

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20231026001

黄文杰, 王锦东, 闫振飞, 等. 河口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 W J, Wang J D, Yan Z F, et al. Research and advances in estuarine aquatic ecological integrity assessment methods [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(1): 74-90 (in Chinese)

河口生态完整性评价方法研究和进展

黄文杰, 王锦东, 闫振飞, 冯承莲*

中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

收稿日期: 2023-10-26 录用日期: 2023-12-31

摘要: 河口是连接淡水和海洋环境的重要过渡区, 在维持生物多样性和生态系统服务方面发挥着重要作用。河口的生态完整性对于生态系统的可持续管理和保护至关重要。本文对河口生态完整性评价进行了文献计量学分析, 重点介绍了河口生态完整性评价的评价方法和指标选择。主要包括物理化学指标、生物指标和社会经济指标。通过案例研究系统分析了不同指标选取对河口生态完整性评价的重要性。最后, 指出了在河口生态完整性评价中仍面临一些问题, 并针对这些问题提出了几点建议。

关键词: 河口; 水生态完整性评价; 指示物种法; 指标体系法; 指标选取

文章编号: 1673-5897(2024)1-074-17 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Research and Advances in Estuarine Aquatic Ecological Integrity Assessment Methods

Huang Wenjie, Wang Jindong, Yan Zhenfei, Feng Chenglian*

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Received 26 October 2023 accepted 31 December 2023

Abstract: The estuary is a critical transitional zone between freshwater and marine ecosystems, which plays a pivotal role in the preservation of biodiversity and the provision of ecosystem services. The ecological integrity of estuaries is vital in the sustainable ecosystem management and conservation. This study conducted a bibliometric analysis of estuarine ecological integrity assessment, focusing on the methodologies and the selection of relevant indicators. The methodology primarily included physical-chemical, biological, and socio-economic indicators. The evaluation's significance was systematically analyzed through various indicators in several case studies. Finally, the paper identifies ongoing challenges in assessing estuarine ecological integrity and offers several suggestions to address them.

Keywords: estuary; aquatic ecosystem integrity assessment; indicator species method; index system method; indicator selection

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200104)

第一作者: 黄文杰(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态完整性评价方法和应用, E-mail: crystallization@foxmail.com

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

广义的河口是指河流汇入受纳水体时形成的交界区域,是河流与受水体的过渡带。根据受水体的不同,河口可分为入海河口、入湖河口、入库河口和支流河口等类型。该术语的词源源自拉丁语“*Aestus*”,意为“潮汐的”。河口的狭义概念仅包括受潮汐和径流影响的区域,即入海河口^[1]。本文所出现的河口均指狭义上的河口。作为淡水与海水相遇的交界处,河口是陆地和海洋生态系统相互联系的重要区域,既承载着流域与海洋之间的物质交换,又具有河流与海洋生态系统的特征^[2]。河口地区因其得天独厚的地理和环境条件,常成为经济发达且人口密集的区域^[3]。近年来,随着经济社会的发展和人口增长,河口地区受到了一系列人为胁迫因素的影响,导致沉积物、营养物质和污染物负荷增加,栖息地退化等^[4-5]。它们改变了河口区的群落组成和物种多样性,破坏了河口的生态功能,同时对河口所能提供的生态系统服务也有巨大的影响^[6],严重制约了河口地区的发展。因此对河口生态系统的完整性状况进行评价具有十分必要的意义。在这方面,水环境质量是其中重要的评价指标之一。评价河口水环境质量可以采用水质指数、污染指数等多种方法^[7]。然而,仅仅评价水环境质量还无法全面反映河口生态系统的完整性。因此,水生态完整性评价在这个过程中起到了重要作用。水生态完整性评价是一种定量的、系统的评价方法,是对生态系统的结构、功能和过程进行全面综合评价,能够为生态保护和管理提供科学依据。水生态系统完整性研究是国际热点,维护水生态系统健康和稳定已经成为了世界各国的目标和管理策略^[8]。

生态完整性的概念源于生态学,其发展历程可以追溯到20世纪中期。1949年Leopold首次提出“土地伦理”概念,他认为“人类活动朝着保护生物群落完整性、稳定性和美感等方向发展时是正确的,相反,是错误的^[9]。”但并未对他所提到的完整性作进一步解释;1981年,Karr和Dudley首次明确给出生态系统完整性的定义,完整性是反映生态系统维持其组织(结构和功能)能力的健康维度,为评价自然生态系统在外来干扰下维持自然状态、稳定性和自组织能力的程度提供了一个有效工具^[10];20世纪90年代初,经济合作与发展组织(Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD)建立了压力-状态-响应框架模型(Pressure-State-Response Framework, PSR),被运用于各国生态环境评价指标

体系建立^[11];1989年,Rapport提出完整性良好的生态系统应具有维持自身组织结构完整性并在受到胁迫后具有自我恢复的能力^[12];在1992年,Costanza总结了生态系统完整性的定义,即生态系统应该没有疾病,具有稳定性或可恢复性,同时保持多样性或复杂性,并具备活力或增长的潜力,同时保持系统及其要素间的自动平衡^[13]。目前国内外学者已经针对水生态完整性评价开展了大量的研究,其研究范围涵盖了河流^[14-15]、湿地^[16-17]、湖泊^[18]、水库^[19]等多个生态系统。然而,大多数生态完整性评价研究都是在河流和溪流中进行的,由于河口生态系统的生态特征较为复杂且受到人类活动的影响较大,对其完整性评价研究相对较少^[20]。本文将重点介绍河口生态完整性评价的方法、指标选取和权重分配等问题,旨在为河口生态系统的保护和管理提供参考。

1 河口生态完整性的文献计量学分析 (Bibliometric analysis of estuarine ecological integrity)

为了解目前关于河口生态完整性评价研究的发展历程,以及研究前沿的新兴趋势,采用聚类分析、突发分析和文献整理等方法,运用知识图谱工具CiteSpace,对河口生态完整性评价方面的相关文献进行文献计量分析,主要总结了近30年出版物的年度变化,并确定主要的学科类别;以及确定新兴的研究热点,并最终预测发展趋势。

1.1 检索方式与数据来源

本文选取Web of Science(WOS)数据库中的核心合集数据库作为研究数据来源,文献类型选择:article,设置时间跨度为30年,检索时间包括从1993年到2023年01月01日发表的文章,使用由布尔运算符“AND”和“OR”链接的关键词组合进行检索,检索式为:TS=(“Estuar*”) AND (“ecological quality” OR “ecological integrity” OR “ecological health”)。对得到的文献进行识别与筛选,最后确定590条记录,并分析其数据来源。

同时选取CNKI数据作为中文文献数据库,文献类型选择:论文,时间跨度不限,运用CNKI专业检索工具,检索式为:SU=(“河口” * “生态”) and SU=(“健康” + “完整性”),得到52条记录,通过对检索结果的识别与筛选,最后仅得到29篇相关文献,由于样本容量过低,导入软件分析无法得到有效结果,故本次分析仅采用WOS数据库中检索到文献作为数据来源。

1.2 历年发文量分析

统计分析河口生态完整性评价领域每年发表文章的数量,得到历年发文量(图 1)。结果显示:近 30 年对于河口生态完整性评价的研究热度呈逐年上升趋势。最初的几年,即 1994—1999 年,仅有少量文献发表。而从 2000 年开始,发文量逐渐上升,并于 2005 年迅速增加,此后一直保持在较高水平。尤其是在 2007 年之后,发文量逐年攀升,呈现出指数级增长的趋势,在 2012 年发文量出现一次顶峰,根据 Rocha 等^[21]所提到的,可能原因是学界对水生态完整性评价的关注愈加热切,甚至有期刊为其特意出版专刊,如 *Biologia Acuatica* 在 2012 年出版了一个关于生态质量的专刊。在 2021 年和 2022 年,发文量分别达到了 53 篇和 58 篇,进一步显示出该领域的高速发展势头。从总的趋势来看,河口生态完整性评价研究在近 30 年来持续增长,呈现出逐年增加的趋势,表明该领域受到了广泛的关注,并且其在生态环境领域具有重要的研究价值和实际应用意义。

1.3 关键词及突现性分析

图 2 中列出了河口生态完整性评价研究中引用爆发性较强的关键词,显示了该研究领域的不同时期研究主题的演变。图 2 显示了每个关键词出现的时间和持续时间,反映了关键词在研究领域的影响

力的长短。此外,需要注意的是,表中蓝色线代表整个研究时期(2002—2023 年),红色线代表引文爆发的持续时间^[22-23]。此外,为了更准确地探究河口生态完整性评价领域的研究主题,掌握其发展规律,我

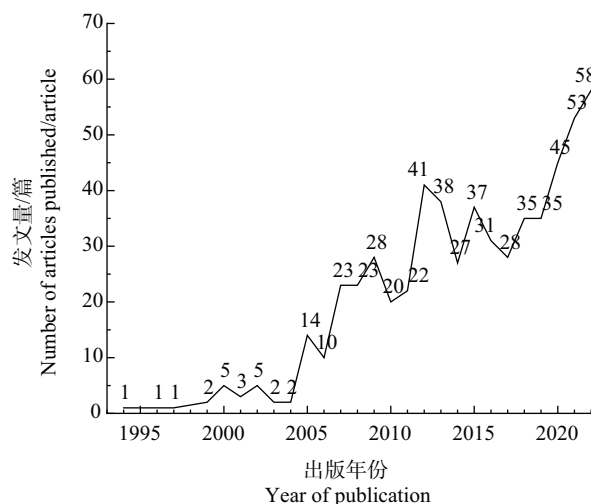


图 1 河口生态完整性评价领域历年发文量

注:图中发文量数据为 WOS 数据库统计结果。

Fig. 1 Number of publications in the field of estuarine ecological integrity assessment over the years

Note: The number of published articles in the figure is the statistical result of WOS database.

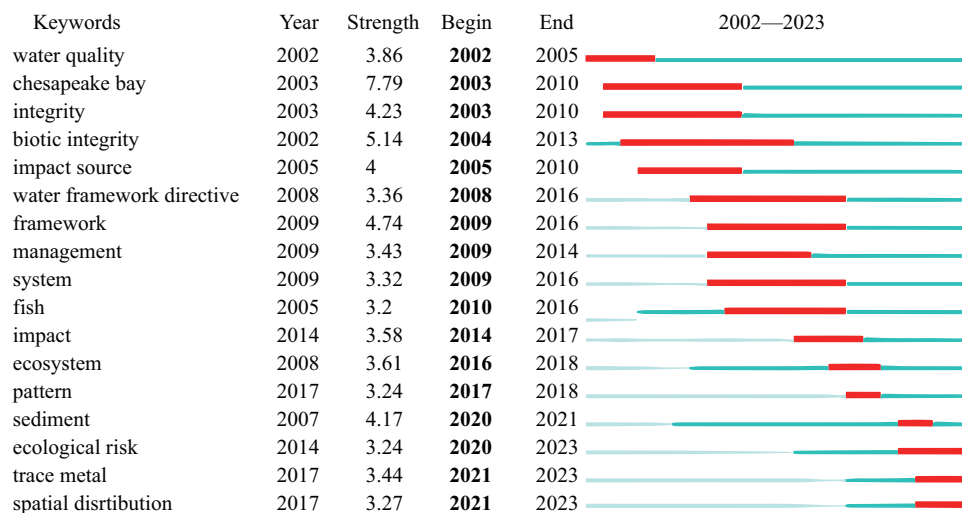


图 2 河口生态完整性评价领域突现强度前 17 位关键词的时间图谱

注:突现强度值越大,代表关键词在该时段内研究热度增长越快;开始时间、结束时间分别代表关键词突现开始、突现结束的时间;时间轴中红色片段代表关键词研究爆发增长的时段。

Fig. 2 Temporal mapping of the top 17 keywords in the field of estuarine ecological integrity assessment in terms of emergent intensity

Note: The larger the value of emergence intensity, the faster the keyword's research popularity grows during this period; the start time and end time represent the time when keyword emergence begins and ends respectively; the red segment in the timeline represents the period of explosive growth in keyword research.

他们将2002—2023年的发展分为3个时期。当前阶段可概括为生态完整性评价概念探索(2002—2009年)、生态指标监测与生态完整性评价框架构建(2010—2016年)、生态风险评价与污染物溯源(2017—2023年)。生态完整性评价概念探索这一阶段,学者对于生态完整性概念还不十分明了,对于水体主要关注水质状况等具体指标;生态指标监测与生态完整性评价框架构建这一阶段,研究者认识到水体与生态系统是密不可分的,并开始以整体的视角来研究水生态完整性,关注综合评估及管理,并开始运用各种模型来对生态系统演变进行模拟;生态风险评价与污染物溯源阶段,学者对于生态风险评价以及微量金属元素的时空分布展开了一系列的研究,旨在揭示污染物分布对于生态系统完整性的影响。

2 河口生态完整性评价指标选取(Indicator selection for estuarine ecological integrity assessment)

河口相对于其他水体表现出独特的差异性,主要体现在水体混合、潮汐影响、泥沙沉积、生态系统复杂性、人类活动集中和盐度变化等方面。根据Elliott和Quintino^[24]的研究,河口是淡水和海水相互交汇的地方,这导致了水文和化学特性的复杂性。潮汐的作用对河口地区水位和水流产生显著影响,进一步增加了水动力学的复杂性^[25]。此外,根据Stevenson和Kennish^[26]的观点,河口地区的泥沙沉积现象是由于河水流速减缓而导致的,这对地形和地貌的演变产生了深远的影响。生态系统在河口表现出极高的复杂性,由于淡水和咸水的相互作用,支持着丰富多样的生物种类^[27]。最后,河口地区是人类活动的热点区域,渔业、航运和城市发展等活动使得这一地区成为自然和人为因素相互影响的复杂系统。这些差异性使得河口成为生态学、地理学和水文学等多学科研究的关键领域,对于理解复杂水域生态系统的功能和响应、推动可持续发展具有深远的意义。

河口生态完整性评价指标的选取是河口生态完整性评价研究的关键步骤,对于后续评价结果的科学性起到了决定作用。为了使河口生态系统完整性评价能够实际问题并为管理决策者提供科学依据,需要根据生态系统的特征进行指标选取^[28]。适当的评价指标应该准确反映生态系统完整性的关键因素^[29]。河口生态完整性评价指标的选取应遵循以下原则:指标应能够反映河口生态系统的完整性状况^[30],能够准确、可靠地测量河口生态系统的变化;

指标应具有可比性^[31],能够在不同的河口生态系统之间进行比较;指标应具有可操作性^[32],能够通过现有的技术手段进行测量。此外,在选取河口生态完整性评价指标时,应综合考虑多种指标,包括水质指标、鱼类指标、底栖生物指标和沉积物中的重金属指标等,以全面准确地评估河口生态完整性状况^[33]。结合现有研究,目前学者主要将河口生态完整性评价指标分为3类:物理化学指标、生物指标以及社会经济指标。其中生物指标是最常用的指标,因为评价生态完整性的一个组成部分是测量生物完整性,通常强调对浮游生物、底栖生物、大型藻类和鱼类的分析。

2.1 物理化学指标

当涉及到河口生态系统的评估时,物理化学指标是必不可少的一部分。物理指标是对河口物理环境状况(如水质、沉积物质量和水文)的直接衡量^[34],并且有助于检测人为影响造成的变化,化学指标用于评估河口水体中化学物质的含量和污染状况。河口常用物理化学指标见表1。在为河口生态完整性评估选择物理化学指标时需要仔细考虑所研究的河口的具体特点和功能。例如,河口的流体动力学,如潮汐交换的大小和时间,可以影响评估生态完整性的某些指标的适用性^[35]。潮汐是河口生态系统中一个至关重要的驱动力,其规律性对生态系统结构和功能产生深远影响。学者们强调了潮汐对河口水动力和水文的关键作用。根据Galois等^[36]的研究,潮汐引起的水流变化对河口沉积物输运、溶解氧分布和生态系统中物质循环等方面有显著影响。而在极端气象事件下,潮汐规律可能会发生变化,进一步影响河口生态系统的稳定性和适应性。此外,Smith和Hollibaugh^[37]的研究表明,潮汐对河口生态系统中微生物和底栖生物的空间分布和丰度也有显著影响。同样,河口生境的具体特征,如植被的类型和分布,也会影响到选择物理化学指标来衡量生境质量和数量的变化^[38]。此外,物理化学指标的选择应以生态完整性评估的总体目标和目的为指导,包括评估旨在解决的具体管理问题。例如,如果主要的管理目标是减少进入河口的营养物质,那么营养物质指标,如氮和磷的浓度可能比其他指标更有意义,因为氮和磷是生物生长的2个主要营养元素,它们在水体中的浓度直接影响着藻类和其他生物的生长和繁殖^[39]。过多的氮和磷可以导致富营养化,引发藻华暴发,而河口地区由于淡水和海水的交汇以及强

表 1 河口生态完整性评价常用物理化学指标

Table 1 Commonly used physical and chemical indicators for estuary ecological integrity assessment

指标种类 Type of indicator	包含指标 Included indicators	指标作用 Role of indicators
物理指标 Physical indicators	水文指标 ^[14,16,40] Hydrological indicators ^[14,16,40] 盐度、基质、深度、流量特性、流量偏差、潮差和泥沙输运速率平均降雨量、洪水强度指数、入海年径流比例等 Salinity, substrate, depth, flow characteristics, flow deviations, tidal and mean rainfall for sediment transport rates, flood intensity index, proportion of annual runoff into the sea, etc.	提供有关河口环流和沉积过程的信息 Providing information on estuarine circulation and sedimentation processes
	地貌指标 ^[41-42] Geomorphological indicators ^[41-42] 海岸线侵蚀、沉积速率和河道稳定性等 Shoreline erosion, sedimentation rates and channel stability, etc.	指示塑造河口环境和为水生物种提供重要栖息地的物理过程 Indicates the physical processes that shape estuarine environments and provide critical habitat for aquatic species
化学指标 ^[14,43-45] Chemical indicators ^[14,43-45]	pH、溶解氧、氨氮、硝酸盐、磷酸盐、重金属、生化需氧量等 pH, dissolved oxygen, ammonia, nitrate, phosphate, heavy metals, biochemical oxygen demand, etc.	提供关于水体污染程度、养分含量、有害物质积累等信息 Provide information on the level of pollution of water bodies, nutrient content, accumulation of harmful substances, etc.

烈的人类活动,往往更容易发生富营养化现象。需要注意的是,任何一个单一的指标都无法反映河口生态完整性的全貌,应该使用一套互补的指标来提供更全面的评估^[25]。物理化学指标的选择也应定期审查和更新,以确保它们在评估生态完整性方面继续具有相关性和有效性。河口生态完整性评价中物理化学指标的选取与其他水生态系统并无明显差异。

2.2 生物指标

除了物理化学指标外,生物指标对于评估河口的生态完整性也至关重要,因为它们提供了关于环境压力因素对生物群落影响的信息,可以帮助我们了解生物多样性、生态过程和生态系统的稳定性^[46]。这些指标通常涉及生态系统中物种丰富度、物种组成和生物多样性等方面的测量。例如,物种多样性指数可以用于评估河口生态系统中不同物种的数量和相对丰度,这有助于理解河口生态系统中各种生物之间的相互作用和生态位的分配情况。物种组成等指标则可以更具体地描述河口生态系统中的生物组成,包括鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖生物等,并对其生态功能进行评估。底栖无脊椎动物、浮游植物和鱼类经常被用作河口生态完整性评估的生物指标,因为它们对水质和生境条件的变化很敏感^[47]。

在具体运用中,马廷婷等^[48]选用了包括浮游植物 Shannon-Wiener 指数在内的多个指标,来综合评估我国太湖流域主要河口完整性状况;Hallett 等^[49]运用鱼类群落指数量化了澳大利亚西南部河口的生态状况;Kido^[50]运用溪流生物完整性指数对美国夏威夷 18 条溪流的完整性状况进行评价,通过对 39 个地点(包括 6 个河口段)进行取样分析,证实了这种方法的有效性。但是值得注意的是,由于河口质量悖论的存在^[24,51],即由于河口物理化学特性的高度可变性,相较于其他淡水或海洋生态系统而言,河口生物群落对于环境压力的耐受度更高。在同一胁迫条件下,淡水或海洋生态系统物种可能将其视为环境压力,而河口生物由于其高耐受度,该压力对他们的影响可以忽略不计。Le 等^[33]指出,河口地区常见的一些特有物种包括能够在淡水和海水过渡区域生存的特殊鱼类、甲壳类动物以及具有高度耐盐性的植物种类。在适应性策略方面,一些研究表明,河口生物区系经常表现出对不断变化的盐度、水温和水动力条件的高度适应性。这可能包括行为适应、生理适应和基因适应等多个层面的变化^[52]。例如,某些河口地区的鱼类可能表现出在不同盐度条件下的迁徙行为,以适应水域的季节性变化。因此在选择基于河口结构特征的生物指标(物种组成、生物多样

性等)来评价河口生态完整性状况时,应考虑到这种情况对评价结果造成的误差。为了解决河口质量悖论对评价结果的影响,许多学者提出了一些对应的解决办法,如 Elliott 和 Quintino^[24]指出,不能过渡依赖生态系统的结构特征来识别人类活动对于河口生态的胁迫程度,而是要将结构特征指标与功能特征指标相结合,而 Hess 等^[53]发现采用有孔虫监测方法来检测河口环境扰动时,能够有效解决河口质量悖论难题。

2.3 社会经济指标

社会经济指标能够反映河口生态系统与人类活动之间的相互关系,它包括了对河口周边社会和经济活动的考量,这些活动对河口生态系统的完整性产生着直接或间接的影响。根据 Rapport 等^[54]的研究,社会经济指标的选择应基于其对生态系统服务的影响和依赖程度,以及其与生态指标的相互作用。通过文献检索,目前最常用的社会经济指标包括人口密度、土地利用、农业和工业活动以及水资源利用等^[55]。人口密度是一个重要的社会经济指标,它表示河口周边地区的人口数量与面积的比值。人口密度的增加通常意味着对土地和水资源的增加需求,可能导致土地开发和水资源利用的增加,从而对河口生态系统产生影响。研究表明,高人口密度区域的河口往往面临着更大的污染压力和资源压力,这可能导致水质下降、栖息地退化以及生物多样性丧失^[56]。同时,河口周边地区的土地利用方式对河口生态系统的完整性产生着深远的影响。不同的土地利用类型可能对河口生态系统产生不同的影响。例如,城市化和农业扩张可能导致湿地和红树林等栖息地的减少,从而影响生物多样性和生态功能^[57]。土地利用的合理规划和管理是维护河口生态完整性的重要措施之一。农业活动可以通过农药和化肥的使用对河口水体产生污染,特别是在农田径流进入河口时。工业活动可能会排放有害物质和废水,对河口生态系统造成直接的负面影响。水资源利用也是评价社会经济影响的关键指标。水是河口生态系统的关键要素,同时也是农业、工业和城市生活的基本需求。过度的水资源利用可能导致水体营养物质过多,引发藻类暴发和水质恶化,包括盐度降低、营养动态改变、沉积增加以及潮汐混合和冲刷等物理过程被破坏。对河口生态系统产生负面影响^[58],这些变化可能会对生物多样性产生不利影响,损害渔业和沿海保护等生态系统服务,并破坏河口的整体

功能。盐度是评估海水流量减少影响的重要指标,因为当它偏离自然平衡标志着生态压力的上升。监测盐度水平为我们提供了宝贵的信息,帮助我们了解这种流量减少的程度和严重程度,是理解对河口生物多样性、生态系统服务和整体功能的生态后果的关键参数平衡水资源利用和保护河口生态系统是社会经济规划和管理中的重要问题。平衡水资源利用和保护河口生态系统是社会经济规划和管理中的重要问题。由于河口与人类活动与经济发展的密切相关,因此,相较于其他水生态系统完整性评价,在进行河口生态完整性评价时,社会经济类指标对评价结果的影响更大,社会经济类指标的选取是评价过程中不可或缺的一环。

3 河口生态完整性评价方法(Methods for estuarine ecological integrity assessment)

生态系统完整性评价方法可分为2类:指示物种法和指标体系方法。指标体系方法可进一步细分为综合指标评价法、层次分析法、主成分分析法和熵权法等方法^[42]。在进行生态系统完整性评价时,往往是采用多个生态指标,并通过数学方法对其赋分加权进行整合,形成综合指标体系来描述生态系统的结构与功能^[44]。近年来,在指标体系法的实际应用中使用了大量具体的定量方法,且多种方法结合交叉使用,不仅限于单一固定方法体系。由于指示物种法通常适用于单一生态系统,并且需要大量的物种测量数据,而指标体系法不受生态系统数量或类型或数据来源的限制,因此目前对于生态完整性评价方法来说后者的应用较前者更为广泛^[59]。

3.1 指示物种法

指示物种法是评价生态系统完整性的2种主要评估方法之一。该方法主要基于群落中优势物种、关键物种和敏感物种的数量,以分析环境变化并评估自然生态系统的完整性状况。包括生物指数法、多样性指数法和生物完整性指数法3类。1981年, Karr 和 Dudley 提出了一种评价方法,该方法基于鱼类完整性指数(F-IBI)^[10],后来还发展出了底栖生物完整性指数(B-IBI)和藻类完整性指数(D-IBI)^[60]。目前,IBI 评价方法已经包括了多种生物类群,如浮游动植物^[61-62]、大型底栖生物、鱼类和藻类^[63]。IBI 主要用于评估基于鱼类和浮游动物的水生生态系统完整性^[64-66],而 Shannon-Weaver 生物多样性指数一般用于评估基于浮游植物和浮游动物的水生生态系统完整性^[67]。在制定评估生物完整性的方法时,底栖

大型无脊椎动物群落是水生态系统中最一贯强调的生物组成部分。目前有大量的方法,包括多种指数、指标和评价工具^[68]。由于河口本身的特异性,并非所有的指标都能适用于河口生态完整性评价。例如 AZTI 海洋生物指数(AZTI's marine biotic index, AMBI)和海洋底栖生物指数(benthic biotic index, BENTIX)等旨确定认为压力的指数都与耐受物种的丰度有关,而河口水域由于其独特的生态特征,如天然的有机质含量高,耐受物种为典型性。这些特征可能会导致 AMBI 和 BENTIX 等指数在河口水域中的应用产生不准确的结果,即错误地认为河口生态状况被降级。此外,由于河口水域中物种多样性较低,某些指数(例如 AMBI 和生物量质量指数(bio-mass quality index, BQI))可能无法使用或计算,因为达到了它们的使用或计算阈值。

尽管指示物种法早期便被发展并广泛应用于生态系统完整性评价中,在河口生态系统完整性评价中,也有案例采用鱼类群落指数和浮游动物完整性指数进行生态状况评估^[48-49]。但指示物种法也存在一定的局限性,具体如下:依赖于物种的可识别性,该方法需要对底栖生物进行准确鉴定和分类,但有些物种可能很难被鉴定或分类,从而导致评估的不准确性;依赖于环境条件的一致性,该方法假设某些物种只在特定的环境条件下出现,如果环境条件发生变化,则这些物种的可靠性也会受到影响;受到人为干扰的影响,人类活动对生态系统产生了广泛和复杂的影响,可能会干扰底栖生物的生存和分布,从而影响指示物种法的准确性和有效性。因此相比于复合生态系统,指示物种法更适用于对受人类活动干扰很小的自然生态系统进行评价。

3.2 指标体系法

指标体系法建立在生态系统特征和服务功能的基础上,采用数学方法确定生态系统的完整性状况。该方法综合了多项指标,包括生态系统的结构、功能演替过程、生态服务等,反映了生态系统的完整性状态和变化趋势。如 Jiang 等^[69]利用多源遥感数据和实地测量,采用综合评价方法,研究了 2004—2009 年九龙江口生态完整性及其变化情况。相比于指示物种法,指标体系法可以反映生态系统不同尺度的完整性评价转换,是一种更加全面、综合的生态系统完整性评价方法,同时也是国内外目前应用最为广泛的生态系统完整性评价方法^[70]。指标体系法主要步骤见图 3,指标选取及指标权重分配是其中十分

重要的 2 个关键步骤,指标选取相关内容已在本文第 2 节进行论述,本节主要介绍指标权重分配相关方法。

在河口生态完整性评价中,不同的评价指标对于评价结果的影响程度可能不同,因此需要通过合理的权重分配,更准确地综合考虑各个指标的贡献,这样才能全面反映河口生态系统的完整性状况。目前在生态完整性评价中,学者们常用的方法包括层次分析法、熵权法、模糊综合评价法和灰色关联分析法等。其中,层次分析法是通过层次结构模型和判断矩阵来计算各指标的权重;熵权法则是利用信息熵原理和熵权准则来确定指标权重;模糊综合评价法则通过模糊数学的概念和算法,将指标转化为模糊数并进行综合评价;灰色关联分析法的基本思想是通过对各指标间关联度的计算,找出不同指标之间的相关性,从而识别出具有相对重要性的指标。上述方法的原理及适用性见表 2。

3.3 河口与其他水体类型生态完整性评价方法的差异

河口与其他淡水生态系统的—个主要区别在于河口环境具有高度的多变性,包括盐度、基质、深度、细颗粒和富含有机物的最大浊度带等物理化学变化^[41]。此外,河口还受到人为影响,包括水质污染、河口表面大小的改变和航道管理等^[74]。由于频繁的人类活动,河口地区受到了包括河道治理、建设和工业、农业、城市化的干扰,这些干扰比内陆生态系统更为严重。基于河口生态系统的特点,河口生态完整性评价与其他水体类型的生态完整性评价存在差异。河口生态完整性评价的评价对象是河口及其周边海域和海岸带,而内陆生态完整性评价的评价对象是内陆地区的生态系统。河口生态完整性评价需要考虑河口生态系统的特殊环境和物种组成,评价指标包括水动力条件、海水和河水水质、物种多样性、土地利用和人类活动等因素,而内陆生态完整性评价的评价指标主要包括土地利用、植被覆盖、土壤质量、生物多样性和水文条件等因素。此外,由于河口生态系统处于陆海交界处,数据获取相对困难,需要涉及到多个部门和领域的的数据,评价过程相对于内陆生态系统更加复杂。

综上所述,河口生态完整性评价相对于其他水体生态完整性评价主要体现在 3 个方面:(1)评价对象及自身特性的差异;(2)评价指标选取的差异;(3)数据获取难易程度的差异。

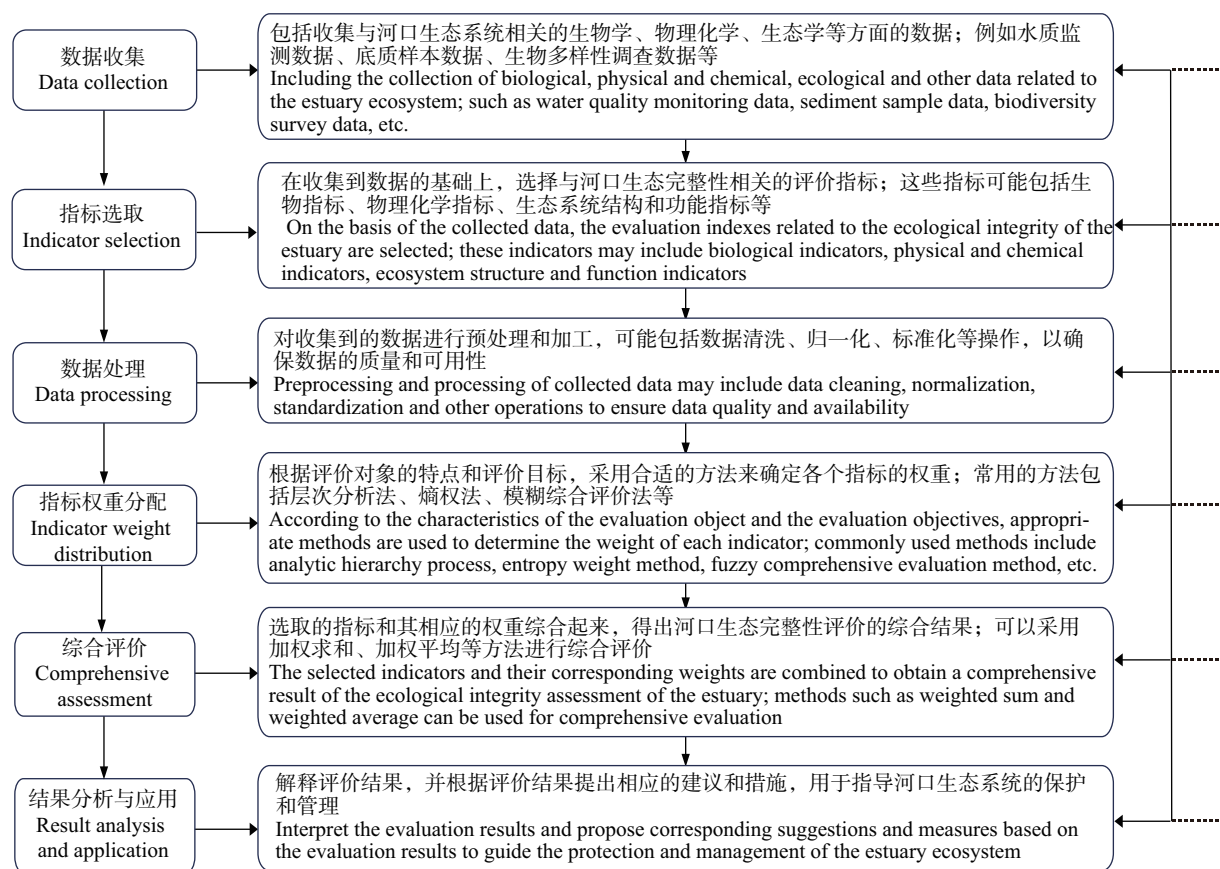


图3 指标体系法主要内容及步骤框架图

Fig. 3 The main content and steps of the index system method

4 河口生态完整性评价的研究案例 (Case studies of estuarine ecological integrity assessment)

目前国内外学者都针对河口生态完整性评价做了很多研究,在这些研究中大多数指数都是基于物种群落组成以及生态系统结构功能属性,结合多个独立指标计算得出的。如 Ferreira^[75]考虑河口的物理特征和生化特性,结合水质特性、动力学、沉积物特性和抗干扰能力等独立指标,构建了生态完整性综合评价体系。Borja 和 Dauer^[76]指出,当涵盖各种响应性生态和社区特征的不同指标结合在一起时,会得到更加准确全面的评估结果。在指标组中,物种丰富度-组成指标在当前指数中使用最广泛。其中,与河口质量特征相关的指示物种或类群通常在指数中占主导地位。

总体而言,国外在河口生态完整性评价方面的研究相对较为深入,涉及到多个方面,包括物理、化学、生物指标的应用、模型模拟方法和综合评价方法的研究。如欧美国家的研究着重于采用综合评价方法,将多个生态指标结合起来,全面评估河口生态系

统的完整性状况和功能。例如,Chiu 和 Wu^[77]开发了潜在健康因素指数(LHFI)的统计模型方法,该指数结合了多个生态指标,包括水质、栖息地和生物多样性,对河口生态系统进行全面评估。此外,国外学者还将遥感技术应用于河口生态完整性评价,借助高分辨率的卫星数据和地理信息系统,对河口生态系统的空间分布和变化进行精细化研究^[78]。在国内,河口生态完整性评价的研究趋势逐渐从单一的生物学指标拓展至多学科综合评价。许多研究着重于建立适用于中国特有河口的评价体系和指标体系,如针对长江口、黄河口等的研究,强调综合考虑潮汐、盐度等特定环境条件对评价结果的影响^[43,45]。同时,国内学者也开始重视社会经济因素对河口生态系统的影响,逐渐引入社会经济指标来综合评价河口生态完整性^[28]。

目前国内学者针对我国的河口特点建立了适宜的评价指标体系。孙涛和杨志峰^[79]指出,河口生态系统的完整性状况应该综合考虑环境质量、生物质量以及对流域和人类的影响这3个方面;彭涛和陈晓宏^[14]从环境、生态、社会经济3个方面共选取了

17 项指标对海河流域典型河口的生态系统完整性状况进行了评价;刘春涛等^[40]对 PSR 模型加以改进建立 DPSRC 模型,从“驱动力-压力-状态-系统响应-控制”5 个方面评价辽河口的生态完整性水平;惠秀娟等^[80]采用主成分分析以综合反映水体理化特征、水生生物特征、水体卫生学特征、栖息地环境特征;董君杰等^[15]通过综合岸坡稳定性、河岸植被覆盖度、河岸带人工干扰程度等指标,对月河口至滦河口评估河段河岸带完整性状况进行了评价;牛明香等^[43]基于 PSR 模型,从黄河河口区的生物生态、环境质量、社会经济、管理措施和人类健康等方面筛选出 50 个评价指标,构建了黄河河口区生态系统完整性评价指标体系;张芮等^[81]依照黄河口水域鱼类区域

组成特征,从鱼类种类组成、繁殖共位体、鱼类耐受性和营养结构等方面提出了 12 个评价指标,构建了黄河口水域鱼类生物完整性指数评价指标体系,并制定了评价标准。

综上所述,国外的研究在河口生态完整性评价方面取得了较大的进展,但对生态完整性内涵的理解仍存在一定分歧^[82]。国内的研究在借鉴国外研究的基础上,形成了适合中国河口湿地的评价指标体系和方法,但仍需加强对河流生态系统的综合评价和栖息地研究。表 3 中列举了部分国内外学者对于生态完整性评价的相关研究案例。未来的研究可以借鉴国外经验,加强国内外研究的合作与交流,共同推进河口生态完整性评价领域的发展。

表 2 河口生态完整性评价指标的常用权重分配方法

Table 2 Commonly used weight distribution methods for estuary ecological integrity evaluation indicators

评价方法 Evaluation method	原理 Principle	适用性 Applicability	应用案例 Applications
层次分析法 Analytic hierarchy process	将评价指标进行层次化,采用对比判断方法确定各层次指标的权重 The evaluation index is hierarchical, and the comparative judgment method is used to determine the weight of each level index	多层级评价时 Multi-level evaluation	长江河口海域生态系统健康评价指标体系及其初步评价 ^[45] Index system for the ecosystem health of the Yangtze River Estuary and its preliminary assessment ^[45]
熵权法 Entropy weight method	根据指标之间的差异程度和关联性,计算其信息熵和权重,综合得分 According to the degree of difference and correlation between indicators, calculate their information entropy and weight, and obtain a comprehensive score	指标之间相关性较强时 When the correlation between indicators is strong	基于熵权的新疆典型流域生态健康评价 ^[71] Ecological health evaluation of typical watersheds in Xinjiang based on entropy weight ^[71]
模糊综合评价法 Fuzzy comprehensive evaluation method	利用模糊数学方法对指标进行综合评价 Comprehensive evaluation of indicators using fuzzy mathematical methods	指标权重难以确定时,指标之间关联较弱时 When the indicator weight is difficult to determine and the correlation between indicators is weak	矿区生态系统健康现状模糊综合评价方法 ^[72] A fuzzy comprehensive evaluation method for ecosystem health status in mining area ^[72]
灰色关联分析法 Gray relational analysis	通过建立灰色关联度模型,评价指标之间的关联性和重要性 Evaluate the correlation and importance of indicators by building a gray correlation model	指标权重难以确定时,指标之间关联较弱时 When the indicator weight is difficult to determine and the correlation between indicators is weak	基于灰色关联分析法的辽河保护区河流水生态健康评价 ^[73] Assessment on river water ecological health based on grey relation analysis in Liaohe Conservation Area ^[73] 使用包括环境质量、生物与生态、景观格局与生态系统管理的 EBLE 指数(一个多尺度评价指标体系)研究河口湿地生态系统完整性及其变化 ^[69] Use the EBLE index (a multi-scale evaluation index system including environmental quality, biology and ecology, landscape pattern and ecosystem management) to study the integrity of the estuarine wetland ecosystem and its changes ^[69]

表 3 河口生态完整性评价研究案例

Table 3 Case studies of estuary ecological integrity assessment

评价区域 Assessment area	评价方法 Assessment method	评价指标 Assessment indicators	评价目的 Assessment purpose	年份 Year	参考文献 References
南非河口 South African estuaries	综合评价法 Integrated evaluation method	根据河口的大小、类型、生物地理区域、栖息地和生物(植物、无脊椎动物、鱼类和鸟类)对南非所有河口生态完整性状况进行了排名	评估南非河口的保护优先级,以便在管理和水分配中使用	1996	[83]
		Ranking of the ecological integrity status of all South Africa's estuaries based on their size, type, biogeographic region, habitat and organisms (plants, invertebrates, fish and birds)	Assessing conservation priorities for South African estuaries for use in management and water allocation		
英国纳拉甘西特湾 Naragansett Bay, UK	指示物种法 Indicator species method	河口产卵物种数量、鲔鱼比例、个体数量、比目鱼比例、香农多样性指数和底栖物种比例 6 个指标	评估纳拉甘西特湾生态完整性状况,同时提出生物完整性对河口的适用性可能存疑	2002	[84]
		Six indicators: Number of spawning species in the estuary, proportion of killifish, number of individuals, proportion of flafish, Shannon-Wiener diversity index and proportion of benthic species	Assess the status of the ecological integrity of Naragansett Bay while raising concerns that biological integrity may be of questionable suitability for the estuary		
国外 Overseas	河口鱼类群落 指数(EFCI) Estuary fish community index (EFCI)	包括 14 个指标,代表了 4 种广泛使用的鱼类群落属性:物种多样性和组成、物种丰度、苗圃功能和营养结构完整性	结合了河口鱼类群落的结构和功能属性,并将它们整合在一起,为评估河口系统的生态状况提供了一种可靠的方法	2006	[85]
		Include 14 indicators representing 4 widely used fish community attributes: Species diversity and composition, species abundance, nursery function, and trophic structural integrity	Combining the structural and functional properties of estuarine fish communities and integrating them together provides a reliable method for assessing the ecological status of estuarine systems		
葡萄牙 Mira 河口 Mira Estuary, Portugal	AZTI 的海洋生物 指数(AMBI) AZTI's marine biotic index (AMBI)	底栖大型无脊椎动物群落 Benthic macroinvertebrate community	计算用于评估海洋和淡水系统底栖生物状况的常用指标,并提出对 AMBI 和伊比亚生物监测工作组(IBMWP)指数的改善意见	2012	[86]
			Metrics commonly used to assess benthic condition in marine and freshwater systems were calculated and a modification of the AMBI and Iberian Biological Monitoring Working Party (IBMWP) indices was proposed		
葡萄牙河口 Portuguese estuary	河口鱼类评估指数 (EFAI) Estuarine fish assessment index (EFAI)	综合了物种丰富度、海洋移民比例、物种数量和丰度、食鱼物种数量和丰度、溯河物种状况、引进物种状况和干扰敏感物种状况 7 个指标	提出一个旨在对过渡水域和河口水体进行整体评估的多指标评估指数	2012	[87]
		It integrates seven indicators: Species richness, proportion of marine migration, number and abundance of species, number and abundance of fish-eating species, status of river-tracing species, status of introduced species and status of disturbance-sensitive species	Propose a multi-metric assessment index aimed at a holistic assessment of transitional and estuarine waters		

续表3

评价区域 Assessment area	评价方法 Assessment method	评价指标 Assessment indicators	评价目的 Assessment purpose	年份 Year	参考文献 References
国外 Overseas	夏威夷河流生物完整性指数(HS-IBI) Hawaii stream index of biotic integrity (HS-IBI)	5 个生态类别(分类丰富度、敏感物种、繁殖能力、栖息地营养状况和耐受能力)11 个指标 11 indicators for 5 ecological categories (taxonomic richness, sensitive species, reproductive capacity, habitat nutritional status and tolerance)	评价夏威夷主要岛屿 19 条河流生态状况 Evaluate the ecological status of 19 rivers on the main islands of Hawaii	2013	[88]
	指示物种法 Indicator species method	软体动物群落指标, 收集了 37 个科、82 种和 21 827 个个体 Molluscan community indicators, 37 families, 82 species, and 21 827 individuals collected	提供了日本九州 70 条河流软体动物区系的基 本信息, 旨在保护中小河流河口 Provides basic information on the mollusc fauna of 70 rivers in Kyushu, Japan, aiming to protect the estuaries of small and medium-sized rivers	2018	[89]
	指示物种法: 底栖大型 无脊椎动物指数 Indicator species method: Benthic macroinvertebrate index	底栖无脊椎动物的群落组成 Community composition of benthic invertebrates	利用底栖大型无脊椎动物指数对佛罗里达西北 部河口的生物完整性进行评估 Assessing the biological integrity of northwest Florida estuaries using the benthic macroinverte- brate index	2020	[90]
	AZTI 的海洋 生物指数(AMBI) AZTI's marine biotic index (AMBI)	软底大型底栖生物群落的分布 Distribution of soft-bottom macrobenthic communities	探寻季节性变化对 AMBI 评价结果的影响 Exploring the impact of seasonal variations on AMBI evaluation results	2020	[91]
国内 China	综合评价法、 底栖动物完整性 指数(B-IBI) Integrated evaluation method, benthic index of biotic integrity (B-IBI)	选取物理化学特征、生态学特征和社会经济特征 3 个方面共 30 个指标; 选取多样性指数、种类数、总栖息密度、总生物量、甲壳类的密度百分比和棘皮动物的密度百分比等 6 个生物参数; 选取 Shannon-Wiener 多样性指数、AZTI 海洋生物指数(AMBI)和多变量 AMBI(M-AMBI)等指标 A total of 30 indicators were selected from three aspects: Physico-chemical, ecological and socio-economic characteristics; six biological parameters were selected: Diversity index, number of species, total habitat density, total biomass, percentage density of crustaceans and percentage density of echinoderms; select indicators such as Shannon-Wiener Diversity index, AZTI marine biological index (AMBI) and multivariate AMBI (M-AMBI)	评价长江口生态系统的生态完整性状况 Assessing the state of ecological integrity of the Yangtze River Estuary ecosystem	2007、 2008、 2018	[45,92-93]

续表3

评价区域 Assessment area	评价方法 Assessment method	评价指标 Assessment indicators	评价目的 Assessment purpose	年份 Year	参考文献 References
海河流域 典型河口 Typical estuary in Haihe River Basin	综合评价层次分析法和 计点模型 Integrated evaluation of hierarchical analysis and point modeling	环境、生态、社会经济 3 个方面共选取了 17 项指标 A total of 17 indicators were selected in 3 areas: Environmental, ecological and socio-economic	评价海河流域典型河口生态完整性状况 Assessing the ecological integrity of typical estuaries in the Haihe River Basin	2009	[14]
九龙江河口 Jiulong River Estuary	综合评价法 Integrated evaluation method	包括环境质量、生物与生态、景观格局与生态系统管理(EBLE)在内的多尺度评价指标体系 Multi-scale evaluation index system including environmental quality, biology and ecology, landscape pattern and ecosystem management (EBLE)	评价九龙江河口生态完整性状况 Assessing the ecological integrity of the Jiulong River Estuary	2015	[69]
国内 China	综合评价法 PSR 模型、 鱼类生物完整性 指数(F-IBI)、 底栖动物完整性 指数(B-IBI) Integrated evaluation method PSR model, fish-based index of biotic integrity (F-IBI), benthic index of biotic integrity (B-IBI)	从生物生态、环境质量、社会经济、管理措施和人类健康等方面筛选出 50 个评价指标;从鱼类种类组成、繁殖共位体、鱼类耐受性和营养结构等方面提出了 12 个评价指标;采用群落物种多样性指数和丰度/生物量比较曲线 Fifty evaluation indicators were screened from aspects such as biological ecology, environmental quality, social economy, management measures and human health; 12 evaluation indicators were proposed from aspects such as fish species composition, reproductive symbiosis, fish tolerance and nutritional structure; indicators using community species diversity index and abundance/biomass comparison curve	构建了黄河流域河口生态系统完整性评价指标体系;构建黄河流域水生生物完整性指数评价指标体系,并制定评价标准;对黄河流域大型底栖动物群落结构和生态状况进行分析 Constructed an evaluation index system for the ecosystem integrity of the Yellow River estuary area; constructed an evaluation index system for the fish biological integrity index in the Yellow River estuary waters, and formulated evaluation standards; analyzed the macrobenthic community structure and ecological conditions of the Yellow River estuary	2017	[43,81,94]

5 问题与展望(Challenges and prospects)

评价河口生态完整性是一个复杂的任务,涉及到多个生态因素、评价指标和评价方法。虽然许多研究已经在这一领域取得了进展,建立了各种评价体系和方法,但仍存在一些问题需要解决。

(1)复杂结构与生态完整性挑战

河口生态系统由于其复杂的结构备受关注。生物多样性和结构复杂性使其生态完整性评价变得复杂,需要综合考虑各种生物和非生物因素。河口系统由陆地、河流和海洋3个主要部分组成,包括广泛的生物和非生物成分,这些组成元素之间存在复杂的相互作用和反馈机制,河口系统的生物多样性和结构复杂性增加了生态完整性评价的挑战。

(2)人类活动的影响与复杂性加剧

人类活动对河口系统的影响不可忽视。水质污染、海岸线开发和捕捞等活动对生态系统造成严重影响,甚至可能导致生态系统的不可逆变化,如何识别人类活动对于河口生态完整性状况的响应关系,对评价工作提出了更高的要求。

(3)评价方法的不一致性限制了比较与综合评价

全球甚至全国范围内缺乏一致而标准的评价方法,使得对河口生态系统的评估在跨国和跨地区的比较以及整体综合评价方面面临较大的限制。缺少普遍接受的评价标准和方法,导致了不同地区和国家之间评估结果的可比性不足,从而妨碍了对全球河口生态系统的一致性和全面性认识。

基于此,未来关于河口的生态完整性评价,应重点考虑以下几个方面:1)综合考虑各种因素,选取适当的评价指标和方法,以全面准确地评估河口生态系统的完整性状况。包括多个方面的指标,如物种多样性、生态系统功能和生态系统服务等;2)建立综合性生态监测网络。该网络应涵盖多个关键领域,包括水质、土壤、植被、动物群落等,以确保全面覆盖生态系统的各个方面。监测数据的长期积累将有助于深入了解人类活动的实际效应,并帮助识别与生物完整性变化相关的关键因素;3)制定河口相关的标准。应促进数据共享和交流,研究制定统一的评价标准和方法,实现河口生态完整性评价的比较和综合评价,推动河口生态系统的保护和可持续发展。

通信作者简介:冯承莲(1981—),女,博士,研究员,主要研究方向为水生态毒理和风险、水生态完整性评估。

参考文献(References):

- [1] 刘培,黄鹏飞,张艳艳,等.我国河口管理研究进展[C]. 2022 中国水利学会学术年会. 北京:中国水利学会, 2022: 397-402
- [2] 郭丽霞,王亚松,乔德会,等.夏季长江口南北支溶解有机质的比较[J]. 海洋科学, 2022, 46(11): 67-82
Guo L X, Wang Y S, Qiao D H, et al. Comparative study on dissolved organic matter in the north and south branches of the Changjiang River Estuary in summer [J]. Marine Sciences, 2022, 46(11): 67-82 (in Chinese)
- [3] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems [J]. Science, 2008, 319(5865): 948-952
- [4] Bricker S B, Longstaff B, Dennison W, et al. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: A decade of change [J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 21-32
- [5] Johnston E L, Mayer-Pinto M, Crowe T P. Chemical contaminant effects on marine ecosystem functioning [J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(1): 140-149
- [6] Tolkinen 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
- [7] 叶敦雨. 南四湖入湖河流水环境质量状况及其对流域土地利用空间格局的响应[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2022: 22-24
- [8] 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 F H, Guo Y D, Wang Y C, 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)
- [9] Leopold A. A Sand County Almanac: And Sketches Here and There [M]. New York: Oxford University Press, 1949: 48-68
- [10] Karr J R, Dudley I J. Ecological perspective on water quality goals [J]. Environment Manage, 1981(5): 55-68
- [11] Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). Core set of indicators for environmental performance reviews: A synthesis report by the group on the state of the environment [R]. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development, 1993
- [12] Rapport D J. What constitutes ecosystem health? [J]. Perspectives in Biology and Medicine, 1989, 33(1): 120-132
- [13] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management [M]. Wash-

- ington DC: Island Press, 1992: 52-66
- [14] 彭涛, 陈晓宏. 海河流域典型河口生态系统健康评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 631-634, 639
- Peng T, Chen X H. Assessment of ecosystem health for typical estuary in Haihe River Basin [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 631-634, 639 (in Chinese)
- [15] 董君杰, 赵民, 王闯. 月河口至浏河口段河流生态系统健康评价[J]. 河南水利与南水北调, 2013(11): 30-31
- [16] 徐浩田, 周林飞, 成遣. 基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8264-8274
- Xu H T, Zhou L F, Cheng Q. Study on ecosystem health evaluation and risk assessment for Linghekou wetlands based on a PSR model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8264-8274 (in Chinese)
- [17] 王铁良, 孙一民. 双台河口湿地生态系统健康评价研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(6): 793-798
- Wang T L, Sun Y M. Ecosystem health assessment of Shuangtaihekou wetland [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(6): 793-798 (in Chinese)
- [18] Xu F, Yang Z F, Chen B, et al. Development of a structurally dynamic model for ecosystem health prognosis of Baiyangdian Lake, China [J]. Ecological Indicators, 2013, 29: 398-410
- [19] 王福峰. 锦凌水库生态环境现状调查与评价[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(1): 237-239
- [20] Souza G B G, Vianna M. Fish-based indices for assessing ecological quality and biotic integrity in transitional waters: A systematic review [J]. Ecological Indicators, 2020, 109: 105665
- [21] Rocha L, Hegoburu C, Torremorell A, et al. Use of ecosystem health indicators for assessing anthropogenic impacts on freshwaters in Argentina: A review [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 611
- [22] Chen Y, Xiong K N, Ren X D, et al. An overview of ecological vulnerability: A bibliometric analysis based on the Web of Science database [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(9): 12984-12996
- [23] Qiu H H, Liu L G. A study on the evolution of carbon capture and storage technology based on knowledge mapping [J]. Energies, 2018, 11(5): 1103
- [24] Elliott M, Quintino V. The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 54(6): 640-645
- [25] Borja A, Ranasinghe A, Weisberg S B. Assessing ecological integrity in marine waters, using multiple indices and ecosystem components: Challenges for the future [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59(1-3): 1-4
- [26] Stevenson L H, Kennish M J. Ecology of estuaries: Anthropogenic effects [J]. Estuaries, 1992, 15(3): 428
- [27] Cloern J E, Abreu P C, Carstensen J, et al. Human activities and climate variability drive fast-paced change across the world's estuarine-coastal ecosystems [J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 513-529
- [28] 牛明香, 王俊. 河口生态系统健康评价研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1977-1982
- Niu M X, Wang J. Review on estuary ecosystem health assessment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(7): 1977-1982 (in Chinese)
- [29] Meng W, Liu L S. On approaches of estuarine ecosystems health studies [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 86(3): 313-316
- [30] O'Brien A, Townsend K, Hale R, et al. How is ecosystem health defined and measured? A critical review of freshwater and estuarine studies [J]. Ecological Indicators, 2016, 69: 722-729
- [31] Gibson R, Atkinson R, Gordon J. Loss, status and trends for coastal marine habitats of Europe [J]. Oceanography and Marine Biology, 2007, 45: 345-405
- [32] Zhang F, Peng G Y, Xu P, et al. Ecological risk assessment of marine microplastics using the analytic hierarchy process: A case study in the Yangtze River Estuary and adjacent marine areas [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 425: 127960
- [33] Le Guen C, Tecchio S, Dauvin J C, et al. Assessing the ecological status of an estuarine ecosystem: Linking biodiversity and food-web indicators [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 228: 106339
- [34] 林海荣. 闽三角地区生态系统完整性评价方法研究[D]. 福州: 福州大学, 2019: 3-6
- [35] 刘雪萍, 卢双舫, 唐明明, 等. 河流-潮汐耦合控制下河口湾坝体沉积动力学数值模拟[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2944-2957
- Liu X P, Lu S F, Tang M M, et al. Numerical simulation of sedimentary dynamics to estuarine bar under the coupled fluvial-tidal control [J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2944-2957 (in Chinese)
- [36] Galois R, Blanchard G, Seguignes M, et al. Spatial distribution of sediment particulate organic matter on two estuarine intertidal mudflats: A comparison between Marennes-Oléron Bay (France) and the Humber Estuary (UK) [J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(10/11): 1199-1217

- [37] Smith S V, Hollibaugh J T. Coastal metabolism and the oceanic organic carbon balance [J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(1): 75-89
- [38] 许宇田. 长江口南汇东滩潮间带盐沼湿地鱼类物种多样性及其营养结构[D]. 上海: 华东师范大学, 2019: 4-5
- [39] Jiang M Q, Nakano S I. The crucial influence of trophic status on the relative requirement of nitrogen to phosphorus for phytoplankton growth [J]. *Water Research*, 2022, 222: 118868
- [40] 刘春涛, 刘秀洋, 王璐. 辽河河口生态系统健康评价初步研究[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(3): 43-48
- [41] 陈静. 河口区水生态健康评价技术方法及其应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 4-7
- [42] 刘焱序, 彭建, 汪安, 等. 生态系统健康研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 5920-5930
- Liu Y X, Peng J, Wang A, et al. New research progress and trends in ecosystem health [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 5920-5930 (in Chinese)
- [43] 牛明香, 王俊, 徐宾铎. 基于 PSR 的黄河河口区生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 943-952
- Niu M X, Wang J, Xu B D. Assessment of the ecosystem health of the Yellow River Estuary based on the pressure-state-response model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3): 943-952 (in Chinese)
- [44] 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)
- [45] 叶属峰, 刘星, 丁德文. 长江河口海域生态系统健康评价指标体系及其初步评价[J]. *海洋学报*, 2007, 29(4): 128-136
- Ye S F, Liu X, Ding D W. Ecosystem health assessment of the Changjiang River Estuary: Indicator system and its primarily assessment [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(4): 128-136 (in Chinese)
- [46] Müller F, Lenz R. Ecological indicators: Theoretical fundamentals of consistent applications in environmental management [J]. *Ecological Indicators*, 2006, 6(1): 1-5
- [47] Pinto R, Patrício J, Baeta A, et al. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(1): 1-25
- [48] 马廷婷, 范亚民, 李宽意, 等. 基于浮游植物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(4): 501-508
- Ma T T, Fan Y M, Li K Y, et al. Ecological health assessment of main estuaries of Lake Taihu based on phytoplankton index of biotic integrity [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(4): 501-508 (in Chinese)
- [49] Hallett C S, Trayler K M, Valesini F J. The fish community index: A practical management tool for monitoring and reporting estuarine ecological condition [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2019, 15(5): 726-738
- [50] Kido M H. A native species-based index of biological integrity for Hawaiian stream environments [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(5): 4063-4075
- [51] Dauvin J C. Paradox of estuarine quality: Benthic indicators and indices, consensus or debate for the future [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1-6): 271-281
- [52] Elliott M, Whitfield A K. Challenging paradigms in estuarine ecology and management [J]. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 2011, 94(4): 306-314
- [53] Hess S, Alve E, Andersen T J, et al. Defining ecological reference conditions in naturally stressed environments: How difficult is it? [J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 156: 104885
- [54] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397-402
- [55] Arocena R, Castro M, Chalar G. Ecological integrity assessment of streams in the light of natural ecoregions and anthropic land use [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(10): 748
- [56] Barbier E, Hacker S, Kennedy C J, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services [J]. *Ecological Monographs*, 2011, 81: 169-193
- [57] Alongi D M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(1): 1-13
- [58] Borja A, Bricker S B, Dauer D M, et al. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(9): 1519-1537
- [59] Zhao C, Shao N, Yang S, et al. Integrated assessment of ecosystem health using multiple indicator species [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 130: 157-168
- [60] Lane C R, Brown M T. Diatoms as indicators of isolated herbaceous wetland condition in Florida, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7(3): 521-540
- Wang Y Y, Yin K, Yang Q, 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)
- [61] Kane D D, Gordon S I, Munawar M, et al. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1234-1247
- [62] Li Z X, Ma C, Sun Y N, et al. Ecological health evaluation of rivers based on phytoplankton biological integrity index and water quality index on the impact of anthropogenic pollution: A case of Ashi River Basin [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 942205
- [63] Ruaro R, Gubiani É A. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: Applications and main flaws [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 105-110
- [64] Zogaris S, Tachos V, Economou A N, et al. A model-based fish bioassessment index for Eastern Mediterranean Rivers: Application in a biogeographically diverse area [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 676-689
- [65] Li J, Li Y, Qian B, 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
- [66] Li T H, Huang X L, Jiang X H, et al. Assessment of ecosystem health of the Yellow River with fish index of biotic integrity [J]. *Hydrobiologia*, 2018, 814(1): 31-43
- [67] Guerrero E, Gili J M, Maynou F, et al. Diversity and mesoscale spatial changes in the planktonic cnidarian community under extreme warm summer conditions [J]. *Journal of Plankton Research*, 2018, 40(2): 178-196
- [68] Diaz R J, Solan M, Valente R M. A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 73(3): 165-181
- [69] Jiang M Z, Chen H Y, Chen Q H, et al. Wetland ecosystem integrity and its variation in an estuary using the EBLE index [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 252-262
- [70] Frashure K M, Bowen R E, Chen R F. An integrative management protocol for connecting human priorities with ecosystem health in the Neponset River Estuary [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2012, 69: 255-264
- [71] 李燕, 马晓婷, 胡潇涵, 等. 基于熵权的新疆典型流域生态健康评价[J]. *新疆环境保护*, 2015, 37(4): 39-43, 51
- Li Y, Ma X T, Hu X H, et al. Entropy weight based ecological health evaluation on typical watershed system in Xinjiang [J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2015, 37(4): 39-43, 51 (in Chinese)
- [72] 刘惠君, 闫旭骞, 林大泽. 矿区生态系统健康现状模糊综合评价方法[J]. *中国安全科学学报*, 2009, 19(12): 154-158
- Liu H J, Yan X Q, Lin D Z. A fuzzy comprehensive evaluation method for ecosystem health status in mining area [J]. *China Safety Science Journal*, 2009, 19(12): 154-158 (in Chinese)
- [73] 李海霞, 韩丽花, 蔚青, 等. 基于灰色关联分析法的辽河保护区河流水生态健康评价[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(4): 553-561, 531
- Li H X, Han L H, Yu Q, et al. Assessment on river water ecological health based on grey relation analysis in Liaohe Conservation Area [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4): 553-561, 531 (in Chinese)
- [74] Dauvin J C, Ruellet T. The estuarine quality paradox: Is it possible to define an ecological quality status for specific modified and naturally stressed estuarine ecosystems? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 59(1-3): 38-47
- [75] Ferreira J G. Development of an estuarine quality index based on key physical and biogeochemical features [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2000, 43(1): 99-122
- [76] Borja A, Dauer D M. Assessing the environmental quality status in estuarine and coastal systems: Comparing methodologies and indices [J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(4): 331-337
- [77] Chiu G S, Wu M A, Lu L. Model-based assessment of estuary ecosystem health using the latent health factor index, with application to the richibucto estuary [J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65697
- [78] Shamaskin A C, Correa S B, Street G M, et al. Considering the influence of land use/land cover on estuarine biotic richness with Bayesian hierarchical models [J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2022, 32(7): e2675
- [79] 孙涛, 杨志峰. 河口生态系统恢复评价指标体系研究及其应用[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(3): 381-384
- Sun T, Yang Z F. Studies on the evaluating index system for estuarine ecosystem restoration and its application [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3): 381-384 (in Chinese)
- [80] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 等. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 181-188
- Hui X J, Yang T, Li F Y, et al. Health assessment on aquatic ecosystem in Liaohe River of Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 181-188 (in Chinese)
- [81] 张芮, 徐宾铎, 薛莹, 等. 黄河口及其邻近水域鱼类生

- 物完整性评价[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 946-952
- Zhang R, Xu B D, Xue Y, et al. Evaluation of the biotic integrity of fish assemblages in the Yellow River Estuary and its adjacent waters [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 946-952 (in Chinese)
- [82] 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
- [83] Whitfield A K. Fishes and the environmental status of South African estuaries [J]. Fisheries Management and Ecology, 1996, 3(1): 45-57
- [84] Meng L S, Orphanides C D, Christopher Powell J. Use of a fish index to assess habitat quality in Narragansett Bay, Rhode Island [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2002, 131(4): 731-742
- [85] Harrison T D, Whitfield A K. Application of a multimetric fish index to assess the environmental condition of South African Estuaries [J]. Estuaries and Coasts, 2006, 29(6): 1108-1120
- [86] Medeiros J P, Chaves M L, Silva G, et al. Benthic condition in low salinity areas of the Mira Estuary (Portugal): Lessons learnt from freshwater and marine assessment tools [J]. Ecological Indicators, 2012, 19: 79-88
- [87] Cabral H N, Fonseca V F, Gamito R, et al. Ecological quality assessment of transitional waters based on fish assemblages in Portuguese Estuaries: The Estuarine Fish Assessment Index (EFAI) [J]. Ecological Indicators, 2012, 19: 144-153
- [88] Kido M H. A native species-based index of biological integrity for Hawaiian stream environments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(5): 4063-4075
- [89] Itsukushima R, Yoshikawa H, Morita K. A dataset of molluscan fauna sampled in river estuaries of medium and small size river in Kyushu Island, Japan [J]. Biodiversity Data Journal, 2018(6): e26101
- [90] Nestlerode J A, Murrell M C, Hagy J D, et al. Bioassessment of a northwest Florida estuary using benthic macroinvertebrates [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2020, 16(2): 245-256
- [91] Mulik J, Sukumaran S, Dias H Q. Is the benthic index AMBI impervious to seasonality and data transformations while evaluating the ecological status of an anthropized monsoonal estuary? [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 186: 105080
- [92] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉, 等. 基于底栖动物完整性指数的河口健康评价[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 242-247
- Zhou X W, Wang L P, Zheng B H, et al. Estuary health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Yangtze Estuary and its adjacent waters [J]. Environmental Science, 2009, 30(1): 242-247 (in Chinese)
- [93] Qiu B C, Zhong X, Liu X S. Assessment of the benthic ecological status in the adjacent waters of Yangtze River Estuary using marine biotic indices [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 137: 104-112
- [94] 张嵩, 张崇良, 徐宾铎, 等. 基于大型底栖动物群落特征的黄河口及邻近水域健康度评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 65-71
- Zhang S, Zhang C L, Xu B D, et al. Ecological status assessment based on macrobenthic community characteristics in Yellow River Estuary and its adjacent waters [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(5): 65-71 (in Chinese) ◆