

# 酸沉降影响下庐山森林生态系统水相硫的分布与动态研究

石盛莉<sup>1</sup>, 潘根兴<sup>1</sup>, 张乐华<sup>2</sup>, 黄明星<sup>2</sup>, 王连峰<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学资源环境科学学院, 农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 中国科学院庐山植物园, 江西庐山含鄱口 332900)

**摘要:**从 1997 年 7 月到 1999 年 8 月, 在庐山植物园选取针叶林和阔叶林各一片样地, 对降雨、透冠水、干流水、渗漏水 and 地表径流进行了监测。结果表明庐山降雨  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度有升高趋势, 1998 年降雨中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度为  $4.21 \pm 3.48 \text{ mg/L}$ 。林冠对干沉降硫有吸收和截获作用, 透冠水和干流水中  $\text{SO}_4^{2-}$  明显高于雨水, 针叶林中分别为  $13.68 \pm 17.40 \text{ mg/L}$  和  $15.50 \pm 25.20 \text{ mg/L}$ , 阔叶林分别为  $6.18 \pm 6.37 \text{ mg/L}$  和  $7.35 \pm 7.73 \text{ mg/L}$ , 是森林中硫沉降的重要组成部分。针叶林地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量与雨水的显著正相关 ( $R^2 = 0.758, n = 6$ ), 与透冠水和树干流中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量之和极显著正相关 ( $R^2 = 0.880, n = 8$ ), 说明日本柳杉针叶林加重了硫沉降, 对土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  有较大影响; 阔叶林的相关性都不显著, 说明阔叶林虽然对  $\text{SO}_4^{2-}$  在土壤中的输入有所贡献, 但相对作用较小。针叶林  $\text{SO}_4^{2-}$  输入高而输出低; 阔叶林输入低而输出高, 可能处于稳态平衡。针叶林地表径流中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量受雨水影响较大, 阔叶林中的则可能主要是土壤溶液中保存的  $\text{SO}_4^{2-}$  持续淋洗的结果。

**关键词:**庐山; 森林生态系统; 水相; 硫酸根; 酸沉降

## Sulfate in liquid phase of forest ecosystem and its dynamics in Mt. Lushan under acid deposition

SHI Sheng-Li<sup>1</sup>, PAN Gen-Xing<sup>1</sup>, ZHANG Le-Hua<sup>2</sup>, WONG Ming-Xing<sup>2</sup>, WANG Lian-Feng<sup>1</sup> (1. College of Res. & Environm. Sic., Nanjing Agric. University, Nanjing 210095, China; 2. Lushan Botanical Garden, Lushan, Jiujiang, Jiangxi 332900, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1463~1468.

**Abstract:** Sulfur translocation is one of the major issues concerning the biogeochemical cycling of sulfur in forest ecosystem under acid deposition. In China, acid deposition and its impacts on forest vitality and aquifer chemistry had been increased since 1980's. Wet acid deposition has been a severe problem in Mt. Lushan, a famous tourist mountain with plant diversity reserve in subtropical region of Central China, for the last 20 years. In this paper, we report our study on sulfate in the forest ecosystem and its translocation dynamics associated with acid deposition.

The field study was carried out in the forest within the area of Lushan Botany Garden, located in a relatively undisturbed forest valley with an elevation of 1100m a. s. l. Two plots were chosen for both broad-leaf (dominated by *Cornus controversa* and *L. glauca*, stand age over 10a) and need-leaf forest (dominated by *Crypomeria japonicum*, stand age 30~40a) at the two separate sides. From July, 1997 to August, 1999, in site monitoring of water fluxes and concentration of sulfate was performed seasonally. Facilities for collecting water samples of through-fall (TF), stem flow (SF), soil percolate (SP), seepage (SE) and surface runoff

**基金项目:**国家自然科学基金(49671038)资助项目

参加野外研究和采样的还有刘德辉教授、成杰民副教授、孙玉华高级实验师以及研究生张旭辉等。

**收稿日期:**2000-04-05; **修订日期:**2000-12-12

**作者简介:**石盛莉, 女, 土家族, 贵州都匀人, 博士。主要从事土壤与生态环境研究。现在集美大学水产学院工作。

(SR) were implemented under forest on site. Precipitation water was collected on a open site. The sulfate in water was determined by turbidimetry. Sulfate concentration in precipitation appeared  $4.21 \pm 3.48 \text{ mg/L}$ , being remarkably higher than that reported in 1987. Sulfate in TF and SF was  $13.68 \pm 17.40 \text{ mg/L}$  and  $15.50 \pm 25.20 \text{ mg/L}$  respectively under needle-leaf forest stands, and  $6.18 \pm 6.37 \text{ mg/L}$  and  $7.35 \pm 7.73 \text{ mg/L}$  respectively under broad-leaf forest stand. There were significant relationships between the seasonal mean of soil solution and of atmospheric precipitation ( $R^2 0.758, p < 0.05$ ), and between that of soil solution and of forest precipitation (SF + TF) ( $R^2 0.880, p < 0.01$ ) in needle-leaf forest stand. Owing to the leaf type, the needle-leaf forest actually received bigger amount of sulfate and discharged less in contrast to the broad-leaf forest. This might explain much higher degree of sulfate accumulation and soil acidification stress in needle-leaf forest stands under acid deposition impacts. Sharp variability of sulfate concentration in runoff under need-leaf forest implicated a prompt response of aquifer S to the deposition. However, relatively stable sulfate discharge was found under broad-leaf forest. Therefore, it is necessary to understand the S biogeochemistry in forest under acid deposition for illustrating the effects of vegetation sulfate retention on ecosystem S translocation and aquifer S chemistry.

**Key words:** acid deposition; forest ecosystem; sulfate translocation; sulfate eco-chemistry; Mt. Lushan

文章编号:1000-0933(2001)09-1463-06 中图分类号:S153.6+1 文献标识码:A

庐山位于江西北部,为亚热带高山景观,生长着 3000 多种植物,森林覆盖率达 67%。多年平均气温 11.4℃,降水量 1950mm,春夏季多雨雾。庐山处于南昌-九江-黄石酸雨区,酸沉降污染严重,酸雨频率在 80% 以上,pH 值可低至 4 以下<sup>[1,2]</sup>。近年在庐山森林生态系统观察到森林衰亡现象。丁国安等曾调查研究了庐山云雾水及降水化学的垂直分布<sup>[1]</sup>,王保安等也研究了庐山春季降水化学,认为庐山酸沉降主要是煤烟型,且以长距离输送为主<sup>[2]</sup>。硫是酸沉降中重要的致酸因子之一。许多研究表明<sup>[3~6]</sup>,透冠水中的硫沉降量大于大气降水中的硫,是森林土壤中硫沉降的重要组成部分。透冠水中  $\text{SO}_4^{2-}$  主要由雨水冲刷树冠吸附的干沉降  $\text{SO}_4^{2-}$  而来。本文就庐山森林生态系统中酸沉降硫的动态进行了分析和研究,为进一步探讨酸雨对森林生态系统的影响提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地及样品采集

研究区位于含鄱口庐山植物园内,海拔 1100m 左右。实验地点为一谷地,两侧分别为以灯台树(*Cornus controversa*)、山胡椒(*L. glauca*)等树木为主的自然落叶阔叶林(树龄在 10a 以上)和日本柳杉(*Cryptomeria japonicum*)次生林,树龄 30~40a)针叶林。分别选取以阔叶林及针叶林样地各一块,面积为 500m<sup>2</sup> 左右,在林中分别设置透冠水(TF)、干流水(SF)、土壤渗漏水(SE)、地表径流水(SW)收集采样装置各 3 套。土壤渗漏水采集装置(Lysimeter)埋藏于距地表 15cm 处。降水收集装置设于植物园办公大楼顶。每次降水后收集大气降水、林内降水和渗漏水。按季节进行集中的动态昼夜连续观测,并按 12、1、2 月份为冬季,3、4、5 月份春季,6、7、8 月份为夏季和 9、10、11 月份为秋季进行资料统计。

### 1.2 分析方法

- ① 降雨、径流水  $\text{SO}_4^{2-}$  用铬酸钡比色法进行测定<sup>[7]</sup>。
- ② 透冠水、干流水、土壤渗漏水样品中  $\text{SO}_4^{2-}$  用硫酸钡比浊法进行测定<sup>[8]</sup>。
- ③ 土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$ ,取林下表层 0~15cm 土层,风干磨碎过 1mm 筛孔,称取 2.5g 土壤于 50ml 离心管中,加入 0.15%  $\text{CaCl}_2$  溶液,振荡 30min,离心,取上清液,用硫酸钡比浊法测定  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[9]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生态系统水相 $\text{SO}_4^{2-}$ 的分配

表 1 是 1999 年 8 月间监测测定的庐山森林生态系统水相硫酸根平均值结果。其中,降雨  $\text{SO}_4^{2-}$  最低值出现在 1998 年 6 月份,为 0.26mg/L,最高值在 1999 年 4 月份,为 15.41mg/L。其他各水

相  $\text{SO}_4^{2-}$  的变化范围为:透冠水,针叶林下为 1.36~7.80mg/L;阔叶林下介于 0.29~35.38mg/L;干流水,针叶林下为 1.46~157.81mg/L,阔叶林为 1.02~51.77mg/L;渗漏水,针叶林下为 0.67~67.80mg/L,阔叶林下为 1.28~49.89mg/L;土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$ ,针叶林下为 11.95~128.77mg/L,阔叶林下为 11.44~96.78mg/L;径流水的  $\text{SO}_4^{2-}$ ,变幅相对较小,且针叶林下(0.08~0.23mg/L)明显小于阔叶林下(1.54~1.96mg/L)。说明针叶林透冠水、干流水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度水和土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  显著高于阔叶林,地表径流水则是阔叶林极显著高于针叶林。

表 1 监测 2 年间供试生态系统各水相中  $\text{SO}_4^{2-}$  的平均值分布(mg/L)

Table 1 Mean concentrations of  $\text{SO}_4^{2-}$  in different water phases of the studied ecosystems during 2-year monitoring

|                          | TF                     | SF                    | SWSS                  | SE                    | SW                  | PR                  |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 针叶林下<br>Coniferous       | 13.68±17.40<br>(n=129) | 15.50±25.20<br>(n=62) | 50.01±30.95<br>(n=39) | 10.98±12.27<br>(n=58) | 0.72±0.39<br>(n=35) |                     |
| 阔叶林下<br>Deciduous        | 6.18±6.37<br>(n=146)   | 7.35±7.73<br>(n=74)   | 44.63±18.41<br>(n=41) | 5.90±8.42<br>(n=41)   | 1.14±0.44<br>(n=23) | 4.21±3.48<br>(n=49) |
| t-test 值<br>t-test value | 8.35**                 | 2.64**                | 2.01*                 | 2.29*                 | 3.85**              |                     |

\* $>t_{0.05}$ , \*\* $>t_{0.01}$ . TF:透冠水 Through fall; SF:干流水 Stem flow; SWSS:土壤水溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  Soil water soluble  $\text{SO}_4^{2-}$ ; SE:渗漏水 Seepage; SW:地表径流 Stream water; PR:降雨 Precipitation; 土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  为 1998 年 12 月到 1999 年 11 月的结果 Water-soluble sulfate was monitored during December, 1998 and November, 1999

就各相  $\text{SO}_4^{2-}$  的分布来说,降雨中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较低,仅高于地表径流。透冠水中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度与干流水接近,最高浓度可达降水 10 倍以上。其中针叶林下透冠水极显著高于雨水(t-test 值为 4.12),而阔叶林下差异不显著。干流水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度均极显著高于降雨,两种林下 t 值分别为 3.11 和 2.67。透冠水和干流水所含高浓度的  $\text{SO}_4^{2-}$  很可能是树冠截留的干沉降硫被雨水冲刷的结果<sup>[5,12]</sup>。因此,透冠水和干流水对  $\text{SO}_4^{2-}$  的输入是不可忽视的。而针叶林树冠吸收截留  $\text{SO}_4^{2-}$  的能力更强。

土壤中可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较高,且针叶林下显著高于阔叶林下。但针叶林和阔叶林下土壤表层(0~20cm)  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分别为 57.15±30.39mg/L 和为 51.15±20.84mg/L,二者间差异不显著。渗漏水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度也高于降雨,这在针叶林下达极显著差异,而阔叶林下则不显著。渗漏水与透冠水和干流水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度相近,说明透冠水和干流水对森林土壤溶液中  $\text{SO}_4^{2-}$  输入的重要性。

径流中的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量都很低,针叶林下平均为 0.72±0.39mg/L,阔叶林下为 1.14±0.44mg/L,阔叶林显著高于针叶林。由以上结果可以看出,与针叶林相比,阔叶林系统  $\text{SO}_4^{2-}$  输入大而输出小,说明针叶林土壤对  $\text{SO}_4^{2-}$  有较强的吸持能力,或针叶林植被根系能吸收较多的  $\text{SO}_4^{2-}$ 。

## 2.2 水相 $\text{SO}_4^{2-}$ 的季节动态

**2.2.1 降雨  $\text{SO}_4^{2-}$  的年变化** 1997 年夏季到 1999 年夏季监测的降雨  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度结果见图 1。由图可以看出,降水中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度最高值出现在冬春季,最低为夏季。1999 年降水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度高于 1998 年。1998 年 3 月份和 1999 年 3 月份监测的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分别为 4.42±0.57 和 5.61±3.37mg/L,高于文献报道的 1993 年 3 月份的 3.18 mg/L。1998 年 5 月份的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度为 3.58±2.59 mg/L,也高于 1987 年 5 月份的 2.22 mg/L<sup>[1]</sup>。1999 年 1~8 月份的  $\text{SO}_4^{2-}$  平均值为 6.26 mg/L,同样远高于 1998 年同期的 2.74 mg/L。说明庐山降水中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度有十分明显的升高趋势。不过,1998 年  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度平均为 2.91 mg/L,远低于江西省 1992 和

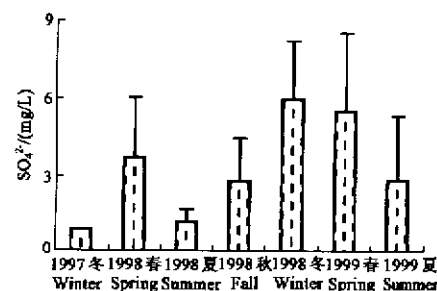


图 1 降水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of  $\text{SO}_4^{2-}$  in precipitation

1993年的平均降水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度 (9.87 和 9.55 mg/L)<sup>[11]</sup>。

**2.2.2 透冠水** 1997年7月份到1999年8月份对透冠水、下流水和土壤渗漏水的结果见图2。可见,透冠水  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的季节动态与降水吻合,表现为冬季最高,夏季最低。响应雨水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的变化,1998年秋冬季及1999年春季的透冠水  $\text{SO}_4^{2-}$  含量高于其他季节。针叶林下透冠水  $\text{SO}_4^{2-}$  含量远高于阔叶林下,尤其是1998年12月份至1999年5月份的冬春季节。阔叶林下透冠水和雨水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度比为1.47,比针叶林小,表明阔叶林吸附的  $\text{SO}_2$  较少。

针叶林下透冠水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在冬季明显高于其他季节。1997年冬季为  $10.99 \pm 3.96$  mg/L,而1998年冬季则高达  $62.34 \pm 28.88$  mg/L;透冠水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在夏季最低,3a分别为6.73,6.78和7.92 mg/L。阔叶林下透冠水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度季节变化趋势与针叶林相同,冬季高夏季低的差异性显著,1997年夏季最低值为  $2.10 \pm 0.85$  mg/L,1998年冬季最高值为  $14.84 \pm 10.24$  mg/L。但变化幅度较针叶林小得多,其原因可能是冬季阔叶林叶子凋落,树冠面积变小。由透冠水/雨水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度比来看,针叶林最高值出现在冬季,1998年、1999年分别为12.55和10.50 mg/L,阔叶林则出现在秋季(1998年为3.85 mg/L),而冬季仅为2.50 mg/L。这可能是由于阔叶林冬季落叶,因而树冠吸附的  $\text{SO}_4^{2-}$  减少。1999年冬季针叶林透冠水/雨水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度比是春夏季的1.9~6.7倍,阔叶林仅为1.3~4.3倍。

**2.2.3 干流水** 监测期间测定的干流水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度显著高于雨水,并与透冠水相近,这与程伯荣等<sup>[12]</sup>、Zhang等<sup>[13]</sup>和Masanori Okazaki等<sup>[9]</sup>所得的干流水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度高于透冠水3~4倍的结果有所不同。野外观察到森林的干流水的流量较大,同时庐山森林冠层可能接受较高的干沉降,这可能是这种差异的原因。针叶林下和阔叶林下干流水/雨水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度比分别为3.60和1.75,而在重庆马尾松林中该比值为8.71。

与透冠水一致,干流水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的季节变化趋势也是秋冬季高而夏季最低。针叶林下其最高值出现在1998年冬季,达  $57.79 \pm 60.33$  mg/L,最低值为1997年夏季 ( $3.03 \pm 1.71$  mg/L)。阔叶林下其最高值出现在1998年秋季 ( $21.03 \pm 18.61$  mg/L),最低值也出现在夏季(1997年、1998年和1999年夏季的  $\text{SO}_4^{2-}$  平均浓度分别为  $3.70 \pm 1.45$  mg/L,  $4.05 \pm 2.25$  mg/L 和  $5.24 \pm 2.54$  mg/L)。阔叶林下干流水中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度与透冠水中未见显著差异。不管是针叶林下,还是阔叶林下,干流水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在冬春季间差异显著,而夏秋季差异不明显。

**2.2.4 渗漏水 and 地表径流** 除1997年夏季和1999年春季外,针叶林渗漏水中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度都显著高于雨水。在针叶林下,其平均值为  $10.98 \pm 12.32$  mg/L,接近Baba等(1995)在日本东京西部所得结果<sup>[4]</sup>,而Masanori Okazaki等(1998)在重庆真山所得结果则是本研究的10~70倍<sup>[6]</sup>。然而,针叶林下渗漏水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度都是冬季最高,夏季最低。

阔叶林渗漏水中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度变动于  $5.90 \pm 8.41$  mg/L。1999年春季出现高值 ( $14.37 \pm 18.67$  mg/L)。可能与1998年秋冬季和1999年春季阔叶林透冠水和树干流中输入的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度大量增加有关。而1999年其余季节均为3.7 mg/L左右。在1997年和1999年夏季也为5.13和5.62 mg/L。这看来阔叶林对酸沉降有一定缓冲作用,当突增的  $\text{SO}_4^{2-}$  输入超过其缓冲容量时才出现春季骤然增高。

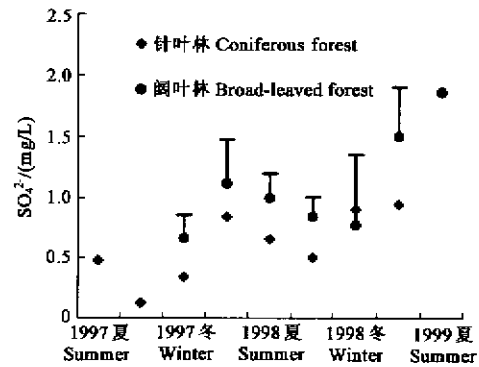


图2 林内降水和渗漏水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的季节动态  
Fig. 2 Seasonal dynamics of  $\text{SO}_4^{2-}$  in through fall, stemflow and soil seepage

TF-CON, TF-DEC: 分别为针叶林下和阔叶林下透冠水 Through fall under coniferous and deciduous forest respectively; ST-CON, ST-DEC: 分别为针叶林下和阔叶林下干流水 Stem flow under coniferous and deciduous forest respectively; SE-CON, SE-DEC, 分别为针叶林下和阔叶林下渗漏水 Seepage under coniferous and deciduous forest respectively

供试生态系统地表径流  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的监测结果见图 3。针叶林下径流  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度低值出现在秋季,其他季节都较高;阔叶林下径流  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度则表现为春夏高而冬季最低。其原因一方面可能与土壤生物(植物和动物)活动春夏季较强,因土壤中有有机物分解而释放较多的  $\text{SO}_4^{2-}$ ,另一方面也可能与冬季土壤湿度小,影响了  $\text{SO}_4^{2-}$  在土壤溶液中的移动有关<sup>[21]</sup>。

**2.2.5 土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  的季节动态** 1998年9、12月份和1999年4、7和11月份分别取土样,进行分级测定,测得可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  结果见表2。

由表2可以看出,1998年秋冬季和1999年春季的土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度明显比1999年夏秋季高。针叶林下的土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度高于阔叶林,但只有1998年9月差异显著( $t$ -检验值为2.53,  $n=14$ ,  $P>P_{0.05}$ )。

表2 土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的变化(mg/kg)

Table 2 Change of soil soluble  $\text{SO}_4^{2-}$

|                 | 1998年9月<br>Sep. 1998 | 1998年12月<br>Dec. 1998 | 1999年4月<br>Apr. 1999 | 1999年7月<br>Jul. 1999 | 1999年11月<br>Nov. 1999 |
|-----------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 针叶林下 Coniferous | 64.28±13.30          | 63.71±34.89           | 70.65±30.83          | 38.76±36.22          | 34.35±12.90           |
| 阔叶林下 Deciduous  | 49.25±8.98           | 57.83±23.71           | 54.23±10.13          | 30.49±8.68           | 22.13±7.55            |

### 2.3 讨论

**2.3.1 各水相  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度间的相互关系** 对各季节降雨及各水相  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度进行相关分析,结果见表3。可见,降雨与透冠水、干流水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度之间没有显著的相关性,说明降雨中的  $\text{SO}_4^{2-}$  并非透冠水和干流水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的主要来源,透冠水和干流水中  $\text{SO}_4^{2-}$  更多可能主要来自于沉降。针叶林下土壤渗漏水  $\text{SO}_4^{2-}$  与降雨  $\text{SO}_4^{2-}$  成显著正相关,且与透冠水和干流水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度之和有极显著正相关,说明针叶林土壤渗漏水  $\text{SO}_4^{2-}$  受降雨和林内雨影响极大,而阔叶林中则不然。针叶林下地表径流水  $\text{SO}_4^{2-}$  与雨水成显著正相关,但在阔叶林下则相关性不显著,这可能是由于针叶林植被较单一,仅为日本柳杉一层,持水能力差,所以降雨对径流影响较大。阔叶林是多层次的植被覆盖,土壤中植物根系发达,持水能力强,径流中的  $\text{SO}_4^{2-}$  是经土壤溶液从上层向下层淋洗而来。

表3 各水相  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  in different water phases

|            |       | PR~TF | PR~SF | PR~SE  | PR~SW  | TF~SF (TF-SF)~SE | SE~SW   |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|------------------|---------|
| 针叶林下       | $R^2$ | 0.339 | 0.312 | 0.588* | 0.758* | 0.932**          | 0.880** |
| Coniferous | (n)   | (7)   | (7)   | (7)    | (6)    | (9)              | (8)     |
| 阔叶林下       | $R^2$ | 0.278 | 0.002 | 0.261  | 0.310  | 0.476*           | 0.001   |
| Deciduous  | (n)   | (7)   | (7)   | (6)    | (7)    | (9)              | (7)     |

\*  $P>P_{0.05}$ , \*\*  $P>P_{0.01}$ ; PR:降雨 Precipitation; TF:透冠水 Throughfall; SF:干流水 Stem flow; SE:渗漏水 Seepage; SW:地表径流 Stream water

**2.3.2 土壤水相及可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  与地表水  $\text{SO}_4^{2-}$  的关系** 由表3可以看出,土壤渗漏水  $\text{SO}_4^{2-}$  虽与径流水有一定的相关性,但未达到5%的显著水平。说明土壤渗漏水对土壤径流有一定影响,但并不是主导因子。其相关系数针叶林略大于阔叶林,说明针叶林径流水受土壤溶液的直接影响较大。土壤可溶性  $\text{SO}_4^{2-}$  与地

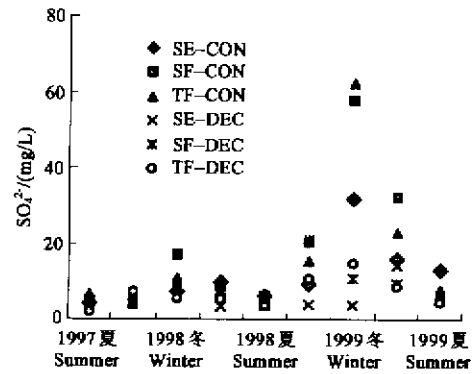


图3 地表径流水  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of  $\text{SO}_4^{2-}$  in stream water

表水  $\text{SO}_4^{2-}$  无明显的相关性,说明土壤可溶性硫并不直接参与水迁移,径流水  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源于地表水。

**2.3.3 不同生态系统对酸雨的抗性问题** 不同森林生态系统对沉降的抗性有不同。日本柳杉针叶林植被单一,林冠对  $\text{SO}_4^{2-}$  的缓冲能力较弱,但其生态系统中对  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸收能力较强,所以径流水中输出的  $\text{SO}_4^{2-}$  较少;阔叶林则是林冠有较强的缓冲能力,但生态系统吸收  $\text{SO}_4^{2-}$  的能力较弱,输入少而输出多,可能是对抗酸雨硫输入的一种稳态机制。

**2.3.4 庐山酸沉降中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的增加与土壤演变** 本文结果说明了庐山酸沉降中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度有升高趋势。日本柳杉针叶林生态系统中  $\text{SO}_4^{2-}$  水输出较少,对土壤硫形态的研究已表明,土壤吸附性  $\text{SO}_4^{2-}$  的累积十分强烈。虽然  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸附对酸沉降有一定的缓冲作用,但到一定限度,则可能因  $\text{SO}_4^{2-}$  解吸加速土壤和水的酸化<sup>[14]</sup>,因此, $\text{SO}_4^{2-}$  的临界负荷研究对于酸沉降控制是十分必要的。

### 3 结论

(1) 庐山降雨中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度有升高趋势。透冠水和树干流中  $\text{SO}_4^{2-}$  明显高于雨水,是森林中硫沉降的重要组成部分。

(2) 针叶林下地表水中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量与 S 的湿沉降有密切的关系,生态系统 S 积累明显,对土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  有较大影响;阔叶林系统虽然对  $\text{SO}_4^{2-}$  在土壤中的输入有所贡献,但其排硫能力较强,缓冲作用较明显。

### 参考文献

- [1] 丁国安,纪湘明,房秀梅,等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. 气象学报,1991,49(2):191~197.
- [2] 王保安,张远航,张 铮,等. 庐山春季降水化学的研究. 中国环境科学,1996,16(2):218~222.
- [3] Zhang Fuzhu, Zhang Jingyang, Zhang Hongrui, et al. Chemical composition of precipitation in a forest area of Chongqing, Southwest China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, 90:407~415.
- [4] Baba M, Okazaki M, and Hashitani T. Effect of acid deposition on forested catchment in the western Tokyo, Japan. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 85:1215~1220.
- [5] Michael Bredemeier. Forest canopy transformation of atmospheric deposition. *Water, Air and Soil Pollution*, 1988, 40:121~138.
- [6] Masanori Okazaki, Xu Guangshan, and Sun Zhouping. Effects of acidic deposition on soil ecosystems under forest in the Chongqing region of China. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1998, 44(2): 187~196.
- [7] 艾有年,阎立荣. 环境监测新方法. 北京:中国环境科学出版社,1992. 52~54.
- [8] 曾壁容. 土壤有效硫比浊测定法改进. 土壤,1997,29(4):218~220.
- [9] 单孝全,陈 斌,铁 军,等. 土壤和河流沉积物中硫的形态分析. 环境科学学报,1991,11(2):172~177.
- [10] Cappekkato R, Peters NE Meyers T. Above-ground sulfur cycling in adjacent coniferous and deciduous forests and watershed sulfur retention in the Georgia Piedmont, U. S. A. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 103:151~171.
- [11] 石 晶,黄 云,陈宏文,等. 江西省酸雨时空分布规律及发展趋势. 见:陈志远,刘志荣主编. 中国酸雨研究. 北京,中国环境科学出版社,1997. 254.
- [12] 程伯荣,许广山,高世东. 森林林冠对酸性降水化学组成的影响. 中国环境科学, 1989, 9(2): 155~157.
- [13] Edwards P J, Gregory J D and Allen H L. Seasonal sulfate deposition and export patterns for a small Appalachian watershed. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 110:137~155.
- [14] 陈 铭,谭见安,孙富臣,等. 湘南红壤对  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸附机理研究. 环境化学, 1993, 12(4): 252 ~ 257.