

引用格式: 宋国苍, 鄢世琳, 于福科, 等. 滇中地区典型人工林凋落物层生态水文效应[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(2): 302–311. SONG Guocang, YAN Shilin, YU Fuke, *et al.* Eco-hydrological effects of litter layer in typical plantations forests in central Yunnan[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(2): 302–311.

滇中地区典型人工林凋落物层生态水文效应

宋国苍^{1,2}, 鄢世琳³, 于福科⁴, 毛传良⁴, 余 潇¹, 杨 瑶¹, 黄新会¹

(1. 西南林业大学 水土保持学院, 云南 昆明 650244; 2. 昆明市官渡区水利管理中心, 云南 昆明 650214; 3. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 4. 云南大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 【目的】定量评价滇中地区典型人工林凋落物层生态水文效应, 为改善人工林蓄水能力和实现森林生态系统可持续管理提供理论依据。【方法】以滇中地区 3 种典型人工林 (本沁桉 *Eucalyptus benthamil* 过熟林、华山松 *Pinus armandii* 过熟林、本沁桉中龄林) 为研究对象, 通过野外调查、室内浸泡实验、失水实验以及人工模拟降雨试验, 分析人工林凋落物层生态水文效应。【结果】①滇中地区典型人工林凋落物总蓄积量为 13.07~16.84 t·hm⁻², 从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林, 3 种人工林中本沁桉过熟林凋落物总厚度显著大于本沁桉中龄林 ($P<0.05$)。②3 种人工林凋落物的自然含水率为 42.28%~78.51%, 室内浸泡和人工模拟降雨表明: 凋落物持水性能从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林, 降雨强度对凋落物持水性能影响不显著。③各林型凋落物累积吸(失)水量与时间呈对数函数关系, 吸(失)水速率与时间则呈幂函数关系。④3 种林分凋落物的失水是由快速失水到缓慢失水, 再到逐渐不失水的过程, 能较好地反映凋落物的保水能力。【结论】人工模拟降雨与凋落物室内浸泡实验结果具有一致性, 本沁桉过熟林的自然含水率和持(截)水性能最差。综合滇中地区 3 种人工林凋落物持水与蒸发, 建议在森林经理时, 从涵养水源方面考虑, 应适当减少本沁桉过熟林面积, 提高华山松种植比例。图 5 表 3 参 29

关键词: 典型人工林; 凋落物层; 降雨截留量; 持水能力; 生态水文效应

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)02-0302-10

Eco-hydrological effects of litter layer in typical plantations forests in central Yunnan

SONG Guocang^{1,2}, YAN Shilin³, YU Fuke⁴, MAO Chuanliang⁴, YU Xiao¹, YANG Yao¹, HUANG Xinhui¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650244, Yunnan, China; 2. Kunming Guandu District Water Conservancy Management Center, Kunming 650214, Yunnan, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 4. College of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] Quantitatively evaluate the eco-hydrological effects of litter layer of typical plantations in central Yunnan, is aimed to provide theoretical basis for plantation water storage capacity and realizing forest ecosystem sustainable management. [Method] With 3 typical plantations (over-matured *Eucalyptus benthamil*, over-matured *Pinus armandii*, medium-aged *E. benthamil*) selected as the research objects, field investigation, indoor immersion experiment, water loss experiment and laboratory rainfall simulation experimental analysis was conducted of the eco-hydrological effects in plantation. [Result] (1) The total litter stocks range of typical

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31460191, 31960305); 云南省科技计划项目农业联合专项 (202401BD070001-114); 西南林业大学水土保持与荒漠化防治学云南省一流学科开放课题 (SBK20240024)

作者简介: 宋国苍 (ORCID: 0000-0002-0984-7019), 工程师, 从事生态水文学研究。E-mail: 3289778049@qq.com。
通信作者: 黄新会 (ORCID: 0000-0002-7634-9490), 副教授, 从事生态水文学研究。E-mail: 54264927@qq.com

plantations in central Yunnan is $13.07\text{--}16.84\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and over-matured *P. armandii* > medium-aged *E. benthamil* > over-matured *E. benthamil*. The total thickness of over-matured *Eucalyptus benthamil* in the 3 kinds of plantation forests was significantly greater than that of medium-aged *E. benthamil*. (2) The natural moisture content of litter in three types of plantations ranged from 42.28%–78.51%. Both indoor soaking experiments and artificial rainfall simulation tests demonstrated that the water-holding capacity of the litter, and over-matured *P. armandii* > medium-aged *E. benthamil* > over-matured *E. benthamil*. The impact of rainfall intensity on the litter's water-holding performance was not significant. (3) The cumulative water uptake (loss) of litter in each forest type was a logarithmic function with time, and the rate of water uptake (loss) was a power function with time. (4) The 3 typical stands water loss process of litter was a change process from rapid water loss to slow water loss and then to gradual non-water loss, which better reflected the water holding capacity of litter. [Conclusion] The results of laboratory rainfall simulation and litter indoor immersion experiments were consistent, the natural water content and water-holding (interception) performance of the over-matured *E. benthamil* are the minimum. Based on the water holding capacity and evaporation of litter of 3 typical plantations in central Yunnan, it is suggested that the area of over-matured *E. benthamil* forest should be appropriately reduced and the planting proportion of *P. armandii* should be increased from the aspect of water conservation. [Ch, 5 fig. 3 tab. 29 ref.]

Key words: typical plantation; litter layer; rainfall interception; water holding capacity; eco-hydrological effects

凋落物层在森林水文循环中发挥着拦蓄降水、调节径流、影响土壤入渗等生态水文功能，其作用可以通过最大持水量、吸(失)水量、吸(失)水速率、有效拦蓄量来体现^[1-3]。近年来，随着全球造林规模的扩大，中国人工林约 7 890 万 hm^2 ，占全球人工林面积的 28%，是世界上造林面积最大的国家^[4]。滇中地区人工林种植面积为 136.56 万 hm^2 ，人工林类型以华山松 *P. armandii*、云南松 *P. yunnanensis*、柏木 *Cupressus funebris*、桉木 *Alnus cremastogyne*、桉树 *Eucalyptus* spp. 等为主。云南是第四大桉树种植区^[5]，种植面积超过 42 万 hm^2 ，其中滇中地区种植面积占 7.23%。华山松是陕西、云南、四川、湖北等地用于退耕还林的特有常绿山地针叶树种^[6]，在滇中地区种植面积达 16.14%。因此，定量研究和评估凋落物层生态水文功能，对制定科学合理的森林生态环境建设保护方案具有重要意义。

近年来，国内学者对不同森林类型凋落物蓄积量和水土保持功能进行了研究^[7-12]，但较少对浸泡条件和模拟降雨条件下凋落物持水能力进行比较。目前，森林生态水文过程研究中，用室内浸泡法测定凋落物层截持水分特性所取得的结果和实际降雨过程中凋落物对降水截持效果并不完全一致。因此，综合评价植被生态水文效应是确定适宜树种、优化植被空间分布模式、实现生态效益最大化的关键。基于此，本研究以滇中地区典型人工林本沁桉 *E. benthamil* 过熟林、华山松过熟林和本沁桉中龄林为研究对象，探讨不同人工林凋落物的蓄积量、吸失水、降雨截留等特征，对凋落物层蓄水能力进行验证，以期为进一步理解滇中地区典型人工林凋落物层生态水文效应及水土保持功能提供理论支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于滇池西南岸出水河螳螂川流域昆明市海口林场，属典型亚热带季风气候，年均降水量为 909.7 mm，年均日照时数为 2 200.0 h，年均气温为 14.5 $^{\circ}\text{C}$ 。该区平均海拔为 2 000 m，坡度为 16°~25°，土壤类型主要为红壤。森林覆盖率为 80.54%，乔木树种以华山松、云南松、本沁桉、柏木、黑荆 *Acacia mearnsii* 等为主。

1.2 样品采集与蓄积量测定

2022 年 8 月在本沁桉过熟林、华山松过熟林、本沁桉中龄林 3 种人工林中，根据林分密度、郁闭

度、树高、胸径以及土壤的成土母质、地形地貌、土壤质地、土壤类型等自然条件,每个林分设定 20 m×20 m 样地各 3 块,样地基本信息见表 1。在每块样地内用对角线法设置 5 个 1 m×1 m 的样方收集凋落物,在每个小样方内用卷尺测量厚度,分别收集小样方内的未分解层和半分解层凋落物,称取鲜质量,把样品带回实验室内烘干(85 ℃)至恒量后称量,计算各层次单位面积蓄积量^[13]和自然含水率^[14]。

表 1 人工林样地基本信息

Table 1 General information of each plot for plantation										
林分类型	林龄/a	林分密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	海拔/m	坡向	坡度/(°)	郁闭度	平均树高/m	灌木组成	草本组成
本沁桉过熟林	35	3 800	12.67	2 085	南西 17°	12	0.88	10.78	6科6属6种,紫金牛科 Myrsinaceae较多	13科18属20种,菊科Compositae和禾本科Gramineae较多
华山松过熟林	62	3 500	12.39	2 026	西南 38°	11	0.58	13.03	11科13属15种,紫金牛科和使君子科Combretaceae较多	13科20属23种,菊科和莎草科Cyperaceae较多
本沁桉中龄林	10	3 200	12.69	2 055	东南 45°	8	0.72	15.24	9科12属17种,木樨科Oleaceae和紫金牛科较多	10科属20属20种,禾本科和唇形科Labiatae较多

1.3 凋落物持水能力测定

1.3.1 室内浸泡法 将凋落物样品烘干后装入尼龙网袋没入盛有清水的容器中,使容器内水面略高于尼龙网上沿。测定样品在浸泡 5 min、15 min、30 min、1 h、2 h、3 h、4 h、5 h、6 h、8 h、10 h、12 h、16 h、20 h、24 h 时的质量。每次测定前将样品从水中取出静置 5 min,使称量时样品内不再有水滴释放。浸泡样品质量不再增加时,停止实验,此时凋落物的持水量即为凋落物最大持水能力。根据文献^[14]计算凋落物层最大持水量(率)和有效拦蓄量(率)。

最大持水量(率):

$$R_1 = W_3 - W_2;$$
(1)

$$R_m = \frac{W_3 - W_2}{W_2} \times 100\%。$$
(2)

有效拦蓄量(率):

$$W_m = (R_m - R_0) \times M;$$
(3)

$$W = (0.85R_m - R_0) \times M。$$
(4)

式(1)~(4)中: R_1 为最大持水量(g); R_m 为最大持水率(%); R_0 为自然含水率(%); W_m 为最大拦蓄量($t \cdot hm^{-2}$); W 为有效拦蓄量($t \cdot hm^{-2}$); W_2 为凋落物干质量(g); W_3 为凋落物浸水 24 h 后的质量(g); M 为凋落物的蓄积量($t \cdot hm^{-2}$)。

1.3.2 人工模拟降雨试验 在西南林业大学水土保持学院森林土壤侵蚀模拟实验室,采用西安清远测控有限公司生产的喷射式人工模拟仿真降雨设备(TSJY-103)模拟人工降雨,测定凋落物截留降雨能力。对研究区多年降雨统计显示:降雨强度为 20~30 mm·h⁻¹ 的降水占 72.11%,降雨强度为 30~50 mm·h⁻¹ 的降水占 24.79%,降雨强度为 50 mm·h⁻¹ 以上的降水占 3.10%。试验前对不同降雨强度标定,选定 30、45、60 mm·h⁻¹ 均匀度达 95% 以上 3 个降雨强度,同时在喷射有效覆盖范围放置 6 个雨量器校核降雨强度。将每个林分半分解层和未分解层凋落物烘干后折算凋落物量装入直径 40 cm 筛子(上部无遮挡,底部为 100 目纱网),放置在降雨器下方,通过时间控制器、电磁阀门控制降雨强度和降雨量对所取样品进行人工模拟降雨截留试验。按每次降雨强度每个林分下每种凋落物 3 个重复,共计 54 个凋落物样。降雨试验开始后,降雨时间每达 5 min 时,停止模拟降雨,称量样品。当样品盒内的凋落物质量不再增加时,试验结束。

1.4 凋落物失水过程测定

将室内浸泡持水 24 h 后的凋落物取出,根据其在野外自然条件下的分布,按照未分解层、半分解层分别装入 0.45 m×0.30 m 尼龙网袋,每种林分每个层次 3 个重复,总共 18 个样品。放置在铁丝网上自然失水(室温 25 ℃),分别于 15 min、30 min、1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、10 h、12 h 对凋落物称量,之后每

间隔 12 h 称量 1 次，直至凋落物质量不再波动。

1.5 数据处理

用 Excel 整理数据，SPSS 26.0 进行单因素方差分析和最小显著差异法 (LSD) 检验，采用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 人工林凋落物蓄积特征

由表 2 可见：凋落物的总厚度为 3.37~3.86 cm，从大到小依次为本沁桉过熟林、本沁桉中龄林、华山松过熟林，且各林分未分解层厚度大于半分解层，本沁桉过熟林与中龄林之间总厚度差异显著 ($P<0.05$)。凋落物的总蓄积量为 13.07~16.84 $t\cdot hm^{-2}$ ，从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林。3 种林分类型中，半分解层蓄积量占总蓄积量的百分比是未分解层蓄积量的 2 倍。蓄积量占总蓄积量的百分比半分解层为 65.76%~68.03%，从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉过熟林、本沁桉中龄林；未分解层为 31.97%~34.24%，从大到小依次为本沁桉中龄林、本沁桉过熟林、华山松过熟林。

表 2 典型人工林凋落物层厚度和蓄积量

Table 2 Litter layer thickness and storage of typical plantation

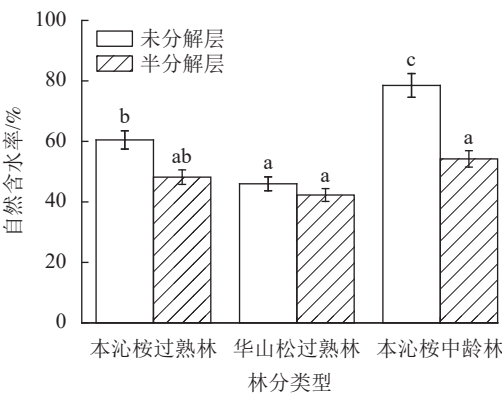
林分 类型	未分解层			半分解层			总蓄积量/ ($t\cdot hm^{-2}$)	总厚度/cm
	厚度/cm	蓄积量/ ($t\cdot hm^{-2}$)	占总蓄积量 百分比/%	厚度/cm	蓄积量/ ($t\cdot hm^{-2}$)	占总蓄积量 百分比/%		
本沁桉过熟林	2.43±0.46 a	4.29±1.09 b	33.06	1.43±0.50 a	8.78±1.95 a	66.94	13.07±2.39 a	3.86±0.93 a
华山松过熟林	2.23±0.38 a	5.32±2.03 a	31.97	1.13±0.12 a	11.52±2.72 a	68.03	16.84±0.69 a	3.37±0.32 ab
本沁桉中龄林	2.27±0.31 a	4.77±2.51 b	34.24	1.30±0.32 b	8.76±2.07 a	65.76	13.53±4.00 a	3.57±0.62 b

说明：同列不同字母表示同一指标不同林分类型间差异显著($P<0.05$)。

2.2 凋落物持水性能

2.2.1 凋落物的自然持水性能 由图 1 可见：凋落物层自然含水率与分解程度和林分类型有关，3 种人工林从大到小依次为本沁桉中龄林、本沁桉过熟林、华山松过熟林，未分解层大于半分解层。经 LSD 差异性分析，3 种林分类型未分解层之间自然含水率差异显著 ($P<0.05$)；半分解层之间自然含水率差异不显著。

2.2.2 浸泡条件下凋落物的持水性能 由表 3 可见：不同林分类型半分解层凋落物最大持水率为 149.96%~210.50%，最大持水量为 13.17~24.25 $t\cdot hm^{-2}$ ，有效拦蓄率为 79.28%~136.65%，有效拦蓄量为 6.96~15.74 $t\cdot hm^{-2}$ ，从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林；未分解层凋落物最大持水率为 153.46%~207.90%，最大持水量为 6.58~



不同字母表示同一分解层不同林分类型间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同林分类型未分解层和半分解层的自然含水率

Figure 1 Natural water content of litter non-decomposed layer and semi-decomposed layer

9.92 $t\cdot hm^{-2}$ ，有效拦蓄率为 69.94%~103.14%，有效拦蓄量为 3.00~5.49 $t\cdot hm^{-2}$ ，从大到小依次为本沁桉中龄林、华山松过熟林、本沁桉过熟林。凋落物累积持水量 (y , $t\cdot hm^{-2}$) 与浸泡时间 (x , h) 函数关系为： $y = a\ln x + b$ (未分解层 R^2 为 0.923 5~0.962 9，半分解层 R^2 为 0.936 5~0.981 4)，其中： a 为系数， b 为常数项；凋落物吸水速率 (v , $t\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}$) 与浸泡时间 (t , h) 函数关系为： $v = kt^{-a}$ ，其中： k 为系数， a 为常数项。

由图 2 可见：滇中地区典型人工林凋落物未分解层和半分解层吸持水过程可以分为 3 个阶段。累积

持水量在 0~2 h 为快速增长阶段, 2~12 h 为缓慢增长阶段, 12 h 以后基本达到饱和阶段。不同林分类型凋落物未分解层吸持水量从大到小依次为本沁桉中龄林、华山松过熟林、本沁桉过熟林; 半分解层吸持水量从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林。初始浸泡 15 min 时, 吸水速率最大, 2 h 以内吸水速率递减变化明显, 之后基本趋近于 0。未分解层本沁桉中龄林吸水速率最高, 本沁桉过熟林最低。半分解层华山松过熟林吸水速率最高, 本沁桉过熟林最低。

表 3 典型人工林凋落物持水特征

林分类型	凋落物层	最大持水率/%	最大持水量/ (t·hm ⁻²)	有效拦蓄量/ (t·hm ⁻²)	有效拦蓄率/%
本沁桉	未分解层	153.46	6.58	3.00	69.94
过熟林	半分解层	149.96	13.17	6.96	79.28
华山松	未分解层	175.44	9.33	5.49	103.14
过熟林	半分解层	210.50	24.25	15.74	136.65
本沁桉	未分解层	207.90	9.92	4.68	98.21
中龄林	半分解层	187.40	16.42	9.20	105.07

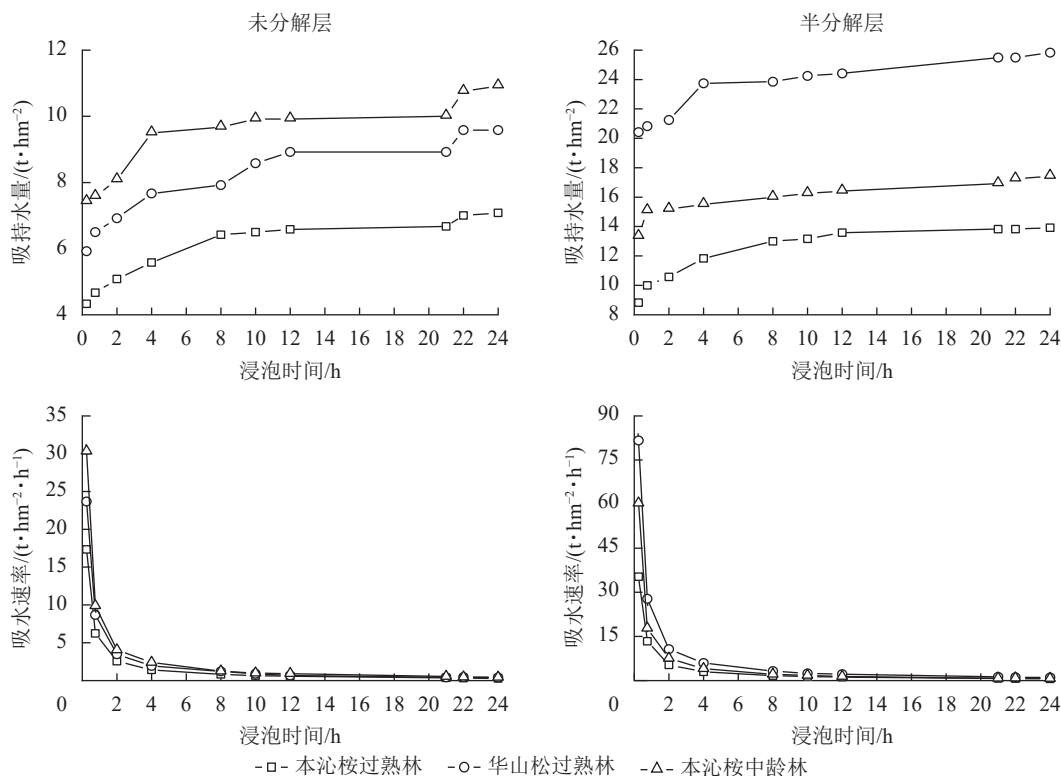


图 2 未分解层和半分解层凋落物持水和吸水速率的变化

Figure 2 Change of water-holding and absorption rate of litter non-decomposed layer and semi-decomposed layer

2.2.3 模拟降雨条件下凋落物的持水性能 降雨条件下凋落物的持水性能可以通过凋落物对雨水的截留能力来反映。从图 3 可以看出: 不同林分类型半分解层凋落物的最大截留率为 31.67%~76.73%, 未分解层凋落物的最大截留率为 22.70%~43.97%。在人工模拟降雨条件下, 凋落物的最大截留率半分解层从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林, 未分解层从大到小依次为本沁桉中龄林、华山松过熟林、本沁桉过熟林。在相同降雨强度下, 同种林分类型凋落物的最大截留率半分解层大于未分解层, 且凋落物的最大截留率并不随降雨强度的增大而增大。

由图 4 可知: 不同林分凋落物层截留降雨过程分为 3 个阶段, 即快速截留阶段 (0~15 min)、稳定截留阶段 (15~60 min)、饱和稳定阶段 (60 min 后)。分析不同降雨强度各林分类型的凋落物层截持水特征发现: 降雨初始阶段 (0~15 min), 凋落物较为干燥, 能迅速吸持雨水。15 min 后, 凋落物基本被湿润, 吸持雨水能力变缓, 低于降雨初始阶段, 截留速率逐渐趋于基本稳定。到 60 min 后, 凋落物吸水达到饱和。凋落物在各降雨强度下的最大截留量均值未分解层从大到小依次为本沁桉中龄林 (29.70 t·hm⁻²)、华山松过熟林 (19.07 t·hm⁻²)、本沁桉过熟林 (12.71 t·hm⁻²), 半分解层从大到小依次为华山松过熟林 (11.73 t·hm⁻²)、本沁桉中龄林 (8.94 t·hm⁻²)、本沁桉过熟林 (8.01 t·hm⁻²)。各林分类型凋落物截留量 (y , t·hm⁻²) 与降雨时间 (x , min) 之间的函数关系为: $y = a \ln x + b$, 其中: a 为系数, b 为常数项。半分解层

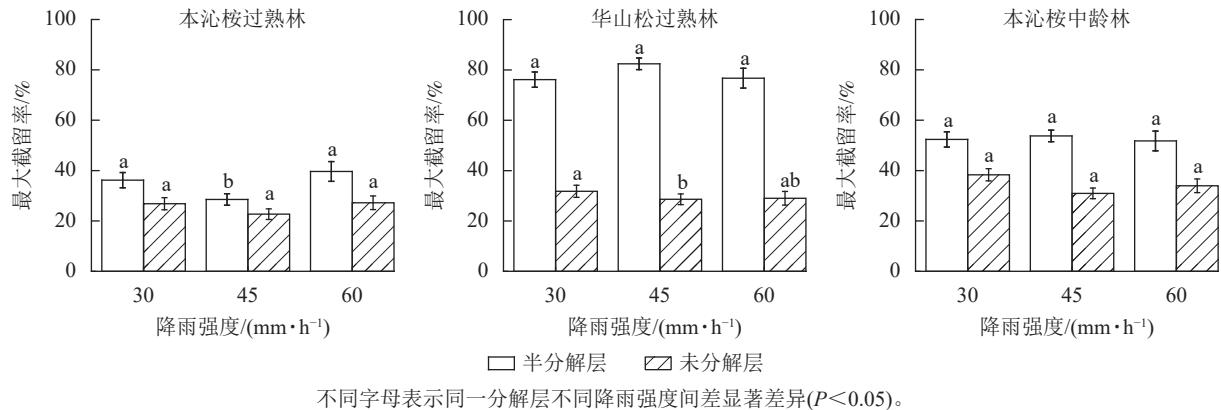


图 3 不同降雨条件下凋落物未分解层和半分解层截留能力

Figure 3 Rainfall interception and different rainfall capacity of litter non-decomposed layer and semi-decomposed layer

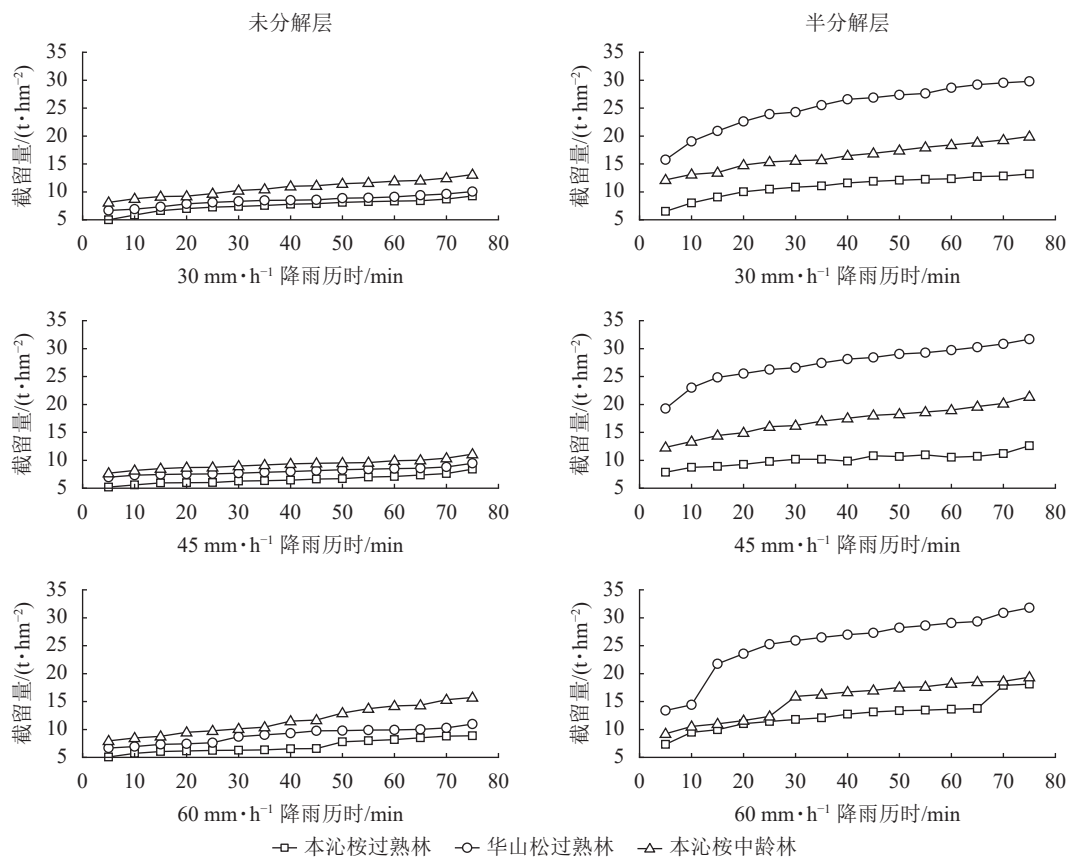


图 4 不同降雨条件下凋落物未分解层和半分解层截留过程

Figure 4 Rainfall interception and different rainfall process of litter non-decomposed layer and semi-decomposed layer

R^2 为 0.920 1~0.996 1, 未分解层 R^2 为 0.862 7~0.994 0。当降雨强度为 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 最大截留量半分解层本沁桉中龄林最大 ($29.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 未分解层华山松过熟林最大 ($12.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$); 当降雨强度为 $45 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 最大截留量半分解层本沁桉中龄林最大 ($30.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 未分解层华山松过熟林最大 ($10.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$); 当降雨强度为 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 最大截留量半分解层本沁桉中龄林最大 ($29.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 未分解层华山松过熟林最大 ($12.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.3 凋落物失水动态

凋落物失水实验是量化凋落物失水过程中累积失水量、失水速率与时间变化的常用方法。凋落物的累积失水量 (y , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与失水时间 (x , h) 的函数关系为: $y = a \ln x + b$, 其中: a 为系数, b 为常数项。半分解层 R^2 为 0.906 2~0.926 7, 未分解层 R^2 为 0.946 6~0.950 7。失水速率 (v , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 与时间 (t , h) 的函数关系为: $v = kt^{-a}$, 其中: k 为系数, a 为常数项。由图 5 可以看出: 凋落物的累积失水量随着时

间的增加而逐渐增大,失水速率随着时间的增加而逐渐减小。各林分类型凋落物层经历了3个失水阶段:快速失水阶段,在0~2 h内累积失水量急剧上升,失水速率极快;缓慢失水阶段,在2~24 h内累积失水量逐渐减小,失水过程和失水速率变得缓慢;稳定失水阶段,在24~72 h内失水趋于平稳,72 h以后不再失水。未分解层在0~24 h内累积失水量和失水速率从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林,24 h以后从大到小依次为本沁桉中龄林、华山松过熟林、本沁桉过熟林;半分解层则在整个失水过程中从大到小依次为华山松过熟林、本沁桉中龄林、本沁桉过熟林。

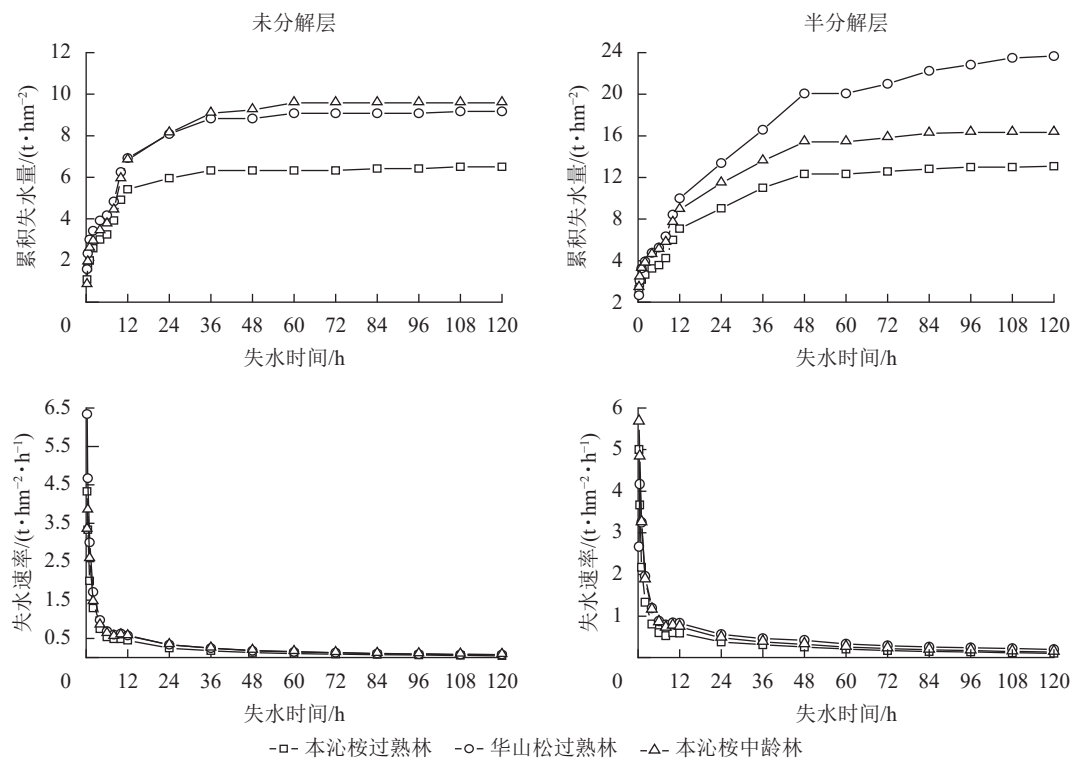


图5 不同林分类型未分解层和半分解层失水过程和失水速率
Figure 5 Water loss process and water loss rate of litter non-decomposed layer and semi-decomposed layer

3 讨论

3.1 凋落物蓄积量差异

地形、气候、人为活动是影响凋落物蓄积的主要因素,同一区域还受林分类型、林分密度、林龄和凋落物分解程度的影响^[14-17]。蓄积量与林龄密切相关,一般情况下林龄大的凋落物蓄积量相对较高^[18]。叶片是凋落物的主要成分,本沁桉过熟林因枝、叶的过分脱落和更新换代能力下降,凋落物蓄积量低于本沁桉中龄林。陈严武等^[19]对云南高原盆地城市水源地针叶林凋落物持水效应研究表明:滇中地区华山松凋落物的厚度为1.56 cm,蓄积量为 $5.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;魏雅丽等^[20]对元谋干热河谷桉树成熟林(17 a)林下凋落物蓄积量的实地调查和室内研究表明:凋落物的厚度为3.70 cm,蓄积量为 $3.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究本沁桉过熟林凋落物的厚度为3.73 cm,蓄积量为 $13.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,华山松过熟林凋落物的厚度为3.37 cm,蓄积量为 $16.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,本沁桉中龄林凋落物的厚度为3.70 cm,蓄积量为 $13.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见,本研究桉树凋落物蓄积量、华山松过熟林凋落物的厚度和蓄积量都要高于陈严武等^[19]和魏雅丽等^[20]的研究结果,这可能是本研究区域华山松林和本沁桉林在林分类型、林分密度、林龄、凋落物分解程度等方面有一定的优势。

3.2 凋落物吸持水性能

凋落物持水特性是评估森林涵养水源和保持水土的重要指标。影响凋落物持水的因素有森林类型、林分特征和成土因素等^[21]。各林分类型凋落物层持水能力具有差异,本研究中凋落物最大持水量达自身干质量的1.51~1.99倍。研究表明:凋落物最大持水量与林龄呈正相关^[7,18]。本研究本沁桉中龄林凋落物

最大持水量高于本沁桉过熟林，这与张淑兰等^[16]对不同林龄麻栎 *Quercus Acuvarius* 凋落物的研究结果一致。

凋落物降雨动态截留过程随着降雨强度和时间发生变化。莫非等^[22]研究认为：凋落物持水能力随着降雨强度的增大而呈升高趋势。在 ZHU 等^[23]的研究中，最大截留量与降雨强度之间存在显著线性关系。但本研究发现：凋落物层截留降水能力受降雨过程中降雨强度的变化影响不显著，这与牛勇等^[24]的研究结果一致。模拟降雨事件时凋落物层的最大截留率半分解层为 31.67%~76.73%、未分解层为 22.70%~43.97%，远远低于室内浸泡实验的最大持水率和有效拦蓄率，这是因为模拟降雨过程中凋落物没有室内浸泡充分的供水条件。对比 2 种测定方式下凋落物的持水过程可以看出，模拟人工降雨与凋落物室内浸泡的结果具有一致性，凋落物吸持水量都经历了由快速增长到缓慢增长再到趋于稳定的过程。

3.3 凋落物失水特征

凋落物水分动态变化应从吸水、失水 2 个方面综合分析，将两者结合可以很好表征不同林分类型的生态水文特征。失水量与失水时间的关系显示：各林分类型凋落物的失水特性不同，可能是因为受凋落物残体保水能力和可供释放水量大小的限制^[25-26]，潜在调控能力存在差异。在本研究中，凋落物失水初期，未分解层本沁桉中龄林和半分解层华山松过熟林凋落物持水量高，失水速率快，随着凋落物持水量的降低，失水速率逐渐降低并趋于平稳。说明持水量越高的凋落物更易于失水。这是因为同样环境中，持水量越高就与大气间的水势差越大，这与已有的研究结果^[25, 27-29]基本一致。在失水过程中，不同林分类型凋落物在 0~2 h 内失水明显，24 h 后变化较为平缓，但在 48 h 也未达到稳定，失水 72 h 后才基本稳定，该结果与刘一霖等^[25]和刘琳等^[29]的研究结果一致。进一步说明滇中地区不同人工林虽然前 2 h 内失水较快，但保水时间至少可达 72 h，具有良好的拦蓄和保水能力。

4 结论

滇中地区各林分类型受林龄影响，凋落物层总厚度差异显著。林分类型是影响自然含水率的主要因素，本沁桉中龄林未分解层自然含水率优于其他林分类型。凋落物持水能力未分解层最大持水量(率)、有效拦蓄量(率)均表现为华山松过熟林最大。凋落物层作为多孔介质，其截留量受降雨强度的变化影响不显著。华山松过熟林凋落物的多孔堆积结构可有效减少雨水流失。从失水过程来看，本沁桉过熟林在 3 种林分类型中保水能力最好。综合考虑，建议提高华山松人工林种植面积，实现森林水源涵养能力提升。

5 参考文献

- [1] LIU Yexuan, SHI Wenjiao, TAO Fulu, *et al.* A global synthesis of multi-factors affecting water storage capacity in forest canopy, litter and soil layers [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(3): e2022GL099888 [2024-06-01]. DOI: 10.1029/2022GL099888.
- [2] PUTUHENA W M, CORDERY I. Estimation of interception capacity of the forest floor [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **180**(1/4): 283-299.
- [3] 蔚阿龙, 温慧, 丛日春, 等. 坝上地区不同森林类型凋落物层水文效应[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(5): 959-969.
YU Along, WEN Hui, CONG Richun, *et al.* Hydrological effects of litter layers in different forest types in the Bashang region [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(5): 959-969.
- [4] PAYN T, CARNUS J M, FREER-SMITH P, *et al.* Changes in planted forests and future global implications [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, **352**: 57-67.
- [5] XIE Yaojian, ARNOLD R J, WU Zhihua, *et al.* Advances in eucalypt research in China [J/OL]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2017, **4**(4): 380 [2024-06-01]. DOI: 10.15302/J-FASE-2017171.
- [6] FARJON A, FILER D. *An Atlas of the World's Conifers: An Analysis of Their Distribution, Biogeography, Diversity, and Conservation Status* [M]. Leiden: Brill, 2013.
- [7] 高迪, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. *林业科学研究*, 2019, **32**(4): 26-32.
GAO Di, GUO Jianbin, WANG Yanhui, *et al.* Hydrological effects of forest litters of *Larix principis-rupprechtii* plantations

- with varying ages in Liupanshan of Ningxia, China [J]. *Forest Research*, 2019, **32**(4): 26–32.
- [8] 马晓至, 毕华兴, 王珊珊, 等. 晋西黄土区典型林分枯落物层水文生态特性研究[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(6): 77–83, 88.
- MA Xiaozhi, BI Huaxing, WANG Shanshan, *et al.* Hydrological and ecological characteristics of typical stand litter layer in the loess region of western Shanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(6): 77–83, 88.
- [9] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, **13**(6): 48–53.
- LUAN Lili, ZHANG Guanghui, SUN Long, *et al.* Spatial variation of typical plant litters in the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, **13**(6): 48–53.
- [10] 张宝琦, 王忠禹, 杨艳芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(4): 76–81.
- ZHANG Baoqi, WANG Zhongyu, YANG Yanfen, *et al.* Accumulation and water-holding capacity of typical shrub woodland litters in Loess Hilly Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(4): 76–81.
- [11] 杨寒月, 张光辉, 张宝军. 黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J]. 中国水土保持科学, 2019, **17**(3): 83–90.
- YANG Hanyue, ZHANG Guanghui, ZHANG Baojun. Litter and its water-holding properties of typical plant communities distributed on gully steep slopes in the loess hilly-gully region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(3): 83–90.
- [12] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 等. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J]. 生态学报, 2019, **39**(7): 2416–2425.
- WANG Zhongyu, LIU Guobin, WANG Bing, *et al.* Litter production and its water holding capability in typical plants communities in the hilly region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(7): 2416–2425.
- [13] 李鹏, 陈璇, 杨章旗, 等. 不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(2): 368–377.
- LI Peng, CHEN Xuan, YANG Zhangqi, *et al.* Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(2): 368–377.
- [14] 张缓, 穆兴民, 高鹏. 黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(3): 45–52.
- ZHANG Huan, MU Xingmin, GAO Peng. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(3): 45–52.
- [15] 赵娜, 王俊博, 李少宁, 等. 北京松山4种典型林分枯落物持水特征研究[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(6): 1139–1147.
- ZHAO Na, WANG Junbo, LI Shaoning, *et al.* Study on water holding characteristics of four typical forest litter in Songshan, Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(6): 1139–1147.
- [16] 张淑兰, 韩勇, 杨盼, 等. 汉江上游不同林龄麻栎林枯落物的水文功能评价[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(1): 44–51.
- ZHANG Shulan, HAN Yong, YANG Pan, *et al.* Evaluation of hydrological function of litter of *Quercus acuvarius* at different ages in the upper reaches of Han River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(1): 44–51.
- [17] 简永旗, 吴家森, 盛卫星, 等. 间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(2): 320–328.
- JIAN Yongqi, WU Jiasen, SHENG Weixing, *et al.* Effects of thinning and stand types on litter stock and soil water-holding capacity [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(2): 320–328.
- [18] 蒋仲龙, 叶柳欣, 刘军, 等. 封育年限对毛竹林凋落物和土壤持水效能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(5): 860–866.
- JIANG Zhonglong, YE Liuxin, LIU Jun, *et al.* Effects of enclosure duration on litter and soil water holding capacity of *Phyllostachys edulis* forest [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, **37**(5): 860–866.
- [19] 陈严武, 史正涛, 常龙芳, 等. 云南高原盆地城市水源地针叶林枯落物持水效应研究[J]. 节水灌溉, 2013(11): 4–8.
- CHEN Yanwu, SHI Zhengtao, CHANG Longfang, *et al.* Water-holding effects of coniferous forest litters of city water source in Yunnan Plateau Basin [J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(11): 4–8.
- [20] 魏雅丽, 贺玉晓, 金杰, 等. 元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(3): 181–186.
- WEI Yali, HE Yuxiao, JIN Jie, *et al.* Water conservation function of typical vegetation litters in Yuanmou dry-hot valley

- [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(3): 181–186.
- [21] 耿琦, 王海燕, 张美娜, 等. 森林枯落物持水特性影响因素研究进展[J]. 生态科学, 2020, **39**(5): 220–226.
GENG Qi, WANG Haiyan, ZHANG Meina, *et al.* Review on factors affecting water-holding characteristics of forest litter [J]. *Ecological Science*, 2020, **39**(5): 220–226.
- [22] 莫菲, 于澎涛, 王彦辉, 等. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程[J]. 生态学报, 2009, **29**(6): 2868–2876.
MO Fei, YU Pengtao, WANG Yanhui, *et al.* 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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(6): 2868–2876.
- [23] ZHU Xia, ZHANG Wanjuan, JIANG Xiaojin, *et al.* Conversion of primary tropical rainforest into rubber plantation degrades the hydrological functions of forest litter: insights from experimental study [J/OL]. *CATENA*, 2021, **200**: 105172[2024-06-01]. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105172](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105172).
- [24] 牛勇, 刘洪禄, 张志强. 北京地区典型树种及非生物因子对枯落物水文效应的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(8): 183–189.
NIU Yong, LIU Honglu, ZHANG Zhiqiang. Effects of typical tree species and abiotic factors on hydrologic characters of forest litter in Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(8): 183–189.
- [25] 刘一霖, 温娅檬, 李巧玉, 等. 川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(5): 151–156, 162.
LIU Yilin, WEN Yameng, LI Qiaoyu, *et al.* Water-holding and water-loss characteristics of six types of forest litter in the alpine gorge region of western Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(5): 151–156, 162.
- [26] 张学龙, 金铭, 刘贤德, 等. 祁连山 5 种典型灌木林枯落物蓄积量及其持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(5): 735–740.
ZHANG Xuelong, JIN Ming, LIU Xiande, *et al.* Litter storage and its water holding capacity characteristics of five typical shrubs in Qilian Mountains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 735–740.
- [27] 周丽丽, 蔡丽平, 马祥庆, 等. 不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 249–253.
ZHOU Lili, CAI Liping, MA Xiangqing, *et al.* Eco-hydrological function in different developing stages of Chinese fir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(5): 249–253.
- [28] 郑文辉, 林开敏, 徐昇, 等. 7 种不同树种凋落叶持水性能的比较研究[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1): 88–91.
ZHENG Wenhui, LIN Kaimin, XU Bian, *et al.* Comparative study of water-holding capacity of litter in seven different trees' species [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(1): 88–91.
- [29] 刘琳, 熊东红, 张宝军, 等. 拉萨河谷杨树人工林枯落物蓄积特征及持水性能[J]. 干旱区研究, 2021, **38**(6): 1674–1682.
LIU Lin, XIONG Donghong, ZHANG Baojun, *et al.* Litter storage and its water-holding capacity of *Populus* plantations in Lhasa River Valley [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(6): 1674–1682.