

石生苔藓碳含量和碳同位素对城市地区人为二氧化碳和大气氮沉降变化的响应

刘学炎^{1, 2}, 肖化云¹, 刘丛强¹, 李友谊^{1, 2}, 肖红伟^{1, 2}

(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, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对贵阳市区到农村地区 4 个方向的石生苔藓碳含量和同位素组成进行了分析. 苔藓碳含量(34.47% ~ 52.76%)从市区到农村随距离逐渐降低, 并与氮含量(0.85% ~ 2.97%)存在较好的正相关关系, 表明大气氮沉降对苔藓的碳吸收能力具有促进作用, 市区较高的大气氮输入或铵沉降增强了苔藓的光合作用和固碳能力, 同时使碳同化过程发生较大的¹³C分馏. 苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-30.69‰ ~ -26.96‰)从市区往外逐渐升高, 还与城市人为 CO_2 排放有关, 主要机制在于人为成因的 CO_2 源本身富含¹²C并可能增加市区大气 CO_2 的浓度, 从而导致市区苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负. 此外, 根据苔藓碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 随距离的变化关系判断, 贵阳城市人为来源的 CO_2 对植物的影响主要集中在 20 km 范围内. 本研究重点探讨了控制苔藓碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的因素及其与氮素的相互关系, 揭示了苔藓碳和 $\delta^{13}\text{C}$ 响应城市 CO_2 排放和大气氮沉降变化的规律, 为城市大气污染的防治和周边生态系统的保护提供了新的地球化学证据.

关键词:苔藓; 碳同位素; 大气氮沉降; 二氧化碳; 贵阳

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0023-06

Responses of Tissue Carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in Epilithic Mosses to the Variations of Anthropogenic CO_2 and Atmospheric Nitrogen Deposition in City Area

LIU Xue-yan^{1, 2}, XIAO Hua-yun¹, LIU Cong-qiang¹, LI You-yi^{1, 2}, XIAO Hong-wei^{1, 2}

(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: We investigated the carbon (C) and nitrogen (N) concentrations and isotopic signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) in epilithic mosses collected from urban sites to rural sites along four directions at Guiyang area. Mosses C (34.47%–52.76%) decreased significantly with distance from urban to rural area and strongly correlated with tissue N (0.85%–2.97%), showing atmospheric N deposition has positive effect on C assimilation of epilithic mosses, higher atmospheric N/ NH_x deposition at urban area has improved the photosynthesis and C fixation of mosses near urban, which also caused greater ^{13}C discrimination for urban mosses. Mosses $\delta^{13}\text{C}$ signatures (-30.69‰–-26.96‰) got less negative with distance from urban to rural area, which was also related to the anthropogenic CO_2 emissions in the city, and these ^{12}C -enriched CO_2 sources would lead to more negative mosses $\delta^{13}\text{C}$ through enhancing the atmospheric CO_2 concentration in urban area. Moreover, according to the characteristics of mosses C and $\delta^{13}\text{C}$ variations with distance, it is estimated that the influences of urban anthropogenic CO_2 sources on plants was mainly within 20 km from city center. This study mainly focused on the factors regulating tissue C and $\delta^{13}\text{C}$ of mosses in city area and the interaction between C and N in mosses, the responses of mosses C and $\delta^{13}\text{C}$ to urban CO_2 emission and atmospheric N deposition have been revealed, which could provide new geochemical evidences for the control of city atmospheric pollution and the protection of ecosystems around city.

Key words: mosses; carbon isotope; atmospheric nitrogen deposition; carbon dioxide; Guiyang

20 世纪 50 年代以来, 寻找可靠实用的方法来指示环境变化成为环境生态领域关注的热门课题, 随后开展了大量大气污染的植物指示研究. 1968 年, 在荷兰召开第一届关于大气污染对动植物影响的欧洲会议, 苔藓植物因其特殊的形态结构和生物学特性而被确定为指示环境变化和大气污染较为可靠的植物群体. 20 世纪 80 年代以后, 大量研究集中利用苔藓的生理生态特征和体内污染物含量来监测环境污染和大气沉降的高低^[1]. 近几年, 人们又进一步发现苔藓稳定同位素能够可靠地示踪大气物源和

反映影响苔藓吸收大气物质的环境因素^[2], 其主要原因在于不同来源的大气物质具有不同的稳定同位素组成, 并在不同的环境条件下表现出不同的同位素效应^[3]. 植物碳同位素技术是判断植物活力与环境胁迫状况的重要指标, 在揭示植物碳动态的机制中发挥着重要作用^[4], 具有相同光合途径的同种植

收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-03-24

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

作者简介: 刘学炎(1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学和同位素生态学, E-mail: liuxueyan@vip.sklge.cn

物碳同位素主要受碳源以及其它环境因素(如温度、水分、光照强度、大气 CO₂ 状况等)的控制^[5,6],而氮同位素是追踪植物氮源、氮素利用状况和生态系统氮周转的可靠工具^[6,7].由于碳氮元素在生物生长发育过程中的重要性和密切联系,碳氮同位素通常被认为是生物学上非常重要的同位素对,通过植物碳氮元素或同位素之间的关系可以揭示控制植物生长与营养获得的生态环境信息,理解植物氮素利用与固碳能力之间的联系等^[8,9].

目前,大气氮沉降的增加已经引起了全球科学家与政治家的关注^[10],其中理解大气氮沉降对植物 CO₂ 固定的影响及其生态环境效应已经成为一个研究热点.部分研究报道大气氮沉降的增加会提高植被的固碳能力(施肥效应)^[11],同时也有观点认为大气氮沉降增加会造成生态系统酸化等破坏,进而影响植被固碳能力^[12,13].石生苔藓是一类非常特殊的附生植物类群,由于其生长基质不能提供水分和氮营养物质,该类植物具有基本一致的岩面生活环境和专一的氮素来源(大气氮沉降).因而,该类植物对大气氮输入变化的反应非常敏感,是研究大气氮沉降生物生态效应的优势植物种群.

本研究首次系统地对我国城市地区(贵阳)石生苔藓的碳氮含量及其同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)进行了分析,目的在于通过不同环境和氮沉降梯度下苔藓碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间变化特征以及碳氮元素和同位素之间的相互关系,讨论影响苔藓碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的因素与机制,揭示苔藓碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 对城市大气环境和大气氮沉降变化的响应规律,深化苔藓稳定同位素方法在环境科学研究中的应用.

1 材料与方法

1.1 研究区与样品描述

研究区概况及样品采集参见文献^[14]中关于石生苔藓氮含量和氮同位素指示贵阳地区大气氮沉降空间变化和来源介绍.

1.2 元素分析与同位素测定

苔藓碳氮含量(以干重 DW 计,%)采用元素分析仪(型号为 PE2400II, USA)测定,测量误差为 $\pm 0.1\%$.碳同位素分析采用石英管(样品 + CuO 丝)真空封装燃烧然后经液氮纯化的方法.氮同位素先称取适量样品(20 ~ 30 mg)、2 ~ 3 g CuO 丝和 1 ~ 2 g 线状精 Cu 于石英管中,抽高真空然后焊封,于 850℃ 下燃烧 4 h 后在真空系统上纯化,然后用质谱(型号为 Finigan MAT 252)测定.碳氮同位素测定数

据分别采用 IAEA-C₃(纤维素, $\delta^{13}\text{C} = -24.91\text{‰}$)标准和日本硝酸钾(MOR2386-01, $\delta^{15}\text{N} = 1.92\text{‰}$)标准校正,碳同位素和氮同位素测定误差分别为 $\pm 0.1\text{‰}$ ($n = 5$)和 $\pm 0.2\text{‰}$ ($n = 5$).

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 比值定义为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰ vs V-PDB}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000$$

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

式中 R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 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

贵阳地区石生苔藓碳含量变化范围为 34.47% ~ 52.76%,并从市区往外随距离逐渐降低($y = 9.206e^{-0.042x} + 38.024$)(图 1).市区(0 ~ 5 km)苔藓平均碳含量($45.60\% \pm 3.27\%$)明显比 25 km 以外的农村地区高(表 1).统计结果表明,在 17.18 km 以外的农村地区,苔藓含碳量随距离的变化关系为 $y = 0.0008x + 40.489$ ($r = 0.0028$),苔藓含碳量基本没有变化(图 1),每 5 km 范围内的苔藓平均碳含量在 20 km 以外也没有显著差异(表 1).

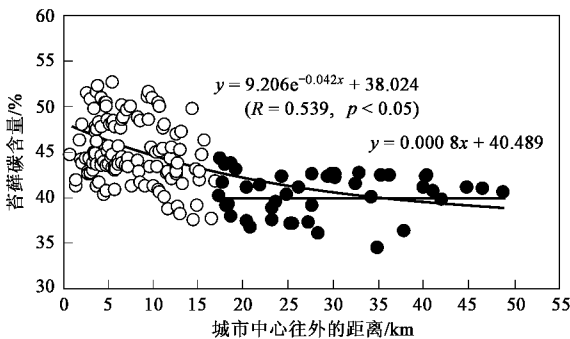


图 1 贵阳市区到农村地区石生苔藓碳含量随距离的变化关系

Fig.1 Variations of tissue C in epilithic mosses with distance from city center at Guiyang area

苔藓碳同位素的变化范围为 -30.69‰ ~ -26.42‰ ,从市区到农村地区随距离对数升高,总体变化为 $y = 0.674\ln x - 30.03$ (图 2).和碳含量平均值变化相似,在 20 km 以外的农村地区,每 5 km 范围内苔藓碳同位素平均值不存在显著差异,且明显低于市区平均值($29.27\text{‰} \pm 0.82\text{‰}$, 0 ~ 5 km)(表 1).

3 讨论

3.1 苔藓碳含量

表1 贵阳地区从市中心往外每5 km 范围内石生苔藓碳含量和碳同位素平均值¹⁾

Table 1 Average tissue C and $\delta^{13}\text{C}$ in epilithic mosses within every 5 km from city center at Guiyang area

距离/km	样品(n)	碳含量/%	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
0~5	48	45.60±3.27 ^a	-29.27±0.82 ^a
5~10	43	45.66±3.78 ^a	-28.65±0.79 ^{ab}
10~15	32	43.61±3.47 ^{ab}	-28.33±0.64 ^{ab}
15~20	17	42.55±3.30 ^{ab}	-28.06±0.77 ^{ab}
20~25	9	39.50±1.97 ^b	-28.07±0.55 ^b
25~30	9	39.52±2.66 ^b	-27.93±0.44 ^b
30~35	6	40.61±3.16 ^b	-27.52±0.36 ^b
35~40	4	40.66±2.89 ^b	-27.27±0.68 ^b
40~45	4	41.34±1.25 ^b	-27.52±0.43 ^b
45~50	3	40.95±0.29 ^b	-27.61±0.39 ^b

1) 相同字母代表组间平均值差异不显著,显著水平为 0.05

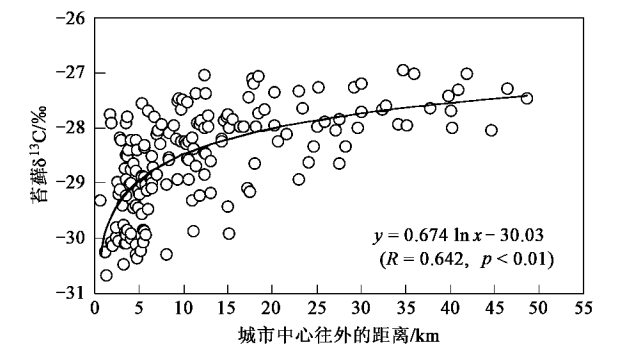


图2 贵阳市区到农村地区石生苔藓碳同位素组成随距离的变化关系

Fig.2 Variation of $\delta^{13}\text{C}$ in epilithic mosses with distance from city center at Guiyang area

碳含量是直接反映植物光合固碳能力的重要参数,同种苔藓植物碳含量的差异主要反映环境条件对其固碳能力的影响^[6].由于所有石生苔藓均生长于开阔的裸岩表面,具有基本一致的基质条件和光照条件,且整个采样区内的年平均温度、湿度、降雨量等基本没有差异.因此,对于依靠大气物质生长的苔藓植物,其碳含量的差异主要与大气污染的程度和大气营养供给状况有关,这也是石生苔藓碳含量具有环境指示潜能的主要原因.

目前对城市地区苔藓碳含量的研究非常少,只有 Vingiani 等^[15]采用苔藓袋方法对意大利 Naples 城区较高的人为碳排放和大气氮输入进行了指示,认为在城市大气污染胁迫下(如 SO_2 污染),苔藓光合作用会受到不同程度的抑制,碳含量会稍微降低($<2\%$).然而,从贵阳农村地区向市区靠近,石生苔藓碳含量反而逐渐升高(图 1),反映贵阳石生苔藓

的生长和 CO_2 吸收并没有受到城市大气污染的影响.这可能由于贵阳地区石生苔藓的碱性基质(主要为石灰岩)有助于增高苔藓细胞内的 pH 值,稀释或中和酸性污染物的毒害作用,从而增强对城市污染环境的适应能力和忍受能力^[16].贵阳地区苔藓平均碳含量(市区为 $45.60\% \pm 3.27\%$,农村不低于 $39.50\% \pm 1.97\%$)远远高于相对清洁的地区(如贡嘎山为 $38.2\% \sim 38.9\%$ ^[17]、川西峡谷区为 $35.42\% \pm 0.22\% \sim 37.44\% \pm 0.21\%$ ^[18]).

由于着生于氮素营养非常贫乏的基质上,石生苔藓只能依靠吸收大气氮源来维持生命活动.从图 3 可以看出,苔藓碳氮含量之间具有较好的正相关关系.由于苔藓氮含量的变化指示了贵阳地区大气氮沉降从市区往外逐渐降低的规律^[14],因此,贵阳地区石生苔藓碳氮含量的相关性表明苔藓碳含量随大气氮沉降的升高而升高,大气氮沉降对石生苔藓植物的固碳能力具有正面积效应的效应.在大气氮沉降较高的市区,苔藓组织碳氮含量均较高,而农村地区苔藓碳含量明显比市区低(图 1),原因在于较高的大气氮素供给满足了苔藓生长的氮营养需求,提高了苔藓的光合作用和生理活性,促进苔藓体内叶绿素、蛋白质、核酸等的合成.该结论与过去对苔藓新老组织以及其它高等植物碳氮含量的变化机制相似^[8,19],潘庆民等^[20]对羊草(*Leymus chinensis*)进行氮添加实验也发现氮素增加会导致植物组织碳水化合物含量明显上升.

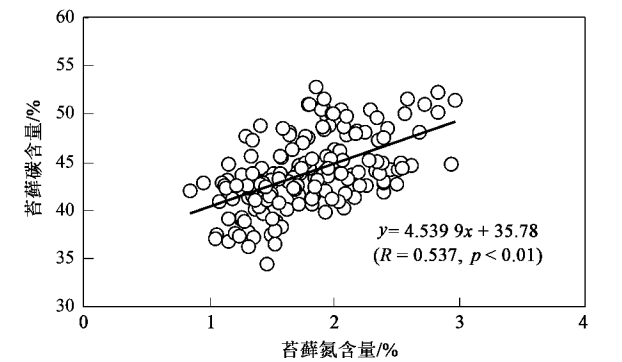


图3 贵阳地区石生苔藓碳氮含量之间的相关性

Fig.3 Correlation between tissue C and tissue N in epilithic mosses at Guiyang area

此外,由于市区人类活动排放 CO_2 十分明显,较高的苔藓碳含量可能还与城市地区大气 CO_2 浓度较高有关,因为在较高的大气 CO_2 浓度和氮营养条件下,叶片光合速率会升高,植物体内碳水化合物(如淀粉、多糖等)会明显增加^[21].

3.2 苔藓碳同位素

尽管植物碳同位素的影响因素具有多解性^[22],但是石生苔藓碳同位素组成能够消除或控制许多因素的干扰,因此,在响应特定环境因子方面非常有优势.首先,本研究中的苔藓样品具有相同的种类组成,因此可以排除生理遗传因素不同产生的碳同位素差异.此外,所有样品均处于开阔地的裸岩表面,具有一致的光照条件和生长基质(水分条件),整个研究区内部的年均降雨量、湿度、温度基本没有差异,采样点的海拔变化($1\,169.6\text{ m} \pm 78.3\text{ m}$)可能引起的碳同位素差异也非常小(有研究报道为 $1.1 \sim 1.37\text{‰/km}^{[23]}$).因此,贵阳市区到农村地区石生苔藓碳同位素组成的差异主要与大气 CO_2 和氮沉降的变化有关.

3.2.1 城市 CO_2 排放对石生苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响

过去的研究表明植物碳同位素组成能够响应大气 CO_2 浓度和来源的变化,原因是较高的大气 CO_2 浓度和较负的碳源均会导致植物碳同位素偏负^[24,25].贵阳市区苔藓碳同位素明显偏负($29.27\text{‰} \pm 0.82\text{‰}$, $0 \sim 5\text{ km}$),并从市区到农村地区随距离逐渐升高(图 2),主要原因在于市区存在较高的人为 CO_2 排放,其影响机制分 2 个方面.

第一,城市人为 CO_2 排放造成大气 CO_2 浓度从市区往外逐渐降低(例如北京市区较农村地区高出 $53\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[26]).由于植物碳同位素与大气 CO_2 浓度呈负相关关系^[4,24],因此,从贵阳市区往外苔藓碳同位素逐渐升高. Polley 等^[27]的研究也表明许多农作物(小麦、燕麦、玉米、芥菜等)的碳同位素随大气 CO_2 浓度增加而降低. Fletcher 等^[28]最近报道了苔类植物光合作用的碳同位素分馏随大气 CO_2 浓度的升高而增大,导致植物碳同位素偏负. O'leary^[29]认为在较低的大气 CO_2 浓度下,植物碳同位素偏高的原因在于光合作用过程中植物细胞来不及分馏重碳同位素.

第二,城市人为来源的 CO_2 主要源于化石燃料燃烧,这些碳源的同位素组成远远低于自然大气 CO_2 的碳同位素组成(约为 -7.8‰). Farquhar 等^[4]报道了煤炭燃烧产生的 CO_2 碳同位素值约为 -22.4‰ ,石油天然气为 $-28\text{‰} \sim -32\text{‰}$. Widory 等^[30]最近报道了巴黎市区各种人为来源 CO_2 的碳同位素变化范围为 $-40.5\text{‰} \sim -24.6\text{‰}$,其变化取决于化石燃料的燃烧方式和燃烧过程的差异,甚至人为呼吸的 CO_2 碳同位素组成平均值为 $-24.5\text{‰} \pm$

0.5‰ .如图 1 所示,苔藓碳含量随距离逐渐降低,但在 17.18 km 以外的地区,苔藓碳含量随距离变化的梯度趋近于 0($y = -0.0008x + 40.489$),苔藓碳含量和碳同位素平均值在离市中心 20 km 以外的地区已经不存在明显差异(表 1),这些信息表明贵阳市人为来源的 CO_2 排放对周边植物的影响主要发生在 20 km 以内.因此,贵阳地区石生苔藓碳含量和碳同位素的变化能够直观地反映城市人为 CO_2 排放对城市植被的影响,贵阳地区城乡苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 存在差异的主要原因在于市区富 ^{12}C 的人为 CO_2 排放增加了大气 CO_2 浓度等机制.

3.2.2 石生苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 对大气氮输入变化的响应

植物碳同位素能够响应大气氮沉降的主要原理在于氮素营养状况会直接影响植物光合作用以及碳代谢的很多指标.对完全依靠大气氮素营养生长的石生苔藓而言,其碳同位素组成对理解大气氮沉降的生物效应以及碳氮代谢的相互关系有更特殊的意义.

从贵阳市区到农村地区,大气氮沉降逐渐降低^[14],而苔藓碳同位素与碳氮含量呈负相关关系(图 4),说明大气氮沉降升高将导致苔藓碳同位素偏负.其主要机制在于氮素供给在植物光合作用过程中对碳同化反应(暗反应)的影响非常明显甚至成为限制因子,氮的高低直接影响光合作用羧化酶(主要为 Rubisco)以及叶绿素的含量,较高的氮输入促进石生苔藓的光合作用和固碳能力,增加了植物对大气 $^{12}\text{CO}_2$ 的吸收,从而导致光合产物和植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏低^[31].因而,石生苔藓碳同位素能够响应大气氮沉降的变化,随大气氮沉降增加,苔藓会表现出更负的碳同位素信号^[6].

此外,贵阳市区大气氮沉降以铵沉降为主,较高的铵沉降造成市区苔藓氮同位素明显偏负^[14].如图 5 所示,苔藓碳同位素和氮同位素之间也存在正相关关系,表明控制苔藓氮同位素的主要因素也可能对其碳同位素产生相似的影响. Liu 等^[2]发现不同生长条件下苔藓的碳氮同位素存在正相关关系,反映了苔藓氮吸收($\delta^{15}\text{N}$)和光合作用($\delta^{13}\text{C}$)之间存在重要联系.因此,较高的大气铵输入也可能提高市区苔藓光合作用和固碳能力,使苔藓碳同位素偏负. Nadelhoffer 等^[32]认为较高的大气铵输入会增加森林植被对 CO_2 的固定. van Hove 等^[33]用气室法对白杨(*Populus euramericana*)进行了研究,表明较高的大气氮浓度($64\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)会使叶片 CO_2 的同化速率、气孔

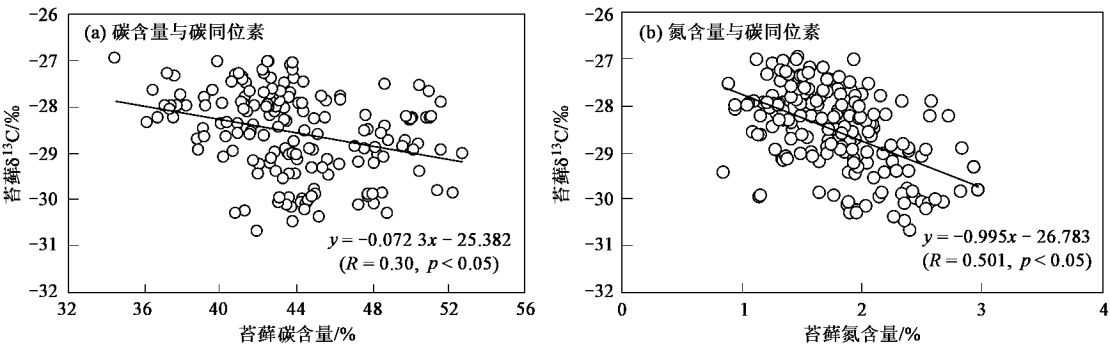


图 4 石生苔藓碳含量与碳同位素、氮含量和碳同位素之间的相关性

Fig. 4 Correlation between tissue C and $\delta^{13}\text{C}$, tissue N and $\delta^{13}\text{C}$ in epilithic mosses

导度和对 NH_3 的吸收增加. van der Eerden 等^[34]发现植物叶片对 NH_3 的吸收能增加酶活性, 诱导气孔开放, 光合作用增强, 促进对大气 NH_3 和 CO_2 的吸收. 这些机制和大气氮沉降相似, 会使贵阳市区苔藓在吸收 CO_2 的过程中发生较大的碳同位素分馏, 从而导致市区碳同位素偏负.

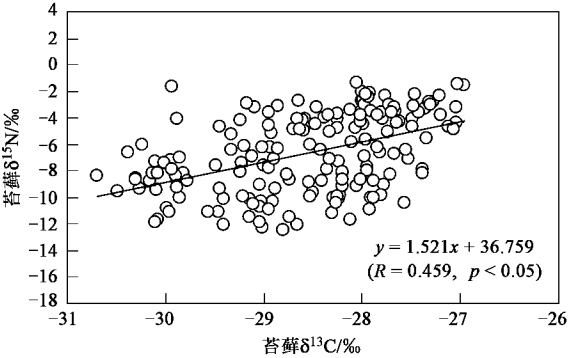


图 5 贵阳地区石生苔藓碳氮同位素之间的相关性

Fig. 5 Correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in epilithic mosses at Guiyang area

4 结论

(1)从贵阳市区到农村地区, 石生苔藓碳含量随距离逐渐降低并与氮含量存在较好的正相关关系, 表明市区石生苔藓对碳的吸收(光合能力)并没有受到城市污染的影响, 较高的大气氮沉降反而促进了该类依靠大气氮生长的植物的固碳能力. 此外, 城市人为 CO_2 排放使市区具有较高的大气 CO_2 浓度, 从而增强苔藓光合作用和碳同化, 这也是形成市区苔藓含碳量较高的原因之一.

(2)苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 从市区往外随距离逐渐升高, 其原因在于城市人为来源的 CO_2 本身 $\delta^{13}\text{C}$ 值较负, 以及

这些碳源会增加市区大气 CO_2 浓度, 从而导致市区苔藓 $\delta^{13}\text{C}$ 比农村地区偏负. 此外, 苔藓碳氮含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的相关性表明市区较高的大气氮沉降或铵沉降也可能通过增强苔藓光合作用和碳代谢, 使光合固碳过程中发生更大的同位素分馏.

(3)贵阳石生苔藓平均碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值随距离的变化关系表明, 贵阳城市人为 CO_2 排放和大气氮沉降的影响主要集中在 20 km 以内的地区, 在 20 km 以外的地区明显减少. 本研究显示苔藓生物指示功能和碳同位素结合是研究城市地区环境条件变化的新方法, 碳氮同位素之间良好的相关性进一步反映了苔藓氮素利用和光合固碳等过程的重要联系, 苔藓碳同位素可以作为响应大气氮沉降变化的证据.

致谢: 诚挚感谢河北师范大学生命科学学院李琳博士对本研究样品鉴定等方面给予的建议和帮助.

参考文献:

[1] Press M C, Woodin S J, Lee J A. The potential importance of an increased atmospheric nitrogen supply to the growth of ombrotrophic *Sphagnum* species [J]. New Phytologist, 1986, 103: 45-55.

[2] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q, et al. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of moss (*Haplcladium microphyllum* (Hedw.) Broth) for indicating environment variations and canopy retention on atmospheric nitrogen deposition [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(23): 4897-4907.

[3] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 507-559.

[4] Farquhar G D, O' Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9: 121-137.

[5] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1989, 40: 503-537.

- [6] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q *et al.* 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[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(21): 5413-5423.
- [7] 刘学炎,肖化云,刘丛强,等. 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.
- [8] 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.
- [9] Robinson D, Handley L L, Scrimgeour C M, *et al.* Using stable isotope natural abundances ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) to integrate the stress responses of wild barley (*Hordeum spontaneum* C. Koch.) genotypes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, **51**: 41-50.
- [10] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**: 737-750.
- [11] Jenkinson D S, Goulding K, Powlson D S. Nitrogen deposition and sequestration[J]. *Nature*, 1999, **400**: 630.
- [12] Ollinger S V, Aber J D. The interactive effects of land use, carbon dioxide, ozone, and N deposition[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 545-562.
- [13] Holland E A, Braswell B H, Sulzman J, *et al.* Nitrogen deposition onto the United States and Western Europe: Synthesis of observations and models[J]. *Ecological Applications*, 2005, **15**(1): 38-57.
- [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] Vingiani S, Adamo P, Giordano S. Sulphur, nitrogen and carbon content of *Sphagnum capillifolium* and *Pseudevernia furfuracea* exposed in bags in the Naples urban area[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129**: 145-158.
- [16] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 102-143.
- [17] 程根伟,罗辑. 贡嘎山崖高山林地碳的积累与耗散特征[J]. *地理学报*, 2003, **58**(2): 179-185.
- [18] 包维楷,雷波,冷俐. 六种人工针叶林下地表苔藓植物生物量与碳贮量关系[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(10): 1817-1821.
- [19] 克热木·伊力,新居直佑. 不同氮素施用量对葡萄叶、枝、根碳水化合物含量的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2001, **24**(1): 64-68.
- [20] 潘庆民,白永飞,韩兴国,等. 羊草根茎的贮藏碳水化合物及对氮素添加的响应[J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(1): 53-58.
- [21] Finn G A, Brun W A. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on growth, nonstructural carbohydrate content and root nodule activity in soybean[J]. *Plant Physiology*, 1982, **69**: 327-331.
- [22] 王国安,韩家懋. C_3 植物碳同位素在旱季和雨季中的变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, **21**(4): 43-47.
- [23] Körner C, Farquhar G D, Roksandic Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude[J]. *Oecologia*, 1988, **74**: 623-632.
- [24] Körner C H, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends[J]. *Oecologia*, 1991, **88**(1): 30-40.
- [25] Ménot G, Burns S J. Carbon isotopes in ombrogenic peat bog plants as climatic indicators: calibration from an altitudinal transect in Switzerland[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, **32**: 233-245.
- [26] 蒋高明,黄银晓,韩兴国. 城市与山地森林地区夏秋季大气 CO_2 浓度变化初探[J]. *环境科学学报*, 1998, **18**(1): 108-111.
- [27] Polley H W, Johnson H B, Marino B D, *et al.* Increase in C_3 plant water-use efficiency and biomass over glacial to present CO_2 concentrations[J]. *Nature*, 1993, **361**: 61-63.
- [28] Fletcher B J, Brentnall S J, Quick W P, *et al.* BRYOCARB: A process-based model of thallose liverwort carbon isotope fractionation in response to CO_2 , O_2 , light and temperature[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**: 5676-5691.
- [29] O'leary M H. Carbon isotope fractionation in plants[J]. *Phytochemistry*, 1981, **20**(4): 553-567.
- [30] Widory D, Javoy M. The carbon isotope composition of atmospheric CO_2 in Paris[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **215**: 289-298.
- [31] Israeli Y, Schwartz A, Plaut Z, *et al.* Effects of light regime a $\delta^{13}\text{C}$, photosynthesis and yield of field-grown banana (*Musa* sp., *Musaceae*) [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1996, **19**: 225-230.
- [32] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, *et al.* Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests[J]. *Nature*, 1999, **398**: 145-148.
- [33] van Hove L W A, van Kooten O, van Wijk K J, *et al.* Physiological effects of long term exposure to low concentrations of SO_2 and NH_3 on poplar leaves[J]. *Physiologia Plantarum*, 1991, **82**(1): 32-40.
- [34] van der Eerden L J M, Pérez-Soba M G F J. Physiological responses of *Pinus sylvestris* to atmospheric ammonia[J]. *Trees*, 1992, **6**(1): 48-53.