

鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律

闫俊华, 周国逸, 张德强, 王 旭

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要: 运用连续 7a(1993~1999)的水文观测资料,对亚热带顶级生态系统鼎湖山季风常绿阔叶林集水区水文要素时空规律进行分析,得到如下一些主要结论:(1)鼎湖山多年平均降水量为 1910 mm,湿季降水量占年降水量 80%,干季仅占 20%。6 月份的降水量最大,1 月份最小。(2)季风常绿阔叶林冠层截留率为 31.8%,湿季的截留量占全年截留量的 66.7%,截留量最大值和最小值所在的月份分别为 7 和 1 月份。各月的截留率差异很大,截留量大的月份,截留率较低;截留量小的月份,截留率较高。(3)季风常绿阔叶林集水区多年平均总径流量 953.0 mm,总径流系数 49.9%,其中地表径流量为 252.3 mm,地表径流系数 13.2%;地表径流与降水量之间存在二次抛物线型回归关系,与降水强度的关系不大,这说明季风常绿阔叶林的产流形式是蓄满产流。(4)季风常绿阔叶林多年平均蒸散 948.2 mm,占同期降水量的 49.7%;蒸散力 1031.4 mm,年蒸散系数为 0.92,蒸散月变化规律较降水量的月变化规律有所滞后。(5)系统贮水量的月变化很大,2~8 月份,系统处于蓄水阶段;9 月份至翌年 1 月份,系统处于失水阶段。蓄水和失水的最大值分别出现在湿季和干季的第一个月,即 4 月份和 10 月份。(6)集水区多年平均水量总输入 2129.9 mm,实际输入 1910 mm(降水量),其中 219.9 mm 的水量输入是由系统贮水量变化而产生。支出的总水量 2129.9 mm,实际支出 1901.3 mm(径流和蒸散量),其中 228.6 mm 的水量支出是由系统贮水量变化引起的。

关键词: 鼎湖山;顶级森林生态系统;季风常绿阔叶林;集水区;水文要素

Spatial and temporal variations of some hydrological factors in a climax forest ecosystem in the Dinghushan region

YAN Jun-Hua, ZHOU Guo-Yi, ZHANG De-Qiang, WANG Xu (South China Institute of Botany, Academia Sinica, Guangzhou 510650, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2359~2366.

Abstract: Although most parts of landscape are arid or desert in the subtropics in the world, the subtropic region of South China is an exception, where monsoon evergreen broad-leaf forest, the climax forest ecosystem in the region is conserved. Using field measurements from 1993 to 1999, we analyzed the spatial and temporal variations of some hydrological factors in this climax forest ecosystem. Main results are: (1) the average annual precipitation is 1910 mm, of which 80% is from wet seasons and 20% from dry

基金项目: 广东省自然科学基金重点项目(010567);国家基础研究快速反应资助项目(2001CCB00600);中国科学院海外青年合作基金资助项目

收稿日期: 2002-12-18; **修订日期:** 2003-05-04

作者简介: 闫俊华(1973~),男,河南固始人,博士,副研究员,主要从事森林生态系统水文学研究。E-mail: jhyan@scib.ac.cn

Foundation item: The Key Project of Natural Science Foundation of Guangdong Province(No. 010567); The Preliminary Project of the State Key Basic Research (No. 2001CCB00600); the Overseas Talent Chinese Foundation from Chinese Academy of Sciences.

Received date: 2002-12-18; **Accepted date:** 2003-05-04

Biography: YAN Jun-Hua, Ph. D., Associate professor, main research field: forestry hydrology, E-mail: jhyan@scib.ac.cn

seasons. The mean monthly precipitation is highest in June and lowest in January; (2) About 31.8% of rainfall is intercepted. Interception during wet season accounts for 66.7% of annual total. Canopy interception is highest in July and lowest in January. The rate of interception decreases within an increase in the amount of rainfall intercepted in the canopy; (3) the annual runoff is 953.0 mm with a coefficient of variation of 49.9%. The amount of annual surface runoff is 252.3 mm with a coefficient of variation of 13.2%. Variation of annual surface runoff is more closely related to that of annual precipitation than rainfall intensity. (4) Average annual evapotranspiration in the monsoon evergreen broad-leaf forest is 948.2 mm, which amounts to 49.7% of annual precipitation. Annual potential evapotranspiration is 1031.4 mm, and is similar to the amount of actual evapotranspiration. Temporal variation of monthly evapotranspiration lags behind that of monthly precipitation; (5) Monthly change in water storage in the ecosystem is significant. The amount of water stored in the catchment increases between February to August, and decreases during remaining months of a year. The increase in water storage of the catchment is highest in April, and the decrease in water storage is highest in October. (6) The mean annual water input to the catchment is 2129.9 mm, of which 1910 mm is from annual precipitation, and 219.9 mm from a change in the water storage. The mean annual total input of water is approximately equal to its output. The mean outputs are 1901.3 mm through runoff and evapotranspiration, and 228.6 mm from the change of water storage.

Key words: Dinghushan; climax forest ecosystem; monsoon evergreen broad-leaved forest; catchment; hydrological factors

文章编号: 1000-0933(2003)11-2359-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

顶级森林生态系统是地球上结构层次和功能行为最复杂的生态系统,生态系统一般性规律往往并不能刻画此类生态系统响应机理和反馈过程^[1],因此,顶级森林生态系统的功能和过程始终是森林生态学研究的热点问题之一。水文要素的时空规律是反应生态系统极其重要的一类调节功能,也是以水分循环与水量平衡为突出标志研究的最实质的过程与目标所在。本文将以鼎湖山顶级森林生态系统季风常绿阔叶林为样地,研究其水文要素的时空规律。

鼎湖山位于北回归线附近地区,保存着南亚热带地带性顶级森林生态系统^[2],主要归功于本区位于欧亚大陆的东南缘,濒临太平洋和印度洋,海洋上空的潮湿气流易于在本区上空集聚形成浓厚的云层,阻挡了较强的太阳辐射,并带来大量的降水。鼎湖山属于典型的东亚季风气候,其地面太阳辐射并没有显示出显著的纬度地带性规律,有别于同纬度的其它地区,无论是辐射强度还是辐射总量,较同纬度地区小得多^[3]。海洋与大气之间较强的水通量交换,对缓解鼎湖山水热矛盾有着重要意义,对该地区地带性森林的生存发育也起到关键作用^[4]。据已有的研究报道可知,季风常绿阔叶林以其丰富多样的物种、复杂的群落结构以及较高的生物量成为支配本区域水热平衡的主要因素之一^[5]。

1 研究地概况

鼎湖山位于广东省肇庆地区境内,居于北纬 23°10',东经 112°34'。本区大面积是丘陵和低山,海拔在 100~700 m 间,最高峰鸡笼山海拔 1000.3 m。气候属南亚热带季风湿润型气候,冬夏气候交替明显。年平均温度 21℃,最热月在 7 月份,最冷月为 1 月份,极端最高温度为 38℃,极端最低温度为 -2℃。林区多年平均降雨量为 1900 mm,4~9 月份为主要降雨季节,11~翌年 1 月份为少雨季节,年平均蒸发量为 1115 mm,年平均相对湿度为 82%。灾害性天气是寒潮和台风。

集水区建于季风常绿阔叶林样地内,面积 8.8 hm²,平均坡度约为 30°,坡向北 34°东,海拔 250~350 m,林龄约为 400a。该集水区水文规律系统观测历时 7a(1993~1999),为该地区大气降水的 1 个周期^[6],至今已收集了较为系统和完整的水文资料。集水区内设有小气候梯度观测站。该集水区物种丰富,结构复杂,群落垂直结构大致可分为 5 层,包括乔木 3 层,灌木 1 层,草本 1 层。乔木第 1 层植物主要有锥栗

(*Castanopsis chinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、荷木(*Schima superba*)和华润楠(*Machilus chinensis*)等,高度为16~27 m;乔木第2层植物有厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、翅子树(*Pterospermum lanceae-folium*)等,高度为8~15 m;乔木第3层植物有云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)、鼎湖钓樟(*Lindera chinensis*)、水石梓(*Sarcosperma laurinum*)等,高度为3~7 m。灌木层有柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、罗伞树(*Ardisia quinquegona*)等,密度较大,但多为乔木幼树,真正灌木种类不多。草本层有双盖蕨(*Diplazium donianum*)、山姜(*Alpinia chinensis*)等。此外层间植物有附生植物石蒲藤(*Pothos chinensis*)等,木质藤本植物有杖枝省藤(*Calamus rhabdo-cladus*)等。

2 研究方法

2.1 气候和小气候因子

主要采用自动气象站和小气候梯度测定仪进行测定,观测项目包括降水、风速、水汽压、空气相对湿度、蒸发、日照时间和辐射平衡项等。

2.2 径流

采用“小集水区径流场”配合自然分水和人工的封闭技术,把生态系统边界定义在小集水区的边界以内,在自然分水不明显的地方加以人工隔离,人为地将整个集水区径流导入测流堰中,通过测流堰用自记水位计记录径流过程线。地表径流和地下径流是根据分割径流过程线实现的。

2.3 冠层截留

冠层截留用林内水降水平衡法求得:

$$I = P - T - S$$

式中, I 为冠层截留量, T 为穿透水, S 为树干流。穿透水和树干流的收集法已有系统描述^[7]。

2.4 蒸散力和蒸散

蒸散力采用 Penman 蒸散力理论公式来计算,蒸散是运用适于计算林地蒸散的理论公式,该公式的推导过程及其应用已有详细报道^[7]。

3 结果与分析

3.1 大气降水

7a(1993~1999年)的观测结果表明,鼎湖山地区降水量丰富,多年平均降水量为1910 mm,与多年平均降水量接近。降水集中在湿季(4~9月份),约占年降水量的80%;干季(10月至翌年3月份)的降水量仅占年降水量的20%。其季节的分配情况如图1所示,呈单峰型,6月份的降水量最大,值为334 mm;1月份的降水量最小,值为35 mm。

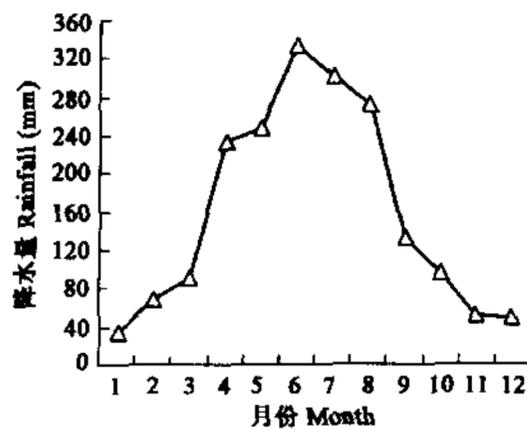


图1 鼎湖山降水量月均分配(1993~1999年)
Fig. 1 Monthly distribution of rainfall in Dinghushan (1993~1999)

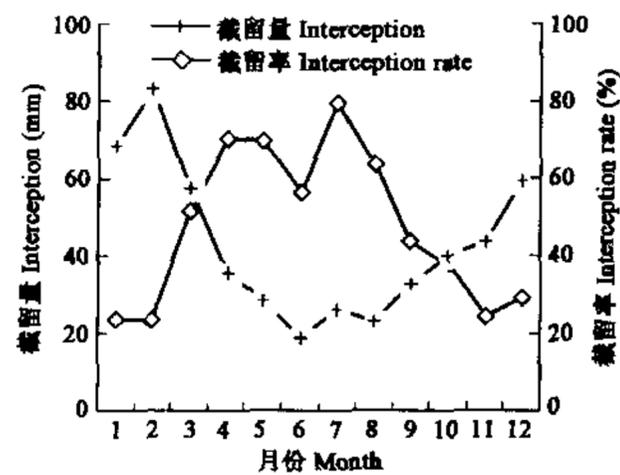


图2 冠层截留量与截留率的月变化(1993~1999年)
Fig. 2 Monthly changes of interception and interception rate(1993~1999)

降雨强度(I)按如下区间进行分级^[7]:小雨($I < 2.5$ mm/h);中雨(2.5 mm/h $\leq I < 8.0$ mm/h);大雨

($8.0 \text{ mm/h} \leq I < 16.0 \text{ mm/h}$);暴雨($I \geq 16.0 \text{ mm/h}$)。研究期间,平均每次降雨强度为 8.3 mm/h 。中雨和大雨带来的降水量较大,分别占总降水量 33% 和 31%。小雨的降雨次数最多,占总降水次数的 39%,但所带来降水量很少,仅占总降水量的 15%。

3.2 冠层截留

1993~1999 年间季风常绿阔叶林的冠层截留率为 31.8%,而 1985~1986 年间季风常绿阔叶林的冠层截留率为 25.5%^[8],1989~1990 年间的冠层截留率为 26.7%^[9];以上的数据反应出季风常绿阔叶林冠层截留率的年际动态呈逐渐增高的趋势。季风常绿阔叶林林分郁闭度大,冠层结构复杂,降水经过多层拦截,从时间上延缓地表径流产生,降低洪峰系数并提高水分利用效率;从空间上改变降水的运动方式,增加或减小雨滴对地面的溅蚀力^[10]。

图 2 显示了季风常绿阔叶林冠层截留量与截留率的季节变化规律,湿季的截留量占全年截留量的 66.7%,截留量最大值和最小值所在的月份分别为 7 月和 1 月。各月的截留率差异很大,干湿季差异明显。截留量大的月份,截留率较低;截留量小的月份,截留率较高。2 月份的降水量虽然只有 28.7 mm ,但冠层截留率达 83.3%,而 6 月的截留率仅为 18.9%。干季期间,冠层截留率较大,截留了大部分的降水量,用于冠层的表面蒸发,减少林地土壤的水分损失,也降低了下垫面与大气间的热量交换强度,可见,冠层截留对林下层水热调节有一定的作用。

表 1 鼎湖山季风常绿阔叶林多年平均径流特征 (1993~1999)

Table 1 Runoff characteristics of monsoon evergreen broad-leaf forest in Dinghushan (1993~1999)

月份 Month	大气降水 Precipitation (mm)	地表径流 Surface runoff (mm)	地下径流 Underground runoff (mm)	总径流 Total runoff (mm)	地表径流系数 Surface runoff coefficient (%)	地下径流系数 Underground runoff coefficient (%)	总径流系数 Total runoff coefficient (%)
1	35	0.0	3.3	3.3	0.0	9.4	9.4
2	69	0.7	5.8	6.5	1.0	8.4	9.4
3	90	1.2	20.1	21.3	1.3	22.3	23.7
4	232	40.3	57.8	98.1	17.4	24.9	42.3
5	247	31.2	62.5	93.7	12.6	25.3	37.9
6	334	78.0	143.9	221.9	23.4	43.1	66.4
7	302	49.4	82.3	131.7	16.4	27.3	43.6
8	273	27.7	105.9	133.6	10.1	38.8	48.9
9	131	9.0	68.6	77.6	6.9	52.4	59.2
10	95	12.6	85.7	98.3	13.3	90.2	103.5
11	52	1.0	36.1	37.1	1.9	69.4	71.3
12	50	1.2	28.7	29.9	2.4	57.4	59.8
Total	1910	252.3	700.7	953.0	13.2	36.7	49.9

3.3 地表径流和地下径流

由表 1 可知,季风常绿阔叶林集水区年总径流量为 953 mm ,总径流系数为 49.9%,其中地表径流量 252.3 mm ,地表径流系数为 13.2%,地下径流量 700.7 mm ,地下径流系数为 36.7%。干季的地表径流量很少,仅占全年径流总量的 6.6%,在降水量最小的 1 月份没有地表径流发生。地表径流系数最大出现在 6 月份,值为 23.4%,这与本月降水量大有关,同时,该月降水相对集中也是影响地表径流系数的重要因子。地表径流季节变化趋势与降水量大体上相似,即降水量大的月份地表径流均较大。

地下径流量与总径流量最大的月份都出现在降水量最大的 6 月份,而最大地下径流系数和总径流系数却出现在干季的 10 月份。可以认为,系统在湿季贮存了大量的水分,到了干季的 10 月份,系统依然有较多的径流流出,而此时降水量急剧减少。10 月份的总径流系数为 103.5%,说明该月的径流量超过了降水量,这是森林生态系统蓄水、贮水功能的有力证据。事实上,整个干季系统均有一定量的径流流出,尽管干季系统收入的降水量很少,说明森林生态系统对径流有一定的调节和滞后作用,尤其对于地下径流。

图 3 和图 4 分别是季风常绿阔叶林集水区每次降水的降水量和降水强度与该次降水所产生的地表径

流之间的相关关系。可以看出,地表径流与降水量之间呈显著二次抛物线型回归关系($r=0.954, n=238, \alpha < 0.01$),这与同处于亚热带的草坡生态系统研究结果一致^[11]。地表径流与降水强度之间的相关点分布异常散乱,看不出有明显的相关关系,说明鼎湖山季风常绿阔叶林集水区的产流形式是蓄满产流。因为蓄满产流主要受降水量的影响,与降水强度的关系不大,而超渗产流则相反^[12]。从区域性产流机制来说,鼎湖山地处湿润地区,土壤通透性良好,下渗率大,土壤剖面变化比较均匀,符合蓄满产生发生的条件。

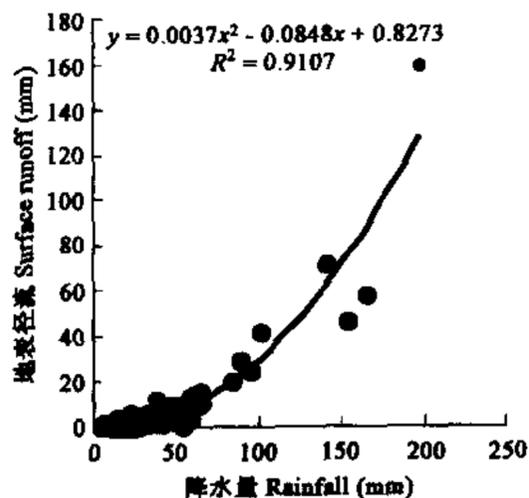


图3 降水量与地表径流(1993~1999年)

Fig. 3 Relationship between surface runoff and precipitation (1993~1999)

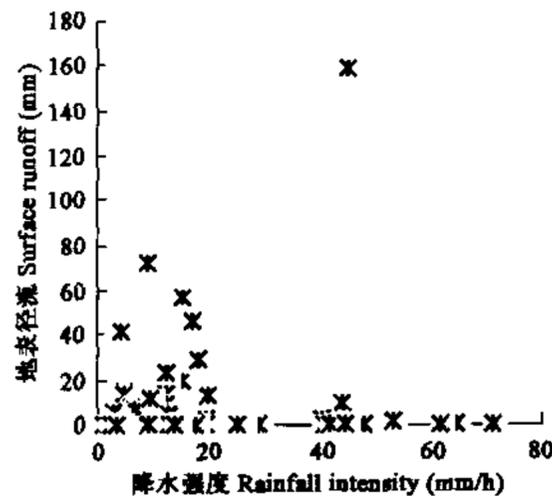


图4 降水强度与地表径流(1993~1999年)

Fig. 4 Relationship between surface runoff and rainfall intensity (1993~1999)

3.4 蒸散力和蒸散

7a 计算数据得出,季风常绿阔叶林年均蒸散力为 1031.4 mm,平均相对变差 δ/X (δ 为不同年份间蒸散力的标准差; X 为年均蒸散力)为 0.001,远远小于降水量的平均相对变差($\delta/X=0.172$),也就是说蒸散力的年际变化不明显,尽管年降水量的差异较大。图 5 是鼎湖山季风常绿阔叶林蒸散力的月变化规律。蒸散力最大的月份是 7 月份,为 141.1 mm;蒸散力最小的月份是 2 月份,为 39.4 mm,这与近地面层的气温变化规律相吻合,也就是说近地面层的气温变化对蒸散力的影响较为显著。

运用上述计算蒸散的方法得出季风常绿阔叶林的蒸散为 948.2 mm,略低于蒸散力,占同期降水量的 49.7%。图 6 是季风常绿阔叶林蒸散与降水量月变化的关系。可以看出,蒸散最大值和最小值分别出现在 7 月份和 2 月份,而降雨量最大和最小值却出现在 6 月份和 1 月份,可见,二者极值出现的月份并不同步,蒸散较降水量的月变化有所延迟。形成这种滞后的现象是气候因子和系统水文生态功能共同作用的结果。6 月份降水量虽然最多,但其热量条件较 7 月份差,研究期间,7 月份的日照时间平均为 182.3 h,而 6 月份的日照时间平均为 144.7 h;同时,季风常绿阔叶林有较好的保水和贮水功能,6 月份较多的降水量并没有过多流失,到了 7 月份,既有足够的水分供其蒸散,又有充分的热量促其蒸散,因而蒸散在此月达到最大。由于 2 月份的气温较 1 月份低,日照时间平均为 79.3 h,而 1 月份平均为 98.5 h,因此,蒸散的最小值出现在 2 月份而不是出现在降水量最小的 1 月份。上述的分析可知,对季风常绿阔叶林来说,热量因子对蒸散的影响强于水分因子。

降水量与蒸散力之比或差常用作干湿指标,但此指标存在一定的缺陷^[7,13],用来分析小尺度生态系统的干湿状况更不适合。选用蒸散与蒸散力的比值能比较真实反映生态系统的干湿状况,定义这一比值为蒸散系数(C_e)。由于生态系统的蒸散不可能为负值,也不可能大于蒸散力,因此, $C_e \in [0,1]$ 。当 $C_e=0$ 时,表明系统绝对干燥,此时系统既没有蒸发,也没有蒸腾;当 $C_e=1$ 时,表明系统充分湿润,此时系统的蒸散等于蒸散力。由蒸散力(下垫面足够湿润条件下,水分保持充分供应时,由本地区的能量潜力所决定的生态系统水分以汽态形式输出的最大量)定义可以看出,蒸散力大小取决于系统的热力条件;而蒸散反映的是系统水分以汽态形式输出的实际量,取决于系统的水分状况。蒸散系数有机地把系统的热力条件和水分状况结合起来,具有一定的物理意义,又是一个无量纲的量,便于不同区域的比较,应用前景相当广阔。事实上,在

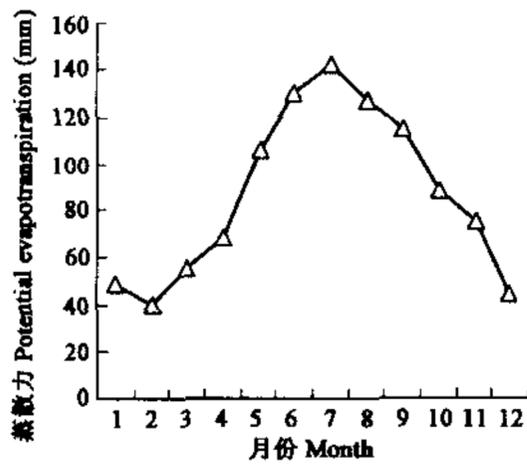


图5 蒸散力的月分配(1993~1999年)

Fig. 5 Monthly distribution of potential evapotranspiration (1993~1999)

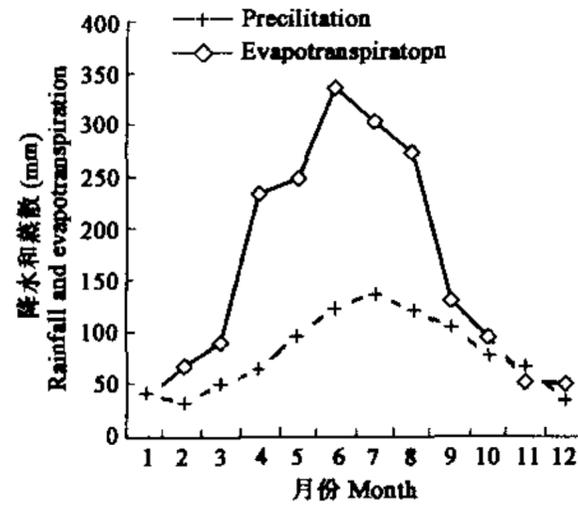


图6 降水和蒸散的月分配(1993~1999年)

Fig. 6 Monthly distribution of rainfall and evapotranspiration(1993~1999)

本文提出和讨论这一概念以前,这一比值已得到不同学科的引用,并把它称之为湿润指数、水热环境量度指标、估算气候生产潜力的水分订正函数等。季风常绿阔叶林的年蒸散系数为 0.92,月蒸散系数变化也不显著,平均相对变差为 0.066,说明该系统保水、贮水功能较好,使系统处于相当稳定的湿润状态。

3.5 系统贮水量变化特征

系统贮水量变化取决于系统的结构和性质,对于相对稳定的系统来说,多年(一般指的是 1 个降水周期)的系统贮水量变化可视为零。季风常绿阔叶林作为地带性顶级生态系统,已有 400 多年的历史^[2],冠层结构和土壤性质相对稳定,7a(1 个降水周期)的系统贮水量变化只有 8.7 mm,与年降水量相比,其量微小,属于系统误差之范围。但是,系统贮水量的月变化很大(如表 2)。2~8 月份,系统贮水量变化基本上为正值,说明系统处于蓄水阶段;9 至翌年 1 月份,系统贮水量变化为负值,说明系统处于失水阶段。与干湿季相

表 2 季风常绿阔叶林系统水量月变化和水量平衡(1993~1999 年)

Table 2 System water change and water balance in monsoon evergreen broad-leaved forest(1993~1999)

月份 Month	降水量 Precipitation (mm)	总径流量 Total runoff (mm)	蒸散量 Evapotranspiration (mm)	系统水量变化 System water change(mm)	水分输入 Water input (mm)	系统水分输出 Water output (mm)	输入与输出 比 Output/ Input (%)
1	35	3.3	40.5	-8.8	35+8.8	3.3+40.5	100
2	69	6.5	31.9	30.6	69	6.5+31.9+30.6	100
3	90	21.3	49.8	18.9	90	21.3+49.8+18.9	100
4	232	98.1	62.7	71.2	232	98.1+62.7+71.2	100
5	247	93.7	98.4	54.9	247	93.7+98.4+54.9	100
6	334	221.9	123.6	-11.5	334+11.5	221.9+123.6	100
7	302	131.7	137.8	32.5	302	131.7+137.8+32.5	100
8	273	133.6	118.9	20.5	273	133.6+118.9+20.5	100
9	131	77.6	105.3	-51.9	131+51.9	77.6+105.3	100
10	95	98.3	78.4	-81.7	95+81.7	98.3+78.4	100
11	52	37.1	66.2	-51.3	52+51.3	37.1+66.2	100
12	50	29.9	34.8	-14.7	50+14.7	29.9+34.8	100
Total	1910	953.0	948.3	8.7	2129.9	2129.9	100

比,系统的失水、蓄水并非与干、湿季完全一致,这也是系统调节和实现水文生态功能的体现。值得一提的是蓄水和失水的最大值分别出现在湿季和干季的第 1 个月,即 4 和 10 月份。到了 4 月份,降水量虽然急剧增加,而降水相对均匀,大雨、暴雨并不多见,径流量以地下径流为主,由于地下径流较降水量有所滞后,所



以水分没有过多的以径流形式流出系统,同时,此间温度回升较慢,系统的蒸散能力不强,因此,系统蓄水显著增加;到了10月份,降水量迅速减少,由于系统对地下径流延缓作用使径流量保持在一定的水平,这一点由表1也可看出,此间的温度也没有大幅度下降,蒸散能力依然不弱,导致了系统出现明显失水的现象。

4 结语与讨论

季风常绿阔叶林集水区地形完整,没有地下水渗入,降水是水量平衡唯一的水分来源,降水的季节分配极不均匀对其产生不利的影响^[6]。但复杂的结构层次,改变了降水的空间运动方式和地表径流的时间分配格局,有效防止水土流失并提高水分利用效率,同时,植被层的贮水对缓解干季的缺水有着重要的意义。

季风常绿阔叶林集水区的总径流量占降水量一半,但地表径流量并不大,尽管集水区的降水以大中雨占绝大部分,说明林地的土壤通透性良好,下渗率大,为区域产流形式是是蓄满产流提供了有力证据。季风常绿阔叶林的蒸散为948.2 mm,略低于蒸散力。这是多因素综合作用的结果,如丰富的年降水量,高大茂盛的森林,较多的截留量,比较丰富的土壤含水量等,加上树木的根系发达,主根较深,森林蒸腾几乎不受土壤表层水分限制,因此,其蒸散基本上与蒸散力相当。

从水量平衡去分析,支出项是径流和蒸散,如果不考虑系统贮水量变化,集水区各月收入的降水量与集水区支出的径流和蒸散量并没有达到平衡,仅仅反映了各月进入和输出集水区的水量,对于剩余水量的去向和超支水量的来源难以理解。因此,对于多年水量平衡来说,系统贮水量的变化可以视为零,但对于年内或短期的水量平衡,系统贮水量的变化这一项决不可忽略。系统水分收支中的滞后性和可变性都是通过系统贮水量的变化来实现的,它既可作为输入项又可作为支出项。当系统贮水量变化为负值时,其水量消耗在支出上,是支出水分的一种来源,作为输入项(如表2);相反,当系统贮水量变化为正值时,它作为支出项(如表2)。正是由于系统贮水量作为水分输入和支出的变化,使得系统的水分处于动态的平衡之中。

表2可以看出集水区年平均水量总输入2129.9 mm,实际输入1910 mm(降水量),其中219.9 mm由系统贮水量变化而产生。支出的总水量2129.9 mm,实际支出1901.3 mm(径流和蒸散量),其中228.6 mm由系统贮水量变化引起的。

References:

- [1] Mackenzie A, Ball A S, Virde S R. Instant notes in ecology. BIOS Scientific Publishers Limited, 1998. 201~207.
- [2] Peng S L, Wang B S. Forest succession at Dinghushan, Guangdong, China. *Chinese J. Bot.*, 1995, 7(1): 75~80.
- [3] Yan J H, Zhou G Y, Meng Z. Solar radiation environment in Dinghushan Biosphere Reserve I. Solar radiation on the ground surface. *Tropic and Subtropic Forest Ecosystem*, 2002, 9:108~114.
- [4] Yan J H, Zhou G Y. Solar Radiation Environment in Dinghushan Biosphere Reserve I. Solar Radiation on Atmospheric Layer. *Tropic and Subtropic Forest Ecosystem*, 2002, 9:102~107.
- [5] Wu H S. The situation of hydro-thermal condition and its relationship with the ecological environments in Dinghushan biosphere reserve. *Trop. Geo.*, 1982, 4: 14~20.
- [6] Zhou G Y, Yan J H. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2002~2012.
- [7] Zhou G Y. The hydro-thermal theories and their applications of ecosystem. Beijing: Meteorological Press, 1997. 173~193.
- [8] Wu H S, Liu H P, Huan D J. The interception effect of the monsoon evergreen broad-leaved forest on precipitation in Dinghushan Biosphere reserve. *Tropic and Subtropic Forest Ecosystem*, 1998, (8): 146~149.
- [9] Huang Z L, Ding M M, Zhang Z P, et al. The hydrological and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Acta Phytocologic Sinica*, 1994, 18(2): 194~199.

- [10] Zhou G Y, Wei X H, Yan J H. Impacts of Eucalyptus (*Eucalyptus exserta*) Plantation on Soil Erosion in Guangdong Province, Southern China--- A Kinetic Energy Approach. *CATENA*, 2002, **49**: 231~251.
- [11] Shen W J, Peng S L, Zhou G Y, *et al.* Hydrological properties and water balance of grassland ecosystem in Heshan hill region. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, **24**(2): 162~168.
- [12] Ma X H. *Forest hydrology*. Beijing: Chinese forest press, 1993. 176~188.
- [13] Zhou G S, Zhang X S. Study on Chinese climate-vegetation relationship. *Acta Phytoecologic Sinica*, 1996, **20**(2): 114~119.

参考文献:

- [3] 闫俊华, 周国逸, 孟泽. 鼎湖山自然保护区太阳辐射环境 I. 地面太阳辐射. 热带亚热带森林生态系统研究, 2002, **9**: 108~114.
- [4] 闫俊华, 周国逸. 鼎湖山自然保护区太阳辐射 I. 大气上界太阳辐射. 热带亚热带森林生态系统研究, 2002, **9**: 102~107.
- [5] 吴厚水. 鼎湖山自然保护区水热状况及其与生态环境的关系. 热带地理研究, 1982, **4**: 14~20.
- [6] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响. 生态学报, 2001, **21**(12): 2002~2012.
- [7] 周国逸. 生态系统水热原理与应用. 北京: 气象出版社, 1997. 173~193.
- [8] 吴厚水, 刘慧屏, 黄大基. 鼎湖山自然保护区季风常绿阔叶林对降水截留的影响. 热带亚热带森林生态系统研究, 1998, (8): 146~149.
- [9] 黄忠良, 丁明懋, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态. 植物生态学报, 1994, **18**(2): 194~199.
- [11] 申卫军, 彭少麟, 周国逸, 等. 鹤山草坡生态系统水文特征和水量平衡. 植物生态学报, 2000, **24**(2): 162~168.
- [12] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993. 176~188.
- [13] 周广胜, 张新时. 中国气候-植被关系研究. 植物生态学报, 1996, **20**(2): 114~119.