

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.025

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.025

韩伟杰,左合君,郭建英,等.洪水事件驱动下间歇性河流CO₂与CH₄的排放特征及控制机制[J].水土保持学报,2026,40(5):253-264.

Han Weijie, Zuo Hejun, Guo Jianying, et al. Emission characteristics and controlling mechanisms of CO₂ and CH₄ in intermittent rivers under flood events[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 253-264.

洪水事件驱动下间歇性河流CO₂与CH₄的 排放特征及控制机制

韩伟杰^{1,2}, 左合君¹, 郭建英², 刘心宇², 杨振奇², 贺慧芳^{1,2}

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018; 2.中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓

草原生态水文国家野外科学观测研究站,北京 100038)

摘要: [目的] 揭示洪水事件对半干旱区间歇性河流CO₂和CH₄排放的响应特征及控制机制。[方法] 以内蒙古半干旱区典型间歇性河流塔布河一次洪水事件为研究对象,采用静态箱法连续监测河床裸露期(S1)沉积物-大气界面、洪水前期(S2)和洪水后期(S3)水-大气界面的CO₂与CH₄通量,同步测定水文、水质和沉积物理化指标,并结合 Spearman秩相关分析、冗余分析(RDA)和偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)探讨温室气体排放的主要驱动因素及作用路径。[结果] 洪水过程显著改变河道水动力、水体理化环境和沉积物结构,CO₂与CH₄排放呈明显不同步响应。河床裸露期 F_{CO_2} 处于较高水平[(564.90±147.29)mg/(m²·h)],洪水前期明显下降,洪水后期略有回升; F_{CH_4} 则在洪水前期迅速升高并形成峰值[(0.62±0.03)mg/(m²·h)],随后逐渐下降并趋于稳定。相关性分析表明, F_{CO_2} 与溶解氧(DO)呈显著负相关($p<0.01$),并与pH呈较显著负相关($p<0.05$); F_{CH_4} 与黏粒、粉粒呈极显著正相关,与粗砂呈负相关。RDA结果表明,黏粒、pH和悬浮泥沙浓度(SSC)是解释CO₂与CH₄通量变化的关键环境因子。PLS-SEM结果进一步表明, F_{CO_2} 主要受pH、SSC和总溶解性固体(TDS)等水体理化因子影响, F_{CH_4} 则更多受沉积物粒径组成及其衍生过程控制。[结论] 短历时洪水事件通过改变界面状态、水体理化环境和表层沉积物粒径组成,驱动间歇性河流CO₂与CH₄通量的不同步响应。CO₂排放更敏感于水体环境变化和界面交换过程,而CH₄排放更易受到复水扰动和表层沉积物改变的影响。研究结果表明,在半干旱区间歇性河流碳排放核算中,应区分不同水文阶段并分别考虑CO₂和CH₄的差异化响应。

关键词: 间歇性河流; 洪水事件; 温室气体通量; 塔布河; 偏最小二乘结构方程模型

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0253-12

Emission Characteristics and Controlling Mechanisms of CO₂ and CH₄ in Intermittent Rivers under Flood Events

Han Weijie^{1,2}, Zuo Hejun¹, Guo Jianying², Liu Xinyu², Yang Zhenqi², He Huifang^{1,2}

(1.College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.National Field Scientific Observation and Research Station for Grassland Ecological Hydrology at the Northern Foot of Yinshan Mountain in Inner Mongolia, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the response characteristics and controlling mechanisms of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions to flood events in semi-arid intermittent rivers. [Methods] A flood event in the Tabu River, a typical intermittent river in the semi-arid region of Inner Mongolia, was selected as the study case. The static chamber method was used to monitor CO₂ and CH₄ fluxes at the sediment-atmosphere interface during the exposed riverbed stage (S1), and at the water-atmosphere interface during the early flood stage (S2) and late flood stage (S3). Hydrological variables, water quality parameters, and sediment

收稿日期: 2026-03-19

修回日期: 2026-04-28

录用日期: 2026-05-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-06-30

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2025QN04015); 内蒙古自治区科技项目(2025KYPT0177); 中国水科院基本科研业务费项目(MK0145B022021, MK110145B00012024)

第一作者: 韩伟杰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事间歇性河流碳排放与碳输移研究。E-mail: 13488579946@163.com

通信作者: 左合君(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: zuohj@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

physicochemical properties were measured simultaneously. Spearman rank correlation analysis, redundancy analysis (RDA), and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) were used to identify the main driving factors and pathways regulating greenhouse gas emissions. [Results] The flood event significantly altered river channel hydrodynamics, water physicochemical environment, and sediment structure, resulting in asynchronous responses of CO_2 and CH_4 emissions. F_{CO_2} was high during the exposed riverbed stage [$(564.90 \pm 147.29) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], decreased markedly during the early flood stage, and slightly increased during the late flood stage. In contrast, F_{CH_4} increased rapidly and reached a peak during the early flood stage [$(0.62 \pm 0.03) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], then gradually declined and became stable. Correlation analysis showed that F_{CO_2} was significantly negatively correlated with DO ($p < 0.01$) and strongly negatively correlated with pH ($p < 0.05$), whereas F_{CH_4} was highly significantly positively correlated with clay and silt and negatively correlated with coarse sand. RDA results indicated that clay, pH, and suspended sediment concentration (SSC) were the key environmental factors explaining the variations in CO_2 and CH_4 fluxes. PLS-SEM results further showed that F_{CO_2} was mainly regulated by water physicochemical factors such as pH, SSC, and TDS, whereas F_{CH_4} was more strongly controlled by sediment particle size composition and its derived processes. [Conclusion] The short-duration flood event drives asynchronous responses of CO_2 and CH_4 fluxes in the intermittent river by altering interface conditions, water physicochemical properties, and surface sediment particle size composition. CO_2 emissions are more sensitive to changes in the water environment and interface exchange processes, whereas CH_4 emissions are more susceptible to rewetting disturbance and changes in surface sediment properties. These findings indicate that carbon emission accounting in semi-arid intermittent rivers should distinguish among different hydrological stages and separately consider the differentiated responses of CO_2 and CH_4 .

Keywords: intermittent river; flood event; greenhouse gas fluxes; Tabu River; partial least squares structural equation modeling

Received: 2026-03-19

Revised: 2026-04-28

Accepted: 2026-05-06

Online(www.cnki.net): 2026-06-30

在全球碳循环研究中,内陆水体被视为连接陆地生态系统与大气的重要碳通道^[1]。河流不仅承担陆地碳向下游输送的功能,同时也是 CO_2 和 CH_4 向大气释放的重要场所^[2]。相较于常流性河流,间歇性河流具有干涸-复流交替的水文变化特征,对降水变化和极端水文事件更为敏感,其碳矿化、迁移和释放过程往往表现出较强的非连续性和脉冲性^[3]。由此,间歇性河流并非传统意义上的“低流量河流”,而是陆地-水体-大气碳交换中不可忽视的活跃界面,也是当前全球变化背景下内陆水体碳排放研究的重要对象。

洪水事件是驱动间歇性河流碳排放快速变化的重要过程。洪水不仅改变河道水位、流速和悬浮颗粒物输移特征,也会引起水体理化性质和底泥粒径组成的重新分配,从而重塑界面环境,影响 CO_2 和 CH_4 的释放过程^[1,4]。已有研究^[4-5]表明,洪水往往对应温室气体排放的“热时刻”,但这种增强并不必然表现为所有气体通量同步升高,而更可能表现为不同气体在事件过程中的差异化响应。 CO_2 释放通常与系统呼吸强度、水体无机碳平衡密切相关,其变化

容易受到水动力稀释、湍流交换和溶解氧波动的共同影响; CH_4 则更依赖厌氧微环境的形成、甲烷生成与氧化之间的平衡及冒泡逸散等过程,因此更容易在复流初期或特定阶段出现脉冲释放^[1,4-5]。对于间歇性河流而言,洪水并不是简单地“增加”或“降低”温室气体排放,而是通过重构水体环境和沉积物条件,改变 CO_2 与 CH_4 释放的控制机制^[4-5]。

现有研究^[6-7]已经注意到极端水文过程对河流温室气体排放的重要影响,但对间歇性河流洪水事件内部过程的认识仍然不足。很多学者^[7-8]更关注水文情势和水体理化因子对 CO_2 和 CH_4 变化的解释,而对沉积物这种关键介质的作用讨论相对有限。沉积物粒径组成、孔隙结构及部分氧化还原关键因子可通过影响氧扩散和厌氧微环境形成,进而调节并制约温室气体的生成与释放^[6,8]。在间歇性河流中,洪水过程伴随沉积物暴露-淹没状态的快速切换,水体环境变化与底泥重构往往同步发生, CO_2 与 CH_4 排放是否呈现不同步响应,以及这种分异如何受到水体理化因子与底泥性质的差异化调控,仍缺乏事件尺度

上的系统认识^[6-8]。内蒙古半干旱区降水集中于夏季,产汇流历时短,河床暴露-复水转换频繁,具备开展间歇性河流事件尺度碳排放研究的典型性。塔布河位于阴山北麓草原区,河道径流对集中降雨响应敏感,非汛期常出现河床裸露状态,是认识半干旱区间歇性河流洪水响应过程的典型对象。

基于此,本研究选取内蒙古半干旱区典型间歇性河流塔布河一次洪水事件为研究对象,聚焦河床裸露-复水-退水过程中沉积物-大气界面和水-大气界面CO₂与CH₄通量的阶段性变化及其控制因素。通过分阶段观测温室气体通量,并同步测定水文、水质和表层沉积物理化指标,重点辨析水体环境变化与表层沉积物重分选对CO₂和CH₄排放的差异化影响。本研究旨在明确短历时洪水事件下间歇性河流温室气体通量的响应方向、变化幅度及主控因素,揭示CO₂与CH₄在复水过程中的不同步响应机制,并为半干旱区间歇性河流事件尺度碳排放监测及极端水文事件背景下温室气体核算提供案例依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔布河位于中国内蒙古自治区中部的阴山北麓草原(41°21'~42°46'N,110°30'~112°11'E),是典型的间歇性河流,流域面积约10 219 km²,全长约322 km,属于温带半干旱大陆性气候(图1)。根据塔布河流域西厂汗营水文站(1980—2021年)的数据,该地区年平均气温4℃,年平均降水量228.2 mm,主要集中在7—9月,占总降水量的79.8%。多年平均年径流深度为7.1 mm,多年平均年水面蒸发量为1 108 mm。流域土壤以栗钙土和棕钙土为主,质地粗糙、土层浅薄。植被群落结构简单,草层稀疏低矮。

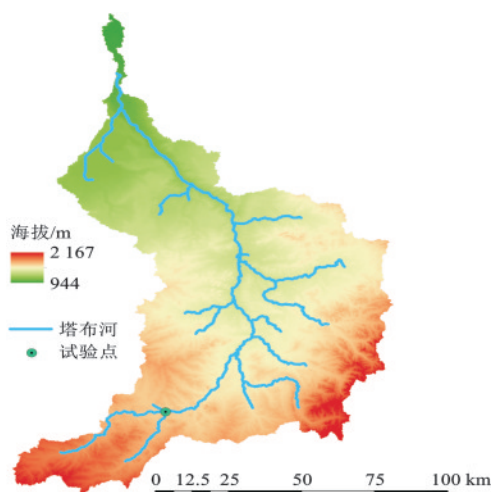


图1 塔布河流域

Fig.1 Map of Tabu River basin

1.2 试验设计

1.2.1 采样点与采样时间 采样点设置于塔布河上游固定观测断面。根据河床暴露状态、水位变化及洪水过程特征,将观测期划分为3个阶段:2024年6月25日为河床裸露期(S1),用于表征洪水发生前河床暴露条件下的背景状态;2024年7月11日至7月12日为洪水前期(S2);2024年7月13日至7月15日为洪水后期(S3)。由于研究重点为一次洪水事件前后温室气体排放及环境因子的阶段性变化,S1设置为洪水前背景观测时点,S2和S3为洪水过程连续观测阶段。

1.2.2 气样采集 使用静态箱法进行沉积物-大气界面(S1)和水-大气界面(S2阶段和S3阶段)碳通量测量:提前预埋采样环,采样环直径为20 cm;采用LI-7810温室气体分析仪配合SmartChamber静态暗箱系统测定CO₂和CH₄通量。测量时间单次为120 s,箱体闭合后延迟10 s开始记录,以减少外部气体扰动对初始气体的影响,之后记录箱内CO₂和CH₄浓度随时间的变化,并据此计算通量。采样频率为:S1阶段进行1次采样;S2和S3阶段根据洪水过程及水位变化连续开展多时点观测,以捕捉洪水上涨和退水阶段温室气体通量的动态变化。

1.2.3 河床沉积物及水文数据采集 在各采样点采集0~10 cm表层沉积物样品,样品采集后装入密封聚乙烯采样袋中保存,并带回实验室进行后续理化性质分析。本研究未对洪水过程中的河床冲淤厚度进行连续测量。各阶段沉积物样品均以当期河床表面为基准采集0~10 cm表层样,因此沉积物理化性质和粒径组成主要反映各阶段与温室气体交换界面相对应的表层沉积物条件,而非对同一沉积层的连续追踪。

利用便携式多参数水质分析仪(Multi 3630 IDS, WTW,德国)现场测定水温(WT)、溶解氧(DO)、酸碱度(pH)和总溶解性固体(TDS);使用便携式流速仪(LS300-B型,中国)测定流速,径流水深(WL)和宽度使用不锈钢卷尺人工测量;悬浮泥沙浓度(SSC)通过水样滤膜过滤、烘干、称重后计算得出。所有水文水质参数的测量均与气体和沉积物采样同步进行。每个采样时间点设置3个平行重复。洪水前后监测均在同一固定观测断面内进行,每次采样点均固定于前次采样位置。

1.2.4 河床沉积物理化性质测定方法 河床沉积物样品经自然风干后,去除植物残体和砾石,研磨并过筛后用于理化性质分析。沉积物全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;沉积物有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热氧化法测定;沉积物硫酸根离子(SO₄²⁻)采用水浸提后比浊法测定。粒径组成采用激光粒度法测

定,测试前用H₂O₂去除有机质、HCl去除碳酸盐,并加入六偏磷酸钠分散。粒径组成分类参照土壤颗粒组成分级标准,将沉积物颗粒划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、细砂(0.05~0.25 mm)和粗砂(0.25~2 mm)。各粒级含量以质量百分比表示。沉积物中铁(Fe)、锰(Mn)含量经混酸消解后,分别采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)和质谱法(ICP-MS)^[9]测定。该方法测定结果反映沉积物中铁、锰元素含量,不区分其具体价态。

1.2.5 统计分析可视化方法 采用Spearman秩相关分析检验F_{CO₂}、F_{CH₄}与各环境因子之间的相关关系。相关性分析在Origin 2024软件中完成,缺失值采用成对删除法处理,显著性水平设定为p<0.05、p<0.01和p<0.001。水文情势、水质指标、沉积物理化性质及相关图件均在Origin 2024软件中绘制。

为探讨环境因子对F_{CO₂}和F_{CH₄}变化的综合影响,采用冗余分析(RDA)进行排序分析。分析前,对响应变量和解释变量进行Z-score标准化,以消除不同量纲带来的影响;采用方差膨胀因子(VIF)检验评估解释变量间的多重共线性,并剔除VIF>10的变量^[10],最终保留黏粒、SOC、pH、DO、TDS和SSC进入RDA模型。RDA及其显著性检验在R4.5.0环境中利用vegan2.7-3软件包完成,并通过999次置换检验对整体模型、排序轴及单个环境因子的显著性进行检验;RDA图形在Origin 2024软件中绘制与优化。

为进一步识别环境因子对F_{CO₂}和F_{CH₄}的直接和间接作用路径,采用偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)进行分析^[11]。模型中,粒径组成作为潜变量,由黏粒、粉粒、细砂和粗砂4个观测变量共同表征,其余变量均作为单指标变量纳入模型。模型中各变量关系依据研究目的和预设路径进行设定,采用标准化路径系数表征变量间作用方向和强度,并结合总标准化效应评价各因子对2种温室气体通量的综合影响。PLS-SEM分析在R4.5.0环境中利用seminr 2.4.2软件包完成。

2 结果与分析

2.1 洪水脉冲过程

河床裸露期(S1):洪水脉冲来临之前,河床处于干旱状态。

洪水前期(S2):降雨(R)逐渐增大,在7月11日晚8:00达到最大降雨量(0.6 mm),之后逐渐下降,在7月12日凌晨6:00停止(图2a);径流量(Q)对降雨呈现出滞后性,在7月12日10:00开始呈现明显上升趋势,并于10:30达到峰值[(0.857±0.134)m³/s],河道水动力得到极大增强(图2b);随着径流量的增加,WL也随之上升,在最大径流量时达(0.29±0.03)m(图2c)。此时,水流对河床及河岸泥沙的侵蚀、搬运作用急剧增强,大量泥沙被卷入水体,悬浮泥沙浓度(SSC)出现剧烈上升,最高值达到(2.52±0.76)kg/m³(图2d)。

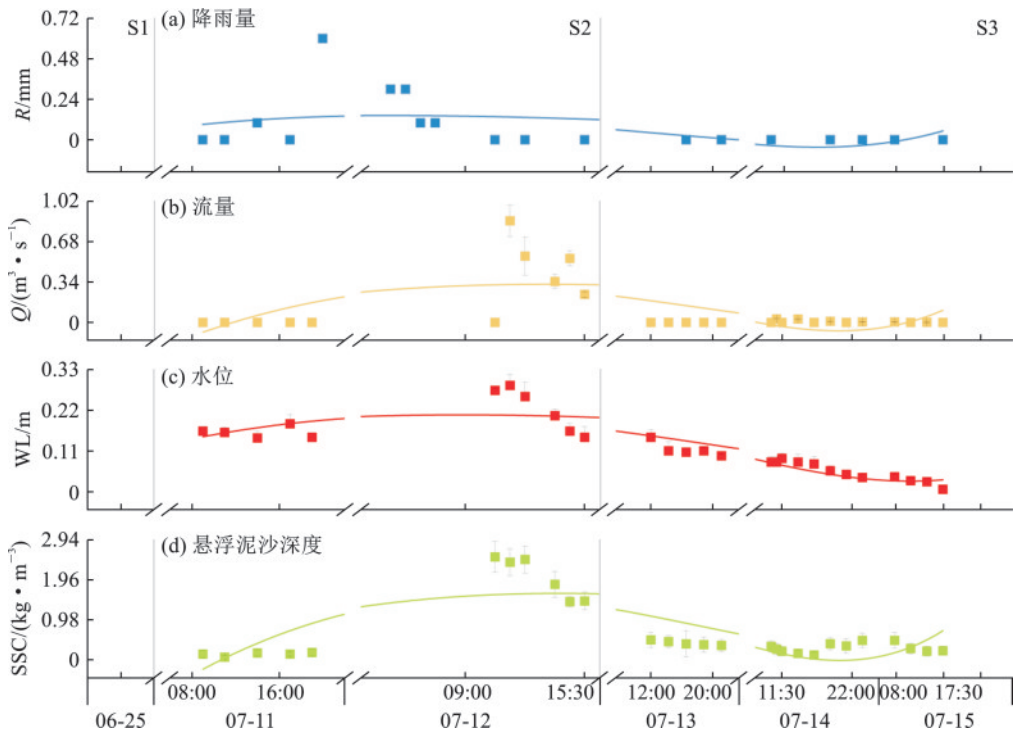


图2 塔布河试验样点一次洪水期间降雨、径流、水位及泥沙变化特征

Fig.2 Temporal variations in rainfall, discharge, water level, and suspended sediment concentration during a flood event at Tabu River experimental sampling site

洪水后期(S3): Q 逐渐下降,在 (0.01 ± 0.004) m³/s浮动,河道水动力开始减弱;与 Q 相似,WL也逐步下降,最小值为 (0.03 ± 0.009) m,河道水量持续减少;SSC也呈逐渐降低趋势[最小值达 (0.12 ± 0.04) kg/m³],河流逐步恢复稳定状态。

2.2 环境因子变化

在洪水事件期间,塔布河的水质参数表现出显著的时间动态变化(图3)。pH总体呈波动上升趋势,

为7.8~9.1,并在后期阶段保持较高水平的相对稳定(图3a)。TDS在S2期间升高[平均值为 (324.2 ± 97.2) mg/L],随后稳步下降,在S3期间达到较低的平均值 $[(263.6\pm 12.6)$ mg/L](图3b)。DO在S2期间相对稳定[平均值为 (6.7 ± 0.3) mg/L](图3c),而在S3期间波动更为剧烈[平均值为 (7.6 ± 1.5) mg/L]。WT在采样期间主要随昼夜时间变化(图3d)。

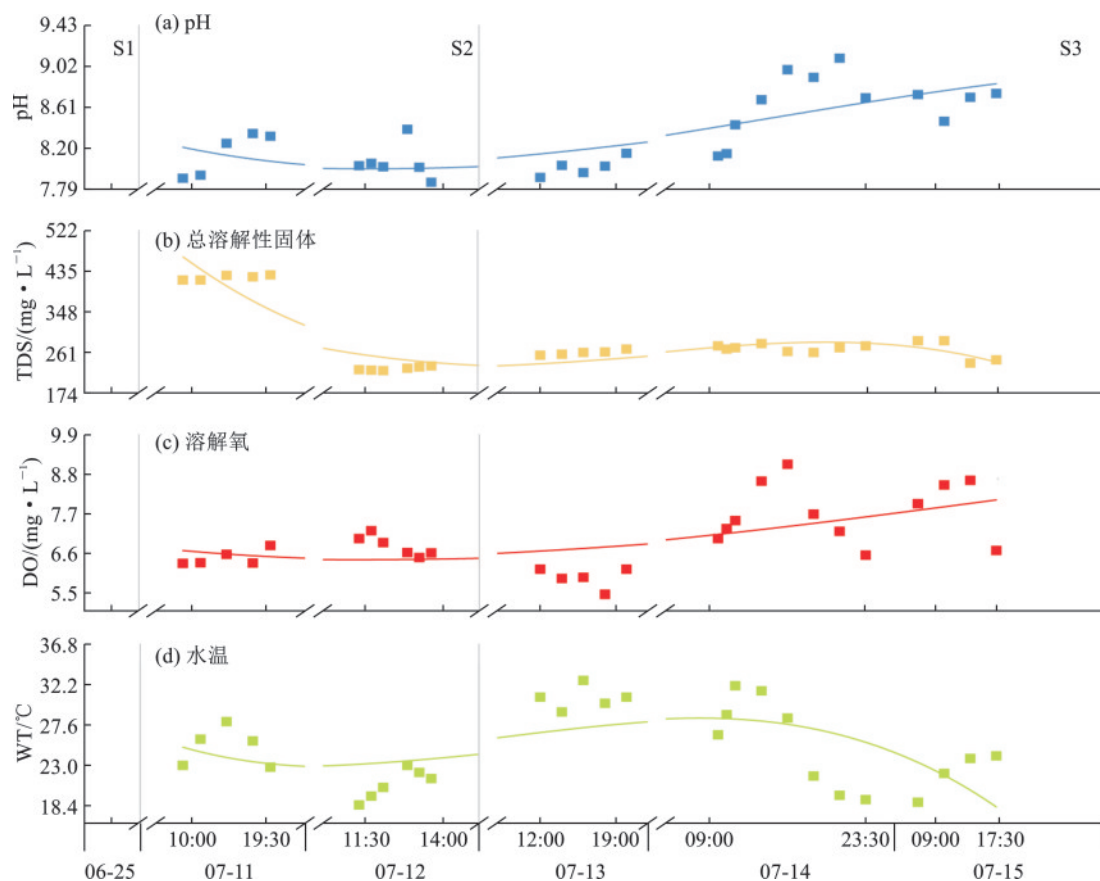


图3 塔布河试验样点一次洪水期间水质变化特征

Fig.3 Temporal variations in water quality parameters during a flood event at Tabu River experimental sampling site

由图4可知,试验样点底泥理化性质在一次洪水过程中呈现出较为清晰的阶段性变化。SOC含量由S1阶段的12.38 g/kg下降至S2阶段的10.94、11.18 g/kg,随后在S3阶段波动变化,其中7月13日升至14.35 g/kg,7月14日降至9.68 g/kg,7月15日又回升至13.83 g/kg,表明其在洪水后期波动幅度明显增大。TN含量由S1阶段的0.17 g/kg分别显著升高至S2阶段的1.28、1.21 g/kg,至S3阶段进一步维持在较高水平,并在7月15日达到1.63 g/kg。

沉积物Fe含量整体变化幅度较小,但不同阶段间仍表现出一定差异(图4c)。S1阶段Fe含量为32.0 g/kg,进入S2阶段后降至29.4、29.1 g/kg;S3阶段Fe含量在29.3~30.2 g/kg小幅波动,整体保持相对稳定。沉积物Mn含量在整个过程中呈先降后升

趋势(图4d),由S1阶段的550.0 mg/kg下降至S2阶段的503.3 mg/kg,随后略有回升;S3阶段波动较为明显,其中7月14日降至472.5 mg/kg,为全时段最低值,7月15日升至567.8 mg/kg,为全时段最高值。SO₄²⁻含量同样表现出较强波动性(图4e),S1阶段为0.070 g/kg,S2阶段先升至0.148 g/kg后降至0.022 g/kg;S3阶段前2次采样分别为0.063、0.033 g/kg,至7月15日明显升高至0.190 g/kg。

粒径组成方面,S1阶段底泥以粉粒为主,含量为62.95%,黏粒和细砂含量分别为19.97%和16.91%,粗砂含量仅为0.18%;进入S2阶段后,粗砂含量迅速增加至82.42%,粉粒含量降至10.35%,显示底泥颗粒明显粗化,7月12日细砂含量短时升至42.08%,粗砂含量降至15.09%;至S3阶段,粗砂含量重新占据优势

并持续升高,由 73.24% 增至 85.14%,而粉粒含量由 8.31% 进一步降至 7.35%,黏粒含量始终维持在较低水平。总体来看,一次洪水过程下试验样点底泥粒径

组成由前期的粉粒占优逐步转变为后期的粗砂主导,同时 SOC、Mn 和 SO_4^{2-} 表现出较强波动性,TN 总体持续升高,Fe 则呈现相对稳定的小幅变化特征。

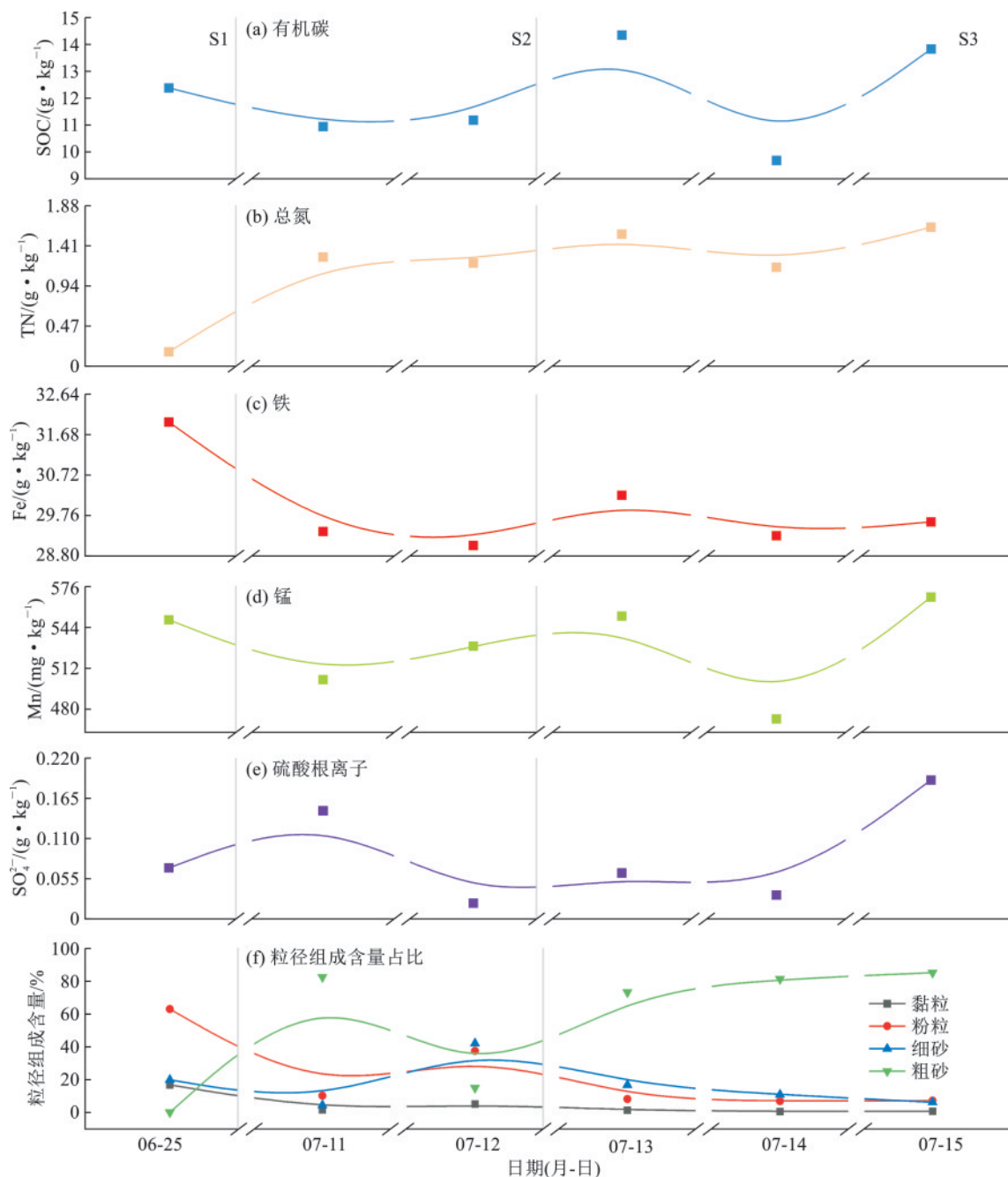


图 4 塔布河试验样点一次洪水期间底泥理化性质变化特征

Fig.4 Temporal variations in physicochemical properties of sediments during a flood event at Tabu River experimental sampling site

2.3 温室气体排放

二氧化碳通量(F_{CO_2})在洪水脉冲不同阶段表现出显著差异(图 5a)。S1 阶段河床裸露, F_{CO_2} 处于较高水平,平均值为 $(564.90 \pm 147.29) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;S2 阶段 F_{CO_2} 整体变化较为平稳,通量值为 $(15.72 \pm 5.34) \sim (122.95 \pm 39.07) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;S3 阶段 F_{CO_2} 较 S2 阶段波动幅度较大且呈逐渐上升趋势,各时点通量平均值

为 $(-62.87 \pm 34.03) \sim (181.18 \pm 68.00) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

甲烷通量(F_{CH_4})表现出与 F_{CO_2} 相反趋势(图 5b)。S1 阶段, F_{CH_4} 排放较低,平均值为 $(0.088 \pm 0.009) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,S2 阶段, F_{CH_4} 排放明显上升,峰值高达 $(0.62 \pm 0.03) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。S3 阶段, F_{CH_4} 下降并趋于稳定,波动很小,平均值维持在 $(0.101 \pm 0.026) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

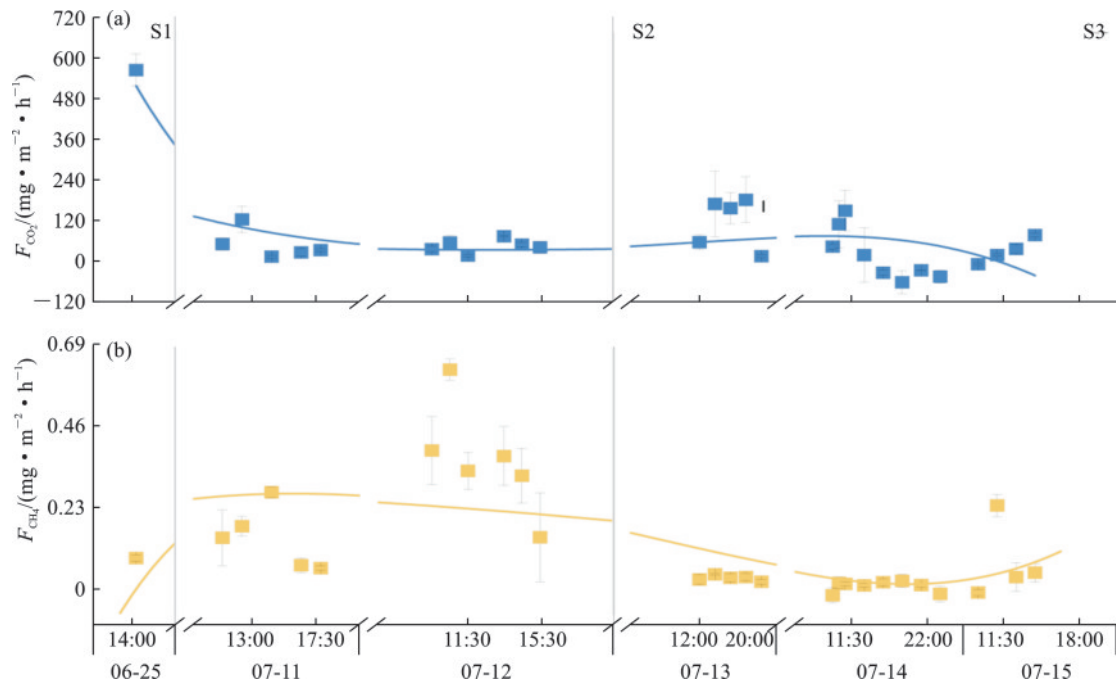


图 5 塔布河一次洪水事件期间 F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 的变化特征
Fig.5 Variations in F_{CO_2} and F_{CH_4} during a flood event in Tabu River

2.4 温室气体通量与环境因子的相关分析

相关性分析表明, F_{CH_4} 与 F_{CO_2} 对环境因子的响应存在明显差异(图 6)。 F_{CH_4} 与沉积物粒径组成的相关性最为突出, 表现为与黏粒和粉粒均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.83 和 0.84 ($p < 0.001$); 与 TDS、

pH 和粗砂均呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.38 、 -0.43 和 -0.39 ($p < 0.05$)。 F_{CH_4} 与 Q 、SSC、细砂、SOC 及 Mn 呈弱正相关, 与 DO、Fe、 SO_4^{2-} 呈弱负相关, 相关性均未达到显著水平。 整体来看, F_{CH_4} 的变化主要与细颗粒沉积物组分密切相关。

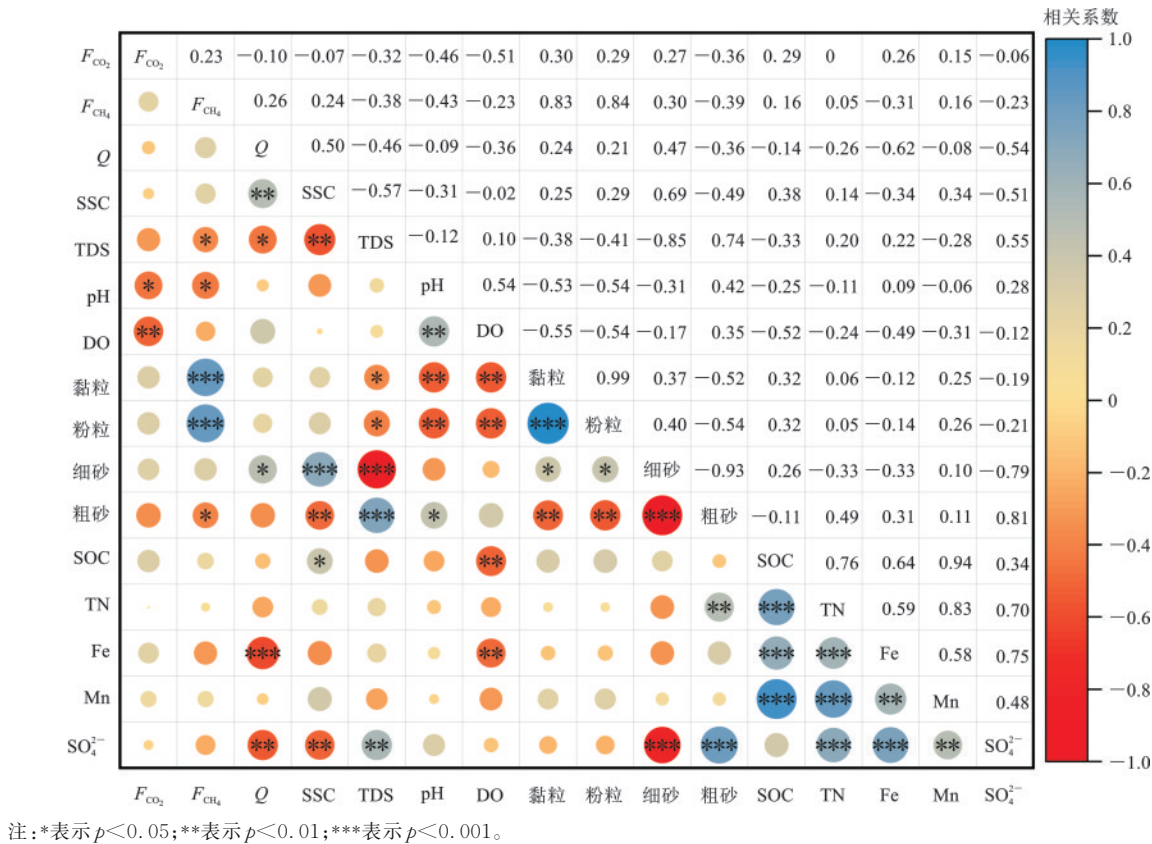


图 6 二氧化碳和甲烷通量与环境因子的相关性特征
Fig.6 Correlation matrix between CO₂ and CH₄ fluxes and environmental factors
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

F_{CO_2} 的相关性特征与 F_{CH_4} 不同, F_{CO_2} 与 pH 和 DO 均呈显著负相关, 相关系数分别为 $-0.46 (p < 0.05)$ 和 $-0.51 (p < 0.01)$; F_{CO_2} 与 Q、SSC、TDS、粗砂和 SO_4^{2-} 也均呈负相关, 相关性相对较弱。 F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 、黏粒、粉粒、细砂、SOC、Fe 和 Mn 均呈正相关, 与黏粒、粉粒和 SOC 的相关系数分别为 0.30、0.29 和 0.29, 但均未达到显著水平。总体上, F_{CO_2} 主要与水体理化因子相关, 而 F_{CH_4} 更明显地受到沉积物粒径组成的影响。

2.5 温室气体通量与环境因子的 RDA 分析

冗余分析结果(图 7)显示, 前 2 条约束排序轴能够较好表征环境因子与温室气体通量之间的关系。 F_{CH_4} 主要分布于 RDA1 正轴方向, 并与黏粒及 SSC 的箭头方向基本一致, 而与 TDS 方向相反, 表明 F_{CH_4} 与黏粒及 SSC 呈正相关、与 TDS 呈负相关。 F_{CO_2} 则主要沿 RDA2 正轴方向分布, 与 SOC 方向较为接近, 而与 pH、DO 方向相反, 表明这些因子可能对 F_{CO_2} 变化具有较强解释作用。总体来看, F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 在排序空间中的分布方向存在明显差异, 说明二者对环境梯度的响应特征并不一致, 受不同主导环境因子的调控。

置换检验结果表明, 冗余分析整体模型达到极显著水平 ($F=6.798, p=0.001$), 说明筛选后的环境因子能够显著解释 F_{CO_2} 和 F_{CH_4} 的变化。

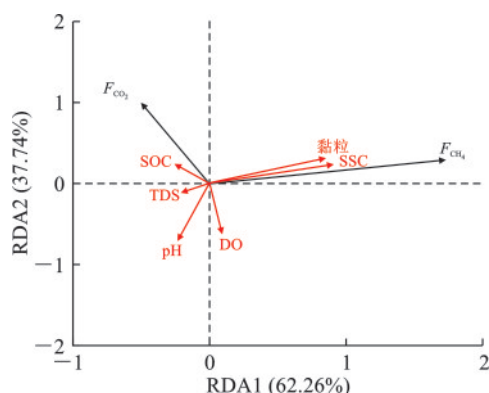


图 7 洪水不同阶段 F_{CO_2} 和 F_{CH_4} 与环境因子关系的冗余分析排序

Fig.7 RDA ordination of relationship between F_{CO_2} and F_{CH_4} and environmental factors at different flood stages

排序轴检验表明, RDA1 轴 ($F=25.393, p=0.001$) 和 RDA2 轴 ($F=19.059, p=0.001$) 均达到极显著水平, 说明前 2 个排序轴能够有效反映环境梯度与气体通量之间的对应关系。进一步对环境因子进行显著性检验(表 1)发现, 黏粒、pH 和 SSC 分别达到显著水平 ($p < 0.01$), 其中黏粒的贡献率最高 (43.1%); SOC 仅呈边缘显著 ($p=0.091$), 而 DO 和 TDS 未达到显著水平 ($p > 0.05$)。综合来看, 粒径组成、pH 及悬浮泥沙浓度是驱动研究区 F_{CO_2} 和 F_{CH_4} 变化的关键环境因子。

表 1 RDA 环境因子置换检验结果

Table 1 Permutation test results of environmental factors in RDA

指标	贡献率/%	F	p
黏粒	43.1	17.6	0.001
SOC	6.0	2.5	0.091
pH	25.3	10.3	0.001
DO	3.6	1.5	0.227
TDS	3.6	1.5	0.241
SSC	18.3	7.5	0.003

2.6 结构方程模型分析

PLS-SEM 模型对 F_{CH_4} 和 F_{CO_2} 的解释度 (R^2) 分别为 0.772 和 0.522, 表明模型能够较好地解释 2 种气体通量的变化。由图 8a 可知, 不同环境因子对 F_{CH_4} 和 F_{CO_2} 的影响路径存在明显差异。在 F_{CH_4} 路径中, SSC 和 TDS 对 F_{CH_4} 具有正向直接影响, 路径系数分别为 0.966 和 0.387; pH 及 Fe、Mn 对 F_{CH_4} 具有负向直接影响, 路径系数分别为 -0.133 和 -0.022 。粒径组成对 F_{CH_4} 无直接影响, 但对 SSC、TDS 及 Fe、Mn 具有直接作用, 其中对 SSC 为显著正向作用 ($\beta=0.914, p < 0.001$), 对 TDS 和 Fe、Mn 为显著负向作用, 路径系数分别为 $-0.398 (p < 0.01)$ 和 $-0.599 (p < 0.05)$ 。总标准化效应(图 8b)表明, SSC、粒径组成和 TDS 是影响 F_{CH_4} 的主要因子。在 F_{CO_2} 路径中, pH、SSC 和 TDS 对 F_{CO_2} 均具有负向直接影响, 路径系数分别为 -0.679 、 -0.542 和 -0.415 ; 粒径组成对 F_{CO_2} 有极弱的正向间接影响 ($\beta=0.040$), Fe、Mn 对 F_{CO_2} 具有较弱的负向直接影响 ($\beta=-0.042$)。粒径组成还通过 pH、DO 和 TDS 对 F_{CO_2} 产生间接影响, 其中对 pH 和 TDS 的作用均为负向, 路径系数分别为 $-0.453 (p < 0.01)$ 和 $-0.398 (p < 0.01)$, 对 DO 的作用为 -0.203 。总标准化效应(图 8c)表明, pH、SSC 和 TDS 是影响 F_{CO_2} 的主要因子, 而沉积物粒径组成及 Fe、Mn 的影响相对较弱。

3 讨论

3.1 国内外相关研究对比

从表 2 可以看出, 不同河流在洪水过程中的 F_{CH_4} 变化总体上均表现出对洪水扰动的敏感响应, 但峰值出现的时间和变化幅度并不相同^[12]; 相比之下, F_{CO_2} 的变化分化更为明显。多数河流在洪水期或复水初期 F_{CH_4} 升高^[13], 而 F_{CO_2} 则既有洪水期升高、洪水后下降的类型, 也有塔布河和科罗拉多河这样在洪水顶峰时下降的情况。表明洪水对 F_{CH_4} 的作用在不同河流中更容易表现为方向上的相似, 而 F_{CO_2} 的变化则更受河流初始状态和界面过程差异的影响。

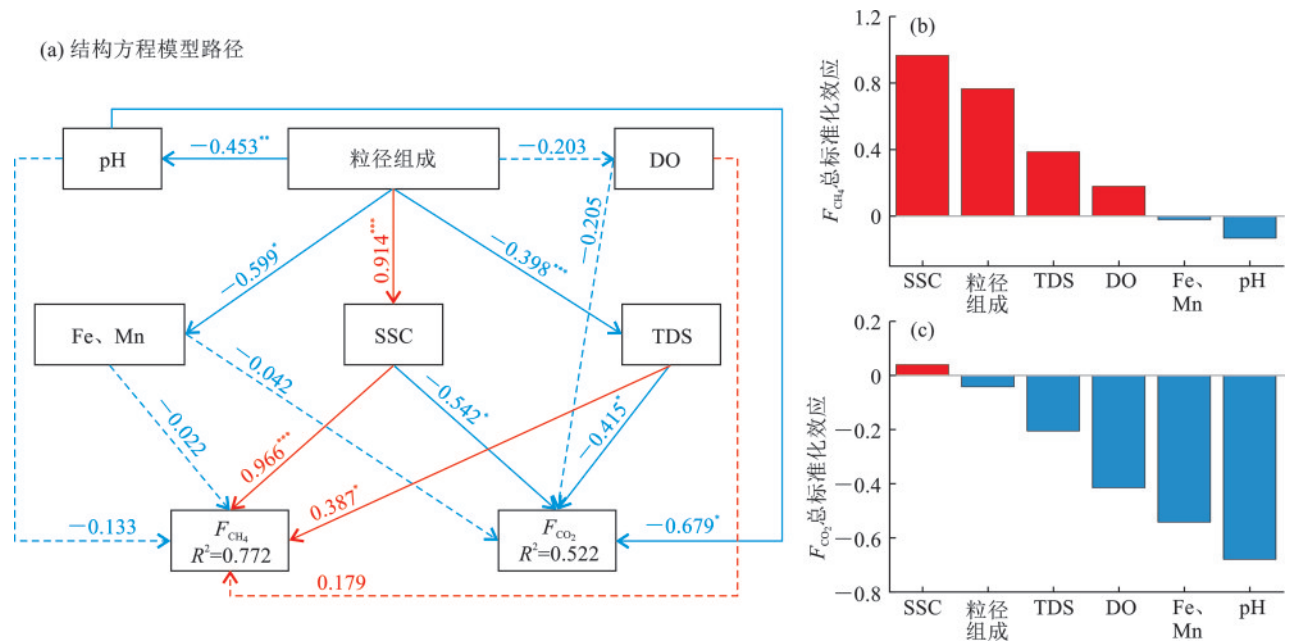


图 8 洪水扰动下 CO₂与 CH₄排放的结构方程模型及总标准化效应

Fig.8 Structural equation model and total standardized effects of CO₂ and CH₄ emissions under flood disturbance

表 2 不同河流洪水过程中 CO₂和 CH₄排放特征对比

Table 2 Comparison of CO ₂ and CH ₄ emission characteristics among different rivers during flood events					
河流名称	类型	描述	$F_{CO_2}/(mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	$F_{CH_4}/(mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	文献
塔布河	间歇性河流	河床裸露期	564.90 ± 147.29	0.088 ± 0.009	本研究
		洪水前期	41.90 ± 12.21	0.254 ± 0.056	
		洪水后期	33.70 ± 11.24	0.101 ± 0.026	
科特河	间歇性河流	洪水前期	—	0.177	[14]
		洪水中期	—	4.129	
		洪水后期	—	0.383	
里士满河流域	常流性河流	洪水期	$7\,200 \pm 1\,100$	424 ± 165.7	[15]
		洪水后期	$3\,600 \pm 240$	12 ± 3.6	
安博利哈流域	常流性河流	汛期	196.9	0.41	[16]
		过渡期	144.5	0.47	
		流量最低期	75.2	0.05	
特威德河	人工常流性排水渠	洪水阶段	497.00	0.037 00	[17]
		恢复阶段	25.60	0.003 80	
		基线阶段	2.28	0.002 56	
科罗拉多河	常流性河流地点 2	涨水期	271.33 ± 31.17	0.53 ± 0.07	[4]
		洪峰期	443.67 ± 47.67	0.47 ± 0.07	
		退水期	396.00 ± 47.67	1.13 ± 0.13	
	间歇性河流地点 3	涨水期	621.50 ± 77.00	0.53 ± 0.07	
		洪峰期	529.83 ± 55.00	0.33 ± 0.07	
		退水期	463.83 ± 45.83	0.33 ± 0.07	
	间歇性河流地点 4	涨水期	636.17 ± 82.50	0.33 ± 0.07	
		洪峰期	528.00 ± 60.50	0.33 ± 0.07	
		退水期	370.33 ± 92.50	0.33 ± 0.13	
亚马逊河	常流性河流	春季洪水前期	—	1.16	[18]
		洪水期	—	4.86	
		洪水后期	—	1.01	
马瑶蒲河	间歇性河流支流	洪水初期	568.33	—	[19]
		洪水过后	20.17	—	

塔布河与其他河流比较,相似的是 F_{CH_4} 的升高更多反映洪水对沉积环境的普遍激活,而 F_{CO_2} 的变化则更依赖洪水到来前河道处于何种状态。对 F_{CH_4} 而言,洪水过程增加有机底物供给、扰动沉积物并促进厌氧环境形成,通量增强,因此不同河流虽然峰值阶段并不一致,但总体方向较为接近^[17]。 F_{CH_4} 在洪水期迅速升高,正符合此特点。

F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 不同。塔布河在洪水前河床裸露,经过一段时间雨水冲刷,暴露界面本身已经具有较强的 F_{CO_2} 释放能力,因此洪水来临后并没有像其他常流性河流那样继续升高,而是随着水层覆盖和界面交换方式改变明显下降。表明塔布河中 F_{CO_2} 在洪水来临前已经经历过多次状态变化,而不是在洪水来临之后单纯受流量增大控制。也正因为如此,塔布河所具有前高后低的变化特征,在所比较河流中表现出一定特殊性^[20]。此现象与干涸河道复水过程中的已有认识是一致的。Bianchi等^[4]在科罗拉多河三角洲发现,干涸站点的 F_{CO_2} 高值更容易出现在涨水初期,而湿润站点则更可能在洪峰期达到高值。说明对 F_{CO_2} 而言,洪水前河道是暴露还是有水,直接影响其峰值出现时机和变化方向。塔布河的结果进一步表明,在间歇性河流中,河床暴露状态在受到未连续降雨影响后,不仅影响 F_{CO_2} 释放强度,也可改变其对洪水扰动的响应方式。

3.2 温室气体通量变化特征及其与环境因素的关联

本研究表明,塔布河在一次洪水事件中, F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 呈明显的不同步响应。河床裸露时, F_{CO_2} 处于较高水平 $[(564.90 \pm 147.29) \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$;洪水来临后处于较低水平 $[(41.90 \pm 12.21) \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 。相反, F_{CH_4} 在洪水前期迅速升高并形成峰值 $[(0.62 \pm 0.03) \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$,随后逐渐下降并趋于稳定。说明同一次洪水事件对 CO_2 和 CH_4 通量的影响方向和幅度并不一致。

F_{CO_2} 的变化主要与界面状态转换及水体理化环境有关。河床裸露时,沉积物直接暴露于大气,表层有机质矿化、土壤呼吸和无机碳平衡调节均可能促进 CO_2 释放^[21-22]。洪水来临后,沉积物-大气界面转变为水-大气界面,水层覆盖、稀释和混合作用可能降低 CO_2 释放强度。 F_{CO_2} 与pH和DO呈负相关,表明其变化可能与水体 CO_2 积累、碳酸盐体系调节和有机质分解耗氧过程有关。较低pH通常有利于游离 CO_2 比例升高,而较低DO可能反映系统呼吸和有机质分解增强,从而促进 CO_2 积累与释放。

F_{CH_4} 的变化更具有典型的复水特征。河床裸露时,沉积物长期处于相对通气状态,不利于甲烷在表层积累和释放,因此 F_{CH_4} 较低^[23-24]。洪水前期,河床由

暴露迅速转为淹没,细颗粒沉积物受到扰动并重新分布,沉积物孔隙结构和氧扩散条件随之改变,可能降低局部微环境中的氧扩散能力,为甲烷生成、保存和释放提供有利条件,从而导致 F_{CH_4} 快速升高^[23-25]。洪水后期粗颗粒比例上升及沉积环境重新调整,甲烷通量逐渐下降并趋于稳定。表明塔布河中 F_{CH_4} 的变化并非简单地随水文过程线性变化,而是更明显地反映沉积物环境由暴露到淹没再到调整的过程^[23-24]。

总体来看,塔布河 CO_2 和 CH_4 对洪水扰动的响应基础不同。 CO_2 排放更直接受界面转换、水体混合和碳酸盐平衡过程影响; CH_4 排放则更易受到复水扰动和表层沉积物结构变化的影响。因此,洪水对间歇性河流温室气体排放的作用并非简单增强或抑制,而是通过不同环境过程分别调控 CO_2 和 CH_4 的释放^[26]。

3.3 CO_2 与 CH_4 排放的主控因子及作用路径

相关性分析、RDA和PLS-SEM结果表明,塔布河洪水过程中 F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 的主控因子并不一致。 F_{CO_2} 与pH、DO呈显著负相关,说明其变化更直接受水体理化环境控制; F_{CH_4} 则与黏粒和粉粒呈极显著正相关,与粗砂呈负相关,表明甲烷释放对沉积物粒径结构变化更为敏感。RDA进一步显示,黏粒、pH和SSC是解释2种气体通量变化的关键因子,其中黏粒的解释作用最强。PLS-SEM结果也表明, F_{CH_4} 的总效应主要集中在SSC、沉积物粒径和TDS上,而 F_{CO_2} 则主要受pH、SSC和TDS影响。整体来看, CO_2 更偏向水体环境控制, CH_4 更偏向沉积物环境控制^[27]。

F_{CO_2} 与pH、DO的负相关说明 CO_2 排放与水体代谢状态及无机碳平衡变化密切相关。DO下降通常意味着系统呼吸增强、有机碳分解加快及水体内部 CO_2 积累增加;而pH的变化影响无机碳在不同形态间的分配,进而改变 CO_2 的逸散潜力。因此,塔布河中 F_{CO_2} 更像是对洪水过程中水体环境重组的直接响应,而不是单纯由某一类沉积物性质决定,与Webb等^[17]的研究结果一致。该研究指出,洪水后 CO_2 的高值主要受地下水输入和DIC向自由 CO_2 转化的维持,而 CH_4 的变化则由不同过程驱动,说明2种气体对洪水事件的响应具有不同的控制基础。

F_{CH_4} 的控制机制明显更依赖沉积物结构。细颗粒沉积物表面积大、孔隙通气性弱,更有利于有机底物滞留和还原微环境形成,因此通常有利于甲烷生成与保存;粗颗粒比例升高时,表层沉积物通透性和水体交换能力可能增强, CH_4 在沉积物中的滞留条件相对减弱^[6,28]。相关性结果、RDA结果及PLS-SEM中沉积物粒径通过SSC、TDS等变量对 F_{CH_4} 的间接调节,

都共同支持此观点,即塔布河洪水过程中 F_{CH_4} 的变化并不主要体现为对某个瞬时水质指标的响应,而是更明显地反映底泥重构及其引起的界面过程变化^[6,29]。

本研究表明,塔布河洪水过程中CO₂与CH₄的差异,并不仅体现在变化趋势上,更体现在控制路径上。 F_{CO_2} 更直接响应水体环境变化, F_{CH_4} 则更敏感于沉积物结构及其衍生效应。若将二者视为同一类排放指标并采用统一解释框架,容易掩盖事件尺度上最关键的过程差异。

4 结论

1) F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 对洪水扰动呈明显不同步响应。河床裸露期 F_{CO_2} 处于较高水平 $[(564.90 \pm 147.29) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$,洪水来临后明显下降,洪水前期降至 $(41.90 \pm 12.21) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,降幅约为92.6%;而 F_{CH_4} 则由河床裸露期的 $(0.088 \pm 0.009) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 升高至洪水前期的 $(0.254 \pm 0.056) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,约为河床裸露期的2.9倍,随后在洪水后期下降并趋于稳定。表明同一次洪水事件对CO₂和CH₄排放具有不同方向 and 不同幅度的影响。

2) F_{CO_2} 与 F_{CH_4} 的主控因子和作用路径存在明显差异。 F_{CO_2} 主要受pH、DO、SSC和TDS等水体理化因子影响,说明其对界面状态转换、水体混合和无机碳平衡变化更为敏感; F_{CH_4} 则与沉积物粒径组成关系更密切,尤其与黏粒和粉粒质量分数呈极显著正相关,表明复水扰动和表层沉积物重分选可能改变CH₄在沉积物中的保存与释放条件。CO₂排放更偏向受水体环境过程控制,而CH₄排放更偏向受表层沉积物结构及其衍生过程控制。

3)洪水过程对塔布河温室气体排放核算的影响主要体现在事件尺度上的阶段差异和气体排放差异。若仅以洪水期水-大气界面通量代表整个过程,可能低估河床裸露期较高的CO₂释放;若忽略洪水前期CH₄短时升高,则可能低估复水初期甲烷排放脉冲。因此,在半干旱区间歇性河流碳排放核算中,应区分河床裸露期、洪水前期和洪水后期等不同水文阶段,并分别考虑CO₂和CH₄的差异化响应。

本研究表明,短历时洪水事件虽然不宜直接外推至全年或整条河流尺度的碳排放贡献,但其能够显著改变间歇性河流不同阶段的温室气体排放特征,是识别CO₂高排放背景和CH₄复水脉冲的重要过程。将洪水事件及河床裸露-复水转换过程纳入监测与核算框架,有助于提高半干旱区间歇性河流碳排放评估的精确性。

参考文献:

- [1] 熊春兰,刘士伟,尚盈辛,等.全球河流水气界面二氧化碳排放通量研究进展[J].环境工程技术学报,2025,15(3):811-818.
Xiong Chunlan, Liu Shiwei, Shang Yingxin, et al. Research progress on carbon dioxide emission fluxes at the water-air-interface of global rivers[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(3): 811-818.
- [2] 刘婷婷,王晓锋,袁兴中,等.快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素[J].环境科学,2019,40(6):2827-2839.
Liu Tingting, Wang Xiaofeng, Yuan Xingzhong, et al. Spatial-temporal characteristics and driving factors of greenhouse gas emissions from rivers in a rapidly urbanizing area[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2827-2839.
- [3] Fovet O, Belemtougri A, Boithias L, et al. Intermittent rivers and ephemeral streams: Perspectives for critical zone science and research on socio-ecosystems [J]. WIREs Water, 2021, 8(4): e1523.
- [4] Bianchi T S, Butman D, Raymond P A, et al. The experimental flow to the Colorado River delta: Effects on carbon mobilization in a dry watercourse[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(3): 607-627.
- [5] 李敬,黄佳芳,罗敏,等.淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及CO₂和CH₄排放通量的影响[J].环境科学,2019,40(12):5493-5502.
Li Jing, Huang Jiafang, Luo Min, et al. Effect of increasing tidewater inundation on porewater geochemistries and CO₂ and CH₄ effluxes in the tidal freshwater marshes of the Minjiang River estuary, southeast China[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5493-5502.
- [6] Liu Xinyu, Lu Xixi, Yu Ruihong, et al. Sediment and carbon dynamics during an episodic flood in an intermittent river[J]. Ecosphere, 2022, 13(10): e4248.
- [7] 陈玉鹏,毛旭锋,魏晓燕,等.连续筑坝河流水气界面温室气体排放通量及其影响因素:以青海省湟水支流火烧沟为例[J].水生态学杂志,2020,41(3):17-23.
Chen Yupeng, Mao Xufeng, Wei Xiaoyan, et al. GHG flux at the water-air interface of rivers with cascaded dams: A case study on the Huoshaogou tributary of Huangshui River, Qinghai Province[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(3): 17-23.
- [8] Cui Panpan, Zheng Yunlong, Cui Lijuan, et al. Sediment properties control riverine methane emissions: A case study of the Liao River in northern China[J]. Environmental Research, 2024, 263: e120076.
- [9] 何芳.电感耦合等离子体质谱法测定土壤和沉积物中12种金属元素[J].黑龙江环境通报,2020,33(2):2-3.
He Fang. Determination of 12 metal elements in soil and sediment by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2020, 33(2): 2-3.
- [10] Zuur A F, Ieno E N, Elphick C S. A protocol for data

- exploration to avoid common statistical problems: *Data exploration*[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2010, 1(1):3-14.
- [11] Leguina A. A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)[J]. *International Journal of Research and Method in Education*, 2015, 38(2):220-221.
- [12] 王雪然, 万荣荣, 赵晓松, 等. 洪泛湿地甲烷排放机制与量化评估: 进展与挑战[J]. *地理科学*, 2025, 45(1):23-35.
Wang Xueran, Wan Rongrong, Zhao Xiaosong, et al. Mechanisms and quantitative assessment of methane emissions in floodplain wetlands: Progress and challenges [J]. *Geographical Science*, 2025, 45(1):23-35.
- [13] 塔依尔江·艾山, 姚诗雨, 王慧娟, 等. 塔里木河中游胡杨树干 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(12):4008-4018.
AISHAN Tayierjiang, Yao Shiyu, Wang Huijuan, et al. CH_4 , CO_2 , and N_2O fluxes of *Populus euphratica* trunk in the middle reaches of the Tarim River and influencing factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(12):4008-4018.
- [14] Sherman B S, Ford P W. Extreme hydrological events and reservoir methane emissions[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:e893180.
- [15] Gatland J R, Santos I R, Maher D T, et al. Carbon dioxide and methane emissions from an artificially drained coastal wetland during a flood: Implications for wetland global warming potential: Carbon emissions during flood [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(8):1698-1716.
- [16] Castro-Morales K, Canning A, Körtzinger A, et al. Effects of reversal of water flow in an Arctic floodplain river on fluvial emissions of CO_2 and CH_4 [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127:e2021JG006485.
- [17] Webb J R, Santos I R, Tait D R, et al. Divergent drivers of carbon dioxide and methane dynamics in an agricultural coastal floodplain: Post-flood hydrological and biological drivers[J]. *Chemical Geology*, 2016, 440:313-325.
- [18] Sieczko A K, Demeter K, Singer G A, et al. Aquatic methane dynamics in a human-impacted river-floodplain of the Danube[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(S1): DOI: 10.1002/lno.10346.
- [19] 刘心宇. 内蒙古锡林河河滨带湿地碳排放和碳储藏影响机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
Liu Xinyu. Study on the mechanism of carbon emission and carbon storage in the Xilin River riparian wetlands in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022.
- [20] von Schiller D, Detry T, Corti R, et al. Sediment respiration pulses in intermittent rivers and ephemeral streams[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(10):1251-1263.
- [21] 刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 等. 辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO_2 交换及其环境调控[J]. *环境科学*, 2024, 45(2):920-928.
Liu Siqi, Chen Hong, Xing Qinghui, et al. Ecosystem CO_2 exchange and its environmental regulation of a restored wetland in the Liaohe River estuary [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(2):920-928.
- [22] 罗佳宸, 李思悦. 三峡库区典型河流水-气界面 CO_2 通量日变化观测及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(11):5217-5226.
Luo Jiachen, Li Siyue. Daily variation of CO_2 flux at water-air interface and analysis of its affecting factors in a typical river of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11):5217-5226.
- [23] Shumilova O, Zak D, Detry T, et al. Simulating rewetting events in intermittent rivers and ephemeral streams: A global analysis of leached nutrients and organic matter [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(5):1591-1611.
- [24] Paranaíba J R, Quadra G, Josué I I P, et al. Sediment drying-rewetting cycles enhance greenhouse gas emissions, nutrient and trace element release, and promote water cytogenotoxicity [J]. *PLoS One*, 2020, 15(4):e0231082.
- [25] 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 等. 降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(2):732-739.
Chen Min, Xu Haoting, Wang Xuezhu, et al. Impact of rainfall-runoff events on methane emission from Xiangxi bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2):732-739.
- [26] Hassett E, Bohrer G, Kinsman-Costello L, et al. Changes in inundation drive carbon dioxide and methane fluxes in a temperate wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 915:e170089.
- [27] Herreid A M, Wymore A S, Varner R K, et al. Divergent controls on stream greenhouse gas concentrations across a land-use gradient[J]. *Ecosystems*, 2021, 24(6):1299-1316.
- [28] Xin Yuan, Gao Qun, Zhang Sibao, et al. Microbial regulatory mechanisms underlying methane emission in rivers with different land covers[J]. *Water Research*, 2025, 281:e123680.
- [29] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 控制灌溉对稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放及温室效应的影响[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2):235-240.
Peng Shizhang, Yang Shihong, Xu Junzeng. Influence of controlled irrigation on CH_4 and N_2O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2):235-240.