

# 南亚热带5种典型人工林凋落物水文效应

王金悦<sup>1</sup>, 邓羽松<sup>1</sup>, 林立文<sup>1</sup>, 黄娟<sup>1</sup>, 蒋代华<sup>2</sup>, 黄智刚<sup>2,3</sup>

(1.广西大学林学院, 南宁 530004; 2.广西大学农学院, 南宁 530004;  
3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:**以广西国有高峰林场的5种不同人工林(马尾松林、杉木林、桉树林、米老排林、红锥林)为研究对象,结合野外调查和室内浸水法,对各人工林凋落物层的水文效应进行定量分析。结果表明:(1)5种林分凋落物蓄积量范围在1.96~9.05 t/hm<sup>2</sup>,大小顺序为红锥林>杉木林>马尾松林>桉树林>米老排林。(2)5种林分凋落物中,杉木林最大持水量最大,为14.23 t/hm<sup>2</sup>,马尾松林最小,为6.26 t/hm<sup>2</sup>;米老排林凋落物最大持水率最大,为577.98%,红锥林最小,为135.46%。(3)杉木林凋落物的有效拦蓄量最大,为10.18 t/hm<sup>2</sup>,马尾松林最小,为4.07 t/hm<sup>2</sup>;米老排林凋落物有效拦蓄率最大,为463.35%,红锥林最小,为92.38%。(4)回归分析表明,凋落物持水量与浸水时间的关系符合对数函数关系( $Q = a \ln t + b (R^2 > 0.773)$ ),凋落物吸水速率和浸水时间的关系符合幂函数关系( $V = kt^n (R^2 > 0.997)$ )。持水过程中,各林分凋落物均表现为在1 h内持水量迅速增加,1 h后增加速度变慢,在10~12 h之后,吸水基本停止。综上,杉木林、米老排林凋落物层水源涵养功能较强。

**关键词:**人工林;凋落物;水文效应;南亚热带

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0169-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.024

## Study on the Hydrological Effects of the Litters Layer from Five Typical Plantations in South Subtropics of China

WANG Jinyue<sup>1</sup>, DENG Yusong<sup>1</sup>, LIN Liwen<sup>1</sup>, HUANG Juan<sup>1</sup>, JIANG Daihua<sup>2</sup>, HUANG Zhigang<sup>2,3</sup>

(1.College of Forestry Guangxi University, Nanning 530004; 2.College of Agricultural Guangxi University, Nanning 530004;  
3.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Taking five kinds of plantations (*Pinus massoniana* forest, *Cunninghamia lanceolata* forest, *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* forest, *Mytilaria laosensis* forest and *Castanopsis hystrix* forest) in Nanning State-owned Gaofeng Forest Farm of Guangxi as research objects, using field investigation and indoor soaking method, the hydrological effects of the litter layers were quantitatively compared and studied. The results showed as the following: (1) The litter accumulations of five kinds of plantations was about 1.96~9.05 t/hm<sup>2</sup>, and the order of litter accumulation was *Castanopsis hystrix* forest > *Cunninghamia lanceolata* forest > *Pinus massoniana* forest > *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* forest > *Mytilaria laosensis* forest. (2) Among the five stand litters, the *Cunninghamia lanceolata* forest had the largest maximum water-holding capacity (14.23 t/hm<sup>2</sup>), and the *Pinus massoniana* forest had the smallest maximum water-holding capacity (6.26 t/hm<sup>2</sup>). The maximum water-holding rate of litter in *Mytilaria laosensis* forest was the largest(577.98%), with that in *Castanopsis hystrix* forest was the smallest(135.46%). (3) The effective water storage capacity of litters in *Cunninghamia lanceolata* forest was the largest (10.18 t/hm<sup>2</sup>), while that in *Pinus massoniana* forest was the smallest (4.07 t/hm<sup>2</sup>). The most effective interception rate of litter was 436.35% in the *Mytilaria laosensis* forest and the smallest was 92.38% in the *Castanopsis hystrix* forest. (4) The regression analysis showed that the relationship between the water-holding capacity of litters and the soaking time conformed to the logarithmic function ( $Q = a \ln t + b (R^2 > 0.773)$ ), and the relationship between litter water absorption rate and soaking time conformed to the power function ( $V = kt^n (R^2 > 0.997)$ ).

收稿日期:2020-03-08

资助项目:广西科技重大专项(AA17204078-4);广西自然科学基金项目(2016JJA130212);国家重点研发计划项目(2017YFC0505402)

第一作者:王金悦(1997-),女,硕士研究生,主要从事森林水土保持研究。E-mail:wangjinyue2020@163.com

通信作者:邓羽松(1988-),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail:denny2018@gxu.edu.cn

In the water-holding process, the litters in all stands showed that the water-holding capacity increased rapidly within 1 hour, and the increasing speed slowed down after 1 hour. After 10 ~ 12 hours, the litter basically stopped absorbing water. In conclusion, the litters layer of *Cunninghamia lanceolata* forest and *Mytilaria laosensis* forest had strong water conservation function.

**Keywords:** plantations; litter; hydrological effects; south subtropics

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,具有改善水质、保持水土、涵养水源的巨大功能,人们形象地称其为“森林水库”。森林主要通过林冠层、凋落物层和根系土壤层来截留降雨、调节径流,从而减轻水土流失,避免洪水水患。凋落物层作为森林水文效应的第 2 活动层,是森林生态系统的重要组成部分,主要由林木及林下植被凋落下来的茎、叶、枝、花、果实、树皮和枯死的植物残体组成。凋落物的水文作用主要体现在持水方面,凋落物层结构疏松,能有效拦蓄雨水、抑制土壤水分蒸发、防止土壤溅蚀、增加土壤水分入渗,对水源涵养具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。因此,开展凋落物层水文效应的研究对于探讨森林生态系统的水文循环和水量平衡具有重要意义。

不同类型的森林植被在保持水土、涵养水源和净化水质的能力上有很大差异<sup>[3]</sup>。近年来,已有学者<sup>[4-9]</sup>从凋落物的凋落变化、持水过程、持水能力、阻滞径流、积累分解等方面对大兴安岭低质林、重庆市经济林、北京市生态景观林、新疆人工林等多种林分的水文效应进行了研究,并取得了一定的成果。在多种林分类型中,人工林凋落物层的水文效应是我国学者关注的热点问题。其中,时忠杰等<sup>[10]</sup>对桉树人工林凋落物层的持水特性进行了研究,计算出桉树人工林的凋落物蓄积量为 42.09 t/hm<sup>2</sup>,最大蓄水量为 42.8 t/hm<sup>2</sup>,并将其与武夷山甜槠林、滇中常绿阔叶林、海南岛山地雨林和热带次生林进行了对比分析得出,凋落物的最大持水量受其分解速率、蓄积量影响的结论。陈波等<sup>[11]</sup>对冀北山地不同海拔下华北落叶松人工林凋落物水文效应进行了研究得出,凋落物总蓄积量、最大持水量、有效拦蓄能力均随海拔升高而增大的结论,并通过回归分析证明凋落物持水量与浸水时间呈明显的对数函数关系,凋落物吸水速率与浸水时间呈明显的幂函数关系;邓继峰等<sup>[12]</sup>对宁夏盐

池县的新疆杨、樟子松、花棒 3 种林分调查发现,樟子松和新疆杨人工林地被物的水文性能显著。以上研究虽然已经科学、详尽地阐述了多地人工林凋落物层的持水特性,但均具有较强的地域性,关于南亚热带不同林分人工林凋落物水文效应方面研究相对较少。南亚热带在气候带上位于亚热带和北热带之间,在我国华南境内、云南省和四川省有较大面积的分布。南亚热带森林生态系统人工林分类型多,结构复杂,主要包括马尾松林、杉木林、桉树林、米老排林、红锥林等。各人工林分生长快、分布广、适应性强,在我国的森林资源中占有重要的地位。因此,研究南亚热带不同人工林凋落物层水文效应对研究南亚热带乃至全国的森林水土保持能力、设计合理科学并能涵养水源的林分结构、营造良好的森林生态环境具有重大意义。本文选取广西国有高峰林场内的 5 种人工林为研究对象,对其凋落物水文生态功能做了定量分析研究,旨在揭示不同种人工林凋落物层水源涵养功能,为南亚热带森林水源涵养功能和生态水文研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西国有高峰林场(108°20'57"—108°24'37"E,22°56'48"—22°89'18"N),林场现有超过 3.3 万 hm<sup>2</sup> 的林地呈带状环绕在南宁市的北部,大片的大径材林和珍贵树种分布在林场内,森林覆盖率达 87%。研究区属南亚热带季风气候,海拔高度为 130~360 m,多年平均气温 21.6 °C,年平均降水量 1 320 mm,多年平均相对湿度 79%,土壤类型主要为赤红壤,多呈酸性至强酸性。研究样地中乔木种类主要有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桉树(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、米老排(*Mytilaria laosensis*)等。各林分样地的基本情况见表 1。

表 1 研究地基本状况

林分类型	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	林龄/a	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm
马尾松林	108°22'37"E, 22°58'37"N	217	18~22	25	0.6	10.7	23.5
杉木林	108°22'40"E, 22°58'01"N	180	22~28	15	0.7	12.3	20.6
桉树林	108°22'01"E, 22°59'20"N	358	20~25	8	0.3	18.2	13.4
米老排林	108°22'04"E, 22°58'08"N	234	22~26	12	0.8	13.5	18.1
红锥林	108°22'37"E, 22°58'08"N	190	22~25	10	0.6	15.6	16.5

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置样品采集 样品采集时间在 2019

年 11 月上旬,在踏查基础上,选择坡向、坡位相同的 5 种不同人工林(马尾松林、杉木林、桉树林、米老排

林、红锥林)作为研究对象。在不同人工林内具有代表性的地段设置 20 m×20 m 的标准样地,以每块标准样地的四角及对角线中心为基准,沿对角线均匀设置 3 个 0.5 m×0.5 m 的小样方(共 15 个小样方)。除去样方内植物活体部分,采用四分法收集未分解层(新鲜凋落物组成,保持原状,颜色未变,外表无分解痕迹)和半分解层(枝叶未完全腐烂,肉眼观察能分辨出枝叶的大体形状)凋落物,装入相同规格的自封袋,将其密封后带回实验室<sup>[13]</sup>。

1.2.2 凋落物蓄积量测定 在实验室中,用 0.01 g 的电子天平分层测定凋落物的鲜重并进行记录,然后将半、未分解层的凋落物置于 85 °C 烘箱中烘至恒重,待冷却后称量其干重,以凋落物干重计算各林分凋落物的蓄积量和自然含水率。计算公式为:

$$R_0 = (M_1 - M_0) / M_0 \times 100\%$$

式中: $R_0$  为凋落物自然含水率(%); $M_1$  为鲜重(g); $M_0$  为干重(g)。

1.2.3 凋落物持水量与吸水速率测定 采用室内浸水法测定凋落物持水量及吸水速率。将烘干后的凋落物装入孔径为 1 mm 的网袋(预先称重,并标记),将其放入盛有清水的容器中浸泡,分别测定在浸泡 1/12, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24 h 时的凋落物的重量。以静置样品到不滴水为标准,进行称重,所得凋落物的质量与凋落物干重的差值为这一时刻凋落物的持水量,根据持水量计算凋落物的吸水速率、持水率、最大持水量、最大持水率。各指标计算公式为:

$$\Delta M = M_t - M_0$$

$$V = (M_t - M_0) / t$$

$$R = (M_t - M_0) / M_0 \times 100\%$$

$$M_{\max} = M_{24} - M_0$$

$$R_{\max} = (M_{24} - M_0) / M_0 \times 100\%$$

式中: $\Delta M$  为凋落物浸泡  $t$  h 的持水量( $t/hm^2$ ); $M_t$  为浸泡  $t$  h 的质量(g); $V$  为浸泡  $t$  h 的吸水速率( $t/(hm^2 \cdot h)$ ); $t$  为浸泡时间(h); $R$  为持水率(%); $M_{\max}$  为最大持水量( $t/hm^2$ ); $M_{24}$  为浸泡 24 h 的质量(g); $R_{\max}$  为最大持水率(%)。

1.2.4 凋落物有效拦蓄量测定 依据凋落物的蓄积量、自然含水率、最大持水率可以推算出凋落物的最大拦蓄量、最大拦蓄率、有效拦蓄量、有效拦蓄率。各指标计算公式为:

$$W_{\max} = W_m \times M$$

$$W_m = R_{\max} - R_0$$

$$W = (0.85R_{\max} - R_0) \times M$$

式中: $W_{\max}$  为最大拦蓄量( $t/hm^2$ ); $W_m$  为最大拦蓄率(%); $M$  为凋落物的蓄积量( $t/hm^2$ ); $W$  为有效拦蓄量( $t/hm^2$ )。

1.2.5 数据分析 使用 SPSS 19.0 和 Excel 2017 进行数据分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分类型凋落物蓄积量

凋落物的蓄积量作为衡量森林生态系统第一生产力的重要指标受林型、气候条件、凋落物自身特性和凋落物分解速度等多种因素的影响<sup>[14-16]</sup>。由表 2 可知,5 种林分类型不同层凋落物蓄积量变化范围在 1.96~9.05  $t/hm^2$ ,其大小顺序为红锥林(9.05  $t/hm^2$ )>杉木林(8.95  $t/hm^2$ )>马尾松林(2.89  $t/hm^2$ )>桉树林(1.99  $t/hm^2$ )>米老排林(1.96  $t/hm^2$ )。其中,未分解层凋落物蓄积量范围在 1.04~3.61  $t/hm^2$ ,大小顺序为红锥林>杉木林>马尾松林>米老排林>桉树林;半分解层凋落物蓄积量范围在 0.75~6.41  $t/hm^2$ ,大小顺序为杉木林>红锥林>桉树林>马尾松林>米老排林。通过分析 5 种林分未、半分解层凋落物蓄积量所占比例可以看出,虽然米老排林、桉树林、马尾松林 3 种林分未分解层凋落物蓄积量大于半分解层,但差异不明显。综合来看,5 种林分半分解层凋落物蓄积量大于未分解层。在未分解层凋落物中马尾松林蓄积量所占比例最大,占总蓄积量的 71.09%;在半分解层凋落物中杉木林蓄积量所占比例最大,占总蓄积量的 71.58%,这是由于针叶林凋落物分解速率比阔叶林慢<sup>[8,17]</sup>。

表 2 不同林分类型凋落物蓄积量特征

林分类型	未分解层		半分解层		总蓄积量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )
	蓄积量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/ %	蓄积量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/ %	
米老排林	1.21	61.63	0.75	38.16	1.96
桉树林	1.04	52.11	0.95	47.89	1.99
马尾松林	2.06	71.09	0.84	28.91	2.89
杉木林	2.54	28.42	6.41	71.58	8.95
红锥林	3.61	39.92	5.44	60.08	9.05

### 2.2 凋落物的持水性能

2.2.1 凋落物最大持水量和最大持水率 凋落物的持水量是评价森林水源涵养功能的重要指标之一,林地凋落物层的持水能力用最大持水量和最大持水率表示<sup>[15]</sup>。由表 3 可知,5 种林分类型最大持水量有所差异,不同林分凋落物最大持水量总和范围在 6.26~14.23  $t/hm^2$ ,其大小顺序为杉木林(14.23  $t/hm^2$ )>红锥林(12.16  $t/hm^2$ )>米老排林(11.20  $t/hm^2$ )>桉树林(7.43  $t/hm^2$ )>马尾松林(6.26  $t/hm^2$ ),其中,未分解层凋落物最大持水量范围在 3.82~6.72  $t/hm^2$ ,其大小顺序为米老排林>杉木林>红锥林>桉树林>马尾松林。半分解层最大持水量范围在 2.44~8.56  $t/hm^2$ ,其大小顺序与凋落物最大持水量总和排序相

同。可以看出,无论是从整体,还是未分解层、半分解层马尾松林的最大持水量都是最小的,原因在于针叶树种凋落物中含有较多的油脂,使凋落物对水具有排斥性,不易吸收并储存水分。5 种林分凋落物最大持水率均值范围在 135.46%~577.98%,大小顺序为米老排林(577.98%)>桉树林(373.86%)>马尾松林(238.59%)>杉木林(178.19%)>红锥林(135.46%),其中米老排林最大持水率远大于其他林分,是红锥林的 4.27 倍、杉木林的 3.24 倍。未分解层最大持水率大小顺序为米老排林>桉树林>杉木林>马尾松林>红锥林,半分解层最大持水率大小顺序与均值相同。整体来看,5 种林分凋落物最大持水量和最大持水率呈现不同的规律,这主要与人工林类型、凋落物蓄积量、凋落物分解程度等有关<sup>[18]</sup>。

表 3 不同林分类型凋落物最大持水量

林分类型	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
米老排林	6.72	4.49	11.20	555.96	600.00	577.98
桉树林	3.87	3.56	7.43	373.36	374.37	373.86
马尾松林	3.82	2.44	6.26	185.80	291.39	238.59
杉木林	5.67	8.56	14.23	222.80	133.58	178.19
红锥林	5.08	7.09	12.16	140.53	130.39	135.46

2.2.2 不同林分凋落物持水过程 凋落物的持水量与吸水速率作为研究凋落物持水过程的 2 个重要指标,与凋落物的类型、分解程度、蓄积量、干燥程度等相关。由图 1 可知,随着浸水时间的增加,5 种林分凋落物未、半分解层的持水量都呈增加的趋势,均表现为在浸水 1 h 内,持水量迅速增加,随着浸泡时间的延长,单位时间内持水量增量逐渐减小,在 10~12 h 之后,凋落物吸水基本停止,24 h 后凋落物持水量达到最大。不同林分凋落物层持水量大小表现为杉木林>红锥林>米老排林>桉树林>马尾松林。从各林分凋落物不同层次来看,5 种林分未分解层与半分解层持水量的动态变化稍有不同,其中米老排林和杉木林未分解层凋落物持水曲线在 2~4 h 形成交点,这是因为在浸水的 0~2 h,杉木林的吸水速率大于米老排林,并且杉木林未分解层凋落物在浸水 2 h 时持水量趋于稳定,而米老排林在浸水 8 h 时持水量趋于稳定。综合来看,米老排林未分解层凋落物持水性能优于杉木林,所以形成了交点。马尾松林和桉树林未分解层凋落物持水曲线也在浸水 0.5 h 后形成了多处交点,这同样是 2 种林分在浸水时的吸水速率、持水量不同导致的结果。2 种林分凋落物在浸水时持水量差别不明显,所以 2 种林分持水量曲线基本趋于重合,造成了图中的多处交点。5 种林分凋落物未分解层持水量在浸水 12 h 时已基本达到饱和,而半分解层持水量浸水 10 h 时基本达到饱和,这

与凋落物的分解程度有关,分解的越彻底,持水量达到饱和的时间越短。对 5 种林分凋落物各层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:  $Q$  为凋落物持水量(t/hm<sup>2</sup>);  $t$  为浸泡时间(h);  $a$  为方程回归系数;  $b$  为方程常数项。5 种林分类型凋落物持水量与浸水时间关系式见表 4,  $R^2 > 0.773$ , 拟合效果较好。

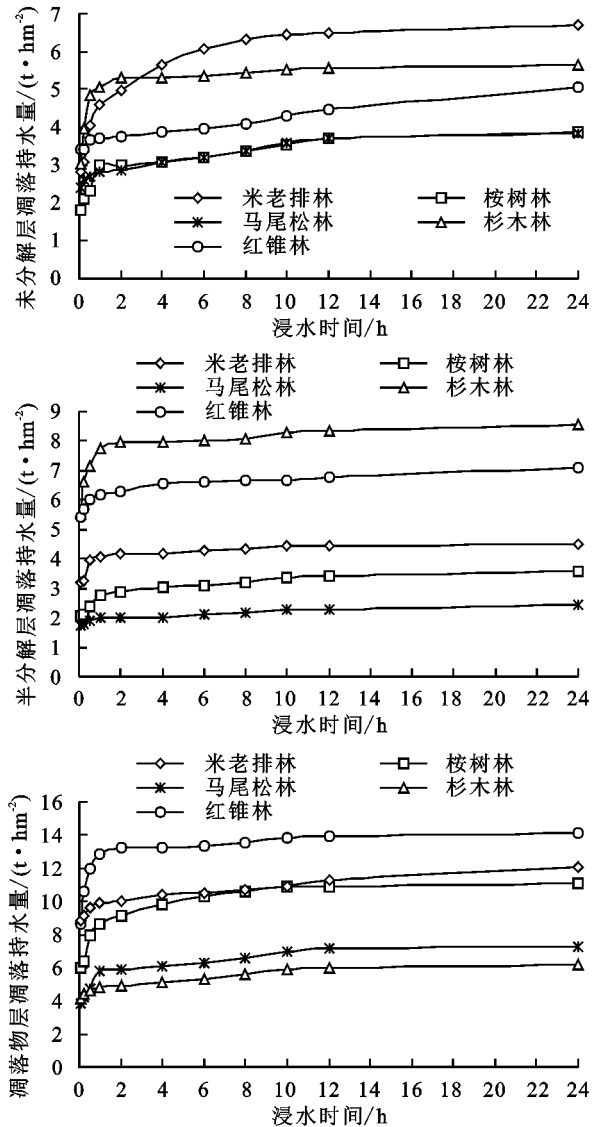


图 1 不同林分类型凋落物持水量变化过程

吸水速率是衡量凋落物层吸持降水强度的重要指标<sup>[7]</sup>。由表 5 可知,不同林分不同层次凋落物的吸水速率随时间的增加均呈下降的趋势,在浸水 1 h 内吸水速率大幅度下降,在 1~4 h 下降趋势逐渐变缓,趋于稳定,这说明凋落物在降水 4 h 内能够发挥比较好的蓄水功能。在浸水 12 h 后,未分解层吸水速率达到稳定状态,到 24 h 时凋落物不再吸水,吸水速率趋于 0。半分解层吸水速率在浸水 10 h 后达到稳定,总的凋落物层在浸水 10 h 后达到稳定状态。从不同林分来看,5 种林分未分解层、半分解层吸水速率有所差异,但总体变化趋势基本相同。各林分浸水初期

综合吸水速率大小顺序为红锥林>杉木林>米老排林>马尾松林>桉树林;在 1 h 时吸水速率大小顺序为杉木林>红锥林>米老排林>桉树林>马尾松林。出现以上结果,可能是由于随着浸水时间的增加,影响吸水速率的主导因素不断发生变化<sup>[14]</sup>。从各林分不同层次来看,在浸水初期,除马尾松林外,其余 4 种林分

半分解层起始吸水速率均大于未分解层。对各层凋落物吸水速率和浸水时间的关系进行拟合分析,拟合方程为: $V=kt^n$ 。式中: $V$  为吸水速率( $t/(hm^2 \cdot h)$ ); $t$  为浸水时间(h); $k$  为方程回归系数; $n$  为指数。拟合结果见表 4, $R^2 > 0.997$ ,这说明各层凋落物的吸水速率和时间呈较为显著的幂函数关系。

表 4 不同林分类型凋落物持水量、吸水速率与浸水时间的关系

凋落物层	林分类型	持水量与浸水时间的关系		吸水速率浸水时间的关系	
		关系式	相关系数	关系式	相关系数
未分解层	米老排林	$Q=0.7711 \ln t + 4.5510$	0.9802	$V=4.3107t^{-0.828}$	0.9985
	桉树林	$Q=0.3631 \ln t + 2.6938$	0.9606	$V=2.5950t^{-0.863}$	0.9987
	马尾松林	$Q=0.2487 \ln t + 2.8920$	0.9118	$V=2.8442t^{-0.914}$	0.9995
	杉木林	$Q=0.4121 \ln t + 4.6548$	0.8485	$V=4.5217t^{-0.902}$	0.9967
	红锥林	$Q=0.2398 \ln t + 3.7763$	0.7734	$V=3.7318t^{-0.936}$	0.9992
半分解层	米老排林	$Q=0.2340 \ln t + 3.8740$	0.8971	$V=3.8161t^{-0.935}$	0.9993
	桉树林	$Q=0.2844 \ln t + 2.6665$	0.9708	$V=2.6008t^{-0.892}$	0.9995
	马尾松林	$Q=0.1178 \ln t + 1.9632$	0.9296	$V=1.9397t^{-0.938}$	0.9998
	杉木林	$Q=0.4732 \ln t + 7.2660$	0.9012	$V=7.1433t^{-0.929}$	0.9989
	红锥林	$Q=0.2750 \ln t + 6.1170$	0.9845	$V=6.0535t^{-0.951}$	0.9999

注:Q 为凋落物持水量( $t/hm^2$ );t 为浸泡时间(h);V 为吸水速率( $t/(hm^2 \cdot h)$ )。

表 5 不同林分类型凋落物吸水速率变化过程

浸水时间/h	未分解层凋落物持水速率/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$					半分解层凋落物持水速率/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$					凋落物层持水速率/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$				
	米老排林	桉树林	马尾松林	杉木林	红锥林	米老排林	桉树林	马尾松林	杉木林	红锥林	米老排林	桉树林	马尾松林	杉木林	红锥林
1/12	33.98	21.60	28.66	36.48	40.99	38.35	24.72	20.69	66.62	64.99	72.34	46.32	49.34	103.10	105.98
1/4	12.27	8.40	10.53	15.82	13.74	13.12	8.42	7.09	26.43	22.67	25.39	16.82	17.62	42.26	36.42
1/2	8.11	4.68	5.42	9.72	7.30	7.86	4.82	3.80	14.26	12.01	15.98	9.50	9.22	23.98	19.30
1	4.60	2.99	2.82	5.04	3.72	4.05	2.79	1.99	7.77	6.18	8.66	5.78	4.81	12.81	9.90
2	2.48	1.51	1.43	2.65	1.88	2.09	1.44	1.00	3.98	3.14	4.58	2.95	2.43	6.63	5.03
4	1.41	0.77	0.77	1.33	0.98	1.05	0.76	0.51	1.99	1.64	2.46	1.53	1.27	3.32	2.61
6	1.01	0.53	0.53	0.89	0.66	0.71	0.52	0.35	1.34	1.10	1.72	1.05	0.88	2.23	1.76
8	0.79	0.42	0.42	0.68	0.51	0.54	0.40	0.27	1.01	0.83	1.33	0.82	0.69	1.69	1.34
10	0.65	0.35	0.36	0.55	0.43	0.44	0.34	0.23	0.83	0.67	1.09	0.69	0.59	1.38	1.09
12	0.54	0.31	0.31	0.47	0.37	0.37	0.29	0.19	0.70	0.56	0.91	0.60	0.50	1.16	0.94
24	0.28	0.16	0.16	0.24	0.21	0.19	0.15	0.10	0.36	0.30	0.46	0.30	0.26	0.59	0.50

### 2.3 凋落物的拦蓄能力

凋落物层对降水的拦蓄能力与其含水量密切相关。由表 6 可知,凋落物层最大拦蓄量范围在 5.00~12.32  $t/hm^2$ ,各林分凋落物层最大拦蓄量大小顺序为杉木林(12.32  $t/hm^2$ )>米老排林(10.68  $t/hm^2$ )>红锥林(10.11  $t/hm^2$ )>桉树林(7.10  $t/hm^2$ )>马尾松林(5.00  $t/hm^2$ )。其中马尾松林最大拦蓄量无论是总体还是各层次均小于其他 4 种林分,这是由于针叶树种凋落物的拦蓄能力小于阔叶树种。5 种林分凋落物最大拦蓄率与最大拦蓄量变化趋势有所差异,未分解层凋落物最大拦蓄率的范围在 117.32%~531.85%,大小顺序为米老排林>桉树林>杉木林>马尾松林>红锥林,半分解层凋落物最大拦蓄率范围在 108.08%~568.24%,大小顺序为米老排林>桉树林>马尾松林>杉木林>红锥林,与最大拦蓄率均值大小顺序相同,米老排林凋落物最大拦蓄率远大于其

他林分。

最大持水率和最大拦蓄率一般只能反映凋落物层持水能力的大小,不能反映对实际降雨的拦蓄效果。据研究<sup>[19]</sup>,当降雨量达到 20~30 mm 以上,无论凋落物层含水量多少,实际持水率约为最大持水率的 85%。因此凋落物的有效拦蓄量和有效拦蓄率是判断凋落物对降水拦蓄的真实指标,能反映出凋落物实际拦蓄降水的能力,受凋落物蓄积量、水分状况、降雨特性等因素影响<sup>[20-21]</sup>。由表 6 可知,各林分之间有效拦蓄量和有效拦蓄率变化趋势有所差异。凋落物层有效拦蓄量范围在 4.07~10.18  $t/hm^2$ ,各林分凋落物层有效拦蓄量大小顺序为杉木林(10.18  $t/hm^2$ )>米老排林(9.01  $t/hm^2$ )>红锥林(8.29  $t/hm^2$ )>桉树林(5.99  $t/hm^2$ )>马尾松林(4.07  $t/hm^2$ )。未分解层凋落物有效拦蓄量的范围在 2.53~5.43  $t/hm^2$ ,各林分大小顺序为米老排林>杉木林>红锥林>桉树

林>马尾松林。半分解层凋落物有效拦蓄量范围在1.54~6.11 t/hm<sup>2</sup>,各林分大小排序为杉木林>红锥林>米老排林>桉树林>马尾松林。综合来看,杉木林半分解层凋落物有效拦蓄量高于其他林分,为6.11 t/hm<sup>2</sup>,相当于拦截0.61 mm降水。马尾松林半分解层凋落物有效拦蓄量低于其他林分,为1.54 t/hm<sup>2</sup>,只能拦截0.15 mm降水。各林分不同层次凋落物有效拦蓄量与最大拦蓄量变化趋势相同。各林分平均有效拦蓄率范围在92.38%~463.35%,大小顺序为米老排林(463.35%)>桉树林(300.74%)>马尾松林

(152.99%)>杉木林(127.78%)>红锥林(92.38%)。未分解层有效拦蓄率范围在96.24%~448.46%,各林分大小顺序为米老排林>桉树林>杉木林>马尾松林>红锥林,与有效拦蓄量总量排序不完全相同,这是由于有效拦蓄量受到蓄积量的影响。半分解层有效拦蓄率范围在88.52%~478.24%,与均值排序结果相同。综合来看,杉木林的最大拦蓄量、有效拦蓄量大于其他林分,米老排林凋落物的最大拦蓄率、有效拦蓄率远大于其他林分,结合蓄积量分析,米老排林和杉木林的拦蓄能力优于其他林分。

表6 不同林分类型凋落物有效拦蓄量

凋落物层	林分类型	自然含水率/%	最大拦蓄率/%	最大拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )
未分解层	米老排林	24.11	531.85	6.42	448.46	5.43
	桉树林	11.12	362.24	3.75	306.24	3.18
	马尾松林	35.08	150.72	3.10	122.85	2.53
	杉木林	29.20	193.60	4.93	160.18	4.07
	红锥林	23.21	117.32	4.24	96.24	3.47
半分解层	米老排林	31.76	568.24	4.25	478.24	3.59
	桉树林	22.98	351.39	3.35	295.23	2.80
	马尾松林	64.55	226.84	1.90	183.13	1.54
	杉木林	18.16	115.42	7.40	95.38	6.11
	红锥林	22.31	108.08	5.88	88.52	4.82

### 3 讨论

本研究结果显示,研究区5种林分类型凋落物蓄积量变化范围为1.96~9.05 t/hm<sup>2</sup>。大小排序为红锥林>杉木林>马尾松林>桉树林>米老排林,这与李海星<sup>[22]</sup>关于桂西南4种人工林(桉树林、红锥林、马尾松林、米老排林)研究结果略有差异,造成差异的原因可能与各林分的种植密度、郁闭度等相关。在适宜的情况下,林分初植密度越大,年蓄积量越多;郁闭度越大,年蓄积量越多<sup>[20]</sup>。本研究中人工林郁闭度均小于李海星<sup>[22]</sup>的研究,密度也有所不同。相比以往类似研究<sup>[22]</sup>,本次研究凋落物蓄积量部分偏小,这与不同人工林生长条件有关。5种林分类型中,红锥林、杉木林凋落物层的蓄积量远大于其他3种林分,这是由于红锥林、杉木林下灌木和草本植物多于其他林分。从凋落物不同层次来看,各林分未分解层、半分解层凋落物蓄积量占比有所差异,这与曲炳鹏等<sup>[8]</sup>所得结论一致,但与兰亚男等<sup>[23]</sup>和杨霞等<sup>[13]</sup>所得凋落物半分解层蓄积量均高于未分解层的结论不同。这是由于采样时间的不同,相关学者<sup>[13,23]</sup>采样时间为夏季,正值研究区植被生长旺盛的时期,较少有凋落物掉落,而本研究采样时间为秋季,研究区内植被凋落物已经大量掉落。各林分不同层凋落物蓄积量的差异中,马尾松差异显著,可能是由于针叶林凋落物中存在较多的单宁、酚类物质、萜类物质<sup>[21,24]</sup>,这与涂志华等<sup>[17]</sup>所得结论一致。

凋落物的持水过程表现为在凋落物浸水初期,烘干

后的凋落物含水率较低,吸水速率快,持水量迅速增加,随着浸水时间的延长,凋落物吸水速率降低,直至持水量达至饱和状态。各林分凋落物在持水过程中的持水量、吸水速率变化整体趋势与其他学者<sup>[3,12,23]</sup>研究结果相同。这主要是因为凋落物从烘干状态浸入水中,凋落物死细胞间或枝叶表面水势差较大,吸水速率快。凋落物层在浸水过程中的初始吸水速率、最大持水量、饱和时间等有所差异,这与凋落物自身特性、蓄积量等因素相关<sup>[18]</sup>。本研究中,5种林分凋落物最大持水率均值范围在135.46%~577.98%,其中米老排林最大持水率为577.98%,这虽然比李海星<sup>[22]</sup>的研究结果偏大,但2次研究都表明米老排林的最大持水率大于其他研究对象。在浸水初期,除马尾松林外,其余4种林分半分解层起始吸水速率均大于未分解层,主要原因是半分解层的凋落物已经逐步开始分解,含有少量的腐殖质,另外动植物残体的存在也使得凋落物的吸水速率增强,这与杨霞等<sup>[13]</sup>研究结果一致,但与郭宇嘉等<sup>[25]</sup>研究结果相反,产生这种结果的主要原因是研究对象的林分组成不同,本次研究选取的对象大多为阔叶人工纯林,而郭宇嘉等<sup>[25]</sup>选取的研究对象为分别为针叶纯林、针阔混交林和阔叶混交林。通过拟合分析发现,凋落物持水量与浸水时间的关系符合对数函数关系( $Q = a \ln t + b (R^2 > 0.773)$ );凋落物吸水速率和浸水时间的关系符合幂函数关系( $V = kt^n (R^2 > 0.997)$ )且5种林分变化趋势相同,这与多位学者<sup>[7,8,13]</sup>的研究结果相同。

通过对 5 种林分凋落物最大拦蓄量、有效拦蓄量计算结果进行分析, 5 种林分不同层次凋落物最大拦蓄率与最大拦蓄量变化趋势有所差异, 这与彭云莲等<sup>[14]</sup>研究结果相同。各林分平均有效拦蓄率范围在 92.38%~463.35%, 其中, 米老排林凋落物的最大拦蓄率、有效拦蓄率远大于其他林分, 说明米老排林凋落物拦蓄能力较强, 这与李海星<sup>[22]</sup>的研究结果相同。从凋落物不同层次来看, 各林分凋落物未分解层、半分解层有效拦蓄量均呈现不同的规律, 这与涂志华等<sup>[17]</sup>、曲炳鹏等<sup>[8]</sup>的研究结果相同。本次研究选取了当地典型的 5 种人工林类型作为研究对象, 为了更好地研究当地林分的水文效应, 更多地人工纯林、人工混交林应作为下一步研究的主要对象。此外, 在今后的研究中应更多地结合野外定位试验和室内模拟降雨等试验研究凋落物的水文效应, 从而为南亚热带地区森林建设的树种选择、林分结构的调控提供理论依据。

## 4 结论

(1) 5 种林分类型凋落物蓄积量变化范围在 1.96~9.05 t/hm<sup>2</sup>, 其中半分解层凋落物蓄积量大于未分解层, 各林分凋落物主要来源于半分解层。

(2) 5 种林分凋落物中, 杉木林最大持水量最大; 米老排林最大持水率最大。综合来看, 杉木林和米老排林凋落物层持水性能优于其他林分。

(3) 持水过程中, 各林分凋落物均表现为在 1 h 内持水量迅速增加, 1 h 后增加速度变慢, 在 10~12 h 之后, 凋落物吸水基本停止。5 种林分凋落物持水量与浸水时间的关系均符合对数函数关系, 凋落物吸水速率和浸水时间的关系均符合幂函数关系。

(4) 5 种林分凋落物中, 杉木林的有效拦蓄量大于其他林分, 米老排林的有效拦蓄率大于其他林分, 综合来看, 杉木林和米老排林凋落物层的拦蓄能力优于其他林分。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈更艳, 王槐岳, 宿少锋, 等. 海南典型人工林枯落物持水特征[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(17): 117-121, 164.
- [3] 富丽, 赵锦梅, 李永宁, 等. 陇东黄土高原不同林龄苹果林地枯落物及土壤的水文效应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 40-45.
- [4] Neris J, Tejedor M, Fuentes J. Effect of forest floor characteristics on water repellency infiltration runoff and soil loss in and isols of Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. *Catena*, 2013, 29: 50-57.
- [5] Yang L, Liang Y R, Bai T W. Research on litter hydrological properties of inefficient forest in Jinyun Mountain [J]. *Energy Procedia*, 2011, 11: 2624-2628.
- [6] Li X, Niu J Z, Xie B Y. Study on hydrological functions

of litter layers in North China [J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e70328.

- [7] 张志兰, 郑云泽, 于秀娟. 重庆市几种常见经济林凋落物持水性能研究[J]. 中国水土保持, 2019(2): 59-62.
- [8] 曲炳鹏, 王咏嘉, 李素艳, 等. 生态景观林 10 种林分枯落物的水文效应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 65-70, 74.
- [9] 张甜, 董希斌, 唐国华, 等. 大兴安岭不同类型低质林土壤和枯落物的水文性能[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(10): 1-5.
- [10] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 等. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [11] 陈波, 孟成生, 赵耀新, 等. 冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 216-221.
- [12] 邓继峰, 丁国栋, 吴斌, 等. 宁夏盐池地区 3 种林分枯落物层和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 108-114.
- [13] 杨霞, 陈丽华, 康影丽, 等. 辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2662-2670.
- [14] 彭云莲, 金兆梁, 吕刚, 等. 浑河源水源地水源涵养林枯落物持水能力研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 613-620.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 涂志华, 范志平, 孙学凯, 等. 大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 127-133.
- [18] 刘斌, 鲁绍伟, 李少宁, 等. 北京西山 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 73-78, 137.
- [19] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. 林业科学, 2010, 46(10): 6-14.
- [20] 韩友志, 邢兆凯, 顾宇书, 等. 浑河上游白桦冷杉等 4 种林分枯落物储量及持水特性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(11): 15-18.
- [21] 鲁绍伟, 陈波, 潘青华, 等. 北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 54-58, 70.
- [22] 李海星. 桂西南四种人工林水源涵养功能的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [23] 兰亚男, 孙旭, 秦富仓, 等. 阴山北麓不同林分类型枯落物层持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 151-157.
- [24] 赵阳, 余新晓, 吴海龙, 等. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 148-152.
- [25] 郭宇嘉, 牛庆花, 陆贵巧, 等. 承德市第三乡林场不同林分类型枯落物和土壤的持水特性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 38-44.