

程思源, 陈俏艳, 乔栋, 戴黎聪. 2024. 海南热带雨林不同林分凋落物储量及其持水特性. 热带地理, 44 (4): 700-708.
Cheng Siyuan, Chen Qiaoyan, Qiao Dong, and Dai Licong. 2024. Litter Accumulation and Water Retention Characteristics of Different Stands of Tropical Rainforest in Hainan. *Tropical Geography*, 44 (4): 700-708.

海南热带雨林不同林分凋落物储量及其持水特性

程思源, 陈俏艳, 乔栋, 戴黎聪

(海南大学 生态与环境学院, 海口 570228)

摘要: 以海南热带雨林地区3种典型林分——橡胶林、原始林和次生林为研究对象, 通过测定其凋落物储量、持水量、持水率及凋落物吸水速率, 探究热带雨林不同林分凋落物储量及持水特性。结果表明: 1) 原始林的凋落物储量 (2.791 t/hm^2) 最大, 显著高于次生林 (2.077 t/hm^2) 和橡胶林 (1.660 t/hm^2 , $P<0.05$)。2) 对于凋落物持水量和持水率, 原始林和次生林均随着浸水时间的变化而增大, 原始林的凋落物持水量和持水率高于次生林, 随后趋于相对平稳, 而橡胶林凋落物持水量和持水率随着浸水时间无明显趋势。整体而言, 各林分凋落物吸水速率与浸水时间之间的关系呈较好的幂函数关系。3) 3种林型最大持水量表现为: 原始林 (8.041 t/hm^2) > 次生林 (6.251 t/hm^2) > 橡胶林 (4.896 t/hm^2); 3) 对于吸水速率和失水速率而言, 失水率表现为: 橡胶林 > 次生林 > 原始林; 最大失水量表现为原始林 (5.225 t/hm^2) > 次生林 (4.626 t/hm^2) > 橡胶林 (4.079 t/hm^2), 而最大失水率表现为: 橡胶林 (246.319%) > 次生林 (222.649%) > 原始林 (189.748%); 4) 因原始林凋落物储量最大, 其最大拦蓄量和有效拦蓄量均表现为原始林 > 次生林 > 橡胶林; 最大拦蓄率和有效拦蓄率均表现为原始林 > 橡胶林 > 次生林。综上, 不同林分凋落物储量和持水性存在显著差异, 原始林凋落物相比于其他2种林分具有较高凋落物储量和凋落物持水量以及较低的失去率, 表明热带原始林凋落物的累积对于调节森林水量和减弱地表径流的发生具有重要作用。

关键词: 凋落物储量; 热带雨林; 持水量; 吸水速率; 有效拦蓄; 海南

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2024)04-0700-09

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003853

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



热带雨林作为地球表面极重要的森林类型, 约占世界森林总面积的40%, 其丰富地上凋落物层通过对雨水的截留、入渗、储存和蒸发等过程, 削弱了降雨对土壤的冲击力与侵蚀力, 在很大程度上减少了地表径流和水土流失的发生(周光益, 1997)。凋落物层作为森林对降水截留的最后一层, 存在于森林植被和土壤层之间, 是森林生态系统垂直结构中十分关键的一层(宋小帅等, 2014; 肖文贤等, 2023), 不仅参与森林生态系统养分和能量的流动, 而且枯落物层内部空间结构疏松、具有良好的透水性和保水能力, 在水源涵养和水土保持等方面发挥重要作用(朱金兆等, 2002)。过去几十年由于大

规模的商业采伐和少数民族长期的刀耕火种, 人为干扰后不同恢复阶段的次生林和人工林成为海南热带森林的主要森林类型(丁易等, 2011)。然而目前关于热带原始林转化为人工林和次生林其凋落物水源涵养功能是否发生显著改变仍不清楚(余新晓, 2013)。因此, 探究热带雨林不同林分凋落物储量及持水特性, 对于评估热带雨林水源涵养功能具有重要意义。

近年来, 国内外关森林水源涵养功能研究已有大量报道, 但主要关注不同恢复阶段水源涵养功能的影响, 如董安涛(2016)通过研究西双版纳不同恢复阶段的人工橡胶林水源涵养功能发现, 随着人

收稿日期: 2023-05-18; **修回日期:** 2023-08-24

基金项目: 海南省自然科学基金项目(422QN264); 海南省“南海新星”科技创新人才平台项目(NHXXRCXM202303); 国家自然科学基金项目(42207524); 海南大学科研启动基金[KYQD(ZR)-22085]

作者简介: 程思源(2000—), 男, 河南省平顶山人, 硕士研究生, 主要从事森林水文研究, (E-mail) sycheng@hainanu.edu.cn;

通信作者: 戴黎聪(1991—), 男, 江西上饶人, 副教授, 主要从事生态水文学研究, (E-mail) licongdai@hainanu.edu.cn。

工橡胶林恢复年限的增加,其水源涵养功能呈先增加后减少趋势;林灯等(2016)通过研究海南热带次生林恢复过程中枯落物及土壤水源涵养功能变化发现,随着次生林恢复年限的增加,凋落物最大持水率逐渐减小。此外,目前关于森林凋落物持水能力研究也有大量报道,凋落物持水特性不仅受降雨量及降雨持续时间影响,还受林分密度、林冠透雨特性、坡度和土壤孔隙度等因素的影响(贾剑波,2016)。如高迪等(2019)通过研究六盘山华北落叶松林凋落物发现,凋落物持水能力主要受枯落物数量、组成、林龄、分解状况影响;而杨俊玲(2013)以福建将乐国有林场杉木林研究发现,凋落物的持水能力主要受降雨量的大小和强度影响。总体而言,以往关于凋落物储量及持水特性主要集中在温带和亚热带地区,对于海南热带地区凋落物储量及持水特性研究较为薄弱,尤其是关于不同林分凋落物储量及持水特性变异特征尚不清晰。

基于此,本文选取海南七仙岭温泉国家森林公园范围内的原始林、次生林和橡胶林3种林分,使用浸水法,通过测定凋落物储量及持水特性,探究热带雨林不同林分凋落物储量及持水特性差异。以期期为热带雨林生态系统研究以及海南国家热带雨林公园建设提供理论依据和数据支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南省保亭黎族苗族自治县的海南七仙岭温泉国家森林公园(18°14′—18°44′ N、109°35′—109°45′ E),东接陵水县,南邻三亚市,西连乐东县,北依五指山市和琼中县,县境内东西宽49 km,南北长54 km。该区属热带季风气候,具有热量丰富、雨量丰沛、蒸发量大。平均海拔100~200 m,年均温23℃左右,年降雨量1 900 mm,但全年降雨不平衡,4—10月为雨季,雨量占全年雨量的87%,10月至翌年3月份为旱季。该区域拥有十分丰富的生物资源和温泉资源,多为热带雨林植被,具有多层、常绿、混交和多树种特点。珍贵树种有坡垒、花梨、绿楠、红罗和加卜等。研究区内典型林分有原始林、次生林和橡胶林。该区域土壤类型主要以花岗岩、沙岩为母质发育而成的砖红壤为代表类型,土层比较薄,约80~100 cm,土壤pH约5.5,土壤养分特征见表1所示。

1.2 研究方法

2023年2月,在海南省保亭黎族苗族自治县的

表1 3种林分土壤养分特征

Table 1 Soil nutrient information of three vegetational types g/kg

林分	有机碳	速效氮	全氮	全碳
橡胶林	13.72±2.67	0.21±0.03	1.54±0.21	16.60±2.56
次生林	12.69±1.13	0.19±0.02	1.41±0.11	13.77±1.21
原始林	17.24±1.13	0.26±0.02	1.96±0.14	18.88±1.71

海南七仙岭温泉国家森林公园内选取坡形、坡度、坡向等地形因子基本一致的3种林分(原始林、次生林和橡胶林),在每种林分分别设置3个20 m×20 m的标准样地,调查乔木层胸径、冠幅和树高等植被因素;其次,在标准样地中四角及中心位置选取1 m×1 m的小样方各5个,用于收集凋落物。不同林分的基本情况见表2所示。

表2 3种林分样地基本情况

Table 2 Basic information of three vegetational types

林分	树高/m	胸径/cm	冠幅/(m×m)	郁闭度
原始林	8.161±0.432	20.969±1.952	2.000×2.262	0.8
次生林	5.192±0.731	12.275±2.518	1.592×1.742	0.6
橡胶林	9.383±0.212	19.567±1.400	1.842×2.108	0.4

1.3 测定方法

将采集的凋落物带回实验室,称其自然状态质量及在85℃烘箱中烘至恒量的质量,以干质量推算凋落物的储量,并计算自然含水率。同时,采用室内浸泡法,称取50 g重量烘干的凋落物样品放入尼龙网袋中,再将装有凋落物的尼龙网袋放入装有清水的容器中,并使其完全浸没,分别浸泡0.5、1、2、4、6、9、12、24 h后分别拿出沥出水分确保无水分滴出后称量,并计算每个时段的吸水量和吸水速率,每种林分凋落物重复6次。吸水24 h后,将所有样品在自然条件下风干,并在被风干的0.5、1、2、4、6、9、12、24 h后分别称量,并计算每个时段的吸水量和吸水速率。每次称量所得凋落物湿质量与干质量的差值,即为凋落物样品在不同浸泡时长的持水量,并由此计算各时间段凋落物的持水量、持水率、平均自然含水率、最大失水率、最大失水量、有效拦蓄率和有效拦蓄量等水文参数(简永旗等,2021)。计算公式为:

$$\text{凋落物持水量}(\text{t}/\text{hm}^2)=[\text{凋落物湿重}(\text{kg}/\text{m}^2)-\text{凋落物干重}(\text{kg}/\text{m}^2)]\times 10 \quad (1)$$

$$\text{凋落物持水率}(\%)=\text{凋落物持水量}/\text{凋落物干重}\times 100\% \quad (2)$$

$$\text{吸水速率}[\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}^{-1})]=\text{凋落物持水量}/\text{吸水时间} \quad (3)$$

平均自然含水率(%)=(凋落物鲜重-凋落物干重)/凋落物干重×100% (4)

凋落物最大持水率(%)=(24 h时的凋落物湿重-凋落物干重)/凋落物干重×100% (5)

最大持水量(t/hm^2)=凋落物累积量×凋落物最大持水率 (6)

最大拦蓄率(%)=最大持水率-平均自然含水率 (7)

有效拦蓄率(%)=0.85×最大持水率-平均自然含水率 (8)

有效拦蓄量(t/hm^2)=凋落物累积量×有效拦蓄率 (9)

凋落物失水量(t/hm^2)=吸水 24 h 时的凋落物湿重-凋落物干重 (10)

凋落物失水率(%)=凋落物失水量/凋落物干重×100% (11)

失水速率(%)=凋落物失水量/失水时间 (12)

1.4 数据处理与分析

采用 R 软件进行统计分析, 为比较不同植被凋落物储量和持水特性差异, 采用单因方差分析 (ANOVA), 利用 Duncan 法进行多重比较和差异显著性分析 ($P < 0.05$), 并使用 Origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林分凋落物储量及含水率

3 种林分凋落物的储量存在显著差异, 其中原始林凋落物的储量 ($2.79 \pm 0.32 \text{ t}/\text{hm}^2$) 显著高于次生林 ($2.08 \pm 0.15 \text{ t}/\text{hm}^2$) 和橡胶林 ($1.66 \pm 0.11 \text{ t}/\text{hm}^2$) ($P < 0.05$)。同时, 3 种林地 (橡胶林、原始林、次生林) 的平均自然含水率也存在一定差异, 具体表现为: 原始林 (57.57%) > 次生林 (48.33%) > 橡胶林 (46.44%)。

2.2 不同林分凋落物持水量和持水率

3 种林分 (橡胶林、原始林、次生林) 的最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量存在显著差异 ($P < 0.05$), 而最大失水量 3 种林分无显著差异 ($P > 0.05$, 图 1)。总体而言, 最大持水量表现为: 原始林 ($8.041 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 次生林 ($6.251 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 橡胶林 ($4.896 \text{ t}/\text{hm}^2$) (图 1-a); 最大拦蓄量表现为: 原始林 ($6.45 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 次生林 ($5.24 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 橡胶林 ($4.11 \text{ t}/\text{hm}^2$) (图 1-b); 有效拦蓄量表现为: 原始林 ($5.25 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 次生林 ($4.30 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 橡胶林

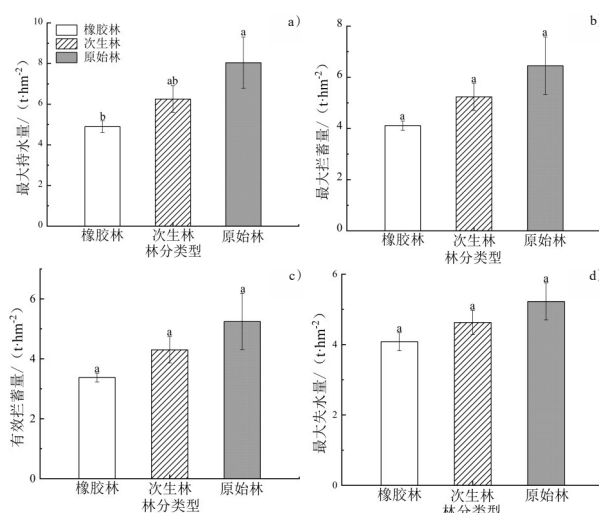


图1 3种林分凋落物最大持水量(a)、最大拦蓄量(b)、有效拦蓄量(c)和最大失水量(d)

Fig.1 Maximum water holding capacity(a), maximum blocking capacity(b), effective blocking capacity(c) and maximum water losing capacity(d) of three vegetational types

注: 不同字母表示不同林分类型间差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示不同类型间差异不显著 ($P > 0.05$); 图 2 同。

($3.38 \text{ t}/\text{hm}^2$) (图 1-c); 最大失水量表现为: 原始林 ($5.225 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 次生林 ($4.626 \text{ t}/\text{hm}^2$) > 橡胶林 ($4.079 \text{ t}/\text{hm}^2$) (图 1-d)。

对于持水率而言, 3 种林地 (橡胶林、原始林、次生林) 的最大持水率、最大拦蓄率和有效拦蓄率无显著差异 ($P > 0.05$, 图 2), 而最大失水率存在显著差异 ($P < 0.05$, 图 2)。整体而言, 最大拦蓄率表现为: 原始林 (250.52%) ≈ 橡胶林 (248.78%) > 次生林 (228.00%); 有效拦蓄率表现为: 原始林 (205.70%) ≈ 橡胶林 (204.49%) > 次生林 (185.18%); 而最大失水率表现为: 橡胶林 (246.319%) > 次生林 (222.649%) > 原始林 (189.748%)。

2.3 不同林分凋落物持水量、持水率与浸泡时间关系

原始林和次生林的持水量随着浸水时间的增加均呈先增加后趋于稳定趋势, 而橡胶林随着浸水时间的增加无明显变化趋势 (图 3-a)。观测开始 6 h 内 3 种林地的持水量表现为: 橡胶林 ($3.38 \text{ t}/\text{hm}^2$) < 次生林 ($4.21 \text{ t}/\text{hm}^2$) < 原始林 ($4.97 \text{ t}/\text{hm}^2$)。3 种林分从观测开始 24 h 内的持水量基本与 12 h 内的持水量无太大变化, 整体表现为: 原始林 > 次生林 > 橡胶林 (图 3-a)。对于凋落物的持水率, 与凋落物

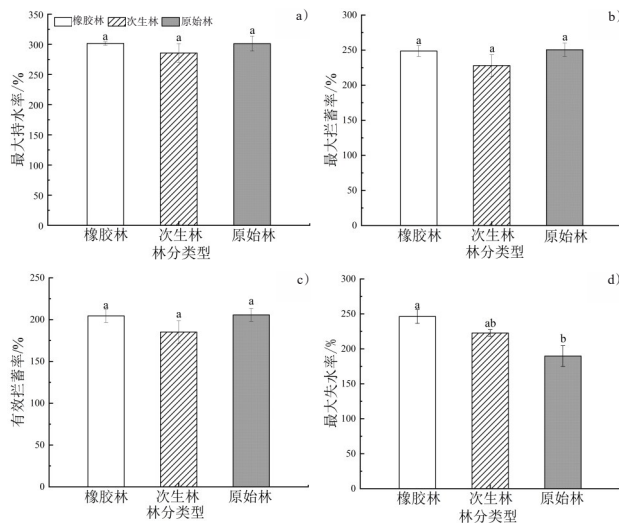


图2 3种林分凋落物最大持水率(a)、最大拦蓄率(b)、有效拦蓄率(c)和最大失水率(d)

Fig.2 Maximum water holding rate(a), maximum blocking rate(b), effective blocking rate(c), and maximum water losing rate(d) of three vegetational types

的持水量类似, 原始林和次生林的持水量均随着浸水时间的增加均呈先增加后趋于稳定趋势, 而橡胶林随着浸水时间的增加无明显趋势(图3-b), 从观测开始6 h内, 原始林和次生林持水率从刚开始的218.80%和224.71%增长至298.18%和278.69%, 观测12至24 h持水率达到饱和状态。原始林变化幅度最大, 达到饱和状态时, 原始林持水率最大(301.18%), 其次是橡胶林(296.96%)和次生林(296.32%, 图3-b)。

2.4 不同林分凋落物的吸水速率和失水速率

通过对3种林分凋落物吸水速率与浸水时间进行拟合曲线发现, 吸水速率和浸水时间二者具有较好的幂函数关系($y=at^b$), 其相关系数 R^2 均在0.99以上, 表明该函数能模拟凋落物吸水速率与浸水时间关系(图4-a)。总体而言, 原始林的吸水速率略高于橡胶林和次生林, 在观测开始前3 h内, 3种林分的吸水速率快速下降, 随着浸水时间的持续增加, 吸水速率趋于平稳(图4-a)。对于失水速率, 3种林分(原始林、橡胶林、次生林)的失水速率均呈先上升后降低趋势, 且橡胶林失水速率变化最大(图4-b), 在风干的第1小时内失水速率达到最大 $[3.72 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$, 随后一直减小直至第24小时内达到最小值 $[1.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$, 而原始林 $[2.61 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 和次生林 $[2.30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 则都在风干2 h内达到失水最高速率。

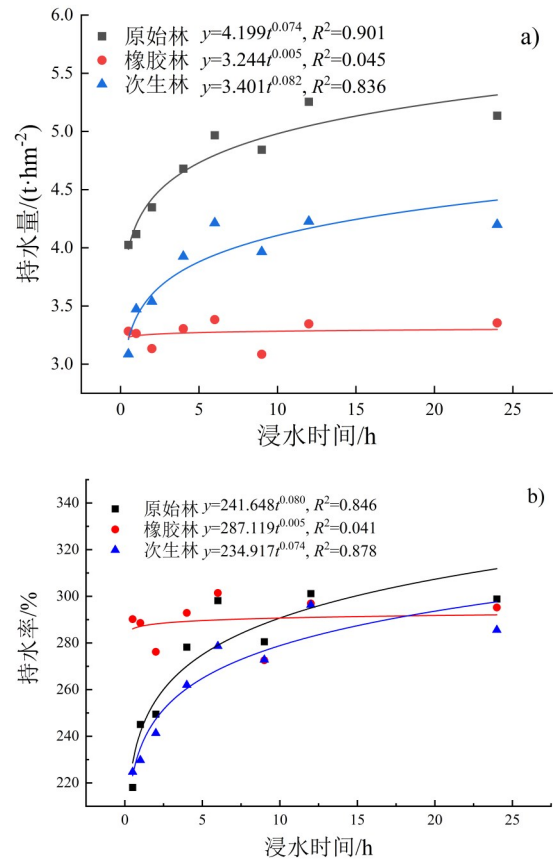


图3 3种林分凋落物持水量(a)和持水率(b)与浸水时间关系

Fig.3 Relationship between water holding capacity(a) and water holding rate(b) of litters and immersed time of three vegetational types

2.5 不同林分凋落物的失水量和失水率

3种林地(橡胶林、原始林、次生林)的失水率和失水量变化趋势基本一致, 随着风干时间的增加, 失水率和失水量均呈现逐渐增加趋势(图5)。总体而言, 失水率表现为: 橡胶林>原始林>次生林, 在观测开始的24 h内, 橡胶林的失水率(246.319%)是次生林(189.749%)的1.3倍。对于凋落物的失水量, 3种林分无明显差别。观测开始9 h内, 3种林地(橡胶林、原始林、次生林)的失水量基本相等, 橡胶林的失水量略大于次生林和原始林, 在观测9至24 h内, 3种林地的失水量表现为: 次生林>原始林>橡胶林。这表明次生林的短时间保水能力较强, 而长时间保水能力相对较弱, 橡胶林刚好相反, 短期保水能力较弱, 长时间保水能力较强。

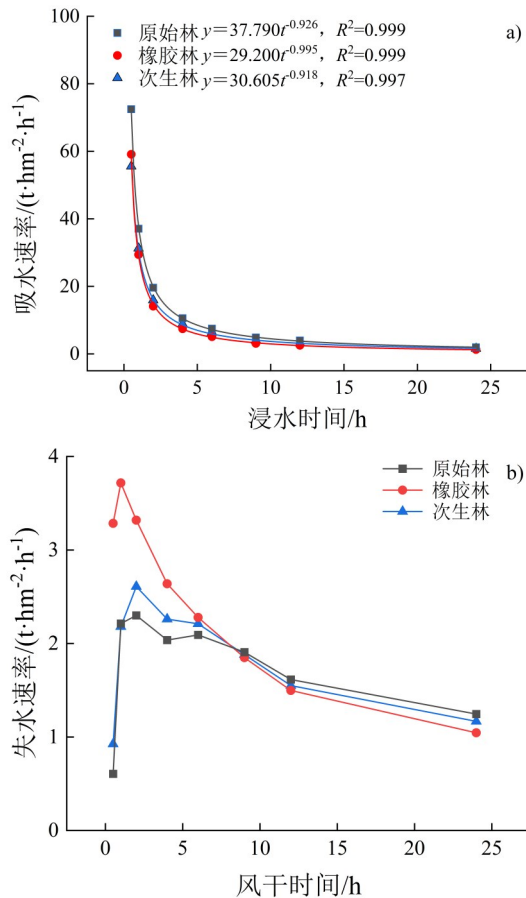


图4 3种林分凋落物吸水速率(a)和失水速率(b)与浸水时间关系

Fig.4 Relationship between water absorption rate(a), water loss rate (b) of litters and soaking time across three vegetational types

3 讨论

3.1 不同林分凋落物储量差异

森林水源涵养功能表现在对降水的分配和运动作用上,其作用分为3个部分,即林冠层的截留、枯枝落叶层的吸持以及林地土壤的蓄水作用(彭少麟等,2002)。其中,凋落物层与土壤层的森林涵养水源能力占85%以上(简永旗等,2021),目前凋落物储量和持水特性已成为森林水文学研究的热点之一(唐伟等,2022)。本研究中次生林和原始林凋落物储量为 $2.077 \sim 2.791 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与西双版纳热带季节雨林凋落物储量($2.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)比较接近(熊壮等,2018),但明显低于鼎湖山亚热带常绿阔叶林的凋落物储量($8.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(官丽莉等,2004),也低于云南石林地区半湿润常绿阔叶林凋落物的储量($7.16 \sim 7.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)(吴毅等,2007)。并且,本研究橡胶林凋落物储量低于西双版纳橡胶

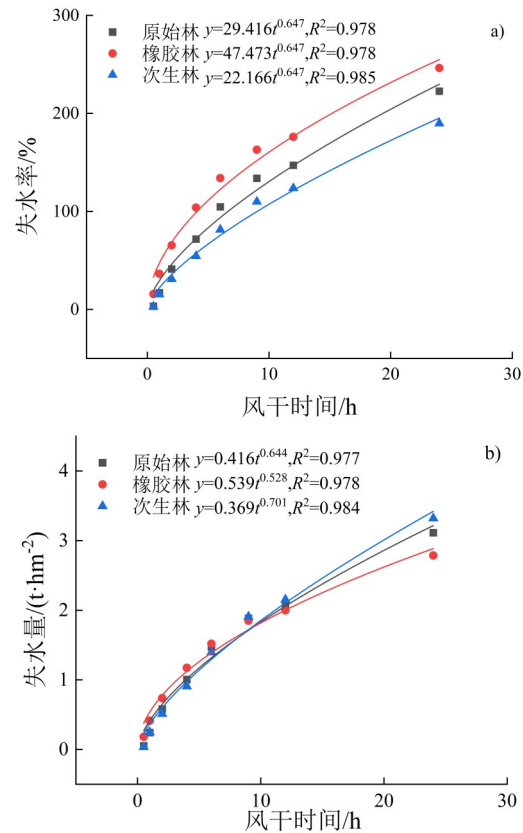


图5 3种林分凋落物失水率(a)和失水量(b)与风干时间的关系

Fig.5 Relationship between water-losing rate(a), water-losing capacity(b) of litter and air-drying time across three vegetational types

林凋落物储量($3.79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。凋落物的现存量不仅取决于凋落物输入量、分解速率及分解年限,还受气候和环境因素影响(施昀希等,2018)。已有研究表明,森林凋落物受气候因子的影响较大,全球森林的凋落量从低纬度/低海拔向高纬度/高海拔逐渐减少,且水热条件较好的低纬度地区具有高的年凋落量(任泳红等,1999)。但本研究发现,海南热带雨林具有较低的凋落物储量,主要是归因于:1)热带雨林气温高,湿度大,这种气候条件促使植物生长迅速,使得植物有限的生物量分配到凋落物的比例较低;2)热带雨林的养分循环系统高效,植物和微生物分解有机物的速度很快,大部分凋落物迅速被分解为可被植物吸收利用的养分,而不在地表积累;另外,由于热带雨林凋落物质量较高,C:N比较低,具有较高的分解速率,导致热带雨林现存量较低(Zhang et al., 2014)。3)热带雨林地区生物多样性非常高,植物和动物丰富度高,这些植物和动物相互依赖、互相竞争,形成一个复杂的

食物网,大量的生物相互作用和食物链的存在,导致养分的快速循环,凋落物很快被分解和利用;4)热带雨林的植物之间存在激烈的竞争,由于热带雨林光线资源受限,许多植物会向上生长,形成高大的树木并生成茂密的树冠层,树冠层遮挡住大部分阳光,使得地面上的植物生长受到限制。因此,较少的光线和养分限制了地面上植物的生长和凋落物的积累(熊壮等,2018)。

本研究还发现,热带地区不同林分凋落物存在一定差异,天然林凋落物储量高于人工橡胶林。这与杨玉盛等(2004)通过对比33年生杉木人工林和7种天然次生林研究凋落物现存量发现,天然林凋落物量显著高于人工林的结果一致。天然林与人工林凋落物储量的差异影响因素复杂,不仅受同林分树种特性、林龄、林分密度影响(Zhang et al., 2014),还与人类经营活动的强弱有关(何斌等, 2009)。大量研究表明,树种组成是影响一个气候区内凋落物产量的最重要因素(郭剑芬等, 2006),其植物多样性、林分密度和树冠覆盖决定凋落物的数量和质量(Szanser et al., 2011)。相比原始林和次生林,橡胶林物种单一,物种多样性和林分密度较低,凋落物的输入较小,导致其凋落物现存量较少。尽管已有研究表明,单一物种的人工林也具有较高的凋落物储量(熊壮等, 2018),但橡胶人工林受人为经营活动影响较大,如割胶过程人为活动的踩踏,加速凋落物的分解速率;并且人为活动的除草措施也在一定程度上减少凋落物输入量。此外,相比次生林,原始林也有较高的凋落物储量,一方面,由于天然林物种丰富度和生产力更高,其凋落物输入更高。在天然次生林的恢复过程中,生物多样性逐渐增加,树种丰富度也逐渐增加,树种丰富度的增加会显著增加凋落物数量和质量,从而影响凋落物的储量(Wang et al., 2007)。另一方面,可能是由于不同优势物种凋落物初始化学属性之间存在显著差异,如当优势树种凋落物含C越低时,其凋落物分解速率越快(路颖等, 2019)。

3.2 不同林分凋落物持水特性比较

森林凋落物的最大持水能力客观反映最大截留量和持水能力,该指标常被用于评估其潜在蓄水能力(时忠杰等, 2010)。目前,关于凋落物持水性、凋落物分解特征及其水土保持功能研究已有大量报道,如周志立等(2015)发现,阔叶林树种凋落物持水能力低于针叶林树种,表明凋落物持水能力与树种生物学特性、林分类型和结构密切相关。本研

究也发现,不同林分类型凋落物的持水特性存在显著差异。总体上,凋落物最大持水量和持水率表现为原始林高于次生林。凋落物的持水能力可由持水率和持水量反映,凋落物的持水率可用凋落物吸收的水分与干物质量的比值表示,凋落物的持水率越大,表明其持水能力越强(彭耀强等, 2006)。同时,森林凋落物层的持水量与现存量密切相关,凋落物储量越大,其持水量也越大(熊壮等, 2018)。本研究发现,原始林和次生林林分凋落物持水量和持水率均随浸水时间的增加逐渐增大,且前3 h内增加迅速,之后趋于平缓,而橡胶林持水率无明显变化。原始林持水量高于次生林,一方面是由于原始林具有较高的生产力,导致其凋落物储量较高,凋落物积累多、层次厚,分解程度高,因而具有孔隙多、细、小、吸水面大的特点,表面张力亦较大,其蓄水和持水性能较好(赵晓春, 2012)。因此,不同的林分类型,其凋落物的组成不同,由此造成凋落物的分解程度不同,进而影响凋落物的水源涵养能力。

同时,森林凋落物的吸水速率与持水能力密切相关,吸水速率越大,林内降水涵养的速率越快,可以更好地减少地表径流的发生。本研究发现原始林吸水速率与浸水时间关系呈幂函数方程变化,在前1 h内最大,随时间变化,不同林分吸水速率趋向一致,这与以往研究(刘芝芹等, 2013)基本一致,该研究表明凋落物层可在短时间内迅速吸收降水,减少地表径流的发生。此外,最大拦蓄量作为调控凋落物持水能力的一个重要指标,反映凋落物对降雨最大限度的拦截能力(刘小娥等, 2020)。本研究发现,原始林最大拦蓄量和有效拦蓄量明显高于次生林和橡胶林,表明原始林具有较高的拦截降水能力,可显著减少地表径流对土壤的侵蚀。另外,原始林具有较低的失水率,而橡胶林具有较高的失水率。一般失水率越大,表明凋落物的持水能力越差(周烨等, 2018),该结果进一步证实原始林凋落物的持水能力较强,而橡胶林凋落物的持水能力较弱。

4 结论

通过分析海南热带雨林地区橡胶林、原始林和次生林3种典型林分凋落物储量和持水特性发现,原始林的凋落物储量显著高于次生林和橡胶林。整体上,各林分凋落物吸水速率与浸水时间之间的关系呈较好的幂函数关系。相比次生林和橡胶林,原

始林持水量最大,同时原始林具有较高的最大拦蓄量和有效拦蓄量;而橡胶林的失水率和最大失水率高于原始林和次生林,因此原始林凋落物累积更加有利于森林水源涵养功能的发挥。

总体而言,本文以海南岛不同林分为研究对象,通过分析其凋落物储量和持水特性,厘清了热带地区不同林分凋落物持水特性的差异,揭示了热带原始林凋落物在森林水源涵养功能的重要性,强调了未来应加强对原始林凋落物的保护;而橡胶林凋落物具有较高失水率,其凋落物水源涵养功能较差,未来应考虑对橡胶林的林下植被的种植,增加橡胶林凋落物水源涵养功能,防止水土流失的发生。本研究对于森林经营管理和水源涵养功能的提升具有指导意义。

参考文献 (References):

- 丁易, 臧润国. 2011. 海南岛霸王岭热带低地雨林植被恢复动态. 植物生态学报, 35 (5): 577-586. [Ding Yi and Zang Runguo. 2011. Vegetation Recovery Dynamics of Tropical Lowland Rain Forest in Bawangling of Hainan Island, South China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35(5): 577-586.]
- 董安涛. 2016. 西双版纳不同林龄橡胶林土壤特征及水源涵养功能研究. 昆明: 云南师范大学. [Dong Antao. 2016. *The Research on Soil Physico-Chemical Properties and Water Source Conservation Function from Different Age Rubber Plantation in Xishuangbanna*. Kunming: Yunnan Normal University.]
- 高迪. 2019. 六盘山华北落叶松林枯落物时空特征变化及其水文效应. 北京: 北京林业大学. [Gao Di. 2019. *Temporal-Spatial Variation and Hydrological Effects of Litter of Larix Principis-Rupprechtii Plantation in Liupan Mountain*. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 官丽莉, 周国逸, 张德强, 刘菊秀, 张倩媚. 2004. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林凋落物量20年动态研究. 植物生态学报, 28 (4): 449-456. [Guan Lili, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang, Liu Juxiu, and Zhang Qianmei. 2004. Twenty Years of Litter Fall Dynamics in Subtropical Evergreen Broad-Leaved Forests at the Dinghushan Forest Ecosystem Research Station. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 28(4): 449-456.]
- 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 2006. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, (4): 93-100. [Guo Jianfen, Yang Yusheng, Chen Guangshui, Lin Peng, and Xie Jinsheng. 2006. A Review on Litter Decomposition in Forest Ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, (4): 93-100.]
- 何斌, 黄承标, 韦家国, 莫限农, 韦明宝, 荣慧, 陈玉萍. 2009. 不同林龄秃杉人工林凋落物储量及其持水特性. 东北林业大学学报, 37 (3): 44-46. [He Bin, Huang Chengbiao, Wei Jiaguo, Mo Xiannong, Wei Mingbao, Rong Yi, and Chen Yuping. 2009. Reserves and Water Capacity Characteristics of Litter in Taiwanian Flousiana Plantation at Different Stand Ages. *Journal of Northeast Forestry University*, 37(3): 44-46.]
- 贾剑波. 2016. 北京山区典型森林生态系统水分运动过程与机制研究. 北京: 北京林业大学. [Jia Jianbo. 2016. *Water Movement Process and Mechanism Analysis on Forest Ecosystems in Beijing Mountainous Area*. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 简永旗, 吴家森, 盛卫星, 聂国辉, 郑城, 姜培坤. 2021. 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. 浙江农林大学学报, 38 (2): 320-328. [Jian Yongqi, Wu Jiasen, Sheng Weixing, Nie Guohui, Zheng Cheng, and Jiang Peikun. 2021. Effects of Thinning and Stand Types on Litter Stock and Soil Water-Holding Capacity. *Journal of Zhejiang A&F University*, 38 (2): 320-328.]
- 林灯, 陈壮, 黄荣俊, 王旭, 丁昱, 董翔宇, 龙文兴, 黄瑾, 方精, 李时兴. 2016. 海南热带次生林恢复过程中凋落物及土壤水源涵养功能变化. 西部林业科学, 45 (2): 7-14, 28. [Lin Deng, Chen Zhuang, Huang Rongjun, Wang Xu, Ding Yu, Dong Xiangyu, Long Wenxing, Huang Jin, Fang Jing, and Li Shixing. 2016. Variation of Water-Conservation Functions of Litter and Soil during Forest Restoration Process in Secondary Tropical Forest. *Journal of West China Forestry Science*, 45(2): 7-28, 28.]
- 刘小娥, 苏世平. 2020. 兰州市南北两山5种典型人工林凋落物的水文功能. 应用生态学报, 31 (8): 2574-2582. [Liu Xiao'e and Su Shiping. 2020. Hydrological Functions of Litters under Five Typical Plantations in Southern and Northern Mountains of Lanzhou City, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31(8): 2574-2582.]
- 刘芝芹, 郎南军, 彭明俊, 温绍龙, 江期川, 李甜江, 吴云飞. 2013. 云南高原金沙江流域森林枯落物层和土壤层水文效应研究. 水土保持学报, 27 (3): 165-169, 173. [Liu Zhiqin, Lang Nanjun, Peng Mingjun, Wen Shaolong, Jiang Qichuan, Li Tianjiang, and Wu Yunfei. 2013. Hydrological Effects of Forest Litters Layer and Soil Layer in Jinsha River Watershed of Yunnan Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 27(3): 165-169, 173.]
- 路颖, 李坤, 梁强, 李传荣, 张彩虹. 2019. 泰山4种优势造林树种叶片凋落物分解对凋落物内细菌群落结构的影响. 生态学报, 39 (9): 3175-3186. [Lu Ying, Li Kun, Liang Qiang, Li Chuanrong, and Zhang Caihong. 2019. Effects of Leaf Litter Decomposition on Bacterial Community Structure in the Leaf Litter of Four Dominant Tree Species in Mount Tai. *Acta Ecologica Sinica*, 39(9): 3175-3186.]
- 彭少麟, 刘强. 2002. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. 生态学报, 22 (9): 1534-1544. [Peng Shaolin and Liu Qiang. 2002. The Dynamics of Forest Litter and Its Responses to Global Warming. *Acta Ecologica Sinica*, 22(9): 1534-1544.]
- 彭耀强, 薛立, 曹鹤, 任向荣, 梁丽丽. 2006. 三种阔叶林凋落物的持水特性. 水土保持学报, 20 (5): 189-191, 200. [Peng Yaoqiang, Xue Li, Cao He, Ren Xiangrong, and Liang Lili. 2006. Water Holding Characteristics in Three Broadleaved. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(5): 189-191, 200.]
- 任泳红, 曹敏, 唐建维, 唐勇, 张建侯. 1999. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, (5): 418-425. [Ren Yonghong, Cao Min, Tang Jianwei, Tang Yong, and Zhang Jianhou. 1999. A Comparative Study on Litterfall

- Dynamics in a Seasonal Rain Forest and a Rubber Plantation in Xishuangbanna, SW China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, (5): 418-425.]
- 施昀希, 黎建强, 陈奇伯, 王瑞璋, 杨丽云. 2018. 滇中高原5种森林类型凋落物及营养元素储量研究. 生态环境学报, 27(4): 617-624. [Shi Yunxi, Li Jianqiang, Chen Qibo, Wang Ruizhang, and Yang Liyun. 2018. Litterfall Accumulation and Nutrient Content in Five Forest Ecosystems in Central Yunnan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(4): 617-624.]
- 时忠杰, 张宁南, 何常清, 邱志军, 徐大平, 高吉喜, 胡哲森. 2010. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应. 生态学报, 30(7): 1932-1939. [Shi Zhongjie, Zhang Ningnan, He Changqing, Qiu Zhijun, Xu Daping, Gao Jixi, and Hu Zhesen. 2010. Eco-Hydrological Effect of the Canopy, Litter and Soil of a Eucalyptus Plantation in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 30(7): 1932-1939.]
- 宋小帅, 康峰峰, 韩海荣, 于晓文, 周彬, 程小琴. 2014. 太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应. 水土保持通报, 34(3): 102-108. [Song Xiaoshuai, Kang Fengfeng, Han Hairong, Yu Xiaowen, Zhou Bin, and Cheng Xiaoqin. 2014. Hydrological Effects of Forest Litters and Soil in Pinus Tabulaeformis Plantation under Different Degrees of Canopy Coverage in Taiyue Mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(3): 102-108.]
- Szanser M, Ilieva-Makulec K, Kajak A, Górski E, Kusińska A, Kisiel M, Olejniczak I, Russel SSieminiak D, and Wojewoda D. 2011. Impact of Litter Species Diversity on Decomposition Processes and Communities of Soil Organisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(1): 9-19.
- 唐伟, 侯满福, 刘雨婷, 贺露炎, 吴兴澳. 2022. 亚热带地区3种喀斯特林分凋落物组成对其持水性能的影响. 水土保持通报, 42(6): 137-145. [Tang Wei, Hou Manfu, Liu Yuting, He Luyan, and Wu Xing'ao. 2022. The Influence of Three Different Karst Litter Compositions on Their Water Holding Capacity in Subtropical Regions. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 42(6): 137-145.]
- Wang Qingkui, Wang Silong, Fan Bing, and Yu Xiaojun. 2007. Litter Production, Leaf Litter Decomposition and Nutrient Return in Cunninghamia Lanceolata Plantations in South China: Effect of Planting Conifers with Broadleaved Species. *Plant and Soil*, 297: 201-211.
- 吴毅, 刘文耀, 沈有信, 崔建武, 李玉辉, 刘伦辉. 2007. 滇石林地地质公园喀斯特山地天然林和人工林凋落物与死地被物的动态特征, 山地学报, (3): 317-325. [Wu Yi, Liu Wen Yao, Shen Youxin, Cui Jianwu, Li Yuhui, and Liu Lunhui. 2007. Dynamics of Litter Fall and Litter on Forest Floor of Natural Forest and Plantations in Stone Forest World Geological Park. *Mountain Research*, (3): 317-325.]
- 肖文贤, 王克勤, 宋娅丽, 安文雄. 2023. 氮沉降下滇中高原森林凋落物分解特征对其持水性的影响. 水土保持学报, 37(1): 227-237. [Xiao Wenxian, Wang Keqin, Song Yali, and An Wenxiong. 2023. The Impact of Litter Decomposition Characteristics of the Yunnan Central Plateau Forest under Nitrogen Deposition on Its Water Holding Capacity. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 37(1): 227-237.]
- 熊壮, 叶文, 张树斌, 陈辉. 2018. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性. 浙江农林大学学报, 35(6): 1054-1061. [Xiong Zhuang, Ye Wen, Zhang Shubin, and Chen Hui. 2018. Water-Holding Capacity in Forest Litter of a Seasonal Tropical Rainforest and a Rubber Plantation of Xishuangbanna in Southwest China. *Journal of Zhejiang A&F University*, 35(6): 1054-1061.]
- 杨俊玲. 2013. 几种典型杉木人工林凋落物及土壤持水能力研究. 北京: 北京林业大学. [Yang Junling. 2013. *Water Capacity Characteristics of Litter and Soil in Different Forest Types of Chinese Fir Plantations*. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 杨玉盛, 陈银秀, 何宗明, 郭剑芬, 刘春华. 2004. 福建柏和杉木人工林凋落物性质的比较. 林业科学, (1): 2-10. [Yang Yusheng, Chen Yinxiu, He Zongming, Guo Jianfen, and Liu Chenhua. 2004. Comparatively Study on Litter Properties between Plantations of Fokienia hodginsii and Cunninghamia lanceolata. *Scientia Silvae Sinicae*, (1): 2-10.]
- 余新晓. 2013. 森林生态水文研究进展与发展趋势. 应用基础与工程科学学报, 21(3): 391-402. [Yu Xinxiao. 2013. A Review on Forest Eco-Hydrology Research Progress and Development Tendency. *Journal of Basic Science and Engineering*, 21(3): 391-402.]
- Zhang Haicheng, Yuan Wenping, Dong Wenjie, and Liu Shuguang. 2014. Seasonal Patterns of Litterfall in Forest Ecosystem Worldwide. *Ecological Complexity*, 20: 240-247.
- 赵晓春. 2012. 贺兰山典型森林类型凋落物层水文效应研究. 咸阳: 西北农林科技大学. [Zhao Xiaochun. 2012. *Study on the Hydrology Effect of Litter Fall in the Main Forest Types of Helan Mountain*. Xianyang: Northwest A&F University.]
- 周光益. 1997. 中国热带森林水文生态功能. 生态学杂志, (5): 48-51, 57. [Zhou Guangyi. 1997. Eco-Hydrological Functions of Tropical Forest, China. *Chinese Journal of Ecology*, (5): 48-51, 57.]
- 周烨, 何太蓉, 武雪倩. 2018. 重庆缙云山国家级自然保护区典型林分凋落物持水性研究. 重庆师范大学学报(自然科学版), 35(2): 64-70. [Zhou Ye, He Tairong, and Wu Xueqian. 2018. Research on Water-Holding Character of Litter under Typical Vegetation in Chongqing Jinyun Mountain National Nature Reserve. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 35(2): 65-70.]
- 周志立, 张丽玮, 陈倩, 徐学华, 李玉灵. 2015. 木兰围场3种典型林分枯落物及土壤持水能力. 水土保持学报, 29(1): 207-213. [Zhou Zhili, Zhang Liwei, Chen Qian, Xu Xuehua, and Li Yuling. 2015. Water-Holding Capacity of Three Typical Forest Litter and Soil in Mulan-Weichang. *Journal of Soil and Water Conservation*, 29(1): 207-213.]
- 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 吴钦孝. 2002. 森林凋落物层水文生态功能研究. 北京林业大学学报, (Z1): 30-34. [Zhu Jinzhao, Liu Jianjun, Zhu Qingke, and Wu Qinxiao. 2002. Hydro-Ecological Functions of Forest Litter Layers. *Journal of Beijing*

Forestry University, (Z1): 30-34.]

作者贡献声明:

程思源:主要负责样品采集和实验以及数据分析;

陈俏艳:主要参与样品采集和实验;

乔 栋:主要参与样品采集;

戴黎聪:主要负责实验设计、实验指导和初稿的修改。

Litter Accumulation and Water Retention Characteristics of Different Stands of Tropical Rainforest in Hainan

Cheng Siyuan, Chen Qiaoyan, Qiao Dong, and Dai Licong

(College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: As the final layer for precipitation interception in forests, the litter layer is crucial to the vertical structure of forest ecosystems, situated between the forest vegetation and soil layers. Exploring the litter accumulation and water retention characteristics in different tropical rainforest stands is essential for assessing their water conservation functions. This study focused on three forest stands (primary forest, secondary forest, and rubber plantation) within Qixianling Hot Springs National Forest Park in Hainan, China. The immersion method was used to measure litter accumulation and water retention characteristics, exploring variations among these forest stands. Results revealed (1) significant differences in litter accumulation among the stands, with the primary forest having the highest litter accumulation (2.791 t/hm^2), followed by the secondary forest (2.077 t/hm^2) and rubber plantation (1.660 t/hm^2). Litter moisture content followed the order: primary forest (57.57%) > secondary forest (48.33%) > rubber plantation (46.44%). (2) Regarding water retention and water retention rate, both primary and secondary forests showed an increasing trend with immersion time, with the primary forest exhibiting higher water retention and retention rates than the secondary forest. In contrast, rubber plantations showed no clear trends in water retention or retention rates over time. The relation between litter water absorption rate and immersion time followed a well-fitted power function. The maximum water retention capacities were in the order of primary forest (8.041 t/hm^2) > secondary forest (6.251 t/hm^2) > rubber plantation (4.896 t/hm^2). (3) In terms of water absorption and water loss rates, the rubber plantation had the highest water loss rate, followed by the secondary forest and the primary forest. The maximum water loss was observed in the primary forest (5.225 t/hm^2) > secondary forest (4.626 t/hm^2) > rubber plantation (4.079 t/hm^2), and the maximum water loss rates followed the order: rubber plantation (246.319%) > secondary forest (222.649%) > primary forest (189.748%). The forest litter layer's water retention capacity and storage are closely related, with larger litter reserves correlating with greater water retention. Therefore, among the three forest types, the maximum and effective water interception capacities exhibited the following trend: primary forest > secondary forest > rubber plantation. The maximum and effective interception rates show the pattern: primary forests $\approx$ rubber plantations > secondary forests. The water conservation function of litter is reflected in its water retention capacity and rate of water loss. Given that primary forests exhibit a higher water retention capacity and lower water loss rates, litter accumulation in primary forests is more conducive to forest water conservation functions. Hence, future efforts should focus on protecting litter from primary forests. Conversely, the litter in rubber plantations tends to have a higher rate of water loss, resulting in poorer water conservation. Therefore, future considerations should include planting understory vegetation in rubber plantations to enhance litter water-conservation capabilities and prevent soil erosion. These findings provide crucial theoretical guidance for forest management and the enhancement of water conservation in tropical regions.

Keywords: litter storage; tropical rainforest; water holding capacity; water absorption rate; effective blocking capacity; Hainan