

鼎湖山针阔叶混交林生态系统水文效应研究

尹光彩^{1,2} 周国逸^{1*} 刘景时¹ 张德强¹ 王旭¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广东广州 510650; 2. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广东广州 510090)

摘要: 对鼎湖山针阔叶混交林水文效应的研究表明 2002 年 8 月-2003 年 7 月, 大气总降水量为 1 690 mm, 林内净降水量为 1 212.7 mm, 占总降水量的 72%, 其中穿透雨量和茎流量分别为 1 125.3 和 87.4 mm, 占总降水量的 66.6% 和 5.2%。林冠截留量为 477.3 mm, 截留率 28.2%。地表径流量 62.1 mm, 占总降水量的 3.7%。在一定的降水量范围内, 林冠对降水的截留量随着降水量的增加而增加, 不同的雨量级, 林冠截留量变化的趋势曲线不同, 且一次截留降水量饱和值约为 25 mm; 穿透雨量、茎流量均随着林外大气降水量的增加呈线性增加; 当日大气降水量在 0-30 mm 时, 地表径流量很小, 且呈线性递增; 当日大气降水量 >30 mm 时, 地表径流量随降水量增加以对数递增。与马尾松纯林和季风常绿阔叶林相比, 针阔叶混交林在减少地表径流和保持水土等方面具有更好的水文生态效应。

关键词: 水文效应; 针阔叶混交林; 鼎湖山

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2004)03-0195-07

Hydrological Effects of Coniferous and Broadleaved Mixed Forest Ecosystem in Dinghushan

YIN Guang-cai^{1,2} ZHOU Guo-yi^{1*} LIU Jing-shi¹ ZHANG De-qiang¹ WANG Xu¹

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China;

2. Faculty of Environmental Sciences and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Hydrological effects of coniferous and broadleaved mixed forest ecosystem in Dinghushan were studied from August 2002 to July 2003. The total precipitation during this period was 1 690 mm, of which the net precipitation under canopy was 1 212.7 mm, accounting for 72% of the total. The amounts of throughfall and stemflow were 1 125.3 mm and 87.4 mm, respectively, accounting for 66.6% and 5.2% of the total precipitation, respectively. Canopy interception was 477.3 mm, with an interception rate of 28.2%. The surface runoff was 62.1 mm (about 3.7 % of total precipitation). It was shown that the amount of canopy interception increased with the increasing of precipitation, but having various tendency for different precipitation intensity classes. However, the critical canopy interception for precipitation event was about 25 mm. Throughfall and stemflow were linearly related to the precipitation. The surface runoff was also linearly related to precipitation when the daily precipitation was ≤ 30 mm, but nonlinearly related to precipitation at >30 mm. Compared with monsoon evergreen broadleaved forest or pure coniferous forest, the coniferous and broadleaved mixed forest had a greater hydro-ecological effect on decreasing surface runoff and water and soil conservation.

Key words: Hydrological effect; Coniferous and broadleaved mixed forest; Dinghushan

森林与水是人类生存和发展的重要物质基础,也是森林生态系统的重要组成部分。国内外对森林

与水相互关系的研究报道较多^[1-8],认为森林生态系统具有调蓄径流,改善土壤结构,减少土壤侵蚀,延

收稿日期 2003-08-26 接受日期 2004-01-02

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KSCX2-SW-120);科技部 973 前期资助项目(2001CCB00600);中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01A3);广东省基金重点项目(010567)资助

* 通讯作者 Corresponding author

缓产流汇流过程等水文效应。

大气降水通过林冠时产生重新分配,一部分形成茎流,另一部分形成穿透雨(包括穿过林冠和不穿过林冠而直接进入林地的),当然,还有一部分被林冠截留。茎流在系统水分平衡中通常只占很小的一部分。温带落叶阔叶林茎流约为大气降水的 3%–6%^[4,9,10],但树皮比较光滑的树种茎流可能比较大。针叶林和热带雨林茎流通常不到降水量的 2%^[6,11]。林冠截留损失是大气降水被林冠截留后被蒸发掉的部分,有关研究表明^[12–14],落叶阔叶林和热带雨林的截留损失约为大气降水的 13%,而针叶林约为 26%。

以往森林水文效应的研究主要以热带和温带的地带性群落为对象,而对亚热带地区的研究很少,且大都为成熟的顶级群落。有关鼎湖山针阔叶混交林的林分更新、群落结构、自然演替等曾有报道^[15–20],但对于其水文学方面未见报道。本文选取位于南亚热带季风气候区的鼎湖山的非地带性但面积最大的群落——针阔叶混交林为研究对象,该群落处于该区植被群落演替的中间阶段,其动态变化将影响鼎湖山整个植被空间的分布格局。其生态水文功能研究对于探讨鼎湖山森林生态系统的发展演替动态、森林演替过程的机理以及森林经营和管理有重要的意义。

1 自然概况

研究地点位于广东省肇庆市鼎湖山国家级自然保护区境内,为南亚热带季风型湿润气候,水热条件丰富,年平均气温 21.4℃,最热月 7 月 25.9℃;最冷月 1 月 11.0℃,极端最高温 36.1℃(1979 年 7 月),极端最低温 -0.2℃(1975 年 12 月),年平均降雨量 1 956 mm,多集中在 4 至 9 月,多热带气旋和台风^[21]。年蒸发量 1 115 mm,年均相对湿度 80%左右。

针阔叶混交林 II 号永久样地建于 1999 年,面积为 1 hm²,位于缓冲区内的飞天燕,为人工种植的马尾松林因阔叶树种入侵而自然形成的针阔叶混交林。坡向南,海拔约 250 m,坡度 30°。土壤为砂质壤土,土层厚薄不均,表土有机质含量 2.94%–4.27%。该群落有近 70–80 a 的历史,可分为乔木层、灌木层和草本层 3 层:乔木层覆盖度 80%,乔木上层(≥10 m)平均胸径 20 cm,平均树高约 12 m,主要种类有马尾松(*Pinus massoniana*)、荷木(*Schima superba*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)等,乔木下层(1.5–10 m)平均胸径 3.5 cm,平均树高 3.5 m,主要有荷木、豺皮樟(*Litsea*

rotundifolia var. *oblongifolia*)、锥栗、九节(*Psychotria rubra*)、黄牛木(*Cratoxylon cochinchinense*)、变叶榕(*Ficus variolosa*)等;灌木层覆盖度为 35%,以豺皮樟、九节、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、罗伞树(*Ardisia quinquegona*)等占优势;草本层中以淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、黑莎草(*Gahnia tristis*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)等草本植物占多数^[22]。

2 研究方法

2.1 雨水和林内净降水的测定

在混交林 II 号样地外开阔地段设置一虹吸式自记雨量计和标准雨量桶,同步测定大气降水。林内穿透雨量采用在标地内放置 4 根条状承雨槽收集,承雨槽用两根 4 m 长、内径 200 mm 的聚氯乙烯排水管剖开做成,槽口平面距地面约 80 cm,将收集的水用一根导水管导入承水装置中,雨后观测穿透雨总容量。

树干茎流采用按重要值和径级选标准木,加权计算各径级和林分的茎流。根据样地林分调查的结果,选择标准树 5 株(锥栗和荷木各 2 株,马尾松 1 株),在树干约 1.3 m 处用一端剖开的内径 2–6 cm 聚乙烯管,粘绕样树,固定并用橡皮泥封严胶管和树干之间的空隙,环绕树干的聚乙烯管与水平面间有 30 度左右的倾角,便于水分流下,然后用胶管引出至有密封口的聚乙烯桶,雨后测量。按每株树的树冠投影面积换算成单位面积的茎流量。

2.2 地表径流的测定

在样地内选取具有代表性的地段,在同一坡面设置 3 个面积为 5 m×10 m 的径流观测场(植被未受干扰),径流场四周筑互不透水的隔水墙。在径流场顺坡下方设集流槽和 100 cm×100 cm×100 cm 的盛水箱,箱内设静水装置,箱上方安装 SW40 型日记水位计,自动记录地表径流水位高度。

2.3 林冠截留计算

林冠截留计算公式^[23]: $I=P-T-S$

式中 I 为林冠截流量 (mm); P 为大气降水 (mm); T 为穿透雨量 (mm); S 为茎流 (mm)。

3 结果和分析

3.1 各水文分量的月动态格局

表 1 反映了鼎湖山针阔叶混交林 2002 年 8 月–

2003年7月各水文分量的分配及其月变化。整个观测期间,总降水量为1690 mm,林内净降水量1212.7 mm,其中穿透雨量1125.3 mm,茎流量87.4 mm。林冠截留量为477.3 mm,截留率28.2%。地表径流量62.1 mm。

林外大气降水、林内净降水量和林冠截留雨量各月份动态差异较大,降水主要集中在6、8、9、10月,占全年降水量的71%。最大降水量在2002年8月为416.9 mm,最小在2003年2月仅15.5 mm。林内净降水量和林冠截留量的月动态变化与林外总降水量的月动态变化趋同,即降水量大,林内净降水量和林冠截留量也大,但林冠截留率随降水量的增加而减少。2月份降水量最少,且多为降水量

<10 mm的小雨,降水频率少,强度小,林冠层干燥,大气降水几乎全部被林冠截留。降水量最大的8月,由于降水次数多,强度大,持续时间长,林冠经常处于湿润状态,尽管其林冠截留量的绝对值最大,但林冠截留率却很小,只有17.33%。茎流量在0~24.1 mm之间,其月变化也是与林外大气降水变化一致,但降水量大的月份,尽管树干经常保持湿润,茎流量大,但茎流量占林外降水量的比值小;当降水量不大时,树枝、树干较干燥,降至树干上的水以及沿着树枝流向树干的水几乎被粗糙、较厚的树皮吸着,因此,茎流量很小,但茎流占林外总降水量的比值却较大。

林地地表径流过程受很多因素的影响,包括:

表1 鼎湖山针阔叶混交林各水文分量的月动态格局

Table 1 Precipitation distribution through the canopy of coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan

月份 Month	降水量 P (mm)	林冠截流 I (mm)	穿透雨量 T (mm)	茎流量 S (mm)	林内净降水 T+S (mm)	截留率 I/P (%)	穿透雨/ 降水量 T/P (%)	茎流量/ 降雨量 S/P (%)	地表径流 SR (mm)
8	416.9	72.3	320.6	24.1	344.6	17.3	76.9	5.8	27.2
9	201.5	58.5	133.9	9.1	143.0	29.0	66.5	4.5	9.8
10	277.5	47.2	211.5	18.7	230.3	17.0	76.2	6.8	14.2
11	66.0	36.7	26.0	3.3	29.3	55.6	39.4	5.0	0
12	62.8	36.2	22.9	3.7	26.6	57.7	36.4	5.9	0.6
1	28.8	16.3	12.5	0.0	12.5	56.6	43.4	0.0	0
2	15.5	15.5	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0
3	96.9	49.3	45.0	2.7	47.6	50.8	46.4	2.8	1.0
4	85.0	31.2	50.2	3.6	53.8	36.7	59.1	4.2	1.2
5	63.2	16.0	43.3	3.9	47.2	25.3	68.6	6.1	0.9
6	303.3	74.0	214.9	14.3	229.3	24.4	70.9	4.7	5.5
7	72.6	24.1	44.5	4.0	48.5	33.3	61.3	5.5	1.8
合计 Total	1690	477.3	1125.3	87.4	1212.7	28.2	66.6	5.2	62.1

P: Precipitation; I: Interception; T: Throughfall; S: Stemflow; SR: Surface runoff.

林分结构、林龄、空间分布模式以及与气候、地形、地质、土壤结构和特性等^[24],它可以直观反映降水后产流及森林的生态效应。从表1可以看出,除了2002年8月外,其它月份地表径流量均很小,这是由于2002年6、7月降水量较大,系统处于水分饱和状态,到了8月,降水量大,系统逐渐蓄满后,以蓄满产流为主的地表径流随降水量的增加而迅速增加;其次,林地内凋落物层厚度大,具有很强的保水能力,鼎湖山针阔叶混交林年平均凋落物量为 8.50 t hm^{-2} ^[25],凋落物最大持水率可达313%^[26],大量凋落物的存在对地表径流的产生起重要的抑制作用。整个观测期间,地表径流占林外降水量的比值

在0~4.79%之间,这表明鼎湖山针阔叶混交林生态系统具有很强的水分调节能力。

3.2 各水文分量与降水量的关系

3.2.1 林冠截留

根据试验年度多次降水统计资料,鼎湖山针阔叶混交林林冠截留量与降水量之间的关系如图1。

林冠截留除受林冠本身特性的影响外,还与降雨特性及一些气象要素有关^[27],因此雨量级不同,林冠截留量随降水量变化的曲线也有差别。当一次性降水量 $P \leq 20 \text{ mm}$ 时,林冠截留量随降水量的增加而呈线性上升(图1a),一次性降水量 $P > 3.5 \text{ mm}$ 时,林

内开始产生冠流,降水量在 3.5–20 mm,截留量随降水量的增加迅速增大;当 $20\text{ mm} < P \leq 50\text{ mm}$ 时,林冠截留量随着降水量呈对数级数上升(图 1b);当 $P > 50\text{ mm}$ 时,林冠截留量与降水量的关系近似抛物线,且截留的雨量小于 25 mm。这说明本实验年度鼎湖山针阔叶混交林一次截留降水量饱和值约为 25 mm(图 1c)。

与国内其它地区相比,鼎湖山针阔叶混交林的林冠截留能力与福建赤枝栲(*Castanopsis kawakamii*)林接近(27.83%)^[28],而高于武夷山甜槠林(18.54%)^[29]和滇中常绿阔叶林(18.2%)^[30]。由于林冠对降雨的截留,使得降雨到达地面的数量有所减少,时间有所延迟,从而减少和延缓了地表径流。

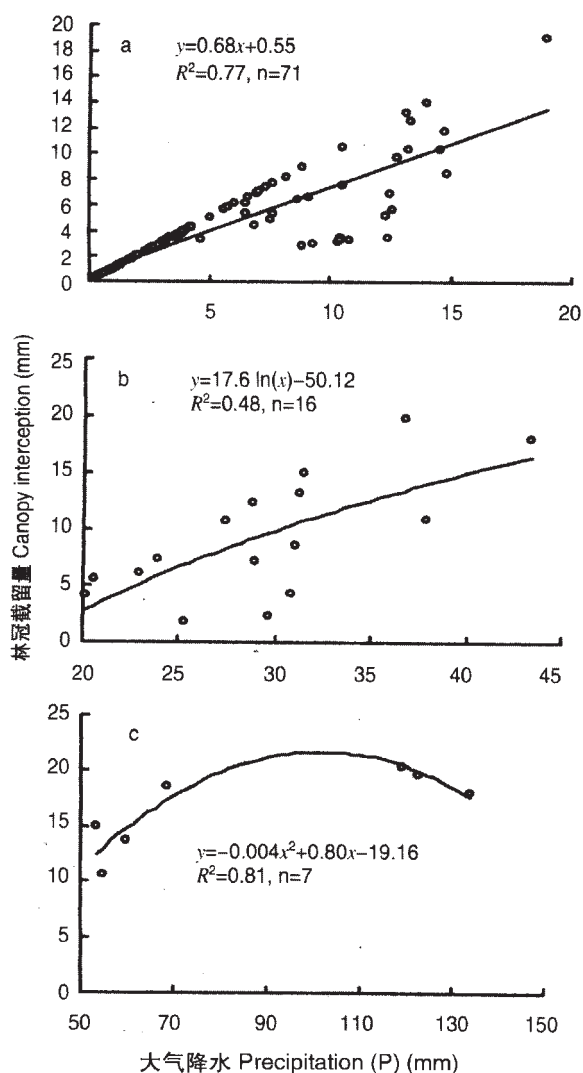


图 1 林冠截留与林外大气降水的关系

Fig. 1 Canopy interception VS incident precipitation
a: $P \leq 20\text{ mm}$; b: $20\text{ mm} < P \leq 50\text{ mm}$; c: $P > 50\text{ mm}$

3.2.2 穿透雨、树干茎流

穿透雨是直接通过叶面和从叶、枝滴落的雨水之和,且穿透雨随林分密度的增加而减少^[31]。实验期间,穿透雨的变率很大,当降雨量很小时,穿透雨几乎为零,随着降雨量的增加,穿透雨量也增加。回归分析结果表明:穿透雨(T)与林外大气降水(P)之间存在如下直线关系(图 2A):

$$T = 0.76P - 2.42, R^2 = 0.95, n = 150$$

茎流是指在降水过程中顺树干流到林地的林内净降水。茎流雨量虽少,但对树木养分元素的补充,以及树体四周土壤的含水量、酸碱度等理化状况均有较大的影响^[29]。茎流量除与降水量、降水持续时间和强度等有关外,也与树木本身形态特征如树木茎围大小,树皮粗糙度等有关^[29]。在一次性降水中,只有当树体表面充分湿润并有持续降水时才产生茎流,即存在一个产生茎流的降水临界值;研究发现,该值受前 24 h 降水量和树种两个因素影响较大^[32]。

茎流量(S)与降水量(P)之间存在以下关系(图 2B):

$$S = 0.07P - 0.24, R^2 = 0.80, n = 150$$

3.2.3 地表径流

通过林冠的净降水到达地面后,一部分被林地枯枝落叶层吸收,一部分进入土壤,其余的成为地表径流,因此,地表径流的形成与降雨量、降雨强度、地被物和枯落物持水量以及土壤水分物理特征等因子密切相关。一般来说,降雨量越大,地表径流量越大;相同降雨量,降雨强度越大,地表径流越容易产生。观测期间,在干旱季节(11–2月),几乎不产生地表径流,雨季(7–9月)径流量大且集中。如果连续几天降水,前期土壤水分比较充足,蓄水较多,则地表径流发生的几率就高,引起地表径流产生的降水量临界值就小,相反,长期干旱,即使降雨量和降水强度均较大,径流量也相对较小,引起产流的临界值就会增大。降水量较多的雨季,鼎湖山针阔叶混交林地地表径流量也很小,其占林外大气降水的比重在 1.36%–4.79%之间,而雨季林内净降水量占总降水量的比重在 67%–83%之间,这表明混交林土壤渗透性强,厚厚的枯枝落叶层对于增加水分下渗、减少地表径流、保持水土等方面有着十分重大的意义。尽管如此,森林对洪水的调节作用是有限的。对针阔叶混交林地地表径流的观测表明,当大气降水量超过 70 mm 后,地表径流量随降水量的

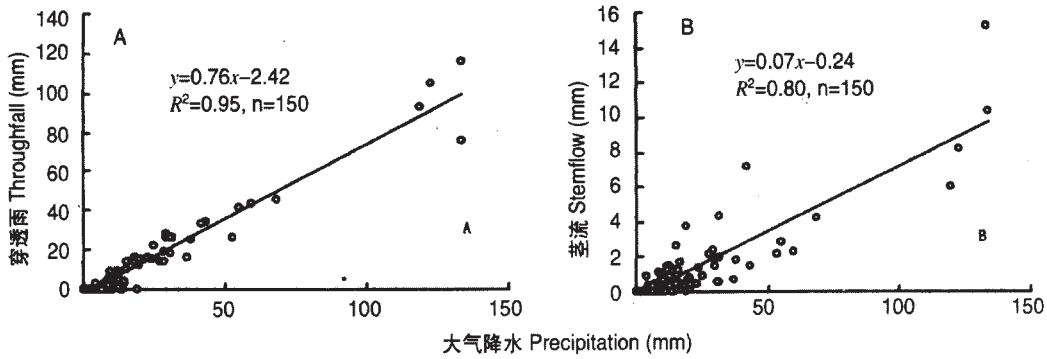


图 2 穿透雨(A)、茎流(B)和林外大气降水的关系

Fig. 2 Relationship between throughfall and incident precipitation (A), stemflow and incident precipitation (B)

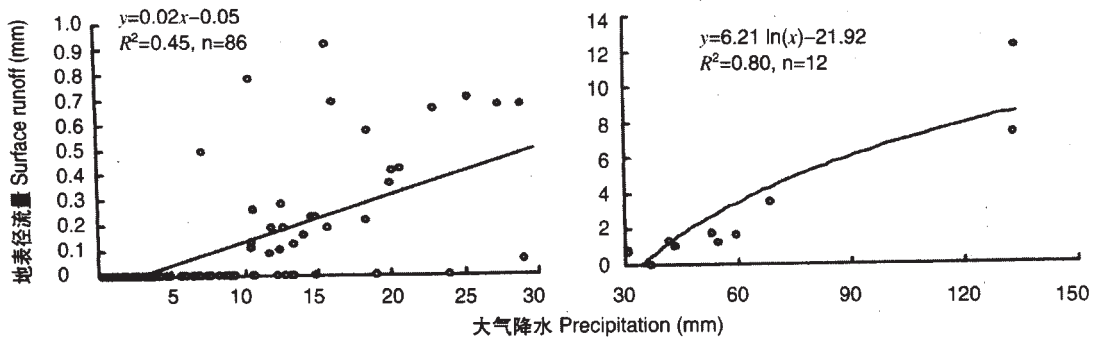


图 3 地表径流量与大气降水关系

Fig. 3 Relationship between surface runoff and incident precipitation

增加而剧增。地表径流 R_s) 与林外大气降水 P) 存在典型的线性关系 (图 3), 可以用以下方程表示:

$$R_s = \begin{cases} 0.02P - 0.05, R^2 = 0.45, n = 86, P \leq 30 \text{ mm} \\ 6.21 \ln P - 21.92, R^2 = 0.80, n = 12, P > 30 \text{ mm} \end{cases}$$

4 讨论

林外大气降水和林冠截留、茎流、穿透雨和地表径流之间的关系及其影响因素是森林生态系统水文生态功能研究的重要内容之一, 它们直接影响到生态系统结构和功能。本文研究结果表明, 不同雨量级, 鼎湖山针阔叶混交林生态系统大气降水和林冠截留量、地表径流量之间存在不同的函数关系, 而与穿透雨、茎流量之间均存在显著的直线关系。这主要是由于林冠截留主要受大气降水和林冠表面物理特性的控制, 而林内净降水还受树叶、树皮物理特性等因素的制约, 地表径流是这些因素综合作用的结果, 从而导致了不同水文分量形成过程机理存在明显的差异。

鼎湖山针阔叶混交林年林冠截留率(28.24%)大于马尾松纯林(17.18%)^[33]和季风常绿阔叶林年林冠截留率(24.7%)^[34]。地表径流量小, 仅占林外大气总降水量的 0-4.79%, 远小于鼎湖山针叶纯林(34%)^[33]和季风常绿阔叶林(24.1%)^[34], 这表明针阔叶混交林系统具有更好的生态水文效应。因此在造林时应该考虑营造多层次、多类型, 具有复合空间结构和生物多样性的混交林生态系统, 这样更有利于水土保持。

引起地表径流变化的因素错综复杂, 如: 气候、土壤、地形、林分组成、林龄和景观空间格局等^[24, 35], 因此, 相似的气候, 不同的土壤、地形和林分条件是引起针阔叶混交林与马尾松纯林、季风常绿阔叶林地表径流差异的原因之一。此外, 马尾松纯林林冠稀疏, 林下植被稀少, 土壤结构致密, 极易发生地表径流, 而处于群落演替顶级阶段的季风常绿阔叶林, 虽然林分密度大, 林下植被丰富, 但该群落内树木由于生理上的衰老以及虫害、台风、雷电等原因, 容易造成群落上层的一些优势乔木死亡, 如: 黄

果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)等,形成一些较大的林间空隙——林窗,将会增加穿透雨占林外大气降水的比重,林下疏松的土壤结构,容易受到林内净降水冲刷,所以地表径流量也比较大。因此,我们认为处于演替中级阶段的针阔叶混交林具有更好的生态水文效应。

参考文献

- [1] Lioyd C R, Marques A. Spatial variability of throughfall and stemflow measurement in Amazonian rain forest [J]. For Agri Meteorol, 1988, 42:63–67.
- [2] Cantú Silva I, Okumura T. Throughfall, stemflow and interception loss in a mixed white oak forest (*Quercus serrata* Thunb.) [J]. J For Res, 1996, 1:123–129.
- [3] Cape J N, Brown A H F, Robertson S M C, et al. Interspecies comparison of throughfall and stemflow at three sites in northern Britain [J]. For Ecol Magnt, 1991, 46:165–177.
- [4] Neary A J, Gizyn W I. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario [J]. Can J For Res, 1994, 24:1089–1100.
- [5] Pearce A J, Rowe L K. Rainfall interception in a multi-storied, evergreen mixed forest: estimates using Gash's analytical model [J]. J Hydrol, 1981, 49:341–353.
- [6] Tobón Marin C, 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.
- [7] Li L H (李凌浩), Lin P (林鹏), Wang Q B (王其兵), et al. Hydrological observation in an evergreen broadleaved forest in the Wuyi Mountains [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1997, 21(5):393–402. (in Chinese)
- [8] Chen B K (陈步峰), Zhou G X (周光益), Zeng Q H (曾庆波), et al. Study on the hydrologic dynamic characteristics of tropical mountain rain forest on Jianfenglin [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1998, 22(1):68–75. (in Chinese)
- [9] Helvey J D, Patric J H. Canopy and litter interception or rainfall by hardwoods of eastern United States [J]. Water Res Res, 1965, 1: 193–206.
- [10] Mahendrappa M K. Partitioning of rainwater and chemicals into throughfall and stemflow in different forest stands [J]. For Ecol Magnt, 1990, 30:65–72.
- [11] Gash J H C, Stewart J B. The evaporation from the Thetford Forest during 1975 [J]. J Hydrol, 1977, 35:385–396.
- [12] Dunne T, Leopold L B. Water in Environmental Planning [M]. San Francisco, CA: Freeman, 1978. 818.
- [13] Thurow T L, Blackburn W H, Warren S D, et al. Rainfall interception by midgrass, shortgrass, and live oak mottes [J]. J Range Magnt, 1987, 40:455–460.
- [14] Bruijnzeel L A. Hydrology of moist tropical forests and effects of conservation: A state of knowledge review [A]. In: International Hydrology Program (UNESCO) [C]. Paris: UNESCO and Vrije Universiteit, Amsterdam, 1990. 224.
- [15] Peng S L (彭少麟). Dynamics of Forest Communities in Subtropical Area [M]. Beijing: Science press, 1996. (in Chinese)
- [16] Peng S L (彭少麟), Fang W (方伟), Ren H (任海), et al. The dynamics on organization in the succession process of Dinghushan *Cryptocarya* community [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1998, 22 (3):245–249. (in Chinese)
- [17] Huang Z L (黄忠良), Kong G H (孔国辉), Wei P (魏平). Plant species diversity dynamics in Dinghu Mountain forests [J]. Chin Biodiv (生物多样性), 1998, 6 (2) :116–121. (in Chinese)
- [18] Kong G H (孔国辉), Ye W H (叶万辉), Huang Z L (黄忠良) et al. Long-term monitoring of the lower subtropical evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Biosphere Reserve (I) Species composition of *Castanopsis chinensis*, *Cryptocarya concinna* community and its contribution to the species pool [A]. In: Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 8 [C]. Beijing: Meteorological Press, 1998. 7–17. (in Chinese)
- [19] Wang B S (王伯荪), Ma M J (马曼杰). The successions of the forest community in Dinghushan [A]. In: Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 1 [C]. Guangzhou: Popular Science Press Guangzhou Branch, 1982. 142–156. (in Chinese)
- [20] Wen D Z (温达志), Wei P (魏平), Zhang Q M (张倩媚), et al. Studies on biomass of three lower subtropical evergreen broad-leaved forest in a MAB Reserve of South China [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 1999, 23 (Suppl):11–21. (in Chinese)
- [21] Wu H S (吴厚水), Deng H Z (邓汉增), Chen H T (陈华堂), et al. Phytico-geophysical features of Dinghushan and their dynamic analysis [A]. In: Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 1 [C]. Guangzhou: Popular Science Press Guangzhou Branch, 1982. 1–10. (in Chinese)
- [22] Zhang Q M (张倩媚), Huang Z L (黄忠良), Liu S Z (刘世忠), et al. The community structure of coniferous and broad-leaved forest in Dinghushan [A]. In: Tropical and Subtropical Forest Ecosystem Vol. 9 [C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 18–27. (in Chinese)
- [23] Zhou G Y (周国逸). Hydro-thermal Principals of Ecosystems and Their Application [M]. Beijing: Meteorological Press, 1997. (in Chinese)
- [24] Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China [J]. Acta Phytoecol Sin, 2003, 27(1):16–22.
- [25] Zhang D Q (张德强), Ye W H (叶万辉), Yu Q F (余清发), et al. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan [J]. Acta Ecol Sin(生态学报) 2000 20(6) 938–944. (in Chinese)
- [26] Yan J H (闫俊华), Zhou G Y (周国逸), Tang X L (唐旭利), et al. Characteristics of litter and its contained water in three succession communities in Dinghushan Mountain [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 2001, 12(4):509–512. (in Chinese)
- [27] Cui Q W (崔启武), Bian L G (边履刚), Shi J D (史继德), et al. Canopy interception of forest ecosystem [J]. Sci Silv Sin(林业科

- 学), 1980, 16(2):141-143. (in Chinese)
- [28] Sun G (孙阁). Review of forest vegetation impacting on river sediment and water quality [J]. J Soil Water Conserv(水土保持学报), 1988, 2(3):83-89. (in Chinese)
- [29] Li L H (李凌浩), Lin P (林鹏). Review on the study of forest precipitation chemistry [J]. J Soil Water Conserv (水土保持学报), 1994, 8(1):84-96. (in Chinese)
- [30] Liu W Y(刘文耀), Liu L H(刘伦辉), Zheng Z(郑征), et al. Preliminary study on hydrologic effect of evergreen broad-leaved forest and *Pinus yunnanensis* forest in central Yunnan [J]. Acta Phytoecol Geobot Sin(植物生态学和地植物学报), 1991, 15(2):159-167. (in Chinese)
- [31] Yang M R(杨茂瑞). Interrelations of forest precipitation, crown interception, and trunk stemflow in subtropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* [J]. For Res(林业科学研究), 1992, 5(2):158-162. (in Chinese)
- [32] Wan S Q (万师强), Chen L Z (陈灵芝). Characteristics of precipitation and forest stem flow of Dongling Mountainous area [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2000, 20(1):61-67. (in Chinese)
- [33] Mo J M(莫江明), Fang Y T(方运霆), Feng Z L(冯肇年), et al. Ecohydrological functions of a human-disturbed *Pinus massoniana* forest in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2002, 10(2):99-104. (in Chinese)
- [34] Huang Z L(黄忠良), Ding M M(丁明懋), Zhang Z P(张祝平), et al. The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1994, 18(2):194-199. (in Chinese)
- [35] Ma X H(马雪华), Yang M R(杨茂瑞), Hu X B(胡星弼). A study on hydrological functions of subtropical *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations [J]. Sci Silv Sin(林业科学), 1993, 29:199-206. (in Chinese)