

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

周国逸, 闫俊华*

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要:通过对鼎湖山区域大气降水特征及降水的物质元素输入的观测分析,得到如下一些主要结果:①本区域年内降水分配不均,而热量输入却相对均匀,使整个区域湿季水土流失和干季水分亏欠的可能性加大。区域内的对比研究发现,无论从降水的季节差异,全年的暴雨降水量,多年的降水变率等方面,鼎湖山都比鹤山偏小,这对鼎湖山森林景观的形成起到了重要的作用。②该区的年降水量主要是湿季降水量存在着显著的 7a 周期性振荡现象。③大气降水中氮的含量偏高,浓度为 $1.92\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总含 N 量为 $38.4\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;而钠、镁的含量偏低,浓度分别为 $0.105\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.061\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总含量分别为 $2.10\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.22\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。年内降水的集中使得生态系统的养分输入主要在湿季,与高温多雨处于同一时期,有利于森林植被的形成和森林生态系统生产力的提高。从水热角度出发,鼎湖山地带性森林的存在不仅是季风气候的结果,和同区域的其它地方相比,也是这里的降水季节性差异,降水变率和暴雨降水量较小的结果;根据区域性水热特性的分析,认为,鼎湖山地带性森林是一个非常脆弱的生态系统。

关键词:鼎湖山;区域;大气降水;养分;脆弱生态系统

The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems

ZHOU Guo-Yi, YAN Jun-Hua* (South China Institute of Botany, CAS, Guangzhou 510650, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2002~2012.

Abstract: The region near tropic of cancer is dominated by semi-desert or desert. Dinghushan, being at $23^{\circ}10' \text{N}$, $112^{\circ}34' \text{E}$, is located in the region, but is covered by regional monsoon evergreen broad-leaved vegetation. This is undoubtedly resulted from the large rainfall due to monsoon climate, but other facts may complicate this explanation. Some regions near Dinghushan, desertification is unavoidable if the degraded ecosystem is not restored timely. For those kinds of degraded ecosystems, high rainfall will accelerate degradation. This study will examine the characteristics of rainfall, mineral input and their influences on the existence and development of forest ecosystems, and identify the major causes for formation of its typical vegetation.

34 years' rainfall data for the periods 1959 to 1965 and 1973 to 1999 were checked for accuracy using double cumulative rainfall curves with data from Gaoyao and Zhaoqing meteorological observatories as reference. The regression analysis was used to estimate the missing rainfall data of Dinghushan for the periods of 1956 to 1958 and 1966 to 1972.

Two rainfall samples over the canopy of forest were taken monthly between 1998 and 1999. Concentrations of ammonia and nitrate were measured using Miniaturized Kjeldahl and Phenoldisulphonic Acid methods respectively, content of phosphorus was measured using Molybdenum Blue method, and

基金项目:本项目是国家基金 39700112, 39928007 项目和中日合作 990283 项目的内容,也得到 CERN 运动费资助。

* 通讯联系人 Author for correspondence

收稿日期:2000-05-14; **修订日期:**2001-04-10

作者简介:周国逸(1963~),男,湖南衡阳人,博士,研究员,主要从事生态系统生态学研究。

these of potassium, sodium and magnesium were measured using atomic absorption (model Zee man 180-80).

More than 80% of annual rainfall falls in wet season (April to September), over which the air temperature is high, and that period coincides with active plant growth. The combination of water and heat inputs influences the development and restoration of ecosystems in this way: (1) Heavy rain in wet season often results in soil erosion and nutrient loss. Sufficient heat input in dry season will loose the washed surface soil, which makes it easy to be flushed in next wet season; and (2) Because of moderate solar radiation input in dry season, the plant growth potential still keeps high and demands for moderate water, but less rainfall in the season can not meet the need, which are detrimental to the recovery of vegetation.

The mean rainfall intensity was $8.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ during 1993 to 1997. The medium and heavy rainfall accounts for over 30% of annual rainfall. Low intensity rainfall is much more frequent, but only accounts for 15.3% of the total. As compared with that in Heshan located in the same subtropical zone, the Dinghushan rainfall from the heavy rain and its frequency are much less. Yearly rainfall variability in Dinghushan over many years is 9.3%, much lower than 20% for the regions in the south of Yangtze River. Those results support the assertion that the rainfall and its distribution here have made the vegetation in Dinghushan to recover more easily than that in other regions of the similar latitudinal zones.

Over the period of 1956 to 1999, there were 228 storm events with a mean of 5.3 times per year in Dinghushan. About 86.4% of storm rainfall occurred in the wet season, and only 13.6% in the dry season (October to March). There were occasional storms in November, December and January since 80's, which may relate to global climate change, and is worth further study.

Over the period of 1956 to 1999, there were 132 typhoons. Typhoon usually occurred between May and November. Using the decadal statistics, we found that the highest number of hurricanes occurred in September in 1950's, August in the 1960's and 1970's, July in 1980's and August and September in 1990's.

Following formulae is for autocorrelation analysis:

$$C_D = \frac{1}{N-D} \sum_{i=1}^{N-D} (x_i - \bar{x})(x_{i+D} - \bar{x})$$

In the above equation, C_D is the covariance of the rainfall-time series, x_i is the rainfall at time, i , N is the length of the time series; D has a value of $0, 1, 2, \dots, m (m \leq N)$; $\bar{x}$ is the mean of x_i . The autocorrelation coefficient is equal to the ratio of C_D and C_0 .

The first peak in the auto-covariance function was 7a and the second one was 11a for the rainfall time series in Dinghushan. Global climate oscillation also has a peak period of 7a, and 11a to 13a, which is consistent with rainfall periodical behavior here.

The N content was $1.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in rainfall, and the annual total N input through rainfall was $38.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which originates mainly from decomposition of organic matter and lightning.

The P content was $0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with no much change between different rains, and the annual total P input through rainfall was $0.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

The concentration of K was $0.173 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and annual total K input from rainfall was $3.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, very close to the annual K input of $3.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in Heshan, and lower than the reported K input from rainfall in other parts of China.

The content of Ca was $0.672 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and annual total input from rainfall was $13.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

The Na content was $0.105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and annual total input from rainfall was $2.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which was lower than that in Heshan.

The concentration of Mg was $0.061 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and annual total input from rainfall was $1.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which was lower than that in Hong Kong and Heshan.

The contents of N, P and K in the dry season were higher than those in the wet season, which were totally different from those of Na and Mg. There was no much monthly change for Ca content in rain. However, due to the great variations in rainfall between dry and wet seasons, the total input of minerals was mainly from April to September.

The monsoon climate brings about abundant rainfall to Dinghushan ecosystems, but also results in unevenly distribution of the monthly rainfall within a year. Under the condition of evenly distributed and monthly rich solar radiation, if an ecosystem can reduce the water demand in dry season and increase its water store in wet season, its productivity potential will be high, such as the monsoon evergreen broad-leaved forest. On the contrary, degraded ecosystems in this region do not have the ability of adjustment, tend to go on degradation and are hard to be restored.

Compared with the surrounding areas, rainfall in Dinghushan is usually higher and the seasonal distribution tends to be uniform. These characteristics can alleviate the problem of drought, flooding and soil erosion, which is very beneficial to the development of vegetation and biodiversity of the region.

The rainfall periodicity is about 7a in Dinghushan, which is consistent with the findings by some other researchers, and may also be influenced by El Nino.

The total input of nutrients is mainly from April to September and controlled by rainfall.

Key words: atmospheric precipitation; element input; influence; existence and development; forest ecosystem

文章编号: 1000-0933(2004)12-2002-11 中图分类号: Q148 文献标识码: A

北回归线附近由于受副热带高压控制, 大多高温少雨, 主要分布着热荒漠植被。鼎湖山居于北纬 $23^{\circ}10'$, 东经 $112^{\circ}34'$, 也属于北回归线附近地区, 却生长着针阔叶混交林以及地带性森林季风常绿阔叶林, 这无疑主要归功于本区位于欧亚大陆的东南缘, 并受南亚热带季风气候的影响, 海洋上空的潮湿气流易于在本区上空集聚而带来大量降水。但问题可能并不如此简单, 事实上, 与鼎湖山一样同属于南亚热带季风气候的邻近地区很多退化土地如果不进行人工恢复, 则荒漠化现象是不可避免的^[1]; 对于这些退化土地, 南亚热带季风气候所带来的降水季节差异, 不但对退化生态系统的恢复无益, 反而可能加剧水土流失和生境的严酷^[2]。本研究对鼎湖山大气降水特征及物质元素输入与该区森林植被存在和发育的关系进行初步探讨, 以期阐明该区森林植被景观形成的缘由。

鼎湖山所在区域属南亚热带季风湿润型气候, 大气降水的特征深受季风的支配。由于影响降水因子的复杂性和随机性, 造成降水的异常变化, 而降水的异常则是导致旱涝灾害的主要原因^[3]。因此, 对多年的大气降水特征进行分析, 找出其变化规律, 有利于防旱防涝以及提高水分利用效率, 同时, 水分和其中的养分彼此或二者结合在一起, 对系统的稳定性、连续性以及生物的生产力影响极大^[4]。

1 降水资料及处理

由于点样数据常常受到地面降水的极端局部变化和微量变化的影响而带有相当大的不确定性, 因此, 来自标准气象观测站的降水原始数据首先要经过标准的验证, 取自 1959~1965 年和 1973~1999 年共 31a 的鼎湖山大气降水资料, 并对其进行准确性检验, 检验的手段是通过双累积曲线^[5]。双累积曲线检验方法中的参照资料来自鼎湖山附近的高要气象站和肇庆气象站。一般情况下, 邻近各站的月总降水量和年总降水量之间存在明显的正相关, 这种相关程度随两站间水平和垂直距离的减小而增加。由于高要气象站的水平距离和海拔高度与鼎湖站都比较接近, 利用两站 1959~1965 年和 1973~1999 年月总降水量数据进行回归, 相关系数均较高, 达极显著相关的检验水平 ($P < 0.001$)。因此, 在分析大气降水特征时, 本文用高要站的大气降水资料推求了鼎湖山 1956~1958 年和 1966~1972 年缺少的月降水数据。1956~1958 年和 1966~1972 年的暴雨和台风雨资料来自于肇庆市气象局的统计。

2 降水养分分析方法

对鼎湖山 1998~1999 年 2a 间各月的大气降水采样 2 次(其中 1998 年 12 月只有 1 次降水,1999 年 2 月无降水),保存于聚乙烯瓶内,采集点设在季风常绿阔叶林永久样地中的铁塔上,位于林冠的上方。氨态氮和硝态氮分别用半微量直接蒸馏法和酚二磺酸比色法测定,磷用钼蓝比色法测定,钾、钠、钙、镁用 Zeeman180-80 型原子吸收光度计测定。养分含量是将测定的养分浓度和雨量换算成统一单位相乘而得。

3 结果与分析

3.1 大气降水分配

大气降水是陆地上水分的主要来源,其特征不仅决定了自然界物种和植被的形成与分布,同时对人类社会的生产和生活产生重要影响。鼎湖山地区多年平均降水量为 1997.4mm,年降水量最大为 2504.0mm(1972 年),最小为 1374.2mm(1963 年)。年内 6 月份的降水量最大,达 313.6mm;2 月份最小,仅为 32mm。4~9 月份的降水占年降水量的 80%以上,这一时期的气温较高(见图 1),正是植物的生长季节,充沛的雨水资源有利于生物量的积累。年内各月降水量的差异很大,月降水最大值为 1989 年 5 月,达 753.7mm,最小值为零。从各月降水量占年降水量的百分比可以看出,鼎湖山地区年内降水分配不均,但年内的热量输入相对平均,年内相对标准差分别为 5.81 和 3.51(见图 2)。

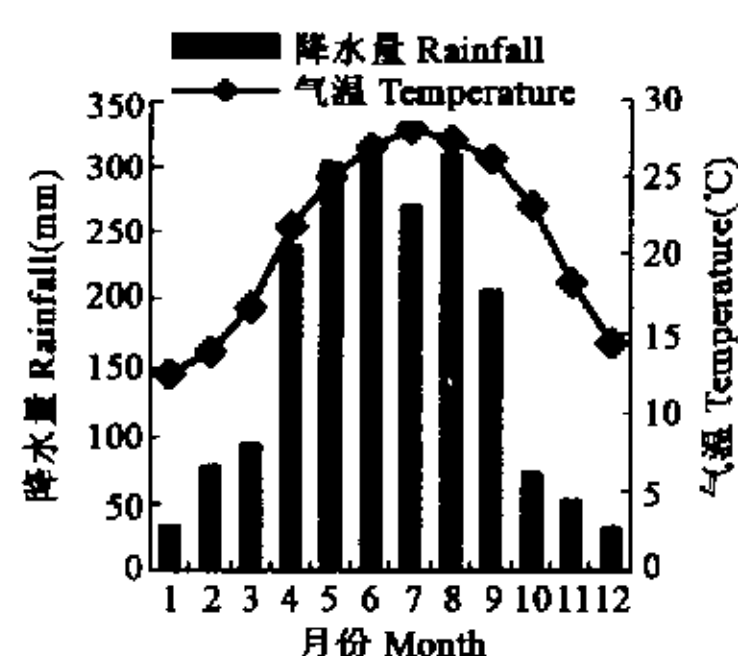


图 1 鼎湖山降水量与气温的月变化

Fig. 1 The monthly changes of rainfall and temperature at Dinghushan

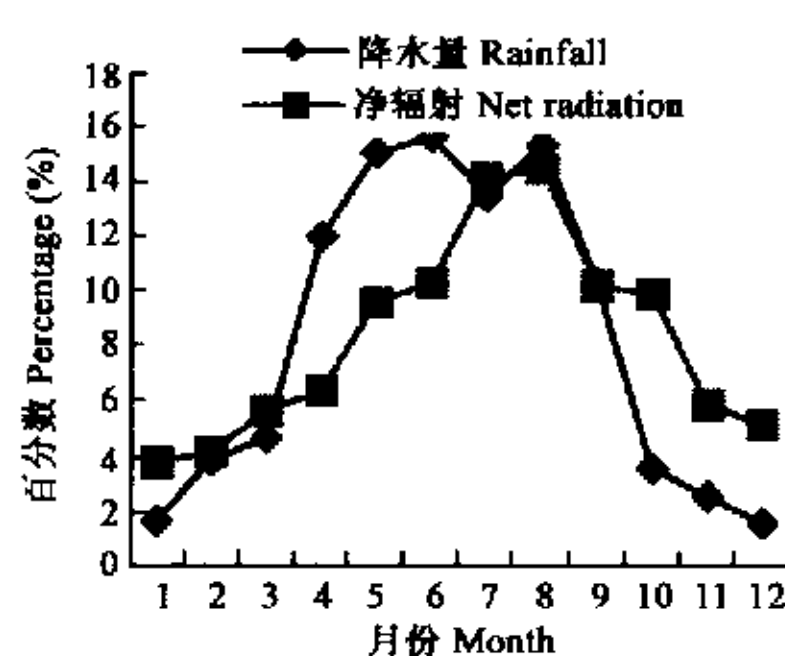


图 2 鼎湖山降水量与净辐射的月分配

Fig. 2 The monthly distributions of rainfall and net radiation at Dinghushan

这样的水热组合对区域生态系统的保育和恢复的影响表现在 3 个方面:(1)降水的过分集中所产生较大的地表径流易冲刷地表,同时,干季足够的热量输入,对地表起着疏松作用,减少了土壤的蓄墒保墒能力,有助于加大湿季的水土流失。(2)湿季的降水经常造成洪水泛滥,使生态系统中的营养物质大量输出,干季的足够热量输入和水分匮乏给生态系统的植被恢复造成严酷的生境。(3)对于植物生长来说,由于干季的热量输入适度,植物生长具有旺盛的生长潜力,需要较多的水分供应,从而使干季的水分供应更加紧张。由此看出,季风气候给本区只是带来了降水总量,也就是水分供应的潜力,而各个月份分配是极不均匀的,如果生态系统能很好地调节这些水分,使其在系统内部的季节性差异上趋于均匀,则系统的生产力潜力将会很高,发育很好的生态系统,鼎湖山的季风常绿阔叶林;与此相比,退化生态系统则不具备,如上 3 个方面的影响是存在的。

3.2 降水强度与降水变率

鼎湖山 1993~1999 年 7a 间的每次降雨强度平均为 $8.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,各级雨强所占降水量和降雨次数的百分比由表 1 列出。鼎湖山由中雨和大雨带来的降水量偏大,其降水量均占 30%以上。小雨的降雨次数最多,占 39.1%,但所带来的降水量很少,只有 15.3%。与同属于南亚热带的鹤山相比^[9],鼎湖山暴雨所占降水量和降雨次数的百分比都远远小于鹤山,其原因可能是由于鹤山临近海洋,受海陆位置影响较大的缘故。这个结果从区域降水特性的角度支持了鼎湖山较同纬度的其它地区有利于植被恢复和地带性森林存

在的结论。

表 1 各级雨强所占降雨量和降雨次数的百分比(%) (1993~1999)

Table 1 Percentages of all levels precipitation intensity to annual rainfall and rain times

雨强级别 Rainfall intensity	小雨	中雨	大雨	暴雨
	Light rain	Medium rain	Heavy rain	Torrential rain
	$I^* < 2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq I < 8.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$8.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq I < 16.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$I \geq 16.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$
占年降水量的百分比 Percentages to annual rainfall (%)	15.3	32.4	30.7	21.6
占年降雨次数的百分比 Percentages to annual rain times (%)	39.1	28.2	23.2	9.5

* Intensity

降水变率用以表征某一地区降水的变化程度。降水变率小,说明降水稳定且趋于平均,水资源利用价值高,也利于植被生态系统的发育和生存;降水变率大,表明降水不稳定且分配不均,反映了该区的旱涝程度较高,水土流失的潜在危险大。长江以南的降水变率在 20% 左右^[10],而鼎湖山地区多年的平均降水变率为 9.3%,较长江以南的降水变率小得多,这个结果意味着,在鼎湖山地区,由于地形的影响和森林植被的存在,一方面引起降水量的增加,年降雨量比临近高要站高出 309.8mm (1975~1986 年) 和 217.6mm (1993~1995 年)^[11];另一方面使年际之间的降水趋于平均,在一定程度上缓解了该地区的旱涝灾害和水土流失,更利于植被的发育与生物多样性的维持。

鼎湖山被森林植被覆盖,与世界同纬度地区的热荒漠景观有所差异,季风和台风所带来充沛的雨水是该区形成森林景观的主要原因之一,但是,各级雨强的分配及其降水变率的特征对鼎湖山森林格局的形成起了非常重要的作用。由于雨强与地表径流系数有显著的相关性^[4],结果导致鼎湖山地区地表径流系数小,雨滴对土壤的冲击力弱,有利于水土保持,增加系统的有效水分,避免系统养分的流失,促进森林的发育和成长。降水变率小,说明系统有较为稳定的水资源供应,有利于保持系统的中生环境,防止大旱大涝导致的森林生态系统的退化和消亡。

3.3 暴雨与台风雨

鼎湖山 1956~1999 年 44a 中,发生暴雨共 228 次,平均每年 5.3 次,年变化幅度较大,最多年份 12 次 (1965 年),最少 1 次 (1968 年,1990 年)。湿季 (4~9 月份) 发生的暴雨次数占总数的 86.4%,干季 (10~3 月份) 仅占 13.6%,80 年代以后,11、12 和 1 月份也出现过暴雨,这可能与全球的气候变化有关,但需要进一步的探讨。

鼎湖山是受台风影响的地区,当台风入侵,由台风带来的狂风暴雨,常常造成该地区的风灾和涝害,从气候角度看,台风又是鼎湖山地区夏、秋的主要降水天气系统。1956~1999 年 44a 中,入侵鼎湖山的台风雨共 132 次,平均每年 3.1 次,最多年份 7 次 (1964 年)。台风雨入侵集中在每年的 5~11 月从,如果分年代进行统计分析,得出盛行月份随年代变化而变更,20 世纪 50 年代是 9 月份,60~70 年代是 8 月从,80 年代是 7 月从,90 年代的 8、9 月从都比较盛行。

从暴雨量、台风雨量与年降水量的相关关系可以看出 (见图 3、4),暴雨量和台风雨量的大小并没有对年降水量产生很大影响。暴雨量与年降水量二者之间的直线回归方程为 $Y = 1.0886X + 1501$,相关系数仅为 0.65;台风雨量与年降水量之间相关点分布异常散乱,看不出有明显的相关关系。这可能是因为它们有各自的变化规律和周期,或者说,它们的变化规律不同步。

3.4 大气降水周期

大气降水的周期可采用自相关^[12]、功率谱^[13]和最大熵谱^[14]等方法进行分析。本文应用的是自相关分析方法,按下式计算:

$$C_D = \frac{1}{N-D} \sum_{i=1}^{N-D} (x_i - \bar{x})(x_{i+D} - \bar{x})$$

式中, C_D 为降水序列自协方差; x_t 为降水时间序列; N 为降水时间序列长度; D 取 $0, 1, 2, \dots, m (m < N)$; $\bar{x}$ 为降水序列 x_t 的平均数。则自相关系数 R_D 就等于 C_D 与 C_0 的比值。根据鼎湖山所在区域的气候特征, 把降水量分成 5 个方面进行分析, 计算结果如表 2。

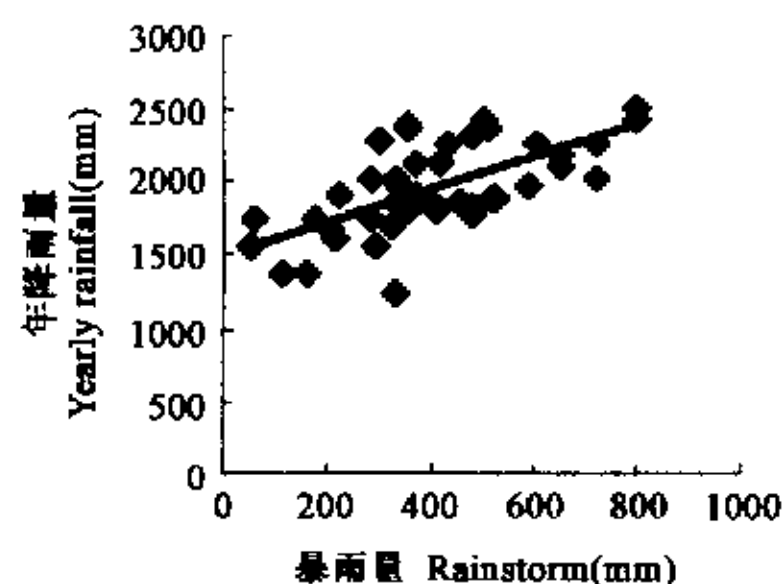


图 3 鼎湖山暴雨量与年降雨量的关系

Fig. 3 The relations between yearly rainfall and rainstorm at Dinghushan

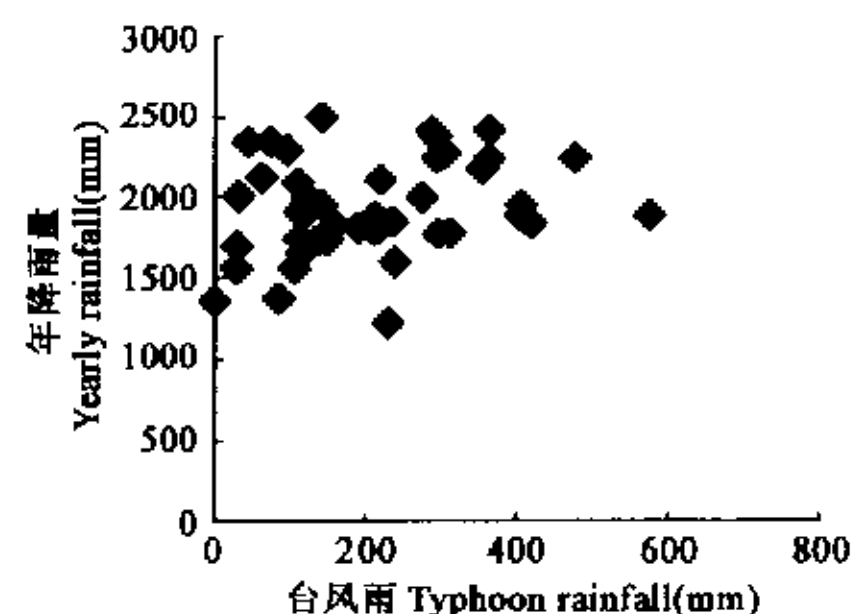


图 4 鼎湖山台风雨量与年降雨量的关系

Fig. 4 The relations between yearly rainfall and typhoon rainfall at Dinghushan

针对 44a 的时间序列统计资料, 如果去分析较长周期的变化规律是不切实际的, 因为分析出来的周期缺乏检验的可能性。从表 2 可以看出, 年降水量的后延为 1a、2a、3a、4a、5a、6a 的自相关系数绝对值都很小, 说明年降水量与其自身前期变化的线性相关关系非常差。当后延为 7a 时, 自相关系数较大, 值为 0.362, 同时, 后延为 14a、21a、28a、35a、42a 的自相关系数分别为 0.392、0.459、0.526、0.943、0.230, 说明该区的年降水量存在着以 7a 为周期的规律性变化, 反映了该区大涝(旱)7a 后将很可能再次出现大涝(旱)年。对大于 7a 的周期进行分析, 发现年降水量还存在着以 11a 为周期的变化规律, 但不及以 7a 为周期的明显。因此, 可以认为, 鼎湖山地区年降水量的第一显著周期是 7a, 其次是 11a。而 7a、11~13a 的周期也是全球气候振动中最显著的特征之一, 它们在日本、欧洲、前苏联和世界许多地区气温、降水和一些大气环流指标中都有明显的表现^[13], 可见, 鼎湖山年降水量的周期变化与全球气候振动的规律相一致。

用类似的方法对湿季降水量、干季降水量、暴雨量和台风雨量进行分析, 仅发现湿季降水量与年降水量相似, 存在着 7a 的周期性振荡, 但 11a 的周期不存在。而干季降水量、暴雨量和台风雨量看不出明显的周期性变化规律, 这就进一步验证了上述得出的暴雨量、台风雨量与年降水量的变化规律不同步的结论。

3.5 全年大气降水物质元素

大气降水是陆地生态系统化学物质主要来源之一, 也是森林生态系统养分循环及平衡的基础。由于鼎湖山地区大面积被森林覆盖, 地面裸露不多, 空气污染较少, 靠干沉降输入的养分是微不足道的, 因此, 该地区生态系统养分输入主要来源湿沉降, 大气降水携带大量养分为该地区植物生长提供必要的条件。

我国各地区大气降水中的养分含量列于表 3^[16~21]。

在大气降水的养分含量中, N 占有很大的比例, 得到众多学者的关注。由于大气中 N 化合物含量受到雷电、土壤反硝化作用、有机物分解、大气尘埃及工业污染等因素影响, 因此, 世界各地降水中 N 素含量变幅很大, 最高可达 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上(苏门答腊), 而挪威的降水仅含 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[25]。我国各地大气降水中 N 含量的差异也很大(见表 3)。鼎湖山地区大气降水的 N 浓度为 $1.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总含 N 量较高, 为 $38.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其原因还难于作出确切的估计。但结合鼎湖山地区的具体情况看, 尽管工业并不太多, 由于该地区大面积被森林覆盖, 有机物分解增加了大气中 N 素的含量, 同时该地区夏、秋季节雷电频繁, 由雷电作用产生的 N 也是导致该地区降水含 N 量偏高的原因之一。

降水中 P 元素的含量少, 不同地区降水中的 P 含量的变幅也相对较小。鼎湖山降水中 P 浓度为 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总含量为 $0.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 处于国内报道资料的中间水平。P 元素含量虽少, 但是它可以促进森林对 N 素的吸收, 对林下土壤中微生物的活动也有意义。

表 2 自相关系数计算结果

Table 2 The calculation results of self-correlation coefficient

后延	年降水量		湿季降水量		干季降水量		暴雨量		台风雨量	
Delay	Annual rainfall		Rainfall in wet season		Rainfall in dry season		Storm rainfall		Typhoon rainfall	
D	C_D	R_D	C_D	R_D	C_D	R_D	C_D	R_D	C_D	R_D
$D=0$	94084.7	1.000	66759.2	1.000	32264.8	1.000	31763.5	1.000	17535	1.000
$D=1$	-6284.2	-0.067	1332.2	0.020	-5375.4	-0.167	-3307.4	-0.104	-2029.9	-0.116
$D=2$	-9539.7	-0.101	-5034.5	-0.075	7030.5	0.218	1505.5	0.047	1330.1	-0.076
$D=3$	-10390.2	-0.110	-7904.6	-0.118	1648.4	0.051	-5598.8	-0.176	2646.5	0.151
$D=4$	536.1	0.006	3578.7	0.054	-7294.3	-0.226	4839.8	-0.152	1418.3	0.081
$D=5$	-21233.6	-0.226	-5869	-0.088	3787.1	0.117	-1667.5	0.052	-3652.6	-0.208
$D=6$	-19.5	0.000	-10471	-0.157	-1215.8	0.131	-1928.8	-0.061	1317.5	0.075
$D=7$	34095.8	0.362	19689	0.295	5174.4	0.160	7016.2	0.221	4325.9	0.217
$D=8$	2150.4	0.023	14152.7	0.212	4321.9	0.134	2395.8	0.075	-4735.5	-0.270
$D=9$	-22430.5	-0.238	-5495.8	-0.082	816.1	0.025	9725	-0.306	1596.2	0.091
$D=10$	286.5	0.003	-10599.9	-0.159	5005.9	0.155	1320.3	0.042	2042.1	0.116
$D=11$	11493.9	0.122	1032.2	0.015	-3509.4	-0.109	1627.5	0.051	4.3	0.000
$D=12$	-3985.5	-0.042	4005.3	0.060	3239.1	0.100	161	0.005	-3841.8	-0.219
$D=13$	3255.9	0.035	1160.6	0.017	-2832.7	-0.088	790	0.025	872.6	0.050
$D=14$	36835.1	0.392	9550.2	0.143	5168.3	0.160	-461.5	-0.015	-892.8	-0.051
$D=15$	-9504.2	-0.101	4181.8	0.063	-1903.1	-0.059	-3970.3	-0.125	-91.1	-0.005
$D=16$	-8994.5	-0.096	4773.8	0.072	-6466.9	-0.200	-3271.8	-0.103	-1423	-0.081
$D=17$	-23198.4	-0.247	-4930.3	-0.074	4351	-0.135	2219.7	0.070	-4541	-0.259
$D=18$	-12509.7	-0.133	-13061	-0.196	-16.3	-0.001	-488.8	-0.015	2916.2	0.166
$D=19$	-13101.6	-0.139	-9295.3	-0.139	-10264.9	-0.318	-8076.3	-0.254	527.5	0.030
$D=20$	177.5	0.002	-256	-0.004	-2337	-0.072	-4550.7	-0.143	-3477.8	0.198
$D=21$	43223.3	0.459	7155.8	0.107	-3155.6	-0.098	-7317.9	-0.230	54.5	0.003
$D=22$	20427.9	0.217	-1765.4	-0.026	-854.3	-0.026	5171.7	0.163	731	0.042
$D=23$	-9208.2	-0.098	-15549.1	-0.233	-3450.7	-0.107	-469.6	-0.015	-4801.6	0.274
$D=24$	24988	0.266	9312.4	0.139	-558.6	-0.017	24428.7	0.769	694.1	0.040
$D=25$	-25631.9	-0.272	-5344.7	-0.080	-8189.1	-0.254	1946.5	0.061	1541.1	0.088
$D=26$	-32872.1	-0.349	-33054.6	-0.495	3331.3	0.103	-9387.1	-0.296	-7780.3	0.444
$D=27$	-38563.6	-0.410	-7916.1	-0.119	-9933.5	-0.308	-5088	-0.160	-1977.6	-0.113
$D=28$	49476.1	0.526	12978.7	0.194	5517.3	0.171	1390	-0.044	2625.9	0.150
$D=29$	11170	0.119	4135.1	0.062	-4110.7	-0.127	2006.9	0.063	6388.4	0.354
$D=30$	-17013.4	-0.181	-19321	0.289	-3338.8	-0.103	2887.7	0.091	-1364.5	-0.078
$D=31$	-20386.9	-0.217	-30591.6	-0.458	-781	-0.024	4116.4	0.130	2396	0.137
$D=32$	45913.9	0.488	34658.7	0.519	-7348.6	-0.228	12221.3	0.385	1829.3	0.104
$D=33$	29	0.000	-6709.7	-0.101	2009	0.062	-20071.8	-0.632	8032.1	-0.458
$D=34$	17688.4	-0.188	-20582.5	-0.308	-7790	-0.241	4103.3	0.129	3102.1	0.177
$D=35$	88751.2	0.943	36186.7	0.542	6735.9	0.209	7351.1	0.231	-2909.9	-0.166
$D=36$	55266.6	0.587	8292.2	0.124	6385.4	0.198	3896.1	0.126	8.4	0.000
$D=37$	-12249.7	-0.130	-868.6	-0.013	2581.6	-0.080	6011.6	0.189	-5138.3	-0.293
$D=38$	-88714.8	-0.943	-7931.6	-0.119	11593.3	0.359	-13994	-0.441	6080.2	0.347
$D=39$	-17306.1	-0.184	11172.3	0.167	-15806.7	-0.490	5575.7	0.176	-6399.6	-0.365
$D=40$	-46181.1	-0.491	-38598.2	-0.578	5636.5	0.175	20518.6	-0.646	-2643.6	-0.151
$D=41$	15202.37	0.162	2663	0.040	-7220.5	-0.224	-3999.5	-0.126	-6376.5	-0.564
$D=42$	21637.2	0.230	20547.2	0.308	11613.6	0.360	4307.2	0.136	2149.6	0.123
$D=43$	-13429.3	-0.143	-47612.7	-0.713	3421.5	0.106	20316.2	0.640	-4458.5	0.254

表 3 我国各地区大气降水中营养元素的含量
Table 3 The nutrient element content in rainfall in China

项目 Contents	N	P	K	Ca	Na	Mg	单位 Unit	年降水(mm) Rainfall
鼎湖山 Dinghushan	1.920	0.031	0.173	0.672	0.105	0.061	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1997.1
	38.4	0.62	3.46	13.42	2.10	1.22	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	
尖峰岭 Jianfengling	0.43	0.12	1.28	1.01	—	0.78	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	—
鹤山 Heshan	8.31	0.03	3.63	9.22	6.11	1.39	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	1801.1
大冈山 Dagangshan	5.964	0.023	0.683	0.935	1.852	0.141	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
滇中 Dianzhong	0.710*	0.031	0.625	1.090	—	0.320	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	869.2
西双版纳 Xishuangbanna	18.09	0.322	12.83	8.88	—	10.49	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	—
长白山 Changbaishan	0.58*	—	0.67	1.24	0.44	0.17	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	—
中山大学校园 Zhongshan University	2.32	0.029	0.78	6.11	0.52	5.54	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1500.0
金华 Jinhua	23.10	0.12	7.20			—	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	1405.0
香港 Hong Kong	—	—	9.5	11.6	19.1	3.0	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	3764.3

* — $\text{NO}_3\text{-N}$

鼎湖山地区降水中 K 元素浓度为 $0.173 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总含量为 $3.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 接近于同处于南亚热带的鹤山地区 ($3.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 但小于其它各地。由于 K 是溶解度高的元素, 在植物体内转移速度快, 植物中的 K 基本上以水溶态存在, 雨水可以把大量的 K 元素淋入土壤, 因此, 大气降水对于补充林下土壤 K 元素有重要意义, 这也是林下土壤中 K 元素含量远多于空旷地的主要原因之一。

降水中的 Ca 主要来源于大气中的尘埃及有机物, 供应有限, 释放缓慢, 因此不因雨量增加而呈显著递增。鼎湖山降水中 Ca 的浓度为 $0.672 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总含量为 $13.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。植物体内的 Ca 以果胶酸钙的形态存在于细胞的胞间壁内, 溶解度低, 转移速度缓慢, 且多累积在树干里, 其生物循环不如 K、Na 强烈^[18]。由于大气降水中的钙素以水溶态存在, 易为植物吸收, 因此, 降水中的钙素对鼎湖山森林植被的生长发育有一定的意义。

Na 素可以通过调节植物体内的渗透压来影响植物对其它元素的吸收, 指示了特有的来源。如香港被海洋包围, 海盐溶解于大气水汽中, 导致降水 Na 素的含量高达 $19.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。鼎湖山降水中 Na 的浓度为 $0.105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总含量为 $2.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 较同处于南亚热带的鹤山地区低, 可能也是因为鹤山离海洋近一些, 受海风中的钠元素影响较大。

鼎湖山降水中 Mg 的浓度为 $0.061 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总含量为 $1.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与香港、鹤山相比, 处于较低水平。Mg 的来源和 Na 相似, 大多是来自海风的盐粒。

3.6 降水养分季节变化

鼎湖山地区的旱季, 空气中的尘埃较多, 加之此期群众开荒备耕、大量烧山对低空大气层的污染程度较深, 增加了低空大气层的养分浓度, 故旱季降水中 N、P、K 养分元素的浓度高于雨季 (见图 5~图 7)。由于大气层中的 Na、Mg 元素有其特殊的来源, 该地区夏秋季节常吹海风带来了大量的盐粒, 导致了夏秋季节 Na、Mg 元素的浓度偏高 (见图 9, 图 10)。Ca 素在水中的溶解度较低, 其浓度的月变化似乎没有什么规律 (见图 8)。由于干湿季节降水量相差悬殊, 无论养分元素浓度月变化如何, 湿季大气降水中的养分量均明显多于干季。也就是说, 由大气降水给该地区生态系统带来的养分集中在湿季, 这一时期正是植物生长季节, 大量的养分输入促进植物的发育和植被的形成, 有利于提高系统生产力。

由大气降水所输入系统的养分, 受到养分浓度和水量双重因素的影响, 尽管各种养分元素浓度的月变化很复杂, 但含量基本上随月降水量的增大而增大, 故月养分元素含量与月降水量之间存在较显著的回归关系。马雪华^[18]报道了江西省大冈山地区雨水的养分量与降雨量存在着半对数关系。本文同时用直线回归和半对数回归去拟合鼎湖山地区大气降水养分与降水量的关系, 回归方程与相关系数见表 4, N、P、Ca、Na 的相关系数均达 0.8 以上, 直线回归和半对数回归所得的相关系数相差不大。

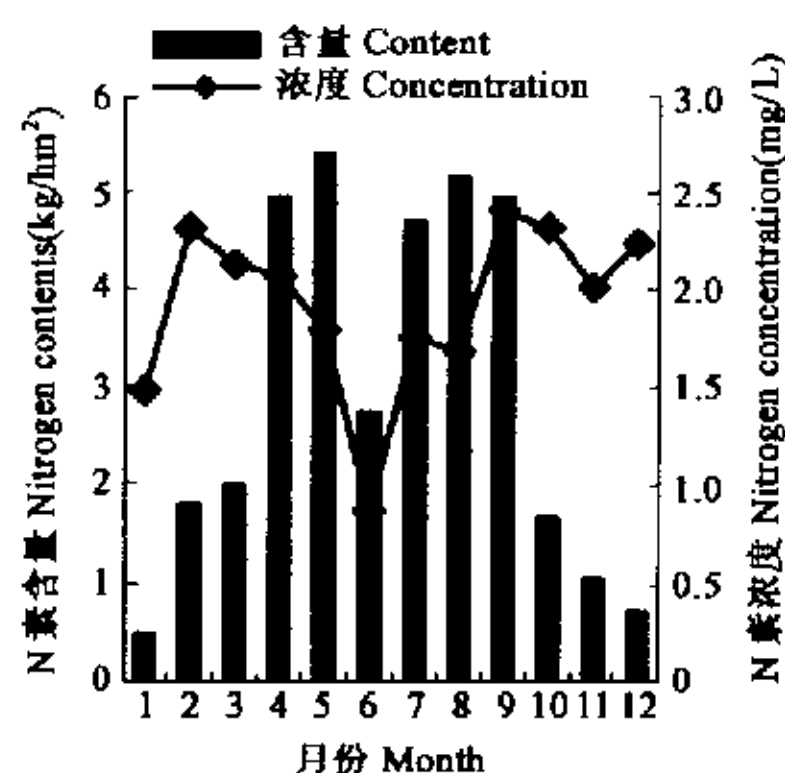


图5 N素含量与浓度的月变化

Fig. 5 The monthly changes of content and concentration of nitrogen

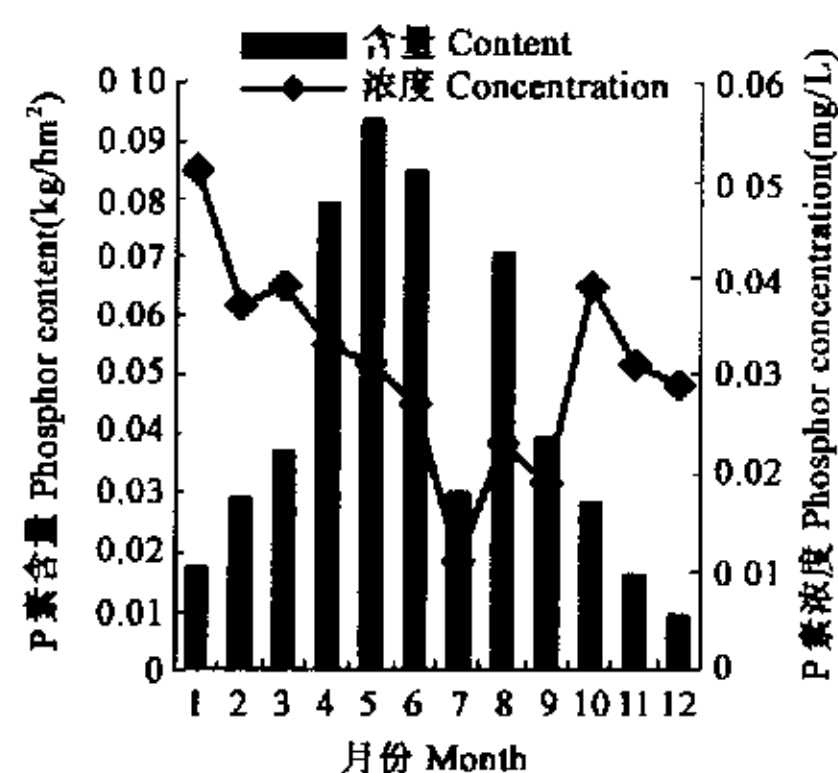


图6 P素含量与浓度的月变化

Fig. 6 The monthly changes of content and concentration of phosphorus

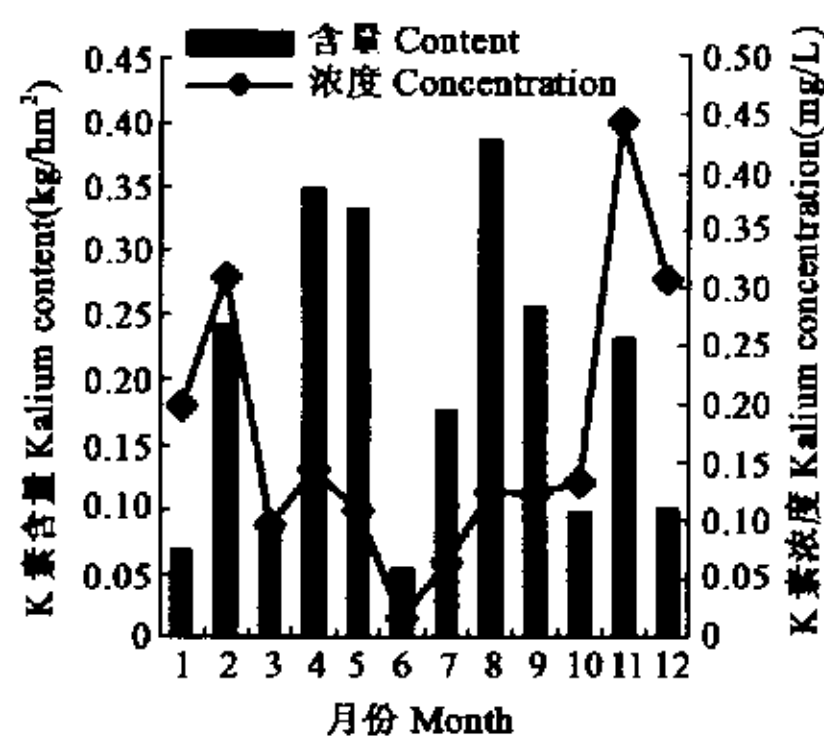


图7 K素含量与浓度的月变化

Fig. 7 The monthly changes of content and concentration of kalium

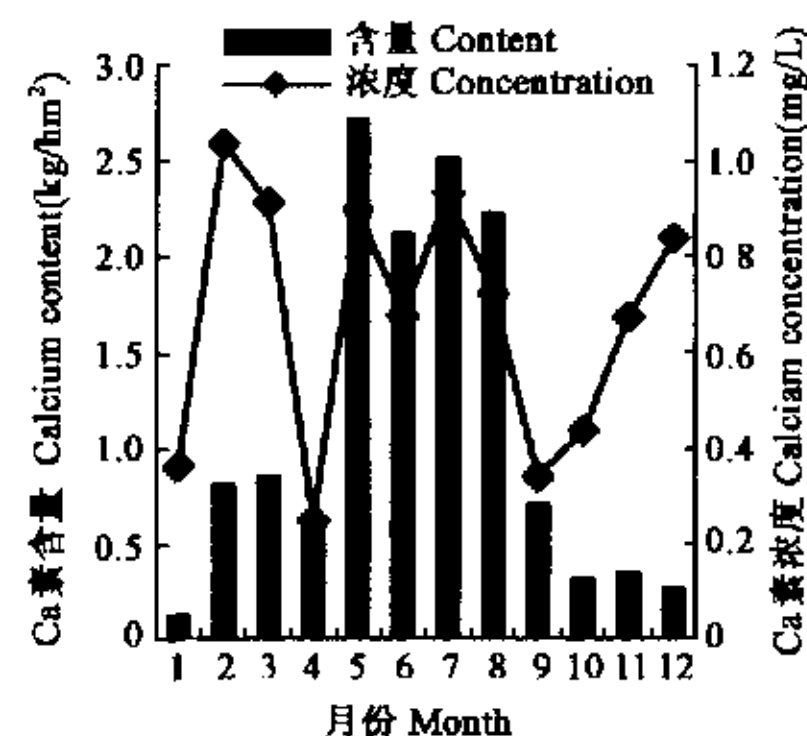


图8 Ca素含量与浓度的月变化

Fig. 8 The monthly changes of content and concentration of calcium

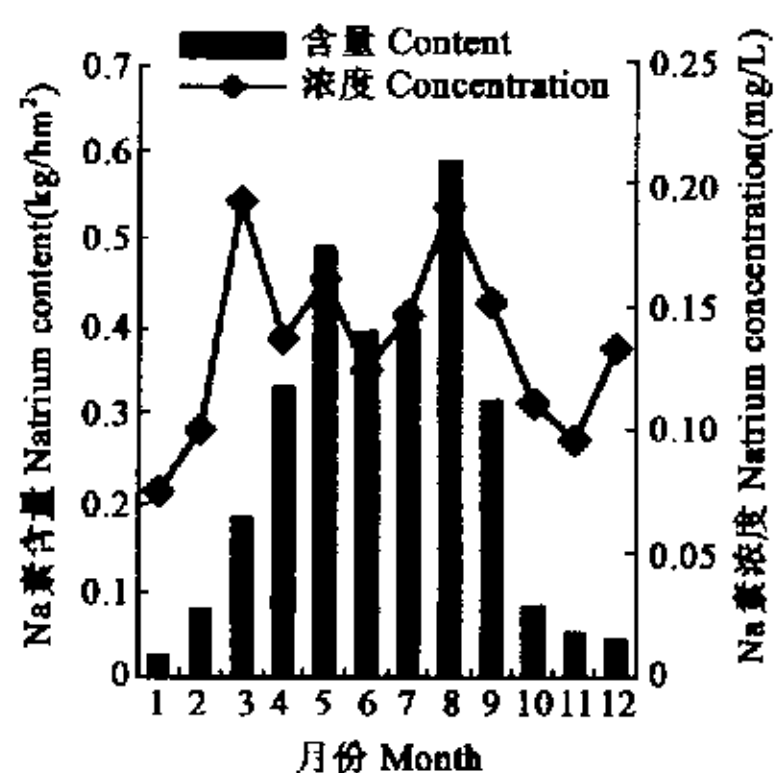


图9 Na素含量与浓度的月变化

Fig. 9 The monthly changes of content and concentration of natrium

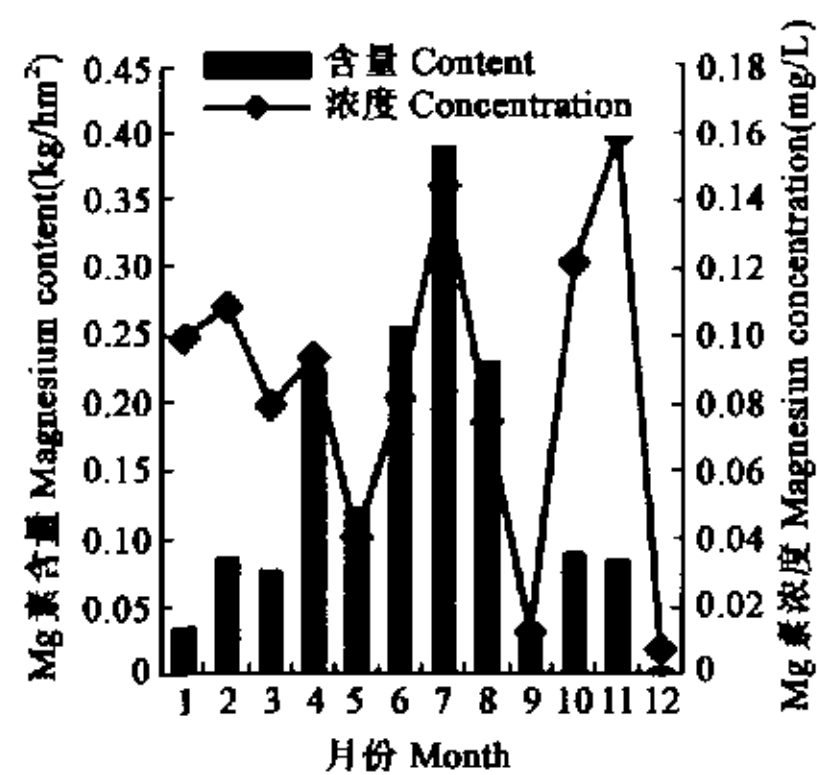


图10 Mg素含量与浓度的月变化

Fig. 10 The monthly changes of content and concentration of magnesium

4 讨论

鼎湖山地带性森林的存在得益于受季风气候的控制,在这种气候控制下,夏季湿润气团所带来的大量降水加上本区充足的热量为森林的生存创造了基本条件。但季风气候控制下的年内大气降水分配极不均匀,水分供应的不均匀性与干季热量的充足实际上对植物的生长和生态环境的中生化是不利的^[1]。鼎湖山森林生态系统要维持其高的生产力,则系统内部必然有调节以水分为主导的环境因子的机制,这种机制保证了系统即使是在干旱季节也有充足的水分供应以维持高生产力,这也是鼎湖山地带性森林能够长期存在的另一个重要原因。同时受到季风气候控制的本区域退化生态系统,有的也几乎接近荒漠化景观^[4-5]。这说明两个问题,第一,鼎湖山这种区域性降水及气候背景下,发育良好的生态系统可以拥有很高的生产力,而退化生态系统内可能形成严酷的环境;第二,鼎湖山地带性森林生态系统是非常脆弱的。

表4 鼎湖山大气降水中各养分月含量和月降水量的回归关系

Table 4 Regression relations between monthly precipitation and nutrient in rainfall at Dinghushan

元素 Element	线性回归 Linear regression		半对数回归 Half logarithm regression	
	回归方程	相关系数	回归方程	相关系数
	Regression equation	Correlation coefficient	Regression equation	Correlation coefficient
N	$Y=0.0145X + 0.5506$	0.88	$Y=1.9764\ln X - 6.5312$	0.91
P	$Y=0.0002X - 0.0083$	0.86	$Y=0.0277\ln X - 6.5312$	0.84
K	$Y=0.0005X + 0.1144$	0.50	$Y=0.0699\ln X - 0.01384$	0.53
Ca	$Y=0.0072X - 0.0645$	0.86	$Y=0.8841\ln X - 3.1215$	0.81
Na	$Y=0.0016X - 0.0237$	0.97	$Y=0.2070\ln X - 0.7479$	0.94
Mg	$Y=0.0007X + 0.0125$	0.73	$Y=0.0932\ln X - 0.3146$	0.72

与纬度相近的鹤山比较,鼎湖山大气降水的季节分配要均匀一些,并且由暴雨所带来的降水量较小,而多年平均的年降水量要大,这些特性也有可能是在鼎湖山得以保存地带性森林的一个原因。

鼎湖山大气降水存在 7a 左右的周期性变化规律,这与刘黎明等^[15]、周国逸等^[26]的研究结果相一致,并且还可能受到厄尔尼诺现象的影响^[27]。

鼎湖山地区由于降水量丰富,由降水带入森林的总 N 量为 $38.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,居于全国的高水平,可能主要与森林丰富有关,大量的森林腐殖质分解在大气中形成高浓度的含 N 化合物,同时,闪电和雷击也是这里降水含 N 高的一个原因。这对森林生长也是有利的。

参考文献

- [1] 余作岳,皮永丰. 广东热带沿海侵蚀地的植被恢复途径及其效应. 热带亚热带森林生态系统研究, 1985, (3): 97~108.
- [2] Yu Z Y. Ecology of the rehabilitation of vegetation on tropical coastal eroded land in Guangdong, China. *Journal of Environmental Sciences*, 1995, 7(1): 74~84.
- [3] Yu Z Y. Rehabilitation of eroded tropical coastal land in Guangdong, China. *Journal of Tropical Forest Science*, 1994, 7(1): 28~38.
- [4] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用. 北京: 气象出版社, 1997.
- [5] Brown S and Lugo A E. Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. *Restoration Ecology*, 1994, 2(2): 97~111.
- [6] 周国逸, 余作岳, 彭少麟, 等. 小良试验站 3 种生态系统中蒸散的对比研究. 生态学报, 1995, 15(supp(A)): 230~236.
- [7] 邓先瑞, 黄建国, 朱吉英. 湖北省降水量分布特征与蒸发力的初步研究. 华中师范大学学报, 1987, 21(2): 283~290.
- [8] Lee R 著, 张建列译. 森林水文学. 哈尔滨: 东北林学院, 1984.

- [9] 周国逸, 门俊华, 申卫军, 等. 马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究. 植物生态学报, 2000, 24(4): 451~458.
- [10] 潘树荣. 自然地理学. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [11] 黄忠良, 蒙满林, 张佑吕. 鼎湖山生物圈保护区的气候. 热带亚热带森林生态系统研究, 北京: 气象出版社, 1998, (8): 134~139.
- [12] 吴宜进, 邓先端. 湖北省降水量的周期分析. 热带地理, 1998, 18(3): 201~204.
- [13] 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984, 394~409.
- [14] 项静恬. 动态和静态数据处理. 北京: 气象出版社, 1991, 567~571.
- [15] 刘黎明, 陈创买. 广东全省性年气候变化的定量分析. 热带地理, 1998, 18(3): 193~196.
- [16] 卢俊培. 海南岛尖峰岭热带林生态系统的水化学特征. 林业科学研究, 1991, 4(3): 231~237.
- [17] 姚文华, 余作岳. 广东鹤山丘陵地人工林林内降雨养分含量. 生态学报, 1995, 15(supp(A)): 124~131.
- [18] 马雪华. 在杉木林和马尾松林中雨水的养分淋溶作用. 生态学报, 1989, 9(1): 15~20.
- [19] 刘文耀, 刘伦辉, 郑征, 等. 滇中常绿阔叶林及云南松林水文作用的初步研究. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(2): 159~167.
- [20] 王醇儒, 罗仲全, 赵仕远. 西双版纳地区降雨和橡胶林内雨养分含量的初步研究. 生态学报, 1984, 4(3): 259~265.
- [21] 程伯容, 许广山, 耿晓源, 等. 长白山红松云冷杉林林内降水的养分输入. 应用生态学报, 1993, 4(4): 447~449.
- [22] 唐常源, 王翌. 湿地松人工林中降雨对养分物质的淋溶影响. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(4): 379~383.
- [23] 鲁如坤, 史陶钧. 金华地区降雨中养分含量的初步研究. 土壤学报, 1979, 16(1): 81~84.
- [24] 邹桂昌. 香港红壤地区的林内雨养分含量. 林业科学, 1980, 2: 102~107.
- [25] 库克. 中国科学院南京土壤研究所译. 高产施肥. 北京: 科学出版社, 1978. 12~13.
- [26] 周国逸, 黄忠良. 广州近 35 年来的气候变化. 热带地理, 1999, 19(3): 198~203.
- [27] Piechota T C, Dracup J A and Fovell R G. Western US streamflow and atmospheric circulation patterns during El Nino-Southern Oscillation. 1997, 201: 249~271.