

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.008.

王平, 李璐杉, 丁智强, 等. 滇中地区主要森林凋落物有效截留量及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 213-221, 229.

Wang Ping, Li Lushan, Ding Zhiqiang, et al. Effective Retention of Main Forest Litter and Its Influencing Factors in Central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 213-221, 229.

滇中地区主要森林凋落物有效截留量及其影响因素

王平¹, 李璐杉², 丁智强^{1,3,4}, 李玉辉¹

(1. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2. 云南省楚雄紫溪中学, 云南 楚雄 675099;

3. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007; 4. 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 福建 三明 365002)

摘要: [目的] 研究滇中地区主要森林类型凋落物有效截留量差异及其影响因素, 为该地未来植被恢复和森林管理提供科学支撑。 [方法] 利用样方调查法、烘干法和浸泡法分析了昆明市双河—磨南德水源林自然保护区内的地带性次生常绿阔叶林(SF)、针阔混交林(TF)、旱冬瓜林(ACF)、华山松林(PA)、成熟云南松林(OPY)、幼龄云南松林(YPY)、银荆林(AD) 7 种主要森林类型凋落物未分解层(OL)和半分解层(OF)的有效截留量及其影响因素。 [结果] (1) 7 种森林类型凋落物厚度为 2.06~7.57 cm, 其中 OL 层 1.10~4.30 cm, OF 层 0.83~3.93 cm, 凋落物层厚度排序为 TF>ACF>PA>OPY>SF>AD>YPY, 凋落物蓄积量为 4.75~17.45 t/hm², 其中 OL 层占比为 32.02%~62.48%, OF 层占比为 37.52%~67.98%, 凋落物层蓄积量排序为 TF>PA>SF>OPY>ACF>AD>YPY。 (2) 凋落物最大持水率为 115.3%~170.7%, 初始吸水速率为 3.65~5.62 g/(g·h), 凋落物持水率和浸水时间的关系可用对数函数 $y=a\ln(x)+b$ 表示, 吸水速率与浸水时间可用幂函数 $y=kt^n$ 表示。 (3) 凋落物最大持水量为 7.05~32.19 t/hm², 排序为 PA>TF>SF>OPY>ACF>AD>YPY, 有效截留量为 5.45~25.34 t/hm², 以 TF 最高(25.34 t/hm²), PA(24.99 t/hm²) 和 SF(24.62 t/hm²) 次之, YPY 最低(5.45 t/hm²), 影响有效截留量的场地特征主要为蓄积量、自然含水率、分解强度以及厚度, 影响有效截留量的水动力过程主要是最大失水量、前 6.0 h 平均吸水速率和前 2.0 h 平均吸水速率。 [结论] 滇中地区未来植树造林应以针阔混交林为主, 注重对地带性次生常绿阔叶林的保育, 采取辅助自然更新的措施促进人工纯林向混交林演化, 同时减少踩踏、收集凋落物等人类活动的干扰, 从而增加森林生态系统凋落物的水源涵养能力。

关键词: 凋落物; 主要森林类型; 持水特性; 有效截留量; 滇中地区

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0213-09

Effective Retention of Main Forest Litter and Its Influencing Factors in Central Yunnan

Wang Ping¹, Li Lushan², Ding Zhiqiang^{1,3,4}, Li Yuhui¹

(1. Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Zixi Middle School Chuxiong, Yunnan Province, Chuxiong, Yunnan 675099, China;

3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

4. Fujian Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming, Fujian 365002, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate variations in the effective retention of litter within main forests and the influence factors, and to provide scientific support for future vegetation restoration and forest management. [Methods] we employed a combination of field surveys and indoor water immersion experiments within the Shuanghe-Monande Nature Reserve located in Kunming City, the central of Yunnan Province. We studied site characteristics and hydrodynamic processes of seven representative types of forest: Secondary Forest (SF), Theropencedrymion forest (TF), *Alnus cremastogyne* forest (ACF),

收稿日期: 2023-07-05

修回日期: 2023-07-30

资助项目: 中央财政林业改革发展资金项目“云南乌蒙山国家级自然保护区森林群落土壤监测”(53060020000000025798)

第一作者: 王平(1965—), 男, 云南昭通人, 硕士, 教授, 研究方向: 土壤地理与生态修复。E-mail: ynwangping@163.com

通信作者: 丁智强(1993—), 男, 云南禄劝人, 博士, 研究方向: 水土资源与环境变化。E-mail: zhiqiang_ding9303@163.com.

<http://stbcyj.paperonce.org>

Pinus armandii forest (PA), Old *Pinus yunnanensis* forest (OPY), Young *Pinus yunnanensis* forest (YPY), *Acacia dealbata* forest (AD). [Results] (1) The litter thickness of seven types of forest ranged from 2.06 to 7.57 cm, with OL layer 1.10~4.30 cm and OF layer 0.83~3.93 cm, and ranked as TF>ACF>PA>OPY>SF>AD>YPY. The litter accumulation volume ranged from 4.75 to 17.45 t/hm², with OL layer accounting for 32.02%~62.48% and OF layer 37.52%~67.98%, and ranked as TF>PA>SF>OPY>ACF>AD>YPY. (2) The maximum water holding rate of litter was 115.3%~170.7%, and the initial water absorption rate was 3.65~5.62 g/(g·h), and their correlation with water immersion were described by logarithmic function $y=a\ln(x)+b$ and power function $y=kt^n$. (3) The maximum water holding capacity of litter ranged from 7.05 to 32.19 t/hm², ranked as PA>TF>SF>OPY>ACF>AD>YPY. The effective holding capacity ranged from 5.45 to 25.34 t/hm², and TF was the highest (25.34 t/hm²), followed by PA (24.99 t/hm²) and SF (24.62 t/hm²), while YPY had the lowest capacity (5.45 t/hm²). The effective storage capacity of litter ranged from 5.45 to 25.34 t/hm², with the same ranking as water holding capacity. The site characteristics that influenced the effective storage volume included litter storage volume, natural water content, decomposition intensity, and thickness. The hydrodynamic processes affecting the effective storage volume included maximum water loss, average absorption rate in initial 6.0 hours, and average absorption rate in initial 2.0 hours. [Conclusion] For future afforestation efforts in the central Yunnan region, we recommend to prioritize the establishment of mixed needle-broad forests and conserve the zonal evergreen secondary forests. To facilitate the evolution of artificial monoculture forests towards mixed forests, it is advisable to implement measures for natural regeneration. Furthermore, it is crucial to minimize human activities, such as trampling and excessive litter collection, which can disrupt forest ecosystem. By doing so, the water retention capacity of forest system can be enhanced through effective conservation of litter.

Keywords: litter; main types of forest; water holding characteristics; effective retention; central Yunnan region

森林生态系统具有调节区域气候、保持水土、涵养水源、提供生物质能等生态和经济效益^[1]。随着人口增长和全球变暖造成的水资源胁迫,森林水源涵养功能日益重要,该功能的下降或丧失会导致水土流失、土地荒漠化以及洪涝、滑坡等自然灾害^[2]。以往的研究重点关注了林冠层截留、穿透雨和树干径流,而忽略了凋落物层的水文功能^[3]。然而作为连接大气降水与矿质土壤的缓冲层,凋落物层在坡面水文过程中发挥着至关重要的作用。凋落物层能够减弱雨水滴溅和土壤流失^[4],提高水分入渗比例并延迟或消除坡面产流,降低土壤水分蒸发^[6],凋落物分解还会影响土壤结构和物理特性^[7],增加土壤孔隙度和有机质含量,调节土壤稳定性和水分下渗能力,进而驱动土壤水文响应和地下水补给。因此凋落物截留是相对于林冠的另一个更加重要的降雨再分配过程,是森林水源涵养和生态功能的重要支撑。

凋落物层按分解程度可划分为未分解层和半分解层^[8],浸泡试验是了解森林凋落物保水能力的常用方法,充足的水分供给能够确定凋落物持水的最大潜力,通过经验系数转换可以了解凋落物层的有效截留量^[5]。凋落物层能够截留降水的 15%~70%,以往

的研究认为这种高度变异性与树冠特征、地形、降水强度、频率和降水持续时间等因素^[6]有关,但最近的研究越来越关注凋落物类型与组成、厚度和蓄积量、分解强度、叶片功能性状和空间分布格局等凋落物层场地特征及水动力过程^[7-8]的相互影响,但目前尚未完全了解它们的相互关系。

云南高原历史上人地关系矛盾突出,森林破坏严重,目前地带性植被基本以次生林为主^[19],此外为增加森林覆盖率,还大面积种植早冬瓜、云南松、华山松和银荆等人工林,因为这些树种耐贫瘠、耐干旱、速生且适应性非常强^[20]。虽然已经认识到这些人工林恢复会影响森林生物多样性^[9]、土壤养分状况和水土流失强度等^[1],但是目前并不了解林下凋落物特征及水文功能的差异,这严重阻碍了该区域未来通过植被恢复和森林管理来应对气候变暖的能力^[10]。

滇中地区有关森林凋落物水文特征的研究已开展较多,如赵雨田^[11]和杞金华等^[12]关注单一树种或森林类型的凋落物水文特征,而彭邦晓^[13]、刘芝芹^[14]、方斌^[15]、周祥等^[16]研究了多个林分类型凋落物特征及持水规律。但总体来看,相关学者对各森林类型或树种凋落物持水特性的研究结果并不一致,同

时对影响凋落物有效截留量的因素主要关注厚度、蓄积量等场地特征,对于吸水、失水等水动力过程的关注较少,然而凋落物浸水后在不同时间段的吸水和失水特性才是反映其有效截留量的重要指标^[17-18]。因此本研究选取位于滇中地区昆明市的双河—磨南德水源林自然保护区7种主要森林类型:(1)了解林下凋落物层的场地特征,包括厚度、蓄积量、自然含水率以及分解强度等;(2)揭示不同森林类型凋落物水动力学过程的差异,包括吸水/失水过程中不同时间段内的质量以及速率等;(3)探讨凋落物有效截留量与场地条件和水动力过程的关系。本研究将加深对滇中地区主要森林类型凋落物层生态水文效应及其功能价值的认识,并为该地区未来植被恢复和森林管理提供科学支撑。

1 研究区概况

双河—磨南德水源林自然保护区位于滇中昆明市西南部晋宁区双河彝族乡和安宁市八街街道办事处境内,地理坐标:24°28′25″—24°40′36″N,102°15′40″—102°30′22″E,总面积31666.67hm²。海拔范围1930~2513.4m,平均海拔2129m。地势由南部、东部向西北倾斜。以中海拔丘陵和小起伏中山为主,山岭之间镶嵌有山间盆地和河谷。气候类型为低纬高原北亚热带湿润季风气候,年平均气温11.6~14.6℃,年平均降水量917.0~1190.0mm。雨季(5—10月)和旱季(11月至次年4月)分明,旱季降水量仅占全年的14%左右。保护对象为车木河等水库及其集水区半湿润常绿阔叶林、云南松林生态系统和生态环境。典型地带性植被为半湿润常绿阔叶林,经过20世纪五十至八十年代的严重破坏,目前以次生常绿阔叶林为主,主要由滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)等构成,以及由栓皮栎(*Quercus variabilis*)、槲栎(*Quercus aliena*)、麻栎(*Quercus acutissima*)与云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)等组成的针阔混交林,林下以大白花杜鹃(*Rhododendron decorum*)、碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)、米饭花(*Vaccinium mandarinorum*)、乌饭(*Vaccinium bracteatum*)、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)、水红木(*Viburnum cylindricum*)和滇杨梅(*Myrica nana*)等小灌木为主。其次是次生天然云南松林、早冬瓜(*Alnus cremastogyne*)林,以及人工华山松纯林、银荆(*Acacia dealbata*)纯林等。

2 材料与方法

2.1 样地设置与凋落物收集

本研究在保护区范围内选择植被均匀、立地条件相似、人为干扰较少的次生常绿阔叶林(Secondary forest, SF)、针阔混交林(Theropencedrymion forest, TF)、早冬瓜林(*Alnus cremastogyne* forest, ACF)、华山松林(*Pinus armandii* forest, PA)、成熟云南松林(Old *Pinus yunnanensis* forest, OPY)、幼龄云南松林(Young *Pinus yunnanensis* forest, YPY)、银荆林(*Acacia dealbata* forest, AD)等7种森林类型(表1),其中次生常绿阔叶林由原生林砍伐后封禁自然恢复形成,针阔混交林是在次生林基础上种植华山松和云南松后封禁抚育而成,其余森林类型均由坡旱地退耕和撂荒后种植形成的人工林,YPY的林龄最短为5~8a,其余森林类型的林龄在18~23a。每个森林类型设置3个20m×20m的样地,在样地沿对角线方向的上坡、中坡、下坡各设置1个0.5m×0.5m凋落物样方,记录样地的相关情况(表1)。

研究区每年超过50%的凋落物掉落发生在11月至次年5月的旱季,雨季来临前的5月是地上凋落物蓄积量最大的时段^[7]。因此本研究在连续5d以上无降雨的2019年5月9—12日进行野外采样并测定自然含水率,5月13日开始在云南师范大学地理学部土壤地理实验室开展其他相关试验。野外采样时在每个标准样地内按未分解层(OL层)、半分解层(OB层)收集完整的凋落物层装入塑料容器内,共收集42袋凋落物。现场记录每袋凋落物的鲜重(W_f),随机测量6个点来代表该样方的凋落物层平均厚度,以某层凋落物占样方蓄积量的比值表示该样方凋落物的分解强度。

2.2 凋落物样品测定

将收集的新鲜凋落物称重(W_f)后放入85℃烘箱中烘至恒重(W_0),之后计算单位面积(0.5m×0.5m)的凋落物质量,即为凋落物蓄积量(W , t/hm²)。采用室内浸泡法测定凋落物持水性能,具体步骤为:称取一定量烘干至恒重的凋落物,装入45cm×30cm大小的多孔尼龙网袋,将尼龙网袋完全放入水中浸泡0.25h,0.5h,1.0h,2.0h,4.0h,6.0h,8.0h,12.0h,24.0h后捞起,静置至不滴水时称重(W_t)。每个样方的试验进行3次,每次更换凋落物样品。

凋落物持水率(R_t)指凋落物中储存的水分与凋落物干重(W_0)的比值,计算公式为:

$$R_t = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_t 是凋落物在浸水 t 小时后的持水率; W_0 是凋落

物干重(kg); W_t 是浸水 t 小时后的凋落物质量($t=0.25$ h, 0.5 h, 1.0 h, 2.0 h, 4.0 h, 6.0 h, 8.0 h, 12.0 h, 24.0 h)。

表 1 调查样地基本情况

Table 1 Basic information of survey plots

样地 代号	森林类型	经纬度	坡向	平均 海拔/m	平均 坡度/(°)	平均 树高/m	平均 胸径/cm	平均 郁闭度/%	乔木层密度/ (株·hm ⁻²)
PA	华山松林	24°31'21"N, 102°19'15"E	SE5°	2272	17	15.2	21.3	82	1850
ACF	旱冬瓜林	24°31'32"N, 102°19'17"E	NW25°	2294	17	9.8	12.6	88	1875
OPY	成熟云南松林	24°31'59"N, 102°19'27"E	NW70°	2156	24	13.6	16.7	76	1825
AD	银荆林	24°37'47"N, 102°23'34"E	SW21°	1945	19	9.3	10.4	74	1775
TF	针阔混交林	24°37'44"N, 102°23'33"E	SW40°	1954	20	7.2	8.4	80	1850
YPY	幼龄云南松林	24°37'34"N, 102°23'17"E	NE58°	1939	16	4.8	6.5	72	1725
SF	次生常绿阔叶林	24°35'27"N, 102°22'22"E	SE20°	1941	19	8.4	15.6	94	1925

凋落物吸水速率 $[V_t, \text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})]$ 是指凋落物浸水 t 小时的持水率, 计算公式为:

$$V_t = [(W_t - W_0) / W_0] / t \quad (2)$$

W_m 为凋落物最大持水量, 当凋落物重量不随浸水时间增加而增加时, 此时的质量与凋落物干重之差即为 W_m , 在本研究中, 凋落物在水中浸泡 24 h 后持水率基本不增加, 因此, W_m 在数值上等同于 $W_{24 \text{ h}}$, 森林凋落物的有效截留量(M_p)约为最大持水率的 85%:

$$R_m = (W_m - W_0) / W_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$R_0 = (W_f - W_0) / W_f \times 100\% \quad (4)$$

$$P = 0.85 \times R_m - R_0 \quad (5)$$

$$M_p = P \times W \quad (6)$$

$$M_m = R_m \times W \quad (7)$$

式中: R_m 为凋落物最大持水率(%); R_0 为凋落物自然含水率(%); P 为凋落物有效截留率(%); W_f 为凋落物鲜重; M_p 为凋落物有效截留量(t/hm^2); M_m 为凋落物最大持水量(t/hm^2); W 为凋落物蓄积量(t/hm^2)。

尼龙网袋在浸水 24 h 后取出放置于空气中自然风干, 分别隔 0.25 h, 0.5 h, 1.0 h, 2.0 h, 4.0 h, 6.0 h, 8.0 h, 12.0 h, 24.0 h 时称其重量, 凋落物失水率($R_{t'}$)指凋落物在 t 小时后的失水量与凋落物最大持水量(W_m)的比值, 计算公式为:

$$R_{t'} = (W_m - W_{t'}) / W_m \times 100\% \quad (8)$$

式中: $R_{t'}$ 是凋落物在失水 t 小时后的持水率; W_m 凋落物最大持水量; $W_{t'}$ 是失水 t' 小时后的凋落物质量($t'=0.25$ h, 0.5 h, 1.0 h, 2.0 h, 4.0 h, 6.0 h, 8.0 h, 12.0 h, 24.0 h)。

凋落物失水速率 $[V_{t'}, \text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})]$ 是指凋落物浸水 t' 小时的失水速率, 计算公式为:

$$V_{t'} = [(W_m - W_{t'}) / W_m] / t' \quad (9)$$

式中: $V_{t'}$ 为凋落物失水速率; $M_{t'}$ 为失水 t' 小时后的

凋落物质量。

2.3 统计分析

使用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验确定数据的正态分布和方差齐性, 单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著性差异法 (Least significant difference, LSD) 用于确定各个森林类型的差异显著性, 双因素方差分析用于确定森林类型、凋落物层对凋落物厚度、蓄积量的独立或交互影响, 显著性水平为 0.05, 使用 Origin 2021b 软件绘制相关图表。使用 SIMCA-P 软件中的偏最小二乘回归模型 (PLS) 分析场地特征及水动力过程等因子对凋落物有效截留量的贡献, 并计算 VIP (Variable importance in project, VIP) 指数来量化各个因子的重要性。

3 结果与分析

3.1 凋落物厚度与蓄积量

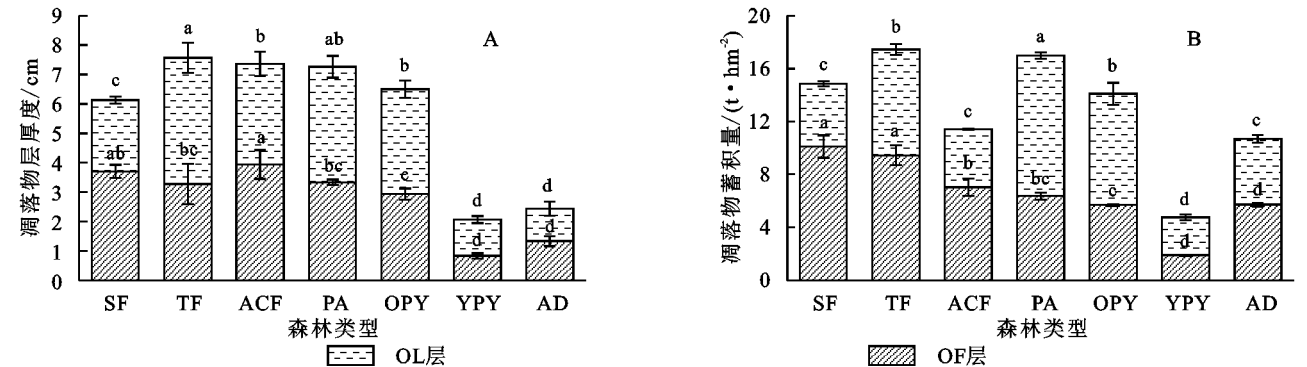
森林类型、凋落物层以及森林类型 \times 凋落物层对凋落物厚度和凋落物蓄积量均有显著影响 (表 2), 乔木层密度仅单独对凋落物层厚度有影响 ($p < 0.05$)。不同森林类型凋落物总厚度为 2.06~7.57 cm, 其中 OL 层 1.10~4.30 cm, OF 层 0.83~3.93 cm, 凋落物层厚度排序为 TF>ACF>PA>OPY>SF>AD>YPY (图 1A)。不同森林类型凋落物总蓄积量为 4.75~17.45 t/hm^2 , 大小依次为 TF>PA>SF>OPY>ACF>AD>YPY (图 1B)。不同层凋落物蓄积量占总凋落物蓄积量的比例不同, 其中 OL 层占比为 32.02%~62.48%, OF 层占比为 37.52%~67.98%, 其中 PA, OPY 和 YPY 的 OL 层蓄积量大于 OF 层, 不同森林类型凋落物分解强度为 0.60~2.12, 凋落物分解强度排序为 SF(2.12)>ACF(1.60)>TF(1.18)>AD(1.16)>OPY(0.68)>YPY(0.65)>PA(0.6), 表现为阔叶林大于针叶林。

表 2 影响凋落物厚度和蓄积量的双因素分析

Table 2 Bifactorial analysis of factors influencing litter thickness and accumulation

因变量	影响因素	df	SS	MS	F	p
凋落物厚度/cm	森林类型	6	109.20	18.20	47.31	0.00***
	凋落物层	1	86.00	86.00	223.55	0.00***
	凋落物层×森林类型	6	15.16	2.53	6.57	0.00***
凋落物蓄积量/(t·hm ⁻²)	森林类型	6	174.34	29.06	142.79	0.00***
	凋落物层	1	1.11	1.11	5.48	0.03*
	凋落物层×森林类型	6	95.96	15.99	78.59	0.00***

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。



注:OL表示凋落物未分解层;OF表示凋落物半分解层;SF表示次生常绿阔叶林;TF表示针阔混交林;ACF表示旱冬瓜林;PA表示华山松林;OPY表示成熟云南松林;YPY表示幼龄云南松林;AD表示银荆林;不同小写字母表示两个森林类型同层凋落物存在显著差异($p < 0.05$)。

图 1 不同森林类型凋落物厚度和蓄积量差异

Fig. 1 Variations in litter thickness and accumulation across different forest types

3.2 凋落物持水率和吸水速率

在浸水前 2 h 内各森林类型凋落物持水率迅速增加,在相同浸水时间内,OF 层的持水率略高于 OL 层,且 OF 层优先达到饱和。OL 层持水率以 SF 增幅最快,ACF 增幅小于 SF,但整个吸水过程中 SF 和 ACF 的持水率均高于其他森林类型(图 2A),OF 层持水率除 YPY 较小外,其余 6 种森林类型的持水率大小基本一致(图 2B)。各森林类型凋落物持水率(y)与浸水时间(x)的最佳拟合公式为 $y = a \ln(x) + b, R^2 > 0.96$ 。

不同森林类型凋落物在浸水 4.0 h 之前为快速吸水阶段,OL 层吸水速率 4.86~2.20 g/(g·h),ACF 最快,SF 次之,OPY 最慢(图 2C);OF 层吸水速率 3.65~5.62 g/(g·h),SF, PA, ACF 吸水速率较大,在 5 g/(g·h)以上。浸水 2.0~8.0 h 为持续吸水阶段,吸水速率变缓,浸水 8.0 h 后基本没有变化,持水量逐渐趋于饱和(图 2D),总体上调落物吸水速率 OF 层大于 OL 层,OL 层达到饱和的时间比 OF 层滞后约 2 h。各森林类型的吸水速率(y)与浸水时间(x)的最佳拟合公式为 $y = kx^n, R^2 > 0.999$ 。

3.3 凋落物持水能力

各森林类型凋落物最大持水量为 7.05~32.19 t/hm²,大小排序为 PA>TF>SF>OPY>ACF>AD>YPY。OL 层凋落物最大持水量以 PA 最高(17.33 t/hm²),

OF 层以 SF 最高(21.95 t/hm²),无论是 OL 层还是 OF 层,凋落物最大持水量均以 YPY 最小。不同凋落物层对比来看,OPY 和 YPY 的 OL 层和 OF 层相接近,PA 的 OL 层>OF 层,其余森林类型凋落物层最大持水量均为 OF 层>OL 层,其中 SF 的 OF 层最大持水量是 OL 层的 2.26 倍(图 3A)。

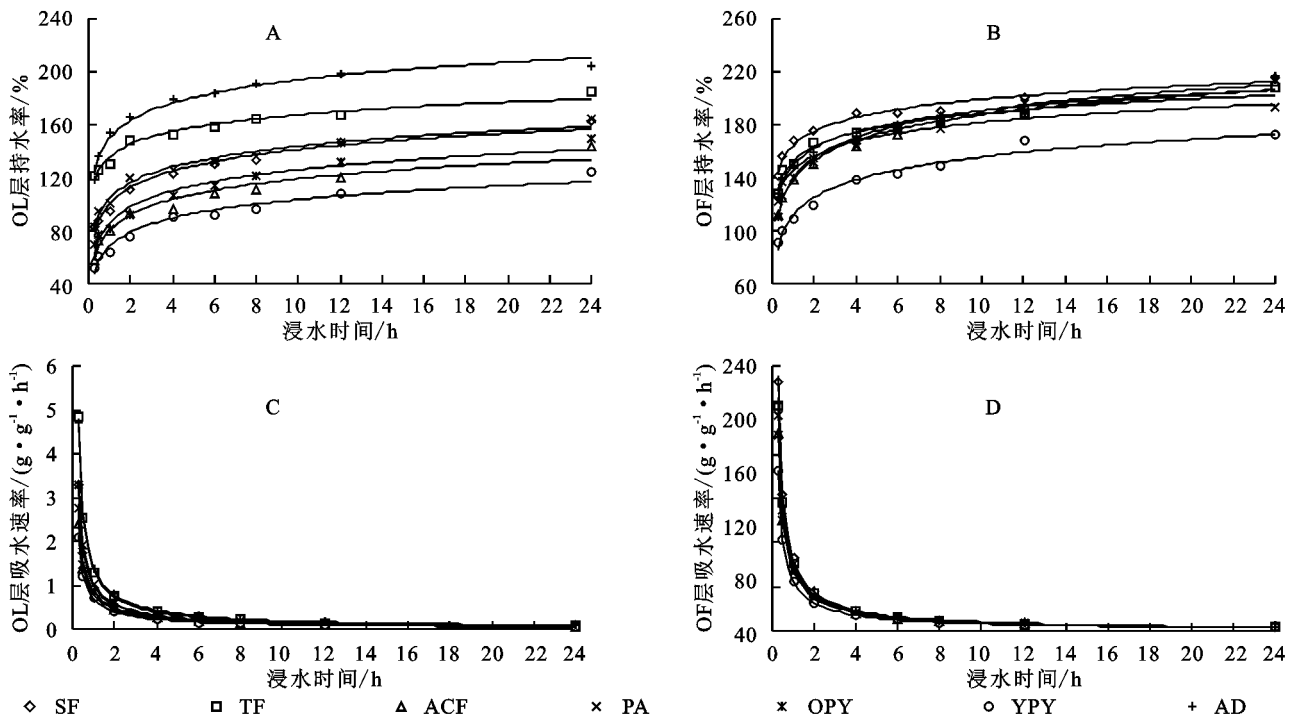
7 个森林类型的有效截留量为 5.45~25.34 t/hm²,大小排序为 TF>PA>SF>OPY>ACF>AD>YPY,TF 是 YPY 的 4.65 倍。在 OL 层中,PA 的有效截留量最大,其次是 OPY 和 TF,在 OF 层中 SF 和 TF 的有效截留量最大,ACF,PA,OPY 和 AD 十分接近,YPY 在 OL 和 OF 层的有效截留量均最小,不同凋落物层的有效截留量变化特征与最大持水量一致(图 3B)。

3.4 凋落物有效截留量的影响因素

基于偏最小二乘回归计算得到 VIP 值显示,对各个森林类型凋落物有效截留量的贡献较大的因素主要是凋落物的蓄积量(2.43)、最大失水量(2.03)以及自然含水率(1.27)、分解强度(1.21)(图 4A)。进一步区分 OL 层(图 4B)和 OF 层(图 4C),发现影响二者有效截留量的因子具有差异性。其中对 OL 有效截留量影响较大的因素是凋落物的蓄积量(2.47)、最大失水量(2.38)以及厚度(1.55);而影响 OF 层有

效截留量的因素较多,最大为凋落物的蓄积量(1.92),其次是自然含水率(1.61)和厚度(1.56),最后为最大

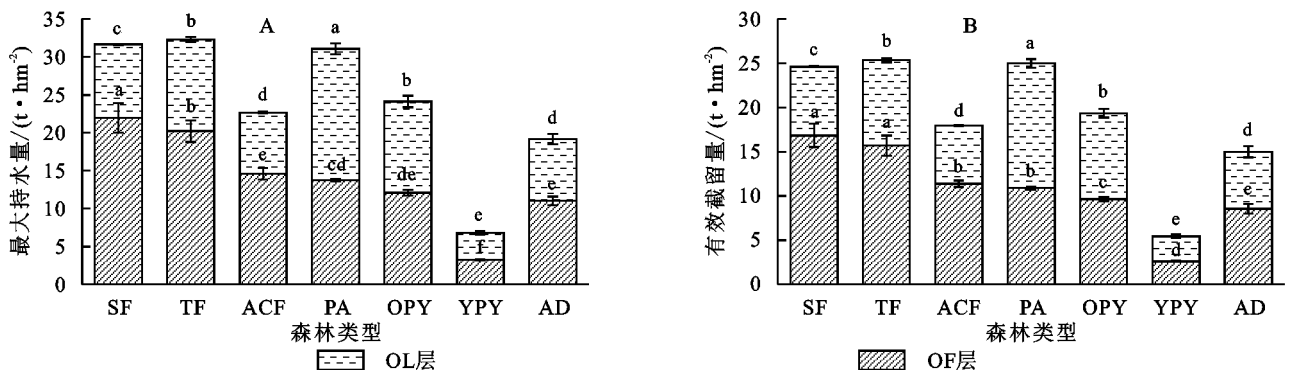
失水量(1.31)、分解强度(1.23)、前 6.0 h 平均吸水速率(1.22)和前 2.0 h 平均吸水速率(1.05)。



注:OL表示凋落物未分解层,OF表示凋落物半分解层,SF表示次生常绿阔叶林,TF表示针阔混交林,ACF表示旱冬瓜林,PA表示华山松林,OPY表示成熟云南松林,YPY表示幼龄云南松林,AD表示银荆林。

图2 不同森林类型凋落物吸水过程

Fig. 2 Water absorption process of litter in different forest types



注:OL表示凋落物未分解层,OF表示凋落物半分解层,SF表示次生常绿阔叶林,TF表示针阔混交林,ACF表示旱冬瓜林,PA表示华山松林,OPY表示成熟云南松林,YPY表示幼龄云南松林,AD表示银荆林;不同小写字母表示两个森林类型同层凋落物存在显著差异($p < 0.05$)。

图3 不同森林类型凋落物持水能力

Fig. 3 Water holding capacity of litter in different forest types

4 讨论

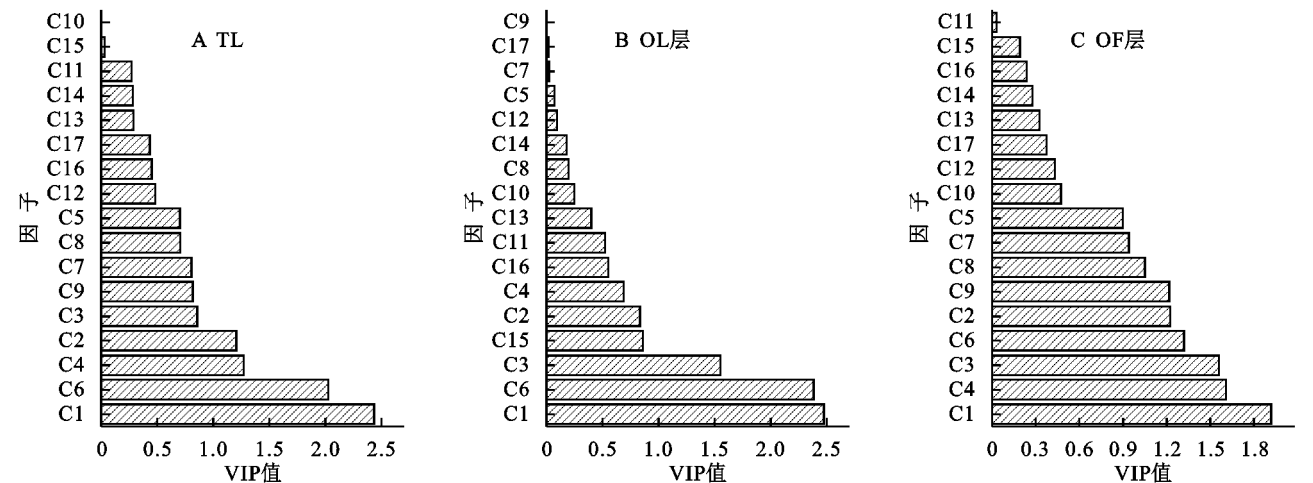
4.1 凋落物场地特征及水动力过程的差异

凋落物厚度和蓄积量受到植物特性(如生长速度、落叶状况、自然整枝强度等)、林内水热条件、凋落物分解速度及人为活动干扰等因素的影响,反映凋落物归还与分解的平衡,不同森林类型凋落物蓄积量存在较大差异^[1,19]。本研究中乔木层密度仅独立对凋落物厚度有影响,而森林类型的差异才是导致凋落物厚度和蓄积量变化的重要因素(表2),Bai等的研究

同样显示了植物群落类型对凋落物蓄积量和厚度的显著影响^[20]。各森林类型中以针阔混交林的凋落物蓄积量最高,其次是阔叶和针叶纯林(图1),这与Su等的研究结果一致^[21],针阔混交林由于更高的物种多样性,分布于不同高度的树冠对光能的利用效率相比其他林型更高,所以有较高的凋落物归还,同时由于针叶凋落物与阔叶凋落物混合有助于增加凋落物的密度以及降低阔叶凋落物的分解,所以导致其蓄积量高于纯林类型。针叶林与阔叶林蓄积量的大小存在较大争议,一般认为针叶凋落物具有独特的针状形

态和蜡质表面,并含有较高浓度的木质素和酚类等顽固化合物,所以其分解速率较低,导致其有更多的凋落物积累,而阔叶凋落物由于难分解的木质素等含量较低,更容易被微生物分解吸收,因此与针叶凋落物相比其降解和矿化速度更快^[22]。然而在本研究中次生常绿阔叶林的凋落物蓄积量小于华山松林,但大于

成熟云南松林,另外两种阔叶树种旱冬瓜林和银荆林又小于华山松林和成熟云南松林,仅大于幼龄云南松林,而且针叶林凋落物蓄积量表现为未分解层>半分解层,其他森林类型表现为半分解层>未分解层,所以针叶和阔叶林凋落物蓄积量大小关系的不确定性可能还受树种以及林龄的影响。



注:TL表示总凋落物,OL表示凋落物未分解层,OF表示凋落物半分解层,C1表示凋落物蓄积量,C2表示分解强度,C3表示厚度,C4表示自然含水量,C5表示有效拦蓄率,C6表示最大失水量,C7表示初始吸水速率,C8表示前2.0 h平均吸水速率,C9表示前6.0 h平均吸水速率,C10表示1.0~2.0 h吸水速率,C11表示第4.0~6.0 h吸水速率,C12表示初始失水速率,C13表示前2.0 h失水速率,C14表示前6.0 h平均失水速率,C15表示第1.0~2.0 h失水速率,C16表示第4.0~6.0 h失水速率,C17表示24.0 h平均失水速率。

图 4 凋落物有效截留量的影响因素

Fig. 4 Factors influencing the effective interception of litter

7种森林类型凋落物持水率、吸水速率与浸水时间(x)可用对数函数和指数函数表示,这与陈琦等的研究^[5]一致,总体上不同森林类型凋落物浸入水中后其持水率迅速增加,并且由于水势差较大的影响,吸水速率较高,之后持水率逐渐趋于恒定,而吸水速率则快速减小。7种森林类型凋落物的最大持水率在115.3%~170.7%,其大小与杨钟学等的结果^[23]接近,初始吸水速率在3.65~5.62 g/(g·h),而Bai等研究显示马尾松混交林的初始吸水速率在6.67~15.21 g/(g·h)^[20],由此可见,不同树种的差异会导致凋落物持水特性的差异,进而影响凋落物的有效截留量。

4.2 凋落物有效截留量差异

本研究中不同森林类型凋落物有效截留量具有差异性,其中以针阔混交林(25.34 t/hm²)最大,华山松林(24.99 t/hm²)和次生常绿阔叶林(24.62 t/hm²)接近,其次是成熟云南松林(19.35 t/hm²)、旱冬瓜林(17.96 t/hm²)和银荆林(14.99 t/hm²),幼龄云南松林(5.45 t/hm²)最小,针阔混交林凋落物有效截留量最大的结果与曾建军等的研究^[24]一致。除幼龄云南松林外,其余森林类型凋落物有效截留量明显高于昆明市海口林场栎类林分的9.39~10.25 t/hm²^[25],这可能与本研究中采样时间段凋落物储量最大、自然含

水率最小有关。同时,人工林林龄是影响凋落物有效截留量的重要因素,幼龄云南松林凋落物有效截留量仅为成熟云南松林的28.2%,说明成熟人工林具有更强的水源涵养能力。

此外,针叶林和阔叶林的关系较为复杂,一般认为阔叶林会显著增加降水的拦蓄能力以及减小地表径流,但针叶和阔叶凋落物分解率的不同导致其储量的不一致变化,以及叶面积和叶形态的水动力学差异^[20],进而造成二者在截留降水方面的不确定性。Zhao等^[26]的研究发现叶面积较大的阔叶凋落物平铺在地面,限制了雨水渗入底部的半分解层,并且叶片的连续叠加分布为雨水迁移提供了一个平滑的路径,从而促进雨水在凋落物层表层的流动,导致阔叶凋落物截留的雨水少于针叶,Li等的结果显示阔叶林是针叶林的1.6倍^[3]。但从本研究来看,常绿阔叶次生林与华山松林接近且高于成熟云南松林,但旱冬瓜林和银荆林却低于华山松林和成熟云南松林,这可能与阔叶林的树种组成以及林分结构有关,次生常绿阔叶林生物多样性更高,有更丰富的物种组成和垂直结构,旱冬瓜林和银荆林内生物多样性较低,垂直结构单一。林分结构以及树种差异最终导致林下凋落物场地特征以及水动力条件的差异,进而影响不同森

林类型凋落物的有效截留量。

4.3 影响凋落物有效截留量的因素

从偏最小二乘回归分析来看,影响有效截留量的场地特征主要为蓄积量、自然含水率、分解强度以及厚度,这得到多项研究成果的支持。首先 Sun 等研究显示凋落物有效截留量与蓄积量的相互关系^[27],而凋落物蓄积量取决于森林树种组成及林龄,其动态特征在不同林分中的差异很大,同时凋落物蓄积量还与林分密度有关,在林分密度较高的林分中,凋落物产生量较大,较多凋落物覆盖在地面上可以有效减缓雨水的冲击力,有利于水分的渗透和滞留,从而影响凋落物截留降水的能力,所以凋落物蓄积量与有效截留量的关系说明了森林类型和林分密度对有效截留量的叠加影响。其次,Liu 等发现不同森林类型凋落物自然含水率对环境变化的敏感性^[28],自然含水率会影响凋落物收缩、膨胀的状态,进而改变凋落物储水能力,此外 Kucza^[29]指出凋落物有效截留量取决于体积密度和前期储水量。不仅如此,凋落物持水量还受持水率和蓄积量的交互影响,Su 等^[21]发现虽然混交林的持水率较大,但由于凋落物蓄积量较低,其持水量依然很小。同时,影响有效截留量的水动力条件主要是最大失水量、前 6.0 h 平均吸水速率和前 2.0 h 平均吸水速率,表明凋落物层的水文功能不仅体现在对降水的拦截、重新分配以及水分在凋落物层中的运移,还体现在凋落物吸水/失水质量和速率等动态水动力学过程上^[20]。

显而易见,不同森林类型的凋落物层场地条件和水动力学过程都极大地影响凋落物层拦截降水的能力,所以滇中地区未来植树造林应该以针阔混交林为主,同时注重对地带性次生常绿阔叶林的封禁抚育,对于人工纯林应该采取辅助自然更新的做法,通过保护保留木、幼树以及促进地带性植被扩张,引导人工纯林逐渐向混交林发展。同时鉴于场地特征对凋落物有效截留量的突出作用,应该在未来森林管理过程中减少放牧、人为踩踏以及收集凋落物等干扰,维持林下凋落物储量和结构,进而增加森林系统的水源涵养能力。

5 结论

(1) 滇中地区 7 种主要森林类型凋落物总厚度为 2.06~7.57 cm,其中以针阔混交林最高(7.57 cm),华山松林(7.26 cm)次之,幼龄云南松林最小(2.06 cm)。凋落物蓄积量在 4.75~17.45 t/hm²,大小排序为针阔混交林>华山松林>次生常绿阔叶林>成熟云南松林>旱冬瓜林>银荆林>幼龄云南松林,除华山松林、成熟云南松林、幼龄云南松林外,其余森林类型蓄

积量以半分解层为主。

(2) 7 种森林类型凋落物最大持水率为 115.3%~170.7%,初始吸水速率为 3.65~5.62 g/(g·h),凋落物持水率和浸水时间可用对数函数 $y=a\ln(x)+b$ 表示,吸水速率与浸水时间可用幂函数 $y=kx^n$ 表示。

(3) 凋落物最大持水量为 7.05~32.19 t/hm²,大小排序为华山松林>针阔混交林>次生常绿阔叶林>成熟云南松林>旱冬瓜林>银荆林>幼龄云南松林,凋落物有效截留量为 5.45~25.34 t/hm²,以针阔混交林最高(25.34 t/hm²),华山松林(24.99 t/hm²)和次生常绿阔叶林(24.62 t/hm²)次之,幼龄云南松林最低(5.45 t/hm²),影响有效截留量的场地特征主要为蓄积量、自然含水率、分解强度以及厚度,影响有效截留量的水动力条件主要是最大失水量、前 6.0 h 平均吸水速率和前 2.0 h 平均吸水速率。

参考文献(References):

- [1] Hua F, Bruijnzeel L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches [J]. *Science*, 2022, 376 (6595):839-843.
- [2] 孙阁,张槽,王彦辉.准确理解和量化森林水源涵养功能[J].*生态学报*,2023,43(1):9-25.
Sun G, Zhang L, Wang Y H. On accurately defining and quantifying the water retention services of forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(1):9-25.
- [3] Li X, Xiao Q, Niu J, et al. Rainfall interception by tree crown and leaf litter:an interactive process[J]. *Hydrological Processes*, 2017,31(20):3533-3542.
- [4] Felix R W, Dias A T C, Bevilacqua M S, et al. Litter addition as a tool for restoring hydrological processes and controlling erosion in riparian forests disturbed by fine sediment deposition[J]. *Restoration Ecology*, 2023, 31(3):13895-13903.
- [5] 陈琦,刘苑秋,刘士余,等.杉木取代阔叶林后林下水源涵养功能差异评价[J].*水土保持学报*,2019,33(2):244-250.
- [6] 白云星,周运超,张薰元,等.马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力[J].*林业科学*,2021,57(11):24-36.
Bai Y X, Zhou Y C, Zhang X Y, et al. Water conservation capacity of litter and soil in mixed plantation of *Pinus massoniana* and broadleaved trees[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021,57(11):24-36.
- [7] Dunkerley D. Percolation through leaf litter:What happens during rainfall events of varying intensity[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,525(6):737-746.
- [8] Li K F, Zhao L S, Hou R, et al. Effect of leaf distribution pattern on the interception storage capacity of leaf litter under simulated rainfall conditions[J]. *Hydrologi-*

- cal Processes, 2021, 35(2):10-21.
- [9] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1):1-10.
- [10] Zhang M, Liu S, Jones J, et al. Managing the forest-water nexus for climate change adaptation[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 525(12):120545-120556.
- [11] 赵雨田, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林枯落物蓄积特征及持水性能的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2):99-104.
- Zhao Y T, Chen Q B, Li J Q, et al. Effects of prescribed burning on accumulation and water holding capacity of litters in *Pinus Yunnanensis* forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):99-104.
- [12] 杞金华, 章永江, 张一平, 等. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J]. 生态学报, 2012, 32(6):1692-1702.
- Qi J H, Zhang Y J, Zhang Y P, et al. Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6):1692-1702.
- [13] 彭邦晓, 孙煜镛, 黎建强, 等. 滇中高原磨盘山典型森林类型枯落物持水性能研究[J]. 森林工程, 2022, 38(6):45-52, 60.
- Peng B X, Sun Y R, Li J Q, et al. Study on litter water-holding capacity of typical forests in Mopan mountain in central Yunnan Plateau[J]. Forest Engineering, 2022, 38(6):45-52.
- [14] 刘芝芹, 黄新会, 涂璟, 等. 云南高原不同林分类型枯落物储量及持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6):919-924.
- Liu Z Q, Huang X H, Tu J, et al. Litter reserves and water holding characteristics of different species in Yunnan Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(6):919-924.
- [15] 方斌, 黄俊文, 赵洋毅, 等. 滇中地区典型林分林地凋落物及土壤水文效应[J]. 防护林科技, 2016, 33(6):18-21, 30.
- Fang B, Zhang J W, Zhao Y Y, et al. Hydrological effects of soil and typical forest litters in the central area of Yunnan Province[J]. Protection Forest Science and Technology, 2016, 33(6):18-21, 30.
- [16] 周祥, 赵一鹤, 张洪江, 等. 云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2):248-252.
- Zhou X, Zhao Y H, Zhang H J, et al. Study on water-holding capacity and characteristics of forest litter in plateau region of Yunnan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2):248-252.
- [17] 杜晨曦, 史常青, 杨建英, 等. 小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):236-243.
- Du C X, Shi C Q, Yang J Y, et al. Recovery characteristics of water-holding capacity of litter in typical stands of Xiaowutai Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):236-243.
- [18] 赵雨虹, 范少辉, 夏晨. 亚热带4种常绿阔叶林林分枯落物储量及持水功能研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(6):93-98.
- Zhao Y H, Fan S H, Xia C. A study on reserves and water holding function of litter in four types of evergreen broadleaved forest in subtropical zone of China[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2015, 39(6):93-98.
- [19] Thakur T K, Eripogu K K, Thakur A, et al. Disentangling forest dynamics for litter biomass production in a biosphere reserve in Central India[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10(7):940614-940622.
- [20] Bai Y, Zhou Y, Du J, et al. Effects of a broadleaf-oriented transformation of coniferous plantations on the hydrological characteristics of litter layers in subtropical China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 25(1):1400-1410.
- [21] Su S, Liu X. The water storage function of litters and soil in five typical plantations in the northern and southern mountains of Lanzhou, Northwest China[J]. Sustainability, 2022, 14(14):8231-8245.
- [22] Ni X, Lin C, Chen G, et al. Decline in nutrient inputs from litterfall following forest plantation in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 496(9):445-456.
- [23] 杨钟学, 奎燕, 鲍绍辉, 等. 抚仙湖径流区4种典型森林凋落物水源涵养功能研究[J]. 林业建设, 2020, 37(3):29-33.
- Yang Z X, Kui Y, Bao S H, et al. Water conservation function of litter in four forests in the runoff area of the Fuxianhu lake[J]. Forestry Construction, 2020, 37(3):29-33.
- [24] 曾建军, 史正涛, 张华伟, 等. 滇中城市水源地不同林型水源涵养功能评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6):84-87, 101.
- Zeng J J, Shi Z T, Zhang H W, et al. Evaluation on water conservation function of different forest types in urban water sources of the Central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(6):84-87, 101.

- 会 DB11/685, 2021.
- Beijing Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd.. Code for design of stormwater management and harvest engineering[S]. Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, DB11/ 685, 2021.
- [28] Jing X E, Zhang S H, Zhang J J, et al. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 126:74-85.
- [29] Zhang S H, Zhang J J, Yue T J, et al. Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665:262-274.
- [30] Ali S, Zhang S H, Yue T J. Environmental and economic assessment of rainwater harvesting systems under five climatic conditions of Pakistan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259:120829.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)[M].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC. Technical Guidelines for Sponge City construction-Construction of Rainwater System for Low Impact Development(Trial) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [32] Imteaz M A, Ahsan A, Shanableh A. Reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: Variations within a large city[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 77:37-43.
- [33] Sample D J, Liu J. Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 75:174-194.
- [34] Okoye C O, Solyali O, Akintuğ B. Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104:131-140.
- [35] Liang R, Di Matteo M, Maier H, et al. Real-time, smart rainwater storage systems: Potential solution to mitigate urban flooding[J]. *Water*, 2019, 11(12):2428;w11122428.
- [36] Parker E A, Grant S B, Sahin A. Can smart stormwater systems outsmart the weather? Stormwater capture with real-time control in southern California[J]. *Acs Est Water*, 2022, 2(1):10-21.
- [37] Sefton C, Sharp L, Quinn R, et al. The feasibility of domestic raintanks contributing to community oriented urban flood resilience[J]. *Climate Risk Management*, 2022, 35:100390.
- [38] Xu W D, Burns M J, Cherqui F, et al. Enhancing stormwater control measures using real-time control technology: A review[J]. *Urban Water Journal*, 2020, 18(2):101-114.
- [39] Behzadian K, Kapelan Z, Mousavi S J, et al. Can smart rainwater harvesting schemes result in the improved performance of integrated urban water systems [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(20):19271-19282.
- [40] Dirckx G, Korving H, Bessembinder J, et al. How climate proof is real-time control with regard to combined sewer overflows?[J]. *Urban Water Journal*, 2017, 15(6):1-8.

(上接第 221 页)

- [25] 郭倩汝, 许彦红, 杨旭, 等. 昆明市海口林场栎类林分枯落物层及土壤层水源涵养功能的研究[J]. *西南林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 41(4):136-143.
- Guo Q R, Xu Y H, Yang X, et al. Study on water conservation function of litter layer and soil layer of oak stand in Haikou Forest Farm of Kunming[J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2021, 41(4):136-143.
- [26] Zhao L, Hou R, Fang Q. Differences in interception storage capacities of undecomposed broad-leaf and needle-leaf litter under simulated rainfall conditions [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 446(8):135-142.
- [27] Sun J, Yu X, Wang H, et al. Effects of forest structure on hydrological processes in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561(6):187-199.
- [28] Liu X, Feng Y, Liu P, et al. Soil moisture dominated the temporal dynamics of litter moisture content in subtropical forests: A 7-year observation in south China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 41(6):101102-101112.
- [29] Kucza J. Laboratoryjne badania zatrzymywania wody w poziomach organicznych i mineralnych gleb wybranych dolnoreglowych drzewostanow swierkowych w Beskidzie Slaskim. Czesc I. Wplyw dlugosci czasu przesychnania probki organicznej na jej zdolnosc zatrzymywania wody [J]. *Acta Agraria Et Silvestria. Series Silvestris*, 2003, 41(5):39-58.