

何文, 刘辉志, 冯健武. 2010. 城市近地层湍流通量及 CO₂ 通量变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 21-33. He Wen, Liu Huizhi, Feng Jianwu. 2010. Characteristics of turbulent fluxes and carbon dioxide flux over urban surface layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 21-33.

城市近地层湍流通量及 CO₂ 通量变化特征

何文^{1,2} 刘辉志¹ 冯健武^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用北京 325 m 气象塔 47 m 高度上 2006 年全年连续观测获得的湍流资料, 分析了北京城市近地层动量通量、感热通量、潜热通量和 CO₂ 通量的典型日变化、月平均日变化和季节变化特征。分析结果显示: 动量通量具有明显的单波峰日变化特征, 在 15 时 (北京时间) 左右达到最大, 季节变化中春季最大, 冬季次之, 夏、秋季最小; 感热通量和潜热通量全年变化范围分别为 $-92 \sim 389 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $-75 \sim 376 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其日变化也表现为单波峰特征。感热通量的日变化受城市下垫面和人为热源影响, 入夜后虽然降为负值, 但只略小于 0。阴雨天感热通量和潜热通量均很小, 降雨前后有明显区别。感热和潜热最大值分别在春季 3 月和夏季 6 月, 最小值都在冬季 1 月; 城市下垫面 CO₂ 通量总表现为正值, 即净排放, 最大值为 $3.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 不稳定情况下最小值小于 $-2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。受到人类活动的影响, CO₂ 通量的日变化特征在工作日与周末有明显区别; 由于冬季采暖, CO₂ 通量明显大于夏季; 在夜间, CO₂ 通量受进城车辆的影响也出现高值。

关键词 城市近地层 湍流通量 CO₂ 通量

文章编号 1006-9585 (2010) 01-0021-13 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Characteristics of Turbulent Fluxes and Carbon Dioxide Flux over Urban Surface Layer

HE Wen^{1,2}, LIU Huizhi¹, and FENG Jianwu^{1,2}

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Diurnal and seasonal variations of turbulence and carbon dioxide flux were investigated based on one year continuous measurements at the height of 47 m on Beijing 325-m meteorological tower. Results showed that the momentum fluxes had a typical diurnal variation characteristic with a single peak in the afternoon around 1500 LST. The momentum fluxes were the largest in spring, followed by winter, then summer and autumn. The sensible and latent heat fluxes throughout a year ranged between $-92 - 389 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and $-75 - 376 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. Typical diurnal variation could be observed obviously in sunny days with a single peak. The sensible heat fluxes usually reduced to a value slightly below zero at night due to the heat released by human. Both of the sensible and latent heat fluxes were small during rainy days and there were clear differences before and after the rain. The maximums of

收稿日期 2008-09-06 收到, 2009-11-12 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 40575069 和中科院知识创新工程 KZCX2-YW-219

作者简介 何文, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气边界层湍流数据收集处理方面工作。E-mail: hewen12345@163.com

sensible and latent heat fluxes were observed in March and June respectively, with the minimum in January for both. The CO_2 flux was mainly positive throughout the year, with the maximum of $3.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and the minimum of less than $-2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in unstable conditions. The diurnal variation characteristics of CO_2 flux were influenced by human activities. There were obvious differences between weekdays and weekends. Because of human heating, CO_2 flux was larger in winter than in other seasons. Peaks of CO_2 flux were also observed during the midnight because of the trucks transporting to Beijing.

Key words urban surface layer, turbulent flux, carbon dioxide flux

1 引言

城市化的快速发展所引起的空气污染及其对气候的影响是当今国际研究的热点问题,城市下垫面的非均匀性和各种人为排放源又使得城市边界层中的湍流过程异常复杂,因此研究城市边界层中的动量通量、热通量、水汽通量和碳通量等湍流通量的变化特征显得尤为重要。

城市与人类的关系越来越密切,有报告称,20世纪末全球大约有45% (约30亿)的人口居住在城市地区,而这个数字在2025年左右会翻一倍,占总人口比例也会增长为2/3 (Uitto and Biswas, 2000)。另外近年来温室气体排放引起的全球气候变化问题已经越来越严重,城市作为主要的温室气体排放源,城市边界层也受到人们越来越多的关注,并取得了不小的成果 (Oke, 1987)。这些成果主要集中在对城市热岛、各种气象要素 (降雨、风场、温度场、湿度等) 等宏观特征方面。近年来,以CSAT3超声风速温度计和LI-7500水汽—二氧化碳分析仪为主的涡动相关通量观测系统 (Campbell Scientific, Inc.), 由于其高频响应较好和功耗较低,虽然在非均匀的城市边界层观测和研究中,受到诸如能量闭合 (Culf et al., 2004), 弱湍流情况下碳通量偏低 (Goulden et al., 1996), 夜间稳定边界层中出现的间歇、波动和流动分离, 降雨或沙尘天气对仪器镜片的污染等问题的困扰, 依然被广泛采用, 带动了城市边界层中微观的湍流特征观测和研究的发展。

全球生态系统通量观测网 (FLUXNET) 中不少站点就设在城市地区 (Baldochi et al., 2001), 旨在利用涡动相关观测系统观测和研究城市边界层中动量、热量、水汽和物质输送特征及

其对全球变化的影响, 其中对于城市碳通量的观测和研究更是目前国际上研究的热点问题。

近年的城市碳通量研究主要集中在中纬度发达国家和地区 (美国、日本、英国、法国、澳大利亚、瑞士等) (Idso et al., 2001; Nemitz et al., 2002; Vogt et al., 2003; Grimmond et al., 2004; Moriwaki et al., 2004; Coutts et al., 2007), 高纬度的芬兰和发展中国家墨西哥也进行过一些系统观测和研究 (Velasco et al., 2005; Vesala et al., 2008)。早期的观测都是短期的, 最近几年才开始进行长期连续系统的城市碳通量观测研究 (Grimmond et al., 2002), 并发展出“Urban-FluxNet: CO_2 -Flux Measurements”计划, 建立了遍布全球的城市碳通量观测网。

北京325 m气象塔是目前国际上为数不多的位于发展中国家超大城市市区的气象观测塔, 2005年在47 m高度上架设了CSAT-3超声风速仪和LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪, 近年来对各湍流通量和 CO_2 通量进行着连续的观测和数据采集, 并已经加入全球城市碳通量观测计划中。根据殷达中和洪钟祥 (1999) 的研究, 气象塔观测点粗糙度 z_0 平均约为3.9 m (与风向有关), 零平面位移高度 d 约为23 m, 虽然近几年高层建筑有所增加, 结果有一定的差异, 但是依然可以认为47 m高度处于常通量层中, 其观测资料可以代表整个城市粗糙下垫面。

本文利用47 m高度上2006年全年连续湍流观测原始资料, 分析了北京城市近地层动量通量、感热通量、潜热通量和 CO_2 通量等各湍流通量的典型日变化、月平均日变化和季节变化特征及其影响因子。该分析有助于人们了解城市复杂非均匀下垫面对于动量、热量、水汽输送的影响, 并得到发展中国家超大城市的碳收支特征。

2 观测场地及资料处理

中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象铁塔 (39°58'N, 116°22'E), 位于北京市内德胜门以北约 2.7 km 处, 海拔高度 49 m, 于 1974 年开始建设, 1979 年 8 月正式投入使用。建立气象塔的目的是为“首都大气污染物理规律研究”服务, 同时也是为大气边界层理论研究服务 (洪钟祥, 1983)。气象塔建成初期, 周围的地形反映了市郊的一般特征, 有农田、房舍、树木、小河等, 半径 500 m 范围内无高大建筑群和树林。80 年代末 90 年代初期以来, 随着我国经济的发展, 北京市城市建设及城市化规模的快速发展, 目前北京 325 m 气象塔周围建起了多座高层建筑, 已从当初城郊下垫面变为现在的城市粗糙复杂下垫面。图 1 是由 GoogleEarth 软件截取的观测塔附近地表特征图。观测塔现在位于三环路和四环路之间,

距离北三环约 1 km, 在其东面 200 m 处为南北走向的京昌八达岭高速公路, 车流量很大; 北面 20 m 处有一条宽约 5 m 的小河, 100 m 处为东西走向的北辰西路, 车流量早晚较大, 再往外为建筑不太高的居民区; 南面 200 m 外耸立一排高度为 80 m 左右的冠城园高档住宅区; 西面和东南面有两个小型遗址公园; 西北方向近年也出现一些高层建筑。总体来说, 大塔附近下垫面综合了混凝土地面、高速公路、草地、高低建筑和街道等城市下垫面特征, 是研究北京城市边界层特征的难得观测平台。

该塔 47 m 高度上安装了 CSAT3 型超声风速仪及 Li-7500 CO₂/H₂O 分析仪以 10 Hz 的频率连续采集得到湍流原始数据, 通过数据线连接到地面微机储存。原始数据包含了 10 Hz 的水平风速 (u 、 v)、垂直风速 w 、温度 T 、CO₂ 浓度 C 、比湿 q 、气压 p 等要素的瞬时值, 利用涡动相关方法, 就能够计算出 30 min 平均的各通量值。



图 1 北京 325 m 气象塔附近下垫面特征

Fig. 1 The surface environment near Beijing 325 m meteorological tower

涡动相关通量系统一般以 10~20 Hz 的采样频率采集传感器高度上的水平风速 u 、 v ，垂直风速 w ，温度 T ，比湿 q 和 CO_2 浓度 C 。在一定“平均时间”（如 30 min）内，某标量 C 的湍流输送通量可由下式计算：

$$Q_C = \overline{w(\rho C)} = \overline{\rho w C}.$$

涡动相关法的核心内容就是首先得到垂直速度脉动项 w' 和其他特征量脉动项的协方差，然后计算各种通量，过程中伴随着坐标旋转和各种修正方法的应用（洪钟祥，1983；Stull，1988；殷达中和洪钟祥，1999；李国平等，2002）。通过雷诺分解，则动量通量（即切应力， τ ）、感热通量（ H ）、潜热通量（ L_E ）和 CO_2 通量（ F_C ）可分别由以下各脉动量计算：

$$\begin{aligned}\tau &= -\overline{\rho u' w'}, \\ H &= c_p \overline{\rho w' T'}, \\ L_E &= \lambda \overline{\rho w' q'}, \\ F_C &= \overline{\rho w' C'},\end{aligned}$$

式中， u' ， w' ， T' ， q' ， C' 分别为进行雷诺分解后生成的水平风度、垂直风速、温度、湿度和 CO_2 浓度的脉动量； ρ 为空气密度，单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； c_p 为空气比定压热容，单位： $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； λ 为蒸发潜热，单位： $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； τ 、 H 和 L_E 的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ； F_C 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 ρ 、 c_p 、 λ 分别由以下各式计算：

$$\rho = 100 \times p / [287.1 \times (T_a + 273.16) \times (1 + 0.61 \times q)],$$

$$c_p = 1004.7,$$

$$\lambda = (2.501 - 0.00237 \times T_0) \times 10^6,$$

其中， p 为气压，单位： hPa ； T_a 为气温，单位： $^{\circ}\text{C}$ ； q 为比湿，单位： $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； T_0 为地表温度，单位： $^{\circ}\text{C}$ 。

以上资料处理过程采用 EdiRe 软件 (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe>)，其中穿插进行了一定质量保证和质量控制 (QA&QC)，并对处理后获得的 30 min 湍流结果资料进行了一定空缺填补。但是由于许多客观原因，如降雨沙尘天气、仪器故障、更换存储卡等影响，用于分析的资料并不十分完整。7 月 1 日~8 月 10 日大约 40 天的资料处理出来的结果偏差较大，全部删除，不予分析，因此 8 月份平均变化只取了后 20 天，夏季变化也只有 50 天左右

的平均。

3 城市近地层湍流通量及 CO_2 通量变化特征

3.1 动量通量变化特征

根据通量定义，单位时间通过单位面积空气质量即为动量通量。我们把这个面当作一个实体，则空气通过它的时候，由于空气速度产生的冲力作用，一定会使这个面发生变形，就像石头投入水中一样。因此，动量通量可以等同于这个冲力的影响，因此动量通量 $\tau = -\rho_0 \overline{u'w'}$ (ρ_0 为空气密度)，称之为雷诺应力 (Stull，1988)。它的大小主要与下垫面粗糙度、风速以及边界层稳定度有关。

图 2 给出了动量通量 2006 年各月月平均日变化特征。可以看出，全年动量通量变化范围在 0~0.9 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间，对比青藏高原 (李国平等，2002) 0~0.06 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 和珠峰绒布河谷地区 (冯健武等，2007) 0~0.3 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，城市动量通量变化幅度大得多，城市下垫面的高粗糙度是造成这一现象的主要原因。各月变化中，3、4 月变化幅度最大，1 月份变化幅度很小，8、9 月夜间极小值最小，而且，每月日变化趋势基本一致。定义归一化因子 r 等于月平均日变化中各时刻值与月平均值之比，则归一化因子 r 的日变化趋势与月平均日变化是一致的，把全年 11 个月归一化因子 r 的日变化作平均，得出全年动量通量平均日变化趋势 (图 3)。可见，动量通量日变化呈明显的单波峰特征，午夜至日出时段，边界层基本处于稳定状态，湍流发展较小，动量通量保持平稳，日出后开始增大，至午后 15 时 (北京时间，下同) 左右达到最大，之后降低至 22 时左右达到平稳状态。入夜之后，由于城市人为热源的排放以及高大粗糙元阻碍热量扩散等原因，城市边界层状态由白天的不稳定转为稳定的过程需要的时间较长，这种亚稳定状态几乎能持续到夜间 22 时左右。此结果与李国平等 (2002) 在拉萨等地观测结果相近，而由于地形的差异，与冯健武等 (2007) 珠峰绒布河谷地区研究观测结果则完全不同。

图 4 给出了动量通量四季季平均日变化特征。冬季后半夜由于经常有较大水平风，使得动量通

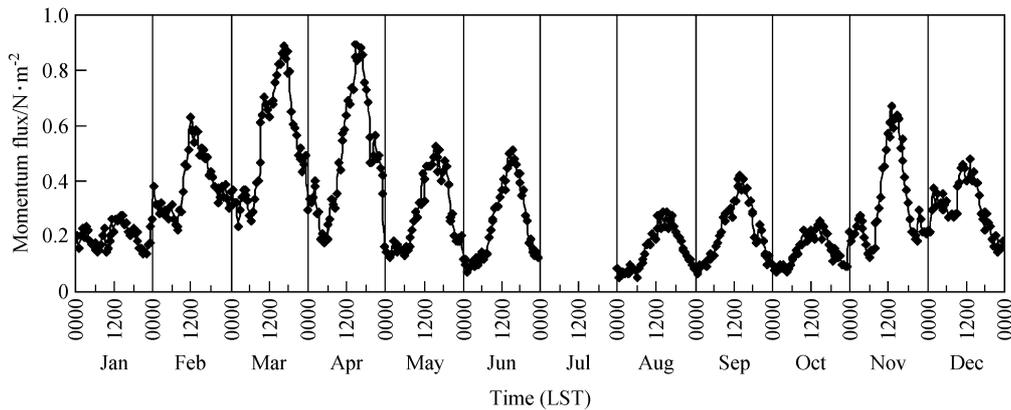


图 2 动量通量各月月平均日变化特征
Fig. 2 Monthly average diurnal variation of momentum flux

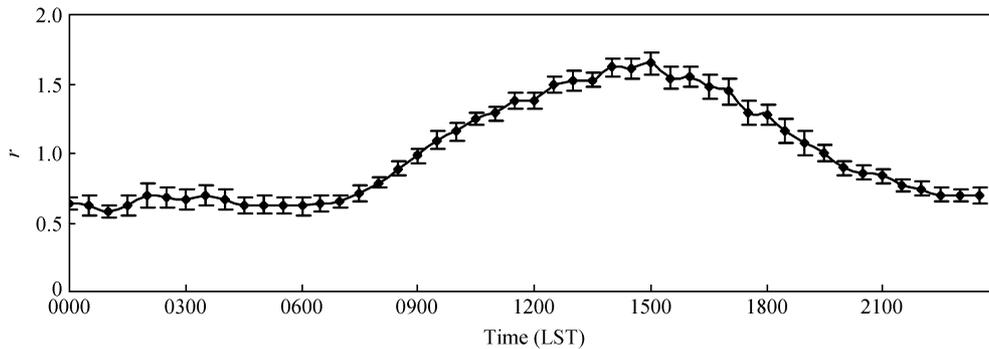


图 3 动量通量归一化 (图中线段表示误差)
Fig. 3 Normalization factor (r) of momentum flux (line segments in the figure indicate error bars)

量与春季大小相近, 较夏季和秋季大; 白天春季最大, 夏、秋、冬三季变化差别不大; 入夜后春季最大, 冬季次之, 夏秋季最小。春、夏、秋、冬四季平均动量通量分别为 0.44、0.20、0.23、0.30 $N \cdot m^{-2}$, 全年总平均值为 0.29 $N \cdot m^{-2}$ 。

3.2 感热通量和潜热通量变化特征

3.2.1 感热通量和潜热通量整体变化特征

感热通量变化范围在 $-92 \sim 389 W \cdot m^{-2}$ 之间 (图 5), 潜热变化范围在 $-75 \sim 376 W \cdot m^{-2}$ 之间 (图 6), 年平均值分别为 $29.2 W \cdot m^{-2}$ 和 $28.7 W \cdot m^{-2}$ 。相比 1998 年 5~8 月 TIPEX 试验中青藏高原改则地区 (李家伦等, 1999) 感势通量和潜热通量最大值 $250 W \cdot m^{-2}$ 和 $200 W \cdot m^{-2}$, 2002~2003 年半干旱地区吉林通榆干湿季观测结果 (刘辉志等, 2006), 珠峰绒布河谷地区 (冯健武等, 2007) 2006 年 6 月观测得到的 $294 W \cdot m^{-2}$ 和 $73 W \cdot m^{-2}$, 北京城市近地层感热通量和潜热

通量都要大一些。城市下垫面主要由比热较小的混凝土或者沥青马路街道组成, 受太阳辐射时温度变化较大, 是感热通量较大的主要原因, 潜热通量的较大值则主要受到夏季雨季天气影响。

3.2.2 感热通量和潜热通量典型日变化特征

感热通量和潜热通量受天气过程和季节变化的影响差异很大, 本文分别选取 3、6、9 和 12 月中某一晴天日变化作为不同季节典型日变化特征, 另外选取 4 月 6 日前后共五天的日变化作为阴雨天前后典型日变化特征进行分析。

感热通量和潜热通量晴天的典型日变化规律基本一致 (图 7), 夜间 21 时后至次日日出前较小, 感热通量为负值, 但前半夜只略小于 0, 绝对值小于 $30 W \cdot m^{-2}$, 后半夜有所降低, 但一般不会小于 $-100 W \cdot m^{-2}$, 冬季夜间这种表现尤其明显。夜间城市人为热的排放以及高大密集建筑物不易散热等特征, 使得城市表面温度和上层空气

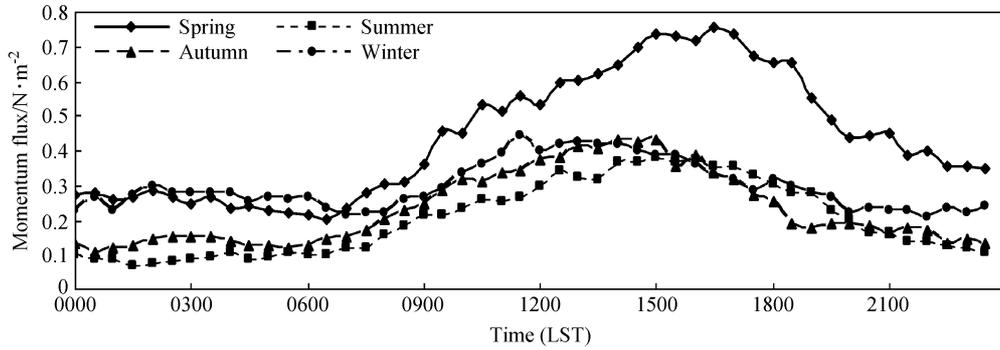


图 4 动量通量四季季平均日变化特征

Fig. 4 Seasonal average diurnal variation of momentum flux

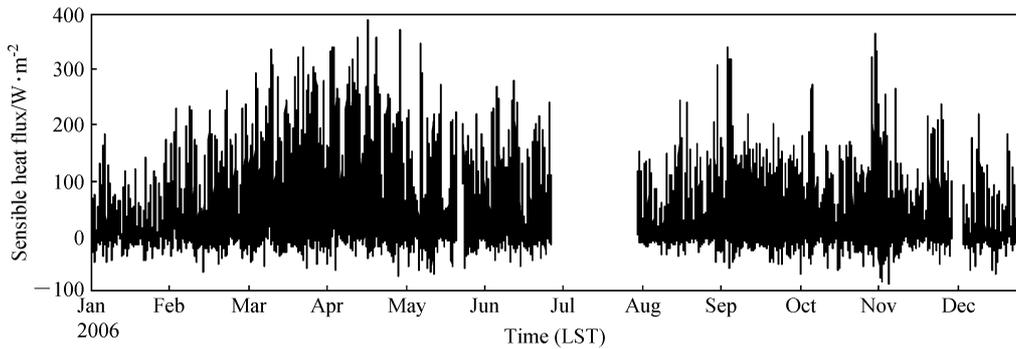


图 5 感热通量 30 min 时间序列全年变化总体特征

Fig. 5 Annual variation of 30-min time series of sensible heat flux

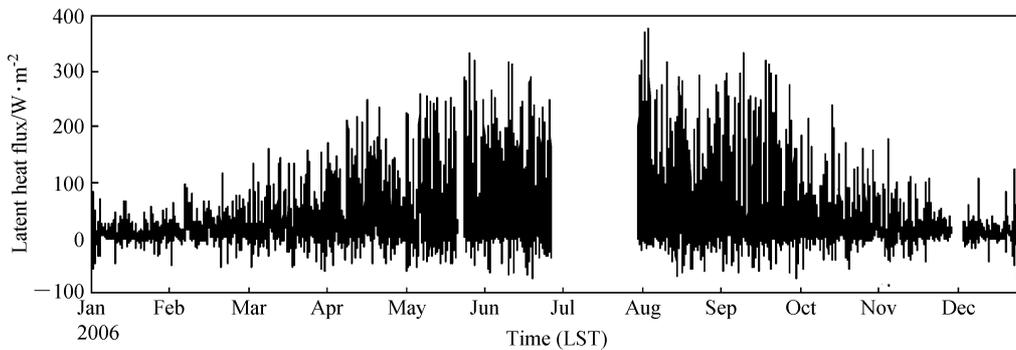


图 6 潜热通量 30 min 时间序列全年变化总体特征

Fig. 6 Annual variation of 30-min time series of latent heat flux

温度不会很快形成巨大差别而使得感热通量不致降至 0 值以下很多, 这与沙漠戈壁等地区是完全不同的。潜热通量夜间较小, 略大于 0, 水份仍然以蒸发为主。日出后, 感热通量和潜热通量同时开始增大, 不同月份开始早晨增大的时间有所差别, 一般在午后 14 时左右达到最大, 然后减小, 白天由于云量影响会有少许波动。12 月 28 日 (图

7d) 潜热通量日变化基本等于 0, 冬季气温低, 水分多以固态冰形式存在, 空气干燥是这一特征形成的主要原因。

4 月 6 日降雨当天, 感热通量和潜热通量都很小 (图 8), 感热通量最大为 $78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 潜热通量最大为 $101 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 潜热通量总体略大于感热通量。因为降雨当天虽然水汽丰富, 达到饱和,

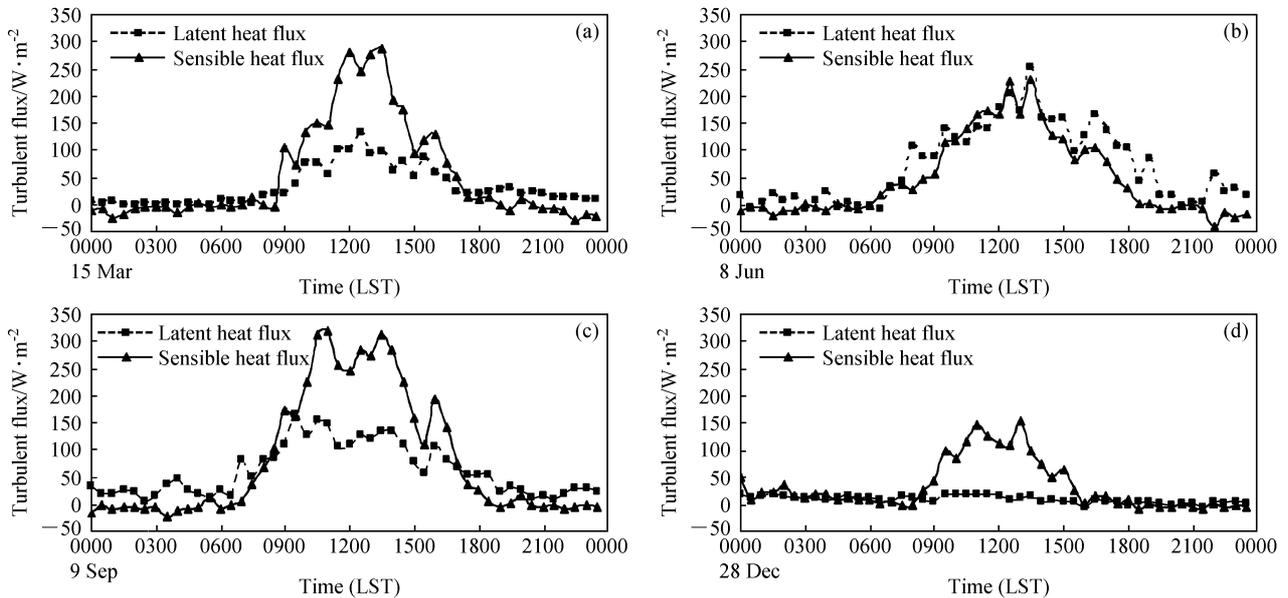


图 7 感热通量和潜热通量晴天典型日变化：(a) 3月15日；(b) 6月8日；(c) 9月9日；(d) 12月28日

Fig. 7 Typical diurnal variations of sensible heat flux and latent heat flux in sunny days: (a) 15 Mar; (b) 8 Jun; (c) 9 Sep; (d) 28 Dec

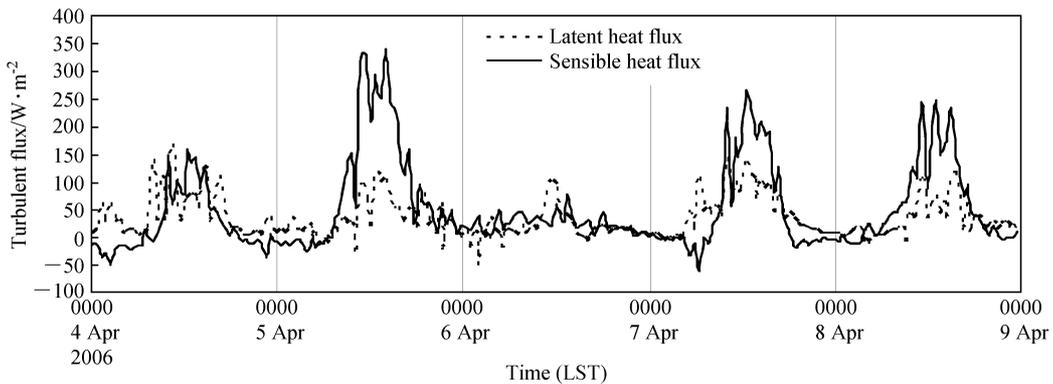


图 8 感热通量和潜热通量阴雨天前后日变化特征

Fig. 8 Typical diurnal variations of sensible heat flux and latent heat flux in rainy days

但是气温较低，能够蒸发的水汽很少，潜热通量相应也很小。降雨过后，气温升高，丰富的水汽提供的相变潜热增多，潜热通量明显增大。而降雨后地面潮湿，比热增大，太阳照射后升温较慢，与空气形成的温差也较小，因此感热通量在降雨后明显减小。

3.2.3 感热通量和潜热通量月平均日变化特征

感热通量和潜热通量的月平均日变化符合单波峰特征（图 9）。2006 年全年感热通量 4 月最大，3 月次之，1 月最小，潜热通量 6 月最大，1 月份最小（图 10）。5~10 月潜热通量大于感热通量，8 月份差异最大，其余月份则相反。北京的

10 月不属于雨季，但是由于入秋之后气温降低，白天感热减小，而夜间感热又为负值，因而平均值较小。潜热由于观测点附近水汽源相对充足（公园、小河等），气温也不会低于 0℃，潜热基本保持正值，平均值比感热还要大一点。

3.2.4 感热通量和潜热通量季节变化特征

图 11 和 12 分别给出了感热通量及潜热通量的季节变化特征。其中感热通量在春季最大，夏季次之，秋、冬季最小且差别不大，春、夏、秋、冬四季的季平均值分别为 46.9、28.2、21.9 和 21.5 W·m⁻²。虽然夏季缺失了 40 天左右的数据，但是这期间多有阴雨天气，对上述季节变化

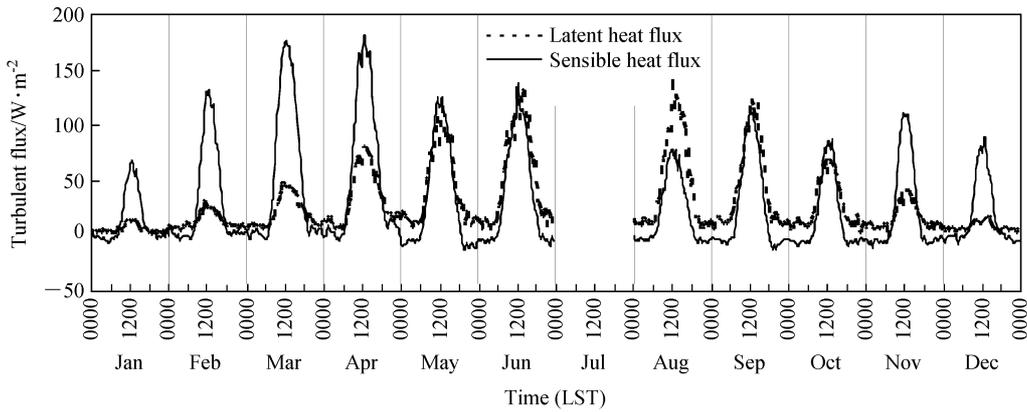


图 9 感热通量和潜热通量各月月平均日变化总体特征

Fig. 9 Monthly average diurnal variations of sensible heat flux and latent heat flux

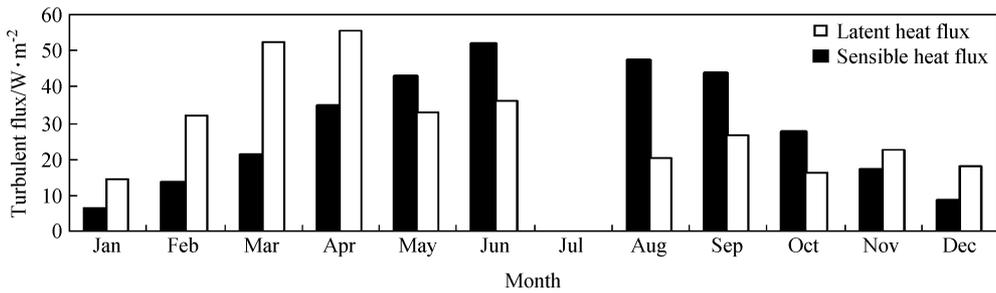


图 10 感热通量和潜热通量各月月平均值变化特征

Fig. 10 Variations of the monthly mean values of sensible heat flux and latent heat flux

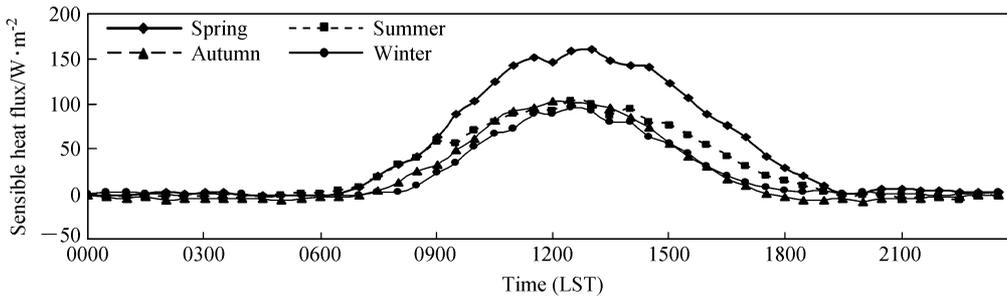


图 11 感热通量四季季平均日变化特征

Fig. 11 Seasonal average diurnal variations of sensible heat flux

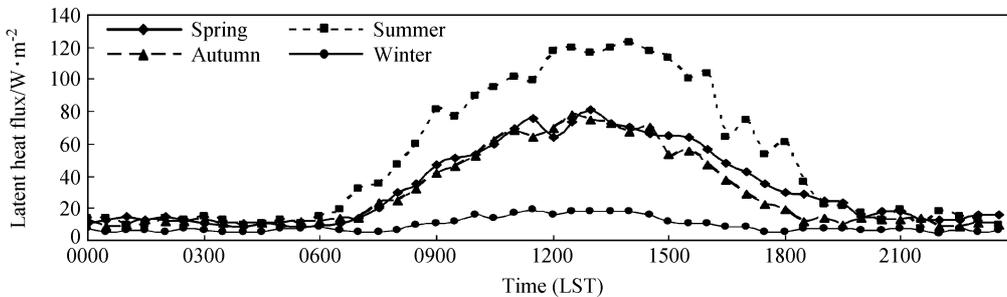


图 12 潜热通量四季季平均日变化特征

Fig. 12 Seasonal average diurnal variations of latent heat flux

特征并无太大影响。潜热通量有明显的季节变化区别，夏季最高，春秋次之，冬季最小，基本为正值，其春、夏、秋、冬四季的季平均值分别为 33.0、49.5、29.4 和 9.3 W·m⁻²。因此春、冬季城市近地层热量分配中以感热为主，而夏、秋季以潜热为主

3.3 CO₂ 通量变化特征

城市碳通量的研究目前主要集中在一些发达国家和地区。已有的研究表明，CO₂ 通量不论在日变化尺度还是季节变化尺度上，它都是一个持续的净源 (Moriwaki and Kanda, 2004)。CO₂ 通量的大小和变化受到人类活动、生态学过程和气象要素影响，并具有很大的可变性 (Vogt et al., 2006)。人类活动的影响主要体现在机动车流量方面，CO₂ 通量的日变化与机动车流量具有明显的正相关，在早晨和傍晚车流量高峰时期 CO₂ 通量也会出现明显的峰值 (Grimmond et al., 2002; Velasco et al., 2005; Vesala et al., 2008)。城市对于 CO₂ 的输送影响范围极广，Grimmond et al. (2002) 对美国芝加哥的郊外研究显示，郊外的城市绿化能够限制 CO₂ 通量的大小，但是城市近郊依然是人为 CO₂ 排放的源。

另外，不同城市以及不同城市区域的 CO₂ 通量大小是不同的。Nemitz et al. (2002) 对苏格兰爱丁堡城市中心的研究显示，CO₂ 通量在城市中心最大，11 月平均值约 1.14 mg·m⁻²·s⁻¹，最大能达到 2.2~3.3 mg·m⁻²·s⁻¹，观测点附近所有风向上的平均值为 0.97 mg·m⁻²·s⁻¹。Vogt et al. (2006) 在瑞士巴塞尔城市密集建成区的研究表明，夏季早上机动车增多时 CO₂ 通量为 0.53 mg·m⁻²·s⁻¹，白天保持在此范围，并于午后 17 时达到最大 (0.66 mg·m⁻²·s⁻¹)，观测期间最大值为 1.32 mg·m⁻²·s⁻¹。而 Grimmond et al. (2002) 在美国芝加哥郊外的研究显示，CO₂ 通量值整天都保持着正值，变化范围为 0~1.32 mg·m⁻²·s⁻¹，峰值时能达到 1.67 mg·m⁻²·s⁻¹。日本东京的 CO₂ 通量 7 月变化范围在 0.2~0.5 mg·m⁻²·s⁻¹，12 月变化范围为 0.2~1.1 mg·m⁻²·s⁻¹。发展中国家墨西哥首都墨西哥城的 CO₂ 通量变化范围为 -0.22~1.60 mg·m⁻²·s⁻¹，年平均值为 0.41 mg·m⁻²·s⁻¹。高纬度地区芬兰赫尔辛基城区 CO₂ 通量平均值为 0.22 mg·m⁻²·s⁻¹，

公路区域较之大一倍多。CO₂ 通量的最大观测值在哥本哈根居民区 (Soegaard and Noller-Jensen, 2003) 观测得到，城市中心主道路附近最大能达到 4.4 mg·m⁻²·s⁻¹。

国内对于城市 CO₂ 通量的研究较少，北京 325 m 气象塔难得地提供了一个很好的观测平台，加入城市碳通量观测计划之后，自 2005 年以来对 CO₂ 通量一直保持持续观测和数据收集。本文利用 2006 年一年的持续观测脉动资料分析了 CO₂ 通量典型日变化、月平均日变化和季节变化特征，并与国外城市观测结果进行对比，分析其影响因素。

3.3.1 CO₂ 通量全年整体变化特征

CO₂ 通量大小基本以正值为主，在不稳定层结状态或者其他外界影响条件下，能观测到负值，但是依然可以认定城市是 CO₂ 排放的净源。虽然观测点附近区域内有不少绿化，白天植物的光合作用 (特别是夏季) 能够吸收部分 CO₂，但是并不足以抵消城市的 CO₂ 人为排放。

全年 CO₂ 通量最大值为 3.88 mg·m⁻²·s⁻¹，最小值低于 -2 mg·m⁻²·s⁻¹ (图 13)。最大值接近哥本哈根城市中心主道路附近观测结果，较生长季的水稻 (Gao et al., 2003)、森林 (Sai-gusa et al., 1998) 及农田及退化草地 (刘辉志等, 2006) 等下垫面地区都要大得多。大塔东面就是北京最繁忙的八达岭高速公路，又靠近比较繁华的 CBD (西单等地)，虽然不处于北京城市中心地带，其 CO₂ 通量绝对值却依然达到较高水平。

3.3.2 CO₂ 通量典型日变化

CO₂ 通量日变化波动较多，不过也有其共同特征 (图 14)：1) CO₂ 通量基本保持正值，6 月 14 日和 9 月 6 日白天在不稳定情况下才偶尔出现了负通量；2) 虽然白天波动很多，但是早上 07 时至 09 时之间必定有一增大过程，傍晚 18 时左右也有一增大过程，这两个增大过程出现的时间正是人们上下班高峰时期，车流量有明显增大，而观测点附近正是交通要道所在，因而 CO₂ 通量的变化很好地体现了人类活动对它的影响；3) 凌晨 03 时至 06 时和午后 15 时左右，日变化中都会出现一个谷值，凌晨谷值主要是由于该时段排放最小，午后谷值夏季比较明显，甚至会出现负通量，虽然该时段边界层不稳定，湍流发展比较强

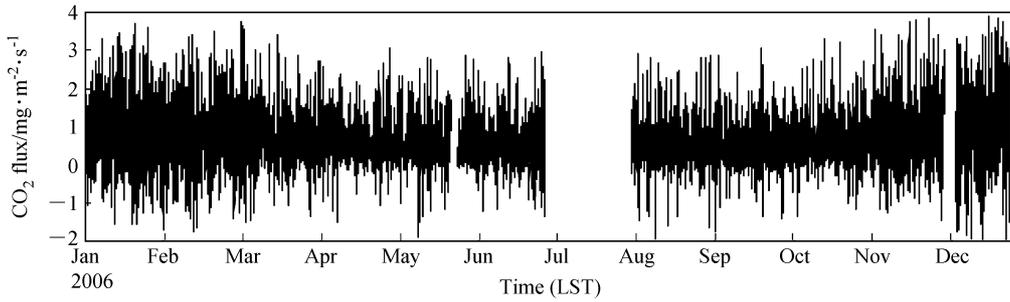
图 13 CO₂通量全年整体变化特征

Fig. 13 Annual variations of carbon dioxide flux

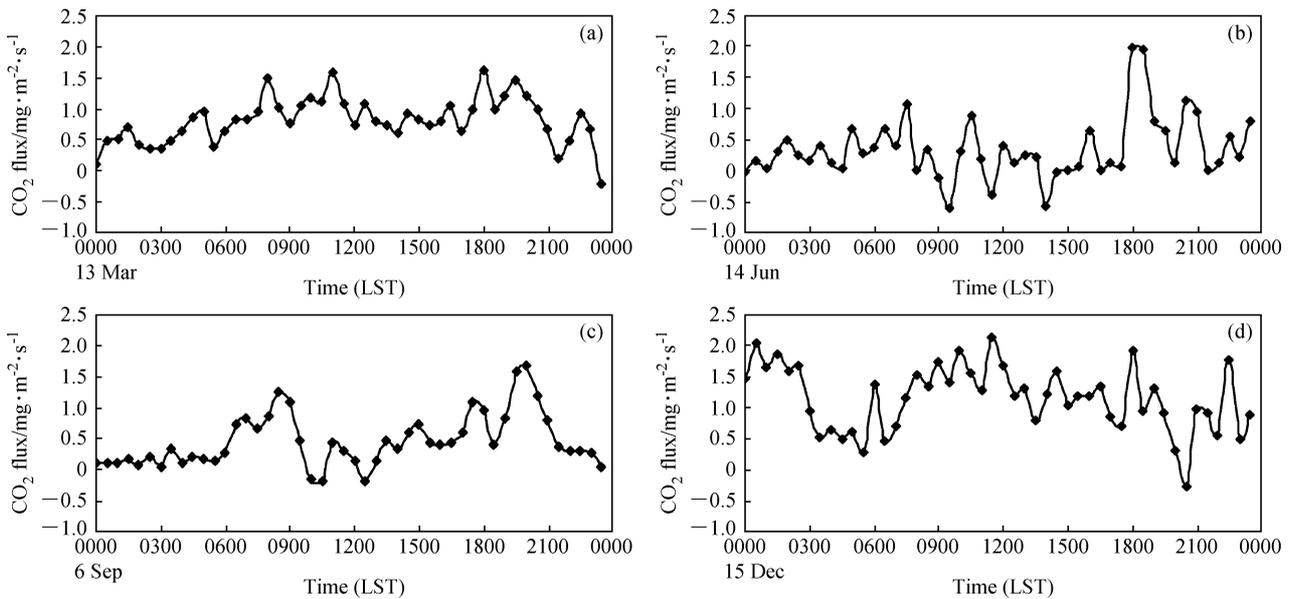
图 14 CO₂通量日变化特征: (a) 3月13日、(b) 6月14日、(c) 9月6日和 (d) 12月15日

Fig. 14 Diurnal variations of carbon dioxide flux on (a) 13 Mar, (b) 14 Jun, (c) 6 Sep, and (d) 15 Dec

烈,但是同时也是植物光合作用吸收 CO₂ 最强烈的时段,观测点附近分布的公园下垫面植物绿化比较丰富,因此吸收作用超过了湍流作用;4) 午夜 22 时至 24 时也多出现了增大过程,该时段是大货车入城的时间,夜间边界层稳定的条件下,大货车的大排放对于 CO₂ 通量增大的影响比较突出,冬季月份表现明显。

综合来说,CO₂ 通量的日变化呈现“双峰双谷”模态,具有典型的日变化特征。该日变化特征体现了人类活动、植物生态、CO₂ 基础浓度和边界层状态等因素的综合作用。

3.3.3 CO₂ 通量月平均日变化

CO₂ 通量进行月平均之后(图 15),可以更明显地看出城市近地层 CO₂ 通量都处于 0 值以上,

最低大概 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在 3 月。各月平均值最大出现在冬季 12 月,最小出现在秋季 9 月。其总体日变化特征能清楚看出其“双峰双谷”变化模态。而且冬季月份的 CO₂ 通量变化幅度较其他月份大,早上的峰值比傍晚的峰值大,其他月份两个峰值基本相同。所有月份凌晨谷值明显,午后谷值在非冬季月份明显。冬季月份由于植物光合作用微弱,午后 CO₂ 通量降低不明显,反而是凌晨时段,此时城市大气边界层十分稳定,CO₂ 的扩散受到抑制,CO₂ 输送明显降低。

3.3.4 CO₂ 通量季节变化特征

从图 16 上可以看出,春、夏、秋三季 CO₂ 通量变化范围为 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 冬季变化幅度稍大,为 $0.2 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。冬季

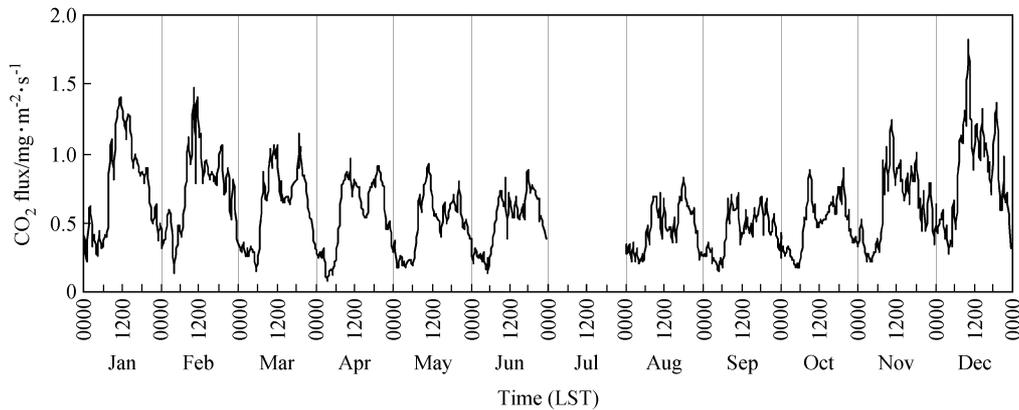


图 15 CO₂通量各月月平均日变化特征
Fig. 15 Monthly average diurnal variations of carbon dioxide flux

夜间的 CO₂ 通量波动较大, 03 时至 06 时的日最低值四季都很明显, 早晨峰值出现的时间因季节的不同有所差异, 午后 15 时左右的谷值在春、夏、秋三季都很明显, 而冬季这一特征并不明显, 傍晚峰值的时间也随着季节的不同稍有差异, 入夜之后, 边界层转为稳定, CO₂ 通量均有所下降。在 Velasco et al. (2005) 中提到, CO₂ 通量早上的峰值一般会出现 2~3 个, 分别集中在 07 至 08 时、09 至 10 时、11 至 13 时, 这一点在春、夏、秋三季的平均日变化中得到验证, 而冬季第一个峰值在 09 时左右。因此人类生活习惯随季节的不同对 CO₂ 通量有很大的影响。

3.3.5 CO₂ 通量工作日与周末对比特征

在城市边界层的研究中, 工作日与周末对比法是主要方法之一。城市中人口密集, 工作日与周末不同的人类活动对于 CO₂ 通量有十分重要的影响。工作日工厂生产排放、机动车排放、人为

活动等周末会有明显减小, 这使得城市边界层中 CO₂ 通量具有了明显的周变化特征。

选择 6 月和 12 月, 这两个月份人们的生活习惯有明显的不同, 对两个月四周的工作日和周末分别进行平均日变化对比分析。图 17 显示, 工作日 CO₂ 通量总体总是比周末要大一些, 冬季月份表现比较明显。6 月工作日早上个峰值出现在 07 时 30 分、09 时和 11 时, 与墨西哥在 4 月份的结果类似, 6 月周末却观察不到这第一个峰值。12 月工作日峰值分别出现在 09 时、10 时 30 分和 14 时, 周末也观察不到这第一个峰值, 其余峰值类似, 但比周末低。因而在日变化的峰值中, 第一个峰值受到人类活动的影响最大, 其余峰值则主要受到边界层状态的影响。傍晚 18 时左右的峰值工作日和周末都很明显, 12 月份提前 1 小时左右, 而且 12 月份夜间 19 时至 22 时之间还有增大过程, 这主要与该季节时段人们取暖活动增多有关。

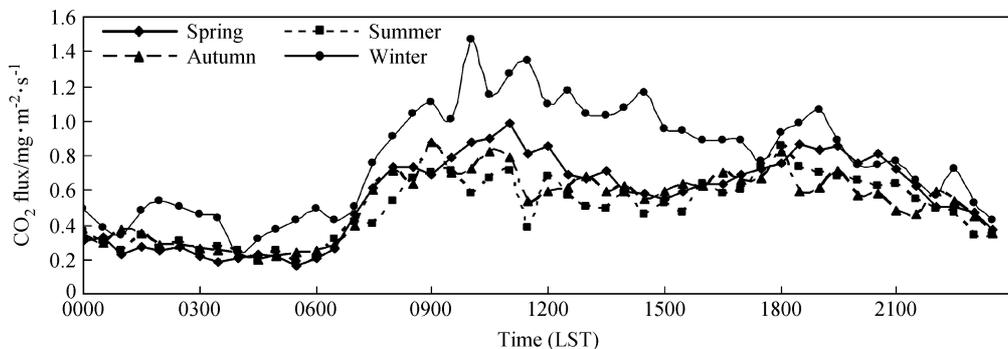


图 16 CO₂ 通量四季季平均日变化特征
Fig. 16 Seasonal average diurnal variations of carbon dioxide flux

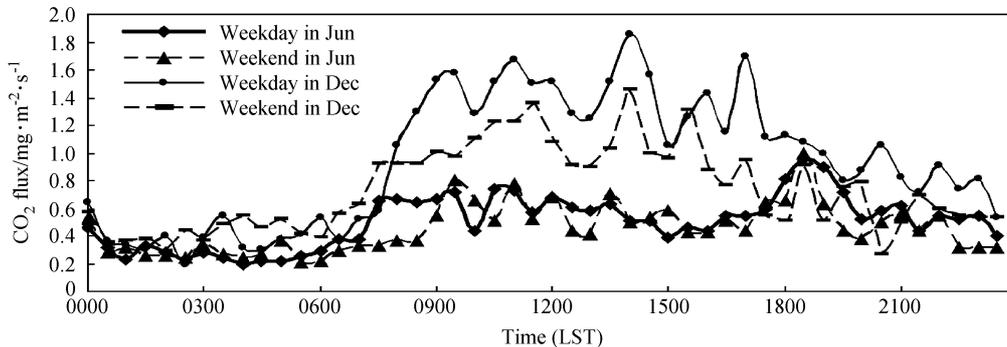
图 17 CO₂ 通量工作日与周末平均日变化对比特征

Fig. 17 Average diurnal variations of carbon dioxide flux on weekdays and weekends

4 总结

本文利用北京 325 m 气象塔 47 m 高度 2006 年一年连续观测湍流资料, 经过资料后处理, 分析了动量通量、感热通量、潜热通量和 CO₂ 通量的典型日变化, 月平均日变化和季节变化特征, 并对其中的 CO₂ 通量进行了工作日与周末的对比, 主要结论包括:

(1) 动量通量变化范围为 $0 \sim 0.9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 具有明显的单波峰日变化特征, 最大值出现在午后 15 时左右。季节变化中春季最大、冬季次之、夏秋季最小。

(2) 感热通量变化范围为 $-92 \sim 389 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 潜热变化范围为 $-75 \sim 376 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 年平均值分别为 $29.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $28.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。感热通量和潜热通量也都有明显的单波峰日变化特征, 夜间感热通量变化还反映了城市人为热源的影响。阴雨天感热和潜热都很小, 降雨后感热减小而潜热增大。四季变化中, 春季感热最大, 夏季由于雨季影响和秋冬季差不多, 潜热在夏季雨季最大, 春秋次之, 冬季最小。总体来说, 春夏季感热占主导, 夏秋季潜热占主导。

(3) CO₂ 通量的变化表明城市是 CO₂ 排放的净源, 其日变化特征复杂, 但也有共同之处, 具体表现为凌晨边界层稳定、排放少时段的谷值, 早晨和傍晚人们上下班高峰时段、机动车增多时的峰值, 午后光合作用影响下的谷值以及午夜大货车入城时段的增大变化, 该变化具有“双峰双谷特征”。其中凌晨谷值、傍晚及午夜前后的增大

过程全年都能观测到, 早晨峰值出现时间随季节的不同而有所变化, 午后谷值在冬季月份并不十分明显。季节变化中, 冬季明显高于其他三季, 季节性引起的人类生活习惯的变化影响着 CO₂ 通量的变化。另外, 在工作日和周末的平均日变化对比中更是体现了人类活动的影响。

致谢 感谢李爱国高级工程师提供的宝贵观测资料。

参考文献 (References)

- Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. 2001. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82: 2415–2434.
- Coutts A M, Beringer J, Tapper N J. 2007. Characteristics influencing the variability of urban CO₂ fluxes in Melbourne, Australia [J]. *Atmos. Environ.*, 41: 51–62.
- Culf A D, Foken T, Gash J H C. 2004. The Energy Balance Closure Problem, in: *Vegetation, Water, Humans and the Climate* [M]. Berlin: Springer, 159–166.
- 冯健武, 刘辉志, 邹捍, 等. 2007. 珠峰绒布河谷近地面层气象要素及湍流通量变化 [J]. *高原气象*, 26 (6): 1244–1253.
- Feng Jianwu, Liu Huizhi, Zou Han, et al. 2007. Characteristics of micrometeorological elements and turbulent fluxes in the surface layer in rongbuk valley on northern slope of Mount Qomolangma [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (6): 1244–1253.
- Gao Z, Bian L, Zhou X. 2003. Measurements of turbulent transfer in the near surface-layer over a rice paddy in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (13D), 4387, doi: 10.1029/2002JD002779.
- Goulden M J, Munger J W, Fan S M, et al. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy [J]. *Global Change Biology*, 2 (3): 169–182.

- Grimmond C S B, King T S, Cropley F D, et al. 2002. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago [J]. *Environmental Pollution*, 116: 243–254.
- Grimmond C S B, Salmond J A, Oke T R, et al. 2004. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass, water and carbon dioxide, and momentum [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D24101, doi: 10.1029/2004JD004936.
- 洪钟祥. 1983. 北京 325 米气象塔的测量系统 [M]. 北京: 科学出版社, 69pp. Hong Zongxiang. 1983. Observation Systems on Beijing 325 m Metrological Tower [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 69pp.
- Idso C D, Idso S B, Balling R C. 2001. An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix, Arizona, USA [J]. *Atmos. Environ.*, 35: 995–1000.
- 李国平, 段廷扬, 巩远发, 等. 2002. 青藏高原近地层通量特征的合成分析 [J]. *气象学报*, 60 (4): 453–460. Li Guoping, Du-an Tingyang, Gong Yuanfa, et al. 2002. A composite study of the surface fluxes on the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (4): 453–460.
- 李家伦, 洪钟祥, 罗卫东, 等. 1999. 青藏高原改则地区近地层通量观测研究 [J]. *大气科学*, 23 (2): 142–151. Li Jialun, Hong Zhongxiang, Luo Weidong, et al. 1999. A study of surface fluxes in Gerze area, Qinghai Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences* (in Chinese), 23 (2): 142–151.
- 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 2006. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化 [J]. *大气科学*, 30 (1): 108–118. Liu Huihui, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. 2006. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area [J]. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences* (in Chinese), 30 (1): 108–118.
- Moriwaki R, Kanda M. 2004. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43: 1700–1710.
- Nemitz E, Hargreaves K J, McDonald A G, et al. 2002. Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 36: 3139–3146.
- Oke T R. 1987. *Boundary Layer Climates* (2nd ed.) [M]. New York: Routledge, 435pp.
- Soegaard H, Moller-Jensen L. 2003. Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements [J]. *Remote Sens. Environ.*, 87: 283–294.
- Saigusa N, Oikawa T, Liu S. 1998. Seasonal variations of the exchange of CO₂ and H₂O between a grassland and the atmosphere: An experimental study [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89 (1): 131–139.
- Stull R B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* [M]. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 666pp.
- Uitto J I, Biswas A K. 2000. *Water for Urban Areas: Challenges and Perspectives* [M]. New York: United Nations University Press, 245pp.
- Vesala T, Jarvi L, Läunianen S, et al. 2008. Surface-atmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland [J]. *Tellus*, 60B: 188–199.
- Velasco E, Pressley S, Allwine E, et al. 2005. Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico City urban landscape [J]. *Atmos. Environ.*, 39 (38): 7433–7446.
- Vogt R, Christen A, Rotach M W, et al. 2003. Fluxes and profiles of CO₂ in the urban roughness sublayer [C]. In: *Fifth International Conference on Urban Climate*, Lodz, Poland: 1–5.
- Vogt R, Christen A, Rotach M W. 2006. Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a central European city [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 84: 117–126.
- 殷达中, 洪钟祥. 1999. 北京地区严重污染状况大气边界层结构与参数研究 [J]. *气候与环境研究*, 4 (3): 303–307. Yin Dazhong, Hong Zongxiang. 1999. Study on the boundary layer structure and parameters under heavy pollution conditions in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 4 (3): 303–307.