

文章编号: 1001-1498(2008)04-0576-06

# 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

何志华<sup>1</sup>, 柏明娥<sup>2</sup>, 高立旦<sup>1</sup>, 刘本同<sup>2</sup>, 洪利兴<sup>2</sup>

(1. 浙江省林业技术推广总站, 浙江 杭州 310020; 2 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**采用客土喷播、植生袋围堰造坑植树和基质型容器苗种植等技术对浙江海宁鼠尾山露采废弃矿山进行植被修复, 3 a后形成乔木盖度 31%、灌木盖度 52%、草本盖度 59%的森林植物群落, 物种多样性较丰富, 与周边山体自然植被的相似度为 0.127 6。地上部分灌木和草本的生物干质量为  $657.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 地下部分生物干质量为  $254.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 枯落物干质量  $148.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。地上灌草植被和枯落物及土壤三者合计的蓄持水量为  $15.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究结果为矿山生态环境治理的生态效益评价提供了基础数据和科学依据。

**关键词:**废弃矿山; 植被修复; 群落结构; 持水效应

中图分类号: X171.4 文献标识码: A

## Community Structure and Water-holding Effects of Restoring Vegetation on Open-cast-abandoned Quarry in Shuwei Mountain in Haining, Zhejiang Province

HE Zhi-hua<sup>1</sup>, BA Ming-e<sup>2</sup>, GAO Li-dan<sup>1</sup>, LIU Ben-tong<sup>2</sup>, HONG Li-xing<sup>2</sup>

(1. Forestry Technique Extension Department of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, Zhejiang, China;

2. Forestry Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** Using the technique of spray sowing with artificial soil, tree planting in cofferdam-made pits made by planting bags and planting with base material container seedlings, the vegetation restoration was carried out on open-cast-abandoned quarry in Shuwei Mountain in Haining, Zhejiang Province. After 3 years, the forest community formed with a coverage of 31%, 52% and 59% for arbor layer, shrub layer and grass layer respectively. The biodiversity was high, with the similarity to the neighborhood vegetation being 0.127 6. The biomass (dry weight) for shrub and grass aboveground was  $657.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , and that for under ground  $254.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . The biomass (dry weight) of litterfall was  $148.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . The total water-holding capacity of undergrowth, litterfall and soil was  $15.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ . This study can be a reference to evaluate the ecological benefit of ecological environment treatment for mine.

**Key words:** abandoned quarry; vegetation restoration; community structure; water-holding effect

矿山开采为社会发展提供了必需的矿业资源, 同时也给矿山和社会环境造成较严重的影响, 诸如植被破坏、水土流失、土地沙化、“三废”污染等<sup>[1]</sup>, 甚至容易形成各类次生地质灾害隐患。为改善矿山

生态环境, 促进浙江生态省建设, 2004年浙江省国土资源厅在全国率先开展“百矿示范、千矿整治”行动, 至2005年底累计治理废弃矿山735个<sup>[2]</sup>, 治理的矿山取得了较好的绿化效果; 但是如何从植物群

收稿日期: 2008-04-07

基金项目: 浙江省社会发展重大科技攻关项目“山体坡面人工生态修复技术研究与示范”(2003C13010)部分内容

作者简介: 何志华(1962—), 男, 浙江诸暨人, 硕士, 高级工程师。Email: hezhihua@zjly.gov.cn

落的结构与组成分析植被修复后的效果,以及植被修复后对于边坡水土保持等方面生态效益的量化研究少见报道。本文以浙江海宁鼠尾山露采废弃矿山边坡植被人工修复为例进行这方面的调查研究,为矿山生态环境治理的效益评价提供基础数据和科学依据。

## 1 研究地概况

研究地点浙江省海宁市黄湾镇鼠尾山,属海宁市治江围垦管理委员会管辖,位于 120°47'27" E, 30°20'46" N,地处钱塘江杭州湾出海口北岸,杭州湾跨海二通道北端着落于此。属北亚热带海洋性湿润气候区,气候温和,雨量较丰沛,日照充足,四季分明;年平均气温 15.9℃,最冷月(1月)平均气温 3.5℃,最热月(7月)平均气温 28.5℃;年日照时数 2 003 h,无霜期 233 d;年降水量 1 187 mm。由于毗邻海边山海口,平时风力较大。

海宁鼠尾山露采矿山为工程性矿山,因围海造地需要开山取石筑坝,留下 21 000 m<sup>2</sup>的废弃岩石边坡,平均坡高 45 m,最高达 60 m,坡度大部分在 50°~60°之间,坡脚线长 400 m。该地 2005 年 4 月列入浙江省重大社会发展科技攻关项目“山体坡面人工生态修复技术与示范”的示范样板,2005 年 6 月 1 日正式开工建设,先后经过修坡清坡、挂网钉网、厚层基质喷播、利用小平台进行植生袋围堰造坑植树和边坡专用基质型容器苗种植等技术工艺<sup>[3]</sup>,于 2005 年 12 月完工并通过交工验收,后经 2 a 养护,至 2007 年 12 月竣工并通过工程验收。

## 2 调查研究方法

### 2.1 植物群落调查

乔木样地设在边坡中间,面积 20 m × 20 m,以“田”字形分成 4 个 10 m × 10 m 的小样地,于 2007 年 10 月进行每木调查,记录乔木种类、高度和冠幅,并目测乔木总盖度。灌木和草本样地设在边坡的上、下、左、右,作为 4 个固定样地,面积 4 m × 4 m,于 2005 年 10 月、2006 年 10 月和 2007 年 10 月连续 3 次调查;草本样地分别在固定样地的右下角设置 1 m × 1 m 的小样地;调查记录灌木和草本植物种类、高度、盖度和株数或丛数,并统计重要值。

为便于与周边自然植被相比较,于 2007 年 10 月在毗邻边坡的山体选择面积 20 m × 20 m 的代表性样地,也以“田”字形分成 4 个 10 m × 10 m 的小样

地调查乔木树种,在小样地内的右下角分别设置 1 个 4 m × 4 m 的灌木样地,再在灌木样地的右下角分别设置 1 m × 1 m 的草本样地。调查记录植物种类、高度、盖度和株数或丛数,并统计重要值。

重要值 = (相对密度 + 相对频度 + 相对盖度) / 3

### 2.2 生物量调查

2007 年 10 月分别在固定样地的右下角选取面积 1 m × 1 m 的小样地,获取灌木和草本植物的地上和地下部分及枯落物部分的样品,并称质量,然后分别选取 10% 左右各部分的样品带至实验室在 80℃ 恒温箱中烘干至恒质量,折算成生物干质量。

### 2.3 植被蓄持水分调查

从获取的地上部分和枯落物部分生物量样品中,分别选取 10% 左右的鲜样品及时称质量。地上部分植物鲜样品直接置于水桶中 1 min,捞出并沥干至无明显水滴后(约 30 min 后)称湿质量;枯落物部分样品装入纱布袋置于水桶中,捞出并沥干至无明显水滴后(约 50 min 后)称湿质量,扣除湿纱布质量,然后计算持水量(持水量 = 湿质量 - 鲜质量)。

### 2.4 土壤蓄持水分调查

边坡喷附的植物生长基质(又称人工土壤)简称土壤,分别在 4 个灌木样地中进行取样测定。用铝盒测定土壤自然含水量,用环刀法测定单位体积饱和持水量<sup>[4]</sup>,蓄持水量 = 饱和持水量 - 自然含水量,并统计单位面积土壤(平均厚度 10 cm)的蓄持水量。

### 2.5 植物物种多样性分析

采用目前广泛使用的 Simpson 指数 ( $D$ ) 和 Shannon-Wiener 指数 ( $H$ )<sup>[5]</sup>。物种均匀度指数采用 Pielou 指数 ( $J_H$ )。物种丰富度指数为样地中物种总数。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

$$J_H = \left( - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \right) \ln S$$

上式中:  $P_i$  为第  $i$  物种的重要值,  $S$  为小区样方中出现的植物种类数量,  $i = 1, 2, \dots, S$ 。

### 2.6 物种相似度分析

采用离差标准化后的内积,以取值为 0 与 1 之间的相关系数  $R$  来表达<sup>[6]</sup>:

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)(X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)^2}}$$

式中:  $R_{jk}$  是  $j$  与  $k$  2 个比较对象的相似系数;  $n$  是 2 个比较对象合计的植物种数;  $X_{ij}$  是第  $i$  种在对象  $j$  中的个体数;  $\bar{X}_j$  为对象  $j$  所有种个体数量的平均值;  $X_{ik}$  是第  $i$  种在对象  $k$  中的个体数;  $\bar{X}_k$  为对象  $k$  所有种个体数量的平均值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 边坡植物群落的结构与组成

调查显示:海宁鼠尾山露采废弃矿山乔木树种有湿地松 (*Pinus elliottii* Engelm.)、香花槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn cv Idaho) 等 9 种 (表 1), 均为人工植生袋围堰种植的树种, 并以湿地松占优势, 高度在 3.2 m 左右, 重要值为 27, 其次是香花槐, 高度在 2.1 m 左右, 重要值为 16。灌木有盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.)、紫薇 (*Lagerstroemia indica* Linn.) 和美丽胡枝子 (*Lespedeza formosa* (Vog.) Koehne)、马棘 (*Indigofera pseudotinctoria* Mats.) 等 7 种, 以马棘和美丽胡枝子占优势, 重要值分别为 38 和 26, 高度通常在 1.1 ~ 1.2 m 之间, 马棘均为人工喷播, 美丽胡枝子为人工喷播和容器苗种植。灌木中的野桐 (*Mallotus japonicus* (Thunb.) Muell-Arg var *floccosus* (Muell-Arg) S. M. Hwang) 和大青 (*Clerodendrum cyrtophyllum* Turcz.) 2 个种为周边山体自然侵入种。草本有高羊茅 (*Festuca anundinacea* Schreb.)、狗牙根 (*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.) 和紫花苜蓿 (*Medicago sativa* Linn.) 等 7 种, 以狗牙根为优势, 高度在 0.25 m 左右, 重要值达 64, 其次紫花苜蓿, 高度在 0.3 m 左右, 重要值为 16。

人工植被乔木层、灌木层和草本层的平均高度分别为 2.3、1.2、0.35 m, 盖度分别为 31%、52% 和 59%。可见, 通过治理裸露的岩石边坡变成了以乔木、灌木和草本相复合的森林植物群落 (表 1)。

#### 3.2 边坡物种组成的演替动态

自然植被具有一定的演替规律, 在浙江, 常绿阔叶林是区域的地带性自然植被, 其演替的一般规律为: 荒山草坡 次生灌丛 马尾松针叶林 针阔叶混交林 常绿与落叶阔叶混交林 常绿阔叶林。岩石边坡在水、土、肥奇缺的条件下, 通过客土喷播等方式建立人工植被, 在建植初期需要足够的水分和养分等的养护管理, 促进植被的正常生长; 同时, 由于植物之间相互竞争或由于植物本身对岩石边坡立地条件的适应性, 边坡物种的组成也会发生一定的变化。

表 1 海宁鼠尾山露采废弃矿山边坡人工植被的群落结构 (2007 年 10 月调查)

	植物种类	重要值	高度 /m	加权平均高度 /m	盖度 /%
乔木层	湿地松	27	3.2		
	香花槐	16	2.1		
	石楠	10	1.6		
	合欢	8	2.0		
	女贞	17	1.9	2.3	31
	黄连木	8	1.6		
	木荷	4	1.5		
	冬青	7	1.3		
	构树	3	2.2		
灌木层	盐肤木	5	1.5		
	紫薇	9	1.4		
	美丽胡枝子	26	1.2		
	马棘	38	1.1	1.2	52
	紫穗槐	7	1.2		
	野桐*	7	1.2		
	大青*	8	1.1		
草本层	高羊茅	5	0.35		
	狗牙根	64	0.25		
	紫花苜蓿	16	0.30		
	白三叶	2	0.23	0.35	59
	马唐*	5	0.32		
	狗尾草*	5	0.45		
	一年蓬*	3	0.80		

注: 石楠 (*Photinia serulata* Lindl.)、合欢 (*Albizia julibrissin* Durazz.)、女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait.)、黄连木 (*Pistacia chinensis* Bunge)、木荷 (*Schinus superba* Gardn. et Champ.)、冬青 (*Ilex chinensis* Sims.)、构树 (*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L'Her. ex Vent.)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.)、白三叶 (*Trifolium repens* Linn.)、马唐 (*Digitaria ischaemum* (Schreb. ex Schw.) Schreb. ex Muhl.)、狗尾草 (*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.)、一年蓬 (*Erigeron annuus* (Linn.) Pers.); \* 自然入侵种。

从表 2 看出: 海宁鼠尾山露采废弃矿山在喷播第 1 年植物种类都是由人工喷播的物种组成, 即美丽胡枝子、紫穗槐、马棘、高羊茅、狗牙根、紫花苜蓿和白三叶, 其中美丽胡枝子等木本植物的重要值较小, 草本植物的重要值较大。第 2 年, 随着养护的继续和边坡植物的生长, 木本植物的重要值随之增加, 而草本植物的重要值随之降低, 大青和狗尾草等周边的自然物种有一定数量的侵入。到第 3 年, 木本植物的重要值继续增加, 草本植物的重要值继续降低, 大青和狗尾草等自然物种的重要值在不断提高。

此外, 在喷播的 4 种草本植物中, 高羊茅、紫花苜蓿和白三叶植物的重要值随着生长进程而逐年降低, 如高羊茅重要值由第 1 年的 26 降至第 3 年的 3; 而狗牙根重要值随着生长进程而逐年增加, 由第 1 年的 23 提高到第 3 年的 38, 表明狗牙根比高羊茅、紫花苜蓿、白三叶更适宜于岩石边坡的生长。

表 2 海宁鼠尾山露采废弃矿山喷播植物重要值 3 a 统计

植物种类		第 1 年	第 2 年	第 3 年
木本植物	美丽胡枝子	2	5	9
	紫穗槐	1	3	5
	马棘	6	18	23
人工喷播植物种	草本植物			
	高羊茅	26	9	3
	狗牙根	23	33	38
	紫花苜蓿	31	19	9
	白三叶	11	8	1
木本植物	大青	-	1	2
	野桐	-	-	2
周边自然植物种	马唐	-	2	3
	草本植物			
	狗尾草	-	2	3
	一年蓬	-	-	2
合计		100	100	100

通过对海宁鼠尾山露采废弃矿山修复植物群落的连续观察,可以把坡面物种组成的这种变化作为边坡人工植被演替的一般规律,并具有以下 3 个基本特征:(1)初期特征:由于客土喷播过程中除表土中混有少量当地植物种外,所用植物种均为人工配置的商品种,因此,人工植物种在施工初期占有绝对的优势,从而坡面植被表现以人工植被为主;(2)中期特征:人工植被在经过短暂的生长旺盛期后,由于对气候、土壤等适宜性不如本地植物而逐渐产生一定的衰退,相反,本地植物种子则很容易随风、降雨和动物活动等方式侵入,从而坡面植被出现了本地植物与人工喷播植物共存的状态;(3)后期特征:本地乡土植物侵入后,外来或商品性植物因对环境的不适应而完全消失,坡面植物被本地植物全部取代,实现与周边自然植被相一致的植物群落。因此,喷播植物的选择应以乡土植物为主,这是增进边坡人工植被演替、促进边坡植物群落稳定发展的关键之一。

### 3.3 边坡植物物种的多样性

森林植物的多样性是森林群落稳定性的重要标志,统计表明(表 3):海宁鼠尾山露采废弃矿山边坡人工植被乔木层的物种丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数分别为 3.16、0.721 4、2.571 3 和 0.382 5,除乔木层的 Pielou 指数小于灌木层的外,均大于灌木层和草本层,这是由于边坡植被营建设计充分考虑乔木树种多个种类在边坡上的种植,充分利用自然小平台,采用植生袋围堰构建种植槽或种植坑,起到了较好的效果。草本植物的多样性指数相对较低,这是由于大量人工喷播的狗牙根和高羊茅等植物种类基本覆盖了边坡而形成了草本植物较低的多样性。灌木层的物种多样性居于乔木和草本植物之间,说明灌木层的物种多样性相对较高,这是由于在营造时充分考虑美丽胡枝子、马棘等木本植物的种类和数量,使灌木层的物种

多样性得到进一步提高。

表 3 海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被的物种多样性

多样性指数	乔木层	灌木层	草本层
物种丰富度指数	3.16	2.21	1.81
Simpson 指数	0.721 4	0.532 1	0.515 2
Shannon-Wiener 指数	2.571 3	2.067 7	1.631 1
Pielou 指数	0.382 5	0.394 2	0.332 8

### 3.4 与周边物种的相似度分析

根据对海宁鼠尾山露采废弃矿山周边山体自然植被的调查(表 4),乔木树种主要有黑松(*Pinus thunbergii* Parl),高度在 2.3 m 左右,重要值达 41,灌木层主要有盐肤木、美丽胡枝子和金樱子(*Rosa laevigata* Michx)等,高度为 1.1~1.3 m,重要值分别为 27、22、18。草本以野青茅(*Deyeuxia anundinacea* (Linn) Beauv var *laxiflora* (Rendle) P. C. Kuo et S. L. Lu)和蕨(*Pteridium aquilinum* (Linn) Kuhn var *Latiusculum* (Desv) Underw. ex Heller)为主,高度为 0.7~0.9 m,重要值分别为 39、27。乔木层、灌木层和草本层的平均高度分别为 2.1、1.2、0.4 m,盖度分别为 65%、47%和 10%。与表 1 中人工植被乔木层、灌木层和草本层的平均高度和盖度有一定的相似性。

表 4 海宁鼠尾山露采废弃矿山周边自然植被的群落结构

植物种类	重要值	高度 /m	加权平均高度 /m	盖度 /%
乔木层	黑松	41	2.3	65
	合欢	3	2.1	
	黄连木	7	2.5	
	木荷	9	1.5	
	冬青	5	1.8	
	构树	3	1.4	
	短柄枹栎	18	2.1	
	白栎	12	1.6	
	黄檀	2	1.5	
	灌木层	盐肤木	27	
美丽胡枝子		22	1.3	
野桐		13	1.2	
梔子		5	0.8	
金樱子		18	1.1	
牡荆		5	1.0	
算盘子		5	0.9	
山棉被		5	0.3	
草本层	马唐	7	0.3	10
	狗尾草	6	0.3	
	一年蓬	11	0.6	
	野青茅	39	0.9	
	艾蒿	5	0.7	
	蕨	27	0.7	
	芒	5	1.0	

注:短柄枹栎(*Quercus serrata* Murray var *brevipetiolata* (A. DC.) Nakai)、白栎(*Quercus fabric* Hance)、黄檀(*Dalbergia hupeana* Hance)、梔子(*Gardenia jasm inoides* Ellis)、牡荆(*Vitex negundo* Linn var *cannabifolia* (Sieb et Zucc) Hand-Mazz)、算盘子(*Glochidion puberum* (Linn) Hutch)、山棉被(*Wikstroemia indica* (Linn) C. A. Mey)、艾蒿(*Artemisia argyi* L. et Vant)、芒(*Miscanthus sinensis* Anders)。

应用相关系数 ( $R$ ) 的统计结果 (表 5) 表明: 人工植被乔木层树种的组成与周边自然植被相似度最大 ( $R=0.4119$ ); 灌木层的相似度为  $0.0222$ , 草本层植物相似度为  $-0.3416$ , 乔木、灌木和草本层综合相似度为  $0.1276$ 。可以认为, 海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被的结构与组成与周边山体的自然植被具有一定的相似性, 随着时间的推移和人工植被的生长, 这种相似程度将会逐渐提高, 并与周边自然植被融为一体。

表 5 海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被与周边自然植被的相似度

植被类型	乔木层	灌木层	草本层	乔灌草综合
相关系数 $R$	0.4119	0.0222	-0.3416	0.1276

### 3.5 生物量组成

海宁鼠尾山露采废弃矿山边坡人工植被的生物量调查表明 (表 6): 由于样地的植物种类组成不同, 测得的生物量数据也不尽相同。地上部分生物干质量为  $361.93 \sim 1224.74 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 相差较大, 其中以 4

表 6 海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被的生物干质量组成

项 目	1号样地	2号样地	3号样	4号样地	平均值
生物干质量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	地上部分	582.30	459.65	361.93	1224.74
	地下部分	185.75	170.40	336.57	326.56
	合计	768.05	630.05	698.50	1551.30
生物量干质量的根冠比	0.32	0.37	0.93	0.27	0.47
枯落物干质量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	98.27	176.35	288.67	31.98	148.82

注: 1号样地植物以马棘和高羊茅为主; 2号样地植物以狗尾草、狗牙根和马棘为主; 3号样地植物以紫花苜蓿为主; 4号样地植物以狗牙根为主。

### 3.6 蓄持水分效益

测定表明: 海宁鼠尾山露采废弃矿山各样地植被的地上活地被部分持水量平均为  $880.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  (表 7), 以 4号样地最大, 为  $1387.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最小是 3号样地, 为  $437.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与各样地的地上部分生物量干质量相一致。

各样地的枯落物持水量平均为  $702.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 以 3号样地最大, 为  $1405.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最小是 4号

号样地的地上部分生物量最大。地下部分生物干质量为  $170.4 \sim 336.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 差异也较大, 其中以 3号样地的地下部分生物量最大。地上部分和地下部分平均生物干质量分别为  $657.16, 254.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

地上部分和地下部分的生物干质量比 (即生物干质量的根冠比) 的统计表明: 各样地生物干质量根冠比相差很大, 4号样地最小 ( $0.27$ ), 3号样地最大 ( $0.93$ ); 但无论如何, 地上部分的生物干质量均大于地下部分。

各样地的枯落物干质量也不同, 枯落物干质量最高的是 3号样地, 为  $288.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最低的是 4号样地, 为  $31.98 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均为  $148.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

通过植被重植, 使原来寸草难生的裸露岩石坡面覆盖了植被, 改善了视觉环境, 具有一定的固定  $\text{CO}_2$  和制造  $\text{O}_2$  的功能。此外, 大量的枯落物能够改良基质或土壤, 增强植被的自然生存能力。

样地, 为  $140.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与各样地的地上部分枯落物干质量相一致。

喷附在边坡上的基质成为植物生长的土壤, 其蓄持水量平均为  $13919.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 各样地间的差异不大。

地上植被和枯落物及土壤三者合计的平均持水能力为  $15.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  左右, 相当于每公顷约  $155.0 \text{ t}$ , 发挥着显著的水土保持生态效益。

表 7 海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被修复 3 a 后的蓄持水分效益

项 目	1号样地	2号样地	3号样	4号样地	平均值
地上活地被持水量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	858.23	837.63	437.10	1387.99	880.24
枯落物持水量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	438.21	824.20	1405.48	140.27	702.04
土壤蓄持水量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	14223.27	14879.26	15395.82	11178.05	13919.10
合计持水量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	15519.71	16541.09	17238.40	12706.31	15501.38

此外, 边坡植被的修复, 除了具有良好的视觉与景观效益和防止水土流失的生态效益外, 还具有良好的边坡防护和浅层边坡的加固作用。因此, 植被

护坡的方法已逐渐并广泛应用于受损山体坡面的治理中<sup>[7-11]</sup>。这种边坡生物防护的功能主要依靠坡面植物的地下根系及地上茎叶起到根系力学加筋、

锚固、支撑作用和茎叶的降雨截留、抑制地表径流、削弱溅蚀等护坡效应。

#### 4 结论与建议

从 2005 年 6 月到 2007 年 10 月,浙江海宁鼠尾山露采废弃矿山边坡采用客土喷播、植生袋围堰造坑植树和边坡专用基质型容器苗种植等植被修复技术,已形成乔木高度 2.3 m、盖度 31%,灌木 1.2 m、盖度 52%,草本高度 0.35 m、盖度 59%,乔木、灌木和草本复合的森林植物群落。

海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被的演替特征表现为:(1)初期特征以客土喷播的人工植被为主;(2)中期特征出现了本地植物与人工喷播植物共存的状态;(3)后期特征随着本地乡土植物的侵入后实现与周边自然植被相一致的植物群落。因此,喷播植物的选择应以乡土植物为主,这是增进边坡人工植被演替、促进边坡植物群落稳定发展的关键之一。

边坡植被物种的多样性为:乔木层 > 灌木层 > 草本层。乔木层树种的组成与周边自然植被相似度最大, $R=0.4119$ ;灌木层的相似度为 0.0222,草本层植物相似度为 0.3416,乔木、灌木和草本层综合相似度为 0.1276。可以认为,海宁鼠尾山露采废弃矿山人工植被的结构与组成与周边山体的自然植被具有一定的相似性。

边坡植被地上部分和地下部分平均生物干质量分别为  $657.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $254.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。枯落物干质量为  $148.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。地上活地被部分持水量平均为  $880.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,枯落物持水量平均为  $702.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,土壤蓄持水量平均为  $13919.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,各样地间的差异不大。地上植被和枯落物及土壤三者

合计的平均蓄持水量为  $15.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  左右。

矿山边坡水、土、肥奇缺,植被修复难度较大。海宁鼠尾山露采废弃矿山植被修复采用以乡土植物为主的客土喷播、植生袋围堰造坑植树和边坡专用基质型容器苗种植等技术,已形成乔木、灌木和草本复合的森林植物群落,改善了视觉环境,较好地发挥生物护坡、水土保持的功能,值得推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 孙翠玲,苏铁成,郭玉文. 矿山矸石台地植被恢复栽培模式研究 [J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 356 - 361
- [2] 袁航,谢利刚. 浙江省矿山生态环境整治工作进展 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(增刊): 116 - 121
- [3] 柏明娥,洪利兴,钱华,等. 浙江省海宁市尖山区鼠尾山露采矿山植被恢复技术 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(增刊): 150 - 155
- [4] 叶仲节,柴锡周. 浙江林业土壤 [M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1986: 303 - 365
- [5] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 [M] // 中国科学院生物多样性委员会. 生物多样性研究的原理与方法. 北京:中国科学技术出版社, 1994: 141 - 165
- [6] 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
- [7] 周德培,张俊云. 植被护坡工程技术 [M]. 北京:人民交通出版社, 2003
- [8] 张俊云,李绍才,周德培. 岩石边坡植被护坡技术(2)——厚层基材的组成及特性 [J]. 路基工程, 2000(5): 4 - 6
- [9] 张俊云,周德培,李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1400 - 1403
- [10] 朱海鹰,徐国钢,张军,等. 高速公路边坡生态防护施工技术 [J]. 中外公路, 2003, 23(3): 83 - 85
- [11] 刘本同,钱华,何志华,等. 我国岩石边坡植被修复技术现状和展望 [J]. 浙江林业科技, 2004, 24(3): 47 - 54