中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 1 期： 189–201
论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

多时间尺度湖库二氧化碳通量环境驱动因子研究

贺相綦[1]，Ankur DESAI[2]，Ivan MAMMARELLA[3]，Xixi LU[4]，李小雁[1]，刘辉志[5]，Uwe SPANK[6]，郭兰兰[1]，徐红涛[1]，褚阳[1]，郝兴明[7*]，何斌[1,8*]

1. 北京师范大学地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室，北京 100875
2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences，University of Wisconsin-Madison，Madison WI 53706, USA
3. Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR)/Physics，Faculty of Science，Helsinki 00014，Finland
4. Department of Geography，National University of Singapore，Singapore 117570，Singapore
5. 云南大学大气科学系，昆明 650091
6. Institute of Hydrology and Meteorology，Dresden University of Technology，Dresden 01069，Germany
7. 新疆阿克苏绿洲农田生态系统国家野外科学观测研究站，阿克苏 843017
8. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，乌鲁木齐 830011
* 通讯作者，E-mail：haoxm@ms.xjb.ac.cn(郝兴明)，hebin@bnu.edu.cn(何斌)

2025-06-25收稿，2025-10-28修回，2025-11-04接受，2025-12-11网络版发表
国家自然科学基金项目(42361144877)、新疆维吾尔自治区“天山英才”培养计划项目(2023TSYCJU0005)、第三次新疆科考项目(2022xjkk0106)、美国国家科学基金会北温带湖泊长期生态研究计划项目(DEB-2025982)、新加坡教育部项目(A-8001793-00-00)和德国科学基金会项目(TregaTa288267759、MEDIWA445326344)资助

摘要 湖泊在内陆水体碳循环中发挥着关键作用。然而，受制于实地观测数据的稀缺，湖泊二氧化碳通量(Carbon dioxide fluxes，FCO_2)的环境驱动因子及机制仍不明晰。基于此，本研究收集了全球19个湖泊和8个水库(以下统称为湖泊)共计332个月的涡度协方差观测数据，深入分析了不同时间尺度湖泊FCO_2的环境驱动因子，并探究不同类型湖泊FCO_2交换的环境影响机制。研究结果表明，pH值越高的湖泊，其表现为碳汇的可能性越大。湖泊FCO_2的主要驱动因子随时间尺度变化表现出显著差异：昼夜尺度上主要由辐射因子控制，多日尺度上则转为受能量交换相关因子主导，而在季节尺度上则表现为由温度主导。基于互信息法进一步分析表明，FCO_2对环境因子的响应存在明显的滞后效应，且随湖泊类型而异。具体而言，昼夜尺度上，FCO_2对主要驱动因子短波辐射的响应在酸性、中性和碱性湖泊中分别为−0.3±0.5天、0.4±0.9天和0.2±0.7天；在多日尺度上，酸性湖泊FCO_2对主要驱动因子的响应也表现出较短的滞后时间；而在季节尺度上，各湖泊FCO_2对主要驱动因子的响应时间差异显著增大，表明在更长时间尺度中，FCO_2对驱动因子的响应机制更加复杂。本研究有助于深化对湖泊碳循环机制的理解，可为准确评估湖泊碳收支提供科学依据。

关键词 涡度协方差，二氧化碳通量，水-气界面，滞后，环境驱动因子

1 引言

第五次评估报告(5th Assessment Report，AR5)中，政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)首次明确指出内陆水体是全球温室气体收支的重要组成部分(Lauerwald等，2023)。湖泊与水库(以下统称为“湖泊”)占内陆水体表面积的79.1%(Raymond等，2013；Pi等，2022)，在全球碳循环中发挥着关键作用(Cole等，2007；Regnier等，2013，2022；Battin等，2023；Casas-Ruiz等，2023)。然而，全球湖泊二氧化碳(Carbon dioxide，CO_2)排放量的估算仍存在较大不确定性，现有研究的估算范围从0.4到2.14 Pg CO_2 yr^{-1}不等，这主要源于湖泊二氧化碳通量(Carbon dioxide fluxes，FCO_2)观测数据的稀疏和空间分布不均

中文引用格式：贺相綦, Desai A, Mammarella I, Lu X, 李小雁, 刘辉志, Spank U, 郭兰兰, 徐红涛, 褚阳, 郝兴明, 何斌. 2026. 多时间尺度湖库二氧化碳通量环境驱动因子研究. 中国科学: 地球科学, 56(1): 189–201, doi: 10.1360/N072025-0320
英文引用格式：He X, Desai A, Mammarella I, Lu X, Li X, Liu H, Spank U, Guo L, Xu H, Chu Y, Hao X, He B. 2026. Dominant environmental influencing factors of carbon dioxide fluxes in lakes and reservoirs at different time scales. Science China Earth Sciences, 69(1): 178–189, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1752-7

© 2025《中国科学》杂志社

(Raymond等，2013；DelSontro等，2018；Lauerwald等，2023)。由于不同湖泊FCO_2较大的差异，使其解释与预测常面临挑战(Huotari等，2011；Mammarella等，2015；Deemer等，2016；Qi等，2020；Vachon等，2021；Ran等，2021)，深入研究不同类型湖泊FCO_2的环境驱动因子，进而构建基于过程的碳通量预测模型，将有助于降低全球湖泊CO_2排放估算的不确定性(Tranvik等，2018；Zwart等，2019；Woolway等，2020；Golub等，2023)。

湖泊FCO_2受表层水体与大气之间CO_2浓度梯度以及水-气界面气体交换速率共同调控。 气象条件、水体理化学特征及生物活动等多种环境因子均会影响上述两个过程，从而改变湖泊FCO_2(Shao等，2015；Liu等，2016；Zwart等，2019；Han等，2020；Li等，2022；Hounshell等，2023)。以水温为例，其不仅显著影响CO_2溶解度(Shao等，2015)，调节水生生物的呼吸与光合作用(Hounshell等，2023)，甚至还能改变干旱地区湖泊的pH值(Wu等，2014；Yang等，2021)。以往研究表明，在昼夜、季节以及年尺度上FCO_2对环境因子的响应往往存在差异(Huotari等，2011；Podgrajsek等，2015；Du等，2018；Wang等，2022)。例如，即使同一湖泊，FCO_2对温度的敏感性会随时间尺度变化而发生改变(Wang等，2022；Li等，2022)。因此，有必要在多时间尺度上开展系统分析，以全面理解环境因子对湖泊FCO_2的影响机制(Reed等，2018；Eugster等，2020；Han等，2020)。除时间尺度外，监测方法的差异也是影响FCO_2驱动因子识别的重要因素。传统的监测方法如浮箱法和顶空平衡法，虽被广泛应用，但往往难以同时高频监测FCO_2及其相关环境因子(Liu等，2016；Paranaíba等，2018)，且受限于观测频率、时长及空间覆盖(Matthews等，2003；Zhao等，2019；Scholz等，2021)。相比之下，涡度协方差(Eddy Covariance，EC)通量塔可在生态系统尺度上实现能量与物质通量的高频、同步、长期监测，是当前探索湖泊FCO_2与环境因子的关系相对理想的途径(Xiao等，2014；Gorsky等，2021；Knox等，2021；Hounshell等，2023)。然而，EC通量数据的不同处理方法也会导致FCO_2驱动因子识别的差异。部分研究通过平均或聚合通量数据获得日、月或年尺度数据(Yang等，2021；Li等，2022)，这种方法虽然简单且易于理解(Rannik等，2016)，但会显著减少原始通量数据量。而一些研究采用最大重叠离散小波变换(Maximum overlap discrete wavelet transform，MODWT)方法处理大量通量数据(Sturtevant等，2016；Golub等，2023)。该方法可在不同时间尺度上分解通量变化的特征与扰动(Knox等，2021)，保留较多的数据和信息量以支持更多方法探索FCO_2与驱动因子的关系。

尽管已有的研究在识别湖泊FCO_2驱动因子方面取得了诸多进展，但多数研究仅针对单个湖泊，对不同湖泊类型以及更大空间尺度上仍缺乏系统性的分析(Morin等，2018；Paranaíba等，2018；Eugster等，2020；Gorsky等，2021；Hounshell等，2023；Golub等，2023)。基于此，本研究整合了公开发表文献和FLUXNET数据集中全球范围内27个EC观测站点(包括19个湖泊和8个水库)的通量观测数据。综合考虑影响水-气界面CO_2浓度梯度及气体交换速率的主要环境因子(表1)，采用MODWT方法对通量数据进行多时间尺度分解，并结合相对互信息(Relative mutual information，IR)等统计方法探究FCO_2的主要驱动因子及其滞后效应。与目前少数的多站点研究(Jansen等，2019；Golub等，2023)相比，本研究在数据基础上实现了显著拓展，涵盖了更广泛的观测站点、更全面的环境因子以及更长时序的观测数据，并首次探究了湖泊FCO_2对主要驱动因子的滞后响应特征，深化了对湖泊碳循环过程的理解。本研究的主要目标包括：(1) 识别不同时间尺度中湖泊FCO_2的主要驱动因子；(2) 评估湖泊FCO_2与驱动因子间的滞后响应特征；(3) 探索不同类型湖泊水-气界面CO_2交换的机制。

2　数据与方法

2.1　数据概况

本研究基于现有公开数据库和已发表文献收集了全球19个湖泊和8个水库的EC观测站点，这些站点的通量数据至少包含一个完整的季节观测周期。每个观测站点包括经纬度、湖泊表面积、平均和最大深度，以及平均pH值或其变化范围等信息(表2)。站点ID依据其FLUXNET代码或以“国家名-站点缩写”命名。各站点的详细描述、数据来源及相关参考文献列于网络版附表S1和附表S2中。研究站点分布于25°N–70°N，湖泊面积在1.10×10^4–4.43×10^9 m^2，最大深度为1.2–90.0 m(图1A)。

为探讨不同时间尺度中FCO_2的驱动因子，根据前人研究，本研究重点关注了以下变量：感热通量(Sensible heat，H)、潜热通量(Latent heat，LE)、空气温度(Air temperature，Ta)、风速(Wind speed，WS)、相对湿度(Relative humidity，RH)、气压(Pressure，PA)、短波辐射(Shortwave radiation income，SW)、净辐射(Net radiation，Rnet)和水温(Water temperature，Tw)。通过分析这些变量与FCO_2之间的关系，旨在揭示多时间尺度中环境驱动因子与湖泊FCO_2之间复杂的相互作用机制。

表1　本研究所选取的环境因子及其影响湖泊FCO_2的主要机制

环境因子	机制	参考文献
感热通量（Sensible heat，H）	改变水体垂向混合过程(H>0时，促进混合；H<0时，增强分层)，从而影响水体中CO_2的垂向分布及水-气界面CO_2交换。	Eugster等，2003；Lin等，2021；Ayala等，2024
潜热通量（Latent heat，LE）	增强表层冷却，提高CO_2溶解度并改变水-气浓度梯度。 改变水柱内的湍流强度，影响垂向CO_2输送与水-气CO_2交换。	Eugster等，2003；Augusto-Silva等，2019
气温（Air temperature，Ta）	降低表层水体CO_2溶解度(温度越高)，从而影响FCO_2。 调节水生系统中的光合作用(吸收CO_2)与呼吸作用(释放CO_2)。 改变水体热分层结构，限制垂向混合并阻碍CO_2向表层输送。	Åberg等，2010；Sakaguchi等，2023；Liu等，2024；Yuan等，2024
风速（Wind speed，WS）	与气体交换系数(k)相关，影响水-气界面CO_2扩散(直接驱动因子)。 在高风速(WS)条件下，可通过形成气泡或破坏热分层来增强水-气界面的CO_2交换。	Jonsson等，2008；Bade，2009；Ulseth等，2019；Xu等，2021
相对湿度（Relative humidity，RH）	在低RH下促进蒸发和水面冷却，从而间接影响CO_2溶解度和通量。 在高RH下抑制蒸发，导致表层水温升高。	Ito和Momii，2021；Yang等，2021
气压（Pressure，PA）	与大气中平衡CO_2浓度相关，从而改变水-气浓度梯度。	Liu等，2024
短波辐射（Shortwave radiation income，SW）	提高表层水温，降低CO_2溶解度(在高SW时)。 影响水生植物和浮游植物的光合作用，改变水-气CO_2浓度梯度。	Zagarese等，2021；Ayala等，2024
净辐射（Net radiation，Rnet）	升高表层水温，降低CO_2溶解度(在高Rnet时)。 影响水生植物与浮游植物的光合作用，改变水-气CO_2浓度梯度。	Yang等，2019；Yang等，2023；Ayala等，2024
水温（Water temperature，Tw）	影响CO_2溶解度，改变水-气CO_2浓度梯度。 促进微生物呼吸作用使产生CO_2。 改变热成层结构，限制垂向混合并阻碍CO_2向表层输送。 影响碳酸盐平衡(如$HCO_3^- \leftrightarrow CO_2$)，改变水-气$CO_2$浓度梯度。 寒冷时与冰盖持续时间相关，进而影响$CO_2$活跃交换期。	Åberg等，2010；Gorsky等，2021；Yang等，2022；Liu等，2024

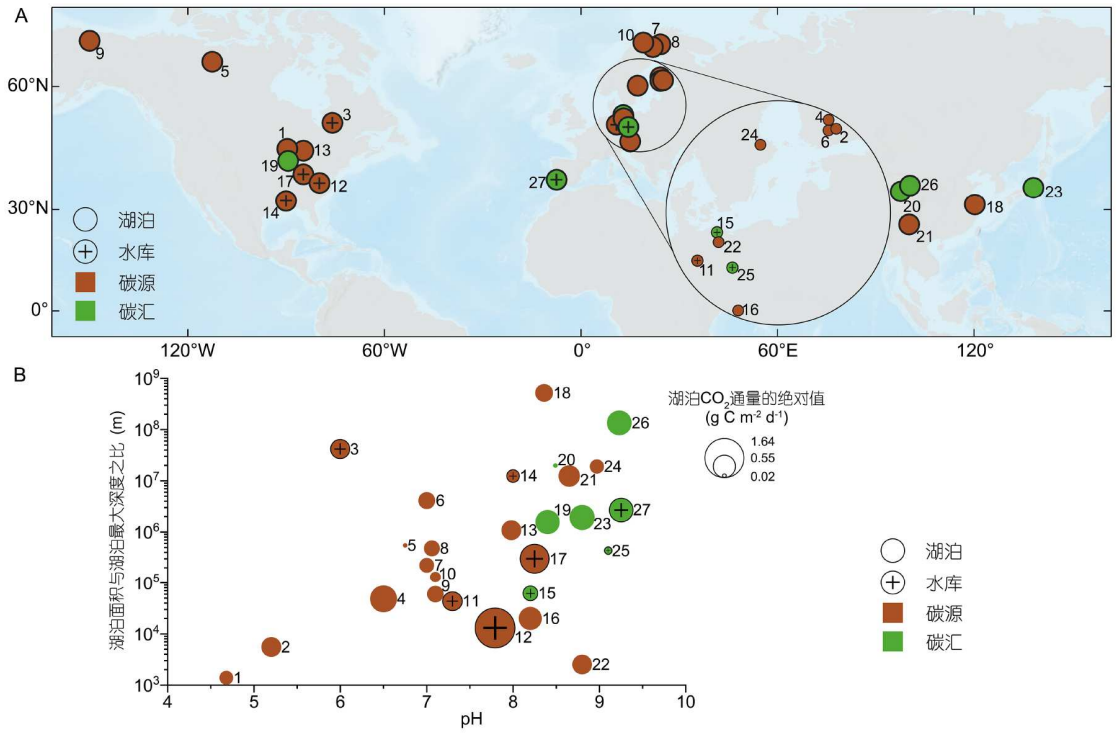


图1　涡度协方差通量站点分布。(A) 研究站点的空间分布；(B) 湖泊平均FCO_2与湖泊理化特征的关系。纵轴表示湖泊面积与湖泊最大深度的比值，横轴表示湖泊的pH值。图中绿色指示该湖泊为碳汇，棕色指示碳源；圆形直径表示湖泊平均FCO_2的绝对值。圆旁的数字对应表2中的站点编号

表2　监测站点信息

编号	站点ID	纬度	经度	类型	面积(m^2)	平均/最大深度(m)	pH	参考文献
1	US-Trb	46.04°N	89.69°W	湖泊	1.10×10^4	5.6/7.9	4.68	Gorsky等，2021
2	FI-VKa	61.24°N	25.06°E	湖泊	3.60×10^4	2.5/6.5	5.2	Golub等，2023；Vesala等，2006
3	CA-Est	52.13°N	75.90°W	水库	6.23×10^8	11.0/15.0	6	Demarty和Tremblay，2019；Golub等，2023
4	FI-Kui	61.83°N	24.28°E	湖泊	6.30×10^5	6.4/13.0	6.5	Mammarella等，2015；Golub等，2023
5	CA-Dar	64.86°N	112.59°W	湖泊	1.48×10^7	-/27.0	6.75	Golub等，2023
6	FI-Van	61.13°N	24.26°E	湖泊	1.03×10^8	7.0/25.0	7	Golub等，2023
7	SE-Mer	67.55°N	21.96°E	湖泊	3.80×10^6	5.1/17.0	7	Jonsson等，2008
8	FI-Pal	68.01°N	24.21°E	湖泊	1.73×10^7	9.0/36.0	7.06	Lohila等，2015
9	US-Too	68.63°N	150.00°W	湖泊	1.50×10^6	7.0/25.0	7.1	Eugster等，2020；Luecke等，2014；Golub等，2023
10	SE-Vls	68.35°N	19.05°E	湖泊	1.70×10^5	0.7/1.3	7.1	Jammet等，2017；Jansen等，2019
11	DE-Rbd	51.74°N	10.89°E	水库	3.95×10^6	28.6/90.0	7.3	Spank等，2020；Dadi等，2020
12	US-FCR	37.30°N	79.84°W	水库	1.19×10^5	4.0/9.3	7.79	Hounshell等，2023
13	US-UM3	45.57°N	84.70°W	湖泊	1.52×10^7	5.5/14.0	7.98	Golub等，2023
14	US-RBa	32.44°N	90.00°W	水库	1.34×10^8	3.6/10.7	8	Liu等，2016；Golub等，2023
15	DE-Zrk	53.88°N	12.89°E	水库	7.50×10^4	0.6/1.2	8.2	Golub等，2023；Franz等，2016
16	AT-Luz	47.85°N	15.05°E	湖泊	6.80×10^5	20.0/34.0	8.2	Scholz等，2021；Ejarque等，2021
17	US-Act	39.58°N	84.76°W	水库	2.40×10^6	4.3/8.0	8.25	Waldo等，2021
18	CN-Tai	31.40°N	120.22°E	湖泊	2.34×10^9	2.0/4.5	8.36	Zhang等，2020
19	US-Men	43.08°N	89.40°W	湖泊	3.96×10^7	12.8/25.3	8.4	Reed等，2018
20	CN-Ngr	35.01°N	97.65°E	湖泊	6.11×10^8	17.6/30.7	8.49	Han等，2020
21	CN-Erh	25.77°N	100.17°E	湖泊	2.57×10^8	10.0/20.7	8.53–8.76	刘辉志等，2014；Du等，2018
22	DE-Dgw	53.15°N	13.05°E	湖泊	2.40×10^4	5.0/9.5	8.8	Guseva等，2021
23	JP-SWA	36.05°N	138.11°E	湖泊	1.33×10^7	4.0/6.9	8.8	Urai等，2022
24	SE-Tam	60.16°N	17.32°E	湖泊	3.80×10^7	1.3/2.0	8.97	Podgrajsek等，2015
25	DE-Bau	51.21°N	14.46°E	水库	5.80×10^6	7.4/13.5	9.1	Spank等，2023；Dadi等，2020
26	CN-QHL	36.59°N	100.50°E	湖泊	4.43×10^9	21.0/32.8	9.15–9.3	Li等，2022
27	PT-Alq	38.22°N	7.46°W	水库	2.50×10^8	16.6/92.0	8.9–9.6	Potes等，2017

2.2　研究方法

已有研究表明，湖泊形态特征与营养状态在调节FCO_2过程中发挥着重要作用(Casas-Ruiz等，2021；Borges等，2022；Chiriboga等，2024)，因此本研究首先分析了FCO_2与湖泊面积、深度、营养化指标(总氮、总磷、溶解性有机碳和叶绿素)及pH值之间的关系(网络版附图S1，附图S5)。结果显示湖泊FCO_2与湖泊面积、pH值、总磷呈显著负相关，而与湖泊深度及营养化指标(总氮、溶解性有机碳和叶绿素)呈不显著负相关。其中，pH值对湖泊碳源汇表现出很强的调控作用，pH值较高的湖泊更可能成为碳汇(图1B)。由于湖泊的营养状态会因所选指标不同而存在较大差异(Diaz等，2007；Zhou等，2023；Meyer等，2024)，例如以总氮(Zhang F J等，2023)、总磷(Golub等，2023)或叶绿素a(Zhao等，2023)为依据，其分级结果通常不一致(Mammarella等，2015)。相比之下，pH虽然也会存在一定的时空波动，但其平均值更具稳定性(Liang等，2023)。因此本研究依pH平均值，将所有站点划分为酸性湖泊(pH<7)、中性湖泊(7≤pH≤8)和碱性湖泊(pH>8)。

EC数据易受仪器故障、通量非平稳性、湍流随机性及测量误差等因素影响，从而导致时间序列中产生数据缺失(Richardson等，2006)。本研究采用边缘分布采样法(Marginal distribution sampling，MDS)对经质量控制后的通量数据进行插补。该方法相较于平均日变化法(Mean diurnal variation，MDV)、查表法(Look-up table，LUT)、非线性回归法(Non-linear regression，NLR)及人工神经网络法(Artificial neural network，ANN)(Ooba等，2006；Stauch和Jarvis，2006；Moffat等，2007；Kim等，2020)，在插补误差与计算效率方面具有优势，被广泛应

用于FLUXNET数据插补中(Kim等，2020；Golub等，2023)。通量数据插补通过REddyProc程序实现(详见补充材料)。

在上述处理基础上，利用MODWT方法对通量数据进行多时间尺度分析。该方法可将时间序列分解为从粗到细的多层细节成分，从而揭示不同时间尺度中的变化特征(Sturtevant等，2016)。本研究选用LA8小波滤波器，其小波系数在不同时间尺度间相关性较低，且相邻尺度间的干扰较传统Haar小波更少。具体而言，四个时间尺度分别为：小时尺度(2^0–2^1次测量，1–2小时)、昼夜尺度(2^2–2^5次测量，4小时–1.3天)、多日尺度(2^6–2^9次测量，2.7–21.3天)及季节尺度(2^{10}–2^{13}次测量，42.7–170.7天)(Zhang Z等，2023)。

本研究采用相对互信息方法识别各时间尺度中FCO_2的主要环境驱动因子。该方法无需假定变量X与Y之间的函数形式，能够同时捕捉线性与非线性的关系。通过在计算中引入时间滞后(τ)，进一步增强了I_{XY}与IR_{XY}的识别能力，从而区分同步与异步交互作用。滞后范围设定为：昼夜尺度为1天以内，多日尺度为15天以内，季节尺度为100天以内。利用ProcessNetwork软件(V1.5)，在各尺度的滞后(τ)范围内计算FCO_2与环境因子的IR值，并考虑离散化、统计显著性及偏差校正(Ruddell和Kumar，2009)。

3 结果

3.1 湖泊FCO_2变化特征

在27个监测站点中，大多数湖泊FCO_2值相对较低，而少数中性湖泊(US-FCR)和碱性湖泊(US-Act、CN-QHL)则表现出较高通量(FCO_2的绝对值大于7.5 μmol m^{-2} s^{-1})，主要集中在晚春至初秋时段。酸性湖泊中，仅US-TrB和FI-VKa站点的FCO_2在昼夜变化上表现出明显波动(6:00–18:00色块较浅)；相比之下，除FI-Van站点外，所有中性湖泊的夜间FCO_2普遍高于白天。在拥有全年监测的湖泊(CA-Est、FI-Van、SE-Vls、US-FCR、DE-Zrk、US-Act、CN-Erh、DE-Dgw、JP-SWA)中，均呈现相似的季节性变化特征：夏季和秋季FCO_2值较高(无论吸收或排放)，而春季和冬季FCO_2值较低，这一现象表现为年积日(Day of year，DOY)153–336天的色块为深色(图2)。

为进一步探讨所有湖泊FCO_2的昼夜与季节变化特征，基于30 min的EC通量数据计算并统计三类湖泊(酸性、中性和碱性)的FCO_2均值及标准差，将结果按日和季节进行汇总，季节划分如下：春季(3月至5月)、夏季(6月至8月)、秋季(9月至11月)和冬季(12月至次年2月)。

昼夜尺度的分析结果表明，酸性湖泊的FCO_2波动较小(0.34±0.07–0.49±0.07 μmol m^{-2} s^{-1})，而中性湖泊和碱性湖泊的波动较为明显。总体上，各类湖泊的夜间FCO_2普遍高于白天(图3A)。值得注意的是，部分碱性湖泊在白天呈现碳汇，平均FCO_2在正午时分达到最小值(−0.17±0.07 μmol m^{-2} s^{-1})，这可能源于白天浮游植物光合作用增强。酸性湖泊FCO_2的波动较小，或反映出酸性条件下生物活性受限(Moiseenko，2005；Verspagen等，2022)。在季节尺度上，酸性湖泊在夏、秋季呈明显碳源，表现出更高的FCO_2及波动，而在春、冬季排放较低。中性湖泊的季节性变化相对平缓，碱性湖泊在夏季表现出明显的碳汇特征(FCO_2中位数为−0.006 μmol m^{-2} s^{-1})，而在其他季节仍为碳源(图3B)。

3.2 不同时间尺度湖泊FCO_2驱动因子

为识别不同时间尺度湖泊FCO_2的驱动因子，本研究基于IR方法计算了小时尺度、昼夜尺度、多日尺度及季节尺度各湖泊环境因子与FCO_2的相关性(图4)。在小时尺度上，H和LE对FCO_2的影响最为显著。由于在小波分解中小时尺度常受噪声主导(Hollinger和Richardson，2005)，因此后续分析主要聚焦于昼夜至季节尺度的驱动因子。

在昼夜尺度上，SW和Rnet是三种湖泊中大多数站点FCO_2的主要驱动因子。在少数站点(如CA-Est、US-MEN、CN-Erh、CN-QHL、PT-ALQ和JP-SWA)，H或LE影响更大，这可能与辐射相关因子的数据缺失有关，并且由于这些变量通常相互关联，共同受太阳辐射昼夜周期的驱动，进而导致了该结果。在多日尺度上，H的影响占据主导地位，LE次之。这两个因子不仅是生态系统内能量交换的体现，也是指示湖泊气体储存过程的重要变量(Morin等，2018)。在季节尺度上，Ta是FCO_2最重要的驱动因子，温度对湖泊FCO_2的影响随时间尺度延长而增强，这与以往研究结论一致(Han等，2020；Eugster等，2020；Li等，2022；Golub等，2023)。此外，由于Tw与Ta存在强相关性，Tw同样表现出重要作用。季节尺度上各湖泊FCO_2主导因子的差异性增大，这可能与不同站点的观测时长差异有关——部分站点覆盖单季，而一些站点覆盖多个季节甚至多年。

3.3 FCO_2对驱动因子的滞后响应特征

通过比较互信息值与最大互信息值之间的差异，本研究分析了FCO_2对环境因子的滞后响应关系。结果表明，滞后时间随湖泊类型和时间尺度变化而变化(图5)。

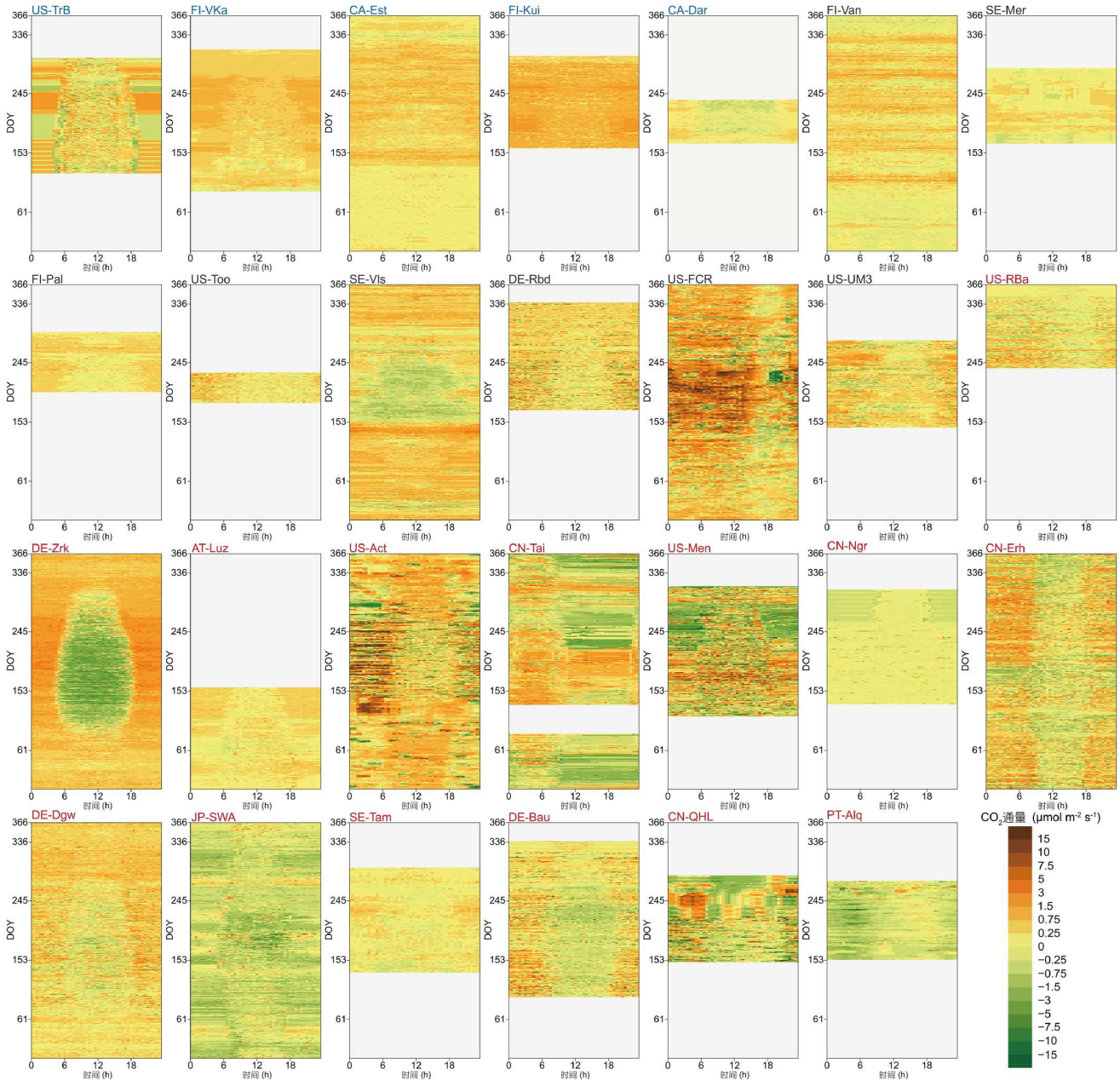


图 2　各站点全年逐小时FCO_2特征。横轴表示一天中的时间(0:00–24:00)，纵轴表示年积日(Day of year，DOY)，颜色表示通量FCO_2数值(整体上绿色表示吸收CO_2，棕色表示排放CO_2)。站点ID按湖泊类别着色：蓝色(酸性湖泊)、灰色(中性湖泊)和红色(碱性湖泊)

在昼夜尺度上，湖泊FCO_2对主要驱动因子(SW和Rnet)的响应时间较短，在碱性湖泊分别为0.2±0.7天和0.4±0.5天(图5A，图5B)；中性湖泊也呈现类似响应特征(0.4±0.9天与0.6±0.5天)，而酸性湖泊中的响应时间为负(−0.3±0.5天与−0.2±0.4天)。需要说明的是，响应时间小于0并非意味着FCO_2的变化先于环境因子，而是反映FCO_2的峰值出现在环境因子的峰值之前，或其下降过程在环境因子开始降低之前已启动(Knox等，2021)。由于辐射相关因子(SW和Rnet)主要通过影响水生生物(浮游植物和浮游动物)的光合作用与呼吸作用来改变湖泊FCO_2，因此昼夜尺度的响应时间可视为该过程的时长。叶绿素浓度可作为浮游生物丰度的指标。随着pH值升高，湖泊叶绿素浓度上升(附图S6)，表明浮游生物量相应增加。酸性湖泊中FCO_2对SW和Rnet的响应时间较短，这可能源于此类湖泊水体中浮游植物和藻类数量普遍少于碱性及中性湖泊(Verspagen等，2022)。

在多日尺度上，FCO_2相对于H的滞后响应在酸性湖泊、中性湖泊和碱性湖泊中分别为3.3±8.5天、2.4±8.8天

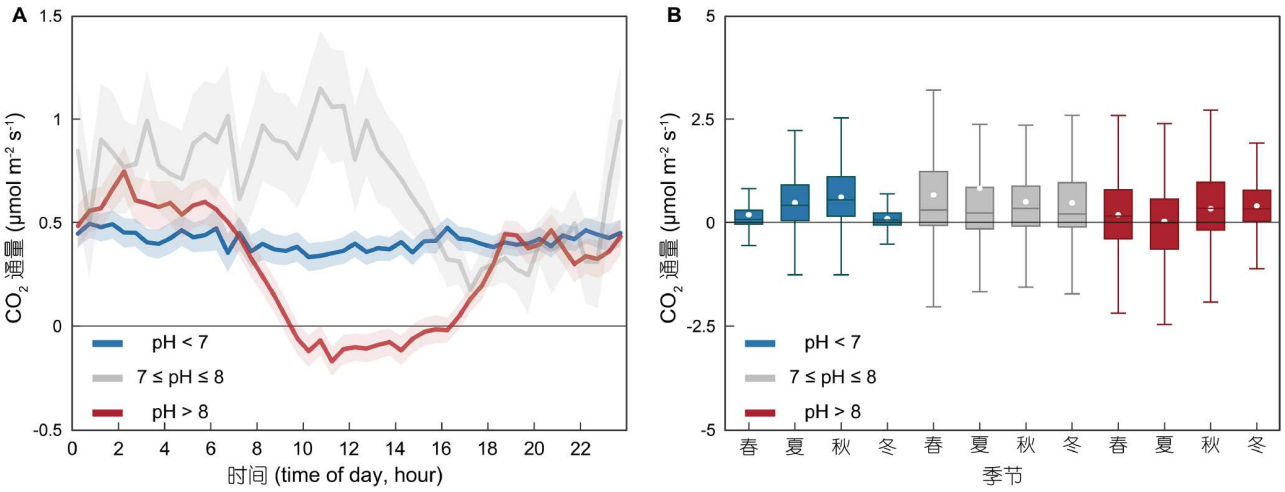


图3 不同类型湖泊FCO_2的时间变化特征。(A) 三类湖泊平均FCO_2的小时变化曲线，阴影区域表示95%的置信区间；(B) 三类湖泊平均FCO_2的季节变化特征。箱体中间的线表示中位数，白点表示均值

和−3.2±6.2天(图5C)，FCO_2相对LE也呈现类似的响应特征(图5D)。尽管H和LE并非直接驱动碳通量的因子，但它们与湖泊中的物理与生物过程密切相关(Morin等，2018；Han等，2020)。在季节尺度上，Tw和Ta是湖泊FCO_2的主要驱动因子，但湖泊FCO_2对主要驱动因子的响应时间相较于短时间尺度表现出更显著的差异(图5E和图5F)。这种较大的差异反映了湖泊长期碳循环过程的复杂性，不同类型湖泊对环境季节性变化的响应呈现出多样化与非同步性的特征。

4 讨论

4.1 湖泊FCO_2主导环境因子的驱动机制

分析不同湖泊间FCO_2及其环境因子的变化特征，为识别构建湖泊碳通量模型的关键因子提供了基础。虽然各类湖泊数量不同(酸性湖泊5个、中性湖泊8个、碱性湖泊14个)，但三类湖泊FCO_2与环境因子的点密度图中有着相似的热点区域(附图S2–S4)，这表明环境因子对FCO_2的基本驱动机制(促进或抑制)在不同类型湖泊基本一致。

湖泊FCO_2的主要驱动因子随时间尺度显著变化。昼夜尺度上，辐射相关因子(SW和Rnet)是最主要的影响因素。由于辐射是光合作用的主要能量来源，其通过促进光合作用促使浮游植物和藻类将CO_2转化为有机物。白天辐射强度较高，促进浮游植物和藻类的光合作用，从而消耗水体中的CO_2。夜间光合作用减弱或停止，而呼吸作用持续进行，使湖泊转为CO_2排放源。

在多日尺度上，能量交换相关因子是FCO_2主要影响因素。已有研究证实，H和LE二者能够驱动或指示微生物活动及湖泊气体储存变化(Morin等，2018)。根据传输理论可知H与水面和空气之间的温差呈正比，即H是Tw-Ta的函数(Han等，2020)，其可通过垂直热交换和水体分层影响湖泊FCO_2(Li等，2015；Du等，2018)。此外，LE是风驱动水面湍流的有效指标，可引发湖水深层混合并增强湍流交换，从而影响湖泊FCO_2(Blanken等，2003；Shao等，2015)。

季节尺度的分析结果表明，温度相关因子是FCO_2主要影响因素。Ta和Tw直接调控CO_2溶解度，温度升高将促使CO_2逸散。湖泊中水生生物包括浮游植物、藻类和浮游动物，它们通过呼吸作用将有机物分解为CO_2(Gorsky等，2021；Yang等，2022；Liu等，2024)。水温升高会加速生物代谢过程和呼吸速率，从而增强湖泊CO_2的释放。温度还影响水体分层现象，该现象限制了水体垂直混合与CO_2传输(Åberg等，2010)。分层期间，CO_2在底层水体中富集(Åberg等，2010；MacIntyre等，2021)。当发生混合事件时，这些累计的CO_2将释放至大气，对FCO_2产生显著影响(Davidson等，2024)。

4.2 不同类型湖泊CO_2产生与消耗机制差异

本研究发现湖泊FCO_2的驱动因子及滞后响应时间因湖泊类型而异，这源于其水体理化特征的差异。这种差异导致湖泊CO_2产生与消耗机制涉及的物理、化学及生物过程并不完全一致(图6)。其中，物理过程主要与CO_2在标准温压下的溶解与逸散动态平衡有关。随着水温升高，CO_2的溶解度降低，此外风速、湍流等也会显著影响气体交换效率(Ulseth等，2019；Liu等，2022)。而化

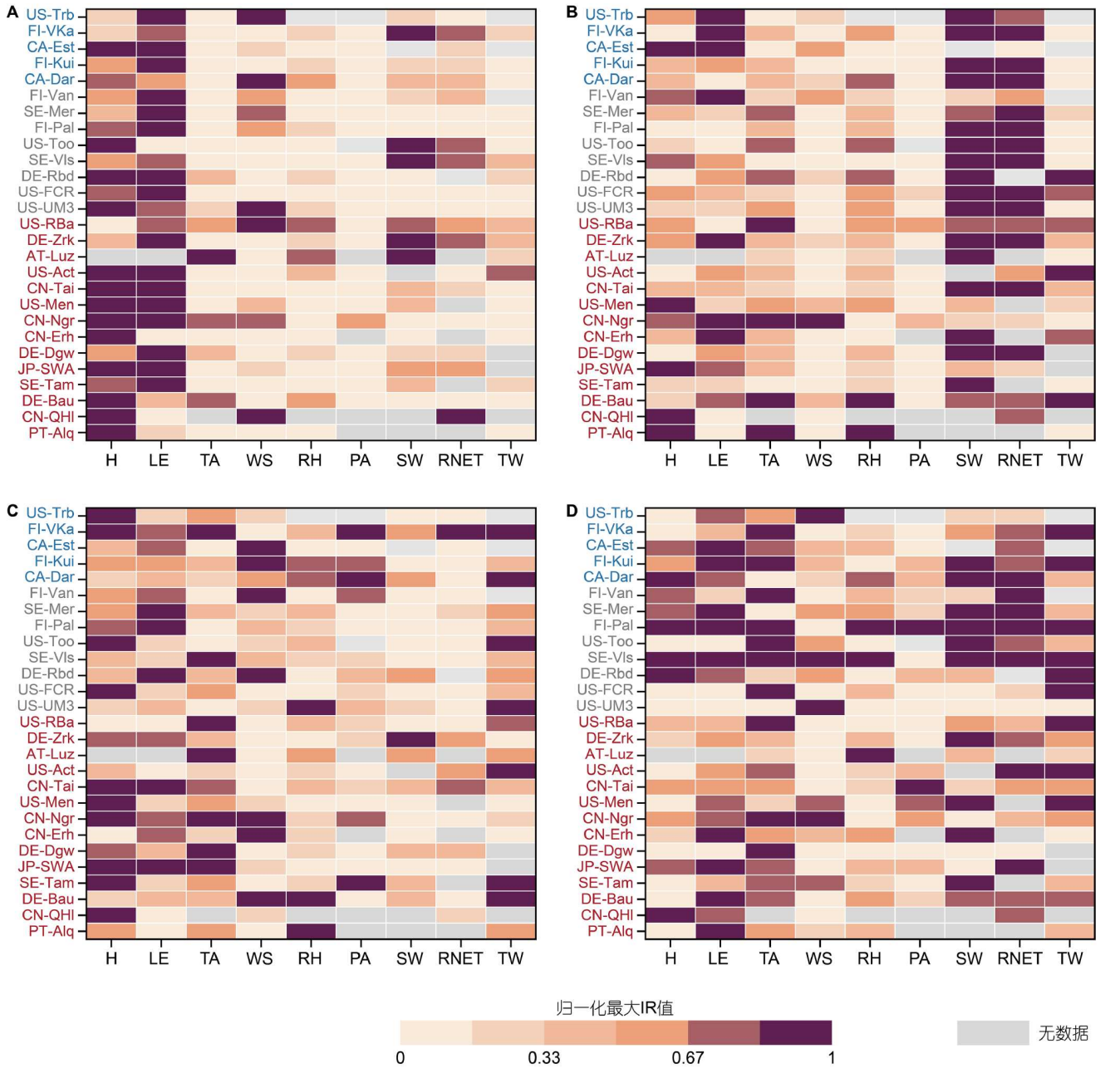


图 4　各站点FCO_2与环境因子相关性热力图。(A) 小时尺度；(B) 昼夜尺度；(C) 多日尺度；(D) 季节尺度。站点ID按湖泊类别着色：蓝色(酸性湖泊)、灰色(中性湖泊)和红色(碱性湖泊)

学过程涉及溶解CO_2、碳酸(H_2CO_3)及其分解产物间的可逆平衡(Li等，2022)。生成的碳酸(H_2CO_3)可与水体中的H^+和OH^-发生不同反应(Shi等，2024)。生物过程主要包括由水生生物的光合作用和呼吸作用(Pace等，2021；Zhang等，2022)。浮游植物通过光合作用降低水体pCO_2，促使大气中CO_2溶解于水中；而浮游动物及微生物呼吸作用则释放CO_2(Phillips，2020；Li等，2022；Shi等，2024)。

三种过程中的化学、生物过程在不同类型湖泊中存在差异。在酸性湖泊中，水体H^+浓度高于OH^-，导致水中的H_2CO_3更易转化为H_2O和CO_2(高扬等，2022)。而在碱性湖泊中，水中的OH^-浓度高于H^+，导致H_2CO_3更易转化为H_2O和CO_3^{2-}(Jia等，2022)。在盐碱湖中，水体中常存在金属阳离子(如Ca^{2+})，CO_3^{2-}与这些金属阳离子形成沉淀，从而进一步增强CO_2的吸收(Duarte等，2008；Li等，2022)。大多数酸性湖泊中，由于水体较低的pH值，使浮游植物和浮游动物难以生存，而中性及碱性湖

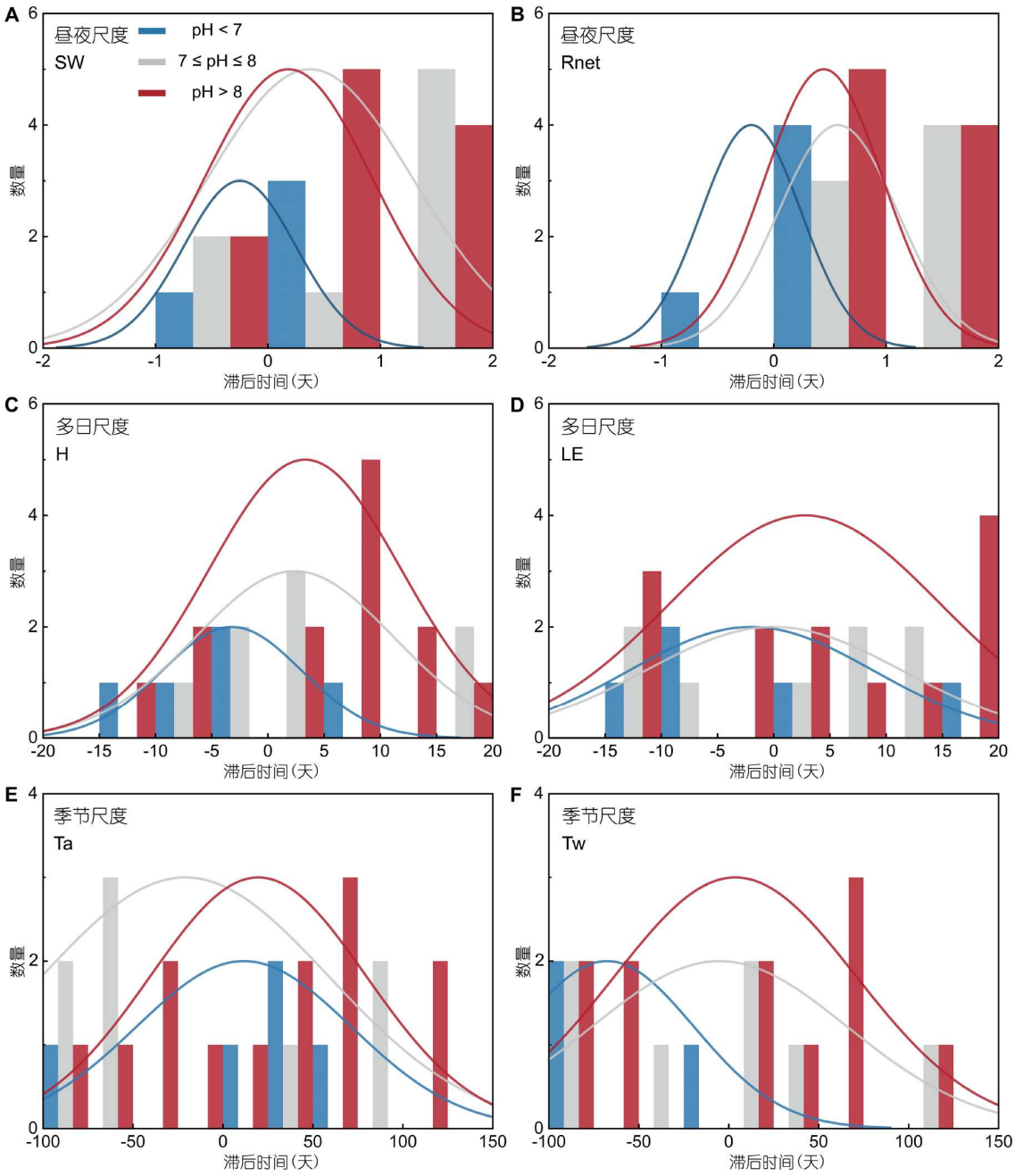


图5 不同时间尺度湖泊FCO_2主导因子滞后时间分布直方图。(A，B) 昼夜尺度；(C，D) 多日尺度；(E，F)季节尺度。图A至F中的曲线为对应直方图的正态分布拟合曲线

泊往往拥有更丰富的水生生物(Moiseenko，2005；Meyer等，2024)，因此，其生物过程更为复杂多样。

4.3 不足与展望

本研究对湖泊与水库中FCO_2的环境驱动因子进行了目前最全面的综合分析，但仍存在以下局限性。首先，为确保小波分解的连续性，本研究采用插值通量数据集。尽管质量控制数据占总数据的较高比例(平均值：43%，中位数：34%)，但插值过程不可避免地引入了不确定性，尤其在部分环境变量缺失的站点(如CN-QHL)，其插值前后数据标准差的差异显著(附表S1)。

其次，由于南半球仍缺乏EC通量数据，本研究仅聚焦北半球湖泊。然而，基于静态箱法的南半球淡水湖泊研究表明，其FCO_2普遍偏低但仍处于本数据集的范围之内(Li等，2016；Gerardo-Nieto等，2017)。这些研究显示其昼夜变化与季节动态的特征也与北半球湖泊相似，

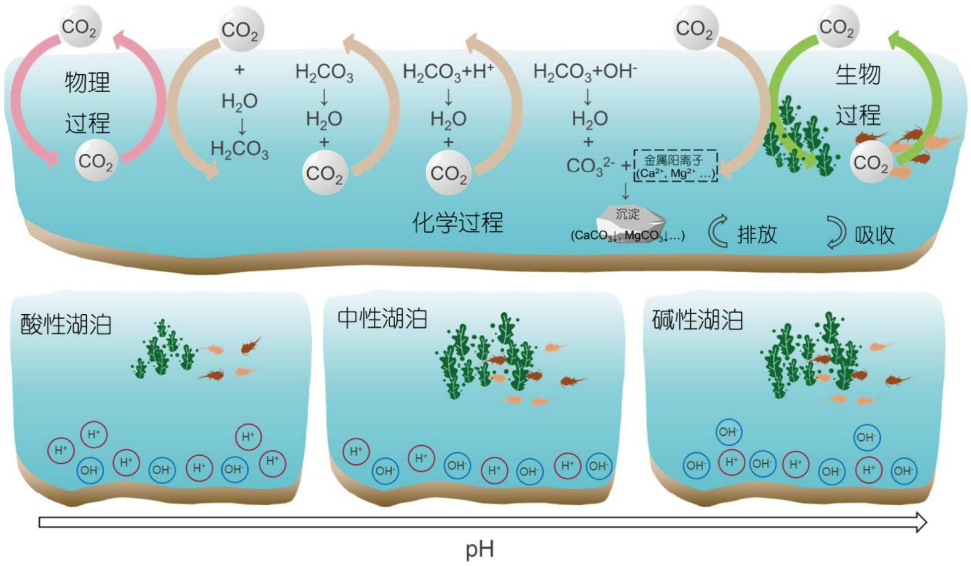


图 6　不同类型湖泊中CO_2产生与消耗机制示意图。湖泊FCO_2受物理、化学和生物过程共同调控。物理过程主要包括CO_2溶解度变化；化学过程涉及溶解CO_2的电离平衡、水体中碳酸盐之间的反应；生物过程则包含水体中浮游植物的光合作用以及浮游动物和微生物的呼吸作用。根据pH将湖泊划分为酸性、中性和碱性三类，每类湖泊水体有着不同的化学、生物特征

因此南半球湖泊FCO_2可能也具有类似的环境驱动机制(Gerardo-Nieto等，2017；Sadat-Noori等，2021)。此外，按pH对湖泊进行分组是一种实用且可重复的分类方式，pH相对稳定、易于测量，可减少未来FCO_2建模中的冗余。本研究通过涵盖四季的采样及均值与中位数的统计平衡，以最大程度减少样本量不同(酸性湖泊5个，中性湖泊8个，碱性湖泊14个)所导致的偏差，未来研究若能增加不同位置湖泊的数量与类型，将以进一步提高结果的代表性与可靠性。

5　结论

本研究整合了全球27个观测点的EC通量数据，涵盖19个湖泊与8个水库。部分初始观测站点因观测周期短、数据不连续或缺失率过高而被剔除。尽管部分站点仍缺乏环境因子测量数据，本研究仍是迄今量化湖泊与水库FCO_2环境驱动因子最全面的研究。与以往的单点或少量多点研究相比，本研究基于多时间尺度的长期观测揭示：湖泊FCO_2的主导环境驱动因子从昼夜尺度到季节尺度发生系统性转变。首次探索了主要驱动因子的滞后特征，且不同类型湖泊间滞后特征存在差异。这些结果拓展了湖泊碳通量研究的时空推断范围，有助于提升区域至全球尺度上水-气界面碳交换的普适性认知。与其他生态系统相比，湖泊生态系统的EC观测站点数量明显不足。湖泊是全球生物地球化学循环和生态过程的重要组成部分，而气候变化正在显著改变其功能与动态。深入探究湖泊FCO_2的环境驱动因子，有助于发展经验与过程模型，例如基于湖泊类型的经验建模及考虑滞后效应的FCO_2驱动过程分析，从而更准确地评估湖泊碳排放。

致谢　衷心感谢编委及匿名审稿人们提出的宝贵意见，这些建议显著提升了本文的质量。同时，感谢所有涡度通量观测站点的团队成员在数据获取与维护中做出的贡献。此外，Alqueva水库的数据采集工作得到了FCT与FEDER-COMPETE资助(EXPL/GEO-MET/1422/2013，FCOMP-01-0124-FEDER-041840)，特此致谢。

补充材料　本文的补充材料见网络版(http://earthcn.scichina.com)。补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责。

参考文献

高扬, 王朔月, 陆瑶, 等. 2022. 区域陆-水-气碳收支与碳平衡关键过程对地球系统碳中和的意义. 中国科学: 地球科学, 52: 832–841

刘辉志, 冯健武, 孙绩华, 等. 2014. 洱海湖气界面水汽和二氧化碳通量交换特征. 中国科学: 地球科学, 44: 2527–2539

Åberg J, Jansson M, Jonsson A. 2010. Importance of water temperature and thermal stratification dynamics for temporal variation of surface water CO_2 in a boreal lake. J Geophys Res, 115: 2009JG001085

Augusto-Silva P B, MacIntyre S, de Moraes Rudorff C, et al. 2019. Stratification and mixing in large floodplain lakes along the lower Amazon River. J Great Lakes Res, 45: 61–72

Ayala A I, Mesman J P, Jones I D, et al. 2024. Climate change impacts on surface heat fluxes in a deep Monomictic Lake. J Geophys Res-Atmos, 128: e2022JD038355

Bade D L. 2009. Gas Exchange at the Air-Water Interface, Encyclopedia of Inland Waters. London: Academic Press. 70–78
Battin T J, Lauerwald R, Bernhardt E S, et al. 2023. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world. Nature, 613: 449–459
Blanken P D, Rouse W R, Schertzer W M. 2003. Enhancement of evaporation from a large northern lake by the entrainment of warm, dry air. J Hydrometeorol, 4: 680–693
Borges A V, Deirmendjian L, Bouillon S, et al. 2022. Greenhouse gas emissions from African lakes are no longer a blind spot. Sci Adv, 8: eabi8716
Casas-Ruiz J P, Jakobsson J, del Giorgio P A. 2021. The role of lake morphometry in modulating surface water carbon concentrations in boreal lakes. Environ Res Lett, 16: 074037
Casas-Ruiz J P, Bodmer P, Bona K A, et al. 2023. Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange. Nat Commun, 14: 1571
Chiriboga G, Bouillon S, Borges A V. 2024. Dissolved greenhouse gas (CO_2, CH_4, and N_2O) emissions from highland lakes of the Andes cordillera in Northern Ecuador. Aquat Sci, 86: 24
Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, et al. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. Ecosystems, 10: 172–185
Dadi T, Rinke K, Friese K. 2020. Trajectories of sediment-water interactions in reservoirs as a result of temperature and oxygen conditions. Water, 12: 1065
Davidson T A, Søndergaard M, Audet J, et al. 2024. Temporary stratification promotes large greenhouse gas emissions in a shallow eutrophic lake. Biogeosciences, 21: 93–107
Deemer B R, Harrison J A, Li S Y, et al. 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. Bioscience, 66: 949–964
DelSontro T, Beaulieu J J, Downing J A. 2018. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. Limnol Oceanogr Lett, 3: 64–75
Demarty M, Tremblay A. 2019. Long term follow-up of pCO_2, pCH_4 and emissions from Eastmain 1 boreal reservoir, and the Rupert diversion bays, Canada. EcoHydrol HydroBiol, 19: 529–540
Diaz M, Pedrozo F, Reynolds C, et al. 2007. Chemical composition and the nitrogen-regulated trophic state of Patagonian lakes. Limnologica, 37: 17–27
Du Q, Liu H Z, Xu L J, et al. 2018. The monsoon effect on energy and carbon exchange processes over a highland lake in the southwest of China. Atmos Chem Phys, 18: 15087–15104
Duarte C M, Prairie Y T, Montes C, et al. 2008. CO_2 emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux. J Geophys Res, 113: G04041
Ejarque E, Scholz K, Wohlfahrt G, et al. 2021. Hydrology controls the carbon mass balance of a mountain lake in the eastern European Alps. Limnol Oceanogr, 66: 2110–2125
Eugster W, Kling G, Jonas T, et al. 2003. CO_2 exchange between air and water in an Arctic Alaskan and midlatitude Swiss lake: Importance of convective mixing. J Geophys Res, 108: 4362
Eugster W, DelSontro T, Shaver G R, et al. 2020. Interannual, summer, and diel variability of CH_4 and CO_2 effluxes from Toolik Lake, Alaska, during the ice-free periods 2010–2015. Environ Sci-Processes Impacts, 22: 2181
Franz D, Koebsch F, Larmanou E, et al. 2016. High net CO_2 and CH_4 release at a eutrophic shallow lake on a formerly drained fen. Biogeosciences, 13: 3051–3070
Gerardo-Nieto O, Astorga-España M S, Mansilla A, et al. 2017. Initial report on methane and carbon dioxide emission dynamics from sub-Antarctic freshwater ecosystems: A seasonal study of a lake and a reservoir. Sci Total Environ, 593-594: 144–154
Golub M, Koupaei-Abyazani N, Vesala T, et al. 2023. Diel, seasonal, and inter-annual variation in carbon dioxide effluxes from lakes and reservoirs. Environ Res Lett, 18: 034046
Gorsky A L, Lottig N R, Stoy P C, et al. 2021. The importance of spring mixing in evaluating carbon dioxide and methane flux from a small north-temperate lake in Wisconsin, United States. J Geophys Res-Biogeosci, 126: e2021JG006537
Guseva S, Casper P, Sachs T, et al. 2021. Energy flux paths in lakes and reservoirs. Water, 13: 3270
Han B, Meng X H, Yang Q H, et al. 2020. Connections between daily surface temperature contrast and CO_2 flux over a Tibetan Lake: A case study of Ngoring Lake. J Geophys Res-Atmos, 125: e2019JD032277
Hollinger D Y, Richardson A D. 2005. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. Tree Physiol, 25: 873–885
Hounshell A G, D'Acunha B M, Breef-Pilz A, et al. 2023. Eddy covariance data reveal that a small freshwater reservoir emits a substantial amount of carbon dioxide and methane. J Geophys Res-Biogeosci, 128: e2022JG007091
Huotari J, Ojala A, Peltomaa E, et al. 2011. Long-term direct CO_2 flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data. Geophys Res Lett, 38: L18401
Ito Y, Momii K. 2021. Potential effects of climate changes on evaporation from a temperate deep lake. J Hydrol-Reg Stud, 35: 100816
Jammet M, Dengel S, Kettner E, et al. 2017. Year-round CH_4 and CO_2 flux dynamics in two contrasting freshwater ecosystems of the subarctic. Biogeosciences, 14: 5189–5216
Jansen J, Thornton B F, Jammet M M, et al. 2019. Climate-sensitive controls on large spring emissions of CH_4 and CO_2 from northern lakes. J Geophys Res-Biogeosci, 124: 2379–2399
Jia J J, Sun K, Lü S, et al. 2022. Determining whether Qinghai-Tibet Plateau waterbodies have acted like carbon sinks or sources over the past 20 years. Sci Bull, 67: 2345–2357
Jonsson A, Åberg J, Lindroth A, et al. 2008. Gas transfer rate and CO_2 flux between an unproductive lake and the atmosphere in northern Sweden. J Geophys Res, 113: 2008JG000688
Kim Y, Johnson M S, Knox S H, et al. 2020. Gap-filling approaches for eddy covariance methane fluxes: A comparison of three machine learning algorithms and a traditional method with principal component analysis. Glob Change Biol, 26: 1499–1518
Knox S H, Bansal S, McNicol G, et al. 2021. Identifying dominant environmental predictors of freshwater wetland methane fluxes across diurnal to seasonal time scales. Glob Change Biol, 27: 3582–3604
Lauerwald R, Allen G H, Deemer B R, et al. 2023. Inland water greenhouse gas budgets for RECCAP2: 1. state-of-the-art of global scale assessments. Glob Biogeochem Cycle, 37: e2022GB007657
Li S Y, Bush R T, Ward N J, et al. 2016. Air-water CO_2 outgassing in the Lower Lakes (Alexandrina and Albert, Australia) following a millennium drought. Sci Total Environ, 542: 453–468
Li X, Shi F, Ma Y, et al. 2022. Significant winter CO_2 uptake by saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. Glob Change Biol, 28: 2041–2052
Li Z G, Lyu S H, Ao Y H, et al. 2015. Long-term energy flux and radiation balance observations over Lake Ngoring, Tibetan Plateau. Atmos Res, 155: 13–25
Liang L, Deng Y, Li J, et al. 2023. Modelling of pH changes in alkaline lakes with water transfer from a neutral river. Chemosphere, 310: 136882
Lin H, Chiu C, Tsai J, et al. 2021. Influence of thermal stratification on seasonal net ecosystem production and dissolved inorganic carbon in a shallow subtropical lake. J Geophys Res-Biogeosci, 126:

e2020JG005907
Liu H P, Zhang Q Y, Katul G G, et al. 2016. Large CO_2 effluxes at night and during synoptic weather events significantly contribute to CO_2 emissions from a reservoir. Environ Res Lett, 11: 064001
Liu S D, Kuhn C, Amatulli G, et al. 2022. The importance of hydrology in routing terrestrial carbon to the atmosphere via global streams and rivers. Proc Natl Acad Sci USA, 119: e2106322119
Liu X, Li X Y, Shi F Z, et al. 2024. Thermal structure regulates the dynamics of carbon dioxide flux in alpine saline lake on the Qinghai-Tibet Plateau, China. Sci Total Environ, 931: 172700
Lohila A, Tuovinen J P, Hatakka J, et al. 2015. Carbon dioxide and energy fluxes over a northern boreal lake. Boreal Environ Res, 20: 474–488
Luecke C, Giblin A E, Bettez N D, et al. 2014. The response of lakes near the Arctic LTER to environmental change. In: Hobbie J E, Kling G W, eds. Alaska's Changing Arctic: Ecological Consequences for Tundra, Streams, and Lake. New York: Oxford University Press. 238–286
MacIntyre S, Bastviken D, Arneborg L, et al. 2021. Turbulence in a small boreal lake: Consequences for air-water gas exchange. Limnol Oceanogr, 66: 827–854
Mammarella I, Nordbo A, Rannik Ü, et al. 2015. Carbon dioxide and energy fluxes over a small boreal lake in Southern Finland. J Geophys Res-Biogeosci, 120: 1296–1314
Matthews C J D, St.Louis V L, Hesslein R H. 2003. Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces. Environ Sci Technol, 37: 772–780
Meyer M F, Topp S N, King T V, et al. 2024. National-scale remotely sensed lake trophic state from 1984 through 2020. Sci Data, 11: 77
Moffat A M, Papale D, Reichstein M, et al. 2007. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. Agric For Meteorol, 147: 209–232
Moiseenko T I. 2005. Effects of acidification on aquatic ecosystems. Russ J Ecol, 36: 93–102
Morin T H, Rey-Sánchez A C, Vogel C S, et al. 2018. Carbon dioxide emissions from an oligotrophic temperate lake: An eddy covariance approach. Ecol Eng, 114: 25–33
Ooba M, Hirano T, Mogami J I, et al. 2006. Comparisons of gap-filling methods for carbon flux dataset: A combination of a genetic algorithm and an artificial neural network. Ecol Model, 198: 473–486
Pace M L, Buelo C D, Carpenter S R. 2021. Phytoplankton biomass, dissolved organic matter, and temperature drive respiration in whole lake nutrient additions. Limnol Oceanogr, 66: 2174–2186
Paranaíba J R, Barros N, Mendonça R, et al. 2018. Spatially Resolved Measurements of CO_2 and CH_4 Concentration and Gas-Exchange Velocity Highly Influence Carbon-Emission Estimates of Reservoirs. Environ Sci Technol, 52: 607–615
Phillips J S. 2020. Time-varying responses of lake metabolism to light and temperature. Limnol Oceanogr, 65: 652–666
Pi X H, Luo Q Q, Feng L, et al. 2022. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. Nat Commun, 13: 5777
Podgrajsek E, Sahlée E, Rutgersson A. 2015. Diel cycle of lake-air CO_2 flux from a shallow lake and the impact of waterside convection on the transfer velocity. J Geophys Res-Biogeosci, 120: 29–38
Potes M, Salgado R, Costa M J, et al. 2017. Lake-atmosphere interactions at Alqueva reservoir: A case study in the summer of 2014. Tellus A-Dynamic Meteorol Oceanogr, 69: 1272787
Qi T C, Xiao Q T, Cao Z G, et al. 2020. Satellite estimation of dissolved carbon dioxide concentrations in China's Lake Taihu. Environ Sci Technol, 54: 13709–13718
Ran L S, Butman D E, Battin T J, et al. 2021. Substantial decrease in CO_2 emissions from Chinese inland waters due to global change. Nat Commun, 12: 1730
Rannik Ü, Peltola O, Mammarella I. 2016. Random uncertainties of flux measurements by the eddy covariance technique. Atmos Meas Tech, 9: 5163–5181
Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, et al. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. Nature, 503: 355–359
Reed D E, Dugan H A, Flannery A L, et al. 2018. Carbon sink and source dynamics of a eutrophic deep lake using multiple flux observations over multiple years. Limnol Oceanogr Lett, 3: 285–292
Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, et al. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. Nat Geosci, 6: 597–607
Regnier P, Resplandy L, Najjar R G, et al. 2022. The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. Nature, 603: 401–410
Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, et al. 2006. Comparing simple respiration models for eddy flux and dynamic chamber data. Agric For Meteorol, 141: 219–234
Ruddell B L, Kumar P. 2009. Ecohydrologic process networks: 1. Identification. Water Resour Res, 45: 2008WR007279
Sadat-Noori M, Rutlidge H, Andersen M S, et al. 2021. Quantifying groundwater carbon dioxide and methane fluxes to an urban freshwater lake using radon measurements. Sci Total Environ, 797: 149184
Sakaguchi J, Nakayama K, Komai K, et al. 2023. Carbon dioxide uptake in a eutrophic stratified reservoir: Freshwater carbon sequestration potential. Heliyon, 9: e20322
Scholz K, Ejarque E, Hammerle A, et al. 2021. Atmospheric CO_2 exchange of a small mountain lake: Limitations of eddy covariance and boundary layer modeling methods in complex terrain. J Geophys Res-Biogeosci, 126: e2021JG006286
Shao C L, Chen J Q, Stepien C A, et al. 2015. Diurnal to annual changes in latent, sensible heat, and CO_2 fluxes over a Laurentian Great Lake: A case study in Western Lake Erie. J Geophys Res-Biogeosci, 120: 1587–1604
Shi F Z, Li X Y, Zhao S J, et al. 2024. In-phase PDO and El Niño events enhance the summer CO_2 emissions in Saline Lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. Geophys Res Lett, 51: e2024GL108917
Spank U, Hehn M, Keller P, et al. 2020. A season of eddy-covariance fluxes above an extensive water body based on observations from a floating platform. Bound-Layer Meteorol, 174: 433–464
Spank U, Bernhofer C, Mauder M, et al. 2023. Contrasting temporal dynamics of methane and carbon dioxide emissions from a eutrophic reservoir detected by eddy covariance measurements. Meteorol Z, 32: 317–342
Stauch V J, Jarvis A J. 2006. A semi-parametric gap-filling model for eddy covariance CO_2 flux time series data. Glob Change Biol, 12: 1707–1716
Sturtevant C, Ruddell B L, Knox S H, et al. 2016. Identifying scale-emergent, nonlinear, asynchronous processes of wetland methane exchange. J Geophys Res-Biogeosci, 121: 188–204
Tranvik L J, Cole J J, Prairie Y T. 2018. The study of carbon in inland waters-from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. Limnol Oceanogr Lett, 3: 41–48
Ulseth A J, Hall Jr R O, Boix Canadell M, et al. 2019. Distinct air-water gas exchange regimes in low- and high-energy streams. Nat Geosci, 12: 259–263
Urai A, Takano Y, Matsui Y, et al. 2022. Origin of deep methane from active faults along the Itoigawa-Shizuoka tectonic line between the Eurasian and North American Plates: $^{13}C/^{12}C$ and $^{14}C/^{12}C$ methane profiles from a Pull-Apart Basin at Lake Suwa. ACS Earth Space Chem, 6: 1689–1697
Vachon D, Sponseller R A, Karlsson J. 2021. Integrating carbon emission, accumulation and transport in inland waters to understand their role in the global carbon cycle. Glob Change Biol, 27: 719–727
Verspagen Jolanda M H, Ji X, Liu Quan-Xing, et al. 2022. Large-scale variation in phytoplankton community composition of >1000 lakes across the USA. Environ Res-Ecol, 1: 015001

Vesala T, Huotari J, Rannik Ü, et al. 2006. Eddy covariance measurements of carbon exchange and latent and sensible heat fluxes over a boreal lake for a full open-water period. J Geophys Res, 111: D11101

Waldo S, Beaulieu J J, Barnett W, et al. 2021. Temporal trends in methane emissions from a small eutrophic reservoir: The key role of a spring burst. Biogeosciences, 18: 5291–5311

Wang L, Xiao C D, Du Z H, et al. 2022. In-situ measurement on air-water flux of CH_4, CO_2 and their carbon stable isotope in lakes of northeast Tibetan Plateau. Adv Clim Change Res, 13: 279–289

Woolway R I, Kraemer B M, Lenters J D, et al. 2020. Global lake responses to climate change. Nat Rev Earth Environ, 1: 388–403

Wu Y, Wang N A, Zhao L Q, et al. 2014. Hydrochemical characteristics and recharge sources of Lake Nuoertu in the Badain Jaran Desert. Chin Sci Bull, 59: 886–895

Xiao W, Liu S D, Li H C, et al. 2014. A flux-gradient system for simultaneous measurement of the CH_4, CO_2, and H_2O fluxes at a lake-air interface. Environ Sci Technol, 48: 14490–14498

Xu L J, Liu H Z, Du Q, et al. 2021. Characteristics of lake breezes and their impacts on energy and carbon fluxes in mountainous areas. Adv Atmos Sci, 38: 603–614

Yang P, Wang N A, Zhao L Q, et al. 2021. Variation characteristics and influencing mechanism of CO_2 flux from lakes in the Badain Jaran Desert: A case study of Yindeer Lake. Ecol Indic, 127: 107731

Yang R J, Xu Z, Liu S L, et al. 2019. Daily pCO_2 and CO_2 flux variations in a subtropical mesotrophic shallow lake. Water Res, 153: 29–38

Yang R J, Chen Y Y, Du J, et al. 2022. Daily Variations in pCO_2 and fCO_2 in a Subtropical Urbanizing Lake. Front Earth Sci, 9: 805276

Yang R J, Chen Y Y, Li D, et al. 2023. Significant daily CO_2 source-sink interchange in an urbanizing lake in southwest China. Water, 15: 3365

Yuan D N, Li S Y, Xu Y J, et al. 2024. Response of dissolved carbon dioxide and methane concentration to warming in shallow lakes. Water Res, 251: 121116

Zagarese H E, Sagrario M Á G, Wolf-Gladrow D, et al. 2021. Patterns of CO_2 concentration and inorganic carbon limitation of phytoplankton biomass in agriculturally eutrophic lakes. Water Res, 190: 116715

Zhang F J, Xue B, Cai Y J, et al. 2023. Utility of Trophic State Index in lakes and reservoirs in the Chinese Eastern Plains ecoregion: The key role of water depth. Ecol Indic, 148: 110029

Zhang Z Z, Yu R H, Xia X H, et al. 2022. Significant diurnal variation of CO_2 flux from a shallow eutrophic lake: Effects of submerged aquatic vegetation and algae bloom. Aquat Sci, 84: 62

Zhang Z, Zhang M, Cao C, et al. 2020. A dataset of microclimate and radiation and energy fluxes from the Lake Taihu eddy flux network. Earth Syst Sci Data, 12: 2635–2645

Zhang Z, Bansal S, Chang K, et al. 2023. Characterizing performance of freshwater wetland methane models across time scales at FLUXNET-CH_4 sites using wavelet analyses. J Geophys Res-Biogeosci, 128: e2022JG007259

Zhao J Y, Zhang M, Xiao W, et al. 2019. An evaluation of the flux-gradient and the eddy covariance method to measure CH_4, CO_2, and H_2O fluxes from small ponds. Agric For Meteorol, 275: 255–264

Zhao L, Zhu R, Zhou Q C, et al. 2023. Trophic status and lake depth play important roles in determining the nutrient-chlorophyll a relationship: Evidence from thousands of lakes globally. Water Res, 242: 120182

Zhou N, Liu Z C, Liu K, et al. 2023. Carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in China's lakes: Climatic and geographic influences. Environ Monit Assess, 195: 113

Zwart J A, Hanson Z J, Read J S, et al. 2019. Cross-scale interactions dictate regional lake carbon flux and productivity response to future climate. Geophys Res Lett, 46: 8840–8851

（责任编委：孟雅冰）