

DOI: 10.20103/j.stxb.202402040310

余恩旭, 刘世荣, 张明芳, 侯怡萍, 孙美荣, 邓诗宇. 林分-流域森林凋落物持水能力空间尺度上推模型构建——以河南宝天曼蜜子庄流域为例. 生态学报, 2025, 45(2): 911-922.

Yu E X, Liu S R, Zhang M F, Hou Y P, Sun M R, Deng S Y. Development of spatial upscaling models for stand-to-watershed forest litter water holding capacity: a case study in the Manzizhuang watershed in Baotianman, Henan Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 911-922.

# 林分-流域森林凋落物持水能力空间尺度上推模型构建

——以河南宝天曼蜜子庄流域为例

余恩旭<sup>1,2</sup>, 刘世荣<sup>1,2,\*</sup>, 张明芳<sup>3</sup>, 侯怡萍<sup>4</sup>, 孙美荣<sup>1</sup>, 邓诗宇<sup>3</sup>

1 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

2 河南宝天曼森林生态系统国家野外科学观测研究站, 南阳 474365

3 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731

4 不列颠哥伦比亚大学(奥肯那根校区), 加拿大不列颠哥伦比亚省 V1V 1V7

**摘要:** 森林凋落物持水能力是森林生态水文研究的重要内容之一。然而当前研究多集中在样地或林分尺度。如何将林分实测结果上推至流域或更大空间尺度一直是生态水文学研究的难点之一。以典型暖温带天然林流域河南宝天曼蜜子庄为例, 基于林分调查和凋落物持水特性测定, 结合遥感植被指数和树种组成比例等植被结构和环境因子构建凋落物持水能力林分-流域尺度上推模型, 量化流域尺度森林凋落物持水能力及其空间格局。结果表明: (1) 凋落物层最大持水量与坡度、树高和锐齿槲栎占比显著相关, 凋落物层有效拦蓄量与多年平均地上生物量和锐齿槲栎占比显著相关。其中, 锐齿槲栎比例是凋落物层持水量最为关键的因子。随着锐齿槲栎比例由 0% 增加到 100%, 凋落物层最大持水量和有效拦蓄量分别显著提升 59.2 和 55.6% ( $P < 0.05$ )。 (2) 植被结构特征因子引入锐齿槲栎占比后, 凋落物最大持水量和有效拦蓄量尺度上推模型拟合优度显著提升,  $R^2$  分别达到 0.918 和 0.857, 模型预测效果显著提升。 (3) 根据尺度上推模型估算结果, 流域凋落物平均最大持水量和有效拦蓄量分别为 17.69、17.13 t/hm<sup>2</sup>。流域中部凋落物最大持水量较高; 流域北、南部的凋落物有效拦蓄量较高。 (4) 流域低海拔缓坡地带、NDVI 最大值越高、多年平均地上生物量较小和锐齿槲栎占比越高的区域凋落物层持水能力更强。研究结果可为林业部门制定林业资源适应性森林经营管理措施提供科学依据。

**关键词:** 水源涵养; 锐齿槲栎; 凋落物; 持水特性; 尺度上推模型

## Development of spatial upscaling models for stand-to-watershed forest litter water holding capacity: a case study in the Manzizhuang watershed in Baotianman, Henan Province

YU Enxu<sup>1,2</sup>, LIU Shirong<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Mingfang<sup>3</sup>, HOU Yiping<sup>4</sup>, SUN Meirong<sup>1</sup>, DENG Shiyu<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Baotianman Forest Ecosystem Research Station, Nanyang 474365, China

3 School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

4 Department of Earth, Environmental and Geographic Sciences, University of British Columbia (Okanagan), 1177 Research Road, Kelowna, British Columbia V1V 1V7, Canada

**基金项目:** 国家重点研发计划课题项目(2021YFD2200405); 国家自然科学基金项目(31930078)

**收稿日期:** 2024-02-04; **网络出版日期:** 2024-10-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

**Abstract:** Water holding capacity of forest litter is an important topic for forest eco-hydrology. Yet, most studies on forest litter water holding capacity are performed at plot or stand scales. There remains a lack of effective methods to extrapolate the forest water holding capacity from the plot or stand scale to larger spatial scale, e.g., watershed scale. By use of field sampling and experimental data on the water holding capacities of different types of forest stands and tree species composition along with remote sensing data e.g., vegetation index in the Manzizhuang watershed in Baotianman, this study established the spatial upscaling models based on forest vegetation structures (e.g., vegetation index and the proportions of different tree species) and environmental factors, and then applied the models to evaluate water holding capacity of forest litter and its spatial pattern at a watershed scale. We found that (1) The maximum water holding capacity of forest litter is significantly related to slope, tree height and the proportion of *Quercus* while the effective storage capacity is closely related to the average annual aboveground biomass and the proportion of *Quercus*. (2) The proportion of *Quercus* is a key factor for the water holding capacity of forest litter. The maximum water holding capacity and the effective storage capacity significantly increased by 59.2 and 55.6% ( $P < 0.05$ ), respectively, when the proportion of *Quercus* increased from 0 to 100%. Introducing the proportion of *Quercus* greatly promote the performance of the upscaling models of maximum water holding capacity and effective storage capacity forest litter with higher  $R^2$  values of 0.918 and 0.875, respectively, and lower values of stand deviation ( $SD$ ), root mean square error ( $RMSE$ ) and mean absolute error ( $MAE$ ). (3) According to the upscaling results, the average values of maximum water holding capacity and effective storage capacity of forest litter were 17.69 and 17.13 t/hm<sup>2</sup>, respectively in Manzizhuang watershed. The areas with higher litter maximum water holding capacity were in the centre of the watershed, while greater litter effective storage capacity areas were located in the north and south of the watershed. (5) In terms of terrain and vegetation conditions, areas with greater litter water holding capacity were mostly featured with lower elevations and annual average aboveground biomass, higher maximum NDVI and the proportion of *Quercus* and flatter slopes. This study can provide scientific supports for forestry sectors to develop adaptive management measures for managing forest-water nexus.

**Key Words:** water conservation; *Quercus aliena* var. *acutiserrata*; litter; water holding capacity; upscaling model

近年来,随着全球变化、人类活动加剧和水安全问题日益凸显,森林生态系统水源涵养功能受到广泛关注<sup>[1]</sup>。凋落物作为森林生态系统的重要组成部分,直接参与全球生物地球化学循环和森林生态水文过程<sup>[2-3]</sup>。森林凋落物通过截留降水和抑制土壤水分蒸发等过程,发挥森林水源涵养功能<sup>[4]</sup>。因此,森林凋落物持水能力研究是森林生态水文领域关注的热点<sup>[5]</sup>。众多学者聚焦林分尺度开展了凋落物持水能力的研究<sup>[6-7]</sup>。然而,复杂的森林结构和环境条件导致流域内凋落物持水能力存在明显的空间差异<sup>[8]</sup>,林分实测结果通常难以反映流域整体分布特征<sup>[9]</sup>,对流域、区域等大尺度的林水资源管理的作用有限<sup>[10]</sup>。因此,开展林分-流域凋落物持水能力尺度推演对于林水关系研究具有重要意义,同时将有利于全面理解森林水源涵养功能时空特征及其形成机制。

如何将林分实测水源涵养参数上推至流域乃至更大的尺度一直是生态水文研究的难题之一<sup>[11]</sup>。徐亚莉等<sup>[12]</sup>基于林分实测数据和遥感产品,采用逐步回归方法,构建了基于植被和环境因子的林分-流域森林土壤水源涵养功能尺度转换模型,实现岷江上游杂谷脑流域尺度森林土壤持水能力估算。然而,目前鲜有关于森林凋落物持水能力尺度上推的研究。森林凋落物持水能力尺度上推模型的构建首先需要准确识别森林凋落物持水能力的关键影响因子。但是森林凋落物持水能力的关键影响因素通常因空间尺度而异。有研究表明,坡面或林分尺度上,如林龄、林分密度和树种组成等林分特征是影响凋落物持水的主要因素<sup>[5, 13-14]</sup>。其中,林分结构特征决定林下调落物蓄积特征,进而成为主导林分凋落物分解和持水能力的关键因素<sup>[5]</sup>。例如,贾秀红等<sup>[14]</sup>研究鄂中低丘区不同演替阶段林分凋落物持水能力表现为麻栎林(*Quercus acutissima*)>马尾松+冬青混交林(*Pinus massoniana*, *Ilex chinensis*)>马尾松林。在流域或更大空间尺度上,森林凋落物持水能力的影

响因子更为复杂。除森林植被特征外,地形(海拔、坡度、坡向)和气候(降雨、气温、风速等)等因素对森林凋落物持水能力的作用增强,使其空间变异性更大<sup>[15]</sup>。由此可见,随着研究尺度扩大,气候和下垫面特征的高度时空变异性 and 复杂性增加了林分凋落物持水能力尺度上推的难度<sup>[11]</sup>。

此外,森林凋落物持水能力的准确计算依赖于精细化植被空间数据。林分尺度上使用样地调查、便携式仪器等手段能够精细量化植被结构信息,如树种组成比例等。而流域或更大尺度上由于获取精细化植被结构数据的成本高昂,通常使用遥感植被指数(如 LAI 等)表征<sup>[16]</sup>。但是遥感植被指数对树种、林龄组成等森林结构信息的表达不足影响了尺度上推模型的准确性。这也是导致对流域尺度上森林结构特征对凋落物持水能力影响的认识仍旧缺乏的原因之一<sup>[17-18]</sup>。因此,如何建立林分精细化植被结构参数与遥感植被指数之间的关系是构建凋落物持水能力空间尺度上推模型的重点和难点之一。

河南宝天曼蛮子庄流域地处的伏牛山区为汉水、淮河和黄河中游的共同水源涵养地、“南水北调中线工程”渠首水源的重要涵养林区,是国家水资源安全的重要绿色生态屏障。该地区因 19 世纪末至 20 世纪初的毁林开荒,导致天然林面积陡降。新中国成立后,政府明令禁止开荒,号召植树造林,经长期演替形成广袤的天然次生林<sup>[19]</sup>。其中,锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)和华山松(*Pinus armandii*)是宝天曼海拔 1300m 以上地区的优势树种<sup>[20]</sup>,受人为干扰较小,凋落物保存较好。两种阳性树种,生长特性相似(如耐寒喜湿、生长速度快)<sup>[21-23]</sup>,存在强烈的种间竞争关系<sup>[24-25]</sup>,其树种组成比例受全球变化影响在森林演替中将逐渐发生变化,从而改变凋落物持水特性和水源涵养功能,最终影响区域森林水源涵养能力。因此,开展宝天曼森林凋落物持水能力的空间尺度上推研究对于支撑国家水资源安全的绿色生态屏障建设和区域全球变化下适应性林水资源管理十分必要。

本研究立足国家水资源安全的绿色生态屏障建设需求,以河南宝天曼蛮子庄流域为例,针对森林凋落物水源涵养能力尺度上推的难题,通过融合遥感技术、野外采样、室内浸泡法和统计分析方法,量化林分精细化植被参数和遥感植被指数的关系,构建林分-流域森林凋落物持水能力尺度上推模型,揭示流域凋落物持水能力空间分布特征。本研究重点解决三个问题,一是森林凋落物持水能力关键影响因素的识别;二是流域尺度锐齿槲栎占比数据的生成;三是林分-流域森林凋落物持水能力尺度上推模型精度的提升。

## 1 研究区概况

河南宝天曼国家级自然保护区(111°47′—112°04′E, 33°20′—33°36′N),地处秦岭东缘伏牛山脉南麓、湍河上游地区,其中蛮子庄流域面积为 8.20km<sup>2</sup>(图 1)。地形起伏明显,最高海拔 1830m。属于季风性大陆气候,年均温度约为 15.1℃,7 月温度最高(平均 27.8℃,极端高温 41.2℃),1 月温度最低(平均 1.5℃,极端低温 -14.8℃);年均降水量为 886mm,约 60%集中在 5—10 月。土壤类型主要为山地褐土(海拔<800m),山地黄棕壤土(海拔 800—1300m)和山地棕壤土(海拔>1300m)。植被覆盖率达 98%左右,以常绿针叶林、落叶阔叶林和针阔混交林为主,主要树种包括锐齿槲栎、华山松、短柄枹(*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)<sup>[19]</sup>。

## 2 数据与方法

凋落物持水能力空间尺度上推模型构建及预测的

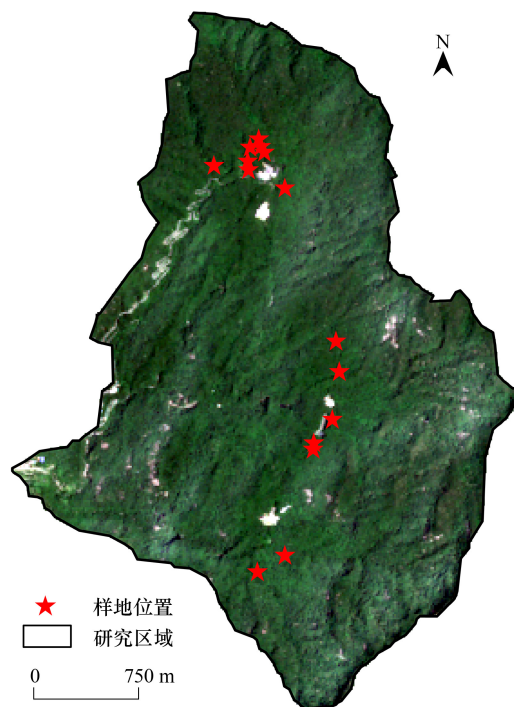


图 1 蛮子庄流域和样地位置

Fig.1 Manzizhuang watershed and sampling plot positions

技术路线见图 2。

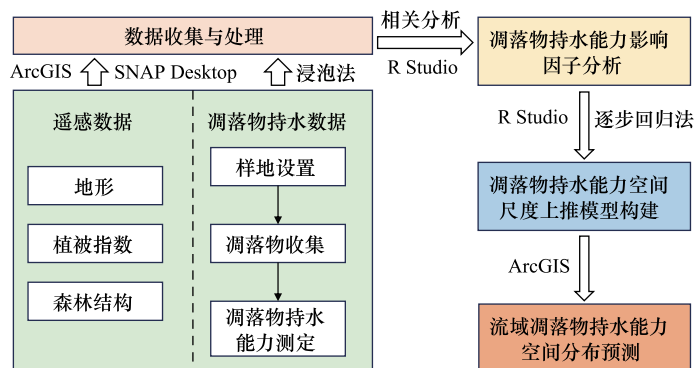


图 2 技术路线图

Fig.2 Research design

## 2.1 数据获取与处理

### 2.1.1 遥感数据

本文涉及的遥感数据包括地形和植被特征数据。DEM 来源于阿拉斯加卫星设备处网站 (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) 用于海拔、坡度和坡向等地形数据计算。Sentinel-2 遥感影像 (2023-07-16) 免费下载自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 使用 SNAP Desktop 计算采样期的叶面积指数 (LAI)、归一化植被指数 (NDVI) 和植被覆盖度 (FVC)。2022 年中国 30m 分辨率年最大 NDVI 数据集来源于国家科技资源共享平台 (<http://www.nesdc.org.cn/>), 用于定量采样前一年凋落物累积状况。2019—2021 年中国 30m 森林地上生物量产品下载于 ScienceDB (<https://www.scidb.cn/>), 并按均值合成用于定量森林植被多年平均生长状态。2019 年中国 30m 分辨率树高数据集来源于 GUO-LAB (<https://www.3decology.org/>), 建立与 2023 年样地实测数据的关系 ( $T_h = 0.5849 \times T_0 + 10.667, R^2 = 0.600, P < 0.05$ ) 进行校正。最后, 基于地形、植被特征数据构建锐齿槲栎占比反演模型 ( $P_Q = -7.077 + 6.784 \times \text{NDVI}_{\text{max-pre}} - 0.048 \times S_1 + 2.41 \times \text{FVC}, R^2 = 0.746, P < 0.01$ ), 并生成空间分布图。上述数据均在 ArcGIS 10.2 中按照蛮子庄流域边界进行裁剪, 并统一重采样至 30m×30m。

### 2.1.2 凋落物持水数据

根据样地可达性和研究区代表性树种, 2023 年 8 月, 本研究在蛮子庄流域内设置 5 种锐齿槲栎和华山松混交比例的样地, 以表征流域森林自然分布状况。各类型设置 3 个 20m×20m 重复样地, 样地间隔至少 100m。各样地的林龄均为 70 年左右、林分密度相似且人类干扰较小, 详见表 1。收集各样地四角和中心位置 1m×1m 范围内所有凋落物。按照未分解层 (枝叶完整, 无明显分解) 和半分解层 (枝叶破碎, 发生腐烂且呈暗色; 若半分解层和分解层区分困难, 均视为半分解层) 分装并称其鲜重。带回实验室在 85℃ 条件下烘干至恒重并称干重。

本研究采用室内浸泡法<sup>[26]</sup>测定凋落物的最大持水量和有效拦蓄量作为蛮子庄流域森林凋落物持水能力评价指标。分别将凋落物未分解层和半分解层装入已知质量的多孔尼龙网袋内, 并浸入清水 24h 后, 静置至无水滴落, 分别测定凋落物湿重、持水量和持水率。据此, 凋落物持水特性指标可由公式 (1) — (5) 得到:

$$R_{h\max} = (G_{24} - G_d) / G_d \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_{h\max} = M \times R_{h\max} \quad (2)$$

$$R_0 = (G_0 - G_d) / G_d \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{sv} = 0.85 R_{h\max} - R_0 \quad (4)$$

$$Q_{sv} = R_{sv} \times M \quad (5)$$

式中,  $G_d$  为凋落物干重 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $R_{h\max}$  为凋落物最大持水率 (%);  $G_{24}$  为凋落物浸水 24h 后湿重 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $Q_{h\max}$

为凋落物最大持水量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $M$  为凋落物蓄积量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $R_0$  为平均自然含水率 (%);  $G_0$  为凋落物鲜重 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $R_{\text{se}}$  为凋落物有效拦蓄率 (%);  $Q_{\text{se}}$  为凋落物有效拦蓄量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

表 1 样地基本信息  
Table 1 Basic information of different forest types

| 类型<br>Types | 森林类型<br>Forest types | 海拔<br>Elevation/m | 坡度<br>Slope/( $^{\circ}$ ) | 坡向<br>Aspect | 林分密度<br>Stand density/<br>(株/ $\text{hm}^2$ ) | 胸径<br>Diameter at<br>breast height/cm | 树高<br>Tree height/m     | 郁闭度<br>Canopy density |
|-------------|----------------------|-------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| HR0:4       | RR                   | 1413              | 8.22                       | 半阴坡          | 1062<br>(0, 1062)                             | 27.23<br>(0, 27.23)                   | 15.96<br>(0, 15.96)     | 0.75                  |
| HR1:3       | RH                   | 1357              | 11.99                      | 阳坡           | 1075<br>(292, 783)                            | 24.33<br>(22.44, 26.22)               | 15.52<br>(14.44, 16.60) | 0.80                  |
| HR2:2       | RH                   | 1393              | 8.40                       | 半阴坡          | 1175<br>(575, 600)                            | 21.76<br>(22.02, 21.50)               | 16.02<br>(16.52, 15.52) | 0.77                  |
| HR3:1       | RH                   | 1360              | 15.16                      | 半阴坡          | 1108<br>(833, 275)                            | 21.82<br>(21.77, 21.87)               | 15.34<br>(15.64, 15.04) | 0.78                  |
| HR4:0       | HH                   | 1370              | 13.32                      | 阳坡           | 1100<br>(1100, 0)                             | 28.72<br>(28.72, 0)                   | 17.62<br>(17.62, 0)     | 0.77                  |

HR0:4:华山松株数:锐齿槲栎株数=0:4 Ratio of Pinus and Quercus trees of (0:4); HR1:3:华山松株数:锐齿槲栎株数=1:3 Ratio of Pinus and Quercus trees of (1:3); HR2:2:华山松株数:锐齿槲栎株数=2:2 Ratio of Pinus and Quercus trees of (2:2); HR3:1:华山松株数:锐齿槲栎株数=3:1 Ratio of Pinus and Quercus trees of (3:1); HR4:0:华山松株数:锐齿槲栎株数=4:0 Ratio of Pinus and Quercus trees of (4:0); RR:锐齿槲栎纯林 Quercus pure forest; RH:锐齿槲栎-华山松混交林 Quercus-Pinus mixed forest; HH:华山松纯林 Pinus pure forest; 括号中分别对应样地内华山松和锐齿槲栎的基本信息:(华山松, 锐齿槲栎); 表中数字均为平均值

2.2 凋落物持水能力影响因子分析

地形、植被和气候是流域森林凋落物持水能力的主要影响因素,因流域范围较小,气象因子在空间上视为一致。首先,根据样地经纬度位置提取各样地的较高精度遥感数据指标,同时进行样地调查获取实测数据。由此,提取 11 个影响凋落物持水能力的地形和植被因子(表 2),并与凋落物层最大持水量和有效拦蓄量进行 Spearman 相关性分析,筛选出显著相关因子用于凋落物持水能力空间尺度上推模型构建。上述步骤在 R Studio 中实现。

表 2 凋落物持水能力潜在影响因子  
Table 2 Potential impact factors on litter water holding capacity

| 因子分类 Factor type         | 影响因子 Impact factors                                                             |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 地形因子 Topographic factors | $S_1$ 、 $A_s$ 、 $E_v$                                                           |
| 植被因子 Vegetation factors  | FVC、 $T_h$ 、 $AGB_{\text{mean}}$ 、DBH、 $NDVI_{\text{max-pre}}$ 、LAI、NDVI、 $P_Q$ |

$S_1$ :坡度 Slope;  $A_s$ :坡向 Aspect;  $E_v$ :海拔 Elevation; FVC:采样期间植被覆盖度 Fraction vegetation coverage during sampling period;  $T_h$ :树高 Tree height;  $AGB_{\text{mean}}$ :多年平均地上生物量 Annual average aboveground biomass; DBH:胸径 Diameter at breast height;  $NDVI_{\text{max-pre}}$ :前一年最大归一化植被指数 Maximum normalized vegetation index of the previous year; LAI:采样期叶面积指数 Leaf area index during sampling period; NDVI:采样期归一化植被指数 Normalized vegetation index during sampling period;  $P_Q$ :锐齿槲栎占比 Proportion of Quercus

2.3 凋落物持水能力空间尺度上推模型构建与预测

为降低数据冗余,提高精度,本研究在相关性分析结果的基础上进一步选取 2/3 数据作为训练集,使用逐步回归法构建凋落物层最大持水量和有效拦蓄量预测模型。基于剩下 1/3 的验证集的实测值与预测值,计算标准差( $SD$ )、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)作为模型精度及其误差的评价指标。然后,综合选取  $R^2$  最大, $SD$ 、RMSE 和 MAE 最小的模型作为凋落物持水能力空间尺度上推模型。最后,基于模型参数的空间分布数据在 ArcGIS 中使用栅格计算器进一步生成流域凋落物持水能力空间分布图。

2.4 统计分析

单因素方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)用于检验不同样地类型凋落物特征和持水特性指标组间

差异。回归分析用于拟合锐齿槲栎比例与凋落物持水特性指标间的关系。统计分析和绘图用 R Studio 和 ArcGIS 10.2 实现。

3 结果与分析

3.1 不同森林类型凋落物基本特征

三种林分类型的凋落物层、未分解层、半分解层和锐齿槲栎蓄积量均值分别为(11.85±1.15)、(6.79±0.97)、(5.06±1.29)t/hm<sup>2</sup>和(7.60±0.91)t/hm<sup>2</sup>,均表现为锐齿槲栎林>锐齿槲栎-华山松混交林(后称混交林)>华山松林(表3)。凋落物自然含水率变化范围为37.89%—43.21%。锐齿槲栎占比增加(0—100%),凋落物层、未分解层和锐齿槲栎蓄积量均显著增加( $P<0.05$ ),变化量分别为(6.05±0.02)、(4.42±1.54)和(14.70±0.66)t/hm<sup>2</sup>,半分解层蓄积量变化趋势不显著( $P>0.05$ )。

表3 不同锐齿槲栎、华山松比例样地凋落物特征

Table 3 The forest litter characteristics of sample plots with varying ratios of Pinus and Quercus

| 样地类型<br>Sample plot types | 凋落物层蓄积量<br>Litter accumulation/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 未分解层<br>Undecomposed layer                   |                    | 半分解层<br>Semi-decomposed layer                |                    | 锐齿槲栎<br>Quercus                              |                    | 凋落物密度<br>Litter density/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 凋落物<br>自然含水率<br>Litter natural<br>water content/% |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                           |                                                         | 蓄积量<br>Accumulation/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 比例<br>Proportion/% | 蓄积量<br>Accumulation/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 比例<br>Proportion/% | 蓄积量<br>Accumulation/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 比例<br>Proportion/% |                                                  |                                                   |
|                           |                                                         |                                              |                    |                                              |                    |                                              |                    |                                                  |                                                   |
| HR0:4                     | 14.70±0.66a                                             | 8.70±1.93a                                   | 59.13              | 6.01±1.88a                                   | 40.87              | 14.70±0.66a                                  | 100                | 23.23±2.81a                                      | 42.82±3.71a                                       |
| HR1:3                     | 13.67±2.42a                                             | 7.99±0.92a                                   | 59.09              | 5.68±1.95a                                   | 40.91              | 11.29±2.05b                                  | 82.60              | 31.70±8.81a                                      | 38.21±0.52b                                       |
| HR2:2                     | 12.39±1.33a                                             | 7.34±0.74ab                                  | 59.25              | 5.06±0.68a                                   | 40.75              | 8.38±1.46c                                   | 67.42              | 30.82±2.90a                                      | 43.21±1.97a                                       |
| HR3:1                     | 9.82±0.69b                                              | 5.63±0.88bc                                  | 57.96              | 4.18±1.55a                                   | 42.04              | 3.64±0.40d                                   | 37.40              | 26.30±4.23a                                      | 37.89±3.19b                                       |
| HR4:0                     | 8.65±0.64b                                              | 4.28±0.39c                                   | 49.50              | 4.37±0.37a                                   | 50.50              | 0e                                           | 0                  | 28.96±4.19a                                      | 42.79±0.98a                                       |

不同小写字母表示同列不同样地类型之间的差异显著( $P<0.05$ );数据为平均值±标准误

3.2 不同森林类型凋落物持水能力

凋落物持水量(率)方面,三种林分类型的凋落物层、未分解层和半分解层最大持水量均为锐齿槲栎林>混交林>华山松林(表4)。其中,华山松林凋落物层最大持水率最高,为193.99%±2.32%。随锐齿槲栎比例提升(图3),凋落物最大持水率变化不显著( $P>0.05$ )。凋落物层和未分解层最大持水量显著增加( $P<0.01$ ),提升幅度分别约为59.2%和92.8%;半分解层变化不显著( $P>0.05$ )。

凋落物拦蓄量(率)方面,三种林分类型的凋落物层、半分解层和未分解层有效拦蓄量均表现为锐齿槲栎林>混交林>华山松林(表5)。凋落物层有效拦蓄率表现为华山松林>混交林>锐齿槲栎林。随锐齿槲栎比例提升(图4),凋落物各层次有效拦蓄率变化不明显( $P>0.05$ )。凋落物层和未分解层有效拦蓄量上升显著( $P<0.01$ ),提升幅度分别约为55.6%和87.9%。

表4 不同森林类型凋落物持水特征

Table 4 The litter water holding capacities of different forests types

| 森林类型<br>Forest types | 凋落物层<br>最大持水率<br>Litter maximum<br>water holding rate/% | 半分解层<br>最大持水率<br>Maximum water<br>holding rate of semi-<br>decomposed layer/% | 未分解层<br>最大持水率<br>Maximum water<br>holding rate of<br>undecomposed<br>layer/% | 凋落物层<br>最大持水量<br>Litter maximum<br>water holding<br>capacity/(t/hm <sup>2</sup> ) | 半分解层<br>最大持水量<br>Maximum water<br>holding capacity of<br>semi-decomposed<br>layer/(t/hm <sup>2</sup> ) | 未分解层<br>最大持水量<br>Maximum water<br>holding capacity of<br>undecomposed<br>layer/(t/hm <sup>2</sup> ) |
|----------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RR                   | 182.34±25.79a                                           | 142.72±33.41b                                                                 | 210.54±21.06ab                                                               | 26.70±2.52a                                                                       | 8.54±2.89a                                                                                             | 18.16±3.16a                                                                                         |
| RH                   | 184.54±10.95a                                           | 168.29±11.35a                                                                 | 196.53±13.22b                                                                | 22.09±4.32ab                                                                      | 8.30±2.15a                                                                                             | 13.79±3.05b                                                                                         |
| HH                   | 193.99±2.32a                                            | 168.26±8.03ab                                                                 | 220.80±13.09a                                                                | 16.77±1.04b                                                                       | 7.35±0.70a                                                                                             | 9.42±0.34c                                                                                          |

不同小写字母表示同列不同样地类型之间的差异显著( $P<0.05$ );数据为平均值±标准误

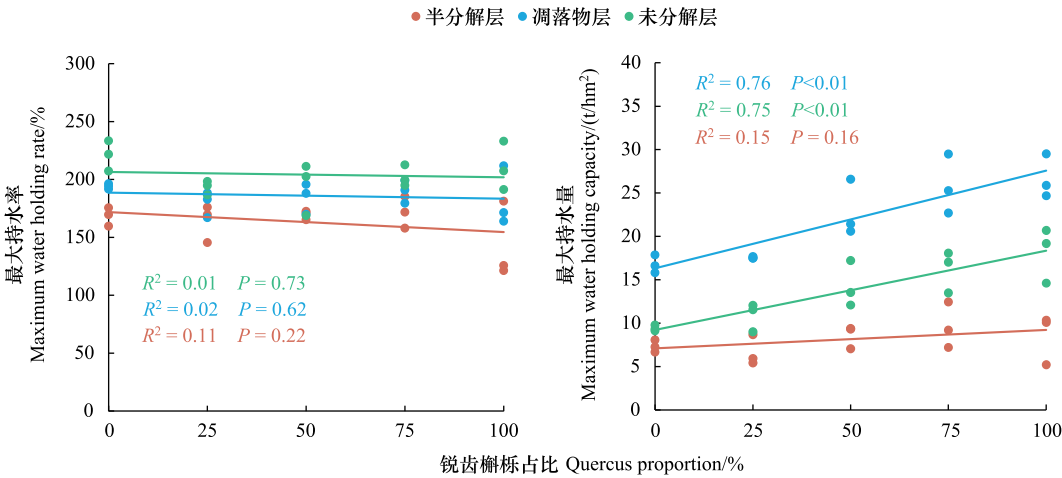


图 3 不同锐齿槲栎占比样地凋落物最大持水率和最大持水量变化趋势

Fig.3 The tendencies of litter maximum water holding rates and capacities in different plots with varying Quercus proportions

表 5 不同森林类型凋落物有效拦蓄特征

Table 5 The effective storage capacities of different forest types

| 森林类型<br>Forest types | 凋落物层<br>有效拦蓄率<br>Litter effective<br>storage rate/% | 半分解层<br>有效拦蓄率<br>Effective storage<br>rate of semi-<br>decomposed layer/% | 未分解层<br>有效拦蓄率<br>Effective storage<br>rate of undecomposed<br>layer/% | 凋落物层<br>有效拦蓄量<br>Litter effective<br>storage capacity/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 半分解层<br>有效拦蓄量<br>Effective storage<br>capacity of semi-<br>decomposed layer/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 未分解层<br>有效拦蓄量<br>Effective storage<br>capacity of undecomposed<br>layer/(t/hm <sup>2</sup> ) |
|----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| RR                   | 112.17±19.08a                                       | 82.17±23.19b                                                              | 133.56±14.98a                                                         | 16.41±2.04a                                                                    | 4.91±1.75a                                                                                           | 11.54±2.20a                                                                                  |
| HR                   | 117.09±10.93a                                       | 104.69±9.10a                                                              | 126.06±13.04a                                                         | 14.00±2.89ab                                                                   | 5.15±1.32a                                                                                           | 8.86±2.18ab                                                                                  |
| HH                   | 122.10±2.89a                                        | 101.06±6.88ab                                                             | 144.12±12.86a                                                         | 10.55±0.53b                                                                    | 4.41±0.47a                                                                                           | 6.14±0.11b                                                                                   |

不同小写字母表示同列不同样地类型之间的差异显著 ( $P<0.05$ ); 数据为平均值±标准误

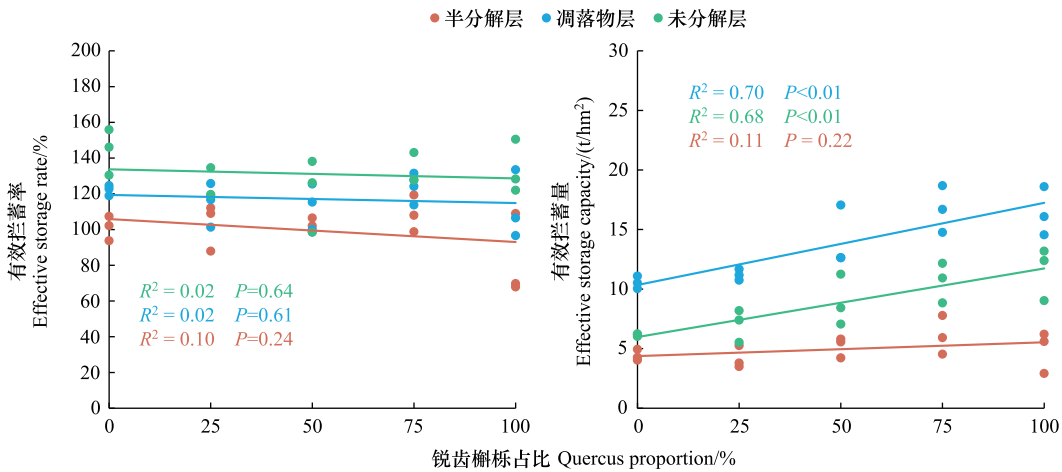


图 4 不同锐齿槲栎占比样地凋落物有效拦蓄率和有效拦蓄量变化趋势

Fig.4 The tendencies of litter effective storage rates and capacities in different plots with varying Quercus proportions

3.3 凋落物持水能力影响因子

相关性分析表明(表 6),凋落物层最大持水量和有效拦蓄量与地形、植被因子均存在显著相关性。其中凋落物层最大持水量与坡度、海拔、树高、多年平均地上生物量、前一年最大 NDVI 和锐齿槲栎占比显著相关

( $P<0.05$ ), 相关系数分别为-0.504、0.644、-0.493、-0.589、0.681 和 0.861。凋落物层有效拦蓄量与坡度、海拔、多年平均地上生物量、前一年最大 NDVI 和锐齿槲栎占比显著相关( $P<0.05$ ), 相关系数分别为-0.521、0.615、-0.472、0.602 和 0.838。

表 6 凋落物持水能力指标与影响因子相关性检验结果(Spearman 显著相关)

Table 6 Correlation test results between litter water holding indices and impact factors (Spearman correlation)

| 因子类别<br>Factor types        | 影响因子<br>Impact factors | 凋落物层最大持水量<br>Litter maximum water holding rate | 凋落物层有效拦蓄量<br>Litter effective storage capacity |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 地形因子<br>Topographic factors | $S_l$                  | -0.504 **                                      | -0.521 **                                      |
|                             | $A_s$                  | 0.321                                          | 0.22                                           |
|                             | $E_v$                  | 0.644 **                                       | 0.615 **                                       |
| 植被因子<br>Vegetation factors  | FVC                    | 0.361                                          | 0.375                                          |
|                             | $T_h$                  | -0.493 **                                      | -0.414                                         |
|                             | $AGB_{mean}$           | -0.589 **                                      | -0.472 **                                      |
|                             | DBH                    | -0.25                                          | -0.311                                         |
|                             | $NDVI_{max-pre}$       | 0.681 ***                                      | 0.602 **                                       |
|                             | LAI                    | 0.384                                          | 0.399                                          |
|                             | NDVI                   | 0.264                                          | 0.282                                          |
|                             | $P_Q$                  | 0.861 ***                                      | 0.838 ***                                      |

\*\*  $P<0.05$ ; \*\*\*  $P<0.01$

3.4 凋落物持水能力尺度上推模型

根据相关性分析结果,将显著相关的因子与凋落物层最大持水量和有效拦蓄量进行逐步回归,分别构建多元线性回归模型(方差膨胀因子  $VIF<10$ ,因子不存在共线性)。未引进锐齿槲栎占比因子时,凋落物层最大持水量模型( $LMWHC = 56.429 - 0.842 \times S_l - 1.583 \times T_h$ )拟合度  $R^2$  为 0.768,显著性  $P<0.01$ ;凋落物层有效拦蓄量模型( $LESC = 84.775 - 0.725 \times AGB_{mean}$ )的  $R^2$  为 0.659,显著性  $P<0.01$ 。引入锐齿槲栎占比因子后,凋落物层最大持水量模型的输入变量为坡度、树高和锐齿槲栎占比, $R^2$  为 0.918,显著性  $P<0.01$ ;凋落物层有效拦蓄量模型的输入变量为多年平均地上生物量和锐齿槲栎占比, $R^2$  为 0.857,显著性  $P<0.01$ (表 7);最优拟合度  $R^2$  和显著性水平大幅提高,模型拟合效果均较好。模型精度验证表明(表 8),凋落物层最大持水量模型的  $SD$ 、 $RMSE$  和  $MAE$  分别为 4.40、3.66 和 2.47,凋落物层有效拦蓄量模型的  $SD$ 、 $RMSE$  和  $MAE$  分别为 1.91、3.46 和 2.84。 $SD$ 、 $RMSE$  和  $MAE$  值均较小,说明模型预测结果可靠,精度较高。

表 7 凋落物持水能力指标逐步多元线性回归模型

Table 7 Stepwise multiple linear regression models of litter water holding indices

| 类型 Type                                            | 回归模型 Regression model                                                     | $R^2$ | $P$   |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| 凋落物层最大持水量<br>Litter maximum water holding capacity | $LMWHC = 40.608 - 0.466 \times S_l - 1.065 \times T_h + 6.723 \times P_Q$ | 0.918 | 0.001 |
| 凋落物层有效拦蓄量<br>Litter effective storage capacity     | $LESC = 48.067 - 0.375 \times AGB_{mean} + 5.25 \times P_Q$               | 0.857 | 0.001 |

LMWHC:凋落物层最大持水量 Litter maximum water holding capacity;LESC:凋落物层有效拦蓄量 Litter effective storage capacity

表 8 模型精度检验结果

Table 8 Accuracy of Stepwise multiple linear regression models

| 模型 Model                                        | $SD/(t/hm^2)$ | $RMSE/(t/hm^2)$ | $MAE/(t/hm^2)$ |
|-------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------|
| 凋落物层最大持水量 Litter maximum water holding capacity | 4.40          | 3.66            | 2.47           |
| 凋落物层有效拦蓄量 Litter effective storage capacity     | 1.91          | 3.46            | 2.84           |

$SD$ :标准差 Standard deviation; $RMSE$ :均方根误差 Root mean square error; $MAE$ :平均绝对误差 Mean absolute error

### 3.5 流域凋落物持水能力空间分布特征

研究区凋落物层最大持水量和有效拦蓄量在空间变异明显(图 5)。流域凋落物层最大持水量均值为  $17.69\text{t}/\text{hm}^2$ ,变化范围为  $0\text{--}32.35\text{t}/\text{hm}^2$ ;凋落物层有效拦蓄量均值为  $17.13\text{t}/\text{hm}^2$ ,变化范围为  $4.83\text{--}48.07\text{t}/\text{hm}^2$ 。就空间分布来看,凋落物最大持水量在流域中部较高,西部、东部和南部较小;而较高凋落物有效拦蓄量主要分布在流域北、南部,低值区主要位于流域中、西部地区。

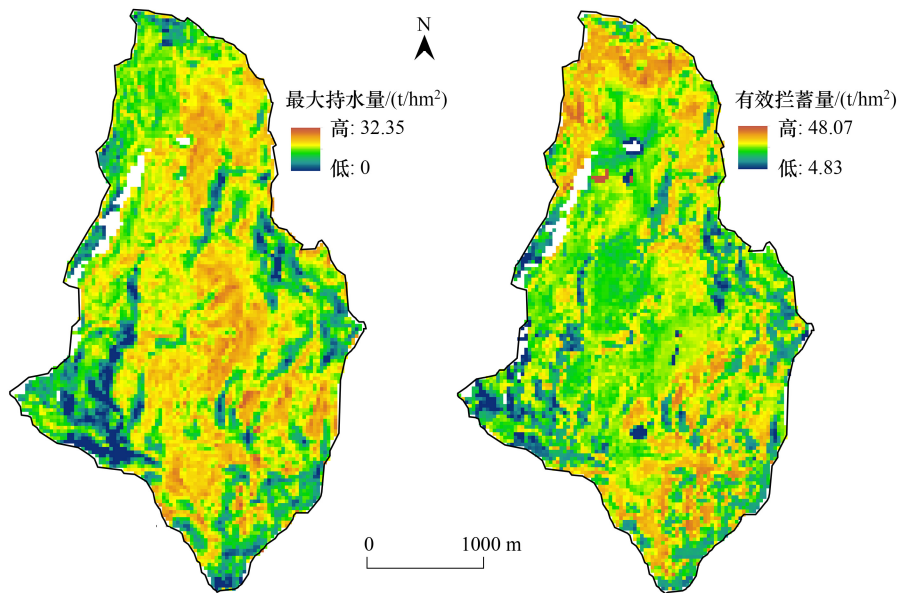


图 5 研究区域凋落物层最大持水量和有效拦蓄量空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of litter maximum water holding capacity and effective storage capacity in study area

对流域海拔、坡度、2022 年最大 NDVI、多年平均地上生物量和锐齿槲栎占比空间数据进行自然间断法分为四个等级,叠加凋落物层最大持水量和有效拦蓄量预测结果统计不同地形和植被条件下凋落物持水能力的

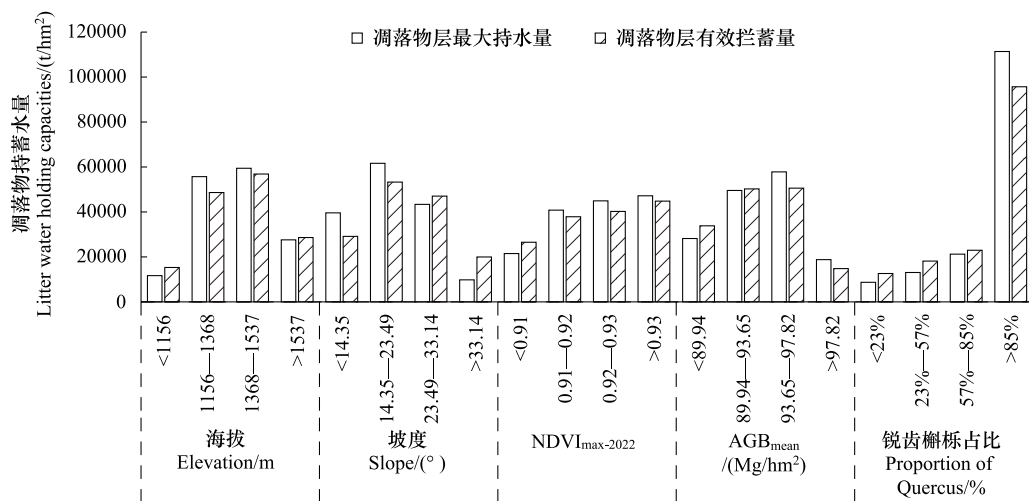


图 6 不同地形、植被条件下流域凋落物持水能力空间分布情况

Fig.6 Spatial distribution of litter water holding capacities in varying terrain and vegetation conditions

NDVI<sub>max-2022</sub>: 2022 年最大 NDVI 值 Maximum normalized vegetation index of 2022; AGB<sub>mean</sub>: 多年平均地上生物量 Annual average aboveground biomass

分布情况(图 6)。就地形来看,流域低海拔缓坡的凋落物持水能力相对较强,其中海拔小于 1537m 和坡度小于  $33.14^{\circ}$  地区的凋落物层最大持水总量分别为  $126792.43\text{t}/\text{hm}^2$  和  $144600.31\text{t}/\text{hm}^2$ , 占比分别为 82.13% 和 93.66%;该区域凋落物层有效拦蓄总量分别为  $120813.8\text{t}/\text{hm}^2$  和  $129449.6\text{t}/\text{hm}^2$ , 占比分别为 80.85% 和 86.63%。就植被条件来看,2022 年 NDVI 最大值越高和锐齿槲栎占比越高的区域凋落物层最大持水量和有效拦蓄量更高。多年平均地上生物量介于  $84.94\text{—}97.82\text{Mg}/\text{hm}^2$  的区域凋落物持水能力较强,可能因为流域内普遍为 70a 林龄的森林,在面积上相对于更老林龄的林分更具优势,说明未来流域凋落物持水能力将持续增强。

## 4 讨论

### 4.1 不同混交比例林分类型凋落物持水和拦蓄能力

树种比例变化将改变林分凋落物持水能力,随锐齿槲栎占比增加,凋落物层和未分解层的最大持水量和有效拦蓄量均显著增加( $P<0.01$ )。一方面,凋落物蓄积量和吸持水能力影响凋落物持水量和拦蓄量<sup>[27]</sup>。相比华山松,锐齿槲栎林凋落物蓄积更丰富(表 3),因此随着锐齿槲栎占比增加,林分凋落物累积量显著提升,使凋落物最大持水量和有效拦蓄量也均显著增加。另一方面,水热条件通过控制凋落物分解速率,影响凋落物各层次蓄积特征进而导致持水差异。研究区冬季的持续低温和春季冻融会减缓凋落物分解速率<sup>[28]</sup>,可能使凋落物未分解层蓄积量总体高于半分解层;叠加锐齿槲栎更高凋落物输入速率,锐齿槲栎比例提升将显著增加凋落物层和未分解层蓄积量(表 3),导致凋落物持水能力提升明显。由此可见,锐齿槲栎占比显著影响林分凋落物的持水能力,从流域尺度来看,锐齿槲栎的占比在空间分布上存在较强的异质性,可能是影响流域凋落物持水能力空间分异的重要植被特征因子。

### 4.2 流域凋落物持水能力影响因素及机制

流域森林凋落物持水能力与凋落物蓄积量密切相关,受到地形和植被因子的显著影响。甄别关键特征因子是构建精准的林分-流域凋落物持水能力尺度上推模型的基础。地形特征方面,蜜子沟流域内海拔和坡度分别与凋落物持水能力呈显著正相关和负相关( $P<0.05$ )。地形因子可以通过影响光照、降水和水分等因素对植被生长产生影响,进而影响林下调落物蓄积量<sup>[29]</sup>。高海拔地区云雾缭绕,水汽充足,为植被生长提供良好环境。同时,高海拔地区相对较低温度的环境使得分解者活性降低<sup>[30]</sup>,加之受到人类和野生动物的干扰较少,有利于凋落物蓄积和保存。不过海拔的影响通常存在阈值<sup>[12]</sup>。坡度平缓地带通常汇集径流,水分充足有利于植被生长,使得凋落物蓄积量高。同时地表湿度高,地表吸附力强,有利于凋落物蓄积,提高凋落物持水能力。唐玉芝等<sup>[31]</sup>在乌江流域内也发现类似规律:随着坡度增加森林水源涵养功能呈显著下降趋势。植被特征方面,森林凋落物持水能力与多年平均地上生物量和树高呈显著负相关( $P<0.05$ ),与前一年最大 NDVI 值和锐齿槲栎占比呈显著正相关( $P<0.05$ )。相同林龄下,华山松树高和平均胸径较锐齿槲栎高(表 1),因此,华山松多年平均地上生物量较高。然而华山松作为常绿针叶树种,生长季落叶量不及作为落叶阔叶树种的锐齿槲栎(表 3),导致流域内多年平均地上生物量和树高较大的区域表现出低凋落物蓄积量和低持水能力。前一年最大 NDVI 值一定程度上表征了凋落物输入情况,前一年最大 NDVI 值越高,说明落叶期可能输入的凋落物量越大。此外,NDVI 值较高的区域通常林内温度较低,在一定程度上能抑制分解者的活动强度从而利于凋落物的积累<sup>[32]</sup>。锐齿槲栎和华山松的性状、生长周期的差异导致凋落物蓄积特征存在显著不同。生长季落叶阔叶林叶面积增量通常高于常绿针叶林<sup>[33]</sup>,导致落叶期内锐齿槲栎的凋落物输入速率( $0.21\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )明显高于华山松( $0.12\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )(表 3)。因此,锐齿槲栎占比提升相应地提高了凋落物的蓄积量,进而提升了森林凋落物持水能力<sup>[34]</sup>。

过去森林生态系统持水能力影响因素的研究往往忽略了树种组成比例。本研究发现锐齿槲栎占比因子对于凋落物持水能力的预测起到关键作用。林分-流域凋落物持水能力尺度上推模型构建过程中引入锐齿槲栎占比因子后(表 7),凋落物层最大持水量和有效拦蓄量预测模型的最优拟合度  $R^2$  分别显著提高 0.15 和

0.198,显著性水平进一步提升。可见,考虑林分树种比例组成等精细化森林植被结构特征,是实现更高精度尺度上推模拟的有效途径,为未来流域水源涵养功能尺度上推研究提供了新思路。

#### 4.3 流域凋落物持水能力空间分布特征

蛮子庄流域森林凋落物持水能力的空间异质性显著,地形和植被分布特征可能是主要驱动机制。凋落物层最大持水量方面,流域中部最大持水量较高,西部、东部和南部较低。流域中部海拔较低、地势平坦,相对于陡峭的东、西、南、北部地区水热条件良好、养分充足从而促进树木生长;紧靠流域西部出水口,林地易受强烈的人为活动干扰。因此,以落叶阔叶树种为主的中部地区森林长势优于其余地区,林下凋落物蓄积量和累积速率相对较高。受外营力作用(风速、动物活动等)影响,陡坡地区凋落物易沿坡面滑落至缓坡地带堆积,加剧凋落物蓄积的空间分异<sup>[35]</sup>。此外,流域中部树体高大且繁茂,能有效削弱林下降水强度,促进凋落物对水分的吸收。因此,流域中部凋落物最大持水量较高。凋落物层有效拦蓄量方面,流域北、南部较高,西、中部地区较低。南、北部坡度较大,土层浅薄,养分匮乏,不利于高大粗壮树木生长,因而以低矮的疏林为主,相同降水条件下更多穿透雨被林下凋落物拦截<sup>[36]</sup>。此外,坡度较陡的高海拔地区分布大面积华山松针叶林,其较高的凋落物有效拦蓄率提升凋落物的拦蓄降水能力(表5)。因此,坡度较大的东、南、北部地区凋落物有效拦蓄量高于其他地区。可见,地形与植被特征的交互作用主导凋落物特征的空间分异,进一步影响凋落物持水能力空间格局。

#### 4.4 研究局限与展望

为厘清暖温带流域森林凋落物持水特征,本文以宝天曼蛮子庄流域为研究对象,依据野外调查、室内实验和遥感产品构建流域凋落物持水能力尺度上推模型,为流域森林水文管理提供科学支持和技术手段。然而研究数据和方法存在一定局限。数据方面,由于流域内树种分布离散难以采样,并且现有遥感数据(30m×30m)难以全面反映树种信息,所以仅研究了锐齿槲栎和华山松两个关键树种,导致构建的模型存在一定的不确定性。因此,未来需要结合激光雷达和无人机技术生成更精确树种分布图,以实现更高精度的尺度上推建模。方法方面,本文实验过程中采用的传统室内浸泡法难以完全表征凋落物持水实际情况。未来应拓展更多林分类型凋落物持水的对比研究,结合室内外实验确定流域关键树种凋落物的降水拦蓄系数,使结果更契合凋落物持水实际情况。最后,需要加强森林凋落物持水能力持续监测,以深入研究变化环境下流域凋落物水文效应动态特征以及与森林固碳功能间的联系。

### 5 结论

本研究表明蛮子庄流域不同森林类型的最大持水量和有效拦蓄量均为锐齿槲栎林>锐齿槲栎-华山松混交林>华山松林。随锐齿槲栎比例提升,凋落物层、未分解层和锐齿槲栎凋落物蓄积量均显著增加;凋落物层、未分解层最大持水量和有效拦蓄量显著提高。锐齿槲栎占比因子的引入能够显著提升凋落物持水能力尺度上推模型的模拟精度。模型估算结果表明,流域凋落物层最大持水量均值为17.69t/hm<sup>2</sup>,凋落物层有效拦蓄量均值为17.13t/hm<sup>2</sup>。空间上,流域中部凋落物最大持水量较高,西、东、南部较小;北、南部的有效拦蓄量较高,西、中部较低。流域低海拔缓坡凋落物持水能力相对较强,NDVI最大值越高和锐齿槲栎占比越高的区域凋落物层最大持水量和有效拦蓄量更高。多年平均地上生物量介于84.94—97.82Mg/hm<sup>2</sup>的区域凋落物持水能力较强。

#### 参考文献(References):

- [1] 孙阁, 张橹, 王彦辉. 准确理解和量化森林水源涵养功能. 生态学报, 2023, 43(1): 9-25.
- [2] 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.
- [3] 刘世荣. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996: 1-346.
- [4] 杨吉华, 张永涛, 李红云, 夏江宝. 不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响. 水土保持学报, 2003, 17(2): 141-144.

- [5] 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.
- [6] 郑江坤, 王婷婷, 付万全, 杨润红, 宫渊波. 川中丘陵区典型林分枯落物层蓄积量及持水特性. 水土保持学报, 2014, 28(3): 87-91, 118.
- [7] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 邱志军, 徐大平, 高吉喜, 胡哲森. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [8] 白云星, 周运超, 张薰元, 杜姣姣. 马尾松阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力. 林业科学, 2021, 57(11): 24-36.
- [9] 王楠. 基于 Landsat 8 OLI 影像的森林地上生物量估算和空间尺度转换研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- [10] 李中恺, 李小雁, 周沙, 杨晓帆, 付永硕, 缪驰远, 王帅, 张光辉, 吴秀臣, 杨超, 邓元红. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105-2138.
- [11] 刘贤赵. 论水文尺度问题. 干旱区地理, 2004, 27(1): 61-65.
- [12] 徐亚莉, 张明芳, 李强, 余恩旭, 邓力豪, 邓诗宇, 刘子佩, 连晖. 基于植被和环境因子的亚高山森林土壤水源涵养功能空间尺度上推模型构建——以岷江上游杂谷脑流域为例. 生态学报, 2023, 43(13): 5614-5626.
- [13] 周巧稚, 毕华兴, 孔凌霄, 侯贵荣, 魏曦, 魏小燕. 晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究. 水土保持学报, 2018, 32(4): 115-121.
- [14] 贾秀红, 曾毅, 周志翔, 高大雄, 谢经荣, 郭国志. 鄂中低丘区不同演替阶段森林凋落物和土壤水文特征. 水土保持学报, 2013, 27(4): 125-129.
- [15] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [16] Chen J M, Ju W M, Ciais P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. Nature Communications, 2019, 10(1): 4259.
- [17] Bai Y X, Zhou Y C, An Z F, Du J J, Zhang X Y, Chang S X. Tree species identity and mixing ratio affected the release of several metallic elements from mixed litter in coniferous-broadleaf plantations in subtropical China. Science of the Total Environment, 2022, 838(Pt3): 156143.
- [18] 张艳, 袁亚玲, 李勋, 宋思梦, 周扬, 张健. 马尾松与 3 种阔叶树混合凋落叶分解过程中碳循环相关酶活性的变化特征. 植物资源与环境学报, 2022, 31(1): 29-41.
- [19] 叶永忠, 刘世荣. 河南宝天曼自然保护区科学考察集. 郑州: 河南科学技术出版社, 2018: 1-502.
- [20] 李鹿鑫, 陈诗, 刘晓静, 房会普, 姚松. 宝天曼华山松锐齿栎混交林生物量研究. 河南科学, 2016, 34(4): 511-516.
- [21] 徐晓琳. 锐齿栎培育技术. 特种经济动植物, 2018, 21(9): 30-31.
- [22] 范玉龙, 胡楠, 丁彦珍, 卢训令. 伏牛山自然保护区森林生态系统乔木层优势种群动态. 西北林学院学报, 2015, 30(4): 14-20.
- [23] 许秀兰. 二郎山华山松凋落针叶及真菌降解作用的初步研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [24] 陈诗. 伏牛山南北坡松栎混交林群落结构及土壤特性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [25] 袁志良. 暖温带—北亚热带过渡区宝天曼落叶阔叶林物种多样性维持机制[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [26] 刘小娥, 苏世平. 兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2574-2582.
- [27] 闫俊华, 周国逸, 唐旭利, 张德强. 鼎湖山 3 种演替群落凋落物及其水分特征对比研究. 应用生态学报, 2001, 12(4): 509-512.
- [28] 张岷, 满秀玲, 刘思琪, 徐志鹏. 寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 65-74.
- [29] 刘玉平, 刘贵峰, 达福白乙拉, 程伟燕, 陈志婧, 姜丽丽. 地形因子对大青沟自然保护区不同森林群落叶性状的影响. 林业科学, 2017, 53(3): 154-162.
- [30] 陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 党维, 鞠学良, 于媛. 秦岭太白山森林表层土壤有机碳分布特征. 森林与环境学报, 2022, 42(3): 244-252.
- [31] 唐玉芝, 邵全琴. 乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 987-999.
- [32] 赵鸣飞, 薛峰, 吕烨, 左婉怡, 王国义, 邢开雄, 王宇航, 康慕谊. 黄土高原森林枯落物储量、厚度分布规律及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(22): 7364-7373.
- [33] 蒋丽伟, 张家琦, 赵一臣, 赵永雷. 北京山区典型林分生长季叶面积指数动态变化. 林业资源管理, 2019(2): 132-136.
- [34] 林德喜, 樊后保. 马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化. 林业科学, 2005, 41(6): 10-18.
- [35] 王安宁, 蔺鑫, 穆枫, 李玉灵, 李晓红. 冀北木兰围场沙荒地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能. 北京林业大学学报, 2018, 40(1): 98-107.
- [36] 李侃. 秦岭南坡不同间伐强度下锐齿栎林和油松林水量平衡研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.