

DOI: 10.20103/j.stxb.202304280900

薛璟, 陈辛安, 王宪伟, 孙晓新. 大兴安岭多年冻土区两种水体温室气体浓度动态与冬季储存特征. 生态学报, 2024, 44(5): 1918-1927.

Xue J, Chen X N, Wang X W, Sun X X. Greenhouse gas concentration dynamics and winter storage characteristics of two water bodies in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1918-1927.

大兴安岭多年冻土区两种水体温室气体浓度动态与冬季储存特征

薛 璟¹, 陈辛安¹, 王宪伟³, 孙晓新^{1,2,*}

1 东北林业大学林学院, 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

2 黑龙江三江平原湿地生态系统国家定位观测研究站, 抚远 156500

3 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102

摘要: 北方内陆水体是温室气体排放的热点, 对量化区域碳收支起重要作用, 但其排放的季节变化尚不清楚。观测了大兴安岭多年冻土区府库奇河及其改道形成的牛轭湖(演替晚期)冻结期冰层中储存的二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)浓度, 并比较了两种水体中 CO₂ 和 CH₄ 浓度在三个不同时期(冻结期、非冻结期、春季融化)的差异。结果表明: 两种水体 CO₂ 和 CH₄ 浓度季节变化存在差异。牛轭湖在冻结期水体中 CO₂ 和 CH₄ 浓度最高, 有明显的冰下积累现象, 其中 CH₄ 浓度平均值为 (2.21±0.54) μmol/L, 分别是非冻结期和春季融化期水体 CH₄ 浓度的 5 倍和 14 倍。河流水体中 CO₂ 和 CH₄ 浓度最高出现在春季融化期, 显著高于非冻结期和冻结期 ($P<0.05$)。水中 CO₂ 和 CH₄ 浓度受多种环境因子的影响, 与可溶性有机碳(DOC)正相关 ($P<0.05$), 与溶解氧(DO)、水温为负相关 ($P<0.05$)。冻结期冰层形成后, 温室气体以冰气泡的形式存储在冰层中, 气泡的主要成分是 CO₂ 和 CH₄, 其中 CO₂ 占 90% 以上。由于冰气泡中 CO₂ 和 CH₄ 浓度约为冰下水体浓度的 1%—30%, 忽略冰层中储存的温室气体将会增加北方水体碳排放的不确定性。研究明确了大兴安岭多年冻土区两种水体溶解性 CO₂ 和 CH₄ 的季节变化特征与冬季温室气体储存能力, 为深入认知该区域水体碳循环过程提供重要数据支持。

关键词: 溶解 CO₂ 和 CH₄ 浓度; 冰层覆盖时期; 内陆水域; 冰气泡

Greenhouse gas concentration dynamics and winter storage characteristics of two water bodies in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains

XUE Jing¹, CHEN Xinan¹, WANG Xianwei³, SUN Xiaoxin^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Heilongjiang Sanjiang Plain Wetland Ecosystem Research Station, Fuyuan 156500, China

3 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

Abstract: Boreal inland waters are hotspots for greenhouse gas emissions, and they play an important role in quantifying the regional carbon budget, but seasonal variations in their emissions are not well understood. In this study, we observed the concentration of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) trapped in the ice during the ice cover period of the Fukuchi River and its diverted oxbow lakes (late successional stage) in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains. Differences in dissolved CO₂ and CH₄ concentrations in the two water bodies during three periods (ice cover period, open

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (2572020BA06, 2572021DS04); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2020C033); 国家自然科学基金基金项目 (31870443)

收稿日期: 2023-04-28; **网络出版日期:** 2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunxiaoxin@nefu.edu.cn

water period, and spring thaw period) were also compared. The results showed that there were differences in the seasonal variation patterns of dissolved CO_2 and CH_4 concentrations in the two water bodies. Concentrations of dissolved CO_2 and CH_4 were highest in the water column of oxbow lakes during the ice cover period. There was a significant accumulation of CO_2 and CH_4 under the ice layer. The mean dissolved CH_4 concentration in the water column was $(2.21 \pm 0.54) \mu\text{mol/L}$, which was 5 and 14 times higher than the CH_4 concentration during the open water and spring thaw periods, respectively. River had the highest dissolved CO_2 and CH_4 concentrations in the water column during the spring thaw period, which were significantly higher than during the open water period and ice cover period ($P < 0.05$). Dissolved CO_2 and CH_4 in water were influenced by various environmental factors and were positively correlated with dissolved organic carbon (DOC) ($P < 0.05$) and negatively correlated with dissolved oxygen (DO) and water temperature ($P < 0.05$). CO_2 and CH_4 were also trapped within the ice as bubbles when the ice formed during the ice cover period. CO_2 was the main component in bubbles, with concentrations of about 90% or more within the bubbles. As CO_2 and CH_4 concentrations in bubbles are about 1%—30% of those in the water column under the ice, ignoring the greenhouse gases stored in the ice would increase the uncertainty of carbon emissions from boreal inland waters. This study clarified the seasonal characteristics of dissolved CO_2 and CH_4 and the winter storage capacity of two water bodies in the Great Hing'an Mountains permafrost region. The results provide important data to understand carbon cycling processes in the water bodies of this region.

Key Words: dissolved CO_2 and CH_4 concentration; ice cover period; inland water; ice bubbles

二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)是两种重要的温室气体,与全球气候变化息息相关^[1]。自工业革命以来,这两种气体在大气中的浓度增加迅速,截止至 2019 年,其空气中的浓度已达工业化前水平的 260% 和 148%^[2]。内陆水体作为重要的温室气体排放源,尽管其面积仅占非冰川陆地表面的 3.7%^[3],但其在温室气体预算中的贡献不可忽视^[4]。然而,由于这些内陆水体温室气体动态具有较高的时空变异性^[5],或是由于它们的面积较小,与湿地相连难以区别等原因,导致这些水体无法被卫星识别^[3],因此有必要对这些小型水体进行现场观测以促进对温室气体通量的精确估计^[6]。

不同于低纬度的水体,中高纬度水体由于冬季严寒往往会被冰层覆盖^[7]。冰层覆盖时期减少了水文输入^[8],但沉积物中的微生物仍然保持活跃并产生温室气体^[9]。这些温室气体可能随着冰层加厚逐渐积累在冰下的水体中^[10],或者当冰层冻结速率很大时,一些温室气体会以“冰气泡”的形式冻结在冰层之中^[11]。到春季气温升高、冰层破裂,冰下和冰层中的温室气体可能会在短时间内“爆发式排放”^[8],导致水体中溶解性温室气体浓度骤减,或随水流以溶解性气体的形式被输送至河流下游或邻近的生态系统中^[12]。由于冬季采样后勤困难等因素,以往对于中高纬度水体的研究主要聚焦于生长季或无冰时期的温室气体通量与浓度^[13],对冬季冰下水体中温室气体浓度变化及储存鲜有报道。因此,对冬季水体温室气体浓度动态还需要进一步明确。

大兴安岭地区位于欧亚大陆多年冻土区的南缘^[12],是我国地带性多年冻土主要分布区之一^[14]。由于受到气候变化的影响,该区域多年冻土南界北移^[15]。冻土融化会释放出大量的碳,而水体作为碳排放的“管道”可能对气候变化有更明显的反馈^[16]。对于大兴安岭地区水体碳循环近年也受到一些学者的关注,例如对河流可溶性有机碳(DOC)的研究等^[17]。但对于该区水体温室气体浓度的研究仍非常有限,尤其是缺少冬季冰封期间的观测数据。故本研究选择大兴安岭多年冻土区府库奇河与河流改道形成的牛轭湖为研究对象,测定其全年不同季节水体中温室气体(CO_2 和 CH_4)浓度、溶解氧、DOC 等指标,揭示影响水体温室气体排放的季节变化规律与主要影响因素,重点观测冬季冰封期间、春季融化期间河流和牛轭湖的温室气体储存状况,以期为准评估该区温室气体排放量,进一步深入研究水体碳循环及碳收支过程提供数据支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国大兴安岭北部漠河市图强林业局奋斗林场的中国科学院东北地理与农业生态研究所大兴安岭湿地站(52°56′34″N,122°51′19″E),气候属于寒温带大陆性季风气候,平均年降水量为 450 mm,年平均温度为-3.9℃^[18]。研究区湿地除广泛分布在沟谷地带的泥炭地以外,还分布有湖泊与河流湿地,常见的湿地植物主要有柴桦(*Betula fruticos*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、小叶杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)、狭叶杜香(*Ledum palustre*)、甸杜(*Chamaedaphne calyculata*)、白毛羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)、玉簪藁草(*Carex globularis*)及泥炭藓(*Sphagnum* spp.)^[19]。此外,该区是我国第二大冻土分布区和唯一的高纬度冻土区,位于欧亚冻土区的南缘,活动层平均厚度为 1.0—1.5 m^[17],在气候变化和人类活动的影响下,多年冻土区南界北移,地表温度升高,冻土层厚度减小。

1.2 采样点设置

选择研究区内典型的河流、湖泊湿地景观,即府库奇河与其改道形成的一个牛轭湖(演替晚期)为研究对象。牛轭湖形成与河水的侵蚀、流量季节性变化有关,由于其本质为废弃的旧河道,因此沉积物类型、水文来源与新河道(府库奇河)相近。本研究中的牛轭湖最大深度 1.6 m,面积约为 200 m²,与河流采样点距离约为 100 m,牛轭湖设置有 6 个采样点(湖心与沿岸区域)。府库奇河为阿穆尔河(黑龙江二级支流)支流,全长约为 44 km,河面宽 14 m 左右,平均水深约 0.5 m,水流湍急。选择在其水流稍缓的中游段布设横向采样断面,同样设置为 6 个采样点,每个采样点间隔约为 1 m,包括河心区域和近岸区域。

1.3 样品采集与分析

野外采样时间于 2021 年 6 月开始,2022 年 6 月结束。根据现场调查结果,将全年分为 3 个典型的时期,即非冻结期(冰雪完全消融):6 月初—9 月中旬;冻结期(冰层出现至完全冻结):9 月下旬—次年 4 月下旬;春季融化期(冰雪开始消融至完全融化):5 月—6 月初。由于 12 月后河流被完全冻结至底部无法取水样,冻结期仅在 9 月—次年 1 月进行,次年 1 月仅采集冰样;春季融化期增加取样频率至每月 4—5 次,具体采样频率见表 1。

表 1 各时期水样采样频率
Table 1 Sampling frequency for each period

采样时期 Sampling periods	非冻结期 (6 月初—9 月中旬) Ice cover period	冻结期 (9 月下旬—次年 4 月) Ice free period	春季融化 (次年 5 月—6 月初) Spring thaw period
采样次数(河流) Sampling times(river)	12	5	5
采样次数(牛轭湖) Sampling times (oxbow lake)	9	4	4
采样间隔 Sampling interval	平均每周 1 次	平均每月 1 或 2 次	一月 4 或 5 次
样品名称 Sample name	水样(<i>n</i> = 126)	水样(<i>n</i> = 27)/冰样(<i>n</i> = 6)	水样(<i>n</i> = 27)

非冻结期 采集 0.3 m 深度的水样于 500 mL 样品瓶中,4 ℃ 低温避光保存。冻结期根据两种水体冻结状态采集水样,对牛轭湖而言,湖面由于形成稳定的冰层,因此在冰面钻取直径约为 10 cm 的小洞获取冰下水样。对于河流而言,由于水体流动,水面不会形成稳定的冰层,冰层是从河岸至河心冻结的,因此直接进行水样的采集,采集的水样同样装入 500 mL 样品瓶中,为避免采集水样在低温下冻结,所有水样装入保温箱中闭光保存。水样带回实验室后在 2 d 内完成水体溶解 CO₂ 和 CH₄ 浓度、总氮(TN)、总磷(TP)、可溶性有机碳(DOC)的测定。水体中溶解 CO₂ 和 CH₄ 使用顶空平衡-气相色谱法测定^[20]。该方法基于道尔顿分压定律和亨利定律,利用顶空平衡气体浓度计算水体温室气体溶存浓度,操作如下:使用高纯氮气(99.99%)清洗注射器后,量取 20 mL 氮气,通过短针头将顶空气体缓缓注入到顶空瓶中,瓶内的水样通过长针头排出,待气体全

部注入到顶空瓶内后关闭短针头。然后放置到振荡器上,高速震荡 5 min 后取下顶空瓶静置半小时使气液达平衡后,抽取气象部分于赛默飞 Trace- 1300 气相色谱仪(Thermo fisher, 美国)进行测定。

水体 TN、TP 分别根据国家环境保护标准(GB11894-89, GB11893-891)中的碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法与钼酸铵分光光度法测定。水体 DOC 通过 0.45 μm 滤膜后使用 Multi N/C 2100 TOC 仪(Analytik180 Jena, 德国)测定。其他水质指标,如溶解氧(DO)、pH、水温、电导率(EC)、总溶解固体颗粒(TDS)、氧化还原电位(ORP)、盐度(SAL)使用便携式水质分析仪(YSI 556 MS, 美国)每次观测时现场测定。

冻结期冰层中捕获的温室气体浓度通过切割带有冰气泡的冰柱获取。冰柱取样在 2022 年 1 月进行,此时研究区温度极低,冰层可能达到最大冻结深度。切割冰柱前,对冰面进行除雪活动以观察被冰层捕获气泡的位置和大小,确定好位置后用油锯将带有气泡的冰柱进行切割,切割过程尽量避免切破气泡所在的冰柱。切割好的冰柱立即装入聚酰胺真空袋中抽出袋中空气密封保存,然后将真空袋运回实验室,使其在室温下融化,待冰全部融化后,抽取真空袋的气象部分以测定冰层中的温室气体含量^[21]。所有涉及样品(水/冰)均为三个重复。

1.4 数据分析

使用 Kolmogorov-Smirnov 检验测试数据的正态性和同质性。对不满足条件的数据进行对数转换以满足统计假设。使用单因素方差分析不同时期水体中温室气体浓度的差异。两种水体中溶解性 CO_2 和 CH_4 与水质参数的相关性采用主成分分析(PCA)。统计分析均使用 SPSS 统计软件进行,图形处理采用 Origin 2021 制图软件完成。显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 两种水体中溶解温室气体浓度动态及其与环境因子的关系

对牛轭湖而言,水体中溶解的 CO_2 浓度总体表现为冻结期>春季融化期>非冻结期,但不同时期浓度差异不显著($P>0.05$)。牛轭湖水体溶解 CH_4 浓度在春季融化期显著低于冻结期($P<0.01$)和非冻结期($P<0.05$),冻结期 CH_4 在冰下有明显的积累现象,平均值为 (2.21 ± 0.54) $\mu\text{mol/L}$,分别为非冻结期和春季融化期间水体 CH_4 浓度的 5 倍和 14 倍。与牛轭湖水体 CO_2 与 CH_4 浓度的季节变化模式不同,河流在春季融化时水体中含有较高的 CH_4 和 CO_2 浓度。河流水体中 CO_2 浓度在春季融化时期显著高于冻结期($P<0.01$), CH_4 浓度在春季融化时期显著高于非冻结期($P<0.05$)。对比这牛轭湖和河流两种水体的 CO_2 和 CH_4 浓度大小,牛轭湖水体中溶解的温室气体浓度均高于河流(图 1)。

对牛轭湖和河流水体中温室气体含量与水体化学参数进行主成分分析。PCA 轴 PC1、轴 PC2 共同解释变量的 60.1%。主成分分析显示,牛轭湖与河流两种水体环境参数之间存在显著差异($P<0.05$)。水体中 DOC、TN、DO、水温均与溶解性 CO_2 和 CH_4 显著相关($P<0.05$),其中 DOC 和 TN 与水体中溶解 CO_2 、 CH_4 正相关,DO、水温(WT)和水中溶解 CO_2 、 CH_4 负相关(图 2)。

2.2 冻结期间两种水体冰层中封存温室气体含量

除冰下水体积累的温室气体之外,温室还可以气泡的形式储存在冰层中。气泡的主要成分为 CO_2 和 CH_4 ,其中 CO_2 为主要成分,在气泡中浓度占 90% 以上(牛轭湖:97.7%,河流:97.9%),含量显著高于 CH_4 (图 3)。将气泡中温室气体含量与冻结期水体温室气体浓度对比(表 2),气泡中储存的 CO_2 和 CH_4 含量相当于冻结期水体中溶解性气体浓度的 1%—6%和 2.71%—29.41%。

3 讨论

3.1 不同时期两种水体中溶解性温室气体含量及其影响因素

在本研究中,比较了两种水体不同时期的温室气体浓度,无论是冻结期还是非冻结期,结果远低于多年冻土区典型的热喀斯特湖(表 3)。这是由于这些冻土塌陷形成的湖泊沉积物中含有大量的有机质

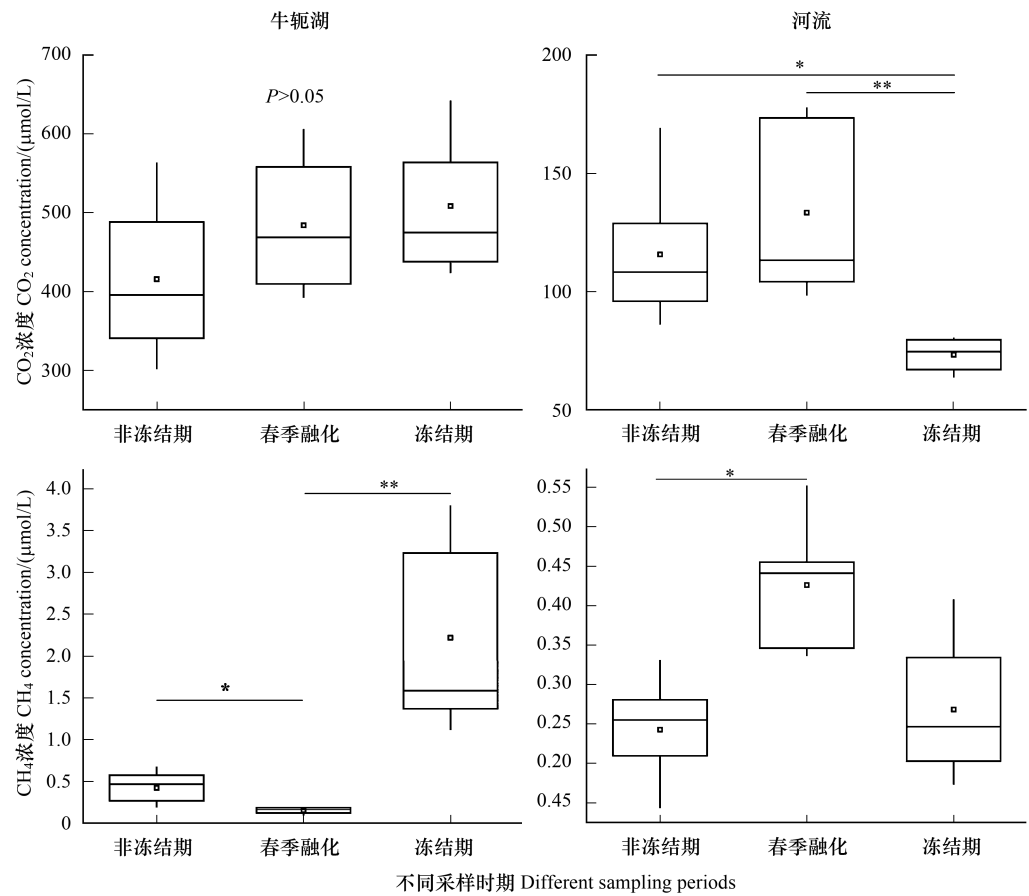


图 1 不同时期牛轭湖与河流水体中 CO₂ 和 CH₄ 浓度对比

Fig.1 Dissolved CO₂ and CH₄ concentrations in oxbow lakes and rivers in different periods

箱线图中空心正方形,每个框内的线、下边缘和上边缘分别表示平均值、中位数、第 3 四分位数和第 1 四分位数数; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

表 2 冻结期间冰下水体与冰气泡中 CO₂ 和 CH₄ 浓度的对比

Table 2 Comparison of greenhouse gas concentrations in the water column under ice and ice bubbles during the ice cover period

水体类型 Water body type	采样阶段 Sampling period	CO ₂ / (μmol/L)	占比 Contribution/%	CH ₄ / (μmol/L)	占比 Contribution/%
牛轭湖 Oxbow lake	冰层中气泡	2.65±0.17	—	0.06±0.02	—
	冻结期水体	508.42±41.36	0.52	2.21±0.54	2.71
河流 River	冰层中气泡	4.43±1.19	—	0.10±0.01	—
	冻结期水体	73.37±3.89	6.03	0.34±0.08	29.41

数值为平均值±标准误

(TOC:>20%),能够释放出大量温室气体^[22],本研究的水体沉积物类型主要以有机质含量极低的砂质沉积物为主(TOC:0.44%),故很难原位产生高浓度的温室气体^[23]。对河流而言,冻结期水体中 CO₂ 浓度则低于非冻结期。这是由于冻结期间温度降低、土壤冻结,而研究地点水体中溶解性气体的来源主要又以邻近湿地活动层中的土壤孔隙水为主^[24],水文输入的减少导致冻结期水体中溶解性气体浓度降低。尽管牛轭湖和河流的水文来源相似,但静止的水体为 CO₂ 和 CH₄ 的积累提供了条件,静止的水面可以快速形成冰层,冰层的形成后隔绝氧气^[25],为温室气体的积累提供了稳定的环境。反之河流由于水体的流动,在没有完全冻结之前仍处于曝气状态,流动水体由于较高的湍流可能还会存在水体中 CH₄ 的氧化^[26],导致河流总体 CH₄ 浓度低于牛轭湖(表 3)。

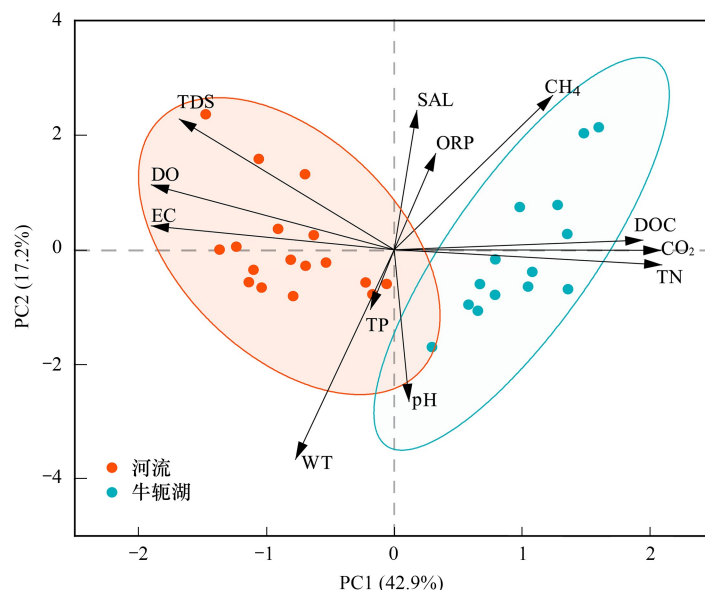


图2 牛轭湖、河流水体中温室气体含量与水环境参数主成分分析

Fig.2 Principal Component Analysis of greenhouse gas content and water environment parameters in oxbow lakes and river water bodies

DO:溶解氧;EC:电导率;WT:水温;TP:总磷;TN:总氮;CO₂:水中溶解 CO₂;DOC:可溶性有机碳;CH₄:水中溶解 CH₄;ORP:氧化还原电位;SAL:盐度;TDS:总溶解性固体

本研究中,河流融化期间水体溶解的温室气体含量最高,显著高于冻结期和非冻结期。在北方地区,已有不少研究观测到春季融化时期水体中存溶有高浓度的CO₂和CH₄^[30–31],融雪时期融水将永久冻土中储存的碳和氮等外源物质冲入河流^[30],导致河流此时期出现温室气体浓度的峰值,刺激大量温室气体的排放。尽管湖泊也是春季融化时期温室气体大量排放的“热点”之一,但在结果中,春季融化时水体溶解CH₄却显著低于非冻结期的浓度。这可能是研究的牛轭湖水较浅,面积较小,在春季水体混合翻转时水中溶解的CH₄已经通过扩散途径被快速排放到大气中^[32],导致该时期未观测到水体中高浓度的温室气体。由此可见,为精确估计多年冻土区小型湖泊的温室气体收支,需要对融化时期进行高频率的观测和调查。

水体中溶解性CO₂和CH₄浓度直接参与水体碳循环,受到多种环境因素的控制。DOC、水温、DO在产甲烷菌生成CO₂和CH₄过程中有重要的调控作用^[33–35]。本研究同样发现溶解性CO₂和CH₄与DOC正相关,与水温和DO负相关。DOC是水生生态系统重要的碳源,尤其是CO₂排放的驱动因素,可以被微生物直接利用产生CO₂和CH₄^[36]。先前的研究表明,DOC含量高的水体中有更高的CO₂和CH₄排放量^[37],此外,研究区水体中溶解性气体来源于毗邻湿地,附近湿地类型大部分为泥炭地,泥炭地孔隙水中高含量的DOC导致水体中溶解性CO₂含量较高。水温和水中溶解性CO₂,CH₄负相关的原因是气体溶解度随温度升高而减小,因为当温度升高时,气体分子运动速率加大,更容易自水面逸出^[38]。水体中溶解氧与溶解CO₂表现为负相关的原因与微生物呼吸作用有关,呼吸作用消耗水体中氧气,主

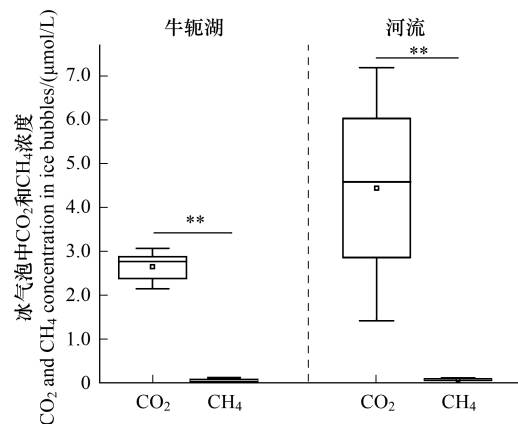


图3 冰冻时期冰层中捕获气泡中的CO₂和CH₄浓度

Fig.3 CO₂ and CH₄ concentration in captured bubbles in ice during freezing periods

要产物为 CO_2 ^[39], 而 CO_2 在水中主要以溶解在水中的扩散方式传输^[40–41]。因此, 水体中 CO_2 浓度升高的同时, 氧的含量降低, 二者呈现负相关关系。

表 3 北方不同水体类型不同时期(不含春季融化)溶解性 CO_2 和 CH_4 浓度对比

Table 3 Comparison of dissolved greenhouse gas concentrations in boreal waters at different period (excluding spring thaw period)

地点 Locations	水体类型 Water body types	$\text{CO}_2/(\mu\text{mol/L})$		$\text{CH}_4/(\mu\text{mol/L})$		参考文献 References
		冻结期 Ice cover period	非冻结期 Ice free period	冻结期 Ice cover period	非冻结期 Ice free period	
加拿大魁北克	热融湖	1349	541	318	34	[21]
加拿大北部	釜状湖	108.9	97.5	0.1	4.2	[27]
阿拉斯加	热融湖	855.2	170.1	2.5	12.3	[28]
芬兰	森林湖	210	22	0.43	0.2	[29]
青藏高原	河流	ND	ND	0.03	0.011	[30]
中国东北	河流	ND	136.83	ND	1.04	[24]
西伯利亚	河流	ND	ND	0.01	0.04	[23]
中国东北	河流	73.37	133.38	0.34	0.23	本研究
中国东北	牛轭湖	508.42	415.69	2.21	0.42	

ND 表示没有数据

3.2 冻结期两种水体冰层中温室气体储存能力

两种水体冬季冰层中均观察到被捕获的气泡, 气泡主要成分是 CO_2 (其中牛轭湖: 97.7%, 河流: 97.9%)。之前的研究同样表明冰层内气泡中 CO_2 比例会占到气体成分的 50% 以上^[21], 这与气泡内 CH_4 氧化生成 CO_2 有关^[42]。冰层中被捕获的气泡主要来自于温室气体排放的“冒泡”的途径^[43–44], 这主要存在于静水水体中^[23]。但对河流而言, 冰层不能够稳定形成, 而是由河岸带向河中心开始冻结, 并且由于层流作用, 冰层由上到下不是连贯的, 而是分层冻结的, 这时冰层中的气泡推测可能是冰层在形成过程中溶解性气体脱气, 导致冰层中形成孔隙, 出现气泡“被捕获”的现象。鉴于缺乏河流冰气泡温室气体含量的数据, 在本研究中只对比了牛轭湖与热喀斯特湖^[21]的冰气泡含量。牛轭湖冰气泡中 CO_2 含量为 $(2.65 \pm 0.17) \mu\text{mol/L}$, CH_4 含量为 $(0.061 \pm 0.02) \mu\text{mol/L}$, 结果低于热熔湖中观测到的结果 ($\text{CO}_2: 35 \text{ mmol/m}^2$, $\text{CH}_4: 6 \text{ mmol/m}^2$), 冰气泡中温室气体含量与数量与湖泊“冒泡”途径、沉积物类型、冰层冻结速度差异有关^[45]。大部分冰气泡中 CO_2 与 CH_4 浓度低于水体中的含量, 相当于冻结期水体中溶解 CO_2 和 CH_4 总量的 0.52%—29.41%。这些储存在冰层中的气泡会在春季融化时会优先从融化或者破裂的冰层中释放出来, 可能造成潜在的温室气体高排放期。然而, 鉴于冬季采样的困难, 以前很少有研究关注冬季冰层中温室气体的储存能力, 这为精确量化温室气体收支带来了不确定性, 本研究的结果说明在多年冻土区水体温室气体通量的观测中, 应进行长时间的连续监测, 以免错过可能的高排放期。

3.3 对多年冻土区不同水体碳收支的启示

对于大兴安岭多年冻土区两种水体的研究表明, CO_2 和 CH_4 在两种水体中储存与排放方式不同, 这取决于湖泊和河流的水文状况。因此, 基于本研究结果, 应注意区分不同贡献者(河流或湖泊)以精确量化碳收支^[46]。河流和牛轭湖这两种景观在研究区分布广泛, 尽管这类水体不如冻土塌陷形成的热融湖碳排放量高, 但由于毗邻泥炭地, 大部分溶解性温室气体由泥炭地提供^[24], 水中溶解性有机碳含量仍维持在较高的水平, 未来的研究可侧重于对这些水体温室气体通量的观测。

在全球变暖的背景下, 永久冻土融化不仅会改变水文景观, 促进湖泊/池塘的形成或扩张, 还会增加有机碳向河流的输出^[47]。此外, 气候变暖导致更短的冰层覆盖期, 延长了非冻结期温室气体排放的时间, 这可能会增加研究区水体的碳排放。综上, 需要对区域内不同水体长期观测以探究其对气候变化的反馈。

4 结论

本研究观测了大兴安岭多年冻土区两种水体溶解 CO_2 和 CH_4 浓度在不同时期的变化,以及冬季冰层中存储的温室气体浓度。对于牛轭湖而言,冻结期冰下 CO_2 和 CH_4 浓度明显高于非冻结期和春季融化时期,这是由于其停滞的水体更利于温室气体在冰下积累。而河流由于水体的流动,冻结期并未观测到温室气体积累的现象,其最高浓度时期出现在春季融化时期。尽管研究的两种水体沉积物构成相似,但由于水文状况导致两种水体在溶解性温室气体浓度和水质指标上存在显著的差异。因此,以后对水体 CO_2 和 CH_4 排放的观测时间应该划分不同阶段,例如,加强冻结期的观测可能对湖泊更重要,加强春季融化期间的观测对河流更重要。此外,冬季冻结期间冰层中还会保留一部分温室气体,这部分温室气体往往被排除在全年的温室气体收支之外,为精确量化温室气体收支带来不确定性。总之,本研究揭示了我国大兴安岭多年冻土区不同水体溶解 CO_2 和 CH_4 浓度的动态变化,为今后深入研究水体对碳循环的影响提供数据基础。但由于水体温室气体浓度变化是一个复杂的机理过程,包括受沉积物类型、水文状况等综合因素影响,今后需结合微生物相关机理研究深入阐明水体溶解性 CO_2 和 CH_4 的产生、分解与释放过程。

参考文献 (References):

- [1] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yeleki, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] World Meteorological Organization (WMO). WMO Greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin)-No.15: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2018. Geneva, 2019.
- [3] Verpoorter C, Kutser T, Seekell D A, Tranvik L J. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(18): 6396-6402.
- [4] Rosentreter J A, Borges A V, Deemer B R, Holgersson M A, Liu S D, Song C L, Melack J, Raymond P A, Duarte C M, Allen G H, Olefeldt D, Poulter B, Battin T I, Eyre B D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 2021, 14(4): 225-230.
- [5] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, Sobek S, McDonald C, Hoover M, Butman D, Striegl R, Mayorga E, Humborg C, Kortelainen P, Dürr H, Meybeck M, Ciais P, Guth P. Erratum: global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 2014, 507(7492): 387.
- [6] Woolway R I, Kraemer B M, Lenters J D, Merchant C J, O'Reilly C M, Sharma S. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(8): 388-403.
- [7] Bégin P N, Tanabe Y, Rautio M, Wauthy M, Laurion I, Uchida M, Culley A I, Vincent W F. Water column gradients beneath the summer ice of a High Arctic freshwater lake as indicators of sensitivity to climate change. *Scientific Reports*, 2021, 11: 2868.
- [8] Bertilsson S, Burgin A, Carey C C, Fey S B, Grossart H P, Grubisic L M, Jones I D, Kirillin G, Lennon J T, Shade A, Smyth R L. The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(6): 1998-2012.
- [9] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, Juutinen S, Larmola T, Hammar T, Silvola J, Martikainen P J. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, 2003, 52(3): 609-621.
- [10] Karlsson J, Giesler R, Persson J, Lundin E. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1123-1127.
- [11] Walter K M, Zimov S A, Chanton J P, Verbyla D, Chapin F S 3rd. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 2006, 443(7107): 71-75.
- [12] 王宪伟, 谭稳稳, 宋长春, 杜宇, 张豪, 陈宁. 大兴安岭北部多年冻土区河岸森林湿地土壤性质和微生物呼吸活性特征. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4237-4246.
- [13] Hampton S E, Galloway A W E, Powers S M, Ozersky T, Woo K H, Batt R D, Labou S G, O'Reilly C M, Sharma S, Lottig N R, Stanley E H, North R L, Stockwell J D, Adrian R, Weyhenmeyer G A, Arvola L, Baulch H M, Bertani I, Bowman L L Jr, Carey C C, Catalan J, Colom-Montero W, Domine L M, Felip M, Granados I, Gries C, Grossart H P, Haberman J, Haldna M, Hayden B, Higgins S N, Jolley J C, Kahilainen K K, Kaup E, Kehoe M J, MacIntyre S, MacKay A W, Mariash H L, McKay R M, Nixdorf B, Nöges P, Nöges T, Palmer M, Pierson D C, Post

- D M, Pruett M J, Rautio M, Read J S, Roberts S L, Rücker J, Sadro S, Silow E A, Smith D E, Sterner R W, Swann G E A, Timofeyev M A, Toro M, Twiss M R, Vogt R J, Watson S B, Whiteford E J, Xenopoulos M A. Ecology under lake ice. *Ecology Letters*, 2017, 20(1): 98-111.
- [14] 程国栋. 中国冻土研究近今进展. *地理学报*, 1990, 45(2): 220-224.
- [15] Shan W, Zhang C C, Guo Y, Qiu L S. Mapping the thermal state of permafrost in northeast China based on the surface frost number model. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3185.
- [16] Dean J F, Meisel O H, Martyn Rosco M, Marchesini L B, Garnett M H, Lenderink H, van Logtestijn R, Borges A V, Bouillon S, Lambert T, Röckmann T, Maximov T, Petrov R, Karsanaev S, Aerts R, van Huissteden J, Vonk J E, Dolman A J. East Siberian Arctic inland waters emit mostly contemporary carbon. *Nature Communications*, 2020, 11: 1627.
- [17] 王雯倩, 蔡玉山, 肖湘, 段亮亮. 老令岭多年冻土小流域春季冻融期径流溶解性有机碳的变化特征. *生态学报*, 2023(16), 1-13.
- [18] 王宪伟, 孙丽, 杜宇, 谭稳稳, 宋长春, 宋艳宇, 郭跃东, 陈宁, 张豪. 大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤性质与微生物呼吸活性研究. *湿地科学*, 2021, 19(6): 682-690.
- [19] 任娜, 宋长春, 王宪伟, 宋艳宇, 谭稳稳, 张豪, 孙丽. 大兴安岭地区不同类型多年冻土区灌丛—藁草沼泽植物群落组成及其物种多样性. *湿地科学*, 2020, 18(2): 228-236.
- [20] Wiesenburg D A, Guinasso N L Jr. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1979, 24(4): 356-360.
- [21] Matveev A, Laurion I, Vincent W F. Winter accumulation of methane and its variable timing of release from thermokarst lakes in subarctic peatlands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(11): 3521-3535.
- [22] Arsenault J, Talbot J, Brown L E, Holden J, Martinez-Cruz K, Sepulveda-Jauregui A, Swindles G T, Wauthy M, Lapierre J F. Biogeochemical distinctiveness of peatland ponds, thermokarst waterbodies, and lakes. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(11): 49.
- [23] Ingeborg B, Irina F, Bennet J, Paul O P, Matthias W. Methane dynamics in three different Siberian water bodies under winter and summer conditions. *Biogeosciences*, 2021, 18(6): 2047-2061.
- [24] Guo Y D, Song C C, Wang L L, Tan W W, Wang X W, Cui Q, Wan Z M. Concentrations, sources, and export of dissolved CH₄ and CO₂ in rivers of the permafrost wetlands, northeast China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 491-497.
- [25] Denfeld B, Wallin M, Sahlée E, Sobek S, Kokic J, Chmiel H, Weyhenmeyer G. Temporal and spatial carbon dioxide concentration patterns in a small boreal lake in relation to ice cover dynamics. *Boreal Environment Research*, 2015, 20: 679-692.
- [26] Zhao F, Zhou Y Q, Xu H, Zhu G W, Zhan X, Zou W, Zhu M Y, Kang L J, Zhao X C. Oxidic urban rivers as a potential source of atmospheric methane. *Environmental Pollution*, 2022, 297: 118769.
- [27] Vilmantas P, Isabelle L, Frédéric B, Douglas Peter M J, Billett Michael F, Daniel F, Xu X M. Seasonal patterns in greenhouse gas emissions from lakes and ponds in a High Arctic polygonal landscape. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66: S117-S141.
- [28] Elder C D, Schweiger M, Lam B, Crook E D, Xu X, Walker J, Walter Anthony K M, Czimczik C I. Seasonal sources of whole-lake CH₄ and CO₂ emissions from interior Alaskan thermokarst lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(5): 1209-1229.
- [29] Miettinen H, Pumpanen J, Heiskanen J, Aaltonen H, Mammarella I, Ojala A, Levula J, Rantakari M. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics—two-year measurements of concentrations and fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a typical boreal lake surrounded by managed forests. *Boreal Environment Research*, 2015, 20: 75-89.
- [30] Lin P L, Du Z H, Wang L, Liu J F, Xu Q, Du J, Jiang R. Hotspots of riverine greenhouse gas (CH₄, CO₂, N₂O) emissions from Qinghai Lake Basin on the northeast Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159373.
- [31] Denfeld B A, Klaus M, Laudon H, Sponseller R A, Karlsson J. Carbon dioxide and methane dynamics in a small boreal lake during winter and spring melt events. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(8): 2527-2540.
- [32] Hughes-Allen L, Bouchard F, Laurion I, Séjourné A, Marlin C, Hatté C, Costard F, Fedorov A, Desyatkin A. Seasonal patterns in greenhouse gas emissions from thermokarst lakes in Central Yakutia (Eastern Siberia). *Limnology and Oceanography*, 2021, 66: S98-S116.
- [33] Shirokova L S, Payandi-Rolland D, Lim A G, Manasyrov R M, Allen J, Rols J L, Bénézeth P, Karlsson J, Pokrovsky O S. Diel cycles of carbon, nutrient and metal in humic lakes of permafrost peatlands. *The Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139671.
- [34] 王玉超, 徐璇, 曹鹏鹤, 刘渤然, 周艳, 金昌善, 王维枫. 溪流二氧化碳排放研究进展. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 182-189.
- [35] Li M X, Peng C H, Zhang K R, Xu L, Wang J M, Yang Y, Li P, Liu Z L, He N P. Headwater stream ecosystem: an important source of greenhouse gases to the atmosphere. *Water Research*, 2021, 190: 116738.
- [36] Ask J, Karlsson J, Jansson M. Net ecosystem production in clear-water and brown-water lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(1): GB1017-1-GB1017-7.
- [37] Jongejans L L, Liebner S, Knoblauch C, Mangelsdorf K, Ulrich M, Grosse G, Tanski G, Fedorov A N, Konstantinov P Y, Windirsch T, Wiedmann J, Strauss J. Greenhouse gas production and lipid biomarker distribution in Yedoma and Alas thermokarst lake sediments in Eastern

- Siberia. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2822-2839.
- [38] 李香华, 胡维平, 杨龙元, 张发兵, 胡志新. 太湖梅梁湾冬季水-气界面二氧化碳通量日变化观测研究. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1425-1429.
- [39] Åberg J, Jansson M, Jonsson A. Importance of water temperature and thermal stratification dynamics for temporal variation of surface water CO₂ in a boreal lake. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, 115(G2):115.
- [40] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(4): 647-656.
- [41] Sepulveda-Jauregui A, Walter Anthony K M, Martinez-Cruz K, Greene S, Thalasso F. Methane and carbon dioxide emissions from 40 lakes along a north-south latitudinal transect in Alaska. *Biogeosciences*, 2015, 12(11): 3197-3223.
- [42] Denfeld B A, Ricão Canelhas M, Weyhenmeyer G A, Bertilsson S, Eiler A, Bastviken D. Constraints on methane oxidation in ice-covered boreal lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(7): 1924-1933.
- [43] Bastviken D, Cole J, Pace M, Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB4009.
- [44] Walter K M, Chanton J P, Chapin F S III, Schuur E A G, Zimov S A. Methane production and bubble emissions from Arctic Lakes: Isotopic implications for source pathways and ages. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: G00A08.
- [45] Boereboom T, Depoorter M, Coppens S, Tison J L. Gas properties of winter lake ice in Northern Sweden: implication for carbon gas release. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 827-838.
- [46] Saunio M, Staver A R, Poulter B, Bousquet P, Canadell J G, Jackson R B, Raymond P A, Dlugokencky E J, Houweling S, Patra P K, Ciais P, Arora V K, Bastviken D, Bergamaschi P, Blake D R, Brailsford G, Bruhwiler L, Carlson K M, Carrol M, Castaldi S, Chandra N, Crevoisier C, Crill P M, Covey K, Curry C L, Etiope G, Frankenberg C, Gedney N, Hegglin M I, Höglund-Isaksson L, Hugelius G, Ishizawa M, Ito A, Janssens-Maenhout G, Jensen K M, Joos F, Kleinen T, Krummel P B, Langenfelds R L, Laruelle G G, Liu L C, Machida T, Maksyutov S, McDonald K C, McNorton J, Miller P A, Melton J R, Morino I, Müller J, Murguía-Flores F, Naik V, Niwa Y, Noce S, O'Doherty S, Parker R J, Peng C H, Peng S S, Peters G P, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Regnier P, Riley W J, Rosentretter J A, Segers A, Simpson I J, Shi H, Smith S J, Steele L P, Thornton B F, Tian H Q, Tohjima Y, Tubiello F N, Tsuruta A, Viovy N, Voulgarakis A, Weber T S, van Weele M, van der Werf G R, Weiss R F, Worthy D, Wunch D, Yin Y, Yoshida Y, Zhang W X, Zhang Z, Zhao Y H, Zheng B, Zhu Q, Zhu Q A, Zhuang Q L. The global methane budget 2000-2017. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561-1623.
- [47] Bogard M J, Kuhn C D, Johnston S E, Striegl R G, Holtgrieve G W, Dornblaser M M, Spencer R G M, Wickland K P, Butman D E. Negligible cycling of terrestrial carbon in many lakes of the arid circumpolar landscape. *Nature Geoscience*, 2019, 12(3): 180-185.