

DOI: 10.5846/stxb201108241239

邓云, 唐炎林, 曹敏, 张一平, 刘文杰, 邓晓保, 李玉武, 张文富. 西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征. 生态学报, 2012, 32(24): 7836–7843.

Deng Y, Tang Y L, Cao M, Zhang Y P, Liu W J, Deng X B, Li Y W, Zhang W F. Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7836–7843.

西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征

邓 云^{1,*}, 唐炎林¹, 曹 敏¹, 张一平¹, 刘文杰¹, 邓晓保¹, 李玉武^{1,2}, 张文富¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 勐腊 666303; 2. 中国科学院北京研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过与本地典型的橡胶林和季节雨林进行对比, 研究了在橡胶林基础上抚育、恢复而来的人工雨林群落结构及林下降雨侵蚀力特征。通过 16a 的抚育管理, 人工雨林 Shannon-Wiener 多样性指数达到 3.652, 接近当地季节雨林的一般情况。对 6a 的降雨侵蚀力计算发现, 人工雨林 7 月林内降雨侵蚀力达 $962.2 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 对旷地降雨侵蚀力的削减量是橡胶林的 2.08 倍。人工雨林初步重现了类似热带自然雨林的群落结构和叶面积指数特征, 能够有效对削减降雨侵蚀力, 这有利于林内水土保持和进一步的植被恢复。因此, 人工雨林的抚育、恢复模式是热带退化山地地区植被恢复与重建的一条较为可行的途径。

关键词: 人工雨林; 群落结构; 降雨侵蚀力; 植被恢复

Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna

DENG Yun^{1,*}, TANG Yanlin¹, CAO Min¹, ZHANG Yiping¹, LIU Wenjie¹, DENG Xiaobao¹, LI Yuwu^{1,2}, ZHANG Wenfu¹

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Community structure and throughfall erosivity of artificial rainforest were compared with rubber forest and seasonal rainforest in this study. After 16 years grown without any management, the Shannon-Wiener index of artificial rainforest has increased to 3.652, which was much closer to local seasonal rainforest. A calculation of throughfall erosivity based on 6 years' data shown that the throughfall erosivity of artificial rainforest in July was $962.2 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, and the amount of rainfall erosivity reduction to clear surface was 2.08 times higher than rubber forest. Artificial rainforest has similar community structure and leaf area index (LAI) to tropical seasonal rainforest, and decreasing throughfall erosivity efficiently, which were very useful for soil conservation and vegetation restoration. Artificial rainforest is a feasible restoration type for degraded ecosystem in tropical area.

Key Words: Artificial rainforest, community structure, throughfall erosivity, vegetation restoration

自 20 世纪 60 年代开始, 出于对橡胶资源的迫切需要, 我国在西双版纳地区进行了大规模的橡胶种植工作。1976—2007 年间, 西双版纳地区土地利用/覆盖变化剧烈, 有林地面积大幅减少, 覆盖率从 69.0% 减少到

基金项目: 中国科学院野外台站基金项目

收稿日期: 2011-08-24; 修订日期: 2012-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dy@xtbg.org.cn

<http://www.ecologica.cn>

43.6%; 橡胶园覆盖率则从 1.3% 增加到 11.8%^[1], 森林覆盖率和森林结构变化已成为导致本地气候变化的主要原因^[2], 由于森林结构变化, 森林对气候、土壤的调控作用也随之改变。

降雨是引起土壤侵蚀的最主要动力因子, 作为定量预测土壤流失的重要环节, 降水侵蚀力计算能够对区域气候对土壤侵蚀的潜在影响作出评价^[3]。对森林群落而言, 由于存在复杂的林冠结构, 因此只有受到林冠截留作用后的林内有效雨量才能参与径流的形成, 并直接影响林地土壤水分的消长变化^[4]。由于此过程中的穿透雨量占林内有效雨量的 90% 以上^[5], 因此评价林内穿透雨的降水侵蚀力成为衡量生态系统功能恢复的重要指标之一。中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站自 20 世纪 60 年代开始即开始开展在橡胶林基础上恢复热带雨林结构与功能的人工雨林的模拟实验, 试图对热带森林生态系统的恢复与重建方法进行一些尝试和探索^[6], 并在该群落的林内小气候特征^[7]、土壤温度变化^[8]及生物量和净第一生产力^[9]等研究方面取得一些进展。本文从人工雨林群落组成与垂直结构出发, 通过对人工雨林与本地代表性人工植被单排单层橡胶林和典型地带性植被热带季节雨林进行对比, 以期了解人工雨林物种和结构的恢复现状, 并结合降雨侵蚀力计算, 评价人工雨林结构重建过程中伴随的生态系统服务功能变化, 为热带退化生态系统结构与功能的恢复与重建研究提供参考依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究所选各样地均位于云南省勐腊县勐仑镇。该区终年受西南季风控制, 属热带季风气候。年内 85% 的降水集中在雨季, 旱雨两季分明。年平均气温 21.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 7860℃, 平均最低气温 7.5℃, 年日照时数 1828 h, 年降水量 1557 mm, 年相对湿度 86%。

为尽量避免由于海拔、地形因素导致的降水差异对试验结果造成影响, 本试验选择人工雨林附近 1 km 范围内的单行橡胶林及建群阶段后期季节雨林作为对照群落(表 1)。

人工雨林 该样地位于中国科学院西双版纳热带植物园内, 群落与作为对照的季节雨林相邻, 调查样地距离两种群落的林缘相交处约 100 m。该群落 1960 年确定, 种下第一层乔木树种橡胶树, 1962 年开始在橡胶树行间种植第二层乔木木奶果和萝芙木, 1965 年在上层树种形成一定遮蔽后开始种植下层草本。20 世纪 70—90 年代, 陆续引入本地或外引有明确经济价值植物共计 84 科、176 属、216 种。1992 年至今停止全部人工管理, 任其自然发育。根据 2008 年样地调查结果, 该样地共有胸径 2 cm 以上乔木层物种 40 种, 其中优势种 2 种, 乔木层最大高度 25.4 m; 无高度 50 cm 以上灌木层; 草本层物种 8 种, 其中优势种 1 种, 平均盖度 47.7%。

季节雨林 样地中心距离人工雨林约 700 m, 是人工雨林恢复的目标群落。该样地 20 世纪 60 年代末期群落中有部分大树被择伐, 80 年代中期以后, 西双版纳热带植物园将其作为滇南濒危植物迁地保护区进行保护与管理, 现植被恢复良好, 属建群阶段后期。根据 2008 年样地调查结果, 该样地有胸径 2 cm 以上乔木层物种 120 种, 其中优势种 10 种, 乔木层最大高度 31.5 m; 高度 50 cm 以上灌木层物种 33 种, 其中优势种 5 种, 平均盖度 20.8%; 草本层物种 40 种, 其中优势种 2 种, 平均盖度 65.2%。

表 1 样地基本信息

Table 1 General situation of sample plots

	中心坐标 Location	海拔 Elevation/m	样地大小 Area/m ² ×m	坡度 Gradient/(°)		坡向 Aspect	坡位 Position	土壤类型 Soil type
				最低	最高			
季节雨林 SRF Seasonal rain forest	N 21°55'7.9" E 101°16'22.8"	566	50×100	30	35	SE	坡中下	砖红壤
人工雨林 AF Artificial forest	N 21°55'24.2" E 101°16'5"	521	30×30	0	5	NW	中下	砖红壤
橡胶林 RF Rubber forest	N 21°54'37.7" E 101°16'27.1"	592	30×30	15	15	SW	中	砖红壤

橡胶林 为 1981 年栽种的单行橡胶林。该样地除日常割胶外,还进行人工抚育管理,如施肥、除去橡胶窄行间的杂草等。根据 2008 年调查结果,该样地乔木层物种仅有橡胶树 1 种,乔木层最大高度 24 m。由于人工除草关系,该样地无灌木层和草本层。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨及穿透雨量

林外降雨量 使用距样地直线距离约 500 m 处综合气象观测场降水观测资料,为 20 cm 口径雨量器定时观测当日 8:00 到次日 8:00 记录。

穿透雨量 于每个样地内不同位置放置 4 个(橡胶林内为 2 个) 30 cm × 200 cm 的穿透雨槽对穿透雨进行收集,通过较大的集水面积弥补林冠不均一性。穿透雨槽放置高度为 1.0—1.5 m,每个雨日后以称重法进行观测。本研究中所用降雨、穿透雨资料为 2003—2008 年间整理数据的平均值。

1.2.2 群落组成与结构调查

由于所用穿透雨资料至 2008 年截止,因此选用 2008 年生物调查数据对群落组成和结构进行描述。对所选样地内胸径 ≥ 2 cm 乔木进行每木调查,记录植物种名,以测树围尺测量胸径,以目测法对树高进行估计。

本文通过以下公式计算群落物种多样性分析:

$$\text{Simpson 多样性指数} \quad D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数} \quad H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad E = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i / \ln S \quad (3)$$

式中, p_i 为第 i 个物种在群落中的相对多度, S 为群落树种总数。

1.2.3 叶面积指数测定

使用美国 LI-COR 公司产 LI-2000 冠层分析仪,于每月月底进行对各群落的叶面积指数(LAI)进行测定。仪器测量高度为 1.5m,每个观测点上重复测量 3 次。季节雨林设立 10 个固定观测点,人工雨林和橡胶林中设立 5 个固定观测点。测量完成后通过 FV2000 软件求算各点的 LAI。本文所用数据为 2005—2008 年实测数据月平均值。

1.2.4 降水侵蚀力计算

由于热带雨林中往往林冠不齐且层次较多,各层分界不明显,冠层高度、冠层厚度等重要特征难以进行量化的准确描述,理论模型使用受到限制,因此本文主要通过经验模型对降雨侵蚀力进行估算。Yu 等^[10-12]通过对澳大利亚南部、新南威尔士州及热带地区的降雨侵蚀力研究,得出了能够反映降雨侵蚀力时间和季节分布变化的模式:

$$E_i = \alpha \left[1 + \eta \cos(2\pi f_i + \omega) \right] \sum_{k=1}^N R_k^\beta \quad (R_k > R_0) \quad (4)$$

式中, E_i 为 i 月份降雨侵蚀力的估计值, R_k 为第 k 日的降雨量, R_0 为临界降雨量, N 为 i 月降雨中超过临界降雨量的天数, α 、 β 、 η 、 ω 为模型参数。现有研究^[13-14]表明,该公式能够良好描述中国西南地区降水侵蚀力状况。模型参数选择参考张一平等^[14]对本地森林的相关研究。

1.2.5 数据处理

使用 Excel 2003 对数据进行处理和分析。

2 研究结果

2.1 群落结构

2.1.1 物种组成

相对自然群落,人工雨林由于所有物种均为人工引种,因此个体数、丰富度、Simpson 多样性指数及

Shannon-Wiener 多样性指数均相对天然林偏低,但仍明显高于单层单种的橡胶林(表 2)。同时由于人工雨林系人工林改造而来,物种分布相对较为均匀,群落均匀度(0.794) 相对季节雨林(0.763) 更高。

表 2 群落组成特征

Table 2 The characteristics of tree species in different community sample plots

	季节雨林 SRF	人工雨林 AF	橡胶林 RF
科 Family/(个/hm ²)	36	24	1
属 Genera/(个/hm ²)	74	36	1
丰富度 Species richness	120	40	1
个体数 Number/(个/hm ²)	2822	1822	511
Simpson 多样性指数 Simpson index	0.955	0.909	—
shannon-wiener 多样性指数 shannon-wiener's index	3.652	2.927	—
Pielou 均匀度 Pielou's index	0.763	0.794	—

2.1.2 胸径与树高结构

胸径是反映群落个体大小的最简单最直观的指标。由于本研究中所选季节雨林已为演替建群阶段中后期,其群落胸径级分布呈典型的异龄林的近似双曲线形式的反 J 型曲线;与此相对,由于人工雨林是在人工林基础上构建而成,虽经过 16a 封闭管理,但仍具有一定的群状同龄林特征,林分直径分布呈波纹状的反 J 型曲线(图 1)。

由于林冠是降雨进入森林的第一水文效应层,因此树高结构对穿透雨量关系密切。研究发现,随群落高度增加,中后期次生林中个体数量呈下降趋势,而人工雨林由于系人工有选择的引入物种,尚处人工林向天然林的过渡过程中,因此 5—10 m 高度具有最多的个体数量(45.12%);与此相对,橡胶人工林内个体集中分布于 10—15 m(95.65%),呈正态分布,是人工纯林的典型特征。

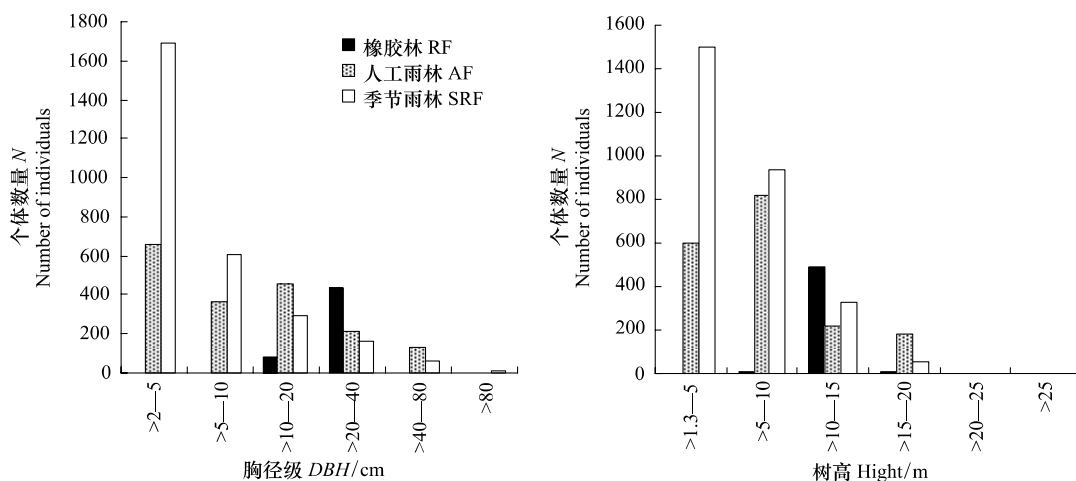


图 1 不同径级和树高等级个体数量比较

Fig. 1 The total number of individuals in different DBH and tree height classes

2.1.3 叶面积指数

在 3 个研究群落中,群落叶面积指数高低依次为季节雨林>人工雨林>橡胶林(图 2)。其中,受群落上层部分乔木树种旱季落叶的影响,季节雨林 LAI 最低值出现在旱季末期的 4 月,当 5 月雨季到来之后又有所回升。

本地橡胶树同样存在季节性落叶,林内 LAI 最低值出现于 1—2 月。3 月之后由于橡胶树新叶展出而有所增加,而 4、5 月份由于受雨季初期常见的强对流天气所伴随的大风影响,橡胶树常有大枝被风吹断形成林窗,因此 LAI 会有降低并直至 7 月前后方才恢复。

与以上两种典型群落相比,人工雨林 LAI 季节变化兼具二者特征。由于具有较橡胶林更多的物种和个体数,人工雨林全年 LAI 高于橡胶林,但由于该群落内最顶层仍为早期种植的橡胶树,因此 1—2 月时也有类似橡胶林 LAI 降低;当 3 月橡胶树新叶展出时其林内郁闭度会有一段时间增加,但因此时已是旱季末期,其他植物又开始落叶,叶面积指数 4 月时又再次降低。进入 5 月雨季来临之后,各物种均开始生长,此时 LAI 呈近似季节雨林的月变化。

2.2 降雨侵蚀力

2.2.1 穿透雨与林内降雨侵蚀力

对群落结构特征的了解,最终是为对群落的功能特征进行评价。比较各林型下穿透雨量和降雨侵蚀力逐月变化情况发现,本地各类森林中穿透雨量最低值出现于 12 月—翌年 2 月,在 5 月之后开始逐渐增加,7—8 月时达到最大值。与此相对,降雨侵蚀力的最低值和最高值也分别出现于 12 月—翌年 2 月和每年 7 月份(图 3)。

由于旱季(10 月—翌年 4 月)降雨较少,降雨强度较低,此时季节雨林、橡胶林和人工雨林中降雨侵蚀力强度均相对较小,3 种林型下差异不大;但进入雨季之后,随着降雨量增加,不同群落下降雨侵蚀力差异逐渐增大,7 月时橡胶林中表现出最大的降雨侵蚀力($1103.6 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$),而此时人工雨林位于橡胶林和季节雨林之间($962.2 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 季节雨林为 $849.6 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$),呈现出介于两种林型之间的过渡特征。

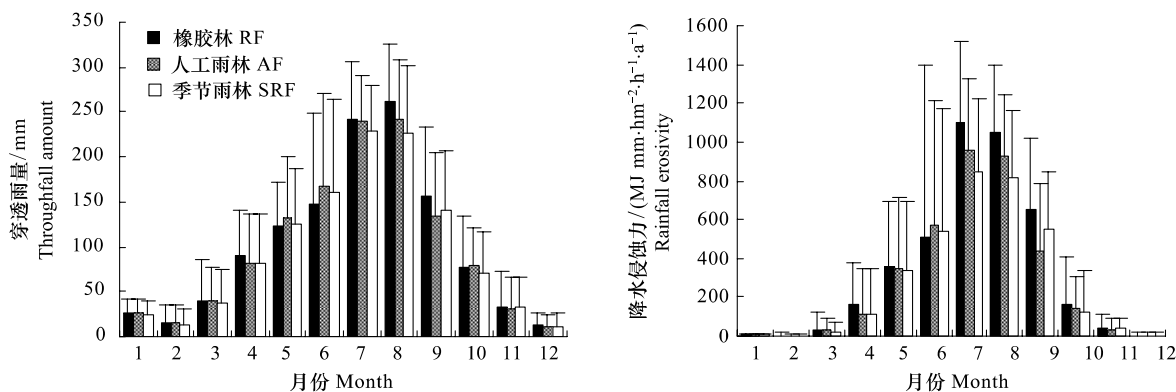


图 3 不同群落穿透雨量与降雨侵蚀力月变化

Fig. 3 Monthly variation of throughfall amount and rainfall erosivity under different community type

2.2.2 不同林型下降雨侵蚀力削减量比较

相对旷地降雨而言,多层多种的人工雨林表现出类似季节雨林的下降雨侵蚀力的削减作用,在 4—7 月间,这种削减作用甚至要略高于季节雨林。单行橡胶林由于结构单一,对降雨侵蚀力的削减量明显低于其他两种林型,在降雨侵蚀力最高的 7 月份,橡胶林较旷地的降雨侵蚀力削减量仅相当于人工雨林的 48.03%(图 4)。

旱季橡胶林和次生林下降雨侵蚀力相对接近,而雨季时则存在较大差值(7 月平均值相差可达 $254.04 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$)。人工雨林由于在人工林基础上一定程度的恢复了天然林内的群落结构,因此对降水侵蚀力的削减要优于未改造过的橡胶林(7 月时降雨侵蚀力最大时相对橡胶林平均值减少 $141.44 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$)。

3 讨论

3.1 人工雨林的物种多样性

对本地森林的研究结果表明,本区热带季节雨林中 Shannon-Wiener 多样性指数一般可达 3.888^[13] 和 4.07—4.54^[14]。本研究中处于建群阶段中后期的季节雨林 Shannon-Wiener 多样性指数为 3.652,接近本地顶级群落典型值域范围,而人工雨林下 Shannon-Wiener 多样性指数为 2.927,低于季节雨林,但已接近本地季风常绿阔叶林^[17] 和低海拔下山地雨林或热带季节雨林的次生林^[18-20] 的一般水平,人工雨林很好的重构和再现本地自然群落的物种多样性。

另一方面,虽然人工雨林较好的模拟了天然林内的物种组成,但由于系人工林基础上构建,因此虽经 16a

的封闭管理,但在群落径级结构和树高分布上仍然呈现出具有类似类似群状同龄林特征的波纹状反 J 型曲线,树高结构则介于人工纯林的正态分布和天然异龄林近似双曲线形式的反 J 型曲线两种类型之间^[21],具体表现为 5 m 以下幼树个体数量相对较少。由于人工雨林群落上层植被主要为人工引种的乔木同龄种群,受母树成熟周期和幼苗生长年限限制,更新的幼苗/幼树尚未能够完全进入乔木层,从而导致该层个体数量相对较少。

3.2 人工雨林对降雨侵蚀力的削减作用

叶面积指数被认为与林冠截留能力线性相关^[22-23]。张一平等^[14]的研究结果表明,旱季季节雨林和橡胶林与旷地的降雨侵蚀力相差不大,而雨季时两种群落内降雨侵蚀力均低于旷地,其中橡胶林内降雨侵蚀力大于季节雨林,这与本研究结果一致。人工雨林穿透雨量和降水侵蚀力均介于次生林和橡胶林之间,与人工雨林的 LAI 特征相符。而就对旷地降雨侵蚀力的削减量而言,人工雨林在雨季前期(5—7 月)和旱季初期(10 月)甚至略高于次生林。这可能系此时人工雨林的郁闭度已足够阻挡该时期相对较少的降雨,而且低于天然林的 LAI 更有利于空气流动和太阳辐射进入冠层,在降雨较少时期使林冠具有更高的干燥度,增加林冠截留率并减少穿透雨的形成^[24-26],减弱降雨的侵蚀力强度;而橡胶林由于郁闭度过低,始终无法对降雨形成有效阻挡,因此对降雨侵蚀力的削减效果始终处于较低的水平。

3.3 人工雨林空间结构改善对削减降雨侵蚀力的贡献

一般认为,林内降雨侵蚀力大小除与降雨量大小有关外,可能还受林冠高度影响,因为这有可能增加雨滴动能。当林冠高超过 7 m,降水量超过 5 mm 的情况下,林冠层将不能有效降低降水动能,当降水继续增大时林内降水动能还将继续增大,并超过同期林外雨的动能^[27];而对于超过 20 mm 的单次降水而言,冠层厚度可能是唯一仍然对穿透雨特征有显著影响的环境因子^[28]。本研究表明,由于热带雨林本身的多层多种,林内不存在明显分层,丰富的物种组成也暗示了林内多样化的树冠形态,这些都有利于对林内的穿透雨滴形成层层阻挡,削弱降雨动能^[29]。而对于橡胶林而言,由于其林下缺乏其他物种进行截留,穿透雨滴产生之后直落地面,有可能进一步增加对地表的侵蚀。

人工雨林由于在橡胶林中引入了其他物种,初步重现了类似季节雨林的林内垂直结构,通过在最高层的橡胶树下填充大量其他物种个体,明显减少了各层间的相对距离,这有利于避免雨滴直接冲击土壤,减缓和削弱穿透雨动能。本文经验模型的计算结果也表明,人工雨林林下降雨侵蚀力明显优于单层单种的典型橡胶林,这充分体现了人工雨林垂直结构重建所带来的森林生态功能的改善。

已有研究表明,热带季节雨林的水分循环利用和涵养水源功效远高于人工橡胶林^[30]。调查数据证实,1976—2007 年间,西双版纳有林地覆盖率从 69.0% 减少到 43.6%,橡胶园覆盖率则从 1.3% 增加为

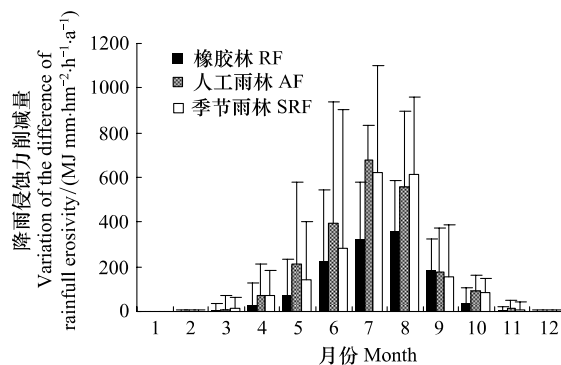


图4 3 种类型森林较旷地降雨侵蚀力削减量月变化

Fig. 4 Difference of rainfall erosivity between clear surface and three type forest

11.8%^[1],橡胶园的扩张被认为主要来源于对热带季节雨林的砍伐,这是该区山地雨林面积减少的主要原因^[2]。由于橡胶林会引起径流中短期事件降水所占比例增加^[3],大面积的橡胶园将导致区域涵养水源能力的下降,进而可能引起局地气候的变化^[1]。在目前市场的高需求和投资的高回报背景下,西双版纳橡胶园的扩张可能仍会在未来持续一段时间^[4],因此,单纯通过对现有天然林进行保护,可能并不足以改善已被破坏的当地生态系统功能。人工雨林作为一种在经济林基础上改造的恢复模式,一方面不与现有橡胶园的扩张需求发生冲突,另一方面又能够对当地土著物种进行保护,并通过优化林内结构达到改善橡胶林水文生态功能的目的,不失为协调地方经济发展与生态环境保护二者间矛盾的一种可行的解决办法。

4 结论

经过 16a 的封闭管理,人工雨林已初步呈现出类似天然林的物种多样性,并且随着物种和空间结构上的恢复,人工雨林穿透雨量已经介于季节雨林和橡胶林之间,对降雨侵蚀力的削减作用在雨季前期和旱季初期甚至略优于季节雨林,初步具备了类似天然林的水文功能特征。人工雨林是人工橡胶林向本地典型森林恢复的一种可行模式,在橡胶林种植面积日益扩大的今天,人工雨林将是未来在退化橡胶林基础上恢复典型森林结构与功能的一种重要模式,也是将类似热带退化山地地区植被恢复与重建的一条较为可行的途径。

致谢: 本文主要工作在中国科学院西双版纳热带植物园西双版纳热带雨林生态系统研究站完成,李绍安、段文平、刘梦楠、马玖、陈德富、余江、邓云超等为本文的数据获取提供了协助,在此一并致谢。

References:

- [1] Li Z Z, Ma Y X, Li H M, Peng M Q, Liu W J. Relation of land use and cover change to topography in xishuangbanna, southwest china. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(5): 1091-1103.
- [2] Zhang K Y, Zhang Y P. The influence of deforestation of tropical rainforest on local climate // Forestry meteorology symposium. Beijing: China Meteorological Press, 1984: 14-23.
- [3] Wischmeier, W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society Proceedings*, 1959, 23(3): 246-249.
- [4] Fan S X, Jiang D M, Alamusa, Li X H, Liu Z M. Studies on throughfall model in forest area. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1403-1407.
- [5] Nakano H. Forest Hydrology. Li Y S Trans. Beijing: Chinese forestry Press, 1983.
- [6] Feng Y Z. Artificial community. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2007.
- [7] Liu W J, Duan W P. Analysis of microclimatic effect of tropical artificial rainforest. *Journal of Yunnan Tropical Crops Science&Technology*, 1997, 20(3): 7-11.
- [8] Liu W J, Li H M. Laws of temperature variation of artificial rainforest soil in Xishuangbanna. *Journal of Yunnan Tropical Crops Science&Technology*, 1997, 20(1): 16-20.
- [9] Tang J W, Zhang J H, Song Q S, Huang Z Y, Li Z N, Wang L F, Zeng R. Biomass and net primary productivity of artificial tropical rainforest in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 1-6.
- [10] Yu B, Hashim G M, Eusof Z. Estimating the R-factor with limited rainfall data: A case study from peninsular Malaysia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(2): 101-105.
- [11] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales. *Australian Journal of Soil Research* 1996, 34(1): 139-152.
- [12] Yu, B. Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 143-165.
- [13] Ning L D, Shi H. Estimating R-factor in southwest China with data of daily rainfall amount. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 183-186.
- [14] Zhang Y P, He Y L, Yang G C. Release effects of tropical seasonal rain forest and rubber forest on rainfall erosivity in South Yunnan. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 731-737.
- [15] Cao M, Zhang J H. Tree species diversity of tropical forest vegetation in Xishuangbanna, SW China. *Biodiversity and Conservation*, 1997, 6: 995-1006.
- [16] Lü X T, Tang J W. Structure and composition of the understory treelets in a non-dipterocarp forest of tropical Asia. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260: 565-572.
- [17] Li D, Tang J W, Luo C Q, Li J S, Liu Z A. Analysis on the coenological Characteristics of monsoonal Evergreen broad-leaved forest communities in Xishuangbanna. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(3): 257-267.
- [18] Zhu H. A discussion on plant diversity of tropical montane rain forests in xishuangbanna, yunnan. *Journal of Plant Ecology*. 2006, 30(1): 184-186.
- [19] Tang J W. Discussion on the issue in the paper "A discussion on plant diversity of tropical montane rain forests in xishuangbanna, yunnan".

Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 187–189.

- [20] Li Z S, Tang J W, Zheng Z, Li Q J, Luo C Q, Liu Z A, Li Z N, Duan W Y, Guo X M. A study on plant diversity of tropical montane rain forests in xishuangbanna, yunnan. Journal of Plant Ecology. 2004, 28(6): 833–843.
- [21] Meng X Y. Forest mensuration. 2ED. Beijing: Chinese forestry Press, 1996
- [22] Dijk A I J M, Bruijnzeel L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. Journal of Hydrology, 2001, 247(3/4): 239–262.
- [23] Zhang Y P, Wang X, Liu W J. Research review on the partitioning of gross rainfall into stemflow, throughfall and interception of canopies in the tropical forests. Journal of Fujian College of Forestry, 2004, 24(3): 274–282.
- [24] Liu, S. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. Ecological Modelling, 1997, 99(2/3): 151–159.
- [25] Liu J G. The process of rainfall interception in forest canopy. Journal of Beijing Forestry University, 1987, 9(2): 140–144.
- [26] Liu, J. G. . A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. Ecological Modelling, 1988. 42(2): 111–123.
- [27] Zhou X F, Zhao H X, Sun H Z. Proper assessment for forest hydrological effect. Journal of Natrual Resources, 2001, 16(5): 420–426.
- [28] Parka A, Cameron J L. The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation Forest Ecology and Management, 2008, 255(5/6): 1915–1925.
- [29] Zhou G Y. Eco-hydrological functions of tropical forest, China. Chinese Journal of Ecology, 1997, 16(5): 47–50.
- [30] Liu W J, Zhang Y P, Liu Y H, Li H M, Duan W P. Comparison of fog in terception at a tropical seasonal rainforest and a rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest Ch ina. Acta Ecolog ica Sinica, 2003, 23(11): 2379–2386.
- [31] Li Z J, Ma Y X, Li H M, Peng M C, Liu W J. Relation of land use and cover change to topoguaphy in Xishuangbanna, Southwest China. Journal of PlantEcology, 2008, 32(5): 1091–1103.
- [32] Li H M, Ma Y X, Guo Z F, Liu W J. Land use/land cover dynamic change in Xishuangbanna based on RS and GIS technology. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3): 280–289.
- [33] Liu W J, Liu W Y, Lu H J, Duan W P, Li H M, Runoff generation in small catchments under a native rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, southwestern China. Water and Environment Journal, 2011, 25(1): 138–147.
- [34] Li H M, Ma Y X, Aide T M, Liu W J Past, present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics. Forest Ecology and Management, 2011, 20(1): 16–24.

参考文献:

- [1] 李增加, 马友鑫, 李红梅, 彭明春, 刘文俊. 西双版纳土地利用/覆盖变化与地形的关系. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1091–1103.
- [2] 张克映, 张一平. 西双版纳森林开伐对地方气候的影响 // 林业气象论文集. 北京: 气象出版社, 1984: 14–23.
- [4] 范世香, 蒋德明, 阿拉木萨, 李雪华, 刘志民. 林内穿透雨量模型研究. 生态学报, 2003. 23(7): 1403–1407.
- [5] 中野秀章(日)著. 李云森译. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1983
- [6] 冯耀宗. 人工群落. 昆明: 云南科技出版社, 2007
- [7] 刘文杰, 段文平. 热带人工雨林小气候效应分析. 云南热作科技, 1997, 20(3): 7–11.
- [8] 刘文杰, 李红梅. 西双版纳人工雨林土壤温度变化规律. 云南热作科技, 1997, 20(1): 16–20.
- [9] 唐建维, 张建候, 宋后示, 黄白云, 李自能, 王利繁, 曾荣. 西双版纳热带人工雨林生物量及净第一性生产力的研究. 应用生态学报, 2003, 14(1): 1–6.
- [13] 宁丽丹, 石辉. 利用日降雨量资料估算西南地区的降雨侵蚀力. 水土保持研究, 2003, 10(4): 183–186.
- [14] 张一平, 何云玲, 杨根灿. 滇南热带季节雨林和橡胶林对降雨侵蚀力的减缓效应. 生态学杂志, 2006, 25(7): 731–737.
- [17] 李冬, 唐建维, 罗成坤, 李俊松, 刘正安. 西双版纳季风常绿阔叶林的群落学特征. 山地学报, 2006. 24(3): 257–267.
- [18] 朱华. “西双版纳热带山地雨林的植物多样性研究”的一些问题讨论. 植物生态学报, 2006. 30(1): 184–186.
- [19] 唐建维. 关于对朱华先生“西双版纳热带山地雨林的植物多样性研究的一些问题讨论”一文中有关问题的说明. 植物生态学报, 2006, 30(1): 187–189.
- [20] 李宗善, 唐建维, 郑征, 李庆军, 罗成昆, 刘正安, 李自能, 段文勇, 郭贤明. 西双版纳热带山地雨林的植物多样性研究. 植物生态学报, 2004, 28(6): 833–843.
- [21] 孟宪宇, 测树学. 第二版. 北京: 中国林业出版社, 1996
- [23] 张一平, 王馨, 刘文杰. 热带森林林冠对降水再分配作用的研究综述. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 274–282.
- [25] 刘家冈. 林冠对降雨的截留过程. 北京林业大学学报, 1987, 9(2): 140–144.
- [27] 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林水文效应. 自然资源学报, 2001, 16(5): 420–426.
- [29] 周光益. 中国热带森林水文生态功能. 生态学杂志, 1997, 16(5): 47–50.
- [30] 刘文杰, 张一平, 刘玉洪, 李红梅, 段文平. 热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留雾水的比较研究. 生态学报, 2003, 23(11): 2379–2386.
- [31] 李增加, 马友鑫, 李红梅, 彭明春, 刘文俊. 西双版纳土地利用/覆盖变化与地形的关系. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1091–1103.
- [32] 李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 刘文俊. 基于 RS 和 GIS 的西双版纳土地覆被动态变化. 山地学报, 2007, 25(3): 280–289.