南京夏季城市冠层大气 CO_2 浓度时空分布规律的观测

高韵秋[1,2],刘寿东[1,2*],胡凝[1],王淑敏[1],邓力琛[1],于洲[1],张圳[1],李旭辉[1,2]
(1. 南京信息工程大学大气环境中心,南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心,南京 210044)

摘要: 城市是 CO_2 重要排放源,直接观测城市中大气 CO_2 浓度对于研究人类活动对大气温室气体的贡献至关重要,而在城市中多个站点、多个高度上观测大气 CO_2 浓度则有助于认识城市 CO_2 浓度的时空变化规律,确定其影响机制. 本研究于 2014 年 7 月 18 日至 7 月 25 日在南京主城区东、西、南、北和中共 5 个方位(100 m 左右高度),2014 年 8 月 3 日至 2014 年 8 月 9 日在南京主城区中部站点的 3 个高度(30、65 和 110 m)观测 CO_2 浓度. 结果表明: ① 南京主城区垂直方向上 CO_2 浓度存在明显梯度,近地面 30 m 处 CO_2 浓度受人为活动影响明显,平均值达 427.3×10^{-6}($\pm 18.2 \times 10^{-6}$)(摩尔分数,下同),高层 65 m、110 m 处 CO_2 浓度混合均匀,平均值分别为 411.8×10^{-6}($\pm 15.0 \times 10^{-6}$)和 410.9×10^{-6}($\pm 14.6 \times 10^{-6}$). 大气层结越稳定,CO_2 浓度越高,垂直梯度越大. ② 南京主城区 CO_2 浓度的水平分布受风和大气稳定度的控制. 观测期间盛行东北风向,导致 CO_2 浓度分布整体呈现西南高,东北低的格局,城市主城区上下风向 CO_2 浓度差为 7.8×10^{-6}. 而且水平风速越大,越有助于将上风向的 CO_2 传输至城市的下风向,CO_2 浓度差就越小. 大气层结越稳定,整体 CO_2 浓度越高. ③ 南京主城区 5 个站点 CO_2 浓度均有明显的日变化,日最高值出现在交通早高峰期间,谷值在 17:00 左右,在 19:00 左右有时会因交通晚高峰而出现次高值.

关键词: 南京市; 主城区; CO_2 浓度; 盛行风向; 垂直分布
中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)07-2367-07 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.2015.07.006

Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO_2 Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer

GAO Yun-qiu[1,2], LIU Shou-dong[1,2*], HU Ning[1], WANG Shu-min[1], DENG Li-chen[1], YU Zhou[1], ZHANG Zhen[1], LI Xu-hui[1,2]
(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Direct observation of urban atmospheric CO_2 concentration is vital for the research in the contribution of anthropogenic activity to the atmospheric abundance since cities are important CO_2 sources. The observations of the atmospheric CO_2 concentration at multiple sites/heights can help us learn more about the temporal and spatial patterns and influencing mechanisms. In this study, the CO_2 concentration was observed at 5 sites (east, west, south, north and middle) in the main city area of Nanjing from July 18 to 25, 2014, and the vertical profile of atmospheric CO_2 concentration was measured in the middle site at 3 heights (30 m, 65 m and 110 m). The results indicated that: ① An obvious vertical CO_2 gradient was found, with higher CO_2 concentration [molar fraction of 427.3×10^{-6}($\pm 18.2 \times 10^{-6}$)] in the lower layer due to the strong influences of anthropogenic emissions, and lower CO_2 concentration in the upper layers [411.8×10^{-6}($\pm 15.0 \times 10^{-6}$) and 410.9×10^{-6}($\pm 14.6 \times 10^{-6}$) at 65 and 110 m respectively] for the well-mixed condition. The CO_2 concentration was higher and the vertical gradient was larger when the atmosphere was stable. ②The spatial distribution pattern of CO_2 concentration was dominated by wind and atmospheric stability. During the observation, the CO_2 concentration in the southwest was higher than that in the northeast region with the CO_2 concentration difference of 7.8×10^{-6}, because the northwest wind was prevalent. And the CO_2 concentration difference reduced with increasing wind speed since stronger wind diluted CO_2 more efficiently. The more stable the atmosphere was, the higher the CO_2 concentration was. ③ An obvious diurnal variation of CO_2 concentration was shown in the 5 sites. A peak value occurred during the morning rush hours, the valley value occurred around 17:00 (Local time) and another high value occurred around 19:00 because of evening rush hour sometimes.

Key words: Nanjing City; main urban zone; CO_2 concentration; prevailing wind direction; vertical distribution

收稿日期: 2014-12-08; **修订日期:** 2015-03-03
基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)
作者简介: 高韵秋(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境与温室气体,E-mail: gaoyunqiu1106@126.com
* **通讯联系人**, E-mail: lsd@nuist.edu.cn

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

长三角地区是温室气体 CO_2 排放的高强度地区之一,碳排放高达全国总量的 15%[1]. 南京是该地区第二大城市,也是重要的综合性工业生产基地,碳排放总量仅次于苏州位居江苏省第二位[2]. 城市是 CO_2 重要排放源,直接观测城市中大气 CO_2 浓度对于研究人类活动对大气温室气体的贡献至关重要.

由于城市下垫面的特殊性和复杂性,研究城市 CO_2 排放规律需根据自身的特点因地制宜,目前主要的试验方法分为流动观测和定点观测. 流动观测是利用便携式气体分析仪,采用车载方式观测城市道路上的 CO_2 浓度. 研究结果显示,道路上的 CO_2 浓度和交通量关系密切,城市中心的 CO_2 浓度高于城市周围,存在明显的"锅盖"现象[3~5]. 但是受观测高度的限制,观测值极易受地面排放源和非均匀建筑物的影响,空间代表性非常差. 定点观测是在固定观测点的某一高度或者不同高度观测 CO_2 浓度. 研究结果显示,CO_2 通量基本表现为净源[6~10]. 但是以森林为主的城市下垫面[11,12],夏季的 CO_2 通量可为负. 因此,CO_2 浓度的分布与城市下垫面状况密不可分[13]. 对城市 CO_2 垂直观测的最新研究表明,CO_2 垂直分布在 300 m 以下受地面影响强烈,在特定气象条件下可以呈现较大的垂直梯度[14]. 因此,某个高度或者某一种下垫面的观测结果难以代表城市 CO_2 的分布特征.

基于上述定点观测和流动观测的局限性,在城市中多个站点、多个高度上观测大气 CO_2 浓度更加有助于全面具体地认识城市 CO_2 浓度的时空变化规律. 因此,以南京主城区为研究区域,设立多个同步连续 CO_2 浓度观测点. 在城市的东、西、南、北和中这 5 个方位上,基于非色散红外技术和离轴积分腔输出光谱技术观测城市的 CO_2 浓度,研究其时空变化特征. 同时结合气象资料,分析风向、风速、大气层结稳定度对城市 CO_2 浓度分布的影响,以期为城市碳排放模型的建立提供基础数据,也为政府各类节能减排政策提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 观测时间与地点

两次观测试验于 2014 年 7 月和 8 月进行,观测时间各 7 d.

第一次观测于 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00(北京时间,下同)进行. 在南京主城区东、西、南、北和中这 5 个方位 100 m 左右高度上同步连续观测大气 CO_2 浓度,用于研究城市冠层顶 CO_2 水平分布的时空特征(如图 1). 其中,东部为维景国际大酒店(32°02′N,118°29.4′E,楼高 120 m),西部为天玺国际公寓楼(32°02′N,118°25.8′E,楼高 103 m),南部为海通大厦(31°57′N,118°27.6′E,楼高 107 m),北部为玉桥国际公寓(32°05′N,118°27.6′E,楼高 102 m),中心为城开大厦(32°02′N,118°28.2′E,楼高 110 m). 采样点均设在楼顶,除观测人员外无其他人为活动.

第二次观测于 8 月 3 日 00:00 至 2014 年 8 月 9 日 24:00 进行. 在 110 m(高层建筑的顶层)、65 m(高层建筑物的中部)和 30 m(高层建筑的低层)这 3 个高度上同步连续观测 CO_2 浓度,获取城市 CO_2 浓度的垂直分布,用于进一步分析上述测点的空间代表性. 其中 110 m 和 65 m 采样点位于城开大厦,30 m 采样点位于新澳大厦(32°02′19.11″N,118°47′5.01″E).

地面气象资料和探空资料源于南京方山气象站.

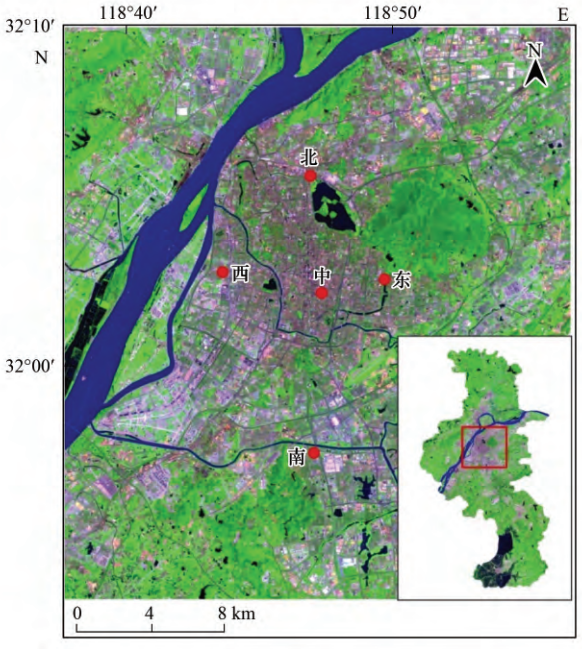


图 1 观测点示意

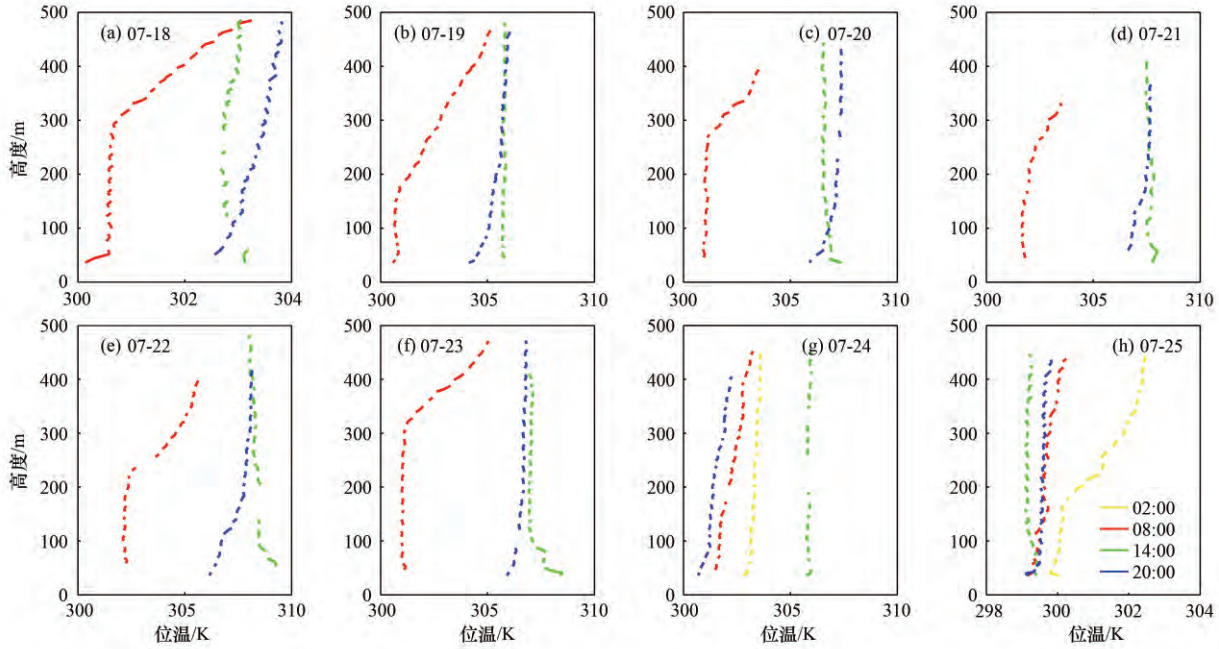
Fig. 1 Image of the surroundings of the observation sites

1.2 天气背景

观测期间天气炎热,天气以晴好为主,日平均气温达 28℃,盛行东北风.

第一次观测期间的位温廓线(Ⅰ)见图 2,可见除了 7 月 18 日存在较明显的稳定层结外,其他时间以近中性层结为主. 第二次观测期间的位温廓线(Ⅱ)见图 3,从中可以看出,8 月 3 日至 8 月 6 日大

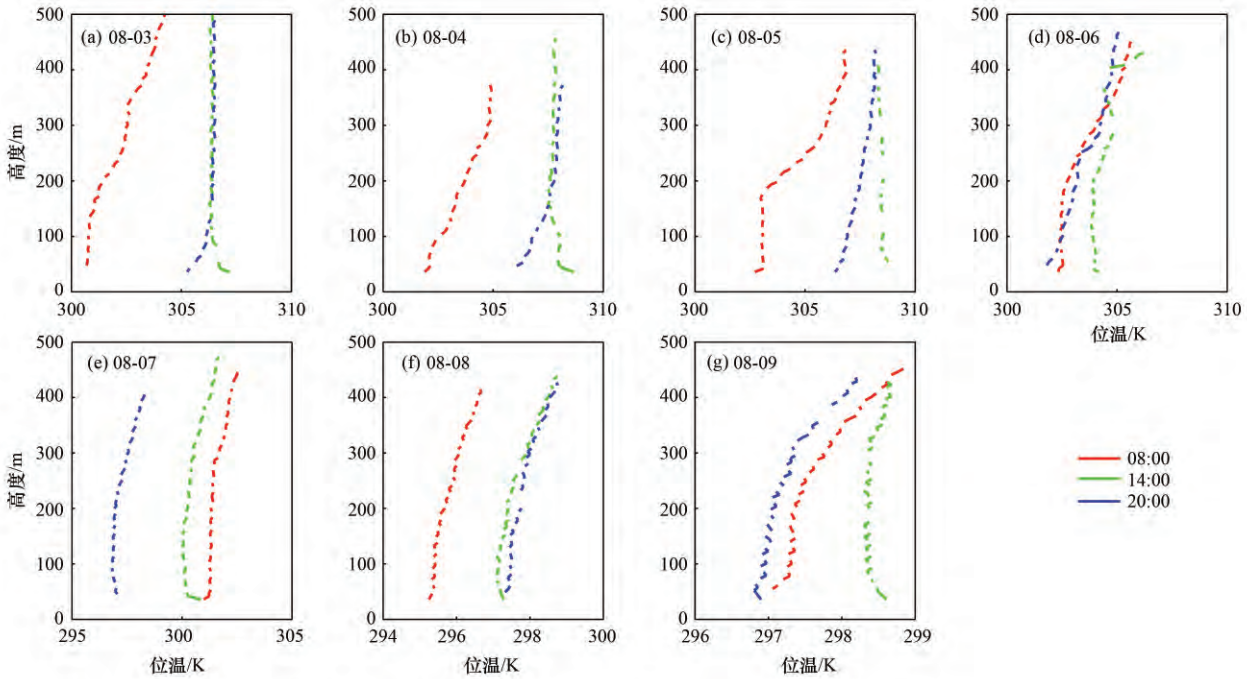
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00

图 2　位温廓线(Ⅰ)

Fig. 2　Vertical profiles of virtual potential temperature(Ⅰ)



2014 年 8 月 3 日至 2014 年 8 月 9 日

图 3　位温廓线(Ⅱ)

Fig. 3　Vertical profiles of virtual potential temperature(Ⅱ)

气多以稳定层结和弱稳定层结为主，8 月 7 日至 8 月 9 日期间大气以弱不稳定层结和中性层结为主.

1.3　观测仪器

观测仪器为 3 台基于离轴积分腔输出光谱技术的便携式 $CO_2/CH_4/H_2O$ 分析仪(型号 915-0011，Los Gatos Research，Mountain View，CA，USA)，用于城市主城区中部站点的 3 个高度 CO_2 浓度垂直梯度观测；5 台非色散红外 CO_2/H_2O 分析仪(型号

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

LI-840A，LICOR，Inc. Lincoln，NE，USA)，用于 5 个方位的 CO_2 浓度水平观测. 数据采集频率均为 1 Hz. 观测仪器采样口均伸出楼外 2 m. 采气管为内径 1/4 英寸的特氟龙管，末端连接过滤器(Swagelok，USA)和漏斗，防止颗粒污染物和雨水进入仪器影响观测效果和损坏仪器.

LI-840A 型 CO_2/H_2O 气体分析仪(LI-COR Corporate，USA)是一款非色散红外(NDIR)气体分析仪. 它的准确度 $<1\%$，总漂移 $<0.4\times10^{-6}℃^{-1}$. 温度是决定分析仪测量精度的主要因素，为降低温度变化对观测结果的影响，配合自行设计的恒温系统. 此外，为了解决观测结果的漂移问题，对仪器每日进行 1 次零值校准和 490×10^{-6} 的标准值校准. 首先利用 99.999% 的高纯氮气，由 LI-840A 读取数值，确定仪器的零点漂移值；再利用 490×10^{-6} 的国家 2 级标准气体(干空气中 CO_2，南京红健气体有限公司)，同样由 LI-840A 读取数值，确定仪器 490×10^{-6} 标准值的漂移度；假设仪器的漂移为线性漂移，结合如下公式进行线性插值校正:

$$c(t) = \frac{c'_{std}-0}{c_{std}-N_{std}}c(t) - \frac{c'_{std}-0}{c_{std}-N_{std}}N_{std} \quad (1)$$

$$c' = c(t_1) + \frac{c(t_2)-c(t_1)}{t_2-t_1}(t-t_1) \quad (2)$$

式中，t 表示观测时间，t_1 和 t_2 表示标定时间，$t_1<t<t_2$. c'代表校正之后的 CO_2 浓度，c 代表 LI-840A 型气体分析仪的测量值，c'_{std}、N_{std} 和 c_{std} 分别代表 CO_2 标准气体的实际浓度值、LI-840A 型气体分析仪读取的 N_2 标准气体和 CO_2 标准气体的浓度值. 通过温度控制和校准，仪器间 CO_2 浓度观测值的艾伦方差 24 h 内不超过 1×10^{-6}，适用于城市大气 CO_2 浓度观测[14].

便携式 $CO_2/CH_4/H_2O$ 分析仪是一款离轴积分光腔技术气体分析仪，仪器本身可以自行调节温压等参数，测量精度达 0.1×10^{-6}，试验期间无需另外标定. 但为了使两种仪器的结果具有可比性，在试验开始前使用国家一级标准气体(干空气中 CO_2，标准值 490×10^{-6}，南京红健气体有限公司)对 915-0011 型和 LI-840A 型气体分析仪进行标定.

1.4 浓度差计算方法

为了分析风向对 CO_2 浓度空间分布的影响，根据风向建立直角坐标系. 令风向方向为 x 轴方向，沿着风向方向的左侧为 y 轴方向，对 CO_2 浓度进行向量分解. 其中，$c_S\cos\theta$、$c_W\sin\theta$、$c_E\sin\theta$、$c_N\cos\theta$ 为平行于风向的 CO_2 分量，$\Delta c_{h_down}(c_S\cos\theta + c_W\sin\theta)$ 为下风向的 CO_2 分量，$\Delta c_{h_up}(c_E\sin\theta + c_N\cos\theta)$ 为上风向的 CO_2 分量；$c_S\sin\theta$、$c_W\cos\theta$、$c_E\cos\theta$、$c_N\sin\theta$ 为垂直于风向的 CO_2 分量. 因此，平行、垂直于风向的 CO_2 浓度差为:

$$\Delta c_h = c_S\cos\theta + c_W\sin\theta - c_E\sin\theta - c_N\cos\theta \quad (3)$$

$$\Delta c_v = -c_S\sin\theta + c_W\cos\theta - c_E\cos\theta + c_N\sin\theta \quad (4)$$

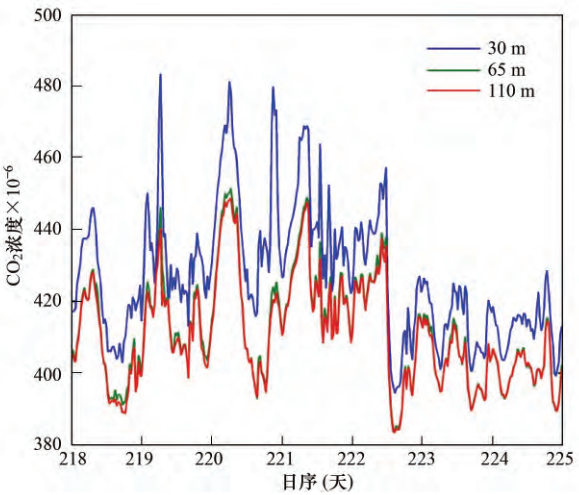
式中，Δc_h 和 Δc_v 分别代表平行和垂直于风向的 CO_2 浓度差，θ 代表风向.

2 结果与分析

2.1 CO_2 浓度的垂直分布

图 4 为 2014 年 8 月 3 日 00:00 至 2014 年 8 月 9 日 24:00 期间 3 个高度 CO_2 浓度变化的时间序列. 从中可见，不同高度上的 CO_2 浓度时间变化趋势一致，但是数值相差较大. 其中，低层大气靠近地面 CO_2 排放源，因此受人为活动影响最大，表现为 30 m 高度上的 CO_2 浓度最高，观测期间的平均值为 $427.3\times10^{-6}(\pm18.2\times10^{-6})$；65 m 和 110 m 高度上，距离地面排放源较远且大气湍流混合作用较强，因此 CO_2 浓度下降、垂直梯度减小，观测期间的摩尔分数平均值分别为 $411.8\times10^{-6}(\pm15.0\times10^{-6})$ 和 $410.9\times10^{-6}(\pm14.6\times10^{-6})$.

此外，大气层结越稳定，CO_2 浓度会越高同时垂直梯度也越大. 以 8 月 4 日 07:00 为例，此时为稳定层结，65 m 与 100 m 高度上的 CO_2 浓度差为 10.2×10^{-6}. 相对地，8 月 3 日 10:30，此时为不稳定层结，



2014 年 8 月 3 日至 2014 年 8 月 9 日

图 4 不同高度 CO_2 浓度的时间序列

Fig. 4 Time series of CO_2 concentration at different heights

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

65 m 和 100 m 高度上的 CO_2 浓度差为 -0.7×10^{-6}. 因此，当大气以弱稳定层结为主时(8 月 3 日至 8 月 6 日)，城市冠层内的大气 CO_2 浓度整体较高且垂直梯度较大. 30 m 处 CO_2 浓度为 $433.0\times10^{-6}(\pm18.2\times10^{-6})$，比 65 m 和 110 m 处浓度平均高 17.1×10^{-6}、18.4×10^{-6}. 8 月 7 日至 8 月 9 日，大气以弱不稳定层结和中性层结为主时，CO_2 浓度整体较低且垂直梯度较小. 30 m 高度上的 CO_2 浓度平均值分别为 $413.1\times10^{-6}(\pm7.2\times10^{-6})$，比 65 m 和 110 m 处的 CO_2 浓度仅高 11.4×10^{-6}和 11.7×10^{-6}.

2.2　CO_2 浓度的水平分布

2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00 期间 CO_2 总体平均浓度的水平分布如表 1 所示. 可以看出，主城区大气 CO_2 浓度的分布呈现西、南高，东、北低，中心介于这两者之间的特征. 其中，南面的 CO_2 浓度最高，比中心 CO_2 浓度高 8.3×10^{-6}；其次是西面，比中心浓度高 4.2×10^{-6}；然后是东面，比中心浓度低 1.6×10^{-6}；北面最低，比中心浓度低 2.3×10^{-6}. 东与北之间、西与南之间的 CO_2 浓度差异较小，仅为 0.7×10^{-6}和 4.1×10^{-6}. 结合风向资料，观测期间盛行东北风，该风向出现频率分别 43.6%. 正是由于风向原因，导致城市排放的 CO_2 被平流输送到下风方向，形成西南高、东北低的 CO_2 浓度分布格局.

表 1　5 个观测点 CO_2 浓度的统计结果[1)]

Table 1　CO_2 concentration statistical results in the five observation sites

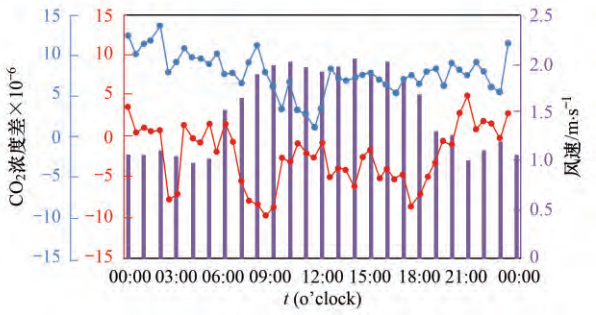
观测点	东	南	西	北	中
平均值 $\pm1\sigma(\times10^{-6})$	412.6 ± 14.4	422.5 ± 16.4	418.4 ± 16.3	411.9 ± 18.0	414.2 ± 14.8

1) 统计时间：2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00，东、南、西、北和中分别代表 5 个观测点

2.3　CO_2 与风向、风速的关系

为了进一步分析风向对 CO_2 浓度空间分布的影响，将上风向的 CO_2 分量(Δc_{h_up})与下风向的 CO_2 分量(Δc_{h_down})进行相关分析. 结果显示，两者的相关系数高达 0.999 7 ($n=371$，$P<0.01$)，但是 Δc_{h_down}比 Δc_{h_up}高 $7.85\times10^{-6}(\pm8.74\times10^{-6})$. 这说明了风的水平输送造成了 CO_2 空间分布的不均匀.

图 5 是 2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00 期间平行、垂直于风向的平均 CO_2 浓度差和风速的关系. 首先，垂直于风向的 CO_2 浓度差在零值附近摆动，平均值为 $-2.2\times10^{-6}(\pm9.5\times10^{-6})$，明显低于平行于风向的 CO_2 浓度差 $7.8\times10^{-6}(\pm8.7\times10^{-6})$. 再一次证明了风向是影响城市 CO_2 空间分布的决定性因素. 除此之外，平行、垂直于风向的 CO_2 浓度差与风速的相关系数分别为 −0.572 9($n=24$，$P<0.01$)、−0.630 4($n=24$，$P<0.01$). 说明 CO_2 浓度差与风速存在一定的负相关关系，水平风速越大，空气的平流输送作用越强烈，更多的 CO_2 被转移出城市，因此 CO_2 浓度差越小.



红色实线代表平行于风向的 CO_2 浓度差，蓝色实线代表垂直于风向的 CO_2 浓度差，紫色柱状代表风速，2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00

图 5　CO_2 浓度差和风速的关系

Fig. 5　Relationship between D-value of CO_2 concentration and wind speed

2.4　CO_2 浓度的时间变化

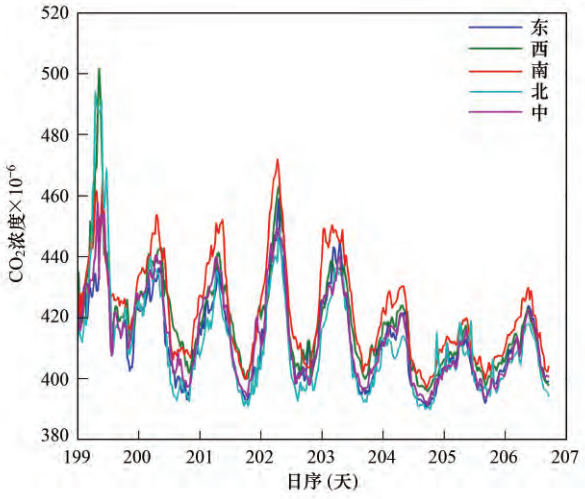
图 6 为 2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00 期间 CO_2 平均浓度的时间序列. 从中可以看出，5 个站点的 CO_2 浓度的变化趋势基本一致. 首先，由于 CO_2 源和汇的周期性变化，CO_2 浓度呈现明显的日变化特征. CO_2 浓度的峰值大多出现在 07:00 ~ 09:00，该段时间正是上班早高峰，地面交通的碳排放量增加. 早高峰过后，随着植物光合作用的增强，CO_2 浓度逐渐降低，到 17:00 左右达到最低值，最低至 396×10^{-6}左右. 随着太阳落山，植物光合作用转为呼吸作用，CO_2 浓度再次逐渐升高.

其次，大气稳定度对 CO_2 浓度的变化也起着非常重要的作用. 大气层结越稳定，CO_2 浓度越高. 19:00 左右正是南京主城区的下班晚高峰. 因此，在 7 月 17 ~ 19 日、7 月 21 日、7 月 24 ~ 25 日，该时段 CO_2 浓度有一个明显次高峰. 但是，在 7 月 20 日、7 月 22 ~ 23 日的 19:00，大气为不稳定层结，由于湍流混合作用强烈，这种现象并未出现. 也正是由于

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大气稳定度的影响，当大气以稳定层结为主时（7 月 18 日），城市冠层内的大气 CO_2 浓度整体偏高；当大气层结向近中性和中性过渡时（7 月 19 ~ 25 日），CO_2 浓度逐渐降低.

因此，决定城市大气 CO_2 浓度变化的主要因素，除了 CO_2 源与汇以外，主要是风和大气层结稳定度.



2014 年 7 月 18 日 00:00 至 2014 年 7 月 25 日 17:00

图 6 5 个观测点 CO_2 浓度的时间变化

Fig. 6 Time series of CO_2 concentration in the five observation sites

3 讨论

首先，CO_2 浓度的垂直分布与高度有关. 近地层大气的 CO_2 浓度受地面 CO_2 排放源的强烈影响. 高度越低，离排放源越近，CO_2 浓度值越高，空间代表性较差. 随着高度的增加，大气湍流混合作用增强，CO_2 浓度逐渐降低且垂直梯度减小，空间代表性会逐渐改善[15,16]. 此次观测结果显示，南京主城区 30 m 高度处 CO_2 浓度明显高于 65 m、100 m 高度 CO_2 浓度，且 65 m 和 110 m 高度 CO_2 浓度值非常接近，空间代表性有明显改善. 因此，选择 110 m 作为主要观测高度来分析南京市主城区冠层高度的 CO_2 浓度分布特征基本可行. 需要指出的是，尽管南京市主城区多以 24 m 以内的高层建筑为主[17]，但由于城区 100 m 以上超高层建筑的不断增加（2011 年数据），需要选择更高的观测高度，提高 CO_2 浓度观测的空间代表性.

其次，风和大气稳定度是造成 CO_2 浓度时空变化的重要因素. 由于大气的平流输送运动，上风向的 CO_2 浓度大多低于下风向[19]. 观测试验期间盛行东北风，因而主城区的 CO_2 浓度分布整体呈现西南高，东北低的格局. 水平风速越大，CO_2 的平流输送项越大，就有更多的城市 CO_2 被转移，导致城市 CO_2 浓度差就越小. 因此，风在城市 CO_2 收支中占有重要地位[20]. 且 Li 等[14]研究表明，大气层结稳定时，CO_2 浓度较高，反之浓度较低. 观测期间，在大气稳定度较低，大气混合较均匀的情况下，晚间 CO_2 浓度的次高值现象便不存在，与上述结论一致.

最后，试验期间南京市 CO_2 浓度变化有明显的日变化规律，主要体现在早晨的峰值和午后的谷值上，与其他研究结果基本一致[21~26]. 但是由于城市布局的差异，季节以及人类活动作息时间的不同，CO_2 浓度的峰值和谷值的出现时间以及 CO_2 浓度值的不同. 观测期间南京城区 CO_2 浓度峰值出现时间为 07:00 ~ 09:00，在 425×10^{-6} ~ 445×10^{-6} 左右，谷值出现在 17:00 在 395×10^{-6} 左右，并伴有 19:00 左右的次高值现象. 2010 年上海夏季城区 CO_2 浓度峰值出现时间段为 08:00 ~ 10:00，约 415×10^{-6} 左右，谷值出现在 15:00 为 405×10^{-6} 左右[27]；2010 年 5 ~ 6 月美国洛杉矶的 CO_2 浓度峰值出现时间为 05:00 左右，在 425×10^{-6} 左右，谷值出现在 17:00 为 410×10^{-6} 左右[28]. 因此，一个城市的观测结果往往不能直接套用到另一个城市中.

4 结论

（1）南京主城区夏季 CO_2 浓度的垂直分布与高度有关，近地面浓度较高，高层浓度较低，100 m 高度处可以代表南京主城区冠层高度的大气 CO_2 浓度水平.

（2）风和大气稳定度是影响南京主城区夏季 CO_2 浓度分布的重要因素，下风向 CO_2 浓度高于上风向，风速越大，上下风向浓度差越小；稳定度越高，CO_2 浓度越高.

（3）南京主城区 CO_2 浓度存在明显的日变化特征且伴有自身的城市特征.

参考文献：

[1] Shen S, Yang D, Xiao W, *et al*. Constraining anthropogenic CH_4 emissions in Nanjing and the Yangtze River Delta, China, using atmospheric CO_2 and CH_4 mixing ratios [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, **31**(6): 1343-1352.

[2] 肖翔. 江苏城市 15 年来碳排放时空格局变化研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011. 20-33.

[3] Idso C D, Idso S B, Balling Jr R C. An intensive two-week study of an urban CO_2 dome in Phoenix, Arizona, USA [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(6): 995-1000.

[4] Gratani L, Varone L. Daily and seasonal variation of CO_2 in the

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

city of Rome in relationship with the traffic volume [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(14): 2619–2624.

[5] Wang H K, Fu L X, Zhou Y, *et al*. Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005 [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(2): 394–400.

[6] Velasco E, Pressley S, Allwine E, *et al*. Measurements of CO_2 fluxes from the Mexico City urban landscape [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(38): 7433–7446.

[7] Vogt R, Christen A, Rotach M W, *et al*. Temporal dynamics of CO_2 fluxes and profiles over a Central European city [J]. Theoretical and applied climatology, 2006, **84**(1–3): 117–126.

[8] Liu H Z, Feng J W, Järvi L, *et al*. Four-year (2006-2009) eddy covariance measurements of CO_2 flux over an urban area in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(17): 7881–7892.

[9] Song T, Wang Y S. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2012, **106**(3): 139–149.

[10] Contini D, Donateo A, Elefante C, *et al*. Analysis of particles and carbon dioxide concentrations and fluxes in an urban area: Correlation with traffic rate and local micrometeorology [J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**(1): 25–35.

[11] Vesala T, Järvi L, Launiainen S, *et al*. Surface-atmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland [J]. Tellus B, 2008, **60**(2): 188–199.

[12] Grimmond C S B, Offerle B D, Hom J, *et al*. Observations of local-scale heat, water, momentum and CO_2 fluxes at Cub Hill, Baltimore [C]. Preprints 4th Urban Environment Symposium, American Meteorological Society. 2002: 117–118.

[13] **郭毅. 西安市大气 CO_2 时空分布研究** [D]. **西安: 陕西师范大学**. 2011.

[14] Li Y L, Deng J J, Mu C, *et al*. Vertical distribution of CO_2 in the atmospheric boundary layer: characteristics and impact of meteorological variables [J]. Atmospheric Environment, 2014, **91**: 110–117.

[15] **何新星，王跃思，刘广仁，等. 北京大气 CH_4、CO_2、TOC 日变化规律及垂直分布的自动连续观测** [J]. **中国环境监测**, 2005, **21**(3): 62-66.

[16] Idso S B, Idso C D, Balling Jr R C. Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO_2 concentration within a residential sector of the urban CO_2 dome of Phoenix, AZ, USA [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(10): 1655–1660.

[17] **贺文慧，杨昕，汤国安，等. 基于数字高程模型的城市地表开阔度研究——以南京老城区为例** [J]. **地球信息科学学报**, 2012, **14**(1): 94–100.

[18] **刘红年，蒋维楣，孙鉴泞，等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析** [J]. **南京大学学报(自然科学版)**, 2008, **44**(1): 99–106.

[19] Lietzke B, Vogt R. Variability of CO_2 concentrations and fluxes in and above an urban street canyon [J]. Atmospheric Environment, 2013, **74**(2): 60–72.

[20] Strong C, Stwertka C, Bowling D R, et al. Urban carbon dioxide cycles within the Salt Lake Valley: A multiple-box model validated by observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 2011, **116**(D15): 307–319.

[21] Miyaoka Y, Inoue H Y, Sawa Y, *et al*. Diurnal and seasonal variations in atmospheric CO_2 in Sapporo, Japan: anthropogenic sources and biogenic sinks [J]. Geochemical Journal, 2007, **41**(6): 429–436.

[22] Rigby M, Toumi R, Fisher R, *et al*. First continuous measurements of CO_2 mixing ratio in central London using a compact diffusion probe [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(39): 8943–8953.

[23] Rice A, Bostrom G. Measurements of carbon dioxide in an Oregon metropolitan region [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(5): 1138–1144.

[24] Henninger S, Kuttler W. Near surface carbon dioxide within the urban area of Essen, Germany [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2010, **35**(1–2): 76–84.

[25] George K, Ziska L H, Bunce J A, *et al*. Elevated atmospheric CO_2 concentration and temperature across an urban–rural transect [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(35): 7654–7665.

[26] García M Á, Sánchez M L, Pérez I A. Differences between carbon dioxide levels over suburban and rural sites in Northern Spain [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, **19**(2): 432–439.

[27] **王长科，王跃思，刘广仁. 北京城市大气 CO_2 浓度变化特征及影响因素** [J]. **环境科学**, 2003, **24**(4): 13–17.

[28] Newman S, Jeong S, Fischer M L, *et al*. Diurnal tracking of anthropogenic CO_2 emissions in the Los Angeles basin megacity during spring 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(2): 5771–5801.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net