

DOI: 10.12131/20250070

文章编号: 2095-0780-(2025)05-0071-12

• 综述 •

中国大水面网箱养殖技术研究进展

魏念, 朱永久, 杨德国, 李学梅

中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北武汉 430223

摘要: 中国大水面资源禀赋突出, 湖泊、水库数量众多且分布广泛, 在环境变化、生态服务、水资源安全及流域经济发展等方面发挥着重要作用, 大水面网箱养殖在淡水渔业中占据重要地位。中国大水面网箱养殖经历了“粗放扩张—环境治理倒逼退出和调整—技术升级与生态转型”3个阶段。从早期的无序发展导致的环境问题, 到近年来在生态文明建设要求下, 网箱养殖逐步退出部分水域并进行规范化治理。目前主要养殖技术包括投饵式、不投饵式、多层立体式和集污式4类, 分别通过精准投喂、利用天然饵料、多营养级套养及废弃物收集等方式实现生态友好型养殖。文章系统梳理了这4类网箱养殖技术的特点及其应用特征, 解析了现存技术的核心问题, 如养殖容量与生态适配性矛盾、饲料转化效率低、信息化管理不足等, 并提出将不投饵式、多层立体式和集污式养殖作为未来重要发展方向, 旨在为行业技术优化与生态管理决策提供科学支撑。

关键词: 大水面网箱养殖; 生态承载力; 投饵式养殖; 集污式养殖; 多层立体式养殖

中图分类号: S 964

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on cage aquaculture technology in large water bodies in China

WEI Nian, ZHU Yongjiu, YANG Deguo, LI Xuemei

Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

Abstract: China possesses abundant large water bodies resources, with numerous lakes and reservoirs widely distributed across the country. These water bodies play a vital role in environmental regulation, ecological services, water resource security, and watershed economic development. Cage aquaculture in large water bodies is important in freshwater fisheries. The development of large-scale cage aquaculture in China has undergone three distinct phases: "extensive expansion—environmental governance-driven contraction and adjustment—technological upgrading and ecological transformation." From early unregulated development leading to environmental degradation to recent years, where, under the requirements of ecological civilization construction, cage aquaculture has been gradually phased out in certain areas and subjected to standardized management. Currently, the main aquaculture technologies include feed-based, non-feed-based, multi-layer integrated, and waste-collection systems, which achieve eco-friendly practices through precision feeding, utilization of natural bait, multi-trophic polyculture, and waste collection, respectively. The paper systematically reviews the characteristics and applications of these four cage aquaculture technologies, analyzes core challenges such as the conflict between aquaculture capacity and ecological compatibility, low feed conversion efficiency, and insufficient digital management, and proposes sustainable development pathways. The paper further pro-

收稿日期: 2025-04-03; 修回日期: 2025-07-03

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-46); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目-大水面净水渔业技术研发与应用(20223BBF61010); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2023TD61)

作者简介: 魏念(1989—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为湖库生态渔业。E-mail: weinian@yfi.ac.cn

通信作者: 李学梅(1985—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为湖库增殖渔业。E-mail: xml@yfi.ac.cn

poses non-feed-based, multi-layer integrated, and waste-collection aquaculture systems as priority directions for future development. The findings provide scientific support for technological optimization and ecological management decision-making in the industry.

Keywords: Large water bodies cage aquaculture; Ecological carrying capacity; Feed-based aquaculture; Waste-collection aquaculture; Multi-layer integrated aquaculture

1 中国大水面网箱养殖历史及现状

1.1 中国大水面资源现状

大水面是湖泊、水库等内陆水体的统称^[1]。中国大水面资源禀赋突出, 现有面积 1 km² 以上的天然湖泊 2 670 个, 总面积 8.07×10⁴ km²; 面积 10 km² 以上湖泊总水量达 1.04×10¹² m³; 现有水库 9.86 万座, 总库容 9 306×10⁸ m³^[2]。中国大水面的空间分布具有显著的区域性: 湖泊主要分布在东部平原、云贵高原、青藏高原、蒙新高原和东北平原五大湖区^[3]; 水库资源则高度集中于长江、珠江、黄河三大流域, 水库总库容占全国总量的 71.63%。其中长江流域尤为突出, 水库数量占比达 54.62%, 库容占比为 46.74%, 2 项指标均居全国首位^[4]。作为地表水资源的重要载体, 湖泊、水库等大水面在中国环境变化、生态服务功能维持、生源要素循环、水资源安全保障、防洪抗旱和流域经济社会发展方面发挥着不可替代的作用^[5]。中国宜渔湖泊、水库面积分别为 428.16×10⁴、235.79×10⁴ hm², 以湖泊、水库为载体的大水面渔业生产活动在中国淡水渔业中占举足轻重的地位^[6]。2023 年, 湖泊和水库的养殖面积、养殖产量分别为 248.34×10⁴ hm²、4 015 796 t, 分别占全国淡水养殖面积和淡水养殖总量的 45.90%、11.76%^[7]。

1.2 网箱养殖历史沿革

网箱养殖技术通过网片组装工艺构建特定形状的箱体结构, 布设于开阔水域后, 借助网孔通道实现箱体内外水体交换, 从而在半开放养殖单元内形成适合多种鱼类生长的稳定生境系统。网箱养殖是在局部范围内进行高密度养殖的集约化养殖方式, 具有高投入、高产出的特点, 可有效提高大水面的渔业生产效率, 是大水面渔业的主要方式之一, 是“向江河湖海要食物”和“构建多元化食物供给体系”的重要组成部分。

中国于 1973 年引进网箱养殖技术, 80 年代开始大规模出现^[8], 并发展成为水产养殖的重要组成部分。中国渔业统计年鉴数据显示, 从 2003 年到 2014 年, 中国淡水网箱养殖年产量逐年攀升, 于 2014 年达到历史最高值的 139.17×10⁴ t (图 1)。由于网箱养殖无序发展在一定程度上加剧了大水面水体富营养化等环境问题, 各级政府逐渐推进湖库网箱养殖规范化治理, 部分省区甚至实施了网箱退

出措施。自 2015 年起, 湖库网箱养殖产量逐渐下降。2017 年, 全国多个省区强化网箱拆除工作, 至 2017 年底大部分水域的网箱全部拆除。2017 年网箱养殖产量降至 82.66×10⁴ t, 养殖面积萎缩至历史峰值的 31.39%^[9]。2018 年以来, 随着生态文明建设的推进和水环境保护力度的加强, 网箱养殖进一步退出。2023 年, 淡水网箱养殖产量和面积仅为 27.12×10⁴ t 和 1 458.81 hm², 相比历史峰值分别下降了 80.51% 和 93.44%; 淡水网箱养殖面积和养殖产量排前六的省区分别是安徽、湖南、广西、江苏、福建和辽宁, 辽宁、广西、云南、福建、江苏和青海^[7]。

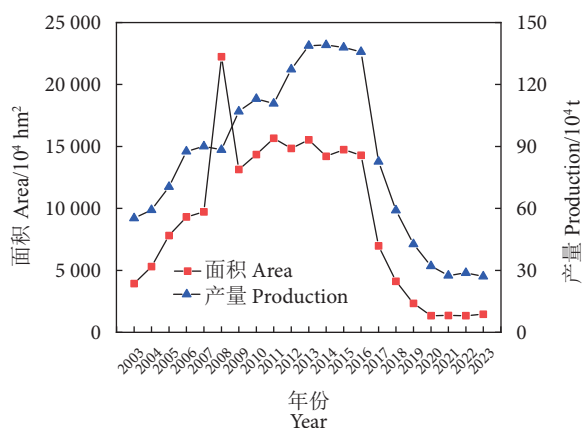


图1 2003—2023年中国淡水网箱养殖产量和面积变化

注: 根据 2004—2024 年《中国渔业统计年鉴》数据整理。

Fig. 1 Changes in freshwater cage aquaculture production and area in China from 2003 to 2023

Note: Drawn based on China Fishery Statistical Yearbook data (2004–2024).

大水面网箱投饵型养殖品种主要有鲤 (*Cyprinus carpio*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)、鲫 (*Carassius auratus*)、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)、罗非鱼 (*Oreochromis*)、斑点叉尾鲴 (*Ictalurus punctatus*)、大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)、鳊 (*Siniperca chuatsi*)、鲟类 (*Acipenser*) 等^[10]。经济价值较高的品种 (如虹鳟、斑点叉尾鲴) 和出口品种 [如尼罗罗非鱼 (*O. niloticus*)] 备受青睐。不投饵养殖品种主要是鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*) 等滤食性鱼类。养殖规格从幼鱼到成鱼均有。由于水库一般水位年内变化较大, 水库网箱多为漂浮网箱。而湖泊相对较浅, 漂浮网箱和固定网箱均有。淡水网箱养殖的生产水平因物种而异, 且各省之间存在一定

差异。

1.3 网箱养殖环境影响与技术发展

网箱养殖的负面环境影响主要是粗放式养殖、养殖规模的无序扩大、养殖密度的不合理增加所导致的以氮(N)、磷(P)、有机物为主的营养负荷超出了生态系统的承受能力^[11]。其危害主要在于以下3个方面: 1) 未被及时摄食的饵料(即残饵)、养殖对象粪便、排泄物大量逸散进入水体, 造成水体氮、磷营养盐增加、透明度下降、富营养化水平升高以及局部缺氧, 威胁水生态系统健康^[12-13], 扰乱水生生物群落结构^[14-17]; 2) 残饵粪便和渔药中的大量有机质、重金属沉积至底泥, 通过矿化作用释放硫(S)化物、甲烷(CH₄)等还原性物质, 导致底泥黑化和酸化、内源污染释放、底栖生态系统退化^[18-20]; 3) 网箱的高密度布局降低了水体的交换效率, 进一步加剧了局部污染物的滞留和水域生物多样性的下降^[21-22]。

目前, 通过整合生态学研究和技术创新, 中国大水面网箱养殖正在逐步形成环境友好的技术体系^[23-24]。现有技术主要包括投饵式、不投饵式、多层立体式及集污式4类。投饵式通过合理布设、精准投喂减少残饵扩散; 不投饵式依托天然饵料养殖滤食性鱼类、开展鱼类瘦身; 多层立体式通过合理套养实现营养层级利用; 集污式通过固体废物收集降低营养盐和有机物扩散。这些技术通过优化营养物质投入、减少污染物排放、强化营养物质循环利用管理, 降低养殖水域生态系统负荷, 初步实现了生态环境保护、资源合理利用与养殖效益的统筹发展。本文旨在系统梳理当前大水面常用的4类网箱养殖技术及其应用特征, 解析现存技术核心问题, 并指出针对性的发展方向, 旨在为行业技术优化与生态管理决策提供科学支撑。

2 大水面网箱养殖的生态承载力研究进展

为实现可持续的水产养殖发展, 开展网箱养殖前, 需综合评估水域生态承载力(Ecological carrying capacity), 在承载力范围内实现资源的有效利用。生态承载力在一定程度上区别于水产养殖容量, 后者主要指在特定时期、某个环境条件下, 生态系统所承载的某一生物种群的能力^[25]。评估生态承载力需考虑整个生态系统及生产各阶段。其具体概念是指对养殖水域及周围生态系统无显著影响的最大养殖密度, 与某一水域生产容量和环境净化能力密切相关^[25-26]。对网箱养殖而言, 这一概念应该包含对网箱养殖活动与受纳环境相互作用的识别和量化。

目前专门评估大水面网箱养殖生态承载力的研究相对较少。中国主要通过规范大水面的网箱养殖容量来限定养

殖规模。行业标准 SC/T 1006—92《淡水网箱养鱼 通用技术要求》规定饲养滤食性鱼类的网箱总面积应少于水域面积的1%; 饲养吃食性鱼类的网箱总面积应少于水域面积的0.25%。国家“八五”重点科技攻关项目“大型多功能水库渔业利用优化模式研究”的研究结果指出水库投饵式网箱养殖规模上限为水库水体总面积的0.078%^[27]。各省区制定的关于特定鱼种网箱养殖的地方标准也均参考了上述数据。限定网箱养殖规模主要考虑了养殖对水域的水质理化因素的影响, 并未考虑对沉积物等造成的生态影响, 也并未考虑养殖水域自身的生态恢复力, 存在一定的局限性。《淡水网箱养鱼 通用技术要求》的修订稿《大水面网箱养殖 通用技术要求》(待发布)针对上述问题进行了改进, 明确规定网箱养殖容量需依据 SC/T 1149—2020《大水面网箱养殖容量计算方法》中的公式进行科学核算, 并结合大水面需符合的地表水水质标准分类(I—V类)限定网箱养殖规模。修订后的通用技术要求具有更高的科学性与生态适应性, 使养殖规模更符合特定水域水体自净能力和生态阈值, 为平衡生态保护与渔业生产提供了更具操作性的量化框架。

常用的大水面网箱养殖生态承载力的评估方法主要为限制因子估算法^[28-30]、现场试验法^[31]和综合评估法^[32]等。限制因子估算法因具有普适性强、实施成本低、参数易量化等优势, 在实践中使用更为广泛。该方法通过识别制约养殖物种生长的关键环境参数, 依据其耐受阈值评估特定水域养殖物种的生态承载力。网箱养殖生态承载力的限制因子主要为氮、磷、溶解氧等。目前, 以基于磷负荷的 Dillon-Rigler 模型^[33](即 Dillon-Rigler 磷平衡模型)用于大水面网箱养殖的生态承载力估算最为普遍^[28-29, 34], Beveridge 磷平衡模型也有应用^[30]。

Dillon-Rigler 磷平衡模型是一种统计模型, 基于稳态条件, 通过量化水体总磷负载量、水体容积参数(面积、平均深度)、水交换率及磷滞留系数等关键变量, 估算水体网箱养殖的承载力^[33]。彭建华等^[35]在 Dillon-Rigler 模型的基础上, 结合了中国实际情况, 加入了原模型未考虑的有效库容系数, 建立了包含有效库容系数、营养水平、养殖强度和养殖对象等参数的网箱养殖生态承载力模型, 形成了适用于中国大水面的改进模型。考虑到大水面通常兼顾多种功能, SC/T 1149—2020《大水面网箱养殖容量计算方法》进一步限定网箱养殖鱼类磷排放量占水体磷承载力的比例为15%。目前, 以 Dillon-Rigler 磷平衡模型为基础的网箱养殖生态承载力研究方法在中国青海^[28, 34]、云南^[36]等省区的部分水库得到了应用。但也主要局限于以上示范性水

域,多数区域仍依赖经验性管理。技术应用有限的原因主要包括:1)网箱养殖生态承载力评估技术体系尚未形成统一标准,未针对水域功能差异优化;2)基层管理部门和养殖主体普遍缺乏专业培训,对生态承载力概念认知模糊;3)评估技术配套仪器设备和数据维护增加了养殖成本压力,中小规模养殖主体缺乏积极性;4)承载力评估结果未纳入养殖许可的前置条件,导致技术应用缺乏制度层面的约束。此外,现有评估方法自身也存在一定的缺陷。当前网箱养殖生态承载力评估指标体系相对单一,主要以磷元素为核心指标,未能识别和量化网箱养殖生产活动对水域生态系统的化学与生物等维度的影响。现有模型虽能以磷负荷阈值来评估生态承载力,但忽略了氮元素、溶解氧动态、有机物积累等关键生态过程(化学维度),也未考虑浮游生物群落、底栖动物及鱼类多样性等生物因子的响应(生物维度)。此外,模型基于稳态水文条件假设,未有效纳入季节性水位波动^[37]、暴雨径流冲击^[38]、水体分层消解^[39]等动态环境要素对磷迁移转化的影响。这种单一化、静态化的评估方式,不仅可能导致测算结果与真实生态弹性偏差较大,还进一步加剧了技术落地的难度,使科学评估难以全面替代经验管理。

3 主要大水面网箱养殖技术研究进展

3.1 投饵式网箱养殖技术

目前,投饵式网箱养殖仍是中国大水面渔业生产的主要模式,尤其是在中小型养殖水体,其主导地位源于养殖成本可控性强、短期经济效益显著、技术要求相对低等原因。该模式以主要经济淡水鱼类(如草鱼、鲤等)及特色高值品种[如斑点叉尾鲴、南方鲇(*Silurus meridionalis*)等]为主要养殖对象(表1),通过集中投喂配合饲料实现规模化产出(图2)。科学的网箱养殖技术包含适宜养殖区域的选择、网箱的合理制作和安装、健康鱼种的放养与科学投喂、日常管理和疾病防治5个关键环节^[40-45]。上述环节的实施应参照GB 11607—1989《渔业水质标准》、NY 5051—2001《无公害食品 淡水养殖用水水质》和GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的水质规范,以确保养殖活动与大水面功能相兼容。

投饵式网箱养殖技术主要参照SC/T 1006—1992《淡水网箱养鱼通用技术要求》、SC/T 1007—1992《淡水网箱养鱼操作技术规程》和SC/T 5027—2006《淡水网箱技术条件》等传统行业标准。然而,随着生态环境保护政策的强

表1 中国主要大水面网箱养殖技术及特点

Table 1 Major cage aquaculture technologies and their characteristics in large water bodies in China

技术模式 Technology	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	主要应用场景 Primary application scenarios	主要分布区域 Major distribution areas	主要养殖对象 Principal cultured species
投饵式 Feed-based system	养殖成本可控性强、短期经济效益显著、技术要求相对低	环境污染相对较高;极度依赖养殖人员经验	风浪较小、无洪水频发、水深适度(低水位时,网箱底部至水底的垂直距离不少于2.0 m)、缓流(流速不大于0.2 m·s ⁻¹)、富营养化风险低的库湾、湖汊	全国	主要经济淡水鱼类(如草鱼、鲤等)及特色高值品种(如斑点叉尾鲴、南方鲇)等
不投饵式(滤食性鱼类养殖) Non-feed-based system (Filter-feeding fish culture)	养殖成本低、效益高、产品品质高	依赖自然饵料,养殖周期长、产量受限	饵料丰富、生态稳定性高的水库库湾	全国	鲢、鳙、匙吻鲟
不投饵式(鱼类瘦身) Non-feed-based system (Fish conditioning)		高度依赖自然环境,人为可控性弱	径流交换率高的大型水库库湾	全国	鳙、草鱼、鳊、鲂、罗非鱼、斑点叉尾鲴、南方鲇等
多层立体式 Multi-layer integrated system	空间利用率高、综合效益高、环境污染低	设施复杂、成本高、依赖深水环境	水深达10 m以上的深水库	云南墨江县龙马、泗南江和崖羊水电站库区、清江隔河岩水库(2018年前)	主养:斑点叉尾鲴、鲟类等高价值杂食性和肉食性鱼类;套养:鲢、鳙等滤食性鱼类及黄颡鱼、鲫等杂食性鱼类
集污式 Waste-collection system	显著降低废弃物排放、资源化利用粪污	设备成本高、维护复杂	大型深水库	青海共和龙羊峡水库、甘肃永靖刘家峡水库、新疆尼勒克温泉电站水库和浙江千岛湖	高价值鱼类:鲢鳙类、鲟类等

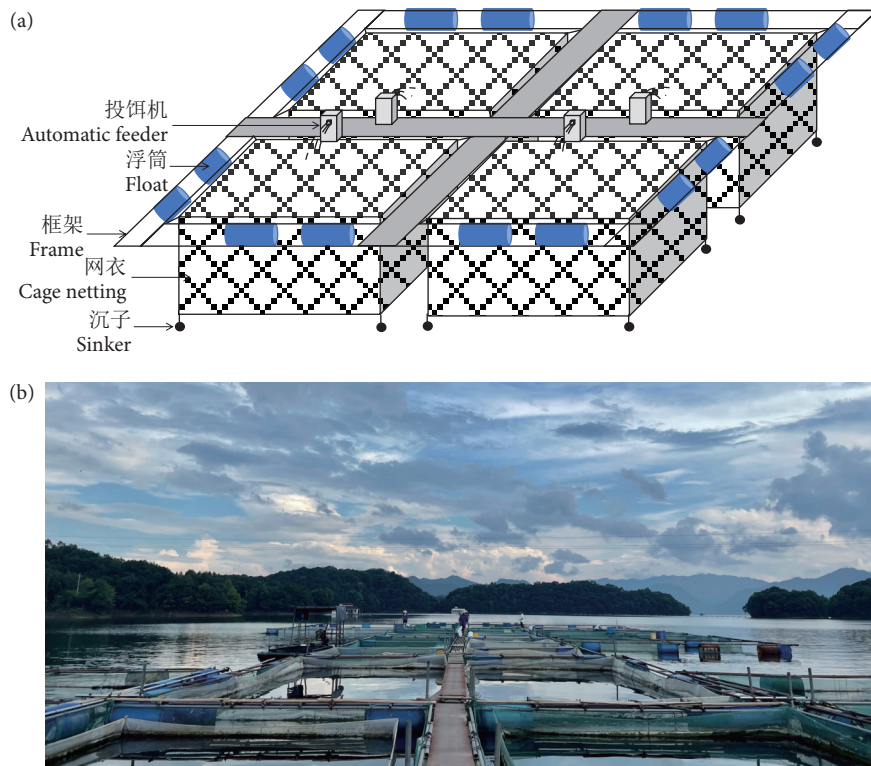


图2 投饵式网箱养殖系统示意图 (a) 及应用场景 (b)

Fig. 2 Schematic diagram of feeding cage aquaculture system (a) and its practical application (b)

化和低碳生产需求的提升, 原有的技术规范规程已显露出明显的局限性。例如, 早期标准对合理空间布局、水域轮休轮养、生态配套设施、环保饲料选择等要求均未作明确规定, 难以适应现代渔业的绿色转型需求。为应对这些矛盾, 相关标准已进行系统修订(待发布)。

近年来, 随着技术的进步和推广, 投饵型网箱养殖技术逐步向信息化和智能化方面升级, 主要在水质监测和精准投喂两个环节^[46-48]。由于网箱养殖对湖库水质变化敏感, 暴雨径流等突发性水质波动易引发大规模死鱼, 因此, 实时监测溶解氧、浊度、水温及 pH 等核心水质指标成为保障安全生产的关键^[47]。在投喂管理方面, 智能投饵系统通过减少人工操作、优化饵料利用率, 显著降低了劳动强度与环境污染风险^[49]。在广西南宁开展的基于智能化技术的匙吻鲟 (*Polyodon spathula*) 网箱养殖研究结果表明, 采用智能化技术优化后的养殖模式, 相较于传统模式, 总成本降低约 12%, 产量提高 25%, 成活率提升 12%, 养殖户年收入增长约 28%^[48]。尽管如此, 投饵式网箱养殖在基础研究和共性关键技术领域仍存在诸多问题(详见第 4 部分), 使其技术升级多停留在局部改良层面, 缺乏系统性技术集成, 从而制约了其绿色高质量发展的进程。

3.2 不投饵网箱养殖技术

不投饵网箱养殖技术包括两类: 一类是滤食性鱼类的养成, 另一类是高价值鱼类的瘦身(表 1, 图 3)。前者通过

自然水体交换持续补充浮游生物饵料, 无需人工投喂, 适用于鲢、鳙、匙吻鲟等滤食性鱼类的生态化养殖; 后者是指将在常规池塘养成、符合上市规格的腹部肥厚的商品鱼, 利用优质水库水和湖泊水, 在网箱内进行饥饿流水养殖, 使鱼在养殖中消耗多余脂肪, 达到肉质紧实、无泥土味、无腥味、无异味等标准的体态均匀的商品鱼, 此种技术生产的鱼称为“瘦身鱼”。

相对于投饵式养殖方式, 滤食性鱼类的不投饵网箱养殖主要有 3 个特点: 降低成本、保护环境和产品优质^[50-51]。该养殖方式既契合国家生态环保政策导向, 又通过模拟近自然生境提升鱼类抗病能力与风味品质, 其养殖产品因此更易获得市场认可, 并为养殖户创造更高经济效益^[50-51]。《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》(农渔发〔2019〕1号)中明确建议在宜渔的大中型水库, 科学评估水域浮游生物和悬浮有机碎屑的生产力, 开展滤食性的鲢、鳙的不投饵型网箱养殖。不投饵网箱养殖的水域选择极为重要, 需综合考虑水域饵料供给能力与生态稳定性。选址时需优先评估目标水域及上游区域的浮游生物资源, 确保其生物量充足且群落动态稳定, 以满足滤食性鱼类持续摄食需求; 同时严格筛选水质条件, 选择远离工农业污染、水体交换活跃的优质水域, 规避环境影响风险。养殖过程中可采取聚饵灯辅助增饵策略, 于网箱两侧设置光源并定时开启(每日黄昏前至黎明), 利用昆虫趋光性及

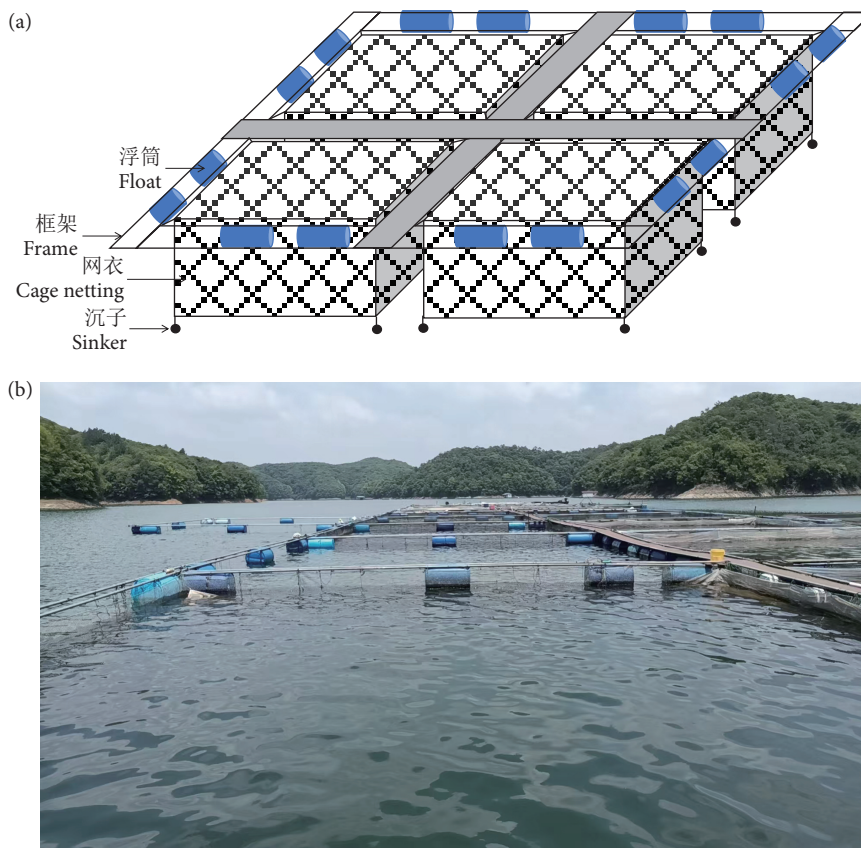


图3 不投饵式网箱养殖系统示意图 (a) 及应用场景 (b)

Fig. 3 Schematic diagram of a non-feeding cage aquaculture system (a) and its practical application (b)

浮游生物聚集效应补充夜间饵料^[52]。此外可以根据浮游生物密度监测数据周期性迁移网箱位置，避免局部资源过度消耗^[51]。

“瘦身鱼”网箱养殖技术主要是针对近些年来池塘等集约化养殖的淡水鱼肉质及口感下降、水产品质量安全问题屡屡出现、鱼价持续过低等问题，提供了一种科学的淡水鱼增效提质养殖方法。普通商品鱼经过网箱无饵养殖“瘦身”后，价格一般比直接上市高 30% 以上^[53]，在提升传统养殖价值的同时，显著提升了养殖从业者的经济效益。目前，高价值鱼类的瘦身已成为热门的养殖方式，在珠三角、西南、华中等地区广泛开展，常用于鳊、草鱼、鳙 (*Parabramis pekinensis*) 和鲂 (*Megalobrama skolkovii*) 等，也同样适用于罗非鱼、斑点叉尾鲴、南方鲇等。重庆市水产学会于 2024 年率先发布了 T/CQSF 101—2024《重庆瘦身草鱼评价规范》和 T/CQSF 102—2024《重庆瘦身草鱼养殖技术规范》用于规范重庆境内瘦身草鱼的养殖。鱼类瘦身时间受地域、季节、养殖品种规格等的影响，一般水温越高需要的时间越短。以湖北省的鳊为例，瘦身时间在 5—6 月一般为 25~30 d 或更长，7—9 月在 20~25 d，10—11 月在 25 d 以上^[53]。

总体而言，不投饵网箱养殖具有养殖成本低、投入产

出比高、效益高等优点，尤其适用于径流交换率高、防洪压力大且生态渔业防逃与捕捞难度大的大型水库库湾应用。其技术实施需以保障大水面生态功能稳定及协调水域多功能需求 (如防洪、饮用水源、农业生产灌溉) 为前提，适度推广可有效提升水域资源利用效率。然而，当前技术体系基础研究较为薄弱，标准化建设有待加强。在滤食性鱼类养殖方面，主要问题为水域饵料资源本底与变动特征缺乏系统评估，以及放养种类、规格、密度及网箱布局对特定水域生态系统 (尤其是恢复力) 的定量影响研究空白，制约了承载阈值的科学界定。在“瘦身鱼”养殖方面，核心问题在于瘦身活动对水域生态的扰动机制未量化，且放养量、瘦身周期与水环境参数 (水温、溶解氧等)、水动力特征 (流速、流量等)、饵料生物群落的关联性研究缺失，标准化参数体系无法建立。当前形势下，若缺乏科学引导与标准化约束，不合理的发展可能导致部分区域局部饵料资源透支或生态系统功能失衡。因此，需通过合理规划不投饵网箱的养殖规模与时空布局，统筹水域资源分配，实现渔业生产与生态保护的协同。

3.3 多层立体网箱养殖技术

多层立体网箱养殖技术是通过将投饵网箱养殖进行改造，在常规小网箱外加套大网箱，同时在大网箱内投放

鲢、鳙等滤食性鱼类以维持水质，以及黄颡鱼 (*Pelteobagrus*)、鲫等杂食性鱼类以利用未消耗的饲料^[10,54] (表 1)。该技术借鉴了多营养级综合养殖 (Integrated multi-trophic aquaculture, IMTA) 原理，通过不同营养级别、生态功能互补水产物种的协同作用，提升饵料利用率并减少养殖废物和碳排放，具有更高的养殖与生态效益^[55-56]。与传统单层网箱养殖相比，多层立体网箱养殖系统中的不同品种鱼类可以充分利用水体空间和营养物质资源^[10]。在实际应用中，多层网箱更适用于深水水库，一般水深需达 10 m 以上。

在中国淡水网箱养殖中，双层或三层网箱常被采用，通过空间隔离主养品种与套养品种，避免套养品种抢食饵料，同时便于生产管理^[54,57-59]。主养品种通常是斑点叉尾

鲌、鲟类等杂食性和肉食性鱼类，套养品种即上文提到的滤食性和杂食性鱼类。在双层网箱养殖案例^[54,57,59] 中 (图 4 和图 5)，4 个较小且较浅的内层网箱被安装在一个更大且更深的外层网箱中，并在外层网箱中心安装了钢制交叉人行道。外层网箱边缘铺设了水泥浮筒，浮筒通过无缝焊接钢连接，相邻浮筒之间留有 50 cm 间隙以允许水流通过。在投喂方面，仅对内层网箱中的主要养殖品种进行投喂，而外层网箱中的套养品种不进行投喂。与传统单层网箱养殖系统相比，双层或三层网箱养殖系统可增强抗风浪能力、降低养殖物种逃逸风险、提高饵料利用率，并减少传统投饵网箱养殖过程中未食用饲料和粪便带来的负面影响，有效提高投入产出比^[57,59]。

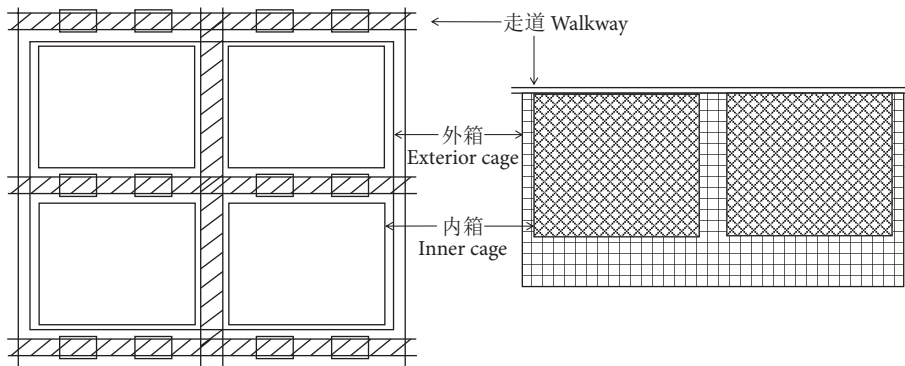


图4 双层网箱养殖系统俯视图 (左) 和侧视图 (右)

Fig. 4 Top view (Left) and side view (Right) of a double-layer cage aquaculture system



图5 双层网箱养殖系统的实际应用场景

Fig. 5 Application of a double-layer cage aquaculture system in actual aquaculture practice

在杨树国等^[54] 和袁婷^[59] 的案例中，研究者将多层立体网箱养殖与鱼菜共生技术进一步结合，在小网箱外围布设植物浮床，进一步减轻网箱养殖的负面环境影响。鱼菜共生是一种将水产养殖与水生植物种植结合的技术。养殖过程中

的营养物质被植物吸收利用，由此净化了水质，实现了增产增收。植物浮床在吸收利用养殖废物的同时，也可起到遮阴防浪作用，减少鱼类应激，改善网箱鱼类的生存环境，提高生态防病能力。在云南普洱市墨江县的龙马、泗

南江和崖羊山水电站库区开展的研究表明,与传统单层网箱相比,鱼菜共生的多层立体网箱养殖氮、磷利用效率分别提升了约 6.84%、8.21%,经济效益提升了约 30%^[59]。

如上所述,尽管多层立体网箱养殖技术在小规模试验上展现出一定潜力,但其实际应用仍局限于少数深水水库试点,缺乏可规模化推广的技术模式,与成熟的海水和淡水 IMTA 模式(如海水鱼-虾蟹-贝-藻、稻渔综合种养)^[60]相比存在显著差异。主要瓶颈在于基础理论研究的系统性缺失:1)套养品种的营养需求与种间营养关系尚未明晰,物种间食物网结构^[61-62]缺乏定量解析,制约了生态位互补机制的优化利用;2)品种搭配多依赖经验性尝试,未建立基于水域生态特征(营养盐水平、饵料生物丰度等)的动态配比模型;3)营养物质循环路径的定量化研究^[55]近乎空白,能量转移效率与资源利用效能不明,导致“投喂-转化”过程难以精准调控。IMTA 作为国际公认的健康水产养殖理念,其核心在于通过多营养级协同实现物质高效循环与生态风险可控^[63-64]。推动 IMTA 与大水面实际生产相结合,亟需强化生态互动机制解析、标准化技术参数构建及动态管理模型开发,以推进多层立体网箱养殖技术的提升。

3.4 集污式网箱养殖技术

集污式网箱养殖技术是在投饵式网箱底部安装固体废弃物收集装置(即集污装置),定期将网箱养殖过程中沉降至集污装置内的残饵、粪污等转移出来并进行无公害化处

理,以此降低网箱养殖环境污染的环保网箱养殖技术(图 6)。由于养殖成本较高,集污式网箱养殖品种通常为高价值鱼类如鲑鳟类和鲟类。目前,集污式网箱养殖技术已在青海共和龙羊峡水库(青海民泽龙羊峡生态水产有限公司)、甘肃永靖刘家峡水库(甘肃文祥生态渔业股份有限公司)、新疆尼勒克温泉电站水库(新疆天蕴有机农业有限公司)和浙江千岛湖(千岛湖鲟龙科技股份有限公司)得到较为成熟的应用。该技术在龙羊峡水库、刘家峡水库和温泉电站水库的主养品种为鲑鳟类,网箱形制为圆形和方形;千岛湖主养品种则为鲟类,所用网箱形制为方形。新疆天蕴有机农业有限公司等制定了首个集污式网箱的地方标准 DB65/T 4141—2018《绿色生态 虹鳟鱼环保网箱养殖技术规范》,用于规范集污装置的安装和日常管理。

集污式网箱养殖技术的核心是在网箱底部安装集污装置,该装置从上而下由下框架、集污网兜和集污漏斗组成。下框架形制与养殖网箱匹配,尺寸与养殖网箱顶部上框架外围一致。集污网兜采用 80 目白色筛绢网(聚乙烯或尼龙材质)制作,呈圆锥形(斜面夹角 60°~80°),顶部固定于下框架,通过重力沉降的残饵、粪便等固体废弃物沿网兜斜面滑落至网兜底部的不锈钢集污漏斗。集污漏斗内的固体废弃物通过 2 种方式转移:使用气提装置将污物提升至水面收集^[65];通过管路系统与集污泵连接定期抽离,后者更

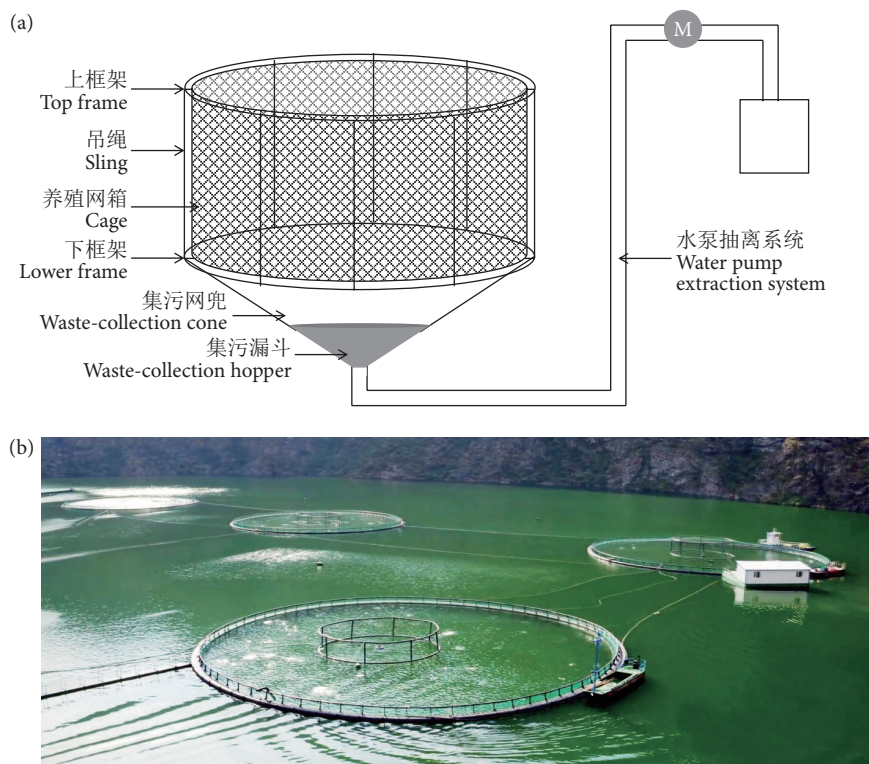


图6 集污式网箱养殖系统示意图(a)及应用场景^[66](b)

Fig. 6 Schematic diagram of waste-collection cage aquaculture system (a) and its practical application^[66] (b)

为常用^[66-67]。收集的固体废弃物经脱水、烘干、包装后还田利用^[68]。养殖网箱顶部的上框架通过绳索(数量: 6 m×6 m/10 m×10 m/12 m×12 m 方形网箱配 12 根, 周长 100 m 圆形网箱配 16 根)连接集污装置下框架, 绳索长度等于养殖网箱深度。该结构可实现集污装置的悬吊安装与便携拆卸检修, 不影响网箱起网生产与主体安全。集污装置安装完成后, 再安装养殖网箱, 集污装置上口与养殖网箱底部无缝隙对接, 防止固体废弃物外漏。

王涛等^[69]在陕西安康电站水库开展的集污网箱与传统网箱对比实验结果表明, 加装集污装置并未对养殖鱼类的存活率产生显著影响, 但显著提高了投饵网箱的氮、磷的回收率(约 30%)与利用率(约 3%), 有效降低了网箱系统的氮、磷排放。赵贤花^[68]在刘家峡水库的普通网箱(6 m×6 m×6 m)底部悬挂放置密网布制成的圆锥形废物收集网箱, 两次试验的废弃物收集率分别为 75.9% 和 75.6%。陈胜娟等^[70]在刘家峡水库以高密度聚乙烯(HDPE)圆形深水网箱养殖虹鳟为实验对象, 在网箱底部放置 80 目尼龙筛绢制作的圆锥形废弃物网箱开展废弃物收集试验, 废弃物收集率为 83.5%。笔者于 2023 年在江西九江柘林水库库湾以普通网箱(6 m×6 m×3 m)养殖斑点叉尾鲴, 在网箱底部放置尼龙布制作的锥形集污漏斗开展集污效果试验, 废弃物收集率占可沉降固体废弃物的 90% 左右。表明在网箱底部合理布置集污装置能较好地发挥废弃物移出效果。

通常, 为更好地减轻整套集污式网箱养殖系统的负面影响, 集污式网箱养殖技术中会配备一系列环保养殖技术, 包括远程智能化精准投喂技术、水质在线监测技术、可视化鱼病防治与在线诊断技术^[24,66]。这些技术的结合有利于大幅度降低网箱养殖带来的环境污染, 形成水产与生态有机结合的可持续发展养殖模式。

以上研究表明, 集污式网箱养殖技术可有效控制投饵养殖的污染排放, 并具备广泛的水域适应性, 其应用前景良好。但其规模化推广仍面临基础研究不足、标准化缺失及设备成本较高等诸多挑战。未来工作应在 5 个方面重点推进: 1) 开展主要养殖对象不同生长阶段饵料摄入后的粪便形态演化规律及排粪峰值量化研究, 为抽污系统的时序优化提供数据支撑; 2) 加强不同水动力特征下粪污残饵沉降的物理学与流体力学基础研究^[71-72], 厘清其迁移扩散规律, 优化集污装置结构设计以提升集污效率; 3) 加快集污设备的标准化设计与低成本化改造, 推广模块化集污漏斗与自动化抽离系统, 降低中小养殖主体应用门槛; 4) 强化粪污残饵高效固液分离与稳定化技术, 探索鱼粪有机肥、厌氧发酵能源转化等多元化利用路径^[73-74]; 5) 加强政策支

持力度, 将粪污残饵收集设施纳入投饵式网箱养殖许可的强制性要求, 并通过生态补贴、税收优惠等政策激励养殖主体积极性。

4 大水面网箱养殖技术核心问题与发展建议

4.1 养殖容量与生态适配性矛盾

网箱养殖作为半开放式系统, 其生态影响取决于水域生态承载力与养殖布局的合理性。当前因网箱布局不合理、密度过高等, 已引发局部水域富营养化、病害频发及养殖对象品质下降等问题。究其核心在于网箱布局与规模设置缺乏基础研究支撑, 具体表现为: 1) 养殖水域生态系统本底特征缺乏系统评估, 生态系统动态变化规律不明; 2) 养殖活动与生态系统的交互作用及长期影响研究不足; 3) 网箱设置密度对水动力的阻力效应未量化; 4) 养殖废弃物(残饵、粪便等)迁移扩散规律不清, 缺乏定量评估; 5) 综合考虑养殖容量、环境压力与生态功能的模型与工具缺失。

建议发展方向主要包括: 1) 系统研究养殖水域初级生产力动态及食物链物质能量传递规律, 解析养殖对象与生态系统的相互作用机制; 2) 开展养殖活动的生物多样性影响及生态环境效应评价研究; 3) 定量分析养殖废弃物排放量及形态、沉降通量与养殖种类、饵料系数、水动力的关联性, 阐明迁移扩散规律; 4) 构建养殖容量估算模型及数据库, 为优化养殖布局、提高生态适配性提供科学依据。

4.2 饲料转化效率有待提升

饲料是投饵式网箱养殖系统主要的营养输入途径, 当前饲料转化效率处于较低水平, 导致大量营养物质以残饵、粪便、排泄物的形式进入水体造成污染。主要原因包括: 1) 养殖对象各生长阶段营养需求未明确; 2) 饲料营养组成、投喂方式及其交互作用对养殖对象生长代谢的影响机制不清; 3) 氮、磷、碳在鱼体内的贮积及废物排放规律缺乏系统研究; 4) 环境因子(水温、溶解氧等)对饲料利用效率的影响量化不足。

针对以上问题开展系统研究, 明确养殖对象营养需求、优化饲料配方, 制定科学合理的投喂策略(投喂频次、量、时间), 集成构建投饲管理方案^[75], 对于提高饲料利用效率、降低养殖成本与环境污染, 促进网箱养殖的可持续发展具有重要意义。

4.3 养殖管理信息化程度较低

当前养殖管理信息化程度较低, 制约了养殖生产效益的提升, 主要问题在于: 1) 水质监测技术单一, 多因子综合预测预警的理论与方法研究不足; 2) 投喂管理未能与鱼

类实时行为有效结合, 导致饲料浪费; 3) 疾病早期异常行为识别能力有限, 预警诊断体系不完善; 4) 对鱼类行为特征(摄食、应激反应)的研究与应用不足, 制约了管理效益。

建议发展方向包括: 1) 集成水温、溶解氧、pH、浊度等关键因子的实时监测与预警技术; 2) 基于水下摄像系统开发基于鱼类实时行为监测的智能投喂管理系统, 降低残饵率; 3) 融合计算机技术、显微图像处理与网络通信技术, 构建远程病害诊断和防治信息平台, 增强疾病预警和诊疗能力; 4) 深入开展鱼类行为学研究, 应用机器视觉和图像处理技术量化鱼类行为特征, 优化养殖设施和管理方案, 提升网箱养殖的信息化管理水平。

5 总结

大水面网箱养殖作为淡水养殖的重要组成部分, 在高效利用水域资源、供给优质蛋白质方面具有不可替代的作用。当前国内主要技术包括投饵式、不投饵式(滤食性鱼类养成与鱼类瘦身)、多层立体式(多营养级套养提升饵料利用率)及集污式(底部安装集污装置减少污染排放)4类。实现网箱养殖健康可持续发展的前提是科学评估生态承载力并严格限制养殖规模。在渔业绿色高质量发展要求下, 无需人工投喂的不投饵式养殖、可充分利用水体空间和营养物质资源的多层立体式养殖以及污染可控的集污式养殖将是未来重要的发展方向。突破当前技术的核心问题, 即养殖容量与生态适配性矛盾、饲料转化效率低下及信息化管理不足, 需针对关键科学问题开展系统研究, 推动大水面网箱养殖向生态安全、资源高效、智能管控的可持续模式升级。

参考文献:

[1] 刘家寿, 王齐东, 解缓启, 等. 内陆大水面生态牧场化管理: 群落调控、生物多样性恢复与资源利用[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 237-242.

[2] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊生态环境研究报告[R]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2022: 2.

[3] 张甘霖, 谷孝鸿, 赵涛, 等. 中国湖泊生态环境变化与保护对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 358-364.

[4] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024: 19-22.

[5] 张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题[J]. 科学通报, 2022, 67(30): 3503-3519.

[6] 叶少文, 张堂林. 水库生态牧场绿色发展模式与技术对策的思考[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 243-248.

[7] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.

[8] HU B T. Cage culture development and its role in aquaculture in China[J]. *Aquac Res*, 1994, 25(3): 305-310.

[9] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2018 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.

[10] WANG Q D, CHENG L, LIU J S, et al. Freshwater aquaculture in PR China: trends and prospects[J]. *Rev Aquac*, 2015, 7(4): 283-302.

[11] 李学梅, 孟子豪, 胡飞飞, 等. 网箱养鱼的氮磷排放[J]. *淡水渔业*, 2020, 50(4): 39-46.

[12] 高亚洲, 李梓君, 房志达, 等. 网箱养殖对库区水环境的影响: 以百色水利枢纽库区为例[J]. *环境影响评价*, 2024, 46(2): 50-55.

[13] BENNION H, CLARKE G, FRINGS P, et al. Paleolimnological evidence for variable impacts of fish farms on the water quality of Scottish freshwater lochs[J]. *J Environ Manage*, 2024, 369: 122155.

[14] ABD HAMID M, SAH A S R M, IDRIS I, et al. Impacts of tilapia aquaculture on native fish diversity at an ecologically important reservoir[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e15986.

[15] 郭倩倩, 卢彪, 秦燕, 等. 网箱养殖对喀斯特深水型湖泊水体细菌群落结构的影响: 以万峰湖为例[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(4): 175-183.

[16] ALMEIDA E C, JACINAVICIUS F R, PASSOS L S, et al. Phytoplankton composition and metabolomic profiles in aquaculture systems: a case study in Brazil's natural lakes[J]. *Aquaculture*, 2025, 599: 742135.

[17] RAMOS J K K, PARRA A B, KLIEMANN B C K, et al. Effects of cage fish farms on functional diversity of wild fish communities in a Neotropical reservoir[J]. *Aquaculture*, 2025, 595: 741625.

[18] XIE Q, QIAN L S, LIU S Y, et al. Assessment of long-term effects from cage culture practices on heavy metal accumulation in sediment and fish[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 194: 110433.

[19] YANG F Y, ZHONG J C, WANG S M, et al. Patterns and drivers of CH₄ concentration and diffusive flux from a temperate river-reservoir system in North China[J]. *J Environ Sci*, 2022, 116: 184-197.

[20] ZHANG J, LIU K Y, GUO C L, et al. Assessment of potential ecological risk based on the vertical characteristics of potential toxic elements in sediments from a high-density cage culture reservoir in China[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2023, 262: 115136.

[21] SHAO D D, HUANG L, WANG R Q, et al. Flow turbulence characteristics and mass transport in the near-wake region of an aquaculture cage net panel[J]. *Water*, 2021, 13(3): 294.

[22] YANG X Y, ZENG X L, GUALTIERI C, et al. Numerical simulation of scalar mixing and transport through a fishing net panel[J]. *J Mar Sci Eng*, 2022, 10(10): 1511.

[23] 高勤峰, 张恭, 董双林. 网箱养殖生态学研究进展[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(3): 7-17.

[24] 姚丁香, 刘子飞. 生态环保型网箱养殖模式应用背景及推广要点[J]. *中国水产*, 2020(6): 24-27.

[25] 韩毓, 张杭君. 水产生态容量及在淡水养殖上的应用研究进

- 展[J]. 水产科学, 2024, 43(4): 675-682.
- [26] WEITZMAN J, FILGUEIRA R. The evolution and application of carrying capacity in aquaculture: towards a research agenda[J]. *Rev Aquac*, 2020, 12(3): 1297-1322.
- [27] 胡传林, 万成炎, 丁庆秋, 等. 我国水库渔业对水质的影响及其生态控制对策[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 161-168.
- [28] 简生龙, 关弘弢, 李柯懋, 等. 青海黄龙羊峡—积石峡段水库鲢鳙鱼网箱养殖容量估算[J]. 河北渔业, 2019(6): 22-27, 57.
- [29] ABD HAMID M, SAH A S R M, IDRIS I, et al. Trophic state index (TSI) and carrying capacity estimation of aquaculture development; the application of total phosphorus budget[J]. *Aquac Res*, 2022, 53(15): 5310-5324.
- [30] TE VELDE K, PEETERS E, VERDEGEM M, et al. Aquaculture carrying capacity of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* and Nile crocodile *Crocodylus niloticus* in Lake Kariba, Zambia and Zimbabwe[J]. *Aquac Environ Interact*, 2022, 14: 113-125.
- [31] MACUIANE M A. Cage aquaculture and environment in Lake Malawi: an assessment of water quality, food web shifts, and development of a decision support tool for sustainable aquaculture[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 2014: 126-188.
- [32] AURA C M, MWARABU R L, NYAMWEYA C S, et al. Unbundling sustainable community-based cage aquaculture in an afro-tropical lake for blue growth[J]. *J Great Lakes Res*, 2024, 50(5): 102410.
- [33] DILLON P J, RIGLER F H. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water[J]. *J Fish Res Board Can*, 1974, 31: 1771-1778.
- [34] 苏子郡, 杜岩岩, 史小宁, 等. 刘家峡水库网箱养殖容量估算[J]. 甘肃畜牧兽医, 2024, 54(1): 124-128.
- [35] 彭建华, 刘家寿, 熊邦喜. 水体对网箱养鳊的承载力[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 28-34.
- [36] 牛奔. 澜沧江糯扎渡水电站库区网箱养殖容量调查研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019: 33-40.
- [37] LIMA NETO I E, MEDEIROS P H A, COSTA A C, et al. Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 815: 152875.
- [38] ZHANG X, HUANG T L, LI K, et al. Effects of storm events on nutrient characteristics in a stratified drinking water reservoir: behavior, transmission pathways and management strategy[J]. *Environ Res*, 2024, 261: 119762.
- [39] LI C L, ZHANG P, ZHU G W, et al. Dynamics of nitrogen and phosphorus profile and its driving forces in a subtropical deep reservoir[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2022, 29(19): 27738-27748.
- [40] 曾维农, 傅红梅, 付新梅. 探究网箱草鱼养殖技术的要点[J]. 农业与技术, 2019, 39(23): 142-143.
- [41] 王玉森. 藤县库区网箱高效养殖加州鲈鱼技术初探[J]. 江西水产科技, 2021(1): 23-24.
- [42] 星强华, 王国杰, 王振吉, 等. 青海省三倍体虹鳟淡水网箱养殖技术分析探讨[J]. 中国水产, 2021(6): 82-84.
- [43] 秦勇, 丁丰源, 张国维, 等. 刘家峡水库虹鳟鱼网箱养殖当年养成技术[J]. 中国水产, 2022(9): 81-83.
- [44] 张翼, 李亚楠. 杂交鲟水库网箱养殖技术总结[J]. 河南水产, 2024(5): 6-8.
- [45] 王德云, 朱仁勇, 马进春, 等. 拉西瓦水库网箱养殖虹鳟技术[J]. 科学养鱼, 2024(2): 20-21.
- [46] 林炳明. 中国淡水养殖智能化模式探讨与展望[J]. 农业工程技术, 2020, 40(24): 41, 43.
- [47] 刘世晶, 李国栋, 刘晃, 等. 中国水产养殖装备发展现状[J]. 水产学报, 2023, 47(11): 190-203.
- [48] 覃元锋, 韦剑山, 覃善恩. 基于智能化技术的匙吻鲟网箱养殖探究: 以南宁市为例[J]. 农村科学实验, 2024(11): 181-183.
- [49] 左渠, 田云臣, 马国强. 水产养殖智能投饲系统研究进展和存在问题[J]. 天津农学院学报, 2020, 27(4): 73-77.
- [50] 汪文忠. 花鲢不投饲网箱养殖技术[J]. 渔业致富指南, 2019(23): 39-41.
- [51] 赵亚中. 花鲢不投饲网箱养殖研究[J]. 乡村科技, 2019(3): 100-101.
- [52] 江振强. 匙吻鲟水库生态网箱养殖技术[J]. 渔业致富指南, 2013(4): 71-73.
- [53] 许文全. 水库精品瘦身吊水鳊鱼[J]. 渔业致富指南, 2023(10): 38-39.
- [54] 杨树国, 陈斐, 范伟, 等. 云南库区罗非鱼鱼菜共生生态网箱立体养殖试验[J]. 云南农业, 2018(7): 76-77.
- [55] NEDERLOF M A J, VERDEGEM M C J, SMAAL A C, et al. Nutrient retention efficiencies in integrated multi-trophic aquaculture[J]. *Rev Aquac*, 2022, 14(3): 1194-1212.
- [56] LI K, JIANG R T, QIU J Q, et al. How to control pollution from tailwater in large scale aquaculture in China: a review[J]. *Aquaculture*, 2024, 590: 741085.
- [57] 朱永久, 杨德国, 陈德荣, 等. 网箱养殖鲤鱼的双层网箱套养模式[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(5): 998-1000.
- [58] 蒲开阳. 淡水鱼类立体生态网箱养殖模式与精深加工关键技术研究[D]. 成都: 西华大学, 2013: 6-28.
- [59] 袁婷. 水产养殖废物排放机制及其生态调控作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 77-104.
- [60] 韩枫, 常志强, 高勇, 等. 多营养层次生态养殖模式简析[J]. 水产养殖, 2021, 42(4): 24-30.
- [61] BALTADAKIS A, CASSERLY J, FALCONER L, et al. European lobsters utilise Atlantic salmon wastes in coastal integrated multi-trophic aquaculture systems[J]. *Aquac Environ Interact*, 2020, 12: 485-494.
- [62] 周聃, 刘梅, 张政, 等. 基于 Ecopath 模型的淡水虾蟹池塘多营养层级养殖模式[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(4): 47-54.
- [63] NISSAR S, BAKHTIYAR Y, ARAFAT M Y, et al. The evolution of integrated multi-trophic aquaculture in context of its design and components paving way to valorization via optimization and diversification[J]. *Aquaculture*, 2023, 565: 739074.
- [64] TUCCIARONE I, SECCI G, CONTIERO B, et al. Sustainable aquaculture over the last 30 years: an analysis of the scientific litera-

- ture by the Text Mining approach[J]. *Rev Aquac*, 2024, 16(4): 2064-2076.
- [65] 江涛, 许明昌, 曾智, 等. 大水面网箱收集养殖废弃物及水处理系统研发[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 211-218.
- [66] 赵长兰. 新疆冷水鱼环保网箱养殖现状及其技术[J]. *中国水产*, 2018(12): 99-102.
- [67] 魁海刚. 刘家峡水库网箱养殖粪污处理集污装置[J]. *水产养殖*, 2022, 43(6): 52, 67.
- [68] 赵贤花. 刘家峡水库环保网箱鱼粪收集效果[J]. *渔业致富指南*, 2019(23): 30-31.
- [69] 王涛, 单世涛, 杨超, 等. 加装集污装置对水库投饵网箱养殖框鳞镜鲤生长及氮、磷排放的影响[J]. *水产学报*, 2016, 40(2): 218-224.
- [70] 陈胜娟, 邹惠全, 魁海刚, 等. 刘家峡水库 HDPE 深水网箱养殖废弃物收集设施设计及收集效果研究[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2024, 54(4): 128-131.
- [71] REID G K, LIUTKUS M, ROBINSON S M C, et al. A review of the biophysical properties of salmonid faeces: implications for aquaculture waste dispersal models and integrated multi-trophic aquaculture[J]. *Aquac Res*, 2009, 40(3): 257-273.
- [72] YUAN T, WANG Q D, LI S Q, et al. Assessment of biophysical properties of faecal pellets from channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*)[J]. *Sustainability*, 2022, 14(12): 7201.
- [73] ZHAN J X, LU J S, WANG D. Review of shell waste reutilization to promote sustainable shellfish aquaculture[J]. *Rev Aquac*, 2022, 14(1): 477-488.
- [74] 丁兰, 徐胜南, 周聃, 等. 水产养殖固体废弃物有机肥对土壤肥效和蔬菜品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(19): 102-108.
- [75] 王岩. 鱼类养殖饲喂管理: 概念、技术方案和应用[J]. *水产学报*, 2025, 49(4): 26-41.