水土流失情况,用皮尺在坡的上、中、下分别横向拉线,逐一测量皮尺经过的侵蚀沟的深度和宽度,并测量各侵蚀沟的长度,用下式计算单位面积的坡面流失量。分别于2007年8月和2008年8月进行调查,两次调查结果之差为各样地的水土流失状况。

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{1}{6} \times (a_{i上} h_{i上} + a_{i中} h_{i中} + a_{i下} h_{i下}) \times l_i$$

式中: a 代表侵蚀沟的宽度; h 代表侵蚀沟的深度; l 代表侵蚀沟的长度; i 代表侵蚀沟的序号; n 代表侵蚀沟的个数。

2.3 数据统计分析

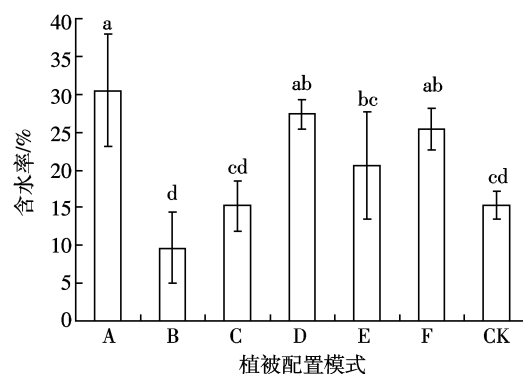
数据用DPS V9.5和Excel软件进行统计分析,采用单因素方差分析比较不同配置模式之间土壤质量的差异显著性($P < 0.05$),数值为平均值 $\pm$ 标准差。

3 结果与讨论

3.1 不同植被配置模式土壤含水率比较

水分是植物生长所必需的,而植被覆盖及其根系对水分的吸收对土壤水分含量具有很大的影响。由图1可知,紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式土壤含水率存在一定差异,恢复5a后,模式A、模式D、模式E和模式F土壤含水率均超过了对照,分别为对照的1.99、1.78、1.34倍和1.66倍,其中模式A土壤含水率最大,达到了30.45%,模式A、模式D和模式F显著高于对照($P < 0.05$),原因是马尾松、枫香等乔木树种根系具有较好的固土保水作用,从而提高了土壤含水率。但模式B土壤含水率最低,仅为9.66%,原因可能与其配置模式中增加了香根草,从而消耗了较

多土壤表层水分有关。一些研究也表明土壤含水量是香根草返青后生长的主要限制因子^[22],矿山废弃地恢复初期土壤含水率较低,且保水能力较差。因此,在矿山废弃生态恢复过程中植被配置模式的选择应根据立地条件慎重选择。



不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式土壤含水率
Figure 1 Soil moisture contents of different mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine

3.2 不同植被配置模式土壤水稳性团聚体比较

土壤团聚体大小分布和稳定性是土壤物理性质的主要指标,水稳性团聚体能够改善土壤结构,具有较高的稳定性,含量越高土壤的抗蚀能力越强。因此众多学者把水稳性团聚体的含量作为评价土壤可蚀性的重要标准^[23]。

由表2可知,紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式土壤水稳性团聚体存在一定差异。 >5 mm水稳性团聚体含量,除模式D和模式E小于对照外,其他均大于对照,其中模式A最大,达到了17.70%,且显著高于模式D和模式E($P < 0.05$); $2\sim 5$ mm水稳性团聚体含量,除模式F(19.20%)大于对照外,其他均小于对照; $1\sim 2$ mm和 $0.5\sim 1$ mm水稳性团聚体含量,各配置模式均小于对照; $0.25\sim 0.5$ mm水稳性团聚体含量,除模式A和模式D小于对照外,其他均大于对照,其中模式B最大,达到了8.30%;各配置模式 > 0.25 mm水稳性团聚体含量均小于对照,其中模式B和模式F显著高于模式A、模式D和模式E($P < 0.05$),表现为模式F $>$ 模式B $>$ 模式C $>$ 模式A $>$ 模式E $>$ 模式D;

结构破坏率,模式B和模式F小于对照,模式D和模式E显著大于对照($P < 0.05$),表现为模式D $>$ 模式E $>$ 模式A $>$ 模式C $>$ 模式F $>$ 模式B。

从以上分析可得出,模式B、模式C和模式F土壤水稳性团聚恢复效果较好,这3种模式中均配置有

马尾松和本地河滩草,说明马尾松和本地河滩草可以较快改善土壤团聚组成,提高抗蚀能力。

3.3 不同植被配置模式土壤养分比较

许多研究表明强酸碱度、土壤理化性质差为限制矿山废弃地恢复的主要因子,尾矿废弃地中几乎没有植物可利用的养分^[24-25]。由表3可知,紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式土壤及对照pH均较低,这可能是限制其植被恢复的重要因素;不同植被配置模式土壤养分含量均较低,除各模式速效P含量和模式B全K含量高于对照外,其他养分含量均低于对照。全N、水解N、全P和速效K均为模式D最高,分别为对照的54.98%、78.17%、63.18%和85.19%;模式F速效P含量最高,达到对照的7.06倍;模式B全K含量最高,为对照的1.02倍;模式C、模式D和模式E全N和水解N含量,模式A、模式D和模式F速效P含量及各配置模式全P和全K含量均大于土壤养分缺乏指标的上限值。有机质含量模式C最大,为对照的45.97%,除模式B外,其他模式均超过土壤养分缺乏指标。从以上分析可得出模式D(枫香+本地河滩草)的各养分含量均较高,说明在矿山废弃地治理中配置

落叶阔叶树种,有利于较快改善土壤养分状况。有关研究表明枫香适应性较强,其落叶量大、分解快、养分含量高,是良好的改土培肥树种^[26]。因此,枫香较适合在矿山废弃植被恢复中应用。

3.4 不同植被配置模式土壤重金属污染比较

由表4可知,与对照相比,模式B土壤Cu全量,模式A、模式C、模式D和模式E土壤Zn全量,各模式土壤Mn全量,模式C、模式D和模式E土壤Cd全量,模式B、模式D和模式E土壤Cr全量,模式A、模式B、模式C、模式D和模式E土壤Ni全量均大于对照。模式A和模式E的土壤Mn全量分别达到对照17.28倍和17.02倍;模式B土壤Cr和Ni全量均最大,分别为对照的2.28倍和4.78倍。

与国家土壤质量三级标准相比,除模式A、模式B、模式C、模式D和模式E土壤Cd全量超标外,各模式其他重金属全量均未超标。与福建省土壤质量背景值相比,各模式土壤Cu、Pb和Cd全量均超标,Cr全量均未超标;除模式A、模式B和模式F土壤Zn全量未超标外,其他模式均超标;模式A、模式D和模式E土壤Mn全量超标,分别达到背景值的2.37、

表2 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式土壤团聚体组成

Table 2 Soil aggregate structure of different mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine

模式	水稳性团聚体组成/%						结构破坏率/%
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	>0.25 mm	
A	17.70±4.10a	12.10±5.80ab	5.50±2.69d	9.00±4.81d	4.30±1.23a	48.60±9.05bc	32.65±18.14bc
B	12.00±2.82ab	11.30±0.71ab	19.50±1.27a	14.6±0.85ab	8.30±0.99a	65.70±4.67a	12.68±2.92c
C	13.07±5.49ab	13.40±2.12ab	16.00±1.11ab	13.93±3.64bc	5.87±1.88a	62.27±3.51ab	29.72±6.77bc
D	6.20±3.30b	9.00±4.85b	10.13±3.32cd	9.20±1.64cd	4.73±2.23a	39.27±10.52c	58.75±10.58a
E	7.00±3.64 b	10.60±4.80b	11.93±5.51bc	10.93±1.89bcd	6.53±0.50a	47.00±14.84bc	46.92±16.62ab
F	14.00±3.80ab	19.20±1.83a	18.67±2.54a	13.93±0.99bc	6.00±2.64a	71.80±4.33a	17.45±4.50c
CK	11.93±5.28ab	15.33±4.97ab	20.33±1.22a	19.73±3.19a	5.40±1.16a	72.73±11.55a	22.02±2.74c

注:结构破坏率=(>0.25 mm团聚体干筛含量->0.25 mm团聚体湿筛含量)/>0.25 mm团聚体干筛含量×100%。表中同一列数据后面出现相同小写字母者表示在P=0.05水平上差异不显著。下同。

表3 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式土壤养分含量

Table 3 Soil nutrition of different mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine

模式	pH	全 N/mg·kg ⁻¹	水解 N/mg·kg ⁻¹	全 P/mg·kg ⁻¹	速效 P/mg·kg ⁻¹	全 K/mg·kg ⁻¹	速效 K/mg·kg ⁻¹	有机质/mg·kg ⁻¹
A	5.42±0.31a	0.70±0.44cd	64.29±34.35d	3.15±0.08c	10.72±1.58bc	14.38±2.30bc	62.24±3.00cde	10.16±6.98cd
B	5.31±0.49ab	0.54±0.17d	60.71±10.38d	2.76±0.12e	4.78±2.50bc	28.83±2.01a	29.76±1.41e	6.29±4.44d
C	5.28±0.07ab	1.16±0.20bc	119.29±17.84ab	2.98±0.12d	3.88±1.86bc	23.67±2.01a	99.49±2.71abc	27.22±6.52b
D	4.82±0.04bc	1.27±0.32b	124.52±33.88ab	3.50±0.05b	15.16±9.73ab	24.25±1.80a	116.33±12.82ab	24.71±7.44b
E	5.18±0.19ab	1.01±0.27bcd	106.19±28.88bc	3.46±0.01b	4.72±0.50bc	16.92±3.21b	76.19±14.58bcd	22.86±5.30bc
F	4.62±0.32cd	0.74±0.09bcd	73.33±0.41cd	2.05±0.08f	23.95±11.32a	11.50±3.12c	52.21±1.37de	15.84±3.13bcd
CK	4.18±0.19d	2.31±0.57a	159.29±25.71a	5.54±0.12a	3.39±0.83c	28.17±3.97a	136.56±28.46a	59.21±15.23a
养分缺乏指标≤	—	0.8	100	0.5	8	5	80	10

表 4 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式土壤重金属全量/mg·kg⁻¹
Table 4 Soil heavy metals content of different mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine/mg·kg⁻¹

模式	Cu	Pb	Zn	Mn	Cd	Cr	Ni
	173.49±113.44abc	103.33±4.54a	60.61±42.38bc	664.80±27.86a	1.77±0.18bc	14.03±7.09cde	18.88±0.99b
B	306.20±41.87a	68.13±14.90a	27.00±4.51c	54.52±1.56c	1.75±0.26c	35.10±14.47a	28.22±9.39a
C	85.98±5.63c	139.92±69.66a	143.66±75.52a	214.61±124.90bc	2.53±0.26a	11.47±4.19de	7.26±1.45cd
D	173.97±102.15abc	71.02±13.19a	93.46±21.58ab	378.95±69.58b	2.16±0.31ab	23.10±1.98bc	9.73±2.63c
E	133.91±9.67bc	95.83±27.02a	83.09±26.88abc	655.07±185.03a	2.56±0.21a	26.04±1.66ab	21.33±3.26ab
F	157.38±17.52bc	67.25±14.94a	44.84±17.22bc	98.01±36.83bc	0.95±0.04d	4.33±1.37e	0.63±0.41d
CK	236.12±87.14ab	672.31±86.92b	53.31±9.91bc	38.48±6.22c	2.14±0.17abc	15.39±0.49bcd	5.90±7.21cd
国家土壤标准 ^[31]	400	500	500	—	1.0	300	200
福建省背景值 ^[32]	21.6	34.9	82.7	280	0.051	41.3	13.5

1.35 倍和 2.34 倍;模式 A、模式 B 和模式 E 土壤 Ni 全量超标,其中模式 B 最大,达到背景值的 2.09 倍。

由以上分析可知,紫金山矿山废弃地土壤中重金属含量较高,为其植被恢复的另一重要限制因子,在植被配置模式的选择中应考虑植物对重金属的富集作用。金属矿山废弃地土壤重金属污染引起了土壤微生物群落功能多样性的下降,减少了能利用有关碳源底物的微生物数量、降低了微生物对单一碳源底物的利用能力^[27-28],进而对矿山废弃地生态恢复起到限制作用。目前国内外在重金属超富集植物筛选方面已进行了大量研究^[29-30],但因缺少针对适合不同矿山废弃地应用的重金属富集植物研究而限制了其应用。

3.5 不同植被配置模式水土流失比较

水土流失是矿山废弃地造成的主要环境问题之一,由图 2 可知,恢复 5 a 后,不同植被配置模式土壤侵蚀量均大于未开采的对照样地,其中模式 A 最大,达到了 2 404.583 m³·hm⁻²·a⁻¹ 显著大于其他模式(*P*<0.05),除模式 A 外其他植被配置模式中均有本地河滩草,因此说明本地河滩草具有很好的水土保持效果,模式 F 土壤侵蚀量最小,为 43.25 m³·hm⁻²·a⁻¹。不同模式土壤侵蚀量表现为模式 A>模式 D>模式 B>模式 E>模式 C>模式 F。

3.6 不同植被配置模式土壤质量的聚类分析

以土壤含水率、水稳性团聚体、养分、有机质、重金属、侵蚀量等指标为变量对紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式土壤质量进行聚类分析(图3),从图可看出,模式 A 单独为一类,模式 B、模式 D 和模式 F 归为一类,模式 C 和模式 E 归为一类。结合前面分析结果可以得出,模式 A 土壤理化性质恢复较差,原因可能是植被配置中无草本植物。模式 B、模式 D 和模式 F,即马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草、

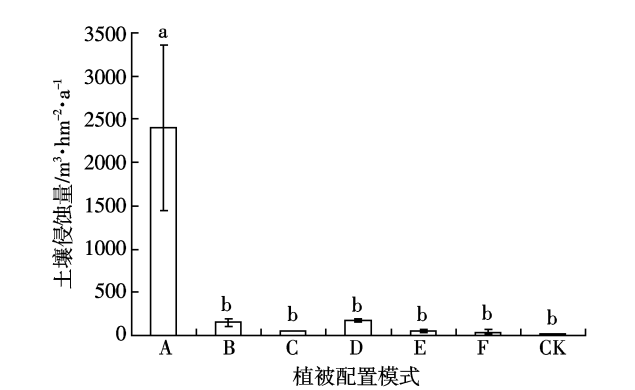


图 2 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式水土流失
Figure 2 Soil erosion amount of different mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine

枫香+本地河滩草、马尾松+桉树+本地河滩草 3 种模式可较快改善土壤理化性状,减小水土流失和重金属污染。矿山废弃地不同部位立地条件存在一定差异,其植被恢复过程也具有不同特点。张静雯等^[3]研究不同煤矸石山坡面植被配置模式的研究发现,不同坡面适宜采取不同植被配置模式,可以达到较好恢复效果。本研究仅对同一立地条件下不同植被配置模式恢复效果进行了分析,今后应针对矿山废弃地不同部位开展植被恢复模式的研究,筛选出适合不同部位及立地条件废弃地恢复的植被配置模式。

4 结论

不同植被配置模式对废弃地土壤理化性质均有一定的恢复效果。马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)、马尾松+本地河滩草(模式 C)和马尾松+桉树+本地河滩草(模式 F),可以较好改善土壤水稳性团聚体结构,提高土壤的抗蚀性。枫香+本地河滩草(模式 D)可较快提高土壤全N、全P、速效P、全K和

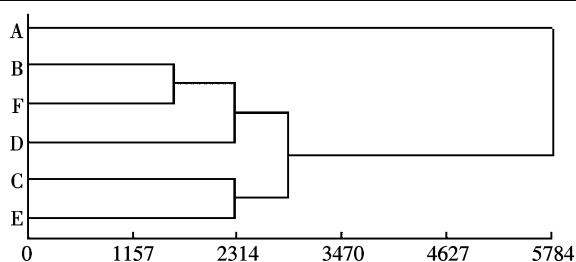


图3 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式
立地条件聚类分析

Figure 3 Cluster analysis on soil quality of different mixed-species planting on mining wasteland at Zijinshan gold-copper mine

速效 K 含量。马尾松+桉树+本地河滩草(模式 F)对土壤速效 P 恢复效果较好,马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)对土壤全 K 恢复效果较好。马尾松+桉树+本地河滩草(模式 F)对土壤 Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Mn 和 Ni 7 种重金属污染均具有较好的修复效果。植被配置模式中加入本地河滩草可以较快的提高土壤的抗蚀能力。

结合聚类分析结果,可以得出马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)、枫香+本地河滩草(模式 D)和马尾松+桉树+本地河滩草(模式 F)3 种模式可以较快速恢复土壤理化性状,减少水土流失和重金属污染。

参考文献:

- [1] 方向京,王 伟,张洪江,等. 云南省个旧锡矿山废弃地植被恢复技术[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6):40-45.
FANG Xiang-jing, WANG Wei, ZHANG Hong-jiang, et al. Vegetation restoration technique of mining wasteland in Gejiu Stannary of Yunnan Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(6):40-45.
- [2] Aibrecht H, Eder E, Langbehn T, et al. The soil seed bank and its relationship to the established vegetation in urban wastelands[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100:87-97.
- [3] 张静雯,张成梁,宋 楠,等. 煤矸石山不同坡面土壤营养元素与植被配置模式研究[J]. 山西农业科学, 2011, 39(8):841-845, 861.
ZHANG Jing-wen, ZHANG Cheng-liang, SONG Nan, et al. The research about nutrient element and plant configuration mode on different slopes in Coal Gangue Mountain[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(8):841-845, 861.
- [4] Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metal liferous mine wasteland in China: A review of research and practice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 357:38-53.
- [5] 许 丽,周新澄,王冬梅. 煤矸石废弃地复垦研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3):117-122.
XU Li, ZHOU Xin-cheng, WANG Dong-mei. Progress on the reclama-

tion of gangue waste area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(3):117-122.

- [6] 王婧静. 金属矿山废弃地生态修复与可持续发展研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15):8082-8084, 8087.
WANG Jing-jing. Research on the ecological restoration and sustainable development of discarded land of metal mine wasteland [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2010, 38(15):8082-8084, 8087.
- [7] Chauhan S, Ganguly A. Standardizing rehabilitation protocol using vegetation cover for bauxite waste (red mud) in eastern India[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(3):504-510.
- [8] Kuznetsova T, Rosenvald K, Ostonen I. Survival of black alder (*Alnus glutinosa* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in a reclaimed oil shale mining area[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4):495-502.
- [9] Reid N B, Naeth M A. Establishment of a vegetation cover on tundra kimberlit mine tailings: A field study[J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13(4):602-608.
- [10] Harris J A, Birch P, Palmer P. Land restoration and reclamation: Principles and practice[M]. Singapore. Prentice Hall, Longman, 1996.
- [11] Singh A N, Raghubanshi A S, Singh J S. Comparative performance and restoration potential of two Albizia species planted on mine spoil in a dry tropical region, India[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22(2):123-140.
- [12] Singh A N, Raghubanshi A S, Singh J S. Impact of native tree plantations on mine spoil in a dry tropical environment[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(1):49-60.
- [13] 李 冰,谢小康,廖富林,等. 香根草对稀土矿废弃地土壤环境影响分析:以广东平远稀土矿为例[J]. 嘉应学院学报(自然科学), 2011, 29(5):60-64.
LI Bing, XIE Xiao-kang, LIAO Fu-lin, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* on rare earth mineral soil environment: Taking rare earth mineral in Pingyuan as an example[J]. *Journal of Jiaying University*, 2011, 29(5):60-64.
- [14] 钟吉祥. 紫金山金矿矿渣边坡治理与植被恢复技术[J]. 福建林业科技, 2006(2):79-80.
ZHONG Ji-xiang. Governance and vegetation restoration technology of mining waste at Zijinshan gold mine [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006(2):79-80.
- [15] 黄福才. 紫金山矿区裸地植被恢复技术研究[J]. 福建林业科技, 2005, 32(4):160-163.
HUANG Fu-cai. Recovery technology of vegetation at the barren sites of Zijinshan diggings[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2005, 32(4):160-163.
- [16] 黄福才,吴丽君. 紫金山矿区裸地引种耐寒桉树试验研究 [J]. 福建林业科技, 2006, 33(3):147-150, 177.
HUANG Fu-cai, WU Li-jun. The experiment on introducing cold-tolerant *Eucalyptus* to naked lands in Zijinshan Mining Area[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006, 33(3):147-150, 177.
- [17] 庄 凯. 福建不同类型矿山废弃地植被的恢复与重建研究[D]. 福州:福建农林大学, 2009.
ZHUANG Kai. Study on the vegetation restoration and reconstruction

- on different kinds of mining wastelands in Fujian Province[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [18] 黄建辉. 紫金山矿区水土流失的整治措施及成效初探[J]. 绿色科技, 2011(4):170-171.
- HUANG Jian-hui. Achievements and treatment of water and soil loss at Zijinshan mining area [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2011(4):170-171.
- [19] 国家林业局. LY/T 1952—2011 中华人民共和国林业行业标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Nation Forestry Bureau. LY/T 1952—2011. The people's Republic of China forestry industry standard[S]. Beijing: China Standards Press, 2011
- [20] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992:74-76.
- China Environmental Monitoring Centre. Modern analyses method of soil elements[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992: 74-76.
- [21] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:54, 90.
- ZHANG Jia-en. Ecology commonly used method and technology of experimental[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:54, 90.
- [22] 刘红霞. 香根草逆境生态响应及调控措施效应的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- LIU Hong-xia. The research of ecological response in environment stress and management measures on *Vetiveria zizanioides*[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2006.
- [23] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1):81-85.
- LU Jin-wei, LI Zhan-bin. Advance in soil aggregate study[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(1):81-85.
- [24] 林文杰, 肖唐付, 敖子强, 等. 黔西北土法炼锌废弃地植被重建的限制因子[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3):631-635.
- LIN Wen-jie, XIAO Tang-fu, AO Zi-qiang. Limiting factors of waste land revegetation in indigenous zinc smelting areas of western Guizhou [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3):631-635.
- [25] YANG Sheng-xiang, LIAO Bin, Li Jin-tian, et al. Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil-plant system of revegetated acid mine wasteland[J]. *Chemosphere*, 2010(80):852-859.
- [26] 文仕知, 张希, 杨丽丽. 长沙市郊枫香人工林养分归还研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5):98-103.
- WEN Shi-zhi, ZHANG Xi, YANG Li-li. Nutrient return of *Liquidambar formosana* in suburbs of Changsha City[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5):98-103.
- [27] Liao M, Chen C L, Huang C Y. Effect of heavy metals on soil microbial activity and diversity in a reclaimed mining wasteland of red soil area [J]. *Journal of Environmental Science*, 2005, 17(5):832-837.
- [28] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 红壤矿区复垦土壤的微生物生态特征及其稳定性恢复研究 II: 对土壤微生物生态特征和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2):237-240.
- LONG Jian, HUANG Chang-yong, TENG Ying, et al. Microbial eco-characterization and its restoration in copper reclaimed wasteland in red soil area of China II: Effects on soil microbial characteristics and community structure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2):98-103.
- [29] Romeh A A. Phytoremediation of water and soil contaminated with Imidacloprid Pesticide by plantago major[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2010, 12(2):188-199.
- [30] 汤叶涛, 吴好都, 仇荣亮, 等. 滇苦菜(*Picris divaricata* Vant.)对锌的吸收和富集特性[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1823-1831.
- TANG Ye-tao, WU Hao-dou, QIU Rong-liang, et al. Zinc uptake and accumulation in *Picris divaricata* Vant.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):1823-1831.
- [31] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- National Environmental Protection Bureau, National Technical Supervision Bureau. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soil[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [32] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究 [J]. 环境科学, 1992, 13(4):70-75
- CHEN Zhen-jin, CHEN Chun-xiu, LIU Yong-qing. Soil environmental background value in Fujian Province[J]. *Environmental Science*, 1992, 13(4):70-75.