#### DOI: 10.20103/j.stxb.202404100779

农海勤,陆明路,易弘韬,张乐,吴丽青,宋贤威.亚热带主要人工林凋落物和土壤层水源涵养功能研究.生态学报,2025,45(17): - . Nong H Q,Lu M L, Yi H T,Zhang L, Wu L Q,Song X W.Study on the water conservation function of litter and soil layer in subtropical artificial forests. Acta Ecologica Sinica,2025,45(17); - .

### 亚热带主要人工林凋落物和土壤层水源涵养功能研究

农海勤1,陆明路1,易弘韬2,张乐1,吴丽青1,宋贤威1,\*

1 广西大学林学院,广西森林生态与保育重点实验室,广西高校亚热带人工林培育与利用重点实验室,南宁 530004 2 广西壮族自治区国有高峰林场,南宁 530001

摘要:森林生态系统凋落物和土壤层在降雨拦蓄和水分储存等方面发挥重要作用。尤其在气候变化背景下,极端降雨和干旱事件直接影响凋落物和土壤层的水源涵养功能,进而对人工林的可持续经营构成威胁。本研究以亚热带地区三种主要人工林(尾巨桉、马尾松、杉木)为研究对象,基于传统浸泡法和模拟降雨法测定凋落物持水性能,使用环刀法评估土壤持水性能,综合分析凋落物和土壤层水源涵养功能。结果表明:(1)在相同时间(1h)内,模拟降雨法测得的尾巨桉、马尾松和杉木的凋落物持水量较传统浸泡法分别高出 136.00%、129.51%和 109.41%,传统浸泡法未能充分考虑凋落物表面水分的沥干效应和凋落物堆叠导致的"兜滞作用",从而低估了凋落物的持水量。(2)不同类型凋落物持水量随降雨强度增加而增加,且存在显著差异(P<0.05)。凋落物单位质量的最大持水量排序为:尾巨桉(2.82 g/g)、马尾松(2.11 g/g)和杉木(1.80 g/g)。凋落物单位面积最大持水量(3.92—23.38 t/hm<sup>2</sup>)和有效拦蓄量(1.85—14.91 t/hm<sup>2</sup>),其排序均为:马尾松林>杉木林>尾巨桉林。(3)土壤持水性能方面,马尾松林的土壤最大蓄水量表现最优(322.46 mm),杉木林的土壤毛管蓄水量表现最佳(263.44 mm)。综合来看,凋落物和土壤层的单位面积最大持水量总和为:马尾松林(324.49 mm)>杉木林(298.45 mm)>尾巨桉林(253.42 mm)。马尾松林由于较大的凋落物蓄积量和较高的土壤孔隙度,表现出较强的水源涵养能力,尾巨桉林则因较大的叶面积,其凋落物吸水速率优于其他林型。本研究综合评估了亚热带地区三种主要人工林的凋落物和土壤层对水源涵养的贡献,可为优化人工林林分结构、提升区域水源涵养能力以及在气候变化背景下实现人工林的可持续经营提供科学依据。 关键词:森林凋落物;土壤;拦蓄能力;持水性能;降雨强度

## Study on the water conservation function of litter and soil layer in subtropical artificial forests

NONG Haiqin<sup>1</sup>, LU Minglu<sup>1</sup>, YI Hongtao<sup>2</sup>, ZHANG Le<sup>1</sup>, WU Liqing<sup>1</sup>, SONG Xianwei<sup>1,\*</sup>

1 Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory for Cultivation and Utilization of Subtropical Forest Plantation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 Guangxi Zhuang Autonomous Region State-owned Gaofeng Forest Farm, Nanning 530001, China

**Abstract**: Litter and soil layers in forest ecosystems play a vital role in rain interception and water storage. In the context of climate change, extreme rainfall, and drought events directly impact the water retention performance of litter and soil layers, posing threats to the sustainable management of artificial forests. This study investigated three major artificial forest types in subtropical regions (Eucalyptus, Pinus massoniana, and Chinese fir), employing both traditional soaking methods and simulated rainfall methods to determine litter water-holding performance, and using the ring knife method to evaluate soil water-holding properties. A comprehensive analysis of the water retention performance of litter and soil layers was

**基金项目**:国家自然基金项目(42301042);广西科技基地和人才专项青年创新人才科研专项(桂科 AD22035032);南亚热带针阔混交林土壤对 垂直迁移可溶性有机碳的物理化学固持机制(202310593542)

收稿日期:2024-04-10; 网络出版日期:2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: sxwkerry@163.com

http://www.ecologica.cn

conducted. The results indicated: (1) Within the same time frame (1 h), the water-holding capacity of Eucalyptus, Pinus massoniana, and Chinese fir litter measured by simulated rainfall methods was 136.00%, 129.51%, and 109.41% higher, respectively, than that measured by traditional soaking methods. The traditional soaking method fails to fully account for surface water drainage effects and the "retention effect" caused by litter accumulation, leading to underestimation of litter water-holding capacity. (2) Water-holding capacity of different litter types increased with rainfall intensity and exhibited significant differences (P < 0.05). The maximum water-holding capacity per unit mass of litter was ranked as follows: Eucalyptus forest (2.82 g/g), Pinus massoniana forest (2.11 g/g), and Chinese fir forest (1.80 g/g). The range of unit area maximum water retention was from 3.92 t/hm<sup>2</sup> to 23.38 t/hm<sup>2</sup>, and the effective interception amount ranged from 1.85 t/hm<sup>2</sup> to 14.91 t/hm<sup>2</sup>, with the ranking as follows: Pinus massoniana forest>Chinese fir forest>Eucalyptus forest. Waterholding capacity of different litter types increased with increasing rainfall intensity, showing significant differences (P <0.05). (3) In terms of soil water-holding performance, Pinus massoniana soil demonstrated the best maximum water storage capacity (322.46 mm), while Chinese fir soil exhibited the highest capillary water storage capacity (263.44 mm). Overall, the total maximum water-holding capacity per unit area was ranked as Pinus massoniana (324.49 mm)>Chinese fir (298.45 mm)>Eucalyptus (253.42 mm). Pinus massoniana forests exhibit strong water conservation capabilities due to their greater litter accumulation and higher soil porosity. Eucalyptus forests, on the other hand, possess superior litter water absorption rates owing to their larger leaf area compared to other forest types. This study provides a comprehensive assessment of the contributions of litter and soil layers to water-holding capacity in three major subtropical artificial forests, offering scientific evidence for optimizing forest stand structures, enhancing regional water retention capacities, and achieving sustainable management of artificial forests under climate change conditions.

Key Words: forest litter; soil; interception capacity; water-holding performance; rainfall intensity

全球气候变化导致降雨模式变化,进而引发森林生态系统降雨再分配、凋落物层截留及土壤层蓄水等水 文过程的快速变化<sup>[1]</sup>,为森林水源涵养评估带来新挑战。狭义的森林水源涵养功能指森林拦蓄降雨或调节 径流的能力,而广义功能则涵盖森林各结构层在各水文过程中的作用<sup>[2]</sup>。林地凋落物通过截留降雨减少水 土流失,土壤层则在调节森林水文过程中发挥重要作用,因此森林具有较强的水源涵养效应<sup>[3]</sup>。在森林生态 系统中,超过 90%的水储存在土壤层,其次是林冠层和凋落物层<sup>[4]</sup>。根据第九次森林资源调查报告,中国人 工林占森林总面积的 36.45%,其中亚热带人工林占 61.46%,杉木林(17.33%)、桉树林(9.57%)和马尾松林 (4.41%)是亚热带地区的主要营林树种<sup>[5]</sup>。因此,研究者越来越关注森林凋落物和土壤层的持水性能<sup>[6]</sup>。森 林凋落物和土壤层可以截留 2%—70%的降雨量<sup>[7]</sup>,是涵养水源、减少侵蚀、保持肥力和调蓄洪涝的关键因 素<sup>[8]</sup>。研究亚热带人工林的水源涵养功能,对于维护区域生态平衡和提供水资源具有重要意义<sup>[9]</sup>。

凋落物具有持水和调节土壤入渗的功能,其持水性能是研究森林水文过程和建模的重要参数<sup>[10]</sup>。凋落 物不仅有助于拦蓄雨水、减少蒸发引起的土壤水分流失,还能削弱强降雨对地表结皮的冲刷,发挥显著的水土 保持作用<sup>[10]</sup>。森林凋落物层的最大持水率可达 200.0%—448.9%,可截留降雨量的 10%—34%<sup>[11]</sup>。由于气 候不同,不同地区不同森林类型的凋落物持水性能差异明显,目前不同人工林水源涵养功能的差异仍缺乏系 统研究<sup>[12]</sup>。凋落物的拦截变化受到气候、土壤地形和植被结构的影响<sup>[7]</sup>具体包括土壤表面坡度<sup>[7,13]</sup>、降雨特 征<sup>[14]</sup>、凋落物层厚度<sup>[15]</sup>、凋落物结构<sup>[16]</sup>和分解程度<sup>[17]</sup>等因素。一般来说,阔叶林凋落物持水性能高于针叶 林,如在中国北方地区,研究发现阔叶凋落物(栓皮栎和元宝槭)的截水能力是针叶凋落物(侧柏和油松)的 1.6—2.0 倍<sup>[15]</sup>。此外,随着林龄的增加,凋落物质量不断积累,导致不同林龄人工林的水源涵养能力存在差 异。例如,李淑宝等研究发现,落叶松林在成熟阶段的林下水源涵养能力约为幼龄林的 2 倍<sup>[18]</sup>。在测定方法 上,野外原位监测<sup>[19]</sup>和实验室浸泡法<sup>[20]</sup>是评估凋落物持水性能的常用方法。浸泡法的供水条件远超自然降 雨,这可能导致对最大持水量的高估<sup>[21]</sup>,尤其是在降雨强度较小且叶片湿润时。此外,凋落物厚度和叶片表

3

面水分对持水性能的影响常被忽视。因此,模拟降雨实验已成为优化凋落物持水性能测定的主要方法<sup>[15,22]</sup>。 模拟降雨试验不仅能控制降雨条件,还能解决原位观测的拦截损失问题<sup>[23]</sup>。目前,关于不同森林类型凋落物 特征对持水性能的影响及测定方法差异的评估仍然不足,亟需对比不同测定方法和凋落物类型对持水性能的 影响<sup>[24]</sup>。

亚热带丘陵地区主要由花岗岩、砂岩和页岩等地质类型形成的红壤、赤红壤和黄壤等地带性土壤组 成<sup>[25]</sup>。这些土壤颗粒较大,渗透性和排水性较强,但持水性能较弱,夏季降雨频繁,易引发地表径流和水土流 失<sup>[26]</sup>。土壤孔隙度、容重和透水性等物理特性是影响地表径流和土壤水分调节的关键因素<sup>[6]</sup>。优化土壤孔 隙度和储水能力,增强表层蓄水能力,可有效促进水土保持和水源涵养<sup>[27]</sup>。此外,植被类型也对土壤性质和 持水性能产生影响,阔叶林的凋落物持水性能较强,而针叶林由于凋落物蓄积量更高,具备更强的持水性 能<sup>[6]</sup>。Liu等<sup>[28]</sup>对全球1km<sup>3</sup>的土壤储水量进行统计,发现土壤最大储水量为422.4 mm,平均值为161.5 mm。 桂北地区杉木林土壤的最大持水量为1100 t/hm<sup>2</sup>和有效持水量 311.47 t/hm<sup>2[29]</sup>。降雨强度显著影响渗透速 率,强度越大,渗透深度和速率越大。目前,大多数研究集中于森林特定层的水文过程<sup>[30—31]</sup>,迫切需要整合不 同水文层的初级水文过程,以评估不同林分的保水功能<sup>[19]</sup>。目前,不同人工林种植下的凋落物特征和土壤性 质差异缺乏充分对比,可能限制土壤物理模型的准确性和可靠性<sup>[32]</sup>。因此,深入研究森林凋落物和土壤层的 水源涵养能力,有助于优化人工林管理措施,避免不合理管理导致的土壤干旱和退化<sup>[33]</sup>。

为探讨我国亚热带主要人工林凋落物和土壤层水源涵养能力的差异及不同评估方法的影响,本研究以亚 热带地区不同林龄的尾巨桉、马尾松和杉木人工林的凋落物和土壤层为研究对象,采用模拟降雨法和浸泡法 测定凋落物持水性能及分布特征,对比两种评估方法的差异;测定土壤层的持水性能及基本理化性质,并分析 土壤层持水性能的影响因素。研究目标包括:(1)比较浸泡法和模拟降雨法对凋落物持水特性的评估,探讨 其与降雨强度、凋落物类型等因素的关系;(2)分析不同林龄人工林土壤的持水性能及其影响因素;(3)揭示 三种主要人工林凋落物与土壤层水源涵养功能的差异。本研究可为凋落物持水性能的评估提供可靠的方法, 以优化相关研究设计和实验方案,同时,厘清主要人工林凋落物和土壤层的水源涵养功能,有助于准确评估人 工林经营中的水资源供给与需求平衡,进而指导人工林可持续经营。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 人工林及立地条件

本研究选择了亚热带地区三种主要人工林作为研究对象,分别为马尾松(Pinus massoniana)、杉木(Cunninghamia lanceolate)和尾巨桉(Eucalyptus urophylla×E.grandis)为确保研究的代表性,分别在不同林龄的样地进行分析:马尾松(25 a、34 a 和 39 a),杉木(5 a、8 a、11 a 和 15 a),尾巨桉(2 a、7a 和 17 a)(见表 1)。研究区受亚热带季风气候影响,雨季降雨量充沛,三种林型的年均降雨量分别为:1489 mm(马尾松)、1824 mm(杉木)和 1606 mm(尾巨桉)。马尾松生长于红壤(砂壤土),杉木生长于黄壤(壤土),尾巨桉生长于黄壤(砂壤土)。马尾松土壤的容重 1.49 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度 55.14%;杉木土壤的容重 1.18 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度 50.14%;尾巨桉土壤的容重 1.24 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度 46.79%。三种林型土壤均呈酸性(pH 4.5—5.5)。每个林地随机设置三个 20 m×20 m 的标准样地进行调查与采样。

#### 1.2 野外采样

在每个样地内进行每木检尺,测定树高、胸径、郁闭度等指标。采用S形采样法,在每个标准样地内随机 设置4个1m×1m样方框,测量森林凋落物平均厚度,并在每次收集后及时称重记录。样本运回实验室后, 放入65℃烘箱进行干燥处理。在每个大样地内,随机挖掘3个土壤剖面,每个剖面分为五层(0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm)进行土壤采集。同时,使用3个体积为100 cm<sup>3</sup>的环刀,在不同土层分 层采集土壤,密封后带回实验室,测定土壤持水性能及其他物理化学性质。

			N176763	F'IH VC				
	Ta	ble 1 The bas	ic situation	of the study	area			
林分类型 Forest types	经纬度 Longitude & Latitude	海拔 Elevation/m	林龄 Age of stand/a	郁闭度 Crown density/%	平均树高 Mean canopy height/m	平均胸径 Mean diameter/cm	坡度 Gradient/(°)	行间距 Line spacing/m
杉木	109°18′50″E,25°10′51″N	194	5	75	6.90	9.04	27	2×2
Chinese fir	109°19′10″E,25°07′35″N	165	8	95	10.04	11.24	15	2×2
	109°18′47″E,25°10′45″N	193	11	85	11.08	14.72	30	2×3
	109°17′58″E,25°08′53″N	201	15	80	14.00	16.49	38	2×3
尾巨桉	108°21′23″E,22°59′19″N	245	2	60	7.56	12.50	32	2×3
Eucalyptus	109°21′05″E,22°59′06″N	215	7	70	18.78	14.36	32	2×3
	108°22′05″E,22°57′52″N	272	17	75	28.70	23.87	28	2×3
马尾松	106°51′20″E,22°03′05″N	472	25	80	17.55	35.45	31	3×3
Pinus massoniana	106°50′47″E,22°01′51″N	466	34	85	26.00	36.26	37	3×3
	106°53′08″E.22°01′56″N	460	39	85	35.32	37.89	35	3×3

主 1 研究地其木桔况

#### 1.3 实验设计

#### 1.3.1 基于浸泡法的凋落物持水性能测定

本研究使用烘干法测定凋落物的干重,并采用浸没法<sup>[25]</sup>研究样品的吸水过程。将烘干后的样品装入 60 目尼龙网袋中,浸没于水中,测定不同时间点(0.25、0.5、1、2、4、6、8、10、12、24 h)的样品质量变化,计算含水 量、最大持水量和有效蓄积量等指标,公式如下:

WHC = 
$$(M_0 - M_1) / M_1 \times 100\%$$
 (1)

$$W_{m} = (M_{2} - M_{1}) / M_{1}$$
<sup>(2)</sup>

$$W_e = (0.85 \times W_m \times 100\% - \text{WHC}) \times M \tag{3}$$

$$AM_m = (M_2 - M_1) / 100 \tag{4}$$

$$4M_{e} = (M_{3} - M_{1}) / M \times 100\%$$
<sup>(5)</sup>

$$RM_{m} = (M_{4} - M_{1})/M_{1}$$
(6)

$$RM_{e} = (M_{3} - M_{1})/M_{1}$$
(7)

$$RAM_m = (M_4 - M_1) / 10000$$
(8)

$$RAM_e = (M_3 - M_1) / 10000 \tag{9}$$

式中,WHC:调落物自然含水量(%); $M_0$ :落物鲜重(g); $M_1$ :调落物干重(g); $M_2$ :样品浸泡 24 h 后的重量(g);  $M_{3}$ ;调落物淋溶前的质量(g); $M_{4}$ ;调落物淋溶1h后的瞬时质量(g); $M_{2}$ 单位面积凋落物质量(t/hm<sup>2</sup>);0.85; 有效拦蓄系数;W<sub>m</sub>:单位质量最大持水量(g/g);W<sub>e</sub>:单位质量有效拦截量(g/g);AW<sub>m</sub>:单位面积最大持水量  $(t/hm^2); AW_e:$ 单位面积有效拦截量 $(t/hm^2); RW_m:$ 模拟降雨单位质量最大持水量 $(g/g); RW_e:$ 模拟降雨单位 质量有效拦截量(g/g);RAW<sub>w</sub>:模拟降雨单位面积最大持水量(t/hm<sup>2</sup>);RAW<sub>w</sub>:模拟降雨单位面积有效拦截量  $(t/hm^2)$ 

#### 1.3.2 基于模拟降雨的凋落物拦截测定

本实验依托广西水利电力职业技术学院模拟降雨大厅进行。模拟降雨系统(QYJY-503,西安清远测控技 术有限公司)通过调节喷嘴阀门和水压来调控降雨强度,降雨高度为6m,可确保雨滴达到自然降雨的终端速 度,有效降雨均匀性>85%<sup>[26]</sup>。为确保降雨强度的准确性,每次试验前均进行率定。凋落物持水性能测定装 置采用内径为2 cm 的 PVC 管搭建 50×50×50 cm3框架。并铺设 60 目尼龙网以防止凋落物掉落,同时减少表 面张力对凋落物截留水量的影响。尼龙网四周固定在框架上,以防降雨过程中因重力变形。根据不同林地的 单位面积凋落物质量,将凋落物均匀铺设于尼龙网上。为避免未经过凋落物层的雨水进入收集装置,在尼龙 17 期

网下方铺设防水塑料薄膜,并设置排水孔引流至 PVC 桶(见图 1)。

实验采用水量平衡法计算凋落物截留水量。降雨结束后,依据凋落物沥水完成时的保留水量,测定最小截留储存能力;依据降雨停止瞬间凋落物层的存水量<sup>[27]</sup>,测定最大截留储存能力(*RW<sub>m</sub>*)。实验设定五种降雨强度(30 mm/h, 50 mm/h, 70 mm/h, 90 mm/h, 110 mm/h),持续时间为 60 min,观测截留特征及水文功能, 在水滴完全落尽后进行取样,每组实验重复 4 次。



图 1 装置图 Fig.1 Installation diagram

#### 1.3.3 土壤持水性能的测定

土壤持水性能采用环刀法<sup>[28]</sup>测定,主要指标包括容重(R)、毛管持水量( $S_{pwe}$ )、最大持水量( $S_{maxwe}$ )、田间 持水量( $S_{ewe}$ )、非毛管孔隙度(f)、毛管孔隙度(p)、总孔隙度(k),最大蓄水量( $W_m$ )、毛管蓄水量( $W_e$ )及非毛 管蓄水量( $W_n$ )。具体步骤如下:称取各环刀的重量( $m_0$ )及装有原状土壤的环刀质量( $m_1$ ),计算自然含水量 ( $S_w$ )。将装有原状土的环刀置于水中浸泡 12 h,称重( $m_2$ )计算得  $S_{maxwe}$ ,环刀继续放置在石英砂沙盘中 2 h, 使非毛管水排出后称重( $m_3$ ),并计算得p和  $S_{pwe}$ ,将上述环刀放置在铺有干砂的平底盘中,保持一定时间(砂 土:24 h、壤土:48—52 h、粘土:96—120 h),此时环刀中土壤的水分为毛管悬着水,称量( $m_4$ ),即可计算得田 间持水量( $S_{ewe}$ );最后将土样置于 105℃恒温烘箱中烘干至恒重( $m_5$ )计算得 R,p 以及f,p和 f之和即为k。各 指标计算公式如下:

$$R = (m_5 - m_0) / V \tag{10}$$

$$k = (m_2 - m_5) / (m_5 - m_0) \times R \times 100\%$$
(11)

$$p = (m_3 - m_5) / (m_5 - m_0) \times R \times 100\%$$
(12)

$$f = k - p \tag{13}$$

$$S_w = (m_1 - m_5) / (m_5 - m_0) \times 100\%$$
(14)

$$S_{\text{maxwc}} = (m_2 - m_5) / (m_5 - m_0) \times 100\%$$
(15)

$$S_{\rm pwc} = (m_3 - m_5) / (m_5 - m_0) \times 100\%$$
(16)

$$S_{\rm cwc} = (m_4 - m_5) / (m_5 - m_0) \times 100\%$$
<sup>(17)</sup>

$$W_m = 0.1 \times R \times h \times S_{\text{maxwe}} \tag{18}$$

$$W_c = 0.1 \times R \times h \times S_{\text{pwc}} \tag{19}$$

$$W_n = 0.1 \times R \times h \times S_{ewe} \tag{20}$$

式中,*V*:环刀内体积(cm<sup>3</sup>);*h*:土层深度(cm)

1.4 数据统计与分析

数据记录、清洗与整理采用 Microsoft Excel 2022 进行。统计分析使用 IBM SPSS Statistics 20,包含单因素 方差分析(ANOVA)及 LSD 事后检验(P<0.05)。使用 Pearson 相关系数计算各水文指标间的相关性,并通过 95%置信区间评估相关性结果的精确度(P<0.05)。水文指数与降雨强度、林型、林龄的关系通过多元回归和 非线性回归分析进行,决定系数(R<sup>2</sup>)用于评估模型拟合度。回归分析和数据可视化均使用 OriginPro 2022 进行。

#### 2 结果

#### 2.1 凋落物持水性能

2.1.1 基于浸泡法的凋落物持水性能

表 2 的方差分析表明,不同植被类型对调落物蓄积量有显著影响(P<0.05)。研究区调落物的平均蓄积量依次为:马尾松(9.45 t/hm<sup>2</sup>)>杉木(6.38 t/hm<sup>2</sup>)>尾巨桉(3.07 t/hm<sup>2</sup>)。除尾巨桉 17 a 林龄外,其他人工林 凋落物蓄积量随林龄增长而增加。浸泡法测定的调落物单位质量有效拦蓄量(W<sub>e</sub>)为:尾巨桉(2.32 g/g)>杉木(1.76 g/g)>马尾松(1.27 g/g),单位质量最大持水量(W<sub>m</sub>)为:尾巨桉(2.86 g/g)>杉木(2.25 g/g)>马尾松(1.63 g/g)(见表 2)。不同林型的 W<sub>e</sub>和 W<sub>m</sub>差异不显著(P>0.05),在同一林型的不同林龄之间差异显著(P<0.05)。不同林型的凋落物持水性能差异显著。尾巨桉的 AW<sub>e</sub>和 AW<sub>m</sub>显著低于马尾松和杉木(P<0.05),具体 表现为:马尾松(10.77 t/hm<sup>2</sup>)>杉木(9.14 t/hm<sup>2</sup>)>尾巨桉(5.23 t/hm<sup>2</sup>),而 AW<sub>m</sub>则为马尾松(13.75 t/hm<sup>2</sup>)>杉木(11.65 t/hm<sup>2</sup>)>尾巨桉(6.45 t/hm<sup>2</sup>)。尾巨桉吸水率高达 285.75%,杉木和马尾松的吸水率分别为223.95% 和 162.63%。三种凋落物类型的自然含水率、最大持水量和有效拦蓄量均随林龄增加而增大。凋落物持水量 随浸泡时间逐渐增加,0.5 h 内迅速增加;而在 2—8 h 间增幅放缓;8—24 h 后趋于饱和。持水量(Q,g/g)与 浸泡时间(t,h)呈对数关系(见图 2)。三种林分的凋落物吸水速率随浸泡时间逐渐降低(见图 2),与持水率 相反。浸泡 2 h 内,吸水速率最高,随着时间增加迅速减小。在 2—10 h 内,持水量逐渐饱和,吸水速率逐渐减 缓。24 h 浸泡后,吸水速率趋近于 0。同一林型不同林龄的单位质量凋落物吸水速率差异不显著,采用并置 拟合表征其随时间的变化,凋落物吸水速率(V)与浸泡时间(t)呈极显著的幂函数相关关系(P<0.001)。

林分类型 Forest type	林龄 Age of stand/a	凋落物蓄积量 Litter stock/ (t/hm <sup>2</sup> )	自然含水率 WHE/%	单位质量 有效拦截量 <i>W<sub>e</sub>/(g/g)</i>	单位质量 最大持水量 <i>W<sub>m</sub>/(g/g)</i>	单位面积 有效拦截量 $AW_e/(t/hm^2)$	单位面积 最大持水量 $AW_m/(t/hm^2)$
尾巨桉	2	3.39±0.04 Ca	13.39±0.18 Ba	2.60±0.2 Aa	3.22±0.23 Aa	6.68±0.65 Ba	8.26±0.76 Ba
Eucalyptus	7	3.68±0.19 Ca	$10.19{\pm}1.27~\mathrm{Bb}$	$2.01{\pm}0.18~{\rm Ac}$	$2.48{\pm}0.23~{\rm Ac}$	$5.83{\pm}0.16~\mathrm{Bb}$	$7.21{\pm}0.18~\mathrm{Bb}$
	17	$2.14{\pm}0.28~{\rm Cb}$	$7.98{\pm}0.60~\mathrm{Bc}$	$2.36 \pm 0.23$ Ab	$2.87{\pm}0.27~\mathrm{Ab}$	$3.19{\pm}0.57~\mathrm{Be}$	$3.8 \pm 0.71$ Bc
马尾松	25	$7.47{\pm}1.41~{\rm Ab}$	$8.10{\pm}0.76~\mathrm{Bc}$	$1.30\pm0.25$ Ab	$1.62{\pm}0.29~\mathrm{Ab}$	$9.86{\pm}1.51~{\rm Ac}$	$12.26 \pm 1.91$ Ac
Pinus massoniana	34	$9.29 \pm 1.82$ Aab	$10.26{\pm}0.49~\mathrm{Bb}$	$1.21\pm0.22$ Ac	$1.55{\pm}0.27~{\rm Ac}$	11.21±1.17 Ab	$14.33 \pm 1.56$ Ab
	39	10.28±0.64 Aa	14.25±0.91 Ba	1.31±0.03 Aa	1.71±0.03 Aa	11.24±0.73 Aa	14.66±0.98 Aa
杉木	5	3.56±0.20 Cc	$9.08 \pm 2.35$ Ad	$1.71{\pm}0.13~{\rm Ac}$	2.12±0.16 Ad	$6.19 \pm 0.26$ Ad	$7.53 \pm 0.36$ Ad
Chinese fir	8	$5.08{\pm}0.86~\mathrm{Bb}$	$12.06 \pm 2.70$ Ac	1.94±0.11 Aa	2.43±0.15 Aa	$9.80{\pm}1.07~{\rm Ab}$	$12.28 \pm 1.46$ Ac
	11	$5.94 \pm 0.25$ Bab	$18.33 \pm 3.44$ Ab	$1.63{\pm}0.01~{\rm Ad}$	$2.13\pm0.03$ Ac	9.78±0.35 Ac	$12.66 \pm 0.38$ Ab
	15	6.11±0.39 Ba	21.40±2.66 Aa	$1.75{\pm}0.04~\mathrm{Ab}$	$2.31{\pm}0.07~\mathrm{Ab}$	10.80±1.31 Aa	14.13±1.29 Aa

表 2 各类型凋落物持水特征 Table 2 Water-holding characteristics of different types of litters

表中数值表示"平均值±标准误";同列中不同大写字母表示不同林型之间差异显著(P<0.05);同列中不同小写字母表示相同林型下不同林 龄之间差异显著(P<0.05)

#### 2.1.2 基于模拟降雨的凋落物持水性能

在模拟降雨条件下,凋落物1h单位质量有效拦蓄量( $RW_e$ )范围为(0.85±0.27)g/g—(2.00±0.24)g/g。 同一林型凋落物持水量随降雨强度增加而显著上升(P<0.05),且不同林型间存在显著差异(P<0.05),而同一 林型内不同林龄间差异不显著(P>0.05)。小雨强下,马尾松和杉木的凋落物1h单位质量最大持水量 ( $RW_m$ )无显著差异(P>0.05),但大雨强下差异显著(P<0.05)(见图3)。凋落物单位面积最大持水量表现为 马尾松(20.30 t/hm<sup>2</sup>)>杉木(13.26 t/hm<sup>2</sup>)>尾巨桉(7.89 t/hm<sup>2</sup>),相当于分别固持2.03、1.33、0.79 mm 的降雨



图 2 不同森林类型凋落物单位质量持水量和凋落物吸水速率与浸泡时间的关系



阴影部分表示 95% 置信区间

量。单位面积有效拦蓄量(RAW<sub>e</sub>)为(1.85±0.18) t/hm<sup>2</sup>—(14.91±4.32) t/hm<sup>2</sup>,总体高于  $RW_{e}$ 。1 h RAW<sub>e</sub>排 序为:马尾松>杉木>尾巨桉。不同林龄间 RAW<sub>e</sub>差异显著(P<0.05),表现为:马尾松凋落物:39 a(2.34 mm)> 34 a(2.18 mm)>25 a(1.57 mm);杉木凋落物:15 a(2.16 mm)>11 a(1.36 mm)>8 a(1.06 mm)>5 a(0.73 mm);尾巨桉凋落物:2 a(0.90 mm)>7 a(0.71 mm)>17 a(0.56 mm)。 $RW_{e}$ 、 $RW_{m}$ 以及 RAW<sub>e</sub>与降雨强度间均呈 现对数函数关系;随着降雨强度的变化,RAW<sub>m</sub>呈现先增大后减小再增大的趋势(见图 3)。

2.1.3 两种方法的凋落物持水性能对比

图 4 显示,模拟降雨法测得的凋落物单位质量有效拦蓄量( $RW_e$ )与浸泡法测得的( $W_e$ )之间存在显著差 异(P<0.01);同样,模拟降雨法的凋落物单位质量最大持水量( $RW_m$ )与浸泡法测得的( $W_m$ )之间也存在显著 差异(P<0.05)。然而,在相同的 1 h 时间内,浸泡法测得的单位质量持水量显著低于模拟降雨法(P<0.05)。 在 1 h 内,尾巨桉、马尾松和杉木的 1 h  $RW_e$ 占 24 h  $W_e$ 的比率分别为:136.00%、129.51%、109.41%,而  $RW_e$ 占  $W_e$ 的比率分别为:94.26%、124.95%、78.70%。尾巨桉、马尾松和杉木的 1 h  $RW_m$ 占 24 h  $W_m$ 的比率分别为: 98.60%、129.51%、79.91%,而  $RW_m$ 占  $W_m$ 的比率分别为:71.31%、112.30%、61.67%。



图 3 模拟降雨法中单位质量和单位面积的有效拦蓄量与最大持水量在不同降雨强度下的变化关系

Fig.3 The relationship between the effective storage capacity per unit mass and unit area and the maximum water holding capacity under different rainfall intensities in the simulated rainfall method

#### 2.2 土壤物理特征和持水性能

图 5 显示,三种人工林的土壤容重随土层深度增加而显著增大,且表层与深层之间的土壤容重差异显著 (P<0.05)。马尾松林的土壤容重最高,杉木林的土壤容重最低。总孔隙度随土层深度增加而递减,范围为 34.25%—63.35%。表层与深层土壤总孔隙度差异显著(P<0.05),但在同一林型的不同林龄之间,毛管孔隙 度无显著差异(P>0.05)。毛管孔隙度以杉木林的土壤最高,马尾松林最低。非毛管孔隙度则以马尾松林的 土壤最大,尾巨桉林的土壤最小。

图 6 显示, 三种林型土壤的最大持水量、毛管持水量、田间持水量均随土层深度增加而减小。杉木林土壤的最大持水量最高(44.16%), 尾巨桉林最低(38.19%)。0—60 cm 土壤层最大蓄水量为: 马尾松林(322.46 mm)>杉木林(297.12 mm)>尾巨桉林(252.63 mm)。毛管持水量排序为: 杉木林(37.91%)>尾巨桉林(34.47%)>马尾松林(24.77%), 其对应的毛管蓄水量依次为: 杉木林(263.44 mm)>尾巨桉林(228.50 mm)>马尾松林(213.29 mm)。田间持水量排序为: 杉木林(29.99%)>尾巨桉林(25.03%)>马尾松林(21.80%)。田间蓄水量排序一致: 杉木林(208.47 mm)>尾巨桉林(187.07 mm)>马尾松林(161.42 mm)。

#### 2.3 凋落物和土壤水源涵养及影响因素

综合分析亚热带三种主要人工林的凋落物和土壤的持水性能,凋落物和土壤的单位面积最大持水量总和 依次为:马尾松林(324.49 mm)>杉木林(298.45 mm)>尾巨桉林(253.42 mm)。这表明植被类型差异对凋落 物层和土壤层的水源涵养能力有显著影响。相关性分析表明,凋落物的持水性能受到多种因素的影响。林



图 4 浸泡法和模拟降雨法的凋落物持水性能比较

# **Fig.4** Comparison of litter water-holding characteristics between soaking method and simulated rainfall method $RW_e$ : 模拟降雨法的凋落物单位质量有效拦蓄量; $W_e$ : 浸泡法的凋落物单位质量有效拦蓄量; $RW_m$ : 模拟降雨法的凋落物单位质量最大持水量; $*P \le 0.05$ ; $**P \le 0.01$ ; $***P \le 0.001$

龄、郁闭度、降雨强度以及凋落物的蓄积量、厚度等物理性质与凋落物的持水性能指标呈显著正相关(P<0.05),颜色深浅与其持水性能的相关性强弱呈正比。叶型与单位质量有效持水量、单位质量最大持水量呈正相关(P<0.01),与单位面积有效持水量、单位面积最大持水量呈正相关(P<0.001)。土壤容重与土壤毛管持水量、最大持水量及田间持水量均呈显著负相关(P<0.001),与总孔隙度和毛管孔隙度均呈显著正相关(P<0.001)。此外,土壤的最大持水量、毛管持水量和田间持水量与土壤孔隙性质显著相关,进一步证实土壤持水性能主要由土壤孔隙结构决定(见图7)。

#### 3 讨论

#### 3.1 凋落物持水性能的影响因素

凋落物层在森林生态系统中具有重要作用,直接影响生态系统的水分循环和持水性能<sup>[34]</sup>。本研究发现, 马尾松和杉木的凋落物蓄积量与林龄呈正相关,表明随着林龄的增加,凋落物层的水源涵养能力得到增 强<sup>[35]</sup>。这一发现与高迪等<sup>[21]</sup>的研究一致,因为林龄增长促使林木的枝叶更加茂盛,冠幅扩大,进而促进凋落 物的产出和蓄积<sup>[36]</sup>。不同植被类型对凋落物蓄积量有显著影响(*P*<0.05),这种差异可能与植被类型、郁闭 度、种植密度、凋落物分解程度以及气候等因素有关,符合周弘愿<sup>[37]</sup>的研究结论。在持水性能方面,凋落物的 平均持水率超过154%,但尾巨桉的持水率相对较低。相比之下,尾巨桉、马尾松和杉木的凋落物吸水量分别



图 5 不同林分类型土壤容重和孔隙度特征

#### Fig.5 Characteristics of soil bulk density and porosity in different forest types

不同的大写字母表示不同土层间的显著差异,而不同的小写字母则表示同一土层中不同林型间的显著差异(*P*<0.05); \* *P*≤0.05; \*\* *P*≤0.01; \*\*\* *P*≤0.001

为其自身重量的 2.86 倍、1.63 倍和 2.25 倍,符合山毛榉和云杉凋落物能够拦截降雨量的研究范围(即为其自 身重量的 2.0 倍—2.1 倍)<sup>[38]</sup>。因此,林型和林龄的差异直接影响凋落物层的持水性能<sup>[31]</sup>。尽管尾巨桉的凋 落物持水量和吸水速率较马尾松和杉木更高,显示出较强的持水性能,但这一过程受到吸水饱和度的限 制<sup>[39]</sup>;即当凋落物达到吸水饱和度后,其持水性能将不再显著增加。因此,科学选择树种并调整林分结构,可 以有效提升水源涵养能力,增强森林生态系统的稳定性和可持续性。

凋落物的有效拦蓄量越大,有助于削弱地表径流并增强水土保持<sup>[35]</sup>。本研究发现,随着林龄的增加,凋 落物的有效拦蓄量增加,这与前人研究的结果一致<sup>[21]</sup>。不同林型的凋落物截留能力差异显著(P<0.05),与 其他研究结果一致<sup>[40]</sup>。阔叶凋落物的截留储存量约为针叶凋落物的 1.6 倍<sup>[20]</sup>。尾巨桉的凋落物表现出较强 的持水和截留能力,可能与其凋落物多层堆叠及特定拦截作用相关<sup>[41]</sup>。而马尾松和杉木的凋落物由于交叉



土层深度/cm 🖸 0-20 🔲 20-40 🔀 40-60

不同的大写字母表示不同林型间的显著差异,而不同的小写字母则表示同一林型中不同土层间的显著差异(P<0.05)

分布,空隙较大,易于水滴渗透,因此其截留能力相对较弱<sup>[15]</sup>。随着降雨强度和凋落物重量的增加,凋落物的 持水特性显著增强。降雨强度增大导致雨滴对凋落物的冲击力增强,使得凋落物与雨滴接触更加充分<sup>[41]</sup>,从 而提高了凋落物的滞留和截留能力<sup>[42]</sup>。在恒定降雨强度的实验中,随着降雨强度的增加,凋落物的吸水量呈 指数增长<sup>[13]</sup>。凋落物持水量随着降雨强度的变化呈非线性趋势,因为小雨强时,凋落物表层迅速饱和,持水 量减少;而在持续的强降雨下,强烈冲击增强了凋落物的吸水能力,滞留水分增多,持水量增加<sup>[43]</sup>,表明降雨 强度与凋落物吸水量之间存在非线性关系。高强度降雨可能增加凋落物的瞬时持水量,但也可能导致快速排 MET - + + + + 4.6.

					/何 谸	r1权			调洛彻							
Age			****	****			*	**	****	**						
RI	0.00		**		****	*										
$RAW_e$	0.66	0.41		****	**		****	**	****	****						
$RAW_m$	0.71	-0.18	0.72				****	**	****	****						
RW <sub>e</sub>	0.081	0.67	0.43	-0.024		****		**		**						
$RW_m$	-0.15	0.36	0.039	-0.24	0.84		****	****	**	****						
acc	0.32	0.030	0.53	0.52	-0.25	-0.49		****	****	****						
cd	0.44	0.0015	0.37	0.41	-0.40	-0.67	0.70		****	****						
d	0.51	0.033	0.67	0.69	-0.11	-0.42	0.72	0.77		****						
aer	-0.42	0.00	-0.50	-0.57	0.41	0.72	-0.74	-0.76	-0.66							
	Age	RI	$RAW_e$	$RAW_m$	$RW_e$	$RW_m$	acc	cd	d	aer						
	土壤															
$S_{ m maxwc}$		**:	** *	***	****	****	**:	**	*	****						
$S_{\rm pwc}$	0.88		*	***	****	****	**:	**		****						
$S_{ m cwc}$	0.92	0.9	95		****	****	**:	**		****						
R	-0.67	-0.	76 -	0.66		****	**:	**		****						
k	0.62	0.8	35 (	).77	-0.78		***	* *	**	**						
р	0.50	0.7	6 (	).66	-0.59	0.89		×	****							
f	0.29	-0.	17 0	.030	0.21	-0.44	-0.	51		*						
h	-0.71	-0.	55 -	0.57	0.63	-0.37	-0.	25 -	0.34							
	Smaxwc	Snuc		Scwe	R	k	2	۹.	f	Ч						



#### Fig.7 Correlation analysis of litter water-holding capacity and soil water-holding capacity

Age:林龄; *RI*:降雨强度 Rainfall intensity; RAW<sub>e</sub>:单位面积有效持水量 Effective water holding capacity per unit area; RAW<sub>m</sub>:单位面积最大 持水量 Maximum water holding capacity per unit area; *RW<sub>e</sub>*:单位质量有效持水量 Effective water holding capacity per unit mass; *RW<sub>m</sub>*:单位质量 最大持水量 Maximum water holding capacity per unit mass; acc: 凋落物的蓄积量 Litter accumulation amount; *cd*: 郁闭度 Crown density; *d*: 凋 落物厚度 Litter thickness; aer: 叶型 Aerofoil; *S*<sub>maxwe</sub>: 土壤最大持水量 Largest water retaining capacity of soil; *S*<sub>pwe</sub>: 土壤毛管持水量 Soil capillary capacity; *S*<sub>ewe</sub>: 土壤田间持水量 Soil field capacity; *R*: 容重 Volume weight; *k*: 总孔隙度 Total porosity; *p*: 毛管孔隙度 Capillary porosity; *f*: 非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; *h*: 土层厚度 The thickness of the layer; \**P*≤0.05; \*\**P*≤0.01; \*\*\* *P*≤0.001

水和水分流失,降低长期持水性能。因此,降雨强度、持续时间和频率等因素共同作用,影响凋落物的吸水性能和滞留能力<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 土壤持水性能的影响因素

土壤容重、孔隙度及田间持水量等特性是影响土壤水分动态变化的关键因素<sup>[44]</sup>。随着土层深度的增加, 土壤容重逐渐增大。主要因为土层加深导致腐殖质和有机物含量减少,进而影响土壤结构的团聚性,使得土 壤容重逐渐增大。研究发现,马尾松林的土壤最大蓄水量(322.46 mm)高于杉木林(297.12 mm)和尾巨桉林 (252.63 mm)。马尾松林地下土壤容重较低,孔隙度较高,表明其具备较强的降雨储存和保肥能力,有助于减轻地表径流,提高水分滞留,并有效减少地下水的侵蚀<sup>[45]</sup>。总孔隙度随土层加深而减小,良好的土壤孔隙结构和疏松的土壤质地有利于水分和养分的运输<sup>[46]</sup>。相关性分析表明,土壤持水性能与容重呈负相关,而与总孔隙度、毛管孔隙度显著正相关,这与马雯静等<sup>[47]</sup>的研究一致。尤其是毛管持水量与总孔隙度的相关性最为显著<sup>[48]</sup>。马尾松林的土壤最大蓄水量为322.46 mm,结合凋落物层的最大蓄水量,总蓄水量为324.49 mm,为各林型中最高,表明人工林类型是影响凋落物和土壤的水源涵养的主要因素<sup>[40]</sup>。因此,合理改善林分结构,特别是选择优势人工林树种,保持适当的凋落物蓄积量,并优化土壤孔隙结构,可有效提升亚热带地区人工林土壤的水分储存能力。

#### 3.3 浸泡法和模拟降雨法对凋落物持水的影响

部分研究表明,在凋落物量和降雨强度相似的条件下,凋落物达到饱和的时间相似<sup>[49]</sup>。然而,在本实验中,相同时间段内,模拟降雨法测得的凋落物持水量明显高于浸泡法(P<0.05)。尾巨桉、马尾松和杉木的模拟降雨持水量分别为浸泡法的136.00%、129.51%和109.41%,这可能是因为模拟降雨法的降雨冲击力减少了 凋落物达到吸水饱和状态所需的时间,导致降雨停止时,凋落物表面残留的水量增加<sup>[24]</sup>。在较大的降雨强度 下,凋落物能够更有效地吸水,尤其是对于含水量较低的凋落物,表现出较强的持水性能<sup>[50]</sup>。大多数研究表 明,24 h 的浸泡法测得的凋落物最大持水量高于 1 h 的模拟降雨法结果,主要因浸泡法无法模拟自然降雨中 雨强逐渐增加的效应,导致其持水量偏高。同时,模拟降雨法通常会使凋落物表面滞留更多水分<sup>[51]</sup>。因此, 降雨持续时间对凋落物持水性能的影响不可忽视<sup>[52]</sup>。在本实验中,由于模拟降雨仅持续 1 h,凋落物未能充 分饱和,其持水性能可能被低估<sup>[3]</sup>。与其他研究一致,长时间的模拟降雨(如 6 h 的实验)有助于凋落物达到 饱和并发挥水文调节功能<sup>[53]</sup>。因此,尽管模拟降雨法能较好地反映降雨特性(包括降雨强度和频率)对凋落 物持水性能的直接影响,未来研究中应考虑延长模拟降雨的时长,以更准确地评估长时间降雨下的凋落物持 水性能。

#### 4 结论

在评估森林凋落物持水性能方面,模拟降雨法能够更准确地模拟雨滴对凋落物的撞击和溅射,并能控制 降雨强度、持续时间和频率,而传统浸泡法易低估凋落物表面水分滞留的效应。因此,本研究建议优先采用模 拟降雨法评估森林凋落物持水性能。凋落物持水量受植被类型、林龄、蓄积量、林分结构及降雨条件(如降雨 强度和持续时间)等因素的影响,特别是降雨强度和持续时间对凋落物持水性能具有显著影响。土壤持水性 能主要受容重和孔隙度的调控。马尾松林土壤孔隙度较高,土壤最大蓄水量最好,而杉木林土壤毛管孔隙度 和田间持水性能表现最佳。综合来看,马尾松林因凋落物累积量最大,其凋落物和土壤层的水源涵养功能在 三种人工林中最优。本研究对比了亚热带地区三种人工林的凋落物和土壤层水源涵养功能差异,为气候变化 背景下亚热带人工林的林分优化和可持续经营提供了数据和理论支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] Gao J, Zhang Y J, Zheng Z T, Cong N, Zhao G, Zhu Y X, Chen Y, Sun Y H, Zhang J S, Zhang Y. Ecological engineering projects shifted the dominance of human activity and climate variability on vegetation dynamics. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2386.
- [2] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [3] Yi C L, Zhao X Y, Feng Y J, Zhang Q M, Zhang W Q, Gan X H, Njoroge B, Liu X D. Regional climax forest has a better water conservation function than pine plantation: A comparative study in humid subtropical China. Catena, 2024, 239: 107935.
- [4] 陈晶亮,杨慧,刘超,王博,黄磊.宁夏罗山自然保护区3种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估.生态学报,2023,43 (19):7987-7997.
- [5] 国家林业和草原局编制.中国森林资源报告-2014—2018.北京:中国林业出版社, 2019.
- [6] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [7] Du J, Niu J Z, Gao Z L, Chen X W, Zhang L, Li X, van Doorn N S, Luo Z T, Zhu Z J. Effects of rainfall intensity and slope on interception and

precipitation partitioning by forest litter layer. Catena, 2019, 172: 711-718.

- [8] De Groen M M, Savenije H H G. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. Water Resources Research, 2006, 42(12): 2006WR005013.
- [9] Bao J W, Sherwood S C, Alexander L V, Evans J P. Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates. Nature Climate Change, 2017, 7(2): 128-132.
- [10] Van Stan J T II, Coenders-Gerrits M, Dibble M, Bogeholz P, Norman Z. Effects of phenology and meteorological disturbance on litter rainfall interception for a Pinus elliottii stand in the Southeastern United States. Hydrological Processes, 2017, 31(21): 3719-3728.
- [11] Coenders-Gerrits M, Sellers B A, Moein Sadeghi S M, John T Van Stan II. Rainfall interception and redistribution by a common North American understory and pasture forb, Eupatorium capillifolium (Lam. dogfennel). Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(9): 4587-4599.
- [12] Ilek A, Kucza J, Szostek M. The effect of stand species composition on water storage capacity of the organic layers of forest soils. European Journal of Forest Research, 2015, 134(1): 187-197.
- [13] Li Y L, Yang F F, Ou Y X, Zhang D Q, Liu J X, Chu G W, Zhang Y R, Otieno D, Zhou G Y. Changes in forest soil properties in different successional stages in lower tropical China. Plos One, 2013, 8(11): e81359.
- [14] Deng W P, Zheng X L, Xiao S S, Chen Q, Gao Y Y, Zhang L, Huang J H, Bai T J, Xie S H, Liu Y Q. Effects of leaf type, litter mass and rainfall characteristics on the interception storage capacity of leaf litter based on process simulation. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129943.
- [15] Li X, Xiao Q F, Niu J Z, Dymond S, McPherson E G, van Doorn N, Yu X X, Xie B Y, Zhang K B, Li J. Rainfall interception by tree crown and leaf litter: An interactive process. Hydrological Processes, 2017, 31(20): 3533-3542.
- [16] Li K F, Zhao L S, Hou R, Fang Q, Fan C H. Effect of leaf distribution pattern on the interception storage capacity of leaf litter under simulated rainfall conditions. Hydrological Processes, 2021, 35(2): e14022.
- [17] Xing Z, Yan D, Wang D, Liu S S, Dong G Q. Experimental analysis of the effect of forest litter cover on surface soil water dynamics under continuous rainless condition in North China. Kuwait Journal of Science, 2018, 45(2).
- [18] 李树宝,张丽娜,王树森,马迎梅,张苗苗,马成功,于胜利.森林经营方式对不同林龄落叶松林枯落物及土壤水源涵养能力的影响.森林工程,2023,39(2):12-21.
- [19] Liu X D, Feng Y J, Liu P L, Zhang Q M, Njoroge B, Zhou Q, Gan X H, Zhang W Q, Li Y L. Soil moisture dominated the temporal dynamics of litter moisture content in subtropical forests: a 7-year observation in South China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 41: 101102.
- [20] Sato Y, Kumagai T, Kume A, Otsuki K, Ogawa S. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers-the effects of rainfall conditions and leaf shapes. Hydrological Processes, 2004, 18(16); 3007-3018.
- [21] 高迪,郭建斌,王彦辉,王晓,马菁,洪流,高艳斌.宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应.林业科学研究,2019,32 (4):26-32.
- [22] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: IV the relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation. Hydrological Processes, 1990, 4(2): 169-188.
- [23] Acharya B S, Stebler E, Zou C B. Monitoring litter interception of rainfall using leaf wetness sensor under controlled and field conditions. Hydrological Processes, 2017, 31(1): 240-249.
- [24] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? Journal of Hydrology, 2015, 525: 737-746.
- [25] 章明奎,姚玉才,邱志腾,毛霞丽,杨良觎.中国南方碳酸盐岩发育土壤的成土特点与系统分类.浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019,45(1):54-65.
- [26] 谭宏伟,杨尚东,吴俊,刘永贤,熊柳梅,周柳强,谢如林,黄国勤,赵其国. 红壤区桉树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较.土壤学报,2014,51(3):575-584.
- [27] Gomyo M, Kuraji K. Effect of the litter layer on runoff and evapotranspiration using the paired watershed method. Journal of Forest Research, 2016, 21(6): 306-313.
- [28] Liu Y X, Shi W J, Tao F, Shi X L, Fu B. A global synthesis of multi factors affecting water storage capacity in forest canopy, litter and soil layers. Geophysical Research Letters, 2023, 50(3): e2022GL099888.
- [29] 林立文,邓羽松,李佩琦,杨钙仁,蒋代华,黄智刚,雷震.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,2020,34 (5):200-207,215.
- [30] Felix R W, Dias A T C, Bevilacqua M S, da Silva M P F, Bozelli R L, de Barros M P F. Litter addition as a tool for restoring hydrological processes and controlling erosion in riparian forests disturbed by fine sediment deposition. Restoration Ecology, 2023, 31(5): e13895.
- [31] Xie J J, Su D R. Water-holding characteristics of litter in meadow steppes with different years of fencing in inner mongolia, China. Water, 2020, 12 (9): 2374.

- [32] Zhao L S, Hou R, Fang Q. Differences in interception storage capacities of undecomposed broad-leaf and needle-leaf litter under simulated rainfall conditions. Forest Ecology and Management, 2019, 446: 135-142.
- [33] Issa O M, Valentin C, Rajot J L, Cerdan O, Desprats J F, Bouchet T. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. Geoderma, 2011, 167: 22-29.
- [34] De Long J R, Dorrepaal E, Kardol P, Nilsson M C, Teuber L M, Wardle D A. Understory plant functional groups and litter species identity are stronger drivers of litter decomposition than warming along a boreal forest post-fire successional gradient. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 159-170.
- [35] Zhang Y L, Tian L L. Dynamic changes in moisture content and applicability analysis of a typical litter prediction model in Yunnan Province. PeerJ, 2021, 9; e12206.
- [36] Mo F, Yu P T, Wang Y H, Wang J, Xiong W, Xu L. The water-holding capacity of litter layers in the forests of Larix principis-rupprechtii and Betula albo-sinensis in Liupan Mountain and their rainfall interception process. Acta Ecol Sin, 2009, 29(6): 2868-2876.
- [37] 周弘愿. 桂西南巨尾桉人工林凋落物量及养分动态特征[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [38] Zagyvai-Kiss K A, Kalicz P, Szilágyi J, Gribovszki Z. On the specific water holding capacity of litter for three forest ecosystems in the eastern foothills of the Alps. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107656.
- [39] 张振明, 余新晓, 牛健植, 鲁绍伟, 宋维峰, 刘秀萍, 张颖. 不同林分枯落物层的水文生态功能. 水土保持学报, 2005, 19(3): 139-143.
- [40] Zhao L S, Meng P, Zhang J S, Zhang J X, Sun S J, He C X. Effect of slopes on rainfall interception by leaf litter under simulated rainfall conditions. Hydrological Processes, 2022, 36(8): e14659.
- [41] 党毅, 王维, 余新晓, 贾国栋, 樊登星. 北京西山典型人工林分枯落物层生态水文效应. 北京林业大学学报, 2022, 44(12): 72-87.
- [42] Cui Y S, Pan C Z. Hydrological responses to litter density on runoff-infiltration patterns and water conservation in Pinus tabuliformis plantation. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129293.
- [43] Gerrits A M J, Pfister L, Savenije H H G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. Hydrological Processes, 2010, 24(21): 3011-3025.
- [44] Sure A, Dikshit O. Estimation of root zone soil moisture using passive microwave remote sensing: A case study for rice and wheat crops for three states in the Indo-Gangetic basin. Journal of Environmental Management, 2019, 234; 75-89.
- [45] Luo Z D, Lian J J, Nie Y P, Zhang W, Wang F, Huang L, Chen H S. Improving soil thickness estimations and its spatial pattern on hillslopes in Karst forests along latitudinal gradients. Geoderma, 2024, 441: 116749.
- [46] Qu W, Bogena H R, Huisman J A, Vanderborght J, Schuh M, Priesack E, Vereecken H. Predicting subgrid variability of soil water content from basic soil information. Geophysical Research Letters, 2015, 42(3): 789-796.
- [47] 马雯静,曾倩婷,郑江坤,侯贵荣.北京山区典型林分枯落物层和土壤层水文效应.人民长江,2020,51(10):67-72.
- [48] Gwak Y, Kim S. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. Hydrological Processes, 2017, 31(2): 431-445.
- [49] Rajão P H M, Berg M P, Cornelissen J H C, Dias A T C. The effects of leaf traits on litter rainfall interception with consequences for runoff and soil conservation. Journal of Ecology, 2023, 111(12): 2662-2675.
- [50] 卢洪健,李金涛,刘文杰.西双版纳橡胶林枯落物的持水性能与截留特征.南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(4):67-73.
- [51] Wu H F, Hu B A, Yan J X, Cheng X Q, Yi P H, Kang F F, Han H R. Mixed plantation regulates forest floor water retention and temperature sensitivity in restored ecosystems on the Loess Plateau, China. Catena, 2023, 222: 106838.
- [52] Li Q W, Lee Y E, Im S J. Characterizing the interception capacity of floor litter with rainfall simulation experiments. Water, 2020, 12(11): 3145.
- [53] Guevara-Escobar A, Gonzalez-Sosa E, Ramos-Salinas M, Hernandez-Delgado G D. Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(5): 1703-1716.