

哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征

巩合德^{1,2,3}, 张一平^{1,2}, 刘玉洪^{1,2}, 杨国平^{1,2}, 鲁志云^{1,2}, 卢华正^{1,3}

(1. 中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南 景东 676209; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了评估亚热带常绿阔叶林的水源涵养服务功能, 选择哀牢山典型的原始常绿阔叶林, 定位监测了林冠层对1 a中共144次降雨的截留分配效应。观测期间降水总量为1 707.8 mm, 穿透雨量、茎流量和林冠截留量分别是1 421.8, 15.4和270.6 mm, 穿透雨率、茎流率和截留率分别为83.3%, 0.9%和15.8%。总降雨量大于3.7 mm时才观测到林内穿透雨和树干茎流, “漏斗”状的林冠结构和持续的降雨, 均可造成穿透雨量大于林外大气总降水量, 而树木较大分枝角度和较多附生物, 可能使有些胸径和冠幅较大树木的树干茎流量反而更小; 穿透雨量和茎流量、林冠截留量与降水量均呈显著的线性正相关($P < 0.01$), 而林冠截留率随降水量增大而减少; 降雨特征和林分特征是影响林冠截留的主要因素。图3表3参20

关键词: 森林生态学; 常绿阔叶林; 穿透雨; 树干茎流; 林冠截留

中图分类号: S715.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2008)04-0469-06

Interception capability in an evergreen broad-leaved forest of Ailaoshan, Yunnan Province

GONG He-de^{1,2,3}, ZHANG Yi-ping^{1,2}, LIU Yu-hong^{1,2}, YANG Guo-ping^{1,2}, LU Zhi-yun^{1,2}, LU Hua-zheng^{1,3}

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, Yunnan, China; 2. Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Jingdong 676209, Yunnan, China; 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: An experiment was conducted in the evergreen broad-leaved forest (the primitive tree species were *Castanopsis wattii* and *Lithocarpus xylocarpus*) of Ailaoshan, Yunnan Province to evaluate its water interception capability and accumulate basic data for forest hydrology. A total of 144 precipitation events from May 2005 to May 2006 were monitored, and a correlation analysis was used to determine the redistribution and interception effects of the tree canopy on precipitation. The total of 1 707.8 mm of precipitation, consisted of throughfall, 1 421.8 mm (83.3%); stemflow, 15.4 mm (0.9%); and canopy interception, 270.6 mm (15.8%). However, throughfall and stemflow could only be recorded when precipitation was over 3.7 mm. A “funnel” shaped canopy structure and duration of rainfall sometimes caused recorded rainfall to be greater than real precipitation; meanwhile a low stemflow of tree with greater diameter at breast height and crowns sometimes resulted from large branch angles and lots of epigrowth. Total throughfall, stemflow, and canopy interception were positively correlated ($P < 0.01$) with precipitation, whereas the canopy interception rate was negatively correlated ($P < 0.01$) with precipitation. Thus, precipitation and forest structure mainly determined interception capability. [Ch, 3 fig. 3 tab. 20 ref.]

Key words: forest ecology; evergreen broad-leaved forest; throughfall; stemflow; canopy interception

森林对降雨产生影响的第1个作用层为林冠。大气降水经过林冠后, 林冠对它们进行了第1次分

收稿日期: 2007-07-18; 修回日期: 2007-11-25

基金项目: 中国科学院研究基金资助项目(118502JX14)

作者简介: 巩合德, 研究实习员, 硕士, 从事森林生态学研究。E-mail: gonghede3@163.com

配，分为树干茎流、穿透雨及树冠截留。这一过程中，林冠不仅削减了降雨的动能，截留了部分降雨，同时还改变了降雨的空间分布格局，而降雨空间分布格局的变化不仅对林下土壤的水分分配有影响，而且对与降雨相关的营养物质的循环和分配有重要影响^[1]。研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分养分平衡、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也有着极其重要的意义^[2,3]。常绿阔叶林主要分布在亚热带地区的大陆东岸，以我国分布的面积最大^[4]。哀牢山自然保护区有原始常绿阔叶林 504 km²，是中国原始常绿阔叶林分布面积最广大的地区之一^[5]。哀牢山的常绿阔叶林主要分布在海拔 2 200 ~ 2 600 m，以腾冲栲 *Castanopsis wattii* 和木果柯 *Lithocarpus xylocarpus* 为优势种，占该区森林总面积的 77.94%^[6]。关于林冠截留方面的研究在热带雨林^[2,7-10]开展的较多，并且取得了一些有意义的研究结果，但是关于常绿阔叶林林冠截留^[11-13]的报道较少。虽然甘建民等^[13]1999 年对该林生态系统进行了初步的研究，但他的研究采用了较少的雨量器，而且面积远小于本研究中采用的集水槽，而这些可以造成研究较大的误差；另外，由于该区域森林生态系统中附生物茂密，对树干茎流产生较大影响。笔者的研究还采用了去除树干附生物的方法观测它们对树干茎流的影响，以期了解该区域常绿阔叶林林冠截留特征，为森林水文效应积累基本资料。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于哀牢山国家级自然保护区核心区的徐家坝地区，地理位置为 24°32' N, 102°01' E，海拔 2 400 ~ 2 600 m。根据哀牢山森林生态系统研究站的资料，研究区域平均年降水量为 1 931 mm，干、雨季分明，雨季（5 - 10 月）降水量占年降水量的 85%，年平均蒸发量 1 485 mm。年平均温度为 11.3 ℃，最热月（7 月）气温为 16.4 ℃，最冷月（1 月）气温为 5.4 ℃，无霜期 200 d。成土母质由片岩、片麻岩和闪长岩组成，多发育为典型的黄棕壤，土壤肥沃，偏酸性（pH 4.4 ~ 4.9），土壤表面由枯落物层（厚度 3 ~ 7 cm）覆盖，土壤有机碳、全氮和全磷质量分数分别为 129.1, 5.2 和 0.6 g·kg⁻¹，土壤表面的碳氮比为 14.4, 30 ~ 50 cm 深度碳氮比为 15.3^[5]。

1.2 群落调查

哀牢山亚热带常绿阔叶林林冠非常郁闭，叶面排列非常复杂，可明显分为乔木层、灌木层和草本层。研究样地为 50 m × 50 m 的正方形，共有乔木 291 株，平均胸径 68.0 cm，乔木层优势种为腾冲栲和木果柯，树高多在 25.0 m 以上，最高可达 32.0 m，盖度在 85% 以上。灌木层较丰富，以箭竹 *Sinarundinaria nitida* 为主，盖度在 35% 左右。草本植物以滇西瘤足蕨 *Plagiogyria communis* 和细梗薹草 *Carex teinogyna* 等为主。附生植物相当丰富，以黄杨叶芒毛苣苔 *Aeschynanthus buxifolius* 和鳞轴小膜盖蕨 *Araiostegia perdurans* 等为主。藤本植物常见，主要有冷饭团 *Kadsura coccinea* 和匍匐酸藤子 *Embelia procumbens* 等。由于该森林生态系统属于常绿阔叶林，其叶面积指数基本保持不变，群落叶面积指数为 5.60^[14]。

1.3 研究方法

根据水量平衡法，在林冠层次内，存在如下水量平衡： $P_w = T + S + I$ 。其中： P_w 为总降水量（mm）， T 为穿透雨量（mm）， S 为树干径流量（mm）， I 为林冠截留量（mm）。

1.3.1 总降水量的测定 林外总降水量资料来源于中国科学院西双版纳植物园哀牢山亚热带森林生态系统定位研究站气象观测站。

1.3.2 穿透雨的测定 在样地内随机安装 10 个 PVC 材料制作的集水槽（1.0 m × 0.2 m）和 5 个直径为 20 cm 的雨量器收集林内穿透雨。为了减少灌木及草本植物对穿透雨的影响，使集水槽距和雨量器离地面的高度不低于 50 cm，并与地面保持约 0.5 的倾角，集水槽较低的一端底部开口，连接 1 个体积为 25 L 聚乙烯塑料桶。为了避免枯枝落叶等对测量结果的影响，降雨前把集水槽内的枯落物等物质清理干净。降雨后及时测定塑料桶内的水量，并转化为水深（mm），用直径 20 cm 雨量器专用量杯直接测定雨量器内的水量。

1.3.3 树干茎流的测定 根据径级分布, 选择 16 株树木作为标准木观测树干茎流。将直径为 1.5 cm 大小的聚乙烯塑料管沿中缝剪开一段(剪开的长度取决于树干的大小), 然后用大头针将塑料管开口处固定在树干上, 再将剪开的塑料管从两边螺旋上升缠绕于树干 1 圈。用大头针固定后, 用玻璃胶将接缝处封严, 在塑料管的下端接 1 个 25 L 聚乙烯塑料桶, 用于收集树干茎流, 其中 9 ~ 16 号样树树干去除附生物, 以和 1 ~ 8 号样树做对比。

每次降雨后次日 8:00 测量塑料桶内雨水的量, 并根据集水槽承雨面积换算为 mm 单位, 其中样地内得到的值的平均值作为穿透雨量。根据每次测定的茎流量和胸径的回归方程估算样地内其他树木的茎流量, 它们的总和作为林分内的总茎流^[15], 并转化为茎流水深(mm)。

利用公式: $I(\text{mm}) = P - T - S$ 计算林冠截留量。观测时间为 2005 年 5 月 1 日至 2006 年 5 月 1 日。

2 结果

2.1 大气降雨特征

研究时间内共观测到 144 次降雨, 降雨总量 1 707.8 mm。最高降雨频率的等级是 0 ~ 5 mm, 达 64 次, 暴雨事件最少, 为 3 次(图 1), 30 ~ 40 mm 降雨事件降雨量最多, 为 298.0 mm。

大气降雨具有明显的干季和雨季变化(图 2)。降水量明显集中在 6~10 月, 占年总降水量的 87.3%, 期间 2006 年 1 月出现明显干旱, 没有降雨。

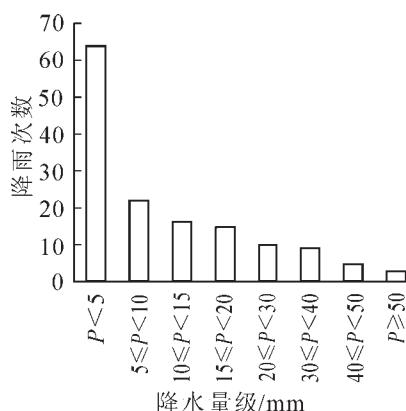


图 1 总降水量级分布

Figure 1 Distribution of precipitation in rainfall class

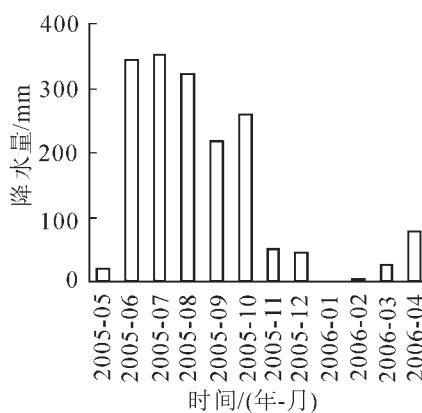


图 2 哀牢山常绿阔叶林总降水量月分配格局

Figure 2 The characteristics of monthly rainfall on Ailaoshan

2.2 穿透雨特征

穿透雨槽测定的穿透雨量为 1 421.8 mm, 占总降水量的 83.3%(表 1), 穿透雨槽测定的穿透雨率结果(83.3%)和雨量器测定结果(96.7%)有较大差异, 方差分析结果表明两者差异显著($P < 0.05$)。拟合 2 种测定方法测定的穿透雨量和大气降水量的相关性, 线性函数最佳(图 3)。利用 95% 可信度水平上的标准值 2.0、变异系数及观测穿透雨的容器个数计算穿透雨测定的误差^[16]。表 1 可知, 在 95% 可信度上, 穿透雨槽和雨量器测定的结果误差均小于 10%, 所以可以反映研究区域森林群落的穿透雨特征, 但是由于雨量器较小的面积和较少的数量, 它的测定结果不如穿透雨槽测定的结果精确, 因此, 采用穿透雨槽的测定结果。总降水量和穿透雨量的线性回归方程式为: $T = 0.87P_w - 0.47$, $R^2 = 0.95$ ($P < 0.01$), $n = 71$ 。

表 1 2 种穿透雨测定方法结果比较

Table 1 The compare of two methods about throughfall measure

观测方法	观测次数	穿透雨量/mm	穿透雨率/%	变动系数	标准误差/mm	95%可信度穿透雨范围/mm	误差/%
穿透雨槽	71	1 421.8 ± 84.4	83.3	5.9	26.7	1 368.4 ~ 1 475.2	3.8
雨量器	78	1 651.0 ± 200.1	96.7	12.1	81.7	1 487.6 ~ 1 814.4	9.9

当大气降水量小于3.7 mm时,林冠截留了几乎全部降雨,不产生穿透雨(表2);在降水量为3.7~10.0 mm时,有4次测定的穿透雨量均明显高于总降水量,导致较高的穿透雨率;而在降水量>10 mm时,穿透雨率一般随着降水量的增大而增大。但是6号穿透雨槽有49次降雨事件测定的穿透雨量大于总降水量(占测定的穿透雨次数的63.4%)。

2.3 树干茎流特征

哀牢山常绿阔叶林生态系统树干茎流量非常小(表2),约占总降水量0~1.4%。观

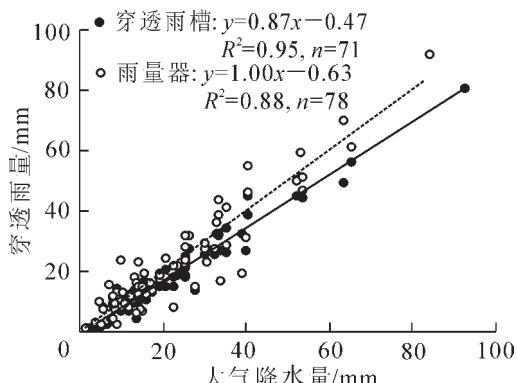


图3 穿透雨量和总降水量的关系

Figure 3 Relationship between throughfall and gross rainfall in the plot

表2 各级降雨分配

Table 2 Partition of gross rainfall for different rainfall events

雨量级/mm	测定次数	频度/%	平均降水量/mm	穿透雨量		茎流量		林冠截留量	
				雨量/mm	百分比/%	茎流量/mm	百分比/%	截留量/mm	百分比/%
P < 3.7	53	36.8	2.6	0	0	0	0	2.6	100
3.7~P < 10.0	33	22.9	7.2	6.4	88.9	0.1	1.4	0.7	9.7
10.0~P < 20.0	32	22.2	14.7	11.9	81.0	0.1	0.7	2.7	18.3
20.0~P < 30.0	10	6.9	24.2	20.0	82.6	0.2	0.8	4.0	16.6
30.0~P < 40.0	9	6.3	34.2	29.3	85.7	0.3	1.0	4.6	13.3
P > 40.0	7	4.9	57.2	51.8	90.6	0.6	1.0	4.8	8.4

测期间树干茎流量为15.4 mm,仅占大气降水量的0.9%。树干茎流量和降水量之间的关系也以线性函数拟合最佳,方程式为: $S=0.01P_w+0.01$, $R^2=0.70(P<0.01)$, $n=62$ 。

表3为各树干茎流样树特征,其中未去除树干附生物的1~8号样树数据以指数函数最能反映树干茎流量和胸径之间的关系,其方程式为: $S=43.50e^{0.06D}$, $R^2=0.73(P<0.01)$, $n=16$ 。其中:D为树木胸径。而树干茎流量和树冠面积之间的关系以线性函数拟合最佳,其方程式为: $S=9.51A-40.96$, $R^2=0.75(P<0.01)$, $n=16$ 。其中:A为树冠面积。

2.4 林冠截留特征

观测期间,林冠总截留量和总截留率分别为270.6 mm和15.8%。从降雨事件与截留量的关系来看,当总降水量小于3.7 mm时,林冠几乎将降水全部截留,截留率达100%,在降水量大于10 mm时,林冠截留率随降水量增大而降低,因此在整个降水量级中,林冠截留率有下降趋势,充分反映了林冠截留降水能力的有限性。拟合林冠截留量和大气降水量之间的关系,也是线性函

表3 各树干茎流样树特征

Table 3 The characteristics of the trees for stemflow

树号	树种	胸径/cm	树冠面积/m ²	树干茎流量/mm
1	南洋木荷	48.7	59.2	394.2
2	红花木莲	40.1	53.1	246.6
3	滇润楠	40.4	42.4	427.9
4	景东冬青	17.2	28.8	90.8
5	红花木莲	22.6	32.0	86.9
6	硬斗柯	25.5	26.5	305.3
7	木果柯	49.7	131.5	773.1
8	腾冲栲	41.1	59.2	926.7
9	南洋木荷	66.2	123.8	1 215.7
10	红花木莲	37.6	29.7	148.5
11	滇润楠	41.4	46.0	447.9
12	景东冬青	10.5	10.9	94.7
13	红花木莲	20.7	21.6	85.8
14	硬斗柯	29.9	30.2	396.6
15	木果柯	56.1	117.1	1 423.8
16	腾冲栲	37.6	75.9	721.7

说明: 南洋木荷 *Schima noronhae*, 红花木莲 *Manglietia insignis*, 滇润楠 *Machilus yunnanensis*, 景东冬青 *Ilex gintungensis*, 硬斗柯 *Lithocarpus hancei*, 木果柯 *Lithocarpus xylocarpus*, 腾冲栲 *Castanopsis wattii*。

数相关性最显著, 方程式为: $I = 0.12P_w + 0.49$, $R^2 = 0.24$ ($P < 0.01$), $n = 71$ 。

3 讨论

3.1 穿透雨变化特征

穿透雨和降水的关系密切, 降水量和降雨强度越大, 穿透雨量越大, 但森林郁闭度越大, 穿透雨量越小。8号穿透雨槽有24次降雨测定的穿透雨量甚至大于总降水量, 可能是由于特殊的林冠结构形成类似于“漏斗”的构造造成的, 而测定的穿透雨事件中, 有4次是发生在连续大强度的降雨之后, 所以测定的穿透雨量均明显高于总降水量, 但总的来说穿透雨的平均值都比总降水量少。

与该区域以前的研究相比, 本研究所测定的年穿透雨量(1 421.8 mm)明显小于甘建民等^[13]以前的研究结果(1 637.1 mm), 穿透雨率(83.3%)与甘建民等^[13]的结果(86.9%)相比也稍小。这可能主要是由于2006年春季本区域遭遇干旱, 造成年降水量偏少造成的。另外, 研究方法(甘建民等采用了面积较小和数量较少的雨量器)及测量结果误差可能也是其中的原因。

3.2 树干茎流变化特征

茎流量主要取决于植被的结构特征和降水特征, 一些气候因素也有影响^[17]。茎流产生的过程是:树叶表面对降水的截获汇入枝条, 再汇入主干, 然后进入林地, 因此, 树叶的形状、叶柄的粗细、枝条与树干的夹角、树皮的特点都可能影响茎流量^[18]。树干茎流量一般随胸径和冠幅的增大而增大, 但由于树冠结构的不同, 有些胸径和冠幅较大的树木, 其树干茎流量反而较小, 如2号样树和5号样树, 与万师强等^[19]的研究结果一致。可能是由于树木分枝角度增大, 导致树干茎流量减小。另外, 树木胸径越大, 表面附生物越多, 也可能是树干茎流减少的一个原因。由于1~8号样树未去除树干附生物, 树干茎流量相对较少。因此哀牢山常绿阔叶林生态系统树干茎流量非常小, 只占大气降水量的0.9%, 可以忽略不计, 可能主要是由于哀牢山常绿阔叶林生态系统繁茂的附生植物造成的。

3.3 林冠截留变化特征

降雨持续时间长、降水量大是该研究区域的显著特征, 因此, 导致有4次林冠截留计算结果为负值。另外, 本研究林冠截留率稍微低于李昌华等^[12]对江西九连山常绿阔叶林的研究, 因此, 影响林冠截留分配效应的因素很多, 但主要是降雨特征(包括总降水量、降水过程以及降水形态等)与林分状况(包括林分郁闭度、冠幅、林木密度和胸径大小等)^[20]。降水过程中的蒸发一般不大, 本研究也未对此进行测定, 因此, 可能导致林冠截留量测定结果偏大。

4 主要结论

在1年的观测期, 共有144次降水事件, 降水总量为1 707.8 mm, 穿透雨量、茎流量和林冠截留量分别是1 421.8, 15.4和270.6 mm, 穿透雨率、茎流率和截留率分别为83.3%, 0.9%和15.8%。

一般在总降水量大于3.7 mm时, 才能观测到穿透雨和树干茎流。“漏斗”状的林冠结构和持续的降雨, 均可造成穿透雨量大于总降水量, 而树木较大分枝角度和较多附生物, 可能是有些胸径和冠幅较大的树木, 树干茎流量反而更小。

研究区域常绿阔叶林的穿透雨量和茎流量、林冠截留量与降水量均呈显著的线性正相关, 而林冠截留量与降水量呈显著的线性负相关。降雨特征和林分特征是影响林冠截留的主要因素。

致谢: 哀牢山亚热带森林生态研究站提供了基本的研究条件和经费支持, 景东自然保护局给予了大量的帮助, 杞金华和罗鑫参与了大部分野外工作, 李达文、杨文争和罗成昌等同志参加了野外调查工作。另外, 还得到李新德、周玲和鲁开菊的大力帮助。在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 李振新, 郑华, 欧阳志云, 等. 岷江冷杉林下穿透雨空间分布特征[J]. 生态学报, 2004, 24 (5): 1 015 - 1 021.
- [2] 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[J]. 福建林学院学报, 2004, 24 (3): 274 - 282.

- [3] 李正才, 傅懋毅, 谢锦忠, 等. 沐川县退耕还林生态恢复地碳截留效应的研究[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21 (4): 382 - 387.
- [4] 娄安如. 植物与环境[M] 周云龙. 植物生物学. 北京: 高等教育出版社, 2004: 503 - 504.
- [5] LIU W Y, JOHN E D F, XU Z F. Biomass and nutrient accumulation in montane evergreen broad-leaved forest (*Lithocarpus xylocarpus* type) in Ailao Mountains, SW China[J]. For Ecol Manage, 2002, 158: 223 - 235.
- [6] 邱学忠. 自然地理环境条件[M] 邱学忠. 哀牢山森林生态系统研究. 昆明: 云南科技出版社, 1997: 7 - 11.
- [7] SCHELLEKENS J, BRUIJNZEEL L A, SCATENA F N, et al. Evaporation from a tropical rain forest, Luquillo Experimental Forest, eastern Puerto Rico[J]. Water Resour Res, 2000, 36: 2 183 - 2 196.
- [8] MARIN C T, BOUTEN W, SEVINK J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia[J]. J Hydrol, 2000, 237: 40 - 57.
- [9] 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): 2 653 - 2 665.
- [10] 王馨, 张一平, 刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26 (3): 722 - 729.
- [11] MASUKATA H, ANDO M, OGAWA H. Throughfall, stemflow and interception of rainwater in an evergreen broadleaved forest[J]. Ecol Res, 1990, 5: 303 - 316.
- [12] 李昌华, 铃木雅一, 刘曙光, 等. 江西九连山区常绿阔叶林林冠截留量的估算[J]. 自然资源学报, 1997, 12 (3): 233 - 242.
- [13] 甘健民, 赵恒康, 薛敬意. 云南哀牢山常绿阔叶林林冠对降雨的再分配[J]. 林业科技, 1999, 24 (4): 16 - 18.
- [14] 巩合德, 杨国平, 张一平, 等. 哀牢山3种森林群落叶面积指数比较研究[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35 (3): 34 - 36.
- [15] HANCHI A, RAPP M. Stemflow determination in forest Stands[J]. For Ecol Manage, 1997, 97: 231 - 235.
- [16] HOLWERDA F, SCATENA F N, BRUIJNZEEL L A. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: A comparison of sampling strategies[J]. J Hydrol, 2006, 327: 592 - 602.
- [17] ABOAL JR, MORALES D, HERNÁDEZ M, et al. The measurement and modeling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands[J]. J Hydrol, 1999, 221: 161 - 175.
- [18] 魏晓华, 周晓峰. 3种阔叶次生林的茎流研究[J]. 生态学报, 1989, 9 (4): 325 - 329.
- [19] 万师强, 陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流[J]. 生态学报, 2000, 20 (1): 61 - 67.
- [20] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 等. 岷江上游油松人工林对降水的截留分配效应[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26 (5): 10 - 16.