

段月, 程雪玲, 华维, 等. 2018. 北京城区二氧化碳时空分布及湍流谱特征 [J]. 气候与环境研究, 23 (6): 725–736. Duan Yue, Cheng Xueling, Hua Wei, et al. 2018. Spatial and temporal distribution of CO₂ and its spectrum characteristic in Beijing urban area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (6): 725–736, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17132.

北京城区二氧化碳时空分布及湍流谱特征

段月^{1,2} 程雪玲² 华维¹ 徐佳男¹ 冯冬蕾³

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

³ 辽宁省桓仁满族自治县气象局, 辽宁本溪 117200

摘 要 利用北京 325 m 气象塔上安装的 7 层 CO₂ 涡动相关系统在 2014 年 12 月到 2015 年 11 月的观测资料, 分析了北京城区不同高度上 CO₂ 浓度、通量时空分布及湍流谱的特征。结果表明: 城市 CO₂ 浓度日变化除了冬季都呈现双峰型, 冬季由于人为碳源排放的大幅增加, 双峰型不明显。每层的 CO₂ 浓度、通量都有明显的季节变化: 冬季最高, 春末、夏季最低。CO₂ 浓度整体随高度的增加而降低。北京城区是 CO₂ 源, CO₂ 通量的日变化不如 CO₂ 浓度日变化规律明显。CO₂ 通量在 47 m 以下为负, 47 m 以上为正。通量在 140 m 以下随高度的增加而增加; 140 m 以上随高度的增加而减少。根据对 CO₂ 时空分布的分析可知: 边界层 CO₂ 浓度、通量强烈受到碳源、下垫面植被、大气稳定度、环境温度和天气过程等因素的影响。各变量谱与 Kaimal 等的研究结果接近: 归一化速度谱和 CO₂ 谱在惯性子区有 $-2/3$ 的斜率, 在低频区与稳定度参数 (Z/L) 有一定的关系。这说明复杂地形的城市下垫面的湍流谱结构与平坦地形相比没有太大的实质性差异。

关键词 涡动系统 二氧化碳浓度 二氧化碳通量 湍流能谱 城市边界层

文章编号 1006-9585 (2018) 06-0725-12

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17132

Spatial and Temporal Distribution of CO₂ and Its Spectrum Characteristic in Beijing Urban Area

DUAN Yue^{1,2}, CHENG Xueling², HUA Wei¹, XU Jianan¹, and FENG Donglei³

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

³ Huanren Manchu Autonomous County Meteorological Bureau, Benxi, Liaoning Province 117200

Abstract Using the turbulence data measured by the open path eddy covariance system deployed at the Beijing 325-m meteorological tower, the concentration and flux and spectrum of CO₂ at seven different height levels are calculated for the period from December 2014 to November 2015. Analysis of the results indicate that the CO₂ concentration displays diurnal variation with double peaks except in the winter. Human activities must be considered in the winter since they reduce the diurnal variation of CO₂ concentration and lead to a relatively flat pattern. At all observational heights, the CO₂ concentration and flux show obvious seasonal variations with the maximum values appearing in the winter and the

收稿日期 2017-08-31; **网络预出版日期** 2018-01-03

作者简介 段月, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向: 大气边界层物理。E-mail: m13121719938@163.com

通讯作者 程雪玲, E-mail: chengxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05040301)

Funded by the Strategy Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA05040301)

minimum values occurring at the end of the spring and summer. The CO_2 concentration decreases with height as a whole. Beijing is a carbon dioxide source. Daily changes in the CO_2 flux are not as obvious as daily changes in the CO_2 concentration. The CO_2 flux is negative below 47 m and positive above 47 m. The CO_2 flux decreases with height below 140 m and increases with height above 140 m. According to the analysis of spatial and temporal distribution of CO_2 , it is found that the CO_2 concentration and flux in urban boundary layer are strongly affected by surface carbon emission source, underlying surface vegetation, atmospheric stability, environment temperature and weather process and so on. The results of turbulence spectra in the present study are very close to the results of Kaimal, i.e., the normalized velocity spectrum and the CO_2 spectrum have a slope of $-2/3$ in the inertial subregion and they both have relationships with the stability parameter (Z/L) in the low frequency zone. This indicates that the turbulence spectra of the city with complex topography are not quite different from those with flat topography.

Keywords Eddy covariance system, Carbon dioxide concentration, Carbon dioxide flux, Spectrum, Urban boundary layer

1 引言

城市化和气候变化是全球面临的最重要的两个问题 (Hoornweg et al., 2011)。占陆地面积不到 2.4% 的人类定居的城市 (Potere and Schneider, 2007) 却排放了全球 80% 以上的 CO_2 (Grabler, 1994; O'Meara, 1999), 了解并掌握城市 CO_2 的浓度分布变化及地气间 CO_2 的交换对于研究城市气候及全球碳循环、全球变暖等方面有重大意义。

涡动相关法是目前公认的通量观测最好方法。涡动相关法已经广泛应用于城市边界层中微观的湍流特征的研究, 如芝加哥、罗马、北京 (何文等, 2010); 但与自然生态系统相比, 城市通量研究依然薄弱 (贾庆宇等, 2010)。城市早期的观测都是短期的, 20 世纪 90 年代开始才开始长期连续的城市碳通量观测研究 (Grimmond and Oke, 2002), 并发展出“Urban-Flux Net: CO_2 -Flux Measurements”计划, 建立了遍布全球的城市碳通量观测网。基于逐步成熟的观测实验, 得到一系列城市碳通量研究成果。近年来, 随着测量技术和计算机技术的飞速发展, 涡动相关技术在实际应用中取得了长足的进步。到 2004 年为止, 已有 260 多个注册的通量观测站应用涡动相关技术开展长期的下垫面与大气 CO_2 、水汽通量观测 (Baldocchi et al., 1988; Aubinet et al., 2000; Baldocchi and Wilson, 2001)。

有关 CO_2 浓度和通量的研究国内外已有很多, 多数城市观测表明, 城市 CO_2 浓度日变化呈双峰型曲线 (何文等, 2010; 刘晓曼等, 2015), 且 CO_2 浓度整体随高度而下降 (刘晓曼等, 2015)。城市 CO_2 通量整体为正, 说明城市是 CO_2 的排放源 (Nemitz et al., 2002; Soegaard and Møller-Jensen, 2003; Grimmond et al., 2004; Moriwaki and Kanda,

2004; Walsh et al., 2004)。 CO_2 浓度和通量的日变化周期不完全重合 (Velasco et al., 2005)。 CO_2 浓度具有季节变化, 夏季 CO_2 浓度小于冬季, 且与稳定度有关。 CO_2 浓度和通量的日变化特征在工作日与周末有明显区别 (Helfter et al., 2011)。影响 CO_2 浓度和通量的因素有很多, CO_2 浓度和通量与下垫面、人类活动、环境温度、天气过程等相关。何文等 (2010) 指出 CO_2 浓度与通量的变化受风向与源区的协同影响。虽然城市 CO_2 浓度和通量的研究结果较多, 但有关 CO_2 浓度和通量的梯度观测还较少, 特别是从地面到近地层顶的 CO_2 浓度和通量的研究更少。

20 世纪中期以后, 随着计算机和大气探测手段的不断提高, 人类对平坦均匀下垫面的大气湍流谱特征研究越来越多, 已经有很多试验并形成理论 (Kaimal et al., 1972)。近几十年, 针对复杂下垫面湍流谱也开展了相应研究, 虽然不同地形条件下谱的特征有所不同, 但是仍然遵从一些统一的规律 (王介民, 1992): 速度谱高频段遵从 Monin-Obukhov 相似理论, 低频段的谱随稳定度参数 Z/L 分布 (刘明星等, 2008)。王介民 (1992) 和 Roth et al. (1989) 指出: 复杂城市下垫面的湍流谱结构与平坦下垫面相比没有实质差异, 且对通量测量地点和高度, 不一定像 Raupach et al. (1980) 要求的那么高。前人对速度谱的研究很多, 但有关 CO_2 谱的研究很少, 城市 CO_2 谱的研究几乎没有, Sahlée et al. (2008) 研究过海洋边界层上的 CO_2 谱。本文就 7 层高度不同稳定度上速度谱和 CO_2 谱进行研究, 分析北京城区各湍流谱的特征, 为分析城市近地面湍流乃至整个大气环流提供新思路。

北京 325 m 气象塔是目前国际上为数不多的位于超大城市的气象观测塔, 从 1979 年建塔以来记录了北京的变迁, 为研究提供了宝贵的资料。目前

有关城市 CO₂ 的梯度观测研究较少, 所以本文利用北京 325 m 气象塔上 7 层 CO₂ 涡动相关测量系统在 2014 年 12 月到 2015 年 11 月共 365 d 的观测资料, 在对数据质量控制和空缺值填补的基础上, 分析了北京城区不同高度上 CO₂ 浓度、通量日变化、季节、年变化等特征, 并初步给出 CO₂ 浓度、通量随高度的廓线拟合结果。通过研究这些不间断且有代表意义的观测数据, 能够更全面了解城市地气间交换 CO₂ 的模式变化及人为因素对 CO₂ 的影响程度。另外, CO₂ 作为示踪气体, 再加上湍流谱的研究, 这些对研究城市边界层内湍流输送机制, 了解、预测和缓解城市气候效应有重大意义。

2 观测场地和资料处理

2.1 观测场地

北京 325 m 气象塔 (39°58'N, 116°22'E) 位于中国科学院大气物理研究所院内, 德胜门以北约 2.7 km, 距离北三环约 1 km, 海拔高度为 49 m。随着城市建设的高速发展, 气象塔周围相继涌现出高大的建筑群, 使气象塔周围地区已从当年的城郊非均匀下垫面变成复杂的城市粗糙下垫面。有关气象塔周围的下垫面状况及塔的 7 层安装示意图已有很多介绍 (刘郁珏等, 2016; 刘阳等, 2017)。气象塔共 15 层观测平台, 分别在 8 m、16 m、47 m、80 m、140 m、200 m、280 m 安装有水汽—二氧化碳分析仪 Li7500A 和超声风温仪 Windmaster, 采样频率是 10 Hz, 可以连续采集风速 (u 、 v 、 w)、温度、CO₂ 和水汽浓度。经过前期的仪器校正、维护, 数据的调试等, 于 2012 年 12 月正式采集数据。利用涡动相关方法计算 30 min 平均的通量值。

2.2 涡动相关技术与资料的处理

涡动相关法是通过测定和计算物理量的脉动与垂直风速脉动之间的协方差计算湍流输送量 (湍流通量), 被认为现今唯一直接测量地气间各通量的最直接、标准的方法。早在 1895 年, Reynolds (1895) 就已经建立了涡动相关技术的理论框架, 即雷诺分解。在一定平均时间 (如 30 min) 内, 经过雷诺分解后, 某标量 x 的湍流通量可由下式计算: $Q_x = \overline{w'x'}$, 其中, w' 、 x' 分别为垂直风速和标量 x 的脉动值。CO₂ 通量的计算公式为: $F_C = \overline{w'C'}$, 其中, F_C 表示 CO₂ 通量, 单位为 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; w' 、 C' 分别为垂直风速和 CO₂ 浓度

的脉动值, 单位依次为 m s^{-1} 、 $\mu\text{mol m}^{-3}$ 。

由于涡动相关法前提条件比较高, 要求观测地点满足水平均匀假设, 观测过程定常流动, 但是在城市下垫面并不满足这些条件, 并且涡动相关技术在通量测定时也有很多不确定因素, 如仪器的局限性, 仪器安装架设不平衡, 平流项损失, 夜间通量低估等。保证湍流通量计算的准确性, 是涡度相关法测量通量的关键, 也是涡度相关法测量通量的一大难点。

本文采用 EddyPro 数据处理与通量计算软件, 软件包括的质量控制如下: 坐标旋转、趋势修正、统计检验、WPL (Webb-Pearman-Leuning) 修正 (Webb et al., 1980)、超声虚温修正 (Van Dijk et al., 2004)、谱修正 [高通滤波修正 (Moncrieff et al., 2004)、低通滤波修正 (Moncrieff et al., 1997)]、数据质量控制标记 (Foken et al., 2004)。后期用多重插补法 (Hui et al., 2004) 对 30 min 湍流结果进行了空缺填补, 得到 2014 年 12 月到 2015 年 11 月共 365 d 的观测资料。

3 结果与讨论

3.1 CO₂ 浓度的时空分布特征

3.1.1 不同高度上 CO₂ 浓度全年及日变化

我国北方季节划分一般是春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月)、冬季 (本年 12 月到次年 2 月)。实际上, 北京供暖期开始于 11 月 15 日, 停暖于 3 月 15 日。因此作为本地的季节划分, 应当将冬天提前、推迟 15 天左右。

由图 1 和图 2 可知: 每层高度上 CO₂ 浓度月变化规律一致, 11 月到次年 2 月也就是秋末到春初 CO₂ 浓度偏高, 这是因为冬季大气逆温增强, 植被呼吸作用最低, 还有城市燃煤供暖的共同作用。3 月开始浓度降低一直到整个夏秋季, 最低值出现在 5~8 月; 这是因为日照时间增长, 植物光合作用增强。全年 CO₂ 浓度最高为 531.23 ppm (10^{-6}), 最低为 264.95 ppm。这与瓦里关全球大气本底站 CO₂ 浓度月变化 (周凌晞等, 2002) 不同, 后者一般在春季 (4~5 月) 最高, 导致这一差异最主要的原因就是北京供暖燃煤排放 CO₂。可见城市 CO₂ 浓度日变化、月变化具有其自身的规律性。随着高度的升高, CO₂ 浓度明显降低。

从 CO₂ 浓度年平均日变化剖面图 (图 3) 看出,

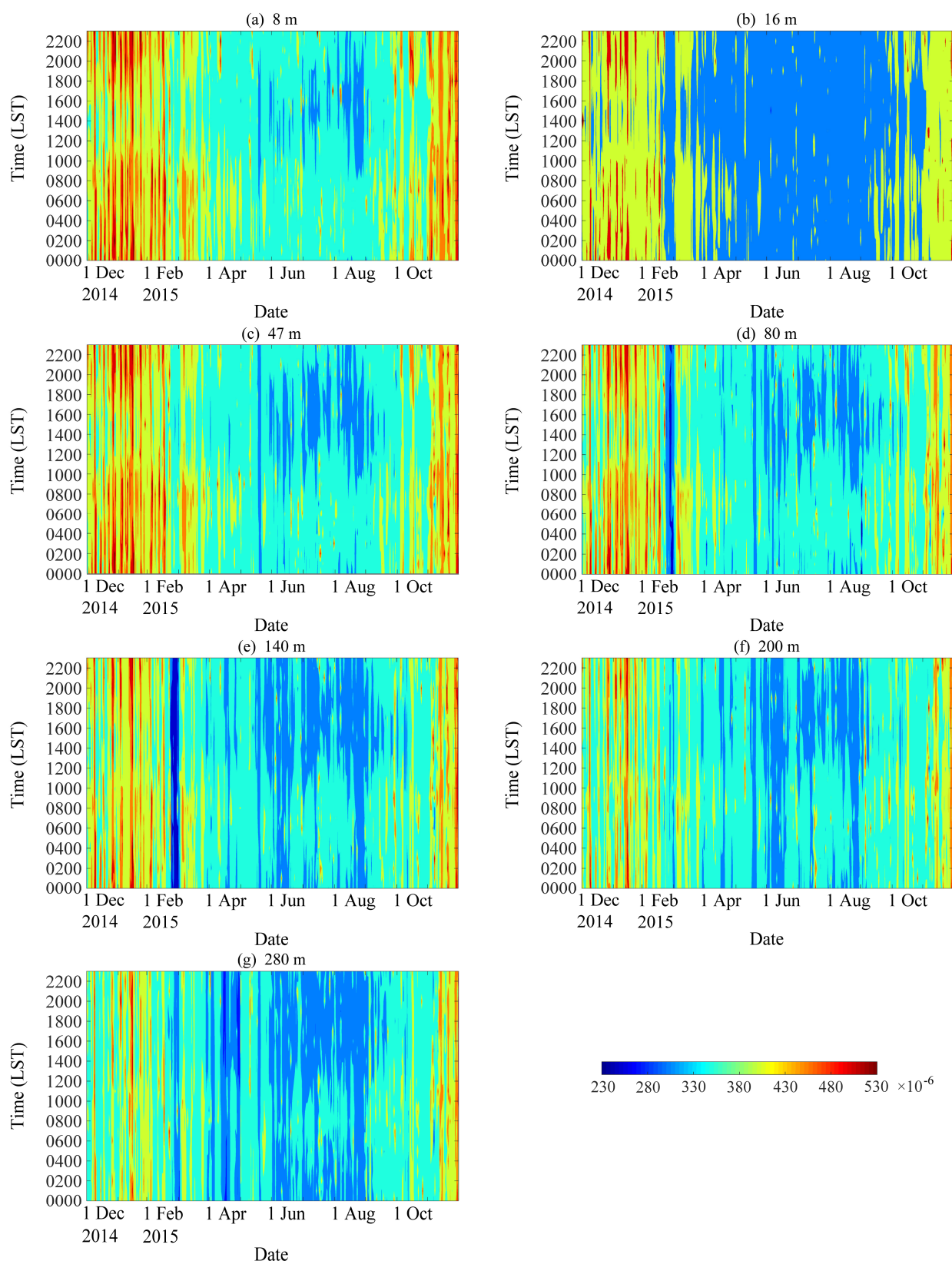
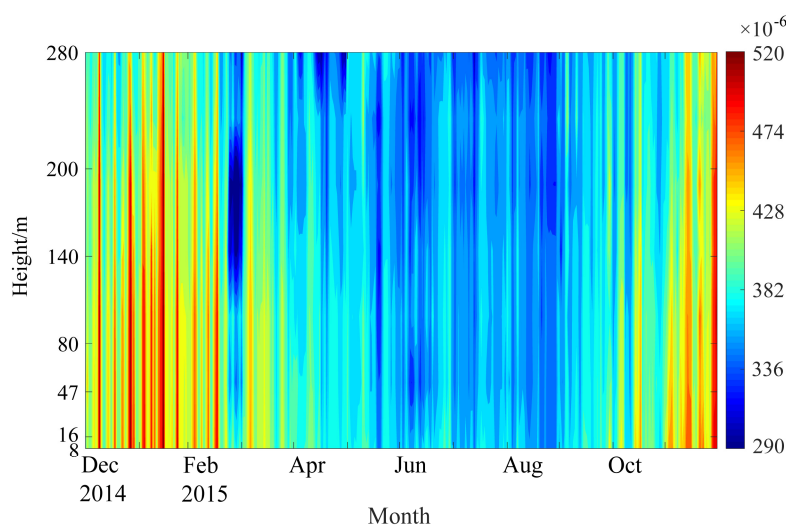
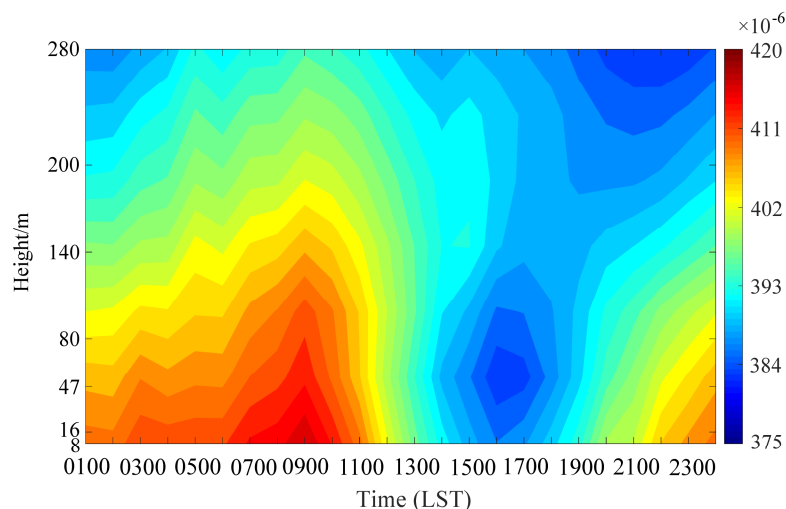


图1 2014年12月1日至2015年11月30日北京325 m气象塔全年7层CO₂浓度年际日变化: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m

Fig. 1 Interannual variation of diurnal patterns of CO₂ concentration at seven levels at the Beijing 325-m meteorological tower from 1 December 2014 to 30 November 2015: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m

图2 2014年12月至2015年11月北京325 m气象塔CO₂浓度月变化剖面Fig. 2 Vertical profile of monthly variation of CO₂ concentration at the Beijing 325-m meteorological tower from December 2014 to November 2015图3 2014年12月1日至2015年11月30日北京325 m气象塔CO₂浓度年平均日变化剖面Fig. 3 Vertical profile of annual mean diurnal variation of CO₂ concentration at the Beijing 325-m meteorological tower from 1 December 2014 to 30 November 2015

CO₂浓度年平均日变化有两个峰值和一个波谷。夜间边界层稳定,不利于扩散,再加上累计了植物夜间呼吸作用排放的CO₂,所以整体保持较高浓度。日出前后人为源排放,CO₂浓度从05:00(北京时间,下同)开始上升,在07:00至09:00达到峰值,然后开始减弱(北京单位上班时间多数为09:00)。CO₂浓度在10:00开始明显下降,在14:00至16:00最低。这是因为该时段温度上升导致边界层抬升,且稳定边界层开始向对流边界层过渡。CO₂浓度在18:00开始增加,这是由于机动车的集中排放,植物光合作用的减弱,呼吸却增强,边界层又趋于稳定,顶部开始出现逆温层,边界层底部浓度开始积累,浓度再次随高度出现分层,22:00至23:00达到最

大。随着高度的增加,第一个早高峰可以穿透280 m,而正午的低谷效应和第二个峰值却只能影响到200 m。说明夜晚的垂直湍流输送能力没有白天强。总体来讲,该日变化是由人类活动、植物生态、CO₂基础浓度和边界层状态等综合因素的影响。

3.1.2 季节日变化特征

由图4可知,灰色区域为正、负1个标准差分布范围,包含了全年60%的值。每层高度CO₂浓度值从高到低依次为冬季、秋季、年平均值、春季、夏季。CO₂浓度日变化在春、夏、秋季都呈现出“双峰型”,冬季由于人为碳排放的大幅增加使得变化趋势相对缓和,在140 m高度以上双峰不明显,春、夏季的第二个峰值不明显。四季都在07:00至09:00

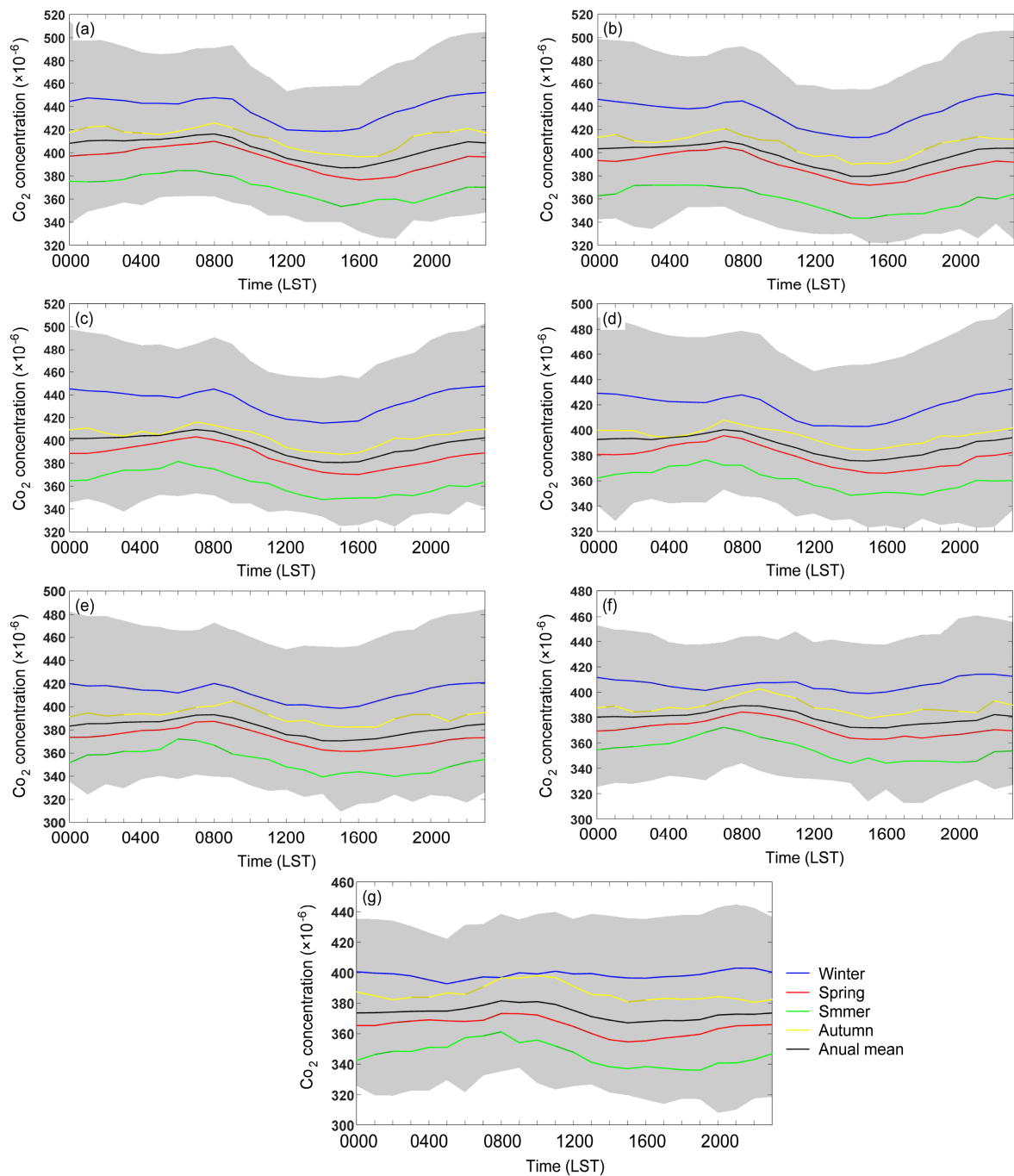


图4 不同季节北京 325 m 气象塔 7 层高度上 CO_2 浓度日变化: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m
Fig. 4 Diurnal variations of CO_2 concentration measured at seven levels at the Beijing 325-m meteorological tower in different seasons: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m

出现第一个峰值, 然后冬季的峰值到达的时间比其他季节晚了 1 h 左右。8 m、16 m、47 m 高度上 CO_2 浓度日变化双峰型明显, 春、夏季 140 m 高度上双峰型的第二个峰值的幅度开始变小。

图 5 为不同季节及年平均 CO_2 浓度随高度的廓线图及其拟合曲线, 对应的拟合公式为

$$C = 0.00028z^2 - 0.18z + 393.28 \text{ (春季)}, \quad (1)$$

$$C = 0.000043z^2 - 0.08z + 365.29 \text{ (夏季)}, \quad (2)$$

$$C = 0.00047z^2 - 0.21z + 412.78 \text{ (秋季)}, \quad (3)$$

$$C = 0.00031z^2 - 0.23z + 439.74 \text{ (冬季)}, \quad (4)$$

$$C = 0.00027z^2 - 0.18z + 402.54 \text{ (年平均)}. \quad (5)$$

其中, z 为观测高度, C 为 CO_2 浓度 (ppm)。

由图 5 可知：夏季拟合方程相关系数较小，其它都接近 1，说明拟合效果比较好。从拟合曲线和实际廓线充分看出了 CO₂ 浓度有着从低空到高不断减小的整体规律。

3.2 CO₂ 通量时空分布特征

3.2.1 CO₂ 通量垂直分布

从图 6 中可以看出，在 47 m 以下，因为植被光合作用，CO₂ 通量为负，CO₂ 的汇大于源，且 CO₂ 通量几乎不随高度的变化而变化。而 47 m 以上，通量为正。80 m 以上，11 月末至 3 月中旬 CO₂ 通量最大，其余月份通量相差不大。从 CO₂ 通量年平均日变化（图 7）可以看出，80 m 以下每层高度上的 CO₂ 通量在 11:00 至 15:00 略有变化，其余时刻变化不大，200 m 以上，CO₂ 通量在 17:00 至 18:00 达最

大。

3.2.2 季节特征

图 8 显示，8 m 和 16 m 的 CO₂ 通量年平均日变化在 0 附近，多为负值。白天，冬季和春季的 CO₂ 通量整体高于夏季和秋季；夜晚，冬季高于其他季节，其他季节之间则相差不大。在 8 m 和 16 m，没有城市特有的 CO₂ 通量日变化波动特征；47~80 m，具有明显的“三峰三谷”日变化特征；140 m 以上，则变为双峰型。不同高度的日变化模型区别在于：冬季由于人们的早晨活动开始的时间较之其他季节晚，春夏秋进入早高峰的时间比冬季早 1 h 左右，以往的研究表明，城市下垫面的 CO₂ 通量在早、晚高峰期，以及夜间都会出现数个小的波动，47 m 至 80 m，冬季 CO₂ 通量在

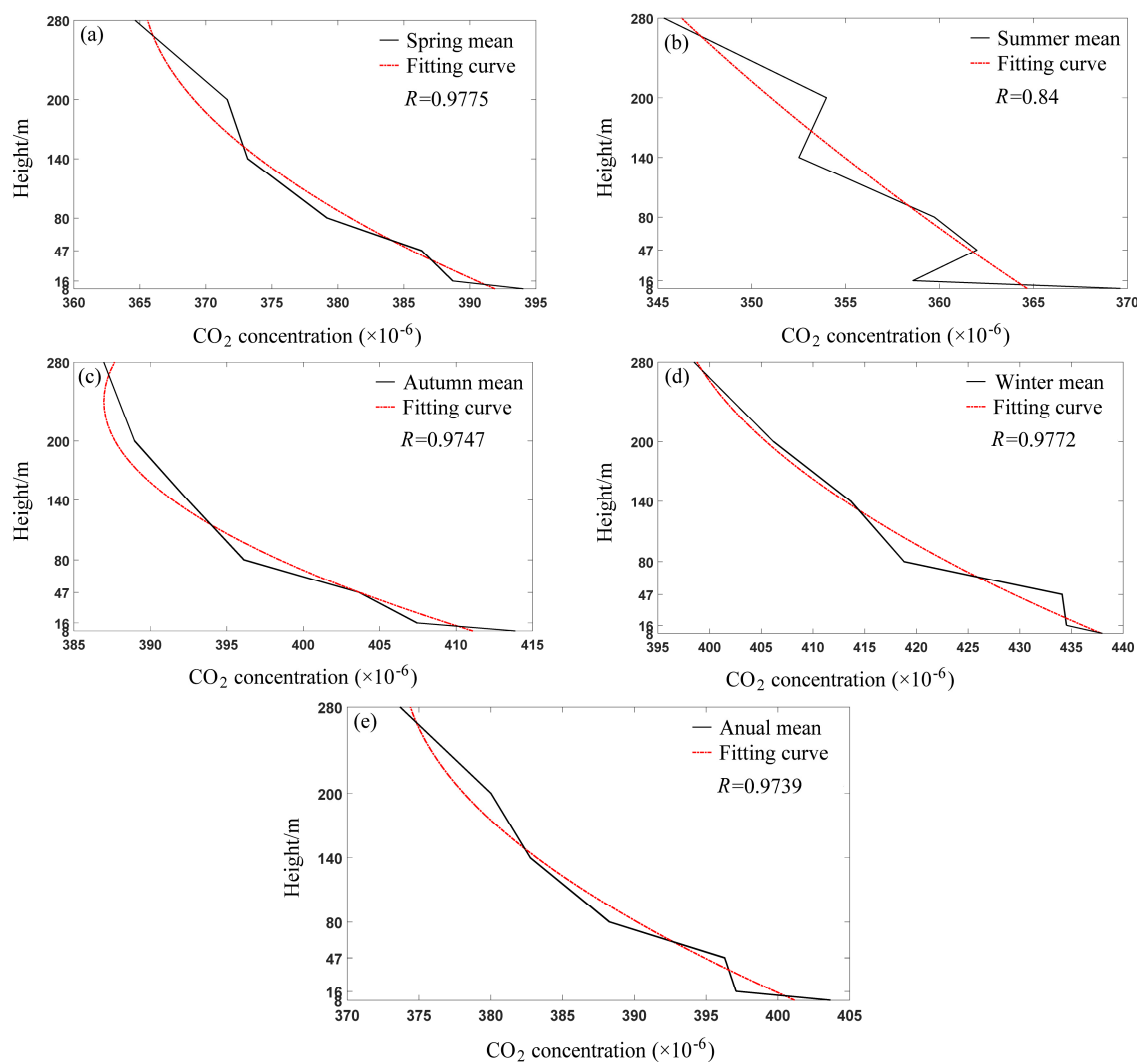
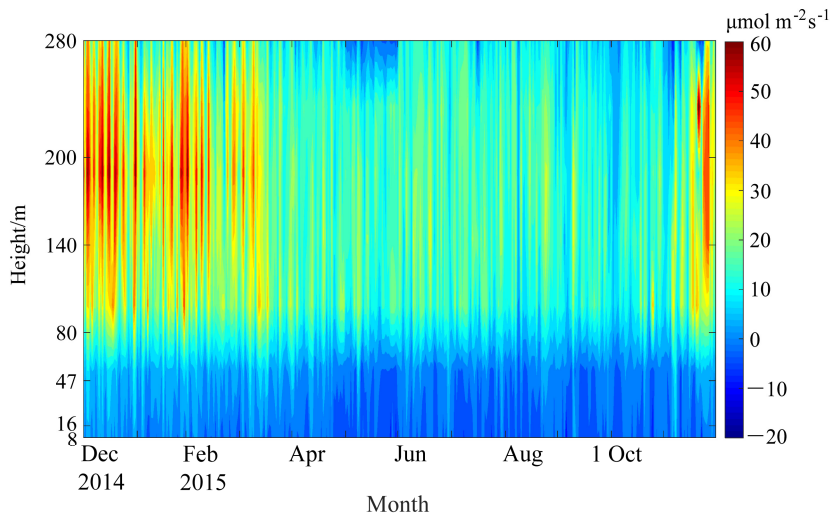
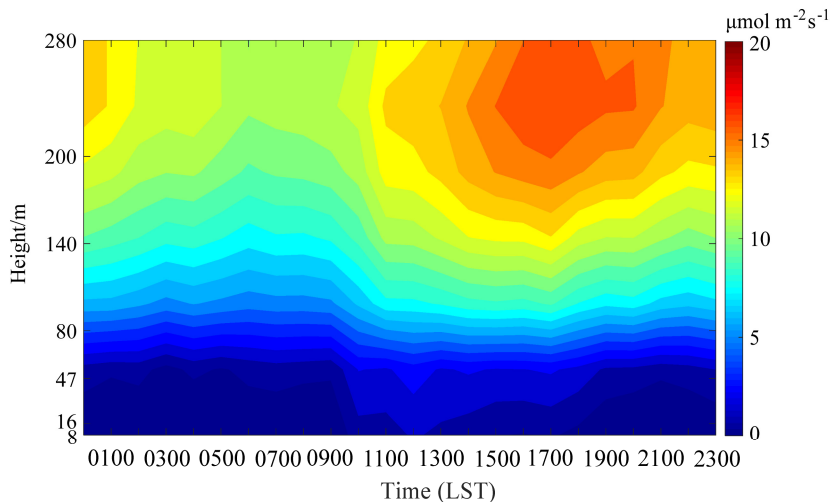


图 5 北京 325 m 气象塔四季及年平均 CO₂ 浓度廓线拟合图 (R 表示相关系数): (a) 春季平均; (b) 夏季平均; (c) 秋季平均; (d) 冬季平均; (e) 年平均
Fig. 5 Fittings of the vertical profiles of CO₂ concentration at the Beijing 325-m meteorological tower averaged in the four seasons and the annual average: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter; (e) anual. R represents correlation coefficient

图 6 2014 年 12 月至 2015 年 11 月北京 325 m 气象塔 CO₂ 通量月变化剖面Fig. 6 Vertical profile of monthly variation of CO₂ flux at the Beijing 325-m meteorological tower from December 2014 to November 2015图 7 2014 年 12 月 1 日至 2015 年 11 月 30 日北京 325 m 气象塔 CO₂ 通量年平均日变化剖面Fig. 7 Vertical profile of annual mean diurnal variation of CO₂ flux at the Beijing 325-m meteorological tower from 1 December 2014 to 30 November 2015

22:00 至 23:00 左右出现了第四个高峰值,这是由于其他季节里入夜后,边界层逐渐稳定,CO₂通量有所下降,而冬季从 19:00 开始进入取暖高峰期,23:00 后结束采暖,因此出现第四个小高峰值;在 47 m 以上,四季都明显表现出 03:00 至 06:00 CO₂ 通量最低,为谷值。

图 9 中 CO₂ 通量廓线拟合公式如下:

$$F_c = -0.0009z^2 + 0.27z + 0.45 \text{ (春季)}, \quad (6)$$

$$F_c = -0.0007z^2 + 0.23z - 0.22 \text{ (夏季)}, \quad (7)$$

$$F_c = -0.0008z^2 + 0.25z + 0.19 \text{ (秋季)}, \quad (8)$$

$$F_c = -0.0013z^2 + 0.42z + 1.30 \text{ (冬季)}, \quad (9)$$

$$F_c = -0.0009z^2 + 0.29z + 0.43 \text{ (年平均)}; \quad (10)$$

其中, z 为观测高度,通量 F_c 单位为 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

由图 9 可知: R 都接近 1, 说明拟合效果比较好。从拟合曲线和实际廓线充分看出了 CO₂ 通量有着从低空到高先增加后减小的整体规律且最大值出现在 140 m 附近。

3.3 湍流能谱

本文在不同季节和高度上依据稳定度 ($Z/L = -2 \sim 2$) 筛选出 30 组最优数据,画出了不同稳定度的归一化速度谱和 CO₂ 谱 (图 10)。横坐标为无因次频率 fz/u (f 为自然频率, z 为观测度减去零平面位移, u 为平均风速),纵坐标为归一化速度谱密度 $fS(f)/u_*^2\phi_\epsilon^{2/3}$, 归一化 CO₂ 谱密度 $fS(f)/C_*^2$ 。其中, u_* 为特征速度, S 为谱能, ϕ_ϵ 为矢量或标量对应的普适函数 (相似性参数), u_* 表达式为

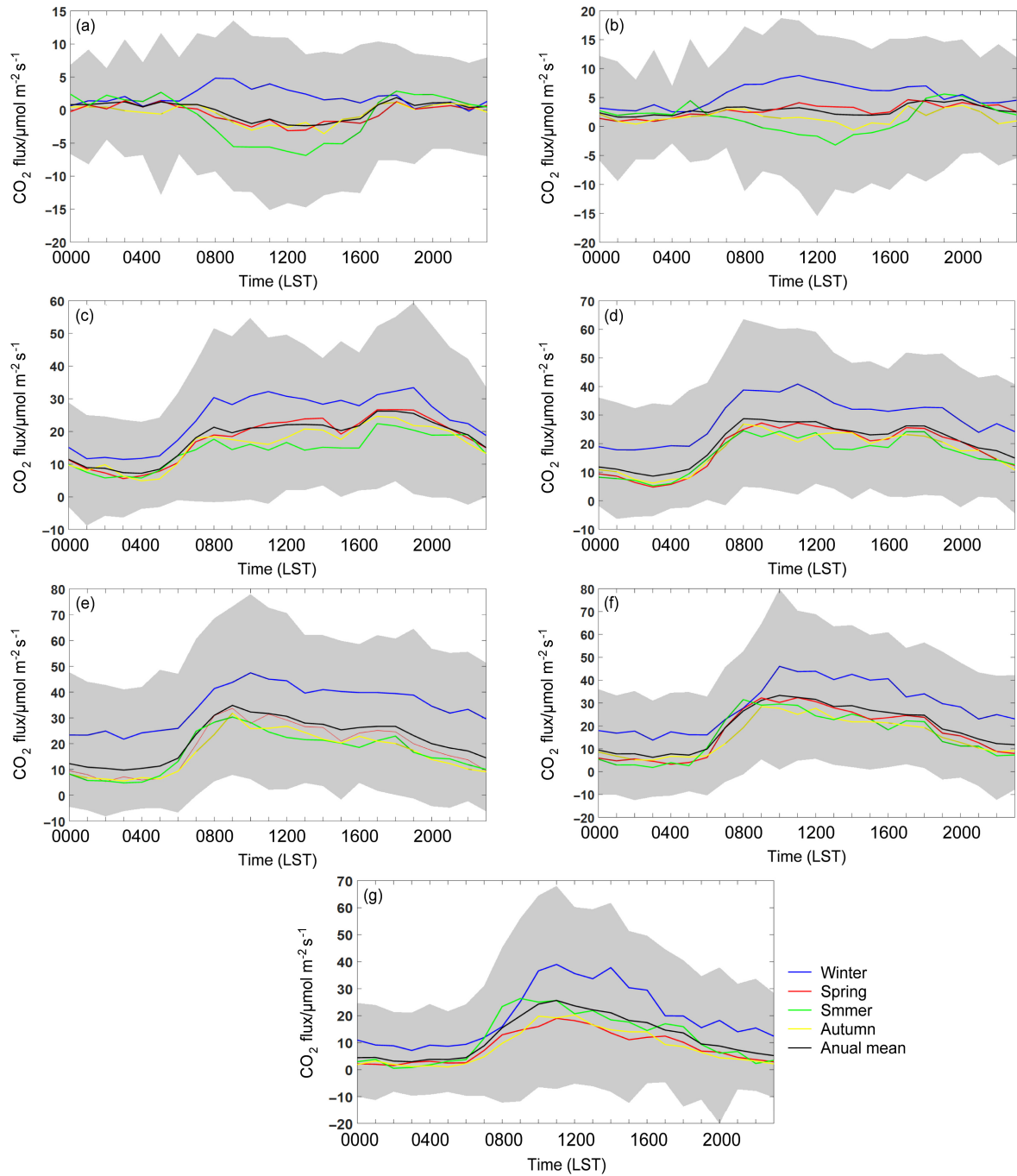


图8 北京325 m气象塔不同高度四季及年平均CO₂通量日均变化: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m
Fig. 8 Diurnal variations of CO₂ fluxes measured at seven levels of the Beijing 325-m meteorological tower in different seasons: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m

$$u_* = \left[-(\overline{u'w'})_0 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

C_* 为CO₂通量的特征量,其表达式为(Kaimal et al., 1972)

$$C_* = \frac{-(\overline{w'C'})_0}{u_*}. \quad (12)$$

由于归一化CO₂谱中的 $\phi_z^{2/3}$ 与稳定度参数 Z/L 之间没有明确的关系式,所以纵坐标用 $fS(f)/C_*^2$ 进行归一化。

可见,归一化速度谱和CO₂谱曲线高频段($fz/u > 5$)都有明显的惯性副区(斜率为 $-2/3$),与Kaimal et al. (1972)结论一致。由于谱峰较难确

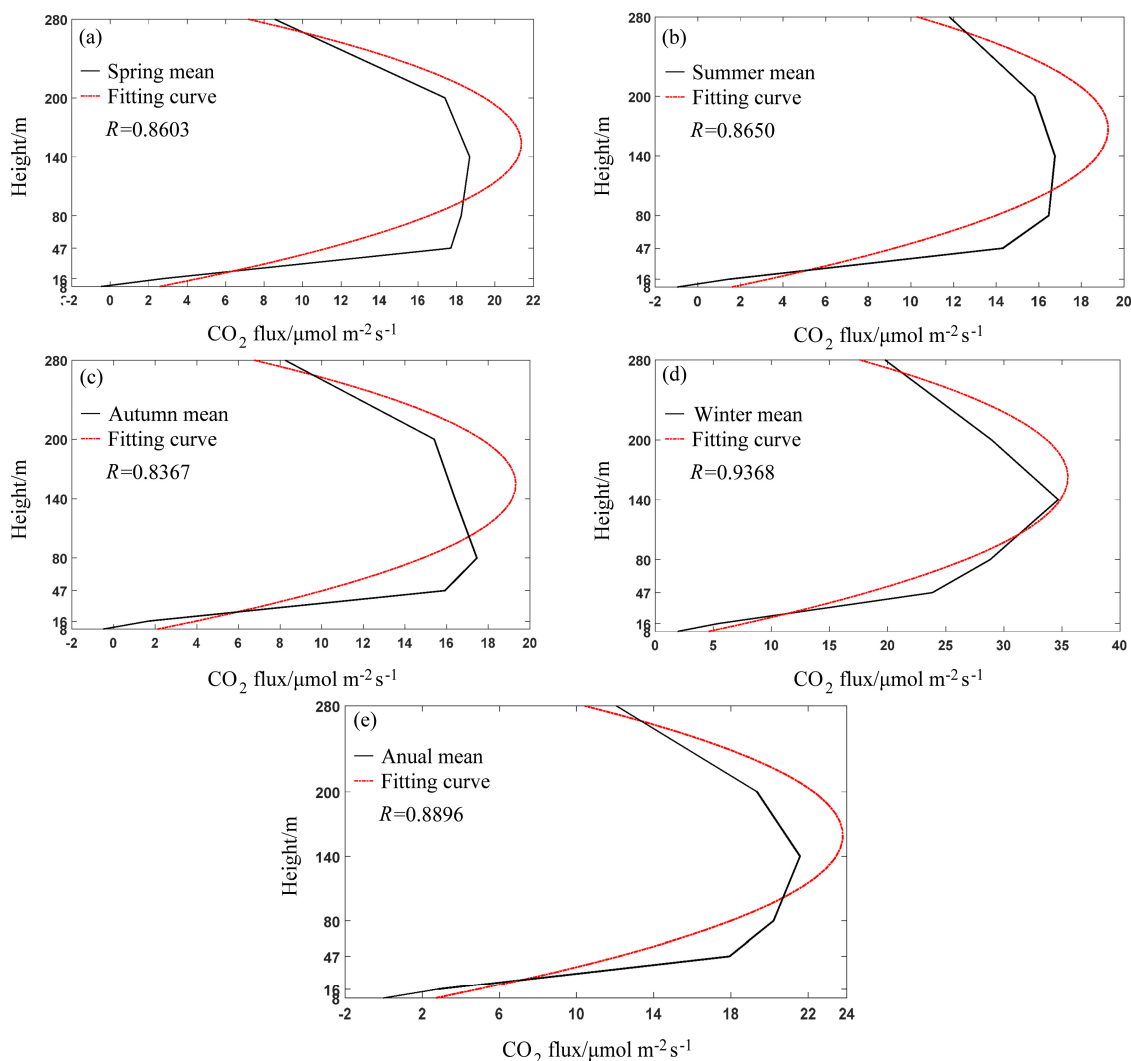


图9 北京325 m气象塔四季及年平均CO₂通量廓线拟合图: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m

Fig. 9 Fittings of CO₂ flux profiles at the Beijing 325-m meteorological tower averaged in the four seasons and the annual average: (a) 8 m; (b) 16 m; (c) 47 m; (d) 80 m; (e) 140 m; (f) 200 m; (g) 280 m

定, 这里认为谱峰频率的变化范围是 $0.2 < fz/u < 2$, 较多集中在 0.5。 u 、 v 谱峰值普遍比 w 峰值大, 这说明 u 、 v 谱的最大能量要比 w 能量大。 u 、 v 谱在低频谱区无明显下降且集中在较窄的范围内, 而 w 谱在低频区较分散且下降较快, 说明 u 和 v 谱能集中在大涡, 而 w 能量集中在小涡内。一般而言, 归一化谱应与稳定度参数 Z/L 存在一定变化关系, 图 10 中也显示了这种关系: 低频区, 随着稳定度增加, 谱能量减少。

CO₂ 谱的报道尚不多见, 尤其是低频段特征在文献中没有涉及。本文 CO₂ 谱也基本满足上述谱的一般规律: 高频段有明显的惯性副区, 归一化谱与稳定度参数 Z/L 存在一定变化关系。另外横向和侧

向速度谱、CO₂ 谱在低频区能量衰减很慢, 在中性和不稳定时谱曲线甚至还上翘, 有关这点解释, 刘明星等 (2008) 在分析温湿度谱时也出现了这一现象, 他认为低频上翘和双峰现象一定意义上可以认为是等同的; Cava et al. (2001) 在南极研究也发现了横向和侧向速度谱低频上翘现象, 他认为是地形扰动的缘故。

综上, 速度谱、CO₂ 谱的分布特征跟观测高度没有直接的关系, 这与 Roth et al. (1989) 的观点一致。复杂城市下垫面谱的低频区与稳定度有关, 这点与多数研究谱的结论相同。有关能谱和稳定度的关系有待进一步研究探讨, 温湿度谱特征也是作者今后的研究内容。

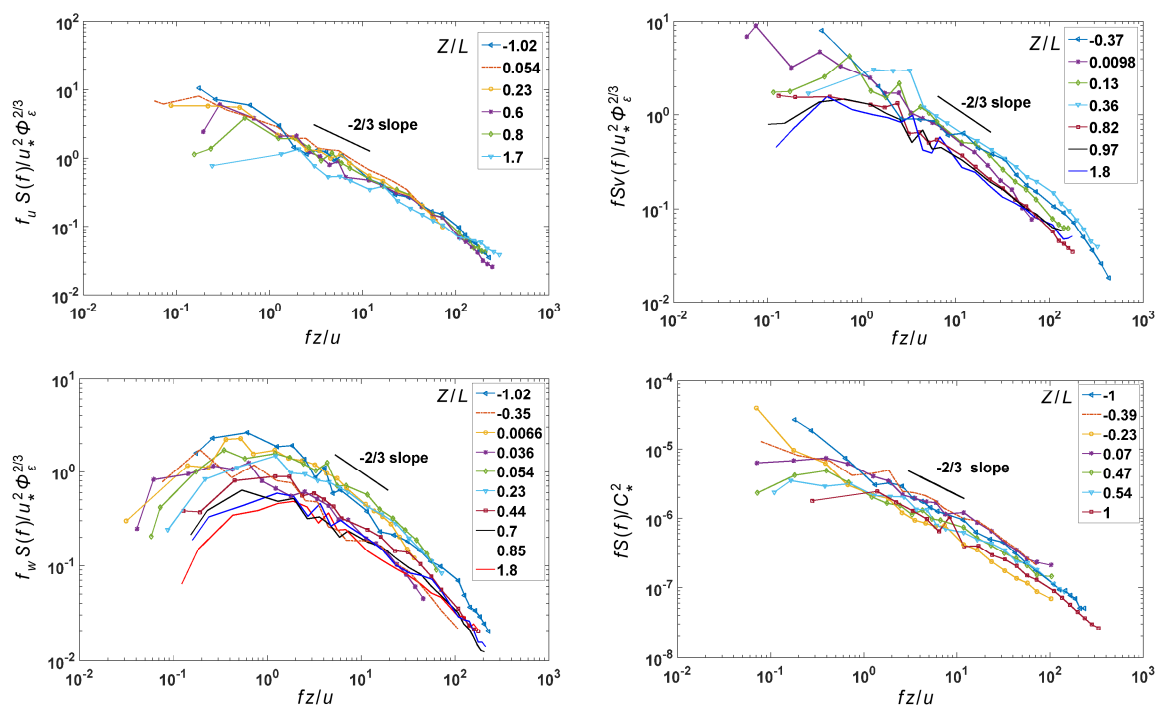


图 10 北京 325 m 气象塔归一化速度谱 (a) u 谱、(b) v 谱、(c) w 谱和 (d) CO_2 谱

Fig. 10 The normalized velocity (a) u spectrum, (b) v spectrum, (c) w spectrum, and the (d) CO_2 spectrum at the Beijing 325-m meteorological tower

4 结论

本文研究了北京城区 CO_2 时空分布及湍流谱特征, 得到如下结论:

(1) CO_2 浓度季节变化为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季。每层日变化具有典型的“双峰型”, 日变化是由人类活动、植物生态、 CO_2 基础浓度和边界层状态等综合因素的影响。随着高度的增加, CO_2 浓度减少。

(2) 北京 CO_2 的源大于汇, 说明北京城市是个 CO_2 的源, 这与前人研究结果一致。 CO_2 通量的日变化曲线较 CO_2 浓度的日变化曲线波折较多, 不如 CO_2 浓度日变化模型规律明显。说明 CO_2 浓度比通量稳定。8 m 和 16 m 的 CO_2 通量年平均日变化在 0 附近, 多为负值。白天, 冬季和春季的 CO_2 通量整体高于夏季和秋季; 夜晚, 冬季高于其他季节, 其他季节之间则相差不大。在 47 m 以下, 因为植被光合作用, CO_2 通量为负, 而 47 m 以上, 通量为正。140 m 以下: 通量随高度的增加而增加; 140 m 以上, 通量随高度的增加而减少。

(3) 归一化速度谱和 CO_2 谱在惯性子区有一 $-2/3$ 的斜率, 在低频区与稳定度参数 (Z/L) 有一定的关系。后续将进一步对能谱进行研究, 如不同季节标

量谱和各变量协谱的分布规律, 横向、侧向速度谱和 CO_2 谱在低频区上翘原因等。

参考文献 (References)

- Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology [J]. *Advances in Ecological Research*, 30: 113–173.
- Baldocchi D D, Hincks B B, Meyers T P. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. *Ecology*, 69 (5): 1331–1340, doi:10.2307/1941631.
- Baldocchi D D, Wilson K B. 2001. Modeling CO_2 and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales [J]. *Ecological Modelling*, 142: 155–184, doi:10.1016/S0304-3800(01)00287-3.
- Cava D, Giostra U, Tagliazucca M. 2001. Spectral maxima in a perturbed stable boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 100 (3): 421–437, doi:10.1023/A:1019219117439.
- Foken T, Gockede M, Mauder M, et al. 2004. Post-field data quality control [M]//Lee X, Massman W, Law B. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic, 181–208, doi:10.1007/1-4020-2265-4_9.
- Grabler A. 1994. Technology [M]//Meyer W B, Turner B L. *A Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Cambridge: Cambridge University, 287.
- Grimmond C S B, Oke T R. 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 41 (7): 792–810, doi:10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2.

- 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]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109 (D24): D24101, doi:10.1029/2004JD004936.
- 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*, 15 (1): 21–33, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.01.03.
- Helfter C, Famulari D, Phillips G J, et al. 2011. Controls of carbon dioxide concentrations and fluxes above central London [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (5): 1913–1928, doi:10.5194/acp-11-1913-2011.
- Hoomweg D A, Freire M, Lee M J, et al. 2011. Cities and Climate Change: Responding to An Urgent Agenda [M]. Washington D C: The World Bank, 324.
- Hui D F, Wan S Q, Su B, et al. 2004. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimations [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 (1–2): 93–111, doi:10.1016/S0168-1923(03)00158-8.
- 贾庆宇, 周广胜, 王宇, 等. 2010. 城市复杂下垫面供暖前后 CO₂ 通量特征分析 [J]. *环境科学*, 31 (4): 843–849. Jia Qingyu, Zhou Guangsheng, Wang Yu, et al. 2010. Characteristics of CO₂ flux before and in the heating period at urban complex underlying surface area [J]. *Environmental Science*, 31 (4): 843–849, doi:10.13227/j.hjxx.2010.04.025.
- Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 98 (417): 563–589, doi:10.1002/qj.49709841707.
- 刘明星, 张宏升, 宋星灼, 等. 2008. 不同下垫面温度和湿度湍流谱特征研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 44 (3): 391–398. Liu Mingxing, Zhang Hongsheng, Song Xingzhuo, et al. 2008. Spectral characteristics of atmospheric turbulence over various surface conditions [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 44 (3): 391–398, doi:10.3321/j.issn:0479-8023.2008.03.011.
- 刘晓曼, 程雪玲, 胡非. 2015. 北京城区二氧化碳浓度和通量的梯度变化特征——I 浓度与虚温 [J]. *地球物理学报*, 58 (5): 1502–1512. Liu Xiaoman, Cheng Xueling, Hu Fei. 2015. Gradient characteristics of CO₂ concentration and flux in Beijing urban area part I: Concentration and virtual temperature[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 58 (5): 1502–1512, doi:10.6038/cjg20150504.
- 刘阳, 刘辉志, 王雷. 2017. 北京城市下垫面大气边界层湍流输送垂直分布特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 47 (10): 1243–1256. Liu Yang, Liu Huizhi, Wang Lei. 2017. The vertical distribution characteristics of integral turbulence statistics in the atmospheric boundary layer over an urban area in Beijing [J]. *Science China Earth Sciences*, 60 (8): 1533–1545, doi:10.1007/s11430-016-9050-doi.
- 刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 2016. 北京 325 米气象塔上 CO₂ 梯度观测数据质量控制与评价 [J]. *大气科学*, 40 (2): 390–400. Liu Yujue, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. 2016. Data processing and quality assessment of the eddy covariance system of the 325-m meteorology tower in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (2): 390–400, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14325.
- Moncrieff J B, Massheder J M, De Bruin H, et al. 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide [J]. *J. Hydrol.*, 188–189: 589–611, doi:10.1016/S0022-1694(96)03194-0.
- Moncrieff J B, Clement R, Finnigan J, et al. 2004. Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series [M]// Lee X, Massman W, Law B. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic, 7–31, doi:10.1007/1-4020-2265-4_2.
- 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, doi:10.1175/JAM2153.1.
- 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 (14): 3139–3146, doi:10.1021/es010277e.
- O'Meara M. 1999. Reinventing cities for people and the planet[R]. World Watch Paper 147. Washington D C: World watch Institute.
- Potere D, Schneider A. 2007. A critical look at representations of urban areas in global maps [J]. *GeoJournal*, 69 (1–2): 55–80, doi:10.1007/s10708-007-9102-z.
- Raupach M R, Thom A S, Edwards I. 1980. A wind-tunnel study of turbulence flow close to regularly arrayed rough surfaces [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 18 (4): 373–397, doi:10.1007/BF00119495.
- Reynolds O. 1895. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of criterion [J]. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 186:123–164.
- Roth M, Oke T R, Steyn D G. 1989. Velocity and temperature spectra and cospectra in an unstable suburban atmosphere [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 47 (1–4): 309–320, doi:10.1007/BF00122336.
- Sahlée E, Smedman A S, Rutgerström A, et al. 2008. Spectra of CO₂ and water vapour in the marine atmospheric surface layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 126 (2): 279–295, doi:10.1007/s10546-007-9230-5.
- Soegaard H, Møller-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 (2–3): 283–294, doi:10.1016/S0034-4257(03)00185-8.
- Van Dijk A V, Moene A F, De Bruin H A R. 2004. *The Principles of Surface Flux Physics: Theory, Practice and Description of the ECPACK Library* [M]. Wageningen: Wageningen University, 99pp.
- 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, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.08.038.
- Walsh C J, Oke T R, Grimmond C B, et al. 2004. Fluxes of atmospheric carbon dioxide over a suburban area of Vancouver [C]//Proceedings of the Fifth Symposium on the Urban Environment. Vancouver, Canada: AMS.
- 王介民. 1992. 山谷城市的近地层大气湍流谱特征 [J]. *大气科学*, 16 (1): 11–17. Wang Jieming, 1992. The spectral characteristics of atmospheric turbulence in an urban area of complex terrain [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 16 (1): 11–17, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.01.02.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106 (447): 85–100, doi:10.1002/qj.49710644707.
- 周凌晔, 汤洁, 温玉璞. 2002. 地面风对瓦里关山大气 CO₂ 本底浓度的影响分析 [J]. *环境科学学报*, 22 (2): 135–139. Zhou Lingxi, Tang Jie, Wen Yupu. 2002. Impact of local surface wind on the atmospheric carbon dioxide background concentration at Mt. Waliguan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 22 (2): 135–139, doi:10.3321/j.issn:0253-2468.2002.02.002.