

贝江河林场杉木人工林凋落物储量及其持水特性

何琴飞^{1,2,3}, 郑 威^{1,2,3}, 彭玉华^{1,2,3}, 谭长强^{1,2,3}, 何 峰^{1,2,3}, 申文辉^{1,2,3*}

(1. 广西林业科学研究院,广西 南宁 530002; 2. 广西优良用材林资源培育重点实验室,广西 南宁 530002;

3. 国家林业局 中南速生材繁育实验室,广西 南宁 530002)

摘要:基于野外调查与室内浸水试验,研究贝江河林场不同林龄组的杉木人工林凋落物储量、持水量、持水率和吸水速率。结果表明,不同林龄杉木人工林凋落物储量为 $1.41\sim7.77\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,大小顺序为成熟林>近熟林>幼龄林>中林龄,且未分解层大于半分解层;最大持水量为 $2.88\sim12.01\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,大小顺序与总储量一致;最大持水率为 $171.0\%\sim266.8\%$,大小顺序为幼龄林>中林龄>近熟林>成熟林。不同林龄不同分解程度凋落物的持水动态变化规律一致,即持水量和持水率随着浸水时间的增加而增加,在 0.25 h 前增加较快,最后达到最大值;吸水速率随着浸水时间的增加而降低,在 0.5 h 前吸水速率很高,之后渐渐趋于饱和;且持水量和持水率与浸泡时间均呈对数关系,吸水速率与浸泡时间呈幂函数关系。总体上,在一定的年龄范围内,林龄的增加有利于凋落物的积累和持水量的增加。

关键词:杉木人工林;凋落物;持水量;林龄

中图分类号:S791.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)04-0048-07

Accumulation Amount and Water-holding Characteristics of the Litters under Chinese fir Plantation in Beijiang River Forest Farm

HE Qin-fei^{1,2,3}, ZHENG Wei^{1,2,3}, PENG Yu-hua^{1,2,3}, TAN Zhang-qiang^{1,2,3}, HE Feng^{1,2,3}, SHEN Wen-hui^{1,2,3*}

(1. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning 530002, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Nanning 530002, Guangxi, China)

Abstract: Combined with field investigation and indoor water immersion test, a study was conducted on the accumulation amount, water-holding capacity, water-holding rate and water-absorption rate of the litters under different forest age groups (young, middle aged, near-mature, and mature forest) in Beijiang River Forest Farm. The results indicated that the accumulation amount of the litters varied from $1.41\sim7.77\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ in the order of mature forest>near-mature forest>young forest>middle aged forest, and the percentage of un-decomposed litter storage was higher than that of semi-decomposed litter. The maximum water-holding capacity was $2.88\sim12.01\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the order was the same as the accumulation amount. The maximum water-holding rate ranged from 171.0% to 266.8%, and was in the order of young forest>middle aged forest>near-mature forest>mature forest. The water-holding capacity and water-holding rate of litters at different decomposition degrees increased with the increase of immersion time with faster rate before 0.25 h, and finally reached the maximum value. Whereas the water absorption rate decreased with the increase of immersion time, the fastest during 0.5 h, and then gradually tended to saturation. The water-holding capacity and water-holding rate changed logarithmically, while the water-absorption rate as-

收稿日期:2020-08-07 修回日期:2020-09-18

基金项目:广西科技重大专项“杉木人工林生态功能监测与增效研究”(桂科 AA17204087-8)。

作者简介:何琴飞,高级工程师,硕士。研究方向:森林生态。E-mail:dragonfly_hqf@126.com

*通信作者:申文辉,教授级高工,博士。研究方向:森林生态和森林培育。E-mail:shenwenhui2003@163.com

sumed a power function of immersion time. The study provides an important basic theory that the increase of forest age is beneficial to the increase of the accumulation and water holding capacity of litter.

Key words: Chinese fir plantation; litter; water-holding capacity; forest age

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的常绿针叶树种之一,具有生长快、成林迅速等优点,也是我国南方重要的速生用材树种。近些年由于杉木人工林连栽等经营方式,导致地力衰退、水土流失等生态问题突出。森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分,不仅能改良土壤、提高土壤肥力,而且其结构疏松,具有良好的透水性和持水能力,能够阻滞和分散降水,吸收降落到地表的水分,减缓降水对土壤的直接冲击,增加土壤水分下渗,减少地表径流,起到保持水土和涵养水源的作用^[1-2]。因此,人工林凋落物的研究越来越引人重视,关于杉木人工林凋落物的研究主要在凋落物量、组成、空间分布特征及其分解作用^[3-7]、养分含量^[8]、碳循环与化学计量特征^[9-11]及持水特性^[12-15]等方面,其中持水特性的研究主要集中在福建、湖南、江西等地,广西关于杉木人工林凋落物的持水特性及其内在机理的研究很少。而凋落物累积量受凋落物产量、分解速度、积累年限等因素的影响,这些因素又与林型、林分发育、林分生产力、气候状况和人为活动等相关^[16-17],且不同地区不同年龄杉木林分年凋落量差异较大^[3]。融水县位于广西北部,是全国杉木优良种源区,也是广西杉木的中心产区之一,研究该地区不同林龄的杉木人工林凋落物储量和持水特性对杉木人

工林的多目标经营和可持续发展具有重要意义。因此,本试验在融水县贝江河林场选取不同生长年限的杉木人工林,即幼龄林(3 a)、中龄林(8 a)、近熟林(12 a)、成熟林(20 a)4个林龄组为研究对象,研究其凋落物的累积量、持水量和持水动态变化规律,旨在为杉木人工林的合理经营和生态服务功能提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广西融水县贝江河林场,地理坐标109°14' E, 25°04' N, 属中亚热带季风气候区; 年均气温19.6°C, 最热7月均温27.9°C, 极端最高温38.6°C; 最冷1月均温9.3°C; 极端最低温-3°C; 光热充足, 年均日照时数1 699.0 h, ≥10°C积温为6 000~6 500°C; 雨量充沛, 年均降水量1 824.8 mm, 年均相对湿度为80%左右, 年总蒸发量1 561.2 mm; 夏湿冬干, 干湿季节明显, 年均无霜期322 d。

选择立地条件基本一致、生长状况良好的幼龄林(3 a)、中龄林(8 a)、近熟林(12 a)、成熟林(20 a)4个林龄组的杉木人工林,每组设置3个20 m×20 m的标准样地,林分样地基本情况见表1。

表1 林分样地基本特征

Table 1 General characteristics of test plantations

林龄组	林龄	林分密度 (株·hm ⁻²)	平均树高 /m	平均胸径 /cm	郁闭度 /%	海拔 /m	坡度/(°)	坡向
YLL	幼龄林	3 210	3.20	3.43	50	185	38	S 175
ZLL	中龄林	2 716	11.11	11.18	95	187	38	EN 39
JSL	近熟林	1 792	12.12	12.65	90	180	38	E 111
CSL	成熟林	1 395	15.07	17.92	80	462	26	N 345

1.2 凋落物储量测定

在每个标准样地的4个边角和对角线中心点布设50 cm×50 cm的小样方5个,按未分解(由新鲜凋落物组成,保持原有形态,颜色变化不明显,外表无分解的痕迹)和半分解(叶无完整的外观轮廓,颜色变黑,多数凋落物已粉碎)分层收集各小样方内的全部凋落物,称其鲜重,并带回实验室于80°C下烘干至恒重,据此换算成林地的凋落物储量。

1.3 凋落物持水特性测定

每个标准样地选取3个小样方的烘干凋落物,分别装入100目20 cm×30 cm的尼龙网袋中,每个林龄组共计9个,然后把网袋完全浸入清水中,分别

浸水0.25、0.5、1、2、4、8、12、24 h后取出,悬挂静置约5 min至无水滴滴下时立刻称重。不同浸泡时间凋落物的持水量、持水率和吸水速率计算公式如下^[18-20]:

$$\text{凋落物持水量 } W(t \cdot \text{hm}^{-2}) = [\text{凋落物湿质量} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) - \text{凋落物干质量} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})] \times 10$$

$$\text{凋落物持水率 } R/\% = (\text{凋落物持水量}/\text{凋落物干质量}) \times 100$$

$$\text{凋落物吸水速率 } V(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = \text{凋落物持水量} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{吸水时间} (\text{h})$$

1.4 数据处理

采用Excel 2010进行数据处理和绘图;运用

SPSS19.0 统计软件对凋落物储量、最大持水量和最大持水率进行单因素方差分析(One-way AVOVA)和多重比较分析(Duncan),同时对凋落物持水量、持水率和吸水速率与浸水时间的关系进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 凋落物储量、最大持水量和最大持水率

由表 2 可知,不同林龄的杉木人工林凋落物总储量 $1.41\sim7.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,大小顺序为成熟林>近熟林>幼龄林>中林龄,且未分解层大于半分解层,

各分层的大小顺序与总量基本一致,除了中林龄的未分解层略大于幼龄林;总最大持水量为 $2.88\sim12.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,大小顺序与总储量一致,说明随着林龄的增加,杉木人工林林分结构更加完整,林地凋落物的量呈增加趋势,持水能力也在增强。平均最大持水率 $171.0\sim266.8\%$,由大到小的排序为幼龄林>中林龄>近熟林>成熟林,与林龄的增长呈负相关,这可能与凋落物本身组成及其分解速率有关。方差分析表明,未分解层和半分解层的储量、最大持水率和最大持水量,以及总储量和最大持水量、平均最大持水率均存在显著差异($P<0.05$)。

表 2 不同林龄杉木人工林凋落物累积量、最大持水量和最大持水率

Table 2 Litter accumulation amount, max water-holding capacity and max water-holding content rate of different age groups (mean \pm se, $n=15,9$)

林龄组	未分解层			半分解层			总累积量 $/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	平均最大持水率/%	总最大持水量 $/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$
	累积量 $/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	最大持水率/%	最大持水量 $/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	累积量 $/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	最大持水率/%	最大持水量 $/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$			
YLL	0.93 ± 0.09 a	266.9 ± 2.7 b	2.48 ± 0.23 a	0.65 ± 0.13 a	266.6 ± 13.3 c	1.71 ± 0.36 b	1.58 ± 0.19 a	266.8 ± 8.3 c	4.19 ± 0.54 a
ZLL	1.03 ± 0.10 a	207.2 ± 7.1 a	2.14 ± 0.22 a	0.38 ± 0.05 a	195.8 ± 10.2 b	0.74 ± 0.11 a	1.41 ± 0.13 a	201.5 ± 5.9 b	2.88 ± 0.27 a
JSL	2.99 ± 0.19 b	186.8 ± 8.8 a	5.52 ± 0.29 b	1.40 ± 0.07 b	213.8 ± 5.8 b	3.00 ± 0.15 c	4.40 ± 0.22 b	200.3 ± 8.7 b	8.52 ± 0.38 b
CSL	5.35 ± 0.53 c	187.4 ± 3.7 a	8.42 ± 1.38 c	2.42 ± 0.29 c	154.6 ± 6.9 a	3.61 ± 0.38 c	7.77 ± 0.70 c	171.0 ± 4.1 a	12.01 ± 1.44 c

注:不同字母表示林间同层次的差异显著性($P<0.05$)。

2.2 凋落物持水量动态过程

不同林龄杉木人工林凋落物持水量与浸水时间的变化关系有共性也有差异(图 1)。4 种林龄的凋落物累积持水量的变化规律相同,即凋落物的累积持水量随着浸水时间的增加而不断增加,前 0.25 h 内快速增加,随后开始减慢,渐渐趋于稳定,浸水 24 h 后达到最大值。但 4 种林龄的凋落物总累积持水量差异明显,大小顺序为成熟林>近熟林>幼龄林>中龄林,未分解层和半分解层大小顺序与总量一致,且未分解层大于半分解层,可见,林龄的增加对持水能力有促进作用,尤其是未分解层表现得更加明显,增幅更大。

对不同林龄的杉木人工林各层凋落物持水量与浸水时间数据拟合发现,凋落物持水量 W 与浸水时间 t 之间呈极显著的对数函数关系($P<0.01$,表 3),相关系数 R^2 均 >0.94 ,表达式为: $W=a+b\ln t$,表明凋落物持水量与浸水时间相关性较好。

2.3 凋落物持水率动态过程

图 2 表明,4 种林龄的凋落物持水率随浸水时间的变化规律一致,在开始浸水时增加较快, 0.25 h 后随着浸水时间的增加,累积持水率增幅逐渐减小,最后达到某一稳定值。不同林龄的杉木人工林累积持水率存在差异,平均持水率为幼龄林明显较高,其次为近熟林和中龄林,最后是成熟林,未分解层为幼龄林>中龄林>成熟林>近熟林,半分解层为幼龄

林>近熟林>中龄林>成熟林,可见,持水率与林龄不存在明显的相关性,其中幼林龄持水率较高,可以缓解由于储量不多而导致持水能力较差的状况。成熟林的未分解层明显大于半分解层,近熟林则刚好相反,幼龄林和中龄林的未分解层和半分解层之间相差很小。

表 3 不同林龄杉木人工林的凋落物持水量与浸水时间的回归方程

Table 3 Equations between the water-holding capacity of litter and the immersion time in the different age groups ($n=8$)

林龄组	凋落物层	关系式	R^2
YLL	U	$W=1.727+0.184\ln t$	0.982 **
	S	$W=1.243+0.166\ln t$	0.986 **
	T	$W=2.969+0.351\ln t$	0.989 **
ZLL	U	$W=1.289+0.198\ln t$	0.982 **
	S	$W=0.499+0.063\ln t$	0.974 **
	T	$W=1.789+0.262\ln t$	0.985 **
JSL	U	$W=3.390+0.571\ln t$	0.994 **
	S	$W=2.523+0.160\ln t$	0.948 **
	T	$W=5.915+0.730\ln t$	0.997 **
CSL	U	$W=6.231+0.636\ln t$	0.988 **
	S	$W=3.100+0.184\ln t$	0.980 **
	T	$W=9.334+0.819\ln t$	0.991 **

不同林龄的杉木人工林各层凋落物持水率与浸水时间经方程拟合表明,凋落物持水率 R 与浸水时间 t 之间呈极显著的对数函数关系($P<0.01$,表 4),表达式为: $R=a+b\ln t$,相关系数 R^2 均在

0.97以上,说明凋落物持水率与浸水时间存在良好的相关性。

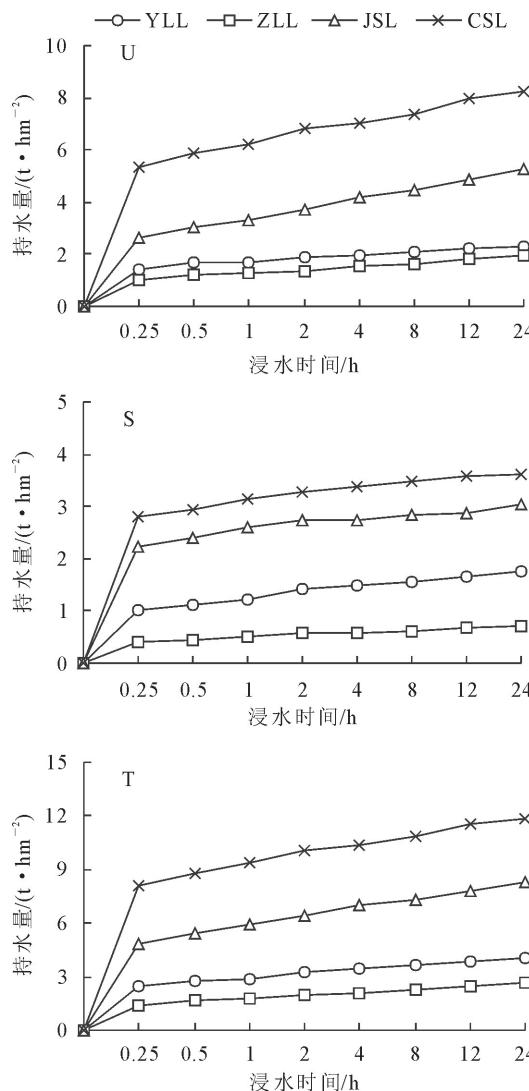


图1 不同林龄杉木人工林凋落物持水量与浸水时间的关系

Fig. 1 Relationship between the water-holding capacity of litter and the immersion time in different age groups

2.4 凋落物吸水速率动态过程

从图3可看出,4种林龄杉木人工林的凋落物吸水变化规律相同,在刚浸水时吸水速率高,0.5 h后吸水速率明显下降,4 h后吸水速率降幅逐渐变小,12 h后凋落物吸水速率基本不变,逐渐趋于饱和。这表明凋落物对截获短时降雨的作用很大,但当凋落物吸水达到极值后,凋落物层几乎成为一层水流通道。不同林龄的杉木人工林吸水速率存在差异,未分解层为幼龄林>成熟林>中龄林>近熟林,半分解层为幼龄林和近熟林明显大于成熟林和中龄林,平均吸水速率大小顺序为幼龄林>成熟林>近熟林>中龄林,可见,吸水速率不受林龄增长的影响。一般而言,凋落物的吸水速率越大,林内降水涵蓄的速率越快,可以更好地减少地表径流,其中幼龄林凋落物层具有较高的吸水速率,也可以一定程度地缓解由于储量不多而产生水土流失的问题。

同一林龄不同分解层的吸水速率存在差异,幼林龄和中龄林的未分解层和半分解的吸水速率相差很小,成熟林的未分解层明显大于半分解层,近熟林则刚好相反,与持水率表现出相同的变化规律。

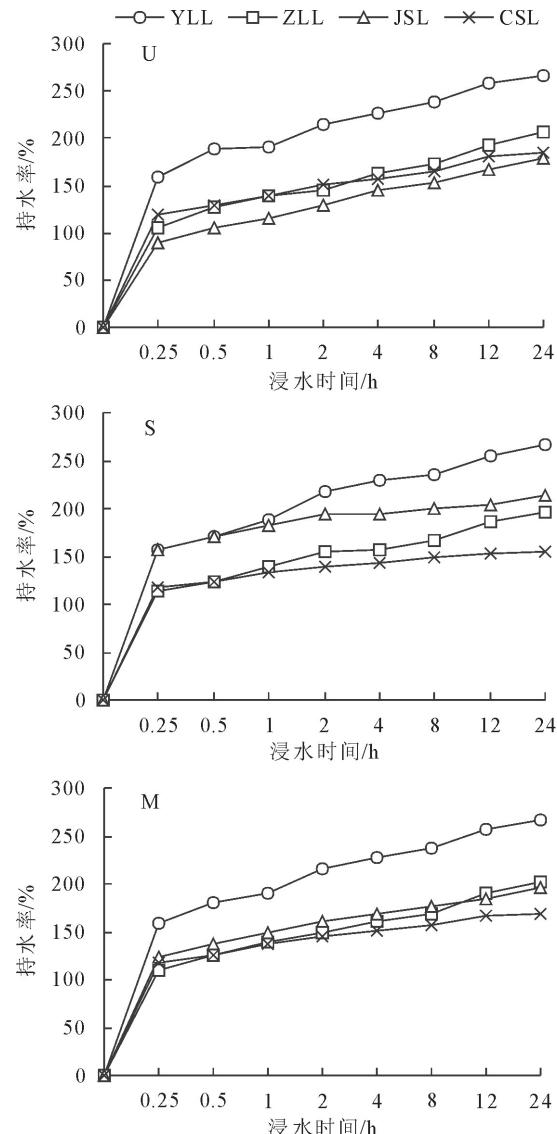


图2 不同林龄杉木人工林凋落物持水率与浸水时间的关系

Fig. 2 Relationship between the water content rate of litter and the immersion time in different age groups

拟合不同林龄的杉木人工林各层凋落物吸水速率与浸水时间可知,凋落物吸水速率V与浸水时间t之间呈极显著的幂函数关系($P<0.01$,表5),表达式为: $V=kt^{-a}$,相关系数 R^2 均 >0.99 ,说明凋落物吸水速率与浸水时间相关性较好。

3 讨论

不同林龄的杉木人工林的凋落物储量差异显著,大小顺序为成熟林($7.77\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>近熟林($4.40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>幼龄林($1.58\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>中林龄($1.41\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),这说明在一定的年龄范围内,林龄

表 4 不同林龄杉木人工林凋落物持水率与
浸水时间的回归方程

Table 4 Equations between the water content rate of litter and the immersion time in the different age groups ($n=8$)

林龄组	凋落物层	关系式	R^2
YLL	U	$R = 195.899 + 22.707 \ln t$	0.981 **
	S	$R = 191.106 + 24.482 \ln t$	0.984 **
	M	$R = 193.510 + 23.594 \ln t$	0.988 **
ZLL	U	$R = 36.490 + 21.040 \ln t$	0.981 **
	S	$R = 137.314 + 17.607 \ln t$	0.976 **
	M	$R = 136.892 + 19.322 \ln t$	0.984 **
JSL	U	$R = 116.961 + 19.246 \ln t$	0.995 **
	S	$R = 178.434 + 11.266 \ln t$	0.948 **
	M	$R = 147.713 + 15.262 \ln t$	0.992 **
CSL	U	$R = 139.434 + 14.327 \ln t$	0.988 **
	S	$R = 130.780 + 8.377 \ln t$	0.973 **
	M	$R = 135.121 + 11.357 \ln t$	0.991 **

表 5 不同林龄杉木人工林凋落物吸水速率与
浸水时间的回归方程

Table 5 Equations between the water-absorption rate of litter and the immersion time in the different age groups ($n=8$)

林龄组	凋落物层	关系式	R^2
YLL	U	$V = 2147.979 t^{-0.946}$	0.996 **
	S	$V = 2090.112 t^{-0.935}$	0.995 **
	M	$V = 2119.435 t^{-0.941}$	0.996 **
ZLL	U	$V = 1488.367 t^{-0.915}$	0.996 **
	S	$V = 1503.777 t^{-0.937}$	0.995 **
	M	$V = 1496.431 t^{-0.926}$	0.995 **
JSL	U	$V = 1271.763 t^{-0.906}$	0.996 **
	S	$V = 1968.751 t^{-0.992}$	0.996 **
	M	$V = 1622.430 t^{-0.957}$	0.996 **
CSL	U	$V = 1783.924 t^{-0.960}$	0.995 **
	S	$V = 1443.093 t^{-0.992}$	0.996 **
	M	$V = 1613.806 t^{-0.974}$	0.996 **

的增加有利于凋落物的积累,而幼龄林略大于中龄林,可能原因是幼龄林的郁闭度小,林下灌草植被、碎屑杂物等会增加其凋落物的累积量。曾有研究表明,凋落物现存量与林龄基本呈正相关关系,但达到一定林龄后,凋落物现存量开始下降^[21]。植物在不同发育阶段,再生能力与新陈代谢能力差异明显,在生长的最旺盛时期凋落量最大^[22]。周丽丽等^[12]人的研究表明杉木人工林的凋落物现存量随着林龄的增加而增加。相比其他地区同龄段杉木人工林的年均凋落物量,广西融水县大于福建尤溪县($1.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}, 8 \text{ a}$)、湖南会同($4.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}, 22 \text{ a}$)、广西龙胜($4.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}, 23 \text{ a}$)^[3],可见杉木人工林的凋落物量受地域影响。不同分解层的凋落物储量不同,4种龄林的凋落物储量均为未分解层大于半分解层,与苍梧县的马尾松针叶林表现相同,与大叶栎林、红锥林等^[23]阔叶树种表现相反,可能与杉木属针叶树种,且叶表面被有蜡粉难分解有关,一般针叶林未分解层所占比例普遍高于阔叶林^[21]。

凋落物最大持水量差异显著,大小顺序为成熟林($12.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>近熟林($8.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>幼龄林($4.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>中林龄($2.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),与储量大小顺序一致,但大于福建三明的杉木人工林($10 \sim 34 \text{ a}$)持水量($1.71 \sim 4.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[12],且均为未分解层大于半分解层。一般认为,凋落物的现存量越多,持水能力越强,水源涵养功能越好^[24]。平均最大持水率大小顺序为幼龄林(266.8%)>中林龄(201.5%)>近熟林(200.3%)>成熟林(171.0%),接近湖南会同杉木人工林叶凋落物(208.2%~241.4%)、大于枝凋落物(81.8%~148.6%)^[14],与累积量的大小顺序不一致,不同分

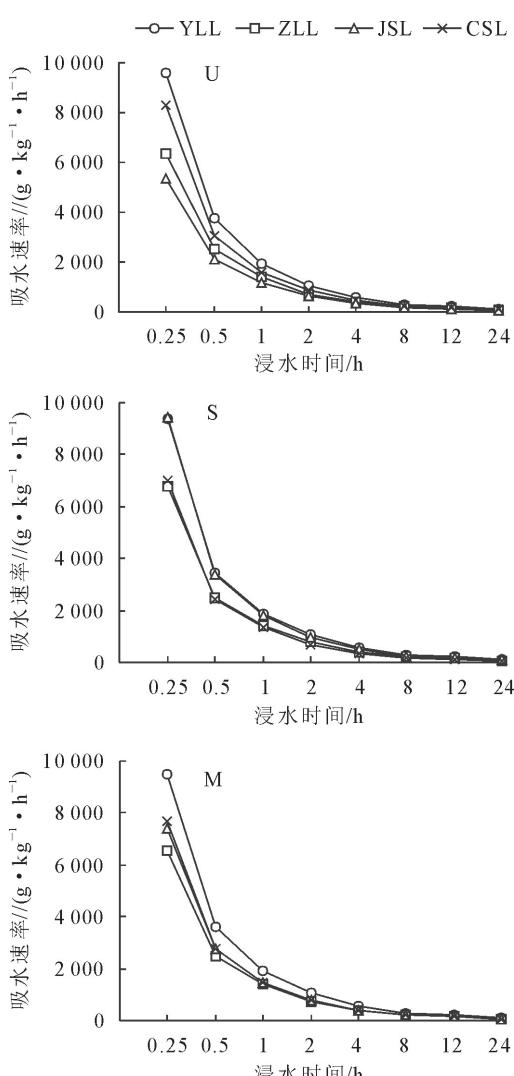


图 3 不同林龄杉木人工林凋落物吸水速率与
浸水时间的关系

Fig. 3 Relationship between the water-absorption rate of litter and the immersion time in different age groups

解层凋落物持水率受林龄影响,成熟林持水率表现为未分解层明显大于半分解层,近熟林则刚好相反,幼龄林和中龄林的未分解层和半分解层之间相差较小,这可能与凋落物的组成成分有关,不同发育阶段杉木人工林凋落物的组成存在差异^[3],而不同组成成分的持水率也存在差异^[14]。

不同林龄的杉木人工林凋落物持水量、持水率和吸水速率随浸水时间的动态变化规律一致,表现出相同的持水特性,即凋落物持水量和持水率随着浸水时间的增加而不断增加,增速先快后慢,逐渐趋于稳定,浸泡24 h达到理论最大值,且与浸水时间均呈对数关系,符合已有的研究结果^[13,15]。吸水速率在初浸水时很高,随后慢慢下降,最后到达饱和,且与浸水时间呈幂函数关系,与顾宇书等^[25]、杨玉莲等^[26]研究结果一致。一般在降雨开始时,凋落物层吸水量迅速增加,当水分到达细胞内部,吸水量增加缓慢^[27],各组分细胞吸水速率不会无限增大。可见,凋落物层在短时间内具有迅速拦截降水、减少地表径流的作用。

4 结论

不同林龄杉木人工林凋落物储量为成熟林(7.77 t·hm⁻²)>近熟林(4.40 t·hm⁻²)>幼龄林(1.58 t·hm⁻²)>中林龄(1.41 t·hm⁻²);最大持水量为成熟林(12.01 t·hm⁻²)>近熟林(8.52 t·hm⁻²)>幼龄林(4.19 t·hm⁻²)>中林龄(2.88 t·hm⁻²);最大持水率为幼龄林(266.8%)>中林龄(201.5%)>近熟林(200.3%)>成熟林(171.0%)。这表明在一定年龄范围内,林龄的增加有利于凋落物的积累和持水量的增加,而持水率不受其影响。

杉木人工林4个林龄组的凋落物储量和持水量均为未分解层大于半分解层,而持水率和吸水速率未分解和半分解层的大小因林龄不同而表现不同。

不同林龄杉木人工林凋落物的持水特性一致,即持水量和持水率随着浸水时间的增加而增加,与浸水时间呈显著的对数关系,可用 $W/R = a + b \ln t$ 方程式表达;吸水速率随着浸水时间的增加而降低,与浸水时间呈幂函数关系,即 $V = kt^{-a}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LIU X D,QIAO Y N,ZHOU G Y,*et al*. Water-Holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(9): 8-15. (in Chinese)
- [3] 马祥庆,刘爱琴,何智英,等.杉木幼林生态系统凋落物及其分解作用研究[J].植物生态学报,1997,21(6):564-570.
- [4] MA X Q,LIU A Q,HE Z Y,*et al*. The litter and its decomposition in young Chinese fir plantation ecosystem[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(6): 564-570. (in Chinese)
- [5] 何宗明,陈光水,刘剑斌,等.杉木林凋落物产量、分解率与储量的关系[J].应用与环境生物学报,2003,9(4):352-356.
- [6] HE Z M,CHEN G S,LIU J B,*et al*. Relationships among litter production, decomposition and accumulation in Chinese fir plantation[J]. Chinese Journal Applied Ecology, 2003, 9 (4): 352-356. (in Chinese)
- [7] 刘瑞强,黄志群,何宗明,等.根系去除对米老排和杉木凋落物分解的影响[J].林业科学,2015,51(9):1-8.
- [8] LIU R Q,HUANG Z Q,HE Z M,*et al*. Effect of root removal on litter decomposition in plantations of *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015,51(9):1-8. (in Chinese)
- [9] 陈梦瑶,林开敏,许诺,等.不同杉木林类型林地现存凋落物空间分布特征及其取样策略[J].热带作物学报,2017,38(4):635-639.
- [10] CHEN M Y,LIN K M,XU N,*et al*. Spatial distribution of litter biomass of different Chinese fir and its sampling strategy [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017,38(4):635-639. (in Chinese)
- [11] 李俊宁.不同杉木林经营模式凋落物特征比较[J].武夷学院学报,2018,37(9):22-26.
- [12] LI J N. Litters characteristic of different management model in *Cunninghamia lanceolata* forest[J]. Journal of Wuyi University, 2018,37(9):22-26.
- [13] 郑金兴,熊德成,黄锦学,等.中龄和老龄杉木人工林凋落物量及养分归还[J].福建林学院学报,2013,33(1):18-24.
- [14] ZHENG J X,XIONG D C,HUANG J X,*et al*. Litter production and nutrient return in 2 plantations of young and old *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2013,33(1):18-24. (in Chinese)
- [15] 方晰,田大伦,项文化,等.杉木人工林凋落物量及其分解过程中碳的释放率[J].中南林学院学报,2005,25(6):12-16.
- [16] FANG X, TIAN D L, XIANG W H, *et al*. Carbon release ratios in the decomposition process of litter[J]. Journal of Central South Forestry University, 2005, 25(6): 12-16. (in Chinese)
- [17] 孟庆权,葛露露,林宇,等.格氏栲天然林及人工林和杉木人工林生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2019,34(6):8-15.
- [18] MENG Q Q,GE L L,LIN Y,*et al*. Ecological stoichiometric characteristic of leaf-litter-soil in natural and planted forests of *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 8-15. (in Chinese)
- [19] 胡小燕,段爱国,张建国,等.广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(4):1207-1218.
- [20] HU X Y,DUAN A G,ZHANG J G,*et al*. Stoichiometry of

- carbon, nitrogen, and phosphorus of Chinese fir plantations in Daqing Mountain, Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1207-1218. (in Chinese)
- [12] 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):249-252.
- ZHOU L L, CAI L P, MA X Q, et al. Eco-hydrological function in different developing stages of Chinese fir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 249-252. (in Chinese)
- [13] 杨俊玲,王新杰.四种杉木人工林枯落物持水性研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(6):70-74.
- YANG J L, WANG X J. Study on water-holding properties of litter layer in four forest types of *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Journal of Central South University Forestry & Technology*, 2013, 33(6): 70-74. (in Chinese)
- [14] 夏璟钰,王雯颖,蒋林君,等.不同林龄杉木人工林凋落物持水特性研究[J].广西林业科学,2019,48(4):449-454.
- XIA J J, WANG W Y, JIANG L J, et al. Water holding characteristics of litters in different-aged *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2019, 48 (4): 449-454. (in Chinese)
- [15] 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.
- ZHAO L, WANG B, CAI T J, et al. Water-holding capacity of litter and soil under Chinese fir forest with different densities in Dagangshan Mountain of Jiangxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 203-208. (in Chinese)
- [16] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2011,25(4):221-226.
- TIAN C, YANG X B, LI J, et al. Hydrological effects of Forest litters and soil of *Quercus mongolica* in the different altitudes of North Mountain of Hebei Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 221-226. (in Chinese)
- [17] 韩春华,赵雨森,辛颖,等.阿什河上游小流域主要林分枯落物层的持水特性[J].林业科学研究,2012,25(2):212-217.
- HAN C H, ZHAO Y L, XIN Y, et al. Water-holding characteristics of litter layers of main forest types in the upstream small watershed of Ashi river [J]. *Forest Research*, 2012, 25 (2): 212-217. (in Chinese)
- [18] 薛立,何跃君,屈明,等.华南典型人工林凋落物的持水特性[J].植物生态学报,2005,29(3):415-421.
- XUE L, HE Y J, QU M, et al. Water holding characteristics of litter in plantations in South China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(3): 415-421. (in Chinese)
- [19] 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.
- CHANG Y J, CAO J, MA J W, et al. Water-holding characteristics of coniferous forest litters in West Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2008, 19 (11): 2346-2351. (in Chinese)
- [20] 刘忠玲,吕跃东,姚颖.不同林分密度原始红松林枯落物和土壤的持水特性[J].森林工程,2020,36(5):8-15.
- LIU Z L, LV Y D, YAO Y W, et al. Holding characteristics of litter and soil of original korean pine forests stands with different densities [J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(5): 8-15. (in Chinese)
- [21] 郑路,卢立华.我国森林地表凋落物现存量及养分特征[J].西北林学院学报,2012,27(1):63-69.
- ZHENG L, LU L H. Standing crop and nutrient characteristics of forest floor litter in China [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(1): 63-69. (in Chinese)
- [22] 冷海楠,张玉,崔福星,等.森林凋落物研究进展[J].国土与自然资源研究,2016(6):87-89.
- LENG H N, ZHANG Y, CUI F X, et al. A review of researches on forest litterfall [J]. *Territory & natural Resources Study*, 2016(6): 87-89. (in Chinese)
- [23] 何琴飞,郑威,彭玉华,等.珠江流域中游主要森林类型凋落物持水特性[J].水土保持研究,2017,24(1):128-134.
- HE Q F, ZHENG W, PENG Y H, et al. Water-holding characteristics of litters under main forest types in the middle reaches of Pearl River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 128-134. (in Chinese)
- [24] 常雅军,陈琦,曹靖,等.甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J].生态学报,2011,31(9):2392-2400.
- CHANG Y J, CHEN Q, CAO J, et al. Litter amount and its nutrient storage and water holding characteristics under different coniferous forest types in Xiaolong Mountain, Gansu Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (9): 2392-2400. (in Chinese)
- [25] 顾宇书,邢兆凯,韩友志,等.浑河上游4种典型林分类型枯落物持水特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37 (1):31-36.
- GU Y S, XING Z K, HAN Y Z, et al. Water-holding characteristics of four typical forests litter in upstream of Hunhe River [J]. *Journal of Nanjingt Forestry University: Natural Science Edition*, 2013, 37(1): 31-36. (in Chinese)
- [26] 杨玉莲,马兴艳,吴庆贵,等.龙门山断裂带主要森林类型凋落物累积量及其持水特性[J].水土保持通报,2014,34(3):69-74.
- YANG Y L, MA X Y, WU Q G, et al. Accumulation amount of litter and their water-holding characteristics under main forest types in Longmen Mountains fault zone [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34 (3): 69-74. (in Chinese)
- [27] YOSHINOBU S, TOMO'OMI K, ATSUSHI K, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(16): 3007-3018.