

南亚热带不同类型人工林的水土保持效应

孙 聃¹, 刘素萍¹, 申卫军^{1†}, 饶兴权¹, 郭志峰², 李永强²

(1. 中国科学院华南植物园, 510650, 广州; 2. 鹤山市林业科学研究所, 529725, 广东鹤山)

摘要: 为了探讨不同类型植被恢复过程中的水土保持效应, 本文基于设在鹤山森林生态系统国家野外科学观测与研究站的9个地表径流场6年水文监测, 研究了不同植被类型恢复过程中的水土流失特征。结果表明: 幼龄人工林地表径流系数大小为: 尾叶桉林(EU1) < 10物种混交林(M1) < 厚荚相思林(AC) < 30物种混交林(M2) < 红椎(CH), 成熟人工林地表径流系数: 荷木林(SS) < 窿缘桉(EU) < 马占相思(AM) < 马尾松林(PM), 成熟林6年平均径流量较幼龄林减少64.2%。幼龄人工林年平均推移质排序为 AC < M1 < M2 < EU1 < CH, 成熟人工林年平均推移质: SS < AM < EU, 幼龄人工林(3~7年林龄)中年均推移质量是成熟人工林(24~28年林龄)的7.14倍。混交林在短期和长期的减流效果都要好于纯林; 桉林在减少地表径流方面短期和长期均有较好的效果, 但在减少推移质方面效果不理想。幼龄期红锥林的减少径流和推移质的效果较差, 成熟林中松林的减少径流效果较差。总的来看, 幼龄人工林径流系数和推移质呈逐年降低趋势并趋于平缓, 到2011年已经接近成熟林水平, 而成熟林径流系数和推移质多年来均处于一个稳定较低水平; 因此, 保护森林应首要减少人为干扰, 森林在一段时期自然恢复后, 均可在水土保持方面发挥重要作用。

关键词: 南亚热带; 成熟人工林; 幼龄人工林; 地表径流; 水土保持

中图分类号: S157.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2018)01-0072-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2018.01.009

Soil and water conservation effects of different plantations in southern subtropical area of China

SUN Dan¹, LIU Suping¹, SHEN Weijun¹, RAO Xingquan¹, GUO Zhifeng², LI Yongqiang²

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 510650, Guangzhou, China;

2. Heshan Forestry Science Research Institute, 529725, Heshan, Guangdong, China)

Abstract: [**Background**] Soil and water conservation is one of the major ecological functions of plantations, which may be affected by plant species composition and age of the plantations. There are 69 million ha plantations in China, which is composed of tens of thousands of plant species including both native and exotic species. These plantations have played important role in soil and water conservation. A study at Heshan National Field Research and Observation Station of Forest Ecosystem was conducted. [**Methods**] Five kinds of young plantations and four mature plantations were selected, and runoff fields were built under all plantations in order to have the long-term data. Runoff was monitored by automatic level logger placed in every plot. Bed load sediment data was collected at the end of each year. Characteristics of runoff and bed load sediment of each plantation were analyzed with ANOVA. [**Results**] Mature plantations functioned better than young plantations in terms of runoff reduction, the former reduced runoff by 64.2% compared to young ones in six years (2008–2013). The annual mean

收稿日期: 2017-12-03 修回日期: 2017-12-29

项目名称: 国家自然科学基金“土壤微生物对森林生态系统碳-氮耦合循环过程的调控机制”(31290222)

第一作者简介: 孙聃(1983—), 男, 博士, 工程师。主要研究方向: 恢复生态学。E-mail: sdgz@scbg.ac.cn

† 通信作者简介: 申卫军(1971—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 全球变化生态学。E-mail: shenweij@scbg.ac.cn

runoff of young plantations was 159.4 mm, with the order of EU1 (*Eucalyptus urophylla*) < M1 (*Eucalyptus urophylla*) < AC (*Acacia crassicarpa*) < M2 (30 species mixed forest) < CH (*Castanopsis hystrix*). Monthly mean runoff was 13.29 mm within the range of 9.22 to 16.59 mm. The annual mean runoff of mature plantations was 57.1 mm, with the order of EU (*Eucalyptus urophylla*) < AM (*Acacia mangium*) < SS (*Schima superba*) < PM (*Pinus massoniana*). Monthly mean runoff was 4.34 mm within the range of 3.22 to 6.04 mm. On the study of soil erosion, the average bed load sediment of young plantations (3–7 years) was 7.14 times of mature plantations (24–28 years). Bed load sediment varied with plantation type in the order of AC < M1 < M2 < EU1 < CH for young plantations and in the order of SS < AM < EU for mature plantations. In 2010, the bed load sediment amount of all plantations except CH began to reach a steady low level, while in 2012 all plantations were at a steady low level. [Conclusions] Soil and water erosion from different plantations show a significant downward trend through young plantation stage. *Eucalyptus* spp. is a better candidate for water conservation both in young and mature plantations, but *Castanopsis hystrix* and *Eucalyptus* spp. do not act well in reducing bed load sediment in young plantations. *Pinus massoniana*'s bed load sediment is significantly higher than other forest types of mature ones, though the differences of quantity in runoff among different forest types are not big in the long-term restoration. In both young and mature forests, the mixed forests are better than monoculture forests in water and soil conservation.

Keywords: southern subtropical area; mature plantation; young plantation; surface runoff; soil and water conservation

我国南方自 20 世纪 80 年代以来大规模植造人工林, 以华南地区为例, 山地丘陵占土地面积的 70% 以上, 人工林种植面积为 3 213 公顷, 水土流失面积达 3 533 hm^2 , 通过种植人工林改变地表径流和土壤侵蚀特征的研究显得尤为重要。森林影响径流的过程是一个十分复杂的过程, 不同的树种和植被群落结构, 不同的森林年龄在地区、季节都会产生不同效应。森林植被变化对径流的影响幅度相差较大, 森林覆盖度的降低可以不同程度地增加流域的产水量, 造林则导致流域产水量降低。但森林植被变化对流域产水量的影响却不近相同^[1-3], 主要有 3 种不同结论: 1) 森林的存在会使径流量增加; 2) 森林的存在与径流量之间没有明显的关系; 3) 森林的存在会减少年径流量。

为了研究水土流失过程, 许多国家和地区已经设立了小区径流场^[4], 中国过去几十年中大量的水土流失研究也都使用了小区径流场^[5-6]。尽管径流场的大小、保护措施和测量时长有所不同, 但其数据对中国的水土流失提供了宝贵的信息, 也揭示了不同植被类型与水土侵蚀之间存在的规律^[7-12]。

受季风气候的强烈影响, 我国南亚热带地区拥有丰富的森林动植物种类和资源, 植物区系、植被类型以及稀有濒危植物的分布也存在着地带分异性。我国南亚热带也有大面积的各种人工林和次生林。

人工林的主要造林树种以马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马占相思 (*Castanopsis hystrix*)、桉树 (*Eucalyptus* spp) 及一些乡土树种为主^[13]。本文将结合 9 种植被类型和 6 年的观测数据来分析水土流失的动态过程, 研究植被类型和林龄如何影响着水土保持, 以期为华南地区人工林造林提供科学依据。

1 研究区概况

鹤山丘陵综合试验站是中国科学院华南植物研究所(园)与鹤山市林业科学研究所共建, 2005 年成为国家野外台站之一。该站位于广东省江门市鹤山市, 地处南亚热带丘陵地区, 平均海拔高度 80 m, 顶极森林群落是亚热带季风常绿阔叶林。年均温度 22.5 $^{\circ}\text{C}$, 最热为 7 月份, 最冷为 1 月份。年均降雨量 1 534 mm, 干湿季交替明显。土壤为砂页岩发育而成的赤红壤。鹤山站先后建立成熟人工林和幼龄人工林 2 个研究样地。成熟人工林样地 1984 年建于桃源镇, 位于 E 112 $^{\circ}$ 54', N 22 $^{\circ}$ 41', 1986 年种植人工林种类包括: 1) 马占相思林 AM (*Acacia mangium*); 2) 桉树林 EU (*Eucalyptus urophylla*); 3) 荷木林 SS (*Schima superba*); 4) 马尾松林 PM (*Pinus massoniana*); 幼龄人工林样地 2005 年建于共和镇, 位于 E 112 $^{\circ}$ 50', N 22 $^{\circ}$ 34' 各样地约 1 hm^2 。2005 年幼龄人

工林样地包括:1)10种树种混交M1(10 species mixed forest);2)30种树种混交M2(30 species mixed forest);3)尾叶桉纯林EU1(*Eucalyptus urophylla*);4)厚荚相思纯林AC(*Acacia crassicarpa*);5)红锥纯林CH(*Castanopsis hystrix*);6)草坡GL本实验地立地条件相似,林下物种主要为芒萁(*Dicranopteris pedata*)。

2 材料与方法

2.1 数据采集

本研究采用小集水区径流场,把生态系统边界定义在小集水区的边界以内,我们分别在4个成熟人工林和5个幼龄人工林中建立了地表径流和含沙量监测系统。在每个林型内部用四周插入水泥板至20 cm深土层,插入后将原土回填,水泥板高出地面10 cm,使地表径流导入测流堰中,径流进入堰中通过三角堰口流出,也是径流的唯一出口。在坡底边设1个径流槽和1个仪器室,通过WGZ-1型自动水位计记录堰内水位高度从而换算出径流量。幼龄人工林试验区每个径流场投影面积大小为15 m × 20 m,成熟人工林试验区每个径流场投影面积为10 m × 20 m,通过测流堰用自动水位计记录径流量。每个试验区都配有1个自动雨量计用于测定大气降水。测流堰顶角为20°,流量计算公式^[14]如下:

$$Q_0 = 0.25H^{2.5}; \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(Q_0 + Q'_0)t_i. \quad (2)$$

式中: Q_0 为水位自计曲线上某一水位高度的流量, m^3/s , H 为堰口水头高度, m 。 Q 为某一降水过程的径流总量, Q_0 和 Q'_0 为水位曲线上相临两点水位高度(H_1 和 H_2)的流量, m^3/s 。 T 为相临2点的时间差(s), $i=1,2,3,\dots,n$,分别表示某一径流过程1,2,3, \dots,n 个相临2点的径流时段。最后将径流流量除以样地面积换算为径流深, mm 。地表径流为连续监测,记录间隔为5 min 1次;推移质每年年底收集,在沉沙池底部称量泥沙总量,并取样品回实验室在烘箱中105 °C干燥至恒重,计算出推移质干重。

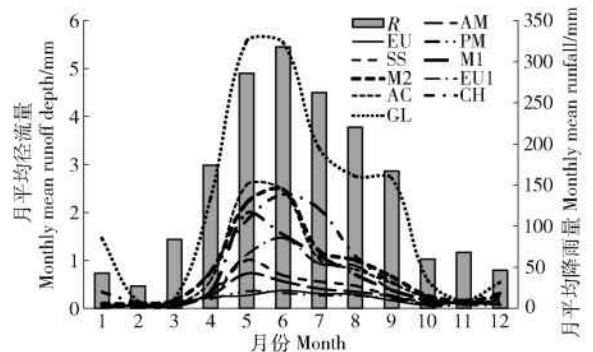
2.2 分析方法

所有的统计分析均用SPSS(Version14.0)软件进行。不同林型之间径流量与系数和径流土壤产出的显著性差异均用(One-way ANOVA)单因素方差和(Repeated measure ANOVA)重复测定方差分析,使用LSD检验,当 $P < 0.05$ 时视为统计上差异显著。

3 结果与讨论

3.1 地表径流特征

图1显示成熟人工林试验区4种林型和幼龄人工林试验区5种林型的地表径流系数各月间的变化情况。4—9月之间各林型地表径流变化较大,从量上来说要高于10月到翌年3月份,显示出了明显的干湿季差异。从降雨量规律来说,6月份降雨量最大,5月份次之,2月份降雨量最小,1月份次之。其中,成熟人工林和幼龄人工林地表径流均远远小于草坡地表径流。成熟人工林6年月平均地表径流量5月份最大,6月份次之,1月份径流量最小,12月份次之。幼龄人工林月平均地表径流量为6月份最大,5月份次之,2月份径流量最小而1月份次之。各林型地表径流量5月份和6月份呈现峰值,1、2、11、12月处于谷底。这与申卫军等^[15]等所得出的径流月度变化规律基本一致。



月均地表径流量和月均降雨量为2008—2013年月平均值; R 为降雨量, mm ;成熟人工林实验区:AM = 马占相思林,EU = 窿缘桉林,SS = 荷木林,PM = 松林;幼龄人工林试验区:M1 = 10物种混交林,M2 = 30物种混交林,EU1 = 尾叶桉纯林,AC = 厚荚相思纯林,CH = 红锥纯林,GL = 草坡。Monthly mean runoff depth and monthly mean rainfall refer to the mean value of all months during 2008—2013. R : rainfall, mm. In the experimental area of mature plantation: AM: *Acacia mangium*. EU: *Eucalyptus urophylla*. SS: *Schima superba*. PM: *Pinus massoniana*. Young plantation in 2005 include: M1: 10 species mixed forest. M2: 30 species mixed forest. EU1: *Eucalyptus urophylla*. AC: *Acacia crassicarpa*. CH: *Castanopsis hystrix*. GL is Grassland. The same below.

图1 成熟人工林与幼龄人工林试验区各林型月均地表径流系数及月均降雨量

Fig. 1 Surface runoff coefficient and monthly mean rainfall in the experimental area of the mature plantation and young plantation

结合表1和2的降雨量,幼龄人工林实验区6年降雨平均值为1 695.6 mm,变异系数21.2%,最大降雨量2012年为2 217.3 mm,最小降雨量2011

年为 1 132.4 mm。成熟人工林实验区 6 年降雨平均值为 1 754.7 mm, 变异系数 20.1%, 最大降雨量在 2012 年, 为 2 196.8 mm, 最小降雨量在 2011 年为 1 194.5 mm。

表 1 中幼龄人工林试验区不同林型 6 年平均径流量为 157.2 mm, 径流量从小到大依次为: 尾叶桉林 EU1 (109.4 mm) < 10 物种混交林 M1 (129.7

mm) < 厚荚相思林 AC (169.1 mm) < 30 物种混交林 M2 (182.8 mm) < 红锥纯林 CH (194.8 mm)。变异系数为 43.7% ~ 70.1%。表 2 成熟人工林试验区不同林型 6 年平均径流量为 57.1 mm, 径流量从小到大依次为: 荷木林 SS (41.3 mm) < 窿缘桉林 EU (42.0 mm) < 马占相思林 AM (63.7 mm) < 松林 PM (78.6 mm)。变异系数为 26.3% ~ 33.3%。

表 1 2008—2013 年幼龄人工林降雨与径流动态

Tab. 1 Dynamics of rainfall and runoff in young plantation from 2008 to 2013

幼龄人工林 Young plantation forest		10 物种混交 M1			30 物种混交 M2			尾叶桉 EU1		厚荚相思 AC		红锥 CH	
年份 Year	降雨量 Rainfall/ mm	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/ %	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/ %	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/ %	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/ %	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/ %		
2008	1 831.3	237.8	13.0	321.2	17.5	207.6	11.3	387.3	21.1	412.4	22.5		
2009	1 515.5	199.4	13.2	213.1	14.1	171.7	11.3	210.7	13.9	227.6	15.0		
2010	1 709.0	91.9	5.4	162.0	9.5	80.8	4.7	73.8	4.3	133.3	7.8		
2011	1 132.4	38.9	3.4	99.5	8.8	39.0	3.4	73.9	6.5	75.2	6.6		
2012	2 217.3	94.5	4.3	184.2	8.3	95.5	4.3	149.5	6.7	203.6	9.2		
2013	1 768.0	115.6	6.5	116.5	6.6	61.9	3.5	119.4	6.8	118.0	6.7		
平均值 Mean	1 695.6	129.7	7.6	182.8	10.8	109.4	6.4	169.1	9.9	195.0	11.3		
CV	21.2	57.3	57.0	43.7	38.4	60.3	59.3	70.1	64.7	61.7	55.9		

表 2 2008—2013 年成熟人工林降雨与径流动态

Tab. 2 Dynamics of rainfall and runoff in mature plantation from 2008 to 2013

成熟人工林 Mature plantation forest		马占相思 AM		窿缘桉 EU		荷木 SS		马尾松 PM	
年份 Year	降雨量 Rainfall/ mm	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/%	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/%	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/%	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient/%
2008	1 932.0	74.1	3.8	43.7	2.3	44.2	2.3	91.6	4.7
2009	1 615.6	72.0	4.5	30.7	1.9	41.1	2.5	79.9	4.9
2010	1 625.8	66.1	4.1	37.9	2.3	35.6	2.2	60.6	3.7
2011	1 194.5	31.0	2.6	28.5	2.4	17.9	1.5	44.3	3.7
2012	2 196.8	75.8	3.4	52.5	2.4	56.3	2.6	104.9	4.8
2013	1 963.5	63.3	3.2	58.5	3.0	52.8	2.7	90.2	4.6
平均值	1 754.7	63.7	3.6	42.0	2.4	41.3	2.3	78.6	4.4
CV	20.1	26.3	18.3	28.4	14.6	33.3	18.8	28.5	12.5

注: 变异系数 = (标准偏差/平均值) × 100%。Notes: Coefficient of variation = (Standard deviation/Mean) × 100%.

从表 1 可以看出: 2008—2010 年期间, 幼龄人工林各幼龄林型地表径流量随着时间推移径流系数有一个较为显著的降低过程, 而在 2010 年到 2013 年的过程中趋于平稳, 即使在 2012 年和 2013 年雨

水相对充沛的年份里的地表径流系数也无显著增加, 且各种林型也几乎趋于稳定; 因此人工林在 6 林龄时基本处于拦蓄径流能力快速增加的末端, 之后效果较为缓和, 从森林类型上看, 总体来说混交林径

流要少于纯林。而在成熟人工林中(表 2),地表径流系数无显著变化,说明成熟林减流效果已经达到一个平稳较低的水平且荷木混交林相较于其他纯林减流效果最好。

3.2 成熟人工林与幼龄人工林径流差异

林龄和观测年份做两因素重复测量方差分析,

表 3 成熟与幼龄人工林在 2008 年到 2013 年间的径流系数的重复测量方差分析

Tab. 3 P value of repeated measurement ANOVAs for young plantation and mature plantation during 2008 - 2013

	林龄 Age		年份 Year		林龄 × 年份 Age × Year	
	F	P	F	P	F	P
径流系数 Runoff coefficient	27.007	0.001	70.951	0.001	66.611	0.001

的调节功能,随着森林植被率的增加,地表径流的形成和土壤侵蚀明显减少。地表径流是引起流域水文变化的主要因子,是洪水流量的主要成分,同时也是水土流失、土壤侵蚀的一个重要因素^[16]。

从图 2a 可以看出:幼龄人工林不同林型间地表径流系数差异显著,尾叶桉纯林径流系数要显著小于其他林型,说明在幼龄人工林中,快速生长树种尾

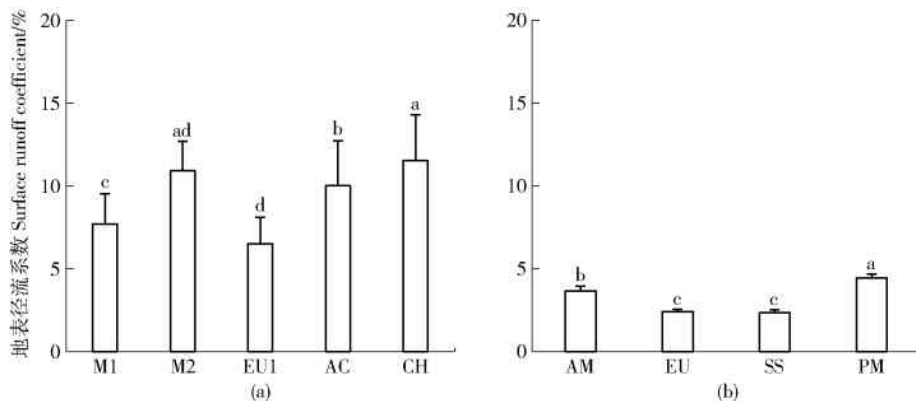


图 2 2008—2013 年成熟林年平均径流系数

Fig. 2 Average annual runoff coefficient of mature plantation from 2008 to 2013

从图 2b 可以看出,2008—2013 年松树林径流系数显著高于其他林型,其次是马占相思林,最小的是蔴椴林和荷木林且显著低于其他林型。从结果来看阔叶林减少径流能力要比针叶林强,而同为速生树种的马占相思和蔴椴,在成熟林阶段对径流的减流能力有一定的差别,桉林要好于马占相思林,这在幼龄林中也是呈现这样的趋势,作为乡土树种的荷木林减少径流的能力最强。

通过对不同林型间的产流对比发现,天然林、混交林优于人工林、纯林,复合层结构要好于单层,林龄与水土保持功能呈现正相关关系。这一结论与 Narain 等^[22] 和 Sánchez 等^[23] 等学者的结论一致,通过 20 多年恢复期的成熟林,年际间的地表径流林型

表 3 的结果表明:成熟人工林和幼龄人工林在林龄间差异极为显著($P < 0.01$),说明成熟人工林相对于幼龄人工林更能有效减少径流;年际间的差异为极为显著($P < 0.01$),表明随着时间推移,径流有显著的降低趋势。

国内有研究分析认为森林对地表径流具有良好

叶桉林能较早地起到减少径流的作用^[17-18],且其蒸腾作用较强^[19-20],减少了地表径流的流出量;红锥纯林除了 30 物种混交林外,径流系数显著大于其他林型,红锥树种在早期生长较为缓慢,属于后发树种。有研究发现其 30 年后能达到甚至超过桉林的蓄积量^[21],但早期由于个体较小,林冠不发达导致其无法有效截留降雨,导致林区径流量较大。

间已经没有了明显差异,从类型上看也是混交林地表径流要小于纯林。

3.3 成熟人工林与幼龄人工林土壤推移质特征

从林龄上来看(图 3),幼龄人工林(3~7 林龄)中各林型推移质年平均值土壤侵蚀量是成熟人工林(24~28 年林龄)的 7.14 倍。幼龄人工林自 2008—2012 年土壤推移质量各林型平均值是 0.5 t/hm^2 ,而成熟人工林平均为 0.07 t/hm^2 。从各自林型来看,成熟人工林中推移质量为:荷木林(SS) < 马占相思林(AM) < 蔴椴林(EU);幼龄人工林中表现为:厚荚相思林(AC) < 10 物种混交林(M1) < 30 物种混交林(M2) < 尾叶桉林(EU1) < 红锥纯林(CH)。

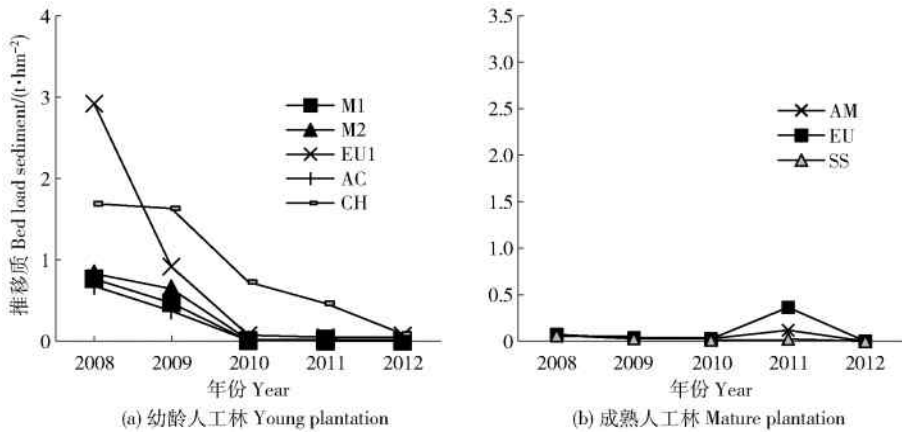


图 3 幼龄人工林(a)和成熟人工林(b)推移质量

Fig. 3 Young plantation (a) and mature plantation (b) soil loss

3.4 成熟人工林与幼龄人工林土壤推移质差异

以林龄和观测年份对年际土壤推移质量做两因素重复测量方差分析,结果表明:成熟人工林和幼龄人工林在林龄间土壤流失量有差异但不显著($P = 0.070$),而年际间的差异显著($P = 0.034$),说明成

熟人工林相对于幼龄人工林虽然在总的推移质量上差异不大,但年际间两者还是存在差异的。究其原因是因为后面几年的年际土壤流失量不同林龄之间差异越来越小,也越来越趋近于 0,表明随着时间推移,年际推移质量逐年递减。

表 4 成熟人工林与幼龄人工林在 2008 年到 2012 年间的推移质的重复测量方差分析

Tab. 4 P value of repeated measurement ANOVAs with young plantation and mature plantation

	林龄 Age		年份 Year		林龄 × 年份 Year × Age	
	F	P	F	P	F	P
推移质 Bed load sediment	4. 822	0. 070	7. 472	0. 034	7. 570	0. 033

从图 4 可以看出,桉林和红锥林与其他林型土壤推移质量有显著性差异($P < 0.05$),说明在幼龄人工林中,桉林和红锥对土壤侵蚀的保护力比其他林型弱,原因可能是林冠不如其他林型茂密,穿透雨对地面侵蚀较大。从土壤流失和径流系数可以看出:虽然桉林对径流量的减流作用较好,但对土壤的保持能力却较弱;而厚荚相思虽然对减流能力比较弱,但是对土壤的保持能力却最强;红锥纯林相比其

他树种对径流和土壤流失的阻滞能力最弱。

从上图(图 4a)可以看出:2007—2009 年土壤推移质量不同林型差异显著($P < 0.05$),尾叶桉林和红锥纯林最高,显著高于 10 物种混交林和厚荚相思林,而 30 物种混交林与其他林型差异不显著;2008—2010 年土壤推移质量(图 4b)中红锥纯林显著高于 10 物种混交林和厚荚相思林,而 30 物种混交林和尾叶桉林与其他林型差异不显著;2009—

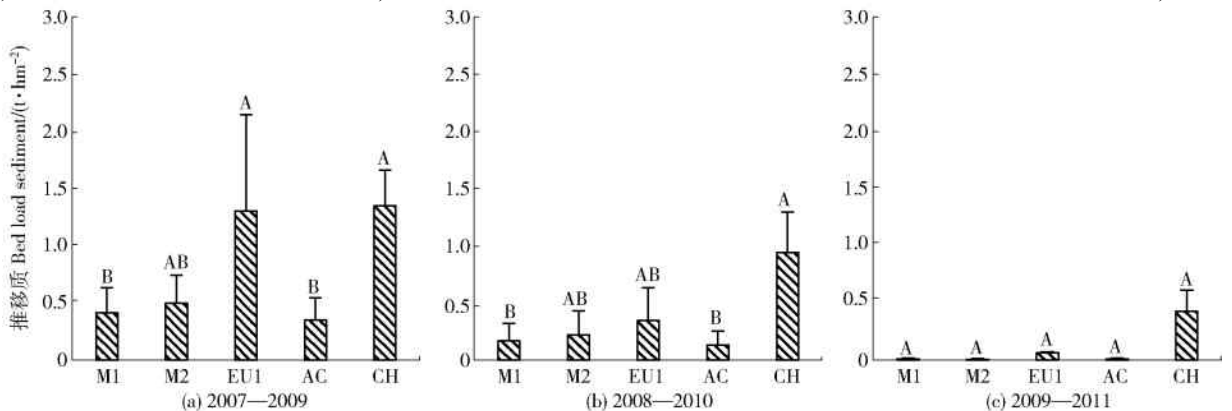


图 4 幼龄人工林不同时间段的年均推移质量

Fig. 4 Average annual bed load sediment of young plantation in different time

2011年(图4c)虽然红锥还大于其他林型,尽管差异未达到统计学上的显著水平,但其绝对值还是远高于其他林型。以上说明红锥林对土壤保持效果相对于混交林和桉树林效果较差,而桉林在早期也保持土壤的效果也较差,但随着时间推移,桉林的效果也逐渐得到了加强。

4 结论

研究期间,鹤山站降雨年内呈明显干湿季划分,年际间差异较大,是造成不同年份径流量和推移质差异的因素之一。研究结果表明:成熟人工林和幼龄人工林地表径流均远远小于草坡地表径流。成熟人工林的地表径流和推移质流失均小于幼龄人工林。其中成熟林地表径流相较于幼龄林减少了64.2%,推移质流失减少了86.0%。幼龄林在3~5年林龄期间,各林型水土流失有一个显著的下降趋势,7年林龄后达到一个稳定较低水平,而成熟林中泥沙流失趋势已经趋于平稳,年际间差异不大。从树种上看,纯林中的桉林在幼龄林阶段能有效减少地表径流,但推移质流失效果显示较慢。长期来看,桉林与荷木混交林均表现出良好的水土保持效果,得出这一结果可能是桉林早期的快速生长使得其蒸腾作用较强,降雨快速以蒸腾的方式回归大气,而后期桉树进入缓慢生长期时,由于其稀疏的冠层使得其他物质得到快速生长,从而径流也较少。而混交林由于不同物种的协同作用,使得径流和推移质侵蚀均较小。结果也表明,在华南地区气候水热条件充足的情况下,虽然幼龄不同林型水土保持能力有差异,只要保护得当,后期均能有不错的保持效果。

5 参考文献

[1] ZHOU Guoyi, WEI Xiaohua, CHEN Xiuzhi, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield[J]. *Nat Commun*, 2015, 6(3): 5918.

[2] 李文华,何永涛,杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. *自然资源学报*, 2001(5): 3.
LI Wenhua, HE Yongtao, YANG Liyun, et al. A summary and perspective of forest vegetation impacts on water yield[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001(5): 3.

[3] 石培礼,李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. *自然资源学报*, 2001(5): 86.
SHI Peili, LI Wenhua. Influence of forest cover change on hydrological process and watershed runoff[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001(5): 86.

[4] GARCÍA-RUIZ JOSÉ M, BEGUERÍA SANTIAGO, NAD-

AL-ROMERO ESTELA, et al. A meta-analysis of soil erosion rates across the world[J]. *Geomorphology*, 2015, 239: 16.

[5] GUO Qiankun, HAO Yanfang, LIU Baoyuan. Rates of soil erosion in China: a study based on runoff plot data[J]. *Catena*, 2015, 124: 68.

[6] 郑粉莉,唐克丽,白红英. 标准小区和大型坡面径流场径流泥沙监测方法分析[J]. *人民黄河*, 1994(7): 19.
ZHENG Fenli, TANG Keli, BAI Hongying, et al. Analysis of monitoring methods of runoff and sediment in standard plot and large sloping runoff field[J]. *Yellow River*, 1994(7): 19.

[7] 邓湘雯,康文星,田大伦,等. 不同年龄阶段杉木人工林生态系统的径流规律[J]. *林业科学*, 2007(6): 1.
DENG Xiangwen, KANG Wenxing, TIAN Dalun, et al. Runoff changes in Chinese fir plantations at different age classes, Huitong, Hunan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007(6): 1.

[8] 王斌,杨校生,李正才,等. 不同气候区4种典型地带性植被土壤水文功能比较[J]. *林业资源管理*, 2009(6): 84.
WANG Bin, YANG Xiaosheng, LI Zhengcai, et al. Comparison of hydrological functions of four typical zonal vegetation in different climatic zones[J]. *Forest Resources Management*, 2009(6): 84.

[9] 江森华,谢锦升,王维明. 闽北不同土地利用方式水土流失与降雨历时的关系研究[J]. *南昌工程学院学报*, 2011(4): 6.
JIANG Miaohua, XIE Jinsheng, WANG Weiming, et al. Relationship between rainfall duration and loss of soil and water in diverse land-use types of northern Fujian[J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2011(4): 6.

[10] 黄承标,刘运华,秦武明,等. 3种植被恢复过程中水土流失规律的研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010(2): 59.
HUANG Chengbiao, LIU Yunhua, QIN Wuming, et al. Study on the water and soil erosion rules during the three types of vegetation recovery process[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2010(2): 59.

[11] 张喜,薛建辉,许效天,等. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素[J]. *热带亚热带植物学报*, 2007(6): 527.
ZHANG Xi, XUE Jianhui, XU Xiaotian, et al. Forest surface runoff and its influence factors in Karst mountainous area in center of Guizhou Province, China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2007(6): 527.

- [12] 罗兴录,樊吴静,杨鑫,等. 不同植被下水土流失研究[J]. 中国农学通报, 2013(29): 162.
LUO Xinglu, FAN Wujing, YANG Xin, et al. The study on the water and soil loss in different vegetations [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013(29): 162.
- [13] 广东森林编辑委员会. 广东森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990:45.
Guangdong Forest Editorial Board. Guangdong forest [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990.
- [14] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用[M]. 北京: 中国气象出版社, 1997:147.
ZHOU Guoyi. Ecosystem hydrothermal principle and application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997:147.
- [15] 申卫军,周国逸,彭少麟,等. 南亚热带鹤山5种生态系统的地表径流[J]. 热带亚热带植物学报, 1999(4): 273.
SHEN Weijun, ZHOU Guoyi, PENG Shaolin, et al. Surface runoff in five ecosystems of Heshan subtropical hilly land [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1999(4): 273.
- [16] 刘世荣,温远光,王兵等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996:201.
LIU Shirong, WEN Yuanguang, WANG Bin, et al. Hydrological laws functions laws of major forest ecosystems in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996:201.
- [17] LIU Zhanfeng, WU Jianping, ZHOU Lixia, et al. Effect of understory fern (*Dicranopteris dichotoma*) removal on substrate utilization patterns of culturable soil bacterial communities in subtropical Eucalyptus plantations [J]. Pedobiologia-International Journal of Soil Biology, 2011, 55(1): 7.
- [18] DUAN Wenjun, REN Hai, FU Shenglei, et al. Community comparison and determinant analysis of understory vegetation in six plantations in South China [J]. Restoration Ecology, 2010, 18(2): 206.
- [19] POORE M E D, FRIES C. The Ecological effects of Eucalyptus [M]. FAO Paper No. 59: 4.
- [20] BAI J Y, GAN S M. Social, economic and ecological problems of Eucalyptus plantations [J]. World Forestry Research, 1996(2): 63.
- [21] 李松海,蒋军林,吴敏,等. 29年生红锥人工林经济效益分析[J]. 南方农业学报, 2016(6): 984.
LI Songhai, JIANG Junlin, WU Min, et al. Economic benefit evaluation of 29-year-old *Castanopsis hstrix* plantation [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016(6): 984.
- [22] NARAIN P, SINGH R K, SINDHWAL N S, et al. Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region of India 2. Crop and tree production [J]. Agroforestry Systems, 1997, 39(2): 175.
- [23] SÁNCHEZ L A, ATAROFF M, LÓPEZ R. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes [J]. The Environmentalist, 2002, 22(2): 161.