

基于 Meta 分析的中国内陆水体沉积物产甲烷潜势驱动因子识别*

汪万府¹, 刘 流^{1**}, 范雨春¹, 刘少达², 马健荣³, 黄丝傲¹, 陈光杰¹

(1:云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南师范大学地理学部, 昆明 650500)

(2:水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

(3:中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘 要: 内陆水体是大气中温室气体甲烷的一个重要自然来源。沉积物在厌氧条件下的产甲烷潜势是决定水体甲烷排放规模的一个关键指标。然而, 截止目前尚缺乏针对内陆水体沉积物产甲烷潜势的跨系统比较研究, 对其驱动因子的认识尚不清晰。本研究收集了我国内陆水体包括水库、湖泊、河流和湿地的沉积物产甲烷潜势数据, 结合部分未发表自有数据(共 210 条数据), 探索了几种不同水体沉积物产甲烷潜势的时空分布, 并识别了水环境因子对沉积物产甲烷潜势的驱动因子。研究发现, 沉积物产甲烷潜势季节性明显, 呈现雨季显著大于旱季态势(~ 3.5 倍, $p < 0.01$); 拦河筑坝会导致沉积物的产甲烷潜势增加十倍以上, 水库、湖泊沉积物产甲烷潜势显著($p < 0.01$)大于河流或湿地。相关分析表明, 人类活动引起的水体富营养化对沉积物产甲烷潜势驱动作用显著($p < 0.05$), 水温、水深、沉积物有机质含量均对沉积物产甲烷潜势有显著($p < 0.01$)正向刺激作用, 而水体盐度对沉积物产甲烷存在显著($p < 0.01$)抑制作用。本研究表明, 在全球气候变化这一背景下, 预测未来内陆水体的碳排放, 除去全球升温这一自然过程, 一些强人类活动干扰诸如拦河筑坝、水体富营养化等过程也必须给予充分考虑。

关键词: 湖泊和水库; 厌氧产甲烷; 温室气体; 碳循环; 富营养化

Identification of potential driving factors for sediment methanogenesis in Chinese inland waters based on meta-analysis

Wang Wanfu¹, Liu Liu^{1*}, Fan Yuchun¹, Liu Shaoda², Ma Jianrong³, Huang Siao¹, Chen Guangjie¹

(1: Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R. China)

(2: State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R. China)

(3: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, P. R. China)

Abstract: Inland waters are an important natural source of methane to the atmosphere, a potent greenhouse gas. The potential of sediment methane production (PMP) under anaerobic conditions is a key indicator for the level of atmospheric emissions of methane. However, there is a lack of cross-system studies on the sediment PMP in inland waters. The underlying driving mechanisms are still unclear. In this study, we collected data on PMP in inland waters in China including reservoirs, lakes, rivers and wetlands. Combined with some unpublished data (a total of 210 data points), the temporal and spatial distribution of sediment PMP in several different

* 2024-12-14 收稿; 2025-03-18 收修改稿。

云南省科技厅基础研究计划面上项目(202401AT070132)、国家自然科学基金项目(42207089, 42311530334)、云南省西南联合研究生院科技专项(202302AP370001)、云南省科技厅社会发展重大专项(202203AC100002)和云南省科技厅异龙湖高原浅水湖泊云南省野外科学观测研究站(202305AM070002)联合资助。

**通讯作者: E-mail: liu.liu@ynnu.edu.cn

systems was explored, and the drivers of the sediment PMP were identified. We found that PMP is seasonally variable, showing a trend of being significantly greater in the rainy season than in the dry season (~ 3.5 times, $p < 0.01$); damming causes a significant increase in PMP by more than ten times, and sediment PMP in reservoirs and lakes is significantly ($p < 0.01$) greater than that of rivers or wetlands. Correlation analysis shows that eutrophication caused by human activities has a significant ($p < 0.05$) driving effect on sediment PMP. Water temperature, water depth and sediment organic matter content have a significant ($p < 0.01$) positive stimulating effect on sediment PMP, while salinity has a significant ($p < 0.01$) inhibitory effect. In the context of global climate change, in order to make good future projections of carbon emissions from inland waters, human disturbances such as damming and eutrophication must be well incorporated, in addition to the natural process of global warming.

Keywords: Lakes and reservoirs; anaerobic methane production; greenhouse gases; carbon cycling; eutrophication

内陆水体包含水库、河流、湖泊、湿地等，是一个全球甲烷排放的重要自然排放源，对全球气候变化的贡献不可忽略^[1]。尽管最新研究论证了有氧条件下产甲烷过程对甲烷排放的贡献^[2,3]，但这些内陆水生态系统中所排放甲烷，仍有相当大一部分是厌氧条件下沉积物有机质矿化分解的终端产物^[4]。目前基于水-气界面甲烷排放观测数据的 Meta 分析，由于无法考虑影响甲烷排放的一些关键过程，其外推结果往往存在较大不确定性^[1]，这也限制了基于这些 Meta 分析进行未来排放预测的能力。

甲烷排放通量的直接观测面临诸多挑战，其中一个重要原因是通量的高度时空异质性。沉积物所产甲烷通过多种途径被释放到大气中，其中最主要的两种为扩散和冒泡^[4]。甲烷通过水-气界面扩散排放前，相当大比例会在氧跃层被氧化^[5,6]，水柱中剩余溶存甲烷受水-气界面物理过程调控^[7]呈现明显的时空异质性^[8]，导致其观测结果具有较大不确定性^[9]。相较于水-气界面分子扩散，冒泡被认为是沉积物所产甲烷的一种高效排放途径^[10-11]。然而，高度时空异质性仍是准确预测甲烷冒泡通量的一大挑战^[12-16]。相较于物理作用驱动下，甲烷通量在水-气界面呈现的高度时空异质性，水体有机质的埋藏能够整合时空异质性信号，受风生流等外力的直接影响相对较小，因此沉积物的产甲烷潜势可作为评估水体甲烷排放潜力的一个关键指标。

沉积物产甲烷潜势对水体底部温度和氧化还原条件的敏感性已得到较为充分的认识。温度上升会刺激沉积物产甲烷，使得水-气界面甲烷排放通量大幅上升^[17]。研究还发现^[18]，升温会促进沉积物中甲烷气泡的生长和排放，当水温超过 10 °C 后甲烷冒泡开始占据主导地位。因此，尽管在升温作用刺激下甲烷的氧化会部分抵消其生成，但总体来看升温对甲烷的净产生潜势呈现显著正向驱动作用^[19]。不仅如此，气候变暖导致深层水体底部溶氧含量下降，还会进一步刺激沉积物产甲烷^[20]。除去气候变暖这一自然驱动过程，研究还指出人类活动影响下水库和湖泊的营养状态也能很好的预测甲烷排放水平^[21, 22]，富营养水体的甲烷排放水平通常较高。基于以上认识，我们收集了不同类型水体的沉积物产甲烷潜势数据，在分析比较沉积物产甲烷潜势时空分布格局的基础上，试图验证人类活动信号对沉积物产甲烷潜势占据主导地位这一假设，从而为制定有效的碳减排措施提供科学支撑。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究划定研究区域为中国，通过 CNKI(中国知网数据库)和 Web of science 检索文献，检索关键词为“沉积物甲烷”、“水库甲烷”、“河流甲烷”、“湖泊甲烷”、“湿地甲烷”，“sediment methane production”、“sediment methanogenesis”共检索到文献 3823 篇，筛选到已有发表关于中国内陆水体水库、河流、湖泊、湿地沉积物产甲烷潜势的文献共计 38 篇。通过 Get Data Graph Digitizer 2.24 软件提取论文中沉积物产甲烷潜势(PMP($\text{mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$))，并摘录了水体总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素(Chl.a)、溶解氧(DO)、电导率(SPC)、水温(WT)，pH、氨氮(NH_4^+)、硝氮(NO_3^-)、亚硝氮(NO_2^-)等水环境参数；沉积物固态总有机碳(TOC)，以及沉积物孔隙水溶解态总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+)、硝氮(NO_3^-)、亚硝氮(NO_2^-)、溶解性有机碳(DOC)等指标，使用百度地图拾取坐标系统获得采样点地理位置，根据季风气候区旱雨季划分：4~10 月份为雨季，11 月至次年 3 月份为旱季。

1.2 研究区域

本研究共收集 40 个水库^[14, 23-26](67 个样点), 10 条河流^[27-35](33 个样点), 28 个湖泊^[36-48](67 个样点), 35 个湿地^[49-59](43 个样点), 包含少量未公开发表的自有数据。本文所涉及的湿地为介于陆地生态系统与水生态系统之间的过渡生态系统, 即陆地和水域的交汇处, 水位接近或处于地表面, 或有浅层积水, 周期性以水生植物为植物优势种。包含天然河流湿地、湖泊湿地、海岸湿地, 不包括人工湿地如水库塘坝、稻田、水产养殖场等。文中所有的河流、水库按照松辽流域(L/HR)、海河(含淮河)流域(HR)、黄河流域(HUR)、长江流域(CJ)、珠江流域(ZJ)、西南诸河(SWR)、西北内陆河流域(IFR)七大片区进行分类; 湖泊, 湿地按照青藏湖区(QTi)、东北湖区(NE)、蒙新湖区(MX)、东部湖区(Ea)和云贵湖区(YG)归类。

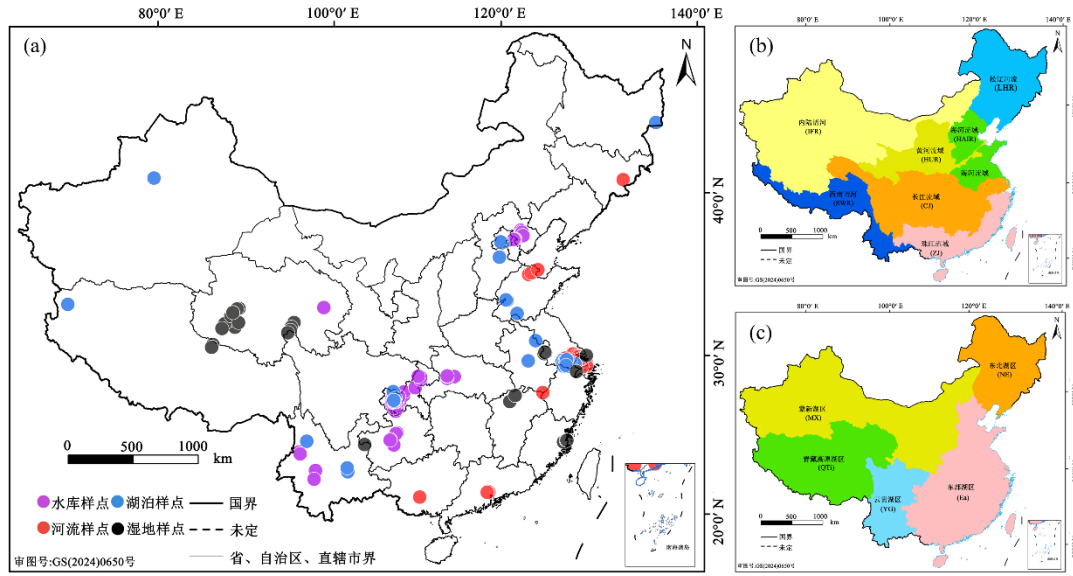


图1 研究区采样点分布图。a)水库样点在图上以紫色实心点标出, 湖泊样点用蓝色实心点标出, 河流样点用红色实心点标出, 湿地样点用黑色实心点标出; b)中国几大主要流域的空间分布图; c)中国五大湖区的空间分布图

Fig.1 Location of study sites. a) reservoirs are designated as solid purple dots, lakes are shown as solid blue dots, rivers are shown as solid red dots and wetlands are shown as solid black dots; b) the spatial distribution of the major watersheds in China; c) the spatial distribution of the five lake districts in China.

1.3 数据筛选与均一化处理

数据采用的标准设置为沉积物须在厌氧条件下培养。目前所收集文献中沉积物产甲烷培养方法分为两类: 1)原性状沉积物直接厌氧培养; 2)沉积物加水混合后培养。由于第二种方法改变了沉积物的原含水率, 本研究根据文献中的沉积物/水混合比例对沉积物产甲烷潜势进行了修正, 将产甲烷潜势按原沉积物含水率水平进行换算。处理后, 数据统一报告为 $\text{mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。由于收集到的文献中沉积物培养温度不一致, 为比较不同空间上的沉积物产甲烷潜势, 根据 Aben 等人^[18]提供的温度校正公式, 标准化为 20 °C 来统一处理, 在沉积物产甲烷潜势与环境因子的分析中则采用原位温度。为探究海拔对湖泊、水库水温的影响, 本研究获取了 19 个湖库的多年平均水温数据。本研究产甲烷潜势采样为表层沉积物, 分层培养的沉积物取 0~15 cm 深度的产甲烷潜势平均值, 采用原位温度校正后的沉积物产甲烷潜势与水质和沉积物环境因素进行相关性分析, 温度校正公式^[18]为:

$$\text{PMP}_{\text{原位}} = \text{PMP}_{20} * 1.12^{(a-20)} \quad (1)$$

其中 PMP₂₀ 为 20 °C 培养温度下产甲烷潜势，a 为原位温度。通过文献收集不同水体沉积物的含水率计算平均值，不同水体的含水率分别为：水库(61.88%)、河流(50.84%)、湖泊(87.07%)、湿地(49%)，湿重产甲烷潜势分别乘以 2.62、2.03、7.69、1.96 倍得到干重下沉积物产甲烷潜势，已有含水率的论文用实测含水率计算，无含水率的采用平均含水率。

为评估湖泊和水库的富营养化状况，选取水体总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)、叶绿素 a(Chl.a) 这四项评价指标，根据以下公式计算营养状态指数(TSI)^[60]：

$$TSI=0.219TSI(TN)+0.230TSI(TP)+0.225TSI(SDD)+0.326TSI(Chla) \quad (2.1)$$

$$TSI(TN)=10 \times (5.453+1.694 \ln(TN)) \quad (2.2)$$

$$TSI(TP)=10 \times (9.436+1.624 \ln(TP)) \quad (2.3)$$

$$TSI(SD)=10 \times (5.118-1.94 \ln(SD)) \quad (2.4)$$

$$TSI(Chla)=10 \times (2.5+1.086 \ln(Chla)) \quad (2.5)$$

根据综合 TSI 值，所有采样水体被分为三种营养状态^[61]：贫营养(TSI<30)，中营养(30<TSI<50)和富营养(TSI>50)。

为探究水体盐度与 PMP 的关系，将水体电导率(SPC)运用联合国教科文组织 1983 年盐度计算公式^[61]和 Hill 等人 1986 年盐度计算的方法^[62](采用 James Douglass 学位提供的 Excel 计算表格(DouglassCondSalConversionHilletal1986.xlsx，网上可免费下载))得出结果，该方法适用的盐度范围为 0~42 PSU，温度范围为 -2~40 °C。

1.4 统计分析

原始数据在 Microsoft Excel 2021 中进行预计算和处理，对所有数据单位进行标准化，使用 Grapher 18 和 ArcGIS 10.8.1 进行数据绘图，使用 R Studio 进行统计分析。相关分析使用 Pearson 相关， $p<0.05$ 为显著相关。

2 结果

2.1 内陆水体沉积物产甲烷潜势(PMP)的时空分布特征

四类水体的 PMP₂₀ 的分布范围均较为离散(图 2；图 4a；表 1)，水库为 $4.29 \times 10^{-4} \sim 37.20 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ，其中三峡水库沉积物 PMP₂₀ 最大值为 $30.42 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ，最低值为 $4.29 \times 10^{-4} \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ，两者相差 5 个数量级，说明同一水库沉积物 PMP₂₀ 具有极大的库内空间变异性。湖泊和湿地沉积物 PMP₂₀ 分布范围分别为 $3.07 \times 10^{-5} \sim 56.89$ 、 $1.46 \times 10^{-5} \sim 24.50 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ，呈现与水库类似的高度空间异质性。相比之下，河流沉积物 PMP₂₀ 分布范围为 $3.08 \times 10^{-4} \sim 1.91 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ，空间异质性远小于其它三类水体。

结合图 2 沉积物 PMP₂₀ 呈现出的较大空间分布差异，对纬度、水温、海拔这几个关键驱动因子进行了探索式数据分析。相关分析表明，纬度梯度(23~43 °N)对几类水体沉积物的 PMP₂₀ 影响不显著($p>0.05$)。而回归分析表明(图 3)，海拔梯度(3~4720 m)解释了 72%的水温变化($R^2=0.72$ ， $p<0.001$)，即海拔越高水温越低；海拔梯度解释了 41%的原位沉积物 PMP ($R^2=0.41$ ， $p<0.001$)。

针对四类水体的系统差异分析(图 4a)表明，整体来看水库、湖泊沉积物的 PMP₂₀(4.20 ± 8.52 ； $5.69 \pm 11.51 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)显著($p<0.01$)高于河流($0.33 \pm 0.56 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)和湿地($4.10 \pm 7.78 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)，由于湿地收集数据样本有限，导致湿地沉积物甲烷 PMP₂₀ 偏低。水库与湖泊间的差异不显著($p>0.05$)；河流与湿地间的差异也不显著($p>0.05$)。值得注意的是，鉴于数据符合 log 正态分布，因此中值更能反映一类水体沉积物 PMP 的平均水平。表 1 也同时给出了四类水体沉积物 PMP₂₀ 的中值，呈现出：水库(0.60)>湖泊(0.36)>河流(0.10)>湿地(0.08)。与方差分析的结果基本一致，但更突出水库、湖泊是沉积物产甲烷的热点区域。这与水库作为人类强干扰活动下的一类典型水体，对泥沙及营养物质的拦截和富集作用，以及诸多湖泊面临的富营养化趋势基本一致。对 19 个湖库点位的水体沉积物 PMP₂₀ 的干湿季数据对比分析(图 4b)表明，水文情势对沉积物 PMP₂₀ 存在影响，雨季 PMP₂₀($0.88 \pm 0.61 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)显著($p<0.01$)高于旱季($0.23 \pm 0.21 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)。

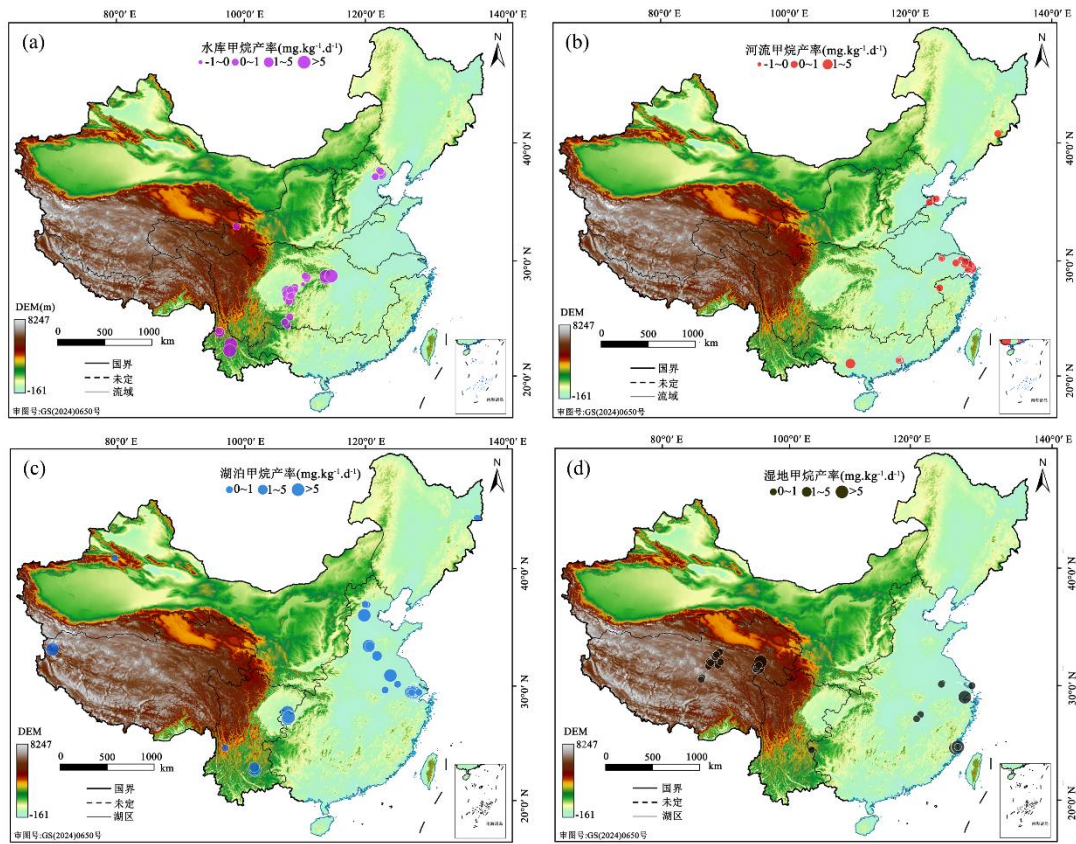


图2 几类水体沉积物产甲烷潜势(PMP₂₀)的空间分布特征

Fig. 2 The spatial patterns of sediment potential methane production rates at 20 °C (PMP₂₀) sorted by system

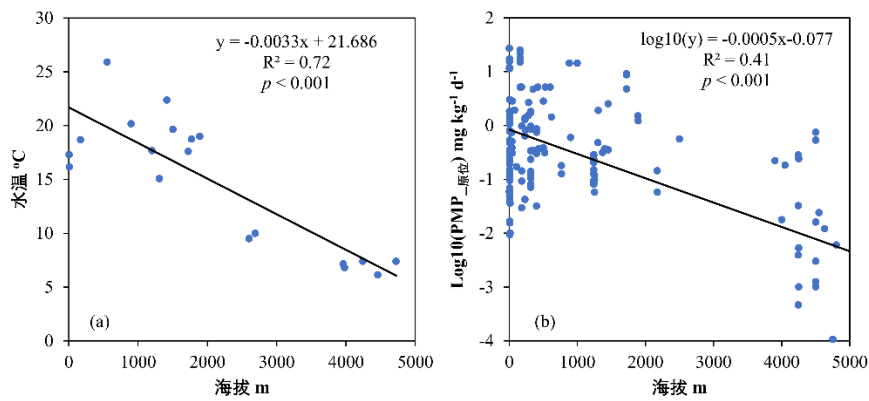


图3 a)年平均水温对海拔的响应(n=19); b)校正到原位温度后的沉积物产甲烷潜势(log10(PMP_{原位}))对海拔梯度(n=162)的响应

Fig. 3 The response of a) water temperature and b) temperature-corrected sediment potential methane production rates (log10(PMP_{原位})) to altitude.

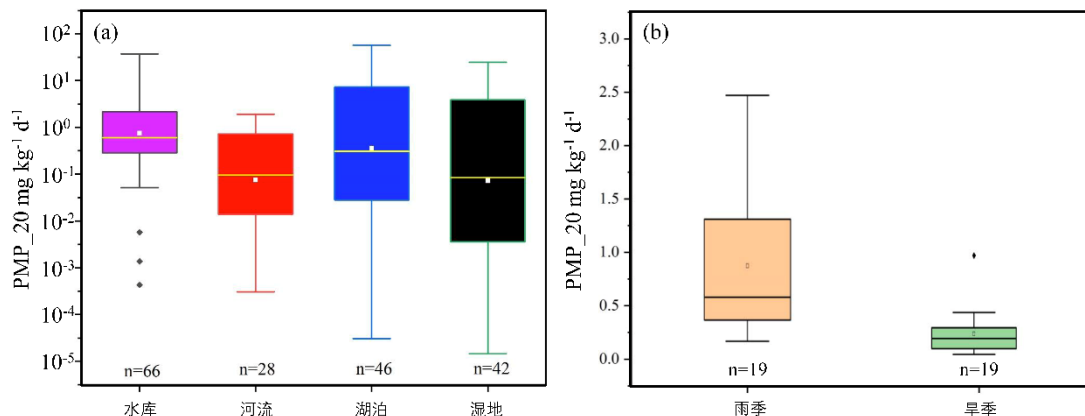


图 4 几类内陆水体沉积物 PMP₂₀ 的 a)系统间差异和 b)季节差异

Fig. 4 The systematic differences of PMP₂₀ between a) water types and b) seasons.

表 1 几类内陆水体沉积物 PMP₂₀ 的统计学特征(单位: mg CH₄ kg⁻¹ d⁻¹).

Table 1 The statistical features of PMP₂₀ from the four different water bodies (mg CH₄ kg⁻¹ d⁻¹).

PMP ₂₀ mg kg ⁻¹ d ⁻¹	水库 (n=66)	河流 (n=28)	湖泊 (n=46)	湿地 (n=42)
极值范围	4.29×10 ⁻⁴ ~37.20	3.08×10 ⁻⁴ ~1.91	3.07×10 ⁻⁵ ~56.89	1.46×10 ⁻⁵ ~24.50
中位数	0.60	0.10	0.36	0.08
均值	4.26	0.41	5.69	4.10
标准差	8.57	0.56	11.51	7.78

2.2 影响沉积物 PMP₂₀ 的主要物理化学指标分析

内陆水体的水温($p<0.001$)、总氮($p<0.05$)、pH($p<0.05$)与沉积物 PMP₂₀ 显著相关, 其他相关水环境因子(DO、SPC、Chl.a、TP、NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻、DOC、COD)没有表现出显著相关性($p>0.05$, 图 5a)。沉积物孔隙水总氮(TN)、总磷(TP)是 PMP₂₀ 的主要驱动因子($p<0.001$), 其他参数(DOC、NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻)不具有显著相关性(图 5b)。

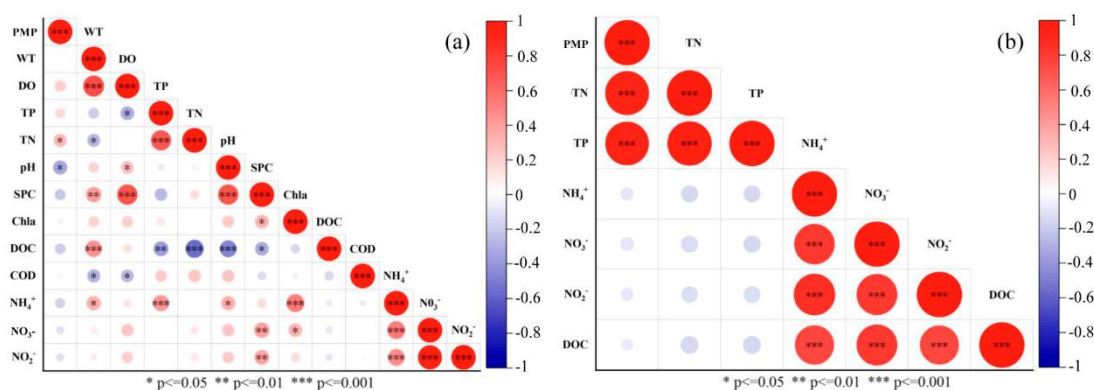


图 5 沉积物产甲烷潜势(PMP₂₀)与 a)水体和 b)沉积物主要物理化学指标之间相关关系矩阵(Pearson 相关分析)

Fig. 5 The correlation matrix of PMP₂₀ and physiochemical properties in a) water column and b) sediment column (Pearson correlation).

尽管上述相关分析表明沉积物孔隙水氮磷含量与 PMP_20 显著相关,但由于本数据集收集到的沉积物氮磷数据样本有限,不足以支撑有意义的统计分析,因此未进一步进行回归分析。在湖库 TSI 指数与 PMP_20 回归分析中(图 6a),TSI 指数与湖库沉积物 PMP_20 呈指数关系($n=12, p<0.05$),TSI 指数解释了 49%的沉积物产甲烷潜势,湖泊的数据点虽少于水库,但其趋势与水库基本一致。湖库水深显著正向驱动沉积物 PMP_20($n=44, p<0.05$),但解释度较低(22%;图 6b),表明随着湖库水深的增加,沉积物产甲烷潜势增加。由于湖泊数据的稀缺,这里仅针对水库沉积物有机质含量(OC)进行分析,其分布范围为 $46.04\pm 28.19 \text{ g kg}^{-1}$,83%的水库 OC 低于 70 g kg^{-1} 。OC 显著正向驱动沉积物 PMP_20 ($n=95, p<0.001$),解释了 28%的沉积物产甲烷潜势图(6c)。相关分析(6d)还表明,水体盐度对沉积物 PMP_20 有显著抑制作用($n=32, p<0.01, R^2=0.40$),即随着盐度增大沉积物产甲烷潜势降低。

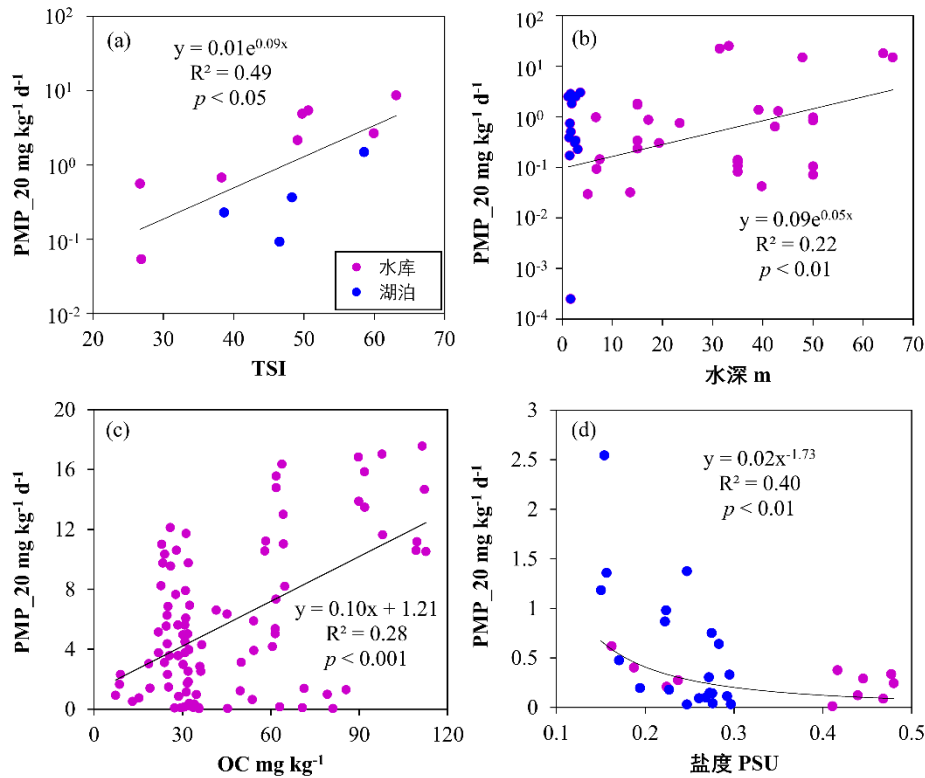


图6 沉积物产甲烷潜势(PMP_20)与几个关键指标的回归分析。a)PMP_20 与水体营养指数(TSI)的回归分析; b)PMP_20 与水深的回归分析; c)PMP_20 与沉积物有机质含量(OC)的回归分析; d)PMP_20 与水体盐度的回归分析

Fig. 6 The regression analyses between sediment PMP_20 and the key environmental drivers. The regression analysis between PMP_20 and a) TSI, b) water depth, c) OC and d) salinity.

2.3 沉积物中 PMP_20 沿深度分布特征

除河流外(无相关深度分布数据),其它三类内陆水体沉积物 PMP_20 均呈现表层高于中低深度的总体分布特征,而湖泊中沿沉积物深度的 PMP_20 向表层集中的趋势更为明显。比较三大流域水库沉积物 PMP_20 的垂向分布(图 7a)发现,澜沧江水库干流($0.68\sim 26.37 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)与富营养的三峡水库支流库湾 PMP_20($17.96\sim 30.42 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)处于同一水平,远高于三峡水库干流($<0.10 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)和黄河水库干流($<2.00\times 10^{-3} \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$),后者与前者相差 3~5 个数量级。总体来说,湖泊沉积物的 PMP_20 在表层 10cm 以内更活跃。而高海拔($>3800 \text{ m}$)的西藏班公错、云南高山湖沉积物 PMP_20 均高于云南中等海拔湖泊抚仙湖和昆明浅水湖,而 PMP_20 最低水平出现在山东东平湖,比最高水平的云南高山湖低两个数量级。湿地沉积物的 PMP_20 深度分布数据相对稀缺,仅有杭州湾湿地一例。

杭州湾湿地沉积物 PMP₂₀ 尽管在表层 10 cm 以内略大于更深层, 但 PMP₂₀ 在表层的活跃程度相对深层沉积物并不明显, 总体呈现与澜沧江、黄河水库干流沉积物 PMP₂₀ 类似的分布模式。

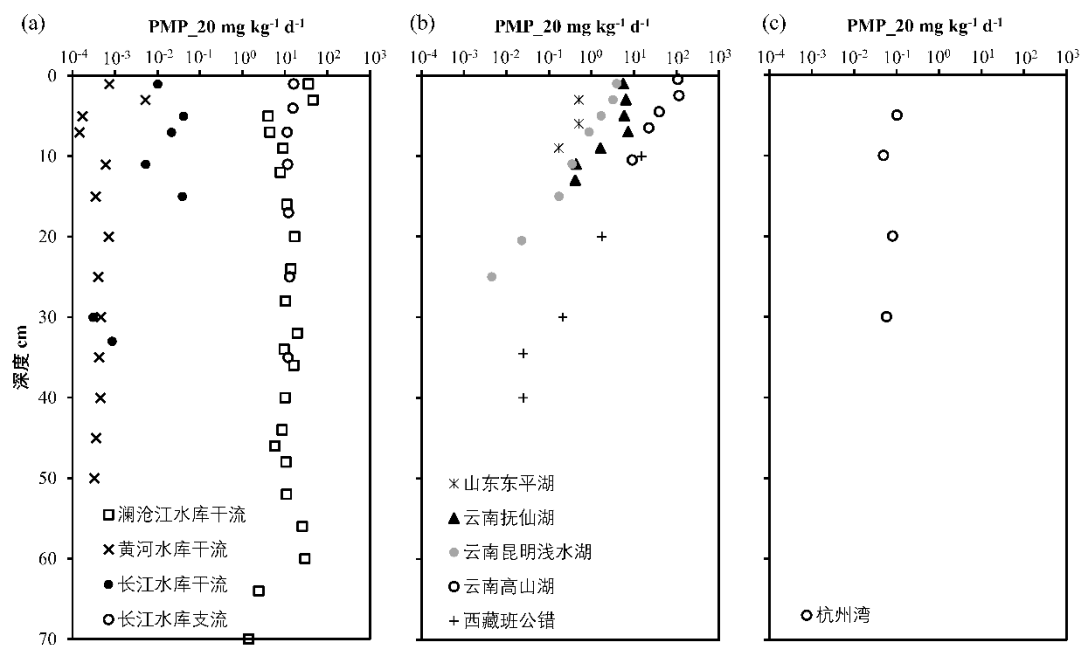


图7 三种水体(a-水库、b-湖泊、c-湿地)沉积物产甲烷潜势(PMP₂₀)沿深度分布。

同一水库、湖泊和湿地同一深度产甲烷潜势有多个值时取平均值

Fig. 7 The vertical distribution of PMP₂₀ in sediment column in a) reservoirs, b) lakes and c) wetlands. Note that data are reported by taking the average of multiple measurements at the same sediment depth if any.

3 讨论

3.1 水体沉积物产甲烷潜势系统性差异的驱动因子分析

基于本数据集的再分析(图 4a)发现, 水库、湖泊沉积物产甲烷潜势显著高于河流和湿地这两类水体, 沉积物产甲烷潜势与 OC 的回归分析(图 6c)也支持这一发现, 即有机碳埋藏促进沉积物甲烷产生潜势。河流筑坝后, 沉积物在坝前淤积, 导致库区沉积物产甲烷潜势远高于河流, 成为甲烷产生和排放的热点区域^[12]。而统计中值(表 1)显示水库的平均水平高于湖泊, 这与全球水库、湖泊的有机碳埋藏速率统计趋势一致。Mendonça 等人^[63]发现, 全球水库有机碳埋藏速率平均比湖泊高一个数量级。水库相对较高的沉积速率是导致这一系统性差异的主要原因之一, 相比湖泊毫米级的年均沉积速率^[64, 65], 水库的年均沉积速率通常至少在厘米级以上^[12]。已有研究均表明富营养化会刺激湖库甲烷排放^[21, 22], 本研究相关分析结果(图 6a)支持这一观点。

水深在水库和湖泊中的作用机制既有共同点, 也有差异, 作为驱动湖库甲烷排放的一个重要因子, 其中一个重要作用机制是其决定了甲烷冒泡通量的排放水平。这是因为沉积物中甲烷气泡生成的一个先决条件是孔隙水溶存甲烷浓度过饱和^[67], 而水深增加引起的静水压强增加会推高孔隙水溶存甲烷的饱和浓度临界值, 从而抑制沉积物甲烷气泡的生长水平。水深究竟如何影响湖库沉积物甲烷产生潜势目前尚未确定结论。本研究(图 6b)发现, 湖库沉积物 PMP₂₀ 均随水深加深而增加, 但其驱动作用较弱 ($R^2=0.22$)。这与刘流等人^[14]在澜沧江上游水库以及 Maeck 等人在^[12]德国的小型梯级水库甲烷气泡排放通量的趋势一致, 他们均发现在坝前水深更大的水域甲烷的排放通量更高, 这可能与受流速减缓影响泥沙在坝前的淤积有关, 大水深对应更弱的水动力条件, 而相应的沉积物更细、有机质含量更高, 进而

促进了沉积物甲烷生成。而水深作为一个影响因子,在湖泊沉积物中呈现正向驱动的一个重要原因在于深水区更高的有机碳埋藏速率。这是因为湖泊深水区相较于湖滨带更易出现底层水体厌氧,从而导致有机碳埋藏增加^[68]。另外,相较于湖滨带沉积物有机质来源多为流域输入,深水区沉积物有机碳多来自浮游植物,更容易被产甲烷菌分解利用^[69]。

本研究同时测试了水体盐度对沉积物产甲烷潜势的影响(图 6d),结果表明盐度对沉积物 PMP₂₀ 有显著($p<0.01$)抑制作用。这与刘虎等人^[70]在青藏高原湖泊的盐度上升抑制水体甲烷溶存浓度的结论一致。Zhang 等人^[71]研究蒙古高原湖泊发现,盐度是湖泊沉积物中甲烷氧化的主要驱动因素,该驱动过程通过调节甲烷氧化菌群落的多样性和甲烷氧化菌种间的协同性来发挥作用。在区域尺度上, Soued 等人^[72]研究发现,在全球最大的硬水区之一加拿大大草原,排除盐度的影响会导致对该地区小型水体的甲烷排放高估至少 81%(~1 Tg yr⁻¹ CO₂ 当量)。鉴于水体盐度对湖库甲烷产生和排放的重要影响,对区域乃至全球湖库甲烷循环的升尺度效应值得未来进一步研究。

3.2 驱动沉积物产甲烷潜势的自然过程和人类活动影响

温度是驱动沉积物产甲烷的一个关键自然过程。水温随海拔升高显著降低这一发现(图 3a)并不出乎意料,我们的数据集显示通过水温作用海拔对沉积物原位产甲烷潜势存在显著影响($p<0.001$, $R^2=0.41$),随着海拔的上升沉积物原位产甲烷潜势降低。同时,本研究比较了季节采样的数据集,发现雨季沉积物产甲烷潜势远高于干季(图 4b),这与 Yang 等人^[73]在我国西南 70 余个湖 CH₄ 溶存浓度的季节调查结果一致,同时也与我们的有机质含量增加促进沉积物产甲烷潜势的结果(图 6c)互相印证。雨季降水多且集中,导致大量流域陆源有机质输入湖泊,为沉积物产甲烷提供充足基质。同时,我国大部分地区均为雨热同季,温度偏高的雨季也同为浮游植物生长季,水温升高叠加来自流域的高营养盐输入,诱发浮游植物大量繁殖,浮游植物残体的沉积也为产甲烷提供了丰富底质^[69]。流域输入的难降解有机质维持了湖泊沉积物常年产甲烷的基线,而生长季富含易分解有机质的浮游植物残体埋藏进一步推高了沉积物产甲烷潜势^[74]。

除温度和降水这些自然过程外,本研究还识别出人类活动对沉积物产甲烷潜势的驱动作用。水体营养指数(TSI)作为一个强预测因子,解释了 49%的湖库沉积物产甲烷潜势变化(图 6a)。同时,水体 TN 和 pH 对沉积物产甲烷潜势均存在显著影响(图 5a),沉积物孔隙水 TN、TP 的影响也很显著(图 5b)。营养盐的驱动作用可能更多是间接的,水体营养盐的富集导致水体初级生产力增加,促进了有机质的埋藏,从而最终促进了沉积物产甲烷(图 6c)。尽管本研究中沉积物孔隙水 TN、TP 数据样本限制了进一步深入解析氮磷对产甲烷潜势的驱动机制,但这一结果与 Isidorova 等人^[75]和 Moras 等人^[76]对湖库沉积物产甲烷潜势的预测模型基本一致,在这些研究中沉积物 TN 含量被识别为重要的预测因子。此外,Wilkinson 等人^[77]在德国莱茵河流域水库的研究还表明,沉积物深度能够很好的预测产甲烷潜势,证明了沉积物年代作为产甲烷潜势预测因子的有效性,也表明新鲜有机碳的埋藏有利于沉积物甲烷生成。本研究结果也与富营养化促进湖库甲烷排放的模型预测结果^[22]一致,在全球变暖背景下,预期湖库富营养化趋势会加剧^[78],在增加有机碳埋藏的同时会进一步刺激沉积物产甲烷^[79]。

通过比较三类水体(水库、湖泊和湿地)沉积物产甲烷潜势的深度分布,本研究还发现,可能其它过程也参与了沉积物中甲烷的生成或影响了沉积物产甲烷的垂向分布。这些过程包括沉积物的甲烷厌氧氧化。例如,在抚仙湖沉积物中李彪等人^[80]发现铁还原耦合甲烷的氧化,范雨春等人^[44]发现在云南的三个老君山高山湖沉积物中均存在不同程度的甲烷厌氧氧化,Deutzmann 等人^[81]发现在德国康斯坦斯湖反硝化作用与甲烷厌氧氧化耦合使得大部分沉积物所产甲烷在沉积物中被消耗。如何考虑甲烷厌氧氧化过程,进一步完善沉积物产甲烷潜势模型的预测能力将是未来亟需解决的一个关键科学问题。同时需要注意的是,Isidorova 等人^[75]提出的沉积物产甲烷潜势预测经验模型基于一个重要假设,即沉积物有机碳埋藏速率(或沉积速率)在几十年内是相对稳定的,这在一些受人类活动因素干扰较少的天然湖泊可能适用,但对一些受人为调控影响较大的水体如水库和富营养化湖泊可能并不适用。刘流等人^[14]在澜沧江上游梯级水库的调查结果也证实了这一观点,即沉积物产甲

烷潜势沿深度衰减趋势不明显,且水库甲烷排放与水库库龄无显著相关关系。这表明水库作为一类特殊水体,在其水沙淤积受高度人为调控情况下,沉积物产甲烷潜势的预测仅考虑自然过程是不够的。

3.3 中国内陆水体沉积物产甲烷潜势研究展望

沉积物产甲烷潜势是评估内陆水体甲烷排放潜力的一个重要指标。然而,本研究发现中国内陆水体沉积物产甲烷的研究存在因数据稀缺导致的代表性不足问题。例如,按流域划分,长江流域是当前研究的热点地区,占据已有采样点的76%,西南诸河、海河、黄河、珠江、内陆诸河、松辽河流等流域的数据相对稀缺。而按湖区划分,蒙新湖区和东北湖区均仅有一个湖泊样点,进行空间分布比较存在样本代表性不足情况。因此,我们呼吁更多的研究,将沉积物产甲烷培养实验纳入水体甲烷循环调查的常规项目,以弥补数据空白。同时,我们也建议未来的沉积物培养研究尽量采用统一方法,即尽可能培养原性状沉积物样品,以避免对沉积物微生物族群的潜在干扰。数据的报告,也尽可能同时包含沉积物湿重产甲烷潜势、湿重产甲烷潜势这两种方式,以方便不同水体或系统间的比较。此外,需要注意的是,由于沉积物产甲烷潜势是实验室厌氧培养条件下得到的潜在产甲烷速率,因此仅仅据此预测水-气界面的甲烷排放通量是远远不够的,还需要全面考虑甲烷在沉积物-水界面的氧化,水柱中的甲烷产生与消耗过程。

4 结论

沉积物厌氧环境下产甲烷的规模很大程度上决定了整个水体的水-气界面甲烷排放水平,结合自有数据和文献数据,本研究首次对我国内陆水体沉积物产甲烷潜势的系统差异和关键驱动过程进行了识别。统计分析发现水库、湖泊沉积物产甲烷潜势显著($p<0.01$)高于河流和湿地。尽管水库与湖泊不存在显著差异($p>0.05$),但水库沉积物产甲烷潜势中值水平($0.60 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)较湖泊($0.36 \text{ mg CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)偏高,水库较高的有机质埋藏速率是导致这种系统差异的主要原因,同时也导致了水库沉积物产甲烷潜势相对湖泊沉积物缺乏明显的深度梯度。沉积物产甲烷潜势除受海拔引起的水温梯度($R^2=0.41$, $p<0.001$),以及水深、有机碳含量、盐度等物理化学因子驱动,同时还受人类活动引起的富营养化过程(TSI 营养指数指代)驱动($R^2=0.49$, $p<0.05$),具体驱动因子包括水体 TN、pH 以及沉积物孔隙水中的 TN、TP 浓度,这表明未来评价内陆水体碳排放与埋藏规模,除全球升温这一自然过程,流域开发引起的水体富营养化也必须给予充分考虑。

5 参考文献

- [1] Rosentreter JA, Borges AV, Deemer BR *et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(4): 225-230.
- [2] Günthel M, Donis D, Kirillin G *et al.* Contribution of oxic methane production to surface methane emission in lakes and its global importance. *Nature communications*, 2019, **10**(1): 5497.
- [3] Ordóñez C, DelSontro T, Langenegger T *et al.* Evaluation of the methane paradox in four adjacent pre-alpine lakes across a trophic gradient. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): 2165.
- [4] 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.
- [5] Lidstrom ME and Somers L. Seasonal study of methane oxidation in Lake Washington. *Applied and Environmental Microbiology*, 1984, **47**(6): 1255-1260.
- [6] Kang M, Liu L, Grossart H-P. Spatio-temporal variations of methane fluxes in sediments of a deep stratified temperate lake. *iScience*, 2024, **27**(4): 109520.
- [7] Liss P. Processes of gas exchange across an air-water interface. in *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Elsevier. 1973, **20**(3): 221-238.
- [8] Hofmann H. Spatiotemporal distribution patterns of dissolved methane in lakes: How accurate are the current estimations of the diffusive flux path? *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(11): 2779-2784.
- [9] Natchimuthu S, Sundgren I, Gålfalk M *et al.* Spatio-temporal variability of lake CH₄ fluxes and its influence on annual whole lake emission estimates. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(S1): S13-S26.
- [10] McGinnis D, Greinert J, Artemov Y *et al.* Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, **111**(C9): C09007.

- [11] Wilkinson J, Maeck A, Alshboul Z *et al.* Continuous seasonal river ebullition measurements linked to sediment methane formation. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(22): 13121-13129.
- [12] Maeck A, DelSontro T, McGinnis DF *et al.* Sediment trapping by dams creates methane emission hot spots. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8130-8137.
- [13] Maeck A, Hofmann H, Lorke A. Pumping methane out of aquatic sediments—ebullition forcing mechanisms in an impounded river. *Biogeosciences*, 2014, **11**(11): 2925-2938.
- [14] Liu L, Yang ZI, Delwiche K *et al.* Spatial and temporal variability of methane emissions from cascading reservoirs in the Upper Mekong River. *Water Research*, 2020, **186**: 116319.
- [15] Liu L, Wilkinson J, Koca K *et al.* The role of sediment structure in gas bubble storage and release. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**(7): 1992-2005.
- [16] Liu L, Sotiri K, Dück Y *et al.* The control of sediment gas accumulation on spatial distribution of ebullition in Lake Kinneret. *Geo-Marine Letters*, 2020, **40**(4): 453-466.
- [17] Yvon-Durocher G, Allen AP, Bastviken D *et al.* Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 2014, **507**(7493): 488-491.
- [18] Aben RC, Barros N, Van Donk E *et al.* Cross continental increase in methane ebullition under climate change. *Nature communications*, 2017, **8**(1): 1682.
- [19] D'Ambrosio SL, Harrison JA. Methanogenesis exceeds CH₄ consumption in eutrophic lake sediments. *Limnology and Oceanography Letters*, 2021, **6**(4): 173-181.
- [20] Jansen J, Woolway RI, Kraemer BM *et al.* Global increase in methane production under future warming of lake bottom waters. *Global Change Biology*, 2022, **28**(18): 5427-5440.
- [21] Deemer BR, Harrison JA, Li SY *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, 2016, **66**(11): 949-964.
- [22] Beaulieu JJ, DelSontro T, Downing JA. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature communications*, 2019, **10**(1): 1375.
- [23] 张佩. 都市区小型湖库水体碳形态与甲烷排放的时空特征研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [24] 张博文. 河道型水库水体溶解甲烷分布规律及机制研究[学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- [25] Meng J-H, Kang M-C, Ji D-B *et al.* CH₄ production and oxidation of sediments in the typical tributary of Three Gorges Reservoir. *Journal of Lake Science*, 2023, **35**(5): 1670-1681. [孟江槐, 康满春, 纪道斌等. 三峡水库典型支流库湾沉积物 CH₄ 产生和氧化规律. 湖泊科学, 2023, **35**(5): 1670-1681.]
- [26] 杨凡艳. 渠河梯级水库 CH₄ 产生、排放及影响机制研究[学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [27] 方家琪. 城市典型污染河道温室气体排放特征及影响因素研究[论文]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [28] 李鑫迪. 城市河涌沉积物产甲烷过程及其对活性小分子输入响应[学位论文]. 广州: 广州大学, 2024.
- [29] 张秀云. 大型丝状藻类对河岸带湿地甲烷排放的影响[学位论文]. 上海: 上海大学, 2014.
- [30] 顾培培. 典型可流、河口溶存甲烷和氧化亚氮的分布、释放及产生和转化[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [31] 刘恺华. 南宁市朝阳溪甲烷排放通量及其影响因素研究[学位论文]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [32] Zhao F, Zhou Y, Xu H, *et al.* Oxidation of urban rivers as a potential source of atmospheric methane. *Environmental Pollution*, 2022, **297**: 118769.
- [33] 唐珍妮. 亚热带和温带河流温室气体排放规律及其影响机制研究[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [34] 李小飞. 长江口沉积物甲烷厌氧氧化过程及其影响机理[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [35] Liu G-G, Zeng Y, Yan T-Z. Seasonal and spatial variability of greenhouse gas concentration and emission flux in the urban river. *China Environmental Science*, 2023, **43**(8): 4409-4417. [刘改过, 曾勇, 闫铁柱. 城市河流温室气体浓度及排放通量的时空特征. 中国环境科学, 2023, **43**(8): 4409-4417.]
- [36] Liu Y-Q, Conrad R, Yao T-D *et al.* Change of methane production pathway with sediment depth in a lake on the Tibetan plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, **474**: 279-286.
- [37] Li B, Gu Q, Miao Y *et al.* Methane distribution patterns along a transect of Lake Fuxian, a deep oligotrophic lake in China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2020, **27**(21): 25848-25860.
- [38] Li L-L, Yao S-C, Xue B *et al.* Methane levels in five shallow lakes in China: Effect of lake paludification. *Quaternary International*, 2019, **503**(PT.A): 128-135.

- [39] Wang T, Zhumabieke M, Zhang N *et al.* Variable promotion of algae and macrophyte organic matter on methanogenesis in anaerobic lake sediment. *Environmental Research*, 2023, 237: 116922.
- [40] 艾永平. 城市湖泊的甲烷排放时空变化及其与水文水质关系[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- [41] Yang Y-L, Zhang D-Y, Liu Y-X *et al.* The impact of soil moisture and temperature on GHGs emission of lakeshore zone sediments-A case study of urban landscape water body in Nanjing. *China Rural Water and Hydropower*, 2024, 4: 111-121+140. [杨伊琳, 张丹奕, 刘艺轩等. 水分和温度交互作用下城市景观水体湖滨带沉积物 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放研究. 中国农村水利水电, 2024, 4: 111-121+140.]
- [42] 赵子涵. 小型湖泊 CH₄ 排放空间差异性及其影响因素研究—以上海市青浦区大莲湖为例[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [43] 曹起孟. 优势水生植物对东平湖水体有机碳来源与矿化的影响[学位论文]. 聊城: 聊城大学, 2022.
- [44] Fan YC, Liu L, Liu Z *et al.* Sediment methane production potential and its driving factors in small alpine lake sediments in the Yunnan Plateau. *Journal of Hydroecology*, 2024. [范雨春, 刘航, 刘智等. 云南小型高山湖泊沉积物产甲烷潜力及其驱动因素. 水生态学杂志, 2024.] <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202309150254>.
- [45] Xu Q, Du Z-H, Wang L *et al.* Temperature sensitivity of methanogenesis and anaerobic methane oxidation in thermokarst lakes modulated by surrounding vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 167962.
- [46] 成伟望. 青藏高原热融湖塘沉积物甲烷排放潜力研究[学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [47] Li T, Ding L-F, Wei W-X *et al.* Temporal and spatial variations of sediment methane production rates and their influencing factors in Lake Taihu. *China Environmental Science*, 2025, 45(1): 519-527. [李彤, 丁立飞, 魏文欣等. 太湖沉积物产甲烷速率时空变化与影响因素. 中国环境科学, 2025, 45(1): 519-527.]
- [48] 蒲海光. 小兴凯湖沉积物有机碳矿化和组分以及细菌群落特征对增温的响应[学位论文]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2023.
- [49] 寇永珍. 草海高原湿地湖滨带甲烷产生与氧化潜力研究[学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
- [50] 徐晓. 淡水螺类对湿地微生物介导的甲烷排放的影响[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- [51] E Y, Tong C, Wang W *et al.* Effects of Substrates and Electron Acceptors on Methane Production Potential from *Spartina alterniflora* Wetland Surface Sediment. *Wetland Science & Management*, 2010, (1): 49-54. [鄂焱, 全川, 王维等. 底物和电子受体对互花米草湿地沉积物甲烷产生潜力的影响. 湿地科学与管理, 2010, (1): 49-54.]
- [52] 王蒙, 吴明, 邵学新. 杭州湾滨海湿地 CH₄ 排放通量的初步研究. 第四届中国湖泊论坛, 2014, 225-238.
- [53] 王维奇. 闽江河口湿地甲烷厌氧氧化及其机制研究[学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- [54] 王佳佳. 鄱阳湖湿地甲烷排放通量与甲烷产生潜力及其影响因素研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [55] 迟海腾. 青藏高原中部热融湖塘甲烷排放及产甲烷影响因素[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [56] 申志博. 氮沉降对干旱区高寒湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放的影响[学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [57] Zhang D-Y, Liu Y-X, Zhou X-D *et al.* Effects of moisture content and temperature on greenhouse gas emission from sediments in the Yangtze River floodplain: a case study of the Nanjing Lvshuiwan Wetland. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2358-2370. [张丹奕, 刘艺轩, 周旭东等. 水分状况及温度对长江漫滩沉积物温室气体排放的影响: 以南京绿水湾湿地为例. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2358-2370.]
- [58] Cheng Z-Y, Liu G-M, Wang Y-X *et al.* Effect of temperature on methane production in sediments of thermokarst lakes/ponds on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 548 -557. [成伟望, 刘桂民, 王耀新等. 温度对青藏高原热融湖塘沉积物甲烷产量的影响. 冰川冻土, 2023, 45(2): 548-557.]
- [59] 李杨杰. 植被在长江口湿地温室气体排放过程中的影响机制研究[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [60] Zhang Y, Zhou Y, Shi K *et al.* Optical properties and composition changes in chromophoric dissolved organic matter along trophic gradients: Implications for monitoring and assessing lake eutrophication. *Water Research*, 2018, 131: 255-263.
- [61] Wang M-Z, Zhang Y-L, Liu X-H *et al.* Phytoplankton absorption and chlorophyll-specific absorption coefficients characteristics of different trophic level lakes. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(4): 505-513. [王明珠, 张运林, 刘笑菡等. 不同营养水平湖泊浮游植物吸收和比吸收系数变化特征. 湖泊科学, 2013, 25(4): 505-513.]
- [62] Fofonoff NP, Millard Jr R. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. 1983.
- [63] Hill K, Dauphinee T, Woods D. The extension of the Practical Salinity Scale 1978 to low salinities. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1986, 11(1): 1-10.

109-112.

- [64] Mendonça R, Müller RA, Clow D *et al.* Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nature Communications*, 2017, **8**(1): 1694.
- [65] Wang J, Chen X, Zhu XH *et al.* Taihu Lake, lower Yangtze drainage basin: evolution, sedimentation rate and the sea level. *Geomorphology*, 2001, **41**(2-3): 183-193.
- [66] Kemp A, Dell C, Harper N. Sedimentation rates and a sediment budget for Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research*, 1978, **4**(3-4): 276-287.
- [67] Langenegger T, Vachon D, Donis D *et al.* What the bubble knows: Lake methane dynamics revealed by sediment gas bubble composition. *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**(4): 1526-1544.
- [68] Sobek S, Durisch-Kaiser E, Zurbügg R *et al.* Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6): 2243-2254.
- [69] West WE, Coloso JJ, Jones SE. Effects of algal and terrestrial carbon on methane production rates and methanogen community structure in a temperate lake sediment. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(5): 949-955.
- [70] Liu H, Xiao S, Liu W *et al.* Salinity decreases methane concentrations in Chinese lakes. *Science of The Total Environment*, 2024, 937: 173412.
- [71] Zhang S, Yan L, Cao J *et al.* Salinity significantly affects methane oxidation and methanotrophic community in Inner Mongolia lake sediments. *Frontiers in Microbiology*, 2023, **13**: 1067017.
- [72] Soued C, Bogard MJ, Finlay K *et al.* Salinity causes widespread restriction of methane emissions from small inland waters. *Nature Communications*, 2024, **15**(1): 717.
- [73] Yang X, Zhou Y, Yu Z *et al.* Influence of hydrological features on CO₂ and CH₄ concentrations in the surface water of lakes, Southwest China: A seasonal and mixing regime analysis. *Water Research*, 2024, **251**: 121131.
- [74] Grasset C, Mendonça R, Villamor Saucedo G. *et al.* Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(4): 1488-1501.
- [75] Isidoro A, Grasset C, Mendonça R *et al.* Methane formation in tropical reservoirs predicted from sediment age and nitrogen. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 11017.
- [76] Moras S, Zellmer UR, Hiltunen E *et al.* Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2024, **129**(1): e2023JG007463.
- [77] Wilkinson J, Bodmer P, Lorke A. Methane dynamics and thermal response in impoundments of the Rhine River, Germany. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 1045-1057.
- [78] Kakouei K, Kraemer BM, Anneville O *et al.* Phytoplankton and cyanobacteria abundances in mid-21st century lakes depend strongly on future land use and climate projections. *Global Change Biology*, 2021, **27**(24): 6409-6422.
- [79] Sepúlveda-Jauregui A, Hoyos-Santillan J, Martínez-Cruz K *et al.* Eutrophication exacerbates the impact of climate warming on lake methane emission. *Science of The Total Environment*, 2018, **636**: 411-419.
- [80] Li B, Tao Y, Mao Z *et al.* Iron oxides act as an alternative electron acceptor for aerobic methanotrophs in anoxic lake sediments. *Water Research*, 2023, **234**: 119833.
- [81] Deutzmann JS, Stief P, Brandes J *et al.* Anaerobic methane oxidation coupled to denitrification is the dominant methane sink in a deep lake. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, **111**(51): 18273-18278.