

水生态评价方法研究进展及展望^{*}

易雨君^{1,2,3**}, 叶敬盱³, 丁航³, 银森录³

(1: 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

(2: 北京师范大学水沙教育部重点实验室, 北京 100875)

(3: 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 水生生态系统是人类赖以生存的基础, 近年来气候变化和水资源开发、水体污染、过度捕捞等人类活动导致水生生态系统严重受损, 水生生态系统的保护和修复已成为全球面临的重大挑战。科学合理的水生态评价方法是实现水生生态系统稳定、健康和可持续管理的基本保障, 也是目前我国各相关管理部门高度重视的关键问题, 多个部门围绕水生态评价展开了积极探索与实践。本文系统回顾了水生态评价方法的发展历程并阐释了水生态评价的内涵, 梳理了常用的水生态评价方法, 明晰了各方法的基本理念和应用场景, 分析了各方法的优点和不足, 提出了基于生态完整性的水生态健康评价方法, 最后对目前我国水生态评价需进一步完善的工作进行了展望。本文以期与相关领域研究者和管理者在水生态评价理论和方法方面进行探讨, 为我国水生态考核工作提供理论支持。

关键词: 水生态评价; 生态完整性; 生态健康

Research progress and prospect in China of aquatic ecosystem assessment methods^{*}

Yi Yujun^{1,2,3**}, Ye Jingxu³, Ding Hang³ & Yin Senlu³

(1: *State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

(2: *Ministry of Education Key Laboratory of Water and Sediment Science, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

(3: *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

Abstract: Aquatic ecosystems are the basis for human survival. Due to climate change and human activities such as water resource exploitation, water pollution, overfishing and etc., aquatic ecosystems have been seriously damaged in recent years and the conservation and restoration of aquatic ecosystems have become a major challenge to the world. Scientific and reasonable assessments are the basic guarantee to achieve stable, healthy and sustainable management of aquatic ecosystems. Relevant management departments attach great importance to aquatic ecosystem assessments and have launched active exploration and practice. In this context, the development of aquatic ecosystem assessment and its definition and implications were thoroughly examined. The basic concepts and applications of the most widely used aquatic ecosystem assessment methods were sorted out and analyzed by the advantages and disadvantages. With a comprehensive understanding of aquatic ecosystem assessment methods, an aquatic ecosystem health assessment based on ecological integrity in basin management was proposed. Finally, the trends of aquatic ecosystem assessment are discussed. By discussing the theories, methods and trends of aquatic ecosystem assessment with researchers and managers in related fields, this paper aims to provide theoretical support for aquatic ecosystem assessment and management in China.

Keywords: Aquatic ecosystem assessment; ecological integrity; ecological health

水生生态系统是人类社会和经济发展的基础, 发挥着灌溉、供水、航运、净化、调节和生物栖息地等重要作

^{*} 2023-06-29 收稿; 2024-02-06 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2022YFC3202000)和国家杰出青年科学基金项目(52025092)联合资助。

^{**} 通信作者; E-mail: yiyujun@bnu.edu.cn。

用,全球淡水生态系统潜在服务价值使用率高达 5.6 万亿美元^[1]。气候变化和高强度人类活动改变了水生生态系统原有的水文情势和理化性质,导致景观破碎化、环境污染和生物多样性丧失^[2-4],水生生态系统面临严重的生态危机。据世界自然基金会(WWF)统计,自 1970 年以来,全球淡水生态系统已损失近 30%,超过 1/4 的淡水物种正濒临灭绝^[5],90% 发挥城市供水功能的水生态系统因人类活动而恶化^[6],未来水生生态系统功能退化的问题有持续加重的风险^[7]。因此,如何科学地评价水生生态系统以指导水生生态管理和修复成为全球性的重要课题。

水生生态评价是对水生生态系统进行全面、系统、科学的研究和评估,旨在了解和分析人类活动对水生生态系统造成的影响,为水资源的合理利用和生态保护与修复提供科学依据^[8-10]。自上世纪中以来,水生生态评价从最初的物理、化学评价,发展到单一物种评价,再拓展到某一类群的评价,最后到整个生态系统的综合评价,其理论体系和方法逐渐完善和发展^[11-12]。近年来,综合物理、化学、生物的多维度水生生态评价指标体系日趋成熟并应用广泛,在一些发达国家已经形成了全国性或区域性的常规化水生生态评估项目,评价结果以报告形式公布^[13-15],用以指导和规划水生生态管理与修复。

随着我国对水生生态问题的认识不断深化和对水生生态环境质量的要求日益提高,对水生生态评价的重视程度也持续提升,学者们围绕水生生态评价开展了大量研究^[16-17]。然而,水生生态评价多学科、多部门交叉融合的特性使其仍处于不断探索的过程中,完善水生生态监测评价被列为“十四五”生态环境监测规划中一项重点工作。本文系统梳理了水生生态评价的发展历程并阐释了其内涵,介绍了常用的水生生态评价方法,进一步提出了基于生态完整性的水生健康评价方法,最后针对未来我国水生生态评价的发展方向提出展望,以期为推进水生生态考核和生态协同治理提供有益的支持。

1 水生生态评价方法发展历程与内涵

20 世纪中叶起,工农业等人类活动加剧排放污染物,进而引发自然水体水质恶化、水生生物生境破坏和生物多样性丧失的问题,由此产生了基于水体理化指标的评价方法来指导水污染治理^[18]。随着社会的发展,研究和管理水平逐渐提高,对如何评估水生生态系统状况有了更高要求,一系列面向水生生物和水生态系统的水生生态评价方法涌现。

早期水生生态评价方法一般选择易观测、易捕获、对环境敏感性较高的优势种、特有种或濒危种作为关键指示种^[19],后续学者们通过对不同生物类群的耐受性、功能性和多样性影响的量化研究,提出了如 Shannon-Wiener 多样性指数、科级生物指数(family biotic index, FBI)、生物监测工作组(biological monitoring working party, BMWP)指数等一系列生物指数(biotic index)^[20],并证实能有效表征生态系统受外部干扰的强度^[21],使这些指数成为水生生态评价的常用手段。

1970s 提出的基于生态位理论的群落构建规则使水生生态评价步入着眼于水生生物群落及其影响因素的新阶段^[22-23]。这一规则认为群落组成是由环境因素和生物间相互作用主导的,水生生物群落受到包括持久污染物、外来物种入侵等多方面压力的影响^[24],综合考虑水生生态系统中群落水平的生物—环境响应关系复杂性的水生生物多参数(multimetric)或多变量(multivariate)的水生生物群落水平的评价方法在美国、英国、澳大利亚和南非等国家得到推广^[25],其中最具代表性的有 1981 年 Karr 提出的生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)^[26]和 1984 年 Wright 等提出的河流无脊椎动物预测与分类系统(river invertebrate prediction and classification system, RIVPACS)^[27]。

与此同时,水生生态系统保护经历了由最初对关键物种的保护,到生物多样性的保护,再到将实现水生生态系统质量全面提升作为水生生态保护目标的发展过程。评价方法方面,在 IBI 等生物多参数评价方法的基础上,1990s 发展了综合物理、化学、生物等多个生态学参数的综合评价指数方法(multimetric index, MMI)。MMI 基本思路在于综合考虑水生生态系统整体状况,通过监测水生生态系统中不同水生生态指标(包括生物指标和非生物指标),基于评价目标给多个指标赋分,并按其对生态系统的影响及重要性赋予权重,最终由数学方法形成综合评价指数,对生态系统进行全面评估^[28]。MMI 适用于特定水体、全流域、国家尺度等不同尺度的河流、湖泊、库区等多种类型水体^[29-30],是水生生态评价的重要发展趋势^[31-32]。澳大利亚溪流状态指数(index of stream condition, ISC)和欧盟《水框架指令》^[34](water framework directive, WFD)等均采用了这种多

参数多要素的评价方法。MMI 构建的首要前提是明确评价目标,使用较为普遍的有生态系统服务(ecological service)、生态健康(ecological health)、生态完整性(ecological integrity)等。生态系统服务关注生态系统能为人类社会提供的服务,倾向于寻求人类社会发展和生态系统保护之间的耦合协调,但对人类福祉以外的生态系统功能关注不足;生态健康是从有机体衍生到生态系统的形象表述,为研究者、管理者和公众提供了沟通的平台和易于理解的共同目标^[35],但“健康”概念本身的模糊性和不确定性导致生态健康的定义尚不明确,难以界定和量化;生态完整性强调生态系统的结构、功能和生态过程完整,为水生态评价提供了更为具体和更易于量化的标准,但让大众理解和接受“生态完整性”的概念还需要过程。

总的来说,水生态评价是以生态保护目标为导向,基于选定的指标评价水生态系统的状态,判断水生态系统受损的程度,其目的是为生态修复措施效果评估和相关政策法规制定提供依据^[36-37]。随着我国进入流域高质量发展新阶段,流域管理工作在水资源高效利用、水污染防治的基础上,向统筹水环境、水生态、水资源治理转变,如何在原有研究基础上运用新思路发展和完善水生态评价以适应水生态保护新目标,协助解决水资源开发利用和水生态环境保护不平衡、不协调的问题,成为当下亟待完成的关键任务。

2 主要水生态评价方法

水生态评价方法经历了从定性到半定量或定量、从单要素到多要素、从单指标到多指标的发展历程。根据评价目标对象范围,可将水生态评价方法分为基于关键指示种的评价方法、基于类群的评价方法和基于水生态系统的评价方法。

2.1 基于关键指示种的评价方法

水生生物是水生态系统的重要组成部分,且水生生物的保护是水生态管理持续关注的热点,因此水生生物长期被选作水生态评价的核心要素,其中又有部分物种对维持生物群落构成和发挥水生态系统功能起关键作用^[38],同时对环境压力具有良好的指示作用^[39],这些物种常被选作关键指示种。关键指示种可能是对环境敏感的特有物种或濒危物种,如江豚等;或是具有重要经济价值的物种,如“四大家鱼”等;也可能是种群变化易于观测的优势种,如底栖动物中的水生昆虫等对水质要求较高的种类。通过评估一个或多个关键指示种的种群数量、物种分布、种群年龄结构、生物体型分布和个体健康状态等,可以为水生态评价提供重要参考^[40-42]。

基于关键指示种的评价方法结果直观,易于解读,为生物资源保护和生态修复提供科学的指导意见。但评价结果极度依赖关键指示种的选取,同一区域可能因选取的物种不同而出现截然相反的结果。

2.2 基于类群的评价方法

水生生物数量庞大,种类繁多,构成了关系错综复杂的网络,关键物种的相关指标仅是对其局部的描述。当水生态系统受损时,一般会在水生生物类群的整体结构和功能上有所体现,基于类群的水生态评价因更具敏感性和综合性而广受推崇,典型方法有生物指数、生物完整性指数和 O/E 指数。

2.2.1 生物指数(BI) 生物指数通过描述生物群落结构或功能组织以指示水生态系统状况^[43]。20 世纪以来,多个描述水生生物群落结构的生物指数,包括 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数等,以及 FBI 指数、BMWP 指数、富营养化硅藻指数(trophic diatom index,TDI)等量化水生生物功能属性的生物指数被广泛应用于水生态评价^[44]。其中,Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数应用最广。具体到类群而言,大型底栖无脊椎动物和鱼类由于其对水生态系统状况具有很好的指示作用,且易于采样,是水生态评价常用的生物类群。近年来,DNA 条形码和宏条形码技术的进步开拓了基于 eDNA 的生物指数新领域,如 Apothélos-Perret-Gentil 等^[45]在 2017 年提出了免分类学分子硅藻指数,根据高通量测序结果直接计算硅藻指数,不需要参考形态分类学相关知识,有助于进行快速、高效的生物评估。

生物指数生态意义明确,计算简单,方便快捷,得到了广泛应用,具有重要的参考价值^[46]。但由于其仅考虑某一生物类群的单一指标,过度简化了生态系统的多元性,忽视了生物—环境响应机制的复杂性^[47],因而往往结合其他评价方法使用。

2.2.2 生物完整性指数(IBM) 生物完整性指支撑和保持一个平衡的、完整的、适应性的生物群落的能力且该群落具有与该区域自然栖息地相当的种类组成、多样性和功能组织^[48]。IBM 选用了多种指示生物相关指标

以表征与区域环境相适应的、经长时间演化形成的生物群落组成、结构和功能方面的属性,是多指标综合的结果,可以识别来源多样的复杂影响。Karr 在 1981 年通过构建鱼类完整性指数评价水生生态系统^[26],得到高度认可,后续又衍生了大型底栖无脊椎动物完整性指数^[49]、浮游植物完整性指数^[50]、浮游动物完整性指数^[51]等。

IBI 为水生生态系统的水生生物群落评估提供了较为全面的视角,其丰富的实践成果凸显了其在水生态评价发展中的关键阶段性成就和在水生态管理中的重要应用价值^[52],如 2021 年我国农业农村部印发的《长江流域水生生物完整性指数评价办法(试行)》^[53]以鱼类完整性作为长江禁渔成效评估的重点考评指标。尽管如此,IBI 的一个明显短板在于未体现岸线、水文、水质等环境因素受人类活动直接影响的程度,评价指标体系中缺少对非生物指标的考虑。

2.2.3 O/E 指数 一些生物预测模型,如 RIVPACS 模型、澳大利亚河流评估系统(Australian river assessment system, AUSRIVAS)模型、沉积物评估(benthic assessment of sediment, BEAST)模型或其他机器学习方法,通过整合自然预测因子和物种出现/不出现数据,计算生物类群中常见物种数的期望值^[54],并用实际观测值(observation)与期望值(expectant)的比值,即 O/E 指数描述外部干扰下水生生物类群数的损失,以此进行水生生态评价。

O/E 指数体现实际生物群落与期望生物群落的差异性,可以有效甄别受人类干扰程度大、偏离自然状态的受损区域,在溪流、浅水湖泊等不同类型水体均有较好的应用成果^[55],但该方法需要借助大量的历史数据并构建复杂的模型,且仅将环境因子作为模型的输入变量,在最终结果上也并未体现出非生物因素的评价结果,故推广较为有限。

2.3 基于水生生态系统的评价方法

水生生态系统是由生命和非生命物质组成的统一整体,基于水生生物类群的水生生态评价往往忽视了非生物要素对外界干扰的响应。基于水生生态系统的评价方法致力于在水生生物的基础上有效整合环境变量,采用多参数的评价方法为评估水生生态系统状况提供更全面、科学的支撑,也是目前水生生态评价工作的重点,代表性方法包括水生生态系统服务评价、水生健康评价和生态完整性评价。

2.3.1 水生生态系统服务评价 生态系统服务是指人类从生态系统直接或间接获取的利益,与人类的福祉、健康、生计息息相关,是连接人类社会和生态系统的必要纽带。生态系统服务包括供给服务、文化服务、调节服务、支持服务^[56],可以从供水、水能、水生生态系统维持和环境效益等多个方面进行评价^[57]。

水生生态系统服务评价的主要途径是量化生态系统提供服务的能力、人类对服务的需求并比较供需平衡^[58],评价方法可分为生态模型法、问卷调查法和价值评价法等。常用生态模型包括 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型、SWAT(soil and water assessment tool)模型、ARIES(artificial intelligence for ecosystem services)模型等^[59-61],这些模型可以模拟生态过程,对生态系统服务进行定量评价,结果可视化效果较好,但由于所需数据量大、评价结果易受模型内部算法与经验参数设置影响、模拟结果的验证方法不足等,应用受到一定限制^[62]。问卷调查法能够较为直观地反映公众对生态系统服务供给水平和需求的认知情况,但耗时费力,且受主观性影响较大,应用十分有限。价值评价法一般将服务价值指标转化为统一单位后进行加和,据此衡量服务价值的高低,操作相对较为简单,得到了广泛的应用。1997 年 Costanza 等^[63]定量评估了全球生态系统服务的经济价值,由此引发的讨论推进了生态系统服务价值评价研究,影子工程法、机会成本法等经济学方法是间接估算生态系统服务价值的常用方法;谢高地等^[64]在 2006 年基于上述方法提出的当量因子法是目前应用最多的定量转化方法之一。除货币等值转换外,1996 年 Odum^[65]提出了将各类能量统一转换为太阳能的能值分析法,将传统能量分析定量转变为新兴生态经济系统,也是现阶段研究中应用较多的评估方法。该方法是将指标转化为等价的货币价值或能值的间接评价方法,可能会存在评价结果与实际情况出现偏差的问题。

水生生态系统服务评价能很好地评估生态系统为外界提供服务的能力^[66],但现行的水生生态管理策略中,工作重心倾向以修复和保护为主,对人类对于水生生态系统服务的需求研究重视不足,提高生态系统提供服务的能力和满足人类对服务的需求往往作为次要目标,其评价结果在辅助管理决策时主要发挥着补充作用。

2.3.2 水生态健康评价 Costanza 等在 1992 年将“生态健康”定义为如果一个生态系统是稳定和可持续的,即如果它是活跃的,并随时间的推移保持其组织和自主性,且对压力具有弹性,那么它就是健康的^[67]。由此衍生了“活力(V)—组织(O)—弹性(R)”评估框架,该框架综合考虑生态系统的生产力、结构稳定性和对外界干扰的抵抗性及在被干扰后的恢复力,重视生态系统的结构和功能的健康^[68],对于水生态系统有良好的适用性。VOR 框架是常用的水生态健康评估方法,通常表达为 $EH = \sqrt[3]{V \times O \times R}$,其中, EH 为生态健康指数; V 为生态系统活力指数,是系统活力或初级生产力的基本度量; O 为生态系统组织指数,表示生态系统结构的稳定性,包括其多样性和连通性; R 为生态系统弹性指数,包括系统抵抗外界干扰的能力和在被干扰后的恢复能力。

水生态健康评价能描述水生态系统的基本物理化学和生物状态,可以帮助识别和解决水生态系统所面临的关键问题。生态健康是由生物体健康推广而来的,认为健康的生态系统是“没有疾病且可持续的”^[69],将复杂的生态系统状况通过生动的类比,转化为便于公众理解的描述,故长期被用作生态管理的目标^[70-71]。但实际上如何科学、全面地界定和量化“健康”仍面临一系列困难。首先,生态系统适应地调控以达到某一平衡状态的被动控制(passive control)过程有别于生物体基于预设目标对自身进行调控的主动控制(active control)过程^[72],有学者批评生态健康是一种无效的类比^[73];其次,基于 VOR 框架选取的指标较难量化,尤其体现在计算弹性指数时对生态系统在压力下动态变化的预测^[74]。

因此,尽管生态健康的概念在管理上应用较为普遍,然而在具体的指标体系制定方面,并没有完全遵循原有 VOR 的概念,通常会选用“压力(pressure)—状态(state)—响应(response)”、生物完整性或生态完整性等方法体系,将最终结果用“健康”的概念表述^[75-77]。

2.3.3 水生态完整性评价 1949 年,Leopold 在 *A Sand County Almanac* 中通过结合哲学和生物学概念的方式,首次将“完整性(integrity)”的概念引入生态科学:“当一件事倾向于维护生物群落的完整性、稳定性和美丽时,它就是正确的,反之,就是错误的”。1972 年,美国《清洁水法》^[78]中将生态完整性解释为“物理完整性、化学完整性和生物完整性的统一”;1977 年,Cairns^[79]提出了更具生态意义的定义“化学、物理和生物完整性的总和可以等同于生态完整性。一个具有完整性的系统可以承受自然环境过程施加的大多数扰动以及人类引发的一部分重大破坏,并从中恢复”。在后续研究中,众多学者不断深化对生态完整性的探讨,充实生态完整性的内涵。1997 年,De Leo 和 Levin^[80]提出如果受外部干扰的系统保留了其所有要素以及要素之间的功能关系,则该系统将保持其完整性;21 世纪初,Gessner 等^[81]和 Manuel-Navarrete 等^[82]也提出了类似的观点,认为生态系统的完整性包含生物群落构成、空间形态格局等结构组成和初级生产力、气候调节等功能组织两部分。随着对生态系统更深入的研究和对人类社会与自然生态的关系更深刻的理解,学者们对生态完整性有了新的阐释,将能够提供生态系统服务的生态过程也作为生态完整性的重要组成部分^[83-84]。

生态完整性概念的出现是对生态系统管理理论的丰富,其术语可分解为两个组成部分——完整性的状态以及生态系统的物理、化学和生物要素的相互作用机制^[85]。基于水生态系统的共性,一般认为水生态完整性概念所指示的良好的水生态系统具有高质量的物理生境、良好的理化性质、完整的生物群落结构和功能组织,并具备一定抵抗干扰和破坏的抗性以及拥有良好的自组织和恢复能力^[86-88]。

过去 40 年在生态完整性理念的指导下水生态监测与评价得到极大发展^[89],水生态评价常依托生态完整性清晰的理论框架构建评价指标体系,但生态完整性面临术语专业性的限制,如何以易于理解的方式阐述生态完整性是向管理者和公众提供有效信息的关键^[90],常以生态健康或生态系统质量等更易理解的表述替代完整性描述评价结果^[91-92]。

各类水生态评价方法的优缺点见表 1。

3 基于生态完整性的水生态健康评价

水生态健康是目前管理部门普遍采纳和大众易于接受的概念,但在具体操作中生态完整性的概念和指标体系由于其方法成熟、便于实施得到了更广泛的应用。在此基础上,本文提出基于生态完整性的水生态健康评价方法,以期能让未来的水生态评价工作在集两个方法优势的基础上概念清晰。

表 1 各典型评价方法的优点与不足
Tab.1 Advantages and disadvantages of typical assessment methods

典型方法	优点	不足
基于关键指示种的评价方法	结果直观,易于解读	评价结果极度依赖关键指示种的选取
基于类群的生物指数评价方法	生态意义明确,计算简单,方便快捷	仅考虑了单一生物类群,过度简化了生态系统的复杂性,不能全面代表水生态系统
生物完整性指数	可以表征生物群落组成、结构和功能方面的属性	以生物为主,对环境因素考虑不全面
O/E 指数	体现生态系统受人类干扰后偏离自然状态的程度,适用各种类型的水体	模型方法复杂,需要大量历史数据支撑
基于水生生态系统的综合评价方法	有效评估生态系统为人类社会提供商品和服务的能力	一般仅作为生态管理与保护的补充支撑
水生态系统服务评价	能描述水生态系统的基本物理化学和生物状态,为复杂的生态系统状况提供生动形象的类比,易于理解	“健康”的定义具有模糊性和不确定性,健康评价的方法尚没有统一的定义和解释
水生态健康评价	科学、全面、客观地评估水生态系统的结构、功能和过程,对水生态管理与保护有重要参考价值	“完整性”的概念被大众接受需要过程
水生态完整性评价		

基于生态完整性的水生态健康评价是综合考虑水生态系统物理生境、理化性质和水生生物等组成要素的结构、功能和过程的完整性,评估水生态系统的健康状态。主要包括 3 个关键步骤:生态基准确定、评价指标选取和综合赋权评分。

生态基准指综合反映理想状态下生态系统的结构、组成、功能等相关属性的一系列参考值^[93],是水生态系统评价的先决条件,一般基于“参照状态(reference condition)”来确定。选取或确定合适的参照状态决定评价结果的准确性,常用的方法包括参照点位法^[94]、历史参照法^[95]、专家判断法^[96]和模型推算法^[97]。可以根据研究区域的生态特征、数据储备和预期的管理目标,针对性地选取相应方法,为不同区域提供一个通过管理可达的参照状态,满足水生态保护的现实需求。

评价指标的选取遵循科学性、全面性、敏感性、可操作性、可量化和无冗余 6 个基本原则,选取具有明确生态意义、可重复性强的常用生态指标^[98-99],再借鉴生物完整性评价的核心指标筛选方法^[100-101],通过适用性验证、敏感性验证和冗余性验证进行筛选,以确保保留的指标是具有代表性的控制性指标,且各指标间互不冗余。

综合赋权评分是对一系列指标进行赋分并给予不同指标不同权重,最终通过数学方法综合为一个分数的过程,直观描述水生态系统现状相对于参照状态的偏离程度。赋权方法类型多样,常用于多指标综合评价的赋权方法可以分为主观赋权法和客观赋权法。层次分析法和德尔菲法等主观赋权法不受数据质量约束,基于先验知识和具体问题对各指标赋予权重,但赋权的科学性有赖于专家组构成的专业性和合理性;客观赋权法由数据结构驱动,通过各种数学和统计学方法、信息论方法或降维方法等综合分析各指标的相对重要性,从而确定各指标权重,包括 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法、熵权法和投影寻踪法等,具有较强的数学理论和科学依据,但往往受到数据的制约。计算机技术的发展所带来的算力增强简化了主观赋权法冗长的反馈交流过程和客观赋权方法繁复的计算要求,可以定量分析不同赋权方法在不同情境下的适用性^[102],通过单因素方差分析、ROC 曲线、箱线图等方法验证评价结果有效性的方法也被进一步普及推广^[103],为不同样点提供连续、量化、可区分的分数。

尽管不同国家或地区的评价方法在细节上有所差异,但本质上都是基于生态完整性的水生态健康评价(表 2),这一方法在管理上已有了良好的实践基础,尤其在发达国家已形成了较为完备的周期性调查评估项目。综上所述,基于生态完整性的水生态健康评价符合当前全球生态管理的发展趋势,这一说法的提出在

方法的层面上明确了生态完整性理念的重要参考价值,在评价结果的表述上又满足了当前管理的实际需求。

表 2 各国或地区使用的规范性文件
Tab.2 Normative documents used in different countries or regions

国家或地区	物理生境指标	理化性质指标	水生生物指标	评价目的	实施情况
美国 ¹⁾	植被覆盖率、生境复杂度等	酸度、电导率、溶解氧、总氮、总磷、盐度、沉积物汞等	浮游植物、着生藻类、浮游动物、大型底栖无脊椎动物、鱼类、高等水生植物等	评估可以维持健康的生态系统的 水域比例	每 5 年进行一次调查与评估,每次在全国流域内随机抽取不同类型的水体进行评估
欧盟 ²⁾	流量、流态、水体连通性、水深、河岸带结构等	盐度、酸度、营养状态、优先污染物等	大型底栖无脊椎动物、鱼类、高等水生植物等	确保水生生态系统在定性和定量上均达到良好的健康状态	各成员国基于本国面临的主要环境问题和处理能力差异性地进行评估
澳大利亚昆士兰 ³⁾	流量、河岸带宽度、河岸带连续性等	水温、溶解氧、电导率、盐度、总氮、总磷等	着生藻类、大型底栖无脊椎动物、鱼类等	评估流域生态健康,向管理人员提供科学意见	每年对 19 个流域进行评估,并通过年度报告卡的形式公布评估结果
新西兰 ⁴⁾	流量、水位、河岸植被覆盖等	温度、溶解氧、pH、总悬浮物等	水生高等植物、大型底栖无脊椎动物、鱼类等	以维持淡水生态系统的健康状态为首要目标	每 5 年发布一次生态系统健康评估的综合报告,并提出改善生态劣化的相应措施
中国 ⁵⁾	水体连通性、自然岸线率等	总磷、氨氮、高锰酸盐指数等	浮游植物、浮游动物、大型底栖无脊椎动物、鱼类等	加强生物多样性和水生生态保护和生态修复,提升水生生态健康水平	2022—2024 年在长江流域 17 省(自治区、直辖市)开展 50 个重点水体的水生生态考核试点

1)《国家水资源调查项目》(2018—2019 年)^[104];2)《水框架指令》(2000 年)^[34];3)《生态系统健康监测项目》(2022 年)^[105];4)《国家淡水管理政策声明》(2020 年)^[106];5)《长江流域水生态考核细则(试行)》(2023 年)^[107]。

4 结论与展望

本文系统梳理了主要的水生态评价方法,详细分析了各评价方法的优点和不足,综合考虑当前水生态管理的
具体需求和国内外成功案例的推广经验,提出基于生态完整性的水生态健康评价方法,以期
为水生态评价的未来发展提供一条切实可行的路径。

我国水生态评价工作虽然起步较晚,但国家和相关部委非常重视,促进了研究的快速发展,取得了显著的
进步和成果。如何在借鉴欧美国家经验的基础上,结合自身特色,基于科学的水生态评价实现水生态系统
管理可持续的良性发展,作者认为有以下几点有待进一步完善。

4.1 确定生态基准的科学方法

随着社会发展,水利水电开发、航道整治、岸带建设等活动使水生态系统部分区域已发生在一定时期内不可逆的人为改造,以历史状态(historical condition)、极小干扰状态(minimally disturbed condition)或最少干扰状态(least disturbed condition)作为生态基准在很大程度上已不现实,而对于以最佳可达状态(best attainable condition)作为基准,目前无论是理论还是技术手段都尚不成熟。应针对不同区域受干扰程度和处理问题能力的差异,融合生物地理学、空间生态学、保护生物学、气候变化和环境管理等学科知识,借助先进的统计和机器学习技术处理水生态系统中生物与环境、生物与生物之间的非线性关系,开发生态系统恢复或修复过程等模拟与预测模型^[108-109]。此外,还可以将模型与高空间分辨率的地理数据集的可访问性相结

合,以更高的精度用于研究生物群落群落与其环境之间的关系,从而制定科学的生态基准。

4.2 实现水生态评价的差异化适用

水生态评价为支撑水生态保护管理决策服务,水生态保护政策和法令法规是水生态评价发展的关键推动力。2023年,我国生态环境部联合发展和改革委员会、财政部、水利部、林业和草原局等部门印发了《重点流域水生态环境保护规划》,提出到2025年实现水资源、水环境、水生态等要素系统治理、统筹推进格局基本形成,展望在2035年实现生态系统良性循环,基本实现美丽中国水生态环境目标。生态保护目标已不仅仅局限于理化性质指征的优良水体比例或水生生物的生物多样性,而是要求水生态系统整体的阶段性质量提升。此外,由于我国幅员辽阔,各流域特色鲜明,同时极端气候、突发环境事件等因素引起生态系统长期性、大范围改变的风险,在国家统一的生态保护目标指导下,不同区域的主要生态问题也会存在差异,水生态保护措施应各有侧重。

水生态保护目标的提升对水生态评价提出了新的要求。评价指标体系的构建需紧密围绕当前阶段的生态保护目标,通过动态优化及时调整与战略目标偏离的指标,同时充分发挥水生态评价方法的灵活性,根据地域特征和发展需求确定生态基准和选取具体指标。完善水生态评价结果实时反馈机制,以便诊断关键影响因子和重点治理区域,为水生态系统保护及相关修复保护工程的规划设计、实施应用和合理的管理决策、资源分配提供科学依据。展望未来,评价指标体系可以增补生态容量评价、生态足迹评价和生态系统服务评价等内容,实现生态效益和经济效益协同增长的双赢局面。

4.3 建立健全监测网络和监测数据管理机制

水生态评价依赖于气象、水文、水质、水生生物等各类数据,不同类型数据由不同部门采集,监测数据时间、空间尺度不匹配,生物数据的采集目前仍多采用耗时、耗力、耗钱的人工采样方法,新型污染物的监测也处于起步阶段,尚未形成完备的监测体系。鉴于此,需要建立健全常规监测网络,在原有的生态环境监测网络基础上,完善新型污染物监测模块,加快生物自动化监测设备的开发和应用,结合遥感技术、地理信息系统、卫星观测等技术实现“天空地一体化”自动化监测。各网点的监测数据通过信息传输系统进行连接并汇聚于监测数据平台,利用大数据技术和人工智能处理分析庞大的监测数据集,最终达到数据优质、公开、共享的目的,打破各部门之间的数据壁垒,以加强水生态评价与管理部门常规监测数据的耦合,形成评价监测一体化和评价常态化的体系。

4.4 推进新技术在水生态评价领域的应用

现有水生态评价标准的制定通常聚焦于水生态系统受到干扰后的各状态要素的改变,水生态评价等级划分也多基于机械的百分位数,缺乏生态学意义。数学模型的出现为未来情景的预测和水生态评价的突破创新提供了可能。对于水生态评价,可以突破以往以专家经验和主观判断为主的局限,利用增强回归树^[110]、人工神经网络^[111]等机器学习方法协助识别生态退化的关键因子;R语言的MixSIAR模型^[112]、fluxweb包^[113]等模型可以解析生态系统过程,结合能量学和生态网络理论等知识,能为深入认识不同管理模式下水生态系统结构和功能的响应机制提供支持;水动力模型、水环境模型及水生态模型与水生态评价的耦合能模拟生态系统随时间动态变化轨迹,并通过识别突变点来设定状态阈值边界,同时推动水生态评价预警性功能的开发,加速推进生态管理模式由“破坏后再治理”向“提前预警,提前预防,维持稳态”转型,使管理决策更具战略性。

致谢:感谢 Dr. Ellis Penning 提供欧盟《水框架指令》(2000)实施效果的信息。

5 参考文献

- [1] Dodds WK, Perkin JS, Gerken JE. Human impact on freshwater ecosystem services: A global perspective. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9061-9068. DOI: 10.1021/es4021052.
- [2] Nilsson C, Reidy CA, Dynesius M *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, **308**(5720): 405-408. DOI: 10.1126/science.1107887.
- [3] Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, **467**: 555-561. DOI: 10.1038/nature09440.
- [4] Chase JM, Blowes SA, Knight TM *et al.* Ecosystem decay exacerbates biodiversity loss with habitat loss. *Nature*, 2020, **584**: 238-243.

- DOI: 10.1038/s41586-020-2531-2.
- [5] 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.
- [6] Chung MG, Frank KA, Pokhrel Y *et al.* Natural infrastructure in sustaining global urban freshwater ecosystem services. *Nature Sustainability*, 2021, **4**(12): 1068-1075. DOI: 10.1038/s41893-021-00786-4.
- [7] Zhang YL, Lu YY, Zhou Q *et al.* Optimal water allocation scheme based on trade-offs between economic and ecological water demands in the Heihe River Basin of Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**: 134958. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134958.
- [8] Stoddard JL, Larsen DP, Hawkins CP *et al.* Setting expectations for the ecological condition of streams: The concept of reference condition. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2006, **16**(4): 1267-1276. DOI: 10.1890/1051-0761(2006)016[1267: sefec]2.0.co;2.
- [9] Poikane S, Salas Herrero F, Kelly MG *et al.* European aquatic ecological assessment methods: A critical review of their sensitivity to key pressures. *Science of the Total Environment*, 2020, **740**: 140075. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140075.
- [10] Brosed M, Jabiol J, Chauvet E. Towards a functional assessment of stream integrity: A first large-scale application using leaf litter decomposition. *Ecological Indicators*, 2022, **143**: 109403. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109403.
- [11] Martinez-Haro M, Beiras R, Bellas J *et al.* A review on the ecological quality status assessment in aquatic systems using community based indicators and ecotoxicological tools: What might be the added value of their combination? *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 8-16. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.07.024.
- [12] Diaz S, Settele J, Brondizio ES *et al.* Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 2019, **366**(6471): eaax3100. DOI: 10.1126/science.aax3100.
- [13] United States Environmental Protection Agency, National Rivers and Streams Assessment 2018–2019 Report, 2023.
- [14] European Environment Agency, European waters assessment of status and pressures, 2018.
- [15] Australia Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, 2021 State of the Environment report, 2022.
- [16] Mao ZY, Xu LG, Lai XJ *et al.* Assessment on ecosystem health of Lake Poyang based on comprehensive index method. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 1022-1036. DOI: 10.18307/2023.0321. [毛智宇, 徐力刚, 赖锡军等. 基于综合指标法的鄱阳湖生态系统健康评价. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 1022-1036.]
- [17] Jin XW, Zhao XF, Qu XD *et al.* Research progress of aquatic ecological monitoring and assessment in watersheds and development recommendations in China. *J Lake Sci*, 2024, **35**(3): 1-12. DOI: 10.18307/2023.0300. [金小伟, 赵先富, 渠晓东等. 我国流域水生态监测与评价体系研究进展及发展对策. 湖泊科学, 2024, **35**(3): 1-12.]
- [18] Dolédec S, Statzner B. Responses of freshwater biota to human disturbances: Contribution of J-NABSto developments in ecological integrity assessments. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(1): 286-311. DOI: 10.1899/08-090.1.
- [19] LEOPOLD J. Getting a handle on ecosystem health. *Science*, 1997, 276(5314): 887-887. DOI: 10.1126/science.276.5314.887a.
- [20] Warren MS, Maes D, van Swaay CAM *et al.* The decline of butterflies in Europe: Problems, significance, and possible solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(2): e2002551117. DOI: 10.1073/pnas.2002551117.
- [21] Hubbell SP. Tree dispersion, abundance, and diversity in a tropical dry forest. *Science*, 1979, **203**(4387): 1299-1309. DOI: 10.1126/science.203.4387.1299.
- [22] Niu KC, Liu YN, Shen ZH *et al.* Community assembly: The relative importance of neutral theory and niche theory. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 579-593. [牛克昌, 刘锋宁, 沈泽昊等. 群落构建的中性理论和生态位理论. 生物多样性, 2009, **17**(6): 579-593.]
- [23] Cairns J, McCormick PV, Niederlehner BR. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 1993, **263**(1): 1-44. DOI: 10.1007/BF00006084.
- [24] Wang HF, Bai B, Bai XL. Influence factors of river health and evaluation way. *Water Resources and Power*, 2007, **25**(5): 12-14. [王好芳, 白斌, 白晓龙. 河流健康的影响因素及评价思路. 水电能源科学, 2007, **25**(5): 12-14.]
- [25] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27. DOI: 10.1577/1548-8446(1981)006<0021:A0BIUF>2.0.CO;2.
- [26] Wright JF, Moss D, Armitage PD *et al.* A preliminary classification of running-water sites in Great Britain based on macro-invertebrate species and the prediction of community type using environmental data. *Freshwater Biology*, 1984, **14**(3): 221-256. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1984.tb00039.x.
- [27] Thornbrugh DJ, Leibowitz SG, Hill RA *et al.* Mapping watershed integrity for the conterminous United States. *Ecological Indicators*, 2018, **85**: 1133-1148. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.10.070.
- [28] da Silva PB, Santos PP, Montag L. Using multimetric indices to assess the effect of reduced impact logging on ecological integrity of Amazonian streams. *Ecological Indicators*, 2018, **91**: 315-323. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.04.020.
- [29] Zhou XD, Xu MZ, Wang ZY *et al.* Responses of macroinvertebrate assemblages to environmental variations in the river-oxbow lake system of the Zoige wetland (Bai River, Qinghai-Tibet Plateau). *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 150-160. DOI: 10.1016/j.scitotenv.

- 2018.12.310.
- [30] Li DM, Liu B, Chen S *et al.* Improving biological condition assessment accuracy by multimetric index approach with microalgae in streams and lakes (in Chinese). *Scientia Sinica Vitae*, 2021, **51**(9): 1287-1298. DOI: 10.1360/SSV-2021-0236. [李丹敏, 刘波, 陈硕等. 基于微藻多量度指标法提高河流和湖泊生物学状态评价准确性的研究进展. 中国科学: 生命科学, 2021, **51**(9): 1287-1298.]
 - [31] Yi YJ, Wang ZY, Yang ZF. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on habitat suitability of carps in the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2010, **387**(3/4): 283-291. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.018.
 - [32] Gu XC, Wang ZL, Zhao XH *et al.* Establishment and application of the index system for river ecosystem health assessment. *Environmental Monitoring in China*, 2023, **39**(3): 87-98. [古小超, 王子璐, 赵兴华等. 河流生态环境健康评价技术体系构建及应用. 中国环境监测, 2023, **39**(3): 87-98.]
 - [33] 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.
 - [34] 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.
 - [35] Boulton AJ. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(2): 469-479. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1999.00443.x.
 - [36] Zhang ZM, Fan YG, Jiao ZJ. Wetland ecological index and assessment of spatial-temporal changes of wetland ecological integrity. *Science of the Total Environment*, 2023, **862**: 160741. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160741.
 - [37] Dai YC, Xue YD, Zhang YY *et al.* Summary comments on assessment methods of ecosystem integrity for national parks. *Biodiversity Science*, 2019, **27**(1): 104-113. DOI: 10.17520/biods.2018142. [代云川, 薛亚东, 张云毅等. 国家公园生态系统完整性评价研究进展. 生物多样性, 2019, **27**(1): 104-113.]
 - [38] Paine RT. A note on trophic complexity and community stability. *The American Naturalist*, 1969, **103** (929): 91-93. DOI: 10.1086/282586.
 - [39] Gissi E, Manea E, Mazaris AD *et al.* A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment. *Science of the Total Environment*, 2021, **755**(Pt 1): 142564. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142564.
 - [40] Fan RL, Su WC, Zhang ZJ. A preliminary discussion on the influence factor and the assessment method of the ecosystem health. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(6): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2006.06.025. [范荣亮, 苏维词, 张志娟. 生态系统健康影响因子及评价方法初探. 水土保持研究, 2006, **13**(6): 82-86.]
 - [41] Sadovy de Mitcheson Y, Craig MT, Bertoncini AA *et al.* Fishing groupers towards extinction: A global assessment of threats and extinction risks in a billion dollar fishery. *Fish and Fisheries*, 2013, **14**(2): 119-136. DOI: 10.1111/j.1467-2979.2011.00455.x.
 - [42] Rao RC, Yu JX, Que JL *et al.* Population structure and growth status of Yangtze finless porpoise in the sand pits waters of southern Songmen Mountain, Poyang Lake. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, **32**(6): 1237-1244. DOI: 10.12024/jsou.20230404145. [饶榕城, 余进祥, 阙江龙等. 鄱阳湖松门山南部砂坑水域长江江豚群体结构及生长状况评估. 上海海洋大学学报, 2023, **32**(6): 1237-1244.]
 - [43] Washington HG. Diversity, biotic and similarity indices. *Water Research*, 1984, **18**(6): 653-694. DOI: 10.1016/0043-1354(84)90164-7.
 - [44] Gontier M, Balfors B, Mörtberg U. Biodiversity in environmental assessment—Current practice and tools for prediction. *Environmental Impact Assessment Review*, 2006, **26**(3): 268-286. DOI: 10.1016/j.eiar.2005.09.001.
 - [45] Apothéoz-Perret-Gentil L, Cordonier A, Straub F *et al.* Taxonomy-free molecular diatom index for high-throughput eDNA biomonitoring. *Molecular Ecology Resources*, 2017, **17**(6): 1231-1242. DOI: 10.1111/1755-0998.12668.
 - [46] Orfanidis S, Papathanasiou V, Mittas N *et al.* Further improvement, validation, and application of CymoSkew biotic index for the ecological status assessment of the Greek coastal and transitional waters. *Ecological Indicators*, 2020, **118**: 106727. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106727.
 - [47] Sousa V, Dala-Corte RB, Benedito E *et al.* Factors affecting the transferability of bioindicators based on stream fish assemblages. *Science of the Total Environment*, 2023, **881**: 163417. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163417.
 - [48] Feio MJ, Poquet JM. Predictive models for freshwater biological assessment: Statistical approaches, biological elements and the Iberian peninsula experience: A review. *International Review of Hydrobiology*, 2011, **96**(4): 321-346. DOI: 10.1002/iroh.201111376.
 - [49] Hawkins CP, Cao Y, Roper B. Method of predicting reference condition biota affects the performance and interpretation of ecological indices. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(5): 1066-1085. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02357.x.
 - [50] Karr JR, Dudley DR. Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 1981, **5**(1): 55-68. DOI: 10.1007/BF01866609.
 - [51] Liu XJ, Wang Y, Meng XY *et al.* Improved method for benthic ecosystem health assessment by integrating chemical indexes into multiple biological indicator species—A case study of the Baiyangdian Lake, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, **335**: 117530. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117530.

- [52] Wang F, Li YJ, Ma TT *et al.* Ecological health assessment of urban lake based on phytoplankton—A case study of Lake Xihu, Tongling, lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 1890-1900. DOI: 10.18307/2022.0628. [王芳, 李永吉, 马廷婷等. 基于浮游植物的城市湖泊生态健康评价——以长江下游铜陵市西湖为例. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 1890-1900.]
- [53] Zhang YY, Ban X, Li EH *et al.* Evaluating ecological health in the middle-lower reaches of the Hanjiang River with cascade reservoirs using the Planktonic index of biotic integrity (P-IBI). *Ecological Indicators*, 2020, **114**: 106282. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106282.
- [54] 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.]
- [55] 农业农村部. 长江流域水生生物完整性指数评价办法(试行), 2021.
- [56] Cao TG, Yi YJ, Liu HX *et al.* The relationship between ecosystem service supply and demand in plain areas undergoing urbanization: A case study of China's Baiyangdian Basin. *Journal of Environmental Management*, 2021, **289**: 112492. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112492.
- [57] Cai QH, Tang T, Deng HB *et al.* Discussion on freshwater ecosystem service and its evaluation index system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, (1): 135-138. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2003.0030. [蔡庆华, 唐涛, 邓红兵. 淡水生态系统服务及其评价指标体系的探讨. 应用生态学报, 2003, (1): 135-138.]
- [58] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S *et al.* Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, **21**: 17-29. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.06.019.
- [59] Yang D, Liu W, Tang LY *et al.* Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning*, 2019, **182**: 133-143. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.10.011.
- [60] Villa F, Bagstad K, Johnson G *et al.* ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services): A new tool for ecosystem services assessment, planning, and valuation. *Biodiversity and Economics for Conservation*, 2009.
- [61] Bagstad KJ, Villa F, Batker D *et al.* From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 2014, **19**(2): art64. DOI: 10.5751/es-06523-190264.
- [62] Jiang QZ, Li JY, Liang XY *et al.* Research progress on supply and demand evaluation of green infrastructure water ecosystem services based on bibliometrics. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(4): 1738-1747. DOI: 10.5846/stxb202108182287. [姜芊孜, 李金煜, 梁雪原等. 基于文献计量的绿色基础设施水生态系统服务供需评价研究进展. 生态学报, 2023, **43**(4): 1738-1747.]
- [63] Costanza R, d'Arge R, de Groot R *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260. DOI: 10.1038/387253a0.
- [64] Xie GD, Lu CX, Leng YF *et al.* Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(2): 189-196. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3037.2003.02.010. [谢高地, 鲁春霞, 冷允法等. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, **18**(2): 189-196.]
- [65] Odum H. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making. New York: Wiley & Sons, 1996: 20-50.
- [66] Yang T, Zhang DQ, Shen CY *et al.* Valuation of river basin ecosystem services based on emergy analysis: A case study of Dongjiang River Basin. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(1): 9-15. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202106260205. [杨婷, 张代青, 沈春颖等. 基于能值分析的流域生态系统服务功能价值评估——以东江流域为例. 水生态学杂志, 2023, **44**(1): 9-15.]
- [67] Costanza R, Norton BG, Haskell BD. Ecosystem health: New goals for environmental management. Washington D.C.: Island Press, 1992.
- [68] Kang P, Chen WP, Hou Y *et al.* Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 1442-1454. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.427.
- [69] Mallee H. The evolution of health as an ecological concept. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, **25**: 28-32. DOI: 10.1016/j.cosust.2017.04.009.
- [70] Yang H, Shao XX, Wu M. A review on ecosystem health research: A visualization based on CiteSpace. *Sustainability*, 2019, **11**(18): 4908. DOI: 10.3390/su11184908.
- [71] 生态环境部, 国家发展改革委, 自然资源部, 水利部. 黄河流域生态环境保护规划, 2023.
- [72] O'Brien A, Townsend K, Hale R *et al.* How is ecosystem health defined and measured? A critical review of freshwater and estuarine studies. *Ecological Indicators*, 2016, **69**: 722-729. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.004.
- [73] Calow P. Can ecosystems be healthy? Critical consideration of concepts. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(1): 1-5. DOI: 10.1007/BF00044403.
- [74] Wicklum D, Davies RW. Ecosystem health and integrity? *Canadian Journal of Botany*, 1995, **73**(7): 997-1000. DOI: 10.1139/b95-108.
- [75] Wang YT, Wang YS, Wu ML *et al.* Assessing ecological health of mangrove ecosystems along South China Coast by the pressure-state-response (PSR) model. *Ecotoxicology*, 2021, **30**(4): 622-631. DOI: 10.1007/s10646-021-02399-1.
- [76] Xiao SS, Hao YB, Liu JD *et al.* Aquatic ecological health assessment of Qiantang River Basin in Zhejiang Province by phytoplankton index of biotic integrity. *Fisheries Science*, 2021, **40**(5): 740-749. [肖善势, 郝雅宾, 刘金殿等. 应用生物完整性指数评价钱塘江流域—浙

- 江段水生态系统健康. 水产科学, 2021, **40**(5): 740-749.]
- [77] Xu XQ, Cai WQ, Wang Y *et al.* Assessment on ecological integrity of typical lakes, reservoirs and wetlands in Tianjin, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(8): 2767-2774. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202008.038. [徐香勤, 蔡文倩, 王艳等. 天津市典型湖库湿地生态完整性评价. 应用生态学报, 2020, **31**(8): 2767-2774.]
- [78] Fellows, Elizabeth, Jeste. Clean water act. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1993, **35**(5).
- [79] Cairns J. Quantification of biological integrity. In: Ballentine RK, Guarraia LJ eds. The Integrity of Water, U.S. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, Office of Water and Hazardous Materials, 1977: 171-187.
- [80] De Leo GA, Levin SA. The multifaceted aspects of ecosystem integrity. *Conservation Ecology*, 1997, **1**(1).
- [81] Gessner MO, Chauvet E. A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity. *Ecological Applications*, 2002, **12**(2): 498. DOI: 10.2307/3060958.
- [82] Manuel-Navarrete D, Kay J, Dolderman D. Ecological integrity discourses: Linking ecology with cultural transformation. *Human Ecology Review*, 2004, **11**: 215-229.
- [83] Capmourteres V, Anand M. Assessing ecological integrity: A multi-scale structural and functional approach using Structural Equation Modeling. *Ecological Indicators*, 2016, **71**: 258-269. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.07.006.
- [84] Müller F, Bicking S, Ahrendt K *et al.* Assessing ecosystem service potentials to evaluate terrestrial, coastal and marine ecosystem types in Northern Germany-An expert-based matrix approach. *Ecological Indicators*, 2020, **112**: 106116. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106116.
- [85] Roche PK, Campagne CS. From ecosystem integrity to ecosystem condition: A continuity of concepts supporting different aspects of ecosystem sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, **29**: 63-68. DOI: 10.1016/j.cosust.2017.12.009.
- [86] Parrish JD, Braun DP, Unnasch RS. Are we conserving what we say we are? Measuring ecological integrity within protected areas. *BioScience*, 2003, **53**(9): 851. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[0851: awcwws]2.0.co;2.
- [87] Faber-Langendoen D, Lemly J, Nichols W *et al.* Development and evaluation of NatureServe's multi-metric ecological integrity assessment method for wetland ecosystems. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 764-775. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.025.
- [88] Sun FH, Guo YD, Wang CY *et al.* Significance, current situation, challenges and future direction and development of research on freshwater ecological integrity in China. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(12): 2748-2757. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.08.11. [孙福红, 郭一丁, 王雨春等. 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. 环境科学研究, 2022, **35**(12): 2748-2757.]
- [89] Karr JR, Larson ER, Chu EW. Ecological integrity is both real and valuable. *Conservation Science and Practice*, 2022, **4**(2): e583. DOI: 10.1111/csp2.583.
- [90] Wurtzebach Z, Schultz C. Measuring ecological integrity: History, practical applications, and research opportunities. *BioScience*, 2016, **66**(6): 446-457. DOI: 10.1093/biosci/biw037.
- [91] Silvano RAM, Udvardy S, Ceroni M *et al.* An ecological integrity assessment of a Brazilian Atlantic Forest watershed based on surveys of stream health and local farmers' perceptions; Implications for management. *Ecological Economics*, 2005, **53**(3): 369-385. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.12.003.
- [92] Xu XQ, Cai WQ, Lei K *et al.* Assessment of ecological integrity of rivers in Tianjin city. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(10): 2308-2317. [徐香勤, 蔡文倩, 雷坤等. 天津市河流生态完整性评价. 环境科学研究, 2020, **33**(10): 2308-2317.]
- [93] Xu YP, Wang ZJ. Developing the benchmark and reference condition for monitoring and assessment of ecological integrity of surface waters. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(6): 1-9. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2018.06.01. [许宜平, 王子健. 水生态完整性监测评价的基准与参照状态探究. 中国环境监测, 2018, **34**(6): 1-9.]
- [94] Pardo I, Gómez-Rodríguez C, Wasson JG *et al.* The European reference condition concept: A scientific and technical approach to identify minimally-impacted river ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2012, **420**: 33-42. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.01.026.
- [95] Lotze HK, Worm B. Historical baselines for large marine animals. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, **24**(5): 254-262. DOI: 10.1016/j.tree.2008.12.004.
- [96] 水利部. 河湖健康评价指南(试行), 2020.
- [97] Yen JDL, Dorrough J, Oliver I *et al.* Modeling biodiversity benchmarks in variable environments. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2019, **29**(7): e01970. DOI: 10.1002/eap.1970.
- [98] Zheng BH, Zhang Y, Li YB. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 928-936. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2007.06.006. [郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 928-936.]
- [99] Chen Y, Xu RJ, Jia SQ *et al.* Preliminary study on aquatic ecological assessment index of Yangtze River Basin. *Environmental Monitoring in China*, 2022, **38**(1): 45-57. [陈勇, 许人骥, 贾世琪等. 长江流域水生生态评价指标初步研究. 中国环境监测, 2022, **38**(1): 45-57.]
- [100] Barbour MT, Gerritsen J, Griffith GE *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal*

- of the North American Benthological Society, 1996, **15**(2): 185-211. DOI: 10.2307/1467948.
- [101] Maxted JR, Barbour MT, Gerritsen J *et al.* Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, **19**(1): 128-144. DOI: 10.2307/1468286.
- [102] Xiang JY, Tan S, Tan XL *et al.* Spatiotemporal assessment of water security in the Dongting Lake region: Insights from projection pursuit method and sparrow search algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **378**: 134447. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134447.
- [103] 生态环境部. 水生态监测技术指南 湖泊和水库水生生物监测与评价(试行)(HJ 1296—2023), 2023.
- [104] United States Environmental Protection Agency. National aquatic resource surveys: Indicators used in the national aquatic resource surveys, 2019.
- [105] Healthy land & water, Queensland. Ecosystem Health Monitoring Program EHMP, 2022.
- [106] New Zealand Ministry for the Environment. National policy statement for freshwater management 2020 (Amended 2023), 2020.
- [107] 生态环境部, 发展改革委, 水利部, 农业农村部. 长江流域水生态考核指标评分细则(试行), 2023.
- [108] Araújo MB, Guisan A. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 2006, **33**(10): 1677-1688. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x.
- [109] Meynard CN, Quinn JF. Predicting species distributions: A critical comparison of the most common statistical models using artificial species. *Journal of Biogeography*, 2007, **34**(8): 1455-1469. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2007.01720.x.
- [110] Elith J, Leathwick JR, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, **77**(4): 802-813. DOI: 10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x.
- [111] Pany R, Rath A, Swain PC. Water quality assessment for River Mahanadi of Odisha, India using statistical techniques and Artificial Neural Networks. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **417**: 137713. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137713.
- [112] Yi YJ, Zhao FX, Liu Q *et al.* Runoff from upstream changes the structure and energy flow of food web in estuary. *Frontiers in Marine Science*, 2023, **10**: 1103502. DOI: 10.3389/fmars.2023.1103502.
- [113] Barnes AD, Jochum M, Lefcheck JS *et al.* Energy flux: The link between multitrophic biodiversity and ecosystem functioning. *Trends in Ecology & Evolution*, 2018, **33**(3): 186-197. DOI: 10.1016/j.tree.2017.12.007.