

鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究*

刘菊秀 张德强 周国逸** 温达志 张倩媚

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

【摘要】 雨水的水质在通过森林后会发生变化. 如果雨水是酸性的, 这种变化会更加明显. 通过一年多时间在鼎湖山主要森林类型采样分析发现, 鼎湖山大气降水 pH 值低, 酸雨频率高; 阔叶林穿透雨 pH 值比大气降水高, 树干径流和地表水 pH 值比大气降水低, 土壤自然酸化非常严重; 混交林穿透雨和地表水酸度比大气降水低, 树干径流酸度则大于大气降水; 针叶林穿透雨和树干径流都有进一步酸化趋势, 但地表水 pH 值比大气降水高. 3 种林型比较, 阔叶林林冠缓冲能力最强, 针叶林土壤缓冲能力最大. 3 种林型, 林内降水和地表水养分 N、P、K、Ca、Mg 和 Na 含量除 N 外都明显高于大气降水. 各林型树干径流对养分富集能力强于穿透水, 养分在大气降水中的浓度低于在地表水中的浓度. 针叶林林内降水比混交林和阔叶林养分含量高, 但地表水中养分浓度比后两者低. 从地表水的养分浓度看, 阔叶林和混交林养分亏损更为严重.

关键词 鼎湖山 酸沉降 水化学特征

文章编号 1001 - 9332(2003)08 - 1223 - 06 **中图分类号** X173 **文献标识码** A

A preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow and surface runoff in major forest types at Dinghushan under acid deposition. LIU Juxiu, ZHANG Deqiang, ZHOU Guoyi, WEN Dazhi, ZHANG Qianmei (South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). - *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(8): 1223 ~ 1228.

Studies on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow and surface runoff in major forest types at Dinghushan under acid deposition showed that the pH value of precipitation was about 4.90, and the frequency of acid rain was over 62%. In broad-leaved forest, the pH value of precipitation was lower than that of throughfall, but higher than that of stemflow and especially the surface runoff, indicating that the soil was naturally acidified. In mixed forest, both throughfall and surface runoff had a higher pH value, but stemflow had a lower pH value than precipitation. The throughfall and stemflow were more acidified than precipitation in coniferous pine forest, but the surface runoff had a higher pH value than precipitation. These results suggested that among the three major forest types at Dinghushan, the canopy of broad-leaved forest had the highest buffering ability, whereas for the soil, the coniferous forest had the highest soil buffering capacity. The concentrations of nutrient elements, such as P, K, Ca, Na and Mg in the throughfall, stemflow and surface runoff were higher than those in bulk precipitation in all forests at Dinghushan, some even 10 times higher, indicating that a large amount of nutrients were leached from the canopy. The concentrations of nutrient elements in stemflow were higher than those in throughfall in all forests, and the concentration of nutrient elements in surface water was higher than those in atmospheric rainfall. Coniferous forest had a higher concentration of nutrients in the throughfall and stemflow and a lower nutrient concentration in the surface runoff than other forest types, which implied that nutrient loss was more serious in broad-leaved and mixed forests than in coniferous forests.

Key words Dinghushan, Acid deposition, Chemical properties.

1 引言

森林水化学特征反映森林生长的一般生态条件和生理特性. 具体来说, 大气降水直接反映当地湿沉降情况, 间接反映当地受空气污染的现状. 因为降水过程冲刷污染物 (SO_2 、 NO_x 和 NH_3 等) 及尘埃 (含 Ca、Mg、Al、Si 和碳酸根等), 穿透雨和树干径流则反应了森林林冠和树干对湿沉降的缓冲能力 (表现在降水中 pH 值的升高与降低), 与大气降水的反应情况 (离子的释放与吸收) [2, 12]. 通过对大气降水和

地表水养分的比较则可估计森林养分流失状况 [16]. 本文的目的是研究鼎湖山主要森林类型在酸沉降背景下: 林内降水、地表水酸化状况; 林内降水、地表水养分含量; 养分输出与输入概况, 以便深入了解水酸化的过程和特点, 预测鼎湖山酸化程度和发展趋势, 反映鼎湖山森林生态系统生长的一般生态条件.

*国家自然科学基金 (39928007)、广东省自然科学基金重点资助项目 (010567).

**通讯联系人.

2001 - 06 - 14 收稿, 2001 - 12 - 23 接受.

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区

鼎湖山东距广州 86 km,南临西江 3 km,西离肇庆市 18 km,位于 112°30'39"~112°33'41"E,23°09'21"~23°11'30"N.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 1 000.3 m,坡度平均为 30°~45°.

鼎湖山属亚热带季风气候,年平均气温 20.9℃.最冷月(1月)和最热月(7月)的平均温度分别为 12.6℃和 28.0℃.年均降雨量和蒸发量分别为 1 929 mm 和 1 115 mm,4~9 月为湿季,11 月至次年 1 月为旱季,干湿季明显,年均相对湿度 81.5%.

鼎湖山分布着赤红壤、黄壤和山地灌丛草甸土,3 类土呈垂直分布.赤红壤主要分布在海拔 300 m 以下,主要粘粒矿物为伊利石、高岭石和蛭石,以伊利石为主,有机质含量 0.15~0.55 g·kg⁻¹,pH 值为 4.1~4.9,酸性较强,土层深度 30~65 cm.本论文研究的主要森林类型的土壤均为赤红壤.

鼎湖山主要植被类型为季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林.季风常绿阔叶林——锥栗、荷木、厚壳桂群落已有 400 年林龄,已接近地带性顶极群落,是亚热带森林的典型代表类型.在面积为 125 hm² 的群落内,物种丰富,结构复杂,成层现象较为明显^[19].针阔叶混交林——马尾松、锥栗、荷木群落多分布于季风常绿阔叶林的边缘,是人工或自然的马尾松林,由于阔叶树的自然入侵而形成,是演替系列中间阶段的典型代表类型.该群落垂直结构大致可分为 4 层,乔木 2 层,灌木 1 层,草本 1 层,组成种类以常绿树种占绝对优势^[18].马尾松林主要分布于季风常绿阔叶林边缘,土层较浅,一般不超过 30 cm^[15],pH 值 4.5~5.0.林冠层树种主要为马尾松林,还有少量的桉树.林龄约为 50 年,林下植物包括草本、藤本、灌木和蕨类^[5].鼎湖山主要植被类型都处于广东佛山市工业区的下风方向,虽然远离佛山 50 km 左右,但由于他们之间地势较为平坦,由东南风带来一定量的污染气体.附近 10 km 左右的高要市的陶瓷工业区也有一定的污染气体进入鼎湖山.

2.2 研究方法

2.2.1 研究材料 于 1999 年 10 月至 2000 年 12 月在各林型(季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林)收集冠层穿透雨、树干径流、地表水,同时在气象观测站同步收集大气降水,共收集、记录雨水 50 次.大气降水和穿透雨的收集器系是直径 15 cm 的聚乙烯漏斗做成.冠层穿透雨收集器分别置于各林型冠层的下方,各林型与气象站放置 5 个.树干径流水样的收集是选标准木 8 株,在离地面 1.2 m 处用聚氯乙烯胶管蛇形环绕树干,蛇形管末端接树干径流养分元素分析收集器.地表水直接在集水区进行采样.收集到的大气降水和林内降水、地表水样品经过滤后,分别置入 500 ml 的聚乙烯塑料瓶内保存,供化学分析 pH 值和 N、P、K、Ca、Mg、Na 养分含量.

2.2.2 分析方法 水样在降水后立即测定 pH 值,用 S-2 型

pH 计测定.水样当天送往实验室,用原子吸收法(GBC932AB 型,澳大利亚)分析 K、Ca、Mg、Na.水样中的 N 用紫外分光光度法、P 用钼酸铵分光光度法测定.最后进行 50 次采样的平均值计算.

3 结果与分析

3.1 鼎湖山大气降水酸度分析

鼎湖山位于肇庆境内,大气降水 pH 值很低,变动范围为 4.35~5.65,平均值 4.90,稍高于肇庆市 2000 年降水 pH 平均值 4.84(肇庆市 2000 年环境公报),也高于鹤山大气降水 pH 均值 4.44^[11],酸雨频率在 62.7% 以上.影响鼎湖山大气降水 pH 值低的原因可能很多,笔者分析主要原因是受周边地区工业迅猛发展排放出来的污染气体的影响.通过对 50 次大气降水样品进行不同 pH 值区间所占比例统计(图 1),pH 值在 4.7~5.3 之间占很大比例,50 次采样之间的标准差为 0.50.

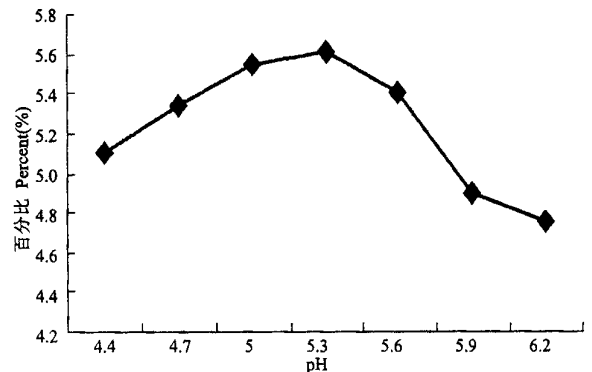


图 1 不同酸度大气降水分配比例

Fig. 1 Distribution pattern of pH values in bulk precipitation.

通过对各月降水酸度进行分析,发现随着月份的推移,pH 值有一定动态变化(图 2),4~9 月 pH 值稍高于其它月份.其原因是鼎湖山大气降水主要集中于 4~9 月,一般来说在雨季,由于降水集中,降水量大,降雨频率高,pH 值相对较高;而在旱季,降雨频率低,由于对长期集中于鼎湖山上空酸沉降前

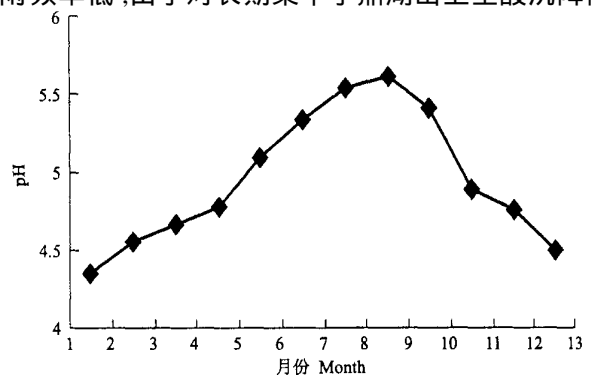


图 2 鼎湖山大气降水 pH 值月动态变化

Fig. 2 Monthly change of pH values in bulk precipitation at Dinghushan.

体物的冲刷, pH 值较低, 酸度增大. 酸雨的出现, 将会加速林冠层养分离子的冲刷^[6,7], 也容易导致森林土壤养分流失量加大^[16].

3.2 鼎湖山各林型穿透雨、树干径流和地表水酸度分析

从图 3 可以看出, 在阔叶林中与大气降水相比, 穿透雨 pH 值有所升高, 这与鹤山所得结果一样^[11], 但与周国逸、小仓纪雄^[24]在重庆南山的研究结果不同, 表明鼎湖山阔叶林冠对酸雨有一定的缓冲能力; 树干径流和地表水 pH 值低于大气降水 pH 值, 地表水尤其表现明显, 土壤自然酸化严重, 与温达志等^[22]的研究结果一致. 其主要原因是由于季风常绿阔叶林有 400 多年的历史, 属于自然演替的顶极群落类型, 生物量大, 产生凋落物有机质多, 凋落物分解过程中产生大量的有机酸和无机酸. Daniel Markewitz 等^[10]通过 30 年在永久样地采样分析后对 pH 预测发现, 38% 的土壤酸化归因于酸沉降, 62% 归因于土壤的自然酸化, 例如, 生物量的积累, 有机质的增多, 根和微生物的呼吸增强, 有机酸和无机酸增多. 大气酸沉降则加速了土壤酸化过程.

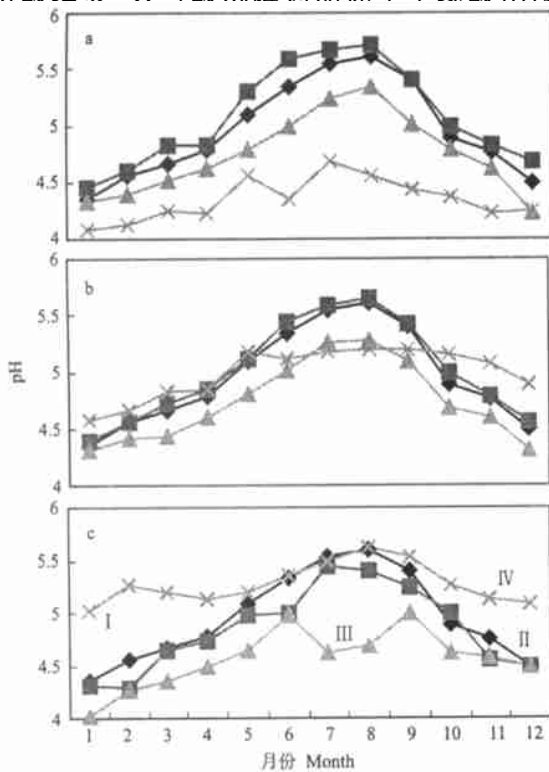


图 3 鼎湖山 3 种森林类型大气降水、穿透雨、树干径流和地表水 pH 值

Fig. 3 pH value of bulk precipitation, throughfall, stemflow and surface water in three forest types at Dinghushan.

. 大气降水 Bulk precipitation, . 穿透雨 Throughfall, . 树干径流 Stemflow, . 地表水 Surface water. 下同 The same below. a) 阔叶林 Broad-leaved forest, b) 混交林 Mixed forest, c) 针叶林 Coniferous forest. 下同 The same below.

Warfvinge 等^[21]在瑞典北部森林的研究结果也表明, 即使人为导致了酸沉降产生, 但有机物含量的多少仍然对地表水的酸度起着决定作用, 也即有机物导致土壤的自然酸化过程.

针阔叶混交林穿透雨和地表水 pH 值稍高于大气降水, 树干径流 pH 值低于大气降水, 林冠和土壤都对酸雨有一定的缓冲能力. 马尾松林穿透雨和树干径流较大气降水都有进一步酸化的趋势, 然而土壤酸缓冲能力较强. 其原因可能是针叶林生产力低, 所产生的凋落物较少, 因而有机物分解所产生的有机酸和无机酸较少, 自然酸化不如其它两种林型. 混交林冠层缓冲能力不及阔叶林, 土壤酸缓冲能力则高于阔叶林. 马尾松林冠酸缓冲能力不及阔叶林和混交林, 但土壤酸缓冲能力大于阔叶林和混交林. 在 3 种林型中, 树干径流都有进一步酸化趋势, 可能是因为树干径流量小, 且融入了一部分树干分泌的有机酸和无机酸^[6,7].

植被通过林冠对酸沉降截留、收集和蓄存作用, 叶面对酸性气体和气溶胶的吸收作用, 叶片的分泌作用以及降水对冠层的洗脱作用, 影响整个生态系统酸沉降的缓冲能力. 造成鼎湖山 3 种不同林型林冠酸缓冲能力的差别的因为: 1) 不同类型冠层接受的干沉降量为针叶林冠 > 阔叶林冠^[25]; 2) 不同冠层叶片各种离子分泌量不同, 矿质分泌量为阔叶林 > 针叶林, 其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分泌量阔叶林分别是针叶林的 7.3 倍和 2.5 倍, 而酸性物质的分泌量则是阔叶林 < 针叶林, 其中阔叶林 SO_4^{2-} 的分泌量只有针叶林的 1/3 左右^[20].

3.3 鼎湖山大气降水、穿透雨、树干径流和地表水养分状况

3.3.1 穿透雨、树干径流和地表水与大气降水的化学组成对比

在鼎湖山 3 种主要林型季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林中, 穿透雨、树干径流和地表水养分 N、P、K、Ca、Mg 和 Na 含量除 N 外都明显高于大气降水中养分含量 (图 4), 增加倍数有的甚至高达 10 多倍 (表 1), 大量营养离子从林冠层淋溶下来, 这与曹洪法等^[6]在峨眉山的 研究结果一致. 林冠淋溶是自然发生现象, 穿透雨、树干径流养分含量一般较大气降水养分含量高, 然而酸沉降往往促进林冠层离子的淋溶作用. 在阔叶林, 穿透雨、树干径流养分含量为 $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$; 在针叶林和混交林, 穿透雨、树干径流养分含量则为 $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$.

从表 1 可看出, 穿透雨、树干径流两者养分浓度

表 1 鼎湖山 3 种森林类型穿透雨、树干径流和地表水与大气降水养分含量之比

Table 1 Ratio of nutrient concentration of throughfall, stem flow and surface water to the rainfall in three forests at Dinghushan

林型 Forest type	水类型 Water type	Ca	Mg	K	Na	P	N
阔叶林 Broad-leaved forest	穿透雨 Throughfall	1.4	5.4	15.9	2.6	1.2	0.5
	树干径流 Stemflow	1.8	3.9	15.9	4.4	2.9	1.0
	地表水 Surface water	3.55	15.3	9.2	9.7	10	1.0
混交林 Mixed forest	穿透雨 Throughfall	1.2	9.1	3.3	4.2	3.3	2.1
	树干径流 Stemflow	1.7	6.0	15.1	3.4	2.9	1.9
	地表水 Surface water	2.9	10.9	10.5	6.7	2.1	0.8
针叶林 Coniferous forest	穿透雨 Throughfall	2.4	7.0	11.5	3.1	8.4	2.1
	树干径流 Stemflow	5.9	8.5	16.2	8.6	3.8	4.6
	地表水 Surface water	1.5	4.9	6.0	6.4	3.0	0.9

都大于大气降水.这是因为通常林冠层拦截了一定量的干沉降以及林冠分泌了一些代谢产物,当下雨时这些物质随着大气降水一起被淋溶下来,降雨酸度增大,会促进养分离子的流失;降水中 H^+ 被叶片吸收,与叶子中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等阳离子进行交换;冠层叶片中淋失的弱碱与雨水中强酸结合,形成弱酸和硫酸盐或硝酸盐.这一过程导致降水溶液中 H^+ 的净消耗,从而造成 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等养分的流失^[9].树干径流对养分的富集明显多于穿透雨,是因为树干径流量小,且融入了一些树干分泌的有机酸和无机酸^[6,7].

地表水中营养离子显著高于大气降水.随着大气降水,土壤中的营养离子也被流失.从表 5 中可以看出,Mg、K、P、Ca 和 Na 等养分在大气降水中浓度远低于在地表水中的浓度,Mg、K 表现尤为明显.Niklinska 等^[16]通过波兰南部一森林的营养元素输入和输出量研究也发现,随地表水大量养分从土壤流失.

3.3.2 大气降水、穿透雨、树干径流和地表水中主要营养元素 鼎湖山大气降水中有有效氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N) 浓度为 $1.593\mu g \cdot ml^{-1}$,大大超过程伯容等^[8]在长白山大气降水中测定的有效氮浓度 $0.53\mu g \cdot ml^{-1}$.大气降水进入各林型后,N 浓度有一定程度的增加(图 4),然而各林型地表水中,N 含量较之大气降水有下降趋势.在如此高的 N 沉降量下,为何出现此特殊现象呢?其原因是鼎湖山土壤酸化严重,由于酸性环境对 N 硝化具有抑制作用^[13],很少转化为 NO_3^+-N ,而 N 的流失主要通过硝酸根的形式流失,所以就出现了 N 在地表水中的浓度相对较低的现象.N 流失量低,表明在鼎湖山森林生态系统 N 还未饱和.挪威和瑞典的部分森林生态系统在严重酸沉降影响下,也未发现 N 饱和现象^[1,3].N 沉降量增加,将促进植物体生长,然而也会导致土壤酸化,系统养分平衡失调^[4].鼎湖山主要森林类型对 N 高沉降量的吸收是否会导致土壤养分失衡,仍需进一步研究.

降雨中 P 主要来源是大气降尘的溶解.因此,除高 P 地区(P 矿区)外,一般降雨中含 P 量很少^[17],鼎湖山也不例外,大气降水中 P 含量为 $0.029\mu g \cdot ml^{-1}$.P 在阔叶林、混交林、马尾松林穿透雨和树干径流富集倍数不如 K、Ca、Mg、Na 明显,分别为大气降水的 1.2、3.3、8.4 倍和 2.9、2.9、3.8 倍.针叶林 P 富集能力比阔叶林强,然而阔叶林 P 在地表水中的浓度大于针叶林 P 在地表水中的浓度,说明

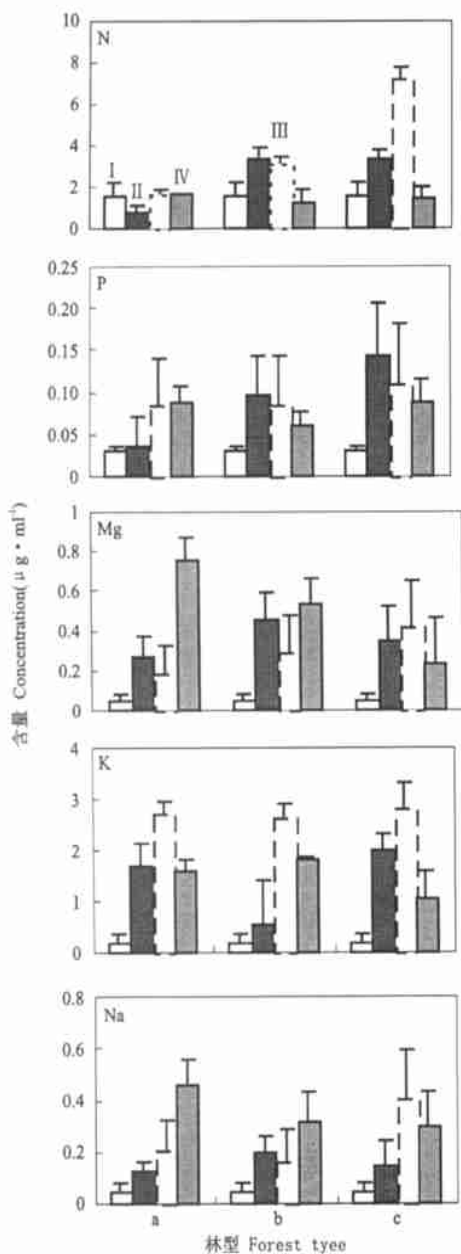


图 4 鼎湖山 3 种森林类型大气降水、穿透雨、树干径流和地表水养分含量

Fig. 4 Concentration of nutrient in bulk precipitation, throughfall, stemflow and surface water in three forest types at Dinghushan.

阔叶林地表水酸化比针叶林更严重。

K 是一种溶解度高的营养元素,在植物体内转移快,淋洗显著。据测定,鼎湖山大气降水中浓度为 $0.173 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$,而在阔叶林、混交林、马尾松林穿透雨中浓度分别为 1.683 、 0.568 和 $1.994 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$,树干径流中浓度为 2.749 、 2.617 和 $2.81 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$ (图 4),增加非常显著。对大气降水和地表水中 K 含量进行比较,发现各林型 K 素在地表水中含量很高,说明流失非常显著。3 种林型中地表水中养分 K 浓度分别是大气降水中浓度的 9.2、10.5 和 6.0 倍 (表 1)。

Ca 主要来源于陆地上的尘埃及有机物。鼎湖山大气降水中 Ca 浓度为 $0.883 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$,比程伯容等^[8]在长白山大气降水中测定的浓度低,可能是离肇庆市区较远的缘故。Ca 溶解度不如 K,淋洗较困难,因而在林内降水中增加量不如 K 那么明显,在阔叶林、混交林、马尾松林穿透雨中浓度分别是大气降水中的 1.4、1.2 和 2.4 倍,树干径流中则分别是大气降水中的 1.8、1.7 和 5.9 倍 (表 1)。

Mg 也是较难溶解和淋洗的一种营养元素。鼎湖山大气降水中 Mg 含量为 $0.049 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$,在阔叶林、混交林、马尾松林穿透雨中分别为 0.265 、 0.448 和 $0.344 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$,树干径流中分别为 0.191 、 0.292 和 $0.417 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$ 。Mg 虽然溶解度不如 K,但在地表水中浓度很高,分别是大气降水中浓度的 15.3、10.9 和 4.9 倍,表明从土壤中流失了一定量的 Mg,暗示酸性土壤中发生 H^+ 与 Mg^{2+} 的置换作用。

Na 对植物的功能还未确定,但在林内降水中具有重要意义。因为它指示着特有的来源。鼎湖山大气降水中 Na 浓度为 $0.047 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$,比鹤山大气降水中浓度低^[14],可能是离海相对较远的缘故。在鼎湖山 3 种林型穿透雨和树干径流、地表水中,Na 素富集量增加。

4 讨 论

冠层淋洗是一种自然现象,对于养分循环和林木生长可起到重要作用:1) 林内降水归还土壤的养分容易被林木吸收;2) 林内降水的养分和凋落物的养分可起到互补作用;3) 冠层淋洗能加速营养元素的循环和生物作用,促进植物生长^[23]。过度淋洗会造成营养物质析出量超过正常的淋洗量,对林冠层产生负面影响。Cronan 等的研究表明,酸性降水促进盐离子在冠层雨的富集,造成叶片中营养离子流失^[9]。在本研究中,由于鼎湖山酸雨频繁出现,使林

内降水养分含量高,高出大气降水养分含量很多,显示了酸沉降对冠层淋洗的促进作用。过分的冠层淋洗容易使鼎湖山主要森林类型养分输出量大于养分输入量。

阔叶林冠酸缓冲能力比针叶林冠强,表现在阔叶林穿透雨 pH 值比大气降水高,但养分流失量在阔叶林也相对最大,地表水中养分浓度最高。阔叶林中,地表水养分浓度高,土壤养分流失量大,原因是由于阔叶林林龄长,生物量大,产生凋落物多,有机物分解产生的有机酸和无机酸含量高,土壤自然酸化比较严重,而酸沉降加速着这一进程。在土壤严重酸化的情况下,为中和 H^+ 贡献了大量的盐基离子,导致了养分离子的大量流失。Mg、P 两种元素含量本来不高,然而在阔叶林地表水中浓度很高,阔叶林最有可能出现养分失衡。一般来说,针叶林更容易受到酸沉降的影响,然而在鼎湖山针叶林内降水养分富集能力最强,而地表水中浓度却最小。

5 结 论

5.1 鼎湖山阔叶林穿透雨 pH 值比大气降水高,树干径流和地表水 pH 值比大气降水低,土壤自然酸化非常严重;混交林穿透雨和地表水酸度比大气降水低,树干径流酸度则大于大气降水;马尾松林穿透雨和树干径流都有进一步酸化趋势,但地表水 pH 值比大气降水高。3 种林型比较,阔叶林冠酸缓冲能力最强,马尾松林土壤缓冲能力最大。

5.2 3 种林型,林内降水和地表水 N、P、K、Ca、Mg 含量除 N 外都明显高于大气降水,与在鹤山研究结果一致。各林型树干径流对养分富集能力强于穿透水,养分在大气降水中的含量低于在地表水中的含量。针叶林林内降水比混交林和阔叶林养分含量高。从地表水中养分浓度看,阔叶林和混交林养分流失更为严重。

参考文献

- 1 Abrahamsen G, Stuanes AO. 1998. Retention and leaching of N in Norwegian coniferous forests. *Nutr Cycl Agroecol*, **52**(2-3): 171 ~ 178
- 2 Amezcaga I, Arias AG, Domingo M, et al. 1997. Atmospheric deposition and canopy interactions for conifer and deciduous forests in northern Spain. *Water Air Soil Poll*, **97**:303 ~ 313
- 3 Binkley D, Hogberg P. 1998. Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? *For Ecol Man*, **92**:119 ~ 152
- 4 Boxman P, Blanck K, Brandrud TE, et al. 1998. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project. *For Ecol Management*, **101**(1/3): 65 ~ 79
- 5 Brown SM, Lenart MT, Mo J, et al. 1995. Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China. *Biotropica*, **27**:276 ~ 289

- 6 Cao H-F(曹洪法), Wang W(王 玮), Gao Y-X(高映新), *et al.* 1989. Response of forest canopy to acidic precipitation and its effects. *China Environ Sci* (中国环境科学), **9**(2): 81 ~ 85 (in Chinese)
- 7 Cheng B-R(程伯容), Xu G-S(许广山), Gao S-D(高世东). 1989. Biogeochemical response of forest canopies to acid precipitation. *China Environ Sci* (中国环境科学), **9**(2): 155 ~ 157 (in Chinese)
- 8 Cheng B-R(程伯容), Xu G-S(许广山), Geng X-Y(耿晓源), *et al.* 1993. Nutrient input of throughfall in a pine-spruce-fir forest of Changbai Mountain. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **4**(4): 447 ~ 449 (in Chinese)
- 9 Cronan CS, Reiners WA. 1983. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hard-wood forests in New England. *Oecologia*, **59**: 216 ~ 223
- 10 Daniel M, Daniel DR, Allen HL, *et al.* 1998. Division S-7-forest & range soils, three decades of observed soil acidification in the cal-houn experimental forest: Has acid rain made a difference. *Soil Sci Soc Am J*, **62**: 1428 ~ 1439
- 11 Fang W(方 炜), Ding M-M(丁明懋), Lu D-M(吕冬梅). 1995. Hydrological dynamics and nutrient migration with precipitation of artificial *Acacia mangium* forest in low subtropical downland. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **15** (suppl.): 115 ~ 123 (in Chinese)
- 12 Fenn ME, Kiefer JW. 1999. Throughfall deposition of nitrogen and sulfur in a Jeffrey pine forest in the San Gabriel Mountains, southern California. *Environ Poll*, **104**: 179 ~ 187
- 13 Jordan CF, Todd RL, Escalate C. 1979. Nitrogen conservation in a tropical rain forest. *Oecologia*, **39**: 123 ~ 128
- 14 Liu J-X(刘菊秀), Wen D-Z(温达志), Zhou G-Y(周国逸). 2000. Chemical properties of the rainfall in the coniferous and broad-leaved forests in acid rain area of Heshan, Guangdong. *China Environ Sci* (中国环境科学), **20**(3): 198 ~ 202 (in Chinese)
- 15 Mo J, Brown S, Lenart MT, *et al.* 1995. Nutrient dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China. *Biotropica*, **27**: 290 ~ 304
- 16 Niklinska M, Maryanski M, Szarek G, *et al.* 1995. Chemical input/output balance for a moderately polluted forest catchment in southern Poland. *Water Air Soil Poll*, **3**: 1771 ~ 1776
- 17 Nu R-K(鲁如坤), Shi T-J(史陶钧). 1979. The content of plant nutrients of precipitation in Jinhua District of Zhejiang Province. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **16**(3): 81 ~ 84 (in Chinese)
- 18 Peng S-L(彭少麟), Fang W(方 炜). 1995. Dynamic characteristic of biomass and productivity at the different succession stages of south subtropical forests. *Ecol Sci* (生态科学), (2): 1 ~ 8 (in Chinese)
- 19 Ren H(任 海), Peng S-L(彭少麟), Zhang Z-P(张祝平), *et al.* 1996. Study on canopy structure and canopy radiation of monsoon evergreen broad leaf forest in Dinghushan biosphere reserve, Guangdong. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **16**(2): 174 ~ 179 (in Chinese)
- 20 Wang W(王 炜), Cao H-F(曹洪法). 1993. Response of forest canopy to acidic fog in Hengshan mountain. *Res Environ Sci* (环境科学研究), **6**(6): 32 ~ 37 (in Chinese)
- 21 Warfvinge P, Lofgren S, Lundstrom U. 1995. Implications of natural acidification for mitigation strategies in northern Sweden. *Water Air Soil Poll*, **2**: 499 ~ 504
- 22 Wen D-Z(温达志), Zhou G-Y(周国逸), Kong G-H(孔国辉). 2000. A status report on the effects involved with acid rain on plants, soils and surface waters of three selected terrestrial ecosystems in lower subtropical China. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **19**(5): 11 ~ 18 (in Chinese)
- 23 Yao W-H(姚文华), Yu Z-Y(余作岳). 1995. The nutrient content of throughfall inside the artificial forests on downland. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **15** (suppl.): 124 ~ 131 (in Chinese)
- 24 Zhou G-Y(周国逸), Ogura NR(小仓纪雄). 1996. The influences of acid rain of the liberation of several elements from various soil types in Chognqing. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **16**(3): 251 ~ 257 (in Chinese)
- 25 Zhou X-P(周修萍), Xiang F(向 锋). 1993. The ILWAS model for the effect of acid precipitation, soil and vegetation on surface water acidification. *China Environ Sci* (中国环境科学), **13**(2): 90 ~ 94 (in Chinese)

作者简介 刘菊秀,女,1975年生,在读博士,主要从事植物环境生态学研究工作,发表文章9篇。E-mail: ljxiu@scib.ac.cn
