

三峡水库 CO₂、CH₄ 通量监测分析研究*

李哲^{1,2}, 杨柳^{1,2}, 吴兴华³, 陈永柏³, 鲁伦慧^{1,2}, 王殿常^{3**}

(1: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

(2: 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714)

(3: 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

摘要: 自成库以来, 三峡水库 CO₂、CH₄ 等温室气体通量较蓄水前发生明显改变。如何科学认识和客观评估三峡水库修建及运行对其 CO₂、CH₄ 等温室气体通量的影响备受关注。本文简要回顾了自 2009 年以来在三峡水库开展 CO₂、CH₄ 等温室气体通量监测与分析工作, 综述认为, 现阶段三峡水库温室气体排放以水-气界面扩散释放为主要途径。陆源输入的有机碳是主导三峡水库 CO₂、CH₄ 产生的主要碳源, 但在局部区段或时段自源性有机碳的贡献亦十分显著。同蓄水前相比, 三峡水库碳排放量呈现为净增加, 淹没效应约占水库 C 净增量的 20%, 库区内点面源污染负荷并未对 CO₂ 排放的净增量产生显著贡献, 阻隔效应和生态系统重建效应对三峡水库碳排放的净增量产生显著贡献。近 10 年来, 监测方法对比、监测点位优化等工作在一定程度上完善了三峡水库温室气体通量监测体系。新方法、新技术的引入也为三峡水库温室气体通量监测分析提供了有利支撑和保障, 但复杂水文环境下驱动水库碳循环的水文生态机制仍不明晰, 这是制约三峡水库碳通量长期趋势预测的难点。未来将通过监测技术持续创新以促进对三峡水库碳通量的精准核算, 在深化基础研究的同时, 仍亟待提出更科学有效的模型或方法以支撑长期趋势预测, 服务水库碳管理。

关键词: 三峡水库; 温室气体; 净排放量; 甲烷; 复杂水文环境

Monitoring and analysis of CO₂ and CH₄ fluxes in the Three Gorges Reservoir*

Li Zhe^{1,2}, Yang Liu^{1,2}, Wu Xinghua³, Chen Yongbo³, Lu Lunhui^{1,2} & Wang Dianchang^{3**}

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

(2: *Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, P.R.China*)

(3: *China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R.China*)

Abstract: Since the impoundment in 2003, the flux of CO₂, CH₄ in the Three Gorges Reservoir (TGR) has changed significantly compared with the pre-impoundment status. Accessing the influence of the construction and operation of the TGR on these greenhouse gas fluxes has attracted much attention. In this paper, we reviewed the experience of monitoring and analysis of CO₂, CH₄ fluxes in TGR since 2009. At present, air-water diffusion was the major pathway for carbon emissions in the reservoir. Terrigenous organic carbon input was the main carbon source leading the production of CO₂ and CH₄ in the reservoir. Yet, the contribution of autochthonous organic carbon seemed to be with growing significant. Compared with pre-impoundment status, a net increase of greenhouse gas emissions in TGR is evident. Flooding accounted for about 20% of the net increase of the reservoir formation. Anthropogenic pollution in the reservoir region did not significantly to the net increase of CO₂ emissions. In addition, the dam acting as barriers and reservoir aquatic ecosystem reconstruction were major contributors for the net greenhouse gas emissions. Sampling campaigns and research in the past decade promoted the improvement and optimization of monitoring system of the greenhouse gas emissions in TGR. Application of new monitoring methods and technologies also provided support and reimbursement. However, the hydro-ecological mechanism driving the carbon cycle in the reservoir under complex hydrological environment is still unclear, which is a difficulty in the long-term trend prediction of the reservoir carbon flux. In the future, innovation of monitoring technology will

* 2022-12-01 收稿; 2022-12-29 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2022YFC3203504)、国家自然科学基金国际合作研究项目(51861125204)和中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103493)联合资助。

** 通信作者; E-mail: wang_dianchang@ctg.com.cn。

be applied to promote the accurate calculation of the carbon flux of TGR. It is still urgent to put forward more scientific and effective models or methods to support the long-term trend prediction and serve the reservoir carbon management.

Keywords: Three Gorges Reservoir; greenhouse gas; net emission; methane; sophisticated hydro-environment

水库是指在河流或依托一定地势修建水坝拦截蓄水后形成的人工水体,亦称为人工湖泊。作为人类改造自然、开发利用水资源的重要工程手段,千百年来水库修建及运行持续发挥了供水、灌溉、养殖、防洪、发电、航运等多种重要功能,服务人类社会经济发展。我国是世界上水库数量最多的国家。截至2021年,我国已建成各类水库9.8万多座^[1],总库容9306亿 m^3 ,约是我国天然湖泊淡水蓄存总量的4倍,约占我国河川年径流总量的33%。2021年我国水电装机容量3.91亿kW,约占全球水电总装机容量的29%,是世界水电装机容量与水电发电量最大的国家^[2]。但是,水库修建及运行也在一定程度上改变了流域C、N、P等生源要素的生物地球化学过程,对流域生态环境乃至地球系统产生了尚不完全确定的影响。

同绝大部分淡水系统一样,水库通常是 CO_2 、 CH_4 等温室气体的排放源。该现象较早地报道来自于对水库蓄水淹没土地之后发生的水环境变化。1980年,Ostrosky等以“Trophic upsurge”描述了水库蓄水初期初级生产力迅速升高、藻类生物量显著增加的现象^[3],Grimard等进一步将其归因于水库淹没后土壤磷溶出所致^[4]。1985年,Godshalk与Barko在Gunnison编著的《Microbial processes in reservoirs》一书中较为详尽地报道了水淹之后植被与土壤有机质溶出及降解的动力学过程^[5],并探讨了水库蓄水初期将产生各种气体排放(CO_2 、 CH_4 、 H_2S 等)^[6]。1993年,加拿大学者Rudd等、巴西学者Oud分别撰文,报道了发电水库将引起 CH_4 、 CO_2 排放量增加^[7-8],并质疑水电能源“零排放”特征^[8]。以此为起点,水库修建及运行的碳排放问题逐渐引起全球科学家们的关注,并发展成地球科学、环境科学与水利工程交叉融合的新兴学科方向^[9-10]。

根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,以下简称为“IPCC”)第六次评估报告估计^[11],过去10年中全球淡水水体 CO_2 年排放量约为1.5 Pg CO_2/a , CH_4 年排放量约为(117~212) Tg CH_4/a 。其中,全球水库 CO_2 、 CH_4 年排放量分别约为134.93 Tg CO_2/a 、17.73 Tg CH_4/a ^[12]。从全球尺度下水库 CO_2 、 CH_4 排放量并未在淡水水体中占据绝大多数,仅约占10%左右。限于尚存的不确定性与复杂性,IPCC第六次评估报告尚未将水库 CO_2 、 CH_4 排放作为人为源(anthropogenic sources)予以单列,而仍将其归纳于自然源(natural sources)中进行全球碳循环的统合分析。2019年IPCC将水库温室气体排放作为“水淹地”(flooded land)的重要情形,纳入新修编的国家温室气体清单,指导世界各国开展温室气体核算。然而,作为对流域水循环直接干预的人类活动,水库发挥自身社会服务功能的同时,如何调节流域生源要素循环并反馈于流域生态系统?如何定量筑坝蓄水人类活动影响地球“水-碳”循环的程度?上述问题迄今依然需要更深入的探索与更丰富的证据。

三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程,具有巨大的综合效益。但三峡工程将改变长江部分水文情势,这一生态环境变化的关键诱因又会对库区、长江中下游及河口地区的生态、环境乃至社会经济等方面产生不同程度的影响^[13]。自2003年蓄水以来,受回水顶托、水位雍升影响,三峡水库生态系统总体呈现出由库尾“河相”(急流系统)向库首“湖相”(缓流系统)过渡的特征,“蓄清排浑”的季节性调度运行亦对库区干支流回水区段、消落带的生态系统结构、功能产生显著影响,改变了C、N、P的生物地球化学循环,也诱使三峡水库 CO_2 、 CH_4 等温室气体通量较蓄水前发生明显变化。如何科学认识和客观评估三峡水库修建及运行对 CO_2 、 CH_4 等温室气体通量的影响,成为了三峡工程生态环境影响的重要方面而备受关注^[9,10]。近年来,中国学者围绕三峡水库温室气体通量监测评估、影响因素分析与模拟预测等方面形成了颇为丰硕的成果^[14-19]。这些努力使得三峡水库成为近年来我国水库碳循环与碳通量研究的主要案例代表,为国际水库温室气体相关方法、模型或标准制定提供了有价值的研究支撑^[20-23]。

在前人研究基础上,本文拟梳理近年来三峡水库温室气体通量的研究成果,并结合作者所在团队前期积累与进展,尝试回答3个问题:1)三峡水库 CO_2 、 CH_4 排放水平如何?主要途径是什么?2)三峡水库修建及运行是否导致了 CO_2 、 CH_4 排放量的净增加?主要来自哪里?3)既有工作对进一步推进长江上游高坝大库湖沼学研究的启示是什么?未来研究方向有哪些?限于相关研究任务要求,本文聚焦于 CO_2 、 CH_4 通量,暂不涉及三峡水库 N_2O 通量变化与分析。

1 三峡水库 CO₂、CH₄ 通量监测分析研究的简要回顾

以 Web of Science(国际)、CNKI(国内)为检索引擎,对近年来三峡水库温室气体通量研究(涵盖 CO₂、CH₄或 N₂O)的文献报道进行了梳理(图 1)。在剔除新闻报道和部分不相关的期刊文献后,截至 2022 年 10 月,CNKI 中关于三峡水库温室气体通量的期刊文献共 48 篇,总被引 651 次。而 Web of Science 中,相关的期刊文献报道共 66 篇,总被引 1102 次。在中文论文中较早的报道来自于 2008 年长江科学院陈进教授《水库温室气体排放问题初探》一文^[24]。英文论文中较早的报道则来自于 2009 年 Tullos 对三峡工程环境影响评价对科学研究与决策影响的述评^[25];同年,Chen 等关于三峡水库新生消落带 CH₄ 通量的研究引起了广泛关注^[26]。

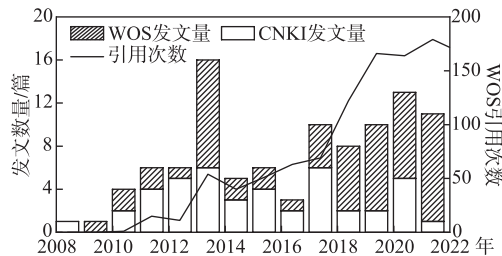


图 1 近年来三峡水库温室气体相关研究的发文与引用情况

Fig.1 Recent publications and citations of greenhouse gases with respect to Three Gorges Reservoir

在机构研究中,中国长江三峡集团有限公司(以下简称“三峡集团”)是我国较早关注并开展三峡水库温室气体通量监测分析的机构。近年来,在三峡集团的带领下,中国科学院空天信息创新研究院(原中国科学院遥感与数字地球研究所)、中国水利水电科学研究院、中国科学院水生生物研究所、中国科学院生态环境研究中心、三峡大学、长江水利委员会长江科学院、重庆大学、中国科学院重庆绿色智能技术研究院等单位先后开展了三峡水库温室气体通量监测研究。此外,中国科学院武汉植物园、上海大学、西南大学、中国科学院成都生物研究所等相关团队亦开展了相关工作。从当前所聚焦的议题上,大致可以分为:1) CO₂、CH₄ 浓度或通量监测方法构建;2) CO₂、CH₄ 浓度或通量影响因素分析;3) 温室气体效应评估 3 个主要议题。从文献报道的数量、被引次数上看,2009—2015 年前后是该方向关注热度迅速增加的时期(图 1)。但此后该方向研究关注热度略有下降并逐渐趋稳。近 5 年来,涉及三峡水库温室气体相关研究的中英文文献报道大致维持在每年 10 篇左右(图 1),中文论文呈现逐渐减少的趋势,而英文论文则显著增加(图 1),文献报道的重点也逐渐从温室气体通量监测与分析向碳循环的机理、过程或机制转变。部分研究成果被 IPCC 所直接引用,成为 2019 年 IPCC 国家温室气体清单水淹地章节精细化修编中的数据来源或重要参考,产生了一定的国际影响^[20-23]。

2 三峡水库 CO₂、CH₄ 通量监测与基本认识

2.1 现阶段三峡水库 CO₂、CH₄ 通量与主要排放途径

水库中 CO₂、CH₄ 产汇变化同水体碳循环密切相关,其主要地球化学过程见图 2。其中,水库 CO₂、CH₄ 同大气间交换的主要途径包括(图 2):1) 水—气界面扩散交换;2) 易在近岸浅水区域形成的气泡释放;3) 过坝下泄消气释放;4) 消落带土壤、植被同大气之间的交换等。

受地形地貌特征限制,三峡水库属典型的河道峡谷型水库。当坝前正常蓄水水位为 175 m 时,三峡水库二十年一遇(上游来水流量为 72300 m³/s)回水水库面积 1084 km²,其中淹没陆域面积 632 km²。在正常蓄水水位为 175 m 的枯水期,三峡水库平均水面宽度为 986 m,平均水深为 48.6 m,坝前水深为 160~170 m,回水区长度约 655 km,末端位于重庆市江津区境内。同天然河道相比,正常蓄水水位条件下水库坝前水位抬高超过 100 m,水库长宽比约 650:1,库区最大水面宽约为 3411 m,最小水面宽度仅为 279 m,断面宽窄相

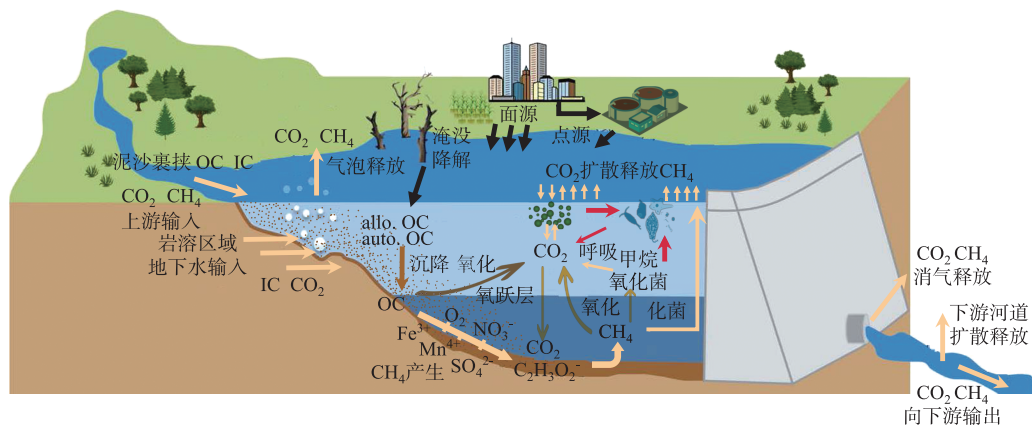


图2 水库 CO₂、CH₄迁移转化主要过程(OC表示有机碳(Organic Carbon), auto. OC表示自源性有机碳(autochthonous OC), allo. OC表示异源性有机碳(allochthonous OC); 本图在文献[27]底图基础上修改)

Fig.2 The fate and transport of CO₂ and CH₄ in reservoir (OC: Organic Carbon, auto. OC: autochthonous OC, allo.OC: allochthonous OC, modified based on reference[27])

差 11 倍,整体上水库蓄水后依然保持其河道峡谷型的形态特征。

在国家“973”项目支持下,三峡集团组织国内相关科研团队于 2010—2011 年(库龄 R=1)组织了第 1 次大面采样,涵盖水库、消落带及坝下河段(三峡大坝坝下至葛洲坝,图 3)。后经采样方案优化,于 2015—2017 年(库龄 R=5~6)开展了第 2 阶段的大面采样工作(图 3)。在第 2 阶段的工作期间,同步开展了针对局部库湾浅水区域气泡通量、过坝下泄释放通量的探索,形成了较为完整的温室气体通量监测数据序列,满足了对三峡水库现阶段温室气体总排放量的评估^[10]。在有限的数据库基础上,结合水库温室气体排放特征、水库调度运行特点与环境影响因素,作者团队提出了水下地形划分法和环境因素控制法^[28],结合相关团队的遥感影像资料分析^[29],将各采样点所获得的瞬时观测值较为合理地外推至整个三峡水库回水区,实现了对三峡水库温室气体总排放量的估算。

综合近年来的分析结果^[30],现阶段三峡水库 CO₂、CH₄总排放量约为(298~415) GgC/a(CO₂+CH₄),平均约为 360 GgC/a(图 4)。按 CH₄的全球增温潜势为 CO₂的 25 倍计算,三峡水库年碳排放量约为 131.3 万 t CO_{2e}(约为 109.0 万~151.9 万 t CO_{2e})^[30]。水—气界面扩散释放是三峡水库 CO₂、CH₄的首要排放途径。以扩散形式产生的干流 CO₂排放量约占水库 CO₂总排放量的 61%±9%,干流 CH₄约占 55%±12%。支流产生的 CO₂扩散排放约占水库 CO₂总排放量的 13%±3%,支流 CH₄则约占 28%±14%(图 4)。三峡水库夏季水位消落期间,消落带土—气界面 CO₂、CH₄排放量约占水库总排放量的 12%±2%、12%±7%。而水库局部近岸浅水区域的气泡释放、过坝消气及坝下河段的释放等,并未呈现出显著的高排放特征。经由气泡释放途径所形成的 CH₄排放总量约占水库总排放量的 1.6%±0.2%,CO₂所占比重小于 1%。过坝消气及坝下河段(三峡坝下至葛洲坝区间河段)所形成的 CO₂总排放量约占水库总排放量的 13%±9%,CH₄所占比重约为 3%±1%(图 4)。

根据目前已掌握的观测数据,以水—气界面扩散通量为例,同已公开报道的国际水库案例相比^[12, 31],三峡水库水—气界面 CH₄扩散通量中位值(约为 0.16 mmol/(m²·d))在国际案例的百分位数约为 8.1%,CO₂扩散通量中位值(约为 32.9 mmol/(m²·d))的百分位数约为 70%(图 5)。总体上,三峡水库水—气界面 CO₂、CH₄通量水平并未呈现出此前国际报道中所关切的“高排放”现象,更不是全球 CH₄排放的重要“威胁”(menace)。另一方面,三峡水库干流水面面积年平均值约为 600 km²,约占整个水库总水面面积的 70%以上。冬季高水位期间,干流水面面积可达到 750~770 km²,夏季低水位运行面积在 490~530 km²之间。因此,相对较大的干流水面面积是导致三峡水库干流水—气界面扩散通量成为其主要排放途径的原因。

现阶段针对三峡水库气泡释放量和过坝消气释放量的估测结果仍具有一定的不确定性。尽管支流或

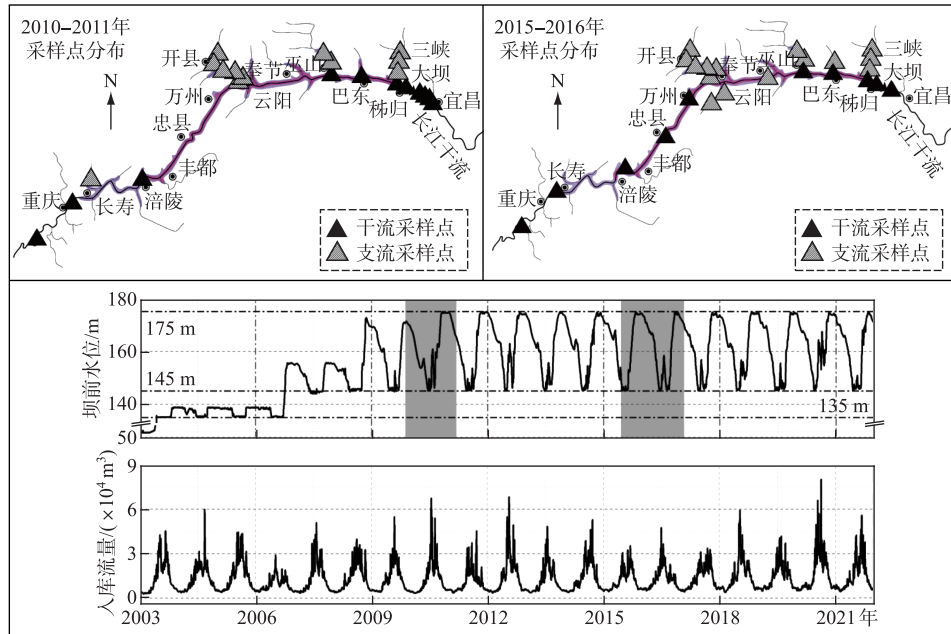


图3 三峡水库 CO₂、CH₄ 通量监测点位分布与采样期间(阴影部分)坝前水位、入库流量信息
Fig.3 CO₂, CH₄ field sampling sites and the hydrological condition of Three Gorges Reservoir

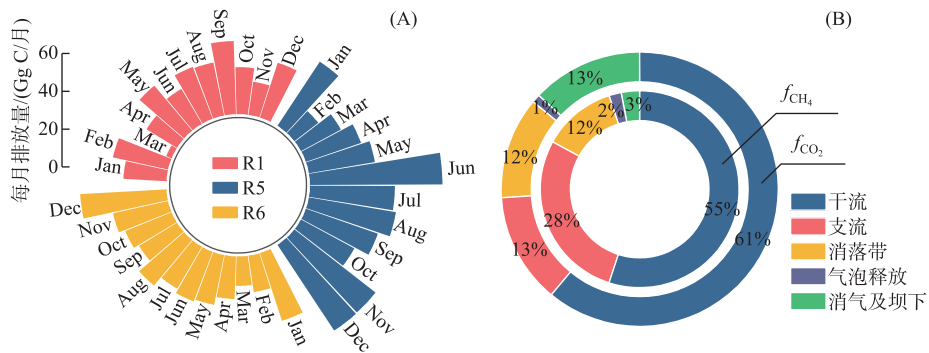


图4 三峡水库 CO₂、CH₄ 总排放量与各途径占比
(A 图为折算成 C 后 CO₂+CH₄ 的总排放量;R1 为 2010—2011 年期间监测结果;
R5、R6 为 2015—2017 年期间监测结果;B 图为各途径所占比重)

Fig.4 Total C emissions (A) and the proportion of each pathway (B) in Three Gorges Reservoir
(Total C emissions are converted from CO₂+CH₄, R1 is the result of 2010—2011,
R5, R6 are the results of 2015—2017)

局部浅水区域存在局部时段超量产生气泡的现象,局部水域(以支流澎溪河高阳平湖库湾为例)CH₄气泡释放强度最高可达 22.4 mmol/(m²·d),约是同期水—气界面 CH₄扩散通量的数十倍甚至数百倍^[32]。但是,受整个水库地形特征的影响,三峡水库气泡释放仅易出现在干支流部分库湾或浅水水域。以水深不超过 10 m 的近岸浅水水域作为气泡产生主要区域予以初步估算,能够形成气泡的水域面积年平均约为 64 km²。5—9 月是近岸浅水水域气泡产生的主要时段,据此推算现阶段气泡所形成的 CH₄排放量约为 (22±2) MgC/a。此外,受限于监测手段、监测频次的影响,关于过坝消气释放通量的估测,目前仍存在难题,仅能针对发电过程

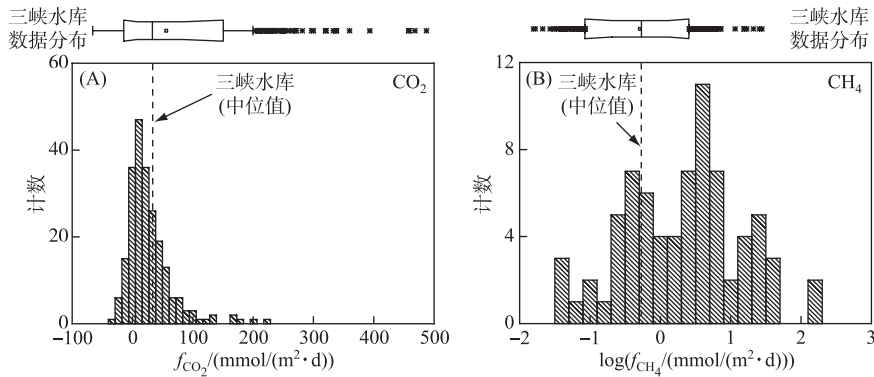


图5 全球水库 CO₂、CH₄通量频次分布与三峡水库相关数据的分布情况

Fig.5 Histogram of CO₂, CH₄ fluxes of global reservoir datasets and Three Gorges Reservoir

开展观测与估算,尚不能够对泄洪期间的消气释放通量进行实测^[33]。从近年来观测数据分析,由于三峡水库坝前并未呈现出明显的温度分层现象,且目前坝前尚未发现有低氧区(hypoxia; DO ≤ 4 mg/L)^[34]。故推测因过坝消气所形成的 CO₂、CH₄释放通量在大概率上并不强烈。

大坝下游河段的温室气体排放是衡量筑坝蓄水对河流碳循环影响的重要内容之一。既有共识是大坝下游河道 CO₂、CH₄等的水—气界面排放通量普遍高于成库前的自然河道状态,并受季节和下泄流量影响。Petit Saut、Balbina 等水库下游水—气界面 CO₂释放通量约为水库 CO₂总释放通量的 7%~25%,下游水—气界面 CH₄释放通量在水库 CH₄总释放通量中所占比重约为 10%~30%^[35-36]。一些研究认为大坝下游河段受影响的范围可达 30~60 km 或更长^[35, 37]。国内新安江水库^[38]、猫跳河梯级水库^[39]等亦有相关报道,认为坝下河道 CO₂、CH₄排放通量存在显著升高的情况。在针对三峡水库 CO₂、CH₄通量监测工作中,作者所在团队主要以三峡大坝至葛洲坝之间的 32 km 河段为主要研究区段开展持续监测。近期,倪晋仁院士团队将研究工作拓展到了葛洲坝下游至长江河口的全河段,估算认为三峡大坝以下河段温室气体通量受影响的范围(offset distance) CO₂为 766~819 km,而 CH₄则约为 124~180 km^[40]。在上述范围内所形成的 CO₂、CH₄通量排放的增量,仍有待进一步评估与分析。

2.2 影响三峡水库 CO₂、CH₄通量变化的重要因素或过程

水—气界面 CO₂、CH₄通量是水体碳循环的重要环节(图 2)。作为描述两相界面的环境变量,水—气界面 CO₂、CH₄通量变化,不仅受到水—气界面两相之间 CO₂、CH₄气体浓度或分压的影响,也同两相界面之间的扩散交换程度有关。对短时间尺度而言,两相间的物理传质过程(水—气界面紊动程度、传质系数等)对水—气界面的影响更为显著^[41];但对较长的时间尺度(如逐月或年际变化)而言,水生态系统的变化是决定水—气界面 CO₂、CH₄通量的关键。基于上述认识,选择了水文与主要水环境要素,构建了三峡水库干支流水—气界面 CO₂、CH₄通量的结构方程模型(图 6)。干流区段 CO₂、CH₄通量主要受到水文径流条件变化影响。而在水体滞留时间较长的支流区段 CO₂、CH₄通量更易受到藻类生物量变化(叶绿素 *a*)的影响。结合 C、N 等稳定同位素的分析结果^[34],三峡水库中段(忠县至万州区段)呈现出有陆源有机碳向自源有机碳过渡的趋势(图 7),而在支流回水区则受水体富营养化或水华过程的干扰,自源性有机碳通常是水生态系统主要的有机碳源。

3 三峡水库修建及运行对 CO₂、CH₄的影响评估分析

水库修建及运行对河流碳循环或碳通量产生的影响,可归纳为四个方面效应(图 2)^[9]: 1) 淹没: 筑坝蓄水将淹没一定面积陆地,迫使淹没区土壤、植被等有机质逐渐溶出、降解,产生温室气体排放入大气; 2) 阻隔: 大坝拦截阻碍了有机碳(OC)向下游输送,一部分 OC 降解形成 CO₂、CH₄等释放入大气,另一部分 OC 则随泥沙淤积埋藏于库底; 3) 重建: 水库水体更新周期延长,促进了藻类等初级生产者的生长,推动了水生生

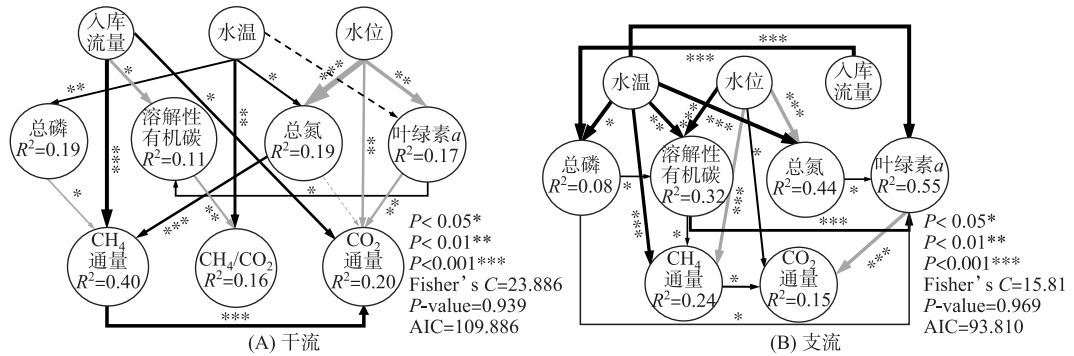


图 6 三峡水库 CO₂、CH₄ 通量与水文、主要水环境要素的结构方程模型

(黑色路径代表正效应,灰色路径代表负效应;
虚线代表路径效应不显著,路径宽度代表影响强度)

Fig.6 The relative contributions of environment factors on CO₂, CH₄ fluxes in Three Gorges Reservoir (Black and grey paths represented positive and negative effects respectively. Dashed paths represented the insignificant effects. The width of each path represented the strengths of the effect)

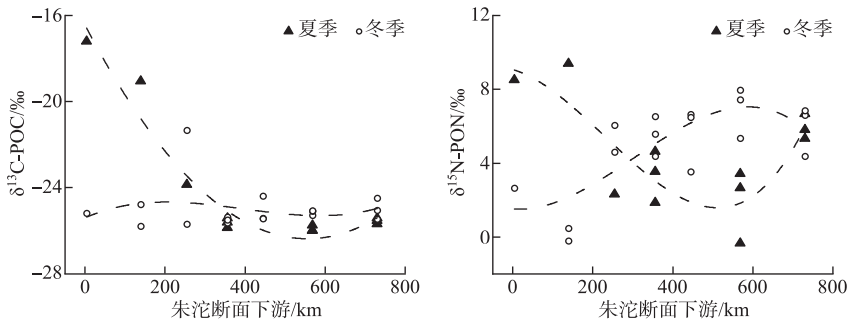


图 7 三峡水库沉降捕集物 δ¹³C-POC 与 δ¹⁵N-PON 的纵向沿程分布^[34]

Fig.7 Longitudinal gradients of δ¹³C-POC and δ¹⁵N-PON of trapped sediments in the Three Gorges Reservoir^[34]

态系统逐步由“河流型”异养体系向“湖泊型”的自养体系发育并完善,改变了碳循环与碳通量;4) 消纳:水库修建及运行将影响其流域及库区人类活动,改变入库点源或面源污染负荷,影响温室气体排放。

如何科学客观评估水库修建及运行对河流碳循环的影响,一直以来备受关注。有观点认为,大坝阻隔实现了对“陆—海”碳输送的人工拦截,促进了陆地碳埋藏,减少了陆地碳向近海的输入,故某种意义上仅呈现为“碳转移”^[42-43]。以 Cole 等提出的“淡水管道”为代表,学界拓展了对筑坝蓄水温室气体效应的科学认识^[44]。近年来,Prarie 教授等联合国际上的相关专家,强调了衡量水库修建及运行对气候变暖的影响应建立在“大气感受到了什么”基础上^[27],并据此引导了 IPCC 2019 年国家温室气体清单水淹地章节的精细化修编^[45]。最近倪晋仁院士团队认为三峡工程建设及运行在水库区段形成了温室气体的净增加,而在全流域的空间尺度下则导致了长江温室气体通量的净降低^[40]。尽管既有共识是筑坝蓄水将导致水库区段 CO₂、CH₄ 等温室气体的净增加,但净增加的主要途径或来源是什么? 迄今仍未能有充分回答^[46-47]。

IPCC 于 2011 年首次官方提出了水库温室气体净排放量的概念^[9, 48],认为水库温室气体净排放量等于蓄水后水库温室气体排放量 (Post-impoundment GHG emissions, 简称为“Post”),同蓄水前的温室气体排放量 (Pre-impoundment GHG emissions, 简称为“Pre”)和其他人类活动对水库温室气体排放变化的贡献量 (Unre-

lated Anthropogenic Sources, 简称为“UAS”)的差值。但在对三峡水库开展的净排放量评估中尚存在2个技术难点:1)蓄水前淹没区土地利用情况与碳通量实测数据缺失;2)蓄水前后库区点面源污染对水库(或自然河段)CO₂、CH₄通量影响不确定。针对上述问题,作者团队通过蓄水前库底清理的技术资料分析,应用IPCC土地利用变化第一层级核算方法,实现了对蓄水前淹没区资料缺测下的碳排放量估算;以1998年为基准年,改进了DHI MIKE21+Ecolab水动力-水质耦合模型,实现了对自然河道CO₂、CH₄通量的模拟^[49]。相关工作获得了三峡水库蓄水前淹没区域与自然河道CO₂、CH₄排放量约为74.3 GgC/a(以C计,CO₂+CH₄)或约为3.2 × 10⁵ t CO_{2e}/a,其中约74%来自淹没区,26%来自自然河道水面^[10, 49]。以前述三峡水库CO₂、CH₄总排放量(以C为计)为参考,三峡水库CO₂、CH₄的净排放量约为285.7 GgC/a,蓄水前的排放量约占总排放量的21%^[10]。

结合不同污染负荷的情景分析,对三峡水库CO₂、CH₄净排放量评估结果更深入解读^[30]:1)相比较于三峡水库上游流域(长江干流——朱沱以上;嘉陵江——北碚以上;乌江——武隆以上),库区范围内点面源污染负荷输入并未能够显著地影响三峡水库CO₂排放。在“零情景”下(即在模型中假定库区范围内污染负荷为零),三峡水库蓄水后(2015年负荷水平)形成的CO₂排放量增量约为17%,未蓄水的自然河流状态下形成的CO₂排放量增量约为15%(图7)。由于三峡库区总面积仅约占其控制流域面积的7%,故在径流条件相同的情况下,上游输入有机碳是三峡水库CO₂排放的主要贡献源;2)以1998年蓄水前状态作为基准年,2015年作为蓄水后的参考年,对库区主要断面的C年度收支分析表明,仅有约20%的净排放量(334 Gg C; CO₂+CH₄, 扩散通量)来自于淹没形成的C溶出(图8)。库区点面源负荷增量对净排放量贡献仅约为0.9%;因两个年份水文径流条件存在显著区别,输入、输出间差异对净排放量增加的贡献约为48.5%(图8)。除上述3部分外,C的净排放量中仍约有30%尚无法通过宏观收支的变化直接解释,推测可能主要来源包括阻隔效应(碳埋藏)与生态系统重建(含消落带等)。

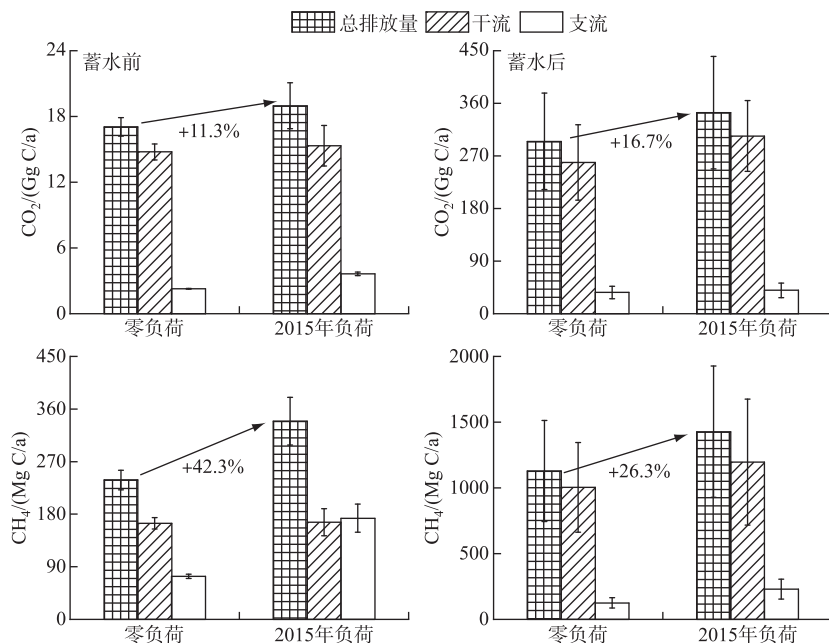


图8 三峡水库蓄水前、蓄水后不同污染负荷情境下的CO₂、CH₄排放量估算结果

Fig.8 Pre- and Post-impoundment CO₂, CH₄ emissions in the Three Gorges Reservoir under different pollution load scenarios

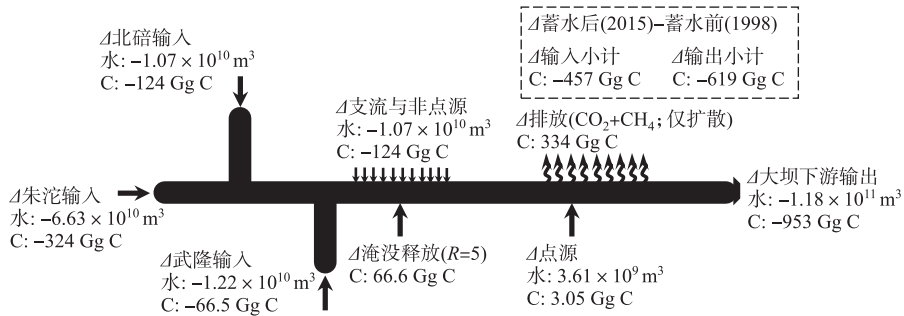


图9 蓄水前(1998)、蓄水后(2015)三峡水库 C 收支变化情况(翻译修改自文献[30])

Fig.9 Pre- and Post-impoundment C budget in the Three Gorges Reservoir
(Modified and translated from reference[30])

4 三峡水库 CO₂、CH₄ 通量监测分析研究的主要经验与局限性

回顾过去 10 年的研究,随着从 CO₂、CH₄通量监测分析到水库碳循环过程与机制的深入,在我国学者的努力下,已逐步形成了以三峡水库为主要区域、以我国西南高坝大库为特色的水库碳循环与碳通量研究方向。有别于在加拿大、巴西、美国等地区开展的相关研究,当前围绕三峡水库碳通量监测与碳循环探索形成了以下两个方面的研究经验与局限性:

4.1 大型水库温室气体通量监测体系构建、优化

作为超大的河道峡谷型水库,三峡水库温室气体通量监测工作涉及水域面积近 1000 km²,涵盖了干支流回水区、消落带等不同景观单元,监测水域水深范围从数米到百余米,生态环境要素时空异质性显著,加之不同排放途径温室气体通量监测手段、方法仍存在显著区别,给构建或优化其温室气体通量监测体系带来了挑战。在监测点位优化比选上(图 2),第二期监测任务设计中(2015—2017 年),充分考虑了干流在库中段与库尾监测点位布设需要,也同步选择了长江右岸支流(磨刀溪)作为左岸支流的代表。考虑到不同监测方法可能产生的差异,2012 年中国科学院空天信息创新研究院吴炳方研究员组织了国内外相关团队在三峡库区组织开展了同一水域不同监测方法的比较分析^[23]。在此后的监测实践中逐步形成了以浮箱法为主要手段、薄边界层模型估算法为辅助手段的水—气界面扩散通量监测技术,也形成了以遥感影像解析、地统计学插值等为主要途径的大面估算方案,凝练提出的我国首部《水库温室气体通量监测技术导则》亦于 2021 年正式颁布施行^[50]。近年来,新技术、新方法的创新也为我国在该领域的国际学术影响力提供了重要的支撑^[14-15]。

然而,当前以“自下而上”(bottom-up)逻辑建立起来的水库温室气体监测与总排放量估算方法,仍存在一定的不确定性。一方面,三峡水库顺直河道与高山深谷的地形条件和多云多雨的气象特征,在一定程度上限制了大尺度区域温室气体通量监测方法的应用。缺乏“自上而下”(top down)的水库区域温室气体排放量估算方法,制约了对当前水库温室气体监测与总排放量估算的校核。另一方面,复杂水文水动力条件对气液两相传质的影响不应被忽略。当前,现场监测中浮箱法所获得的数据与薄边界层方法估算的通量数据仍存在较大差别(数倍或数十倍),特别是在流速较大的水域。这是当前不确定性的主要来源。尽管近年来对传质系数的认识程度逐渐提升,有不少学者也提出了适用于三峡水库的传质系数(k_{600})^[41,51],但针对一些更为复杂的问题(如过坝下泄消气、过水轮机等)、气泡释放等仍需要在气液传质机理上开展更深入的探索。

4.2 复杂水文水动力条件下 CH₄产汇的水文生态机制与长期趋势预测

在水库温室气体核算中,既有的共识是 CH₄排放量是衡量水库长期气候效应的重点^[45],掌握水库 CH₄长期排放趋势是实现水库生命周期碳核算的关键。作为典型的河道型水库,三峡水库年平均水力停留时间约为 26~32 天,呈现出较好的混合特征,水体复氧程度较高,坝前并未出现显著的温度分层和溶解氧分层,故三峡水库 CH₄排放的总体水平同南美热带水库相比是极小的(图 4),且在 C 的总排放量中 CH₄所占比重仅约为 4%,即便是考虑了 CH₄的增温潜势(25 倍于 CO₂),在 CO_{2e}总排放量中 CH₄所占比重也仅约为 3.4%。

大体上,陆源输入的 POC 是驱动三峡水库 CH_4 产生的重要来源,但 CH_4 通量出现极值的情况多与支流库湾富营养化和水华现象相关^[52]。自源性 POC 等对水库 CH_4 排放的贡献不可忽视,且随着水库营养程度的逐渐升高可能呈现持续增加的趋势。优化氮磷营养物管理,减缓水库富营养化趋势是实现“减污降碳”的重要抓手。另一方面,从模型情景分析可以看出(图 8),相比较于蓄水前自然河道状态,水库修建在一定程度上减少了因污染负荷增加而导致的 CH_4 排放的增量。在上游向家坝水库 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 稳定同位素的分析也支撑了存在高坝大库因水深增加、促进 CH_4 氧化而减少 CH_4 排放的机制^[53]。但是,水库调度运行如何影响高坝大库 CH_4 产汇? 复杂水文环境下 OC 的迁移转化究竟是促进了 CH_4 的氧化? 还是减少了 CH_4 的产生? 目前尚难以准确回答。尽管径流变化与调节是预测水库 CH_4 浓度及通量变化长期趋势的重要变量^[34],但当前关于径流变化与调节对水库 CH_4 产汇过程的影响仍存在诸多科学盲区,这限制了对全球或区域尺度水库 CH_4 排放量的科学预测,也阻碍了 IPCC 国家温室气体清单方法学“水淹地”章节的下一阶段完善与补充。

5 未来的工作展望

三峡水库是我国最大的水库,自 2003 年开始蓄水至今已经近 20 年。作为具有代表性的重要案例,三峡水库碳通量的监测分析工作在一定程度上形成了具有代表性的重要案例,推进了我国在水库碳循环与碳通量方面的研究。但在监测方法、监测技术与碳循环机制等方面仍存在不确定性,这也为后续更深入的探索和创新提供了新要求。未来更深入的研究可能包括以下几个方面:

5.1 充分考虑时空异质性而导致的碳循环机制与碳通量强度差异

作为长江上游典型的河道型水库,三峡水库存在高度的时空异质性。库区在自然地理特征、地球化学背景、土地利用方式与人类活动强度等方面具有十分显著时空差异,而水库“蓄清排浑”的调度运行方式,更迫使其水生态环境在不同时段、不同区段也呈现出迥异的特征。尽管水库碳循环的基本过程或其原理同大多数自然水体并无显著的差异,但上述时空异质性不仅改变了三峡水库碳的来源、归趋与分布特征,也潜在地调节了水库生态系统对不同碳源的消纳利用方式与循环过程,碳通量强度也因此存在较大的变化。一些关键的碳循环过程尚待进一步深入探索,例如,三峡水库碳埋藏的分布及其变化特征、降雨与径流过程对碳循环的影响与碳通量的变化、库区生态系统重建(如部分支流水体富营养化、消落带植被恢复等)对水库碳循环的贡献程度与影响机制等。

5.2 发展新型监测技术创新促进对大型水库碳通量的准确核算

极显著的时空异质性开展三峡水库 CO_2 、 CH_4 通量观测与估算的难点,但依然是未来实现学科创新的重要突破口,更是发展不同监测方法、验证不同监测技术的重要试验场。围绕水-气界面(扩散通量、气泡释放通量)、消落带土壤-大气界面交换等,依然需要持续的监测技术创新以支撑对大型水库碳通量的准确核算。近年来,三峡大学肖尚斌教授等开发了快速响应的自动气体平衡装置(FaRAGE)^[54],配合自动气体记录仪能够实现水中溶解性气体浓度的自动监测。围绕动水条件下水库水-气界面传质(k_{600})、沉降物捕集等问题,笔者所在团队也进行了新的尝试与探索^[34, 41]。上述工作为更好地开展我国长江上游高坝大库的碳通量监测提供了经验参考。

5.3 强化数学模型应用以提升对人工-自然耦合系统的科学认识

三峡水库是典型的、具有高度时空异质性的人工-自然耦合系统。因服务于防洪、发电等功能,三峡水库典型的“蓄清排浑”调度运行模式创造了复杂的水文水动力条件,不同程度影响了三峡水库的碳循环和碳通量。实现三峡水库温室气体排放量的长期趋势预测是三峡水库碳循环与碳通量研究的出口,也是支撑行业需求、推进碳管理的关键。然而,当前的工作并未能有充分的科学证据链和创新的方法学以厘清三峡水库 CO_2 、 CH_4 通量中人工干预和自然响应之间的耦合关系。如何定量水库人工属性和自然过程对碳通量与碳排放的影响,是未来的研究方向。这不仅依赖于对 CO_2 、 CH_4 等温室气体产汇过程更精准、更清晰的认识,还需要在建模技术与方法上实现突破,更简单、更易被使用的生命周期三峡水库温室气体排放长期趋势预测模型也将是未来值得持续探索的方向。

6 参考文献

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2021. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.

- [2] IHA. London, UK: International Hydropower Association, 2021.
- [3] Ostrofsky ML, Duthie HC. Trophic upsurge and the relationship between phytoplankton biomass and productivity in Smallwood Reservoir, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 1980, **58**(10): 1174-1180. DOI: 10.1139/b80-146.
- [4] Grimard Y, Jones HG. Trophic upsurge in new reservoirs: A model for total phosphorus concentrations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, **39**(11): 1473-1483. DOI: 10.1139/f82-199.
- [5] Godshalk GL, Barko JW. Vegetative succession and decomposition in reservoirs. *Microbial Processes in Reservoirs*, 1985: 59-77. DOI: 10.1007/978-94-009-5514-1_4.
- [6] Gunnison D. Microbial processes in reservoirs. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985. DOI: 10.1007/978-94-009-5514-1.
- [7] Rudd JWM, Harris R, Kelly CA *et al.* Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases. *Ambio*, 1993, **22**(4): 246-248.
- [8] Oud E. Global warming: a changing climate for hydro. *International Water Power & Dam Construction*, 1993, **45**(5): 20-23.
- [9] Li Z, Wang DC. From reservoir greenhouse gas emissions to hydropower carbon footprint: Methodology and advances. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, **53**(2): 139-153. [李哲, 王殿常. 从水库温室气体研究到水电碳足迹评价: 方法及进展. 水利学报, 2022, **53**(2): 139-153.]
- [10] Sun ZY, Chen YB, Li C *et al.* Research of reservoir greenhouse gas emissions in China(2009-2019): Review and outlook. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(3): 253-267. [孙志禹, 陈永柏, 李翀等. 中国水库温室气体研究(2009-2019): 回顾与展望. 水利学报, 2020, **51**(3): 253-267.]
- [11] IPCC. Chapter 2 Changing state of the climate system. In: Climate Change 2021: The physical science basic. IPCC, 2021.
- [12] 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.
- [13] 黄真理, 吴炳方, 敖良桂. 三峡工程生态与环境监测系统研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] Guo XJ, Liu J, Liu D *et al.* Density currents reduce nitrous oxide emissions in a tributary bay of Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2021, **190**: 116750. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116750.
- [15] Liu J, Xiao S, Wang C *et al.* Spatial and temporal variability of dissolved methane concentrations and diffusive emissions in the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2021, **207**: 117788. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117788.
- [16] Xiao SB, Liu DF, Wang YC *et al.* Temporal variation of methane flux from the Three Gorges Reservoir. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 2500. DOI: 10.1038/srep02500.
- [17] Li S, Wang FS, Luo WY *et al.* Carbon dioxide emissions from the Three Gorges Reservoir, China. *Acta Geochimica*, 2017, **36**(4): 645-657. DOI: 10.1007/s11631-017-0154-6.
- [18] Ma YM. Spatial and temporal comparisons of dissolved organic matter in river systems of the Three Gorges Reservoir region using fluorescence and UV-Visible spectroscopy. *Environmental Research*, 2020, **189**: 109925. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109925.
- [19] Li SY. Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs. *Water Research*, 2018, **147**: 13-24. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.053.
- [20] Zhao Y, Wu BF, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China. *Biogeosciences*, 2013, **10**(2): 1219-1230. DOI: 10.5194/bg-10-1219-2013.
- [21] Li Z, Zhang ZY, Xiao Y *et al.* Spatio-temporal variations of carbon dioxide and its gross emission regulated by artificial operation in a typical hydropower reservoir in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(5): 3023-3039. DOI: 10.1007/s10661-013-3598-0.
- [22] Lu F. Preliminary report on methane emissions from the Three Gorges Reservoir in the summer drainage period. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(12): 2029-2033. DOI: 10.1016/S1001-0742(10)60668-7.
- [23] Zhao Y, Sherman B, Ford P *et al.* A comparison of methods for the measurement of CO₂ and CH₄ emissions from surface water reservoirs: Results from an international workshop held at Three Gorges Dam, June 2012. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2015, **13**(1): 15-29. DOI: 10.1002/lom3.10003.
- [24] Chen J, Huang W. Problem on greenhouse gas emissions of reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, **25**(6): 1-5. [陈进, 黄薇. 水库温室气体排放问题初探. 长江科学院院报, 2008, **25**(6): 1-5.]
- [25] Tullis D. Assessing the influence of environmental impact assessments on science and policy: An analysis of the Three Gorges Project. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**: S208-S223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.07.031.
- [26] Chen H, Wu YY, Yuan XZ *et al.* Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, **114**(D18): D18301. DOI: 10.1029/2009jd012410.
- [27] Prairie YT, Alm J, Beaulieu J *et al.* Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: What does the atmosphere see? *Ecosystems: New York*, 2018, **21**(5): 1058-1071. DOI: 10.1007/s10021-017-0198-9.
- [28] Li Z, Bai L, Jiang T *et al.* Estimation on annual water-air CO₂ and CH₄ fluxes in Pengxi River, Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2013, **24**(4): 551-559. [李哲, 白镭, 蒋滔等. 三峡澎溪河水域 CO₂与 CH₄年总通量估算. 水科学进展, 2013, **24**(4): 551-559.]
- [29] Wang ZH, Du QY, Zhao DZ. Study on spatiotemporal characteristics of CO₂ emission and effects of environmental factors in Shuibuya reser-

- voir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(2): 146-151. [汪朝辉, 杜清运, 赵登忠. 水布垭水库 CO₂ 排放通量时空特征及其与环境因子的响应研究. 水力发电学报, 2012, **31**(2): 146-151.]
- [30] Li Z, Sun ZY, Chen YB *et al.* The net GHG emissions of the Three Gorges Reservoir in China: II. Post-impoundment GHG inventories and full-scale synthesis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **277**: 123961. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123961.
- [31] Barros N, Cole JJ, Tranvik LJ *et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(9): 593-596. DOI: 10.1038/ngeo1211.
- [32] Li Z, Zhang C, Liu L *et al.* Ebullition fluxes of CO₂ and CH₄ in Pengxi River, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 789-798. DOI:10.18307/2014.0518. [李哲, 张呈, 刘靛等. 三峡水库澎溪河 CO₂、CH₄ 气泡释放通量初探. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 789-798.]
- [33] Huang JP, Ou YM, Li R *et al.* Greenhouse gas emission rate under discharge condition by numerical simulation. *J Lake Sci*, 2022, **34**(2): 664-674. DOI:10.18307/2022.0225. [黄菊萍, 欧洋铭, 李然等. 过坝下泄水流中温室气体排放速率的数值模拟. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 664-674.]
- [34] Li Z, Lu LH, Lv PY *et al.* Imbalanced stoichiometric reservoir sedimentation regulates methane accumulation in China's Three Gorges reservoir. *Water Resources Research*, 2020, **56**(9). DOI: 10.1029/2019wr026447.
- [35] Guérin F, Abril G, Richard S *et al.* Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(21): L21407. DOI: 10.1029/2006gl027929.
- [36] Guérin F, Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, **112**(G3). DOI: 10.1029/2006jg000393.
- [37] Abril G, Guérin F, Richard S *et al.* Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(4). DOI: 10.1029/2005gb002457.
- [38] Wang FS. Seasonal variation of CO₂ diffusion flux from a large subtropical reservoir in East China. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 129-137. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.12.042.
- [39] Wang FS, Wang B, 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.
- [40] Ni JR, Wang HZ, Ma T *et al.* Three Gorges Dam: Friend or foe of riverine greenhouse gases? *National Science Review*, 2022, **9**(6): nwac013. DOI: 10.1093/nsr/nwac013.
- [41] Huang JP, Zhao WY, Li Z *et al.* Estimation of CO₂ emission in reservoir coupling floating chamber and thin boundary layer methods. *Science of the Total Environment*, 2022, **811**: 151438. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151438.
- [42] Maavara T, Lauerwald R, Regnier P *et al.* Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. *Nature Communications*, 2017, **8**: 15347. DOI: 10.1038/ncomms15347.
- [43] Zuijgeest A, Wehrli B. Carbon and nutrient fluxes from floodplains and reservoirs in the Zambezi Basin. *Chemical Geology*, 2017, **467**: 1-11. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.07.025.
- [44] Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF *et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8.
- [45] IPCC. Chapter 7 Wetlands. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, 2019.
- [46] Soued C, Harrison JA, Mercier-Blais S *et al.* Reservoir CO₂ and CH₄ emissions and their climate impact over the period 1900–2060. *Nature Geoscience*, 2022, **15**(9): 700-705. DOI: 10.1038/s41561-022-01004-2.
- [47] Keller PS, Marcé R, Obrador B *et al.* Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(6): 402-408. DOI: 10.1038/s41561-021-00734-z.
- [48] Kumar A, Schei T, Ahenkorah A *et al.* Hydropower. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y *et al.* eds. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge, United Kingdom and New York, USA; Cambridge University Press, 2011.
- [49] Li Z. The net GHG emissions of the China Three Gorges Reservoir; I. Pre-impoundment GHG inventories and carbon balance. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **256**: 120635. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120635.
- [50] 中国长江三峡集团有限公司. 水库温室气体通量监测技术导则. 武汉: 中国长江三峡集团有限公司, 2021.
- [51] Li SY. CO₂ oversaturation and degassing using Chambers and a new gas transfer velocity model from the Three Gorges Reservoir surface. *Science of the Total Environment*, 2018, **640/641**: 908-920. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.345.
- [52] Huang Y, Yasarer LMW, Li Z *et al.* Air-water CO₂ and CH₄ fluxes along a river-reservoir continuum: Case study in the Pengxi River, a tributary of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189**(5): 223. DOI: 10.1007/s10661-017-5926-2.
- [53] Zhang YY, Su Y, Li Z *et al.* Terrigenous organic carbon drives methane dynamics in cascade reservoirs in the Upper Yangtze China. *Water Research*, 2022, **219**: 118546. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118546.
- [54] Xiao SB, Liu L, Wang W *et al.* A Fast-Response Automated Gas Equilibrator (FaRAGE) for continuous *in situ* measurement of CH₄ and CO₂ dissolved in water. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, **24**(7): 3871-3880. DOI: 10.5194/hess-24-3871-2020.