J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(4):000-000
DOI 10.18307/2027.0401
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

河道型水库温室气体通量监测方法及其应用进展*

张妍婷[1,2]，尹　炜[1,2]，陶江平[1,2]，吴兴华[1,2]，张玉松[1,2]，王殿常[2**]
（1：长江经济带生态环境国家工程研究中心，　武汉 430014）
（2：中国长江三峡集团有限公司，武汉 430014）

摘　要：在国家“双碳”战略背景下，科学评估水库温室气体排放特征，是客观认定水电工程气候效应、支撑水电行业低碳属性的重要内容。河道型水库兼具河流纵向输移、水库滞留沉积和工程调度控制等特征，其温室气体排放不仅取决于水体内部碳转化过程，也受蓄水淹没、水位调度、过坝下泄和消落带干湿交替等过程共同控制。科学识别河道型水库温室气体的排放路径、动态变化及尺度外推方法，是客观评估水电工程气候效应和低碳属性的重要基础。本文围绕河道型水库温室气体排放的主要途径识别及其评估需求，系统梳理了蓄水期碳脉冲、水库调度驱动的源汇转换、水-气界面扩散、气泡释放、过坝下泄消气及消落带非稳态排放等关键过程及其监测要求。进一步评述了通量箱法、薄边界层模型、涡度相关法、声学探测及遥感空间识别等多种主要技术的适用性与局限。在此基础上，以三峡水库为典型案例，总结大型河道型水库温室气体监测技术的实践演进和主要挑战。综合分析表明，当前河道型水库温室气体监测仍面临排放过程耦合解析不足、多方法接口不清、关键路径高不确定性、消落带非稳态过程难以刻画以及多尺度数据融合能力不足等问题。未来应从单项技术应用转向监测目标驱动的方法组合，构建多要素协同监测网络和标准化数据集，强化遥感空间约束与机理约束，并推动过程模型与数据驱动方法融合，为河道型水库温室气体全库动态评估、碳足迹核算和低碳运行管理提供方法支撑。
关键词：河道型水库；温室气体；通量监测；监测方法；三峡水库；甲烷；二氧化碳

Progress in greenhouse gas fluxes monitoring methods and applications in riverine reservoirs*

Zhang Yanting[1,2], Yin Wei[1,2], Tao Jiangping[1,2], Wu Xinghua[1,2], Zhang Yusong[1,2] & Wang Dianchang[2**]
（1：*National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt, Wuhan,* 430014*, P.R.China*）
（2：*China Three Gorges Corporation, Wuhan* 430014*, P.R.China*）

Abstract: With the implementation of China’s dual-carbon strategy, scientifically assessing greenhouse gas (GHG) emissions from reservoirs is essential for objectively evaluating the climatic effects of hydropower projects and verifying the low-carbon nature of the hydropower industry. Riverine reservoirs are influenced by longitudinal river transport, reservoir retention and sedimentation, and human-regulated operations. Their GHG emissions are controlled by internal carbon transformation processes, as well as by reservoir impoundment, water level regulation, degassing at dam discharges, and wet-dry alternation in water level fluctuation zones. Therefore, clarifying the emission pathways, temporal dynamics, and upscaling methods of reservoir GHGs is fundamental to assessing the climatic effects and low-carbon attributes of riverine hydropower reservoirs. This review identifies the main GHG emission pathways from riverine reservoirs and clarifies relevant assessment requirements. It systematically summarizes key ecological processes and monitoring needs, including carbon pulse events during impoundment, source-sink shifts driven by reservoir operation, air-water interface diffusion, ebullition, degassing at dam discharges, and unsteady emissions from water level fluctuation zones. The study then discusses the applicability and limitations of major monitoring techniques, such as the chamber method, the thin boundary layer model, eddy covariance, acoustic sensing, and remote sensing-based spatial

*2026-01-20 收稿；2026-07-15 收修改稿;2026-07-20 录用。
国家自然科学基金项目（U2340222）资助。
**通信作者：王殿常，E-mail：wang_dianchang@ctg.com.cn。

identification. Taking the Three Gorges Reservoir as a typical case, this paper summarizes the practical development and core challenges of GHG monitoring technologies for large riverine reservoirs. The synthesis indicates that current GHG monitoring for riverine reservoirs still faces several bottlenecks. These include low resolution in characterizing coupled emission processes, ambiguous boundary conditions among different monitoring methods, high uncertainty in key emission pathways, technical difficulties in quantifying unsteady emissions from water level fluctuation zones, and insufficient capacity for multi-scale data integration. Future research should shift from single-method applications to monitoring-target oriented method combinations, construct multi-parameter collaborative monitoring networks and standardized datasets, enhance remote sensing-based spatial constraints and mechanistic constraint analyses, and promote the integration of process-based models with data-driven approaches. These improvements can provide methodological support for whole-reservoir dynamic assessment, carbon footprint accounting, and low-carbon operation management of large riverine reservoirs.
Keywords: Riverine reservoir; greenhouse gases; flux monitoring; monitoring methods; Three Gorges Reservoir; methane; carbon dioxide

科学评估水库温室气体排放特征，是认定水电工程气候效应和支撑水电行业低碳属性的重要基础。截至 2024 年底，我国共建成水库 9.5 万座，总库容超过 1 万亿立方米，水库规模居世界首位[1]。随着长江、黄河、金沙江、澜沧江等流域梯级水电开发持续推进，许多河流干支流已形成由多个水库首尾衔接或相互影响的水库群[2-5]，大量原有河段也随之转变为受人工调控影响的河道型水库。与单一湖泊型水库相比，河道型水库兼具河流纵向输移、水库滞留沉积和工程调度控制等特征，使温室气体排放呈现更强的路径多样性、空间分区性和非稳态变化。因此，准确认识和监测河道型水库温室气体排放过程，是科学评价水库碳循环过程、水电低碳属性及流域碳收支的重要基础。

河道型水库是在原有河道基础上拦蓄形成的人工调控水体，其形态和运行过程明显区别于天然湖泊和湖泊型水库。天然湖泊通常具有相对稳定的湖盆形态和水文节律，湖泊型水库则多表现为较大的开阔水面和相对明显的库区水体滞留特征；而河道型水库通常具有狭长水面、纵向水动力梯度强、入库河流与支流库湾众多、坝前深水区与坝下河段差异显著等特点[6-7]。受梯级调度、日内调峰、季节性蓄泄和深层取水等影响，河道型水库中的碳输入、沉积、转化、释放和向下游输移过程不再仅受自然水文节律控制，而是与工程运行过程紧密耦合[8]。由此，河道型水库温室气体排放通常表现出更强的人工调控属性、空间分区特征和非稳态变化特征。

在排放路径上，河道型水库既具有水-气界面扩散和气泡释放等内陆水体共性排放过程，也更容易受到深层取水、过坝下泄、坝下强紊动、水位调度和梯级运行等工程过程影响。已有研究指出，水库水面二氧化碳（CO_2）与甲烷（CH_4）排放主要包括界面扩散和气泡释放等途径，不同排放路径对总排放贡献及其不确定性来源差异明显[9-10]。与开阔湖泊或湖泊型水库相比，河道型发电水库还具有坝前深水区与坝下河段连接紧密、泄流过程频繁、压力骤降和紊动增强显著等特点，使过坝消气成为其温室气体排放监测中不可忽视的工程控制路径。已有研究表明，坝下河段气体交换速率可显著高于库区水面[11]，说明仅关注库区水面扩散可能低估河道型发电水库的系统排放[11]。此外，对于调度水位变幅较大、岸带周期性暴露明显的河道型水库，消落带土壤-植被系统还可能形成阶段性的 CO_2 和 CH_4 排放，其排放量取决于水位涨落幅度、暴露面积、暴露历时、土壤含水率和植被覆盖等条件[12-13]。上述特点决定了河道型水库温室气体监测的核心难点，不仅在于获取局地通量值，更在于区分水面扩散、气泡释放、过坝消气和消落带非稳态排放等不同路径的相对贡献，捕捉调度运行下的短期波动和阶段性变化，并将点位观测结果可靠外推至库段、全库乃至梯级水库群尺度。

围绕这些需求，国内外已发展形成通量箱直接观测、浓度梯度与薄边界层模型估算、气泡捕集与声学探测、过坝消气断面监测与模型评估、涡度相关连续观测，以及遥感辅助的水面面积、消落带范围和空间分区识别等方法[14-16]。然而，在河道型水库中，水面狭长、支流库湾复杂、调度过程频繁和坝前坝下水动力差异显著，使单一方法或少量点位观测难以支撑全库尺度排放评估。因此，河道型水库温室气体通量监测方法的发展，需要从单项技术比较转向面向排放路径识别、动态过程捕捉、尺度外推和不确定性约束的

多方法协同体系。三峡水库为我国总库容最大的河道型发电水库，具有水位波动大、支流库湾众多、季节性消落带广布、坝前深水区明显和调度方式复杂等特征。多项研究表明，三峡水库运行会影响长江干流温室气体输移与释放，并使 CO_2 和 CH_4 动态受到反季节调度、深层取水、消落带干湿交替和坝下释放等过程的共同影响[12, 17-19]。这些特征不仅加大了监测难度，也使三峡水库成为检验不同通量监测技术适用性的理想区域，为总结大型河道型水库温室气体监测技术演进和优化方向提供了重要基础。

基于此，本综述针对 CO_2 和 CH_4 这两种关键温室气体，围绕河道型水库温室气体排放路径识别、动态捕捉、尺度外推和不确定性约束等核心需求，系统梳理水库温室气体排放关键过程及其监测要求，评述河道型水库温室气体通量监测技术的时空尺度适用性、技术集成方式和不确定性来源。在此基础上，结合三峡水库等典型场景，分析河道型水库温室气体监测技术的演进特征，并探讨河道型水库温室气体监测技术发展的关键方向。本文旨在为我国河道型水库温室气体监测体系优化、流域碳循环研究和水电低碳属性科学评价提供方法学参考。

1 河道型水库温室气体排放的关键过程识别及监测要求

明确关键排放过程和监测边界，是河道型水库温室气体通量评估的前提。河道型水库温室气体既具有内陆水体碳循环的一般特征，也受到河流纵向输移、梯级调度、水位涨落、深层取水和过坝下泄等工程过程的共同影响。河道型水库通常具有狭长水面、库段差异明显、支流库湾众多、坝前深水区与坝下河段水动力条件差异显著等特征，这些特征使 CO_2 和 CH_4 的产生、氧化、传输和释放不再仅受自然水文节律和湖盆内部生物地球化学过程控制，而是与工程调度和河流连续性改变紧密耦合[20-21]。因此，河道型水库温室气体监测的重点不仅是获取温室气体排放通量值，更在于识别关键排放过程、区分不同路径贡献、捕捉调度驱动下的非稳态变化。

1.1 蓄水淹没与陆源碳脉冲

蓄水期碳脉冲是新建水库区别于天然河流和湖泊的重要新增排放过程，其监测重点在于建立蓄水前背景、捕捉早期排放峰值并识别长期衰减过程。初次蓄水后，陆地生态系统被淹没，土壤有机质、植被残体及外源输入有机碳进入新的水体环境，在厌氧或缺氧条件下发生分解与转化，并可能在蓄水初期形成阶段性的 CO_2 与 CH_4 排放增强，即所谓蓄水期“碳脉冲”[22-23]。与天然河流中有机碳快速向下游输移不同，水库蓄水显著延长了水体停留时间，并增强了有机碳在支流库湾、浅水区、入库河口和消落带等区域的沉积与转化[24]。

河道型水库蓄水淹没引起的碳脉冲往往具有更强的空间差异和明显的时间衰减特征[9, 19]。不同库段的淹没高程、原土地利用类型、植被清理程度、泥沙沉积和水体停留时间不同，导致陆源碳输入、沉积和转化强度并不均一。特别是在入库河口、支流库湾和浅水沉积区，有机碳更容易沉积和累积，可能形成局部排放热点[25-26]。

从监测体系构建来看，蓄水期碳脉冲监测应重点服务于背景基准建立、早期脉冲捕捉和长期衰减识别。对于新建水库，首先应尽可能在蓄水前调查背景基准，记录原有土地利用类型、植被生物量、土壤有机碳储量、河流水体 CO_2 与 CH_4 浓度及水-气界面通量等基础信息，为后续判断新增排放提供参照。其次则需要在蓄水初期连续或加密观测，以捕捉短期排放峰值及其随水文条件和有机质供给变化的响应过程。同时，应结合淹没高程、土地利用类型和水动力条件等进行空间分区，识别不同区域碳脉冲强度及其衰减差异。对于已建成多年的河道型水库，蓄水期碳脉冲往往难以通过现场观测直接重建，一般依赖历史土地利用资料、淹没面积、植被和土壤碳库估算、长期排放序列及模型反演间接约束[19, 27]。

1.2 水库调度驱动的碳源汇转换

水库调度是河道型水库温室气体源汇转换的核心外部驱动，与水位和水动力条件相对稳定的天然湖泊相比，河道型水库水位变化往往具有更强的人为节律性，水位上升、回落和短周期调峰不仅改变水体面积、水深和水动力条件，也会影响水体分层、界面湍流、沉积物氧化还原状态以及溶解性气体的传输路径[28]。

水位涨落对温室气体源汇状态影响尤为明显。以 CH_4 排放为例，水位下降时，浅水区和库岸带沉积物所受静水压力降低，沉积物中原本储存的 CH_4 气泡更容易逸出；水位上升和淹没过程则可能增强厌氧环境

和有机质分解底物供给，促进 CH_4 产生[29-30]。CO_2 的源汇变化则更多体现为水体代谢过程、碳酸盐体系和气体交换条件的综合结果。水位下降、沉积物暴露和水体扰动增强，可促进有机碳好氧矿化和溶解态 CO_2 释放；而在水体初级生产较强或藻类生长旺盛的阶段，光合作用消耗 CO_2，使局部水域表现为弱排放甚至阶段性吸收状态[13,31]。

上述过程在大型河道型水库中具有明显的阶段性和空间分异特征。以三峡水库为例，其“蓄清排浑”运行方式使坝前水位在 145~175 m 之间季节性变化，排水期、低水位运行期和高水位运行期对应不同的水深、流速、水体交换和水环境状态[32]。主库区、支流库湾、浅水沉积区和坝前深水区对调度过程的响应并不一致，增加了通量观测和区域外推的不确定性[33]。因此，水库调度驱动的源汇转换对监测提出了过程性要求。监测不能仅关注某一时段的平均通量，而应结合水库运行阶段和水动力分区，同步获取 CO_2/CH_4 排放通量、不同水文要素条件、溶解氧、有机碳、营养盐及沉积物氧化还原状态等信息。由此，调度驱动过程的监测为后续连续观测、关键阶段加密监测和运行情景下的通量外推提供了基础。

1.3 水-气界面扩散与气泡释放

水-气界面扩散和气泡释放是河道型水库水体向大气释放温室气体的两类基本路径。与开阔湖泊或湖泊型水库相比，河道型水库中水面扩散和气泡释放的基本机制并无本质差异，但其空间组织方式和主控因子更受河道形态与调度过程影响。河道型水库通常沿纵向形成入库河段、过渡库段、支流库湾、主库区和坝前深水区等不同水动力单元，不同库段在流速、水深、停留时间、沉积物有机质和水体混合条件方面差异明显，从而导致溶解气体浓度、界面交换强度和 CH_4 气泡释放概率呈现明显空间分异[9,14]。以三峡水库为例，高分辨率观测显示，其溶解态 CH_4 浓度和扩散通量具有显著时空差异，上游库段浓度和通量通常高于近坝库段[34]。

支流库湾和浅水沉积区是河道型水库水面排放监测中需要重点关注的空间单元。这类区域水体交换相对较弱，营养盐、有机质和细颗粒沉积物更易累积，既可能增强溶解态 CO_2 和 CH_4 的浓度，也可能为 CH_4 气泡释放提供底物和厌氧环境[14,35]。由此，监测设计应按库段和水动力单元区分扩散通量与气泡释放贡献，重点覆盖入库河段、支流库湾、浅水沉积区和坝前深水区，并在水位快速变化或关键调度阶段加密观测，以降低路径归属和尺度外推的不确定性。

1.4 过坝下泄消气的工程控制过程

过坝下泄消气是河道型发电水库区别于天然湖泊和开阔型水库的重要排放过程。对于具有深层取水和集中泄流特征的河道型水库，坝前深水区可能因水体分层、有机质分解和溶解气体累积形成较高的 CO_2 或 CH_4 浓度。当水体经水轮机、泄洪孔、溢洪道或深孔下泄时，压力骤降、掺气增强和水流强紊动会促进溶解气体快速释放，使坝下河段成为温室气体排放的重要区域[36-37]。

过坝消气的特殊性在于其具有明显的工程工况依赖性和空间快速变化特征。一方面，不同泄流方式对应不同取水深度和消能过程，同一水库在发电、泄洪、调峰或生态调度等不同运行工况下，坝前溶解气体输入和坝下释放效率可能存在明显差异。另一方面，坝下河段通常处于高速水流和强紊动环境中，气体交换可同时发生在自由水面、掺气气泡和尾水混合区等多个界面，溶解气体浓度也可能在较短距离内快速衰减[11]。已有关于过坝下泄总溶解气体研究表明，高坝泄流产生的气体过饱和及其下游输移受初始气体饱和度、泄流方式、掺气过程、水深和紊动条件等因素影响，常需通过现场观测与两相流或水动力模型结合预测和校验[38-39]。尽管这类研究主要面向总溶解气体过饱和及其生态效应，但其揭示的取水层、泄流结构、掺气紊动和坝下沿程衰减之间的过程联系，对 CO_2 和 CH_4 过坝消气监测与评估具有方法学借鉴意义。

因此，过坝下泄消气的监测要求不应局限于在坝下某一点位直接测定通量，而应服务于过坝消气过程识别和模型评估。监测对象应从单一水面通量扩展到坝前取水层溶解气体累积、泄流工况变化和坝下河段溶解气体衰减过程；监测时段应覆盖不同泄流方式、流量条件和调度阶段；空间上则需要关注坝前深水区、坝下近区和下游恢复河段之间的连续变化。对于梯级河道型水库，还应考虑上一级水库下泄水体对下游河段及下一级水库溶解气体输移和再释放过程的影响。由此，过坝消气监测的重点是建立泄流工况、溶解气体变化和坝下释放量之间的过程关联，为模型提供边界条件与校验依据。

1.5 水位涨落驱动的消落带非稳态排放

水位涨落使消落带成为河道型水库中最典型的非稳态排放单元。消落带是河道型水库受季节性蓄泄、调峰运行和生态调度影响形成的水陆交错区域，消落带暴露期主要以土壤、植被的排放过程为主。与自然河岸带相对缓慢的季节性变化不同，河道型水库消落带暴露和淹没过程直接受水库蓄泄调度控制，因而具有更强的人工节律和非稳态特征，可被视为一个水位变化驱动的“动态生物地球化学反应器”，其特殊性主要体现在三个方面：一是淹没-出露过程可快速改变表层土壤含水率、氧扩散条件和氧化还原状态；二是植被-土壤系统在淹没期的厌氧分解与落干期的好氧矿化之间交替转换，从而调控温室气体的产生、氧化与排放；三是水位涨落伴随的沉积和再悬浮过程会重塑表层基质、植被残体和有机质分布，进而影响微生物活动和碳转化过程[40-41]。

这种动态反应器特征直接影响消落带 CO_2 和 CH_4 的产生与释放。在出露阶段，沉积物由缺氧状态转为相对好氧环境，土壤通气性增强，可显著促进土壤有机质矿化及根系呼吸，从而增强 CO_2 释放；而在重新淹没后，土壤含水率升高、氧扩散受限，植被残体及土壤有机质分解为产甲烷微生物提供底物，进而在厌氧条件下促进 CH_4 生成[42-44]。部分具有发达通气组织的湿生植物还可通过植物介导途径，将根际或土壤中产生的 CH_4 直接输送至大气[44]。

消落带温室气体排放的定量难点在于，其通量变化同时受到水位阶段、暴露历时和空间分异的共同控制。在时间上，水位下降期、出露初期、持续暴露期和再淹没阶段对应不同的土壤含水率、氧化还原状态和微生物过程，低频或单一时段观测难以代表全年排放；在空间上，不同高程带的淹没历时、植被覆盖、土壤质地和土地利用背景存在差异，使同一水库消落带温室气体排放量具有空间异质性[13, 45-46]。对于三峡水库这种反季节调度明显、消落带面积较大的河道型水库，水位涨落还会持续改变暴露面积和暴露时长，其区域排放估算不仅取决于单位面积通量，也取决于动态暴露边界的识别[45,47]。由此，消落带监测要求应突出水位阶段、动态边界和空间分区。时间上，应覆盖出露初期、持续暴露期和复淹初期等关键阶段；空间上，应结合高程带、植被类型、土壤质地和有机质条件进行分区。

1.6 多过程耦合下的综合监测要求

河道型水库温室气体排放并非单一水面交换过程，而是河流纵向输移、水库滞留沉积、水位调度、工程泄流和岸带干湿交替共同作用的结果（图 1）。这种多界面、多路径和多阶段叠加的特征，是河道型水库温室气体监测区别于天然湖泊和一般河流监测的核心难点。因此，河道型水库温室气体监测的关键不只是提高通量测定精度，更在于建立能够解释排放来源和过程归属的综合监测体系。该综合监测体系首先要求明确水库温室气体排放路径和核算边界。水-气界面扩散、气泡释放、过坝下泄消气、消落带土壤与植被排放，在发生位置、持续时间和控制因素上均存在差异。若仅用水面温室气体平均排放通量代表水库整体排放，容易低估具有空间热点性、事件性或动态边界特征的排放组成，也可能在库区、坝下河段和消落带之间造成核算边界不清。因此，路径区分和边界统一是提高水库温室气体通量估算可比性的前提。

其次，监测体系匹配水库排放的非稳态特征。水库蓄水初期、排水期、运行期、泄洪期、再淹没期等关键阶段，往往对应不同的水动力条件、氧化还原状态和气体释放方式。低频人工采样可以获得基础排放通量水平，但难以识别短期高通量事件及其过程机制。因此，监测频率应与水库水文条件相匹配，并同步获取水温、溶解氧、有机碳、营养盐、沉积物或土壤氧化还原状态等环境过程因子。

最后，综合监测还需要解决空间代表性和尺度外推问题。水库内部存在干流、支流库湾、浅水沉积区、坝前深水区、坝下河段和消落带等不同功能单元，其碳源供给、水动力条件和排放机制差异明显。因此，温室气体排放通量监测设计应围绕干流与支流库湾、浅水区与深水区、坝前与坝下、稳定水面与动态消落带等典型空间单元分区布设，并将通量观测与水文过程、底物供给、沉积物或土壤性质及植被状态等信息联系起来。总体而言，水库温室气体综合监测应围绕路径识别、动态捕捉、空间分区、过程解释和不确定性约束展开，为后续监测技术适用性评价和多方法集成提供问题基础。

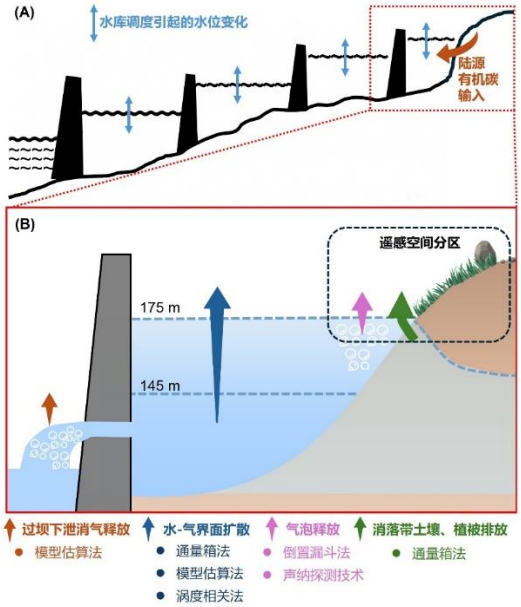

图 1 河道型水库温室气体关键排放过程与监测方法。（A）流域梯级水库群形成下的河流纵向输移、水库调度和陆源有机碳输入格局；（B）河道型水库中过坝下泄消气、水-气界面扩散、气泡释放及消落带土壤-植被排放等关键过程及主要监测方法

Fig.1 Schematic diagram of key greenhouse gas emission processes and monitoring methods in riverine reservoirs. (A) Longitudinal riverine transport, reservoir regulation, and terrestrial organic carbon input under a basin-scale cascade reservoir system; (B) key processes and major monitoring methods in a typical riverine reservoir, including degassing during dam discharge, air–water diffusive exchange, ebullition, and soil-vegetation emissions from the drawdown zone

表 1 水库温室气体关键排放途径特征及监测要求

Tab.1 Characteristics and monitoring requirements of key greenhouse gas emission pathways in reservoirs

关键过程	主要监测问题	时空特征	关键监测要求
蓄水淹没与陆源碳脉冲	初次蓄水形成的新增 CO_2 和 CH_4 排放如何与蓄水前背景区分	蓄水初期可能增强，后续随底物消耗和水体稳定而衰减；受淹没土地利用类型、植被和土壤有机质性质影响	建立蓄水前背景基准，捕捉蓄水初期排放峰值，结合淹没高程、土地利用和碳库信息长期约束
水库调度驱动的碳源汇转换	水位涨落和运行调度如何改变 CO_2 和 CH_4 产生、氧化和释放之间的平衡	具有时空分异特征，受水文条件、水化环境条件影响	结合水库不同运行阶段观测，同步获取通量、水文水质和沉积物过程因子
水-气界面扩散与气泡释放	扩散与 CH_4 冒泡如何区分，并量化其对温室气体总排放的相对贡献	界面扩散时间连续变化，空间相对均匀但受水动力影响；气泡释放的空间热点性和时间突发性可能在浅水区和支流库湾叠加	获取浓度梯度、气体交换条件和气泡释放过程，识别冒泡热点，区分扩散和气泡贡献
过坝下泄消气	工程泄流如何导致溶解态温室气体快速释放，并如何纳入水库排放边界	受泄流方式、取水深度、流量、水头等条件控制，受运行工况影响显著	关注坝前取水层溶解气体累积、泄流工况变化和坝下断面浓度衰减，明确过坝及坝下释放边界
消落带非稳态排放	如何将不同路径、阶段和空间单元的监测结果整合进而估算排放	多路径并存，高时空异质性，不确定性来源复杂	建立路径识别、动态捕捉、空间分区、过程解释和不确定性约束相结合的综合监测思路

2 河道型水库温室气体通量监测方法及适用性评价

河道型水库温室气体监测方法的适用性，取决于其能否匹配空间结构、调度过程和排放路径。水-气界面扩散和气泡释放是各类湖库普遍存在的排放途径，其监测方法已相对成熟，但在河道型水库中，狭长库形、纵向水动力梯度、支流库湾、浅水沉积区和水位调度会改变点位布设、参数选择和空间外推方式。相比之下，过坝下泄消气、消落带动态暴露及梯级水库群尺度外推更能体现河道型发电水库区别于天然湖泊和开阔型水库的监测难点。因此，本章主要围绕不同技术对河道型水库关键排放过程的适应性、局限性和组合方式展开评述（表 2）。

表 2 传统监测方法在河道型水库温室气体通量评估中的适用性评价

Tab.2 Applicability of conventional monitoring methods for greenhouse gas flux assessment in riverine reservoirs

监测方法	主要观测尺度	时间分辨率	适用监测对象	河道型水库中的适配重点	主要局限与不确定性
通量箱法	局地/点位尺度	低-中	开放水面、土壤-植被界面的局地排放通量	需按入库河段、支流库湾、坝前库区和消落带等典型空间单元分区布设；在水位快速变化前后加密观测	空间代表性有限，受箱体扰动、风速与湍流条件变化影响
涡度相关法	局地/点位尺度	高	较均一水面或陆地生态系统的连续净通量	暂不常见，更适合典型库段或岸带连续背景通量监测	狭长水面、峡谷地形等地下垫面特征难以区分不同排放路径
薄边界层模型法	点位-区域尺度	低	水-气界面扩散通量	适合多点扩散通量估算和区域外推	k 值参数化不确定性大，难以表征气泡释放，受风速与湍流条件变化影响
倒置漏斗法	点位尺度	低	气泡释放的点位收集和气体组成测定	适合支流库湾、浅水沉积区、入库河口和有机质沉积区等潜在冒泡热点，操作简单	气泡捕获效率受漏斗尺寸、布设深度和环境扰动影响，时空分辨率低
声呐探测技术	局地-区域尺度	中	气泡羽流识别和冒泡热点空间探测	适合在狭长库区、支流库湾和浅水沉积区空间扫描，并与倒置漏斗结合评估	数据处理复杂，设备成本高，模型与校准依赖强
坝前后断面监测与水动力-传质模型	工程局部尺度	按工况模拟	过坝下泄消气过程	适用于高流速、强紊动条件下的气体快速释放过程	受工况变化、断面代表性、传质参数、气泡参数和模型边界条件影响
消落带箱式通量观测	局地/点位尺度	低-中	不同水位阶段和空间分区的单位面积通量	可按不同高程带、植被类型和水位阶段原位监测	受样点代表性、采样频率、土壤和植被异质性、暴露时长影响
遥感空间分区与通量外推	区域尺度	中	水面面积、消落带动态暴露边界、高程带面积权重和植被空间分布	可识别消落带动态边界，实现由点位向区域尺度扩展	受水陆边界识别误差、植被分类误差、面积权重等影响

2.1 点位直接通量监测方法

作为水库温室气体监测中最基础的实测方法，适用于水-气界面扩散通量、消落带土壤植被排放和局地点位过程通量测定，主要包括通量箱法和涡度相关法。通量箱法侧重局地界面通量，适合点位对比和过程响应观测；涡度相关法侧重碳足迹范围内的连续净通量，适合刻画时间变化曲线。对于河道型水库而言，直接通量观测的关键不只是获得某一点位通量值，而是需要根据库段分异和水动力单元分区布设。具体来

说，这类方法的适用性评价重点在于其空间代表性、时间连续性、过程分辨能力和观测扰动。

2.1.1 通量箱法　通量箱法是一种传统的现场直接测量扩散通量技术。用于开放水面监测时，通常采用浮箱；用于消落带、湿地或植被覆盖区域监测时，则多采用静态箱或透明、不透明箱，以区分土壤呼吸、植被光合作用和植物介导传输等过程[48-50]。通量箱法的一般计算公式如下：

$$F = \frac{S \times P \times F_1 \times F_2 \times V}{R \times (273.15+T) \times A} \tag{1}$$

其中,F 为水-气界面扩散通量（mg/（m^2·h）），S 为箱内温室气体浓度随时间变化的斜率（μatm/s 或 ppm/s），P 为环境大气压力（kPa），F_1 为分子摩尔质量（如 CO_2：44 g/mol），F_2 是秒与小时的转化系数（3600 s/h），V 为箱内气体的有效体积（m^3），R 理想气体方程中的常量（8.3144 J/（mol·K），T 为箱内气温（℃），A 为箱内覆盖水面的表面积（m^2）[51-54]。

通量箱法的优势在于所用设备简单、成本低、布设灵活，其可靠性主要受箱体设计、采样时长、箱内混合、温度变化和水动力扰动影响。对于河道型水库，其应用价值主要体现在两方面：一是可在支流库湾、浅水沉积区、坝前库区和消落带等典型单元分区观测，揭示不同水动力和底物条件下的局地排放差异；二是可在水位涨落初期或调度转换期加密观测，捕捉短期过程响应。因此，通量箱法更适合作为典型点位和关键阶段的过程观测工具，而不宜直接用少量点位代表全库平均排放。

通量箱法的不确定性主要来自箱体扰动、采样频率和样点代表性。箱体覆盖水面后会改变箱内风场、压力、温度和近表层湍流结构，从而使测得通量偏离自然状态下的交换速率。对于开放水面，浮箱可能改变原有风浪和湍流结构，从而影响水体与大气界面交换。例如，Vachon 等研究发现使用的特定浮箱在低湍流条件下可使气体通量最高高估约 10 倍；在高湍流条件下，高估幅度明显降低，但平均高估比仍约 50%以内[55]。这说明通量箱误差并非固定方向和固定量级，而与箱体结构、固定或漂移方式、观测时长以及外部风浪和湍流条件密切相关。对于植被覆盖土壤区域，透明箱与不透明箱的选择会影响光照条件和植被生理过程，因此需要根据生态系统呼吸或土壤呼吸等不同目标选择箱体类型[56]。

对于 CO_2 和 CH_4，通量箱偏差还具有不同表现。CO_2 扩散通量主要受浓度梯度和界面传质控制，箱体诱导湍流可能在低风速、低湍流条件下造成高估，而在强风浪条件下也可能因屏蔽自然风生湍流和波浪破碎过程导致低估。Erkkilä 等在湖泊环境中监测发现，浮箱测得的 CO_2 通量有时高于同步涡度相关结果[57]。CH_4 通量则更易受到气泡释放事件影响。若观测期间偶发气泡进入箱体，会造成箱内浓度短时快速升高，使 CH_4 通量被显著高估；若低频布设未捕捉气泡释放事件，则可能低估区域 CH_4 排放。因此，在河道型水库中，通量箱观测应尽量与气泡识别、溶解气体浓度观测、连续水位记录或涡度相关观测结合使用，以避免将局地箱体扰动或偶发气泡事件误判为区域平均通量。

2.1.2 *涡度相关法*　涡度相关法是一种基于大气湍流输送原理的直接通量观测方法，可在不干扰下垫面的条件下获取一定足迹范围内温室气体与大气之间的净交换通量[58-60]。与通量箱法相比，涡度相关法不局限于箱体覆盖范围，而是反映观测点上风向足迹范围内的综合净通量，因而更适合连续观测和通量动态变化研究。涡度相关法的气体通量计算公式一般如下：

$$F = \overline{w'c'} \tag{2}$$

其中,F 为待测气体通量（mg/（m^2·d）），w'为垂直风速脉动（m/s），c'为待测气体平均浓度（g/m^3），$\overline{w'c'}$ 代表风速与浓度脉动的协方差[61]。按照上述参数单位，$\overline{w'c'}$与 F 之间还需单位换算，即 F=$\overline{w'c'}$×1000×86400。

近年来，涡度相关法在湖泊环境中主要用于 CO_2 通量监测，少数研究应用于 CH_4 通量测定[15,59,62]。其突出优势是时间分辨率高，可实现全年连续监测[15]。然而，涡度相关法在河道型水库中的应用也受到通量足迹和下垫面异质性的限制。尤其是对于峡谷型或山地河道型水库，复杂地形还可能影响风场稳定性和湍流结构，增加通量解释难度。这是由于涡度相关法本质仍属于点位尺度观测，空间代表性受观测高度、风向、风速、大气稳定度和下垫面粗糙度等因素控制[63]。因此，涡度相关法更适合作为连续净通量和关键事件响应的观测手段，而不宜单独作为全库排放外推依据。

2.2 水-气界面扩散通量的估算方法

水-气界面扩散通量估算方法是河道型水库温室气体通量评估中的重要手段，目前常采用薄边界层模

型，其基本表达式为：

$$F = k \times \left(C_{water} - C_{eq}\right) \quad (3)$$

其中,F 为水-气界面扩散通量（mg/（m^2·h）），k 为气体传质系数（mm/h），C_{water} 和 C_{eq} 分别是水中 CO_2/CH_4 浓度（mg/L）和大气 CO_2/CH_4 浓度在特定温度下达到平衡时的浓度[52,64]。需要注意的是，薄边界层模型估算的是水体与大气界面扩散通量，而不是沉积物与水界面通量。沉积物扩散系数和沉积物结构等参数需另行计算，不能与水体与大气界面扩散通量混用。

对于河道型水库而言，薄边界层模型的适用难点在于浓度场和 k 值均具有显著空间分异。有关热带水库的空间解析观测表明，若采用平均风速换算得到的固定 k 值，可使 CO_2 扩散通量低估约 41%至 57%，也可能高估约 70%；对于 CH_4 扩散通量，固定 k 值可造成约 34%至 82%的通量低估[65]。关于大型湖泊温室气体通量评估的研究指出，不同经验模型和过程模型对 k 值的预测可相差约 2 倍[66]。河道型水库的狭长水面、支流汇入、水位调度和纵向水动力变化等特征，使水-气界面交换不仅受局地风速控制，还可能受流速、分层破坏、热对流、泄流扰动和库湾水体混合影响。若直接采用开阔湖泊或低流速水体中建立的风速经验公式，可能难以代表实际界面交换强度。湖泊区域的相关研究表明，将风剪切和水体冷却等过程纳入 k 值估算后，得到的气体交换速率可显著高于早期单一风速模型，说明不同 k 值模型可能造成系统性排放通量差异[67]。

从适用边界看，薄边界层模型适合估算非气泡主导条件下的水-气界面扩散通量，尤其适用于多点位调查、断面观测和开放水域扩散通量外推。若水体中温室气体以气泡释放、过坝下泄消气等途径为主，仅依据模型估算会严重低估总排放通量。

2.3 气泡释放监测方法

气泡释放过程的监测目标与扩散过程不同，其核心在于识别温室气体冒泡事件、刻画热点区域分布，并尽可能量化气泡释放在总排放中的贡献。值得注意的是，目前可被监测到的气泡几乎全部以 CH_4 为主，而较少涉及 CO_2 等其他温室气体[14, 68-69]。下面技术方法描述中主要以 CH_4 为核心监测对象。

目前水库气泡释放监测主要包括倒置漏斗法和声学探测方法。倒置漏斗法设备简单、成本较低，能够提供局地气泡通量和气体组成实测数据[70]。但由于漏斗覆盖面积有限，其结果对布设位置高度敏感，难以代表气泡释放的空间异质性；若观测频率较低，也容易遗漏短时冒泡事件和水位变化引起的脉冲释放。该方法气泡释放通量的计算公式一般如下：

$$F = \frac{1000 \times C \times V}{A \times t} \quad (4)$$

其中,F 为气泡释放通量（mg/（m^2·d）），C 为漏斗收集气泡中所含温室气体浓度（mg/m^3），V 为漏斗气泡收集的体积（m^3），A 为漏斗口径面积（m^2），t 为气泡收集时间间隔（d）[52-53,71]。在河道型水库中，该方法更适合用于典型浅水区、支流库湾和高有机质沉积区的定点观测，不宜单独用于全库气泡释放外推。

声呐探测技术是近年来用于气泡释放空间识别和通量反演的重要技术，与倒置漏斗相比，声学方法在空间扫描和热点识别方面具有优势，尤其适合河道型水库中支流库湾、浅水沉积区和有机质丰富区域的冒泡空间结构调查。但声学探测本身通常不能独立给出温室气体排放通量，其气泡体积反演需要气泡尺寸、上升速度和声学散射模型支持。其监测数据处理需通过去卷积算法还原气泡体积分布，设置单目标筛选标准剔除鱼群、悬浮颗粒物等干扰信号，确保目标识别准确性[72]。气泡中温室气体体积分数仍需通过倒置漏斗或气相色谱分析获取，两者联合估算。

由此，声呐技术在气泡释放监测中的科学定位在于获取空间结构与体积通量，而非独立完成温室气体通量估算，其有效应用依赖多参数观测与多方法耦合。若目标是量化支流库湾 CH_4 冒泡对水库总排放的贡献及其年际变化，则需要满足高空间分辨率识别冒泡热点、高时间分辨率捕捉突发性冒泡事件、长时间连续观测计算年通量，以及区分水-气界面扩散背景通量等需求。针对这些需求，声学探测主要用于走航或季节性扫描，以刻画冒泡热点及其空间分布；倒置漏斗或自动集气装置应布设于声学识别出的代表性热点区和背景区，用于获取连续或高频点位气泡通量及气体组成；溶解气体观测结合薄边界层模型则用于估算同期扩散通量背景。最终需要建立声学信号强度、气泡体积分布、点位气泡通量和气体组成之间的转换关系，

将点位观测结果向库湾或全库尺度外推，并评估热点识别、点位代表性、气体组成和时间外推等不确定性。

2.4 过坝消气监测与模型评估

过坝消气属于河道型水库温室气体排放中具有较强非连续性和高不确定性的排放路径。对于过坝消气监测，已有关于大坝泄洪总溶解态气体过饱和的研究提供了重要理论借鉴。大坝泄洪下游水体中溶解态气体变化不仅与自由水表面传质有关，更与气泡卷吸进入水体后的气泡界面传质、有效水深和水流紊动特性密切相关[37]。在高坝挑流消能条件下，溶解态气体过程可概化为消能区内高压掺气水流中的气体过溶，以及水流离开消能区后因压力和水深降低引起的快速释放[39]。所以，过坝消气的关键控制环节并非单一水面边界层交换，而是泄流建筑物、消能方式和坝下水动力条件共同决定的非均匀传质过程。这一过程特征决定了常规原位通量方法的适用性有限。

由此，现有温室气体过坝下泄评估研究主要采用现场边界条件与水动力传质模型结合的技术路线。黄菊萍等基于气液两相的 VOF（Volume of Fluid）模型构建了大坝泄流条件下 CO_2 与 CH_4 排放速率的数学模型。具体而言，可通过现场获取上游来流浓度、水位、流量及运行工况等边界条件，再利用气液两相流模型对过流坝面及坝下消力池中的气泡传质和自由液面传质过程模拟，从而估算 CO_2 与 CH_4 排放速率[36]。该模型的可靠性取决于边界条件和关键传质参数，尤其是依赖掺气浓度、气泡粒径、气泡界面传质系数、自由液面传质系数和紊动扩散参数等变量，其中部分参数难以在原型工程中直接测定，通常需要结合水力模型、经验关系或现场断面资料校准[36]。尽管现有温室气体过坝模拟多借鉴水体中溶解氧过饱和研究框架[37,73]，但 CO_2 与 CH_4 的溶解度、扩散系数和生物地球化学背景与溶解氧均不同，模型参数仍需针对具体河道型水库特点和气体类型进一步校验。对于梯级河道型水库，还需考虑上一级水库下泄水体对下游河段及下一级库区溶解气体输入和再释放过程的影响。由此，过坝下泄消气监测与评估的适配重点在于：以现场断面监测约束模型输入与输出，以工程运行资料解释工况差异，并通过模型模拟弥补高紊动、短历时释放过程难以直接观测的不足。

2.5 消落带排放通量监测与空间外推方法

消落带排放是水位涨落幅度较大、周期性暴露明显的河道型水库中需要重点关注的排放过程。与稳定岸带或开阔型水库固定水陆边界不同，河道型水库消落带的暴露范围、暴露历时和复淹时间直接受蓄泄调度控制，单位面积通量和暴露面积均随水位过程动态变化。因此，消落带温室气体监测不能仅依赖少量固定点位通量观测，而需要解决两个问题：一是不同水位阶段和空间分区的单位面积通量如何获取，二是这些通量对应的暴露边界和面积权重如何确定。

地面通量监测仍是消落带排放评估的基础。在实际应用中，消落带通量箱监测通常需要结合高程带分区和水位过程布设，并在出露初期、持续暴露期及再淹没前后等关键阶段提高监测频率，以捕捉非稳态排放变化。必要时，还可同步监测土壤含水率、氧化还原状态及有机质性质等参数，从而分析排放通量与过程驱动因子之间的关系[41]。通量箱或与在线气体分析仪联用的箱式观测系统可在一定程度上提高消落带典型点位的时间分辨率，适用于捕捉昼夜变化、降雨事件和水位快速变化引起的非稳态响应。涡度相关法也可用于连续净通量观测，但其在消落带地区的应用相对有限，且观测结果受足迹范围、下垫面均一性和风场条件影响，难以直接区分土壤呼吸、植被交换和邻近水面排放[52]。由此，消落带排放监测应以分区通量箱观测为基础，结合关键阶段的连续观测和过程因子同步测定，形成对不同水位阶段排放机制的约束。遥感技术正是在这一环节发挥作用，其核心作用通常不是直接反演近地表温室气体浓度，而是为空间分区和尺度外推提供边界约束[74]。

遥感技术可以获取水体或消落带的空间范围及其动态变化，在此基础上结合地面观测获得的通量数据，从而得到区域总排放通量。该方法的核心思路是：通过遥感影像提取水面面积或消落带暴露的动态范围[75]，并结合不同区域的通量观测结果或代表性排放因子，对整个区域尺度通量加权计算[47,76]。例如，在三峡库区消落带 CO_2 排放研究中，研究者基于 Sentinel-1 SAR 卫星数据提取消落带暴露与淹没范围，结合地面静态箱观测获得的 CO_2 排放通量，建立了 30 m、月尺度的 CO_2 通量估算框架。结果表明该方法对暴露与淹没边界的识别精度可达 92.3%，说明遥感技术能够较好反映消落带排放的空间差异特征[47]。

除基于空间范围识别的分区外推外，遥感技术也可以用来反演水体或生态系统相关的环境参数（如水

表温度、叶绿素 a、透明度及溶解有机物等），并结合地面观测数据建立经验模型或机器学习模型，估计温室气体通量的区域尺度。该方法已应用于内陆水体环境中。例如，在太湖藻型湖区的 CH_4 通量监测研究中，利用 MODIS 卫星数据反演水体温度、叶绿素 a 及光学参数，并结合实测 CH_4 通量数据构建随机森林模型，重建了湖泊 CH_4 扩散通量的时空分布[77]。

总体而言，消落带温室气体排放通量监测的不确定性主要来自三个方面：一是地面点位监测能否代表不同高程带、植被类型、土地利用类型和暴露历时单元；二是遥感识别的水陆边界、植被覆盖和暴露状态是否准确；三是点位通量向区域尺度转换时是否充分考虑水位过程和排放阶段差异。已有内陆水体遥感和升尺度研究均表明，遥感反演或空间外推结果高度依赖地面数据质量、模型参数和空间分区合理性[78]。

2.6 监测方法集成与不确定性控制

河道型水库温室气体通量监测的关键不在于选择单一方法，而在于根据排放路径和监测目标建立相互约束的方法组合。从温室气体排放路径看，水库开放水域的界面扩散通量可由溶解态气体浓度监测和薄边界层模型估算，并通过通量箱或涡度相关观测对气体交换速率约束；气泡释放需要将声学热点识别与倒置漏斗结合，以同时获得空间分布、气泡通量和气体组成；过坝下泄消气需依赖坝前浓度、泄流工况、坝下断面观测和水动力-传质模型耦合评估；消落带排放则应以高程带、植被类型和暴露历时分区为基础，结合通量箱观测、关键阶段高频监测和遥感边界识别进行空间外推。

上述监测方法的不确定性控制应贯穿监测设计和尺度转换全过程。点位监测方法的不确定性主要来自通量箱体扰动、采样频率不足和样点代表性有限；模型估算方法的不确定性主要来自参数确定和边界条件设定；空间外推方法的不确定性则来自消落带边界识别、面积权重和模型结构选择。由此，水库温室气体通量监测应形成路径识别、过程观测、空间约束和模型外推相结合的技术链条。对于大型河道型水库，还需特别关注水库调度、支流库湾异质性、消落带动态暴露和过坝下泄消气对监测方案的影响。对于其他类型水库，则应根据水库形态、调度方式、消落带规模和泄流条件调整技术组合，避免简单套用特定水库的监测框架。

3 典型河道型水库温室气体通量监测目标与方法组合

在实际监测中，方法选择并不是孤立进行的，而是取决于监测目标、排放路径、运行阶段和空间单元。对于大型河道型发电水库，温室气体监测通常经历从基础排放识别、空间异质性约束、动态过程捕捉到多路径核算边界拓展的转变，相应地，监测方法也由单一点位观测逐步发展为多路径、多尺度和多技术组合。三峡水库作为典型大型河道型水库（以水力发电为重要功能），其特殊的调度方式如“蓄清排浑”、30 m 的水位变化幅度以及巨大的库区尺度等特性，使其成为研究河道型水库温室气体通量的典型且复杂的系统[12,19,49]。自 2003 年蓄水以来，三峡水库温室气体研究逐渐从早期依赖静态箱法的单一技术体系，发展为多技术耦合更高时空覆盖的监测框架[12,14]。基于此，本章以三峡水库为核心案例梳理不同监测目标下的方法组合，有助于理解温室气体监测方法在河道型水库中的实践路径，以揭示复杂水库场景下监测技术集成应用的必要性（表 3）。

3.1 基础排放识别

三峡水库温室气体通量的监测研究从 2008 年起逐步开展，早期监测目标主要是回答大型河道型水库蓄水运行后库区是否形成显著的温室气体排放源[19,79-80]。由于当时针对我国大型河道型水库温室气体排放的实测资料极为有限，国际上有关水库温室气体效应的认识主要来源于热带和亚热带地区水库研究成果，因此需要通过直接观测获得基础证据，为后续排放评估提供依据[19,81]。

在这一背景下，围绕其水-气界面扩散排放是否显著增强的问题，通量箱法成为早期研究采用最广泛的监测技术。Chen 等于 2009 年夏在三峡水库干流及坝后河段布设多个监测点，采用静态浮箱法结合气相色谱分析测定三峡水库水面 CH_4 平均扩散通量为 0.26 ± 0.38 mg/（m^2·h），为三峡水库蓄水后的温室气体排放提供了直接观测证据[82]。随后，Yang 等、Zhao 等在干流、支流库湾以及坝下河段多点位连续观测，结果表明三峡水库 CO_2 和 CH_4 通量具有明显的空间区域差异，其中支流及上游主干流 CH_4 通量相对更高，主库区 CO_2 通量则受水体代谢、水动力条件和碳输入共同影响相对更高[83-84]。这些研究中的技术选择具有

明显的探索性：通量箱法能够直接给出单位面积界面交换通量，适合回答水库蓄水后是否存在排放及其大致水平，但其空间覆盖和时间连续性有限。然而，随着监测工作的开展，研究者逐渐发现单纯依赖通量箱观测难以支撑区域尺度排放评估。这一认识推动研究逐步从单纯获取通量数据转向探索排放空间异质性的形成机制。与此同时，研究者开始尝试将直接观测与模型估算结合，以提高区域尺度评价能力。例如，2011年姚骁等基于顶空平衡测定溶解态 CO_2 浓度、结合薄边界层模型估算发现，两种监测方法集成应用可为扩散通量变化趋势判断提供补充约束[64]。李哲等进一步基于监测 2010-2011 年连续监测资料数据，分别采用水下地形划分法和环境因素控制法估算澎溪河回水区全年 CO_2、CH_4 水-气界面总通量，指出水库支流扩散排放的年总量评估需充分考虑空间分区差异及时间动态变化，单点观测难以准确反映真实排放水平[85]。

表 3 三峡水库温室气体通量监测目标和方法组合特征

Tab. 3 Monitoring objectives and method combinations for greenhouse gas fluxes in the Three Gorges Reservoir

监测目标	核心监测问题	主要监测对象	监测方法组合特征	监测方法贡献与适用边界
基础排放识别	蓄水运行后是否形成显著温室气体排放源	开放水域 CO_2 与 CH_4 水-气界面扩散通量	以通量箱法结合气相色谱分析为主，辅以薄边界层模型估算；监测尺度以典型点位、断面和季节性调查为主	建立三峡水库温室气体排放的基础观测证据，明确水-气界面扩散排放是重要路径；点位覆盖和时间连续性有限
监测方法标准化	不同研究结果差异来自方法误差还是环境异质性		比较通量箱法的箱体结构、分析仪配置和数据处理差异	推动监测结果具有可比性，为后续空间分区监测和区域核算奠定基础
连续监测与区域外推	如何从有限点位观测走向全库尺度核算	支流库湾、浅水区、入库河口等地 CH_4 气泡释放	由固定点位定时观测发展为连续溶解气体观测、薄边界层模型、采样点位优化和区域外推	提高沿程浓度场和空间梯度识别能力，利于全库核算；通量转换仍受模型参数限制
气泡释放识别	扩散通量是否遗漏局地温室气体高排放路径		由倒置漏斗点位集气发展为倒置漏斗与水声探测结合	推动气泡监测从点位监测转向热点识别；仍需结合关键水位阶段分区监测
过坝下泄消气评估	发电和泄洪过程是否造成溶解态温室气体快速释放	过坝水流 CO_2 与 CH_4 消气释放	由坝前和坝下断面浓度差与流量估算，发展为结合泄流工况、水动力条件和气液两相传质过程的模型评估	监测边界由自然界面过程向工程运行过程扩展；难以直接原位测定，模型结果依赖边界条件和传质参数
消落带排放与动态外推	非稳态水陆交错带如何纳入区域核算	消落带土壤植被 CO_2 与 CH_4 排放	按照土地利用、高程梯度和水位阶段分区通量箱监测；结合环境、水文、微生物等要素解析机制，并利用遥感监测分区外推	将监测目标由识别热点推至机制解释和区域外推；仍需加强关键水位阶段高频观测

根据这些研究可以看到，基础排放识别的核心贡献在于建立了三峡水库温室气体排放的基础观测体系，并初步明确了扩散排放是库区温室气体释放的重要途径。然而，不同监测点之间通量差异显著，支流库湾、主河道和坝下河段往往表现出完全不同的排放特征。并且，单一通量箱观测结果容易受到风速、水体扰动以及短期生物过程变化的影响，不同时间和不同位置获得的数据离散性较高[64]。随着基础通量水平被识别，空间异质性、方法可比性以及区域尺度外推等问题逐渐成为新的关注焦点。

3.2 监测方法标准化

随着三峡水库基础排放水平逐步得到识别，研究开始关注库区内部排放的空间异质性。早期监测结果显示，三峡水库干流、支流库湾、坝前深水区和坝下河段的 CO_2、CH_4 通量差异明显，说明河道型水库并不能被简单视为均质水面。由此引起研究者们思考，不同研究结果之间的差异究竟来源于监测方法还是环境本身。

为评估监测方法本身带来的不确定性，2012 年在三峡大坝坝前水域组织开展了国际温室气体监测方法比对试验[86]。来自多个国家的研究团队采用不同结构和规格的浮箱系统，在相同环境条件下同步测定水-气界面的 CO_2 和 CH_4 扩散通量。这一试验的背景在于，不同团队所采用的箱体结构、箱体体积、气体循环方式、分析仪配置和数据处理流程并不完全一致。在同一地点、同一环境条件下比对，就能判断不同研究结果之间的差异到底是由方法差异造成，还是由水库内部空间异质性造成。结果表明，在低风速条件下，不同浮箱系统获得的 CH_4 通量结果具有较好一致性，而 CO_2 通量则表现出更高的变异性，对短期环境条件和生物过程变化更加敏感。该研究的重要意义并不在于比较不同设备本身，而在于首次系统区分了方法误差与环境异质性的贡献，证明三峡库区不同区域之间的排放差异主要来源于真实环境差异，而非监测方法造成的偏差[86]。这一认识推动河道型水库温室气体监测体系从单点观测向空间分区监测转变，为后续区域尺度排放核算奠定了基础。

3.3 连续监测与区域外推

在方法可比性和空间异质性得到初步认识后，河道型水库全库尺度排放核算中的时间连续性和空间代表性问题进一步凸显。由此，温室气体排放监测技术由固定点位定时观测，发展为连续溶解气体观测、模型估算和区域尺度外推相结合的监测模式。

随着自动化监测技术的发展，连续溶解气体观测装置开始被引入三峡水库研究。Xiao 等开发的快速响应自动气体平衡器 FaRAGE（Fast-Response Automated Gas Equilibrator）可连续原位观测溶解 CO_2 和 CH_4 浓度，其响应时间短（监测气体响应时间 10-12 秒）、测量精度高（监测 CH_4 准确度 0.5%），为大型河道型水库连续溶解气体监测提供了技术基础[87]。连续溶解气体观测推动了空间尺度外推。Liu 等利用 FaRAGE 与温室气体分析仪连续测定 CH_4 浓度，并采用薄边界层模型估算得到 CH_4 扩散通量，模拟结果表明仅依赖单点进行全库区推算会产生显著误差；至少需布设 38 个（夏季）或 52~58 个（冬季）监测点，才能获得较可靠的区域平均估值[34]。

除连续溶解气体观测外，涡度相关法也代表了水体温室气体连续通量监测的重要方向。然而，三峡水库峡谷地形复杂、岸线曲折，水陆交错界面多，船行和局地风场影响显著，涡度相关观测的通量足迹解释和数据质量控制难度较大，因此尚未在三峡库区本体形成长期应用。相比之下，在三峡工程下游开阔连通湖泊中，该方法已显示出应用潜力。Zhao 等采用涡度相关法监测鄱阳湖 CO_2 通量，并结合机器学习分析揭示三峡大坝运行对下游大型连通湖泊 CO_2 通量格局的扰动[88]。这表明连续通量观测可将监测对象由库区水面扩展至库-河-湖连续体，为评估工程调度对更大区域碳通量的影响提供方法支撑。

近年来，区域外推还与遥感和机器学习方法结合。对于大型湖泊和水库，现场连续观测能够提供高精度浓度或通量样本，但难以长期覆盖整个水域；遥感则可提供大范围、高频次的水色、水温、叶绿素、悬浮物和水面范围等空间变量，为通量空间外推提供外部约束[89]。已有研究将现场 CH_4 通量监测与卫星影像和随机森林模型结合，量化了大型富营养湖泊 CH_4 扩散通量的空间范围[77]。

3.4 多路径排放核算

随着水-气界面扩散通量监测逐步从点位观测走向全库尺度核算，新的问题进一步凸显：水-气界面扩散通量并不能覆盖河道型水库全部温室气体释放过程。对于河道型水库而言，气泡释放、过坝下泄消气以及消落带干湿交替排放这些具有事件性、空间集中性和过程非稳态特征的排放途径，均可能对排放总量和核算边界产生重要影响。因此，监测目标由水面扩散通量估算，拓展为多路径排放识别和综合核算。

3.4.1 *气泡释放识别*　与水-气界面分子扩散不同，气泡释放通常发生于沉积物有机质丰富、底层还原环境较强、气体过饱和程度较高的区域，尤其在支流库湾、浅水区、入库河口和沉积物淤积带更易形成局地排放热点。已有研究指出，水库拦截泥沙和有机质可形成 CH_4 排放热点，气泡释放具有显著小尺度空间差异[25]。不过，气泡释放监测的关键并不只是获得某一个点位的通量值，而是识别热点区域、捕捉突发事件。

三峡水库早期气泡释放监测主要依赖倒置漏斗等原位集气装置。以澎溪河回水区为代表的支流库湾水域，由于水动力较弱、沉积物沉降和有机质积累较明显[90]，是监测气泡释放的重要区域。2012 年李哲等以三峡水库典型支流澎溪河回水区高阳平湖库湾为研究对象，采用倒置漏斗法，构建了由浮标、水面缆绳、倒置漏斗、集气瓶和配重装置组成的水下气泡收集系统，并用气相色谱分析 CO_2 和 CH_4 浓度。监测结果

表明，研究水域存在明显的气泡释放现象，CH_4 气泡释放通量变化范围（0.00016~373.62 mg/（m^2·d）），明显高于 CO_2 气泡释放通量变化范围（0~35.2 mg/（m^2·d）），其最大值相差约 1~2 个数量级[35]。其中，局部浅水区 CH_4 气泡释放强度最高可达约 22.4 mmol/（m^2·d），可为同期水-气界面 CH_4 扩散通量的数十倍至数百倍[35]。这些结果说明，在三峡库区局地浅水库湾区域，气泡释放可为局地 CH_4 排放的重要途径。

然而，倒置漏斗法也直接暴露出气泡释放监测的核心瓶颈。气泡释放具有很强的随机性和空间异质性，漏斗开口面积有限，若布设点位未覆盖热点区，容易低估通量；若恰好布设于强冒泡点，又可能高估区域平均水平。国际研究已表明，单点集气结果难以代表系统总量，在瑞士沃伦湖水电水库中，沉积物冒泡是 CH_4 排放的重要贡献途径，但气泡释放总量还需要结合系统尺度质量平衡才能约束确定[91]。所以，仅依赖少数倒置漏斗点位判断整个水库中气泡贡献碳排量是不可行的，必须识别热点区域。

与倒置漏斗相比，声学探测具有非接触、空间覆盖范围大和快速识别热点的优势，能够沿断面或航线获取气泡羽流分布。由此，研究者们将两种技术结合，进而满足气泡释放通量核算对通量强度和空间代表性的双重要求。2012 年三峡大坝国际温室气体监测方法比对为这种技术组合提供了重要示范。该试验除比较不同浮箱系统外，还在三峡坝前及邻近支流水域进行气泡释放的水声调查。瑞士 Eawag 团队采用分裂波束回声探测仪（Simrad EK60，120 kHz）对水体中的气泡羽流进行水声探测，辅以开口面积约 0.1 m^2 的小型倒置漏斗对局部羽流区域采样分析。该研究表明，水声探测方法能够有效识别气泡释放的空间分布及其发生位置[86]。这种融合模式既弥补了倒置漏斗法覆盖范围小的缺陷，又具有解决声呐探测难以定性问题的潜力，为库区气泡排放监测提供了有效示范。

3.4.2 过坝下泄消气评估　过坝下泄消气是发电水库特有的工程控制型排放过程，也是河道型水库区别于天然湖泊和开阔型水库的重要监测对象。早期国际上针对南美洲几座热带水库的研究表明，深层高 CH_4 水体经水轮机或底孔下泄后，可在坝下河段形成显著消气释放，推动过坝消气逐渐被纳入水库温室气体排放核算边界[92-93]。与水-气界面扩散及气泡释放过程相比，三峡水库过坝下泄消气排放通量的监测研究相对较少，现有工作主要集中于基于运行参数与模型方法的排放评估，直接原位通量观测案例较为缺乏。从技术演进看，过坝消气最初多采用坝前和坝下断面浓度差结合法估算，即通过测定坝前取水层或坝前控制断面的溶解态 CO_2、CH_4 浓度，以及坝下近场或下游断面的残余浓度，结合下泄流量估算气体释放量[36,39]。这类方法可用于判断过坝下泄是否造成明显溶解气体损失，但其本质上只能反映过坝前后浓度变化的综合结果，难以区分水轮机过流、泄洪掺气、消力池混合、气泡界面传质和下游再曝气等不同环节的贡献。

在这种认识基础上，过坝消气评估技术逐步由坝前—坝下浓度差的经验估算，转向结合泄流工况和水动力传质过程的模型评估。3.4 一节中提到黄菊萍等基于气液两相 VOF 模型，对大渡河铜街子水电站大坝泄流条件下 CO_2 和 CH_4 排放过程模拟评估[36]。该研究为三峡水库过坝消气排放提供了重要的定量评估手段，其将排放估算与泄流方式、坝下水动力条件和气液传质过程联系起来，使过坝消气作为工程控制型排放过程得到更清晰的过程表达。

从方法组合角度看，过坝消气监测需要以坝前取水层溶解气体浓度、泄流流量、运行工况和坝下断面浓度衰减为基础，并通过水动力-传质模型解析高流速、强紊动和强掺气条件下难以直接观测的快速释放过程。未来研究还需围绕发电下泄、泄洪、深层取水和坝前分层增强等关键工况，加强关键参数（如溶解氧、温度剖面）实测的基础上，提高模型参数本地化水平，并探索适用于高流速和非稳态环境的观测方法，以提升过坝消气路径排放估算的可靠性。

3.4.3 消落带排放与动态外推　三峡水库“蓄清排浑”的反季节调度使消落带在夏季长时间出露、冬季重新淹没，导致土壤含水率、氧化还原状态、植被残体输入、有机质分解和温室气体产生/氧化过程随水位阶段快速转换，进而导致温室气体排放过程表现出显著的非稳态特征[13]。因此，消落带通量监测的核心问题不再是单一界面过程的测定，而是如何捕捉水位变化驱动下的阶段性排放响应。

三峡水库消落带温室气体监测最初主要依赖静态箱法点位观测，目标是识别该区域是否构成重要排放源。Chen 等在 2008 年夏对三峡水库新形成的消落带监测 CH_4 通量，得到 CH_4 通量范围是 0.25~14.9 mg/（m^2·h），他们发现不同植被群落间 CH_4 排放差异显著[49]。该研究也是首次明确了消落带在三峡水库 CH_4 排放估算中的重要性。随后，Yang 等在三峡库区秭归、巫山、云阳三个典型消落带区域，监测重点从单一

样地扩展到更广泛的消落带地表类型，具体针对水稻田、休耕地、农田、砍伐地四种土地利用类型开展静态箱监测，发现不同土地利用类型 CH_4 通量范围差异显著，并估算三峡水库消落带 CH_4 年排放量为 1033.5–1333.9 Mg CH_4/a，约相当于同期水-气界面 CH_4 排放量的 42%~54%[46]。这表明，消落带的土地利用、植被恢复和水位阶段共同决定其温室气体排放强度。

基于上述定点定时监测研究，监测重点逐渐转向消落带温室气体的时空排放规律识别。已有消落带高程梯度观测研究显示，三峡水库低高程（如 155m 高程）、长淹水历时区域相对更有利于 CH_4 产生，消落带排放沿高程带和淹水历时呈现显著空间分异[18]。在时间变化方面，Yang 等在秭归、巫山和云阳 3 个下游典型点位，结合静态箱观测和主干流、支流多站点资料，对三峡消落带排水期 CO_2 年排放通量估算。结果显示排水期的 CO_2 排放量为 342.67~495.96 Gg/yr，占消落带全年 CO_2 排放量的 74.1%~81.5%[94]，说明消落带水位下降期是温室气体集中释放的阶段。

上述一系列研究从不同角度揭示了消落带温室气体排放在空间与时间上的显著异质性，也推动监测目标从单纯通量观测转向过程机制识别。消落带排放受土壤水分、温度、氧化还原状态、有机碳底物、植被残体和微生物过程共同影响[41,44-45]，其中出露期土壤有机质矿化主要影响 CO_2 释放，再淹没阶段植物残体分解和厌氧环境恢复则可能增强 CH_4 产生[43]。由此，在消落带碳来源和转化过程识别方面，相关研究还引入碳同位素、有机质组分和微生物群落监测分析，以分析温室气体排放机制和温室气体产生潜力。例如，Zhao 等从土壤溶解性有机质特征与有机碳分解温度敏感性的关系出发，说明 DOM 组成和活性可影响消落带土壤有机碳分解产生 CO_2 潜力[95]。

在全库碳排放核算需求推动下，消落带温室气体监测进一步转向多时段、多区域协同监测评估。李哲等综合 2010—2011 年和 2015—2017 年三峡水库水面、消落带及坝下河段等多路径监测资料，估算三峡水库后蓄水期净排放量达（$10.41\times10^5\pm1.28\times10^5$）t CO_{2eq}/yr，表明消落带温室气体排放在库区整体碳收支中占据重要地位[96]。近期研究尝试在更大空间尺度上刻画消落带排放差异，例如 Dai 等在三峡水库运行 15 年后，围绕消落带土壤温室气体通量的纵向、垂向和局地尺度空间变异开展全库尺度调查，表明消落带排放不仅受单点土壤条件控制，还与库区上下游位置、高程带和局地环境差异共同相关[13]。

近年来，随着对消落带非稳态特征认识的加深，研究者们意识到传统通量箱法在消落带区域外推中仍存在明显局限。监测目标从点位通量测定转向区域尺度估算发展，高频监测和遥感空间约束在消落带动态监测中的作用日益突出。一方面，通过高频监测或关键时段加密采样，提高对排放峰值的捕捉能力；另一方面，结合遥感技术识别消落带空间范围及其动态变化，为区域尺度排放外推提供约束条件。由于三峡库区范围广、云雨频繁且岸线变化显著，仅依赖地面样点难以准确刻画消落带暴露面积及其时序变化。基于此，Zhang 等将地面静态箱观测、Sentinel-1 SAR 遥感边界识别与水文资料相结合，构建了 2015—2023 年三峡水库消落带月尺度 CO_2 通量反演框架，实现了 30 m 分辨率的动态估算。结果表明，消落带虽只占库区水面约 21.7%的面积，其年度总 CO_2 排放量却达（392.2 ± 19.5）Gg CO_2，约占库区水面排放通量的 44.4%[47]。由此可见，卫星遥感驱动的区域尺度估算在捕捉消落带引起的温室气体脉冲式排放方面具有明显优势。

综上，三峡水库消落带温室气体通量监测经历了由点位排放识别、土地利用与高程分区观测、关键水位阶段过程监测、多路径总量核算到遥感约束区域外推的演进过程。三峡水库消落带温室气体排放通量监测的特殊性主要体现在三方面：其一，监测对象是受反季节水位调度控制的非稳态水陆交错带，而非单一稳定界面；其二，排放过程受淹水历时、高程梯度、植被恢复及土壤环境等多因素共同驱动，具有比一般水面扩散更复杂的时空异质性；其三，监测目标已从早期识别排放热点，逐步发展为服务全库区碳足迹核算的多尺度综合估算。因而，消落带不仅是三峡水库温室气体排放监测中的独立组成部分，也是当前河道型水库碳核算中最需要强化监测和方法创新的关键区域之一。

3.5 典型河道型水库温室气体通量监测案例启示

三峡水库温室气体监测实践表明，大型河道型水库监测目标并非一开始就指向全库尺度综合核算，而是随着问题认识不断扩展。早期监测重点在于确认库区水面是否存在显著 CO_2 和 CH_4 排放；随后，干流、支流库湾、坝前和坝下河段之间的通量差异推动监测转向方法比对和空间分区；连续溶解气体观测和模型估算提高了对纵向梯度和时间动态的捕捉能力；气泡释放、过坝消气和消落带排放的逐步纳入，则扩展了

水库温室气体排放核算边界。

从方法组合角度看，三峡水库案例(表 3)说明，河道型水库温室气体监测不能依赖单一技术完成。通量箱适合基础排放识别和典型点位比较，连续溶解气体观测和薄边界层模型适合水面扩散通量的纵向调查与库段外推，声学探测与倒置漏斗结合有助于识别 CH_4 气泡释放热点，坝前-坝下断面监测与水动力-传质模型是过坝消气评估的核心技术路径，遥感分析则为消落带动态边界识别和区域外推提供约束。不同方法之间不是替代关系，而是分别承担通量实测、过程识别、边界约束和尺度外推功能。

4 河道型水库温室气体通量监测的技术瓶颈与发展方向

科学认识并客观评估河道型水库运行对 CO_2、CH_4 等温室气体排放通量的影响，已成为水电工程生态环境研究的重要议题之一。总体来看，水库温室气体监测已由早期水-气界面扩散观测，逐步扩展至多路径识别，并开始向连续观测、遥感外推和区域尺度核算发展。然而，当前监测与估算方法仍难以充分满足大型河道型水库碳足迹核算和运行管理需求。不同监测方法各有适用边界，存在尺度、对象和不确定性来源差异[52]。水库排放具有显著场地特异性和运行调控性，通用排放因子或少量点位观测难以反映水位调度、支流库湾、消落带和过坝消气等过程造成的时空异质性[9, 97]。因此，未来水库温室气体通量监测技术的发展，不应仅停留在单项方法精度提升，而应面向动态过程识别、路径贡献量化、区域尺度外推，构建多源观测与模型协同的综合方法学体系。

4.1 技术瓶颈

当前河道型水库温室气体通量监测的主要瓶颈，集中体现在路径识别、动态捕捉、空间外推和模型约束四个方面。首先，水面扩散、气泡释放、过坝下泄消气和消落带土壤-植被排放等路径在发生位置、持续时间和控制因素上差异显著，若核算边界不清，容易造成漏算、重复计算或不同研究结果不可比。其次，水位调度、调峰运行、泄洪、复淹和消落带出露等过程具有明显非稳态特征，传统低频人工采样难以捕捉短期高通量事件及其过程机制。第三，河道型水库干流、支流库湾、浅水沉积区、坝前深水区、坝下河段和消落带之间差异明显，少量点位观测难以直接代表库段或全库排放，空间分区、面积权重和动态边界识别仍是尺度外推的重要不确定性来源。第四，现有监测往往偏重通量结果，对有机碳组成、沉积物或土壤氧化还原状态、微生物过程、泄流工况和传质参数等中间过程指标覆盖不足，限制了模型参数校准、机制解释和运行情景预测。上述瓶颈表明，河道型水库温室气体监测需要从单点、单路径和静态核算，转向多路径识别、多要素协同和模型约束下的动态综合评估。

4.2 发展方向

4.2.1 监测目标驱动的方法组合设计　针对河道型水库多路径排放、强空间异质性和调度驱动非稳态过程并存的特点，未来监测体系首先需要从以方法为导向，全面转向以目标导向。当前温室气体通量监测方法评述多以单项方法为中心，重点比较通量箱法、薄边界层模型法、涡度相关法、倒置漏斗法、声学探测和遥感方法的原理、适用场景和优缺点。这类评述能够说明不同方法的技术特征，但对于实际监测方案设计而言，仍难以回答在特定科学目标下不同方法应如何设置、如何衔接以及如何共同支撑尺度外推。Seth 等指出，直接观测、经验模型、过程模型、遥感、机器学习和混合模型在准确性、可扩展性、数据需求和透明性方面各有优势与局限，未来更有前景的是多方法约束下的混合估算框架[97]。

这种方法组合设计应首先明确监测目标。若目标是识别水库是否存在显著排放，通量箱法和薄边界层模型可提供基础通量证据；若目标是量化库区尺度年排放，则需要将长期断面监测、连续溶解气体观测、遥感面积约束和分区外推模型结合；若目标是识别气泡释放贡献，则需将声学探测与倒置漏斗或自动集气装置的点位通量测定能力结合；若目标是评估过坝下泄消气，则需围绕坝前取水层浓度、坝下断面浓度变化、泄流工况和气液传质过程建立观测与模型联合方案；若目标是量化消落带排放，则需将高程分区、暴露历时、地面通量观测、土壤过程指标和遥感边界识别结合起来。由此，监测技术不再是并列工具，而是在特定目标下承担不同功能的观测单元。

未来技术发展的重点还在于建立方法之间的接口。以 CH_4 气泡释放为例，倒置漏斗能够获得点位气泡通量和气体组成，但难以覆盖气泡释放的热点事件。核心环节在于发展基于声学空间数据与连续点观测的

尺度外推模型，建立声学信号强度、气泡体积分布、气体组成与点位通量之间的定量转换关系，并在统一框架下将热点区高强度间歇性冒泡、背景区低强度冒泡及同期水-气界面扩散通量整合，评估其不确定性[14,98]。类似地，遥感边界识别需要与地面通量分区匹配，连续溶解气体观测需要与气体交换速率参数化和过程模型衔接，过坝消气断面监测需要与水动力和气液传质模型耦合。只有这些接口关系被明确，不同监测方法才能从经验性拼接转变为可复制的方法学策略。

4.2.2 多要素协同监测网络与数据集建设　多要素协同监测的核心，是用过程数据解释通量变化，而不是只记录通量结果。河道型水库温室气体排放受陆源有机碳输入、沉积物微生物转化、水体氧化消耗与水-气界面释放等多过程耦合控制，其最终通量是有机碳性质、微生物代谢与氧化还原环境共同作用的结果。具体而言，有机碳的含量与组成决定微生物底物供给，而产甲烷菌与甲烷氧化菌等微生物通过一系列代谢过程控制 CO_2 或 CH_4 的生成与转化路径；水位涨落引起的氧化还原条件变化进而调节这些过程，从而影响温室气体排放的强度与结构[33,99-100]。由此，温室气体排放是有机碳性质、微生物代谢和氧化还原环境共同作用的结果。

当前监测指标体系对温室气体排放中间过程相关的关键指标监测覆盖仍不足，例如微生物功能性状（产甲烷菌丰度、胞外酶活性）、有机碳组成特征及氧化还原条件的动态变化等。这在一定程度上限制了有机质来源与转化、微生物代谢过程于温室气体排放之间关联的精细解析，导致温室气体排放核心驱动路径识别不足。未来应由单一界面观测转向覆盖碳输入、转化与释放全过程的多要素协同监测。在监测内容上，应在现有通量观测基础上，同步引入沉积物有机碳库、水体溶解有机碳及颗粒有机碳、氧化还原电位与溶解氧等关键环境参数的监测[13,95]。对于微生物过程，则可通过功能基因丰度、群落结构或代谢活性指标，对温室气体产生与氧化过程约束[41,45]。在监测布局上，应优先在典型主河道、代表性支流库湾及典型消落带建立综合观测单元，在同一单元内同步获取界面通量、过程参数与控制因子数据。

在此基础上，还应将多要素观测转化为可复用的数据集。目前，河道型水库温室气体监测仍存在数据稀疏、监测周期短、时空覆盖不足和模型验证数据不足等问题，这也是当前河道型水电水库温室气体排放通量估算的重要挑战。未来监测数据集应包含通量数据、过程数据和空间边界数据。通量数据包括水-气界面温室气体通量、气泡释放通量、坝前-坝下浓度差和消落带土壤植被排放通量等，用于约束不同排放路径；过程数据包括水位、流量、流速、水温、溶解氧、pH、有机碳、营养盐、叶绿素、土壤水分和氧化还原状态等，用于解释通量变化机制；空间边界数据包括水面范围、支流库湾分区、消落带暴露面积、暴露历时、高程带和土地利用/植被覆盖等，用于支撑区域外推。只有将通量、过程和空间边界同步纳入监测数据集，点位观测结果才能转化为可用于模型训练、参数校准和独立验证的标准化数据产品。

4.2.3 面向河道型水库复杂场景的遥感应用与机理约束　遥感技术为河道型水库温室气体排放的空间外推提供了重要支撑，但其科学定位与应用边界需予以明确。遥感的核心功能在于提供空间边界与关键环境变量的时空连续信息，而非直接替代通量观测。遥感反演结果通常对应特定过境时刻的瞬时状态，其向日尺度、月尺度和年尺度转换仍存在明显困难，且遥感变量与通量之间的统计关系往往受到水体类型、水动力条件和生物地球化学过程差异的影响[78]。

三峡水库这类狭长型河道水库对遥感应用提出了更高要求，其核心挑战可概括为“边界识别难、过程难表征、外推验证不足”。具体来看，岸线曲折、支流库湾众多且水面宽度变化大，水陆混合像元问题突出，尤其水位变化引起暴露与淹没边界的快速迁移增加了分类难度[47]，比较突出的是细长、弯曲、多支流区域仍是消落带提取误差集中场景[101]。其二，遥感能够获取水面范围、消落带暴露状态、植被覆盖等空间信息，但这些变量主要反映地表或水体环境状态，难以直接表征温室气体产生、氧化、传输和释放等过程；库区多云雾天气会降低有效光学影像获取率，高悬浮物浓度也会影响水色参数反演精度，进而削弱基于遥感变量建立经验关系的通量估算可靠性。其三，现有遥感通量估算多依赖经验回归或机器学习模型，遥感输入变量与温室气体通量之间缺乏明确的物理和生物地球化学机制约束，导致模型在跨区域、跨季节或跨水位阶段应用时泛化能力不足[78]。因此，遥感在三峡水库这类复杂场景中的核心价值应聚焦于动态边界识别、暴露历时估算与空间分区，其通量估算结果仍需依赖地面通量观测、过程监测和机理模型进行校准与验证。

提升遥感应用可靠性的关键在于引入机理约束。具体而言，应在经验模型与机器学习方法的基础上，纳入水动力条件、水温分层与生物地球化学过程等机理信息，构建机制与数据驱动相结合的混合模型[97]。其实现路径包括：以水动力模型模拟不同调度工况下的流场与水体停留时间，以此约束气体交换速率的空间分异；将水温、溶解氧与碳酸盐平衡参数纳入 CO_2 通量估算的物理框架，降低纯统计学关系的漂移风险；通过地面连续观测数据对遥感反演结果进行系统校准与误差修正。这种机理约束的路径有助于提升通量估算的可解释性与跨区域适用性，是未来河道型水库遥感研究的重要方向。

4.2.4 全库动态评估与模型预测　在监测目标明确、多要素数据集逐步完善、遥感空间约束不断增强的基础上，未来河道型水库温室气体通量监测还需要解决观测数据如何转化为全库尺度动态评估结果的问题。经验模型和面积外推方法能够提高估算效率，但通常依赖平均通量或统计关系，难以解释水库不同运行情景下通量变化的原因。过程模型能够描述有机碳降解、温室气体产生与氧化、水体输运、气泡释放和气液交换等过程，有助于机制解析，但其可靠性依赖高质量数据和现场观测校准。机器学习等数据驱动方法能够识别多源变量与通量之间的非线性关系，在空间预测、参数优化和偏差修正方面具有潜力，但其应用也需要实测数据支撑和过程认识约束[97]。因此，未来方法发展的重点不应是以某一类模型替代现场观测，而应是将现场观测、遥感信息、过程模型和数据驱动方法结合起来，形成面向全库动态评估的综合模型框架。

对于大型河道型水库，模型融合应突出水库运行过程对温室气体排放的调控作用。水动力模型可用于描述不同调度工况下的流场、水温分层和湍流条件；生物地球化学模型可用于描述有机碳输入、分解、转化过程机制；气液传质模型可用于描述水-气界面扩散和过坝消气过程；数据驱动方法可用于识别多因子非线性关系，并对模型偏差和空间外推结果修正。通过上述方法的融合，水库温室气体监测不再只是获得定时定点的通量值，而是能够把水位、流量、水温、溶解氧、有机碳、溶解气体浓度、界面通量和遥感边界等多源数据纳入同一评估框架，进而分析通量变化机制和不同排放路径的相对贡献。

模型构建应将水库调度过程作为重要输入条件。反季节调度、水位涨落、支流库湾回水、坝前取水层变化、坝下水体混合和消落带暴露历时，都会影响温室气体产生、转化和释放过程。未来可将运行水位、流量过程、支流库湾水动力状态、坝前和坝下断面监测、消落带暴露面积以及现场通量观测共同纳入模型框架，评估不同运行阶段下扩散、气泡释放、过坝消气和消落带排放的变化特征，并预测不同水位调度或气候条件下的通量响应。在实现路径上，可将现场监测作为模型校准基础，将遥感作为空间边界约束，将过程模型作为机制表达工具，将机器学习作为参数优化和误差修正手段。现场监测提供通量和关键过程参数，决定模型结果是否可信；遥感提供水面范围、消落带暴露面积和土地覆盖等空间信息，决定点位观测能否合理外推；过程模型表达水动力条件、碳转化过程和气体释放路径，决定模型是否具有机制解释能力；机器学习则可在实测数据和过程认识约束下，提高空间预测能力[97]。由此，河道型水库温室气体监测可由静态结果统计，发展为动态过程评估和运行情景预测。

这一发展方向也可作为水库碳循环数字孪生系统的初步构想，该平台可以在虚拟模型中同步表达河道型水库运行状态、碳输入与转化过程以及多路径排放响应，并利用持续观测数据不断校正模型结果。未来若能将多要素监测网络、遥感识别、过程模型、机器学习和不确定性评估纳入统一框架，就能够形成面向全库尺度和运行情景评估的水库温室气体监测与模拟平台。该平台不仅可用于估算历史和当前排放，也可用于比较不同调度方案或气候条件下的潜在排放变化，从而为水库低碳运行和碳足迹评价提供方法支撑。

综上，河道型水库温室气体通量监测技术的发展可概括为从监测目标设定、过程数据获取、空间尺度外推到模型融合预测的技术路径，其关键问题、方法支撑与预期发展总结见表 4。

5 结论

河道型水库温室气体排放是陆源有机碳输入、水库调度扰动、水体与沉积物生物地球化学转化以及多界面释放过程共同作用的结果。与天然湖泊和河流相比，水库排放具有更强的人工调控属性和多路径耦合特征，主要表现为蓄水期碳脉冲、水库调度驱动的源汇转换、水-气界面扩散、气泡释放、过坝下泄消气以及消落带非稳态排放等过程并存。不同排放过程在形成机制、空间分布、时间变化和监测要求上差异明显，决定了水库温室气体通量监测不能依赖单一方法完成，而需要从排放路径识别、动态过程捕捉和尺度外推

三个层面开展综合监测。

表 4 河道型水库温室气体通量监测方法的发展方向与关键支撑

Tab. 4 Development pathway and key supports for reservoir greenhouse gas fluxes monitoring methods in riverine reservoirs

发展方向	关键问题表现	方法学支撑	预期发展
目标导向的方法组合	单独监测方法并列使用，难以支撑多路径排放识别	按监测目标区分排放路径，配置监测方法	形成可复制的多路径监测方案
方法接口与尺度衔接	不同方法之间缺少定量转换关系	明确不同监测方法的功能与接口	提高多方法协同和尺度外推能力
全过程多要素协同观测	监测偏重通量结果，过程指标不足，驱动机制难解析	同步监测有机碳、溶解氧、氧化还原状态、微生物指标和水动力条件	支撑碳输入、转化与释放机制解析
标准化监测数据集建设	数据稀疏、周期短，难以复用和验证	整合通量数据、过程数据和空间边界数据	支撑模型训练、参数校准和跨库比较
遥感空间约束与机理约束	遥感反演受水陆混合像元、云雾、高悬浮物和经验模型泛化能力限制	利用遥感识别区域面积和空间分区，并引入水动力和生物地球化学过程约束	提高区域尺度外推的可靠性和可解释性
模型融合与动态预测	静态外推难以反映水库调度和气候变化影响	融合现场监测、遥感边界、过程模型等方法，构建水库碳循环数字孪生系统	预测全库动态评估和运行情景

现有监测方法包括通量箱法、薄边界层模型、涡度相关法、倒置漏斗法、声学探测、断面监测、遥感空间识别和模型估算等在内的多类型监测技术体系，为认识水库温室气体排放特征提供了重要支撑。以三峡水库为代表的大型河道型水库监测实践表明，随着研究目标由排放存在性识别转向排放贡献量化和区域尺度评估，监测技术也逐步由单点、低频、单方法观测向多路径、多尺度和多技术耦合方向发展。然而，当前监测仍面临过程指标不足、方法接口不清、气泡释放和过坝消气等高不确定性路径难量化以及点位观测向全库尺度外推能力不足等问题。

未来河道型水库温室气体通量监测技术的发展，应进一步从单项方法应用转向综合方法学体系构建。首先，以监测目标为导向，针对不同排放路径设置监测方法，重点建立多方法之间的接口关系。在此过程中，加强通量数据、过程数据和空间边界数据的同步获取，形成可用于模型训练、参数校准和独立验证的标准化数据集。此外，遥感技术应重点服务于水面范围、消落带暴露面积和空间分区识别，并与地面观测和过程机理相结合；过程模型和数据驱动方法则应在现场监测约束下用于全库动态评估和运行情景预测。总体而言，面向大型河道型水库的温室气体监测体系，应逐步形成以过程识别为基础、以多源数据融合为支撑、以模型预测为拓展的技术路径，为水库碳足迹核算、水电低碳属性评价和优化运行管理提供科学依据。

6 参考文献

[1] 王浩, 游仪, 邓剑洋. 我国水库总库容约 1 万亿立方米 大坝类型、大坝数量、高坝数量等位居世界第一 . 北京：人民日报, 2025.

[2] Yang XY, Jiao J, Qu B *et al*. Coordinated evolution characteristics of cascaded reservoir system in the Yellow River Basin under different water-sediment regulation stages. *Water Resources Protection*, 2026, **42**(3): 146-153. [杨啸宇，缴健，屈博等. 不同水沙调控阶段黄河流域梯级水库群系统协同演变特征. 水资源保护，2026, **42**(3): 146-153.]

[3] Ma L, Tian Y, Chen LC *et al*. Dam-break flood risk for cascade reservoirs: A case study of the upper Lancangjiang River. *Henan Science*, 2024, **42**(2): 157-164. [马黎，田耘，陈灵淳等. 梯级水库群溃坝洪水风险分析——以澜沧江上游为例. 河南科学，2024, **42**(2): 157-164.]

[4] Wang LD, Mao YX, Xiao W *et al*. Research on refined scheduling of cascade reservoirs in drawdown period in the lower reaches of Jinshajiang River. *Water Resources and Power*, 2025, **43**(9): 208-211, 113. [王李东，毛玉鑫，肖婉等. 金沙江下游梯级水库消落期精细化调度研究. 水电能源科学，2025, **43**(9): 208-211, 113.]

[5] Chen J. Achievements, challenges and measures of joint operation of cascade reservoirs on the Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research*

Institute, 2024, **41**(5): 1-7. DOI: 10.11988/ckyyb.20240245. [陈进. 长江梯级水库群联合调度成效、挑战及对策. 长江科学院院报，2024, **41**(5): 1-7.]

[6] Zarfl C, Lumsdon A E, Berlekamp J *et al*. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 2015, **77**(1): 161-170. DOI: 10.1007/s00027-014-0377-0.

[7] Zhong ZY, Zou Q, Wang XM *et al*. Study on multi-objective joint operation technology of cascade reservoirs in upper reaches of Changjiang River. *Yangtze River*, 2022, **53**(2): 12-20. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.02.003. [仲志余，邹强，王学敏等. 长江上游梯级水库群多目标联合调度技术研究. 人民长江，2022, **53**(2): 12-20.]

[8] Chen QW, Zhang JY, Mo KL *et al*. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 793-810. [陈求稳，张建云，莫康乐等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施. 水科学进展，2020, **31**(5): 793-810.]

[9] 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.

[10] St Louis VL, 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[0766:RSASOG]2.0.CO;2.

[11] Guérin F, Abril G, Serça D *et al*. Gas transfer velocities of CO_2 and CH_4 in a tropical reservoir and its river downstream. *Journal of Marine Systems*, 2007, **66**(1-4): 161-172. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2006.03.019.

[12] Li Z, Yang L, Wu XH *et al*. Monitoring and analysis of CO_2 and CH_4 fluxes in the 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 CO_2、CH_4通量监测分析研究. 湖泊科学，2023, **35**(2): 423-434.]

[13] Dai LJ, Wang XF, Liu TT *et al*. Greenhouse gas emissions in water-level fluctuation zones (WLFZs) of the Three Gorges Reservoir after 15 years of operation. *Journal of Environmental Management*, 2025, **395**: 127849. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127849.

[14] Kang MC, Liu L, Liu J *et al*. Methane ebullition from lakes and reservoirs: A review. *J Lake Sci*, 2024, **36**(2): 339-352. DOI: 10.18307/2024.0201. [康满春，刘流，刘佳等. 湖、库水体 CH_4冒泡排放研究进展. 湖泊科学，2024, **36**(2): 339-352.]

[15] Hounshell AG, D'Acunha BM, Breef-Pilz A *et al*. Eddy covariance data reveal that a small freshwater reservoir emits a substantial amount of carbon dioxide and methane. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, **128**(3): e2022JG007091. DOI: 10.1029/2022JG007091.

[16] Ran JJ, Lin CX, Guo JS *et al*. Research of monitoring methods of greenhouse gas emissions from reservoir. *Yangtze River*, 2010, **41**(21): 76-80. [冉景江，林初学，郭劲松等. 水库温室气体排放的监测方法研究. 人民长江，2010, **41**(21): 76-80.]

[17] Lu F, Yang L, Wang X K *et al*. 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.

[18] Hao QJ, Chen SJ, Ni X *et al*. Methane and nitrous oxide emissions from the drawdown areas of the Three Gorges Reservoir. *Science of The Total Environment*, 2019, **660**: 567-576. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.050.

[19] 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.

[20] Prairie YT, Alm J, Beaulieu J *et al*. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: What does the atmosphere see *Ecosystems*, 2018, **21**(5): 1058-1071. DOI: 10.1007/s10021-017-0198-9.

[21] Deemer BR, Holgerson MA. Drivers of methane flux differ between lakes and reservoirs, complicating global upscaling efforts. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, **126**(4): e2019JG005600. DOI: 10.1029/2019JG005600.

[22] Lyu JX, Peacock CL, Zhang YF *et al*. Lability of riverine particulate organic carbon increased by water storage and extreme drought-heatwave events. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2026, **420**: 148-160. DOI: 10.1016/j.gca.2026.03.056.

[23] Zhou YL, Ning ZH, He YT *et al*. Multi-objective optimal scheduling of water-carbon in cascade reservoirs during impoundment for carbon emission reduction. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2025, **42**(6): 194-202. DOI: 10.11988/ckyyb.20240596. [周研来，宁志昊，何鋆涛等. 面向碳减排的梯级水库蓄水期水碳多目标优化调度研究. 长江科学院院报，2025, **42**(6): 194-202.]

[24] Yi YB, Zhong J, Bao HY *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.

[25] Maeck A, DelSontro T, McGinnis D F *et al*. Sediment trapping by dams creates methane emission hot spots. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8130-8137. DOI: 10.1021/es4003907.

[26] Ion IV, Ene A. Evaluation of greenhouse gas emissions from reservoirs: A review. *Sustainability*, 2021, **13**(21): 11621. DOI: 10.3390/su132111621.

[27] Li Z, Sun ZY, Chen YB *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.

[28] Ai YD, Huang T, Duan CC *et al*. Knowledge domain of greenhouse gas emissions from hydropower reservoirs: Hotspots, frontiers and future perspectives. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 1055891. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1055891.

[29] Harrison JA, Deemer BR, Birchfield MK *et al*. Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1267-1277. DOI: 10.1021/acs.est.6b03185.

[30] Beaulieu JJ, Balz DA, Birchfield M K *et al*. Effects of an experimental water-level drawdown on methane emissions from a eutrophic reservoir. *Ecosystems*, 2018, **21**(4): 657-674. DOI: 10.1007/s10021-017-0176-2.

[31] Xiao SB, Wang YC, Liu DF *et al*. Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(10): 2065-2071. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60269-1.

[32] Qin Y, Gou Y J, Yu Z T *et al*. Effects of environmental factors on the methane and carbon dioxide fluxes at the middle of Three Gorges Reservoir. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, **12**(8): 4007-4020. DOI: 10.2166/wcc.2021.081.

[33] Mao YF, He RX, Li H *et al*. Research progress on methane emissions from tributaries of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2024, **36**(1): 17-33. DOI: 10.18307/2024.0102. [毛羽丰，何蕊序，李宏等. 三峡水库支流甲烷排放研究进展. 湖泊科学，2024, **36**(1): 17-33.]

[34] Liu J, Xiao SB, Wang CH *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.

[35] Li Z, Zhang C, Liu L *et al*. Ebullition fluxes of CO_2 and CH_4 in Pengxi River, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 789-798. DOI: 10.18307/2014.0518. [李哲，张呈，刘靓等. 三峡水库澎溪河 CO_2、CH_4气泡释放通量初探. 湖泊科学，2014, **26**(5): 789-798.]

[36] 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.]

[37] Cheng XJ, Chen YC. Theoretical analysis of dissolved gas supersaturation downstream of sluicing dam and application. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(3): 346-350. [程香菊，陈永灿等. 大坝泄洪下游水体溶解气体超饱和理论分析及应用. 水科学进展，2007, **18**(3): 346-350.]

[38] Huang JP, Lu JY, Li R *et al*. Numerical study on the cumulative effect of supersaturated TDG through the spillway. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2021, **21**(2): 292-298. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2021.01.003.

[39] Li R, Li J, Li KF *et al*. Study on supersaturation prediction of total dissolved gas in high dam project. *Scientia Sinica: Technologica*, 2009, **39**(12): 2001-2006. [李然，李嘉，李克锋等. 高坝工程总溶解气体过饱和预测研究. 中国科学：E 辑：技术科学，2009, **39**(12): 2001-2006.]

[40] Bao YH, Gao P, He XB. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir—A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 2015, **150**: 14-24. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.07.005.

[41] Su YM, Liu WB, Rahaman MH *et al*. Methane emission from water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir: Seasonal variation and microbial mechanism. *Science of The Total Environment*, 2024, **912**: 168935. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168935.

[42] Lu YM, Li Z, Lu LH *et al*. Response of soil organic carbon in riparian zone of Three Gorges Reservoir to anthropogenic activities. *Yangtze River*, 2025, **56**(6): 15-23, 30. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2025.06.003. [陆一鸣，李哲，鲁伦慧等. 三峡水库消落带土壤有机碳对人类活动的响应. 人民长江，2025, **56**(6): 15-23, 30.]

[43] Wang Z, Hu L, Zhu B. Characteristics of greenhouse gases emission under inundation from dominant herbaceous plants in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(9): 1965-1974. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202009007. [王正，胡磊，朱波等. 三峡水库消落带优势草本植物残体淹水后温室气体排放特征. 长江流域资源与环境，2020, **29**(9): 1965-1974.]

[44] Zhang DD, Li JS, Wu JJ *et al*. Soil CO_2 and CH_4 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.

[45] Shi WJ, Du M, Ye C *et al*. Divergent effects of hydrological alteration and nutrient addition on greenhouse gas emissions in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Water Research*, 2021, **201**: 117308. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117308.

[46] Yang L, Lu F, Wang XK *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. DOI: 10.1029/2011JD017362.

[47] Zhang S, Long X, Liu L *et al*. Remote sensing-based estimation of monthly CO_2 flux in Three Gorges Reservoir drawdown areas. *Journal of Environmental Management*, 2025, **394**: 127635. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127635.

[48] Zhao DZ, Tan DB, Li C *et al*. Tempo-spatial variations and influential factors of carbon dioxide emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 954-963. DOI: 10.13227/j.hjkx.201607086. [赵登忠，谭德宝，李翀等. 隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素. 环境科学，2017, **38**(3): 954-963.]

[49] 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.

[50] Zhang JQ, Yuan GL, Hu J *et al*. Emission characteristics and influencing factors of greenhouse gas emissions from urban rivers in the plain river network region of China. *Environmental Research Communications*, 2025, **7**(10): 105001. DOI: 10.1088/2515-7620/ae0a0e.

[51] Raymond P A, Zappa C J, Butman D *et al*. Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2012, **2**(1): 41-53. DOI: 10.1215/21573689-1597669.

[52] Li H, Wang XF, Yuan XZ *et al*. Review on monitoring methods for greenhouse gases fluxes in freshwater ecosystems. *J Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1153-1175. DOI: 10.18307/2023.0402. [李航，王晓锋，袁兴中等. 淡水生态系统温室气体通量监测方法综述. 湖泊科学，2023, **35**(4): 1153-1175.]

[53] 中国水力发电工程学会. 水库温室气体通量监测技术导则: T/CSHE 0003-2022. 北京：中国标准出版社，2022.

[54] Jämsén M, Agar D, Alakoski E *et al*. Measurement methodology for greenhouse gas emissions from storage of forest chips--a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **51**: 1617-1623. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.064.

[55] Vachon D, Prairie YT, Cole J J. The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(4): 1723-1732. DOI: 10.4319/lo.2010.55.4.1723.

[56] Minke M, Augustin J, Hagemann U *et al*. Similar methane fluxes measured by transparent and opaque chambers point at belowground connectivity of *Phragmites australis* beyond the chamber footprint. *Aquatic Botany*, 2014, **113**: 63-71. DOI: 10.1016/j.aquabot.2013.11.006.

[57] Erkkilä KM, Ojala A, Bastviken D *et al*. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: Comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method. *Biogeosciences*, 2018, **15**(2): 429-445. DOI: 10.5194/bg-15-429-2018.

[58] Baldocchi AK, Reed DE, Loken LC *et al*. Comparing spatial and temporal variation of lake-atmosphere carbon dioxide fluxes using multiple methods. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, **125**(12): e2019JG005623. DOI: 10.1029/2019JG005623.

[59] Eugster W, DelSontro T, Sobek S. Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH_4 emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability. *Biogeosciences*, 2011, **8**(9): 2815-2831. DOI: 10.5194/bg-8-2815-2011.

[60] Deshmukh C, Serça D, Delon C *et al*. Physical controls on CH_4 emissions from a newly flooded subtropical freshwater hydroelectric reservoir: Nam Theun 2. *Biogeosciences*, 2014, **11**(15): 4251-4269. DOI: 10.5194/bg-11-4251-2014.

[61] Esters L, Rutgersson A, Nilsson E *et al*. Non-local impacts on eddy-covariance air-lake CO_2 fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2021, **178**(2): 283-300. DOI: 10.1007/s10546-020-00565-2.

[62] Huotari J, Ojala A, Peltomaa E *et al*. Long-term direct CO_2 flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(18): L18401. DOI: 10.1029/2011GL048753.

[63] Baldocchi DD. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 479-492. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x.

[64] Yao X, Li Z, Guo JS *et al*. Comparison between closed static chamber method and thin boundary layer method on monitoring air-water CO_2 diffusion flux. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 289-296. [姚骁，李哲，郭劲松等. 水-气界面 CO_2通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算法比较. 湖泊科学，2015, **27**(2): 289-296.]

[65] Paranaíba JR, Barros N, Mendonça R *et al*. Spatially resolved measurements of CO_2 and CH_4 concentration and gas-exchange velocity highly influence carbon-emission estimates of reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(2): 607-615. DOI: 10.1021/acs.est.7b05138.

[66] Perolo P, Fernández Castro B, Escoffier N *et al*. Accounting for surface waves improves gas flux estimation at high wind speed in a large lake. *Earth System Dynamics*, 2021, **12**(4): 1169-1189. DOI: 10.5194/esd-12-1169-2021.

[67] Heiskanen JJ, Mammarella I, Haapanala S *et al*. Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, **66**: 22827. DOI: 10.3402/tellusb.v66.22827.

[68] Joyce J, Jewell P W. Physical controls on methane ebullition from reservoirs and lakes. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2003, **9**(2): 167-178. DOI: 10.2113/9.2.167.

[69] DelSontro T, Kunz MJ, Kempter T *et al*. Spatial heterogeneity of methane ebullition in a large tropical reservoir. *Environmental Science & Technology*,

2011, **45**(23): 9866-9873. DOI: 10.1021/es2005545.

[70] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R *et al*. Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide. *SIL Proceedings*, 2000, **27**(3): 1391-1395. DOI: 10.1080/03680770.1998.11901464.

[71] Wik M, Crill PM, Varner RK *et al*. Multiyear measurements of ebullitive methane flux from three subarctic lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(3): 1307-1321. DOI: 10.1002/jgrg.20103.

[72] Ostrovsky I, McGinnis DF, Lapidus L *et al*. Quantifying gas ebullition with echosounder: The role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6**(2): 105-118. DOI: 10.4319/lom.2008.6.105.

[73] Li R, Li KF, Feng JJ *et al*. Review on the effect of dissolved gas supersaturation of dam spill on fishes and its mitigation measures. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, **55**(4): 91-101. DOI: 10.15961/j.jsuese.202200117. [李然，李克锋，冯镜洁等. 水坝泄水气体过饱和对鱼类影响及减缓技术研究综述. 工程科学与技术，2023, **55**(4): 91-101.]

[74] 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.

[75] Xu BS, Wu W, Ye HH *et al*. Monitoring the area change in the Three Gorges Reservoir riparian zone based on genetic algorithm optimized machine learning algorithms and Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 2023, **15**(23): 5456. DOI: 10.3390/rs15235456.

[76] Zhao Y, Zeng Y, Wu B F *et al*. Review of methods for measuring greenhouse gas flux from the air-water interface of reservoirs. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(1): 135-146. [赵炎，曾源，吴炳方等. 水库水气界面温室气体通量监测方法综述. 水科学进展，2011, **22**(1): 135-146.]

[77] Duan HT, Xiao QT, Qi TC *et al*. Quantification of diffusive methane emissions from a large eutrophic lake with satellite imagery. *Environmental Science & Technology*, 2023, **57**(36): 13520-13529. DOI: 10.1021/acs.est.3c05631.

[78] Wen Z D, Shang YX, Lyu LL *et al*. A review of quantifying pCO_2 in inland waters with a global perspective: Challenges and prospects of implementing remote sensing technology. *Remote Sensing*, 2021, **13**(23): 4916. DOI: 10.3390/rs13234916.

[79] Qiu J. Chinese dam may be a methane menace. *Nature*, 2009. DOI: 10.1038/news.2009.962.

[80] Sun Z, Chen Y, 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.]

[81] 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.

[82] Chen H, Yuan XZ, Chen ZL *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.

[83] 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.

[84] Yang L, Lu F, Wang XK *et al*. Spatial and seasonal variability of diffusive methane emissions from the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*: *Biogeosciences*, 2013, **118**(2): 471-481. DOI: 10.1002/jgrg.20049.

[85] Li Z, Bai L, Jiang T *et al*. Estimation on annual water-air CO_2 and CH_4 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 CO_2 与 CH_4 年总通量估算. 水科学进展, 2013, **24**(4): 551-559.]

[86] Zhao Y, Sherman B, Ford P *et al*. A comparison of methods for the measurement of CO_2 and CH_4 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.

[87] Xiao SB, Liu L, Wang W *et al*. A Fast-Response Automated Gas Equilibrator (FaRAGE) for continuous *in situ* measurement of CH_4 and CO_2 dissolved in water. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, **24**(7): 3871-3880. DOI: 10.5194/hess-24-3871-2020.

[88] Zhao XS, Fan XW, Griffis TJ *et al*. Three gorges dam operations affect the carbon dioxide budget of a large downstream connected lake. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(12): e2022GL102697. DOI: 10.1029/2022GL102697.

[89] Palmer SCJ, Kutser T, Hunter PD. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **157**: 1-8. DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.021.

[90] Song ZH, Yao XX, Yonas M *et al*. Using the sedimentary records to reveal the influence of algal blooms on internal nutrient accumulation in the first-order tributaries of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2025, **37**(6): 1948-1961. [宋增辉，姚学杏, Muhammad Waqas Yonas 等. 沉积记录揭示的三峡库区一级支流水华对内源营养积累的影响. 湖泊科学, 2025, **37**(6): 1948-1961.]

[91] Delsontro T, McGinnis 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.

[92] 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): 2006GL027929. DOI: 10.1029/2006GL027929.

[93] Kemenes A, Forsberg BR, Melack JM. Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(12): 2007GL029479. DOI: 10.1029/2007GL029479.

[94] Yang L, Lu H, Yu XF *et al*. Carbon dioxide flux in the drained drawdown areas of Three Gorges Reservoir. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 1015888. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1015888.

[95] Zhao Y, Lin JJ, Cheng SX *et al*. Linking soil dissolved organic matter characteristics and the temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir. *Ecological Indicators*, 2023, **154**: 110768. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110768.

[96] 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.

[97] Seth M, Aparicio MU, Nakomcic-Smargdakis B *et al*. A review of hydropower reservoir GHG estimation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, **233**(C): 116859.

[98] Linkhorst A, Paranaíba JR, Mendonça R *et al*. Spatially resolved measurements in tropical reservoirs reveal elevated methane ebullition at river inflows and at high productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, **35**(5): e2020GB006717. DOI: 10.1029/2020GB006717.

[99] Liu CQ, Wang FS, Wang YC *et al*. Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 384-396. [刘丛强，汪福顺，王雨春等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角.长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 384-396.]

[100] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210715. [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.]

[101] Wan L, Bao YH, Zhang HZ *et al*. Research on radar remote sensing extraction algorithms for reservoir water level fluctuation zones. *Yangtze River*, 2026, **57**(1): 92-101. [万励，鲍玉海，张浩哲等. 水库消落带雷达遥感提取算法研究. 人民长江, 2026, **57**(1): 92-101.]