

# 间伐保留密度对杉木人工林凋落物与土壤持水特性的影响

卢德浩 冯铭淳 邱展鹏 黄焕强 陈世清 林娜

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 以粤北地区 11 年生间伐保留密度为 1200、1800、2500 株/hm<sup>2</sup> 的杉木人工林为研究对象, 探究间伐 2 年后不同杉木人工林凋落物和土壤持水特性的差异以及影响因素, 分析不同间伐保留密度林分的持水性能。结果表明: 较高的保留密度有利于凋落物量的积累, 其中 2500 株/hm<sup>2</sup> 杉木林的凋落物现存量和厚度相较于其他 2 种密度林分依次增加了 7.96%~30.87% 和 4.90%~24.92%。在不同保留密度杉木林中, 1800 株/hm<sup>2</sup> 林分的土壤最大持水量和土壤有效拦蓄量最大, 且显著大于 1200 株/hm<sup>2</sup> 林分。在 3 种保留密度杉木林中, 1800 株/hm<sup>2</sup> 林分的土壤饱和持水量和土壤毛管持水量最大, 相较于其他 2 种保留密度林分增加了 6.50%~24.95%。土壤非毛管持水量随着保留密度的增大而增大, 表现为 2500 株/hm<sup>2</sup> (45.50 t/hm<sup>2</sup>) > 1800 株/hm<sup>2</sup> (32.21 t/hm<sup>2</sup>) > 1200 株/hm<sup>2</sup> (23.76 t/hm<sup>2</sup>)。相关性分析结果显示, 凋落物持水量指标与凋落物厚度和现存量、土壤 pH、有机碳含量、非毛管孔隙度、非毛管持水量呈显著相关, 土壤持水量指标与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度、土壤容重、土壤有机质含量以及郁闭度和叶面积指数显著相关。坐标综合评定法结果显示, 在不同保留密度林分中, 凋落物和土壤综合持水能力表现为 1800 株/hm<sup>2</sup> > 2500 株/hm<sup>2</sup> > 1200 株/hm<sup>2</sup>。因此, 在 3 种不同保留密度林分中, 1800 株/hm<sup>2</sup> 林分的凋落物和土壤持水能力最好。

**关键词:** 间伐; 保留密度; 凋落物; 土壤; 杉木; 人工林; 持水特性

中图分类号: S715.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2025)03-0001-09

引文格式: 卢德浩, 冯铭淳, 邱展鹏, 等. 间伐保留密度对杉木人工林凋落物与土壤持水特性的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(3): 1-9. Lu D H, Feng M C, Qiu Z P, et al. Effects of Thinning Retention Density on Litter and Soil Water Retention Characteristics of *Cunninghamia lanceolata* Plantation [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(3): 1-9. DOI: [10.11929/j.swfu.202407021](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202407021)



## Effects of Thinning Retention Density on Litter and Soil Water Retention Characteristics of *Cunninghamia lanceolata* Plantation

Lu Dehao, Feng Mingchun, Qiu Zhanpeng, Huang Huanqiang, Chen Shiqing, Lin Na

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong 510642, China)

**Abstract:** Taking *Cunninghamia lanceolata* plantation with 11-year thinning retention density of 1200, 1800 and 2500 trees/hm<sup>2</sup> in northern Guangdong as the research object, the differences of litter and soil water retention characteristics of different *C. lanceolata* plantation after thinning for 2 years and the influencing factors were analyzed, and the water retention performance of stands with different thinning retention density was explored. The results show that higher retention density was conducive to litter accumulation, and the litter inventory and thickness of 2500 trees/hm<sup>2</sup> *C. lanceolata* forest increased by 7.96%–30.87% and 4.90%–24.92% compared with the other 2 density stands. The soil maximum water holding capacity and effective storage capacity of 1800 trees/hm<sup>2</sup> stands were the largest in different retention densities of *C. lanceolata* forests, and were significant.

收稿日期: 2024-07-09; 修回日期: 2024-09-12

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2021A1515011092)资助; 广东省林业科技创新项目(2023KJ CX001)资助。

第 1 作者: 卢德浩(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 森林经理。Email: [875363261@qq.com](mailto:875363261@qq.com)。

通信作者: 林娜(1988—), 女, 博士, 讲师。研究方向: 森林可持续经营。Email: [nalin@scau.edu.cn](mailto:nalin@scau.edu.cn)。

antly greater than 1 200 trees/hm<sup>2</sup> stands. The soil saturation water holding capacity and capillary water holding capacity of 1 800 trees/hm<sup>2</sup> stands were the largest in the 3 kinds of preserved density *C. lanceolata* forests, which increased by 6.5% to 24.95% compared with the other 2 kinds of preserved density stands. The soil non-capillary water capacity increased with the increase of retention density, which was 2 500 trees/hm<sup>2</sup>(45.50 t/hm<sup>2</sup>) > 1 800 trees/hm<sup>2</sup>(32.21 t/hm<sup>2</sup>) > 1 200 trees/hm<sup>2</sup>(23.76 t/hm<sup>2</sup>). The results of correlation analysis showed that litter water capacity was significantly correlated with litter thickness and existing stock, soil pH value, organic carbon content, non-capillary porosity, and non-capillary water capacity. The soil moisture content was significantly correlated with total porosity, capillary porosity, and non-capillary porosity, soil bulk density, soil organic matter content, canopy density and leaf area index. The results of coordinate comprehensive evaluation showed that the comprehensive water holding capacity of litter and soil was 1 800 trees/hm<sup>2</sup> > 2 500 trees/hm<sup>2</sup> > 1 200 trees/hm<sup>2</sup> in the stands with different retention densities. In conclusion, 1 800 trees/hm<sup>2</sup> stands had the best litter and soil water retention capacity among the 3 different retention density stands.

**Key words:** thinning; retention density; litter; soil; *Cunninghamia lanceolata*; plantation; water retention characteristic

森林是陆地生态系统的重要组成部分之一,具有多样的类型、复杂的结构和广泛的分布,在水文生态方面发挥着重要作用,如拦截降水<sup>[1]</sup>、调节径流<sup>[2]</sup>、保持水土<sup>[3]</sup>等。而森林凋落物层和土壤层作为森林涵养水源的主要部分<sup>[4]</sup>,在森林生态系统养分循环、维持森林生态系统水土保持功能等方面扮演着重要角色<sup>[5]</sup>。我国杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林面积达 $9.90 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,在全国人工乔木林总面积排名第一<sup>[6]</sup>,不仅在我国木材生产方面具有重要战略意义<sup>[7]</sup>,还在水源涵养功能方面发挥出其潜在巨大的生态效益<sup>[8]</sup>。但由于杉木人工林存在造林密度大、造林树种单一以及多代连栽等问题,造成林分结构简单、林分质量不高、生物多样性降低、地力衰退,导致杉木林中凋落物和土壤的水源涵养功能正不断退化<sup>[9]</sup>。

抚育间伐是森林经营最主要的措施之一<sup>[10]</sup>。一方面,通过调控林分密度可以优化林分结构,扩大林木的营养空间,从而促进林木生长;另一方面可以改变林冠层对降雨的再分配,改善林内光照环境,调节微生物和土壤动物的种群及活性<sup>[11-12]</sup>,进而提高凋落物和土壤的水源涵养功能<sup>[8,13]</sup>。相关研究表明,间伐后林冠层变得稀疏,导致叶面积指数下降<sup>[14]</sup>。此时林内降水和光照增加,温度随之上升,这些变化加速了凋落物的分解,提高了其最大持水率和有效拦蓄率<sup>[15]</sup>。但也有研究发现<sup>[8]</sup>,间伐保留密度过低会减缓凋落物的分解,从而影响凋落物持水特性。此外,土壤的持水能力主要受到其结构和孔隙大小等物理性质以及pH值、养分含量等化学性质的影响<sup>[16]</sup>。改善土壤理化性质可以提高林下植被的生长速

率,从而间接影响森林生态系统的水源涵养功能。如林立文等<sup>[17]</sup>在不同密度杉木人工林土壤持水能力的研究中发现,密度为1 755株/hm<sup>2</sup>的杉木人工林的土壤容重最小且孔隙度较大,有利于拦截雨水。以上研究虽然对凋落物和土壤的水文效应做出了详细报道,但有极强的地域性,关于抚育间伐对粤北地区杉木人工林凋落物和土壤水源涵养功能的机理研究仍相对缺乏。为此,本试验以清远市11年生间伐保留密度为1 200、1 800、2 500株/hm<sup>2</sup>的杉木人工林为研究对象,研究抚育间伐2年后土壤和凋落物持水能力的变化,找出杉木人工林土壤和凋落物持水能力最佳的保留密度,为杉木人工林的多功能经营提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省清远市(112°13'01"~113°19'01"E, 24°02'16"~24°54'16"N),属亚热带气候,雨水资源丰富,年均气温18.9~22℃,平均年降水量1 631.4~2 149.3 mm。本研究在清远市金鸡林场(112°57'~113°01'E, 24°08'~24°13'N)、英德林场(112°45'15"~113°55'38"E, 23°50'31"~24°33'11"N)和小龙林场(东经112°11'03"~112°15'49", 北纬24°51'43"~24°56'05")的杉木人工纯林开展。研究区内土壤厚度主要在60~80 cm之间,质地以沙壤土为主,腐殖质层厚度约为4.0 cm,石砾含量20%左右,土壤pH呈酸性。研究所处地主要为山地黄壤和红壤区,夏季降雨频发,地表侵蚀剧烈,加之其山体陡峭,极

易造成大面积的水土流失。试验区内森林类型多为南亚热带常绿阔叶林、针阔混交林、针叶纯林等，森林资源丰富。所调查林分均为2010年造林的杉木人工纯林。造林前3年均进行过割灌除草，第4年开始便不再开展任何抚育措施。林下草本层以华南毛蕨 (*Cyclosorus parasiticus*)、乌毛蕨 (*Blechnum orientale*)、芒萁 (*Dicranopteris pedata*) 和金钗凤尾蕨 (*Pteris fauriei*) 为主，灌木层主要有五指毛桃 (*Ficus hirta*)、九节 (*Psychotria rubra*)、鸭脚木 (*Schefflera octophylla*)、鲫鱼胆 (*Maesaper larius*) 和玉叶金花 (*Mussaenda pubescens*) 等。

## 1.2 样地设置与调查

选取立地条件基本一致，间伐试验处理前造

林密度为3000~4500株/hm<sup>2</sup>的11年生杉木人工林作为研究对象，并分别设置间伐保留密度1200、1800、2500株/hm<sup>2</sup>共3个处理，每个处理设置20m×20m的样地3块，共计9块样地。于2020年10月进行间伐试验，在2022年的11月对各个样地进行间伐后的调查。

调查的林分因子有林木胸径、树高等。用佳能相机 (Canon EOS 50D Mark II, 日本) 鱼镜头 (Canon EF 8-15 mm f/4L USM, 日本) 在每个样地随机选取3个点 (间隔大于5m)，并在距地面50cm处拍摄，获得晴朗天气下林分照片，用于林分郁闭度和叶面积指数计算。样地基本情况如表1所示。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic overview of sample plots

密度分级	间伐保留密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	叶面积指数/(cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	平均胸径/cm	平均树高/m
低密度	1200	0.60 ± 0.01	1.24 ± 0.01	15.81 ± 0.09	12.28 ± 0.11
中密度	1800	0.69 ± 0.01	1.48 ± 0.01	14.41 ± 0.08	11.64 ± 0.05
高密度	2500	0.74 ± 0.01	1.61 ± 0.02	12.01 ± 0.04	10.64 ± 0.04

注：数据为平均值 ± 标准误 (n=3)。

## 1.3 凋落物现存量 and 持水特性的调查和测定

在每个样地随机选取3个点 (间隔大于5m) 并设置0.5m×0.5m的凋落物样方，测量凋落物厚度，根据枯枝落叶层的分解程度，采集未分解层和半分解层凋落物，并混合装入信封袋中，称鲜质量后带回实验室。置于80℃烘箱中烘至恒质量后称量，计算凋落物层的单位面积现存量。从干燥后的凋落物中取20g，放入20cm×30cm尼龙网带 (100目)，采用室内浸泡法，浸泡48h之后取出，至不滴水时称量，计算拦蓄率 (量)、持水率 (量) 等指标<sup>[18-19]</sup>，公式如下：

$$M = M_d / 100 \quad (1)$$

$$R_n = (M_w - M_d) / M_d \times 100\% \quad (2)$$

$$M_{wmax} = R_{max} \times M \quad (3)$$

$$R_{max} = (M_{48w} - M_d) / M_d \times 100\% \quad (4)$$

$$R_{lmax} = R_{max} - R_n \quad (5)$$

$$M_{lmax} = R_{lmax} \times M \quad (6)$$

$$R_w = 0.85R_{max} - R_n \quad (7)$$

$$M_w = R_w \times M \quad (8)$$

式中为M为凋落物现存量 (t/hm<sup>2</sup>)；M<sub>d</sub>为凋落物干质量 (t/hm<sup>2</sup>)；R<sub>n</sub>为凋落物自然含水率 (%)；M<sub>w</sub>为凋落物湿质量 (t/hm<sup>2</sup>)；R<sub>max</sub>为凋落物最大

持水率 (%)；M<sub>wmax</sub>为凋落物最大持水量 (t/hm<sup>2</sup>)；M<sub>48w</sub>为浸泡48h后凋落物湿质量 (g)；R<sub>lmax</sub>为凋落物最大拦蓄率 (%)；M<sub>lmax</sub>为凋落物最大拦蓄量 (t/hm<sup>2</sup>)；R<sub>w</sub>凋落物有效拦蓄率 (%)，0.85为有效拦蓄系数；M<sub>w</sub>为有效拦蓄量 (t/hm<sup>2</sup>)。

## 1.4 土壤理化性质和持水特性调查和测定

每个样地中随机选取3个点，相距5m以上，移除凋落物和腐殖质层并挖取剖面，在0~10、10~20、20~30cm共3个土层由下至上每层均匀采集1kg左右土壤样品，将3层的土壤样品混匀后并从中采样1kg左右，去除须根及杂物，装入密封袋中待测定土壤化学性质。然后，由上至下在每个土层采集3个环刀样品，用于土壤物理性质的测定。用元素分析仪 (Vario EL cube, Elementar, 德国) 测定土壤全氮和有机碳含量<sup>[7]</sup>；pH采用电位法 (土水比1:2.5) 测定。采用环刀法测定土壤含水量、容重以及土壤孔隙度等。最后将土壤饱和持水量、土壤毛管持水量和土壤非毛管持水量作为土壤持水特性指标<sup>[20]</sup>，计算公式为：

$$W_t = 10000 \times P_t \times h \quad (9)$$

$$W_a = 10000 \times P_a \times h \quad (10)$$

$$W_b = 10\,000 \times P_b \times h \quad (11)$$

式中： $P_t$ 为土壤总孔隙度(%)； $P_a$ 为土壤毛管孔隙度(%)； $P_b$ 为土壤非毛管孔隙度(%)； $h$ 为土层厚度(m)。

### 1.5 凋落物和土壤水源涵养能力评价

采用坐标综合评定法对凋落物和土壤水源涵养能力进行综合评价。1)对评价指标进行无量纲化处理,列出原始数据表,记为 $s_{ij}$ ,其中 $i$ 表示不同处理, $j$ 表示不同指标。2)通过公式(12)将 $s_{ij}$ 与每个指标中的最优值 $m_{ij}$ 比较,形成原始数据相对值( $d_{ij}$ )的矩阵坐标;使用公式(13)计算第 $i$ 种处理到标准点的距离( $P_{ij}$ )。3)通过公式(14)求出各处理到标准点的距离和 $M$ ,按 $M$ 从小到大排序,综合值最小者为最优<sup>[20]</sup>。

$$d_{ij} = s_{ij}/m_{ij} \quad (12)$$

$$P_{ij} = \sqrt{(1-d_{ij})^2} \quad (13)$$

$$M = \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (14)$$

### 1.6 数据处理与分析

用Shapiro-Wilk检验和Levene检验数据是否满足正态性分布和方差齐性,对不满足条件的数据进行转换,使所有的数据均满足方差分析的假

设;使用单因素方差分析(ANOVA)对不同林分凋落物现存量、持水量和土壤物理性质、持水量以及环境因子的差异显著性进行分析,并对其进行多重比较(LSD)。用Perason相关性分析来判断凋落物和土壤持水特性和影响因子的相关性,其中相关分析中土壤相关的指标采用不同土层的平均值计算。以上分析在IBM SPSS Statistics 25.0软件完成,绘图在Graph Pad Prism 8.0.2软件中完成,所有分析的差异设定为 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同保留密度和林龄杉木人工林凋落物层的特征和持水能力

#### 2.1.1 凋落物持水特性

凋落物现存量和厚度随保留密度的增大而增大,其中1200株/hm<sup>2</sup>林分相比于2500株/hm<sup>2</sup>林分的现存量和厚度显著增加了30.87%和24.92%。不同保留密度林分的最大持水量和有效拦蓄量表现为1800株/hm<sup>2</sup>(4.51、3.23 t/hm<sup>2</sup>) > 2500株/hm<sup>2</sup>(4.22、2.89 t/hm<sup>2</sup>) > 1200株/hm<sup>2</sup>(3.72、2.53 t/hm<sup>2</sup>)。3种不同保留密度林分的最大持水率和有效拦蓄率之间差异显著(表2)。

表2 不同保留密度杉木人工林凋落物特征和持水能力

Table 2 Litter characteristics and water retention in *C. lanceolata* plantation with different retention density

保留密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	现存量/(t·hm <sup>-2</sup> )	厚度/cm	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )	最大持水率/%	有效拦蓄率/%
1200	3.11 ± 0.41 <sup>b</sup>	3.21 ± 0.14 <sup>b</sup>	3.72 ± 0.23 <sup>b</sup>	2.53 ± 0.16 <sup>b</sup>	128.84 ± 19.25 <sup>c</sup>	79.57 ± 5.63 <sup>b</sup>
1800	3.77 ± 0.45 <sup>ab</sup>	3.88 ± 2.33 <sup>ab</sup>	4.51 ± 0.38 <sup>a</sup>	3.23 ± 0.24 <sup>a</sup>	187.26 ± 13.35 <sup>a</sup>	127.37 ± 11.23 <sup>a</sup>
2500	4.07 ± 0.35 <sup>a</sup>	4.01 ± 1.65 <sup>a</sup>	4.22 ± 0.31 <sup>ab</sup>	2.89 ± 0.18 <sup>ab</sup>	160.48 ± 12.18 <sup>b</sup>	95.88 ± 8.58 <sup>b</sup>

注:数据为平均值±标准误(n=3);不同的大写字母表示同一处理的不同林分之间具有显著差异(P<0.05)。

#### 2.1.2 凋落物持水过程

各林分凋落物层持水量总体上随浸水时长的增加呈倒“J”型(图1a)。0~2h内各林分凋落物层持水量迅速上升,4~24h各林分凋落物持水量增加速率逐渐减缓,慢慢趋于饱和。凋落物持水量和浸水时间的回归系数( $R^2$ )均达到0.948以上,表明凋落物持水量和浸泡时间具有高度相关性(表3)。

凋落物的吸水速率与浸泡时间存在着明显的相关性(图1b),不同保留密度林分凋落物的持水速率随浸泡时间的增加呈现出负相关关系,不同处理的吸水速率与浸泡时间的拟合回归系数 $R^2$ 均在0.958以上。

### 2.2 不同保留密度和林龄杉木人工林土壤的理化性质及持水能力

#### 2.2.1 土壤持水能力

不同林分的土壤饱和持水量、毛管持水量均随土层厚度的增加而减少,而非毛管持水量随土层厚度的变化无明显规律(图2)。在3种不同保留密度杉木林中,1800株/hm<sup>2</sup>林分的饱和持水量和毛管持水量最大,相较于2500株/hm<sup>2</sup>和1200株/hm<sup>2</sup>林分分别增大了1.05、1.25倍和1.02、1.25倍。而土壤非毛管持水量随着保留密度的增大而增大,表现为2500株/hm<sup>2</sup>(45.50 t/hm<sup>2</sup>) > 1800株/hm<sup>2</sup>(32.21 t/hm<sup>2</sup>) > 1200株/hm<sup>2</sup>(23.76 t/hm<sup>2</sup>)。

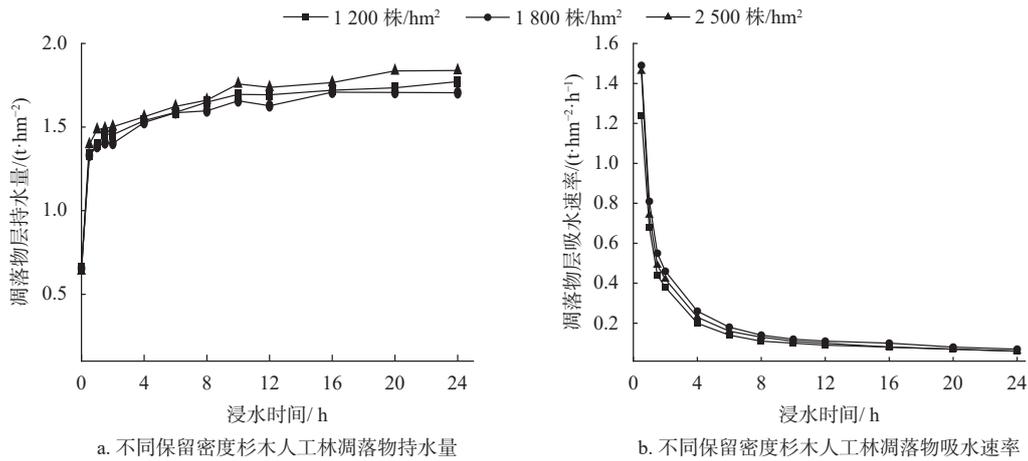


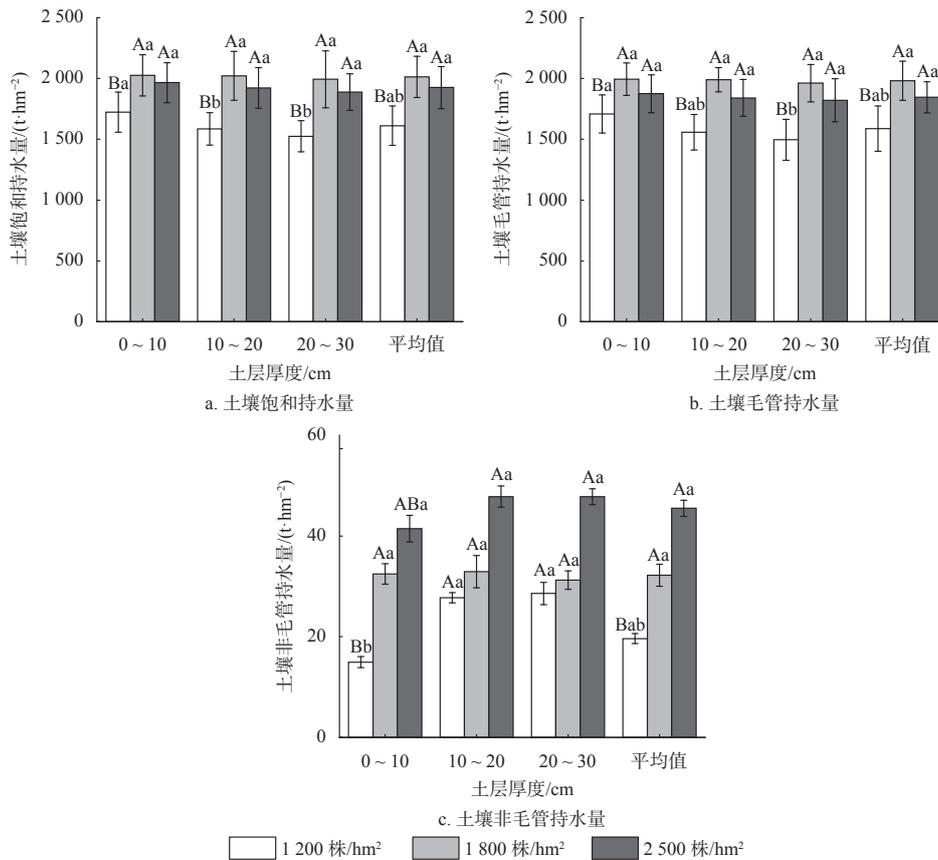
图1 不同保留密度杉木人工林凋落物持水和吸水速率随浸泡时间的变化

Fig. 1 Changes in litter water retention and water absorption rate with soaking time in *C. lanceolata* plantations with different retention densities

表3 不同保留密度杉木人工林凋落物持水量与浸泡时间拟合方程

Table 3 The fitting equation of litter water retention and soaking time for Chinese fir plantation with different retention densities

保留密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	凋落物持水量曲线方程	R <sup>2</sup>	P	凋落物吸水速率曲线方程	R <sup>2</sup>	P
1200	$Q=0.1088\ln t + 1.0709$	0.948	0.001	$V=0.7479t^{-0.8972}$	0.985	0.000
1800	$Q=0.1159\ln t + 1.3984$	0.987	0.000	$V=0.6928t^{-0.8565}$	0.958	0.001
2500	$Q=0.1237\ln t + 1.0709$	0.948	0.001	$V=0.7597t^{-0.8489}$	0.979	0.001



数据为平均值 ± 标准误 (n=3); 不同大写字母表示相同土层不同保留密度林分的土壤持水量具有显著差异 (P < 0.05), 不同小写字母表示不同土层相同保留密度林分的土壤持水量具有显著差异 (P < 0.05)。

图2 不同保留密度杉木人工林土壤持水量的差异

Fig. 2 Difference in soil water retention in *C. lanceolata* plantation with different retention density

### 2.2.2 土壤理化性质

不同林分的土壤有机碳、pH 和总孔隙度整体上均随土层加深而减小，其中 11 年生 1200 株/hm<sup>2</sup> 林分的土壤有机碳含量显著小于其他 3 种林分，但其土壤 pH 和容重大于其他 3 种林分。不同林分的土壤孔隙度随着土层的增加整体上无明

显变化。其中土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度随着保留密度的增加呈先增后减的趋势，表现为 1800 株/hm<sup>2</sup> (45.82%、45.06%、0.76%) > 2500 株/hm<sup>2</sup> (41.81%、41.19%、0.62%) > 1200 株/hm<sup>2</sup> (36.69%、40.35%、0.68%) (表 4)。

表 4 不同保留密度杉木人工林土壤理化性质

Table 4 Soil physicochemical properties of *C. lanceolata* plantation with different retention densities

保留密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	土层/cm	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤容重/(g·cm <sup>-1</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
1200	0~10	19.08 ± 1.55 <sup>Ba</sup>	1.25 ± 0.11 <sup>Aa</sup>	34.07 ± 3.56 <sup>Ba</sup>	37.78 ± 2.33 <sup>Aa</sup>	0.29 ± 0.05 <sup>Ba</sup>
	10~20	16.93 ± 1.26 <sup>Aa</sup>	1.28 ± 0.08 <sup>Aa</sup>	37.61 ± 3.65 <sup>Ba</sup>	37.32 ± 3.52 <sup>Ba</sup>	0.30 ± 0.02 <sup>Ba</sup>
	20~30	15.07 ± 1.01 <sup>Aa</sup>	1.32 ± 0.06 <sup>Aa</sup>	38.39 ± 3.26 <sup>Ba</sup>	38.10 ± 3.63 <sup>Aa</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>Ba</sup>
	平均值	17.02 ± 0.99 <sup>Aa</sup>	1.28 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	36.69 ± 2.58 <sup>Ba</sup>	36.40 ± 3.12 <sup>Aa</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>Ba</sup>
1800	0~10	27.17 ± 2.11 <sup>Aa</sup>	1.05 ± 0.10 <sup>Ba</sup>	45.37 ± 4.52 <sup>Aa</sup>	44.62 ± 4.11 <sup>Aa</sup>	0.75 ± 0.07 <sup>Aa</sup>
	10~20	20.60 ± 1.58 <sup>Aa</sup>	1.06 ± 0.09 <sup>Ba</sup>	45.99 ± 4.12 <sup>Aa</sup>	45.21 ± 3.85 <sup>Aa</sup>	0.78 ± 0.02 <sup>Aa</sup>
	20~30	16.48 ± 1.21 <sup>Ab</sup>	1.04 ± 0.08 <sup>B</sup>	46.10 ± 3.83 <sup>Aa</sup>	45.35 ± 3.26 <sup>Aa</sup>	0.75 ± 0.01 <sup>Aa</sup>
	平均值	22.41 ± 1.63 <sup>Aa</sup>	1.05 ± 0.15 <sup>Aa</sup>	45.82 ± 3.66 <sup>Aa</sup>	45.06 ± 3.33 <sup>Aa</sup>	0.76 ± 0.05 <sup>Aa</sup>
2500	0~10	24.44 ± 2.12 <sup>ABa</sup>	1.16 ± 0.12 <sup>ABa</sup>	41.55 ± 3.82 <sup>ABa</sup>	40.90 ± 3.21 <sup>Aa</sup>	0.65 ± 0.05 <sup>Aa</sup>
	10~20	20.94 ± 1.95 <sup>Aa</sup>	1.17 ± 0.15 <sup>ABa</sup>	42.31 ± 3.33 <sup>ABa</sup>	41.70 ± 3.53 <sup>ABa</sup>	0.62 ± 0.02 <sup>Aa</sup>
	20~30	19.74 ± 1.88 <sup>Aa</sup>	1.17 ± 0.16 <sup>ABa</sup>	41.57 ± 3.85 <sup>ABa</sup>	40.97 ± 2.85 <sup>Aa</sup>	0.60 ± 0.01 <sup>Aa</sup>
	平均值	21.71 ± 1.25 <sup>Aa</sup>	1.17 ± 0.08 <sup>Aa</sup>	41.81 ± 3.16 <sup>ABa</sup>	41.19 ± 2.36 <sup>Aa</sup>	0.62 ± 0.03 <sup>Aa</sup>

注：数据为平均值 ± 标准误 (n=3)；不同大写字母表示相同土层不同保留密度林分的土壤理化性质具有显著差异 (P < 0.05)，不同小写字母表示不同土层相同保留密度林分的土壤理化性质具有显著差异 (P < 0.05)。

### 2.3 凋落物和土壤持水能力的分析与评价

#### 2.3.1 凋落物和土壤持水能力分析

相关性分析表明，凋落物厚度和现存量与凋落物最大持水量、有效拦蓄量和最大持水率呈显著正相关，与土壤 pH、有机碳含量、非毛管孔隙度、非毛管持水量呈显著负相关。凋落物厚度和最大持水量还与郁闭度和叶面积指数呈显著正相

关。土壤饱和持水量、毛管持水量和非毛管持水量与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度呈极显著正相关，与土壤容重呈极显著负相关。此外，土壤毛管持水量还与土壤有机质含量呈显著正相关，与郁闭度和叶面积指数呈显著负相关 (表 5)。

表 5 不同保留密度杉木人工林凋落物和土壤持水能力的影响因素

Table 5 Influencing factors of litter and soil water retention in *C. lanceolata* plantation with different retention densities

指标	凋落物现存量	凋落物最大持水量	凋落物有效拦蓄量	土壤饱和持水量	土壤毛管持水量	土壤非毛管持水量
凋落物厚度	0.70 <sup>**</sup>	0.57 <sup>*</sup>	0.54 <sup>*</sup>	-0.14	-0.48 <sup>*</sup>	-0.14
凋落物最大持水率	0.46 <sup>*</sup>	0.79 <sup>**</sup>	0.85 <sup>***</sup>	0.70 <sup>**</sup>	-0.38	0.70 <sup>**</sup>
凋落物有效拦蓄率	0.33	0.56 <sup>*</sup>	0.73 <sup>**</sup>	0.11	-0.26	0.12
土壤 pH 值	-0.52 <sup>*</sup>	-0.11	0.08	-0.01	-0.11	-0.01
土壤有机碳含量	-0.48 <sup>*</sup>	-0.53 <sup>*</sup>	-0.46 <sup>*</sup>	0.18	0.66 <sup>**</sup>	0.18
土壤容重	0.20	0.25	0.37	-0.76 <sup>**</sup>	-0.73 <sup>**</sup>	-0.71 <sup>**</sup>
土壤总孔隙度	-0.15	-0.14	-0.29	0.84 <sup>***</sup>	0.93 <sup>***</sup>	0.84 <sup>***</sup>
土壤毛管孔隙度	-0.15	-0.14	-0.29	0.64 <sup>**</sup>	0.73 <sup>**</sup>	0.64 <sup>**</sup>
土壤非毛管孔隙度	-0.57 <sup>*</sup>	-0.67 <sup>**</sup>	-0.82 <sup>**</sup>	0.78 <sup>**</sup>	0.89 <sup>***</sup>	0.77 <sup>**</sup>
郁闭度	0.10	0.49 <sup>*</sup>	0.34	-0.06	-0.52 <sup>**</sup>	-0.06
叶面积指数	0.09	0.48 <sup>*</sup>	0.31	-0.13	-0.51 <sup>**</sup>	-0.13

注：数据为平均值 ± 标准误 (n=3)。\*为 P < 0.05，\*\*为 P < 0.01，\*\*\*为 P < 0.001。

### 2.3.2 凋落物和土壤持水能力评价

由表6可知，不同林分的凋落物和土壤持水能力存在差异，其中在不同保留密度林分中，表现为1800株/hm<sup>2</sup> (0.81) > 2500株/hm<sup>2</sup> (0.91) >

1200株/hm<sup>2</sup> (2.57)。整体上看，1800株/hm<sup>2</sup>林分的凋落物和土壤持水能力最好，1200株/hm<sup>2</sup>的林分较差。

表6 不同保留密度杉木人工林凋落物和土壤持水能力综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of litter and soil water retention in *C. lanceolata* plantation with different retention densities

保留密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	凋落物 现存量	凋落物最大 持水量	凋落物有效 拦蓄量	土壤饱和 持水量	土壤毛管 持水量	土壤非毛管 持水量	综合 评价	综合 排序
1200	0.42	0.32	0.39	0.36	0.36	0.73	2.57	3
1800	0.13	0.07	0.08	0.06	0.06	0.41	0.81	1
2500	0.08	0.12	0.20	0.15	0.15	0.21	0.91	2

## 3 结论与讨论

凋落物层是森林对降水再分配的第2个作用层，是表征森林水文功能的重要指标<sup>[21]</sup>，其持水性能受到凋落物现存量、分解程度、含水量、树种组成等多种因素的制约<sup>[22]</sup>。抚育间伐作为人们积极干预人工林生长发育的主要森林经营措施<sup>[9]</sup>，对森林涵养水源能力有着重要影响<sup>[15]</sup>。相关研究表明，适宜的间伐保留密度可以改善林内光照条件，使得林木生长速度、代谢速度加快，增加林木的枯枝落叶凋落<sup>[23]</sup>。本研究中，凋落物现存量和厚度随保留密度的增大而增大，其中11年生1200株/hm<sup>2</sup>林分相比于2500株/hm<sup>2</sup>林分的现存量和厚度显著增加了30.87%和24.92% (表2)。这说明在一定的林分密度范围内，较高的保留密度有利于凋落物量的积累，这与赵磊等<sup>[24]</sup>的研究结果相类似。适当地间伐可以改善林内光环境，使得补充到林地内的凋落物增多，加之针叶树种凋落物中存在的单宁、酚类等难以被降解的物质<sup>[25]</sup>，使得保留密度较大的凋落物的分解速率慢于其凋落的速率<sup>[26]</sup>。

间伐保留密度会影响凋落物的分解动态和土壤的养分循环，从而间接影响土壤的持水特性<sup>[27]</sup>。相关研究表明，凋落物现存量是影响凋落物持水能力的关键因素，与凋落物持水量呈正相关关系<sup>[28-29]</sup>。然而，本研究中凋落物的最大持水量和有效拦蓄量随保留密度的增大呈先增后减趋势，与凋落物的变化规律并不一致，且保留密度为1800株/hm<sup>2</sup>林分的最大持水量和有效拦蓄量显著大于1200株/hm<sup>2</sup>林分。这可能是由于适宜的间伐保留密度 (1800株/hm<sup>2</sup>) 带来的地表温度环境能够提高微生物活性，加快凋落物的分解速率，从而增加凋落物半分解层储量，提高了凋落物

层持水能力<sup>[30]</sup>；但如果林分的保留密度过小 (1200株/hm<sup>2</sup>) 会导致凋落物大面积暴露在光照下，林内湿度降低抑制了土壤微生物的数量，致使凋落物分解速率减慢<sup>[8]</sup>。

土壤层是森林生态系统水源涵养的主要组成部分，其持水量通常占整个林分水源涵养量的85%以上，是评估森林持水能力的重要指标<sup>[31]</sup>。相关研究表明，适度的间伐保留密度可以保持足够的林冠覆盖来减少雨水蒸发，同时可以通过增加地表的有机质和改善土壤结构来提高土壤的持水能力<sup>[29]</sup>。反之，若保留密度过小，可能会导致土壤表面暴露过多，增加水土流失的风险。在11年生3种保留密度的杉木人工林中，1800株/hm<sup>2</sup>林分的饱和持水量和毛管持水量最大，这可能是由于1800株/hm<sup>2</sup>林分的土壤物理性质优于其他2种密度林分 (表4)。相关研究指出，土壤的孔隙度和容重是反映土壤结构变化的关键指标<sup>[20]</sup>。较低的土壤容重通常意味着更大的孔隙空间，这样的土壤可以储存更多的水分，进而促进水分在土壤中的移动速率。这种情况提高了土壤水的下渗和植物根系对水分的吸收能力，从而增强了土壤的水保持性<sup>[24]</sup>。

土壤水分保持能力受到其物理属性如孔隙度和容重的直接影响，同样也与土壤pH值、有机质含量等化学特性紧密相关<sup>[16]</sup>。改善这些土壤化学特性可有助于林地下层植被的生长，进而间接增强森林生态系统在水土保持方面的性能。在本研究不同保留密度林分中，与土壤持水量的变化规律相类似，土壤有机碳含量均值表现为1800株/hm<sup>2</sup> (22.41 g/kg) > 2500株/hm<sup>2</sup> (21.71 g/kg) > 1200株/hm<sup>2</sup> (17.02 g/kg)。而土壤pH随着间伐保留密度的增加而降低。一方面，间伐保留密度过低可能会导致林内湿度降低，抑制了土壤微生物

的数量,致使凋落物分解速率减慢,从而降低了土壤的有机质含量。另一方面,间伐保留密度的降低缓解了林地土壤酸化,这可能是由于保留密度越大,杉木的凋落物越多,有研究表明针叶树种的凋落物中富含酸性物质,如松脂和鞣质等,这些物质在分解过程中会释放酸性化合物,如有机酸和氢离子等到土壤中。而过高或者过低的 pH 都不利于微生物的活动,从而影响土壤理化性质,导致土壤水源涵养能力下降<sup>[32]</sup>。这可能也是本研究中保留密度为 1800 株/hm<sup>2</sup> 杉木人工林的土壤饱和持水量、毛管持水量均高于其他林分的原因。

凋落物现存量、厚度和土壤孔隙度、容重、有机碳含量和 pH 与林分凋落物和土壤水源持水能力的变化密切相关(表 5)。在抚育间伐后,不同保留密度林分之间的凋落物和土壤综合水源涵养能力产生差异的原因可能是因为这些因素的不同所导致。坐标综合评定法直接反映了不同林分的水源涵养能力<sup>[20]</sup>。综合评价值越小,对应的水源涵养能力效果越高。由表 6 可知,不同间伐保留密度林分的综合水源涵养能力大小排序依次为:1800 株/hm<sup>2</sup> 林分(0.81) > 2500 株/hm<sup>2</sup> 林分(0.91) > 1200 株/hm<sup>2</sup> 林分(2.57)。研究结果显示,在 3 种间伐保留密度中,1800 株/hm<sup>2</sup> 林分的凋落物和土壤持水能力最佳。

本研究通过对清远市抚育间伐 2 a 后 3 种间伐保留密度杉木人工林的凋落物与土壤层持水特性进行研究,得出以下结论:在一定的林分密度范围内,较高的保留密度有利于凋落物量的积累,凋落物的最大持水量和有效拦蓄量随保留密度的增大呈先增后减趋势,1800 株/hm<sup>2</sup> 林分的凋落物最大持水量和有效拦蓄量大于其他林分,且 1800 株/hm<sup>2</sup> 林分的土壤饱和持水量和毛管持水量均为最大。相关性分析结果显示,凋落物持水量指标与凋落物厚度和现存量、土壤 pH、有机碳含量、非毛管孔隙度、非毛管持水量呈显著相关。土壤持水量指标与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度、土壤容重、土壤有机质含量以及郁闭度和叶面积指数显著相关。坐标综合评定法结果表明,在 3 种不同保留密度林分中,凋落物和土壤水源涵养能力表现为 1800 株/hm<sup>2</sup> > 2500 株/hm<sup>2</sup> > 1200 株/hm<sup>2</sup>。

#### [参 考 文 献]

- [1] Edwards D P, Tobias J A, Sheil D, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(9): 511–520.
- [2] Zong Y T, Xiao Q, Lu S G. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 177–190.
- [3] 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.
- [4] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能 [J]. *生态学报*, 2012, 32(2): 538–547.
- [5] 张益,林毅雁,张杰铭,等.北京山区典型植被枯落物和土壤层水文功能 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 160–168.
- [6] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014–2018) [R].北京:中国林业出版社,2019.
- [7] 刁娇娇,肖文娅,费菲,等.间伐对杉木人工林生长及生态系统碳储量的短期影响 [J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2017, 37(3): 134–139.
- [8] 肖文娅,刁娇娇,费菲,等.不同强度间伐对杉木人工林凋落物分解速率的影响 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1291–1299.
- [9] 徐雪蕾,孙玉军,周华,等.间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响 [J]. *林业科学*, 2019, 55(3): 1–12.
- [10] 马履一,李春义,王希群,等.不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响 [J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 1–9.
- [11] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands [J]. *Nature*, 1994, 367: 363–365.
- [12] Harmer R, Kerr G, Stokes V, et al. The influence of thinning intensity and bramble control on ground flora development in a mixed broadleaved woodland [J]. *Forestry*, 2017, 90(2): 247–257.
- [13] Cheng C P, Wang Y D, Fu X L, et al. Thinning effect on understory community and photosynthetic characteristics in a subtropical *Pinus massoniana* plantation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, 47(8): 1104–1115.
- [14] 石君杰,陈忠震,王广海,等.间伐对杨桦次生林冠层结构及林下光照的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1956–1964.
- [15] 简永旗,吴家森,盛卫星,等.间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响 [J]. *浙江农林大*

- 学报, 2021, 38(2): 320–328.
- [16] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4162–4172.
- [17] 林立文, 邓羽松, 李佩琦, 等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 200–207, 215.
- [18] 张建利, 王加国, 李苇洁, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 167–173.
- [19] 何琴飞, 郑威, 彭玉华, 等. 贝江河林场杉木人工林凋落物储量及其持水特性 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 48–54.
- [20] 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.
- [21] 莫非, 赵鸿, 王建永, 等. 全球变化下植物物候研究的关键问题 [J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2593–2601.
- [22] Lagomarsino A, Mazza G, Agnelli A E, et al. Litter fractions and dynamics in a degraded pine forest after thinning treatments [J]. *European Journal of Forest Research*, 2020, 139(2): 295–310.
- [23] 尤海舟, 毕君, 宋熙龙, 等. 间伐抚育对小五台山华北落叶松林下枯落物持水特性的影响 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 63–67, 225.
- [24] 赵磊, 王兵, 蔡体久, 等. 江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 203–208, 246.
- [25] Yang K, Zhu J, Zhang W, et al. Litter decomposition and nutrient release from monospecific and mixed litters: comparisons of litter quality, fauna and decomposition site effects [J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110: 1673–1686.
- [26] Bravo-Oviedo A, Ruiz-Peinado R, Onrubia R, et al. Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 309–320.
- [27] 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.
- [28] 夏璟钰, 王雯颖, 蒋林君, 等. 不同林龄杉木人工林凋落物持水特性研究 [J]. *广西林业科学*, 2019, 48(4): 449–454.
- [29] 陈家琛, 左晓东, 陈立, 等. 间伐对杉木人工林凋落物分解和养分释放速率的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 119–125.
- [30] 贺淑霞, 李叙勇, 莫非, 等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能 [J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3285–3295.
- [31] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 357–363, 371.
- [32] 何俊, 谢腾蛟, 杨旅涵, 等. 模拟酸雨对土壤修复中重金属淋溶特征及土壤持水能力的影响 [J]. 化工环保, 2020, 40(4): 388–395.

(责任编辑 张 坤)