

引用格式: 陈鹏宇, 范金花, 孙守琴. 川西贡嘎山林下地被层截留特征: 枯落物、苔藓及其混合体的比较研究[J]. 山地学报, 2025, 43(4): 518-529.

CHEN Pengyu, FAN Jinhua, SUN Shouqin. Rainfall interception characteristics of understory layer in the Gongga Mountain, western Sichuan: A comparative study on litter, moss, and their mixtures [J]. Mountain Research, 2025, 43(4): 518-529.

川西贡嘎山林下地被层截留特征: 枯落物、苔藓及其混合体的比较研究

陈鹏宇, 范金花, 孙守琴*

(四川大学 a. 山区河流保护与治理全国重点实验室; b. 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 林下地被层的降雨截留功能, 在森林水文循环过程发挥关键作用。既有研究多针对单一枯落物/苔藓开展, 难以真实反映地被层整体的截留特性。本研究以川西贡嘎山暗针叶林和阔叶林地被层(枯落物层、苔藓层、苔枯层(苔藓-枯落物复合层))为研究对象, 通过人工模拟降雨实验, 比较不同地被类型的截留量, 并探讨影响其截留能力的主要因素。结果表明, (1) 枯落物和苔枯层的截留过程可分为快速湿润、缓慢增长和饱和稳定三个阶段; 苔藓层的截留分为快速湿润和缓慢增长两个阶段。坡度越大, 地被层达到饱和和所需时间越长。(2) 降雨后期, 苔枯层和枯落物层的截留速率逐渐减小至零, 而苔藓层在 2~5 h 内保持相对恒定的低速率。苔枯层在短期内具有较强的拦截降雨能力, 苔藓在长历时降雨中表现出更大的截留潜力。(3) 除苔藓层外, 各类地被层的最大截留量 C_{max} 由大到小依次为苔枯层、针叶枯落物层、阔叶枯落物层。所有地被层 C_{max} (最大截留量) 均与雨强呈正相关, 与坡度呈负相关。相同雨强和坡度条件下, 针叶林地被层的 C_{max} 可达阔叶林地被层的 4.2~5.4 倍, 苔枯层 C_{max} 约为针叶枯落物的 1.3 倍。(4) 雨强与暗针叶林枯落物及苔枯层 C_{max} 的相关性最强 ($P < 0.01$), 坡度与苔藓层和阔叶林枯落物 C_{max} 的相关性最强 ($P < 0.01$)。蓄积量是影响贡嘎山地被层截留能力的关键因子, 其次是坡度。(5) 基于上述发现, 建议在森林经营实践中根据林分类型与地形条件制定差异化的枯落物蓄积量管理策略, 优化地被物组成, 以最大化其生态水文效益。本研究可为理解亚高山森林水文过程提供数据支撑, 并为长江上游水源涵养管理提供参考。

关键词: 贡嘎山; 亚高山森林; 地被层; 苔藓; 枯落物; 人工模拟降雨; 截留

中图分类号: S715-3

文献标志码: A

降雨截留是森林水文循环的重要环节, 它包括林冠层、林下地被植物以及地表枯落物对雨水的滞留及后续蒸发过程^[1], 其动态特征受降雨频率、降雨强度以及森林结构的影响^[2]。由林下地被植物和地表枯落物组成的地被层, 具有突出的降雨截留能力, 其在调节径流、降低土壤侵蚀等方面发挥重要的生态功能^[3-4], 是驱动森林水文循环过程的关键

组分。例如, Tsiko^[5]等的研究表明, 热带稀树林林下地被物截留量可占降雨量的 14%; Floriancic^[6]等通过对比有无枯落物覆盖条件下降雨前后土壤含水率差异, 发现枯落物可拦截和蒸发约 24% 的降水。

在亚高山森林生态系统中, 枯落物和苔藓是两种关键的地被类型, 其降雨截留作用一直是生态水文领域研究的焦点。枯落物的雨水截留能力受降雨

收稿日期 (Received date): 2025-04-20; 改回日期 (Accepted date): 2025-08-22

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42273081)。[National Natural Science Foundation of China (42273081)]

作者简介 (Biography): 陈鹏宇 (2004-), 男, 本科生, 主要研究方向: 生态水文。[CHEN Pengyu (2004-), male, B. S. candidate, research on eco-hydrology] E-mail: chenpengyu7@stu.scu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 孙守琴 (1980-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 生态水文。[SUN Shouqin (1980-), female, Ph. D., professor, research on eco-hydrology] E-mail: shouqinsun@scu.edu.cn

强度^[7-9]、坡度^[8]、枯落物种类^[7, 9-10]、蓄积量^[7]等因素影响。苔藓雨水截留能力与蓄积量^[11]、降雨强度和坡度^[12]、初始湿度^[13]以及苔藓结构特征^[14]等有关。在自然条件下, 枯落物与苔藓相互交织重叠, 形成具有一定功能结构的覆盖层(苔枯层)^[15], 其综合持水特性与单一枯落物/苔藓的截雨功能存在差异^[16-17]。然而, 目前多数研究将两者分开测定, 较少关注苔枯层整体的雨水截留量化特征, 尤其是降雨强度、坡度和蓄积量等因子对地被物截留能力的综合影响机制尚未完全阐明。

浸水法^[15-17]是地被物雨水截留能力的常用测定方法, 用于度量地被层在充分静态饱水条件下的最大持水量。但由于该方法条件理想, 难以反映自然降雨过程中的动态截留。相比之下, 人工模拟降雨法则能够更真实地模拟地被层在自然降雨条件下的水文响应过程。

川西亚高山针叶林带是中国第二大林区——西南林区的主体, 承担着重要的水源涵养功能, 林下苔藓与枯落物蓄积丰富^[18]。本研究以川西亚高山阔叶林和暗针叶林为对象, 针对其枯落物、苔藓层及苔枯层, 通过人工模拟降雨试验, 比较不同地被类型的截留量, 并探讨影响其截留能力的主要因素。结果有助于深化对亚高山森林水文过程与地被物的相互作用机制的认识, 并为长江上游山地水资源的科学管理提供理论基础与数据支撑。

1 研究区概况

本研究于四川省泸定县贡嘎山东坡(29°20′~30°20′N, 101°30′~102°15′E)开展。该区地处青藏高原东南缘, 以亚热带季风气候为主, 干季(11月至次年4月)与湿季(5—10月)分明, 其中海拔3000 m处年平均降雨量1947.7 mm, 年平均气温4.2℃。该地区在28 km的水平距离下形成了近6400 m的相对高差, 具有较为完整的植被垂直带谱, 其中常绿阔叶林区海拔1900~2400 m, 林下枯落物蓄积丰富, 年蓄积量达3811.017 kg·hm⁻²^[18], 但苔藓覆盖度很低; 暗针叶林区海拔2800~3600 m, 优势树种为峨眉冷杉(*Abies fabri*), 林下枯落物年蓄积量为2809.925 kg·hm⁻²^[18], 且林下苔藓分布广泛, 物种多样性丰富, 盖度约为70%^[19], 包括塔藓(*Hylocomium splendens*)和锦丝藓(*Actinothuidium hookeri*)等。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

于2021年12月分别在海拔3100 m处的峨眉冷杉针叶林和海拔2100 m处的阔叶林各布设一个20 m×20 m的研究样地。在每个样地内, 按对角线法设置五个50 cm×50 cm的样方, 并于2022年7月进行地被物样品采集。鉴于全分解枯落物基本无法截留雨水, 而未分解和半分解枯落物构成贡嘎山枯落物层截留的主体, 且两者在自然状态下难以物理剥离, 本研究将未分解和半分解枯落物作为一个整体(即枯落物层)进行截留特征测定。根据实地地被覆盖情况, 在暗针叶林样地采集枯落物层、苔藓层及两者交织形成的苔藓-枯落物复合层(苔枯层)样品, 在阔叶林仅采集枯落物层样品。将采集好的样品带回实验基地, 均匀铺展于定制实验筛中。为模拟野外实际状态, 用塑料板对枯落物样品轻柔按压, 使其厚度恢复至野外调查时的实测厚度; 苔藓层样品则保持其自然蓬松结构, 不做按压处理。所有样品在模拟降雨实验开始前, 均在自然条件下晾干至表面无明显水分, 以消除不同初始含水量差异对实验结果的影响。

2.2 实验装置与测试准备

实验装置由人工模拟降雨系统、定制实验筛和雨量监测系统三部分组成(图1)。其中, 人工模拟降雨系统为新汇泽测控技术有限公司生产的XHZ-JY102模拟降雨系统, 包括降雨系统控制操作台、水泵、压力管道、三组可调式喷头及1 t容量的水箱, 能够稳定输出预设强度的降雨。定制实验筛采用314不锈钢制成(尺寸: 长2 m、宽1 m、深0.5 m)。实验筛后支架高度可调, 用于模拟不同坡度。在深度0.25 m处安装一个5 cm×5 cm孔径的金属网, 将筛体分为上下两部分。金属网上方铺设一层孔径2 mm的金属纱网, 用于承载地被物样品并防止渗漏。金属网下方固定有集水槽, 分别收集穿透地被层的水流(垂向流)和沿坡面流出的水流(侧向流)。垂向流和侧向流出水口均通过管道连接至翻斗式自记雨量计。为防止雨水干扰, 雨量计上部加盖塑料防护盖。雨量计数据由雨量监测站自动记录, 设定记录间隔为1 min, 用于精确获取侧向流和垂向流的动态流量。

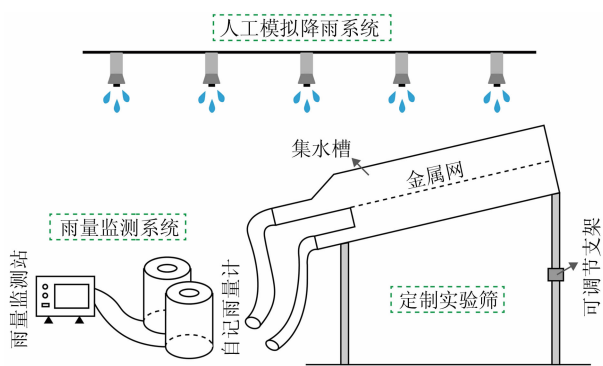


图1 人工模拟降雨实验装置

Fig. 1 Artificial simulation rainfall experimental device

2.3 实验设置与截留特征测定

根据贡嘎山暗针叶林和阔叶林带地形特征^[11, 20], 实验设置 0° (平地)、 10° (缓坡) 和 20° (陡坡) 三种坡度。根据中国科学院贡嘎山高山生态系统观测试验站 1999—2019 年降水观测数据 (历史最大降雨强度 $58.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 及近五年数据 (最大降雨强度 $24.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 并参考 Yang^[21] 等关于贡嘎山暗针叶林穿透雨的研究结果, 最终确定实验的最大和最小降雨强度分别为 $48 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。结合设备性能 (精度与稳定性) 及研究目的, 设置 20、28、35、42、48 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 共五个降雨强度梯度。所有降雨历时统一设定为 5 h。

地被层的累积截留量根据所测得不同时刻的降雨量、侧向流和垂向流按照水量平衡方程计算。每次模拟降雨实验前后, 分别在实验筛上坡、中坡、下坡三个点位设置 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的小样方, 称量其承载的地被物样品重量, 并将降雨后样品平均饱和重量与降雨前样品平均风干重量之差定义为最大截留量 C_{max} 。

2.4 数据处理

记录降雨截留量并计算截留速率、最大截留量等统计数据, 并绘制装置示意图。采用 Origin 2024 绘制数据分析图并进行斯皮尔曼相关性分析, 采用 SPSS 27 对四种地被层在不同坡度和平均雨强下的截留过程和截留速率变化过程进行非线性回归分析, 利用 RStudio 对主要环境因子进行方差分解分析。

3 结果与分析

3.1 不同类型地被层降雨截留动态差异

暗针叶林中, 枯落物和苔枯层的雨水截留量在

降雨初始的 0 ~ 30 min 内迅速增加, 30 min 时累积截留量均值分别达 3.23 和 4.03 mm (图 2)。阔叶林枯落物层的雨水截留量在 0 ~ 20 min 内快速增长, 20 min 时累积截留量均值为 1.12 mm。随降雨历时延长, 所有枯落物和苔枯层截留量增长速率均逐渐放缓。其累积截留过程可划分为三个典型阶段: 快速湿润期 (截留量急剧增加)、缓慢增长期 (增速显著降低) 和饱和稳定期 (截留量基本不再增加)。总体而言, 当降雨历时超过 5 h 后, 枯落物层和苔枯层的截留量均趋于稳定, 表明达到饱和状态。

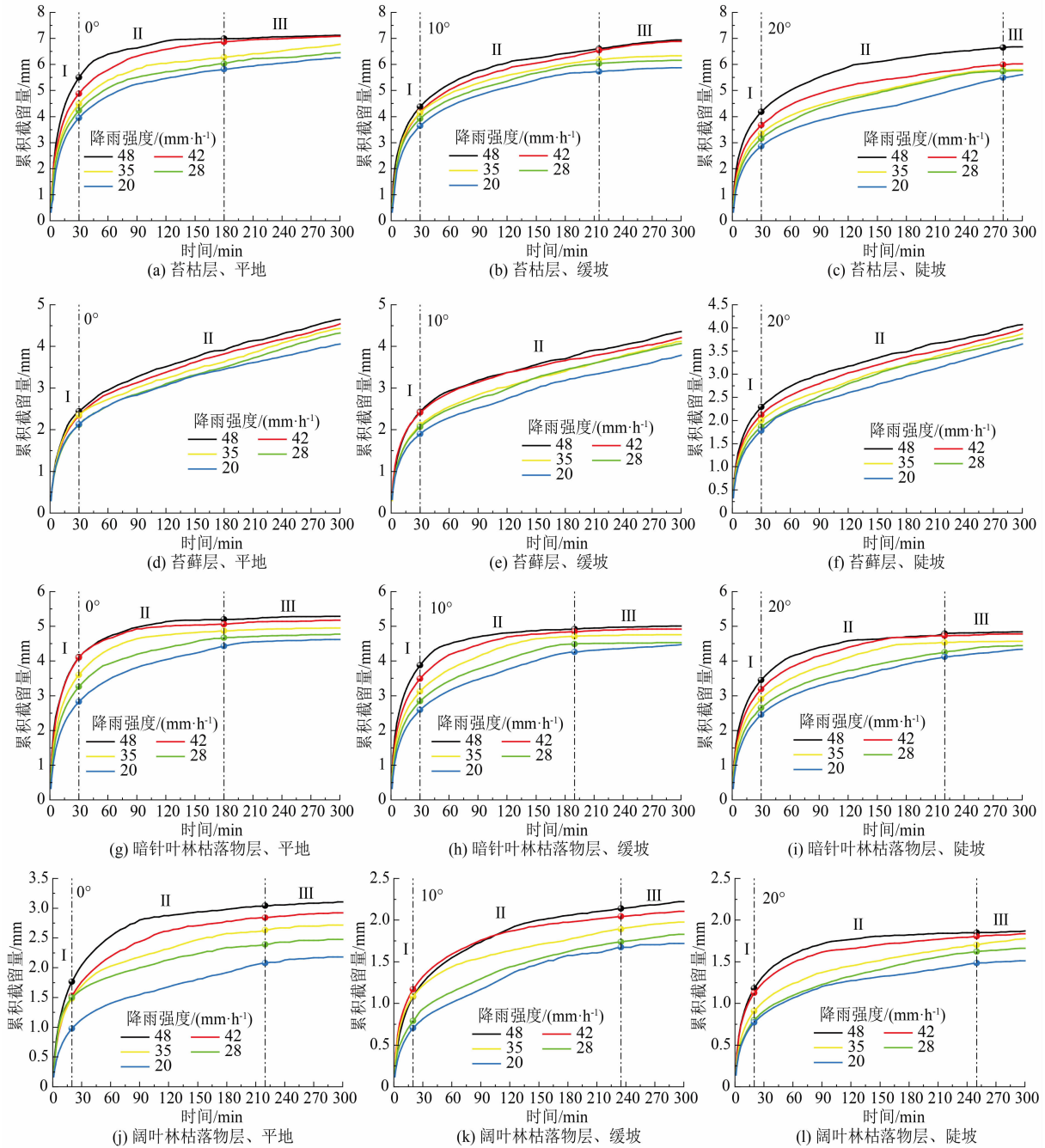
苔藓层的雨水截留量在降雨初期 (0 ~ 30 min) 也快速增加。然而, 与枯落物层和苔枯层不同, 在后续的降雨过程中 (> 30 min), 苔藓层的截留量并未表现出明显的饱和趋势, 而是以相对恒定的较低速率持续增加 (图 2)。苔藓层的雨水截留过程整体上分为快速增长期和持续缓慢增长期两个阶段。

地被层的截留动态受地被类型、坡度、降雨强度的共同影响。相同降雨强度下, 坡度越小, 地被层达到饱和所需的时间越短。例如, 在 $48 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下, 当坡度为 0° 时, 针叶枯落物和苔枯层达到饱和的时间仅为 180 min, 而阔叶枯落物层约需要 220 min; 坡度为 20° 时, 针叶枯落物、苔枯层和阔叶枯落物层达到饱和的时间分别延长至 220、280 和 250 min。

3.2 不同类型地被层降雨截留速率差异与截留过程模拟

不同地被类型和不同截留阶段的降雨截留速率存在显著差异 (图 3)。在降雨初始的快速湿润期, 各类型地被层均表现出最高的瞬时截留速率。此后, 截留速率随时间迅速下降, 速率变化范围分别为: 针叶苔枯层 ($0.576 \sim 0.035 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、苔藓层 ($0.400 \sim 0.019 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、针叶枯落物 ($0.576 \sim 0.029 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、阔叶枯落物 ($0.234 \sim 0.016 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。进入缓慢增长期后, 苔藓层的截留速率约在 120 min 后趋于稳定, 维持在 $0.004 \sim 0.007 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的较低水平; 而枯落物与苔枯层的截留速率则继续缓慢下降, 直至进入饱和稳定期后逐渐趋于零。

在快速湿润期, 不同类型地被层的平均截留速率由大到小表现为苔枯层、暗针叶林枯落物层、苔藓层、阔叶林枯落物层。约 90 min 后, 苔藓层的截留速率开始超过针叶枯落物层, 表明在长历时降雨后



说明: I. 快速湿润期; II. 缓慢增长期; III. 饱和稳定期。

图 2 不同地被层累积截留动态

Fig. 2 Dynamic interception process of different understory layers

期,苔藓具有更强的持续截留能力。总体上,阔叶枯落物层的截留速率最小,苔枯层的截留速率最大。坡度对同一地被层的截留速率影响不显著(图 3)。

对五种雨强下、不同坡度综合后的平均累积截留量和瞬时截留速率分别与降雨历时进行非线性回归分析,结果表明累积截留量随历时的变化符合对

数函数关系 ($P < 0.001$),瞬时截留速率随历时的变化符合幂函数关系 ($P < 0.001$),拟合公式如下:

$$I = a \ln t + b \tag{1}$$

$$V = c \cdot t^d \tag{2}$$

式中, I 为各类型地被层的累积截留量; V 为各类型地被层的瞬时截留速率; t 为降雨历时; a 、 b 、 c 、 d 为

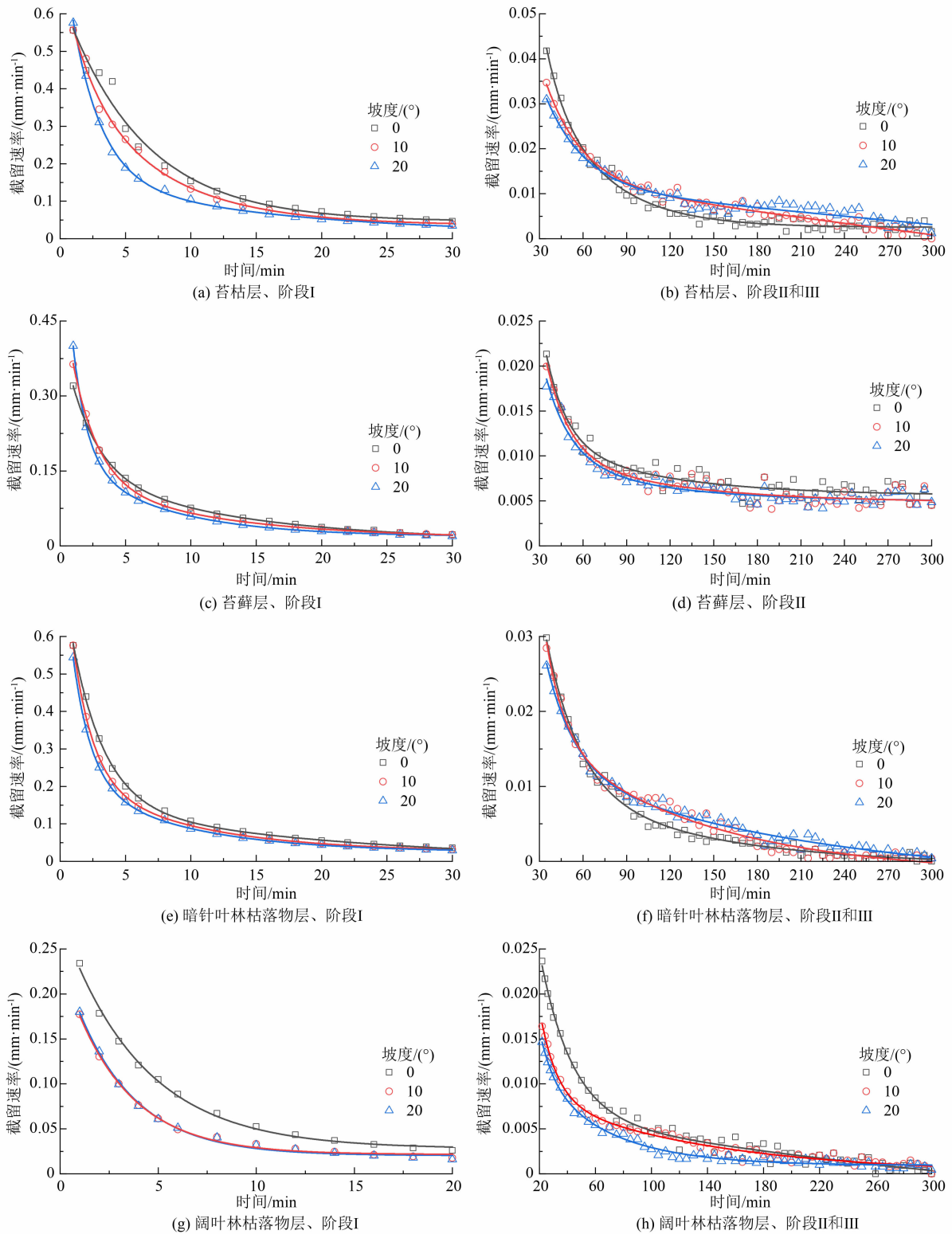


图3 各地被层在不同坡度下的平均截留速率

Fig. 3 Average interception rate of all understory layers under different slope gradients

常数。拟合结果分别见表1与表2。

由表1和表2可知,累积截留量对数模型的拟合优度(R^2)为0.977~0.999,截留速率幂函数模型

的 R^2 值为0.915~0.998,表明所选模型能很好地描述累积截留量和截留速率随降雨历时的动态变化规律。

表 1 各地被层累积截留量与降雨历时的关系
Tab. 1 Relationship between cumulative interception amount and interception time of each understory layer

地被组分	坡度/(°)	拟合方程	R ²
暗针叶林 苔枯层	0	$I = 1.118 \ln t + 0.624$	0.984
	10	$I = 1.099 \ln t + 0.303$	0.999
	20	$I = 1.017 \ln t + 0.084$	0.995
苔藓层	0	$I = 0.755 \ln t - 0.207$	0.980
	10	$I = 0.688 \ln t - 0.073$	0.983
	20	$I = 0.640 \ln t - 0.061$	0.977
暗针叶林 枯落物层	0	$I = 0.793 \ln t + 0.725$	0.978
	10	$I = 0.786 \ln t + 0.478$	0.991
	20	$I = 0.769 \ln t + 0.329$	0.997
阔叶林 枯落物层	0	$I = 0.466 \ln t + 0.076$	0.998
	10	$I = 0.348 \ln t - 0.031$	0.992
	20	$I = 0.287 \ln t + 0.109$	0.999

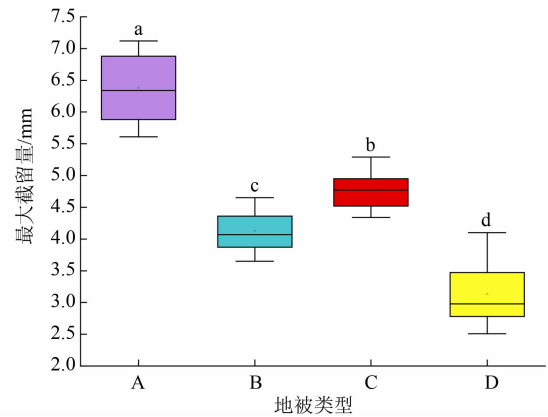
表 2 各地被层截留速率与降雨历时的关系
Tab. 2 Relationship between interception rate and interception time of each understory layer

地被组分	坡度/(°)	拟合方程	R ²
暗针叶林 苔枯层	0	$V = 0.676t^{-0.675}$	0.915
	10	$V = 0.650t^{-0.709}$	0.950
	20	$V = 0.627t^{-0.774}$	0.982
苔藓层	0	$V = 0.356t^{-0.699}$	0.974
	10	$V = 0.391t^{-0.764}$	0.986
	20	$V = 0.407t^{-0.841}$	0.998
暗针叶林 枯落物层	0	$V = 0.637t^{-0.774}$	0.973
	10	$V = 0.608t^{-0.814}$	0.990
	20	$V = 0.568t^{-0.822}$	0.993
阔叶林 枯落物层	0	$V = 0.264t^{-0.712}$	0.965
	10	$V = 0.193t^{-0.753}$	0.983
	20	$V = 0.197t^{-0.776}$	0.978

3.3 各地被层最大截留量及其主要影响因素

地被层最大截留量 C_{max} 随地被层类型、降雨强度和坡度的变化而显著不同。不同地被类型间的 C_{max} 差异显著(图 4)。整体上, 苔枯层的 C_{max} 最高(5.61 ~ 7.12 mm), 其次是针叶枯落物层(4.34 ~ 5.29 mm), 阔叶枯落物层的 C_{max} 最低(2.51 ~ 4.10 mm)。坡度一定时, 随降雨强度增大, 各地被

层 C_{max} 逐渐增大; 同样, 雨强一定时, 坡度越大, 地被层所能截留的最大雨量越小(图 5)。相同降雨历时、强度和坡度条件下, 针叶林地被层的 C_{max} 可达阔叶林地被层的 4.2 ~ 5.4 倍; 苔枯层最大截留量约为针叶枯落物层的 1.3 倍。



说明: a、b、c、d 分别表示不同地被层最大截留量 (C_{max}) 的种间差异。A. 苔枯层; B. 苔藓层; C. 暗针叶林枯落物; D. 阔叶林枯落物。

图 4 各地被层最大截留量差异

Fig. 4 Differences of maximum interception capacity of each understory layer

斯皮尔曼相关性分析表明(表 3), 各地被层 C_{max} 与降雨强度呈显著正相关, 与坡度呈显著负相关。不同地被类型 C_{max} 对两个环境因子的响应强度不同: 对于针叶枯落物和苔枯层, C_{max} 与降雨强度的相关性最为显著 ($P < 0.01$), 表明降雨强度是影响其最大截留量的主要环境驱动因子。对于阔叶枯落物和苔藓层, C_{max} 与坡度的负相关性最强 ($P < 0.01$), 表明坡度是影响其最大截留量的主导环境因子。

表 3 各地被层最大截留量与降雨强度、坡度的相关性分析
Tab. 3 Correlation analysis between maximum interception capacity of each understory layer and rainfall intensity or slope

地被类型	与 C_{max} 的相关性系数	
	雨强	坡度
苔枯层	0.72 **	-0.66 **
苔藓层	0.63 *	-0.75 **
暗针叶林枯落物层	0.83 ***	-0.53 *
阔叶林枯落物层	0.51	-0.84 ***

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$ 。

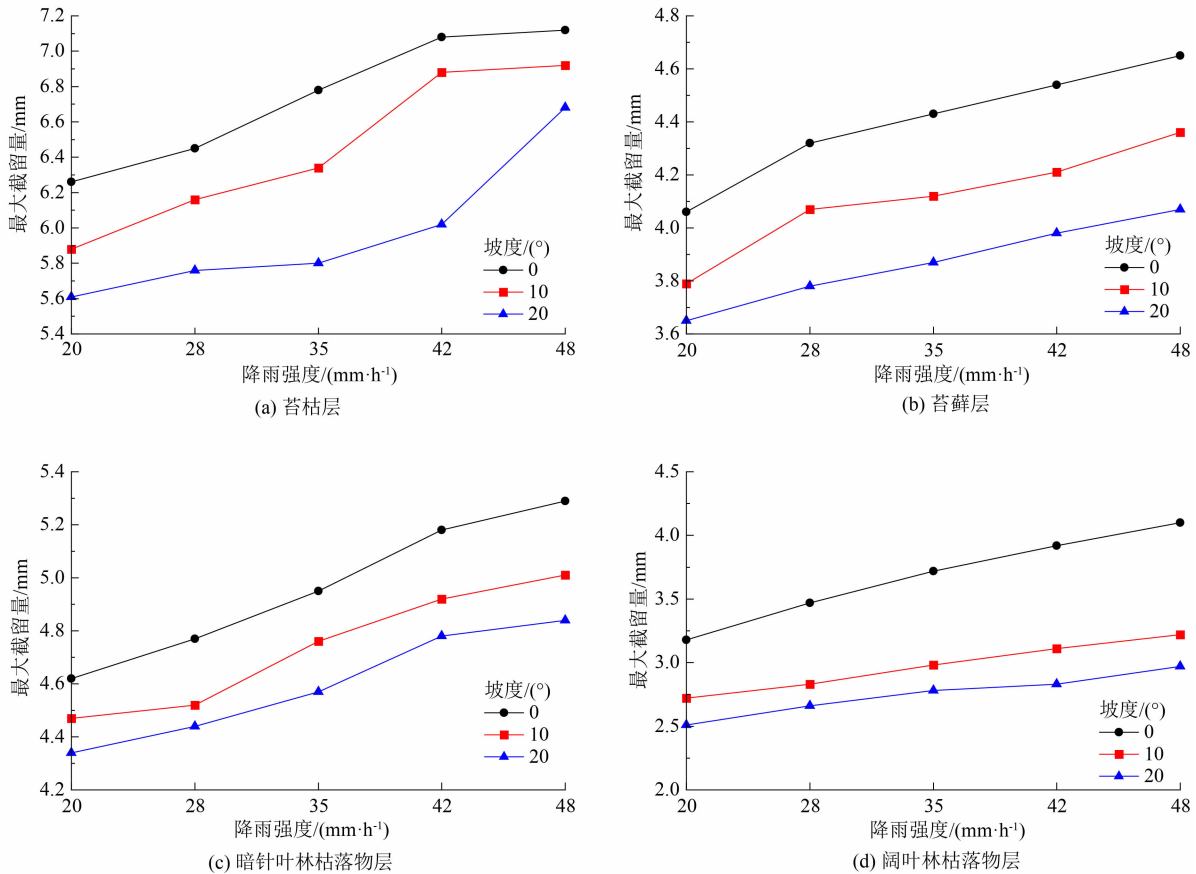


图5 各地被层最大截留量随降雨强度和坡度的变化

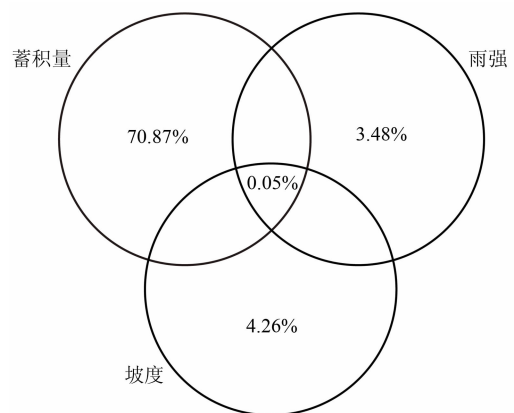
Fig. 5 Variation of maximum interception capacity of each understory layer with rainfall intensity and slope

综合考虑蓄积量^[15]、雨强、坡度三个主要环境因子对 C_{\max} 的影响,进行方差分解分析。结果表明(图6),蓄积量对 C_{\max} 变异的独立解释度最高,达70.87%,是影响贡嘎山地被层截留能力的最主要因子。坡度(4.26%)和降雨强度(3.48%)的独立解释度相对较低。三种因素间两两交互作用及三者交互对 C_{\max} 的影响均不显著,表明各环境变量对 C_{\max} 的影响基本相互独立,因此无需探究降雨强度、坡度与蓄积量之间的交互作用。

4 讨论

4.1 亚高山森林地被层截留特征

现有关于森林地被层降雨截留过程的研究通常将其划分为二至四个阶段。例如,齐记^[22]等观察到枯落物截留过程包括迅速吸收、缓慢吸收、逐渐饱和与饱和四个阶段,相比于本研究结果增加了达到完全饱和的过程,这是由于其设置的高降雨强度



说明:蓄积量数据引用相同研究样地的研究结果^[15]。

图6 地被层最大截留量主要影响因素的方差分解分析

Fig. 6 Variance partitioning analysis (VPA) of main influencing factors on the maximum interception capacity of understory layers

($300 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)以及长降雨历时(8 h),使所有类型枯落物均能在240 min后达到自身的最大持水量。而党毅^[23]等和Du^[8]等则将枯落物层的降雨截留过程分为快速吸水湿润和缓慢增长两个阶段,原因在

于其设置的降雨历时仅为 60 min, 缺乏使枯落物层达到饱和的时间条件。而本研究设置的降雨强度为 $20 \sim 48 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 降雨历时为 5 h。在此条件下, 阔叶林枯落物层、暗针叶林枯落物层及苔枯层的截留过程可分为快速湿润、缓慢增长和饱和稳定三个阶段。其中, 针叶林枯落物及苔枯层、阔叶林枯落物的快速湿润时间分别为 $0 \sim 30 \text{ min}$ 和 $0 \sim 20 \text{ min}$ 。这一结果与莫菲^[24]的研究基本一致, 其将枯落物截持过程分为迅速吸收 ($0 \sim 0.5 \text{ h}$)、缓慢吸收 ($0.5 \sim 3 \text{ h}$)、逐渐饱和 ($3 \sim 8 \text{ h}$) 三个阶段。总体而言, 截留阶段的划分受实验设置的降雨历时、降雨强度、地被层类型等因素影响显著。因此, 在进行人工模拟降雨时, 需谨慎选择降雨历时、强度、坡度等参数, 以获得更准确的截留特征描述。

地被层的截留速率变化与截留阶段的划分密切相关, 其变化主要受地被物表面分子吸附力的限制^[23]。本研究中枯落物和苔枯层截留速率的变化规律与党毅^[23]等的结果相符。在迅速湿润阶段, 地被层主要依靠表面分子吸附力快速吸收和截持雨水。随地被层含水量迅速增加, 其内部层水势差急剧减小, 导致截留速率显著下降。

值得注意的是, 苔藓层的截留动态明显区别于其他三种地被层。在长达 5 h 的降雨条件下, 苔藓层并未表现出趋于饱和的迹象, 其截留速率也未趋近于零, 表明其达到饱和需更长的降雨历时。周碧莲^[12]等在 8 h 的模拟降雨中也观察到苔藓层未饱和的现象, 其在 $15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下测得的最大截留量为 $24.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (相当于 2.406 mm), 降雨结束时的截留速率约为 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (相当于 $0.005 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。该研究中苔藓层的最大截留量低于本实验在 5 h 内观测到的值, 可能主要有两方面原因。首先, 其所选祁连山研究样地的苔藓蓄积量高于贡嘎山样地, 导致其达到饱和和所需的总降雨量更大; 其次, 其实验设置的降雨强度较低 (最大仅 $15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 因此在 8 h 内的总降雨量较少, 相应地截留量较小。与枯落物层等死地被物相比, 苔藓层更不易饱和, 这可能与独特的物理特性有关。一方面, 苔藓具有丰富的毛细孔隙结构^[25], 在毛细作用下表现出较强的吸水能力, 能够截持大量雨水; 另一方面, 苔藓下层密集交织的假根形成弱透土层, 延长了水分在苔藓层内部的滞留时间, 促进水分充分吸收。相比之下, 苔枯层在降雨后期截留速率趋

于零, 并非像苔藓层那样维持相对稳定, 这可能是苔枯层整体存在某种机制^[17], 使其比苔藓层更易达到饱和状态。综合研究结果, 苔藓与枯落物结合似乎能将苔藓的长期截留潜力转化为苔枯层在短期内拦截大量雨水的力量。

4.2 亚高山地被层最大截留量及其影响因素

本研究中, 暗针叶林枯落物层的截留能力整体优于阔叶林枯落物层。然而, 关于针叶林和阔叶林枯落物截留能力的比较, 目前的研究结论尚存分歧。部分研究认为阔叶林枯落物的截留能力更强^[26], 主要基于其叶片通常具有更大的比表面积和大量的表面凹凸结构, 有利于储存降水^[27-28]; 持续降雨带来的水分压力可使阔叶枯落物层逐渐压实, 限制水分向下的垂向渗透流损失。而针叶林枯落物 (如马尾松^[10]、刚松^[9]等) 通常孔隙度较大, 其疏松多孔的结构利于雨水快速下渗至底层, 形成较大的垂向渗透流损失。然而, 也有研究支持针叶林枯落物截留能力更强。例如, Zhao^[28]等发现针叶枯落物平均截留量是阔叶枯落物的 2.08 倍。Li^[9]等也观察到杉松 (松科冷杉属针叶) 枯落物的最大截留量高于阔叶枯落物, 并归因于其较低的孔隙度、针叶表面对水分子更强的吸附力, 以及对水分垂向下渗产生更大阻力, 使得水流在缓慢下渗过程中能更充分地填充持水孔隙。

本研究结果 (图 6) 表明, 蓄积量是影响贡嘎山地地被层截留能力的关键因子, 枯落物层截留量与其质量呈正相关关系^[10]。参考同一样地的地被层蓄积量数据^[15], 暗针叶林未/半分解层蓄积量 ($8.28 \pm 1.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 大于阔叶林 ($7.36 \pm 1.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 这可能是导致暗针叶林枯落物层截留量更大的主要原因。此外, 在坡地条件下, 阔叶枯落物层类似于“托盘”^[28], 其储存的雨水易在重力作用下沿坡面向下汇集, 增加侧向流损失。同时, 峨眉冷杉枯落物的叶形和堆积结构与杉松相似, 整体较为紧实, 在持续降雨中可能更有利于持水孔隙的充分填充, 这也是导致本研究中针叶林枯落物截留量较大的一个潜在因素。总体而言, 针叶林与阔叶林枯落物的截留能力表现出一定的空间异质性, 评价时需综合考虑枯落物叶形^[23]、孔隙度^[9]、蓄积量及地形条件 (坡度) 等多种因素。

值得注意的是, 苔枯层的最大截留量并非简单等于苔藓层与暗针叶林枯落物层最大截留量之和,

而是小于两者之和。这一结果与范金花^[15]等的浸水实验结果不同。这可能是降雨过程中,上层苔藓吸水增重后对下层枯落物产生压实作用,破坏了其层间有效的持水孔隙结构,导致整体密度增加、孔隙度减小。这使得储存的水分更容易通过垂向渗漏或沿坡侧向路径流失,从而降低截留效率。这一发现表明,将苔藓和枯落物单独剥离研究可能会高估地被层的实际截留效果。

本研究观察到各地被层最大截留量(C_{\max})均与降雨强度呈显著正相关,与坡度呈显著负相关,这与前人研究结论一致^[7-8, 29]。然而,不同地被层 C_{\max} 对降雨强度和坡度的响应程度存在显著差异:暗针叶林枯落物 C_{\max} 与降雨强度的相关性最强,而阔叶林枯落物层 C_{\max} 与坡度的相关性最强。参考已有研究,在低于 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降雨强度下,阔叶林枯落物层比针叶枯落物层更容易产生侧向流^[30]。阔叶枯落物层通常呈层状堆积,层间孔隙横向连通性较好,且在持续雨滴击打下易形成多叶堆叠覆盖结构^[28],限制雨水垂向下渗。因此,当存在坡度时,其蓄积在凹陷处的水分易在重力作用下沿坡面形成侧向流排出^[10]。而针叶枯落物层的多孔堆积结构使其孔隙的纵向连通性更佳,雨水优先垂向下渗,使下层枯落物得以充分截持,受坡度影响相对更小^[26]。苔藓层 C_{\max} 与坡度的相关性最强,可能是因为相当一部分雨水尚未完全进入苔藓层即已沿坡面流失^[12]。

本研究采用的人工模拟降雨法虽比室内浸水法更能反映自然降雨下的地被层截留特性,但仍存在局限性,无法完全模拟自然降雨过程中的复杂因素(如风速、温度变化)。此外,由于实验中苔藓层并未达到饱和,其报告的最大截留量实为5 h降雨过程观测到的最大值,而非真实的饱和持水能力。未来研究可延长苔藓层的降雨历时直至饱和,以更全面评估其截留潜力。本实验将苔藓铺满实验筛(模拟100%盖度),而自然状况下暗针叶林下部分区域苔藓覆盖并非完全连续。因此,实验结果代表了理想高盖度状况。未来可在自然降雨条件下进行实地观测,并结合地被层实际覆盖面积等因素,对亚高山地被层截留效果进行更精确的量化分析。

5 结论

(1)川西亚高山阔叶林枯落物、暗针叶林枯落

物及苔藓层的降雨截留过程可划分为快速湿润、缓慢增长、饱和稳定三个阶段;苔藓层则包括快速湿润和缓慢增长两个阶段。暗针叶林地被层快速湿润阶段为0~30 min;阔叶林枯落物快速湿润阶段为0~20 min。枯落物和苔藓层达到基本饱和所需的时间随坡度增大而延长。

(2)地被层截留速率在快速湿润阶段下降最快,随后缓慢减小并逐渐趋近于零;而苔藓层在2~5 h内保持相对恒定的低速率。四种地被层在迅速湿润阶段的平均截留速率由大到小依次为苔藓层、针叶枯落物层、苔藓层、阔叶枯落物层。苔藓层截留速率最高,且比苔藓层更易在降雨后期达到饱和,表明苔藓层有较强的短期降雨拦截能力,而苔藓层则在长历时降雨中表现出更强的持续截留潜力。

(3)除苔藓层外,其余的三种地被层的最大降雨截留量依次为:苔藓层(5.61~7.12 mm)、针叶枯落物(4.34~5.29 mm)、阔叶枯落物(2.51~4.10 mm)。各地被层 C_{\max} 均与降雨强度呈正相关,与坡度呈负相关。相同降雨历时、强度和坡度下,暗针叶林地被层的 C_{\max} 可达阔叶林地被层的4.2~5.4倍,暗针叶林苔藓层 C_{\max} 约为枯落物层的1.3倍。

(4)影响不同地被层 C_{\max} 的主导因子存在差异,降雨强度是影响暗针叶林枯落物层及苔藓层 C_{\max} 的主要因子($P < 0.01$);坡度是影响苔藓层和阔叶林枯落物 C_{\max} 的主要因子($P < 0.01$)。蓄积量是决定亚高山森林地被层截留能力的最关键因子,其次为坡度。

(5)未来森林经营中,可依据林分类型(针叶林/阔叶林)和地形条件,制定差异化的枯落物蓄积量管理策略,并优化地被物组成,以最大化其生态水文效益。

参考文献(References)

- [1] ACHARYA S, MCLAUGHLIN D, KAPLAN D, et al. A proposed method for estimating interception from near-surface soil moisture response [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, **24**(4): 1859–1870. DOI: 10.5194/hess-24-1859-2020
- [2] GERRITS A M J, PFISTER L, SAVENIJE H H G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest [J]. *Hydrological Processes*, 2010, **24**(21): 3011–3025. DOI: 10.1002/hyp.7712
- [3] 马志良, 赵文强, 刘美, 等. 岷江源头区乔灌交错带地被物和土壤持水能力[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(5): 146–150.

- [MA Zhiliang, ZHAO Wenqiang, LIU Mei, et al. Water holding capacity of soils and ground covers in a forest-shrub ecotone of the source area of Minjiang River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(5): 146 – 150] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.05.024
- [4] 王飞, 陈国鹏, 齐瑞, 等. 甘南白龙江上游小流域主要林分地被物层的持水特性分异[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(6): 242 – 247. [WANG Fei, CHEN Guopeng, QI Rui, et al. Water-holding performance of major forest litter layer in Bailong River upstream watershed of Gannan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(6): 242 – 247] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.06.033
- [5] TSIKO C T, MAKURIRA H, GERRITS A M J, et al. Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, **47** – **48**: 122 – 127. DOI: 10.1016/j.pce.2011.06.009
- [6] FLORIANCIC M G, ALLEN S T, MEIER R, et al. Potential for significant precipitation cycling by forest-floor litter and deadwood [J]. *Ecohydrology*, 2023, **16**(2): e2493. DOI: 10.1002/eco.2493
- [7] DENG Wenping, ZHENG Xiling, XIAO Shengsheng, et al. Effects of leaf type, litter mass and rainfall characteristics on the interception storage capacity of leaf litter based on process simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, **624**: 129943. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129943
- [8] DU Jie, NIU Jianzhi, GAO Zhaoliang, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer [J]. *Catena*, 2019, **172**: 711 – 718. DOI: 10.1016/j.catena.2018.09.036
- [9] LI Qiwen, LEE Y E, IM S. Characterizing the interception capacity of floor litter with rainfall simulation experiments [J]. *Water*, 2020, **12**(11): 3145. DOI: 10.3390/w12113145
- [10] HAN Zhen, LI Kaifeng, FANG Qian, et al. Rainfall interception by leaf litters: What happens with fallen leaves of different types and mixing degrees under simulated rainfall? [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, **637**: 131390. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131390
- [11] 陈丽华, 余新晓, 张东升, 等. 贡嘎山冷杉林区苔藓层截持降水过程研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(4): 60 – 63. [CHEN Lihua, YU Xinxiao, ZHANG Dongsheng, et al. Hydrological process of bryophyte of *Abies fabri* forest in Gongga Mountain [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(4): 60 – 63] DOI: 10.13332/j.1000-1522.2002.04.015
- [12] 周碧莲, 顾继雄, 易玉媛, 等. 祁连山青海云杉林下苔藓层持水及截留特征[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, **60**(1): 60 – 67. [ZHOU Bilian, GU Jixiong, YI Yuyuan, et al. Water-holding characteristics of the moss under Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest in Qilian Mountains [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, **60**(1): 60 – 67] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2024.01.008
- [13] KLAMERUS-IWAN A, KHAN M O, SINGH P D, et al. Water retention capacity of red-stemmed feathermoss *Pleurozium schreberi* Mitt [J]. *Sylwan*, 2024, **168**(2): 146 – 157. DOI: 10.26202/sylwan.2024003
- [14] THIELEN S M, GALL C, EBNER M, et al. Water's path from moss to soil: A multi-methodological study on water absorption and evaporation of soil-moss combinations [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, **69**(4): 421 – 435. DOI: 10.2478/johh-2021-0021
- [15] 范金花, 谢汶天, 曹球铤, 等. 川西亚高山森林苔藓与枯落物持水特征[J]. *山地学报*, 2024, **42**(1): 1 – 13. [FAN Jinhua, XIE Wentian, CAO Qiuyao, et al. Water holding capacity of bryophytes and litter in subalpine forest in western Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2024, **42**(1): 1 – 13] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000799
- [16] 杨军军, 何志斌, 蔺鹏飞. 祁连山地区林下地被物持水量与采样方法的关系研究[J]. *冰川冻土*, 2021, **43**(2): 610 – 617. [YANG Junjun, HE Zhibin, LIN Pengfei. Study on the relationship between water holding capacity and sampling methods of forest understory in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(2): 610 – 617] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0022
- [17] 叶吉, 郝占庆, 姜萍. 长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程[J]. *生态学报*, 2004, **24**(12): 2859 – 2862. [YE Ji, HAO Zhanqing, JIANG Ping. Studies on rainfall holding process of the bryophyte and litter layer in coniferous forest of Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(12): 2859 – 2862] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.12.029.
- [18] 罗辑, 程根伟, 陈斌如, 等. 贡嘎山垂直带林分凋落物及其理化特征[J]. *山地学报*, 2003, **21**(3): 287 – 292. [LUO Ji, CHENG Genwei, CHEN Binru, et al. Characteristic of forests litterfall along vertical spectrum on the Gongga Mountain [J]. *Mountain Research*, 2003, **21**(3): 287 – 292] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2003.03.005
- [19] 刘涛, 孙守琴, 邱阳. 川西亚高山生态系统三种典型植物凋落物分解动态特征[J]. *山地学报*, 2017, **35**(5): 663 – 668. [LIU Tao, SUN Shouqin, QIU Yang. Dynamics and differences in the decomposition of litters from three dominating plants in subalpine ecosystems in western Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(5): 663 – 668] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000265
- [20] 季冬, 关文彬, 谢春华. 贡嘎山暗针叶林枯落物截留特征研究[J]. *中国水土保持科学*, 2007, **5**(2): 86 – 90. [JI Dong, GUAN Wenbin, XIE Chunhua. Litters interception capability of dark coniferous in Gongga Mountain [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, **5**(2): 86 – 90] DOI: 10.16843/j.sswc.2007.02.016
- [21] YANG Ruxin, WANG Genxu, CUI Junfang, et al. Improving the

- estimation of throughfall amounts in primeval forests along an elevation gradient on mountain Gongga, southwest China [J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(4): 639. DOI: 10.3390/atmos13040639
- [22] 齐记, 史宇, 余新晓, 等. 北京山区主要树种枯落物水文功能特征研究[J]. *水土保持研究*, 2011, **18**(3): 73–77. [QI Ji, SHI Yu, YU Xinxiao, et al. Hydrological function of litters of the main tree species in Beijing mountainous area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, **18**(3): 73–77]
- [23] 党毅, 王维, 余新晓, 等. 北京西山典型人工林分枯落物层生态水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2022, **44**(12): 72–87. [DANG Yi, WANG Wei, YU Xinxiao, et al. Eco-hydrological effects of litter layer in typical artificial forest stands in Xishan Mountain of Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, **44**(12): 72–87] DOI: 10.1217/j.1000–1522.20220040
- [24] 莫菲. 六盘山洪沟小流域森林植被的水文影响与模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008: 1–129. [MO Fei. The hydrological effects of forest/vegetation and simulation in the small watershed of Honggou, Liupan Mountains [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008: 1–129]
- [25] 徐振锋, 胡庭兴, 张远彬, 等. 川西亚高山几种天然林下苔藓层的持水特性[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(z1): 112–116. [XU Zhenfeng, HU Tingxing, ZHANG Yuanbin, et al. Water holding characteristics of bryophyte layer under natural forest stands in sub-alpine region of western Sichuan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(z1): 112–6] DOI: 10.3969/j.issn.1004–8227.2008.z1.020
- [26] SATO Y, KUMAGAI T, KUME A, 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. DOI: 10.1002/hyp.5746
- [27] ZHAO Longshan, HOU Rui, WU Faqi. Rainwater harvesting capacity of soils subjected to reservoir tillage during rainfall on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, **217**: 193–200. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.02.048
- [28] ZHAO Longshan, HOU Rui, FANG Qian. Differences in interception storage capacities of undecomposed broad-leaf and needle-leaf litter under simulated rainfall conditions [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **446**: 135–142. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.043
- [29] ZHAO Longshan, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al. Effect of slopes on rainfall interception by leaf litter under simulated rainfall conditions [J]. *Hydrological Processes*, 2022, **36**(8): e14659. DOI: 10.1002/hyp.14659
- [30] KIM J K, ONDA Y, KIM M S, et al. Plot-scale study of surface runoff on well-covered forest floors under different canopy species [J]. *Quaternary International*, 2014, **344**: 75–85. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.07.036

Rainfall Interception Characteristics of Understory Layer in the Gongga Mountain, Western Sichuan: A Comparative Study on Litter, Moss, and Their Mixtures

CHEN Pengyu, FAN Jinhua, SUN Shouqin *

(a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering;

b. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Rainfall interception by understory layer plays a key role in forest hydrological cycles. Previous studies mostly paid attention to understory litter or moss separately, making it difficult to reflect the overall rain interception performance of an understory layer.

In this study it investigated the performances of rainfall interception by understory layers (litter layer/moss layer/moss-litter composite layer) in both dark coniferous and broadleaf forests in the Gongga Mountain, western Sichuan, China. Through artificial simulated rainfall experiments, it compared the interception capacities of different understory layer types and explored the associated influencing factors.

(1) It found that the interception processes of both litter and moss-litter layers exhibited three stages: rapid wetting, low wetting, and saturation stage, whereas moss layers showed two stages, lacking the saturation stage. Steeper slopes prolonged the time to saturation.

(2) In the late period of rainfall, interception rates of moss-litter composite layer and litter layer gradually

decreased to zero, whereas moss layers maintained a relatively constant low rate over 2 – 5 hours. Moss-litter layers demonstrated strong short-term interception capacity, while moss layers exhibited greater potential during prolonged rainfall.

(3) Excluding moss layers, maximum interception capacity (C_{\max}) followed the order: moss-litter layer > coniferous litter > broadleaf litter. All C_{\max} values correlated positively with rainfall intensity and negatively with slope. Under the same rainfall intensity and slope conditions, C_{\max} in coniferous forests reached 4.2 – 5.4 times that of broadleaf forests, with moss-litter layers showing 1.3 times that of coniferous litter alone.

(4) Rainfall intensity strongly correlated with C_{\max} in dark coniferous litter and moss-litter layers ($P < 0.01$), while slope showed the strongest correlation with C_{\max} in moss and broadleaf litter ($P < 0.01$). Floor mass (the stock volume of understory layer) was the key factor affecting interception capacity, followed by slope.

(5) These findings suggest in forest management practice, differentiated understory layer management strategies should be tailored to forest types and terrain, to optimize understory composition and maximize eco-hydrological benefits.

This study provides critical data for understanding subalpine forest hydrological processes and informs water conservation management in the upper Yangtze River Basin.

Key words: the Gongga Mountain; subalpine forest; understory layer; moss; litter; artificial simulated rainfall; rainfall interception

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)