

## 西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性

熊 壮<sup>1</sup>, 叶 文<sup>1</sup>, 张树斌<sup>2</sup>, 陈 辉<sup>2</sup>

(1. 西南林业大学 地理学院, 云南 昆明 650224; 2. 中国科学院 热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303)

**摘要:** 为了比较热带季节雨林和橡胶林 2 种植被类型凋落物层的持水能力差异, 在云南西双版纳选取了这 2 种森林, 收集了地表凋落物, 对比研究 2 种植被类型的凋落物地表现存量、持水率、持水速率、最大持水量和有效持水量等持水特性的差异。结果表明: 橡胶林凋落物地表现存量( $3.79 \pm 0.34$ )  $t \cdot \text{hm}^{-2}$  显著高于热带季节雨林( $2.19 \pm 0.14$ )  $t \cdot \text{hm}^{-2}$  (独立样本  $t$  检验,  $P = 0.012$ ); 橡胶林凋落物的最大持水量( $12.50 t \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 显著高于热带季节雨林( $5.53 t \cdot \text{hm}^{-2}$ ) (独立样本  $t$  检验,  $P = 0.000$ ); 同时, 橡胶林和热带季节雨林凋落物的有效最大持水量分别为 10.63 和 4.71  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ , 橡胶林具有显著更高的有效最大持水量(独立样本  $t$  检验,  $P = 0.000$ )。因此, 橡胶林凋落物无论在数量上还是持水能力上都优于热带季节雨林, 橡胶林凋落物具有相对较好的生态持水效果。图 2 表 5 参 30

**关键词:** 森林生态学; 热带季节雨林; 橡胶林; 凋落物; 持水特性; 西双版纳

**中图分类号:** S718.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2018)06-1054-08

## Water-holding capacity in forest litter of a seasonal tropical rainforest and a rubber plantation of Xishuangbanna in southwest China

XIONG Zhuang<sup>1</sup>, YE Wen<sup>1</sup>, ZHANG Shubin<sup>2</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>

(1. Geography College, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to assess the differences in water-holding capacity of the litter between the seasonal tropical rainforest (STRF) and rubber plantation (RP), the water-holding characteristics were measured in the litter of two forests in Xishuangbanna of southwest China. The litter storage, water-holding rate, water-absorption rate, and water-holding capacity of litter between these two forests were compared using independent  $t$ -tests. Results showed that the total litter mass in RP ( $3.79 \pm 0.34$ )  $t \cdot \text{hm}^{-2}$  was significantly higher than STRF ( $2.19 \pm 0.14$ )  $t \cdot \text{hm}^{-2}$  (independent  $t$ -test,  $P = 0.012$ ). The maximum water-holding capacity for litter was significantly higher in RP ( $12.50 t \cdot \text{hm}^{-2}$ ) than in STRF ( $5.53 t \cdot \text{hm}^{-2}$ ) (independent  $t$ -test,  $P = 0.000$ ). Moreover, the efficient maximum water-holding capacity of RP litter ( $10.63 t \cdot \text{hm}^{-2}$ ) was significantly higher than STRF ( $4.71 t \cdot \text{hm}^{-2}$ ) (independent  $t$ -test,  $P = 0.000$ ). These results suggested that litter quantity and its water-holding capacity were superior in RP compared to STRF, which could indicate the greater water-holding capacity in litter of RP over STRF even though a rubber forest canopy has a higher evapotranspiration rate than a seasonal tropical rainforest. [Ch, 2 fig. 5 tab. 30 ref.]

**Key words:** forest ecology; seasonal tropical rainforest; rubber plantation; litter; water-holding capacity; Xishuangbanna

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分, 在物种多样性保持、物质循环、土壤结构改良、涵养

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31600479); 中国科学院西部之光资助项目(Y7XB081K01)

作者简介: 熊壮, 从事森林水文和森林生态学研究。E-mail: allanlqm@qq.com。通信作者: 叶文, 教授, 博士生导师, 从事地理学和旅游学等研究。E-mail: ywenyn@qq.com

水源等方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。凋落物增加了土壤表面的粗糙度，使水流蜿蜒曲折，阻滞径流产生的速度，增加了水分向土壤渗透的时间。有研究发现：有凋落物覆盖的林地产生径流的时间是无凋落物覆盖的荒地的 1.8~7.7 倍<sup>[3-6]</sup>。凋落物层通常结构疏松，覆盖在土壤表面，可防止雨滴对土壤的滴溅侵蚀<sup>[7]</sup>，并能阻挡阳光对土壤的直接曝晒，调节土壤的温度，当土壤含水量为 1/2 田间持水量时，土壤表面 5 cm 厚的凋落物就能比裸地减少 27.1% 的日平均蒸发量，并且土壤含水量越高，这种抑制土壤水分蒸发的能力越高<sup>[8-9]</sup>。因此，森林凋落物在森林生态系统的水土保持和水分循环过程中发挥着重要作用。热带森林是地球陆地上物种最丰富、结构最复杂的生态系统，在全球碳循环、生物多样性，以及气候调节等方面发挥着重要的作用，同时，热带森林也是遭受干扰最严重的植被类型之一<sup>[10]</sup>。三叶橡胶树 *Hevea brasiliensis* 原产亚马逊河流域的热带雨林，由于经济发展的需要和受经济利益的驱使，东南亚、南美、非洲的很多地区，成片的热带森林被砍伐后改种橡胶，土地利用发生了显著变化。从 20 世纪 70 年代开始，西双版纳地区广泛种植橡胶树，大量侵占海拔 800 m 以下的热带雨林区，甚至在个别地方已经侵占到了海拔 1 200 m 的山地，低海拔地区橡胶林几乎占据了所有能植胶区，原有的热带季节雨林、山地雨林面积锐减，破碎化严重。据统计，在约 30 a 里热带森林面积锐减了 14 万  $\text{hm}^2$ ，西双版纳地区橡胶林的种植面积已经超过该地区土地面积的 20%<sup>[11-15]</sup>。许多学者评估了大规模橡胶种植对生态环境的影响。SONG 等<sup>[14]</sup>研究发现：橡胶林林冠温度全年都高于热带雨林。TAN 等<sup>[16]</sup>发现橡胶树的蒸腾作用强烈，对水的消耗要高于热带雨林，土壤水分不足以支撑地表径流的产生，导致在干季时橡胶林下水资源短缺。还有学者在橡胶林的物种多样性<sup>[17]</sup>、生物量<sup>[18]</sup>、生态水文<sup>[4]</sup>、土壤养分元素及固碳<sup>[12]</sup>等方面做了大量研究，但在大量种植橡胶、砍伐热带森林对当地的生态环境、土壤、水文等产生影响的过程中，凋落物所起到的作用并不清楚，橡胶林和热带季节雨林的凋落物在持水性能上有何差异，以及橡胶林取代热带森林后凋落物的水源涵养能力如何变化等也都需要进行相关的验证。本研究选取了西双版纳地区热带季节雨林和人工橡胶林样地，测定了 2 种森林凋落物不同分解层的地表现存量及持水特性，揭示了热带季节雨林被橡胶林替代后凋落物的持水特性和水源涵养能力的变化，探讨了大规模种植橡胶对生态环境的影响，以期为推动环境友好型胶园的示范栽植，以及退化热带季节雨林的恢复提供科学依据。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究区概况

云南省西双版纳傣族自治州(21°09'~22°33'N, 99°58'~101°50'E)地处北亚热带北缘，山地面积约占全州总面积的 95%，盆地面积约占 5%，热带森林茂密，河谷众多，土壤以砖红壤和赤红壤为主，属北热带季风气候区，年平均气温为 21.5 °C，最热月(6 月)平均气温为 25.5 °C，最冷月(1 月)平均气温为 14.8 °C，终年无霜，干湿季分明，年平均降水量为 1 557 mm，雨季为 5-10 月，降水量约占全年的 87%，干季为 11-4 月，降水量约占全年的 13%，年径流量为 764 mm，年日照时数为 1 828 h，干燥度为 1.01<sup>[19]</sup>。

### 1.2 样地基本概况

实验样地位于云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇。这里大面积橡胶林与热带季节雨林交错融合，小区域内气象条件相同。所选择的热带季节雨林样地(21°55'7"N, 101°16'22"E)面积为 50 m × 50 m，海拔 570 m，属于该地区典型的湿性热带季节雨林群系组；所选择的橡胶林样地(21°54'37"N, 101°16'27"E)距离热带季节雨林样地约 0.5 km，面积为 50 m × 50 m，海拔 560 m，植株行距 5 m，株距 2 m，为典型的人工橡胶种植模式(表 1)。2 块样地均为砖红壤，群落特征<sup>[20-24]</sup>具体见表 1。

### 1.3 凋落物的收集

中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站在生长旺季的 9 月，均收集凋落物地表现存量，在每个样地选取 5 个点，设定 0.584  $\text{m}^2$  的圆形收集面积，收集框内土壤以上的全部凋落物，从而得出热带季节雨林和橡胶林凋落物地表现存量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。将收集到的凋落物按照分解程度分为未分解(新鲜凋落物，质地坚硬，外部无分解痕迹)、半分解(已有分解痕迹，但外形仍完整，未达腐朽状态)和已分解(颜色变黑，外表破碎，已达腐朽状态)3 种<sup>[25]</sup>，分别在 80 °C 烘干至恒量，然后称量并记录，并计算不同分解程度凋落物所占的比例(%)。本研究采用了 2014-2016 年收集的地表凋落物现存量。

表1 2块样地的群落特征

Table 1 Community characteristics of two study plots

植被类型	土壤颗粒级含量/%		$w_{\text{养分}}/(g \cdot kg^{-1})$				群落层	群落高度/m	盖度/%	主要植物
	0.002~0.020 mm	0.02~2.00 mm	总有机碳	总氮	总磷	总钾				
热带季节雨林	23.04	57.43	16.70	1.74	0.27	8.10	乔木 I 层	>40	30	绒毛番龙眼 <i>Pometia tomentosa</i> 千果榄仁 <i>Terminalia myriocarpa</i>
							乔木 II 层	20~40	80	梭果玉蕊 <i>Barringtonia macrostachya</i> 绒毛紫薇 <i>Lagerstroemia tomentosa</i>
							乔木 III 层	3~20	50	大叶红光树 <i>Knema linifolia</i> 窄序崖豆树 <i>Millettia leptobotrya</i>
							灌木层	1~3	25	细腺萼木 <i>Mycetia gracilis</i> 细罗伞 <i>Ardisia affinis</i>
							草本层	<1		山壳骨 <i>Pseudoranthemum malaccense</i> 莠竹 <i>Microstegium ciliatum</i>
橡胶林	36.84	31.88	18.40	1.99	0.36	15.1	乔木层	15	85	三叶橡胶树 <i>Hevea brasiliensis</i>
							草本层	<1		飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> 画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i> 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>

#### 1.4 持水率、持水速率和持水量的测定

采用浸泡法测定凋落物各分解层的持水量和持水速率。在实验室内将各分解层的凋落物分别装入尼龙网袋，扎紧封口并编号，放入烘箱在 80 °C 下 48 h 后称量。然后浸入水中，分别在 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24 h 后捞起并悬挂静置，至不再滴水时迅速称量，所得凋落物的湿质量减去干质量便是不同时间凋落物的持水量(g)；持水量与干质量的比值是不同时间凋落物的持水率(%)<sup>[26]</sup>；持水量与浸水时间的比值是不同时间凋落物的持水速率( $g \cdot h^{-1}$ )；经试验测定凋落物在浸水 24 h 后的持水量基本不再增加，故将浸水 24 h 的持水量认为该凋落物的最大持水量，但是在现实情况中，很少会出现地表凋落物完全浸水 24 h 的情况，所以将最大持水量乘以 0.85 的系数<sup>[2]</sup>，作为有效最大持水量。根据 1.3 测量的凋落物地表现存量，就可以计算样地内的最大持水量和有效最大持水量( $t \cdot hm^{-2}$ )。

#### 1.5 统计分析

采用软件 SPSS 16.0 进行数据统计分析，利用独立样本  $t$  检验比较 2 种植被类型的凋落物及其持水特性的差异，显著水平为  $\alpha=0.05$ ，并利用软件 SigmaPlot 10.0 绘制图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 凋落物现存量及其组分

根据 2014–2016 年对凋落物现存量的监测，热带季节雨林地表现存量为  $(2.19 \pm 0.14) t \cdot hm^{-2}$ ，显著低于橡胶林( $P < 0.05$ ，表 2)。

从表 2 可见：热带季节雨林和橡胶林未分解层的数量差异不显著( $P > 0.05$ )；但是热带季节雨林未分解层比例要显著高于橡胶林( $P < 0.05$ )；热带季节雨林半分解层凋落物的数量显著高于橡胶林( $P < 0.05$ )，且热带季节雨林半分解层的比例( $28.55\% \pm 2.65\%$ )也显著高于橡胶林( $7.53\% \pm 0.86\%$ )( $P < 0.05$ )；

表2 热带季节雨林和橡胶林凋落物现存量及其组分

Table 2 Litter mass and its components in tropical seasonal rainforest and rubber plantation

植被类型	凋落物现存量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	未分解层		半分解层		已分解层	
		数量/( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/%	数量/( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/%	数量/( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/%
热带季节雨林	$2.19 \pm 0.14$	$0.17 \pm 0.01$	$7.54 \pm 0.30$	$0.63 \pm 0.06$	$28.55 \pm 2.65$	$1.40 \pm 0.06$	$63.92 \pm 2.74$
橡胶林	$3.79 \pm 0.34$	$0.13 \pm 0.03$	$3.48 \pm 0.90$	$0.29 \pm 0.03$	$7.53 \pm 0.86$	$3.37 \pm 0.02$	$88.98 \pm 0.54$
$P$	0.012	0.371	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000

然而，橡胶林已分解层的凋落物数量和所占比例均显著高于热带季节雨林( $P<0.05$ )。

### 2.2 凋落物持水率和持水速率比较

随着浸泡时间的增加，2种植被类型的凋落物持水率逐渐增加，并且浸水后 2 h 内持水率增长速度较快，之后变缓，最终趋平，整个过程持水率都是已分解层>半分解层>未分解层(图 1)。

2种植被类型凋落物的持水速率都是随时间逐渐降低的，各分解层在开始浸水时，持水速率相差较大，均为已分解层>半分解层>未分解层，浸水后 2 h 内持水速率急剧降低，之后降低速度变缓，最终在浸水 12 h 后，基本全都趋近于 0，表示持水量已基本达到饱和(图 2)。浸水时间  $t=2$  h 是一个重要的节点，当浸水时间  $t<2$  h 时，凋落物极度不饱和，持水率迅速增长，持水速率急剧降低；当浸水时间  $t>2$  h 时，持水率增长的速度和持水速率降低的速度都变缓，进入一个相对平稳的阶段(图 1 和图 2)。因此，浸水 2 h 内是凋落物发挥持水能力的关键时期<sup>[27]</sup>。

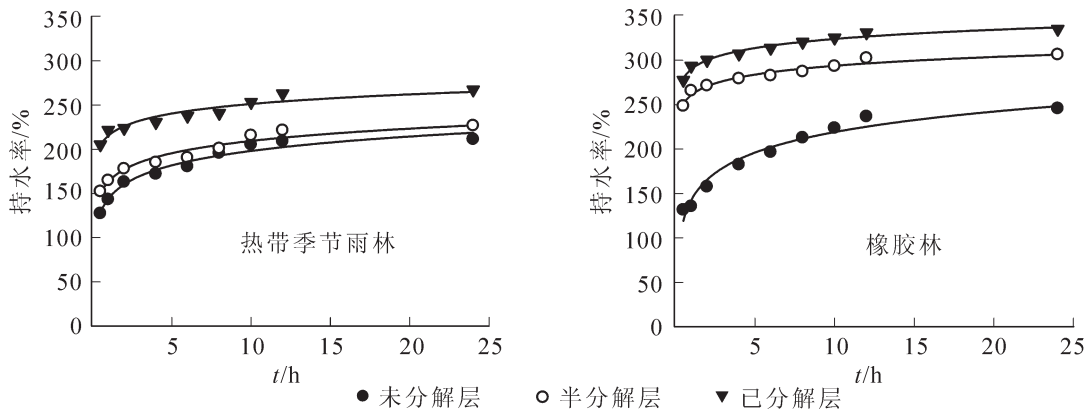


图 1 热带季节雨林和橡胶林凋落物的持水率比较

Figure 1 Water-holding rate of the litter in tropical seasonal rainforest and rubber plantation

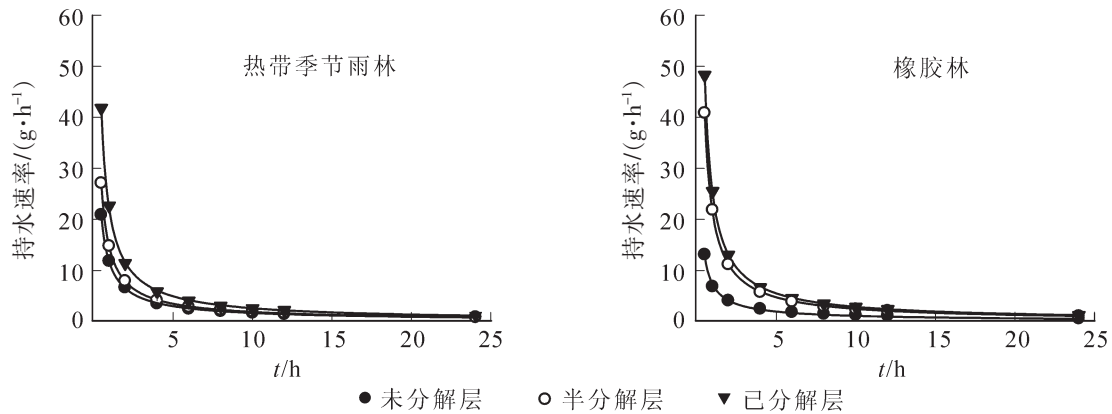


图 2 热带季节雨林和橡胶林凋落物的持水速率比较

Figure 2 Water absorption rate of the litter in tropical seasonal rainforest and rubber plantation

2种植被类型的凋落物各分解层的持水率( $U$ )与浸水时间( $t$ )的关系，可以按照对数函数方程  $U=a+b\ln t$  进行拟合，其中  $a$  和  $b$  为方程系数。用该方程按浸水时间对凋落物各分解层的持水率进行模拟，并与实测结果进行了比较，各分解层持水率模拟的决定系数( $R^2$ )均大于 0.90，各分解层持水率的模拟值与实测值都呈极显著相关关系( $P<0.001$ )(表 3)。

2种植被类型的凋落物各分解层的持水速率( $V$ )与浸水时间( $t$ )的关系，可以按照指数函数方程  $V=at^b$  进行拟合，其中  $a$  和  $b$  为方程系数。用该方程按浸水时间对凋落物各分解层的持水速率进行模拟，并与实测结果进行了比较，各分解层持水速率模拟的决定系数( $R^2$ )均大于 0.98，各分解层持水速率的实测值与模拟值都呈极显著相关关系( $P<0.001$ )(表 4)。

### 2.3 凋落物持水能力比较

表 5 显示：热带季节雨林最大持水率为 267.36%，发生在已分解层，显著小于橡胶林已分解层的



表3 热带季节雨林和橡胶林凋落物持水率 ( $U$ )与浸水时间( $t$ )的拟合方程

Table 3 Fitted equations between water-holding rate ( $U$ ) and immersed time ( $t$ ) of the litter in tropical seasonal rainforest and rubber plantation

植被类型	凋落物层	拟合方程	$R^2$
热带季节雨林	未分解层	$U=143.968+23.510 \ln t$	0.970*
	半分解层	$U=163.256+20.046 \ln t$	0.953*
	已分解层	$U=215.250+15.617 \ln t$	0.924*
橡胶林	未分解层	$U=142.356+33.321 \ln t$	0.978*
	半分解层	$U=260.729+14.317 \ln t$	0.965*
	已分解层	$U=289.764+14.830 \ln t$	0.966*

说明: \*表示  $P<0.001$

表4 热带季节雨林和橡胶林凋落物持水速率 ( $V$ )与浸水时间( $t$ )的拟合方程

Table 4 Fitted equations between water absorption rate ( $V$ ) and immersed time ( $t$ ) of the litter in tropical seasonal rainforest and rubber plantation

植被类型	凋落物层	拟合方程	$R^2$
热带季节雨林	未分解层	$V=11.678 t^{-0.843}$	0.999*
	半分解层	$V=14.647 t^{-0.892}$	0.999*
	已分解层	$V=22.077 t^{-0.928}$	0.999*
橡胶林	未分解层	$V=7.294 t^{-0.820}$	0.999*
	半分解层	$V=21.439 t^{-0.936}$	0.999*
	已分解层	$V=25.174 t^{-0.943}$	0.989*

说明: \*表示  $P<0.001$

335.01% ( $P<0.05$ ), 并且热带季节雨林已分解层的最大持水量为  $(3.74 \pm 0.22) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 显著小于橡胶林的  $(11.29 \pm 0.72) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 橡胶林凋落物的最大持水量  $(12.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$  显著高于热带季节雨林  $(5.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$  ( $P<0.05$ ); 同时, 橡胶林和热带季节雨林凋落物的有效最大持水量分别为 10.63 和  $4.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 说明橡胶林具有显著更高的有效最大持水量 ( $P<0.05$ )。

表5 热带季节雨林和橡胶林凋落物的最大持水率、最大持水量和有效最大持水量

Table 5 Maximum water-holding rate, maximum water-holding capacity and effective maximum water-holding capacity in the litter of tropical seasonal rainforest and rubber plantation

项目	最大持水率			最大持水量			有效最大持水量		
	热带季节雨林/%	橡胶林/%	$P$	热带季节雨林/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	橡胶林/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	$P$	热带季节雨林/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	橡胶林/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	$P$
未分解层	211.30	245.69	0.277	$0.36 \pm 0.51$	$0.32 \pm 0.82$	0.22	0.31	0.27	0.315
半分解层	226.76	306.19	0.000	$1.43 \pm 0.91$	$0.89 \pm 0.67$	0.00	1.22	0.76	0.000
已分解层	267.36	335.01	0.000	$3.74 \pm 0.22$	$11.29 \pm 0.72$	0.00	3.18	9.60	0.000
合计				5.53	12.50		4.71	10.63	

### 3 讨论和结论

#### 3.1 2种植被类型凋落物现存量的比较

本研究发现: 橡胶林的凋落物现存量  $(3.79 \pm 0.34) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 显著高于热带季节雨林的  $(2.19 \pm 0.14) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $P<0.05$ , 表2)。三叶橡胶树原产亚马逊河流域的热带雨林, 作为经济植物被引种到中国热带和东南亚地区。西双版纳处于北热带的边缘地区, 有明显的干湿季, 冬季还有短暂的低温<sup>[19]</sup>。三叶橡胶树木质部具有较大的导管, 叶片和枝条的抗干旱能力都比本地同科的植物低, 因此在每年的2月底存在一个明显的换叶期<sup>[28]</sup>。本研究采样时间为9月, 此时处于西双版纳地区的雨季中期, 橡胶树还处于生长期, 落叶较少, 地表凋落物多为上一个干季积存下来的, 在该地区高温高湿的气候条件下, 经过半年时间的分解, 大部分都已达分解状态, 从本研究中测得橡胶林凋落物的已分解层占到88.98%的比例也可以得到印证(表2)。热带季节雨林结构较复杂, 树种组成丰富, 大部分植物种为常绿植物<sup>[29]</sup>, 没有集中落叶期。同时, 热带季节雨林层次多, 上层乔木产生的凋落物部分被阻挡、截留在下层乔木的树冠、树枝上。可见, 橡胶树自身的生理特征和橡胶林的群落特征与热带季节雨林具有较大差异, 决定了橡胶林比热带季节雨林具有更高的凋落物产量和现存量, 为凋落物持水能力的发挥提供重要的基底。

#### 3.2 2种植被类型凋落物持水能力比较

森林凋落物的最大持水能力能客观地反映最大截留量和持水能力, 这一指标常常用于评估其潜在蓄水能力<sup>[30]</sup>。本研究发现: 橡胶林凋落物的未分解层、半分解层和已分解层的最大持水率(245.69%, 306.19%, 335.01%)均高于热带季节雨林(211.30%, 226.76%, 267.36%)(表5), 而且橡胶林凋落物的现存量也高于热带季节雨林(表2), 特别是凋落物中持水率最高的已分解层, 在橡胶林占总凋落物的

88.98%, 在热带季节雨林占总凋落物的 63.29%(表 2), 橡胶林已分解层的数量是热带季节雨林的 2.4 倍, 致使在凋落物总最大持水量里, 橡胶林已分解层的最大持水量达 $(11.29 \pm 0.72) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 是热带季节雨林已分解层最大持水量的 3 倍多, 所以也就导致了橡胶林凋落物的最大持水量和有效最大持水量, 均显著高于热带季节雨林( $P < 0.05$ )(表 5)。因此, 橡胶林的地表凋落物相比热带季节雨林具有更好的降雨拦截能力。TAN 等<sup>[16]</sup>研究发现: 橡胶林的生长比热带季节雨林需要更多的水, 如同“抽水泵”一般从土壤中索取更多的水资源, 导致在干季时, 橡胶林下水资源短缺、地表径流消失。本研究发现: 橡胶林的凋落物无论是在数量上还是在持水能力上都优于热带季节雨林, 从森林水源涵养能力角度来看, 橡胶林凋落物具有较好的生态持水功能。

另外, 相比人类干扰小的热带季节雨林, 橡胶林人为活动较多, 所以在收集橡胶林凋落物的时候, 有选择地避开人类割胶活动踩踏严重的地方。而且有研究发现: 橡胶林下凋落物对土壤含水量只在降水偏少的干季有影响<sup>[3]</sup>, 西双版纳地区的割胶时间(4–11 月)与雨季(5–10 月)高度重合, 所以虽然橡胶林人为活动多, 但是对土壤含水量的影响却不大。

### 3.3 结论

橡胶林的凋落物地表现存量为 $(3.79 \pm 0.34) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 显著高于热带季节雨林的 $(2.19 \pm 0.14) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $P < 0.05$ ); 2 种植被类型凋落物的持水率随着浸泡时间的延长不断增加, 浸水时间 2 h 是一个重要节点, 凋落物在浸水 2 h 内持水率增长迅速, 之后变缓。已分解层的凋落物的持水率最高, 在整个凋落物的持水能力里发挥着主要作用; 橡胶林凋落物的最大持水量 $(12.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 显著高于热带季节雨林 $(5.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$  ( $P < 0.05$ ); 橡胶林和热带季节雨林凋落物的有效最大持水量分别为 10.63 和  $4.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 所以橡胶林具有更高的有效最大持水量( $P < 0.05$ )。

总之, 橡胶林凋落物在储量和持水能力方面均显著优于热带季节雨林。在中国西南热带地区环境友好型胶园的构建过程中, 应该加强对凋落物的管理, 减少人为清除地表凋落物的措施, 减少降水对土壤的直接侵蚀作用, 降低地表径流, 从而提高橡胶林的水土保持和水源涵养功能。

## 4 致谢

中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站为本研究提供了凋落物地表现存量数据, 并在野外采样过程中给予了大力支持, 在此表示诚挚的谢意!

## 5 参考文献

- [1] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究[J]. 植物生态学报, 1999, **23**(5): 418 – 425.  
REN Yonghong, CAO Min, TANG Jianwei, *et al.* A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. *J Plant Ecol*, 1999, **23**(5): 418 – 425.
- [2] 曲杭峰, 董希斌, 张甜, 等. 大兴安岭白桦低质林补植改造后枯落物水文效应变化[J]. 东北林业大学学报, 2017, **45**(8): 14 – 19.  
QU Hangfeng, DONG Xibin, ZHANG Tian, *et al.* Changes of replanting alterations of *Betula platyphylla* low quality forest on litter hydrological effect in Daxing'An Mountains [J]. *J Northeast For Univ*, 2017, **45**(8): 14 – 19.
- [3] 卢洪健, 刘文杰, 罗亲普. 西双版纳山地橡胶林凋落物的生态水文效应[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(10): 2129 – 2136.  
LU Hongjian, LIU Wenjie, LUO Qinpu. Eco-hydrological effects of litter layer in a mountainous rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(10): 2129 – 2136.
- [4] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(4): 108 – 113.  
WANG Youmin. Summary of researches on water and soil conservative function of litter in forestland in China [J]. *J Soil Water Conserv*, 2000, **14**(4): 108 – 113.
- [5] 吴长文, 王礼先. 水土保持林中枯落物的作用[J]. 中国水土保持, 1993(4): 28 – 30.  
WU Changwen, WANG Lixian. The function of litter in soil and water conservation forest [J]. *Soil Water Conserv China*, 1993(4): 28 – 30.

- [6] 王佑民, 翁俊华. 林地枯落物的水土保持作用[J]. 中国水土保持, 2002(7): 18.  
WANG Youmin, WENG Junhua. The water and soil conservative function of litter in forestland [J]. *Soil Water Conserv China*, 2002(7): 18.
- [7] 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.  
ZHENG Jiangkun, WANG Tingting, FU Wanquan, *et al.* Storage and water-holding characteristics of the litter layer of typical forest types in the central Sichuan hilly region [J]. *J Soil Water Conserv*, 2014, 28(3): 87 - 91.
- [8] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东. 森林枯枝落叶层抑制土壤蒸发的研究[J]. 西北林学院学报, 1992, 7(2): 14 - 20.  
ZHAO Hongyan, WU Qinxiao, LIU Xiangdong. Researches on the inhibition of soil evaporation in the forest litter layer [J]. *J Northwest For Coll*, 1992, 7(2): 14 - 20.
- [9] 卢洪健, 李金涛, 刘文杰. 西双版纳橡胶林枯落物的持水性能与截留特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 67 - 73.  
LU Hongjian, LI Jintao, LIU Wenjie. Study on water-holding capability and interception characteristics of litter layers under rubber plantations in Xishuangbanna, southwestern China [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2011, 35(4): 67 - 73.
- [10] 臧润国, 张志东. 热带森林植物功能群及其动态研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3289 - 3296.  
ZANG Runguo, ZHANG Zhidong. Plant functional groups and their dynamics in tropical forests: a review [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(12): 3289 - 3296.
- [11] 李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 等. 基于RS和GIS的西双版纳土地覆被动态变化[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 280 - 289.  
LI Hongmei, MA Youxin, GUO Zongfeng, *et al.* Land use/land cover dynamic change in Xishuangbanna based on RS and GIS technology [J]. *J Mount Sci*, 2007, 25(3): 280 - 289.
- [12] 孙燕瓷, 马友鑫, 曹坤芳, 等. 西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 412 - 419.  
SUN Yanci, MA Youxin, CAO Kunfang, *et al.* Impacts of long-term rubber plantation on soil carbon and nitrogen sequestration in Xishuangbanna [J]. *Chin J Soil Sci*, 2015, 46(2): 412 - 419.
- [13] XU Jianchu, GRUMBINE R E, BECKSCHÄFER P. Landscape transformation through the use of ecological and socioeconomic indicators in Xishuangbanna, Southwest China, Mekong Region [J]. *Ecol Indic*, 2014, 36(1): 749 - 756.
- [14] SONG Qinghai, DENG Yun, ZHANG Yiping, *et al.* Comparison of infrared canopy temperature in a rubber plantation and tropical rain forest [J]. *Int J Biometeorol*, 2017, 61(10): 1885 - 1892.
- [15] LI Hongmei, MA Youxin, MITCHELL A T, *et al.* Past, present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics [J]. *For Ecol Manage*, 2008, 255(1): 16 - 24.
- [16] TAN Zhenghong, ZHANG Yiping, SONG Qinghai, *et al.* Rubber plantations act as water pumps in tropical China [J]. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L24406, doi:10.1029/2011GL050006.
- [17] 付永能, 崔景云, 陈爱国, 等. 热带地区橡胶林和旱谷地户级水平农业生物多样性评价: 以西双版纳大卡老寨为例[J]. 云南植物研究, 2000(增刊1): 91 - 101.  
FU Yongneng, CUI Jingyun, CHEN Aiguo, *et al.* Household-based agrobiodiversity assessment (HH-ABA) of rubber plantation and of upland land use stages in Daka, Xishuangbanna [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2000(suppl 1): 91 - 101.
- [18] 贾开心, 郑征, 张一平. 西双版纳橡胶林生物量随海拔梯度的变化[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1028 - 1032.  
JIA Kaixin, ZHENG Zheng, ZHANG Yiping. Changes of rubber plantation aboveground biomass along elevation gradient in Xishuangbanna [J]. *Chin J Ecol*, 2006, 25(9): 1028 - 1032.
- [19] 胡晓聪, 黄乾亮, 金亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 55 - 63.  
HU Xiaocong, HUANG Qianliang, JIN Liang. Hydrological functions of the litters and soil of tropical montane rain forest in Xishuangbanna, Yunnan, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28(1): 55 - 63.
- [20] 朱华, 王洪, 李保贵, 等. 西双版纳热带季节雨林的生物量[J]. 广西植物, 1998, 18(4): 370 - 383.  
ZHU Hua, WANG Hong, LI Baogui, *et al.* Research on the tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, south Yun-

- nan [J]. *Guihaia*, 1998, **18**(4): 370 – 383.
- [21] 朱华. 云南热带季雨林及其与热带雨林植被的比较[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(4): 463 – 470.  
ZHU Hua. Tropical monsoon forest in Yunnan with comparison to the tropical rain forest [J]. *J Plant Ecol*, 2011, **35**(4): 463 – 470.
- [22] 张敏, 邹晓明. 热带季节雨林与人工橡胶林土壤碳氮比较[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1013 – 1019.  
ZHANG Min, ZOU Xiaoming. Comparison of soil C and N in rubber plantation and seasonal rain forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20**(5): 1013 – 1019.
- [23] 唐炎林, 邓晓保, 李玉武, 等. 西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, **27**(1): 70 – 75.  
TANG Yanlin, DENG Xiaobao, LI Yuwu, *et al.* Comparison of the mechanical composition and soil fertility between tropical seasonal rain forest soil and rubber forest soil in Xishuangbanna [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2007, **27**(1): 70 – 75.
- [24] 李玉武. 西双版纳热带森林生态系统土壤养分动态研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
LI Yuwu. *Seasonal Dynamics of Nutrients Under the Tropical Forest Ecosystems in Xishuangbanna, Southwest China* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [25] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸, 等. 鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J]. 林业科学, 2013, **49**(9): 8 – 15.  
LIU Xiaodong, QIAO Yuna, ZHOU Guoyi, *et al.* Water-holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan [J]. *Sci Silva Sin*, 2013, **49**(9): 8 – 15.
- [26] 赵雨虹, 范少辉, 夏晨. 亚热带 4 种常绿阔叶林林分枯落物储量及持水功能研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, **39**(6): 93 – 98.  
ZHAO Yuhong, FAN Shaohui, XIA Chen. A study on reserves and water-holding function of litter in four types of evergreen broadleaved forest in subtropical zone of China [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, **39**(6): 93 – 98.
- [27] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(4): 108 – 113.  
WANG Youmin. Summary of researches on water and soil conservative function of litter in forestland in China [J]. *J Soil Water Conserv*, 2000, **14**(4): 108 – 113.
- [28] 吕晓涛, 唐建维, 何有才, 等. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(1): 11 – 22.  
LÜ Xiaotao, TANG Jianwei, HE Youcai, *et al.* Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31**(1): 11 – 22.
- [29] CHEN Junwen, CAO Kunfang. A possible link between hydraulic properties and leaf habits in *Hevea brasiliensis* [J]. *Funct Plant Biol*, 2015, **42**(8): 718 – 726.
- [30] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 等. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, **30**(7): 1932 – 1939.  
SHI Zhongjie, ZHANG Ningnan, HE Changqing, *et al.* Eco-hydrological effect of the canopy, litter and soil of a *Eucalyptus* plantation in South China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(7): 1932 – 1939.