

鄱阳湖南矶湿地净生态系统 CO₂ 交换量的日变化特征

王莉莉, 杨涛^①, 高晨, 高丹, 卢成芳, 王野乔^② (鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室/江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 利用涡度相关技术分未淹水期和淹水期对 2015 年 4 月—2016 年 10 月鄱阳湖南矶湿地净生态系统 CO₂ 交换量 (net ecosystem CO₂ exchange, NEE) 进行观测, 分析其日变化特征和影响因子。结果表明: 在未淹水期, 湿地 NEE 日变化呈现“U”型分布特征, 日间最大 CO₂ 吸收量为 18.24 μmol · m⁻² · s⁻¹, 夜间最大 CO₂ 释放量为 24.92 μmol · m⁻² · s⁻¹。在淹水期, 除较高洲滩及湖岸高地外, 植被被水面覆盖, 湿地 NEE 日变化无明显特征, 日间最大 CO₂ 吸收量为 2.29 μmol · m⁻² · s⁻¹, 夜间最大 CO₂ 释放量为 12.66 μmol · m⁻² · s⁻¹。相关分析和主成分分析表明在未淹水期南矶湿地日间 NEE 月平均日变化与光量子通量密度相关性最高, 与气温、降水、土壤含水量和土壤温度的相关性次之, 夜间 NEE 月平均日变化与气温、土壤温度和土壤含水量相关性较高。在淹水期, 南矶湿地日间 NEE 月平均日变化与光量子通量密度、土壤含水量有关, 夜间变化与土壤温度、土壤含水量和气温有关。

关键词: 净生态系统 CO₂ 交换量; 涡度相关; 南矶湿地; 鄱阳湖

中图分类号: Q948.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2017)11-1007-06

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.11.007

Diurnal Variation of Net Ecosystem CO₂ Exchange of Nanji Wetland Ecosystem in Poyang Lake. WANG Li-li, YANG Tao, GAO Chen, GAO Dan, LU Cheng-fang, WANG Ye-qiao (Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education/ School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: With the aid of the eddy covariance technique, monitoring was carried out of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) of the Nanji Wetland National Nature Reserve, sitting in the south of Poyang Lake, for analysis of diurnal variation of NEE and its affecting factors, during non-flooding and flooding periods of April, 2015–October, 2016. Results show that during the non-flooding period, diurnal variation of NEE exhibited a typical "U" shaped curve. In the day, CO₂ uptake peaked up to 18.24 μmol · m⁻² · s⁻¹, while at the night CO₂ release did up to 24.92 μmol · m⁻² · s⁻¹. During the flooding period, the vegetation in the area was submerged by water, except for the parts in shoals and high lands around the lake. Diurnal variation of NEE in this period didn't have any distinct characteristics, and was much narrower in amplitude than that in the non-flooding period. In daytime, CO₂ uptake peaked up to 2.29 μmol · m⁻² · s⁻¹ while at night CO₂ release did up to 12.66 μmol · m⁻² · s⁻¹. Correlation analysis and principal component analysis show that during the non-flooding period, monthly mean daily NEE variation in daytime was the most closely related to photosynthetic photon quanta flux density, and then to air temperature, precipitation, soil moisture content and soil temperature, whereas at night, it was closely related to air temperature, soil temperature and soil moisture content. During the flooding period, monthly mean daily NEE variation in daytime was related to photosynthetic photon quanta flux density and soil moisture content, whereas at night, it was related to soil temperature, soil moisture content and air temperature.

Key words: net ecosystem CO₂ exchange; eddy covariance; Nanji Wetland; Poyang Lake

在人类活动的影响下, 温室气体 (CO₂、CH₄ 和 N₂O) 的持续排放是造成气候变暖的主要原因之一^[1]。研究表明: 湿地是 CO₂ 汇和 CH₄ 源^[2]。湿地植物通过自身的生命活动固定 CO₂, 同时又通过物质循环释放 CO₂ 和 CH₄。湿地在化学元素循环中, 特别是在 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体的固定和释放中起着重要的“开关”作用^[3]。湿地碳通量研究主要关注 CO₂ 和 CH₄ 的排放问题以及影响它们蓄积或

者排放的因素^[3]。目前基于微气象原理的涡度相

收稿日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (41471298); 江西省自然科学基金 (20133ACB20011); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金 (PK2016001); 江西省研究生创新专项 (YC2016-S127); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ150335)

① 通信作者 E-mail: youngspigger@163.com

② 共同通信作者 E-mail: ywang0559@126.com

关法已成为直接测定大气与群落 CO₂ 交换通量的主要方法,也是世界上 CO₂ 和水热通量测定的标准方法^[4]。

目前国内学者利用涡度相关技术已经在高寒湿地^[5-10]、河口三角洲湿地和滨海湿地^[11-16]等湿地生态系统开展了 CO₂ 通量研究。但是,目前针对亚热带湖泊湿地生态系统的有关研究相对较少,尤其是针对鄱阳湖湿地的研究则更少。胡启武等^[17-18]利用密闭箱-气相色谱法测定了非淹水期鄱阳湖苔草湿地 CO₂ 释放通量和鄱阳湖典型苔草湿地的 CH₄ 释放通量。王佳佳等^[19]利用密闭箱-气相色谱法测定了鄱阳湖星子湿地的 CH₄ 排放通量。尚未有利用涡度相关技术对鄱阳湖南矶湿地进行 CO₂ 通量观测的研究报道。

依托鄱阳湖南矶湿地野外综合试验站,利用涡度相关技术所获 CO₂ 通量数据,分析鄱阳湖南矶湿地净生态系统 CO₂ 交换量(net ecosystem CO₂ exchange, NEE)日变化特征,并探讨鄱阳湖湿地 NEE 日变化的影响因素,为亚热带湖泊湿地生态系统碳循环研究提供基础资料。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖南矶湿地综合试验站位于鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区内,该地区属亚热带湿润季风气候区,热量丰富,雨量充沛,无霜期长,四季分明。年无霜期为 246~275 d,年平均气温为 17~17.8℃,年日照时数为 2 008~2 105 h,年降水量为 1 368~1 633.8 mm^[20]。整个保护区处在水陆过渡带,土壤类型主要为草甸土、草甸沼泽土和水上沉积物,成土母质为近代河湖冲积物和沉积物等,南山和矶山岛土质为红壤土。

鄱阳湖最大的特点是年内巨大的水位变化,南矶湿地的景观随其水位变化而变化。在丰水期湿地植被被淹没,湿生草本植物进入休眠期,以沉水植物和部分挺水植物、水生植物群落为主;在枯水期,洲滩逐渐显露,大部分水生植物枯死,以苔草群落为优势种群的湿生草本植物生长茂盛^[21]。

1.2 数据来源

研究数据来源于鄱阳湖南矶自然保护区野外综合试验站,该试验站的涡度通量观测系统包括 LI-7700 开路式 CH₄ 分析仪、LI-7500A 开路式 CO₂/H₂O 分析仪、三维超声风速仪和数据采集器等,可以自动测量并存储地表与大气相互作用时近地气层的瞬时三维风速、温度、CO₂、H₂O 和 CH₄ 脉动,采

用微气象学湍流涡动协方差方法处理可获得 CO₂、H₂O 和 CH₄ 通量等地表与大气之间的物质与能量交换量数值。该系统还搭载了常规气象要素测定系统。采用 2015 年 4 月—2016 年 7 月的星子站水位数据作为参考。

1.3 数据处理

采用 Eddypro 软件(LI-COR 公司)对涡度相关仪的原始 10 Hz 数据进行处理,以 Express 版块为主要处理流程。主要处理步骤:原始采集数据经坐标旋转修正(二次坐标轴旋转),除趋势修正(块平均),数据同步(默认值下最大协方差),统计检验(异常值计数/去除、振幅分辨率、缺失值、绝对限度、偏度和峰度),密度修正,水热校正,超声虚温修正,谱修正,迎角修正,数据质量控制标记等,得到 30 min 的通量数据。由于大气稳定性、天气原因以及仪器的物理限制等影响,Eddypro 软件输出的 30 min 通量值仍然存在一些野点,需要进一步进行质量控制:(1)剔除异常值(-9999);(2)剔除降水时期的通量;(3)以每个月的光量子通量密度(photo-synthetic photon quanta flux density, PPFD) 600~1 600 μmol·m⁻²·s⁻¹为界,得出每月对应的 CO₂ 通量最大值(A_{max}),以 A_{max} 为阈值剔除该月份 CO₂ 通量极端值;(4)剔除夜间摩擦风速低于 0.1 m·s⁻¹ 的通量数据;(5)剔除夜间通量为负的数据,总计剔除数据所占比例为 30.9%。

采用数据插补方法,对通量数据进行预处理。数据插补方法如下:(1)小于 3 h 的短时缺失数据用线性内插法。(2)大于 3 h 的缺失数据,分日间数据和夜间数据分开插补。当 PPFD ≥ 1 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时,定义为日间段;当 PPFD < 1 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时,定义为夜间段。利用平均昼夜变化法,用相邻几天(7~14 d)的相同时段观测数据的平均值对日间数据进行插补;利用夜间生态系统 CO₂ 交换数据与 20 cm 深处土壤温度之间的经验公式^[22]对夜间数据进行插补,经验公式为

$$R_{\text{eco},n} = a \exp(bT_s) \quad (1)$$

式(1)中, $R_{\text{eco},n}$ 为夜间生态系统呼吸量(以 CO₂ 计), μmol·m⁻²·s⁻¹; T_s 为 20 cm 深处土壤温度,℃; a 为温度为 0℃ 时的生态系统呼吸速率(以 CO₂ 计), μmol·m⁻²·s⁻¹; b 为温度反应系数。

2 结果与分析

2.1 南矶湿地生态系统的水位变化

由于通量塔配备的水位计在 2016 年 3 月才开始投入使用,故利用 2016 年 4—7 月的星子站水位

(x) 与实测的同时期塔下水位(y) 作曲线拟合, 发现两者关系符合线性关系: $y = 0.816x - 10.902$, $R^2 = 0.988$ 。利用此方程插补 2015 年 4 月—2016 年 3 月塔下水位, 得出 2015 年 4 月—2016 年 10 月的水位变化, 见图 1。

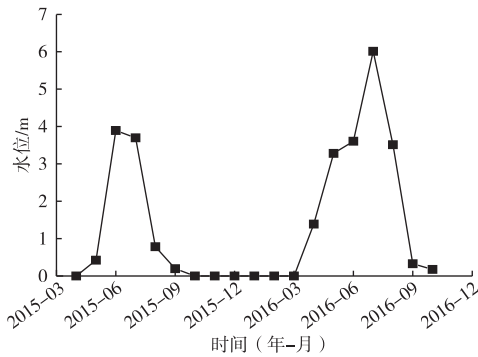


图 1 2015 年 4 月—2016 年 10 月通量塔下方的水位变化
Fig. 1 Variation of the water level below the flux tower during April, 2015 to October, 2016

由图 1 可知, 2015 年 6—7 月与 2016 年 5—8 月通量塔下方的水位较高, 并依据物候相机所摄照片, 可以获取通量塔下方处于水淹状态的时间段。湿地水文状况是影响湿地碳通量的一个重要因素, 湿地水位和土壤含水量决定着湿地生态系统中土壤的氧化还原环境, 通过影响 O₂ 的扩散速率与 CO₂

的传输速率制约着湿地土壤呼吸。因此, 根据水位变化情况, 将 2015 年 4—5 月、2015 年 8—10 月、2016 年 4 月、2016 年 9—10 月归为未淹水期, 此时湿地生态系统的植物群落主要由苔草 (*Carex cinerascens*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 和南荻 (*Triarrhena lutarioriparia*) 等组成。而 2015 年 7 月、2016 年 5—8 月为淹水期, 湿地生态系统除部分洲滩及湖岸高地还出露地表外, 植被多被湖水覆盖, 植被的光合和呼吸作用都受到影响。在退水之后的一段时间内部分植被仍具备继续生长的能力, 在次年 1—2 月逐渐有新的植被萌发生长并替代原有湿地植被群落。

2.2 南矶湿地 NEE 的日变化特征

将 2015 年 4 月—2016 年 10 月每月同时刻的半小时通量数据进行平均, 得到 NEE 的月平均日动态 (图 2)。NEE 为正值时表示生态系统向大气中释放 CO₂, NEE 为负值时表示生态系统从大气中吸收 CO₂。

由图 2 可知, 在未淹水期, 南矶湿地 NEE 日变化大致呈“U”型变化, 夜间 NEE 为正值, 表现为释放 CO₂, 日间 NEE 为负值, 表现为吸收 CO₂。这与对其他湿地的研究结果^[10, 13-14]一致。在淹水期, 南矶湿地 NEE 日变化无明显规律, 变化幅度较未淹水期小。

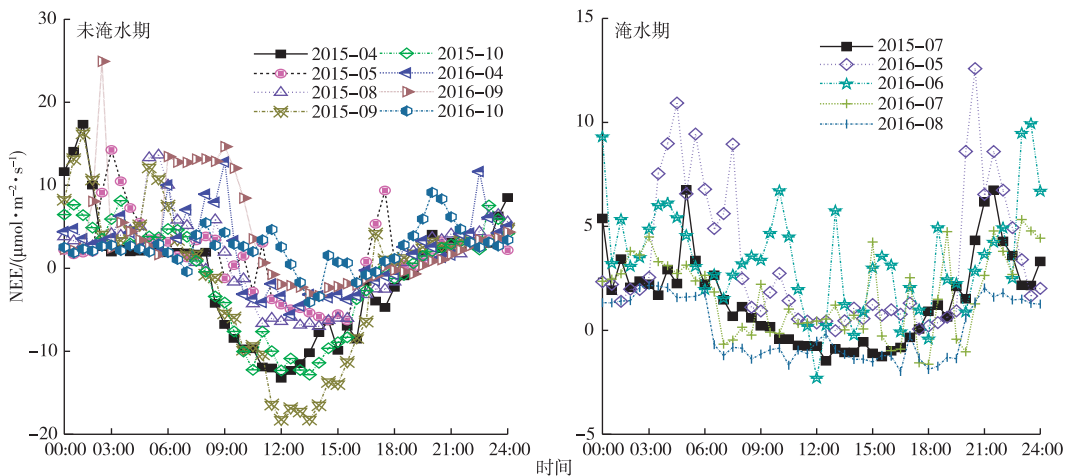


图 2 2015 年 4 月—2016 年 10 月南矶湿地净生态系统 CO₂ 交换量 (NEE) 的日变化
Fig. 2 Diurnal variation of NEE of the wetland during the period from April, 2015 to October, 2016

由图 2~3 可知, 在未淹水期, 06:30—08:00 前后, 南矶湿地 NEE 由正值 (释放) 转为负值 (吸收), 之后随着辐射增加, NEE 值逐渐变小, 中午前后 CO₂ 吸收量达到最大。之后随着辐射减弱, NEE 值逐渐

变大, CO₂ 吸收量减少, 在 17:00—18:30 前后, NEE 由负值转为正值, 之后一直呈现 CO₂ 释放状态。日间最大 CO₂ 吸收量为 18.24 μmol · m⁻² · s⁻¹, 夜间最大 CO₂ 释放量为 24.92 μmol · m⁻² · s⁻¹。其中,

2015 年 9 月 NEE 日变化幅度最大, 日间 NEE 累积量(每个月的日均 NEE 累加) 达 $-185.59 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 日间 CO_2 吸收量达 $18.24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 夜间 CO_2 释放量达 $16.26 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外, 2015 年 4、9、10 月月均日间 NEE 累积量分别为

-154.23 、 -185.59 和 $-146.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 2016 年 4、9、10 月月均日间 NEE 累积量分别为 5.20 、 80.19 和 $52.39 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 2 a 间相同时期的 3 个月之间碳交换量差别很大, 可能与 2016 年淹水期较长、植被生长受限有关。

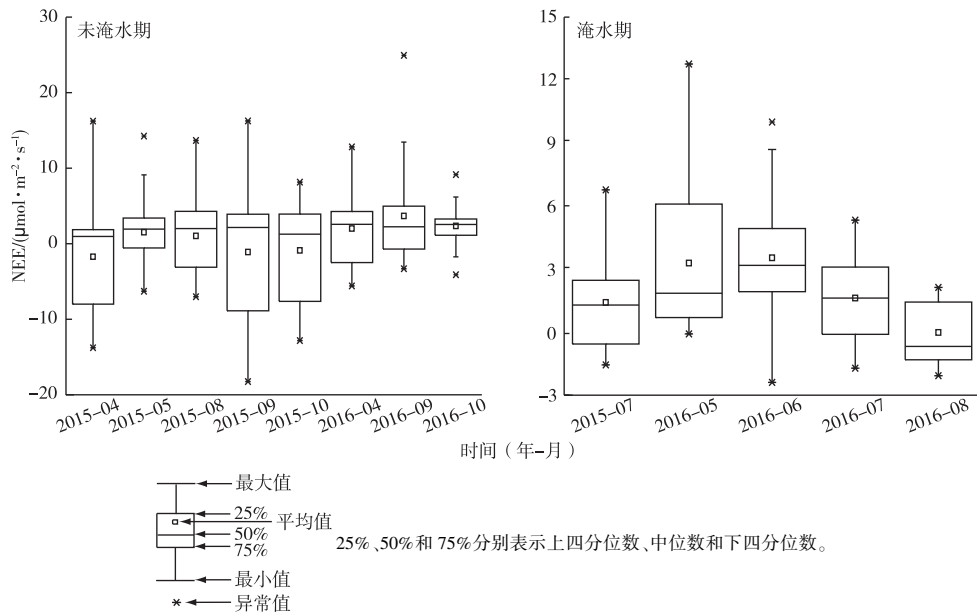


图 3 各个月份南矾湿地净生态系统 CO_2 交换量 (NEE) 的日变化均值
 Fig. 3 Mean daily variation of the NEE of the wetland in the months

由图 2~3 还可知, 在淹水期, 南矾湿地 NEE 明显低于未淹水期, 日间最大 CO_2 吸收量为 $2.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 夜间最大 CO_2 释放量为 $12.66 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在淹水期较长时间内, NEE 为正值, 表现为该生态系统向大气排放 CO_2 , 但某些月份 NEE 在 09:00—16:00 前后为负值, 说明该生态系统处于 CO_2 吸收状态, 可能与一些挺水植物进行光合作用而致 CO_2 吸收量大于释放量有关。

2.3 南矾湿地 NEE 日变化的影响因子分析

将 NEE 月平均日变化与 PPFD、气温、土壤温度等环境因子进行相关性分析(表 1~2)。在未淹水期的日间, 南矾湿地 NEE 月平均日变化与 PPFD 相关性最高, 与气温、降水、土壤含水量、土壤温度的相关性次之; 而在夜间, 南矾湿地 NEE 月平均日变化与气温、土壤温度、土壤含水量相关性较高。在淹水期日间, 南矾湿地 NEE 月平均日变化与 PPFD、土壤含水量相关性较高; 而在夜间, NEE 月平均日变化与土壤温度、土壤含水量、气温相关性较高。

对未淹水期日间 NEE 月平均日变化的影响因子进行主成分分析, 结果见图 4, 第 1 和第 2 主成分的载荷分别为 31.78% 和 24.57%。因此, PPFD、气

温、土壤温度直接影响南矾湿地 NEE 月平均日变化, 降水和土壤含水量则对其产生间接影响。

表 1 南矾湿地日间 NEE 月平均日变化与其环境因子的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients of monthly mean daily variation of NEE and environmental factors in day-time

时间 (年-月)	光量子通量密度	土壤含水量 ¹⁾	土壤温度 ¹⁾	降水量	气温
2015-04	-0.902**	-0.339	-0.081	-0.151	-0.300
2015-05	-0.686**	-0.497**	-0.186	-0.573**	-0.229
2015-07	-0.937**	-0.504**	-0.151	0.340	-0.059
2015-08	-0.915**	0.187	-0.101	0.185	-0.403*
2015-09	-0.946**	-0.587**	0.063	-0.776**	0.091
2015-10	-0.932**	-0.119	-0.023	0.237	-0.046
2016-04	-0.745**	-0.294	-0.391*	0.051	-0.456*
2016-05	-0.551**	-0.059	0.151	-0.120	0.150
2016-06	-0.138	-0.440	0.126	-0.176	-0.246
2016-07	0.057	-0.051	0.032	-0.074	-0.007
2016-08	0.121	0.221	0.138	0.051	0.137
2016-09	-0.557**	-0.190	0.123	-0.260	0.120
2016-10	-0.506**	-0.156	0.077	-0.387	-0.225

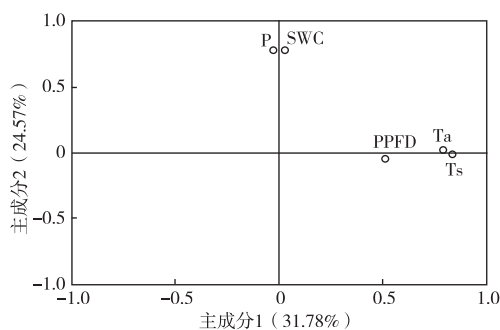
* 和 ** 分别表示在 0.05 水平(双侧)和 0.01 水平(双侧)上显著相关。1) 20 cm 深处。

表 2 南矶湿地夜间 NEE 月平均日变化与其环境因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients of monthly mean daily variation of NEE and its environmental factors at night

时间 (年-月)	土壤含水量 ¹⁾	土壤温度 ¹⁾	降水量	气温
2015-04	0.229	0.020	-0.318	0.226
2015-05	-0.214	-0.374	-0.173	-0.398
2015-07	0.289	0.335	0.284	0.427
2015-08	0.307	-0.519*	-0.570*	-0.478*
2015-09	-0.544**	-0.368	0.270	-0.455
2015-10	0.474*	-0.234	—	-0.156
2016-04	0.158	0.145	0.063	0.034
2016-05	-0.197	0.121	0.288	0.016
2016-06	0.078	0.307	-0.245	-0.100
2016-07	0.618**	0.361	0.147	0.270
2016-08	-0.019	-0.340	-0.098	-0.355
2016-09	-0.119	-0.284	-0.321	-0.293
2016-10	0.495*	-0.728**	0.605**	0.788**

* 和 ** 分别表示在 0.05 水平(双侧)和 0.01 水平(双侧)上显著相关。“—”表示无数据。1) 20 cm 深处。



PPFD—光量子通量密度; Ta—气温; P—降水;
SWC—土壤含水量; Ts—土壤温度。

图 4 南矶湿地 NEE 月平均日变化影响因子的主成分分析结果

Fig. 4 Principal component analysis of the factors affecting monthly mean daily variation of NEE of the Nanji wetland

在淹水期,湿地生态系统光合作用受到抑制,呼吸作用因水体的隔断和扩散,仪器较难监测到生态系统实际碳交换,NEE 月平均日变化与现有环境因子的相关关系普遍较弱,特别是夜间时段。由于缺乏水环境相关指标如溶解氧含量、溶解性有机碳含量、浊度和叶绿素含量等数据,无法进一步分析该时期 NEE 的主要影响因素。

3 讨论与结论

鄱阳湖的水位波动是影响湿地生态系统碳交换的关键因素。鄱阳湖巨大的水位变化导致南矶湿地生态系统与其他湿地生态系统有很大差别,在

探讨其碳通量变化时需先考虑水位变化。水位变化影响生态系统的植被生长、发育与繁殖以及分布,进而直接或间接地改变湿地生态系统的碳通量。低水位时,植被生长旺盛,植物通过光合作用固定大量 CO₂,南矶湿地 NEE 日变化特征与其他湿地相似。而高水位时,植被均被淹没,生长停止,仅有少量挺水植物和浮游植物生长,光合作用与呼吸作用受限制,所以在高水位时该湿地的 NEE 变化无明显规律。

在未淹水期南矶湿地 NEE 与其他湿地生态系统相类似。在 2015—2016 年的未淹水期,鄱阳湖南矶湿地 NEE 月平均日变化呈“U”型分布。日间最大 CO₂ 吸收量为 18.24 μmol · m⁻² · s⁻¹,夜间最大 CO₂ 释放量为 24.92 μmol · m⁻² · s⁻¹。在日间,该湿地 NEE 变化主要受 PPFD、气温、土壤温度的影响;在夜间,其主要受气温、土壤温度、土壤含水量的影响。

在淹水期南矶湿地 NEE 可能受到其他因素影响。在淹水期鄱阳湖南矶湿地日间最大 CO₂ 吸收量为 2.29 μmol · m⁻² · s⁻¹,夜间最大 CO₂ 释放量为 12.66 μmol · m⁻² · s⁻¹,月平均日变化无明显规律,NEE 与 PPFD、气温、土壤温度等因子有关,但数值上相关关系较弱。因此,开展后续该区域 NEE 研究应增加对水体环境因子,如溶解氧含量、溶解性有机碳含量、浊度和叶绿素含量等的监测内容。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 143-151.
- [2] CAO M K, GREGSON K, MARSHALL S. Global Methane Emission From Wetlands and Its Sensitivity to Climate Change [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(19): 3293-3299.
- [3] 马安娜, 陆健健. 湿地生态系统碳通量研究进展 [J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 116-123. [MA An-na, LU Jian-jian. The Progress of Research on Carbon Flux in Wetland Ecosystems [J]. Wetland Science, 2008, 6(2): 116-123.]
- [4] BALDOCCHI D, VALENTINI R, RUNNING S, et al. Strategies for Measuring and Modeling Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes Over Terrestrial Ecosystems [J]. Global Change Biology, 1996(2): 159-168.
- [5] 宋涛. 三江平原生态系统 CO₂ 通量的长期观测研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. [SONG Tao. Long Term Carbon Dioxide Flux Measurements in Sanjiang Plain, Northeastern China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007.]
- [6] 何奇瑾. 盘锦芦苇湿地碳通量特征与模拟研究 [D]. 北京: 中国

- 气象科学研究院, 2007. [HE Qi-jin. Characteristics of Net Ecosystem CO₂ Exchange Over Panjin Reed Wetland and Its Simulation [D]. Beijing: China Academy of Meteorological Sciences, 2007.]
- [7] 李英年, 赵亮, 赵新全, 等. 高寒湿地生态系统土壤有机物质补给及地-气 CO₂ 交换特征 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 940-946. [LI Ying-nian, ZHAO Liang, ZHAO Xin-quan, et al. The Features of Soil Organic Matters Supplement and CO₂ Exchange Between Ground and Atmosphere in Alpine Wetland Ecosystem [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 940-946.]
- [8] 张法伟, 刘安花, 李英年, 等. 青藏高原高寒湿地生态系统 CO₂ 通量 [J]. 生态学报, 2008, 28(2): 453-462. [ZHANG Fa-wei, LIU An-hua, LI Ying-nian, et al. CO₂ Flux in Alpine Wetland Ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 453-462.]
- [9] ZHOU L, ZHOU G S, JIA Q Y. Annual Cycle of CO₂ Exchange Over a Reed (*Phragmites australis*) Wetland in Northeast China [J]. Aquatic Botany, 2009, 91(2): 91-98.
- [10] 王记明, 陈克龙, 曹生奎, 等. 青海湖高寒湿地生态系统夏季 CO₂ 通量日变化及其影响因子研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3): 317-323. [WANG Ji-ming, CHEN Ke-long, CAO Sheng-kui, et al. Diurnal Variation of CO₂ Flux From Qinghai Lake Alpine Wetland Ecosystems in Summer and Its Affecting Factors [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(3): 317-323.]
- [11] 李玉, 康晓明, 郝彦宾, 等. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征 [J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4400-4411. [LI Yu, KANG Xiao-ming, HAO Yan-bin, et al. Carbon, Water and Heat Fluxes of a Reed (*Phragmites australis*) Wetland in the Yellow River Delta, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4400-4411.]
- [12] HAN G X, YANG L Q, YU J B, et al. Environmental Controls on Net Ecosystem CO₂ Exchange Over a Reed (*Phragmites australis*) Wetland in the Yellow River Delta, China [J]. Estuaries and Coasts, 2013, 36(2): 401-413.
- [13] 杨利琼, 韩广轩, 于君宝, 等. 黄河三角洲芦苇湿地生长季净生态系统 CO₂ 交换及其环境调控机制 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2415-2422. [YANG Li-qiong, HAN Guang-xuan, YU Jun-bao, et al. Net Ecosystem CO₂ Exchange and Its Environmental Regulation Mechanisms in a Reed Wetland in the Yellow River Delta of China During the Growth Season [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2415-2422.]
- [14] 王江涛, 仲启铖, 欧强, 等. 崇明东滩滨海围垦湿地生长季 CO₂ 通量特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 416-425. [WANG Jiang-tao, ZHONG Qi-cheng, OU Qiang, et al. Characteristic of CO₂ Flux in the Coastal Reclaimed Wetland of Chongming Dongtan During the Growing Season [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 416-425.]
- [15] 葛振鸣, 周晓, 王开运, 等. 长江河口典型湿地碳库动态研究方法 [J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1097-1108. [GE Zhen-ming, ZHOU Xiao, WANG Kai-yun, et al. Research Methodology on Carbon Pool Dynamics in the Typical Wetland of Yangtze River Estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 1097-1108.]
- [16] 马安娜, 陆健健. 长江口崇西湿地生态系统的二氧化碳交换及潮汐影响 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 716-721. [MA Anna, LU Jian-jian. Net Ecosystem Exchange of Carbon and Tidal Effect in Chongxi Wetland, Yangtze Estuary [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(7): 716-721.]
- [17] 胡启武, 幸瑞新, 朱丽丽, 等. 鄱阳湖苔草湿地非淹水期 CO₂ 释放特征 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1431-1436. [HU Qi-wu, XING Rui-xin, ZHU Li-li, et al. Characteristics of CO₂ Emission From *Carex*-Dominated Wetland in Poyang Lake in Non-Flooded Period [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1431-1436.]
- [18] 胡启武, 朱丽丽, 幸瑞新, 等. 鄱阳湖苔草湿地甲烷释放特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4851-4857. [HU Qi-wu, ZHU Li-li, XING Rui-xin, et al. Methane Emission From a *Carex*-Dominated Wetland in Poyang Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4851-4857.]
- [19] 王佳佳, 弓晓峰, 李志龙, 等. 不同季节鄱阳湖湿地的甲烷排放通量 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2015, 39(3): 286-295. [WANG Jia-jia, GONG Xiao-feng, LI Zhi-long, et al. Selenium Deposition Regularity With Different Forms of Selenium in Rat Tissues [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2015, 39(3): 286-295.]
- [20] 王晓鸿. 鄱阳湖湿地生态系统评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 20-60. [WANG Xiao-hong. Wetland Ecosystem Assessment of Poyang Lake [M]. Beijing: Science Press, 2004: 20-60.]
- [21] 张全军, 于秀波, 钱建鑫, 等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征 [J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3656-3669. [ZHANG Quan-jun, YU Xiu-bo, QIAN Jian-xin, et al. Distribution Characteristics of Plant Communities and Soil Organic Matter and Main Nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3656-3669.]
- [22] LLOYD J, TAYLOR J A. On the Temperature Dependence of Soil Respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.

作者简介: 王莉莉 (1991—), 女, 河南周口人, 硕士生, 主要研究方向为湿地生态与通量监测。E-mail: wang243488@163.com

(责任编辑: 李祥敏)