#### DOI: 10.5846/stxb201801190152

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 CO<sub>2</sub>通量的影响.生态学报,2019,39(2): - . Gong Y,Guo Z J,Zhang K D,Xu L,Wei Y Y,Zhao M.Impact of vegetation on CO<sub>2</sub> flux of a subtropical urban ecosystem .Acta Ecologica Sinica,2019,39 (2): - .

# 植被对亚热带城市生态系统 CO, 通量的影响

龚 元<sup>1,4</sup>,郭智娟<sup>1,2</sup>,张凯迪<sup>1,2</sup>,徐 良<sup>3,5</sup>,魏艳艳<sup>2,5</sup>,赵 敏<sup>3,\*</sup>

1上海师范大学城市生态与环境过程重点实验室,上海 200234

2 上海师范大学生命与环境科学学院,上海 200234

3上海师范大学旅游学院地理系,上海 200234

4 南京林业大学生物与环境学院,南京 210037

5上海师范大学城市生态与环境研究中心,上海 200234

摘要:城市是陆地生态系统的主要碳源,而城市植被是城市区域缓解人类活动所释放的二氧化碳的主要碳汇,但对城市植被对 城市大气二氧化碳的影响方面的研究比较缺乏,尤其是发展中国家。发展中国家多数处于亚热带气候区,且发展中国家城市化 进程较快,为推进不同生态系统类型碳循环的研究,该研究以位于中国东南部的上海市奉贤大学城为案例,研究该区域植被对 亚热带城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量的影响。使用上海市奉贤大学城的涡动相关通量观测站点所观测和记录的 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日共计 12 个月的通量,气象数据结合遥感数据分析了该研究区的 CO<sub>2</sub>通量动态特征及其影响因子,主要结论 是:(1) 整个生态系统全年 CO<sub>2</sub>通量总交换量为 9664.06 µmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>即表现为碳源。CO<sub>2</sub>通量增长率在 2017 年 5 月 6 日达到 最低为-4.48 µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>在 2017 年 7 月 30 日的 CO<sub>2</sub>通量增长率为 0,在 2017 年 8 月 30 日达到最高为 2.24 µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,生长 季 CO<sub>2</sub>通量交换量为 2169.58 µmol m<sup>-2</sup> 月<sup>-1</sup>低于非生长季的 CO<sub>2</sub>通量交换量(7494.48 µmol m<sup>-2</sup> 月<sup>-1</sup>);(2) 不同风区的 CO<sub>2</sub>通量 特征不同,主要表现为随着植被面积的上升 CO<sub>2</sub>通量有下降的趋势,生长季 CO<sub>2</sub>通量均值的最低值出现在西北风区为 0.09 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>;(3) CO<sub>2</sub>通量与叶面积指数呈现负相关关系,即随着叶面积指数的上升 CO<sub>2</sub>通量有下降的趋势。植物的生长状况和其 生理活动影响亚热带城市生态系统的碳循环过程,该研究可以为量化城市植被对大气二氧化碳的影响提供参考,同时为亚热带 地区建设绿色低碳城市提供服务。

关键词:涡动相关系统,CO2通量,植物生理,亚热带城市,遥感

# Impact of vegetation on CO<sub>2</sub> flux of a subtropical urban ecosystem

GONG Yuan<sup>1,4</sup>, GUO Zhijuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kaidi<sup>1,2</sup>, XU Liang<sup>3,5</sup>, WEI Yanyan<sup>2,5</sup>, ZHAO Min<sup>3,\*</sup>

1 Key Laboratory of Urban Ecology and Environmental Processes, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

2 College of Life and Environmental Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

3 Geography Department, Tourism College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

4 College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

5 Research Center of Urban Ecology and Environment, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

**Abstract**: Cities are the main carbon source among the terrestrial ecosystem types, and urban vegetation is an important carbon sink to mitigate carbon emissions from human activities in urban areas, but research on the influence of urban vegetation on urban atmospheric carbon dioxide is scarce, especially in developing countries. Most of the developing countries are in a subtropical climate zone, and the urbanization speed in developing countries is faster than that in

基金项目:国家自然科学基金青年基金(31100354)

收稿日期:2018-01-19; 网络出版日期:2018-00-00

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaomin@ shnu.edu.cn

developed countries. In order to promote the study of the carbon cycle in different ecosystem types, we studied the influence of vegetation on the CO<sub>2</sub> fluxes of the subtropical urban ecosystem in Fengxian University city, Shanghai, China. Using the 12-month flux observed and recorded by the eddy-related flux observation site in the study area and meteorological data combined with remote sensing data, the CO<sub>2</sub> flux dynamic characteristics and its influencing factors were analyzed. The main results are the following: (1) The study area was a carbon source, and the total annual CO<sub>2</sub> flux of the whole ecosystem was 9664.06 µmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. The CO<sub>2</sub> flux growth rate reached a minimum of -4.48 µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> on May 6, 2017, with a CO<sub>2</sub> flux growth rate of 0 on July 30, 2017 and a maximum of 2.24 µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> on August 30, 2017. The CO<sub>2</sub> flux exchange in the growing season was lower than the CO<sub>2</sub> flux exchange in the non–growing season; these were 2169.58 µmol m<sup>-2</sup>  $\beta^{-1}$  and 7494.48 µmol m<sup>-2</sup>  $\beta^{-1}$  respectively; (2) Urban vegetation was a carbon sink, and its CO<sub>2</sub> fluxes decreased with the urban vegetation area in different wind sectors. The lowest mean value of CO<sub>2</sub> flux in the growing season appeared in the Northwest region and was 0.09 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; (3) Leaf area index and plant biotic characteristics influence CO<sub>2</sub> flux. There was a negative correlation between CO<sub>2</sub> flux and leaf area index. Plant growth status and plant physiological activities affected the carbon cycling process of the subtropical urban ecosystem. This study can provide a reference for quantifying the effects of urban vegetation on atmospheric carbon dioxide and provide guidelines for the construction of green low-carbon cities in subtropical areas.

Key Words: eddy covariance, CO2 flux, plant physiology, subtropical city, remote sensing

城市地区是温室气体的主要来源<sup>[1-6]</sup>,为了更好地了解温室气体(Greenhouse gas,GHG)排放动态<sup>[1]</sup>,特别 是陆地生态系统中的几个关键生态系统的二氧化碳(Carbon dioxide,CO<sub>2</sub>)气体排放动态,其中目前关于城市 生态系统的二氧化碳排放和吸收动态的研究日益增多,主要包括基于涡动相关技术的 CO<sub>2</sub>通量(CO<sub>2</sub> flux)<sup>[7-14]</sup>,通量足迹(Flux footprint)<sup>[15]</sup>, CO<sub>2</sub>浓度(CO<sub>2</sub> concentration)<sup>[5]</sup>,基于生命周期的碳足迹(Carbon footprint)研究<sup>[16]</sup>,以及基于遥感观测的大尺度 CO<sub>2</sub>排放的研究<sup>[17-18]</sup>。

20世纪90年代以来,涡动相关/涡动协方差观测系统(Eddy covariance,EC)<sup>[19-24]</sup>的应用和发展为观测和 记录一定生态尺度上地表与大气之间的物质、热量及动量湍流交换提供了工具,涡动相关通量观测系统最初 应用于观测植物和大气的 CO<sub>2</sub>交换并且迅速发展,开始应用于城市,湿地,水域等其他关键陆地生态系统<sup>[1-2]</sup>。 如今随着越来越多的涡动相关通量观测站的建立,世界各国的涡动相关通量站点开始寻求合作和数据共享, 形成了例如:FLUXNET(http://fluxnet.fluxdata.org/),ChinaFLUX(http://www.chinaflux.org/index.aspx), EUROFLUX(http://www.euroflux.fr/)等<sup>[5]</sup>的通量数据共享的网络系统,如今将涡动相关观测系统用于人口稠 密的城市地区观测二氧化碳排放的研究开始成为热点<sup>[23-28]</sup>。

基于涡动相关观测系统的城市生态系统碳循环的研究主要集中于 CO<sub>2</sub>通量动态特征, CO<sub>2</sub>通量影响因子, 通量足迹等方面的研究<sup>[5]</sup>。由于城市生态系统受人类活动影响较大,以及城市生态系统下垫面(土地利用) 的复杂性,研究涡动相关系统所观测的通量的来源即通量足迹是研究城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量交换的基础和前 提<sup>[15,25]</sup>。目前基于 CO<sub>2</sub>通量动态特征,通量足迹分析等的城市生态系统碳循环研究也有较多, 如下表 1 所示。

以上基于涡动相关技术的城市生态系统碳循环的研究主要集中于 CO<sub>2</sub>通量动态特征,通量足迹分析等方面且多集中在温带发达国家的城市<sup>[6]</sup>,亚热带城市的相关研究则较少。关于城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量动态特征的分析主要集中于不同季节,供暖期前后等不同时间尺度的 CO<sub>2</sub>通量差异的对比和原因解释,对 CO<sub>2</sub>通量差异的解释多从人类活动和植被生长状况的角度出发来解释 CO<sub>2</sub>通量的变化。为分析植被对亚热带城市生态系统碳循环的影响,因此使用 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日共计 12 个月的通量,气象数据和遥感数据结合地理信息系统工具分析亚热带季风气候区的上海市奉贤大学城的 CO<sub>2</sub>通量特征及其与叶面积指数的

关系来研究植被在城市系统碳循环中的作用。	该研究可以为处于业热带	气候区的其他发展中国家的城市系
统碳循环研究和降低二氧化碳排放建设绿色生	<b>E态城市提供服务和参考</b> 。	

Table 1 Application of eddy covariance system in different urban ecosystem						
参考文献 References	国家 Country	地区 Region	所属气候带 Climate zone	研究内容 Research content	数据时间长度 Data length	
[14]	波兰	克拉科夫	温带	城市土壤 CO2 通量季节分异	2009年7月 —2012年5月	
[8]	新加坡	弗兰克尔区	热带	植被对热带城市 CO2 通量的影响	2010 年 10 月 —2012 年 6 月	
[10]	日本	东京	温带	人类活动对城市中心区 CO <sub>2</sub> 通量 的影响	2012 年 11 月 —2013 年 10 月	
[24]	美国	明尼苏达州	寒温带	城市 CO <sub>2</sub> 通量特征及其与植物生 理活动的关系	三年	
[26-27]	中国	沈阳	温带	城市地区供暖期前后 CO <sub>2</sub> 通量差 异及其通量足迹分析	2008 年 10 月 —2008 年 11 月	
[12]	芬兰	赫尔辛基	温带	城市地区不同土地利用对 CO <sub>2</sub> 通 量的影响	2011年7月— 2013年6月	
[28]	美国	巴尔的摩	亚热带	城市地区水热通量,CO2 通量特征	2001年6月 —2001年11月	
[6]	中国	上海	亚热带	车流量对城市 CO2 通量的影响	2011 年 12 月 —2012 年 1 月	

表 1 涡动相关系统在城市生态系统的应用

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

该研究区域位于中国长江中下游平原、上海市最南端海湾旅游区的上海市奉贤大学城总面积 456.42 hm<sup>2</sup> (图 1)。研究区地形平坦,毗邻杭州湾。上海市奉贤大学城所属温度带为亚热带,气候属亚热带季风气候。 全年水热同期,夏季高温多雨,冬季寒冷少雨。由于夏季的东南季风来自海洋带来了较多的水汽导致研究区 内一年中的降水主要集中在夏季,年总降水量约 1200 mm,年均相对湿度 82%,无霜期约 200 d<sup>[5]</sup>,年均空气温 度约 15℃(最低月均温出现在 1 月约 2℃,最高月均温出现在 8 月约 34℃),10 cm 处土壤温度与空气温度类 似最低月均温出现在 1 月约 3℃,最高月均温出现在 7 月约 26℃,月均光合有效辐射最大值出现在 8 月约 510 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1[5]</sup>,年能量闭合度为 0.82。由于该研究区靠近海洋(图 1),导致其气候特点具有较明显的海洋性 (海陆风)。城市生态环境长期定位研究站位于上海师范大学奉贤校区内,地理坐标为 30°50′44.73″ N, 121° 31′18.01″ E,通量观测塔安装有微气象梯度观测系统和开路涡动协方差通量观测系统,塔高 20 m,涡动相关系 统负责观测和记录 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 通量、风向、风速等数据<sup>[5]</sup>。微气象梯度观测系统负责观测和记录降水、光合有 效辐射、土壤温度、净辐射等微气象数据<sup>[5]</sup>。通量观测塔(定位站)的西北侧和南侧有以香樟(*Cinnamonum camphora*)为优势种的亚热带常绿阔叶林(平均冠层高度 8 m)<sup>[5]</sup>,以及麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、菖蒲 (*Acorus calamus L*)、芦苇(*Phragmites australis*)等草本植物<sup>[4]</sup>。东侧有教学楼,宿舍楼,食堂等校园建筑(平均 高度 10m),北侧约 150m 有交通主干道<sup>[3]</sup>。

从图 1 可以看出该研究区(上海市奉贤大学城)属于城市(郊区)生态系统<sup>[4-6]</sup>,研究区内分布有木本,草 本植物为主的自然生态系统<sup>[2]</sup>,湖泊和河流组成的水域生态系统,由温室大棚组成的农田生态系统,以及道 路和建筑物等组成的社会系统<sup>[2]</sup>。该研究区属于由多个不同生态系统组成的混合生态系统,各个不同的生 态系统共同影响了研究区整体的碳循环过程<sup>[2-3]</sup>。

1.2 涡动相关通量观测系统的组成

研究区的整体 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 通量采用涡动相关系统进行观测和记录。该系统由一个三维超声温度/风速测





量仪器(Windmaster, Gill, United Kingdom)<sup>[4]</sup>和一个开路式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外气体分析仪器(Li-7500, Licor, Lincoln, NE, USA)组成,其安装高度为距离地面 20m<sup>[2-3]</sup>(图 1),安装在研究区的中心位置(30°50′44.73" N, 121°31′18.01" E)。通量和气象数据采集和存储设备为 CR3000(Campbell Scientific Instruments, USA)10Hz 高频数据采集仪器<sup>[2-3]</sup>。

# 1.3 CO2通量数据质量控制

该研究选取 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日共计 12 个月的通量和气象数据,使用 EddyPro 5.1.1 软件(Li-COR,NE,USA, https://www.licor.com/)<sup>[4]</sup>以 30min 的时间间隔计算 CO<sub>2</sub>通量,并且使用 EddyPro 5.1. 1 软件进行坐标轴旋转<sup>[2]</sup>,频率响应修正<sup>[3]</sup>,WPL 密度修正<sup>[28-31]</sup>,野点去除<sup>[5]</sup>,建立通量数据质量指标(0— 1—2,0 代表最好,1 代表较好,2 代表较差)等<sup>[2-3]</sup>处理。之后我们对降雨前后 1 小时内或摩擦速度(u star, u \*)小于 0.15m/s 时产生的通量进行删除<sup>[5]</sup>,以及删除通量数据指标标注为"2"的通量数据<sup>[2]</sup>。在应用数据 质量控制后,12 个月的通量数据合格率为 63%,一般通量数据合格率大于 50%则具有代表性<sup>[35]</sup>。当 CO<sub>2</sub>通 量为负值时代表整个生态系统处于吸收二氧化碳的状态,反之则代表整个生态系统处于排放二氧化碳的 状态<sup>[5]</sup>。

在 CO<sub>2</sub>通量数据插补方面(Gap-fill),采用 MDV 法即用相邻天的同一时刻的数据的平均值进行插补<sup>[5]</sup>。 白天通量数据的插补周期为 7d,夜晚通量数据的插补周期为 14d<sup>[5]</sup>。针对较长时间断内丢失的数据,根据白 天或夜间使用以下方法:在白天使用了基于净生态系统交换(Net ecosystem exchange, NEE)和光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation, PAR)关系的 Landsberg 模型<sup>[20]</sup>,而在夜间则使用基于土壤温度的 Van't Hoff 模型进行相关的计算和插补<sup>[5]</sup>。

## 1.4 CO2通量增长率的计算

为分析该区全年日 CO<sub>2</sub>通量交换量( $\mu$ mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)的变化特征即 CO<sub>2</sub>通量增长率(Growth rate)<sup>[32]</sup>,这里 参考 Gu 等<sup>[32]</sup>发展的基于生态系统总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)的植物群落光合作用的物 候模型(Phenology model)如下公式1和公式2所示。该模型原作者 Gu 等<sup>[32]</sup>使用年际尺度的每天每半小时 最大 GPP( $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)来量化植物群落光合能力的季节变化(Canopy photosynthetic capacity, CPC)<sup>[32]</sup>。 由于该物候模型同样适用于同类型具有一定时间(天/季节)变化特征的其他 CO<sub>2</sub>通量数据的增长率分析,因 此将该物候模型应用于该研究区日 CO<sub>2</sub>通量交换量的增长率( $\mu$ mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)分析。

$$A(t) = y_0 + \frac{a_1}{\left[1 + \exp\left(-\frac{t - t_{01}}{b_1}\right)^{c_1}\right]} - \frac{a_2}{\left[1 + \exp\left(-\frac{t - t_{02}}{b_2}\right)^{c_2}\right]}$$
(1)  
$$k(t) = \frac{dA(t)}{dt} = \frac{a_1c_1}{b_1} \frac{\exp\left(-\frac{t - t_{01}}{b_1}\right)}{\left[1 + \exp\left(-\frac{t - t_{01}}{b_1}\right)\right]^{1+c_1}} - \frac{a_2c_2}{b_2} \frac{\exp\left(-\frac{t - t_{02}}{b_2}\right)}{\left[1 + \exp\left(-\frac{t - t_{02}}{b_2}\right)\right]^{1+c_2}}$$
(2)

公式 1 中 A(t) 函数代表该研究区的日 CO<sub>2</sub>通量交换量(µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), t 代表日序(d)。该模型所用到的参数:  $y_0, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, t_{01}, t_{02}$ 均为拟合参数<sup>[32]</sup>,且在计算拟合参数时可以依据经验和实际情况对所计算的参数进行调整<sup>[32]</sup>。公式 2 中 k(t)即为该研究区的 CO<sub>2</sub>通量增长率函数<sup>[32]</sup>(µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),在使用该物候模型时只要将年际尺度的(1—365 d)的日 CO<sub>2</sub>通量交换量带入公式 1 中计算出所需拟合参数,再将计算出的拟合参数带入 k(t)函数即可计算出 CO<sub>2</sub>通量增长率(主要包括最大点,最小点,0 点等)<sup>[32]</sup>。

1.5 叶面积指数(LAI)的计算

为研究整个生态系统 CO<sub>2</sub>通量交换的影响因子,通 过提取和计算 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日 以观测站点(EC)为中心范围 1km(500m×4)的叶面积 指数(Leaf Area Index,LAI)<sup>[33]</sup>分析 LAI 的变化对 CO<sub>2</sub> 通量的影响,所使用和计算的遥感数据为 MODIS 遥感 数据(https://modis.gsfc.nasa.gov/)的 MOD15A2H 产品 (MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006)<sup>[34]</sup>的 LAI 数据(https://ladsweb. modaps.eosdis.nasa.gov/)所提取的 LAI 数据周期为 8 d (图 2)。



图 2 以观测站点为中心范围 1km 的叶面积指数特征(2016-10-01--2017-09-30)

**Fig.2** LAI characteristics of the study area (2016-10-01-2017-09-30)

### 2 结果与讨论

#### 2.1 风向与通量足迹

基于通量观测塔所搭载的 Windmaster 三维超声风速/温度仪器所观测的风速,风向数据,统计出从 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日的研究区气象信息如图 3 所示,遥感影像来自谷歌地图(https://maps.google.com/)。

根据图 3,2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日研究区中风向在西北方向的占总风频的 13.42%,风向在 西南方向的占总风频的 25.04%,风向在东南方向的占总风频的 40.63%,风向在东北方向的占总风频的 20. 91%。其中瞬时最大水平风速为 20.61 m/s 出现在东南方向,平均最大水平风速为 7.49 m/s 出现在东南方向 (图 3a)。该研究区全年东南风为主风向,西北风为非主风向。

同样依据 Windmaster 超声风速仪器观测的水平风速(m/s),垂直风速(m/s),风向(°)等<sup>[2-5,15]</sup> 微气象信息使用 Kljun 通量足迹模型(http://geography.swansea.ac.uk/nkljun/ffp/www/index.php)计算通量源区(Source area)<sup>[15]</sup>,结果表明该研究区的通量足迹可延伸至上风向约1 km 处(图 3b,图 3c)。

# 2.2 CO2通量增长率分析

为使用该物候模型来帮助分析研究区的 CO2通量的变化特征,我们将 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月



图 3 研究区风玫瑰图与主风向上通量足迹(2016-10-01-2017-09-30)

**Fig.3** Wind rose map of the study area and flux footprint on the main wind direction (2016-10-01—2017-09-30) a 为风玫瑰图,b 为大气不稳定状态下通量足迹,c 为大气稳定条件下通量足迹,通量足迹等值线由内到外依次为 10%—90%,(0,0) 点为观 测点,x 轴指向来风方向

30 日研究区 CO<sub>2</sub>通量数据代入公式 1 中, 计算出所有拟合参数后使用公式 2 计算出 CO<sub>2</sub>通量增长率<sup>[32]</sup>如下 图 4 所示。

依据图 4,整个生态系统在 2017-05-06(春季中期) 这一天的 CO<sub>2</sub>通量增长率达到最低为-4.48 μmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,即 CO<sub>2</sub>通量的下降速率达到最大<sup>[32]</sup>,其原因可能是 该天为 5 月初即从冬季步入春季,植物开始生长光合作 用增强吸收了一部分人类活动产生的二氧化碳<sup>[32]</sup>,在 2017-07-30 这一天的 CO<sub>2</sub>通量增长率为 0 代表在这天 的 CO<sub>2</sub>通量交换量达到最低<sup>[32]</sup>。并且从 2017-07-31 开 始 CO<sub>2</sub>通量增长率开始出现正值—直到 2017-08-30(夏 季即将结束)到达 CO<sub>2</sub>通量增长率峰值为 2.24 μmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,即 CO<sub>2</sub>通量的上升速率达到最大<sup>[32]</sup>。因此我 们推断研究区整个生态系统碳汇能力最强出现春夏季





节,研究区内的绿色植物在春季中期开始一直到夏季结束开始恢复生长和吸收二氧化碳的功能,约从夏末秋 初开始植物的光合作用开始减弱。该结果与王江涛<sup>[19]</sup>在崇明东滩湿地的 CO<sub>2</sub>通量特征研究较一致,同样表 现为春夏季节 CO<sub>2</sub>通量处于下降趋势。袁庄鹏等<sup>[5]</sup>研究的城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量也表现为同样的特征。 Grimmond 等<sup>[28]</sup>研究的郊区城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量交换也证明在绿色植物影响下的生态系统多在春夏季节 吸收大量的二氧化碳(CO<sub>2</sub>通量下降)。据此我们推测植物的生长状况和生理活动是影响该研究区 CO<sub>2</sub>通量 交换和碳平衡的重要因素。

2.3 生长季与非生长季 CO2通量特征

由图 1 所知,研究区整个生态系统碳循环受到多个 子生态系统影响,且由草本和木本组成的自然生态系统 面积占整个研究区面积较大比重<sup>[5]</sup>。为进一步研究由 木本和草本植物组成的森林,草地生态系统对整个生态 系统碳交换的潜在影响,选取生长季与非生长季<sup>[35-39]</sup> 的 CO<sub>2</sub>通量数据来对比两者的通量差异。考虑到整个 研究区下垫面分布有大量的常绿植物(香樟)和 2.2 章 节的分析结果,且该研究区位于北半球的亚热带季风气 候区<sup>[28]</sup>。因此选取 3,4,5,6,7,8 月作为生长季代表, 10,11,12,1,2,9 月作为非生长季代表<sup>[28]</sup>。如下图 5 所示。

依据图 5,研究区整个生态系统全年 CO<sub>2</sub>通量总交 换量为 9664.06 μmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,全年角度来说研究区表现 为碳源(Carbon source)。但生长季和非生长季的 CO<sub>2</sub> 通量特征不同。

研究区整个生态系统在生长季的5月,6月以及8





月的月 CO<sub>2</sub>通量交换量为负值分别为-176.75, -308.01, -402.02 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>即在以上月份研究区表现为碳 汇。研究区整个生态系统在生长季的 CO<sub>2</sub>通量交换量为 2169.58 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>,在生长季研究区每月 CO<sub>2</sub>通量 交换量平均值为 361.59 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>,整个生态系统在生长季表现为碳源。而整个生态系统在非生长季的月 CO<sub>2</sub>通量交换量的均值为 1249.08 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>,且每月的 CO<sub>2</sub>通量交换量交换均在 0 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>以上,整个 非生长季的 CO<sub>2</sub>通量交换量为 7494.48 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>,即整个生态系统在非生长季表现为碳源。总体来说生 长季的 CO<sub>2</sub>通量总值低于非生长季的 CO<sub>2</sub>通量总值。Kordowski 等<sup>[7]</sup>研究的城市公园的 CO<sub>2</sub>通量特征中发现 了城市绿地对大气中的二氧化碳的吸收作用虽然其研究没有将生长季和非生长季的 CO<sub>2</sub>通量进行对比,但依 然证实了城市绿地的碳汇作用。Velasco 等<sup>[1]</sup>对城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量特征的研究也证实了城市绿地吸收二 氧化碳的作用。

为进一步分析生长季与非生长季的 CO<sub>2</sub>通量特征和差异,统计出生长季与非生长季的一天中每半小时 CO<sub>2</sub>通量(µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)特征,如下图 6 所示。

依据图 6,研究区整个生态系统在生长季的 CO<sub>2</sub>通量均值为 0.2 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,总体范围是-10.85—5.25 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。在非生长季的 CO<sub>2</sub>通量均值为 0.8 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,总体范围是-5.41—3.63 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。同样表现为生长季的 CO<sub>2</sub>通量小于非生长季的 CO<sub>2</sub>通量。在生长季夜间通量比较平稳,约在 8:30 左右 CO<sub>2</sub>通量开始 进入负值为-2.45 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,一直到 12:30 左右到达负值的顶峰为-10.85 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,且约在 16:30 分左 右 CO<sub>2</sub>通量重新进入正值为 3.35 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,整体趋势表现为"V"字形状。在非生长季夜间 CO<sub>2</sub>通量同样表现的较为平稳,但是与生长季不同非生长季 CO<sub>2</sub>通量约在 10:00 左右开始进入负值为-2.7 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,并且 在 13:00 左右 CO<sub>2</sub>通量到达负值的顶峰为-5.41 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,整体趋势也表现为"V"字形状。关于有植被分布的城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量特征,Grimmond 等<sup>[28]</sup>认为在春夏季节正午时间段 CO<sub>2</sub>通量可接近-30 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>与本研究区相比表现为更强的碳汇,其原因可能是受植被种类差异和通量足迹的影响,Guidolotti 等<sup>[39]</sup>所研究的城市公园的下垫面情况与本文较接近,且其春夏季节正午时间段的 CO<sub>2</sub>通量约为-10 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>与本 文句。



图 6 生态系统生长季与非生长季 CO<sub>2</sub>通量时间变化特征

# Fig.6 Characteristics of CO<sub>2</sub> flux at the time of day(h) in growing season and non-growing season of the study area 误差线为标准差

导致生长季与非生长季 CO<sub>2</sub>通量差异的原因可能是绿色植物的影响,依据图 1 研究区的下垫面分布有大量的草本,木本植物。在生长季植物的光合作用吸收了较多的二氧化碳导致 CO<sub>2</sub>通量的降低。在非生长季植物凋零,但是由于下垫面分布有一定数量的常绿植物(香樟),导致其在白天的稍晚些时段依然可以起到吸收 二氧化碳的作用。王江涛等<sup>[19]</sup>在崇明东滩湿地的 CO<sub>2</sub>通量研究中同样发现了 CO<sub>2</sub>通量的"V"字形特征,并且 碳汇的能力同样表现为夏季的中午时间段最强,且夜间 CO<sub>2</sub>通量表现比较平稳。生长季与非生长季的 CO<sub>2</sub>通 量差异证明了绿色植物是较明显的碳汇(Carbon sink)与 Velasco 等<sup>[1]</sup>,Grimmond 等<sup>[28]</sup>以及郭智娟等<sup>[25]</sup>的研 究结果一致。

## 2.4 生长季不同风区 CO,通量特征

不同风向导致涡动相关系统所观测的通量不同<sup>[11]</sup>,为讨论在生长季植被对生态系统碳交换的潜在影响, 将研究区基于风向定义为不同的风区(Wind sector)<sup>[11]</sup>,即当风向在 0°—90°定义为东北风区,风向在 90°— 180°定义为东南风区,风向在 180°—270°定义为西南风区,风向在 270°—360°/0°定义为西北风区。不同的风 区下垫面情况不同,依据图 1 和 Kljun 通量足迹模型<sup>[3,15]</sup>统计出不同风区通量足迹内植被面积所占源区面积 百分比(%),以及依据风向统计出不同风区在生长季的 CO<sub>2</sub>通量特征(μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)如下图 7 所示。



Fig.7 CO<sub>2</sub> flux of different wind sector in growing season of the study area

依据图 7,研究区在生长季不同风区 CO,通量特征不同但均表现为碳源,其中西北风区在生长季的 CO,通

量均值为 0.09 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,西南风区 CO<sub>2</sub>通量均值为 0.11 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,东北风区 CO<sub>2</sub>通量均值为 0.47 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,东南风区 CO<sub>2</sub>通量均值为 0.46 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。不同风区植被面积占比不同西北风区为 55%,西南风区 为 51%,东北风区为 46%,东南风区为 45%。不同风区植被面积占比和 CO<sub>2</sub>通量均值有较好的一致性,表现为 随着植被面积上升 CO<sub>2</sub>通量有下降趋势,CO<sub>2</sub>通量均值最低值和植被面积占比最高均出现在西北风区。各个 风区日最低 CO<sub>2</sub>通量均值的最低值出现在西北风区为-13.21 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>出现时间为正午,其最高值出现在 东南风区为-8.36 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>出现时间同样为正午,同样与植被面积占比有较好的一致性。形成该现象的原 因可能是西北方向分布较多的绿色植物在生长季吸收了更多的二氧化碳导致 CO<sub>2</sub>通量水平最低。据此我们 建议在城市建设规划的过程中为降低碳排放和保持碳平衡,应在城市中多种植绿色植物且建议植被面积的占 总规划面积的百分比应在 50%以上,如果气候和降水条件满足的情况下应多种植常绿植物来保证在非生长季吸收二氧化碳的能力<sup>[5]</sup>。

Burri 等<sup>[38]</sup>在城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量特征的研究中同样使用了基于不同风区的方法,其结果表明在植被占主导的地区(占比>50%)的 CO<sub>2</sub>通量要小于道路等占主导的地区。Vesala 等<sup>[11]</sup>基于风区对城市生态系统的 CO<sub>2</sub>通量进行了分析,同样也认为在植被占主导的地区的 CO<sub>2</sub>通量较低。袁庄鹏等<sup>[5]</sup>基于不同的风向对城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量分析中同样发现在植被较多的区域 CO<sub>2</sub>通量低于其他区域。他们的研究结果和该研究较一致,由于 CO<sub>2</sub>通量受到多种因素的影响(风向,风速,下垫面等)<sup>[5,15]</sup>,基于风区的 CO<sub>2</sub>通量研究由于各个风向上数据量和气象条件的差异可能会对分析结果产生影响,关于下垫面对 CO<sub>2</sub>通量变化的影响机制需在以后使用更长时间序列的 CO<sub>2</sub>通量和气象数据进行分析和解释。

2.5 叶面积指数对 CO2通量的影响

叶面积指数(LAI)是代表草本,木本等绿色植物生 长状况的重要指标<sup>[40]</sup>,而植被是影响生态系统碳循环 的重要因素<sup>[40-46]</sup>,因此我们统计出 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日研究区整个生态系统每个月的 LAI 均值( $m^2/m^2$ )和月 CO<sub>2</sub>通量交换量( $\mu$ mol  $m^{-2}$ 月<sup>-1</sup>),分 析叶面积指数和 CO<sub>2</sub>通量的关系,如下图 8 所示。

依据图 8,2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日研 究区整个生态系统的年 CO<sub>2</sub>通量总交换量为 9664.06 μmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,即表现为碳源。其中在 8 月份的月 CO<sub>2</sub> 通量交换量最低为-402.02 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>,在 1 月份的 月 CO<sub>2</sub>通量交换量最高为 1689.36 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>。叶面 积指数月均值在 8 月份到达峰值为 1.03 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>,在 11



图 8 生态系统 LAI 和 CO<sub>2</sub>通量特征(2016-10-01—2017-09-30) Fig.8 LAI and CO<sub>2</sub> flux characteristics of the ecosystem in the study area(2016-10-01—2017-09-30)

月份到达最低均值为 0.24 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>。叶面积指数与 CO<sub>2</sub>通量具有较好的一致性, CO<sub>2</sub>通量水平最低的月份与叶 面积指数均值最高的月份均在 8 月份。为进一步分析叶面积指数与 CO<sub>2</sub>通量的关系我们对其进行回归分析, 如下图 9 所示。

依据图 9,研究区整个生态系统 CO<sub>2</sub>通量和叶面积指数进行回归分析的相关系数(R<sup>2</sup>)为 0.66,代表 CO<sub>2</sub> 通量和叶面积指数具有较好的相关性<sup>[4041]</sup>。具体表现为随着叶面积指数的上升 CO<sub>2</sub>通量有下降的趋势,其原 因可能是当叶面积指数处于较高水平时代表下垫面中的草本,木本等绿色植物长势良好,在白天具有较强的 光合作用吸收了部分二氧化碳导致 CO<sub>2</sub>通量的下降。马小红等<sup>[40]</sup>对胡杨林 CO<sub>2</sub>通量和叶面积指数的关系研 究区也证实了叶面积指数与 CO<sub>2</sub>通量的负相关关系。Bracho 等<sup>[41]</sup>对松树林生态系统碳循环的研究中也发现 了较相似的规律。

研究区在 7 月的叶面积指数均值为 0.93 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>(LAI 处于较高水平),但是 7 月的 CO<sub>2</sub>通量的交换量为 256.81  $\mu$ mol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>(碳源)。其原因可能是研究区为上海市奉贤大学城,7 月学生和教职工还未全部离校,人

9

为活动导致了一部分的二氧化碳排放导致 CO<sub>2</sub>通量处 于正值。关于该现象产生的实际原因和 CO<sub>2</sub>通量的影 响机制需在以后使用更长时间序列的 CO<sub>2</sub>通量数据,叶 面积指数数据以及配合车流量调查进行分析和解释。

#### 3 结论

该研究使用了位于上海市奉贤大学城的涡动相关 通量观测系统(EC)所观测和记录的 2016 年 10 月 1 日 至 2017 年 9 月 30 日的 CO<sub>2</sub>通量,气象数据,配合叶面 积指数数据分析了整个生态系统 CO<sub>2</sub>通量变化特征和 CO<sub>2</sub>通量的影响因子。该研究可以为处于亚热带气候 区的其他发展中国家的城市系统碳循环研究和合理城 市布局建设绿色生态城市提供服务和参考,主要结论 如下。

(1)研究区整个生态系统全年 CO<sub>2</sub>通量总交换量为 9664.06 μmol m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,即整个研究区表现为碳源。月 CO<sub>2</sub>通量交换量最小值出现在 8 月份为-402.02 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>,最大值出现在 1 月份为 1689.36 μmol m<sup>-2</sup>月<sup>-1</sup>。且生长季的总体 CO<sub>2</sub>通量低于非生长季的总体 CO<sub>2</sub> 通量,其中 CO<sub>2</sub>通量增长率在春季中期达到最低,在夏末秋初达到最高,其原因可能是在春季中期绿色植物恢 复生长并且开始进行光合作用导致了 CO<sub>2</sub>通量的下降,当在夏末秋初时植物开始凋零导致光合作用减弱导致 CO<sub>2</sub>通量的上升。

(2) 在基于风区的生长季 CO<sub>2</sub>通量特征研究中发现在植被占主导地区的整体 CO<sub>2</sub>通量水平较低。生长季 CO<sub>2</sub>通量均值的最低值出现在西北风区,且西北风区植被面积所占通量源区百分比最多为 55%。导致该现象 的原因可能是生长季植物生长状况良好,其在白天的光合作用起到了较好的碳汇作用。

(3) CO<sub>2</sub>通量与叶面积指数(LAI)的关系呈现负相关关系,即随着叶面积指数的升高 CO<sub>2</sub>通量有下降的趋势,其原因可能是研究区下垫面分布有相当数量的绿色植物,在春夏季节 LAI 值较高时植物由于光合作用吸收了大量的二氧化碳导致 CO<sub>2</sub>通量的下降。植被的生长情况和植物生理活动是该研究区整个生态系统碳循环的重要影响因子。

**致谢:**作者感谢中国科学院西北生态环境资源研究院的王介民研究员在通量数据处理和通量足迹计算方面的 指导,同时感谢英国 Swansea 大学地理系的 Kljun 教授提供的通量足迹计算模型和上海师范大学的姚鑫、牛明 星在图表绘制方面的帮助。

#### 参考文献(References):

- Velasco E, Perrusquia R, Jiménez E, Hernández F, Camacho P, Rodríguez S, Retama A, Molina L T. Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City. Atmospheric Environment, 2014, 97: 226-238.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 龚元,赵敏,郭智娟,姚鑫,何毅,张立平.复杂下垫面碳通量足迹分析——以上海市奉贤大学城为例.上海师范大学学报:自然科学版,2017,46(2):284-291.
- [5] 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.
- [6] 袁庄鹏,赵敏,黄辞海,高峻,林文鹏,柳云龙,刘冬燕.城市节假日前后碳通量特征及其与车流量关系.环境工程学报,2013,7(9):



图 9 生态系统 LAI 和 CO<sub>2</sub>通量的关系(2016-10-01—2017-09-30)

Fig.9 The relationship between LAI and CO<sub>2</sub> flux in the study area (2016-10-01-2017-09-30) 3501-3506.

- [7] Kordowski K, Kuttler W. Carbon dioxide fluxes over an urban park area. Atmospheric Environment, 2010, 44(23): 2722-2730.
- [8] Velasco E, Roth M, Tan S H, Quak M, Nabarro S D A, Norford L. The role of vegetation in the CO<sub>2</sub> flux from a tropical urban neighbourhood. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(20): 10185-10202.
- [9] Stone J P, Steinberg D K. Influence of top-down control in the plankton food web on vertical carbon flux: a case study in the Chesapeake Bay. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2018, 498: 16-24.
- [10] Hirano T, Sugawara H, Murayama S, Kondo H. Diurnal variation of CO<sub>2</sub> flux in an urban area of Tokyo. SOLA, 2015, 11: 100-103.
- [11] Vesala T, Järvi L, Launiainen S, Sogachev A, Rannik Ü, Mammarella I, Ivola E S, Keronen P, Rinne J, Riikonen A, Nikinmaa E. Surfaceatmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2008, 60(2): 188-199.
- [12] Kurppa M, Nordbo A, Haapanala S, Järvi L. Effect of seasonal variability and land use on particle number and CO<sub>2</sub> exchange in Helsinki, Finland. Urban Climate, 2015, 13: 94-109.
- [13] Pita G, Gielen B, Zona D, Rodrigues A, Rambal S, Janssens I A, Ceulemans R. Carbon and water vapor fluxes over four forests in two contrasting climatic zones. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 180: 211-224.
- [14] Jasek A, Zimnoch M, Gorczyca Z, Smula E, Rozanski K. Seasonal variability of soil CO<sub>2</sub> flux and its carbon isotope composition in Krakow urban area, Southern Poland. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2014, 50(2): 143-155.
- [15] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, Schmid H P. A simple parameterisation for flux footprint predictions. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 112 (3): 503-523.
- [16] Gill B, Moeller S. GHG emissions and the rural-urban divide. a carbon footprint analysis based on the German official income and expenditure survey. Ecological Economics, 2018, 145: 160-169.
- [17] Feng L, Palmer P I, Parker R J, Deutscher N M, Feist D G, Kivi R, Morino I, Sussmann R. Estimates of European uptake of CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT X<sub>CO2</sub> retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside Europe. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16 (3): 1289-1302.
- [18] Guo M, Li J, Xu J W, Wang X F, He H S, Wu L. CO<sub>2</sub> emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data. Environmental Pollution, 2017, 226; 60-68.
- [19] 王江涛. 崇明东滩滨海围垦区芦苇湿地 CO2通量特征[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [20] 顾永剑,高宇,郭海强,赵斌.崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区分析.复旦学报:自然科学版,2008,47(3):374-379.
- [21] Leuning R, Denmead O T, Lang A R G, Ohtaki E. Effects of heat and water vapor transport on eddy covariance measurement of CO<sub>2</sub> fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 1982, 23(2): 209-222.
- [22] Dyer A J, Hicks B B, King K M. The Fluxatron--A revised approach to the measurement of Eddy fluxes in the lower atmosphere. Journal of Applied Meteorology, 1967, 6(2): 408-413.
- [23] Bakan S. Note on the Eddy correlation method for CO<sub>2</sub> flux measurements. Boundary-Layer Meteorology, 1978, 14(4): 597-600.
- [24] Menzer O, McFadden J P. Statistical partitioning of a three-year time series of direct urban net CO<sub>2</sub> flux measurements into biogenic and anthropogenic components. Atmospheric Environment, 2017, 170: 319-333.
- [25] 郭智娟, 龚元, 张凯迪, 张立平, 何毅, 徐良, 赵敏. 复杂下垫面下不透水层的 CO<sub>2</sub>通量足迹分析——以上海市奉贤大学城为例. 环境科 学学报, 2018, 38(2): 772-779.
- [26] 贾庆宇,周广胜,王宇,刘晓梅.城市复杂下垫面供暖前后 CO2通量特征分析.环境科学,2010,31(4):843-849.
- [27] 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.
- [28] Grimmond C S B, Offerle B D, Hom J, Golub D. Observations of local-scale heat, water, momentum and CO<sub>2</sub> fluxes at Cub Hill, Baltimore// Proceedings of the 4th Symposium on Urban Environments. Norfork, VA: America Meteorology Society, 2002.
- [29] Vote C, Hall A, Charlton P. Carbon dioxide, water and energy fluxes of irrigated broad-acre crops in an Australian semi-arid climate zone. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(1): 449-465.
- [30] Wu J B, Zhou X Y, Wang A Z, Yuan F H. Comparative measurements of water vapor fluxes over a tall forest using open- and closed-path eddy covariance system. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2015, 8(5): 4711-4736.
- [31] Euskirchen E S, Edgar C W, Turetsky M R, Waldrop M P, Harden J W. Differential response of carbon fluxes to climate in three peatland ecosystems that vary in the presence and stability of permafrost. Journal of Geophysical Research; Biogeosciences, 2014, 119(8); 1576-1595.
- [32] Gu L H, Post W M, Baldocchi D D, Black T A, Suyker A E, Verma S, Vesala T, Wofsy S C. Characterizing the seasonal dynamics of plant community photosynthesis across a range of vegetation types//Noormets A, ed. Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research. New York: Springer, 2009: 35-58.
- [33] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sensing of Environment, 1997,

62(3): 241-252.

- [34] Kang S, Running S W, Lim J H, Zhao M S, Park C R, Loehman R. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(2): 232-242.
- [35] Razar R M, Missaoui A. Phenotyping winter dormancy in switchgrass to extend the growing season and improve biomass yield. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 2018, 8(1): 1-22.
- [36] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. Nature, 1999, 397(6721): 659-659.
- [37] Sadeghi S M M, Attarod P, Pypker T G. Differences in rainfall interception during the growing and non-growing seasons in a *Fraxinus rotundifolia* mill. plantation located in a semiarid climate. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 17(1): 145-156.
- [38] Burri S, Frey C, Parlow E, Vogt R. CO<sub>2</sub> fluxes and concentrations over an urban surface in Cairo/Egypt//Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate. Yokohama, Japan: International Association for Urban Climate (IAUC), 2009.
- [39] Guidolotti G, Calfapietra C, Pallozzi E, De Simoni G, Esposito R, Mattioni M, Nicolini G, Matteucci G, Brugnoli E. Promoting the potential of flux-measuring stations in urban parks: An innovative case study in Naples, Italy. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 153-162.
- [40] 马小红, 冯起, 苏永红, 鱼腾飞, 金华. 胡杨林净生态系统 CO2交换特征. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 108-115.
- [41] Bracho R, Starr G, Gholz H L, Martin T A, Cropper W P, Loescher H W. Controls on carbon dynamics by ecosystem structure and climate for southeastern U.S. slash pine plantations. Ecological Monographs, 2012, 82(1): 101-128.
- [42] Milne R, Brown T A. Carbon in the vegetation and soils of Great Britain. Journal of Environmental Management, 1997, 49(4):413-433.
- [43] Ward H C, Kotthaus S, Grimmond C S B, Bjorkegren 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.
- [44] Yao X, Zhao M, Escobedo F J. What causal drivers influence carbon storage in Shanghai, China's urban and peri-urban forests? Sustainability, 2017, 9(4): 577.
- [45] 姚鑫."城-郊"绿地木本植被群落碳储量影响因素的差异性分析[D].上海:上海师范大学, 2017.
- [46] 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.