

新疆干旱区典型湖泊的碳排放监测与特征分析*

谭佳宇^{1,2}, 梁妮^{1**}, 周永强³, 肖启涛³, 张力伟⁴, 马玉东⁵, 卜晓彪⁶, 闫起发⁷, 丁金枝^{2**}

(1: 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500)

(2: 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(4: 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

(5: 黄河水利委员会上游水文水资源局, 兰州 730030)

(6: 青海省水文水资源测报中心, 西宁 810001)

(7: 甘肃省酒泉水文站, 嘉峪关 735100)

摘要: 湖泊等水体的碳排放是全球碳循环的重要组成部分,但目前对干旱区湖泊的碳排放特征及其影响机制的研究严重不足,从而导致全球湖泊碳排放估算存在极大不确定性。本研究以新疆干旱区三大典型湖泊——乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖为研究对象,分别于2023年春季和夏季采集气体、水体和沉积物样品,计算各湖泊二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)浓度,并估算了相应的气体扩散通量和冒泡通量,结合水质、气象、沉积物碳氮含量等参数,探讨了新疆干旱区典型湖泊碳排放大小及影响因素。结果表明:3个湖泊均表现为CO₂和CH₄净排放,平均CO₂和CH₄通量分别为(26.8±28.5)和(0.39±0.25) mmol/(m²·d)。受碳源和水质等因素综合影响,湖泊的碳排放通量存在季节差异。具体表现为,春季CO₂通量((19.1±26.5) mmol/(m²·d))低于夏季((31.9±28.5) mmol/(m²·d)),而春季CH₄通量((0.55±0.25) mmol/(m²·d))高于夏季((0.27±0.17) mmol/(m²·d))。在此基础上初步推算,新疆干旱区3个湖泊的CO₂和CH₄排放总量分别为212.0和4.7 Gg/a。相较于其他气候区,新疆干旱区湖泊碳排放偏低,但考虑到全球干旱区湖泊面积辽阔,碳排放总量不容小觑,需要在全局湖泊碳排放相关研究中予以综合考虑。

关键词: 湖泊; 二氧化碳; 甲烷; 碳排放; 干旱区

Carbon emissions monitoring and characteristic analysis of typical lakes in arid regions of Xinjiang*

Tan Jiayu^{1,2}, Liang Ni^{1**}, Zhou Yongqiang³, Xiao Qitao³, Zhang Liwei⁴, Ma Yudong⁵, Bu Xiaobiao⁶, Yan Qifa⁷ & Ding Jinzhi^{2**}

(1: Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P.R.China)

(2: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(4: College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, P.R.China)

(5: Bureau of Hydrology and Water Resources of the Upper Reaches of the Yellow River, Lanzhou 730030, P.R.China)

(6: Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining 810001, P.R.China)

(7: Jiuquan Hydrology Station in Gansu Province, Jiayuguan 735100, P.R.China)

Abstract: Carbon emissions from lakes are an important part of the global carbon cycle. However, the current research on the char-

* 2024-04-09 收稿; 2024-04-22 收修改稿。

第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2022QZKK0101)资助。

** 通信作者; E-mail: jzding@itpcas.ac.cn, liangnikust@163.com。

acteristics of carbon emissions from lakes in arid areas and their influencing mechanisms is seriously insufficient, which leads to great uncertainty in the estimation of global lake carbon emissions. In this study, three typical lakes in arid region of Xinjiang—Ulungur, Sayram and Bosten Lakes were selected as the research objects. Samples of gas, water and sediments were collected in spring and summer of 2023, respectively. The concentrations of carbon dioxide(CO_2) and methane(CH_4) in each lake were calculated, and the corresponding diffusive and ebullitive fluxes were estimated. Combined with water quality, meteorology, sediment carbon and nitrogen content and other parameters, the carbon emission size and influencing factors of typical lakes in Xinjiang were discussed. The results showed that all the three lakes were net emissions of CO_2 and CH_4 , with average CO_2 and CH_4 fluxes of (26.8 ± 28.5) and (0.39 ± 0.25) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively. Due to the comprehensive influence of carbon sources and water quality, the carbon emission fluxes of lakes had seasonal differences. The CO_2 fluxes in spring $((19.1 \pm 26.5)$ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$ was lower than that in summer $((31.9 \pm 28.5)$ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$, and the CH_4 fluxes in spring $((0.55 \pm 0.25)$ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$ was higher than that in summer $((0.27 \pm 0.17)$ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$. On this basis, the magnitudes of CO_2 and CH_4 emissions from the three lakes in the arid region of Xinjiang were 212.0 and 4.7 Gg/a, respectively. Compared with other climate regions, lake carbon emissions in arid areas of Xinjiang were relatively low. However, considering lake areas in global arid regions are big, the magnitude of carbon emissions needs to be comprehensively considered in the research on global lake carbon emissions.

Keywords: Lake; CO_2 ; CH_4 ; carbon emissions; arid region

湖泊是内陆水系的重要组成部分,当前全球湖泊面积约为 3.2×10^6 km^2 ,并且湖泊数量和面积在过去几十年间均呈快速增加趋势^[1]。最近研究表明全球湖泊 CO_2 排放量约为 571 Tg/a, CH_4 排放量达 42 Tg/a^[2-3],约占全球内陆水系碳排放总量的 33%^[4],并且未来气候变化可能使全球湖泊碳排放持续增加^[5]。尽管近年来湖泊碳排放的相关研究取得了长足进步,但当前全球湖泊碳排放估算仍然存在很大的不确定性^[6],其主要原因之一是关键区域的湖泊没有包括在内,特别是干旱区湖泊碳排放的研究寥寥无几^[7],致使当前全球湖泊碳排放的估算可能存在向上修正的问题。另外,现有研究鲜少考虑 CH_4 冒泡通量,这也给湖泊碳排放量估算带来不确定性^[3]。

全球干旱区地域广阔,干旱区湖泊面积约为 4.1×10^5 km^2 ,约占全球湖泊面积的 12.7%^[1,8]。我国干旱区湖泊主要分布于西北寒旱地区,新疆干旱区湖泊总面积达 6680 km^2 ,近年来湖泊面积呈显著扩张趋势^[9]。干旱的气候条件使得这一区域的湖泊具有独特的环境属性:一方面,干旱区降水稀少,植被覆盖率低,湖泊接受的陆源有机碳较低;另一方面,干旱区湖泊盐度偏高,营养物质较少^[10-11]。基于以上两方面特征,我们推测相较于植被覆盖较高的湿润区域,干旱区域湖泊的碳排放通量可能较低。最近的研究^[12]发现新疆博斯腾湖的 CO_2 和 CH_4 扩散通量分别为 12.6 和 0.28 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,仅约相当于全球湖泊平均 CO_2 通量(25.6 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) 和 CH_4 通量(0.54 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)的一半^[2]。即便如此,考虑到干旱区湖泊面积辽阔^[8],其碳排放量依然可观。为此,本研究选择我国新疆干旱区域典型湖泊(包括乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖)作为研究对象,通过野外调查采样结合实验室分析测定,探讨三大湖泊 CO_2 和 CH_4 排放特征,揭示影响干旱区湖泊碳排放的主要环境因素,并评估其排放量级,旨在减小干旱区湖泊碳排放估算的不确定性。

1 材料与方法

1.1 研究区域

乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖分别位于新疆阿勒泰地区福海县、博尔塔拉自治州博乐市和巴音郭勒自治州博湖县,均为典型的干旱区湖泊(图 1)。3 个湖泊不仅为当地经济社会发展提供了宝贵的水资源,还是维系区域生态系统平衡的基石。乌伦古湖是干旱地区典型湖泊,由布伦托海和吉力湖组成,总面积为 1027 km^2 ,其主要补给水源为乌伦古河^[13]。赛里木湖地处天山西北山间盆地中,面积 463 km^2 ,最大水深达到 92 m,主要水源补给为冰雪融水^[14]。博斯腾湖面积 1100 km^2 ,主要入湖河流为开都河、黄水沟和清水河,唯一出湖河流是孔雀河^[15]。新疆湖泊的主要气候特征为大陆性干旱气候,夏季干燥炎热,光照充足,降水稀少,冬季风大寒冷,年平均气温 $4.1 \sim 8.4$ $^\circ\text{C}$,年平均降水 65~255 mm^[14,16]。由于人类活动和气候变化的影响,新疆湖泊出现了一系列的水环境问题,如乌伦古湖呈现出矿化度高、水质差等问题^[13];赛里木湖总磷和总氮浓度偏高,水体呈中营养状态^[17];博斯腾湖主要出现水质咸化、有机质污染和富营养化问题^[18]。

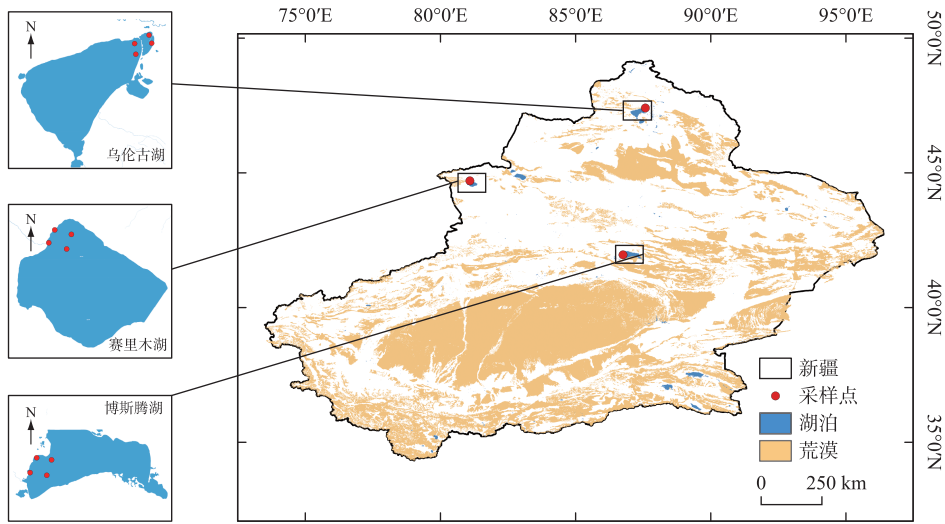


图1 新疆三大湖泊的分布

Fig.1 Distributions of three lakes in Xinjiang

1.2 样品采集与分析

本研究分别在2023年4月(春季)和7月(夏季)在三大湖泊各布设4个采样点,并采集大气、水体和沉积物样品。用便携式风速仪和水质分析仪对每个采样点的气温、风速、pH、水温、溶解氧(DO)、溶解氧饱和度(%O₂)、电导率(EC)和氧化还原电位(ORP)等气象和水质参数进行原位测定并及时记录。用于测定溶解性有机碳(DOC)、溶解性无机碳(DIC)、氨氮(NH₃-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)的水样用0.45 μm聚醚砜过滤器过滤,酸化后冷藏保存在50 mL离心管中,回到实验室后分别用TOC分析仪(Vario TOC Select analyzer)和流动分析仪(Bran & Luebbe)测定DOC、DIC、NH₃-N、NO₃⁻-N浓度。总磷(TP)浓度采用钼酸铵分光光度法利用紫外分光光度计(Agilent UV-vis spectroscopy)测得。

水中CO₂和CH₄浓度采用顶空法测定^[19],取水样到血清瓶中,密封避光保存,回实验室向瓶内加入惰性气体,制成顶空后剧烈震荡5 min,使得CO₂和CH₄气体在瓶内的气相和液相达到平衡,取上层气体进样到气相色谱仪(Agilent 7890B)便可测水体中的气体浓度(C_w, mol/m³),同时用采集的大气样品测得大气平衡浓度(C_{eq}, mol/m³),进一步得到气体饱和度(C=C_w/C_{eq})。

$$C = K_H \times P_g \quad (1)$$

式中,P_g为气体分压(Pa),气体亨利系数(K_H, mol/(m³·Pa))通过Bunsen系数(β)计算,一般来说,CO₂的K_H=β,而CH₄的K_H=β/22.4,β计算公式为:

$$\ln \beta = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(100/T) + S[(B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2)] \quad (2)$$

式中,A₁~A₃、B₁~B₃为常数,T为水温(°C),S为盐度(‰)(淡水湖不需要考虑盐度的影响^[20])。

根据溶存浓度可以通过公式(3)计算气体的扩散通量(F_d, mmol/(m²·d),即气体随浓度梯度通过分子扩散排出)。气体通过浮箱采集,每个样点布设4个浮箱,采样时倒扣于水面上,通过导气管抽取样品,每次取样间隔一段时间,总共采样1 h,每次通量观测5次。浮箱采集气体时会随着时间而变化,公式(3)会低估瞬时通量,因此,将时间连续化,并代入理想气体状态方程,得到总通量(F_t, mmol/(m²·d))计算公式^[21-22]:

$$F_d = k \times (C_w - C_{eq}) \quad (3)$$

$$F_t = \left(\frac{dP}{dt} \right) \left(\frac{V}{R \times T \times A} \right) \quad (4)$$

式中,k为水气交换速率(m/d),dP/dt为浮箱内气体累积的斜率(Pa/d),V为浮箱体积(m³),A为浮箱接触水面面积(m²),R为气体常量(m³/(mol·K)),T为水温(K)。一般认为CO₂溶解度大,只有扩散通量,而

CH₄由于溶解度小,可能存在冒泡通量^[23](CH₄以气泡形式从水体排放到大气中)。当 F_i 大于 F_d 时,差值即认为是 CH₄ 冒泡通量。k 值一般受到风速和水温的影响,通过公式(5)、(6)计算^[20,24]。

$$k = k_{600} \times \left(\frac{Sc}{600}\right)^{-n} \tag{5}$$

$$Sc = A + BT + CT^2 + DT^3 \tag{6}$$

式中,k₆₀₀是 20 °C 时淡水中 CO₂ 对应的 k 值,此时 Sc=600;Sc 为施密特数,无量纲;n 为常数,当风速超过 3.6 m/s 时,n 取值 0.5,当风速低于 3.6 m/s 时,n 取值 0.67;A~D 为常数。

湖泊全年碳排放总量(E, Gg/a)通过公式(7)进行初步推算^[25]:

$$E = F_i \cdot A_L \cdot t \tag{7}$$

式中,F_i为总通量(mmol/(m²·d)),A_L为湖泊总面积(km²),t 为无冰期时间(d)(新疆湖泊无冰期时间取 255 d^[26])。需要指出的是,这里的估算没有考虑湖泊碳排放在时间和空间上的异质性。

1.3 数据分析

利用 t 检验分析不同湖泊、不同季节之间的显著性差异,利用随机森林算法来评估主要影响因素的相对重要性,进而采用 Pearson 相关性分析来探讨主要影响因素与湖泊碳排放特征之间的关系,所有统计分析和绘图利用 SPSS、ArcGIS 和 R 语言软件完成。

2 结果与讨论

2.1 湖泊环境变量分析

新疆三大湖泊的环境变量具有明显的时空差异(表 1)。在观测的时间段,湖泊水体 pH 值、溶解氧饱和度、水温均呈现春季低于夏季,而春季水体 DO、电导率高于夏季;对于不同湖泊而言,赛里木湖的 pH 和溶解氧饱和度更高,乌伦古湖的 DO 浓度更高,博斯腾湖的电导率和水温更高。春季水温偏低导致氧气溶解度高,DO 浓度偏高但不易饱和,从而春季溶解氧饱和度低^[27]。至于气象要素,呈现春季风速高于夏季,而春季气温则低于夏季的特征。不同季节的 DOC 和 DIC 存在差异,湖水的氨氮和硝态氮均表现为春季低于夏季。博斯腾湖的硝态氮和氨氮浓度偏高,乌伦古湖的 DOC 浓度偏高,赛里木湖的 DIC 浓度偏高。通过分析发现,氨氮和硝态氮与 CO₂ 浓度呈现相同的变化趋势,DO 与 CO₂ 浓度呈现相反的变化趋势;溶解氧饱和度、DOC 和 DIC 与 CH₄ 浓度呈现相同的变化趋势,电导率与 CH₄ 浓度呈现相反的变化趋势。对于不同湖泊,在季节上几乎也表现出类似的趋势,至于其他环境变量与气体浓度可能表现出相同变化趋势的情况,是有一些偶然性存在的。

表 1 新疆湖泊水体理化参数均值

Tab.1 Mean values of physicochemical parameters for the samples of lakes in Xinjiang

湖泊	时间	pH	DO/ (mg/L)	溶解氧 饱和度/%	电导率/ (μS/cm)	水温/ °C	NH ₃ -N/ (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg/L)	DOC/ (mg/L)	DIC/ (mg/L)	pCO ₂ / μatm	cCH ₄ / (nmol/L)
乌伦古湖	4月	9.06	13.14	107.7	1561	4.5	0.045	0.097	9.1	40.0	226.1	25.76
乌伦古湖	7月	9.09	8.36	109.7	3.06	25.4	0.081	0.172	10.6	59.8	439.2	47.41
赛里木湖	7月	9.26	8.77	119.8	3.34	18.3	0.102	0.214	3.3	76.4	561.1	66.18
博斯腾湖	4月	8.68	9.46	97.4	1110	11.4	0.107	0.197	7.9	32.8	507.3	20.25
博斯腾湖	7月	9.03	6.95	102.4	1392	28.8	0.124	0.267	7.1	26.4	891.2	13.10

2.2 新疆湖泊 CO₂ 浓度和通量的时空差异及其驱动机制

采样期间,乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖的 CO₂ 浓度分别为(332.6±112.8)、(561.1±170.8)和(699.2±248.9) μatm,大气 CO₂ 浓度为(336.1±54.7) μatm,博斯腾湖和赛里木湖的 CO₂ 浓度相对于大气表现为过饱和,而乌伦古湖表现为欠饱和。博斯腾湖的 CO₂ 浓度最高,赛里木湖次之,乌伦古湖最低;在季节上,春季 CO₂ 浓度低于夏季(表 1)。相对重要性分析表明,溶解氧、硝态氮、水温、溶解无机碳和氨氮对 CO₂ 浓度的影响更为重要(图 2)。相关性分析进一步发现,CO₂ 浓度与氨氮、硝态氮呈显著正相关,与 DO 呈显著负相关,

与其他因素不相关(表2)。氮源(氨氮和硝态氮)是微生物进行呼吸作用的生源要素,低 DO 条件下微生物利用氮源进行呼吸作用,更有利于产生 CO_2 ,同时 DO 会在有机物降解过程中被消耗^[28]。除以上因素外,水体中的碳源主要来自 DOC 和沉积物中的有机碳,碳源丰富有利于 CO_2 产生^[29-30]。

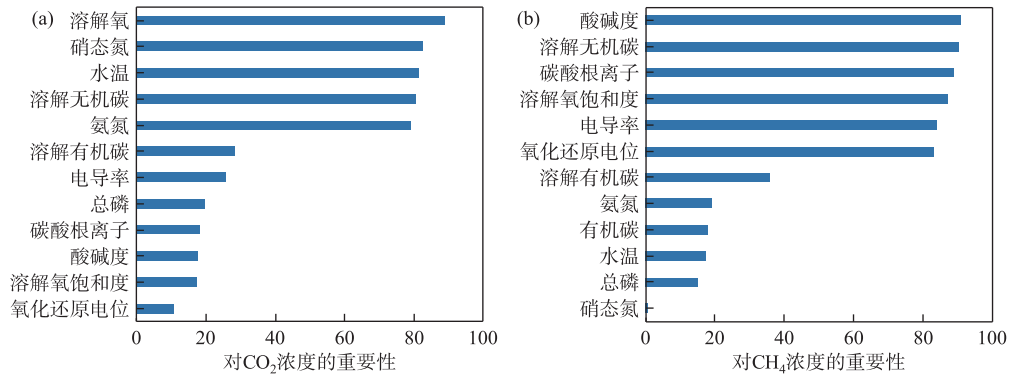


图2 环境因素对气体浓度影响的相对重要性

Fig.2 Relative importance of environmental factors on gas concentration

表2 环境因素与气体浓度的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between environmental factors and gas concentration

气体浓度	DO	溶解氧饱和度	电导率	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	DOC	DIC
$p\text{CO}_2$	-0.966 *	-0.184	0.032	0.918 *	0.970 **	-0.402	-0.263
$c\text{CH}_4$	-0.072	0.909 *	-0.896 *	-0.115	-0.074	0.973 *	0.999 **

* 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。

乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖均是大气 CO_2 的源, CO_2 扩散通量分别为 (5.3 ± 17.2) 、 (58.5 ± 27.0) 和 (32.4 ± 19.2) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 并且乌伦古湖的 CO_2 扩散通量明显低于赛里木湖和博斯腾湖(图3a)。可能的原因是: 乌伦古湖的 DO 浓度高于赛里木湖和博斯腾湖, 氨氮和硝态氮浓度也高于赛里木湖和博斯腾湖, 说明乌伦古湖中微生物呼吸作用弱, DO 和氮源被消耗利用少, 产生的 CO_2 少, 从而 CO_2 浓度低。通过分析发现, 水体中 CO_2 饱和度控制着其水气界面的排放^[31]: 当水体中 CO_2 欠饱和($< 100\%$)时, 湖水便从大气中吸收 CO_2 ; 当水体中 CO_2 过饱和($> 100\%$)时, 湖水则向大气排放 CO_2 (图4a)。乌伦古湖 CO_2 浓度低、饱和度低, 从而 CO_2 排放少。

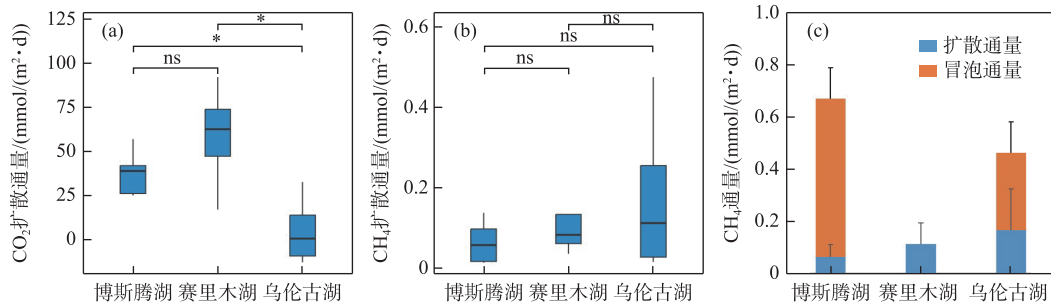


图3 不同湖泊的气体扩散通量和冒泡通量

Fig.3 Gas diffusive and ebullitive fluxes in different lakes

同时, 湖泊的 CO_2 排放也表现出时间变化。3 个湖泊在春季和夏季的 CO_2 扩散通量分别为 (19.1 ± 26.5)

和 $(31.9 \pm 28.5) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。可能的原因是:春季的氨氮和硝态氮浓度低于夏季,而 DO 浓度高于夏季,同时春季水温低,抑制微生物的活性,有机物被微生物降解少,DO 和氮源被消耗利用少,从而 CO_2 浓度低,使得水体中 CO_2 饱和度低, CO_2 排放少;而夏季水温适宜,促进微生物利用氮源、碳源进行呼吸作用产生 CO_2 ,使得水中 CO_2 浓度高,从而 CO_2 饱和度高, CO_2 排放高。值得注意的是,乌伦古湖在春季 CO_2 欠饱和,扩散通量为负值,湖泊从大气中吸收 CO_2 。因此,湖泊 CO_2 的产生和排放是个复杂的动态变化过程,受到 DO、氨氮、硝态氮和饱和度等因素的影响。此外,通过分析发现博斯腾湖浅水区 CO_2 通量显著高于深水区,可能是因为浅水区接受了更多的陆源碳。通过比较发现(表 3),新疆干旱区湖泊 CO_2 的平均扩散通量和全球湖泊^[2] 的均值相近,低于中国湖泊^[11] 和城市湖泊^[32-33] 的均值,低于青藏高原湖泊^[34] 和黄土高原水库^[35-36] 的均值,高于太湖^[37]。这可能是由于其他地区湖泊靠近城市和农业等景观,接受了更多的碳源和营养物质,受人类活动的影响较大^[38]。

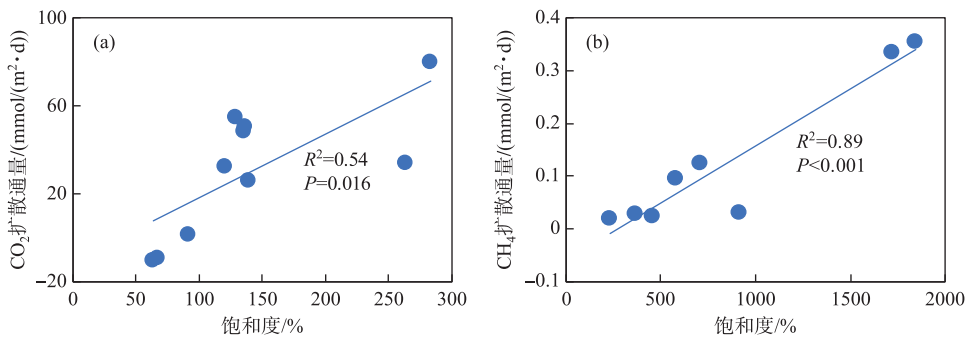


图 4 气体饱和度与扩散通量之间的关系

Fig.4 The relationship between gas saturation and diffusive fluxes

表 3 干旱区湖泊碳排放与其他地区的比较

Tab.3 Comparison of lake carbon emissions in arid region with other regions

湖泊	景观	气候区	CO_2 扩散通量/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	CH_4 扩散通量/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	来源
全球湖泊	—	多气候区	25.6	0.54	文献[2]
中国湖泊	—	多气候区	37.3	2.03	文献[11]
青藏高原湖泊	冻土	多气候区	73.7	5.2	文献[34]
刘家峡	冻土	半干旱半湿润区	233.0	—	文献[35]
太湖	城市	湿润区	18.2	0.09	文献[37,42]
南沟水库	高原水库	半湿润区	929.0	—	文献[36]
乌鲁木齐南湖	城市	半干旱区	1221.0	530	文献[32]
洪泽湖	平原湖泊	湿润区	43.5	—	文献[38]
观音塘	城市	湿润区	218.0	4.01	文献[33]
新疆湖泊	荒漠	干旱区	26.8	0.12	本研究

2.3 新疆湖泊 CH_4 浓度和通量的时空差异及其驱动机制

采样期间,乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖的 CH_4 浓度分别为 (36.58 ± 13.34) 、 (66.18 ± 5.73) 和 $(16.67 \pm 6.01) \text{ nmol}/\text{L}$,大气 CH_4 浓度为 $(3.29 \pm 0.59) \text{ nmol}/\text{L}$,新疆 3 个湖泊的 CH_4 浓度相对于大气都表现为过饱和。赛里木湖的 CH_4 浓度最高,乌伦古湖次之,博斯腾湖最低。在季节上,春季 CH_4 浓度低于夏季(表 1)。相对重要性分析表明,pH 值、溶解无机碳、碳酸根离子、溶解氧饱和度、电导率对 CH_4 浓度的影响更重要(图 2)。相关性分析进一步发现, CH_4 浓度与溶解氧饱和度、DOC 和 DIC 呈显著正相关,与 EC 呈显著负相关(表 2)。在水体中,产甲烷菌直接在厌氧环境下利用有机碳产生 CH_4 ,当溶解氧饱和度较高时水温越高,氧气溶解度

低, DO 浓度就越低, 有利于 CH_4 的产生和传输^[39]。当电导率越高, 湖泊盐度越高, 盐湖会抑制产甲烷菌的活性, 盐湖的化学增强会促进 CH_4 的排放, 从而使得 CH_4 浓度降低^[34,40]。同时, 湖底的沉积物会在厌氧条件下产生 CH_4 气泡, 形成的 CH_4 气泡可以快速地在水底上升到水面, 并且气泡不易被氧化, 因此, CH_4 主要以冒泡形式排放出来^[41]。

乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖也是大气 CH_4 的源, CH_4 扩散通量分别为 (0.17 ± 0.16) 、 (0.11 ± 0.08) 和 (0.06 ± 0.05) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (图 3b)。同时, 测得乌伦古湖和博斯腾湖的冒泡通量分别为 (0.30 ± 0.12) 和 (0.61 ± 0.12) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 分别达到 CH_4 总通量的 63.83% 和 91.04% (图 3c)。造成湖泊 CH_4 扩散通量差异可能原因是: 博斯腾湖的溶解氧饱和度低于乌伦古湖和赛里木湖, DOC 浓度高于赛里木湖而低于乌伦古湖, 而电导率高于乌伦古湖和赛里木湖, 其低溶解氧饱和度和高电导率抑制了博斯腾湖 CH_4 的产生, 导致博斯腾湖 CH_4 浓度低。通过分析发现, 水体中 CH_4 饱和度控制着水气界面的排放, 并且呈显著正相关, 当水体中 CH_4 饱和度越低时, CH_4 排放越低; CH_4 饱和度越高时, CH_4 排放就越高 (图 4b)。博斯腾湖 CH_4 浓度低, 从而其饱和度低, CH_4 扩散通量小。

同时, 湖泊碳排放也随着时间变化。3 个湖泊在春季和夏季的 CH_4 扩散通量分别为 (0.067 ± 0.043) 和 (0.147 ± 0.142) $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。可能的原因是: 春季的溶解氧饱和度、DOC 浓度和水温低于夏季, 而电导率高于夏季。在春季, 低水温使得产甲烷菌活性弱和 CH_4 溶解度低, 同时低溶氧饱和度和高电导率抑制 CH_4 的产生, CH_4 浓度和饱和度低, 从而 CH_4 扩散通量小, CH_4 以沉积物产生的冒泡通量 (77.8% ~ 94.3%) 为主; 在夏季, 碳源丰富, 产甲烷菌利用碳源产生 CH_4 , 同时夏季水温高, CH_4 溶解度高, 产生的 CH_4 溶解到水体中, CH_4 主要以扩散形式排放到大气中。此外, 通过分析发现赛里木湖浅水区 CH_4 扩散通量明显低于深水区, 其中原因可能还需进一步研究。通过比较发现 (表 3), 新疆干旱区湖泊 CH_4 的平均扩散通量低于全球湖泊均值, 低于中国湖泊、青藏高原湖泊和城市湖泊均值, 高于太湖^[42] 均值。总的来说, 湖泊 CH_4 的产生和排放是一个复杂的动态变化过程, 受到溶氧饱和度、电导率、碳源和饱和度等因素的影响, 干旱区的 CH_4 排放普遍低于其他地区。

2.4 新疆干旱地区湖泊碳排放总量特征分析

通过初步估算, 乌伦古湖、赛里木湖和博斯腾湖的 CO_2 排放量分别 (16.5 ± 54.0) 、 (82.8 ± 38.2) 和 (109.0 ± 64.6) Gg/a , CH_4 排放量分别为 (1.46 ± 0.87) 、 (0.16 ± 0.11) 和 (2.26 ± 0.55) Gg/a 。新疆干旱区 3 个湖泊的 CO_2 和 CH_4 排放量之和分别为 (212.0 ± 225.5) 和 (4.7 ± 2.5) Gg/a , 约占全国湖泊^[11] CO_2 和 CH_4 排放总量的 1.33% 和 0.33%, 而新疆三大湖泊面积约占全国湖泊总面积的 3.15%, 表明干旱区湖泊单位面积的碳排放小。可能的解释是: 一方面, 干旱区植被覆盖率低、岩石裸露, 湖泊接受陆源有机碳^[43] 和营养物质少, 而接受无机碳多, 单位体积水柱产生 CO_2 和 CH_4 的能力弱, 从而干旱区湖泊碳排放低。而其他非干旱区, 如半干旱区湖泊高碳排放可能受到了碳酸盐、厌氧状况和水体盐度的影响^[32], 青藏高原湖泊的高碳排放可能与该区域冻土较大的碳储量以及有利的水文、气象和地理条件相关^[34-35], 湿润区的城市湖泊高碳排放可能与这些区域更高的碳源和营养物质输入密切相关, 湖泊营养状态变化影响了碳排放^[38]。总的来说, 新疆干旱区湖泊碳排放普遍低于其他非干旱区。

3 结论

新疆干旱区湖泊的 CO_2 通量为 $26.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, CH_4 通量为 $0.39 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 表现为碳排放源, 且碳排放普遍低于全国其他地区的湖泊, 主要是因为干旱区湖泊碳源输入少和营养物质浓度低, 同时受到水质特征的影响。时间上, 夏季湖泊的 CO_2 和 CH_4 扩散通量均高于春季; 空间上, 赛里木湖的 CO_2 扩散通量最高, 乌伦古湖的 CH_4 扩散通量最高, 博斯腾湖 CH_4 冒泡通量最高。干旱区湖泊碳排放的时空异质性的原因包括: (1) 湖泊水质特征和环境污染情况的不同; (2) 干旱区的气候变化, 碳源和营养物质输入的差异; (3) CO_2 和 CH_4 的产生途径不同。本研究认为, 应该将干旱区湖泊纳入全球湖泊碳排放估算清单中, 来减小全球湖泊碳排放估算的不确定性。

4 参考文献

[1] Pi XH, Luo QQ, Feng L *et al.* Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. *Nature Communications*, 2022, 13:

5777. DOI: 10.1038/s41467-022-33239-3.
- [2] Holgerson MA, Raymond PA. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nature Geoscience*, 2016, **9**: 222-226. DOI: 10.1038/ngeo2654.
- [3] Rosentreter JA, Borges AV, Deemer BR *et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 2021, **14**: 225-230. DOI: 10.1038/s41561-021-00715-2.
- [4] Regnier P, Resplandy L, Najjar RG *et al.* The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. *Nature*, 2022, **603**: 401-410. DOI: 10.1038/s41586-021-04339-9.
- [5] DelSontro T, Beaulieu JJ, Downing JA. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 64-75. DOI: 10.1002/lol2.10073.
- [6] Drake TW, Raymond PA, Spencer RGM. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 132-142. DOI: 10.1002/lol2.10055.
- [7] Liao YS. Characteristics and influencing factors of CH₄ diffusion emissions from a typical lake in arid area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(10): 462-472. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167721. [廖远珊. 干旱区典型湖泊 CH₄扩散排放特征及其影响因素. 环境科学学报, 2022, **42**(10): 462-472.]
- [8] Li Y, Zhang CQ, Wang NA *et al.* Substantial inorganic carbon sink in closed drainage basins globally. *Nature Geoscience*, 2017, **10**: 501-506. DOI: 10.1038/ngeo2972.
- [9] Zhang GQ, Yao TD, Chen WF *et al.* Regional differences of lake evolution across China during 1960s–2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **221**: 386-404. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038.
- [10] Zhu G, Gao HJ, Zeng G. Lake change research and reasons analysis in Xinjiang arid regions during the past 35 years. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(1): 103-110. [朱刚, 高会军, 曾光. 近 35a 来新疆干旱区湖泊变化及原因分析. 干旱区地理, 2015, **38**(1): 103-110.]
- [11] Li SY, Bush RT, Santos IR *et al.* Large greenhouse gases emissions from China's Lakes and reservoirs. *Water Research*, 2018, **147**: 13-24. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.053.
- [12] Liao YS, Xiao QT, Li YM *et al.* Salinity is an important factor in carbon emissions from an inland lake in arid region. *Science of the Total Environment*, 2024, **906**: 167721. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167721.
- [13] Tong LH, Liu YJ, Zhang S *et al.* Modeling temporal changes in salinity and fluoride concentration of Lake Ulungur in Xinjiang, China. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 134-141. DOI: 10.18307/2022.0112. [全利红, 刘英俊, 张硕等. 乌伦古湖水体矿化度和氟化物浓度的年际变化及模拟. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 134-141.]
- [14] Qin QY, Li XM, Zhang B *et al.* Change of ice phenology in the Sayram Lake from 2000 to 2019. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(1): 37-45. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.029. [秦启勇, 李雪梅, 张博等. 2000—2019 年赛里木湖冰物候特征变化. 干旱区地理, 2022, **45**(1): 37-45.]
- [15] Zhang L, Shen TT, Cheng Y *et al.* Temporal and spatial variations in the bacterial community composition in Lake Bosten, a large, brackish lake in China. *Scientific Reports*, 2020, **10**: 304. DOI: 10.1038/s41598-019-57238-5.
- [16] Cao Y, Fu CS, Yang MX *et al.* Exploring the drivers for changes in lake area in a typical arid region during past decades. *Water*, 2023, **15**(19): 3354. DOI: 10.3390/w15193354.
- [17] You B, Sui J, Chen JJ *et al.* Analysis on the results of water quality verification and monitoring in Sayram Lake. *Arid Environmental Monitoring*, 2022, **36**(2): 88-92. [尤斌, 隋静, 陈晶晶等. 赛里木湖水水质验证监测结果评价分析. 干旱区监测, 2022, **36**(2): 88-92.]
- [18] 陈世峰. 博斯腾湖水质变化及其影响因素研究[学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2021.
- [19] Johnson KM, Hughes JE, Donaghy PL *et al.* Bottle-calibration static head space method for the determination of methane dissolved in seawater. *Analytical Chemistry*, 1990, **62**(21): 2408-2412. DOI: 10.1021/ac00220a030.
- [20] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2014, **12**(6): 351-362. DOI: 10.4319/lom.2014.12.351.
- [21] Bastviken D, Cole J, Pace M *et al.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(4): GB4009. DOI: 10.1029/2004GB002238.
- [22] Zhang LW, Xia XH, Liu SD *et al.* Significant methane ebullition from alpine permafrost rivers on the East Qinghai-Tibet Plateau. *Nature Geoscience*, 2020, **13**(5): 349-354. DOI: 10.1038/s41561-020-0571-8.
- [23] Stanley EH, Casson NJ, Christel ST *et al.* The ecology of methane in streams and rivers: Patterns, controls, and global significance. *Ecological Monographs*, 2016, **86**(2): 146-171. DOI: 10.1890/15-1027.
- [24] Raymond PA, Cole JJ. Gas exchange in rivers and estuaries: Choosing a gas transfer velocity. *Estuaries*, 2001, **24**(2): 312-317. DOI: 10.2307/1352954.
- [25] Yang M, Hu MM, Yang T *et al.* Greenhouse gas emissions from high-altitude hydropower reservoir—An example of the Zangmu Reservoir on the Yarlung Tsangpo. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 188-194. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0260. [杨萌, 胡明明, 杨

- 腾等. 高海拔水电水库温室气体的排放特征——以雅鲁藏布江藏木水库为例. 环境科学学报, 2022, 42(1): 188-194.]
- [26] Wang R, Niu ZG. Characteristics of changes in lake temperature in China and their response to climate change. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 780-788. [王瑞, 牛振国. 中国湖泊温度变化特征及其对气候变化的响应. 中国环境科学, 2020, 40(2): 780-788.]
- [27] Yang CY, Shi Z, Jiao CY *et al.* Analysis of temporal variation of dissolved oxygen and its main influencing factors in the Lugu Lake from 2013 to 2020. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(4): 139-145. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2022.04.14. [杨春艳, 施择, 焦聪颖等. 2013—2020年泸沽湖溶解氧随时间变化规律及主要影响因素分析. 中国环境监测, 2022, 38(4): 139-145.]
- [28] Soja G, Kitzler B, Soja AM. Emissions of greenhouse gases from Lake Neusiedl, a shallow steppe lake in Eastern Austria. *Hydrobiologia*, 2014, 731(1): 125-138. DOI: 10.1007/s10750-013-1681-8.
- [29] Sobek S, Tranvik LJ, Cole JJ. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2003. DOI: 10.1029/2004GB002264.
- [30] Kocic J, Sahlée E, Brand A *et al.* Low sediment-water gas exchange in a small boreal lake. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(9): 2493-2505. DOI: 10.1002/2016JG003372.
- [31] Balmer M, Downing J. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: Undersaturation implies atmospheric uptake. *Inland Waters*, 2011, 1(2): 125-132. DOI: 10.5268/iw-1.2.366.
- [32] Li DP. Greenhouse gas emissions of typical waterbody in summer in Urumqi City. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(6): 122-128. [李典鹏. 乌鲁木齐市典型水体夏季温室气体排放初探. 环境保护科学, 2020, 46(6): 122-128.]
- [33] Wang XF, Long YX, Yu LL *et al.* Effects of aquatic plants on the spatio-temporal variations of CO₂ and CH₄ fluxes in urban landscape waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3592-3606. DOI: 10.5846/stxb202206281837. [王晓锋, 龙雨行, 余乐乐等. 不同水生植物对景观水体 CO₂与 CH₄排放通量的影响. 生态学报, 2023, 43(9): 3592-3606.]
- [34] Yan FP, Sillanpää M, Kang SC *et al.* Lakes on the Tibetan Plateau as conduits of greenhouse gases to the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(7): 2091-2103. DOI: 10.1029/2017JG004379.
- [35] Gong C, Yang XK, Tian MY *et al.* Variations of CO₂ evasion from reservoirs and its influencing factors in warm season in the headwater region of the Yellow River: A case study of the Liujiaxia Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(7): 2919-2930. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2018.0016. [宫辰, 杨现坤, 田明扬等. 黄河源区水库二氧化碳逸出暖季变化规律及影响因素分析——以刘家峡水库为例. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2919-2930.]
- [36] Yue R, Shi HY, Ran LS *et al.* Study on diurnal variation of CO₂ flux from reservoir and the influencing factors of partial pressure of CO₂ in melting and non-melting seasons. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 678-686. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2019.0384. [岳荣, 史红岩, 冉立山等. 融冰期与非融冰期水库 CO₂逸出昼夜变化及 CO₂分压影响因素研究. 环境科学学报, 2020, 40(2): 678-686.]
- [37] Xiao QT, Xu XF, Duan HT *et al.* Eutrophic Lake Taihu as a significant CO₂ source during 2000–2015. *Water Research*, 2020, 170: 115331. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115331.
- [38] Zhu JY, Peng K, Li YY *et al.* Characteristics and influence factors of carbon dioxide efflux from Lake Hongze under different hydrological scenarios. *J Lake Sci*, 2022, 34(4): 1347-1358. DOI: 10.18307/2022.0425. [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. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1347-1358.]
- [39] Schrier-Uijl AP, Veraart AJ, Lefelaar PA *et al.* Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1): 265-279. DOI: 10.1007/s10533-010-9440-7.
- [40] Xun F, Li B, Chen H *et al.* Effect of salinity in alpine lakes on the southern Tibetan Plateau on greenhouse gas diffusive fluxes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127(7): e2022JG006984. DOI: 10.1029/2022JG006984.
- [41] Bastviken D, Tranvik LJ, Downing JA *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science*, 2011, 331(6013): 50. DOI: 10.1126/science.1196808.
- [42] Xiao QT, Zhang M, Hu ZH *et al.* Spatial variations of methane emission in a large shallow eutrophic lake in subtropical climate. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(7): 1597-1614. DOI: 10.1002/2017JG003805.
- [43] Song KS, Wen ZD, Shang YX *et al.* Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of China. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 391-402. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.121.