

DOI: 10.11964/jfc.20240114350

· 综述 ·

水产养殖中温室气体排放的核算方法及其影响因素

梁贺君¹, 韩冠荣², 许竞翔^{1*}, 张锦辉², 李灿锋³, 隋恒寿⁴

1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 3. 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南 昆明 650111; 4. 中水集团远洋股份有限公司, 北京 100032

摘要: 为了深入厘清水产养殖生态系统温室气体排放的核算方法、通量测量和影响因素, 本综述对水产养殖温室气体排放核算方法相关研究进行了系统梳理和整合分析, 总结了目前核算温室气体排放的方法, 包括橡树岭国家实验室 (ORNL) 法、政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 排放因子法和生命周期分析 (LCA) 方法等, 并概述了测量温室气体排放通量的方法, 如倒置漏斗法、涡流协方差 (EC) 技术和静态箱法等。此外, 本综述从养殖物种、水管理模式、温度、饲料等多个方面分析了影响温室气体排放的因素。综上所述, ①核算方法科学界并未达成一致共识, 计算公式简略, 考虑因素不全面; ②通量测量较复杂, 测量精度和效率有待提高; ③影响温室气体排放量的因素众多, 饲料是导致水产养殖温室气体产生的因素之一, 但目前针对由饲料投喂产生的水生生物代谢碳研究较少。本文指出目前相关研究在一定程度上存在局限性, 并从估算方法、考虑因素、监测时间和 N_2O 排放系数四个角度提出了未来水产养殖温室气体排放研究的建议, 以期在今后更深入的研究提供启示和帮助。

关键词: 水产养殖; 温室气体排放; 核算方法; 影响因素

第一作者: 梁贺君, 从事低碳渔业与智慧养殖研究, E-mail: hjliang@shou.edu.cn



通信作者: 许竞翔, 从事新型碳汇技术与渔业机械研究, E-mail: jxxu@shou.edu.cn



资助项目: 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心开放课题 (CS2023D11)

收稿日期: 2024-01-29

修回日期: 2024-08-27

文章编号:

1000-0615(2025)06-069302-15

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

© 《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

水产养殖是人类获得动物性蛋白质来源的重要途径之一, 也是许多国家和地区优先发展的重点产业之一, 在水产养殖过程中也会伴随着温室气体 (greenhouse gas, GHG) 的产生^[1-2], 水产养殖中温室气体排放对环境的影响愈发引起人们的关注^[3-4]。随着全球人口增长, 人们对高品质动物蛋白的需求量不断增加, 水产养殖规模随之扩大。自 19 世纪 70 年代中期以来, 全球水产养殖明显增加^[5], 水产养殖产量已经超过捕捞渔业产量^[6], 进而导致水产养殖所需的饲料投入也在增加, 从而促使池塘沉积物中有机碳和氮营养物质的不断累积, 造成甲烷 (CH_4) 等温室气体排放量升高^[7-9]。

水产养殖作为一种经济活动, 其产生的二氧化碳 (CO_2) 排放量非常广泛, 从池塘建设前期到后期运输和销售水产品, 均涉及能源和饵料使用, 这些活动都会产生温室气体的排放, 主要排放包括 CO_2 、 CH_4 以及氧化亚氮 (N_2O)^[10] (图 1), 其中 CH_4 排放量最大, Yang 等^[11] 认为



CH₄ 在水产养殖温室效应的贡献占比达 91%，主要来自饲料中的有机质和鱼类养殖过程中的代谢废物等，这些代谢产物沉积在池塘底部，成为 CH₄ 细菌活动的主要场所^[12]。在水产养殖系统中，CH₄ 的产生主要来自两种途径，分别是醋酸发酵和 CO₂ 还原，CH₄ 氧化可以将 CH₄ 转化为 CO₂^[13]；另外，有机物的分解作用也会

产生 CO₂，在缺氧条件下，同样会产生 CH₄^[14]。N₂O 是一种消耗臭氧层的温室气体，主要来自作物种植期间土壤中氮的微生物转化，以及水产养殖池塘中饲料和肥料中含氮化合物的微生物转化^[15-16] 和微生物的硝化和反硝化作用，但是其形成 N₂O 的路径尚不确定^[4,10,17]。

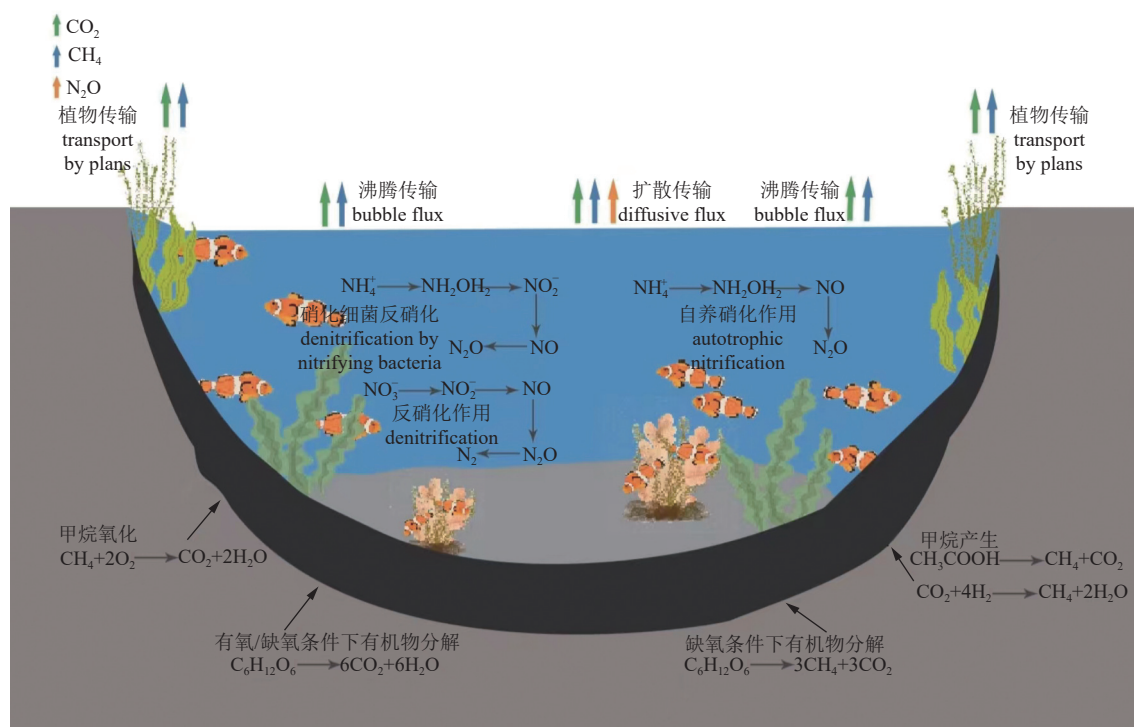


图 1 水产养殖温室气体产生与排放途径

Fig. 1 Pathways of greenhouse gas production and emission in aquaculture

N₂O 与 CO₂ 和 CH₄ 相比，在相同的时间尺度上被认为具有更高的全球变暖能力^[18-19]。在 100 年的时间尺度上，其变暖能力是 CO₂ 的 310 倍^[4,20]。因此，确定一个相对准确的 N₂O 直接排放系数对准确估算水产养殖 N₂O 的排放总量至关重要^[21]。截至目前，对水产养殖的 N₂O 排放进行量化的研究很少^[4,17]。大多数学者在 N₂O 排放量的探讨或研究中均参考了 Williams 等^[3]、Hu 等^[17] 和胡志强^[21] 的相关研究。在 N₂O 排放系数选择方面，由于污水处理厂的废水处理过程和工业化养殖类似，因此，国外学者在计算 N₂O 排放系数时，通常参考污水处理厂的 N₂O 排放系数进行计算。而 Williams 等^[3] 和 Hu 等^[17] 则采用 1.80% 和 2% 的 N₂O 排放系数，从水产养殖总产量来预估未被利用的氮量。胡

志强^[21] 基于华东地区的 N₂O 排放情况，采用静态暗箱-气相色谱法原位同步观测和比较常规稻田和相邻蟹/鱼养殖湿地 N₂O 排放，探讨不同农业湿地温室气体的排放强度、排放特征、驱动机制和综合温室效应，对全国和全球水产养殖湿地的温室气体排放量进行了估算，但该研究仅仅只在华东地区进行观测。总之，在 N₂O 排放的研究方面，研究结果差异明显。不同的养殖模型在选取 N₂O 排放系数方面存在较大的区别，即使在相同的养殖模式下，每次实测 N₂O 的排放系数差异也较大^[22-23]。在 N₂O 排放量的测定方面，不同水产养殖系统的 N₂O 排放量可能会因为环境条件的不同而存在巨大差异，因此，为了估计全球排放量，需要统一排放因子^[4]。基于不同国家不同条件的养殖管理措施，联合

国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) (2000) 建议不同的国家尽可能采用适合本国的 N_2O 直接排放因子^[24]。此外, 由于缺乏精确的测量技术等原因, 很难建立全国水产养殖排放清单与核算模型来估计若干季节和地区的 N_2O 排放量^[4]。

水产养殖主要在池塘、水库、湖泊、江河及其他内陆水域中进行, 由于投喂饲料, 导致养殖水体接收大量外来碳和氮等营养物质^[25-28]。对于小型养殖池塘, 虽然其养殖规模较小, 但由于其较高的生产力和较浅的水深度, 导致更多的 CO_2 和 CH_4 排放^[8,29]。由于缺乏相关数据, 目前对水产养殖池塘 CH_4 排放量的估计具有很大的不确定性^[30]。小型农场水库的温室气体排放一直是该领域温室气体核算中 CO_2 和 CH_4 的一个被忽视但确实是潜在的重要来源^[31]。湖泊作为区域和全球大气 CH_4 排放源, 占全球 CH_4 排放量的 16%^[32-33]。Huttunen 等^[34] 通过对不同地理区域湖泊的数据整合来研究湖泊碳循环。事实上, 由于水库和池塘的生物活性远远高于湖泊, 推测, 其碳循环速率较其他生态系统要高^[35]。因此, 有必要对小型湖泊、水库和池塘温室气体排放进行研究, 以便更准确地核算水产养殖温室气体排放量。

综上, 对水产养殖温室气体排放系统与养殖环境分析发现, 水产养殖生态系统的温室气体排放是由有氧和厌氧过程对有机物的降解所致^[36-38], 因此, 在核算水产养殖系统温室气体排放时应考虑沉积物反硝化带来的气体排放^[25,39-40]。然而, 迄今为止, 针对水产养殖生态系统温室气体排放核算方法、评估测量、数据采集及影响因素方面的研究处于初级阶段, 科学界并未达成一致认识。水产养殖相关部门关于温室气体排放量无明确数据, 同时缺少不同养殖系统的单独数据^[5,41]。基于此, 本研究通过对相关文献的搜集和梳理, 对水产养殖温室气体排放的核算、测量及影响因素进行整理汇总, 并分析目前方法的缺点和局限性, 并对未来的研究方法提出建议和展望。

1 水产养殖的温室气体排放核算

目前水产养殖温室气体排放核算方法并未统一, 从能源消耗考虑, 可以使用橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) 方

法和排放因子 (IPCC) 法进行估算; 从评估方法考虑, 可以采用碳足迹法; 从物质转换考虑, 可以通过饲料转化率结合排放系数的方法来估算 N_2O 排放量^[40]。根据文献收集情况, 目前关于水产养殖温室气体排放核算方法归纳为四个方面 (表 1)。

1.1 直接测量法

该方法是基于排放源实测基础数据, 汇总得到相关温室气体排放量。温室气体排放核算可靠性较高, 但需要大量的实地观测数据和设备支持, 通常使用漂浮通量箱法、扩散模型法和设备测定法来测定。漂浮通量箱法和扩散模型法是温室气体排放通量的观测方法; 设备测定法是一种操作简便、结果可靠的快速测定方法, 常用的设备包括 LI-7500A 水体 CO_2 通量仪、二氧化碳传感器、星载遥感等。已有学者对直接测量法进行了研究, 赵光辉等^[42] 以福建省江河口鳊鱼滩陆基养虾塘为研究对象, 采用悬浮箱/静态箱-气相色谱法对养虾塘养殖期水-大气界面和非养殖期沉物-大气界面白天 CO_2 垂直通量进原位观测, 研究不同时间的碳通量变化特征。宋红丽等^[43] 以黄河三角洲神仙沟南部的养虾塘为研究对象, 采用漂浮箱-气相色谱法对养殖塘白天水-气界面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量进行观测, 分析养殖塘温室气体通量季节变化特征。高洁^[44] 以内陆水体生态系统为研究对象, 采用漂浮通量箱法和扩散模型法对水中 CH_4 和 N_2O 的排放通量进行测定, 结果显示, 不同方法之间的差异很大, 甚至存在数量级上的差异。两类方法测定的气体通量之间存在显著的线性相关性。吕蒙等^[45] 提出一种基于星载遥感的碳通量直接测量方法, 该方法可提供大尺度碳通量观测数据, 作为地基 CO_2 通量测量的有益补充。

1.2 间接估算法

该方法是利用统计数据、模型计算、影响因素推断等进行计算温室气体排放, 也是应用最为普遍的一种温室气体核算方法。这种方法可以减少对实时观测数据的需求, 但通常需要更多的统计数据支持, 并且精度较低。国内外学者进行了大量的间接测量方法的研究, 刘晃等^[46] 根据 ORNL^[47] 提出的 CO_2 排放量的计算方法进行估算, 估算出 2007 年我国水产养殖碳排放量为 730.1 万 t。金书秦等^[48] 利用 ORNL 法

表 1 估算水产养殖温室气体排放量的主要方法

Tab. 1 Main methods for estimating greenhouse gas emissions in aquaculture

类别 type	方法 method	原理 principle	文献 references
直接测量法 direct measurement method	漂浮静态通量箱法 floating static flux box method	该方法利用漂浮通量箱,在水体表面测定一段时间内漂浮通量箱中CH ₄ 和N ₂ O浓度量,来确定这些气体的排放通量。	[42-45]
	扩散模型法 diffusion model method	可以通过大气-水面扩散模型,在计算气体在两种介质中的扩散和传输,从而得出精确的测量结果。	
间接估算法	IPCC排放因子法 IPCC emission factors	适用范围最广、应用最为普遍。碳核算基本方程:温室气体(GHG)排放=活动数据(AD)×排放因子(EF)。	[46-49]
	ORNL法 ORNL method	ORNL法,是一种风险评估方法,用于评估化学品在环境中的迁移和转化,以及对环境和人类健康的影响。	
	标杆能效评估法 benchmarking energy efficiency assessment method	以全国平均水平为标杆,如果该地区规模养殖户和一般养殖户的温室气体排放强度与全国平均水平进行比较,将结果分为低能耗低排放水平、较高能耗较高排放水平和高能耗高排放水平。	
	评估N ₂ O的排放系数法 evaluating N ₂ O emission factor method	根据不同养殖模式等因素的影响,采用不同的排放系数进行温室气体估算。	
预测法 predicted method	粗糙集方法 rough set method	粗糙集可以有效地分析和处理各种不完整信息,发现隐藏的知识并揭示潜在的规则 ^[50] 。除了问题需要处理的数据集之外,不需要提供任何其他先前信息,只需从观察数据中删除冗余信息,分析属性之间的不完整知识粗糙度、依赖性和重要性,获得分类或决策规则。	[51-52]
	线性预测 linear prediction	先预测水产养殖鱼类产量,通过排放因子估计温室气体排放量。	
生命周期分析法 life cycle assessment	LCA法	在水产养殖领域,该方法考虑饲料、化肥等原料生产、加工与运输等过程,是一个考虑水产品从摇篮到大门的整个生命周期过程的资源消耗与温室气体排放的方法。	[17,29]
	碳足迹方法 carbon footprint method	将水产养殖温室气体排放分为4个阶段,每一阶段都有相应的核算方法,最后,将四个阶段的排放量进行求和即为水产养殖的温室气体排放。	
其他方法 other methods	质量平衡方法 mass balance method	通过分析水产养殖的输入输出,建立平衡方程,从而得到温室气体排放情况。	[11]

注:根据相关文献整理得出。

Notes: Based on the relevant literature.

与标杆能效评估法,采集全国 12 个主要省市的数据进行分析,计算出平均每公顷养殖水面所产生的温室气体排放量为 420.5 kg。每万元产值直接能耗导致的温室气体 (CO₂) 排放量为 367.77 kg。王逸清^[49]根据 IPCC 排放因子法计算石化燃料燃烧产生的 CO₂,与张祝利等^[53]利用 ORNL 法计算的结果进行相比较,发现两种方法的差值比例在 5% 以内,无显著影响。另外,王逸清^[49]利用 IPCC 排放因子法与刘晔等^[46]相关统计数据进行比较,其结果分析发现,这两种方法差值比例约在 1.4%,多项研究结果表明 IPCC 排放因子法所测算的 CO₂ 排放量结果是可以接受的。

1.3 预测法

该方法是利用现有数据、模型和方法,通过对水产养殖过程中的关键投入产出指标进行分析、评价和预测,对水产养殖活动的温室气体排放总量和排放强度进行预测和优化。其中,

粗糙集方法和线性预测是比较常用的预测方法。粗糙集方法主要是一种基于数据挖掘的方法,可以处理不确定和不完整的数据集,可以有效预测温室气体排放量和排放强度。而线性预测则是一种基于统计学的方法,使用时间序列分析来预测未来温室气体排放量和排放强度。这些方法的优点在于不需要大量精细的数据,仅需要一些简单的预测模型和历史数据来预测未来的温室气体排放情况。Hu 等^[51]基于粗糙集理论建立了水产养殖湿地温室气体排放预测模型,该方法不仅提高了预测精度,还缩短了预测时间。该预测方法需要先收集水产养殖湿地温室气体排放历史数据,并进行预处理,然后建立数据关系模型以预测未来的排放情况。在此基础上,该研究对基于粗糙集与支持向量回归对水产养殖湿地温室气体的排放进行了预测,充分利用粗糙集理论,提出了一种新的加权系数组合预测模型。此方法的特点在于克服了传统

权重系数过于主观的缺点, 使权重系数更加客观合理。在 CH_4 排放预测的比较上, 该预测模型的结果与实际结果的差异较小, 精度较高。在 N_2O 的预测方面, 该模型呈现出了同样的优势。Paudel 等^[52] 基于线性预测方法对尼泊尔水产养殖的 N_2O 排放量进行预测, 该研究先对每年尼泊尔的鱼产量进行预测, 在此基础上, 通过不同鱼类的蛋白质含量选定合适的 N_2O 排放系数, 最后建立线性方程对 N_2O 的排放量进行预测。然而, 由于人口、生产和需求不能无限增长, 如果直接用线性回归来对水产养殖的温室气体排放量进行长期预测, 这很可能导致结果的不确定性。

1.4 LCA 法

该方法通过综合分析水产养殖从生产到销售和消费整个过程的所有温室气体排放, 利用加权法来计算总的温室气体排放量。这种方法具有很高的精度, 但需要的数据和信息较多, 计算过程较为复杂。该方法包括水产品从生产到进入养殖场的整个过程中的所有温室气体排放, 考虑因素不仅仅局限于水产养殖水体, 还包括养殖场前和养殖场后相应的生产活动产生的温室气体排放^[29]。近年来, LCA 法已经成为一种包括农业在内的不同行业受到环境影响的评估方法, 被称为“从摇篮到坟墓”分析^[39]。LCA 法通常应用于核算整个过程的全能耗, 即考虑从原材料采集到产品生产、运输、销售、使用、回收、维护和最终处置整个生命周期过程的能源消耗^[48]。LCA 法通常由四个主要步骤组成, 分别是目标和范围定义、生命周期清单分析、影响评估及结果解释。Robb 等^[29] 建立了水产养殖 LCA 模型, 在模型中考虑了养殖场的产出比因素, 同时也考虑了饲料排放、运输距离和鱼种排放等信息。另外, 为了提高灵活性, 在其模型中, 允许改变 4 个关键参数: 养殖场年产量、饲料转化率、池塘 N_2O 排放系数、用于计算土地利用变化 (land use change, LUC) 排放量的方法。其使用 LCA 模型对亚洲 3 种鱼类养殖系统产生的温室气体进行了相关研究评估, 结果发现, 尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)、印度鲤 (*Catlocarpio*) 和条纹鲮 (*Leiocassis virgatus*) 平均每千克排放 CO_2 强度分别为 1.58、1.84 和 1.37 kg, 结果与其他 LCA 一致。

另一种基于 LCA 的碳足迹方法也得到广泛的应用。碳足迹方法将水产养殖温室气体排放分为四个阶段: ①查询饲料原材料的排放因子, ②统计每种原料的数量, ③通过 FISH-e 工具计算饲料原料的温室气体排放量, 该工具可以用于计算水产养殖的全球温室气体排放量, ④通过式 (1) 计算各饲料原料的温室气体排放量:

$$\text{GE}_{fs} = \text{EF}_{fs} \times \text{AC}_{fs} \quad (1)$$

式中, GE_{fs} 为饲料原料 s 的温室气体排放量 (kg), EF_{fs} 为饲料原料 s 的排放因子, AC_{fs} 为每种原料的量, 所有饲料原料的温室气体排放通过 FISH-e 工具计算, 该工具可用于计算全球水产养殖和海水养殖的温室气体排放。

在水产养殖场, 有许多设备的使用都在消耗能源, 如车辆、提供动力的设备以及排水泵等。能源使用的温室气体排放量用式 (2)^[17] 计算:

$$\text{GE}_{ei} = \text{EI}_{ei} \times P_i \quad (2)$$

式中, GE_{ei} 是养殖场能源的温室气体排放量 (kg), EI_{ei} 是每吨重量的电力、柴油和汽油的排放强度, P_i 是每种物种组 i 的产量 (t)。

N_2O 是导致全球气候变化的温室气体之一, N_2O 主要有微生物的硝化和反硝化产生。影响 N_2O 生成的因素有许多, 包括温度、盐度和 pH 值等^[54], 且这些因素很可能会随季节发生变化。因此, 核算水产养殖产生的 N_2O 排放量具有一定的难度。水生 N_2O 产量通过产量乘以每千克产量的 N_2O EF 来计算^[17]:

$$\text{GE}_{Ni} = \text{EF}_{Ni} \times P_i \quad (3)$$

由于缺乏水产养殖的肥料使用数据, 肥料碳排放量使用式 (4) 计算:

$$\text{GE}_{fei} = \frac{\text{GE}_{wfei}}{P_{wi}} \times P_i \quad (4)$$

式中, GE_{wfei} 是第 i 组各物种的全球池塘肥料碳排放量 (kg), P_{wi} 是第 i 类各物种的总产量 (kg)。

综上, 其总排放量计算公式 (5):

$$\text{GE}_i = \sum_{s=1}^{s=n} \text{GE}_{fs} + \text{GE}_{ei} + \text{GE}_{Ni} + \text{GE}_{fei} \quad (5)$$

基于上式, Xu 等^[55] 发现, 仅饲料产生的碳排放量就占温室气体排放总量的 52%, 这是四个阶段温室气体排放量最大的部分。尽管其研究中已经计算了 85% 以上的温室气体排放量,

但由于忽略了其他的 15%, 因此其估算的温室气体排放量仍然存在低估的可能性。

此外, 除了上述讨论的核算方法, Yang 等^[11]还运用温室气体核算的质量平衡方法分析了养虾池塘的温室气体排放情况。研究发现, 温室气体排放量随时间呈显著变化, 5—6 月 CO₂ 排放量较低, 5—10 月 CH₄ 排放量较低, 而 8 月和 9 月的 CO₂、CH₄ 排放量较高。尽管使用质量平衡方法有助于理解水产养殖池塘内的温室气体核算和分析其动态情况, 但是该方法在水产养殖池塘的研究中仍然很少被使用。

综上, 大量学者对水产养殖系统温室气体排放核算方法做了研究, 但在实际的应用中, 这些方法都存在一些问题和挑战。直接测量法受测定环境因素的影响, 无法充分反映水产养殖的实际排放情况, 这是由于水产养殖的环境条件、物种、管理方式等都具有很强的时空变异性。同时, 这些方法还存在测量成本高、时间周期长等问题, 限制了该方法的应用范围和效果。间接测量法存在数据来源不确定、计算公式复杂、误差控制难度大等问题, 对其可靠性产生了较大影响。预测法的可靠性和精度受很多因素影响, 因此难以准确预测温室气体排放情况。生命周期法涉及到大量复杂的生产过程和环境影响因素, 需要收集和分析大量的数据, 同时还需要建立可靠的模型进行优化和预测, 因此该方法在水产养殖业中实施难度较大。此外, 对于温室气体排放核算的研究还需要考虑到养殖场内外环境的因素, 养殖场内部因素主要包括饲料种类、养殖密度、水质状况等, 这些因素都会影响温室气体排放量和排放强度。而养殖场外部因素主要包括季节、天气、气温等因素, 这些因素也会对养殖场的温室气体排放造成影响。

综上所述, 水产养殖温室气体排放核算方法主要涉及直接测量法、间接测量法、预测法和生命周期法。为了更准确地核算和控制水产养殖的温室气体排放, 研究人员需要进一步加强技术研发和创新, 建立整套科学可靠的温室气体排放核算体系。

2 水产养殖的温室气体通量测量

温室气体通量测量是水产养殖温室气体排放研究的基础和关键。通过梳理相关文献发现,

水产养殖温室气体通量测量方法包括倒置漏斗法、静态箱法、动态箱法、模型估算法、涡度相关法、可调谐二极管吸收光谱 (TDLAS) 技术、传递系数法、涡流协方差 (EC) 技术等(表 2)。

倒置漏斗法是一种快速、简便的测量方法, 该方法主要适用于冒泡方式排放的温室气体采集和分析, 主要集中在热带和亚热带以及一些浅水域温室气体通量的观测研究^[56-57]。静态箱法和动态箱法适用于小区域观测, 相比于静态箱法, 动态箱法减小了对环境的破坏, 也使得结果更接近于真实值, 但是其在实际应用中依旧有许多难题, 如箱体平衡气流量的设计、箱体覆盖面积小等^[65]。漂浮箱法和模型估算法是现在用于水-气界面温室气体扩散通量最常用的野外监测方法^[66]。在采样点测量表面和大气之间温室气体扩散通量的最常用技术是漂浮箱法^[67]。但许多因素都有可能对漂浮箱内的温室气体浓度造成影响, 如人为扰动和水面波动, 另外, 该方法也容易受天气状况影响而无法实现全时段和大范围的连续监测。模型估算法中的气体交换系数 k , 时常会受表层水体紊流混合作用及风速、降雨等环境因素的影响而变得十分复杂, 这使得该方法的估算结果具有不确定性^[68-69]。TDLAS 技术精度高, 响应迅速, 但是该技术对下垫面的要求较高, 且地形复杂区域的条件下难以发挥作用。涡度相关法作为直接测定植被-大气之间 CO₂ 通量的标准方法在全球碳循环和水循环中得到了广泛的应用^[60]。涡度相关法可以分析更大区域的温室气体排放通量, 该方法也不需要安排值班人员长时间连续监测, 但该方法除了 TDLAS 的缺点外, 还具有成本高、技术复杂和需要专业人员维护等痛点^[70]。目前国际上已经采用涡度相关法对面积较大的水库和湖泊进行温室气体排放通量的采集、分析和研究^[71]。传递系数法有助于了解 CH₄ 生产过程的生物和非生物控制因素, 但不适用于量化 CH₄ 的总排放量, 因为该方法忽视了 CH₄ 排放中的沸腾途径^[63]。涡流斜方差方法是一种革命性的新型测量温室气体通量方法, Zhao 等^[64]利用该方法对长江三角洲鱼塘中的复合体 CH₄ 通量进行了约 4 年的观察测量, 这可能是首次将 EC 技术应用于水产养殖生态系统的研究。在大范围测试中, 该技术不容易受到微观空间变化的影响, 这种连续性的测量非常适合量化年度生态系统规模的 CH₄ 排放。然而,

表 2 测量温室气体排放通量的主要方法

Tab. 2 Main methods for measuring greenhouse gas emissions fluxes

方法 method	原理 principle	文献 references
倒置漏斗法 inverted funnel method	在水体表层以下的一定深度放置倒置的漏斗, 使用连接装置获取水下排放的气泡, 然后对装置中的气体浓度进行测量, 最终计算出排放量。	[56-57]
开放式动态箱法 open dynamic box method	通过控制一定的空气流量, 将被测气体通过箱体, 在箱体入口和出口处测量气体浓度差异, 从而确定被罩表面该气体的交换通量。	[57-59]
模型估算法/梯度法 model estimation/gradient method	通过利用Fick定律和浓度梯度, 估算不同相间(如水-气)气体的通量F。	[56]
涡度相关法 eddy covariance method	利用大气中湍流运动所产生的风速脉动与物理量脉动, 对物质通量进行直接测定。	[60]
可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术 tunable diode laser absorption spectroscopy technology	使用一定波长的激光器照射待测气体, 利用光谱仪测量被选定的特征吸收线的强度, 通过与已知标准样品对比, 确定待测气体的成分浓度。	[56,61]
静态箱法 static box method	通常在水体表面会放置一个顶部密封的箱体, 该箱体底部开有通道, 收集表层水体中扩散产生的待测气体。每隔一段时间, 进行待测气体浓度的测量。可以计算出随时间变化的浓度差值, 从而估算被覆盖水体的待测气体排放通量。	[56]
漂浮箱法 flotation tank method	利用水面漂浮装置收集水体表层扩散排放的温室气体, 采用一个顶部密封、底部中通的采样箱, 每隔一定时间, 对采样箱中的气体进行测量, 计算温室气体的排放通量。	[62]
传递系数法 transfer coefficient method	将观测到的水体中的CH ₄ 浓度与水-空气传递系数的参数化相结合, 以确定CH ₄ 向大气的扩散通量。	[63]
涡流协方差(EC)技术 eddy covariance technology	利用配备足够精度传感器的气体分析仪来测量生态系统中的碳交换。常用的方法主要有开放光路式和闭路式两种。	[64]

由于 EC 技术成本高且需要技术人员对设备进行安装, 不建议将其用于测量小型池塘的温室气体^[58,72]。

综上所述, 水产养殖的温室气体通量测量是一个复杂的问题, 需要综合考虑多种测量方法来保证测量结果的准确性。虽然目前已经有较多方法可以用于水产生态系统温室气体排放的测量, 但不同的测量方法优点和局限性不同, 选择合适的测量方法需要根据具体的情况来决定。未来, 通过新技术和新方法的发展, 可以进一步提高水产养殖温室气体通量测量的精度和效率。

3 水产养殖的温室气体排放量影响因素

3.1 养殖物种

不同的养殖物种对于温室气体的排放量也有明显的差异。在 Fang 等^[73]的一项为期 2 年的实验中, 分别观察了螃蟹养殖池塘和鱼类养殖池塘的温室气体排放量, 研究表明, 鱼类养殖池塘的 CH₄ 排放量远高于螃蟹养殖池塘, 而 N₂O 排放量较低, 这很可能与水产养殖物种有关。不同的物种往往具有不同的摄食类型, 这也有可能影响 N₂O 的排放速率^[74]。与鱼类相比, 螃蟹会对沉积物产生更多的干扰, 螃蟹在池塘底部的日常活动都会破坏底栖物的厌氧环境,

从而抑制 CH₄ 的产生^[75]。以藻类和浮游动物为食的鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*) 温室气体、氮和磷排放量最低^[76]。然而在实际养殖中, 养殖池塘有相当一部分是多品种混养, 因此有必要研究不同的混养组合间温室气体排放情况的差异。此外, 池塘物种的种群密度、生长发育过程也会影响水产养殖池塘的温室气体排放量^[77-78]。

3.2 水管理模式

水管理模式的不同会对池塘水体中的沉积物特性、物质循环和微生物活动状态产生影响, 从而对碳排放产生影响。传统的水管理模式是不回流、不替换水体, 这种模式下, 池塘中的废水会产生大量的氨气和 CH₄, 对环境产生较大的影响。而现代化的水管理模式采用替换水体、循环利用水等方法, 可有效减少废水的产生, 并降低温室气体的排放量。为了研究水管理模式对养殖池塘之间的 CH₄ 和 N₂O 排放率的影响, Fang 等^[73]的研究中对鱼类养殖池塘和蟹类养殖池塘选取了不同的水管理模式。结果表明, 在无排水活动的情况下, 池塘处于厌氧状态, 有利于鱼类养殖中 CH₄ 的产生, 而蟹类养殖池塘的排水期则大大促进了 N₂O 的沉积物释放。此外, 尽管鱼塘的沉积物矿物 N 含量高于

蟹塘, 但由于其处于厌氧-积水条件, 反硝化过程中 N_2O 的还原加强, 因此在鱼塘中 N_2O 的排放量并不高。杨吉平等^[79] 测算了 6 种养殖模式的碳、氮、磷排放负荷和排放强度, 结果显示, 网箱养殖模式的 CO_2 排放负荷和排放强度均比其他模式低, 循环水养殖模式的氮排放强度和排放负荷均比全流水养殖模式低, 而 6 种养殖模式之间, 磷排放负荷和排放强度的差异不显著, 磷排放是制约扩大养殖规模的主要因素。杨平等^[80] 在实验中发现, 排干后池塘的 N_2O 排放量远远高于未排干池塘的排放量, 而对团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 池塘的夏季淹水阶段与冬季晒塘阶段排放通量比较, 发现冬季池塘 CO_2 和 CH_4 排放量远低于夏季淹水期, N_2O 排放量更低, 这表明 N_2O 排放受到排水活动的影响远远超过低温对其抑制作用。

3.3 环境温度

环境温度也是影响温室气体排放的因素之一。水温对 CH_4 和 N_2O 排放的影响是通过其对微生物活性和气体溶解度等的影响而间接发生的。随着水温上升, 微生物活性增强, 气体在水中的溶解度降低, 导致水体向大气释放的 CH_4 和 N_2O 量增加^[81-82]。研究表明, 温度升高会加速沉积物中乙酸发酵的速率, 加快 CH_4 的产生, 使其积聚在底泥中形成气泡, 这些气泡的释放增加了大气中 CH_4 的量。许多学者研究表明, 相对于气温较低的时间段, 在气温较高的季节温室气体排放量维持在较高水平^[83]。此外, 朱林等^[84] 对典型淡水鱼池塘生态系统的温室气体排放通量监测与分析实验中发现, CO_2 和 CH_4 的温室气体排放通量与气温呈现正相关的关系, 虽然 N_2O 的排放规律没有 CO_2 和 CH_4 明显, 但是也与气温呈现出一定的相关性。但并不能简单地认为温度越高温室气体排放量越高。水温对 N_2O 的生成速率影响稍微复杂。在对水体 N_2O 的研究中, Silvennoinen 等^[85] 发现, 水温升高会促进水-气界面的 N_2O 排放速率, 因为水体沉积物的硝化与反硝化速率因微生物活性增强而加快。但也有研究表明, 更高的水温会导致水体形成缺氧环境, 从而抑制硝化作用, 降低了 N_2O 的产生和释放^[86]。另外, 李元正等^[87] 的研究表明, 阴雨天和夜晚的 CO_2 排放量与温度呈负相关。张成等^[88] 对夏季富营养化浅水池

塘温室气体通量的昼夜变化进行了监测, 发现 CO_2 昼夜性扩散通量与气温和底层水体水温呈现出显著的负相关关系。然而, 尽管已经有很多研究关注养殖环境温度变化对温室气体排放通量的影响, 但多数研究是围绕水产养殖温室气体排放的规律性和相关性的定性研究, 尚未发现定量或与温度有关的预测模型研究^[40]。

3.4 饲料种类和饲喂量

饲料种类和饲喂量也是影响温室气体排放的因素, 不同种类的饲料中蛋白含量和脂肪含量的多少也会影响代谢和呼吸产生的温室气体排放量。通常来说, 动物性饲料的碳含量较高, 而植物性饲料的碳含量相对较低。以鱼类养殖为例, 鱼类常用的饲料主要由蛋白质、脂肪和碳水化合物等组成。其中, 脂肪含碳量高, 而碳水化合物含碳量相对较低。过量饲喂会导致养殖动物摄入超过其需要的饲料, 这样不仅会浪费饲料, 还会导致排泄物的增加, 进而造成温室气体排放量的增加。因此, 过量或不合理的饲喂量将会导致温室气体排放的增加。一些研究表明, 高蛋白质饲料和低蛋白-高碳水化合物饲料的使用都会增加温室气体的排放^[89]。此外, 不同养殖物种对饲料的需求不同, 也会影响温室气体排放。例如, 虾类对高蛋白质饲料的需求较高, 因此其排放量也更高^[90], 且饲喂量的增加也会导致温室气体排放量的增加^[91]。因此, 科学合理的饲料配方和饲喂管理对于减少水产养殖的温室气体排放至关重要。

3.5 其他因素

水产养殖的温室气体排放量还受其他多种因素的影响。首先, 风速可以增加水体与空气的接触面积, 进而改变表层水与大气间的 CO_2 浓度梯度。当风速增大时, 气体扩散强度也会相应增加^[62]。其次, 养殖水体 pH 值直接影响水中的碳酸盐平衡与分布, 从而影响着水体中 CO_2 的排放量和活动状态^[62]。另外, pH 值还会影响微生物活性, 进而对温室气体的排放造成影响^[82]。水体中溶解氧含量和分布情况对水体中的生态系统和化学反应过程都有着重要影响^[92]。在有氧环境下, 有机物会产生 CO_2 和 CH_4 , 而在缺氧环境下则主要产生 CH_4 ; 在有氧环境下, 氮循环主要是硝化反应, 而在缺氧环境下则是

反硝化反应。除此之外, 生物因素、水动力因素、营养盐等同样会对水体温室气体的产生存在影响。例如, 生物的呼吸和分泌作用会产生 CO_2 和 CH_4 , 而水动力因素如湍流则会促进气-水界面的扩散, 从而影响气体产生和扩散^[67]。同时, 营养盐如氮和磷也会影响微生物的生长和代谢活动, 从而对温室气体的排放产生影响^[71]。

此外, 人类活动同样对水生态系统带来不可忽视的影响。LUC、大坝与水库的建设等活动都改变了水生态系统本来的自然演化过程, 导致水体中碳和氮等要素的来源、流动和生物地球化学行为发生明显变化^[67]。例如, LUC 会导致河流水量和流速的变化, 从而影响水体中有机碳和溶解氧的含量, 进而影响温室气体的产生和排放^[80]。此外, 养殖池塘是否有疏浚也会影响温室气体的排放。Zhao 等^[64]的分析显示, 疏浚池塘的 CH_4 排放量远低于未疏浚的池塘。

综上所述, 水产养殖的温室气体排放量受多种因素影响, 包括水体物理化学因素、生物因素、水动力因素、营养盐等, 以及人类活动和饲料管理等。针对这些因素, 应当采取科学的管理措施, 从根源上减少水产养殖中温室气体排放量。

4 结论与展望

目前已有多种方法可用于核算水产养殖温室气体排放量, 包括 ORNL 法、IPCC 排放因子法、粗糙集方法和质量平衡方法等。但现有研究仍有不足之处, 主要原因在于计算公式简略, 考虑因素不全面。在测量温室气体排放量方面, 虽然已有多种方法, 但如何高效、快速且准确地测量仍是科研人员面临的主要难题。很多研究是基于季节性的测量, 为获得更加精确的实验结果, 应适当延长测量时间, 同时还需对夜间的温室气体排放通量进行测量。影响温室气体排放的因素众多, 如养殖物种、水管理模式、温度、饲料等。不同的养殖物种由于其不同的活动方式和摄食习惯等会对温室气体排放造成影响。水管理模式对池塘水体中物质循环、沉积物特性及微生物活动状态有着重要影响, 这也会导致温室气体排放的差异。同时, 温度对温室气体排放量也有一定的影响, 随着温度升高, 温室气体排放量在一定程度上增加, 但超

过一定限度后, 可能会抑制其排放, 呈现出复杂性。已有研究表明, 饲料是导致水产养殖温室气体排放的主要因素之一, 因此建议将其作为一个影响因子。但在饲料投喂环节温室气体排放核算方面, 由于缺乏残饵氧化反应和水生生物自身代谢温室气体排放等数据, 导致饲料投喂中温室气体排放难以准确核算。另外, 各地的管理措施和环境条件等不同, 如何找到适合本地区的 N_2O 排放系数是目前的一个难点。

针对上述温室气体排放核算研究中存在的问题与不足, 本文对水产养殖温室气体排放核算提出以下研究展望。

4.1 估算方法有待优化

目前估算方法的计算公式较为简单, 此类方法计算的温室气体排放并不能够反映水产养殖真实的排放情况, 因为该类方法计算的排放量并不包含水体的温室气体排放及其他的可能排放。此外, 大多数研究并未考虑水生生物光合作用对碳的吸收作用, 即现在研究的温室气体排放并不是净排放, 实际上水生生物光合作用的碳汇作用也非常重要。

4.2 考虑因素有待完善

已有研究表明, 饲料从生产到进入养殖场的整个过程中均伴随温室气体排放^[29, 54, 93]。然而, 多数研究并未考虑发生在养殖场大门之外的饲料对温室气体排放的影响; 另外, 大多数学者都是基于养殖场内的研究, 常常忽视其上下游温室气体的排放。对于饲料公司而言, 低成本是其首要考虑因素, 而不是解决温室气体排放问题。因此, 建议政府鼓励企业在减少饲料产生的温室气体排放方面多做贡献, 从而减少水产养殖温室气体排放。

此外, 相比于陆地畜牧动物的温室气体排放, 由于水产养殖物种更多, 因此研究水产养殖温室气体排放更为复杂。这也对研究人员提出了更高的要求, Yang 等^[94]在研究两个不同养殖池塘的温室气体通量中发现, 虾和鱼虾混养池塘之间的排放呈现出差异性。因此, 在评估养殖池塘的温室气体时, 需要将养殖池塘类型作为一个考虑因素。

4.3 监测时间有待细分

在温室气体排放通量的监测上, 很少有研

究是以年为周期进行监测的, 大多数研究通常集中于特定季节进行分析, 但是不同周期会影响温室气体排放的估算。为了更准确地核算温室气体排放量, 建议以年为单位进行研究分析^[95]。除此之外, 白天和夜晚的温室气体排放情况也不尽相同, 大多数研究都监测了白天的温室气体排放通量, 而忽视了夜晚的温室气体排放通量。这也对温室气体估算结果造成一定的误差。

4.4 N₂O 排放系数有待量化

水产养殖中 N₂O 排放系数是目前研究的焦点和难点, 不同水产养殖系统的 N₂O 排放系数和排放量可能因为环境条件的不同而产生较大区别, 即使是在相同的养殖模式下, 不同时间实测的 N₂O 排放系数也有差别。因此, 如何更好地量化 N₂O 排放系数以评估 N₂O 排放量是亟需解决的问题。

参考文献 (References):

- [1] MacLeod M J, Hasan M R, Robb D H F, *et al.* Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 11679.
- [2] 赵晓日, 樊相文, 刘玲, 等. 长江经济带淡水养殖单位面积产量、碳排放规律及空间差异 [J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2): 410-419.
Zhao X R, Fang X W, Liu L, *et al.* Per unit area yield, carbon emissions, and spatial differences of freshwater aquaculture in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 410-419.
- [3] Williams J, Crutzen P J. Nitrous oxide from aquaculture[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 143.
- [4] Hu Z, Lee J W, Chandran K, *et al.* Nitrous oxide (N₂O) emission from aquaculture: a review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(12): 6470-6480.
- [5] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2016 (SOFIA): contributing to food security and nutrition for all[R]. Rome: FAO, 2016.
- [6] Action S I J F, Organization A. World fisheries and aquaculture[J]. Food Agriculture Organization, 2020, 2020: 1-244.
- [7] Yuan J J, Xiang J, Liu D Y, *et al.* Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(4): 318-322.
- [8] Yang P, Derrick Y F L, Yang H, *et al.* Large increase in CH₄ emission following conversion of coastal marsh to aquaculture ponds caused by changing gas transport pathways[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118882.
- [9] Yang P, Zhang Y F, Yang H, *et al.* Ebullition was a major pathway of methane emissions from the aquaculture ponds in South-east China[J]. *Water Research*, 2020, 184: 116176.
- [10] Macleod M, Hasan M R, Robb D H F, *et al.* Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture[R]. Rome: FAO, 2019.
- [11] Yang P, Tang K W, Yang H, *et al.* Insights into the farming-season carbon budget of coastal earthen aquaculture ponds in southeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 335: 107995.
- [12] Raul C, Pattanaik S S, Prakash S. Greenhouse gas emissions from aquaculture systems[J]. *World Aquaculture*, 2020, 57: 61.
- [13] Diem T. Methane dynamics in oxic and anoxic aquatic systems[D]. Zurich: ETH Zurich, 2008.
- [14] Deshmukh C. Greenhouse gas emissions (CH₄, CO₂ and N₂O) from a newly flooded hydroelectric reservoir in subtropical South Asia: the case of Nam Theun 2 Reservoir, Lao PDR[D]. Toulouse: Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2013.
- [15] Macleod M J, Hasan M R, Robb D H F, *et al.* Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11679.
- [16] Kosten S, Almeida R M, Barbosa I, *et al.* Better assessments of greenhouse gas emissions from global fish ponds needed to adequately evaluate aquaculture footprint[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 141247.
- [17] Hu Z, Lee J W, Chandran K, *et al.* Nitrogen transformations in intensive aquaculture system and its implication to climate change through nitrous oxide emission[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130: 314-320.
- [18] Kumar A, Yang T, Sharma M P. Greenhouse gas measurement from Chinese freshwater bodies: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 368-378.
- [19] Fagodiya R K, Pathak H, Bhatia A, *et al.* Nitrous oxide emission and mitigation from maize-wheat rotation in the upper Indo-Gangetic Plains[J]. *Carbon Management*, 2019, 10(5): 489-499.
- [20] Pathak H, Upadhyay R C, Muralidhar M, *et al.* Measurement of greenhouse gas emission from crop, livestock and aquaculture[R]. New Delhi: Indian Council of Agricultural Research, 2013.
- [21] 胡志强. 稻田与蟹/鱼养殖湿地甲烷和氧化亚氮排放的观测比较研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
Hu Z Q. A comparison of methane and nitrous oxide emissions

- between paddy fields and crab/fish farming wetlands in south-east China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [22] 刘俊文, 刘晃, 庄保陆, 等. 淡水池塘养殖温室气体排放研究进展 [J]. 渔业现代化, 2019, 46(6): 14-21.
- Liu J W, Liu H, Zhuang B L, *et al.* Research progress on greenhouse gas emission from freshwater pond aquaculture[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(6): 14-21 (in Chinese).
- [23] Bhattacharyya P, Sinhababu D P, Roy K S, *et al.* Effect of fish species on methane and nitrous oxide emission in relation to soil C, N pools and enzymatic activities in rainfed shallow lowland rice-fish farming system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 176: 53-62.
- [24] Penman J, Kruger D, Galbally I, *et al.* Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[R]. Institute for Global Environmental Strategies, Japan: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.
- [25] Yang M, Grace J, Geng X M, *et al.* Carbon dioxide emissions from the littoral zone of a Chinese reservoir[J]. *Water*, 2017, 9(7): 539.
- [26] Liu S W, Hu Z Q, Wu S, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of rice paddies to inland crab-fish aquaculture in Southeast China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(2): 633-642.
- [27] Rosentreter J A, Borges A V, Deemer B R, *et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(4): 225-230.
- [28] Huang Y Y, Ciais P, Goll D S, *et al.* The shift of phosphorus transfers in global fisheries and aquaculture[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 355.
- [29] Robb D H F, MacLeod M, Hasan M R, *et al.* Greenhouse gas emissions from aquaculture: a life cycle assessment of three Asian systems[R]. Rome: FAO, 2017.
- [30] Dong B G, Xi Y, Cui Y X, *et al.* Quantifying methane emissions from aquaculture ponds in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(4): 1576-1583.
- [31] Webb J R, Leavitt P R, Simpson G L, *et al.* Regulation of carbon dioxide and methane in small agricultural reservoirs: optimizing potential for greenhouse gas uptake[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(21): 4211-4227.
- [32] Palma-Silva C, Marinho C C, Albertoni E F, *et al.* Methane emissions in two small shallow neotropical lakes: the role of temperature and trophic level[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 373-379.
- [33] Juutinen S, Rantakari M, Kortelainen P, *et al.* Methane dynamics in different boreal lake types[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(2): 209-223.
- [34] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(3): 609-621.
- [35] Downing J A. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot[J]. *Limnetica*, 2010, 29(1): 9-24.
- [36] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123-125.
- [37] Chen J, Zhong P A, An R, *et al.* Risk analysis for real-time flood control operation of a multi-reservoir system using a dynamic Bayesian network[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 111: 409-420.
- [38] Liu L X, Xu M, Li R Q. Modeling temporal patterns of methane effluxes using multiple regression and random forest in Poyang Lake, China[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2018, 26(1): 103-117.
- [39] Bastviken D, Tranvik L J, Downing J A, *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink[J]. *Science*, 2011, 331(6013): 50-50.
- [40] Wang H X, Zhang L, Yao X L, *et al.* Dissolved nitrous oxide and emission relating to denitrification across the Poyang Lake aquatic continuum[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52: 130-140.
- [41] Manan H, Zhong J M H, Kanan N A, *et al.* Carbon dioxide flux from intensive aquaculture shrimp farming applying biofloc system of Setiu Terengganu, Malaysia[J]. *Aquaculture*, 2019, 509: 52-58.
- [42] 赵光辉, 杨平, 谭立山, 等. 闽江河口养虾塘养殖期和非养殖期 CO₂ 通量变化特征 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(4): 949-957.
- Zhao G H, Yang P, Tan L S, *et al.* Temporal variation of carbon dioxide flux between farming and non-farming stages in the land-based shrimp pond in the Min River Estuary[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(4): 949-957 (in Chinese).
- [43] 宋红丽, 刘兴土, 文波龙. 黄河三角洲养殖塘水-气界面 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量特征 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1554-1561.
- Song H L, Liu X T, Wen B L. Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds in the Yellow River Estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(9): 1554-1561 (in Chinese).
- [44] 高洁. 漂浮通量箱法和扩散模型法测定内陆水体 CH₄ 和

- N₂O 排放通量的初步比较研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- Gao J. Preliminary comparison between the floating static chamber technique and the diffusion model method for measuring water-atmosphere exchanges of fluxes of methane and nitrous oxide[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013 (in Chinese).
- [45] 吕蒙, 张思勃, 王磊, 等. 一种基于星载遥感的碳通量直接测量方法 [J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(4): 137-148.
- Lü M, Zhang S B, Wang L, *et al.* A direct measurement technique of satellite-based CO₂ flux[J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(4): 137-148 (in Chinese).
- [46] 刘晃, 车轩. 中国水产养殖二氧化碳排放量估算的初步研究 [J]. 南方水产, 2010, 6(4): 77-80.
- Liu H, Che X. Elementary study on evaluation of CO₂ emissions from aquaculture in China[J]. South China Fisheries Science, 2010, 6(4): 77-80 (in Chinese).
- [47] Marland G, Boden T A, Griffin R C, *et al.* Estimates of CO₂ emissions from fossil fuel burning and cement manufacturing, based on the United Nations energy statistics and the US Bureau of Mines cement manufacturing data[R]. Oak Ridge, TN, United States: Oak Ridge National Laboratory, 1989.
- [48] 金书秦, 陈洁. 我国水产养殖的直接能耗及碳排放研究 [J]. 中国渔业经济, 2012, 30(1): 73-82.
- Jin S Q, Chen J. A study on energy consumption and carbon emission of China's aquaculture[J]. Chinese Fisheries Economics, 2012, 30(1): 73-82 (in Chinese).
- [49] 王逸清. IPCC 排放因子法在渔业碳排放减排评价中的应用 [J]. 现代农业科技, 2015(20): 165-166, 182.
- Wang Y Q. Application of IPCC emission factor method in the assessment of fishery carbon emissions reduction[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(20): 165-166, 182 (in Chinese).
- [50] Rosli N M, Abu Hasan Ashari K I, Azmi N S A. Isolation and preliminary screening of endophytic fungi from *Ficus carica* for biocontrol and phosphate solubilization[J]. Environment & Ecosystem Science, 2020, 4(2): 77-84.
- [51] Hu Z Q, Zhu Y, Wang Y, *et al.* Construction of a model for predicting greenhouse gas emission for aquaculture wetlands based on rough set[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2022, 21(2): 191-201.
- [52] Paudel S R, Luitel S, Adhikari R, *et al.* Potential nitrous oxide (N₂O) emission from aquaculture in Nepal[J]. International Journal of Environmental Studies, 2019, 76(2): 318-328.
- [53] 张祝利, 王玮, 何雅萍. 我国渔船作业过程碳排放的估算 [J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(06): 848-852.
- Zhang Zhuli, Wang Wei, He Yaping. The calculation of emissions of carbon during the process of fishing boats operations in China[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(06): 848-852.
- [54] Change I C. The physical science basis[J]. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2013, 1535: 2013.
- [55] Xu C J, Su G H, Zhao K S, *et al.* Current status of greenhouse gas emissions from aquaculture in China[J]. Water Biology and Security, 2022, 1(3): 100041.
- [56] 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 [J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 135-146.
- Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, *et al.* Review of methods for measuring greenhouse gas flux from the air-water interface of reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 135-146 (in Chinese).
- [57] Flury S, McGinnis D F, Gessner M O. Methane emissions from a freshwater marsh in response to experimentally simulated global warming and nitrogen enrichment[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, 115(G1): G01007.
- [58] 张振超, 王金牛, 孙建, 等. 土壤温室气体测定方法研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1228-1243.
- Zhang Z C, Wang J N, Sun J, *et al.* A review of methods for measuring soil greenhouse gases[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(5): 1228-1243 (in Chinese).
- [59] Ramos F M, Lima I B T, Rosa R R, *et al.* Extreme event dynamics in methane ebullition fluxes from tropical reservoirs[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(21): L21404.
- [60] 延芳芳. 陆地生态系统碳通量观测方法的研究进展 [J]. 科技促进发展, 2012(4): 158-159.
- Yan F F. Research progress on observation methods of carbon flux in terrestrial ecosystems[J]. Science & Technology for Development, 2012(4): 158-159 (in Chinese).
- [61] Tremblay A, Varfalvy L, Garneau M, *et al.* Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: hydroelectric reservoirs and natural environments[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [62] 吴双. 灌溉河流和淡水养殖湿地甲烷和氧化亚氮排放通量观测研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- Wu S. Measurements of methane and nitrous oxide fluxes from irrigation rivers and inland aquaculture wetlands[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018 (in Chinese).
- [63] Brooks Avery G, Shannon R D, White J R, *et al.* Controls on

- methane production in a tidal freshwater estuary and a peatland: methane production via acetate fermentation and CO₂ reduction[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 62(1): 19-37.
- [64] Zhao J Y, Zhang M, Xiao W, *et al.* Large methane emission from freshwater aquaculture ponds revealed by long-term eddy covariance observation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308-309: 108600.
- [65] 王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放(吸收)测量方法简评[J]. *气候与环境研究*, 1997, 2(3): 251-263.
- Wang G C. A view on measurement methods for greenhouse gases emission from terrestrial ecosystem[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1997, 2(3): 251-263 (in Chinese).
- [66] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6868-6880.
- Yang P, Tong C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6868-6880 (in Chinese).
- [67] IEA Hydro Technical Report. Hydropower and the environment: managing the carbon balance in freshwater reservoirs[R]. 2015.
- [68] Goldenfum J A. The UNESCO/IHA measurement specification guidance for evaluating the GHG status of man-made freshwater reservoirs[J]. 2009.
- [69] Raymond P A, Cole J J. Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity[J]. *Estuaries*, 2001, 24(2): 312-317.
- [70] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future[J]. *Global change biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [71] Huotari J, Ojala A, Peltomaa E, *et al.* Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: five years of eddy covariance data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(18): L18401.
- [72] Malyan S K, Singh O, Kumar A, *et al.* Greenhouse gases trade-off from ponds: an overview of emission process and their driving factors[J]. *Water*, 2022, 14(6): 970.
- [73] Fang X T, Zhao J T, Wu S, *et al.* A two-year measurement of methane and nitrous oxide emissions from freshwater aquaculture ponds: affected by aquaculture species, stocking and water management[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 151863.
- [74] Stief P, Poulsen M, Nielsen L P, *et al.* Nitrous oxide emission by aquatic macrofauna[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(11): 4296-4300.
- [75] 刘杰, 陈振楼, 许世远, 等. 蟹类底栖动物对河口潮滩无机氮界面交换的影响[J]. *海洋科学*, 2008, 32(2): 10-16.
- Liu J, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Impacts of burrowing crab on the dissolved inorganic nitrogen exchange at the sediment-water interface in the intertidal flat of the Yangtze Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(2): 10-16 (in Chinese).
- [76] Gephardt J A, Henriksson P J G, Parker R W R, *et al.* Environmental performance of blue foods[J]. *Nature*, 2021, 597(7876): 360-365.
- [77] Vasanth M, Muralidhar M, Saraswathy R, *et al.* Methodological approach for the collection and simultaneous estimation of greenhouse gases emission from aquaculture ponds[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(12): 671.
- [78] Weerathunga V, Liu L L, Yuan F L, *et al.* Temporal variability of air-water gas exchange of carbon dioxide in clam and fish aquaculture ponds[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170090.
- [79] 杨吉平, 王志, 郭黎明. 海水鱼养殖碳、氮、磷排放及对环境影响的初步评价——以大西洋鲑养殖为例[J]. *水产科技情报*, 2022, 49(6): 350-358.
- Yang J P, Wang Z, Guo L M. Preliminary evaluation of the environment impact of carbon, nitrogen and phosphorus emissions from marine fish farming - take Atlantic salmon (*Salmo salar*) farming as an example[J]. *Fisheries Science and Technology Information*, 2022, 49(6): 350-358 (in Chinese).
- [80] 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 等. 初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 300-309.
- Yang P, Tan L S, Huang J F, *et al.* Diurnal variations of CH₄ and N₂O fluxes from the drained aquaculture pond in the Minjiang River Estuary during early winter[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 300-309 (in Chinese).
- [81] Soumis N, Duchemin É, Canuel R, *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): GB3022.
- [82] Schrier-Uijl A P, Veraart A J, Leffelaar P A, *et al.* Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1): 265-279.
- [83] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(30): 5532-5540.
- [84] 朱林, 车轩, 刘晃. 夏季团头鲂养殖池塘生态系统温室气体排放通量分析[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(10): 1297-1300.
- Zhu L, Che X, Liu H. Greenhouse gas emissions of megalom-

- brama amblycephala culture pond ecosystems in summer[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(10): 1297-1300 (in Chinese).
- [85] Silvennoinen H, Liikanen A, Torssonen J, *et al.* Denitrification and N₂O effluxes in the Bothnian Bay (northern Baltic Sea) river sediments as affected by temperature under different oxygen concentrations[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(1): 63-72.
- [86] 林海, 周刚, 李旭光, 等. 夏季池塘养殖中华绒螯蟹生态系统温室气体排放及综合增温潜势 [J]. *水产学报*, 2013, 37(3): 417-424.
- Lin H, Zhou G, Li X G, *et al.* Greenhouse gases emissions from pond culture ecosystem of Chinese mitten crab and their comprehensive global warming potentials in summer[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(3): 417-424 (in Chinese).
- [87] 李元正, 雷丹, 刘佳, 等. 天气状况对富营养化池塘水-气界面冬季二氧化碳通量的影响 [J]. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 2018, 40(4): 33-38.
- Li Y Z, Lei D, Liu J, *et al.* Influence of weather condition on CO₂ flux in eutrophic pond water-air interface in winter[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2018, 40(4): 33-38 (in Chinese).
- [88] 张成, 龙丽, 吕新彪, 等. 某富营养化池塘夏季温室气体通量的昼夜变化 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(8): 28-33, 47.
- Zhang C, Long L, Lü X B, *et al.* Diel greenhouse emissions from an eutrophic pond in summer[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(8): 28-33, 47 (in Chinese).
- [89] 董双林. 多维视角下的新时代水产养殖业发展 [J]. *水产学报*, 2019, 43(1): 105-115.
- Dong S L. The development of aquaculture in the new era from a multi-dimensional perspective[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 105-115 (in Chinese).
- [90] 张凯, 王广军, 龚望宝, 等. 草鱼-鳊-鲫零换水池塘有机碳、氮、磷收支研究 [J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(6): 188-198.
- Zhang K, Wang G J, Gong W B, *et al.* Study on organic carbon, nitrogen, and phosphorus budgets of zero-water exchange ponds of grass carp, bighead carp, and crucian carp[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 188-198 (in Chinese).
- [91] 李雪, 刘子飞, 赵明军, 等. 我国水产养殖与捕捞业“双碳”目标及实现路径 [J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(11): 13-26.
- Li X, Liu Z F, Zhao M J, *et al.* Carbon peak and carbon neutralization goals and realization paths of the aquaculture and fishing industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(11): 13-26 (in Chinese).
- [92] 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展 [J]. *湿地科学*, 2012, 10(1): 121-128.
- Cheng B H, Hao Q J, Jiang C S. Research progress on the emission of greenhouse gases from reservoir and its influence factors[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1): 121-128 (in Chinese).
- [93] Hammer A J, Millar C, Hennige S J. Reducing carbon emissions in aquaculture: using Carbon Disclosures to identify unbalanced mitigation strategies[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 96: 106816.
- [94] Yang P, He Q H, Huang J F, *et al.* Fluxes of greenhouse gases at two different aquaculture ponds in the coastal zone of southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 115: 269-277.
- [95] 马煜春, 孙丽英, 刘翠英, 等. 太湖地区两种典型水产养殖系统 CH₄ 排放研究 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(7): 1269-1275.
- Ma Y C, Sun L Y, Liu C Y, *et al.* Methane emission from two typical aquaculture ponds in Taihu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(7): 1269-1275 (in Chinese).

Accounting methods and influencing factors of greenhouse gas emissions in aquaculture

LIANG Hejun ¹, HAN Guanrong ², XU jingxiang ^{1*}, ZHANG Jinhui ²,
LI Canfeng ³, SUI Hengshou ⁴

1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink,
Ministry of Natural Resources, Kunming 650111, China;

4. CNFC Overseas Fisheries Co., Ltd., Beijing 100032, China

Abstract: Aquaculture is an important part of aquaculture, and its greenhouse gas emissions cannot be ignored. In order to clarify the calculating methods, flux measurement, and influencing factors of carbon emissions in aquaculture ecosystems, this paper systematically reviewed and integrated relevant research on greenhouse gas emissions of aquaculture, summarized the current calculation methods of greenhouse gas emissions, including oak ridge national laboratory method, Intergovernmental Panel on Climate Change emission factor method, and life cycle assessment method, and outlined methods for measuring greenhouse gas emissions, such as inverted funnel method, eddy covariance technique, and static chamber method. In addition, this paper analyzed various factors affecting greenhouse gas emissions from the perspectives of aquaculture species, water management mode, temperature, and feed. The study found that: ① greenhouse gas emission calculating methods have not reached a consensus in the present scientific community, the calculation formulas are oversimplified, and the factors considered are not comprehensive; ② flux measurement is complex, and the measurement accuracy and efficiency need to be improved; ③ there are many factors that affect carbon emissions, and feed is the largest contributing factor to greenhouse gas emissions from quaculture, but limited studies have addressed the aquatic animal-derived metabolic carbon generated by feeding. This paper points out that relevant research currently has certain limitations, and proposes suggestions for future research on greenhouse gas emissions of aquaculture from four angles: estimation methods, factors considered, monitoring time, and N₂O emission factors, in order to provide inspiration and assistance for deeper research in the future.

Key words: aquaculture; greenhouse gas emissions; calculating methods; influence factors

Corresponding author: XU Jingxiang. E-mail: jxxu@shou.edu.cn

Funding projects: the Open Project of Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink (CS2023D11)