# 南亚热带三种主要森林降雨及其再分配过程中的养分差异规律*

张 娜[1,2] 刘兴诏[1,2] 李 坤[1,2] 褚国伟[1] 闫俊华[1**]

([1] 中国科学院华南植物园,广州 510650;[2] 中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘 要** 马尾松林、针阔叶混交林和季风常绿阔叶林是南亚热带鼎湖山地区由演替初期到成熟森林过程的典型代表,对3种林地的降雨量及其再分配过程进行观测,并测定该过程中养分(N、P、K、Ca、Mg)浓度。结果表明,大气降雨经过冠层再分配后,除Ca外,各养分浓度在穿透雨和树干流中都有所增加,树干流增加的幅度更大。穿透雨中Ca元素浓度低于大气降水,这一现象在3种林型均有表现。穿透雨和树干流中养分浓度在演替系列上没有显示出一致的规律,但比较不同演替阶段的输入量可以看出,树干流养分输入量随演替进行呈增加趋势。经过冠层作用后,雨水带来的养分输入量大于凋落物分解输入量,这种现象在马尾松林和混交林尤为明显。表明大气降雨不仅促使养分元素从冠层向地表迁移,而且提供了演替初期植物生长所需的重要养分。

**关键词** 降水再分配;养分输入;凋落物;鼎湖山

**中图分类号** S715.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)2-0193-08

**Differential patterns of nutrient elements in rainfall and its redistribution in three typical subtropical forests in South China.** ZHANG Na[1,2], LIU Xing-zhao[1,2], LI Kun[1,2], CHU Guo-wei[1], YAN Jun-hua[1**] ([1]*South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*; [2]*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(2): 193-200.

**Abstract**: *Pinus massoniana* forest, mixed *P. massonniana*-broadleaved forest, and monsoon broadleaved evergreen forest are the three typical subtropical forests at the succession stages from pioneer community to nearly climax in Dinghushan Nature Reserve in South China. In this paper, the differential patterns of five nutrient elements (K, Ca, Mg, N, and P) in rainfall and its redistribution in these forests were studied. The results showed that after the redistribution of rainfall through canopy, the concentrations of test nutrient elements except Ca in throughfall and stemflow had somewhat increase, especially in stemflow. In all the three forests, the Ca concentration in throughfall was lower than that in rainfall. The nutrient concentrations in throughfall and stemflow didn't show any significant changes in these forests, but the nutrient inputs in stemflow had an increasing trend with the progress of succession. In addition, the nutrient inputs of throughfall and stemflow were generally higher than those of litter fall, especially in the mixed forest and *P. massoniana* forest. Our results suggested that rainfall not only played an important role in nutrient transfer from forest canopy to soil, but also supplied necessary nutrients for forest growth, especially for that at early succession stage.

**Key words**: rainfall redistribution; nutrient input; litter fall; Dinghushan.

鼎湖山森林生态系统是南亚热带典型森林生态系统,主要由马尾松林(*Pinus massoniana* forest, PF)、针阔叶混交林(mixed *P. massonniana*/broad-leaved forest,MF,简称混交林)和季风常绿阔叶林(monsoon evergreen broad-leaved forest,MBF,简称季风林)构成,这3种林型构成了从初极到接近气候顶极的演替系列。不同演替阶段的森林生态系统结

*国家自然科学基金项目(30872012、40730102)资助。
**通讯作者 E-mail: jhyan@scib.ac.cn
收稿日期: 2010-07-30 接受日期: 2010-10-13

构和组成差异对生态系统养分循环有重要影响。养分循环是植物获取养分的重要途径,养分在森林内循环过程包括地上生物量通过凋落物和枯死物形式转移到地被物及土壤层,以及大气降雨穿过林冠层时以穿透雨和树干流向土壤输入两部分(Dezzeo & Chacon,2006)。与凋落物及枯死物分解相比,穿透雨和树干流向地被物及土壤层输入的养分可以被植物体直接吸收。因此,这部分养分被认为是研究森林生态系统内部养分动态的主要途径(Parker,1983)。穿透雨和树干流对森林土壤养分库输入的重要性在一些热带地区已有报道(Tobón *et al.*,2004)。然而,对同一演替系列上不同演替阶段森林生态系统穿透雨和树干流养分输入的比较未见报道。对该地区森林水文及养分循环的研究主要涉及在森林水文循环过程中的水量变化以及相应的物质元素浓度变化和土壤养分状况研究(闫俊华,2001;周传艳等,2005)。因此,本文对鼎湖山地区演替系列上的3个森林穿透雨和树干流中养分含量及时间动态进行阐述,从而进一步揭示不同演替阶段对森林生态系统功能中的养分内循环过程的影响,为南亚热带地区天然林保护和功能低下的森林结构改造提供依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

鼎湖山位于广东省肇庆市境内(23°10′N,112°34′E),是我国第一个自然保护区,其中保护区面积为1145 $hm^2$。该地区年平均温度为20.9 ℃,最冷月(1月)与最热月(7月)的月均温分别为12.6 ℃和28.0 ℃。年均降雨量及蒸发量分别为1929和1115 mm,相对湿度年均值为81.5%。干湿季明显,其中4—9月为湿季,11月—次年3月为旱季。土壤类型以赤红壤地带性土壤为主,在垂直带上分布着黄壤和山地灌丛草甸土。

3种主要森林类型的植物群落和结构有差异,其中季风林植物群落结构复杂,乔木分3层,主要树种有锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)和肖蒲桃(*Acmena acuminatissima*)等,作为南亚热带地带性森林的代表类型的锥栗、荷木、厚壳桂群落已有400多年林龄,林下包括灌木层及草本层,林中还有较多的藤本植物和附生植物(唐旭利等,2003),整个群落处于由阳生植物占优势的森林向中生性和耐阴性植物占优势的演替后期阶段。混交林是马尾松群落向季风林演替发展的过渡阶段,针阔比例大约为4∶6,针叶树种为马尾松,阔叶树种主要有荷木、锥栗、红皮紫棱(*Craibiodendron kwangtungense*)和黧蒴(*Castanopsis fissa*)等。马尾松林为20世纪60年代前人工种植的单种马尾松林,在自然发展状况下,马尾松是现有唯一的乔木层。

### 1.2 研究方法

研究区域内分别在3个林中选择面积为1 $hm^2$的森林作为试验标准样地,在标准样地内对每场降雨产生的穿透雨和树干流样品采集并进行长期观测。

**1.2.1** 水样采集方法 大气降雨的采集。在每个林冠层上方约3 m安装直径为20 cm的雨量筒,每个林内均在每场降雨后全部收集,并混合后取适量混合水样放于冰箱内保存。

穿透雨的采集。在标准样地内随机放置6个由PVC材料制成,收集面积为1.25 $m^2$的承接槽。承接槽离地面高度约40 cm,以排除灌草层对穿透雨的影响,承接槽与水平地面保持0.5°倾角,较低一端底部开口,连接带盖塑料桶用于收集穿透雨。

树干流的采集。根据鼎湖山森林生态系统定位站多年森林调查结果,在每个林分中选取不同胸径的优势树种,每个种选择3棵作为标准木(表1)。将直径为4 cm的聚乙烯塑料管沿中缝剪开,在树干上呈螺旋状环绕一周,用玻璃胶固定并封严接缝处,确保树干茎流全部流入聚乙烯塑料管下的带盖塑料壶里(闫文德等,2005)。

所有采集装置安装前均用3%的盐酸浸泡24 h后用自来水冲洗干净,再用蒸馏水清洗至少3次。为了避免枯枝落叶等对测量结果的影响,降雨前对

**表1 3种林型标准木基本参数($n=3$)**

**Table 1 Basic parameters of standard wood in three forests**

| 林型 | 树种 | 胸径(cm) | 树高(m) |
|---|---|---|---|
| 季风林 | 肖蒲桃 | 25.8± 6.0 | 15.3 ±1.5 |
| | 厚壳桂 | 33.9±1.6 | 22.7±0.6 |
| | 白颜树 | 23.8±0.8 | 13.8±1.3 |
| | 荷木 | 29.7±0.2 | 16.8±2.0 |
| 混交林 | 锥栗 | 24.9±5.6 | 12.3±2.7 |
| | 荷木 | 21.6±2.0 | 13.2±1.4 |
| | 马尾松 | 35.7±2.5 | 15.2±1.4 |
| 松林 | 马尾松 | 24.4±4.6 | 9.8 ±0.6 |

数值为平均值±标准差。

雨量筒及承接槽进行定期清理。

**1.2.2** 水样分析方法 于 2009 年 3 月—2010 年 2 月对每场降雨 3 个林中的大气降雨、穿透雨和树干流进行采集。所有水样均在每次降雨后 2 h 内及时采集。采集前在大气降雨、树干流及穿透雨收集装置中首先用酸度计测定 pH 值,然后用水样冲洗采集瓶至少 3 次后再进行采集,并立即带回实验室后使用中速滤纸过滤,最后将过滤液放入 4 ℃冰箱冷藏(水样前处理),并按各种指标的分析测试要求在 5 日内完成所有实验室分析测试。化学成分的分析参照中国生态系统网络观测与分析标准方法(谢贤群和王立军,1998):$K^+$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$ 用原子吸收法(GBC932AB 型,澳大利亚);总氮(N)用紫外分光光度法;总磷(P)用钼酸铵分光光度法。

对大气降雨、树干流、穿透雨溶质浓度用容积加权平均值(volume-weighted means per event (VWME))计算,计算方法如下(Zimmermann *et al.*, 2008):$VWM_E = (\sum C_{Ei}, V_{Ei},)/(\sum V_{Ei},)$,其中,$C_{Ei}$、$V_{Ei}$分别是每次降雨中各种离子的浓度和样品体积,容积加权平均值标准差用 95% 置信区间计算。

为了量化大气降雨从林冠层沿树干流向地面过程中物质元素的转换量,对每个林型计算富集率,计算公式如下(André *et al.*, 2008):$E = C_s \cdot S/(C_p \cdot R \cdot B_a)$,式中,$E$ 为沉积率,$C_s$ 为树干流中物质元素浓度($mg \cdot L^{-1}$);$S$ 为树干流体积(mm);$C_p$ 为大气降雨中物质元素浓度($mg \cdot L^{-1}$);$R$ 为降雨量(mm);$B_a$ 为标准木断面积($m^2$)。沉积率加权平均值标准差用 95% 置信区间计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 大气降雨、穿透雨及树干流中的养分浓度特征

在观测期间内(2009 年 3 月—2010 年 2 月)鼎湖山地区 3 种森林大气降雨、穿透雨和树干流中的养分浓度年均值见表 2。

由表 2 可知,鼎湖山地区大气降雨中养分浓度最大的是 Ca,年均值为 3.06 $mg \cdot L^{-1}$,最小的是 P,仅 0.05 $mg \cdot L^{-1}$。大气降雨经过 3 个林型的林冠层再分配过程后,5 种养分元素的浓度除了 Ca 之外均有不同程度增加,增加趋势为树干流>穿透雨>大气降雨;Ca 则是树干流>大气降雨>穿透雨,即在穿透雨中浓度低于大气降雨。季风林中养分元素 P、K、Mg 在穿透雨中的浓度显著高于大气降雨中浓度($P<0.05$),同时 Ca 在穿透雨中的浓度显著低于大气降雨中浓度($P<0.05$),但 N 元素在穿透雨和大气降雨中的浓度差异未达到显著水平($P>0.05$)。混交林和松林穿透雨中除 Ca 外的 4 种养分含量均显著高于大气降雨中养分浓度($P<0.05$)。3 种林型树干流中 N、P、K、Ca、Mg 的浓度均显著高于大气降雨($P<0.05$)。

比较穿透雨和树干流在 3 种林型中的差异发现,在穿透雨中 P、K、Mg 的浓度均表现为松林<季风林<混交林。在树干流中 N、Ca、Mg 的浓度均表现为混交林<季风林<松林。分别对穿透雨和树干流中养分浓度在 3 个林型间的差异做单因素方差分析发现,穿透雨中仅有 K 在混交林和松林间含量差异显著($P<0.05$)。3 个林型树干流中 P、N、Mg 在季风林和松林间以及混交林和松林含量差异均显著($P<0.05$);K 在季风林和混交林以及季风林和松林之间的差异显著($P<0.05$)。

由图 1 可知,3 种林型穿透雨和树干流体积的月变化趋势与大气降雨相同,在观测期间穿透雨占大气降雨的比例分别为季风林:66%;混交林:76.7%;松林:81.1%,为季风林<混交林<松林。树干流占大气降雨的比例分别为季风林:4.2%;混交林:2.8%;松林:0.2%,为季风林>混交林>松林。尽管 3 种森林类型结构不同,但穿透雨体积的月变化与大气降雨具有显著相关性($r^2 = 0.94 \sim 0.98$, $n = 28$, $P<0.05$)。树干流体积月变化与大气降雨量也

**表 2 3 种林型大气降雨、穿透雨及树干流中的养分浓度年均值($mg \cdot L^{-1}$)**

**Table 2 Average nutrient concentration in incident rainfall, throughfall and stemflow under different forest types**

| 养分 | 大气降雨 | 穿透雨 | | | 树干流 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 季风林 | 混交林 | 松林 | 季风林 | 混交林 | 松林 |
| N | 2.85±0.32 | 4.28±0.42 | 4.78±0.56 | 5.48±0.45 | 7.46±0.37 | 7.44±0.47 | 12.23±0.80 |
| P | 0.05±0.01 | 0.12±0.02 | 0.13±0.02 | 0.10±0.04 | 0.17±0.01 | 0.15±0.01 | 0.52±0.36 |
| K | 0.97±0.24 | 3.17±0.34 | 3.92±0.70 | 1.93±0.23 | 6.76±0.56 | 4.93±0.37 | 3.76±0.36 |
| Ca | 3.06±0.50 | 2.88±0.27 | 2.55±0.29 | 2.49±0.23 | 4.41±0.30 | 4.05±0.35 | 4.99±0.48 |
| Mg | 0.26±0.04 | 0.43±0.03 | 0.44±0.04 | 0.38±0.03 | 0.64±0.05 | 0.56±0.04 | 0.83±0.07 |

数值为平均值±标准差。

同样具有显著相关性($r^2=0.86\sim0.91$,$n=28$,$P<0.05$)。

由图2可知,3种林型中穿透雨和树干流的养分浓度有明显的季节变化趋势,并且月变化趋于一致,即在降雨初期(3月)养分浓度较高(穿透雨中Ca除外),随着降雨量和降雨频率增加,8月或9月的浓度最小。在旱季浓度显著高于雨季。3个林型中养分元素浓度月平均值的标准差很大,变异系数范围在50.2%~235%,说明3个林内的树干流和穿透雨均有很大的空间变异性。这种变异性可能是导致某些元素在3种森林类型间的差异不显著的原因之一。

分别对各种养分元素在树干流和穿透雨中的浓度与其体积作相关性分析发现,仅季风林的N和混交林的K与穿透雨体积呈负相关($r$分别为-0.721和-0.638);此外,仅季风林中的P、Ca、Mg和混交林中的Mg与树干流体积呈负相关($r$分别为-0.487、-0.539、-0.519、-0.475)。其余养分浓度与体积的相关性未达到显著水平($P>0.05$)。

用富积率(enrichment ratio)量化大气降雨从冠层沿树干流向地面过程中养分元素的转换规律,反应不同森林类型对大气降雨通过林冠和树干迁移过程的漏斗效应差异(图3)。

由图3可以看出,季风林和混交林均为K的富集率最高,分别比大气降雨浓度高4.9倍和2.1倍。

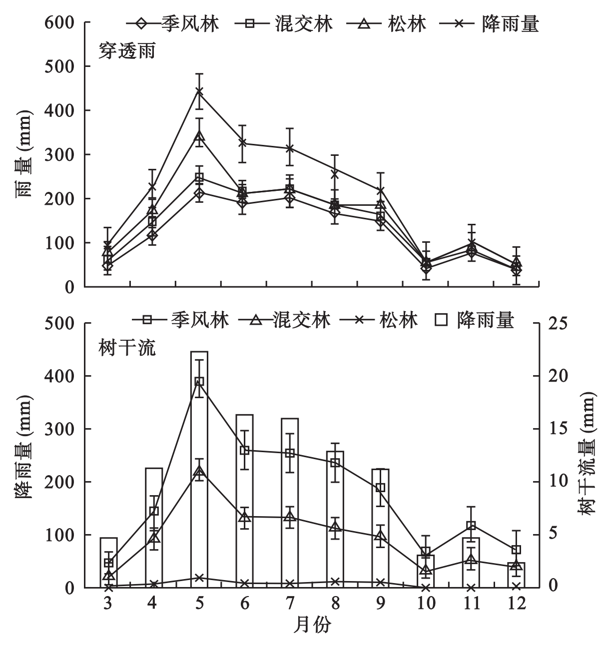


**图1 各种林型降雨量、穿透雨量和树干流量月变化**

**Fig. 1 Monthly variation in the water volume in throughfall, stemflow and incident rainfall of different forest types**

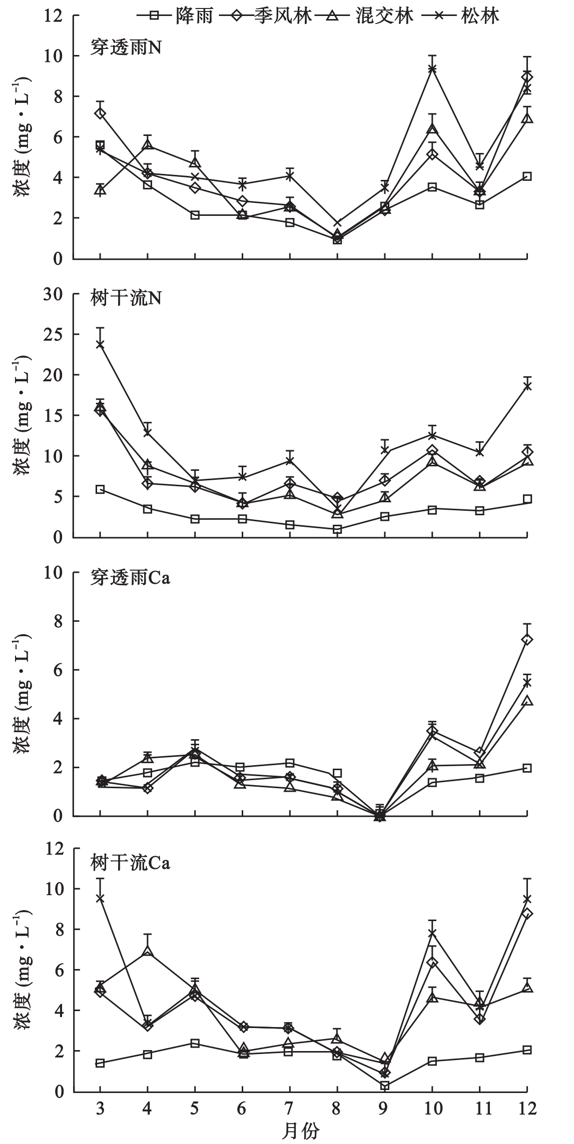


**图2 各种林型大气降雨、穿透雨和树干流中N和Ca月变化**

**Fig. 2 Monthly variation in the concentration of N and Ca in throughfall, stemflow and incident rainfall of differont forest types**

季风林中养分元素的富集率变化趋势为:K>P>Ca>Mg>N;混交林中养分元素的富集率变化趋势为:K>P>N>Ca>Mg;松林中养分元素的富集率变化趋势为:P>N>K>Mg>Ca。5种养分的富集率在3种林型间的变化趋势均为季风林>混交林>松林。

## 2.2 大气降雨、穿透雨和树干流养分元素的年输入量

在观测期间内(2009年3月—2010年2月),大气降雨总量为1968.1 mm,其中月降水量最大值为5月435.1 mm。鼎湖山3个森林穿透雨量为1298.9~1596.1 mm,树干流量为3.9~82.6 mm。

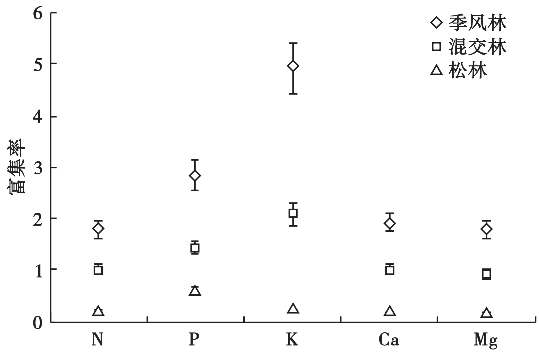


**图 3　3 种林型树干流物质元素的沉积率**

**Fig. 3　Enrichment ratio of the chemical composition in three forests**

由表 3 可看出,3 种林型穿透雨中养分元素年输入量范围为 N:55.04 ~ 87.44 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;P:1.56 ~ 1.93 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;K:30.87 ~ 59.2 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;Ca:37.45 ~ 39.78 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;Mg:5.64 ~ 6.64 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$,除季风林中 N 外,均高于大气降雨输入量 N:56.11 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;P:0.9 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;K:19.03 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;Ca:32.18 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$;Mg:5.02 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$。说明在 3 种森林中穿透雨是养分元素从林冠层转移到森林地被物及土壤层的重要途径。在 3 种林型中 P 的输入量均非常低,这是由于该元素是长期稳定元素,并主要来源于岩石风化,而鼎湖山地区土壤属于高度风化类型,大气降雨输入量也很低。穿透雨中 N 和 Ca 输入量在 3 种林型间由演替初级到顶极递减。P 和 Mg 的输入量变化趋势为季风林<松林<混交林,K 则为松林<季风林<混交林。

**表 3　3 种林型穿透雨、树干流养分年输入量和凋落物养分年归还量对比(kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$)**

**Table 3　Annual inputs of nutrients in littlefall and in throughfall+stemflow in three studied forests**

| | 林型 | N | P | K | Ca | Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 降雨 | | 56.11 | 0.90 | 19.03 | 32.18 | 5.02 |
| 穿透雨 | 季风林 | 55.04 | 1.56 | 41.23 | 37.45 | 5.64 |
| | 混交林 | 72.14 | 1.93 | 59.20 | 38.46 | 6.64 |
| | 松林 | 87.44 | 1.64 | 30.87 | 39.78 | 6.08 |
| 树干流 | 季风林 | 6.17 | 0.14 | 5.59 | 3.64 | 0.53 |
| | 混交林 | 4.10 | 0.08 | 2.72 | 2.23 | 0.31 |
| | 松林 | 0.48 | 0.02 | 0.15 | 0.20 | 0.03 |
| 穿透雨+树干流 | 季风林 | 61.20 | 1.70 | 46.82 | 41.09 | 6.17 |
| | 混交林 | 76.24 | 2.01 | 61.92 | 40.70 | 6.95 |
| | 松林 | 87.92 | 1.66 | 31.02 | 39.97 | 6.11 |
| 凋落物 | 季风林 | 130.03 | 2.61 | 10.80 | 31.72 | 4.67 |
| | 混交林 | 107.41 | 4.69 | 31.60 | 24.41 | 3.99 |
| | 松林 | 79.84 | 4.43 | 9.75 | 52.54 | 3.96 |

尽管树干流中养分元素浓度高于大气降雨和穿透雨(表 2),但树干流对地被物及土壤层的养分输入量低于大气降雨和穿透雨(表 3),以 K 为例,季风林中树干流的输入量仅 5.59 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$,仅为大气降雨的 29.4%,穿透雨的 13.6%;混交林中树干流的输入量仅 5.59 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$,仅为大气降雨的 14.3%,穿透雨的 4.6%;松林中树干流的输入量仅 0.15 kg · $hm^{-2}$ · $a^{-1}$,仅为大气降雨的 1.6%,穿透雨的 0.5%。树干流中养分元素的输入量在 3 种林型间的变化趋势由演替初级到顶极递增,即松林<混交林<季风林。

用穿透雨+树干流输入量(Nelda & Chacón, 2006)计算鼎湖山地区 3 种森林类型生态水文过程中输入土壤的养分量(表 3)。与凋落物分解对土壤层的年输入量对比发现,养分元素 K 和 Mg,穿透雨+树干流的年输入量高于凋落物归还量,前者占 3 个林型养分输入的比例分别为 66% ~ 81%,57% ~ 64%。同时,季风林和混交林穿透雨+树干流 Ca 输入量也高于凋落物归还量,占总输入量的 56% 和 63%。但对于养分 N 季风林和混交林中凋落物输入量占总输入量的比例较大,占土壤层养分总输入量的 68% 和 58%,松林凋落物输入量占 48%。养分元素 P,3 个林中均以凋落物分解输入为主,占总输入量的 61% ~ 73%。此外,松林中养分元素 Ca 凋落物输入量占总输入量的 57%。但考虑到穿透雨和树干流输入的养分物质比凋落物分解中的物质更具有活性,大多数呈可溶性无机态,不需要分解反应等一系列理化作用便可被植物直接吸收利用,因此,对于森林土壤中的养分来源,穿透雨+树干流输入比凋落物归还分解更具有重要意义,尤其对于像鼎湖山地区的酸性并且养分缺乏的森林土壤,对该地区森林生态系统的生长发育有重要意义。

## 3　讨　论

### 3.1　不同森林类型对森林结构和功能的影响

森林类型不同导致森林结构如物种组成、群落结构、植被类型、林冠结构等有差异。而这些结构的差异又是导致森林生态服务功能如水土保持、养分吸收利用及循环、水源涵养等差异的主要因素之一。鼎湖山典型 3 种森林类型物种组成和垂直结构有很大差异,其中接近气候顶级的季风常绿阔叶林群落垂直结构复杂,可划分为 5 个层次,包括乔木层 3

层、灌木层和草本层,此外还包括多种藤本及附生等层间植物(唐旭利等,2003)。第1层植物主要有黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、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、翅子树(*Pterospermum lanceaefolium*)等,高度为16~27 m;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。乔木层的郁闭度在90%以上。灌木层多为乔木幼树,有柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、罗伞树(*Ardisisa quinquegona*)等,密度较大。针阔混交林垂直结构大致分为4层,包括乔木层2层,灌木1层,草本1层,冠层连续。乔木上层主要有马尾松、锥栗、荷木,高度为8~16 m;下层主要有红皮紫棱(*Craibiodendron kwangtungense*)、黄果厚壳桂和藜蒴(*Castanopsis chinensis*)等,高4~8 m。灌木层主要有豺皮樟(*Litsea rotundifolia*)、九节(*Psychotria rubra*)和罗伞树(*Ardisisa quinquegona*)等。马尾松林群落垂直结构大致分为乔木层、灌木层和草本层3层,乔木层为马尾松,林冠不连续;灌木层有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)、龙船花(*Ixora chinensis*)和鬼灯笼(*Clerodendrum fortunatum*)等。这些结构差异对生态系统降水截留量及其养分交换有重要影响。

**3.2** 鼎湖山地区大气降雨养分变化规律

大气降雨量及降雨中的养分浓度受地理位置及周围环境因素的共同影响。鼎湖山地区受南亚热带季风影响,降雨量及降雨中养分元素含量具有季节性变化。根据多年观测结果发现,该地区降雨集中在4—9月,近30年来年平均降雨量为1656 mm,其中雨季占全年降雨量80%,旱季占20%,多年平均降雨变率为13%,远远小于长江以南地区的20%。说明该地区降雨稳定。同时,由于该地区处于人口稠密、经济发达地区,人类活动产生的干沉降也是影响大气降雨成分的主要因素之一。与其他热带亚热带地区降雨中养分平均浓度相比,鼎湖山地区大气降雨中除了P以外,其他养分浓度均偏高(N 0.04~0.85 $mg \cdot L^{-1}$、P 0.03~0.19 $mg \cdot L^{-1}$、$K^+$ 0.13~0.48 $mg \cdot L^{-1}$、Ca 0.18~0.51 $mg \cdot L^{-1}$、Mg 0.06~0.17 $mg \cdot L^{-1}$)(Wilcke *et al.*,2001;Chuyong *et al.*,2004)。其中N元素含量比报道值高出3.4~71.8倍,Mg元素含量比报道值高出1.5~4.3倍,N元素含量高与人类活动干扰频繁有密切关系,Mg元素含量偏高可能受鼎湖山地区地理位置离海较近影响(Dezzeo & Chacón,2006)。

**3.3** 不同类型森林中穿透雨和树干流养分变化规律

大气降雨通过森林群落时,林冠层对降雨的再分配作用使得降雨的体积和浓度均发生变化。由于冠层截留作用导致一部分降雨量直接蒸发而损失。损失量直接取决于降雨量性质,同时也受林型、植被组成、年龄结构、林分密度、冠层郁闭度等特征影响(周国逸,1997)。鼎湖山地区3种林型穿透雨体积按演替方向呈递减趋势,即松林>混交林>季风林,树干流体积则按演替方向呈递增趋势,即松林<混交林<季风林。这是由于从针叶林向阔叶林演替的过程中,森林和种类组成结构由单一的马尾松纯林过渡到针阔混交林再向复杂的季风林转变。林冠郁闭度和林冠层结构由简单向复杂发展。鼎湖山地区穿透雨中养分浓度含量与大气降雨相比除Ca之外基本呈上升趋势,这主要是由于林冠截留使得一部分大气降水直接从林冠蒸发,从而减少了降水体积(Kopáček *et al.*,2009)。此外,降雨和林冠层的相互作用,包括降雨对干沉降物质的冲刷;冠层及植物体表面物质的淋溶;林冠对物质元素的吸收均能导致穿透雨浓度变化(Parker,1983)。

鼎湖山3种森林树干流中养分元素浓度均显著高于大气降雨,并且在不同的森林类型中增加的程度不一致,这与目前所报道的结论相吻合(André *et al.*,2008)。树干流养分含量增加受生物和气象两大因素影响。气象因素主要包括:降雨前的干燥时间、降雨量、风速风向、周围环境中干湿沉降的元素来源等(André *et al.*,2007)。生物因素主要指树种组成(Levia & Herwitz,2005)、物候林相、树种养分状况等。鼎湖山3种森林树干流中除K外,其他养分元素浓度均为松林>季风林>混交林。这主要是由于松树树皮粗糙,比表面积大、树皮储水量大,从而增加了干沉降和离子交换的面积并减慢树干流流速,延长降雨对树干表面干沉降物质的冲刷和淋溶时间,因此导致松林树干流中养分元素含量远远高于另外2个林(André,2007)。此外,松林树干流量远远小于季风林和混交林也是导致松林树干流养分浓度高的一个原因。

鼎湖山3种森林树干流和穿透雨的养分浓度呈

明显的季节动态,即旱季浓度高,雨季中期及后期浓度较低,这种季节性变化受降雨的季节性变化以及植物生长的季节性变化影响。旱季及雨季初期由于降雨量较少,干沉降时间长,导致降雨对林冠层及树干物质的冲刷作用明显,随着雨季降雨增加,对雨中养分元素以稀释作用为主。3 种林型穿透雨养分浓度与穿透雨体积的相关性均未达到显著水平,说明在鼎湖山地区穿透雨的体积变化不是导致养分浓度变化的关键因素,这与亚马逊西北森林生态系统研究结果相同(Tobón *et al.*,2004)。造成树干流季风林中 P、Ca、Mg 和混交林中 Mg 与树干流体积的负相关关系的原因,可能是小降雨量对林冠层物质有明显的冲刷效果,随着降雨的进行,雨水对林冠及树干物质则转变为以稀释作用为主。

对 3 种林型间穿透雨的差异性比较,仅有 K 在混交林和松林间含量差异显著,其余的养分浓度在林型间的差异均未达到显著水平。这与南委内瑞拉 2 种森林研究结果相吻合(Dezzeo & Chacon,2006)。说明森林结构和区系组成不是影响林冠层养分动态的重要因素。此外,由于季风林林冠层结构的复杂性导致穿透雨在季风林林内的空间差异性较大,从而使得在不同林型间的差异性不显著(Zimmermann *et al.*,2007)。用养分富集率衡量树干对大气降雨通过树干流向地面时物质元素通量的漏斗效应,结果显示随着针叶林向阔叶林的演替,富集率呈增加趋势,说明阔叶树种养分通量比针叶树种大,造成这种变化趋势的主要原因是随着演替进行,树皮光滑、林冠层结构复杂的树种增多使得树干流量增大。

### 3.4　不同森林类型对养分输入的影响

森林水文过程输入和凋落物分解及矿化是森林养分从地上部分生物量转移到地被物及土壤层的重要内循环途径(Whitemore,1998),共同推动了森林养分循环。二者对养分迁移转换的重要性取决于养分元素的流动性、生态系统的养分状况、植被组成、树的形状及相对位置、季节等(Parker,1983)。鼎湖山地区大气降雨带来的养分输入量($kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)与其他热带地区相比(K:2.1 ~18;Ca:0.2 ~20;Mg:0.4 ~15.8;N:1.5 ~60;P:0.1 ~2.3)(Hölscher *et al.*,1998;Chuyong *et al.*,2004),K、Ca 的输入量略高,其他元素除 P 处于报道范围的偏高水平,尤其 N 元素基本和报道范围的最高值相同,说明鼎湖山地区受大气 N 沉降量影响较大。穿透雨养分的输入量($kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)与其他热带地区相比(K:2.1 ~18;Ca:0.2 ~20;Mg:0.4 ~15.8;N:1.5 ~60;P:0.1 ~2.3)(Hölscher *et al.*,1998;Chuyong *et al.*,2004;Tobón *et al.*,2004),N 和 Ca 的输入量高于已报道范围,其余元素范围基本吻合,其中 P 处于偏低水平,K 和 Mg 处于中等水平。

树干流养分输入量比大气降雨和穿透雨低,这主要是由于树干流所占大气降雨的比例远远小于穿透雨所占降雨比例和截留率,不同森林类型树干流比例不同。但树干流中养分浓度含量更高,并且能直接到达植物根部,是相对更重要的养分来源,对林下植被、菌根生长及发生在土壤中的物理化学过程有更重要作用(Chang & Matzner,2000)。此外,树干流养分输入还能对树干附生植物及动物群落有重要影响(Mitchell *et al.*,2005)。尽管树干流中的养分浓度在松林中含量高于季风林和混交林,但 3 种林型树干流养分输入量,随着演替方向呈递减规律,即季风林>混交林>松林,这主要是由于随着演替方向树干流占大气降雨比例逐渐增大,对根际附近土壤及微环境的影响增大,可能是导致 3 种林型地被植物及土壤肥力状况差异的原因之一,同时也是影响林冠层附生生物生长的重要因素之一。

通过对比 3 种林型森林水文过程的养分输入与凋落物年归还量,发现森林土壤养分的主要输入来源在不同森林类型间有差异。以 N 为例,季风林主要来源于凋落物归还分解,但混交林和松林则主要来源于穿透雨+树干流输入。鼎湖山地区长期的 N 高输入量可能导致该地区森林生态系统的 N 饱和(Fang *et al.*,2009),目前开展该地区不同森林类型对 N 沉降的响应研究已成为热点。P 在季风林和混交林中森林水文过程输入量均较小,这与 P 元素是长期稳定的元素,主要来源于岩石风化,大气降雨输入量极小,而在高度风化的成熟森林生态系统中这种作用进程极缓慢有关。鼎湖山地区森林水文过程的 N/P 比可能会导致该地区土壤 P 缺乏,从而限制森林生态系统的生长发育。研究表明,随着森林演替由初期到中后期的进行,森林生态系统越来越受到 P 限制(Wardle *et al.*,2004)。对于阳离子养分,松林穿透雨+树干流输入量比凋落物输入量高 3.5 ~6.4 倍,说明该地区大气降雨养分输入利于维持初级生态群落向顶极演替。

受地理位置和人类活动共同作用,该地区大气降雨养分输入的变异性随机性很大,从而导致森林水文过程中养分含量的时空差异性较大。同时,影

响穿透雨和树干流的因素众多,通过短期的观测对反映该地区养分输入状况的长期规律有一定的局限性,因此需要长期观测以深入研究森林类型与森林水文过程养分输入的规律,从而探讨该地区不同结构森林养分内循环规律。

**参考文献**

唐旭利, 周国逸, 周 霞,等. 2003. 鼎湖山季风常绿阔叶林粗死木质残体的研究. 植物生态学报, **27**(4): 484-489.

谢贤群, 王立军. 1998. 水环境要素观测与分析. 北京: 中国标准出版社.

闫俊华. 2001. 鼎湖山主要生态系统的水热过程研究及脆弱性初探(博士毕业论文). 北京: 中国科学院研究生院.

闫文德, 田大伦, 陈书军, 等. 2005. 4个树种径流养分特征研究. 林业科学, **41**(6): 50-56.

周传艳, 周国逸, 闫俊华, 等. 2005. 鼎湖山地带性植被及其不同演替阶段水文学过程中长期对比研究. 植物生态学报, **29**(2): 208-217.

周国逸. 1997. 生态系统水热原理及其应用. 北京: 气象出版社.

André F, Jonard M, Ponette Q. 2007. Influence of meteorological factors and polluting environment on rain chemistry and wet deposition in a rural area near Chimay, Belgium. *Atmospheric Environment*, **41**: 1426-1439.

André F, Jonard M, Ponette Q. 2008. Effects of biological and meteorological factors on stemflow chemistry within a temperate mixed oak-beech stand. *Science of the Total Environment*, **393**: 72-83.

André F. 2007. Influence of the heterogeneity of canopy structure on the spatio-temporal variability of atmospheric deposition within a mixed oak-beech stand (PhD thesis). Universite Catholique Delouvain.

Chang SC, Matzner E. 2000. The effects of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological Processes*, **14**: 135-144.

Chuyong GB, Newbery DM, Songwe NC. 2004. Rainfall input, throughfall and stemflow of nutrients in a central African rain forests dominated by ectomycorrhizal trees. *Biogeochemistry*, **67**: 73-91.

Dezzeo N, Chacón N. 2006. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. *Forest Ecology and Management*, **234**: 218-226.

Fang YT, Gundersen P, Mo JM, *et al*. 2009. Nitrogen leaching in response to increased nitrogen inputs in subtropical monsoon forests in southern China. *Forest Ecology and Management*, **257**: 332-342.

Hölscher D, De A, Sá TD, *et al*. 1998. Rainfall partitioning and related hydrochemical fluxes in a diverse and in a monospecific (*Phenakospermum guyannense*) secondary vegetation stand in eastern Amazonia. *Oecologia*, **114**: 251-257.

Kopáček J, Turek J, Hejzlar J, *et al*. 2009. Canopy leaching of nutrients and metals in a mountain spruce forest. *Atmospheric Environment*, **43**: 5443-5453.

Levia DF, Herwitz SR. 2005. Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. *Catena*, **64**: 117-337.

Mitchell RJ, Truscot AM, Leith ID, *et al*. 2005. A study of the epiphytic communities of Atlantic oak woods along an atmospheric nitrogen deposition gradient. *Journal of Ecology*, **93**: 482-492.

Nelda D, Noemí C. 2006. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. *Forest Ecology and Management*. **234**: 218-226.

Parker GG. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, **13**: 57-133.

Tobón C, Sevink J, Verstraten JM. 2004. Solute fluxes in throughfall and stemflow in four forest ecosystems in northwest Amazonia. *Biogeochemistry*, **70**: 1-25.

Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD. 2004. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, **305**: 509-513.

Whitemore TC. 1998. An Introduction to Tropical Rain Forests. Oxford University Press, Oxford, UK.

Wilcke W, Yasin S, Valarezo C, *et al*. 2001. Change in water quality during the passage through a tropical montane rain forest in Ecuador. *Biogeochemistry*, **55**: 45-72.

Zimmermann A, Germer S, Neill C, *et al*. 2008. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest. *Journal of Hydrology*, **360**: 87-102.

Zimmermann A, Wilcke W, Elsenbeer H. 2007. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology*, **343**: 80-96.

**作者简介** 张 娜,女,1985年生,硕士研究生,从事生态系统生态学研究。E-mail: nzhang@scib.ac.cn
**责任编辑** 王 伟