

校园树附生苔藓氮含量与氮同位素特征及其环境指示

——以福建农林大学为例

杨柳生, 熊在秋, 朱子谦, 李晶, 刁丹*

福建农林大学林学院, 福建 福州

收稿日期: 2021年9月11日; 录用日期: 2021年10月14日; 发布日期: 2021年10月22日

摘要

为探讨校园苔藓植物氮素特征, 对福建农林大学不同功能区(主干道、教学区、生活区和景观区)树附生苔藓植物氮含量和氮同位素值($\delta^{15}\text{N}$)进行了研究。结果表明: 树附生苔藓氮含量变化范围为1.43%~3.99%, 均值为 $2.71 \pm 0.03\%$, 整体偏高。主干道苔藓氮含量显著低于教学区、生活区和景观区($P < 0.05$)。苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化范围为 -12.26‰ ~ 1.78‰ , 均值为 $-6.54 \pm 0.16\text{‰}$ 。生活区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值比教学区、景观区和主干道明显偏负, 而教学区、景观区与主干道差异不显著($P > 0.05$)。苔藓氮同位素偏负特征指示了校园大气中的氮来源以生活污水和人畜排泄物($\text{NH}_x\text{-N}$)为主, 同时未来应考虑交通源氮($\text{NO}_x\text{-N}$)排放的影响。本研究为开展苔藓植物监测大气环境提供了基础资料。

关键词

树附生苔藓, 氮稳定同位素, 氮沉降, 大学校园

Characteristics and Environmental Implication of Nitrogen Content and Stable Isotope in Epiphytic Bryophytes in the Campus

—Taking Fujian Agriculture and Forestry University for Example

Liusheng Yang, Zaiqiu Xiong, Ziqian Zhu, Jing Li, Dan Xi*

College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian

*通讯作者。

文章引用: 杨柳生, 熊在秋, 朱子谦, 李晶, 刁丹. 校园树附生苔藓氮含量与氮同位素特征及其环境指示[J]. 世界生态学, 2021, 10(4): 487-494. DOI: 10.12677/ije.2021.104055

Abstract

In order to explore the nitrogen characteristic of moss on campus, the content and isotope value of nitrogen in epiphytic bryophytes were studied from different function areas (main road, teaching, living quarter, and landscape area) in Fujian Agriculture and Forestry University campus. Results showed that the nitrogen content in mosses ranged from 1.43% to 3.99% with the mean value of $2.71 \pm 0.03\%$, reflecting a high nitrogen status. The nitrogen contents of mosses in main road area were significantly higher than those in the areas of teaching, landscape, and living quarters ($P < 0.05$). Mosses $\delta^{15}\text{N}$ values varied from -12.26‰ to 1.78‰ with the mean value of $-6.54 \pm 0.16\text{‰}$. More negative $\delta^{15}\text{N}$ values in mosses were observed in living quarters compared to the areas of teaching, landscape, and main road. However, there was no significant difference between teaching, landscape, and main road ($P > 0.05$). The negative signature of nitrogen isotope in epiphytic mosses suggests that the nitrogen in the atmosphere of campus mainly originates from $\text{NH}_x\text{-N}$ emission of excretory wastes and sewage, and more attention should be paid to the effect of traffic source nitrogen ($\text{NO}_x\text{-N}$) emission. This research provides baseline information for using moss to monitor atmospheric environment.

Keywords

Epiphytic Bryophytes, Nitrogen Stable Isotope, Nitrogen Deposition, University Campus

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几十年来,化石燃料燃烧、化肥使用及畜牧业发展等向大气层排放的含氮化合物激增,导致大气氮沉降成比例增加[1] [2]。此外,工业化及城市化进程的推进则进一步加剧了大气氮沉降[2]。现今,氮沉降已成为全球变化突出的环境问题之一。近年来,利用苔藓植物来指示其生长地长期的、综合的大气物质输入已成为大气环境污染监测研究中非常关注的热点[3]。苔藓植物没有真正的根和维管束组织,主要通过假叶从大气吸收养分,对大气氮沉降的敏感度普遍高于维管植物,是比维管植物更有效的氮沉降原位“接受器”[4]。此外,苔藓植物受自身生命反应过程的干扰少,其组织中的元素同位素能更精确地指示污染源[5]。目前,利用苔藓植物体内氮素变化反映大气氮沉降强度和氮来源的研究日益增多,如利用苔藓氮含量和氮同位素特征探讨中国南方部分城市[3] [6] [7]和欧洲国家[8] [9]大气氮沉降水平及沉降源。Chen [10]等研究石生细叶小羽藓氮同位素值在城乡间的变化,指出城区大气湿沉降氮主要受机动车排放和煤炭燃烧等影响,而郊区及农村则受农业和人畜废水等所排放的氮影响。另外,也有研究发现过量的氮输入会降低苔藓植物的丰度和生长势[11] [12],降低其固碳潜力[13]。因此,研究苔藓植物氮含量及其同位素特征,有助于深入理解非维管束植物对大气氮污染的响应机制。

目前关于苔藓植物指示大气污染的研究主要集中在石生和土生苔藓上,比如长叶鳞叶藓、大灰藓

和深绿绢藓用来检测重金属污染[14]，而对树附生苔藓的指示研究非常缺乏[15]。树附生苔藓是生活在活的树木或灌木树皮上的一类植物，个体小，叶表面积大，几乎不受树皮基质的干扰，其水分和营养物质主要来自雨水、露水和大气尘埃撞击沉积物供给[15] [16] [17]。相比石生和土生苔藓植物，树附生苔藓受基质影响较少，具有更敏感的环境变化指示功能[15]。然而，目前关于树附生苔藓植物的研究，尤其在城市大气下垫面，主要侧重在其多样性分布特征[16] [18] [19]与附生专一性方面[17]，而对其组织中元素同位素特征的指示研究还刚处于起步阶段。因此，开展树附生苔藓植物体内氮素同位素特征研究，对于明确城市环境下树附生苔藓植物在大气氮沉降与污染监测中的指示作用和应用前景具有重要意义。

大学校园作为城市的特色功能区，是城市文化精神的提升之地，具有较为明确而稳定的空间，可成为一个相对独立的小社会甚至小城市[20]。随着社会服务功能增强，大学校园已成为人口密集、人员活动频繁的公共区域，校园植物的生存空间受到影响。植物不断地与外界环境发生物质交换，过量的氮输入会引起植物体内氮素的变化，增加植物对大气氮的敏感度。校园是学生和教职工学习、工作和生活的场所，校园空气质量的下降对师生健康具有重要影响。通常认为，苔藓植物消除了基质的干扰和生理因素分馏的影响，所以它记录的信息比其他高等植物更直接，具有更高的可靠性和可信度[21]。目前校园树附生苔藓植物的研究相对缺乏，对其氮素等营养元素及生态环境功能的研究有待探讨与完善。本研究以福建农林大学为对象，通过采集校园内不同功能区不同种植树种上附生的苔藓植物，分析其氮素含量和氮同位素值，探讨苔藓植物氮素分布特征，并甄别校园大气氮的主要来源，为生态校园空气质量的评价及开展城市苔藓植物大气环境监测提供数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

福建农林大学位于福建省福州市西部，地处东经 119°17'18"，北纬 26°04'8"，位于南台岛西端闽江下游河口盆地中心[22]，属海洋性亚热带季风气候，全年冬短夏长，气候温暖湿润，年均气温 20℃，最冷 1~2 月为 6℃~10℃，最热 7~8 月 24℃~29℃，年降雨量 900~2100 mm，年均相对湿度 77% [23]。各类植物 168 科 843 属 1458 种[24]，以农林性质特色的果树和观赏价值较高的树种作为行道树，如荔枝(*Litchi chinensis*)、芒果(*Mangifera indica*)、杨桃(*Averrhoa carambola*)、白兰(*Michelia alba*)、羊蹄甲(*Bauhinia purpurea*)、南洋楹(*Albizia falcataria*)等，形成“一路一树，异路异景”的道路景观特色[25]。

2.2. 样品采集、处理与分析

道路作为校园内各个场所的连接通道，贯穿于整个校园之中。综合考虑车流量和各场所属性，人为将校园分成主干道、教学区、生活区和景观区这四个主要功能区。于 2017 年 7 月在福建农林大学校园内，选择道路和各个场所周边胸径大于 10 cm 的树木，采集离树基 80~150 cm 范围内苔藓植物，共收集到 242 个样品。对于直径比较大且苔藓绕圈生长的树种，分别沿东、南、西、北四个方向进行采集，然后混合成 1 个样品，以消除采光照和其他外在条件导致的误差。所有采集的新鲜苔藓样品用干净信封保存，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 60℃干燥箱中经 48 h 烘干，经球磨机研磨、粉碎，干燥保存用于氮含量和氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)分析。

苔藓植物氮含量和同位素的分析在福建农林大学森林生态稳定同位素研究中心完成。采用元素分析仪(Elementar Vario isotope cube, German)-稳定同位素比率质谱仪(Isoprime 100, UK)联机测定样品中氮含量和同位素。测定原理为固体有机质 950℃燃烧转化为 CO_2 、 NO_x 、 N_2 和 H_2O ，经还原铜 630℃下将 NO_x

还原成 N₂, 然后分别经脱水管和吸附柱去除 H₂O 和 CO₂, 纯化的 N₂ 气体进入 TCD 检测器进行氮含量测定, 随后经色谱柱分离并送入同位素比率质谱仪进行 δ¹⁵N 测定。苔藓 δ¹⁵N 的测定数据采用 D-谷氨酸(δ¹⁵N = -5.39‰), 甘氨酸(δ¹⁵N = 1.22‰)和 L-组氨酸(δ¹⁵N = -1.09‰)作为标准样品进行校正, 分析误差为 ±0.03‰ (n = 20)。样品 δ¹⁵N 值基于的国际标准为大气 N₂, 计算公式为:

$$\delta^{15}\text{N} = \left[\left(\frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{标准}}} \right) - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

式中, R 为 ¹⁵N/¹⁴N 自然丰度比。

2.3. 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 16.0 软件进行数据处理和统计分析, 不同功能区间苔藓植物氮含量及其同位素值的差异显著性采用单因素方差分析(One-Way ANOVA), LSD 法进行多重比较分析; 采用 origin 8.5 软件绘制图。

3. 结果和分析

3.1. 苔藓氮含量

由表 1 可知, 苔藓植物主要附生在荔枝、南洋楹、白兰、芒果、香樟树上。树附生苔藓平均氮含量为 2.71 ± 0.03%, 变化幅度较大, 最高值(3.99%)是最低值(1.43%)的 2.8 倍。教学区苔藓平均氮含量最高(2.76 ± 0.49%), 与生活区(2.75 ± 0.41%)、景观区(2.72 ± 0.37%)差异不显著(P > 0.05, 图 1(A)), 但均与主干道(2.57 ± 0.36%) 差异显著(P < 0.05)。在相同功能区内, 苔藓氮含量在附生树种间有所不同, 如景观区中的南洋杉与枫杨、教学区中的南洋楹与荔枝、樟树表现最为明显。

Table 1. Tissue N content (%) and isotope value (δ¹⁵N, ‰) of epiphytic bryophytes
表 1. 树附生苔藓氮含量(%)与氮同位素(δ¹⁵N, ‰)

区域	附生树种	树棵数	苔藓氮含量(%)	苔藓 δ ¹⁵ N (‰)
教学区	荔枝(<i>Litchi chinensis</i>)	17	2.51 ± 0.14 (1.43~3.52)	-4.89 ± 0.38 (-8.10~-1.94)
	南洋楹(<i>Albiziafalcataria</i>)	11	3.05 ± 0.09 (2.50~3.48)	-7.16 ± 0.53 (-9.65~-4.43)
	芒果(<i>Mangiferaindica</i>)	7	2.69 ± 0.09 (2.47~3.18)	-6.24 ± 0.29 (-7.27~-4.82)
	白兰(<i>Michelia alba</i>)	5	2.71 ± 0.18 (2.31~3.28)	-4.50 ± 0.96 (-6.40~-1.21)
	香樟(<i>Cinnamomumcamphora</i>)	5	2.55 ± 0.19 (1.81~2.90)	-6.57 ± 1.50 (-9.80~-2.89)
	榕树(<i>Ficusmicrocarpa</i>)	4	2.85 ± 0.28 (2.17~3.35)	-7.24 ± 0.12 (-7.55~-7.00)
	华棕(<i>Washingtoniafilifera</i>)	2	2.87 ± 0.24 (2.64~3.11)	-5.47 ± 1.38 (-6.85~-4.09)
	蒲桃(<i>Syzygiumjambos</i>)	1	3.00	-6.87
	阴香(<i>Cinnamomumburmanni</i>)	1	2.56	-9.79
景观区	垂柳(<i>Salix babylonica</i>)	7	2.76 ± 0.08 (2.52~3.09)	-4.74 ± 0.51(-6.23~-2.46)
	华棕(<i>Washingtoniafilifera</i>)	7	2.72 ± 0.19 (2.04~3.28)	-3.38 ± 1.36 (-6.89~1.78)
	南洋楹(<i>Albiziafalcataria</i>)	6	2.81 ± 0.06 (2.57~2.94)	-8.21 ± 0.47 (-9.85~-7.08)
	南洋杉(<i>Araucaria cunninghamii</i>)	4	2.18 ± 0.05 (2.09~2.31)	-5.16 ± 0.27 (-5.61~-4.40)
	柿子(<i>Diospyros kaki</i>)	4	2.53 ± 0.16 (2.11~2.80)	-5.54 ± 0.68 (-7.45~-4.31)
	柏树(<i>Platycladusorientalis</i>)	4	2.85 ± 0.11 (2.67~3.16)	-1.06 ± 1.26 (-4.62~1.14)
	羊蹄甲(<i>Bauhinia purpurea</i>)	3	2.94 ± 0.03 (2.90~3.00)	-6.20 ± 0.70 (-7.53~-5.15)
	香樟(<i>Cinnamomumcamphora</i>)	3	2.65 ± 0.14 (2.41~2.88)	-8.34 ± 0.46 (-8.93~-7.42)

Continued

景观区	枫杨(<i>Pterocaryastenoptera</i>)	2	3.64 ± 0.16 (3.48~3.80)	-6.65 ± 0.55 (-7.20~-6.10)
	蒲桃(<i>Syzygiumjambos</i>)	2	2.71 ± 0.08 (2.63~2.79)	-4.72 ± 2.95 (-7.67~-1.76)
	罗汉松(<i>Podocarpusmacrophyllus</i>)	2	2.75 ± 0.01 (2.74~2.76)	-6.58 ± 0.07 (-6.65~-6.51)
	相思(<i>Acacia confusa</i>)	2	2.67 ± 0.20 (2.46~2.87)	-6.76 ± 1.20 (-7.96~-5.56)
	白兰(<i>Michelia alba</i>)	1	2.85	-4.20
生活区	白兰(<i>Michelia alba</i>)	35	2.96 ± 0.07 (2.13~3.99)	-7.94 ± 0.42 (-12.26~0.60)
	芒果(<i>Mangiferaindica</i>)	49	2.61 ± 0.04 (1.95~3.34)	-8.02 ± 0.21 (-10.42~-4.02)
	南洋楹(<i>Albiziafalcataria</i>)	3	2.61 ± 0.30 (2.01~2.95)	-9.04 ± 0.41 (-9.76~-8.35)
	相思(<i>Acacia confusa</i>)	1	2.62	-2.29
主干道区	白兰(<i>Michelia alba</i>)	53	2.65 ± 0.06 (1.81~3.98)	-5.92 ± 0.34 (-9.18~0.63)
	木棉(<i>Bombaxmalabaricum</i>)	1	1.88	-1.47

3.2. 苔藓氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)

树附生苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 $-6.54 \pm 0.16\text{‰}$, 变化幅度较宽, 最高(-12.26‰)与最低值(1.78‰)相差 14% (表 1)。生活区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 均值($-8.06 \pm 0.23\text{‰}$)比景观区($-5.21 \pm 0.35\text{‰}$)、主干道($-6.09 \pm 0.33\text{‰}$)和教学区($-6.54 \pm 0.16\text{‰}$)更加贫化 ^{15}N , 景观区、教学区均与主干道无显著差异($P > 0.05$, 图 1(B))。在相同生活区内, 苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值在附生树种间的分布与其氮含量的分布趋势相似, 存在一定差异, 主要体现在教学区中的榕树与荔枝、白兰, 景观区中的柏树与南洋楹、香樟。

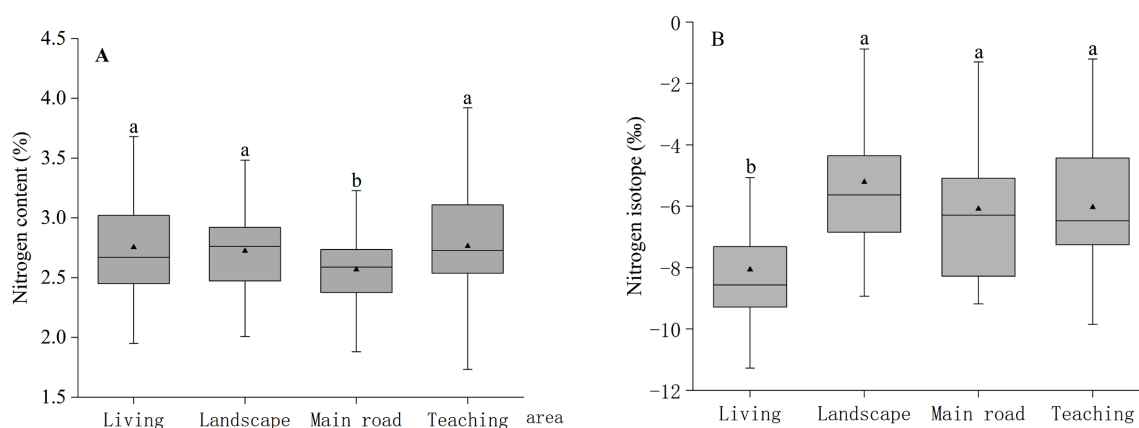


Figure 1. Tissue N content and isotope value ($\delta^{15}\text{N}$) of epiphytic bryophytes in different functional areas. Different small letters meant significant differences among functional areas at a 0.05 level

图 1. 不同功能区树附生苔藓氮含量与同位素值($\delta^{15}\text{N}$)。不同小写字母表示功能区间差异显著($P < 0.05$)

4. 讨论

本研究中树附生苔藓氮含量变化为 1.43%~3.99%, 比前人报道的关于石生和土生苔藓氮含量的研究范围相对较宽[3] [5] [8] [9] [26], 这可能与苔藓自身特性、氮素利用、采样点环境等因子差异有关。不同种类的苔藓对营养物质的吸收机制因生长基质不同而不同[3]。树附生苔藓植物由于没有与土壤直接相连的根系, 也不侵入宿主的维管植物, 其生命活动所需要的养分和水分更多的来自雨水或空气中的凝结水, 并且保水能力极差, 空气干燥时易丧失水分和光合能力[19], 因而影响了苔藓植物的生长和营养吸收。另外, 附生树种所处的立地条件、树种类型、树皮粗糙度及树龄等同样会影响苔藓植物对氮素的吸收, 表 1 中苔

藓氮含量在附生树种间和种内均存在变异的结果也可以证实这点。因而与土生和石生苔藓相比, 树附生苔藓不能持久获取氮素, 受附生树种和外界环境影响较大, 故其体内氮含量的变化也会相对较大。进一步分析发现, 树附生苔藓氮含量虽然在不同生活区域和附生树种间表现有所差异(表 1 和图 1(A)), 但总体平均氮含量(2.71%)明显超过德国 Velmerstot 污染区苔藓氮含量最高值(2.02%) [9]和苏格兰西北部非污染区最低氮含量(0.60%) [27], 也明显高于我国贵阳市区苔藓氮含量($2.24 \pm 0.32\%$) [26], 与我国江西省大部分地区苔藓氮含量相近[3]。研究显示这些地区大气氮沉降水平较高, 已受到严重的人为氮输入影响[3] [9] [26]。因此, 上述分析表明, 本研究区极有可能受到人为氮输入的影响。在没有人为干扰的非污染区, 苔藓植物总体应表现出更低的氮含量。本研究区福建农林大学地处福州市三环快速路主干道旁, 周边农业活动非常少, 因此校园内人畜排泄物、生活污水及交通尾气氮的排放可能是主要的氮贡献源。

苔藓植物具有特殊的形态构造和生物学特性, 且由于其叶片的单层细胞结构对大气输入物质具有累积效应, 使其对大气物质相当敏感[21], 因此苔藓氮含量可以用来评价大气氮沉降水平[3]。刘学炎等[26]通过分析前人已有的数据, 归纳出不同地区不同藓类氮含量(y)和大气氮沉降(x)的平均变化关系为 $y = 0.052x + 0.7325$, 并据此估算出的贵阳市氮沉降量平均值($29.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)与贵阳市大气氮沉降量平均值($31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)十分吻合。利用上述定量关系式, 估算出福建农林大学校园大气氮沉降平均值为 $38.18 \pm 0.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于根据降雨中铵态氮和硝态氮浓度(1.34 和 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)估算出的校园大气氮湿沉降($31.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 未发表数据)。这可能的原因有: 1) 估测出的大气氮湿沉降不包括有机氮那部分, 低估了大气氮湿沉降量; 2) 附生树种、苔藓种类组成差异引起测定的苔藓氮含量偏高。校园树木多为人工种植, 其植被特征受校园面积、园林设计等影响, 附生树木数量、分布及树龄不同。由于各功能区紧密相连, 人为活动频繁, 促进周围空气对流, 有利于附生苔藓植物间团簇密集生长, 而我们在采样过程中只是将每株附生树木生长上的苔藓作为一个样品进行分析, 并没有逐一区分出每种苔藓种类, 因而测出的氮含量有可能高于实际值。另外, 本研究并没有测定树附生苔藓氮含量在一定时间间隔内的变化动态, 因此, 树附生苔藓氮含量指示的氮沉降量, 是否能够与石生苔藓植物一样间接反映研究区大气氮沉降水平, 还需要更多的数据支撑。同时, 这也反映出利用树附生苔藓植物作为大气氮沉降的生物指示种, 需要考虑不同苔藓物种对大气氮的响应, 应尽量采集对环境变化敏感的同一种属的苔藓样品进行大气氮沉降的定量分析。

苔藓在吸收氮的过程中氮同位素分馏效应非常小, 因而不同的苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 能够有效地反映大气氮的来源[3] [6] [28]。已有研究表明, 以交通(-1.8% ~ 3.9%)和工业(6% ~ 13%)源 NO_x 排放为主的地区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏正, 以农业(-5% ~ 0%)、人畜排泄物(-15% ~ -4%)及生活污水源(-15.2% ~ -8.9%) NH_x 释放为主的地区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏负[28] [29] [30]。本研究中树附生苔藓植物 $\delta^{15}\text{N}$ 主要集中在 -10% ~ -2% (表 1), 且校园周围并没有明显的农业耕作活动, 反映了福建农林大学校园大气氮主要来源于人畜排泄物氨和生活污水氨的释放。李爱萍等[31]对福建省不同地区大气沉降研究中指出福州大气湿沉降以无机氮沉降为主, 且铵态氮(NH_4^+-N)较多。大气铵(NH_x)主要来源于人畜排泄物、生活污水、农业化肥铵的挥发[3]。这就表明树附生苔藓植物 $\delta^{15}\text{N}$ 可以用于指示大气氮沉降形式。另外, 本研究发现虽然不同功能区树附生苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 均为负值(-8.06% ~ -5.21%), 但景观区和教学区苔藓 $\delta^{15}\text{N}$ 值与主干道的非常相近, 比生活区更加富集 ^{15}N (图 1(B)), 这有可能反映出相比于生活区, 景观区和教学区苔藓受到汽车尾气排放氮的影响较大。这是因为景观区和教学区离主干道相对较近, 而且我们在主干道路口监测到校园每天平均机动车车流量能达到 150 辆/小时。这也间接指出如果长期不控制进入校园内机动车数量, 校园大气氮源极有可能由 NH_x 向 NO_x 转化, 树附生苔藓植物将会强烈受到汽车尾气排放氮的影响, 甚至有可能影响苔藓植物的生长。

5. 结论

本研究表明福建农林大学树附生苔藓植物氮含量变化为 1.43%~3.99%，不同功能区氮污染程度存在一定差异。树附生苔藓平均氮同位素值总体偏负(-10‰~-2‰)，表明校园大气氮沉降源主要是人畜排泄物和生活污水中氨的释放，但不应忽视汽车尾气氮排放的贡献。

基金项目

福建农林大学校级大学生创新创业训练计划项目(201710389175)。

参考文献

- [1] Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., *et al.* (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science*, **320**, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- [2] Liu, X.J., Zhang, Y., Han, W.X., *et al.* (2013) Enhanced Nitrogen Deposition over China. *Nature*, **494**, 459-462. <https://doi.org/10.1038/nature11917>
- [3] 谢志英, 肖化云, 朱仁果, 等. 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[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 943-948.
- [4] Liu, X.Y., Xiao, H.Y., Liu, C.Q., *et al.* (2007) $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of Moss for Indicating Growing Environment Variation and Canopy Retention on Atmospheric Nitrogen Deposition. *Atmospheric Environment*, **41**, 4897-4907. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.004>
- [5] Xiao, H.Y., Tang, C.G., Xiao, H.W., *et al.* (2010) Stable Sulphur and Nitrogen Isotopes of the Moss (*Haplocladium microphyllum*) at Urban, Rural and Forested Sites. *Atmospheric Environment*, **44**, 4312-4317. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.023>
- [6] Liu, X.Y., Xiao, H.Y., Liu, C.Q., *et al.* (2008) Stable Carbon and Nitrogen Isotopes of the Moss *Haplocladium microphyllum* in an Urban and a Background Area (SW China): The Role of Environmental Conditions and Atmospheric Nitrogen Deposition. *Atmospheric Environment*, **42**, 5413-5423. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.038>
- [7] 罗笠, 肖化云. 用苔藓氮含量和氮同位素值指示庐山大气氮沉降[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 512-515.
- [8] Pitcairn, C.E., Fowler, D., Leith, D., *et al.* (2003) Bioindicators of Enhanced Nitrogen Deposition. *Environmental Pollution*, **126**, 353-361. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00248-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00248-3)
- [9] Solga, A., Burkhardt, J., Zechmeister, H.G., *et al.* (2005) 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. *Environmental Pollution*, **134**, 465-473. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.09.008>
- [10] Chen, Z.L., Huang, T., Fan, R., *et al.* (2020) Atmospheric Nitrogen Deposition in Yangtze River Delta: Insights Gained from the Nitrogen Content and Isotopic Composition of the Moss *Haplocladium microphyllum*. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **13**, 202-209. <https://doi.org/10.1080/16742834.2019.1688629>
- [11] Limpens, J., Granath, G., Gunnarsson, U., *et al.* (2011) Climatic Modifiers of the Response to Nitrogen Deposition in Peat-Forming Sphagnum Mosses: A Meta-Analysis. *New Phytologist*, **191**, 496-507. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03680.x>
- [12] Xian, M.S., Liang, S., Wen, Y.L., *et al.* (2017) Epiphytic Bryophytes as Bio-Indicators of Atmospheric Nitrogen Deposition in a Subtropical Montane Cloud Forest: Response Patterns, Mechanism, and Critical Load. *Environmental Pollution*, **229**, 932-941. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.077>
- [13] Du, E.Z., Liu, X.Y. and Fang, J.Y. (2014) Effects of Nitrogen Additions on Biomass, Stoichiometry and Nutrient Pools of Moss *Rhytidium rugosum* in a Boreal Forest in Northeast China. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, **188**, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.011>
- [14] 李琦, 籍霞, 王恩辉, 等. 苔藓植物对青岛市大气重金属污染的生物监测作用[J]. 植物学报, 2014, 49(5): 569-577.
- [15] 崔明昆. 附生苔藓植物对城市大气环境的生态监测[J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 2001, 21(3): 54-57.
- [16] 徐晟翀, 曹同, 于晶, 等. 上海市树附生苔藓植物分布格局研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(5): 1053-1058.
- [17] 官飞荣, 茹雅璐, 胡忠健, 等. 杭州市树附生苔藓植物的附生专一性[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 61-66.
- [18] 盛威, 莫亚鹰, 胡忠健, 等. 杭州市树附生苔藓植物分布特征及其与环境的关系[J]. 浙江大学学报(农业与生命

- 科学版), 2018, 44(6): 711-721.
- [19] 赵德先, 王成, 孙振凯, 等. 树附生苔藓植物多样性及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(8): 2523-2532.
- [20] 刘宁. 大学园区对城市发展的影响研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [21] 陈勤, 方炎明. 苔藓植物对大气生态环境作用的研究进展[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(6): 115-120.
- [22] 夏青, 辛桂亮, 吴仁焯, 等. 福建农林大学金山校区植物群落多样性分析[J]. 福建林业科技, 2013, 41(3): 69-75.
- [23] 傅伟聪, 陈梓茹, 朱志鹏, 等. 福州城郊不同游憩空间大气颗粒物浓度的变化规律——以福建农林大学校园为例[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2016, 45(4): 458-464.
- [24] 叶宝鉴, 兰思仁, 李明河, 等. 福建农林大学校园植物区系特征[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2013, 42(1): 51-56.
- [25] 刘圣晶. 高校植物园规划研究——以福建农林大学植物园为例[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [26] 刘学炎, 肖化云, 刘丛强, 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.
- [27] Pitcaim, C.E., Folwer, D. and Grace, J. (1995) Deposition of Fixed Atmospheric Nitrogen and Foliar Nitrogen Content of Bryophytes and *Calluna vulgaris* (L.) Hull. *Environmental Pollution*, **88**, 193-205. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)91444-P](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)91444-P)
- [28] Gerdol, R., Bragazza, L., Marchesini, R., et al. (2002) Use of Moss (*Tortula muralis* Hedw.) for Monitoring Organic and Inorganic Air Pollution in Urban and Rural Sites in Northern Italy. *Atmospheric Environment*, **36**, 4069-4075. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00298-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00298-4)
- [29] Hicks, W.K., Leith, I.D., Woodin, S.J., et al. (2000) Can the Foliar Nitrogen Concentration of Upland Vegetation Be Used for Predicting Atmospheric Nitrogen Deposition? Evidence from Field Surveys. *Environmental Pollution*, **107**, 367-376. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00166-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00166-9)
- [30] Pearson, J., Wells, D.M., Seller, K.J., et al. (2010) Traffic Exposure Increases Natural ^{15}N and Heavy Metal Concentrations in Mosses. *New Phytologist*, **147**, 317-326. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00702.x>
- [31] 李爱萍, 黄广华, 高人, 等. 福州、建瓯和武夷山大气氮/硫湿沉降特征分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(3): 33-40.