

青藏高原更尕海水—气界面 CO_2 交换通量及其影响因素

林嘉欣^{1,2}, 金彦香^{1,2,3*}, 徐 勇⁴, 金 鑫^{1,2,3}, 刘铖霖^{1,2}, 李 渊⁵

(1. 青海师范大学地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810016;

2. 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810016;

3. 青海省人民政府—北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘 要:湖泊作为陆地水生生态系统的重要组成部分,对全球碳收支有着重要作用。理解湖泊水—气界面 CO_2 交换通量($F(\text{CO}_2)$)及影响因素是探讨湖泊碳收支的重要基础和前提。为探究青藏高原湖泊水—气界面碳收支及其影响因素,课题组于2021年7月23日、8月8日、8月28日、9月25日、9月26日8:00~17:00采用静态箱法对更尕海湖泊水深10、20、30、80和150 cm水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 开展连续、定点监测,初步探讨了该湖泊水—气界面 CO_2 交换特征及其影响因素。结果表明,更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 变化介于 $-19.44 \sim 22.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,平均值为 $-2.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,因此,更尕海为大气 CO_2 的汇。特别是在12:00~14:00之间,湖泊“汇”的功能表现得更为明显,这可能主要与强烈的水生植物光合作用带来的水体pH值较高有关。此外,湖泊内水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 具有明显的空间差异。水深30 cm处水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 平均值为正值,呈现出 CO_2 释放状态;其余4个监测点水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 平均值均为负值,呈现出 CO_2 吸收状态。这主要与水深30 cm监测点周围生长有大量黄苔,可能抑制了其他浮游植物、水生植物的繁殖有关。青藏高原湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 存在明显的时间和空间差异,未来评估其碳源汇潜力时应综合考虑湖泊内部和不同时间湖泊碳收支通量,以提高评估的准确性。

关 键 词:浅水草型湖泊;水—气界面;二氧化碳;更尕海;青藏高原

大气中温室气体浓度的不断升高加剧了温室效应,由此诱发增温效应对全球生态环境变化与社会经济发展产生了重要影响^[1]。湖泊占全球陆地总面积的3.7%^[2],其与陆地生态系统物质和能量交换强烈,对全球陆地生态系统碳收支有着重要的影响^[3-8]。湖泊水—气界面 CO_2 交换通量($F(\text{CO}_2)$)及其变化直接影响水体的碳收支功能。Sobek等^[9]进一步指出湖泊向大气净排放的 CO_2 量为 $0.07 \sim 0.15 \text{ pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。因此,评价湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 是准确评估湖泊碳收支的重要基础和前提。

20世纪80年代以来,学者们通过监测湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$,认为绝大多数湖泊为碳源^[10-12],仅有少部分湖泊表现为碳汇^[13],相关研究主要集中在热带亚马逊地区^[14-16]、北温带^[17]、北美五大湖区^[18]。中国湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 变化特征及其影响因素研究起步较晚,且主要集中在长江中下游平原^[19-24]、云贵高原^[25-27]以及内蒙古高原^[28]。研究发现,同一时间尺度不同区域或者同一区域不同时间尺度其水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 及其影响因素均具有差异性,证实湖泊表面复杂的生产/消耗机制导致湖泊水—气

收稿日期:2023-05-15;修订日期:2023-08-27。

基金项目:国家自然科学基金项目(42201174);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0406);青海省自然科学基金项目(2021-ZJ-705)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42201174; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No. 2019QZKK0406; Qinghai Provincial Natural Science Foundation of China, No. 2021-ZJ-705.]

第一作者简介:林嘉欣(1996—),女,宁夏银川人,硕士生,主要研究方向为湖泊碳循环。E-mail: 865822957@qq.com

*通信作者简介:金彦香(1989—),女,甘肃白银人,副教授,主要研究方向为生态水文。E-mail: jinyx13@lzu.edu.cn

引用格式:林嘉欣,金彦香,徐勇,等. 青藏高原更尕海水—气界面 CO_2 交换通量及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2023, 42(10): 1984-1993.
[Lin Jiaxin, Jin Yanxiang, Xu Yong, et al. Variations in CO_2 fluxes at the water-air interface and its influencing factors in the Genggahai Lake on the Qinghai-Tibetan Plateau. Progress in Geography, 2023, 42(10): 1984-1993.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.10.010

界面 CO₂ 交换过程存在复杂性^[29-30]。

青藏高原是中国重要的生态安全屏障,该地区碳收支变化对区域及全球碳循环意义重大。青藏高原湖泊面积约占全国湖泊总面积的 57%^[31]。海拔高、太阳辐射强烈、缺氧、气温低及昼夜温差大的气候环境可能使得该地区湖泊生态系统碳收支过程具有其独特性。然而,目前对青藏高原源汇功能研究仍相当匮乏,极大限制了对该区域碳源汇功能的整体认知^[32]。Wen 等^[33]、Guo 等^[34]和 Li^[35]等发现,青藏高原咸水湖泊是 CO₂ 的汇,并认为这主要与咸水湖高 pH 值带来的化学吸收过程有关。也有研究指出,受陆源有机碳输入和湖泊面积扩张影响,青藏高原湖泊总体是碳源^[36-38]。生物吸收过程使得湖泊成为 CO₂ 的汇,这在中国南方地区洞庭湖、太湖、三担湖等已有系统认识^[23,39-40]。青藏高原湖泊中水生植物生长对湖泊水—气界面 CO₂ 交换是否有影响?此外,流域气象因子(如温度、风速)和湖泊水环境因子(如 pH、DO)如何影响青藏高原湖泊水—气界面 CO₂ 交换?这些问题的回答对于认识该区域湖泊碳收支及其影响因素具有重要意义。

本文选取青藏高原东北部湖泊更尕海为研究对象,采用静态箱法对该湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 进行系统监测,初步探讨湖泊水—气界面 CO₂ 交换特征及其影响因素,可为深入理解青藏高原湖泊碳收支及其影响机理提供实证案例,也可为准确评估中国陆地生态系统碳源/汇的时空分布格局积累基础资料。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区概况

共和盆地(35°27'~36°56'N,98°46'~101°22'E)位于青藏高原东北部,具有高寒干旱半干旱大陆性气候特征^[41]。共和县气象观测站 1990—2020 年记录显示,该地区年平均气温为 5.1℃,年平均降水量为 325 mm。更尕海(36°11'N、100°06'E,图 1a)位于共和盆地中部,湖面海拔 2860 m,最大水深约为 1.8 m,水域面积约 2 km²^[42]。更尕海为一浅水草型湖泊。2021 年调查显示,该湖泊内未见轮藻(*Chara*)生长,零星分布芦苇(*Phragmites australis*)、眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)等,黄苔(*Spirogyra communis*)生长较为密集深水区狐尾藻植物(*Myriophyllum spicatum*)分布广泛(图 1b)。

1.2 样品采集

根据更尕海水深和植物分布特征,分别在水深 10、20 cm 的水生植物稀少区域、水深 30 cm 的黄苔爆发区域、水深 80 cm 的水生植物稀少区域(S4)和水深 150 cm 的狐尾藻高覆盖度区域布置 5 个采样点开展监测(图 1b、表 1)。监测时间为 2021 年 7 月 23 日、8 月 8 日和 28 日、9 月 25—26 日。监测工作自上午 8:00 开始,下午 17:00 结束(由于天气原因,8 月 8 日监测时间自 8:00 开始,13:00 结束;8 月 28 日 S5 检测点自 8:00 开始,14:00 结束)。

气体采集使用静态箱法,静态箱箱体采用 PC

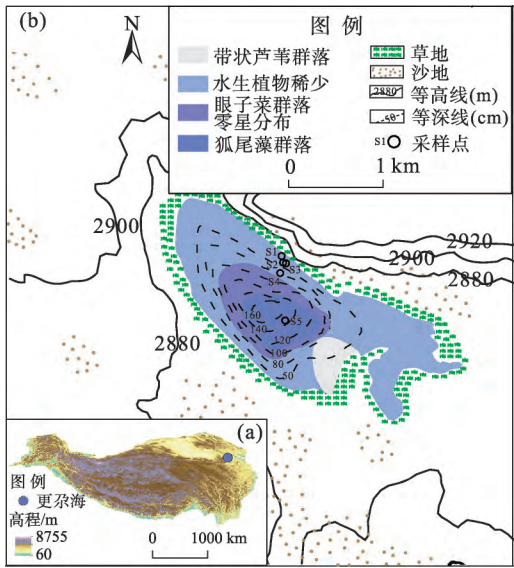


图 1 更尕海湖泊地理位置(a)与采样点分布(b)
Fig.1 Geographic location (a) of the Genggahai Lake and sampling point distribution (b)

表 1 监测点位置及相关信息一览表
Tab.1 Location and general information of the observation sites in the Genggahai Lake

监测点	经纬度	水深/ cm	周围植被 类型	采样时间及 天气状况
S2	36°11'47"N 100°06'04"E	10		7 月 23 日(晴)
				8 月 8 日(晴转小雨)
				8 月 28 日(晴)
S1	36°11'47"N 100°06'01"E	20		9 月 25 日(晴转阴)
				9 月 26 日(晴转阴)
S3	36°11'47"N 100°06'03"E	30	黄苔	
S4	36°11'43"N 100°06'0"E	80		
S5	36°11'23"N 100°06'11"E	150	狐尾藻	

材料做成直径26 cm、高35 cm、顶部密封、底部中通的圆柱体,底部安置防潮垫,使其能浮动在水面之上(图2)。在箱体顶部通3根短管,其中一根通往气管,末端连接带三通阀的注射器;一根是电子温度计,粘贴在箱内;另外一根在箱体内部放置电风扇以均匀搅动空气。箱体表层包裹锡箔纸,以降低太阳辐射对箱体环境的影响。采样前,箱体置于空气中,内部气体与空气流通。采样时,将静态箱置于水面,保证箱体漂浮于水面上,下方箱口浸入水中,箱内空气与外界空气隔绝。从观测时间开始,通过箱顶连接的50 mL注射器,每隔15 min采集一次气样,即每个箱体1 h采集4个气样。由于连接箱体与注射器的气体管道有一定长度,在每次采气前,通过缓慢拉推注射器,使箱体及管道内气体均匀,采集的气样保存在容量为50 mL注射器中,再用保鲜膜包裹防止气体溢出,标记好序号及时间样品号等信息,放置阴凉处,待返回实验室后进行测定。采用多参数水质分析仪器(Aquaread AP-1000)现场原位测量水体pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP),并且使用便携式叶轮风速仪(Kestrel 5500LINK)同步测量气温、气压和风速等环境参数,使用TES-1339R分析仪测量光照度。

1.3 样品分析

CO₂气体含量测定采用气相色谱仪法(Agilent 7890B, USA)测定,CO₂检测器为热导检测器(TCD),灵敏度 $\geq 800 \text{ mV} \cdot \text{mL} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。色谱柱和样品分别为HP-5.30 $\text{m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$ (19091J.413),流速为 $6.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,模式为恒定流量,进样口温度为 250°C ,检测器温度为 300°C ,载气为H₂。

1.4 CO₂通量计算方法

根据气象色谱仪的分析结果,求出气体质量浓度随时间的变化率,经式(1)计算水—界面CO₂交换通量^[43]:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为温室气体排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下被测气体密度($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为静态箱体积(m^3); A 为静态箱覆盖面积(m^2); P 为采样点气压(hPa); P_0 为标准状态下的大气压(hPa); T_0 为标准状态下空气绝对温度(K); T 为采样时箱内绝对温度(K); dC_t/dt 为采样点箱内被测气体的浓度随时间的变化率。交换通量为正值时表示水体向大气排放CO₂,为负值时表示水体从大气中吸收CO₂。

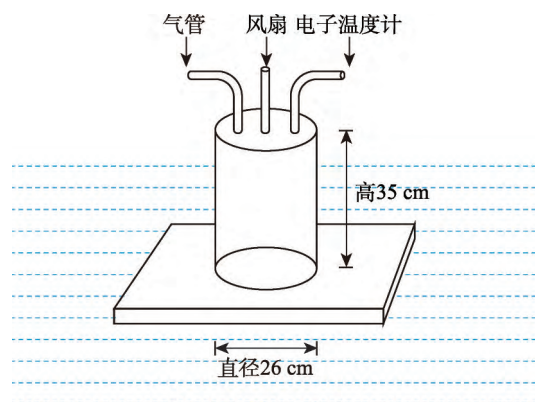


图2 静态箱示意图

Fig.2 Schematic diagram of the closed static chamber

文中日平均值指白天监测时段内平均值,非24 h昼夜监测平均值。

2 结果与分析

2.1 近湖面气象因子变化

整个监测期内,近湖面气温、风速和光照度分别在 $12.10 \sim 33.90^\circ\text{C}$ 、 $0 \sim 6.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4359 \sim 121200 \text{ lux}$ 范围波动,平均值分别为 22.98°C 、 $2.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 63480.74 lux 。不同监测日,近湖面气象因子表现出明显的差异性。上午8:00至下午17:00,各监测日气温平均值大小依次为 28.15°C (7月23日) $> 23.10^\circ\text{C}$ (8月8日) $> 22.79^\circ\text{C}$ (8月28日) $> 20.44^\circ\text{C}$ (9月25日) $> 20.50^\circ\text{C}$ (9月26日);风速平均值大小依次为 $3.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (9月26日) $> 3.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (8月28日) $> 2.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (9月25日) $> 1.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (8月8日) $> 0.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (7月23日);光照度平均值大小依次为 87526.70 lux (8月28日) $> 69748.80 \text{ lux}$ (9月26日) $> 64240.60 \text{ lux}$ (9月25日) $> 59905 \text{ lux}$ (8月8日) $> 34552.30 \text{ lux}$ (7月23日)。

天气晴朗状况下,近湖面气温自12:00开始大体呈现明显上升趋势;风速在12:00后保持在相对较低状态(图3a、3b)。随着天气由晴转阴或晴转小雨,近湖面气温开始下降,风速逐渐升高(图3a、3b)。光照度总体上在13:00~15:00之间保持在较高水平(图3c)。

2.2 湖泊水环境因子变化

整个监测期内,湖泊DO、pH和ORP分别变化在 $0.1 \sim 7.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.26 \sim 9.63$ 和 $27 \sim 170 \text{ mV}$ (图3d、3e、3f)。平均值分别为 $3.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 9.49 和 94.22 mV 。不同监测日,近湖面气象因子表现出明显的

差异性。上午 8:00 至下午 17:00, 各监测日 DO 平均值大小依次为 $5.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (8月8日) $> 3.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (9月25日) $> 3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (9月26日) $> 3.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (7月23日) $> 3.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (8月28日); pH 平均值大小依次为 9.52 (9月25日) > 9.49 (9月26日); ORP 平均值大小依次为 156.80 mV (8月8日) $> 111.90 \text{ mV}$ (8月28日) $> 109.70 \text{ mV}$ (7月23日) $> 64.50 \text{ mV}$ (9月25日) $> 59.50 \text{ mV}$ (9月26日)。

2.3 更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 时空变化

更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的日变化动态如图 4a 所示, 水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的变化范围为 $-19.44 \sim 22.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值为 $-2.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 最大值为 $22.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 出现在 8月8日 12:00; 吸收通量最大值出现在 7月23日 13:00 和 8月8日 10:00, 通量值分别为 -19.44 和 $-19.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。观测期间每日的吸收峰值出

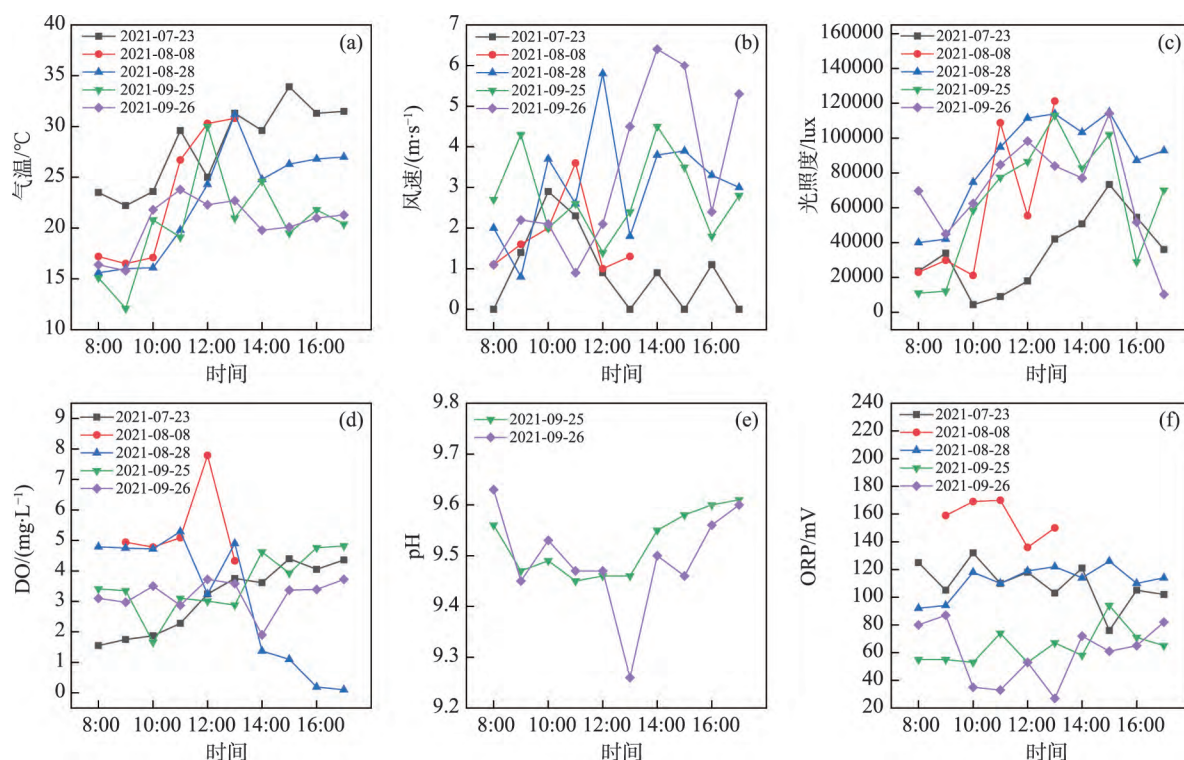


图3 更尕海近湖面气象因子与湖泊水环境因子变化

Fig.3 Variations in meteorological factors and water chemical factors in the Genggahai Lake

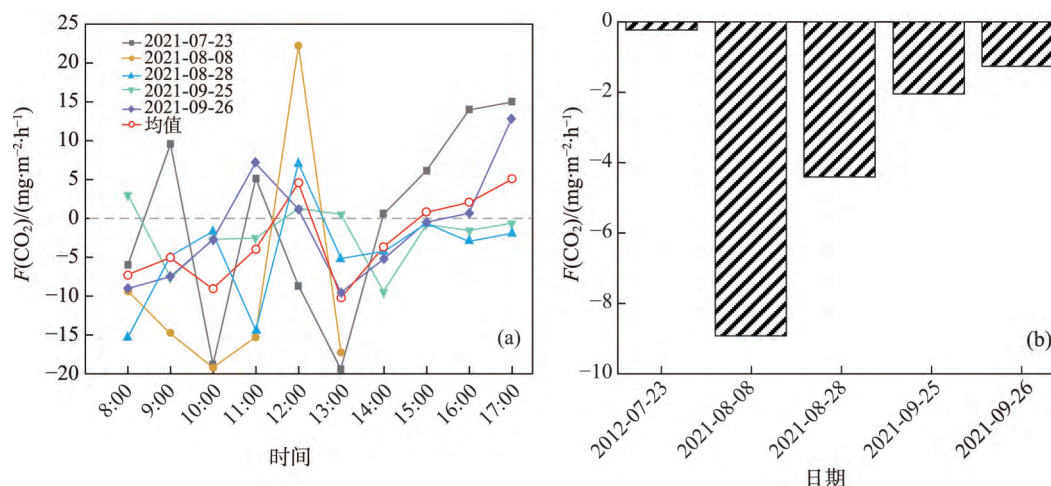


图4 更尕海水—气界面 CO_2 交换通量日变化(a)与各监测日水—气界面 CO_2 交换通量平均值变化(b)

Fig.4 Daily variation of $F(\text{CO}_2)$ (a) and variations in average $F(\text{CO}_2)$ on the observation dates (b) in the Genggahai Lake

现在10:00和13:00左右,释放峰值出现在12:00和17:00左右。5个监测时段内,更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出相对一致的变化趋势,上午8:00~9:00开始,水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 逐渐升高,至11:00~12:00之间上升至较大值,然后逐渐降低;在16:00后呈现上升趋势,湖泊表现为大气 CO_2 “源”的特征逐渐明显(图4a)。8月8日水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 波动较大,8:00~10:00吸收通量值逐渐上升,在10:00达到吸收较大值,而后在10:00~12:00排放通量逐渐升高,在12:00上升至最大值。7月23日,水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 也具有较大波动,在10:00~12:00之间排放通量上升至较大值,而后开始降低,14:00后排放通量处于上升状态至17:00时上升至最大值。与7月23日相似,9月26日水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 最大值也出现在17:00左右。

7月23日、8月8日、8月28日、9月25日、9月26日更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 日平均值均为负值,表明湖泊呈现吸收 CO_2 状态,湖泊为大气 CO_2 的“汇”(图4b)。具体来说,日平均吸收通量值表现为 $-8.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (8月8日) $> -4.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (8月28日) $> -2.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (9月25日) $> -1.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (9月26日) $> -0.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (7月23日)。

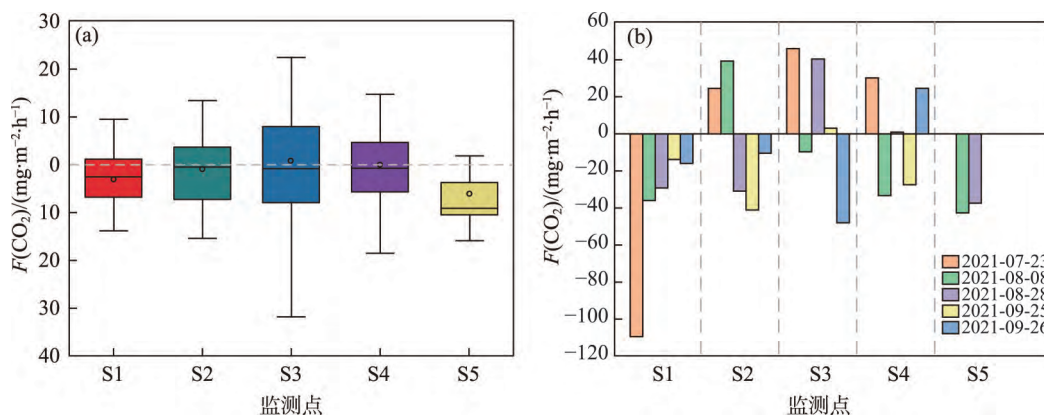
观测期内不同监测点水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 存在明显差异(图5a)。S3的水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 平均值为正值,呈现出 CO_2 释放状态;其余4个监测点的 $F(\text{CO}_2)$ 平均值均为负值,呈现出 CO_2 吸收状态。从 CO_2 吸收的角度来看,S5的吸收通量平均值最高($-6.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),其次S1的 CO_2 排放通量平均值($-3.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)高于S2($-0.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)和S4

($-0.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),S3测点最低($0.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) (图5a)。此外,不同监测点在不同日期水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 也呈现出差异性(图5b)。更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 在S1的5次监测中均为负值,呈现出吸收状态,并且水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 在7月23日吸收速率达到最大值,为 $-109.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3 更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 影响因子分析

湖泊水—气界面 CO_2 交换与一系列生物、物理和化学过程有关。水中 CO_2 主要来源于湖泊沉积有机质矿化分解及水生植物呼吸作用^[44];而水生植物光合作用及湖泊内自生碳酸盐沉淀形成均会消耗水中 CO_2 ^[45]。流域内温度、风速及气压等都会影响水—气界面 CO_2 交换通量^[46-52];湖泊水环境,如湖泊内水生植物的类型、水体富营养化程度等也会在水—气界面 CO_2 交换通量产生影响^[53]。基于此,本文分析更尕海流域内气温、风速、气压及水体ORP、pH、DO与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的相关关系(图6)。

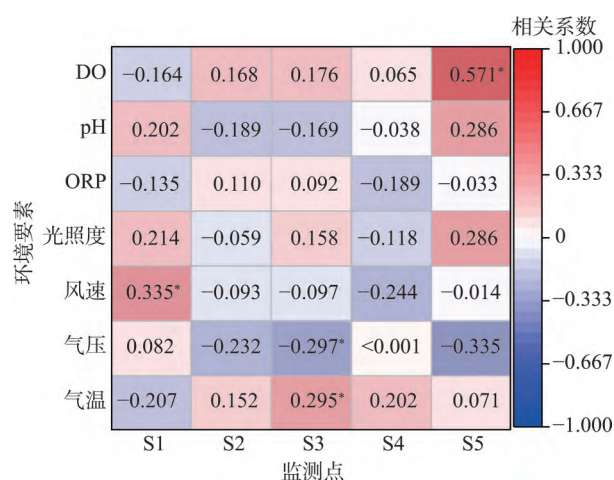
一般情况下,随着流域内温度升高,一方面导致水体 CO_2 溶解度降低,水中微生物活性增强,水体中DO含量下降,使得底泥呼吸作用增强,促进了水体 CO_2 排放^[54];另一方面导致水生植物光合作用增强,大量 CO_2 被固定在植物有机体中,水体 CO_2 分压降低,有助于水体吸收大气 CO_2 ^[46]。监测期间,仅S3水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 与气温呈显著正相关($r=0.295$, $P<0.05$),其他监测点水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 与气温未表现出显著相关性。这表明气温对监测点S3



注:图a中圆圈代表平均值,横线代表中值,工字形代表标准误差。

图5 更尕海各采样点水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ (a)与不同日期水—气界面总 $F(\text{CO}_2)$ 变化(b)

Fig.5 Spatial variation of the total $F(\text{CO}_2)$ at different sites (a) and the variation of the total $F(\text{CO}_2)$ on observation dates (b) in the Genggahai Lake



注: *表示 $P < 0.05$ 。

图6 更尕海各监测点水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 与环境要素的相关系数

Fig.6 Correlation coefficients of $F(\text{CO}_2)$ and environmental factors at the monitoring points in the Genggahai Lake

水体 CO_2 释放有着促进作用。位于半干旱区的乌梁素海,在温度较高的7月具有较大的 $F(\text{CO}_2)$,湖泊表现为 CO_2 的源,气温与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出正相关^[28],这与本研究有相同的发现。

风速可以通过扰动水体,进而增加水体和空气的接触面积,导致水中 CO_2 通量增加^[51]。监测期内,风速仅在监测点 S1 与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出显著正相关($r=0.335, P<0.05$),在其他监测点未表现出显著相关性。Mammarella 等^[12]和 Natchimuthu 等^[52]的研究均指出,风速主导影响水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的条件下,风速越大,水体 CO_2 释放速率越快;由气温、水温及太阳辐射等因子主导,风速与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的相关性会减弱。张状^[28]的研究也指出,藻类爆发、沉水植被覆盖会减弱水体表面的扰动,造成风速与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 不相关。

气压通过改变 CO_2 在水体中的溶解度来影响水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 。随着气压增大, CO_2 在水体中的溶解度升高,水体吸收 CO_2 的量则越大^[39]。此外,气压升高时,水体中 O_2 的溶解度增大,水中的有机碳在好氧细菌的分解下产生更多 CO_2 ^[55]。监测期内,气压仅在 S3 与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出显著负相关($r=-0.297, P<0.05$)。这可能与 S3 的 CO_2 呈释放状态,随着气压增大, S3 的水体溶解 CO_2 增加有关。在其他监测点, CO_2 呈吸收状态,气压对水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 影响不显著,因此二者未表现出显著相关关系。

水体 DO 变化与水生生物活动有关^[56]。如前文所述,水生植物光合作用增强,导致水体 DO 增加,增强水体 CO_2 吸收作用^[44],使得水体 DO 与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出显著正相关关系。监测期内, DO 在 S5 与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出显著正相关($r=0.571, P<0.05$)。S5 生长着大量狐尾藻,水生植物光合作用较强,吸收大气 CO_2 作用也较强。水体 pH 值也是影响水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的重要水环境因子。当 pH 值较高时,水体中游离的 CO_2 就会转变为碳酸盐,水体 CO_2 分压降低,促使大气 CO_2 进入水体;相反,当水体 pH 较低时, CO_2 则从水体扩散至大气中。然而,本文中水体 pH 未与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 表现出显著相关性,乌梁素海也有相同的发现^[28]。这可能与浅水湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 变化易受到天气状况的影响,使得水体 CO_2 的源汇出现变化;另外,在其他因子也对湖泊水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 变化产生重要影响时, pH 单一因子与水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 的相关性就会减弱。Tremblay 等^[51]发现,当 pH 值 >8 时,所观测的湖泊和水库会从大气中吸收 CO_2 气体,水体成为 CO_2 的汇。观测期内,更尕海沉水植物强烈的光合作用使得水体 pH 值升高^[42], pH 值 >9 ,这可能是水体整体表现为大气 CO_2 的“汇”的主要原因。更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 在 12:00~14:00 之间呈现出负值,而自 17:00 开始,随着温度降低,水生植物光合作用减弱,水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 逐渐变为正值,这一变化趋势也证实了水生植物强烈的光合作用对其的影响。

不同监测日更尕海水—气界面日平均 $F(\text{CO}_2)$ 均为负值,即湖泊为大气 CO_2 的“汇”,但其“汇”的强弱程度存在差异(图 4b)。5—9 月,随着气温升高,更尕海沉水植物光合作用逐渐增强,水体 CO_2 分压降低,促使大气 CO_2 进入水中^[57]。7 月 23 日更尕海流域光照度远远低于其他监测日(图 3c),使得对应时段水生植物光合作用强度远远低于其他监测日。8 月 8 日、9 月 25 日、9 月 26 日水体较高的 DO 也从侧面证实了这一推测。更尕海作为大气 CO_2 的“汇”不仅在时间尺度上存在明显的强弱差异,空间尺度上也表现出明显的差异。5 个监测日中 S1 均表现为大气 CO_2 的汇,且 S1、S2 水体吸收大气 CO_2 的程度较 S4 更强,仅有 S3 呈现出释放状态。当 S3 呈现释放状态时,其水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 与气温呈显著正相关(图 6),意味着随着温度的升高,水体中有机质的分解速度加快, S3 周围生长的大量

黄苔可能抑制了其他浮游植物、水生植物的大量繁殖^[28]。这可能是更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 在空间分布表现出黄苔分布区高于其他区域的原因。S1、S2 位于湖滨浅水地带, S3、S4 水位较深, S5 水位最深。然而, 并不能以此推测更尕海浅水区碳汇功能较深水区强。鉴于监测期短、数据量较少, 有待于进一步开展工作。

4 结论与讨论

(1) 更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 变化介于 $-19.44 \sim 22.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值为 $-2.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 为大气 CO_2 的汇。8月8日水体吸收的 CO_2 最多, 平均值为 $-8.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 7月23日吸收的 CO_2 最少, 平均值为 $-0.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。昼间更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 为负值, 即湖泊为大气 CO_2 的“汇”, 特别是在 12:00~14:00 间表现得更为明显, 这可能主要与强烈的水生植物光合作用带来的水体 pH 值较高有关。

(2) 不同监测日更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 具有明显的时间差异, 这可能主要受控于太阳辐射影响的水生植物光合作用的强弱程度。更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 具有明显的空间差异。监测点 S3 周围生长的大量黄苔可能抑制了其他浮游植物、水生植物的大量繁殖, 使得 S3 的 $F(\text{CO}_2)$ 平均值为正值, 呈现出 CO_2 释放状态; 其余 4 个监测点的 $F(\text{CO}_2)$ 平均值均为负值, 呈现出 CO_2 吸收状态。

(3) 相关分析表明, 监测点 S1 的 $F(\text{CO}_2)$ 与风速呈显著正相关; S3 的 $F(\text{CO}_2)$ 与气温呈显著正相关, 与气压呈显著负相关; S5 的 $F(\text{CO}_2)$ 与 DO 呈显著正相关, 其他环境因素的影响并不明显。具体来看, 风速造成 S1 表层水体发生扰动, 进而影响其水—气界面的 $F(\text{CO}_2)$ 。S3 由于温度的升高, 水体中有机质的分解速度加快, 周围生长的大量黄苔可能抑制了其他浮游植物、水生植物的大量繁殖, 并且随着气压增大, 水体溶解 CO_2 增加, 使得 S3 呈现出水体释放 CO_2 的特征。S5 生长着大量狐尾藻, 水生植物光合作用较强, 导致水体 DO 增强, 因此, S5 吸收大气 CO_2 作用也较强。作为面积较小的湖泊, 更尕海水—气界面 $F(\text{CO}_2)$ 存在明显的时间和空间差异, 通量变化可达 126%。未来应综合考虑湖泊内部和不同时间湖泊碳收支通量, 以提高青藏高原湖泊碳源汇潜力评估的准确性。

致谢: 感谢青海师范大学郑丽、张富兄、权欣忠等多位同学参与采样。

参考文献(References)

- [1] Tollefson J. IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125000 years [J]. *Nature*, 2021, 596: 171-172.
- [2] Holgersson M A, Raymond P A. Large contribution to inland water CO_2 and CH_4 emissions from very small ponds [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(3): 222-226.
- [3] 胡文峰, 王乃昂, 赵力强, 等. 巴丹吉林沙漠典型湖泊湖气界面水—热交换特征 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 1061-1071. [Hu Wenfeng, Wang Nai'ang, Zhao Li-qiang, et al. Water-heat exchange over a typical lake in Badain Jaran Desert, China. *Progress in Geography*, 2015, 34(8): 1061-1071.]
- [4] 段洪涛, 罗菊花, 曹志刚, 等. 流域水环境遥感研究进展与思考 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(8): 1182-1195. [Duan Hongtao, Luo Juhua, Cao Zhigang, et al. Progress in remote sensing of aquatic environments at the watershed scale. *Progress in Geography*, 2019, 38(8): 1182-1195.]
- [5] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2298-2314.
- [6] Finlay K, Vogt R J, Simpson G L, et al. Seasonality of pCO_2 in a hard-water lake of the northern Great Plains: The legacy effects of climate and limnological conditions over 36 years [J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, 64(1): 118-129.
- [7] Serikova S. Carbon Emissions from Western Siberian Inland Waters [D]. Umea, Sweden: Umea University, 2019.
- [8] Martinsen K T, Kragh T, Sand-Jensen K. Carbon dioxide efflux and ecosystem metabolism of small forest lakes [J]. *Aquatic Sciences*, 2019, 82(1): 1-17.
- [9] Sobek S, Tranvik L J, Cole J J. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2). doi: 10.1029/2004GB002264.
- [10] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, et al. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes [J]. *Science*, 1994, 265: 1568-1570.
- [11] Spafford L, Risk D. Spatiotemporal variability in lake-atmosphere net CO_2 exchange in the littoral zone of an oligotrophic lake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(4): 1260-1276.
- [12] Mammarella I, Nordbo A, Rannik Ü, et al. Carbon dioxide and energy fluxes over a small boreal lake in Southern Finland [J]. *Journal of Geophysical Research: Bio-*

- geosciences, 2015, 120(7): 1296-1314.
- [13] Balmer M B, Downing J A. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: Undersaturation implies atmospheric uptake [J]. *Inland Waters*, 2011, 1(2): 125-132.
- [14] Yang R J, Xu Z, Liu S L, et al. Daily pCO₂ and CO₂ flux variations in a subtropical mesotrophic shallow lake [J]. *Water Research*, 2019, 153: 29-38.
- [15] Rudorff C M, Melack J M, Macintyre S, et al. Seasonal and spatial variability of CO₂ emission from a large floodplain lake in the lower Amazon [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(4). doi: 10.1029/2011JG001699.
- [16] Polsenaere P, Deborde J, Detandt G, et al. Thermal enhancement of gas transfer velocity of CO₂ in an Amazon floodplain lake revealed by eddy covariance measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9). doi:10.1002/grl.50291.
- [17] Hanson P C, Pollard A I, Bade D L, et al. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(8): 1285-1298.
- [18] Weiler R R. Carbon dioxide exchange and productivity in Lake Erie and Lake Ontario [J]. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 1975, 19(1): 694-704.
- [19] 齐天赐, 肖启涛, 苗雨青, 等. 巢湖水体二氧化碳浓度时空分布特征及其水—气交换通量 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(3): 766-778. [Qi Tianci, Xiao Qitao, Miao Yuqing, et al. Temporal and spatial variation of carbon dioxide concentration and its exchange fluxes in Lake Chaohu. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3): 766-778.]
- [20] 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 等. 不同水文情景下洪泽湖二氧化碳排放通量特征及影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1347-1358. [Zhu Junyu, Peng Kai, Li Yuyang, et al. Characteristics and influence factors of carbon dioxide efflux from Lake Hongze under different hydrological scenarios. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4): 1347-1358.]
- [21] 李香华. 太湖水—气界面温室气体通量及时空变化特征研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005. [Li Xianghua. Study of the greenhouse gas flux of water-air interface and its spatio-temporal change in Taihu Lake. Nanjing, China: Hohai University, 2005.]
- [22] 胡博文. 气候变暖与富营养化趋势下浅水湖泊水—气界面温室气体交换机制研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. [Hu Bowen. The greenhouse gases exchange mechanism at the water-air interface of shallow lakes, response to climate warming and eutrophication. Wuhan, China: Huazhong Agricultural University, 2020.]
- [23] 陈永根, 李香华, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水—气界面 CO₂ 通量 [J]. *生态环境*, 2006, 15(4): 665-669. [Chen Yonggen, Li Xianghua, Hu Zhixin, et al. Carbon dioxide flux on the water-air interface of the eight lake in China in winter. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 665-669.]
- [24] 嵇晓燕, 崔广柏, 杨龙元, 等. 太湖水—气界面 CO₂ 交换通量观测研究 [J]. *环境科学*, 2006, 27(8): 1479-1486. [Ji Xiaoyan, Cui Guangbai, Yang Longyuan, et al. Measurement of the CO₂ flux on the water-air interface of Taihu Lake. *Environmental Science*, 2006, 27(8): 1479-1486.]
- [25] 刘涛泽, 王宝利, 朱四喜, 等. 红枫水库水—气界面二氧化碳分压及扩散通量的时空变化 [J]. *地球与环境*, 2019, 47(6): 851-856. [Liu Taoze, Wang Baoli, Zhu Sixi, et al. Spatiotemporal variation of CO₂ partial pressure and exchange flux at the air-water interface of the Hongfeng Reservoir. *Earth and Environment*, 2019, 47(6): 851-856.]
- [26] Tao F X. Air-water CO₂ flux in an algae bloom year for Lake Hongfeng, Southwest China: Implications for the carbon cycle of global inland waters [J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(4): 658-666.
- [27] 刘辉志, 冯健武, 孙绩华, 等. 洱海湖气界面水汽和二氧化碳通量交换特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(11): 2527-2539. [Liu Huizhi, Feng Jianwu, Sun Jihua, et al. Characteristics of water vapor and carbon dioxide flux exchange at the air interface of Erhai Lake. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(11): 2527-2539.]
- [28] 张状状. 半干旱区富营养化浅水湖泊水—气界面温室气体昼夜变化研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. [Zhang Zhuangzhuang. Diurnal variation pattern of greenhouse gases at water-air interface in an eutrophic shallow lake of semi-arid area. Hohhot, China: Inner Mongolia University, 2021.]
- [29] 张发兵, 胡维平, 杨龙元. 太湖春季水—气界面碳通量日变化观测研究 [J]. *生态环境*, 2004, 13(2): 186-190. [Zhang Fabing, Hu Weiping, Yang Longyuan. Daily variation of carbon dioxide flux on the water-air interface of the Taihu Lake in spring. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004, 13(2): 186-190.]
- [30] 肖启涛. 太湖水—气界面温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)通量研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. [Xiao Qitao. Study on greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014.]
- [31] Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s–2015 and its natural and anthropogenic causes [J]. *Remote*

- Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404.
- [32] 汪涛, 朴世龙. 青藏高原陆地生态系统碳汇估算: 进展、挑战与展望 [J]. 第四纪研究, 2023, 43(2): 313-323. [Wang Tao, Piao Shilong. Estimate of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau: Progresses, challenges and perspectives. Quaternary Sciences, 2023, 43(2): 313-323.]
- [33] Wen Z D, Song K S, Shang Y X, et al. Carbon dioxide emissions from lakes and reservoirs of China: A regional estimate based on the calculated $p\text{CO}_2$ [J]. Atmospheric Environment, 2017, 170: 71-81.
- [34] Guo L N, Wu Y H, Zheng H X, et al. Lake ice phenology dataset across the Tibetan Plateau during 1978–2016 [DB/OL]. A Big Earth Data Platform for Three Poles, 2022. doi: 10.6084/m9.figshare.18852338.v1.
- [35] Li X Y, Shi F Z, Ma Y J, et al. Significant winter CO_2 uptake by saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Global Change Biology, 2022, 28(6): 2041-2052.
- [36] Yan F P, Sillanpää M, Kang S C, et al. Lakes on the Tibetan Plateau as conduits of greenhouse gases to the atmosphere [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(7): 2091-2103.
- [37] Ran L S, Butman D E, Battin T J, et al. Substantial decrease in CO_2 emissions from Chinese inland waters due to global change [J]. Nature Communications, 2021, 12 (1). doi: 10.1038/s41467-021-21926-6.
- [38] Chen H A, Ju P J, Zhu Q A, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 701-716.
- [39] 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 等. 太湖藻型湖区 CH_4 、 CO_2 排放特征及其影响因素分析 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2316-2329. [Jia Lei, Pu Yini, Yang Shijun, et al. Analysis of greenhouse gas emission characteristics and their influencing factors in the algae zone of Lake Taihu. Environmental Science, 2018, 39(5): 2316-2329.]
- [40] 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦. 重庆西部山区典型湖泊水—气界面 CO_2 交换通量及其影响因素 [J]. 环境科学, 2019, 40(1): 192-199. [Luo Jiachen, Ni Maofei, Li Siyue. Water-air interface CO_2 exchange flux of typical lakes in a mountainous area of the western Chongqing and their influencing factors. Environmental Science, 2019, 40(1): 192-199.]
- [41] 宋磊. 晚冰期以来青藏高原东北部更尕海沉积记录的气候变化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Song Lei. Climatic changes documented by sediments from Genggahai Lake since the late Clacial, northeastern Tibetan Plateau. Lanzhou, China: Lanzhou University, 2012.]
- [42] 金彦香, 强明瑞, 刘英英, 等. 共和盆地更尕海湖泊现代水环境与碳酸盐碳氧同位素组成变化 [J]. 科学通报, 2015, 60(9): 847-856. [Jin Yanxiang, Qiang Mingrui, Liu Yingying, et al. Variations in carbon and oxygen isotopes of carbonate and water environments: A case study from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(9): 847-856.]
- [43] Liu J, Jiang P K, Wang H L, et al. Seasonal soil CO_2 efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(6): 1131-1137.
- [44] 高扬, 于贵瑞. 区域 C-N- H_2O 耦合循环过程及其驱动机制 [J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(9): 1195-1205. [Gao Yang, Yu Guirui. Regional coupled C-N- H_2O cycle processes and associated driving mechanisms. Science China: Earth Sciences, 2020, 50(9): 1195-1205.]
- [45] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展 [J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6868-6880. [Yang Ping, Tong Chuan. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: A review. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6868-6880.]
- [46] Junger P C, da Costa Catombé Dantas F, Nobre R L G, et al. Effects of seasonality, trophic state and landscape properties on CO_2 saturation in low-latitude lakes and reservoirs [J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 283-295.
- [47] Rantakari M, Kortelainen P. Interannual variation and climatic regulation of the CO_2 emission from large boreal lakes [J]. Global Change Biology, 2005, 11(8): 1368-1380.
- [48] 吴文欣. 天目湖地区中田舍河流域水体温室气体排放特征及影响因素 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020. [Wu Wenxin. Characteristics and influencing factors of greenhouse gas emissions from the water bodies of the Zhongtianshe River Basin in the Tianmu Lake area. Nanjing, China: Nanjing Normal University, 2020.]
- [49] Rosa L P, dos Santos M A. Certainty and uncertainty in the science of greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs [R]. Cape Town, South Africa: World Commission on Dams, 2000.
- [50] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992, 97(5): 7373-7382.
- [51] Tremblay A, Varfalvy L, Garneau M, et al. Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: Hydroelectric reservoirs and natural environments [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [52] Natchimuthu S, Selvam B P, Bastviken D. Influence of

- weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond [J]. *Biogeochemistry*, 2014, 119: 403-413.
- [53] 邓焕广, 张智博, 刘涛, 等. 城市湖泊不同水生植被区水体温室气体溶存浓度及其影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(4): 1055-1063. [Deng Huanguang, Zhang Zhibo, Liu Tao, et al. Dissolved greenhouse gas concentrations and the influencing factors in different vegetation zones of an urban lake. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 1055-1063.]
- [54] Yu Z J, Wang D Q, Li Y J, et al. Carbon dioxide and methane dynamics in a human-dominated lowland coastal river network (Shanghai, China) [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(7): 1738-1758.
- [55] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1471-1475. [Wang Liang, Xiao Shangbin, Liu Defu, et al. Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1471-1475.]
- [56] Belger L, Forsberg B R, Melack J M. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River Basin, Brazil [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 105: 171-183.
- [57] 金彦香. 共和盆地更尕海现代碳酸盐碳氧同位素变化及其环境意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Jin Yanxiang. Stable isotopes of modern carbonate from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for environmental changes. Lanzhou, China: Lanzhou University, 2017.]

Variations in CO₂ fluxes at the water–air interface and its influencing factors in the Genggahai Lake on the Qinghai–Tibetan Plateau

LIN Jiaxin^{1,2}, JIN Yanxiang^{1,2,3*}, XU Yong⁴, JIN Xin^{1,2,3}, LIU Chenglin^{1,2}, LI Yuan⁵

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining 810016, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810016, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Lake is an important component of terrestrial aquatic ecosystems, which plays an important role in global carbon balance. Investigating the CO₂ exchange flux ($F(\text{CO}_2)$) at the water-air interface and its influencing factors in lakes is fundamental for assessing the carbon budget of lakes. To explore the carbon budget at the water-air interface in Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) lakes, the $F(\text{CO}_2)$ at the water-air interface in the Genggahai Lake were observed continuously from 8:00 a.m. to 17:00 p.m. on 23 July, 8 and 28 August, and 25 and 26 September in 2021 based on the floating chamber method. The depth of water at the monitoring sites was 10 cm, 20 cm, 30 cm, 80 cm, and 150 cm respectively. The results show that the $F(\text{CO}_2)$ varied from -19.44 to $22.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and the average daily $F(\text{CO}_2)$ was $-2.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The Genggahai Lake was a sink of the atmospheric CO₂, especially between 12:00 and 14:00. The daily variations in $F(\text{CO}_2)$ was mostly influenced by the high pH value, which was related to the photosynthesis of submerged plants. In addition, there were significant spatial differences in the $F(\text{CO}_2)$ within the lake. The average $F(\text{CO}_2)$ value in the yellow moss distribution area was positive, suggesting that this area was a carbon source; The average $F(\text{CO}_2)$ values of the other four monitoring points were negative, suggesting that these four monitoring areas were carbon sinks. The $F(\text{CO}_2)$ in QTP lakes showed distinct temporal and spatial differences. To obtain accurate evaluation results of carbon source/sink potential of QTP lakes, we should take carbon budget within the lakes and at different temporal scales into account.

Keywords: shallow macrophytic lake; water-air interface; carbon dioxide; Genggahai Lake; Qinghai-Tibet Plateau