

亚热带北缘湿地松脂材兼用林凋落物持水特性

杜 杰, 袁莉芹, 蔡天培, 陈 杰, 刘西军*

(安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

摘 要: 为研究亚热带北缘湿地松脂材兼用林(RT, resin and timber)凋落物水源涵养功能, 以安徽省宣城市宣州区宛陵林场内的湿地松脂材兼用林和湿地松未采脂人工林(CK)为研究对象, 采用烘干法、浸泡法对凋落物现存量及其持水能力进行研究。结果表明: (1) 湿地松脂材兼用林凋落物以凋落叶为主, 总现存量为 $10.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 显著小于对照林分 ($P < 0.05$)。 (2) 湿地松脂材兼用林凋落物的总最大持水量与平均最大持水率 ($12.97 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 125.09%) 均低于对照林分 ($21.73 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 136.54%), 未分解层 (UL, un-decomposed layer) 和半分解层 (SL, semi-decomposed layer) 最大持水率分别降低了 11.38% 和 4.03% 。 (3) 湿地松脂材兼用林凋落物吸水速率在浸泡 $0 \sim 0.5 \text{ h}$ 内最大, 且各分解层最大吸水速率 (UL, $1.28 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; SL, $2.41 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) 均低于对照林分 (UL, $1.58 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; SL, $2.56 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)。 (4) 湿地松脂材兼用林凋落物持水量与浸水时间均呈极显著对数函数关系 ($R^2 > 0.95$)。湿地松脂材兼用经营模式降低了凋落物现存量和持水性, 不利于湿地松人工林凋落物层的水源涵养。

关键词: 湿地松; 脂材兼用林; 凋落物; 蓄积量; 持水能力

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)01-0041-07

The water-holding characteristics of litterfall in *Pinus elliottii* plantations for resin and timber in northern of subtropical area

DU Jie, YUAN Liqin, CAI Tianpei, CHEN Jie, LIU Xijun

(School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In order to study the water conservation function of the litterfall in slash pine plantations in the northern subtropical area, we investigated the accumulation amount and water-holding capacity of the litterfall in *Pinus elliottii* plantations, which located in the Wangling Forest Farm, Xuanzhou District, Xuancheng City, Anhui Province, using the drying method and soaking method in slash pine plantations for both resin and timber (RT), respectively, taken the slash pine plantation (no resin) as the control group (CK). The results showed that: (1) The majority of litterfall of slash pine plantations for both resin and timber was needle litter, and the total litterfall accumulation was $10.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. The total litter accumulation was significantly less than CK ($P < 0.05$). (2) The total maximum water-holding capacity and the average maximum water-holding rate of the litterfall in RT ($12.97 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 125.09%) were lower than those of CK ($21.73 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 136.54%). The maximum water-holding rate of the un-decomposed layer (UL) and semi-decomposed layer (SL) in RT decreased by 11.38% and 4.03% , respectively. (3) The water absorption rate of litterfall in RT reached the largest value within $0 - 0.5 \text{ h}$ of immersion, and the maximum water absorption rate of each decomposition layer in RT (UL, $1.28 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; SL, $2.41 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) was lower than that of CK (UL, $1.58 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, SL, $2.56 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). (4) The significantly logarithmical correlations between water-holding capacity of litter and immersion time were found ($R^2 > 0.95$). In conclusion, the management model of slash pine plantation for both resin and timber reduces the litterfall accumulation and its water-holding capacity, which is not conducive to the water conservation of the slash pine plantation.

Key words: slash pine; plantations for both resin and timber; litter; volume; water-holding capacity

收稿日期: 2021-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0600502)和安徽省自然科学基金项目(1908085MC73)共同资助。

作者简介: 杜 杰, 硕士研究生。E-mail: 1352499931@qq.com

* 通信作者: 刘西军, 博士, 副教授。E-mail: liuxj104@126.com

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分,不仅发挥着固碳、养分循环、土壤有机质输入调节的功能,而且具有重要的水土保持与水源涵养功能^[1]。凋落物层结构疏松,表层粗糙度高,通过吸收、贮存和蒸发降落到地表的雨水,减少地表径流,增加地下径流,对森林生态系统的水文循环和水分平衡具有重要意义^[2-3]。自20世纪90年代以来,许多国内学者相继开展了凋落物现存量及持水特性研究,其影响因素主要包括森林树种、林分密度、森林类型、经营管理措施、生长阶段、林龄等。常雅军等对甘肃小陇山不同针叶林凋落物量及持水特性研究表明,云杉(*Picea asperata* Mast.)、松林、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)林的凋落物层蓄积量、最大持水率等均有明显不同^[4]。孟庆权等对滨海沙地典型人工林的凋落物现存量及其持水特性研究表明,木麻黄(*Casuarina equisetifolia* L.)凋落物现存量和持水能力最强,湿地松(*Pinus elliottii*)林次之^[5]。侯瑞萍等研究表明,中等密度的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)人工林凋落物量最大,凋落物持水能力最好^[6]。王玲等也证明了中等密度油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)林的凋落物蓄积量最大,最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均最大^[7]。褚欣等提出以2 100~2 700株·hm⁻²的中等密度飞播马尾松(*Pinus massoniana*)林的凋落物蓄积量及土壤持水性能最高^[8]。周巧稚等同样发现晋西黄土区刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)林凋落物蓄积量及持水量以1 575株·hm⁻²的中等密度最好,半分解层的持水量高于未分解层^[9]。何琴飞等发现珠江流域中游主要森林类型凋落物量与持水性存在显著差异,混交林的凋落物量和持水能力高于纯林^[10]。孙欧文等研究认为浙江省针阔混交林的凋落物蓄积量最高,其次是阔叶林,而持水量则是针阔混交林和杉木较大,毛竹(*Phylloslachys pubescens*)林的凋落物和持水量均最小^[11]。曾昭霞等发现桂西北喀斯特区次生林的凋落物储量大于原始林,而凋落物持水率和吸水速率则小于原始林,凋落物持水量及持水率随浸泡时间的增加呈对数增长^[12]。施昀希^[13]、刘玉国^[14]等分别对滇中高原和贵州喀斯特山地的典型森林类型凋落物量进行了研究。韩艺师等提出连栽降低了桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)人工林的持水功能^[15]。赵勇等研究发现秦岭华山松(*Pinus armandii* Franch.)、油松和锐齿栎(*Quercus acutidentata*)林的凋落物累积量随间伐强度增大而减小,半分解层持水率大于未分解层^[16]。唐禾等揭示了抚育间伐减少了麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)次

生林的凋落物量,随间伐强度提高分解层储量先增后减;轻度间伐的凋落物持水量和吸水速率最高^[17]。张鹏等提出杉木(*Cunninghamia lanceolata*)成熟林的凋落物总量最大,最大持水率随林龄增加而减小^[18]。陈进等认为贵阳市不同林龄马尾松林凋落物储量及持水特性存在显著差异,呈现先增后减趋势,成熟林最大^[19]。由此可见,不同区域、不同森林类型以及同一森林类型受林分密度、经营措施的影响均存在较大差异,其凋落物持水的影响机制仍存在不确定性。

湿地松是我国引进的速生多用途树种,湿地松脂材兼用林、大径材林和水源涵养林是南方林区的常见栽培模式,在获得松脂、木材、造纸、森林康养等功能的同时,其水源涵养功能也受到了重视。许多学者相继对中亚热带、南亚热带气候区的湿地松林凋落物现存量及持水性能进行了探讨^[5,10,20-21],但湿地松在采脂初期其生长势明显减弱,针叶生长缓慢^[22],且采脂导致林分密度降低,其对凋落物现存量及持水功能的影响尚鲜见报道。为了探讨湿地松脂材兼用林的凋落物现存量及其持水特性,以安徽省宣城市宣州区国有宛陵林场湿地松脂材兼用林为研究对象,结合野外调查和室内浸水法探讨了湿地松脂材兼用林的凋落物现存量及其水土保持功能,为湿地松脂材兼用林的生态管理和保护利用提供科学依据。

1 试验地概况

试验地位于安徽省宣城市宣州区国有宛陵林场(30°7'48" N, 118°3' 39" E),在黄山山脉向北延伸的余脉,境内全为丘陵岗地,海拔30~240 m,坡度1°~15°,境内有水阳江,属长江支流。该地属北亚热带季风气候,气候温和,雨量适中,无霜期长,年平均气温16.1℃,年均降水量1 368.6 mm,年均相对湿度79%,无霜期230 d。土壤为砖红壤,土层厚100 cm以上。湿地松林立地指数16~18。湿地松试验林分于1992年造林,初植密度为1 875株·hm⁻²(株行距2.31 m×2.31 m),分别在2002年与2007年进行了2次间伐,间伐强度均为50%。林下植被主要为蕨类,櫟木(*Loropetalum chinense*)等。

2 研究方法

2.1 试验设计与样品采集

2011年,选择立地条件相似的湿地松人工林,设置20 m×20 m的样地10块,样地间相隔20 m以上,调查样地环境因子,进行每木检尺,林分密度

平均为 550 株·hm⁻²。将 10 块样地平均分为 2 组, 其中一组为脂材兼用林样地 (RT, resin and timber), 从 2011 年开始连续采脂, 另一组为对照样地(CK),

不采脂, 每组处理 5 次重复。2018 年 4 月, 对所有样地进行复查, 样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic characters of plots

经营模式	林分密度/(株·hm ⁻²)	海拔/m	坡度/°	平均树高/m	平均胸径/cm
脂材兼用林	390 ± 55	138.3	13~15.8	16.3 ± 0.30	23.64 ± 1.23
对照林	468 ± 25	139.1	13~16.2	17.4 ± 0.33	23.54 ± 0.81

在每块样地内沿对角线和中心点随机设置 0.5 m × 0.5 m 的样方 5 个, 按照未分解层(UL, un-decomposed layer, 颜色变化不明显, 结构完整, 外表无分解痕迹)、半分解层(SL, semi-decomposed layer, 颜色变黑, 结构已破坏, 多数已开始分解)分别进行收集森林凋落物^[24], 现场称重, 并取样装入牛皮纸袋带回实验室, 烘干备用。

2.2 凋落物现存量测定

将凋落物按分解程度分别用牛皮纸袋包装, 放入烘箱于 60 °C 烘干至恒重。手工按照凋落针叶、枝、其他阔叶将未分解层分开, 用精确度为 0.01 g 的电子天平分别称量凋落物的干重, 最后换算成单位面积内 (1 hm²) 凋落物现存量 (t·hm⁻²), 记为 M_t 。

2.3 凋落物持水性和吸水特性的测定

凋落物持水性采用室内浸泡法测定^[23]。将同一样地内 5 个样方内的凋落物按分解层混合均匀, 分别取一定量已烘干凋落物称重, 记为 M_0 , 即凋落物初重, 装入 30 cm × 40 cm 尼龙网袋中(孔径 1 mm × 1 mm), 扎紧袋口, 将其完全浸入水中, 分别在 0.5、1、2、4、6、8、12 和 24 h 后, 捞起静置至网袋不滴水时用电子天平称量湿重, 记为 M_t , 各 5 次重复, 然后计算不同浸水时间凋落物的持水指标。24 h 后重量基本不变, 因此, 将 24 h 的持水量定为最大持水量, 记为 H_{max} , 此时的持水率也为最大持水率^[24]。

2.4 各指标计算公式

持水过程中凋落物持水率/% :

$$R_w = (M_t - M_0) / M_0 \times 100\%$$

凋落物最大持水率/% :

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

持水过程中凋落物持水量/(t·hm⁻²):

$$H_w = M_0 \times R_{max}$$

凋落物最大持水量/(t·hm⁻²): $H_{max} = M_t \times R_{max}$

平均吸水速率/(g·g⁻¹·h⁻¹):

$$Sp = (M_{t-p} - M_t) / M_0 \times P$$

式中: M_{max} 为浸水 24 h 后凋落物湿重(g); M_{t+p} 为浸水(t+p) h 后凋落物湿重(g); P 为连续 2 次称量

之间的浸泡时间差 (h)。

2.5 数据处理

数据采用 Excel 2016 和 SPSS 25.0 进行汇总与处理, 使用 SPSS 25.0 进行独立样本 T 检验分析组间差异显著性, 差异性水平平均设定为 $P < 0.05$ 。对不同分解程度凋落物持水量与浸水时间的函数关系使用 Logarithmic 曲线回归分析。使用 Origin 2019 b 作图。

3 结果与分析

3.1 凋落物现存量

由表 2 可知, 脂材兼用林的未分解层、半分解层以及总凋落物现存量 (5.26、4.92 和 10.18 t·hm⁻²) 均显著小于对照林分 (8.21、7.53 和 15.74 t·hm⁻²) ($P < 0.05$), 半分解层凋落物现存量均略小于未分解层, 但凋落物分解层占总凋落物现存量的比例相接近, 分别为 51.72% 与 52.15%。从各层凋落物组成来看, 凋落物未分解层均以针叶量最大, 分别占未分解层凋落物量的 73.4% 和 76.5%, 其次是枝。脂材兼用林的针叶现存量显著低于对照林分 ($P < 0.05$)。脂材兼用林的林分密度相比对照林平均降低了 150 株·hm⁻², 但对比单株凋落物现存量发现, 二者分别为 0.027 和 0.030 t·株⁻¹, 无显著差异 ($P > 0.05$)。从林分密度与凋落物现存量的相关性可以看出 (表 3), 林分密度与针叶凋落物现存量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与凋落物总现存量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与凋落枝及半分解层现存量间无显著相关性 ($P > 0.05$)。因此, 湿地松脂材兼用林凋落物现存量的降低主要受林分密度影响。

3.2 凋落物持水性能

湿地松脂材兼用林凋落物层的平均最大持水率 (125.09 ± 14.44)% 小于对照林分 (136.54 ± 6.31)%, 未分解层和半分解层的最大持水率分别比对照林分降低了 11.38% 和 4.03% (图 1)。两种林分的半分解层凋落物的最大持水率 (149.92 ~ 156.22)% 均大于未分解层 (105.88 ~ 119.48)%。

由图2可知,湿地松脂材兼用林的凋落物总最大持水量、未分解层及半分解层最大持水量(12.97、5.57和7.39 t·hm⁻²)均小于对照林分(21.73、9.86和11.88 t·hm⁻²),且凋落物总最大持水量、未分解

层最大持水量与对照林分的差异达到显著水平($P < 0.05$)。脂材兼用林与对照林分的半分解层凋落物最大持水量均大于未分解层。

表2 湿地松脂材兼用林的凋落物现存量

Table 2 The litterfall of slash pine plantation for resin and timber

经营模式	未分解层 UL/(t·hm ⁻²)			半分解层 SL/(t·hm ⁻²)	合计 / (t·hm ⁻²)
	凋落针叶	凋落枝	阔叶凋落物		
脂材兼用林 RT	3.86±0.92 ^a	1.29±0.27 ^a	0.11±0.06 ^a	4.92±0.81 ^a	10.18±1.06 ^a
对照林 CK	6.28±1.71 ^b	1.88±0.43 ^a	0.05±0.04 ^a	7.53±2.99 ^b	15.74±4.38 ^b

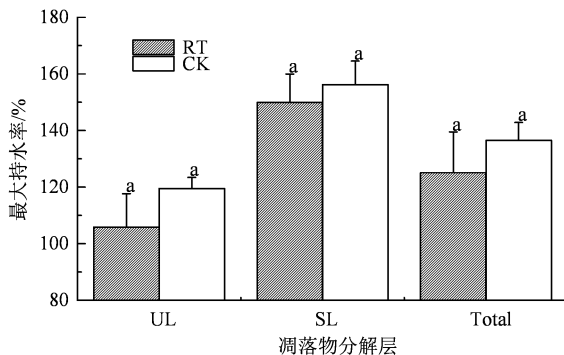
注: 同列相同小写字母表示不同林分间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表3 林分密度与各组分凋落物现存量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between stand density and accumulation of litterfall each component

凋落物组分	密度	针叶	枝	半分解层
针叶	0.91**			
枝	0.11	0.14		
半分解层	0.56	0.65*	0.41	
总现存量	0.71*	0.79**	0.53	0.95**

注: *和**分别为0.05及0.01水平上的显著性差异。



注: 同一分解层相同小写字母表示不同林分间差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

图1 湿地松脂材兼用林凋落物最大持水率

Figure 1 The maximum water-holding rate of litterfall in slash pine plantation for resin and timber

3.3 凋落物持水率和吸水速率的动态过程

凋落物持水率随浸水时间呈上升趋势,在浸水前0.5 h内,各分解层持水率的增速最大,但未分解层凋落物在吸水4 h后,持水率增长逐渐趋于稳定,而半分解层凋落物在吸水2 h后趋于稳定,且相同浸泡时间内未分解层持水率始终低于半分解层(图3)。湿地松脂材兼用林各分解层凋落物累积持水率均低于对照林分,动态变化趋势一致。

由图4可知,湿地松脂材兼用林与对照林分的凋落物吸水速率随浸水时间的动态变化趋势一致,在浸水0~0.5 h内吸水速率最大,在0.5~1 h内迅速下降并趋于稳定。半分解层凋落物的初始吸水速

率要显著高于未分解层($P < 0.05$),且湿地松脂材兼用林未分解层与半分解层的最大吸水速率(1.28和2.41 g·g⁻¹·h⁻¹)分别小于对照林分(1.58和2.56 g·g⁻¹·h⁻¹)。

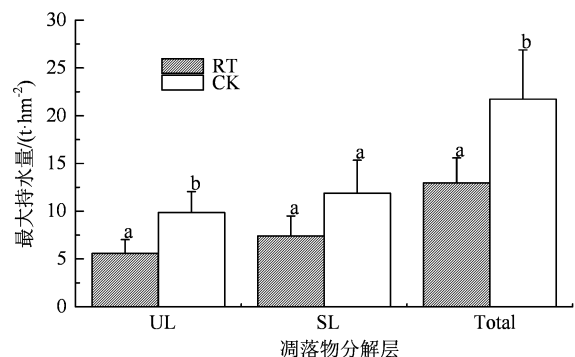


图2 湿地松脂材兼用林凋落物最大持水量

Figure 2 The maximum water-holding capacity of litterfall in slash pine plantation for resin and timber

3.4 凋落物持水量的动态过程

由图5和表4可知,湿地松脂材兼用林与对照林分凋落物的持水量动态变化趋势基本一致,累积持水量随浸水时间的增加而不断增加。各分解层凋落物的持水量动态与其持水率动态相一致,未分解层和半分解层凋落物累积持水量分别在浸水4 h和2 h后达到总量的85%。兼用林各分解层凋落物累积持水量在整个浸水过程中均低于对照林分。回归分析表明,各凋落物层持水量与浸水时间均呈显著对数函数关系($R^2 > 0.95$)。

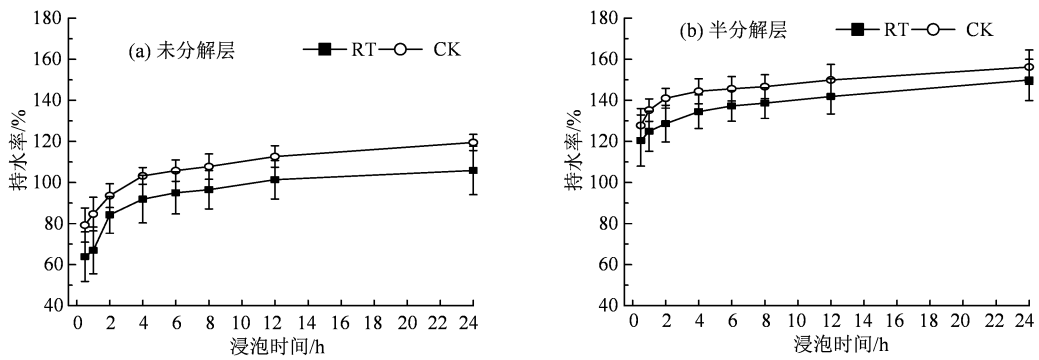


图 3 湿地松脂材兼用林凋落物持水率随浸水时间的动态变化

Figure 3 The dynamics of water-holding rate of litterfall with immersed time in slash pine plantation for resin and timber

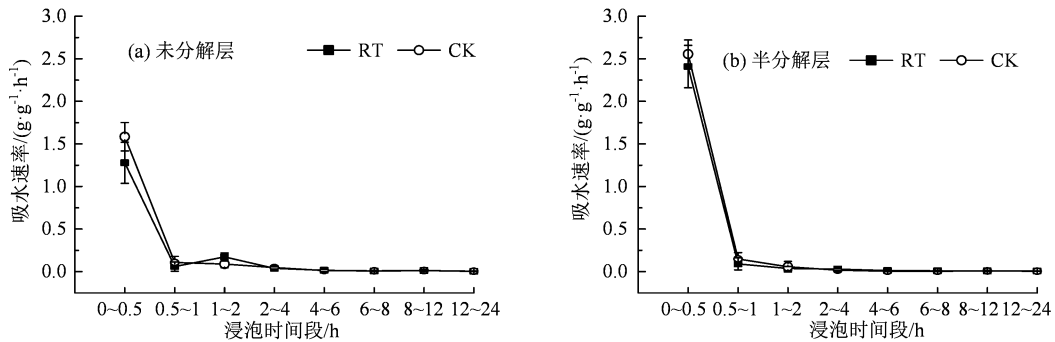


图 4 湿地松脂材兼用林凋落物吸水速率随浸水时间的动态变化

Figure 4 The dynamics of water absorption rate of litterfall with immersed time in slash pine plantation for resin and timber

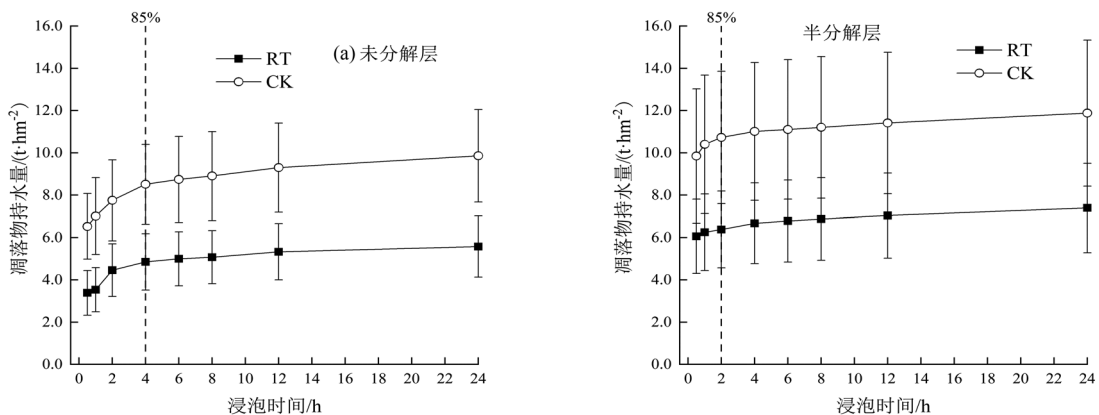


图 5 凋落物持水量随浸水时间的动态过程

Figure 5 The dynamics of water-holding capacity of litter with time in slash pine plantation for resin and timber

表 4 凋落物持水量与浸泡时间的回归方程

Table 4 The regression equation of water-holding capacity of litter and immersed time

经营模式	未分解层	R^2	半分解层	R^2
RT	$H = 0.607 \ln t + 3.82$	0.96**	$H = 0.335 \ln t + 6.222$	0.98**
CK	$H = 0.875 \ln t + 7.127$	0.99**	$H = 0.476 \ln t + 10.298$	0.98**

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关。H 为持水量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$); t 为浸水时间 (h)。

4 讨论与结论

4.1 凋落物现存量

湿地松脂材兼用林凋落物现存量为 $10.18 t \cdot \text{hm}^{-2}$, 相比对照减少了 35.34%, 也明显低于我国

亚热带凋落物现存量平均水平 ($14.73 t \cdot \text{hm}^{-2}$) [25]。凋落物现存量由凋落物输入量、分解速率及分解年限共同决定, 在一定范围内维持着动态平衡[13]。徐慧兰等[26]研究表明, 松树采脂减少了木材管胞中的树脂含量, 纤维壁变薄, 木材密度降低导致力学性

能下降, 极端天气下易从采脂处折断。因此, 两次样地调查发现湿地松脂材兼用林实施采脂 8a 后, 与对照林分相比其林分密度表现出大幅度降低现象。凋落物输入量主要受林分密度^[7-9]、凋落物生产量等影响, 林分密度的降低减少凋落物输入量, 降低了凋落物现存量。同时, 采脂使树体内存储的由淀粉和糖类构成的总非结构性碳水化合物(TNC)大量流失^[27], 抑制了幼叶生长使得树木生长放缓^[23], 凋落叶生产减少, 也会降低凋落物现存量。

湿地松针叶具有较高的 C:N、C:P 化学计量比以及叶表面积小、叶质厚硬且角质含量高等性质, 分解速率较慢^[28]。但凋落物的分解速率受环境因素、凋落物的初始质量等多种因素的综合影响, 充足的光照有利于微生物的分解过程^[29]和木质素的光降解^[30-31]。湿地松脂材兼用林的林分密度降低, 林内光照增多, 进一步促进了凋落物的分解而降低凋落物现存量。

4.2 凋落物的持水性能

凋落物持水率是决定凋落物持水特性强弱的重要指标之一, 主要取决于凋落物类型和分解程度。研究区湿地松脂材兼用林与对照林的凋落物平均最大持水率基本一致, 但普遍低于亚热带其他区域的湿地松林^[3,10,16], 这可能与不同气候下湿地松林凋落叶的结构和化学性质存在差异有关^[32]。湿地松脂材兼用林未分解层凋落物最大持水率的降低可能是采脂改变了针叶中的油脂含量^[4], 而半分解层分解程度高, 结构疏松更易吸持水分, 弱化了油脂对水分的排斥效应, 导致半分解层凋落物最大持水率接近一致。凋落物持水量主要由凋落物现存量及其持水率共同决定, 两种湿地松林分的半分解层凋落物现存量小于未分解层, 但最大持水率大于未分解层, 使得半分解层最大持水量大于未分解层。因此, 湿地松林采脂会降低其凋落物水源涵养功能。

4.3 凋落物的持水过程

吸水速率反应凋落物在单位时间内可吸持水量大小。吸持量大, 表示在短降雨过程中水源涵养功能更强^[33]。前期研究表明, 干燥凋落物的枝叶表面或死亡细胞间的水势差较大, 在浸泡初期凋落物吸水速率最高^[34]。湿地松林凋落物吸水速率随着浸泡时间的增加而减小, 在浸泡 0~0.5 h 内吸水速率最高, 和前期研究结果一致^[34]。但未分解层要小于半分解层, 其原因可能是半分解层凋落物的密度相对小, 内部空隙大, 初期水分吸收能力强^[35]。然而, 湿地松脂材兼用林的各分解层凋落物吸水速率均小于对照林分, 说明在短降雨下, 湿地松脂材兼用林

凋落物对雨水的截留能力较弱。凋落物未分解层、半分解层分别在浸泡 4 h、2 h 后达到累积持水量的 85%, 半分解层较未分解层先达到持水保持阶段, 因此, 半分解层凋落物对水分的拦蓄效率更高。各分解层凋落物持水量与浸水时间呈极显著对数关系 ($R^2 > 0.95$), 可方便地预测湿地松脂材兼用林各分解层凋落物的持水量。湿地松脂材兼用林的凋落物现存量、凋落物持水率低于对照林分, 其持水功能的发挥要滞后于对照林分。

通过对北亚热带采脂 8a 湿地松脂材兼用林凋落物现存量及其持水特性的研究发现, 湿地松脂材兼用林凋落物层持水能力要弱于对应的未采脂林分, 采脂导致的林分密度降低是影响湿地松人工林凋落物层持水功能削弱的主要因素之一。湿地松作为脂、材两用林受人为干扰较严重, 林下凋落物现存量减小, 凋落物层的雨水截留能力减弱, 水文生态功能发挥具有滞后性, 为湿地松脂材兼用林后期的经营管理提供基础依据。

参考文献:

- [1] 路翔, 项文化, 任辉, 等. 中亚热带四种森林凋落物及碳氮贮量比较[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2234-2240.
- [2] 郑江坤, 王婷婷, 付万全, 等. 川中丘陵区典型林分枯落物层蓄积量及持水特性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 87-91, 118.
- [3] 薛立, 何跃君, 屈明, 等. 华南典型人工林凋落物的持水特性[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 315-321.
- [4] 常雅军, 陈琦, 曹靖, 等. 甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2392-2400.
- [5] 孟庆权, 葛露露, 杨馨邈, 等. 滨海沙地不同人工林凋落物现存量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 146-152.
- [6] 侯瑞萍, 张克斌, 郝智如. 造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 624-630.
- [7] 王玲, 赵广亮, 周红娟, 等. 八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1767-1775.
- [8] 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.
- [9] 周巧稚, 毕华兴, 孔凌霄, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 115-121.
- [10] 何琴飞, 郑威, 彭玉华, 等. 珠江流域中游主要森林类型凋落物持水特性[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 128-134.

- [11] 孙欧文, 蔡建国, 吴家森, 等. 浙江省典型森林类型枯落物及林下土壤水文特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 118-123.
- [12] 曾昭霞, 刘孝利, 王克林, 等. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物储量及持水特性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1429-1434.
- [13] 施昫希, 黎建强, 陈奇伯, 等. 滇中高原 5 种森林类型凋落物及营养元素储量研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(4): 617-624.
- [14] 刘玉国, 刘长成, 李国庆, 等. 贵州喀斯特山地 5 种森林群落的枯落物储量及水文作用[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 82-88.
- [15] 韩艺师, 魏彦昌, 欧阳志云, 等. 连栽措施对桉树人工林结构及持水性能的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4609-4617.
- [16] 赵勇. 不同间伐强度下秦岭三种类型森林枯落物持水性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [17] 唐禾, 陈永华, 张建国, 等. 抚育间伐对麻栎次生林枯落物持水性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 104-109, 115.
- [18] 张鹏, 王新杰, 衣晓丹, 等. 杉木不同生长阶段凋落物持水性与养分储量[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(10): 58-62.
- [19] 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.
- [20] 覃勇荣, 曾艳兰, 蒋光敏, 等. 不同植被恢复模式凋落物水分涵养能力比较研究: 以桂西北喀斯特石漠化地区为例[J]. 中国农学通报, 2008, 24(10): 179-184.
- [21] 李海防, 杨章旗, 韦理电, 等. 广西华山 5 种幼龄人工林水源涵养功能研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(12): 70-74.
- [22] LI M, HOCH G, KÖRNER C. Source/sink removal affects mobile carbohydrates in *Pinus cembra* at the Swiss treeline[J]. *Trees*, 2002, 16(4/5): 331-337.
- [23] 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.
- [24] 张腾达, 陶建平, 王玉平. 两种生境下不同生活型植物凋落叶的持水特性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 310-315.
- [25] 刘士玲, 郑金萍, 范春楠, 等. 我国森林生态系统枯落物现存量研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(1): 66-71.
- [26] 徐慧兰, 颜培栋, 唐生森, 等. 采脂处理对湿地松幼龄林生长和材性的影响[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(2): 252-256.
- [27] RAESSLER M, WISSUWA B, BREUL A, et al. Chromatographic analysis of major non-structural carbohydrates in several wood species-an analytical approach for higher accuracy of data[J]. *Anal Methods*, 2010, 2(5): 532-538.
- [28] 尤龙辉, 叶功富, 陈增鸿, 等. 滨海沙地主要优势树种的凋落物分解及其与初始养分含量的关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2014, 43(6): 585-591.
- [29] ZHAO J, WAN S Z, LI Z A, et al. Dicranopteris-dominated understory as major driver of intensive forest ecosystem in humid subtropical and tropical region[J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 49: 78-87.
- [30] FOEREID B, BELLARBY J, MEIER-AUGENSTEIN W, et al. Does light exposure make plant litter more degradable? [J]. *Plant Soil*, 2010, 333(1/2): 275-285.
- [31] 周丽, 李彦, 唐立松, 等. 光降解在凋落物分解中的作用[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2045-2052.
- [32] 王健健, 王永吉, 来利明, 等. 我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4818-4825.
- [33] 刘飞鹏, 曾曙才, 莫罗坚, 等. 尾叶桉人工林改造对土壤和凋落物持水效能的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1111-1117.
- [34] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 177-181.
- [35] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 等. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2416-2425.