

鼎湖山地带性植被及其不同演替阶段水文学过程长期对比研究

周传艳^{1,2} 周国逸^{1*} 闫俊华¹ 王旭¹

(1 中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广州 510650) (2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 分析鼎湖山3种植被类型生态系统水文的长期连续观测资料,采用时空互代的方法,得到如下一些结果: 1)鼎湖山自然保护区东沟集水区产水量达到降水量的66.5%,日径流量高峰的出现相对降水的发生滞后1d左右。2)地下水位平均稳定在2.22m,最低为2.84m,最高为1.14m。1999、2000、2001、2002和2003年地下水位平均值分别为2.38、2.27、2.08、2.13和2.11m。鼎湖山东沟集水区每日地下水位与前16d每一天的降水量相关。3)随着时间推移3种不同的植物群落中土壤含水量都有减少的趋势。季风林($p < 0.01$)和混交林($p < 0.05$)的土壤含水量减少趋势具有统计上的显著性,松林除外。4)鼎湖山3个处于不同演替阶段的植物群落其穿透水量与大气降水皆呈线性相关,它们的 R^2 值随演替的进展而减小。穿透水占大气降水的比例也随演替进展而减少,松林、混交林和季风林分别为83.4%、68.3%和59.9%。松林、混交林和季风林的树干茎流占大气降水的比例分别为1.9%、6.5%和8.3%。树干茎流和胸径的关系受控于整个群落整体的影响而不仅仅是某个单一物种,并且群落的郁闭程度和结构是影响降水在林内再次分配的关键因素。季风林2月大气降水28.7mm林冠截流率为83.3%,而在大气降水为297.8mm的6月林冠截留率仅为18.9%,并且随着植物群落的演替,从松林、混交林到季风林的过程中林冠截留逐渐增大。

关键词 鼎湖山自然保护区 季风林 混交林 松林 水文学过程

LONG TERM COMPARATIVE STUDY OF THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF FORESTS IN DIFFERENT SUCCESSIONAL STAGES IN THE DINGHUSHAN BIOSPHERE RESERVE, GUANGDONG PROVINCE, CHINA

ZHOU Chuan-Yan^{1,2} ZHOU Guo-Yi^{1*} YAN Jun-Hua¹ and WANG Xu¹

(1 Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Dinghushan biosphere reserve (112°30'39" E, 23°09'21" N - 23°11'30" N) is located in central Guangdong Province in southern China, about 84 km from Guangzhou city, with an area of 1 156 hm². Due to its location on the tropic of cancer, the forest vegetation is very rich and dominated by monsoon evergreen broad-leaved forests. The dominant forest types in the Dinghushan biosphere reserve are *Pinus massoniana* forests (PF), mixed *Pinus massoniana*/broad-leaved forests (PBF), and monsoon evergreen broad-leaved forests (MBF), which form a natural successional sequence. The aim of this paper was to quantify the magnitude and annual variation of water yields in the Dinghushan Nature Reserve in the three forest types, which would be used for estimating carbon outputs in streamflow, and to discuss how hydrological processes vary at different successional stages of forest development.

Climatic data were obtained from weather stations located at the Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, Chinese Ecosystem Research Network (CERN). Runoff was monitored at three landscape levels. The first level was the entire eastern watershed. The second level referred to small catchments within the larger watershed that were dominated by the different forest types, i. e., a PF catchment, a PBF catchment, and a MBF catchment. The third level referred to three surface runoff plots placed within each of the three catchments. Stream runoff in the eastern watershed and the three smaller catchments was monitored continuously year a round by measurement weirs with streamflow recorders. The ephemeral surface runoff from the nine surface runoff plots was collected in separate plastic tanks and the water level of each tank was recorded automatically following every precipitation event. The subsurface water table depth was recorded manually at 5-day

收稿日期: 2004-02-18 接受日期: 2004-12-02

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCXZ-SW-120)

*通讯作者 Author for correspondence E-mail: gyzhou@scib.ac.cn

intervals in wells located in the valley of the eastern watershed at elevations of 20 - 30 m. Soil water content has been measured monthly using neutron probes since 1983. Soil water content was measured at 10 - 15 places in each of the three catchments and distributed across the elevational gradient. At each point, the water content was monitored at three soil depths, 0 - 15, 15 - 30 and 30 - 45 cm. Throughfall was collected at four sites in each catchment using cross-shaped troughs with a horizontal area of 2.25 m², and was measured using a fluviograph (Zhou, 1997). Thirty trees adjacent to each throughfall site that represented the range of species and size of trees in each catchment were selected and stemflow monitored (Gash *et al.*, 1978). Stemflow was collected in an open PVC tube wrapped around the stem of each tree that led to a tipping bucket rain gauge. Throughfall and stemflow were monitored from April 1999 to April 2000, during which time there were 61 rain events. Leaf area index and canopy cover were measured at 10 sampling sites within each catchment four times each year using a CI-110 digital plant canopy imager (CID, Inc. Vancouver).

The water yield in the eastern watershed of Dinghushan biosphere reserve was 66.5 % of its rainfall with the maximum outflow occurring about one day after a rain event. The subsurface water table averaged 2.22 m below the soil surface, with the deepest water levels at 2.84 m and highest at 1.14 m depth. The annual average position was 2.38, 2.27, 2.08, 2.13 and 2.11 m deep in the years 1999, 2000, 2001, 2002 and 2003, respectively. The depth of the water table in the eastern watershed was correlated with rainfall events that occurred 16 days previously. There was an abating tendency of soil water content for all the three forest communities. The tendency was statistically significant for MBF ($p < 0.01$) and PBF ($p < 0.05$), whereas no statistically significant effect for the PF was found.

The relationship between the amount of throughfall and precipitation was linear for the three different forest communities at different successional stages, but the correlation decreased from MBF, PBF to PF. The ratio of throughfall to precipitation also decreased with successional stage of the forest, from 83.4 %, 68.3 % to 59.9 % for the PF, PBF and MBF, respectively. The relationship of stem flow with DBH was controlled by the effects of the whole forest community instead of a single species. The canopy structure of the forest community played a key role in the redistribution of precipitation. The canopy interception rate in the MBF was 83.3 % in February when total precipitation was 28.7 mm, but was only 18.9 % when precipitation was 297.8 mm in June. The canopy interception rate increased in the three forest types from PF, PBF to MBF.

Key words Dinghushan biosphere reserve, Stream outflow, Throughflow, Stemflow, Hydrological processes, Successional stage

准确确定森林流域水文学过程中各个量的大小及其受森林类型和森林成熟度控制的机理在生态系统研究、全球变化研究和水资源管理上都处于极其重要的地位。

水是生态系统物质搬运的媒介,水文学过程与生态系统功能紧密相连(周国逸, 1997; Zhou *et al.*, 2002a, 2002b)。森林流域的水文学过程在全球水循环中起着关键的作用(Levia & Frost, 2003), 全球范围的碳循环研究已表明大约 1/3 的碳不知去向(Schimel *et al.*, 2001; Sarmiento & Gruber, 2002), 准确估算随着水流搬运和土壤侵蚀沉降或沉积下来的碳量或许是找到“丢失的碳汇”的一个重要途径,因此,精确估算森林生态系统中随径流输出的碳量对于生态系统碳平衡研究具有重大意义,可以预见,高精度量化的水文学过程及机理的研究将由此受到比以往任何时候都更为广泛的关注。水资源具有不可替代性,近来对其生态地位的关注使集水区尺度且基于自然过程的植被对水质、水量影响的

研究成为一个新热点(Levia & Frost, 2003; Haworth & McPherson, 1995; Helvey & Patric, 1965; Helvey, 1967; Tallaksen, 1995; Carlyle-Moses & Price, 1999; Aboal *et al.*, 1999; Nyholm *et al.*, 2003)。Swank 和 Douglass (1974)的研究发现在阿巴拉契亚山脉南部的一些集水区以落叶硬木取代美国五针松(*Pinus strobus*)后,产水量以 20 % 的速度减少,这说明了森林类型对水资源量的控制作用。

本文的目的在于量化鼎湖山自然保护区产水量及其年变化,探讨鼎湖山自然保护区不同森林植被类型水文学过程机理,这将为进一步研究不同成熟度森林有机碳随径流和土壤侵蚀搬运的差异打下基础。

1 研究区自然概况

鼎湖山自然保护区居于北回归线附近(112°30'39" ~ 112°33'41" E, 23°09'21" ~ 23°11'30" N),广东省中部,距广州市 84 km。面积 1 156 hm²,海拔高度在 10 m 到 1 000.3 m 之间。受典型南亚热带季

风气候影响,年均降水量 1 942.3 mm,其中 80.0% 发生在湿季(4~9 月),20.0% 发生在干季(10 月~翌年 3 月)。年均气温和空气相对湿度分别为 22.3 和 77.7%。

主要植被类型按演替顺序分别为马尾松针叶林 (*Pinus massoniana* forest, PF)、马尾松针阔混交林 (Mixed *Pinus massoniana*/ broad-leaved forest, PBF) 和季风常绿阔叶林 (Monsoon evergreen broad-leaved forest, MBF), MBF 属于南亚热带地带性植被,该区有记载的植物共 1 843 种,分属于 267 科, 877 属。

地带性土壤类型为发育于砂岩和砂页岩的赤红壤,分布在海拔 400~500 m 范围以下地带,随着海拔的升高土壤类型逐渐变为山地黄壤。

鼎湖山自然保护区由两个相对独立的集水区组成,即东沟集水区和西沟集水区,面积分别为 613.2 hm²和 542.8 hm²。东沟集水区范围内分布着鼎湖山的所有植被类型,本文所研究的 3 种森林类型在东沟集水区的位置如图 1 所示。

PF 结构简单,乔木仅以马尾松为主,林龄约 66 年。位于保护区外围的缓冲区,海拔 30~200 m,坡向北,坡度 26°~30°。土壤为砂岩发育的砖红壤性红壤,土层厚约 40 cm,表土有机质含量 2.25%~3.95%,pH 值 4.16~4.48(莫江明等,1997)。

PBF 位于保护区缓冲区,海拔 200~300 m,坡

向东南,坡度 30°左右。土壤为砂岩发育的砖红壤性红壤,森林起源于 20 世纪 30 年代营造的马尾松林,但为半自然状态的针叶林。由于距居民点较远,人为干扰轻,到 1980 年时演替为马尾松、荷木 (*Schima superba*) 针阔混交林,此后一直处在自然演替的状态(方运霆等,2002)。

MBF 结构复杂,乔木以黄果厚壳桂 (*Cryptocarya concinna*)、荷木等为优势,林龄 400 多年。位于保护区核心区内的三宝峰,海拔 270~330 m,坡向东北,坡度 26°~30°,局部可达 40°。土壤为砂页岩发育的赤红壤,土层厚 30~90 cm,表土有机质含量 3.23%~5.60%,pH 值 4.06~4.34(温达志等,1999)。

2 方法

2.1 气象因子

本研究所用气象资料来自于中国生态系统研究网络(Chinese ecosystem research network, CERN)鼎湖山森林生态系统定位研究站的气象站,该气象站位于鼎湖山自然保护区内,所在海拔高度为 80 m。

2.2 径流

分别从 3 个尺度对径流进行监测,第 1 尺度为整个东沟集水区;第 2 个尺度是 3 个小集水区,分别为 PF、PBF 和 MBF;第 3 个尺度为 3 个小集水区中各设的 3 个地表径流场。东沟集水区以及 3 个小集水区的径流量通过安装在集水区出口测流堰上的自记

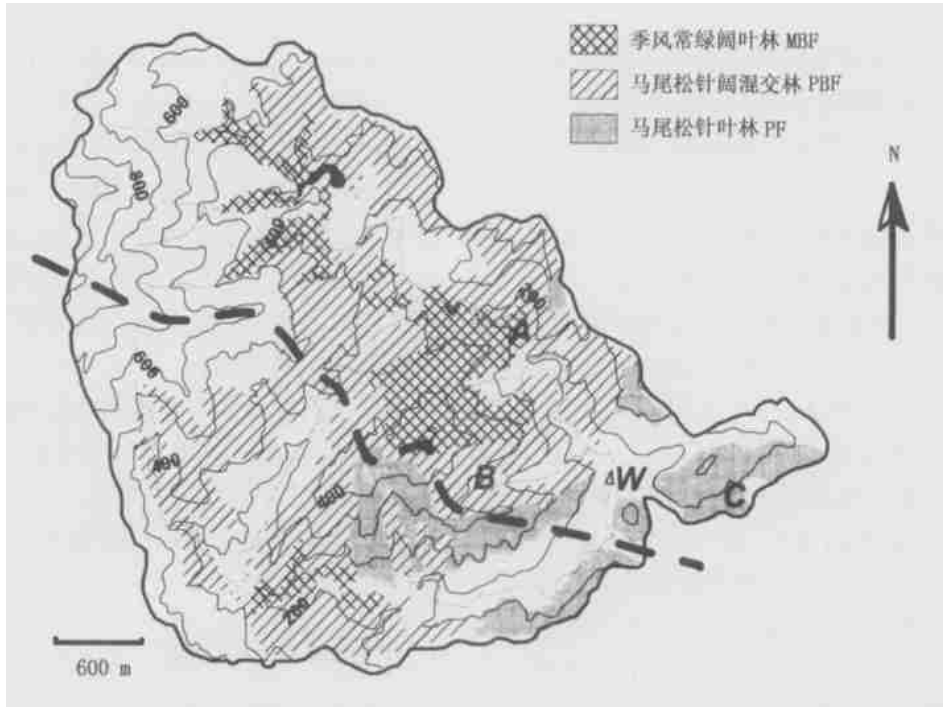


图 1 鼎湖山自然保护区林型分布图
Fig. 1 Forest distribution in Dinghushan biosphere reserve

水位计自动记录。径流场通过设置带标尺的塑料桶记录每次降水过程下的地表径流量。

第 1、2 尺度的径流量实际上包含了地表和地下径流两部分,要较为准确地将这两部分分开必须分析每次降雨过程的水文曲线,这在长期连续监测是不容易做到的,因此,本文根据式(1)将地表、地下径流分开,统计学上可以证明,这种分开地表、地下径流的方法将随着观测次数的增加(即:越来越多的降雨-径流水文曲线)而越来越接近真实状况。

$$\begin{cases} R_{ss} = (1 + \frac{n_2}{n_1})_{i=1}^{n_1} R_{ss_i} \\ R_{sf} = R - R_{ss} \\ n = n_1 + n_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为 n 天内的径流量(mm),在这 n 天内有 n_1 个无雨日和 n_2 个有雨日; R_{ss} 为 n 天内的地下径流量(mm); R_{sf} 为 n 天内的地表径流量(mm); R_{ss_i} 为在第 i 个无雨日($i = 1, 2 \dots n_1$)的地下径流量(mm)。

2.3 地下水埋深

地下水观测井位于海拔 28 m 的东沟集水区山谷,每 5 d 观测一次地下水埋深。

2.4 土壤含水量

用中子水分仪测定土壤含水量,每个林型根据不同海拔高度布设采样点 10~15 个。每个点的土壤含水量分 0~15、15~30 和 30~45 cm 3 层进行测量。

2.5 穿透水和树干径流

穿透水用十字形塑料承接器收集并配合自计水位计测定。用切开的 PVC 管蛇形缠绕树干以收集树干径流,再将它导入自计雨量计中以便得到树干径流量的变化过程曲线。

2.6 叶面积指数和林冠郁闭度

每年 4 次用 CF-110 数字植被郁闭测度仪(CID, Inc. Vancouver)在每个林型中各选 10 个点进行叶面积指数和郁闭度测定。

3 结果与分析

3.1 径流

从 2000 年 4 月到 2003 年 3 月 3 年期间,鼎湖山总大气降水量 5 454.4 mm,湿季和干季分别占 76.8%和 23.2%。总径流量为 3 628.3 mm,湿季和干季分别为 69.2%和 30.8%。3 年中东沟集水区径流系数平均为 66.5%,湿季和干季分别为 60.0%和 88.2%。

Bosch 和 Hewlett (1982) 总结世界上 94 个实验集水区的数据显示这些集水区的产水量占降水量的比例从低于 15%到大于 65%不等。因而,鼎湖山自然保护区东沟集水区产水量达到降水量的 66.5%的数据足以说明该流域的植被及其结构对产水量的增加具有促进作用,可以作为水资源保护的一个范例。

图 2 是 2000 年 4 月到 2003 年 3 月期间的日径流量和大气降水。

对图 2 计算统计量 $\frac{s}{\bar{x}}$ (s -标准差, \bar{x} -平均值),得到 3 年中日径流量和大气降水的 $\frac{s}{\bar{x}}$ 分别为 1.47 和 2.70,这说明径流量在通过鼎湖山下垫面的调节后其日变化相对于大气降水来说大大地减小,体现出森林对水资源的调蓄作用。

式(1)中各项参数在东沟集水区的值由表 1 给出:

3 年内不同年份间有雨天数和无雨天数非常相近($p < 0.001$),年降水量变化不显著($p > 0.05$),但 2001~2002 年度湿季降水量极显著地高($p < 0.001$),使得年径流量从 739.2 mm 变化到 1 750.4 mm,相应地湿季径流量从 509.0 mm 变化到 1 254 mm,干季径流量从 230.2 mm 变化到 496.4 mm,差异都极显著($p < 0.001$),径流量的变化趋势与降水量 D 的变化趋势完全一致。径流量在 2001 年 4 月至

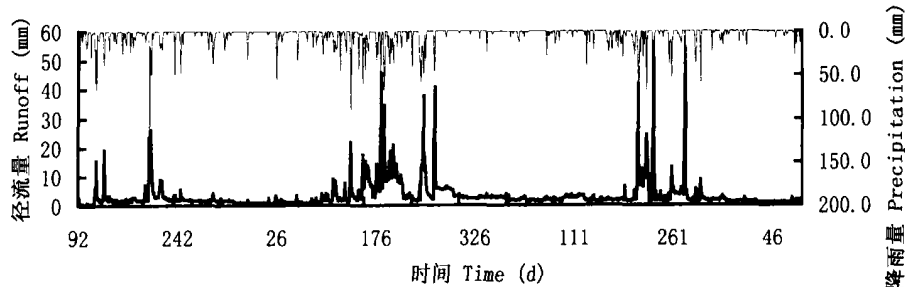


图 2 鼎湖山东沟集水区日径流量和降水量(2000 年 4 月~2003 年 3 月)

Fig. 2 Daily runoff and precipitation in eastern watershed of Dinghushan biosphere reserve during Apr. 2000 - Mar. 2003

表 1 东沟集水区式(1)的各项参数

Table 1 Parameters in Eq (1) for the eastern watershed

年份 Year	干湿季 Season	n_1	n_2	R_{ss} (mm)	R_{sf} (mm)	$R_{ss} + R_{sf}$ (mm)	P (mm)	$\frac{R_{ss}}{R_{ss} + R_{sf}}$	$\frac{R_{ss}}{P}$	$\frac{R_{sf}}{P}$	$\frac{R_{ss} + R_{sf}}{P}$
2000 年 4 月 ~ 2001 年 3 月 Apr. 2000 - Mar. 2001	湿季 Wet season	94	89	358.8	150.2	509.0	1 178.9	0.705	0.304	0.127	0.432
	干季 Dry season	129	53	197.5	32.7	230.2	512.1	0.858	0.386	0.064	0.450
2001 年 4 月 ~ 2002 年 3 月 Apr. 2001 - Mar. 2002	湿季 Wet season	81	102	845.6	408.4	1 254.0	1 737.2	0.674	0.487	0.235	0.722
	干季 Dry season	141	41	481.3	15.1	496.4	206.3	0.970	2.333	0.073	2.406
2002 年 4 月 ~ 2003 年 3 月 Apr. 2002 - Mar. 2003	湿季 Wet season	102	81	515.5	232.9	748.4	1 271.8	0.689	0.405	0.183	0.588
	干季 Dry season	122	60	364.7	25.6	390.3	548.1	0.934	0.665	0.047	0.712
总和 Total		669	426	2 894.2	734.1	3 628.3	5 454.4	/	/	/	/

P : 大气降水(mm), 其它参数与式(1)同 P : Precipitation (mm), the other parameters is same as Eq (1)

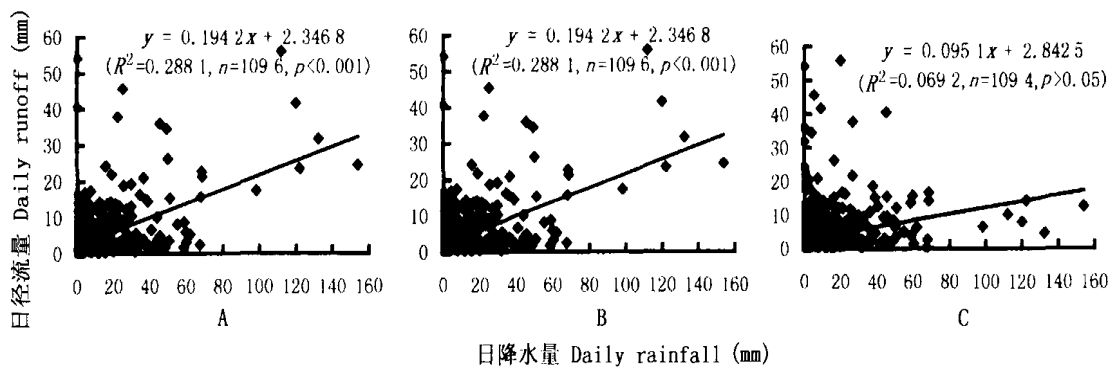


图 3 东沟集水区日降水量和径流量的相关性

Fig. 3 The correlation of daily rainfall and runoff for the eastern watershed

A: 同一天的降水量和径流量 The rainfall and runoff in the same day B: 第一天降水量与第二天径流量 The rainfall in a day and runoff in the next day C: 第一天降水量与第三天径流量 Rainfall in a day and runoff in the next second day

2002 年 3 月出现异常增加的现象, 主要原因是该期间降水量的季节分布表现为干湿季差异特别大, 湿季和干季分别为 1 737.2 mm 和 206.3 mm, 各占总量的 89.4% 和 10.6%。降水在湿季的集中发生不仅使得湿季地表和地下径流很大, 而且还影响到干季, 使得其径流量超过了降水量。

在降水量变化不大而降雨天数又几乎一致的情况下, 径流量的差异还极显著, 这个事实证明了降水强度对径流量的大小仍然起着控制作用, 即就算是在主要为地带性植被的自然保护区。鼎湖山自然保护区由于受到长期保护, 森林结构在本地带已经非常完善, 但还是不能有效地减缓暴雨下的洪峰而特别有效地调节河川径流量的季节分配, 这就说明了森林在这方面虽然如前面所述有一定的调蓄功能, 但仍有一定的限度。

同一天内的降水量和径流量有较高的相关性, 但低于第一天降水量与第二天径流量的相关性, 图 3 表明第一天的降水量与第三天的径流量无明显统计相关性。因此我们认为日径流量高峰的出现相对降水的发生滞后 1 d 左右。

3.2 地下水位

图 4 是经过不同海拔高度修订后的地下水位观测结果。

地下水位平均稳定在 2.22 m, 日值最低为 2.84 m, 最高为 1.14 m。

5 年间, 年降水量变化达到 791.5 mm, 地下水位年平均值变化仅为 0.38 m, 变化不显著 ($p > 0.05$), 表明鼎湖山东沟集水区在年的时间尺度范围内能稳定地保持地下水位的稳定。

然而, 当以月为时间尺度来考察地下水位的调

节能力时,则出现另一种情况。图 5A 显示月平均地下水位与月降水量之间存在明显的相关性,东沟

集水区生态系统在月降水量发生改变时,地下水位不能保持稳定。

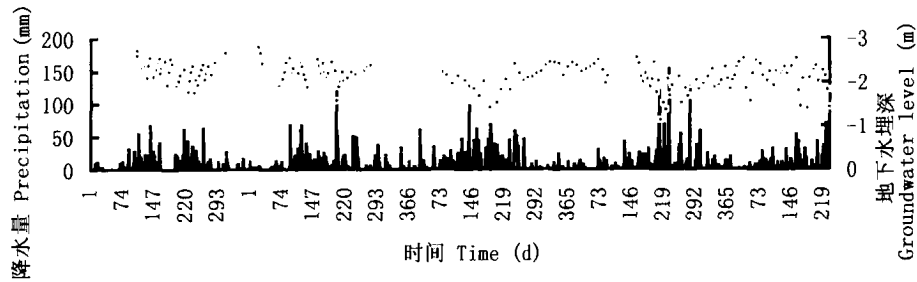


图 4 鼎湖山地下水位与日大气降水量的比较

Fig. 4 Comparison of groundwater level and daily precipitation in Dinghushan biosphere reserve

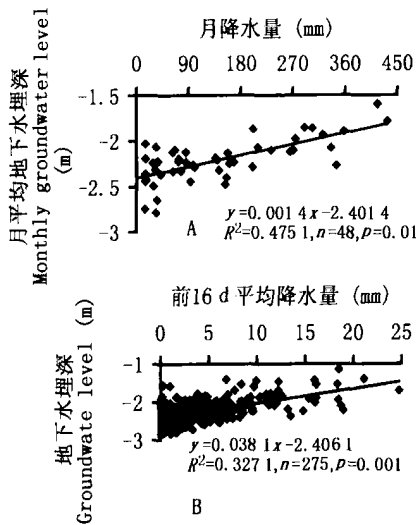


图 5 地下水位与不同周期平均降水量之间的相关性

Fig. 5 The correlation of groundwater level with the average rainfall of different periods

以天的时间尺度来考虑时,将每次测量地下水位前 1 ~ 20 d 的降水量作平均处理。统计分析结果表明对每日地下水位产生重要影响的是其前 16 d 的降水量平均值,显示出日地下水位的高低对降水量的响应具有滞后作用(如图 5B)。

3.3 土壤水动态

1983 ~ 2002 年(其中 1989 ~ 1998 年数据缺失)鼎湖山 3 个主要森林类型 PF、PBF 和 MBF 月土壤含水量由图 6 给出。

在该时间段内,随着时间的推移 3 种不同的植物群落中土壤含水量都存在减少的趋势,MBF ($p < 0.01$)和 PBF ($p < 0.05$)的土壤含水量减少趋势具有统计上的显著性。

土壤含水量是生态系统水分状况的重要指标,

是生态系统储水量的主体,维持着植物的耗水和生态系统的蒸散,它的减少将使生态系统的稳定性受到威胁,降低生态系统的抗胁迫能力。鼎湖山主要森林生态系统土壤水分的持续下降,可能预示着由于环境的变迁,系统处于波动或缓慢退化之中。

1983 ~ 2002 年,如表 2 ($p < 0.01$)所示土壤含水量明显分为 3 个不同阶段。1983 ~ 1985 年土壤含水量和月内标准差()都最大,以后逐渐减小。土壤含水量在 1986 ~ 1999 年间最为稳定,并且在此期间 PF、PBF、MBF 的水分状况都处于最佳。

图 7 显示土壤含水量的年平均值和标准差()分别为松林(PF) 2.83 和 0.46,混交林(PBF) 3.31 和 0.44,季风林(MBF) 3.34 和 0.38。混交林和季风林土壤含水量年平均值的统计差异不显著($p > 0.05$),然而,松林与混交林、松林与季风林的年平均值统计差异相当显著($p < 0.01$)。

鼎湖山植被的自然演替过程中,松林到混交林阶段土壤含水量连续不断地增加。尽管从森林结构来看混交林与地带性植被季风林存在很大差异,但是二者的土壤含水量已经非常接近。这一事实说明植物群落的演替滞后于森林生态系统水文学功能的演化发展。

3.4 对比 3 种森林类型几个水文学过程的机理

3.4.1 穿透水和树干茎流

鼎湖山 3 个处于不同演替阶段的植物群落其穿透水量与大气降水呈线性相关(图 8)。它们的 R^2 值随演替的进展而减小。穿透水占大气降水的比例也随演替进展而减小,松林 PF、混交林 PBF 和季风林 MBF 分别为 83.4%、68.3% 和 59.9%。这或许可以归结于该 3 种植物群落结构的不同。PF 结构简单,郁闭度低且叶面积指数较小(表 3),林冠与穿透水的交互作用过程也较简单,大气降水主要以穿

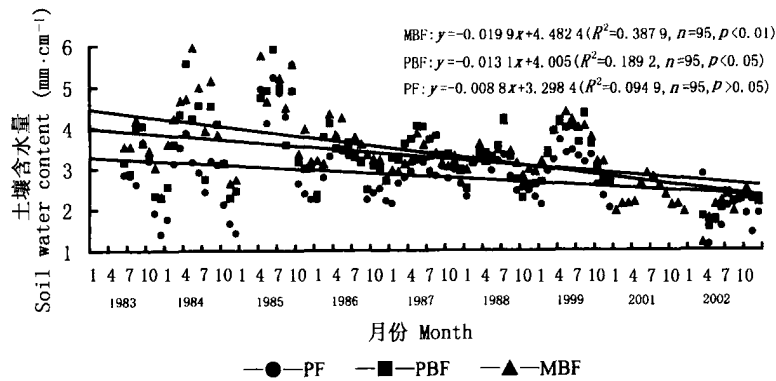


图 6 3 个森林类型多年月土壤含水量

Fig. 6 Monthly soil water content in the three forest types during 1983 - 2002
PF, PBF, MBF: 见图 1 See Fig. 1

表 2 3 个森林类型不同时期土壤含水量的平均值和标准差

Table 2 Average and standard deviation () of soil water content for the three forests types in different periods

时段 Periods	1983 ~ 1985		1986 ~ 1999		2001 ~ 2002	
	平均值 Mean (mm cm ⁻¹)	标准差	平均值 Mean (mm cm ⁻¹)	标准差	平均值 Mean (mm cm ⁻¹)	标准差
马尾松针叶林 PF	3.11	1.11	2.87	0.44	1.89	0.45
马尾松针阔混交林 PBF	3.73	1.02	3.33	0.53	2.09	0.27
季风常绿阔叶林 MBF	4.12	1.01	3.42	0.44	2.20	0.35

PF, PBF, MBF: 见图 1 See Fig. 1

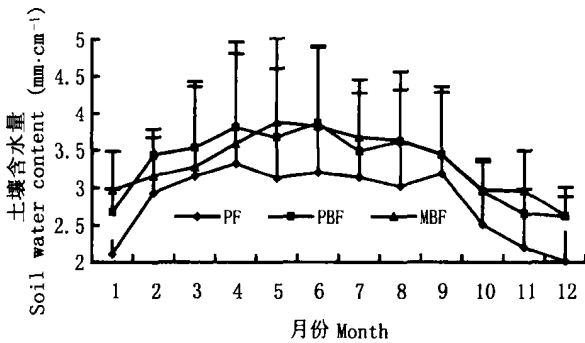


图 7 3 种林型的土壤含水量年内变化

Fig. 7 Annual change of soil water content for the three forest types
PF, PBF, MBF: 见图 1 See Fig. 1

透水的形式到达地面。因此,穿透水的量相对 PBF 和 MBF 两种林型为大,与大气降水的关系也更密切。MBF 林冠由多层组成,群落结构极其复杂,叶面积指数 17.8,郁闭度 93%。在发生相同降水量的情况下,MBF 内多层林冠的截留使到达地面的穿透水量总是要少于 PBF 和 PF 中的穿透水量。PBF 处于演替的中间过渡阶段,群落结构、叶面积指数、穿透水占大气降水的百分比及它们之间的相关程度也都介于松林和季风林之间。

PF、PBF 和 MBF 的树干茎流占大气降水的比例分别为 1.9%、6.5% 和 8.3%,这是由于这 3 种

不同的森林类型其树种组成和各树种所占比例不同造成的,树木的叶、枝条和树皮的性状对树干茎流大小也都会产生直接的影响。PF 的树干茎流量少是因为在该群落中马尾松粗糙的树皮和细小的针叶不利于对大气降水的截留。相反,MBF 能形成较大的树干茎流恰好是因为其优势树种如黄果厚壳桂、荷木等具有宽阔肉质的树叶和密集的枝干。

3.4.2 树干茎流与物种进化关系

生长在 PF 和 PBF 内的马尾松各自年树干茎流量与胸径的关系如图 9 所示。

PF 内生长的马尾松树干茎流比 PBF 内的马尾松树干茎流量大。这表明树干茎流和胸径的关系受控于整个群落整体的影响而不仅仅是某个单一物种,并且群落的郁闭程度和结构也是影响降水在林内再次分配的关键性因素。鼎湖山自然保护区先锋群落松林物种极其单一,仅仅偶见阔叶树种。相对低的林内密度使生长至成熟阶段的马尾松可以充分伸展宽阔茂密的树冠,这有利于截留更多降水和产生较大树干茎流。但当演替进展到 PBF 阶段,阳生阔叶树种逐渐排挤先锋树种马尾松,占据森林的上部空间成为群落的优势树种。随着上层林冠的进一步发展,阔叶树种的截留以及对上层林冠空间的竞争限制了受荫蔽的马尾松树冠的生长从而减少了其

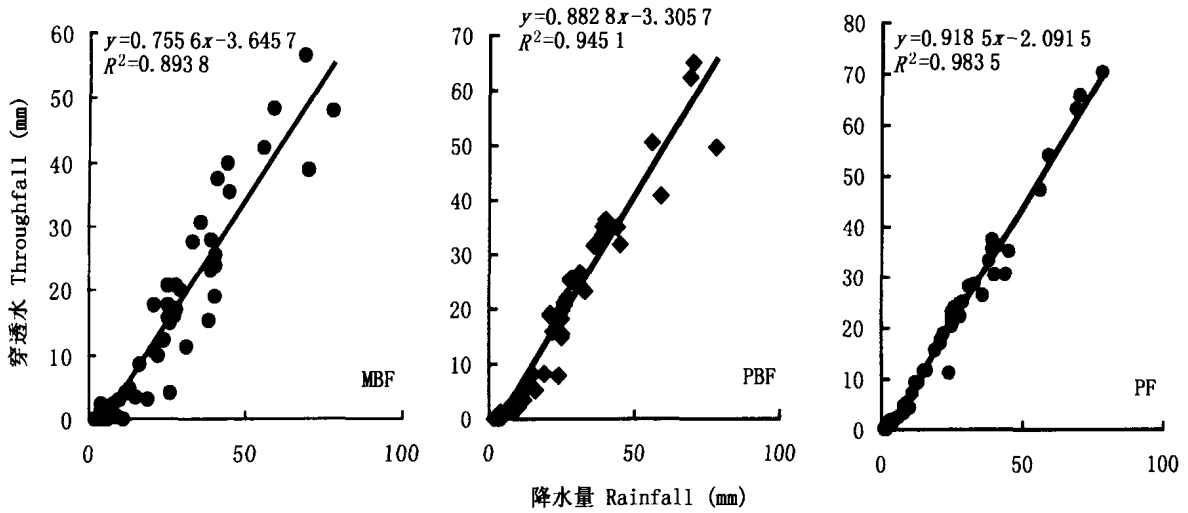


图 8 3 种林型的穿透水和大气降水之间关系

Fig. 8 The relationship between throughfall and rainfall for the three forest types
PF、PBF、MBF:见图 1 See Fig. 1

表 3 3 种林型的叶面积指数和郁闭度
Table 3 Leaf area index and canopy cover of three forest types

林型 Forest types	季风常绿阔叶林 MBF	马尾松针阔混交林 PBF	马尾松针叶林 PF
叶面积指数 Leaf area index	17.76 ±1.2	11.28 ±1.6	6.61 ±2.1
郁闭度 Canopy cover	93 %	86 %	58 %

PF、PBF、MBF:见图 1 See Fig. 1

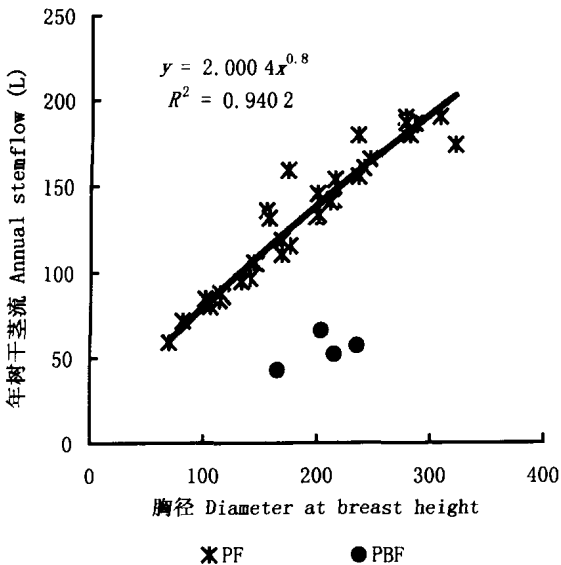


图 9 马尾松针叶林和马尾松针阔混交林内
马尾松年树干茎流量与胸径的关系

Fig. 9 The relationship between annual stem flow and diameter at breast height (DBH) for masson pines (*Pinus massoniana*) growing in PF and PBF
PF、PBF:见图 1 See Fig. 1

植物群落。这也就是从 PF 到 PBF 的演替过程中树干茎流与物种竞争之间的交互作用过程。

PBF 演替为 MBF 的过程中类似的现象也会发生。胸径 6.3 cm 的荷木总的年树干茎流量为 1 382 L,而同一树种胸径 10.4 cm 全年树干茎流量仅为 1 365 L。很明显,荷木在 MBF 中冠形减小所以林冠的截留量和树干茎流量也随之减少,水分和养分的匮乏使它不能够很好适应 MBF 里相对复杂的生境。可以说树干茎流的减少是导致荷木在 PBF 里能生长良好而在 MBF 内却常常死亡的主要原因之一(彭少麟和方伟,1995)。

3.4.3 林冠截留

表 4 显示鼎湖山森林群落自然演替的 3 个类型依照水量平衡的方法计算出的各自的林冠截留率。

表 4 显示了从 PF、PBF 到 MBF 的 3 个演替阶段林冠截留呈增加趋势,这与森林群落结构的演替过程是相一致的。在 3 种林型中 MBF 穿透水占的比例最小而林冠截留量最大,这与 MBF 比较高的郁闭度和持水能力有很大关系。MBF 被认为是亚热带地区林冠截留能力最大的森林群落类型之一(吴厚水等,1998)。MBF 群落调控水的机制使得水的利用效率提高而系统产水量减少,PF 与之刚好相反。

对大气降水的截留和树干茎流。也就导致了马尾松输送到其根系的水分和养分的减少,适合它生长繁殖的小生境不复存在,最后马尾松被逐渐挤出该

表 4 鼎湖山 3 种林型中降水的林内分配状况(1998~2003)

Table 4 Distribution pattern of rainfall by the canopy for three forest types in Dinghushan from 1998 - 2003

林型 Forest types	马尾松针叶林 PF	马尾松阔混交林 PBF	季风常绿阔叶林 MBF
降雨量 Rainfall (%)	100.0	100.0	100.0
穿透水 Throughfall (%)	83.4 ±9.2	68.3 ±8.6	59.9 ±3.5
树干茎流 Stemflow (%)	1.9 ±1.1	6.5 ±1.6	8.3 ±1.1
林冠截留 Interception (%)	14.7 ±9.3	25.2 ±8.7	31.8 ±3.7

PF、PBF、MBF:见图 1 See Fig. 1

图 10 显示 MBF 林冠截留的季节变化动态,截留和降水具同样的季节变化模式。截留量和降水量都在 7 月达到最大值 2 月为最小值。湿季(4~9 月)截留量占全年 66.7%。较高大气降水时的月截留率低于在较小的大气降水情况下的月截流率。图 10 显示 2 月大气降水 28.7 mm 林冠截流率为 83.3%,而在大气降水为 297.8 mm 的 6 月林冠截留率仅为 18.9%。在干季,大部分降水从林冠直接被截留和蒸散掉了,湿润的林冠可减少土壤水分散失。同时,林冠截留的蒸散也减轻了森林土壤表面和大气之间的热量交换,因此,林冠截留对森林生态系统水分的时空分布以及水文学过程都有一定程度的影响,并且这种影响过程是比较复杂的。

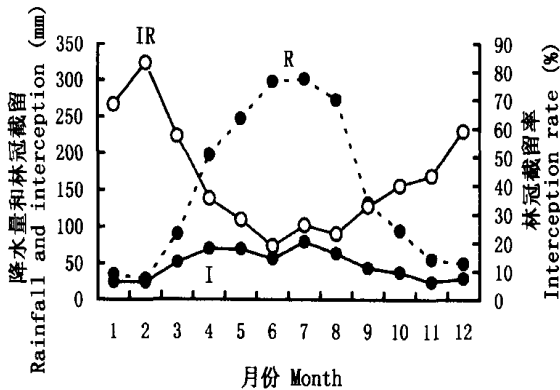


图 10 季风常绿阔叶林降水(R)、截留(I)、截留率(IR)的月变化
Fig. 10 Monthly changes of rainfall (R), interception (I) and interception rate (IR) in MBF

4 结论

鼎湖山自然保护区天然植被长期水文监测的研究结果表明该流域的植被及其结构对产水量的增加具有促进作用,但其调蓄功能仍有一定的限度;东沟集水区在年的时间尺度范围内能保持地下水位的稳定;鼎湖山主要森林生态系统土壤水分处于持续下降状态,这可能预示着由于环境的变迁,系统处于波动或缓慢退化之中,从森林结构来看混交林与地带性植被季风林还存在很大差异,但是二者的土壤含

水量已经非常接近,这一事实表明在鼎湖山自然保护区植物群落的演替滞后于森林生态系统水文学功能的演化发展;森林水文学的几个典型过程中,对群落内种间关系和物种进化产生最直接影响的是树干茎流量的变化,某些情况下树干茎流的大小甚至可以决定一个物种在某群落中是否能继续生存;鼎湖山森林植被自然演替过程中林冠截留的增加深刻改变了生态系统内部的水环境及热量交换关系,这说明某个单一的森林水文学过程在森林群落自然演替过程中所发挥的作用是值得再深入进行研究的。

参考文献

- Aboal JR, Morales D, Hernandez M, Jimenez MS (1999). The measurement and modeling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology*, 221, 161 - 175.
- Bosch JM, Hewlett JD (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3 - 23.
- Carlyle Moses DE, Price AG (1999). An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*, 214, 103 - 110.
- Fang YT (方运霆), Mo JM (莫江明), Zhang QM (张倩媚), Zhang YC (张佑昌), Xu GL (徐国良) (2002). Soil carbon storage and distribution for three types of Forests in Dinghushan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 9, 115 - 124. (in Chinese with English abstract)
- Gash JHC, Morton AJ (1978). An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *Journal of Hydrology*, 38, 49 - 58.
- Haworth K, McPherson GR (1995). Effects of *Quercus emoryi* trees on precipitation distribution and microclimate in a semi-arid savanna. *Journal of Arid Environment*, 31, 153 - 170.
- Helvey JD (1967). Interception by eastern white pine. *Water Resources Research*, 3, 723 - 729.
- Helvey JD, Patric JH (1965). Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. *Water Resources Research*, 1, 193 - 206.
- Levia DF, Frost E (2003). A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*,

- 274, 1 - 29.
- Mo JM (莫江明), Brown S, Kong GH (孔国辉), Lenart M, Zhang YC (张佑昌) (1997). Litter decomposition and its nutrient dynamics of a pine forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 20, 534 - 542. (in Chinese with English abstract)
- Nyholm T, Rasmussen KR, Christensen S (2003). Estimation of stream flow depletion and uncertainty from discharge measurements in a small alluvial stream. *Journal of Hydrology*, 274, 129 - 144.
- Peng SL (彭少麟), Fang W (方炜) (1995). Studies on dynamics of *Castanopsis chinensis* and *Schima superba* population in forest succession of Dinghushan Mountain. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 19, 311 - 318. (in Chinese with English abstract)
- Sarmiento JL, Gruber N (2002). Sinks for anthropogenic carbon. *Physics Today*, 8, 30 - 36.
- Schimel DS, Ciais P, Peylin P (2001). Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414, 169 - 172.
- Swank WT, Douglass JE (1974). Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science*, 185, 857 - 859.
- Tallaksen LM (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165, 349 - 370.
- Wen DZ (温达志), Wei P (魏平), Zhang QM (张倩媚), Kong GH (孔国辉) (1999). Studies on biomass of three lower subtropical evergreen broad-leaved forests in a Mab Reserve of South China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 23 (Suppl.), 11 - 21. (in Chinese with English abstract)
- Wu HS (吴厚水), Liu HP (刘慧屏), Huang DJ (黄大基) (1998). The interception effect of the monsoon evergreen broad-leaved forest on precipitation in Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem* (热带亚热带森林生态系统研究), 8, 146 - 149. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GY, Morris JD, Yan JH, Yu ZY, Peng SL (2002a). Hydrological impacts of reforestation with eucalyptus and indigenous species: a case study in southern China. *Forest Ecology and Management*, 167, 209 - 222.
- Zhou GY, Wei XH, Yan JH (2002b). Impacts of eucalyptus (*Eucalyptus exserta*) plantation on sediment yield in Guangdong province, Southern China — a kinetic energy approach. *CATENA*, 49, 231 - 251.
- Zhou GY (周国逸) (1997). *Principles and Applications of Water and Heat in Ecosystem* (生态系统水热原理及其应用). China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese)

责任编辑: 黄建辉 责任编辑: 刘丽娟