

# 矿山废弃地 3 种人工植被恢复模式土壤水源涵养特征

林明春

(福建牛姆林自然保护区管理处, 福建 永春 362600)

**摘要:** [目的] 分析评价福建省大田县银顶格矿区三种人工植被恢复类型土壤的水源涵养功能。[方法] 采用土壤入渗率、最大可蓄水量、有效蓄水量和非毛管孔隙等指标进行测定分析。[结果] (1) 邓恩桉×马尾松类型土壤初渗率、稳渗率和平均入渗率均较快, 母质层与淋溶层的初渗率和稳渗率之差均较小, 其次为邓恩桉×紫花泡桐类型, 马尾松×杉木类型最差; (2) 各植被类型各土层入渗率与入渗时间呈显著幂函数关系; (3) 邓恩桉×紫花泡桐类型土壤最大可蓄水量、有效蓄水量和非毛管孔隙均较大, 邓恩桉×马尾松类型次之, 马尾松×杉木类型最差; (4) 用主成分法综合评价各植被类型土壤涵养水源能力从高到低依次为: 邓恩桉×紫花泡桐类型>邓恩桉×马尾松类型>马尾松×杉木类型。[结论] 邓恩桉×紫花泡桐类型改良矿山废弃地土壤结构效果较好, 可在类似地区推广应用。

**关键词:** 矿山废弃地; 土壤入渗率; 最大可蓄水量; 有效蓄水量; 非毛管孔隙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0296-06

中图分类号: S714.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.055

## Soil Water Conservation Features of Three Types of Artificial Vegetation Restoration in Abandoned Mining Area

LIN Mingchun

(Niumulin Nature Reserve Administrative Office of Yongchun, Yongchun, Fujian 362600, China)

**Abstract:** [Objective] In order to evaluate the soil water conservation features of three artificial vegetation types in Yindingge mining area of Datian County, Fujian Province. [Methods] Four indexes of infiltration, maximum water-holding capacity, available storage capacity of soil and non-capillary pore were calculated and analyzed. [Results] (1) The maximum value of initial infiltration rate, stable infiltration rate and average infiltration rate appeared in *Eucalyptus dunnii* × *Pinus massoniana* forest type, meanwhile, the difference of initial infiltration rate and steady infiltration rate in parent material layer and leached layer is smaller, the next was *E. dunnii* × *Paulownia tomentosa* forest type, the third was *P. massoniana* × *Cunninghamia lanceolata* forest type. (2) The relationship between infiltration rate and infiltration time of all vegetation types was a significantly power regression. (3) The maximum value of maximum water-holding capacity, available storage capacity of soil and non-capillary pore appeared in *E. dunnii* × *P. tomentosa* forest type, the next was *E. dunnii* × *P. massoniana* forest type, the third was *P. massoniana* × *C. lanceolata* forest type. (4) Using principal component analysis method to evaluate the soil water conservation features, the order expressed *E. dunnii* × *P. tomentosa* forest type > *E. dunnii* × *P. massoniana* forest type > *P. massoniana* × *C. lanceolata* forest type. [Conclusion] The better soil amelioration effects in abandoned mines belonged to *E. dunnii* × *P. tomentosa* forest type, it could be applied in the similar area.

**Keywords:** abandoned mines; soil infiltration storage; maximum water-holding capacity; available storage capacity of soil; non-capillary pore

矿山废弃地是指在采矿活动中,被破坏或占用造成无法正常使用的土地,具体是指在矿业生产中形成的采矿场、弃渣场、矿洞、坑道、地质塌陷区以及其他因采矿活动而无法正常使用土地。长期的采矿活动严重破坏了矿山的生态环境,造成水土流失、河道

淤积,水资源均衡失调等<sup>[1-3]</sup>问题。近年来,中国投入大量的资金技术对各地区矿山废弃地进行生态修复,已取得一定的成绩。但是矿山废弃地本身土壤理化性质较差、重金属污染等一系列问题,使得在该地域进行生态修复的人工植被生长较差,造成土壤有机质

收稿日期:2014-07-09

修回日期:2014-07-27

资助项目:福建省教育厅科技厅 B 类项目(JB12318)

第一作者:林明春(1971—),男(汉族),福建省泉州市人,大专,工程师,从事森林资源经营管理工作。E-mail:2108946381@qq.com。

累积少、地上生物产量低、植被盖度小及地表枯落物少等<sup>[4-7]</sup>,降低了林冠层和枯落物层的水源涵养能力。因此,该地域植被—土壤系统的水源涵养功能主要取决于土壤层<sup>[8]</sup>。本文以福建省大田县银顶格矿区矿山废弃地3种人工植被恢复类型为研究对象,通过研究土壤入渗率、最大可蓄水量、有效蓄水量和非毛管孔隙等方面评价各类型林地土壤的水源涵养功能的指标,以期为矿山废弃地植被恢复树种选择和配置提供科学依据。

## 1 研究区概况

大田县(25°29′—26°10′N, 117°29′—118°03′E)位于福建省中部,戴云山脉西侧,包括18个乡镇,矿藏丰富,其中煤、铁、硫磺产量大,有“闽中宝库”之美称。大田县属中亚热带季风气候,四季常青,温湿适中。年平均气温15.3~19.6℃,无霜期280~300d,年降水量1491~1809mm。土壤以酸性红黄壤为主,由花岗岩风化而成。境内群山延绵,山高谷深,山体切割强烈,暴雨频发,加上矿山开采,极易引发水土流失,是福建省水土流失重点监督区。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查与样品采集

本研究于2013年10月,在大田县银顶格矿区

(25°48′36″N, 117°49′05″E)定位监测标准地,选取3种典型的矿山废弃地植被恢复类型样地,进行林下土壤水源涵养功能差异分析,参照样地设置在矿区周边未被开采破坏的杉木次生林中。各植被恢复类型分别为由邓恩桉(*Eucalyptus dunni*)和紫花泡桐(*Paulownia tomentosa*)组成的阔叶混交林、邓恩桉和马尾松(*Pinus massoniana*)组成的针阔混交林及马尾松和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)组成的针叶混交林。每个植被类型设置3标准样地,共计12个样地,样地面积20m×20m,共计4800m<sup>2</sup>,分别对各样地进行每木检尺和群落调查(表1)。每个样地按照“义”字型随机布设5个土壤采样点,挖掘土壤剖面,划分土壤发生层次。其中,参照地杉木次生林土壤淋溶层、过渡层和母质层分层明显,分3层;而各植被恢复类型林地土壤由于受矿山开采的剧烈影响,仅有淋溶层和母质层分层较为明显,故分两层。每个土层取5个环刀,共计挖取360个环刀土样。林冠郁闭度和林下植被盖度,均采用样线法<sup>[9]</sup>,即在标准样地对角线布设样线,测算对角线上树冠冠幅总长与样地对角线总长的比值。林下植被灌木层主要以山苍子(*Litsea cubeba*)、楸木(*Aralia chinensis*)等为优势,草本层主要以铁芒萁(*Dicranopteris lihearis*)、光叶菝葜(*Smilax corbularia*)、木豆(*Cajanus cajan*)等为优势。

表1 各植被恢复类型的基本情况

植被类型	邓恩桉×紫花泡桐	邓恩桉×马尾松	马尾松×杉木	杉木次生林
起源	人工林	人工林	人工林	天然次生林
混交比例/混交方式	5桉5桐/株间混交	5桉5马/株间混交	5马5杉/株间混交	—
种植年限/a	6	6	6	—
造林密度	2m×2m	2m×2m	2m×2m	—
平均树高/m	3.2	2.6	2.1	14.4
平均地径(胸径)/cm	地径9.6	地径12.4	地径13.8	胸径16.2
郁闭度	0.7	0.6	0.5	0.9
林下植被盖度/%	60	50	30	70
土层厚度/cm	淋溶层21,母质层49	淋溶层18,母质层52	淋溶层20,母质层50	土壤层24,母质层46
基岩类型	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩
地形/海拔(m)	丘陵/829	丘陵/845	丘陵/823	丘陵/798
坡度/坡位/坡向	21°/中坡/东南	18°/中坡/东南	20°/中坡/东南	19°/中坡/东

### 2.2 土壤水分—物理性质与土壤蓄水能力的测算

依照《LY/T 1215—1999 森林土壤水分—物理性质的测定》方法,将装有原状土样的环刀置于水位与环刀等高的水盆中12h,取出称重,计算土样的最大持水量;然后,将该环刀静置于铺有干沙平底盆中2h,取出称重,计算土样的毛管持水量;称重后,将该

环刀再次静置于铺有干沙平底盆中24h,取出称重,计算田间持水量;最后,将环刀置于鼓风烘箱中,105℃烘干至恒重,取出称重,计算土壤水分换算系数及土壤容重。

称取过2mm筛风干土样20g,平铺于已知质量称量瓶中,将该称量瓶置于盛有饱和硫酸钾溶液的干燥

器中,2 周后充分吸水,取出称重,然后将湿土样置于鼓风烘箱 105 °C 烘干至恒重,计算土壤最大吸湿水。

将所采原状土样置于大容量广口玻璃容器中,栽种对土壤湿度不足反应较为敏感的指示作物,用德国 TESTO 生产的 QS-WT 型土壤湿度计测定指示作物叶片出现凋萎,空气湿度接近饱和时,容器中的土壤湿度,即可得土壤凋萎湿度。土壤入渗率则利用“双环法”<sup>[10]</sup> 测算得出。即首先在试验坡地上用铁铲清理出大小适宜的水平面,然后将用于测算土壤入渗率的内外圆环同时打入土中 10 cm(其中,内环直径为 5 cm,外环直径为 10 cm,内外环高度均为 15 cm),地表以上预留 5 cm,水头高略低于 5 cm,再利用马氏瓶为圆环供水,当内外环水层厚度达到 5 cm 时,开始用秒表计时,并每隔 1 min 读取供水桶标尺刻度值。实验过程保持水头高度约 5 cm,读数时一并读取水湿。

### 2.3 土壤入渗率测算

$$f_0 = q_0 / t_0; f_s = 0.510 \Delta h / [\Delta t (0.7 + 0.03T)]^{[10]}$$

式中:  $f_0$ ——初渗率;  $q_0$ ——入渗开始 3 min 的实测累积入渗量 (mm);  $t_0$ ——3 min;  $f_s$ ——稳渗率;  $\Delta h$ ——某一时段  $\Delta t$  供水桶读数差值 (mm);  $\Delta t$ ——时段 (min);  $T$ ——某时段的平均水温 (°C)。

### 2.4 数据数理方法

利用 Microsoft Excel 2007, SPSS 17.0 等软件进行数据的计算、统计分析与图表制作。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤渗透性

土壤的渗透性是指土壤疏导下渗大气降水或人工灌溉水的导水性能,既是反映土壤水源涵养功能的指标之一,也是计算土壤抗侵蚀力的基础变量之一,对于评价矿山废弃地土壤水土流失治理成效具有重要意义<sup>[11]</sup>。土壤渗透性能高低主要由土壤入渗率反映得出。

从表 2 中可以看出,各植被类型中,邓恩桉 × 马尾松类型各土层的土壤初渗率、稳渗率和平均入渗率最大,与杉木次生林各土层土壤入渗率最为接近,其次为邓恩桉 × 紫花泡桐类型,马尾松 × 杉木类型最差;除杉木次生林外,各植被类型各土层土壤入渗率均表现为:母质层 > 淋溶层。各植被类型累计入渗量表现为:在淋溶层,杉木次生林 > 邓恩桉 × 马尾松类型 > 邓恩桉 × 紫花泡桐类型 > 马尾松 × 杉木;母质层则相反;母质层(过渡层)累计入渗量均大于淋溶层。土壤入渗速率越高,累计入渗量越大,说明土壤结构越好,其疏导下渗降雨或灌溉水的能力越强,综合分析土壤初渗率、稳渗率、平均入渗率和累计入渗量可知,邓恩桉 × 马尾松类型的土壤渗透性能最好,其次为邓恩桉 × 紫花泡桐类型,马尾松 × 杉木类型最差。

表 2 不同植被恢复类型的土壤入渗率特征

入渗率特征	邓恩桉 × 紫花泡桐		邓恩桉 × 马尾松		马尾松 × 杉木		杉木次生林		
	淋溶层	母质层	淋溶层	母质层	淋溶层	母质层	淋溶层	过渡层	母质层
初渗率/(mm · min <sup>-1</sup> )	3.72	8.61	4.87	9.48	3.15	8.33	5.66	5.31	7.45
稳渗率/(mm · min <sup>-1</sup> )	0.70	1.97	1.09	2.22	0.48	1.82	2.14	1.98	1.76
平均入渗率/(mm · min <sup>-1</sup> )	1.84	1.92	2.30	2.57	1.34	2.70	2.48	2.95	1.87
T/min	78.00	141.00	68.00	97.00	57.00	135.00	71.00	84.00	122.00
Q/mm	143.70	270.40	156.40	249.70	76.50	364.60	175.80	247.60	228.50

注:  $T$  为达到稳渗时刻距初渗的时间;  $Q$  为从初渗至稳渗时间的累计入渗量。

利用 Kostiakov 入渗模型对各植被类型土壤入渗过程进行拟合<sup>[12]</sup>,结果显示(表 3),拟合精度均较高,  $R^2$  达到 0.608~0.972, sig.  $F < 0.01$ , 呈极显著水平。其中,  $a$  值在 2.675~44.339 之间,各植被类型 Kostiakov 方程  $a$  值的大小次序与土壤初渗率一致;  $b$  值在 0.070~0.414 之间,各植被类型入渗率下降越快,  $b$  值越大。

### 3.2 土壤最大可蓄水量

土壤最大可蓄水量由土壤饱和持水量扣除最大吸湿水计算得出,是衡量土壤水源涵养潜力的重要指标。由单位土层厚度最大可蓄水量和土层最大可蓄

水量来体现。

从表 4 中可以看出,各植被类型中,单位土层厚度最大可蓄水量和各土层累计最大可蓄水总量从高到低的顺序均依次为:杉木次生林 > 邓恩桉 × 紫花泡桐类型 > 邓恩桉 × 马尾松类型 > 马尾松 × 杉木类型,各层最大可蓄水量和土壤层最大可蓄水量从高到低的顺序大体为杉木次生林 > 邓恩桉 × 紫花泡桐类型 > 马尾松 × 杉木类型 > 邓恩桉 × 马尾松类型,其中,单位土层厚度最大可蓄水量为 2.76~4.97 mm/cm,各层最大可蓄水量为 39.8~159.1 mm/cm,土壤层最大可蓄水量为 76.7~107.9 mm,各土层累计最大

可蓄水总量为 215.6~252.8 mm;母质层蓄水比例从类型>邓恩桉×紫花泡桐类型>杉木次生林,为 57.3%~67.5%。

表 3 不同植被恢复类型土壤入渗过程的 Kostiakov 模型拟合比较

植被类型	土壤层次	Kostiakov 方程	R <sup>2</sup>	F	sig. F
邓恩桉×紫花泡桐	淋溶层	$y=3.852t^{-0.183}$	0.608	19.694	0.001
	母质层	$y=16.997t^{-0.148}$	0.904	150.577	0.000
邓恩桉×马尾松	淋溶层	$y=4.367t^{-0.414}$	0.774	35.096	0.000
	母质层	$y=44.339t^{-0.380}$	0.972	1 173.408	0.000
马尾松×杉木	淋溶层	$y=2.675t^{-0.070}$	0.697	26.143	0.000
	母质层	$y=13.643t^{-0.126}$	0.881	154.760	0.000
杉木次生林	淋溶层	$y=8.482t^{-0.158}$	0.902	219.005	0.000
	过渡层	$y=6.186t^{-0.102}$	0.729	54.970	0.000
	母质层	$y=11.721t^{-0.336}$	0.878	153.980	0.006

注: Kostiakov 方程的形式为  $f(t)=at^{-b}$ , 其中  $f(t)$  为入渗速率;  $a, b$  为参数;  $t$  为入渗时间。

表 4 不同植被恢复类型的土壤最大可蓄水量特征

植被类型	土壤层次	饱和持水量/%	最大吸湿水/%	单位土层厚度可蓄水量/(mm·cm <sup>-1</sup> )	各层最大可蓄水量/mm	土壤层最大可蓄水/mm	最大可蓄水/mm	母质层蓄水比例/%
邓恩桉×紫花泡桐	淋溶层	46.3	5.3	4.58	96.2	96.2	250.5	61.6
	母质层	28.6	2.8	3.15	154.4			
邓恩桉×马尾松	淋溶层	43.8	4.8	4.26	76.7	76.7	235.8	67.5
	母质层	24.4	5.6	3.06	159.1			
马尾松×杉木	淋溶层	39.7	4.1	3.88	77.6	77.6	215.6	64.0
	母质层	22.0	4.4	2.76	138.0			
杉木次生林	淋溶层	50.6	3.6	4.97	39.8	107.9	252.8	57.3
	过渡层	44.9	5.0	4.26	68.2			
	母质层	34.2	5.2	4.18	144.9			

土壤各层最大可蓄水量越大,说明其蓄水能力越强,减少地表径流和降低水土流失的效果越好,综合分析单位土层厚度最大可蓄水量、各层最大可蓄水量、土壤层最大可蓄水量和各土层累计最大可蓄水量可知,邓恩桉×紫花泡桐类型的土壤最大可蓄水能力最强,与杉木次生林最为接近,这可能与阔叶树种凋落物养分归还能力较强,改善土壤团粒结构,增加土壤蓄水空间有关<sup>[13]</sup>。另外,邓恩桉和紫花泡桐均属深根性树种,也能在一定程度上增加土壤垂直方向上的蓄水空间<sup>[14]</sup>。

### 3.3 土壤有效蓄水量

土壤有效蓄水量由土壤田间持水量扣除土壤凋萎湿度计算得出,该部分水量能被植物有效吸收利用,是衡量土壤保水能力的重要指标,对林地土壤水分管理也有重要意义。由单位土层厚度有效蓄水量和土层有效蓄水量来体现(表 5)。各植被类型中,各土层单位土层厚度有效蓄水量和各土层累计有效蓄

水总量从高到低顺序均为:杉木次生林>邓恩桉×紫花泡桐类型>邓恩桉×马尾松类型>马尾松×杉木类型,各土层单位土层厚度有效蓄水量为 1.42~2.72 mm/cm,各土层累计有效蓄水总量为 118.60~147.56 mm;各层有效蓄水量在淋溶层从大到小的顺序为:杉木次生林>邓恩桉×紫花泡桐类型>马尾松×杉木类型>邓恩桉×马尾松类型,在母质层则为:邓恩桉×马尾松类型>邓恩桉×紫花泡桐类型>杉木次生林>马尾松×杉木类型,为 43.92~89.96 mm;母质层蓄水比例从高到低依次为:邓恩桉×马尾松类型>邓恩桉×紫花泡桐类型>马尾松×杉木类型>杉木次生林,为 59.2%~67.2%;有效水占最大可蓄水比例排序为:杉木次生林>邓恩桉×紫花泡桐类型>邓恩桉×马尾松类型>马尾松×杉木类型,为 55.0%~58.4%。

土壤各层有效蓄水量越大,说明其保水能力越强,可供植物吸收利用的水分越多,对植物生长越有

利。综合分析单位土层厚度有效蓄水量、各层有效蓄水量、土壤层有效蓄水量、各土层累计有效蓄水总量和有效水占最大可蓄水比例可知,邓恩桉×紫花泡桐类型土壤保水能力最强,较接近杉木次生林。这可能

是由于紫花泡桐和邓恩桉速生能力均高于其他植被类型树种,发达的根系和较强的养分归还能力能够在短时间内有效改善土壤质量,提高土壤保水保肥的能力。

表 5 不同植被恢复类型的土壤有效水分特征

植被类型	土壤层次	田间持水量/%	凋萎湿度/%	有效水/%	单位土层厚度有效蓄水量/(mm·cm <sup>-1</sup> )	各层有效蓄水量/mm	土壤层有效蓄水量/mm	70 cm 土层有效蓄水量/mm	母质层蓄水比例/%	有效水占最大可蓄水比例/%
邓恩桉×紫花泡桐	淋溶层	27.5	4.25	23.25	2.56	53.76	53.76	142.45	62.3	56.9
	母质层	18.3	6.23	12.07	1.81	88.69				
邓恩桉×马尾松	淋溶层	25.4	4.97	20.43	2.44	43.92	43.92	133.88	67.2	56.8
	母质层	20.1	7.33	12.77	1.73	89.96				
马尾松×杉木	淋溶层	24.7	5.68	19.02	2.38	47.60	47.60	118.60	59.9	55.0
	母质层	19.5	5.77	13.73	1.42	71.00				
杉木次生林	淋溶层	30.8	3.57	27.23	2.72	21.76	60.16	147.56	59.2	58.4
	过渡层	26.6	6.07	20.53	2.40	38.40				
	母质层	22.8	5.34	17.46	1.90	87.40				

### 3.4 土壤非毛管孔隙及其蓄水量

近年来,许多研究者认为,毛管水只在垂直方向上为植物根系供水发挥作用,森林土壤涵养水源的功能主要依赖于土壤非毛管孔隙,它不仅为降水或灌溉水提供贮存的空间,达到减少地表径流、削减洪峰的功能,而且能为林地植被根系的通气供肥发挥重要作用<sup>[15]</sup>。

从表 6 中可以看出,在淋溶层,邓恩桉×马尾松类型和马尾松×杉木类型土壤中石砾含量虽高于邓恩桉×紫花泡桐类型和杉木次生林,但非毛管孔隙度

及非毛管孔隙蓄水量却是邓恩桉×紫花泡桐类型与杉木次生林较大,说明通过植被恢复可有效改善土壤理化性质,进而改良土壤结构,使土壤蓄水量增加;母质层与淋溶层表现的趋势基本一致。各植被恢复类型各土层土壤非毛管孔隙累计蓄水总量从高到低依次为:杉木次生林>马尾松×杉木类型>邓恩桉×紫花泡桐类型>邓恩桉×马尾松类型,为 28.01~84.46 mm。其中,母质层占蓄水比例从高到低依次为:马尾松×杉木类型>邓恩桉×紫花泡桐类型>邓恩桉×马尾松类型>杉木次生林,为 22.9%~34.8%。

表 6 不同植被恢复类型的土壤非毛管孔隙蓄水量特征

蓄水量特征	邓恩桉×紫花泡桐		邓恩桉×马尾松		马尾松×杉木		杉木次生林		
	淋溶层	母质层	淋溶层	母质层	淋溶层	母质层	淋溶层	过渡层	母质层
石砾>3 mm/%	15.83	30.47	26.42	38.18	22.64	35.39	19.27	18.86	31.45
非毛管孔隙/%	8.98	3.15	7.06	2.70	8.13	3.22	12.56	9.14	5.57
非毛管孔隙蓄水量/mm	26.16	11.77	20.52	7.49	24.84	13.27	35.26	29.87	19.33
土壤层蓄水量/mm	26.16		20.52		24.84		65.13		
70 cm 土层总蓄水量	37.93		28.01		38.11		84.46		
母质层占蓄水比例/%	31.00		26.70		34.80		22.9		

### 3.5 土壤水源涵养功能综合评价

利用 SPSS 软件中的主成分分析法计算土壤入渗率、最大可蓄水量、有效蓄水量和非毛管孔隙 4 个指标对土壤水源涵养功能的贡献程度<sup>[16-17]</sup>。结果显示(表 7),第 1 主成分方差累积贡献率达到 90.663%,信息损失量仅为 9.337%,且各因子载荷量均相差不大,在 0.457~0.524 之间,说明 4 个指标对土壤水源涵养功能影响程度较为接近,而用主成分 2 和 3(即仅

用入渗率或入渗率和最大可蓄水量等单一或 2 个指标来描述土壤水源涵养功能)存在局限性,其方差累积贡献率分别为 8.736%和 0.527%。

利用第 1 主分方程,计算各植被恢复类型土壤水源涵养功能的得分值<sup>[16-17]</sup>。从表 8 中可以看出,邓恩桉×紫花泡桐类型土壤水源涵养功能最强,与杉木次生林较接近,其次为邓恩桉×马尾松类型,马尾松×杉木类型最差。具体原因可能是:(1)邓恩桉和紫花

泡桐属阔叶树种, 林分凋落物凋落量较大, 林地下垫面糙度大, 可有效降低降雨对土壤的击溅侵蚀强度, 防止土壤表面结皮, 降低地表径流量<sup>[18]</sup>; (2) 邓恩桉和紫花泡桐均属深根性速生树种, 根系发达, 能够大大提高土壤孔隙度, 增加土壤蓄水空间<sup>[13-14, 19]</sup>; (3) 邓恩桉和紫花泡桐凋落物养分归还能力强, 能够提高土壤动物和微生物活性, 改善土壤理化性质, 增加土

壤团聚体含量, 进而提高土壤水源涵养功能<sup>[20]</sup>; (4) 邓恩桉×紫花泡桐类型林下透光度大, 林下植被覆盖率高, 也有利于林地土壤的蓄水保肥<sup>[21]</sup>; (5) 马尾松、杉木树种属针叶树种, 凋落物较难分解, 不利于土壤质量的改善<sup>[20]</sup>; (6) 另外, 杉木林分立地质量一般要求较高, 矿山废弃地贫瘠的土壤, 不利于杉木的生长, 又反过来影响土壤的水源涵养功能<sup>[22]</sup>。

表 7 不同植被恢复类型土壤水源涵养能力的 PCA 分析

主成分	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
P <sub>1</sub>	0.457	0.493	0.521	0.524	3.625	90.663	90.663
P <sub>2</sub>	0.824	-0.548	-0.131	-0.072	0.348	8.736	99.399
P <sub>3</sub>	0.335	0.674	-0.443	-0.489	0.022	0.527	99.926

表 8 不同植被恢复类型土壤水源涵养能力评价

植被类型	淋溶层		母质层		平均得分	排序
	得分	排序	得分	排序		
邓恩桉×紫花泡桐	3.208	2	-0.803	2	1.203	2
邓恩桉×马尾松	2.504	3	-1.393	3	0.556	3
马尾松×杉木	-0.212	4	-1.405	4	-0.809	4
杉木次生林	3.356	1	-0.427	1	1.465	1

#### 4 结论

(1) 各植被类型中, 邓恩桉×马尾松类型各土层的土壤初渗率、稳渗率和平均入渗率最大, 与杉木次生林各土层土壤入渗率最为接近, 其次为邓恩桉×紫花泡桐类型, 马尾松×杉木类型最差; 除杉木次生林外, 各植被类型各土层土壤入渗率均表现为: 母质层 > 淋溶层。各植被类型累计入渗量表现为: 在淋溶层, 杉木次生林 > 邓恩桉×马尾松类型 > 邓恩桉×紫花泡桐类型 > 马尾松×杉木; 母质层则相反; 母质层(过渡层)累计入渗量均大于淋溶层。

(2) 邓恩桉×紫花泡桐类型各土层单位土层厚度最大可蓄水量(有效蓄水量)、各土层累计最大可蓄水总量(有效蓄水量)、土壤层最大可蓄水量(有效蓄水量)、各土层非毛管孔隙度和非毛管孔隙蓄水量均较大, 与杉木次生林较为接近, 说明该植被恢复类型林地土壤潜在蓄水容量较大, 可贮存较多的降雨或灌溉水供高温干旱天气下植被的水分需求; 其次, 土壤保水持水能力较强, 降低林地土壤水分管理所需成本; 再者, 减小地表径流、削减洪峰及通气透水供肥能力较强。邓恩桉×马尾松类型次之, 马尾松×杉木类型最差。

(3) 主成分法综合分析各植被类型土壤入渗率、土壤最大可蓄水量、土壤有效蓄水量和土壤非毛管孔隙可知, 采取邓恩桉×紫花泡桐类型的恢复模式可有

效改善矿山废弃地土壤结构, 可在类似地区推广应用。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 彭建, 蒋一军, 吴健生, 等. 我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 38-48.

[2] 吕春娟, 白中科, 赵景逵, 等. 矿区土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 85-88.

[3] 李永康, 蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 95-100.

[4] Conesa H M, Faz A, Arnaldos R. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District[J]. Chemosphere, 2007, 66(1): 38-44.

[5] Wang S L, Liao W B, Yu F Q, et al. Hyperaccumulation of lead, Zinc, and Cadmium in plants growing on a lead/Zinc outcrop in Yunnan Province, China[J]. Environmental Geology, 2009, 58(3): 471-476.

[6] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China[J]. Environmental Pollution, 2004, 132(1): 29-40.

[7] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, 7(1): 47-59.

[8] 王丽, 梦丽, 张金池, 等. 不同植被恢复模式下矿区废弃地土壤水物理性质研究[J]. 中国水土保持, 2010(3): 54-58.

[9] Fiala A C S, Garman S L, Gray A N. Comparison of five canopy cover estimation techniques in the western Oregon Cascades[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 232(1/2/3): 188-197.

(下转第 308 页)

- Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, Eng; Cambridge University Press:2013.
- [2] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716.
- [3] 唐国利, 任国玉, 周江兴. 西南地区城市热岛强度变化对地面气温序列影响[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 722-730.
- [4] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 957-966.
- [5] Li Q, Zhang H, Liu X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79(3-4): 165-174.
- [6] 戴一枫, 刘屹岷, 周林炯. 中国东部地区城市化对气温影响的观测分析. 气象科学, 2011, 31(4): 365-371.
- [7] 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 城市化对北京夏季极端高温影响的数值研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1689-1694.
- [8] Knight S, Smith C, Roberts M. Mapping Manchester's urban heat island [J]. Weather, 2010, 65(7): 188-193.
- [9] 刘学锋, 阮新, 谷永利. 石家庄地区气温变化和热岛效应分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 11-14.
- [10] 方修琦, 章文波, 张兰生, 等. 近百年来北京城市空间扩展与城乡过渡带演变[J]. 城市规划, 2002, 26(4): 56-60.
- [11] 司鹏, 李庆祥, 轩春怡, 等. 城市化对北京气温变化的贡献分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 138-144.
- [12] 郑祚芳, 郑艳, 李青春. 近 30a 来城市化进程对北京区域气温的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 26-29.
- [13] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(7): 882-886.
- [14] Peterson T C. Assessment of urban versus rural in situ-surface temperatures in the contiguous United States: No difference found[J]. Journal of Climate, 2003, 16(18): 2941-2959.
- [15] Stone B. Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities: 1951-2000 [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(13): 1801-1807.
- [16] Wang Fang, Ge Quansheng. Estimation of urbanization bias in observed surface temperature change in China from 1980 to 2009 using satellite land-use data [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(14): 1708-1715.
- [17] 王文, 张薇, 蔡晓军. 近 50 a 来北京市气温和降水的变化[J]. 干旱气象, 2009, 27(4): 350-353.
- [18] 张佳华, 孟倩文, 李欣, 等. 北京城区城市热岛的多时空尺度变化[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1349-1354.
- [19] Heusinkveld B G, Steeneveld G J, van Hove L W A, et al. Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 19(2): 677-692.

(上接第 301 页)

- [10] 朱良君, 张光辉, 任宗萍, 等. 4 种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 163-167.
- [11] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.
- [12] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2331-2340.
- [13] 徐凤兰, 魏坦, 刘爱琴, 等. 杉木泡桐混交幼林地土壤的物理性质[J]. 浙江林学院学报, 2000, 17(3): 285.
- [14] 钱永平. 邓恩桢根系生态学研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [15] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 351-360.
- [16] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86(1): 84-98.
- [17] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.
- [18] 张志永, 张卓文, 陈玉生, 等. 5 种主要森林类型涵养水源能力比较研究[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(2): 171-175.
- [19] 陈慈禄. 泡桐毛竹混交林混交效果试验研究[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(2): 31-33.
- [20] 郭培培, 江洪, 余树全, 等. 亚热带 6 种针叶和阔叶树种凋落叶分解比较[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(5): 655-659.
- [21] 潘辉, 黄石德, 张金文, 等. 试论福建省桉树人工林的生态问题及其对策[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 605-609.
- [22] 黄宇, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2199-2205.