

# 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究

张一平<sup>1</sup>, 王 馨<sup>1</sup>, 王玉杰<sup>2</sup>, 刘文杰<sup>1</sup>, 刘玉洪<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; 2. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083)

**摘要:** 季节雨林和橡胶林是西双版纳热带森林系统中可以代表原始林和大面积种植的人工林两种林型, 采用水量平衡法, 利用对以上两种林分林冠水文各分量 1996~2001 年的观测结果, 初步分析其林冠水文效应, 结果表明: 一年内, 季节雨林林冠截留量 660.6mm, 树干径流量 80.7mm, 穿透降雨量, 853.2mm, 分别占同期降雨总量的 41.43%、5.24%、53.74%; 橡胶林林冠截留量 393.5mm, 树干径流量 104.1mm, 穿透降雨量 1096.8mm, 分别占同期降雨总量的 24.68%、6.68%、67.85%; 两种林分森林水文各分量干、雨季差异显著; 在研究中还发现, 季节雨林中树干径流量随级数的增大而减小, 干季出现密林(季节雨林)的穿透降雨量大于疏林(橡胶林)的反常现象; 与我国其他地区相比, 季节雨林和橡胶林有较大的林冠截留率及干流率。

**关键词:** 热带季节雨林; 橡胶林; 降雨; 林冠截留; 树干径流; 穿透降雨; 西双版纳

## Comparison research on hydrological effect of the canopy of the tropical seasonal rainforest and rubber forest in Xishuangbanna, Yunnan

ZHANG Yi-Ping<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, WANG Yu-Jie<sup>2</sup>, LIU Wen-Jie<sup>1</sup> LIU Yu-Hong<sup>1</sup> (1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223; 2. College of Resource and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2653~2665.

**Abstract:** The Region of Xishuangbanna is located in the north edge of the distribution of tropical rainforest in the world, and it has remarkable seasonal climate variations which is different from tropical rainforest in other regions. In Xishuangbanna, the canopy of rubber forest (*Hevea brasiliensis*) plantation often form a single layer structure that is different from the multiplayer canopy found in natural tropical seasonal rainforest. The objective of this research is to compare and quantify the hydrological characteristics of rubber forest and natural tropical seasonal rainforest canopies.

The experiments were conducted in the rubber forest plantation in Xishuangbanna (21°56'N, 101°15'E). Based on six-years observation from 1996 to 2001, it was found that the canopy interception, stemflow and throughfall of tropical seasonal rainforest were 660.6, 80.7 and 853.2 mm per year, which account for 41.43%, 5.24% and 53.74% of the total rainfall respectively. In rubber forest plantation, the canopy interception, stemflow and throughfall of rubber forest were 393.5, 104.1 and 1096.8 mm per

基金项目: 中国科学院重大资助项目(KZ95T-04-02)

收稿日期: 2002-07-07; 修订日期: 2003-04-10

作者简介: 张一平(1957~), 男, 云南省人, 博士, 研究员, 主要从事生态气候研究. E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

Foundation item: the Grand Program of Chinese Academy of Sciences(KZ95T-04-02)

Received date: 2002-07-07 Accepted date: 2003-04-10

Biography: ZHANG Yi-Ping, Ph. D., professor, main research field: ecological climatology.

year, which account for 24.68%, 6.68% and 67.85% of the total rainfall respectively. The stemflow of tropical seasonal rainforest decreased with the increased of diameter at breast height of the trees.

The proportions of canopy interception, stemflow and throughfall of two types of forests also had great differences between dry (from Nov. to Apr.) and rain (from May to Oct.) seasons. The curve of canopy interception of tropical seasonal rainforest was found to be a reverse "V". The percentage of rain being intercepted decreased as the total rainfall increased. The curve of canopy interception of rubber forest during a typical year formed "M", and the rate of interception decreased as the rainfall increased from Feb. to Sep. while no clear regularity during other months in the year. During dry seasons, the amount of throughfall of tropical seasonal rainforest (with complex structure) was found to be greater than that of rubber forest plantation (with simple structure). It was probably owing to great amount of dew and fog water in dry seasons in this region.

In summary, the canopy the tropical seasonal rainforest intercepts much greater amount of water during rain season, especially in July, when the monthly precipitation account for more than half of the annual precipitation. Compare with other regions in China, both tropical seasonal rainforest and the rubber plantations in Xishuangbanna have much higher canopy interception and stemflow rates.

**Key words:** tropical seasonal rainforest; rubber forest; rainfall; canopy interception; stemflow; throughfall; Xishuangbanna

文章编号:1000-0933(2003)12-2653-13 中图分类号:S715.2 文献标识码:A

森林水文效应是森林生态学研究的重要内容,也是森林和水相互作用及其功能的综合体现。森林对大气降水的再分配是其水文效应中的重要一环,即通过对大气降水的再分配影响到森林的水量平衡,从而对森林生态系统和流域的水分循环产生影响。作为森林水文的热点之一,多年来国内外许多专家、学者从理论和实践两方面对森林对大气降水的再分配作了大量研究,取得了丰富的成果;实验方面,林业部建立了森林生态系统实验研究的 11 个网络生态站,中国科学院建立了 7 个森林生态定位实验站,这些站点和各地相关研究机构对此做了全面而详尽的研究和报道,得出全年林冠截留占大气降水的 10%~36.5%,树干径流占 0.1%~9.2%,穿透降雨占 68%~87.6%(见表 9)。除此之外,还对实验方法<sup>[1]</sup>、森林降水的化学特征<sup>[2~6]</sup>及气候影响规律<sup>[7]</sup>等进行了实验和探讨。理论方面,已经从对单一或少量的实验、观测下结论,发展到对一系列的研究成果进行综合分析 & 集成,使认识有进一步的提高<sup>[8]</sup>,提出了若干理论模型,并对其进行了总结和评述<sup>[9~11]</sup>。但是,在这些研究中对不同林分再分配作用的研究却很少,对热带地区的研究更为鲜见。而且已有的研究往往集中在再分配过程的某一方面。同时由于森林水文各要素均为多种因子综合影响的结果,而被研究的两种林分相距较远<sup>[12]</sup>,存在着诸多地理、气候、水文等方面的差异,难以用实测的结果比较因林分不同而对大气降水产生的不同分配效果。

西双版纳州地处北回归线以南,面积 19223km<sup>2</sup>,其中山地(坡度  $\alpha > 8^\circ$ )面积占 95%,山间盆地(坡度  $\alpha \leq 8^\circ$ 面积占 5%),以热带森林茂密而著称。西双版纳的热带雨林是分布在热带北缘水热和海拔高度极限条件下的森林类型,具有热带森林的结构和群落特征,但在种类组成上又有向南亚热带森林过渡的特点,与赤道潮湿雨林有所不同<sup>[13]</sup>。橡胶林人工群落是西双版纳地区的又一大景观,从 20 世纪 60 年代初期开始,由于对天然橡胶的迫切需要,我国在西双版纳地区进行了大规模的橡胶种植工作。据《中国森林·第 4 卷》所述,西双版纳景洪、勐腊是我国橡胶林最适宜的造林区,也是发展我国制胶业的重点地区。本区的气候、土壤、水分条件十分适合橡胶树生长,产胶量不但高于我国海南岛,在世界范围内也比较高<sup>[14]</sup>,因此在西双版纳种植面积较大,占有林地面积的 25.9%(1998)<sup>①</sup>,近年来随着山地承包到户,橡胶的种植面积又进一步增加。

## 万方数据

① 西双版纳傣族自治州统计局,西双版纳傣族自治州统计年鉴,1998

热带季节雨林和橡胶林作为西双版纳热带森林系统中两个极端的林型,在当地森林系统中占有很大的比重,有其不可取代的森林水文效应。热带季节雨林多层多种,结构复杂,橡胶林单层单种,结构简单。在同一地区内,这两种差异较大的极端林型同时存在,其水文效应如何、有何差异,值得探讨。另一方面,我国热带原始林位于赤道热带雨林带的印度-马来雨林区内,为世界热带林分布的北缘,仅见于海南省和云南省南部的西双版纳地区。西双版纳地处内陆,属西南季风区,其气候、水文特征与属东南季风区、海洋性气候的海南岛有很大差异,相应两地的热带雨林也有很大差异,西双版纳的雨林有显著的季相变化,有其特殊性,由此带来的森林效应必将有所差异。近几十年来,由于人类活动的增加,使热带雨林正以惊人的速度急剧减少,使生态环境失去平衡,国内外虽有相关研究,但仍远远不够,对它的研究亦有紧迫性。本文利用西双版纳热带季节雨林和橡胶林的观测资料,探讨两类林型对大气降水的再分配及相关过程,以此揭示西双版纳热带森林系统中两个具有代表性的林型的森林水文效应特征。

## 1 研究地概况和研究方法

### 1.1 研究地概况

西双版纳终年受西南季风控制,属热带季风气候,一年中有雾凉季(11~翌年2月份)、干热季(3~4月份)和湿热季(5~10月份)之分。在雾凉季和干热季降水较少(约占全年降水的15%),85%的降水则主要集中在湿热季,因此,通常将雾凉季、干热季合称为干季(11~4月份),将湿热季称为雨季(5~10月份)。季节雨林的观测样地位于云南省西双版纳州勐腊县的热带季节雨林自然保护区内(21°57'N,101°12'E,海拔756 m),年平均气温 21.5℃,≥10℃积温 7860℃,平均最低气温 7.5℃,年日照时数 1828h,年降水量 1557mm,年相对湿度 86%,干燥度 1.01,年径流量 764mm<sup>[15]</sup>。

此次研究所选的两种植分位于西双版纳州勐仑自然保护区内,其中橡胶林样地选在中科院西双版纳热带植物园的人工林试验区内,热带季节雨林样地选在距该站 10km(直线距离 8km)的热带季节雨林内的永久定位样地内。两样地均建有的 CREN 的森林水文观测系统。

热带季节雨林样地的植物群落为千果榄仁-番龙眼林,群落高度 35~45m,结构复杂,分层现象明显,可分为上、中、下乔木层、灌木层、草本和藤本植物 6 个层次:上层乔木高 30m 以上,优势种主要为千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼(*Pometia tomentosa*)等;中层乔木高度在 16~30m 之间,常见种有云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)、大白叶颜树(*Girardinia subaequalis*)、山焦(*Mitrephora maingayi*)等;下层高 16 m 以下,主要种包括云树(*Garcinia cowl*)、假广子(*Knema erratica*)、细罗伞(*Ardisia tenera*)、蚊花(*Mezzettipsis creaghii*)及毒鼠子(*Dichmpetalum gelonioides*)等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外,常见种有染木(*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟(*Morinda angustifolia*)、玉叶金花(*Mussaenda* sp.)等。草本层与灌木层处于同一层次,种类不多,常见的有凤尾蕨(*Pteris* sp.)、海芋(*Aloxaxis macrorrhiza*)、盈江南星(*Arisaema inkiangense*)等<sup>[16]</sup>。该群落林内藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著,是西双版纳季节雨林中分布面积较大、保存完好、具有代表性的群系类型<sup>[13]</sup>。

橡胶(*Hevea brasiliensis*)林样地设在中科院西双版纳热带森林生态系统研究站的橡胶-云南大叶茶(*Camellia sinensis*)-小粒咖啡(*Coffea arabica* Linn.)人工群落试验区内(21°56'N,101°15'E,海拔约 580m),1969 年定植于坡度小于 6°的西南坡上,采用宽窄行密株的种植方式(株距 3.1m,窄行距 2.5m,宽行距 19.0m),橡胶树平均高度为 25m,其林冠已经完全郁闭,在宽行间中间种有茶叶、咖啡等。

### 1.2 研究方法

本研究采用水量平衡法,即在林冠层次内,存在如下平衡:

$$P = I + T + S \quad (1)$$

式中, $P$  为林外降水量(mm); $I$  为林冠截留量(mm); $T$  为穿透雨量(mm); $S$  为树干径流(mm)。

本研究中观测项目为林外降水、穿透雨和树干径流,所使用资料的期间为 1996~2001 年。

**1.2.1 林外降水的测定** 本研究中林外降水资料使用中国科学院西双版纳热带森林生态系统定位研究站气象观测站的气象数据,为口径为 20cm 的雨量器定时观测资料和虹吸式雨量计自计记录资料。

**1.2.2 穿透降水的测定** 根据公式  $n = N / (1 + Na^2 / \sigma^2)$ ,  $N = A / A'$  计算出试验区需要的雨量计个数,式中

$n$  为所需的雨量计个数,  $N$  为抽取样本所代表的区域大小,  $\alpha$  为精度,  $\sigma$  为变异系数,  $A$  为调查区面积 ( $m^2$ ),  $A'$  为雨量计受雨口面积 ( $m^2$ )。

季节雨林内, 植被繁多, 林冠疏密程度不均, 且层次较多, 样点选择具有一定难度。为使观测更具代表性, 采用自制的  $2.0m \times 0.3m$  V 型承水槽来收集穿透降水, 通过增大集水面积来弥补林冠的不均匀性。具体方法为将集水槽固定在林冠下, 10 个为一组, 用  $6^\circ$  三角堰与自计水位计自动记录。橡胶林则 6 个为一组, 记录方法相同。

**1.2.3 树干径流的测定** 采用镀锌铁皮环状收集槽, 用虹吸式雨量计或  $6^\circ$  三角堰与自计水位计自动记录。热带雨林共设 4 块样地, 样地 1 取不同径级的树干 6 棵, 样地 2 取径级  $16cm < d \leq 32cm$  的树干 1 棵, 样地 3 取径级  $10cm < d \leq 16cm$  的树干 4 棵, 样地 4 选取径级  $d \leq 10cm$  的树干 4 棵。橡胶林树种单一, 径级相差不大, 取径级  $10cm < d \leq 16cm$  的树干 2 棵。取得总量后, 用有效树冠面积 (对产流做贡献的树冠面积) 计算单位林冠下的树干径流量。

**1.2.4 树冠截留量的计算** 采用差值法计算, 在已测得林外降水、穿透降水、树干径流的基础上, 据公式 (1) 得:

$$I = P - (T + S) \tag{2}$$

## 2 结果与分析

### 2.1 降水特征

观测期间 (1996~2001 年) 勐仑地区平均年降水量 1595mm, 其中干季 232mm, 占总降水量的 14.55%, 雨季 1363mm, 占总降水量的 84.45%。多年平均年总雨日 151d, 其中雷暴日 102d, 占总雨日的 67.6%。

从图 1 中可以看出, 25mm 以下各量级日雨量分布比较均匀, 5mm 以下的日降雨占总降雨量的 45.2%, 10mm 以上的日降雨占总雨量的 37.7%。由图 2 可知, 西双版纳地区的降雨量呈现明显的季节分异特征, 全年降雨多集中在 5~10 月份, 占降雨总量的 85.5%。7 月雨量达到最大值, 占全年降雨量的 22.7%, 占雨季的 26.6%; 1~2 月份最小, 占全年降雨量的 2.0%, 占干季的 13.8%。

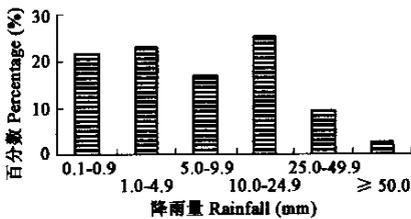


图 1 不同等级日降雨量百分率

Fig. 1 Percent of different daily precipitation

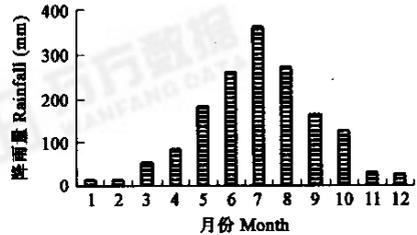


图 2 降雨量年变化

Fig. 2 Variation of precipitation

### 2.2 林冠截留

林冠对大气降雨的截留缓冲是水分输入森林进行的第一次分配, 通过这次分配, 降雨到达地面的数量、速度、时间均发生了变化, 但不能一味强调林冠对降雨动能的阻截和减弱作用<sup>[17]</sup>。大部分研究认为, 林冠截留量与降水量呈正相关关系<sup>[18~21]</sup>。一般来说, 二者之间的关系在降雨初始或雨量很小时表现十分明显, 但随降雨量的增加, 截留量的增长率迅速减小, 最后增加缓慢或不再增加, 达到饱和状态, 接近树冠的最大截留量。另外, 林冠截留量也受到林冠结构、前期降水、雨量及雨强等因素的影响。

本研究中季节雨林林冠的最大截留量 (图 3) 出现在 5~7 月份, 最小出现在 11~翌年 2 月份, 截留量变化趋势呈倒“V”型; 季节雨林林冠截留率曲线较为平缓 (25.65%~67.15%), 最大截留率出现在 3 月份, 最小出现在 9 月份。随着降雨量及截留量的增加而减小。季节雨林树冠截留量季节差异十分明显, 雨季截留量是干季的 4 倍还多, 截留率不到干季的 2/3。橡胶林最大林冠截留量 (图 4) 出现在 4、5 月份, 8 月份

次之,最小在 11~翌年 2 月份,7 月份为次低值,呈“M”型变化趋势,雨季随降雨量的增大而减小,干季则随降雨量的增大而增大。橡胶林林冠截留率变化较大(6.5%~98.75%),截留率最大值出现在 2 月份,最小值出现在 7 月份,2~9 月份截留率随降雨量的增大而减小,10~翌年 1 月份较为复杂,没有明显的规律。橡胶林树冠截留率也存在明显的季节差异:干季截留量是雨季的 3/5,截留率却是雨季的 3.5 倍。

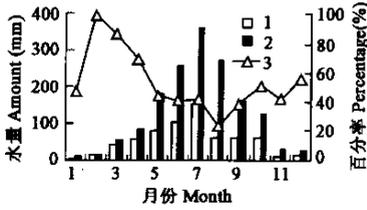


图 3 季节雨林林冠降雨截留年变化

Fig. 3 Variation of canopy interception in tropical seasonal rainforest

1. Interception (mm); 2. Rainfall (mm); 3. Interception (%)

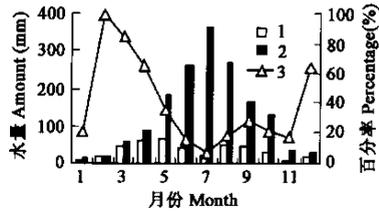


图 4 橡胶林林冠降雨截留年变化

Fig. 4 Variation of canopy interception in rubber forest

1. Interception (mm); 2. Rainfall (mm); 3. Interception (%)

2.3 树干径流

冠层中叶片和枝条截留降雨达到饱和后多余的水分中的一部分或直接降至树干的雨水,经树干表皮吸收湿润形成重力水,沿树干汇集而下成为茎流。从图 5 可以看出,树干径流集中产生在 5~10 月份,最大值出现在 7 月份,11~翌年 3 月份各月茎流量小于 1.5mm, 2,3 月份最小。季节雨林雨季茎流量占全年茎流总量的 94.8%,7 月份茎流量占全年的 31.5%;橡胶林雨季茎流占全年茎流总量的 93.3%,7 月份茎流量占全年的 37.3%。比较两种林分的树干径流(表 1),橡胶林各项的数值均大于季节雨林。

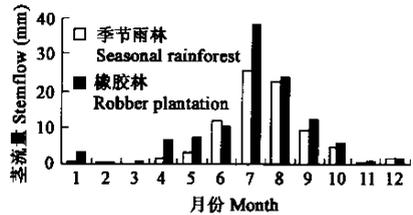


图 5 树干径流量年变化

Fig. 5 Variation of stemflow

表 1 季节雨林和橡胶林树干径流的对比

Table 1 Contrast of stemflow between tropical seasonal rainforest and rubber forest

林分 Stand	月平均最大值 Monthly mean maximum (mm)	干季径流量 Stemflow in dry season (mm)	雨季径流量 Stemflow in rain season (mm)	年平均径流量 Yearly mean stemflow (mm)	分配率 Dispensation (%)	年平均分配率 Yearly mean dispensation (%)
季节雨林 Seasonal rainforest	25.0	4.2	76.5	79.2	0.24~8.23	5.15
橡胶林 Robber plantation	38.9	7.0	97.2	104.1	0.49~10.72	6.68

2.4 穿透降雨

穿透降雨包括从林冠空隙直接落到林地表面的降雨量和从林冠上汇集而下的冠滴量,它是林地土壤水分及径流的主要来源。穿透降雨量的大小与林型、林分密度等因素有关,也要受大气降雨量及强度的制约。从多年平均资料来看(图 6),季节雨林穿透降雨最大值出现在 8 月份(183mm),最小在 1~2 月份,不足 10mm;全年穿透降雨量为 853mm,其中 59.5%集中在 7~9 月份;橡胶林最大值出现在 7 月份(300mm),最小在 1 月份(<10mm);全年穿透降雨量为 1136mm,其中 62.3%集中在 7~9 月份。

随着穿透降雨量的增加,橡胶林与季节雨林穿透降雨的差值也逐渐增加(表 2),7 月份差异最大,占全

年总差值的 41.4%，2~3 月份差异较小，占全年总差值的 0.75%。两种林分穿透降雨差值的季节分异比较显著，干季比雨季小 94.0%。

表 2 橡胶林与季节雨林穿透降雨差值的变化

Table 2 Variation of difference of throughfall between rubber plantation and tropical seasonal rainforest

月份 Month	11	12	1	2	3	4	干季 Dry season
差值 Difference(mm)	7.7	-2.2	6.2	-0.1	1.9	2.6	16.0
月份 Month	5	6	7	8	9	10	雨季 Rain season
差值 Difference(mm)	13.5	66.9	117.1	15.6	14.7	37.1	265.0

### 3 讨论

#### 3.1 关于林冠截留

截留能力是指在不受其他气象环境因素影响的理想条件下，林冠对某一雨量的可能截留量，其大小完全取决于林冠本身的结构特征<sup>[12]</sup>，在不同类型的森林之间，林冠截留率能更好地比较截留效能。林冠对大气降雨的截留作用是森林发挥其水文作用的第一步，它一方面减小了林下径流量，另一方面又推迟了林下的降雨时间和产流时间。对一场特定降雨而言，林冠的截留作用在很大程度上影响到林内降雨的特征，继而影响到其他森林水文过程，对森林生态系统的水分、养分循环有着重要的意义。本研究表明(图 3, 图 4)，不同林分的截留率变化趋势呈现较大差异，其原因来源于两种林分结构特征上的不同。两种林分的叶片大都为长卵圆形，光滑革质，大小相差不多。表面光滑的叶片截留降雨的多少受机械作用的影响很大，下落到叶面的雨滴动能很大时，对叶面的冲击力就比较大，叶面很难蓄存过多的水分。雨季来临时，雨量和雨强比干季增大很多，大到暴雨的几率也增多，在雨量集中的 6、7 月份更是如此，单个叶片的截留量甚至不如雨量和雨强小的降雨大，一个时段内的截留量会出现增长停滞，甚至倒退。当雨量、雨强逐渐减小时，单个叶片的截留量相应增加，一个时段内的截留量亦开始有所回升。橡胶林截留量的“M”型变化趋势正源于此。季节雨林中大多数树种的叶片虽然与橡胶树相似，但是由于季节雨林结构复杂、层次较多，雨滴冲击到上层叶片后下落，受到下面叶片的层层拦截，动能逐渐减小。这样，虽然林冠表层单个叶片的截留量很小，但是整个林冠的截留量比较大，因此季节雨林的截留量变化呈倒“V”型。倒“V”型和“M”型变化趋势差异反映了季节雨林和橡胶林生态学意义上的差异：季节雨林林冠能较好地截持丰水期的雨水，而橡胶林林冠在丰水期几乎没有发挥截留降雨的作用，使林内有效降雨接近林外降雨，这无疑不利于减少地表径流对林地的冲刷，对汛期的防洪工作也有较大的危害。

季节雨林和橡胶林在降雨量较小的干季保持了较高的截留率，而在雨量充沛的雨季截留率较低，林冠截留率随截留量的增加而减小(图 3, 图 4)，这与我国海南岛尖峰岭、湖南会同、川西米亚罗等地区的森林生态系统定位研究结果相似<sup>[19, 22~24]</sup>。比较两种林分树冠截留的季节动态(表 3)，橡胶林在雨季截留量和截留率小于季节雨林，7 月份差距最为显著，差值分别为 130.5mm 和 36.02%；在干季，除 11 月、1 月份外，截留量和截留率大于季节雨林，各月之间截留量无显著差异，截留率则有较大的波动。两种林分都存在着明显的季节分异性，所不同的是，当降雨量发生较大的变化(如干季、雨季的交替)后，季节雨林的林冠截留量较为显著，而橡胶林的林冠截留率较为显著。在研究期间内(1996~2001 年)，季节雨林的年截留量为 677.3mm，截留率为 42.47%；橡胶林年截留量 393.6mm，仅为季节雨林的 58.1%，截留率为 24.68%，比季节雨林低 17.79%。

本研究中所选取的两种林分的林冠结构处于两种极端的状态，季节雨林结构复杂，层次较多，林分郁闭较好，丰富的藤本和附生植物使各层次之间、林木之间的界限更加模糊；而橡胶林为人工群落，结构整齐，层次简单分明。体现在截留能力上，二者存在一定的差异。此次研究的两块样地气象环境因素差距较

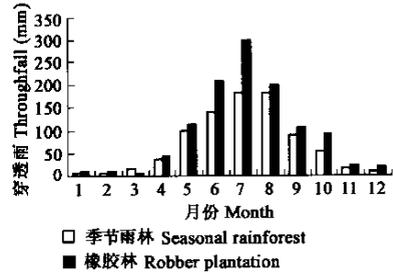


图 6 穿透降雨量年变化

Fig. 6 Variation of throughfall

小,可用实测的截留量作为比较截留能力的表征值,比较二者的截留能力。由以上分析可以得出季节雨林的截留能力大于橡胶林:橡胶林在雨量较小的干季与季节雨林截留能力相差不多,但在雨季来临之后起到的截留作用不大,在雨量最多的 7 月尤为明显,这也符合普遍认同的林冠结构越稠密,截留量越大的规律<sup>[25,26]</sup>。另外,由于截留量是由实际的枝叶蓄水量和冠层蒸发量的总和,枝叶会把部分水分蒸发到大气中去,即便是对于历时较长的降雨,林冠截留降雨的潜力也会有所增加。在西双版纳地区,干季雨量不多,林冠蒸发量很大,截留能力较大;雨季来临后,大部分降雨历时不长,一场降雨和另一场降雨之间时间间隔短,但由于气温高,蒸发量大,林冠的截留潜力依然会不断的发挥出来。在这一点上,季节雨林发挥了复层林的优势,枝叶量大,林冠蓄水量大,冠层蒸发量大,截留潜力相应就比较大,因此,截留率的最低值比降雨最大值推迟一个月,而且很快恢复到原有的高水平。橡胶林则在雨季来临后截留能力不断下降,雨量减少后回升很慢,维持在比较低的水平。

表 3 橡胶林与季节雨林林冠截留差值的年变化

Table 3 Variation of difference of canopy interception between rubber plantation and tropical seasonal rainforest

月份 Month	11	12	1	2	3	4	干季 Dry Season
截留量 Interception(mm)	-8.0	2.5	-3.3	8.4	9.4	9.7	18.6
截留率 Dispensation(%)	-25.37	8.58	-23.54	48.24	17.78	11.14	8.00
月份 Month	5	6	7	8	9	10	雨季 Rain season
截留量 Interception(mm)	-17.5	-65.1	-130.5	-16.2	-17.8	-38.5	-285.6
截留率 Dispensation(%)	-9.62	-25.06	-36.02	-5.98	-10.97	-30.75	-20.96

### 3.2 关于树干径流量

对比所研究的两种林分(图 5、表 1)可见,季节雨林无论是径流量还是分配率都小于橡胶林,其原因和两种林分的特征有关。季节雨林林冠较厚,层次较多;对于径级较大的树木,其树冠在各个方向上分布不均,在某些方向上树枝分支角度很大,接近或超过 90°,对树干径流贡献很少,能够从枝条和叶片上汇集而下的水流又会受到树干上大量附生植物的拦截;对于径级较小的树木,本身冠幅很小,而且往往受到上层林冠的遮蔽,当降雨发生时接收到的大部分是上层林冠的穿透降雨,因此产生的径流量也比较小。橡胶林人工群落存在一定的行间距,单层单种,对树干径流的产生起作用的有效树冠面积较大,同时由于该群落受到人工管理,树干上几乎没有成规模的附生植物,阻碍物较少,易于形成树干径流。

有研究认为,树干径流除了受雨量、雨强的制约外,还受林木分枝角度、叶片形状结构、树皮粗糙度及松软度等因素的影响;分枝角度小、树皮光滑而质地较硬,则有利于形成树干径流,而树干体积大小与之无明显规律<sup>[19,20,27]</sup>。而在本研究中,季节雨林的树干径流量随径级及树冠面积的增大而减小,占降雨量的比率也有同样的变化趋势(表 4)。季节雨林中树木径级不一,径级较大的树木常占有资源和养分上的优势,树干上有较多的附生植物,使树干表面变得粗糙,已产生的树干径流受到拦截,因此,在季节雨林中径级大的树木径流量较小。

表 4 热带季节雨林不同径级树干的茎流量及分配率

Table 4 Stemflow and dispensation ratio of different diameter at breast height in tropical seasonal rainforest

样地 Experimental site	径级 Diameter at breast height(cm)	平均树冠面积 Mean canopy area (m <sup>2</sup> )	年最大茎流量 Yearly maximum stemflow (mm)	年平均茎流量 Yearly mean stemflow (mm)	分配率 Dispensation (%)
雨林 1 Rainforest I	16<d≤32	75.91	4.3	63.8	4.12
雨林 2 Rainforest II	10<d≤16	12.20	7.2	141.8	9.15
雨林 3 Rainforest III	d≤10	7.64	7.3	167.6	10.82

树干径流虽然在总量上不占优势,比例很小,但它一方面可以免除雨滴引起的溅蚀,增加树木根基周围的水分,对保水数据和树木生长具有重要意义。另一方面,它对于某些离子养分经由树干输入到林地,在某些生态系统中仍然很重要。干流水是溶质传输到树体基部小面积的主要途径,因此会影响到此面积林下

灌木的分布、土壤理化性质及微生物的活动<sup>[29]</sup>,这对于季节雨林维持其生物多样性十分重要,对橡胶林这样的人工群落增加生物多样性也有很大的意义。

### 3.3 关于穿透雨

穿透降雨是林内降雨和林外降落到上层林冠的降雨相比,其降雨历时、过程、强度、雨滴动能及降雨量都已经发生了变化,而且林冠截留作用发挥的越大,这种变化就越显著。在雨季,季节雨林的截留量较大,其穿透降雨量就小,橡胶林的截留量相对小,其穿透降雨量就比较大,但总而言之,穿透降雨是林

外降雨到达林冠后的主要去向。在干季,相对来说多层、茂密的季节雨林穿透降雨量比单层的橡胶林还要大,这是因为 11~翌年 4 月份虽然降雨量不大,但是其他形式的大气降水会弥补降雨量的不足(表 7);作为西双版纳特殊的地方气候现象,在一年中,特别是干季,夜间常会升起浓雾,一直维持到次日近中午才会消散,空气湿度很大,形成雾雨。由于西双版纳这种特殊的气候现象,干季的穿透降雨中雾露水凝结形成的冠滴水也做了很大的贡献。季节雨林虽然在春旱时期有 15%的枝叶要换叶,但整个林分的枝叶量依然很大,是橡胶林人工群落所远不能及的,因此,干季反而会出现密林的穿透降雨量大于疏林的情况。

### 3.4 降水的再分配

在研究期间内,随着林外降雨量的变化,两种不同林分森林水文各分量基本上不同程度地保持了同步变化(图 7、8),即在雨量大的月份,各分量也较大,反之亦然(橡胶林 6~8 月份林冠截留量则有相反的趋势,原因见前述)。这表明在一个比较大的时间区间内(例如以月为单位),某一种林分各森林水文分量的大小在很大程度上受到这一地区大气降水的制约。从图 7、8 还可以看出,两种林分森林水文要素季节动态曲线中,穿透降雨、林冠截留两项有很大区别。季节雨林的穿透降雨曲线比较缓和,雨量变化越大,穿透降雨变化越小;橡胶林的穿透降雨曲线则十分贴近林外降水曲线,并为之保持了大致相同的变化趋势。两条曲线之间的差距可近似地用林冠截留曲线来表示,它可以更清晰的看出两种林分的林冠削减降水的程度。一年中各月两种林分林冠对降雨分配格局如表 6、表 7 所示。

表 6 季节雨林林冠对降水的再分配

Table 6 Redispensation of precipitation on the canopy of tropical seasonal rainforest

月份 Month	林外降雨	林冠截留		树干径流		穿透降雨	
	Precipitation (mm)	Canopy interception (mm)	(%)	Stemflow (mm)	(%)	Through fall (mm)	(%)
1	14.2	6.3	44.53	0.4	3.12	7.4	52.35
2	17.4	8.8	50.51	0.3	1.58	8.3	47.91
3	52.9	35.5	67.05	0.2	0.33	17.3	32.62
4	87.0	47.4	54.47	1.3	1.44	38.4	44.09
5	181.7	80.4	44.27	3.2	1.78	98.0	53.94
6	259.9	106.3	40.92	11.9	4.57	141.6	54.51
7	362.4	154.1	42.52	25.4	7.02	182.9	50.46
8	270.9	64.9	23.95	22.7	8.36	183.4	67.69
9	162.5	62.8	38.66	8.9	5.45	90.8	55.89
10	125.1	64.5	51.54	4.4	3.53	56.2	44.92
11	31.7	13.5	42.58	0.6	1.81	17.6	55.61
12	28.9	16.1	55.89	1.5	5.26	11.2	38.85
干季 Dry season	232.0	127.6	54.99	4.2	1.89	100.2	43.87
雨季 Rain season	1362.5 b	533.0	39.12	76.5	5.87	753.0	55.31
年 Year	1694.5	660.6	41.43	80.7	5.24	853.2	53.74

表 7 橡胶林林冠对降水的再分配

Table 7 Redispensation of precipitation on the canopy of rubber plantation

月份 Month	林外降雨 Precipitation	林冠截留 Canopy interception		树干径流 Stemflow		穿透降雨 Through fall	
	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
1	14.2	3.0	20.98	1.0	7.17	10.2	71.85
2	17.4	17.1	98.75	0.2	1.25	0.0	0.00
3	52.9	44.9	84.83	0.3	0.49	7.8	14.68
4	87.0	57.1	65.61	3.3	3.74	26.7	30.65
5	181.7	63.0	34.65	7.2	3.96	111.5	61.39
6	259.9	41.2	15.86	10.1	3.90	208.5	80.24
7	362.4	23.6	6.50	38.9	10.72	300.0	82.78
8	270.9	48.7	17.96	23.2	8.58	199.0	73.46
9	162.5	45.0	27.69	12.0	7.37	105.6	64.94
10	125.1	26.0	20.79	5.8	4.61	93.3	74.60
11	31.7	5.5	17.21	0.9	2.99	25.3	79.79
12	28.9	18.6	64.47	1.3	4.37	9.0	31.16
干季 Dry season	232.0	146.1	62.98	7.0	3.20	78.9	35.73
雨季 Rain season	1362.5	247.4	18.16	97.2	7.33	1017.9	73.80
年 Year	1594.5	393.5	24.68	104.1	6.68	1096.8	67.85

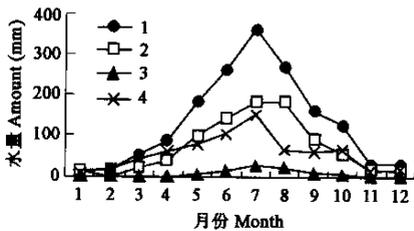


图 7 季节雨林森林水文各要素年变化

Fig. 7 Variation of hydrographic elements in tropical seasonal rainforest

1 降水 Precipitation; 2 穿透降雨 Throughfall; 3 茎流 Stemflow; 4 林冠截留 Interception

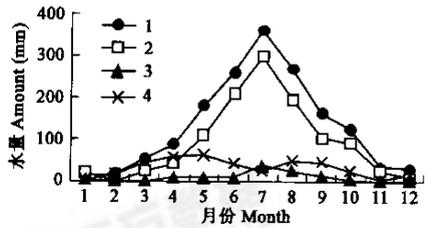


图 8 橡胶林森林水文各要素年变化

Fig. 8 Variation of hydrographic elements in rubber plantation

1 降水 Precipitation; 2 穿透降雨 Throughfall; 3 茎流 Stemflow; 4 林冠截留 Interception

橡胶林与季节雨林林冠对降雨再分配的差值有显著的季节变化(表 8)。在干季橡胶林的林冠截留率大于季节雨林,雨季相反,差别最大的是 7 月份和 2 月份;除个别月份外,橡胶林的树干径流分配率大于季节雨林,差别最大的是 12 月份和 5 月份;干季橡胶林的穿透降雨分配率小于季节雨林,雨季反之,差别最大的是 3 月份和 7 月份。

季节雨林的林冠截留量占林外降水的 41.43%,树干径流占 5.24%,穿透降雨占 53.74%;橡胶林的林冠截留占林外降水的 24.68%,树干径流占 6.68%,穿透降雨占 67.85%。与我国各地林冠对降雨的分配状况相比(表 9),季节雨林有较大的林冠截留率;除海南岛的热带雨林外,橡胶林的林冠截留率比其他人工林大,比大多数针叶林小。这符合林冠截留的一般规律,即在相似的森林覆盖度下,针叶林>阔叶林,落叶林>常绿林,复层异龄林>单层林。与同属热带地区的海南岛尖峰岭相比,截留率从大到小依次是:季节雨林>山地雨林>半落叶季雨林>橡胶林;干流率:橡胶林>季节雨林>半落叶季雨林。从树干径流的分配率来看,季节雨林和橡胶林的干流率只小于北京东灵山的辽东栎林,与其他地区相比,仍处于较高的水平。

表8 橡胶林与季节雨林林冠对降雨的再分配差值的年变化(%)

Table 8 Variations of difference of redispensation of precipitation on the canopy between rubber and tropical seasonal rainforest

月份 Month	1	2	3	4	11	12	干季 Dry season
林冠截留 Canopy interception	-23.54	48.24	17.78	11.14	-25.37	8.58	7.99
树干径流 Stemflow	4.05	-0.33	0.17	2.30	1.18	-0.89	1.31
穿透降雨 Through fall	14.39	-5.61	-18.81	-16.56	24.19	-7.69	-8.14
月份 Month	5	6	7	8	9	10	雨季 Rain season
林冠截留 Canopy interception	-9.62	-25.06	-36.02	-5.98	-10.97	-30.75	-20.96
树干径流 Stemflow	2.17	-0.68	3.70	0.22	1.92	1.08	1.46
穿透降雨 Through fall	7.44	25.73	32.32	5.76	9.05	29.67	18.49

表9 我国各地林冠对降雨的再分配状况

Table 9 Redispensation of precipitation on the canopy of forest in different region of China

地点 Experimental site	林种 Stand	截留率(%) Dispensation of interception	茎流率(%) Dispensation of stemflow	穿透率(%) Dispensation of throughfall	时段 Time	文献 Reference
西双版纳 Xishuangbanna	季节雨林 Tropical seasonal rainforest	41.43	5.24	53.74	全年 A Year	本研究
海南尖峰岭 Jianfenglig, Hainan	山地雨林 Tropical mountainrainforest	36.5			全年 A Year	[27]
甘肃靖远 Jingyuan, Gansu	油松林 Chinese pine forest	34.37			全年 A Year	[30]
海南尖峰岭 Jianfenglig, Hainan	半落叶季雨林 Tropical semideciduous monsoon forest	29	3	68	全年 A Year	[19]
湖南会同 Huitong, Hunan	杉木林 Chinese fir plantation	25.8	0.1	74.1	全年 A Year	[22]
西双版纳 Xishuangbanna	橡胶林 Robber plantation	24.68	6.68	67.85	全年 A Year	本研究
甘肃靖远 Jingyuan, Gansu	灌木林 Shrubs	23.77			全年 A Year	[30]
云南会泽 Huize, Yunnan	华山松人工林 Pinus armandii plantation	20.9	4.9	74.2	全年 A Year	[31]
四川理县 Sishuan	冷杉林 Fir forest	20~70			全年 A Year	[29]
湖北宜昌 Yichang, Hubei	柏木人工林 Cupressus funebri plantation	19.1	1.17	79.73	7月 Jul.	[32]
北京东灵山 Beijing	混交林 Deciduous broad- leaved mixed forest	18.6	4.5	76.9	5~10月 From May To Oct.	[33]
秦岭 Qinling Mountain	油松林 Chinese pine forest	17.1~22.85			5~10月	[36]
陕西宝鸡 Shanxi	锐齿栎林 Quercus aliena var. acuteserrata forest	11.9~15.5			5~10月 From May To Oct.	[34]
江西分宜 Jiangxi	毛竹人工林 Mosobamboo plantation	11.1	4.4	84.5	全年 A Year	[35]
广西里骆 Guangxi	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved	10	2.4	87.6	全年 A Year	[21]

总而言之,在西双版纳,每年干季,两种林分截留了多种形式的大气降水,增加了林内湿度和林下土壤水分。雨季来临时,季雨林在丰水期减少了形成径流的来水量,减缓了雨水到达林地的时间,对减小汛期洪水危害有重要的意义;橡胶林截留作用没有季节雨林显著,但茎流量较大,引导水流沿着植物根系的分

布下渗或汇流,减轻了穿透降雨对林地地表的溅蚀作用,对保护林地表层土壤有重要的意义。比较而言,季节雨林在影响森林生态系统的水分循环、水土保持及保护当地居民生活安全等方面都起到了积极的作用,因此,应加强对西双版纳地区季节雨林的保护力度,减缓季节雨林数量急剧减小的趋势,尽量维持其现有的数量;橡胶林虽不及季节雨林的作用显著,但和其它地区的人工群落相比,橡胶林也有其自身的优势和经济价值,在大面积推广的同时向复合农林的方向发展,变单层单种为多层多种,增大它的经济效益、生态效益和社会效益。

## References:

- [ 1 ] Chen B F, Wang X W, *et al.* Study on collection technology of the hydrologic elements in tropical forest. *Ecologic Science*, 1998, **17**(1): 15~18.
- [ 2 ] Wang C R, Luo Z Q, Zhao S Y. Research on precipitation and trophic content of throughfall of rubber plantation in Xishuangbanna. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, **4**(3): 259~265.
- [ 3 ] Fan H B. Temporal and spatial Changes in acidity and electrical conductivity of forest precipitation. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, **24**(4): 463~467.
- [ 4 ] Fan H B. Effects of canopy interception by Chinese fir forests on precipitation chemistry. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, **36**(4): 2~8.
- [ 5 ] Huang J H, Li H T, *et al.* Nutrient characteristics of stemflow and throughfall in two coniferous forest ecosystems. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, **24**(2): 248~251.
- [ 6 ] Zhou G Y, Xu Y G, *et al.* Influences of acid rain on crown leaching of chemical ions in different forest in Guangzhou. *Forest Research*, 2000, **13**(6): 598~607.
- [ 7 ] Wang B, Guo Q S, *et al.* The potential impact of climate change on the rainfall interception of forest in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, **33**(4): 299~301.
- [ 8 ] Sun H N. Progress of the research on the role of the forest during the past 20 years. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5): 407~412.
- [ 9 ] Liu J G, Wan G L, *et al.* Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, **36**(2): 2~5.
- [ 10 ] Yu P P. Application of physically-based Distributed Models in forest hydrology. *Forest Research*, 2002, **13**(4): 431~438.
- [ 11 ] Zhang G C, Liu Y, Zhao M. On rainfall interception models. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, **24**(1): 64~68.
- [ 12 ] Fan S X, Pei T F, *et al.* Rainfall interception capacity of forest canopy between two different stands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(5): 671~674.
- [ 13 ] Zhu H. The tropical rain forest vegetation in Xishuangbanna. *Tropical Geography*, 1990, **10**(3): 233~240.
- [ 14 ] Jiang A L. Ecological climate and botany plant in Xishuangbanna. *Natural Resource*, 1987, (2): 32~36, 15.
- [ 15 ] Liu Y H, Zhang K Y, *et al.* Design of the hydrological observation system for tropical rain forests in Xishuangbanna. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2001, **28**(2): 14~16.
- [ 16 ] Ren Y H, Cao M, *et al.* A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rainforest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1999, **23**(5): 418~425.
- [ 17 ] Liu S R, Wen G Y, *et al.* *Ecophysiological Functions of Forest Ecosystems in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996. 3~6.
- [ 18 ] Ma X H, Yang M R, *et al.* A study on hydrological function of cunninghamia lanceolata and pinus massoniana plantations. In: Zhou X F, eds. *Long-Term Research On China's Forest Ecosystems*. Haebing: Northeast Forestry University Press, 1994. 346~353.
- [ 19 ] Zeng Q B. Hydrologic cycling of tropical Forest ecosystems in Jianfengling Hainan Island. In: Zhou X F, eds. *Long-Term Research On China's Forest Ecosystems*. Haebing: Northeast Forestry University Press, 1994. 413~429.

- [20] Zhou G Y. Eco-hydrological functions of tropical forest, China. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **16**(5): 47~50.
- [21] Huang C B, Wen S C. Climatic and hydrological effects of evergreen broad-leaved and Artificial Chinese fir forests in Liliu forested region. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, **12**(3): 1~7.
- [22] Wen S Z, Pan W C, Gao Y M. Water balance and its dynamic features in Chinese fir plantation ecosystem. In: Zhou X F, eds. *Long-Term Research on China's Forest Ecosystems*. Harbing: Northeast Forestry University Press, 1994. 376~383.
- [23] Kang W X, Peng Y Y, Cai B Y. Studies on the function of crown interception on water and heat balances in Chinese fir plantation. In: Zhou X F, eds. *Long-Term Research On China's Forest Ecosystems*. Haebing: Northeast Forestry University Press, 1994. 394~399.
- [24] Huang L L. Preliminary studies on water conservation functions of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan. In: Zhou X F, eds. *Long-Term Research On China's Forest Ecosystems*. Harbing: Northeast Forestry University Press, 1994. 400~412.
- [25] Wang Y M. A summary on the study of redistribution of precipitation by canopies in China (I). *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, **15**(3): 1~7.
- [26] Wang Y M. A summary on the study of redistribution of precipitation by canopies in China (II). *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, **15**(4): 1~5.
- [27] Jiang Y X, Lu J P, et al. eds. *Ecosystems of Tropical Forest in Jianfengling Hainan Island, China*. Beijing: Science Press, 1991. 188~198.
- [28] Anderson, T. Influence of stemflow and throughfall from common oak (*Quercus robur*) on soil chemistry and vegetation patterns. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, **21**: 917~924.
- [29] Liu S R, Sun P S, et al. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5): 451~456.
- [30] Yang W J. Investigation and analysis of hydrological effects of forestry vegetation in Hasi Mountain in Jingyuan. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2000, **25**(2): 23~26, 44.
- [31] Meng G T, Lang N J, et al. Hydrological properties and water balance of *Pinus armandii* plantation in Central Dian Plateau, Yun'nan Province. *Forest Research*, 2001, **14**(1): 78~84.
- [32] Wang Q C, Deng H B, et al. Redistribution of rainfall and nutrient cycling in cupressus funebris forest in the three-gorge region. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, **9**(4): 451~457.
- [33] Wan S Q, Chen L Z. Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(1): 61~67.
- [34] Gao J R. Hydrological effect of *Quercus aliena* Var. *acuteserrata* stands in forest region of the Qinling Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, **20**(6): 31~35.
- [35] Wang Y H, Liu Y M. A study on hydrological functions of a mosobamboo plantation. In: Zhou X F, eds. *Long-Term Research on China's Forest Ecosystems*. Harbing: Northeast Forestry University Press, 1994. 354~363.
- [36] Zhou X F, eds. *Forest and Ecology in China*. Beijing: China Forest Publishing House, 1999. 87~90.

## 参考文献:

- [1] 陈步峰, 王新文, 等. 热带森林水文研究中数据收集技术的探讨. *生态科学*, 1998, **17**(1): 15~18.
- [2] 王醇儒, 罗仲全, 赵仕远. 西双版纳地区降雨和橡胶林内雨养分含量的初步研究. *生态学报*, 1984, **4**(3): 259~265.
- [3] 樊后保. 森林降水酸度及电导率的时空变化. *植物生态学报*, 2000, **24**(4): 463~467.
- [4] 樊后保. 杉木林截留对降水化学的影响. *林业科学*, 2000, **36**(4): 2~8.
- [5] 黄建辉, 李海涛, 等. 暖温带两种针叶林生态系统中径流和穿透雨的养分特征研究. *植物生态学报*, 2000, **24**(2): 248~251.
- [6] 周光益, 孙文敏. 广州市酸雨对不同林冠层淋溶规律的研究. *林业科学研究*, 2001, **13**(6): 598~607.
- [7] 王兵, 郭泉水, 等. 气候变化对我国森林降水截留规律的可能影响. *林业科学*, 1997, **33**(4): 299~306.

- [8] 孙惠南. 近 20 年来关于森林作用研究的进展. 自然资源学报, 2001, 16(5): 407~412.
- [9] 刘家冈, 万国良, 等. 林冠对降雨截留的半理论模型. 林业科学, 2000, 36(2): 2~5.
- [10] 于澎涛. 分布式水文模型在森林水文学中的应用. 林业科学研究, 2000, 13(4): 431~438.
- [11] 张光灿, 刘霞, 赵玫. 树冠截留降雨模型研究进展及其评述. 南京林业大学学报, 2000, 24(1): 64~68.
- [12] 范世香, 裴铁璠, 等. 两种不同林分截留能力的比较研究. 应用生态学报, 2000, 11(5): 671~674.
- [13] 朱华. 西双版纳的热带雨林植被. 热带地理, 1999, 10(3): 233~240.
- [14] 江爱良. 云南西双版纳的生态气候和植物. 自然资源, 1987, (2): 32~37, 15.
- [15] 刘玉洪, 张克映, 等. 西双版纳热带雨林水文观测系统的设计. 福建林业科技, 2001, 28(2): 14~16.
- [16] 任泳红, 曹敏, 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. 植物生态学报, 1999, 23(5): 418~425.
- [17] 刘世荣, 温远光, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996. 3~6.
- [18] 马雪华, 杨茂瑞, 等. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究. 见: 周晓峰主编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 346~353.
- [19] 曾庆波. 海南岛尖峰岭热带林生态系统的水分循环研究. 见: 周晓峰主编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 413~429.
- [20] 周光益. 中国热带水文生态功能. 生态学杂志, 1997, 16(5): 47~50.
- [21] 黄承标, 文受春. 里骆林区常绿阔叶林和人工杉木林气候水文效应. 生态学杂志, 1993, 12(3): 1~7.
- [22] 文仕知, 潘维俦, 高耀明. 杉木人工林生态系统水量平衡及动态特征研究. 见: 周晓峰主编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 376~383.
- [23] 康文星, 彭元英, 蔡宝玉. 林冠截留在杉木人工林水热平衡中的作用. 见: 周晓峰主编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 394~399.
- [24] 黄礼隆. 川西亚高山暗针叶森林涵养水源性能的初步研究. 见: 周晓峰主编, 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 400~412.
- [25] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I). 西北林学院学报, 2000, 15(3): 1~7.
- [26] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(II). 西北林学院学报, 2000, 15(4): 1~5.
- [27] 蒋有绪, 卢俊培, 等. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统. 北京: 科学出版社, 1991. 188~198.
- [29] 刘世荣, 孙鹏森, 等. 长江上游森林植被水文功能研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 451~456.
- [30] 杨万军. 靖远哈思山森林植被水文效应调查与分析. 甘肃林业科技, 2000, 25(2): 23~26, 44.
- [31] 孟广涛, 郎南军, 等. 滇中华山松人工林的水文特征及水量平衡. 林业科学研究, 2000, 14(1): 78~84.
- [32] 王青春, 邓红兵, 等. 三峡库区柏木林降雨的再分配及养分循环研究. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4): 451~457.
- [33] 万师强, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林冠层对降水的分配作用. 植物生态学报, 1999, 23(6): 557~561.
- [34] 高甲荣. 秦岭林区锐齿栎水文效应的研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 31~35.
- [35] 王彦辉, 刘永敏. 毛竹人工林水文作用的研究. 见: 周晓峰主编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 354~363.
- [36] 周晓峰. 中国森林与生态环境. 北京: 中国林业出版社, 1999. 87~90.