

法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究

王燕丽^{1,2}, 肖化云^{1*}, 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: 通过对贵阳市法国梧桐叶片为期1 a的监测(2009-03~2010-04), 分析其叶片氮含量及氮同位素组成随季节变化的规律, 并与同期湿沉降监测结果进行对比, 探讨维管束植物叶片响应大气湿沉降氮的可能性。结果表明, 法国梧桐叶片N%变化范围为1.48%~5.27%, 均值为3.36%, 根际土TN%为0.29%, 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为4.48‰~8.39‰, 均值为6.38‰。叶片N%与 $\delta^{15}\text{N}$ 具有较好的相关性, 随时间变化皆呈现春夏较高、秋季降低的趋势, 冬季落叶, 无监测数据。结合该采样点同期雨水监测数据, 发现叶片N%与雨水中DIN浓度(0.57~6.74 mg·L⁻¹)、叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与雨水 $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+-\text{N}$ 呈现一致的变化规律, 表明湿沉降氮是叶片吸收氮的一个重要来源, 法国梧桐叶片指示大气N沉降量的变化成为可能。研究还发现法国梧桐叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 比其吸收氮的2个主要端元(根际土 $\delta^{15}\text{TN}$: 3.19‰±1.04‰, 雨水 $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$: -19.76‰~-10.41‰)都偏正, 表明法国梧桐在吸收氮的过程中存在着较大的同位素分馏。

关键词: 法国梧桐; 湿沉降氮; 叶片组织氮含量; 叶片氮同位素

中图分类号: X142; X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1080-06

Platanus orientalis Foliar N% and $\delta^{15}\text{N}$ Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area

WANG Yan-li^{1,2}, XIAO Hua-yun¹, XIAO Hong-wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Leaves of *Platanus orientalis* were collected since Mar. 2009 till Apr. 2010, in an urban area at Guiyang. After mass of experiments and analysis, we carried out constructing the temporal variation of foliar N% and $\delta^{15}\text{N}$: both higher in Spring/Summer, lower in Autumn, no data of Winter because of leaf abscission. Results showed that foliar N% varied from 1.48% to 5.27%, with an annual average of 3.36%, while the average concentration of total N in rhizospheric soil was 0.29%. The foliar N% rose and fell relative to DIN in rainwater (range from 0.57 mg·L⁻¹ to 6.74 mg·L⁻¹), indicating that the N% content in foliar tissue of plant was approximately proportional to atmospheric N inputs. The range of foliar $\delta^{15}\text{N}$ were from 4.48‰ to 8.39‰, with the average of 6.33‰, much higher than the $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ of rain water (-19.76‰~-10.41‰) and $\delta^{15}\text{TN}$ of rhizospheric soil (3.19‰±1.04‰). Besides, a good uniform correlation between foliar $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ of rain water were found. As synthesis of two main N sources, the more positive $\delta^{15}\text{N}$ values of *Platanus orientalis* can be explained by isotopic fractionation during N uptake and basipetal translocation. These responses of both foliar N% and $\delta^{15}\text{N}$ to atmospheric nitrogen deposition, revealed the potential value in using vascular leaves as bio-monitors for assessment of N deposition, furthermore, for prevention and control of air pollution in urban ecosystem.

Key words: *Platanus orientalis*; wet deposition nitrogen; foliar N%; foliar $\delta^{15}\text{N}$

大气中氮的来源可以分为自然源和人为源, 在森林等自然体系中以自然源为主, 而城市大气氮则以人为源为主, 比如交通运输、工业生产等活动中化石燃料燃烧产生的NO_x, 农业活动、废水和人类排泄物释放的NH₃等^[1,2]。不同来源氮的同位素组成存在显著差异, 应用氮同位素可以辨识不同的大气氮源^[3]。由于工农业的快速发展, 过量的含氮化合物向大气迁移, 大气氮循环受人类干扰而失衡, 是导致酸沉降的主要因素之一^[4]。大气中的氮通过沉降输入地表生态系统, 从而影响其结构、功能和演化^[5,6]。

关于大气氮沉降, 国内外已从多方面开展研究。在物理监测方面, 有对雨水、气溶胶的分析及同位素组成的测定^[7-10]。在生物监测方面, Press等^[11]早在1986年就已开展过关于氮沉降量增多对影响苔藓生长的研究。苔藓氮同位素也被应用于示踪城市大气氮源, 并被证实为指示大气氮沉降的可靠工具^[12-14]。关于响应的研究还相对较少, 主要集中在

收稿日期: 2011-06-13; 修订日期: 2011-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40573006, 40721002)

作者简介: 王燕丽(1986~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境同位素地球化学, E-mail: wangyanlingok@163.com

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

应用松针、樟树等指示氮沉降和氮源^[15~17]。研究高等植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 对大气氮沉降的响应,还可帮助认识植物对大气氮的吸收机制,理解大气-植被系统-土壤的氮循环,分析大气氮的生物可利用性及其影响^[18]。

本研究对象为法国梧桐,因其被广泛应用于城市绿化,便于不同区域进行对比分析^[19]。通过对法国梧桐叶片氮含量及稳定氮同位素的分析,探讨其季节变化规律及对大气湿沉降氮的响应,从而指示氮源的变化和污染程度,研究大气湿沉降氮对生态系统的影响,及后者的响应和反馈机制,对于合理制定政策措施以保护生态系统的可持续发展具有重要意义。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

本研究区域为贵阳市,地处西南喀斯特地区,是一个有过严重酸雨污染历史的城市。虽然近年来贵州政府加大治理力度,关闭和转移了一些重型污染工厂,环境质量有所改善^[7,20],但其大气氮沉降水平仍较高,因此,研究贵阳市大气氮沉降对城市生态系统的影响具有重要意义。

贵阳属温暖湿润的亚热带季风气候区^[21],雨量充沛,年均降雨量约1200 mm,夏季常降大雨。贵阳市环境状况公报数据^[22]显示,从2002~2010年,贵阳市大气 NO_2 浓度基本保持稳定,而降水中的 NO_3^- 比80年代降低了数倍,而 NH_4^+ 却有所增加,反映近年来贵阳市燃煤减少而畜牧养殖业等有所增加的情况。

由于特殊的地理位置和敏感的生态环境,前人对于贵阳开展的研究较多,有丰富的基础数据可以进行比对分析,为深入研究以贵阳市为例的城市大气环境提供了很好的条件^[7,23]。如2009年刘学炎等^[24]基于石生苔藓氮含量,估算得贵阳地区大气氮沉降的变化范围为 $0.91 \sim 44.69 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,市区沉降均值为 $(29.21 \pm 6.17) \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。对大气沉降氮源的氮同位素示踪结果表明,市区氮沉降的主要来源是人畜排泄物和城市污水释放^[20]。Liu等^[25]的研究结果还表明,贵阳地区的大气氮沉降以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主,其中铵态氮的贡献约占76%,硝态氮约为23%。

1.2 样品采集和处理

本研究以中国科学院地球化学研究所园区内的一棵法国梧桐为监测对象,所选法国梧桐约为20年

生,树高约18 m。采样时间为2009-03~2010-04,采样频率春季为3次·月⁻¹,其余季节为1次·月⁻¹。按照植物样品采样原则,所选树种近旁无高大建筑或其他树木遮蔽影响,环树干采集等距叶片混合为综合样品^[26]。在所选法国梧桐树下,采集根际土,深度约20~80 cm,不分剖面作混合样品,春、秋各采集1次。本研究中共采集叶片样品45个,土壤样品2个。

叶片样品采集后,先用稀HCl溶液($1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)泡洗以去除表面尘土,去离子水反复清洗,最后用超纯水(Milli-Q)冲洗干净,直至清洗液中检测不出无机氮(NH_4^+ 或 NO_3^-)。将植物叶片于70℃真空干燥箱中烘至恒重,而后用液氮冷冻磨碎,过筛(100目),保存于干净自封袋中备用待测。土壤样品,拣去树根、石粒等杂物后,取其中约5 g新鲜土,用于测定土壤pH值等一些基本理化性质,其余部分风干,粉碎过筛(100目)备用。

1.3 元素分析和同位素测定

样品上机测定前,在70℃重新干燥后,称取约2 mg样品(叶片或土样),用全自动元素分析仪(型号PE2400 II, USA),采用标准物质胱氨酸(N%=11.7%),测定其元素含量,测量误差为 $\pm 0.1\%$ 。

氮同位素值测定,叶片样品使用连续流质谱仪CF-IRMS(IsoPrime JB144)进行测定。由于土样氮含量较低,土样氮同位素值改用质谱(Finigan MAT 252)测定。 $\delta^{15}\text{N}$ 测定数据采用硝酸钾标准物质ST-N1($\delta^{15}\text{N} = -1.89\text{‰}$)、ST-N2($\delta^{15}\text{N} = 21.38\text{‰}$)进行校正,分析测试的标准偏差为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

本研究中所有分析实验,均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 结果与分析

2.1 叶片N%的季节变化

本次研究结果显示,法国梧桐叶片N%变化范围为1.48%~5.27%,均值为3.36%。如图1所示,从3~11月,N%逐渐降低。春季含量较高,其中3月为最高峰值,4月降低,5月有回升;在夏季,6月出现第2个峰值,7、8月稍有回落;进入秋季,9~11月持续降低;在冬季(12月~次年2月),法国梧桐落叶,故没有监测数据。

由图1中可以看出,叶片N%总体表现为春夏高、秋季降低的趋势。结合该采样点同期雨水监测结果作对比分析^[27],由于雨水中 NO_2^- 浓度很低(<10%),本研究以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之和代表雨水DIN。对比发现在3~8月期间,叶片N%与雨水DIN

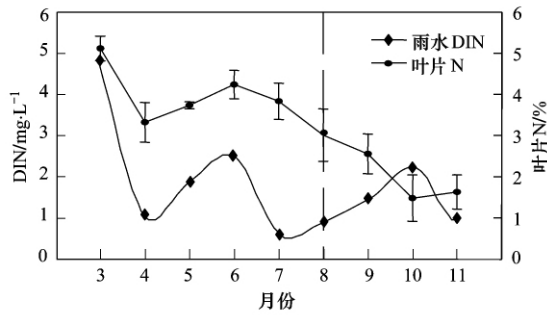


图1 叶片 N%与雨水 DIN 随时间的变化

Fig. 1 Temporal variation of foliar N% and DIN in rainwater

的季节变化同步,而在 8~11 月期间,叶片 N% 未随雨水 DIN 的波动而起伏.将叶片 N% 与湿沉降量 (DIN × 降雨量) 作相关性分析,如图 2 所示, $R = 0.90$, 属高度相关, $P < 0.01$.

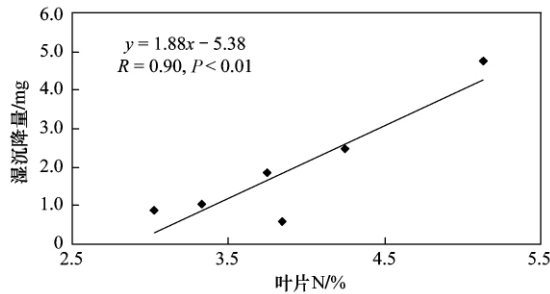
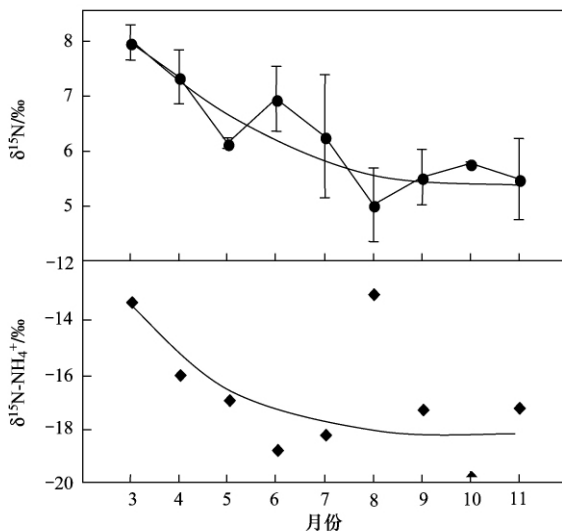


图2 叶片 N%与湿沉降量的相关性分析

Fig. 2 Correlation between foliar N% and wet deposition N

2.2 叶片 $\delta^{15}N$ 的季节变化

如图 3 所示,法国梧桐 $\delta^{15}N$ 变化范围为 4.48‰ ~ 8.39‰,均值为 6.38‰.叶片 $\delta^{15}N$ 的月变化规律表现为 3~8 月持续降低(由 8‰ 左右降低至 5‰ 左



图中 8 月雨水 $\delta^{15}N-NH_4^+$ 异常

图3 法国梧桐叶片 $\delta^{15}N$ 与雨水 $\delta^{15}N-NH_4^+$ 的同位素比较

Fig. 3 Comparison of foliar $\delta^{15}N$ and $\delta^{15}N-NH_4^+$ in rain

右) 8~11 月变化较小.

对比同期雨水中 NH_4^+-N 的同位素组成 ($\delta^{15}N$ 范围: -19.76‰ ~ -10.41‰,均值为 -15.42‰),发现叶片 $\delta^{15}N$ 远比雨水 $\delta^{15}N-NH_4^+$ 偏正,而两者的季节变化规律皆呈现出春季高,夏秋降低的趋势,作相关性分析,如图 4 所示, $R = 0.66$, 属中度相关.

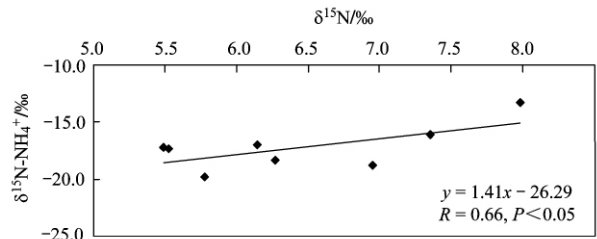


图4 叶片 $\delta^{15}N$ 与雨水 $\delta^{15}N-NH_4^+$ 的相关性分析

Fig. 4 Correlation between foliar $\delta^{15}N$ and $\delta^{15}N-NH_4^+$ of rainwater

本研究中还测定了法国梧桐根际土总氮的同位素组成 ($\delta^{15}TN$ 为 3.19‰ ± 1.04‰),也较叶片 $\delta^{15}N$ 偏负.

2.3 叶片 N% 和 $\delta^{15}N$ 的相关性研究

从图 5 中可以看出,叶片 $\delta^{15}N$ 与 $\ln(N\%)$ 中度线性相关,叶片氮含量越高,结果显示其同位素组成也越偏正,表明叶片吸收 N 过程中存在同位素分馏.

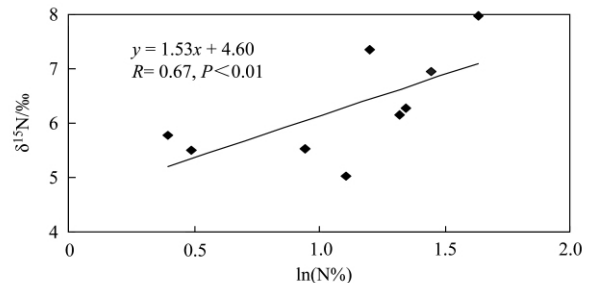


图5 叶片 N%与 $\delta^{15}N$ 的相关性分析

Fig. 5 Correlation between foliar N% and $\delta^{15}N$

3 讨论

3.1 叶片对大气湿沉降氮的响应

利用植物对大气污染的灵敏响应,判断污染物类型及污染程度,是生物监测环境污染的重要方面^[19].苔藓因其特殊的形态结构和生物学性质而被确定为指示大气污染较为可靠的生物物种^[25, 28, 29].在具有详细大气氮沉降数据的地区,已有少数研究者建立了苔藓氮含量和大气氮沉降量之间的定量关系^[14, 30, 31].在欧美,也有学者对比研究了清洁区和污

染区的几个树种^[1, 32], 证明了松针等高等植物叶片能指示大气氮沉降的动态变化, 在国内, Xiao 等^[16]也探讨了樟树叶片对大气氮的响应规律。

前人研究发现, 叶片对氮沉降的主要吸收形式是可溶性无机氮 DIN^[33]. 在本研究中, 也发现法国梧桐叶片 N% 与雨水 DIN 之间有很好的相关性. 如图 1 中所示, 在 8 月处设分界线, 将叶片生长期大致分为 2 个部分: 旺盛期和衰落期. 春夏季 (3 ~ 8 月) 是植物的生长旺盛期, 新生叶片对氮的需求较大, 植物体优先供给新生组织以满足其生长^[34]. 叶片 N% 随大气氮供给情况而波动. 在秋季 (9 ~ 11 月), 叶片生长放缓, 进入衰落期; 在冬季法国梧桐开始落叶, 不再从大气中吸收氮, 而是一直往外运移供给植物体其他组织^[18]. 因而即使雨水 DIN 中氮含量在 10 月有较高的浓度值, 叶片 N% 仍呈降低趋势。

大气中氮的来源可分为自然源和人为源, 自然源主要指: 土壤释放、海水蒸发、植物释放等; 人为源包括化肥生产和使用、人畜排泄物、以及污水释放等^[35]. 不同来源的氮, 具有不同的同位素特征范围^[3]. 本研究中所选城市贵阳, 其大气氮沉降的主要形态是 NH_4^+ 沉降, 来源主要有人畜排泄物 (-15.2‰ ~ -8.9‰) 和城市污水释放 (-15‰ ~ -4‰)^[20, 25], 而 NO_x ($\delta^{15}\text{N}$: -5‰ ~ +5‰) 贡献相对较小. 雨水中的 NH_4^+ 主要来自于被雨水溶解的大气气态 $\text{NH}_3(\text{g})$ 和被雨水捕获的气溶胶中的 NH_4^+ ^[20]. 因此本研究所参考的雨水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 值可以作为反映大气氮沉降同位素特征的参数. 已有前人研究发现落叶树种叶片更倾向于吸收 NH_4^+ ^[34], 这在本研究结果中也有体现, 如图 3 所示, 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 和雨水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 随时间变化的规律基本同步, 在控制相同土壤背景情况下, 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化可看为大气湿沉降氮对植物的贡献, 即叶片对大气湿沉降氮源差异或形态差异的响应。

3.2 叶片吸收大气氮过程中的同位素分馏

表 1 植物叶片与雨水、根际土中 N%、 $\delta^{15}\text{N}$ 的比较

Table 1 N% and $\delta^{15}\text{N}$ of leaves, rain water and rhizospheric soil

项目	N/%		$\delta^{15}\text{N}$	
	均值	范围	均值	范围
苔藓 ^[22]	2.24%	1.58% ~ 2.97%	-8.87‰	-12.50‰ ~ -6.01‰
法国梧桐	3.29%	1.48% ~ 5.27%	6.33‰	4.48‰ ~ 8.39‰
根际土	0.29%		3.19‰	
NH_4^+-N (雨水) ^[23] / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.67	0.48 ~ 6.38	-15.42‰	-19.76‰ ~ -10.41‰
NO_3^--N (雨水) ^[23] / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.16	0.04 ~ 0.37	1.40‰	-8.00‰ ~ 28.70‰

有研究表明, 阔叶树种叶片对氮的滞留比针叶树种大^[39], 本研究所选的法国梧桐, 其叶片较大的

应用植物叶片示踪大气氮沉降已有较长的研究历史, 如苔藓对大气氮沉降的直接指示作用已得到了证实^[11]. 由于土生树种生长所需的氮, 既有来自于大气, 也有来自于土壤, 因此关于土生树木叶片对大气氮沉降的响应能力, 研究相对较少. 已有的少量对针叶树种的研究, 结果证明松针 $\delta^{15}\text{N}$ 可以示踪大气氮源, 也有学者研究取得了一些关于大气氮沉降影响植物氮动态的证据^[1, 5, 16, 36]. 然而不同树种的植物生理生态特性有区别, 它们对不同形态氮的吸收机制, 以及植物体吸收氮后, 组织间的输送转移情况和同化路径都不尽相同, 可能导致分馏情况存在差异^[18].

虽同是非固氮植物, 苔藓仅从大气吸收氮, 且在这个过程中几乎不发生同位素分馏^[12], 而法国梧桐属维管束植物, 根系发达, 它有 2 个主要的氮源: 大气氮沉降和土壤基质氮. 土壤受降雨、降尘等影响导致其同位素组成的变化, 也可归因于大气氮引起的差异, 因此, 与大气中氮的存在形态、沉降方式的多样性相比, 土壤基质氮可作为稳定氮源考虑^[16].

本研究中法国梧桐叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 受 2 个主要氮源的混合作用、氮吸收过程以及氮在植物体内运移过程中的氮同位素分馏作用等因素的影响^[18]. 由表 1 可知, 法国梧桐叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 比 2 个主要端元 (根际土: 3.19‰, 雨水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$: -19.76‰ ~ -10.41‰) 都偏正, 比同一地区苔藓的 $\delta^{15}\text{N}$ (-12.50‰ ~ -6.01‰)^[25] 也偏正. 叶片是维管植物的主要营养器官, 它吸收大气 N, 也接受从根系运移上来的 N, 进行光合作用, 这过程中无机氮以多种方式合成进入有机物, NH_4^+-N 通过酶的固定作用进入生物体, 氧化态的 NO_3^- 和 NO_2^- 首先被还原为 NH_3 , 然后被植物体吸合成有机物^[15]. 植物叶片同化 NH_4^+ 的过程中主要发生动力学分馏, 引起的氮同位素分馏范围为 -27‰ ~ 0‰^[37, 38], 本研究中法国梧桐叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 比根际土偏正约 3‰, 比雨水偏正约 22‰.

表面积及布满的细密绒毛, 都有益于其阻滞大气沉降, 从而使得法国梧桐叶片能够对大气氮沉降响应

更充分.

本研究中叶片 N% 与雨水 DIN、叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 和雨水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 一致的季节变化规律表明,除了落叶的冬季,法国梧桐叶片响应大气湿沉降氮的季节变化是可能的.开展维管束植物叶片氮同位素组成指示大气氮沉降的研究,探讨其季节变化规律及对大气氮沉降的响应,从而指示城市大气氮源的变化和污染程度,定性评价大气氮输入对植物的贡献,为防治城市大气氮污染提供一些生物监测方面的参考资料.

4 结论

(1) 法国梧桐叶片 N% 与雨水 DIN 的季节变化有很好的相关性,总体呈现春夏高、秋季低的变化趋势.表明大气湿沉降氮是法国梧桐叶片吸收氮的一个重要来源,叶片 N% 可以指示区域大气氮沉降水平.

(2) 在土壤基质氮基本稳定的情况下,法国梧桐叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与雨水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ 呈现一致的变化规律,即叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化可看为大气湿沉降氮对植物的贡献,说明叶片对大气湿沉降氮源差异或形态差异能够作出响应

(3) 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 比其吸收氮的 2 个主要端元(根际土: $3.19\% \pm 1.04\%$, 雨水: $-19.76\% \sim -10.41\%$) 都偏正,表明法国梧桐叶片在对氮的吸收、转化、运移过程中存在较大的同位素分馏.

参考文献:

- [1] Jung K, Gebauer G, Gehre M, et al. Anthropogenic impacts on natural nitrogen isotope variations in *Pinus sylvestris* stands in an industrially polluted area [J]. *Environmental Pollution*, 1997, **97**(1-2): 175-181.
- [2] Craft C B, Broome S W, Seneca E D, et al. Estimating sources of soil organic matter in natural and transplanted estuarine marshes using stable isotopes of carbon and nitrogen [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, **26**(6): 633-641.
- [3] Heaton T H E. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1986, **59**(1): 87-102.
- [4] Norby R J. Nitrogen deposition: a component of global change analyses [J]. *New Phytologist*, 1998, **139**(1): 189-200.
- [5] Binkley D, Högborg P. Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? [J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, **92**(1-3): 119-152.
- [6] Gundersen P, Emmett B A, Kjonaas O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 37-55.
- [7] Xiao H Y, Liu C Q. Chemical characteristics of water-soluble components in TSP over Guiyang, SW China, 2003 [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(37): 6297-6306.
- [8] Widory D. Nitrogen isotopes: tracers of origin and processes affecting PM_{10} in the atmosphere of Paris [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(11): 2382-2390.
- [9] Waser N A D, Harrison W G, Head E J H, et al. Geographic variations in the nitrogen isotope composition of surface particulate nitrogen and new production across the North Atlantic Ocean [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, **47**(7): 1207-1226.
- [10] Yeatman S G, Spokes L J, Dennis P F, et al. Can the study of nitrogen isotopic composition in size-segregated aerosol nitrate and ammonium be used to investigate atmospheric processing mechanisms? [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(7): 1337-1345.
- [11] 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**(1): 45-55.
- [12] Stewart G R, Schmidt S, Handley L L, et al. ^{15}N natural abundance of vascular rainforest epiphytes: implications for nitrogen source and acquisition [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1995, **18**(1): 85-90.
- [13] 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 growing environment variation and canopy retention on atmospheric nitrogen deposition [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(23): 4897-4907.
- [14] 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**(2): 193-205.
- [15] Ammann M, Ballmoos P, Stalder M, et al. Uptake and assimilation of atmospheric NO_2-N by spruce needles (*Picea abies*): a field study [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **85**(3): 1497-1502.
- [16] Xiao H Y, Wu L H, Zhu R G, et al. Nitrogen isotope variations in camphor (*Cinnamomum Camphora*) leaves of different ages in upper and lower canopies as an indicator of atmospheric nitrogen sources [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 363-367.
- [17] Skinner R A, Ineson P, Jones H, et al. Heathland vegetation as a bio-monitor for nitrogen deposition and source attribution using $\delta^{15}\text{N}$ values [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(3): 498-507.
- [18] Högborg P. Tansley Review No. 95 ^{15}N natural abundance in soil-plant systems [J]. *New Phytologist*, 1997, **137**(2): 179-203.
- [19] 冀鸿. 植物在环境监测中的应用 [J]. *山东环境*, 2003, (6): 54-55.
- [20] Xiao H Y, Liu C Q. Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, southwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(33): 5121-5130.

- [21] 赵汝植. 西南区自然区划探讨 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 1997, **22**(2): 193-198.
- [22] 贵阳市人民政府门户网站. 2009 年贵阳市环境状况公报 [R]. <http://www.gygov.gov.cn/gygov/1442565874186715136/20100609/244659.html>.
- [23] Han G L, Liu C Q. Strontium isotope and major ion chemistry of the rainwaters from Guiyang, Guizhou Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2006, **364**(1-3): 165-174.
- [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): 1785-1790.
- [25] 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.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 肖红伟. 贵阳市降水硫氮同位素地球化学研究 [D]. 贵阳, 2011.
- [28] Pearson J, Wells D M, Sella K J, et al. Traffic exposure increases natural ^{15}N and heavy metal concentrations in mosses [J]. New Phytologist, 2000, **147**(2): 317-326.
- [29] Harmens H, Norris D A, Cooper D M, et al. Nitrogen concentrations in mosses indicate the spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition in Europe [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2852-2860.
- [30] 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**(3): 465-473.
- [31] 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**(1): 106-114.
- [32] Kuang Y W, Wen D Z, Li J, et al. Homogeneity of $\delta^{15}\text{N}$ in needles of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) was altered by air pollution [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1963-1967.
- [33] 刘学炎, 肖化云, 刘丛强. 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.
- [34] Garten C T Jr, Hanson P J. Foliar retention of ^{15}N -nitrate and ^{15}N -ammonium by red maple (*Acer rubrum*) and white oak (*Quercus alba*) leaves from simulated rain [J]. Environmental and Experimental Botany, 1990, **30**(3): 333-342.
- [35] Schlesinger W H, Hartley A E. A global budget for atmospheric NH_3 [J]. Biogeochemistry, 1992, **15**(3): 191-211.
- [36] Gebauer G, Schulze E D. Carbon and nitrogen isotope ratios in different compartments of a healthy and a declining *Picea abies* forest in the Fichtelgebirge, NE Bavaria [J]. Oecologia, 1991, **87**(2): 198-207.
- [37] Søvik A K, Mørkved P T. Use of stable nitrogen isotope fractionation to estimate denitrification in small constructed wetlands treating agricultural runoff [J]. Science of the Total Environment, 2008, **392**(1): 157-165.
- [38] Fogel M L, Cifuentes L A. Isotope fractionation during primary production [A]. In: Engel M H, Macko S A, (eds.). Organic geochemistry [M]. New York: Plenum Press, 1993. 73-98.
- [39] Garten C T Jr, Schwab A B, Shirshac T L. Foliar retention of ^{15}N tracers: implications for net canopy exchange in low-and high-elevation forest ecosystems [J]. Forest Ecology and Management, 1998, **103**(2-3): 211-216.