

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¹

龚元, 赵敏^{1*}, 姚鑫², 郭智娟², 何毅, 张立平, 林文鹏

(1. 上海师范大学城市生态与环境研究中心, 上海 200234; 2. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234)

【摘要】随着城市化进程的加速和城市人口规模的增加, 城市已成为最大的碳源, 研究城市生态系统对大气二氧化碳的贡献成为碳循环研究的焦点问题之一。基于研究区域内土地利用现状和一年的涡动观测系统观测数据, 结合地理信息技术(ArcGIS)和通量计算工具(Ed即pro及ARTFootprintTool)以及碳通量足迹模型分析了上海奉贤大学城碳通量足迹特征, 基于此探讨不同下垫面类型, 包括以草本和木本等透水层为主的下垫面(称为自然系统), 以建筑物、道路等不透水层为主的下垫面(称为社会系统)碳通量的变化特征。研究结果表明: 1) 在不同风向上, 碳通量贡献区范围随着大气稳定度的增加而扩大。大气处于稳定条件下, 非主风向一上的碳通量贡献区范围(最大范围1100m)比主风向上的碳通量贡献区范围(最大范围780m)要大; 当大气处于不稳定条件下时主风向和非主风向下的碳通量贡献区范围相差不大(最大范围分别为321和351m) 2) 不同下垫面其源汇特征不同, 以绿色植物为主的自然系统年碳通量均值为 $-1.1 \text{ mol/m}^2/\text{s}$, 表现为碳汇; 社会系统的年碳通量均值为 $8.6 \text{ mol/m}^2/\text{s}$, 表现为碳源。3) 自然系统的碳通量日变化具有较明显的季节分异, 变化特征大致呈“U”型; 社会系统的碳通量日变化没有明显的季节分异, 变化特征大致呈“M”型。绿色植物对城市生态系统的大气二氧化碳有降低作用, 结合自然和社会系统的碳通量变化特征可以为以后合理规划城市布局, 建立低碳城市提供服务。

【关键词】涡动观测技术; 一下垫面; 社会系统; 自然系统; 碳通量; 足迹分析

【中图分类号】Q14

【文献标志码】A

【文章编号】1004—8227(2017)01—0091—09

【DOI】10.11870/cjlyzyyhj201701011

随着气候变化和温室效应的加剧, 人们开始关注温室气体(GHG, 主要是二氧化碳)的排放, 而城市是GHG的主要来源[1]在这样的背景下合理规划城市结构控制碳排放成为各国政府的共识。减少碳排放需要知道当地碳通量的变化情况, 但是由于城市环境的复杂性导致其不同下垫面碳通量的精确观测难度较大, 使用涡动相关通量观测系统进行城市大气中碳通量特征[2—9]的探讨在近年来城市系统碳循环的研究中一直是个热点。

¹ 收稿日期: 2016—05—18; 修回日期: 2016—08—17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100354, 41571047) [National Natural Science Foundation of China (31100354, 41571047)]

作者简介: 龚元(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市生态和GIS应用方面的研究. E-mail: 1072363740@qq.com

* 通讯作者 E-mail: zhaomin@shnu.edu.cn

涡动相关通量观测系统 (Eddy covariance, EC) 是当前最基本且广泛使用的观测生态尺度上地表与大气之间物质、热量及动量湍流交换的工具。1990 年代中期开始, EC 应用于观测植物和大气的碳交换并且迅速崛起 [2], 建立了例如全球 FLUXNET 等的碳通量观测和数据共享的网络系统。21 世纪初起, 将 EC 用于人口稠密的城市系统测量温室气体 (如二氧化碳) 的研究开始成为热点。鉴于城市下垫面的复杂性, 为了研究城市系统碳交换中碳通量的影响因子和各地类对碳通量的参与度, 贡献源区的足迹 (FootPrint) [10] 概念发展起来并且运用于城市自然生态系统的碳循环的研究中。通量贡献区的足迹分析是了解观测区域不同下垫面贡献比率的基本方法。通量贡献区又可分为源、汇两种。随着通量贡献区的研究和发展涌现出了许多 Footprint 计算模型如 Horst - Weil 模型、KormannandMeixner 模型、FSAM 模型以及 HSieh 模型和 KUun 模型等 [11]。基于源区足迹分析进行的碳通量研究和应用在国内外已有很多, 如袁庄鹏等 [12] 认为城市系统碳通量源区的分布有明显的季节分异。刘郁压等 [13] 认为在不同的观测高度下通量贡献区有不同的表现特征。顾永剑等 [13] 在湿地系统的研究中认为大气稳定性是影响通量贡献区的重要因素。张慧 [14] 在中亚热带人工林的研究中认为碳通量贡献区有明显的季节变化。王江涛 [15] 在湿地系统的研究得到和顾永剑等 [13] 一致的研究结果。Velasco 等 [16] 认为城市绿地有降低城市碳排放的作用。Kordowski 等 [17] 认为人类活动是影响城市地区碳通量变化的主要因素。KIShore 等 [18] 训、为城市地区不同土地利用有不同碳通量和碳浓度变化特征。Kurppa 等 [19] 认为城市环境下不同土地利用的碳通量足迹特征不同。2007 年, 一款基于 KormannandMeixner 模式由 Neftel 等 [20] 开发的方便计算源区内不同下垫面通量贡献百分比的工具问世, 名为 TheART (AgroscopeReckenholz - T 垠 nikon) FootprintTool (简称 ARTFootPrintTool)。Neftel 等 [20] 使用并且评估了这款通量足迹计算工具, 认为其可以实现预测规定区域的碳通量的贡献百分比, 并且可以通过使用长期大量的 EC 数据来控制 ARTFootPrintTool 所预测的通量贡献百分比的质量。以上的研究中, 国内多是局限在自然生态系统的通量贡献区及季节变化特征等, 就城市生态系统复杂下垫面的碳通量贡献研究较少; 国际上尽管有就城市下垫面通量足迹及碳通量贡献的研究, 但把二者融合到一切进行探讨自然和人为系统碳通量贡献及特征的较少。

综上所述, 由于城市下垫面的复杂性给精确计算源区和汇区带来了极大的挑战。随着地理信息系统技术 (GIS) 的成熟, ArcGIS 等 GIS 软件的使用可以为城市碳通量研究提供精确的土地利用信息包括位置信息和统计信息等。利用 GIS 可以精确量化城市复杂下垫面的空间分异性, 但如何将该技术与碳通量结合, 精确量化城市复杂下垫面 CO₂ 通量的源汇特征, 相关研究成果还比较鲜见。本文将结合地理信息系统工具和研究区内的土地利用特征, 基于通量足迹模型主要是 ARTFootPrintTool 分析城市复杂下垫面碳通量足迹, 精确量化城市各类下垫面的碳通量变化特征, 为其他地区城市环境下的碳通量研究和合理规划城市布局降低碳排放提供参考和服务。

1 研究方法

1.1 研究地区概况

本研究区域位于长江中下游平原、上海市最南端海湾旅游区的上海市奉贤大学城; 地形平坦, 毗邻杭州湾。定位监测塔 (EC 点) 坐标为 N30° 50' 32.26", E121° 30' 38.96"。塔高 20m, 安装有微气象梯度双测系统和开路涡动相关测量系统。EC 点西北侧禾南侧有以香樟 (Cinnamomum camphora) 为优势种的亚热带常绿阔叶林 (冠层高度 8m [2]), 以及以麦冬 (Ophiopogon japonicus)、营蒲 (Acorus calamus L.)、芦苇 (Phragmites australis) 为优势种的草本植物。东侧有教学楼, 操场和食堂等学校建筑; 北侧约 150m 有主干道。该区域属中纬度温带-亚热带季风气候, 年平均气温 12 - 20°C; 夏季盛行东南风并且晨温多雨, 冬季盛行西北风并且低温少雨 [21]。降水集中于梅雨季, 梅雨季 6 月份至 7 月份降水约占总降水量 70%, 年总降水量约 2100mm。年均相对湿度为 80%, 无霜期约 200d。研究区土地利用如图 1 和表 1 所示。

从表 1 可以看出, 研究区内不透水层面积约占 44%, 其中建筑物占总面积的 23.44%, 多为宿舍楼, 教学楼和食堂, 平均高度 10m。道路占研究区总面积的 11.53%。交通和建筑物占总研究区域的 34.97%。以植被为主得透水层面积约占 56%, 其中草本和木本下垫面占总研究区域的 49.20%。

1.2 涡动相关通量观测系统

搭载涡动相关系统设备的监测塔高 20m，其通量观测系统主要由 Gill 三维超声风速仪（Campbell Scientific Instruments, USA）,LI-7500(LICOR, Inc., USA) 开路式二氧化碳和水汽分析仪，以及 CR3000(Campbell Scientific Instruments, USA) 数据采集器组成。超声及 LI-7500 气体分析仪安装在距离地面 20m 处 [2]。

1.3 通量数据质量控制

选取 2015 年 4 月至 2016 年 3 月共计 12 个月的通量观测数据。原始数据采样频率为 10Hz，通过 EddyPr. 软件(Li-COR, USA) 处理，包括倾斜修正，频率响应修正，感热的超声虚温修正，以及密度（WPL）修正等。最终输出 30min 平均的各种通量值、通量的质量控制标注以及其他相关统计量等 [2]。

考虑到天气，人为以及仪器等因素所产生的影响，在完成 Eddypro 数据处理后，我们对软件输出的 1/2h 的通量值进行筛选：(1) 剔除质量控制标注为 ‘2’ 的数据；(2) 剔除降水前后 1h 的数据；(3) 剔除 10Hz 原始数据每 1/2h 缺失率大于 10% 的数据；(4) 剔除夜间摩擦风速小于 0.15m/s 的数据 [13]。从 2015 年 4 月至 2016 年 3 月的碳通量数据缺失和拒绝率为 32%，一般情况下

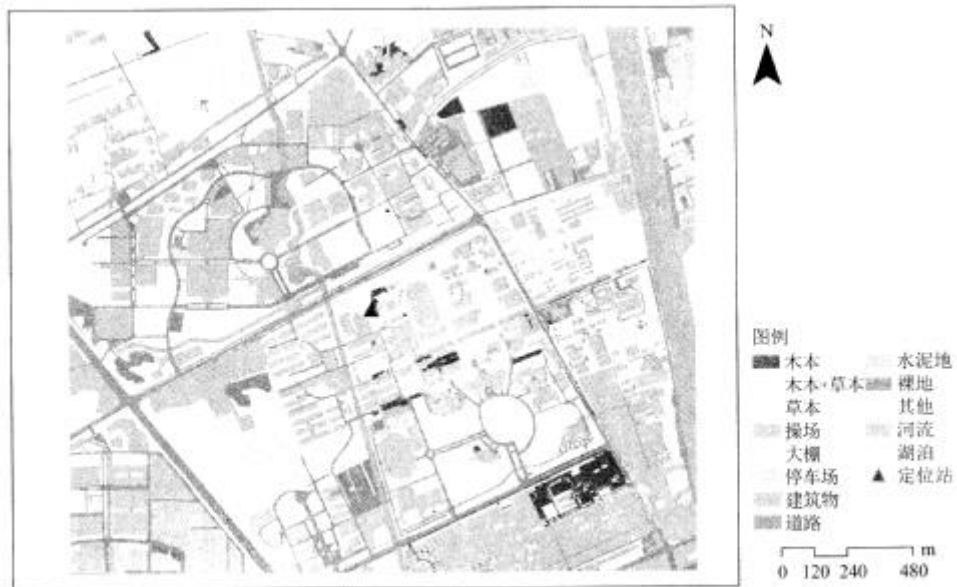


图 1 2016年上海市奉贤大学城土地利用图

Fig.1 Land Use Map of Shanghai Fengxian University City in 2016

表 1 上海奉贤大学城土地利用现状
Tab.1 Land Uses of Fengxian University City, Shanghai

土地利用类型	面积(ha)	占比(%)
木本	8.71	1.91
木本+草本	179.98	39.43
草本	35.87	7.86
操场	15.94	3.49
大棚	6.70	1.47
停车场	0.49	0.11
建筑物	106.98	23.44
道路	52.61	11.53
水泥地	8.36	1.83
裸地	6.35	1.39
其他	2.74	0.60
河流	27.79	6.09
湖泊	3.91	0.86
总计	456.42	100.00

数据的缺失和拒绝率小于 50%即具有代表性 [21]。在数据插补方面采用平均日变异法 (MDV)，即用相邻天的同一时刻的数据的平均值进行插补。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 [13]。

1.4 Footprint 计算

足迹计算包括两个部分即规定通量贡献率 (10%—90%) 区域位置的计算和规定区域内通量贡献率的计算。因为与 ART FootPrint Tool 不同大部分通量足迹模型只能给出 10%—90%通量贡献区域的二维信息，基于通量足迹模型可以确定通量来源的大致范围。因此在通量足迹模型模型的计算结果的基础上确定通量来源的大致范围再使用 ART FootprintTool 进行进一步的分析。

1.4.1 ART FootPrint 计算模型

源区不同下垫面通量足迹的计算基于 ART FootPrint Tool。其计算部分包括沿来风向的横风积分模型和横风分布模型两部分，然后通过综合分布网格点结果来计算规定区域内通量贡献的百分比。模型所需要输入的参数均可从 Eddypro 输出的 1/2h 一次的数据结果中获得。在 z_m 高度上，水平坐标系中原点测量的通量 $F_c(0, 0, z_m)$ 和下垫面各点源强 $F_c(x, y, 0)$ 及一个概率密度函数即所谓 Footprint 函数 $\phi(x, y, z_m)$ 有关 [20]：

$$F_c(0, 0, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F_c(x, y, 0) \phi(x, y, z_m) dx dy \quad (1)$$

这里 x 轴指向的是平均水平风向的方向。足迹函数 $\phi(x, y, z_m)$ 代表的是 EC 监测区域内任意位置对 EC 点所测量的通量贡献的加权函数，由 Kormann 等 [20] 所提出的平流扩散模型的解析法计算，可以写成下式等。

$$\phi(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} D x^E} \exp\left(-\frac{y^2}{2(Dx^E)}\right) C x^{-A} \exp\left(-\frac{B}{x}\right) \quad (2)$$

其中，5 个参数 A 至 E 分别由测量高度，水平风速，摩擦速度，横风速度标准差，莫宁—奥布霍夫稳定度长度决定 [20]：

$$A = 1 + \mu \quad (3)$$

$$B = \frac{u_0 \cdot z^r}{r^2 \cdot k_0} \quad (4)$$

$$C = \frac{B^\mu}{\Gamma(\mu)} \quad (5)$$

$$D = \frac{\sigma_v \cdot \Gamma\left(\frac{1}{r}\right) \cdot \left(\frac{r^2 \cdot k_0}{u_0}\right)^{-\frac{m}{r}}}{\Gamma(\mu) \cdot u_0} \quad (6)$$

$$E = \frac{r - m}{r} \quad (7)$$

其中用到的参数 $r=2+m-n$, $\mu=(1+m)/r$, σ_v 为侧风风速标准差, Γ 为 Gamma 函数。m, n 和 u_0 , k_0 在有一定高度的风速观测值, 并已知下垫面粗糙度和大气稳定度 (Z_m/L) 的情况下, 可利用近地层相似关系公式计算 [20]。

1.4.2 不同下垫面通量贡献比值的计算

依照 ART FootPrintTool, 为了计算规定区域内的通量贡献百分比, 这些规定的区域必须是四边形, 其 4 个顶点的坐标需根据研究区的土地利用决定。要求四边形所有的内角要小于 180°。

在计算通量贡献比值时, 我们采用公式 2, 选取顺风点 200 个, 横风 100 个的网格点估算。接下来将网格内的碳通量贡献的信息旋转至来风方向, 并且用我们规定的四边形区域进行覆盖, 对四边形内的所有网格点的碳通量贡献数据叠加, 最终计算出感兴趣 (四边形) 区域的碳通量贡献比值 [20]。

1.4.3 HSieh 模型

通量足迹模型众多如 Horst-Weil 模型、FSAM 模型等, 但是鉴于城市下垫面的复杂性, 刘郁压等 [11] 认为 HSieh 模型要求输入的参数较简单且易获得, 更加符合城市的复杂环境的要求, 因此本文将基于 HSieh 模型来确定研究区内通量来源的大致范围。Hsieh 模型要求输入的参数主要包括观测高度 (单位: m), 零平面位移值 (单位: m), 空气动力学粗糙度 (单位: m) [11]。

2 结果分析

2.1 碳通量足迹分析

2.1.1 风向分布特征

2015 年 4 月至 2016 年 3 月的风速风向图如图 2 所示, 其中春季风向在 0° 至 90° 上的风频占总风频的 68% 为主风向, 180° 至 270° 上的风频占总风频的 26% 为非主风向。夏季 90° 至 180° 上的风频占总风频的 60% 为主风向, 270° 至 360° (0°) 占总风频的 21% 为非主风向。秋季 180° 至 270° 上风频占总风频的 58% 为主风向, 0° 至 90° 占总风频的 16% 为非主风向。冬季 270° 至 360° (0°) 上的风频占总风频的 63% 为主风向, 90° 至 180° 占总风频的 12% 为非主风向。

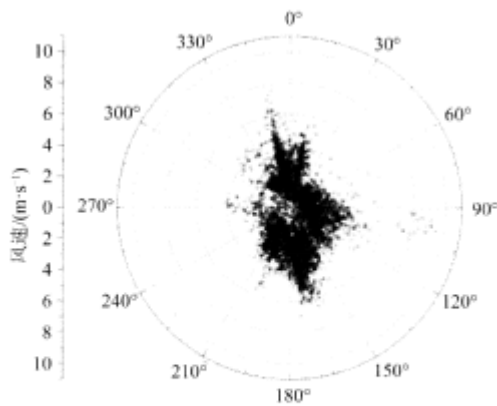


图2 研究区风速风向图

Fig.2 Wind Speed and Wind Direction of the Study Area

2.1.2 主风向上的碳通量足迹分析

基于 Hsieh 模型，计算出研究区内全年主风向上碳通量贡献值为 90% 的区域。如表 2 所示。数据显示，春季在主风向上大气处于稳定状态时通量贡献区长度为 300—607m 这比处于大气不稳定条件下的 186—351m 的通量贡献区长度要大的多。夏季在主风向上大气处于稳定状态的通量贡献区长度为 190—420m，大气处于不稳定状态时通量贡献区长度为 130—210m，同样大气处于稳定条件下要比大气处于不稳定条件下的通量贡献区范围大。其他季节同样表现出随着大气稳定度的增强，通量贡献区范围有扩大的趋势。这于顾永剑等[13]，袁庄鹏等[2] 和刘郁压等[11]的研究结果一致。大气稳定度变化所带来的通量贡献区范围的变化其原因在于，当大气较稳定时，大气中的物质和气体等垂直扩散活动效率较低，导致距离观测地点更远的地区对观测数据的通量贡献信息产生影响，相反当大气处于不稳定状态时，地表至大气间的湍流活动较为活跃，物质的垂直传输频率较快，距离观测地点远处的二氧化碳活动不能对通量值产生影响，导致通量贡献区的范围较小[13]。

表 2 主风向上90%通量贡献区范围

Tab.2 Range of 90% Contribution Area for Dominate Wind Directions in Different Seasons

季节	方向(°)	大气 稳定度	贡献区 长度(m)	贡献区长度 平均值(m)	贡献区长度 标准差(m)
春季	0~90	稳定	300~607	453	153
春季	0~90	不稳定	186~351	268	82
夏季	90~180	稳定	190~420	305	115
夏季	90~180	不稳定	130~210	170	40
秋季	180~270	稳定	330~780	555	225
秋季	180~270	不稳定	108~350	229	121
冬季	270~360	稳定	290~731	510	220
冬季	270~360	不稳定	161~300	230	69

与同类研究相比，龚笑飞等[21]利用 FSAM 模型分析了安吉毛竹林生态系统的碳通量足迹，其研究显示通量贡献区范围在大气趋于稳定的条件下有变大的趋势，这与本研究结果一致，其研究中当大气处于稳定条件下时，通量贡献区范围最大可以达到 2175m 这于本文的研究结果差距较大，原因可能是生态系统差异和通量监测设备的安装高度不同（其观测高度为 40m）。王江涛[15]运用 FSAM 模型在分析生季下崇明湿地的碳通量贡献区特征中，显示在大气稳定条件下通量贡献区范围可达到 378m 这和本论文夏季通量贡献区范围结果较为一致。

2.1.3 非主风向上碳通量足迹分析

基于 Hsieh 模型，计算出研究区内全年非主风向上碳通量贡献值为 90% 的区域，如表 3 所示。

表 3 非主风向上 90% 通量贡献区范围
Tab.3 Range of 90% Contribution Area for Non-dominate Wind Directions in Different Season

季节	方向/度	大气	贡献区	贡献区长度	贡献区长度
		稳定度	长度/m	平均值/m	标准差/m
春季	180-270	稳定	260-810	535	275
春季	180-270	不稳定	121-220	170	49
夏季	270-360	稳定	200-784	492	292
夏季	270-360	不稳定	105-240	172	67
秋季	0-90	稳定	264-1100	682	418
秋季	0-90	不稳定	170-270	220	50
冬季	90-180	稳定	220-876	548	328
冬季	90-180	不稳定	150-321	235	85

数据显示，在春季非主风向上在大气稳定状态下通量贡献区的长度在 260—810m，在大气不稳定状态下通量贡献区长度为 121m 至 220m，所以在大气稳定的状态下的通量贡献区范围要超过大气处于不稳定条件下的通量贡献区的范围。夏季在大气处于稳定状态时的通量贡献区长度为 200—784m，大气处于不稳定状态时通量贡献区长度为 105—240m，也表现为随着大气的趋于稳定对应条件下的碳通量贡献区范围有增大的趋势。秋冬季节表现为同样的现象，即大气稳定度和通量贡献区范围的正相关关系。研究结果同顾永剑[13]在崇明湿地生态系统利用 FSAM 模型分析的碳通量足迹的分析结果一致。周琪[22]在西北干旱区荒漠系统的碳通量足迹研究中运用 FSAM 模型得出风向对通量贡献区影响的结果和本文的研究结果相对一致。

2.2 不同下垫面类型碳通量变化特征

城市系统的碳循环由自然系统和社会系统（不透水层系统和透水层系统）构成，本文将城市系统的碳循环组成部分分为由草本和木本等组成的自然系统和由建筑物和水泥路面等组成的社会系统。

根据研究区内 90% 通量贡献区域的分布特征（主要分布在距离 EC 点 500m 左右的范围），考虑到研究区内最小土地利用斑块的大小和风向分布特征，在研究区构建 15m×15m 的网格如图 3 所示，并且在研究区内距离 EC 点 500m 处东南，西北，东北，西南方位内各选取 40 个网格共 160 个网格作为研究试验区。通过 ART FootPrint Tool 的计算获得网格内碳通量贡献比值，再根据网格内的土地利用类型来确定自然系统和社会系统的碳通量变化特征。

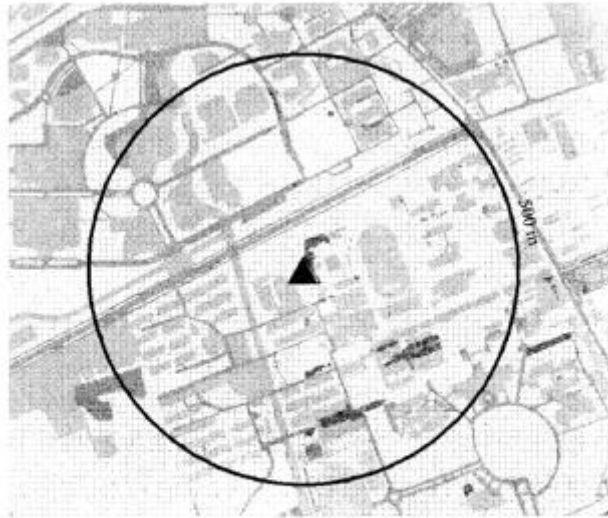


图3 研究区试验网格区示意图
Fig.3 Fish Net of the Study Area

2.2.1 自然系统碳通量变化特征

在完成数据处理后，以草本和木本为主的自然系统碳通量日变化特征如图4所示（单位： $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）。

从图4可以看出，草本和木本春夏季节的光合作用较为强烈白天可以作为碳汇存在，晚间由于呼吸作用充当碳源，草本和木本类植物变化符合绿色植物的光合作用和呼吸作用，全年平均碳通量为 $-4.1\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ （碳汇）。夏季草本和木本类植物均在7点至7点30分时通量值为负值为 $-5.2\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，一直到11点30分碳汇出现顶峰碳通量值 $-35.5\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。并在此后的时间内出现下降的趋势直到18点30分左右碳通量值开始出现正值。因此，夏季木本和草本基本都在7点至7点30分开始光合作用（碳汇），直到18点30分进入呼吸作用（碳源），光合作用峰值出现在11点30分大致变化曲线呈“U”型，春季结果和

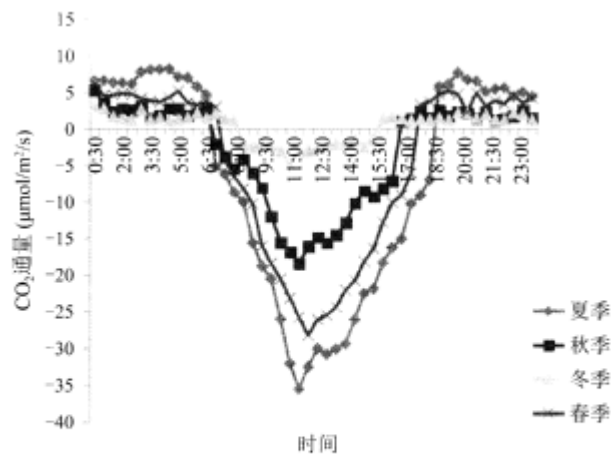


图4 自然系统碳通量各个季节的日变化特征
Fig.4 Diurnal Variation Characteristics of Natural Systemcarbon Fluxes in Different Seasons

夏季类似，不同的是春季 17 点 30 分开始进入呼吸作用比夏季早 1 个小时，秋冬季节由于植物的凋零碳汇作用和夏季比较弱，其中冬季进入光合作用最晚约 8 点开始进入光合作用。夏季碳通量波动幅度最大，冬季波动较平稳。理论上秋冬季节应以草本和木本类植物对应的下垫面土壤的呼吸作用为主，汤洁等 [23] 在吉林西部的土壤碳通量的研究中土壤碳通量的最大值为 $2.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，这和本文冬季通量最大值 $3.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 较接近，王江涛 [15] 研究的崇明湿地地碳通量变化特征和本文的自然系统碳通量变化特征的研究结果较一致同样都表现为夏季碳通量变化幅度较大，冬季碳通量变化幅度较小，夏季在 7 点 30 分左右植物进入光合作用，在 18 点左右进入呼吸作用，并且碳通量变化趋势都呈现“U”型，和本文的研究结果一致。王宇等 [24] 在东北地区森林系统碳通量的研究中同样认为森林系统（自然系统）是重要的碳汇。

综上，草本和木本类植物在春夏季节的光合作用较为强烈白天可以作为碳汇存在，晚间由于呼吸作用成为碳源，秋冬季节光合作用较弱。夏季碳通量变化幅度最大，冬季碳通量变化较平稳，季节是主要的影响因素。从全年角度来说自然系统表现为碳汇。

2.2.2 社会系统碳通量变化特征

在完成数据处理后，由建筑物，水泥路面和道路等组成的社会系统的碳通量变化特征如图 5 所示（单位： $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）。

从数据中可以看出全年中社会系统的碳通量变化没有明显的季节分异，大致呈“M”型，并且在 7 点和 12 点以及 18 点出现了 3 个通量峰值，其原因可由于学生上下课以及上下班高峰期导致人类活动较强以及用餐时间食堂燃烧化石燃料产生了大量的

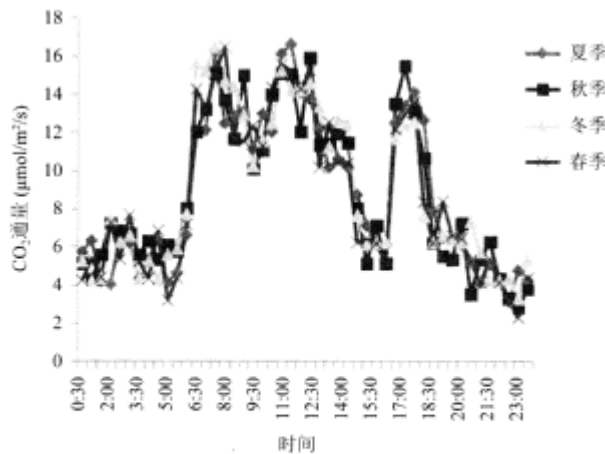


图 5 社会系统碳通量各个季节的日变化特征

Fig.5 Diurnal Variation Characteristics of Social System Carbon Fluxes in Different Seasons

二氧化碳，导致碳通量值出现峰值其峰值范围在 $14 - 16 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。其他时间段 20 点至 22 点碳通量有下降趋势范围在 $4 - 8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，其原因可能是晚间交通流量和人类活动较少导致碳通量值出现下降趋势。同样在夜间的碳通量值变化较为平稳范围在 $4 - 6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，其原因同样也可能是由于夜间交通流量和人类活动较少导致的。总之，研究区中社会系统的碳通量变化无明显的季节变化特征。全年通量均值为 $8.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 表现为碳源，其变化受学生作息时间的影响较大。Nemitz 等 [25] 在观测英国爱丁堡市中心的碳通量范围为 $10 - 38 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，碳通量均值为 $26 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，高于本文的社会系统碳通量均值，其原因可能受观测地区和城市绿化的影响。贾庆宇等 [26] 研究的沈阳市中心地区的碳通量值冬季最大可达到 $84 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，和本文的社会系统碳通量峰值 $16 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 差距较大，其原因可能由于北方重工业较多以及受到冬季供暖的影响。Schmidt 等 [27]

研究的位于德国的 M 位 nster 地区的碳通量范围是 $4 - 11 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。Vogt 等 [28] 监测的位于瑞士的 Basel 地区的碳通量是 $3 - 16 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。Velasco 等 [29] 研究中的墨西哥城地区碳通量范围为 $3 - 18 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。Grimmond 等 [30] 研究的芝加哥地区的碳通量范围是 $0 - 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。他们的研究结果和本文的结果都很接近，并且 Basel, Mtinster, 墨西哥城和芝加哥地区都属于城区少绿地，社会系统是碳通量的主要来源。

3 结论

从研究结果来看，上海奉贤大学城的碳通量贡献区分布主要受风向和大气稳定度影响，特别表现为，大气稳定度和各个风向上的通量贡献区范围呈正相关关系，当大气处于稳定状态下时非主风向上的碳通量贡献区范围要大于主风向上的碳通量贡献区范围，当大气处于不稳定条件下时主风向和非主风向下的碳通量贡献区范围相差不大。自然系统和社会系统方面，上海奉贤大学城的碳通量贡献区主要为草本类，木本类，建筑系统和道路。其他地类碳通量贡献参与度较低。因此上海奉贤大学城的碳通量变化影响因素可以总结为绿色植物，建筑系统，交通，其中绿色植物作为自然系统的碳通量贡献区（碳汇），建筑系统和交通作为社会系统的碳通量贡献区（碳源），水体，裸地等地类由于碳通量贡献度较低本文没有进行量化处理，可能会对研究区内的碳排放收支平衡有一定的影响，这方面会在今后的工作中进行完善。

致谢：感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的王介民教授在数据处理和足迹模型使用方面的指导。

参考文献：

- [1] 赵荣钦，黄贤金．城市系统碳循环：特征、机理与理论框架[J]．生态学报．2013，33（2）：355—366．
- [2] 袁庄鹏，赵敏．基于 FsAM 模型的城市碳通量观测贡献区研究阴．上海师范大学学报（自然科学版），2012，41（5）：533—539．
- [3] GAHAGANA，GIARDINA CP，KING JS，et al．Carbon fluxes，storage and harvest removals through 60 years of stand development in red pine plantations and mixed hardwood stands in Northern Michigan，USA [J]．Forest Ecology and Management，2015，337—388—97．
- [4] SHAH MV，BADLE 55，RAMACHANDRAN KB．Hyaluronic acid production and molecular weight improvement by redirection of carbon flux towards its biosynthesis pathwayLJI．Biochemical Engineering Journal，2013，80：53—60．
- [5] O' HAGAN A．Probabilistic uncertainty specification：overview，elaboration techniques and their application to a mechanistic model of carbon flux [J]．Environmental Modelling & Software，2012，36：35—48．
- [6] GREGG WW，CASEY NW，ROUSSEAU C 5．Sensitivity of simulated global ocean carbon flux estimates to forcing by reanalysis productslJ]．Ocean Modelling，2014，80：24—35．
- [7] BORCHARDN，SCHIRRMANNM，VON HEBELC，et al．Spatio-temporal drivers of 5011 and ecosystem carbon fluxes at field scale in an upland grassland in Germany [J]．Agriculture，Ecosystems & Environment，2015，211：84—93．
- [8] HARRISA，DASH J．The potential of the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index for carbon flux estimation [J]．Remote Sensing of Environment，2010，114（8）：1556—1562．

-
- [9] MILANoLos , GABROV 总 EK F . Estimation of carbon dioxide flux degassing from percolating waters in a karst cave : case study from B ij ambare cave , Bosnia and Herzegovina [J] . *Chemie der Erde - Geochemistry* , 2015 , 75 (4) : 465 -474 .
- [10] STROHBACH MW , ARNOLDE , HAASE D . The carbon footPrint of urban green space — a life cycle approach [J] . *Landscape and Urban Planning* , 2012 , 104 (2) : 220 — 229 .
- [11] 刘郁压, 胡非, 程雪玲, 等. 北京城市通量足迹及源区分布特征分析 [J] . *大气科学*, 2014 , 35 (6) : 1044 — 1054 .
- [12] 袁庄鹏. 碳通量变化特征及影响因子研究 [D] . 上海: 上海师范大学硕士学位论文, 2013 .
- [13] 顾永剑, 高宇, 郭海强, 等. 崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区分析 [J] . *复旦学报 (自然科学版)*, 2008 , 47 (3) : 374 — 379 , 386 .
- [14] 张慧. 中亚热带人工林碳水通量贡献区的评价研究 [D] . 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2012 .
- [15] 王江涛. 崇明东滩滨海围垦区芦苇湿地 CO₂ 通量特征 [D] . 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2010 .
- [16] VELASCOE , PERRUSQUIAR , JIM NEZE , et al . Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City [J] . *Atmospheric Environment* , 2014 , 97 : 226 — 238 .
- [17] KORDOWSKIK , KUTTLER W . Carbon dioxide fluxes over an urban park area [J] . *Atmospheric Environment* , 2010 , 44 (23) : 2722 — 2730 .
- [18] KUMAR KM , NAGENDRA M . Characteristics of ground level CO₂ concentrations over contrasting land uses in a tropical urban environment [J] . *Atmospheric Environment* , 2015 , 115 : 286 — 294 .
- [19] KURPPAM , NORDBOJA , HAAPANALAS , et al . Effect of seasonal variability and land use on particle number and CO₂ exchange in Helsinki , Finland [J] . *Urban Climate* , 2015 , 13 : 94 — 109 .
- [20] NEFTELA , SPIRIGC , AMMANN C . Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations [J] . *Environmental Pollution* , 2008 , 118 (3) : 64 — 652 .
- [21] 龚笑飞, 陈丽萍, 莫路锋. 基于 FSAM 模型的毛竹林碳通量贡献区研究 [J] . *西南林业大学学报*, 2015 , 35 (6) : 37 — 44 .
- [22] 周琪, 李平衡, 王权, 等. 西北干旱区荒漠生态系统通量贡献区模型研究 [J] . *中国沙漠*, 2014 , 34 (1) : 98 — 107 .
- [23] 汤洁, 韩源, 刘森, 等. 吉林西部不同土地利用方式下的生长季土壤 CO₂ 排放通量日变化及影响因素 [J] . *生态环境学报*, 2012 , 21 (1) : 33 — 37 .
- [24] 王宇, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较 [J] . *生态学报*, 2010 , 30 (16) : 4376 — 4388 .

-
- [25] NEMITZE , HARGREAVES KJ , MCDONALD AG , et al . Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale [J]. Environmental Science Technology , 2002 , 36 (14) : 3139 — 3146 .
- [26] 贾庆宇, 周广胜, 王宇, 等. 城市复杂下垫面供暖前后 CO₂ 通量特征分析 [J] . 环境科学, 2010 , 31 (4) : 843 — 849 .
- [27] SCHMIDTA , WRZESINSKYT , KLEMM O . Gap filling and quality assessment of CO₂ and water vapour fluxes above an urban area with radial basis function neural networks [J]. Boundary — Layer Meteorology . 2008 , 126 (3) : 389 — 402 .
- [28] VOGTR , CHRISTENA , ROTACH MW , et al . Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city [J]. Theoretical and Applied Climatology , 2006 , 84 (1 / 3) : 117 — 126 .
- [29] VELASCOE , PRESSLEYS , ALLWINEE , et al . Measurements of CO₂ fluxes from the Mexico City urban landscape [J]. Atmospheric Environment , 2005 , 39 (38) : 7433 — 7446 .
- [30] GRIMMOND C SB , KING TS , CROPLEY FD , et al . Local scale fluxes of carbon dioxide in urban environments : methodological challenges and results from Chicago [J]. Environmental Pollution . 2002 , 116 (1) : 5243 — 5254 .