

我国水生态系统完整性研究的重大意义、现状、挑战与主要任务

孙福红¹, 郭一丁¹, 王雨春², 夏 瑞¹, 张 远³, 闫振广¹, 刘雪松¹, 吴丰昌^{1*}

1.中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2.中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038

3.广东工业大学环境生态工程研究院, 广州 510006

摘要: 水生态系统完整性研究是当今国际热点, 维护水生态系统健康与稳定已成为世界各国水生态系统保护的目标、方向和管理策略。“十三五”以来, 我国地表水环境质量改善效果显著, 但部分流域或局部水生态退化问题成为突出短板, 强调水生态系统整体保护、促进水生态环境质量全面改善、提高生态系统自我修复能力将是未来我国水生态环境保护的重点任务. 本文详细剖析了典型流域水生态系统保护现状和需求, 阐述了我国开展水生态系统完整性研究的重大意义, 系统总结了完整性研究国际进展和应用实践, 深入分析了当前我国完整性研究面临的主要挑战, 提出了未来发展思路与重点任务. 加快研发完整性监测与评价新技术, 建立物理、化学和水生生物多要素统筹的完整性评价指标体系, 创新发展多尺度完整性评价理论, 持续开展典型流域完整性状况评估, 摸清水生态家底及演变趋势; 突破完整性退化诊断与修复调控新技术, 厘清退化机制及驱动因子, 阐明气候变化与人类活动复杂压力下退化水生态系统修复路径和调控策略, 提升水生态系统保护修复的科学性, 加快推动我国水生态环境管理制度迈上新台阶为恢复和维持重点流域水生态系统原真性和完整性提供科技支撑.

关键词: 生态系统完整性; 评价; 退化; 生态修复

中图分类号: X32

文章编号: 1001-6929(2022)00-00-00

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.08.11

Significance, Current Situation, Challenges and Future Direction and Development on the Researches of Ecological Integrity for Fresh Waters in China

SUN Fuhong¹, GUO Yiding¹, WANG Yuchun², XIA Rui¹, ZHANG Yuan³, YAN Zhengguang¹, LIU Xuesong¹, WU Fengchang^{1*}

1.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Department of Water Ecology and Environment, Beijing 100038, China

3.Guangdong University of Technology, Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangzhou, 510006, China

Abstract: The study on ecological integrity has become an international hotspot. Improving the health and quality stability of aquatic ecosystem has been adopted as the ultimate management goal, direction and strategies worldwide. Since the “13th Five-Year Plan”, the quality of surface water has been significantly improved in China. However, the degradation of aquatic ecosystem has been prominent shortcomings in typical watersheds. The overall conservation for physical, chemical and biological integrity should be emphasized for the future management of ecosystem. The amelioration of water quality and restoring the resilience of aquatic ecosystem will be the vital goals and tasks for protection of freshwater ecosystems in China. In this review, the current status and demands for ecosystem conservation in typical watershed was firstly summarized. The significance of ecological integrity researches for fresh waters in China was elucidated. Then, the progress and application practice regarding ecological integrity from foreign countries were demonstrated. The challenges and deficiencies were also highlighted for the present achievements of ecological integrity researches in China. Finally, the future developments of ecological integrity studies in China were proposed. New technologies for ecological integrity monitoring and assessment should be expedited in the future. The index for ecological integrity

assessment that integrates physical, chemical and biological metrics will be established in China. The theories for multi-scale ecological integrity assessment need to be developed. The investigation of ecological integrity should be carried out periodically to grasp the ecosystem background and evolution trend for typical watersheds. The new methods for degradation diagnosis and restoration of ecological integrity need to be proposed to clarify the degradation mechanism and driving factors. It is also urgent to put forward the restoration pathway and regulation strategies for degraded aquatic ecosystems under the complex stress of climate change and human activities, which is beneficial to improve the protection and restoration of freshwater ecosystem. Researches of ecological integrity are fundamental to speed up the management of aquatic ecosystem in China to enter to a new era, and to provide technological support for the maintenance of freshwater ecosystems health.

Keywords: ecological integrity; assessment; degradation; ecological restoration

收稿日期: 2022-05-12 修订日期: 2022-08-11

作者简介: 孙福红(1980-), 女, 辽宁大连人, 研究员, 博士, 主要从事流域水生态系统完整性研究, sunfhiae@126.com.

*责任作者, 吴丰昌(1964-), 男, 浙江衢州人, 中国工程院院士, 研究员, 博士, 博导, 主要从事环境质量演变与污染成因、环境基准与标准、流域水生态系统完整性研究, wufengchang@vip.skleg.cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2021YFC3201000, 2021YFC3201001)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2021YFC3201000, 2021YFC3201001)

水生态系统完整性研究是当前国际上水生态监测与评价、生态环境综合治理、水生态系统保护与修复等领域的研究热点和前沿^[1-2]. 目前, 国际上对于水生态系统完整性的定义侧重点略有不同, 但达成共识的“水生态系统完整性”是指物理、化学和生物完整性的有机整体^[3-5]. 1972年, 美国《清洁水法》将“恢复和维持国家淡水水域化学、物理和生物完整性”确定为国家目标^[6]. Karr等^[4]于1981年首次明确提出了生态系统完整性的概念, 将其定义为“生态系统能够支撑或维持生物群落具有平衡性、整体性、且适应外界压力的能力, 生物群落应具有自然状态下的全部群落种类组成、多样性和功能属性”. 完整性良好的生态系统, 具有完整的生物群落结构, 包括完整的物种组成、协调的外界环境和过程, 同时具有一定的抗性和弹性, 可以抵抗自然环境过程或者人类活动的干扰和破坏, 拥有良好的自组织和恢复能力^[3-4,7]. 水生态系统完整性研究主要包括完整性监测、评价、退化诊断、模型预测、修复调控等方面.

“十三五”期间, 我国水污染防治攻坚战取得显著成效, 地表水环境质量持续改善. 然而, 部分流域或局部水生态保护形势依然严峻, 存在生物多样性减少、生境破碎化、部分河湖水生态功能退化严重等问题^[8-9]. 在生态文明建设全面推进的新形势下, 如何运用新思路、新理论、新方法恢复水生态系统各要素持续发展是未来我国水生态环境保护的重大科技需求.

美国、欧盟、加拿大、澳大利亚、南非等先后开展了水生态系统完整性监测与评价, 构建了适用于本土流域水生态系统特征的监测与评价技术体系, 动态掌握水生态系统完整性状况及其演变趋势. 在过去几十年, 完整性监测技术、评价方法不断创新, 配套政策也得到了迅速发展, 在流域综合管理实践中表现出良好的应用效果^[2,5]. 目前我国水生态系统完整性研究起步较晚, 基础薄弱, 亟需全面了解国际进展和经验, 切实做好相关技术研发和机理机制研究. 该文系统剖析了当前我国流域水生态系统保护现状与问题, 阐述了完整性研究的重要意义, 系统总结了完整性研究的国际进展, 分析了当前我国完整性研究面临的机遇和挑战, 系统谋划未来研究的主要思路与重点任务, 旨在为国家重点流域水生态考核与评价提供科技支撑, 推动我国水生态环境管理制度迈上新台阶, 与国际接轨.

1. 我国开展水生态系统完整性研究的重大意义

进入“十三五”以来, 我国水环境治理力度持续加大, 全国及重点流域地表水环境质量改善成效突出, 水污染防治攻坚战取得阶段性成果. 根据《中国生态环境状况公报》^[10]监测数据显示: 近年来全国地表水水质持续好转, 水质优良(I~Ⅲ类)断面比例大幅提升, 由2015年64.5%提高到2021年84.9%, 劣五

类断面比例大幅下降,由 2015 年 8.8%下降至 2021 年 1.2%(见图 1).从流域层面上看,重点流域水环境质量状况普遍好转,以长江流域为例,水质优良断面比例由 2015 年 81.8%提高到 2020 年 96.9% (见图 2),2020 年长江流域全面消除劣 V 类水质,干流全面达到了 II 类水质,地表水环境质量总体达到历史最优水平.

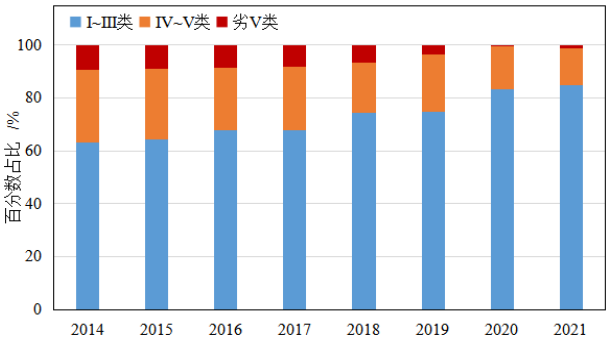


图 1 全国地表水水质状况变化(2014—2021 年)^[10]

Fig.1 Changes in the status of national surface water quality from 2014 to 2021^[10]

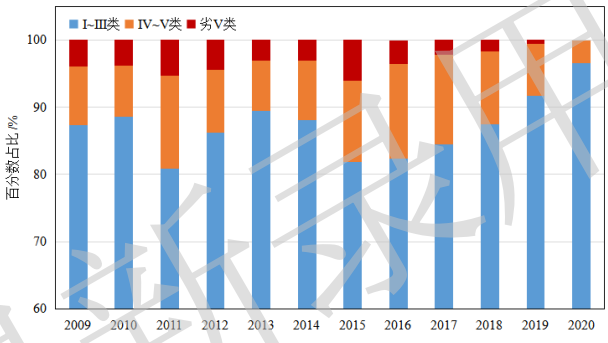


图 2 长江流域地表水水质状况变化(2009—2020 年)^[10]

Fig.2 Changes in the status of surface water quality for Yangtze River from 2009 to 2020^[10]

在水污染防治工作取得显著成效的同时,还应看到水生态系统失衡问题依然存在,成为建设“美丽中国”的突出短板和瓶颈问题^[8],主要表现在以下方面:①典型流域水生生物资源普遍面临严峻形势.部分流域(如长江)水生生物多样性下降,多种珍稀水生野生动植物濒危程度加剧,水生物种资源严重衰退,已成为影响中国生态安全的突出问题^[11];②典型河湖生境状况发生重大改变.部分流域(如长江)或区域(京津冀地区)天然水生生境面积大幅萎缩,水生生物生存空间被挤占,导致栖息地破碎化,“人鱼争水”问题凸显,严重威胁水生生物生存^[12-13];③湖泊富营养化和水华问题突出^[14].全国重点湖库藻类生物量自 1980 年以来,稍有增加的趋势,微囊藻水华有逐步北移的趋势,如拟柱孢藻原适应于亚热带区域,近年在华北地区湖库出现;④典型流域水环境风险依然存在.伴随经济快速发展,重金属、农药、内分泌干扰物(如全氟化合物及其替代物、新型溴代阻燃剂等)有毒有害物质进入水体,对水生生物安全构成潜在威胁^[9,15].由于部分污染物特别是新型污染物未列入常规水质监测评价,从而忽视了其对水生生物的长短期毒性效应和影响.

当前我国全面进入生态文明建设新时期,水生态环境保护形势与需求发生重大转变,守护大江大河,必须着眼更大的格局,从生态系统的整体性和全局性出发^[16-17],根据物理、化学和生物完整性全要素保护需求,统筹管理,系统推动水生态保护与修复工作,维护水生态系统稳定性与可持续发展.

1.1 符合生态文明建设的国家重大需求

水生态系统完整性保护理念符合新时期全面推进生态文明建设的重大需求,是贯彻“生态文明建

设”的有力抓手。“十四五”时期是推动我国水生态环境管理制度从以“水污染防治”为主导向“水生态系统保护修复”转变的重要阶段,强调水生态系统整体保护、促进水生态系统质量全面改善是未来我国水生态环境保护的重点方向和任务^[8]。因此,全面加快流域水生态系统完整性科学研究刻不容缓,亟需系统开展完整性监测、评价、退化诊断与修复调控相关研究,促进水生态系统健康发展。

1.2 有助于实现多要素综合评价水生态系统质量状况

水生生物是水生态系统的主体,健康完整的水生态系统是生物与维护其生存的各环境要素达到和谐共生、稳定发展的状态。长期以来,我国水质监测评价与治理目标主要以总磷、COD等常规理化指标为主,无法综合反映水生态系统健康状况。以长江流域为例,近年来长江水质改善显著(见图2),但受气候变化、水利工程等长期累积影响,流域水生态功能退化严重,生物完整性指数到了最差的‘无鱼’等级,因此如何准确评价水生态系统质量状况成为亟待解决的科学问题。用完整性来表征水生态系统健康状况,是把物理、化学和生物完整性及其生态过程 and 影响因素作为一个系统来整体考虑,从物种、种群、群落、生态系统到景观水平开展多尺度要素综合评价,有助于全面反映水生态系统质量状况。

1.3 有助于科学解析水生态系统退化成因与复杂机制

水生态系统退化成因复杂,如气候变暖、栖息地丧失、水文情势改变、环境污染、物种入侵等,各胁迫因素存在交互作用,会产生协同、拮抗和加和作用,对生物多样性产生复杂影响^[18],为流域水生态系统保护修复带来较大难度,如何准确解析水生态系统复杂退化成因及其贡献是影响修复效果的关键。目前,定量解析多种胁迫因素对流域水生生物群落结构与功能交互影响的研究已成为国际热点^[19-20]。完整性研究是从水生态系统的物理、化学和水生生物多要素出发,识别自然与人类活动多重环境压力下的复杂退化机制与关键驱动因子,为流域水生态系统保护与修复提供有力的科学依据和目标,有助于实现系统治污、精准治污、科学治污。

1.4 有助于提升我国水生态环境管理与治理能力现代化水平

维护和提升水生态完整性已成为国际上许多国家水生态系统管理策略,稳固水生态环境质量改善成效是我国“十四五”期间的重要任务和发展目标,亟需寻求更加完善的管理理念和治理模式。系统开展完整性相关研究是实现这一目标的有力支撑,能够实现水生态管理制度由单一水质理化参数向多指标、多要素、多尺度的完整性监测评估体制转变,为水生生物多样性恢复、流域综合治理和保护修复提供指导和方向,具有极其重要的科学价值。完整性监测与评价将逐步成为我国未来水生态环境管理的核心和基础,促进我国水生态环境管理制度现代化能力建设,与国际接轨。

2. 国外水生态系统完整性研究进展

从20世纪80年代开始,美国、欧盟、澳大利亚、南非等国家和地区先后开展了完整性监测与评价国家项目,从物理、化学和水生生物完整性角度综合评估国家河流(溪流)、湖泊(水库)的完整性状况,完整性监测与评估技术得到不断完善,主要体现在以下方面:监测技术从传统分类学发展到现代分子生物学手段,提高了水生态监测效率和精度^[21];评价指标由水质理化指标,逐步拓展到涵盖物理生境、理化、水生生物、水文水动力等多指标体系,水生生物完整性指标从群落组成向生态系统水平发展,生态系统功能、食物网和景观等指标日益得到重视^[22];评价方法从生物指数法、指示生物法发展到生物完整性指数法(F-IBI, D-IBI, B-IBI)^[23-24]、多指标综合评价(MMI)^[25]等,统计和模型预测得到应用;完整性评价对象也从单一河流发展到流域尺度^[5]。美国和欧盟较早地开展了完整性评价研究并形成了较为成熟的技术方法,本文着重介绍美国和欧盟完整性评价相关进展,以期为我国完整性研究提供思路、方向和经验指导。

2.1 美国水生态系统完整性研究进展

为支撑《清洁水法》,美国EPA制定并颁布了一系列水生态系统完整性监测评价的法令法规和标准。1999年,美国EPA制定了《可涉水河流和溪流快速生物评价方案(第二版)》^[26],提出了河流和溪流中着生藻类、大型底栖无脊椎动物和鱼类调查的标准方法及质控措施,并对栖息地质量进行评估,该方案提

出了生物数据分析的多指标评价法,即基于生物完整性指数法(IBM法)进行水生态状况评价.2006年,美国EPA出版了《不可涉水河流和溪流生物评价概念及方法》^[27],规定了大型河流中藻类、大型底栖无脊椎动物和鱼类调查标准方法,并着重强调对物理生境(水深、浸湿宽度、蜿蜒度、坡度、河岸稳定性)的监测评估,同时对调查数据分析、整合和评估有了更具体的规定.

在标准化的标准技术方法的支撑下,美国EPA开展了多项国家水生态调查项目,定期评价水生态系统健康状况.目前,美国正在实施的水生态调查项目为国家水生资源调查项目(NARS),2007年开始执行,以5年为一个周期,旨在调查评估国家河流(溪流)、湖泊(水库)、沿海水域以及湿地水生态系统完整性状况.本文详细总结了美国近期开展的河流和湖泊评价项目结果,分别如表1和表2所示.2013—2014年,NARS项目对1853条河流和小溪开展了水生态调查与评价^[28],结果如表1所示:①水生生物状况.选择了大型底栖无脊椎动物和鱼类作为评价指标,被评估水体中生物状况良好的河长占比30%,一般生物状况的河长占比26%,较差生物状况的河长占比44%;其中,底栖动物和鱼类为良好状态的河长占比分别为30%和26%,与2008—2009年的调查结果相比,鱼类良好状况比例下降了8.3%.②物理生境状况.选择了鱼类栖息地、河岸带植被覆盖度、河床沉积物、河岸带人类扰动4项参数进行评价,各参数评估为良好的河长占比分别为64%、58%、52%和29%.③化学污染状况.总氮和总磷状况为良好的河长比例分别为32%和18%,与2008—2009年的调查结果相比,分别下降6.4%和17%.

2012年,NARS项目对美国1038个湖泊、水库和池塘的水生态状况进行了调查^[29],评价结果如表2所示:①水生生物状况.31%的湖库中大型底栖无脊椎动物群落受到严重干扰,21%的湖库中浮游动物群落受到严重干扰,退化的种群包括小型水生生物(如腹足类和蜉蝣).②物理生境状况.岸带植被覆盖和生境复杂度两类指标受到最大程度干扰的湖库占比分别为28%和29%,湖水位波动异常的情况显著改善,受水位干扰最小的湖库占79%,比2007年提高42%.③营养盐状况.受总氮和总磷严重干扰的湖库分别占35%和40%.④营养状况.据叶绿素a浓度进行评估,重度营养型、富营养型、中营养型和寡营养型湖库占比分别为21%、34%、35%和10%.⑤微囊藻毒素.39%的湖库中检出了微囊藻毒素,检出率比2007年提高了9.4%.

2.2 欧盟水生态系统完整性研究进展

2000年,欧盟颁布《水框架指令(2000/60/EC)》(WFD)^[30],提出了流域综合管理新理念,旨在促进所有水域达到良好状态、实现水资源可持续利用.WFD规定:良好的地表水状况是指地表水体的生态状况和化学状况同时达到良好及以上水平.WFD规定地表水生态状况评价参数主要为水生生物、水文地貌和物理化学3大类^[30].根据生物、水文形态和物理化学质量要素评估结果,地表水生态状况分为极好、良好、中等、较差、极差5个等级,并针对支持或维护生物生存环境的水文、物理和化学条件采取相应的治理措施,从根本上满足动植物保护及水资源可持续利用的需求.对于生物质量要素来说,河流水生态状况评价采用的是大型底栖无脊椎动物和鱼类,以及沉水植物或其它大型维管束植物中至少一种,湖泊水生态状况评价则采用浮游藻类.良好的地表水化学状况是指“地表水中的所有优先污染物浓度不超过欧盟优先污染物水环境质量标准(2013/39/EU)^[31]中规定的标准值,且不超过其他欧共体相关法律设定的环境质量标准值”.化学状态采用“达到良好状态”和“未达到良好状态”两级进行评价,如果所有污染物均符合环境质量标准,则该水体的化学状况为“良好”.

2018年,欧盟环境署(EEA)发布了《欧洲水域现状和压力评估》报告^[32],评价了111072个水体,结果显示大约40%的地表水(河流、湖泊、过渡和沿海水域)处于良好或极好的生态状态或潜力,4%的水体状况缺乏生态状况/潜力信息;38%地表水体处于良好的化学状况,46%水体没有达到良好的化学状态,16%水体化学状况不清;大部分国家的主要超标污染物是汞、多环芳烃(PAHs)、镉、镍和铅.压力因子分

析结果发现：水文地貌改变对水生态状况影响最大，影响了 40%水体的水生态状况，扩散源污染、大气沉降、点源污染和取水工程分别影响了 38%、38%、18%和 7%水体的水生态状况。

表 1 2013—2014 年美国国家河流、溪流评估项目(NRSA)采用的评价指标及评价结果^[28]

Table 1 Evaluation indicators and results in 2013-2014 National Rivers and Streams Assessment of USA^[28]

分类	指标	评价结果 ¹⁾			
		好	中	差	未评估
生物	大型底栖无脊椎动物	30%	26%	44%	<0.5%
	鱼类	26%	22%	37%	14%
物理	鱼类栖息地	64%	20%	14%	1%
	河岸带人类扰动	29%	47%	23%	1%
	河岸植被覆盖度	58%	17%	24%	1%
	河床沉积物	52%	22%	22%	4%
化学	总氮	32%	25%	43%	0%
	总磷	18%	24%	58%	0%
	盐度	86%	10%	4%	<0.5%
	酸度	98%	<0.5%	1%	<0.5%
人体健康	肠球菌	0	69%	30%	1%
	微囊藻毒素	<0.5%	37%	63%	0%
	汞 ²⁾	24%		76%	
	PCB ²⁾	40%		60%	
	鱼组织中污染物质含量	PCB ²⁾	17%	83%	
		PFOS ²⁾	3%	97%	

注：1)以河流和溪流的长度占比计算；2)评价结果分“好”和“差”两级。

表 2 2012 年美国国家湖泊评估项目(NLA)采用的评价指标及评价结果^[29]

Table 2 Evaluation indicators and results in 2012 National Lakes Assessment of USA^[29]

分类	指标	评价结果 ¹⁾				
		最小干扰	中等干扰	最大干扰	未评估	未检出
生物	大型底栖无脊椎动物	33%	26%	31%	11%	

	浮游动物	53%	27%	21%	0%	
	湖岸植被覆盖度	48%	23%	28%	<1%	
	浅水栖息地	55%	27%	18%	0%	
物理	湖泊下降水位	79%	14%	6%	0%	
	湖岸人类干扰度	29%	53%	18%	1%	
	湖泊生境复杂度	43%	28%	29%	0%	
娱乐 和 人 体 健 康	蓝藻	61%	23%	15%	1%	
	微囊藻毒素	39%	0%	0%	1%	60%
	阿特拉津	70%	30%	0%	0%	
	总汞	21%	51%	26%	2%	
	甲基汞	31%	28%	40%	1%	
	总氮	41%	25%	35%	0%	
	总磷	45%	15%	40%	0%	
化学	溶解氧	88%	8%	2%	2%	
	叶绿素 a	51%	34%	15%	1%	1%
	酸度	97%	2%	0%	0%	
	营养状态	10%(贫营养型)	35%(中营养型)	34%(富营养型)	21%(重度富营养)	

注：1)以湖泊、水库和池塘个数占比计算。

3. 我国水生态系统完整性研究进展与现状

经过近十年的积极探索，我国已具备了一定的水生态监测能力，初步开展了水生态完整性评价相关研究，积累了一定的水生态监测数据和宝贵经验，为在长江流域乃至全国范围内开展水生态系统完整性监测与评价奠定了良好的基础。

3.1 完整性监测技术发展

近年来，我国完整性监测技术得到迅速发展，形成了很好的技术储备。2020年，水利部发布了《河湖健康评价指南(试行)》(第43号)^[33]，采用“盆”、“水”、“生物”与“社会服务功能”四个准则层对河湖健康状态进行评价，并提出了统一的监测技术规范。2020年，生态环境部发布了《河流水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》、《湖库水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》(环办标征函〔2020〕49号)^[34]，分别规定了河流、湖泊水生态环境质量监测评价要素(包括水环境质量、生境和水生生物)，选取大型底栖无脊椎动物与着生藻类作为河流水生态监测要素，选取底栖动物、浮游藻类、浮游动物和大型维管束植物作为湖泊水生态监测要素，并对每一要素的监测技术进行了详细阐述。近年我国环境DNA技术得到快速发展，该技术可用于监测特定流域生物多样性、群落结构和组成变化情况，具有高重复性、高时空分辨的优势^[21]。

3.2 完整性评价技术发展

我国在完整性评价方面也积累了一定的研究基础和工作成果。2013年，原环境保护部印发《流域生态健康评估技术指南(试行)》(环办函〔2013〕320号)^[35]，将评估指标分为6大类17项，包括水域生态健康评估的生境结构、水生生物和生态压力三类指标及陆域生态健康评估的生态格局、生态功能和生态压力三类指标。生态环境部发布的《河流水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》、《湖库水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》(环办标征函〔2020〕49号)^[34]，从水环境质量、生境、水生生物三方面评价水生态环境质量状况，规定了相关指数计算方法及评价等级^[34]。水利部发布了《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793—2020)，采用水文完整性、化学完整性、形态结构完整性、生物完整性与社会服务功能可持续性5大类共计27项指标对河湖的健康状况进行评价^[36]。2021年，农业农村部发布《长江流域水生生物完整性指数评价办法(试行)》(农长渔发〔2021〕3号)^[37]，采用鱼类状况指数、重要物种指

数与生境状况指数 3 大类 14 项必选指标对长江水生生物完整性进行评估, 并提出鱼类状况指数、浮游生物状况指数等 5 大类 16 项参考指标供有条件的区域选择使用. 地方管理部门也出台了相关的评价技术规范, 如北京市市场监督管理局印发了《水生态健康评价技术规范》(DB11/T 1722—2020)^[38].

3.3 流域水生态特征基础调查

目前, 我国学者已在长江、松花江和辽河等流域开展了完整性监测与评价相关研究. 世界自然基金会联合中国科学院水生生物研究所等单位共同发布了《长江生命力报告 2020》^[13], 从水生态、水环境与水文三方面评估了长江干流(上、中、下游)与四湖(洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、太湖)的水生态系统健康状况, 由好到差划分为 A、B、C、D、E 五级. 结果显示: 长江流域健康状况呈现区域差异性, 干流总体生命力状况等级为 B-, 其中源头区为 A, 上游区和下游区为 B-, 中游区为 C; 洞庭湖与鄱阳湖为 C, 太湖为 D, 巢湖则为 D-. 中国环境科学研究院通过长期研究揭示了辽河流域鱼类、大型底栖无脊椎动物和着生藻类的河流纵向梯度变异规律, 阐述了区域景观格局、水文生境、水环境要素对水生生物安全的影响^[39]. 中国环境监测总站、生态环境部长江流域生态环境监督管理局等单位开展了长江、黄河、淮河和海河等重点流域水生态状况调查监测试点工作. 此外, 北京、江苏、浙江等地方管理部门也先后组织开展了水生态特征调查相关工作.

4. 问题与挑战

4.1 典型流域水生态系统本底、现状与演变规律不清

我国地域规模宏大, 气候、地质、水文特征等区域差异显著, 造就了类型多样、特征复杂的水生态系统. 目前, 重点流域水生态系统本底特征与现状不清, 演变规律不明. 以长江流域为例, 自西向东跨越中国地势的三级阶梯, 气候、地理、地貌条件的多样性和复杂的江湖关系决定了长江源头区、上游、中下游和河口区具有复杂多样的生态系统特征. 已有研究针对长江部分区域的水生态系统特征开展了调查, 如在长江中游干流江段(宜昌、荆州等)调查了以轮虫、桡足类、枝角类为代表的浮游动物空间分布特征^[40], 分析了大型底栖无脊椎动物、水生维管植物多样性的时空格局^[41-42]. 但总得来说, 水生态调查数据零散, 缺乏系统的水文、水动力、物理生境及水生生物的长期数据积累.

4.2 水生态系统完整性监测技术待完善

长期以来, 我国水质评价与考核以理化指标为主, 采用传统手工采集-实验室检测相结合的形式. 相比之下, 水生生物、遥感解译、分子生物学等监测能力亟需进一步提高. 目前我国水生生物分类和鉴定主要以人工显微镜观察为主, 周期长、耗时耗力, 亟需研发高特异性、高灵敏度的水生生物监测新技术; 尚缺少鱼类、底栖生物和浮游藻类等监测技术规范, 亟待从样品采集、保存、运输、检测、质控等方面制定统一的技术流程; 目前研究多关注浮游生物、底栖动物和鱼类等类群, 可尝试开展基于整个食物网结构的多营养级的全面生物监测; 此外, 亟待研发物理完整性指标(如土地利用方式、岸带植被状况、河道宽度等)的监测技术.

4.3 缺乏水生态系统完整性评价指标与方法

水生态系统是一个组织结构复杂庞大, 且物理、化学和水生生物多要素相互影响的整体. 水生生物状况是衡量水生态系统完整性的最有力指标, 当一条河流或湖泊的生物状况良好时, 其化学污染水平和物理生境通常也会处于良好状态. 我国水质评价工作主要以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)为基本依据, 对水生生物组成、物理生境等因素考虑不足, 不能满足水生态整体保护与系统修复的重大需求. 当前, 我国还尚未完全建立水生态系统完整性评价与考核制度, 缺乏物理、化学和水生生物完整性评价指标和综合评价方法.

4.4 水生态系统退化与修复机制复杂

水生态系统完整性退化受多种因素共同影响, 过程复杂, 揭示其退化机制和调控途径是当前学科前

沿. 20 世纪 70 年代起, 科学家普遍关注水文、水质等单一要素对生态系统的影响, 如氮磷过量输入造成湖泊生物群落失衡、连通性改变影响栖息地适宜性等. 目前对于水生态系统完整性退化拐点的认识不统一, 如何解析其耦合机制、甄别自然变化和人类活动对完整性退化的贡献仍是重大挑战^[20]. 目前完整性退化与调控研究存在的难点主要包括: ①全球变暖背景下, 多因子共同作用对水生态系统过程和功能的影响机理尚不清楚; ②缺乏定量的多途径综合解析水生态系统退化成因的技术方法或理论模型; ③缺乏从生态系统角度对生态系统退化的临界阈值识别技术研究, 制约了水生态保护修复和综合治理长期成效.

5 未来完整性研究的主要思路与重点任务

完整性研究对于流域水生态系统整体保护与协同治理具有重要的指导意义, 当前我国完整性研究尚处于起步阶段, 亟需进一步明确未来发展思路与重点任务, 在借鉴欧美国家的完整性监测与评价技术方法的基础上, 形成具有中国特色的水生态系统完整性评价、诊断与调控技术体系.

5.1 着力提升现代化水生态监测技术能力

借鉴国内外技术经验, 研发现代化、高效快速的水生态监测技术(如环境 DNA 技术), 动态监测水生生物(如鱼类、大型底栖无脊椎动物等)种群变化特征; 进一步完善遥感技术在物理生境、水文情势调查中的应用; 针对物理生境、典型新污染物、水生生物等不同类型指标, 逐一形成监测技术规范, 建立标准化、规范化的技术流程与质控方法, 保证结果的准确性、有效性和可比性; 研发预报预警智慧管理平台提升完整性监控预警与智能化管理技术水平, 建成国家或地方统一的水生态系统完整性监测网络体系和预报预警平台.

5.2 创新发展多尺度水生态系统完整性评估理论

选择代表性河流、湖泊水体, 辨识水生态系统“个体-种群-群落-生态系统”多层次生态响应关联性, 探讨不同指标对外界干扰的指示作用, 识别关键压力因子并筛选敏感性指标, 提出基于物理/化学/生物多要素、种群/群落/生态系统多层次、体现区域差异性的完整性指标体系. 此外, 完整性指标的基准与阈值是评价的关键环节, 建立物理、化学和生物完整性指标的阈值确定技术, 提出以本土生物为保护目标的完整性指标基准值, 建立分类、分区、分级的完整性综合评价方法, 形成完整性评价技术规范, 支撑国家重点流域水生态考核业务化工作, 丰富水生态系统完整性发生、演变及稳定维持的科学认知.

5.3 定期评估典型流域水生态系统完整状况

定期开展典型流域完整状况调查与评估, 调查鱼类、底栖动物、浮游藻类和浮游动物等物种组成、分布和种群数量, 重点关注珍稀濒危、特有物种监测, 对水生生物受威胁状况、生境水文、化学污染等进行全面评估, 明确亟需保护的物种和重要区域, 掌握各类型水生态系统的主要指示性生物、珍稀物种名录及其空间分布特征, 明晰水生态系统完整性的区域差异特征, 掌握一手水生态数据, 摸清水生态家底, 建立典型流域水生态系统完整性数据库. 健全完善水生态考核配套机制, 逐步实现水生态管理制度由单一理化指标到多要素综合的完整性评估体制转变.

5.4 构建完整性退化诊断和机制解析技术体系

系统分析人类活动(水利工程、水污染等)与自然变化对典型水生态系统特征动态演化的驱动过程, 通过机理模型与大数据分析有机融合, 创新发展完整性退化诊断技术体系, 解析并识别代表性水体完整性退化特征差异及其关键影响因子; 综合建立完整性退化与气候变化、水工程建设、生境变化、水质恶化等过程的复杂内在关系, 揭示气候变化和人类活动复杂影响下完整性退化成因与机制; 构建多过程、多尺度嵌套的水生态系统完整性模拟预测方法与耦合模型, 揭示不同尺度水体“水文-水动力-水质-水生生物”的多过程耦合与交互影响机制.

5.5 突破完整性修复与调控技术新模式

水生态保护修复应立足生态系统整体性和流域系统性, 遵照生态系统各要素的内在作用关系与规律, 探索水生态系统保护修复新思路、新理念. 将水生态系统物理、化学和水生生物各要素作为整体, 以河湖

为统领,统筹水环境、水生态、水资源,聚焦突出问题,加强上下游、左右岸、河湖关系的系统保护和协同治理^[43-44],建立完整性修复与调控技术新模式.识别不同类型水生态系统退化弹性阈值与主要调控路径,突破物理、化学和水生生物完整性修复调控关键技术,研究典型流域水生态完整性状态对环境压力因子的响应规律与机制,明晰完整性修复的主要调控因子与阈值区间,解决多重压力下退化水生态系统修复路径、决策优化及综合监管技术瓶颈,因地制宜提出保护修复策略.

6 结论

a)“十三五”以来,全国重点流域地表水环境质量稳中向好,但改善成效尚不稳固,部分流域水生态系统退化状况严峻.在生态文明建设新需求下,我国水生态环境管理理念向水资源、水环境、水生态多要素统筹转变,完整性研究对于流域水生态系统整体保护与协同治理具有重要的应用价值和指导意义,亟需进一步深入开展水生态系统完整性相关研究.

b)生态系统完整性研究已成为国际热点和前沿领域,美国、欧盟成员国、加拿大和澳大利亚等国家和地区先后开展了长期的完整性监测评价国家项目,从物理、化学和水生生物完整性多要素入手,综合评价流域水生态系统完整性状况及其演变趋势.

c)我国水生态系统完整性研究应在以下方面加强:创新发展多尺度流域水生态系统完整性评估理论,构建物理、化学和水生生物多要素耦合的、适合流域特征的完整性评价指标与评价方法;加大完整性监测、评价技术规范 and 标准研究力度,制定并发布相关技术标准;评估典型流域完整性状况,摸清水生态家底,推动流域水生态系统完整性管理制度常态化;创新完整性退化诊断新技术体系,揭示流域水生态系统退化成因及复杂交互作用;突破流域综合治理与完整性修复调控新技术模式,提出水生态系统保护修复策略,坚持一湖一策、一河一策,推进河湖生态系统功能恢复,实现精准治污、科学治污、系统治污,探索研究典型流域水生态系统完整性管理办法和配套措施,支撑“十四五”水生态系统保护、协同治理新思路.

参考文献(References):

- [1] MARGARET P,ALBERT R.Linkages between flow regime,biota,and ecosystem processes:Implications for river restoration[J].Science,2019,365 (6459):eaaw2087.
- [2] BEST J.Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J].Nature Geoscience,2019,12:7-21.
- [3] CAIMS J.Quantification of biological integrity[M].U.S.Environmental Protection Agency,Washington,D.C.1975:171-185.
- [4] KARR J R,DUDLEY D R.Ecological perspective on water quality goals[J].Environmental Management,1981,5(1):55-68.
- [5] KUEHNE L M,OLDEN J D,STRECKER A L,et al.Past,present,and future of ecological integrity assessment for fresh waters[J].Frontiers in Ecology & the Environment,2017,15(4):197-205.
- [6] US Environmental Protection Agency.Federal Water Pollution Control Act[S].Section 101(a) and (2),1972.
- [7] KARR J R.Defining and assessing ecological integrity:beyond water quality[J].Environmental Toxicology & Chemistry,1993,12(9):1521-1531.
- [8] 吴丰昌.对话吴丰昌院士:水污染防治领域也是降碳的一个战场[EB/OL].北京:环境保护杂志社.(2022-04-27)[2022-04-27].<http://www.hjbhzz.com/news/2022/0425/1559.html>
- [9] 符志友,张衍燊,冯承莲,等.我国水环境风险管理进展、挑战与战略对策研究[J].环境科学研究,2021,34(7):1532-1541.
- [10] FU Z,ZHANG Y,FENG C,et al.Progress,challenge and strategic countermeasures of Chinese pollution risk management of water environment[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(7):1532-1541.
- [11] 生态环境部.中国生态环境状况公报[R].<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzk/gb/>.
- [12] 生态环境部,农业农村部,水利部.关于印发《重点流域水生生物多样性保护方案》的通知[EB/OL].北京:生态环境部,农业农村部,水利部.(2018-04-08)[2018-04-08].https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/sthjbjw/201804/t20180410_434172.htm.
- [13] 世界自然基金会.《长江生命力报告 2020》[R].2020.
- [14] 刘录三,黄国鲜,王璠,等.长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J].环境科学研究,2020,33(5):1081-1090.
- [15] LIU L,HUANG G,WANG F,et al.Main problems,situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze

River Basin[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(5):1081-1090.

[14] 赵晏慧,李韬,黄波等.2016—2020 年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素.湖泊科学,2022,34(5).

Zhao Y,Li T,Huang B,et al.Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020.Journal of Lake Science,2022,34(5).

[15] WU F C,MU Y S,CHANG H,et al.Predicting water quality criteria for protecting aquatic life from physicochemical properties of metals or metalloids[J].Environmental Science & Technology,2013,47:446-453.

[16] United Nations Environment Programme (UNEP).Making Peace with Nature:A scientific blueprint to tackle the climate,biodiversity and pollution emergencies[R].Nairobi.2021.<https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>.

[17] ANASTAS P T,ZIMMERMAN J B.Moving from protection to prosperity:Evolving the U.S.Environmental Protection Agency for the next 50 years[J].Environmental Science & Technology,2021,55(5):2779-2789.

[18] MICHELLE C.Net effects of multiple stressors in freshwater ecosystems:A meta-analysis[J].Global Change Biology,2016,22:180-189.

[19] BIRK S,CHAPMAN D,CARVALHO L,et al.Impacts of multiple stressors on freshwater biota across spatial scales and ecosystems[J].Nature Ecology & Evolution,2020,4(8):1060-1068.

[20] MESSENGER M L,LEHNER B,COCKBURN C,et al.Global prevalence of non-perennial rivers and streams[J].Nature,2021,594,391-397.

[21] ZHANG X W.Environmental DNA shaping a new era of ecotoxicological research[J].Environmental Science & Technology,2019,53(10):5605-5612.

[22] LI F L,ALTERMATT F,YANG J H,et al.Human activities' fingerprint on multitrophic biodiversity and ecosystem functions across a major river catchment in China[J].Global Change Biology,2020,26(12):6867-6879.

[23] KARR J R.Assessment of biotic integrity using fish communities[J].Fisheries.1981,6(6):21-27.

[24] VILE J S,HENNING B F.Development of indices of biotic integrity for high-gradient Wadeable rivers and headwater streams in New Jersey[J].Ecological indicators,2018,90:469-484.

[25] RUARO R,GUBIANIÉDER A,HUGHES R M,et al.Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition[J].Ecological Indicators,2020,110:105862.

[26] BARBOUR T M,GERRITSEN J,SNYDER D,et al.Rapid bioassessment protocols for use in Wadeable streams and rivers[M].Washington,DC 20460:United States Environmental Protection Agency,1999.

[27] FLOTEMERSCH E,STRIBLING B,PAUL J.Concepts and Approaches for the bioassessment of non-Wadeable streams and rivers[M].Washington,DC 20460:United States Environmental Protection Agency,2006.

[28] US Environmental Protection Agency.National rivers and streams assessment 2013–2014:a collaborative survey[R].Washington,DC:United States Environmental Protection Agency,2020.

[29] US Environmental Protection Agency.National lakes assessment 2012:a collaborative survey of lakes in the United States[R].Washington,DC:United States Environmental Protection Agency,2016.

[30] EU.Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy[S].2000.

[31] EU.Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy[S].2018.

[32] European Environment Agency.European waters:Assessment of status and pressures 2018[R].Denmark:Publications Office of the European Union,2018.

[33] 水利部.《河湖健康评价指南(试行)》(第 43 号).水利部,2020.

[34] 生态环境部.《河流水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》《湖库水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》环办标征函〔2020〕49 号.生态环境部,2020.

[35] 环境保护部.《流域生态健康评估技术指南(试行)》环办函〔2013〕320 号.环境保护部,2013.

[36] 水利部.《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793—2020).水利部,2020.

[37] 农业农村部.《长江水生生物完整性指数评价体系(征求意见稿)》农长渔发〔2021〕3 号.农业农村部,2021.

[38] 北京市市场监督管理局.《水生态健康评价技术规范》(DB11/T 1722-2020).北京市市场监督管理局,2020.

- [39] ZHANG Y,WANG X N,DING H Y,et al.Threshold responses in the taxonomic and functional structure of fish assemblages to land use and water quality:a case study from the Taizi River[J].Water 2019,9:661.
- [40] 罗丹,李星浩,余育和,等.长江中游干流浮游动物空间分布[J].水生生物学报,2019,43(S01):3-8.
- LUO D,LI X,YU Y,et al.Spatial distribution of zooplankton in the main stem of the middle Yangtze River[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2019,43(S01):3-8.
- [41] 和雅静,王洪铸,舒凤月,等.长江流域底栖动物资源的宏观格局[J].水生生物学报,2019,43(S01):9-17.
- HE Y,WANG H,SHU F,et al.Macro-Patterns of species diversity and standing crops of macrozoobenthos in the Yangtze River basin[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2019,43(S01):9-17.
- [42] 吴志刚,熊文,侯宏伟.长江流域水生植物多样性格局与保护[J].水生生物学报,2019,43(S01):27-41
- WU Z,XIONG W,HOU H.Biodiversity pattern and conservation of aquatic vascular plants in the Yangtze River basin,China[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2019,43(S01):27-41.
- [43] 杨荣金,孙美莹,傅伯杰,等.长江流域生态系统可持续管理策略[J].环境科学研究,2020,33(5):1091-1099.
- YANG R,SUN M,FU B,et al.Sustainable management strategy of ecosystems in the Yangtze River Basin[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(5):1091-1099.
- [44] 李翀,李玮,周睿萌,等.长江大保护战略下科技支撑长江生态环境治理的几点思考[J].环境工程技术学报,2022,12(2):356-360.
- LI C,LI W,ZHOU R,et al.Some thoughts on the scientific support to the eco-environmental management of the Yangtze River under Great Protection of the Yangtze River[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(2):356-360.