

# 鼎湖山不同演替阶段土壤酸性阳离子淋溶动态研究\*

刘可慧<sup>1,2</sup>, 于方明<sup>3</sup>, 彭少麟<sup>1</sup>, 李富荣<sup>1</sup>

(1. 中山大学有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广东 广州 510275;

2. 桂林电子科技大学应用科技学院, 广西 桂林 541004;

3. 广西师范大学环境与资源学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 采用室内土柱模拟实验, 对鼎湖山不同演替阶段(演替早期的针叶林、演替中期的混交林和演替后期的阔叶林)森林土壤酸性阳离子的淋溶动态及机理进行研究。结果表明, 土壤滤出液酸性阳离子的释放浓度及电导率(EC)与土壤所处的演替阶段密切相关, 即与本底值密切相关。随着模拟酸雨处理时间的增加, 滤液EC呈下降趋势, pH逐渐上升, 在淋溶的第6天略有下降, 且滤液pH和EC呈极显著负相关( $P < 0.001$ ;  $R = -0.81$ )。滤液中 $H^+$ 浓度及EC变幅均以演替早期针叶林最大, 混交林最小。各演替阶段土壤 $Al^{3+}$ 溶出随着淋溶时间的延长迅速下降, 但在第6天有进一步被活化的趋势。针叶林和混交林 $Fe^{3+}$ 和 $Mn^{2+}$ 比较相似的释放; 而阔叶林则较为复杂。与模拟酸雨的酸度相比, 离子的浓度对测定指标起着更重要的作用。对不同演替阶段土壤酸性阳离子的释放动态分析表明, 各演替阶段土壤均处于铝氧化物缓冲阶段; 同时, 演替后期阔叶林土壤还处于铁氧化物和锰氧化物(氢氧化物)缓冲阶段。

**关键词:** 模拟酸雨; 酸性阳离子; 淋溶动态; 缓冲机理; 演替土壤

**中图分类号:** S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 01-0073-05

近几十年来由于酸沉降引起的土壤酸化问题普遍受到关注。土壤酸化不但引起盐基离子的淋溶, 还导致酸性阳离子 $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 和 $Fe^{2+}$ 的活化与释放, 从而对森林植物和地下水产生严重的影响。然而, 影响土壤阳离子淋溶的因素繁多, 不仅取决于渗透雨水的pH值和离子组成, 还取决于土壤的特性<sup>[1]</sup>。有研究表明, 即使处于同一酸沉降环境下的不同演替阶段的土壤对外加酸的响应也是不一致<sup>[2]</sup>。

位于广东省中部的鼎湖山国家自然保护区(112°30'39"~112°33'41"E, 23°09'21"~23°11'30"N), 水热资源丰富, 物种资源丰富, 拥有同一演替系列不同演替阶段的代表性植被类型<sup>[3]</sup>。同时, 该地区酸雨问题严重<sup>[2]</sup>。因此, 本研究选取鼎湖山不同演替阶段的3个林型土壤进行室内土柱模拟实验, 从pH、电导率的变化及土壤酸性阳离子 $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 和 $Mn^{2+}$ 的释放特征等方面探讨各演替阶段土壤酸化的化学过程, 为进一步了解酸沉降下各演替阶段土壤对酸缓冲的机制、酸沉降作用下森林演替动态及森林生态恢复与管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验土壤

本实验选取处于同一演替系列不同演替阶段的3个林型土壤, 即演替早期的针叶林, 演替中期的混交林和演替后期的常绿阔叶林土壤进行研究。林下土壤为赤红壤(其中阔叶林的土壤为水化赤红壤), 土壤母质均为砂页岩。各演替土壤部分性质见表1。针叶林、混交林和阔叶林土壤交换态 $Al^{3+}$ 质量分数分别为312, 337和423  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $Fe^{3+}$ 和 $Mn^{2+}$ 分别为45, 105, 134和1.80, 1.18, 2.24  $mg \cdot kg^{-1}$ 。

### 1.2 土柱淋溶实验

**1.2.1 土样制备** 2005年5月在针叶林、混交林和阔叶林样方中选取坡向(南坡或偏南坡)、坡度(25~30°)、海拔(200~300 m)相同的样方, 在水平和垂直方向每隔10 m随机设置土壤采样样点, 用直径5 cm的土钻取0~20 cm的土壤样品, 各林型30个, 均匀混合。风干, 过2 mm筛待用。

\* 收稿日期: 2007-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30670385); 教育部重大资助项目(403037)

作者简介: 刘可慧(1976年生), 女, 博士; 通讯联系人: 彭少麟; E-mail: lsspsl@mail.sysu.edu.cn

表 1 鼎湖山不同演替阶段森林土壤 0~20 cm 部分理化特征参数 (平均值 (标准差))  
Tab. 1 Soil properties (0~20 cm) of different forest succession stages in Dinghushang (mean  $\pm$  S. D.)

林型	含水率 (%)	pH(水)	pH(氯化钾)	电导率 ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )	有机质 (%) <sup>[4]</sup>	容重 (%) <sup>[4]</sup>
针叶林	16.27(2.06)	4.04(0.08)	3.23(0.12)	102.73(18.91)	5.35(0.58)	1.41(0.04)
混交林	18.94(1.01)	3.93(0.08)	3.21(0.05)	100.70(6.55)	3.45(0.35)	1.30(0.04)
阔叶林	25.47(0.67)	3.81(0.06)	3.16(0.08)	191.13(21.66)	2.73(0.17)	1.21(0.03)

1.2.2 模拟酸雨的配制 根据广东省 1992-1997 年大气降水成分配制模拟酸雨。AR2 化学组成与广东省 1992-1997 年酸雨组成相近; AR1 和 AR3 离子组成为 AR2 的 0.5 倍和 2 倍, pH 均为 4.5; AR4, AR5, AR6 离子组成分别与 AR1, AR2 和 AR3 的相同, pH 均为 3.5; 对照 (CK) 为蒸馏水 pH 5.6。

1.2.3 模拟酸雨土柱淋溶 将制备好的土壤样品装入高 30 cm, 内径 4.5 cm, 事先安置好 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜和高约 3 cm 石英砂的 PVC 管内, 土高为 20 cm, 淋溶柱顶层铺高约 1 cm 的石英砂。土柱淋溶前用蒸馏水平衡 24 h。每天淋溶 250 mL, 连续 6 d。对每次收集的滤出液, 分取 50 mL 立即进行 pH 和电导率的测定。其余的放入 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱内保存。重复 3 次。

### 1.3 分析方法

pH 值用 pHS-2 型酸度计测定。电导率用

DDS-11A 型电导率仪测定。Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 用 ICP-AES 法。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 进行数据处理回归分析, SPSS 软件进行差异显著性分析, Origin 7.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟酸雨对土壤滤出液 pH 和电导率 (EC) 的影响

从图 1 可以看出, 随着淋溶时间的延长, 各演替土壤滤出液的 pH 呈上升的变化趋势, 且 H<sup>+</sup> 浓度变化主要发生在淋溶初始阶段。针叶林以 AR2 和 AR5 处理的滤出液 pH 值较高, AR3 和 AR6 处理的较低。混交林除 AR3 处理变幅较大外, 其余各处理淋溶的 pH 值变化较缓和。阔叶林除 AR6 处理相对较低外, 其余各处理的 pH 值也比较接近。One-Way ANOVA 分析表明, 同一演替阶段土壤、

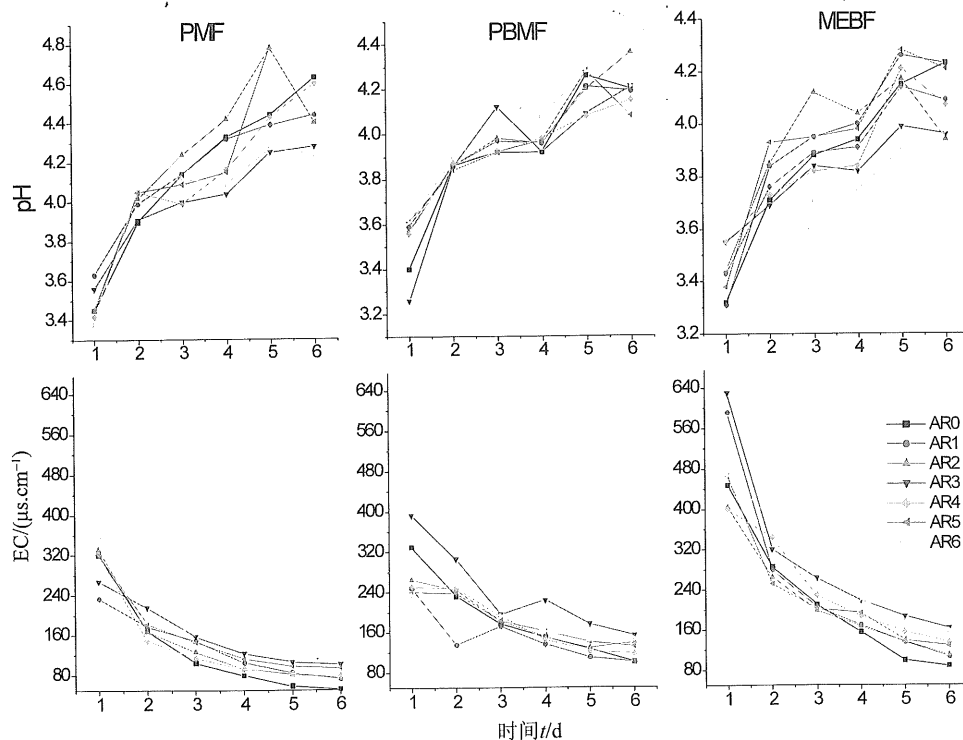


图 1 酸雨对各演替阶段森林土壤滤出液 pH 和电导率 (EC) 的影响

Fig. 1 Simulated acid rain on pH and EC values of leachate in different forest succession stage soils

注: PMF, PBMF, MEBF 分别代表针叶林, 混交林和常绿阔叶林 (下同)

各处理之间 pH 无显著性差异，说明在一定酸雨强度淋溶时间下，滤出液 pH 值主要决定于土壤本身的理化性质。但 pH3.5 处理的滤出液 pH 值比 pH4.5 处理的相应值要低约 0.2 ~ 0.6 个 pH 单位。表明，外源 H<sup>+</sup> 浓度是影响土壤滤出液 pH 大小的一个主要因素。在同一 pH 值下，各演替土壤均以 AR2 处理的 pH 值最高，AR6 处理最低。体现了酸雨中离子的加入对土壤酸化的缓冲作用。

随着处理时间的增加，滤出液的 EC 呈下降的变化趋势（图 1）。针叶林各处理土壤滤出液 EC 变化不明显，但均高于对照。这是因为处理液添加了离子。混交林的下降幅度比针叶林小，阔叶林介于上述二者之间。然而，各演替土壤对照值也较高，这可能与土壤强烈风化，易溶于水的离子溶解于水有关。

滤出液的 pH 和 EC 与土壤的本底值密切相关，本底值 pH 和 EC 越高，其滤出液 pH 和 EC 也越高。相关性结果表明，pH 和 EC 具有极显著的负相关 ( $P < 0.001$ ,  $R = -0.81$ )，说明滤出液的酸性离子浓度与电导率密切相关。随着森林土壤的演替这种相关性有所下降，针叶林，混交林和阔叶林的相关系数 ( $R$ ) 分别为  $-0.93$ ， $-0.81$  和  $-0.74$ ，说明演替后期滤出液中非酸性离子对 EC 的贡献增大。

## 2.2 模拟酸雨对土壤滤出液酸性阳离子 Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 的影响

各演替阶段土壤的 Al<sup>3+</sup> 随着淋溶时间的延长呈下降的变化趋势（图 2）。Al<sup>3+</sup> 的浓度在淋溶初期淋溶量较大，但到第 6 天时部分处理有上升的趋势，说明在淋溶后期土壤中的铝可能被活化。处理间 Al<sup>3+</sup> 浓度无显著性差异。当模拟酸雨为低、中离子浓度时，除针叶林 AR4 和 AR5 处理的滤出液 Al<sup>3+</sup> 的浓度高于对照外，其它均低于对照，说明在酸度不太大的情况下，离子的加入能够缓和土壤中 Al<sup>3+</sup> 的释放，而在强酸度下，这种缓和作用效果不明显。在同一 pH 值下，高离子浓度酸雨处理下 Al<sup>3+</sup> 浓度最高。

酸雨对各演替土壤 Fe<sup>3+</sup> 的释放动态不同。针叶林和混交林 Fe<sup>3+</sup> 的释放均呈先下降，后上升的变化趋势。阔叶林呈先上升后下降的趋势，在淋溶到第 3 天时达到最大值，说明铁在阔叶林土壤对酸雨的缓冲起了重要作用。

针叶林和混交林 Fe<sup>2+</sup> 的释放动态也非常相似，均随着处理时间的延长而下降。阔叶林则在淋溶的第 6 天呈上升的变化趋势，说明随着淋溶的进行，加速了土壤中有效锰的释放。同一土壤各处理之间无显著性差异，但阔叶林各处理平均值释放量显著高于前两种土壤，这可能与本底值有关。

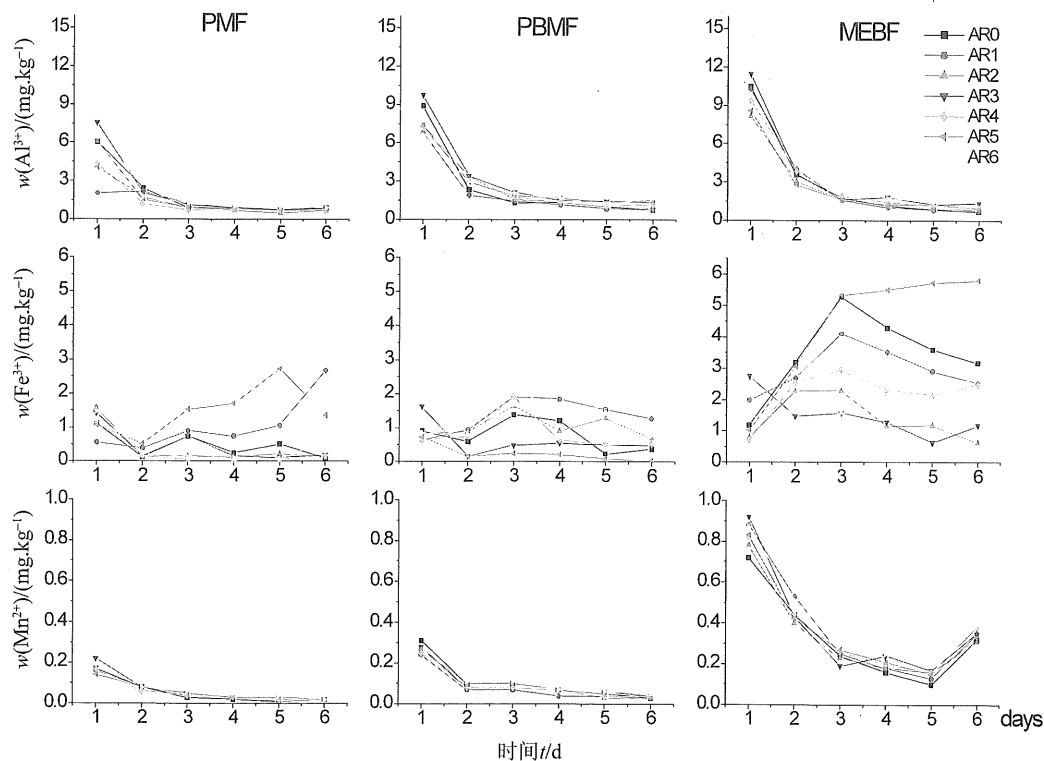


图 2 模拟酸雨对各演替阶段森林土壤 Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> pH 淋溶动态的影响

Fig. 2 Simulated acid rain on Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> leaching dynamics in different forest successional stage soils

### 3 讨论

本实验研究结果表明,各演替阶段土壤淋溶液 pH 随着淋溶时间的增加逐渐上升,而 EC 逐渐下降,且均是演替早期的针叶林变化最大。说明针叶林对酸更加敏感,离子更容易流失,这与 Fang 等<sup>[2]</sup>野外喷氮实验结果相似。同时,该林型土壤中氧化物总量相对较低,对酸的缓冲总容量小,再加之土壤有效态的离子浓度也较低<sup>[13]</sup>,所以,酸雨有可能更容易导致演替早期土壤元素的缺乏,从而影响植被正常生长,进而影响演替的进程。处于演替中期的混交林 pH 变化较为缓和,EC 的下降也较平缓,说明混交林土壤对酸的响应不如针叶林敏感。这与混交林处于演替的中期,系统相对稳定,植物生长旺盛有关。

土壤释放的物质的量与其本底值的大小密切相关,本底值酸度,EC 及可交换性酸性阳离子大的演替后期的阔叶林土壤,其滤出液中物质总量也最大;而演替早期的针叶林的相应值最小。本实验条件下,滤出液的化学过程主要决定于土壤所处的演替阶段。

本实验选取的各演替土壤均属于赤红壤(或水化赤红壤)。赤红壤阳离子的释放主要有两种途径,即盐基离子的交换反应和氢氧化物或氧化物的水解反应<sup>[14]</sup>。含较多的次生固态氢氧化铝和部分铁、铜、锰氢氧化物或氧化物是酸性土壤发生发育的重要特征<sup>[13]</sup>,它们来自成土母质风化产物的再沉淀。在土壤的淋溶过程中前一种反应往往在短期内迅速完成,而后一种反应会相对缓慢些。本研究中土壤  $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$  和  $Fe^{2+}$  的释放因土壤或处理不同而不同。对  $Al^{3+}$  而言,到第 6 天时,3 种土壤中有些处理的滤出液中  $Al^{3+}$  的浓度呈现上升,说明在淋溶后期土壤中的铝有被活化的趋势。 $Fe^{3+}$  的活化相对  $Al^{3+}$  发生的时期更快,各演替土壤在 2 d 后就开始活化,且演替后期土壤中  $Fe^{3+}$  的活化幅度更大。 $Fe^{2+}$  的活化主要出现在演替后期土壤的淋溶后期(第 5 天)。说明 3 种土壤处于不同的对酸缓冲阶段。

通常土壤中 pH 的缓冲机制可为以下几个阶段<sup>[15]</sup>: pH 6.2~8.6,大气中  $CO_2$  与土壤中  $H_2CO_3$  平衡; pH 5.0~6.2,硅酸盐矿物风化产生  $H_4SiO_4$  和硅酸盐风化产生  $H_4SiO_4$ , 和部分  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  等离子; pH 4.2~5.0,交换性阳离子  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  等与  $H^+$  交换; pH 3.5~4.2,  $Al^{3+}$  由铝化合物中释放出来; pH 3.0~3.5,土壤中  $Fe_2O_3$  转换成  $Fe^{3+}$ 。根据以上理论,由于

各演替土壤 pH 值均低于 4.2,且铝在淋溶后期有被活化的趋势,证实铝化合物对土壤起缓冲作用。阔叶林土壤 pH 最低,除了铝的缓冲外,铁和锰的缓冲作用得到很好的体现,主要表现为阔叶林的滤出液铁的大量活化和锰的突然增大。说明处于演替后期的土壤具有与演替早、中期土壤不同的酸缓冲机理:各演替土壤均处于铝氧化物的缓冲阶段;同时,演替后期的阔叶林土壤还处于铁氧化物和锰氧化物(氢氧化物)缓冲阶段。

**致谢:**感谢鼎湖山定位站对本实验的支持。感谢华南植物研究所鼎湖山定位站黄忠良、莫江明研究员及方运霆博士对本实验的指导。感谢莫定升先生野外采样、肖艳秀女士及陈少薇老师室内分析实验的帮助。

#### 参考文献:

- [1] LIU Chun, SONG Guohan, SHI Yanxi, et al. Characteristics of acid leaching of Brown soil and Cinnamon soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16 (3): 5-8.
- [2] FANG, Yunting, ZHU Weixing, MO Jiangming, et al. Dynamics of soil inorganic nitrogen and their responses to nitrogen additions in three subtropical forests, South China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18 (40): 752-759.
- [3] 彭少麟. 南亚热带森林群落生态学[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-20.  
PENG Shaolin. Dynamics of Forest Community in South Subtropics [M]. Beijing: Science Press, 1996: 1-20.
- [4] MO Jiangming, BROWN SANDRA, PENG Shaolin. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175: 573-583.
- [5] 李平, 王兴祥. 几种低分子量有机酸淋溶对土壤铝、硅及盐基离子淋失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38 (4): 441-447.  
LI Ping, WANG Xing. Effects of soil leaching with low molecular weight organic acids on leaching loss of soil aluminium, silicon and base ions [J]. *Soil*, 2006, 38 (4): 441-447.
- [6] 邵宗臣, 何群, 王维君. 模拟酸雨对红壤铝形态的影响[J]. *热带亚热带土壤*, 1997, 6(3): 187-193.  
SHAO Zhongcheng, HE Qun, WANG Weijun. Effects of simulated acid rain on Al form [J]. *Trop Subtrop Soil*, 1997, 6(3): 187-193.
- [7] 刘洪杰. 赤红壤对模拟酸雨缓冲能力的研究[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 1983, 1: 92-98.  
LIU Hongjie. Buffer capacity of laterite red earth to simulated acid rain [J]. *Journal of South China Normal University*, 1983, 1: 92-98.

- [8] LIAO Bohan, LARSEN THORJØRN, SEIP HANSMAR-TIN. Response of five Chinese forest soils to acidic inputs: batch experiment [J]. *Geoderma*, 1998, 86: 295-316.
- [9] 俞元春, 丁爱芳, 胡茄, 等. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响 [J]. *南京林业大学学报*, 2001, 25, (2): 29-32.  
YU Yuanchun, DING Aifang, HU Jia, et al. Effects of simulated acid rain on soil acidification and base ions transplant [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25, (2): 29-32.
- [10] 廖柏寒, 蒋青. 我国酸雨中盐基离子的重要性 [J]. *农业环境保护*, 2001, 20(4): 254-256.  
LIAO Bohan, JIANG Qing. Importance of base cations of acid precipitation in China [J]. *Agro-environmental Protection*. 2001, 20(4): 254-256.
- [11] 郭朝晖, 廖柏寒, 黄昌勇. 酸雨中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$  对红壤中重金属的影响 [J]. *中国环境科学*, 2002, 22(1): 6-10.  
GUO Zhaohui, LIAO Bohan, HUANG Changyoun. Effects of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  of acid rain on the heavy metals in red soils [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(1): 6-10.
- [12] 郭朝晖, 黄昌勇, 廖柏寒. 模拟酸雨对污染土壤中 Cd、Cu 和 Zn 释放及其形态转化的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1547-1550.  
GUO Zhaohui, HUANG Changyoun, LIAO Bohan. Effects of simulated acid rain on Cd, Cu and Zn release and their form transformation in polluted soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1547-1550.
- [13] 何金海, 陈兆其, 梁永奕. 鼎湖山自然保护区之土壤 [J]. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982(第 1 集): 25-38.  
HE Jinghai, CHEN Shaoqi, LIANG Yongan. The soils of Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Trop Subtrop For Ecosys*, 1982(1): 25-38.
- [14] 廖柏寒, 李长生. 土壤对酸沉降缓冲机制探讨 [J]. *环境科学*, 1989, 10(1): 30-34.  
LIAO Bohan, LI Changsheng. Soil buffer mechanism to acid deposition [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1989, 10(1): 30-34.
- [15] ULRICH B. Effects of Acidic Precipitation on Forest Ecosystem in Europe (Vol 2) [M]. Berlin: Acidic precipitation Spring-Verlay, 1989: 189-272.

## Release of Acidic Cations by Simulated Acid Rain from Different Successional Stage Soils in Dinghushan

LIU Ke-hui<sup>1,2</sup>, YU Fang-ming<sup>3</sup>, PENG Shao-lin<sup>1</sup>, LI Fu-rong<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Biocontrol, School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
2. College of Applied Science and Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;  
3. College of Resource and Environment, Guanxi Normal University, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The dynamics of acidic cations by simulated acid rain from different successional stage soils (Pine forest (PMF), Pine-broadleaf mixed forest (PBMF) and Monsoon evergreen broadleaf forest (MEBF), belonging to the early, the medium and the later stage, respectively) were studied. Results showed there was a close relationship between leaching concentration of each acidic cation and the soil characteristics. pH values of leachate increased with leaching, but opposite in EC. The change extent of  $\text{H}^+$  and EC was biggest in PMF while least in PBMF. In each soil, the concentrations of  $\text{Al}^{3+}$  of leachate decreased rapidly as simulated acid leaching, while increased in the later leaching period. The leaching dynamics of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  were similar in PMF and PBMF, but which were more complexity in MEBF. Generally, simulated acid rain with lower or medium concentration of balances ions in pH 4.5 could favor to reduce the acidic cations releasing and leachate acidity, but intensified as higher balance ions addition. Analyzed from the released dynamic of acidic cations from different successional stage soils, all of the soil belonged to the Al oxid compound buffer stage, whereas soil in later successional stage also belonged to the Fe and Mn oxid buffer stages.

**Key words:** acidic cations; buffer mechanism; leaching dynamics; simulated acid rain; forest soil