

# 两种巨桉人工林地土壤抗蚀性的比较研究

余晓章, 魏鹏, 范川, 王谢, 张腾飞, 沈卫

(四川农业大学 林学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:** [目的] 揭示巨桉人工林组培苗和实生苗两种起源对土壤抗蚀性的影响。[方法] 利用 S 形采样法在样地内采集多个样点, 按上(0—10 cm), 中(10—20 cm), 下(20—30 cm)三层分别利用环刀和塑料盒采集原状土壤, 测定不同层次土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、渗透速率、水稳性团聚体含量等。[结果] (1) 随着土壤深度增加, 两种巨桉林地土壤容重呈现递增趋势, 而总孔隙度和通气孔隙度呈递减趋势。组培巨桉林地土壤容重低于实生苗巨桉林地, 而土壤总孔隙度、通气孔隙度高于显著实生苗巨桉林地( $p < 0.05$ ); (2) 随着土壤深度增加, 两种巨桉林地土壤水稳性指数、抗蚀指数、团聚状况、团聚度和结构系数呈现下降趋势, 水稳性指数和抗蚀指数达到显著水平( $p < 0.05$ ), 而分散率和分散系数呈现升高趋势。组培巨桉林地不同土层的抗蚀指数和结构系数均高于实生苗巨桉林地, 但分散系数均显著低于实生苗巨桉林地( $p < 0.05$ ); (3) 随着土壤深度增加, 两种巨桉林地土壤各粒径水稳性团聚体含量和平均重量直径(MWD)呈现出下降趋势, 土壤结构体破坏率呈现上升趋势。组培苗巨桉林地不同土层各粒径( $>5$  mm;  $5 \sim 2$  mm;  $0.5 \sim 0.25$  mm;  $>0.5$  mm;  $>0.25$  mm)水稳性团聚体含量和 MWD 均高于实生苗林地, 而结构体破坏率、 $2 \sim 1$  mm 和  $1 \sim 0.5$  mm 水稳性团聚体含量均低于实生苗巨桉林地。[结论] 组培巨桉人工林的土壤抗蚀性更佳。

**关键词:** 土壤抗蚀性; 巨桉人工林; 组培苗; 实生苗

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0058-06

中图分类号: S714.7, S157.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.012

## Comparative Study of Soil Anti-erodibility Between Two Kinds of *Eucalyptus Grandis* Plantations

YU Xiaozhang, WEI Peng, FAN Chuan, WANG Xie, ZHANG Tengfei, SHEN Wei

(College of Forestry, Sichuan Agriculture University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** [Objective] To research the effects of two seedlings [tissue culture seedling ( $P_1$ ) and seed seedling ( $P_2$ )] of *Eucalyptus grandis* plantation on soil anti-erodibility. [Methods] Soil samples of 0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm were collected with ring-knife and plastic box to determine the index as soil bulk density, non-capillary porosity, capillary porosity, total porosity, soil aeration porosity and water stable aggregates content, etc. [Results] The soil bulk density in the two seedling plantation lands increased at the downward soil profiles, while total porosity and soil aeration porosity decreased with the increase of soil depth. The soil bulk density in  $P_1$  was significantly lower than that in  $P_2$ . The total porosity and soil aeration porosity in  $P_1$  were significantly higher than those in  $P_2$ . Water stable index, soil erosion resistance, aggregate condition, aggregate degree and structure coefficient in the two kinds of plantations decreased with the increase of soil depth, while the soil dispersion rate and dispersion coefficient increased. The water stability and resistance to corrosion index were both significantly different at the 0.05 level. Soil erosion resistance and structure coefficient in  $P_1$  were higher than those in  $P_2$ , while the dispersion coefficient was lower than that in  $P_2$ . Contents of water-stable aggregate in all size and MWD (mean weight diameter) in both plantations decreased with the increase of soil depth, while soil structure damage rate increased. Contents of water-stable aggregate in different size ( $>5$  mm,  $5 \sim 2$  mm,  $0.5 \sim 0.25$  mm,  $>0.5$  mm,  $>0.25$  mm) and MWDS in  $P_1$  were higher than

收稿日期: 2014-03-06

修回日期: 2014-04-04

资助项目: 国家“十二五”科技支撑项目“长江上游低山丘陵区生态综合整治技术与示范”(2011BAC09B05); 四川省科技支撑计划项目(2010NZ0049)

第一作者: 余晓章(1959—), 男(汉族), 四川省成都市人, 实验师, 主要从事人工造林理论与技术研究。E-mail: yuxz0825@163.com。

通信作者: 范川(1973—), 男(汉族), 四川省渠县人, 博士, 副教授, 主要从事人工造林理论及技术研究。E-mail: fanchuan01@163.com。

those in  $P_2$ , while the structure damage rate, and water-stable aggregate in sizes of 2~1 mm and 1~0.5 mm in  $P_1$  were lower than those in  $P_2$ . [Conclusion] Soil anti-erodibility in  $P_1$  was higher than that in  $P_2$ , in the present study condition.

**Keywords:** soil anti-erodibility; *Eucalyptus grandis* plantation; tissue culture seedling; seed seedling

土壤抗蚀性是指土壤抵抗侵蚀营力对其分散和搬运作用的能力,它是评价土壤抵抗侵蚀能力的重要参数之一<sup>[1]</sup>。土壤抗蚀性强弱主要由土粒与水分子间的亲和力和土粒间的胶结力决定,一般亲和力越小,土壤越不易分散悬浮,团粒结构也越不易受到破坏而解体<sup>[2]</sup>。有研究<sup>[3-4]</sup>表明,土壤抗蚀性大小不仅与土壤颗粒组成、团聚体稳定性、有机质含量、渗透率、紧实度、黏土矿物等理化性质密切相关,还与林下枯落物和土壤中根系有着紧密联系。通常枯落物能对土壤形成机械保护,从而减弱降水的侵蚀能力,而植物根系通过穿插、盘绕和固结等减弱了流水冲刷和重力侵蚀作用,增强了土壤抗侵蚀能力<sup>[5]</sup>。同时,植被类型差异也会影响土壤抗蚀性。植被能显著改善土壤理化性质,进而提高林地土壤抗蚀性<sup>[6]</sup>,通常无林地土壤抗蚀性小于有林地<sup>[7-8]</sup>。不同林分类型的土壤抗蚀性也有明显差异<sup>[3,9]</sup>,黄进等<sup>[7]</sup>研究发现,不同林分类型的土壤抗蚀性强弱顺序为:青冈林>香樟林>杉木林>马尾松林>毛竹林>板栗林。但是,不同起源的同一树种林地土壤抗蚀性是否存在差异,至今尚不清楚。

巨桉(*Eucalyptus grandis*)是优良的速生树种,具有抵御土壤侵蚀,稳定土壤结构和很强的碳固定能力<sup>[10]</sup>。林亚丽<sup>[11]</sup>等对组培与实生苗巨桉的对比研究发现,巨桉组培苗总体生长量好于实生苗,无论是从胸径抑或树高上均表现出显著的优势<sup>[12]</sup>,而对不同起源巨桉林地的土壤抗蚀性研究尚未见报道。因此,本研究选取位于四川省丹陵县杨场镇的不同起源巨桉林(组培苗林与实生苗林)为研究对象,通过对不同巨桉林土壤物理性质及土壤水稳性团聚体等土壤抗

蚀性指标进行研究,比较不同巨桉林下土壤抗蚀性能,为四川盆地丘陵区生态恢复的树种选择和水土保持工作提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省丹陵县杨场镇退耕还林后 2009 年营造的巨桉林区(102°57'—103°04' E, 29°55'—29°59' N),海拔 570~590 m,该地区处于四川盆地西南边缘,属于亚热带气候,年平均气温 16.6 °C,最冷月(1 月)平均温度为 6.7 °C,最热月(7 月)平均温为 28.0 °C。冬干春旱,夏洪秋雨,阴天偏多,日照偏少。年平均降水量 1 233 mm,年平均相对湿度 82%,土壤为老冲击黄壤,pH 值为 4.3~6.8。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及样品采集 2012 年 9 月,根据典型性和代表性的原则,在组培苗巨桉人工林和实生苗巨桉人工林,分别选取 3 块面积为 20 m×20 m 的样地,试验地基本情况详见表 1。

在样地内按 S 形布点,采集多个样点,每个样点均按上(0—10 cm),中(10—20 cm),下(20—30 cm)3 层分别利用环刀和塑料饭盒采集原状土壤,带回实验室测定不同层次土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、渗透速率、水稳性团聚体含量等物理性质。层次的划分和采样是结合前人的研究以及实际样地土壤深度而定<sup>[13]</sup>。同时再分别采集 0—10 cm, 10—20 cm,20—30 cm 土层约 2 kg 的混合土样,带回室内自然风干,供土壤机械组成、微团聚体组成等各指标的测定。

表 1 巨桉人工林的基本概况

种源	林龄/a	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	胸径/cm	树高/m	落叶层厚度/ cm	郁闭度	坡度/ (°)	坡向
组培苗	3	1 681	13.5	14.8	3.5	0.7	10	东南
实生苗	3	1 670	10.6	10.5	1.6	0.6	9	东南

### 1.2.2 测定方法

(1) 水稳性指数测定方法。土样均匀放在孔径 0.5 cm 的金属网格上,置于静水中进行观测,以 1 min 为间隔分别记取 0.7~1.0 cm 直径的风干土粒 50 颗,记下分散土粒数,连续进行 10 min 观测,每

1 min 间隔乘以不同的校正系数,计算出水稳性指数。

(2) 水稳性团聚体及风干率的测定。用土壤团聚体分析仪测定风干土水稳性团聚体含量<sup>[14]</sup>。参照日本川村秋男的方法测定毛管饱和和水土样水稳性团聚体的含量<sup>[15]</sup>,即把风干土土样放在已浸入水中的海

绵上,让其均匀吸水,经过 48 h 使其饱和,然后用土壤团粒分析仪进行分析<sup>[16]</sup>。

(3) 结构体破坏率等的测定。采用干湿筛法,土壤有机质的测定采用硫酸重铬酸钾法,土壤机械组成与微团聚体组成测定采用比重计法,土壤理化性质的测定均参照国标测定。

1.2.3 数据处理与统计分析 抗蚀指数、有机质、水稳性团聚体、团聚度、团聚状况、分散率、分散系数等常用指标计算方法为:

$$\text{水稳性指数: } K = (\sum P_i K_i + P_{10}) / A$$

式中: $i$ ——1,2,3,⋯,10;  $P_{10}$ ——10 min 内没有分散的土粒数;  $P_i$ ——第  $i$  分钟分散的土粒数;  $K_i$ ——第  $i$  分钟的校正系数;  $A$ ——试验的土粒总数(50 粒)。

$$\text{抗蚀指数} = (\text{总土粒} - \text{崩塌土粒}) / \text{土粒总数} \times 100\%$$

$$\text{团聚状况} = (>0.05 \text{ mm 微团聚体分析值}) - (>0.05 \text{ mm 机械组成分析值})$$

$$\text{团聚度} = \text{团聚状况} / >0.05 \text{ mm 微团聚体分析值} \times 100\%$$

$$\text{分散率} = (<0.05 \text{ mm 微团聚体分析值} / <0.05 \text{ mm 机械组成分析值}) \times 100\%$$

$$\text{分散系数} = (<0.001 \text{ mm 微团聚体分析值} / <0.001 \text{ mm 机械组成分析值}) \times 100\%$$

$$\text{结构系数} = 100\% - \text{分散系数}(\%)$$

$$\text{结构性颗粒指数} = \frac{\text{黏粒含量} (<0.001 \text{ mm})}{\text{粉粒含量} (0.001 \sim 0.05 \text{ mm})}$$

$$\text{水稳性团聚体平均重量直径(MWD)} = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

式中: $x_i$ ——任一颗粒级范围内水稳性团聚体的平均直径;  $w_i$ ——对应于  $x_i$  的团聚体百分含量(以小数表示)。

小于 0.01 mm 物理性黏粒含量 = ( $<0.01$  颗粒的校正读数 / 总烘干土重)  $\times 100\%$

数据处理和图表生成采用 Excel 软件,采用 SPSS 16.0 软件进行统计和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种起源巨桉人工林土壤物理性质

由表 2 可以看出,随着土壤深度的增加,土壤容重呈现递增趋势,而总孔隙度和通气孔隙度呈现递减趋势。

不同巨桉人工林同一层次间的土壤容重均表现出组培巨桉林低于实生苗巨桉林的趋势。而土壤总孔隙度、通气孔隙度均表现为组培巨桉林高于实生苗巨桉林。

方差分析显示,组培巨桉人工林不同土层间土壤容重差异不显著( $p > 0.05$ ),而总孔隙度和通气孔隙度差异显著( $p < 0.05$ );实生苗巨桉林 3 个指标在不同层次上均差异显著( $p < 0.05$ )。

表 2 两种巨桉人工林土壤物理性质

指标	组培巨桉人工林			实生苗巨桉人工林		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层
容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	1.05 <sup>aA</sup>	1.15 <sup>aA</sup>	1.23 <sup>aA</sup>	1.13 <sup>bB</sup>	1.21 <sup>aA</sup>	1.28 <sup>aA</sup>
总孔隙度/%	49.95 <sup>aA</sup>	46.44 <sup>aB</sup>	44.42 <sup>aC</sup>	47.92 <sup>bA</sup>	44.79 <sup>bB</sup>	42.67 <sup>bC</sup>
通气孔隙度/%	22.04 <sup>aA</sup>	18.89 <sup>aB</sup>	17.76 <sup>aB</sup>	20.66 <sup>bA</sup>	15.45 <sup>bB</sup>	13.34 <sup>bC</sup>

注:不同小写字母表示同一土层的同一指标在两种巨桉人工林间差异显著( $p < 0.05$ ),不同大写字母表示同一指标在相同的巨桉人工林不同土层间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.2 水稳性指数、抗蚀指数及微团聚体含量为基础的土壤抗蚀性指标

由表 3 可知,随着土层深度的增加,组培和实生苗巨桉林人工林的土壤水稳性指数和抗蚀指数均呈现出下降趋势,团聚状况、团聚度和结构系数呈现出下降趋势,分散率和分散系数呈现升高趋势。方差分析显示,两种巨桉人工林各层次的水稳性指数、抗蚀指数均表现出显著差异性( $p < 0.05$ )。

对上层而言,组培巨桉林的水稳性指数、抗蚀指数、团聚状况、团聚度、结构系数均高于实生苗巨桉人工林,分别高出 3.06%,12.08%,16.95%,26.29%,3.01%;而组培巨桉林的分散率、分散系数分别低于

实生苗巨桉人工林 0.91%,14.45%。方差分析显示,两种巨桉人工林间除土壤分散率差异不显著外( $p > 0.05$ ),其余指标均差异显著( $p < 0.05$ )。

对中层而言,组培巨桉林的抗蚀指数、团聚状况、团聚度、分散率、结构系数均高于实生苗巨桉人工林,分别高出 4.05%,13.01%,17.46%,5.11%,13.59%;而组培巨桉林的水稳性指数、分散系数分别低于实生苗巨桉人工林 1.07%,26.32%。方差分析显示,两种巨桉人工林间除土壤水稳性指数、分散率差异不显著外( $p > 0.05$ ),其余指标均差异显著( $p < 0.05$ )。

对下层而言,组培巨桉林的水稳性指数、抗蚀指数、分散率、结构系数均高于实生苗巨桉人工林,分别

高出 2.52%, 12.63%, 0.98%, 0.02%; 而组培巨桉林的团聚状况、团聚度、分散系数分别低于实生苗巨桉人工林 5.36%, 37.42%, 4.06%。方差分析显示, 两种巨桉人工林间除分散率、结构系数、分散系数差异不显著外 ( $p > 0.05$ ), 其余指标均差异显著 ( $p < 0.05$ )。

表 3 两种巨桉人工林水稳性指数、抗蚀指数及微团聚体含量为等土壤抗蚀性指标

指标	组培巨桉人工林			实生苗巨桉人工林		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层
水稳性指数	0.93±0.07 <sup>aA</sup>	0.84±0.07 <sup>aB</sup>	0.75±0.054 <sup>aC</sup>	0.90±0.09 <sup>aA</sup>	0.85±0.06 <sup>aB</sup>	0.73±0.06 <sup>bC</sup>
抗蚀指数/%	91.00±8.68 <sup>aA</sup>	74.00±7.04 <sup>aB</sup>	60.67±4.25 <sup>aC</sup>	80.00±7.55 <sup>bA</sup>	71.00±6.99 <sup>bB</sup>	53.00±6.23 <sup>bC</sup>
团聚状况/%	34.926±3.43 <sup>aA</sup>	33.26±2.88 <sup>aA</sup>	24.68±2.69 <sup>bB</sup>	28.99±3.11 <sup>bA</sup>	28.93±2.81 <sup>bA</sup>	28.02±2.789 <sup>aA</sup>
团聚度/%	67.64±6.45 <sup>aA</sup>	67.13±6.34 <sup>aA</sup>	45.62±3.58 <sup>bB</sup>	49.85±4.62 <sup>bA</sup>	46.23±5.49 <sup>bB</sup>	62.69±6.44 <sup>aC</sup>
分散率/%	58.46±5.05 <sup>aA</sup>	65.48±5.75 <sup>aB</sup>	65.81±5.43 <sup>aB</sup>	58.99±5.71 <sup>aA</sup>	62.13±6.01 <sup>aB</sup>	65.15±6.46 <sup>bC</sup>
分散系数/%	33.01±3.72 <sup>bA</sup>	34.00±3.17 <sup>bA</sup>	41.45±3.55 <sup>aB</sup>	40.52±3.64 <sup>aA</sup>	41.91±4.82 <sup>aA</sup>	43.12±3.52 <sup>aB</sup>
结构系数/%	66.67±5.51 <sup>aA</sup>	66.10±6.23 <sup>aA</sup>	59.87±5.55 <sup>aB</sup>	60.78±6.48 <sup>bA</sup>	57.11±4.99 <sup>bA</sup>	59.85±5.48 <sup>aB</sup>

### 2.3 水稳性团聚体为基础的土壤抗蚀性指标

由表 4 可知, 同一层次不同巨桉人工林的土壤 > 5 mm 水稳性团聚体差异不显著, 其他各粒径水稳性团聚体含量、结构体破坏率和水稳性团聚体平均重量直径 MWD 均差异显著 ( $p < 0.05$ )。随着土层深度的增加, 2 种人工林土壤各粒径水稳性团聚体含量和 MWD 从上到下大致呈现出下降趋势。各模式土壤结构体破坏率从上到下层呈现出逐渐上升的趋势。

对上层而言, 组培巨桉人工林土壤 > 5 mm, 5~2 mm, 0.5~0.25 mm, > 0.5 mm 和 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量和 MWD 均高于实生苗巨桉人工林, 分别高出 7.49%, 59.03%, 50.96%, 37.00%, 37.63%, 25.23%; 而 2~1 mm 和 1~0.5 mm 水稳性团聚体含量, 结构体破坏率均低于实生苗巨桉人工林, 分别低出 19.08%, 40.26%, 19.10%。中层和下层表现出与上层相同的变化规律。组培巨桉林土壤中层各粒径 (> 5 mm, 5~2 mm, 0.5~0.25 mm, > 0.5 mm,

> 0.25 mm) 水稳性团聚体含量和 MWD 分别高出实生苗巨桉林 6.43%, 72.03%, 2.79%, 44.78%, 43.36%, 27.71%; 而 2~1 mm 和 1~0.5 mm 水稳性团聚体含量, 结构体破坏率分别低出实生苗巨桉林 100.72%, 12.80%, 14.54%。组培巨桉林土壤下层各粒径 (> 5 mm, 5~2 mm, 0.5~0.25 mm, > 0.5 mm, > 0.25 mm) 水稳性团聚体含量和 MWD 分别高出 24.78%, 90.34%, 16.34%, 6.18%, 64.41%, 41.30%; 2~1 mm 和 1~0.5 mm 水稳性团聚体含量, 结构体破坏率分别低出 52.02%, 172.50%, 15.05%。分析结果表明, 组培巨桉人工林的抗蚀性相对较高, 实生苗巨桉林下土壤的抗蚀性相对较低。

### 2.4 不同人工林土壤结构与土壤抗蚀性能的关系

以抗蚀指数表征不同人工林土壤的抗蚀性能, 以土壤容重、总孔隙度、通气孔隙度和结构破坏率表征土壤结构, 经定量指标分析, 土壤结构与土壤抗蚀性呈明显的函数非线性关系。

表 4 两种巨桉人工林水稳性团聚体为基础的土壤抗蚀性指标

指标	组培巨桉人工林			实生苗巨桉人工林		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层
> 5 mm	8.826±0.87 <sup>aA</sup>	6.6560±0.45 <sup>aB</sup>	3.595±0.38 <sup>aC</sup>	8.165±0.783 <sup>aA</sup>	6.232±1.65 <sup>aB</sup>	2.704±1.69 <sup>aC</sup>
5~2 mm	19.959±1.68 <sup>aA</sup>	15.442±1.14 <sup>aB</sup>	12.934±0.95 <sup>aC</sup>	8.178±1.16 <sup>bA</sup>	4.274±0.75 <sup>bB</sup>	1.249±0.67 <sup>bC</sup>
2~1 mm	2.233±0.01 <sup>aA</sup>	0.752±0.01 <sup>bB</sup>	0.567±0.02 <sup>bC</sup>	2.659±0.15 <sup>bA</sup>	2.043±0.09 <sup>aB</sup>	0.862±0.02 <sup>aC</sup>
1~0.5 mm	0.698±0.08 <sup>aA</sup>	0.559±0.07 <sup>bB</sup>	0.406±0.05 <sup>bC</sup>	0.979±0.07 <sup>bB</sup>	0.636±0.04 <sup>aC</sup>	1.105±0.01 <sup>aA</sup>
0.5~0.25 mm	1.483±0.06 <sup>aA</sup>	0.825±0.06 <sup>aB</sup>	0.643±0.03 <sup>aC</sup>	0.727±0.03 <sup>bB</sup>	0.802±0.03 <sup>aA</sup>	0.538±0.02 <sup>aC</sup>
> 0.5 mm	31.716±2.68 <sup>aA</sup>	23.512±2.69 <sup>aB</sup>	17.501±1.98 <sup>aC</sup>	19.982±1.65 <sup>bA</sup>	12.983±0.97 <sup>bB</sup>	5.920±0.37 <sup>bC</sup>
> 0.25 mm	33.202±5.17 <sup>aA</sup>	24.336±2.22 <sup>aB</sup>	18.144±2.13 <sup>aC</sup>	20.709±3.15 <sup>bA</sup>	13.784±2.16 <sup>bB</sup>	6.458±0.66 <sup>bC</sup>
结构体破坏率/%	65.814±8.66 <sup>aC</sup>	74.882±6.51 <sup>bB</sup>	81.144±8.16 <sup>bA</sup>	78.380±5.86 <sup>bC</sup>	85.766±7.22 <sup>aB</sup>	93.356±7.69 <sup>aA</sup>
MWD/mm	1.152±0.06 <sup>aA</sup>	0.928±0.04 <sup>aB</sup>	0.722±0.02 <sup>aC</sup>	0.861±0.02 <sup>bA</sup>	0.671±0.01 <sup>bB</sup>	0.424±0.01 <sup>bC</sup>

土壤容重、总孔隙度、通气孔隙度和结构体破坏率与土壤抗蚀性指数的相关系数分别为 -0.885,

0.961, 0.89 和 -0.916, 达到了极显著性水平。通过回归拟合发现, 其定量关系以二次函数模拟效果最

好,通过  $F$  检验达到极显著水平。土壤容重、总孔隙度、通气孔隙度和结构体破坏率分别在低于  $1.22 \sim 1.36 \text{ g/cm}^3$ ,  $30\% \sim 47\%$ ,  $16.27\% \sim 20.83\%$  和

$50.56\% \sim 146.67\%$  内,均与土壤抗蚀性能成显著正相关,当超过  $1.36 \text{ g/cm}^3$ ,  $47\%$ ,  $20.83\%$  和  $146.67\%$ , 均与土壤抗蚀性呈负相关关系(表 5)。

表 5 土壤抗蚀性能与土壤结构关系模型

指标	拟合方程	决定系数 $R^2$	相关系数 $r$	$F$ 值
土壤容重	$Y=31.055X^2-84.46X+175.98$	0.869	-0.885**	97.33**
总孔隙度	$Y=0.063X^2-5.92X+70.23$	0.886	0.961**	67.12**
通气孔隙度	$Y=0.32X^2+12.92X+15.29$	0.893	0.890**	87.55**
结构破坏率	$Y=-0.0089X^2-2.64X+163.91$	0.845	-0.916**	72.50**

注:  $Y$  为土壤抗蚀性指数;  $X_1$  为容重;  $X_2$  为总孔隙度;  $X_3$  为通气孔隙度;  $X_4$  为结构破坏率。\* \* 表示相关性极显著 ( $p < 0.05$ )。

### 3 结论与讨论

土壤物理性质是影响土壤抗蚀性能的主要因素之一。土壤容重是土壤紧实度的反应指标,土壤容重越小,土壤越疏松,土壤入渗速率和蓄水量越大<sup>[17]</sup>。本研究中组培巨桉人工林土壤容重低于实生苗巨桉林地,而土壤总孔隙度、通气孔隙度高于显著实生苗巨桉林地 ( $p < 0.05$ )。可见组培巨桉人工林土壤容重和土壤孔隙分布水平更好,有利于土壤透水和保水,土壤发生侵蚀的可能性和程度明显减弱<sup>[17]</sup>,从而提高了组培巨桉人工林土壤抗蚀性能。另外,土壤物理性质得到改善后,地下根系生长更旺盛,分布更广,有利于根系的盘绕和固结,降低水流对地表的冲刷作用,从而提高土壤抗侵蚀能力<sup>[5]</sup>。

水稳性指数能综合反映土壤抵抗降雨和径流分散以及悬浮作用,抗蚀指数和结构体破坏率也是反映土壤抗蚀性的较好指标<sup>[9]</sup>。本研究中组培巨桉人工林不同层次土壤的水稳性指数和抗蚀指数均显著高于实生苗巨桉人工林,而结构体破坏率显著低于实生苗巨桉人工林。由此可见,组培巨桉人工林土壤水稳性较实生苗巨桉人工林好,主要是因为水稳性指数与土壤物理性质关系密切,组培巨桉人工林土壤水稳性指数高,极大程度地降低了水土流失潜在危险性<sup>[17]</sup>。同时,组培巨桉林地上和地下生长均优于实生苗,具较大的生长潜力,使组培巨桉人工林植被覆盖率较实生苗巨桉人工林高<sup>[11]</sup>,具有较好的保持水土能力,能够减弱降水侵蚀,从而增加土壤水稳性。水稳性团聚体是由有机质胶结而成的团粒结构,具有较高的稳定性,不仅能改善土壤结构,而且被水浸湿后不易解体<sup>[18]</sup>。本研究中组培巨桉人工林土壤的水稳性团聚体含量高于实生苗巨桉人工林,这主要是因为与实生苗相比,组培苗有自身的优点,比如根系较发达,活跃,定植后迅速恢复,造林成活率高<sup>[19]</sup>,能够保持优树原株的优势,生长速度较实生苗快,生物量的积累较

多<sup>[20]</sup>,林下枯枝落叶层较厚,能够为土壤提供机械保护作用,减弱降雨的冲蚀程度。同时,林下枯落物不断的分解和转化,使土壤中腐殖质含量增加,从而促进土壤团聚体形成良好的具有大量孔隙和不易破碎的团粒结构<sup>[21]</sup>。团粒结构的积累不仅能防止地表径流的发生,而且能减缓地表径流的流速,进一步防止地表径流的集中<sup>[22]</sup>。此外,有研究<sup>[4]</sup>表明,当水稳性团粒含量相同时,团粒结构的颗粒越大,其抗蚀性越强。本研究中组培巨桉人工林土壤的大粒级水稳性团聚体含量明显高于实生苗巨桉人工林。在土壤 3 个层次中  $>5 \text{ mm}$  的水稳性团聚体含量分别比实生苗巨桉人工林高出  $7.49\%$ ,  $6.43\%$  和  $24.78\%$ 。这有可能是因为组培苗巨桉人工林地下根系生长旺盛,活根分泌物较多,死亡细根不断分解提供有机质作为土壤团粒的胶结剂,加上根系的穿插和缠绕,使土壤中大粒级水稳性团聚体增加。进一步改善土壤团粒结构,增强了对降水冲击和径流冲刷的抵抗能力,从而也提高了土壤抗冲击能力<sup>[23]</sup>。由此可见,组培巨桉人工林土壤抗侵蚀能力更强。

综合分析可知,巨桉组培苗比实生苗有更强的生存能力和适应环境的能力,不仅能够改良土壤结构和减弱降水侵蚀程度,而且还能增强林地土壤水稳性,提高土壤抗侵蚀能力,在保持水土方面有着较大优势。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王云琦,王玉杰,朱金兆. 重庆缙云山典型林分林地土壤抗蚀性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 775-780.
- [2] 刘旦旦,张鹏辉,王健,等. 黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 102-106.
- [3] 任改,张洪江,程金花,等. 重庆四面山几种人工林地土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 20-24.
- [4] 董慧霞,李贤伟,张健,等. 退耕地三倍体毛白杨林地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2009, 28(6): 45-48.

- [5] 潘树林, 辜彬, 杨晓亮. 土壤抗蚀性及评价研究进展[J]. 宜宾学院学报, 2011, 11(12): 101-104.
- [6] 王俭成, 杨建英, 史常青, 等. 北川地区典型林分土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 71-75.
- [7] 黄进, 杨会, 张金池. 桐庐生态公益林主要林分类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 49-52.
- [8] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 等. 黔中杠寨小流域不同植被类型土壤抗蚀性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 64-70.
- [9] 丛日亮, 黄进, 张金池, 等. 苏南丘陵区主要林分类型土壤抗蚀性分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1862-1867.
- [10] Manning A D, Fischer J, Lindenmayer D B. Scattered trees are keystone structures-implications for conservation[J]. *Biological Conservation*, 2006, 132(3): 311-321.
- [11] 林亚丽, 张文春. 巨桉无性系(组培苗)造林推广试验初报[J]. 四川林勘设计, 2006(2): 49-50.
- [12] 蓝贺胜, 曹汉洋, 黄秀美, 等. 巨桉家系与无性系造林对比试验初报[J]. 桉树科技, 2009, 26(2): 32-35.
- [13] 吴培衍. 巨尾桉优良无性系组培苗与扦插苗的造林效果[J]. 亚热带农业研究, 2006, 2(2): 94-96.
- [14] 石长金, 刘和民. 水土保持产业化经营的理论与模型研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 1999, 15(3): 209-212.
- [15] 丁文峰, 李占斌. 土壤抗蚀性的研究动态[J]. 水土保持科技情报, 2001, 1(1): 36-39.
- [16] Whalen J K, Hu Q, Liu A. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1842-1847.
- [17] 史东梅, 吕刚, 蒋光毅, 等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 35-39.
- [18] 赵洋毅, 周运超, 段旭, 等. 黔中喀斯特地区不同植被土壤抗蚀性研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 633-636.
- [19] 牛芳华, 李志辉, 王昌熙, 等. 尾巨桉幼苗根系分布及生物量特征研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 6-11.
- [20] 罗柳媚, 韦理电, 何斌, 等. 尾巨桉和厚荚相思人工林水源涵养功能研究[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 220-224.
- [21] 廖建良. 组培苗无性系巨尾桉营林技术[J]. 惠州大学学报, 1997(4): 119-121.
- [22] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 等. 不同草本层三倍体毛白杨林地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 70-74.
- [23] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49.

(上接第 57 页)

- [21] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- [22] 耿威, 王林和, 刘静, 等. 鄂尔多斯高原 3 种 4 龄—5 龄灌木根系抗拉特性初步研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2008, 29(3): 86-89.
- [23] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3445-3452.
- [24] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28.
- [25] Coutts M P. Root architecture and tree stability[J]. *Plant and Soil*, 1983, 71(1/3): 171-188.
- [26] 格日乐, 额尔敦花, 宋想斌, 等. 6 种水土保持植物枝条的数量特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 71-76.
- [27] 伯姆, 德榕, 协麟. 根系研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [28] 马红燕, 格日乐, 赵杏花. 排土场 2 种灌木根系数量特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 156-159.
- [29] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 329-335.
- [30] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [31] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7-12.
- [32] 李勇著. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [33] 苑淑娟. 4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [34] 张永亮. 沙棘根系生物力学特性研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.