

# 生长条件对苔藓硫含量和硫同位素组成指示 大气硫沉降的影响

刘学炎<sup>1,2</sup>, 肖化云<sup>1\*</sup>, 刘丛强<sup>1</sup>, 肖红伟<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院 研究生院 北京 100049

**摘要:** 对相同大气沉降和土壤背景但生长条件不同的苔藓  $w(S)$  和  $\delta(^{34}S)$  进行了分析. 土生苔藓  $w(S)$  高于石生苔藓, 表明土壤对苔藓  $w(S)$  指示大气硫沉降有影响. 受树冠遮挡的苔藓  $w(S)$  偏低反映了树冠吸收会削弱冠下的大气硫输入, 而不同类型树冠对大气硫的截留吸收程度不同, 这可能是造成树冠下方苔藓  $w(S)$  存在差异的主要原因, 但随树冠厚度变化无明显规律. 石生苔藓  $\delta(^{34}S)$  与大气硫  $\delta(^{34}S)$  吻合, 而土生苔藓  $\delta(^{34}S)$  明显受土壤硫的影响而偏正. 此外, 树冠下苔藓  $\delta(^{34}S)$  偏高还与树冠吸收大气硫的过程中发生  $^{34}S$  歧视有关, 苔藓  $\delta(^{34}S)$  随树冠厚度增加而偏正, 进一步证实了树冠的长期吸收会使沉降到树冠下的大气硫源  $\delta(^{34}S)$  偏正. 因此, 受生长条件歪曲了的苔藓  $w(S)$  和  $\delta(^{34}S)$  不能用于解释大气硫沉降的变化和来源, 开阔地的石生苔藓比土生苔藓和受树冠遮挡的苔藓更具有大气指示意义.

**关键词:** 苔藓; 大气硫沉降; 硫同位素; 树冠; 土壤

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2008)05-0145-05

## Influences of Growing Condition on Sulfur Concentration and $\delta(^{34}S)$ of Mosses for Indicating Atmospheric Sulfur Deposition

LIU Xue-yan<sup>1,2</sup>, XIAO Hua-yun<sup>1</sup>, LIU Cong-qiang<sup>1</sup>, XIAO Hong-wei<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Sulfur content and  $\delta(^{34}S)$  of mosses under different growing conditions but with the same atmospheric deposition and soil background were investigated. Sulfur content of soil-growing mosses was found significantly higher than that of epilithic mosses, showing that soil substratum has influence on using mosses sulfur for indicating atmospheric sulfur deposition. Mosses under canopies have generally lower sulfur content than those at open sites, indicating that canopy retention has caused a significant reduction of atmospheric sulfur inputs. Besides, mosses have varying sulfur content under different canopies, which was related to the retention capacities of canopies, but no correlation was seen between mosses sulfur and canopy thickness.  $\delta(^{34}S)$  of epilithic mosses was very close to that of atmospheric sulfur deposition, while less negative  $\delta(^{34}S)$  for soil-growing mosses was significantly influenced by soil-derived sulfur. Moreover,  $\delta(^{34}S)$  values of mosses under different canopies were related to the  $^{34}S$  discrimination during canopy retention of atmospheric sulfur deposition, which was confirmed by the positive linear relationship between canopy thickness and mosses  $\delta(^{34}S)$ , suggesting that long-term canopy absorption of atmospheric sulfur will make the  $\delta(^{34}S)$  of atmospheric sulfur more positive. Consequently, sulfur content and  $\delta(^{34}S)$  of mosses distorted by growing conditions could not be used to interpret the level and sources of atmospheric sulfur deposition, and epilithic mosses at open sites were more valuable and reliable than those grown on soil and shed by canopies in atmospheric sulfur deposition research.

**Key words:** mosses; atmospheric sulfur deposition; sulfur isotope; canopy; soil

收稿日期: 2007-12-19 修订日期: 2008-01-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403200);  
国家自然科学基金项目(40573006)

作者简介: 刘学炎(1982-), 男, 贵州金沙人, 博士研究生,  
liuxueyan@vip.skleg.cn.

\* 责任作者, 肖化云(1970-), 男, 江西高安人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事环境地球化学研究, xiaohuayun@vip.skleg.cn

随着产业经济的发展, 大量人为成因的硫进入大气系统并导致大气硫沉降, 已成为全球重大的环境问题之一<sup>[1]</sup>. 有关大气硫沉降的地球化学问题也越来越受到环境科学研究领域的重视<sup>[2-3]</sup>. 探讨大气硫的来源、迁移途径、归宿等对于大气硫污染的防治以及了解硫沉降的生态环境影响具有重要意义

义<sup>[4-5]</sup>. 20 世纪 50 年代以来, 稳定硫同位素已经成为环境地球化学领域研究示踪物质来源和走向的有力工具<sup>[6-8]</sup>, 苔藓植物由于其特殊的形态结构和生物学特性而被广泛应用于大气环境的指示以及大气沉降物质输入的研究中<sup>[9]</sup>. 因此, 近年来, 部分从事环境和生态领域的研究者开始采用苔藓  $w(S)$  和硫同位素分析来解决日益突出的大气硫沉降问题<sup>[10-11]</sup>, 其主要原因在于苔藓在吸收硫的过程中记录了物质来源和生态环境的变化等信息, 进行苔藓稳定硫同位素分析有助于理解大气硫的来源、变化以及生物可利用性等<sup>[12]</sup>.

然而, 由于苔藓植物的生境多样性和部分苔藓种类的生境选择性, 造成在选取该类植物指示大气硫沉降或对比不同地区苔藓  $w(S)$  和硫同位素组成数据时非常困难. 相同沉降区域但不同生长条件下的同种苔藓是否具有相同的指示信息仍不清楚, 受生长条件改变或影响了苔藓  $w(S)$  和稳定硫同位素可能导致在解释大气硫沉降来源时得出错误结论. 因此, 基于大气沉降硫同位素资料较详细的贵阳市区, 笔者选取了一小生境内的细叶小羽藓 [*Haplocladium microphyllum* (Hedw.) Broth] 为研究对象, 对其  $w(S)$  和硫同位素组成进行了分析. 在尽可能消除了大气硫源及苔藓植物种间差异影响的条件下, 通过探讨不同生长条件对苔藓  $w(S)$  和硫同位素的影响, 揭示苔藓  $w(S)$  和硫同位素指示大气硫沉降的可靠性, 以期为进一步开展应用苔藓监测大气硫沉降以及研究大气硫沉降的生态环境效应打下基础.

## 1 采样与分析方法

### 1.1 研究区概况

贵阳市曾经是我国西南地区酸沉降较严重的城市之一<sup>[2]</sup>, 年降水量为 900 ~ 1 500 mm (平均 1 174.7 mm), 年平均温度为 15.3 °C, 平均相对湿度 (RH) 约 86%. 适宜的温度、充沛的降水和较高的空气湿度使该地区苔藓植物较为丰富, 分布广泛, 因此, 具有利用苔藓监测大气沉降的前提条件. 研究区位于贵阳市区西南部一疏林地 (26°34'N, 106°43'E), 面积约 0.2 km<sup>2</sup>, 所选采样点平均海拔为 (990 ± 3)m, 区内没有高层建筑.

### 1.2 样品采集和处理

于 2005 年 8 月采集开阔地的土生苔藓、石生苔藓以及受不同树冠条件遮挡的苔藓样品共 29 个, 经鉴定, 挑选出同种苔藓样品 (细叶小羽藓). 该种呈羽状分支, 交织状匍匐延伸, 曾被用于指示城市大气

重金属污染物和城市生态环境的评价<sup>[13]</sup>. 刘学炎等<sup>[14]</sup>研究了细叶小羽藓氮同位素对大气氮沉降变化的响应, 认为该种对大气输入的变化反应敏感. 由于研究目的在于通过苔藓反映其着生地大气硫输入受苔藓生长条件的长期影响, 因此, 所有样品均一致选取整个苔藓植物体进行分析, 以尽量消除单个生长期或不同年龄组织因生理活性不同带来的差异.

此外, 处于开阔地的苔藓必须不受任何树冠和建筑物等遮盖物影响, 因此对所有采样点的选取进行了充分考虑, 避免地表水冲刷、鸟巢和牲畜粪便等外在因素干扰. 石生苔藓要求生长于没有薄土的裸岩表面. 所有样品用干净塑料自封袋保存. 样品处理: 先用稀盐酸淋洗, 后用去离子水 (Milli-Q) 反复冲洗以彻底去除表面吸附的尘土和颗粒物; 在 70 °C 真空干燥箱中烘干后用液氮冷冻研磨均匀, 并重新干燥.

### 1.3 元素分析和同位素测定

苔藓  $w(S)$  (% , 以干质量计) 采用 PE2400 II (USA) 元素分析仪测定. 苔藓硫同位素测定: 采用艾氏卡试剂分离并转化为硫酸钡的方法 [样品处理及操作见文献 [15]] 制备样品, 然后用连续流同位素质谱仪 CF-IRMS (EA-IsoPrime, 型号为 Euro3000, GV instruments) 测定硫同位素组成. 测定数据采用以国际硫同位素 CDT 标准标定的国家硫同位素标准 (硫化银) 进行校正, 编号分别为 GBW-4414 [ $\delta(^{34}S) = -0.07\text{‰}$ ] 和 GBW-4415 [ $\delta(^{34}S) = 22.15\text{‰}$ ], 测量误差小于  $\pm 0.2\text{‰}$  ( $n = 5$ ).

$\delta(^{34}S)$  定义:

$$\delta(^{34}S) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000$$

式中,  $R$  为  $^{34}S$  与  $^{32}S$  的自然丰度比. 所有分析测定在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 苔藓 $w(S)$ 的变化

苔藓植物对大气硫沉降 (尤其是大气  $SO_2$  浓度) 的变化可能存在多种生物学响应, 其中, 苔藓组织  $w(S)$  的变化是反映大气硫输入或大气硫污染程度的重要指标, 因为较高大气硫沉降或大气  $SO_2$  浓度将导致较高的苔藓  $w(S)$ <sup>[10]</sup>.

由于所有采样点分布范围非常小 (约 0.2 km<sup>2</sup>), 且各采样点间具有相同的大气沉降来源和通量. 因此, 不同生长条件下苔藓  $w(S)$  的差异 (0.25% ~ 0.56%, 见表 1) 主要反映了沉降到苔藓的大气硫通

量受生长条件的影响. 如图1所示, 开阔地土生苔藓的  $w(S)$  平均值 ( $0.47\% \pm 0.06\%$ ) 明显高于开阔地的石生苔藓  $w(S)$  ( $0.39\% \pm 0.04\%$ ), 其原因在于匍于地表生长的土生细叶小羽藓由于能够直接从土壤基质中吸收  $SO_4^{2-}$  而获取更多的硫; 而石生苔藓只能从大气中吸收硫, 其下方的基质(碳酸岩)基本不能对其体内的硫进行贡献或补充.

2.2 苔藓  $w(S)$  与大气  $SO_2$  浓度的关系

1989年, 瞿丽雅等<sup>[16]</sup>曾应用苔藓袋技术对贵阳市区13个点的大气  $\rho(SO_2)$  进行过指示研究, 发现  $\rho(SO_2)$  ( $x$ ,  $202 \sim 1020 \mu g/m^3$ ) 和苔藓  $w(S)$  ( $y$ ,

$0.73\% \sim 2.62\%$ ) 存在较好的正相关关系 ( $y = 0.0026x + 0.231, P < 0.05$ ), 苔藓(袋)  $w(S)$  较好地反映了贵阳市当时严重的大气  $SO_2$  污染. 据王玉庆<sup>[17]</sup>报道, 1981—1990年贵阳市地表  $\rho(SO_2)$  平均值高达  $400 \sim 500 \mu g/m^3$ , 比北美10个主要城市平均值高3倍<sup>[18]</sup>. 根据上述回归方程和2005年贵阳市大气  $\rho(SO_2)$  平均值(仅  $70 \mu g/m^3$ )<sup>[19]</sup> 计算, 贵阳市区对应的苔藓  $w(S)$  约为  $0.41\%$ , 该值与研究中生苔藓  $w(S)$  [平均值为 ( $0.39\% \pm 0.04\%$ ),  $0.35\% \sim 0.44\%$ ] (见表1) 基本吻合, 进一步肯定了自然生长的石生细叶小羽藓  $w(S)$  能够较可靠地反映大气硫输入.

表1 不同种生长条件下的苔藓  $w(S)$  和硫同位素组成

Table 1 Sulfur contents and  $\delta(^{34}S)$  values of mosses under different growing conditions

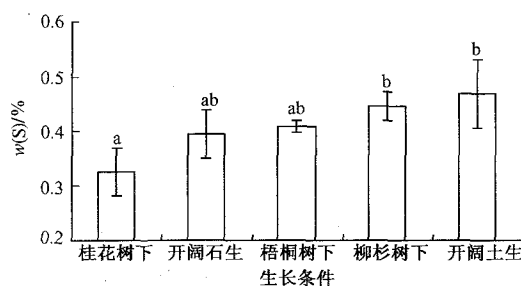
基质类型	上方树冠	样本数/个	$w(S)/\%$ <sup>1)</sup>	$\delta(^{34}S)/\%$ <sup>2)</sup>
土生	日本柳杉(常绿)	5	$0.45 \pm 0.03$ ( $0.40 \sim 0.47$ )	$-2.25 \pm 0.99$ ( $-3.33 \sim -1.65$ )
土生	桂花树(常绿)	13	$0.33 \pm 0.04$ ( $0.25 \sim 0.41$ )	$-1.49 \pm 0.46$ ( $-2.26 \sim -0.61$ )
土生	法国梧桐(落叶)	3	$0.41 \pm 0.01$ ( $0.40 \sim 0.42$ )	$-2.42 \pm 0.53$ ( $-2.76 \sim -1.18$ )
土生	开阔地	5	$0.47 \pm 0.06$ ( $0.39 \sim 0.56$ )	$-1.80 \pm 0.36$ ( $-2.36 \sim -1.45$ )
石生	开阔地	3	$0.39 \pm 0.04$ ( $0.35 \sim 0.44$ )	$-4.22 \pm 0.90$ ( $-3.20 \sim -4.88$ )

1)以干质量计; 2)CDT.

此外, 受树冠遮挡的土生苔藓平均  $w(S)$  总体低于开阔地土生苔藓的  $w(S)$  (见图1), 这反映了树冠对大气硫沉降的长期吸收削弱了树冠下方的大气硫输入. 其中, 柳杉树冠下方的苔藓和开阔地土生苔藓  $w(S)$  没有显著差异, 可能原因在于柳杉树冠较小, 对大气硫沉降的吸收程度低; 而桂花树冠下方苔藓出现最低的  $w(S)$  ( $0.33\% \pm 0.04\%$ ), 这可能与其树冠相对致密以及常绿树种长期影响大气硫向树冠下方输入有关. 此外, 同一树冠(桂花树)不同树冠厚度下方的苔藓平均  $w(S)$  也有差异 ( $0.25\% \sim 0.38\%$ ) (见表2), 但随树冠厚度变化 ( $1 \sim 4$  m) 苔藓  $w(S)$  没有表现出明显规律 (见图2). 因此, 即使在大气硫沉降相同的地方, 不同生长条件下的同种苔藓  $w(S)$  也并非一致. 相对而言, 不受树冠影响的石生苔藓  $w(S)$  对指示大气硫沉降具有较好的代表性.

2.3 苔藓硫同位素的变化及其对大气硫沉降的指示

由于不同来源硫的同位素组成存在明显差异, 因此植物硫同位素组成可以用于指示其长期吸收的硫来源<sup>[20-21]</sup>. Zhao等<sup>[21]</sup>对英国受当地燃煤 [ $\delta(^{34}S)$  为  $-10\% \sim -6\%$ ] 影响的小麦 (*Triticum aestivum* L.) 硫同位素组成进行了时间变化研究, 发现从1845年到20世纪70年代, 小麦  $\delta(^{34}S)$  从  $+6\% \sim +7\%$  减少至  $-5\% \sim -2\%$ ; 20世纪90年代, 由于燃煤减少, 小麦的  $\delta(^{34}S)$  又回升到  $+0.5\% \sim +2.0\%$ , 反映了小麦  $\delta(^{34}S)$  值随着燃煤  $SO_2$  排放量的增加而明显偏负.



注: 误差线上方不同字母表示组间平均值存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

图1 不同生长条件的苔藓  $w(S)$  比较

Fig. 1 Comparison of average sulfur content of mosses between different growing conditions

表2 同一树冠(桂花树)不同树冠厚度下方苔藓  $w(S)$  和硫同位素组成

Table 2 Sulfur contents and  $\delta(^{34}S)$  of mosses under *O. fragrans* with different canopy thickness

树冠厚度/m	样本数/个	$w(S)/\%$ <sup>1)</sup>	$\delta(^{34}S)/\%$ <sup>2)</sup>
1.0	1	0.27	-2.26
1.5	2	$0.31 \pm 0.01$ ( $0.30 \sim 0.31$ )	$-1.67 \pm 0.18$ ( $-1.79 \sim -1.54$ )
2.0	2	$0.38 \pm 0.05$ ( $0.35 \sim 0.41$ )	$-1.69 \pm 0.13$ ( $-1.78 \sim -1.60$ )
2.5	1	0.25	-1.69
3.0	1	0.36	-2.06
3.5	3	$0.33 \pm 0.01$ ( $0.32 \sim 0.34$ )	$-1.00 \pm 0.28$ ( $-2.01 \sim -1.50$ )
4.0	3	$0.34 \pm 0.04$ ( $0.29 \sim 0.37$ )	$-1.26 \pm 0.35$ ( $-1.27 \sim -0.61$ )

注: 1)以干质量计; 2)CDT.

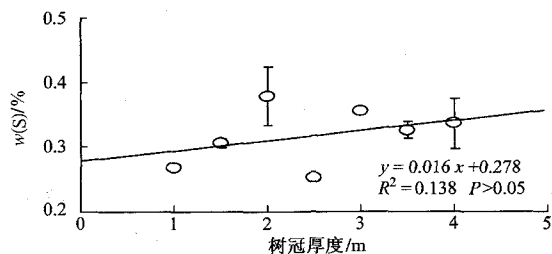
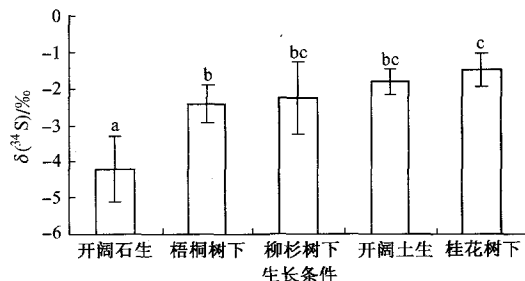


图 2 同一树冠下方苔藓  $w(S)$  与树冠厚度变化的关系  
Fig.2 Canopy thickness plotted against sulfur contents of mosses under a canopy

苔藓植物硫同位素对大气硫的指示要比其他高等植物更敏感和更可靠,因为该类植物体内的物质基本来源于大气输入.刘学炎等<sup>[22]</sup>还报道了细叶小羽藓新生组织和衰老组织的碳、氮同位素没有显著差异,其原因主要在于其个体小、形态结构简单和无维管束构造等.

研究中苔藓  $\delta(^{34}S)$  为  $-4.88\text{‰} \sim -0.61\text{‰}$  (见表 1), 石生苔藓  $\delta(^{34}S)$  (平均值为  $-4.22\text{‰} \pm 0.90\text{‰}$ ) 明显比土生苔藓  $\delta(^{34}S)$  (平均值为  $-1.80\text{‰} \pm 0.36\text{‰}$ ) 偏负 (见图 3), 反映了不同生长基质的苔藓所吸收的硫来源存在差异. 其中, 石生苔藓  $\delta(^{34}S)$  与贵阳大气  $\delta(^{34}S)$  平均值 [ $(-4.0 \pm 3.6)\text{‰}$ , 夏季]、大气  $SO_2$   $\delta(^{34}S)$  ( $-7.8\text{‰} \sim +2.7\text{‰}$ , 平均值为  $-4.3\text{‰}$ )<sup>[23]</sup> 以及该研究区内雨水  $\delta(^{34}S)$  ( $-4.9\text{‰} \pm 2.8\text{‰}$ )<sup>[24]</sup> 非常接近, 表明石生苔藓硫受到大气硫沉降的绝对控制. 而土生苔藓不只吸收大气来源的硫, 同时还受到土壤来源的硫 [ $\delta(^{34}S)$  平均值为  $-2.2\text{‰}$ ]<sup>[25]</sup> 影响, 从而导致其  $\delta(^{34}S)$  较石生苔藓偏正. Winner 等<sup>[20]</sup> 曾比较了苔藓植物和其他高等植物硫同位素响应大气硫输入的敏感性, 发现在天然气冶炼厂附近不同种类的苔藓  $\delta(^{34}S)$  ( $+16\text{‰} \sim +32\text{‰}$ , 平均值为  $+24\text{‰}$ ) 较准确地反映了源自该冶炼厂  $SO_2$  污染物 [ $\delta(^{34}S)$  为  $+25\text{‰}$ ] 的大气硫输入, 而针叶 (*Picea glauca* 和 *Abies balsamea*) 的  $\delta(^{34}S)$  (平均值为  $+18\text{‰}$ ) 要低于苔藓, 其原因在于受到土壤来源的硫 [ $\delta(S) + 7\text{‰} \sim +12\text{‰}$ ] 干扰. 这一原理能够进一步证明土生细叶小羽藓受到土壤硫输入的影响而较大气硫源的同位素偏正. 因此, 对于相同地点的苔藓, 石生类群的  $\delta(^{34}S)$  比土生类群在示踪大气硫输入方面更具有优势和应用前景.

除受到土壤硫影响外, 图 3 中受树冠遮挡的土生苔藓  $\delta(^{34}S)$  较大气硫偏正可能还与树冠吸收大气硫沉降过程发生的  $^{34}S$  歧视 (优先吸收  $^{32}S$ ) 有关, 该过



注: 误差线上方不同字母表示组间平均值存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

图 3 不同生长条件的苔藓硫同位素组成比较  
Fig.3 Comparison of average  $\delta(^{34}S)$  of mosses between different growing conditions

程将导致穿过树冠到达下方苔藓的硫酸盐  $\delta(^{34}S)$  偏正. Heaton 等<sup>[26]</sup> 对比了相同地点开阔地雨水和穿冠水的  $\delta(^{34}S)$ , 发现穿冠水  $\delta(^{34}S)$  [ $+4.7\text{‰} \sim +9.8\text{‰}$ , 平均值为  $(+6.1 \pm 1.9)\text{‰}$ ] 比开阔地雨水  $\delta(^{34}S)$  [ $+3.5\text{‰} \sim +6.4\text{‰}$ , 平均值为  $(+5.1 \pm 1.1)\text{‰}$ ] 偏正. 因此, 对于具有相同土壤背景的土生苔藓, 上方树冠吸收大气硫的过程中发生不一致的硫同位素分馏, 这可能导致下方苔藓  $\delta(^{34}S)$  发生不明显变化 (见图 3).

#### 2.4 树冠厚度与下方苔藓硫同位素的变化

不同树冠厚度下方苔藓  $\delta(^{34}S)$  平均值存在较小变化 ( $-2.26\text{‰} \sim -1.00\text{‰}$ ) (见表 2), 但与树冠厚度 (1~4 m) 呈正相关关系 (见图 4). 由于树冠厚度的

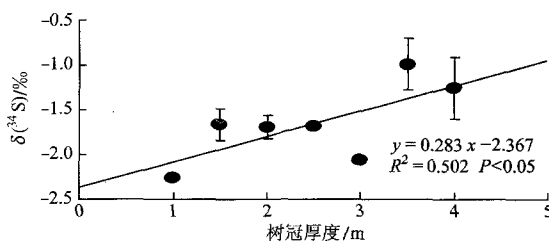


图 4 同一树冠下方苔藓  $\delta(^{34}S)$  与树冠厚度变化的关系  
Fig.4 Canopy thickness plotted against  $\delta(^{34}S)$  of mosses under a canopy

变化直接决定树冠对大气沉降的吸收程度<sup>[27-28]</sup>, 因此, 树冠对大气硫的差异吸收可能导致沉降到地表的大气硫源出现不同程度的同位素分馏. Wania 等<sup>[29]</sup> 曾报道了生长在同一树冠内部的附生植物氮同位素组成因其上方树冠厚度增加而偏正, 反映了树冠增厚吸收了更多的轻同位素 ( $^{14}N$ ). 同理, 不同树冠厚度下方苔藓  $\delta(^{34}S)$  平均值与树冠厚度的正相关关系 ( $y = 0.283x - 2.367$ ), 表明树冠吸收大气硫过程中产生的大气  $\delta(^{34}S)$  变化与树冠厚度 (吸收程

度)直接相关,其机制在于树冠长期优先吸收大气硫沉降(尤其是雨水)中的 $^{32}\text{S}$ ,使得沉降到地表的大气 $\delta(^{34}\text{S})$ 随树冠厚度增加而偏正。

### 3 结论

a. 开阔地的石生苔藓 $w(\text{S})$  ( $0.39\% \pm 0.04\%$ )能够更可靠地反映其生长地大气硫输入,而土生苔藓由于土壤基质硫的贡献造成含硫量偏高,受树冠遮挡的苔藓能够反映不同树冠对大气硫沉降的截留吸收程度,但随树冠厚度变化无明显规律。

b. 根据贵阳市苔藓 $w(\text{S})$ 与大气 $\rho(\text{SO}_2)$ 的变化关系计算可知,贵阳市当前的大气 $\rho(\text{SO}_2)$ 与研究中生苔藓的 $w(\text{S})$ 基本吻合,表明石生细叶小羽藓可应用于大气硫沉降的指示研究。

c. 开阔地的石生苔藓 $\delta(^{34}\text{S})$  (平均值为 $-4.22\text{‰} \pm 0.90\text{‰}$ )比土生苔藓更接近其生长地大气沉降的 $\delta(^{34}\text{S})$ ,其主要原因在于土生苔藓受土壤硫源的影响而偏正。进一步证实石生苔藓比土生苔藓对大气硫沉降的响应更敏感。

d. 受树冠遮挡的土生苔藓 $\delta(^{34}\text{S})$ 偏正,还与树冠吸收大气硫沉降过程中发生的 $^{34}\text{S}$ 歧视(优先吸收 $^{32}\text{S}$ )有关,其机制在于树冠吸收大气硫沉降的过程导致穿过树冠到达下方供苔藓吸收的大气 $\delta(^{34}\text{S})$ 偏正,尤其是同一树冠下方苔藓 $\delta(^{34}\text{S})$ 与树冠厚度的正相关关系( $y = 0.283x - 2.367$ ),表明树冠的长期影响确实改变了其下方大气硫源的同位素信息。因此,相同土壤背景下的土生苔藓 $\delta(^{34}\text{S})$ 也能对树冠吸收大气硫的差异进行指示。

e. 即使在相同的大气硫沉降背景下,受生长条件歪曲了的同种苔藓 $w(\text{S})$ 或 $\delta(^{34}\text{S})$ 也不能用于解释区域硫沉降的变化,应用苔藓 $w(\text{S})$ 和 $\delta(^{34}\text{S})$ 指示大气硫沉降应该选取开阔地的石生苔藓。

致谢:诚挚感谢河北师范大学生命科学学院李琳博士对野外工作和植物样品分类鉴定等方面的诸多帮助。

### 参考文献(References):

- [1] 杨新兴,高庆先,曲金枝,等.我国 $\text{SO}_2$ 排放总量控制方法探索与初步评估[J].环境科学研究,1999,12(6):17-20.
- [2] 孟凡,棘峻,何教,等.贵阳市二氧化硫和酸沉降污染源及控制战略[J].环境科学研究,2002,15(1):24-26.
- [3] HONG Yetang, ZHANG Hongbin, ZHU Yongxuan, et al. Characteristic of sulphur isotopic composition of meteoric water in China[J]. Progress in Natural Science, 1995, 5(3): 344-349.
- [4] 姚文辉,陈佑蒲,刘坚,等.衡阳大气硫同位素组成环境意义的研究[J].环境科学研究,2003,16(3):3-5.
- [5] 高吉喜,潘风云,周兴宝.二氧化硫对植物新陈代谢的影响(II):对光合、呼吸与物质代谢的影响[J].环境科学研究,1997,11(6):5-9.
- [6] Trust B A, Fry B. Stable sulfur isotopes in plants: a review[J]. Plant

- Cell and Environment, 1992, 15: 1105-1110.
- [7] 刘广深,洪业汤.用稳定同位素方法探讨大气颗粒物中硫的来源[J].中国环境科学,1996,16(6):426-429.
- [8] 张鸿斌,胡霁琴,卢承祖,等.华南地区酸沉降的硫同位素组成及其环境意义[J].中国环境科学,2002,22(2):165-169.
- [9] LIU Xueyan, XIAO Huayun, LIU Congqiang, et al.  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of moss (*Haplocladium microphyllum* (Hedw.) Broth) for indicating environment variations and canopy retention on atmospheric nitrogen deposition[J]. Atmos Environ, 2007, 41(23): 4897-4907.
- [10] Vingiani S, Adamo P, Giordano S H, Sulphur, nitrogen and carbon content of *Sphagnum capillifolium* and *Pseudevernia furfuracea* exposed in bags in the Naples urban area[J]. Environ Pollut, 2004, 129: 145-158.
- [11] Nrlagu J O, Glooschenko W A. Isotopic Composition of Sulfur in Mosses across Canada[J]. Environ Sci Technol, 1992, 26: 85-89.
- [12] Novák M, Bottrell S H, Přečhova E. Sulfur isotope inventories of atmospheric deposition, spruce forest floor and living Sphagnum along a NW-SE transect across Europe[J]. Biogeochemistry, 2001, 53: 23-50.
- [13] 安丽,曹同,俞鹰浩.上海市小羽藓属植物重金属含量及其与环境的关系[J].应用生态学报,2006,17(8):61-71.
- [14] 刘学炎,肖化云,刘丛强,等.石生苔藓氮含量和氮同位素指示贵阳地区大气氮沉降的空间变化和来源[J].环境科学,2008,29(7):1785-1790.
- [15] 蒋高明,耿龙明,陈业材.植物样品中碳、硫稳定同位素的测试[J].植物学通报,1995,12(生态学专辑):230-237.
- [16] 瞿丽雅,林齐维,李梅,等.苔藓植物含硫量与大气 $\text{SO}_2$ 间对应关系的应用研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,1994,12(1):45-48.
- [17] 王玉庆.中国环境污染的状况和对策[J].中国环境科学,1993,13(4):241-245.
- [18] 黄美元,沈志来,刘帅仁,等.中国西南典型地区酸雨形成过程研究[J].大气科学,1995,19(3):359-366.
- [19] 贵阳市环境保护局.贵阳市环境状况公报:2005[R].贵阳:贵阳市环境保护局,2006.
- [20] Winner W E, Bewley J D, Krouse H R, et al. Stable sulfur isotope analysis of  $\text{SO}_2$  pollution impact on vegetation[J]. Oecologia, 1978, 36(3): 351-361.
- [21] Zhao F J, Knights J S, Hu Z Y, et al. Stable sulfur isotope ratio indicates long-term changes in sulfur deposition in the broadbalk experiment since 1845[J]. J Environ Qual, 2003, 32(1): 33-39.
- [22] 刘学炎,肖化云,刘丛强,等.苔藓新老组织及其根际土壤的碳氮元素含量和同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ )对比[J].植物生态学报,2007,31(6):1168-1173.
- [23] Mukai H, Tanaka A, Fujii T, et al. Regional characteristics of sulfur and lead isotope ratios in the atmosphere at several Chinese urban sites[J]. Environ Sci Technol, 2001, 35(6): 1064-1071.
- [24] XIAO Huayun, LIU Congqiang. Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, Southwest China[J]. Atmos Environ, 2002, 36: 5121-5130.
- [25] 刘广深,洪业汤.贵阳城、郊近地面大气颗粒物的硫同位素组成特征[J].矿物学报,1996,16(4):353-357.
- [26] Heaton T H E, Spiro B, Madeline S, et al. Potential canopy influences on the isotopic composition of nitrogen and sulphur in atmospheric deposition[J]. Oecologia, 1997, 109: 600-607.
- [27] Hietz P, Hietz-Seifert U. Structure and ecology of epiphyte communities of a cloud forest in central Veracruz, Mexico[J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6: 719-728.
- [28] Filoso S, Williams M R, Melack J M. Composition and deposition of throughfall in a flooded forest archipelago (Negro River, Brazil)[J]. Biogeochemistry, 1999, 45: 169-195.
- [29] Wania R, Hietz P, Wanek W. Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of epiphytes depends on the position within the forest canopy: source signals and isotope fractionation[J]. Plant Cell and Environment, 2002, 25: 581-589.