福建省紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式的恢复效果分析

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，福建 福州 350002；2. 福州市环保局，福建 福州 350003)

摘 要：为了研究不同植被措施对矿山废弃地的恢复效果，采用标准样地调查的方法，分别从植物种类、数量、覆盖度、物种多样性及生物量等方面对福建省紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式的恢复效果进行了全面的调查分析。结果表明，不同植被配置模式均可快速增加废弃地植物种类，恢复 5 a 后不同配置模式的草本植物数量均高于未经开采的对照样地，其中马尾松＋胡枝子＋香根草＋当地河滩草(模式 B)最多，达到了 25 种；枫香＋本地河滩草(模式 D)和桉树＋本地河滩草(模式 E)物种丰富度指数 *M* 和 Shannon—Wiener 及 Simpson 多样性指数较大，可较快地提高群落物种多样性；不同配置模式植被覆盖度均有较大提高，除马尾松＋胡枝子(模式 A)较低外，其他模式均达到 85％以上；马尾松＋胡枝子＋香根草＋本地河滩草(模式 B)灌草层生物量最大，达到对照的 15.81 倍；结合聚类分析结果可得出，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)和桉树＋本地河滩草(模式 E)3 种植被配置模式对紫金山金铜矿废弃地植被恢复效果较好，可在矿山废弃地植被恢复中推广应用。

关键词：紫金山金铜矿；矿山废弃地；植被配置模式；恢复效果

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)06-0147-05 **中图分类号**：S157.5

Efficiency of Different Vegetative Restoration Settings Deployed on Wastelands of Zijinshan Gold-copper Mine in Fujian Province

HOU Xiao-long[1], ZHUANG Kai[2], LIU Ai-qin[1], CAI Li-ping[1]

(1. *College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian* 350002, *China*; 2. *Fuzhou Environmental Protection Agency, Fuzhou, Fujian* 35003, *China*)

Abstract: The aim of this study was to evaluate the efficiency of different vegetative restoration settings on mining wasteland. Vegetation species, quantity, coverage, species diversity and biomass were surveyed by standard plots on different treatments deployed on the mining wasteland of Zijinshan gold-copper mine in Fujian Province. The results showed that the number of vegetation species was rapidly increased at almost all the treatments, and the species number of the herb layer were significantly greater than the control after 5 year restoration. Species quantity at *Pinus massoniana* ＋*Lespedeza bicolor*＋ *Vetiveria zizanioides*＋ local flood turf (mode B) was the most. There was 25 species of those. Diversity index at *Liquidambar formosana* ＋ local beach turf (mode D) and *Eucalyptus robusta* ＋ local flood turf (mode E) were bigger than others, these two vegetation allocation modes could rapidly increased the species diversity of the community. The vegetation coverage also increased greatly. There were above 85％ apart from *Pinus massoniana*＋*Lespedeza bicolor*(mode A). The biomass of herb layer at *Pinus massoniana* ＋*Lespedeza bicolor*＋ *Vetiveria zizanioides*＋ local beach turf (mode B) was the largest, it was 15.81 times to the control. The treatments of *Pinus massoniana*＋*Lespedeza bicolor*＋*Vetiveria zizanioides*＋local beach turf (B), *Liquidambar formosana*＋local beach turf (D) and *Eucalyptus*＋local beach turf (E) performed considerably better than the other ones and therefore can be promoted for larger areas in the vegetation restoration of the mining wasteland.

Keywords: **Zijinshan gold-copper mine; mining wasteland; vegetation allocation modes; recovery effect**

收稿日期：2011-12-16 **修回日期**：2012-03-09

资助项目：国土资源部公益性行业科研专项“矿集区地球化学累积效应与预警方法研究”(201111020-2)；福建省自然科学基金项目“Pb 富集植物对 Pb 胁迫的耐性机制研究”(2009J01051)

作者简介：侯晓龙(1981—)，男(汉族)，山西省永济市人，硕士，讲师，主要从事土壤侵蚀及生态修复研究。E-mail：lxyhxl@126.com。

通信作者：刘爱琴(1966—)，女(汉族)，福建省浦城县人，学士，研究员，主要从事土壤污染修复研究。E-mail：fjlaq@126.com。

随着人类社会经济的快速发展，对矿产资源的需求日益增加，各类矿产的开采规模也随之不断加大，从而产生了大量土地植被严重破坏、环境污染、生态恶化的开采废弃地，给当地及周边环境造成巨大危害，矿山废弃地的治理已成为当前世界各国普遍遇到的重大环境问题[1-4]。植被恢复不仅可以构建退化生态系统初始植被群落，还能促进土壤结构、肥力、微生物及动物的恢复，从而促进整个生态系统结构与功能的恢复与重建[5-6]。因此，研究不同植被配置模式对矿山废弃地植被的恢复效果，从中筛选出较好的配置模式供矿山废弃地应用，对于解决目前矿山废弃地生态环境破坏严重，治理中盲目性较大等问题具有十分重要的现实意义。

矿山废弃地虽然是一种次生裸地，但其植被恢复过程却具有原生演替的特征[7]，生态系统的自我恢复往往较为缓慢，而人工恢复可在一定程度上改变生态系统演替的方向和速度，并可缩短其恢复周期[8]。近年来，国内外学者在矿山废弃地生态恢复方面进行了大量研究，Harris 等[9]研究表明，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，促进一些先锋树种的生长，从而使这些先锋植物较好地营造一个所谓的“林地环境”的作用，使之更适合林窗入侵种的入侵与生长。印度学者的研究也证实豆科的固氮落叶树种能相对较快的增加矿山废弃地土壤中的氮素[10-11]。郭逍宇等[12]对安太堡矿区复垦地植被恢复过程中多样性的变化进行研究，结果表明，直接种植植被演替后期的植物种极大加速了原始植被演替进程。我国矿山废弃地植被恢复工作较晚，且多集中于煤矿和锰矿矿区的植被恢复，对于金矿研究的报道较少[13-14]。福建省上杭县紫金山金铜矿是中国著名的金矿，长期大规模露天开采，不可避免地引起植被、土壤等生态环境破坏，对矿山废弃地的治理已经成为当地急需解决的重大问题。鉴于此，本研究分别对紫金山金铜矿矿山废弃地不同治理模式的群落植物种类、数量、物种多样性、覆盖度、生物量等进行系统调查，分析不同植被配置模式矿山废弃地植被的恢复效果及其演替规律，试图从中筛选出适合紫金山金铜矿矿山废弃地应用的植被恢复模式，为矿山废弃地的生态恢复提供科学依据。

1 试验地概况

紫金山金铜矿位于福建省上杭县境内，地处东经116°24′—116°25′，北纬25°10′—25°12′，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2 043 h，年降水量1 604 mm，无霜期285 d。该矿从1993年开始开采，年开采3.0×10^4 t，2004年日开采超5.0×10^4 t，11 a间采矿量扩大了近610倍。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，金矿物已浸出回收，铜、银等重金属含量极低。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，边坡稳定性较差。

2 研究方法

2.1 样地设置

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，植被治理的方法主要有两种，一种是先用本地河滩草皮覆盖废弃地，然后挖鱼鳞坑回填客土种植苗木；另一种是不覆盖草皮，直接挖鱼鳞坑回填客种植苗木。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(*Erigeron canadensis*)、藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)、胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)和香根草(*Chryaopogon zizanioides*)等。乔灌木选择马尾松(*Pinus massoniana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、桉树(*Eucalyptus*)。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)，植被配置模式详见表1。同时为了研究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)。2008年对植被恢复效果进行调查。

表1 紫金山金铜矿废弃地植被配置模式

模式编号	配置模式	位置
A	马尾松＋胡枝子	一选厂
B	马尾松＋胡枝子＋香根草＋本地河滩草	一选厂
C	马尾松＋本地河滩草	一选厂
D	枫香＋本地河滩草	风车斗
E	桉树＋本地河滩草	风车斗
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的地名。

2.2 植被调查方法

2.2.1 *植被种类及覆盖度调查* 在每个治理模式及未经开采对照样地内分别设3个10 m×10 m的大样

方,调查乔木和灌木的种类、数量、高度、胸径(地径)和覆盖度;同时在每个大样方内随机设置 4～6 个 1 m×1 m 的小样方,调查草本的种类、数量、高度和盖度。

2.2.2　生物量调查　乔木层生物量采用"平均标准木"法,分枝、叶测定其干物质质量。不同植被配置模式样地乔木和灌木生物量使用相关经验模型(表 2)进行估算,未经开采对照样地乔木层生物量使用相关经验模型(表 3)进行估算。草本层生物量的测定采用"全收获"法,先测定其鲜重,然后取部分带回实验室烘干,测定其干重。

表 2　不同治理模式主要树种生物量回归模型[15-18]

树 种	项 目	回归模型	相关系数
马尾松	地上部分	$W_{全}=1.071\ 5D^{1.363\ 3}H^{-0.151\ 1}$	0.880 0**
桉 树	地上部分	$W_{全}=0.0703D^{0.055\ 0}H^{2.093\ 2}$	0.987 0**
枫 香	干	$W_{干}=1.598\ 8e^{0.277\ 2D}$	0.971 0**
	枝	$W_{枝}=0.082\ 5(D^2H)^{0.649\ 2}$	0.986 0**
	叶	$W_{叶}=1.083\ 6(D^2H)^{0.216\ 6}$	0.694 0**
胡枝子	地上部分	$W_{全}=0.679\ 6+0.596\ 2(D^2H)-0.004\ 2(D^2H)^2$	0.961 3**

注:** 表示达到极显著相关水平。下同。

表 3　对照样地主要树种生物量的回归模型[17,19-20]

树 种	项 目	回归模型	相关系数
马尾松	干	$W_{干}=9.032\ 8(D^2H)^{1.054\ 9}$	0.999 5**
	枝	$W_{枝}=0.395\ 3(D^2H)^{1.293\ 3}$	0.923 6**
	叶	$W_{叶}=1.052\ 5(D^2H)^{0.995\ 6}$	0.930 6**
	地上部分	$W_{全}=7.176\ 3(D^2H)^{1.132\ 8}$	0.994 0**
木荷	干	$W_{干}=0.016\ 8(D^2H)^{1.022\ 1}$	0.960 0**
	枝	$W_{枝}=0.000\ 6(D^2H)^{1.242\ 2}$	0.940 0**
	叶	$W_{叶}=0.027\ 6(D^2H)^{0.582\ 9}$	0.950 0**
	地上部分	$W_{全}=0.064\ 8(D^2H)^{0.918\ 5}$	0.940 0**
枫香	干	$W_{干}=1.598\ 8e^{0.277\ 2D}$	0.971 0**
	枝	$W_{枝}=0.082\ 5(D^2H)^{0.649\ 2}$	0.986 0**
	叶	$W_{叶}=1.083\ 6(D^2H)^{0.216\ 6}$	0.694 0**
细叶青冈	干	$W_{干}=0.030\ 6(D^2H)+8.694\ 9$	0.999 8**
	枝	$W_{枝}=0.028\ 9(D^2H)-5.220\ 1$	0.995 6**
	叶	$W_{叶}=0.002\ 1(D^2H)-0.522\ 0$	0.999 0**
	地上部分	$W_{全}=0.061\ 7(D^2H)+2.952\ 8$	0.999 1**

2.2.3　物种多样性　生物群落的物种多样性是刻画群落结构的重要指标,反映了物种的复杂性和丰富程度[21-22],主要包括重要值、丰富度指数、多样性指数和均匀度指数等[23-26]。

3　结果分析

3.1　不同植被配置模式的植被种类比较

原生裸地植物群落的形成与演替是一种由先锋植物种类的入侵、定居、群聚、竞争的过程,而人工恢复可在一定程度上改变生态系统演替的方向和速度,并可缩短其恢复周期[27]。恢复 5 a 后,不同植被配置模式植物数量总数均小于未经开采对照样地的 31 种,分别为模式 A 17 种,模式 B 27 种,模式 C 15 种,模式 D 21 种,模式 E 22 种,模式 F 20 种。未经开采对照样地中的 31 种植物有 18 种为乔木和灌木,而不同植被配置模式废弃地因恢复时间较短乔灌木的数量基本未增加。但草本植物数量均较大,分别为模式 A 15 种,模式 B 25 种,模式 C 14 种,模式 D 20 种,模式 E 19 种,模式 F 18 种,均超过了对照的 13 种。不同配置模式草本数量表现为:模式 B>模式 D>模式 E>模式 F>模式 A>模式 C。其中蜜柑草(*Phyllanthus matsumurae*)在 6 种模式及对照中均有生长;海金沙(*Lygodium japonicum*)除在模式 B 中无生长外,其他 5 种模式及对照中均有生长;石荠苎(*Mosla scabra*)除在模式 A 无生长外,其他 5 种模式及对照中均有生长;蜈蚣草(*Nephrolepis cordifolia*)在模式 A、模式 B、模式 C 和对照中均有生长;酢浆草(*Oxalis corniculata*)在模式 B、模式 C、模式 D 及对照中均有生长;乌毛蕨(*Blechnum orientale*)在模式 E、模式 F 及对照中均有生长。因此,这 6 种草种可以作为先锋植物应用于该废弃地的植被恢复。

研究结果表明,演替时间对物种多样性的变化具有很大的影响,矿区植被重建的主要方式是通过直接种植植被演替后期的植物种来加速原始植被演替进程,在采用先锋物种对矿山废弃地演替初期取得较为成功的恢复后,需要进行适度的人为干扰以加速其演替进程[28-29]。本研究发现,紫金山金铜矿废弃地植被恢复过程中,草本层的覆盖度和物种多样性都呈上升趋势,但草本层的物种多样性均高于乔木、灌木层,说明废弃地生态系统还处于演替前期。

3.2　不同植被配置模式草本层物种多样性比较

在植物群落形成与演替的过程中,各种群数量及综合优势比呈动态变化,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[30],因不同

植被恢复配置模式乔木层和灌木层物种比较单一，因此本研究仅对草本层物种多样性进行分析。

从表 4 可看出，不同模式草本层物种多样性存在一定差异，物种丰富度 M 模式 E 最大达到了 3.716 5，模式 B、模式 D、模式 E 和模式 F 均大于未经开采对照样地；Shannon—Wiener 多样性指数 H' 模式 D 最大，模式 E 和模式 B 次之，除模式 A 略小于对照外，其他模式均大于对照；Simpson 多样性指数 D 表现为：模式 D＞模式 E＞模式 B＞模式 C＞模式 F＞模式 A，且各模式均大于对照；Pielou 均匀度指数 E 表现为：模式 C＞模式 E＞模式 B＞模式 D＞模式 F＞模式 A，除模式 A 略小于对照外，其他模式均大于对照。

表 4 紫金山金铜矿废弃地不同植被恢复配置模式草本层物种多样性

模 式	物种丰富度 M	Shannon—Wiener 多样性指数 H'	Simpson 多样性指数 D	Pielou 均匀度指数 E
A	$2.037\ 3\pm0.238\ 0^{bc}$	$0.864\ 6\pm0.047\ 1^{c}$	$0.829\ 1\pm0.012\ 0^{bc}$	$0.363\ 7\pm0.008\ 3^{d}$
B	$3.045\ 7\pm0.714\ 9^{ab}$	$1.019\ 4\pm0.105\ 8^{ab}$	$0.877\ 8\pm0.033\ 1^{ab}$	$0.391\ 4\pm0.013\ 7^{abc}$
C	$1.920\ 9\pm0.198\ 4^{c}$	$0.952\ 0\pm0.059\ 7^{abc}$	$0.873\ 8\pm0.016\ 3^{ab}$	$0.414\ 0\pm0.007\ 9^{a}$
D	$3.323\ 7\pm0.327\ 6^{a}$	$1.084\ 2\pm0.026\ 5^{a}$	$0.899\ 0\pm0.005\ 6^{a}$	$0.391\ 3\pm0.000\ 7^{abc}$
E	$3.716\ 5\pm0.137\ 8^{a}$	$1.077\ 8\pm0.001\ 2^{a}$	$0.895\ 3\pm0.005\ 7^{a}$	$0.393\ 4\pm0.004\ 2^{ab}$
F	$3.007\ 8\pm0.118\ 1^{ab}$	$0.958\ 4\pm0.022\ 2^{abc}$	$0.854\ 0\pm0.000\ 4^{abc}$	$0.381\ 0\pm0.009\ 4^{bcd}$
CK	$2.814\ 0\pm0.057\ 2^{abc}$	$0.893\ 8\pm0.022\ 5^{bc}$	$0.815\ 3\pm0.012\ 5^{c}$	$0.368\ 3\pm0.006\ 6^{cd}$

注：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。

3.3 不同植被配置模式的植被覆盖度比较

植被覆盖度是水土流失治理效果的重要评价因子，一直被作为水土保持评价的主要指标[31]。从表 5 可看出，不同植被配置模式植被覆盖度之间存在一定差异，乔木层覆盖度，模式 F 最大，为未经开采对照的 1.9 倍，模式 F、模式 C 和模式 E 均大于对照，模式 B 和模式 D 较小，仅为对照的 44%，表现为：模式 F＞模式 C＞模式 E＞模式 A＞模式 D≥模式 B；灌草层覆盖度，模式 D 最大，达到了 89%，比对照高出 9%。模式 E 与对照相同，其他均小于对照，其中模式 C 和 F 仅为对照的 5%和 8%，表现为：模式 D＞模式 E＞模式 B＞模式 A＞模式 F＞模式 C；各配置模式植被总覆盖度，除模式 A 较低(65%)外，其他模式均在 85%以上，但除模式 C 和模式 F 与对照相同外，其他均小于对照。表现为：模式 C≥模式 F＞模式 D＞模式 E≥模式 B＞模式 A。

表 5 不同植被恢复配置模式植被覆盖度 %

模 式	乔木层	灌草层	群 落
A	32 ± 1^{a}	35 ± 2.5^{a}	65 ± 1^{a}
B	22 ± 2^{b}	71 ± 4.1^{b}	85 ± 5.1^{b}
C	92 ± 0^{c}	4 ± 1^{c}	95 ± 1^{c}
D	22 ± 8^{ab}	89 ± 1.5^{d}	90 ± 3^{bc}
E	80 ± 8.8^{c}	80 ± 4.5^{bd}	85 ± 2^{b}
F	93 ± 2^{c}	6 ± 0.5^{c}	95 ± 1^{c}
CK	50 ± 7.0^{d}	80 ± 5.1^{bd}	95 ± 0.8^{c}

3.4 不同植被配置模式群落生物量比较

从表 6 可看出，不同植被配置模式群落生物量存在一定的差异，各模式乔木层生物量均远小于对照，模式 C 和模式 F 乔木层生物量较大，分别达到了 94.57和 67.75 t/hm²；模式 A、模式 B、模式 D 和模式 E 灌草层生物量均大于未经开采对照，其中模式 B 最大，达到对照的 15.81 倍；模式 C 群落总生物量最大，达到 94.84 t/hm²，模式 D 最小，仅为 3.60 t/hm²，但各模式均小于对照，表现为：模式 C＞模式 F＞模式 B＞模式 A＞模式 E＞模式 D。

表 6 不同植被恢复配置模式群落生物量 t/hm²

模 式	乔木层	灌草层	群 落
A	14.56 ± 2.39^{a}	7.56 ± 0.99^{ab}	22.13 ± 2.39^{cd}
B	11.48 ± 4.86^{a}	12.33 ± 13.77^{a}	23.81 ± 18.24^{c}
C	94.57 ± 15.93^{a}	0.26 ± 0.05^{b}	94.84 ± 22.57^{a}
D	2.40 ± 1.21^{a}	0.93 ± 0.55^{ab}	3.60 ± 2.13^{d}
E	5.11 ± 0.94^{a}	0.87 ± 0.24^{b}	6.06 ± 1.15^{cd}
F	67.75 ± 4.14^{a}	0.21 ± 0.11^{b}	67.93 ± 7.29^{b}
CK	$1\ 645.05\pm394.43^{b}$	0.78 ± 0.13^{b}	$1\ 645.83\pm394.45$

3.5 不同植被配置模式植被群落的聚类分析

以群落覆盖度、草本层物种多样性和群落生物量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植被群落进行聚类分析。分析结果表明，模式 D 和模式 E 的植被群落归为一类，模式 B 与模式 D 和 E 也较为相近；模式 C 和模式 F 的植被群落归为一类；模式 A 单独一类。结合物种多样性、覆盖度、生物量的分析可得出，模式 B、模式 D 和模式 E，即马尾松＋胡枝子＋香根草＋本地河滩草、枫香＋本地河滩、桉树＋本地河滩草 3 种模式植被恢复效果较好，可在紫金山矿山废弃地植被恢复中推广应用。

大量研究表明，矿山废弃地的长期演替趋势一般为：次生裸地→草丛→灌丛→森林[29,32]。因此，对矿

山废弃地的植被恢复应按照“先草本后灌乔木”的原则进行植被的合理配置。本研究中,马尾松+本地河滩草、马尾松+桉树+本地河滩草是较为理想的植被配置模式,说明乔木树种和草本植物能在不同的恢复阶段中相互作用,相互影响,促进该废弃地生态系统的恢复。

4　结 论

植被治理措施可快速增加紫金山矿山废弃地植被种类,恢复 5 a 后不同植被配置模式草本植物数量均大于未经开采的对照,其中马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)最大,达到了 25 种;蜜柑草、海金沙、蜈蚣草、酢浆草、石荠苎和乌毛蕨 6 种植物是可作为先锋植物应用于紫金山金铜矿矿山废弃地的植被恢复。

枫香+本地河滩草(模式 D)和桉树+本地河滩草(模式 E)物种丰富度指数 M 和 Shannon—Wiener 及 Simpson 多样性指数均较大,这 2 种模式可快速提高群落物种多样性;不同植被配置模式群落覆盖度均有较大提高,除马尾松+胡枝子(模式 A)较低外,其他模式均达到 85%以上。马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)、枫香+本地河滩(模式 D)、桉树+本地河滩草(模式 E)3 种模式可以快速增加草本层生物量。

马尾松+胡枝(模式 A)、马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草(模式 B)、枫香+本地河滩(模式 D)、桉树+本地河滩草(模式 E)4 种配置模式在金铜矿废弃地植被恢复效果较好,可在矿山废弃地植被恢复中进行推广应用。

[参 考 文 献]

[1] 束文圣,叶志鸿,张志权,等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论和实践[J]. 生态学报,2003,23(8):1629-1639.

[2] 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.

[3] Yang Shengxiang, Liao Bin, Li Jintian, et al. Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil-plant system of a revegetated acid mine wasteland[J]. Chemosphere, 2010, 80(8):852-859.

[4] Raman K D, Madhoolika A. Restoration of opencast coal mine spoil by planting exotic tree species: A case study in dry tropical region [J]. Engineering, 2003, 21(2/3): 143-151.

[5] 宋书巧,周永章. 矿业废弃地及其生态恢复与重建[J]. 矿产保护与利用,2001(5):43-49.

[6] Parrota J A. The role of plantation forests in rehabilitating degraded tropical ecosystem[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1992, 41(2):115-133.

[7] 王友保,刘登义,张莉,等. 铜官山铜尾矿库植被及土壤酶活性研究[J]. 应用生态学报,2003,14(5):757-760.

[8] Anita K, Ernst-Gerhard M, Anhalt H, et al. Spontaneous and initiated succession on unvegetated slopes in the abandoned lignite-mining area of Goitsche, Germany[J]. Applied Vegetation Science, 2001, 4(1):19-27.

[9] Harris J A, Birch P, Palmer P. Land Restoration and Reclamation: Principles and Practice [M]. Singapore: Prentice Hall,1996.

[10] 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.

[11] Singh A N, Raghubanshi A S, Singh J. Impact of native tree plantations on mine spoil in a dry tropical environment[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 187(1):49-6.

[12] 郭逍宇,张金屯,宫辉力,等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报,2005,25(4):763-770.

[13] 姜宏汝,黄晓凌. 福建省矿山生态环境现状与恢复治理研究[J]. 资源与产业,2008,10(6):80-82.

[14] 林夏馨. 类芦绿化煤矸石山的效果分析[J]. 林业勘察设计,2004(1):108-111.

[15] 林开敏,郑郁善,黄祖清,等. 杉木和马尾松幼林生物产量模型研究[J]. 福建林学院学报,1993,13(4):351-356.

[16] 黄月琼,陈士银,吴小凤. 尾叶桉各器官生物量估测模型的研究[J]. 安徽农业大学学报,2001,28(1):44-48.

[17] 胡理乐,刘琪璟,廖迎春. 小流域治理 20 年后千烟洲生物量的变化[J]. 江西科学,2005,23(1):34-38.

[18] 曾慧卿,刘琪璟,马泽清,等. 千烟洲灌木生物量模型研究[J]. 浙江林业科技,2006,26(1):13-17.

[19] 李轩然,刘琪璟,陈永瑞,等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算[J]. 应用生态学报,2006,17(8):1382-1388.

[20] 赵亮. 木荷人工林干物质积累和结构研究[J]. 江西林业科技,2006(4):5-7,59.

[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.

[22] Curtis J T, McIntosh R P. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin[J]. Ecology, 1951, 32(8):467-496.

[23] Margalef R. Temporal Succession and Spatial Heterogeneity in Phytoplankton: Perspectives in Marine Biologyed[M]. Berkeley: University of California Press, 1958:323-347.

(下转第 157 页)

[2] Long Hualou, Liu Yangsui, Wu Xiuqin, et al. Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su-Xi-Chang region: Implications for building a new countryside in coastal China[J]. Land Use Policy, 2009,26(2):322-333.

[3] 吕春艳,王静,何挺,等. 土地资源优化配置模型研究现状及发展趋势[J]. 水土保持通报,2006,26(2):21-26.

[4] 裴彬,潘韬. 土地利用系统动态变化模拟研究进展[J]. 地理科学进展,2010,29(9):1060-1066.

[5] 邓祥征,林英志,黄河清. 土地系统动态模拟方法研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(10):2123-2129.

[6] 杨梅,张广录,侯永平. 区域土地利用变化驱动力研究进展与展望[J]. 地理与地理信息科学,2011,27(1):95-100.

[7] 鲁春阳,杨庆媛,靳东晓. 中国城市土地利用结构研究进展及展望[J]. 地理科学进展,2010,29(7):861-868.

[8] 黄秋昊,蔡运龙. 国内几种土地利用变化模型述评[J]. 中国土地科学,2005,19(5):25-30.

[9] 陈睿,吕斌. 城市空间增长模型研究的趋势、类型与方法[J]. 经济地理,2007,27(2):240-245.

[10] Batty M. Agents, cells, and cities: New representational models for simulating multiscale urban dynamics [J]. Environment and Planning, 2005, 37(1): 1373-1394.

[11] Batty M. Fifty Years of Urban Modeling: Macro-Statics to Micro-Dynamics[M]// Sergio A, Denise A, Paolo G, et al, The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach. Mendrisio: Physica-Verlag Heidelberg and Accademia di Architettura, 2008:1-20.

[12] 沈体雁. CGE 与 GIS 集成的中国城市增长情景模拟框架研究[J]. 地球科学进展,2006,21(11):1153-1163.

[13] 何春阳,史培军,陈晋,等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. 中国科学(D):地球科学,2005,53(5):464-473.

[14] Grootde R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes[J]. Landscape and Urban Planning, 2006,75(3):175-186.

[15] 郁亚娟,郭怀成,刘永. 城市生态系统的动力学演化模型研究进展[J]. 生态学报,2007,27(6):2603-2614.

[16] 郑新奇,赵璐,胡业翠. 土地利用总体规划指标时空分配[J]. 农业工程学报,2010,26(4):297-305.

[17] 谢正磊,许学工,孙强. 基于 Patch Dynamics 模式的土地覆被变化预测:以北京市为例[J]. 北京大学学报:自然科学版,2008,44(3):452-458.

[18] 孙娴,林振山,孙燕. 我国耕地总量的动力预测及其建议[J]. 自然资源学报,2005,20(2):200-205.

[19] 孙燕,林振山,金晓斌,等. 中国耕地保有量的动力预测模型及对策[J]. 地理科学,2008,28(3):337-342.

[20] 张衍广,林振山,梁仁君. 基于 EMD 分析的山东省土地承载力的动力学预测[J]. 地理科学,2008,28(2):219-223.

[21] 陈红顺,夏斌. 快速城市化地区土地利用变化及驱动因素分析:以广东省东莞市为例[J]. 水土保持通报,2012,32(1):54-59.

(上接第 151 页)

[24] Shannon C E, Wiener W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

[25] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949,163(688):688-690.

[26] Pielou E C. The measure of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13(12):131-144.

[27] 陈芳清,卢斌,王祥荣. 樟村坪磷矿废弃地植物群落的形成与演替[J]. 生态学报,2001,21(8):1347-1353.

[28] 郝蓉,白中科,赵景逵,等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报,2003,23(8):1470-1476.

[29] 许丽,樊金栓,汪季,等. 阜新矿区孙家湾矸石山阳坡物种多样性研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4):246-252.

[30] Wang Youbao, Liu Dengyi, Zhang Li, et al. Patterns of vegetation succession in the process of ecological restoration on the deserted land of Shizishan copper tailings in Tongling City[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(7):780-787.

[31] 张岩,袁建平,刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1033-1036.