

城市复杂下垫面供暖前后 CO₂ 通量特征分析

贾庆宇¹,周广胜^{2,3*},王宇³,刘晓梅⁴

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110016;2. 中国气象科学研究院,北京 100081;3. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093;4. 沈阳区域气候中心,沈阳 110016)

摘要 城市二氧化碳排放是全球大气二氧化碳的重要来源.利用涡度相关法测量的沈阳城市中心 CO₂ 浓度和通量资料,分析了 2008 年 10~11 月供暖期前后 CO₂ 浓度和通量的变化特征.研究表明,供暖期前后 CO₂ 浓度日变化呈双峰型曲线,第 1 个峰值出现在 04:45,与日出时间一致,第 2 个次峰出现受机动车高峰和供暖影响;CO₂ 通量研究表明,城市二氧化碳为净排放,供暖期前二氧化碳排放为 52.69 g·(m²·d)⁻¹,供暖期后为 82.50 g·(m²·d)⁻¹,植被光合作用起到了消减交通高峰时释放的 CO₂ 的作用,供暖期由于燃料燃烧在 17:15~18:15 出现明显 CO₂ 通量峰值,CO₂ 排放比供暖期前增加 29.37 g·(m²·d)⁻¹;CO₂ 通量与温度的峰值和感热通量转为正值的时间有一定的对应关系.研究也指出,CO₂ 浓度与通量的变化受风向与源区的协同影响.

关键词 城市;二氧化碳;浓度;通量;涡度相关法

中图分类号:X16;X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)04-0843-07

Characteristics of CO₂ Flux Before and in the Heating Period at Urban Complex Underlying Surface Area

JIA Qing-yu¹,ZHOU Guang-sheng^{2,3},WANG Yu³,LIU Xiao-mei⁴

(1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China; 2. China Academy Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 4. Shenyang Regional Climate Center, Shenyang 110016, China)

Abstract Urban areas were significant contributors to global carbon dioxide emissions. The eddy covariance(EC)was used to measure carbon dioxide(CO₂) concentration and flux data at urban area in Shenyang. This research analyzed the characteristics of atmospheric CO₂ concentration and flux in October 2008 to November 2008 period before and in the heating period. The results showed that the daily variation of CO₂ concentration was two-peak curve. The first peak time appeared as same as sunrise time, while the second peak time impacted by vehicles and heating. The result of CO₂ flux showed that urban atmospheric CO₂ was net emissions, vegetation photosynthesis absorbed CO₂ of traffic, the CO₂ flux peak appeared at 17:15-18:15 in the heating period, CO₂ emission increased 29.37 g·(m²·d)⁻¹ in the heating period than that before the heating period; there was corresponding relationship between CO₂ flux and the time when temperature peak and sensible heating flux(H_c) turn positive. The results also indicated that atmospheric CO₂ concentration and its flux were affected seriously by both wind direction and carbon sources.

Key words urban; carbon dioxide; concentration; flux; eddy covariance

城市是人口和交通集中区,是 CO₂ 等温室气体的主要来源.有资料表明,占陆地总面积不到 2.4% 的城市贡献的 CO₂ 超过了全球 CO₂ 释放的 80%^[1~3].以往关于全球碳循环的研究主要集中在森林、湿地、草地和农田等自然生态系统^[4,5],城市在生物圈的演变和全球碳循环研究中的作用没有得到足够重视.城市生态系统作为全球变化的驱动者和响应者,影响着局地的气候和生化循环.研究表明,城市生态系统碳通量基本为排放源^[6],且其排放强度远大于其他生态系统,随着全球城市化进程的不断加剧,城市生态系统在全球变化中的作用越来越重要,而城市碳通量却缺乏足够的观测研究.了解城市生态系统碳通量排放特性及其控制机制有助

于更好地评估大气中 CO₂ 浓度及其变化趋势,全面了解全球碳循环,对于理解城市生态系统在全球碳循环中的作用与地位,制定减缓气候变化措施具有重要意义.

涡度相关法因为可以得到连续的通量数据是目前公认的最好的方法,是通量观测的主要技术^[7],已经应用到城市 CO₂ 通量的观测研究^[8],如美国芝加哥市^[9]、英国爱丁堡市^[10]、丹麦哥本哈根市^[11]、

收稿日期 2009-06-30;修订日期 2009-09-04
基金项目:国家自然科学基金项目(40625015);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418507)
作者简介:贾庆宇(1978~),男,硕士研究生,助理研究员,主要研究方向为气候变化与生态系统相互作用,E-mail: beyond.22@126.com
* 通讯联系人,E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

意大利罗马市^[12]和北京^[13]等城市. 但与自然生态系统的通量研究相比,城市通量研究仍旧相对薄弱.

本研究基于沈阳城市的涡度相关通量观测资料,对2008年10~11月供暖期前后CO₂浓度和通量的变化特征进行分析,探讨了沈阳城市2008年供暖期前后碳通量变化的主要影响因子,以增进对城市生态系统在全球碳循环中作用与地位的理解,以期为制定城市生态系统减缓气候变化措施提供参考.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

度66 m,远高于周围建筑物的高度.在距观测塔200 m的范围内,以高度为30~60 m的建筑为主.观测塔西侧和南侧分别是文化路与青年大街.北部和东部为居民生活区,北部500 m左右为青年公园(图1).观测塔周边环境基本代表了沈阳城区和其他中国大城市城区的典型环境.沈阳城市生态系统通量塔建于2008年9月5日.涡度相关观测系统(open path eddy covariance system)主要由三维超声风速仪(CSAT3,Campbell Scientific Inc.,USA)、开路式CO₂/H₂O分析仪(Li-7500,Li-cor,Inc.,USA)和数据采集器(CR5000,CSI,USA)组成,采样频率10 Hz.原始输出数据包括水平风速(U_x,U_y),垂向风速(U_z),二氧化碳绝对密度(CO₂),水蒸气绝对密度(H₂O),超声虚温(T_s),大气压力(pressure)和CSAT3诊断值(diag_csat).系统工作时计算在线通量(每30 min),并存储通量数据(每30 min)和时间系列数据(10 Hz).本研究所用资料包括2008年10月13~19日、11月10~16日,沈阳城市集中供暖热时间始于11月1日.

1.3 数据计算方法

涡度相关法(Eddy covariance)是通过计算物理量的脉动与风速脉动的协方差求取湍流输送量(湍

沈阳市是辽宁省省会,城市区(市内五区)土地面积3 495 km²,人口数499.9万人,人口密度1 430人·km⁻²^[14].研究地点所处的沈河区面积17.6 km²,人口数61.3万人,人口密度34 830人·km⁻²,是沈阳城市人口和交通最为稠密的区.全市民用汽车拥有量在近年来呈直线升高趋势,2000年210 893辆、2004年361 323辆、2005年420 609辆、2006年478 550辆,平均年增长43 469辆.沈阳市能源消费(表1)以煤炭为主,其次为电力,能源消费量在近几年呈增长的趋势.

1.2 实验方法

涡度相关观测系统安置在沈阳区域气象中心楼顶(东经123°25′44.91″,北纬41°46′11.18″),距地高

表1 沈阳城市能源消费表^[14]

年份	煤炭消费总量 /万 t	电力消费总量 ×10 ⁹ /kWh	焦炭/万 t	燃料油/万 t	汽油/万 t	柴油/万 t
2001	838.4	115.2	3.7	85.9	2.3	3.4
2002	899.4	118.4	3.6	99.4	2.5	3.7
2003	1 068.2	131.2	4.8	90.2	2.7	4.4
2004	1 351.8	142.2	7.5	92.2	4.6	5.6
2005	1 731.2	154.3	6.5	75.2	3.9	5.9
2006	2 237.7	167.8	13.5	87.1	8.2	12.2



图1 沈阳城市涡度相关系统位置

Fig.1 Location of the eddy covariance site at urban area in Shenyang

流量量)的方法,也称湍流脉动法.CO₂通量、潜热通量和感热通量的计算如下:

$$F_c = \overline{w'\rho'_c}$$
(1)

$$LE = L_v \overline{w'\rho'_v}$$
(2)

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'} \quad (3)$$

式中, F_c 是 CO₂ 通量, LE 是潜热通量, H 是感热通量, w' 是垂直风速与平均值的瞬时偏差, 即扰动值, ρ'_c 是 CO₂ 密度的瞬时扰动值, L_v 是水的蒸发潜热, ρ'_v 是水汽密度的瞬时扰动值, ρ_a 为空气密度, C_p 为空气定压比热, T' 是大气温度的瞬时扰动值. $\overline{w'T'}$ 、 $\overline{w'\rho'_c}$ 、 $\overline{w'\rho'_v}$ 是垂直风速分别和 CO₂ 密度、水汽密度、温度的协方差. 由于涡度相关观测系统即可以稳定地捕捉 10 Hz 左右的脉动, 又可以在线计算这些协方差量, 被认为是最直接的测定方法^[15].

为确保资料的可靠性, 本研究利用获取的 10 Hz 时间系列数据, 采用以下流程进行通量计算^[16, 17]: ①采用 FLUXNET 推荐的 EdiRe 软件对原

始 10Hz 数据进行坐标旋转、WPL 等修正, 得到 0.5 h 的数据; ②去除由外界环境干扰(如雨滴、尘粒等)和仪器内部误差产生的异常值; ③差分法剔除: 对以上步骤处理后的数据进行差分法剔除; ④摩擦风速剔除: 采用朱治林等^[18]的 AVT 法(“平均值检验法”)进行夜间数据剔除.

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度变化特征

为了解供暖期前后大气中 CO₂ 浓度变化, 选择 2008 年 10 月 13 ~ 19 日、2008 年 11 月 10 ~ 16 日 2 个完整周 CO₂ 浓度和碳通量观测数据进行分析. 10 月 13 ~ 19 日 CO₂ 浓度变化的日变化如图 2 所示.

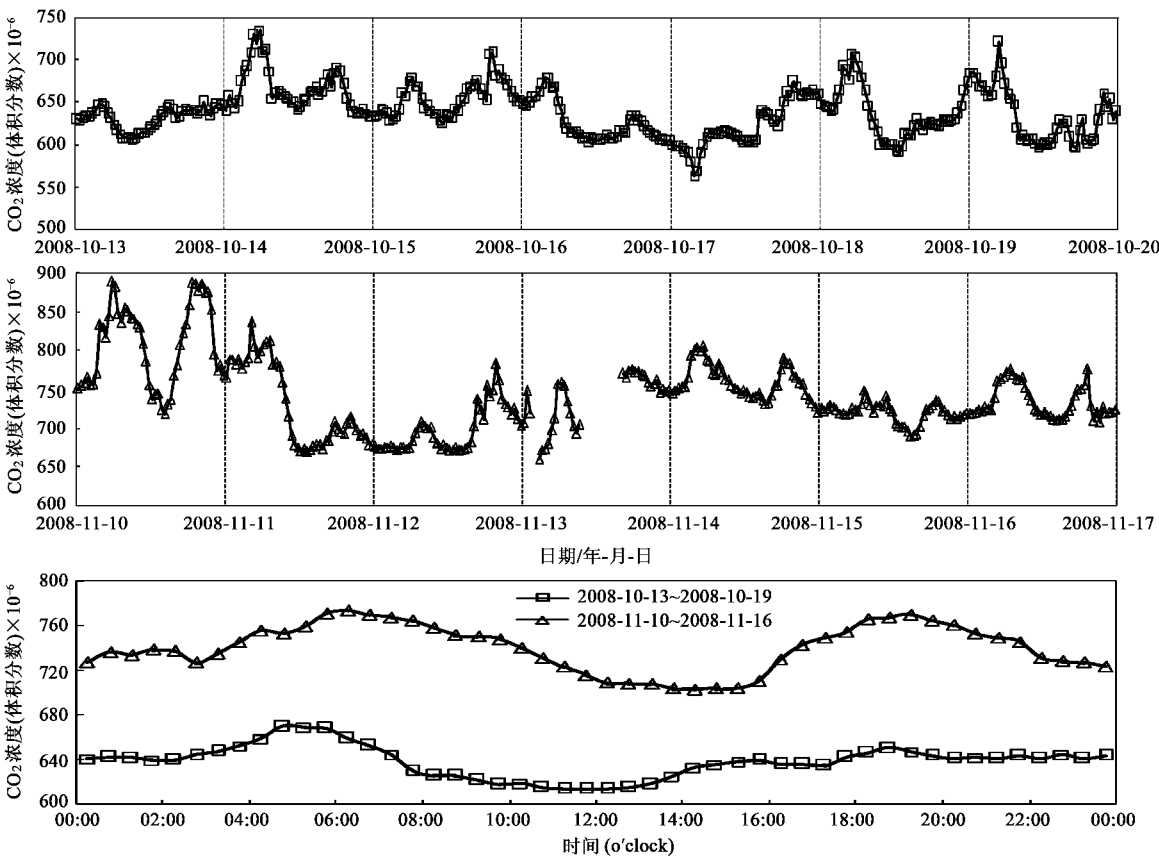


图 2 沈阳市供暖期前后大气 CO₂ 浓度变化

Fig. 2 Diurnal variation of atmospheric CO₂ concentration before and in the heating period at Shenyang

CO₂ 浓度的日变化呈双峰型, 供暖期开始后双峰型更加明显. 从 00 :00 开始, 随着时间的变化 CO₂ 浓度逐渐增加. 供暖期前在 04 :45 CO₂ 浓度(体积分数)达到第 1 个峰值(669.96×10^{-6}), 随后浓度降低, 到 09 :45 ~ 13 :15 CO₂ 浓度(体积分数)维持在 $614.11 \times 10^{-6} \sim 618.87 \times 10^{-6}$ 之间, 为全天的最低值. 13 :15 之后 CO₂ 浓度上升(体积分数)在 15 :45 达到 639.55×10^{-6} 后略降低, 在 17 :15 又开始升高 18 :45 达到第 2 个峰值 650.66×10^{-6} , 之后逐渐降低直到 00 :00. 供暖期后峰值和谷值出现的时间都有延迟, 峰值分别出现在 06 :15(773.59×10^{-6})和 19 :15(770.14×10^{-6}), 谷值出现在 12 :15 ~ 15 :15

($703.90 \times 10^{-6} \sim 708.82 \times 10^{-6}$).

集中供热前大气中 CO_2 浓度(体积分数)日平均变化范围为 $563.07 \times 10^{-6} \sim 735.10 \times 10^{-6}$, 平均值在 638.48×10^{-6} . 集中供热后 CO_2 浓度(体积分数)变化范围为 $659.83 \times 10^{-6} \sim 889.27 \times 10^{-6}$, 平均值在 741.02×10^{-6} . 明显看出, 供暖前后 CO_2 浓度(体积分数)平均值相差达 102.54×10^{-6} . 美国亚利桑那州凤凰城近地面的二氧化碳浓度(体积分数) 650×10^{-6} ^[19] 与本研究的观测结果相近. 供暖期前 CO_2 浓度(体积分数)在夜晚至日出逐渐升高, 是由于植物光合作用减弱, 对流输送降低, 大气 CO_2 汇强度逐渐减弱, 土壤和生物呼吸以及工业生产等产生的 CO_2 在近地层大气中积累, 导致到 06:00 左右有峰值出现. 此后浓度降低, 到 07:45 ~ 08:45 虽然这一段时间是机动车的高峰期, 但浓度降低变化不大, 因为随着太阳的升起, 植物光合作用增强, 植物吸收有效降低了 CO_2 浓度^[20, 21], 植物碳吸收有效抵消了机动车排放的 CO_2 , 机动车高峰期后车流量减少, 光合作用逐渐增强, 一直到下午 13:15 CO_2 浓度都处于低值, 此后 CO_2 浓度上升到 15:45 ~ 17:15 对应了第 2 次机动车高峰. 第 2 个峰值 18:45 对应了餐饮服务业和家庭生活用燃料的高峰, 此时植物的光合作用停止. 供暖期后高、谷出现时间变化一方面是由于日出时间延迟, 另一方面是 18:00 ~ 20:00 集中供热时间与第 2 次峰值相对应.

平时工作日 CO_2 的浓度略高于周末, 供暖期开始前平日与周末 CO_2 的浓度分别为 639.84×10^{-6} 、 635.08×10^{-6} , 供暖期开始后工作日 747.04×10^{-6} , 周末 726.90×10^{-6} , 供暖期后分别增加了 107.2×10^{-6} 和 91.82×10^{-6} . Loretta 等^[12] 在意大利罗马研究也得到相近的结果.

2.2 CO_2 通量的变化特征

城市 CO_2 通量变化显示了城市下垫面与大气间 CO_2 的净交换过程, 正值表示释放, 负值表示吸收. 沈阳城市除部分时段表现为 CO_2 吸收外, 其他时段均为正值表示城市是 CO_2 的排放源. 城市 CO_2 通量存在着明显的白天释放量高、夜晚释放量低的日变化, 供暖期开始前第 1 个峰值出现的时间与 CO_2 浓度第 1 个峰值出现的时间一致在 04:45, 随后通量有小幅降低, 07:00 ~ 08:00 CO_2 通量明显增高, CO_2 通量与交通流量呈线性相关^[12], 峰值与交通高峰时间对应, 供暖期开始后 CO_2 通量的变异比供暖前大, 由于多数供暖设备陆续在傍晚启动很明

显在 17:15 ~ 18:15 CO_2 通量出现了高值. 由沈阳统计年鉴可看出, 沈阳城区能源消耗以燃煤为主, 尤其在冬季采暖期开始后燃烧化石燃料排出大量 CO_2 , 同时大气对流弱, 而且绝大多数植物已经落叶, 未落叶的常绿植物光合作用固定 CO_2 的能力也很低^[21], 汇弱源强导致 CO_2 释放明显增多.

CO_2 通量变化日动态显示, 供暖期前后 CO_2 通量释放主要在 08:00 ~ 20:00, 尤其是在 16:00 ~ 20:00. 10 月 13 ~ 19 日 CO_2 通量的变化范围从 0 ~ $58.82 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $14.10 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ [$52.69 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 11 月 10 ~ 16 日 CO_2 通量的变化范围为 0 ~ $84.09 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $22.50 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ [$82.50 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] (图 3).

由于下垫面的复杂性, 不同城市获得的通量数据不同. Nemitz 等^[10] 在英国爱丁堡市中心 11 月份 CO_2 通量为 $26 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 峰值可达到 $50 \sim 75 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 盐湖城^[22] 通量 8 月为 $-4 \sim 6 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 9 月为 $3 \sim 6 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 最大值与交通高峰 09:00 相同, 沈阳城市 CO_2 通量与爱丁堡市观测的结果相近高于盐湖城, 主要是因为观测塔位于盐湖城郊区的 Kenecott 周围 56% 有植被覆盖. 而沈阳城市与爱丁堡市的观测位置均在城市中心, 交通和供暖影响强烈.

供暖期开始前, CO_2 通量变化趋势与温度变化曲线存在着一定的对应关系(图 4), 尤其是温度的高值与 CO_2 通量的峰值; 在供暖期开始后, 11 月 10 ~ 16 日温度变化不稳定, CO_2 通量和温度变化曲线相关不明显.

进一步分析 CO_2 通量与水热通量之间的关系表明, 感热通量(H_c)是由于湍流运动从地面向大气传输的热量通量; 潜热通量(LE)是由于水气相变向大气传输的热量通量, 感热和潜热向大气输送为正, 向地面输送为负(图 5). 图 6 和图 3 对比在夜间大气稳定, 植物呼吸和其他的人为活动释放的 CO_2 积累在地表, 每天早晨感热通量转为正值的时间与 CO_2 通量的第 1 个峰值对应, 太阳升起加热促进湍流向上输送 CO_2 , 日出后建筑物及地表吸热、排放废物截获太阳射线使空气增温, 与全利红等^[13] 研究结果相似.

由于供暖, 所有风向的 CO_2 浓度均升高, 特别是东风下的 CO_2 浓度升高增量显著. 由于采用烧煤供暖, 整个大气中的 CO_2 浓度均增加, 而由于观测塔的东南面是集市和东西与南北公路交叉的立交

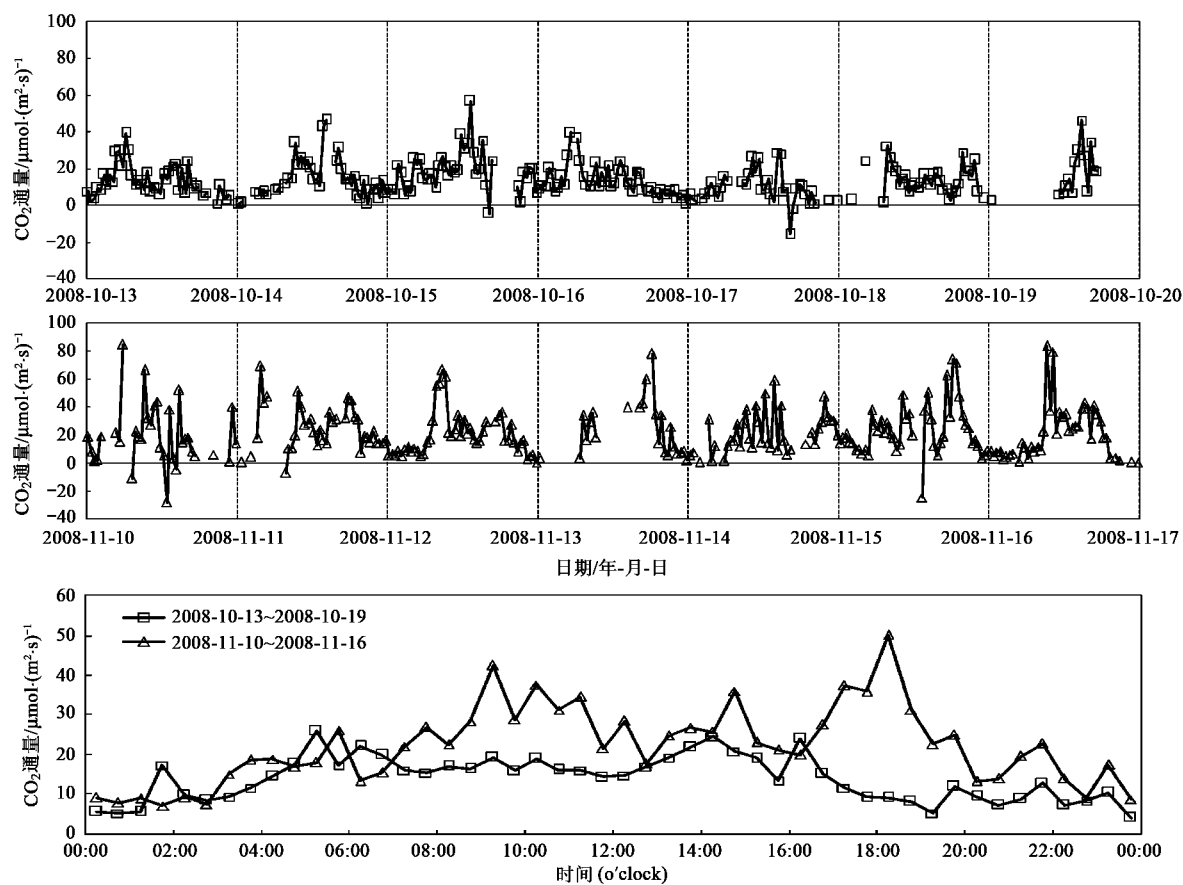


图 3 沈阳城市供暖期前后 CO₂ 通量变化

Fig. 3 Diurnal variation of atmospheric CO₂ fluxes before and in the heating period at Shenyang

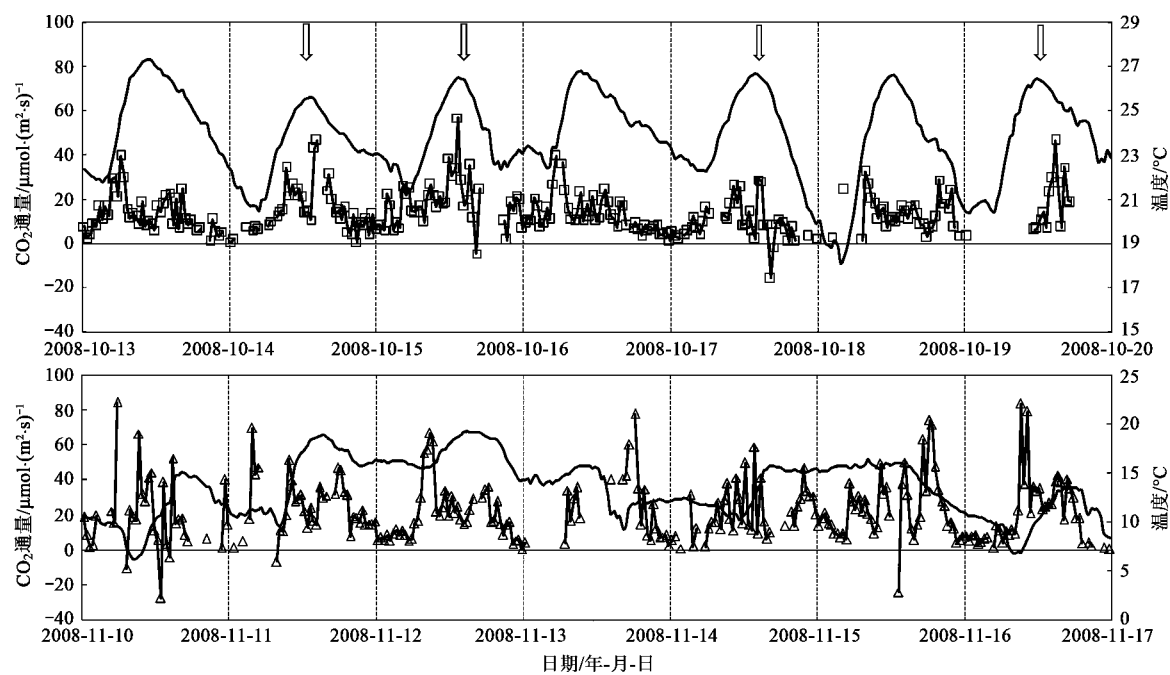


图 4 沈阳城市供暖期前后温度和 CO₂ 通量曲线

Fig. 4 Temperature and CO₂ fluxes dynamics before and in the heating period at Shenyang

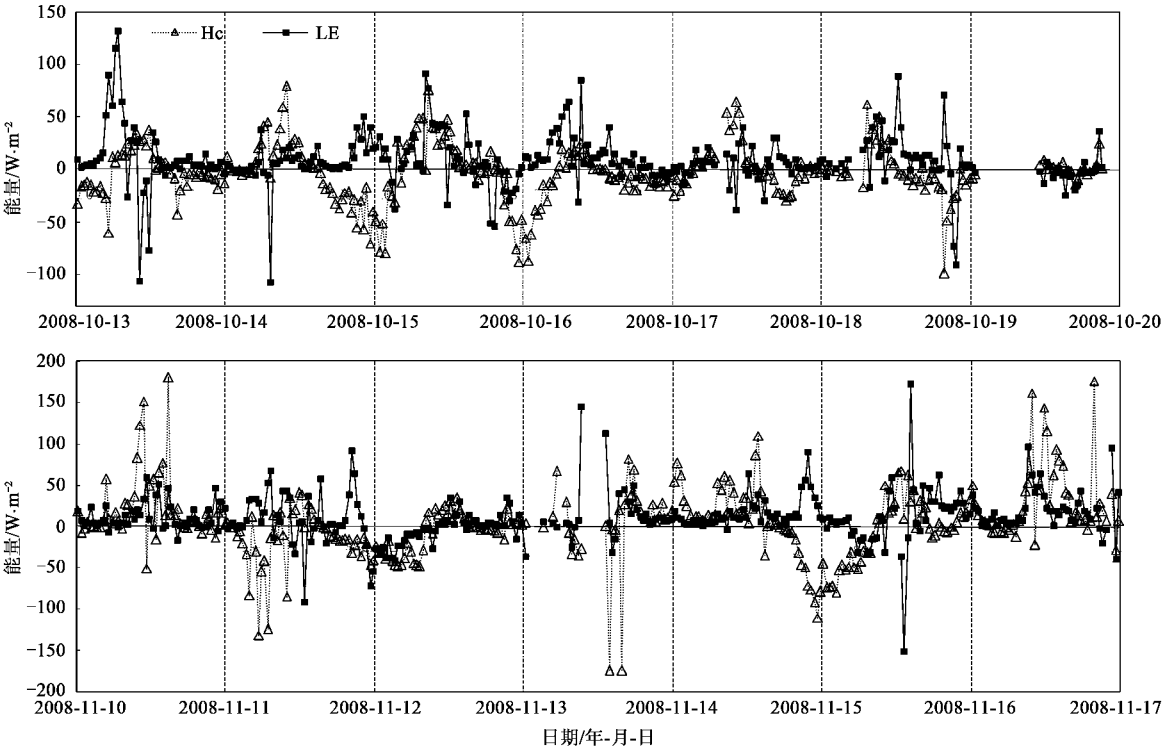


图 5 沈阳城市供暖期前后感热 (Hc)、潜热通量变化曲线 (LE)

Fig. 5 Hc and LE dynamics before and in the heating period at Shenyang

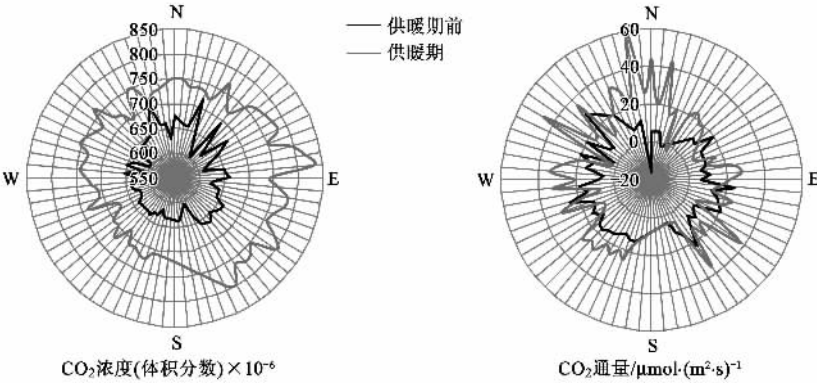


图 6 沈阳城市供暖期前后不同风向的 CO₂ 浓度和通量

Fig. 6 CO₂ concentration and CO₂ fluxes in different wind directions before and in the heating period at Shenyang

桥,车辆与人员活动较多,排放 CO₂ 较多,从而使得东南风下的 CO₂ 浓度显著增加,反映出风向与源区对 CO₂ 浓度的协同影响。尽管如此,CO₂ 通量仅在北风下显著增加,这是由于通量反映的是垂直方向的变化,而辽宁省气象局的锅炉处于塔的北边,烧煤供暖排放的 CO₂ 随烟囱升高引起。这亦证明了风向与源区对 CO₂ 通量的协同作用。

3 结论

(1) 沈阳作为中国北方典型的冬季燃煤取暖城

市,供暖期和供暖期前 CO₂ 浓度和通量特征受燃煤排放显著影响。CO₂ 浓度和通量存在着明显的日变化,这种变化的峰值主要受植物光合作用、机动车流量、冬季取暖燃料燃烧的影响,供暖期前植被光合作用对二氧化碳排放有明显的削弱作用;受供暖期燃料燃烧和植物光合能力降低的影响,供暖后 CO₂ 浓度平均值增加 102.54 μmol·mol⁻¹,CO₂ 排放明显增强,CO₂ 排放比供暖期前高 29.37 g·(m²·d)⁻¹,沈阳城市基本上是 CO₂ 的排放源。

(2) 供暖期前 CO₂ 通量高值与温度的高值有一

定的对应关系. 感热通量转为正值的时间与 CO₂ 通量的第一个峰值对应 ,夜间大气稳定. 相比较感热和潜热通量 ,CO₂ 通量受人为影响更加强烈. 不同风向来源反映了观测它周围不同下垫面类型对 CO₂ 浓度和通量影响 ,供暖期受燃煤影响各风向来源的 CO₂ 浓度都显著增加 ,受北侧锅炉燃煤的影响 CO₂ 通量仅在北风下显著增加 ,反映了风向与源区对 CO₂ 浓度和通量的协同作用.

参考文献：

[1] Potere D , Schneider A. A critical look at representations of urban areas in global maps[J]. *GeoJournal* 2007 **69** 55-80.

[2] William B , Meyer B. Changes in land use and land cover : A global perspective [M]. New York : Turner II Cambridge University Press ,1994. 287-328.

[3] O 'Meara M , Jane A. Reinventing Cities for People and the Plane[M]. Washington : World Watch ,1999. 147.

[4] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems :past , present and future[J]. *Global Change Biology* 2003 **9** 479-492.

[5] Hutley L B , Leuning R , Beringer J , *et al.* The utility of the eddy covariance techniques as a tool in carbon accounting :tropical savanna as a case study[J]. *Australian Journal of Botany* 2005 , **53** 663-675.

[6] Moriwaki R , Kanda M. Seasonal and diurnal fluxes of radiation , heat , water vapor and CO₂ over a suburban area[J]. *Journal of Applied Meteorology* 2004 **43** :1700-1710.

[7] 严燕儿 ,赵斌 ,郭海强 ,等. 生态系统碳通量估算中耦合涡度协方差与遥感技术研究进展[J]. *地球科学进展* ,2008 ,**23** (8) 884-894.

[8] 王介民 ,王维真 ,奥银焕. 复杂条件下湍流通量的观测与分析 [J]. *地球科学进展* 2007 **22**(8) :791-797.

[9] Grimmond C S B , King T S , Cropley F D ,*et al.* Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban ,environments : methodological challenges and results from Chicago[J]. *Environ Poll* 2002 **116** : 243-254.

[10] Nemitz E , Hargreaves K J , Mcdonald A G , *et al* . Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂emissions on a city scale[J]. *Environ Sci Technol* 2002 **36** : 3139-3146.

[11] Soegaard H ,Møller-Jensen L. Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements[J]. *Remote Sensing Environ* 2003 **87** 283-294.

[12] Loretta G ,Laura V. Daily and seasonal variation of CO₂ in the city of Rome in relationship with the traffic volume[J]. *Atmospheric Environment* 2005 ,**39** 2619-2624.

[13] 全利红 ,胡非. 城市边界层动量和保守物通量的特征[J]. *气候与环境研究* 2007 ,**12**(1) 29-36.

[14] 沈阳城市统计局. 沈阳年鉴[M]. 北京 :中国统计出版社 , 2007. 360-386.

[15] 何齐瑾. 盘锦芦苇湿地碳通量特征与模拟研究[D]. 北京 :中国气象科学研究院 ,2007.

[16] Zhou L , Zhou G S , Jia Q Y. Annual cycle of CO₂ exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China[J]. *Aquatic Botany* 2009 **91** 91-98.

[17] Papale D , Reichstein M , Aubinet M , *et al* . Towards a standardized processing of net ecosystem exchange with eddy covariance technique : algorithms and uncertainty estimation[J]. *Biogeosciences* 2006 **3** 571-583.

[18] 朱治林 ,孙晓敏 ,温学发 ,等. 中国通量网(Chinaflux)夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究[J]. *中国科学(D 辑)* , 2006 **36**(增刊 I) 34-44.

[19] Idso C D ,Idso S B ,Balling J *et al* . An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix ,Arizona ,USA[J]. *Atmospheric Environment* 2001 **35** 995-1000.

[20] 王木林 ,李兴生 ,程红兵. 大气本底监测站的 CH₄ , CO₂ 和 CO 浓度的初步分析[A]. 见 :周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境变化的影响[C]. 北京 :气象出版社 ,1996. 38-47.

[21] 王长科 ,王跃思 ,刘广仁. 北京城市大气 CO₂ 浓度变化特征及影响因素[J]. *环境科学* 2003 **24**(4) :13-17.

[22] Ramamurty P ,Pardyjak E R. A comparison of CO₂ fluxes at two sites within the urbanized salt lake valley[J]. *IAUC Newsletter* , 2007 **26** 1-5.