

## 杉木纯林转化为杉楠复层林后的凋落物水文效应

汤隆兴<sup>1,2</sup> 杨芬露<sup>1,2</sup> 唐璐泓<sup>1,2</sup> 熊梓睿<sup>1,2</sup> 卢俊汝<sup>1,2</sup> 范美婷<sup>1,2</sup> 吴鹏飞<sup>1,2,3,4</sup> 蔡丽平<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. 福建农林大学林学院 福建 福州 350002; 2. 南方红壤区水土保持国家林业局和草原局重点实验室 福建 福州 350002; 3. 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心 福建 福州 350002; 4. 福建长汀红壤丘陵生态系统国家定位观测研究站 福建 福州 350002)

**摘要:**【目的】探究杉木纯林转为杉楠复层林后凋落物水文效应,为阐明杉木复层林生态功能和杉木近自然经营提供理论依据。【方法】选取顺昌县杉木纯林4种不同间伐保留密度套种闽楠转化为杉楠复层林的林分,以杉木纯林为对照,调查收集林地上凋落物,测定凋落物层凋落物蓄积量、持水率、拦蓄量、持水量等水文特性,分析不同杉木保留密度的杉楠复层林凋落物水分效应。【结果】结果表明,1)凋落物的总蓄积量表现为D65>D55>CK>D35>D23。在套种相同楠木密度的情况下,杉木保留密度对杉楠复层林凋落物量影响显著,随着杉木保留密度增加,复层林凋落物的蓄积量也在随之增加,半分解层蓄积量占总蓄积量的比例高于未分解层;2)在不同浸水时间下,半分解层凋落物持水量表现为D65>D55>Ck>D35>D23,未分解层表现为D65>D55>Ck>D35>D23。不同保留密度杉楠复层林下凋落物0~4h内吸水速率均为最快,最大持水量与最大持水率表现为半分解层大于未分解层,且均随着杉木密度的增加而增加;3)不同保留密度杉楠复层林下最大拦蓄率变化范围为188.12%~233.54%,有效拦蓄量为24.39 t·hm<sup>-2</sup>~48.54 t·hm<sup>-2</sup>,均为杉木密度最大的复层林值最大。55株杉木/亩与65株杉木/亩密度下调落物蓄积量比杉木纯林分别高了1.37倍和1.38倍,其凋落物持水率增加,最大拦蓄量和有效拦蓄量均显著提高,说明与杉木纯林相比,杉楠复层林凋落物层拦蓄降水的能力更强。【结论】杉木纯林转为杉楠复层林后初期水文效应存在一定差异,杉木保留密度大的杉楠复层林水文功能优于杉木纯林。与杉木纯林相比,D55与D65密度下调落物蓄积量比杉木纯林分别高了1.37倍和1.38倍,凋落物持水率增加,最大拦蓄量和有效拦蓄量均显著提高,说明与杉木纯林相比,针阔混交林凋落物层拦蓄降水的能力更强。D65密度下的蓄积量,持水性能和持水能力为五种密度下最为优势的一种。在今后的造林管理中,建议通过营造合适密度复层林,配合相应的营林措施,实现其生态水文功能的提升,同时在今后的人工林经营管理过程中,尽量避免营造纯林,多考虑多树种之间套种带来的效益。

**关键词:** 杉木; 林下套种; 复层林; 凋落物; 水文功能

### Hydrological Effects of Litter after Conversion of Pure *Cunninghamia lanceolata* forests to *Cunninghamia lanceolata*-*Phoebe bournei* Complex Forests

**Abstract:** 【Objective】 To investigate the hydrological effects of litter after the conversion of pure *Cunninghamia lanceolata* forests to *Cunninghamia lanceolata*- *Phoebe bournei* complex forests, and to provide a theoretical basis for elucidating the ecological functions of *Cunninghamia lanceolata* complex forests and the near-natural management of *Cunninghamia lanceolata*. 【Method】 Four kinds of *Cunninghamia lanceolata* pure forests in Shunchang County with different intercrop retention densities were selected to set seeding of *Phoebe bournei* to be converted into *Cunninghamia lanceolata*- *Phoebe* complex forests, and the *Cunninghamia lanceolata* pure forests were used as the control. Litter were investigated and collected on the forest floor, and hydrological characteristics such as litter layer litter accumulation, water holding rate, storage capacity, water holding capacity, and so on, were determined to analyze the water effects of litter in *Cunninghamia lanceolata*- *Phoebe* complex complex forests with different *Cunninghamia lanceolata* retention densities. 【Result】 The results showed that (1) the total volume of litter was D65>D55>CK>D35>D23. Under the same density of heather, the cedar retention density had a significant effect on the volume of litter in *Cunninghamia lanceolata*- *Phoebe* dipterocarp forests, and with the increase of cedar retention density, the volume of litter in dipterocarp forests increased, and the ratio of the volume of litter in the semi-decomposed layer to the total volume was higher than that of the non-decomposed layer; (2) Under different soaking times, the water holding capacity of apomictic litter in the semi-decomposed layer was D65>D55>Ck>D35>D23, and that in the undecomposed layer was D65>D55>Ck>D35>D23.

Apomictic litter in the understorey of compound-storey forests with different retention densities of cedar trees had the fastest rate of water absorption from 0 to 4h, and the maximal water holding capacity and the maximal rate of water holding were greater in the semi-decomposed than the undecomposed layer, which increased with increasing *Cunninghamia lanceolata* densities. The maximum water holding capacity and maximum water holding rate were greater in the semi-decomposed layer than in the undecomposed layer, and both increased with the increase of *Cunninghamia lanceolata* density; (3) The maximum retention rate varied from 188.12% to 233.54%, and the effective retention amount ranged from 24.39 t·hm<sup>-2</sup> to 48.54 t·hm<sup>-2</sup>, all of which were the highest in the compound forest with the highest density of cedar trees. The litter storage volume in the density of 55 cedar trees/mu and 65 cedar trees/mu was 1.37 and 1.38 times higher than that of the *Cunninghamia lanceolata* in the pure forest, respectively. The increase in litter water holding capacity, the maximum storage capacity and effective storage capacity were significantly higher, indicating that the litter layer of *Cunninghamia lanceolata*-*Phoebe* complex forests has a stronger capacity to store precipitation compared with *Cunninghamia lanceolata* pure forests. 【Conclusion】 There were some differences in the initial hydrological effects after the conversion of *Cunninghamia lanceolata* pure forest to *Cunninghamia lanceolata*-*Phoebe* complex forest, and the hydrological function of cedar-heath complex forest with high *Cunninghamia lanceolata* retention density was better than that of *Cunninghamia lanceolata* pure forest. Compared with the *Cunninghamia lanceolata* forest, the volume of apomictic storage was 1.37 and 1.38 times higher than that of the *Cunninghamia lanceolata* forest in D55 and D65 densities, respectively, and the water holding rate of apomictic storage increased, and the maximum storage capacity and effective storage capacity were significantly higher, indicating that the apomictic layer of mixed coniferous and broadleaf forests had a stronger ability to store precipitation compared with the pure *Cunninghamia lanceolata* forest. The volume of apomictic storage, the water holding capacity and the water holding ability of D65 densities were the most advantageous ones among the five densities. The storage capacity, water holding performance and water holding capacity of D65 density were the most favorable among the five densities. In future afforestation management, it is recommended to realize the enhancement of ecohydrological function by creating suitable density of mixed forests and cooperating with corresponding forest management measures. Meanwhile, in future management of plantation forests, we should try to avoid the creation of pure forests, and consider the benefits brought by the planting of multi-species trees.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata*; Undergrowth planting; complex forest; litter; hydrological functions

凋落物是植物生长发育过程中所产生的代谢产物的总称<sup>[1]</sup>。森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分，是森林生态系统物质循环的重要环节，它不仅对森林资源的保护和永续利用起着重大作用，而且还对涵养水源和水土保持具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。森林凋落物可通过降低林下降水对地表的直接冲刷，预防雨滴直接接触地表，从而达到分散降水的作用<sup>[5]</sup>；研究阐明，森林凋落物可以吸收比自身重2-5倍的水分，能够有效拦蓄的降水是林地径流量的百分之六十，由此可见，其对森林降雨截留、减缓雨水动能、减缓土壤冲刷以及降低径流产流量等一系列水文功能发挥着重要的作用<sup>[6-8]</sup>。目前，研究者们对不同密度林分，不同区域不同海拔等各领域的凋落物蓄积量及其水文效应做了大量研究，赵磊等<sup>[9]</sup>通过对江西大岗山不同密度杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林研究指出，适宜的造林密度和正确的抚育间伐能更好的使森林水源涵养功能得到有效的发挥。林立文等<sup>[10]</sup>人发现，6种不同密度杉木林凋落物的水文效应表现为较高或较低杉木林密度下，凋落物总蓄积量低于中等密度凋落物蓄积量。王玲等<sup>[11]</sup>通过对北京八达岭林场4种密度油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林研究阐明，1260plants/hm<sup>2</sup>的持水能力相对最好，森林水源涵养功能得到有效发挥；丁霞等<sup>[12]</sup>通过对丹江口库区高、中、低3种密度的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)人工林研究指出，营造中等密度马尾松人工林涵养水源的能力最佳。由此可见，不同林分密度影响凋落物蓄积量，随着凋落物蓄积量的变化，凋落物的水文效应也会存在着一定的差异性<sup>[13]</sup>。因此，对不同密度人工林凋落物的水文特性研究，有助于揭示其水文特性的差异性，可为人工林结构优化以及近自然性经营提供重要参考和理论依据。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国南方地区重要的用材树种之一,具有生长快、材质好、经济效益高等特点<sup>[14]</sup>。据国家第八次森林资源清查的调查结果显示,目前我国的人工林栽植面积是世界上最多的国家之一,其中杉木人工林的栽植面积约占全国人工林栽培总面积的25%左右,达1239.1万hm<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。截止至目前我国杉木林地的总面积正逐年上升,杉木产出的总蓄积量也随之呈增长趋势。长期以来,杉木人工林采取纯林、短期轮伐和等经营方式带来巨大经济效益,但也导致林分生产力和土壤质量呈现不断下降的趋势,对人工林生态系统稳定性影响严重,将杉木纯林改造为混交林,尤其是构建异龄复层林,是解决杉木人工纯林所带来的问题的重要途径,以及实现近自然经营和可持续发展的有效途径<sup>[16]</sup>。杉木林近自然经营也是当前杉木人工林生态可持续经探索的重要方向,黄凯璇<sup>[17]</sup>通过对近自然经营下不同杉木套种人工林凋落物研究发现,其凋落物蓄积量规律表现为:杉木与红锥和香樟楠构成的异龄混交林>杉木与大叶栎和格木异龄混交林>杉木纯林。因此,研究者们针对杉木纯林改造后的林分结构、土壤肥力及其水文涵养<sup>[18]</sup>、土壤酶活性<sup>[19]</sup>等进行了大量研究,但针对杉木套种阔叶木转为复层林的近自然经营过程中林下凋落物水文效应的研究较为少见。为此,本研究选取中国福建顺昌县岚下乡杉木林为研究对象,通过研究纯林转化为异龄复层林下凋落物情况,分析不同密度杉木套种人工复层林下水源涵养以及生态水文效应的差异,为杉木人工林经营管理以及生态评估提供科学理论依据。

## 1 研究区概况

研究点位于福建省南平市岚下国有林场所管辖区域,为福建省南平市顺昌县岚下乡的林区,地处顺昌县东北部,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 18.4℃,1 月份平均气温 7.7℃,7 月份平均气温 28℃。年日照 1800h,年平均降水量 1650mm,无霜期 280 天。本研究选取的森林类型为 1997 年营造的杉木纯林,共 41 亩。初植密度 200 株/亩;2006 年 9 月进行一次抚育间伐,保留 110 株/亩;2017 年进行不同强度间伐试验,保留不同密度 23 株/亩,35 株/亩、55 株/亩、65 株/亩。2018 年 2 月在不同密度杉木林下套种 2 年生闽楠轻基质营养袋苗,套种密度为 75 株/亩。各研究样地基本概况如表 1 所示。

表 1 研究样地基本概况

Tab.1 Basic characteristics of the three sampling plots

林分类型 Forest type	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	林龄 Age/a	杉木平均树高 Average tree height/m	杉木平均胸径 Mean DBH/cm	楠木平均树高 Average tree height/m	楠木平均胸径 Mean DBH/cm
CK:杉木纯林	295.3	东南	26	11.7	25.3	-	-
D23:23 杉木+75 楠木	247.2	东南	26/5	15.1	27.6	3.6	3.1
D35:35 杉木+75 楠木	268.7	东南	26/5	17.0	29.0	3.8	2.8
D55:55 杉木+75 楠木	252.7	东南	26/5	16.1	26.5	2.8	1.7
D65:65 杉木+75 楠木	289.5	东南	26/5	17.6	28.2	3.5	2.3

## 2 材料与方法

### 2.1 试验样品采集

试验于 2022 年 7 月进行,在 5 种密度林分类型下,随机选取十个凋落物取样点,收集方法采用全收获法。使用自制 1m×1m 正方形框,放置于样地内,用卷尺测定凋落物厚度,记录凋落物分解层和半分解层厚度。共计采集 50 个凋落物样品带回实验室,进行凋落物层水文性能分析。

### 2.2 凋落物层蓄积量测定

将采集到的样本在实验室中自然风干,对其进行称重。取一定凋落物,按序号放入烘箱中,温度调至

65□连续烘干至恒重后取出，依次称量。凋落物自然含水率及蓄积量公式为：

$$R = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\%$$

$$M = W_0 \times K' / 100$$

式中：M 为凋落物蓄积量 (t/hm<sup>2</sup>)；K'为换算系数，K'=W<sub>2</sub>/W<sub>1</sub>；R 为自然持水率 (%)；W<sub>0</sub>为取样凋落物的质量 (g)；W<sub>1</sub>为烘干前凋落物的质量 (g)；W<sub>2</sub>为烘干后凋落物的质量 (g) [20]。

### 2.3 凋落物层持水性能测定

凋落物持水量采用室内浸泡法进行测定。将处理好的凋落物样品进行凋落物持水量测定。将取出的凋落物样品进行浸泡处理以及混合浸泡处理。将凋落物分别装入做好标签的尼龙网袋中，浸水 0.5h、1h、2h、4h、8h、12h、24h，每次取出悬挂沥水，直至尼龙网带不再滴水时记录其质量，整个试验过程中避免挤压尼龙网，以免造成误差。将浸水过后的各样品进行装袋，放入 65□烘箱中连续烘干至恒重后取出，依次称量。持水性能各项指标计算公式：

$$R_{max} = \frac{W_4 - W_2}{W_2} \times 100\%$$

$$Q_{max} = R_{max} \times M$$

$$Q_{sv} = (0.85R_{max} - R) \times M$$

式中：R<sub>max</sub>为最大持水率 (%)；Q<sub>max</sub>为最大持水量 (t/hm<sup>2</sup>)；Q<sub>sv</sub>为有效拦蓄量 (t/hm<sup>2</sup>)；W<sub>3</sub>为浸泡后烘干的质量 (g)；W<sub>4</sub>为浸泡 24h 的样本质量 (g)。

### 2.4 数据处理

本文采用单因素方差分析方法，分析了自变量不同杉木密度对因变量凋落物厚度和质量的独立影响。方法分析前，对所有数据进行正态性检验和方差齐性检验 (Shapiro-Wilk 检验，均 P<0.05)。在验证数据方差的齐性后，采用 Duncan 方法 (置信区间在 95%以内)，通过多重比较分析数据的差异。所得数据利用 Excel 进行录入与处理，并进行拟合分析得到函数模型。采用 SPSS23.0 进行统计分析，利用 Origin2018 进行绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同密度杉木人工套种林凋落物特征分析

由表 2 可知，凋落物的总蓄积量表现为 D65>D55>CK>D35>D23。D65 的混交林凋落物现存量显著高于纯林以及较低密度的混交林 (p<0.05)。各分解层凋落物现存量在不同密度套种处理下具有一定的差异，其中高密度处理下未分解层的凋落物蓄积量显著高于低密度处理以及对照组，表现为 D65 保留密度下未分解层蓄积量最高，D23 保留密度下未分解层蓄积量最低。(p<0.05)。半分解层凋落物蓄积量表现为 D65、D55 保留密度下无显著性差异 (p<0.05)，D23 保留密度下的半分解层蓄积量与其他处理下均有显著性差异 (p<0.05)。不同保留密度处理下凋落物未分解层和半分解层占总蓄积量的比例各不相同，其中对照组的半分解层占总蓄积量的比例最高，为 55.93%，D35 密度处理下的未分解层占总蓄积量的比例最高，为 49.28%，且所有处理中，半分解层占总蓄积量的比例均高于未分解层。

表 2 不同保留密度杉木人工林凋落物特征及蓄积量

Tab.2 Litter characteristics and accumulation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different retention densities

林分类型 Forest type	总蓄积量 Total accumulation/ (t·hm <sup>-2</sup> )	半分解层 Half-decomposed layer		未分解层 Un-decomposed layer	
		蓄积量 Accumulation/ (t·hm <sup>-2</sup> )	占总蓄积量比例 Ratio/%	蓄积量 Accumulation/ (t·hm <sup>-2</sup> )	占总蓄积量比例 Ratio/%
CK:杉木纯林	18.63±0.23b	10.42±0.03b	55.93	8.21±0.23b	44.07
D23:23 杉木+75 楠木	14.13±0.15d	7.55±0.03d	53.43	6.58±0.14c	46.57
D35:35 杉木+75 楠木	16.56±0.11c	8.40±0.03c	50.72	8.16±0.13b	49.28
D55:55 杉木+75 楠木	25.16±0.21a	14.02±0.15a	55.72	11.14±0.29a	44.28
D65:65 杉木+75 楠木	25.67±0.37a	14.18±0.20a	55.24	11.49±0.43a	44.76

注：同列不同小写字母表示不同林分类型间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among different stand types.

### 3.2 凋落物吸水特性

3.2.1 凋落物持水量动态变化 凋落物持水量与浸水时间的变化如图 1 所示，在 0~4h 内凋落物的持水量迅速增加，尤其是在前 1h 内吸水量迅速增加，斜率最大，在 4~12h 内凋落物持水量增加速率慢慢减缓，12~24 小时内凋落物的持水量基本保持不变，趋于饱和，24h 后凋落物持水量达到饱和。在不同浸水时间下，半分解层凋落物持水量表现为 D65>D55>Ck>D35>D23，未分解层表现为 D65>D55>Ck>D35>D23。在不同密度套种处理下，凋落物各分解层持水量均为 D65 处理最大，D23 处理最小。拟合各林型不同分解阶段枯落物持水量与浸泡时间，见表 3，从得出的函数模型发现，整体拟合效果较好，尤其是各林型回归拟合 R<sup>2</sup> >0.99，说明持水量随浸水时间变化的理论值与实际情况相接近，两者均符合对数函数关系。

3.2.2 凋落物吸水速率的动态变化 由图 2 分析可知，杉木人工林凋落物吸水速率随浸水时间的延长而降低，其吸水速率在 0~4 h 内最大，4~10 h 之间逐渐减缓，24 h 基本趋于饱和。拟合各林型不同分解阶段枯落物吸水速率与浸泡时间，见表 4，从得出的函数模型发现，两者均符合幂函数关系，回归拟合 R<sup>2</sup> 均在 0.99 以上，拟合效果较好，说明吸水速率随浸泡时间变化的理论值与实际情况相接近。

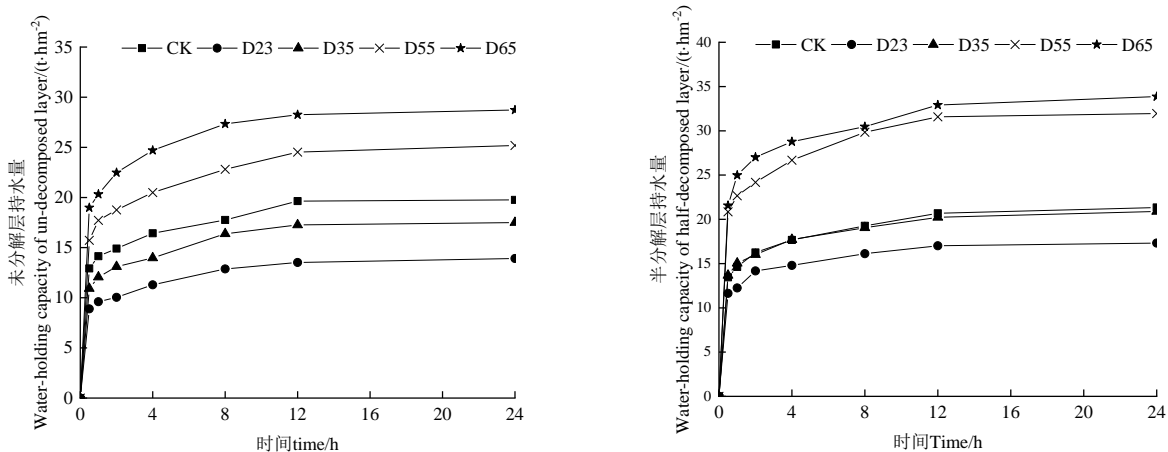


图 1 不同保留密度杉木人工林凋落物持水量与浸水时间关系

Fig.1 Relationship between apoplastic water holding capacity and immersion time in *Cunninghamia lanceolata* litter with different retention densities

表 3 各林型凋落物持水量(Y) 与浸水时间(x) 的回归函数模型

Tab.3 Regression models of deadfall water holding capacity (Y) and immersion time (x) for each forest type (x) for each forest type

分解阶段 Decomposition stage	林型 Forest type	回归模型 Regression model	R <sup>2</sup>
半分解层 semi-decomposed layer	CK	$Y=2.15\ln(X)+14.81$	0.9984
	D23	$Y=1.59\ln(X)+12.68$	0.9964
	D35	$Y=1.95\ln(X)+14.98$	0.9987
	D55	$Y=3.16\ln(X)+22.70$	0.9957
	D65	$Y=3.13\ln(X)+24.44$	0.9973
未分解层 undecomposed layer	CK	$Y=1.90\ln(X)+14.03$	0.9949
	D23	$Y=1.43\ln(X)+9.59$	0.9938
	D35	$Y=1.85\ln(X)+12.04$	0.9932
	D55	$Y=2.55\ln(X)+17.42$	0.9969
	D65	$Y=2.79\ln(X)+20.77$	0.9962

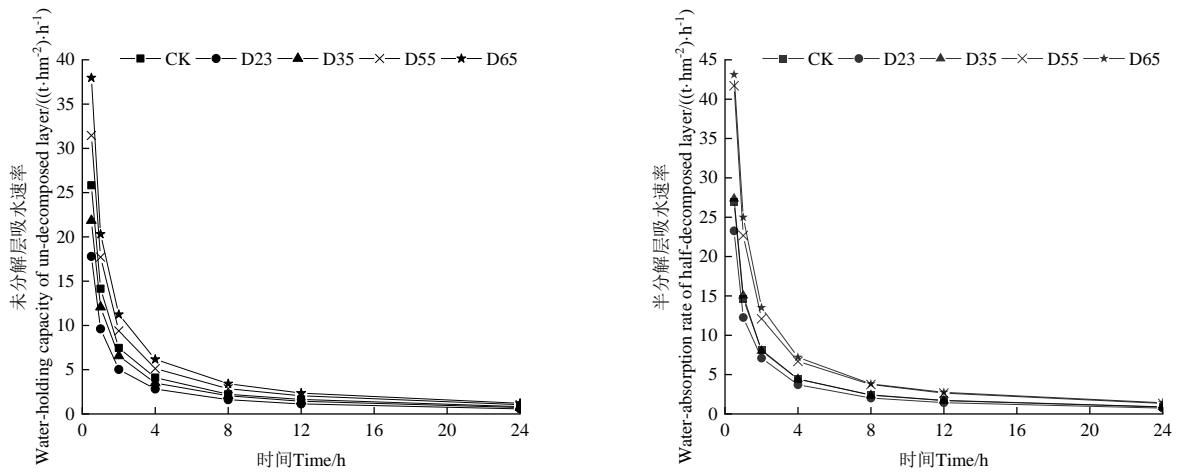


图 2 不同保留密度杉木人工林凋落物吸水速率与浸水时间的关系

Fig. 2 Relationship between water uptake rate and immersion time of *Cunninghamia lanceolata* litter with different retention densities

表 4 各林型凋落物吸水速率(Y) 与浸水时间 (X) 的回归函数模型

Tab.4 Regression model of water uptake rate (Y) and water immersion time for each forest type (X) for each forest type

分解阶段 Decomposition stage	林型 Forest type	回归模型 Regression model	R <sup>2</sup>
半分解层 semi-decomposed layer	CK	$Y=14.71X^{-0.869}$	0.9999
	D23	$Y=12.56X^{-0.883}$	0.9994
	D35	$Y=14.91X^{-0.878}$	0.9999
	D55	$Y=22.61X^{-0.883}$	0.9999
	D65	$Y=24.21X^{-0.844}$	0.9991
未分解层 undecomposed layer	CK	$Y=14.02X^{-0.884}$	0.9999
	D23	$Y=9.59X^{-0.891}$	0.9998
	D35	$Y=11.99X^{-0.867}$	0.9999
	D55	$Y=17.364X^{-0.863}$	0.9997

### 3.3 不保留密度杉木人工林凋落物持水能力

通过分析图 3 可知，不同保留密度杉木人工林总最大持水量依次为：D65>D55>CK>D35>D23，五种不同保留密度处理下最大持水量均有显著性差异 ( $p<0.05$ )，D65 最大，总持水量达 62.59t·hm<sup>-2</sup>，分别是其他四个处理的 1.52 倍，2.00 倍，1.63 倍，1.09 倍；D23 最低，持水量 31.23t·hm<sup>-2</sup>。未分解层与半分解层中，最大持水量的规律均表现为 D65>D55>CK>D35>D23，但 CK 与 D35 并无显著性差异，均是 D65 最大持水量最高，D23 最大持水量最低。

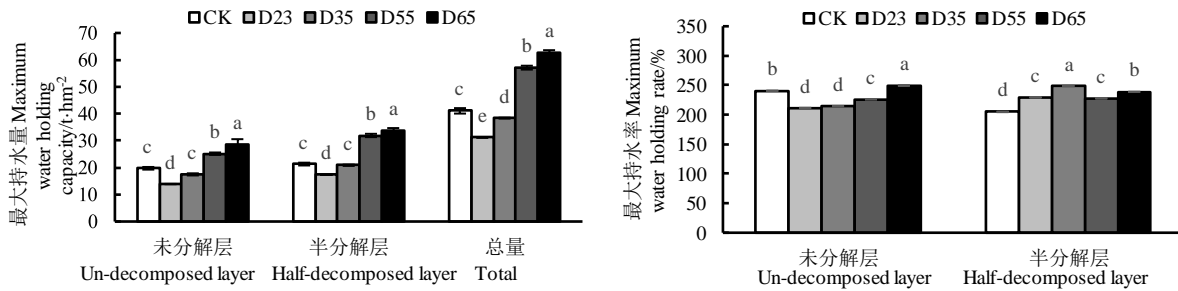


图 3 凋落物最大持水量与最大持水率

Fig.3 Maximum water holding capacity and maximum water holding rate of litter

不同小写字母表示不同处理各分解层在 0.05 水平上差异显著，下同。Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level for each decomposition layer of the different treatments, the same below.

### 3.4 不保留密度杉木人工林凋落物拦蓄能力

3.4.1 凋落物的拦蓄拦蓄能力 由图 4 可以见得，不同保留密度杉木人工林有效拦蓄量不尽相同，半分解层最大拦蓄率变化范围为 188.12%~233.54%，其中未 D35 的最大拦蓄率显著高于其他处理，达到 233.54%；未分解层最大拦蓄率变化范围为 196.22%~231.43%，其中 D65 的最大拦蓄率显著高于其他处理，达到 231.43%。

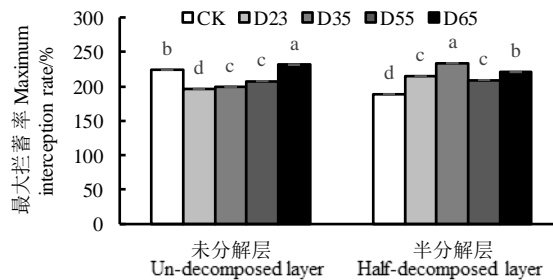


图 4 不同林分类型杉木人工林凋落物各分解层最大拦蓄率

Fig.4 Maximum retention rate of apoplastic litter in different stand types of fir plantations

3.4.2 凋落物的有效拦蓄特征 有效拦蓄量可以反应凋落物的实际拦蓄能力，评估凋落物的持水性能。通过分析图 5 可知，总的有效拦蓄量大小依次是 D65>D55>CK>D35>D23。变化范围是 24.38 t·hm<sup>-2</sup>~48.54 t·hm<sup>-2</sup>。总体而言，凋落物的半分解层有效拦蓄量都比未分解层的有效拦蓄量更大，且两层都是再 D65 密度下达到最大值。



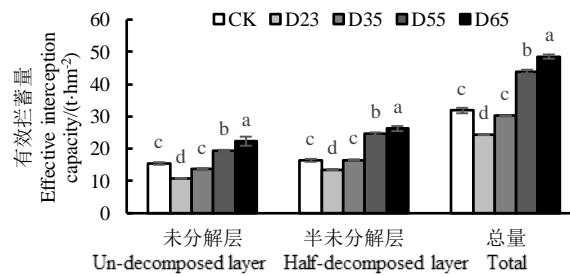


图5 不同林分类型杉木人工林凋落物各分解层有效拦蓄量

Fig.5 Effective retention of apoplastic litter by decomposition layer in different stand types of fir plantations

## 4 讨论

### 4.1 不同保留密度杉木人工林凋落物持水性能

不同保留密度下，树种组成、林分密度、林分结构，凋落物组成成分质量的不同，决定了凋落物蓄积量的差异和其基本特性<sup>[21,22]</sup>。本研究发现，森林凋落物量受到林分密度的影响显著，在楠木密度不变的情况下，随着杉木密度的不断升高，其凋落物的蓄积量也在随之升高，这与张家武等<sup>[23]</sup>通过研究不同林分密度的马尾松对凋落物的影响，得出凋落量与林分密度成正相关的结论，姚瑞玲<sup>[24]</sup>在研究中所得结论马尾松凋落物量与密度呈正相关等前人研究一致。

本研究表明，无论未分解层还是半分解层，杉木人工林凋落物浸水前期吸水速率增加最快，尤其是在浸 0.5 h 内最为显著，凋落物持水量迅速上升，随着浸水时间的延长，5 种林分类型杉木人工林凋落物的累积持水量不断增加，4~10 h 内凋落物持水量增加速率减缓，并逐渐趋于饱和，达到最大持水量后则不再增加，这与张瑛等<sup>[21]</sup>对湖南会同杉木人工林凋落物持水过程的研究结果相似，反映了在实际降水过程中凋落物对降雨的拦蓄过程。同时，研究还发现，凋落物半分解层的持水率和持水量均高于未分解层，可能由于半分解层结构疏松多孔、表面积增大，并且有少量腐殖质的形成，能够吸持更多的水分。本研究显示，杉木纯林的持水率与持水量并不是最低的，反而较低的杉木密度与楠木混交使得凋落物的持水率和持水率最低。但高密度的杉木套种楠木人工林持水率与持水量均高于杉木纯林，这是因为随着杉木密度的增加，杉木凋落物的含量在不断的增加，在楠木密度相同情况下，使得凋落物的综合持水能力在不断上升，可吸持的水分也就更多。

### 4.2 不同保留密度杉木人工林凋落物持水能力

本研究表明，随着密度的增加，与杉木纯林相比，最大拦蓄率、最大拦蓄量和有效拦蓄率、有效拦蓄量都呈先减少后增加的趋势。结果显示，低保留密度下的杉楠复层林，其最大拦蓄率（量）和有效拦蓄率（量）并不是很理想，显著低于纯林；高密度的杉木密度与楠木套种，其结果均显著高于杉木纯林。总的来说，复层林的凋落物组成较纯林复杂，林地情况与生物环境种类更趋多样化，促进凋落物-土壤界面形成多样的微生态环境，加速推动微生物活动，加快凋落物的分解，进而增强凋落物层的持水能力。

## 5 结论

本研究通过研究不同保留密度杉木套种相同密度楠木形成杉楠复层林，分析其凋落物蓄积量持水性能等发现，与杉木纯林相比，D55与D65密度下调落物蓄积量比杉木纯林分别高了1.37倍和1.38倍，凋落物持水率增加，最大拦蓄量和有效拦蓄量均显著提高，说明与杉木纯林相比，针阔混交林凋落物层拦蓄降水的能力更强。总的来说，D65密度下的蓄积量，持水性能和持水能力为五种密度下最为优势的一种。



基于此,在今后的造林管理中,建议通过营造合适密度混交林,配合相应的营林措施,实现其生态水文功能的提升,同时在今后的人工林经营管理过程中,尽量避免营造纯林,多考虑多树种之间套种模式下带来的效益。

## 参考文献

- 陈家琦,翟畅,包广道,等. 2022. 东北地区城市森林常见树种凋落物累积量及其水文效应. 生态学杂志: 1-12.
- 郭昊澜,赵子豪,连晓倩,等. 2021. 间伐对杉木人工林水土保持功能影响的研究进展. 亚热带农业研究, 17(04): 252-257.
- Wang H, Liu S, Schindlbacher A, *et al.* 2019. Experimental Warming Reduced Topsoil Carbon Content and Increased Soil Bacterial Diversity in a Subtropical Planted Forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 133: 155-164.
- Cenini V L, Fornara D A, McMullan G, *et al.* 2016. Linkages Between Extracellular Enzyme Activities and the Carbon and Nitrogen Content of Grassland Soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 96: 198-206.
- 张薰元,周运超,白云星,等. 2021. 基于熵权法评价调控林凋落物层水文特性——以贵州马尾松林和5种阔叶树调控林为例. 中国水土保持科学(中英文), 19(06): 44-53.
- Rani A, Porwal S, Sharma R, *et al.* 2008. Assessment of Microbial Diversity in Effluent Treatment Plants by Culture Dependent and Culture Independent Approaches. *Bioresource Technology*, 99(15): 7098-7107.
- 陈法霖,张凯,向丹,等. 2019. 桉树凋落物对土壤微生物群落的影响:基于控制实验研究. 土壤学报, 56(02): 432-442.
- 徐秋芳,钱新标,桂祖云. 1998. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响. 浙江林学院学报(01): 29-33.
- 赵磊,王兵,蔡体久,等. 2013. 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. 水土保持学报, 27(01): 203-208.
- 林立文,邓羽松,李佩琦,等. 2020. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应. 水土保持学报, 34(05): 200-207.
- 王玲,赵广亮,周红娟,等. 2019. 八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应. 生态环境学报, 28(09): 1767-1775.
- 丁霞,程昌锦,漆良华,等. 2019. 丹江口库区湖北水源区不同密度马尾松人工林水源涵养能力. 生态学杂志, 38(08): 2291-2301.
- 万春红,陶楚,杨小波,等. 2014. 海南岛不同森林类型凋落物产量及其影响因素. 热带生物学报, 5(02): 153-161.
- 汪燕明,周世水,乔卫阳,等. 2018. 杉木复层林伴生树种生长及水源涵养研究. 华东森林经理, 32(01): 1-5.
- 王俊男. 2018. 林下套种楠木对杉木人工林生态系统的影响. 福建农林大学, 95.
- 徐海东,苑海静,熊静,等. 2020. 杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响. 林业科学研究, 33(03): 107-115.
- 黄凯璇. 2021. 近自然经营对杉木人工林群落特征和碳储量的影响. 广西大学, 79.
- 李媛良,汪思龙,颜绍旭. 2011. 杉木人工林剔除林下植被对凋落层养分循环的短期影响. 应用生态学报, 22(10): 2560-2566.
- 吴迪,张萌萌,张钰莹,等. 2017. 帽儿山针阔混交林及纯林土壤碳代谢微生物群落特征研究. 南京林业大学学报(自然科学版), 41(02): 81-89.
- 张甜,李龙龙. 2022. 中条山不同森林类型土壤和枯落物的水文性能分析. 森林工程, 38(03): 32-39.
- 张瑛,徐庆,高德强,等. 2021. 湖南会同不同林分类型杉木人工林凋落物水文效应. 林业科学研究, 34(06): 81-89.
- 陈光升,胡庭兴,黄立华,等. 2008. 华西雨屏区人工竹林凋落物及表层土壤的水源涵养功能研究. 水土保持学报(01): 159-162.
- 张家武,廖利平,李锦芳,等. 1993. 马尾松火力楠混交林凋落物动态及其对土壤养分的影响. 应用生态学报(04): 359-363.
- 姚瑞玲,丁贵杰,王胤. 2006. 不同密度马尾松人工林凋落物及养分归还量的年变化特征. 南京林业大学学报(自然科学版)(05): 83-86.