

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20231204001

范荣桂, 包靓文, 李雪梅, 等. 水生态物理生境完整性评价方法研究进展[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(2): 53-65

Fan R G, Bao L W, Li X M, et al. Research progress on evaluation methods of aquatic eco-physical habitat integrity [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(2): 53-65 (in Chinese)

水生态物理生境完整性评价方法研究进展

范荣桂¹, 包靓文^{1,2}, 李雪梅^{2,3}, 冯承莲², 魏源², 苏海磊^{2,*}

1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012

3. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

收稿日期: 2023-12-04

录用日期: 2024-02-07

摘要: 流域水生态完整性从生物、物理和化学 3 个方面综合描述生态系统的结构和功能, 是近年来生态环境管理的研究热点。物理生境完整性评价作为水生态完整性评价中的重要组成部分, 能够直观反映水生态的健康状况, 受到的关注日益增多。相较于生物完整性评价和化学完整性评价, 我国关于物理生境完整性评价的研究起步较晚, 尚未形成完善的指标体系和评价方法。因此, 亟需开展物理生境完整性评价技术体系研究。本研究借鉴发达国家流域物理生境完整性评价方法的基础上, 结合我国水生态环境管理形势, 提出了我国物理生境完整性评价的指标体系和评价方法。研究结果可为我国的物理生境完整性评价和环境管理提供技术支撑。

关键词: 生态完整性; 物理生境; 评价指标; 参照状态; 环境管理

文章编号: 1673-5897(2024)2-053-13

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Research Progress on Evaluation Methods of Aquatic Eco-physical Habitat Integrity

Fan Ronggui¹, Bao Liangwen^{1,2}, Li Xuemei^{2,3}, Feng Chenglian², Wei Yuan², Su Hailei^{2,*}

1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Received 4 December 2023

accepted 7 February 2024

Abstract: Water ecological integrity of watershed describes the structure and function of the ecosystem from the aspects of biology, physics, and chemistry, which is the research focus of ecological environment management in recent years. As an important part of water ecological integrity assessment, eco-physical habitat integrity assessment can directly reflect the health status of water ecology, and has received increasing attention. Compared with biological and chemical integrity assessment, the research on eco-physical habitat integrity assessment began later in China, and no perfect index system and evaluation method have been formed. Therefore, it is urgent to investigate the technical system of eco-physical habitat integrity assessment. Based on the assessment methods of physical habitat

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC3200104, 2022YFC3702403)

第一作者: 范荣桂(1962—), 男, 教授, 研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: fanronggui@163.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: suhailei666@163.com

integrity in developed countries and the situation of water ecological environment management in China, the index system and evaluation method of eco-physical habitat integrity evaluation were proposed in China. The results can provide technical support for eco-physical habitat integrity assessment and environmental management in China.

Keywords: ecological integrity; physical habitat; evaluation indicators; reference condition; environmental management

水生态系统在人类社会发挥着极大的作用,它不仅为水资源的合理利用和保护提供了科学依据,还对维护生物多样性、提供可持续发展具有重要的作用^[1-2]。在人类活动日益频繁的情况下,水体生态环境遭到了严重破坏,例如重金属和有机物污染、河水断流、湿地萎缩、水生生物灭绝等,传统的“重开发、轻保护”大河流域资源环境开发观亟需改变^[3]。生态环境质量评价是生态保护和环境管理的重要基础和依据,为了实现可持续的生态修复与管理,亟待开展系统的水生态健康评估研究^[4]。

生态完整性(Ecological Integrity)是指在没有干扰的情况下,生态系统支持和维持其与区域自然生境相适应的一个平衡的、综合的、适宜的生物系统的能力^[5-6]。它体现在生态系统内在组成之间的依赖性,流域内自然系统包括森林、草地、农田、河流、湖库等,这些自然系统以水循环为纽带相互依赖、相互作用、相互影响形成一个完整的流域生态系统^[7-8]。在生态完整性中,完整性内涵主要分为组成、功能、结构以及系统特性4个方面,具体的描述如图1所示

示^[9-10]。其评价是目前国内外生态监测、评估与管理的研究热点,广义的生态完整性包含生态系统的物理完整性、化学完整性和生物完整性。物理完整性、化学完整性以及生物完整性三者之间具有密切的耦合性。这些因素相互作用,共同组成了一个复杂的自然体系。以往,研究人员很少关注物理完整性,但河流的物理结构为其生物系统提供了基质,也为其化学系统提供了背景。如果不先将物理完整性的恢复作为基础,任何河流补给工作,特别是河岸栖息地的恢复,是无法取得成功的^[11]。Karr 和 Dudley^[12]认为水生生物完整性描述了水生生态系统支持和维持一个平衡的、适应性的生物群落的能力,这些生物群落具有与一个地区的自然栖息地相当的物种组成、多样性和功能组织。在生态系统中,水环境将生物群落和生境条件相结合,在其达到相对稳定的情况下,对于一定范围内的外来干扰具有自我调节的恢复能力^[13]。生物与生境之间存在着密切的相互作用关系,人类应该促进加强对生物和生态资源的保护,使其免受人类活动的威胁^[14]。对于化学完

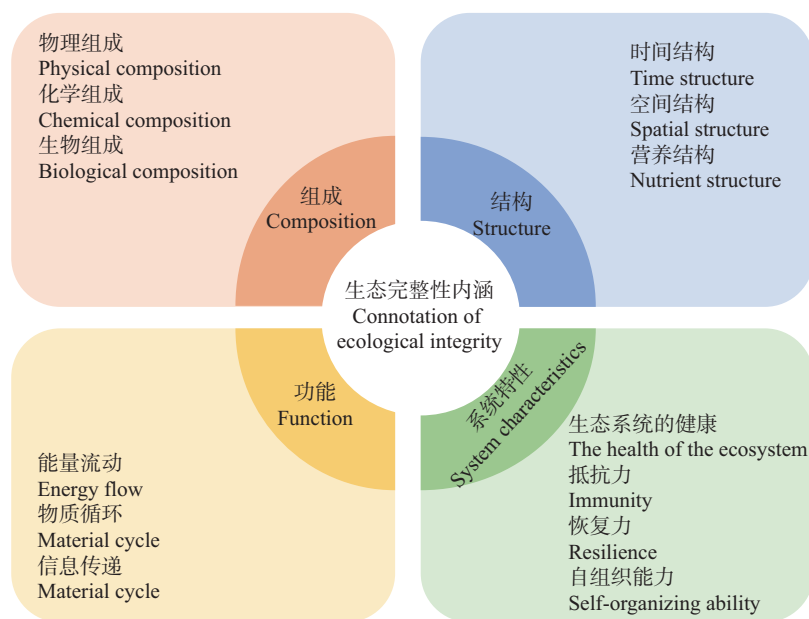


图1 生态完整性内涵描述

Fig. 1 Ecological integrity connotation description

完整性来说,它是一种能维持一个平衡的、完整的、适应性的,包含所有的元素和过程的生物系统的能力。在对水质进行化学完整性评估时,必须识别出主要的化学指标,选择的化学指数需要符合化学完整性的要求^[15]。根据流域水生态完整性对化学完整性提出的要求和“目标-要素-指标”分层结构,构建基于流域水化学完整性评价指标体系。

关注和开展物理生境完整性能够维持水生态系统的结构和功能以及稳定性,还能够提高系统的修复能力,减少水土流失对河岸和农田的侵蚀,这对于保障人类社会的可持续发展和生态环境的健康是必要的^[16]。通过评估和监测水生态物理生境的完整性,可以及时发现和解决水体受到的污染、过度开发等问题,从而保护水生态系统的完整性和多样性。随着对物理生境重要性的认识不断提高,国外已经开展了关于物理生境完整性的研究。与国外相比,我国在物理生境完整性方面的研究基础相对较弱,只是引进了生态完整性的相关理论,对其组成要素的认识还不够深刻,尚未建立完善的评价指标体系和评价方法。本研究从物理生境完整性的概念、意义以及评价指标体系与评价方法等方面展开论述和讨论,旨在为开展水生态完整性评价和环境管理提供技术支持。

1 物理生境完整性的内涵与研究进展(The connotation and research progress of physical habitat integrity)

1.1 概念与内涵(Concept and connotation)

作为当前国际关注的焦点,水生态系统的完整性是水生态监测和评价、水生态环境综合整治以及水生态系统保护和修复领域中的重要研究内容^[17]。如前所述,水生态完整性包括生物完整性、化学完整性和物理完整性。其中,物理生境完整性是指通过对水体物理环境质量状况进行评价,来反映水域生态系统的完整性程度。物理生境完整性评价可以为水体环境治理、水资源管理和生态保护提供科学依据,同时对世界范围的水环境污染防治也有一定的借鉴意义。

河流物理完整性的概念源自美国的《清洁水法案》,其目的是要使河流的物理、化学及生物的完整性得以保持。物理完整性概念的核心特征包括强调主动过程和形式,以及对变化或动态平衡的认识,而不是建立静态和完全可预测的状态^[11]。河流的物理整体性,是指一套河流动态过程和静止的地形形态,

如河道、河岸带、底质、河流形态等,构成的一种动态平衡,并具备一定的自我调节能力^[18]。河流的物理完整性也可以理解为河流的沿岸地带和河道水力性质的健康程度^[19],任何水生和湿生生境都离不开物理完整性的恢复。物理生境是河流生境的重要组成部分,对水生生物群落结构和功能有着重要的影响。良好的物理生境不仅可以促进生物多样性的发展,还能维持水生态系统的稳定^[20]。研究物理生境变化是水生态系统的保护和修复以及河流健康发展的关键。随着人类活动对生态环境的破坏越来越大,进行物理完整性评价对于流域生态环境和社会经济的发展具有十分重要的意义^[21]。

1.2 研究进展(Research progress)

1.2.1 国外研究进展

河流生态系统及河流生境的研究开展的较早,在河流生境的尺度、类型及评价方法等方面,已经有了比较完整的理论体系和实践经验^[22]。近年来,世界各国相继开展了河流生境评价工作,其中以英国、美国、德国为代表,已经形成了一套比较成熟的技术和方法。英国将生境分为物理生境和化学生境^[23],于1994年到1997年进行了河流生境的调查(RHS),主要根据背景资料、河道资料、沉积物特征、植被类型、河岸侵蚀、河岸带特征、土地使用情况等,对河流栖息地的自然特点和质量进行调查和评估^[16-24]。新西兰于20世纪早期对河流、湖泊和海岸等水体进行了一系列的调查和研究,主要关注水体中的生物群落、水质、物理环境等方面的特征和变化。美国于1972年发布《清洁水法》,规定国家与州及部落共同致力于保护和恢复地表水体生态系统的生物学完整性,并建立水生态学基准。《清洁水法》在物理生境方面主要通过限制污染物排放、加强水体保护和修复、加强监测和评估以及促进科技创新等措施来保护和改善水体的物理生境,从而维护水生态系统的健康和可持续发展。美国环境保护局(US EPA)在2001年建立了河流物理栖息地评价体系,从河岸带、河道宽深比、河床条件、水生动植物等方面对河流物理栖息地进行评价^[25]。此外,Barbour等^[26]提出较为全面且应用广泛的河流生境研究方法:《快速生物评估草案》,该方法通过对河岸稳定状况、人为活动干扰等因子的调查,评估河流生境质量。同时可以监测河流的理化参数,用以校准评价指数和确立参照生境状态。

澳大利亚于1992年推出“澳大利亚河流评价

系统”作为其主要工具,并随后推出“河流湿地健康评价框架”;1994年,南非水事务及森林部发起了“河流健康计划”,推出了“河流生物监测框架”,还设立了相关的评价系统和完整性指数^[27]。德国在1999年首次开展了河流栖息地评价,对河流生境进行系统研究,涵盖了各州对河流生境的调查^[28]。紧接着,欧盟于2000年发布的《水框架指令》(WFD)是欧盟成员国通过的最重要的环境立法之一,其最终目标是欧洲所有水域达到良好的状态,包括了物理生境中对水资源的管理和保护的一系列指导原则和措施。基于此,世界粮食计划署呼吁采取综合办法管理流域管理,虽然取得了重大进展,全面实施仍然面对较大的挑战^[29]。综上,国外物理生境完整性的发展历程如图2所示。

国外已经初步建立了物理生境指标体系,主要分为河流和湖库2类。河流方面,欧盟提出了水量与流态、河床结构与基质构成、河岸带结构等指标。澳大利亚尝试在河流管理实践中运用河流健康理论和评价方法,构建了溪流状况指数评估河流健康状况,并将其应用于河流管理的现状评价、管理目标的制定和实施后评价,进而指导可持续的河流管理^[30];澳大利亚的物理生境评价指标包括月径流量与参照自然状态比较、流域内城市化比例、岸坡稳定性等。US EPA提出的物理生境指标包括栖息地复杂性、岸带干扰、岸带植被覆盖、河床沉积物等。南非建立的物理生境指标体系包括河流无脊椎动物、河岸植

被、水质等。英国的生境指标体系包括河流底质特征、河道河岸植被结构与类型、河岸带状况等。德国提出的物理生境指标有植被结构、土地利用、水流形态等。新西兰将物理生境分为宏观生境、中观生境、微观生境3类,不同类别生境对应不同的评价指标。

湖库方面,US EPA建立了包括湖泊水位下降(Lake Drawdown Exposure)、湖泊栖息地复杂性(Lake Habitat Complexity)、岸带植被覆盖等的指标体系;欧盟提出的指标体系则包括与地下水的连通性、深度变化、湖床结构与基质构成、湖滨带结构等。国外物理生境完整性相关指标如表1所示。

1.2.2 我国研究现状

我国关于物理生境完整性的研究起步较晚,目前尚未形成完善的评价理论与方法。我国于20世纪90年代开始重视流域物理生境的治理,在这期间出台了一系列相关政策法规,加强了环境保护和水资源管理的力度。根据河川的生态特点,将河流划分成不同的区域化管理,并建立涵盖生物、物理栖息地和流量等条件的河流管理标准^[39]。20世纪末开始,国内许多城市开展了大型城市河道生态恢复工程,并获得了良好的经济效益、社会效益和环境效益^[40]。从2000年到2010年这一时期,中国流域物理生境治理迈入了新阶段,全面推进流域综合治理,重点是水土保持、水污染治理和生态修复^[32]。在一些重要流域,如长江流域、黄河流域等,开展了大规

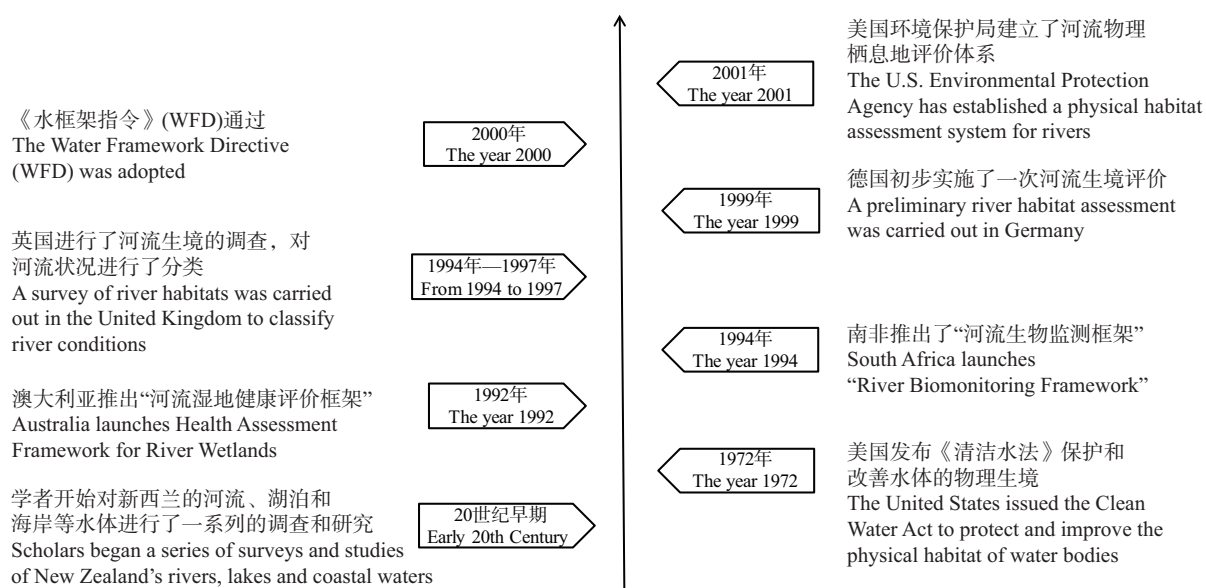


图2 国外物理生境完整性研究发展历程

Fig. 2 Development of physical habitat integrity research abroad

模的生态恢复和生态保护工程。从 2010 年到 2020 年,中国流域物理生境治理处于深化阶段^[41],加强了流域管理体制改革,建立了更加完善的流域管理机构 and 政策框架。随后,为强化流域生态环境的保护

与修复,推动人与自然和谐相处,全国人民代表大会于 2020 年 12 月 26 日和 2022 年 10 月 30 日先后通过了《中华人民共和国长江保护法》和《中华人民共和国黄河保护法》^[42-43]。

表 1 国外物理生境完整性指标
Table 1 Foreign physical habitat integrity indicators

国家/组织/机构 Nation/Organization/Agency	河流指标 River index	湖库指标 Lake and reservoir index	来源 Source
欧盟 European Union	河床结构与基质构成 River bed structure and matrix composition	与地下水的连通性 Connectivity to groundwater	[31-32]
	河岸带结构 Riparian zone structure	深度变化 Depth variation	
		湖床结构与基质构成 Lakebed structure and matrix composition	
		湖滨带结构 Lakeside zone structure	
US EPA	水量与流态、水流与水量、停留时间 Water quantity and flow pattern, Water flow and volume, Residence time		[33]
	河床沉积物 River bed sediment	湖泊水位下降 Lake water level drop	
	栖息地复杂性、岸带干扰、岸带植被覆盖 Habitat complexity, Coastal disturbance, Coastal vegetation coverage	湖泊栖息地复杂性 Lake habitat complexity	
南非 South Africa	河流无脊椎动物、河岸植被、水质、水文、形态 River invertebrates, Riparian vegetation, Water quality, Hydrology, Morphology	-	[27-34]
英国 UK	河流底质特征、河道河岸植被结构与类型、河岸带状况、土地利用类型、河道数据、沉积物特征、河岸侵蚀 Characteristics of river sediment, Structure and types of vegetation along river banks, Riparian zone condition, Land use type, River data, Sediment characteristics, Riverbank erosion	-	[35]
德国 Germany	植被结构、土地利用、水流形态、河床结构、洪泛平原 Vegetation structure, Land use, Water flow pattern, River bed structure, Flood plain	-	[36-37]
新西兰 New Zealand	宏观生境(流域地貌、河流等级等)、中观生境(河岸稳定性、流量、植被覆盖率等)、微观生境(底质稳定性等) Macro habitat (watershed landform, river grade, etc.), Meso-habitat (river bank stability, flow, vegetation coverage, etc.), Micro-habitat (sediment stability, etc.)	-	[28]
澳大利亚 Australia	月径流量与参照自然状态比较、流域内城市化比例、水电站泄流、岸坡稳定性、河床淤积与退化、冲击带的树木枝叶影响、植被宽度、顺河向植被连续性、岸边带结构完整性、乡土种覆盖比例、乡土种再生状况、湿地和洼地状况 Comparison between monthly runoff and reference natural state, Proportion of urbanization in the basin, Discharge of hydropower station, Bank slope stability, River bed siltation and degradation, Influence of tree branches and leaves in impact zone, Vegetation width, Vegetation continuity along the river, Structural integrity of coastal zone, Coverage ratio of native species, Regeneration status of native species, Status of wetlands and depressions		[38]

当前,我国水环境质量不断提高,难以适应“十四五”水环境治理从“水环境防治”向“水生态环境保护”转型的整体需求。面向长江、黄河等重要流域水生态环境保护与治理的重大需求,突破多手段、多尺度水生态环境监测新技术,建立适合我国特色的物理生境完整性评价方法,为流域水生态环境演变过程的精确评价和修复效果评价提供科学依据。研究人员基于不同的指标体系,对我国典型流域的物理生境完整性进行评价研究^[44]。在此基础上,我国也提出了一套适合国情的可持续发展战略,构建科学合理的资源环境承载力评价指标体系,其应遵循科学性、综合性、动态性、层次性、系统性、区域性基本原则。邱东和汤光华^[45]提出在选取指标时,既要进行定性的分析,也要进行定量分析,而采用定量的方法进行评价,是今后的发展趋势。苏为华^[46]认为,对综合评价指标体系进行初步筛选的方法有:分析法、综合法、交叉法、指标属性分组法,其中分析法是最基础也是最普遍的一种。为了客观、全面、科学地研究和确定生态评价指标体系及其评价方法时,要遵循 4 项原则,包括科学性和实用性原则,动态性与可操作性原则,全面性和主导性原则,可持续发展和动态性原则。

在河流健康评价方法中,指标和标准是最核心的部分,对时空尺度的确定可以作为选择评价指标的参考,而对参考基线的选择则可以作为设置评价标准的依据^[47]。在参照点的调查采样过程中,参照点应选择流域水体最接近自然状态的位点^[48],遵循以下 2 个原则:(1) 受人类的干扰最小;(2) 具有水生态系统的代表性。理想情况下,参考点值的唯一变化将与抽样误差有关,如果通过充分的抽样将其最小化,则可以在测试点检测到与预期条件的最小偏差^[49]。大部分的生态评估是将目前的水生态状况(结构、组成、功能、多样性)与原始的、未被污染的、或未被人为干预的参考状况进行对比^[50],河流、湖库健康评价参照状态的定义和设定应根据区域条件及河流定位等体现差异性^[51-52],其确定方法见表 2。欧盟 WFD 将参照状态定义为“无显著或最小人类活动干扰的状态”,即水文要素、一般物理化学元素和生物质量元素等完全或几乎不受人为活动的干扰。

2 物理生境评价指标筛选与评价方法 (Screening and evaluation methods for evaluation index of physical habitat index)

2.1 评价指标筛选(Evaluation index screening)

不同的水体类型,物理生境指标的选择也会存

在差异。评价物理生境完整性时,需要基于研究目的、研究对象和研究尺度上的差异,因地制宜选择评价指标和评价方法。研究物理生境完整性需要依靠水量情况、湖岸植被、湖岸形态、稳定性、人类活动强度、土地利用类型等指标进行评价,得出结论,这些指标可以采用传统方法和遥感方法进行调查研究。传统方法主要是以地面采样调查的方式进行。根据《湖库水生态环境质量监测与评价技术指南》中提到,由于生境的变化缓慢,在没有特殊变化时,物理生境监测可以每年调查一次。在考察过程中,如果发现生境因人为因素或自然环境的改变而发生变化,应立即进行追踪调查。例如,赵伟华等^[18]对蓄水前后各河段各评价指标赋分,进行了物理生境完整性的评价研究,运用传统样本抽样的方法计算植被覆盖度、岸坡稳定性等指标,并进行记录。王琼等^[53]在太子河流域选取了 39 个河段进行调查采样,运用相关分析和冗余分析的方法识别物理生境特征与水质状况的响应关系,采用了我国北方河流生境质量评价方法,评价指标涵盖底质、栖息复杂性、速度-深度结合特性、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水体物理特征、人类活动强度和河岸土地利用类 10 个指标,采取累计求和的方式计算生境质量综合评价指数。同样,郑丙辉等^[54]在辽河流域分别选取了 28 个不同类型的河段生境进行现场观察,并填写调查表,根据质量状况优劣程度,将指标分成 4 个级别。研究人员亲自前往现场进行数据收集和观察,这种调查方式具有真实性和准确性,提高调查结果的可信度,并且可以直接搜集原始数据,增强了数据的可靠性。但是,受自然和人为条件的影响,地面监测也存在一些限制和挑战,如时间和成本的消耗较大,样本容量有限等^[20]。

所以,遥感技术在研究中起到了非常重要的作用。遥感技术最早兴起的标志是 1956 年世界上第一颗人造地球卫星成功发射。美国于 1972 年发射了第一颗地球资源卫星(ERTS-1),后改称陆地卫星(Landsat)。我国于 1986 年启动了“资源”系列遥感卫星的研制,积累了大量航天遥感数据^[55]。遥感的空间分辨率一般从几公里到几米都有,采样范围比较大,但是一般只能处理一些空间信息和定性指数,很难定量获取生境状况,数据本身也存在噪声,预处理过程中有很多不确定定性,一般需要地面数据进行校正。常用的卫星产品有 Landsat 系列卫星、哨兵系列卫星和 MODIS 等。Landsat 系列卫星是由美

表 2 河流、湖库健康评价的参照基线确定
Table 2 Reference baselines for health assessment of rivers and lakes and reservoirs

分类 Classification	参照状况 Reference situation	说明 Explanation	
河流 River	参照点位方法 Reference point method	描述受干扰程度最低的现场的情况 Describe the situation of the least disturbed site 描述受干扰最小场地的状况 Describe the condition of the least disturbed site	在地区描述符合商定的一套最小干扰标准的地点可以提供描述最小干扰条件(MDC)所需的数据 Describing the locations that meet an agreed set of minimum interference standards in a region can provide the data needed to describe the minimum interference condition (MDC) 找到并记录一个地区或类别中受干扰最小的地点,并定量描述其生物学特征 Find and record the least disturbed place in an area or category, and quantitatively describe its biological characteristics
	最佳专业判断(BPJ) Best professional judgment (BPJ)	专家根据专业知识、经验以及相关调查确定参照状态 Experts determine the reference status according to their professional knowledge, experience and relevant investigations	
	解读历史条件 Unscramble historical conditions	根据早期笔记、照片、记录等确定 According to early notes, photos, records, etc.	
	其他估计方法 Other estimation methods	从经验模型推断 Infer from empirical model	
	周围分布 Peripheral distribution	推出生物指标和人为干扰梯度之间的关联中得出的经验模型 The empirical model derived from the correlation between biological indicators and human disturbance gradient is deduced	
		通过对当前数据做出一些假设,可以通过对当前在一个地区观察到的指数或度量值范围的各种解释来估计 By making some assumptions about the current data, it can be estimated by various interpretations of the index or measurement range currently observed in a region	
	历史数据法 Historical data method	通过基础调研收集可用的历史数据进行筛选、分析和评估,并采用一定的数据统计方法确定最终基线水平 Through basic research, available historical data are collected for screening, analysis and evaluation, and the final baseline level is determined by certain data statistics methods	
	参照区域法 Reference area method	利用未受生态环境损害事件影响的邻近区域或相邻湖泊的历史数据或现场监测数据确定基线 Determine the baseline by using the historical data or on-site monitoring data of adjacent areas or lakes that have not been affected by ecological environment damage events	
	环境标准法 Environmental standard method	以国家或地方颁布的环境标准作为评估参照,将相关法规和环境标准中的适用基准值或修复目标值作为基线水平 Take the environmental standards promulgated by the state or local government as the evaluation reference, and take the applicable benchmark value or remediation target value in relevant laws and environmental standards as the baselinelevel	
	模型推算法 Model inference algorithm	通过大量调查数据构建环境胁迫因子与湖泊生物多样性、群落组成、生物量、生态服务功能等的胁迫-响应关系预测模型,推算生态环境基线 Based on a large number of survey data, a prediction model of stress-response relationship between environmental stress factors and lake biodiversity, community composition, biomass and ecological service function is constructed, and the ecological environment baseline is calculated	

地质调查局(USGS)和国家航空航天局(NASA)共同合作开发和运营的一组地球遥感卫星,致力于提供全球范围内的高分辨率地表影像数据。最新的 Landsat 8 卫星提供了更多的光谱波段选择,空间分辨率为 15 ~ 30 m,重复周期为 16 d。MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)是由美国 NASA 在 1999 年发射的一对卫星(Terra 卫星和 Aqua 卫星)上搭载的遥感仪器,旨在获取地球表面的全球性观测数据。其每天都能够提供多次覆盖地球表面的数据,这有助于进行长时间序列的分析。哨兵系列卫星由欧洲空间局(ESA)开发,旨在提供全球范围内的高分辨率地球观测数据,支持多领域的应用。如吴传庆等^[20]介绍了河流物理生境遥感监测的应用领域,进行了物理生境遥感监测评估的实例分析,利用遥感手段监测河流的水色、河流水域占用清退、岸线开发修复等物理生境指标。除此之外,陈志等^[56]依托高分辨率卫星影像对其物理生境进行遥感监测,选取典型性河流从物理、水文、化学、生物 4 个维度构建了河流生态健康评价指标体系,开展了河流生态健康评价。

与传统的地面采样调查方法相比,遥感技术面状信息获取覆盖范围大,周期短,时效强,以图像的方式显示易于理解,并且节约了大量的人力、物力和时间等^[57]。遥感虽然有着优势但是精度没有实践调查高,要发展地面调查和卫星遥感的协同,比如地面调查结果可以验证遥感精度,改进遥感模型等。将传统的地面调查与遥感方法相结合,构建一种强大的土地信息获取和监测体系。这些地面观测数据不仅为遥感数据的验证和校准提供了基础,也为遥感影像的解译和分类提供了参考依据。与传统地面调查相结合的遥感方法主要包括 2 个方面的应用。首先,地面调查提供的实地数据可以用于遥感影像的监督分类。通过在地面采集样本并获取其光谱信息,建立与遥感数据的对应关系,可以训练分类模型,提高遥感影像的分类准确性。其次,地面调查结果可以用于验证和评估遥感数据的精度。对遥感分类结果进行地面实地验证,可以检验遥感方法的可行性和准确性,提供对遥感数据解释的实质性支持。例如俞云飞等^[58]实地观测岸坡稳定性指标,根据遥感解译图像分析出白洋淀湿地物理生境完整性的水平,采用层次分析法构建了白洋淀湿地物理生境完整性评价指标体系,并确定了各准则层及指标层权重。李敬鸿等^[59]利用遥感技术分析样点物理生境特

征及其空间区域差异,选取两景 Landsat TM 影像用以提取分析水体边界,对应采样时间选择同一年的枯水期和丰水期,均选取了无云层干扰且仪器误差较小的影像。另外还选择了一景 30 m 高分辨率的鄱阳湖底面地形影像,用以计算鄱阳湖湖底地形数据,遥感数据基于 Google Earth Engine 云平台 and ArcGIS 进行计算和校对。此外,曾鹏等^[60]采用踏查法、视觉生境评估与无人机航拍等多种方法对城区河流及沿岸特性进行了定性与半定量的记录,构建了太湖流域城市河段生境质量指数(SHQI)评价体系,分析太湖流域城市河流生境现状及空间差异。

基于已有研究基础,本研究着重选取了连通性、植被覆盖度、水体面积、天然岸线率、人类活动强度 5 个指标。其中湖泊水体面积是一个重要的地理和环境指标,反映了湖泊的大小和水资源的重要性,依据 CLCD 数据得到近 20 年来的水体面积变化情况。连通性是利用遥感图像对河流水边线内影响河流连通性的建筑物进行提取,桥梁数量主要依靠人工目视解译从 Landsat 影像中获得,计算其每 100 km 内的建筑数量,数量越少,河流连通性越好;植被覆盖度是提取河流两岸 300 m 范围内的遥感图像,植被覆盖度是越高,生态缓冲带生态功能越好^[56];人类活动强度是根据各土地利用类型及其所占面积比例进行求取,土地利用数据主要来自 CLCD;天然岸线率是利用遥感图像,对河流的岸线进行目视解译,提取出河流的天然岸线长度,其中不透水面数据来自于每年的 CLCD 数据。

2.2 指标权重及评价方法(Index scoring and evaluation method)

对于水生态物理生境完整性的评价方法有很多,比较常见的有预测模型法和多指标评价法。预测模型法操作简单、数据清晰,但对于人类活动导致河流健康破坏时,评价结果具有一定的局限性。相对地,多指标评价法目前已逐渐成为生态健康系统评价的主导方法。根据评价标准对评价指标进行赋分,客观全面地展示河流的健康情况。其缺点是赋分时带有一定的主观性,评价等级界限模糊^[61]。相比之下,国内外更多的使用多指标评价法对河流的健康进行评价,开展了很多研究并制定了相关的法律法规。

运用多指标评价法在进行综合评估时,必须科学合理确定各项指标的权重,其根据来源可以分为主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法^[62]。主观

赋权法是一种基于决策者的信息来赋权的一种方式,如专家调查法。其原始数据是一种基于经验的主观判断而得到的,如 Delphi 法、AHP 法等。客观赋权法是以原始数据间的相互关系为基础,用一种数学的方式来确定加权的,它的判定结果是不受人为因素影响的,具有很强的数理理论基础。其原始数据由各指标在被评价单位中的实际数值形成,如主成分分析法、熵值法等^[63]。组合赋权法的实质是乘法合成的归一化处理。在计算指标赋分时,也有相应的公式进行计算。例如,计算基准岸线的天然岸线率 C_2 时,可以提取出河流的天然岸线长度,计算其占河流总岸线长度的比值;指标鄱阳湖水体面积变化(基准岸线内),可以运用公式 $ASR = 1 - \frac{Ac}{Ar}$ 进行计算;选取连通性、植被覆盖度、人类活动强度等这些指标,运用层次分析法计算它们的权重及评价方法可以参考表 3^[57-64]。由于现在物理生境完整性评价还没有一致的标准去衡量,借鉴相关专家对于

国内外河流、湖泊的研究所使用的综合评价分级,按照水库的物理生境本身特征,将其划分为非常健康、健康、亚健康、不健康和病态 5 个等级,对应 [80, 100]、[60,80)、[40,60)、[20,40)和[0,20)的评价标准^[65]。

通过选择指标,初步运用层次分析方法,对河流、湖库生境的质量状况进行评价,能够定期地对河流、湖库的生境状况进行监测,为流域流域管理部门、相关科研机构以及社会公众提供有用的信息,从而推动流域资源的高效利用,实现其合理有序的开发^[22]。

3 讨论与展望 (Discussion and prospect)

由于目前的流域物理生境完整性评价指标体系还不够全面和科学,可能存在一些指标无法准确反映物理生境的完整性,或者缺乏关键指标。流域物理生境完整性评价需要大量的数据支持,包括水文、地质、土壤、植被等多个方面的数据。然而,由于数据获取困难或者数据不完整,导致评价结果的准确性和可靠性受到影响。

表 3 指标权重及评价方法表
Table 3 Table of index weights and evaluation methods

指标 Index	评价方法 Evaluation methodology	权重 Weight
连通性 Connectivity	连通指数 $0 < CIS < 0.25$ 时,分值 100;在 $0.25 < CIS < 0.5$ 时,分值 60;在 $0.5 < CIS < 1$ 时,分值 40;在 $1 < CIS < 1.2$ 时,分值为 20;当 $CIS > 1.2$ 时,分值 0 When the connectivity index is $0 < CIS < 0.25$, the score is 100; When $0.25 < CIS < 0.5$, the score is 60; When $0.5 < CIS < 1$, the score is 40; When $1 < CIS < 1.2$, the score is 20; When $CIS > 1.2$, the score is 0	0.112
植被覆盖度 Vegetation coverage	当 $0 < PCw < 5$ 时,分值 0 分;当 $5 < PCw < 25$ 时,分值 25 分;当 $25 < PCw < 50$ 时,分值 50 分;当 $50 < PCw < 75$ 时,分值 75 分;当 $PCw > 75$ 时,分值 100 分 When $0 < PCw < 5$, the score is 0; When $5 < PCw < 25$, the score is 25 points; When $25 < PCw < 50$, the score is 50 points; When $50 < PCw < 75$, the score is 75 points; When $PCw > 75$, the score is worth 100 points	0.139
水体面积 Water body area	湖泊面积萎缩比例在小于 5% 时赋分 100 分,10% 时赋分 60 分,20% 时赋分 30 分,30% 时赋分 10 分,大于 40% 时赋分 0 分 When the proportion of lake area shrinkage is less than 5%, 100 points are awarded, 10% is awarded 60 points, 20% is awarded 30 points, 30% is awarded 10 points, and more than 40% is awarded 0 points	0.161
天然岸线率 Natural shoreline rate	当 $0 < C_2 < 20\%$ 时,分值 20;当 $20\% < C_2 < 40\%$ 时,分值 40; 当 $40\% < C_2 < 60\%$ 时,分值 60;当 $60\% < C_2 < 80\%$ 时,分值 80;当 $C_2 > 80\%$ 时,分值为 100 When $0 < C_2 < 20\%$, the score is 20; When $20\% < C_2 < 40\%$, the score is 40; When $40\% < C_2 < 60\%$, the score is 60; When $60\% < C_2 < 80\%$, the score is 80; When $C_2 > 80\%$, the score is 100	0.345
人类活动强度 Intensity of human activity	当 $0 < ha < 30\%$ 时,分值 100;当 $30\% < ha < 60\%$ 时,分值 70; 当 $60\% < ha < 90\%$ 时,分值 50;当 $ha > 90\%$ 时,分值 30 When $0 < ha < 30\%$, the score is 100; When $30\% < ha < 60\%$, the score is 70; When $60\% < ha < 90\%$, the score is 50; When $ha > 90\%$, the score is 30	0.243

注: CIS 表示连通性指数,PCw 表示植被覆盖度,ha 表示人类活动强度, C_2 表示天然岸线率。
Note: CIS stands for connectivity, PCw stands for vegetation coverage, ha stands for human activity intensity, and C_2 stands for natural shoreline rate.

根据当前流域自然栖息地完整性评估中的一些问题,对未来的研究工作进行了展望。

(1)需要进一步研究和探索流域物理生境的关键指标,建立全面、科学的评价指标体系。可以考虑综合利用遥感技术、地理信息系统等现代技术手段,来获取更多、更准确的数据。同时,确立水环境治理理念,以保证水生态系统的健康。

(2)在评价结果中,除了呈现一个定性或定量的评价价值外,还应提供具体的管理建议和措施。评价结果应该能够指导流域管理和保护工作,促进生态环境的可持续发展。

(3)在政策研究方面,需要重点研究如何以法律法规或技术标准的方式纳入到我国环境保护的决策中。将水生态物理生境完整性监测工作与地方水环境常规监测衔接起来,建立基础信息数据库,为科学开展流域水生态物理生境完整性评价工作奠定基础。

通信作者简介:苏海磊(1985—),男,博士,副研究员,主要研究方向为水质基准与风险评估。

参考文献(References):

- [1] 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 J D, Su H L, Li H X, et al. Research progress of water ecological integrity assessment and application in typical watersheds [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(10): 233-241 (in Chinese)
- [2] 程佩瑄.典型流域水化学完整性评价研究:以松花江为例[D].北京:中国地质大学(北京),2020:1-2
Cheng P X. Water chemical integrity assessment in a typical watershed [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020: 1-2 (in Chinese)
- [3] 张雷,鲁春霞,李江苏.中国大河流域开发与国家文明发育[J].长江流域资源与环境,2015,24(10):1639-1645
Zhang L, Lu C X, Li J S. Developments of river basins and national civilization in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1639-1645 (in Chinese)
- [4] Huang X Y, Xu J, Liu B, et al. Assessment of aquatic ecosystem health with indices of biotic integrity (IBIs) in the Ganjiang River system, China [J]. Water, 2022, 14(3): 278
- [5] 段学军,邹辉,王晓龙,等.大河岸线生态完整性内涵及评估方法:以长江岸线为例[J].生态学报,2023,43(14):5788-5801
- Duan X J, Zou H, Wang X L, et al. Implication and assessment of the ecological integrity of riverfront along great rivers: Taking the Yangtze River as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5788-5801 (in Chinese)
- [6] González C. Evolution of the concept of ecological integrity and its study through networks [J]. Ecological Modelling, 2023, 476: 110224
- [7] 吴刚,蔡庆华.流域生态学研究内容的整体表述[J].生态学报,1998,18(6):575-581
- [8] 李琦,闫金霞,陈锋.基于生物完整性指数对水生健康评价的应用[J].工业微生物,2023,53(1):48-50
Li Q, Yan J X, Chen F. Application of biological integrity index to water ecological health assessment [J]. Industrial Microbiology, 2023, 53(1): 48-50 (in Chinese)
- [9] 成文连,刘钢,智庆文,等.生态完整性评价的理论和实践[J].环境科学与管理,2010,35(4):162-165
Cheng W L, Liu G, Zhi Q W, et al. The theory and practice of the ecological integrity assessment [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(4): 162-165 (in Chinese)
- [10] 赵鑫蕊,何思源,苏杨.生态系统完整性在管理层面的体现方式:以跨省国家公园统一管理的体制机制为例[J].生物多样性,2022,30(3):178-185
Zhao X R, He S Y, Su Y. How ecosystem integrity is realized at the management level: A case study on the system and mechanism of the unified management of a cross-provincial National Park [J]. Biodiversity Science, 2022, 30(3): 178-185 (in Chinese)
- [11] Graf W L. Damage control: Restoring the physical integrity of America's rivers [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2001, 91(1): 1-27
- [12] Karr J R, Dudley D R. Ecological perspective on water quality goals [J]. Environmental Management, 1981, 5(1): 55-68
- [13] 王艳杰.辽河流域底栖动物群落特征与生境指标关系[D].沈阳:辽宁大学,2012:1-3
Wang Y J. The relationship between characteristics of macroinvertebrates assemblages with habitat factors in Liao River Basin [D]. Shenyang: Liaoning University, 2012: 1-3 (in Chinese)
- [14] Westra L, Lemons J. Perspectives on Ecological Integrity [M]. Dordrecht: Springer, 1995: 49-51
- [15] Lyons B P, Bignell J P, Stentiford G D, et al. Determining good environmental status under the marine strategy framework directive: Case study for descriptor 8 (chemical contaminants) [J]. Marine Environmental Research,

- 2017, 124: 118-129
- [16] 罗坤. 城市化背景下河流健康评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 9-10
- Luo K. Study on river health assessment under the background of urbanization [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 9-10 (in Chinese)
- [17] Palmer M, Ruhi A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration [J]. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw2087
- [18] 赵伟华, 曹慧群, 黄苗, 等. 向家坝蓄水前后长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区物理完整性评价[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(6): 76-80
- Zhao W H, Cao H Q, Huang Z, et al. Assessment of physical integrity of national nature reserve for rare and endemic fishes in upstream Yangtze River before and after Xiangjiaba Dam impoundment [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(6): 76-80 (in Chinese)
- [19] 郭维东, 陆谦益, 张家阳, 等. 辽河干流物理生境完整性模糊综合评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(3): 310-314
- Guo W D, Lu Q Y, Zhang J Y, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for Liaohe River physical habitat integrity [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2014, 45(3): 310-314 (in Chinese)
- [20] 吴传庆, 殷守敬, 王楠, 等. 河流物理生境遥感监测研究与应用分析[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 28-32
- Wu C Q, Yin S J, Wang N, et al. Research and application of remote sensing monitoring of river physical habitats [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, 11(5): 28-32 (in Chinese)
- [21] Andreasen J K, O'Neill R V, Noss R, et al. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity [J]. *Ecological Indicators*, 2001, 1(1): 21-35
- [22] 刘华. 太湖流域典型河流生境质量评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2012: 23-26
- Liu H. Assessment of typical river habitat quality in Taihu Lake Basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012: 23-26 (in Chinese)
- [23] Wright J F. Spatial and temporal occurrence of invertebrates in a chalk stream, Berkshire, England [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 248(1): 11-30
- [24] Cunha A, Gonçalves P, Barreira J, et al. Mobile RHS: A mobile application to support the "River Habitat Survey" methodology [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 64: 87-94
- [25] Belletti B, Rinaldi M, Buijse A D, et al. A review of assessment methods for river hydromorphology [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 2079-2100
- [26] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al. Rapid bio-assessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macro-invertebrates, and fish [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 1999: 841-899
- [27] Ollis D J, Boucher C, Dallas H F, et al. Preliminary testing of the Integrated Habitat Assessment System (IHAS) for aquatic macroinvertebrates [J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2006, 31(1): 1-14
- [28] 陈婷. 平原河网地区城市河流生境评价研究: 以上海为实例[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 17-22
- Chen T. Studies on habitat assessment of urban river in China's plain water network region [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 17-22 (in Chinese)
- [29] Liao H H, Sarver E, Krometis L H. Interactive effects of water quality, physical habitat, and watershed anthropogenic activities on stream ecosystem health [J]. *Water Research*, 2018, 130: 69-78
- [30] 吴阿娜. 河流健康状况评价及其在河流管理中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2005: 7-9
- Wu A N. Study on river health assessment and its development in river management [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005: 7-9 (in Chinese)
- [31] 刘琰, 郑丙辉. 欧盟流域水环境监测与评价及对我国的启示[J]. 中国环境监测, 2013, 29(4): 162-168
- Liu Y, Zheng B H. Introduction and illumination of EU water environmental monitoring and assessment [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(4): 162-168 (in Chinese)
- [32] 金小伟, 王业耀, 王备新, 等. 我国流域水生态完整性评价方法构建[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 75-81
- Jin X W, Wang Y Y, Wang B X, et al. Methods development for monitoring and assessment of ecological integrity of surface waters in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(1): 75-81 (in Chinese)
- [33] 张文生. 清溪河流域(许昌段)河道物理生境改善研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018: 3-6
- Zhang W S. Research on physical habitat improvement of channel in Qing Yi River Basin (Xuchang Part) [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018: 3-6 (in Chinese)
- [34] Kleynhans C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa) [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996, 5(1): 41-54
- [35] 汪昱昆. 太湖流域河流生境多尺度评价研究[D]. 上海:

- 华东师范大学, 2019: 14-16
- Wang Y K. Multi-scale evaluation of river habitats in Taihu Lake Basin [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019: 14-16 (in Chinese)
- [36] Kamp U, Bock R, Hölzl K. Assessment of river habitat in Brandenburg, Germany [J]. *Limnologica*, 2004, 34 (3): 176-186
- [37] Kamp U, Binder W, Hölzl K. River habitat monitoring and assessment in Germany [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 127(1-3): 209-226
- [38] 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
- [39] 王赫. 我国流域水环境管理现状与对策建议[J]. *环境保护与循环经济*, 2011, 31(7): 62-65
- [40] 马世荣. 拦河措施对河流物理生境的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2012: 4-5
- Ma S R. Influence of wire engineering measures on physical habitat [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012: 4-5 (in Chinese)
- [41] 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): 1022-1036
- Mao Z Y, Xu L G, Lai X J, et al. Assessment on ecosystem health of Lake Poyang based on a comprehensive index method [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1022-1036 (in Chinese)
- [42] 第十三届全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国长江保护法[N]. *人民日报*, 2020-12-30 (013)
- [43] 第十三届全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国黄河保护法[N]. *人民日报*, 2022-12-01 (015)
- [44] 李远远, 云俊. 多属性综合评价指标体系理论综述[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2009, 31(2): 305-309
- Li Y Y, Yun J. Synthetic research on the theory of multi-attribute comprehensive evaluation index system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2009, 31(2): 305-309 (in Chinese)
- [45] 邱东, 汤光华. 对综合评价几个阶段的再思考[J]. *统计教育*, 1997(4): 25-27
- [46] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000: 19-21
- [47] 车越, 吴阿娜, 曹敏, 等. 河流健康评价的时空特征与参照基线探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(6): 761-767
- Che Y, Wu A N, Cao M, et al. Discussion of river health assessment on spatial and temporal scale and baseline [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(6): 761-767 (in Chinese)
- [48] 中国环境科学学会. 水生态学基准制定技术指南编制说明: T/CSES 13—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020
- [49] Davies S P, Jackson S K. The biological condition gradient: A descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems [J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2006, 16(4): 1251-1266
- [50] 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 Y P, Wang Z J. 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)
- [51] Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, et al. Setting expectations for the ecological condition of streams: The concept of reference condition [J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2006, 16(4): 1267-1276
- [52] 李小辉, 赵思琪, 代嫣然, 等. 湖泊生态环境损害基线判定技术综述[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7425-7431
- Li X H, Zhao S Q, Dai Y R, et al. Technique for determining the eco-environmental damage baseline of lakes: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (18): 7425-7431 (in Chinese)
- [53] 王琼, 李法云, 范志平, 等. 大伙房水库入库河流物理生境评价及其对水质状况的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2850-2859
- Wang Q, Li F Y, Fan Z P, et al. Assessment of river physical habitat and its relationship with water quality in the Dahuofang Reservoir inflow rivers [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9): 2850-2859 (in Chinese)
- [54] 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[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928-936
- Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 928-936 (in Chinese)
- [55] 李敬鸿. 基于遥感技术的鄱阳湖生境及鱼类群落的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021: 4-5
- Li J H. Research on Poyang Lake habitat and fish community based on remote sensing technology [D]. Tianjin:

- Tianjin University of Science & Technology, 2021: 4-5 (in Chinese)
- [56] 陈志, 李建华, 崔志杰, 等. 苏州市吴江区典型河流生态健康评价[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(12): 120-125
- Chen Z, Li J H, Cui Z J, et al. Ecological health evaluation of typical rivers in Wujiang District, Suzhou City [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39 (12): 120-125 (in Chinese)
- [57] 李鹏, 殷守敬, 崔希民, 等. 河流水生物理生境遥感评价模型与应用[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 90-95
- Li P, Yin S J, Cui X M, et al. Assessing physical and ecological environment of river using remote sensing model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 90-95 (in Chinese)
- [58] 俞云飞, 申彦科, 王红. 遥感与实测相结合的白洋淀湿地物理生境完整性评价[C]. 《环境工程》2019 年全国学术年会. 北京: 《环境工程》编委会, 工业建筑杂志社有限公司, 2019
- [59] 李敬鸿, 林鹏程, 黎明政, 等. 鄱阳湖物理生境特征及其对鱼类群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2021, 42 (5): 95-102
- Li J H, Lin P C, Li M Z, et al. Physical habitat characteristics of Poyang Lake and their influence on fish community structure [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(5): 95-102 (in Chinese)
- [60] 曾鹏, 汪昱昆, 刘垚焱, 等. 基于河段尺度的太湖流域城市河流生境评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 581-589
- Zeng P, Wang Y K, Liu Y Y, et al. A river stretch scale assessment of urban river habitat in the Taihu Lake Basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (2): 581-589 (in Chinese)
- [61] 冯颖紫, 彭祺, 桂发亮, 等. 河流健康评价方法及指标体系研究进展[J]. 江西水利科技, 2023, 49(2): 135-142
- Feng Y Y, Peng Q, Gui F L, et al. Research progress on river health evaluation methods and index system [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2023, 49 (2): 135-142 (in Chinese)
- [62] 杨学强, 李文俊, 岳勇. 综合评价指标权重确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(1): 101-105
- Yang X Q, Li W J, Yue Y. A method for ascertaining comprehensive evaluation index weight [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(1): 101-105 (in Chinese)
- [63] 曾宪报. 组合赋权法新探[J]. 预测, 1997, 16(5): 69-72
- [64] 南京水利科学研究院, 中国水利水电科学研究院. 河湖健康评价指南(试行)[R]. 北京: 水利部河湖管理司, 2020
- [65] 郭维东, 盛静, 孙翠玲, 等. 多沙河流水库物理生境完整性模糊评价[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 82-84, 89
- Guo W D, Sheng J, Sun C L, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on physical habitat integrity of sandy river reservoir [J]. Yellow River, 2015, 37(7): 82-84, 89 (in Chinese) ◆