

## 我国流域水生态监测与评价体系研究进展及发展对策\*

金小伟<sup>1\*\*</sup>, 赵先富<sup>2</sup>, 渠晓东<sup>3</sup>, 许人骥<sup>1</sup>, 霍守亮<sup>4</sup>, 王业耀<sup>1</sup>, 魏复盛<sup>1</sup>, 吴丰昌<sup>4\*\*</sup>

(1: 中国环境监测总站, 北京 100012)

(2: 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079)

(3: 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

(4: 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)

**摘要:** 水生态监测与评价是水生态系统管理、保护和可持续利用的基础。20世纪80年代开始, 欧美发达国家水环境管理政策开始强调生态保护, 重视流域水生态质量, 先后开展了以水生生物为核心的河流生态监测与评价研究计划。然而我国目前流域水环境监测与评价的指标主要以传统的理化监测指标为主, 缺乏指示水生态变化的水生生物指标, 单一的水质改善无法反映水生态环境好转这一长远目标, 不能满足“十四五”水生态环境管理由水污染防治为主向水环境、水生态、水资源“三水”统筹转变的总体要求。本研究系统分析发达国家和地区(如美国、欧盟、澳大利亚等)水生态监测与评价技术体系与业务化运行方面的先进经验, 总结梳理我国水生态监测与评价试点已有的工作基础, 分析制约我国当前流域水生态监测与评价的关键问题, 从保护目标、管理模式、监测网络、科学研究和公众参与五个方面, 提出开展我国流域水生态监测与评价体系构建和业务化运行的有关建议, 为准确评估和预测流域水生态质量状况的变化、开展保护修复成效评估提供决策支持和重要参考。

**关键词:** 流域; 水生态完整性; 水生生物; 监测网络; 生态质量

## Research progress of aquatic ecological monitoring and assessment in watersheds and development recommendations in China \*

Jin Xiaowei<sup>1\*\*</sup>, Zhao Xianfu<sup>2</sup>, Qu Xiaodong<sup>3</sup>, Xu Renji<sup>1</sup>, Huo Shouliang<sup>4</sup>, Wang Yeyao<sup>1</sup>, Wei Fusheng<sup>1</sup> & Wu Fengchang<sup>4\*\*</sup>

(1: *China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China*)

(3: *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China*)

(4: *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China*)

**Abstract:** Aquatic ecological monitoring and assessment in freshwater ecosystems centers on the effective management, protection, and sustainable utilization of freshwater resources. In the past several decades, the management policies in developed countries such as the United States and those in Europe had emphasized the ecological integrity of freshwater ecosystems. Accordingly, a series of research plans and programs had been successively launched for systematically monitoring and evaluating status of freshwater ecosystems using biological communities as core indicators. However, the monitoring and assessment systems in China are mainly based on traditional physical and chemical indices, thus lacking biological indicators to illustrate changes in ecological quality of freshwa-

\* 2022-10-28 收稿; 2022-12-06 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2021YFC3200105)、中国工程院战略研究与咨询项目(2021-XBZD-5-3)和国家自然科学基金项目(41977364)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: jinxw@cnemc.cn; wufengchang@vip.skleg.cn。

ter ecosystems. Therefore, the progress of water quality improvement cannot meet the long-term goals and overall requirements of the “14th Five-Year Plan” for water environment management—a conceptual change from water pollution prevention and control to a unified framework of “water resource, water ecology, and water environment (i.e., three waters)”. In this review, we systematically discussed the experience of monitoring and assessment philosophy and operational techniques and applications of watershed management in developed countries/regions, such as the United States, Australia, and European Union. In addition, we further summarized the existing works of aquatic ecological monitoring and assessment in China, analyzed key issues that restrict the current water ecological monitoring and assessment progress, and finally proposed relevant suggestions for systematically developing aquatic ecological monitoring and assessment systems in China, including protection target, management mode, monitoring network, scientific research, public participation. It would provide decision support and crucial reference for accurately assessing quality of the nationwide freshwater ecosystems and further evaluating the effectiveness of protection and restoration in China.

**Keywords:** River basin; water ecological integrity; aquatic organism; monitoring network; ecological quality

人类已经进入全球加速变化的新纪元——人类纪 (Anthropocene)<sup>[1]</sup>, 毋庸置疑的是人类活动已经对地球生态系统产生了不可逆转的影响, 自 1500 年以来, 322 种陆生脊椎动物已经灭绝; 而余下物种的种群多度 (数量) 下降了 25%。无脊椎动物目前有监测数据的种群中, 67% 的种群多度下降了 45%。生物数量的减少将对生态系统的功能, 进而对人类福祉造成重要影响<sup>[2]</sup>。在人类活动引起的众多胁迫和影响中, 由于水生生物多样性损失最终导致水生态系统结构和能流的改变是一个广为关注的问题。尽管淡水只占地球表面的 1%, 但却包含了所有已知物种的 10%<sup>[3]</sup>, 淡水生物多样性的下降程度超过了世界上其他任何生态系统<sup>[4-5]</sup>。最近的报告表明, 在过去 30 年里, 全球所有脊椎动物物种的数量下降了 58%, 淡水、海洋和陆地脊椎动物的数量分别下降了 81%、36% 和 38%<sup>[6]</sup>。水资源开发与水环境污染是全球范围内水生生物多样性退化的主要原因。水资源开发中, 生境破碎化、水坝修建和消费性水损失是主导因素; 氮、磷等营养物质和有毒有害污染物是水环境污染导致生物多样性丧失的主要因素<sup>[7]</sup>。此外, 随着人口的增长, 人类活动与水生生态系统的距离也越来越近。目前, 超过 50% 的人口生活在淡水生态系统 3 km 范围以内<sup>[8]</sup>。因此, 研究者与生态环境管理部门将在有效且准确的评估和预测人类活动对水生态系统的潜在影响和风险方面, 面临空前的机遇和挑战<sup>[9-11]</sup>, 包括: (1) 水生生物种群、群落在流域尺度对污染物的响应关系; (2) 水生态系统中的生物多样性与生态系统功能之间的关系; (3) 水生态状况系统性评价体系的建立; (4) 人为环境压力对水生态系统的影响。

水生态监测与评价是水生态系统管理、保护和可持续开发利用的基础, 简而言之就是利用水生生物群落特征对地表水生态环境状态进行定性和定量评估, 判断水生态系统受干扰程度, 诊断水生态系统退化原因与关键因子, 其目的是为制定流域生态修复目标、评估生态修复效果、以及环境立法与执法提供数据支撑<sup>[12-13]</sup>。经过多年的发展, 水生态监测与评价主要经历了四个重要的发展阶段: (1) 20 世纪初 Kolkwit 等提出污水生物 (Saprobien) 系统, 通过推断水体溶氧状况将生物群落与有机污染水平直接联系起来<sup>[14]</sup>; (2) 20 世纪中叶开始流行的生物多样性指数, 假设物种的丰富性和均匀性随着环境干扰的增加而减少<sup>[15]</sup>; (3) 结合上述方法的生物指数 (如 Trent 指数、Chandler 计分系统和 IBI 指数等) 被开发与应用<sup>[16]</sup>; (4) 完整性指数法, 以表征生物群落组成、结构、功能和个体健康的多个参数来综合反映水生态健康程度<sup>[17]</sup>。所有这些方法都侧重于将生物群落属性与人类活动引起的流域水质污染和土地利用变化等联系起来, 并且以生物为核心要素, 反映流域水生态状况。而我国的水环境监测亟需实现从单一的化学指标监测转向综合的水生态系统监测<sup>[12]</sup>。

虽然目前我国引入了水生生物完整性与水生态完整性的概念, 学者开展了大量研究, 探索水生态监测与综合评价, 在基础理论和方法构建等方面积累了较好的基础<sup>[12, 18-20]</sup>, 但现有水生态监测与评价体系距离发达国家现有技术水平, 实现流域水生态环境科学管理仍有一定的距离<sup>[21]</sup>。因此, 本研究围绕国家生态环境保护与环境安全的重大需求, 针对我国当前流域监测网络整体仍不完善, 重点流域水生态环境本底不清, 水生态环境质量评估缺失等瓶颈问题, 在总结梳理我国水生态监测与评价试点工作的基础上, 充分借鉴欧美发达国家监测与评价实践经验, 深入剖析流域水生态监测与评价技术领域的发展态势, 思考水生态监测与评价技术未来的发展方向, 提出开展我国水生态监测与评价的有关建议, 为准确评估国家水生态质量状况

的变化、保护修复成效评估提供决策支持和重要参考。

## 1 国外典型水生态监测与评价体系

20世纪80年代开始,国外水资源政策开始强调生态保护,重视流域水生态质量,美国、欧盟、澳大利亚等发达国家先后开展了河流水生态监测与评价研究计划<sup>[22-25]</sup>。如美国环保局(EPA)在1990年启动环境监测与评价项目(environmental monitoring and assessment program, EMAP)<sup>[22]</sup>,欧盟成员国在2000年开始实施“水框架指令”(water framework directive, WFD)<sup>[26]</sup>。进入21世纪,韩国、巴西、墨西哥等一些发展中国家也开始强调和重视水生态监测和评价<sup>[27]</sup>,并逐渐形成国家监测网络,如韩国于2003—2006年启动完成了“国家水生态监测工程”(national aquatic ecological monitoring program, NAEMP),采用生物和生境指标来反映河流和流域水生态质量<sup>[28]</sup>。由于在流域水生态监测与评价方面开展工作较早,欧美发达国家积累了丰富的经验,建立了较为完备的监测评价体系。下面分别以美国、欧盟和澳大利亚为例来介绍国外典型水生态监测与评价体系。

### 1.1 美国

美国1972年颁布了《清洁水法》(Clear Water Act, CWA),法令明确规定了立法的目的是“恢复和维持美国水体的化学、物理和生物完整性”。第303条和304条要求各州将保护生物完整性作为水质标准的一部分,建立生物基准,并以此来评价水生生物群落的状态、确定水质目标并设置优先次序、评估防治和管理措施的有效性;第305(b)条规定各州环保部门负责每两年对本州河流、湖泊、海湾、湿地等水体进行水质和功能评价,并向国会提交本辖区水质状况报告<sup>[29]</sup>。

20世纪80年代末,美国环境保护署推出了系列针对河流生物完整性评价的技术手册,用于指导水生态监测工作<sup>[30-32]</sup>。其后,美国相继在国家层面开展了系列研究项目,如美国国家监测和评价项目(EMAP)<sup>[22]</sup>、美国国家水资源调查项目(national aquatic resource surveys, NARS)<sup>[33]</sup>和美国“国家水质评价计划”(national water quality assessment, NAWQA)等。NARS报告制度的初衷是为了回应社会对水质监测的关注、展现国家报告全国水环境状况的能力,因为对所有水域进行大规模普查需要消耗大量的人力和物力。而且,以前试图合并不同的非标准化的、各州的监测数据导致报告结果的不精确和不准确。NARS评价使用基于概率的调查设计、标准化的抽样方法和指标,在国家、区域和空间尺度上对水质进行估计,对河流、湖泊、沿海水域和湿地进行为期5年的轮换调查,从而保证了最终评价结果在全国层面的统一性和准确性。

根据NARS 2008—2012年评价结果显示,全美46%的河流和溪流按英里数统计处于较差的生物条件,磷和氮被评估为最普遍的化学胁迫因子<sup>[34]</sup>;21%的湖泊处于超营养状态(即达到了最高的营养盐浓度、藻类及水生植物生物量),磷和氮是湖泊中最普遍的胁迫因子<sup>[35]</sup>;32%湿地面积的生物条件为“差”,主要的胁迫因子包括硬化(土壤板结)和植被破坏<sup>[36]</sup>。根据评价结果,美国依托立法—出台基本导则—推行国家项目计划—完善技术体系的路线,逐步完善了从点位设置、数据分析到监测评价的完整技术体系,并积累了丰富的水生态基础数据,最终形成美国国家水生态监测与评价体系。

### 1.2 欧盟

欧盟于2000年颁布了《水框架指令》(WFD),其核心目标非常明确,即最终实现恢复水生生态系统的结构和功能,保障水资源的可持续利用;同时,法令清晰表明将生物要素的质量作为能否实现水生态质量总体目标的最关键内容<sup>[26]</sup>。WFD认为,某河段内的决策不能是孤立的,一个河流集水区上游采取的行动会影响到下游,因此必须编制流域管理规划(river basin management plan, RBMP)并设计监测评价体系来保障流域的整体健康。同时必须进行相应的行政授权,使流域主管机构可以跨越国家等行政边界进行流域管理。WFD强调了流域尺度的综合管理,是欧洲迄今为止实施的水生态环境方面最综合、要求最高的法律和规范,为各国具体行动和规划明确了截止时间。

欧盟在WFD指令颁布后陆续实施了多项合作项目,如AQEM项目(the development and testing of an integrated assessment system for the ecological quality of streams and rivers throughout europe using benthic macroinvertebrates. Acronym: AQEM)<sup>[37]</sup>和STAR项目(standardisation of river classifications)<sup>[38]</sup>。欧盟水框架提出了保护目标和技术参考,各成员国将依据原则框架根据各国国情选择合适的指标和实施办法。欧盟按照不同

的水体类型(河流、湖泊、过渡带水体、海岸带水体)开展监测,内容包括:生物指标、支撑生物指标的水文地貌指标和物理化学指标。流域管理以6年为一个周期,每隔6年评估一次。WFD主要采用参考条件方法,将结果表示为监测条件与参考条件的比率(ecological quality ratios, EQR)。

迄今为止欧盟成员国已开展两个周期(2012年和2018年)的水体生态状况评价。2012年结果显示,欧洲整体上有半以上的水体(55%)处于受损的状态,只有44%的河流、56%的湖泊、33%的过渡带水体、51%的海岸带水体的生态状况“良好”或者更高<sup>[39]</sup>。对比2018年和2012年两个评价期,欧洲的河湖水体生态状况未发生明显的变化,但也仅有40%维持在“良好”状况以上。2018年的评价结果表明,水文/地貌扰动(40%)、面源污染(38%)、大气沉降(38%)和点源污染(18%)是造成河流生态系统退化的主因;城市污水排放是造成点源污染的主因,农业是造成面源污染的主因;水文/地貌扰动中,河道、河床和岸线扰动以及闸坝修建,是影响河湖生态系统的主要因素<sup>[40]</sup>。

欧盟通过评估水生态系统退化的压力因素,从而制定解决的措施方案,使流域恢复到良好的状态。第二个评估期的结果显示一些措施立竿见影,另一些则会在长期内带来改善。WFD的实施,形成了覆盖欧洲29个国家的监测网络,包括300多个独立的生物评估系统<sup>[41-42]</sup>。这种方式难以得到统一的评价结果,需要各成员国之间采用相互校准的生物评价方法,以确保质量评价(如优秀、良好、中等、较差、极差)和目标上都具有可比性。这个复杂的过程集中在协调水生态质量类别边界,特别是管理上重要的“好一中”边界。相互校准的过程存在很大困难<sup>[43]</sup>,更大的挑战则是如何科学界定参考条件,但WFD提供了一个基于共同原则的框架供欧盟成员国协调努力,以改善对水量和水生态质量的保护,促进可持续用水,并帮助控制地表水的跨界水问题。

### 1.3 澳大利亚

在20世纪90年代初,大规模的环境污染事件以及将生物指标纳入国家政策和水质指南加速了澳大利亚水生生物监测评估的发展和实施<sup>[44-45]</sup>。澳大利亚先后开展了“国家河流健康计划”(national river health program, NRHP)和“可持续河流监管”(the sustainable rivers audit, SRA)等项目,用于监测和评价澳大利亚河流的生态状况,评价现行水管理政策及实践的有效性,并为管理决策提供更全面的生态学及水文学数据支撑<sup>[45]</sup>。NRHP涉及澳大利亚各个州和地区的主要环境机构以及大学和独立的研究者,并由联邦政府中央管理。该项目的目标是开发一个能在全国内进行河流健康评估的生物评估系统,其只进行了一次全国性的河流健康调查,包括了6000个点位<sup>[24]</sup>。

“澳大利亚河流评价计划”方法(Australian river assessment scheme, AUSRIVAS)是该项目计划开发的用于评价澳大利亚河流健康状况的主要工具<sup>[46]</sup>。自最初的评估以来,国家没有对河流生态状况协调评估进行更新,目前AUSRIVAS主要用于固定点位的评价和基于州或地区的评价。此外,澳大利亚自然资源和环境部还开发了溪流状态指数(index of stream condition, ISC),采用河流水文学、形态特征、河岸带状况、水质及水生生物5方面指标,试图了解河流健康状况,并评价长期河流管理和恢复中管理干预的有效性,其结果有助于确定河流恢复的目标,评估河流恢复的有效性,从而引导河流管理的可持续发展<sup>[47]</sup>。该方法强调对影响河流健康的主要环境特征进行长期评估,以每10~30 km长度为河段单位,每5年向政府和公众提交一次报告。需要指出的是方法中设定的参照系统是真实的原始自然状态河道,这种方法只有像澳大利亚这样开发较晚的国家或地区才有可能采用。NRHP现在已经终止,但澳大利亚有几个州(但并非所有州)在全州或区域尺度范围内(超过数千平方公里)维持水生生物评价计划。尽管如此,目前依然缺少大规模、长期项目和协调的、全国性的监测评价计划,以应对土地利用、水资源的变化以及气候变化引起的广泛的跨界影响<sup>[48]</sup>。

### 1.4 国外水生态监测与评价经验比较

借鉴欧美发达国家水生态监测与评价计划成功的经验,以及正在制定的国家尺度水生态监测评价计划,例如南非<sup>[49]</sup>、泰国<sup>[50]</sup>等,明确流域层面的设计与国家或跨国尺度的水生态监测评价方案应满足五个属性:国家和公众指令、可持续的管理策略、适合的目的、明确的目标、时效性和相关性(表1)<sup>[48]</sup>。

尽管大部分国家的水生态监测与评价计划都声称是全国范围的,但只有欧盟(跨国的)和美国的计划是真正大规模的、全国范围的,事实也表明这两个计划的可持续的管理能力最强。依托立法一出台基本导则一

表 1 成功的国家或多国尺度水生态监测与评价计划所具备的属性  
Tab.1 Attributes of successful national or multi-jurisdictional scale aquatic ecological monitoring and assessment programs

成功的属性	描述说明
1.国家或公众指令	必须服务于一个确定的目的,符合国家管理需求和政策框架,例如提供环境状况报告,评估法规的充分性及政策和管理行动的有效性等
2.可持续的管理策略	具备国家指令的计划必须要专门的规划资金、协调能力和相关的管理机构支持,这对于需要持续保障的长期监测项目尤其重要
3.适合的目的	必须为用户提供所需的信息,并符合更高层面的环境和资源管理政策框架,且计划的实施必须公开透明
4.明确的目标	进一步与第 1 项(例如提供环境状况报告或评估法规的充分性等)目的和需求达成协议,国家尺度的水生态监测评价项目如果与政策和投资相关,就需要与量化的国家尺度生态目标和管理需求联系起来
5.时效性和相关性	需要考虑所获取数据随时间变化的一致性以及科学技术发展之间的平衡

推行国家项目计划—完善技术体系的路线,最终形成国家水生态监测与评价体系。澳大利亚在早期的发展中,将资源管理权力交给各州,这减少了国家在资源管理中的作用,并倾向于对广泛问题采取零碎的管理办法,国家计划是建立在已有的各州计划的基础上的。制定可比的、大规模水生态监测与评价计划,最重要且最难的是空间上的覆盖度。尽管欧盟对生物评价方法的相互校准的过程存在很大困难、也非常耗时<sup>[43]</sup>,但WFD提供了一个基于共同原则的框架供欧盟成员国协调努力,从而在各成员国间形成一致的大规模评价报告。

同时,在欧盟、美国和最初在澳大利亚的国家水生态监测评价计划,都具有强有力的政治或政策指令,这是为了响应公众的关注和国家以及各州机构的要求而制定的。这些指令在欧盟和美国继续不断演变,而澳大利亚的国家计划是为了应对公众感知的环境危机而制定的,没有长期持续,只服务于州、地区和地方的需求。

目前,新的挑战也限制了水生态监测与评价结果的应用。当前可用的水生态监测与评价技术,研究人员无法轻易诊断水体损害的原因或在变化的背景下考虑受损的范围<sup>[51]</sup>。此外,对干预措施(如保护修复)快速生态响应的不切实际的期望,在较短的政治周期内是很大的挑战。实际水生态的生态响应可能很慢,必须在气候环境自然变化的背景下进行评估。大规模的评估需要进行大量的投入、组织协调和高的空间覆盖度,这些都需要时间和资源<sup>[52]</sup>。

## 2 我国流域水生态监测与评价实践

2015 年国务院发布的《水污染防治行动计划》明确提出“到 2030 年力争全国水环境质量总体改善,水生态系统功能初步恢复,到 21 世纪中叶,生态环境质量全面改善,生态系统实现良性循环”的目标。“十三五”期间水污染防治攻坚战取得积极成效,水环境质量持续改善(图 1),2020 年全国地表水水质断面 I~III 类比例达到了 83.4%<sup>[53]</sup>。然而目前流域水环境质量监测与评价的指标主要以传统的理化监测指标为主,缺乏指示水生态状况变化的水生生物、栖息地生境等指标,单一的水质改善已经无法满足水生态环境好转这一长远目标。受水资源开发、水域污染、过度捕捞、航道整治、岸坡硬化、挖砂采石等人类活动影响,水源涵养功能受

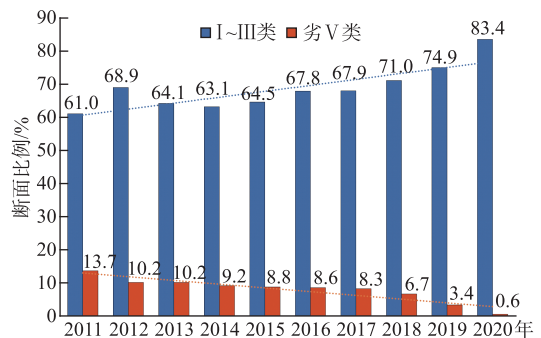


图 1 2011—2020 年全国地表水环境质量变化趋势  
Fig.1 Change trend of surface water environmental quality in China from 2011 to 2020

损、水生态系统失衡、生物多样性丧失等问题在各流域不同程度存在,已经成为建设美丽中国的突出短板。七大流域生物多样性持续下降,水生态系统结构和功能退化,水生生物生境状况不容乐观<sup>[54]</sup>。生态环境部“十四五”期间治水目标为“有河有水、有鱼有草、人水和谐”,标志着我国水生态环境管理由以水污染防治为主向水环境、水生态、水资源“三水”统筹转变<sup>[55]</sup>。这就要求进一步针对预期的水生态环境保护目标在现有水环境监测与评价基础上构建水生态监测与评价体系,加强对流域水生生物的保护,特别是珍稀、土著水生生物种的保护,维持和恢复水生态系统的完整性。

### 2.1 我国水生态监测与评价进展

我国水生态监测与评价大致可以划分为4个阶段:1)1980s中期—1990s初期为第一次快速发展期,以行政区域为单元的水生生物试点监测为主;2)1990s中期—1990s末期为停滞期;3)2000—2010年为恢复期;4)2010年至今为第二次快速发展期,以流域为单元的水生态监测与评价为主。我国水生生物监测发端于20世纪80年代,1986年颁布《环境监测技术规范(第四册)》,涉及生物监测(水环境)部分,当时有20个城市进行水生生物监测试点,随后多个城市的监测站涉足这一新的监测领域;1993年编写出版《水生生物监测手册》,并在这个时期初次建立起国家水生生物监测网,开始在全国范围开展水生生物监测与评价例行工作<sup>[12]</sup>。但由于管理和技术的原因,随着对生态监测和生物监测定位的调整,各级监测站逐渐放弃生物监测,仅有极少数监测站坚持发展这类监测能力,我国环境生物监测出现萎缩的局面。1998年随着国家“污染防治与生态保护并重”方针的确定,水生态监测开始受到各级环境管理部门及监测站的重视,特别是近年来随着环境管理要求的提高及监测技术的发展,水生态监测迎来了新的发展机遇。

党的十九届五中全会对标2035年建成美丽中国远景目标,要求提升生态系统质量和稳定性,加强大江大河和重要湖泊湿地生态保护治理,开展生态系统保护成效监测评估<sup>[56]</sup>。2020年生态环境部发布《生态环境监测规划纲要(2020—2035年)》中提出的“地表水监测要逐步实现水质监测向水生态监测的系统转变,建立以流域为单元的水生态监测指标体系和评价体系”<sup>[57]</sup>。为了加强流域生态环境保护和修复、实现人与自然和谐共生,全国人大于2020年12月26日和2022年10月30日先后通过了《中华人民共和国长江保护法》和《中华人民共和国黄河保护法》,明确提出建立长江、黄河流域水生生物完整性指数评价体系,组织开展长江、黄河流域水生生物完整性评价,并将结果作为评估长江、黄河流域生态系统总体状况的重要依据<sup>[58-59]</sup>。与此同时,水生态监测与评价技术也得到了迅速的发展。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)<sup>[60]</sup>,从水域生态健康评估的生境结构、水生生物和生态压力三类评估指标,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评估指标,共计6大类17项指标评估流域生态健康。2020年生态环境部发布了《河流生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿)》和《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),从水环境质量、物理生境、水生生物三方面评价水生态环境质量状况,规定了水生态环境质量评价的相关指数和计算方法及评价等级<sup>[61-62]</sup>。水利部于2010年部署开展河湖健康评估工作,2020年发布了《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793—2020),通过水文完整性、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<sup>[63]</sup>。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)<sup>[64]</sup>,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。近年来,随着国家水环境管理政策的转变,北京<sup>[65-66]</sup>、江苏<sup>[67-68]</sup>、辽宁<sup>[69]</sup>、山东<sup>[70]</sup>等地方也开展了水生态监测试点并发布了相关的技术规范,积累了一定的经验和数据,为下一步全国范围内开展水生态监测评价奠定了很好的基础。

为掌握我国重点流域水生态状况及变化趋势,2020年生态环境部印发了《2020年重点流域水生态状况调查监测方案》(环办监测函[2020]238号),首次在长江、黄河、淮河、海河、珠江、松花江和辽河流域等全国重点流域干流、主要支流和重点湖库开展水生态调查监测,调查指标包括水生生物、水质理化和物理生境,并通过三类指标综合权重的方法,构建流域水生态环境质量综合评价指数(WEQI)来表征流域水生态状况<sup>[12]</sup>。结果显示,七大流域水生态状况整体以“中等—良好”状态为主,507个可评价断面(516个点位)中优良状态点位占34.2%,中等状态点位占48.2%,13.4%的点位为较差及很差状态(图2)<sup>[53]</sup>。

随着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,强调水生态、水环境与水资源保护并重。我国流域水生态环境监测评价研究虽起步较晚,现有技术水平和科学管理距离发达国家仍有一定的距离。但经过近十年的积极探索,已具备了一定的水生态监测能力和技术储备,初步形成了具有我国流域特色的水生态监测与评价技术体系,积累了一定的水生态监测数据和宝贵经验,为新发展阶段下的山水林田湖草沙系统治理和长江大保护奠定了良好基础。

## 2.2 我国流域水生态监测与评价存在的问题

2.2.1 对流域水生态保护的認識亟需提高 目前,很多管理部门在水生态保护的認識上存在两个倾向:一是忽略了水生态系统变化的区域性、复杂性和长期性,认为水生态保护就是保护生物,大干快上,效果要“立竿见影”;生物不等同于生态系统,生态系统要发挥生态功能需要有良好的结构,即需具有较高的生物多样性,而不是强调单一物种的生物量,更不是强调景观;二是惯性思维应用在水生态保护中,对于生物生态指标采用固定的标准“一刀切”进行管理。这两种倾向都不利于水生态保护工作的良性发展。

2.2.2 流域水生态管理“九龙治水”,职责交叉,不能形成合力 在成立生态环境部,整合了水利、海洋等相关部门后,水环境管理得到了提升和加强,但水生态保护的相关管理职责依然分散在多个部门。以监测为例,农业渔业部门主要以水产生产和农用灌溉等水资源利用为目标监测水质变化,水利部门主要以生态流量等水资源保护为目标监测水文水质等指标,生态环境部门主要以水生态环境保护为目标监测物理化学、生物类指标,中国科学院以水生态研究为目标主要监测生物及水质情况。各部门机构设施重复建设,资源利用效率不高;监测与评价技术标准不统一,监测结果可比性较差;监测数据缺乏共享渠道。

2.2.3 流域水生态监测网络亟需完善,水生态监测评价能力有待加强 水生态监测评价能力发展不平衡,东西部差异大,东南沿海地区和东北等相对有技术积累的地区能力较强,中西部能力普遍较弱,能力建设尤其是软件能力建设方面差距明显。水生态监测点位覆盖面较窄,缺乏流域尺度上的系统规划和整体布局;相关的监测与评价技术体系没有搭建完成,技术方法规范性有待提升,水生态监测评价工作基础十分薄弱,基础研究、数据积累远远不够,各级监测能力建设亟待加强。

2.2.4 流域水生态系统退化成因复杂,影响机制急需深入研究 水生态系统退化受多种因素共同影响,过程复杂,环境因素不一定是群落结构变化的唯一驱动因素,确定环境退化的原因具有挑战性。揭示其退化机制和调控途径是当前前沿的科学问题和管理的迫切需求。如何解析其耦合机制、甄别自然变化和人类活动对水生态系统退化的贡献仍是重大挑战。

2.2.5 现有的评价体系不足以评估新的环境威胁 如气候变化、微塑料和抗生素等新的环境污染物等,可能不能用传统方法来评估。除生物类群的相对丰度外,生态系统指标可能会对重大环境变化产生更清晰的认识。因此,亟需确定如何评估这些新出现的压力源的影响。此外,传统方法多关注生态系统结构性指标如生物多样性等,而忽视生态系统功能性指标。

## 3 我国流域水生态监测与评价相关的建议与对策

### 3.1 保护目标

制定国家宏观层面的水生态保护管理目标,并制定相应的法规制度标准。推动水生态监测与评价的一个因素是管理手段和政策存在明确和可衡量的保护目标。参考发达国家提出“SMART”(即具体的(specific)、可度量的(measurable)、可实现的(achievable)、相关的(relevant)和有时限的(timed))保护思路目标以

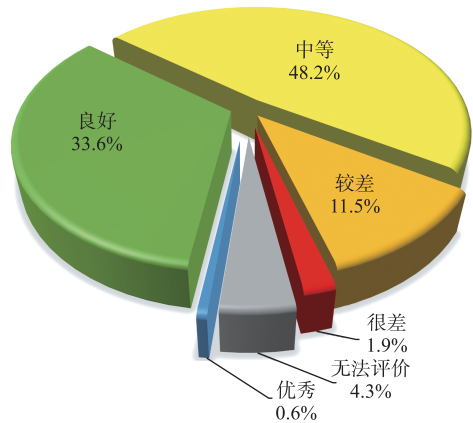


图2 2020年全国重点流域水生态整体状况

Fig.2 Water ecology status in seven major river basins of China in 2020

及分阶段的实施方案,建立与之相适应法律法规、标准规范制度、经费保障等体系,保障其顺利实施<sup>[48,71]</sup>。同时也需要考虑应对环境条件的广泛、长期的变化,尤其是气候条件变化引起基线条件的变化,这意味着依赖参考条件的水生态评估方法需要考虑到因气候变化而导致的参考条件本身的变化,实时动态的调整基线状态<sup>[72]</sup>。

### 3.2 管理模式

加强顶层设计,打破条块分割的管理模式,结合“自上而下”国家主导和“自下而上”地方驱动方式,由各地方政府制定具体的推进实施与协调计划,在国家统一的水生态管理目标和策略下,努力提升地方水生态保护积极性和能动性。利用公众对良好环境管理的关注,建立可持续的国家水生态监测评估体系。这需要来自关注河流健康的、分散的、知情的不同利益攸关方的“自下而上”压力,要求采取一种全国性的办法。通过社交媒体和互联网参考 eWater community ([www.ewater.com.au/community](http://www.ewater.com.au/community)) 的做法,将更广泛的社会关切与国家声音相连接,以此来推动一项更持久的任务,而不是针对爆发的环境危机而采取反应<sup>[48]</sup>。

### 3.3 监测网络

整合生态环境、水利、国土资源、农业、中科院等各级水生态监测网络,数据公开、共享,形成健全统一的水生态监测技术体系和质控体系,实现数据可比,全国一盘棋。坚持“一河一策”、“一湖一策”的原则,着力以建立在科学基础之上的最有效的指标反映水生态状况的变化,建立具有流域特色的监测、评价指标和评价标准。统筹国家和地方层面监测点位设置,国家层面以厘清流域总体水生态系统状况为目标,重点关注社会影响力大、水生态功能价值高的水体;地方层面在国家水生态监测点位基础上,还需要说清水生态问题、阐明水生态现状及其变化成因。建立“国家一流域一分区一省份”四级水生态监测实验室网络,建设全国水生态环境监测技术平台,促进水生态监测技术能力的整体提升。

### 3.4 科学研究

推动国家设立水生态环境监测与评价相关研究项目,加快基础研究成果在水生态监测与评价领域的应用。发展以流域为基础的多尺度水生态系统完整性评估理论,逐步开展综合考虑自然地理地貌、人类活动干扰梯度以及环境管理需求等因素分类、分区、分级的水生态监测与评估,丰富水生态系统演变及稳定维持的科学认知。同时,创新水生态系统退化诊断新技术体系,揭示流域水生态系统退化成因及复交互作用;提出水生态系统保护修复策略,推进河湖生态系统功能恢复。依托学科交叉融合,加强新技术方法的适用性及标准化研究,如自动化、高通量的新方法,以应对当前生物评估多要素、流域大尺度的挑战。高通量分子方法和下一代测序(NGS)技术可以潜在地提高样品分选和鉴定的准确性和速度并降低成本,从而保证有机会开展更有效率、更大规模的生物多样性监测与评估<sup>[73]</sup>。但需要对这些新方法和新兴技术与现有的水生态监测与评价体系框架的衔接和适用性进行验证<sup>[74]</sup>。

### 3.5 公众参与

建立水生态监测与评价信息社会共享平台,健全司法保障和媒体渠道,保证相关数据信息的公开化,透明化,广泛听取公众意见,推动水生态监测与评价的科学普及工作,开展宣传教育、咨询服务和法律援助等活动激励公众与社会机构参与监督。多渠道推广和普及水生态安全理念和实践,让水生态安全深入人心。完善社会参与机制,倡导公民科学行动,通过设立“公民科学研究”、“志愿者调查”等项目,鼓励公众和社会组织参与到水生态监测与评价工作中,促进基础数据积累,推动公民科学素养的提升。

## 4 参考文献

- [1] Steffen W, Persson A, Deutsch L *et al.* The anthropocene: from global change to planetary stewardship. *Ambio*, 2011, **40**(7): 739-761. DOI: 10.1007/s13280-011-0185-x.
- [2] Dirzo R, Young HS, Galetti M *et al.* Defaunation in the anthropocene. *Science*, 2014, **345** (6195): 401-406. DOI: 10.1126/science.1251817.
- [3] Strayer DL, Dudgeon D. Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges. *J North Am Benthol Soc*, 2010, **29** (1): 344-358. DOI: 10.1899/08-171.
- [4] Tickner D, Opperman JJ, Abell R *et al.* Bending the curve of global freshwater biodiversity loss: An emergency recovery plan. *BioScience*, 2020, **70**(4): 330-342. DOI: 10.1093/biosci/biaa002.



- [ 5 ] Sala OE, Stuart CF, Armesto JJ *et al.* Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, **287**(5459): 1770-1774. DOI: 10.1126/science.287.5459.1770.
- [ 6 ] McRae L, Deinet S, Freeman R. The diversity-weighted living planet index: Controlling for taxonomic bias in a global biodiversity indicator. *PLoS One*, 2017, **12**(1): e0169156. DOI: 10.1371/journal.pone.0169156.
- [ 7 ] Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, **467**(7315): 555-561. DOI: 10.1038/nature09440.
- [ 8 ] Kummu M, De Moel H, Porkka M *et al.* Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. *Science of the Total Environment*, 2012, **438**: 477-489. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.092.
- [ 9 ] BussDF, Carlisle DM, Chon TS *et al.* Stream biomonitoring using macroinvertebrates around the globe: a comparison of large-scale programs. *Environ Monit Assess*, 2015, **187**(1): 1-21. DOI: 10.1007/s10661-014-4132-8.
- [ 10 ] RuaroR, Gubianib EA, Hughes RM *et al.* Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition. *Ecological Indicators*, 2020, **110**: 105862. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105862.
- [ 11 ] Maasri A, Jähnig SC, Adamescu MC *et al.* A global agenda for advancing freshwater biodiversity research. *Ecology Letters*, 2022, **25**(2): 255-263. DOI: 10.1111/ele.13931.
- [ 12 ] Jin XW, Wang YY, Wang BX *et al.* Methods development for monitoring and assessment of ecological integrity of surface waters in China. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(1): 75-81. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2017.01.12.[金小伟, 王业耀, 王备新等. 我国流域水生态完整性评价方法构建. 中国环境监测, 2017, **33**(1): 75-81.]
- [ 13 ] Feio MJ, Hughes RM, Callisto M *et al.* The biological assessment and rehabilitation of the world's rivers: An overview. *Water*, 2021, **13**(3): 371. DOI: 10.3390/w13030371.
- [ 14 ] Flössner D. Richard Kolkwitz (1873-1956) and the saprobial system. De Gruyter, 1988: 1-2. DOI: 10.1515/9783112527047-001.
- [ 15 ] McNaughton SJ. Diversity and stability. *Nature*, 1988, **333**(6170): 204-205. DOI: 10.1038/333204a0.
- [ 16 ] Maloney EM. How do we take the pulse of an aquatic ecosystem? Current and historical approaches to measuring ecosystem integrity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, **38**(2): 289-301. DOI: 10.1002/etc.4308.
- [ 17 ] Gray C, Bista I, Creer S *et al.* Freshwater conservation and biomonitoring of structure and function: genes to ecosystems. *Aquatic Functional Biodiversity*. Elsevier, 2015: 241-271.
- [ 18 ] Chen K, Chen QW, Yu HY *et al.* Methods and prospects of index of biological integrity used for China River ecological health assessment. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1589-1600. [陈凯, 陈求稳, 于海燕等. 应用生物完整性指数评价我国河流的生态健康. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1589-1600.]
- [ 19 ] Tang T, Cai QH, Liu JK. River ecosystem health and its assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(9): 1191-1194. [唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价. 应用生态学报, 2002, **13**(9): 1191-1194.]
- [ 20 ] Wang BX, Yang LF, Hu BJ *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6):1481-1490. [王备新, 杨莲芳, 胡本进等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. 生态学报, 2005, **25**(6):1481-1490.]
- [ 21 ] Yin K, Wang YY, Xu RJ *et al.* Constitution and development of national river basin water environmental biomonitoring system. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(5): 114-120. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2014.05.025. [阴琨, 王业耀, 许人骥等. 中国流域水环境生物监测体系构成和发展. 中国环境监测, 2014, **30**(5): 114-120.]
- [ 22 ] Larsen DP, Stevens DL, Selle AR *et al.* Environmental monitoring and assessment program, EMAP-surface waters: A northeast lakes pilot. *Lake and Reservoir Management*, 1991, **7**(1): 1-11. DOI: 10.1080/07438149109354249.
- [ 23 ] Roux DJ. Strategies used to guide the design and implementation of a national river monitoring programme in South Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, **69**(2): 131-158. DOI: 10.1023/a: 1010793505708.
- [ 24 ] Davies PE. Development of a national river bioassessment system (AUSRIVAS) in Australia: proceedings of the Assessing the biological quality of fresh waters: RIVPACS and other techniques. UK: Freshwater Biological Association (FBA), 2000, 113-124.
- [ 25 ] Kallis G, Butler D. The EU water framework directive: measures and implications. *Water Policy*, 2001, **3**(2): 125-142. DOI: 10.1016/S1366-7017(01)00007-1.
- [ 26 ] European Commission. Water framework directive: directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the community action in the field of water policy. European Commission, 2000.
- [ 27 ] Eriksen TE, Brittain JE, Sli G *et al.* A global perspective on the application of riverine macroinvertebrates as biological indicators in Africa, South-Central America, Mexico and Southern Asia. *Ecological Indicators*, 2021, **126**: 107609. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107609.
- [ 28 ] Lee SW, Hwang SJ, Lee JK *et al.* Overview and application of the national aquatic ecological monitoring program (NAEMP) in Korea. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2011, **47**: 40-49. DOI: 10.1051/limn/2011016.
- [ 29 ] Fellows, Elizabeth, Jeste. Clean water act. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1993, **35**(5): 2-2.
- [ 30 ] Barbour MT, Faulkner C, Usepa B. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: Benthic macroinvertebrates and fish.

- Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1989.
- [31] Flotemersch JE, Stribling JB, Paul MJ. Concepts and approaches for the bioassessment of Non-Wadeable Streams and Rivers. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2006.
- [32] Gibson GR, Barbour MT, Stribling JB *et al.* Biological criteria: Technical guidance for streams and small rivers. Revised edition. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1996.
- [33] National aquatic resource surveys; a progress report. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, 2008.
- [34] Flotemersch JE. U.S. EPA's national aquatic resource surveys & draft national rivers and streams assessment 2008–2009: A collaborative survey. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2013.
- [35] Pollard A. National lakes assessment 2012: A collaborative survey of lakes in the United States. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2016.
- [36] Scozzafava M, Kentula ME, Riley EL *et al.* The national wetland condition assessment: National data on wetland quality to inform and improve wetlands protection, 2011.
- [37] Hering D, Moog O, Sandin L *et al.* Overview and application of the AQEM assessment system. *Hydrobiologia*, 2004, **516**(1/2/3): 1-20. DOI: 10.1023/b: hydr.0000025255.70009.a5.
- [38] Szoszkiewicz K, Zbierska J, Staniszewski R *et al.* Standardisation of river classifications: Framework method for calibrating different biological survey results against ecological quality classifications to be developed for the Water Framework Directive. European Environment Agency, 2005.
- [39] Tsakiris G. The status of the European waters in 2015: A review. *Environmental Processes*, 2015, **2**(3): 543-557. DOI: 10.1007/s40710-015-0079-1.
- [40] Kristensen P, Whalley C, Zal F *et al.* European waters assessment of status and pressures 2018. European Environment Agency, 2018.
- [41] Poikane S, Birk S, Böhmer J *et al.* A hitchhiker's guide to European Lake ecological assessment and intercalibration. *Ecological Indicators*, 2015, **52**: 533-544. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.01.005.
- [42] Birk S, Bonne W, Borja A *et al.* Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 31-41. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.10.009.
- [43] Poikane S, Zampoukas N, Borja A *et al.* Intercalibration of aquatic ecological assessment methods in the European Union: Lessons learned and way forward. *Environmental Science & Policy*, 2014, **44**: 237-246. DOI: 10.1016/j.envsci.2014.08.006.
- [44] Donnelly TH, Grace MR, Hart BT. Algal blooms in the Darling-Barwon River, Australia. *Water Air Soil Pollution*, 1997, **99**: 487-496. DOI: 10.1007/BF02406888.
- [45] Anzecc. National water quality management strategy. Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters. Canberra: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 1992.
- [46] Davies PE. River bioassessment manual version 1.0, National River Processes and Management Program, Monitoring River Health Initiative. Canberra, Australia: Australia Environment Protection Agency, 1994.
- [47] Ladson AR, White LJ, Doolan JA *et al.* Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(2): 453-468. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1999.00442.x.
- [48] Nichols SJ, Barmuta LA, Chessman BC *et al.* The imperative need for nationally coordinated bioassessment of rivers and streams. *Marine and Freshwater Research*, 2017, **68**(4): 599. DOI: 10.1071/mf15329.
- [49] Dickens CW, Graham PM. The South African scoring system (SASS) version 5 rapid bioassessment method for rivers. *African Journal of Aquatic Science*, 2002, **27**(1): 1-10. DOI: 10.2989/16085914.2002.9626569.
- [50] Boonsoong B, Sangpradub N, Barbour MT. Development of rapid bioassessment approaches using benthic macroinvertebrates for Thai streams. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **155**(1/2/3/4): 129-147. DOI: 10.1007/s10661-008-0423-2.
- [51] Nichols SJ, Dyer FJ. Contribution of national bioassessment approaches for assessing ecological water security: An AUSRIVAS case study. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, **7**(5): 669-687. DOI: 10.1007/s11783-013-0556-6.
- [52] Tullios DD, Penrose DL, Jennings GD *et al.* Analysis of functional traits in reconfigured channels: Implications for the bioassessment and disturbance of river restoration. *J North Am Benth Soc*, 2009, **28**(1): 80-92. DOI: 10.1899/07-122.1.
- [53] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报, 2021.
- [54] Xu M, Qin SX, Ma LK *et al.* Review and prospect of water ecology and environment protection: From pollution prevention and control to overall planning about water environment improvement, water resource security and water ecology protection. *Chin J Environ Manag*, 2021, **13**(5): 69-78. [徐敏, 秦顺兴, 马乐宽等. 水生态环境保护回顾与展望: 从污染防治到三水统筹. 中国环境管理, 2021, **13**(5): 69-78.]
- [55] 生态环境部. 注重生态保护修复 打造有鱼有草, 人鱼和谐的美丽河湖. 中国食品, 2020, (4): 52-53.
- [56] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议, 2020.

- [57] 生态环境部. 生态环境监测规划纲要(2020—2035年), 2020.
- [58] 全国人民代表大会. 中华人民共和国长江保护法, 2020.
- [59] 全国人民代表大会. 中华人民共和国黄河保护法, 2020.
- [60] 原环境保护部. 流域生态健康评估技术指南(试行), 2013.
- [61] 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), 2020.
- [62] 生态环境部. 湖库水生态环境质量监测与评价技术指南(征求意见稿), 2020.
- [63] 水利部. 河湖健康评估技术导则(SL/T 793—2020), 2020.
- [64] 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), 2021.
- [65] 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), 2020.
- [66] 北京市市场监督管理局. 水生生物调查技术规范(DB11/T 1721—2020), 2020.
- [67] 江苏省市场监督管理局. 生态河湖状况评价规范(DB32/T 3674—2019), 2019.
- [68] 苏州市市场监督管理局. 河湖健康评价规范(DB3205/T 1016—2021), 2021.
- [69] 辽宁省质量技术监督局. 辽宁省河湖(库)健康评价导则(DB21/T 2724—2017), 2017.
- [70] 山东省质量技术监督局. 山东省生态河道评价标准(DB37/T 3081—2017), 2017.
- [71] Authority MDB. Basin-wide environmental watering strategy 2014. Australia; Murray-darling Basin Authority, 2014.
- [72] Reynoldson TB, Wright JF. The reference condition; Problems and solutions. In: Assessing the biological quality of freshwaters RIVPACS and other techniques. Ambleside, UK; Freshwater Biological Association, 2000.
- [73] Baird DJ, Hajibabaei M. Biomonitoring 2.0: A new paradigm in ecosystem assessment made possible by next-generation DNA sequencing. *Molecular Ecology*, 2012, **21**(8): 2039-2044. DOI: 10.1111/j.1365-294x.2012.05519.x.
- [74] Dafforn KA, Johnston EL, Ferguson A *et al.* Big data opportunities and challenges for assessing multiple stressors across scales in aquatic ecosystems. *Marine and Freshwater Research*, 2016, **67**(4): 393. DOI: 10.1071/mf15108.