

富春江国家森林公园典型森林类型 枯落叶水源涵养功能研究

张田宁^{1,2,3}, 唐旭⁴, 吕惠飞⁴, 王小倩^{1,3}, 赵紫晴^{1,3}, 李爱博^{1,3}, 周本智^{1,3}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 2. 南京林业大学, 南京 210000; 3. 国家林业和草原局钱江源森林生态系统定位观测研究站, 杭州 311400; 4. 浙江省建德市林业总场, 浙江 建德 311600)

摘要: [目的] 揭示不同森林类型枯落叶水源涵养功能差异, 并阐明其潜在规律, 为亚热带地区国家森林公园森林生态水源涵养功能评价及经营管理提供科学依据。[方法] 选取富春江国家森林公园 4 种典型森林类型的凋落叶为研究对象, 采用称量法、室内浸泡法和失水试验法对枯落叶的现存量及水源涵养能力进行测定, 分析了不同森林类型水源涵养能力差异, 并通过拟合方程揭示了其潜在规律。[结果] (1) 枯落叶现存量介于 1.61~3.00 t/hm², 并表现为楠木林>毛竹林>杉木林>鹅掌楸林, 且半分解枯落叶现存量>未分解; (2) 各森林类型枯落叶持水量和失水量均随着时间的增长而增长, 持水速率和失水速率均随着时间的增长而下降。持水量、失水量、持水速率、失水速率与时间的关系均符合“Allometric”函数, 即 $Y=ax^b$, 且前两者 $b>0$, 后两者 $b<0$; (3) 毛竹林具有较好的持水性能, 总有效拦蓄率达 246.60%, 其对历时较短、高强度降水有良好的拦蓄功能, 能有效延缓地表径流的产生; 相比之下, 楠木林具有较好的保水性能, 在失水 192 h 后, 保水量达 0.63 t/hm², 可为蒸发量较高的高山峡谷区保持林地水分并涵养水源; (4) 4 种森林类型枯落叶水源涵养功能受森林类型和分解程度的共同影响, 且半分解枯落叶在森林生态系统中发挥着关键的水源涵养作用。[结论] 富春江国家森林公园不同森林类型枯落叶的水源涵养功能存在显著差异, 但其持水与失水过程均遵循“Allometric”函数规律且受分解程度的内在调控。

关键词: 森林类型; 分解程度; 持水性; 失水性; 水源涵养功能

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0323-10

Water conservation function of leaf litter in typical forest types of Fuchunjiang National Forest Park

Zhang Tianning^{1,2,3}, Tang Xu⁴, Lyu Huifei⁴, Wang Xiaoqian^{1,3}, Zhao Ziqing^{1,3}, Li Aibo^{1,3}, Zhou Benzhi^{1,3}

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210000, China; 3. Qianjiangyuan Forest Ecosystem Positioning Observation and Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 311400, China; 4. Jiande Forestry Headquarters, Jiande, Zhejiang 311600, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the differences in the water conservation function of leaf litter across different forest types and clarify its underlying patterns, thereby providing a scientific basis for the evaluation and management of forest ecological water conservation functions in national forest parks in subtropical regions. [Methods] The leaf litter from four typical forest types in Fuchunjiang National Forest Park was selected as the research object. The standing crop and water conservation capacity of the leaf litter were measured using the weighing method, indoor soaking method, and water loss test method. The differences in water conservation

收稿日期: 2025-06-06

修回日期: 2025-07-01

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 科技部“十四五”重点研发计划项目(2024YFD2200900); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFYBB2019ZD001)

第一作者: 张田宁(1995—), 女, 河南周口人, 博士研究生, 研究方向为森林生态系统的结构与功能研究。E-mail: z1181699325@163.com

通信作者: 周本智(1969—), 男, 安徽安庆人, 博士, 研究员, 主要从事森林生态系统的结构与功能研究。E-mail: benzhi_zhou@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

capacity among different forest types were analyzed, and the underlying patterns were revealed through fitting equations. [Results] (1) The standing crop of leaf litter ranged from 1.61 t/hm² to 3.00 t/hm², with the order from the highest to lowest being: *Phoebe zhenan* forest > *Phyllostachys heterocycla* forest > *Cunninghamia lanceolata* forest > *Liriodendron chinense* forest. The standing crop of semi-decomposed leaf litter was greater than that of undecomposed litter. (2) The water holding capacity and water loss of leaf litter in each forest type increased with time, while the water holding rate and water loss rate decreased with time. The relationships of water holding capacity, water loss, water holding rate, and water loss rate with time all conformed to the "Allometric" function, namely, $Y = ax^b$, with $b > 0$ for the former two and $b < 0$ for the latter two. (3) The *Phyllostachys heterocycla* forest exhibited good water holding capacity, with a total effective interception rate of 246.60%. It demonstrated a good interception function for short-duration, high-intensity precipitation, and could effectively delay the generation of surface runoff. In contrast, the *Phoebe zhenan* forest exhibited better water retention performance. After 192 hours of water loss, the water retention amount reached 0.63 t/hm², which could help maintain soil water and conserve water sources in alpine gorge areas with high evaporation. (4) The water conservation function of leaf litter in the four forest types was jointly affected by forest type and decomposition degree, and semi-decomposed leaf litter played a key role in water conservation within the forest ecosystem. [Conclusion] The water conservation function of leaf litter across different forest types in Fuchunjiang National Forest Park exhibits significant differentiation. The water holding and water loss processes follow the "Allometric" function law and are intrinsically regulated by the degree of decomposition.

Keywords: forest type; decomposition degree; water holding capacity; water loss capacity; water conservation function

近半个世纪以来,水资源短缺、水灾害频发、水环境污染和水生态退化等问题日益突出,已逐渐成为全球性问题^[1],并制约着中国社会经济的可持续发展^[2]。森林作为我国生态系统水源涵养的主体,其水源涵养量占全国水源涵养总量的60.80%^[3]。在此背景下,森林生态系统水源涵养功能的重要性愈发凸显,对其精准量化、科学评价及成果转化和应用等备受重视^[4]。森林的水源涵养功能主要表现在对降水的拦截、吸收、储存以及缓慢释放的能力^[2],从而实现大气降水的再分配^[5]。枯落物层是森林生态系统的关键作用层,其降水截留能力是林冠层的两倍^[6]。枯落物层具有结构疏松,表面积大,孔隙多等特点,能够拦蓄和储存降水,调节地表径流、延长水分入渗时间、降低雨水对地表的冲刷,并增加地下水^[2]。同时,覆盖在地表的枯落物层能降低表土温度,减少土壤水分的直接蒸发,通过改变林内微气候环境间接调控水分的蒸发过程,对蒸发和微环境具有调节作用^[7]。因此,在森林水源涵养、保持水土以及微气候调节中扮演着不可或缺的角色。

此外,枯落物的水源涵养不仅包括降水时枯落物对水分的吸持过程,还包括降水结束后的失水过程^[8]。枯落物失水是其持水恢复能力和保水能力的综合体现^[9]。现有关于枯落物失水的研究也主要集中于探索枯落物蒸发、下渗量以及速率与时间的关系^[10-11],而忽视了枯落物的水分蒸发、下渗过程实质上也是其持水

能力的恢复过程^[9],导致目前关于枯落物持水恢复能力的研究报道较少,不利于对水源涵养能力的整体评价。研究表明,枯落物水分蒸发量、下渗量和失水速率受到不同区域、不同植被类型的影响,因而研究不同植被类型枯落物持水能力恢复过程,对进一步深入认识枯落物的调蓄能力及保水能力具有重要意义^[12]。

富春江国家森林公园位于杭州市西南部的钱塘江中上游,建德市东部,是“富春江—新安江风景名胜区”的重要组成部分,森林覆盖率达91.72%。充分发挥这些森林资源在水源涵养和水土保持方面的重要作用,对保障城市水资源安全(如保障长三角南翼城市群饮用水源安全)、增强生态系统的稳定性以及构建区域生态安全屏障都具有重意义^[3,13]。此外,水源涵养还是钱塘江源头区域(涵盖建德市、淳安县、常山县和开化县)划分三大功能区(水土保持、生物多样性保护和土壤污染防治)的重要基点^[13],而目前针对其森林水源涵养功能的评价鲜有报道。枯落叶是枯落层的主要组成部分,占林分含量的80%以上^[14],其水源涵养能力直接影响着整个枯落层的水文效应^[15]。基于此,本研究选取公园内具有代表性的常绿阔叶林(楠木林 *Phoebe zhenan*)、落叶阔叶林(鹅掌楸林 *Liriodendron chinense*)、针叶林(杉木林 *Cunninghamia lanceolata*)以及毛竹林(*Phyllostachys heterocycla*)4种森林类型的枯落叶为研究对象,测定其枯落叶的现存量、不同分解程度枯落叶持水和失水性能,分析不同森林类型和

分解程度下枯落叶现存量和水源涵养能力差异,并通过对森林生态系统水源涵养功能的科学评价,有效指导森林保护、水资源利用以及区域规划等,同时为水源涵养林建设与管理提供理论支撑^[4]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于国家林草局钱江源森林生态系统定位观测研究站富春江国家森林公园内,地理坐标为东经118°34′—119°15′,北纬29°22′—29°50′。平均海

拔233 m,属中亚热带北缘季风气候区,气候温暖湿润。年均气温17.4℃,年平均降水量1600 mm,年均降雨日164 d。年均日照时数1757 h,年无霜期261 d。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与采样方法 2024年8月,选取具有代表性的杉木林(CL)、毛竹林(PH)、楠木林(PZ)、鹅掌楸林(LC)4种典型森林类型为研究对象,每种森林类型分别设置3个30 m×30 m的半固定标准样地,共计12块。并对林分因子进行调查和测定,记录海拔、坡向、冠幅等信息(表1)。

表1 4种森林类型的样地基本概况

Table 1 Basic overview of sample plots in four forest types

森林类型	海拔/m	坡向	树高/m	胸径/cm	密度/(株·hm ⁻²)	冠幅/m	林层结构
PH	136.00	阴坡	11.77±0.10	9.61±0.72	2500.00±44.91	2.82±0.02	单层林
CL	119.33	阴坡	14.60±2.36	12.20±0.29	2525.19±336.31	2.74±0.06	单层林
LC	103.67	阴坡	9.77±0.35	9.24±0.31	1851.85±216.25	3.14±0.39	单层林
PZ	367.53	阴坡	20.17±7.80	26.26±0.70	752.76±61.48	5.61±0.15	单层林

注:平均值±标准误。

1.2.2 凋落物现存量调查 野外采样时,在每个样地内沿对角线布设3个1 m×1 m的枯落物小样框,收集每个小样方内的所有枯落物,将枯落物分为枯落叶和其他。其中,枯落叶按分解程度将其划分为未分解枯落叶和半分解枯落叶^[16-17]。装入密封袋,带回实验室后进行称量,记录其自然状态下的重量,之后将其放入75℃烘箱中烘至恒重,记录其干重量,并以干重量推算相应林地的枯落物现存量(t/hm²)及自然含水率(%)。相关公式如下:

$$M = m' / 100 \quad (1)$$

$$R_0 = (m_0 - m') / m' \times 100\% \quad (2)$$

式中: m' 为干重量(g); M 为现存量(t/hm²);100为单位转换系数; m_0 为自然状态下的重量(g); R_0 为枯落物自然含水率(%)。

1.2.3 枯落物持水性能测定 采用室内浸泡法^[13],将烘干后的枯落物装入1 mm的尼龙网袋,然后浸入装有清水的容器中,并使其完全浸没。分别在浸泡0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 24.0, 36 h后取出枯落叶待无水滴落时称量(同时设置空尼龙网袋作为空白组),每个森林类型设置3个重复。相关计算公式如下:

$$R_m = (m_{36} - m') / m' \times 100\% \quad (3)$$

$$W_m = R_m \cdot M \quad (4)$$

$$R_s = 0.85R_m \cdot R_0 \quad (5)$$

$$W_s = (0.85R_m - R_0) \cdot M \quad (6)$$

$$V_t = \Delta m / (m' \cdot t) \quad (7)$$

式中: m_{36} 为浸泡36 h时达到饱和时的质量(g); R_m 为枯落叶的最大持水率(%) ; W_m 为最大持水量(t/

hm²);0.85为有效拦蓄系数; R_s 为有效拦蓄率(%); W_s 为有效拦蓄量(t/hm²); Δm 为前后两次持水量的差值; t 为吸水相应时间段(h); V_t 为枯落叶的吸水速率[g/(kg·h)]。

研究指出,枯落物浸泡达到饱和时的持水量被视为最大持水量,此时对应的持水率为最大持水率^[18]。本研究中4种森林类型浸泡36 h达到饱和。

1.2.4 枯落物持水恢复能力的测定 枯落物持水恢复能力通过失水试验测定,将持水36 h的枯落叶取出后,使其自然失水(同样设置空白组)。同样,分别于0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 24.0, 36 h后对枯落叶进行称量,至连续3次称量枯落叶重量不再变化为止。相关计算公式如下:

$$m'' = (m_{36} - m'_t) / m' \cdot 1000 \quad (8)$$

$$U_t = \Delta m' / (m' \cdot t) \quad (9)$$

式中:1000为单位转换系数; m'' 为枯落叶单位质量的失水量(g/kg); m'_t 为枯落叶失水 t 时的质量; U_t 为枯落叶失水速率[g/(kg·h)]; $\Delta m'$ 为前后两次失水量的差值; t' 为失水相应时间段(h)。

此外,有学者认为仅用枯落叶的失水量与失水速率指标表征枯落物的保水能力会忽视最大持水量对枯落叶水分蒸发下渗过程造成的影响^[9,19]。因此,本研究引入失水量与其最大持水量的比值即持水恢复能力(E /%),评价枯落叶的持水恢复能力。计算公式如下:

$$E = (m_{36} - m'_t) / m_{36} \quad (10)$$

式中: E 为枯落叶持水恢复能力(%)。

1.3 数据分析处理

在Excel 2016中进行数据整理,在SPSS 26.0中

进行统计分析,并用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同森林类型同一分解程度枯落叶现存量的差异显著性,独立样本t检验(t-test)分析同一森林类型不同分解程度枯落叶现存量差异显著性, $p < 0.05$ 。在Origin 2025中进行绘图,并拟合持(失)水速率与持(失)水时间关系的相应曲线。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型枯落叶现存量

4种森林类型总枯落叶现存量变动范围为1.61~

3.00 t/hm²,由大到小排序为楠木林>毛竹林>杉木林>鹅掌楸林($p < 0.05$,表2)。方差分析结果表明:4种森林类型未分解枯落叶现存量和半分解枯落叶现存量差异显著($p < 0.05$)。其中,未分解枯落叶表现为楠木林>杉木林>鹅掌楸林>毛竹林;半分解枯落叶表现为楠木林>毛竹林>鹅掌楸林>杉木林($p < 0.05$,表2)。独立样本t检验结果表明:除杉木林外,其余3种森林类型半分解枯落叶现存量均显著高于未分解枯落叶现存量($p < 0.05$),且半分解枯落叶现存量占比均超过64%(表2)。

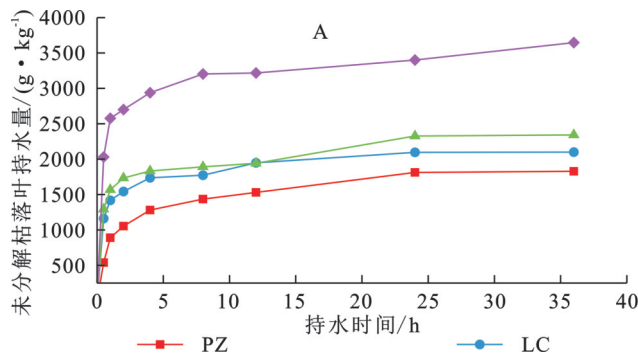
表2 4种森林类型枯落物现存量
Table 2 Standing crop of leaf litter in four forest types

森林类型	未分解/(t·hm ⁻²)	比例/%	半分解/(t·hm ⁻²)	比例/%	总和/(t·hm ⁻²)
PZ	1.04±0.16Ba	35.22	1.96±0.27Aa	64.78	3.00±0.41a
LC	0.32±0.06Bb	19.06	1.30±0.22Ab	80.94	1.61±0.26b
CL	0.54±0.15Aabc	27.88	1.21±0.18Ab	72.12	1.76±0.27b
PH	0.11±0.01Bc	6.12	1.84±0.18Aab	93.88	1.96±0.18b

注:(1)不同小写字母表示同一分解程度枯落叶现存量在不同森林类型之间具有显著差异;(2)不同大写字母表示同一森林类型不同分解程度枯落叶现存量之间具有显著差异; $p < 0.05$,下同。

2.2 不同森林类型枯落叶持水特性

2.2.1 不同森林类型枯落叶持水量动态变化 4种森林类型单位质量枯落叶持水量随浸水时间呈倒“J”型曲线变化特征。整体上,在最初浸泡的0~1 h内枯落叶持水量迅速增加,1~12 h内枯落叶持水量增长速度逐渐减缓,36 h枯落叶持水量基本达到饱和状



态。整体来看,不同森林类型单位质量未分解枯落叶饱和持水量表现为毛竹林>杉木林>鹅掌楸林>楠木林;半分解枯落叶表现为毛竹林>杉木林>楠木林>鹅掌楸林(图1)。同一森林类型下,除毛竹林外,半分解枯落叶单位质量持水量均高于未分解枯落叶。

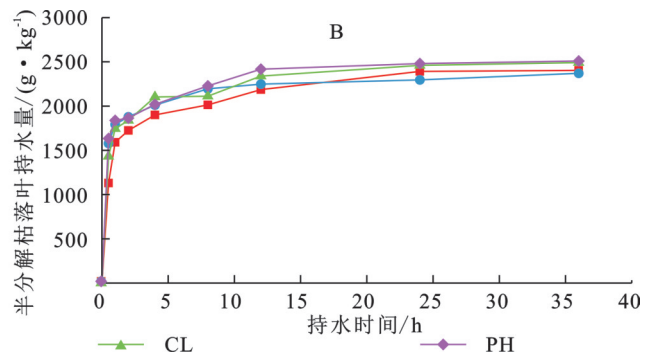


图1 4种森林类型枯落叶持水量随浸泡时间的变化

Fig. 1 Variation of water holding capacity of leaf litter with soaking time in four forest types

对0.5~36 h内4种森林类型单位质量枯落叶持水量均值与浸泡时间进行函数拟合,最佳拟合公式均满足“Allometric”函数,其公式为 $Y=ax^b$, $R^2 \geq 0.94$,且 $b > 0$,表明枯落叶持水量随时间延长而增加(表3)。

2.2.2 不同森林类型枯落叶持水速率动态变化 4种森林类型单位质量枯落叶持水速率随浸水时间呈倒“L”型曲线变化。整体上,在浸水0.5 h后,枯落物持水速率达到最大值,在0.5~2 h内枯落叶持水速率迅速下降,12 h后枯落叶持水速率缓慢下降并逐渐

接近于0 g/(kg·h),图2。从整体来看,毛竹林单位质量未分解和半分解枯落叶均具有最高的初始吸持速率,楠木林未分解和半分解枯落叶均具有最低的初始吸持速率。且除毛竹林外,3种森林类型单位质量半分解枯落叶吸持速率均大于未分解枯落叶吸持速率(图2)。

对0.5~36 h内4种森林类型枯落叶单位质量持水速率均值与浸泡时间的关系也均符合“Allometric”函数,且拟合方程中 $b < 0$,表明枯落叶的持水速率随时间增长而降低。

表 3 4 种森林类型枯落叶持水量与浸泡时间的关系
Table 3 Relationship between water holding capacity and soaking time of leaf litter in four forest types

森林类型	未分解枯落叶		半分解枯落叶	
	方程式	R ²	方程式	R ²
PZ	$y=865.25t^{0.23}$	0.95	$y=1494.52t^{0.14}$	0.94
LC	$y=1389.54t^{0.13}$	0.96	$y=1765.02t^{0.09}$	0.96
CL	$y=1509.54t^{0.12}$	0.95	$y=1693.51t^{0.12}$	0.95
PH	$y=2450.64t^{0.11}$	0.94	$y=1786.08t^{0.10}$	0.97

2.2.3 不同森林类型枯落叶持水能力 不同森林类型枯落叶最大持水率以毛竹林最大,楠木林最小($p <$

0.05),且毛竹最大持水量是其自身质量的3倍;4种森林类型枯落叶最大持水量介于3.66~6.40 t/hm²,其中楠木林持水量最大,毛竹林次之(表4)。相较于最大持水量,有效拦蓄量更能准确衡量枯落物在自然条件下对降水的拦蓄及对水土流失的改善效果^[7]。4种森林类型枯落叶有效拦蓄量介于2.67~4.98 t/hm²,其中,未分解枯落叶有效持水量表现为楠木林>杉木林>鹅掌楸林>毛竹林;半分解枯落叶表现为毛竹林>楠木林>杉木林>鹅掌楸林($p <$ 0.05,表4)。半分解枯落叶有效持水量是未分解枯落叶的2~10倍。

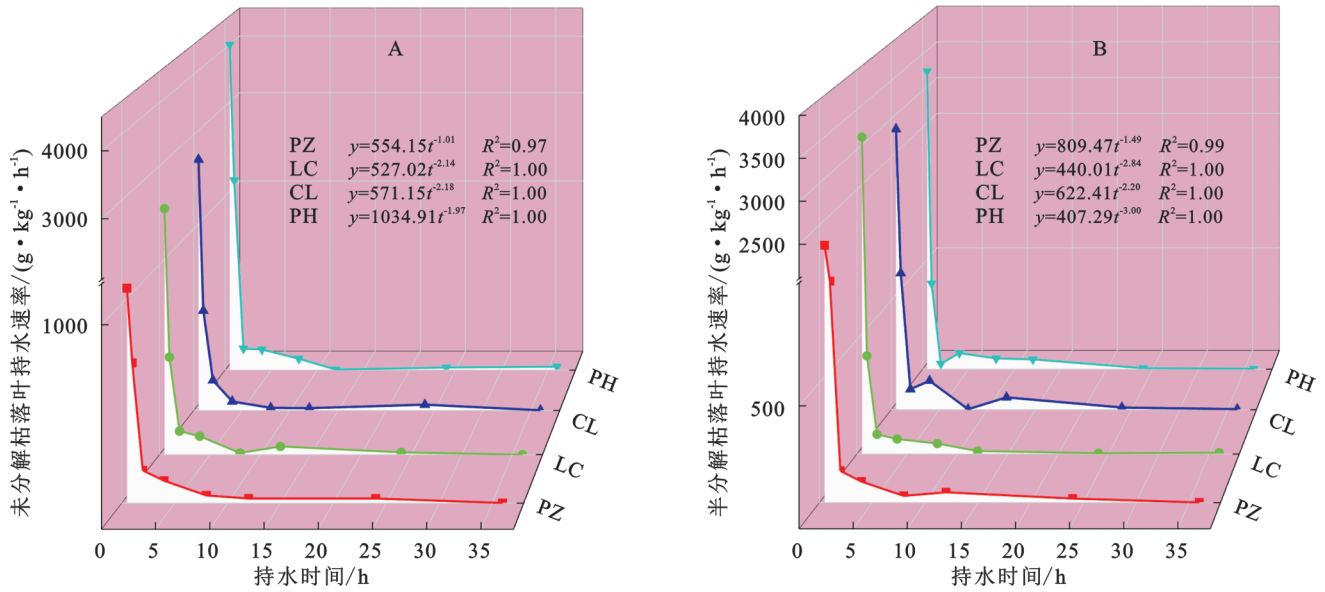


图 2 4 种森林类型枯落叶持水速率随时间的变化

Fig. 2 Variation of water holding rate of leaf litter with time in four forest types

表 4 不同森林类型枯落叶持水能力差异

Table 4 Differences in water holding capacity of leaf litter in different forest types

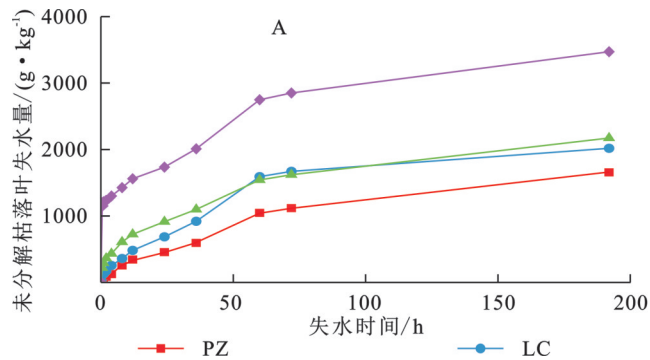
类别	森林类型	自然含水率/%	最大持水率/%	最大持水量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)
未分解枯落叶	PZ	14.01±2.20Aa	182.85±6.80Bc	1.91±0.14Bc	141.38±3.66Bb	1.48±0.10Ba
	LC	20.21±2.42Aa	209.92±7.39Abc	0.65±0.16Bbc	158.22±8.68BAa	0.49±0.11Bb
	CL	15.80±2.91Aa	234.22±6.03Ab	1.31±0.68Ab	183.28±7.53Aa	1.04±0.55Ab
	PH	19.84±3.25Aa	364.61±15.64Ba	0.41±0.03Ba	290.08±10.19Ba	0.33±0.03Bb
半分解枯落叶	PZ	15.25±1.94Aa	240.38±4.19Aa	4.72±0.67Aa	189.07±2.50Aa	3.71±0.49Aa
	LC	20.93±1.05Aa	237.07±10.95Aa	3.02±0.31Aa	180.58±10.19Aa	2.30±0.25Aa
	CL	16.26±4.92Aa	249.14±1.05Aa	3.02±0.36Aa	195.50±4.03Aa	2.38±0.29Aa
	PH	14.18±2.26Ba	250.98±15.47Aa	4.72±1.02Aa	199.15±10.90Aa	3.73±0.79Aa
总量	PZ	14.96±2.06a	212.62±4.39b	6.40±0.64a	165.76±1.86b	4.98±0.44a
	LC	21.10±1.40a	223.61±9.18b	3.55±0.51a	168.97±9.05b	2.67±0.35b
	CL	16.42±4.44a	241.58±2.74b	4.26±0.89a	188.93±6.01b	3.36±0.77ab
	PH	14.51±2.22a	307.19±14.91a	6.09±1.18a	246.60±10.48a	4.88±0.92ab

2.3 不同森林类型枯落叶失水特性

2.3.1 不同森林类型枯落叶失水量动态变化 失水试验结果表明:单位质量未分解枯落叶和半分解枯

落叶的失水量具有相似趋势,二者均表现为在失水0~0.5 h内枯落叶失水量迅速增加,0.5~60 h内枯落叶失水量增加速度减缓,60 h后失水量趋于匀速增

加。整体来看,不同森林类型单位质量枯落叶未分解和半分解枯落叶失水量均表现为毛竹林最大,楠木林最小。与持水量相同,除毛竹林外,同一森林类型单位质量半分解枯落叶失水量均高于未分解枯落



叶(图3)。4种森林类型枯落叶单位质量失水量均值与失水时间的关系同样符合“Allometric”函数。其中, $b > 0$, 表明枯落叶失水量随时间增长而增加(表5)。

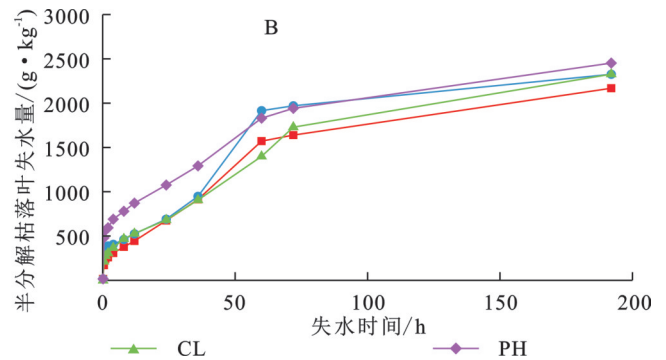


图3 4种森林类型枯落叶失水量随失水时间的变化

Fig. 3 Variation of water loss capacity of leaf litter with dehydration time in four forest types

表5 4种森林类型枯落叶失水量与失水时间的关系
Table 5 Relationship between water loss capacity and dehydration time of leaf litter in four forest types

森林类型	未分解枯落叶		半分解枯落叶	
	方程式	R^2	方程式	R^2
PZ	$y=85.03t^{0.57}$	0.98	$y=170.59t^{0.50}$	0.96
LC	$y=169.32t^{0.49}$	0.94	$y=230.02t^{0.46}$	0.90
CL	$y=274.95t^{0.40}$	0.99	$y=175.84t^{0.50}$	0.97
PH	$y=969.80t^{0.24}$	0.92	$y=430.64t^{0.33}$	0.97

2.3.2 不同森林类型枯落叶失水速率动态变化 4种森林类型单位质量枯落叶失水速率随失水时间也呈

倒“L”型曲线变化,且整体上,单位质量枯落叶失水速率也在0.5 h时最大。从整体来看,单位质量枯落叶失水速率在初始阶段均表现为毛竹林枯落叶初始失水速率最高,楠木林枯落叶失水速率最低。同一森林类型下,杉木林与毛竹林未分解枯落叶初始失水速率均高于半分解枯落叶;楠木林、鹅掌楸林与其相反(图4)。采用“Allometric”函数对0.5~192 h内4种森林类型枯落叶单位质量失水速率与失水时间进行拟合,表现良好($R \geq 0.86$,图4)。总体而言,失水速率随着时间增长而逐渐降低。

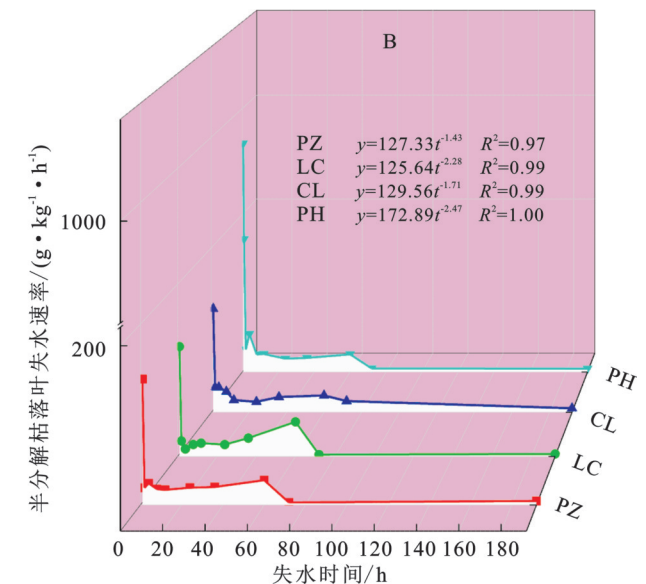
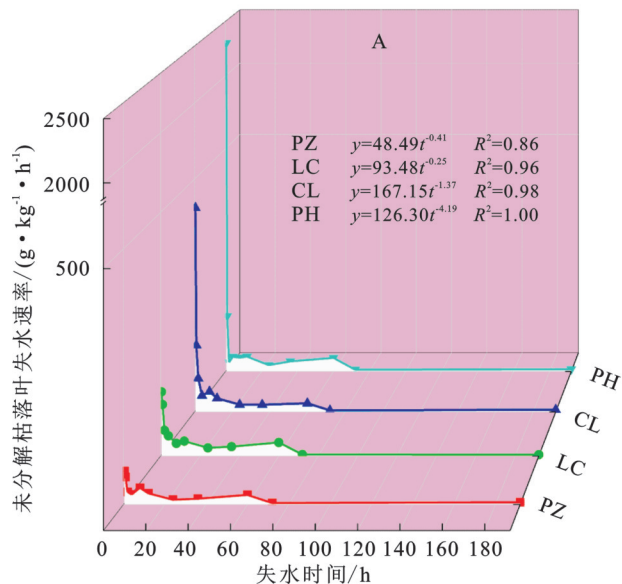


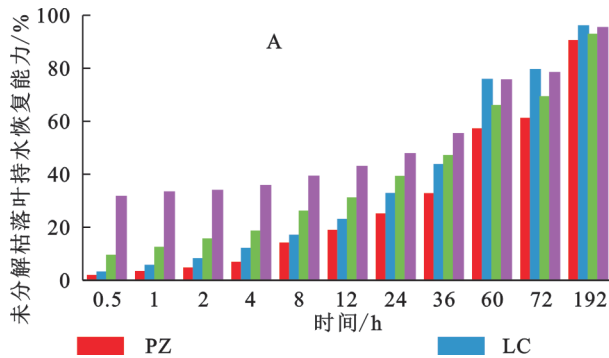
图4 4种森林类型枯落叶失水速率随时间的变化

Fig. 4 Variation of water loss rate of leaf litter with time in four forest types

2.3.3 不同森林类型枯落叶持水恢复能力 如图5所示,4种森林类型枯落叶持水能力恢复速率随着时间增长而逐渐减缓。在失水72 h时,鹅掌楸林和毛竹林各分解程度枯落叶持水恢复能力均已超过70%。在失水192 h时,4种森林类型枯落叶持水恢复

能力均超过90%,表现为鹅掌楸林>毛竹林>杉木林>楠木林,其中未分解枯落叶为95.95%,95.27%,92.76%,90.37%;半分解枯落叶为98.10%,97.69%,93.42%,90.23%。除楠木外,3种森林类型均表现为半分解枯落叶的持水恢复能力强于未分解枯落叶

(图5)。整体而言,4种森林类型枯落叶最大失水量表现为楠木林>毛竹林>杉木林>鹅掌楸林,保水



量则表现为楠木林显著高于杉木林、毛竹林,鹅掌楸林最低($p < 0.05$,表6)。

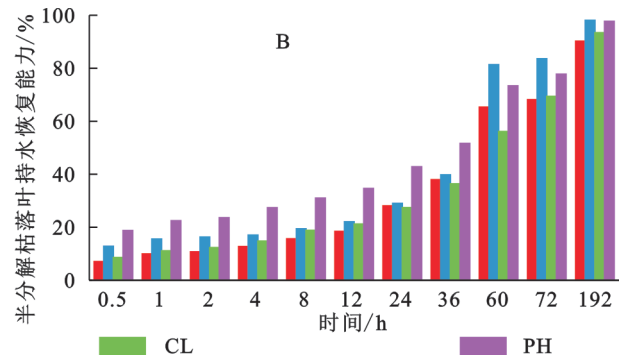


图5 4种森林类型枯落叶持水恢复能力

Fig. 5 Water holding recovery capacity of leaf litter in four forest types

表6 4种森林类型枯落叶失水及保水量

Table 6 Water loss and water retention amount of leaf litter in four forest types

类别	森林类型	最大失水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	保水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
未分解枯落叶	PZ	$1.73 \pm 0.17Ba$	$0.17 \pm 0.03Ba$
	LC	$0.62 \pm 0.14Ab$	$0.03 \pm 0.03Aa$
	CL	$1.21 \pm 0.62Ba$	$0.10 \pm 0.05Aa$
	PH	$0.39 \pm 0.03Bb$	$0.02 \pm 0.01Aa$
半分解枯落叶	PZ	$4.28 \pm 0.66Aa$	$0.45 \pm 0.09Aa$
	LC	$2.97 \pm 0.36Aa$	$0.05 \pm 0.02Ab$
	CL	$2.83 \pm 0.39Aa$	$0.18 \pm 0.08Ab$
	PH	$4.61 \pm 1.00Aa$	$0.11 \pm 0.03Ab$
总量	PZ	$6.00 \pm 0.72a$	$0.63 \pm 0.07a$
	LC	$3.59 \pm 0.48a$	$0.09 \pm 0.04c$
	CL	$4.04 \pm 0.90a$	$0.27 \pm 0.04b$
	PH	$5.00 \pm 1.02a$	$0.13 \pm 0.03bc$

3 讨论

3.1 不同森林类型对枯落叶现存量的影响

森林枯落叶现存量取决于枯落叶的凋落物输入量、分解速度、密度、树种多样性等多种因素^[17,20]。其中树种组成对凋落物输入有显著影响,一般以阔叶树凋落物输入量最高^[21]。本研究结果与此一致,本研究中4种森林类型枯落叶现存量介于 $1.61 \sim 3.00 t/hm^2$,并表现为楠木林>毛竹林>杉木林>鹅掌楸林。且楠木林较高的树木、较大的冠幅和胸径意味着更多的叶片和枝条,这也有助于产生更多的枯落物^[7],阔叶树种鹅掌楸林枯落叶现存量较低则可能是由不同森林类型的物种组成、物候、分解难易程度以及生物学特性引起的^[16]。毛竹枯落叶氮、磷含量相对较低,而硅含量高;杉木枯落叶角质层发达,富含油脂层,且细而硬,故使其分解相对较慢^[20]。此外,本研究中4种森林类型均表现为半分解枯落叶现存量显著高于未

分解枯落叶,这与多数研究结果一致^[20,22]。可能是亚热带地区充沛的降雨与较高的温度有利于枯落叶的分解、转化,从而造成未分解枯落叶占比较小^[16],另外,取样时间也是造成此结果的重要因素。本研究于8月份取样,此时高温多雨;正值植物生长旺盛期,凋落叶输入量相对较少,使得枯落物现存量相对稳定,进而造成了不同分解程度枯落叶占比差异。

3.2 不同森林类型对枯落叶持水/失水特性的影响

枯落叶的水源涵养能力不仅取决于其数量,还取决于质量^[10,23]。枯落叶现存量决定了其持水和贮水有效空间的大小^[23];枯落叶的质量则体现枯落物的持水性能,其持水能力可通过持水率来反映^[17],并可表征吸持水分的快慢,从而间接影响林分蓄水速率和数量。本研究中,4种森林类型单位质量枯落叶最大持水率和持水速率均以毛竹林表现最佳,楠木林最差,这与楠木叶片的蜡质层不利于水分的吸持,而毛竹叶片为纸质有表皮毛的叶片,有利于水分的吸持有关^[15]。此外,本研究毛竹林未分解枯落叶最大持水率高于半分解枯落叶,而其他林分未分解枯落叶最大持水率低于半分解枯落叶。这与陈谋会等^[15]的研究结果一致,即纸质有毛枯落叶的最大持水率在未分解状态高于半分解状态,而革质枯落叶的最大持水率在未分解状态低于半分解状态。最大持水量则表现为楠木林最大,毛竹林次之。这是因为枯落叶现存量和自身生物学特性共同决定着枯落叶最大持水量^[16,20,24]。

在自然条件下,枯落叶对降水的截留作用还受降雨量、时间以及枯落叶类型等因素的影响,最大持水量很可能高估枯落叶对降雨的实际拦蓄效果^[25]。因此,本研究采用有效拦蓄量表征其在自然下的实际拦蓄效果,且有效拦蓄量越大,越有利于水土保持和减缓地表径流的产生^[26]。4种森林类型枯落叶有效拦蓄量介于 $2.67 \sim 4.98 t/hm^2$,表现为楠木林>毛竹林>杉木林>鹅掌楸林。这一方面与枯落叶现存量表现为

楠木林>毛竹林>杉木林>鹅掌楸林,且鹅掌楸林枯落叶易分解而不易积累,而杉木不易脱落^[27]有关。另一方面可能是因为杉木凋落物富含油脂不易分解且较阔叶不易浸湿^[10],致使其枯落叶的亲水性降低,不易于水分的吸收和存储^[11]。此外,4种森林类枯落叶有效拦蓄量均表现为半分解>未分解,表明半分解枯落叶对降雨的拦蓄能力起主导作用,这与曹泽涛等^[7]的研究结果一致。一方面是因为半分解枯落叶现存量远大于未分解,另一方面,半分解枯落物经分解后体积减小,表面积变大,持水量随之增加。因此,与未分解枯落相比,半分解枯落叶有效拦蓄量较高^[20]。

此外,枯落叶的持水是一个反复的过程,持水体现的是其潜在截留水分的能力,而失水则体现其持水恢复能力及保水能力。在相同条件下持水速率通常高于失水速率^[7],本研究结果与此一致。原因在于持水是一个物理吸附以及渗透过程,不需要额外的能量,而失水是水分在重力作用下下渗以及蒸发的过程,蒸发需要能量驱动水分的气化和克服表面张力^[7]。在4种森林类型中,毛竹林的初始失水速率最高,楠木林的初始失水速率最低,较慢的水分蒸发和下渗意味着楠木林可以长久稳定地供给林地水分^[9]。此外,本研究中,4种森林类型持水恢复能力表现为鹅掌楸林>毛竹林>杉木林>楠木林,以及半分解枯落叶>未分解枯落叶,这表明鹅掌楸林、毛竹林及半分解枯落叶有利于水资源的可持续利用。也有研究指出,失水受到枯落物保水能力以及可供释放水量的限制^[9],本研究结果与此观点一致。本研究中,楠木林最大失水量和保水量均显著高于其他林分。这可归因于楠木林具有较高的枯落叶现存量和最大持水量。较大的最大持水量和保水量表明楠木林具有较强的储水能力。此外,楠木林这种高失水量和保水量的特性对于调节区域水文循环、维持流域内的水分平衡、减少洪峰流量和延长枯水期水流具有重要意义。

3.3 不同森林类型枯落叶的水源涵养功能

在森林生态系统中,持水与蒸发、下渗过程是维持水分平衡的关键过程,二者共同驱动着水文循环^[7]。整体而言,富春江国家森林公园4种典型森林类型的枯落叶持(失)水量与持(失)水时间以及持(失)水速率与时间均符合“Allometric”函数。各森林类型不同程度的枯落叶持水量和失水量均随着时间的增长而增长,持水和失水速率均随着时间的增长而下降,这与前人研究结果相一致^[7,10]。此规律可帮助管理者更好地进行水分管理,特别是在干旱和水分过多的地区。此外,这一规律也可为水文模型的构建提供数据支持。

在浸泡初期,枯落叶表面干瘪的植物细胞结构具

有足够丰富的储水空间,且枯落叶内外水势差距较大,在水势差的作用下,通过枯落叶的细胞渗透膜完成渗透,速度较快。但随着水势的增加,枯落叶的吸水作用减弱,从而导致了吸水速率逐渐降低^[28],持水量逐渐接近于饱和。浸泡初期迅速持水的过程能快速涵养林内降雨,延缓短时高强度降水产生的地表径流^[29],尤其是梅雨季节。较大饱和持水量和吸水速率能体现一定时段内枯落叶的拦蓄能力^[15]。本研究发现,毛竹林枯落叶的饱和持水量最大,持水速度也最快。这表明,毛竹林枯落叶对历时较短、高强度降水有良好的拦蓄功能,能有效延缓地表径流的产生^[7,24]。鉴于亚热带地区降水强度大且集中,毛竹林在短时间内能有效防止雨水冲刷和缓解地表径流的形成^[24],因此,本研究认为在高强度降水的山坡上和河岸带种植毛竹林是非常适宜的,这对于森林生态系统的水源涵养功能和水土流失防控等方面具有重要意义。

降雨停止后,进入蒸发、下渗阶段,储存在森林地面枯枝落叶层中的水将被蒸发回到大气中或通过重力排出、渗透^[7]。枯落叶失水前期,水重力作用大于枯落物的吸水力从而导致前期失水速率较快^[25],且枯落叶可供释放的水量也相对较多^[23],而失水后期,枯落叶只有蒸发阶段,因此失水速率逐渐较小^[25]。也有学者认为失水过程比持水过程更缓慢,说明其达到稳定所耗费的时间更长,表明枯落叶具有良好的水分调蓄及保水能力^[9],较慢的失水率更有利于蒸发量较高的高山峡谷区保持林地水分和涵养水源^[10]。本研究中,楠木林在保水方面表现最优,并且种植地适宜。此外,未分解与半分解枯落物在持水和失水上均呈显著差异,原因在于相较于未分解枯落叶,半分解枯落叶结构更加疏松多孔,有利于水分的保持和渗透,因此持水速率较快^[30]。但较多的孔隙也会增强空气流通,较大的表面积也使得水分更易暴露于空气中,从而导致了较快的蒸发下渗速率。加之其较大的现存量,进而使半分解枯落叶持水量,持水恢复能力,失水量、保水量均较大,故而在森林生态系统中发挥着关键的水源涵养作用。

综合来看,本研究区的毛竹林枯落叶持水性能强于其他林型,楠木林枯落叶的保水性能强于其他林型。在实际的林型管理中,也需要综合考虑立地条件(如土壤类型、降雨量)和管理目标(如水土保持、水源涵养),选择合适的林型,以达到最佳的生态效益和社会经济效益。

4 结论

富春江国家森林公园典型森林类型枯落叶的水源涵养功能受森林类型和分解程度的共同影响。4

种森林类型枯落叶现存量介于1.61~3.00 t/hm²。毛竹林枯落叶具有较好的持水性能,总有效拦蓄率达(246.60±10.48)%,总有效拦蓄量为(4.88±0.92) t/hm²;楠木林枯落叶具有较好的保水性能,在失水192 h后,保水量达(0.63±0.07) t/hm²,且各森林类型半分解枯落叶的持水和保水性能均高于未分解枯落叶。此外,枯落叶持水量和失水量均随着时间的增长而增长,持水速率和失水速率均随着时间的增长而下降,持水量、失水量、持水速率、失水速率与时间的关系均符合“Allometric”函数,即 $Y=ax^b$ 。本研究结果可为深入认识研究区域的森林水源涵养效益及经营管理提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016, 2(2):e1500323.
- [2] 周利,彭韬,王世杰.中国西南喀斯特水源涵养特点及其生态功能[J].水土保持学报,2025,39(3):1-14.
Zhou L, Peng T, Wang S J. Characteristics and ecological functions of water conservation in karst regions of southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):1-14.
- [3] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
Gong S H, Xiao Y, Zheng H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [4] 徐亚莉,田苗,郑纪波,等.大熊猫国家公园(四川片区)森林的水源涵养功能[J].水土保持通报,2024,44(6):88-96.
Xu Y L, Tian M, Zheng J B, et al. Evaluation on forest water conservation function of Giant Panda National Park in Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6):88-96.
- [5] 施蕾,王晓荣,史玉虎,等.抚育管理对三峡库区不同类型马尾松林枯落物层持水特性的影响[J].西南林业大学学报:自然科学,2025,45(2):115-121.
Shi L, Wang X R, Shi Y H, et al. Effects of tending and management on water retention characteristics of litter layers in different types of *Pinus massoniana* forest within the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(2):115-121.
- [6] Gerrits A M J, Savenije H H G, Hoffmann L, et al. New technique to measure forest floor interception: an application in a beech forest in Luxembourg[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(2):695-701.
- [7] 曹泽涛,邓杨旭,田婧,等.混交刺槐人工林枯落物蓄积特征及其水文效应[J].水土保持学报,2024,38(6):152-160,169.
Cao Z T, Deng Y X, Tian J, et al. Accumulation characteristics and hydrological effects of litter in mixed *Robinia pseudoacacia* plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):152-160,169.
- [8] 陈凤怡,黄艳萍,戴矜君,等.香樟等10种校园植物枯落物层及其土壤层水文效应[J].生态科学,2024,43(6):110-120.
Chen S Y, Huang Y P, Dai J J, et al. Hydrological effects of litters and soil of ten campus plants including *Cinnamomum camphora*[J]. Ecological Science, 2024, 43(6):110-120.
- [9] 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.
- [10] 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 Y L, Wen Y M, Li Q Y, 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.
- [11] 李素丽,徐佳文,丁翊东,等.赣江中游水源涵养林乔木和蕨类植物凋落物持水和失水特征[J].水土保持学报,2021,35(3):170-176.
Li S L, Xu J W, Ding Y D, et al. Litter water-holding and water-loss characteristics of trees and ferns in the water conservation forests at the middle reaches of the Gan River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):170-176.
- [12] 黄艳萍,洪德伟,韩宇杰,等.海南省典型水土流失区不同混交林枯落物持水能力恢复过程研究[J].中国水土保持,2025(4):75-79.
Huang Y P, Hong D W, Han Y J, et al. The recovery process of water-holding capacity of litter in mixed forests in typical soil erosion and water loss areas of Hainan Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2025(4):75-79.
- [13] 孔凡斌,段淑慧,徐彩瑶.基于生态系统服务和生态敏感性的生态安全格局构建:以钱塘江流域为例[J].生态学报,2024,44(24):11359-11374.
Kong F B, Duan S H, Xu C Y. The construction of ecological security pattern based on ecosystem services and ecological sensitivity: a case study of the Qiantang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11359-11374.
- [14] 魏鲁明,余登利,陈正仁.茂兰喀斯特森林凋落物量的动态研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2009, 33(3):31-34.
Wei L M, Yu D L, Chen Z R. Study on the dynamic variation of litter falls in Maolan karst forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2009, 33(3):31-34.
- [15] 陈谋会,王震洪,林泽北,等.喀斯特阔叶树种不同特征

- 枯落叶的持水性能[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(7): 72-76.
- Chen M H, Wang Z H, Lin Z B, et al. Characteristics of water-holding properties of leaf litters of deciduous tree species in karst region[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 72-76.
- [16] 刘燕平, 王根绪, 胡兆永, 等. 西南山区典型森林枯落物储量及持水能力[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2113-2120.
- Liu Y P, Wang G X, Hu Z Y, et al. Litter storage and water-holding capacity of typical forests in mountainous area of Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2113-2120.
- [17] 郑金萍, 郭忠玲, 徐程扬, 等. 长白山主要次生林的枯落物现存量组成及持水特性[J]. 林业科学研究, 2011, 24(6): 736-742.
- Zheng J P, Guo Z L, Xu C Y, et al. Litter's reserve and water-holding capacity for major secondary forest communities in Changbai Mountains [J]. Forest Research, 2011, 24(6): 736-742.
- [18] 张雷燕, 刘常富, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山南侧森林枯落物及土壤的水文生态功能研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 15-20.
- Zhang L Y, Liu C F, Wang Y H, et al. Study on eco-hydrological function of forest-litter and soil in the south side of Liupan Mountains, Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. Forest Research, 2007, 20(1): 15-20.
- [19] 吕宸, 龚伟, 车明轩, 等. 海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 219-225, 243.
- Lü C, Gong W, Che M X, et al. Effects of altitude and slope direction on water conservation function of litter in alpine shrub meadow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 219-225, 243.
- [20] 胡静霞, 杨新兵, 朱辰光, 等. 冀西北地区4种纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 304-310.
- Hu J X, Yang X B, Zhu C G, et al. Hydrological effects of litter in four pure forests and soils in northwest of Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 304-310.
- [21] 凌华, 陈光水, 陈志勤. 中国森林凋落量的影响因素[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 66-71.
- Ling H, Chen G S, Chen Z Q. Controlling factors of litterfall in China's forests [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2009, 4(4): 66-71.
- [22] 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 A L, Wen H, Cong R C, 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.
- [23] 喻阳华, 李光容, 严令斌, 等. 赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分效应[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 39-44.
- Yu Y H, Li G R, Yan L B, et al. Effects of litters of major tree species on the water storage in upper reaches of Chishui River[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 39-44.
- [24] 宋庆妮, 杨清培, 欧阳明, 等. 毛竹扩张的生态后效: 凋落物水文功能评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2281-2287.
- Song Q N, Yang Q P, Ouyang M, et al. Changes in the hydrological functions of litter layer following *Phyllostachys edulis* expansion into evergreen broadleaved forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2281-2287.
- [25] 董辉, 严朝东, 苏纯兰, 等. 东莞5种生态公益林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 144-149, 160.
- Dong H, Yan C D, Su C L, et al. Litter and soil hydrological effects of five no-commercial forests in Dongguan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 144-149, 160.
- [26] 涂立辉, 熊伟, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山半干旱区典型植物群落的持水功能及其对土壤有机碳的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2023, 59(3): 433-441.
- Tu L H, Xiong W, Wang Y H, et al. Water-holding capacity and impact on soil organic carbon of typical plant communities in semi-arid area in Liupan Mountain, Ningxia[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2023, 59(3): 433-441.
- [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 L L, Cai L P, Ma X Q, 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] 张月, 马岚, 何娇, 等. 晋西黄土区典型林分枯落物持水特性[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3177-3183.
- Zhang Y, Ma L, He J, et al. Water holding characteristics of litters of typical forest in loess area of western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3177-3183.
- [29] 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.
- [30] 赵阳, 王飞, 齐瑞, 等. 白龙江、洮河林区5种典型森林枯落物与土壤层水源涵养效应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 118-125.
- Zhao Y, Wang F, Qi R, et al. Water conservation effect of litter and soil layer of five typical forests in Bailongjiang and Taohu River forest of Gansu[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 118-125.