

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2024.05.001

基于生态完整性的水生态健康评价研究综述

易雨君^{1,2,3}, 丁航³, 叶敬旸³

(1. 北京师范大学水沙教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 系统回顾了水生态健康定义和内涵的发展历程, 梳理了水生态健康评价中构建评价指标体系常用的模型和方法, 指出基于生态完整性的水生态健康评价指标体系在指标分类上更加科学全面、工作流程上更加清晰、实用性与可操作性更强, 分析了基于生态完整性的水生态健康评价主要难点, 包括指标与基准的选取、指标权重的分配、压力源的识别以及评价的准确性, 以期提供更加清晰的水生态健康评价相关概念, 为水生态保护和恢复成效评估提供决策支持。

关键词: 水生态健康评价; 生态完整性; 物理生境; 理化性质; 水生生物

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)05-0001-10

Review of water ecological health assessment based on ecological integrity//YI Yujun^{1,2,3}, DING Hang³, YE Jingxu³
(1. Key Laboratory for Water and Sediment Science, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The development history of the definition and connotation of water ecological health is systematically reviewed, and the commonly used models and methods to construct the index system for water ecological health assessment are sorted out. It is clarified that the index system for water ecological health assessment based on ecological integrity has the advantages of more scientific and comprehensive index classification, clearer work flow, and higher practicability and operability. Then, main difficulties of water ecological health assessment based on ecological integrity are pointed out, including the selection of indexes and benchmarks, the allocation of index weights, the identification of stressors, and the improvement of evaluation accuracy. The research is conducted so as to provide a clearer concept related to water ecological health assessment and decision-making support for evaluation of the effectiveness of water ecological protection and restoration.

Key words: water ecological health assessment; ecological integrity; physical habitat; physicochemical property; aquatic organism

水生生态系统中, 水质污染、栖息地退化和非本土物种入侵是影响生物群落结构组成、生态功能和生态系统服务的主要因素, 对水生态健康造成严重威胁^[1]。健康的生态系统为人类提供福祉^[2], 如提供市政与工农业用水和美学与娱乐功能^[3]。在气候变化和人类活动的影响下, 水生生态系统也发生了一系列转变, 如污染物负荷、水利工程建设、土地利用方式改变等^[4-7]。近年来, 人们越来越重视水生生态系统的健康, 以保障水生生态系统正常的结构、功能, 并提供生态系统服务。

20 世纪 80 年代以前, 监测水质理化指标是水

生态评价的主要方法^[8], 该方法通过对水质理化指标的分析反映水体的环境状况, 有助于确定损害的来源, 但不能确定损害的生物学影响, 也不能确定可能导致或加剧损害的生态因素^[9]。20 世纪 80 年代后, 随着对生物多样性和敏感性研究的深入, 生物评估方法开始成为公认的通过现有水生生物存在状况和类型来评估水体健康状况的方法^[10]。生物指标作为环境质量指标, 可以基于特定分类群(如 BI 生物指数、物种多样性指数)或整个生物群落(如生物完整性指数)对水生态健康状况进行评价。生物指标覆盖了个体、种群、群落和生态系统等多个层次,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202000); 国家自然科学基金创新群体项目(52221003); 国家杰出青年科学基金项目(52025092)

作者简介: 易雨君(1981—), 女, 教授, 博士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: yiyujun@bnu.edu.cn

涉及浮游生物、底栖生物和鱼类等物种^[11]。近年来,将综合考虑物理生境指标、理化性质指标和水生生物指标的多指标评价方法用于水生态健康评估已成为研究的趋势,并应用于水生态保护和管

理^[12-13]。多指标评价方法可以全面揭示生态系统健康问题,从不同角度、不同尺度描述生态系统的基本特征,包括水生生态系统水质特征、物理结构、生物结构和生态服务功能^[14],并结合物理、化学和生态病理学方法,综合反映生态系统在压力下的结构、功能和恢复力^[15]。

本文对水生态健康定义和内涵的发展历程进行系统回顾,梳理水生态健康评价中构建评价指标体系常用的模型和方法,分析基于生态完整性的水生态健康评价流程与难点,以期水生态健康评价研究与应用提供科学支撑。

1 水生态健康定义与内涵

20世纪80年代,Rapport等^[16]提出了生态系统健康的概念,即生态系统稳定性、可持续性和维持组织结构、自我调节和弹性的能力。Costanza等^[17]给出了生态系统健康的定义:“如果生态系统是稳定和可持续的,也就是说,如果它是活跃的,随着时间的推移保持其组织性和自主性,并且对压力有弹性,那么它就是健康的”。活力、组织与弹性是生态系统健康的主要特征,该定义也是目前生态系统健康最受认可的定义。继而,Costanza等^[18]提出了生态系统服务的概念,指人类从生态系统获得的所有惠益,包括供给服务(如提供食物和水)、调节服务(如控制洪水和疾病)、文化服务(如精神、娱乐和文化收益)以及支持服务(如维持地球生命生存环境的养分循环)。目前,越来越多的学者在定义生态系统健康时纳入生态系统服务的概念,认为健康的生态系统应该具有一定的服务功能,并且这些功能应该保持相对稳定性。Fu等^[19]总结了代表性研究成果,提出“健康的生态系统是一个具有强大生物多样性、能够抵抗自然和人为干扰、保持结构完整性、自我维持和更新、满足人们合理需求,并为社会服务的生态系统”。左其亭^[20]认为水生态健康是水生态系统良性循环的一种状态,包括水生态系统结构的完整性、为人类社会提供服务的稳定性以及抵抗干扰仍能保持自身结构和功能的持续性。水生态健康定义的核心是对本土水生生物的保护,包含结构完整与功能健康,并且能在不同经济和社会背景下为人类社会提供生态系统服务。水生态健康为水生态系统可持续发展提供了总体目标,保持和恢复健康的水生态系统状况是国家和国际水管理计划的重要目标。

2 水生态健康评价方法

水生态健康评价应设定研究目标,并证明指标选择与抽样设计的科学性,针对重点生物或环境目标,兼顾社会、文化与经济价值^[21]。目前,水生态健康评价多采用多指标评价方法,形成了可量化的评价指标体系。但指标体系的建立还没有统一的方法,为了解决评价指标归类不明确等问题,许多学者开发并应用一些模型或方法规范评价指标的选取,取得了较好的评价结果。生态系统健康评价主要分为3类,包括利用活力-组织-弹性(vigor-organization-resilience, VOR)及其拓展模型、压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)及其拓展模型和基于生态完整性的水生态健康评价。

2.1 VOR 及其拓展模型

VOR模型是一种基于生态系统健康概念创建的生态系统健康综合评价模型^[22]。VOR模型包括3个要素:活力、组织和恢复力。活力指生态系统的动力和营养循环能力;组织指生态系统组成的多样性,是生命力、韧性和服务功能的基础;恢复力指生态系统在外部干扰下保持结构稳定或恢复原始健康状态的能力。活力-组织-弹性-服务(vigor-organization-resilience-service, VORS)模型基于生态系统质量和生态系统服务创建,是经典VOR模型的拓展^[23-24],可量化生态系统服务的供应能力。VOR模型常与其他模型结合,如与隐马尔可夫模型相结合,通过建立内部生态健康状况与外部观测组合状态之间的关系,模拟生态系统状态的内外相关性^[25]。

2.2 PSR 及其拓展模型

PSR模型^[26]最初由加拿大统计学家Rapport和Friend提出,在20世纪80—90年代由经济合作与发展组织和联合国环境规划署开发,用于研究环境问题。压力指标反映源自生态系统或人类活动的压力;状态指标描述物种多样性现状及其变化,反映生物群落特征、水资源特征和水环境特征;响应指标体现生态红线区等环境保护措施。目前已经开发了多种拓展模型,包括驱动力-压力-状态-影响(driver-pressure-state-impact, DPSI)模型^[27]、驱动力-压力-状态-影响-响应(driver-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型^[28-29]等。驱动力指标常包括社会经济驱动力;压力指标常包括降水变化率(自然压力)和人口密度、水资源利用率(人类活动);状态指标常包括生物完整性指数、水文连通性、流量变异程度、富营养化程度;影响指标常包括对生态系统功能、生态系统服务和人类福祉的影响;响应指标常包括污

水处理率、农田灌溉水资源有效利用系数、植被覆盖率^[30]。这类模型具有明确的因果逻辑,即人类活动对环境施加一定的压力,环境状态发生相应变化,人类社会对这些变化做出响应,以恢复环境质量或防止环境退化。

PSR 及其拓展模型广泛应用于河流生态系统管理^[31]、城市河流健康评价^[32]、水生生物多样性评估^[33]等方面。PSR 及其拓展模型重点强调基于各种指标体系的生态系统质量与人类活动之间的因果关系^[34],注重评估生态系统的状态与外部干扰,其缺点是忽略了生态系统内部的稳定性^[35]。

2.3 基于生态完整性的评价方法

生态完整性注重生态系统结构完整和功能健康,具有不断演化与进化的能力,即自组织能力,且符合人类的价值判断。结构完整性强调生态系统全部,包括成分、组成与过程。功能健康强调生态系统的整体特性,相比于物种,其更关注群落,特别是关注群落的能量流动、营养循环和生产力。自组织生态系统试图建立有序且动态平衡的结构。基于生态完整性的水生态健康评价,通常评价物理生境、理化性质、水生生物 3 大要素。通过对水生态系统中不同水生态指标(生物和非生物)的监测,选取未受损或受人类干扰影响较小的状态作为基准,将待评价的水体与基准进行比较,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,形成综合评价指数,从而对水生态健康和生物种群受威胁状况进行全面评估^[36-37]。

2.4 生态健康评价方法比较

水生态健康综合评价中,VOR 及其拓展模型、PSR 及其拓展模型、基于生态完整性的评价方法都可用于规范评价指标的分类,从而加强对不同指标的生态解释,识别生态受损的压力源,应用于水生态管理与修复。3 种方法进行评价时有各自的优势与局限性(表 1),应根据研究对象与尺度和研究目标选择合适的方法。

在评价对象方面,VOR 及其拓展模型多用于城市生态系统健康评价^[38-39]和湿地生态系统健康评

价^[40],基于生态完整性的评价方法多用于水生态系统健康评价,而 PSR 及其拓展模型适用于多种生态系统健康评价^[41]。

在指标体系方面,根据评价对象不同,三者的指标体系略有差异。VOR、PSR 及其拓展模型为遥感技术应用生态健康评价提供了良好的指标体系,基于遥感的光谱指数、景观指数和空间测量指数,这些模型已被广泛应用于诊断生态系统健康^[42]。VOR 及其拓展模型侧重于评价生态系统自然恢复力和人类干预的影响^[39],而 PSR 及其拓展模型侧重于对生态系统压力和政策管理作用的评价^[43]。基于生态完整性的评价方法包含物理生境、理化性质、水生生物 3 要素^[44],物理生境和理化性质指标反映了水生态系统面临的环境压力,可用于对水生态系统进行即时评估;而水生生物指标可以衡量生态系统的结构,用于识别各种复杂人类活动等干扰的累积影响^[45-47]。

在基准方面,VOR、PSR 及其拓展模型的局限性在于无法确定一条“基线”,从而无法判断环境处于改善或恶化状态。而基于生态完整性的水生态健康评价涉及基准的概念,即以极小干扰状态、历史状态、最低干扰状态或最佳可获得状态为基准,对水生态系统的现状进行评估、对水生态状况进行时空比较。

综上所述,基于生态完整性的水生态健康评价具有明显的优势^[48]。自然生态系统是由多要素构成的统一整体,生态完整性是自然生态系统的重要特征之一。生态系统各要素既有各自内在的结构、功能与变化规律,又与其他要素相互耦合。基于生态完整性的水生态健康评价具有相对清晰的工作流程,能够确定科学且有代表性的指标,从而提高监测与评价水生态状况的效率,其指标分类简单,易于应用^[49]。美国正在实施的国家水生资源调查项目及欧盟《水框架指令(2000/60/EC)》的水生态健康评价指标体系均采用此方法,将指标分为物理生境、理化性质及水生生物等 3 大类。基于生态完整性的水生态健康评价以自然状态、历史较好状态或未来期

表 1 3 种生态系统健康评价方法比较

Table 1 Comparison of three methods for ecosystem health assessment

评价方法	评价对象	评价原理	评价侧重点
VOR 及其拓展模型	陆地生态系统、湿地生态系统	基于生态系统健康概念创建,重点分析生态系统自然恢复力和人类干预对生态系统的影响	通过对生物多样性、生态过程和生态系统功能的评价,评价生态系统的恢复能力和脆弱性
PSR 及其拓展模型	陆地生态系统、水生态系统	人类活动对环境施加一定的压力,环境状态发生相应变化,人类社会对这些变化做出反应,以恢复环境质量或防止环境退化	通过分析生态系统的压力源、生态状态和管理响应,评价可持续性和生态健康状况
基于生态完整性的评价方法	水生态系统	通过指标现状值与基准值对比,对水生态健康状况的时空变化进行评估	通过分析物理生境、理化性质和水生生物指标,评价水生态健康状况

望最好状态为基准,将现状评估转化为变化量评估,显示水生态状况的受损程度,可加强对指标的生态意义解释,增强评估结果的时空可比性^[50]。因此,基于生态完整性的水生态健康评价更适合衡量水生态系统保护和恢复目标。

3 基于生态完整性的水生态健康评价指标体系

2010年以来,我国全面进入水生态健康保护相关的水环境与生态学研究阶段^[51]。经过一系列发展和调整,包含物理生境、理化性质和水生生物的生态完整性评价指标体系被证明可以有效评估水生态健康状况^[52]。基于生态完整性的水生态健康评价可以视为一个多准则决策过程,通过遥感解译、资料收集与野外调查,全面分析水生态特征,对评价指标进行量化,以水生态完整性的多个定量指标为输入,以水生态状况健康等级的定性评估为输出,结合数学方法识别影响水生态状况的压力源,为提出切实可行的水生态系统恢复与管理方案提供技术支撑。基于生态完整性的水生态健康评价流程(图1)包括评价指标体系构建、评价指标值计算与赋分、评价结果表达。科学地评价有助于表征水生态健康状况,判断生态系统受损程度及诊断退化原因^[53]。

水生态健康评价中的物理生境指标通常从7个常规属性中选择,包括河道宽度、河道坡度、底质粒径大小与类型、生境复杂度、河岸植被覆盖度、人类活动干扰度以及河道河岸的交互作用^[57]。

b. 理化性质指标。理化性质指标还没有统一的筛选方法。目前,国内外研究中常用的理化性质指标包括基本理化性质指标以及营养盐、沉积物重金属、非金属无机污染物和非金属有机污染物5大类,微塑料与新型污染物也逐渐受到关注^[58-59]。

c. 水生生物指标。水生生物指标通常包括4种类型,即组成或丰度、丰富度或多样性、敏感性或耐受性、功能指标,反映了生态系统质量的主要组成部分^[60]。生物指标通常使用单一的分类群,最常见的是鱼类或大型无脊椎动物^[61-63],浮游生物也逐渐受到关注^[64-65]。然而,生物群落的生活史、栖息地偏好以及生理和行为特征的差异可能导致其对环境退化的不同反应,这些因素可能导致对水生态健康状况总体评估存在差异。因此选取水生生物指标应充分考虑生态系统食物网能量传递和物质循环等生态功能,尝试开发反映食物网结构的多营养级生物评价指标。水生生物候选指标通常较多,存在部分指标对压力不敏感或指标冗余的问题,可通过判别能力分析、冗余度分析和变异度分析,筛选出能充分反映水生态健康状况的核心指标。

3.2 评价指标值计算与赋分

在水生态健康评价中,指标值的计算通常为现状观测值与基准值的比较。现状观测值一般通过历史数据、实地调查或遥感解译获取,参照状态常被作为基准^[66]。经过多年发展完善,确定参照状态的方法主要包括参照点法、历史数据法、模型推算法和专家经验法等4类。为了便于管理,通常用数学方法将指标值赋予0~100的分值,并根据指标对水生态健康程度的重要性赋权。

3.3 评价结果表达

水生态健康评价是综合物理生境、理化性质和水生生物3要素,由各指标分值通过加权求和等数学方法得到水生态健康状况评价结果,并将健康状况分为健康、亚健康、一般、较差、极差等5个状态。最后,利用统计分析或机器学习方法识别影响水生态健康的压力源,为水生态保护和修复提供技术支撑和科学依据。

4 基于生态完整性的水生态健康评价案例

很多国家和地区开展了水生态完整性评估研究与应用,从物理生境、理化性质和水生生物角度综合评估水生态健康状况,目前美国和欧盟水生态健康

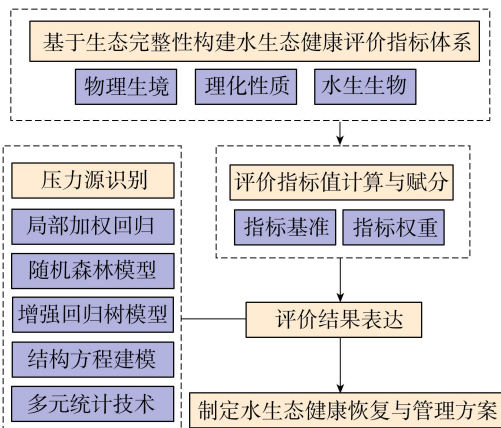


图1 基于生态完整性的水生态健康评价流程
Fig.1 Flow chart for water ecological health assessment based on ecological integrity

3.1 评价指标体系构建

根据生态完整性的内涵,结合水生态保护的现实需求,通常从物理生境、理化性质与水生生物3个要素筛选指标^[54],建立水生态健康评价指标体系。多指标评价体系中,个别指标可以诊断影响评分结果的特定压力源,因此指标的选择是一个关键问题^[55]。

a. 物理生境指标。明晰导致生态完整性受损的关键生境要素十分重要,需要全面考虑^[56]。目前

评价较为成熟。

1972年美国《清洁水法》提出了恢复物理、化学和生物完整性目标。1990年之后,美国从采用单一的化学指标发展到采用物理生境、理化性质、多类群水生生物等数字型和叙述型指标综合评估水生态健康状况,并不断开发、规范与完善野外调查的采样与分析方法。2007年,美国开始国家水生资源调查项目,调查河流、湖泊、水库、沿海水域以及湿地水生态系统健康状况,每5年出台一份水生态健康状况评估报告,目前已完成2008—2009年、2013—2014年、2018—2019年3期项目,报告描述了2008—2019年水生态状况变化,重点分析生物指标和压力源之间的关系。

2000年,欧盟颁发的《水框架指令》提出了以流域综合管理为核心的多要素综合评价办法,以期提升河流、湖泊和过渡性水域的环境质量。评价指标体系主要为生物质量要素(浮游植物、大型底栖无脊椎动物、鱼类)、水体物理-化学质量要素(总体状况、特征污染物)和水文形态学质量要素(水文状况、河流连续性、河流形态状况)3大类,注重分析理化指标与生物指标的关系。

5 基于生态完整性的水生态健康评价主要难点

20世纪80年代以来,基于生态完整性的水生态健康评价技术不断发展,其工作流程较为清晰明确,但由于生态系统本身的复杂性和水生态健康概念与内涵丰富,评价仍有几大难点。

5.1 指标与基准的确定

目前评价指标选取的难点在于:①评价指标的选取大多基于半定量或专家评分,具有较强的主观性^[67];②评价指标体系缺乏代表性和预测性指标,筛选较少指标反映较全生态信息的方法尚未标准化;③评价指标大多根据研究区域特点来选取,不同生态区域或自然地理区域指标差别较大,很难对评价结果进行比较^[68-69]。冗余度分析和对干扰的响应可作为筛选指标的标准,这些定量分析可加强结果的准确性与科学性。此外,可对多指标指数开发过程中使用的标准进行荟萃分析,将指标分为必选指标和备选指标。必选指标适应性较强,可对不同时空下水生态健康状况进行对比分析,而备选指标反映当前时空条件下某研究区突出的生态环境问题。

指标基准的确定将直接影响评价结果的准确性,是构建生态完整性评价指标体系需要克服的难点之一^[70-71]。定义和确定基准的方法未进行完全

标准化,将影响指标值计算和评价等级确立。在使用参照点法进行长时间尺度的多次评估时,参照点状态将随时间变化,若以固定参照点为基准,会出现以下问题:若参照点状态持续变好,可能导致其他点位评估结果变差;若参照点状态变差,则可能导致其他点位评估结果变好。考虑到参照点状态可能随时间不断改善,需要对参照点水生态状况随时间发生的变化进行评估分析和校正。使用模型预测时,在生物预测模型的概念、框架和方法以及使用的数据和对模型的解释方面,尚未达成共识。因此,应针对不同生态系统受干扰程度,使用统计和机器学习技术,开发模拟与预测模型,用技术手段提升模型预测参照点状态的准确性。

5.2 指标权重的分配

基于生态完整性的水生态健康评价中,每种要素都有其侧重点与优点,如水生生物中选取鱼类指标与鱼类作为人类食物来源有关,理化性质指标用于监测家庭和工业用水的原水质量,物理生境在支撑生物群落、保护社会免受洪水灾害方面发挥着作用,如何合理分配指标权重是一个关键问题。生物学家支持将更多权重分配给水生生物以防止生物多样性丧失;水处理工程师认为理化性质更重要,因为清洁的原水意味着污水处理所需的运营成本更低;水资源管理部门更重视物理生境指标,并基于此进行水利工程、水域及岸线的管理与保护。在综合指数的发展中,有两种加权方法,即不等加权和相等加权^[72]。当具有完备的专业知识和数据来理解指标间优先级和权重时,可以采用不等加权;当指标数据不足时,建议采用相等加权^[73]。一般来说,综合指数可根据指标的特性,结合专家意见和数学方法,由不等加权和相等加权混合获得^[74]。

由数据驱动的客观赋权法已经被广泛应用于量化指标的权重,可提高评价的准确性,常用的方法有主成分分析法^[75]和熵权法^[76]。主成分分析法可以将多维数据简化为几个主要成分,而不会有太多信息损失^[77];熵权法更适合处理较大的数据集^[78]。

5.3 压力源的识别

水生态健康评价结果相对于健康状态的偏离往往由一系列自然环境因素、人类干扰及其相互作用形成。在数据分析中,揭示影响水生态健康评价结果的压力源,厘清压力源的来源,有助于提升评价结果的准确性,为环境管理提供支撑^[79-80]。在水生态健康评价过程中,对水生生物指标的影响通常来自物理生境与理化性质,但对于其因果关系的研究较少,未来可作为研究方向之一。

多指标指数可能因指标权重而影响评价结果,

需要开发统计分析工具识别指标对应的压力源,以此作为资源管理决策的工具^[81]。多元统计技术,如 Pearson 相关性分析、Spearman 相关性分析、冗余分析^[82]以及机器学习模型,如随机森林模型^[83]、增强回归树模型^[84]和结构方程模型^[85]等常用来识别影响水生态健康的关键压力源。

5.4 评价的准确性

评价的准确性受到基础数据量及数据准确性的影响,数据采集规范且标准统一,评价才有意义。采样方法和过程的不确定性、监测数据的缺乏可能导致无法进行多要素评价。通过优化监测点、统一监测技术和方法、选取代表性监测断面、增加稳健性较高的指标等,进行长期监测可以提高评价结果的准确性。

整合和分析生物监测数据是另一个难点,分析方法和模型的选择具有不确定性。传统的统计方法,如线性模型具有误导性,往往不合理,而以数据为中心的机器学习法更适用于生态学研究^[86],合理估计监测值的置信区间可降低监测结果的不确定性。学者们根据研究对象和模型特征探索了多种方法,其中,模糊集理论^[87]、物元模型^[88]、集对分析^[89]、灰色理论^[90]、TOPSIS^[91]、投影寻踪^[92]、人工神经网络^[93]和云模型^[94]等方法在生态完整性评价中的应用越来越多,其中一些评估方法极其复杂,需要大量资金、时间、资源和专业知识。目前多数完整性评价研究属于静态分析,某时段的监测结果仅反映当下的水生态状况,构建大数据预测模型、演绎区域水生态状况时空变化的动态过程是未来的研究方向之一。

6 结语

生态完整性体现在结构完整,即具备自然生态系统期望的全部本土生物多样性和生态学进程;功能健康,即在常规条件下维持最优运行状态;自组织能力,即具有不断发展与进化的能力。基于生态完整性的水生态健康评价更倾向于描述系统受到压力时维持其结构与功能并不断进化的能力,相比于 VOR 与 PSR 及其拓展模型,其评价目标更加明确,工作流程更加清晰,便于分析指标间的因果关系和进行健康状况的时空变化比较,更适合构建水生态健康评价指标体系。

基于生态完整性进行物理生境、理化指标、水生生物多指标的水生态健康评价已成为研究热点,美国、欧盟、加拿大和澳大利亚等国家或地区先后开展了长期水生态健康评价,综合评价水生态状况及演变趋势。我国高度重视水生态状况,长江大保护、黄河流域生态保护和高质量发展先后上升为国家战

略。经过多年的研究,基于生态完整性的水生态健康评价理论基础与技术都得到了发展,但由于生态系统本身的复杂性,水生态健康评价仍面临挑战,需要依托学科交融,创新技术方法的科学性与适用性。

参考文献:

- [1] TOLKKINEN M J, MYKRÄ H, VIRTANEN R, et al. Land use impacts on stream community composition and concordance along a natural stress gradient[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 62: 14-21.
- [2] SCOWN M W, FLOTEMERSCH J E, SPANBAUER T L, et al. People and water: exploring the social-ecological condition of watersheds of the United States [J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2017, 5: 64.
- [3] PALMER M, BERNHARDT E, CHORNESKY E, et al. Ecology for a crowded planet [J]. *Science*, 2004, 304 (5675): 1251-1252.
- [4] FLOTEMERSCH J E, LEIBOWITZ S G, HILL R A, et al. A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds [J]. *River Research and Applications*, 2016, 32(7): 1654-1671.
- [5] ERDOZAIN M, KIDD K, KREUTZWEISER D, et al. Linking stream ecosystem integrity to catchment and reach conditions in an intensively managed forest landscape [J]. *Ecosphere*, 2018, 9(5): e4984.
- [6] 李培科, 韩华伟. 水利工程对生态系统健康性与完整性影响研究 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(增刊 2): 95-96. (LI Peike, HAN Huawei. Study on the impact of hydraulic engineering on ecosystem health and integrity [J]. *Yellow River*, 2020, 42(Sup 2): 95-96. (in Chinese))
- [7] 戴凌全, 张培培, 常曼琪, 等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2023, 51(5): 38-45. (DAI Lingquan, ZHANG Peipei, CHANG Manqi, et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(5): 38-45. (in Chinese))
- [8] HAWKES H A. Origin and development of the biological monitoring working party score system [J]. *Water Research*, 1998, 32(3): 964-968.
- [9] JOHNSON S L, RINGLER N H. The response of fish and macroinvertebrate assemblages to multiple stressors: a comparative analysis of aquatic communities in a perturbed watershed (Onondaga Lake, NY) [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 198-208.
- [10] 徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价 [J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1): 23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. Community structure characteristics and health assessment

- of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 23-30. (in Chinese))
- [11] 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[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1589-1600. (CHEN Kai, CHEN Qiuwen, YU Haiyan, et al. Methods and prospects of index of biological integrity used for China river ecological health assessment [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1589-1600. (in Chinese))
- [12] 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[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 755-765. (JIN Xiaowei, ZHAO Xianfu, QU Xiaodong, et al. Research progress of aquatic ecological monitoring and assessment in watersheds and development recommendations in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 755-765. (in Chinese))
- [13] 王业耀, 阴琨, 杨琦, 等. 河流生态环境质量评价方法研究与应用进展[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(4): 1-9. (WANG Yeyao, YIN Kun, YANG Qi, et al. Research and application progress of assessment for river water ecosystem quality [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(4): 1-9. (in Chinese))
- [14] 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[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 1022-1032. (MAO Zhiyu, XU Ligang, LAI Xijun, et al. Assessment on ecosystem health of Lake Poyang based on a comprehensive index method [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1022-1032. (in Chinese))
- [15] 解雪峰, 蒋国俊, 肖翠, 等. 基于模糊物元模型的西苕溪流域生态系统健康评价[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1250-1258. (XIE Xuefeng, JIANG Guojun, XIAO Cui, et al. Evaluation of ecosystem health in Western Tiaoxi River watershed based on matter element model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 1250-1258. (in Chinese))
- [16] RAPPORT D J, REGIER H A, HUTCHINSON T C. Ecosystem behavior under stress [J]. *The American Naturalist*, 1985, 125(5): 617-640.
- [17] COSTANZA R, NORTON B G, HASKELL B. Ecosystem health: new goals for environmental management [M]. Washington D. C.: Island Press, 1992.
- [18] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [19] FU Shaokang, ZHAO Lin, QIAO Zhi, et al. Development of ecosystem health assessment (EHA) and application method: a review [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 11838.
- [20] 左其亭. 国家多层水生态健康保障体系构建[J]. *水利学报*, 2021, 52(11): 1347-1354. (ZUO Qiting. National multi-level guarantee system for the water ecological health [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(11): 1347-1354. (in Chinese))
- [21] 孙然好, 魏琳沅, 张海萍, 等. 河流生态系统健康研究现状与展望: 基于文献计量研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3526-3536. (SUN Ranhao, WEI Linruan, ZHANG Haiping, et al. Current status and outlook of river ecosystem health research: based on cluster analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3526-3536. (in Chinese))
- [22] PENG Jian, LIU Yanxu, LI Tianyi, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 399-410.
- [23] XUE Jie, GUI Dongwei, LEI Jiaqiang, et al. Model development of a participatory Bayesian network for coupling ecosystem services into integrated water resources management [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 50-65.
- [24] DE TORO P, IODICE S. Ecosystem health assessment in urban contexts: a proposal for the metropolitan area of Naples (Italy) [J]. *Aestimum*, 2018, 72: 39-59.
- [25] XIAO Rui, YU Xiaoyu, SHI Ruixing, et al. Ecosystem health monitoring in the Shanghai-Hangzhou Bay metropolitan area: a hidden Markov modeling approach [J]. *Environment International*, 2019, 133: 105170.
- [26] WALZ R. Development of environmental indicators systems: experiences from Germany [J]. *Environmental Management*, 2000, 25(6): 613-623.
- [27] JAFARY P, SARAB A A, TEHRANI N A. Ecosystem health assessment using a fuzzy spatial decision support system in Taleghan Watershed before and after dam construction [J]. *Environmental Processes*, 2018, 5(4): 807-831.
- [28] MALEKMOHAMMADI B, JAHANISHAKIB F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 293-303.
- [29] DAS M, DAS A, MANDAL A. Research note: ecosystem health (EH) assessment of a rapidly urbanizing metropolitan city region of eastern India: a study on Kolkata metropolitan area [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 204: 103938.
- [30] SU Yifan, LI Weiming, LIU Liu, et al. Health assessment of small-to-medium sized rivers: comparison between comprehensive indicator method and biological monitoring method [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107686.
- [31] PAGAN J, PRYOR M, DEEPA R, et al. Sustainable development tool using meta-analysis and DPSIR framework: application to Savannah River Basin, U. S. [J]. *Journal of the American Water Resources*

- Association, 2020, 56(6) : 1059-1082.
- [32] ZHAO Y W, ZHOU L Q, DONG B Q, et al. Health assessment for urban rivers based on the pressure, state and response framework; a case study of the Shiwuli River [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 324-331.
- [33] TU Jianbo, WAN Mengmeng, CHEN Yanshan, et al. Biodiversity assessment in the near-shore waters of Tianjin City, China based on the pressure-state-response (PSR) method [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 184: 114123.
- [34] WU Shaogui, TIAN Conghai, LI Bilong, et al. Ecological environment health assessment of lake water ecosystem system based on simulated annealing-projection pursuit; a case study of plateau lake [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 86: 104131.
- [35] RAPPORT D J, SINGH A. An ecohealth-based framework for state of environment reporting [J]. *Ecological Indicators*, 2006, 6(2) : 409-428.
- [36] CAI Wangwei, ZHOU Zhiyue, XIA Jihong, et al. An advanced index of ecological integrity (IEI) for assessing ecological efficiency of restoration revetments in river plain [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105762.
- [37] DA SILVEIRA PRUDENTE B, POMPEU P S, MONTAG L. Using multimetric indices to assess the effect of reduced impact logging on ecological integrity of Amazonian streams [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 315-323.
- [38] BAO Zhongcong, SHIFAW E, DENG Chengbo, et al. Remote sensing-based assessment of ecosystem health by optimizing vigor-organization-resilience model; a case study in Fuzhou City, China [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 72: 101889.
- [39] DAS M, DAS A, PEREIRA P, et al. Exploring the spatio-temporal dynamics of ecosystem health; a study on a rapidly urbanizing metropolitan area of Lower Gangetic Plain, India [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107584.
- [40] KHATUN R, DAS S. Exploring ecosystem health of wetlands in Rarh tract of West Bengal through V-O-R model [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 72: 101840.
- [41] 黄文杰, 王锦东, 闫振飞, 等. 河口水生态完整性评价方法研究和进展 [J]. *生态毒理学报*, 2024, 19(1) : 74-90. (HUANG Wenjie, WANG Jindong, YAN Zhenfei, et al. Research and advances in estuarine aquatic ecological integrity assessment methods [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2024, 19(1) : 74-90. (in Chinese))
- [42] GAYEN J, DATTA D. Application of pressure-state-response approach for developing criteria and indicators of ecological health assessment of wetlands; a multi-temporal study in Ichhamati floodplains, India [J]. *Ecological Processes*, 2023, 12: 34.
- [43] ZHANG Zhimei, FAN Yanguo, JIAO Zhijun. Wetland ecological index and assessment of spatial-temporal changes of wetland ecological integrity [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 862: 160741.
- [44] KARR J R, LARSON E R, CHU E W. Ecological integrity is both real and valuable [J]. *Conservation Science and Practice*, 2022, 4(2) : e583.
- [45] FURSE M T, HERING D, BRABEC K, et al. The ecological status of European rivers; evaluation and intercalibration of assessment methods [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 566(1) : 1-2.
- [46] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6) : 21-27.
- [47] ZHANG Yingying, BAN Xuan, LI Enhua, 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) [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106282.
- [48] 李欣桐, 王远铭, 梁瑞峰, 等. 河流系统生态完整性评估的回顾与展望 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(4) : 2256-2272. (LI Xintong, WANG Yuanming, LIANG Ruifeng, et al. A review and prospect for ecological integrity assessment of river systems [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(4) : 2256-2272. (in Chinese))
- [49] CARRILLO-GARCÍA D M, KOLB M. Indicator framework for monitoring ecosystem integrity of coral reefs in the Western Caribbean [J]. *Ocean Science Journal*, 2022, 57(1) : 1-24.
- [50] 何洪林, 任小丽, 张黎, 等. 基于“参照系-现状-变化量”的生态系统评估方法 [J]. *生态学报*, 2023, 43(5) : 2049-2060. (HE Honglin, REN Xiaoli, ZHANG Li, et al. Research on ecosystem assessment method based on reference-state-deviation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5) : 2049-2060. (in Chinese))
- [51] 彭文启, 刘晓波, 王雨春, 等. 流域水环境与生态学研究回顾与展望 [J]. *水利学报*, 2018, 49(9) : 1055-1067. (PENG Wenqi, LIU Xiaobo, WANG Yuchun, et al. Review and prospect of progress in water environment and water ecology research [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(9) : 1055-1067. (in Chinese))
- [52] 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 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(12) : 2748-2757. (SUN Fuhong, GUO Yiding, WANG Yuchun, et al. Significance, current situation, challenges and future direction and development of research on freshwater ecological integrity in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(12) : 2748-2757. (in Chinese))
- [53] 夏瑞, 贾蕊宁, 陈焰, 等. 流域水生态系统完整性模拟方法展望 [J]. *环境工程*, 2022, 40(6) : 241-252. (XIA Rui, JIA Ruining, CHEN Yan, et al. Prospects of simulation methods for watershed aquatic ecosystem integrity [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6) : 241-252. (in Chinese))

- [54] 王锦东,苏海磊,李会仙,等. 典型流域生态完整性评价和应用研究进展[J]. 环境工程, 2022, 40(10): 233-241. (WANG Jindong, SU Hailei, LI Huixian, et al. Research progress of water ecological integrity assessment and application in typical watersheds [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(10): 233-241. (in Chinese))
- [55] 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[J]. 中国环境监测, 2023, 39(3): 87-98. (GU Xiaochao, WANG Zilu, ZHAO Xinghua, et al. Establishment and application of the index system for river ecosystem health assessment [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(3): 87-98. (in Chinese))
- [56] 廖迎娣,范俊浩,张欢,等. 长江下游平原河网地区生态护岸对河流生态系统影响的评价指标体系[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 189-194. (LIAO Yingdi, FAN Junhao, ZHANG Huan, et al. Evaluation index system for ecological revetment impact on river ecosystem in plain river network at lower reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 189-194. (in Chinese))
- [57] 高学平,胡泽,闫晨丹,等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 41-47. (GAO Xueping, HU Ze, YAN Chendan, et al. Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 41-47. (in Chinese))
- [58] SAGOVA-MARECKOVA M, BOENIGK J, BOUCHEZ A, et al. Expanding ecological assessment by integrating microorganisms into routine freshwater biomonitoring [J]. Water Research, 2021, 191: 116767.
- [59] 王华,李思琼,曾一川,等. 长江流域微塑料生态风险综合评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 107-116. (WANG Hua, LI Siqiong, ZENG Yichuan, et al. Comprehensive assessment of microplastics ecological risk in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 107-116. (in Chinese))
- [60] NDATIMANA G, NANTEGE D, ARIMORO F O. A review of the application of the macroinvertebrate-based multimetric indices (MMIs) for water quality monitoring in lakes [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(29): 73098-73115.
- [61] 贺瑶,孙长顺,侯易明,等. 基于流域底栖动物完整性指数评价延河的水生态健康[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 806-816. (HE Yao, SUN Changshun, HOU Yiming, et al. Evaluation of water ecological health of Yanhe River based on benthic fauna integrity index [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 806-816. (in Chinese))
- [62] 潘丽波,黄雪妍,刘晶晶,等. 基于鱼类生物完整性的赤水河健康评估研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(8): 1532-1542. (PAN Libo, HUANG Xueyan, LIU Jingjing, et al. Chishui River health assessment based on fish biotic integrity index [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(8): 1532-1542. (in Chinese))
- [63] 张丰搏,胡鹏,闫龙,等. 南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落结构及环境驱动因子[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 135-141. (ZHANG Fengbo, HU Peng, YAN Long, et al. Structure of benthic macroinvertebrate assemblages and environmental driving factors in water source area of upper line of South-to-North Water Diversion Project (West Route) [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 135-141. (in Chinese))
- [64] 盛祥锐,罗遵兰,孙光,等. 基于浮游植物的生物完整性指数开发与验证:以永定河北京段为例[J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 489-500. (SHENG Xiangrui, LUO Zunlan, SUN Guang, et al. Development and verification of the phytoplankton biological integrity index: a case study in Yongding River in Beijing [J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2024, 44(2): 489-500. (in Chinese))
- [65] 王雪,黄锦平,苏玉萍,等. 基于浮游植物生物完整性指数的福建省水库健康状态评价[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 54-60. (WANG Xue, HUANG Jinping, SU Yuping, et al. Health status assessment of reservoirs in Fujian Province based on phytoplankton biotic integrity index [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 54-60. (in Chinese))
- [66] 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[J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 1-9. (XU Yiping, WANG Zijian. Developing the benchmark and reference condition for monitoring and assessment of ecological integrity of surface waters [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(6): 1-9. (in Chinese))
- [67] CORDIER T, LANZÉN A, APOTHÉLOZ-PERRETT-GENTIL L, et al. Embracing environmental genomics and machine learning for routine biomonitoring [J]. Trends in Microbiology, 2019, 27(5): 387-397.
- [68] RUARO R, GUBIANI É A, HUGHES R M, et al. Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition [J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105862.
- [69] HERMAN M R, NEJADHASHEMI A P. A review of macroinvertebrate- and fish-based stream health indices [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2015, 15(2): 53-67.
- [70] ZHU H, ZHANG Y Z, PENG Y C, et al. Assessing the ecological health of the Qingyi River Basin using multi-community indices of biotic integrity [J]. Ecological Indicators, 2023, 156: 111160.
- [71] 蔡琨,秦春燕,李继影,等. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价:以2012年冬季太湖为例[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1431-1441. (CAI Kun, QIN Chunyan, LI Jiyong, et al. Preliminary study on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) assessment for lake ecosystem health: a case of Taihu Lake in winter, 2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5):

- 1431-1441. (in Chinese)
- [72] BELHADJ B. New weighting scheme for the dimensions in multidimensional poverty indices [J]. *Economics Letters*, 2012, 116(3): 304-307.
- [73] DECANCO K, LUGO M A. Weights in multidimensional indices of wellbeing: an overview [J]. *Econometric Reviews*, 2013, 32(1): 7-34.
- [74] ROONEY R C, BAYLEY S E. Quantifying a stress gradient: an objective approach to variable selection, standardization and weighting in ecosystem assessment [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(6): 1174-1183.
- [75] ARSLAN O. Spatially weighted principal component analysis (PCA) method for water quality analysis [J]. *Water Resources*, 2013, 40(3): 315-324.
- [76] YAZDI J. Water quality monitoring network design for urban drainage systems, an entropy method [J]. *Urban Water Journal*, 2018, 15(3): 227-233.
- [77] JIANG Yihong, SHEN Jianfa. Weighting for what? a comparison of two weighting methods for measuring urban competitiveness [J]. *International*, 2013, 38: 167-174.
- [78] LI Yi, GAO Lin, NIU Lihua, et al. Developing a statistical-weighted index of biotic integrity for large-river ecological evaluations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111382.
- [79] 冯治远, 侯易明, 阴琨, 等. 基于底栖动物生物完整性指数的黄河干流生态健康评价 [J]. *湖泊科学*, 2024, 36(2): 512-522. (FENG Zhiyuan, HOU Yiming, YIN Kun, et al. Ecological health assessment of the Yellow River mainstem based on benthic macroinvertebrate index of biological integrity [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2): 512-522. (in Chinese))
- [80] 胡兴坤, 汪鄂洲, 李伟涛, 等. 珠江大藤峡工程蓄水初期对鱼类生物完整性的影响与减缓对策 [J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(4): 855-867. (HU Xingkun, WANG Ezhou, LI Weitao, et al. Impacts of the construction of Datengxia Project on fish index of biotic integrity in Pearl River and mitigation measures [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(4): 855-867. (in Chinese))
- [81] BECK M W, WILSON B N, VONDRACEK B, et al. Application of neural networks to quantify the utility of indices of biotic integrity for biological monitoring [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 195-208.
- [82] WAN Xuhao, YANG Tao, ZHANG Qian, et al. Joint effects of habitat indexes and physic-chemical factors for freshwater basin of semi-arid area on plankton integrity: a case study of the Wei River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106909.
- [83] YANG Zhi, ZHU Di, ZHU Qiguang, et al. Development of new fish-based indices of biotic integrity for estimating the effects of cascade reservoirs on fish assemblages in the upper Yangtze River, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106860.
- [84] PAUMIER A, DROUINEAU H, BOUTRY S, et al. Assessing the relative importance of temperature, discharge, and day length on the reproduction of an anadromous fish (*Alosa alosa*) [J]. *Freshwater Biology*, 2020, 65(2): 253-263.
- [85] SCHMIDT T S, VAN METRE P C, CARLISLE D M. Linking the agricultural landscape of the midwest to stream health with structural equation modeling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(1): 452-462.
- [86] GREEN N S, LI Shibin, MAUL J D, et al. Natural and anthropogenic factors and their interactions drive stream community integrity in a North American river basin at a large spatial scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155344.
- [87] WANG Shuo, ZHANG Qian, YANG Tao, et al. River health assessment: proposing a comprehensive model based on physical habitat, chemical condition and biotic structure [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 446-460.
- [88] DENG Xiaojun, XU Youpeng, HAN Longfei, et al. Assessment of river health based on an improved entropy-based fuzzy matter-element model in the Taihu Plain, China [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 85-95.
- [89] PAN Guangbo, XU Youpeng, YU Zhihui, et al. Analysis of river health variation under the background of urbanization based on entropy weight and matter-element model: a case study in Huzhou City in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Research*, 2015, 139: 31-35.
- [90] YANG Tao, LIU Jingling, CHEN Qiuying. Assessment of plain river ecosystem function based on improved gray system model and analytic hierarchy process for the Fuyang River, Haihe River Basin, China [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 268: 37-47.
- [91] XU Wei, DONG Zengchuan, REN Li, et al. Using an improved interval technique for order preference by similarity to ideal solution to assess river ecosystem health [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2019, 21(4): 624-637.
- [92] ZHANG Xiang, MENG Yu, XIA Jun, et al. A combined model for river health evaluation based upon the physical, chemical, and biological elements [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 416-424.
- [93] MA Diaoyuan, LUO Wenguang, YANG Guolu, et al. A study on a river health assessment method based on ecological flow [J]. *Ecological Modelling*, 2019, 401: 144-154.
- [94] YANG Zhe, WANG Yufeng, PENG Tongqiang. Uncertainty propagation and risk analysis oriented stochastic multi-criteria decision making for unconventional water resources management [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 126019.