J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(2):000-000
DOI 10.18307/2026.0254

河北省串联水库温室气体排放的时空特征及影响因素*

闫艺漫[1], 王凤花[1], 刘韵超[1], 李银辉[1], 刘　红[1], 胡亚宁[1], 王圆圆[2], 丁　林[1], 刘　瑾[1**]
(河北师范大学地理科学学院河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024)
(河北省子牙河河务中心, 衡水 053000)

摘要：水库是温室气体的重要排放源. 为探究串联水库温室气体溶存浓度和扩散通量的时空变化特征及驱动因素, 以位于河北省境内滹沱河干流的岗南水库与黄壁庄水库为研究对象, 于 2023 年排水期和蓄水期开展两次观测, 采用顶空平衡法对水库温室气体水体溶存二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)浓度进行测定, 采用扩散模型法对水库水-气界面扩散通量进行估算, 同步测定水体及沉积物理化性质. 结果表明, CO_2、CH_4、N_2O 溶存浓度均值分别为 442.16±159.64 μmol/L、0.30±0.26 μmol/L 和 0.04±0.02 μmol/L, 通量分别为 63.26±69.43 mmol/(m^2·d)、42.02±49.89 μmol/(m^2·d)和 3.58±3.54 μmol/(m^2·d). 时间上, CO_2、CH_4 溶存浓度与扩散通量以及 N_2O 扩散通量总体表现为排水期>蓄水期, N_2O 溶存浓度则为蓄水期>排水期; 空间上, 排水期 CO_2 溶存浓度与扩散通量为岗南水库>黄壁庄水库, CH_4 和 N_2O 溶存浓度与通量为黄壁庄水库>岗南水库, 蓄水期三种温室气体浓度与通量均在河道地区与黄壁庄水库>岗南水库. 冗余分析显示, 排水期电导率、溶解氧和沉积物 NH_4^+-N 是影响水库温室气体溶存浓度的关键因子, 电导率和沉积物 pH 是影响扩散通量的关键因子; 蓄水期水体 pH、NH_4^+-N 是影响温室气体溶存浓度的关键因子, 溶解氧和悬浮颗粒物是影响扩散通量的关键因子, 表明水库温室气体受水体和沉积物性质的共同调节. 通过与国内水库温室气体平均扩散通量对比发现, 岗南、黄壁庄水库温室气体排放特征有 CO_2 排量通量高、CH_4、N_2O 排放通量低的特点.
关键词：串联水库；温室气体；扩散通量；时空变化；影响因素

Spatiotemporal characteristics and influencing factors of greenhouse gas emissions from cascade reservoirs in Hebei Province

Yan Yiman, Wang Fenghua, Liu Yunchao, Li Yinhui, Liu Hong, Hu Yaning, Ding Lin, Liu Jin**
(Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024,P.R.China)

Abstract：Reservoirs are a significant source of greenhouse gas emissions. This study investigated the spatiotemporal variations and driving factors of dissolved greenhouse gas concentrations and diffusive fluxes in cascade reservoirs, focusing on the Gangnan and Huangbizhuang reservoirs located along the main stem of the Hutuo River in Hebei Province. Two field campaigns were conducted during the drainage (2023) and storage (2023) periods, employing the headspace equilibrium method to measure the dissolved concentrations of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O), while the diffusive fluxes across the water–air interface were estimated using diffusion models. Concurrent measurements of physicochemical parameters in the water column and sediment were performed. The results showed mean dissolved concentrations of 442.16 ± 159.64 μmol/L for CO_2, 0.30 ± 0.26 μmol/L for CH_4 and 0.04 ± 0.02 μmol/L for N_2O, with corresponding fluxes of 63.26 ± 69.43 mmol/(m^2·d), 42.02 ± 49.89 μmol/(m^2·d) and 3.58 ± 3.54 μmol/(m^2·d), respectively. Over time, the dissolved concentrations and diffusive fluxes of CO_2

* *2024-12-24 收稿; 2025-05-20 收修改稿。
国家自然科学基金项目(41901223)、河北省石家庄市驻冀高校基础研究项目(241791267A)、河北省自然科学基金项目(D2020205021)联合资助。
**通讯作者; E-mail: bjfulj0522@163.com。

and CH_4, as well as the N_2O fluxes, were generally higher during drainage than storage; however, the trend for N_2O concentrations was opposite. Spatially, during drainage, CO_2 concentrations and fluxes were higher in Gangnan Reservoir than in Huangbizhuang Reservoir, while CH_4 and N_2O showed higher values in Huangbizhuang Reservoir. During storage, all three greenhouse gases exhibited elevated concentrations and fluxes in riverine zones and in Huangbizhuang Reservoir compared to in Gangnan Reservoir. Redundancy analysis revealed that, during drainage, conductivity, dissolved oxygen and sediment NH_4^+-N were the main factors influencing dissolved gas concentrations, while conductivity and sediment pH primarily affected diffusive fluxes. During storage, water pH and NH_4^+-N controlled dissolved concentrations, while dissolved oxygen and suspended particulate matter governed flux variations. This indicates that reservoir greenhouse gases are co-regulated by both water column and sediment properties. Comparative analysis with national averages showed that the two reservoirs exhibit distinct emission patterns, with elevated CO_2 fluxes but relatively low CH_4 and N_2O emissions.
Keywords：Cascade reservoirs; greenhouse gases; diffusive flux; spatiotemporal variations; influencing factors

全球气候变化导致的生态环境问题日益严峻, 二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)三种温室气体排放的增多是引起温室效应的主要原因之一[1]. 河流是将营养物质从陆地运输到海洋的重要通道, 而水库大坝的建设和运行破坏了河流的自然连通性, 阻碍河流流动, 并增加水力停留时间, 导致大量有机质和氮磷等营养物质随沉积物一起滞留[2]. 富含营养物质的沉积物促进了水生生物和微生物的代谢活动, 进而影响CO_2、CH_4和N_2O等温室气体的排放[3]. 据研究, 全球约 70%的河流受到水库大坝修建的影响, 使陆地有机碳向海洋的输送减少了 26%[4, 5]. 虽然全球水库面积仅占陆地面积的 0.2%[6], 但排放的温室气体为 120.5 g CO_2-C m^{-2} yr^{-1}, 43.8 g CH_4-C m^{-2} yr^{-1}和 0.1 g N_2O-N m^{-2} yr^{-1}[7, 8], 约占人类活动排放全球变暖潜能值总量的 7%[9]. 随着水库大坝建设数量不断增加, 其对温室气体排放的影响已成为研究热点.

在水库中，有机物的好氧与厌氧降解作用是生成CO_2和CH_4的主要途径, 硝化与反硝化作用则是生成N_2O的最主要过程[10, 11]. 水库筑坝对碳、氮、磷等生源物质产生滞留效应, 为微生物提供丰富的营养底物, 进而产生温室气体, 成为温室气体的重要排放源[12]. 此外，水库水文调节受人为控制, 一般可分为蓄水期和排水期[13]. 水文管理通过调节水库的流量和水位, 影响碳、氮、磷等营养物质的生物地球化学过程, 进而影响温室气体的产生与排放[14, 15]. 上述认识主要基于单一水库系统的研究, 与单一水库不同, 串联水库与梯级水库由两座或多座水坝组成, 水文水动力过程和营养物滞留效应更为复杂[16], 这使得温室气体的纵向变化模式更加复杂和不确定. 例如, 对乌江梯级水库的研究表明, 水-气界面N_2O扩散通量沿流向增大, 水力负荷是调控N_2O排放的主要因素[17]. 澜沧江梯级水库的N_2O浓度沿流向则无明显波动, 而CO_2浓度沿流向增大, CH_4沿流向递减, 沉积物的有机碳与总氮含量是主要影响因素[18]. 另一方面, 梯级水库的季节性水文调节不仅改变单个水库的水文条件, 而且会影响上下游水库间的连通性和水体交换, 通过滞留、转化和传输等过程重新分配和改变上下游水库中营养物质的含量和可利用性, 进而影响温室气体沿流向的排放模式. 有研究表明, 排水期上游水库积累的营养物质输入下游水库, 导致下游水库中溶解性无机氮和有机碳含量增加, 从而促进了温室气体的排放[19]. 综上所述, 连续筑坝与季节性水文调节通过改变水文条件、有机物和营养物滞留与输送过程, 对串联水库温室气体的产生与释放有显著影响, 从而呈现出与单库型水库不同的时空变化特征. 然而, 目前的研究主要集中于长江[20]、珠江[21]和湄公河[22]等流域, 对华北地区串联水库温室气体排放特征及其与水体和沉积物性质之间关系的研究尚为缺乏.

华北地区年降水量不足 500 mm, 主要集中在汛期, 且蒸发量达降水量的 2~3 倍[23, 24]. 岗南-黄壁庄水库是华北地区典型的串联水库, 均属于大(I)型水库, 总库容占河北省在册水库(1014 座)的 23.13%[25]. 上游岗南水库通过滹沱河河道与下游黄壁庄水库形成水力联系, 通过跨季节、跨空间的水资源调节, 有效缓解了该地区年际降水不均、水资源短缺的问题, 对保障农业灌溉和城市用水起到关键作用. 两水库实行反季节调蓄管理, 即在雨季进行泄洪与水力调度(分层取水), 在干季蓄水. 因此, 本文分别于排水期和蓄水期对岗南、黄壁庄水库及中间河道进行实地观测, 旨在明确其CO_2、CH_4和N_2O溶存浓度和水-气界面扩散通量的分布特征及影响因素, 为准确评估华北地区串联水库碳收支和管理水库碳排放工作提供数据和参考.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

岗南水库(113°51′44″~114°0′52″E, 38°18′55″~38°21′51″N)与黄壁庄水库(114°12′58″~114°18′50″E, 38°14′10″~38°18′19″N)修建于 1958 年, 总库容分别约为 15.71 亿 m^3 和 12.1 亿 m^3, 共同控制流域面积约 23400 km^2, 是滹沱河中下游重要的大(I)型水利枢纽工程, 同时也是河北省重要的水源水库(图 1). 两水库联合运用, 充分发挥了拦洪错峰、灌溉、城市用水的作用. 研究区属暖温带大陆性季风气候, 降雨集中在 7~9 月. 该区域的地形以平原和低山丘陵为主, 周边土地利用类型多样，包括农田、林地、城镇建设用地等.

图 1　研究区域及采样点位置

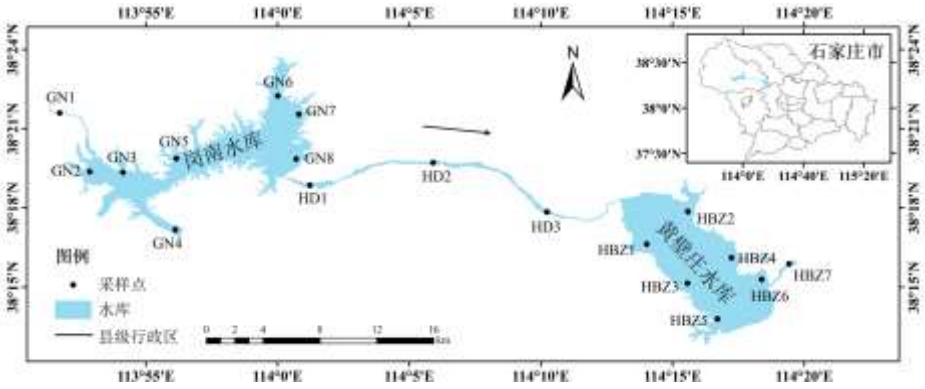

Fig.1 Research area and sampling sites

1.2　样品采集与分析

在岗南水库(上游水库)、黄壁庄水库(下游水库)及连接两水库的河道共设置 18 个采样点(图 1), 分别于 2023 年 9 月(排水期)和 12 月(蓄水期)进行现场采样. 使用有机玻璃采水器采集表层水体(10~20 cm), 使用彼得逊采泥器采集表层沉积物(0~10 cm), 每个样点采集 3 个平行样, 于 4℃避光保存.

采用顶空平衡-气相色谱仪法测定表层水体中 CO_2、CH_4 和 N_2O 溶存浓度[26], 即使用配有三通阀的 60mL 注射器抽取 60mL 水样, 排出气泡, 然后推出 30mL 水样并抽取等体积高纯氮气, 使水气比为 1:1, 关闭三通阀后剧烈震荡 2min, 静置 30min 后抽取 25mL 气体于真空铝箔气袋中保存, 24h 内使用气相色谱仪测定(安捷伦 GC6820，美国). 使用多参数水质分析仪(哈希 HQ40D, 美国)现场测定水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、电导率(EC)、氧化还原电位(ORP)、溶解性固体总量(TDS)等指标; 使用手持气象站(精诚 JH-402, 中国)监测各样点风速.

水样理化指标测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)[27]. 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定总氮(TN), 采用纳氏试剂光度法测定氨氮(NH_4^+-N), 采用紫外分光光度法测定硝态氮(NO_3^--N), 此外采用重量法测定悬浮颗粒物(SS) (GB 11901-89). 沉积物理化性质测定参照《土壤农业化学分析方法》[28], 沉积物 pH 采用电位法测定, 总氮(TN)采用开氏消煮法测定, 氨氮(NH_4^+-N)采用靛酚蓝比色法, 此外硝态氮(NO_3^--N)采用紫外分光光度法(GB/T 32737-2016), 沉积物有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法(LY/T 1237-1999).

1.3　数据计算

利用亨利定律, 根据测定的 CO_2、CH_4、N_2O 气体浓度及其对应溶解度系数计算水库水体中温室气体的溶存浓度[29, 30]:

$$C_{obs} = C_0\left(\frac{\beta RT}{22.4} + \frac{V_0}{V_1}\right) \quad (1)$$

式中, C_{obs} 为水库表层水体中溶存的温室气体浓度, μmol·L^{-1};C_0 为平衡器内水-气平衡后顶空中温室气体浓度, μmol·L^{-1}; R 为理想气体状态常数, 8314 L·Pa·mol^{-1}·K^{-1}; T 为平衡过程中的实际水温, K; 22.4 为气体

摩尔体积, L·mol^{-1}; V_0为平衡器内气体体积, mL; V_1为平衡器内水样体积, mL; β为本森系数, 是用体积分数表示的气体溶解度[31], L·L^{-1}·Pa^{-1}.

水库水-气界面温室气体排放通量(F, CO_2为 mmol·m^{-2}·d^{-1}, CH_4与 N_2O为 μmol·m^{-2}·d^{-1})采用薄边界扩散模型法计算[32], 公式如下:

$$F = 10\times k\ (C_{obs} - C_{eq})\times a \tag{2}$$

$$\frac{k}{k_{600}} = (\frac{S_c}{600})^{-n} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} k_{600} &= 0.72\ U_{10} \qquad U_{10} < 3.7\ m\cdot s^{-1} \\ k_{600} &= 4.33\text{-}13.3\ U_{10} \qquad U_{10} \geq 3.7\ m\cdot s^{-1} \end{aligned} \tag{4}$$

式中，k 表示气体交换系数(cm/h); C_{obs}为测得的温室气体溶存浓度(μmol/L); C_{eq}为与大气达到平衡时水体中温室气体溶存浓度(μmol/L); a 为量纲转换系数; Sc 为气体的 Schmidt 系数[33]; k_{600}表示 Sc 为 600 时淡水中对应的 k 值, 选取适用于湖库生态系统的经验公式, 由风速估算得出[34]; t 为水温(℃); 风速< 3.7m/s 时, n 为 2/3, 风速≥ 3.7m/s 时, n 为 1/2; U_{10}为距水面 10 m 处的风速(m/s), 由 2 m 处实测风速进行换算[34].

1.4 数据分析方法

基于 Microsoft Excel 和 SPSS 25 软件进行数据分析. 采用 Kolmogorov-Smirnov 检验数据正态性，分别利用 Mann-Whitney U 和 Kruskal-Wallis 非参数检验法分析水库温室气体排放的季节和空间差异. 采用 Spearman 相关性分析研究环境因子与温室气体浓度与通量之间的相关性. 基于方差膨胀因子(VIF)检验和冗余分析(RDA)探究影响温室气体溶存浓度与扩散通量的主要环境因子[35]. 在 ArcGIS 10.4 中绘制研究区域图, 在 Origin 2021 中绘制箱线图和相关性分析图, 在 Canoco 5 中绘制 RDA 图.

2 结果

2.1 水库温室气体溶存浓度

如图 2(a~c)所示, 岗南-黄壁庄水库水体 CO_2、CH_4和 N_2O 溶存浓度在排水期分别介于 345.81~593.29 μmol·L^{-1}、0.09~1.29 μmol·L^{-1}、0.02~0.09 μmol·L^{-1}之间; 均值分别为 450.34 μmol·L^{-1}、0.33 μmol·L^{-1}、0.04 μmol·L^{-1}.蓄水期分别介于 30.54~810.87 μmol·L^{-1}、0.04~1.00 μmol·L^{-1}、0.03~0.08 μmol·L^{-1}之间; 均值分别为 434.30μmol·L^{-1}、0.28μmol·L^{-1}、0.04μmol·L^{-1}. 其中, 岗南水库 CO_2 溶存浓度在排水期显著高于蓄水期(P<0.001), CH_4溶存浓度无显著季节差异(P>0.05), 而 N_2O 溶存浓度在蓄水期显著高于排水期(P<0.001); 黄壁庄水库 CO_2溶存浓度在蓄水期显著高于排水期(P<0.001), CH_4溶存浓度排水期显著高于蓄水期(P<0.05), N_2O 溶存浓度无显著季节差异(P>0.05); 河道区水体三种温室气体溶存浓度均在蓄水期显著高于排水期(P<0.01).

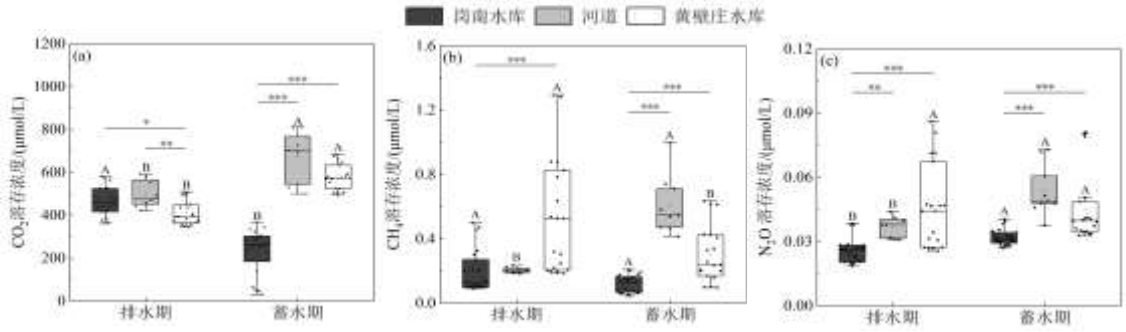

图 2 岗南水库、河道及黄壁庄水库温室气体溶存浓度(a~c)的时空变化

*表示同一季节不同地区在 0.05 水平上差异显著, **表示同一季节不同地区在 0.01 水平上差异显著, ***表示同一季节不同地区在 0.001 水平上差异显著, NS 表示无显著差异; 不同大写字母表示同一区域温室气体溶存浓度在不同时期差异显著(P <0.05).

Fig.2 Spatiotemporal variations of dissolved greenhouse gas concentrations (a~c) in Gangnan Reservoir, river channel, and Huangbizhuang Reservoir

岗南-黄壁庄水库温室气体溶存浓度在两时期均表现出高度的空间异质性. 在排水期, 河道与岗南水库 CO_2 溶存浓度为 501.33±64.96 μmol·L^{-1}、464.45±63.80 μmol·L^{-1}, 显著高于黄壁庄水库(411.79±55.43 μmol·L^{-1}) (P<0.05); 黄壁庄水库 CH_4 溶存浓度最高, 均值为 0.54±0.36 μmol·L^{-1}, 显著高于岗南水库(0.19±0.13 μmol·L^{-1}) (P<0.05), 但与河道区地区(0.20±0.02 μmol·L^{-1})无显著差异(P>0.05); N_2O 溶存浓度同样在黄壁庄水库(0.05±0.02 μmol·L^{-1})最高, 河道区(0.04±0.004 μmol·L^{-1})次之, 均显著高于岗南水库(0.03±0.006 μmol·L^{-1}) (P<0.05). 蓄水期河道区与黄壁庄水库三种温室气体溶存浓度均显著高于岗南水库 (P<0.001).

2.2 水库水−气界面温室气体扩散通量

如图 3(a~c)所示, 岗南-黄壁庄水库排水期 CO_2、CH_4 和 N_2O 扩散通量范围分别在 3.15~412.60 mmol·m^{-2}·d^{-1}、0.87~257.35 μmol·m^{-2}·d^{-1}、0.14~15.38 μmol·m^{-2}·d^{-1}; 均值分别为 73.44 mmol·m^{-2}·d^{-1}、52.03μmol·m^{-2}·d^{-1}、3.93μmol·m^{-2}·d^{-1}. 蓄水期分别为 1.30~144.49 mmol·m^{-2}·d^{-1}、6.94~123.71 μmol·m^{-2}·d^{-1}、0.55~11.26 μmol·m^{-2}·d^{-1}; 均值分别为 53.48 mmol·m^{-2}·d^{-1}、32.02 μmol·m^{-2}·d^{-1}、3.23 μmol·m^{-2}·d^{-1}. 不同地区温室气体扩散通量的季节差异不同, 岗南水库 CO_2 与 CH_4 扩散通量在排水期显著高于蓄水期(P<0.05), N_2O 扩散通量无显著季节差异(P>0.05), 河道区 CO_2 与 CH_4 扩散通量在蓄水期显著高于排水期(P<0.05), N_2O 扩散通量同样无显著季节差异(P>0.05), 黄壁庄水库三种温室气体扩散通量季节差异不显著(P>0.05).

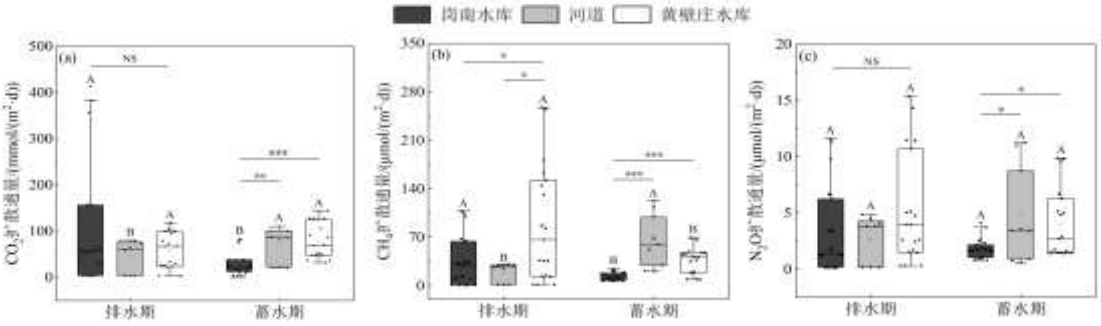

图 3 岗南水库、河道及黄壁庄水库温室气体扩散通量(a~c)的时空变化

*表示同一季节不同地区在 0.05 水平上差异显著, **表示同一季节不同地区在 0.01 水平上差异显著, ***表示同一季节不同地区在 0.001 水平上差异显著, NS 表示无显著差异; 不同大写字母表示同一区域温室气体溶存浓度在不同时期差异显著(P <0.05).

Fig.3 Spatiotemporal variations of greenhouse gas diffusion fluxes (a~c) in Gangnan Reservoir, river channel, and Huangbizhuang Reservoir

在排水期, CO_2 和 N_2O 扩散通量的空间差异不显著(P>0.05). 黄壁庄水库 CH_4 扩散通量(88.29±84.24 μmol·m^{-2}·d^{-1})显著高于岗南水库(33.72±35.13 μmol·m^{-2}·d^{-1})和河道区(18.51±14.10 μmol·m^{-2}·d^{-1}) (P<0.05). 在蓄水期, 岗南水库三种温室气体扩散通量均显著低于黄壁庄水库和河道区(P<0.05).

2.3 水库水体及沉积物理化性质时空变化特征

岗南-黄壁庄水库水体及沉积物理化性质见表 1. 研究区水体 pH 为 6.81~8.51, 呈中性至弱碱性, SS 浓度为 44~210 mg·L^{-1}, 两项水质指标均在排水期显著高于蓄水期(P<0.05), 而 DO、EC、TDS 与 ORP 在蓄水期更高. 黄壁庄水库水体的 TN 浓度蓄水期显著高于排水期(P<0.05), 而岗南水库与河道区季节差异不显著(P>0.05). 河道区水体的 NH_4^+-N 浓度和两水库水体的 NO_3^--N 浓度季节变化趋势一致, 均在蓄水期更高(P<0.05). 两水库中沉积物 TN、NO_3^--N 与 SOC 在排水期显著高于蓄水期(P<0.05); 而沉积物 NH_4^+-N 季节差异不显著(P>0.05).

2.4 水库温室气体与环境因子的关系

空间变化上, 岗南水库水体 pH 值在两季均显著高于黄壁庄水库和河道区, 而其 TDS 和 ORP 最低(P<0.05). 蓄水期岗南水库水体营养盐(TN、NH_4^+-N 和 NO_3^--N)浓度均显著低于下游水库, SS 则最高(P<0.05). 排水期上游水库水体 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度分别显著低于下游水库和河道区(P<0.05), SS 和 TN 浓度空间差异不显著(P>0.05). 岗南水库中沉积物 SOC 含量在两季均显著低于河道(P<0.05). 蓄水期岗南水库沉积物 TN 和 NH_4^+-N 含量显著低于河道和黄壁庄水库, 而排水期岗南水库沉积物 NO_3^--N 含量最高(P<0.05).

表 1 岗南水库、河道及黄壁庄水库环境因子的时空变化

Tab. 1 Spatiotemporal variations of environmental factors in the Gangnan Reservoir, river channel, and Huangbizhuang Reservoir

W 代表水体, S 代表沉积物;不同大写字母表示同一区域某环境因子存在显著季节差异(P<0.05); 数值从大到小依次标记为 A, B; 不同小写字母表示同一季节某环境因子存在显著空间差异(P<0.05), 数值从大到小依次标记为 a, b, c.

水库环境因子	排水期			蓄水期		
	岗南水库	河道	黄壁庄水库	岗南水库	河道	黄壁庄水库
W_pH	8.35±0.13Aa	7.69±0.41Ab	8.05±0.22Ab	8.04±0.39Ba	7.19±0.37Bb	7.60±0.15Bb
WT/(℃)	25.14±1.25Aa	21.40±0.10Ab	24.37±1.18Aa	3.98±1.74Ba	1.53±1.20Bb	3.00±1.80Bab
DO/(mg·L^{-1})	8.29±2.05Ba	6.82±1.59Bb	7.41±2.24Bab	13.12±1.11Ab	13.70±3.71Aab	14.19±1.22Aa
EC/(μs·cm^{-1})	459.25±26.91Bb	497.56±21.17Bb	602.38±34.08Aa	471.25±112.71Ab	652.00±108.00Aa	552.57±151.89Ab
TDS/(mg·L^{-1})	229.63±13.66Bc	252.33±11.45Bb	302.19±15.19Ba	257.50±22.94Ab	340.67±46.03Aa	376.14±29.39Aa
ORP/(mv)	127.36±11.88Ab	169.90±13.89Ba	165.96±21.18Ba	136.36±25.57Ab	216.97±25.27Aa	240.74±25.00Aa
SS /(mg·L^{-1})	175.08±37.83Aa	162.50±28.75Aa	147.52±44.78Aa	73.35±11.75Ba	55.06±9.56Bb	56.67±16.04Bb
W_TN/(mg·L^{-1})	4.00±0.50Aa	4.42±0.82Aa	4.21±0.90Ba	3.95±0.73Ab	4.80±1.59Aab	5.01±1.34Aa
W_NH_4^+-N/(mg·L^{-1})	0.04±0.01Ab	0.06±0.02Bab	0.10±0.07Aa	0.08±0.17Ab	0.19±0.06Aa	0.24±0.35Aa
W_NO_3^--N/(mg·L^{-1})	2.87±0.45Bb	3.73±0.85Aa	2.73±1.15Bab	3.70±0.56Ab	4.29±1.72Aab	4.44±1.10Aa
S_pH	7.87±0.17Ab	7.92±0.32Aab	8.05±0.28Aa	7.75±0.42Aa	7.66±0.29Aa	7.50±0.29Ba
S_TN/(mg·kg^{-1})	637.21±290.10Aa	482.31±226.47Aa	571.32±178.25Aa	275.41±241.53Bb	478.33±112.57Aa	411.40±264.63Bab
S_NH_4^+-N/(mg·kg^{-1})	21.34±4.20Aa	21.43±11.30Aa	27.62±12.73Aa	20.62±1.23Ab	22.93±2.93Aab	30.28±12.45Aa
S_NO_3^--N/(mg·kg^{-1})	4.28±0.81Aa	3.49±0.34Ab	3.37±0.70Ab	1.97±1.00Ba	2.00±1.52Ba	2.33±1.47Ba
SOC/(g·kg^{-1})	14.62±7.80Ab	24.38±6.33Aa	20.41±8.71Aab	5.95±4.83Bb	9.87±1.17Ba	8.99±4.45Bab

将水库水体温室气体溶存浓度和扩散通量与水体和沉积物的理化指标进行 Spearman 相关性分析, 结果如图 4 所示. 不同季节温室气体与环境因子的相关性不同. 排水期 CO_2 溶存浓度与各理化指标相关性均不显著(P>0.05), CO_2 通量仅与沉积物 pH 呈显著负相关(P<0.05). CH_4 溶存浓度和通量与水体 EC、TDS(P<0.01)、NH_4^+-N(P<0.001)呈显著正相关, CH_4 溶存浓度还与水体 pH、沉积物 NO_3^--N 呈显著负相关(P<0.05). N_2O 溶存浓度与水体 ORP(P<0.05)和 NH_4^+-N(P<0.01)呈正相关, 与水体 pH(P<0.001)、DO(P<0.01)和沉积物 NO_3^--N(P<0.05)呈显著负相关, N_2O 通量与水体 EC、TDS(P<0.05)、NH_4^+-N(P<0.01)呈显著正相关. 蓄水期 CO_2 溶存浓度和通量与水体 pH、WT、SS 呈显著负相关(P<0.05), 与 TDS、沉积物 SOC 及水体与沉积物 NH_4^+-N 含量呈显著正相关(P<0.05); CH_4 溶存浓度和通量与水体 pH 呈显著负相关(P<0.05), 与 TDS、ORP 呈显著正相关(P<0.05), CH_4 通量还与 WT、SS 呈显著负相关(P<0.05), 与 DO 和水体无机氮呈显著正相关(P<0.05); N_2O 溶存浓度与 DO、EC、TDS、ORP、水体与沉积物 NH_4^+-N 呈显著正相关(P<0.05), 与水体 pH、WT、SS 呈显著负相关(P<0.05), N_2O 通量与水体 DO、TN、NH_4^+-N(P<0.05)以及沉积物 NO_3^--N(P<0.001)呈正相关.

数据经方差膨胀因子检验消除数共线性后, 将筛选出的环境因子(VIF<5)与水库温室气体溶存浓度和扩散通量进行 RDA 分析(图 5). 在排水期, 水体 EC、DO 和沉积物 NH_4^+-N 是影响温室气体溶存浓度的主要因子(图 5a), 对温室气体溶存浓度差异的解释率分别为 27.9%、21.2%、11.8%. 其中, EC、沉积物 NH_4^+-N 与 CH_4、N_2O 溶存浓度呈正相关, 与 CO_2 溶存浓度呈负相关; DO 与三种温室气体溶存浓度均呈负相关. 沉积物 pH 和 EC 是影响温室气体扩散通量的主要因子(图 5b), 对温室气体扩散通量差异的解释率分别为 16.8%、14.9%. 其中, 沉积物 pH 与三种温室气体扩散通量均呈负相关, EC 与 CH_4、N_2O 扩散通量呈正相关. 在蓄水期, 水体 pH、NH_4^+-N 是影响温室气体溶存浓度的主要因子(图 5c), 解释率分别为 35.7%、16.4%. 其中水体 pH 与三种温室气体溶存浓度均呈负相关, 水体 NH_4^+-N 主要与 N_2O 溶存浓度呈显著正相关. 水体 DO、SS 是影响温室气体扩散通量主要因素(图 5d), 解释率分别为 33.6%、22.2%. 其中 DO 与三种温室气体扩散通量呈正相关; SS 与三种温室气体扩散通量呈负相关.

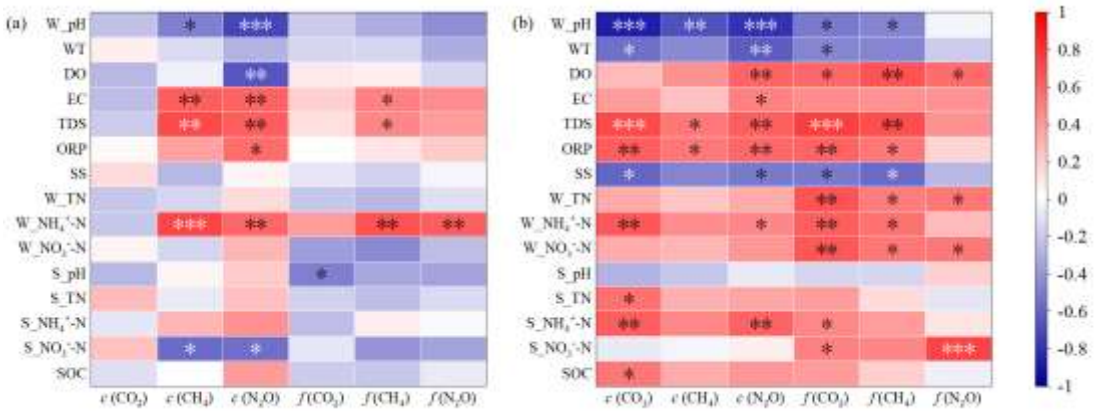

图 4　排水期(a)、蓄水期(b)温室气体溶存浓度、扩散通量与环境因子之间的相关性

Fig.4 Correlation between dissolved greenhouse gas concentrations, diffuse fluxes and environmental factors during discharge (a) and storage (b) periods

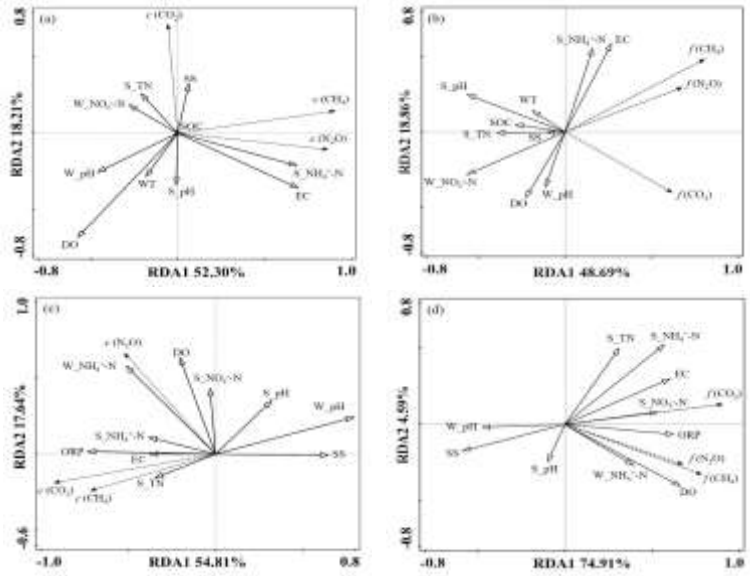

图 5 排水期温室气体溶存浓度(a)、扩散通量(b)和蓄水期温室气体溶存浓度(c)、扩散通量(d)与环境因子的 RDA 分析

Fig.5 RDA analysis of GHG dissolved concentrations (a) and diffuse fluxes (b) during discharge period and GHG dissolved concentrations (c) and diffuse fluxes (d) during storage period in relation to environmental factors

3　讨论

本研究聚焦于串联水库在两个水文管理时期(排水期、蓄水期)温室气体溶存浓度与通量的时空差异. 岗南水库排水期 CO_2 和 CH_4 溶存浓度以及通量均高于蓄水期. 这与排水期较高的 SOC 含量(14.62 g·kg^{-1})有关, 有机质含量高可以增加微生物代谢底物的供应, 增强碳排放潜力[36]. 本研究中, 河道地区蓄水期 CH_4 溶存浓度与扩散通量均显著高于排水期. CH_4 主要来自于厌氧沉积物中的产甲烷作用[37], 蓄水期河道缺少上游水库的水源补给, 水位低于排水期, 甚至出现断流现象, 缩短了 CH_4 从沉积物经过水体扩散至大气的路径, 从而降低了 CH_4 在水体中被氧化的概率[38]. 同时, 蓄水期河道 N_2O 溶存浓度显著高于排水期. 这可能由于蓄水期河道 NH_4^+-N 浓度显著升高, 促进了硝化和反硝化过程[26]. 黄壁庄水库 CO_2 溶存浓度与通量在蓄水期较高, 这种分异可能受水体氧化环境的调控. 蓄水期较高的 DO(14.19 mg·L^{-1})和 ORP(240.74 mv)提供了强氧化条件, 促进微生物的好氧呼吸作用, 增加 CO_2 的产生与排放[39]. 同时, 黄壁庄水库 CH_4 溶存浓度与通量在蓄

水期呈现较低水平, 可能主要归因于水库沉积物 TN 和 SOC 的同步下降(与排水期相比降幅分别为 28%和 56%).

空间尺度上, 本研究中岗南-黄壁庄水库呈现独特的温室气体分布模式. 与国内多数梯级水库研究相比, 长江[40]、湄公河[19, 41]、猫跳河[42]等流域的梯级水库温室气体浓度及通量普遍呈现沿程递增的分布规律, 而岗南-黄壁庄水库则表现出显著的空间异质性特征. 在排水期, CO_2 溶存浓度及通量呈现上游高于下游的分布特征, 而 CH_4 与 N_2O 溶存浓度及通量则呈现相反的梯度特征; 在蓄水期, 三种温室气体沿程先增后减的动态变化亦不同于三峡香溪河 CH_4 溶存浓度单向递减的规律[20]. 进一步具体分析, 在蓄水期, 岗南水库三种温室气体的溶存浓度及通量均显著低于河道和黄壁庄水库, 统计分析结果表明, 水体 DO、EC、TDS、NH_4^+-N 及沉积物 NH_4^+-N 等指标与温室气体溶存浓度及通量呈显著正相关, 而上述环境因子在岗南水库最低. 水体 pH、SS 等与温室气体排放负相关的指标则表现为相反变化趋势. 这表明, 水体与沉积物环境因子对温室气体排放的空间变化具有调控作用. 首先, pH 值升高会促使水体碳酸盐体系向重碳酸盐优势态转化, 致使水中 CO_2 分压降低, 进而抑制 CO_2 的排放[43]. 同时, pH 值可通过影响产甲烷菌与 N_2O 还原酶的活性, 进而影响 CH_4 与 N_2O 的生成过程[44, 45]. 水体中 EC 值较高说明水中有充足的溶解性杂质, 以及丰富的电子受体和供体, 不仅为产甲烷菌提供更多可利用的有效碳, 还会促进氮素的迁移转化, 从而有利于温室气体的产生[46]. SS 浓度通过调节光辐射穿透深度, 影响氮转化与碳-氮循环的耦合过程, 最终作用于温室气体的排放[47]. 另外, NH_4^+-N 作为营养元素会促进浮游植物的光合作用, 产生内源有机碳, 间接促进 CO_2 产生[48]. 黄壁庄水库在排水期中的 CH_4 溶存浓度与通量、N_2O 溶存浓度最高. 这可能是因为黄壁庄水库接纳上游来水, 使得水体中 EC、TDS 和 NH_4^+-N 等物质的浓度显著高于岗南水库[49]. 已有研究表明, 高 TDS 浓度（>300 $mg \cdot L^{-1}$）意味着水体中含有较高的溶解性盐类和离子[46], 这有利于 CH_4 的产生[50]. 此外, Bosse 等[51]对淡水湖泊的研究指出, NH_4^+因其化学结构与 CH_4 分子相似, 能够与 CH_4 竞争甲烷单加氧酶, 从而减少其氧化, 进一步解释了 NH_4^+-N 浓度变化对 CH_4 通量的调控作用. 此外, 在排水期, 两水库 N_2O 溶存浓度与沉积物 NO_3^--N 和水体 DO 呈负相关, 与水体 NH_4^+-N 浓度正相关, 说明排水期 N_2O 生成机制较为复杂, 硝化-反硝化耦合过程可能是 N_2O 生成的主要途径[19]; 而在蓄水期 N_2O 溶存浓度与水体和沉积物 NH_4^+-N 含量均呈正相关, 同时与 DO 也呈正相关, 表明在蓄水期硝化作用可能是 N_2O 生成的主要途径[52]. 综上, 岗南-黄壁庄水库中温室气体的溶存浓度和通量表现出显著的时空异质性, 这反映了在环境因子和水库调度等多种因素共同作用下, 温室气体动态变化过程的复杂性.

Li 等[53]系统收集我国 153 座覆盖四大地理区(东部平原、云贵高原、东北平原山地和蒙新高原)的水库温室气体扩散通量观测数据, 评估得出我国水库温室气体平均排放通量分别为: CO_2: 12.10 $mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; CH_4: 640.88 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; N_2O: 23.09$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. 本研究中, 岗南水库 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放通量分别为全国平均水平的 5.12、0.04、0.11 倍; 黄壁庄水库 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放通量分别为国内平均水平的 5.57、0.01、0.22 倍. 上述差异可能由于岗南-黄壁庄水库所处的温带大陆性季风气候区, 与全国水库主体分布的亚热带季风区之间的气候差异[54]. 两座水库 CO_2 排放量高于国内平均水平, 而 CH_4 和 N_2O 的排放通量相对较低. 因此, 在开展岗南与黄壁庄水库的调度和管理工作中, 需重点关注 CO_2 的排放控制问题. 此外, 本研究观测到蓄水期河道的 CO_2、CH_4 与 N_2O 溶存浓度和通量均显著升高, 结合温室气体与环境因子的显著正相关关系, 建议在水库蓄水调度期间, 加强对河道水体 DO 与 NH_4^+-N 的定期监测, 以便掌握水体环境变化对温室气体排放的影响机制.

4 结论

1)时间尺度上, 岗南水库 CO_2 溶存浓度及通量、CH_4 通量在排水期显著高于蓄水期, 而 N_2O 溶存浓度呈现相反趋势. 河道三种温室气体溶存浓度及 CO_2 与 CH_4 通量均在蓄水期显著高于排水期. 黄壁庄水库 CO_2 溶存浓度在蓄水期显著高于排水期, CH_4 溶存浓度及通量则呈现相反时间差异, N_2O 溶存浓度无显著时间差异.

2)空间尺度上, 排水期岗南水库 CO_2 浓度及通量高于黄壁庄水库, 而 CH_4 与 N_2O 呈现相反的空间分布特征; 蓄水期, 河道与黄壁庄水库的三种温室气体浓度及通量均显著高于岗南水库.

3)在排水期, 水体 EC、DO 和沉积物 NH_4^+-N 是影响岗南-黄壁庄水库温室气体溶存浓度的主要因子. 其

中, EC、沉积物 NH_4^+-N 与 CH_4、N_2O 呈正相关, 与 CO_2 呈负相关; DO 与三种温室气体均呈负相关. 蓄水期, 水体 pH、NH_4^+-N 成为主要控制因子, 水体 pH 与三种温室气体溶存浓度均呈负相关, NH_4^+-N 与 N_2O 溶存浓度呈显著正相关. 温室气体扩散通量在排水期受沉积物 pH 和 EC 的调控, 沉积物 pH 与三种温室气体扩散通量均呈负相关, EC 与 CH_4、N_2O 扩散通量呈正相关. 在蓄水期主要受水体 DO 和 SS 浓度变化影响. 排水期 N_2O 可能主要由硝化-反硝化耦合作用产生, 蓄水期硝化作用可能是 N_2O 主要生成途径.

4)岗南、黄壁庄水库整体表现为大气温室气体的“源”, 其 CO_2 排放通量高于国内水库均值, CH_4 和 N_2O 排放通量较低. 本研究揭示了串联水库系统中温室气体排放时空变化规律的复杂性, 但受限于短期观测数据, 目前对水力调控机制与温室气体通量的定量关联解析仍存在不足, 未来研究需结合长期多时段监测数据与水动力模型深化机制解析.

5 参考文献

[1] Raymond PA, Hartmann J, Lauerwald R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 2014, 503 (7476): 355-359. DOI: 10.1038/nature13142.

[2] Maavara T, Chen QW, Meter KV, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1 (4): 103-116. DOI: 10.1038/s43017-019-0019-0.

[3] Stein LY. The Long-Term Relationship between Microbial Metabolism and Greenhouse Gases. *Trends in Microbiology*, 2020, 28 (6): 500-511. DOI: 10.1016/j.tim.2020.01.006.

[4] Grill G, Lehner B, Thieme M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 2019, 569 (7755): 215-221. DOI: 10.1038/s41586-019-1111-9.

[5] Syvitski JPM, Voeroesmarty CJ, Kettner AJ, et al. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science*, 2005, 308 (5720): 376-380. DOI: 10.1126/science.1109454.

[6] Lehner B, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 2004, 296 (1-4): 1-22. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.

[7] 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. DOI: 10.1093/biosci/biw117.

[8] 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.

[9] Louis VLS, Kelly CA, Duchemin É, et al. Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. *Bioscience*, 2000, 50 (9): 766-775. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050.

[10] Cheng BH, Han QJ, Jiang CS. Research progress on the emission of greenhouse gases from reservoir and its influence factors. *Wetland Science*, 2012, 10 (1): 121-128. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2012.01.014. [程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展. 湿地科学, 2012, 10 (1): 121-128.]

[11] Wang YT, Zhang SH, Jin HX, et al. Effects of dam building on N_2O-producing and N_2O-reducing community structures in river sediments and the associated N_2O emission potential. *Science of the Total Environment*, 2023, 887: 164034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164034.

[12] Zhou XD, Yan XC, Chen QW, et al. Greenhouse gas concentrations and diffusive fluxes in the middle reach of the Lancang River before and after damming. *Journal of Hydrology*, 2024, 645: 132253. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132253.

[13] She WY, Yang J, Wu G, et al. The synergy of environmental and microbial variations caused by hydrologic management affects the carbon emission in the Three Gorges Reservoir. Science of the Total Environment, 2022, 821: 153446. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153446.

[14] Yang YJ, Wang W, Yu SD, et al. Seasonal variations and hydrological management regulate nutrient transport in cascade damming: Insights from carbon and nitrogen isotopes. *Water Research*, 2025, 271: 122894. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122894.

[15] Berberich ME, Beaulieu JJ, Hamilton TL, et al. Spatial variability of sediment methane production and methanogen communities within a eutrophic reservoir: Importance of organic matter source and quantity. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65 (6): 1336-1358. DOI: 10.1002/lno.11392.

[16] Peng AB, Niu KJ, Hu QF, et al. Allocation of multiple water sources and optimal operation of reservoir group in the Yongding River basin. Advances in Water Science, 2023, 34 (3): 418-430. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.009. [彭安帮, 牛凯杰, 胡庆芳等. 永定河流域多水源配置与水库群优化调度. 水科学进展, 2023, 34 (3): 418-430.]

[17] Liang X, Xing T, Li JX, et al. Control of the Hydraulic Load on Nitrous Oxide Emissions from Cascade Reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (20): 11745-11754. DOI: 10.1021/acs.est.9b03438.

[18] Meng YT, Li JR, Wang HB, et al. Cascade reservoirs affected chemical compositions of dissolved organic matter and greenhouse gas dynamics in the Lancang River. *Science of the Total Environment*, 2024, 957: 177398. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177398.

[19] Ye F, Wang Y, Duan L, et al. Nitrous oxide (N_2O) emissions at the air-water-sediment interfaces of cascade reservoirs in the Yunnan-Guizhou Plateau: Spatial patterns and environmental controls. *Environmental Pollution*, 2024, 357: 124436. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.124436.

[20] Liu J, Hu JM, Zheng XW, et al. Effects of Three Gorges Reservoir operation on tempo-spatial distribution of dissolved methane in Xiangxi Reservoir Bay. *China Environmental Science*, 2023, 43 (5): 2508-2518. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230104.003. [刘佳, 胡杰茗, 郑祥旺等. 三峡水库调度对香溪河库湾水体溶存甲烷时空分布的影响. 中国环境科学, 2023, 43 (5): 2508-2518.]

[21] Yi YB, Li SL, Zhong J, et al. The influence of the deep subtropical reservoir on the karstic riverine carbon cycle and its regulatory factors: Insights from the seasonal and hydrological changes. *Water Research*, 2022, 226: 119267. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119267.

[22] Shi WQ, Chen QW, Yi QT, et al. Carbon Emission from Cascade Reservoirs: Spatial Heterogeneity and Mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (21): 12175-12181. DOI: 10.1021/acs.est.7b03590.

[23] Zhang JX, Ge JZ, Ma W, et al. Research advance on annual water use efficiency of winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49 (4): 879-892. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.21034. [张金鑫, 葛均筑, 马玮等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植体系周年水分高效利用研究进展. 作物学报, 2023, 49 (4): 879-892.]

[24] Sun HY, Zhang XY, Liu XY, et al. Impact of different cropping systems and irrigation schedules on evapotranspiration, grain yield and groundwater level in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 202-209. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.09.046.

[25] 彭苏彦,李世聪. 河北省水库安全管理现状及对策. 河北水利, 2022, (3): 29-30.

[26] Wang GQ, Xia XH, Liu SD, et al. Distinctive Patterns and Controls of Nitrous Oxide Concentrations and Fluxes from Urban Inland Waters. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (12): 8422-8431. DOI: 10.1021/acs.est.1c00647.

[27] 魏复盛. 水和废水监测分析方法 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254-284.

[28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146-163.

[29] Johnson KM, Hughes JE, Donaghay 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.

[30] Wang R, Zhang H, Zhang W, et al. An urban polluted river as a significant hotspot for water-atmosphere exchange of CH_4 and N_2O. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114770. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114770.

[31] Gao J, Zheng XH, Wang R, et al. Preliminary comparison of the static floating chamber and the diffusion model methods for measuring water-atmosphere exchanges of CH_4 and N_2O from inland water bodies. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(3): 290-302. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12173. [高洁, 郑循华, 王睿等. 漂浮通量箱法和扩散模型法测定内陆水体 CH_4 和 N_2O 排放通量的初步比较研究. 气候与环境研究, 2014, 19 (3): 290-302.]

[32] Cole JJ,Caraco NF. Emissions of nitrous oxide (N_2O) from a tidal, freshwater river, the Hudson River, New York. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35 (6): 991-996. DOI: 10.1021/es0015848.

[33] 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.

[34] Crusius J,Wanninkhof R. Gas Transfer Velocities Measured at Low Wind Speed over a Lake *Limnology and Oceanography:Methods*, 2003, 48 (3): 1010-1017. DOI: 10.4319/lo.2003.48.3.1010.

[35] Song YM, Dong L, Lu, MQ, et al. Antibiotic Pollution and Its Effects on the Spatiotemporal Variation in Microbial Community

Structure and Functional Genes in Sediment of Baiyangdian Lake. *Environmental Science*, 2024, 45 (8): 4904-4914. DOI: 10.13227/j.hjkx.202309066. [宋圆梦, 董丽, 卢梦淇等. 白洋淀沉积物中抗生素污染及其对微生物群落结构和功能基因时空变化的影响. 环境科学, 2024, 45 (8): 4904-4914.]

[36] Naslund LC, Mehring AS, Rosemond AD, et al. Toward more accurate estimates of carbon emissions from small reservoirs. *Limnology and Oceanography*, 2024, 69 (6): 1350-1364. DOI: 10.1002/lno.12577.

[37] Jin Q, Liu HZ, Xu XG, et al. Emission dynamics of greenhouse gases regulated by fluctuation of water level in river-connected wetland. *Journal of Environmental Management*, 2023, 329: 117091. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117091.

[38] Wang GQ, Xia XH, Liu SD, et al. Intense methane ebullition from urban inland waters and its significant contribution to greenhouse gas emissions. *Water Research*, 2021, 189: 116654. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116654.

[39] Sulman BN, Desai AR, Cook BD, et al. Contrasting carbon dioxide fluxes between a drying shrub wetland in Northern Wisconsin, USA, and nearby forests. *Biogeosciences*, 2009, 6 (55): 1115-1126. DOI: 10.5194/bg-6-1115-2009.

[40] Wang XF, Liu TT, He YX, et al. Greenhouse gases concentrations and emissions from a small subtropical cascaded river-reservoir system. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128190. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128190.

[41] Shi WQ, Maavara T, Chen QW, et al. Spatial patterns of diffusive greenhouse gas emissions from cascade hydropower reservoirs. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129343. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129343.

[42] Wang FS, Wang BL, Liu CQ, et al. Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs–river system on the Maotiao River, southwest of China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45 (23): 3827-3834. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.014.

[43] Peng X, Wang BL, Liu CQ, et al. Diurnal variations of pCO_2 in relation to environmental factors in the cascade reservoirs along the Wujiang River, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2012, 31 (1): 41-47. DOI: 10.1007/s11631-012-0547-5.

[44] Pinheiro JPS, Windsor FM, Wilson RW, et al. Global variation in freshwater physico-chemistry and its influence on chemical toxicity in aquatic wildlife. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2021, 96 (4): 1528-1546. DOI: 10.1111/brv.12711.

[45] Richardson D, Felgate H, Watmough N, et al. Mitigating release of the potent greenhouse gas N_2O from the nitrogen cycle-could enzymic regulation hold the key? *Trends in Biotechnology*, 2009, 27 (7): 388-397. DOI: 10.1016/j.tibtech.2009.03.009.

[46] Quick AM, Reeder WJ, Farrell TB, et al. Nitrous oxide from streams and rivers: A review of primary biogeochemical pathways and environmental variables. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 224-262. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.02.021.

[47] Jiang CR, Zhang SB, Wang JF, et al. Nitrous Oxide (N_2O) Emissions Decrease Significantly under Stronger Light Irradiance in Riverine Water Columns with Suspended Particles. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57 (48): 19749-19759. DOI: 10.1021/acs.est.3c05526.

[48] Kieft B, Li Z, Bryson S, et al. Phytoplankton exudates and lysates support distinct microbial consortia with specialized metabolic and ecophysiological traits. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118 (41): e2101178118. DOI: 10.1073/pnas.2101178118.

[49] Shi WQ, Pan G, Chen QW, et al. Hypoxia Remediation and Methane Emission Manipulation Using Surface Oxygen Nanobubbles. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (15): 8712-8717. DOI: 10.1021/acs.est.8b02320.

[50] Fan LF, Cheng JX, Xie YC, et al. Spatio-temporal patterns and drivers of CH_4 and CO_2 fluxes from rivers and lakes in highly urbanized areas. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: 170689. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170689.

[51] Bosse U, Frenzel P, Conrad R. Inhibition of methane oxidation by ammonium in the surface layer of a littoral sediment. *FEMS Microbiology Ecology*, 1993, 13 (2): 123-134. DOI: 10.1016/0168-6496(93)90030-B.

[52] Rönner U. Distribution, production and consumption of nitrous oxide in the Baltic Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47 (12): 2179-2188. DOI: 10.1016/0016-7037(83)90041-8.

[53] Li SY, Bush RT, Santos IR, et al. Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs. *Water Research*, 2018, 147 (15): 13-24. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.053.

[54] Song CQ, Fan CY, Zhu JY, et al. A comprehensive geospatial database of nearly 100000 reservoirs in China. *Earth Syst Sci Data*, 2022, 14 (9): 4017-4034. DOI: 10.5194/essd-14-4017-2022.