

# 杉木取代阔叶林后林下水源涵养功能差异评价

陈琦<sup>1,3</sup>, 刘苑秋<sup>1,2,3</sup>, 刘士余<sup>4</sup>, 潘俊<sup>1,3</sup>,  
曹雯<sup>1,3</sup>, 牛杰慧<sup>1,3</sup>, 白天军<sup>1,3</sup>, 邓文平<sup>1,2,3</sup>

(1. 江西农业大学林学院, 南昌 330045; 2. 江西庐山森林生态系统定位观测研究站,

江西 九江 332900; 3. 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室, 南昌 330045;

4. 江西农业大学国土资源与环境学院, 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

**摘要:** 为研究杉木人工林取代常绿落叶阔叶混交林后土壤水源涵养能力的变化, 采用室内浸水法和环刀法分别研究杉木纯林和常绿落叶阔叶混交林的枯落物与土壤的持水特性。结果表明: (1) 枯落物平均蓄积量表现为常绿落叶阔叶混交林(3.42 t/hm<sup>2</sup>) > 杉木纯林(3.12 t/hm<sup>2</sup>), 枯落物平均厚度表现为杉木纯林(9.17 cm) > 常绿落叶阔叶混交林(5.42 cm)。 (2) 最大持水量表现为常绿落叶阔叶混交林(6.23 t/hm<sup>2</sup>) > 杉木纯林(5.57 t/hm<sup>2</sup>), 最大持水率也表现出相同的规律, 即常绿落叶阔叶混交林(184.40%) > 杉木纯林(179.50%); 有效拦蓄量表现为常绿落叶阔叶混交林(4.48 t/hm<sup>2</sup>) > 杉木纯林(4.13 t/hm<sup>2</sup>), 最大拦蓄量表现为常绿落叶阔叶混交林(5.41 t/hm<sup>2</sup>) > 杉木纯林(4.97 t/hm<sup>2</sup>)。 (3) 枯落物层的吸水量与浸水时间符合对数函数  $Q = a \ln(t) + b$ , 而吸水速率与浸水时间符合指数函数  $V = at^b$ , 常绿落叶阔叶混交林的蓄水能力强于杉木纯林。 (4) 土壤水分最大吸持贮水量表现为常绿落叶阔叶混交林(43.58 mm) > 杉木纯林(41.88 mm), 可以看出常绿落叶阔叶混交林内的土壤可以更好地为植被提供良好的水分供其生长; 土壤水分最大滞留贮存量表现为常绿落叶阔叶混交林(8.20 mm) < 杉木纯林(10.22 mm), 即杉木纯林内的土壤具有更好的涵养水源能力。从枯落物最大持水量、有效拦蓄量以及土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度等多个因素的计算综合推断可知, 杉木人工林水源涵养能力优于常绿落叶阔叶混交林。

**关键词:** 彭冲涧流域; 枯落物; 涵养水源; 土壤

中图分类号: S727.21

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-00244-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.038

## Evaluation on the Difference of Understory Water Conservation Function After Chinese Fir Replacing Broad-leaved Forest

CHEN Qi<sup>1,3</sup>, LIU Yuanqiu<sup>1,2,3</sup>, LIU Shiyu<sup>4</sup>, PAN Jun<sup>1,3</sup>,

CAO Wen<sup>1,3</sup>, NIU Jiehui<sup>1,3</sup>, BAI Tianjun<sup>1,3</sup>, DENG Wenping<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2. Lu Mount Forest Ecosystem

Positioning Research Station, Jiujiang, Jiangxi 332900; 3. Laboratory of Forest Ecosystem Conservation and

Restoration in Poyang Lake Basin, Nanchang 330045; 4. Jiangxi Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural

Resources and Ecology, College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

**Abstract:** In order to study the changes of soil water conservation ability after replacing evergreen deciduous broad-leaved mixed forest with Chinese fir plantation, the water retention characteristics of the litter and soil in the above two stands were studied by the indoor soaking method and the cutting ring method, respectively. The results showed that: (1) The average volume of litter in the evergreen deciduous broad-leaved mixed forest (3.42 t/hm<sup>2</sup>) was higher than that in the Chinese fir plantation (3.12 t/hm<sup>2</sup>), and the average litter thickness was Chinese fir forest (9.17 cm) > evergreen deciduous broad-leaved mixed forest (5.42 cm). (2) The maximum water-holding capacity was evergreen deciduous broad-leaved mixed forest (6.23 t/hm<sup>2</sup>) > Chinese fir forest (5.57 t/hm<sup>2</sup>), and the maximum water holding rate also showed the same rule, that was, evergreen deciduous broad-leaved mixed forest (184.40%) > Chinese fir forest (179.50%). The effective

收稿日期: 2018-09-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(31460185); 江西省教育厅项目(GJJ60396)

第一作者: 陈琦(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文及同位素水文研究。E-mail: cyyawll@163.com

通信作者: 邓文平(1987—), 男, 助理研究员, 主要从事生态水文及同位素水文研究。E-mail: deng\_wen\_ping@126.com

interception amount and the maximum amount of interception were both evergreen deciduous broad-leaved mixed forest ( $4.48 \text{ t/hm}^2$  and  $5.41 \text{ t/hm}^2$ ) > Chinese fir forest ( $4.13 \text{ t/hm}^2$  and  $4.97 \text{ t/hm}^2$ ). (3) The water absorption amount and soaking time of litter layer accorded with logarithmic function  $Q = a \ln(t) + b$ , while the water absorption rate and soaking time accorded with exponential function  $V = at^b$ , the water storage capacity of evergreen deciduous broad-leaved mixed forest was stronger than that of Chinese fir forest. (4) The maximum soil water holding capacity of evergreen deciduous broad-leaved mixed forest ( $43.58 \text{ mm}$ ) was higher than that of Chinese fir forest ( $41.88 \text{ mm}$ ), the soil in evergreen deciduous broad-leaved mixed forest could provide better water support for vegetation growth. The maximum retention of soil moisture was evergreen deciduous broad-leaved mixed forest ( $8.20 \text{ mm}$ ) < Chinese fir forest ( $10.22 \text{ mm}$ ), indicating that the soil in Chinese fir forest had better water conservation ability. According to the calculation of maximum water holding capacity, effective storage capacity, soil capillary porosity and non-capillary porosity, it was concluded that the water conservation capacity of Chinese fir plantation was better than that of evergreen deciduous broad-leaved mixed forest.

**Keywords:** Peng Chongjian watershed; litter; water conservation; soil

杉木 (*Cunninghamialanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国南方人工造林的主要树种, 如何有效地同时保证杉木的生态效益和经济效益, 对此学者<sup>[1]</sup>做了相关的研究。在红壤区, 降水极易引起水土流失、洪水泛滥等自然灾害<sup>[2]</sup>, 因此充分发挥森林的水文效应显得尤为重要。森林生态系统的水源涵养能力是通过林冠层、枯枝落叶层和土壤层共同作用来实现的, 森林土壤则是森林涵养水源的主体<sup>[3]</sup>, 而作为连接森林与土壤的重要媒介的枯落物是保持水土的主力, 其涵养的降水达到了林地径流量的  $62.9\%$ <sup>[4]</sup>。林下枯落物层是由植被凋落下来的凋落物组成的<sup>[5]</sup>, 其结构疏松, 具有较强的吸水能力和透水性, 在植被的水文生态效益和保土功能方面起着十分重要的作用<sup>[6]</sup>。然而枯落物持水贮水能力和分解情况受到枯落物本身的厚度和性质的影响。

基于前人的研究, 学者<sup>[7]</sup>普遍认为阔叶林涵养水源能力强于针叶林, 但是这些研究大多是基于不同林分类型之间的水平对比, 并未考虑林分结构特征的差异性; 而有部分学者研究发现林分水源涵养能力受林龄和密度的影响, 随着杉木林龄的增大, 水源涵养功能呈增大趋势: 胡小燕等<sup>[8]</sup>研究发现, 在杉木密度为  $1\ 667 \text{ 株/hm}^2$  时更有助于土壤肥力的长期维持, 而吕圣吉<sup>[9]</sup>提到随着土壤肥力的改善土壤涵养水源的能力也逐渐增强, 也就是说, 杉木密度为  $1\ 667 \text{ 株/hm}^2$  时土壤的水源涵养功能较好。然而这些研究皆是基于单一林分结构因子条件下的对比。本文对江西省九江市都昌县大港镇彭冲涧流域武山林场内取代常绿落叶阔叶混交林的杉木纯林 (林龄为 30 年, 平均密度为  $1\ 833 \text{ 株/hm}^2$ ) 和常绿落叶阔叶混交林枯落物的持水能力和土壤持水能力进行对比研究。2017 年 11 月在彭冲涧流域收集林下枯落物, 采用烘干浸泡的方法对枯落物持水能力进行分析, 且于

2017 年 12 月定量研究 2 种林地枯落物储量、持水特性和拦蓄变化规律, 采用环刀法研究土壤的持水特性, 而水源涵养功能的主要表现形式为枯落物截留降水、涵蓄土壤水分、补充地下水等, 以此对该研究区内杉木人工林和常绿落叶阔叶混交林枯落物蓄水、土壤蓄水及综合水源涵养能力进行评价, 旨在为更好发挥当地林分的水源涵养功能以及杉木林近自然改造和经营提供理论指导。

## 1 研究区概况

试验区位于江西省九江市都昌县彭冲涧流域内 ( $29^\circ 32' 41.72'' \text{N}$ ,  $116^\circ 28' 47.79'' \text{E}$ ), 小流域西北高东南低, 地层出露以浅变质岩、花岗岩和灰岩为主。海拔高度  $80 \sim 560 \text{ m}$ 。植被类型丰富, 以杉木林、毛竹林、常绿落叶阔叶混交林为主, 林草覆盖率达  $90\%$ 。气候类型属亚热带湿润季风气候区, 多年平均降水量  $1\ 560 \text{ mm}$ 。小流域四周闭合, 属都昌县武山林场管辖, 无人口居住, 也未修建水利、水土保持工程, 流域内 1988—1989 年常绿落叶阔叶混交林遭到大面积砍伐, 随后人工种植了杉木林, 属于第 1 代杉木林, 林龄 30 年左右。试验区样地概况见表 1。

常绿落叶阔叶混交林以内以枫香 (*Liquidambar formosana* Hance) 为主要树种, 枹栎 (*Quercus serrata* Thunb.)、欏木 (*Loropetalum chinensis* (R. Br.) Oliver)、女贞 (*Ligustrum compactum* (Wall. ex G. Don) Hook. f.)、山茶花 (*Camellia japonica* L.)、山胡椒 (*Lindera glauca* (Sieb. et Zucc.) Bl.)、桤木 (*Eurya japonica* Thunb.)、樱花 (*Cerasus serrulata* (Lindl.) G. Don ex London) 等树种存在其中, 草本以蕨类为主, 其中有金星蕨 (*Parathelypteris glanduligera* (Kze.) Ching)、铁线蕨 (*Adiantum capillus-veneris* L.)、鳞盖蕨 (*Microlepia marginata* (Houtt.) C. Chr.) 等。

表 1 试验区样地概况

林分 类型	编号	经度	纬度	海拔/ m	坡度/ (°)	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	坡向	土壤 类型	郁闭度
杉木纯林	SML1	E116°27′08″	N29°31′43″	110	30	1916	ES	砂壤	0.84
	SML2	E116°27′02″	N29°32′05″	150	42	1750	ES	砂壤	0.80
	SML3	E116°27′02″	N29°32′06″	170	20	1833	ES	砂壤	0.82
常绿落 叶阔叶	KYL1	E116°26′49″	N29°32′13″	120	14	1166	WN	砂壤	0.73
	KYL2	E116°26′49″	N29°32′16″	130	24	1216	W	砂壤	0.78
混交林	KYL3	E116°26′49″	N29°31′18″	140	30	1083	W	砂壤	0.72

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

采用样地调查法对江西省都昌彭冲涧流域内进行实地调查。选择取代常绿落叶阔叶混交林的杉木纯林及常绿落叶阔叶混交林,按随机区组的方法分别设置了 3 个 20 m×30 m 的标准样地,并测定样地的地理坐标、坡度和树种等指标。

### 2.2 枯落物蓄积量和自然含水率

在样地 4 个角选定 4 个 1 m×1 m 的小样方。先用钢尺测定其枯落物厚度并记录,后将小样方内所有枯落物采集带回,立即称取鲜重,然后将枯落物分装在做了记号的牛皮袋中置于 85 ℃ 的烘箱烘至恒重,称其干重并记录,计算公式<sup>[10]</sup>为:

$$R=(M_0-M_1)/M_1\times100\% \quad (1)$$

式中: $R$  为枯落物自然含水率(%); $M_0$  为烘干前的质量(g); $M_1$  为烘干后的质量(g)。

### 2.3 枯落物持水过程

采用室内浸水法<sup>[11]</sup>对枯落物持水过程进行模拟,将烘干的枯落物装入做好标记的尼龙袋中,然后将其浸入清水中,并在 1/4,1/2,1,2,4,6,8,10,12,24 h 时记录其湿重,计算枯落物最大持水量和最大持水率,分析枯落物持水过程。

### 2.4 枯落物有效拦蓄量

有效拦蓄量可用来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量<sup>[12]</sup>,即:

$$W=(0.85R_m-R_0)\times M \quad (2)$$

式中: $W$  为有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $R_m$  为最大持水率(%); $R_0$  为平均自然含水率(%); $M$  为枯落物蓄积量(t/hm<sup>2</sup>)。

### 2.5 土壤物理性质和持水能力

土壤物理性质的测定采用环刀法<sup>[13]</sup>。即在样地

的上、中、下坡分别挖取 1 个土壤剖面,由于试验样地土层较薄,20 cm 以下的土层中石砾较多,所以用环刀采集 0—10,10—20 cm 的原状土,将其带回实验室并通过浸水法和置砂法来测定土壤物理性质和持水能力。由公式计算出一定深度的土壤最大吸持贮水量、最大滞留贮水量和饱和贮水量<sup>[14]</sup>。即:

$$W_c=1000\times P_c\times h \quad (3)$$

$$W_{nc}=1000\times P_{nc}\times h \quad (4)$$

$$W_t=1000\times P_t\times h \quad (5)$$

式中: $W_c$ 、 $W_{nc}$  和  $W_t$  分别为土壤水分最大吸持贮水量、土壤水分最大滞留贮存量和土壤水分饱和贮水量; $P_c$ 、 $P_{nc}$ 、 $P_t$  分别为毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度(%); $h$  为计算土层深度(m)。

### 2.6 土壤团聚体粒级分布

土壤团聚体粒级分布通过筛分法<sup>[15]</sup>获得,土样在室内摊开阴干、去根,然后依次过直径为 2,0.05,0.002 mm 的筛子,按照美国土壤质地分类标准,将土壤粒级划分为砂粒 0.05 mm≤直径( $D$ )<2 mm;粉粒 0.002 mm≤直径( $D$ )<0.05 mm;黏粒直径( $D$ )<0.002 mm。

### 2.7 数据分析处理

数据的分析处理采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,制图通过 Origin 9.0 完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 枯落物厚度与蓄积量

由于该试验区未分解层和半分解层的区别不明显,因此没有对枯落物进行分层处理。由表 2 可知,枯落物层平均厚度表现为杉木纯林(9.17 cm)>常绿落叶阔叶混交林(5.42 cm),平均蓄积量表现为杉木纯林(3.12 t/hm<sup>2</sup>)<常绿落叶阔叶混交林(3.42 t/hm<sup>2</sup>)。

表 2 不同林分类型枯落物厚度、蓄积量及拦蓄能力

林分 类型	枯落物层 厚度/cm	蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	自然 含水率/%	最大 拦蓄率/%	有效 拦蓄率/%	最大拦蓄量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
杉木纯林	9.17±0.49	3.12±0.23	19.24±0.18	159.70±0.03	132.82±0.03	4.97±0.36	4.13±0.30
常绿落叶阔叶混交林	5.42±0.62	3.42±0.36	23.95±0.21	160.50±0.11	132.83±0.09	5.41±0.66	4.48±0.55

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

### 3.2 枯落物层持水能力的分析

#### 3.2.1 枯落物的最大持水量 枯落物具有较强的持

水能力和透水性,通常用最大持水量和最大持水率来表示枯落物的持水能力,不同林分枯落物的持水

能力不同,它受到树种组成、林龄和林分密度等因素的影响<sup>[10]</sup>。由表 3 可知,最大持水量表现为常绿落叶阔叶混交林(6.23 t/hm<sup>2</sup>)>杉木纯林(5.57 t/hm<sup>2</sup>),最大持水率也表现出相似的规律,即常绿落叶阔叶混交林(184.40%)>杉木纯林(179.50%)。综合说明,常绿落叶阔叶混交林枯落物的持水能力优于杉木纯林。

表 3 不同林分类型最大持水量和最大持水率		
林分类型	最大持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	最大持水率/%
杉木纯林	5.57±0.40	179.50±0.09
常绿落叶阔叶混交林	6.23±0.74	184.40±0.11

3.2.2 枯落物的有效拦蓄量 最大拦蓄量和最大持水量不能反映其对实际降雨的拦蓄效果,当 24 h 降雨量超过 25 mm 时,实际持水率约为最大持水率的 85%,在实际应用中,枯落物对雨水的实际拦蓄量常用有效拦蓄量来估算<sup>[12]</sup>。从表 2 可知,有效拦蓄量表现为常绿落叶阔叶混交林(4.48 t/hm<sup>2</sup>)>杉木纯林(4.13 t/hm<sup>2</sup>),最大拦蓄量表现为常绿落叶阔叶混交林(5.41 t/hm<sup>2</sup>)>杉木纯林(4.97 t/hm<sup>2</sup>),杉木纯林的最大拦蓄率和有效拦蓄率与常绿落叶阔叶混交林的差别不大。

3.2.3 枯落物持水能力与浸水时间的关系 常绿落叶阔叶混交林与杉木纯林的枯落物持水规律基本一

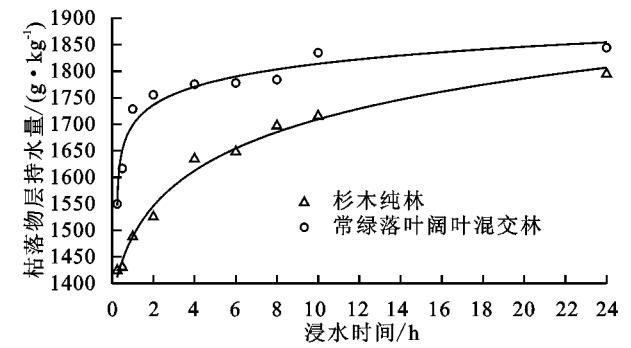


图 1 各林分枯落物持水量与浸水时间的关系

表 4 枯落物随时间的持水量									
林分类型	0.25 h	0.5 h	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	24 h
杉木纯林	1424.24	1430.46	1487.82	1525.38	1634.64	1648.11	1697.23	1715.53	1795.04
常绿落叶阔叶混交林	1549.90	1616.82	1728.72	1755.58	1775.58	1778.00	1784.20	1834.95	1844.50

表 5 各林分枯落物持水量、持水率与浸泡时间关系式				
林分类型	持水量与浸泡时间		持水率与浸泡时间	
	关系式	相关系数 R <sup>2</sup>	关系式	相关系数 R <sup>2</sup>
杉木纯林	$Q=172.7\ln(t)+1349.00$	0.87	$V=8748t^{-1.92}$	0.96
常绿落叶阔叶混交林	$Q=133.0\ln(t)+1551.00$	0.96	$V=10009t^{-1.96}$	0.95

3.3 土壤水文效应

3.3.1 土壤结构 由表 6 可知,杉木纯林和常绿落叶阔叶混交林的林下土壤容重均随着土层的增加而增大,常绿落叶阔叶混交林中土壤容重表现为 0—10

致,即随着枯落物浸水时间的增加,单位时间持水量不断减少,最终枯落物的持水量将保持相对稳定的状态,且常绿落叶阔叶混交林的最大持水量大于杉木纯林(图 1)。在浸水初期的 2 h 内随着浸水时间的增加,枯落物持水量显著增加,在 4~10 h 持水量缓慢增加,10~24 h 持水量趋于稳定状态(表 4)。杉木纯林和常绿落叶阔叶混交林枯落物的吸水速率随时间的增加均呈下降趋势,在浸水 2 h 内吸水速率大幅下降,在 2~10 h 内下降趋势较缓慢,在浸水 10 h 之后,枯落物层吸水速率基本呈稳定状态,浸泡 24 h 时吸水速率趋向于 0,说明此时枯落物吸水量基本达到饱和(图 2)。对杉木纯林和常绿落叶阔叶混交林枯落物持水量与浸水时间的关系进行回归拟合分析,拟合方程为: $Q=a\ln(t)+b$ 。式中: $Q$  为枯落物持水量(g/kg); $t$  为浸水时间(h); $a$  方程回归系数; $b$  方程常数项。拟合结果见表 5, $R^2$  均大于 0.85,说明各林分枯落物的持水量与浸水时间具有很好的相关关系。

对杉木纯林和常绿落叶阔叶混交林枯落物层的吸水速率与浸水时间的关系进行拟合,得出吸水速率和浸泡时间之间的拟合方程(表 5)为: $V=at^b$ 。式中: $V$  表示枯落物吸水速度(g/(kg·h)); $t$  表示浸泡时间(h); $a$ 、 $b$  为常数。可知各林分类型枯落物的吸水速率与浸水时间均满足指数关系,相关系数均大于 0.94,拟合效果比较理想。

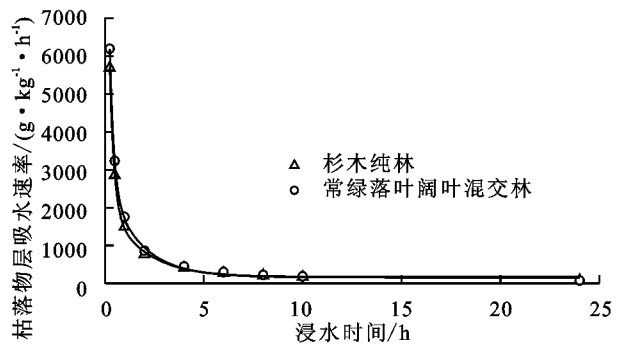


图 2 各林分枯落物层吸水速率与浸水时间的关系

cm(1.33 g/cm<sup>3</sup>)<10—20 cm(1.44 g/cm<sup>3</sup>),杉木纯林中土壤容重表现为 0—10 cm(1.35 g/cm<sup>3</sup>)<10—20 cm(1.38 g/cm<sup>3</sup>)。随着土壤的非毛管孔隙度的增大,土壤的通透性越好。非毛管孔隙度平均值表现为杉木纯林

(10.22%)>常绿落叶阔叶混交林(8.20%)。毛管孔隙度平均值表现为常绿落叶阔叶混交林(43.58%)>杉木纯林(41.88%)。总孔隙度平均值表现为杉木纯林(52.10%)>常绿落叶阔叶混交林(51.79%)。

3.3.2 土壤水文性质 从表 6 可以看出,毛管持水量均值表现为常绿落叶阔叶混交林(318.50 g/kg)>杉木纯林(308.46 g/kg),最小持水量也存在类似的规律,但是最大持水量表现为杉木纯林大于常绿落叶阔叶混交林。在森林生态系统中,土壤对水分的吸

持贮存是指靠毛管吸持力在毛管孔隙中的贮存,因其主要供给植物吸收和土壤蒸发,具有十分重要的植物生态功能。而滞留贮存是指土壤水在饱和土壤中以重力水的形式贮存在非毛管孔隙中,非毛管孔隙对重力水的贮存有效地减少了地表径流,具有较高的水源涵养功能<sup>[16]</sup>。土壤对水分的吸持贮存和滞留贮存都可以有效地减少地表径流和削弱土壤侵蚀,但从涵养水源角度看,只有滞留贮存的水分才可以补充地下水 and 河水。

表 6 不同林分类型下土壤的物理性质

林分类型	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	最小持水量/(g·kg <sup>-1</sup> )	最大持水量/(g·kg <sup>-1</sup> )	毛管持水量/(g·kg <sup>-1</sup> )
常绿落叶阔叶混交林	0—10	1.33±0.03	8.18±0.83	44.84±1.26	53.02±1.36	318.29±13.58	401.98±18.62	339.84±15.76
	10—20	1.44±0.05	8.22±0.82	42.32±0.74	50.55±1.38	284.06±14.04	357.06±22.12	298.02±14.91
杉木纯林	0—10	1.35±0.83	8.32±1.02	42.93±0.97	51.25±1.46	299.16±8.03	379.38±10.65	318.04±8.06
	10—20	1.38±0.02	12.12±1.38	40.82±0.60	52.94±1.47	280.26±8.78	389.89±21.67	298.87±9.92

从表 7 可以看出,土壤水分最大吸持贮水量均值表现为常绿落叶阔叶混交林(43.58 mm)>杉木纯林(41.88 mm),常绿落叶阔叶混交林内的土壤可以更好地为植被提供良好的水分供其生长;土壤水分最大滞留贮存量均值表现为常绿落叶阔叶混交林(8.20 mm)<杉木纯林(10.22 mm),即杉木林内的土壤具有更好的涵养水源的能力,这可能是因为杉木林林下土壤中含有较多的颗粒直径  $D>1\text{ mm}$  的土壤,而阔叶林的土壤中所含大团粒较少(表 8)。

表 7 不同林分类型不同土层贮水能力比较

林分类型	土层深度/cm	土壤水分最大吸持贮水量/mm	土壤水分最大滞留贮存量/mm	土壤水分饱和和贮水量/mm
常绿落叶阔叶混交林	0—10	44.84±1.26	8.18±0.83	53.02±1.36
	10—20	42.32±0.74	8.22±0.82	50.55±1.38
杉木纯林	0—10	42.93±0.97	8.32±1.02	51.25±1.46
	10—20	40.82±0.60	12.12±1.38	52.94±1.47

表 8 不同林分类型土壤粒径分布比

林分类型	土层深度/cm	土壤颗粒直径 $D>2\text{ mm}$	土壤颗粒直径 $1\text{ mm}<D<2\text{ mm}$	土壤颗粒直径 $D>1\text{ mm}$
		所占比/%	所占比/%	所占比/%
常绿落叶阔叶混交林	0—10	62.88±2.84	13.36±0.61	76.23±2.25
	10—20	63.57±2.20	13.80±0.72	77.37±1.55
杉木纯林	0—10	73.25±1.45	11.05±0.60	84.30±0.85
	10—20	70.40±1.75	12.14±0.63	82.54±1.13

4 讨论

研究区常绿落叶阔叶混交林在被杉木人工林取代后,杉木人工林水源涵养能力优于常绿落叶阔叶林。林地的水源涵养功能主要是林地土壤层和地表枯落物层对水分的截留蓄持作用,而林分类型、年龄、密度等生物因子又决定了枯落物和土壤特性,进而影响林分水源涵养效益的发挥。因此可从枯落物蓄积量、枯落物持水能力、土壤涵水作用及其相关的 2 个

重要林分结构因子(密度、年龄)对杉木林和常绿阔叶林水源涵养能力进行探讨和分析。

4.1 枯落物蓄积量

森林凋落物现存量一方面受到凋落物量的控制,另一方面也会受到土壤动物、微生物、气候、土壤等生物和非生物因素的影响<sup>[17]</sup>。对彭冲涧小流域内常绿落叶阔叶混交林以及杉木纯林的枯落物层的平均厚度进行研究表明,杉木纯林(9.17 cm)>常绿落叶阔叶混交林(5.42 cm),平均蓄积量则表现常绿落叶阔叶混交林(3.42 t/hm<sup>2</sup>)略高于杉木纯林(3.12 t/hm<sup>2</sup>),与王波等<sup>[18]</sup>在四面山的结论相近。这主要是因为阔叶林内树种组成以枫香、榿木、女贞、山茶花、桉木等为主,喻阳华等<sup>[19]</sup>在对赤水河上游 27 个树种枯落物收集和处理时的研究发现,枯落物现存量茶(4.50 t/hm<sup>2</sup>)>枫香(1.20 t/hm<sup>2</sup>)榿木(1.00 t/hm<sup>2</sup>)=杉木(1.00 t/hm<sup>2</sup>),与本研究的结论一致。另外也受到杉木的枯落物自身特征的影响<sup>[20]</sup>,且枯落物之间孔隙较大,外界因素例如风、降雨、土壤动物等加速了枯落物的分解,加之杉木人工林内人为活动影响相较于常绿阔叶林更为频繁,对林下枯落物层的破坏使得杉木林枯落物储量相对较小。

4.2 枯落物持水能力

枯落物层最大持水量表现为常绿落叶阔叶混交林(6.23 t/hm<sup>2</sup>)>杉木纯林(5.57 t/hm<sup>2</sup>),且最大持水率也表现出相同的规律,即常绿落叶阔叶混交林(184.4%)>杉木纯林(179.5%),但对枯落物拦截能力的评估一般通过有效拦蓄量来表现的,有效拦蓄量表现为阔叶林(4.48 t/hm<sup>2</sup>)>杉木纯林(4.13 t/hm<sup>2</sup>),可以看出常绿落叶阔叶混交林枯落物的有效拦蓄能力强于杉木纯林,这与贾剑波等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。与这 2 种林分的枯落物层的吸水量与浸水

时间符合对数函数  $Q=a\ln(t)+b$ ,吸水速率与浸水时间符合指数函数  $V=at^b$ ,得出的方程与赵磊等<sup>[21]</sup>在江西大岗山的研究结果相似。不同林分枯落物的持水量均随着浸水时间的增加而增加,而吸水速率随时间的增加均呈下降的趋势,从 2 种林分类型枯落物的最大持水量和吸水速率来看,常绿落叶阔叶混交林枯落物比杉木纯林具有更好的持水能力。

4.3 林龄以及林分密度对杉木林下土壤涵养水源能力的影响

林龄和林分密度通过影响土壤的结构从而影响

林分水源涵养能力,而土壤则是森林涵养水源的重要组成部分<sup>[22]</sup>。诸多学者<sup>[23]</sup>就林龄和密度对森林水源涵养能力进行研究,均发现杉木人工林随着林龄的增加,其枯落物层和土壤层水源涵养能力呈现出增长的趋势,近熟林和老龄林水源涵养功能最大;近熟和老龄杉木林保存密度在 1 000~1 600 株/hm<sup>2</sup> 时,土壤层的肥力维持和水源涵养能力最佳(表 9),这些结论都支持了本研究中发现,即杉木人工林在取代常绿落叶阔叶混交林后,当杉木林成熟后,其林下土壤的水源涵养能力略大于常绿落叶阔叶混交林。

表 9 不同学者对不同林龄和密度下针叶林的水源涵养能力研究

研究区	树种	林龄/龄组(a)	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	结论	参考文献
湖南平江县	不同林龄的杉木林	6,13,23		随着林龄的增大水源涵养功能呈增大趋势	李际平等 <sup>[7]</sup>
广西凭祥	不同密度的杉木林		1 667, 3 333, 5 000, 6 667, 10 000	种植密度为 1 667 株/hm <sup>2</sup> 更有助于土壤肥力的长期维持	胡小燕等 <sup>[8]</sup>
四川理县米亚罗林区	不同林龄云杉	5,10,15,20,25,30,35,40,45, 50,55,60,65,70,90		40 年的时候土壤贮水量最大	代杰 <sup>[23]</sup>
福建三明	不同发育阶段杉木人工林	10,22,34	幼龄林 2 400,中龄林 2 700,成龄林 1 300	34 年老林龄杉木凋落物层具有较强的生态水文功能。	周丽丽等 <sup>[24]</sup>
湖南会同	不同年龄阶段杉木人工林	幼龄林 0~10,中龄林 10~15,近熟林 16~20	幼龄林 2 400,中龄林 2 350,近熟林 2 175	随着林龄的增加,单位面积枯落物最大持水能力呈增长趋势	赵亮生等 <sup>[25]</sup>
福建省邵武市	不同林龄杉木人工林	4,15,32	3 458,1 854,834	杉木人工林土壤水分及持水能力表现为:幼龄林 4 年>成熟林 32 年>中龄林 15 年	危炳忠 <sup>[26]</sup>
福建南平	不同林龄杉木人工林	3,8,13,18,23,28,33,38,43, 48,53,58,63,68		成林后 33 年内,土壤的非毛管孔隙度随林龄的增加而增大	陆尧森 <sup>[27]</sup>
福建南平	不同密度的杉木林		1 875,2 805,3 750,4 500,6 000	密度在未达到 3 750 株/hm <sup>2</sup> 时,涵养水源功能随着密度的增加逐渐增强	林开敏等 <sup>[28]</sup>
广西鹿寨县	不同密度的杉木林		1 250,1 600,1 667,2 500	杉木密度在达到 1 600 株/hm <sup>2</sup> 时可以充分利用现有林地,培育出目标林分	陶韬等 <sup>[29]</sup>

因此综合前人的研究结论和本文的研究结果,在今后的森林经营中,特别是在杉木纯林的改造中(如针叶林间伐补种阔叶树),为了使其发挥最优的水源涵养效益,同时也能获得较好的经济效益,应同时结合林龄和密度进行调整。

参考文献:

[1] 李婷婷,陆元昌,庞丽峰,等. 杉木人工林近自然经营的初步效果[J]. 林业科学,2014,50(5):90-100.

[2] 何绍浪,何小武,李凤英,等. 南方红壤区林下水土流失成因及其治理措施[J]. 中国水土保持,2017(3):16-19.

[3] Santonja M, Rancon A, Fromin N, et al. Plant litter diversity increases microbial abundance, fungal diversity, and carbon and nitrogen cycling in a Mediterranean shrubland[J]. Soil Biology and Biochemistry,2017,111: 124-134.

[4] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):23-28.

[5] Rigdon M, Hung Y, Stelzleni A M. Evaluation of alkaline electrolyzed water to replace traditional phosphate enhancement solutions: Effects on water holding capacity, tenderness, and sensory characteristics [J]. Meat Science,2017,123:211-218.

[6] Lemma T M, Gessesse G D, Kassa A K, et al. Effect of spatial scale on runoff coefficient: Evidence from the Ethiopian highlands [J]. International Soil and Water Conservation Research,2018,6(4):289-296.

[7] 李际平,李沛霖,曹小玉,等. 福寿林场杉木人工林水源涵养功能比较研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(7):80-83.

[8] 胡小燕,段爱国,张建国,等. 南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究[J]. 林业科学研究,2018,31(3):15-23.

[9] 吕圣吉. 杉木—木荷混交林土壤肥力与水源涵养功能的研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(28):13844-13846.

[10] 韦小茶,周秋文,崔兴芬,等. 喀斯特针叶林枯落物层水文效应[J]. 生态科学,2017,36(4):120-127.

- [11] 宣立辉,康凡,谷建才,等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.
- [12] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等.半城子流域 3 种林地枯落物的持水能力[J].中国水土保持科学,2015,13(6):26-32.
- [13] 魏雅丽,贺玉晓,金杰,等.元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):181-186.
- [14] 孙艳红,张洪江,程金花,等.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [15] 张彩红,茹豪,武秀娟,等.庞泉沟流域土壤粒径分形维数特征[J].东北林业大学学报,2017,45(11):83-88.
- [16] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,18(6):1-5.
- [17] 彭少麟,刘强.森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J].生态学报,2002,22(9):1534-1544.
- [18] 王波,张洪江,徐丽君,等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报,2008,22(4):90-94.
- [19] 喻阳华,李光容,严令斌,等.赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分效应[J].中国水土保持科学,2015,13(3):39-44.
- [20] 陈继东,周长亮,李惠丽.接坝地区 9 种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持研究,2017,24(6):216-221.
- [21] 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.
- [22] 盛炜彤,杨承栋,范少辉.杉木人工林的土壤性质变化[J].林业科学研究,2003,16(4):377-385.
- [23] 代杰.米亚罗林区云杉人工林水源涵养效益及防护成熟研究[D].成都:四川农业大学,2009.
- [24] 周丽丽,蔡丽平,马祥庆,等.不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J].水土保持学报,2012,26(5):249-253.
- [25] 赵亮生,闫文德,项文化,等.不同年龄阶段杉木人工林枯落物层水文特征[J].西北林学院学报,2013,28(4):1-5.
- [26] 危炳忠.酸雨区不同林龄杉木人工林土壤物理性质及水源涵养功能差异[J].亚热带农业研究,2017,13(2):105-109.
- [27] 陆尧森.杉木林水文效应成熟问题的探讨[J].林业经济问题,1988(2):32-39.
- [28] 林开敏,俞新妥,何智英,等.不同密度杉木林分生物量结构与土壤肥力差异研究[J].林业科学,1996,32(5):385-391.
- [29] 陶韬,陆丽君.杉木不同造林密度林分生长效应分析[J].绿色科技,2017(9):96-97.

(上接第 243 页)

- [23] 彭勇.模拟氮沉降对瓦屋山次生常绿阔叶林地下碳循环过程和土壤生化特性的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2016.
- [24] 林宝平,林思祖,何宗明,等.不同碳输入方式对沿海防护林土壤氮库的影响[J].森林与环境学报,2016,36(4):385-391.
- [25] 汪金松,赵秀海,张春雨,等.模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(10):88-94.
- [26] 刘志江,林伟盛,杨舟然,等.模拟增温和氮沉降对中亚热带杉木幼林土壤有效氮的影响[J].生态学报,2017,37(1):44-53.
- [27] 沈芳芳,袁颖红,樊后保,等.氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J].生态学报,2012,32(2):517-527.
- [28] Lauber C L, Sinsabaugh R L, Zak D R. Laccase gene composition and relative abundance in Oak forest soil is not affected by short-term nitrogen fertilization[J]. Microbial Ecology, 2009, 57(1):50-57.
- [29] 涂利华,胡红玲,胡庭兴,等.模拟氮沉降对华西雨屏区光皮桦林土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2012,23(8):2129-2134.