热带亚热带植物学报
JOURNAL OF TROPICAL AND SUBTROPICAL BOTANY

沙质海岸不同林分凋落物的水文特性及其对土壤持水的影响

李志鹏, 廖嘉玮, 陈汉尧, 陈少聪, 魏龙, 李旭, 唐旭利

引用本文:
李志鹏, 廖嘉玮, 陈汉尧, 等. 沙质海岸不同林分凋落物的水文特性及其对土壤持水的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(6): 631–639.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11926/jtsb.4940

热带亚热带植物学报 2025, 33(6): 631 ~ 639
Journal of Tropical and Subtropical Botany

沙质海岸不同林分凋落物的水文特性及其对土壤持水的影响

李志鹏[1,2,3], 廖嘉玮[1,3], 陈汉尧[4], 陈少聪[4], 魏龙[5], 李旭[1,2,3], 唐旭利[1,2*]

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖东林场, 广东 汕尾 516543; 5. 广东省林业科学研究院, 广州 510520)

摘要: 为探究木麻黄作为沿海防护林的主要树种对改善和维护生态系统水源涵养功能的重要性, 该研究以木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)纯林、桉树(*Eucalyptus urophylla*)纯林、针阔混交林和天然林 4 种林分的凋落物和土壤为研究对象, 测定其水文特性及相关理化性质。结果表明, 木麻黄纯林可在短时间内积累显著高于其他林分的凋落物量[(36.83±1.11) t/hm^2], 是其他林分的 2~3 倍; 能够在同等时间内吸收更多水, 其饱和持水量可达其他林分的 2~3 倍[(102±2.15) t/hm^2]。同时, 4 种林分凋落物在各时间段内的平均失水速率相近, 这表明吸水量更高的林分能够拥有更好的持水效应。此外, 土壤含水量与凋落物的饱和持水率、有效拦蓄率、最大拦蓄率和碳氮比呈现显著正相关关系, 说明凋落物的水文特性和化学性质对土壤水分保持具有显著的影响。木麻黄纯林凋落物在沙质海岸的水分保持能力和生态系统涵养水源功能提升方面表现出显著优势, 对提升生态系统水文功能有重要意义。该研究为沙质海岸区域的生态恢复和持续管理提供了重要的理论依据和实践参考, 同时为未来的沿海防护林管理策略和生态系统服务功能优化提供了科学指导。

关键词: 沿海防护林; 凋落物; 水分补偿; 木麻黄; 沙质海岸

doi: 10.11926/jtsb.4940 CSTR:32235.14.jtsb.4940

Litter Water Retention Characteristics and Impacts on Soil Water Holding Capacity of Different Sandy Coastal Forests

LI Zhipeng[1,2,3], LIAO Jiawei[1,3], CHEN Hanyao[4], CHEN Shaocong[4], WEI Long[5], LI Xu[1,2,3], TANG Xuli[1,2*]

(1. *South China Botanical Garden*, *Chinese Academy of Sciences*, Guangzhou 510650, China; 2. *Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems*, *Chinese Academy of Sciences*, Guangzhou 510650, China; 3. *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China; 4. *Hudong Tree Farm*, Shanwei 516543, Guangdong, China; 5. *Guangdong Academy of Forestry*, Guangzhou 510520, China)

Abstract: To explore the significance of *Casuarina equisetifolia* as a major tree species in coastal protective forests for improving and maintaining the water conservation function of the ecosystem, this study took the litter and soil of four types of forests, namely pure *C. equisetifolia* forests, pure *Eucalyptus urophylla* forests, mixed coniferous and broad-leaved forests, and natural forests, as the research objects, and measured their hydrological characteristics and related physical and chemical properties. The results showed that pure *C. equisetifolia* forests could accumulate significantly more litter than other forests in a short period of time [(36.83±1.11) t/hm^2], which was 2 to 3 times that of other forests; they could absorb more water in the same period of time, and their saturated water holding capacity could reach 2 to 3 times that of other forests [(102±2.15) t/hm^2]. At the same time, the

收稿日期: 2024-07-09 **接受日期:** 2024-09-02
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3102104)资助
This work was supported by the National Key Research and Development Program (Grant No. 2022YFC3102104).
作者简介: 李志鹏(2000 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: lizhipeng@scbg.ac.cn
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xltang@scbg.ac.cn

average water loss rates of the litter of the four types of forests in each time period were similar, indicating that forests with higher water absorption capacity could have better water retention effects. In addition, soil moisture content was significantly positively correlated with the saturated water holding capacity, effective water retention rate, maximum water retention rate and carbon-nitrogen ratio of the litter, indicating that the hydrological characteristics and chemical properties of the litter had a significant impact on soil moisture retention. Pure *C. equisetifolia* forests showed significant advantages in water retention capacity and ecosystem water conservation function improvement in sandy coastal areas, which was of great significance for improving the hydrological function of the ecosystem. This study provided important theoretical basis and practical reference for the ecological restoration and sustainable management of sandy coastal areas, and at the same time provided scientific guidance for the future management strategies of coastal protective forests and the optimization of ecosystem service functions.

Key words: Costal forest; Litter; Water compensation; *Casuarina equisetifolia*; Coastal sandy area

凋落物层是森林生态系统中的重要功能层之一，疏松多孔的结构使其具有强大的吸水能力和储水能力，对森林的水分储存和释放起着十分重要的调控作用[1]，是量化评估森林水源涵养功能的重要指标之一[2–3]。凋落物的水文特性指森林地表凋落物层在水循环过程中的作用和表现，主要包括持水量、吸水失水速率、拦蓄效能，并受到林型、凋落物累积量、土壤性质等因素的影响，研究表明凋落物层的最大持水量可达 4.52~96.76 t/hm^2，是森林水循环中不可忽视的部分，对生态系统水源涵养产生重要影响[4–5]，证明了凋落物的水文效应受到如林分类型、凋落物来源树种及其特定的叶片性状等因素的显著影响[6–10]。

海岸防护林是我国沿海地区重要的生态屏障，具有改善区域环境条件、提高消灾减灾能力的重要作用。广东省海岸线总长 6 543 km，居全国首位，其中大陆海岸线长 4 114.3 km，岛屿岸线 2 428.7 km。其中沙质海岸线长 1 357.1 km，主要分布在广东省东部和西部[广东省沿海防护林体系建设工程规划(修编) (2023—2025 年)]。沙质海岸土壤为潮积或风积沙土，土质疏松，持水保水能力极差，水分成为限制防护林生长的主要因子[11]。华南地区沙质海岸防护林以木麻黄为主，是南方沿海的绿色长城，有研究发现木麻黄防护林的凋落物年产量可达同地区其他类型防护林的 2 倍以上[12]。凋落物层作为海绵层，在降水多时拦蓄水分，无降水时缓慢释放水分，增强土壤持水能力，并减少地表径流和土壤侵蚀，促进生态系统内土壤环境的稳定[13–14]。此外，凋落物也是表层土壤与森林内部进行水热交换的边界层，承担着土壤表面与空气进行相互作用的缓冲作用，能够最大限度地减少土壤中水分的蒸发，有助于土壤中水分的保存[15–17]。同时，凋落物本身水分的保持以及对降水的拦蓄也是森林水文学中的重要指标，降水时期，大量的水分可能被凋落物层进行储存，进而影响土壤整体的水分动态[18]。对于持水能力极差的沙质土壤，地表凋落物在抑制土壤水分蒸发、增加生态系统稳定性等方面具有重要的作用。故了解沙质海岸中不同林分凋落物的水文特性及其与表层土壤的相互作用对进一步进行沿海防护林的改造优化和改善沙质海岸土壤水分保持具有重要意义[17,19]。

目前，对于沙质海岸防护林的研究主要集中在造林树种选择、防护效应比较、生态效益评估等方面，而对不同林型凋落物水文功能关注较少。因此，本研究以粤东沙质海岸木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)纯林、桉树(*Eucalyptus urophylla*)纯林、针阔混交林和天然林为研究对象，通过探究不同林分类型凋落物持水特性和对土壤水量补偿，了解不同林分类型凋落物在沙质海岸中的水源涵养功能，探讨木麻黄纯林在沙质海岸的环境改善中的作用。以期更好地理解凋落物在生态系统的水分平衡和养分循环中的作用，为沙质海岸沿海防护林的进一步建设和优化提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区位于广东省汕尾市陆丰市湖东镇湖东林场(22.80969° N，115.92135° E)，是典型的粤东沙质海岸丘陵台地沿海防护林二级基干林带。该区域地处南亚热带气候区，年均气温约为 22.5 ℃，年均降水量约 1 500 mm，降水季节分配不均，其中 70%

发生在雨季(4 月—9 月)。研究区属于典型的沙质海岸，土壤类型为沙质土壤，偏碱性，有机质含量低。防护林以木麻黄人工林为主，有少量人工种植的桉树林、针阔叶混交林，和一片面积约 3 hm^2、结构完整的天然林。研究选择木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)纯林、桉树(*Eucalyptus urophylla*)纯林、针阔混交林 3 个人工林和 1 个天然林为研究对象，着重探讨不同林分类型的凋落物水源涵养功能。其中木麻黄纯林为 2013 年 19 号台风损毁后重新种植的林地；桉树林为 2010 年种植且未受采伐；针阔叶混交林为 1990 年种植的湿地松纯林中植入相思类植物形成的；天然林属于附近村落的风水林，林龄不详，有超过 40 a 的保护历史。主要林分类型及其特征见表 1。

表 1 采样林地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the stands

林分类型 Stand type	凋落物来源 Source of litter	林龄 Stand age (a)	植被密度 Density (ind./hm^2)	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均树高 Mean tree height (m)	土壤 pH Soil pH	土壤有机碳 Soil organic carbon (g/kg)
木麻黄纯林	木麻黄 *Casuarina equisetifolia*	10	2 667	5.9	6.4	7.89	1.71
桉树纯林	尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*	14	3 167	7.0	8.3	7.25	3.50
针阔混交林	湿地松 *Pinus elliottii*, 大叶相思 *Acacia auriculiformis*	35	1 894	8.5	6.7	5.83	2.70
天然林	潺槁木姜子 *Litsea glutinosa*, 土蜜树 *Bridelia tomentosa*, 楝 *Melia azedarach*	−	1 417	9.8	5.0	7.07	5.32

−: 林龄不详。

−: Age unknown.

1.2 方法

采样方法　在每种林型内设置 3 个 20 m×30 m 的样地，样地间距>50 m。每个样地内设置 3 个 0.5 m×0.5 m 的小样方进行凋落物采样。取出每个小样方内所有凋落物立即测量鲜重，并从每个小样方中取出等量凋落物作为样品装入网袋带回实验室进行持水试验[20–21]，记录样品鲜重，计算取样比例。去除凋落物后，采用 100 cm^3 环刀对样方内表层土壤(0~10 cm)进行采样，用以测定容重，并同时使用土壤环境检测仪在样地内沿对角线，设置 6 个样点测量土壤含水率，以平均值代表该样地的土壤水分状况。

测定方法　将采集的凋落物置于 85 ℃烘箱中烘干至恒重，称量其干重。随即采用浸泡法，将凋落物样品完全浸入装有清水的容器中，分别称量样品吸水 0.5、1、2、3、4、6、9、12、15、24 h 时的重量，每次拿出称量时均要保证无滴水产生。吸水 24 h 后所有样品在自然状态下进行风干，并按照同样的时间间隔进行称重[20,22–23]。凋落物样品的碳和氮则通过元素分析仪和稳定同位素比质谱仪进行测定。用烘干法测定土壤容重，将环刀土壤样品放置于烘箱内，于 105 ℃烘干至恒重，称量重量[24]。凋落物数据主要计算公式有：持水量=鲜重−干重，持水率=持水量/干重×100%，吸水速率=吸水量/吸水时长，失水速率=失水量/失水时长，最大拦蓄率=饱和持水率/自然持水率×100%，有效拦蓄率=0.85×饱和持水率−自然持水率，有效拦蓄量=累积量×有效拦蓄率。土壤容重=干重/取样体积，单位土层深度含水量=土壤自然含水率×容重。

1.3 数据的统计分析

采用 Excel 2021 对数据进行预处理，使用 Python 3.12 对数据进行统计分析和科研绘图。首先对数据进行正态性检验，然后采用方差分析(ANOVA)和 Tukey's HSD 检验对不同林分间的凋落物累积量、持水量、持水率、拦蓄量、拦蓄率的差异进行检验；对凋落物的吸水和失水相关物理量进行拟合，确定其随处理时长的变化关系；通过相关性分析、描述性分析等方法筛选影响土壤持水的凋落物因素。

2 结果和分析

2.1 不同林分凋落物厚度和现存量

沙质海岸防护林地内有较大的凋落物积累，4 种林分地表现存凋落物厚度和现存量差异显著，凋落物厚度与现存量呈明显线性相关。木麻黄纯林凋落物现存量最高，达(36.83±1.11) t/hm^2，其厚度为 12 cm；混交林和天然林凋落物现存量相似，分别

为(19.50±0.82)和(19.19±0.64) t/hm^2，但厚度分别为 3 和 4 cm；桉树纯林的凋落物现存量最低，仅(12.47±0.45) t/hm^2，厚度为 3 cm (图 1)。

2.2 凋落物的水文效应

持水量与持水率 凋落物含水率和相应的持水量表征自然状态下凋落物的水分保持能力，对土壤水分调节具有重要意义。木麻黄纯林凋落物持水量高达(17.3±1.27) t/hm^2，是针阔叶混交林和天然林的 6 倍、桉树林的 10 倍。木麻黄纯林凋落物自然持水率为(47±5)%，其余 3 种林型间凋落物自然持水率差异不显著，针阔叶混交林、桉树纯林、天然林的凋落物自然持水率分别为(14±2)%、(14±1)%、(14±1)% (图 2)。饱和持水量、饱和持水率反映了凋落物的孔隙结构和通透性，影响着凋落物对降雨的拦截和蓄水能力。天然林凋落物的饱和持水率高达(308±12)%，其次为桉树林、木麻黄纯林和针阔叶混交林。凋落物饱和持水量最高，为(102±2.15) t/hm^2，接近天然林凋落物饱和持水量的 2 倍，是针阔叶混交林的 2.5 倍、桉树纯林的 3 倍。

最大拦蓄率、有效拦蓄量和有效拦蓄率 凋落物的最大拦蓄率、有效拦蓄量和有效拦蓄率是反映凋落物在生态系统中对水文循环进行调控的重要参数，表征凋落物对降雨的拦蓄能力、水分保持能力等重要信息，并影响土壤水分保持能力。由图 3 可见，天然林地表凋落物对降水的拦截效率最高，其次为桉树纯林。木麻黄纯林凋落物对降水的有效拦蓄率和最大拦蓄率较天然林和桉树纯林低，但由于其凋落物现存量大，对降水的有效拦蓄量达(69.55±2.13) t/hm^2。混交林凋落物对降水的拦截能力最低。

吸水量、吸水速率、失水量和失水速率 通

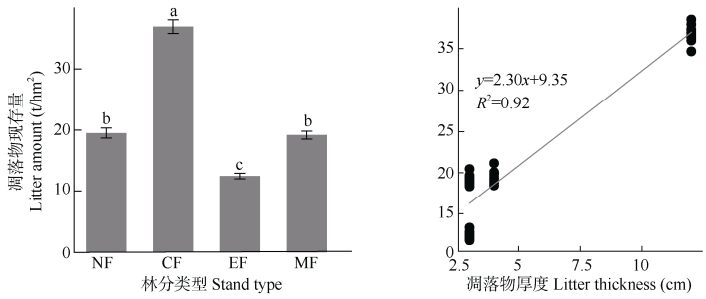

图 1 不同林分凋落物现存量及其与凋落物厚度的关系。NF: 天然林；CF: 木麻黄纯林；EF: 桉树纯林；MF: 混交林；柱上不同字母表示差异显著(P<0.01)。下同。

Fig. 1 Litter amount in different forests and its relationship with litter thickness. NF: Natural forest; CF: *Casuarina* forest; EF: *Eucalyptus* forest; MF: Mixed forest. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

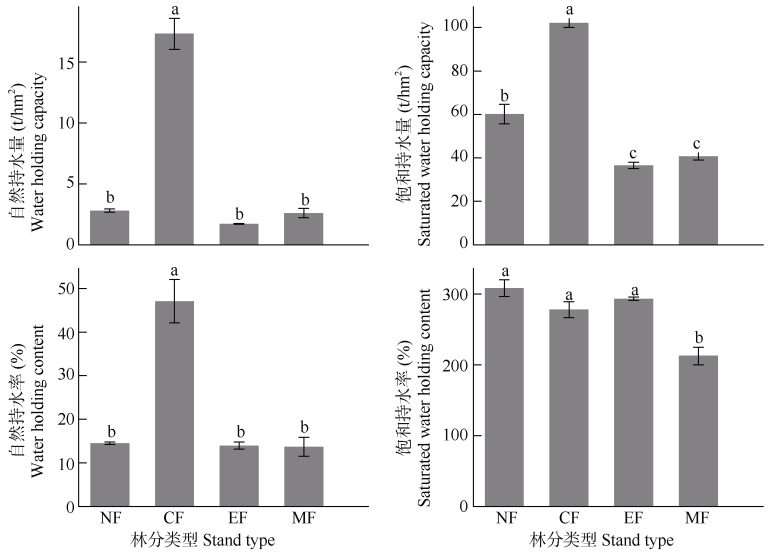

图 2 不同林分凋落物的自然持水量、饱和持水量、自然持水率、饱和持水率

Fig. 2 Litter water holding capacity, saturated water holding capacity, litter water holding content and saturated water holding content in different forests

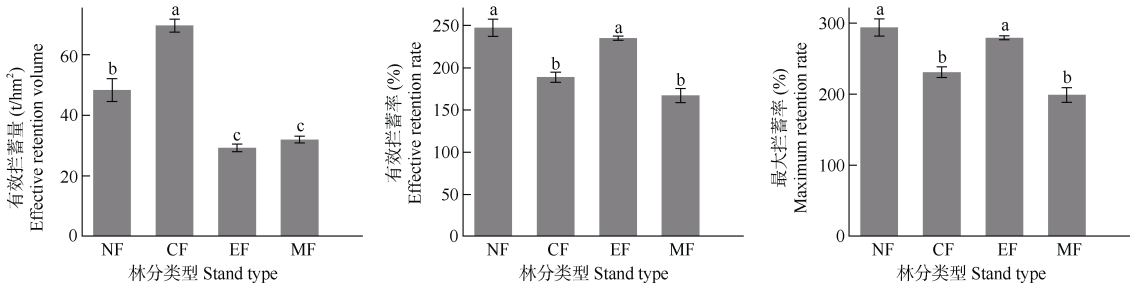

图 3 不同林分凋落物有效拦蓄量、有效拦蓄率、最大拦蓄率

Fig. 3 Effective retention volume, effective retention rate, and maximum retention rate of litter from different forests

过分析凋落物吸水量、吸水速率、失水量和失水速率随时间变化的规律评估不同林型凋落物的保水能力。4 种参数与时间满足幂函数关系($y=a\cdot t^b$)，除木麻黄纯林、桉树纯林、混交林吸水量的决定系数 R^2 为 0.92~0.95，其余拟合结果的 R^2 均大于 0.95 (表 2)。从图 4 可见，4 种林型凋落物吸水量在 0~6 h 均迅速增长，6 h 后基本呈现接近饱和持水状态。木麻黄纯林凋落物的吸水速率始终高于其余 3 种林分，前 6 h 的平均吸水速率达到(13.04±0.1) t/hm^2。天然林凋落物吸水速率低于木麻黄纯林但高于混交林和桉树纯林的吸水速率。凋落物失水过程和失水量随时间的变化幅度均低于吸水过程的水量及变化。0~2 h 是凋落物失水变化最快的阶段，此期间平均失水量分别为天然林>木麻黄纯林>针阔叶混交林≈桉树纯林。4 种林型凋落物失水速率在各时间点均呈现相近的失水速率，其中前 2 h 内呈现指数下降，随后持续缓慢降低至更加一致的失水速率。可见，木麻黄凋落物吸水量速率快，吸水量大，可以达到其他林型凋落物吸水量的 2~4 倍，而在风干过程中失水速率与其他林型凋落物失水速率相当，失水量不超过其他林型的 2 倍，因此，表现出最高的持水效应，其次为天然林、混交林和桉树纯林。

2.3 凋落物对土壤持水的影响

凋落物的理化指标的影响　凋落物对土壤持水具有一定影响，对表层土壤含水量和凋落物的各项指标进行相关分析并对结果进行筛选(R>0.5)，结果表明表层土壤含水量与凋落物饱和持水率、有效拦蓄率、最大拦蓄率和总碳含量呈显著正相关；但与凋落物总氮呈现显著负相关关系(图 5)。可见，具有更高饱和持水率、有效拦蓄率、最大拦蓄率和碳氮比的林分凋落物，能够更好的改善群落内部的土壤持水状况，进而改善群落内部环境。

表 2 不同林分凋落物吸水量、吸水速率、失水量、失水速率的乘幂拟合($y=a\cdot t^b$)结果

Table 2 Power function ($y=a\cdot t^b$) fitting results of water absorption, water absorption rate, water loss, and water loss rate for litter in different forests

指标 Index	林分类型 Stand type	参数 Parameter		
		a	b	R^2
吸水量 Water absorption	木麻黄纯林	59.992	0.126	0.938 8
	桉树纯林	24.372	0.127	0.927 9
	混交林	25.931	0.139	0.940 2
	天然林	43.248	0.100	0.959 6
失水量 Water loss	木麻黄纯林	8.599	0.294	0.966 8
	桉树纯林	4.580	0.211	0.960 3
	混交林	4.692	0.258	0.990 3
	天然林	10.607	0.175	0.996 8
吸水速率 Water absorption rate	木麻黄纯林	57.576	–0.821	0.999 7
	桉树纯林	23.458	–0.826	0.999 5
	混交林	24.918	–0.823	0.999 4
	天然林	42.416	–0.866	0.999 5
失水速率 Water loss rate	木麻黄纯林	7.405	–0.541	0.937 2
	桉树纯林	4.258	–0.676	0.984 8
	混交林	4.642	–0.717	0.999 4
	天然林	10.626	–0.818	0.999 8

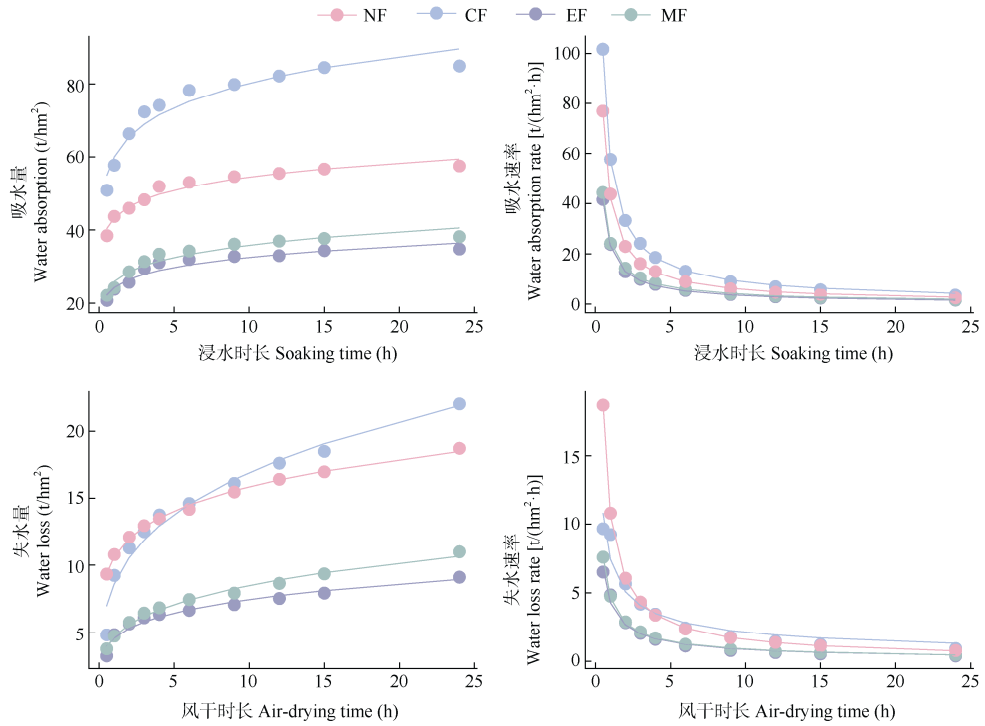

图 4 不同林分凋落物吸水量、吸水速率、失水量、失水速率变化

Fig. 4 Changes in water absorption, absorption rate, water loss, and loss rate of litter from different forests

凋落物持水量对土壤含水量的补偿 沙质土壤保水性极差，自然状态下储水量较低，而凋落物层作为重要的森林蓄水功能层之一，对分布于沿海的森林生态系统下的沙质土壤起着十分重要的水分补偿作用。由表 3 可见，在自然状态下，研究区域内每一单位土层(1 cm)的平均含水量远低于同气候带非沿海沙质土壤的含水量，而天然林单位土层含水量高出其余林分或与其群落多年对土壤结构的改善有关。使用各林分凋落物的自然状态下持水量，对该区域根系主要分布土层(0~20 cm)进行土壤水分补偿深度计算，能够更加清晰地对比出保水性更高的林分凋落物类型，由计算结果可见，木麻黄纯林和混交林具有较好的土壤水分补偿效应，且木麻黄纯林的补偿效应为混交林的 3.6 倍，为桉树纯林和天然林的 12 倍，相当补偿土壤深度分别为木麻黄纯林 3.6 cm、混交林 1.0 cm、桉树纯林和天然林为 0.3 cm。综合土壤含水状态分析，木麻黄纯林凋落物的补偿效应极佳，其次是混交林，其原因或

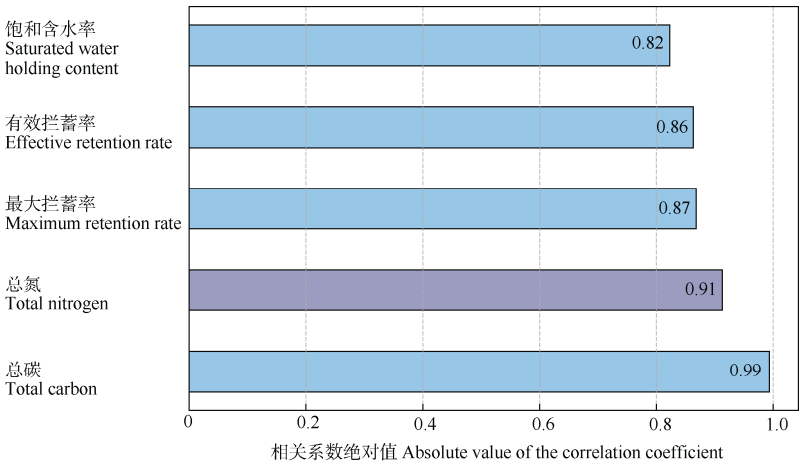

图 5 凋落物理化指标对土壤持水的影响。蓝色：正相关；紫色：负相关。

Fig. 5 Effect of litter physicochemical indicators on soil water retention. Blue: Positive correlation; Purple: Negative correlation.

表 3 不同林分凋落物补偿土层水量的平均深度

Table 3 Mean depth of water compensation of litter in different stands

林分类型 Stand type	单位土层(1 cm)平均含水量 Mean water content per unit (1 cm) soil layer (t/hm^2)	凋落物平均自然持水量 Mean natural water content of litter (t/hm^2)	补偿土层水量平均深度 Mean depth of soil water compensation (cm)
木麻黄纯林	4.84	17.34	3.6
桉树纯林	5.34	1.73	0.3
针阔混交林	2.60	2.61	1.0
天然林	8.86	2.83	0.3

或许与二者凋落物的形态物理特征有关，具有更高比表面积的叶型能够拥有更高的持水量并进一步提高凋落物的土壤水分补偿效应。

3 讨论和结论

林冠截留、凋落物持水、土壤蓄水是森林对降水再分配的主要过程，体现了森林的水源涵养功能[25]。凋落物层是影响森林生态系统水文动态的第二活跃层，能够对水循环产生显著影响[2–3,26]。凋落物的持水能力可由持水率和持水量反映，其中持水率受凋落物特性影响，而持水量与凋落物现存量密切相关[6,13,27]。同时，树种与林分类型凋落物的物理量差异，也将导致不同林分凋落物水文特性产生差异[28–29]，包括持水、拦蓄等综合效应[30–31]。相关研究指出具有较多孔隙的凋落物或分解程度高的凋落物吸水面大，具有较大的表面张力，故其蓄水和持水性能较好。因此，不同林分的凋落物组成不同，由此造成凋落物的分解程度与凋落物形态差异，进而影响凋落物的水文特性[3,14,32]。在本研究中，木麻黄纯林的凋落物层持水效应最佳，对沙质海岸的环境改善具有显著的积极作用，这与同气候带的其他研究结果一致[33–34]。另有研究表明，阔叶林凋落物往往持水性更强，而针叶林则因凋落物量更高及独特的叶形而具有较高的持水量[35]，但想要系统地研究同一气候区内不同区域凋落物特征及其水文特性，需要开展更加全面和深入的研究。本研究中，阔叶植物为主的天然林和桉树林凋落物具有更高的降水拦截能力，木麻黄凋落物主要由针叶状的小枝构成，其本身的持水性不及阔叶凋落物，但现存量远高于其它林型。可见，木麻黄林较高的凋落物现存量决定了其具有较高的持水量。与桉树林和针阔混交林相比，木麻黄林通过凋落物层减少水分散失的潜力更大。因此，在沙质海岸生境中，木麻黄林凋落物层可能具有更高的持水能力和应用潜力。

凋落物的吸水速率则与持水能力密切相关，吸水速率越大，林内降水涵蓄的速率越快，可以更好地减少地表径流发生。本研究表明沙质海岸防护林凋落物吸水速率与浸水时间呈幂函数方程变化，在 0~6 h 内，尤其是前 2 h 凋落物的持水量迅速上升，随后趋于平稳。表明在粤东沙质海岸防护林生态系统中，凋落物层在短时间内可以迅速吸收降水，减少地表径流发生。最大拦截量是调控凋落物持水能力的重要指标，反映凋落物对降水的最大拦截能力[36]。虽然天然林对降水的拦截率较木麻黄林高，但在 2 h 以内其凋落物失水率也显著高于木麻黄，综合说明木麻黄林具有更好的保水效果。

凋落物的水文特性和化学性质对表层土壤的水分保持具有十分重要的作用。表层土壤持水率与凋落物层饱和持水率、有效拦蓄率和最大拦蓄率呈显著正相关，表明能够影响凋落物水文特性的相关因素，如凋落物厚度、累积量、植被类型等，能够通过减少土壤水分散失并向土壤缓慢释放储水而进一步影响表层土壤含水量[26,37]。而土壤持水率与凋落物总碳含量呈极显著正相关，与凋落物总氮含量呈极显著负相关，即与凋落物碳氮比呈显著正相关，其原因或与微生物活动有密切联系，凋落物的碳氮比增大意味着微生物活动的活跃，以促进凋落物的分解增加土壤的有机质含量[38]，使土壤形成稳定的团粒结构，提高土壤孔隙度和持水能力[37]，进而显著改善凋落物-土壤连续体的水分储存能力。同时，凋落物所储水量可以有效补偿土壤散失的水分，尤其是在土壤持水能力较差的条件下[3,7]。这些凋落物通过吸收储存降雨和缓慢释放水分，能够一定程度内提高土壤湿度，增加土壤持水量，从本研究结果来看，木麻黄纯林凋落物层能够极大的为土壤提供水分补偿。为进一步探讨凋落物层对森林生态系统蓄水功能的影响，可在凋落物持水主导土壤含水量的时间动态上展开更加深入的研究。

综上，通过分析沙质海岸防护林 4 种林分类型凋落物水文特性及其对表层土壤含水量的影响和补偿效果，表明木麻黄纯林的凋落物具有最高的凋落物积累量并优于其他林分类型的水源涵养功能，其饱和持水量、自然持水量和有效拦蓄量均显著高于其他林分。通过合理增加木麻黄林的种植比例，优化林分配置，可以促进降雨入渗土壤，改善土壤结构，增强持水能力，有效改善沙质海岸的土壤环境，增强防护林生态系统的水源涵养功能，提升整体生态系统服务功能。未来仍需关注不同林分凋落物在自然状态下的长期水文特征和效应，促进对特定生态系统水热变化的理解。

参考文献

[1] GE X G, ZENG L X, XIAO W F, et al. Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(2): 102–108. doi: 10.1016/j.chnaes.2013.01.006.

[2] ZAGYVAI-KISS K A, KALICZ P, SZILÁGYI J, et al. On the specific water holding capacity of litter for three forest ecosystems in the eastern foothills of the Alps [J]. Agric For Meteor, 2019, 278: 107656. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107656.

[3] GUEVARA-ESCOBAR A, GONZALEZ-SOSA E, RAMOS-SALINAS M, et al. Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2007, 11(5): 1703–1716. doi: 10.5194/hess-11-1703-2007.

[4] ZHU J Z, LIU J J, ZHU Q K, et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers [J]. J Beijing For Univ, 2002, 24(5/6): 30–34. [朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 30–34. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2002.05.006.]

[5] YAN J H, ZHOU G Y, TANG X L, et al. Characteristics of litter and its contained water in three succession communities in Dinghushan Mountain [J]. Chin J Appl Ecol, 2001, 12(4): 509–512. [闫俊华, 周国逸, 唐旭利, 等. 鼎湖山 3 种演替群落凋落物及其水分特征对比研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 509–512.]

[6] PEREIRA L C, BALBINOT L, LIMA M T, et al. Aspects of forest restoration and hydrology: the hydrological function of litter [J]. J For Res, 2022, 33(2): 543–552. doi: 10.1007/S11676-021-01365-1.

[7] TU Z H, CHEN S Y, RUAN D S, et al. Differential hydrological properties of forest litter layers in artificial afforestation of eroded areas of latosol in China [J]. Sustainability, 2022, 14(22): 14869. doi: 10.3390/SU142214869.

[8] XIA L, SONG X Y, FU N, et al. Effects of forest litter cover on hydrological response of hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. CATENA, 2019, 181: 104076. doi: 10.1016/j.catena.2019.104076.

[9] SU S P, LIU X E. The water storage function of litters and soil in five typical plantations in the northern and southern mountains of Lanzhou, northwest China [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8231. doi: 10.3390/SU14148231.

[10] DE LIMA J A, TONELLO K C. Rainfall partitioning in amazon forest: Implications of reduced impact logging on litter water conservation [J]. Hydrology, 2023, 10(4): 97. doi: 10.3390/HYDROLOGY10040097.

[11] WU X L, YE G F. Soil water dynamics and availability in a coastal sand dune *Casuarina* plantation [J]. Staits Sci, 2008(10): 46–50. [吴锡麟, 叶功富. 滨海沙地木麻黄人工林土壤水分动态及有效性 [J]. 海峡科学, 2008(10): 46–50. doi: 10.3969/j.issn.1673-8683.2008.10.017.]

[12] LI K, SHI Y, ZHAO W D, et al. Litterfall production and dynamics of five coastal protective plantations [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2022, 28(2): 317–324. [李凯, 石焱, 赵文东, 等. 5 种沿海防护人工林凋落物产量及动态 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 317–324. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11045.]

[13] CHEN S, CAO T, TANAKA N, et al. Hydrological properties of litter layers in mixed forests in Mt. Qinling, China [J]. IForest, 2018, 11(2): 243–250. doi: 10.3832/ifor2535-011.

[14] NERIS J, TEJEDOR M, RODRÍGUEZ M, et al. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. CATENA, 2013, 108: 50–57. doi: 10.1016/j.catena.2012.04.011.

[15] CHENG J D, LIN J P, LU S Y, et al. Hydrological characteristics of betel nut plantations on slopelands in central Taiwan / Caractéristiques hydrologiques de plantations de noix de bétel sur des versants du centre Taïwan [J]. Hydrol Sci J, 2008, 53(6): 1208–1220. doi: 10.1623/hysj.53.6.1208.

[16] GIÁCOMO R G, ALVES M C, CAMARA R, et al. Litterfall and nutrient input in a degraded area [J]. Floresta Ambiente, 2017, 24: e20160028. doi: 10.1590/2179-8087.002816.

[17] XIE J J, SU D R. Water-holding characteristics of litter in meadow steppes with different years of fencing in Inner Mongolia, China [J]. Water, 2020, 12(9): 2374. doi: 10.3390/w12092374.

[18] FLORIANCIC M G, ALLEN S T, MEIER R, et al. Potential for significant precipitation cycling by forest-floor litter and deadwood [J]. Ecohydrology, 2023, 16(2): e2493. doi: 10.1002/ECO.2493.

[19] BAI Y X, ZHOU Y C, DU J J, et al. Effects of a broadleaf-oriented transformation of coniferous plantations on the hydrological characteristics of litter layers in subtropical China [J]. Glob Ecol Conserv, 2021, 25: e01400. doi: 10.1016/J.GECCO.2020.E01400.

[20] XUE L, HE Y J, QU M, et al. Water holding characteristics of litter in plantations in south China [J]. J Plant Ecol, 2005, 29(3): 415–421. [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): 415–421. doi: 10.17521/cjpe.2005.0055.]

[21] CHENG S Y, CHEN Q Y, QIAO D, et al. Litter accumulation and water retention characteristics of different stands of tropical rainforest in Hainan [J]. Trop Geogr, 2024, 44(4): 700–708. [程思源, 陈俏艳, 乔栋, 等. 海南热带雨林不同林分凋落物储量及其持水特性 [J]. 热带地理, 2024, 44(4): 700–708. doi: 10.13284/j.cnki.rddl.003853.]

[22] 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]. J Zhejiang A&F Univ, 2021, 38(2): 320–328. [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. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20200355.]

[23] CASTAGNOLLI L, BOGGIANI F S, LIMA J A D, et al. Hydrological properties of litter in different vegetation types: Implications for ecosystem functioning [J]. Hydrology, 2023, 10(8): 165. doi: 10.3390/HYDROLOGY10080165.

[24] KANG C B, GUO H Q, ZHANG Y, et al. Infiltration characteristics of soil moisture at different altitudes and slopes of Guandi Mountain [J]. J NE For Univ, 2022, 50(6): 76–82. [亢晨波, 郭汉清, 张垚, 等. 关帝山不同海拔和坡向土壤水分入渗特征 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(6): 76–82. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.06.018.]

[25] ZHOU G Y. Ecosystem Hydrothermal Principles and Their Applications [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997. [周国逸. 生态系统水热原理及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1997.]

[26] LI Y, LI B, ZHANG X, et al. Differential water and soil conservation capacity and associated processes in four forest ecosystems in Dianchi Watershed, Yunnan Province, China [J]. J Soil Water Conserv, 2015, 70(3): 198–206. doi: 10.2489/jswc.70.3.198.

[27] WANG C, ZHAO C Y, XU Z L, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment [J]. J Arid Land, 2013, 5(2): 207–219. doi: 10.1007/s40333-013-0151-5.

[28] GIWETA M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: A review [J]. J Ecol Environ, 2020, 44(1): 11. doi: 10.1186/s41610-020-0151-2.

[29] TU Z H, CHEN S Y, CHEN Z X, et al. Hydrological properties of soil and litter layers of four forest types restored in the gully erosion area of latosol in south China [J]. Forests, 2023, 14(2): 360. doi: 10.3390/F14020360.

[30] ZHANG J L, ZHANG T, PU L H, et al. Litter eco-hydrological function characteristics of three typical plant communities in the area of karst peak-cluster depressions from Guizhou, China [J]. PLoS One, 2022, 17(12): e0278565. doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0278565.

[31] MARTIN W K E, TIMMER V R. Capturing spatial variability of soil and litter properties in a forest stand by landform segmentation procedures [J]. Geoderma, 2006, 132(1–2): 169–181. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.05.004.

[32] ACHARYA B S, STEBLER E, ZOU C B. Monitoring litter interception of rainfall using leaf wetness sensor under controlled and field conditions [J]. Hydrol Process, 2017, 31(1): 240–249. doi: 10.1002/hyp.11047.

[33] WANG X Y, CHEN Y Q, XUE Y, et al. Soil physical properties and water conservation function of typical forests in the coastal terraces in Hainan [J]. Chin J Trop Agric, 2017, 37(2): 5–11. [王小燕, 陈毅青, 薛杨, 等. 海南滨海台地典型森林土壤物理性质及水源涵养分析 [J]. 热带农业科学, 2017, 37(2): 5–11. doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.2017.02.002.]

[34] MENG Q Q, GE L L, YANG X M, et al. Water-holding capacity and accumulation amount of litters in different plantations in coastal sandy area [J]. J Soil Water Conserv, 2019, 33(3): 146–152. [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. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.022.]

[35] DONG H, YAN C D, SU C L, et al. Litter and soil hydrological effects of five no-commercial forests in Dongguan [J]. J Soil Water Conserv, 2021, 35(5): 144–149. [董辉, 严朝东, 苏纯兰, 等. 东莞 5 种生态公益林枯落物及土壤水文效应 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 144–149. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.021.]

[36] LIU X E, SU S P. Hydrological functions of litters under five typical plantations in southern and northern mountains of Lanzhou City, northwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 2020, 31(8): 2574–2582. [刘小娥, 苏世平. 兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2574–2582. doi: 10.13287/j.1001-9332.202008.019.]

[37] DING N, BAI Y X, ZHOU Y C. Tree species mixtures can improve the water storage of the litter-soil continuum in subtropical coniferous plantations in China [J]. Forests, 2023, 14(2): 431. doi: 10.3390/F14020431.

[38] XING J M, HU C, SONG C G, et al. Nitrogen deposition modulates litter decomposition and enhances water retention in subtropical forests [J]. Forests, 2024, 15(3): 522. doi: 10.3390/F15030522.