

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 424 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 48 * 2010-12

叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用

赵德华, 安树青*

(南京大学生物科学与技术系, 南京 210093)

摘要:沿南京市市中心-郊区-城市森林的梯度,观测了近地层大气 CO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$)、 SO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$)、 NO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$) 浓度,以及公路两侧悬铃木 (*Platanus acerifolia*) 叶片重金属 Pb、Cr 含量、稳定碳同位素 ^{13}C 和放射性碳同位素 ^{14}C 的变化规律,探讨叶片 ^{13}C 和 ^{14}C 对城市大气污染的指示作用。结果表明,沿市中心-郊区-城市森林梯度, $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 均呈现下降的趋势,与观测点距市中心距离间均存在极显著的负相关关系;与城市森林相比,市中心 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 分别高 7.3%、88% 和 210%。沿市中心-郊区-城市森林梯度,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C 含量有升高的趋势,其中, $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 -27.9‰ — -31.4‰ , ^{14}C pMC 范围为 95.8%—101.2%,即叶片 C 有 9.3%—14.4% 来源于化石燃料;叶片 ^{14}C 含量与距市中心距离间存在极显著的线性相关。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与污染参数 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 、Pb、Cr 间均表现为负相关,其中与 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、Pb 间的相关性达到显著水平;而叶片 ^{14}C 含量与 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 、Pb 和 Cr 间均表现出显著的负相关。表明,叶片 ^{14}C 含量可用于指示城市大气污染状况,且与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 相比更为稳定。

关键词:城市;大气污染; ^{13}C ; ^{14}C

Variation of carbon isotopic concentrations in tree leaves as an indication of urban air quality

ZHAO Dehua, AN Shuqing*

Department of Biological Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The objectives of this study were to (1) explore the temporal variations of CO_2 , SO_2 and NO_2 concentrations in near-surface (2.5 m above the ground) atmosphere, termed as $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$, $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ and $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$, respectively, and lead (Pb), chromium (Cr), stable carbon ^{13}C and radiocarbon ^{14}C concentrations in leaves of the tree *Platanus acerifolia* in environments with varying land covers and human activities, and (2) investigate whether ^{13}C or ^{14}C in plants can provide an indication of the atmospheric pollution in urban areas. A transect from the Nanjing urban center, across a suburban area to a forested area (urban forest) was selected as our study site (termed as *urban-forest gradient* in this paper). $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ was measured with sensors mounted on a moving vehicle, and $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ and $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ were measured at selected, representative, sites along the transect in summer of 2008. Meanwhile, leaves of *Platanus acerifolia* along the transect were sampled, and Pb, Cr, ^{13}C , ^{14}C concentrations were measured.

Results showed that $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$, $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ and $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ were significantly negatively correlated with the distance to the urban center, with linear R^2 values between 0.84 and 0.97. $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$, $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ and $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ increased by as much as 7.3%, 88% and 210%, respectively, from the urban forested area to the urban center. Heavy metal concentrations of Pb and Cr in leaves also were significantly negatively correlated with the distance to the urban center, with linear R^2 values of 0.89 and 0.69, respectively. However, both ^{13}C and ^{14}C concentrations in leaves decreased along the forest—urban transect from forested area to the urban center, ranging from -27.9‰ to -31.4‰ and pMC from 95.8% to 101.2%, respectively. In other words, the contribution of fossil CO_2 to the assimilated carbon in *Platanus acerifolia* leaves

基金项目:国家自然科学基金项目(31000226);国家林业局公益项目(200804001)

收稿日期:2009-11-11; **修订日期:**2010-09-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: anshq@nju.edu.cn

ranged from 9.3% to 14.4% along the forest-urban transect. Foliar ^{14}C concentration was significantly correlated with each of the five commonly used parameters indicating the urban air pollution in this study, i. e. $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$, $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ and $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ in air, and Pb and Cr concentrations in leaves, with R^2 values of 0.94, 0.92, 0.88, 0.92 and 0.58, respectively. Although there also existed negative relationships between $\delta^{13}\text{C}$ and the five parameters, $\delta^{13}\text{C}$ was significantly correlated with only two of the five parameters, viz. , $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ and Pb with R^2 values of 0.74 and 0.67, respectively. It suggests that instead of stable carbon, radiocarbon concentration in urban plants is a good indication of the air pollution in urban environments.

Key Words: urban; atmospheric pollution; ^{13}C ; ^{14}C

由于植物光合作用过程对稳定碳同位素 ^{13}C 的分馏作用,化石燃料与大气 CO_2 相比具有极低的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$;而由于放射性碳同位素 ^{14}C 的衰减作用,化石燃料也具有极低的 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ (^{14}C 的半衰期是5739a,埋藏在地壳中数百万年的化石燃料其 ^{14}C 含量接近于零),即“Suess 效应”^[1]。化石燃料的燃烧会引起大气 CO_2 中 ^{13}C 、 ^{14}C 组成的改变,而化石燃烧是引起大气 CO_2 浓度变化的最为重要的原因之一,因此大气 CO_2 浓度的变化往往伴随着其碳同位素组成的改变^[2-5]。植物碳同位素组成可反映其生活环境中 CO_2 浓度和受与化石燃料燃烧相关的环境污染状况(如人类活动强度、重金属污染等),即指示大气污染的作用^[6-8]。城市植物 ^{13}C 和 ^{14}C 含量可用于研究城市大气污染与大气 CO_2 浓度的空间格局^[6,8-11]。但是,这一方法对 ^{13}C 、 ^{14}C 含量的测定精度要求较高,目前对植物体碳同位素组成指示城市大气污染的有效性还存在着争议^[4,9,12],国内外特别是国内,有关植物 ^{13}C 和 ^{14}C 含量对城市大气污染指示作用的研究仍非常薄弱。由于 ^{13}C 和 ^{14}C 分析技术的进步与革新,如加速器质谱仪应用于 ^{14}C 的分析,提高了测量精度,使得这一方法的广泛应用成为可能。

本文通过测定沿南京市城市森林-郊区-市中心梯度的悬铃木(*Platanus acerifolia*)叶片 ^{13}C 和 ^{14}C 含量、重金属Pb、Cr含量,以及近地层大气 CO_2 、 SO_2 、 NO_2 浓度,研究植物叶片 ^{13}C 和 ^{14}C 含量对城市大气污染的指示作用,以期在城市大气质量时空格局和全球变化新研究方法的提出提供理论依据。

1 实验地与研究方法

在南京市,选择了一条从市中心到城市森林公园的观测样线:从新街口到农科院家属区到中山陵东侧,途经卫岗、中山门等地(称为城市-森林梯度或市中心-郊区-城市森林梯度,图1)。其中,新街口为繁华的市中心,分布着大量的高层商场与写字楼;农科院家属区是南京市城区-郊区结合地带;中山陵位于紫金山深处,而紫金山位于南京市东部,是城市的绿肺,森林绿地面积达29.7 km²。全程的路两侧无大型工业用地,道路两侧栽有成排的50a以上树龄的高大悬铃木。在整个样线上选择具有代表性的6个样点,每个样点的基本情况详见表1。

表1 观测样点基本情况

Table 1 Conditions of selected measurement sites

代号 Code	名称 Name	距市中心距离度*/km Distance- to-urban center	车流状况 Traffic condition	附近景观 Near area landscape
S1	新街口	0	车流量大,时有拥堵	密集的高层建筑,绿地少
S2	中山门	3.8	车流量大,时有拥堵	密集的高层+多层建筑,绿地少
S3	卫岗	5.3	车流量较大,少有拥堵	多层建筑,绿地面积一般
S4	农科院家属区	7.8	车流量一般,一般无拥堵	多层建筑,绿地面积较大
S5	体育学院	8.6	车流量较小,无拥堵	稀疏的多层建筑,绿地面积较大
S6	中山陵东侧	10.3	车流量小,无拥堵	人工建筑少,绿地面积大

* 沿样线距离,而非直线距离

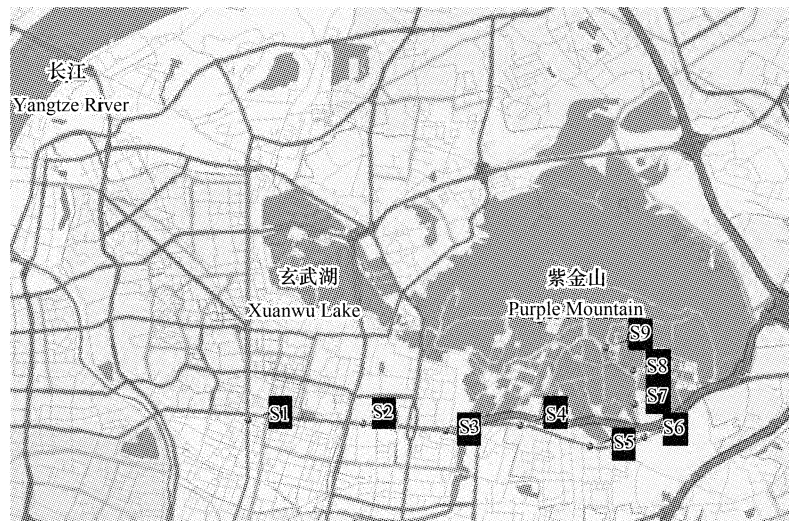


图1 流动观测的样线及样点分布

Fig. 1 Map of Nanjing City showing locations of the urban-forest gradient and measurement sites from S1 to S6

流动观测和 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 数据来源^[13]。 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 用车载 S151 型 CO_2 分析仪测定(加拿大 Quibit 公司生产)。测定时利用气泵(G101, Quibit)抽取汽车上部 1.2 m(距地 2.5 m)处的空气(速度为 1.0 L/m),通过细塑料管进入置于车内的 S151, S151 安装在数据采集器 Labpro 上,设定数据采集间隔为 3s。测量选择在晴朗无风(微风)的天气进行,实际测量日为 2008 年 7 月 24 日、8 月 6 日和 8 月 26 日(取 3 次观测数据的平均值)。每天分别在 6 个时段进行测量:1:00—2:00、5:00—6:00、9:00—10:00、13:00—14:00、17:00—18:00 和 21:00—22:00。汽车行驶速度约为 35 km/h,同时用 GPS 记录各测点的位置。为了降低测量在时间上不同步对结果产生的可能影响,每个时段往返测定(每次往返共需约 1h),将两次结果进行平均作为该时段某个测量点的值。将上述 6 个样点为中心的前后各 300m 的 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 观测值进行平均作为该点数值(即将 600m 的约 20 个观测值进行平均),即每个观测点的数值为 120 个数据的平均值(即 600m 样线的 20 个数据,往返 2 次,重复 3 次)。

定点观测和 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 、 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 数据来源^[13]。在 2008 年 7 月 17 日和 8 月 28 日之间,遇晴天(或多云天气),10:00—11:40 间,在上述 6 个样点处,进行 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 测定,大气采样器气体进口离地高度同样为 2.5m,采样器设定流速为 0.5 L/min,采样持续时间 100min(50L),每个点至少重复 3 次。 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 分别采用甲醛吸收副玫瑰苯胺分光光度法(GB/T 15262—1994)和 Saltzman 法(GB/T 15436—1995)测定。

定点取样和植物叶片 Pb、Cr、 ^{13}C 、 ^{14}C 含量数据来源。在上述 6 个样点,选择连续生长且长势相近的 10 株悬铃木(胸径在 1.5—2.3 m 之间),于每棵树靠近快车道的一侧,在距地面 3.5—4.0m 高度处取 20 片完全展开的叶片,带回实验室高温杀青后于 55℃ 烘干至恒重,粉碎后过 60 目筛备用。重金属元素 Pb 和 Cr 含量用等离子光谱仪测定(ICP-AES, J-A1100, Jarrell-Ash, USA), ^{14}C 含量使用小型化加速质谱仪(PCAMS)测定, ^{14}C 的测量灵敏度达到 6×10^{-15} ,分析结果以占现代碳的百分比表示(pMC), ^{13}C 含量用 MAT-251 型质谱仪测定,分析结果以国际标准物质 PDB 表示($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Standard}} = 0.0112372$),简称为 $\delta^{13}\text{C}$,表达式为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{Sample}} = [(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Sample}}) / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}$ 单位为‰,分析误差 $< 0.1\%$ 。

此外,基于 ^{14}C ,可计算叶片所固定的碳来源于化石燃料的百分比^[9]:

$$\text{化石 C}(\%) = 100 \times (1.1201 - fM_{\text{urban}}) / 1.1201 \quad (2)$$

式中,1.1201 为偏远地区叶片 ^{14}C 含量^[9], fM_{urban} 为测定的城市叶片 ^{14}C 含量。

2 结果与分析

2.1 沿城市森林-郊区-市中心梯度的污染气体浓度

2.1.1 近地层大气 CO_2 浓度 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$)

一天中 6 个时段的观测结果表明,不同观测点间 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 存在显著差异, $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 与观测点距市中心距离间存在显著的线性负相关 ($R^2 = 0.86$, $p = 0.01$, 图 2)。S1 点最高 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2) = 429 \mu\text{mol/mol}$), 但由于重复间变异较大, S1 点与 S2 点 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2) = 427 \mu\text{mol/mol}$) 间差异不显著; S5 点最低, 但是 S4、S5 和 S6 点间的差异不显著 (S4、S5 和 S6 点一天中平均 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 分别为 402 、 $396 \mu\text{mol/mol}$ 和 $400 \mu\text{mol/mol}$), 即 S1 点较 S6 点高 7.3%。

2.1.2 近地层大气 SO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$) 和 NO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$)

与 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 相似, $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 均表现为沿市中心-郊区-城市森林梯度显著降低的趋势 ($P = 0.01$), 与距市中心距离间均可以用线性方程进行较好的拟合, 其决定系数 R^2 分别为 0.97 和 0.84 (图 3)。 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 最低值均出现在 S6 点, 分别为 0.10 mg/m^3 和 0.46 mg/m^3 ; $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 最高值出现在 S1 点 (0.19 mg/m^3), 而 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 最高值出现在 S2 点 (0.15 mg/m^3)。即 S1 点与 S6 点相比, $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 分别高 88% 和 210%。结合 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 的结果表明, 本研究选择的观测样线具有典型性, 反映了主要受交通污染和土地利用方式影响的沿市中心-郊区-森林梯度的大气污染特征, 基于这一样线可进一步研究植物叶片碳同位素对于大气污染的指示作用。

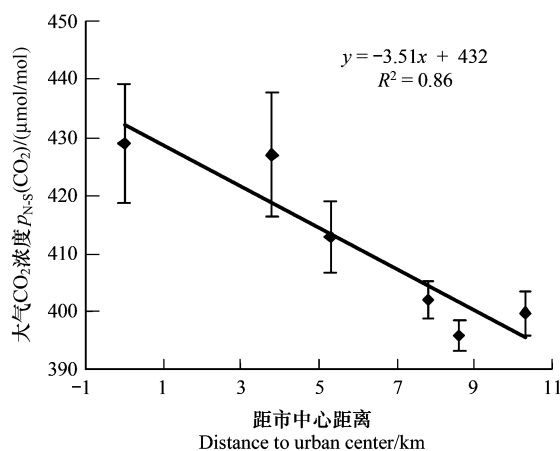


图 2 近地层大气 CO_2 浓度 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$) 与观测点距市中心距离间的关系

Fig. 2 Relationship between near surface atmospheric CO_2 concentrations ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$) and the distance-to-urban center

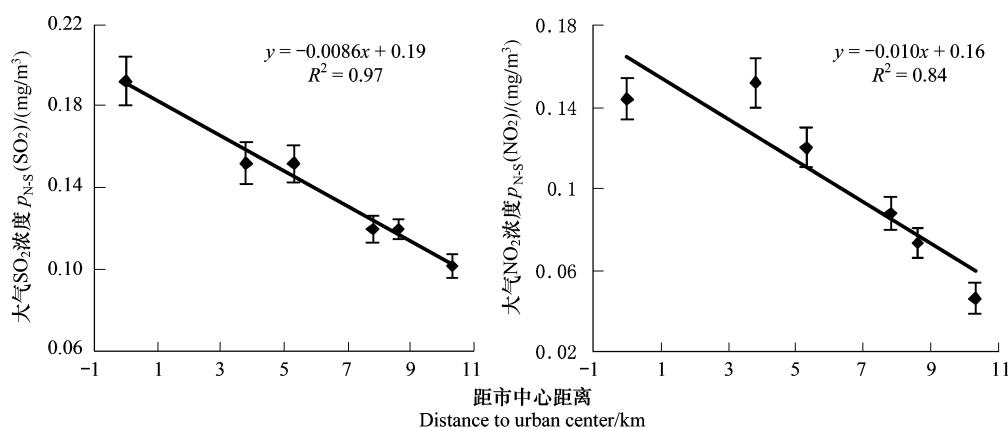


图 3 近地层大气污染物浓度 ($p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$) 与距市中心距离间的关系

Fig. 3 Relationships between the distance-to-urban center and near-surface atmospheric SO_2 and NO_2 concentrations ($p_{\text{N-S}}\text{SO}_2$ and $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$)

2.2 沿市中心-郊区-城市森林梯度的植物叶片重金属与碳同位素含量

2.2.1 Pb 和 Cr

植物体重金属 Pb 和 Cr 常用于指示城市大气污染状况^[14], 图 4 为叶片重金属 Pb、Cr 含量与距市中心距离间的关系, 结果表明, 本研究选择的不同样点间植物叶片 Pb 和 Cr 含量均存在极显著差异 ($P = 0.01$), S1 点

与 S6 点相比,叶片 Pb 和 Cr 含量分别高 94% 和 240%;与距市中心距离间均存在显著的线性负相关(R^2 分别为 0.89 和 0.69)。

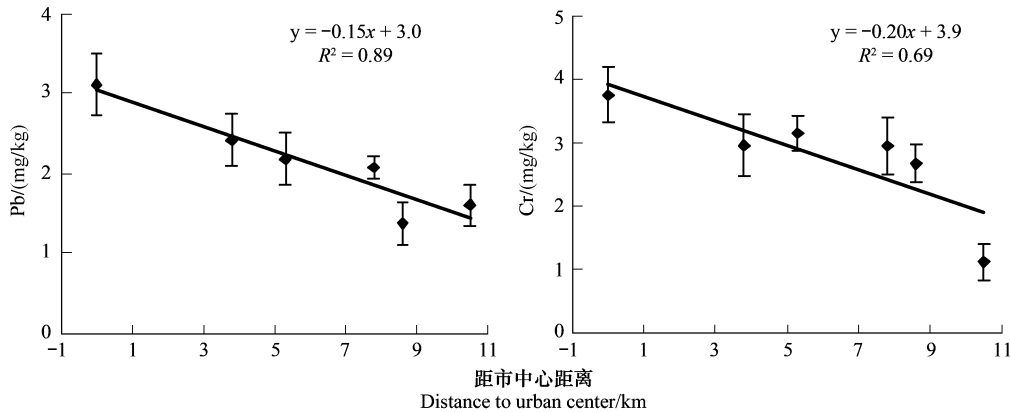


图4 叶片重金属含量(Pb 和 Cr)与距市中心距离间的关系

Fig. 4 Relationships between heavy metal concentrations (Pb and Cr) in leaves and the distance-to-urban center

2.2.2 $\delta^{13}\text{C}$

6 个样点的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -27.9‰ 和 -31.4‰ 之间,而且不同样点间,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著的差异;沿市中心-郊区-城市森林梯度,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 有升高的趋势,与距市中心距离间仍可以用线性方程进行拟合,但是其决定系数 R^2 相对较低($R^2 = 0.47$,图 5)。

2.2.3 ^{14}C

不同样点间,叶片 ^{14}C 含量同样存在显著的差异;叶片 ^{14}C 含量与距市中心距离间存在极显著的线性相关($R^2 = 0.89$, $P = 0.01$,图 5)。叶片 ^{14}C 含量为 pMC 95.8‰ — 101.2‰ ,即沿本研究选择的的城市森林-郊区-市中心梯度,植物叶片所固定的 C 有 9.3‰ — 14.4‰ 来源于化石燃料燃烧释放的 CO_2 。样点间叶片 ^{14}C 含量以 S1 点最低,S5 点最高,但 S5 点与 S6 点间差异不显著。

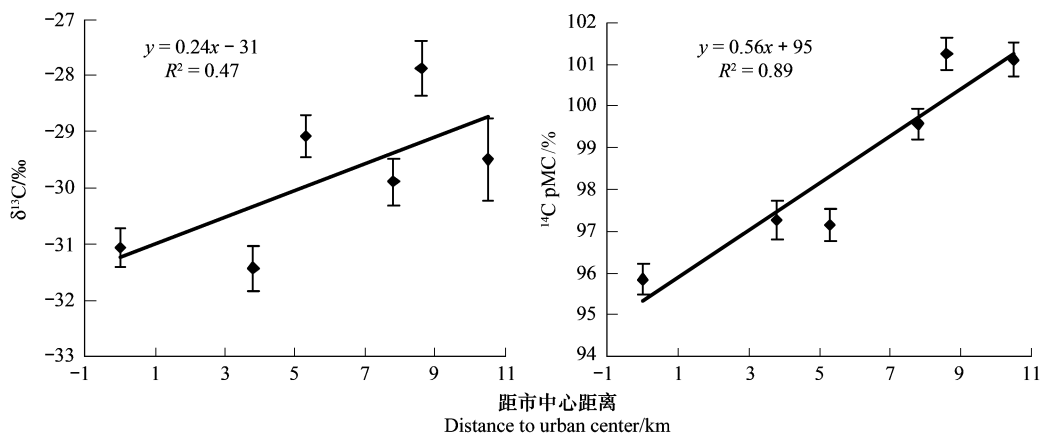


图5 叶片碳同位素含量与距市中心距离间的关系

Fig. 5 Relationships between carbon isotopic concentrations in leaves and the distance-to-urban center

2.3 植物叶片的大气污染指示作用

实地观测与分析表明,沿本研究选择的的城市森林-郊区-市中心梯度上,无大型工业用地,不同样点间的主要差异表现在交通车流量、建筑物密度与绿地覆盖率等方面,引起样点间近地层污染气体浓度变异的主要原因是车流量的变化,因此, $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$ 间均表现出极显著的正相关关系(表 2)。同样,叶片重金属 Pb 和 Cr 含量与近地层污染气体浓度($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$) 间表现出显著的正相关

关系($p_{N-S}(CO_2)$ 与Cr间除外)。叶片 $\delta^{13}C$ 与 $p_{N-S}(CO_2)$ 、 $p_{N-S}(SO_2)$ 、 $p_{N-S}(NO_2)$ 、Pb、Cr间均表现为负相关关系,其中与 $p_{N-S}(CO_2)$ 、Pb间的相关性达到显著水平($P=0.05$,表2);叶片 ^{14}C 含量与城市近地层大气污染物浓度、叶片重金属含量间均表现出显著的负相关关系,其中与 $p_{N-S}(CO_2)$ 、 $p_{N-S}(SO_2)$ 、 $p_{N-S}(NO_2)$ 、Pb间达到极显著水平($P=0.01$)。表明,叶片 ^{14}C 含量可很好地用于指示城市不同区域交通污染状况,而叶片 $\delta^{13}C$ 在一定程度上也可用于指示交通污染状况,但其指示效果与叶片 ^{14}C 含量相比较差。

表2 近地层大气污染物浓度与叶片碳同位素、重金属含量间的线性相关系数

Table 2 Linear correlation coefficients between carbon isotopic and heavy metal concentrations in leaves, and pollutant concentrations in near-surface atmosphere

项目 Item	$p_{N-S}(CO_2)$	$p_{N-S}(SO_2)$	$p_{N-S}(NO_2)$	Pb	Cr	$\delta^{13}C$
$p_{N-S}(SO_2)$	0.88 **					
$p_{N-S}(NO_2)$	0.92 **	0.89 **				
Pb	0.92 **	0.92 **	0.84 *			
Cr	0.61	0.83 *	0.81 *	0.72		
$\delta^{13}C$	-0.86 *	-0.59	-0.71	-0.82 *	-0.35	
^{14}C	-0.97 **	-0.96 **	-0.94 **	-0.96 **	-0.76 *	0.77 *

3 结论与讨论

3.1 植物 $\delta^{13}C$ 指示作用

据IPCC报道,目前大气 CO_2 积累量已经超过了工业革命前的31%,到2100年将升高到540—970 $\mu mol/mol$,化石燃料的燃烧是其最重要的原因^[15],由于“Suess效应”,时间尺度上大气 CO_2 浓度的升高与 ^{13}C 含量的降低密切相关^[2-5],树木年轮中 $\delta^{13}C$ 可用于指示植物生长过程中环境的 CO_2 含量及其动态,研究植物对大气 CO_2 浓度升高的响应^[16-18]。遍及全球各地的树轮 $\delta^{13}C$ 记录都呈现出自工业革命以来明显的下降趋势^[5]。

在空间尺度上,大气 CO_2 浓度与 ^{13}C 含量间同样密切相关^[5]。植物 $\delta^{13}C$ 是由物种特征和许多环境因子综合作用的结果,可用于估测植物生活的外界环境中温度、湿度和降水量等参数,以及提供植物的水分利用、光合作途径等信息^[2,5,18-19]。已有许多研究表明,城市、乡村和森林的近地层大气与植物的稳定碳同位素组成存在显著差异^[5,7,10,20],而造成这一差异的原因有很多,例如:(1)化石燃料燃烧引起的城市大气 ^{13}C 贫化($\delta^{13}C$ -depleted)可显著降低城市植物体 $\delta^{13}C$ ^[5,10];(2)城市大气污染物如 SO_2 、 O_3 等可以降低植物的碳稳定同位素分馏,提高植物体内 $\delta^{13}C$ ^[21];(3)城市热岛、城市干岛等特征性的城市环境可改变城市植物体 $\delta^{13}C$ ^[5,17,22]。因此,用植物稳定碳同位素组成指示城市大气污染状况的干扰因素较多,存在较大的不确定性,部分的研究认为其指示效果较好^[7,10,12,16],而部分的研究认为其指示效果较差^[5]。本研究结果表明,沿市中心-郊区-城市森林梯度,叶片 $\delta^{13}C$ 有升高的趋势,但是其指示城市交通污染的效果相对较差。

3.2 植物 ^{14}C 指示作用

^{14}C 由于半衰期的存在,有机质 ^{14}C 含量可用于确定其形成的时间,土壤有机质中放射性碳同位素组成已被广泛地应用于全球碳循环的研究^[4];而且, ^{14}C 与 ^{13}C 相似,同样存在“Suess效应”,树轮 ^{14}C 组成同样可用于指示植物生长过程的大气 CO_2 动态^[8]。空间尺度上,植物体 ^{14}C 含量同样可用于指示大气环境污染与受燃料燃烧引起的大气 CO_2 变化,分析城市大气 CO_2 的来源,相对于 ^{13}C , ^{14}C 指示大气污染的效果可能更为稳定^[5,8-9],其可能原因在于植物体 ^{14}C 含量主要受大气 CO_2 同位素组成影响,而与物种特性和其他环境相关性较低^[5]。但是,其原因仍然有待于进一步的研究证实,因为目前相关研究多集中在 ^{13}C 方面,对于 ^{14}C 指示作用的研究仍非常薄弱。本研究结果表明,叶片 ^{14}C 含量可很好地用于指示城市交通污染状况,其效果好于叶片 $\delta^{13}C$;沿本研究选择的森林-郊区-市中心梯度,植物叶片所固定的C有9.3%—14.4%来源于化石燃料燃烧释放的 CO_2 。

References:

- [1] Keeling C D. The Suess effect: ^{13}C - ^{14}C interrelations. *Environment International*, 1979, 2 (4/6): 229-300.
- [2] Chen S P, Bai Y F, Han X G. Applications of stable carbon isotope techniques to ecological research. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (5): 549-560.
- [3] Cai D L, Zhang S F, Zhang J. Ecosystem tropic dynamics studies as traced by natural carbon and nitrogen stable isotopes. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2003, 24 (3): 434-440.
- [4] Yu G R, Wang S Q, Chen P Q, Li Q K. Isotope tracer approaches in soil organic carbon cycle research. *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (5): 568-577.
- [5] Zheng S X, ShangGuan Z P. Terrestrial plant stable carbon isotope composition and global change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (4): 733-739.
- [6] Alessio M, Anselmi S, Conforto L, Imrota S, Manes F, Manfra L. Radiocarbon as a biomarker of urban pollution in leaves of evergreen species sampled in Rome and in rural areas (Lazio-Central Italy). *Atmospheric Environment*, 2002, 36 (34): 5405-5416.
- [7] Pataki D E, Xu T, Luo Y Q, Ehleringer J R. Inferring biogenic and anthropogenic carbon dioxide sources across an urban to rural gradient. *Oecologia*, 2007, 152 (2): 307-322.
- [8] Rakowski A, Nakamura T, Pazdur A. Variations of anthropogenic CO_2 in urban area deduced by radiocarbon concentration in modern tree rings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99 (10): 1558-1565.
- [9] Lichtfous E, Lichtfouse M, Kashgarian M, Bol R. ^{14}C of grasses as an indicator of fossil fuel CO_2 pollution. *Environmental Chemistry Letters*, 2005, 3 (1): 78-81.
- [10] Kelomé N C, Lévêque J, Andreux F, Milloux M J, Oyédé L M. C_4 plant isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$) evidence for urban CO_2 pollution in city of Cotonou, Benin (West Africa). *Science of the Total Environment*, 2006, 366 (2): 439-447.
- [11] Takahashi H A, Konohira E, Hiyama T, Minami M, Nakamura T, Yoshida N. Diurnal variation of CO_2 concentration, $\Delta^{14}\text{C}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in an urban forest: estimate of the anthropogenic and biogenic CO_2 contributions. *Tellus*, 2002, 54 (2): 97-109.
- [12] Lichtfouse E, Lichtfouse M, Jaffrézic A. $\delta^{13}\text{C}$ values of grasses as a novel indicator of pollution by fossil-fuel-derived greenhouse gas CO_2 in urban areas. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37 (1): 87-89.
- [13] Zhao D H, OuYang Y, Qi J G, Fan Y M, An S Q. Near-surface atmospheric properties along an urban center-suburban-urban forest gradient in summer in Nanjing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (12): 6654-6663.
- [14] Li H E, Li B T, Lan S F. Response of the urban roadside trees to traffic environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (9): 2180-2187.
- [15] Houghton J T, Ding Y. IPCC Report. UK, Cambridge University Press, 2001.
- [16] Dongarrà G, Varrica D. $\delta^{13}\text{C}$ variations in tree rings as an indication of severe changes in the urban air quality. *Atmospheric Environment*, 2002, 36 (39): 5887-5896.
- [17] Bukata A R, Kyser T K. Carbon and nitrogen isotope variations in tree-rings as records of perturbations in regional carbon and nitrogen cycles. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41 (4): 1331-1338.
- [18] Skrzypek G, Kłuzny A, Wojtuń B, Jędrysek M O. The carbon stable isotopic composition of mosses: a record of temperature variation. *Organic Geochemistry*, 2007, 38 (10): 1770-1781.
- [19] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q, Li Y Y, Xiao H W. 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. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (33): 5413-5423.
- [20] Glaser B, Dreyer A, Bock M, Fiedler S, Mehring M, Heitmann T. Source apportionment of organic pollutants of a highway-traffic-influenced urban area in Bayreuth (Germany) using biomarker and stable carbon isotope signatures. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39 (11): 3911-3917.
- [21] Martin B, Bytnerowicz A, Thorstenson Y R. Effects of air pollutants on the composition of stable carbon isotopes, $\delta^{13}\text{C}$, of leaves and wood, and on leaf injury. *Plant Physiology*, 1988, 88 (2): 218-223.
- [22] Xiao R B, OuYang Z Y, Li W F, Zhang Z M, Tarver Jr G, Wang X K, Miao H. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (8): 2055-2060.

参考文献:

- [2] 陈世苹,白永飞,韩兴国. 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用. *植物生态学报*, 2002, 26 (5): 549-560.
- [3] 蔡德陵,张淑芳,张经. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用. *质谱学报*, 2003, 24 (3): 434-440.
- [4] 于贵瑞,王绍强,陈泮勤,李庆康. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用. *地球科学进展*, 2005, 20 (5): 568-577.
- [5] 郑淑霞,上官周平. 陆生植物稳定碳同位素组成与全球变化. *应用生态学报*, 2006, 17 (4): 733-739.
- [13] 赵德华,欧阳琰,齐家国,范亚民,安树青. 夏季南京市中心-郊区-城市森林梯度上的近地层大气特征. *生态学报*, 2009, 29 (12): 6654-6663.
- [14] 李寒娥,李秉滔,蓝盛芳. 城市行道树对交通环境的响应. *生态学报*, 2005, 25 (9): 2180-2187.
- [22] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,张兆明, Tarver Jr G, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. *生态学报*, 2005, 25 (8): 2055-2060.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元