DOI: 10.5846/stxb201309012181

窦军霞,刘伟东,苗世光,李炬.北京城郊地区二氧化碳通量特征.生态学报,2015,35(15):5228-5238. Dou J X, Liu W D, Miao S G, Li J.Carbon dioxide fluxes in a suburban area of Beijing.Acta Ecologica Sinica,2015,35(15):5228-5238.

北京城郊地区二氧化碳通量特征

窦军霞*,刘伟东,苗世光,李 炬

中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

摘要:利用位于北京市顺义气象局 45 m 气象塔上 36 m 高度的湍流观测资料,对该区域 2008 年 11 月 1 日至 2009 年 10 月 31 日 共 365d 的二氧化碳通量(CO₂)的时间变化和各方位的分布特征进行了分析研究,并计算了 CO₂年排放量。结果表明,CO₂受交 通因素和居民日常生活排放的影响较小,冬季耗能取暖会显著增加 CO₂的排放量;受供暖排放和植物生长季节光合作用的影 响,冬季的 CO₂通量值在全天绝大多数时刻均高于其他季节,其日平均值为 15.6 μmol m⁻² s⁻¹,显著高于春、夏、秋季的日平均值 5.6、5.7 和 8.8 μmol m⁻² s⁻¹(*t*-test, *P*<0.001)。各方向 CO₂通量值的大小与其源区内土地利用/覆盖方式以及建筑物的使用功能 和使用性质密切相关,住宅楼、饭店、工厂、旅馆等人工建筑面积占比例越大,CO₂排放量越大;而植被覆盖比例较高的方向 CO₂ 值较小。观测点周边区域是 CO₂的排放源,且年平均排放量达到 13.6 kg m⁻² a⁻¹,但低于同一时期北京市内高密度住宅区域的 CO₂年排放量。

关键词:二氧化碳通量; 涡动相关技术; 城郊地区; 北京

Carbon dioxide fluxes in a suburban area of Beijing

DOU Junxia*, LIU Weidong, MIAO Shiguang, LI Ju

Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China

Abstract: Over the last two decades, the eddy covariance (EC) technique has been applied to measure the flux of CO, in various ecosystems. Among terrestrial ecosystems, urban areas play an important role because most of the anthropogenic emissions of CO₂ originate in these areas. A better understanding of CO₂ exchange between urban ecosystems and the atmosphere is important for quantifying urban contributions to the global carbon cycle as well as for evaluating the urban climate impact on and response to global climate changes. In the past two decades, studies of CO₂ levels in urban environment mainly focused on the concentration in the ambient and emission inventory based on energy consumption data in China. To date, CO₂ monitoring in Chinese cities using EC techniques is rare because it is difficult to find a representative urban surface and install EC instruments on the available tower. We investigated CO₂ fluxes over a suburban, low-density residential area (Shunyi) in the north east Beijing. Suburban areas are growing rapidly in China and are potentially an important land-use category for anthropogenic CO₂ emissions. We collected the EC measurements from the meteorological tower of Shunyi Meteorology Center from November 1, 2008 to October 31, 2009. The half-hourly CO₂ fluxes were calculated by computing the mean covariance of CO₂ fluctuations with the fluctuating vertical velocity observed by the EC system. Turbulence Knight2 (TK2) software package was employed for quality assurance and quality control of the EC data. TK2 provides a quality flag for each half-hourly flux data, and the highest quality data when the quality flag was less than 3 were used to analyze the daily variation and spatial distribution characteristics of CO₂ flux during different seasons, the summer daytime CO, flux as a function of photosynthetically active radiation (PAR), and the nighttime CO, flux as a

基金项目:国家自然科学基金(41175015);北京市自然科学基金(8122022);中央级公益性科研院所基本科研费专项基金(IUMKY2014 (LH) 02)

收稿日期:2013-09-01; 网络出版日期:2014-10-16

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jxdou@ium.cn

http://www.ecologica.cn

function of soil temperature at 10 cm depth during the measurement period. The data gaps were filled using the back propagation neural network to calculate the annual total CO_2 emissions. Our results indicate that CO_2 emissions were less affected by road vehicles and household activities at the Shunyi measurement area. Fuel consumption for heating during winter significantly increased CO_2 emissions; and because of the carbon uptake by plants for photosynthesis during the growing season, the average daily flux measured in winter was significantly higher than that in other seasons. Patterns of spatial variation of CO_2 flux showed that areas with a high proportion of man-made surfaces had higher CO_2 values, while vegetation covered areas had lower CO_2 values. The consistently positive CO_2 flux throughout the year indicates that the analyzed suburban surface is a net source of CO_2 to the atmosphere. The total annual CO_2 emission from our study area was 13.6 kg m⁻² a⁻¹; this value is higher than the emissions from suburban residential areas in foreign cities. We infer that this high value is because of the low vegetation coverage and higher number of commercial and industrial buildings in our study area. Our data will be added to the global database of CO_2 fluxes and it can be used for future planning of urban development with regard to reducing the CO_2 emission.

Key Words: carbon dioxide fluxes; eddy covariance; suburban area; Beijing

城市生态系统二氧化碳(CO₂)的排放量是全球碳收支的一个重要组成部分^[1]。了解并掌握城市地气间 CO₂交换量对于深刻理解城市生态系统在全球碳循环中的地位与作用,探讨城市群大气-生态-环境相互影响 机理,研究特定城市气候对全球变化的影响与响应等方面都具有重要意义。

自 20 世纪 90 年代初,涡度相关系统逐渐应用于城市 CO₂通量的观测研究中,观测地点集中于芝加哥^[2]、 哥本哈根^[3]、东京^[4]、马赛^[5]、墨尔本^[6]、巴尔的摩^[7]、蒙特利尔^[8]、赫尔辛基^[9]、洛兹^[10]、伦敦^[11]等一些发达 国家的城市。随着观测数据的积累,城市的气候背景、观测点所在功能区类型、各种地表覆盖物所占比例、居 民日常生活和出行模式等各种人为或自然环境因素对城市生态系统 CO₂收支影响的研究日益深入^[7-11]。国 内目前已在多个城市开展了 CO₂通量的长期观测,并且针对城市绿地^[12-13]、高密度住宅区^[14-15]以及城市冬季 供暖前后的 CO₂通量特征研究都已有报道^[16],但是与大量的森林、草原、湿地等陆地自然生态系统与大气间 的碳交换研究相比较^[17],城市 CO₂通量的直接观测和分析还是比较有限的。

作为我国的政治、经济、文化中心,北京的城市化进程近年来始终保持高速增长的态势,人口和机动车的 快速增加,土地利用方式和覆盖物的变化^[18],势必会影响各种 CO₂源、汇的排放或吸收。鉴于城市城郊结合 区是对城市扩张所带来的一系列变化较为敏感的地区,本研究特利用在北京城郊区——顺义气象局开展的通 量观测试验获取的湍流资料,对该区域 2008 年 11 月 1 日至 2009 年 10 月 31 日共 365 d 的 CO₂通量数据进行 了时空分布特征的分析,研究了交通、供暖、植被、土壤等人为和自然环境要素对 CO₂收支的影响;并进一步通 过与北京市内以及其它国家城市住宅区 CO₂年总量的比较,探讨了气象背景条件、土地利用方式/覆盖类型和 能源消耗方式对城市 CO₂通量时空分布特征和排放量的影响,期望研究结果能为今后制定相关城市发展规划 和政策以控制和减少温室气体的排放,减缓城市化进程对生态环境带来的不利影响,乃至对全球气候变化的 影响等方面提供参考。

1 研究地点概况和研究方法

1.1 研究地点概况

观测地点位于北京市东北郊顺义气象观测站内(40°08′N,116°37′E,海拔 28.6 m)。顺义气象站毗邻首都 国际机场,具有较为开阔的环境,周边 500m 范围内的建筑物主要有办公楼、住宅小区、贸易市场、工厂、饭店、 旅馆和汽车修理门店以及堆放家具、建材和回收物资等物品的仓库。高层建筑物不多,除观测点西北方向 200m 外的住宅小区的楼房高约 20m 外,其它建筑物高度多在 6—11 m 之间。气象塔周边主要交通道路包括

利用卫星影像资料得到的以顺义气象塔为中心 2 km×2 km 范围内的植被覆盖率为 25.3%, 建筑物和公 路、人行道等人工建筑面积占 52.4%,裸地面积 22.2%, 水体 0.1%。参照 Stewart and Oke 对建筑物类型的划分 标准^[19],本研究观测地点属于以住宅楼为主,混杂商业 和工业建筑的低密度建成区。

1.2 仪器设置

观测铁塔高 45m,在 36m 和 42m 高处建有观测平 台。根据观测需要,塔上设置了开路涡度相关测量系统 和5层常规气象观测系统,同步进行 CO,、水热通量和 气象条件的观测。其中开路涡度相关系统是由一个三 维超声风速仪(CSAT3, Campbell, USA)和一个快速响 应的红外气体分析仪(LI-7500, LI-COR Inc., USA)构 成。考虑到该观测地点主导风向和铁塔结构的实际情 况,超声风速仪和红外气体分析仪探头被固定于与正北 图中红色五角星代表观测铁塔,紫色和绿色矩形分别表示饭店和旅 夹角为 22.5°的 3m 长铁臂支架上,安装在 36m 处,原始 馆,蓝色轮廓线表示工厂 数据采样频率为 10 Hz。用于进行向上、向下长、短波





Fig.1 Sketch map of the measurement site with the scale 1:500

辐射和净辐射测定的传感器(CNR1, Kipp & Zonen, Netherland)同样设置在铁塔 36m 处。塔上同步进行了 5 层(42、36、18、9、4.5m)空气温、湿(HMP45C, VAISALA, Finland)和风速(AV-30WS, Avalon, USA)以及42m 风向(AV-30WD, Avalon, USA)的观测。

观测期间的气温、降水量、10m风速和风向以及地温(-10 cm)数据来自顺义气象站(站号:54398)。

1.3 数据处理

1.3.1 湍流数据处理、质量控制及插补

顺义 45 m 气象塔上通量原始数据利用 TK2 软件(Turbulence Knight2)进行处理、质量评价和控制工 作^[20-21]。通量原始数据经过野点剔除、平面拟合坐标旋转^[22]、高频损失校正^[23]、虚温校正^[24]以及 WPL 校 正^[25]后,随之进行了稳态检验和整体湍流特征检验^[26-27],最后输出 30min 的通量平均值以及相应数据质量等 级(表1)。根据数据质量等级标示(1-9),将湍流通量资料相应分为优(1-3)、中(4-6)、劣(7-9)3个级 别。优等级数据直接用于 CO,通量的时间变化规律和不同方位分布特征的分析;中等级别数据保留,而劣等 数据需删除并随后进行插补,完成插补后与优、中等级数据一起组成一个从 2008 年 11 月 1 日至 2009 年 10 月 31 日总计 365 d 的 CO2通量数据集。由一天 48 个 CO2通量每 30min 平均值乘以 30min 时长并求和即可得 到 CO₂的日总量值,进而可累加得到月、季节以及年的 CO₂总量值。

缺失和删除的 CO,通量数据采用基于遗传算法优化的 BP 神经网络法进行插补^[14]。选择序日(day of the year)、时刻以及 36 m 处的气温、向下短波辐射、风向和风速数据作为输入变量, CO2通量是输出变量。根据 CO,通量值的缺失与否将观测数据分为两个部分,输入变量和 CO,值完整的这部分数据用于 BP 神经网络模 型的训练和和训练结果的检验;训练好的模型用来模拟并输出缺失的 CO,通量值。

1.3.2 向下短波辐射和常规气象数据处理

向下短波辐射和风、温、湿等常规气象要素同样使用 30min 的平均值进行分析。仪器故障、系统误差以及

数据存储和传输过程中的错误会造成向下短波辐射和常规气象要素值缺失或虚假,需相应进行插补。插补时,在连续缺失数据不超过4次情况下,利用缺失时段前后的数据,采用线性内插法进行插补;一旦缺失数据的时间长度超过4次但少于9次时,则通过求算缺失数据日期的前、后各4d与缺失数据相同时刻的观测数据的平均值插补;如果连续缺失数据超过8次,则利用该日所在月份的月日平均值进行相应缺失时段的插补。

表 1 观测期间湍流半小时平均数据的缺失和实际使用量以及不同级别数据所占比例情况

Table 1 Seasonal 30min averaged turbulent data coverage during the measurement period and the percentage of best, general and poorest data to available observations

	应观测数据量	缺失量	实际使用数据量 Available observations/个				
Season	Potential observations/个	Missing observations/个	优/% Best data	中/% General data	劣/% Poorest data		
≠禾 c	2252	57		2295			
骨季 Spring	2555	57 -	53.2	31.0	15.7		
夏季 Summer	6049	0		6048			
	0048	0	41.1	23.0	35.9		
秋季 Autumn	2216	1622		1584			
	5210	1052	49.6	33.1	19.6		
冬季 Winter	5004	1222		4868			
	5904	1232	19.6	11.4	64.9		

1.4 源区特征

利用 Heish 等人^[28]提供的模型计算获得 90%贡献率的源区。从计算结果看,源区范围有很明显的日变 化特征,其面积随白天大气层结不稳定(ζ <-0.05)与夜间大气层结稳定(ζ >0.05)之间的变化而相应收缩或 扩张。白天大气不稳定状态时,源区在上风方向的 175 m 和 3285 m 之间变化,平均源区距离 1240m;夜间大 气稳定状态时,多介于上风向 6000m 到 12000m 之间。各方向上平均源区距离多在 1610—5274 m 之间波动, 南到西向之间源区距离较小,北和东东北(ENE)方向伸展较远(图略)。

2 结果分析与讨论

2.1 观测期间的气象条件

本研究利用 2008 年 11 月 1 日—2009 年 10 月 31 日的观测资料进行分析,共 365 d。采用候温法进行季节的划分,以连续 5d 日平均气温≥10℃和>22℃的第 1 天,作为春季和夏季的起始日;连续 5d 日平均气温≤ 22℃和<10℃的首日,作为秋季和冬季的起始日。观测期间春、夏、秋、冬 4 个季节分别有 49、126、67 和 123 d, 其中 2008 年 11 月 12 日—2009 年 3 月 14 日是冬季,夏季是 2009 年 5 月 3 日—9 月 5 日,冬季和夏季之间间 隔春、秋两季。春、夏、秋季是当地植物的生长季,而冬季基本与市政集中供暖时段一致。

由气温和地温日均值以及月总降水量的年变化图可见(图2),观测期间日平均气温在-9.8 ℃到 31.0 ℃ 之间变化,年平均气温是 13.2 ℃,冬、夏季节的日平均气温分别是-0.1 ℃和 24.9 ℃。地温的变化趋势与气温 相似,其年和冬、夏季节的日平均值都稍高于气温,分别为 14.3 ℃、0.1 ℃和 26.8 ℃。年降雨量是 387.8 mm,降 水季节分配很不均匀,全年降水的 71%集中在夏季 6—8 月期间。观测站全年风速平均值是 1.9 m/s,盛行风 向为北风、东北风和东南风,其中北风和东北风占全年风向的 29.9%,东南风占 20.8%,尽管西北风出现频率 仅为 14.2%,但该风向平均风速最大,为 3.2 m/s,且常有超过 5 m/s 的风出现(图 3)。

2.2 CO,通量时间变化特征及影响因素

从图 4 可见,观测站点各季节 CO₂通量呈现出了不同的日变化特征。一般情况下城郊住宅区的 CO₂主要 来自汽车尾气排放以及居民日常生活和冬季取暖所消耗的天然气、煤的燃烧排放;并且受交通因素的影响, CO₂通量日间通常会出现与车流量高峰时段一致的早、晚峰值现象;而顺义观测地点除秋季白天的早、晚时段





以及冬季傍晚外,春、夏季节日间 CO₂通量早、晚峰值现象不明显(图 4),这有别于以往发达国家城郊住宅区域 CO₂通量的观测结果^[6-8],与同一时期北京市内高密度住宅区观测到的各季节 CO₂通量均有明显早、晚峰值的特征也不相同^[14-15]。此外,顺义各季节 CO₂通量日变化也没有明显的"周末效应"(图略),工作日与周末/节假日的 CO₂日变化特征相似,且 CO₂日平均值的差异很小,近于相等,与蒙特利尔、巴尔的摩和北京市内观测到的"周末/节假日期间白天 CO₂通量的峰值出现时间滞后于工作日,且日平均值小于工作日"的现象不同^[7-8,14-15]。分析交通因素对于本研究地点 CO₂通量影响相对较小的原因,应该在于观测站点地处北京城郊区,人口密度较小(897 居民/km²)^[18],并且当地居民的家和工作单位之间的距离通常比较近,出行不依赖于汽车,相对于发达国家城郊区和北京市内而言,观测地点周边早晨和傍晚集中出行所引发的车流量较小,因此多数时间没有出现明显的 CO₂通量"交通"峰值。



Bureau during the measurement period





Fig.4 Seasonal mean daily variation of CO₂ flux, and smoothed by a three-element running average during the measurement period

为定量评价居民日常生活排放 CO₂量,本研究利用北京市内住宅区人均天然气使用量的小时、日、月监测数据^[29],得到人均每月用气量在全年所占比值和各小时用气量在全天所占比值;结合天然气燃烧的化学方程

式、天然气密度和北京市居民 2009 年人均全年用气量等资料(计算方法见附录),可知在全年用气量最大的 12 月份,即使人口密度达到 3000 居民/km²时,在全天使用天然气的峰值时刻(18:00),由天然气燃烧生成的 CO₂也仅为 1.3 µmol m⁻² s⁻¹(图 5)。考虑到本研究观测区域人口密度较小的实际情况^[18],可以认为居民日常 生活排放的 CO₂量较少,并且在各季节之间的量值差异也比较小。需要注意的是,本研究地点的建筑物除居 民住宅楼外,还混杂有工厂、饭店、旅馆等,它们生产、经营时也会排放出 CO₂,只是本研究无法确定这部分 CO,量的大小及其在季节间的差异。

除去汽车使用和居民日常生活产生 CO₂,供暖也会产生大量的 CO₂。受此影响,冬、秋季的 CO₂通量值较 春、夏季节高;特别是冬季,其全天 CO₂通量值都高于春、夏季,除夜间 0:00—1:00 外,也都高于秋季(图 4)。 国内外多个城市的研究结果均表明取暖是造成冬季 CO₂通量显著高于其他季节的原因之一^[3,8-10]。本研究对 观测点 2009 年冬季 3 月份供暖(3 月 1—14 日)和刚停止供暖(3 月 18—31 日)期间 CO₂值日变化的对比分析 也证明了这一点。由图 6 和表 2 可见,供暖和刚停止供暖后的 36 m 高处风速平均值差异很小,且主导风向都 是北风和东风,但是供暖期间 CO₂值在全天多数时间都高过停止供暖后(图 6);人工建筑面积较大的北和北 西北(NWN)方向,供暖期间的 CO₂通量日平均值更是停止供暖后的 1.8 倍,差异尤为显著(*t*-test,*P*<0.001) (表 2)。







图 6 2009 年 3 月供暖期间和停止供暖后 CO₂通量日变化 Fig.6 Mean daily variation of CO₂ flux during heating and nonheating periods respectively in March 2009

植物光合作用对 CO₂的吸收也是导致季节间 CO₂通量存在显著差异的重要原因之一^[7-8]。夏季是植物的 主要生长季节,植物光合作用吸收 CO₂的效果尤为明显,这使得夏季白天多数时间的 CO₂通量值都明显低于 其它季节,但夏季白天各时刻的平均值均大于零,在 0.4—9.4µmol m⁻²s⁻¹之间波动,说明光合作用所吸收的 CO₂仍少于人为活动的排放量(图 4)。

表 2	有供暖和刚停止供暖期间的 CO_2 通量和风速值的对比	
-----	--	--

Table 2 Contrast of CO ₂ flux and wind speed between heating and non-heating periods									
	全部。	All data	北和北西北风向	N and NWN direction					
时间段	CO2通量	回 油	CO2通量	고 法					
Period	CO_2 flux /	Wind speed/(m/s)	CO_2 flux /	Wind speed/(m/s)					
	$(\mu mol m^{-2} s^{-1})$		$(\mu mol m^{-2} s^{-1})$						
3月1—14日有供暖 Heating	10.1	2.9	12.4	2.6					
3月18—31日无供暖 Non-heating	6.3	3.0	6.8	3.4					

夜间大气中的 CO₂来自土壤呼吸释放和人为排 放^[7]。土壤呼吸具有明显的季节变化规律,不受水分 和养分条件的限制时,土壤温度是影响土壤呼吸的主要 因子^[30]。就本研究地点而言,理想状况下,土壤呼吸释 放出的 CO₂应该是在夏季地温最高时最多,冬季最小, 秋季和春季介于两者之间(表 3);但是对比观测地点和 农田生态系统夜间 CO₂对地温的响应曲线可见(图 7), 观测地点各季节夜间 CO₂显然更多地来自人为活动的 排放,并且天气越冷时,来自人为活动排放的 CO₂越多, 再次说明寒冷天气会因为取暖的需要增加了 CO₂的排 放量。生物和人为因素综合作用的结果使得夜间 CO₂ 通量值在冬季最大,春季最小,秋季和夏季在两者之间 (图 4,表 3)。

综上所述,供暖和植物生长季节的光合作用是导致 季节间 CO₂通量存在差异的主要原因。冬季的 CO₂通 量值在全天绝大多数时刻均高于其他季节,其日平均值 为 15.6 μ mol m⁻² s⁻¹,显著高于春、夏、秋季的日平均值 5.6、5.7 和 8.8 μ mol m⁻² s⁻¹(*t*-test, *P*<0.001)。此外,尽 管因为光合作用吸收 CO₂使得植物生长季节的白天有 CO₂通量负值出现,但各季节的日平均值都为正值,说 明本研究的观测地点是"碳源"。



图 7 2008 年 11 月 1 日—2009 年 10 月 31 日期间夜间 CO₂ 通量 对地温的响应

Fig.7 Nighttime carbon flux as a function of soil temperature during measurement period. Shaded area is the inter-quartile range; Polynomial curve (blue line) was fit to binned median values of CO_2 (blue circle); Soil temperature is binned in 1 °C increments; The model of Yan *et al*^[30] for a maize ecosystem, scaled by the vegetation fraction for Shunyi measurement site is shown (green dash line)

图中灰色阴影部分为四分位数间距;蓝色实线是 CO₂与地温的拟 合曲线,红色虚线是华北农田玉米地 CO₂对地温的响应模型乘以 本研究地点植被覆盖率后的得到的结果

	Table 3 Nighttime mean, max	ximum and minimum soil temperature a	nd CO ₂ flux
	土壤温度	CO ₂ 通量 CO ₂ flu	$x/(\mu mol m^{-2} s^{-1})$
禾世	Soil temperature/℃	模拟值	观测值
字 U Seecon		Calculated by $\lambda_{\nu} \times \text{model}^{[30]}$	Observation data
Season	平均值(最小值-最大值)	平均值(最小值-最大值)	平均值(最小值-最大值)
	Mean (min-max)	Mean (min-max)	Mean (min-max)
春季 Spring	13.6(2.6-27.7)	0.9(0.3–2.6)	6.0(4.3–9.3)
夏季 Summer	25.7(14.5-37.9)	2.3(0.9-6.2)	7.6(6.1—9.2)
秋季 Autumn	15.7(2.7-28.7)	1.0(0.3-2.8)	9.3(6.6—14.2)
冬季 Winter	0.5(-6.4-14.5)	0.3(0.1-0.9)	12.5(10.0—16.7)

表 3 夜间土壤温度、CO₂通量的模型计算和观测值的平均值及最大、最小值

2.3 各方位 CO2通量的分布特征

多个城市研究结果表明,CO₂通量值的大小与其源区内土地利用方式以及覆盖物所占比例密切相关,CO₂ 通量值会随着源区内建筑面积的增加而增加,随植被覆盖率的增加而减小^[6-9]。本研究观测地点冬、夏季节 不同方向的风频和 CO₂通量值所呈现出的结果证实上述结论。由图 8 可见,尽管夏季主导风是北风和东南 风,冬季是北风,但这两个季节白天和夜间 CO₂通量的最大值都出现在了西北或西南方,正是饭店、工厂和住 宅区集中分布的方向。冬季尤为明显,其 CO₂通量白天最大值和昼、夜最大差值都出现在北西北(NWN)方 向,该方向住宅区依靠市政集中供暖,因供暖造成的昼、夜 CO₂排放量的差异会比较小,更多的是因为饭店和 工厂白天的营业活动所导致。

植被作用同样明显,光合作用的影响使得夏季白天各方位 CO2通量值都小于夜间,分布有大面积农田的



图 8 夏、冬季节 36m 高处风频及白天和夜间各方位 CO2 通量平均值

Fig.8 Wind direction frequency, mean CO_2 by wind direction during daytime and nighttime calculated at 22.5° intervals in summer and winter respectively

西西南方向(WSW),其白天 CO₂通量值为负数,呈现"碳汇"状态。而冬季植物处于休眠状态,除西南方位外, 其他各方位白天的 CO₂通量值始终高于夜间;冬季西南方位之所以夜间 CO₂值更高,可归因于该方向的住宅 和物资回收仓库是自供暖形式取暖,这一点与美国巴尔的摩观测结果类似,由于欧美国家的住宅区多采用分 户自采暖形式,夜间在家时会消耗更多的能源取暖,所以住宅区集中分布的方向夜间 CO₂的排放量高于 白天^[7]。

2.4 CO2通量年变化及年总量

受植物光合作用和供暖影响,CO₂通量有较明显的季节变化特征,其日均值在秋冬季节偏高,春夏季节较小,与气温之间存在显著的负相关关系(y=14.975-0.3945x,R=0.7165)(图9)。观测站点在 2008 年 11 月—2009 年 1 月期间 CO₂通量值随气温的降低而升高的现象不明显,有两个原因可能导致了这一现象的出现,一方面分散供暖的家庭、商店、旅馆等在 11 月集中供暖开始前就已经自行燃煤取暖,会显著增加 CO₂的排放量,这一点可以从北京城市居民 11 月人均用煤量远高于其它月份的统计数据得到证实(表 4)^[31];另一方面源区 计算的结果显示,相比于 1 月,11 月和 12 月的 CO₂更多地来自人工建筑面积所占比例较大的西北和西南方向,而 11 月与 12 月的源区进一步比较的结果则显示 11 月的 CO₂通量更多地来自西南方向,该方向有较多建 筑物采用自取暖方式供暖(图略)。顺义观测站点秋、冬季节气温较低时,因为取暖而导致 CO₂排放量增加的 现象,与 Pawlak 等人^[10]和 Pataki 等人^[32]观测到的气温较低的月份会因供暖导致的化石燃料燃烧产生更多 的 CO₂排放量的结果相似。

本研究地点观测期间计算得到的 CO₂年总排放量达到 13.6 kg m⁻² a⁻¹,高于所有国外郊区住宅区的观测 结果(表 5),原因在于,一方面本研究地点源区内植被覆盖率在所有的观测站点偏低,植物生长季节光合作用



图 9 观测期间日平均气温和 CO₂日总量变化 Fig.9 Daily average air temperature and CO₂ during the measurement period

吸收 CO₂的量相对少于其它地点;另一方面,尽管人工建筑面积所占比例并不高于其它观测地点(表 5),但是 本研究地点的建筑物除居民住宅楼外,还有工厂、饭店、旅馆等,它们营业或生产时会排放比普通居民住宅楼 更多的 CO₂,这也说明源区内除了人工建筑和植被各自在下垫面中所占比例影响 CO₂通量值外,建筑物的使 用功能和使用性质也在很大程度上影响着 CO₂的排放量。尽管顺义 CO₂年总排放量较高,但是仍低于同期北 京市内高密度住宅区的观测结果,后者的建筑面积和人口密度更高、植被覆盖率略小,且交通和供暖排放对 CO₂量值影响显著。

表 4	;京城市居民不同月份能源消费情况
表 4	2.京城市居民不同月份能源消费情况

Table 4 Energy consumption for household in different mon	nsumption for household in different mon	household in	consumption for	Table 4 Energy
---	--	--------------	-----------------	----------------

能源类型及消耗量		月份	子 Month	
Energy type and consumption	3—5	6—8	9—11	12—2
煤炭 Coal/(kg/人)	5.3	1.7	26.3	13.4
液化石油气 Liquefied petroleum gas/(kg/人)	2.3	2.3	2.2	2.6
天然气 Natural gas/(m ³ /人)	12.2	12.2	11.9	14.9

表 5	利用涡动相关技术在各城市郊区和北京市区开展	CO_2 通量观测的基本情况汇总

Table 5	Long term EC	measurement of C	0,	fluxes in	different	suburban	sites	and	an	urban	site	in	Beijin	g
---------	--------------	------------------	----	-----------	-----------	----------	-------	-----	----	-------	------	----	--------	---

城市 Cities	观测地点及 建筑物类型 Site type and buildings characteristics	建筑物和不 透水面覆盖率 Building and impervious plan area fraction/%	植被覆盖率 Vegetation plan area fraction/%	观测年份 Measurement periods	人口密度 Population density/ (人/km ²)	年排放量 Annual budget/ (kg m ⁻² a ⁻¹)	参考文献 References
美国巴尔的摩	郊区-住宅区	31	67	2002—2006	1500	1.3	[7]
加拿大蒙特利尔	郊区-住宅区	49	50	2007—2009	3150	5.2	[8]
澳大利亚墨尔本	郊区-住宅区	62	38	2004—2005	2939	8.5	[6]
日本东京	郊区-住宅区	71	21	2001-2002	11800	12.3	[4]
本研究	郊区-住宅区、 商业区	52	25	2008—2009	897	13.6	本研究
北京	市区-高密度 住宅区	77	23	2008	6533	20.6	[14]

3 结论

(1)本研究地点 CO₂受交通因素的影响相对较小,居民日常生活耗能排放的 CO₂量也较少。供暖和植物 生活季节的光合作用是导致季节间 CO₂通量存在显著差异的主要原因,受此影响,冬季 CO₂日平均值为 15.6 μ mol m⁻² s⁻¹,显著高于春、夏、秋季的日平均值 5.6、5.7 和 8.8 μ mol m⁻² s⁻¹(*t*-test, *P*<0.001)。

(2)各方向 CO₂通量值的大小与其源区内土地利用/覆盖方式以及建筑物的使用功能和使用性质密切相关,住宅楼、饭店、工厂、旅馆等人工建筑面积占比例越大,CO₂排放量越大;而植被覆盖比例较高的方向 CO₂值 较小。

(3)尽管植被会吸收一定量的 CO₂,但不足以抵消 CO₂的排放量,这使得北京顺义气象局附近区域是 CO₂的排放源,且年平均排放量达到 13.6 kg m⁻² a⁻¹,但低于同期北京市内高密度住宅区域的 CO₂年排放量。

附录:北京市居民日常生活使用天然气排放 CO2量的计算方法

天然气的主要成分是甲烷(CH₄),其燃烧的化学方程式是:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$
(1)

根据质量守恒定律,1 kg 的 CH₄燃烧将生成 2.7433 kg CO₂。

$$CO_{2_{NG}} = 2.7433 \times NG_C \times \left(\frac{f_{ngm}}{d_m}\right) \times f_{ngh} \times \rho_{ng} \times \rho_P$$
(2)

式中, $CO_{2_{NC}}$ 表示天然气燃烧生成的 $CO_2 \equiv (kg km^{-2} h^{-1})$, NG_c 是北京市居民 2009 年人均用气量 54.3 m^{3 [18]}, $f_{ngm} \pi f_{ngh}$ 分别指每个居民月用气量在全年所占比值以及小时用气量在全天所占比值^[29], 即 $\sum_{1}^{12} f_{ngm} = 1$, $\sum_{1}^{24} f_{ngh} = 1$ (图 10), ρ_{ng} 是天然气密度 0.72 kg m⁻³, ρ_p 是观测地点周边的人口密度(居民/km²)。用公式(2)计算得到 $CO_{2_{NC}}$, 根据 1 µmol m⁻² s⁻¹ CO_2 等于 44×10⁻⁶ g m⁻² s⁻¹ CO_2 ,将 $CO_{2_{NC}}$ 的单位从 kg km⁻² h⁻¹转化为 µmol m⁻² s⁻¹即可。文中图 5 展示了全年人均用气量最多的 12 月份的 $CO_{2_{NC}}$ 日变化特征(假定观测地点人口密度达到 3000 居民/km²)。



图 10 北京居民人均月用气量比值年变化(fngm)和 12 月的时用气量比值(fngh)日变化

Fig.10 Annual variation of ratio between monthly natural gas use to that of yearly and diurnal variation of ratio between hourly natural gas use to that of daily in December

致谢:感谢北京市气象局季崇萍博士、中国科学院大气物理研究所宋涛博士、清华大学雷慧闽博士在数据处理 方面给予的帮助。感谢顺义气象局李连国科长、中国气象局北京城市气象研究所熊斌等在观测、资料等方面 给与的帮助。

参考文献(References):

- [1] Kordowski K, Kuttler W. Carbon dioxide fluxes over an urban park area. Atmospheric Environment, 2010, 44(23): 2722-2730.
- [2] Grimmond C S B, King T S, Cropley F D, Nowak D J, Souch C. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. Environmental Pollution, 2002, 116(S1): S243-S254.
- [3] Soegaard H, Møller-Jensen L. Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(2/3): 283-294.
- [4] Moriwaki R, Kanda M. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2004, 43(11); 1700-1710.
- [5] Grimmond C S B, Salmond J A, Oke T R, Offerle B, Lemonsu A. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2004, 109(D24), doi: 10. 1029/2004JD004936.
- [6] Coutts A M, Beringer J, Tapper N J. Characteristics influencing the variability of urban CO₂ fluxes in Melbourne, Australia. Atmospheric Environment, 2007, 41(1): 51-62.
- [7] Crawford B, Grimmond C S B, Christen A. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. Atmospheric Environment, 2011, 45(4): 896-905.
- [8] Bergeron O, Strachan I. CO₂ sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city. Atmospheric Environment, 2011, 45 (8): 1564-1573.
- [9] Järvi L, Nordbo A, Junninen H, Riikonen A, Moilanen J, Nikinmaa, Vesala T. Seasonal and annual variation of carbon dioxide surface fluxes in Helsinki, Finland, in 2006-2010. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(18): 8475-8489.
- [10] Pawlak W, Fortuniak K, Siedlecki M. Carbon dioxide flux in the centre of Łódź, Poland-analysis of a 2-year eddy covariance measurement data set. International Journal of Climatology, 2011, 31(2): 232-243.
- [11] Helfter C, Famulari D, Phillips G, Barlow J F, Wood C R, Grimmond C S B, Nemitz E. Controls of carbon dioxide concentrations and fluxes above central London. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(5): 1913-1928.
- [12] 李霞, 孙睿, 李远, 王修信, 谢东辉, 严晓丹, 朱启疆. 北京海淀公园绿地二氧化碳通量. 生态学报, 2010, 30(24): 6715-6725.
- [13] 孙春健, 王春林, 申双和, 张锦标. 珠三角城市绿地 CO, 通量的季节特征. 生态学报, 2012, 32(4): 1273-1282.
- [14] Song T, Wang Y S. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing. Atmospheric Research, 2012, 106: 139-149.
- [15] Liu H Z, Feng J W, Järvi L, Vesala T. Four-year (2006-2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(17): 7881-7892.
- [16] 贾庆宇,周广胜,王宇,刘晓梅.城市复杂下垫面供暖前后 CO2通量特征分析.环境科学,2010,31(4):843-849.
- [17] 于贵瑞,孙晓敏.陆地生态系统通量观测的原理与方法.北京:高等教育出版社,2006:391-428.
- [18] 北京市统计局,北京统计年鉴.北京:北京统计信息网,(2013-01-02) [2013-09-12].http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj/ content/mV39_0302.htmhttp://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj/content/mV234_1305.htmhttp://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj/ content/mV160_0901.htmhttp://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj/content/mV222_1201.htmhttp://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj/ tjnj/content/mV41_0304.htmhttp://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2012-tjnj/content/mV83_0411.htm
- [19] Stewart I D, Oke T R. Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites: Report of 9th Symposium on Urban Environment. Keystone, CO, USA, 2010.
- [20] Mauder M, Foken T. Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2. Bayreuth: University of Bayreuth, Dept of Micrometeorology Internet, 2011: 5-41 [2013-09-12]. http://opus.ub.uni-bayreuth.de/opus4-ubbayreuth/frontdoor/index/idex/docId/639.
- [21] Mauder M, Foken T, Clement R, Elbers J A, Eugster W, Grünwald T, Heusinkveld B, Kolle O. Quality control of CarboEurope flux data-part 2: inter-comparison of eddy-covariance software. Biogeosciences, 2008, 5(2): 451-462.
- [22] Wilczark J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(1): 127-150.
- [23] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correction systems. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 37(1/2): 17-35.
- [24] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 1983, 26(1): 81-93.
- [25] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447): 85-100.
- [26] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78 (1/2): 83-105.
- [27] Foken T, Göckede M, Mauder M, Mahrt L, Amiro B D, Munger J W. Post-field data quality control // Lee X, Massman W, Law B. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 2004: 181-208.
- [28] Heish C I, Kault G, Chi T. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. Advances in Water Resources, 2000, 23(7): 765-772.
- [29] 刘丽珍. 北京市天然气居民用气规律及负荷指标的调查研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2006.
- [30] 严俊霞,李洪建,尤龙凤.玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究.干旱区资源与环境,2010,24(3):183-189.
- [31] 北京统计信息网.北京市城市居民能源消费分析.(2005-02-25)[2014-04-09].http://www.bjstats.gov.cn//ldcxt/tjfx/tjbg/200506/ t20050602_27524.htm.
- [32] Pataki D E, Emmi P C, Forster C B, Mills J I, Pardyjak E R, Peterson T R, Thompson J D, Dudley-Murphy E. An integrated approach to improving fossil fuel emissions scenarios with urban ecosystem studies. Ecological Complexity, 2009, 6(1): 1-14.

35 卷