

①

热带森林林冠对降水再分配作用的研究综述

张 平, 王 馨, 刘文杰

(中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223)

摘要: 森林林冠对大气降水的再分配是水分输入森林的第 1 个环节, 其过程涉及到森林生态、森林水文、森林气象及水土保持等诸多方面. 热带地区森林林冠水文研究有其自身的特点, 也存在着很多问题. 对热带地区林冠降水截留、穿透降雨和树干径流的研究进展和现状进行简要概括, 总结其中得到认可的规律性认识和依然存在的争议, 以期对热带地区森林林冠水文生态效应有个较为正确和全面的认识. 需要在热带地区林冠降水再分配研究中加以关注的方面包括: (1) 附生植物、大型藤本植物、板根、不定根等热带雨林特有现象在水量和降水化学元素输入与分配中的作用; (2) 对热带雨林以外的其他森林类型的林冠截留降水过程的研究; (3) 对林冠降水再分配各过程的更为精确的数学表述, 或改进现有的机理模型使其能够更为准确的反映各森林类型的降水再分配过程; (4) 对热带美洲、热带亚洲和热带非洲森林林冠降水再分配的全景式了解和认识.

关键词: 热带森林; 林冠降水再分配; 林冠截留; 树干径流; 穿透降雨
中图分类号: S715.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-389X (2004)03-0274-09

Research Review on the Partitioning of Gross Rainfall into Stemflow, Throughfall and Interception of Canopies in the Tropical Forests

ZHANG Yaping, WANG Xin, LIU Wenjie

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China)

Abstract: The partitioning of gross rainfall into throughfall, stemflow and water intercepted is the first step as rainfall falling in forest ecosystems and is of hydrological and ecological significance. The research work in the tropical forests has its own characteristics compared with the temperate forests, and the knowledge in measurements, influencing factors and modelling is still limited in this field. This review tries to summarize our current understanding of the partitioning of gross rainfall and many disagreements involved in it, and to get a relative comprehensive knowledge of hydrological and ecological effect of the forest canopies in the tropics. More research works are needed to focus on: (1) the effect of some phenomena in tropical rainforest, such as epiphyte, liane and buttress on water and nutrient input of rainfall; (2) reports on the gross rainfall and its partitioning of other forest types in the tropics, for instance ever-green forests, sparse forests, plantations, agroforests and cropping systems; (3) mathematic expression of the process of interception, stemflow and throughfall, or modification of the former models to fit different tropical forest types; and (4) whole understanding or view of the partitioning of gross rainfall in tropical America, tropical Asia and tropical Africa.

Key words: tropical forest; partitioning of gross rainfall; interception; stemflow; throughfall

森林林冠对大气降水的再分配是水分输入森林的第一个环节, 其过程涉及到森林生态、森林水文、森林气象及水土保持等诸多方面, 是经典森林水文学的主要研究内容之一, 对它的研究在 20 世纪 40 年代森林水文成为一门独立学科之前就开始了^[1]. 探究森林对大气降水的再分配状况, 不仅为森林生态系统的水养平衡、能量流动提供基本的研究数据, 对了解森林的水文生态功能、水资源管理与评价, 以及寻找合理的土地利用方式有着极其重要的意义.

FAO《全球森林资源评价 2000》报道, 热带森林占全球森林面积的 47%, 它以其复杂的结构、丰富的

① 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(国家 973 项目) 科学基金资助项目(2003CB415100).
作者简介: 张一平(1957-), 男, 云南昆明人, 研究员, 博士生导师, 从事生态气候研究; 王 馨: 中国科学院西双版纳热带植物园和中国科学院研究生院联合培养的研究生; 刘文杰: 中国科学院西双版纳热带植物园、中国科学院生态环境研究中心和中国科学院研究生院联合培养的研究生.
收稿日期: 2004-03-25; 修回日期: 2004-05-24.

生物多样性、较高的受损程度成为全球关注的热点之一^[2]。热带森林的水文效应研究，尤其是林冠对大气降水再分配的研究在我国起步较晚，其森林本身的特点又给研究工作带来了许多困难，致使我国在这方面的研究和国际先进水平还存在着相当大的差距。对近几十年来热带森林水文的研究进展和现状进行简要概括，总结其中得到认可的规律性认识和依然存在的争议，以期对热带地区森林水文效应有个较为正确和全面的认识，为我国在该领域的研究提供参考和帮助。

1 林冠降雨再分配各要素的研究

大气降水输入到森林生态系统首先受到林冠的拦截作用，被拦截的这部分水分最终通过蒸发作用返回大气，是森林生态系统水分损失的重要方面之一，也是水文水资源分析计算和森林生态系统能量平衡中常被忽略的部分^[3]。大部分降水则以穿透降雨和树干径流的形式到达林地，被树干、灌草层和枯枝落叶层截留后输入到林地土壤，是森林生态系统接收到的降雨部分，它在一定程度上反映了不同林分利用大气降水的效率。因此可以认为，大气降水输入森林后，林冠截留、穿透降雨、树干径流构成了新的水量分布格局。

1.1 林冠截留

林冠对降雨的截留作用是有限的，通常采用林冠截留率(即截留量占相应时空范围降雨量的百分比)作为比较不同林分截留作用的表征量。我国热带雨林和人工林林冠年平均截留率在 16.81%~41.4%^[4~6]；热带不同地区森林类型的平均截留率在 6%~50% 不等(表 1)。

已有的研究结果显示(表 1、表 2)，热带天然林尤其是热带雨林具有较高的截留率，这除了要归功于热带雨林特殊的群落结构，还与热带地区较高的温度和较强的蒸发有关。

1.1.1 测定方法 林冠截留量的确定一般采用水量平衡法，即通过实测得到的林外降雨、树干径流和穿透降雨量，基于林地表面以上的水量平衡公式(1)来确定

$$I = P - T - S$$

(1)

式(1)中， I 代表林冠截留量， P 、 T 、 S 分别代表相应时空区间的林外降雨量、穿透降雨量和树干径流量。对一次降雨事件而言，林冠截留量 I 实际上不仅指降雨结束时林冠上蓄存的水分，还包括树干蓄存的水分(如果降雨量足够使树体湿润的话)以及降雨过程中林冠和树干的蒸发量。

1.1.2 影响因子 林冠截留主要受到林分本身特点(林木种类、林冠结构、林分年龄等)和环境因素(降水特征、风速、温度等)的共同影响。林冠截留与各影响因子之间的量化研究，目前主要集中在林冠截留与林分组成及大气降水特征的相互关系上，但对热带湿润地区雨量较大的降雨，由于存在较大的标准差，因此难以对林冠截留进行可靠的估计^[25]。表 2 反映了不同纬度对林冠截留的影响，也反映了同一地区(有大致相同的气候条件)不同林分之间的林冠截留差异：从叶片形状来说，针叶树种的截留降水量较大，阔叶树种次之；从林木生长规律来说，常绿树种较大，落叶树种次之；从林冠结构的复杂程度来说，天然林较大，人工林次之。大部分研究认为，林冠截留量与降水量呈正相关关系^[5, 12, 23, 26, 27]，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，但截留率随着降雨量的增加而减小。

斯里兰卡热带树种研究表明, 林外降雨的雨滴动能决定着林冠截留量随雨滴大小的增加而减小的程度^[28~30]. Hall^[11] 通过研究比较不同林型和不同雨型下的林冠截留认为种间的树冠截留差异完全取决于不同的树冠类型, 降雨量大小和降雨频次的改变比雨强对林冠截留产生的影响更大. 另外, 森林经营方式对林冠截留的影响也不可忽视, Asdak 等人^[13] 对印度尼西亚砍伐和未砍伐的林地进行的研究发现当单位面积林木株数减少 52%、林木基地面积减少 63% 后, 该林区林冠截留率从 11% 降低到 6%.

在一些热带湿润地区的干季, 雾、露水是另一种主要的大气降水形式. 在西双版纳热带季节雨林和橡胶人工林的研究表明, 雾及露水极大的弥补了该地区降雨量的不足, 且气温越低、风速越大, 林冠日露水截留量越多, 并指出较小的风速是本地区露水截留量远小于其他世界其他热带森林的主要原因之一^[31~34].

除树冠截留外, 树干截留也是树体截留中不可忽视的组成部分, 但是目前这方面的研究很少. Herwitz^[35] 结合野外实验与实验室方法, 测定澳大利亚热带雨林不同树种单位叶面积和单位树皮体积的最大截留量, 认为拥有较大的木质面积和较小的树冠投影面积的在雨量较大的情况下可以截留更多的降雨, 并认为林冠截留受空气动力学状况的影响, 即在平缓的空气流动状况下, 树干截留占总截留量的 50% 以上, 在湍流空气状况下, 占 80% 以上.

1.1.3 林冠截留能力 相同降雨量下所能达到的最大林冠截留量即通常理解的林冠截留能力^[36], 不同的研究者对林冠截留能力的定义不同^[36~38]. 基于理想环境条件去理解, 林冠截留能力由林地的特性(如树种组成、叶、枝、茎的表面积指数及表面持水能力等)决定^[39], 并且与叶面积指数线性相关^[14]; 基于实际降雨过程去理解, 林冠可到达的最大截留量并非定值, 而是取决于与雨强和雨滴动能相关的雨滴大小^[29]. 估算林冠截留能力常用的 3 种方法为基于野外实测数据的回归法、基于实验室测定的尺度上推法, 以及基于 γ -射线和微波衰减技术的遥感法^[39]. 3 种方法在实际应用中各有特点, 其中回归法受限于测量的方法和数据的选取, 在穿透降雨空间变率较高的热带地区很难应用, 尺度上推法的精确度取决于林地叶(茎、枝)面积指数以及生物量的可靠程度, 而遥感法成本较高, 难以实施.

热带地区气温高, 蒸发量大, 雨季雷暴日明显增多. 由于降雨强度大, 历时短, 又常伴随着大风, 在雨季的大多数降雨过程中几乎不存在可以到达最大截留量的“理想状态”^[30]. 热带森林估算的林冠截留能力在 0.12~1.55 mm 不等(表 3).

1.1.4 林冠截留模型 林冠截留模型是估算和预测林冠截留量的有效工具, 主要包括经验、半理论和理论模型, 三者各有利弊, 但结合理论推导和经验参数的半理论模型更具实用性^[41~46]. 半理论模型中, Calder 的随机模型^[28,29,47]、Rutter 的微气象模型^[38,48,49] 以及 Gash 的解析模型^[37,50] 运用广泛, 热带很多地区都在各种森林类型实验的基础上对这些模型进行了检验, Gash 模型及其改进模型与实际观

表 2 我国各气候带林冠截留状况

Table 2 Various interception loss in China in terms of climatic zone					
气候带	实验地	林 型	截留量 / mm	截留率 / %	文献
温带	凉水	原始红松林	-	27.0	[18]
	黑龙江尚志	硬阔叶林	-	16.1	[18]
	靖远哈思山	灌木林	89.2	23.8	[19]
暖温带	北京东灵山	落叶阔交林	134.9	18.6	[20]
	秦岭火地塘	油松林	190.0	20.0	[21]
	秦岭火地塘	落叶松林	169.9	17.9	[21]
亚热带	福建南平	杉木人工林	213.67	12.40	[22]
	广西里骆	常绿阔叶林	194.2	10.0	[23]
	江西分宜	毛竹人工林	186.7	11.1	[24]
热带	海南尖峰岭	山地雨林	-	36.5	[5]
	西双版纳	季节雨林	660.6	41.43	[6]
	西双版纳	橡胶林	393.5	24.68	[6]

表 3 热带森林林冠截留能力

Table 3 Estimations of canopy capacity of rainfall interception in various tropical forests

地点	林型	截留能力 / mm	方法	文献
印度尼西亚	农作物	0.12, 0.09	尺度上推法	[14]
印度尼西亚	人工林	0.5, 0.6	回归法	[12]
巴西	低地雨林	0.74	回归法	[17]
坦桑尼亚	常绿阔叶林	0.89	回归法	[40]
印度尼西亚	砍伐后雨林	1.00	回归法	[13]
文莱	低地雨林	1.14	回归法	[10]
波多黎各	热带雨林	1.15	回归法	[7]
哥伦比亚	热带雨林	1.16~1.55	回归法	[15]
印度尼西亚	热带雨林	1.30	回归法	[13]

测的结果拟和的较好^[7, 9, 10, 12, 17, 51]，而 Rutter 的

双层随机模型则更能贴切地描述热带天然林小时间尺度的林冠加湿过程^[30]。经验模型虽然有很大的局限性，不能反映截留过程，但它简单明了的表明了林冠截留量与降雨量之间的数量关系。

曾庆波^[5]研究得出尖峰岭热带季雨林 101 次降雨中林冠截留 Y 与降雨量 X 的关系式为

$$Y = 0.9354 + 0.2388X \quad (r = 0.90) \tag{2}$$

Dykes^[10]根据文莱沿海低地雨林 46 场降雨得出截留量 I 与降雨量 P 的回归方程

$$I = 0.13P + 0.93 \quad (R^2 = 49.9\%) \tag{3}$$

Jackson^[40]用线性方程、二次方程和对数方程拟合东非热带森林的各级降雨截留情况，认为对数方程拟合更好

$$I = 0.85 + 0.5419 \ln P \tag{4}$$

式中： I 为截留量， P 为降雨量。由降雨截留过程可知，对未使林冠达到饱和的降雨而言，线性方程拟和较好，其中的参数物理意义也更为明确；对雨量较大的降雨而言，则应尝试用非线性方程拟和，可能结果较好。

1.2 穿透降雨

穿透降雨由两部分组成：一部分是没有接触林冠而直接通过林冠的间隙到达林地表面的降雨，称为自由穿落雨；另一部分是雨滴击打林冠表面溅落的雨滴，以及被叶片和枝条截持后滴落的雨水，称为冠滴水量。和其他地区森林一样，热带森林接收到的降雨中绝大部分以穿透降雨的形式到达林地。各地热带林（天然林、人工阔叶林、农作物）的穿透降雨占大气降水的比率不等，大约为 39~ 90.8%^[5, 8, 9, 12, 14, 15, 17, 51, 52]。

1.2.1 测定方法 穿透降雨的测定工作由集水、测量和记录 3 个部分组成。集水设施一般采用矩形受雨口和矩形、梯形或三角形断面的沟槽式收集器。考虑到热带地区降雨的特点，收集器的容积都比较大，必要的时候可采用分流装置。收集器中的水被导入测量设施或器具中，常用的有倾倒式雨量计、雨量筒、三角堰等。大多数研究都采用自计仪器自动记录，便于长期水文资料的收集，但是仪器的精度容易受到热带高湿环境的影响^[53]，因此有选择的人工观测和记录也是十分必要的。

热带森林尤其是热带雨林林冠盖度、厚度、以及林冠内枝叶密度都具不均匀性，由此带来的重要问题就是穿透降雨的空间分布的不均匀性比较大。消除这种影响的有效方式是增大收集器或收集器组的面积^[54]，但是过大的集水面积要求的集水器数目较大，因此必须寻找适当的仪器和样点布设方式。Loesch-er^[55]运用地学统计的方法检验穿透降雨的空间变率与空间自相关，确定收集器之间的距离应大于 45 m；Lloyd^[52]在亚马逊雨林的研究认为每次降雨后随机布设仪器的优于定点观测，并且仪器在一定的林地纵面迹线上随机重设优于在整个样地上的随机重设。在热带其他地区的雨林进行的研究也大多采用了每次降雨后或每天随机移动穿透雨收集器的方法^[13~ 15, 51]。

1.2.2 影响因子 穿透降雨中，自由穿落雨和冠滴水实际上受到不同的因子影响，即使是同一因子，对两者产生的影响也不尽相同。自由穿落雨由林冠覆盖度决定，即自由穿落雨率（自由穿落雨与总雨量的比率）与林冠覆盖度之和为 1^[37, 47]；但是，实际降雨中风的存在使得雨滴不能垂直降落，使自由穿落雨率变小。在受海洋性气候控制的湿润热带森林中，风是不可忽略的气候因子，如我国的海南岛受台风和海风的共同影响，平均风速为 1.5~ 4.8，30 m·s⁻¹ 以上大大风各月都会出现^[4]。由于冠滴水量和林冠截留作用密不可分，所以影响林冠截留的降雨因子（雨强、雨量、降雨历时及雨型）和林冠因子（主要是叶片质地和形状）都会影响到冠滴水量，风在其中同样是不可忽视的环境因子，由于风或其他干扰（如持续高强度的雨滴击打）对林冠的机械晃动作用，枝叶可能未达到饱和就产生冠滴量。大部分研究认为穿透降雨和林外降雨存在较为密切的关系：Scatena^[8]在热带美洲的研究表明不同流域降雨特征比林相特征对穿透雨的影响更大；Marin^[15]对西亚马逊 4 种不同森林生态系统研究发现穿透降雨量随着雨级的增长而增大；曾庆波^[5]认为降雨强度越大，阴雨持续时间越长，林内相对湿度增大，则穿透雨越大；Sinun^[56]在马来西亚研究表明穿透降雨滞后于降雨的时间是降雨强度的函数。林冠结构对穿透降雨也有一定的影响，在西双版纳干季一些月份出现热带季节雨林内的穿透降雨量大于林冠稀疏的橡胶林的状况，这可能与当地干季沟谷中大量的雾露

水的存在有关^[6].

1.2.3 穿透降雨模型 描述穿透降雨多用基于资料统计的线形回归方程(表 4), 回归系数 b 反映了穿透雨量随降雨量增大而增大的速度; 范世香等^[57] 借用蓄满产流的概念来描述穿透降雨的产生, 提出了尚待完善的机理模型, 但是否适合在热带森林中应用还需要验证.

表 4 不同热带雨林穿透降雨 T 和降雨量 P_C 的回归方程 $T = a + bP_C$ 中回归系数 a 、 b 的取值

Table4 Different values of a and b in the regression equations of interception loss (I) on gross rainfall (P_C) for tropical forests

样地	a	b	备 注	文献	
印尼热带雨林	密闭林冠	1.39	0.83	$r^2= 0.95$	[13]
	不连续林冠	1.77	0.93	$r^2= 0.98$	
	林窗	0.04	1.01	$r^2= 0.99$	
海南岛热带半落叶季雨林	0.722 8	0.813 3	$r= 0.986\ 9, n= 92$	[5]	
马来西亚热带雨林	0.51	0.84	$r^2= 0.97, n= 24$	[56]	
文莱低地雨林	- 0.923	0.861	$n= 46$	[10]	
西亚马逊热带雨林	沉积平原	- 1.02	0.926	$r^2= 0.99, n= 102, 97, 97, 84$	[15]
	高阶地	- 1.02	0.918		
	低阶地	- 1.07	0.906		
	冲积平原	- 1.48	0.887		

1.2.4 穿透降雨的空间分布 热带雨林穿透降雨空间变率研究有很多报道: Sinun^[56] 在马来西亚热带雨林中采用“观测点固定、收集器移动”量测方式, 发现 101 个观测点中 25 个点收集到的穿透雨量比林外降雨多 10%, 22 个观测点收集的水量少于林外降雨的 40%, 林窗下收集到的穿透雨量占当次雨量的 88% ~ 102% 不等; Lloyd^[52] 采用同样的方法在亚马逊雨林中发现 494 个观测点中 29% 的测点记录的穿透降雨大于当时的总雨量. Sinun^[56] 认为林冠密度和树种的差异与穿透降雨的空间分布没有明显的关系, 起主导作用的可能是叶尖滴水, 一些有藤本植物和攀援植物的树也会使其下的收集器收集到更多的穿透降雨, 而 Loescher^[55] 通过地学统计分析认为收集器上方的枝叶与穿透降雨的关系不大, 大的树冠和林窗是热带雨林穿透降雨空间变率大的主要原因.

热带雨林中穿透降雨的空间分布比较复杂, 并不能简单的认为密度较大林冠下的穿透雨量少, 林窗下则比较大. 在雨量不大、不能使林冠饱和的情况下, 高密度的林冠枝叶量较大, 对降雨的截留量大, 穿透降雨就小; 但是在热带湿润地区的大多数降雨中, 雨量足以使林冠达到饱和, 浓密的枝叶形成更多的冠滴量, 从而产生更多的穿透降雨. 林窗中接收到的雨量以自由穿透雨为主, 因此比较接近林外降雨, 但由于收到降雨倾角和林窗边缘枝叶分布的影响, 穿透雨量也会增大或减小. 可以肯定的是, 如果假定林外降雨是均匀的, 那么林冠的存在使得降雨到达林地表面的途径变得复杂和多样, 因而使穿透降雨显示出较大的不均匀性.

1.3 树干径流

树干径流也叫茎流、干流, 在世界不同地区的研究显示树干径流对径流产生、地下水分交换、土壤水分的空间分布、土壤化学, 以及林下植被和附生物分布都有重要的意义^[58, 59], 在树干密度较高的森林生态系统中, 树干径流尤为重要^[60]. 树干径流的产生途径有二: 一是枝叶上拦截的降雨汇集到树干而流下, 二是雨滴直接滴落到树干上, 加湿树干产生树干径流. 树干上的水常以扩散和流动的方式向下运动, 或者只是粘着在树干表面, 有些研究定义其中的一种特定方式为研究对象^[15], 实际中三种方式都是存在的, 以哪一种方式为主可能与降雨特性和树干质地有关, 在具体操作中可以简单地认为在树干上可以收集到的非静止水量就是树干径流.

各种类型的热带林的树干径流占降雨量 0.6% ~ 18% 不等, 其均值远小于温带森林(11.3%)和(半)干旱森林(19%), 在同一生态区内不同森林类型之间树干径流的变率以热带森林为最小; 在热带地区, 天然林的树干径流所占的比例大于人工林, 以热带雨林为最高^[14, 58].

1.3.1 测定方法 惯常的树干径流测定方法是用剖开的聚乙烯塑料管以螺旋形缠绕在树干上(≈ 胸高处), 末端完整的聚乙烯管将收集到的干流水输送到盛水器或雨量计中进行自计或人工记录. 用于收集树干径流

的半剖管(Spiral collars) 需要伸出树干一定的距离, 一般为 2~ 3 cm, 太宽会收集到冠滴量和飘落的雨滴, 太窄收集到的水流则有可能溢出, 也容易被杂物拥堵. 对于茎干较细的农作物如玉米等, van Dijk 等^[14] 采用人工模拟热带地区典型降雨的方法, 将农作物伐下直接插入瓶中来收集, 需要注意的是应根据茎的粗细来选择收集瓶的口径.

针对各种森林类型的特点, 样树的选择必须考虑树种、径级、林木生长状况及其树冠特点等, 在每块样地中随机选择样树^[15] 是比较常用的方法, 也有研究采用在样地内做若干横切面等到相应的样线、在样线上按照径级取样的方法^[13]. 森林水文研究中需要将收集到的树干径流量换算为水深(stemflow depth equivalents), 大多数研究用树冠投影面积进行换算, 因为树冠可以看成是大气降水的收集器, 树干在其中起到了汇集水量的作用, 但也有研究采用了基底面积^[13], 即用每块样地的基底面积分布频率将结果集成到整个样地面积上. 在西双版纳的人工橡胶林群落中, 甚至观察到降雨过程中树干迎风面产生树干径流而背风面依然干燥的情况, 在这种情况下受雨面积则应该是基底面积的一半, 在处理长期的观测数据时往往不可能考虑到树干径流产生的多种情形.

1.3.2 影响因子 树干径流的影响因子可归纳为生态区(气候条件)、气象因子、季节变化、树种差异、林冠结构等几个方面, 且样地差异、附生植物有无、树干质地差异、降雨频率、降雨历时、雨量和雨强是造成同一气候区内树干径流量差异较大的主要原因^[58]. 有研究认为除了大风及雨强较大的天气状况外, 树干径流量随林外雨强的降低而减少; 连续的降雨事件由于使树干优先流的通道超载而使树干径流量减少^[61]. 在马来西亚热带雨林中的研究表明 1.8 mm 的降雨后会产生树干径流^[56], 而海南岛尖峰岭热带半落叶季雨林, 4 mm 以下的大气降雨几乎无树干径流产生^[5]. 在降雨特征一定的情况下, 林冠持水能力是决定干流产生的关键因子, Herwitz^[35] 研究得出不同热带树种树干持水能力在 0.51~ 0.91 mL·cm⁻³ 范围内, 并且发现树皮较薄的树种明显具有比树皮光滑的树种更大的树干持水能力. 对于同一树种的不同个体而言, 林冠结构对树干径流产生的影响较大, 但是不能下结论说具有相似形状的同种林木其树干径流量是定值^[58]. 已有很多研究报告了林冠结构参数如枝条的倾斜角、树的基底面积、树干长度、枝条数目和位置, 以及林窗大小等对林木产生树干径流量的影响^[61, 62]. 西双版纳热带季节雨林中树干径流总量随着树木径级和树冠面积的增大而减小^[6], 而其他研究中则认为树干体积与树干径流的大小之间没有明显的关系^[5, 27].

1.3.3 树干径流的空间分布 在热带雨林中, 树干径流在林木植株个体之间差异很大: 落叶的树和下层林冠的树产生较多的树干径流, 这些树倒掉后水量增加^[13, 56]; Scatena^[8] 在波多黎各的研究表明 1 a 中 50% 的树干径流来自于小于 12% 的树干; Lloyd 等^[52] 在亚马逊雨林中观测的 18 棵样树中 15 棵测得的树干径流量占总量的 14%, 而其他 3 棵树测得的干流量分别占 7%、23%、56%. 与穿透降雨的空间变异相比, 热带雨林内树干径流分布的空间变异似乎很容易理解. 树干径流不同于穿透降雨, 它是借助树干的定点水分输入, 在降雨量一定的情况下, 树干径流的大小取决于其“收集设备”(树冠) 和“导流设备”(树干) 的特征, 而热带雨林中植被物种丰富, 结构复杂, 林木个体显示出较大的不均匀性, 树干径流的分布由此也存在较大的空间变异. 热带树种特有的板根也会影响到干流向林地输入的空间分布. 通过增进树干径流的分异和增加树干径流和凋落物层的接触面积, 板根可以降低树干径流转化为地表漫流的可能性, 因此可以说在大的降雨事件中, 板根的存在限制了热带山地的土壤侵蚀^[63].

1.3.4 树干径流模型 目前预测特定地区林分树干径流量的主要是统计模型. 多数研究认为树干径流量与降雨量直线相关, 而干流率与降雨量则为幂指数或双曲线关系^[43, 44]; 树干径流的机理模型大多数把树干径流的产生过程和林冠截留过程联系起来^[58], 少数研究通过实验室模拟, 考虑降雨强度、降雨历时、叶倾角、叶的形状、枝干夹角、叶面积指数等参数, 把树干径流的产生作为一个独立过程来建立模型^[58, 64].

Marin^[15] 在西亚马逊热带雨林的 4 块样地研究得出的树干径流经验模型为

$$P_s = c(P_C)^d \tag{5}$$

式中: P_s 为树干径流量, P_C 为降雨量, 参数 d 为 1.325~ 1.53, 参数 c 为 0.001 5~ 0.003 1.

曾庆波^[5] 在海南岛尖峰岭半落叶季雨林中得到的干流(Y) 与降水(x) 经验方程为

$$y = 0.2153x + 0.04 \quad (r = 0.9553, n = 74) \tag{6}$$

2 讨论与小结

林冠降水再分配提供另一种审视森林与水关系的角度,它基于植被与水分之间的物理作用而非生理生态所关注的生理过程,既要求更进一步探究小尺度上特定林地某一时段的林冠与大气降水相互作用的机理,也需要在大尺度上了解不同地区以林冠为交换界面的森林生态系统与大气之间水汽交换的不同过程.因此,目前的林冠水文研究已不仅仅是森林水文学的范畴,而更多的是从生态学的视角来观察、解决问题的生态水文学研究内容.

中国的森林林冠对降雨的再分配研究是随着森林生态系统定位研究而全面开展的,总的来说,对热带地区的研究时间相对较短,资料较少.从已发表的研究成果来看,中国现有的研究偏重于以观测数据为基础的讨论,而对实验方法涉及较少;直接得出结论较多,对林冠降雨再分配过程关注较少;得到的经验模型较多,而涉及理论和半理论模型的较少;对降雨再分配各分量间数量关系讨论较多,而结合不同林分结构特征讨论的较少.

从全球来说,热带森林林冠水文研究需要对热带美洲、热带亚洲、热带非洲各种森林类型林冠水文过程和特征的全面认识,尤其是开展了对热带雨林的大量研究后,应同时对热带稀树草原、常绿阔叶林以及人工林和农作物系统予以关注.热带森林林冠水文研究有其自身的特点,以全球的视角审视热带地区林冠对大气降水的再分配模式,采用更加先进的技术手段探究林冠降水再分配过程和林冠、水分的相互作用机制,以及与地球化学循环相关的林冠对降水化学元素的分配应该成为今后研究的趋势和重点,同时还应基于降水再分配过程及其相关影响因子更加深入的理解,加强对林冠截留机理模型的研究.

从以上分析总结,认为在热带湿润地区值得关注的问题有以下几个方面:

热带雨林的多层非均质林冠其蓄水的垂直分异性、以及对降雨进行截留能力的水平分异性如何?采取怎样的研究方法来反映这种空间变异性?

热带雨林表土贫瘠,它对大气降水养分输入的依赖程度如何?树冠、附生植物、树干对大气降水养分输入有何种程度的影响?

与热带雨林内特有现象相关的林冠降水再分配过程有何特殊之处?如热带雨林树种利于排水的特性(如滴水叶尖和光滑的树干)与林内使截留能力增加的大量附生植物同时存在,如何评价它们对降雨再分配过程的影响?大型板根的存在形成养分和水分的定向定点输入对林下植物的生长的分布有多大程度的影响?有板根的树干怎样进行树干径流的量测?如何评价藤本植物和大量不定根在林冠降水再分配中的作用,如何进行量化研究?

面对热带雨林的大面积退化消失和人工林的大面积种植的状况,怎样看待由此引起的水循环过程和水量分配格局的变化?同时,中国热带地区降水时空分布不均,下垫面性质也在经历着前所未有的强烈变化,这就使自然生态系统本来固定的水资源利用模式变得复杂,如何从森林水文生态效应的角度,把同一气候区内对热带雨林、热带次生林、人工林以及农作物系统的研究成果统一起来客观地评价这种土地覆盖的变化?

参 考 文 献:

- [1] 中野秀章著,李云森译.森林水文学[M].北京:中国林业出版社,1983.
- [2] 曾庆波,李意德,陈步峰,等.热带森林生态系统研究与管理[M].北京:中国林业出版社,1997.
- [3] 穆宏强,夏 军.复合生态系统的降雨截留过程模拟[J].人民长江,2002,33(7):25-26,35.
- [4] 蒋有绪,卢俊培.中国海南岛尖峰岭热带林生态系统[M].北京:科学出版社,1991.
- [5] 曾庆波.海南岛尖峰岭热带林生态系统的水分循环研究[A].周晓峰.中国森林生态系统定位研究[C].哈尔滨:东北林业大学出版社,1994.413-429.
- [6] 张一平,王 馨,王玉杰,等.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[J].生态学报,2003,23(12):2653-2665.
- [7] Schellekens J., F. N. Scatena, L. A. Bruijnzeel, et al. Modelling rainfall interception by a low land tropical rain forest in north-eastern Puerto Rico [J]. Journal of Hydrology, 1999, 225: 168-184.
- [8] Scatena F. N. Watershed scale rainfall interception on two forested watersheds in the Luquillo Mountains of Puerto Rico [J].

Journal of Hydrology, 1990, 113: 89-102

- [9] Rao A. S. Interception losses of rainfall from Cashew trees [J]. Journal of Hydrology, 1987, 90: 293-301.
- [10] Dykes A. P. Rainfall interception from a low land tropical rainforest in Brunei [J]. Journal of Hydrology, 1997, 200: 260-279.
- [11] Hall R. L. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modelling for tropical canopies revisited [J]. Journal of Hydrology, 2003, 280: 1-12.
- [12] Bruijnzeel L. A., K. F. Wiersum. Rainfall interception by a young *Acacia Auriculiformis* (A. Cunn) plantation forest in west Java, Indonesia: Application of Gash's analytical model [J]. Hydrogeology Processes, 1987, 1: 309-319.
- [13] Asdak. C., P. G. Jarvis, P. van Gardingen, et al. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan Indonesia [J]. Journal of Hydrology, 1998, 206: 237-244.
- [14] van Dijk A. I. J. M., L. A. Bruijnzeel. Modeling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system [J]. Journal of Hydrology, 2001, 247: 239-262.
- [15] Marin C. T., W. Bouten, J. Sevink. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia [J]. Journal of Hydrology, 2000, 237: 40-57.
- [16] Jackson, N. A. Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100: 323-336.
- [17] Lloyd C. R., J. H. C. Gash, W. J. Shuttleworth. The measurement and modeling of rainfall interception by Amazonian rain forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1988, 43: 277-294.
- [18] 刘世荣, 温远光, 王 兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [19] 杨万军. 靖远哈思山森林植被水文效应调查与分析 [J]. 甘肃林业科技, 2000, 25 (2): 23-26, 44.
- [20] 万师强, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林冠层对降水的分配作用 [J]. 植物生态学报, 1999, 23 (6): 557-561.
- [21] 雷瑞德. 秦岭火地塘林区华山松林水源涵养功能研究 [J]. 西北林学院学报, 1984 (1): 19-33.
- [22] 樊后保. 杉木人工林对降水的截留作用 [J]. 福建林学院学报, 1998, 18 (1), 92-95.
- [23] 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 [J]. 生态学杂志, 1993, 12 (3): 1-7.
- [24] 王彦辉, 刘永敏. 毛竹人工林水文作用的研究 [A]. 周晓峰. 中国森林生态系统定位研究 [C]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 354-363.
- [25] Jackson I. J.. Problems of throughfall and interception assessment under tropical forest [J]. Journal of Hydrology, 1971, 12: 234-254.
- [26] 马雪华, 杨茂瑞, 王建军, 等. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究 [A]. 周晓峰. 中国森林生态系统定位研究 [C]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 346-353.
- [27] 周光益. 中国热带水文生态功能 [J]. 生态学杂志, 1997, 16 (5): 47-50.
- [28] Calder I. R. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model [J]. Journal of Hydrology, 1996, 185: 363-378.
- [29] Calder I. R., R. L. Hall, P. T. W. Rosier, et al. Dependence of rainfall interception on drop size: 2. Experimental determination of the wetting functions and two-layer stochastic model parameters for five tropical tree species [J]. Journal of Hydrology, 1996, 185: 379-388.
- [30] Hall R. L., I. R. Calder, E. R. N. Gunawardena, et al. Dependence of rainfall interception on drop size: 3. Implementation and comparative performance of the stochastic model using data from a tropical site in Sri Lanka [J]. Journal of Hydrology, 1996, 185: 389-407.
- [31] 刘文杰, 李红梅. 西双版纳雾资源及其评价 [J]. 自然资源学报, 1996, 11: 263-267.
- [32] 刘文杰, 张克映, 张光明, 等. 西双版纳热带雨林干季林冠雾露水资源效应研究 [J]. 资源科学, 2001, 23 (2): 75-80.
- [33] 刘文杰, 张克映, 王昌命, 等. 西双版纳热带雨林干季林冠层雾露形成的小气候特征研究 [J]. 生态学报, 2001, 21 (1): 165-170.
- [34] 刘文杰, 张一平, 刘玉洪, 等. 热带季节雨林和橡胶人工林林冠雾水的比较研究 [J]. 生态学报, 2003, 23 (11): 2379-2386.
- [35] Herwitz S. R. Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees [J]. Journal of Hydrology, 1985, 77: 237-

- [36] 范世香, 裴铁, 蒋德明, 等. 两种不同林分截留能力的比较研究 [J]. 应用生态学报, 2000, 11 (5): 671-674.
- [37] Gash J. H. C.. An analytical model of rainfall interception by forests [J]. Quart. J. R. Met. Soc., 1979, 105: 43-55.
- [38] Rutter A. J., K. A. Kershaw, P. C. Robins, et al. A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine [J]. Agricultural Meteorology, 1971, 9: 367-384.
- [39] Liu S. Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida [J]. Journal of Hydrology, 1998, 207: 32-41.
- [40] Jackson I. J. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest [J]. Journal of Hydrology, 1975, 24: 215-238.
- [41] Liu J. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy [J]. Ecological Modeling, 1988, 42: 111-123.
- [42] 刘家冈, 万国良, 张学培, 等. 林冠对降雨截留的半理论模型 [J]. 林业科学, 2000, 36 (2): 2-5.
- [43] 王佑民. 中国林冠降水再分配研究综述(I) [J]. 西北林学院学报, 2000, 15 (3), 1-7.
- [44] 王佑民. 中国林冠降水再分配研究综述(II) [J]. 西北林学院学报, 2000, 15 (4): 1-5.
- [45] 殷有, 周永斌, 崔建国, 等. 林冠截留模型 [J]. 辽宁林业科技, 2001 (2): 10-12.
- [46] 张光灿, 刘霞, 赵玫. 树冠截流降雨模型研究进展及其评述 [J]. 南京林业大学学报, 2000, 24 (1): 64-68.
- [47] Calder I. R. A stochastic model of rainfall interception [J]. Journal of Hydrology, 1986, 89: 65-71.
- [48] Rutter A. J., A. J. Morton, P. C. Robins. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands [J]. J. appl. Ecol., 1975, 12: 367-380.
- [49] Rutter A. J., A. J. Morton. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables [J]. J. appl. Ecol., 1977, 14: 567-588.
- [50] Gash J. H. C., C. R. Lloyd, G. Lachaud. Estimation sparse forest rainfall interception with an analytical model [J]. Journal of Hydrology, 1995, 170, 79-86.
- [51] Hutjes R. W. A., A. Wierda, A. W. L. Veen. Rainfall interception in the Tai Forest, Ivory Coast: Application of two simulation models to a humid tropical system [J]. Journal of Hydrology, 1990, 114: 259-275.
- [52] Lloyd C. R., A. D. O. Marques. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1988, 42: 63-73.
- [53] 陈步峰, 王新文, 曾庆波, 等. 热带森林水文研究中数据收集技术的探讨 [J]. 生态科学, 1998, 17 (1): 15-18.
- [54] 刘玉洪, 张克映, 马友鑫, 等. 西双版纳热带雨林水文观测系统的设计 [J]. 福建林业科技, 2001, 28 (2): 14-16.
- [55] Loescher H. W., J. S. Powers, S. F. Oberbauer. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica [J]. Journal of Tropical Ecology, 2002, 18: 397-407.
- [56] Sinun W., W. W. Meng, I. Douglas, et al. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Saban, Malaysia [J]. Philosophical Transactions: Biological Sciences, 1992, 335: 389-395.
- [57] 范世香, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 林内穿透雨量模型研究 [J]. 生态学报, 2003, 23 (7): 1403-1407.
- [58] Levia Jr. D. F., E. E. Frost. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems [J]. Journal of Hydrology, 2003, 274: 1-29.
- [59] 刘琼. 水化学在森林集水区养分循环的角色 [J]. 林业研究专讯, 2001, 8 (4): 9-12.
- [60] Schroth G., M. E. A. Elias, K. Uguen, et al. Nutrient fluxes in rainfall, throughfall and stemflow in tree-based land use systems and spontaneous tree vegetation of central Amazonia [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 87: 37-49.
- [61] Crockford R. F., D. P. Richardson. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate [J]. Hydrogeology Processes, 2000, 14: 2903-2920.
- [62] Kellman M., N. Roulet. Stemflow and throughfall in a tropical dry forest [J]. Earth Surf. Process. Landf., 1990, 15: 55-61.
- [63] Herwitz S. R. Buttresses of tropical rainforest trees influences hillslope processes [J]. Earth Surf. Process. Landf., 1988, 13: 563-567.
- [64] 裴铁, 刘家冈, 韩绍文, 等. 树干径流模型 [J]. 应用生态学报, 1990, 1 (4): 294-300.

(责任编辑: 卢凤美)