

利用石生苔藓氮含量与氮同位素探讨江西省大气氮沉降量和来源

谢志英¹, 肖化云^{1,2*}, 朱仁果¹, 吴代赦¹

(1. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031; 2. 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, 贵阳 550002)

摘要: 2009~2010 年在江西省“R”型酸控区 11 个地区采集了 107 个石生细叶小羽藓样品。通过分析苔藓氮含量和氮同位素组成, 以反映大气氮沉降强度和空间分布特征, 并甄别大气氮的主要来源。结果表明, 江西省不同地区苔藓平均氮含量变化范围为 2.46%~3.48%。整体上呈现赣西北偏高、赣东南偏低的特点, 反映出江西省大气氮沉降水平由北向南逐渐递减的空间分布特征。江西省城市市区苔藓氮含量(2.79%~3.48%)明显高于郊区氮含量(2.46%~2.74%), 说明市区大气氮沉降量高于郊区氮沉降量。苔藓平均氮同位素均为负值[$(-1.96 \pm 1.30)‰$ ~ $(-9.74 \pm 0.25)‰$], 并且市区比郊区明显偏负。市区苔藓偏负的氮同位素值($-5.51‰$ ~ $-9.74‰$)指示了城市污水和人畜排泄物为主要的氮源, 而郊区氮同位素值($-4.81‰$ ~ $-1.96‰$)反映出农业活动氮源的贡献。本研究为大气氮沉降的生态环境效应提供基础资料。

关键词: 苔藓; 氮含量; 氮同位素; 大气氮沉降; 江西省

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-0943-06

Nitrogen Concentrations and Stable Isotope in Epilithic Mosses to Investigate Atmospheric N Deposition and N Sources in Jiangxi Province

XIE Zhi-ying¹, XIAO Hua-yun^{1,2}, ZHU Ren-guo¹, WU Dai-she¹

(1. Environmental and Chemical Engineering College, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Atmospheric N deposition and N sources in Jiangxi Province were investigated on the basis of the nitrogen concentrations and nitrogen isotope in epilithic mosses which collected from 11 cities of the province during 2009-2010. Mean nitrogen concentrations ranged from 2.46% to 3.48% and showed a significant regional difference. The highest was found in the northwestern of the province and the lowest in the southeastern, reflecting that the level of the atmospheric N deposition gradually decreased from the north to the south in the province. The higher N concentrations in urban mosses than in suburban mosses indicated that the urban areas received higher rates of nitrogen deposition than suburbs areas. Mosses ^{15}N values varied from $(-9.74 \pm 0.25)‰$ to $(-1.96 \pm 1.30)‰$. More negative $\delta^{15}\text{N}$ values of urban mosses ($-5.51‰$ ~ $-9.74‰$) indicated that more NH_3 was released from excretory wastes and sewage, while less negative $\delta^{15}\text{N}$ values of suburban mosses ($-4.81‰$ ~ $-1.96‰$) suggested an important contribution from agricultural NH_3 emission due to extensive fertilizer application. This research provides basic information for further study on the ecological and environmental effects of atmospheric N deposition.

Key words: moss; nitrogen concentration; nitrogen isotope; atmospheric nitrogen deposition; Jiangxi Province

大气氮沉降随着人类活动特别是快速的工业化和农业活动频率加快而增加^[1]。我国是世界上第三大氮沉降地区, 大气氮的不断增长使得对中国大气氮沉降状况在区域乃至全球尺度的研究变得尤为重要^[2]。因此需加强对大气氮沉降的来源、化学形态特征、沉降机制、模型模拟方向的探讨研究^[3,4]。但由于大气氮沉降中氮的形态复杂、沉降形式多样, 要通过直接采样分析或仪器监测方法获得准确性较高的大气氮沉降数据往往非常困难, 成本较高。正因如此, 目前世界上许多地区仍然缺乏详细和准确的大气氮沉降监测的基础资料。

利用植物来指示其生长地长期的、综合的大气

环境变化状况已成为大气污染监测和环境科学所关注的热点^[5,6]。苔藓植物因其特殊的形态结构和生物学特性已被广泛应用于大气氮沉降的研究^[7,8]。近年来, 稳定氮同位素由于具有追踪物源和记录环境变化的功能, 使其成为研究大气氮沉降的有力工具^[9,10]。目前采用苔藓植物组织氮含量与氮同位素值分析大气沉降状况的研究主要集中在欧美等发达国家与地区^[11~13]。在亚洲特别是在大气氮沉降状

收稿日期: 2010-05-11; 修订日期: 2010-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40573006)

作者简介: 谢志英(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向环境监测与评价, E-mail: xiezhiying24@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: xiaohuayun@vip.skleg.cn

况较突出的中国,这方面的研究还较少,其研究程度和广度远远不够.

本研究对江西省酸雨两控区 11 个地区 12 个点的苔藓样品进行了系统地采集和分析,给出了苔藓氮含量和氮同位素的空间分布特征. 利用苔藓氮含量对大气氮沉降量水平的量化关系,对江西省大气氮沉降水平和空间变化进行了定量研究. 结合氮稳定同位素分析方法,初步甄别了大气氮沉降的主要氮源,以期为大气氮污染和氮沉降生态环境效应评估提供更为准确的信息和生物监测资料.

1 材料与方法

1.1 研究区描述

江西省是我国中部地区酸沉降较为严重的省市之一. 过去主要对造成酸雨的大气硫进行了研究,而对大气氯化物的研究较少,对大气氮沉降量状况的研究则更少. 前人对江西省大气氮沉降的研究指出,该地区大气氨浓度较高,氮氧化物的浓度则相对较低. 如王体健等^[14]报道,江西红壤农田地区大气中氨浓度较硝态氮浓度高. 崔健等^[15]测定出江西红壤地区大气氮湿沉降量为 $35.94 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,其中大气氮沉降以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主,占总氮素沉降的 63.75%.

1.2 样品采集与处理

于 2009 ~ 2010 年在江西省 11 个城市 12 个采样点共采集 107 个石生细叶小羽藓类 *Haplocladium microphyllum* (Hedw.) Broth 样品. 该属苔藓植物体较大、呈羽状分支、交织状匍匐延伸,被广泛用于城市大气重金属污染物和城市生态环境的评价^[16]. 刘学炎等^[17]通过对不同生境条件下苔藓对大气氮吸收状况的研究指出,石生细叶小羽藓具有高效利用大气沉降氮和分布广泛的特点,可进一步应用于大气氮沉降的指示或监测研究. Liu 等^[18]报道了该藓属氮同位素对大气氮沉降变化的响应,认为其对大气氮输入变化具有较好的指示功能. 这种苔藓在江西省分布较为广泛,易于采集.

城市采样点集中在城市内部山体附近. 郊区采样点则避免主要公路的影响,其距离任何公路至少 500 m. 且所有采样点开阔并充分考虑不受地表水冲刷、树冠和建筑物遮挡以及其它人为污染(如农村粪堆、城市宠物和农村牲畜排泄物、踩踏等)的直接影响.

所有采集的新鲜苔藓样品用干净自封袋保存,处理过程先自然风干,去除附着在苔藓表面的枯枝、

落叶、泥土等杂物,用超纯水反复冲洗以彻底去除表面吸附的尘土和颗粒物. 在 75 °C 干燥箱中经 48 h 烘干后用粉碎机粉碎,过 100 目筛. 干燥保存用于元素和 $\delta^{15}\text{N}$ 分析.

1.3 元素分析和同位素分析

苔藓组织氮含量用元素分析仪 (ElementarVario macro, German) 测定,测量误差为 $\pm 0.1\%$. 苔藓氮同位素分析依氮含量先称取足量样品(约含 N 的 0.5 mg),2 ~ 3 g 氧化铜(丝)和 1 ~ 2 g 线状精铜于石英管中,抽高真空然后焊封,于 850 °C 下燃烧 5 h 后在真空系统上纯化,然后上质谱(型号为 Finigan MAT 252)测定. 氮同位素测定数据采用日本硝酸钾标准 (MOR2386-01, $\delta^{15}\text{N} = 1.92\text{‰}$) 进行校正,误差为 $\pm 0.2\text{‰}$ ($n = 5$).

苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 比值定义为:

$$\delta^{15}\text{N} (\text{‰ vs at-air}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000$$

式中, R 分别代表 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 自然丰度比. 其中苔藓氮含量在鄱阳湖分析测试中心分析测定,氮同位素分析测定在中国科学院环境地球化学国家重点实验室完成.

2 结果

2.1 苔藓氮含量

江西省苔藓平均氮含量变化范围为 2.46% ~ 3.48% (表 1). 苔藓平均氮含量最高值出现在丰城市区,最低值则出现在吉安市郊外. 江西省苔藓氮含量总体上呈现出赣东北偏高,赣西南偏低的变化趋势. 且郊区采样点苔藓氮含量(2.46% ~ 2.74%)明显低于市区苔藓氮含量(2.79% ~ 3.48%).

2.2 苔藓氮同位素 ($\delta^{15}\text{N}$)

江西省苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在着较为明显的地区差异性,变化范围为 $-1.96\text{‰} \sim -9.74\text{‰}$ (表 1). 苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 最低值出现在上饶市区 (-9.74 ± 0.25) ‰ ,最高值则出现在南昌市郊外风景区梅岭 (-1.96 ± 1.30) ‰ . 江西省城市市区平均苔藓氮同位素变化区间为 $-3.72\text{‰} \sim -9.74\text{‰}$,郊区地区苔藓氮同位素均值变化范围为 $-1.96\text{‰} \sim -4.81\text{‰}$,表现出市区苔藓贫 ^{15}N ,郊区富集 ^{15}N 的变化特征.

3 讨论

3.1 苔藓氮含量

苔藓氮含量最高值(3.90%)出现在南昌市区,大大超过德国 Velmerstot 和 Glindfeld 藓类组织氮含量最高值(2.02%)^[19],也高于贵阳地区苔藓氮含量

表 1 江西省各采样点内苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值与氮含量及其相应的大气氮沉降变化

Table 1 Tissue $\delta^{15}\text{N}$ and N concentration in mosses and atmospheric N deposition in Jiangxi province

采样点	样品数	苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值 /‰	苔藓氮含量 (DW)/%	大气氮沉降 ¹⁾ / $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$
赣州郊区	9	-4.81 ± 0.53 ($-6.42\sim-3.16$)	2.53 ± 0.28 ($1.76\sim3.53$)	34.57 ± 8.75 ($19.68\sim53.82$)
鹰潭	11	-6.19 ± 0.93 ($-10.54\sim-1.71$)	2.89 ± 0.15 ($1.68\sim3.52$)	41.41 ± 11.18 ($18.18\sim53.68$)
贵溪	8	-5.59 ± 0.37 ($-7.11\sim-4.34$)	2.91 ± 0.18 ($2.33\sim3.62$)	41.87 ± 10.57 ($30.74\sim55.59$)
上饶	9	-9.74 ± 0.25 ($-11.15\sim-8.18$)	2.95 ± 0.50 ($2.72\sim3.16$)	42.68 ± 13.12 ($38.30\sim46.76$)
德兴郊区	10	-3.52 ± 0.82 ($-6.97\sim-0.46$)	2.74 ± 0.19 ($2.24\sim3.63$)	38.69 ± 10.40 ($28.93\sim55.72$)
吉安郊区	8	-2.66 ± 0.31 ($-3.61\sim-1.66$)	2.46 ± 0.17 ($2.02\sim2.88$)	33.26 ± 10.88 ($24.82\sim41.38$)
永丰	7	-3.72 ± 0.71 ($-6.70\sim-2.03$)	2.89 ± 0.11 ($2.40\sim3.21$)	41.58 ± 11.95 ($32.05\sim47.68$)
景德镇	8	-5.51 ± 0.48 ($-5.91\sim-3.34$)	2.79 ± 0.16 ($2.47\sim3.49$)	39.66 ± 11.07 ($33.43\sim52.97$)
抚州郊区	6	-4.15 ± 0.45 ($-5.90\sim-3.36$)	2.49 ± 0.23 ($2.11\sim3.15$)	33.79 ± 9.71 ($26.43\sim46.51$)
丰城	7	-5.33 ± 0.62 ($-6.26\sim-4.14$)	3.48 ± 0.05 ($3.39\sim3.58$)	52.92 ± 13.05 ($51.18\sim54.78$)
南昌市区	11	-4.34 ± 0.81 ($-6.40\sim-2.52$)	3.24 ± 0.38 ($2.52\sim3.90$)	48.20 ± 6.79 ($34.37\sim60.74$)
南昌郊区	13	-1.96 ± 1.30 ($-5.26\sim3.53$)	2.52 ± 0.08 ($2.11\sim3.03$)	34.29 ± 12.46 ($26.49\sim44.16$)

1) 大气氮沉降数据由藓类氮含量(y)及大气氮沉降(x)关系式($y=0.052x+0.7325$)^[20]估算

的最高值(2.97%)^[20]. 氮含量最低值(1.68%)出现在鹰潭市,与南非 Metropolitan 苔藓氮含量值相当(1.69%)^[21]. 中国最大铜工业基地德兴市苔藓氮含量变化范围为2.24%~3.63%,远大于西班牙钢铁城市 Zumarraga 和 Azkoitia 苔藓氮含量0.122%~0.948%^[22]. 由表2可以看出,江西省苔藓氮含量比欧洲地区以及我国其它部分城市苔藓氮含量均高,这表明江西省大部分地区已受到较严重人为因素氮输入的影响,如农业活动中化肥氮的挥发,城市污染废水中含氮物质的释放以及工业、汽车尾气氮氧化物的排放等. 由于江西省是农业省份,农业活动氮的排放与挥发可能占总氮排放的主导.

江西省苔藓氮含量由赣东北向赣西南逐渐降低,且城市氮含量明显高于郊区氮含量,这与刘学炎等^[9]报道的贵阳市苔藓氮含量由城市往外随距离指数降低一致. Poikolainen 等^[23]也利用苔藓(*Hylocomium splendens*)进行了大气氮沉降的地区差异研究,指出芬兰地区南部苔藓氮含量最高,并逐渐向北部地区递减,且在北部出现最低值. 同时对于位于同一纬度的芬兰西部地区苔藓氮含量也明显高

于东部地区. 这说明苔藓是研究地区大气氮沉降面上变化的可靠工具.

3.2 苔藓氮同位素

江西省苔藓氮同位素值变化范围为-1.96‰~-9.74‰. Xiao 等^[10]在中国南方地区测得各省份苔藓氮同位素值差异较大,其中拉萨苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值为($+4.2\pm2.5$)‰、成都苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值为(0.0 ± 3.0)‰、贵阳、南京、苏州地区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值均小于-7‰. 刘学炎等^[24]对贵阳地区大气氮沉降机制的研究中指出,贵阳市区苔藓氮同位素偏负(-8.87 ± 1.65)‰,郊区及农村地区苔藓氮同位素值为(-3.55 ± 1.04)‰,比市区苔藓明显富集 $\delta^{15}\text{N}$. Wilson 等^[21]报道,南非 Cape Metropolitan 地区苔藓氮同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化范围为-2.08‰~-6.23‰. Solga 等^[25]测得 Rhine-Westphalia 北部赤茎藓 [*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt] $\delta^{15}\text{N}$ 值为-2.86‰~-7.54‰、疣柄藓 [*Scleropodium purum* (Hedw.) Limpr.] $\delta^{15}\text{N}$ 值在-2.98‰~-7.89‰. 由表2所示,无论是欧洲还是亚洲研究区苔藓氮同位素值大部分偏负.

表 2 不同地区苔藓氮含量和同位素 ($\delta^{15}\text{N}$) 对比¹⁾

Table 2 Tissue N and $\delta^{15}\text{N}$ signature in mosses at different sites

研究区	大气氮沉降/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	苔藓氮含量/%	苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ /‰	文献
南非 Metropolitan	nd	1.32~1.69	$-2.08\sim-6.23$	[21]
苏格兰养殖区附近	49	3~5	nd	[27]
苏格兰养殖区 300 m	11	1.3	nd	[27]
Velmerstot, Glindfeld	8.7~18.5	1.4~2.2	$-2.86\sim-7.89$	[25]
Velmerstot, Glindfeld	8.7~18.5	0.91~2.02	$-3.71\sim-5.97$	[13]
欧洲 11 个国家	5~25	1.3	$-3.8\sim-8$	[37]
贵阳市区	30.18	2.24 ± 0.32	-8.87 ± 1.65	[24]
贵阳郊区	14.3	1.27 ± 0.13	-3.55 ± 1.04	[24]
武汉	28.7(湿沉降)	3.22 ± 0.27	$-6\sim-2$	[10]
南昌	23.0(湿沉降)	3.24 ± 0.38	$-2.52\sim-6.40$	[30], 本研究
鹰潭	62.2(农业区)	2.89 ± 0.15	-6.19 ± 0.93	[14], 本研究

1) nd 表示未测定

3.3 苔藓氮含量反映江西省大气氮沉降水平

苔藓植物具有独特的形态结构和生物学特性,其生长的营养物质主要靠大气直接提供,因此苔藓氮含量可以用来评价大气氮沉降水平和变化。苔藓组织氮含量越高反映其生长地的大气氮沉降水平也越高。刘学炎等^[9]研究贵阳市大气氮沉降时指出贵阳市苔藓氮含量由市区向郊区指数降低($y = 1.5e^{-0.13x} + 1.26$),其估算出的数据表明贵阳市大气氮沉降水平由市区向郊区递减^[20]。Sogla 等^[25]在德国莱茵河和威斯特伐利亚北部地区的研究表明,总氮沉降升高 $1 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,苔藓氮含量将增加 0.066% [赤茎藓 (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt)] 和 0.061% (疣柄藓 *S. purum*)。该结论与 Hicks 等^[26]在大不列颠采用泥灰藓 (*Hylocomium splendens*) 分析该地区大气干、湿、总氮沉降状况的结果相吻合 [随总氮沉降升高 $1 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,苔藓氮含量将增加 0.04%]。Pitcairn 等^[27]指出 2% 的苔藓氮含量能够作为 $20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 氮沉降量的衡量尺度。由此可见,利用苔藓氮含量指示大气氮沉降已由定性向定量计算发展。Hicks 等^[26]认为苔藓氮含量与大气氮沉降关系为 $y = 0.04x + 0.6$ 。Pitcairn 等^[28]推算出苔藓氮含量与大气氮沉降的关系为 $y = 0.06x + 0.55$ 。刘学炎等^[20]根据前人已有的数据,归纳出不同地区不同藓类氮含量 (y) 大气氮沉降 (x) 平均变化关系为 $y = 0.052x + 0.7325$ 。本研究依据综合关系 ($y = 0.052x + 0.7325$) 苔藓氮含量估算了江西省各采样区大气氮沉降通量 (表 1),并相应模拟出大气氮沉降等值分布图 (图 1)。

由图 1 所示,江西省苔藓氮含量指示的大气氮沉降量在总体上表现为赣西北偏高,赣东南较低的特点。其中南昌市和丰城市氮沉降水平较为突出,大气氮沉降量均值分别为 $(52.92 \pm 13.05) \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $(48.20 \pm 6.79) \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。造成较高氮沉降的原因可能是该市火力发电厂燃烧废气的排放。同时郊外采样区大气氮沉降量变化范围为 $33.26 \sim 34.57 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,较之城市市区氮沉降量 $39.66 \sim 52.92 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 偏低。

鹰潭市大气氮沉降平均值为 $(41.41 \pm 11.18) \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 低于王体健等^[14] 2004 ~ 2005 年在鹰潭市生态实验站农田生态系统区测得的大气氮沉降量 $62.2 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。这主要是由于苔藓氮含量指示的大气氮沉降量为鹰潭市林地下垫面氮沉降状况,而红壤生态实验站监测的是下垫面为农田的大气氮沉降量。农田生态系统大气氮输入明显受到农

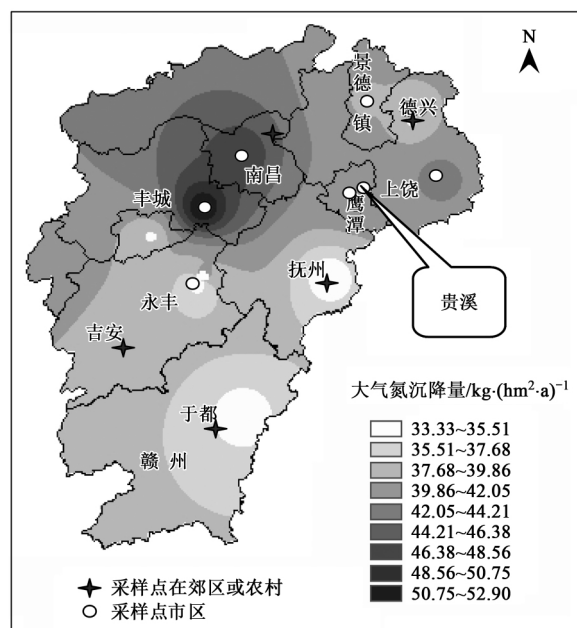


图 1 江西省研究区大气氮沉降分布示意

Fig. 1 Distribution of atmospheric N deposition at Jiangxi Province

业活动的氨氮贡献的影响。同时鹰潭市大气氮沉降值高于孙本华等^[29]在该研究区测定的大气氮湿沉降量 $24.04 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,如果依据鹰潭市湿沉降占总沉降量约 60%^[15]的比例,可换算出孙本华等研究的大气氮沉降总量为 $40.80 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 左右,与本研究估算的大气氮沉降水平相差不大。即可粗略认为苔藓氮含量指示的氮沉降量能够间接反映出该区大气氮沉降水平。刘学炎等^[20]指出利用苔藓氮含量计算得到的大气氮沉降 $(29.21 \pm 6.17) \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 正好和当地测算的数据相吻合 $[30.18 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 。

南昌市大气氮沉降量变化范围为 $34.29 \sim 48.20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。依据胡春燕等^[30] 年测得的南昌市降雨中全年 NH_4^+ 、 NO_3^- 离子平均浓度 (0.77 mg/L 、 1.31 mg/L) 可算出南昌市大气湿沉降通量为 $23.0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,其占苔藓氮含量指示的大气氮沉降量比例的 48% ~ 67%。

3.4 苔藓氮同位素指示大气氮沉降来源及其形式

Pearson 等^[31]和 Gerdol 等^[32]的研究都指出不同的苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 能够有效地反映大气氮的来源及其沉降形式。以交通和工业源氮 (NO_x) 排放为主的城市苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏正 ($2.07\text{‰} \sim 7.3\text{‰}$ ^[31]; $-3\text{‰} \sim 2\text{‰}$ ^[32]),以农业和人畜排泄、城市污水源氮 (NH_x) 释放为主的地区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏负 ($-12\text{‰} \sim -2\text{‰}$ ^[31]; $-2\text{‰} \sim -7\text{‰}$ ^[32])。江西省苔藓氮同位

素值均为负值($-9.54‰ \sim -1.96‰$),与贵阳市苔藓氮同位素值($-8.87‰ \sim -2.48‰$)^[24] 接近,反映了江西省大气氮沉降同样也以铵态氮(NH_x)沉降形式为主. 肖化云等^[33] 和张颖等^[34] 对雨水氮沉降机制的研究中都指出我国大气氮沉降形式以铵态氮($\text{NH}_x\text{-N}$)沉降为主. 王体健^[14]、崔健^[15] 和孙本华^[29] 等也都指出江西省大气氮沉降主要以铵态氮沉降为主. 由于苔藓氮同位素的不同丰度值可以用于识别不同大气氮源. 因此,近年来越来越多的研究应用苔藓氮同位素指示大气氮沉降的氮源^[10,19,24,31,32]. 大气铵(NH_x)主要来源于人畜排泄物、生活污水、化肥铵的挥发. 由于铵(NH_x)的来源不同,其对应的 $\delta^{15}\text{NH}_3$ 值的变化范围存在差异性. 人畜排泄物中 $\delta^{15}\text{NH}_3$ 值为 $-15‰ \sim -4‰$ ^[35], 生活污水的 $\delta^{15}\text{NH}_3$ 值为 $-15.2‰ \sim 8.9‰$ ^[35]、农业活动化肥铵挥发的 $\delta^{15}\text{NH}_3$ 为 $-5‰ \sim 0‰$ ^[36]. 据表 1 所示,江西省研究区市区与郊区苔藓氮同位素存在较为明显的差异,说明两者具有不同的大气氮源. 城市市区苔藓同位素($-5.51‰ \sim -9.54‰$)指示大气氮主要来源于城市污水氨和人畜排泄物氨的释放. 郊区苔藓氮同位素($-4.41‰ \sim -1.96‰$)较富集 $\delta^{15}\text{N}$,反映郊区氮源为农业氮源,主要是农业生产过程中氨的挥发. 苔藓氮同位素组成特征反映了江西省大气氮沉降以铵沉降为主,主要是来源是人畜排泄物、城市污水、农业化肥,而交通和工业排放的硝态氮影响不明显. 这主要与江西省的经济体制、环境现状有关.

4 结论

(1)江西省苔藓氮含量的空间分布特征能较好地反映该地区大气氮沉降的空间变化,其变化为 $18.18 \sim 60.14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$;赣西北偏高,赣东南较低. 值得注意的是在郊外或农村采样点的大气氮沉降量较之城市偏低.

(2)江西省苔藓氮同位素值均为负值($-1.96‰ \sim -9.54‰$),但城市与郊区或农业地区差异明显. 农村和郊区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值($-4.41‰ \sim -1.96‰$)较市区($-5.51‰ \sim -9.54‰$)富集 $\delta^{15}\text{N}$. 说明城市与郊区或农村具有不同的大气氮源. 城市地区苔藓氮同位素主要指示城市排泄物和污水的氮源,而郊区和农村地区苔藓氮同位素主要指示农业氮源.

参考文献:

[1] Galloway J G, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen

cycles: past, present and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**:153-226.

- [2] Larssen T, Seip H M, Semb A, *et al.* Acid deposition and its effects in China: an overview [J]. *Environmental Science and Policy*, 1999, **2**(1): 9-24.
- [3] Holloway T, Levy H, Carmichael G. Transfer of reactive nitrogen in Asia: development and evaluation of a source receptor model [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4251-4264.
- [4] 陈能汪, 洪华生, 张路平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 38-46.
- [5] 王巧红, 宫渊波, 张君. 森林生态系统对大气氮沉降的响应 [J]. *四川林业科技*, 2006, **27**(1): 19-25.
- [6] 刘学炎, 肖化云, 刘从强. 植物叶片氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)指示大气氮沉降的探讨 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, **26**(4): 405-409.
- [7] 刘滨扬, 刘蔚秋, 雷纯义, 等. 三种苔藓植物对模拟 N 沉降的生理响应 [J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(1): 141-149.
- [8] Baddeley J A, Thompson D B A, Lee J A. Regional and historical variation in the nitrogen content of *Racomitrium lanuginosum* in Britain in relation to atmospheric nitrogen deposition [J]. *Environmental Pollution*, 1994, **84**: 189-196.
- [9] 刘学炎, 肖化云, 刘从强, 等. 贵阳地区主要大气氮源的沉降机制与分布: 基于石生苔藓氮含量和氮同位素的证据 [J]. *地球化学*, 2008, **37**(5): 455-461.
- [10] Xiao H Y, Tang C G, Xiao H W, *et al.* Tissue S/N ratios and stable isotopes ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of epilithic mosses (*Haplcladium microphyllum*) for showing air pollution in urban cities in Southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**:1726-1732.
- [11] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotopes of the moss *Haplcladium microphyllum* in an urban and a background area (SW China): The role of environmental conditions and atmospheric nitrogen deposition [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **42**: 5413-5423.
- [12] Pitcairn C E R, Fowler D, Grace J. Deposition of fixed atmospheric nitrogen and foliar nitrogen content of bryophytes and *Calluna vulgaris* (L.) Hull. [J]. *Environmental Pollution*, 1995, **88**: 193-205.
- [13] Solga A, Eichert T, Frahm J P. Historical alteration in the nitrogen concentration and ^{15}N natural abundance of mosses in Germany: Indication for regionally varying changes in atmospheric nitrogen deposition within the last 140 years [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**: 8044-8055.
- [14] 王体健, 刘倩, 赵恒, 等. 江西红壤地区农业生态系统大气氮沉降通量的研究 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 280-287.
- [15] 崔健, 周静, 杨浩. 农田生态系统大气氮、硫湿沉降通量的观测研究 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(6): 2243-2248.
- [16] 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.
- [17] 刘学炎, 肖化云, 刘从强, 等. 碳氮同位素指示苔藓生境特征以及树冠对大气氮沉降的吸收 [J]. *地球化学*, 2007, **36**(3):286-294.

[18] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q, *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]. Atmospheric environment, 2007, **41** (23): 4897-4907.

[19] Solga A, Burkhardt J, Frahman J P. A new approach to assess atmospheric nitrogen deposition by way of standardize exposition of mosses [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, **116**: 399-417.

[20] 刘学炎, 肖化云, 刘从强, 等. 基于石生藓类氮含量的贵阳地区大气氮沉降[J]. 生态学报, 2009, **29**(12): 6646-6653.

[21] Wilson D, Stock W D, Hedderson T. Historical nitrogen content of bryophyte tissue as an indicator of increased nitrogen deposition in the Cape Metropolitan Area, South Africa [J]. Environmental Pollution, 2009, **15**: 938-945.

[22] Gonzalez M L, Elustondo D, Lasheras E, *et al.* Use of native mosses as biomonitors of heavy metals and nitrogen deposition in the surroundings of steel works [J]. Chemosphere, 2010, **78**: 965-971.

[23] Poikolainen J, Piispanen J, Karhu J, *et al.* Long-tern changes in nitrogen deposition in Finland (1990-2006) monitored using the moss *Hylocomium splendens* [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**: 3091-3097.

[24] 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): 1786-1790.

[25] Solga A, Burkhardt J, Zechmeister H G, *et al.* Nitrogen content, ^{15}N natural abundance and biomass of the two pleurocarpous mosses *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt and *Scleropodium purum* (Hedw.) Limpr. in relation to atmospheric nitrogen deposition [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**: 465-473.

[26] Hicks W K, Leith I D, Woodin S J, *et al.* Can the foliar nitrogen concentration of upland vegetation be used for predicting atmospheric nitrogen deposition? Evidence from field survey[J]. Environmental Pollution, 2000, **107**: 367-376.

[27] Pitcairn C E R, Fowler D, Leith I D, *et al.* Bioindicators of enhanced nitrogen deposition [J]. Environmental Pollution, 2003, **126**: 353-361.

[28] Pitcairn C E R, Leith I D, Sheppard L J. Bioindicator methods for assessing effects of atmospheric nitrogen on statutory nature conservation sites. Appendix I Field inter-comparison of different bio-indicator methods [J]. Report to Joint Nature Conservation Committee under Contract, 2004, **90**: 531-535.

[29] 孙本华, 胡正义, 吕家珑, 等. 江西鹰潭典型丘陵农业区氮湿沉降的动态变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(10): 118-127.

[30] 胡春燕, 黄喜根, 李春莲. 南昌市酸雨污染特征及变化规律[J]. 江西农业大学学报(自科版), 2002, **24**(10): 689-691.

[31] Pearson J, Wells D, Seller K J, *et al.* Traffic exposure increases natural ^{15}N and heavy metal concentrations in mosses[J]. New Phytologist, 2002, **147**: 317-326.

[32] Gerdol R, Bragazza L, Marchesini R, *et al.* Use of moss (*Tortula muralis* Hedw.) for monitoring organic and inorganic air pollution in urban and rural sites in Northern Italy [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**: 4069-4075.

[33] 肖化云, 刘从强, 李思亮, 等. 贵阳地区夏季雨水硫和氮同位素地球化学特征[J]. 地球化学, 2003, **32**(3): 248-254.

[34] 张颖, 刘学军, 张福锁, 等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. 生态学报, 2006, **26**(6): 1633-1639.

[35] Heaton T H E. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review [J]. Chemical Geology, 1986, **59**: 87-102.

[36] Freyer H D. Seasonal trends of NH_4^+ and NO_3^- nitrogen isotope composition in rain collected at Jülich Germany [J]. Tellus, 1978, **30**: 83-92.

[37] Bragazza L, Limpens J, Gerdol R, *et al.* Nitrogen concentration and $\delta^{15}\text{N}$ signature of ombrotrophic *Sphagnum* mosses at different N deposition levels in Europe [J]. Global Change Biology, 2005, **11**: 106-114.