

# 南亚热带杉木林改造对土壤及凋落物持水能力的影响

唐洪辉<sup>1</sup>, 张卫强<sup>1</sup>, 严峻<sup>1</sup>, 盘李军<sup>2</sup>, 陈伟光<sup>2</sup>, 冼杆标<sup>2</sup>

(1. 广东省林业科学研究院, 广州 510520; 2. 佛山市云勇生态林养护中心, 广东 佛山 528518)

**摘 要:**对杉木林进行改造,是提高林分质量和生态效能的重要措施。该文研究了杉木林改造前期对土壤及凋落物持水能力的影响。结果表明,在杉木林改造前期,不同林龄段试验林间土壤容重、孔隙度和土壤持水量差异不显著( $P>0.05$ ),但随林龄的增加呈上升趋势,土壤涵养水源能力有所增加。凋落物量及其持水能力随改造林龄的增加呈上升趋势,9~11 a 林龄试验林凋落物及持水能力显著高于 3~5 a 林龄试验林( $P<0.05$ ),而其凋落物持水能力与 5~7 a 林龄试验林差异不显著( $P>0.05$ )。浸水试验表明,凋落物持水率随浸泡时间的增加呈对数曲线增长,吸水速率与浸泡时间呈反函数关系。凋落物最大持水量远小于土壤最大持水量,仅为土壤的 0.18%,0.11%和 0.08%,土壤为森林涵养水源的主体。通过分析试验林土壤和凋落物持水能力发现,杉木+米老排+阴香+山杜英+枫香、杉木+火力楠+米老排+阴香+红荷和杉木+木荷+山杜英+香椿+山黄麻改造模式对土壤和凋落物持水能力影响效果较好,其水文功能较高。

**关键词:**土壤及凋落物持水能力; 杉木林改造前期; 南亚热带

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0047-07

## Effects of *Cunninghamia lanceolata* Stand Reconstructing on the Water-Holding Capacities of Soil and Litter in Southern Subtropical Region

TANG Hong-hui<sup>1</sup>, ZHANG Wei-qiang<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, PAN Li-jun<sup>2</sup>, CHEN Wei-guang<sup>2</sup>, XIAN Gan-biao<sup>2</sup>

(1. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China;

2. Maintenance Center for Yunyong Ecological Forest of Foshan, Foshan, Guangdong 528518, China)

**Abstract:** Transformation of *Cunninghamia lanceolata* plantation was an important measure to improve forest stand quality and its ecological functions. In this paper, transformation methods of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Foshan, were taken as the example to study the water-holding capacities of soil and litter with different forest ages. The bulk density, porosity and water holding capacity of soil for experimental forest with different age segments were not significant ( $P<0.05$ ), while those parameters of soil rose with the extension of forest ages, and water conservation of soil was improved. Litter biomass and water-holding capacity of litter increased with the increase of forest ages. Biomass and water-holding capacity of litter in experimental forest with the ages of 9~11 years were significantly higher than those of litter in experimental forest with 3~5 years ( $P<0.05$ ), while water-holding capacity of litter was not significant with 3~5 years experimental forest. The litter soaking experiments showed that the water holding capacity increased with soaking time, following a logarithmic curve, while water absorption rate decreased with soaking time, following inverse function relationship. The maximum water-holding capacity of litter layer was much less than the soil layer, which accounted for 0.18%, 0.11% and 0.08% of the maximum water-holding capacities of soil. Forest soils become the subject of water conservation. The improvement methods of *Cunninghamia lanceolata*, *Mytilaria laosensis*, *Cinnamomum burmannii*, *Elaeocarpus sylvestris*, *Liquidambar formosa* and *Cunninghamia lanceolata*, *Michelia macclurei*, *Mytilaria laosensis*, *Cinnamomum burmannii*, *Schima wallichii* and *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, *Elaeocarpus sylvestris*, *Toona sinensis*, *Trema orientalis*

收稿日期: 2014-04-04

修回日期: 2014-04-23

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404301); 广东省林业科技创新专项项目(2010KJCX013-02); 佛山市生态景观林培育技术研究与推广示范和国家林业局广东东江源森林生态站联合资助

作者简介: 唐洪辉(1962—), 男, 广东兴宁人, 高级工程师, 主要从事森林生态与风景园林设计。E-mail: gztanghh@126.com

通信作者: 张卫强(1976—), 男, 山西清徐人, 博士, 高级工程师, 主要从事森林水文与植物生理生态。E-mail: happyzwq@sina.com

showed good water holding capacity of soil and litter by analyzing water holding capacity of soil and litter. This study results can provide scientific basis for planting tree selection, near natural transformation of stand, forest management and assessment of service function of forest ecosystem.

**Key words:** water-holding capacities of soil and litter; early stand transformation of *Cunninghamia lanceolata* plantation; southern subtropical region

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方主要速生用材树种,在中国亚热带森林生态系统中占有十分重要的地位<sup>[1]</sup>,大规模营造杉木人工林的后果是树种组成的单一化和针叶化现象严重,影响森林生态功能的正常发挥<sup>[2-3]</sup>。水源涵养是森林生态系统的重要功能,也是生态公益林的核心功能之一<sup>[4]</sup>,主要包括森林生态系统通过林冠层、凋落物层和土壤层拦截滞蓄降水<sup>[5]</sup>。研究表明,凋落物层与土壤层调节降水的能力达到降雨的 90% 以上<sup>[6]</sup>。因此,研究土壤层和凋落物层持水特性具有极其重要的意义,成为生态水文学研究的核心问题之一<sup>[5]</sup>。目前,有关林分改造对土壤层和凋落物层持水能力影响研究主要集中在植物演替<sup>[7-8]</sup>和林分改造<sup>[4,9-10]</sup>等方面。而杉木林改造前期对土壤及凋落物持水特性的影响还缺少系统的、详细的研究。本研究探讨了杉木林改造前期不同

林龄段试验林土壤及凋落物持水特性,旨在为杉木人工林营造中的树种选择、近自然改造、生态林经营及森林生态服务功能评估提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省佛山市高明区云勇林场,东经 112°40′,北纬 22°43′,属南亚热带湿润季风气候,水热资源丰富。年平均气温、最高气温和最低气温分别为 22.0,34.5 和 3.5℃,雨量充沛,年降水量平均达 2 000 mm,集中在 4—8 月<sup>[11]</sup>。地势属丘陵地带,土壤为花岗岩发育的酸性赤红壤,土层深厚。2002—2011 年不同时段对杉木林进行皆伐改造,引入生态景观树种造林,经过多年改造,形成了针阔混交林,试验林概况见表 1。

表 1 试验林概况

造林点	试验林	林龄/ a	坡度	坡向	平均 胸径/cm	平均 树高/m	郁闭度	林下植被 盖度/%	林下植被
桉树坑	杉木+红花荷+盆架子+火焰木	11	20°	东南	5.22	5.02	0.90	90	蔓生莠竹、淡竹、粗叶悬钩子、玉叶金花、山管兰、蕨类、水冬哥、蒲公英
牛牯顶	杉木+米老排+阴香+山杜英+枫香	11	30°	东	10.25	9.71	0.85	45	蒲公英、狗肝菜、半枫荷、铁线蕨、五指毛桃、野牡丹、山管兰、弓果黍、桃金娘
唐利坑	杉木+阴香+香樟+格木+木荷	10	30°	东北	7.61	7.93	0.95	40	狗肝菜、铁线蕨、凤尾蕨、弓果黍
燕尾	杉木+阴香+藜蒴+米老排+山杜英	10	30°	西南	12.47	9.51	0.85	30	铁线蕨、白花酸果藤、山管兰、铁丝蕨、粪箕笃、亮叶猴耳环、鸭脚木、凤尾蕨、酸果藤
长坑	杉木+红荷+香樟+阴香+三角枫	9	30°	西	8.93	7.89	0.85	45	乌毛蕨、铁线蕨、梅叶冬青、漫山秀竹、玉叶金花、野牡丹
寻狗坑	杉木+火力楠+米老排+阴香+红荷	9	30°	西南	9.59	8.52	0.90	40	半边旗、玉叶金花、铁扇蕨、云果黍、黄苟头、乌毛蕨、金毛狗、鲫鱼胆
灯心田	杉木+阴香+香樟+吴茱萸	7	20°	西南	9.02	6.85	0.70	10	麦冬、山管兰、狗肝菜、海金沙、弓果黍、酸果藤、黑面神、玉叶金花、铁线蕨、淡竹叶
南堡屋	杉木+香椿+火力楠+山苍子+小叶青冈	7	30°	东南	4.91	4.53	0.35	95	弓果黍、假臭草、铁线蕨、秀竹、乌毛蕨、狗尾草、华南毛蕨、牛筋藤、大叶油草
飞马山	杉木+观光木+非洲桃花心+红椎+火力楠	5	25°	东南	4.02	3.57	0.45	45	弓果黍、乌毛蕨、狗肝菜、白花酸果藤、铁线蕨
亚婆迳	杉木+木荷+山杜英+香椿+山黄麻	5	20°	东北	4.78	4.35	0.75	70	狗肝菜、小叶决明、长叶油草、山管兰、弓果黍、假臭草、野牡丹、黄鳝藤
大坑尾	杉木+灰木莲+吴茱萸+假苹婆	3	30°	东南	2.59	2.76	0.30	85	野牡丹、狗肝菜、五指毛桃、乌毛蕨、黑面神、玉叶金花
手推车	杉木+山苍子+黄樟+乌柏+吴茱萸	3	30°	西南	2.41	2.33	0.25	90	弓果黍、三桠苦、梅叶冬青、五指毛桃、土茯苓、狗尾草、乌毛蕨

注:杉木为二代萌芽,只保留 1 株。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤物理性质 2013 年 8 月,选择地形地貌、海拔、母岩、土壤类型等相同或相近,且彼此相连的 10~11 a,7~9 a 和 3~5 a 林龄段试验林作为研究对象,在每个林龄段试验林内分别设计 4 个土壤和凋落物研究样地,在每个土壤研究样地内选择有代表性的部位,分别挖取 3 个土壤剖面,按照 0—25,25—50,50—75,75—100 cm 土壤深度用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取样。参考 LY/T1215—1999《森林土壤水分—物理性质的测定》,由环刀法计算土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管空隙度、土壤通气性、自然含水量、最大持水量、毛管持水量和田间持水量等指标。

1.2.2 凋落物蓄积量 2013 年 8 月,按“梅花五点法”在每个研究样地布设 5 块 2 m×2 m 小样方,在样地内收集全部凋落物(不包括直径>2 cm 的粗木质残体)并现场称重;对凋落物进行取样,带回实验室在 85℃ 的恒温箱中烘干至恒重,由干/鲜重比计算含水率,从而推算出凋落物蓄积量。

1.2.3 凋落物持水能力与过程 采用室内浸泡法测定凋落物持水特性。2013 年 8 月,将烘干后凋落物样品称取 100 g,原状放入细网尼龙袋中,浸没于清水中,在分别浸泡 0.25,0.5,1,1.5,2,4,6,8,10,24 h 后称重,每次取出后静置 5 min 左右,直至凋落物不滴水为止,迅速称凋落物的湿重并进行记录,由此计算凋落物在不同浸水时间的持水率、吸水速率和持水量,每个研究样地重复 3 次。

1.2.4 凋落物拦蓄能力 凋落物层的最大拦蓄率即为最大持水率,根据凋落物层的蓄积量、其雨前实测

平均自然持水率及最大持水率可推算出其最大拦蓄量,而最大持水量及最大拦蓄量,只能反映凋落物层的持水能力大小,不能反映对实际降水的拦蓄情况。研究表明,当降雨量达到 20~30 mm 以后,不论哪种植被类型的枯落物层及其含水量高低,实际持水率约为最大持水率的 85% 左右,所以取调整系数 0.85 来估算枯落物层的有效拦蓄量<sup>[12-13]</sup>。

$$R_m=(G_{24}-G_d)/G_d\times100\% \quad R_o=(G_o-G_d)/G_d\times100\%$$
$$W_m=(R_m-R_o)M \quad W=(0.85R_m-R_o)M$$

式中:  $R_m$ ——凋落物最大持水率(%) ;  $G_o$ ,  $G_d$  和  $G_{24}$ ——凋落物自然状态下质量、凋落物风干质量和浸水 24 h 后质量;  $W_m$ ——最大拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>) ;  $W$ ——有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>) ;  $R_o$ ——平均雨前自然含水率(%) ;  $M$ ——凋落物蓄积量(t/hm<sup>2</sup>)。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质与持水能力

从表 2 可知,杉木林改造前期,不同林龄段试验林间土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均值差异不显著( $P>0.05$ ),但随林龄的增加呈上升趋势,而非毛管孔隙度和土壤通气性表现为先升高后降低。10~11 a 林龄不同改造模式间总孔隙度、毛管孔隙度差异不显著( $P>0.05$ ),而非毛管孔隙度和土壤通气性变化规律一致。7~9 a 林龄不同改造模式间容重、非毛管孔隙度及土壤通气性差异不显著( $P>0.05$ ),而总孔隙度和毛管孔隙度间差异性一致。3~5 a 林龄不同改造模式间土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度差异不显著( $P>0.05$ )。

表 2 土壤物理性质分析

林龄/a	造林点	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	土壤通气性/ %
10~11	桉树坑	1.43±0.06a	45.74±3.04a	41.79±2.81a	3.95±0.22b	12.63±0.31b
	牛轱顶	1.42±0.03a	48.49±1.14a	45.41±0.73a	3.07±0.42b	11.44±1.34b
	唐利坑	1.40±0.03a	46.71±0.53a	45.94±0.46a	0.77±0.09a	6.63±1.83a
	燕尾	1.60±0.06b	44.77±1.00a	40.92±0.70a	3.85±0.31b	13.64±0.33b
	均值	1.46±0.05A	46.43±0.79A	43.52±1.26A	2.91±0.74A	11.09±1.55A
7~9	长坑	1.42±0.05a	43.44±1.72ab	39.65±1.45ab	3.79±0.44a	16.78±0.63a
	寻狗坑	1.31±0.06a	48.37±1.50bc	44.36±1.07bc	4.02±0.50a	16.45±0.62a
	灯心田	1.40±0.06a	50.25±1.68c	46.69±1.29c	3.57±0.40a	14.21±0.64a
	南堡屋	1.47±0.00a	41.53±2.53a	38.50±2.12a	3.03±0.51a	15.27±1.11a
	均值	1.40±0.03A	45.90±2.04A	42.30±1.94A	3.60±0.21A	15.68±0.59B
3~5	飞马山	1.31±0.04a	45.90±0.95a	42.71±1.04a	3.19±0.31a	13.62±0.83a
	亚婆垵	1.45±0.03b	47.53±3.96a	45.85±4.58a	1.68±0.96a	10.50±1.39a
	大坑尾	1.38±0.05ab	41.77±1.13a	38.52±1.07a	3.25±0.17a	13.91±1.72a
	手推车	1.32±0.04ab	43.76±0.27a	40.34±0.42a	3.42±0.21a	18.37±0.97b
	均值	1.37±0.03A	44.74±1.26A	41.86±1.58A	2.89±0.40A	14.10±1.62AB

注:表中数据为平均值±标准误,同列小写字母表示同一林龄各改造模式间差异达显著水平( $P<0.05$ ),同列大写字母表示不同林龄间差异达显著水平( $P<0.05$ )。

从表 3 可知,不同林龄段试验林间土壤自然含水量、最大持水量、毛管持水量和田间持水量均值差异不显著( $P>0.05$ ),杉木林改造前期对土壤持水能力影响不大,但最大持水量、毛管持水量和田间持水量随林龄的增加呈上升趋势,与 3~5 a 林龄试验林相比,10~11 a 林龄试验林土壤自然含水量、最大持水量、毛管持水量及田间持水量均值增加了 7.81%,3.77%,3.97%和 5.25%,土壤涵养水源能力有所增加。3~5 a 林龄

不同改造模式间土壤自然含水量、最大持水量、毛管持水量和田间持水量差异不显著( $P>0.05$ ),这可能由于造林抚育刚刚结束,林分处于幼龄期,不同改造模式对土壤持水能力影响效果不明显。7~9 a 林龄不同改造模式间最大持水量和毛管持水量差异性规律一致。10~11 a 林龄不同造林模式间最大持水量、毛管持水量和田间持水量显著不差异( $P>0.05$ ),不同改造模式下土壤涵养水源能力基本趋于一致。

表 3 土壤持水能力分析

林龄/a	地点	土壤含水量/%	最大持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	毛管持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	田间持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
10~11	桉树坑	22.94±4.24ab	4573.9±303.6a	4179.3±281.5a	3497.9±320.7a
	牛牯顶	26.29±1.44ab	4848.4±114.5a	4541.0±72.6a	3750.0±80.1a
	唐利坑	28.86±1.51b	4671.5±53.4a	4594.0±45.7a	3805.9±129.5a
	燕尾	19.54±1.36a	4477.1±100.1a	4092.0±70.0a	3268.0±92.1a
	均值	24.41±2.03A	4642.7±79.21A	4351.6±126.40A	3580.5±123.83A
7~9	长坑	19.04±1.80a	4343.6±172.0ab	3965.0±144.9ab	3060.8±175.4a
	寻狗坑	24.56±0.34ab	4837.1±150.1bc	4435.4±107.2bc	3611.0±109.6bc
	灯心田	25.90±2.12b	5025.3±168.0c	4668.8±128.7c	3805.4±92.3c
	南堡屋	20.66±2.33ab	4153.0±253.2a	3850.1±212.1a	3132.7±194.9ab
	均值	22.54±1.61A	4589.8±204.58A	4229.8±193.49A	3402.5±181.51A
3~5	飞马山	24.80±0.40a	4590.0±95.2a	4270.7±103.6a	3567.6±115.7a
	亚婆垵	26.12±4.37a	4753.1±396.1a	4584.8±458.5a	3704.4±559.8a
	大坑尾	20.38±1.22a	4176.9±112.6a	3852.0±106.5a	3115.9±103.7a
	手推车	19.24±0.61a	4375.7±27.4a	4033.5±41.8a	3219.6±47.4a
	均值	22.64±1.67A	4473.9±125.59A	4185.3±158.38A	3401.9±139.64A

注:表中数据为平均值±标准误,同列小写字母表示同一林龄各改造模式间差异达显著水平( $P<0.05$ ),同列大写字母表示不同林龄间差异达显著水平( $P<0.05$ )。

2.2 土壤物理性质与持水能力相关性分析

为了更深入了解土壤物理性质与持水性的相互影响,对主要指标进行了相关性分析(表 4)。从表 4 可知,不同林龄段试验林土壤容重与最大持水量、毛管持水量、田间持水量呈极显著负相关( $P<0.01$ )。土壤总孔隙度与毛管孔隙度、自然含水量、最大持水量、毛管持水量及田间持水量存在极显著正相关( $P<0.01$ ),随着林龄的增加,总孔隙度与最大持水量和毛管持水量相关性升高,而与土壤自然含水量相关性降低,土壤自然含水量受总孔隙度影响随林龄的增加而降低。土壤自然含水量和田间持水量、毛管持水量、最大持水量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),其中,土壤含水量与田间持水量相关系数最高,说明各林地自然含水量大小主要取决于田间持水量,其次为毛管持水量和最大持水量。土壤通气性与非毛管孔隙度、非毛管持水量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),两者相关性随林龄的增加呈现出先降低后升高的趋势。土壤最大持水量与土壤毛管持水量和田间持水量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

2.3 凋落物持水特性分析

2.3.1 凋落物蓄积量和持水能力分析 从表 5 可知,不同林龄段试验林凋落物量、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量随林龄的增加呈上升趋势,而凋落物自然含水率和最大持水率表现为先升高后降低。凋落物受动物、微生物以及环境等作用,凋落物不断凋落、分解,处于不断的消长动态中,凋落物储量状况反映了凋落物与所处环境的交互作用和富集程度<sup>[14]</sup>,研究发现,10~11 a 林龄不同改造模式凋落物蓄积量均值显著高于 7~9 a 林龄、3~5 a 林龄凋落物量( $P<0.05$ ),分别为 7~9 a 林龄、3~5 a 林龄凋落物量的 2.15 和 2.53 倍。受凋落物蓄积量、凋落物自然含水率和最大持水率的影响,10~11 a 林龄不同改造模式凋落物最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均值与 7~9 a 林龄间差异不显著( $P>0.05$ ),但显著高于 3~5 a 林龄( $P<0.05$ ),分别为 3~5 a 林龄的 2.27,2.25 和 2.25 倍。10~11 a 林龄不同改造模式间凋落物最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量间差异性一致。3~5 a 林龄不同改造模式间凋落物蓄积量、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量间差异不显著( $P>0.05$ )。

表 4 土壤物理性质的相关系数

林龄/a	指标	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>
10~11	容重(X <sub>1</sub> )	−0.450**	−0.481**	0.191	0.059	−0.676**	−0.764**	−0.768**	−0.040	−0.866**
	总孔隙(X <sub>2</sub> )	1	0.977**	0.004	−0.128	0.477**	0.907**	0.899**	0.137	0.555**
	毛管孔隙(X <sub>3</sub> )		1	−0.207	−0.256	0.549**	0.897**	0.918**	−0.071	0.597**
	非毛管孔隙(X <sub>4</sub> )			1	0.619**	−0.390**	−0.046	−0.185	0.969**	−0.255
	土壤通气性(X <sub>5</sub> )				1	−0.611**	−0.082	−0.170	0.606**	−0.312*
	自然含水量(X <sub>6</sub> )					1	0.607**	0.647**	−0.226	0.908**
	最大持水量(X <sub>7</sub> )						1	0.990**	0.156	0.766**
	毛管持水量(X <sub>8</sub> )							1	0.015	0.782**
	非毛管持水量(X <sub>9</sub> )								1	−0.044
	田间持水量(X <sub>10</sub> )									1
7~9	容重(X <sub>1</sub> )	−0.317*	−0.300*	−0.228	−0.380**	−0.464**	−0.740**	−0.729**	−0.495**	−0.686**
	总孔隙(X <sub>2</sub> )	1	0.989**	0.448**	0.047	0.784**	0.859**	0.861**	0.472**	0.884**
	毛管孔隙(X <sub>3</sub> )		1	0.313*	−0.017	0.781**	0.840**	0.859**	0.347*	0.883**
	非毛管孔隙(X <sub>4</sub> )			1	0.413**	0.320*	0.443**	0.342*	0.952**	0.345*
	土壤通气性(X <sub>5</sub> )				1	−0.147	0.243	0.192	0.492**	0.159
	自然含水量(X <sub>6</sub> )					1	0.799**	0.805**	0.410**	0.830**
	最大持水量(X <sub>7</sub> )						1	0.993**	0.609**	0.983**
	毛管持水量(X <sub>8</sub> )							1	0.515**	0.990**
	非毛管持水量(X <sub>9</sub> )								1	0.502**
	田间持水量(X <sub>10</sub> )									1
3~5	容重(X <sub>1</sub> )	−0.143	−0.132	−0.003	−0.486**	−0.202	−0.713**	−0.661**	−0.227	−0.567**
	总孔隙(X <sub>2</sub> )	1	0.967**	−0.128	−0.302*	0.906**	0.783**	0.800**	−0.134	0.826**
	毛管孔隙(X <sub>3</sub> )		1	−0.377**	−0.401**	0.931**	0.757**	0.820**	−0.375**	0.853**
	非毛管孔隙(X <sub>4</sub> )			1	0.462**	−0.330*	−0.100	−0.284	0.970**	−0.317*
	土壤通气性(X <sub>5</sub> )				1	−0.558**	0.069	−0.036	0.547**	−0.187
	自然含水量(X <sub>6</sub> )					1	0.772**	0.820**	−0.299*	0.883**
	最大持水量(X <sub>7</sub> )						1	0.982**	0.037	0.944**
	毛管持水量(X <sub>8</sub> )							1	−0.154	0.971**
	非毛管持水量(X <sub>9</sub> )								1	−0.200
	田间持水量(X <sub>10</sub> )									1

注：\*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ 。

表 5 凋落物量及凋落物持水能力分析

林龄/a	地点	凋落物量/ (t·hm <sup>−2</sup> )	自然 含水率/%	最大持 水率/%	凋落物最大持水量/ (t·hm <sup>−2</sup> )	最大拦蓄量/ (t·hm <sup>−2</sup> )	有效拦蓄量/ (t·hm <sup>−2</sup> )
10~11	桉树坑	2.49±0.31a	42.65	166.33	4.14±0.51a	3.08±0.38a	2.46±0.31a
	牛牯顶	8.51±1.40c	47.52	152.33	12.96±2.13c	8.92±1.46c	6.97±1.14c
	唐利坑	5.82±0.78b	34.68	165.33	9.62±1.29bc	7.60±1.02bc	6.16±0.83bc
	燕尾	4.47±0.46ab	39.58	162.33	7.26±0.75ab	5.49±0.57ab	4.40±0.46ab
	均值	5.32±1.26B	41.11	161.58	8.50±1.86B	6.27±1.28B	5.00±1.02B
7~9	长坑	1.72±0.49a	32.96	245.00	4.21±1.20a	3.65±1.04ab	3.01±0.86ab
	寻狗坑	3.71±0.67b	81.71	203.00	7.53±1.36b	4.50±0.81ab	3.37±0.61ab
	灯心田	3.39±0.55b	26.49	175.00	5.93±0.97ab	5.03±0.82c	4.14±0.68b
	南堡屋	1.10±0.10a	56.30	259.98	2.86±0.27a	2.24±0.21a	1.81±0.17a
	均值	2.48±0.63A	49.37	220.75	5.13±1.02AB	3.86±0.61AB	3.08±0.49AB
3~5	飞马山	1.67±0.38a	40.36	204.33	3.41±0.78a	2.74±0.62a	2.23±0.51a
	亚婆迳	2.61±0.44a	43.25	186.00	4.85±0.82a	3.73±0.63a	3.00±0.51a
	大坑尾	1.85±0.47a	39.05	164.33	3.04±0.77a	2.32±0.58a	1.86±0.47a
	手推车	2.26±0.36a	59.29	163.33	3.69±0.58a	2.35±0.37a	1.80±0.28a
	均值	2.10±0.21A	45.49	179.50	3.75±0.39A	2.79±0.33A	2.22±0.28A

注:表中数据为平均值±标准误,同列小写字母表示同一林龄各改造模式间差异达显著水平( $P<0.05$ ),同列大写字母表示不同林龄间差异达显著水平( $P<0.05$ )。

2.3.2 凋落物持水和吸水过程分析 利用浸泡试验测定凋落物持水率变化过程,按不同改造模式分别计算其持水率随浸泡时间的关系(图 1)。从图 1 可知,凋落物持水量随时间的变化趋势基本相似,在 0~2 h 时段内凋落物持水率随浸泡时间的增加迅速提高,此后增长趋势各不相同,只是增速减少,浸泡 24 h 时,各改造模式凋落物持水率均达到平衡,基本趋于稳定。研究发现,不同林龄段试验林凋落物 0.5 h 内持水率分别占其最大持水率的 57.67%,68.39% 和 68.63%,说明凋落物拦蓄地表径流的功能在降雨开始时较强,此后随着凋落物湿润程度的增加,持水能力降低。凋落物持水速率与浸泡时间存在着明显对数函数关系,其相关系数均在 0.887 以上(表 6)。

$$Q=a\ln(t)+b$$

表 6 凋落物持水量、吸水率和浸泡时间的关系式

造林点	持水量与浸泡时间回归关系		吸水率与浸泡时间回归关系	
	关系式	相关系数( $R^2$ )	关系式	$R^2$
桉树坑	$Q=0.154\ln(t)+1.113$	0.964	$V=-0.862+1.684t^{-1}$	0.993
牛牯顶	$Q=0.133\ln(t)+0.999$	0.887	$V=-0.756+1.456t^{-1}$	0.994
唐利坑	$Q=0.182\ln(t)+1.005$	0.972	$V=-1.070+1.694t^{-1}$	0.991
燕尾	$Q=0.148\ln(t)+1.083$	0.961	$V=-0.954+1.687t^{-1}$	0.992
长坑	$Q=0.232\ln(t)+1.789$	0.975	$V=-0.500+2.424t^{-1}$	0.997
寻狗坑	$Q=0.156\ln(t)+1.484$	0.904	$V=-0.195+2.186t^{-1}$	0.998
灯心田	$Q=0.151\ln(t)+1.201$	0.932	$V=-0.751+2.161t^{-1}$	0.994
南堡屋	$Q=0.217\ln(t)+1.830$	0.905	$V=-0.756+2.665t^{-1}$	0.994
飞马山	$Q=0.147\ln(t)+1.593$	0.915	$V=-0.324+1.948t^{-1}$	0.998
亚婆墟	$Q=0.147\ln(t)+1.361$	0.933	$V=-0.740+1.918t^{-1}$	0.994
大坑尾	$Q=0.166\ln(t)+1.107$	0.977	$V=-0.806+1.704t^{-1}$	0.996
手推车	$Q=0.154\ln(t)+1.172$	0.922	$V=-0.656+1.695t^{-1}$	0.996

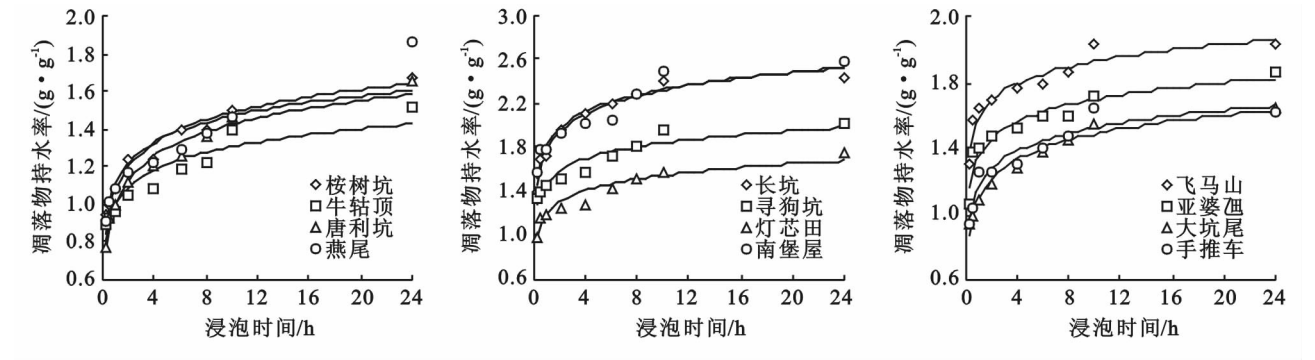


图 1 凋落物持水率与浸泡时间的关系

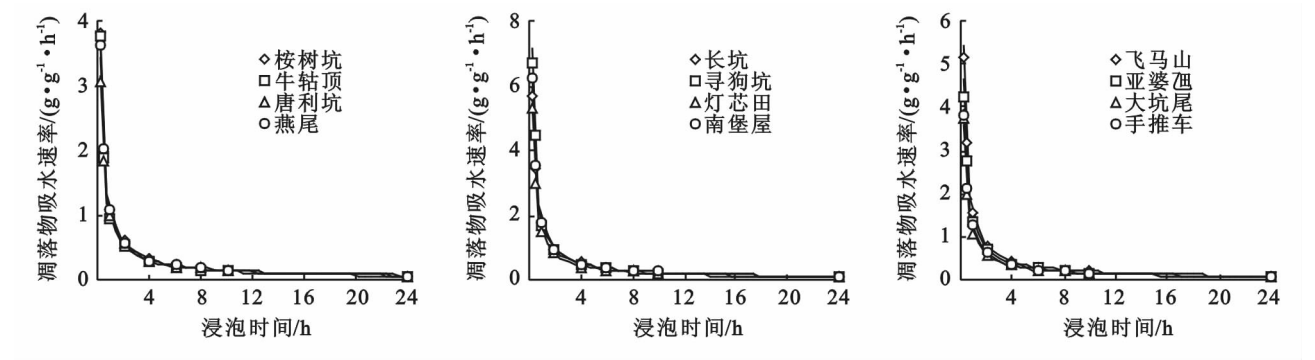


图 2 凋落物吸水速率与浸泡时间的关系

式中: $Q$ ——凋落物持水率( $\text{g/g}$ ), $t$ ——浸水时间( $\text{h}$ ), $a,b$ ——方程系数。

凋落物吸水速率随时间变化趋势是一致的,吸水速率与浸泡时间存在明显的相关性(图 2)。从图 2 可知,在浸水开始到浸水 2 h,凋落物吸水速率急剧降低,之后缓慢下降,凋落物在浸水 24 h 时基本饱和,吸水速率基本上维持在  $0.06\sim0.08\text{ g}/(\text{g}\cdot\text{h})$  之间。不同林龄段试验林凋落物吸水速率表现为  $7\sim9\text{ a}$  林龄试验林 $>3\sim5\text{ a}$  林龄试验林 $>10\sim11\text{ a}$  林龄试验林。凋落物吸水速率与浸泡时间存在着明显反函数关系(表 6),相关系数均在 0.991 以上。

$$V=b_0+b_1t^{-1}$$

式中: $V$ ——凋落物吸水速率 $[\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})]$ ;  $t$ ——浸泡时间;  $b_0,b_1$ ——方程系数。

### 3 结论

(1) 杉木林改造前期,不同林龄试验林间土壤容重和孔隙度差异不显著( $P>0.05$ )。随着试验林林龄的增加,土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量呈上升的趋势,土壤涵养水源能力有所增加,而非毛管孔隙度和土壤通气性表现为先升高后降低。各林龄段试验林土壤容重与最大持水量、毛管持水量、田间持水量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),土壤总孔隙度与毛管孔隙度、自然含水量、最大持水量、毛管持水量及田间持水量存在极显著正相关( $P<0.01$ ),随着林龄的增加,总孔隙度与最大持水量和毛管持水量相关性升高,而总孔隙度与土壤自然含水量相关性降低,土壤自然含水量受总孔隙度影响降低。土壤自然含水量与田间持水量相关系数最高,说明各林地自然含水量的大小主要取决于田间持水量,其次为毛管持水量和最大持水量。

(2) 凋落物量及凋落物持水能力随改造林龄的增加呈上升趋势,10~11 a 林龄试验林凋落物蓄积量显著高于与 7~9 a 林龄、3~5 a 林龄凋落物量的 2.15 倍和 2.53 倍。与其他类似研究相比,南亚热带杉木林改造前期凋落物蓄积量小于温带<sup>[15]</sup>和亚热带<sup>[16]</sup>主要森林植被凋落物蓄积量,这主要是由于南亚热带水热环境明显高于暖温带和中亚热带,加速了凋落物的分解,同时可能与试验林林龄较小有关。研究发现,凋落物持水能力主要发生在 2 h 内,在拦蓄地表径流的功能在降雨开始 2 h 内较强,此后随着凋落物湿润程度的增加,持水能力降低。

(3) 土壤持水能力均远大于凋落物层。凋落物最大持水量仅为土壤最大持水量的 0.18%,0.11% 和 0.08%,但这并不能说明凋落物在森林生态系统水源涵养中的作用不大,由于凋落物层结构疏松,吸水能力和透水性强,不仅能够减缓林内降水对地面的直接冲击,阻滞和分散降水,吸收降落到地表的水分,而且能延缓及减少地表径流,增加土壤水分下渗,对防止土壤侵蚀和水源涵养具有重要作用<sup>[7]</sup>。

(4) 通过分析试验林土壤和凋落物持水能力发现,杉木+米老排+阴香+山杜英+枫香、杉木+火力楠+米老排+阴香+红荷和杉木+木荷+山杜英

+香椿+山黄麻改造模式对土壤和凋落物持水能力影响效果较好,其土壤与凋落物的水文功能较高。

#### 参考文献:

- [1] 俞月凤,宋同清,曾馥平,等.杉木人工林生物量及其分配的动态变化[J].生态学杂志,2013,32(7):1660-1666.
- [2] 俞新妥,张其水.杉木连栽林地土壤生化特性及土壤肥力的研究[J].福建林学院学报,1989,9(3):263-271.
- [3] 俞新妥.杉木栽培学[M].福州:福建科学技术出版社,1997.
- [4] 刘飞鹏,曾曙才,莫罗坚,等.尾叶桉人工林改造对土壤和凋落物持水效能的影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1111-1117.
- [5] 赵磊,王兵,蔡体久,等.江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2013,27(1):203-208.
- [6] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J].生态学报,2012,32(2):538-547.
- [7] 刘效东,乔玉娜,周国逸,等.鼎湖山3种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J].林业科学,2013,49(9):8-15.
- [8] 贾秀红,曾毅,周志翔,等.鄂中低丘区不同演替阶段森林凋落物和土壤水文特征[J].水土保持学报,2013,27(4):125-129.
- [9] 何友均,梁星云,覃林,等.南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响[J].生态学报,2013,33(8):2484-2495.
- [10] 庞学勇,包维楷,张咏梅,等.岷江上游中山区低效林改造对枯落物水文作用的影响[J].水土保持学报,2005,19(4):119-122.
- [11] 薛立,傅静丹,郑卫国,等.3种人工幼林的土壤微生物和酶活性研究[J].中南林业科技大学学报:自然科学版,2008,28(4):98-100.
- [12] 雷瑞德.秦岭火地塘林区华山松林水源涵养功能的研究[J].西北林学院学报,1984,1(1):19-33.
- [13] 胡淑萍,余新晓,岳永杰.北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2008,22(1):146-150.
- [14] 赵艳云,程积民,万惠娥,等.六盘山不同森林群落地被物的持水特性[J].林业科学,2009,45(4):145-150.
- [15] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J].北京林业大学学报,2009(1):91-99.
- [16] 常雅军,曹靖,马建伟,等.秦岭西部山地针叶林凋落物持水特性[J].应用生态学报,2008,19(11):2346-2351.