

鄂西南 5 种典型林分枯落物与土壤的持水性能

周云^{1,2}, 白英辰³, 姚兰^{1,2,4}, 艾训儒^{1,2,4}, 朱江^{1,2,4}, 郭秋菊^{1,2,4}

[1.生物资源保护与利用湖北省重点实验室(湖北民族大学), 湖北 恩施

445000; 2.湖北民族大学 林学院园艺学院, 湖北 恩施 445000; 3.北京林业大学

生态与自然保护学院, 北京 100010; 4.湖北恩施森林生态系统国家定位观测研究站, 湖北 恩施 445000]

摘要: [目的] 探究鄂西南地区典型森林枯落物和土壤的水文特性, 分析对比不同林分的持水性能, 为区域内选择适宜的造林树种、营造合理的水土保持林提供理论依据与科学参考。[方法] 以利川金子山国有林场的 5 种典型林分为研究对象, 采用野外调查与采样、环刀法和室内浸泡法, 对比分析各林分枯落物层储量、持水过程、持水能力, 以及土壤层持水能力和入渗过程。[结果] ①5 种林分枯落物储量表现为: 杉木人工林 > 常绿落叶阔叶混交林 > 日本落叶松人工林 > 柳杉人工林 > 鹅掌楸人工林; 最大持水量变化范围在 13.94~29.12 t/hm² 之间, 与枯落物储量变化相一致。②枯落物持水量与浸水时间关系为对数函数关系, 吸水速率与浸水时间关系为幂函数关系。③0—40 cm 土壤层最大持水量介于 277.02~334.12 t/hm² 之间, 表现为: 鹅掌楸人工林 > 常绿落叶阔叶混交林 > 日本落叶松人工林 > 杉木人工林 > 柳杉人工林; 土壤平均渗透速率变化范围为 6.89~22.30 mm/min, 稳渗时间在 18.40~25.73 min 之间, 其中鹅掌楸人工林土壤渗透性最好。[结论] 枯落物层中杉木人工林持水性能表现最好; 土壤层中鹅掌楸人工林持水性能最好; 各项指标综合评定结果阔叶混交林综合持水性能最佳。鄂西南地区未来应采用近自然营林的方式, 适当地栽植针叶树种和阔叶树种, 提高混交林的种植比例, 增加枯落物水文效益的同时, 使土壤更加通气透水, 以此最大限度地发挥不同林分林下枯落物和土壤的持水能力。

关键词: 森林; 枯落物; 土壤; 水文; 持水量; 鄂西南地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0077-10

中图分类号: S757.2

文献参数: 周云, 白英辰, 姚兰, 等. 鄂西南 5 种典型林分枯落物与土壤的持水性能[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 77-86. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.010; Zhou Yun, Bai Yingchen, Yao Lan, et al. Litter and soil water-holding capacity of five typical forest stands in Southwest Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 77-86.

Litter and Soil Water-holding Capacity of Five Typical Forest Stands in Southwest Hubei Province

Zhou Yun^{1,2}, Bai Yingchen³, Yao Lan^{1,2,4}, Ai Xunru^{1,2,4}, Zhu Jiang^{1,2,4}, Guo Qiuju^{1,2,4}

[1. Hubei Key Laboratory of Biologic Resources Protection and Utilization (Hubei Minzu University),

Enshi, Hubei 445000, China; 2. School of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi,

Hubei 445000, China; 3. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing

100010, China; 4. Hubei Enshi National Key Experimental Station for Forest Ecosystem, Enshi, Hubei 445000, China]

Abstract: [Objective] The hydrological characteristics of typical forest litters and soil in Southwest Hubei Province were studied, and the water-holding capacity of different forest stands were analyzed and compared in order to provide a theoretical basis and scientific reference for selecting suitable afforestation species and creating reasonable soil and water conservation forests in the region. [Methods] The study was conducted for five typical forest stands in the national forest farm of Jinzi Mountain in Lichuan City. Field survey and sampling, the cutting ring method, and the indoor soaking method were used. The litter storage capacity,

收稿日期: 2022-06-03

修回日期: 2022-08-02

资助项目: 湖北省教育厅中青年人才项目“鄂西南高山矮曲林凋落物分解障碍机制”(Q20221903); 湖北民族大学高水平科研成果校内培育项目“鄂西南典型森林空气中康养物质多样性与时空动态研究”(4205022); 生物资源保护与利用湖北省重点实验室开放项目(PT012006)

第一作者: 周云(1998—), 女(土家族), 贵州省铜仁市人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态系统结构与功能。Email: 215096228@qq.com。

通讯作者: 朱江(1987—), 男(汉族), 湖北省天门市人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事森林碳循环方面的研究。Email: 2017052@hbmzu.edu.cn。

water-holding process, and water-holding capacity, as well as the water-holding capacity and infiltration process of the soil layer in each forest stand were compared and analyzed. [Results] ① Litter storage for the five forest stands followed the order of *Cunninghamia lanceolata* plantation > deciduous broad-leaved mixed forest > *Larix kaempferi* plantation > *Cryptomeria fortunei* plantation > artificial plantation of *Liriodendron chinense*. The maximum water-holding capacity varied from 13.94 to 29.12 t/hm², which was consistent with the change of litter storage. ② The litter water-holding capacity and immersion time exhibited a logarithmic relationship. The water absorption rate and immersion time followed a power function relationship. ③ The maximum water-holding capacity of the 0—40 cm soil layer ranged from 277.02 to 334.12 t/hm², and followed the order of artificial plantation of *Liriodendron chinense* > deciduous broad-leaved mixed forest > *Larix kaempferi* plantation > *Cunninghamia lanceolata* plantation > *Cryptomeria fortunei* plantation. The average infiltration rate varied from 6.89 to 22.30 mm/min. The steady infiltration time ranged from 18.40 to 25.73 min. The average infiltration rate of soil varied from 6.89 to 22 mm/min. The steady infiltration time ranged from 18.40 to 25.73 min. The best soil permeability was found in the artificial plantation of *Liriodendron chinense*, followed by the deciduous broad-leaved mixed forest. ④ From the analysis using the coordinate integrated assessment method, we observed the greatest comprehensive water-holding performance for the deciduous broad-leaved mixed forest. However, in terms of the water-holding performance of litter and soil, the *Cunninghamia lanceolata* plantation and the artificial plantation of *Liriodendron chinense*, respectively, were the best. [Conclusion] For the litter layer, *Cunninghamia lanceolata* plantation had the best water-holding performance. For the soil layer, *Liriodendron chinense* plantation had the best water-holding performance. Based on the comprehensive evaluation of all indicators, the overall water-holding performance of broad-leaved mixed forest was the best. Therefore, in Southwest Hubei Province, we recommend adoption of a close-to-natural forest culture and management method, planting coniferous and broad-leaved species appropriately, and increasing the proportion of mixed forests so as to increase the hydrological benefits of litter, and to increase soil aeration and permeability, thereby maximizing the water-holding capacity of litter and soil under different forest stands.

Keywords: forest; litter; soil; hydrology ; water-holding capacity; Southwest Hubei Province

森林因具有水源涵养、净化水质等功能,被称为“绿色水库”,其水文特性是衡量森林水源涵养功能的重要指征^[1]。森林水文效应过程主要体现在林分冠层、枯落物层和土壤层对降水的截持、吸收、贮存上^[2],其中,枯落物层和土壤层作为森林水文效应过程的关键组分,两者相互影响相互关联^[3],在拦蓄降雨、阻滞地表径流、减弱并防止土壤侵蚀等方面发挥着重要作用^[4],直接影响着森林生态系统水文循环过程。因此,研究森林枯落物层和土壤层的水文特性是探讨森林水文效应的基础和前提^[5-6]。有研究表明不同区域、不同林分的森林水文效应具有较大的异质性和不确定性^[7],即森林水文效应会受到林分类型、林分结构、海拔等因素的影响而存在差异。因此,对更多区域内典型林分开展枯落物和土壤的水文特性的研究,通过针对性的研究和评价,深入认识目标区域森林水源涵养能力,对补充和完善中国森林生态系统水源涵养评估和林分多功能经营具有重要意义。

鄂西南地区位于中国长江上游,是中国种子植物三大特有现象中心之一的“川东—鄂西特有现象中

心”的核心地带,区域内降水丰沛,森林覆盖率高,在长江流域的水源涵养、生态安全、净化水质等方面发挥着重要作用^[8]。鄂西南地区典型植被类型为亚热带常绿落叶阔叶混交林,该地区在封山育林的同时,也进行着大面积的人工造林,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、日本落叶松(*Larix kaempferi*)、马尾松(*Pinus massoniana*)均为鄂西南地区重要的造林树种,在维持区域生态平衡及水文调节方面发挥着重要的作用。造林树种如此繁多,但对于何种林型能更好地发挥该地区森林的水源涵养能力和水土保持功能有待深入研究。基于此,本研究以金子山国有林场的杉木人工林、柳杉人工林、鹅掌楸人工林、日本落叶松人工林和常绿落叶阔叶混交林 5 种林分为研究对象,分析对比不同林分的持水能力及土壤物理性质情况,并充分认识区域森林水源涵养特征,为该地区今后该地区探究适宜的造林树种、营造合理的水土保持林提供理论依据与科学参考。

1 研究区概况

研究区域位于金子山国有林场,地处湖北省利川市东部(109°2′—109°4′E,30°17′—30°18′N),属鄂西南山地中亚热带偏北的武陵山余支的中山地带,林场总面积 885.4 hm²,海拔在 1 200~1 767 m 之间,地势北陡南缓,中部高,四周低,主峰金子山为区内最高峰。区域气候属大陆性季风湿润气候,有夏无酷暑,冬无严寒,雾多湿重,雨热同期的气候特点,年均气温 13.7 ℃。林下土壤以石英砂岩发育的山地黄棕壤为主,偏酸性,土体较薄,土层厚度 0.7~1.2 m。林区内天然林(常绿落叶阔叶混交林)优势树种主要有锥栗(*Castanea henryi*)、川陕鹅耳枥(*Carpinus fargesi-*

ana)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)、异叶榕(*Ficus heteromorpha*)、翅柃(*Eurya alata*)等;人工林主要有杉木林、柳杉林、鹅掌楸林、日本落叶松林等。

2 研究方法

2.1 样地设置

2019 年 11 月,在利川金子山国有林场内,选取杉木人工林、柳杉人工林、鹅掌楸人工林、日本落叶松人工林和常绿落叶阔叶混交林 5 种典型林分类型的代表区域,参照 CTFS 样地建立标准,在每种林分类型中建立 3 个 20 m×20 m 固定监测样地,共计 15 个,样地基本信息详见表 1。

表 1 金子山国有林场样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots at Jinzi Mountain

林分	郁闭度	林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	土层厚度/cm	林分密度/(株·hm ⁻²)
杉木林	0.71±0.35	23	16.00±9.52	13.42±7.69	46.66±2.05	1 325±368
柳杉林	0.89±0.52	29	15.36±10.56	13.48±8.85	58.40±12.2	2 166±1 301
鹅掌楸林	0.61±0.35	10	15.35±8.11	15.74±7.01	78.70±3.29	2 275±150
日本落叶松林	0.67±0.12	15	7.29±5.45	6.36±3.25	54.68±15.55	2 963±2 653
阔叶混交林	0.60±0.08	65	3.70±5.32	4.49±3.70	37.13±1.20	7 800±1 495

注:杉木林、柳杉林、鹅掌楸林、日本落叶松林均为人工林;阔叶混交林为常绿落叶阔叶混交林;表中数据为平均值±标准差。下同。

2.2 经营背景

金子山国有林场按照林分特点、树种、经营目的等因素,把林地划分为不同的经营类型。本研究中人工林多为大面积种植的单一树种并划入水土保持林的林分。杉木人工林、柳杉人工林、常绿落叶阔叶混交林主要实行封育管护(2000 年开始),鹅掌楸人工林与日本落叶松人工林主要实行简单抚育(2013 年开始),主要抚育措施是每 5 a 对成活率低于 85% 的林地进行补植。封育管护和抚育措施对林下枯落物层和土壤层的扰动影响较小。

2.3 枯落物储量测定

2021 年 10 月中旬,在各样地内随机选取 1 个 0.3 cm×0.3 cm 的小样方。参照 GB/T33027-2016^[9]对林内枯落物按照未分解层(枯落物如叶、枝等的颜色和形态基本保持刚落地的迹象)、半分解层(叶形不完整、叶肉组织变色并开始腐烂,颜色多为灰褐至灰黑色)和全分解层(枯落物被完全分解成细碎状态,近似土壤,但较土壤轻,松软)分层取样。带回实验室用电子天平称鲜重后装入档案袋,放进 85 ℃ 的烘箱中烘至恒重,以此计算样品自然含水率和单位面积枯落物储量^[10]。

2.4 枯落物持水性能测定

采用室内浸泡法^[11]测量枯落物的持水性能。将不同林分、不同分解程度烘干的枯落物样品分别放入 0.05 mm 尼龙网袋,然后放入清水中浸泡,分别在 0.5,1,2,4,8,10,1 和 24 h 时把尼龙网袋从容器中拿出,将尼龙网袋静置几分钟至不滴水状态后称取湿重,从而计算枯落物在不同时间段内吸水速率、持水率和持水量(枯落物浸水 24 h 后的持水量作为枯落物最大持水量)。

2.5 土壤持水性能测定

在各样地内部选取斑块均一的区域布设 1 个采样点挖取土壤剖面,利用环刀按照 0—10,10—20,20—40 cm 对土壤进行分层采样。采用环刀法^[12]测定不同层次土壤容重、土壤渗透速率,采用环刀浸泡法^[13]测定不同层次持水量、孔隙度等土壤持水指标。以土壤的初始入渗速率、稳定入渗速率作为土壤入渗的基本指标^[14]。初渗速率为最初入渗时段内的渗透量与最初入渗时间的比值,选取最初入渗时间为 1 min^[15];稳渗速率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透量与稳定入渗时间的比值。

2.6 不同林分综合持水性能量化

本文参照多维空间理论坐标综合评定法^[16],对不

同林分下的枯落物层和土壤层综合持水性能进行评价, 值以综合值小者为最优。计算公式为:

$$d_{ij} = a_{ij} / m_j$$

$$P_i = \sqrt{\sum_j (1 - d_{ij})^2}$$

式中: d_{ij} 为“矩阵坐标”; a_{ij} 表示原始数据; i 表示不同林分; j 表示不同指标; m_j 表示每一个 a_{ij} 的最大值; $\sum P_i^2$ 为各处理到标准点距离之和。

2.7 数据处理

使用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整理; 使用 SPSS 26 对数据进行单因素方差分析、Duncan 法进行多重比较、差异显著性分析 ($\alpha = 0.05$) 及回归分析; 使用 Origin 2017 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 不同林分枯落物持水性能

3.1.1 枯落物储量 由表 2 可知, 5 种林分枯落物总储量变化范围为 3.99~9.32 t/hm², 大小依次为杉木林、阔叶混交林、日本落叶松林、柳杉林、鹅掌楸林; 仅杉木林和鹅掌楸林之间具有显著差异 ($p < 0.05$)。杉木林未分解层比例显著高于其他林分, 阔叶混交林未分解层比例最小。从 5 种林分枯落物不同分解层次储量占比看, 相同林分枯落物半分解层储量均占枯落物总储量的 54% 以上, 各林分间无显著差异 ($p > 0.05$), 总体上表现为: 半分解 > 全分解 > 未分解。

表 2 研究区不同林分类型枯落物储量

Table 2 Litter storage of different stand types in the study area

林分	未分解层/ (t · hm ⁻²)	比例/%	半分解层/ (t · hm ⁻²)	比例/%	全分解层/ (t · hm ⁻²)	比例/%	总储量/ (t · hm ⁻²)
杉木林	2.66 ± 0.88 ^{Ba}	29	5.03 ± 1.37 ^{Aa}	54	1.63 ± 0.70 ^{Bab}	17	9.32 ± 1.89 ^a
柳杉林	1.02 ± 0.54 ^{Ab}	16	3.53 ± 2.05 ^{Aa}	56	1.72 ± 0.21 ^{Aab}	28	6.27 ± 2.66 ^{ab}
鹅掌楸林	0.73 ± 0.33 ^{Ab}	18	2.43 ± 1.82 ^{Aa}	61	0.82 ± 0.26 ^{Ab}	21	3.99 ± 1.91 ^b
日本落叶松林	0.75 ± 0.33 ^{Bb}	11	4.05 ± 0.88 ^{Aa}	58	2.16 ± 1.21 ^{Bab}	31	6.97 ± 1.90 ^{ab}
阔叶混交林	0.60 ± 0.06 ^{Cb}	8	4.39 ± 0.95 ^{Aa}	60	2.29 ± 0.73 ^{Ba}	32	7.28 ± 0.26 ^{ab}

注: 同行不同大写字母表示同一林型不同层次之间存在显著差异, 同列不同小写字母表示不同林分各指标之间的差异性 ($p < 0.05$)。下同。

3.1.2 枯落物持水量 5 种不同林分枯落物最大持水量变化范围为 13.94~29.12 t/hm² (表 3), 大小依次为杉木林、阔叶混交林、日本落叶松林、柳杉林、鹅掌楸林, 5 种林分枯落物最大持水量均为自身干重的 3 倍左右, 杉木林最大持水量显著高于鹅掌楸林 ($p < 0.05$), 其他 3 种林分枯落物最大持水量差异不显著 ($p > 0.05$)。从 5 种林分枯落物不同分解层次最大持水量占比看, 各林分枯落物半分解层最大持水量均占总持水量的 50% 以上, 相同林分枯落物半分解层最大持

水量显著高于未分解层与全分解层 ($p < 0.05$)。不同林分枯落物平均最大持水率变化范围为 314.60%~347.65% (表 3), 大小依次为鹅掌楸林、阔叶混交林、日本落叶松林、杉木林、柳杉林。5 种林分类型中, 鹅掌楸林与阔叶混交林枯落物最大持水率表现为: 未分解 > 半分解 > 全分解, 而杉木林、柳杉林以及日本落叶松林表现为: 全分解 > 半分解 > 未分解, 各林分间与各分解层次间枯落物最大持水率均无显著差异 ($p > 0.05$)。

表 3 研究区不同林分类型枯落物持水能力

Table 3 The water-holding capacity of litters of different stand types in the study area

林分	枯落物最大持水量/(t · hm ⁻²)				枯落物最大持水率/%			
	未分解层	半分解层	全分解层	总和	未分解层	半分解层	全分解层	平均
杉木林	8.15 ± 2.14 ^{Ba}	15.75 ± 3.78 ^{Aa}	5.21 ± 1.97 ^{Bab}	29.12 ± 5.24 ^a	310.94 ± 23.70 ^{Ab}	315.62 ± 12.85 ^{Ab}	327.37 ± 29.95 ^{Aa}	317.97 ± 6.12 ^b
柳杉林	3.09 ± 1.40 ^{Bb}	10.95 ± 6.02 ^{Aa}	5.51 ± 0.83 ^{Bab}	19.55 ± 8.00 ^{ab}	310.88 ± 21.64 ^{Ab}	313.20 ± 9.25 ^{Ab}	319.71 ± 19.62 ^{Aa}	314.60 ± 3.73 ^b
鹅掌楸林	2.60 ± 1.07 ^{Bb}	8.54 ± 6.45 ^{Aa}	2.80 ± 1.06 ^{Bb}	13.94 ± 6.86 ^b	359.12 ± 23.66 ^{Aa}	346.86 ± 10.59 ^{Aa}	336.98 ± 38.93 ^{Aa}	347.65 ± 22.27 ^a
日本落叶松林	2.49 ± 1.13 ^{Bb}	13.89 ± 3.19 ^{Aa}	7.41 ± 4.30 ^{Ba}	23.80 ± 6.83 ^{ab}	327.83 ± 4.72 ^{Aab}	342.09 ± 5.15 ^{Aa}	341.39 ± 6.10 ^{Aa}	337.10 ± 4.55 ^{ab}
阔叶混交林	2.13 ± 0.16 ^{Cb}	15.45 ± 3.82 ^{Aa}	7.56 ± 1.75 ^{Ba}	25.15 ± 2.05 ^{ab}	356.78 ± 13.68 ^{Aa}	350.32 ± 14.52 ^{Aa}	332.05 ± 27.01 ^{Aa}	347.30 ± 17.27 ^a

3.1.3 枯落物持水过程 由图 1 可知, 5 种林分枯落物在整个浸水过程中, 0—2 h 内, 枯落物持水量均迅速增加, 随浸水时间的延长, 枯落物持水量增量逐渐

减小, 在 10—12 h 之后, 枯落物吸水基本停止, 24 h 枯落物持水量达到最大。5 种林分内枯落物持水量大小依次为杉木林、阔叶混交林、日本落叶松林、柳杉

林、鹅掌楸林,此外,杉木林在未分解、半分解中持水量也最大。

从 5 种林分枯落物不同分解层次看,各层次持水曲线有一定的差异,0—2 h 内,半分解层持水量增加更为剧烈,未分解与全分解在 10 h 吸水基本停止,而半分解吸水停止出现在 12 h。在相同浸水处理下,杉

木林未分解层持水量与其他 4 个林分差异较大,各林分枯落物持水量均以半分解层最大。对不同林分类型枯落物的持水量与浸水时间进行拟合(表 4),其关系满足数函数关系: $Q=a\ln t+b$, Q 为枯落物持水量(t/hm^2), t 为浸泡时间(h); a, b 为常数项, $R^2 > 0.837(p < 0.01)$,拟合效果较好。

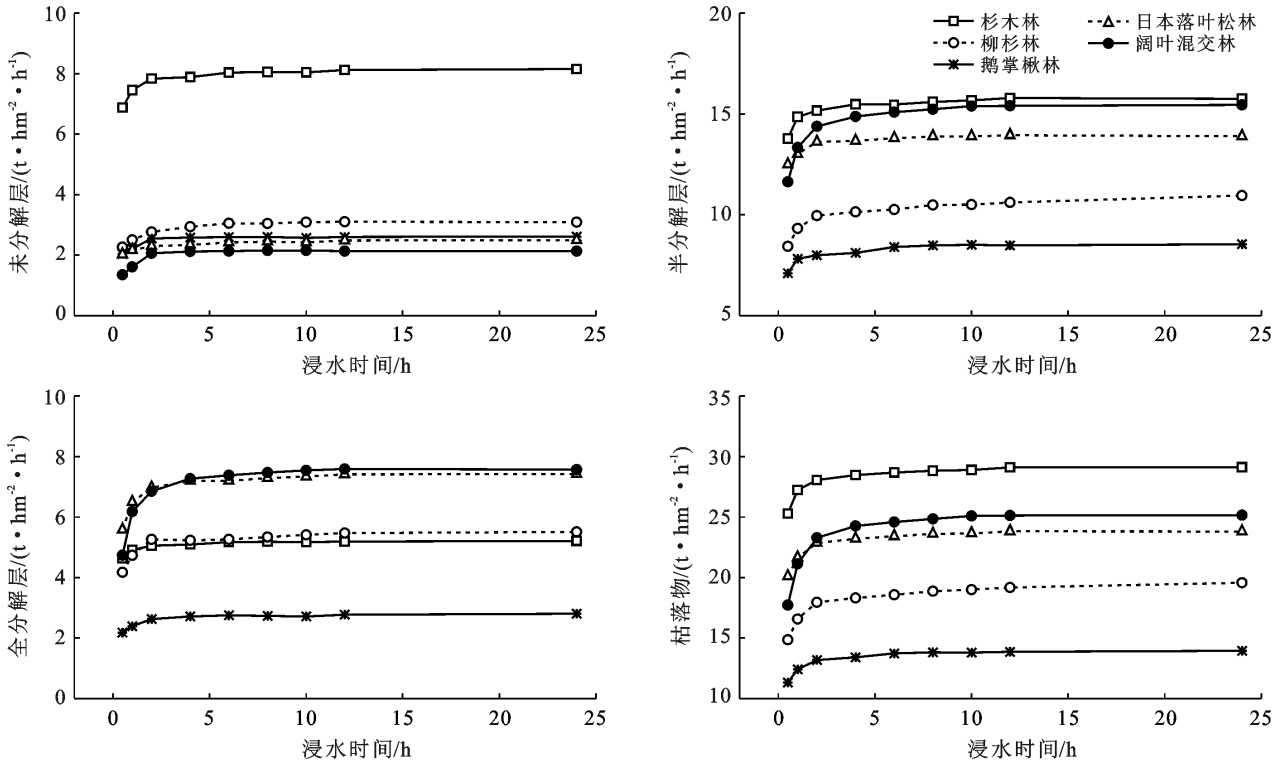


图 1 不同林分枯落物持水量与浸水时间关系

Fig.1 Relationship between litter capacity and immersion time of different stands

由图 2 可知,在整个枯落物浸水过程中,0—1 h 内枯落物吸水速率最大,随着浸水时间的延长,吸水速率逐渐减小,浸水 10—12 h,枯落物吸水速率趋于平稳,到 24 h 时枯落物吸水速率趋于零。各林分枯落物吸水速率与持水量变化表现一致。从各林分枯落物不同分解层次看,半分解层在 0—1 h 内的吸水速率明显大于未分解层与半分解层,未分解层与半分

解层在 10 h 吸水速率基本趋于平稳,而半分解吸水速率趋于平稳出现在 12 h。在相同浸水处理下 5 种林分枯落物吸水速率均以半分解层最大。对 5 种林分类型枯落物的持水量与浸水时间进行拟合(表 4),其关系满足幂函数关系: $V=k \cdot t^n$, V 为枯落物吸水速率[$t \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; t 为浸泡时间(h); k, n 为常数项, $R^2 > 0.998(p < 0.01)$,拟合效果较好。

表 4 不同林分枯落物持水量及吸水速率与浸水时间关系

Table 4 Relationship between water capacity, water absorption rate and immersion time of litter in different stands

林分	持水量与浸水时间		吸水速率与浸水时间	
	关系式	R^2	关系式	R^2
杉木林	$Q=0.910\ln t+26.840$	0.846 8**	$V=26.812t^{-0.967}$	0.999 8**
柳杉林	$Q=1.139\ln t+16.420$	0.913 8**	$V=16.372t^{-0.934}$	0.999 4**
鹅掌楸林	$Q=0.652\ln t+12.313$	0.872 8**	$V=12.268t^{-0.949}$	0.999 5**
日本落叶松林	$Q=0.924\ln t+21.541$	0.855 7**	$V=21.507t^{-0.958}$	0.999 6**
阔叶混交林	$Q=1.832\ln t+20.772$	0.837 1**	$V=20.618t^{-0.916}$	0.998 0**

注:Q 为枯落物持水量(t/hm^2); V 为枯落物吸水速率[$t \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; t 为浸泡时间(h); ** 表示 $p < 0.01$ 显著性水平。

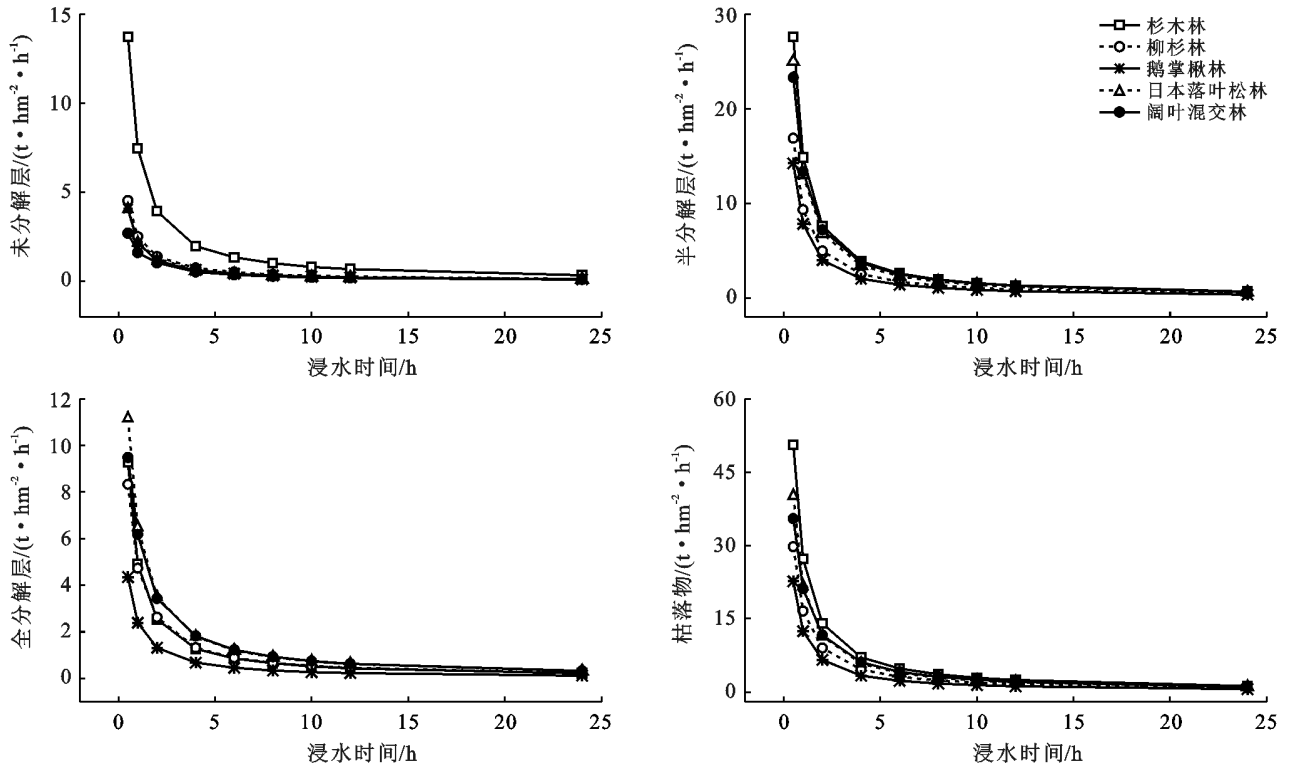
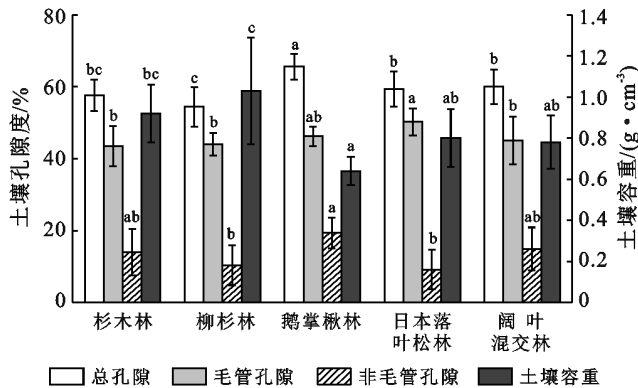


图 2 不同林分枯落物吸水速率与浸水时间关系

Fig.2 Relationship between water absorption rate and immersion time of different stands

3.2 不同林分土壤持水性能

3.2.1 土壤容重及土壤孔隙度 由表 5 可知,5 种林分土壤容重总体上随土层深度的增加而增大,不同层次间土壤容重差异不显著($p>0.05$)。5 种林分 0—10 cm 土壤容重均小于其余土层,其中又以柳杉林最大,鹅掌楸林最小。0—40 cm 的土层中,平均土壤容重为 0.64~1.03 g/cm³(图 3),大小依次为柳杉林、杉木林、日本落叶松林、阔叶混交林、鹅掌楸林,柳杉林与鹅掌楸林间具有显著差异($p<0.05$)。



注:不同小写字母表示同一指标不同林分间的差异性($p<0.05$)。

图 3 不同林分土壤容重及土壤孔隙度

Fig.3 Soil bulk density and soil porosity of different stands

由表 5 可知,5 种林分土壤总孔隙与非毛管孔隙总体上呈现出随土层深度的增加而逐渐减小的趋势,与土壤容重变化相反,不同层次间孔隙度差异不显著

($p>0.05$)。毛管孔隙在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层有反复的现象,但最大值都出现在了 0—10 cm。在 0—40 cm 的土层中(图 3),5 种林分类型土壤平均总孔隙度变化范围为 54.37%~65.37%,大小依次为鹅掌楸林、阔叶混交林、日本落叶松林、杉木林、柳杉林。土壤非毛管平均孔隙度变化范围为 9.19%~19.37%,鹅掌楸林最大,柳杉林最小。土壤平均毛管孔隙度变化范围为 43.53%~50.22%,日本落叶松林最大,杉木林最小。5 种林分平均非毛管孔隙度均占总孔隙度的 15%以上,鹅掌楸林占比最高(29.58%),日本落叶松林占比最小(15.4%)。

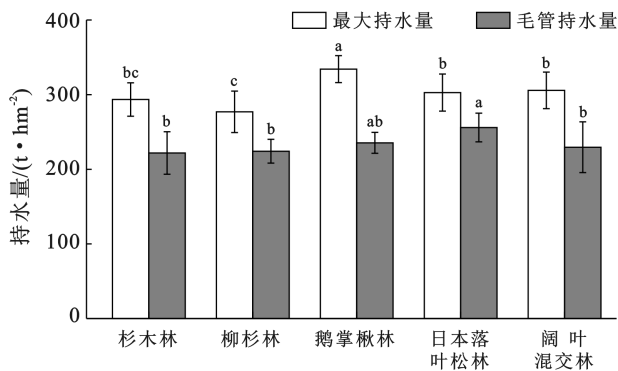
3.2.2 土壤持水量 由表 5 可知,各林分不同层次土壤的最大持水量随着土层深度的增加而下降,毛管持水量随土层深度的增加呈现一定的波动,但总体上也呈下降趋势,不同层次间土壤持水量差异不显著($p>0.05$)。在 5 种林分 0—10 cm 土层,最大持水量鹅掌楸林显著高于柳杉林($p<0.05$);毛管持水量中各林分间均无显著差异($p>0.05$)。在 0—40 cm 的土层中(图 4),5 种林分土壤的最大持水量变动范围 277.02~334.11 t/hm²,大小依次为鹅掌楸林、阔叶混交林、日本落叶松林、杉木林、柳杉林,与土壤总孔隙度变化一致,鹅掌楸林土壤最大持水量显著高于其他林分($p<0.05$);毛管持水量变动范围为 221.81~255.92 t/hm²,大小为日本落叶松林、鹅掌楸林、阔叶混交林、柳杉林、杉木林。

表 5 不同林分类型土壤物理性质

Table 5 Soil physical properties of different stands

林分	土层厚度/cm	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	毛管持水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	最大持水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
杉木林	0—10	0.83±0.18 ^{Ab}	61.17±6.11 ^{Aab}	44.061±1.61 ^{Aa}	17.10±5.43 ^{Ab}	224.51±8.23 ^{Aa}	311.67±31.15 ^{Ab}
	10—20	0.92±0.14 ^{Aa}	56.53±2.37 ^{Aab}	43.13±6.82 ^{Aa}	13.38±8.15 ^{Aa}	219.81±34.76 ^{Aa}	288.02±12.06 ^{Ab}
	20—40	1.01±0.06 ^{Ab}	55.09±2.02 ^{Ab}	43.39±8.68 ^{Aa}	11.69±6.99 ^{Aa}	221.11±44.23 ^{Aa}	280.70±10.28 ^{Ab}
柳杉林	0—10	0.95±0.19 ^{Ab}	56.66±4.07 ^{Ab}	44.84±1.95 ^{Aa}	11.81±2.12 ^{Ab}	228.50±9.97 ^{Aa}	288.73±20.75 ^{Ab}
	10—20	1.02±0.30 ^{Aa}	54.59±4.57 ^{Ab}	45.16±1.49 ^{Aa}	9.42±5.88 ^{Aa}	230.14±7.60 ^{Aa}	278.16±24.22 ^{Ab}
	20—40	1.11±0.34 ^{Ab}	51.84±7.88 ^{Ab}	41.98±4.88 ^{Aa}	9.85±8.79 ^{Aa}	213.94±24.86 ^{Aa}	264.17±40.14 ^{Ab}
鹅掌楸林	0—10	0.64±0.01 ^{Aa}	67.14±0.68 ^{Aa}	47.73±2.21 ^{Aa}	19.40±2.45 ^{Aa}	243.25±11.26 ^{Aa}	342.12±3.45 ^{Aa}
	10—20	0.66±0.13 ^{Aa}	64.83±6.00 ^{Aa}	45.17±1.33 ^{Aa}	19.66±7.29 ^{Aa}	230.17±6.82 ^{Aa}	330.35±30.54 ^{Aa}
	20—40	0.63±0.02 ^{Aa}	58.57±4.49 ^{Ab}	45.67±4.25 ^{Aa}	19.06±3.76 ^{Aa}	232.74±21.66 ^{Aa}	329.87±14.66 ^{Aa}
日本落叶松林	0—10	0.71±0.04 ^{Ab}	63.16±3.22 ^{Aab}	51.64±4.44 ^{Aa}	12.51±2.57 ^{Ab}	261.05±22.66 ^{Aa}	321.81±16.40 ^{Aab}
	10—20	0.80±0.15 ^{Aa}	56.51±5.46 ^{Aab}	48.67±3.03 ^{Aa}	7.84±5.02 ^{Aa}	248.01±15.46 ^{Aa}	297.96±27.82 ^{Aab}
	20—40	0.89±0.18 ^{Ab}	58.57±4.49 ^{Ab}	50.35±4.69 ^{Aa}	7.21±7.96 ^{Aa}	258.68±23.93 ^{Aa}	288.46±22.85 ^{Aab}
阔叶混交林	0—10	0.67±0.10 ^{Aa}	63.69±6.51 ^{Aab}	47.88±8.69 ^{Aa}	17.79±2.82 ^{Ab}	239.82±44.32 ^{Aa}	324.51±33.19 ^{Ab}
	10—20	0.79±0.13 ^{Aa}	59.16±2.17 ^{Aab}	42.17±7.18 ^{Aa}	16.98±7.93 ^{Aa}	214.92±36.61 ^{Aa}	301.46±11.05 ^{Ab}
	20—40	0.89±0.09 ^{Ab}	57.14±3.45 ^{Ab}	45.07±5.61 ^{Aa}	10.06±3.98 ^{Aa}	233.88±28.61 ^{Aa}	291.15±17.58 ^{Ab}

注:小写字母表示不同林分相同土层之间的差异性($p < 0.05$)。



注:不同大写字母表示同一林分不同层次之间的差异性($p < 0.05$)。

图 4 不同林分土壤持水量

Fig.4 Soil water capacity of different stands

3.2.3 土壤入渗特征 由表 6 可知,5 种林分类型土壤平均渗透速率在 6.89~22.30 mm/min 之间,大小

依次为鹅掌楸林、阔叶混交林、柳杉林、日本落叶松林、杉木林,鹅掌楸林平均渗透速率与柳杉林平均稳渗速率相差 3.23 倍;土壤稳渗时间在 18.40~25.73 min 之间,与均渗透速率排序较为一致,仅日本落叶松林、杉木林有变动。

3.3 不同林分综合持水性能

由表 7 可知,阔叶混交林总体上各项指标均较好,柳杉林总体上各项指标都较差。鹅掌楸林土壤层各项指标均较优,但在枯落物储量与枯落物最大持水量上表现都最差;杉木人工林枯落物各项指标最优,但在土壤层各项表现最差。由综合能力排序可知,落叶阔叶混交林综合持水性能最好,其综合能力指标值比其他林分低 0.29~0.43,其次分别是日本落叶松林、杉木林、鹅掌楸林、柳杉林。

表 6 不同林分类型土壤渗透性

Table 6 Soil permeability of different stands

林分	初渗速率/($mm \cdot min^{-1}$)	稳渗速率/($mm \cdot min^{-1}$)	平均渗透速率/($mm \cdot min^{-1}$)	稳渗时间/min
杉木林	8.42±9.12 ^b	5.36±5.75 ^a	6.89±7.02 ^b	21.30±2.00 ^{ab}
柳杉林	11.46±3.33 ^b	6.83±0.65 ^a	9.14±3.32 ^b	23.67±2.31 ^{ab}
鹅掌楸林	33.00±2.95 ^a	11.61±3.56 ^a	22.30±12.07 ^a	25.07±1.66 ^a
日本落叶松林	11.52±8.67 ^b	5.69±3.72 ^a	8.60±6.76 ^b	18.40±5.07 ^b
阔叶混交林	19.46±20.18 ^{ab}	10.37±10.66 ^a	14.91±15.26 ^{ab}	25.73±4.21 ^a

表 7 不同林分综合持水性能

Table 7 The overall water-holding performance of different stands

林分	枯落物储量		枯落物持水量		土壤持水量		土壤总孔隙度		土壤毛管持水量		土壤入渗速率		综合能力	
	P_i^2	次序	P_i^2	次序	P_i^2	次序	P_i^2	次序	P_i^2	次序	P_i^2	次序	P_i^2	次序
杉木林	0.000 0	1	0.000 0	1	0.014 8	4	0.008 7	4	0.017 8	5	0.477 5	5	0.518 8	3
柳杉林	0.107 1	4	0.107 9	4	0.029 2	3	0.020 8	5	0.015 4	4	0.348 3	3	0.628 5	5
鹅掌楸林	0.327 1	5	0.271 5	5	0.000 0	1	0.000 0	1	0.006 4	2	0.000 0	1	0.605 0	4
日本落叶松林	0.063 6	3	0.033 3	3	0.008 8	3	0.004 2	3	0.000 0	1	0.377 4	4	0.487 3	2
阔叶混交林	0.047 9	2	0.018 6	2	0.007 2	2	0.003 1	2	0.010 6	3	0.109 8	2	0.197 2	1

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 枯落物水文特征 本研究中 5 种林分枯落物储量为 3.99~9.32 t/hm², 大小依次为杉木林、阔叶混交林、日本落叶松林、柳杉林、鹅掌楸林, 有研究认为针叶林的枯落物储量高于阔叶林^[17-18], 本研究结果表明除杉木林外, 日本落叶松、柳杉林储量低于阔叶混交林, 高于鹅掌楸林, 原因可能在于针叶林枯落物虽多为木质化的枯枝和革质的针叶, 分解周期长于其他树种^[17], 但枯落物储量受树种种类、环境因子、化学特性等的影响具有显著差异^[19-20]。从枯落物不同层次变化来看, 5 种林分中半分解层储量和占比均为最大, 在森林枯落物的分解过程中, 分解程度越高速度越慢, 半分解层介于未分解层和全分解层之间, 处于分解中期阶段, 导致其累积量最高占有主要地位^[21]。5 种林分枯落物持水量为 13.94~29.12 t/hm², 与枯落物储量大小趋势变化相一致, 表明枯落物储量是决定林分单位面积枯落物最大持水量的关键指标。此外, 5 种林分枯落物最大持水量均为自身干重的 3 倍左右, 这与涂志华等^[22]人研究结果相似(枯落物的最大持水量是自身干重的 2~4 倍)。不同林分枯落物半分解层最大持水量均占枯落物总持水量的 50% 以上, 表明半分解层是枯落物层持水的主要层次。枯落物最大持水率为 314.60%~347.65%, 依次为鹅掌楸林、阔叶混交林、日本落叶松林、杉木林、柳杉林, 与最大持水量变化不一致, 该研究结果与朱家晟等^[23]人研究结果不一致。一般而言, 阔叶林内的枯落物有着比针叶林更快的初期分解速度, 而一些木质素含量更高的难分解成分堆积后形成海绵状的蓬松结构, 具有更高的持水率^[5], 这也是导致针叶林与阔叶林不同分解层次最大持水率变化不一致的原因。本研究中 5 种林分最大持水率均在 300% 以上, 与江西省武山林场内杉木纯林(179.50%)和常绿落叶阔叶混交林(184.40%)^[18]、甘肃省白龙江、洮河林区落叶松林(192.18%)^[24]以及贵州省平坝区大坡林场内柳杉人

工林(304.38%)^[25]相比, 本研究区域林下枯落物有更好的持水能力。本研究中, 5 种林分枯落物持水量和吸水速率随浸水时间变化表现出较一致的规律, 表明枯落物在降水初期对降雨有更好地拦蓄能力, 随着降雨时间的延长, 其拦蓄能力也逐渐减小^[19]。各林分枯落物不同分解层次中, 半分解层持水量和吸水速率总体上高于其他层, 能更快的吸收更多的水分, 这可能是由于枯落物经过分解后, 内部结构发生了改变, 形成了大量细小孔隙的覆盖结构, 含有相对较高的亲水性^[26-27]。在相同的浸水时间内, 全分解层在相同的浸水时间内枯落物吸水速率曲线差异最小。这可能与枯落物内部结构有关^[28], 枯落物完全分解后内部差异变小, 从而使枯落物持水量和吸水速率差异变化减小。不同林分枯落物持水量和吸水速率分别与浸水时间呈较好的对数函数、幂函数关系, 这与孙拥康^[1]、罗航等^[29]人的研究结果一致。综合枯落物层各项指标来看, 各林分半分解层对降雨有更好拦蓄能力, 杉木林枯落物整体持水性能要优其他林分, 更容易减少地表径流的发生。

4.1.2 土壤层水文特征 本研究中, 5 种林分土壤容重总体上随土层深度的增加而增大, 在 0—10 cm 的土层中植物根系发达, 土壤动物活动频繁, 使土壤有机质含量较高、土壤较为松散, 而土层越往下动植物活动越少, 且土层越靠近成土母质, 土壤发育程度越低, 土壤更为紧实, 因此土层越往下土壤容重较大^[30]。在 0—40 cm 的土层中, 平均土壤容重为 0.64~1.03 g/cm³, 大小依次为柳杉林、杉木林、日本落叶松林、阔叶混交林、鹅掌楸林, 针叶林林下枯落物分解缓慢、根系释放酸性物质多, 容易造成土壤板结, 因此针叶林土壤容重均高于阔叶林^[31], 这与赵阳等^[24]人研究结果相似, 说明阔叶林土壤的透水性高于针叶林下的土壤。5 种林分 0—10 cm 土层总孔隙度明显大于下层土壤, 均具有向下逐渐减小的特点, 与土壤容重呈相反变化。研究表明, 土壤总孔隙度一般在 30%~60% 之间, 土壤孔隙度为 50% 左右时适合多数林木的生长^[32], 本研究中土壤平均总孔隙度变化范围为

54.37%~65.37%,说明研究区林地的土壤孔隙状况较好。非毛管孔隙占土壤总孔隙越大,其蓄水能力越强^[33],5种林分平均非毛管孔隙度均占总孔隙度的15%以上,其中鹅掌楸林占比最高(29.58%),表明鹅掌楸林土壤比其他4种林分有更好的水分调节能力。5种林分不同层次土壤的最大持水量与毛管持水量总体上随着土层深度的增加而下降,表层土壤持水能力优于深层土壤。这与土壤动物活动、植物根系、有机质含量随土层深度降低而减小有关。5种林分土壤的最大持水量变动范围277.02~334.11 t/hm²,其大小依次为鹅掌楸林、阔叶混交林、日本落叶松林、杉木林、柳杉林,最大持水量、毛管持水量与土壤容重和土壤总孔隙变化一致,原因在于土壤的容重和孔隙度本身就是影响其持水能力的重要因素^[34]。有研究表明,枯落物进入土壤后会减小土壤容重^[35],本研究中杉木林枯落物层储量最大,但由于针、阔叶片分解特性差异,针叶树种在单位时间内分解产生的有机质也不一定比阔叶类型的枯落物多。虽然杉木林枯落物层储量最大,但并没有使其表层土壤持水量也变得最大,这也是针叶林最大持水量均小于阔叶林的原因,这与胡静霞等^[36]人研究结果相似。土壤渗透性作为评价土壤水源涵养能力的另一重要指标,其水分渗透性越好,水源涵养能力也越强^[37]。本研究中鹅掌楸林土壤水分入渗各项指标整体也优于其他林分,与土壤物理性质表现一致,表明鹅掌楸人工林拥有更强的水源涵养能力,可以有效地延缓地表径流的产生,减少水土流失。综合土壤物理性质的指标来看,鹅掌楸林土壤比其他4种林分有更好的持水性能。

4.1.3 不同林分综合持水性能 通过5种林分综合评价结果来看,阔叶混交林综合持水性能最好,其次分别是日本落叶松林、杉木林、鹅掌楸林、柳杉林。混交林拥有更高的物种丰富度和多样性,枯落物现存量和凋落量较多,腐殖质也高,进而土壤的水分入渗能力更大,土壤蓄水能力更强^[38]。因此,在本研究中阔叶混交林综合持水性能优于纯林,该研究结果与多数研究结果一致^[24,32]。

4.2 结论

枯落物层中杉木林持水性能表现最好,鹅掌楸林最差;土壤层中鹅掌楸林持水性能最好,杉木林最差。而通过5种林分综合评价结果来看,阔叶混交林综合持水性能最好,其次分别是日本落叶松林、杉木林、鹅掌楸林、柳杉林。该区域在未来森林经营或水土保持林造林过程中,应适当提高混交林的种植比例,针叶树种与阔叶树种混合种植,适当的栽植针叶树种能增加枯落物的持水性能,适当栽植阔叶树种能增加土壤

的持水性能,增加枯落物储量的同时、使土壤更加通气透水,以此最大限度地发挥林下枯落物和土壤的持水能力。

[参 考 文 献]

- [1] 孙拥康,汤景明,王怡.亚热带日本落叶松人工林枯落物及土壤层水文效应[J].北京林业大学学报,2021,43(8):60-69.
- [2] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等.宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J].水土保持学报,2005,19(3):134-138.
- [3] 杨美吕.森林枯落物分解研究进展[J].亚热带水土保持,2021,33(3):30-35.
- [4] 吕刚,曹小平,卢慧,等.辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2010,24(3):203-208.
- [5] 郑森.华北土石山区不同林分类型枯落物及土壤水文生态效应[J].中国水土保持科学,2020,18(2):84-91.
- [6] Song Xiang, Yan Changzhen, Xie Jiali, et al. Assessment of changes in the area of the water conservation forest in the Qilian Mountains of China's Gansu Province, and the effects on water conservation [J]. Environmental Earth Sciences, 2012,66(2):2441-2448.
- [7] 刘忠玲,刘建明,吕跃东.倭肯河上游两种林型枯落物和土壤持水特性[J].水土保持研究,2021,28(2):235-241.
- [8] 陈斯.金子山亚热带常绿落叶阔叶混交林群落结构与物种多样性[D].湖北恩施:湖北民族学院,2017.
- [9] 国家林业局.GB/T33027-2016 森林生态系统长期定位观测方法[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [10] 白英辰,朱江,程小琴,等.密度调控对华北落叶松人工林枯落物水文特征的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):128-133.
- [11] 彭圣军,王姣,刘颖,等.崇义客家梯田内森林枯落物持水特性[J].长江科学院院报,2021,38(12):60-65.
- [12] 林业行业标准.LY/T1218-1999 森林土壤渗透率的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [13] 林业行业标准.LY/T1215-1999 森林土壤水分—物理性质的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [14] 张昌顺,范少辉,官凤英,等.闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J].林业科学,2009,45(1):36-42.
- [15] 吕刚,翟景轩,李叶鑫,等.辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):133-139.
- [16] 陈引珍,程金花,张洪江,等.缙云山几种林分水源涵养和保土功能评价[J].水土保持学报,2009,23(2):66-70.
- [17] 梁晓娇,王树力.阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J].水土保持学报,2017,31(1):140-145.
- [18] 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.
- [19] 胡文杰,庞宏东,王晓荣,等.长江中游平原湖区人工林枯落物和表层土壤持水特性[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):644-653.
- [20] 李娜,赵传燕,郝虎,等.海拔和郁闭度对祁连山青海云杉落叶凋落物分解的影响[J].生态学报,2021,41(11):4493-4502.
- [21] 牛勇.北京山区不同林分水文生态效应特征[D].北京:北京林业大学,2015.
- [22] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019,33(1):127-133.
- [23] 朱家晷,秦富仓,李龙,等.内蒙古清水河县公益林区不同林地类型枯落物层水文效应[J].水土保持通报,2022,42(1):114-121.
- [24] 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.
- [25] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301.
- [26] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.
- [27] 刘凯,贺康宁,王先棒.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J].北京林业大学学报,2018,40(1):89-97.
- [28] Wieder W R, Cleveland C C, Townsend A R. Tropical tree species composition affects the oxidation of dissolved organic matter from litter [J]. Biogeochemistry, 2008,88(2):127-138.
- [29] 罗航,何介南,康文星,等.湘南红壤区互叶白千层人工林枯落物层及土壤水源涵养能力研究[J].中南林业科技大学学报,2021,41(5):102-109.
- [30] 陈乾,刘凯,王希贤,等.福建柏混交林主要土壤理化性质与土壤含水量的关联研究[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(6):771-780.
- [31] 骆土寿,李意德,陈德祥,等.广东白盆珠水库水源林土壤水源涵养能力研究[J].生态科学,2007,26(2):159-164.
- [32] 李璐杉.昆明车木河水库水源地不同森林类型枯落物与土壤特性及水源涵养功能研究[D].云南昆明:云南师范大学,2020.
- [33] 赵雨森,韩春华,张宏光,等.阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):203-208.
- [34] 杨晓霞,赵锦梅,张雪,等.祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].干旱区地理,2022,45(1):197-207.
- [35] 孙海,王秋霞,张春阁,等.不同树叶凋落物对人参土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J].生态学报,2018,38(10):3603-3615.
- [36] 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.
- [37] 张引,黄永梅,周长亮,等.冀北山地 5 个海拔梯度油松林枯落物与土壤水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2019,26(2):126-131.
- [38] 王佑民.中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J].水土保持学报,2000,14(4):108-113.

(上接第 75 页)

- [20] Han Chun, Chen Ning, Zhang Cankun, et al. Sap flow and responses to meteorological about the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Gansu Xinlong Mountain, Northwestern China [J]. Forest Ecology and Management, 2019,451:117519.
- [21] 赵飞飞,马煦,邸楠王焯,等.毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子[J].植物生态学报,2020,44(8):864-874.
- [22] Shawcroft R W, Gardner H R. Direct evaporation from soil under a row crop canopy [J]. Agricultural Meteorology, 1983,28(3):229-238.
- [23] Lascano R J, Van-Bavel C H M, Hatfield J L, et al. Energy and water balance of a sparse crop: Simulated and measured soil and crop evaporation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987,51(5):1113-1121.
- [24] Flumignan D L, Faria R T D, Prete C E C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production [J]. Agricultural Water Management, 2011,98(5):791-800.