

DOI: 10.5846/stxb202109092547

赵露, 王效科, 姚扬, 孙旭, 周伟奇, 张红星. 城市复杂环境中碳通量日变化规律及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(11): 4549-4560.

Zhao L, Wang X K, Yao Y, Sun X, Zhou W Q, Zhang H X. The diurnal variation and influencing factors of carbon dioxide fluxes in an urban complex area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4549-4560.

城市复杂环境中碳通量日变化规律及其影响因素

赵 露^{1,2}, 王效科^{1,2,3}, 姚 扬^{1,2}, 孙 旭^{1,3}, 周伟奇^{1,2,3}, 张红星^{1,3,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站, 北京 100085

摘要:城市是人类居住和活动最集中地区,其 CO₂排放量占世界总排放量的 71%,城市碳排放规律研究对全球碳减排工作具有重要意义。利用涡动相关技术观测了北京市某街区 2015 年至 2016 年的 CO₂通量,重点研究了不同时间尺度和气象条件下的 CO₂通量的日变化规律,分析了影响城市 CO₂通量的社会及自然因素。结果表明,CO₂通量日变化特征具有(1)明显的早晚“双峰型”特征,早晚高峰分别出现在早上 7:30—9:30 和晚上 17:30—20:30;(2)周末特征:周末早高峰时间延迟,晚于工作日约 1.5h,且峰值低了约 10.8%,但晚高峰时间提前,且峰值高于工作日约 10.6%;(3)季节特征:冬季 CO₂通量均值和早高峰值明显高于其他季节,夏季中午具有明显低峰区;(4)风向特征:在不同来风方向上,CO₂通量的日变化峰值差异很大;(5)天气特征:阴天双峰特征比晴天明显。研究表明 CO₂通量日变化主要与交通流量动态变化关系最为密切,其次要受到植被的影响。因此,交通减排和植被增汇对于控制城市碳排放具有重要意义。

关键词:北京;CO₂通量;城市;涡动相关法;日变化

The diurnal variation and influencing factors of carbon dioxide fluxes in an urban complex area

ZHAO Lu^{1,2}, WANG Xiaoke^{1,2,3}, YAO Yang^{1,2}, SUN Xu^{1,3}, ZHOU Weiqi^{1,2,3}, ZHANG Hongxing^{1,3,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Cities are the most concentrated area of human habitation and activities, and their CO₂ emissions account for 71% of the world's total emissions. The study on the law of urban carbon emission has great significance for the reduction of the global carbon emission. In this study, we used the eddy covariance (EC) to measure CO₂ fluxes of a block in Beijing, China in 2015—2016, and analyzed the patterns of diurnal variations in CO₂ fluxes over different timescales. The diurnal variations in CO₂ fluxes exhibited (1) the obvious “bimodal” pattern: peaks of CO₂ fluxes appeared at 7:30—9:30 and 17:30—20:30 in the morning and the evening, respectively. (2) The weekend phenomena: Compared with weekday, the peak in the morning on weekends appeared about 1.5 hours later and 10.8% lower, while the peak in the evening was about 10.6% higher. (3) The seasonal dependence: The mean and daily peak values of CO₂ fluxes in winter were significantly higher than those in other seasons. There was an obvious valley in CO₂ fluxes at noon in summer. (4) Differences among wind direction: In the two main wind directions, the peaks varied greatly. (5) The weather influence: The “bimodal”

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0127700)

收稿日期:2021-09-09; 网络出版日期:2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhx973@cees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

pattern on cloudy days was more obvious than that on sunny days. Our research suggested that the diurnal variation of CO₂ fluxes in cities was mainly related to traffic volume, and was secondarily affected by vegetation. Therefore, the reduction in traffic emission and enhancement in vegetation sink play an important role in reducing carbon emissions in cities.

Key Words: Beijing; CO₂ flux; city; eddy covariance; diurnal variation

为了完成《巴黎协定》制定的全球气温升高控制目标,全球主要碳排放大国都提出了实现碳中和的时间表。为了应对全球气候变化,我国政府提出 2030 年前实现碳排放达峰和 2060 年前实现碳中和的目标^[1]。城市是人类居住和活动最集中地区,其 CO₂排放量占世界总排放量的 71%^[2],因此,城市碳排放规律研究对全球碳减排工作具有重要意义。

碳排放规律的研究首先要基于地表-大气间 CO₂交换通量的观测。在众多 CO₂交换通量观测方法中,涡度相关技术,由于观测期间对地表环境和微气象要素干扰很小,并且能够长期连续自动观测等特点,现已成为国际通量观测网络(FLUXNET)的主要标准方法,截止目前全球已有 500 多个站点利用涡动相关技术测定地表-大气间碳通量^[3]。涡度相关技术的通量观测数据已被广泛应用于陆地生态系统碳源/汇情况的估算^[4-5]、模型关键参数获取^[6-7]及遥感产品验证^[8]等方面的研究。涡动相关技术不但广泛应用在自然生态系统的碳通量观测,近年逐步应用到对城市生态系统碳排放的观测。城市 CO₂通量的观测和分析,最早起源于欧美的一些国家和地区^[9]。Grimmond 等在 1995 年夏季对芝加哥进行地气 CO₂交换通量的观测发现,CO₂通量表现出明显的日变化特征,在夏季中午二氧化碳浓度较低,通量出现负值,而夜间二氧化碳浓度较高,通量均为正值^[10]。Velasco 等通过对墨西哥城进行连续 23 天的观测后发现,CO₂通量的日变化主要是人为和自然源汇共同作用的结果,同时也受其他因素的影响。植被的碳汇作用不仅取决于气象变量,还取决于植物的物候和环境胁迫条件。一些人为排放源如家庭供暖取决于气象变量,同时也受到社会生活方式的影响,例如周末的日排放量低于工作日排放量^[11]。Coutts 等于 2004 年对澳大利亚墨尔本地区进行观测,发现平均日 CO₂通量几乎为正值,且在一日内出现两次高峰,第一个高峰出现在早上八点至九点左右,第二个高峰出现在下午五点并持续到晚上八点。第一个高峰的出现与交通流量有关,第二个高峰除了与较高的车流量有关,还与家庭活动(如烹饪)有关的排放量增加有关^[12]。我国近年来开始了城市 CO₂通量的观测和分析^[13-16]。支星等在上海中心城区进行了为期两年的 CO₂通量观测,发现 CO₂通量的日变化特征呈现与交通流量相对应的双峰现象,且节假日 CO₂通量峰值出现的时间晚于工作日,峰值大小也低于工作日^[9]。Liu 等人对北京进行了为期四年(2006—2009 年)的观测,发现 CO₂通量的日变化过程在很大程度上取决于交通流量,早晚高峰对应着一天中最高的车流量。另外,在生长季白天城市植被对 CO₂通量的排放有一定的抑制作用^[17]。除此之外,与城市 CO₂通量的相关研究还在英格兰南部^[18]、意大利佛罗伦萨^[19]、日本大阪府堺市^[20]、中国沈阳市^[21]等地开展过。

由于城市生态系统下垫面的复杂性和人类活动的不确定性,不同城市和观测者的观测分析结果差异很大。即使是普遍认可的城市 CO₂通量双峰型日变化特征,也会受到季节、风向、植被、天气等多因素的影响,具有很大的区域城市差异性。本研究将基于北京城市生态系统研究站 2015—2016 年的 CO₂通量观测数据,通过研究不同时间尺度上(日、周和年)以及不同风向和天气下的 CO₂通量日变化特征,分析影响城市 CO₂通量的主要社会和自然因素,为城市 CO₂排放量估算和影响因素辨识提供科学依据。

1 研究区域概况和方法

1.1 研究区概况

北京市是世界特大城市之一,是中国的首都,也是中国的政治和文化中心。位于华北平原北部,属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,全年无霜期 180—200 天。2016 年北京市地区生产总值

24899.3 亿元,其中第二产业生产总值 4774.4 亿元,占比 19.2%。全市机动车保有量为 571.8 万辆,比 15 年增加 3.9 万辆,其中,私人汽车 452.8 万辆,比 15 年增加 12.5 万辆。截止 2016 年底,全市常住人口 2172.9 万人,比 2015 年末增加 2.4 万人,人口密度为 1324 人/km²[22]。

1.2 站点描述

二氧化碳通量观测地点设在中国科学院生态环境研究中心研究生公寓楼顶,经纬度分别为 116.35°E 和 40.01°N,楼顶距地高度为 42m(图 1)。观测点西面有一条南北向的上下各两车道的交通干道(双清路),南面有一条上下各一车道的街区道路(林业大学北路)。在观测站周边 1km 的范围内,土地利用类型包含交通干道、学校、居民区、住宅区、办公区等多种利用类型。同时该站点距离北四环 1.6km,北四环 2.5km,附近的双清路、学清路是城市的主干道,早高峰以单向进城为主,晚高峰以单向出城为主,通勤特征明显。该站点的结果可在一定程度上代表城市复杂环境的 CO₂ 通量变化特征。

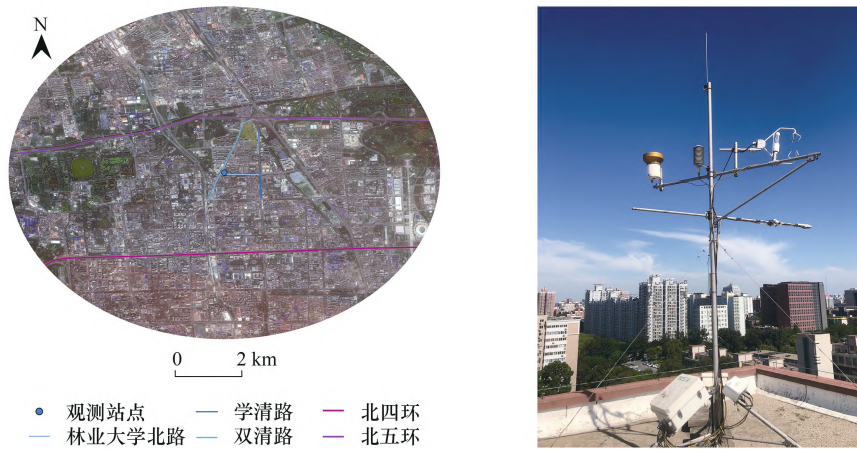


图 1 研究区域和观测设备图

Fig.1 Study area (the left picture) and observation equipment (the right picture)

1.3 观测方法

CO₂ 通量测定利用涡动相关技术(ED)。涡动相关通量观测系统的主要组成部分包括 CSAT3 三维超声风速温度传感器、LI-7500 开路式二氧化碳和水汽分析仪以及数据采集系统。其中,LI-7500 开路式二氧化碳和水汽分析仪的工作原理为依据近红外波段二氧化碳和水汽的吸收带(分别约为 4.26μm 和 2.59μm),测量空气中的二氧化碳和水汽浓度[23],采样频率为 10Hz。

根据涡度协方差技术原理,二氧化碳的湍流输送通量 F_c 可由下式计算[24-25]:

$$F_c = \overline{w \times r} = \bar{w} \times \bar{r} + \overline{w' \times r'}$$

其中, F_c 为二氧化碳的垂直输送通量, w 表示垂直风速(m/s), r 表示观测仪器测得的 CO₂ 摩尔浓度(μmol/m³), w' 和 r' 分别表示 w 和 r 的瞬时值和平均值之间的偏差,横线表示相应时期的平均值。

CO₂ 通量计算过程由 Eddy pro 软件完成。当 LI-7500 被激活后,测得的数据可以直接记录到插入 LI-7500 分析控制单元的 U 盘中。原始数据文件为每 0.5h 一个压缩包(.ghg 文件),内容包含 10Hz 的涡度数据、metadata 数据以及 Biomet 数据等文件。然后将这个压缩包导入 Eddy pro 软件,设置处理文件的时间段为 2015 年 1 月 1 日 0:00 至 2016 年 12 月 31 日 23:59,数据允许缺失率为 10%,平均通量间隔率为 30min,环境压力(Ambient Pressure)和环境温度(Ambient Temperature)统一选择为 LI-7500 测得的数据。运行软件,输出结果为本研究所需要的以 0.5h 为单位的通量数据文件。

1.4 数据处理方法

对于上述获得的数据,本研究进行了一系列的预处理操作[26]:

<http://www.ecologica.cn>

(1) 频率响应修正

受到天气、数据卡替换等影响,数据采集系统记录的数据并不是全部都可以被采用,有部分数据丢失或较差,因此本研究对数据缺失率大于 10%的数据进行剔除^[13]。

(2) 二次坐标旋转

本研究主要是通过二次坐标旋转使得风速方向为垂直方向以消除非均匀地表对垂直风速的影响。

(3) 韦伯-皮尔曼-勒宁修正(WPL)

韦伯-皮尔曼-勒宁修正(WPL)修正的原理是根据大气温度和湿度的脉动量以修正通量值,本研究采用 WPL 修正主要是消除因大气温度、气压等因素的影响产生的通量观测值误差^[27]。

(4) 剔除异常值

涡动相关系统原始资料中极大或极小的异常值点将会对后续通量变化规律的分析产生影响。异常点产生的原因主要有两个方面:(1)外界干扰:如降雨降雪等天气对传感器的干扰;(2)仪器产生的误差,如电路故障、电源不稳定等。

(5) 数据质量控制指标

Eddypro 软件可以对通量(动量和气体通量,显热通量和潜热通量)计算质量标志。本研究选用的是“0—1—2”质量控制系统,该系统的建立是基于 TK2 Eddy Covariance 软件质量控制且是 CarboEurope IP 项目的标准质量控制指标。其中,0 代表质量较高,1 代表质量一般,2 代表质量较差。因此本研究只保留质量控制指标为“0”和“1”的观测数据^[28]。

最终数据因测量仪器故障导致的数据缺口占 6.72%,剔除的异常值占整体数据的 5.98%,研究期间的数据可用率为 87.3%。

1.5 数据分析方法

(1) 年尺度日变化分析

计算一年内每 0.5h 的 CO₂通量均值,采用 R 语言绘图展示 CO₂通量日变化。

(2) 周尺度日变化分析

首先利用 R 语言里的 cutData() 函数将一年内的 CO₂通量区分为工作日和周末,再分别计算工作日和周末每 0.5h 的 CO₂通量均值,并采用 R 语言绘制工作日和周末 CO₂通量日变化图。

(3) 季节尺度日变化分析

首先将 CO₂通量数据分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(1—2月和12月),然后再计算每 0.5h 的 CO₂通量均值,并采用 R 语言绘制不同季节的 CO₂通量日变化图。

(4) 各风向日变化分析

首先,本研究以 45°一个方位,将风向均分为 8 个方位,做出 CO₂通量的风玫瑰图以分析 CO₂通量在不同方位的分布情况,然后计算不同方位上每 0.5h 的 CO₂通量均值,并采用 R 语言绘制出 CO₂通量在不同方位的日变化图。

(5) 晴天和阴天日变化分析

首先根据观测的光合有效辐射(PAR)值来确定全天无云的晴天数据(即 PAR 的日变化为正弦曲线)为最终的典型晴天数据,剩下的数据均归为阴天,再计算典型晴天和阴天下每 0.5h 的 CO₂通量均值,同时采用 R 语言绘制出晴天和阴天下 CO₂通量日变化图。

2 结果

2.1 全年碳通量日变化特征

2015 年和 2016 年平均 CO₂交换通量分别为 $(6.9 \pm 0.2) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(7.2 \pm 0.1) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,年总量分别为 $2611.2 \text{gCm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $2732.2 \text{gCm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。综合这两年结果看,CO₂通量具有明显的日变化特征,整体呈现“双峰

型”(图2),白天 CO₂ 通量波动较大,夜间波动相对较小。其中,早高峰出现在 8:00—9:00,两年最高峰值分别为 $(8.5 \pm 1.0) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(9.1 \pm 1.0) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 晚高峰出现在 18:00—20:30,两年最高峰值分别为 $(9.1 \pm 1.0) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(8.7 \pm 0.9) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,中午会出现 CO₂ 通量低谷,最低值出现在 14:00,两年分别为 $(3.7 \pm 0.6) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(4.2 \pm 0.8) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

2.2 工作日和周末碳通量日变化特征

虽然工作日和周末 CO₂ 通量日变化都具有双峰型特征(图3),但是周末 CO₂ 通量早高峰出现延迟。周末的早高峰出现在 9:30—10:00,晚于工作日早高峰时间 8:00—8:30。周末 CO₂ 通量早高峰的峰值低于工作日早高峰,降低约 $1.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。周末晚高峰时间比工作日略有提前,比工作日提前约 1 个多小时(图3)。周末晚高峰 CO₂ 通量值比工作日明显升高,升高了 $1.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

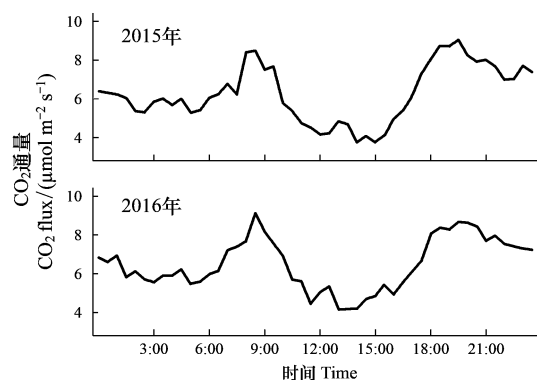


图2 CO₂ 通量日变化图

Fig.2 Mean diurnal variation of CO₂ fluxes

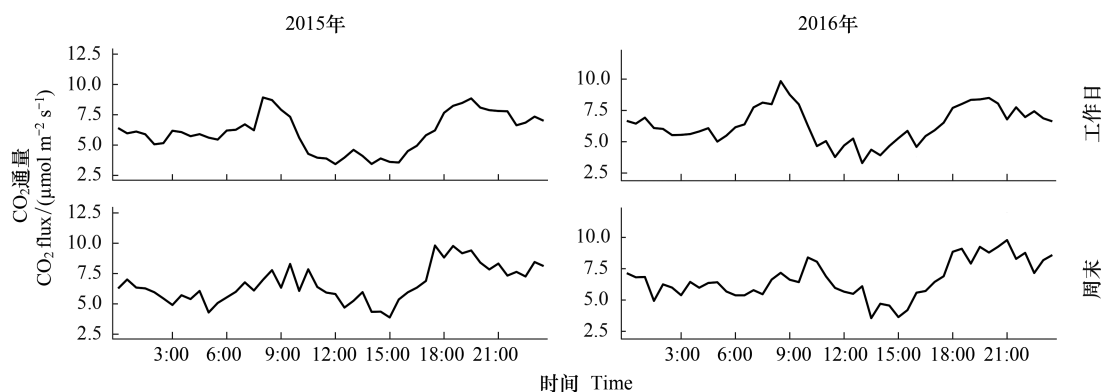


图3 工作日和周末 CO₂ 通量日变化图

Fig.3 Mean diurnal variation of CO₂ fluxes during weekday and weekend

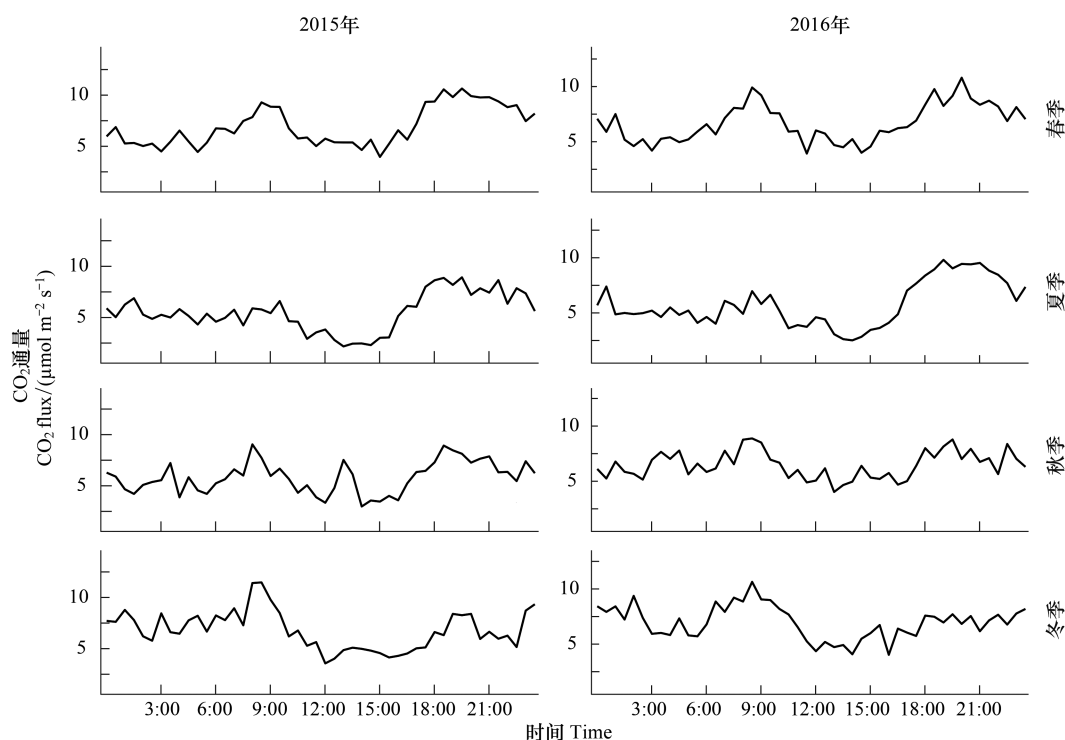
2.3 不同季节碳通量日变化特征

春夏秋冬四季 CO₂ 通量都呈现出“双峰型”,但早晚高峰模式因季节而异。春季、秋季和冬季早高峰更明显(图4),夏季早高峰相对于其他3个季节持续时间短,早高峰峰值相对于凌晨跃升没有其他3个季节明显,其早高峰比春秋冬减少了 $2.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。春季夏季晚高峰时间跨度大,下降缓慢,比秋冬季节高 $2.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。春夏季节晚高峰比早高峰高,平均高 $1.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。秋季早晚高峰接近。冬季早高峰高于晚高峰,平均高 $2.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

秋冬季 CO₂ 通量晚高峰在 2016 年从下午 6:00 持续到午夜,并且晚高峰值也比春夏季要低一些。夏季中午 CO₂ 通量均值 $(3.7 \pm 1.1) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,明显低于冬季中午 CO₂ 通量值 $(5.0 \pm 1.6) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,两者相差 $1.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。另外,冬季 CO₂ 通量均值 $(6.9 \pm 2.0) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 明显高于夏季 CO₂ 通量均值 $(5.6 \pm 1.3) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,两者相差 $1.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

2.4 各风向碳通量日变化特征

风向对二氧化碳通量源区的影响尤为重要,因此需将风向数据与二氧化碳通量的分布建立联系^[21]。结果如图所示:

图4 CO₂通量不同季节日变化Fig.4 Seasonal mean diurnal variation of CO₂ fluxes

不同风向上的 CO₂通量分布不同,东北、东南、西南、西北方向源区碳通量均值分别为 $(6.3 \pm 0.3) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $(7.1 \pm 0.4) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $(8.0 \pm 0.3) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $(5.2 \pm 0.2) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。其中负值,尤其是 2016 年,主要集中在西北方向(315° 至 360°)。

2015 年和 2016 年研究区域的主要风向为西北方向(315° 至 360°)和西南方向(180° 至 225°)且主要风向的日变化规律呈现“双峰型”。相较于西北方向(315° 至 360°),西南方向(180° 至 225°)的 CO₂通量晚高峰值高于早高峰值且日变化幅度更大,其中最高值与最低值相差 $8.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，“双峰型”的日变化规律更加明显。在西北方向(315° — 360°),CO₂通量早高峰值高于晚高峰值,其中早高峰在 8:30—9:00 出现,为 $(7.4 \pm 1.2) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,晚高峰在 19:30—20:30 出现,为 $(5.4 \pm 1.5) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,分别比东南方向低了 $1.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $5.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。另外,由于非主风方向数据量少,变异大,其日变化波动性更明显,特别是 225° 至 270° 方向,除早晚双峰外,还出现了几个小峰。

2.5 晴天和阴天的日变化特征

CO₂通量虽然在晴天和阴天的条件下都表现出“双峰型”的特征,但是阴天的特征更为明显。同时阴天在中午十二点左右表现出另一个明显的小高峰,该小高峰在夏季表现得不明显(峰值仅为 $4.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),而在秋冬季表现更为明显,特别是 2015 年秋季数据,小高峰峰值达到了 $8.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,甚至高于晚高峰峰值(相差约 $0.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。另外,夏季晚高峰峰值明显高于早高峰,尤其在晴天表现出更大的差异(相差约 $5.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),而冬季早高峰值高于晚高峰,在阴天时差异更大(相差约 $2.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

3 讨论

城市 CO₂通量的日变化反映的是大气与城市下垫面间 CO₂净交换过程,人类排放和植物光合作用固定过程同时存在,CO₂通量为正表示观测区域下垫面整体释放 CO₂,CO₂通量为负表示观测区域下垫面整体吸

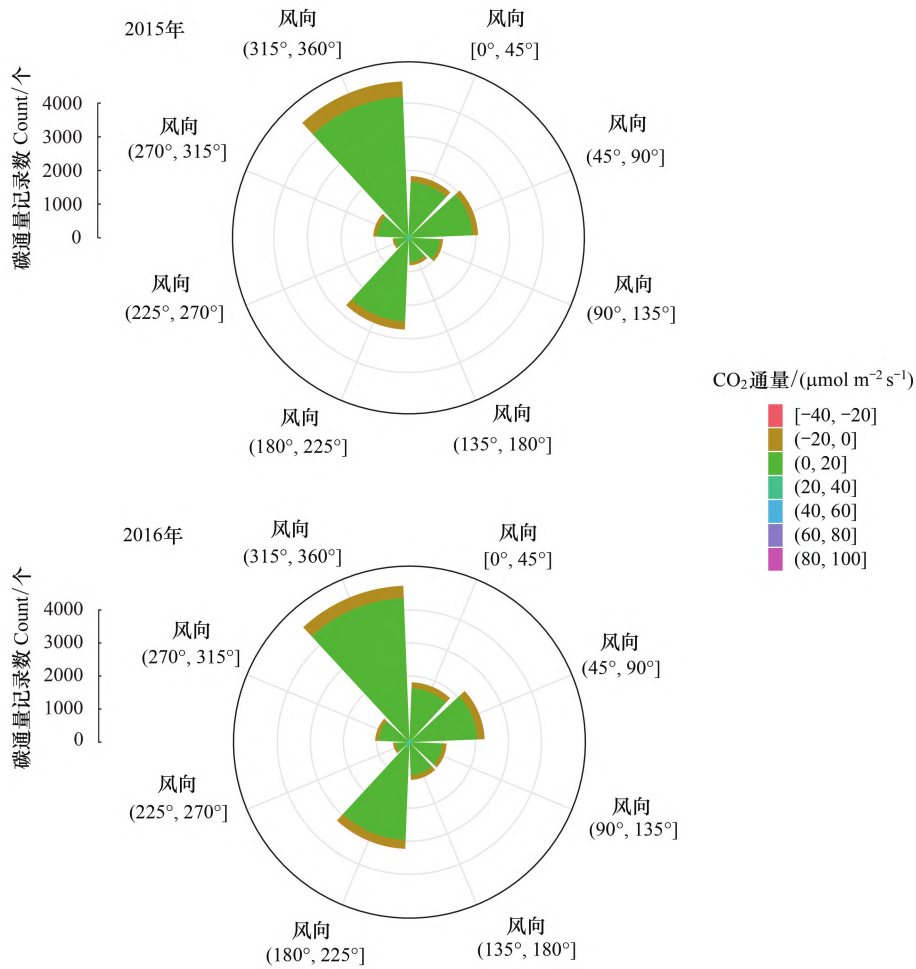


图 5 CO₂通量不同风向分布图

Fig.5 The CO₂ fluxes distribution during the measurement period

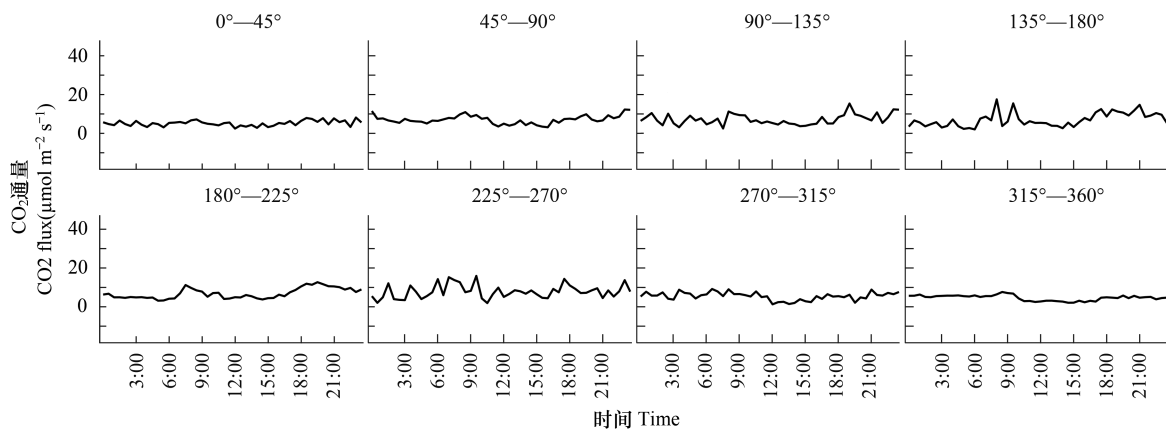


图 6 2015 年各风向上 CO₂通量日变化

Fig.6 Mean diurnal variation of CO₂ fluxes in each wind direction in 2015

收^[29]。2015 年和 2016 年北京城市平均 CO₂交换总量为 2671.7gCm⁻²a⁻¹,处于国内外城市观测结果的中等水平(表 1)。

<http://www.ecologica.cn>

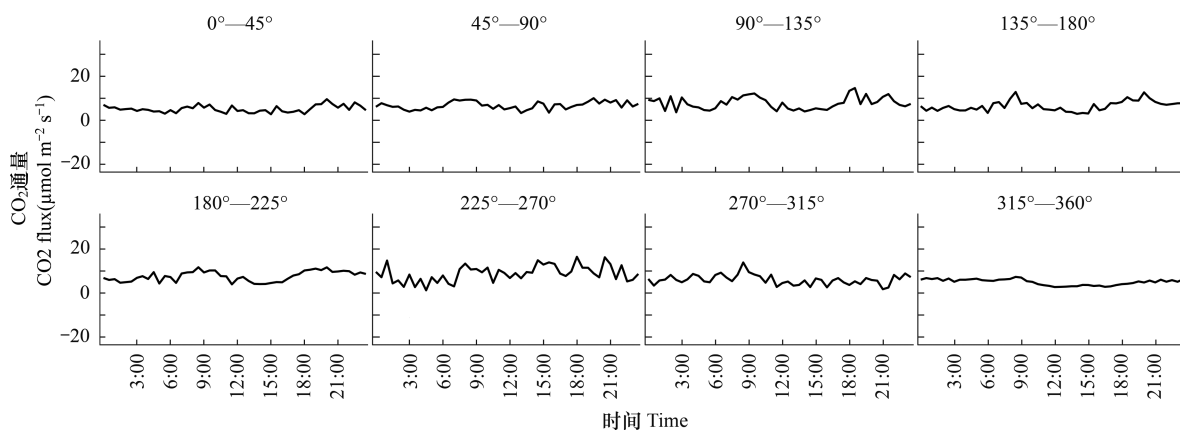


图 7 2016 年各风向上 CO₂ 通量日变化

Fig.7 Mean diurnal variation of CO₂ fluxes in each wind direction in 2016

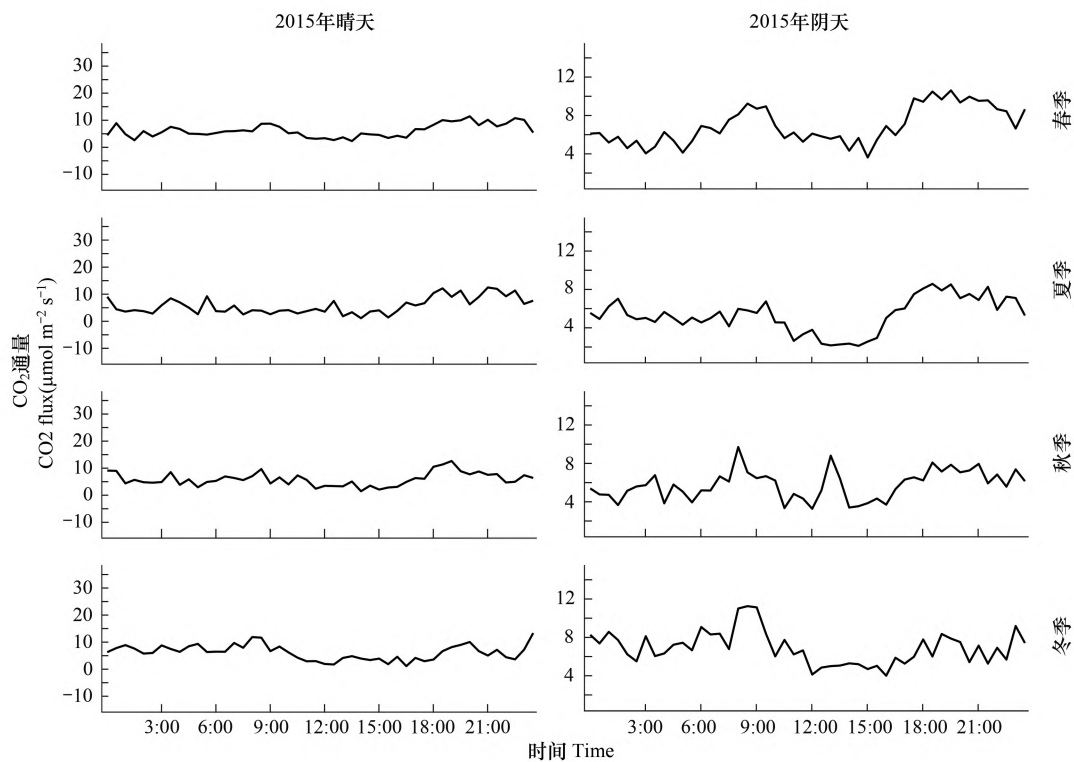


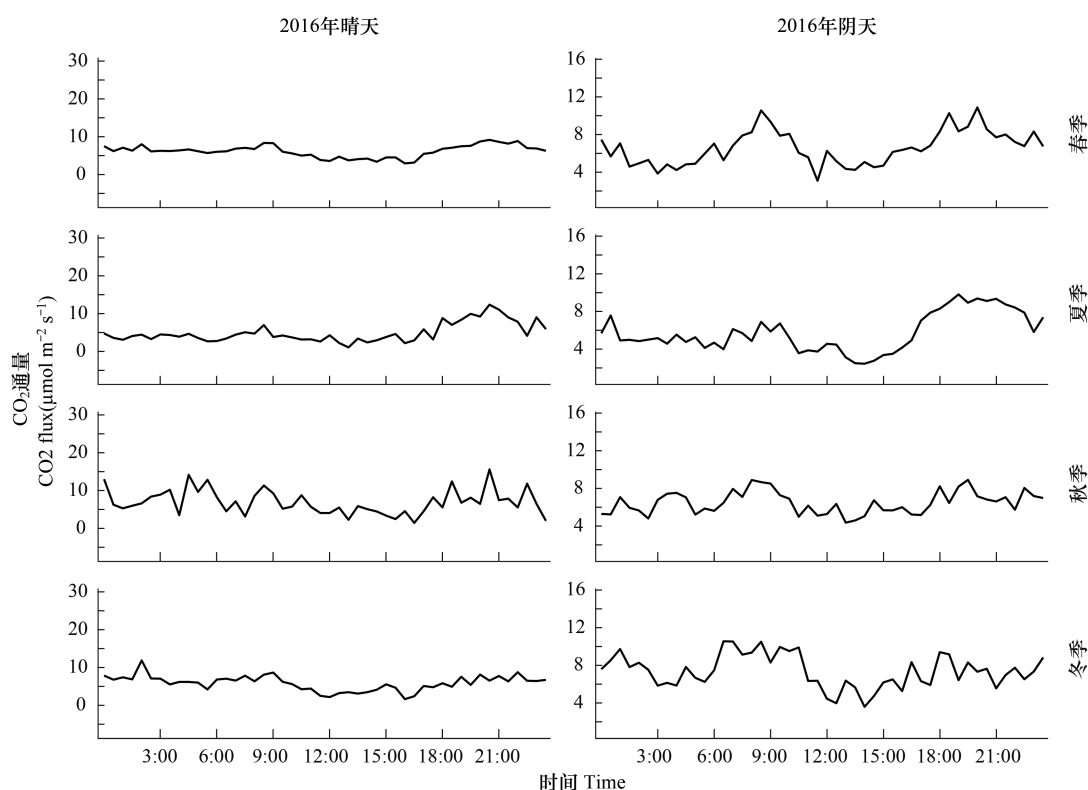
图 8 2015 年不同天气下 CO₂ 通量日变化

Fig.8 Mean diurnal variation of CO₂ fluxes under different weather conditions in 2015

表 1 国内外城市利用涡动相关技术观测 CO₂ 通量的结果汇总

Table 1 Long term EC measurement of CO₂ fluxes in different urban sites

城市 Cities	观测时间 Measurement periods	观测高度/m Measurement height	年 CO ₂ 交换总量/(gCm ⁻² a ⁻¹) Annual exchange of CO ₂ fluxes	参考文献 References
澳大利亚墨尔本	2004 年 2 月至 2005 年 6 月	40	2315.5	[12]
加拿大蒙特利尔	2007 年 11 月至 2009 年 10 月	25	5563.6	[30]
北京	2009 年至 2017 年	47	9927.3	[31]
新加坡	2010 年 10 月至 2012 年 6 月	20.7	1770	[32]
英格兰斯温顿	2011 年至 2012 年	12.5	1750	[18]
上海	2012 年 12 月至 2013 年 11 月	80	12136.4	[9]
日本大阪府堺市	2010 年至 2019 年	111.7	6054.5	[33]

图9 2016年不同天气下CO₂通量日变化Fig.9 Mean diurnal variation of CO₂ fluxes under different weather conditions in 2016

3.1 交通活动对城市CO₂通量的影响

交通活动对城市CO₂通量的影响主要体现在影响CO₂通量的总量以及日变化的早晚高峰的峰值强度、跨度、出现时间和持续时间。此前,Song等通过分析2018年北京市碳通量的观测数据后发现,第29届奥运会和残运会之间严格的交通管制使得道路上的车辆减少了约200万辆,CO₂排放量显著降低(相比2017年降低了约30%)^[34]。全年的早晚高峰时间段(早7:00—9:00和晚5:00—7:00)占全天时间的16.7%,但是对全天的CO₂交换量贡献可达20%。这表明本站点的碳通量变化与人类活动,尤其是交通活动关系密切。同时,将周末与工作日的CO₂通量日变化规律进行对比,本研究发现周末的车流量较少且人们出行时间较晚,早上CO₂排放量较低,使得早高峰的CO₂通量值低且早高峰时间出现较晚。这与人们的生活方式有很大关系,一般周末早上出行人数较少且出行时间较晚,交通活动不如工作日早上频繁,使得整体的CO₂排放量减少。

3.2 植被对城市CO₂通量的影响

植被对城市CO₂通量的影响最早可追溯到1995年,Grimmond等在对芝加哥进行地气CO₂交换通量的观测时发现,夏季中午二氧化碳浓度较低,通量出现负值,下垫面表现为碳汇,证明了城市植被在白天对CO₂通量的日变化有显著影响^[10]。后续国内外学者开展了一系列城市植被对CO₂通量影响机制的研究。例如,Velasco等在新加坡的研究发现植被吸收了居民区8%的CO₂排放量,当把土壤呼吸考虑在内后,植被变成了“净源”,对大气CO₂通量贡献了4%^[32]。龚元等在上海的研究发现CO₂通量与叶面积指数呈负相关关系,二者的相关系数(R²)为0.66,说明植被具有减少CO₂通量的作用^[14]。通过分析不同季节的CO₂通量日变化规律,本研究发现夏季的早高峰值明显低于其他季节,并且中午出现CO₂通量低谷和负值,这是由于夏季日出时间早及植被光合作用能力强,抵消了部分CO₂排放。

3.3 其它影响因素

在本研究中,中午12点左右有时会出现了一个CO₂通量小峰值,尤其是在阴天条件下更为明显。金雪婷

等也报道了城市 CO₂ 通量的中午 (11:00—13:00) 出现小峰值现象^[35]。这与居民中午做饭的 CO₂ 排放高峰时间重合, 说明该区域的 CO₂ 通量日变化规律除受交通活动影响外, 家庭做饭取暖等活动也可能是城市碳源之一。

气象条件对 CO₂ 通量的日变化特征具有直接和间接的影响。阴天的 CO₂ 通量值明显高于晴天, 这与阴天太阳辐射弱, 植被光合作用对大气 CO₂ 的吸收能力降低有关^[36—38]。风向和风速直接决定着 CO₂ 通量的贡献区位置和范围, 本通量观测点的东面和西面存在北京北部出入五环的主要公路, 上下班车流量大, 这是形成 CO₂ 通量的明显早晚双峰的主要原因。

3.4 研究展望

尽管 EC 方法为区域 CO₂ 通量的精确连续观测带来了许多优势, 但由于城市生态系统的高度空间异质性和时间波动性, 给城市 CO₂ 通量的观测分析带来了许多挑战。本研究分析了城市 CO₂ 通量的日变化规律及其影响因素, 主要以定性判断为主, 还不能定量地确定影响城市 CO₂ 通量的主要因素及主要源汇贡献。为了进一步科学探索城市 CO₂ 排放规律, 为城市碳减排对策制定提供科学依据, 未来城市 CO₂ 通量相关研究应该重点开展以下几方面工作:

(1) 城市 CO₂ 通量观测网的建立。由于城市空间异质性, 每一站点的观测结果具有很大的地点局限性, 只能在一定程度上代表相似的城市功能单元或生态系统的状况, 而不能代表整个城市。因此, 需要针对城市不同的功能区和生态系统类型, 设置多个观测站点, 建立城市 CO₂ 通量观测网, 提高观测结果对整个城市的覆盖率, 为精确估算城市碳排放和确定主要碳源汇提供最客观广泛的数据支撑。

(2) 城市碳通量影响因素和典型源汇的同步调查。虽然通过 CO₂ 通量观测结果可以间接反演和推定主要的影响因素和源汇, 但直接数据支撑仍非常必要。因此, 在观测 CO₂ 通量的同时, 应该调查观测点附近的交通流量、居民活动、CO₂ 排放源、植被物候、生长和土地利用变化等, 为城市碳源汇解析提供更多基础资料。

(3) 城市碳通量的数据挖掘。EC 方法获得大量的 CO₂ 通量及其相关参数的观测数据, 但由于城市下垫面的土地覆被、人类活动和粗糙度以及气象条件等因素很不稳定, CO₂ 通量值时空变异很大。现在已经有多种数据处理方法可以用来分析 CO₂ 通量数据, 如足迹模型^[16,28]、小波分析^[39—42] 等都已经得到很好的使用。近年来, 随着大数据方法的快速发展, 各种机器学习、人工智能等数据挖掘方法, 将为城市 CO₂ 通量的数据处理带来新的途径。

4 结论

本研究通过对北京城市生态系统研究站为期两年的 CO₂ 通量观测数据进行分析, 得到以下结论:

(1) 2015 年和 2016 年平均 CO₂ 交换通量为 $(6.9 \pm 0.2) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(7.2 \pm 0.1) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 总地气碳交换量为 $2611.2 \text{gCm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $2732.2 \text{gCm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。另外, CO₂ 通量具有明显的日变化特征, 整体呈现“双峰型”的趋势。其中, 排放峰值的大小和时间与车流量关系密切。受人们生活习惯的影响, 周末 CO₂ 通量早高峰的出现晚于工作日且峰值大小低于工作日, 但晚高峰峰值大小却高于工作日。

(2) CO₂ 通量的变化规律受植被的物候以及天气条件的影响。在生长季, 由于植物的光合作用, CO₂ 通量值降低, 但是整个下垫面仍表现为碳释放。而冬季受供暖和植被光合作用能力减弱的影响, CO₂ 通量均值明显高于其他季节。冬季阴天的早高峰峰值高于晴天, 而在夏秋季, 晴天 CO₂ 通量的晚高峰值显著高于阴天, 但冬季晴天的晚高峰值低于阴天。

(3) 在城市环境中, CO₂ 通量随源区内建筑密度的升高而升高, 随源区内植被覆盖度的减少而减少。CO₂ 通量的日变化规律不仅受风速、风向和植被覆盖率的影响, 而且还与车流量和人们的社会生活方式有关, 是多种因素共同作用的结果。

参考文献 (References):

[1] 赵荣钦, 黄贤金, 鄢文聚, 吴克宁, 陈银蓉, 王少剑, 卢鹤立, 方恺, 李宇. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题. 自然资

- 源学报, 2022, 37(5): 1123-1136.
- [2] Song J Y, Wang Z H, Wang C H. Biospheric and anthropogenic contributors to atmospheric CO₂ variability in a residential neighborhood of Phoenix, Arizona. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(6): 3317-3329.
- [3] 王宏莹. 基于涡度观测和遥感技术的城市碳源/汇研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [4] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, Chen Y R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 99-109.
- [5] Wu W X, Wang S Q, Xiao X M, Yu G R, Fu Y L, Hao Y B. Modeling gross primary production of a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China, using MODIS imagery and climate data. *Science in China Series D: Earth sciences*, 2008, 51(10): 1501-1512.
- [6] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [7] Braswell B H, Sacks W J, Linder E, Schimel D S. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 335-355.
- [8] Stöckli R, Lawrence D M, Niu G Y, Oleson K W, Thornton P E, Yang Z L, Bonan G B, Denning A S, Running S W. Use of FLUXNET in the community land model development. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G1): G01025.
- [9] 支星, 敖翔宇. 上海中心城区二氧化碳通量特征分析. *气象与环境学报*, 2020, 36(3): 72-79.
- [10] 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 Suppl 1: S243-S254.
- [11] Velasco E, Pressley S, Allwine E, Westberg H, Lamb B. Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico city urban landscape. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(38): 7433-7446.
- [12] 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.
- [13] 龚元, 赵敏, 姚鑫, 郭智娟, 何毅, 张立平, 林文鹏. 城市生态系统复合下垫面碳通量特征——以上海市奉贤大学城为例. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(1): 91-99.
- [14] 龚元, 郭智娟, 张凯迪, 徐良, 魏艳艳, 赵敏. 植被对亚热带城市生态系统 CO₂ 通量的影响. *生态学报*, 2019, 39(2): 530-541.
- [15] Zhang K D, Gong Y, Escobedo F J, Bracho R, Zhang X Z, Zhao M. Measuring multi-scale urban forest carbon flux dynamics using an integrated eddy covariance technique. *Sustainability*, 2019, 11(16): 4335.
- [16] Zhang K D, Gong Y, Fa H, Zhao M. CO₂ flux characteristics of different plant communities in a subtropical urban ecosystem. *Sustainability*, 2019, 11(18): 4879.
- [17] 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.
- [18] Ward H C, Kotthaus S, Grimmond C S B, Björkegren A, Wilkinson M, Morrison W T J, Evans J G, Morison J I L, Iamarino M. Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. *Environmental Pollution*, 2015, 198: 186-200.
- [19] Matese A, Gioli B, Vaccari F P, Zaldei A, Miglietta F. Carbon dioxide emissions of the city center of Firenze, Italy: measurement, evaluation, and source partitioning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(9): 1940-1947.
- [20] Ueyama M, Ando T. Diurnal, weekly, seasonal, and spatial variabilities in carbon dioxide flux in different urban landscapes in Sakai, Japan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(22): 14727-14740.
- [21] 贾庆宇, 周广胜, 王宇. 沈阳城市 CO₂ 通量的足迹分析. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1682-1687.
- [22] 北京市统计局. 北京市 2016 年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 北京统计信息网. (2017-02-25)[2017-02-25]. http://tj.beijing.gov.cn/tjsj_31433/tjgb_31445/ndgb_31446/202002/t20200216_1643265.html.
- [23] 龚元. 基于足迹模型的碳通量空间分异性研究——以上海市奉贤大学城为例[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [24] 王介民, 王维真, 奥银焕, 孙方林, 王树果. 复杂条件下湍流通量的观测与分析. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.
- [25] Wu Y, Mao X F, Zhang Z F, Tang W J, Cao G C, Zhou H K, Ma J H, Yin X N. Temporal and spatial characteristics of CO₂ flux in plateau urban wetlands and their influencing factors based on eddy covariance technique. *Water*, 2021, 13(9): 1176.
- [26] 柳媛普, 李锁锁, 吕世华, 奥银焕, 高艳红. 几种通量资料修正方法的比较. *高原气象*, 2013, 32(6): 1704-1711.
- [27] 袁庄鹏. 碳通量变化特征及影响因子研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- [28] 龚元, 赵敏, 姚鑫, 郭智娟, 何毅, 张立平. 基于 Hsieh 和 Kljun 模型的城市生态系统碳通量贡献区分析与对比. *环境工程技术学报*, 2017, 7(2): 225-231.
- [29] 贾庆宇, 王宇, 李丽光. 城市生态系统-大气间的碳通量研究进展. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1569-1574.

- [30] Bergeron O, Strachan I B. CO₂ sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city. *Atmospheric Environment*, 2011, 45 (8): 1564-1573.
- [31] Liu Z, Liu Z R, Song T, Gao W K, Wang Y H, Wang L L, Hu B, Xin J Y, Wang Y S. Long-term variation in CO₂ emissions with implications for the interannual trend in PM_{2.5} over the last decade in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115014.
- [32] Velasco E, Roth M, Tan S H, Quak M, Nabarro S D A, Norford L. The role of vegetation in the CO₂ flux from a tropical urban neighbourhood. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(20): 10185-10202.
- [33] Ueyama M, Takano T. A decade of CO₂ flux measured by the eddy covariance method including the COVID-19 pandemic period in an urban center in Sakai, Japan. *Environmental Pollution*, 2022, 304: 119210.
- [34] Song T, Wang Y S. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing. *Atmospheric Research*, 2012, 106: 139-149.
- [35] 金雪婷. 北京市街区尺度人类活动直接二氧化碳排放过程和机理[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2018.
- [36] 初小静, 韩广轩, 邢庆会, 于君宝, 吴立新, 刘海防, 王光美, 毛培利. 阴天和晴天对黄河三角洲芦苇湿地净生态系统 CO₂ 交换的影响. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 661-673.
- [37] Law B E, Falge E, Gu L, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw U K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [38] Alton P B. Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1641-1653.
- [39] 窦贤明. 机器学习方法在陆地生态系统碳水通量模拟中的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [40] 冯鑫炜, 张志强, 许行, 律江, 张海泉, 孟祥雪. 欧美杨人工林生态系统净碳交换对环境因子响应的时滞. *林业科学*, 2020, 56(2): 12-23.
- [41] 谢潇. 湿地生态系统二氧化碳通量动态特征及其填补策略[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [42] Qin Z, Ouyang Y, Su G L, Yu Q, Li J, Zhang J E, Wu Z Y. Characterization of CO₂ and water vapor fluxes in a summer maize field with wavelet analysis. *Ecological Informatics*, 2008, 3(6): 397-409.