

鼎湖山主要森林类型土壤交换性阳离子 含量及其季节动态特征

江远清^{1,2}, 莫江明^{1*}, 方运霆^{1,2}, 李志安¹

(1. 中国科学院 华南植物园 鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广东 肇庆 526070; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究鼎湖山自然保护区马尾松林、马尾松荷木混交林和季风常绿阔叶林三种代表性森林类型表层土壤(0~20 cm)交换性阳离子含量及其季节动态。结果表明: 土壤交换性阳离子含量因元素种类、森林类型和季节不同而异。三种森林土壤交换性阳离子含量都表现为: $Al^{3+} > H^+ > K^+ > Ca^{2+}$ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 。几乎所有调查的阳离子含量在阔叶林显著高于马尾松林和混交林, 但后两者之间大多数阳离子含量差异不显著。鼎湖山森林土壤可交换性阳离子含量虽然较高, 但盐基饱和度却很低。马尾松林、混交林和阔叶林土壤可交换性阳离子含量在1997年6月份分别为: 58.3、84.5和118.7 mmolc/kg, 盐基饱和度分别为: 5.5%、3.2%和4.5%。三种森林土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 H^+ 含量季节差异极显著($P < 0.001$), 但交换性 Al^{3+} 含量只在马尾松林土壤存在极显著的季节性差异($P < 0.001$)。同一元素季节变化大小程度趋向马尾松林 > 混交林 > 阔叶林。森林土壤交换性 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 H^+ 含量与土壤 pH 值相关关系不明显, 但交换性 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 与土壤 pH 值间呈极显著负相关。

关键词: 森林土壤; 交换性阳离子; 季节动态; pH 值; 鼎湖山

中图分类号: Q948, S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2007)01-0106-08

Concentrations of exchangeable cations of soil and their seasonal dynamics in three representative forests of Dinghushan Biosphere Reserve

JIANG Yuan-Qing^{1,2}, MO Jiang-Ming^{1*}, FANG Yun-Ting^{1,2}, LI Zhi-An^{1,2}

(1. *Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing 526070, China;* 2. *Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Concentrations of exchangeable cations of soil and their seasonal dynamics in three representative forests (pine, pine and broadleaf mixed, monsoon evergreen broadleaf forests) of Dinghushan Biosphere Reserve in southern China were studied. Mineral soils(0~20 cm depth) were collected in June 1997, September 1997, December 1997, and March 1998, and were analyzed for soil pH, concentrations of organic carbon, total N and P, available P and exchangeable cations for each sampling date. Results showed that concentrations of exchangeable cations varied depending on cation types, forests and sampling dates. Concentrations of exchangeable cation were highest for Al^{3+} , followed by

收稿日期: 2005-03-11 修回日期: 2005-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(30270283, 30670392); 广东省自然科学基金(021524); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(KSCX2-SW-133); 中国科学院华南植物研究所所长基金 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (30270283, 30670392); Natural Science Foundation of Guangdong Province (021524); the Field Frontiers Project of Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KSCX2-SW-133); Director of South China Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences]

作者简介: 江远清(1978-), 女, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事森林养分循环与大气氮沉降研究。

* 通讯作者 (Author for correspondence, E-mail: mojm@scbg.ac.cn)

H⁺, and lowest for Ca²⁺, Mg²⁺ and Na⁺ in all three forests. The pine and mixed forests were similar in concentrations of most exchangeable cations, however, both of them were significantly lower than the broadleaf forests. Effective cation exchange capacity in Dinghushan forest soils (CECe, sum of Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, H⁺ and Al³⁺) was relatively high, but base saturation (BS, percent of base cations to CECe) was relatively low. CECe in June 1997 was estimated to be 58.3, 84.5 and 118.7 mmolc/kg for the pine, mixed and broadleaf forest, respectively, and corresponding BS was 5.5%, 3.2% and 4.5%, respectively. Concentration of exchangeable cations varied greatly among sampling dates in all three forests, with seasonal maximum being 1.6~3.6, 1.4~2.2, 1.6~2.8, 2.1~3.2 and 1.1~1.8 times of seasonal minimum for exchangeable Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, H⁺ and Al³⁺, respectively. Seasonal variations was greatest in the pine forest, followed by the mixed forest, with respective to a given cation. Soil pH values showed significantly negative correlation with concentrations of exchangeable Mg²⁺, K⁺ and Al³⁺, but not with exchangeable Ca²⁺, Na⁺ and H⁺.

Key words: forest soils; exchangeable cations; seasonal dynamic; pH value; Dinghushan Biosphere Reserve

在森林生态系统元素循环研究中,土壤元素的分布及其循环特征是其中最重要的内容之一。通过对它的研究,有助于我们了解森林生态系统的结构、功能与动态,为森林资源的保护、利用和管理提供科学依据(Peterson等,1985;Mo等,1994,2003;莫江明等,2000)。在全球变化方面,当前土壤元素的分布及其循环数据为人们比较森林的变化起到基准点作用,这些数据的比较还可用来监测环境和全球变化的效应(Peterson等,1985;Mo等,1994,2003;莫江明等,2000)。例如,由于工业化和城市化进程的加快,煤和石油等化石燃料的消耗量剧增,越来越多的氮氧化物(NO_x)和硫氧化物(SO_x)被排放到大气中,这些氧化物又以干沉降和湿沉降的形式输入森林生态系统,导致森林土壤酸化(D宾克利等,1993;王彦辉,2001;Rodhe等,1995;秦瑞君等,1998)。土壤一旦被酸化之后,一方面会加速土壤中钙、镁等交换性离子的淋失(王代长等,2004;唐鸿寿,2001;肖辉林,2001),可能降低某些重要的植物营养元素(如P和Mo)对林木生长的有效性(Macklon等,1992;D宾克利等,1993),另一方面使土壤溶液中Al离子含量增加,并在土壤与植物中积累,对树木生长产生毒害作用。然而,这些影响的实际效果有待人们去研究。

鼎湖山自然保护区森林生态系统是我国亚热带最具代表性的森林生态系统之一,其林下土壤也是亚热带较为典型的赤红壤和红壤等土类(广东植物研究所,1976;张秉刚等,1985;陈灵芝等,1997)。研究其土壤状况对于了解本地带代表性森林生态系统的生态学问题具有重要的意义(莫江明等,2000;Mo等,2003),因此,近年来得到了许多学者的关注。前期的研究涉及土壤形成、土壤类型及分布、土壤物理性质以及土壤大量和微量养分含量状况(何宜庚,

1983;张秉刚等,1985;何金海等,1982;张秉刚,1990;夏汉平等,1997;李德军等,2004)。本文继续报道该保护区三种主要森林类型(马尾松林、马尾松荷木混交林和季风常绿阔叶林)土壤交换性离子的含量及其季节动态特征,以便从土壤元素分布及其循环特征角度进一步了解本地带代表性森林类型的生态学问题,为本地带森林资源的保护、利用和管理提供科学依据。

1 研究材料与方法

1.1 自然环境概况

研究地位于广东省肇庆市鼎湖山自然保护区(112°34' E, 23°10' N)。该区面积1 145 hm²,属典型的亚热带季风气候,年平均气温21.0℃,年平均相对湿度为80%,最冷月(1月)和最热月(7月)的平均气温分别为12.6℃和28.0℃(黄展帆等,1982)。降水具有明显的年际和季节变化的特点,1997~1999年间年平均降雨量为2 209.9 mm,其中,83.8%~84.5%的降水集中在春夏两季,就月际变化而言,降水高峰期在5~8月份,占全年降水量的66.9%~71.9%,而11~12月份降水极少(<3.6%),年蒸发散量为1 458.5 mm。土壤由砂岩、砂页岩、页岩和石英砂岩发育而成,主要土壤类型为赤红壤和红壤(何金海等,1982;张秉刚等,1985)。

季风常绿阔叶林(简称阔叶林)属于亚热带地带性顶极植物群落,始建于1978年,已有400余年的历史。位于保护区核心区,庆云寺附近。坡向东北,坡度26°~30°,海拔270~330 m。样地母岩为砂页岩,土壤为赤红壤,土层较深,一般60~90 cm。森林植物种类丰富,结构复杂,主要优势树种有锥(*Castanopsis chinensis*),荷木(*Schima superba*),厚壳桂(*Cryp-*

tocarya chinensis), 黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*), 华润楠(*Machilus chinensis*)等(方运霆等, 2005)。

混交林虽位于保护区的缓冲带(地质疗养院背后), 始于20世纪30年代营造的马尾松林, 林龄约70 a, 但因得到良好的保护, 荷木和锥栗等阔叶树种逐渐入侵而形成以阔叶林树种为主的针阔叶混交林。样地海拔320~380 m, 坡向东北, 坡度20°~35°, 土壤为砂质壤土(黄忠良等, 1998)。

马尾松林样地位于保护区东南角过渡区, 其为40年代栽种的马尾松林, 林龄达60余年, 处于演替的初期阶段。坡向南, 坡度10°~20°, 海拔30~80 m。样地母岩为砂页岩, 土壤为砖红壤性红壤, 而土层较浅, 一般不超过30 cm。乔木层林冠稀疏, 而林下灌木层比较稠密, 盖度高达95%以上, 林下层优势树种以桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*), 芒萁(*Dicranopteris linearis*), 毛稔(*Melastoma sanguineum*)等为主。

1.2 土壤样品的采集

一般地表层土壤是最活跃的层面, 对外界环境的响应最明显, 以往在本研究地进行的相关研究也表明, 表层土壤的养分比其它层土壤的养分更容易受到土壤酸度的影响(刘菊秀等, 2003)。因此本研究以表层土壤(0~20 cm)为对象, 于1997年6、9、12月和1998年3月, 按近似网格法在马尾松林、混交林和季

风林采集土样。具体的采样步骤是, 每次取样时, 首先在各个样地上随机选取20个取样点, 然后用直径2cm的土钻在各取样点钻取3钻表层土壤, 再把3钻土壤充分混合均匀作为一个土样。所有的土壤样品均带回实验室风干, 去掉土样中可见的根系和碎石, 磨碎过孔径为2 mm的筛, 并装瓶供测试。

1.3 实验分析方法

本实验所测定指标包括土壤pH(H₂O)、有机质含量、全氮含量、全磷与有效磷含量、交换性阳离子Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、Al³⁺和H⁺。试验方法: 土壤酸度(pH值)采用5:1水提, pH计(S-2)测定; 土壤有机质为K₂Cr₂O₇-砂浴加热, FeSO₄滴定; 全N用凯氏法测定; 全P和有效P用NH₄F-HCl浸提, 钼锑抗比色法测定; 阳离子用醋酸铵(NH₄OAc)浸提后, Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺用原子吸收分光光度计测定, Al³⁺和H⁺用氯化钾法测定(劳家铨, 1988)。其中只有1996年6月份的样品测定了Na⁺含量, 因此只计算了该次采样时土壤的阳离子交换量和盐基饱和度。

1.4 统计分析

用单因素方差分析(One-way ANOVA), 比较土壤各指标在这三种森林类型间的差异和同一森林各阳离子含量在各采样季节的差异。各阳离子含量与pH值间关系采用一元线性回归来分析。所有统计分

表1 鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林土壤主要化学性质参数

Table 1 Parameters of the major chemistry characters in 0~20 cm mineral soils of the pine, mixed and broadleaf forests in Dinghushan

森林类型 Forest type	pH value (H ₂ O)	有机碳(%) Organic C	全N(%) Total N	C/N	全P(mg/kg) Total P	有效P(mg/kg) Available P
马尾松林 Pine forest	4.38(0.01)a	1.36(0.03)c	0.09(0.00)c	14.68(0.33)a	140.63(3.08)c	1.99(0.10)b
混交林 Mixed forest	4.05(0.01)b	1.69(0.05)b	0.11(0.00)b	15.34(0.23)a	166.93(3.54)b	4.09(0.16)a
阔叶林 Broadleaf forest	4.02(0.01)b	2.46(0.06)a	0.19(0.00)a	12.82(0.19)b	257.96(6.62)a	4.22(0.17)a

注: 括号内为标准误。同一列不同字母表示森林类型间差异显著。下同。

Note: With standard errors in parentheses. Different small letters following the parentheses in the same row indicating significant differences among forests. The same as follows.

析用SPSS for Windows 10.0完成。

2 结果与分析

2.1 三个森林土壤酸度和养分含量状况

马尾松林土壤pH值为4.38, 显著高于混交林(4.05)和阔叶林(4.02, $P < 0.05$), 但混交林和阔叶林间的差异不显著(表1)。土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷含量的排序为: 阔叶林 > 混交林 > 马尾松林, 其中有机碳、全氮和全磷含量表现为阔叶林显著高于混

交林, 而混交林又显著高于马尾松林。土壤C/N马尾松林和混交林显著高于阔叶林($P < 0.05$, 表1)。

2.2 三个森林土壤交换性阳离子含量、阳离子交换量和盐基饱和度

土壤交换性阳离子含量因元素种类和森林类型不同而异。三种森林的土壤交换性阳离子含量都表现为: Al³⁺ > H⁺ > K⁺ > Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺。对于1997年6月份而言, 三种森林的所有观测元素都表现为阔叶林显著高于马尾松林和混交林, 而马尾松和混交林差异不大。阔叶林土壤交换性Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、

Na⁺、H⁺和 Al³⁺含量依次是马尾松林的 1.6、2.7、2.1、1.0、1.2 和 2.3 倍,是混交林的 2.8、2.0、2.1、1.2、1.6 和 1.3 倍。阔叶林土壤可交换性阳离子量为 118.7 mmol/kg,分别是马尾松林和混交林的 2.0 和 1.4 倍。阔叶林土壤交换性阳离子含量高的原因可能是其有机质含量较高造成,高的有机质含量意味着

高的可交换性阳离子含量。本研究 6 月份取样的结果显示,两者的相关关系极显著($r=0.756, P<0.001, n=60$)。三种森林土壤的盐基饱和度均很低,依次为 5.5%、3.2% 和 4.5%。类似地,对于整个研究期间,阔叶林土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、H⁺和 Al³⁺也显著高于马尾松林和混交林,而马尾松林和混

表 2 鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林表层土壤交换性阳离子含量,可交换性阳离子量和盐基饱和度
Table 2 Concentrations of exchangeable cations, effective cation exchange capacity (CECe, sum of exchangeable cation) and base saturation (BS, percent of base cations to CECe) in 0~20 cm mineral soils of the pine, mixed and broadleaf forests in Dinghushan

森林类型 Forest type	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	CECe	BS
1997 年 6 月 June 1997 (n=20)								
马尾松林 Pine forest	0.7 (0.09)b	0.34 (0.02)c	1.17 (0.07)b	0.65 (0.03)a	14.92 (2.18)ab	40.47 (4.51)c	58.25 (4.00)c	5.5 (0.58)a
混交林 Mixed forest	0.4 (0.06)c	0.47 (0.02)b	1.18 (0.04)b	0.53 (0.03)b	11.44 (1.71)b	70.49 (5.61)b	84.5 (4.74)b	3.21 (0.21)b
阔叶林 Broadleaf forest	1.14 (0.11)a	0.91 (0.04)a	2.5 (0.16)a	0.66 (0.03)a	18.56 (1.47)a	94.94 (4.96)a	118.71 (4.53)a	4.47 (0.23)a
整个研究期间 Over study period from June 1997 to March 1998 (n=80)								
马尾松林 Pine forest	1.49 (0.07)a	0.55 (0.02)c	1.28 (0.07)b		8.09 (0.73)b	60.45 (2.32)c		
混交林 Mixed forest	1.03 (0.06)b	0.67 (0.03)b	1.35 (0.06)b		7.87 (0.55)b	73.48 (2.06)b		
阔叶林 Broadleaf forest	1.52 (0.06)a	1.08 (0.02)a	2.27 (0.07)a		10.11 (0.71)a	101.09 (1.80)a		

注:只有 1997 年 6 月份采样测定了交换性 Na⁺ 含量。Note: Exchangeable Na⁺ concentration was analyzed for the soil taken in June 1997.

表 3 鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林土壤酸度和交换性阳离子含量季节差异显著性统计结果

Table 3 Statistical results of ANOVA on seasonal difference in pH and concentrations of exchangeable cations in the pine, mixed and broadleaf forests of Dinghushan

项目 Items	马尾松林 Pine forest		混交林 Mixed forest		阔叶林 Broadleaf forest	
	F	P	F	P	F	P
pH	14.986	<0.001	29.865	<0.001	12.587	<0.001
Ca ²⁺	49.521	<0.001	28.242	<0.001	9.269	<0.001
Mg ²⁺	115.453	<0.001	32.748	<0.001	21.89	<0.001
K ⁺	179.534	<0.001	53.895	<0.001	25.282	<0.001
H ⁺	15.882	<0.001	8.064	<0.001	38.858	<0.001
Al ³⁺	13.533	<0.001	0.750	0.525	1.604	0.195

交林间差异也不大(表 2)。

2.3 三个森林土壤 pH 值和交换性阳离子含量季节动态特征

方差分析结果显示,三种森林土壤 pH 值季节差异极显著(表 3),但马尾松林季节变化格局与混交林和阔叶林不同(图 1)。混交林和阔叶林在冬春季节 pH 值明显低于夏秋季节,而马尾松林 pH 值最低值出现在秋季。三种森林土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺

和 H⁺ 含量季节差异极显著($P<0.001$),但交换性 Al³⁺ 含量只有在马尾松林土壤差异显著(表 3, 图 1、2)。三种森林土壤交换性阳离子含量的季节变化规律十分相似,但各阳离子种类不同其季节变化格局也略有差异。其中,交换性 H⁺ 含量 1997 年夏季(6 月份)明显高于其它季节(图 1);马尾松林 Al³⁺ 含量夏季明显高于其它季节,而混交林和阔叶林规律不明显(图 1)。三种森林交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 K⁺ 含量季节变化规律相似,说明它们主要受温度、降水和植物吸收节律的影响。研究期间,从 1997 年夏到 1998 年春,阳离子含量先大幅度增加,在秋季达到最高值,其后大幅度下降,冬季相对于夏季时水平略高(Ca²⁺ 和 Mg²⁺)或略低(K⁺),然后略有回升(图 2)。整个研究期间,3 个森林交换性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、H⁺ 和 Al³⁺ 含量季节最高值分别是其季节最低值的 1.6~3.6、1.4~2.2、1.6~2.8、2.1~3.2 和 1.1~1.8 倍,同一元素季节变化大小趋向马尾松林>混交林>阔叶林。

2.4 土壤阳离子含量与土壤酸度间关系

鼎湖山三种森林土壤交换性 Ca²⁺、Na⁺ 和 H⁺ 含量与土壤 pH 值相关关系不显著($P>0.05$),但交换

性 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 与土壤 pH 值极显著负相关(图 3)。负相关关系可能是因为阔叶林土壤的交换性 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 含量较高,同时土壤 pH 值较低。但是,如果分别分析各森林土壤交换性 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 含量与土壤 pH 值,发现在马尾松林土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 含量与土壤 pH 值也极显著相关($P < 0.001$),混交林 Ca^{2+} 、 K^+ 和 H^+ 与土壤 pH

值极显著相关($P < 0.01$), Mg^{2+} 与土壤 pH 值显著相关($P = 0.045$),在阔叶林只有 H^+ ($P = 0.046$)和 Al^{3+} ($P < 0.001$)含量与土壤 pH 值显著相关。该结果表明,在马尾松林和混交林土壤酸度既受交换性盐基阳离子含量的影响,也受交换性酸离子含量的影响,而在阔叶林土壤酸度主要取决于交换性酸离子含量(H^+ 和 Al^{3+})。

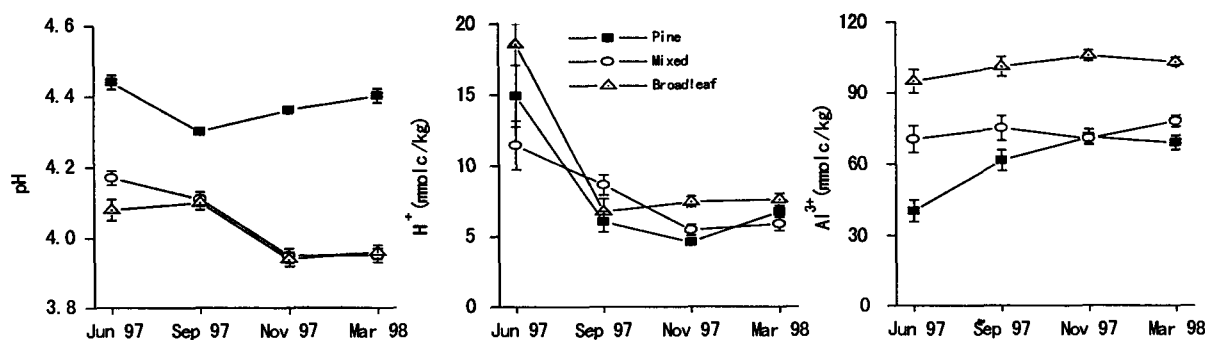


图 1 鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林土壤 pH 值和交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量季节变化

Fig. 1 Seasonal variations in concentrations (Mean \pm 1 SE) of exchangeable H^+ and Al^{3+} in the pine, mixed and broadleaf forests of Dinghushan

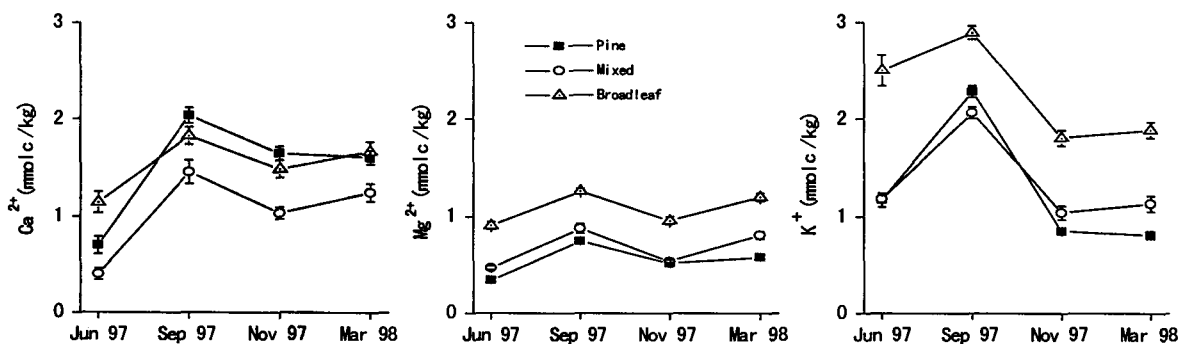


图 2 鼎湖山马尾松林、混交林和阔叶林土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in concentrations (Mean \pm 1 SE) of exchangeable Ca^{2+} 、 Mg^{2+} and K^+ in the pine, mixed and broadleaf forests of Dinghushan

3 讨论

土壤交换性离子含量受诸多因素的影响,如土壤 pH、粘粒含量、有机质含量、含水量、氧化还原电位 (Eh)、微生物、植被类型、母质以及土地利用,气候等影响(D 宾克利等,1993)。本研究结果显示,阔叶林土壤所有的交换性阳离子含量均明显高于马尾松林和混交林,分别是马尾松林和混交林的 1.2~2.7 倍和 1.2~2.8 倍,可交换性阳离子量分别是马尾松林和混交林的 2.0 和 1.4 倍。本研究中的三种森林,其

植物群落、土壤微生物种类以及土壤有机质含量等都存在一定的差异。作者认为,土壤有机质含量和植物需求是影响鼎湖山土壤交换性阳离子含量的主要因素。阔叶林由于受到 400 多年的保护,土壤有机质含量较高,分别是马尾松林和混交林的 1.8 和 1.5 倍,该倍数与交换性阳离子含量的倍数十分接近。另外,土壤有机碳含量和可交换性阳离子量两者呈极显著的正相关。

然而,除了 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 外,较少受到人为干扰的混交林土壤交换性阳离子含量并没有显著高于受到干扰的马尾松林(表 2),其中交换性 Ca^{2+} 和 H^+ 含

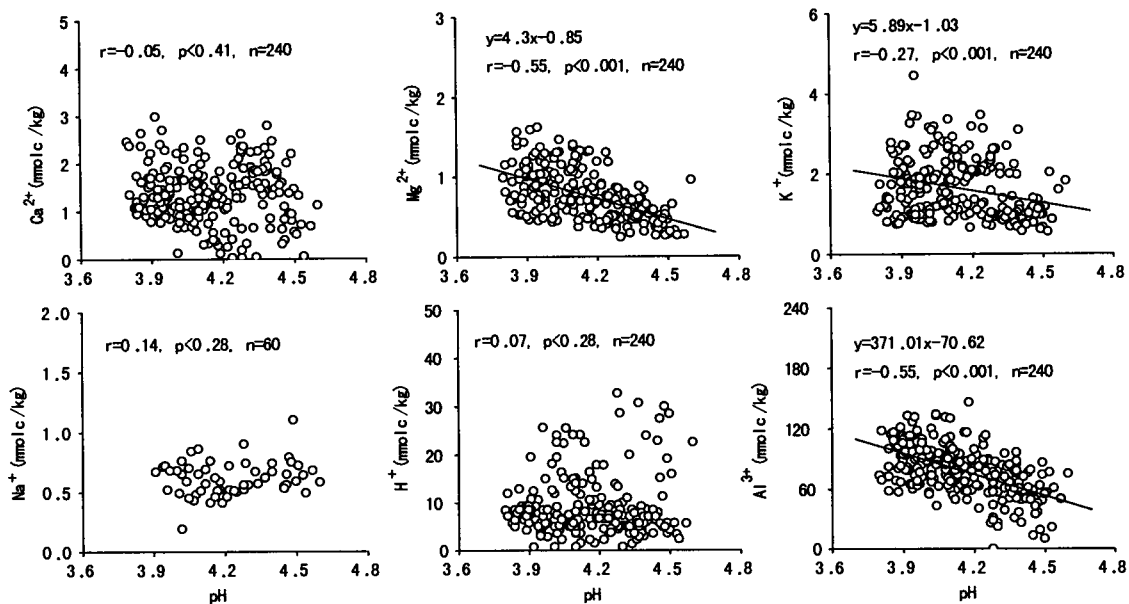


图3 鼎湖山森林土壤交换性阳离子含量与pH值的关系
Fig. 3 Relationships between soil exchangeable cations and pH value
across three Dinghushan forests over the entire study period

量还低于马尾松林, 尽管混交林有机碳含量显著高于马尾松林(表1)。盐基阳离子, 除交换性 Na^+ 外, 都是养分元素, 因此混交林盐基阳离子含量较低的原因可能是由于树木快速生长(方运霆等, 2003)需要吸收更多养分所致。另外, 对于马尾松林土壤交换性 H^+ 含量较高, 可能是马尾松针叶凋落物在分解过程中释放更多的 H^+ 。混交林土壤 Al^{3+} 含量较高可能归因于土壤酸化(表1, 下面进一步讨论)。

对于既定的森林, 土壤交换性阳离子含量是收支差异的结果, 因此取决于如矿物质风化和凋落物分解释放速度(收)、植物吸收和流失(支)等因子, 而这些因子又受温度和水的控制。本研究结果显示, 三种森林土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 H^+ 含量季节差异极显著($P < 0.001$)。交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量总体上表现在夏冬高于春秋季节, 与夏汉平等(1997)的研究结果一致。其原因可能是在夏季, 植物处在旺盛的生长期, 吸收量大, 此时雨水也较多, 流失的比例也会相对多些, 在冬季, 低温和干燥不利于凋落物分解。相反, 在秋季, 温度和湿度均十分有利于凋落物分解, 但此时的降水也少了, 从而减少了流失的可能, 在春季, 温度开始回升, 雨季也来临, 这些因素有利于凋落物分解释放。 H^+ 含量在夏季明显高于其它季节是因为植物旺盛生长而释放大量的 H^+ 。

Al^{3+} 含量季节变化较小可能是它不属于养分元素, 另外相对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 来说它不容易流失的原因。

何金海等(1982)在鼎湖山土壤性质和类型的调查研究结果显示, 鼎湖山阔叶林水化赤红壤(0~11 cm)土层 pH 值、交换性阳离子量和盐基饱和度分别为 4.6、136.6 mmolc/kg 和 5.2%, 15~25 cm 依次为 4.7、110.2 mmolc/kg 和 4.4%, 粗骨赤红壤(本研究马尾松林样地附近)土壤 pH 值为 4.7(0~6 cm)和 4.9(10~20 cm)。夏汉平等(1997)曾对本研究三种森林样地的土壤酸度和养分含量差异及其季节特征进行了研究。他们于 1993 年 1、4、7 和 11 月份分别对三种森林进行取样。其结果显示三种森林土壤表层(0~20 cm)pH 值(年平均, $n=40$)分别为 4.39、4.16 和 4.10, Ca^{2+} 含量分别为: 1.51、1.30 和 1.84 mmolc/kg, Mg^{2+} 含量分别为 0.43、0.62 和 1.32 mmolc/kg。可见, 与 1982 年和 1993 年的取样相比, 本研究所测得的土壤 pH 值普遍较低, 说明鼎湖山森林土壤一定程度上在继续酸化。过去的研究表明, 土壤交换性阳离子含量和组成与土壤酸度紧密相关, 其中钙已经得到研究证实, 而镁、钾等交换性离子有待于进一步研究证实(Lacey 等, 2001; Lambert 等, 1991)。本研究表明, 总体上, 鼎湖山森林土壤交换性 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 含量与 pH 值之间也存在极显著的

线性负相关(图3)。但是,本研究结果也显示,森林类型不同,交换性阳离子含量与酸度的相关程度不同。在马尾松林土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 含量与土壤 pH 值极显著相关($P < 0.001$),混交林 Ca^{2+} 、 K^+ 和 H^+ 与土壤 pH 值极显著相关($P < 0.01$), Mg^{2+} 与土壤 pH 值显著相关($P = 0.045$),在阔叶林只有 H^+ ($P = 0.046$)和 Al^{3+} ($P < 0.001$)含量与土壤 pH 值显著相关。该结果表明,在马尾松林和混交林土壤酸度既受交换性盐基阳离子含量的影响,也受交换性酸离子含量的影响,而在阔叶林土壤酸度主要取决于交换性酸离子(H^+ 和 Al^{3+})。这主要是因为三种森林土壤的 pH 值范围或者说对酸缓冲作用机制不同。Ulrich(1983)把土壤酸缓冲作用划分为碳酸钙(缓冲范围 pH 值为 8.0~6.2)、硅酸盐(pH 值为 6.2~5.0)、阳离子交换(pH 值为 5.0~4.2)、铝(pH 值为 4.2~3.0)和铁(pH 值 < 3.8)5 个缓冲范围。马尾松林土壤 pH 值普遍高于 4.2,其主要缓冲作用机制是依靠盐基阳离子含量来调节,而在混交林和阔叶林土壤 Al 是土壤 pH 缓冲机制的主要部分,在很大程度上制约着土壤的 pH 值。本研究与 Mokolobate 等(2002)的结果相一致,他们的研究也表明土壤 pH 与交换性 Al^{3+} 存在明显的负相关关系($r = -0.94$)。

许多学者认为根际 Al/Ca 比率可以用作评估森林土壤酸化和潜在的危害指标(Kros 等,1993),因为土壤酸化会活化土壤胶体中束缚的 Al^{3+} ,使土壤中交换性 Al^{3+} 含量升高,而 Al^{3+} 含量的升高会使土壤胶体吸附的 Ca^{2+} 被解吸,进入土壤溶液而被淋失,这就进一步增大了土壤中的铝钙比例(陈楚莹,1989; Choonghwa 等,1997)。对于鼎湖山森林来说,土壤还在继续酸化,森林土壤中 Al^{3+} 含量,尤其是阔叶林已经非常高了,严重酸化的土壤可能已经对植物生长产生了危害。况且,近二十多年来,由于受经济发达的珠江三角洲上空大量含氮排放物浓度不断增高和保护区内旅游业的快速发展,该保护区在 1989~1990 年度与 1998~1999 年度,大气降水中氮沉降水平已经分别达到 35.57 和 38.4 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (黄忠良等,1994;周国逸等,2001),大大高于 Cooks 所估计的世界大部分地区降雨含 N 量(2.3~11.3 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,Cooks 等,1967)。尤如前面所述,鼎湖山森林土壤已经在很大程度上酸化(夏汉平等,1997;刘菊秀等,2003)。前人的研究还发现,阔叶林个体数和生物量最近十年来都逐渐减少(1999 年的比 1992 年分别减少了 11% 和 15%,唐旭利等,2002),近二十年来凋

落物量也呈下降趋势(官丽莉等,2004)。这些现象可能与该地区的高氮沉降有直接的关系,因为高氮沉降常会导致森林土壤酸化和林地生产力下降(D 宾克利等,1993;王彦辉,2001;Rodhe 等,1995;秦瑞君等,1998)。总之,从本研究结果看,交换性 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Al^{3+} 含量与土壤 pH 值间呈极显著的负相关。因此,在我国研究氮沉降增加对森林生态系统包括土壤交换性离子含量的影响及其机理已刻不容缓。

致谢:本研究得到郝梦德副研究员协助样品分析,张佑昌协助野外采样,在此一并致谢。

参考文献:

- 广东植物研究所. 1976. 广东植被[M]. 北京:科学出版社
王彦辉. 2001. 酸化森林生态系统对环境变化的响应[M]. 华文出版社
何金海,陈兆其,梁奕. 1982. 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,1:25-38
劳家铨. 1988. 土壤农化分析手册[M]. 农业出版社
张秉刚,卓慕宁,骆伯胜,等. 1990. 鼎湖山亚热带季风常绿林不同林型下土壤热量状况的研究[J]. 热带亚热带森林生态系统研究,6:83-90
张秉刚,卓慕宁. 1985. 鼎湖山自然保护区不同林型下土壤的物理性质[J]. 热带亚热带森林生态系统研究,3:1-10
肖辉林. 2001. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. 林业科学,37(4):111-116
陈灵芝,黄建辉,严昌荣. 1997. 中国森林生态系统养分循环[M]. 气象出版社
陈楚莹. 1989. 酸雨文集[C]. 北京:中国环境科学出版社
罗茹英. 1983. 森林土壤学[M]. 北京:科学出版社
唐旭利,温达志,周国逸,等. 2002. 南亚热带常绿阔叶林植被 C 贮量及其动态特征[J]. 热带亚热带森林生态系统研究,9:55-63
秦瑞君,陈福兴. 1998. 有机质对土壤高活性铝的影响[J]. 土壤通报,23(1):111-112
黄忠良,孔国辉,叶万辉. 1998. 鼎湖山森林生态系统演替[J]. 热带亚热带森林生态系统研究,(8):76-80
黄展帆,范征广. 1982. 鼎湖山的气候[J]. 热带亚热带森林生态系统研究,1:11-16
Choonghwa L, Takeshi I, Masatoshi A, et al. 1997. Growth and element content of red pine seedlings grown in brown forest soil acidified by adding H_2SO_4 -solution[J]. *J Japan Soc Atmosph Environ*, 32(1):46-57
Cooks GW. 1967. The Control of Soil Fertility[M]. Crosby Lockwood and Son Ltd, 179
D 宾克利, C T 德里斯科尔, H L 埃伦, 等. 1993. 酸性与森林土壤—美国东南部的沉降环境及研究实例[M]. 北京:科学出版社, 17-31
Fang YT(方运霆), Mo JM(莫江明), Jiang YQ(江远清), et al. 2005. Acidity and inorganic nitrogen concentrations in soil solution in short-term response to N addition in subtropical forests(鼎湖山森林土壤渗透水酸度和无机氮含量对模拟氮沉降增加的早期响应)[J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), 13(2): 123-129
Fang YT(方运霆), Mo JM(莫江明), Peng SL(彭少麟) et al. 2003. Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosys-

- tems in lower subtropical China(森林演替在亚热带森林生态系统碳吸存中的作用)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 23(9): 1685—1694
- Guan LL(官丽莉), Zhou GY(周国逸), Zhang DQ(张德强), et al. 2004. Twenty years of litter fall dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghushan ecosystem research station(鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量二十年动态研究)[J]. *Acta Phytocol Sin*(植物生态学报), 28(4): 449—456
- Huang ZL(黄忠良). 1994. The hydrological process and nitrogen dynamics in monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan(鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态)[J]. *Acta Phytocol Sin*(植物生态学报), 18(2): 194—199.
- Kros J, De Vries W, Janssen PHM, et al. 1993. The uncertainty in forecasting trends of forest soil acidification[J]. *Water Air Soil Pollution*, 66: 29—58
- Lacey MJ, Wilson CR. 2001. Relationship of common scab incidence of potatoes grown in tasmanian ferrosol soils with pH, exchangeable cations and other chemical properties of those soils[J]. *J Phytopathol*, 149(11—12): 679
- Lambert DH, Manzer FE. 1991. Relationship of calcium to potato scab[J]. *Phytopathology*, 81: 632—636
- Li DJ(李德军), Mo JM(莫江明), Fang YT(方运霆), et al. 2004. Study on availability of micronutrients in soils under three different forests of Dinghushan Nature Reserve(鼎湖山自然保护区不同演替阶段森林土壤中有效微量元素状况研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), 24(6): 529—534
- Liu JX(刘菊秀), Zhou GY(周国逸), Chu GW(褚国伟), et al. 2003. Effects of soil acidity on the soil nutrients under Dinghushan monsoon evergreen broad-leaved forest(鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸度对土壤养分的影响)[J]. *Acta Pedol Sin*(土壤学报), 40(5): 763—767
- Macklon AES, Sin A. 1992. Modifying effects of non-toxic levels of aluminum on the uptake and transports of phosphate in ryegrass [J]. *J Exp Bot*, 43: 915—923
- Mo JM, Brown S, Ding MM, et al. 1994. Nitrogen distribution in vegetation of a subtropical monsoon evergreen broadleaf forest in China[J]. *Tropics*, 3(2): 143—153
- Mo JM, Brown S, Peng SL, et al. 2003. Nitrogen availability in disturbed rehabilitated and mature forests of tropical China[J]. *Fore Ecol Manage*, 175: 573—583
- Mo JM, Zhang DQ, Huang ZL, et al. 2000. Distribution pattern of nutrient elements in plants of Dinghushan lower subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. *J Trop Subtro Bot*, 8(3): 198—206
- Mokolobate MS, Haynes RJ. 2002. Increases in pH and soluble salts influence the effect that additions of organic residues have on concentrations of exchangeable and soil solution aluminium[J]. *Euro J Soil Sci*, 53(3): 481
- Peterson BJ, Melillo JM. 1985. The potential storage of carbon caused by eutrophication of the biosphere[J]. *Tellus*, 37B: 117—127
- Rodhe H, Grennfelt P, Wisniewski J, et al. 1995. Acid reign-Conference summary statement[J]. *Water Air Soil Pollution*, 85(1): 1—14
- Tang HS(唐鸿寿). 2001. Effect of soil acidification on chinese pine growth(土壤酸化对油松生长的影响)[J]. *Chin J Appl Environ Biol*(应用与环境生物学报), 7(1): 20—23
- Ulrich B. 1983. Soil acidity and its relations to acid deposition[M]// Ulrich B, Pankrath J(eds). Effects of accumulation of air pollutants on forest ecosystems. D Redel Publ Co, Dordrecht, the Netherlands, 127—146.
- Wang DZ(王代长), Jiang X(蒋新), He JZ(贺纪正), et al. 2004. Influence of simulated acid rain on transferring of cations in soils(模拟酸雨对阳离子在土体内迁移的影响)[J]. *Geochimica*(地球化学), 33(1): 46—51
- Xia HP(夏汉平), Yu QF(余清发), Zhang DQ(张德强). 1997. The soil acidity and nutrient contents and their characteristics of seasonal dynamic changes under 3 different forests of Dinghushan Nature Reserve(鼎湖山3种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 17(6): 645—653
- Zhou GY(周国逸), Yan JH(闫俊华). 2001. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems(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)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 21(12): 2002—2012

《广西植物》声明

为扩大期刊的影响,推进科技信息交流的网络化进程,更好地为广大植物学工作者服务,本刊已先后入编《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中文科技期刊数据库及台湾中文电子期刊服务——思博网 CEPS 等出版介质。

凡向本刊投稿并被录用的稿件,将由编辑部统一纳入《中国学术期刊(光盘版)》,万方数据——数字化期刊群等出版介质,为广大读者提供信息服务。若有不同意的,请在投稿时予以说明。本刊在付给作者的稿酬中已包含以上各种出版介质的服务报酬,不再另付。