

# 低效杉木林林窗土壤凋落物的持水特性

肖斌<sup>1,2</sup>, 姚甲宝<sup>1,2</sup>, 徐克芹<sup>1,2</sup>, 袁媛<sup>1,2</sup>, 丁颖<sup>1,2</sup>, 蔡宗明<sup>1,2</sup>

(1.中国林业科学研究院亚热带林业实验中心, 江西 分宜 336600;

2.生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室, 江西 分宜 336600)

**摘要:** [目的] 研究不同杉木林窗大小与年龄对土壤及凋落物的持水特性, 为杉木低效林质量提升提供理论依据。[方法] 采用时空替代法选取 4, 15, 30, 50 a 林窗, 并以顶级群落作为对照, 每个林窗年龄设置小林窗( $\leq 50 \text{ m}^2$ )、中林窗( $50 \sim 100 \text{ m}^2$ )、大林窗( $\geq 100 \text{ m}^2$ )及非林窗对照 4 个处理, 通过环刀法、铝盒烘干法、凋落物浸泡法分别测定土壤及凋落物持水特性。[结果] ①仅杉木林窗年龄对土壤及凋落物持水特性具有显著性影响, 而林窗大小、林窗年龄与大小的交互作用影响不显著。②4 a 中林窗土壤持水性最佳, 15 a 中林窗半分解凋落物的现存量、最大持水量、最大持水率、自然持水量和有效拦蓄量表现最优。③各林窗年龄凋落物持水率随浸泡时间变化, 中林窗和大林窗表现较好, 半分解层持水能力强于未分解层。④凋落物半分解自然持水量与土壤毛管孔隙度、田间持水量和毛管持水量呈显著正相关。[结论] 4 a 和 15 a 中林窗土壤及凋落物持水性良好, 人工开设中等大小林窗可作为杉木低效林质量提升的重要技术手段。

**关键词:** 杉木; 林窗; 低效林; 土壤及凋落物; 持水特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0045-09

中图分类号: S714.7

**文献参数:** 肖斌, 姚甲宝, 徐克芹, 等. 低效杉木林林窗土壤凋落物的持水特性[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 45-53. Xiao Bin, Yao Jiabao, Xu Keqin, et al. Water-holding characteristics of soil-litter at forest gap of low-efficiency Chinese fir forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 45-53. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.006; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.006.

## Water-holding characteristics of soil-litter at forest gap of low-efficiency Chinese fir forest

Xiao Bin<sup>1,2</sup>, Yao Jiabao<sup>1,2</sup>, Xu Keqin<sup>1,2</sup>, Yuan Yuan<sup>1,2</sup>, Ding Ying<sup>1,2</sup>, Cai Zongming<sup>1,2</sup>

(1. Subtropical Forestry Experimental Center, Chinese Academy of Forestry, Fenyi, Jiangxi 336600, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Resource Utilization, Fenyi, Jiangxi 336600, China)

**Abstract:** [Objective] The water holding characteristics of soil and litter in low-efficiency of Chinese fir trees with different gap sizes and ages were investigated to provide a theoretical basis for improving the tree quality in low-efficiency Chinese fir forests. [Methods] Gap ages of 4, 15, 30, and 50 years were selected based on the results of the space-time substitution method, and the climax community was used as the control. Four treatments were set for each gap age: small ( $\leq 50 \text{ m}^2$ ), medium ( $50 \sim 100 \text{ m}^2$ ), and large ( $\geq 100 \text{ m}^2$ ) gaps, as well as a non-gap control. The water holding characteristics of soil and litter were determined using the cutting-ring method, oven drying method, and litter soaking methods, respectively. [Results] ① Only the gap age had a significant effect on the water-holding characteristics of soil and litter, whereas the gap size and the interaction between gap age and size had no significant effect. ② The best soil water holding capacity was observed in the 4-year-forest gap, and the best standing crop, maximum water-holding capacity, maximum water-holding rate, natural water holding capacity, and effective storage capacity of semi-decomposed litter was observed in the 15-year-forest gap. ③ The water holding rate of litter in different gap ages changed with soaking time; the middle and large gaps performed the best, and the water-holding capacity of the semi-

收稿日期: 2024-10-20

修回日期: 2024-12-09

采用日期: 2024-12-11

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“江西大岗山典型低效公益林增效经营技术研究”(CAFYBB2020ZB002); 江西省自然科学基金项目(20232BAB205047); 江西省 2023 年度中央财政林业科技推广示范项目(JXTG[2023]05 号)

第一作者: 肖斌(1994—), 男(汉族), 江西省新余市人, 硕士, 工程师, 主要从事人工林经营技术研究。Email: 1165333825@qq.com。

通信作者: 姚甲宝(1981—), 男(汉族), 山东省德州市人, 博士, 高级工程师, 主要从事林木育种和森林质量提升技术研究。Email: ylx101@163.com。

decomposed layer was stronger than that of the undecomposed layer. ④ The natural water-holding capacity of semi-decomposed litter was significantly positively correlated with soil capillary porosity, field water-holding capacity, and capillary water-holding capacity. [Conclusion] The water-holding capacity of soil and litter was good in the 4 and 15-year-forest gaps. Based on our results, the artificial opening of a medium-sized forest gap could be used as an important technical means to improve the quality of low-efficiency Chinese fir forest.

**Keywords:** Chinese fir; forest gap; low-efficiency forest; soil-litter; water holding characteristics

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国南方重要的速生用材树种,在人工林中占有重要地位<sup>[1]</sup>。然而,杉木人工林普遍面临地力衰退、树种单一、林分结构简单、水土流失严重和生态服务功能低下等问题,形成大面积低效林<sup>[2-3]</sup>。为了解决这些问题,学者们开始寻求近自然化改造技术提升杉木人工林质量。而开设林窗是近自然改造的重要手段之一,对森林微环境、植物物种组成和森林更新演替方向具有重要影响<sup>[2,4-5]</sup>。林窗的形成改变了林下光照、温湿度,增加了生境异质性,进而影响林下植被生长和水分涵养能力<sup>[6]</sup>。相关研究表明,林窗水分涵养能力影响森林树木再生和幼苗种类,是维持植物多样性的关键因素之一<sup>[7-10]</sup>。

水源涵养是森林生态系统服务功能的重要组成部分<sup>[11-12]</sup>,其中,土壤层和凋落物层调控着 90% 以上的降水,是森林生态系统发挥水源涵养的主要作用层<sup>[12]</sup>。土壤层的蓄水能力越强,所接纳的降水越多,为植物生长提供水分更多。凋落物层利用本身特有的吸水特性和疏松结构吸持水分,促进下渗,迟滞径流产生的时间,影响土壤水分补充和植物水分供应<sup>[13-14]</sup>。因此,研究林分下土壤—凋落物持水特性对确定植物生长最优生境条件至关重要。近年来,对土壤—凋落物持水特性的研究多集中于不同林分类型、立地条件和经营方式<sup>[14-17]</sup>,而林窗条件下的研究相对较少。李天玲等<sup>[2]</sup>研究发现马尾松林窗年龄、林窗年龄与林窗面积的交互作用对土壤含水率、最大持水量、土壤容重存在极显著影响,苏薇等<sup>[18]</sup>研究发现林窗可以有效改善赤松和刺槐林土壤物理性质。本研究以杉木为对象,探讨林窗大小和年龄对土壤—凋落物持水特性的影响,为杉木低效林质量提升提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国林科院亚热带林业试验中心长埠试验林场(27°33'N, 114°36'E),地处江西省分宜县境内,属亚热带湿润季风气候,夏季高温,冬季低温,7月平均气温最高(28.8℃),1月最低(5.3℃),年无霜期 265 d。年降水量平均 1 626.7 mm,实测最大年

降雨量 2 104.9 mm,最小 1 069.8 mm,春夏季主要集中在 4—6 月,降水占全年 46%。土质以黄红壤为主,土层深厚肥沃。研究区森林覆盖率 65.76%,植物种类丰富,包括杉木等 22 种速生树种,灌木杜茎山、毛冬青等,草本芒萁、狗脊等,藤本有悬钩子、流苏子等。

### 1.2 样地设置及样品采集

通过查阅相关资料及实地调查,采用空间换取时间的方法设置样地。研究区杉木人工林初植于 20 世纪 60 年代,曾于 1973, 1993, 2008 和 2019 年进行林窗式疏伐,形成不同年龄和面积的林窗。林窗式疏伐后林分生长年限(林窗年龄)分别为 50, 30, 15 和 4 a (截至 2023 年)。2023 年 5 月,测定林窗长短轴长度,采用椭圆计算公式  $S = \pi(L \times R)/4$  测定林窗面积,其中  $L$  为长轴长度,  $R$  为短轴长度<sup>[19]</sup>。根据杉木林窗形成原因及林窗大小,在各林分生长年限选择 3 个面积梯度的林窗(小林窗为  $\leq 50 \text{ m}^2$ , 中林窗为  $50 \sim 100 \text{ m}^2$ , 大林窗为  $\geq 100 \text{ m}^2$ ),以未疏伐杉木林(CK)为对照,每个梯度设 3 个重复,另选杉木顶级群落为对照处理,共设 51 个样地。

样地内样品采集采用五点取样法,在林窗中心及东西南北侧各取一点,分别采集土壤和凋落物样品。凋落物在 5 个  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  小样方内采集,按腐烂程度分未分解层和半分解层装入塑料袋标记后带回实验室。在凋落物小样方位置挖取土壤剖面,用环刀和铝盒采集表层土壤,用于测定土壤容重、含水量、孔隙度和持水量。

### 1.3 测定方法

土壤物理性质测定参考中华人民共和国林业行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T 1215—1999),铝盒烘干法测定土壤质量含水量( $C_n$ ),环刀法测定土壤容重(BD)、最大持水量( $C_{\max}$ )、毛管持水量( $C_m$ )、田间持水量( $C_l$ )以及总孔隙度( $G_z$ )、毛管孔隙度( $G_m$ )、非毛管孔隙度( $G_{nm}$ )。

凋落物持水性和吸水特性的测定采用浸泡法。凋落物样品带回实验室称量自然湿质量,65℃烘干至恒定质量,计算凋落物未分解和半分解自然含水率  $R_0$ ,换算法计算  $1 \text{ hm}^2$  凋落物现存量  $M$ ,取部分烘干凋落物样品装入尼龙网袋中称量,使其完全浸泡在水中,等待分别浸水时间 5 min, 10 min, 20 min,

40 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h 后提起静置至凋落物不在滴水为止, 置于精度为 0.01 g 电子天平上称重, 计算不同浸水时间凋落物持水量、持水率。

$$R_0 = (m - m_0) / m_0 \quad (1)$$

$$R_{\max} = (m_{24} - m_0) / m_0 \quad (2)$$

$$R_w = (m_t - m_0) / m_0 \quad (3)$$

$$H_0 = R_0 \times M \quad (4)$$

$$H_{\max} = R_{\max} \times M \quad (5)$$

$$Q_n = (0.85 R_{\max} - R_0) \times M \quad (6)$$

式中:  $R_0$  为自然含水率(%) ;  $R_{\max}$  为最大持水率(%) ;  $R_w$  为持水率(%) ;  $H_0$  为自然持水量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ) ;  $H_{\max}$  为最大持水量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ) ;  $Q_n$  为有效拦蓄量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ) , 0.85 为有效拦蓄系数;  $m$  为凋落物鲜重(g) ;  $m_0$  为凋落物干重(g) ;  $m_{24}$  为浸水 24 h 凋落物湿重(g) ;  $m_t$  为浸水  $t$  时间后凋落物重量(g) ;  $M$  为凋落物现存量( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

#### 1.4 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2016 整理计算, 用 SPSS 17.0

进行统计分析, Origin 8.0 绘制图形。通过 SPSS 17.0 双因素方差分析林窗年龄、大小及其交互作用对土壤一凋落物持水特性的影响, 单因素方差分析同一林窗年龄不同大小和同一大小不同年龄的持水特性, Person 相关性分析土壤与凋落物持水特性的关联度。

## 2 结果与分析

### 2.1 林窗年龄、面积大小及其交互作用对土壤一凋落物持水特性的影响

双因素方差分析表明(表 1), 林窗年龄对土壤及凋落物持水特性有显著影响, 如对土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量, 以及凋落物半分解最大持水量、最大持水率、现存量、自然持水量、有效拦蓄量和凋落物未分解最大持水率差异达到极显著水平( $p < 0.001$ )。而林窗大小、林窗年龄与大小交互作用对土壤持水特性差异不显著, 除半分解自然持水量外, 各处理凋落物持水特性参数间无显著差异( $p > 0.05$ )。

表 1 双因素方差分析(F 值)

Table 1 Two-way analysis of variance (F-value)

变量来源	林窗年龄	林窗大小	林窗年龄× 林窗大小	变量来源	林窗年龄	林窗大小	林窗年龄× 林窗大小
BD	1.909	0.053	0.966	$H_{\max}$ (未)	4.538**	1.957	1.112
$G_Z$	2.481	0.356	0.639	$H_{\max}$ (半)	48.737***	1.212	1.103
$G_m$	10.533***	0.921	0.313	$R_{\max}$ (未)	7.993***	2.496	1.181
$G_{mm}$	5.844***	0.766	0.960	$R_{\max}$ (半)	53.646***	0.936	2.061
$C_n$	5.006**	0.634	0.963	$M$ (未)	5.197**	2.192	1.064
$C_{\max}$	1.875	0.083	0.774 <sup>ns</sup>	$M$ (半)	78.819***	0.950	1.454
$C_m$	4.079**	0.410	0.607 <sup>ns</sup>	$H_0$ (未)	1.378	2.608	1.112
$C_t$	31.465***	0.592	0.677 <sup>ns</sup>	$H_0$ (半)	24.916***	5.914**	4.338***
				$Q_n$ (未)	4.390**	1.938	1.121 <sup>*</sup>
				$Q_n$ (半)	42.574***	1.325	1.573

注: BD 为土壤容重;  $G_Z$  为土壤总孔隙度;  $G_m$  为土壤毛管孔隙度;  $G_{mm}$  为土壤非毛管孔隙度;  $C_n$  土壤质量含水量;  $C_{\max}$  为土壤最大持水量;  $C_m$  为土壤毛管持水量;  $C_t$  为土壤田间持水量;  $H_{\max}$ (未) 为凋落物未分解最大持水量;  $H_{\max}$ (半) 为凋落物半分解最大持水量;  $R_{\max}$ (未) 为凋落物未分解最大持水率;  $R_{\max}$ (半) 为凋落物半分解最大持水率;  $M$ (未) 为凋落物未分解现存量;  $M$ (半) 为凋落物半分解现存量;  $H_0$ (未) 为凋落物未分解自然持水量;  $H_0$ (半) 为凋落物半分解自然持水量;  $Q_n$ (未) 为凋落物未分解有效拦蓄量;  $Q_n$ (半) 为凋落物半分解有效拦蓄, \* 处理在  $p < 0.05$  水平上的显著性差异; \*\* 处理在  $p < 0.01$  水平上的显著性差异; \*\*\* 处理在  $p < 0.001$  水平上的显著性差异。下同。

### 2.2 不同林窗年龄、面积大小土壤孔隙度性质差异

比较不同林窗年龄和面积大小土壤孔隙度性质(表 2), 发现 4, 30 a 林窗均随林窗面积的增大, BD 先减后增,  $G_Z$ ,  $G_m$  先增后减, 表明 4, 30 a 中林窗土壤孔隙度较好。不同林窗年龄的中林窗土壤孔隙特性差异明显( $p < 0.05$ ), 50 a 中林窗 BD,  $G_Z$ ,  $G_m$  与 4, 30 a 林窗存在显著性差异( $p < 0.05$ ), 50 a 中林窗 BD 为  $1.37 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $G_Z$  为 46.53%,  $G_m$  为 40.85%, 显著高于 4, 30 a 的中林窗 BD  $1.2, 1.26 \text{ g}/\text{cm}^3$ ; 显著低于 4, 30 a 的中林窗  $G_Z$  53.64%, 51.11%,  $G_m$  48.51%, 47.98%。

与对照处理相比, 4, 30 a 林窗 BD 小于对照处理, 而  $G_Z$  均大于对照。顶级群落对照(CK) BD 为  $1.13 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $G_Z$  为 53.88%, 相较其他林窗年龄下土壤孔隙表现为 BD 小,  $G_Z$  大, 土壤孔隙度最佳。总体而言, 4, 30 a 土壤孔隙性中林窗优于其他处理, 4 a 的中林窗最好。

### 2.3 不同林窗年龄、面积大小土壤持水性差异

分析不同林窗年龄和面积的土壤持水性(表 3), 4 a, 30 a 林窗均表现为随着林窗面积的增大,  $C_n$ ,  $C_{\max}$ ,  $C_m$  和  $C_t$  先增后减。除  $C_n$  外, 15 a 林窗亦表现

如此,说明 4,15,30 a 中林窗土壤持水性较好。不同林窗年龄中林窗土壤持水性存在显著性差异( $p < 0.05$ ),50 a 中林窗与 4,30 a 中林窗  $C_{\max}$ ,  $C_m$  和  $C_t$  有显著差异( $p < 0.05$ ),50 a 中林窗  $C_{\max}$ ,  $C_m$  和  $C_t$  分别为 341.7,299.5,196.46 g/kg,显著低于 4,30 a 中林窗的  $C_{\max}$  454.77,407.19,  $C_m$  410.67,382.26 g/kg 和  $C_t$

370.13,368.3 g/kg。除此之外,50 a 中林窗显著低于 30 a 中林窗  $C_m$ ,15 a 中林窗  $C_t$  ( $p < 0.05$ )。与对照相比,4,30 a 中林窗持水性均优于对照。顶级群落对照(CK) $C_{\max}$ 最高,为 468.07 g/kg。总体上,4,30 a 土壤持水性中林窗优于其他处理,其中 4 a 中林窗土壤持水性最好。

表 2 不同林窗年龄、面积大小土壤的孔隙特性

Table 2 Soil physical properties of different forest gap ages and sizes

林窗年龄/a	林窗类型	容重(BD)/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度( $G_z$ )/%	毛管孔隙度( $G_m$ )/%	非毛管孔隙度( $G_{nm}$ )/%
4	小林窗	1.25±0.10 <sup>Aa</sup>	51.71±2.90 <sup>Aa</sup>	44.75±6.78 <sup>Aa</sup>	6.97±4.11 <sup>Aa</sup>
	中林窗	1.20±0.06 <sup>Ba</sup>	53.64±2.00 <sup>Aa</sup>	48.51±2.34 <sup>Aa</sup>	5.14±0.38 <sup>ABa</sup>
	大林窗	1.21±0.02 <sup>Aa</sup>	53.45±1.21 <sup>Aa</sup>	44.69±0.60 <sup>Aa</sup>	8.76±1.81 <sup>Aa</sup>
	对照	1.31±0.08 <sup>Aa</sup>	50.42±2.78 <sup>Aa</sup>	44.38±2.58 <sup>Aa</sup>	6.05±3.58 <sup>ABa</sup>
15	小林窗	1.32±0.04 <sup>Aa</sup>	50.4±1.89 <sup>Aa</sup>	44.95±0.97 <sup>Aa</sup>	5.45±1.14 <sup>Aa</sup>
	中林窗	1.28±0.06 <sup>ABa</sup>	50.36±1.77 <sup>ABa</sup>	45.45±0.76 <sup>ABa</sup>	4.91±2.06 <sup>ABa</sup>
	大林窗	1.32±0.16 <sup>Aa</sup>	48.59±4.87 <sup>Aa</sup>	45.00±4.36 <sup>Aa</sup>	3.59±0.71 <sup>Aa</sup>
	对照	1.25±0.05 <sup>ABa</sup>	51.38±2.21 <sup>Aa</sup>	46.11±1.87 <sup>Aa</sup>	5.27±0.35 <sup>Ba</sup>
30	小林窗	1.30±0.02 <sup>Aa</sup>	50.50±1.16 <sup>Aa</sup>	46.08±1.46 <sup>Aa</sup>	4.43±0.62 <sup>Aa</sup>
	中林窗	1.26±0.05 <sup>Ba</sup>	51.11±1.82 <sup>Aa</sup>	47.98±2.44 <sup>Aa</sup>	3.13±0.64 <sup>Ba</sup>
	大林窗	1.28±0.06 <sup>Aa</sup>	50.57±4.03 <sup>Aa</sup>	46.78±3.17 <sup>Aa</sup>	3.79±1.12 <sup>Aa</sup>
	对照	1.31±0.03 <sup>ABa</sup>	50.32±0.12 <sup>Aa</sup>	47.15±0.62 <sup>Aa</sup>	3.17±0.70 <sup>Ba</sup>
50	小林窗	1.24±0.21 <sup>Aa</sup>	46.96±3.51 <sup>Aa</sup>	39.42±4.02 <sup>Aa</sup>	7.53±7.19 <sup>Aa</sup>
	中林窗	1.37±0.04 <sup>Aa</sup>	46.53±2.89 <sup>Ba</sup>	40.85±3.81 <sup>Ba</sup>	5.68±1.16 <sup>Aa</sup>
	大林窗	1.35±0.19 <sup>Aa</sup>	46.94±9.12 <sup>Aa</sup>	40.69±3.56 <sup>Aa</sup>	6.25±5.59 <sup>Aa</sup>
	对照	1.23±0.14 <sup>ABa</sup>	51.00±3.63 <sup>Aa</sup>	38.94±2.65 <sup>Ba</sup>	12.06±4.66 <sup>Aa</sup>
顶级群落	对照	1.13±0.11 <sup>B</sup>	53.88±3.99 <sup>A</sup>	41.12±1.75 <sup>B</sup>	12.77±4.15 <sup>A</sup>

注:①表中数据为平均值±标准差;②不同大写字母表示同一林窗大小不同林窗年龄显著性差异( $p < 0.05$ );③不同小写字母表示同一林窗年龄不同林窗大小显著性差异( $p < 0.05$ )。下同。

表 3 不同林窗年龄、面积大小土壤的持水特性

Table 3 Soil water holding characteristics of different forest gap ages and sizes

林窗年龄/a	林窗类型	质量含水量( $C_n$ )/(g·kg <sup>-1</sup> )	最大持水量( $C_{\max}$ )/(g·kg <sup>-1</sup> )	毛管持水量( $C_m$ )/(g·kg <sup>-1</sup> )	田间持水量( $C_t$ )/(g·kg <sup>-1</sup> )
4	小林窗	260.96±37.54 <sup>Aa</sup>	419.58±53.03 <sup>Aa</sup>	364.74±80.76 <sup>Aa</sup>	329.30±70.99 <sup>Ba</sup>
	中林窗	296.40±33.20 <sup>ABa</sup>	454.77±30.95 <sup>Aa</sup>	410.67±33.57 <sup>Aa</sup>	370.13±24.81 <sup>Aa</sup>
	大林窗	262.35±30.98 <sup>Aa</sup>	453.22±15.27 <sup>Aa</sup>	376.39±3.51 <sup>Aa</sup>	334.53±6.62 <sup>Aa</sup>
	对照	259.52±6.47 <sup>Ba</sup>	388.47±48.64 <sup>Aa</sup>	341.62±30.69 <sup>Aa</sup>	307.23±21.82 <sup>Aa</sup>
15	小林窗	276.18±19.01 <sup>Aa</sup>	384.26±25.26 <sup>Aa</sup>	342.12±17.08 <sup>Aa</sup>	315.36±14.96 <sup>Aa</sup>
	中林窗	258.97±28.29 <sup>ABa</sup>	397.21±28.12 <sup>ABa</sup>	357.14±19.06 <sup>ABa</sup>	330.14±22.23 <sup>Aa</sup>
	大林窗	232.78±46.14 <sup>Aa</sup>	378.05±78.73 <sup>Aa</sup>	349.56±70.78 <sup>Aa</sup>	317.68±78.96 <sup>Aa</sup>
	对照	273.4±28.69 <sup>ABa</sup>	412.92±31.98 <sup>Aa</sup>	370.67±27.42 <sup>Aa</sup>	343.62±27.48 <sup>Aa</sup>
30	小林窗	295.43±7.05 <sup>Aa</sup>	370.62±13.14 <sup>Aa</sup>	352.00±13.77 <sup>Aa</sup>	332.82±12.42 <sup>Aa</sup>
	中林窗	312.33±30.06 <sup>Aa</sup>	407.19±29.70 <sup>Aa</sup>	382.26±33.69 <sup>Aa</sup>	368.30±34.98 <sup>Aa</sup>
	大林窗	303.25±32.87 <sup>Aa</sup>	399.57±56.66 <sup>Aa</sup>	368.85±46.83 <sup>Aa</sup>	347.44±37.44 <sup>Aa</sup>
	对照	296.02±15.77 <sup>Aa</sup>	386.00±7.78 <sup>Aa</sup>	361.53±11.58 <sup>Aa</sup>	345.48±9.17 <sup>Aa</sup>
50	小林窗	259.03±20.54 <sup>Aa</sup>	391.70±105.83 <sup>Aa</sup>	320.59±30.63 <sup>Aa</sup>	220.32±13.89 <sup>Aa</sup>
	中林窗	253.18±25.46 <sup>Ba</sup>	341.70±30.89 <sup>Ba</sup>	299.50±36.63 <sup>Ba</sup>	196.46±38.78 <sup>Ba</sup>
	大林窗	261.64±41.75 <sup>Aa</sup>	358.36±123.57 <sup>Aa</sup>	307.44±72.26 <sup>Aa</sup>	204.78±59.25 <sup>Ba</sup>
	对照	261.74±7.26 <sup>Ba</sup>	425.24±86.41 <sup>Aa</sup>	320.63±32.98 <sup>Aa</sup>	202.47±23.43 <sup>Ba</sup>
顶级群落	对照	255.09±18.51 <sup>B</sup>	468.07±80.37 <sup>A</sup>	358.21±35.20 <sup>A</sup>	231.41±14.41 <sup>B</sup>

## 2.4 不同林窗年龄、面积大小凋落物现存量、拦蓄量及持水性分析

对不同林窗年龄、面积大小凋落物现存量、拦蓄量及持水性分析(表 4),半分解  $M, H_{\max}, R_{\max}, H_0, Q_n$  均大于未分解。4, 30 a 林窗未分解凋落物随林窗面积的增大,  $M, H_{\max}, Q_n$  均表现为先减后增的趋势, 而 15, 50 a 的  $M, H_{\max}, R_{\max}, H_0, Q_n$  值呈现先增后减的趋势, 意味着 15, 50 a 中林窗未分解凋落物持水性最好, 4, 30 a 中林窗最差。对于半分解凋落物, 4 a 林

窗半分解  $M, H_{\max}, R_{\max}, H_0, Q_n$  属大林窗表现最好; 15, 50 a 林窗半分解  $M, H_{\max}, R_{\max}, H_0, Q_n$  均表现为随林窗面积增大先增后减, 中林窗最好。各林窗年龄  $M, H_{\max}, R_{\max}, H_0, Q_n$  差异显著 ( $p < 0.05$ ), 15 a 林窗半分解  $M, H_{\max}, H_0, Q_n$  显著高于 50 a 林窗。与对照相比, 4, 15, 30 a 林窗未分解  $M, H_{\max}, H_0, Q_n$  均低于对照, 50 a 高于对照。4, 15, 30, 50 a 中林窗半分解各项指标均高于对照, 说明中林窗有利于凋落物的分解。而 15 a 中林窗凋落物半分解最优。

表 4 不同林窗年龄、面积大小的凋落物现存量、拦蓄量及持水性

Table 4 Litter standing crop, interception and water holding capacity of different forest gap ages and sizes

林窗 年龄/a	林窗 类型	凋落物现存量( $M$ )/(t·hm <sup>-2</sup> )		最大持水量( $H_{\max}$ )/(t·hm <sup>-2</sup> )		最大持水率( $R_{\max}$ )/%		自然持水量( $H_0$ )/(t·hm <sup>-2</sup> )		有效拦蓄量( $Q_n$ )/(t·hm <sup>-2</sup> )	
		未分解	半分解	未分解	半分解	未分解	半分解	未分解	半分解	未分解	半分解
4	小林窗	0.51±0.36 <sup>Aa</sup>	8.76±0.57 <sup>Bab</sup>	0.87±0.61 <sup>Aa</sup>	14.14±0.89 <sup>Ba</sup>	1.88±0.11 <sup>Aa</sup>	1.90±0.23 <sup>Ba</sup>	0.05±0.03 <sup>Aa</sup>	0.87±0.06 <sup>Ab</sup>	0.76±0.53 <sup>Aa</sup>	15.14±1.77 <sup>Bab</sup>
	中林窗	0.28±0.03 <sup>Ba</sup>	8.04±1.45 <sup>Bb</sup>	0.46±0.06 <sup>Ba</sup>	14.22±2.03 <sup>Ba</sup>	1.86±0.08 <sup>ABa</sup>	1.96±0.22 <sup>Ca</sup>	0.03±0.01 <sup>Ba</sup>	0.74±0.24 <sup>BCb</sup>	0.41±0.06 <sup>Ba</sup>	15.56±2.20 <sup>Bab</sup>
	大林窗	0.36±0.23 <sup>Ba</sup>	10.31±0.97 <sup>Aa</sup>	0.64±0.41 <sup>Aa</sup>	18.26±4.53 <sup>Aa</sup>	2.08±0.09 <sup>ABa</sup>	2.18±0.15 <sup>Ba</sup>	0.04±0.03 <sup>Aa</sup>	1.99±0.74 <sup>Aa</sup>	0.57±0.36 <sup>Aa</sup>	21.08±4.57 <sup>Aa</sup>
	对照	0.81±0.43 <sup>Aa</sup>	7.13±1.31 <sup>Bb</sup>	1.32±0.61 <sup>Aa</sup>	12.59±3.23 <sup>BCa</sup>	1.86±0.18 <sup>Aa</sup>	1.92±0.16 <sup>Ca</sup>	0.08±0.04 <sup>Aa</sup>	0.65±0.12 <sup>BCb</sup>	1.15±0.53 <sup>Aa</sup>	13.62±3.78 <sup>BCb</sup>
15	小林窗	0.21±0.08 <sup>Ab</sup>	12.12±0.58 <sup>Aa</sup>	0.39±0.14 <sup>Ab</sup>	25.19±1.95 <sup>Aa</sup>	2.08±0.03 <sup>Aa</sup>	2.29±0.18 <sup>Ba</sup>	0.02±0.01 <sup>Ab</sup>	1.12±0.09 <sup>Aa</sup>	0.35±0.13 <sup>Ab</sup>	22.37±1.82 <sup>Aa</sup>
	中林窗	0.32±0.43 <sup>Bb</sup>	12.68±1.30 <sup>Aa</sup>	0.59±0.70 <sup>Bb</sup>	25.26±3.63 <sup>Aa</sup>	3.11±1.44 <sup>Aa</sup>	3.17±0.20 <sup>Aa</sup>	0.05±0.04 <sup>ABab</sup>	1.40±0.16 <sup>ABa</sup>	0.55±0.60 <sup>Bab</sup>	22.38±3.24 <sup>Aa</sup>
	大林窗	0.19±0.08 <sup>Bb</sup>	12.14±2.49 <sup>Aa</sup>	0.37±0.09 <sup>Ab</sup>	22.57±6.12 <sup>Aa</sup>	2.35±0.74 <sup>Aa</sup>	2.36±0.28 <sup>Ba</sup>	0.02±0.01 <sup>Ab</sup>	1.23±0.16 <sup>Aa</sup>	0.33±0.07 <sup>Ab</sup>	19.98±5.49 <sup>Aa</sup>
	对照	0.90±0.40 <sup>Aa</sup>	11.61±1.51 <sup>Aa</sup>	1.46±0.55 <sup>Aa</sup>	22.59±1.58 <sup>Aa</sup>	1.88±0.13 <sup>Aa</sup>	2.22±0.18 <sup>Ba</sup>	0.10±0.04 <sup>Aa</sup>	1.37±0.36 <sup>Aa</sup>	1.29±0.48 <sup>Aa</sup>	20.23±1.50 <sup>Aa</sup>
30	小林窗	1.18±0.79 <sup>Aa</sup>	3.48±1.08 <sup>Ca</sup>	2.36±1.74 <sup>Aa</sup>	8.19±2.42 <sup>Ca</sup>	2.11±0.13 <sup>ABab</sup>	3.25±0.39 <sup>Aa</sup>	0.08±0.05 <sup>Aa</sup>	0.92±0.28 <sup>Aa</sup>	2.07±1.53 <sup>Aa</sup>	8.23±2.38 <sup>Ca</sup>
	中林窗	0.48±0.24 <sup>Ba</sup>	5.22±1.19 <sup>Ca</sup>	1.01±0.49 <sup>ABa</sup>	11.78±2.55 <sup>Ba</sup>	2.27±0.07 <sup>ABa</sup>	3.05±0.19 <sup>Aa</sup>	0.04±0.02 <sup>ABa</sup>	1.27±0.42 <sup>Aa</sup>	0.89±0.43 <sup>ABa</sup>	11.56±2.69 <sup>BCa</sup>
	大林窗	0.70±0.44 <sup>ABa</sup>	4.11±0.32 <sup>Ba</sup>	1.35±0.86 <sup>Aa</sup>	9.63±0.34 <sup>Ba</sup>	2.04±0.08 <sup>ABb</sup>	3.49±0.41 <sup>Aa</sup>	0.04±0.03 <sup>Aa</sup>	1.32±0.15 <sup>Aa</sup>	1.18±0.75 <sup>Aa</sup>	10.16±0.75 <sup>Ba</sup>
	对照	1.50±1.04 <sup>Aa</sup>	3.81±0.84 <sup>Ca</sup>	2.59±1.62 <sup>Aa</sup>	8.59±2.05 <sup>Ca</sup>	1.93±0.12 <sup>Ab</sup>	3.04±0.07 <sup>Aa</sup>	0.13±0.13 <sup>Aa</sup>	0.98±0.22 <sup>Ba</sup>	2.27±1.43 <sup>Aa</sup>	8.51±2.02 <sup>CDa</sup>
50	小林窗	1.26±0.76 <sup>Aa</sup>	4.19±1.21 <sup>Ca</sup>	1.79±1.12 <sup>Aa</sup>	8.85±2.63 <sup>Ca</sup>	1.49±0.16 <sup>Ba</sup>	2.26±0.09 <sup>Bb</sup>	0.08±0.05 <sup>Aa</sup>	0.28±0.07 <sup>Ba</sup>	1.54±0.97 <sup>Aa</sup>	7.76±2.30 <sup>Ca</sup>
	中林窗	1.31±0.44 <sup>Aa</sup>	4.35±0.89 <sup>Ca</sup>	1.86±0.43 <sup>Aa</sup>	10.33±1.87 <sup>Ba</sup>	1.57±0.15 <sup>Aa</sup>	2.56±0.07 <sup>Ba</sup>	0.10±0.05 <sup>Aa</sup>	0.30±0.06 <sup>Ca</sup>	1.60±0.37 <sup>Aa</sup>	9.10±1.64 <sup>Ca</sup>
	大林窗	1.14±0.57 <sup>Aa</sup>	2.61±1.16 <sup>Ba</sup>	1.52±0.69 <sup>Aa</sup>	5.75±2.72 <sup>Ba</sup>	1.44±0.11 <sup>Ba</sup>	2.38±0.18 <sup>Bab</sup>	0.07±0.04 <sup>Aa</sup>	0.23±0.16 <sup>Ba</sup>	1.31±0.59 <sup>Aa</sup>	5.11±2.47 <sup>Ba</sup>
	对照	1.05±0.34 <sup>Aa</sup>	3.56±0.90 <sup>Ca</sup>	1.15±0.73 <sup>Aa</sup>	8.04±2.12 <sup>Ca</sup>	1.36±0.03 <sup>Ba</sup>	2.43±0.02 <sup>Bab</sup>	0.06±0.01 <sup>Aa</sup>	0.26±0.04 <sup>Ca</sup>	0.98±0.07 <sup>Aa</sup>	7.09±1.85 <sup>Da</sup>
顶级群落	对照	1.05±0.34 <sup>A</sup>	7.50±2.47 <sup>B</sup>	1.40±0.43 <sup>A</sup>	17.15±5.43 <sup>AB</sup>	1.43±0.04 <sup>B</sup>	2.47±0.22 <sup>B</sup>	0.07±0.03 <sup>A</sup>	0.52±0.19 <sup>C</sup>	1.20±0.37 <sup>A</sup>	15.11±4.80 <sup>AB</sup>

## 2.5 不同林窗年龄、面积大小凋落物持水率随浸泡时间变化

通过对不同林窗、面积大小凋落物持水率分析(图 1), 半分解层持水率要高于未分解层, 在未分解层, 各林窗年龄段持水率均高于对照, 其中大林窗和中林窗持水率较好, 各林窗年龄段持水率在 1 h 内平稳, 2 h 逐渐增大。半分解层中, 各林窗年龄段凋落物持水率表现为同样的规律, 大林窗和中林窗持水率较好, 50 a 不同面积林窗凋落物持水率接近且变化趋势一致。

## 2.6 土壤与凋落物持水特性相关性分析

相关性分析结果显示(图 2), 土壤与凋落物持水特性存在显著相关性。土壤田间持水量与毛管孔隙度、质量持水量、毛管持水量、凋落物未分解最大持水率、半分解自然持水量呈显著正相关, 与土壤毛管孔

隙度、凋落物半分解自然持水量相关系数( $R$ )分别为 0.91, 0.65。凋落物半分解自然持水量与半分解现存量、有效拦蓄量呈显著正相关, 相关系数分别为 0.55, 0.59。表明土壤毛管孔隙越大, 土壤保水能力越强; 凋落物半分解自然持水量越大, 有效拦蓄量越大, 对土壤持水性影响越大, 更有利于植物生长。

## 3 讨论

### 3.1 林窗年龄、面积大小及其交互作用对土壤—凋落物持水特性的影响

林窗大小的不同, 影响林内光照和温度的变化, 增加林下生境异质性, 改变着土壤和凋落物的水源涵养能力<sup>[6]</sup>, 较多研究表明中林窗能提高土壤持水性, 适合林下幼苗更新<sup>[11, 20]</sup>。但相关研究对土壤持水与林窗面积大小的关系并不明确<sup>[21]</sup>, 苏薇<sup>[18]</sup>研究发现不同

林窗大小赤松土壤持水具有显著性差异,而刺槐差异性不显著,C. E. Prescott 等<sup>[22]</sup>研究发现土壤水分与林窗大小之间呈负相关关系,杨婷惠等<sup>[11]</sup>对云杉人工林研究发现,林窗能改善土壤结构,但林窗大小对土壤持水性能没有显著性影响。本研究中林窗大小对土壤和凋

落物持水性影响不显著,可能与杉木凋落物分解速率缓慢<sup>[23]</sup>,以及研究区域林下植被多样性丰富,植被覆盖降低了光照和湿度对土壤和凋落物的影响有关<sup>[24]</sup>。林窗随着时间的推移,林窗内植被的快速更新与生长,林内微生境也逐渐恢复到形成林窗前的状态<sup>[25]</sup>。

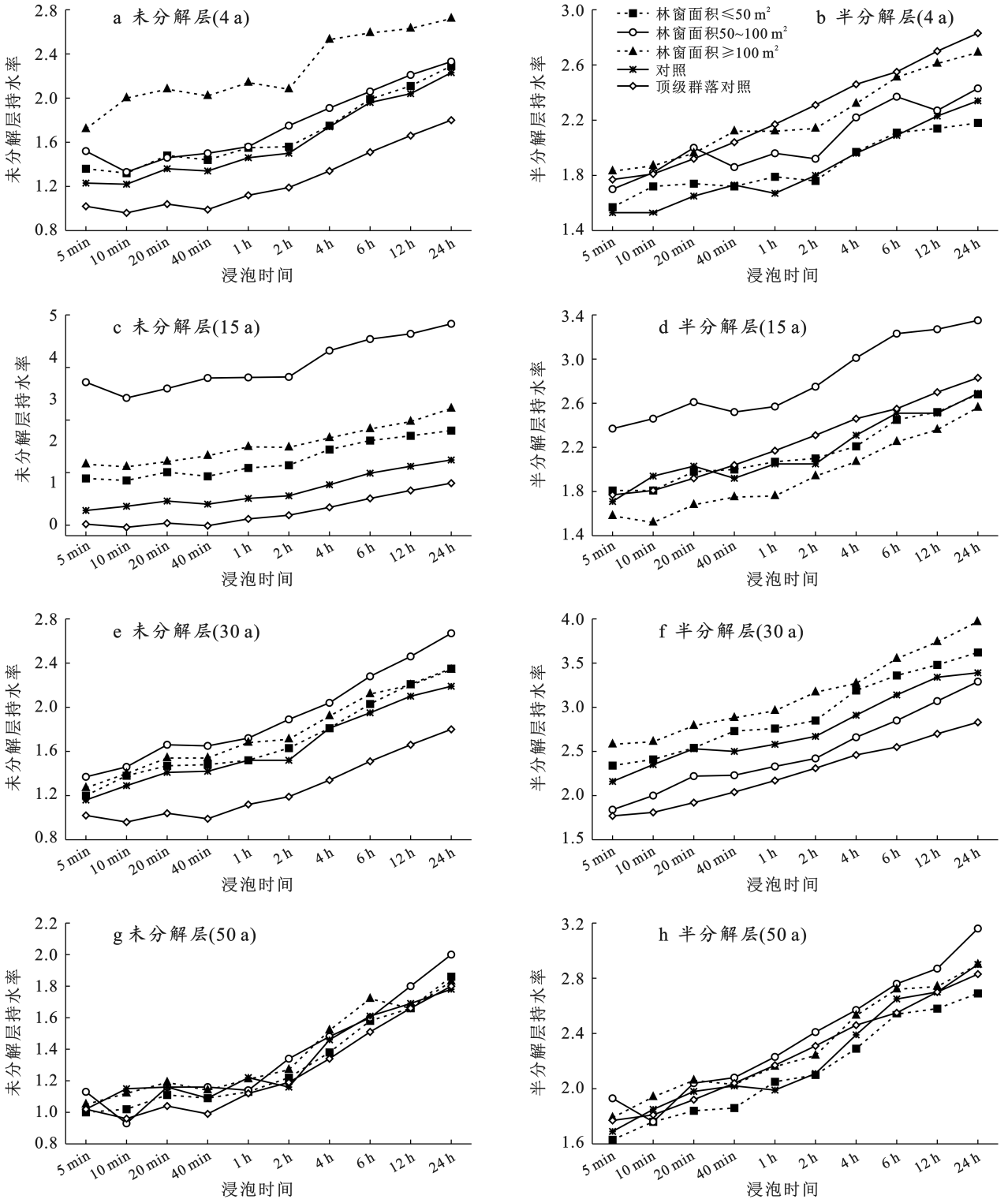
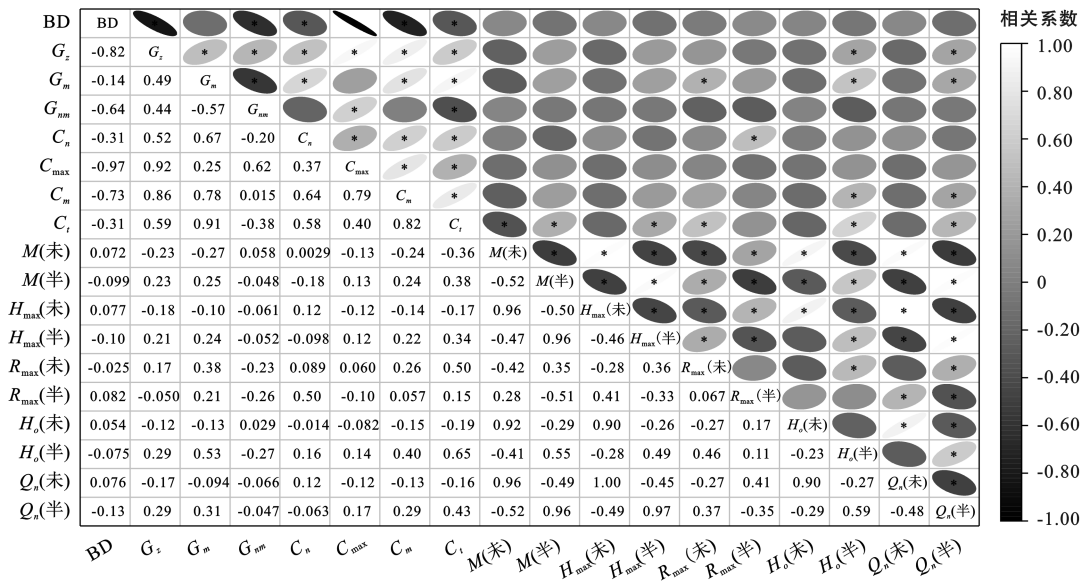


图 1 不同林窗年龄、面积大小的凋落物持水率随浸泡时间变化

Fig.1 Changes of litter water holding rate with soaking time of different forest gap age and area size



注: \* 表示  $p \leq 0.05$ ; 椭圆右倾表示正相关, 左倾表示负相关。

图 2 土壤与凋落物持水特性相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of water holding characteristics between soil and litters

本研究利用时空替代法选用 5 个杉木林窗年龄段对比林窗内土壤—凋落物持水特性, 发现林窗年龄对土壤和凋落物的持水性影响有显著影响。这可能是随着林窗年龄的增加, 林内环境异质性不断积累, 土壤微生物、动物、更新植被凋落物及根系作用差异导致, 其次可能是研究区域内小气候有所差异, 如降雨等因素的干扰所致<sup>[26]</sup>。林窗年龄与林窗大小的交互作用对土壤及凋落物的持水特性无显著性影响, 表明研究区域杉木林窗幼苗更新时可暂不考虑林窗大小, 这与对马尾松的研究结果不同<sup>[2]</sup>, 可能是马尾松林窗面积(100~1 600 m<sup>2</sup>)差异大, 林内生境异质性更高, 造成对土壤蓄水能力的影响更大有关。

### 3.2 不同林窗年龄、面积大小的杉木林土壤及凋落物持水特性及相关性分析

本研究中各林窗年龄中林窗和对照间土壤持水特性有显著差异, 50 a 中林窗持水性最差, 4 a 中林窗最好。主要是因为 50 a 林窗植物多样性丰富, 生态环境稳定, 种间竞争小; 4 a 林窗植物种间竞争大, 灌草丛根系改善土壤结构, 提升蓄水能力<sup>[27]</sup>。C. C. Kern 等<sup>[20]</sup>研究表明中林窗下光照、温湿度适宜, 林窗内植物更加多样性, R. Dirzo 等<sup>[28]</sup>发现草本植物在林窗初期 Shannon-Weaver 多样性指数明显更高。随着时间的推移, 杉木林窗后期林窗内植物从土壤中吸收的水分更多, 蒸腾作用与对照非林窗相比也更加明显。与多数研究一致<sup>[23, 29]</sup>, 杉木凋落物半分解现存量、持水量、拦蓄量高于未分解, 可能半分解层结构疏松多孔且有腐殖质形成, 能够吸持更多的水分。4 a

杉木林窗对照与顶级群落凋落物持水特性接近, 表明林窗演替后期凋落物持水性恢复到形成林窗前状态, 这与李羽翎等<sup>[25]</sup>研究结果相一致。森林凋落物分解受多种因素影响<sup>[30]</sup>, 其凋落物持水能力也受多种因素影响, 包括树种组成、发育阶段、垂直结构以及凋落物分解程度等因素<sup>[31]</sup>, 本研究表明对照处理凋落物未分解持水性更好, 而 15 a 中林窗凋落物半分解现存量、最大持水量、最大持水率、自然持水量、有效拦蓄量优于其他各处理。

凋落物的输入可有效改善土壤的水文效应<sup>[32]</sup>, 本研究也发现凋落物半分解自然持水量与土壤毛管孔隙度、田间持水量、毛管持水量呈正向相关。说明半分解凋落物可改善土壤毛管孔隙度, 进而增加土壤持水量和凋落物拦蓄量, 提高了植物需水供给, 这与赵敏等<sup>[33]</sup>研究一致, 通过增加凋落物的拦蓄能力, 提升杉木林窗内土壤对水分的储存能力。

### 3.3 不同林窗年龄、面积大小凋落物持水率随浸泡时间变化

持水率是表征凋落物持水能力的重要指标之一, 通过浸泡时间的变化可以评测凋落物持水能力<sup>[34]</sup>。各林窗年龄段凋落物持水率在 1 h 内表现较为平稳, 而在 2 h 后持水能力有急剧增大的趋势, Shi Rui 等<sup>[35]</sup>研究表明天然次生林杉木凋落物持水率在 0.5 h 至 10 h 内持水率急剧上升, 而 12 h 后持水率几乎没有变化。陈进等<sup>[34]</sup>研究表明马尾松林在 0.25 h 内凋落物持水率增加得最快, 而后逐渐趋于饱和状态。本研究中林窗半分解层持水率高于未分解层, 持水率均

优于天然次生杉木林、马尾松林,表明杉木凋落物持水能力较好,不饱和状态持续时间长。研究还发现 50 a 林窗不同大小凋落物持水率变化趋势一致,中林窗和大林窗持水率较好,有利于保持水分,降低土壤侵蚀,改善土壤结构<sup>[36]</sup>。

## 4 结论

(1) 对比分析表明,4 a 中林窗土壤持水性最佳,对照处理凋落物未分解持水性较好,15 a 中林窗半分解凋落物现存量、最大持水量、最大持水率、自然持水量和有效拦蓄量优于其他处理。

(2) 杉木各林窗年龄凋落物随浸泡时间变化,持水率以中林窗、大林窗表现最好,半分解层持水能力强于未分解层。

(3) 凋落物半分解自然持水量与土壤保水能力和有效拦蓄量呈显著正相关,其自然持水量越大,越有利于植物生长。

## 参考文献 (References)

- [1] 葛乐,虞木奎,成向荣,等.杉木林下套种不同树种对土壤改良效应初探[J].土壤通报,2011,42(4):948-952.  
Ge Le, Yu Mukui, Cheng Xiangrong, et al. Preliminary studies on improvement effect of interplantation different trees in Chinese-fir forest on soil physical and chemical properties [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011,42(4):948-952.
- [2] 李天玲.马尾松林窗年龄、面积对植物多样性、土壤理化性质及油樟化学计量特征的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2020.  
Li Tianling. Effects of gap age and area of *Pinus massoniana* on plant diversity, physical and chemical properties of soil and stoichiometric characteristics of camphor [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [3] 袁媛,徐克芹,曾平生,等.亚热带生态系统 5 种修复树种的光合特征[J].东北林业大学学报,2024,52(5):28-33.  
Yuan Yuan, Xu Keqin, Zeng Pingsheng, et al. Photosynthetic characteristics of five restoration tree species in subtropical ecosystems [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(5):28-33.
- [4] 林庆凯.天童常绿阔叶林林窗对植物群落更新和物种多样性的影响[D].上海:华东师范大学,2017.  
Lin Qingkai. Effects of gaps on the plants regeneration and species diversity in Tiantong evergreen broad-leaved forest [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [5] 段仁燕,王孝安,吴甘霖.林窗干扰与森林群落演替[J].广西植物,2005,25(5):419-423.  
Duan Renyan, Wang Xiaolan, Wu Ganlin. Gap disturbance and forest community succession [J]. Guihaia, 2005,25(5):419-423.
- [6] 兰雪.马尾松林窗特征及其对土壤生态功能的影响[D].贵州贵阳:贵州大学,2022.  
Lan Xue. Gap Characteristics of gap in *Pinus massoniana* and its effects on soil ecological function [D]. Guiyang Guizhou: Guizhou University, 2022.
- [7] 刘昌,路琦,汪生财,等.林窗对黄槿幼树空间分布及生长发育的影响[J].北京林业大学学报,2024,46(2):9-17.  
Liu Chang, Lu Qi, Wang Shengcai, et al. Effects of forest gaps on spatial distribution and growth of *Phellodendron amurense* saplings [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024,46(2):9-17.
- [8] 刘海英,蒋仲龙,姚任图,等.木荷林窗微环境特征及幼苗更新研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2022,42(5):56-63.  
Liu Haiying, Jiang Zhonglong, Yao Rentu, et al. Micro-environment characteristics and dynamic regeneration of seedlings in *Schima superba* forest gaps [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2022,42(5):56-63.
- [9] Yang X, Long Y, Sarkar B, et al. Influence of soil microorganisms and physicochemical properties on plant diversity in an arid desert of Western China [J]. Journal of Forestry Research, 2021,32(6):2645-2659.
- [10] 曾洪,吴雨茹,钟欣艺,等.华西南雨屏带马尾松人工林林窗大小对植物多样性与土壤理化性质的影响[J].四川农业大学学报,2023,41(2):185-192.  
Zeng Hong, Wu Yuru, Zhong Xinyi, et al. Effects of different gap sizes of *Pinus massoniana* plantation on plant diversity and soil physicochemical properties in the West China rain zone [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023,41(2):185-192.
- [11] 杨婷惠,祁凯斌,黄俊胜,等.林窗式疏伐对云杉人工林土壤持水性能的影响[J].应用与环境生物学报,2018,24(5):1171-1178.  
Yang Tinghui, Qi Kaibin, Huang Junsheng, et al. Effects of different sizes of simulated gaps on the soil water-holding capacity of a *Picea asperata* plantation [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018,24(5):1171-1178.
- [12] 褚欣,潘萍,郭丽玲,等.不同密度飞播马尾松林凋落物及土壤持水性能比较分析[J].浙江农林大学学报,2017,34(5):808-815.  
Chu Xin, Pan Ping, Guo Liling, et al. Comparing water-holding capacity in forest litter and soils for an aerially seeded *Pinus massoniana* plantation with different stand densities [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2017,34(5):808-815.
- [13] Putuhena W M, Cordery I. Estimation of interception

- capacity of the forest floor[J]. *Journal of Hydrology*, 1996,180(1-4):283-299.
- [14] 杨俊玲.几种典型杉木人工林凋落物及土壤持水能力研究[D].北京:北京林业大学,2013.  
Yang Junling. Study on litter and soil water holding capacity of several typical Chinese fir plantations [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [15] 刘效东,乔玉娜,周国逸,等.鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J]. *林业科学*, 2013, 49(9): 8-15.  
Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi, et al. Water-holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013,49(9):8-15.
- [16] 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]. *浙江农林大学学报*, 2021,38(2):320-328.  
Jian Yongqi, Wu Jiasen, Sheng Weixing, et al. Effects of thinning and stand types on litter stock and soil water-holding capacity [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2021,38(2):320-328.
- [17] 王景燕,胡庭兴,龚伟,等.川南坡地不同退耕模式土壤及枯落物持水特性[J]. *四川农业大学学报*, 2012,30(1):24-29.  
Wang Jingyan, Hu Tingxing, Gong Wei, et al. Water-holding characteristics of soil and litter in several slope farmlands with different de-farming patterns in Southern Sichuan Province of China [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2012,30(1):24-29.
- [18] 苏薇.林窗对赤松和刺槐林凋落物—土壤生态化学计量特征的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2023.  
Su Wei. Effects of forest gaps on the ecological chemometric characteristics of litter-soil in *Pinus densiflora* Sieb. and *Robinia pseudoacacia* L. forests [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [19] Watt A. Pattern and process in the plant community [J]. *Journal of Ecology*, 1947,35:1-22.
- [20] Kern C C, D'Amato A W, Strong T F. Diversifying the composition and structure of managed, late-successional forests with harvest gaps: What is the optimal gap size? [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 304: 110-120.
- [21] 张明锦,张健,纪托未,等.林窗对凋落物分解过程中细菌群落结构和多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8):1287-1294.  
Zhang Mingjin, Zhang Jian, Ji Tuowei, et al. Influence of forest gap on bacterial community structure and diversity during litter decomposition [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015,24(8):1287-1294.
- [22] Prescott C E, Hope G D, Blevins L L. Effect of gap size on litter decomposition and soil nitrate concentrations in a high-elevation spruce fir forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003,33(11):2210-2220.
- [23] 梁锋娜,张锦新,沈亚芝,等.森林凋落物持水性影响因素分析[J]. *热带农业工程*, 2019,43(1):101-102.  
Liang Fengna, Zhang Jinxin, Shen Yazhi, et al. Analysis on the water holding capacity of forest litter and its influencing factors [J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2019,43(1):101-102.
- [24] 金鹏,徐明,冉富菊,等.森林光环境特征及其生态作用[J]. *山地农业生物学报*, 2023,42(2):38-47.  
Jin Peng, Xu Ming, Ran Fujun, et al. Characteristics of forest light environment and its ecological effects [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2023,42(2):38-47.
- [25] 李羽翎,张广奇.林窗定义及林窗特征测定方法研究进展[J]. *世界林业研究*, 2021,34(5):58-63.  
Li Yuling, Zhang Guangqi. Forest gap definition and forest gap characteristics measurement methods [J]. *World Forestry Research*, 2021,34(5):58-63.
- [26] 王卓敏,薛立.林窗效应研究综述[J]. *世界林业研究*, 2016,29(6):48-53.  
Wang Zhuomin, Xue Li. A review on effects of forest gap [J]. *World Forestry Research*, 2016,29(6):48-53.
- [27] 巢林,洪滔,李键,等.不同林龄、径级杉木人工林种内竞争规律[J]. *浙江农林大学学报*, 2015,32(3):353-360.  
Chao Lin, Hong Tao, Li Jian, et al. Intraspecific competition in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different age and diameter classes [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2015,32(3):353-360.
- [28] Dirzo R, Horvitz C C, Quevedo H, et al. The effects of gap size and age on the understorey herb community of a tropical Mexican rain forest [J]. *The Journal of Ecology*, 1992,80(4):809.
- [29] 张瑛,徐庆,高德强,等.湖南会同不同林分类型杉木人工林凋落物水文效应[J]. *林业科学研究*, 2021,34(6): 81-89.  
Zhang Ying, Xu Qing, Gao Deqiang, et al. Hydrological effects of litters in different types of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Huitong of Hunan, China [J]. *Forest Research*, 2021,34(6):81-89.
- [30] 汪星星,廖文海,许祖元,等.森林凋落物分解影响因素的研究进展[J]. *北方园艺*, 2022(4):126-132.  
Wang Xingxing, Liao Wenhai, Xu Zuyuan, et al. Research progress of influencing factors affecting forest litter decomposition [J]. *Northern Horticulture*, 2022(4):126-132.

- 2024,43(3):68-75.
- [22] 董育公.陕北黄土高原植物群落物种多样性特征分析[J].陕西农业科学,2024,70(6):58-62.  
Dong Yugong. Analysis of species diversity characteristics of plant communities in Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2024,70(6):58-62.
- [23] 张宝琦,王忠禹,杨艳芬,等.黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能[J].水土保持通报,2019,39(4):76-81.  
Zhang Baoqi, Wang Zhongyu, Yang Yanfen, et al. Accumulation and water-holding capacity of typical shrub woodland litters in loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):76-81.
- [24] 张益望.黄土高原半干旱区山杏种群生长与水分生态特性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2006.  
Zhang Yiwang. Research on the growth and water ecological characteristics of mountain almond populations in the semi-arid region of the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2006.
- [25] 韩蕊莲,侯庆春.山桃山杏苗木耗水特性研究[J].西北植物学报,1996,16(6):92-94.  
Han Ruilian, Hou Qingchun. Study on water consumption characteristics of mountain peach and mountain apricot seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1996,16(6):92-94.
- [26] 邓仕坚,张家武,陈楚莹,等.不同树种混交林及其纯林对土壤理化性质影响的研究[J].应用生态学报,1994,5(2):126-132.  
Deng Shijian, Zhang Jiawu, Chen Chuying, et al. Effects of mixed forests of different tree species and pure forests on soil physical and chemical properties [J]. Applied Ecology, 1994,5(2):126-132.
- [27] 张强.辽西地区油松栎混交林与油松纯林枯落物含水量及过火试验研究[J].内蒙古林业调查设计,2023,46(4):26-28.  
Zhang Qiang. Water content and fire test of litter in *Pinus tabulaeformis* and *Quercus acutissima* mixed forest and *Pinus tabulaeformis* pure forest in Western Liaoning Province [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2023,46(4):26-28.
- [28] 何建东.沙棘在干旱山区水土保持作用的调查[J].现代园艺,2013(18):12.  
He Jiandong. Investigation on the role of sea buckthorn in soil and water conservation in arid mountainous area [J]. Xiandai Horticulture, 2013(18):12.
- [29] 艾彪,黄云,朱元皓,等.赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2021,41(1):197-205.  
Ai Biao, Huang Yun, Zhu Yuanhao, et al. Evaluation of water conservation capacity of litter and soil layer in typical forest stands in hilly region of Southern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):197-205.
- [30] 李开凤.不同刺槐混交林对土壤水分的影响[J].水土保持通报,2024,44(1):12-16.  
Li Kaifeng. Effects of different *Quercus acutissima* mixed forests on soil water conservation in Karst Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):12-16.
- [31] 孙浩,刘晓勇,何齐发,等.修河上游流域4种森林类型的水源涵养功能评价[J].水土保持研究,2017,24(4):337-341.  
Sun Hao, Liu Xiaoyong, He Qifa, et al. Assessments of four types of forests on soil water conservation functions in the upper reaches of Xiu River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(4):337-341.
- [32] 李鹏,陈璇,杨章旗,等.不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):368-377.  
Li Peng, Chen Xuan, Yang Zhangqi, et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):368-377.
- [33] 赵敏,戴全厚,严友进,等.喀斯特山地典型植被类型凋落物和土壤水文效应[J].水土保持研究,2024,31(1):241-249.  
Zhao Min, Dai Quanhou, Yan Youjin, et al. Litter and soil hydrological effects of typical vegetation types in
- [34] 陈进,徐明,邹晓,等.贵阳市不同林龄马尾松林凋落物储量及持水特性[J].水土保持研究,2018,25(6):146-151.  
Chen Jin, Xu Ming, Zou Xiao, et al. Litter layer reserve and water holding capacity of *Pinus massoniana* in different successional stages in Guiyang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(6):146-151.
- [35] Shi Rui, Li Biao, Liu Shaoxiong, et al. Water holding characteristics of litters from different ecological public welfare forest types [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering. December 20-21, 2015. Phuket, Thailand. Paris, France: Atlantis Press, 2015:55-59.
- [36] 李开凤.不同叶形凋落物层持水能力及其影响因素研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2021.  
Li Kaifeng. Study on the water holding capacity of different leaf litter layers and its influencing factors [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2021.

(上接第 53 页)