

三峡水库支流甲烷排放研究进展*

毛羽丰^{1,2,3}, 何蕊序¹, 李宏³, 杨胜发^{1,2}, 余薇薇², 叶开来¹, 林彤³, 白小霞³, 何强^{3**}

(1: 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

(2: 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

(3: 重庆大学, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 甲烷(CH₄)对全球温室效应有着较大的贡献。三峡水库自2003年蓄水以来,其CH₄排放问题已受到广泛关注。但三峡水库反季节的运行方式,使支流库湾CH₄的产生和传输过程受到多方面的影响,进而导致其CH₄排放效应尚不十分明确。本文综述了三峡水库支流CH₄排放的研究进展,典型支流的CH₄排放通量普遍高于干流,位于三峡水库库尾的部分支流CH₄排放通量高于三峡水库库首及库中支流。大多数典型支流的CH₄通量在夏季均达到全年峰值,而在冬季高水位运行期均处于相对较低的水平。同时本文主要从水环境条件、水动力条件、人类活动及气象条件4个方面阐述了三峡水库支流CH₄排放的影响因素。1)水环境条件:支流水华后藻类衰亡分解过程会驱动CH₄释放,且藻类的演替过程会加剧CH₄的产生;温度可以直接影响CH₄的生成速率和消耗速率,也能通过促进藻类的生长间接影响CH₄排放;支流相对较低的甲烷氧化菌丰度是其CH₄通量较高的原因之一。2)水动力条件:蓄水期CH₄主要以扩散的方式进行释放,支流较低的流速促进了悬浮物的沉积,上游沉积物中的CH₄含量高于下游;泄水期CH₄主要以冒泡的方式进行释放,下游沉积物中TOC急剧增加,但干流的入侵会削弱支流的温度分层,破坏藻类生长环境,间接影响CH₄通量。3)人类活动:农业耕作使支流水体中的营养物浓度增加,甲烷氧化菌的丰富度降低,细菌群落的营养相关代谢增强;建设用地扩大、支流筑坝增加抑制了有机物的传输,增加了水体中的产CH₄底物,促进了CH₄的产生。4)气象条件:降雨会携带更多营养物质进入支流,同时会增加水体浊度、破坏水体的温度分层,从而对CH₄的产生和传输过程造成影响。最后对未来的研究热点进行了展望,以期对三峡水库CH₄排放的控制和管理提供参考。

关键词: 三峡水库;支流;甲烷排放;水环境条件;水动力条件;人类活动;气象条件

Research progress on methane emissions from tributaries of the Three Gorges Reservoir*

Mao Yufeng^{1,2,3}, He Ruixu¹, Li Hong³, Yang Shengfa^{1,2}, Yu Weiwei², Ye Kailai¹, Lin Tong³, Bai Xiaoxia³ & He Qiang^{3**}

(1: National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China)

(3: Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: Methane (CH₄) has a large contribution to the global greenhouse effect. The CH₄ emission from the Three Gorges Reservoir has attracted considerable attention since its impoundment in 2003. However, the unique operation mode of the Three Gorges Reservoir affected the CH₄ emission and transport in its tributaries. However, the underlying mechanism of CH₄ emissions remains

* 2023-04-05 收稿;2023-07-04 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52270196, U20A20326, 52000018)、重庆市自然科学基金项目(cstc2020jcyj-msxmX0176)、重庆市教育委员会科学技术项目(KJQN202000745)、中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001)和水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2021B06)联合资助。

** 通信作者;E-mail: Hq0980@126.com。

unclear. This study reviewed the research progress of CH₄ emission from the tributaries of the Three Gorges Reservoir. The CH₄ fluxes of typical tributaries were generally higher than those of the main streams. The CH₄ emission flux of some tail tributaries of the Three Gorges Reservoir was higher than that of the head and tributaries. The CH₄ fluxes in most typical tributaries have peak values in summer, and relatively low values during high water operation in winter. The factors influencing CH₄ emission from these tributaries mainly included algae, climatic factors, hydrodynamic conditions and human activities. The future research hotspots were summarized. 1) Algae: The impoundment of the Three Gorges Reservoir has led to intensified algal blooms in some of its tributaries. The dominant species of phytoplankton gradually changed from river-type algae to lake-type algae in the early stage of water storage. This succession of phytoplankton would increase CH₄ production. In addition, the algal bloom in tributaries of the Three Gorges Reservoir, would undergo seasonal succession. Phytoplankton dominated by green algae and cyanobacteria has high contribution to CH₄ emission. 2) Climatic factors: The generation and consumption rate of tributary CH₄ were positively correlated with temperature. In general, higher temperature promote the growth of algae. However, the out-of-season scheduling mode of the Three Gorges Reservoir also enhances phytoplankton production in winter. The tributary temperature stratification would further aggravate algal bloom, providing substrate for CH₄ production. Rainfall affected CH₄ discharge of these tributaries by increasing the content of organic matter, the abundance of methanogenic bacteria, and disturbing the surface water. The degree of impact was related to the magnitude of rainfall runoff. 3) Hydraulic conditions: During the low water level period of the Three Gorges Reservoir, CH₄ consumption in the water body was lower enhancing CH₄ transmission. Moreover, the water level change caused by the operation of the reservoir also affects environmental factors such as temperature stratification, algae growth and organic matter distribution, which has an indirect impact on the CH₄ flux of tributaries. 4) Human activities: Land use changes caused by human activities would increase nutrient concentrations in tributary water bodies and enhance nutrient-related metabolism of bacterial communities, resulting in an increase of CH₄ emission. The damming and reservoir operation in the tributary area changed the hydrodynamic conditions of the tributary, blocked the transport of organic matter, and thus increased the total organic carbon content in the sediment, providing more substrate for CH₄ production. Finally, the future research hotspots were summarized to provide scientific basic for the management of CH₄ emissions in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: Three Gorges Reservoir; tributaries; methane emission; water environmental conditions; hydrodynamic conditions; human activities; meteorological conditions

全球变暖问题一直以来都备受关注。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的一份报告显示,随着温室气体含量在大气中的不断增加,未来10~30年全球变暖可能达到1.5°C,这无疑增加了自然和人类系统的气候相关风险^[1]。同时,我国明确提出2030年实现“碳达峰”与2060年实现“碳中和”的目标,故在全球变暖和国家“双碳”战略背景下,研究温室气体源汇效应具有重要的意义。

甲烷(CH₄)作为全球第二大温室气体,在大气中的辐射强度仅次于二氧化碳(CO₂)。由于CH₄在百年尺度上的单分子增温效应是CO₂的28~34倍^[2-3],因此即使CH₄只占大气中所有温室气体的5%~10%,其对全球温室效应的贡献率也达到了30%~40%^[4]。CH₄在大气中的浓度自1750年的0.5 mg/m³升高到了目前的1.29 mg/m³,增加了158%^[5-6],约是CO₂增幅的4倍,故随着CH₄浓度的持续增加,其对温室效应的贡献也会随之增大,预计到本世纪末,水体CH₄排放量将再增加20%~54%^[4]。

内陆水体被认为是CH₄排放的一个重要来源,据估计全球淡水系统CH₄排放约为103 Tg/a,占全球CH₄排放总量的25%^[4],特别是在人类活动的影响下,淡水系统CH₄排放进一步增强,成为人为CH₄排放的间接源^[7]。而筑坝蓄水作为人类开发利用水资源的最主要方式,被认为是对自然水生生态系统改变最大的人为活动。水库温室气体排放近10年来广受关注,据估计水库的CH₄排放约占全球人为CH₄排放总量的20%^[8],尤其是热带水库较高的排放引发了水库清洁性的争论^[9],甚至个别热带水库温室气体释放通量强于同等电能输出的火电站^[10]。与其它区域水库CH₄排放通量相比,中国水库平均CH₄排放通量在全球处于较低水平,占全球水库的2.4%~4.8%^[11]。水库的建设阻断了各自河流原有的连续状态,改变了水体和沉积物中的水力条件以及水环境条件等因素^[12-16],进而对温室气体的产生和排放造成了影响。

三峡水库是世界上最大的水电项目,亦是目前中国最大的水库,涉及防洪防旱以及水力发电等大规模运作。库区总库容39.3 km³^[8],全长约660 km,流域面积58000 km²。库区分布有大小60余条支流,流域面

积大于 100 km²的支流有 40 余条^[17]。此外,库区支流河道上筑坝形成三峡库区“库中库”的现象非常普遍。高水位的波动及生态调节坝的建设显著地改变了三峡水库,尤其是其支流的水文情势及水环境,进而可能对库区支流水体 CH₄的排放产生较为复杂的影响。目前三峡水库 CH₄排放的相关研究大多是围绕某条特定的支流或干流的某段区域开展的^[18-22],而三峡水库整体 CH₄排放的相关研究或综述则更侧重于库区整体 CH₄等温室气体排放量的统计分析、评估和预测^[23-27]。但对于支流众多且存在高度的时空异质性的三峡库区,仅对某一区域进行研究或仅对库区内 CH₄的整体排放量进行分析评估是远远不够的。此外,支流的生境、水动力等条件对干流的 CH₄排放具有潜在影响^[15,17-18,21]。因此,三峡水库支流 CH₄排放的研究具有重要意义。鉴于上述因素,本文基于已有的文献和数据,阐述了三峡水库的 CH₄排放情况,系统梳理并总结了三峡水库支流 CH₄排放的主要影响因素,以期对三峡水库 CH₄排放的控制和管理提供参考。

1 三峡水库 CH₄排放情况

1.1 国内外水库 CH₄排放量对比

三峡水库是目前中国最大的水库,于 2003 年开始蓄水,采取夏落冬涨的反季节蓄水方式,是一种特殊的淡水水库生态系统。自 2010 年三峡水库蓄水至最高水位(175 m)以来,三峡库区内的支流由之前的天然河流变为水库型河流,由于水位抬高,干流和支流水流变缓^[26],水动力条件发生变化,进而影响了 CH₄排放。

研究表明,国内大型水库水域 CH₄排放通量并不高,例如三峡水库、密云水库、五里峡水库、二滩水库等均远低于世界水库的平均水平^[11]。其中,三峡水库位于亚热带地区,是一个典型的河道型水库,其 CH₄排放量与纬度较高的北方地区相当^[28]。作为世界上最大的水电项目,三峡水库 CH₄气体的排放一直是国内外广泛关注的热点,且其反季节的运行方式,使得影响三峡水库尤其是支流 CH₄排放的因素较为复杂。表 1 列举了不同气候类型下,国内外各水库 CH₄排放的通量和范围。

表 1 国内外水库 CH₄排放的通量和范围
Tab.1 Flux and extent of CH₄ emissions from domestic and foreign reservoirs

气候类型	地点	CH ₄ 通量/(mg/(m ² ·h))		来源
		平均值	范围	
热带	Petit Saut, French Guyana	47.50	0.21~158.33	[29]
	Samuel Reservoir, Brazil	14.24	—	[30]
	Tucuruí Reservoir, Brazil	0.58	—	[30]
温带	Lake Wohlen, Switzerland	6.25	—	[31]
	密云水库(消落带)	4.60	—	[32]
	密云水库(水域)	0.30	—	[33]
亚热带	三峡水库	0.26	-0.1~2.23	[28]
	二滩水库	0.12±0.06	—	[34]
	五里峡水库(夏季)	0.17	0.03~0.42	[33]
寒带	Lake Lokka, Finland	1.40	0.22~4.96	[35]
	Lake Porttipahta Finland	0.15	0.10~0.20	[35]

—代表无数据,下同。

通过对比国内外水库 CH₄排放的通量和范围可见,在全球水库 CH₄排放的平均通量中,三峡水库位于较低水平,但在国内水库 CH₄排放的平均通量中,三峡水库位于中等水平。因此,三峡水库对我国 CH₄排放的贡献存在着不可忽视的影响,具有重要的研究意义。

1.2 三峡水库干支流 CH₄排放量对比

三峡水库运行前干流和支流 CH₄的年均排放通量分别为(0.09±0.04)和(0.17±0.05) mg/(m²·h)^[36],而运行后碳素迁移行为和环境效应的改变使水库表面监测的 CH₄年均排放通量升高至(0.26±0.38) mg/(m²·h)^[28]。已有研究监测了三峡水库干流和代表性支流的 CH₄排放通量。表 2 为三峡水库干流与香溪河、澎溪

河等具有代表性的典型支流的 CH_4 通量平均值和范围, 研究表明, 自三峡水库运行以来, 典型支流 (如香溪河) 的 CH_4 略微增加^[37-39], 且支流 CH_4 的排放通量相对较大。尽管干流 CH_4 的平均排放通量较低, 但由于其水面面积约占整个水库总水面面积的 70%, 故 CH_4 的总排放量更大^[23], 而支流库湾因营养条件丰富、甲烷氧化菌含量相对较低等原因, 排放潜力更高^[40]。同时, 由于不同支流库湾的生境条件、水动力条件不完全相同, 支流 CH_4 排放通量也存在显著的时空异质性。研究表明, 位于三峡水库库尾的部分支流 CH_4 排放通量要高于三峡水库库首及库中的支流。干流和众多典型支流 (如澎溪河、龙溪河、香溪河) 的 CH_4 通量在夏季泄水期均达到全年峰值, 而在冬季高水位运行期均处于相对较低的水平^[37,41]。

表 2 三峡水库干、支流 CH_4 排放通量及范围Tab.2 CH_4 diffusion flux and extent of the main and tributary streams of the Three Gorges Reservoir

类型	地点	CH_4 通量/($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)		深度/m	来源
		平均值	范围		
干流	湖北段	0.06±0.03	0.02~1.20	58~62	[42]
	巴东段	0.12±0.11	—	110	[43]
	自贡段	0.15±0.18	—	170	[43]
	万州段	0.28±0.33	—	80	[43]
支流	库首 香溪河	0.16	0.00~0.67	—	[37]
		0.13±0.11	0.03~0.70	河口:93.81±5.24 峡口:48.12±4.94 高阳:17.59±2.23	[38]
		蓄水期:0.18±0.24	—	蓄水期:162.4	[39]
		泄水期:0.30±0.47	—	泄水期:155.1	
	神农溪	0.25±0.91(蓄水期:0.03;泄水期:0.48)	—	—	[44]
	库中 磨刀溪	0.27±1.10(蓄水期:0.50;泄水期:0.49)	—	—	[44]
	澎溪河	0.40±0.10	0.10~1.12	145~175	[45]
	库尾 御临河	0.2	0.05~0.427	172.2	[18]
	龙溪河	1.76±1.52	0.08~16.96	145	[41]

以上变化和差异可能是由于三峡水库运行后, 干流和支流之间不同的水环境条件、水动力条件、气象条件和人类活动, 对水体中沉积物、藻类、微生物等的类型、分布产生的影响不同, 从而间接影响了 CH_4 排放通量。因此, 本文针对以上原因对支流 CH_4 排放的影响因素进行了系统性的分析和讨论。

2 三峡水库支流 CH_4 排放的影响因素

2.1 水环境条件

三峡水库成库以来, 支流水体富营养化的加剧和藻类的演替对 CH_4 的产汇造成了重要的影响。同时, 干支流水体温度和微生物群落多样性的差异是促进支流 CH_4 排放的重要因素。

2.1.1 藻类 三峡水库支流水体富营养化导致的藻类衰亡分解会驱动 CH_4 的释放, 同时藻类的演替过程会加剧 CH_4 的产生。

三峡水库众多典型支流均存在一定程度的水华。自三峡水库建成以来, 库区水质及生态系统发生变化^[46]。部分支流区域受干流水体顶托作用的影响, 形成回水区域, 导致水体交换作用减小, 水体流速降低, 处于准静止状态, 水力学条件以及水中营养条件均适合浮游植物的生长, 为水体中浮游植物的生长创造了条件^[39]。库区支流如澎溪河、香溪河、东溪河等的部分河段均出现了不同程度的富营养化现象^[19]。其中以香溪河和神农溪等为代表的典型支流频繁出现严重水华^[47-50]。

支流水华现象出现后, 大量的藻类衰亡是影响 CH_4 产生的一个重要因素^[37,51-52]。本文将以往各典型支流研究中的叶绿素 (Chl. *a*) 和溶解性有机碳 (DOC) 浓度与对应的 CH_4 排放通量进行了相关性分析^[37,41-45]。Chl. *a* 和 DOC 与支流 CH_4 通量的相关系数分别为 0.477 和 0.538, *P* 值为 0.016 和 0.003, 结果表明三峡水库

支流水体的 CH_4 排放与水中的 $\text{Chl.}a$ 和 DOC 浓度呈正相关。一方面,藻类对维持水体生态系统稳定有着重要作用,藻类的正常生长阶段能够通过初级生产固定大量 CO_2 成为水体的碳汇^[53-54]。例如回水区长度较短的库尾支流龙溪河,在水库调度运行下其水体滞留时间呈现不稳定、剧烈变化的特点,这使得龙溪河的环境参量均呈现显著的季节波动变化过程,而且水域生境的不稳定,难以满足浮游植物稳定生长的要求。在缺乏有效浮游植物光合固碳能力的前提下,进入水体的有机污染负荷增加势必提高水柱中细菌对有机质的降解,从而导致龙溪河支流的 CH_4 排放量高于其他支流^[41]。但另一方面,这些研究多关注于藻类生活史的生长聚集阶段,忽视了藻类衰亡分解以及藻源有机质(AOM)矿化等一系列生物化学过程将释放 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 。尤其在初级生产力较高的富营养化水体中, CH_4 的释放量会显著增加^[55-56]。藻类衰亡和分解会消耗水体中的溶解氧(DO),出现缺氧甚至厌氧的条件^[57],提高厌氧微生物尤其是产甲烷菌的活性^[58],同时藻的致密浮渣阻止了水体中的复氧过程^[59]。研究表明,铜绿微囊藻的衰亡显著增加了水体中的藻源碳素,提升了微生物产 CH_4 代谢的底物,并为产 CH_4 微生物创造了合适的厌氧环境,使得 DOC 成为影响 CH_4 释放的主导环境因子^[60],三峡水库典型支流 CH_4 通量与 DOC 的相关性分析结果表明, CH_4 通量与 DOC 浓度呈显著的正相关关系。此外,AOM 比陆源有机质对水生系统产 CH_4 的促进作用更为显著^[61]。快速衰亡下 AOM 的迅速释放会显著改变藻源碳素的归趋,有研究表明自然衰亡释放的总碳中 CH_4 仅占 14.74%,而快速衰亡下的总碳中 CH_4 占 27.49%,且快速衰亡中气体组分的 CH_4 占比是自然衰亡下的 1.86 倍^[60]。

此外,浮游植物演替也对 CH_4 的产汇效应有重要影响^[62]。在藻华衰亡过程中,不同藻类的胞外有机物含量和特征各不相同,潜在的干预着温室气体的产生^[62-64]。长期调查表明,三峡水库的定期运行可导致水库及其支流中的优势浮游植物从以河流型为主的种类(如硅藻或甲藻)向以湖泊型为主的种类(如绿藻或蓝藻)演替^[65-67]。与河流型藻类相比,湖泊型藻类水华衰亡对 CH_4 的产生起着更重要的作用,研究表明,湖泊藻类相较于河流藻类会消耗更多的 DO ,并为水体提供更为丰富的不稳定有机质,从而为厌氧产甲烷过程提供更有利的条件^[62]。三峡水库蓄水后支流回水区(库湾)水质明显下降,并在部分支流库湾出现了显著的藻类水华现象^[68-69],尤其在香溪河、神农溪、大宁河、小江等一级支流库湾内最为严重^[70],且藻类水华优势种已逐渐由蓄水初期的硅藻、甲藻为主的河流型藻类向以蓝藻、绿藻为主的湖泊型藻类演替^[69-71]。

目前,三峡水库支流库湾藻华的季节演替如下:春季以硅藻和甲藻为优势种,夏季以绿藻和蓝藻为优势种,秋季以绿藻、硅藻和甲藻为优势种,冬季以硅藻、甲藻为优势种^[72]。蛋白核小球藻(绿藻门)和铜绿微囊藻(蓝藻门)水华在衰亡的过程中,更易导致水体厌氧、还原和微碱性环境的产生,且会有更多不稳定的有机物,如蛋白质和多糖等被释放到水中,为产甲烷菌提供可用的底物。此外,有害蓝藻水华衰亡还能够引起严重的生态负效应并向水体释放大量物质如 AOM 和微囊藻毒素(MCs)等,从而影响城市水环境的健康与水体的碳行为^[73]。在 He 等^[74]对御临河的研究以及 Liu 等^[75]对香溪河的研究中均发现了 MCs 对水体碳行为的影响。研究表明,无毒铜绿微囊藻衰亡释放了更多不稳定有机物,包括类蛋白质和芳香蛋白类物质等,这为厌氧产 CH_4 过程提供了必要的底物。而高浓度的 MCs 与产毒微囊藻衰亡过程中 CH_4 的产生呈负相关,可能是由于高浓度的 MCs 对产 CH_4 相关细菌的生长有抑制作用^[73]。然而,尽管藻类在淡水水体中的生长衰亡过程对产 CH_4 过程的影响已有较多的研究证据支持,但目前针对三峡水库支流区域水华对 CH_4 产排过程明确影响的系统性研究仍较为缺乏,是未来对三峡水库支流 CH_4 的研究中的一大重点。

除了藻类衰亡和分解过程对厌氧产 CH_4 过程的贡献,有研究者发现,蓝藻还可以在磷酸盐有氧环境中通过甲基磷酸盐去甲基化释放 CH_4 ,或通过光合作用同化 CO_2 产生 CH_4 ,但作为地球上最普遍的生物群,蓝藻在不同水环境中的产 CH_4 机制不同^[76-77]。此外,硅藻、隐藻、绿藻等淡水藻类^[78],在水体的各种环境条件下都可以将无机碳转化为 CH_4 ,然而三峡水库支流流域有关淡水藻类的产 CH_4 途径尚不明确,仍有待进一步研究。

2.1.2 温度 温度既可以直接影响 CH_4 的生成速率和消耗速率,也可以通过对藻类的长生间接影响 CH_4 通量。

较高的温度环境会导致 CH_4 在沉积物表面及支流水体中的生成速率和氧化速率提高,从而对 CH_4 通量造成直接影响。本文将以往研究中各典型支流水温与 CH_4 排放通量的相关性分析进行了汇总,表 3 为三峡水库典型支流水温与 CH_4 通量的相关性分析。研究表明,支流 CH_4 的生成和消耗速率均与温度有显著的正

表3 三峡水库典型支流水温与CH₄通量的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of water temperature and methane flux of typical tributaries of Three Gorges Reservoir

甲烷通量	甲烷氧化(消耗)速率	文献来源
0.687	—	[79]
0.584	—	[79]
0.402	—	[80]
0.320	0.940 **	[81]
—	0.036	[83]

** 表示 $P < 0.01$, 极显著相关。

但在实际观测条件下, CH₄通量除受温度影响外, 还受到水深、水体中溶解的 CH₄浓度等因素的影响。尽管在温度较高的夏季 CH₄在水体中的氧化速率升高, 但夏季支流的水位相对较低, 故 CH₄从沉积物迁移到大气中的路径较短, 其在水体中的氧化和消耗时间更短, 研究表明, 深层沉积物中产生的 CH₄有 51%~81% 在水体中被氧化^[59]。这可能是导致在实际观测中夏季 CH₄排放量仍然普遍高于冬季的原因之一。

温度的升高还会促进藻类的生长, 从而间接影响 CH₄排放。随着气候变暖, 全球平均气温的升高已被证明会通过矿化作用刺激沉积物中营养物质的释放, 从而加剧淡水的富营养化^[84], 且在温度较高的环境(如热带湖泊)更有利于藻类的大量繁殖, 产生更多 CH₄^[77]。蓝藻门的嗜高温特性使其一般在夏秋季节大量繁殖^[85], 但也有研究发现三峡库区部分河段的蓝细菌门在春季和冬季浓度最高, 推测其原因与三峡水库反季节的调度运行方式有一定的关系^[86]。由于春季排水速度快, 夏季洪水脉冲频繁, 春季和夏季三峡水库的水文动态变化非常剧烈, 因此可溶性碳在 CH₄生成过程中的停留时间较短^[28]。而在冬季, 地下水位较高, 且波动较小, 有利于藻类增殖, 因此有更多的底物支持 CH₄的产生^[87]。

2.1.3 微生物 三峡水库 CH₄排放的主要来源是底部缺氧状态下沉积物中有机物的分解^[18,79,83]。尤其是在温度较高的夏季, 相关微生物活性增强, 会导致沉积物中有机质分解作用进一步增强^[19]。其中, 产甲烷菌和甲烷氧化菌作为影响 CH₄产排放的主要微生物在三峡水库干支流中大量存在^[52], 典型支流中与 CH₄产排相关的微生物菌群及其与 CH₄通量的相关性如表 4 所示, 以 *unclassified_p_Euryarchaeota* 和 *norank_c_environmental_samples* 为代表的产甲烷菌与 CH₄通量呈正相关关系, 以 *Methylosarcina* 和 *Methylobacter* 为代表的甲烷氧化菌与 CH₄通量呈显著负相关, 这与其在支流水体中的分布结果一致^[19]。在蓄水期干流和支流的微生物多样性没有显著差异, 具有低温生存优势的 II 型甲烷氧化菌在三峡库区水体中大量存在; 而在蓄水结束前(3 月)和泄水期三峡库区微生物群落多样性有着显著的空间差异, 干流原核生物群落的平均 α 多样性指数高于支流, 大部分优势原核生物(占有预测官能团的 0.05%~53.1%)参与碳循环(如甲基营养菌和光能自养菌), 这可能是因为水位变化导致大量来自周围土壤的 I 型甲烷氧化菌被输入并稳定生长于水库中^[46]。研究表明, 部分支流沉积物中的甲烷氧化菌相比于干流含量较低^[19], 而通过微生物氧化在水体中损失的 CH₄的比例远高于排放到大气中的 CH₄的比例^[83], 因此支流氧化 CH₄的能力相比于干流较弱, 这可能是导致支流 CH₄通量较高的原因之一。

此外, 雨季细菌通常比旱季更丰富, 因为雨季水温较高更有利于细菌生长, 且雨季会有更多的微生物进入水体^[88]。彭兴意等^[19]研究发现, 某未分类属产甲烷菌 *unclassified_p_Euryarchaeota* 的丰度变化在干、支流出现差异, 原因可能是受干、支流的环境差异影响。因 8 月份重庆雨季来临, 降雨量大增, 造成库区上游携带大量微生物进入研究区域, 而其中含有大量产甲烷菌 *unclassified_p_Euryarchaeota*, 从而增加了该产甲烷菌丰度, 对 CH₄通量增加造成了影响。雨季来临后上游洪水所携带的 3 类 I 型甲烷氧化菌(*unclassified_c_Gammaproteobacteria*, *Methylobacter*, *Methylosarcina*)较少, 导致在干流点位的该甲烷氧化菌丰度减少。又由

相关关系^[45,79-81]。在澎溪河支流, 5 和 8 月是 CH₄释放通量较高的时期, 而 11 和 2 月则是 CH₄通量较低的时期, 且在低水位时期水温昼夜变化对 CH₄通量影响明显, 验证了水库 CH₄通量产汇过程受控于温度变化的基本认识^[79]。Wang 等^[81]在对香溪河支流的研究中发现, 其 CH₄的生成与消耗速率也与温度呈显著的正相关, 尤其是 CH₄的氧化速率与温度相关系数甚至可以达到 0.94, 可见水温是影响 CH₄通量的重要因素之一。且在高温下 CH₄氧化速率的增加大于 CH₄生成速率的增加^[81-82]。水温的升高可以大大提高 CH₄的氧化速率, 这尤其在深层水库的 CH₄通量中占主导地位^[37]。在夏季水温最高时, 氧化速率最高^[83]。在香溪河支流中表层沉积物 CH₄的氧化量占总产量的 51.8%, 在 35°C 时甚至达到 77.4%^[81]。

于回水顶托现象,干流水倒灌进支流点位,使得支流点位的该甲烷氧化菌丰度略微减少,从而对 CH_4 通量造成一定影响。在康斯坦茨湖^[89]以及我国湿地^[90]的相关研究均证明, I 型甲烷氧化菌主导着我国湖泊沉积物中的 CH_4 氧化过程,对 CH_4 通量有着显著的影响。

表 4 三峡水库典型支流 CH_4 相关菌群与 CH_4 通量的相关性^[19]
Tab.4 Correlation between methane-associated flora and methane flux in
typical tributaries of the Three Gorges Reservoir

群落类型	群落名称	相关系数 r	P 值
产甲烷菌群落(属)	<i>unclassified_p_Euryarchaeota</i>	0.636	0.174
	<i>norank_c_environmental_samples</i>	0.700	0.122
	<i>environmental_samples_f_Methanosarcinaceae</i>	0.337	0.514
	<i>unclassified_k_norank_d_Archaea</i>	-0.362	0.481
甲烷氧化菌群落(属)	<i>Methylocystis</i>	0.651	0.141
	<i>unclassified_c_Gammaproteobacteria</i>	-0.159	0.763
	<i>Methylosarcina</i>	-0.847	0.033 *
	<i>Methylobacter</i>	-0.853	0.031 *

* 表示 $P < 0.05$, 显著相关。

CH_4 的生成不仅仅依靠赋存于沉积物及水体中的产甲烷菌和甲烷氧化菌,还可能来自有氧环境中其他微生物的代谢作用^[91]。Lenhart 等^[92]首次证明了真菌可以在有氧条件下,以甲硫氨酸为前体产生 CH_4 , 具体产生量取决于代谢底物和真菌种类。而在以往的研究中曾发现,真菌群落在三峡水库支流藻类大量生长后的相对丰度与日俱增^[93]。此外,紫色非硫细菌作为一种常见于淡水水体的光能异养型细菌在全球碳循环中也起着关键作用,其可以在有氧条件下通过固氮酶将 CO_2 还原为 CH_4 ^[77]。这些微生物可能成为三峡水库支流 CH_4 排放的重要途径之一,但目前大多数研究仅聚焦于水环境因素及厌氧产 CH_4 过程对 CH_4 通量的影响,而好氧产 CH_4 过程对三峡水库支流 CH_4 通量的影响还缺乏有力的证据。

2.2 水动力条件

三峡水库在不同的运行期,支流的水动力条件存在较大的差异,因此对 CH_4 的产生和传输过程有着不同的影响。同时,由水库运行导致的水动力条件变化还会影响支流的水温分层、藻类生长和有机物分布,进而对 CH_4 通量造成间接影响。

2.2.1 水位 三峡水库采用冬蓄夏排的反季节运行方式。在“蓄清排浑”的水库调度运行方案下,水库每年 2—5 月为泄水期,6—9 月水库在低水位运行,10 月至次年 1 月为高水位运行。这样反季节性的水位涨落过程在很大程度上影响着水—气界面碳源气体的释放^[51, 94]。水库蓄水运行后,其人控调度方案对库区支流的水动力条件有较为明显的影响,支流水位波动对 CH_4 冒泡和 CH_4 氧化有着直接影响^[19]。

支流沉积物中形成的 CH_4 主要通过扩散迁移和冒泡的方式进入上覆水体,在此过程中水深是调节水体向大气排放 CH_4 的关键因子,在深度较大的高水位时期, CH_4 主要以扩散的方式进行释放,而在深度较小的低水位时期, CH_4 主要以冒泡的方式进行释放^[18, 83]。研究表明, CH_4 排放通量与水位呈显著负相关^[83],低水位更有利于 CH_4 的传输,减少了 CH_4 在运输过程中的氧化^[37]。有对彭溪河支流的研究表明,入汛前水位在该时期已经降至 145 m 最低水位,静水压力减少有利于底部积累的气泡集中释放^[95]。在 7 月主汛期,水体流动剧烈,库湾水位陡涨陡落,且坝前水位越低,流速越大,离干流距离越远,流速变化幅度越大^[96]。故尽管 7 月水温进一步升高,但水文水动力特征可能不利于气泡形成并释放。而进入 8 月伏旱期后,径流量下降为气泡释放创造了稳定的缓流环境,水体中再次形成大量气泡并释放出水面^[95]。尽管夏季沉积物上方水位变化快,相关的静水压力波动强,产生的 CH_4 气泡可能会溶解到水中^[37],导致溶解的 CH_4 浓度和氧化活性较高,但由于水位低, CH_4 到达大气的速度比其他季节更快,故 CH_4 的总消耗率是最低的。尽管在秋季溶解 CH_4 浓度和氧化活性较低,但由于水位高,水体中 CH_4 在传输过程的消耗量大,排放到大气中的 CH_4 就相对较少^[83]。在 Xiao 等^[37]对香溪河的 CH_4 通量进行研究发现, CH_4 最大月通量出现在 6 月,对应最低水位,且

水位的持续大幅下降导致 CH_4 在 6 月的扩散通量比接下来 9 个月的平均通量高 33 倍。这再次验证了水库运行导致的支流水体的水力条件变化对 CH_4 通量有着直接影响,即低水位导致的低静水压力减少了 CH_4 在水体中的消耗,更有利于 CH_4 扩散到大气中。

2.2.2 流速 三峡水库运行导致的水力条件变化还会影响支流水体的流速、温度分层、藻类生长和有机物分布等因素,从而对支流 CH_4 通量造成间接影响。三峡水库蓄水期间,坝前干流平均流速由 2 m/s 降至 0.17 m/s^[97]。受干流水体的回水顶托的影响,支流上游来水的冲击得以减缓,使得部分支流库湾水流缓慢,流速基本小于 0.05 m/s^[98],促进了悬浮物的沉积,通过筑坝捕获的沉积物和相关的碳可以矿化为 CO_2 和 CH_4 ,导致上游沉积物中的 CH_4 含量高于下游^[19,99],水-气界面上游 CH_4 扩散通量高于下游,这与沉积物中 TOC 和 CH_4 的变化趋势一致^[34],但与此同时蓄水期水深的增加也会促进 CH_4 在释放过程中的氧化,这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^[23]。泄水期间,尽管由于 CH_4 在向水面传输时存在氧化过程,但三峡水库支流下游水位的大幅波动仍是潜在的 CH_4 排放源^[21],在部分回水区极短库尾支流,水体流速的急剧变化可能会导致 CH_4 在水体中的传输速率增加^[41]。此外,陆源有机碳已被认为是河流颗粒有机碳的主要来源,而严重的土壤侵蚀已被认为是沉积物来源的主要部分^[100-101]。泄水期间水位周期性大幅波动导致两岸河岸带土壤侵蚀,会使更多的有机质进入河床,下游沉积物中 TOC 急剧增加^[18]。与此同时,Huang 等^[45]认为,泄水期可能会减少变动回水区的水力停留时间,且主干流的入侵会增加水柱中的湍流混合^[102]。这就降低了变动回水区在低水位时期形成温度分层的可能性,从而破坏适合藻类生长的稳定环境,最终抑制藻类生长^[103],这可能会导致 CH_4 排放量在一定程度上减少。在水位较高且波动较小的冬季,更有利于浮游植物的生长,因此有更多的底物支持 CH_4 的产生^[88]。但与此同时,高水位运行期间上覆水 DO 浓度比低水位运行期间更高,这可能会在一定程度上抑制 CH_4 的产生,进而降低库底 CH_4 浓度^[20]。

2.2.3 温度分层 干支流温度差引起的温度分层现象也是加剧藻类水华、促进 CH_4 排放的重要因素之一。目前三峡水库坝前并未呈现出明显的温度分层现象,但现有研究发现部分支流存在不同程度的温度分层^[23]。由于三峡水库干流、支流及上游来流的水体密度差和温差导致三峡水库蓄水后支流库湾普遍存在分层异重流现象^[104]。长江干流水体在冬季、春夏季、秋季分别通过底层、中层和表层倒灌入支流库湾^[105],这说明在不同季节,三峡水库各支流库湾的分层现象具有普遍性^[72]。图 1 为三峡水库支流常见的两种水温分层模式和分层结构与水华间的关系。分层异重流驱动下的混合层(Z_m)与临界层(Z_c)的关系是决定水华生消的关键^[72]。一方面分层异重流强迫支流库湾水体分层,驱动三峡水库支流库湾藻类暴发^[106];另一方面,倒灌异重流持续携带干流营养盐对库湾水体进行补给,丰富了库湾水体中藻类可利用的营养盐^[72]。例如 Jin 等^[107]对香溪河进行研究,发现香溪河支流夏季水体分层强烈,且河流温度分层强度从下游到上游逐渐增强。下游温度分层较弱,Chl. α 浓度也相应偏低,这可能是长江与香溪河水体交换频繁所致。温度分层现象会导致支流水体水华现象的加剧^[106],从而使 CH_4 排放通量增大。

2.3 人类活动

随着人类活动影响的加剧,三峡水库支流水体的水环境特性发生了显著的变化。其中以三峡水库支流土地利用变化为主的人类活动是导致支流水体富营养化加剧、 CH_4 排放量增大的一个重要原因。三峡水库建设前后 10 年内,共有 6118.563 km² 的土地利用类型发生变化,占整个库区土地覆盖面积的 10.48%。其中,耕地面积减少,而林地、草地和水库面积逐渐增加,建设用地面积迅速扩展。耕地面积减少的主要原因是退耕还林工程的实施,但在 10 年的变化中退耕的土地仍非常有限,其中坡度在 25° 以上的耕地中 55% 为坡面耕地,松散的表层易诱发土壤侵蚀,形成库区一定程度的面源污染^[108]。三峡水库支流库湾在低水位运行时期,消落带落干期与作物生长期重叠,且由于坡度平缓、土壤肥力较高,常被近岸农民开垦利用,然而这种土地利用方式可能会对支流水环境造成影响。研究表明,各土地类型的甲烷氧化速率一般为:森林>退耕还林土地>草地>耕地^[5]。农业耕作对土壤的物理干扰可以大大减少土壤甲烷的氧化,这可能是由于不利的营养条件或农药、化肥等扰乱了土壤的理化性质及甲烷氧化菌的生理和群落结构,从而导致甲烷氧化菌多样性的减少,使得 CH_4 氧化速率降低^[5,109]。此外,在淹水条件下,农药、化肥及作物残体携带的污染物浸出后释放进入水体,将增加水质恶化风险,并提高在周期性水位波动下 CH_4 的产生潜力^[110-111]。尤其是在污染

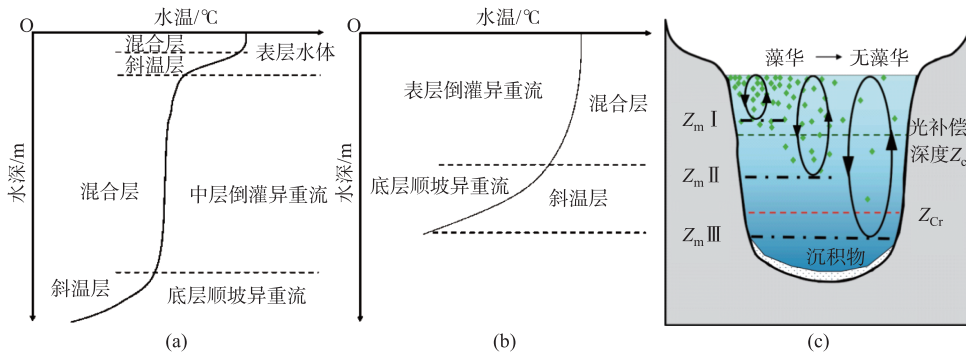


图1 三峡水库支流双斜棍型(a)及半U型(b)水温分层模式^[72]和分层结构与水华间的关系(c)^[106]

Fig.1 Water temperature stratification pattern of tributaries of the Three Gorges Reservoir with double inclined stick type (a) and semi-U type (b)^[72] and relationship between water temperature stratification and blooms (c)^[106]

负荷水平、淹没陆域土壤有机质(SOM)、土壤全氮(STN)等指标较高的库尾支流龙溪河,水库运行导致其流域年均输沙模数达 2939.0 t/km^2 ,水体的有机污染负荷增加提高了水体中细菌对有机质的降解,从而导致 CH_4 产生潜力相较于其他支流更高^[41]。消落带占三峡水库表面积的 $1/3$ 以上,消落带的总 CH_4 排放量占三峡水库表面总排放量的 $42\% \sim 54\%$ ^[112]。研究表明,消落带农业耕作将加剧氮、磷流失风险,化肥投入量大,但作物利用效率低,是形成污染的主要原因^[110]。当土壤氮、磷盈余时,可能提高土壤肥力,但也常以径流、淋溶等方式进入水体,危害水环境^[113],且不同的支流环境下不同耕地利用类型的氮、磷盈余负荷量也有较大差异,其对水环境的潜在威胁也各不相同。与弃耕地相比,农耕地作物的覆盖度相对较低,受到翻耕等物理干扰,会加速消落带土壤的营养物流失^[114],这可能会进一步导致支流水体富营养化的加剧,并最终导致 CH_4 排放通量的增加。

随着三峡水库蓄水以及城市化进程的扩大,森林和草地资源受到了侵占,植被覆盖率减少,居民用地面积显著增加^[115]。本研究团队对御临河支流的研究中发现^[15],监测点附近农业活动十分普遍,人类活动导致的土地利用变化增加了表面水中的营养物浓度。在此期间,化肥和农药导致进入河流的营养物质和有机物增加,显著提高了水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DOC和TOC浓度,这可能会为支流水体中 CH_4 的产生提供底物。淹水后分解的植物残体导致SOM积累,也可能增加 CH_4 排放通量^[116]。此外,人为导致的土地利用变化还会略微增强细菌群落的营养相关代谢,且下游沉积细菌群落的多样性和营养相关代谢低于上游^[15]。

三峡水库支流筑坝作为土地利用类型之一改变了河流的水力条件,并抑制了有机物的传输,增加了水体中的产 CH_4 底物,促进了 CH_4 的产生。一般来说,水库建设导致的 CH_4 排放通量增加主要是来自有机物的分解^[117]。筑坝对颗粒有机碳(POC)在河流中的迁移和归宿有着显著的影响,陆源POC的输入会受到水库调度运行引起的水位变化和流量调节的影响^[117],水位的周期性波动会导致两岸河岸带土壤侵蚀,从而使更多的有机质进入河床^[19],且强烈的水位波动会引发滑坡和泥石流,增加水体中的自源和陆源POC^[118-120],为 CH_4 的产生提供更多底物。同时,筑坝使从河流到水库的流速降低,水力停留时间增加,减少了POC的传输,将上游流域的陆源有机碳收集到水库底部,促使水库底部缺氧生境的形成,为 CH_4 的产生创造了条件^[121]。此外,有研究表明,不同于蓄水期,泄水稳定期支流沉积物产生的 CH_4 主要通过冒泡释放的方式排放至大气环境,占总释放量的比例达 99.5% 以上,支流生态调节坝的拦截蓄水作用导致其上游水位较高^[21],下游水位落差大,水深较浅,故 CH_4 冒泡通量较大,下游的 CH_4 通量明显高于上游,导致下游成为 CH_4 排放的一个周期性热点^[18]。

由此可见,在三峡库区蓄水和泄水期间,因支流的生态调节坝对水体及其生源物质的拦截作用,其上下游河段的水文条件和生境特性产生了较大差异,对河流沉积物中 CH_4 的产生、释放等产排全过程均有显著

影响。

2.4 气象条件

气象条件也是影响三峡水库支流 CH_4 排放通量的关键因素之一,主要通过降雨对 CH_4 通量造成间接影响。降雨会携带更多的营养物质进入支流,并同时在水体产生一定的扰动,破坏水体的温度分层,从而对 CH_4 通量造成影响。

降雨导致的水体营养物质浓度增加为 CH_4 的产生提供了更多底物。研究表明,降雨量增加会进一步导致径流的增加,由于周围土地和三峡水库支流的大量进水,从而使更多的营养物质从陆地输入水体;而在部分旱季,降雨量的减少和较低的流入、流出速率会产生更高的稀释效应^[88],但同时强蒸发作用的增强会对稀释产生一定程度的削弱^[122-123]。降雨事件带来的这些变化最终会加剧水体富营养化,在三峡水库的主要支流中,近 30% 受到了严重污染^[88]。在三峡水库支流,雨水和地表径流带入河流的 SOM 在河流中的分解,是其 CH_4 的排放源之一^[19]。

降雨向水体带入营养物质的同时,也会对支流水体产生扰动,进而影响 CH_4 在水体中的传输过程。雨季洪水的冲刷导致更多的泥沙从周围土地进入三峡水库,会造成支流水体浊度的增加和光利用率的减少,高水平的浊度可以抑制浮游植物和微生物的生长,从而对 CH_4 排放过程产生影响。此外, Huang 等^[45] 通过对三峡水库澎溪河库湾的研究发现,库湾 CH_4 排放高值出现在泄水期及低水位运行初期,推断夏季频繁的暴雨洪水对水温分层的破坏导致排放量的增加。纪道斌等^[124] 的监测结果表明,在强降雨时期,暴雨产生的上游低温洪水可以导致支流库湾上游段表底层温差骤降高达 6°C ,库湾中游监测平台断面底部约 10 m 深度水层上下温差降幅达 $2\sim 3^\circ\text{C}$,反映出底部来流对分层水体的明显扰动,为底部高浓度 CH_4 的向上迁移提供了条件。由此可见,降雨径流事件能够通过对水体的扰动对库湾 CH_4 释放产生影响,但影响程度与降雨径流量级相关^[125]。

3 结论

三峡水库支流 CH_4 排放的通量相比于干流较大,对三峡库区 CH_4 排放通量有着重要的影响。支流 CH_4 排放通量存在显著的时空异质性,位于三峡水库库尾的部分支流 CH_4 排放通量要高于三峡水库库首及库中的支流。在众多典型支流中,大多数支流的 CH_4 通量在夏季均达到全年峰值,而在冬季高水位运行期均处于相对较低的水平。本文系统梳理了影响三峡水库支流 CH_4 排放通量的因素,主要包括水环境条件、水动力条件、人类活动和气象条件 4 个方面的影响。

1) 水环境条件中水华、温度和微生物是影响支流 CH_4 通量的关键因素。支流水华后藻类衰亡分解过程会驱动 CH_4 释放,且藻类的演替过程会加剧 CH_4 的产生;温度可以直接影响 CH_4 的生成速率和消耗速率,也能通过促进藻的生长间接影响 CH_4 排放;三峡水库干支流微生物群落多样性存在显著的空间差异,支流水体中的甲烷氧化菌相较于干流丰度较低是支流 CH_4 通量较高的原因之一。

2) 水动力条件主要通过水位、流速和温度分层对支流 CH_4 通量造成影响。蓄水期 CH_4 主要以扩散的方式进行释放,支流较低的流速促进了悬浮物的沉积,上游沉积物中的 CH_4 含量高于下游;泄水期 CH_4 主要以冒泡的方式进行释放,下游沉积物中 TOC 急剧增加,但干流的入侵会削弱支流的温度分层,破坏藻类生长环境,间接影响 CH_4 通量。

3) 人类活动加剧导致的土地利用变化改变了支流水体的水环境特性,促进了 CH_4 的产生。农业耕作使支流水体中的营养物质浓度增加,甲烷氧化菌的丰富度降低,细菌群落的营养相关代谢增强;建设用地扩大、支流筑坝增加抑制了有机物的传输,增加了水体中的产 CH_4 底物,促进了 CH_4 的产生。

4) 气象条件中降雨是影响支流 CH_4 通量的关键因素。降雨会携带更多营养物质进入支流,同时会增加水体浊度、破坏水体的温度分层,从而对 CH_4 的产生和传输过程造成影响。

4 展望

三峡水库作为我国最大的水电项目,涵盖的支流众多,具有高度的时空异质性。作为典型的淡水水库生态系统,三峡水库支流 CH_4 排放的研究工作对我国水库碳循环和碳通量方面的研究有着重要的参考意

义,更为解析复杂水文环境下驱动水库支流 CH_4 的排放效应提供了明确的参考价值。但对三峡水库支流好氧产 CH_4 机制、 CH_4 产生途径以及各因素间的耦合关系等方面仍有待深入。因此,本文从以下几个方面对未来的研究热点进行了分析。

4.1 深入探讨三峡水库支流的厌氧产 CH_4 途径对 CH_4 通量的影响

现有关于三峡水库支流 CH_4 排放影响因素的研究大多侧重于各因素对 CH_4 排放通量的影响,但这些因素对 CH_4 的产生途径以及其中涉及的微生物生命代谢过程的研究却极为有限。水环境条件和土地利用方式的改变可能会导致微生物的底物类型发生变化,从而导致厌氧 CH_4 生化代谢途径的转变,例如耕地面积减少、污染负荷增加的情况下, CH_4 产生途径可能以 CO_2 还原型/乙酸营养型为主,农业耕作增多、支流藻类暴发后,藻类释放甲基营养型物质,可能会导致乙酸营养型产甲烷的比例上升。不同的 CH_4 产生途径和碳源利用类型对碳循环过程及 CH_4 通量存在潜在的间接影响。因此,三峡水库支流 CH_4 的产生途径对 CH_4 通量的影响有待进一步深化,是今后研究三峡水库支流 CH_4 排放影响因素需要补充的重要内容。

4.2 加强模型应用以深化多因素驱动下的耦合效应和预测分析

三峡水库典型的“蓄清排浑”调度运行模式形成了复杂的水文水动力环境,高度的时空异质性仍然是三峡水库支流 CH_4 通量分析和预测的难点。由于三峡水库面积大、分布广,涵盖的支流众多,因此在不同的条件下各因素对 CH_4 排放产生的影响效应不同,且各因素在影响 CH_4 通量的同时,彼此之间也存在着复杂的交叉影响。然而,目前的工作并没有足够的科学方法以厘清多因素驱动下的耦合效应,进而导致 CH_4 通量难以实现长远的趋势预测。故揭示多因子的复合效应是进一步完善复杂水文环境下三峡水库支流 CH_4 排放效应及预测分析的重要研究方向。在未来的研究中,除了对各因素进行针对性研究,还需要利用模型方法对各因素的耦合关系及其对 CH_4 通量的影响进行分析,以更好地实现三峡水库支流 CH_4 排放通量的长期预测。

4.3 深入开展三峡水库支流 CH_4 在好氧条件下产排机制的研究

三峡水库支流 CH_4 排放通量及影响因素目前已得到了较为广泛的研究,然而目前的研究普遍聚焦于厌氧产 CH_4 机制。尽管近年来好氧产 CH_4 机制已取得了一定的研究进展,例如蓝细菌、藻类、真菌、紫色非硫细菌和隐花植物等均可以在有氧条件下产生 CH_4 [76],但目前对好氧 CH_4 产生过程的研究仅限于少数几个湖泊和河流,对于三峡水库支流水体微生物和藻类的好氧产 CH_4 过程迄今更是鲜有报道,这成为了三峡水库现有调度模式下产 CH_4 机制仍不明晰的关键制约因素。不同的水环境条件具有不同的产 CH_4 功能微生物及不同的 CH_4 形成机制和途径,因此开展三峡水库各流域藻类、微生物等好氧产 CH_4 机制的研究有助于进一步明确 CH_4 在支流水体中的多介质环境行为,对三峡水库 CH_4 排放的控制和管理具有重要意义。

4.4 建立长期监测系统以加强支流 CH_4 在不同层面的定量分析

三峡水库作为我国研究 CH_4 排放的代表性案例之一,其 CH_4 通量的监测已得到了一定程度的开展,对我国水库碳循环方面的研究有着重要的参考价值。但目前各典型支流的监测方法和数据仍有待进一步完善,尤其是不同断面的剖面浓度特征及分析较为缺乏,进而导致 CH_4 通量与水环境因子间的关系难以实现深入的定量分析。为了更准确地监测三峡水库支流的 CH_4 排放通量,需要建立高度成熟的长期监测系统,并以此对不同的 CH_4 排放途径进行动态监测,包括 CH_4 在水体不同深度的浓度变化、不同运行时期各支流水—气界面 CH_4 的扩散/冒泡通量等,从而更好地从定量的角度揭示三峡水库干支流在不同层面及不同区域的 CH_4 排放情况。

5 参考文献

- [1] IPCC. Summary for policymakers in global warming of 1.5°C. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
- [2] Verpoorter C, Kutser T, Seekell DA *et al.* A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(18): 6396-6402. DOI: 10.1002/2014GL060641.
- [3] Townsend-Small A, Disbennett D, Fernandez JM *et al.* Quantifying emissions of methane derived from anaerobic organic matter respiration and natural gas extraction in Lake Erie. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(S1): S356-S366. DOI: 10.1002/lno.10273.
- [4] Wik M, Varner RK, Anthony KW *et al.* Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(2): 99-105. DOI: 10.1038/ngeo2578.

- [5] Shukla PN, Pandey KD, Mishra VK. Environmental determinants of soil methane oxidation and methanotrophs. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, **43**(18): 1945-2011. DOI: 10.1080/10643389.2012.672053.
- [6] Derwent RG. Global warming potential (GWP) for methane: Monte Carlo analysis of the uncertainties in global tropospheric model predictions. *Atmosphere*, 2020, **11**(5): 486. DOI: 10.3390/atmos11050486.
- [7] Park JH, Nayna OK, Begum MS *et al.* Reviews and syntheses: Anthropogenic perturbations to carbon fluxes in Asian river systems-concepts, emerging trends, and research challenges. *Biogeosciences*, 2018, **15**(9): 3049-3069. DOI: 10.5194/bg-15-3049-2018.
- [8] Kumar A, Yang T, Sharma MP. Greenhouse gas measurement from Chinese freshwater bodies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **233**: 368-378. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.052.
- [9] St. Louis VL, Kelly CA, Duchemin É *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate: Reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766-775. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2.
- [10] Dos Santos MA, Rosa LP, Sikar B *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*, 2006, **34**(4): 481-488. DOI: 10.1016/j.enpol.2004.06.015.
- [11] Zhang P, Wang XF, Yuan XZ. General characteristics and research progress of methane emissions from freshwater ecosystems in China. *Chinese Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3567-3579. [张佩, 王晓锋, 袁兴中. 中国淡水生态系统甲烷排放基本特征及研究进展. *中国环境科学*, 2020, **40**(8): 3567-3579.]
- [12] Yan Q, Bi Y, Deng Y *et al.* Impacts of the Three Gorges Dam on microbial structure and potential function. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 8605. DOI: 10.1038/srep08605.
- [13] Ran X, Bouwman L, Yu Z *et al.* Nitrogen transport, transformation, and retention in the Three Gorges Reservoir: A mass balance approach. *Limnology and Oceanography*, 2017, **62**(5): 2323-2337. DOI: 10.1002/lno.10568.
- [14] Sadaoui M, Ludwig W, Bourrin F *et al.* The impact of reservoir construction on riverine sediment and carbon fluxes to the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 2018, **163**: 94-111. DOI: 10.1016/j.pocean.2017.08.003.
- [15] Mao Y, Liu Y, Li H *et al.* Distinct responses of planktonic and sedimentary bacterial communities to anthropogenic activities: Case study of a tributary of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **682**: 324-332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.172.
- [16] Ruiz-González C, Proia L, Ferrera I *et al.* Effects of large river dam regulation on bacterioplankton community structure. *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, **84**(2): 316-331. DOI: 10.1111/1574-6941.12063.
- [17] Pei ZP, Xin XK, Hu S. Evaluation of nutrient status in the mainstream and tributaries of Three Gorges Reservoir. *Water Power*, 2018, **44**(1): 1-4, 58. [裴中平, 辛小康, 胡圣. 三峡库区干支流水体营养状态评价. *水力发电*, 2018, **44**(1): 1-4, 58.]
- [18] Bai X, Xu Q, Li H *et al.* Lack of methane hotspot in the upstream dam: Case study in a tributary of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*, 2021, **754**: 142151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142151.
- [19] Peng XY, Qin Y, Shu YQ *et al.* Effects of functional methane community in sediments of Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir on methane emissions in summer. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(3): 1028-1038. [彭兴意, 秦宇, 舒钰清等. 三峡库区夏季万州段底泥甲烷功能菌群落对甲烷排放的影响. *环境工程学报*, 2022, **16**(3): 1028-1038.]
- [20] Qin Y, Su YH, Li Z *et al.* CH₄ variation and main influencing factors of bottom water column in the middle section of Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 299-308. DOI: 10.18307/2021.0123. [秦宇, 苏友恒, 李哲等. 三峡水库中段库底水体 CH₄浓度变化及其主要影响因素. *湖泊科学*, 2021, **33**(1): 299-308.]
- [21] Bai X, He Q, Li H *et al.* Response of CO₂ and CH₄ transport to damming: A case study of Yulin River in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Research*, 2022, **208**: 112733. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112733.
- [22] Zhang D, Li J, Wu J *et al.* Soil CO₂ and CH₄ emissions and their carbon isotopic signatures linked to saturated and drained states of the Three Gorges Reservoir of China. *Environmental Pollution*, 2022, **293**: 118599. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118599.
- [23] Li Z, Yang L, Wu XH *et al.* Monitoring and analysis of CO₂ and CH₄ fluxes of Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 423-434. DOI: 10.18307/2023.0205. [李哲, 杨柳, 吴兴华等. 三峡水库 CO₂、CH₄通量监测分析研究. *湖泊科学*, 2023, **35**(2): 423-434.]
- [24] Long LH, Huang YB, Xu H *et al.* Research on hydrodynamic characteristics and its water eco-environment effects in Three Gorges Reservoir in recent 20 years: Review and prospect. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 383-399. DOI: 10.18307/2023.0202. [龙良红, 黄宇攀, 徐慧等. 近20年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究: 回顾与展望. *湖泊科学*, 2023, **35**(2): 383-399.]
- [25] Ouyang CY, Qin Y, Liu Z *et al.* Prediction of CO₂, CH₄ diffusion fluxes at the water-air interface and analysis on its influencing factors using machine learning algorithms in the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 449-459. DOI: 10.18307/2023.0206. [欧阳常悦, 秦宇, 刘臻等. 基于机器学习的水-气界面 CO₂、CH₄扩散通量预测及影响因素分析——以三峡水库为例. *湖泊科学*, 2023, **35**(2): 449-459.]

- [26] Cao JX, Li G, Zhou Y *et al.* Evaluation of methane emission flux of Three Gorges Reservoir area base on revised GHG-RA model. *Wetland Science*, 2020, **18**(2): 251-256. [曹稼玺, 李罡, 周延等. 基于修正的 GHG-RA 模型的三峡库区甲烷排放通量估算. 湿地科学, 2020, **18**(2): 251-256.]
- [27] Ni J, Wang H, 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.
- [28] Chen H, Yuan X, Chen Z *et al.* Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D21): D21306. DOI: 10.1029/2011JD016244.
- [29] Galy-Lacaux C, Delmas R, Jambert C *et al.* Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, **11**(4): 471-483. DOI: 10.1029/97GB01625.
- [30] Lima IBT. Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydroreservoirs. *Chemosphere*, 2005, **59**(11): 1697-1702. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.12.011.
- [31] Delsontro T, Mcginis DF, Sobek S *et al.* Extreme methane emissions from a swiss hydropower reservoir; Contribution from bubbling sediments. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2419-2425. DOI: 10.1021/es9031369.
- [32] Li G, Li H, Yang M *et al.* Seasonal and diurnal methane and carbon dioxide emissions from the littoral area of the Miyun Reservoir in Beijing, China. *Marine and Freshwater Research*, 2017, **69**(5): 751-763. DOI: 10.1071/MF17114.
- [33] Yang M, Li HL, Lei T *et al.* Spatial-temporal characteristics of methane emission flux and its influence factors at Miyun Reservoir in Beijing. *Wetland Science*, 2011, **9**(2): 191-197. [杨萌, 李红丽, 雷霆等. 北京密云水库甲烷排放通量时空特征及其影响因素研究. 湿地科学, 2011, **9**(2): 191-197.]
- [34] Zheng H, Zhao X, Zhao T *et al.* Spatial-temporal variations of methane emissions from the Ertan hydroelectric reservoir in southwest China. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(9): 1391-1396. DOI: 10.1002/hyp.7903.
- [35] Huttunen JT, Väisänen TS, Hellsten SK *et al.* Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(1): 3-1-3-17.
- [36] Li Z, Sun Z, Chen Y *et al.* 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.
- [37] Xiao S, Liu D, Wang Y *et al.* Temporal variation of methane flux from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Scientific Reports*, 2013, **3**(1): 1-8. DOI: 10.1038/srep02500.
- [38] Huang WM, Bi HY, Hu ZY *et al.* Spatio-temporal variations of GHG emissions from surface water of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region, China. *Ecological Engineering*, 2015, **83**. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.088.
- [39] Zhao Y, Zeng Y, Wu BF *et al.* Observation on greenhouse gas emissions from Xiangxi River in Three Gorges Region. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(4): 546-553. [赵炎, 曾源, 吴炳方等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测. 水科学进展, 2011, **22**(4): 546-553.]
- [40] Liu J, Hu JM, Zheng XW *et al.* Effects of Three Gorges Reservoir regulation on temporal and spatial distribution of dissolved methane in Xiangxi River Reservoir Bay Water. *Chinese Environmental Science*, 2023, **43**(5): 2508-2518. [刘佳, 胡杰著, 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.]
- [41] Li Z, Bai L, Guo JS *et al.* Comparative study on water-air CO₂, CH₄ flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1008-1016. [李哲, 白镭, 郭劲松等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO₂, CH₄通量比较初探. 环境科学, 2013, **34**(3): 1008-1016.]
- [42] Zhao W, Zhu KX, Huang WM *et al.* Temporal-spatial patterns of methane emission flux and its influence factors in Hubei part of Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(4): 776-781. [赵玮, 朱孔贤, 黄文敏等. 三峡水库湖北段甲烷排放通量时空特征及其影响因素分析. 水生生物学报, 2013, **37**(4): 776-781.]
- [43] 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.
- [44] Zhao D, Wang Z, Tan D *et al.* Comparison of carbon emissions from the southern and northern tributaries of the Three Gorge Reservoir over the Changjiang River Basin, China. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, **19**(4): 515-528. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2019.01.008.
- [45] 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.
- [46] She W, 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.
- [47] Zhang QW, Song LX, Ji DB *et al.* Relationship between water quality of Xiangxi River Reservoir and the algal blooms in non-return area in the Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3018-3026. [张庆文, 宋林旭, 纪道斌等. 香溪河库湾水质特征与非回水区水华响应关系. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 3018-3026.]

- [48] Li X, Song LX, Ji DB *et al.* Characteristics of nitrogen release at the sediment-water interface in the typical tributaries of the three gorges reservoir during the sensitive period in spring. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1113-1121. [李欣, 宋林旭, 纪道斌等. 春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性. 环境科学, 2018, **39**(3): 1113-1121.]
- [49] Yuan YJ, Bi YH, Hu ZY. Comparative study on alkaline phosphatase activity of main tributaries of Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1012-1022. [袁轶君, 毕永红, 胡征宇. 三峡水库主要支流碱性磷酸酶活性的比较. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1012-1022.]
- [50] Liu L, Liu D, Johnson DM *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130. DOI: 10.1016/j.watres.2012.01.029.
- [51] Qin Y, Jiang CY, Zhang YY *et al.* Study on the release fluxes of carbon source gases under different operating conditions in the middle reach of the main stream of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2020, **43**(8): 97-106. [秦宇, 蒋成勇, 张渝阳等. 三峡水库不同运行工况下中段干流碳源气体释放通量研究. 重庆大学学报, 2020, **43**(8): 97-106.]
- [52] Qin Y, Zhang YY, Li Z *et al.* CH₄ fluxes during the algal bloom in the Pengxi River. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1578-1588. [秦宇, 张渝阳, 李哲等. 三峡澎溪河水华期间水体 CH₄ 浓度及其通量变化特征初探. 环境科学, 2018, **39**(4): 1578-1588.]
- [53] Trolle D, Staehr PA, Davidson TA *et al.* Seasonal dynamics of CO₂ flux across the surface of shallow temperate lakes. *Ecosystems*, 2012, **15**: 336-347. DOI: 10.1007/s10021-011-9513-z.
- [54] Anderson NJ, Bennion H, Lotter AF. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. *Global Change Biology*, 2014, **20**(9): 2741-2751. DOI: 10.1111/gcb.12584.
- [55] Deemer BR, Harrison JA, Li S *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. *BioScience*, 2016, **66**(11): 949-964. DOI: 10.1093/biosci/biw117.
- [56] Davidson TA, Audet J, Svenning JC *et al.* Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming. *Global Change Biology*, 2015, **21**(12): 4449-4463. DOI: 10.1111/gcb.13062.
- [57] Dai LL, Guo LL, Wu ZK *et al.* The effects of different concentrations of algal blooms on the two submerged macrophytes. *Chinese Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2765-2773. [代亮亮, 郭亮亮, 吴中奎等. 不同浓度藻类水华对两种沉水植物的影响. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2765-2773.]
- [58] Hu WT, Tang Q, Sun W *et al.* Dissolved methane dynamics during the degradation of organic matter derived from cyanobacterial bloom. *Chinese Environmental Science*, 2017, **37**(2): 702-710. [胡万婷, 唐千, 孙伟等. 水体中蓝藻水华分解产甲烷动态过程研究. 中国环境科学, 2017, **37**(2): 702-710.]
- [59] Yan X, Xu X, Ji M *et al.* Cyanobacteria blooms: A neglected facilitator of CH₄ production in eutrophic lakes. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 466-474. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.197.
- [60] Liu Y, Xu HL, Mao YF *et al.* Methane-producing dynamics and key influencing factors during the decay of *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, **41**(5): 132-140. [刘艺, 许浩康, 毛羽丰等. 铜绿微囊藻衰亡过程中产甲烷动态及关键影响因子. 土木与环境工程学报, 2019, **41**(5): 132-140.]
- [61] 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. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2012.02755.x.
- [62] Xu H, Li H, Tang Z *et al.* Underestimated methane production triggered by phytoplankton succession in river-reservoir systems: Evidence from a microcosm study. *Water Research*, 2020, **185**: 116233. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116233.
- [63] Xiao M, Li M, Duan P *et al.* Insights into the relationship between colony formation and extracellular polymeric substances (EPS) composition of the cyanobacterium *Microcystis* spp. *Harmful Algae*, 2019, **83**: 34-41. DOI: 10.1016/j.hal.2019.02.006.
- [64] Xiao R, Zheng Y. Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications. *Biotechnology Advances*, 2016, **34**(7): 1225-1244. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.08.004.
- [65] Tang X, Wu M, Li R. Phosphorus distribution and bioavailability dynamics in the mainstream water and surface sediment of the Three Gorges Reservoir between 2003 and 2010. *Water Research*, 2018, **145**: 321-331. DOI: 10.1016/j.watres.2018.08.041.
- [66] Yang J, Lv H, Liu L *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557**: 445-452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.094.
- [67] Domingues RB, Sobrino C, Galvão H. Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **74**(1/2): 31-43. DOI: 10.1016/j.ecss.2007.03.021.
- [68] Cai QH, Hu ZY. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Aquatic Biology*, 2006, **30**(1): 7-11. [蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.]
- [69] 中国环境监测总站. 长江三峡工程生态与环境监测公报. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2004.
- [70] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌. 三峡水库支流水华与生态调度. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [71] Tian ZB, Liu DF, Yao XJ *et al.* Effects of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton functional groups in the Xiangxi River Reservoir Bay. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(5): 700-707. [田泽斌, 刘德富, 姚绪姣等.]

- 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(5): 700-707.]
- [72] Liu DF, Yang ZJ, Ji DB *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]
- [73] Xu H, Liu Y, Tang Z *et al.* Methane production in harmful algal blooms collapsed water: The contribution of non-toxic *Microcystis aeruginosa* outweighs that of the toxic variety. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **276**: 124280. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124280.
- [74] He Q, Kang L, Sun X *et al.* Spatiotemporal distribution and potential risk assessment of microcystins in the Yulin River, a tributary of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **347**: 184-195. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.001.
- [75] Liu H, Li J. Influence of impounding process on the variation of phytoplankton and microcystin-LR in a tributary of Three Gorges Reservoir, China. *International Journal of Environment and Pollution*, 2015, **57**(1/2): 57-67. DOI: 10.1504/IJEP.2015.072117.
- [76] Bizić M, Klintzsch T, Ionescu D *et al.* Aquatic and terrestrial cyanobacteria produce methane. *Science Advances*, 2020, **6**(3): eaax5343. DOI: 10.1126/sciadv.aax5343.
- [77] Liu LY, Xie GJ, Ding J *et al.* Microbial methane emissions from the non-methanogenesis processes: A critical review. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**: 151362. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151362.
- [78] Hartmann JF, Günthel M, Klintzsch T *et al.* High spatiotemporal dynamics of methane production and emission in oxic surface water. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(3): 1451-1463. DOI: 10.1021/acs.est.9b03182.
- [79] Li Z, Yao X, He P *et al.* Diel variations of air-water CO₂ and CH₄ diffusive fluxes in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 576-584. DOI: 10.18307/2014.0412. [李哲, 姚晓, 何萍等. 三峡水库澎溪河水-气界面 CO₂, CH₄扩散通量昼夜动态初探. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 576-584.]
- [80] Huang WM, Zhu KX, Zhao W *et al.* Diurnal changes in greenhouse gases at water-Air interface of Xiangxi River in autumn and their influencing factors. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1270-1276. [黄文敏, 朱孔贤, 赵玮等. 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析. 环境科学, 2013, **34**(4): 1270-1276.]
- [81] Wang C, Xiao S, Li Y *et al.* Methane formation and consumption processes in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 4449. DOI: 10.1038/srep04449.
- [82] Duc NT, Crill P, Bastviken D. Implications of temperature and sediment characteristics on methane formation and oxidation in lake sediments. *Biogeochemistry*, 2010, **100**(1): 185-196. DOI: 10.1007/s10533-010-9415-8.
- [83] Lei D, Liu J, Zhang J *et al.* Methane oxidation in the water column of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2019, **47**(9): 1800516. DOI: 10.1002/clen.201800516.
- [84] Greaver TL, Clark CM, Compton JE *et al.* Key ecological responses to nitrogen are altered by climate change. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(9): 836-843. DOI: 10.1038/nclimate3088.
- [85] Zarina A, Shameel M, Naz S. Distribution of freshwater blue-green algae (Cyanophyta) in northeastern Pakistan. *International Journal on Algae*, 2010, **12**(3): 257-270. DOI: 10.1615/InterJAlgae.v12.i3.40.
- [86] Qin Y, Zhang X, Wang ZW *et al.* Seasonal variation of microorganism community structure in the middle section of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(6): 16-23. [秦宇, 张曦, 王紫薇等. 三峡水库中段水体微生物群落结构的季节变化. 水生态学杂志, 2021, **42**(6): 16-23.]
- [87] Yang J, Zhang L, Wang J *et al.* Algal community distribution and evaluation in backwater area of the Pengxi River under the designed water storage level of Three Gorges Reservoir. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2010, **32**(5): 88-95. [杨健, 张磊, 王娟等. 三峡水库澎溪河回水区藻类种群分布及评价. 西南大学学报: 自然科学版, 2010, **32**(5): 88-95.]
- [88] Chen Z, Zhou Z, Peng X *et al.* Effects of wet and dry seasons on the aquatic bacterial community structure of the Three Gorges Reservoir. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, **29**(5): 841-853. DOI: 10.1007/s11274-012-1239-3.
- [89] Yun J, Zhuang G, Ma A *et al.* Community structure, abundance, and activity of methanotrophs in the Zoige Wetland of the Tibetan Plateau. *Microbial Ecology*, 2012, **63**(4): 835-843. DOI: 10.1007/s00248-011-9981-x.
- [90] Liu Y, Zhang J, Zhao L *et al.* Aerobic and nitrite-dependent methane-oxidizing microorganisms in sediments of freshwater lakes on the Yunnan Plateau. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(5): 2371-2381. DOI: 10.1007/s00253-014-6141-5.
- [91] Tang Q, Xue XF, Wang H *et al.* New knowledge of methanogens and methanotrophs in lake ecosystems. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 597-610. DOI: 10.18307/2018.0302. [唐千, 薛校凤, 王惠等. 湖泊生态系统产甲烷与甲烷氧化微生物研究进展. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 597-610.]
- [92] Lenhart K, Bunge M, Ratering S *et al.* Evidence for methane production by saprotrophic fungi. *Nature Communications*, 2012, **3**(1): 1046. DOI: 10.1038/ncomms2049.
- [93] Tan B, Hu P, Niu X *et al.* Microbial community day-to-day dynamics during a spring algal bloom event in a tributary of Three Gorges Reservoir. *Science of The Total Environment*, 2022, **839**: 156183. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156183.
- [94] Qin Y, Ouyang C, Gou Y *et al.* The characteristics and influencing factors of dissolved methane concentrations in Chongqing's central urban

- area in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(47): 72045-72057. DOI: 10.1007/s11356-022-20822-w.
- [95] 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.]
- [96] Tang MJ, Jiang DG, Luo XB *et al.* Hydraulic characteristic analysis of Three Gorges Reservoir Xiangxi Bay. *Advanced Materials Research*, 2013, **726**: 3413-3418. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.3413.
- [97] Ji YZ, Ding QL, Wang LL *et al.* 1-D hydrodynamic numerical simulation of Three Gorges Reservoir and its visualization study. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2012, **43**(11): 21-24. [季益柱, 丁全林, 王玲玲等. 三峡水库一维水动力数值模拟及可视化研究. 水利水电技术, 2012, **43**(11): 21-24.]
- [98] Li CM, Huang ZL, Zhang S *et al.* Risk forecast of algal bloom in the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(1): 1-6. [李崇明, 黄真理, 张晟等. 三峡水库藻类“水华”预测. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1): 1-6.]
- [99] 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.424.
- [100] Hossler K, Bauer JE. Estimation of riverine carbon and organic matter source contributions using time-based isotope mixing models. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**: G03035. DOI: 10.1029/2012JG001988.
- [101] Romano G, Abdelwahab OMM, Gentile F. Modeling land use changes and their impact on sediment load in a Mediterranean watershed. *Catena*, 2018, **163**: 342-353. DOI: 10.1016/j.catena.2017.12.039.
- [102] Li Y, Liu DF, Kong S *et al.* Comparative analysis of the impact of discharging and impounding process of Three Gorges Reservoir on the algal bloom in the Xiangxi Bay. *Journal of Environmental Science*, 2012, **32**(8): 1882-1893. [李媛, 刘德富, 孔松等. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 1882-1893.]
- [103] Xiong CJ, Liu DF, Ji DB *et al.* Influence of the 175 m trial impoundment of the Three Gorges Reservoir on water environment in the Xiangxi Bay. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(5): 648-656. [熊超军, 刘德富, 纪道斌等. 三峡水库汛末 175 m 试验蓄水过程对香溪河库湾水华环境的影响. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(5): 648-656.]
- [104] Yang Z, Liu D, Ji D *et al.* Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**(4): 1114-1125. DOI: 10.1007/s11431-009-0387-7.
- [105] Yang Z, Liu D, Ji D *et al.* An eco-environmental friendly operation: An effective method to mitigate the harmful blooms in the tributary bays of Three Gorges Reservoir. *Science China Technological Sciences*, 2013, **56**(6): 1458-1470. DOI: 10.1007/s11431-013-5190-9.
- [106] Yang Z, Wei C, Liu D *et al.* The influence of hydraulic characteristics on algal bloom in Three Gorges Reservoir, China: A combination of cultural experiments and field monitoring. *Water Research*, 2022, **211**: 118030. DOI: 10.1016/j.watres.2021.118030.
- [107] Jin J, Wells SA, Liu D *et al.* Thermal stratification and its relationship with water quality in the typical tributary bay of the Three Gorges Reservoir. *Water Supply*, 2019, **19**(3): 918-925. DOI: 10.2166/ws.2018.142.
- [108] Zhang L, Dong LX, Wu BF *et al.* Land cover change before and after the construction of three gorges reservoir within 10 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(1): 107-112. [张磊, 董立新, 吴炳方等. 三峡水库建设前后库区 10 年土地覆盖变化. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1): 107-112.]
- [109] Tate KR. Soil methane oxidation and land-use change-from process to mitigation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **80**: 260-272. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.10.010.
- [110] Luo F, Lu LH, Li Z *et al.* Effects of farming practices on soil nitrogen and phosphorus concentrations and its loss in the drawdown area of the tributary embayment of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3763-3772. [罗芳, 鲁伦慧, 李哲等. 农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响. 环境科学, 2021, **42**(8): 3763-3772.]
- [111] Wang X, Huang P, Ma M *et al.* Greenhouse gas emissions from riparian zone cropland in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China. *PeerJ*, 2020, **8**: e8503. DOI: 10.7717/peerj.8503.
- [112] Yang L, Lu F, Wang X *et al.* Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D10): D10109.
- [113] Bian JM, Li YS, Hu YX *et al.* Nitrogen balance of farmland ecosystem in the western Jilin Province and its effect on water environment. *Journal of Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1862-1868. [卞建民, 李育松, 胡昱欣等. 吉林西部农田生态系统氮平衡及其水环境影响研究. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1862-1868.]
- [114] Bono A, Alvarez R. Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, **59**(2): 259-272. DOI: 10.1080/03650340.2011.625413.
- [115] Xiong Y, Zhou J, Chen L *et al.* Land use pattern and vegetation cover dynamics in the Three Gorges Reservoir (TGR) intervening basin. *Water*, 2020, **12**(7): 2036. DOI: 10.3390/w12072036.
- [116] Lima IBT, Ramos FM, Bambace LaW *et al.* Methane emissions from large dams as renewable energy resources: A developing nation per-

- spective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2008, **13**(2): 193-206. DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
- [117] Zhang Y, 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.
- [118] Yi Y, Zhong J, Bao H *et al.* The impacts of reservoirs on the sources and transport of riverine organic carbon in the karst area: A multi-tracer study. *Water Research*, 2021, **194**: 116933. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116933.
- [119] Wang W, Yi Y, Zhong J *et al.* Carbon biogeochemical processes in a subtropical karst river-reservoir system. *Journal of Hydrology*, 2020, **591**: 125590. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125590.
- [120] Zorzal-Almeida S, Salim A, Andrade MRM *et al.* Effects of land use and spatial processes in water and surface sediment of tropical reservoirs at local and regional scales. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 237-246. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.361.
- [121] Li Z, Lu L, Lv P *et al.* Imbalanced stoichiometric reservoir sedimentation regulates methane accumulation in China's Three Gorges Reservoir. *Water Resources Research*, 2020, **56**(9): e2019WR026447. DOI: 10.1029/2019WR026447.
- [122] Jeppesen E, Kronvang B, Meerhoff M *et al.* Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(5): 1930-1941. DOI: 10.2134/jeq2008.0113.
- [123] Jeppesen E, Kronvang B, Olesen JE *et al.* Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: Implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia*, 2011, **663**(1): 1-21. DOI: 10.1007/s10750-010-0547-6.
- [124] Ji DB, Li Y, Kong S *et al.* The influence of a typical storm flood on the water bloom in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (6): 39-44. [纪道斌, 李媛, 孔松等. 典型暴雨洪水对三峡水库香溪河库湾水华的影响. 中国农村水利水电, 2013, (6): 39-44.]
- [125] Chen M, Xu HT, Wang XZ *et al.* Impact of Rainfall-Runoff events on methane emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 732-739. [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. 环境科学, 2021, **42**(2): 732-739.]