北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

透光抚育强度对长白山“栽针保阔”林分凋落物截留和土壤蓄水动态的影响

姬文慧 牟长城 崔雅如 郝鑫海

Effects of release cutting intensity on dynamics of litter interception and soil water storage in “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand in Changbai Mountain, northeastern China

Ji Wenhui, Mu Changcheng, Cui Yaru, Hao Xinhai

引用本文:
姬文慧, 牟长城, 崔雅如, 郝鑫海. 透光抚育强度对长白山“栽针保阔”林分凋落物截留和土壤蓄水动态的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):61–72. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240106
Ji Wenhui, Mu Changcheng, Cui Yaru, Hao Xinhai. Effects of release cutting intensity on dynamics of litter interception and soil water storage in “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand in Changbai Mountain, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):61–72. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240106

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240106

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

透光抚育强度对小兴安岭“栽针保阔”红松林碳储量的影响

Effects of release cutting intensity on the carbon storage of Korean pine forests by planting conifer and reserving broadleaved trees in Xiaoxing’an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(10): 54–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200361

土壤紧实度和凋落物覆盖对城市森林土壤持水、渗水能力的影响

Effects of soil compactness and litter covering on soil water holding capacity and water infiltration ability in urban forest

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 102–111. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190476

长期施氮和降水减少对长白山阔叶红松林凋落物量的影响

Effects of long–term nitrogen addition and precipitation decreasing on the litterfall production of broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains of northeastern China.

北京林业大学学报, 2017, 39(4): 29–37. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160171

温带云冷杉混交林凋落物养分的空间分布特征

Spatial distribution characteristics of litter nutrients in temperate spruce–fir mixed forests

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 73–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200065

抚育间伐对小兴安岭天然针阔混交次生林生境的影响

Effects of thinning on the habitat of natural mixed broadleaf–conifer secondary forest in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2017, 39(10): 1–12. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170187

抚育采伐对针阔混交林林分结构及物种多样性的影响

Effects of tending felling on stand structure and species diversity of mixed coniferous and broadleaved forest

北京林业大学学报, 2019, 41(5): 148–158. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190018

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240106

透光抚育强度对长白山“栽针保阔”林分凋落物截留和土壤蓄水动态的影响

姬文慧　牟长城　崔雅如　郝鑫海
（东北林业大学生态研究中心，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】“栽针保阔”是恢复东北温带地带性顶极植被——阔叶红松林的重要途径，透光抚育能够加速其演替进程，但对其水文生态功能的影响尚不明确。本研究旨在探讨透光抚育强度对“栽针保阔”林分凋落物截留和土壤蓄水这两个关键水文生态过程的影响规律。**【方法】**采用野外连续取样与室内浸泡法，测定长白山不同透光抚育强度（对照、轻度、中度、强度和全透光抚育）中期“栽针保阔”林分（次生林内栽植红松 42 年，透光抚育 26 年）生长季各月凋落物现存量、组成、持水过程、最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量和土壤蓄水量，揭示透光抚育强度对其凋落物截留量和土壤蓄水量生长季月动态过程的影响规律及机制。**【结果】**（1）透光抚育 26 年后，中度和全透光抚育使其生长季月均凋落物现存量（3.80 ~ 5.41 t/hm^2）增幅达 27.7% ~ 42.4%（$p < 0.05$）。仅全透光抚育改变了凋落物组成，未分解层与半分解层占比由对照组的 3∶2 转变为 1∶1，且凋落物主体由阔叶（53.5%）转变为针叶（56.1%）。此外，中度和强度透光抚育显著削弱了凋落物现存量在生长季各月份之间的波动性。（2）全透光抚育显著提高了凋落物月均最大持水量（12.91 ~ 17.83 t/hm^2）、最大拦蓄量（6.37 ~ 8.46 t/hm^2）、有效拦蓄量（4.43 ~ 5.80 t/hm^2）和土壤蓄水量，增幅分别为 22.8%、22.8%、17.5% 和 17.9%；而轻度透光抚育仅显著提高了凋落物的有效拦蓄量（17.9%）。（3）各透光抚育强度虽未改变凋落物最大持水量生长季动态过程（以 6 月和 10 月为峰值的双峰型），但全透光抚育增强了其在雨季（7—8 月）的最大持水量（37.3% ~ 45.7%），而轻度和中度透光抚育使其在 7—9 月趋于恒定。各透光抚育强度均增加了凋落物最大拦蓄量和有效拦蓄量的一个 5/6 月春季峰值，并使两者生长季月动态过程由对照的单峰型转化为双峰型。此外，各透光抚育强度均改变了土壤蓄水量生长季动态过程的总体规律（双峰转化为三峰），并改变了峰值大小（全透光抚育增大 7 月峰值约 1/3，轻度抚育强度增大 10 月峰值约 1/4）。（4）生长季凋落物的最大持水量主要受凋落物量促进；最大拦蓄量主要受凋落物量促进和自然含水率抑制；有效拦蓄量仅受自然含水率抑制；土壤蓄水量受凋落物最大持水量促进。**【结论】**透光抚育 26 年后，全透光抚育提高了凋落物量，改变了凋落物组成，进而增强其凋落物截留（1/6 ~ 1/5）和土壤蓄水能力（约 1/6），显著提升了对降水调节和土壤水源涵养功能的作用。因此，全透光抚育是一种适宜的东北温带顶极植被恢复经营方式。

关键词：“栽针保阔”林分；凋落物现存量与组成；凋落物截留；土壤蓄水；透光抚育强度
中图分类号：S715.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)07−0061−12
引文格式：姬文慧，牟长城，崔雅如，等. 透光抚育强度对长白山“栽针保阔”林分凋落物截留和土壤蓄水动态的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：61−72. Ji Wenhui, Mu Changcheng, Cui Yaru, et al. Effects of release cutting intensity on dynamics of litter interception and soil water storage in “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand in Changbai Mountain, northeastern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 61−72.

Effects of release cutting intensity on dynamics of litter interception and soil water storage in “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand in Changbai Mountain, northeastern China

Ji Wenhui　Mu Changcheng　Cui Yaru　Hao Xinhai
(Center for Ecological Research, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

收稿日期: 2024−04−11　**修回日期:** 2024−05−27
基金项目:“十四五”国家重点研发计划（2022YFF1300502），东北林业大学碳中和科学基金项目（HZX220100003）。
第一作者: 姬文慧。主要研究方向：恢复生态学。Email：jiwenhui98@163.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学生态研究中心。
责任作者: 牟长城，教授，博士生导师。主要研究方向：湿地生态学。Email：muccjs@163.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] "Planting conifer and preserving broadleaved tree" (PCPBT) is an effective way to restore broadleaved Korean pine forest of temperate zone climax vegetation in northeastern China. Release cutting can speed up the succession process, however the impact on its hydrological and ecological functions is still unclear. The purpose of this paper is to explore the influence of release cutting intensity on the two key hydrological and ecological processes of litter interception and soil water storage in stand by PCPBT. [**Method**] The litter accumulation, composition structure, litter water holding process, maximum water storage capacity, maximum interception capacity and effective interception capacity were measured by field monthly sampling method and indoor soaking method in stand by PCPBT (42 years of planting Korean pine in secondary forest and 26 years of release cutting) under different release cutting intensities (control, low-intensity release cutting, moderate-intensity release cutting, heavy-intensity release cutting, and full release cutting) during the growing season in Changbai Mountain of northeastern China, to explore the law and mechanism of the influence of release cutting intensity on monthly dynamic process of litter interception and soil water storage in the growing season. [**Result**] (1) After 26 years of release cutting, moderate-intensity release cutting and full release cutting significantly increased the monthly average litter accumulation (3.80−5.41 t/ha) by 27.7%−42.4% ($p < 0.05$) during growing season. Only full release cutting had changed litter composition, in which the ratio of undecomposed layer and semi-decomposed layer was converted from 3∶2 in control to 1∶1, and the main component of litter was changed from broadleaved (53.5%) to coniferous (56.1%). In addition, moderate-intensity release cutting and low-intensity release cutting obviously weakened the fluctuation of litter accumulation between different months of the growing season. (2) Full release cutting significantly increased the average monthly maximum water storage capacity (12.91−17.83 t/ha), maximum interception capacity (6.37−8.46 t/ha), effective interception capacity (4.43−5.80 t/ha) and soil water storage capacity of litter by 22.8%, 22.8%, 17.5% and 17.9%, respectively, low-intensity release cutting significantly increased litter effective interception capacity by 17.9%. (3) The dynamic process of the maximum water storage capacity of litter in the growing season was not changed by each release cutting intensities (bimodal pattern with the peaks in June and October). However, Full release cutting had increased its maximum water storage capacity (37.3% to 45.7%) during rainfall (July to August). However, low-intensity release cutting and moderate-intensity release cutting tended to be constant from July to September. The maximum and effective interception capacity of litter were increased by each release cutting intensities in May/June, and the monthly dynamic process of the both was transformed from unimodal pattern to bimodal pattern during growing season. The overall regularity of dynamic process of soil water storage during the growing season was changed by each release cutting intensities (double peaks transformed into three peaks), and the size of its peak value was changed (full release cutting increased by about 1/3 in July; low-intensity release cutting increased the October peak by about 1/4). (4) The maximum water storage capacity of litter was mainly promoted by accumulation of litter during the growing season. The maximum interception capacity was mainly promoted by litter accumulation and inhibited by natural water content. The effective interception capacity was inhibited only by the natural moisture content. While soil water storage was only promoted by the maximum water storage capacity of litter. [**Conclusion**] Therefore, after 26 years of release cutting, full release cutting increased litter accumulation, changed litter composition structure, and enhanced litter interception ability (about 1/6−1/5) and soil water storage ability (about 1/6) in the growing season, thus enhancing its function of precipitation regulation and soil water conservation. So full release cutting is a more suitable management mode of temperate zone climax vegetation in northeastern China restoration.

Key words: "planting conifer and preserving broadleaved tree" stand; existing amount and composition of litter; litter interception; soil water storage; release cutting intensity

阔叶红松林是我国温带地带性顶极植被，具有蓄积量高、生态功能强和稳定性好等特点，能够满足国家在木材供给、应对气候变化和促进可持续发展等方面的重大战略需求[1]。然而，由于长期过度利

用，原始红松林已退化为次生林和人工林，导致生态系统结构简化、生态功能严重削弱。因此，如何恢复阔叶红松林成为亟待解决的重要问题。20 世纪 80 年代中期，有学者提出“栽针保阔动态经营体系”（即在次生林下栽植红松并保留天然阔叶树），为恢复阔叶红松林提供了理论依据[2]。然而，在实际应用该理论进行恢复实践时，林冠下红松生长缓慢甚至死亡的问题日益凸显。研究表明，透光抚育能够有效促进红松光合作用与生长，进而提高生产力和碳储量[3−4]。然而，透光抚育对阔叶红松林水文生态功能的影响尚不明确[5]，因此有必要对此进行深入系统的研究。

森林在水循环中发挥重要作用[6]。林冠层对降水分配通常被认为是空间降雨再分配的主要途径，也是森林作用于水循环的第一个重要过程[7]。林冠层可将雨水分为截留、穿透雨和树干径流，通常被认为是空间降雨再分配的主要途径，也是森林作用于水循环的第一个重要过程，一直是研究的重点[8]。相比之下，凋落物层的水文生态功能在过去往往被视为次要问题[9]。然而，近年来研究发现，凋落物层是继林冠层之后第二个重要的降水再分配者[10]。与林冠截留相比，凋落物层具有更大的截留能力和更小的蒸发潜力[8]，其截留量可占总降雨量的 1%～70%[11]。凋落物层通过拦截降水、防止土壤侵蚀、延迟或消除地表径流以及减轻土壤蒸发失水等方式，对水文生态过程产生重要影响[12]。此外，凋落物截留受到凋落物厚度、数量、组成结构和降雨周期[13−14]等多种因素的影响。例如，凋落物截留量与凋落物量和降雨强度呈正相关[11]；较厚的凋落物层比薄层具有更强的截留能力[15]。不同树种的凋落物层蓄水能力也存在显著差异，如山毛榉（*Fagus sylvatica*）凋落物层蓄水能力为雪松（*Cedrus deodara*）的 2 倍[16]，阔叶凋落物截留量显著大于针叶[17]。由此可见，凋落物的量和组成均可能对其截留能力产生实质性影响，因此在研究凋落物截留时，需要同时关注凋落物量和组成的变化。此外，近期研究发现，森林冠层物候期和极端气象干扰（如飓风）也能改变凋落物量，进而影响其截留动态过程[18]。这些研究为探讨透光抚育强度对“栽针保阔”红松林水文生态功能的影响奠定了良好基础。

抚育间伐（间伐）是根据林分发育、森林培育目标等，适时适量伐除部分林木，以调整树种组成和林分密度，优化林分结构，改善林木生长条件，促进林木生长的营林措施，包括透光伐、疏伐、生长伐和卫生伐 4 类[19]。间伐通过重新分配降雨，能够显著改变森林的水文功能，如增加森林的穿透雨[20]，减少冠层截留[21]和树干径流[22]，进而提高森林地被物[23]和土壤[24]的蓄水能力。然而，虽近十余年关于间伐对凋落物截留影响的研究逐渐增多，但多集中于量化单层纯林凋落物动态过程方面[25−27]，且得到较为一致的结论：间伐会减少森林凋落物输入量[28−29]。仅有少量研究发现，轻、中度间伐会增加人工纯林凋落物持水能力[23]；间伐能够提高杉木（*Cunninghamia lanceolata*）人工林和栎类混交林的凋落物和土壤持水能力[24,30]。由此可见，这些研究多针对间伐中的疏伐对单层人工林的凋落物截留或土壤持水能力的单一方面，而针对间伐中的透光伐对异龄复层混交林凋落物截留和土壤持水能力的影响研究较为缺乏。由于异龄复层混交林垂直结构的复杂性，上层林木采伐造成的凋落物损失可能会被下层林木生长释放潜力所补偿，因此透光伐对其凋落物截留和土壤持水能力的影响规律可能与单层林存在显著差异。因此，开展透光伐对异龄复层混交林凋落物截留和土壤蓄水这两个关键水文生态过程及其关联性影响的研究具有重要意义。

本研究以我国东北温带长白山中期“栽针保阔”林分为研究对象，通过测定不同透光抚育强度处理，包括对照（栽针未透光）、轻度透光抚育、中度透光抚育、强度透光抚育与全透光抚育，林分在生长季各月份的凋落物形成量、组成、截留和土壤蓄水等水文生态功能指标，揭示透光抚育强度对其凋落物截留和土壤蓄水能力及其生长季动态过程的影响规律及机制，以期为东北温带森林生态多功能提升提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究地点位于长白山林区白河林业局春雷林场（42°01′～42°48′N、127°53′～128°34′E），平均海拔 800 m，坡度 5°～10°。该区域属于温带大陆性季风气候，春季干旱多风，夏季暖热多雨，冬季寒冷少雨，年平均温度为−7～3 ℃，无霜期约为 100 d。年平均降水量为 700～1 400 mm，降水充沛，其中 60%～70% 集中在 6—9 月。地带性土壤为暗棕壤，地带性植被为温带针阔混交林。然而，由于长期过度利用，原始阔叶红松（*Pinus koraiensis*）林已退化为以蒙古栎（*Quercus mongolica*）、春榆（*Ulmus davidiana* var. *japonica*）、紫椴（*Tilia amurensis*）为主的次生林。春雷林场于 1979 年开始在次生林内栽植红松，栽植密度为2 000～2 500 株/hm^2，并于 1996 年（栽植红松 17 年后）开展了不同强度的透光伐试验。截至 2022 年本次调查时，林下已栽植红松 42 年，透光伐

试验已持续 26 年，“栽针保阔”林分已生长演替至中期阶段。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

2022 年，基于早期在春雷林场建立的透光抚育试验林，开展了透光抚育强度对中期“栽针保阔”红松林凋落物截留和土壤蓄水等水文生态功能影响方面的研究工作。试验样地均处于海拔高度相近的东南坡中坡位上（即立地条件相似），设计了 5 种上层采伐处理：对照（CK）、轻度透光抚育（LT）、中度透光抚育（MT）、强度透光抚育（HT）和全透光抚育（FT），分别保留上层林分郁闭度 0.8、0.6、0.4、0.2 和 0。林分类型为次生林内栽植红松形成的混异龄复层针阔混交林。每个处理设置 3 个 30 m × 20 m 的固定标准地（重复 3 次），共计 15 块标准地。各标准地的具体状况如表 1 所示。

1.2.2 凋落物现存量测定

在生长季（5—10 月）每月从标准地中随机选取 5 个 0.5 m × 0.5 m 的小样方（每次取样后做好标记，确保每月所取样方不同）。采用全收获法收集未分解层（来源易识别，形状完整）和半分解层（仍能分辨其来源的碎片）的凋落物。将未分解层进一步细分为针叶、阔叶、枝条，繁殖体（花、果）及其他部分，并使用电子天平分层分类测定凋落物初始质量，随后将其装入信封，置于 75 ℃ 烘箱中烘干至恒质量后称质量。通过计算平均值，得出每公顷凋落物现存量（即凋落物的生物量）。

1.2.3 凋落物持水量的测定

采用室内浸泡法测定生长季不同月份各组分凋落物的持水量。将凋落物装入孔径为 40 目的网袋中，放入盛有清水的容器中浸泡，并分别在 0.25、0.5、1、2、4、6、8、10、12 和 24 h 时称量质量变化。每次称量前，以静置样品不滴水为标准，记录质量变化，研究生长季各组分凋落物的持水过程。根据公式[5]计算得出凋落物的各项吸水指标。

$$\Delta M = M_t - M_0 \tag{1}$$

$$R = (M_t - M_0)/M_0 \times 100\% \tag{2}$$

$$M_{\max} = M_{24} - M_0 \tag{3}$$

$$R_{\max} = (M_{24} - M_0)/M_0 \times 100\% \tag{4}$$

式中：t 为凋落物浸泡时间（h），ΔM 为凋落物浸泡

表 1 样地状况

Tab. 1 Sample plot status

处理	郁闭度/%	公顷蓄积量/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	树种	密度/($株 \cdot hm^{-2}$)	胸高断面积/($m^2 \cdot hm^{-2}$)	平均胸径/cm	胸径范围/cm
CK	71.5	296.8	红松 *Pinus koraiensis*	763	3.66	6.44	2.00 ~ 15.68
			蒙古栎 *Quercus mongolica*	204	13.02	29.60	2.50 ~ 44.66
			春榆 *Ulmus davidiana* var. *japonica*	81	2.83	21.57	11.70 ~ 28.20
			紫椴 *Tilia amurensis*	281	10.32	14.07	2.07 ~ 34.10
LT	72.7	274.1	红松 *Pinus koraiensis*	800	9.89	9.47	2.30 ~ 26.87
			蒙古栎 *Quercus mongolica*	222	11.86	22.10	3.10 ~ 61.60
			春榆 *Ulmus davidiana* var. *japonica*	104	1.42	12.66	2.13 ~ 22.50
			紫椴 *Tilia amurensis*	407	7.79	13.09	2.16 ~ 34.38
MT	71.6	277.2	红松 *Pinus koraiensis*	756	10.24	9.54	2.00 ~ 29.92
			蒙古栎 *Quercus mongolica*	111	12.37	33.60	8.44 ~ 56.66
			春榆 *Ulmus davidiana* var. *japonica*	59	1.64	16.51	11.10 ~ 24.90
			紫椴 *Tilia amurensis*	407	7.33	14.91	2.04 ~ 32.30
HT	69.6	237.1	红松 *Pinus koraiensis*	978	21.72	13.49	2.28 ~ 34.45
			蒙古栎 *Quercus mongolica*	81	8.27	32.77	8.02 ~ 55.70
			春榆 *Ulmus davidiana* var. *japonica*	37	2.65	30.59	27.10 ~ 33.10
			紫椴 *Tilia amurensis*	237	3.47	11.65	2.29 ~ 31.30
FT	68.8	261.6	红松 *Pinus koraiensis*	852	32.41	19.14	2.98 ~ 36.76
			春榆 *Ulmus davidiana* var. *japonica*	281	3.13	12.70	5.20 ~ 26.30
			紫椴 *Tilia amurensis*	44	1.23	17.43	6.70 ~ 25.10

注：CK为对照，LT为轻度透光抚育，MT为中度透光抚育，HT为强度透光抚育，FT为全透光抚育。下同。表中数值表示不同处理3个样地重复的平均值。

t h 后的持水量(t/hm^2)，M_t 为凋落物浸泡后的质量(t/hm^2)，M_0 为凋落物烘干后质量(t/hm^2)，R 为凋落物持水率(%)，M_{max} 为凋落物最大持水量(t/hm^2)，M_{24} 为凋落物浸泡 24 h 的质量(t/hm^2)，R_{max} 为凋落物最大持水率(%)。

1.2.4　凋落物拦蓄量与拦蓄率的测定

凋落物最大拦蓄量、最大拦蓄率、有效拦蓄量和有效拦蓄率的计算公式[5]为

$$W_{max} = W_m M \tag{5}$$

$$W_m = R_{max} - R_0 \tag{6}$$

$$W = (0.85R_{max} - R_0)M \tag{7}$$

$$R_0 = (M_1 - M_0)/M_0 \times 100\% \tag{8}$$

式中：W_{max} 为最大拦蓄量(t/hm^2)，W_m 为最大拦蓄率(%)，M 为凋落物生物量(t/hm^2)，W 为凋落物持水量(t/hm^2)，R_0 为凋落物自然含水率(%)，M_1 为凋落物初始质量(t/hm^2)。

1.2.5　土壤容重、孔隙度和蓄水量的测定

在采集凋落物的同时，采用土壤剖面调查法，按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 的机械分层对凋落物层下土壤进行采样。采用环刀法测定土壤容重和孔隙度等物理性质，并采用烘干法测定土壤蓄水量等指标。土壤蓄水量的计算公式[31]为

$$S = 1\,000hP \tag{9}$$

式中：S 为土壤蓄水量(t/hm^2)，h 为土壤层厚度(cm)，P 为土壤孔隙度(%)。

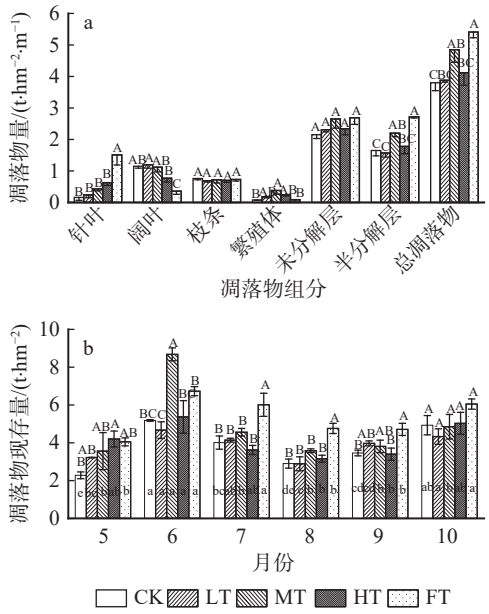
1.3　数据处理

使用 SPSS 23.0 对数据进行统计分析，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析不同组间的差异性($\alpha = 0.05$)。通过 Origin 2021 软件绘制分组散点图，展示凋落物总现存量及各组分持水的动态过程，并利用方程拟合选择 R^2 最高的拟合方程。

2　结果与分析

2.1　透光抚育强度对生长季凋落物现存量、组成和动态的影响

透光抚育强度显著影响了长白山中期“栽针保阔”林分生长季凋落物现存量及其组成(图 1a)。各透光抚育强度处理下，林分的月均凋落物量分布在 3.87 ~ 5.38 t/hm^2，其中，中度和全透光抚育分别相较于对照显著提高了 27.7% 和 42.4%($p < 0.05$)。此外，全透光抚育使凋落物未分解层与半分解层的比例由对照组的约 3∶2(56.6% 和 43.4%)转变为 1∶1(49.7% 和 50.3%)，并导致未分解层中的针叶和阔叶



不同大写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)，不同的小写字母表示不同月份之间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1　长白山不同透光抚育强度下“栽针保阔”林分生长季月均凋落物量(a)和凋落物月动态过程(b)

Fig. 1　Monthly average litter volume (a) and dynamic process of litter (b) during growing season of “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand under different release cutting intensities in Changbai Mountain

占比由对照组以阔叶为主(53.5%)转变为以针叶为主(56.1%)。

透光抚育强度对凋落物量生长季月动态过程也产生了显著影响(图 1b)。对照林分的凋落物现存量在生长季呈现先增后降再增的双峰型波动规律(峰值出现在 6 月和 10 月)，且在 6—8 月呈递减趋势；而各透光抚育强度处理下，林分的凋落物现存量动态仍表现为双峰型(峰值仍出现在 6 月和 10 月)。然而，全透光抚育显著提高了 7、8、9 月的凋落物现存量(增幅为 36.1% ~ 64.1%)，中度和强度透光抚育显著提高了 6 月或 5 月的凋落物量(增幅分别为 67.6% 和 84.2%)。此外，中度和强度透光抚育显著减弱了林分凋落物现存量在生长季各月份之间的波动性。例如，除 6 月峰值外，中度透光抚育下其他月份的凋落物量相近；除 6 月和 10 月两个峰值外，强度透光抚育下其他月份的凋落物量也相近。因此，虽然透光抚育强度未改变凋落物量生长季月动态的双峰型总体规律，但中度和强度透光抚育明显削弱了其在生长季各月份之间的波动性。

2.2　透光抚育强度对凋落物持水过程的影响

不同透光抚育强度并未改变“栽针保阔”林分凋落物持水过程的总体趋势(图 2)。其生长季凋落物现存量及其各组分的持水量(5—10 月平均值)在浸泡的前 2 h 内迅速增加，8 ~ 10 h 后增速趋于缓慢，

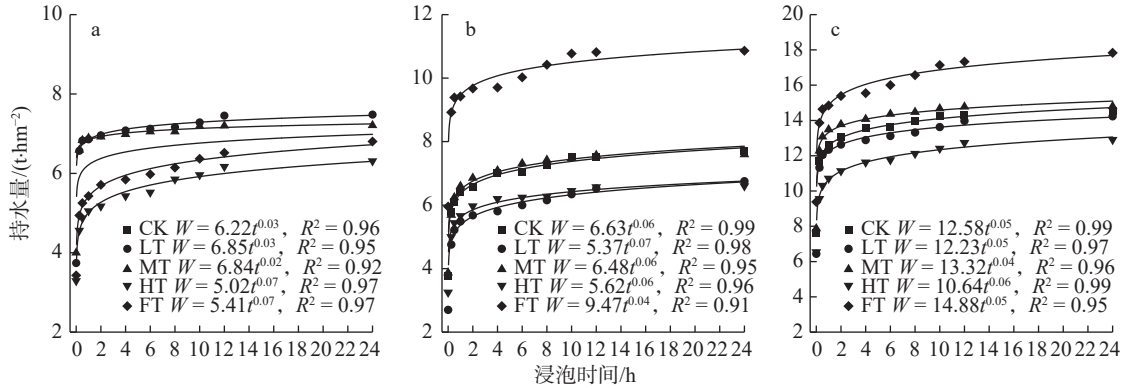


图 2 不同透光抚育强度“栽针保阔”林分凋落物未分解层(a)、半分解层(b)和总量(c)持水过程

Fig. 2 Water holding process of non-decomposed layer (a), semi-decomposed layer (b) and total amount (c) of litter in “planting conifer and preserving broadleaved tree” stand under different release cutting intensities in Changbai Mountain

直至 24 h 后达到最大值。在 0 ~ 24 h 内，凋落物各组分的持水量(W)与浸泡时间(t)均呈显著幂函数关系($W = at^b$, $R^2 \geqslant 0.91$)。然而，全透光抚育显著提高了生长季凋落物现存量在持水中期和末期(12 h 和 24 h)的月均持水量(增幅为 21.2% ~ 22.8%)($p < 0.05$)，从而增强了其凋落物持水过程。

透光抚育强度同样改变了凋落物各组分的持水过程(图 3)。全透光抚育显著提高了生长季凋落物半分解层在持水初期(2 h)、中期和末期的持水量(各月平均值，增幅为 40.9% ~ 47.1%)。然而，全透光抚育不仅显著提高了凋落物未分解层中的针叶在持水初、中、末期的持水量(增幅为 397.0% ~ 481.8%)，还显著降低了阔叶在持水初、中、末期的持水量(降幅为 64.3% ~ 69.8%)。由于针叶和阔叶持水量的变化相互抵消，全透光抚育对未分解层整体的持水过程未产生实质性影响。

2.3 透光抚育强度对生长季凋落物截留量和土壤蓄水量的影响

不同透光抚育强度显著影响了“栽针保阔”林分凋落物的最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量(图 4)。各透光抚育强度处理下，林分生长季的月均最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量依次分布在 12.91 ~ 17.83 t/hm^2、6.37 ~ 8.46 t/hm^2 和 4.43 ~ 5.80 t/hm^2。全透光抚育使其最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量显著提高了 22.8%、22.8% 和 17.5% ($p < 0.05$)；轻度透光抚育仅显著提高其有效拦蓄量(增幅为 17.9%，$p < 0.05$)；而中度和强度透光抚育对其无显著影响。

不同透光抚育强度对其生长季土壤蓄水量同样产生了显著影响(表 2)。各透光抚育处理下，林分生长季的月均土壤蓄水量分布在 755.83 ~ 1 007.50 t/hm^2。全透光抚育显著提高了土壤蓄水量(增幅为 17.9%，$p < 0.05$)，而中度透光抚育则显著降低了土壤蓄水量(降幅为 11.6%，$p < 0.05$)。此外，透光抚育强度还改变了其生长季土壤蓄水量的垂直分布格局(表 2)。对照林分的生长季土壤蓄水量随土壤深度增加而递减(降幅为 12.6% ~ 25.5%，$p < 0.05$)。轻度透光抚育后，土壤底层(20 ~ 30 cm)与表层(0 ~ 20 cm)和中层(10 ~ 20 cm)的蓄水量均无显著差异。中度透光抚育后，土壤底层仅与表层的蓄水量存在显著差异(降幅为 50%，$p < 0.05$)；强度透光抚育和全透光抚育后，各层土壤的蓄水量均无显著差异。因此，随着透光抚育强度增大，生长季土壤蓄水量的垂直分布逐渐由对照的递减型转变为恒定型。

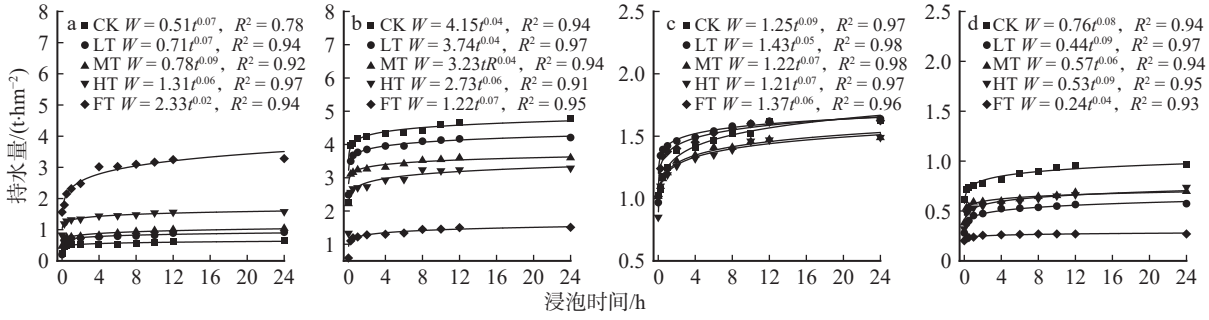


图 3 不同透光抚育强度“栽针保阔”红松林凋落物针叶(a)、阔叶(b)、枝条(c)和繁殖体(d)的持水过程

Fig. 3 Water holding process of coniferous (a), broadleaved (b), branch (c) and reproductive body (d) in the litter of Korean pine forest under different release cutting intensities

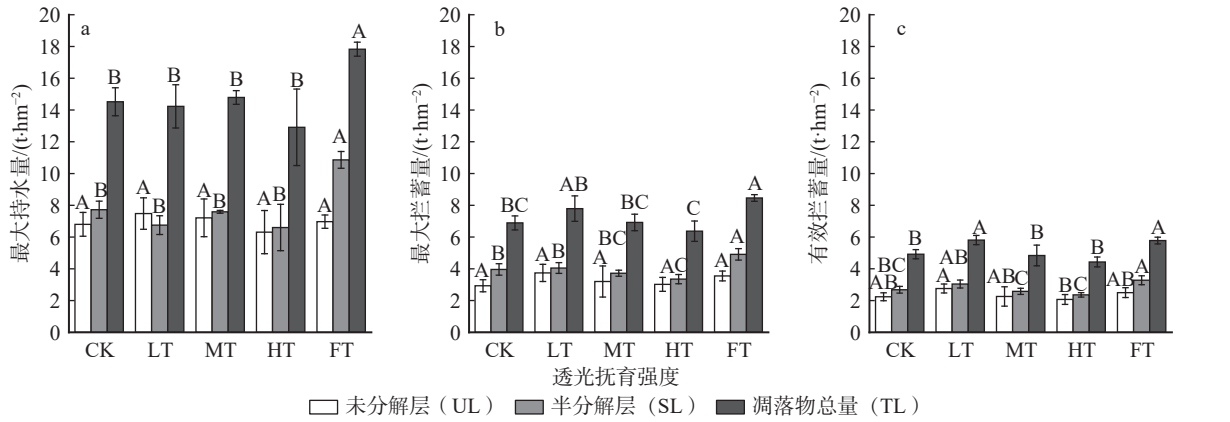


图 4　长白山不同透光抚育强度“栽针保阔”林分凋落物的生长季月均最大持水量(a)、最大拦蓄量(b)和有效拦蓄量(c)

Fig. 4　Monthly average maximum water storage capacity (a), maximum interception capacity (b), and effective interception capacity (c) of litter in PCPBT stand under different release cutting intensities in Changbai Mountain

表 2　长白山不同透光抚育强度下“栽针保阔”林分生长季月均土壤蓄水量　(t·hm^{-2})

Tab. 2　Monthly average soil water storage in growing season of PCPBT stand under different release cutting intensities in Changbai Mountain　(t·ha^{-1})

土壤层/cm	透光抚育强度				
	CK	LT	MT	HT	FT
0 ~ 10	326.37 ± 10.96ABa	340.30 ± 34.86ABa	317.66 ± 0.33Ba	323.06 ± 32.64ABa	360.92 ± 15.20Aa
10 ~ 20	285.34 ± 7.53Ab	285.95 ± 18.05Ab	226.54 ± 34.70Bb	281.49 ± 34.7ABa	297.04 ± 59.07Aa
20 ~ 30	243.19 ± 32.05BCc	291.74 ± 21.88ABab	211.63 ± 21.64Cb	288.52 ± 52.25Ba	349.54 ± 20.11Aa
合计	854.90 ± 42.33B	918.00 ± 43.30AB	755.83 ± 27.45C	893.07 ± 41.92Ba	1 007.50 ± 86.46A

注：不同的大写字母表示不同透光抚育处理之间差异显著($p < 0.05$)，不同的小写字母表示土壤不同层之间差异显著($p < 0.05$)。

2.4　透光抚育强度对凋落物截留和土壤蓄水生长季动态过程的影响

不同透光抚育强度对“栽针保阔”林分凋落物最大持水量在生长季的月动态过程有一定影响(图 5a)。对照林分的最大持水量在生长季呈现双峰型动态规律(峰值出现在 6 月和 10 月)，且在 7—9 月呈先降后升的波谷型变化趋势。透光抚育处理后，其最大持水量的动态过程仍保持双峰型，但不同透光抚育对其编号变化趋势产生了显著差异。轻度和中度透光抚育使最大持水量在 7—9 月趋于恒定，而全透光抚育则使其在 7—9 月呈现递减规律，且 7 月和 8 月的最大持水量显著提高 30.25% ~ 45.70%($p < 0.05$)。因此，尽管透光抚育强度未改变其最大持水量的双峰型动态规律，但轻度、中度和全透光抚育处理显著改变了其 7—9 月的变化趋势。且透光抚育强度显著影响了凋落物最大蓄水量(图 5b)和有效拦蓄量(图 5c)在生长季的月动态过程。对照林分的最大拦蓄量和有效拦蓄量呈现单峰型动态规律(峰值出现在 9 月)，透光抚育处理则使其单峰型转变为双峰型，新增了一个 5 月或 6 月的春季峰值。

透光抚育强度显著影响了土壤蓄水量在生长季的月动态过程(图 5d)。对照林分的土壤蓄水量在生长季呈现双峰型动态规律(峰值分别出现在 7 月和 10 月)。轻度、强度和全透光抚育则使双峰型转变为三峰型，新增了 5 月的峰值。此外，透光抚育强度显著影响了土壤蓄水量峰值的大小。全透光抚育使 7 月的土壤蓄水量显著提高了 33.7%，而轻度透光抚育使 10 月的土壤蓄水量峰值显著提高了 23.6%($p < 0.05$)。因此，透光抚育强度不仅改变了土壤蓄水量在生长季的动态规律(从双峰型转变为三峰型)，还显著改变了峰值的大小(全透光抚育使 7 月峰值增加约 1/3；轻度透光抚育使 10 月峰值增加约 1/4)。

2.5　凋落物最大持水量、最大与有效拦蓄量和土壤蓄水量的主控因子

长白山中期“栽针保阔”林分凋落物最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量的主控因子各不相同(表 3)。生长季凋落物最大持水量主要受凋落物量和最大持水率的驱动，两者分别解释了其变差的 56.8% 和 36.8%($R^2 = 0.944$)，凋落物层厚度和透光抚育强度的影响较小，分别仅解释了 0.3% 和 0.5% 的变差。由此可见，凋落物量是其最大持水量的主要控制因子，最大持水率次之。凋落物最大拦蓄量受自然含水率的抑制作用显著(解释率为 30.8%)，同时受最大持水率(22.8%)和凋落物量(17.2%)的促

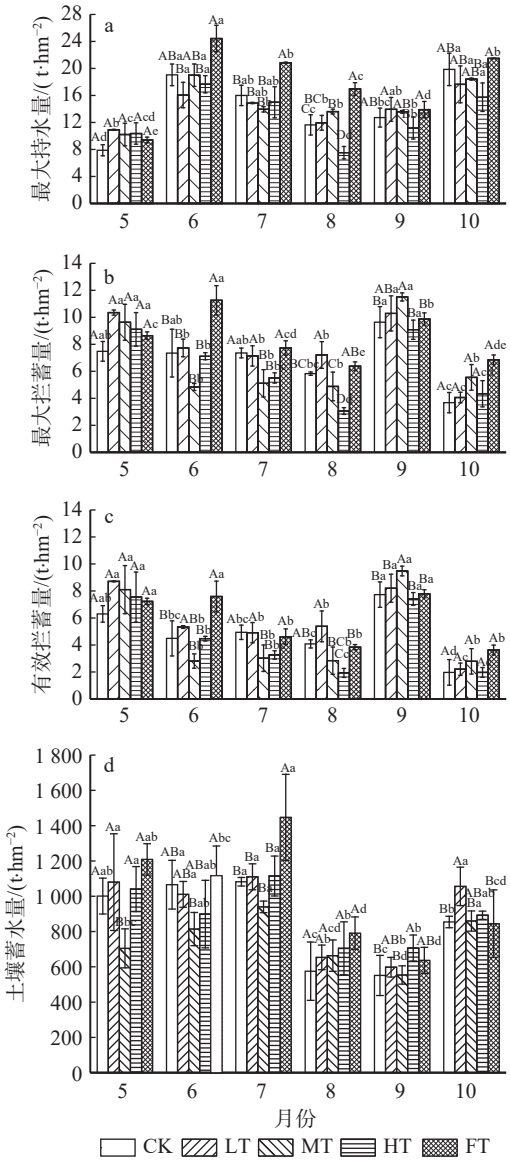


图 5 长白山不同透光抚育强度“栽针保阔”林分凋落物最大持水量（a）、最大拦蓄量（b）、有效拦蓄量（c）和土壤蓄水量（d）生长季动态

Fig. 5 Dynamics of the maximum water storage capacity (a), maximum interception capacity (b) , effective interception capacity (c) of litter and soil water storage (d) in PCPBT stand under different release cutting intensities in Changbai Mountain

进作用，针叶占比的贡献较小（3.4%），其 R^2 值为 0.742。而凋落物有效拦蓄量主要受自然含水率的抑制作用（解释率为 53.7%），受最大持水率、凋落物量和枝条量所促进，但影响较小，其 R^2 值为 0.695。

生长季土壤月均蓄水量受凋落物最大持水量促进，但其对土壤蓄水量的影响程度有限（$R^2 = 0.076$）。然而，不同土壤层蓄水量的影响因素有所不同，但影响效果都较小。土壤表层（0 ~ 10 cm）受毛管孔隙度和凋落物最大持水量所促进，也受土壤容重所抑制（$R^2 = 0.284$），三者分别解释了其变差的 13.8%、3.8% 和 10.8%；中部土壤层（10 ~ 20 cm）受土壤非孔隙度的抑制，但抑制程度有限（$R^2 = 0.171$）；下部土壤层（20 ~ 30 cm）则主要受土壤毛孔隙度、透光抚育强度、凋落物最大持水量和土壤温度共同促进（$R^2 = 0.265$），四者可解释其变差的 15.0%、6.0%、3.0% 和 2.5%（表 4）。

3 讨论与结论

3.1 透光抚育强度对生长季凋落物量、组成和生长季动态过程的影响

本研究发现，中度和全透光抚育增加了长白山“栽针保阔”林分生长季的凋落物量，且全透光抚育改变了凋落物的组成。这一结果与现有研究中关于间伐减少人工林凋落物量的结论不同[26,32−33]，表明透光抚育对异龄复层针阔混交林凋落物量和组成的影响具有特殊规律性。

透光抚育的初衷是为了调节“栽针保阔”红松林上层阔叶树与下层红松之间的生长关系，解除上方阔叶树对红松生长的抑制，从而促进次生林内红松的生长。在本研究中，全透光抚育 26 年后，红松已进入主林层，原以阔叶树种占优势的“栽针保阔”红松林已转变为以红松占优势的针阔混交林。这种树种组成和林型的变化反而增加了凋落物量。原因是全透光抚育使针叶凋落物量增加了 8.4 倍，同时将阔叶凋落物量降低了约 2/3，但未增加未分解层的凋落物量。由于针叶中含有较多难以分解的酚类、萜类和单宁等物质[5]，半分解层的凋落物量增加了近 2/3（图 1a），从而导致总凋落物量的增加。此外，凋落物组成结构也发生了变化：未分解层与半分解层

表 3 凋落物持水能力与凋落物性质以及处理的逐步回归分析

Tab. 3 Stepwise regression analysis of litter water holding capacity, litter properties and treatments

指标	凋落物特征											
	R	NP	BA	PA	ULA	TLA	LL	NWR	MWCR	截距	R^2	p
MWC	0.249**					2.651***	0.549*		0.003 6***	−12.098***	0.944	< 0.01
MIC		1.162*				1.229***		−0.034***	0.034***	−4.778***	0.742	< 0.01
EIC			1.098**			0.512***		−0.025***	0.014***	1.627	0.695	< 0.01

注：*表示在0.05水平上显著，**表示在0.01水平上显著，***表示在0.001水平上差异显著。MWC、MIC和EIC分别为凋落物最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量，R为透光抚育强度，NP为针阔叶比重，BA为枝条量，PA为繁殖体量，ULA为半分解层量，TLA为凋落物总量，LL为凋落物层厚度，NWR为凋落物自然含水率，MWCR为凋落物最大持水率。下同。

表 4　土壤持水能力与土壤、凋落物物理性质的逐步回归分析

Tab. 4　Stepwise regression analysis of soil water holding capacity and physical properties of soil and litter

土壤层/cm	凋落物和土壤的物理性质											
	LI	TLA	LL	MWC	MIC	BD	USP	SP	ST	截距	R^2	p
0 ~ 10				4.860**		−132.558***		2.940***		223.584***	0.284	< 0.01
10 ~ 20							−5.766***			384.850***	0.171	< 0.01
20 ~ 30	16.809*			5.013*				6.246***	4.056*	−102.864	0.265	< 0.01
0 ~ 30				15.163***						660.718***	0.076	< 0.01

注：BD、USP、SP和ST分别为土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度和温度。

占比由对照组的 3∶2 转变为 1∶1，未分解层针叶的比例由对照组的 46.5% 上升至 56.1%。中度透光抚育则通过增加半分解层凋落物量约 1/3 和繁殖体量 3.8 倍（图 1a）来增加总凋落物量，但由于仅伐除部分上层阔叶树，同时促进了红松和阔叶树的生长，因此对凋落物组成结构的影响较小。

透光抚育强度并未改变其凋落物量生长季双峰型动态规律，可能是因为凋落物量的生长季动态过程主要受气候和树种物候期影响。研究区 6 月温暖多风，树木为减少蒸腾失水，会增加叶和枝的生理性脱落[34]；此外，风力干扰引起红松个体之间以及与阔叶树之间树冠剧烈碰撞，也会增加叶、枝和繁殖体的物理性脱落，从而形成一个 6 月春季凋落物峰值。而 10 月秋季峰值主要受叶片发育节律影响，源于 10 月为凋落物凋落盛期[35]。这与成熟天然阔叶红松林凋落物量存在多个峰值（5、7 和 10 月）[35]的现象类似。中度和强度透光抚育均削弱了凋落物量在生长季的波动性，原因在于中、强度透光抚育能够不同程度地促进林内红松生长，并持续提供针叶补充。由于针叶难以分解，半分解层凋落物量有所增加，弥补了夏季因水热条件良好及微生物分解加快所引起的凋落物损失，故削弱了凋落物量在生长季各月份间的波动性。

3.2　透光抚育强度对凋落物持水过程的影响

透光抚育强度并未改变“栽针保阔”林分凋落物持水过程符合幂函数关系的总体趋势，这与蒙古栎、白桦、樟子松凋落物持水过程呈幂函数关系的现有结论一致[31–32]。其原因是湿润阶段（0 ~ 2 h）凋落物层干燥且水势差异较大，持水量增加最快；但当凋落物层逐渐吸收水分并达到饱和时，水势和吸水率同步降低[9]，故其持水过程均符合幂函数关系。

全透光抚育显著提高了生长季凋落物现存量（月均值）在持水中期和末期（12 和 24 h）的持水量，增强了其凋落物持水过程。主要原因在于全透光显著增加了生长季月均凋落物量，特别是显著增加了半分解层凋落物量及其持水量（图 1a 和图 2），进而增强了凋落物的持水能力，这与凋落物持水量与凋落物量呈显著正相关[11]的结论相符。至于在持水初期（2 h）并未提高其凋落物持水量的原因，可能与未分解层中枝条占比较大（27.1%），枝条延迟了吸水过程有关。因此，凋落物持水过程不仅取决于凋落物量，还受凋落物组成的影响。此外，全透光并未改变其凋落物未分解层的持水过程，主要是其既显著增强了针叶凋落物持水过程，又显著削弱了阔叶凋落物的持水过程（图 3），这两个过程综合作用导致其未分解层持水过程并未产生实质性改变。而全透光抚育增强了凋落物半分解层持水过程，主要是其显著增加了半分解层的量（图 1a）。

3.3　透光抚育强度对生长季凋落物截留量和土壤蓄水量的影响

全透光抚育显著提高了生长季月均凋落物最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量，而轻度透光抚育仅显著提高其有效拦蓄量。这一结果与间伐降低人工林凋落物持水能力[7,36]的结论截然不同，但与间伐提高人工针叶纯林或阔叶混交林凋落物的最大持水和拦蓄能力[23,30]结论相类似。

其原因在于，凋落物截留受凋落物厚度、数量、组成结构以及降雨周期[13–14]等因素的综合影响。全透光抚育 26 年后，林型发生了转换，树种组成也发生了改变。随着红松占据主林层并释放其生长潜力，凋落物中针叶占比增大，由于针叶较难分解，半分解层的凋落物量也随之增加，从而增加了整体凋落物量。同时，凋落物组成结构改变（如针叶占比和半分解层占比均增大）也会影响凋落物最大持水率。正是凋落物量与组成的综合作用增强了凋落物层最大持水能力和拦蓄能力。根据逐步回归分析结果（表 3），凋落物最大持水量受凋落物量和最大持水率共同促进，且前者的作用强于后者。全透光抚育使凋落物量提高了 22.8%，而最大持水率仅降低了 14.7%。由于凋落物量的影响强于最大持水率，因此，增强了其最大持水能力；其最大拦蓄量不仅受最大持水率和凋落物量促进，还受到较强的自然含水

率抑制。全透光抚育通过增加凋落物量，并降低自然含水率(15.2%)，进一步增强了其最大拦蓄能力；此外，有效拦蓄量主要受自然含水率的抑制，全透光抚育降低了自然含水率，从而增强了其有效拦蓄能力。轻度透光抚育提高凋落物有效拦蓄量的原因与此类似。因此，全透光抚育后，其凋落物最大持水量仅受凋落物量控制；最大拦蓄量受凋落物量和自然含水率(或组成)共同控制；而有效拦蓄量则仅由自然含水率(或组成)决定。

全透光抚育使生长季土壤蓄水量(各月平均值)提高了约 1/6，这一结果与强度择伐和皆伐降低人工林土壤蓄水能力[37]的现有结论截然相反。其主要原因在于两者所针对的林型不同(单层林和复层混交林)，导致凋落物截留和土壤蓄水过程对采伐干扰的响应机制不同。凋落物层能够拦截降水、延迟或消除地表径流，并减轻土壤蒸发失水[12,15]，从而增加土壤渗透性和蓄水量[11]。全透光抚育通过改变树种组成、促使林型转化，增加了凋落物量并改变了其组成，进而增强了凋落物的最大持水能力、最大拦蓄能力和有效拦蓄能力，最终增加了土壤蓄水量。根据逐步回归分析结果(表 4)，生长季土壤蓄水量仅受凋落物最大持水量($R^2 = 0.076$)的促进作用影响，而全透光抚育提高了凋落物最大持水量，进而增加了土壤蓄水量。此外，透光抚育 26 年后，经过林分演替恢复，各透光抚育强度处理下的林分郁闭度(68.8% ~ 72.7%)(表 1)及生长季 6—9 月的林内穿透雨量(322.5 ~ 380.5 mm)趋于相近，且影响土壤蓄水的物理性质(如土壤总孔隙度为 54.2% ~ 57.1% 和土壤容重为 2.36 ~ 2.45 g/cm^3)也基本一致。这进一步证实了全透光抚育显著增强凋落物的截留作用是导致土壤蓄水量增大的直接原因。至于凋落物最大持水量仅能解释其土壤蓄水量变差来源的 7.6%，可能还与降雨强度、持续时间、降雨周期以及土壤渗透、径流等过程有关，具体的影响机制仍有待于进一步研究。

3.4 透光抚育强度对凋落物截留和土壤蓄水生长季动态过程的影响

透光抚育强度虽未改变其凋落物最大持水量生长季双峰型动态过程的总体规律，但改变了其 7—9 月动态趋势，且全透光抚育显著提高了 7、8 月的最大持水量。其原因是各月份凋落物最大持水量主要由凋落物量和最大持水率共同促进，且前者作用要强于后者(表 3)，另其凋落物最大持水量生长季月动态过程与凋落物量的动态过程一致(图 1b)，故其凋落物最大持水量生长季动态过程主要取决于凋落物量的变化。由于 7、8 月份又恰逢夏季降雨集中期，故全透光抚育能够增强其凋落物层对集中降雨的调节能力，而轻、中度透光抚育则能够使其调节能力维持相对稳定，进而增强凋落物截留对夏季降水的调节作用。

除中度透光抚育外，其他抚育强度通常会使生长季凋落物的最大拦蓄量和有效拦蓄量在春季形成一个新的峰值，进而改变两者在生长季的动态过变化趋势。其原因在于生长季凋落物最大拦蓄量主要受最大持水率和凋落物量促进及自然含水率抑制，有效拦蓄量主要受自然含水率抑制(表 3)。全透光抚育使其 6 月凋落物量最大(峰值)，且自然含水率又低，故在 6 月增加了两者的一个春季峰值；其他透光抚育强度均使其 5 月凋落物自然含水率最低(−296.9% ~−30.3%)，使两者增加了一个 5 月春季峰值。故透光抚育强度(中度透光抚育除外)一般会增强凋落物层对春季冻融期融水的截留作用，这可能有助于增强森林对春季干旱胁迫的抵抗力。

透光抚育强度同样改变了其生长季土壤蓄水量月动态过程的总体规律，并且全透光抚育增大了其 7 月峰值及轻度透光抚育增大其 10 月峰值。这与各透光抚育强度(中度透光抚育除外)增加凋落物最大和有效拦蓄量春季峰值完全相符，故凋落物层对春季冻融期融水的截留作用可能是春季土壤蓄水量增强的主要原因。至于全透光抚育和轻度透光抚育增大土壤蓄水量峰值的原因，则是全透光在 7 月雨季集中期，凋落物的最大持水量显著高于对照，且凋落物的最大持量又是土壤蓄水量的控制因子(表 4)，加之 7 月降雨频次高和强度大，能够充分发挥凋落物的截留作用，故增大了 7 月土壤蓄水量峰值；而轻度透光抚育在 10 月落叶盛期时，因阔叶占比高(76.4%)，且凋落物层最厚(3.3 cm)，能够更有效的抑制土壤蒸发失水，故增大了其 10 月峰值。由此推测，凋落物层截留作用对土壤蓄水过程的影响机制在生长季各时期不同：干旱春季凋落物层通过拦蓄作用调节冻融水增加土壤蓄水量，在雨水集中的夏季凋落物层通过持水作用调节降水增加土壤蓄水量，而在秋季凋落物层则通过防止土壤蒸发失水来维持土壤蓄水量。

因此，对东北温带长白山“栽针保阔”林分采取全透光抚育恢复方式，不仅能够加速其演替恢复进程，初步恢复阔叶红松林，而且还能够提高凋落物量、改变凋落物组成结构，增强其生长季凋落物截留能力(1/6 ~ 1/5)和土壤蓄水能力(约 1/6)，进而增强其对降水调节和土壤水源涵养功能。故从凋落物截留和土壤蓄水这两个关键水文生态功能考虑，全透光抚育是最适宜的红松植被恢复经营方式。

参 考 文 献

[1] 李文华, 周晓峰, 刘兴土. 东北地区森林与湿地保育及林业发展战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Li W H, Zhou X F, Liu X T. Study on forest and wetland conservation and forestry development strategy in Northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[2] 陈大珂, 周晓峰, 丁宝永, 等. 黑龙江省天然次生林研究 (Ⅱ): 动态经营体系 [J]. 东北林学院学报, 1985, 13(1): 1−18.
Chen D K, Zhou X F, Ding B Y, et al. Study on natural secondary forest in Heilongjiang Province (Ⅱ): dynamic management system[J]. Chinese Journal of Northeast Forestry University, 1985, 13(1): 1−18.

[3] 徐蕊, 牟长城, 李婉姝, 等. “栽针保阔”红松林不同透光强度效果分析 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(10): 30−33.
Xu R, Mu C C, Li W S, et al. Effect of different crown thinning intensities om Korean pine forests formed by planting conifers and protecting broadleaved species[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(10): 30−33.

[4] 张晓亮, 牟长城, 张小单, 等. 透光抚育对长白山“栽针保阔”红松林土壤碳储量影响 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 22−30.
Zhang X L, Mu C C, Zhang X D, et al. Effect of liberation cutting on the soil carbon storage of a Korean pine forest restored by planting conifers and reserving broad-leaved trees in Changbai Mountains of China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(10): 22−30.

[5] 刘斑, 牟长城, 王亚辉, 等. 透光抚育强度对小兴安岭“栽针保阔”红松林凋落物水文效应的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2335−2346.
Liu T, Mu C C, Wang Y H, et al. Effects of light-felling intensity on hydrological effects of litter in Korean pine forests by ‘planting conifer and preserving broadleaved tree’ in Xiaoxing’an Mountains of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2335−2346.

[6] Pereira L C, Balbinot L, Lima M T, et al. Aspects of forest restoration and hydrology: the hydrological function of litter[J]. Journal of Forestry Reseach, 2022, 33(2): 543−552.

[7] Johnson S J, Li X, Niu J, et al. Study on hydrological functions of litter layers in North China[J]. PLoS One, 2013, 8(7): e70382.

[8] de Groen M M, Savenije H H G. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall[J]. Water Resources Research, 2006, 42(12): 111−122.

[9] Rosalem L M P, Wendland E C, Anache J A A. Understanding the water dynamics on a tropical forest litter using a new device for interception measurement[J]. Ecohydrology, 2018, 12(2): e165010.

[10] Gomyo M, Kuraji K. Effect of the litter layer on runoff and evapotranspiration using the paired watershed method[J]. Journal of Forest Research, 2016, 21(6): 306−313.

[11] Zhu X, Zhang W, Jiang X, et al. Conversion of primary tropical rainforest into rubber plantation degrades the hydrological functions of forest litter: Insights from experimental study [J]. Catena, 2021, 200 20(1): 50−100.

[12] Giácomo R G, Alves M C, Camara R, et al. Litterfall and nutrient input in a degraded area[J]. Floresta Ecology and Managemengt, 2017, 24(1): 96−104.

[13] Bai Y, Zhou Y, Du J, et al. Effects of a broadleaf-oriented transformation of coniferous plantations on the hydrological characteristics of litter layers in subtropical China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 25(2): e01400.

[14] Du J, Niu J Z, Gao Z L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer[J]. Catena, 2019, 172: 711−718.

[15] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: the effects of rainfall conditions and leaf shapes[J]. Hydrological Process, 2004, 18(16): 3007−3018.

[16] Gerrits A M J, Savenije H H G, Hoffmann L, et al. New technique to measure forest floor interception &ndash: an application in a beech forest in Luxembourg[J]. Hydrological Earth System Science, 2007, 11(2): 695−701.

[17] Zhao L, Meng P, Zhang J, et al. Effect of slopes on rainfall interception by leaf litter under simulated rainfall conditions[J]. Hydrological Process, 2022, 36(8): 1085−1099.

[18] van Stan J T, Coenders-Gerrits M, Dibble M, et al. Effects of phenology and meteorological disturbance on litter rainfall interception for a *Pinus elliottii* stand in the southeastern United States[J]. Hydrological Process, 2017, 31(21): 3719−3728.

[19] 全国营造林标准化技术委员会. 森林抚育规程 [S].北京:中国林业出版社，2015: GB/T-15781.
National Technical Committee on Standardization of Forestry. Regulations for forest tending[S]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015: GB/T-15781.

[20] Dung B X, Miyata G T, Sidle S, et al. Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest[J]. Journal of Hydrology, 2012, 444: 51−62.

[21] Komatsu H, Shinohara Y, Kume T, et al. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan[J]. Forest Ecology & Management, 2008, 256(5): 1189−1197.

[22] Aboal J R, Jiménez M S, Morales D, et al. Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine forest: the role of fog[J]. Journal of Hydrology, 2000, 238(3−4): 218−230.

[23] Cheng X, Bai Y, Zhu J, et al. Effects of forest thinning on interception and surface runoff in *Larix principis-rupprechtii* plantation during the growing season[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 181(10): 224−254.

[24] Li L C , Zhi Y Y , Hong B S , et al. Effects of thinning intensities on soil infiltration and water storage capacity in a chinese pine-oak mixed forest[J]. Scientific World Journal, 2014(14): 1567−1573.

[25] Jonard M, Misson L, Ponette Q. Long-term thinning effects on the forest floor and the foliar nutrient status of Norway spruce stands in the Belgian Ardennes[J]. Canadian Journal of Forest Research,

2006, 36(10): 2684−2695.

[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 Ecological Management, 2017, 391: 309−320.

[27] Lagomarsino A, Mazza G, Agnelli A E, et al. Litter fractions and dynamics in a degraded pine forest after thinning treatments[J]. European Journal Forest Research, 2019, 139(2): 295−310.

[28] Zhang X, Guan D, Li W, et al. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: a meta-analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 429: 36−43.

[29] Roig S, del Río M, Cañellas I, et al. Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. stands under different thinning regimes[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 206(1−3): 179−190.

[30] 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 Y Q, Wu J S, Sheng W X, 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.

[31] 武启骞, 王传宽, 赵娟, 等. 帽儿山 2 种森林类型凋落物和土壤水文效应 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 161−166.
Wu Q Q, Wang C K, Zhao J, et al. Hydrological effect of litter and soil in two forest types in Maoershan rigion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 161−166.

[32] Novak J, Slodicak M, Dusek D. Thinning effects on forest productivity and site characteristics[J]. Forest Systems, 2011, 20(3): 2309−2315.

[33] 赵朝辉, 方晰, 田大伦, 等. 间伐对杉木林林下地被物生物量及土壤理化性质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 102−107.
Zhao Z H, Fang X, Tian D L, et al. Effects of thinning on biomass of under-story, soil physical and chemical properties in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(5): 102−107.

[34] Wang Q, Wang S, Huang Y. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China[J]. Forest Ecology & Management, 2008, 255(3−4): 1210−1218.

[35] 郑金萍, 郭忠玲, 徐程扬, 等. 长白山北坡主要森林群落凋落物现存量月动态 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4299−4307.
Zheng J P, Guo Z L, Xu C Y, et al. Seasonal dynamics of litter accumulation in major forest communities on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4299−4307.

[36] 陈家琦, 翟畅, 包广道, 等. 东北地区城市森林常见树种凋落物累积量及其水文效应 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1339−1347.
Chen J Q, Zhai C, Bao G D, et al. Litter accumulation and hydrological effects of common tree species in urban forest of Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(6): 1339−1347.

[37] Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, et al. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China[J]. Plant Soil, 2008, 304: 179−188 .

（责任编辑 范 娟
责任编委 张会儒）