

# 酸雨作用下的森林冠层 盐基离子( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ )淋洗

蒋益民<sup>1</sup>, 曾光明<sup>1\*</sup>, 张 龚<sup>1</sup>, 刘鸿亮<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学环境科学与工程系, 湖南 长沙 410082; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 在韶山针阔叶混交林中设立了 10 个 30 m×30 m 的样方, 对 1 年中各个季节的森林截留沉降、降雨后树冠层总滤出量、盐基离子滤出量以及树冠层对  $\text{H}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  的摄入量进行了分析和估算。韶山森林湿沉降成分中以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  含量较低。树冠层盐基离子总滤出量中  $\text{Ca}^{2+}$  最高, 达到  $155.34 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  最低, 为  $30.74 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,  $\text{K}^+$  居中, 为  $84.13 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。  $\text{Ca}^{2+}$  的大量滤出表明它是树冠层缓冲降水酸度的主要介质, 同时也表明酸雨对韶山森林的潜在危害, 其在总滤出量中的比重的季节变化是: 夏(58.4%)> 春(54.1%)> 冬(51.4%)> 秋(32.5%)。盐基离子的滤出量以冬→春→夏→秋依次递减, 但是树冠层季节摄入  $\text{NH}_4^+$  的量在  $30\text{--}100 \text{ mmol m}^{-2}$ , 而对  $\text{H}^+$  的摄入量则在  $30\text{--}180 \text{ mmol m}^{-2}$ 。

**关键词:** 酸沉降; 盐基离子; 树冠滤出; 亚热带森林

中图分类号: X517

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2004)05-0425-06

## Leaching of Base Cations ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ ) from Forest Canopy during Acid Rain

JIANG Yi-min<sup>1</sup>, ZENG Guang-ming<sup>1\*</sup>, ZHANG Gong<sup>1</sup>, LIU Hong-liang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Ten plots were used to study the interception deposition, total canopy leaching, base cations from canopy leaching, and the  $\text{H}^+$  and  $\text{NH}_4^+$  uptake by the canopy in subtropical coniferous-broadleaved mixed forest in Shaoshan, Hunan Province, from January 2001 to June 2002. The predominant elements in wet deposition in the forest were  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{K}^+$ .  $\text{Ca}^{2+}$  from canopy leaching was high, amounting to  $155.34 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , followed by  $\text{K}^+$  ( $84.13 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) and  $\text{Mg}^{2+}$  ( $30.74 \text{ mmol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Large amount of  $\text{Ca}^{2+}$  leaching indicated that it was the main acidity buffering agent from canopy leaching, suggesting the potential harmfulness of acid rain to the forest. Seasonal changes in the amount of base cations from canopy leaching were in the order of winter > spring > summer > autumn, but the proportion of total leaching were summer (58.4%) > spring (54.1%) > winter (51.4%) > autumn (32.5%). Seasonal uptake of  $\text{NH}_4^+$  by the canopy in the year observed varied from 30 to 100  $\text{mmol m}^{-2}$ , and that of  $\text{H}^+$  from 30 to 180  $\text{mmol m}^{-2}$ .

**Key words:** Acid deposition; Base cations; Canopy leaching; Subtropical forest

酸雨对各种类型的森林冠层的影响与作用机理, 如林内降水化学<sup>[1]</sup>、树冠层的植物营养离子的交换(淋溶与吸收)<sup>[2,3]</sup>, 以及盐基离子在森林生态系统

中的动态演化过程等, 引起了国内外许多学者的关注和研究。有研究认为森林冠层能显著改变降雨的化学特性, 而且针叶林能有效收集大气干沉降物

收稿日期: 2003-10-27 接受日期: 2004-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(70171055, 50179011); 2000 年度高等学校优秀青年教师科研奖励计划项目资助

\* 通讯作者 Corresponding author

质,不同树种穿透水中离子浓度总量都与叶面积指数成正比<sup>[4,5]</sup>。

在以往的森林降水研究中,一般只对林内单一森林冠层穿透水及其沉降进行研究,研究周期以年为单位,不能全面反映酸雨对季节分明的亚热带地区的森林冠层的作用<sup>[6]</sup>,如曾对重庆针叶林<sup>[7]</sup>中穿透水、茎干流的化学特征进行过研究,却未涉及森林冠层的缓冲作用及盐基离子淋溶量等定量研究。韶山属热带向温带过渡的亚热带气候,生长在这里的树种也具有较大的复杂性和兼容性,森林冠层结构呈二维分布<sup>[8,9]</sup>。本文采用森林冠层在酸沉降作用下的年度研究方法,探讨这种特殊二维冠层结构的森林在不同降水酸度下盐基离子的季节性变化,并分析酸沉降对森林冠层营养结构和生命力的影响,为酸雨环境下的森林经营管理提供科学依据。

## 1 研究地概况

研究地韶山位于湖南省中部,东经 112°91',北纬 27°87',属于亚热带气候,丘陵地貌,平均海拔 292.3 m,年平均降雨量 1 200–1 700 mm;林内物种多样,高大的乔木树种主要有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、油桐(*Vernicia fordii*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*);低矮的灌木主要有山茶花(*Camellia japonica*)、油茶(*C. oleifera*)、夹竹桃(*Nerium indicum*)以及冬青卫茅(*Euonymus japonicus*)等。其中以杉木、马尾松为主,约占到森林覆盖面积的 55%,香樟约占 25%,其次是毛竹。这些树种在林地空间形成明显的复合型树冠层的垂直分布结构,即有高大乔木冠层(Canopy)和低矮的灌木冠层(Sub-canopy)上下两个冠层结构,森林降水经过这种二维结构的冠层到达地表进入土壤层。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集

2001 年 1 月–2002 年 6 月在韶山针阔叶混交林中设立 10 个 30 m×30 m 的研究样方,考虑到样品采集的代表性,分别设立 16 个乔木冠层和 12 个灌木冠层穿透水(包括冠层树叶滴水 and 直接穿透冠层到达地表的雨水)收集点,设点时考虑了地形和风向的影响;在一开旷地带安装一台自动降水采样器同步收集降水样品,逢雨必采。穿透水主要反映高

大乔木冠层对降水的作用,采集方法是在每个收集点选定标准木,在离地面 1 m 的树干处设置一个直径为 10 cm 的上开口的聚氯乙烯容器,中间放置过滤薄片以防止树叶和昆虫进入,下方连一个专用聚乙烯接水容器。地表穿透水则反映低矮灌木层对大气降水的继续作用,采集方法是在每个采样点处用一个直径为 15 cm 的上开口聚乙烯容器置于土中,使之与地表平齐。

### 2.2 分析方法

每周对采集水样的 pH 值,  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  等物质含量进行测定和分析。金属离子采用原子吸收分光光度计(SH-3800)进行分析,阴离子采用 DX-120 离子色谱(DIONEX)进行分析。pH 值以 PHS-3C 数字酸度计现场测定。降水离子浓度采取离子浓度雨量加权法:

$$\bar{C}_j = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ij} V_i}{\sum_{i=1}^N V_i}$$

式中:  $\bar{C}_j$  为  $j$  离子浓度均值;  $C_{ij}$  为第  $i$  次降水中  $j$  离子浓度;  $V_i$  为第  $i$  次降水的降水量;  $N$  为季节降水总次数。

### 2.3 计算方法

有报道指出树冠层能滤出  $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$ , 但通常认为  $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$  的滤出量可以忽略不计<sup>[9]</sup>, 因此认为树冠层的滤出物主要是盐基阳离子。降水的  $H^+$  在树冠层与树叶中的盐基阳离子发生置换反应, 将  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  从树叶内部置换出来。一般认为树冠层  $H^+$  的交换量就等于树冠穿透水中盐基阳离子( $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ )的洗脱量<sup>[10]</sup>。盐基阳离子( $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ )的树冠层滤出量可用 Na- 渗透法<sup>[11]</sup>计算得到。这种方法有两个关键性的假设, 首先假设穿透水样品中的 Na 相对惰性而且树冠层中并不滤出此物质, 尽管有些研究表明有少量的 Na 可从冠层滤出<sup>[12]</sup>, 但是从在韶山的监测来看, 全年的 Na 的沉降量变化幅度并不大, 占总湿沉降的 5% 左右。其次是假设含有  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  等物质的颗粒与含有 Na 的颗粒有相同的粒径和沉降速率。阳离子滤出量按下式计算(其中  $ID$  为截留沉降 interception deposition;  $PD$  为降水沉降 precipitation deposition;  $TF$  为穿透水 throughfall;  $CL$  为冠层滤出 canopy leaching;  $SF$  为树干流 stemflow):

$$\left(\frac{ID}{PD}\right)_x = \left(\frac{ID}{PD}\right)_{Na} \quad x \text{ 为 } Ca^{2+} \text{ 或 } Mg^{2+} \text{ 或 } K^+ \quad (1)$$

$$ID_x = \left(\frac{ID}{PD}\right)_{Na} \times PD_x \quad (2)$$

$$ID_{Na} = TF_{Na} - PD_{Na} \quad (3)$$

ID<sub>x</sub> 就是 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 等物质的干沉降部分，而树冠层滤出的部分就是穿透水中离子沉降量减去截留沉降量和降水沉降量，即：

$$CL_x = TF_x - ID_x - PD_x \quad (4)$$

由于树冠在生长过程中盐基阳离子也会随所分泌的弱酸物质一同析出<sup>[13]</sup>。因此，树冠层总摄入的 H<sup>+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的量等于树冠层滤出的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 总量中减去随树冠层分泌的弱酸等代谢产物一同滤出的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 的量。计算树冠层分泌的盐基阳离子的量，采用 van der Mass 和 Pape<sup>[14]</sup>提出的分泌因子(Excretion factor, EF)法(其中 ID 为干沉降，对于中性有机弱酸而言，认为 ID=PD<sup>[15]</sup>；wa 为弱酸 weak acid；ca 为阳离子 cations；an 为阴离子 anions)：

$$EF = CL_{ua} / (CL_{Ca^{2+}} + CL_{Mg^{2+}} + CL_{K^+}) \quad (5)$$

$$\text{其中：} CL_{ua} = TF_{ua} + SF_{ua} - PD_{ua} - DD_{ua} \quad (6)$$

$$TF_{ua} = TF_{ca} - TF_{an}; SF_{ua} = SF_{ca} - SF_{an};$$

$$PD_{ua} = PD_{ca} - PD_{an} \quad (7)$$

在冠层与 H<sup>+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 交换的盐基阳离子滤出量可由下式得到：

$$CL_{bc} = (CL_{Ca^{2+}} + CL_{Mg^{2+}} + CL_{K^+}) \times (1 - EF) \quad (8)$$

假设所有的有机酸均以一种中性盐的形式存在，对于计算分泌因子(EF)而言，几乎所有已测的离子均对阴阳离子平衡起作用，这样 EF 就具备了较好准确性<sup>[14]</sup>。

在实验室的研究中发现，H<sup>+</sup> 与盐基阳离子的交换速率是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的 6 倍<sup>[16]</sup>。因此，冠层的 H<sup>+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的摄入量分别为：

$$CU_{H^+} = CL_{bc} / (1 + (1/[6 \times (TF_{H^+}/TF_{NH_4^+} + BP_{H^+}/BP_{NH_4^+})/2])) \quad (9)$$

$$CU_{NH_4^+} = CL_{bc} - CU_{H^+} \quad (10)$$

### 3 结果和分析

#### 3.1 大气沉降与树冠层滤出

截留沉降(ID)反映的是森林冠层大气干沉降部分。如图 1 所示，Ca<sup>2+</sup> 的截留沉降季节变化并不大，在 50 mmol m<sup>-2</sup> 左右，夏季最高达到 52.75 mmol m<sup>-2</sup>，冬季最低为 45.5 mmol m<sup>-2</sup>；Mg<sup>2+</sup> 截留沉降在前 3 个季节维持在 7.5 mmol m<sup>-2</sup> 左右，冬季则下降到 4.17 mmol m<sup>-2</sup>；K<sup>+</sup> 的季节截留沉降呈明显的梯度变化，按夏→冬→春→秋依次减小。韶山森林截留沉降成分以 Ca<sup>2+</sup> 为主，Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 较低，大气降水中 Ca<sup>2+</sup> 的浓度较高(表 1)。雨水的化学成分的相关性分析表明<sup>[17]</sup>，Ca<sup>2+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的相关程度很高(r=0.92)，而 H<sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的相关度很低；NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Ca<sup>2+</sup> 的相关程度很高(r=0.80)。土壤中的含 Ca<sup>2+</sup> 物质可能是穿透水中 Ca<sup>2+</sup> 源之一，大气降水会将悬浮在空中的土壤气溶胶物质冲洗下来，进入森林生态系统。目前关于大气降水中 Ca<sup>2+</sup> 的来源有 3 种说法<sup>[18]</sup>：1. 含有 CaCO<sub>3</sub> 的碱性灰尘在干燥的沉积物中、大气气溶胶中或是雨水中与 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 或 HNO<sub>3</sub> 发生反应；2. 含有 CaO 的颗粒排放物在干燥的沉积物中、大气气溶胶中或雨水中与 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 或 HNO<sub>3</sub> 发生反应；3. 含有 CaSO<sub>4</sub> 的矿物质，例如含石膏的尘土被雨水溶解，可以提供 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>。

树冠层盐基离子滤出量不仅受当地气候、地理条件以及森林生态系统状况的影响，而且还取决于森林冠层结构和生理状况<sup>[19]</sup>。从图 1 和 2 可以看出，盐基离子滤出总量季节变化呈明显的梯度变化，按冬→春→夏→秋依次减小。Ca<sup>2+</sup> 的冠层滤出量四季呈明显的梯度变化，春→夏→秋递减，冬季则增加；Mg<sup>2+</sup> 的冠层滤出量秋冬两季明显大于春夏两季，而且从秋季到冬季有个较大的增加梯度；K<sup>+</sup> 的滤出量总体上与 Mg<sup>2+</sup> 相似，但以秋季最高，达到 90.49 mmol m<sup>-2</sup>，冬季下降。冠层盐基离子滤出量最大的是 Ca<sup>2+</sup>，年均值为

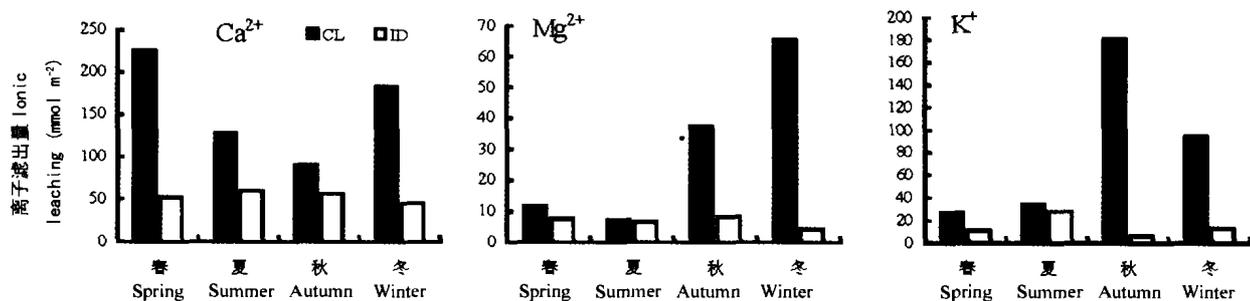


图 1 树冠截留沉降 (ID) 和树冠层滤出的盐基离子 (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) 量 (CL)

Fig. 1 Amounts of base cations (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup>) from interception deposition (ID) and canopy leaching (CL) in different seasons

表 1 韶山森林各季节降雨次数、pH 值、离子浓度 (mmol/L)  
Table 1 Rain times, pH value and concentration of ions (mmol/L) in Shaoshan forest

	降雨次数(酸雨) Rain times (acid rain)	pH	酸雨频率 Acid rain frequency (%)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
春季 BP	15(9)	4.75	60	32.57	18.92	13.55	12.18	215.63
Spring TF	-	5.96	40	237.50	49.36	79.80	11.30	311.53
夏季 BP	24(14)	4.35	63	85.00	37.02	7.42	15.65	66.52
Summer TF	-	6.59	30	166.00	65.82	80.82	12.17	190.13
秋季 BP	12(9)	5.51	75	25.25	14.81	5.62	7.00	30.49
Autumn TF	-	6.18	35	125.5	62.53	122.76	14.78	173.50
冬季 BP	16(12)	4.30	80	22.5	8.23	12.79	13.04	105.32
Winter TF	-	4.32	56	177.50	106.95	150.90	25.65	133.04

BP: 大气降水 Bulk precipitation; TF: 穿透水 Throughfall.

155.34 mmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; Mg<sup>2+</sup> 最小, 为 30.74 mmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; K<sup>+</sup> 居中, 为 84.13 mmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Ca<sup>2+</sup> 最大的原因可能有 3 个: 1. 悬浮在空中的含 Ca<sup>2+</sup> 物质对森林内 Ca<sup>2+</sup> 离子沉降有个净输入过程<sup>[11]</sup>; 2. Ca<sup>2+</sup> 是植物细胞壁的主要组成成分, 酸性较强的降水会破坏植物叶表的蜡质和角质层, 使酸性物质直接进入树叶组织内部淋溶盐基离子<sup>[9]</sup>; 3. Ca<sup>2+</sup> 的滤出量受到降水酸性的影响, 酸性越强, 其淋溶盐基离子的能力也就越强<sup>[14]</sup>.

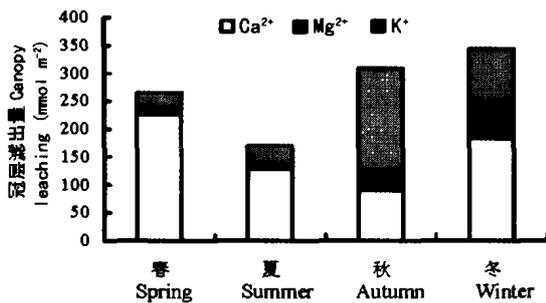


图 2 树冠层盐基离子季节滤出总量  
Fig. 2 Seasonal changes in total amount of base cations from canopy leaching

### 3.2 树冠层盐基离子的滤出量

树冠层的总滤出量包括树冠层分泌部分和冠层滤出部分<sup>[9]</sup>。总滤出量与分泌量之差就是冠层盐基离子与 H<sup>+</sup> 发生置换反应后的滤出量 (CL<sub>bc</sub>)。

如图 3 所示, 盐基离子滤出量的季节变化以冬→秋→春→夏的顺序依次递减, 分别为 271.60, 260.50, 189.30, 150.70 mmol m<sup>-2</sup>; 在总滤出量中所占比重为夏 (58.4%) > 春 (54.3%) > 冬 (51.4%) > 秋 (32.5%)。盐基离子滤出率较高的夏、春两季刚好是树叶初生到伸展完全的季节, 刚伸展完全的树叶对酸雨的敏感性较强, 其组织易被酸雨洗脱<sup>[20]</sup>。模拟酸雨淋溶的结果表明, 雨水 pH 值在 4.5 以下对树叶

的淋溶作用较强, 而 pH 大于 5.0 的雨水其淋溶作用则不明显<sup>[8]</sup>。韶山森林秋季的降水 pH 值为 5.51, 对树冠层树叶的淋溶作用较弱, 这与实验室的模拟结果相同。而冬季的盐基离子滤出量占总滤出量比例较大的原因可能是: 1. 冬季的大气降水酸度为全年最低 (pH=4.30), 有较强的淋溶作用; 2. 尽管有研究表明树木处于生理静止期时, 其冠层穿透水的盐基离子浓度大幅降低<sup>[8]</sup>, 但韶山森林因其树冠层的二维结构导致冬季强酸度的雨水对树冠层仍有较强的淋溶作用。由于基质溶液的酸度和渗透势之间的相互作用, 较大酸度的雨水会影响树木发芽和直接淋溶树皮中的物质, 这种酸雨对森林生命力有一种潜在的伤害<sup>[21]</sup>。

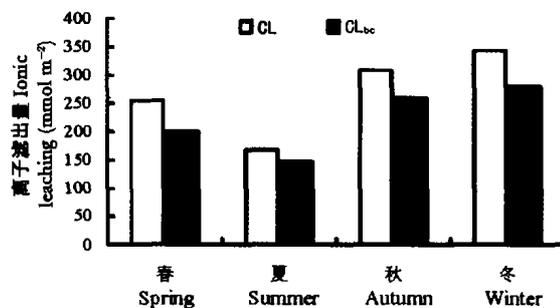


图 3 森林冠层总滤出量与可交换盐基离子的量  
Fig. 3 Total amount of canopy leaching and the amount of exchangeable base cations from canopy leaching  
CL: 树冠层滤出量 Canopy leaching; CL<sub>bc</sub>: 树冠层盐基离子滤出量 Base cations from canopy leaching

### 3.3 树冠层酸度的摄入

树冠层的盐基离子滤出量与树冠层缓冲 H<sup>+</sup> 的量相等<sup>[11]</sup>。但是由于植物吸收的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 也是质子携带体, 硝化后释放 H<sup>+</sup>, 因此, 植被摄入的盐基离子中应该由 H<sup>+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 两部分组成。如图 4 所示, 春、夏两季的 H<sup>+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的摄入量均维持在相当水平, 这可能是

由于植物生长过程中可直接吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 以供其营养的需要, 而酸度较强的大气降水同时也洗脱树叶内的营养离子。秋季 H<sup>+</sup> 的摄入量明显小于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 摄入量, 冬季的 H<sup>+</sup> 摄入量为全年最高, 达到 95.33 mmol m<sup>-2</sup>。秋季 H<sup>+</sup> 摄入量较小可能是因为大气降水 pH 值较高, 淋溶作用不大, 而冬季大量的 H<sup>+</sup> 摄入可能与冬季滤出的盐基离子占总滤出量比例最大有关。从全年来看, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的摄入量在 30–100 mmol m<sup>-2</sup> 之间, 而 H<sup>+</sup> 的变化幅度较大, 为 30–180 mmol m<sup>-2</sup>。树冠穿透水中的盐基离子中, 约有 81% 的 Ca<sup>2+</sup>、49% 的 Mg<sup>2+</sup>、76% 的 K<sup>+</sup> 被 H<sup>+</sup> 置换出来, 即对降水酸度产生了缓冲作用。但 76% 的 K<sup>+</sup> 可能有一部分是随树冠层代谢物一起释放出来的<sup>[22]</sup>。

在生长季节, 含有 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的雨水沉降到树叶表面硝化后与沉降到叶面的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 均具有相同的施氮作用。停留在叶表的雨水中的 H<sup>+</sup> 与树叶内部组分发生置换作用不仅取决于树冠层的生理状况、冠层结构, 还取决于雨水的流量、雨水的接触时间等因素。冠层上部因接受的雨水流量较大, 导致与树叶的接触时间较短, 主要是雨水冲洗冠层树叶上沉积的物质<sup>[15]</sup>, 随着雨水继续下滴和渗透, 受到冠层截留作用的影响, 流量减小, 与叶面的接触时间延长, 雨水中的 H<sup>+</sup> 会取代树叶组织内的盐基离子的位置, 而将其置换出来。也说明森林树冠层缓冲降水酸度的作用, 主要发生在树冠层的中下部分。在降水刚开始时雨水主要是将停留在叶表的干沉降物质冲洗下来, 树冠层对降水酸度的缓冲作用有个滞后过程, 因为这种盐基离子的交换反应需在叶表完全湿润的条件下进行, 交换过程的发生受到雨量和降水酸度的影响。但是离子中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 具有一定的竞争

特性<sup>[23]</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的这种竞争性在 H<sup>+</sup> 与树叶中的盐基离子发生反应时的淋溶量中表现出来(图 4)。

## 4 讨论

### 4.1 树冠层缓冲降水酸度机理

树冠层的缓冲作用主要表现 H<sup>+</sup> 与树叶组织中的盐基离子发生交换反应, 从而减少 H<sup>+</sup> 直接作用于植物。在大部分情况下, 沉降的 H<sup>+</sup> 在森林穿透水中并不以酸的形式出现, 但是整个生态系统中的 H<sup>+</sup> 并不因这种缓冲作用而减少。在酸雨的作用下, 树叶中的盐基营养离子被淋溶出来进入土壤层, 在树木呼吸作用下树木会释放被吸收的质子, 释放出来的质子进入土壤层后会导致土壤的酸化。而土壤层里的营养离子又会被根系吸收。但此时的 Ca<sup>2+</sup> 则会和土壤中的 Al 经过一系列的交换过程从而释放出影响森林生长和恶化土壤水流输出质量的 Al<sup>3+</sup><sup>[18]</sup>。但是, 整个生态系统中的质子不会减少。

### 4.2 韶山森林冠层滤出与其它地区森林冠层滤出的比较

从表 2 中可以看出, 韶山森林冠层滤出量年均值大于芬兰、西班牙和加拿大森林冠层滤出的盐基离子的量, 特别是 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 的滤出量大大高于其它 3 处的树冠层滤出值。这可能是因为韶山降水酸性较强, 酸雨频率较大(>50%) (表 1), 对森林冠层的淋溶作用大。而树冠层盐基离子淋溶量较小的加拿大森林, 由于其降水酸性较小, 对树冠层盐基离子的淋溶作用小。

### 4.3 不确定性因素分析

由于大气沉降速率取决于气象条件, 韶山各季节的气温、湿度、风速等气象因子差别很大, 与降水量紧密相关的降水量分布不均匀, 造成大气沉降量和森林冠层接收沉降的不确定性; 韶山的针阔叶树种混交生长, 常绿与落叶树相间, 树冠在空间形成二维结构, 树种与酸沉降的相互作用机制也各不相同

表 2 韶山森林冠层与其它地区森林冠层滤出量的比较(mmol m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)

Table 2 Comparison of canopy leaching among forests in Shaoshan and other regions of the world

	年均降水量 Annual rainfall (mm)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>
韶山 Shaoshan	1500	115.34	30.74	84.13
Finland <sup>[10]</sup>	502	8	4.5	16.5
Spain <sup>[11]</sup>	1223.6	31	21.7	27.7
Canada <sup>[15]</sup>	1008	4.4	1.0	1.1

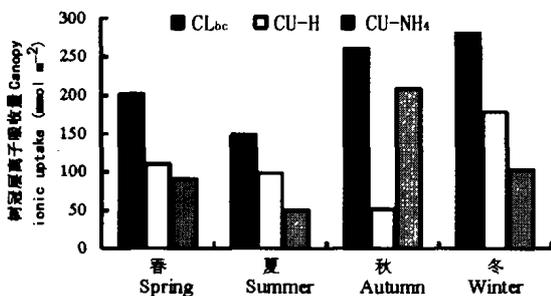


图 4 树冠层盐基离子滤出量与 H<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的摄入量

Fig. 4 The amounts of base cations from canopy leaching and the amount of H<sup>+</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> uptake in canopy

CL<sub>bc</sub>: 树冠层盐基离子滤出量 Base cations from canopy leaching; CU-H: 树冠层吸收 H<sup>+</sup> 的量 H<sup>+</sup> uptake in canopy; CU-NH<sub>4</sub>: 树冠层吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的量 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> uptake in canopy

同,冠层缓冲降水酸度的程度也不尽相同;沉降因子( $ID/PD$ )<sub>Na</sub>是其中的一个关键性的因素,但是  $Ca^{2+}$  的  $ID/PD$  真值与  $Na^+$  的不同(可能是源强、粒径、沉降和化学特征的不同),这样就会低估了大气沉降的量,导致树冠层滤出量的过高估计。 $Na^+$  渗透法在理论上存在两个关键性的假设,在欧洲、北美和加拿大等地的森林降水研究中应用较多,对定量判断盐基离子在森林生态系统中的变化以及森林冠层对酸度的缓冲作用起到了重要的作用。计算过程中,茎干流( $SF$ )因其流量较小,收集量不足降水总量的 3%,达不到检测的要求而没有纳入考虑范围,这势必也会低估了评价的结果。本文在研究森林冠层的缓冲能力时,克服了以年为周期<sup>[8,10,11,15]</sup>带来的较大不确定性,细化到各个季节,研究了季节变化下树冠层盐基离子的淋溶量及对降水酸度有较大影响的  $H^+$  和  $NH_4^+$  的摄入能力。结果表明,韶山针阔叶林酸雨对盐基离子的淋溶量中以  $Ca^{2+}$  最大,它同时也是对酸雨起缓冲作用的主要物质,但是树木冠层大量  $Ca^{2+}$  离子的淋溶却对森林的生命力有潜在危害。在酸雨作用下,冬季森林冠层盐基离子的淋溶量大于夏秋两季。

### 参考文献

- [1] Viogt G K. Distribution of rainfall under forest [J]. For Sci, 1960, 6:2-9.
- [2] Cappellato R, Peters N E. Dry deposition and canopy leaching rates in deciduous and coniferous forests of Georgia Piedmont: An assessment of regression model [J]. J Hydrol, 1995, 169:131-150.
- [3] Lovet D M, Lindberg S E. Dry deposition of nitrate to deciduous forest [J]. Biogeochemistry, 1986, 2:137-148.
- [4] Gao Y X (高映新), Liu L G (刘连贵), Sun J M (孙建民). Acid deposition-canopy interaction model [J]. Acta Sci Circums(环境科学学报), 1992, 12(3):316-324. (in Chinese)
- [5] Matner E. Deposition / canopy interactions in two forest ecosystems of northwest Germany [A]. In: Gerogii H W. Atmospheric Pollutants in Forest Areas [M]. Holland: D. Reidel Publ. Co. Dordrecht, 1986. 247-262.
- [6] Draaijers G P J, Vanek R, Meijers R. Research on the impact of forest stands structure on atmospheric deposition [J]. Envir Pollut, 1992, 75 (2):243-249.
- [7] 冯宗炜. 酸雨对生态系统的影响—中国西南地区酸雨研究 [M]. 北京: 中国科技出版社, 1993. 151-160.
- [8] Shi P L (石培礼), Li W H (李文华), Wan J X (王金锡). Three-dimensional canopy structure in the timberline ecotone dominated by *Abies faxoniana* [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2002, 22(11): 1819-1824. (in Chinese)
- [9] Jiang Y M (蒋益民), Zeng G M (曾光明), Zhang G (张龚), et al. Variation of chemical properties and the mechanisms of forest precipitation [J]. Envir Pollut Treat (环境污染与防治), 2003, 25 (5):271-273. (in Chinese)
- [10] Draaijers G P J, Van Leeuwen E P, De Jong P G H, et al. Base cation deposition in Europe 1. Model description, results and uncertainties [J]. Atmosph Envir, 1997, 31(24):4139-4157.
- [11] Ander G A, Amezcaga I, Arsenio E, et al. Buffering capacity through cation leaching of *Pinus radiata* D. Don canopy [J]. Plant Ecol, 2000, 149:23-42.
- [12] Campo J, Manelmaass J, Victor H. Calcium, potassium and magnesium cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem [J]. Biogeochemistry, 2000, 49:21-36.
- [13] Draaijers G P J. A canopy budget model to assess atmospheric deposition from throughfall measurement [J]. Water Air Soil Pollut, 1995, 85(4):2253-2258.
- [14] Van der Maas M P, Pape T. Hydrochemistry of two Douglas fir ecosystems and a heather ecosystem in the Veluwe, the Netherlands [R]. Dutch Priority Programme on Acidification, 1991, report no. 102.1.01
- [15] Erisman J W, Draaijers G P J, Duyzer J, et al. Particle deposition to forests—Summary of results and application [J]. Atmosph Envir, 1997, 31(3):321-332.
- [16] Van Breemen N, Van Dijk H F G. Ecosystem effects of atmospheric deposition of nitrogen in the Netherlands [J]. Envir Pollut, 1988, 54:249-274.
- [17] Zhang G (张龚), Zeng G M (曾光明), Jiang Y M (蒋益民), et al. The distributional characteristics of ions in the bulk precipitation and forest throughfall in Shaoshan, Hunan province [J]. Res Envir Sci (环境科学研究), 2003, 16(3):14-17. (in Chinese)
- [18] Débora V F. Influence calcareous soil particulates on acid rain: Horizonte mtropolitan region Brazil [J]. Ambio, 1999, 28(6):515-520.
- [19] Balestrini R, Tagliaferri A. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in alpine forest ecosystems (northern Italy) [J]. Atmosph Envir, 2001, 35:6421-6433
- [20] Shan Y F (单运峰). Atmospheric Pollution, Acid Rain and Vegetation [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1993. 165. (in Chinese)
- [21] Van Ek R, Draaijers G P J. Estimation of atmospheric deposition and canopy exchange for three common tree species in the Netherlands [J]. Water Air Soil Pollut, 1994, 73(1):61-82.
- [22] Johannes A H, Chen Y L, Dackson K. Modeling of throughfall chemistry and indirect measurements of dry deposition [J]. Water Air Soil Pollut, 1986, 30:211-216.
- [23] Shibata H, Saton F, Sasa K. Importance of internal proton production for the proton budget in Japanese forest ecosystem [J]. Water Air Soil Pollut, 2000, 130:685-690.
- [24] Ulrich B. A concept of forest ecosystem stability and of acid deposition as driving force for destabilization [A]. In: Ulrich B, Pankrath J. Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems [M]. Dordrecht: Holland, D. Reidel Publ. Co., 1983. 1-29.