

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.01.001

https://xuebao.xaut.edu.cn

引文格式:张向徐,韩美,倪娟,孔祥伦.基于文献计量和可视化分析的河流生态健康评价研究进展与展望[J].西安理工大学学报,2024,40(1):1-14.

ZHANG Xiangxu, HAN Mei, NI Juan, KONG Xianglun. Progress and prospect of research on river ecological health assessment based on bibliometric and visual analysis[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40 (1): 1-14.

基于文献计量和可视化分析的河流生态健康 评价研究进展与展望

张向徐¹, 韩美¹, 倪娟², 孔祥伦¹

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2. 山东城市建设职业学院, 山东 济南 250103)

摘要: 针对目前河流健康相关综述研究趋势分析浅显、内容不全面的问题,本文在对 CNKI 和 Web of Science 数据库中河流健康相关文献的统计与分析的基础上,对国内外研究趋势进行了梳理,对水质、水文、生境和生物等模块与指标、权重确定方法和评价模型等进行了归纳和对比分析。结果表明:①1998—2010 年发达国家是文献的主要增长力量,而 2010—2022 年文献的增长则主要来自发展中国家的贡献;基于 CiteSpace 的国内研究热点分析表明当前研究聚焦于评价与保障河流生态和社会功能。②水质评价已较成熟,但缺乏对药物、微塑料等新兴污染物的评价;水文评价常用水文学法确定生态流量,对生态环境的具体需要有所忽略,天然径流量也缺乏统一的计算方法;生境评价研究有从实地考察转向以遥感监测为主的趋势;生物评价已成为河流健康评价最重要的手段,eDNA 等技术的应用使实时生物数据监测成为可能。③指标赋权轻视主观赋值,不利于明确评价的重点;评价模型缺乏有效性对比与障碍因子识别研究。针对研究存在的不足,对未来的研究方向进行了展望,包括科学界定指标的阈值、明晰河流健康的敏感因子与驱动因素、开展河流分级分类研究和与流域高质量发展的耦合研究等四个方面。

关键词: 河流生态健康; 文献计量; 评价指标; 评价模型; 高质量发展

中图分类号: TV85; X882 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2024)01-0001-14

Progress and prospect of research on river ecological health assessment based on bibliometric and visual analysis

ZHANG Xiangxu¹, HAN Mei¹, NI Juan², KONG Xianglun¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250103, China)

Abstract: In response to the issue of superficial trend analysis and incomplete content in current literature reviews on river health, and based on the statistics and analysis of the publications on river health from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science, the research trends at home and abroad are sorted out. The water quality, hydrology, habitat and biological indicators, weight determination methods and evaluation models are summarized and compared. Conclusions are as follows: ①The research trend is divided into two stages, with developed countries as the main growth force of literature in 1998—2010 and developing countries as

收稿日期: 2023-02-26; 网络首发日期: 2023-07-10

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20230707.1755.004.html>

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(21BGL026)

第一作者: 张向徐,男,硕士生,研究方向为水文水资源与水环境。E-mail: 17863228009@163.com

通信作者: 韩美,女,博士,教授,研究方向为全球变化与区域响应。E-mail: hanmei568568@126.com

the main growth force of literature in 2010—2022. Keyword cluster analysis based on CiteSpace shows that domestic research hotspots of river health focus mainly on evaluation and protection of river ecological and social functions. ②Water quality assessment has been relatively mature, but there is no assessment on emerging pollutants such as antibiotics and microplastics. In the hydrological evaluation, the hydrological method is often used to determine the ecological flow, but the specific needs of the ecological environment are ignored, and the natural runoff also lacks a unified calculation method. There is a trend of habitat assessment from field investigation to remote sensing monitoring. Biological assessment has become the most important means for river health assessment, and the application of eDNA technology makes real-time biological data monitoring possible. ③The neglect of subjective valuation in index weighting hinders the clear identification of key evaluation criteria. The evaluation model is lack of effectiveness comparative study and obstacle factor identification research. The future research directions are prospected in view of the existing deficiencies in the research, including scientifically defining the threshold of indicators, clarifying the sensitive and driving factors of river health, carrying out river classification research and coupling research with high-quality development of the basin.

Key words: river ecological health; bibliometrics; evaluation index; evaluation model; high-quality development

河流作为陆地上重要的水体,具有特殊的生态意义和巨大的社会服务价值,对流域生态系统和人类社会起到支撑作用。长期以来,人类对河流存在破坏性、透支性的使用,特别是工业革命后,由于生产力的空前提高,人类对于河流的索取愈加急迫和无节制^[1],由此造成的河流健康问题也成为了一种普遍现象。河流生态环境的恶化不仅阻碍了水资源的可持续利用,也对流域乃至地区整体生态安全和经济社会可持续发展造成了严重威胁。在这种背景下,河流健康评价作为一种河流管理手段,因可以对河流健康状况进行系统地评价,并直观地表现河流的健康状况和为后续的河流管理和修复工作提供切实的依据^[2]而受到广泛关注。

Wen等^[3]基于CiteSpace对河流健康的核心作者、研究机构、重要文献和期刊进行了综述。彭文启^[4]对河湖评价的指标体系进行了总结。柴朝晖等^[5]阐述和分析了河流生态研究的热点问题。Haron等^[6]与Feio等^[7]分别回顾和概述了世界河流河道稳定性与生物评估方法。鞠茜茜等^[8]探讨和综述了幸福河内涵及其实证研究进展。彭定华等总结了国内外水生态评价方法及在黄河流域的应用。

有关河流健康的综述已有许多,但当前研究对文献数量变化趋势分析深度不足,未能剖析趋势变化的原因,缺乏从河流生态健康评价等实际需求角度出发的归纳与对比分析。因此,本文将在对国内外河流健康研究趋势作分析的基础上,通过生态健康评价内容与方法的归纳对比,重点阐释河流健康评价研究的近今进展,并基于当前研究存在的不足,指出未来研究中应当重点推进的方向,以期为新时期国家河流环境管理提供理论支撑,为全面落实河

长制与实现河流高质量发展的有机衔接提供决策参考。

1 河流健康的概念

1972年美国将《联邦水污染控制法》修订为《清洁水法令》,后者被认为是最早有关河流健康表述的载体^[10]。此后,针对河流健康的概念,国内外学者从生态功能和社会功能两方面展开了大量研究。Schofield等^[11]提出河流的健康状况取决于河流与没有人类干扰的自然状况下的相似程度。Simpson等认为健康河流的生态系统及其支持的生态过程和具有的生物群落应该尽可能接近受干扰前的状态。二者思想侧重于生物多样性和生态功能方面,但是河流作为与人类关系最密切的水体单元,抛开河流与人类社会的紧密联系不谈而只关注其生态特性是不科学的^[14]。Fairweather^[15]指出河流健康的概念应包括与社会环境相适应,健康的河流应具有一定的社会服务功能。Karr^[10]认为在人类的影响下,依旧保持完整结构的河流是健康的。Norris等^[16]认为健康的河流还应该考虑人类福祉。Meyer^[17]认为健康的河流应该在维持自身结构完整、保持生态稳定的情况下还应具有一定的社会价值。国内比较公认的是吴阿娜等^[18]的观点,即处于健康状况的河流应该是结构、功能完整,物质循环和能量流动没有受到破坏,能够维持自身结构长期稳定,对自然干扰具有抵抗力和恢复力,并发挥其正常的生态环境效益,提供合乎自然和人类需求的生态服务。《河湖健康评价指南》则指出河流健康应包括生态系统结构完整性、生态系统抗扰动弹性、社会服务功能可持续性三个方面,基本与吴阿娜的论述相吻合。

总结来说,河流健康状态的认定应该是灵活的,不同背景下的河流健康标准实际上是一种社会选择。

2 基于文献计量的河流健康研究趋势分析

2.1 国际研究趋势分析

由于仅以“river health”作为关键词进行检索^[20]难以反映河流健康研究发展状况。本文在大量分析现有文献的基础上,确定合适的检索条件,以1998年为起点,2022年为终点,在Web of Science (WoS)核心合集数据库进行高级检索,并进行文献的国家/地区统计,结果见图1。

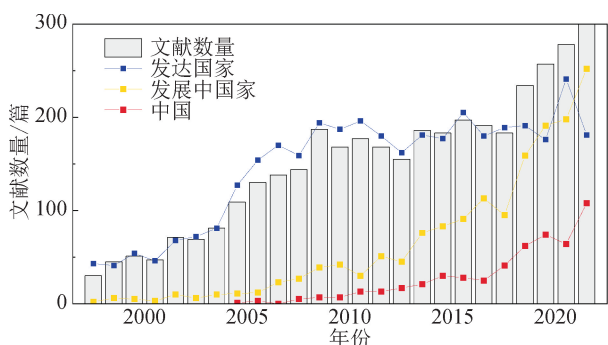


图1 WoS文献量与国家/地区分布
Fig. 1 Number of literatures from the WoS and country/region distribution

可以发现,河流健康相关的文献数量呈稳定增长趋势。研究趋势可以分成两个阶段,1998—2010年为第一阶段,该阶段文献数量增长主要来源于发达国家。美国等许多国家的河流保护标准或工程均建立于这一阶段,例如美国快速生物评价协议(RBPS)^[21]、

日本河流环境普查标准规程(MOC1997b)^[22]、澳大利亚溪流状态指数评价(ISC)^[23]、南非河流健康计划(RHP)^[24]、欧盟水框架指令(WFD)^[25]和韩国光州川生态恢复项目等。2010—2022年为第二阶段,这一时期发展中国家成为文献增长的主要力量。亚洲^[27]、南美洲^[28-29]等地区的国家增长较快,一些欠发达国家也开始探讨自己的河流健康之路^[30-31]。中国学者的文献数量也呈快速增长趋势,并在2019年取代美国成为文献第一大来源国家。纵观全球,河流健康研究正方兴未艾。

2.2 国内研究趋势分析

国内相关研究起步较晚,2002年,唐涛等^[32]发表文章《河流生态系统健康及其评价》,标志着河流健康的概念正式引入国内。本文以CNKI为数据源,以“河流+健康”为主题,限定“学术期刊”和“学位论文”两个范围,检索时段为2002—2022。筛选后共得到536篇文献(图2),并在CiteSpace中对文献进行关键词聚类分析(图3)。

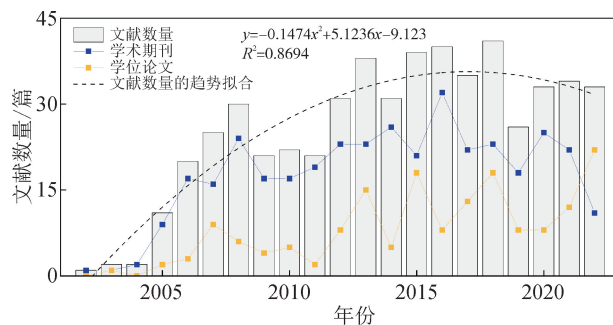
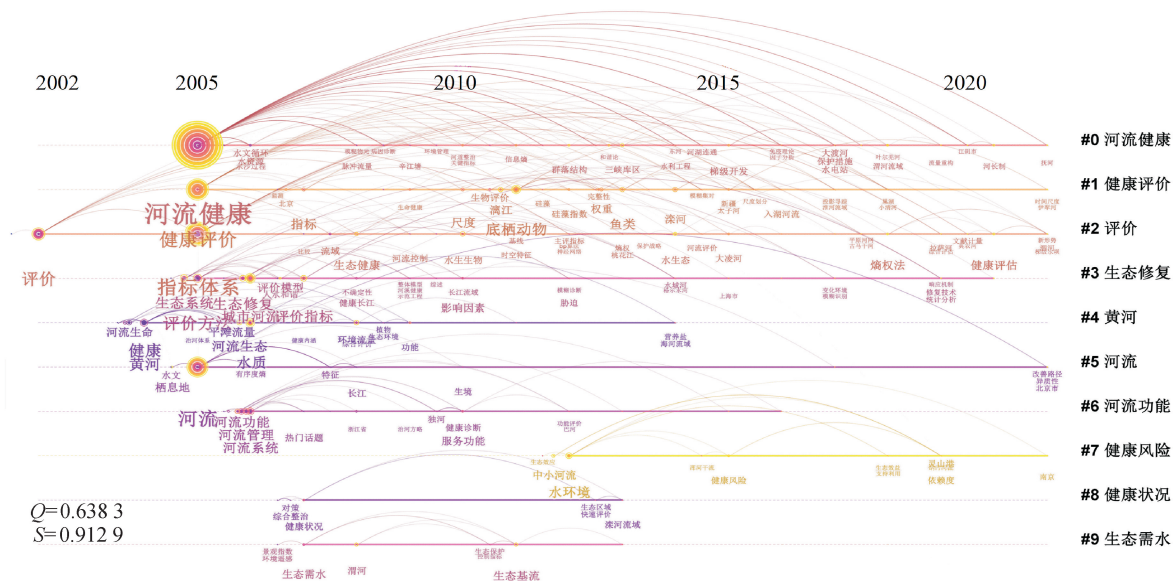


图2 CNKI文献数量变化
Fig. 2 Number of literatures from the CNKI



$Q > 0.3$ 表明聚类结构显著, $S > 0.5$ 表明聚类合理, $S > 0.7$ 表明聚类非常可靠。

图3 河流健康研究的关键词聚类时序

Fig. 3 Time sequence of key word clustering in the study of river health

由图2可见,2002—2004年相关文献较少,2005年,由于以“维持河流健康生命”为主题的黄河国际论坛召开等原因,相关文章数量明显增多,2010年,水利部印发《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作)》,再次促进了文献数量的增长。2018年以后文献数量有所回落可能是国内学者将部分研究成果发表在了外文期刊。

由图3可见,就研究热点与前沿来看:①聚类#0、#1、#2包含“健康评价”、“指标体系”、“底栖动物”和“熵权法”等关键词,重点关注于河流健康评价体系构建与实证评价研究,主要研究方向为指标筛选、权重确定和生物评价等,近些年又关注到河流健康评价与河长制的耦合研究^[33];②聚类#4、#6、#9包含“河流功能”、“健康”、“生态需水”、“黄河”等关键词,聚焦于河流水量与功能的研究,健康的水量是河流提供生态支撑和社会服务功能的基础,虽有关键词“黄河”,但目前与流域高质量发展的耦合研究尚比较缺乏^[34];③聚类#3、#5、#7、#8包含“评价模型”、“胁迫”和“生态区域”等,主要研究方向为通过快速评价确定河流生态环境的影响因素,以制定对策和进行综合整治。

3 评价内容与指标的讨论

3.1 水体环境评价

水体理化指标是水质恢复期的重要参考指标。由于操作的简便性和基础性,以及评价区域的现实所需^[35],在许多发展中国家,水体理化性质评价仍旧是其评估河流健康最主要的手段^[30]。在发达国家,水体理化评价一般作为河流健康评价的一部分,如澳大利亚溪流状态指数^[23]、欧盟水框架指令^[25]等。但由于认为理化指标与生物群落没有很好的相

关性^[36],也有许多研究没有考虑理化性质评价而直接采取生物评价^[37]。在国内,水体理化性质评价相比于其它评价指标发展早,应用也更加广泛,在本世纪初就已经相当成熟。大致可以分为基于《地表水环境质量标准》的水质类别评价^[38]和基于综合污染指数的计分评价^[39]两种。

此外,重金属也是河流水质的重要污染物之一^[40],目前的评价方法主要是通过底泥重金属状况与地化学元素背景值的对比来评价地区重金属的污染程度^[41]。一些新型污染物也值得注意,如药物污染物^[42-43]、微塑料^[44]等,国内外虽做了许多研究,但还没有耦合进河流健康评价之中。更加全面的污染物评估可能是未来水质评价的发展方向。

3.2 水文情势评价

河流水文条件是河流各种物理、化学和生物过程的基础^[45],是河流生态系统的重要属性和驱动力^[46],水文条件的改变会导致河流的河滨形态、水质、岸边植被、水生生物群落产生相应的变化^[47]。因此维护河流水文健康对河流的结构完整性、生态稳定性等均具有重要意义。

目前,河流健康的水文评价以生态流量满足程度和流量稳定性评价为主。生态流量的计算思路可以分为水文学法、水力学法和关系模型法三类(表1),对比来看,水文学法在快速评价方面具有显著优势,是当前国内河流健康评价流行的研究方法^[48];水力学法在河流健康评价中比较少见;关系模型法需要大量的相关指标进行建模,过程繁琐,例如HIT的参考指标甚至多达171种^[49]。流量稳定性评价常用的指标为流量过程变异程度^[50],其涉及的天然月径流量是评价的一大难点,目前尚没有统一的计算方法,常见方法为通过VIC模型拟合得出^[51]。

表1 生态流量研究方法对比

Tab.1 Comparison of the study of ecological flow

方法名称	基本思路	优点	缺点
水文学法 (Tennan法、7Q10法等)	根据以往研究和河流水文状况设定一个最低限流量 ^[54]	评估简便,避免现场调查	未考虑具体生态环境,容易受到极端事件和年度分布不平等的影响 ^[55]
水力学法 (湿周法、R2-Cross等)	根据河流水面宽度、流速等与流量关系的拐点,给出河流最低流量	与河床环境变化联系紧密	不能表达流量季节变动,忽略了生态系统中物种各生命阶段的需求
关系模型法 (IHA、HIT、MESH等)	建立河流生物、生境等参数与流量关系模型,求出河流适宜流量	更好地结合区域实际情况,利于多学科交叉融合	缺乏系统的检测数据和繁琐的步骤,模型迁移性差

经过多年发展,国内河流健康评价的水文指标逐步从水量、流速评价转向生态流量评价,这与我国河流健康保护从河流的水量、水质维持逐步转向整体生态保护的风向是吻合的。此外,水文特征的评价也被用于水系统形态的评估,如在欧洲被广泛使用的 IHA 法^[52],这是一种包含 32 种参数的综合水文质量评估方法。以往被忽略的寒区河流水文研究也正逐步受到重视,例如加拿大的地表水文方案(MESH)^[53]。

3.3 生境适宜性评价

生境评价,又称栖息地评价或河流物理结构评价^[56]。有研究表明,在水文条件和水质条件不变的情况下,生物群落多样性与生境异质性存在着明显的线性关系^[57]。而人类活动,如堤岸加固、河床采砂、水利枢纽建设、人工湖或人工河道的修建都会对河流的生境产生显著影响^[58]。生境评价模块目的

正是对河流的物理结构、栖息地质量进行直接评价来评估河流在自然、人类影响下的健康程度。

河流生境评价基于指标的种类和综合性考虑,大致可以分为两种。一是直接给出栖息地综合质量指数来反映生境的健康状况^[59]。但该方法往往包含大量的水质、生物等指标与其它模块重合严重且灵活性较低,不适用于多样化的评价对象。二是针对河流的物理结构作详细划分,针对各个方面进行单独评价^[60]。这种方法适用性强,应用更加广泛。

河流生境自身的复杂性决定了其保护和开发的艰巨性^[61]。因此,生境评价的方法总体朝复杂化的方向发展,伴随着 GIS 与 RS 技术的发展,遥感监测逐步取代实地考察成为生境研究数据的主要获取方式。根据 Belletti 等^[62]的统计,全世界的生境评价方法已多达上百种,主要集中于美国、欧洲、澳大利亚和中国等国家和地区(表 2)。

表 2 主要河流生境评价方法内容对比
Tab. 2 Comparison of the study of ecological flow

评价方法	评价内容									
	纵向联通性	河岸稳定性	植被状况	河岸带宽度	底质状况	水域面积	生物丰度	河道蜿蜒度	水文状况	岸线人类影响
RBP ^s ^[21] (美国)		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
HIS ^[63] (美国)							✓			
QHEI(美国)		✓	✓		✓	✓			✓	✓
RCE ^[64] (瑞典)		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
RIBI ^[65] (丹麦)			✓				✓			
RHS ^[66] (葡萄牙)	✓		✓	✓	✓				✓	✓
RHAT ^[67] (爱尔兰)	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓
ISC ^[23] (澳大利亚)		✓	✓	✓	✓					✓
MQI ^[68] (意大利)	✓	✓	✓	✓	✓					✓
河湖健康评价指南	✓	✓	✓	✓						✓

注:岸线人类影响包括渠道化的河堤、违规开发或存在点源污染的岸线、土地利用等。

3.4 生物多样性评价

河流生物群落与河流生态健康密切相关。生物的变化可以综合地反映河流系统在不同尺度、不同方面的变化,换言之,生物是各种影响下河流退化的终点^[18]。但是由于生物性评价操作的复杂性,使得其早期的使用被限制,有限的生物评价也常常局限于单一物种。90 年代以后,伴随理论和技术的发展,生物评价已经成了人们进行河流健康评价最重要的手段。

生物评价主要有两种方法,预测模型法和生物

完整性法。预测模型法通过将检测点状况与理想状态模型进行比较来评估河流的健康程度^[69],或将检测点与已知退化点进行比较来评估河流的退化情况^[70]。该方法学术性强,但由于未受干扰的点位较难获得,建模过程复杂,且以人类干扰均为负面干扰为评价出发点而饱受争议。生物完整性法则由于不需要寻找未受干扰的点位,具有较强的适用性而在河流健康评价中广受青睐,并发展出鱼类完整性指数(F-IBI)、底栖动物完整性指数(B-IBI)、藻类完整性指数(P-IBI)等多种方法(表 3)。

表 3 主要生物完整性指数内容对比
Tab. 3 Comparison of the index of biological integrity

方法名称	指示物种优点	采样方法	指标
F-IBI	分布范围广,多层次和较高级别的营养级,清晰的分类、生命周期和健康状况,且具有一定经济和美学价值 ^[74] ,相关文献也更丰富	停止网和电捕鱼通道 ^[75] 背式电鱼器和航运电捕器 ^[76] 挂网法 ^[77]	种类组成和丰度、营养结构、繁殖共位群、耐受性 ^[78] 、鱼类损失指数 ^[79] 等
B-IBI	具有较高的生物多样性,移动能力弱,对外界环境干扰敏感 ^[80] ;分布范围广,易于采集 ^[20]	Surber 网(适用于浅水) ^[81] D 型网(适用于碎石滩) ^[82] 皮得生采样器(适用于淤泥) ^[83]	多样性、密度 ^[84] 、丰度、BMWQ、种类组成 ^[85] 、耐污性 ^[86] 等
P-IBI	对重金属、水体富营养化、农药等都能快速响应 ^[38] 。研究表明,着生藻类对环境的反映能力强于浮游藻类 ^[87]	着生藻类采样:从鹅卵石上擦入容器,并加入 4% 的甲醛保存 ^[88] ;浮游藻类采样:使用 2.5L 半自动塑料水样器加 45% 甲醛固定 ^[89]	相对多度、群落多样性,物种丰富度 ^[90] 、密度、生物特性 ^[91] 等

在生物数据获取方面,相比于传统的宏观调查,eDNA 技术的应用^[71]不仅提高了生态环境状况判断的准确性^[72],也使实时自动生物监测成为了可能^[73]。

4 河流生态健康评价方法和模型

由于各个指标所表达信息量不同导致其在河流健康评价体系中影响大小有差异,指标的获取难度和成本也有很大不同。这就决定了指标不是随意选取的,最终得分也不可能是各个指标的平均累加,而是应采用科学的方法对各指标进行选取、赋分、赋权并基于合理的模型计算最终得分。

4.1 评价体系的构建

河流健康评价的难点之一就是指标的选择。从发展脉络来看,自河流健康评价的研究开展以来,学者们基于河流健康概念的发展对评价指标的筛选进行了完善。主要体现在从最初只考虑水体自身的理化性质和水文情势,到逐步关注生境与生物指标,再到强调河流在提供社会服务方面的重要性以及在各种影响下的系统动态变化趋势。当前,河流健康评价体系的构建方法不一而足,但越来越多地采用“生态系统完整性(IEI)”的方式构建指标体系^[92],其一般包括以下三个步骤:①去除无效指标。将各个采样点之间差异小于 10% 或超过 90% 采样点数据都为零的指标直接弃用^[93]。②分析候选指标对于人类干扰的响应程度。确定一种用以反映人类对河道系统影响程度的指标,通常是水质综合指标^[94-95]或栖息地综合质量指数^[96],并据此确定受损点和参照点。然后根据参照点与受损点箱型图 IQ 重叠情况:箱型图没有重叠,IQ=3;箱型图有重叠但双方中位线均不在对方箱体内,IQ=2;任意一方中位线在

对方箱体内,IQ<2。选择 IQ≥2 的指标进入下一步^[97]。3 指标独立性的检验。采用相关性分析,去除重合度较高的指标^[98]。这种标准化的范式适用于物理、化学、生物、水文等多种指标的筛选,构建与筛选过程充分体现了指标体系所追求的有效性、独立性、可行性与敏感性。

4.2 指标权重确定的方法

在多指标评价中,由于不同的指标重要性的不同,进行评价时需要给每个指标确定权重来体现该指标的重要性的强弱。指标权重的准确与否决定了它能否正确反映河流健康状况^[99]。目前,用于河流健康评价指标权重确定的方法主要有层次分析法、熵权法、神经网络法、CRITIC 法和主成分分析法等(表 4)。

表 4 主要指标权重确定方法对比
Tab. 4 Comparison of the index weight determination methods

方法名称	缺点	优点
层次分析法	主观性较强	对难以量化的多指标评价问题具有很强的适用性
熵权法	处理负值会引入主观条件,缺乏主观性	步骤明了,完全客观
神经网络法	需要已知的评价结果用于学习	消除人为影响
CRITIC 法	极端值会对赋值造成较大影响	步骤简便
主成分分析法	不能对权重给出符合实际意义的解释	消除指标相关性,减少工作量

具体来看,层次分析法是基于主观判断矩阵的一种决策分析方法。熵权法根据指标的信息熵确定指标的权重。神经网络法通过对已知评价结果的学习获取对目标重要性的判别能力。CRITIC法以指标的差异性和冲突性来衡量指标的重要程度。主成分分析法将原指标在方差中的贡献率视为指标权重。对比来看,层次分析法虽然经常被认为缺乏客观性,但由于其简单、实用,对难以量化的多指标评价问题具有很强的适用性^[100],使得其在河流健康评价的权重确定中有着极其重要的地位。其与熵权法相结合的组合赋权法已经成为河流健康评价中最主流的赋权方法^[101]。CRITIC法由于与熵权法有些类似,热度却远不及后者,导致采取该方法的文章也比较少^[102]。神经网络法因依赖于已知的评价结果使得其使用受限。主成分分析法由于不能解释权重的实际意义,极少被使用^[63]。

4.3 河流健康评价模型

目前河流健康评价所采用的模型主要有六类:模糊综合评价法、集对分析模型、物元可拓模型、云模型、贝叶斯公式和突变模型。这些方法被用于指标体系和指标权重确定后的进一步评价,包括指标赋分(定性)与计算最终评价结果。但现阶段模型之间的对比研究还比较少,特别是缺乏深入的有效性研究。

4.3.1 模糊综合评价法

模糊综合评价是对一些边界不清、量化困难的要素进行评估、计算和合成关系以进行定量化分析的一种方法。一般步骤为:首先根据得分矩阵和评价标准矩阵,结合隶属度函数计算出指标的模糊关系矩阵;然后根据指标权重和模糊算子,计算得出指标综合评价集。它可以清楚地展示各准则层和目标层相互健康程度的差异,在河流健康评价的应用中非常广泛。如Luo等^[104]采用模糊综合评价法和熵权法对淮河污染最严重的支流沙营河进行了评价;马克迪等^[105]采用POME模糊评价模型对江苏境内32条骨干河流进行了评价,并引入最大隶属度原则有效性检验。

4.3.2 集对分析模型

集对分析法是处理两个集合之间确定与不确定性关系的方法,通过相同、相异、相反联系数来反映事物之间的联系与差异。Zhao等^[106]采用集对分析法对合肥十五里河的生态和社会服务功能进行了评价。五元联系数法在集对分析法的基础上将相异系数进一步划分为五个,从而更加准确地分析事物的关系以增加评价的准确性。李海霞等^[107]利用五元

联系数法对辽河沈阳段的健康程度进行了评价,采用最大联系数确定其健康度。金菊良等^[108]在北运河的研究表明,五元联系数法的评价结果要略低于集对分析法。

4.3.3 物元可拓模型

物元可拓模型是针对大量不相容的复杂问题,根据各层次、各阶段的需要从定量的角度将不相容的矛盾转化为相容矛盾从而实现最佳决策的一种方法度。该方法依据某一等级各个指标的取值范围和各个指标的取值总范围建立经典域和节域,然后结合指标实测值和关联函数计算得出各个指标对于各个健康等级的关联度^[109]。本方法步骤明了,范式相对固定。

4.3.4 云模型

云模型是基于概率统计学和模糊数学,处理定量描述和定性概念之间模糊性和随机性联系,并构建二者的映射关系的模型。定量描述和定性概念即为指标的实测值和健康等级^[110]。有研究表明,该方法与集对分析法和模糊评价法具有较好的一致性,但目前其在河流健康评价的应用还比较少。

4.3.5 贝叶斯公式

贝叶斯公式是统计学中的一个基本公式,用来描述两个条件概率之间的关系。基本思路为,在已知某个健康等级情况下,基于几何概念,求得指标实测值隶属于它的概率^[111]。但由于先验概率很难给定,该方法一般采取人为设定的 $1/c$ 为先验概率,即认为指标属于每个健康等级的概率是一样的,这一点还有待改进。

4.3.6 突变模型

突变模型通过突变理论和模糊数学结合产生的隶属函数对评估目标进行多层次分析,有效避免了由于指标权重分配造成的潜在误差,但缺点也很明显,即状态变量不能超过5个。张泽中等^[33]针对河湖长制中的河湖分为省、市、县三级管辖,设计了三级指标评定标准并将河流按照人类社会影响程度划分为4类,并据此标准使用突变模型对广西潮河进行了评价。

4.4 健康障碍因子识别与修复

系统健康障碍因子的识别是连接评价工作与修复措施的桥梁。只有进行障碍因子与驱动性评价,才能从较为概括的综合评价中剥离出反映具体影响因素的单因子要素^[59]。常见的障碍因子识别方法有地理探测器、OLS回归、STIRPAT模型和障碍度模型等,但在河流健康评价领域的均未大量应用,目前相关研究仍以敏感性分析和讨论为主。张金良

等^[112]借助标准白化可能度函数计算了黄河健康因子在年尺度上的权重变化以分析其敏感性。李银久等^[102]根据因子贡献度与指标偏离度对光洞河健康做了驱动力分析,结果表明重金属污染是限制河流健康主要因子。

河流生态修复旨在通过恢复河流生态结构、功能和生物的完整性,来恢复河流中退化、受损、被破坏的生态系统的过程^[113]。在具体修复措施方面,主要包括生态调水、养鱼通道建设、大坝拆除与改造、河流地貌恢复、漫滩重建、植被恢复等。实际修复过程中应特别注意以人为本、以生态为导向,切忌“三面光”(河底和两岸护坡全部硬化)河道,或一味为了保证岸带植被完整而拒绝有益的开发,科学建设下的具有生态活性的岸线可提供拦截降水径流、削减面源污染、提高绿地率等多种社会功能。因此,在河流及其周边,协调好这种人类活动密集区与生态脆弱区叠加地带的生态与社会需求,不仅是建设海绵与韧性城市的重要组成部分,更是两岸人民福祉建设的根本。

5 总结与展望

河流健康评价工作在保护河流方面起着重要作用,但相较于其它专题类型研究,如针对生态流量、水质评价的研究,后者通常聚焦于河流的某个特征,具有研究区域小或研究类型单一、资料时间序列长和方法复杂的特点,而河流健康评价所使用的方法通常较为简单,关注的时间跨度比较小,但得益于其指标的全面性,和将模糊的河流健康状况通过指标进行直观表征的方式,可以较为容易识别河流健康的受损点和确定修复计划,使其更适用于进行全国性的河流健康普查。目前,我国河流健康评价工作虽已大量开展,但尚未引起学术界足够的重视^[3],为了河流健康评价能更好地服务于社会,未来的发展趋势和研究重点应着眼于以下几个方面。

1) 科学界定指标的阈值。目前,许多评价体系对指标健康的定义是缺乏显著生态学意义的,这已经成为准确评估河流状态的重要障碍。例如,许多研究使用水文学法确定生态流量,对生态环境的具体需要有所忽略。应加强基于生态健康的多目标生态指标适宜性研究,强化关系模型在河流健康评价中的应用。此外,由于河流的状态时刻处于动态变化之中,指标动态赋值将更具有意义^[114],为此应建立连续性、长系列的生态监测体系。

2) 明晰河流健康的敏感因子,并对这些敏感因子背后的驱动因素进行溯源研究。例如气候变化会

对河流生态需水、水系连通性等产生显著影响^[115],而人类活动造成的土地利用变化则会显著改变河岸带的景观结构^[116]。明确这些原始驱动因子对识别河流生态健康的压力源和探究河流系统对环境影响的响应机制具有重要意义。

3) 开展河流分级分类研究。地理事物具有极强的空间异质性与尺度依赖性,河流也不例外。一方面就研究区域来说,不同区域的主导生态因子不同,例如内流河的径流量、黄河的泥沙输送等,应改变现有的普遍轻视主观评价的观念,重视专家评价和主观建立权重体系的必要性,强调不同类型研究对象的评价体系的区分度,并开展河流分类研究。另一方面,针对不同尺度下的河流评价,由于不同尺度上某些因素的作用强度是不同的,需特别注意指标在当前尺度下的有效性。此外,在大型河流评估时,必然涉及到河流分段的划定,而相关研究目前仍处于起步阶段^[117]。

4) 与流域高质量发展和河长制的耦合研究。2021年,黄河流域生态保护与高质量发展上升为国家战略,这是新的发展风向标,而河流系统与人类社会发展的协调耦合正是实现流域高质量发展的关键内容。但在当前的研究工作中,河流健康与调水调沙、生态修复、岸线治理的耦合仍旧较少,没有很好地参与对现实工作的指导。应充分发挥河流健康评价在河流生态管理中的作用,建立完善的评估与考核体系,并积极开展基于河流健康评价的流域生态修复研究。

参考文献:

- [1] ZINGRAFF-HAMED A, BONNEFOND M, BONTHOUX S, et al. Human-River Encounter Sites: looking for harmony between humans and nature in cities[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2864.
- [2] LU Weiwei, XU Chao, WU Juan, et al. Ecological effect assessment based on the DPSIR model of a polluted urban river during restoration: a case study of the Nanfei River, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 96(Part 1): 146-152.
- [3] WEN Ce, ZHEN Zhuo, ZHANG Ling, et al. A bibliometric analysis of river health based on publications in the last three decades[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 15400-15413.
- [4] 彭文启. 河湖健康评估指标、标准与方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 394-404, 416.
PENG Wenqi. Research on river and lake health assessment indicators, standards and methods[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-

- power Research, 2018, 16(5): 394-404, 416.
- [5] 柴朝晖,姚仕明. 河流生态研究热点与进展[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 68-74.
CHAI Chaohui, YAO Shiming. Several hotspots and progress of river ecology research[J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 68-74.
- [6] HARON N A, YUSUF B, SULAIMAN M S, et al. Morphological assessment of river stability: review of the most influential parameters [J]. Sustainability, 2022, 14(16): 10025.
- [7] FEIO M J, HUGHES R M, CALLISTO M, et al. The biological assessment and rehabilitation of the world's rivers: an overview[J]. Water, 2021, 13(3): 371.
- [8] 鞠茜茜,柳长顺. 幸福河评价方法研究进展[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 7-12.
JU Qiqi, LIU Changshun. Research progress of Happy River evaluation method[J]. Yellow River, 2023, 45(3): 7-12.
- [9] 彭定华,刘哲,张彦峥,等. 水生态环境质量评价方法及在黄河流域的应用进展[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 41-54.
PENG Dinghua, LIU Zhe, ZHANG Yanzheng, et al. Evaluation methods of aquatic ecological environment quality and their application progress in the Yellow River Basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(2): 41-54.
- [10] KARR J R. Defining and measuring river health[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 221-234.
- [11] SCHOFIELD N J, DAVIES P E. Measuring the health of our rivers[J]. Water, 1996, 5(6): 39-43.
- [12] 赵彦伟,杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向[J]. 地理科学, 2005(1): 119-124.
ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. River health: concept, assessment method and direction [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005(1): 119-124.
- [13] 范小杉,何萍. 河流生态系统服务研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(8): 852-864.
FAN Xiaoshan, HE Ping. Research progress, existing problems and future direction on river ecosystem service[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(8): 852-864.
- [14] CAI Ailing, WANG Jun, MACLACHLAN I, et al. Modeling the trade-offs between urban development and ecological process based on landscape multi-functionality and regional ecological networks[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2020, 63(13): 2357-2379.
- [15] FAIRWEATHER P G. State of environment indicators of 'river health': exploring the metaphor [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 211-220.
- [16] NORRIS R H, THOMS M C. What is river health? [J]. Freshwater biology, 1999, 41(2): 197-209.
- [17] MEYER J L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1997, 16(2): 439-447.
- [18] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 602-608.
WU E-nuo, YANG Kai, CHE Yue, et al. Characterization of rivers health status and its assessment [J]. Advances In Water Science, 2005, 16(4): 602-608.
- [19] 王国胜,徐文彬,林亲铁,等. 河流健康评价方法研究进展[J]. 安全与环境工程, 2006(4): 14-17.
WANG Guosheng, XU Wenbin, LIN Qintie, et al. Progress on evaluating methods for river health [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006(4): 14-17.
- [20] 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.
- [21] ZHAO C, PAN T, DOU T, et al. Making global river ecosystem health assessments objective, quantitative and comparable [J]. Science of The Total Environment, 2019, 667: 500-510.
- [22] NAKAMURA K, TOCKNER K, AMANO K. River and wetland restoration: lessons from Japan [J]. BioScience, 2006, 56(5): 419-429.
- [23] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453-468.
- [24] BOULTON A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 469-479.
- [25] BAATRUP-PEDERSEN A, LARSEN S E, ANDERSEN D K, et al. Headwater streams in the EU Water Framework Directive: evidence-based decision support to select streams for river basin management plans [J]. Science of The Total Environment, 2018, 613/614: 1048-1054.
- [26] 梁耀元,陈小奎,李洪远,等. 韩国城市河流生态恢复的案例与经验 [J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 93-96, 100.
LIANG Yaoyuan, CHEN Xiaokui, LI Hongyuan, et al. Analysis and inspiration of urban river restoration cases in Korea [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 93-96, 100.
- [27] NANDI I, TEWARI A, SHAH K. Evolving human dimensions and the need for continuous health assessment of Indian rivers [J]. Current Science, 2016, 111(2): 263-271.
- [28] FIERRO P, ARISMENDI I, HUGHES R M, et al. A benthic macroinvertebrate multimetric index for Chilean Mediterranean streams [J]. Ecological Indicators,

- 2018, 91: 13-23.
- [29] BUSS D F, VITORINO A S. Rapid bioassessment protocols using benthic macroinvertebrates in Brazil: evaluation of taxonomic sufficiency[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(2): 562-571.
- [30] GETACHEW M, MULAT W L, MERETA S T, et al. Challenges for water quality protection in the greater metropolitan area of Addis Ababa and the upper a-wash basin, Ethiopia-time to take stock[J]. *Environmental Reviews*, 2021, 29(1): 87-99.
- [31] KO N T, SUTER P, CONALLIN J, et al. The urgent need for river health biomonitoring tools for large tropical rivers in developing countries: preliminary development of a river health monitoring tool for Myanmar Rivers[J]. *Water*, 2020, 12(5): 1408.
- [32] 唐涛,蔡庆华,刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. *应用生态学报*, 2002(9):1191-1194.
TANG Tao, CAI Qinghua, LIU Jiankang. River ecosystem health and its assessment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002(9): 1191-1194.
- [33] 张泽中,和春华,苏之鸿,等. 改进突变模型在河流健康评价中的应用[J]. *人民黄河*, 2022, 44(6):94-99.
ZHANG Zezhong, HE Chonghua, SU Zhihong, et al. Application of improved catastrophe model in river health evaluation [J]. *Yellow River*, 2022, 44(6): 94-99.
- [34] 周子俊,单凯,姜广艳,等. 新形势下黄河健康评估指标体系研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(8):79-83,129.
ZHOU Zijun, SHAN Kai, LOU Guangyan, et al. Study on health assessment index system of the Yellow River under new situation [J]. *Yellow River*, 2021, 43(8): 79-83, 129.
- [35] USTAOĞLU F, TAŞ B, TEPE Y, et al. Comprehensive assessment of water quality and associated health risk by using physicochemical quality indices and multivariate analysis in Terme River, Turkey[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(44): 62736-62754.
- [36] BAIN M B, HARIG A L, LOUCKS D P, et al. Aquatic ecosystem protection and restoration: advances in methods for assessment and evaluation[J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(S1): 89-98.
- [37] GRINSTEAD S, KELLY B, SIEPKER M, et al. Evaluation of two fish-based indices of biotic integrity for assessing coldwater stream health and habitat condition in Iowa's driftless area, USA[J]. *Aquatic Ecology*, 2022, 56: 983-1000.
- [38] 刘园园,阿依巧丽,张森瑞,等. 着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(11):3833-3843.
LIU Yuanyuan, AYI Qiaoli, ZHANG Senrui, et al. Comparative study on the suitability of periphytic algae and phytoplankton in river health assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3833-3843.
- [39] 侯佳明,胡鹏,刘凌,等. 基于模糊可变模型的秦淮河健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(3):1-8.
HOU Jiaming, HU Peng, LIU Lin, et al. Health assessment of Qinhuai River ecosystem based on variable fuzzy sets[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(3): 1-8.
- [40] SANKHLA M, KUMAR R, BISWAS A. Dynamic nature of heavy metal toxicity in water and sediments of Ayad River with climatic change[J]. *International Journal of Hydrology*, 2019, 3(5): 339-343.
- [41] DEBNATH A, SINGH P K, SHARMA Y C. Metallic contamination of global river sediments and latest developments for their remediation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113378.
- [42] XU Zhaoan, LI Tao, BI Jun, et al. Spatiotemporal heterogeneity of antibiotic pollution and ecological risk assessment in Taihu Lake Basin, China[J]. *Science of The total environment*, 2018, 643: 12-20.
- [43] RANJAN N, SINGH P K, MAURYA N S. Pharmaceuticals in water as emerging pollutants for river health: a critical review under Indian conditions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 247: 114220.
- [44] XIE Haiwen, HAO Hongshan, XU Nan, et al. Pharmaceuticals and personal care products in water, sediments, aquatic organisms, and fish feeds in the Pearl River Delta: occurrence, distribution, potential sources, and health risk assessment [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 659: 230-239.
- [45] 陈歆,靳甜甜,苏辉东,等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用[J]. *生态学报*, 2019, 39(3):799-809.
CHEN Xin, JIN Tiantian, SU Huidong, et al. Construction and application of health assessment index system for Lhasa River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 799-809.
- [46] JIANG Liuzhi, BAN Xuan, WANG Xuelei, et al. Assessment of hydrologic alterations caused by the Three Gorges Dam in the middle and lower reaches of Yangtze River, China [J]. *Water*, 2014, 6(5): 1419-1434.
- [47] ZUO Q, LIANG S. Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 368: 275-280.
- [48] XU Fei, WANG Yonggang, WANG Xu, et al. Establishment and application of the assessment system on ecosystem health for restored urban rivers in North China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5619.

- [49] ZIEGEWEID J R, JOHNSON G D, KRALL A L, et al. Quantifying relations between altered hydrology and fish community responses for streams in Minnesota [J]. *Ecological Processes*, 2022, 11: 536-560.
- [50] 朱惇,贾海燕,周琴. 汉江中下游河流健康综合评价研究[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(1):1-8.
ZHU Dun, JIA Haiyan, ZHOU Qin. Comprehensive health evaluation of the middle and lower Hanjiang River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(1): 1-8.
- [51] 江善虎,周乐,任立良,等. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3):356-365.
JIANG Shanhu, ZHOU Le, REN Liliang, et al. Quantifying attribution of the river hydrological health variation based on ecological-flow threshold method [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 356-365.
- [52] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [53] WHEATER H S, POMEROY J W, PIETRONIRO A, et al. Advances in modelling large river basins in cold regions with Modélisation Environnementale Communautaire—Surface and Hydrology (MESH), the Canadian hydrological land surface scheme[J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(4): e14557.
- [54] 张乐,徐慧. 宁夏人工河道典农河的健康状态评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(2):16-22.
ZHANG Le, XU Hui. Health evaluation of Diannong River in Ningxia[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(2): 16-22.
- [55] 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.
- [56] 陈进. 长江健康评估与保护实践[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(2):1-6, 20.
CHEN Jin. Practices of health assessment and protection of the Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(2): 1-6, 20.
- [57] 李春晖,崔崑,庞爱萍,等. 流域生态健康评价理论与方法研究进展[J]. *地理科学进展*, 2008, (1):9-17.
LI Chunhui, CUI Wei, PANG Aiping, et al. Progress on theories and methods of watershed eco-health assessment[J]. *Progress in Geography*, 2008, (1): 9-17.
- [58] 唐家璇,曾庆慧,胡鹏,等. 近 60 年长江流域河流纵向连通性演变特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1):40-53.
TANG Jiaxuan, ZENG Qinghui, HU Peng, et al. Evolution characteristics of river longitudinal connectivity within Yangtze River basin in the past 60 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(1): 40-53.
- [59] 田震,敖偲成,李先福,等. 高黎贡山南段河流生态系统健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(1):25-33.
TIAN Zhen, AO Sicheng, Li Xianfu, et al. Health assessment of river ecosystem of the Southern Gaoligong Mountains[J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 25-33.
- [60] 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.
- [61] SINGH R, TIWARI A, SINGH G S. Managing riparian zones for river health improvement: an integrated approach[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2021, 17(2): 195-223.
- [62] BELLETTI B, RINALDI M, BUIJSE A, et al. A review of assessment methods for river hydromorphology [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 2079-2100.
- [63] 夏继红,秦如照,窦传彬,等. 中小河流鱼类生境适宜性评估模型与等级分区[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3):9-13, 31.
XIA Jihong, QIN Ruzhao, DOU Chuanbin, et al. Habitat suitability assessment model and suitability grading classification for fishes in small and medium rivers[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 9-13, 31.
- [64] PETERSEN JR R C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape[J]. *Freshwater Biology*, 1992, 27(2): 295-306.
- [65] ALEMU T, BAHRNDORFF S, PERTOLDI C, et al. Development of a plant based riparian index of biotic integrity (RIBI) for assessing the ecological condition of highland streams in East Africa[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 77-85.
- [66] FERREIRA J, PÁDUA J, HUGHES S J, et al. Adapting and adopting River Habitat Survey: problems and solutions for fluvial hydromorphological assessment in Portugal [J]. *Limnetica*, 2011, 30(2): 0263-0272.
- [67] MURPHY M, TOLAND M. River hydromorphology assessment technique (RHAT). Training guide [R]. Ireland: Training guide. Northern Ireland Environment Agency, Department of the Environment, 2012: 2-18.
- [68] RINALDI M, SURIAN N, COMITI F, et al. A method for the assessment and analysis of the hydro-

- morphological condition of Italian streams: the Morphological Quality Index (MQI)[J]. *Geomorphology*, 2013, 180/181: 96-108.
- [69] HAWKINS C P. Quantifying biological integrity by taxonomic completeness: its utility in regional and global assessments[J]. *Ecological Applications*, 2006, 16(4): 1277-1294.
- [70] ROTH N, SOUTHERLAND M, CHAILLOU J, et al. Maryland biological stream survey: development of a fish index of biotic integrity[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51(1): 89-106.
- [71] XI Haojun, LI Tianhong, YUAN Yibin, et al. River ecosystem health assessment based on fuzzy logic and harmony degree evaluation in a human-dominated river basin[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2023, 9: 0041.
- [72] LI Feilong, ZHANG Yan, ALTERMATT F, et al. Consideration of multitrophic biodiversity and ecosystem functions improves indices on river ecological status[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(24): 16434-16444.
- [73] SEPULVEDA A J, HOEGH A, GAGE J A, et al. Integrating environmental DNA results with diverse data sets to improve biosurveillance of river health[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 620715.
- [74] LI Tianhong, HUANG Xulei, JIANG Xiaohui, et al. Assessment of ecosystem health of the Yellow River with fish index of biotic integrity[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 814(1): 31-43.
- [75] CASATTI L, FERREIRA C P, LANGEANI F. A fish-based biotic integrity index for assessment of lowland streams in southeastern Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 623(1): 173-189.
- [76] 刘杨,陈凯,蔡永久,等. 应用鱼类完整性指数 F-IBI 评价巢湖流域的主要河流健康[J]. *中国环境监测*, 2018,34(6):73-83.
LIU Yang, CHEN Kai, CAI Yongjiu, et al. The health assessment of the main rivers in the Chaohu Basin using fish-index of biotic integrity[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 73-83.
- [77] 张杰,苏航,盛楚涵,等. 浑太河河流生态系统完整性评价体系的构建[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 363-374.
ZHANG Jie, SU Hang, SHENG Chuhan, et al. Construction of an evaluation system to assess the ecosystem integrity of the Hun-Tai River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 363-374.
- [78] 蒋孝燕,陈超,冯志政,等. 基于鱼类生物完整性指数的曹娥江流域水生态系统健康评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2023,39(6):767-773.
JIANG Xiaoyan, CHEN Chao, FENG Zhizheng, et al. A Fish-based index of biotic integrity for the health assessment of aqua-ecological system in Caod'e River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(6): 767-773
- [79] 邓梁堃,张翔,高仕春,等. 基于模糊逻辑的河流健康评价与敏感因子识别[J]. *中国农村水利水电*, 2022(4):100-105,113.
DENG Liangkun, ZHANG Xiang, GAO Shihcun, et al. River health assessment and sensitive factor identification based on fuzzy logic[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022 (4): 100-105, 113.
- [80] 王军,周琼,谢从新,等. 新疆额尔齐斯河大型底栖动物的群落结构及水质生物学评价[J]. *生态学杂志*, 2014,33(9):2420-2428.
WANG Jun, ZHOU Qiong, XIE Congxin, et al. The community structure of macrozoobenthos and biological assessment of water quality in the Irtysh River of Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(9): 2420-2428.
- [81] MONDY C P, VILLENEUVE B, ARCHAIMBAULT V, et al. A new macroinvertebrate-based multimetric index (I2M2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands: a taxonomical and trait approach[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 452-467.
- [82] 王旭,王恒嘉,王永刚,等. 基于大型底栖动物完整性指数(B-IBI)的密云水库上游河流(北京段)水生态健康评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(2): 157-167.
WANG Xu, WANG Hengjia, WANG Yonggang, et al. Ecological health assessment on upstream watershed of Miyun Reservoir (Beijing Section) using benthic index of biotic integrity (B-IBI)[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(2): 157-167.
- [83] XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, DUAN Xuehua, et al. Effects of pollution on macroinvertebrates and water quality bio-assessment[J]. *Hydrobiologia*, 2014, 729(1): 247-259.
- [84] 孙徐阳,李卫明,粟一帆,等. 香溪河流域水生态系统健康评价[J]. *环境科学研究*, 2021,34(3):599-606.
SUN Xuyang, LI Weiming, SU Yifan, et al. Health assessment of aquatic ecosystem in Xiangxi River Basin, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(3): 599-606.
- [85] KING R S, BAKER M E, KAZYAK P F, et al. How novel is too novel? Stream community thresholds at exceptionally low levels of catchment urbanization[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(5): 1659-1678.
- [86] 张坤,李卫明,陈圣盛,等. 基于大型底栖动物的黄柏河河流健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(10):2218-2229.
ZHANG Kun, LI Weiming, CHEN Shengsheng, et

- al. River health assessment based on macroinvertebrates in Huangbai River, a tributary of Yangtze River, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(10): 2218-2229.
- [87] DENICOLA D M, KELLY M. Role of periphyton in ecological assessment of lakes[J]. *Freshwater Science*, 2014, 33(2): 619-638.
- [88] TAN Xiang, MA Peiming, BUNN S E, et al. Development of a benthic diatom index of biotic integrity (BD-IBI) for ecosystem health assessment of human dominant subtropical rivers, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 151: 286-294.
- [89] TENG Lihua, ZHANG B, LIU X, et al. Development and use of a phytoplankton-index of biotic integrity to assess Yongjiang River ecosystem health [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23 (3): 901-908.
- [90] BAEK S H, SON M, KIM D, et al. Assessing the ecosystem health status of Korea Gwangyang and Jinhae bays based on a planktonic index of biotic integrity (P-IBI)[J]. *Ocean Science Journal*, 2014, 49: 291-311.
- [91] 李博韬,刘凌,朱燕,等. 利用浮游植物生物完整性对河流健康进行评价[J]. *人民黄河*, 2020, 42(6): 73-78.
- LI Botao, LIU Lin, ZHU Yan, et al. Assessment of river health by using phytoplanktonic index of biotic integrity[J]. *Yellow River*, 2020, 42(6): 73-78.
- [92] 徐香勤,蔡文倩,雷坤,等. 天津市河流生态完整性评价[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2308-2317.
- XU Xiangqin, CAI Wenqian, LEI Kun, et al. Assessment of ecological integrity of rivers in Tianjin City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33 (10): 2308-2317.
- [93] 郝星晨,章群,韩博平,等. 基于鱼类生物完整性指数的广东鉴江流域环境质量评估[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(4): 679-685.
- HAO Xingchen, ZHANG Qun, HAN Boping, et al. Environmental quality assessment of Jian River Basin (Guangdong) based on fish biotic integrity index[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(4): 679-685.
- [94] NIU Lihua, LI Yi, WANG Peifang, et al. Development of a microbial community-based index of biotic integrity (MC-IBI) for the assessment of ecological status of rivers in the Taihu Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 204-213.
- [95] LI Jie, LI Yi, QIAN Bao, et al. Development and validation of a bacteria-based index of biotic integrity for assessing the ecological status of urban rivers: a case study of Qinhuai River basin in Nanjing, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 161-167.
- [96] 渠晓东,刘志刚,张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. *生态学报*, 2012, 32 (15): 4661-4672.
- QU Xiaodong, LIU Zhigang, ZHANG Yuan, et al. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (15): 4661-4672.
- [97] BARBOUR M T, GERRITSEN J, GRIFFITH G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15 (2): 185-211.
- [98] 于英潭,王首鹏,刘琳,等. 太子河本溪城区段河流水生态系统健康评价[J]. *气象与环境学报*, 2020, 36 (1): 89-95.
- YU Yingtan, WANG Shoupeng, LIU Lin, et al. Health assessment of water ecosystem in Benxi urban section of Taizi River [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, 36(1): 89-95.
- [99] 舒持恺,杨侃,王启明,等. 河流健康评价中赋权方法的研究[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(2): 61-65.
- SHU Chikai, YANG Kan, WANG Qiming, et al. Study on weighting method in river health evaluation [J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35 (2): 61-65.
- [100] 王鹏全,吴元梅,张丽娟,等. 湟水干流西宁段河流健康评价模型[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(1): 9-15.
- WANG Pengquan, WU Yuanmei, ZHANG Lijuan, et al. River health assessment model for Xining section in main stream of Huangshui River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(1): 9-15.
- [101] 鲍艳磊,田冰,张瑜,等. 雄安新区河流健康评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 5988-5997.
- BAO Yanlei, TIAN Bing, ZHANG Yu, et al. River health assessment in Xiong'an New Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 5988-5997.
- [102] 李银久,李秋华,焦树林. 基于改进层次分析法、CRITIC法与复合模糊物元 VIKOR 模型的河流健康评价[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 822-832.
- LI Yinjiu, LI Qiuhua, JIAO Shulin. River health evaluation based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and compound fuzzy matter-element VIKOR model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(4): 822-832.
- [103] 胡威,李卫明,王丽,等. 基于 GA-BP 优化模型的中、小河流健康评价研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1786-1797.
- HU Wei, LI Weiming, WANG Li, et al. Health assessment of small and medium rivers based on GA-BP optimization model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1786-1797.

- [104] LUO Zengliang, ZUO Qiting, SHAO Quanxi. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 640/641: 442-453.
- [105] 马克迪,董增川,金大伟,等. 基于改进的POME模糊综合评价模型的江苏省河流生态健康评价[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(1): 67-70, 74.
MA Kedi, DONG Zengchuan, JIN Dawei, et al. Evaluation of river ecological health in Jiangsu Province based on improved POME fuzzy comprehensive evaluation model[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(1): 67-70, 74.
- [106] 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.
- [107] 李海霞,王育鹏,徐笠,等. 基于五元联系数法的辽河保护区沈阳段河流健康评价[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(4): 562-571.
LI Haixia, WANG Yupeng, XU Li, et al. River health evaluation in Shenyang Section of Liaohe Conservation Area based on five-element relation number method[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4): 562-571.
- [108] 金菊良,李蔓,周戎星,等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 198-204.
JIN Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 198-204.
- [109] 李港,陈诚,姚斯洋,等. 基于压力-状态-响应和物元可拓模型的城市河流健康评价[J]. *生态学报*, 2022(9): 3771-3781.
LI Gang, CHEN Cheng, YAO Siyang, et al. Health assessment of urban river based on pressure-state-response and matter-element extension model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022(9): 3771-3781.
- [110] 方国华,张文慧,郭枫,等. 基于云模型的平原河流生态系统健康评价[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4): 9-16.
FANG Guohua, ZHANG Wenhui, GUO Feng, et al. Evaluation of river ecosystem health in plain river network area based on cloud model[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(4): 9-16.
- [111] 王笑宇,王国玖,李娜,等. 贝叶斯公式与模糊识别耦合方法在河流健康评价中的应用[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(1): 48-52.
WANG Xiaoyu, WANG Guojiu, LI Na, et al. Application of Bayesian formula and fuzzy recognition coupling method in river health evaluation[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(1): 48-52.
- [112] 张金良,金鑫,赵梦龙,等. 变化环境下黄河流域河流健康诊断研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(2): 363-373.
ZHANG Jinliang, JIN Xin, ZHAO Menglong, et al. Health diagnosis of river system in the Yellow River Basin under changing environment[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(2): 363-373.
- [113] LI Pushuang, LI Dan, SUN Xiaoqing, et al. Application of ecological restoration technologies for the improvement of biodiversity and ecosystem in the river[J]. *Water*, 2022, 14(9): 1402.
- [114] 赵科学,王立权,李铁男,等. 关于河湖健康评估中标赋分方法的优化[J]. *水利科学与寒区工程*, 2021, 4(2): 10-14.
ZHAO Kexue, WANG Liquan, LI Tienan, et al. Optimization of index assignment method in river and lake health assessment[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(2): 10-14.
- [115] LI Bowen, YANG Zhifeng, CAI Yanpeng, et al. The frontier evolution and emerging trends of hydrological connectivity in river systems: a scientometric review[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2021, 15(1): 81-93.
- [116] KAKORE B G, MAMUN M, LEE S-J, et al. Land-use pattern as a key factor determining the water quality, fish guilds, and ecological health in lotic ecosystems of the Asian Monsoon Region[J]. *Water*, 2022, 14(17): 2765.
- [117] 刘聚涛,温春云,胡芳,等. 基于水环境监测的河流健康评估单元划分方法及其应用研究[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(1): 129-135.
LIU Jutao, WEN Chunyun, HU Fang, et al. Study on division method and application of river health assessment unit based on water environment monitoring[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(1): 129-135.

(责任编辑 王绪迪)