

鼎湖山季风常绿阔叶林水相沉积元素分布及其相关性研究

欧阳学军 周国逸 黄忠良* 褚国伟 李炯 尹光彩

(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)

摘要 2001年2月~2002年3月在鼎湖山季风常绿阔叶林对大气降水、穿透水、土壤水(30和80 cm层)和溪水中的沉积元素进行监测,拟通过不同水相元素浓度的比较及相关关系分析,揭示系统的营养循环功能状况以及对区域化学条件变化的响应,阐明因素在环境中的迁移转化规律。结果表明:林冠与大气间强烈的相互作用,极大地提高穿透水中 Mn^{2+} 、 Sr^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度。水与土壤作用后,极大地提高水相中 Al^{3+} 的浓度。30 cm 土壤溶液和溪水中的 Al^{3+} 浓度分别是大气降水(0.329 mg L^{-1})的4.8和3.7倍。溪水中的 Al^{3+} 主要来源于土壤的淋溶。大气降水平均 Pb^{2+} 浓度为 0.062 mg L^{-1} ,存在着一定程度的 Pb^{2+} 污染,其浓度分别是穿透水和溪水的5倍和10倍。林冠吸收和土壤过滤吸附是森林生态系统净化 Pb^{2+} 等重金属污染物的主要过程。大气降水、穿透水、土壤水和溪水中 Na^+ 的浓度逐步增加,但增幅不大。元素浓度的变异系数在51.1%~236.7%之间。水相中的离子浓度与雨量有关,大气降水、穿透水、土壤水中的沉积元素浓度大部分是干季大于湿季,而溪水中是干季小于或近等于湿季。元素相关分析发现,与元素 Mg 相关的元素最多,穿透水所含相关元素对最多,不同水相间元素相关状况差异与其元素的来源和外部环境条件有关系。Pb 与金属元素 Al、Mn 在大气降水中极显著相关, Mn-Al、Mn-Mg、Mg-K 在所有水相中显著相关, Al-Sr、Mn-Sr、Ca-K、Ca-Mg 在除溪水外的所有水相中显著相关, Na-K、Na-Mg 在除大气降水外的所有水相中显著相关,而 Pb-Na、Pb-K 在所有水相中都无相关关系。结果说明,季风常绿阔叶林系统已经遭受一定的外界环境压力,但是其物质循环功能依然稳定。

关键词 沉积元素 浓度 水相 相关性

CHANGES IN SOLUTION CHEMISTRY OF EIGHT INORGANIC ELEMENTS IN A MONSOON EVERGREEN BROAD-LEAVED FOREST IN DINGHUSHAN

OU YANG Xue-Jun ZHOU Guo-Yi HUANG Zhong-Liang* CHU Guo-Wei LI Jiong and YIN Guang-Cai
(Dinghushan Forest Research Station, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526070, China)

Abstract The monsoon evergreen broad-leaved forest (MEBF) in Dinghushan Biosphere Reserve, Guangdong Province, China, is considered climax forest vegetation in this climatic zone. Studies of its ecological processes, including the hydrology and inorganic solution chemistry, are important for understanding ecosystem function and to direct ecological restoration efforts in this region. In order to understand the response of nutrient cycles to environmental impacts and characterize the nutrient element cycles in this ecosystem, water samples of precipitation, throughfall, soil water at 30 and 80 cm depth and runoff in MEBF were collected weekly and the concentrations of eight inorganic elements measured from February 2001 to March 2002. The elements Al^{3+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} and Pb^{2+} were measured by ICP (ps-1000AT, USA), Ca^{2+} and Mg^{2+} were analyzed using Atomic Absorption Spectrometer, and K^+ and Na^+ were determined using Flame Atomic Absorption Spectrometer. The results showed that the average concentration of Al^{3+} in throughfall (0.393 mg L^{-1}) was slightly higher than that in precipitation (0.329 mg L^{-1}). The average concentrations of Al^{3+} soil solutions were much higher than in precipitation and were about 4.7 times and 3.8 times higher in soil water collected at 30 cm depth and runoff, respectively. Al^{3+} in runoff was derived primarily from soil leaching. Average concentrations of Mn^{2+} , K^+ and Mg^{2+} were lowest in precipitation and Sr^{2+} and Ca^{2+} concentrations were lowest in runoff. The average concentrations of Mn^{2+} , Sr^{2+} , K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in throughfall were much higher than in precipitation as a result of strong interactions with the tree canopy. The average concentration of Pb^{2+} in precipitation was as high as 0.062 mg L^{-1} , indicating some Pb^{2+} pollution, and it was about 5 times and 10 times higher than that in throughfall and runoff, respectively. This indicated that the Pb^{2+} in precipitation

收稿日期: 2003-09-16 接受日期: 2004-01-07

基金项目: 中国科学院创新重要方向性资助项目(KSCX2-SW-120)、国家科技部“973”前期资助项目(2001CCB00600)和广东省自然科学基金重点资助项目(010567)

*通讯作者 Author for correspondence E-mail: huangzl@scib.ac.cn



could be largely absorbed by the tree canopy and soil. The average concentration of Na^+ gradually increased as it passed through the ecosystem from precipitation (0.3202 mg L^{-1}) to throughfall (0.5247 mg L^{-1}), soil water at 30 cm (0.6273 mg L^{-1}) and 80 cm (0.6391 mg L^{-1}) depth and finally as runoff (0.6296 mg L^{-1}). Coefficients of variation of the elemental concentrations in the different solutions ranged from 51.1% and 236.7%. The average concentrations of those elements in precipitation, throughfall, soil water at 30 and 80 cm depth were higher during the dry season than during wet season, but their concentrations in runoff during the dry season were lower than or close to that during the wet season. The element Mg had the highest element-couple correlation as compared to all other elements. The greatest element-couple correlations were found in throughfall. Correlations among other elements were highly variable. The results show that element nutrient cycles in this forest ecosystem are stable even though under environmental stress.

Key words Sediment element, Concentration, Liquid phase, Correlation

沉积元素是生物地球化学循环研究的重要内容。绝大多数营养元素是沉积元素,同时,许多沉积元素在生态系统物质迁移过程中的变化可以作为生态系统功能过程的指示剂(Land *et al.*, 2000)。水是生态系统中物质迁移的重要媒介,它与生态系统各个部分直接联系并相互作用。从生物利用的方面讲,只有参与了水文过程的沉积元素才真正参与生态系统的生物化学循环。因此,研究生态系统水相中沉积元素浓度及其相关关系的变化,能反映系统的营养功能状况以及对区域化学条件变化的响应,阐明因素在环境中的迁移转化规律,为植被恢复和区域环境评价提供理论依据。

鼎湖山季风常绿阔叶林为南亚热带地带性森林植被类型,被认为是本地带接近气候演替顶极的森林群落,其生态过程的研究成果对区域植被生态恢复具有导向性作用(彭少麟,1996)。以往在群落结构(王伯荪和马曼杰,1982;彭少麟,1996)和生物量(温达志等,1999)等方面的研究较多,其它功能方面的研究较少,主要是水文功能及养分动态(周国逸和闫俊华,2001;黄忠良等,1994,2000)。本文报道了季风常绿阔叶林水相中的沉积元素分布特征及其相关关系,以便进一步了解其作为地带性近演替顶极群落的营养循环功能及功能过程对区域化学环境条件的响应。

1 研究地概况

研究地设在广东省中部、珠江三角洲西南的肇庆市鼎湖山生物圈保护区($112^{\circ}30'39'' \sim 112^{\circ}33'41'' \text{ E}$, $23^{\circ}09'21'' \sim 23^{\circ}11'30'' \text{ N}$)内,距广州 86 km,面积 1145 hm^2 。属南亚热带季风气候,年平均气温 20.9°C ,年平均相对湿度为 80%,年均降雨量和蒸发量分别为 1929 mm 和 1115 mm ,4~9 月为雨季,10 月至次年 3 月为旱季(黄展帆和范征广,

1982)。鼎湖山大气降水 pH 值很低,变动范围为 4.35~5.65,平均值 4.90,酸雨频率在 62.7% 以上(刘菊秀等,2003)。全区由东、西两条羽毛状水系组成,皆自西北流向东南,在保护区入口汇合流入西江,年平均径流系数在 0.455~0.492 之间。土壤为水化赤红壤,自然酸化严重,土壤为酸性,pH 值在 4.1~4.9 之间(何金海等,1982)。地质构造属鼎湖山系¹⁾,由不同颜色、硬度与质地的砂岩、砂页岩、页岩与石英砂岩构成。全区森林覆盖率达 85% 以上,分布有季风常绿阔叶林等多种植被类型(王铸豪等,1982)。实验地的季风常绿阔叶林位于东水系东南坡,坡度 26° ,海拔 220~250 m,该森林群落外貌终年常绿,层次结构复杂,优势树种主要有锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、鼎湖钓樟(*Lindera chunni*)等,已有近 400 年的保存历史。

2 研究方法

2.1 采样方法

在季风常绿阔叶林内铁塔顶部设大气降水收集桶 1 个,林内设 11 个收集桶收集穿透水,在林内 3 个点的土壤 30 cm 和 80 cm 两层各埋设两个直径 7.2 cm 的陶瓷布式漏斗,用塑料管引入收集桶收集土壤溶液。在集水区出水口收集溪水。各类水样于 2001 年 2 月~2002 年 3 月约 1 周采集 1 次。水样收集桶为塑料制品。采样器为清洁的蒸馏水水瓶,采样前用 1:5 的硝酸浸洗 3 遍,每次浸泡 3 d,用双蒸水清洗,取样前用水样涮洗两次后再装瓶。水样分析前离心并加硝酸保存。由于降雨量和降雨次数在全年分布极不均匀,因此在采样过程中,多次下雨的 1 周只取样 1 次,一段时间未下雨时,逢下雨都取

1) Jiang R (蒋溶), Xu RL (徐瑞麟) (1932). Geological minerals along the Xijiang river in Guangdong. *Annual Report of Both-Guang Geological Survey Institute* (两广地质调查所年报). (in Chinese)

样。另外,有些水样如土壤水在旱季的采集受到限制或无法收集得到,使取样次数明显少于湿季。

2.2 分析方法

取样 50 ml,加 10 ml 浓硝酸消煮至 5~10 ml 再定容至 50 ml,用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(PS-1000AT,美国)测定铝(Al³⁺)、锰(Mn²⁺)、锶(Sr²⁺)和铅(Pb²⁺)的含量。取样 20 ml,定容至 50 ml,用原子吸收分光光度法测定钙(Ca²⁺)和镁(Mg²⁺)的含量,用火焰原子吸收分光光度法测定钾(K⁺)和钠(Na⁺)的含量。用 Excel2000 和 SPSS11.0 进行数据处理与分析。

3 结果与分析

3.1 沉积元素在水相中的浓度分布

表 1 是水相中 8 种沉积元素 Al³⁺、Mn²⁺、Sr²⁺、Pb²⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 浓度平均值结果。就各水相来讲,土壤水 30 cm 中 Al³⁺ 浓度最高,达 1.588 4 mg·L⁻¹,其次是溪水,而大气降水(0.329 mg·L⁻¹)中最低,前两者是后者的 4.8 和 3.7 倍。穿透水中的 Al³⁺ 浓度(0.393 3 mg·L⁻¹)只比大气降水略高(表 1)。所有与土壤作用后的水相,包括土壤水和溪水,Al³⁺ 浓度均有极大的提高。显示了酸雨区土壤 Al 活化的过程。也说明溪水中 Al³⁺ 的主要来源为土壤淋溶。

Mn²⁺ 与 Sr²⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 具有相似分布特点。它们的浓度在穿透水中最高,而在大气降水或溪水中最低。大气降水淋溶林冠后极大地提高

了水相中这些元素的浓度,而水在土壤间的流动过程中,较高浓度状态基本能在水相中得以保持,在流出土壤后元素浓度又降至最低或较低(表 1)。这些元素均为生命必需元素。它们在水相中的浓度分布说明元素的树冠淋洗、土壤元素的活化、植物吸收以及土壤吸附等系列复杂过程。尤其是穿透水浓度比大气降水的极大提高,反映了林冠与大气间有着强烈相互作用过程。

Pb²⁺ 为污染重金属,其在各水相中分布以在大气降水中浓度最高(达 0.062 mg·L⁻¹),溪水中浓度最低。大气降水与林冠作用以及土壤过程极大地改变了水相 Pb²⁺ 的浓度,形成的穿透水的 Pb²⁺ 浓度比大气降水降低了 5 倍,经过土壤后,溪水中的 Pb²⁺ 浓度比穿透水又降低 5 倍(表 1)。显示了森林生态系统具有通过林冠吸收和土壤过滤吸附等过程净化重金属污染物的能力。

Na⁺ 在大气降水中浓度最低,经过林冠和土壤后水相浓度不断提高,穿透水、土壤水和溪水中 Na⁺ 的浓度约是大气降水的 1.6~2 倍,增幅不大(表 1)。反映了 Na 元素化合物易溶性和强流动性的特点,也说明 Na 元素主要来源于大气降水。

对沉积元素浓度进行水相间相关关系分析发现(表 2),溪水与土壤水 30 cm 中的 Al³⁺ 呈显著相关,溪水与穿透水中的 Mn²⁺ 呈显著相关,土壤水 30 cm 和 80 cm 中的 Mn²⁺、Pb²⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 均呈显著相关,并且平均浓度比较接近,说明溪水中的 Al³⁺ 主要来源于表层土壤的淋溶,溪水中的 Mn²⁺ 则

表 1 季风常绿阔叶林水相中几种沉积元素浓度分布(mg L⁻¹)

Table 1 Mean concentrations of several sediment elements in different water phases of monsoon evergreen broad-leaved forest ecosystem (mg L⁻¹)

水相类型 Liquid phase (LP)	Al ³⁺	Mn ²⁺	Sr ²⁺	Pb ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
大气降水(PR) Precipitation n = 24	0.329 0 (0.78) <u>236.7</u>	0.029 5 (0.05) <u>184.3</u>	0.004 5 (0.005) <u>114.7</u>	0.062 0 (0.068) <u>110.3</u>	0.320 2 (0.31) <u>98.3</u>	0.507 8 (0.68) <u>133.3</u>	0.109 8 (0.13) <u>117.8</u>	0.831 4 (0.82) <u>98.1</u>
穿透水(TF) Throughfall n = 23	0.393 3 (0.40) <u>101.8</u>	0.237 2 (0.21) <u>88.7</u>	0.022 4 (0.036) <u>162.4</u>	0.012 5 (0.010) <u>81.5</u>	0.524 7 (0.34) <u>64.4</u>	6.663 6 (4.01) <u>105.1</u>	0.809 6 (0.83) <u>102.0</u>	3.291 6 (3.39) <u>103.0</u>
土壤水 30 cm (SW30) Soil water of 30 cm in depth n = 21	1.588 4 (1.00) <u>62.8</u>	0.224 8 (0.13) <u>57.4</u>	0.009 7 (0.006) <u>64.2</u>	0.008 0 (0.008) <u>96.2</u>	0.627 3 (0.44) <u>70.3</u>	3.432 4 (2.81) <u>81.9</u>	0.644 9 (0.51) <u>78.6</u>	2.053 8 (1.76) <u>85.9</u>
土壤水 80 cm (SW80) Soil water of 80 cm in depth n = 21	1.046 2 (1.23) <u>117.9</u>	0.213 6 (0.13) <u>59.7</u>	0.011 1 (0.008) <u>67.5</u>	0.007 0 (0.008) <u>119.3</u>	0.639 1 (0.38) <u>59.4</u>	3.721 1 (2.89) <u>77.8</u>	0.638 1 (0.52) <u>82.2</u>	2.357 4 (2.36) <u>100.3</u>
溪水(R) Runoff n = 43	1.172 0 (0.63) <u>54.0</u>	0.072 3 (0.04) <u>56.3</u>	0.004 3 (0.009) <u>210.3</u>	0.006 2 (0.006) <u>112.3</u>	0.629 6 (0.46) <u>73.0</u>	0.570 8 (0.56) <u>97.5</u>	0.435 0 (0.22) <u>51.1</u>	0.567 3 (0.50) <u>88.0</u>

n: 取样数量 Sample number 括号内为标准差,划底线的为变异系数(%) SE in parenthesis, CV marked by a bottom line

表 2 沉积元素在不同水相间浓度间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between concentration of sediment element in different liquid phase

	PR-TF	PR-SW30	PR-SW80	PR-R	TF-SW30	TF-SW80	TF-R	SW30-SW80	SW30-R	SW80-R
Al ³⁺									0.482 *	
Mn ²⁺				0.65 **				0.504 *		
Sr ²⁺						0.596 *				
Pb ²⁺								0.982 **		
Na ⁺	0.591 *	0.655 **						0.802 **		
K ⁺		0.791 **	0.923 **				0.499 *	0.930 **	0.627 **	0.503 *
Mg ²⁺	0.819 **		0.493 *		0.712 **	0.690 **		0.920 **	0.465 *	0.652 **
Ca ²⁺	0.851 **	0.845 **	0.869 **					0.903 **		

PR, TF, SW30, SW80, R: 同表 1 See Table 1 * : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

主要来源于穿透水,而土壤水 30 cm 中的 Mn²⁺、Pb²⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺大多直接迁移到土壤水 80 cm 中。穿透水和土壤水与大气降水中的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺大都呈显著相关,溪水与土壤水和穿透水中的 K⁺和 Mg²⁺大都呈显著相关,说明穿透水和土壤水中的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺主要来源于大气降水,而溪水中的 K⁺和 Mg²⁺主要是穿透水和土壤水。

3.2 水相中元素浓度在干湿季节间的差异

变异系数表现了不同元素浓度时间分布的均匀程度。从表 1 可见,季风常绿阔叶林系统水相元素浓度的变异系数总体说来比较大,最小也在 50% 以上,并且因水相类型和元素种类的不同而不同。从水相来讲,大气降水中元素浓度的变异系数最大,在 98.1% ~ 236.7% 之间,穿透水次之,在 88.7% ~ 162.4% 之间,而土壤水和溪水中元素浓度的变异系数较小。水相中 Al³⁺、Mn²⁺、Sr²⁺浓度的变异系数在不同水相中相差较大,而 Ca²⁺最小。较大的变异系数暗示着干湿季节间元素浓度较大的差异。

据鼎湖山地区气象站降雨资料记录,取样期间(2001 年 2 月到 2002 年 3 月)的 14 个月内,共降雨 2 102.3 mm,其中,2001 年的 2、3、10、11、12 月和 2002 年的 1、2、3 月 8 个月中降雨量为 365.1 mm,占取样期间总降雨量的 17.37%,为典型的干季,2001 年 4~9 月的 6 个月中降雨量为 1 737.2 mm,占取样期间总降雨量的 82.63%,为典型的湿季。在此,用以上所划分的月份来统计取样期间干湿季元素的浓度。

鼎湖山季风常绿阔叶林除溪水外各水相沉积元素浓度大部分是干季大于湿季(表 3)。其中,尤其以大气降水中浓度干湿季相差最大,干季与湿季的浓度比值分别为:10.5 倍(Al³⁺),10.6 倍(Mn²⁺),3.7 倍(Sr²⁺),2.7 倍(Pb²⁺),5.1 倍(Na⁺),2.9 倍

(K⁺),4.0 倍(Mg²⁺),2.3 倍(Ca²⁺)。其次是穿透水,干季与湿季的浓度比值分别为:3.2 倍(Al³⁺),2.4 倍(Mn²⁺),5.5 倍(Sr²⁺),2.0 倍(Pb²⁺),2.6 倍(Na⁺),1.8 倍(K⁺),1.9 倍(Mg²⁺),2.5 倍(Ca²⁺)。土壤水中元素干季与湿季的浓度比值在 0.8 ~ 2.4 倍之间。而溪水中沉积元素浓度大部分是干季小或近等于湿季,干季与湿季的浓度比值分别为:0.7 倍(Al³⁺),1.1 倍(Mn²⁺),0.3 倍(Sr²⁺),1.3 倍(Pb²⁺),0.4 倍(Na⁺),1.0 倍(K⁺),0.8 倍(Mg²⁺),0.4 倍(Ca²⁺)。这说明鼎湖山水相中离子浓度基本上也与雨量有关。

3.3 元素相关性

对同一水相类型水样中的元素以及水相所有水样中的元素分别做相关分析,显著相关及极显著相关的元素对的相关系数列于表 4。从表 4 看出,穿透水中所含相关元素对最多,28 个元素对中占了 22 个,其次是土壤溶液 80 cm 和大气降水,分别有 15 个和 14 个有相关关系的元素对,而溪水中最少,只有 8 个。而整个水相中所有水样所含相关元素对 13 对,元素的相关关系与其它水相类型均有较多的相似之处,同时又不同于任何单一的水相类型(表 4),体现了整体水相中元素的相关状况。另外,穿透水中相关元素对中,除 Pb 与 Mn 显著相关外,不再与其它 6 种元素相关,而其它 7 种元素均两两显著相关。

从元素方面来看,与元素 Mg 明显相关的元素最多,在 5 个水相类型中的 35 个元素对中,有 24 个相关元素对呈现显著或极显著相关,其次是 Mn、Ca、Sr、K、Al、Na,分别有 20、19、19、17、17、15 个呈现显著或极显著相关关系的元素对,而 Pb²⁺最少,只有 7 个。这说明在测定的沉积元素中,Mg 对维持鼎湖山森林生态系统水体环境化学特性有更重要的作用。

在所有的元素对中,Mn-Al、Mn-Mg、Mg-K 在所有

表 3 干湿季水相中元素平均浓度(mg L⁻¹)及比值

Table 3 Mean concentrations (mg L⁻¹) in dry and wet season and their ratio in different water phases of monsoon evergreen broad-leaved forest ecosystem

水相类型 Liquid phase (LP)		Al ³⁺	Mn ²⁺	Sr ²⁺	Pb ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
大气降水 (PR)	干季(D)	0.078 13	0.070 2	0.008 5	0.103 9	0.659 7	0.877 4	0.211 0	1.289 8
	Dry season n = 9	(1.201 3)	(0.076 9)	(0.006 9)	(0.101 3)	(0.233 5)	(1.037 3)	(0.176 8)	(1.190 8)
	湿季(W)	0.074 5	0.006 6	0.002 3	0.038 4	0.129 2	0.299 9	0.052 8	0.573 5
Wet season n = 16	(0.094 2)	(0.004 6)	(0.001 7)	(0.019 1)	(0.146 6)	(0.175 2)	(0.021 4)	(0.333 7)	
	干/湿 D/W	10.49	10.62	3.73	2.7	5.11	2.93	4.00	2.25
渗透水 (TF)	干季(D)	0.643 2	0.362 1	0.041 7	0.017 3	0.804 4	8.916 9	1.105 6	4.949 6
	Dry season n = 10	(0.472 0)	(0.235 5)	(0.049 5)	(0.010 5)	(0.184 9)	(9.490)	(1.120 4)	(4.478 4)
	湿季(W)	0.201 1	0.148 9	0.007 5	0.008 8	0.309 5	4.930 3	0.581 9	2.015 7
Wet season n = 13	(0.187 0)	(0.141 9)	(0.006 0)	(0.008 5)	(0.263 3)	(3.857 3)	(0.423 4)	(1.407 8)	
	干/湿 D/W	3.20	2.36	5.53	1.97	2.60	1.81	1.90	2.46
土壤水 30 cm (SW30)	干季(D)	1.466 4	0.230 4	0.008 4	0.009 0	0.840 1	5.509 4	1.063 6	3.483 8
	Dry season n = 5	(1.102 2)	(0.162 1)	(0.007 6)	(0.011 5)	(0.549 2)	(5.349 7)	(0.934 4)	(3.314 2)
	湿季(W)	1.626 5	0.223 1	0.010 1	0.007 7	0.560 8	2.783 4	0.514 1	1.606 9
Wet season n = 16	(0.997 7)	(0.123 4)	(0.006 0)	(0.006 5)	(0.398 8)	(1.003 5)	(0.180 7)	(0.568 3)	
	干/湿 D/W	0.90	1.03	0.83	1.17	1.50	1.98	2.07	2.17
土壤水 80 cm (SW80)	干季(D)	1.001 4	0.249 6	0.018 5	0.006 5	0.780 4	6.091 3	1.046 1	4.267 8
	Dry season n = 5	(0.749 6)	(0.163 8)	(0.010 6)	(0.007 0)	(0.477 6)	(5.303 0)	(0.960 9)	(4.378 9)
	湿季(W)	1.060 2	0.202 4	0.008 7	0.004 2	0.594 9	2.980 4	0.510 6	1.760 3
Wet season n = 16	(1.370 1)	(0.118 3)	(0.004 5)	(0.005 3)	(0.350 3)	(1.099 5)	(0.218 4)	(0.863 2)	
	干/湿 D/W	0.94	1.23	2.12	1.55	1.31	2.04	2.05	2.42
溪水 (R)	干季(D)	1.006 6	0.075 3	0.002 2	0.007 8	0.383 3	0.572 6	0.379 6	0.358 3
	Dry season n = 24	(0.462 6)	(0.048 0)	(0.003 9)	(0.005 1)	(0.348 8)	(0.688 7)	(0.249 2)	(0.423 9)
	湿季(W)	1.381 0	0.068 6	0.007 0	0.006 0	0.940 5	0.568 6	0.505 1	0.831 3
Wet season n = 19	(0.761 1)	(0.030 0)	(0.012 6)	(0.010 4)	(0.393 5)	(0.340 9)	(0.163 0)	(0.468 5)	
	干/湿 D/W	0.73	1.10	0.32	1.29	0.41	1.01	0.75	0.43

PR, TF, SW30, SW80, R, LP, n: 同表 1 See Table 1 括号内为标准差 SE in parenthesis

水相中都呈现相关关系。Al-Sr、Mn-Sr、Ca-K、Ca-Mg 在除溪水外的所有水相中呈现相关关系。Na-K、Na-Mg 在除大气降水外的所有水相中呈现相关关系。而 Pb-Mg、Pb-Sr 只在大气降水中呈现相关关系，Pb-Ca 只在溪水中呈现相关关系，Mn-Na、Mn-K、Al-Na、Al-K 只在渗透水中呈现相关关系。Al-Mg、Mn-Pb、Sr-Pb 只在大气降水、渗透水中呈现相关关系。Ca-Sr 在渗透水、土壤溶液 80 cm 和溪水中呈现相关关系。Pb 与 Al 在大气降水和土壤水 80 cm 呈现相关关系。Mn-Ca、Sr-K 只在渗透水和土壤溶液 80 cm 呈现相关关系。Pb-Na、Pb-K 在所有水相中 đều 无相关关系。

4 讨论

4.1 系统受到的环境压力及营养维持功能

在美国、西德、荷兰等地的灰壤中，酸沉降使土壤中的 Al 活化并重新移动进入水体 (Driscoll *et al.*, 1985)。大量的模拟酸雨淋溶土壤的实验也显示，随着模拟酸雨 pH 值的降低，Al 等离子会大量溶出 (王维君等, 1992; 周国逸和小仓纪雄, 1996)。本

研究测得所有与土壤作用后的水相 Al 浓度均有极大的提高，且溪水水中的 Al 主要来源于表层土壤的淋溶，与酸雨的淋溶结果一致 (刘菊秀等, 2003)，说明鼎湖山森林生态系统已经遭到酸雨的严重威胁。

水相中元素之间的相关关系，表明元素在水相中的迁移具有相似的运动规律。在鼎湖山的大气降水中，存在一定程度重金属元素 Pb 污染 (表 1)，尤其在干季 (表 3)，而含 Pb 汽油的燃烧被认为是本地区最重要的 Pb 污染源 (欧阳学军等, 2002)。然而，Pb 与工业常用金属元素 Al、Mn 极显著相关 (表 4)，这从侧面反映鼎湖山周围存在冶炼性的污染源。这说明工业生产活动已经对这些元素的区域存在造成一定程度的影响。

Mn、Sr、K、Mg、Ca 均为大量营养元素，在渗透水中的浓度比大气降水有极大提高，而溪水中浓度和大气降水一样最低。这增加了系统的营养来源，并通过土壤的吸附得到保持。可能说明林冠与大气间有着强烈相互作用以及土壤对营养的保护是该系统营养维持的一种机制。因为要在年降雨量大，土壤



表 4 各水相中沉积元素浓度间的相关系数
Table 4 Correlation coefficient matrix of sediment elements in liquid phases

水相 (LP)		Mn ²⁺	Sr ²⁺	Pb ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
大气降水 (PR)	Al ³⁺	0.909 **	0.802 **	0.689 **			0.768 **	
	Mn ²⁺		0.873 **	0.621 **			0.746 **	
	Sr ²⁺			0.551 **	0.469 *		0.648 **	
	Pb ²⁺						0.574 **	
	Na ⁺							
	K ⁺						0.534 **	0.872 **
	Mg ²⁺							0.682 **
穿透水 (TF)	Al ³⁺	0.827 **	0.692 **		0.542 **	0.481 *	0.616 **	0.508 *
	Mn ²⁺		0.823 **	0.483 *	0.581 **	0.776 **	0.768 **	0.761 **
	Sr ²⁺				0.477 *	0.691 **	0.913 **	0.691 **
	Pb ²⁺							
	Na ⁺					0.504 *	0.514 *	0.483 *
	K ⁺						0.706 **	0.835 **
	Mg ²⁺							0.693 **
土壤水 30 cm (SW30)	Al ³⁺	0.689 **	0.511 *					
	Mn ²⁺		0.578 **				0.470 *	
	Sr ²⁺							
	Pb ²⁺							
	Na ⁺					0.645 **	0.718 **	0.655 **
	K ⁺						0.944 **	0.876 **
	Mg ²⁺							0.928 **
土壤水 80 cm (SW80)	Al ³⁺	0.738 **	0.451 *	0.745 **				
	Mn ²⁺		0.734 **				0.601 **	0.540 *
	Sr ²⁺					0.444 *	0.643 **	0.701 **
	Pb ²⁺							
	Na ⁺					0.501 *	0.646 **	0.581 **
	K ⁺						0.834 **	0.884 **
	Mg ²⁺							0.924 **
溪水 (R)	Al ³⁺	0.381 **						0.293 *
	Mn ²⁺						0.253 *	
	Sr ²⁺							0.365 *
	Pb ²⁺							0.371 **
	Na ⁺					0.964 **	0.977 **	
	K ⁺						0.990 **	
	Mg ²⁺							
所有水样 All samples	Al ³⁺	0.461 **	0.177 *	0.242 **				
	Mn ²⁺		0.683 **			0.279 **	0.189 *	0.700 **
	Sr ²⁺					0.215 *		0.643 **
	Pb ²⁺							
	Na ⁺					0.905 **	0.953 **	
	K ⁺						0.960 **	0.283 **
	Mg ²⁺							

PR, TF, SW30, SW80, R, LP: 同表 1 See Table 1 * : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

淋溶强烈,物质分解迅速的区域支持较高的森林生物量,没有较好的营养维持机制是难以想象的。同时,该系统对输入的高浓度重金属 Pb 能通过林冠的枝、叶吸收(薛皎亮等,2000)和土壤过滤吸附(缪坤裕和陈桂珠,1998)使得到较彻底地净化,说明该

系统对不良环境抗性依然很强。

综合以上分析,说明鼎湖山季风常绿阔叶林虽然已经遭受外界环境的压力,但是其物质循环功能依然稳定。

4.2 干湿季节对水相元素浓度的原因与意义

Bravo 等(2000)发现墨西哥玛雅地区雨水中离子的浓度与雨量成负相关关系。Balestrini 等(2000)测得意大利北部地区干沉降输入的 Ca、Mg、K 占总输入的一半左右。以色列降雨中的 Sr 有 56% 是来自灰尘中矿物的溶解 (Herut *et al.*, 1993)。而溪水中离子浓度也与流量有关 (Feller & Kimmins, 1979)。这说明雨量对水相中的元素浓度有重要影响,鼎湖山干季与湿季水相中离子浓度的差异也例证了这个规律。因此,要准确估算生态系统养分循环,取样频率值得重视。

在大气降水中, Al^{3+} 和 Mn^{2+} 干季与湿季浓度比值在 10 倍以上,明显大于其它元素,说明鼎湖山空气颗粒或气溶胶中携带以含 Al、Mn 元素的化合物较多。干湿季浓度相差大,也说明降雨是空气清洁的有效方式。穿透水中各元素干季与湿季的浓度比值比大气降水小,可能与林冠的功能有关。虽然一方面林冠利用其巨大的表面积截获空气颗粒或气溶胶,从而增加林冠尤其是干季时被雨水淋溶的干沉降,但是另一方面,林冠尤其是叶片湿季活跃的新陈代谢产物的向外排泄,增加了林冠表面吸附离子尤其是营养离子 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 的数量。这两方面功能在时间上的错位,可能是穿透水中各元素干季与湿季的浓度比值比大气降水小的原因。穿透水中营养元素 Mn^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 干季与湿季的浓度比值比大气降水明显要小(表 3)就是例证。土壤水中各元素干季与湿季的浓度比值比较接近,可能与取样的方式更有关系。本研究收集的土壤水是土壤水饱和时的渗漏水,只有在水量较多的情况下才能收集到足够分析的水样,而这种水大部分直接来源于大气降水。有研究证明,用本研究方法类似的 Wick samples 方法收集的土壤水 95% ~ 100% 是流动土壤水,这种水可能是降水后或降水期间地表水的再分配 (Landon *et al.*, 1999)。溪水中沉积元素浓度大部分是干季小于或近等于湿季,可能一定程度上支持 van Praag 等(2000)土壤模拟淋溶的结果,他们发现土壤中化学物质的转移依赖于动态的土壤水。

4.3 水相中元素相关性的原因

每种类型水相的相关分析结果反映的是该类型水相特征,而所有水样的相关分析结果反映的是整个水相的特征。穿透水中元素相关对数最多,可能与这些元素具有共同的来源有关。因为水相中有共同来源的元素通常呈现相关关系。例如,降水受海洋影响的地区,降雨和溪水中的 Na^{+} 与 Cl^{-} 通常有极显著相关关系 (Bravo *et al.*, 2000; Balestrini *et*

al., 2000; Semhi *et al.*, 2000)。相同来源的 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 及 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 在与其它元素之间的相关性上没什么差别 (Bravo *et al.*, 2000)。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 之间通常在降雨中呈显著或极显著相关关系,因为它们都来源于海洋的气溶胶 (Bravo *et al.*, 2000; Balestrini *et al.*, 2000)。而穿透水中的元素正是大气降水淋溶林冠的结果。

水相中元素的相关关系也与元素相似的地球化学性质有关。Ca 和 Sr 同属二价易迁移的碱土金属元素,许多地方的降水和溪水中也都能发现两者的显著相关关系 (Bailey *et al.*, 1996; Clow *et al.*, 1997; Probst *et al.*, 2000)。Clow 等(1997)用弱酸分步淋溶片麻岩时发现,淋出液中的 Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 浓度具有极显著的相关性 ($R^2 = 0.99$)。因此,很多研究都支持 Sr 作为 Ca 替代物来示踪 Ca (Jacks *et al.*, 1989; Bailey *et al.*, 1996; Clow *et al.*, 1997; Probst *et al.*, 2000)。在本研究的穿透水、土壤水 80 cm、溪水各水样中以及所有水样中 Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 都呈现显著相关。Ca、Mg 同为碱土金属大量营养元素,也是在水中相关关系出现较多的元素对。

元素相关关系在水相间的差异,可能还受外部环境条件的影响。穿透水中的 Pb 不与 Mn 以外的其它 6 种元素相关,而其它 7 种元素均两两显著相关,以及溪水中相关元素对最少,除元素性质的差异外,可能更多的是因为水相中的元素经历十分复杂的外部环境条件的结果。因为不同水相经历外部环境条件明显不同,大气降水中的元素来源于海洋气溶胶和沿途空气其它悬浮物,穿透水是大气降水淋溶林冠的结果,林冠吸附的干沉降以及排附在林冠表面的林木新陈代谢产物都被淋洗在穿透水中,土壤水和溪水则是穿透水经过土壤间隙后的结果,水相中的元素明显受土壤的淋溶、土壤的吸附以及植物根系吸收等复杂过程的影响,而土壤性质和根系分布在不同土壤层中明显不同。外部环境条件的差异,导致元素迁移命运的不同,必然体现在水相间元素相关关系的差异上。

当然,自然水中元素含量之间的相关关系复杂,是多种因素相互作用的结果,要揭开元素之间相关的机理,还需进一步研究和探讨。但是,鼎湖山水体中 Sr 与 Ca、Mn 等元素的相关关系为用 Sr 同位素示踪营养元素提供了一定程度的支持。

参 考 文 献

Bailey SW, Hornbeck JW, Driscoll CT, Gaudette HE (1996).

- Calcium inputs and transport in a base-poor forest ecosystem as interpreted by Sr isotopes. *Water Resource Research*, 32, 707 - 719.
- Balestrini R, Galli L, Tartari G (2000). Wet and dry atmospheric at prealpine and alpine sites in northern Italy. *Atmospheric Environment*, 34, 1455 - 1470.
- Bravo HA, Saavedra MIR, Sánchez RJ, Torres RJ, Granada LMM (2000). Chemical composition of precipitation in a Mexican Maya region. *Atmospheric Environment*, 34, 1197 - 1204.
- Clow DW, Mast MA, Blutton TD, Turk J T (1997). Strontium-87/strontium-86 as a tracer of mineral weathering reactions and calcium sources in an alpine/subalpine watershed, Loch Vale, Colorado. *Water Resources Research*, 33, 1335 - 1351.
- Driscoll CT, van Breeman N, Mulder J (1985). Aluminum chemistry in a forested podsol. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 437 - 444.
- Feller MC, Kimmins JP (1979). Chemical characteristics of small streams near Haney in southwestern British Columbia. *Water Resources Research*, 15, 247 - 258.
- He JH (何金海), Chen ZQ (陈兆其), Liang YE (梁永奕) (1982). The soils of Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1, 25 - 37. (in Chinese)
- Herut B, Starinsky A, Katz A (1993). Strontium in rainwater from Israel: sources, isotopes and chemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 120, 77 - 84.
- Huang ZF (黄展帆), Fan ZG (范征广) (1982). The climate of Dinghushan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1, 11 - 16. (in Chinese)
- Huang ZL (黄忠良), Kong GH (孔国辉), Yu QF (余清发), Zhang ZH (张志红) (2000). Hydrological function and nutrient dynamics in lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 24, 157 - 161. (in Chinese with English abstract)
- Huang ZL (黄忠良), Ding MM (丁明懋), Zhang ZP (张祝平), Yi WM (蚁伟民) (1994). The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 18, 194 - 199. (in Chinese with English abstract)
- Jacks G, Aberg G, Hamilton J (1989). Calcium budgets for catchments as interpreted by strontium isotopes. *Nordic Hydrology*, 20, 85 - 96.
- Land M, Ingri J, Andersson PS, Ölander B (2000). Ba/Sr, Ca/Sr and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios in soil water and groundwater: implication for relative contributions to stream water discharge. *Applied Geochemistry*, 15, 311 - 325.
- Landon MK, Delin GN, Komor SC, Regan CP (1999). Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samples, and cores in a sandy unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 224, 45 - 54.
- Liu JX (刘菊秀), Zhang DQ (张德强), Zhou GY (周国逸), Wen DZ (温达志), Zhang QM (张倩媚) (2003). A preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, streamflow and surface run-off in major forest types at Dinghushan under acid deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 14, 1223 - 1228. (in Chinese with English abstract)
- Miao KY (缪坤裕), Chen GZ (陈桂珠) (1998). Allocation and migration of lead in simulated wetland system of kandelia candel. *China Environmental Science (中国环境科学)*, 18, 48 - 51. (in Chinese)
- Ouyang XJ (欧阳学军), Zhou GY (周国逸), Huang ZL (黄忠良), Huang MH (黄梦虹) (2002). Analysis on runoff water quality in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 22, 1373 - 1379. (in Chinese with English abstract)
- Peng SL (彭少麟) (1996). *Community Dynamics of Subtropical Forest (亚热带森林群落动力学)*. Science Press, Beijing, 57 - 71. (in Chinese)
- Probst A, Gh' mari AE, Aubert D, Fritz B, McNutt R (2000). Strontium as a tracer of weathering processes in a silicate catchment polluted by acid atmospheric inputs, Strengbach, France. *Chemical Geology*, 170, 203 - 219.
- Semhi K, Clauer N, Probst JL (2000). Strontium isotope compositions of river waters as records of lithology-dependent mass transfers: the Garonne river and its tributaries (SW France). *Chemical Geology*, 168, 173 - 193.
- van Praag HJ, de Smedt F, vu Thanh T (2000). Simulation of calcium leaching and desorption in an acid forest soil. *European Journal of Soil Science*, 51, 245 - 255.
- Wang BX (王伯荪), Ma MJ (马曼杰) (1982). The successions of the forest community in Dinghushan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1, 142 - 156. (in Chinese)
- Wang WJ (王维君), Chen JF (陈家坊), He Q (何群) (1992). Effects of simulated acid rain on release and forms of aluminum from main acidic soils. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 3, 184 - 189. (in Chinese with English abstract)
- Wang ZH (王铸豪), He DQ (何道泉), Song SD (宋绍敦), Chen SP (陈树培), Chen DR (陈定如), Tu MZ (屠梦照) (1982). The vegetation of Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1, 77 - 141. (in Chinese)
- Wen DZ (温达志), Wei P (魏平), Zhang QM (张倩媚), Kong GH (孔国辉) (1999). Studies on biomass of three low subtropical evergreen broad-leaved forests in a MAB reserve of South China. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 23(Suppl.), 11 - 21. (in Chinese with English abstract)
- Xue JL (薛皎亮), Liu HX (刘红霞), Xie YP (谢映平) (2000). Lead in city air accumulated by the green tree, *Sophora japonica*. *China Environmental Science (中国环境科学)*, 20, 536 - 539. (in Chinese)
- 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. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 21, 2002 - 2012. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GY (周国逸), Norio Ogura (小仓纪雄) (1996). The influences of acid rain of the liberation of several elements from various soil types in Chongqing. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 16, 251 - 257. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 欧阳 华 责任编辑: 张丽赫