张 雅,刘 力,罗 华,等.沉湖湿地生态系统 CO_2 通量贡献区分布特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6975-6985.
Zhang Y, Liu L, Luo H, et al. Distribution characteristics of CO_2 flux footprint of Chenhu wetland ecosystem [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6975-6985.

沉湖湿地生态系统 CO_2 通量贡献区分布特征

张 雅[1],刘 力[1*],罗 华[1],刘万亮[1],李 朋[1],王 伟[2],邢新丽[3],尹 猛[1] (1.湖北省地质调查院,湖北 武汉 430034；2.中国科学院武汉植物园,湖北 武汉 430074；3.中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074)

摘要：通量贡献区分析是基于涡度相关法进行生态系统碳水热通量交换研究的重要内容之一.本研究利用 FFP(Flux Footprint Prediction)通量足迹模型,对湖北沉湖湿地生态系统 2022 年全年的观测数据进行分析,探究该区域涡度相关系统在不同时间、不同大气稳定度条件下的通量贡献区变化.结果表明:不同时间沉湖湿地生态系统 CO_2 通量贡献区存在差异,通量贡献区分布与各时期主风向相对应,生长季通量贡献区范围大于非生长季,夜间通量贡献区范围大于白天;90%通量贡献区的最远距离为 1300m.在该通量贡献区范围内,全年通量贡献从大到小依次为沼泽地(56.01%)、坑塘水面(20.44%)、湖泊水面(9.83%)、水工建筑用地(3.05%)、内陆滩涂(0.42%)、其他草地(0.24%),芦苇沼泽和水体对观测数据的贡献大于 80%,观测数据具有代表性.

关键词：涡度相关法；沉湖湿地；通量贡献区；FFP 模型；江汉平原
中图分类号：X83 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6975-11

Distribution characteristics of CO_2 flux footprint of Chenhu wetland ecosystem. ZHANG Ya[1], LIU Li[1*], LUO Hua[1], LIU Wan-liang[1], LI Peng[1], WANG Wei[2], XING Xin-li[3], YIN Meng[1] (1.HuBei Geological Survey, Wuhan 430034, China；2.Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China；3.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6975~6985

Abstract：Understanding the distribution characteristics of flux footprint based on the observation of carbon, water, and heat fluxes by the eddy covariance (EC) method is an important research issue. The flux footprint prediction (FFP) model was used to analyze the annual observation data of Chenhu wetland ecosystem in Hubei province in 2022, and the variation of flux contribution of eddy-related system in different time and atmospheric stability conditions was investigated. The results indicated that flux footprints of Chenhu wetland ecosystem exhibited temporal variations, with their spatial distribution corresponding to the prevailing wind directions. The coverage of flux footprints during the growing season exceeded that of the non-growing season, while the range of night-time flux contribution area was larger than that of daytime. The maximum distance in the 90% flux contribution zone was 1300m. Within this source area, the annual flux contribution is: marshland (56.01%) > pond water surfaces (20.44%) > lake water surfaces (9.83%) > hydraulic construction land (3.05%) > inland mudflats (0.42%) > other grassland (0.24%). The contribution of reed marsh and water body to the observation data was more than 80%, confirming the monitoring data were representative.

Key words：eddy covariance；Chenhu wetland；flux footprint；Flux Footprint Prediction (FFP) model；Jianghan Plain

湿地生态系统作为陆地表层最大的有机碳库,储存了约 20%~30%的陆地碳储量[1],其碳汇功能的精准量化直接关乎全球气候变化模型的预测可靠性.随着涡度相关法的发展和应用[2-4],众多学者对湿地生态系统碳通量开展了相关研究[3-6],发现不同湿地表现出不同的碳源汇属性[7-8],而相同湿地在不同时间或修复阶段[9]的碳源汇属性和碳通量大小[10]也不尽相同.受观测高度、大气边界层高度、大气稳定度等环境因素的影响,通量测量仪所测得的通量值仅代表其周围一定的区域[11],在研究时需对其通量贡献区(Footprint)的覆盖范围和时空分布进行分析.通量贡献区是指通量观测塔上风向的空间代表区域,反映了空间代表区域对应的下垫面源区内各点对通量观测的贡献[12].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,根据求解通量贡献区函数方法的差异,可以将其划分为解析模型[13]、大涡模拟模型[14]、拉格朗日模型[15]和闭合模型[16]等几类,FFP(Flux Footprint Prediction)模型[17]是基于后向拉格朗日随机粒子扩散模型(LPDM-B)发展而来的参数化通量足迹模型,主要是通过求解侧风分布积分函数计算通量源区.较其它模型,FFP 模型可以在各

收稿日期：2025-05-08
基金项目：湖北省地质局民生地质项目(MSDZ202209,MSDZ202316,MSDZ202404);湖北省地质局科技项目(KJ2024-57)
* 责任作者, 高级工程师, 2211094012@qq.com

种真实大气状况下提供通量源区估计、计算成本相对较低、运算速度更快、且适用于整个大气边界层范围内的各种边界层条件和观测高度[18],适合长期连续且长时间序列的通量贡献区计算[19].多位学者围绕 FFP 模型在不同湿地生态系统的通量研究中开展了相关应用,研究方向虽各有侧重但却延伸了 FFP 模型的使用场景:在自然湿地生态系统方面,吴琼等[20]运用 FFP 模型分析了辽河三角洲芦苇湿地的通量贡献区,常勤勤[21]则进一步结合无人机涡动相关技术,通过叠加单独子足迹并进行权重归一化,明确了盐城盐沼湿地不同地类的 CO_2 通量空间分布;在人工湿地生态系统研究中,石捷[22]借助 FFP 模型对长江三角洲典型养殖塘通量数据的空间代表性展开定量评价,王京龙[23]则在此基础上,结合遥感影像解译的养殖塘退养去向与站点监测数据,深入分析了养殖塘退养方式对 CO_2 通量的影响,进而评估其对区域碳交换的作用;此外,蒋晓雯等[24]还通过 FFP 模型对比机载通量观测系统与涡度相关系统的通量贡献区范围,证实二者贡献区基本一致,且机载系统更能体现风向的影响.FFP 模型及其改进在湿地通量贡献区领域的应用越来越广泛.

江汉平原位于长江中游、湖北省中南部,是长江中下游平原的重要组成部分,承载着长江、汉江在内的众多河流,大小湖泊遍布,湿地资源丰富且类型多样[25],在区域局部气候调节与可持续发展等各方面都起着重要作用.然而,目前 FFP 模型的应用多集中在森林[18,20,26]、草原[19]、农田[27]、城市[28]等生态系统通量贡献区的分析,在湿地生态系统中的应用较少,且多集中在河口湿地,对江汉平原内陆湖泊沼泽湿地生态系统通量贡献区分析还未展开.

本研究利用 FFP 通量贡献区模型,对江汉平原典型淡水湖泊沼泽湿地——沉湖湿地 2022 年全年的通量观测数据进行分析,探讨该湿地生态系统在不同时间跨度、不同大气条件下的通量贡献区变化情况以及不同土地类型对通量观测值的贡献,对研究区通量观测值的空间代表性作出解释,为其他湖泊湿地生态系统 CO_2 通量研究和类似下垫面的通量贡献区评估提供服务和参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

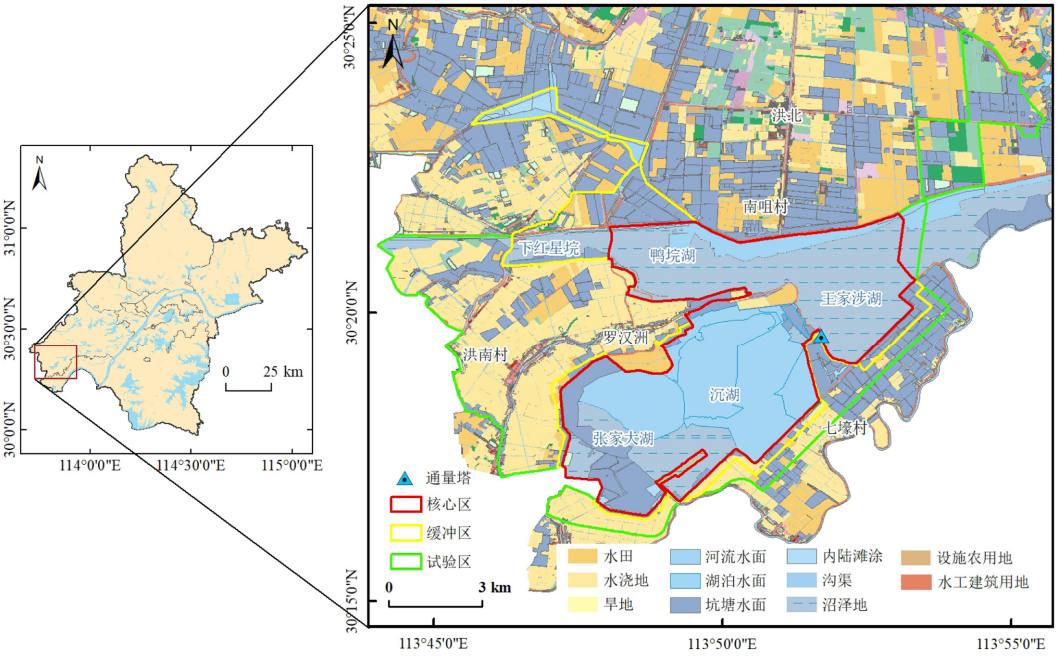


图 1 沉湖湿地通量塔位置

Fig.1 The location of eddy-covariance flux tower in Chenhu Wetland

本研究区位于武汉市蔡甸区西南部的沉湖国际重要湿地内,该湿地地处长江、汉江交汇的三角洲地带,地理坐标位置 30°15′10″~30°24′44″N,113°44′07″~113°55′39″E,海拔在 17.5~21m 之间,主要

由沉湖、张家大湖、王家涉湖和杜家台分蓄洪区部分区域组成,属北亚热带大陆性季风气候.研究区内通量监测设备于 2021 年 1 月安装完成,位于沉湖湿地核心区与缓冲区交界地带,通量观测站点设在图 1 所示位置(30°19′37″N,113°51′42″E).基于观测得到的气象数据,在 2022 年间,研究区域夏季盛行东南风,冬季盛行东北风,年平均风速为 2.4m/s,年平均气温为 18.9℃,年降雨量为 571.0mm,年均相对湿度为 70.9%.研究区下垫面平坦,通量塔西侧为呈块状的退养池塘和开阔湖面,通量塔东北侧为湖沼草甸,主要植被类型为混生的芦苇(*Phragmites australis*)、苔草(*Carex argyi*)群落,芦苇平均冠层高度为 3.5m.本研究选取了 2022 年 1 月 1 日~2022 年 12 月 31 日共 12 个月的通量观测数据进行通量贡献区分析.

1.2　观测仪器

该区域安装的涡度相关系统设备搭载在通量塔 8m 高度处,主要由闭路红外 CO_2/H_2O 气体分析仪(CPEC310, Scientific,MS,USA)、三维超声风速计(CSAT3A,Campbell Scientific)和数据采集器(CR6, Campbell Scientific)组成.常规气象要素测量系统包括安装高度为 8m 的光合有效辐射传感器(LI190R−L,Li−COR,Lincoln,NE,USA)和四分量净辐射传感器(SN−500−SS,Apogee,USA),用于测量光合有效辐射和净辐射.同时在相同高度处测量空气温湿度(HMP155A)、降水量和风速风向.地面以下 20 和 50cm 布设土壤温度(TCAV−L)、土壤水势(257−L)、土壤热通量(HFP01−L).

1.3　通量数据质量控制

原始数据的采集频率为 10Hz,每半小时输出 1 组平均值记录在数据采集器中.实时观测数据通过数据采集器的在线处理程序 EasyFlux−DL 完全校正(包括数据过滤、二次坐标旋转,频率补偿订正,超声温度通量水分修正,潜热和 CO_2 空气密度订正等)后全部输出半小时通量观测结果.

由于系统维护、电压不稳、断电等事件导致涡度相关系统采集到的原始数据存在异常值或数据缺失现象.通量数据的处理按照 ChinaFLUX 推荐的通量数据处理标准流程进行.EasyFlux−DL 程序输出的 30min 通量值仍存在一些野点,需进行如下过滤剔除,以减少数据的不确定性:(1)设备故障时测得的数据;(2)昼间与光辐射趋势不同的数据;(3)质量等级为 9(数据质量差)[29]的通量数据;(4)夜间净碳交换(NEE)为负值的数据;(5)夜间摩擦速度(u*)小于 0.1m/s[30−31]时(湍流发展不充分)对应的 NEE 数据;(6)剔除仪器测量范围外的 NEE 值,即 CO_2 通量超出 −2.64~1.32mg/(m^2·s)范围的值.基于以上数据质量控制原则,本研究保留了 2022 年 86.8%的白天数据和 43.8%的夜间数据用于通量贡献区分析,总的剔除率低于 50%,数据具有代表性[32].

1.4　通量贡献区模型

通常观测塔上传感器所测得的通量值是某一时刻迎风方向上对观测值有影响的下垫面区域的碳源或碳汇强度,该区域即为通量贡献区[33].FFP[20]通量贡献区模型是 Kljun 等[17]在后向拉格朗日随机粒子扩散模型(LPDM−B)基础上开发的,主要用于求解侧风分布积分函数,表达式如下:

$$f(x,y)=\overline{f^{y}}(x)\frac{1}{\sqrt{2\Pi\delta_y}}\exp(-\frac{y^2}{2\delta_y^2}) \tag{1}$$

式中:y 为到足迹中心线(x 轴)的侧风距离;δ_y 为侧风距离的标准差.

利用无量纲的上风距离(X^*)表示侧风积分足迹的无量纲函数 F^{y^*},并通过参数化拟合得到 $F^{y^*}(X^*)$ 的拟合参数 $\hat{F}^{y^*}(\hat{X}^*)$:

$$\hat{F}^{y^*}=a(\hat{X}^*-d)^b\exp(\frac{-c}{\hat{X}^*-d}) \tag{2}$$

式中:a、b、c、d 均为通过 LPDM−B 模型计算出的拟合参数,均与空气动力学粗糙度(Z_0)有关.

表 1 为运行 FFP 模型输入的参数,所有输入参数均可由观测数据获得.输出参数为 10%~90%通量贡献率的区域至涡度相关系统的距离.Kljun 等[17,34]还提供了该模型的在线数据处理网站(http://footprint.kljun.net/index.php),本研究使用此模块研究武汉市沉湖湿地生态系统通量贡献区.

表 1　FFP 模型的输入参数

Table 1　Input parameters of the FFP model

变量	变量描述	单位
Z_m	有效动力学高度	m
d	零平面位移	m
Z_0	空气动力学粗糙度	m
$\overline{u}$	半小时平均风速	m/s
L	Obukhov 长度	m
δ_v	侧风标准差	
u^*	摩擦速度	m/s
WD	风向	°

2 结果与分析

2.1 模型输入参数特征

由FFP足迹模型获得生长季和非生长季在不同稳定度下的贡献值为 90%的足迹.其中,大气稳定度以 Z_m/L 为判断标准,$Z_m/L>0$ 表示大气处于稳定层结状态,$Z_m/L<0$ 表示大气处于不稳定层结状态,其中 Z_m 取观测高度 8m,本研究用 $L>0$ 表示大气稳定状态,用 $L<0$ 表示大气不稳定状态.生态系统通量贡献区的分布范围与风速和风向密切相关,因此计算通量贡献区时需考虑各时期风速和风向的分布情况.观测点 2022 年一整年的风向和风向分布频率如表 2 和图 2 所示,观测点主导风向随时间变化,生长季(4~9 月)呈多风向特征(西南、东北、东南风频率分别为 27.05%、26.65%、26.31%),未达到传统主导风向阈值(≥30%)[20];而非生长季(1~3 月,10~12 月)主导风向为东北风(占 45.93%).从 1~12 月主导风向有自北向东北、东南、西南再向北变化的趋势.

表 2 不同时期不同风向的风频

Table 2 Frequency of wind in different directions at different periods

时间	风频(%)				风速(m/s)		
	东北风 0~90°	东南风 90°~180°	西南风 180°~270°	西北风 270°~360°	最小风速	最大风速	平均风速
生长季(4~9 月)	26.65	26.31	27.05	19.99	0.12	22.65	4.07
非生长季 (1~3 月,10~12 月)	45.93	14.18	14.09	25.79	0.15	15.91	3.60
全年	35.84	20.53	20.88	22.75	0.12	22.65	3.84

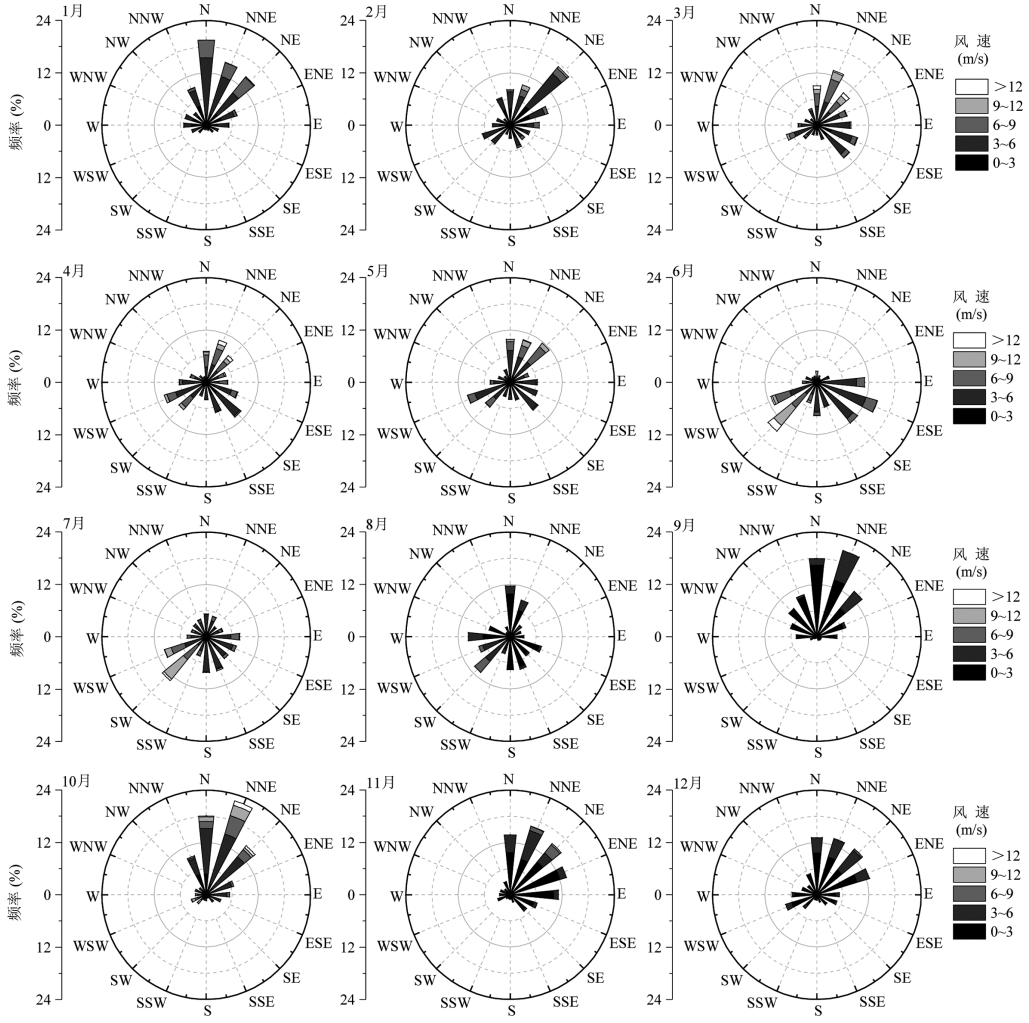


图 2 沉湖湿地 2022 年风速、风向玫瑰图

Fig.2 The wind rose charts for Chenhu Wetland in the year 2022

2022 年平均风速为 3.84m/s,最大风速为 22.65m/s,且风速以 0~6m/s 为主.月均风速的变化范围为 1.92~2.92m/s,月间差异介于 0.94~2.21m/s(图 3a).各月昼夜风速差异明显,白天(1.26~4.08m/s)比夜间(1.14~3.20m/s)大 9.52%~21.57%.生长季昼夜间风速差异大于非生长季, 7 月最大(54.07%),8 月次之(35.65%),11 月最小(0.41%).

摩擦速度年均值为 0.21m/s,季节差异较小(0.16~0.26m/s).月平均摩擦速度介于 0.11~0.30m/s,月间差异介于 0~0.19m/s(图 3b).月平均摩擦速度白天为 0.20~0.30m/s,夜间为 0.11~0.20m/s,摩擦速度白天大于夜间.

侧风标准差年均值为 0.51m/s,季节差异较小(0.43~0.59m/s).月均侧风标准差为 0.33~0.69m/s,月间差异介于 0~0.36m/s(图 3c).月平均侧风标准差白天为 0.49~0.69m/s,夜间为 0.33~0.48m/s,侧风标准差白天大于夜间.

各月大气稳定度特征差异较小(图 3d).各月大气稳定条件占 42.74%~56.69%,不稳定条件占比 57.26%~43.31%.各月间昼夜间差异较大,白天大气以不稳定状态为主(70.28%~84.53%),而夜间以稳定状态为主(16.08%~26.92%).

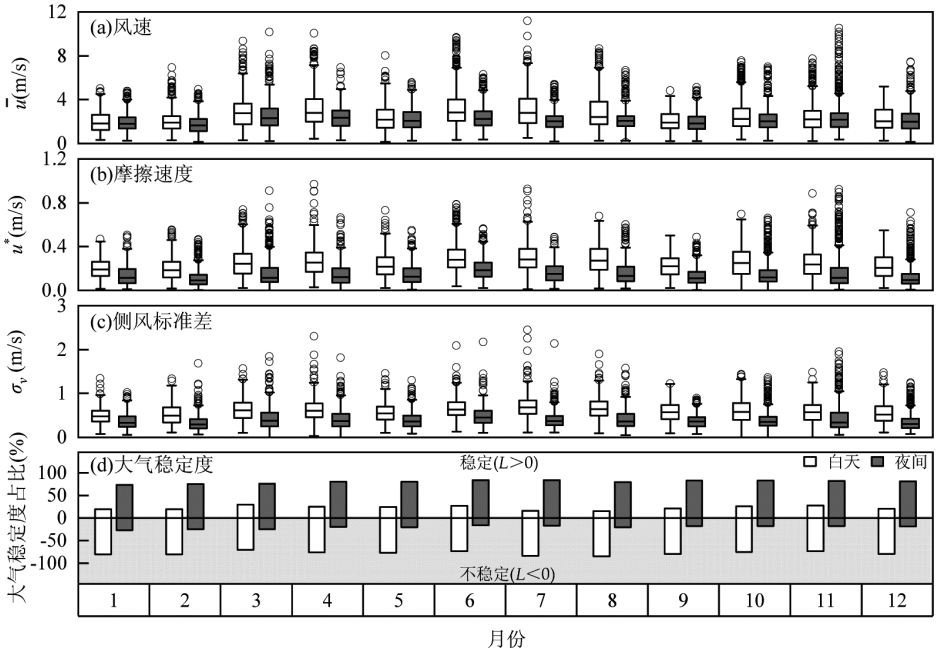


图 3　2022 年沉湖湿地风速、摩擦速度、侧风标准差和大气稳定度占比月变化特征

Fig.3　The monthly variation characteristics of wind speed ($\bar{u}$), friction velocity (u^*), crosswind standard deviation (σ_v), and atmospheric stability (L) proportion for Chenhu Wetland in the year 2022

2.2　不同大气层结状态下的通量贡献区分布

不同大气层结状态下足迹结果(由内向外 10%~90%)如图 4 所示.沉湖湿地生长季和非生长季通量贡献区形状和延伸方向相似,但最大贡献度所在方位存在差异,大气稳定状态下的通量贡献区范围整体大于大气不稳定状态下的通量贡献区范围.生长季和非生长季通量贡献区形状均以塔体为中心向四周扩展,且延伸方向有所不同.生长季通量贡献区显示西南部的贡献度明显大于东北部的贡献度,而非生长季则相反.生长季,大气不稳定条件下,90%通量贡献区在观测塔西南侧 830m 范围内;在大气稳定条件下,90%通量贡献区在观测塔 1153m 范围内,并随主风向变化.非生长季,大气不稳定条件下,90%通量贡献区在观测塔东北侧 764m 范围内;在大气稳定条件下,90%通量贡献区在观测塔东北侧 1300m.与大气稳定条件相比,不稳定条件下 90%通量贡献区的上风平均局里较短,通量贡献区要小得多,这与纪小芳等[35]对凤阳山针阔叶混交林下垫面源区的研究结果一致.这是因为在不稳定的大气中,大气的垂直运动强烈,物质能量的上升输送速度很快,涡流更易形成和传播,通量塔所测得的通量来自上风向更短距离[18,36].

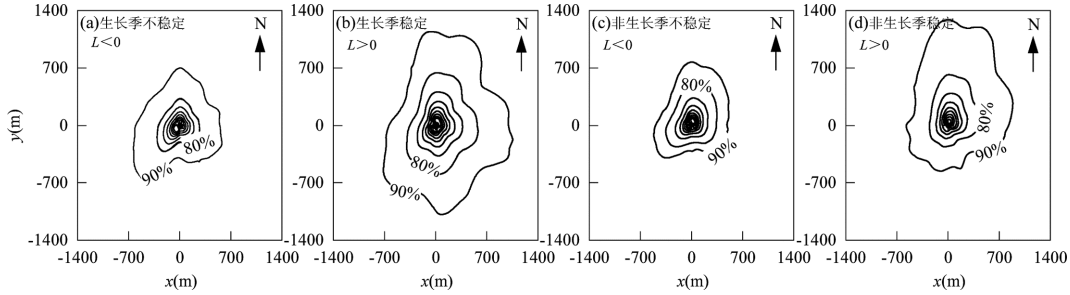


图 4 生长季和非生长季不稳定状态及稳定状态通量贡献区范围

Fig.4 Distribution of footprints under different atmospheric conditions during the growing season and non-growing season

对大气稳定和不稳定条件的发生时间进一步分析发现,生长季和非生长季白天稳定条件占比分别为 13.10%和 26.99%;夜间稳定条件占比分别为 80.85%和 78.27%(图 5).白天,大气不稳定条件出现的频率多于稳定;夜间则稳定条件出现的频率多于不稳定.结合各风向风频数所占比例,通过计算各风向不同大气稳定度条件下在时间上的分布可知,生长季,在大气稳定条件下,0°~90°、90°~180°、180°~270°和 270°~360°风向的通量贡献区分别占 14.02%、15.19%、8.69%、8.85%;在大气不稳定条件下, 0°~90°、90°~180°、180°~270°和 270°~360°风向的通量贡献区分别占 12.44%、10.99%、18.20%、11.64%(图 6).非生长季,在大气稳定条件下,0°~90°、90°~180°、180°~270°和 270°~360°风向的通量贡献区分别占 26.32%、6.80%、5.10%、14.36%;在大气不稳定条件下,0°~90°、90°~180°、180°~270°和 270°~360°风向的通量贡献区分别占 19.97%、7.70%、8.79%、10.97%.综合以上数据信息可得,生长季观测点的通量主要来自西南、东北和东南方向,所占比例分别为 26.88%、26.46%和 26.17%,而来自西北的通量信息相对较少,占 20.49%;非生长季观测点的通量主要来自东北和西北方向,所占比例分别为 46.28%和 25.33%,而来自东南和西南的通量信息相对较少,分别占 14.50%和 13.89%.

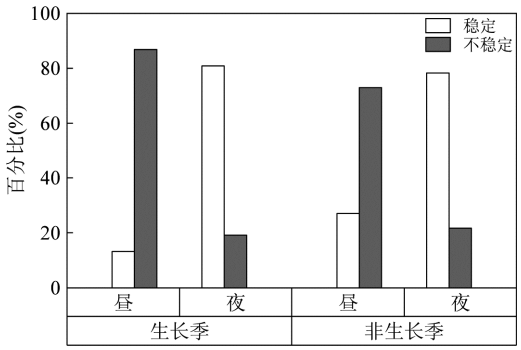


图 5 生长季和非生长季昼夜大气层结条件的分布

Fig.5 Distribution of atmospheric stability conditions during the growing season and non-growing season

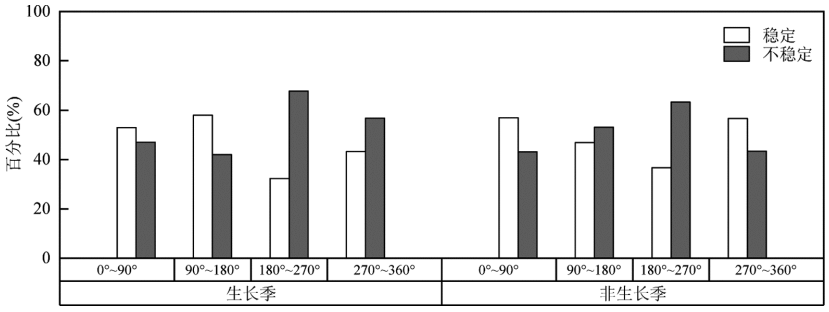


图 6 不同风向的大气层结条件的分布

Fig.6 Distribution of atmospheric stratification conditions in different wind directions

2.3 通量贡献区的日变化特征

本研究选取了生长季和非生长季无降水且太阳辐射呈单峰型曲线的典型晴天,以半小时通量数据为步长对通量贡献区的日变化特征进行了分析.在生长季(5 月 5 日)观测到的 90%通量贡献区最远点距离变化如图 7a 所示:夜间大气稳定状态下, 90%通量贡献区最远点的距离波动较大,距离主要分布在 812~1382m;从 05:00~06:00 由夜间大气稳定状态转为白

天大气不稳定状态时,90%通量贡献区最远点的距离急剧下降,08:00~17:30 白天大气不稳定状态下通量贡献区最远点的距离较其他时间稳定,且稳定在640m左右;18:00之后大气逐渐转变为稳定状态,通量贡献区最远点的距离开始增大.在非生长季(12 月 16 日)观测到的 90%通量贡献区最远点距离变化如图 7b 所示:夜间大气稳定条件,上风向距离波动较为剧烈,主要分布在 600~1000m;而在白天大气不稳定条件下,上风向距离主要分布在 650~850m,最大上风向距离为 838m.通量贡献区日变化特征明显,夜间通量贡献区范围相较白天更大,且波动更强烈,生长季白天和夜间通量贡献区的差异较非生长季显著.

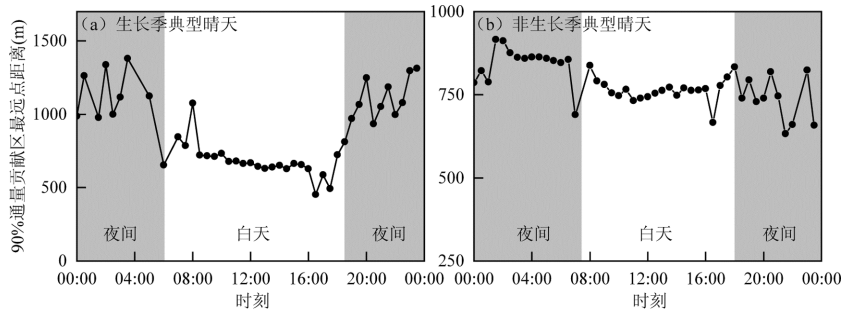


图 7　生长季、非生长季典型日期 90%通量贡献区上风向距离日变化

Fig.7　Daily variation in distance from the upwind side of the 90% flux contribution zone during growing and non-growing seasons

2.4　不同下垫面的通量贡献率

下垫面的土地利用类型对通量值有重要影响,所以能将两者进行结合,可对源区不同下垫面对通量观测的贡献有更加直观的认识.本研究选取 2000×2000m 的研究区范围(图 8a)结合 FFP 模型进行定量化分析,确定全年 90%通量贡献区内的不同下垫面对通量的贡献率(图 8c).从图中可以看出源区贡献从大到小依次为沼泽地、坑塘水面、湖泊水面、水工建筑用地、内陆滩涂、其他草地,湿地自然土地利用的下垫面对观测数据的贡献大于 80%[37],观测数据具有代表性.

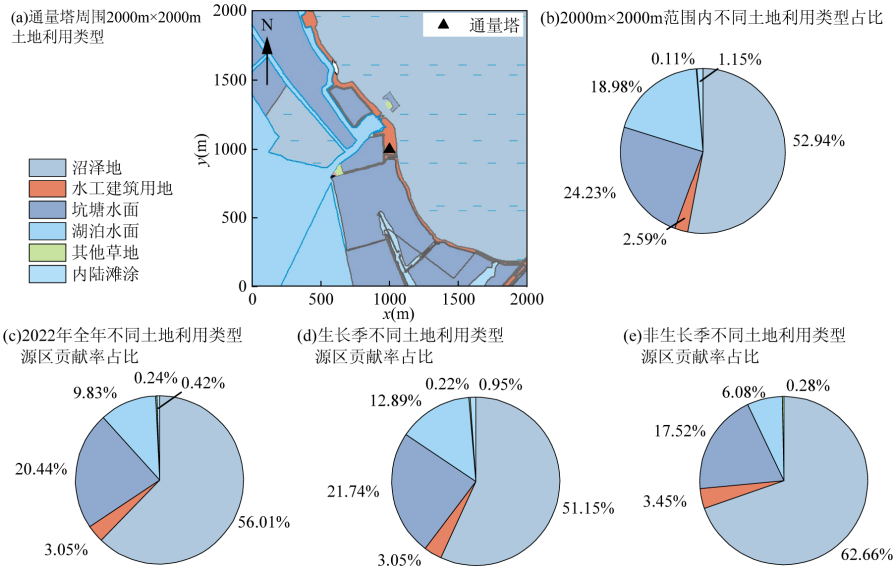


图 8　不同土地利用类型的源区贡献率占比

Fig.8　The proportion of source area contribution rate of different land land use types

结合图 8b 可以看出通常下垫面的面积越大,其占比就较大.通量塔周围 2000×2000m 范围内,沼泽地的面积是湖泊水面的 2.79 倍,但其贡献百分比却是湖泊水面的 5.70 倍,且生长季和非生长季沼泽地源区贡献率占比均超过 50%(图 8d、图 8€),沼泽地在对该湿地研究区的碳汇功能评估有重要作用.水面在生长季贡献率(坑塘水面 21.74%+湖泊水面 12.89%)占比高于非生长季(坑塘水面 17.52%+湖泊

水面 6.08%),而沼泽地在非生长季贡献率(62.66%)占比高于生长季(51.15%),这与生长季和非生长季风向变化相一致(表 2).沉湖通量塔周边沼泽地生长大片芦苇,沼泽地上生长的芦苇为通量传感器提供了大部分的碳通量信息,同时水体的通量贡献也不可忽视.该区域内的水工建筑用地主要为控水闸坝,其本身的 CO_2 通量理论上可以忽略不计.

3 讨论

风向和风速是影响通量贡献区的主要因素,风向控制通量的来源方向[18],风速决定着源区边界与观测点之间的距离[20].研究区生长季主要为东北、西南、东南风,非生长季主风向为东北风,西北风次之(表 1).图 3 显示生长季和非生长季通量贡献区分布与主风向相对应.同时,风速与贡献区面积呈一定正相关(R^2=0.3726)(图 9a).通量贡献区面积大小受大气稳定度、观测高度以及下垫面粗糙度等多种因素的影响[38].本研究中大气稳定状态下的通量贡献区范围比大气不稳定状态下大,这与吴琼等[36]对辽河三角洲芦苇湿地、陈梓涵等[39]对长江口九段沙盐沼湿地的研究结论一致.与观测高度不同的通量监测站对比发现:北海湿地[40]通量观测高度为 1.5m,90%通量贡献区为观测塔 100m 范围内;崇明东滩湿地[38]通量观测高度为 6m,90%通量贡献区在观测塔 400m 范围内,均小于本研究的通量贡献区的最远分布范围 1300m.分析发现这很可能是因观测高度不同导致,本研究中观测高度为 8m,参考王紫昕等[41]对青藏高原典型下垫面通量印痕敏感性的分析,当模型输入参数中湿地观测高度增加 50%或减小 50%时,90%通量贡献区范围最远点距离分别增大 83%或减小 67%,随着观测高度增加,90%通量贡献区最远点距离增大,影响通量观测数据的范围增大.根据 Gash[42]介绍的经验参数,风浪区与测量高度比值达到 100:1 时,通量数据能代表下垫面特征.本监测站点 2022 年 90%通量贡献区平均最远距离为 974m,与测量高度(8m)比值为 121.75:1,能满足风浪区长度与测量高度之比不小于 100:1 的条件,因此本研究结果可以较准确地反映沉湖湿地生态系统的通量信息.

沉湖湿地通量足迹对称指数[26]在生长季更高(图 9b),这与侧风标准差(σ_v)在 4~8 月较高相对应,研究表明[43],σ_v 是影响通量贡献区宽度的风分量,σ_v 越大,通量贡献区越宽,同时它也能指示大气边界层湍流强度,σ_v 越大,湍流强度越强,通量贡献区范围越大.通量足迹对称指数的季节性变化,可能是由于 2022 年武汉较常年气温偏高、降水分布不均、极端天气频发,沉湖湿地全年降雨(571mm)虽低于 2011~2021 年武汉市降雨量均值(1320.46mm)[44],但其生长季降雨仍较非生长季充沛,降雨在一定程度上缓解了厄尔尼诺-南方涛动对气象变量异常的影响[45].

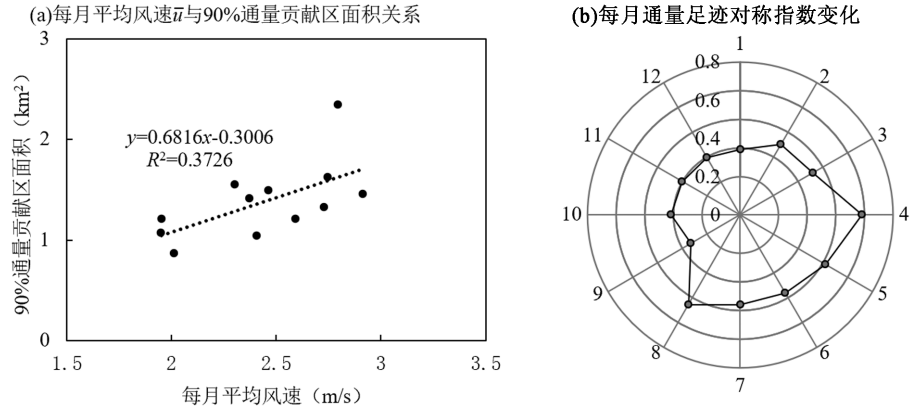


图 9 2022 年不同月份平均风速与 90%通量贡献区面积关系及沉湖湿地通量足迹对称指数变化

Fig.9 Relationship between average wind speed and area of the 90% flux contribution zone and symmetric index variation of flux footprint in Chenhu Wetland across different months in 2022

FFP 模型能较为准确地计算出湿地站点通量贡献区的范围,但仍存在一定的假设条件和局限性[46].FFP 模型假设地表平坦、下垫面均质,对大气稳定度参数(Obukhov 长度 L)的适用范围有限.而沉湖湿地实际下垫面存在东西向分异(东侧沼泽、西侧水域)与微小地形起伏(高程差 0.5~2m),可能导致通量贡

献区范围估算偏差.此外,2022 年极端干旱与水文波动(水位年变幅 1.8m),部分坑塘水面和湖泊水面在干旱持续下干涸,导致部分浅水区域水位降低转变为裸露滩涂,下垫面为滩涂时地表粗糙度高于水面[47],而粗糙度与稳定度呈正相关,与风速呈负相关,摩擦速度随粗糙度增大而减小[48],极端干旱加剧了由地表粗糙度不均匀性所致的平均风速、位温梯度及近地层大气稳定度等的分布对陆气相互作用的影响[49],对通量源区的解析产生较大影响,使当年通量变化异于往常,难以与其他年份比较以解析年际气候影响.未来研究需融合高分辨率遥感与无人机数据优化地表参数,开发动态校准方法(如机器学习修正 L 敏感性),并通过长期多站点观测与多模型对比,提升湿地复杂环境下的通量贡献区模拟精度.

4　结论

4.1　沉湖湿地2022年生长季呈多风向特点,而非生长季主导风向为东北风,风向随时间变化.

4.2　生长季,大气稳定状态下,90%通量贡献区在观测塔 1153m 范围内,而不稳定状态下 90%通量贡献区在观测塔西南侧 830m 范围内;非生长季,大气稳定状态下,90%通量贡献区在观测塔 1300m 范围内,而不稳定状态下 90%通量贡献区在观测塔西南侧 764m 范围内.大气稳定状态下通量贡献区及其最远点距离均大于大气不稳定状态下其对应的值.

4.3　通量贡献区日变化特征明显,夜间通量贡献区范围大于白天.

4.4　源区贡献从大到小依次为沼泽地、坑塘水面、湖泊水面、水工建筑用地、内陆滩涂、其他草地,沼泽地、水面对湿地碳汇功能评估有重要作用.

参考文献：

[1] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, et al. Wetlands, carbon, and climate change [J]. Landscape Ecology, 2013,28(4):583−597.

[2] 刘　硕,甄晓杰,刘　钢,等.我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 [J]. 环境科学, 2022,43(4):2151−2162.
Liu S, Zhen X J, Liu G, et al. Changing characteristics of carbon−based greenhouse gas fluxes in paddy field in the Middle−Lower Yangtze Plain in China [J]. Environmental Science, 2022,43(4): 2151−2162.

[3] 王　涛,邓正苗,谢永宏,等.2014~2016 年洞庭湖湿地南荻生态系统二氧化碳通量观测数据集 [J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2023,8(2):26−35.
Wang T, Deng Z M, Xie Y H, et al. A dataset of carbon dioxide flux observation of the Miscanthus sacchariflorus ecosystem of Dongting Lake Wetland from 2014 to 2016 [J]. China Scientific Data, 2023, 8(2):26−35.

[4] 贾庆宇,温日红,周　莉,等.2018~2020 年盘锦芦苇湿地碳水通量数据集 [J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2023,8(2):58−69.
Jia Q Y, Wen H R, Zhou L, et al. An dataset of carbon and water fluxes over the reed wetlands in Panjin City(2018~2020) [J]. China Scientific Data, 2023,8(2):58−69.

[5] Au−Aff O A. A dataset of microclimate and radiation and energy fluxes from the Lake Taihu eddy flux network [J]. Earth System Science Data, 2020,12(4):2635−2645.

[6] 陈芃深.基于涡度相关观测的图们江下游敬信湿地 CO_2 通量变化特征及其影响因素分析 [D]. 延吉:延边大学, 2024.
Chen P S. Characteristics and influencing factors of CO_2 flux change in Jingxin wetland in the lower reaches of Tumen River based on eddy correlation observations [D]. Yanji: Yanbian University, 2024.

[7] 王永志,刘胜林.黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳通量动态特征及其影响因素 [J]. 生态环境学报, 2021,30(5):949−956.
Wang Y Z, Liu S L. Dynamic characteristics and influencing factors of carbon and water flux in reed wetland ecosystem in the Yellow River Delta [J]. Ecology and Environment Sciences, 2021,30(5):949−956.

[8] Liu Z, Ge J, Yang S, et al. Carbon dioxide and methane fluxes in the growing and non−growing season in the Dajiuhu subtropical peatland: A five−year measurement using the eddy covariance technique [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2024,355:110135.

[9] 刘思琪.辽河口“退塘还湿”修复区盐沼湿地生态系统 CO_2 交换及其影响机制 [D]. 上海:上海海洋大学, 2024.
Liu S Q. Ecosystem CO_2 exchange and its environmental regulation of a restored salt marsh wetland in Liao River Estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2024.

[10] 肖启涛.太湖 CH_4 通量的空间格局及影响因子分析 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2017.
Xiao Q T. Spatial pattern of CH_4 flux and its impact factors analysis in Lake Taihu [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017.

[11] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface−based flux measurements [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1996,78 (1/2):83−105.

[12] 吴东星,李国栋,张　茜.华北平原冬小麦农田生态系统通量贡献区 [J]. 应用生态学报, 2017,28(11):3663−3674.
Wu D X, Li G D, Zhang Q. Flux footprint of winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(11):3663−3674.

[13] Schmid H P, Oke T R. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010,116(494):965−988.

[14] Flesch T K. the footprint for flux measurements, from backward lagrangian stochastic models [J]. Boundary−layer Meteorology, 1996, 78(3/4):399−404.

[15] Horst T W, Weil J C. How far is far enough: The fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994,11(4):1018−1025.

[16] Leclerc M Y, Shen S, Lamb B. Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997,102 (D8):9323-9334.

[17] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, et al. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP) [J]. Geoscientific Model Development, 2015,8(11):3695-3713.

[18] 张 焱,张胤洲,叶 京,等.山地森林下垫面湍流通量贡献区时空特征及其影响因素研究 [J]. 气候与环境研究, 2024,29(3):253-266.
Zhang Y, Zhang Y Z, Ye J, et al. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of turbulent flux contribution zones on mountain forest underlying surfaces [J]. Climatic and Environmental Research, 2024,29(3):253-266.

[19] 晨 阳,李慧融,李冬楠,等.锡林浩特草原净生态系统碳交换量特征及源区分布 [J]. 应用生态学报, 2023,34(6):1509-1516.
Chen Y, Li H R, Li D N, et al. Characteristics of net ecosystem exchange and source distribution of Xilinhot grassland, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(6):1509-1516.

[20] 吴 琼,温日红,贾庆宇,等.辽河三角洲芦苇湿地碳通量特征及空间代表性 [J]. 气象与环境学报, 2023,39(5):72-81.
Wu Q, Wen R H, Jia Q Y, et al. Characteristics and spatial representativeness of carbon flux of Phragmites communis wetland in the Liaohe River Delta, China [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023,39(5):72-81.

[21] 常勤勤.基于无人机涡动相关观测的典型滨海湿地区域尺度碳通量空间特征研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2023.
Chang Q Q. Study of the spatial characteristics of carbon flux at regional scale in typical coastal wetlands using UAV-based eddy covariance observation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.

[22] 石 婕.长江三角洲典型养殖塘 CO_2 通量的时间变化及影响因素 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2022.
Shi J. Temporal variation of CO_2 flux and its influencing factors in typical aquaculture ponds of the Yangtze River Delta [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.

[23] 王京龙.养殖水域退养对 CO_2 通量的影响研究--以上海市青浦区为例 [D]. 上海:上海海洋大学, 2024.
Wang J L. Study on the impact of aquaculture water retirement on CO_2 Flux: A case study of Qingpu District, Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2024.

[24] 蒋晓雯,周广胜,宋兴阳.机载通量观测系统在芦苇湿地 CO_2 通量观测中的应用 [J]. 应用生态学报, 2025,36(4):1189-1196.
Jiang X W, Zhou G S, Song X Y. Application of multi-rotor UAV-borne flux observation system in carbon dioxide flux monitoring of reed wetland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(4):1189-1196

[25] 崔军丽.江汉平原近百年湖泊湿地格局演变特征研究 [D]. 郑州:河南大学, 2021.
Cui J L. Study on the evolution characteristics of lake wetland pattern in Jianghan Plain in the past 100years [D]. Zhengzhou: Henan University, 2021.

[26] Abdaki M, Sanchez-Azofeifa A, Vargas R, et al. Spatial and temporal variation of three eddy-covariance flux footprints in a tropical dry forest [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2024,345:109863.

[27] 张凯迪,姚 筠,凌新锋,等.淮河流域稻麦轮作农田生态系统通量源区分布特征 [J]. 生态学杂志, 2024,43(10):3113-3120.
Zhang K D, Yao Y, Ling X F, et al. Distribution characteristics of flux source of rice-wheat rotation agroecosystem in Huaihe River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(10):3113-3120.

[28] 张凯迪,龚 元,郭智娟,等.2011和2016年亚热带城市生态系统通量源区及 CO_2 通量特征——以上海市奉贤大学城为例 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2018,47(4):458-465.
Zhang K D, Gong Y, Guo Z J, et al. Flux source area and CO_2 flux characteristics of subtropical urban ecosystem in 2011and 2016: A case study of Shanghai Fengxian University City [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2018,47(4):458-465.

[29] Foken T, Leuning R, Oncley S R, et al. Corrections and data quality control [J]. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis, 2012:85-131.

[30] Zhu Z, Sun X, Wen X, et al. Study on the processing method of nighttime CO_2 eddy covariance flux data in ChinaFLUX [J]. Science in China(Series D:Earth Sciences), 2006,49(S2):36-46.

[31] Li X, Jia Q, Liu J. Seasonal variations in heat and carbon dioxide fluxes observed over a reed wetland in northeast China [J]. Atmospheric Environment, 2016,127:6-13.

[32] 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.
Gong X F, Chen L P, Mo L F. Research of flux footprint of *Anji Bamboo* Forest ecosystems based on the FSAM model [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2015,35(6):37-44.

[33] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1997,87(2/3):179-200.

[34] Kim, Hwang, Schaaf, et al. Seasonal variation of source contributions to eddy-covariance CO_2measurements in a mixed hardwood-conifer forest [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2018,253-254(1): 71-83.

[35] 纪小芳,龚 元,郑 翔,等.凤阳山针阔混交林通量观测源区分布及特征 [J]. 生态学报, 2020,40(20):7377-7388.
Ji X F, Gong Y, Zheng X, et al. Distribution and characteristics of flux footprint of coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Fengyang Mountain of Zhejiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(20):7377-7388.

[36] 吴 琼,温日红,贾庆宇,等.辽河三角洲芦苇湿地碳通量特征及空间代表性 [J]. 气象与环境学报, 2023,39(5):72-81.
Wu Q, Wen H R, Jia Q Y, et al. Characteristics and spatial representativeness of carbon flux of *Phragmites communis* wetland in the Liaohe River Delta, China [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023,39(5):72-81.

[37] Göckede M G, Foken T, Aubinet M, et al. Quality control of CarboEurope flux data-Part 1: Coupling footprint analyses with flux data quality assessment to evaluate sites in forest ecosystems [J]. Biogeosciences, 2008,5(2):433-450.

[38] 王江涛,周剑虹,欧 强,等.崇明东滩滨海围垦湿地 CO_2 通量贡献区分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2014,30(5):588-594.
Wang J T, Zhou J H, Ou Q, et al. CO_2flux footprint analysis of coastal polder wetlands in Dongtan of Chongming [J]. Journal of Ecology and

Rural Environment, 2014,30(5):588−594.

[39] 陈梓涵,黄　颖,唐剑武,等.长江口九段沙盐沼湿地生态系统通量贡献区分析 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021,(2):42−53.
Chen Z H, Huang Y, Tang J W, et al. Flux footprint analysis of a salt marsh ecosystem in the Jiuduansha Shoals of the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2021, (2):42−53.

[40] Du Q, Liu H, Liu Y, et al. Water and carbon dioxide fluxes over a “floating blanket” wetland in southwest of China with eddy covariance method [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2021,311:108689.

[41] 王紫昕,仲　雷,马耀明,等.青藏高原典型下垫面通量印痕特征分析 [J]. 高原气象, 2023,42(5):1160−1171.
Wang Z X, Zhong L, Ma Y M, et al. Characteristics of flux footprint over typical underlying surface of Qinghai−Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2023,42(5):1160−1171.

[42] Gash J H C. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements [J]. Boundary−Layer Meteorology, 1986,35(4):409−413.

[43] Heidbach K, Schmid H P, Mauder M. Experimental evaluation of flux footprint models [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2017,246: 142−153.

[44] Zhang Y, Liu L, Luo H, et al. Characteristics of carbon fluxes and their environmental control in Chenhu wetland, China [J]. Water, 2024,16:3169.

[45] Zou L, Cao S, Zhu Z, et al. Assessment of the response of tropical dry forests to El Nino southern oscillation [J]. Ecological Indicators, 2021,133:108390.

[46] Chu H, Luo X, Ouyang Z, et al. Representativeness of eddy−covariance flux footprints for areas surrounding AmeriFlux Sites [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2021,301:108350.

[47] 刘啸然.青藏高原那曲地区地表粗糙度及其在陆面模式中的应用 [D]. 成都:成都信息工程大学, 2019.
Liu X R. Surface roughness in the Naqu Region of the Qinghai−Tibet Plateau and its application in land surface models [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2019.

[48] 何　清,缪启龙,张瑞军,等.塔克拉玛干沙漠肖塘地区空气动力学粗糙度分析 [J]. 中国沙漠, 2008,28(6):1011−1016.
He Q, Liao Q L, Zhang R Y, et al. Analysis on aerodynamic roughness in XiaoTang in the Taklimakan Desert [J]. Journal of Desert Research, 2008,28(6):1011−1016.

[49] 张海宏,姜海梅,周秉荣,等.玉树隆宝 2014 年冬季冻土积雪对陆气通量关键参数的影响分析 [J]. 气象, 2019,45(11):1550−1559.
Zhang H H, Jiang H M, Zhou B R, et al. Impact analysis of frozen soil and snow on key parameters of land atmosphere flux at Longbao, Yushu in winter 2014 [J]. Meteorological Monthly, 2019,45(11): 1550−1559.

作者简介：张　雅(1993−),女,湖北武汉人,工程师,硕士,主要从事水文地球化学、湿地生态监测.发表论文 10 余篇.nanasazya@163.com.