

国内外生境模拟法应用研究进展

张梦瑶¹, 吴琮², 王汝幸^{3,4}, 储著定¹, 刘晓薇^{1,4,5}

(1.合肥大学生物食品与环境学院,安徽 合肥 230601; 2.中水淮河规划设计研究有限公司,安徽 合肥 230601; 3.合肥大学旅游与会展学院,安徽 合肥 230601; 4.巢湖流域治理与高质量发展安徽省哲学社会科学重点实验室,安徽 合肥 230601; 5.安徽省环境污染防治与生态修复协同创新中心,安徽 合肥 230601)

摘要:【目的】生态流量是评估河流生态系统健康的关键指标,其精确确定对流域水资源管理与生态保护至关重要。生境模拟法作为一种基于生物栖息地保护、量化流量-生境关系的生态流量计算方法,受到广泛关注。【方法】采用文献计量学分析方法,系统梳理了相关研究文献,阐述了生境模拟法在河流生态流量研究中的应用现状、技术手段及其核心价值,总结归纳了该方法的优势与当前面临的主要挑战,并展望其未来发展趋势。【结果】生境模拟法在确定河流生态流量时,能够有效整合外界干扰对生物生存环境的影响与河流自然水文特性等关键要素,提升计算结果的准确性。然而,该方法目前仍面临模型参数不确定性、数据获取受限以及对不同生态系统适应性差异考虑不足等挑战。【结论】生境模拟法在河流生态流量研究中兼具优势与发展潜力,未来研究应聚焦于模型优化、加强多学科融合以及与新兴技术结合,以期实现更精确、更具针对性的生态流量确定,为水资源可持续利用和河流生态系统保护提供更坚实的科学支撑。

关键词:生态流量;生境模拟;IFIM法;PHABSIM模型;河流水资源

中国分类号:P33;TV213

文献标识码:A

生态流量即指为确保河流、湖泊等水生态系统结构完整、功能稳定,而需要在水体中保留的、符合特定水质标准的流量(水量、水位)及其动态变化过程^[1],精确合理地确定生态流量对于保障水资源的安全、维持生态环境的平衡具有不可替代的作用。随着工业化、城市化的不断推进,人类活动对河流生态系统的影响日益加剧,使得合理确定生态流量的重要性愈发显著。

自20世纪以来,为了应对不同环境条件下的生态流量计算需求,国内外学者通过融合多种理论框架,开发了一系列多元化的计算方法。截至目前,全球范围内已经形成了200余种不同的计算方法^[2,3],这些方法主要归属于四大类别:水文学方法、水力学方法、生境模拟法以及整体分析法。水文学法是通过分析历史流量数据,运用一系列简单水文指标估算河流生态流量;水力学法通过构建流量-水力学关系估算生态流量;生境模拟法通过栖息地环境因素、水力学条件和河道流量的关系确定生态流量;整体分析法从生态系统的梳理入手,构建健全的河

流生态监测系统,从而最大程度地保障生态流量。

国内外学者对于原理简单、计算快速的水文和水力学方法的应用较多^[4],但这两种方法没有直接考虑到生物目标需要、生物栖息地特性等因素,所提供的生态流量往往存在局限性,其计算结果并不能充分满足栖息地的长期保护需要。例如,范利平等利用水文学方法确定韩江流域的生态流量数值,但该方法未体现水生生态敏感期的特殊要求,不能充分反映韩江流域的河流特征^[5]。王玉莲等对南水北调西线工程水源区进行生态流量的研究,说明计算敏感生态需水选取生境模拟法的正确性,以及采用水文学、水力学方法制定生态流量目标,造成生态流量计算结果的不准确^[6]。整体分析法耗时、耗力,且很大程度上依赖于专家意见。模块构建法(BBM)作为一种常用的整体分析法被应用于对玉龙喀什河的生态流量进行计算,以日流量值作为初始生态流量,结合研究河段的生态特征(如鱼类产卵期)和地形结构模拟天然来水过程,确定逐月或逐时段的生态流量,但BBM法的初始生态流量值

收稿日期:2024-12-18

基金项目:巢湖生物资源调查研究项目(2020-340181-77-01-037328);国家自然科学基金面上项目(52070063);安徽省自然科学基金优秀项目(2308085Y38);合肥市关键共性技术研发项目(2021GJ062)。

第一作者:张梦瑶(2000-),女,硕士研究生,从事资源与环境方面研究。E-mail:1445622963@qq.com。

通信作者:刘晓薇(1984-),女,教授,从事水环境生态风险方面研究。E-mail:liuxw@hfu.edu.cn。

的选取较为单一,无法全面反映不同季节和水文年份的生态需求^[7]。生境模拟法全面考虑物理生境因子的多样性,深入分析生物个体或种群自身的生理需求和行为特性,能充分满足栖息地的长期保护需要,已被广泛认为是当前一种较为可靠的研究途径。

自 20 世纪 80 年代,国外开始日益关注人类活动对自然生态环境所产生的影响,生境模拟法作为一种研究手段被广泛应用,主要通过特定物种栖息地模型相结合,对河流生态流量进行估算。早期,我国主要采用水文和水力学方法估算生态流量,从 21 世纪开始,生境模拟法在我国珠江流域、雅砻江流域以及松辽流域生态流量估算中得到应用^[8,9]。然而,目前国内尚未形成一套完整的、适应性强的生态流量估算方法体系。近年来,国家对保护水环境中生物多样性越来越重视,基于生境保护的角度的开展生物栖息环境与河流流量之间的相互关系研究能够有效地整合河流自然生态系统与其内部生物种群的整体连贯性,解决过度简化河流实际情况、忽视生态系统中物种在不同生命周期阶段的特定需求等问题造成的生态流量计算不准确性,因此生境模拟法的应用在生态流量研究中具有越来越重要的地位。

目前,广泛应用的水文、水力学方法计算生态流量时不能充分反映河流特征,尤其是对于存在水生态环境敏感区的流域内生态流量的适宜性考虑不足,使得管理保障措施产生偏差,从而影响了水资源的合理利用。虽然生境模拟法能够全面考虑敏感区栖息地适宜性,然而有关其在生态流量计算中应用的系统性归纳总结较少。因此,本研究通过文献计量学分析,对生境模拟法在生态流量中的应用进行现状分析和评述,阐明生境模拟在生态流量研究中的发展现状,总结其在河流生态流量研究中所存在的问题以及未来发展趋势,以便提高生态流量计算的科学性和准确性,为生态流量的科学评估和动态管理提供支持。

1 生境模拟法简介

生境模拟法,亦称作栖息地法,该方法着重于分析生物与其栖息环境之间的相互关系,在深入研究生物生态环境整体状况的基础上,分析了生物在特定环境下最适宜的栖息地特征值,并借助数值模拟技术,精确模拟出生物栖息地大小与流量之间的相互作用关系,进而计算出河流的生态流量^[10]。生境模拟法在综合考虑河流生态系统的结构与功能上展现出独特的优势,对于生态流量的定值更加精准,

然而在建立生境模拟模型时生物数据难以获取。目前,研究人员多采用简化模型的方法或者结合计算机科学的机器预测、测绘学的动态监测、统计学的关系推导等其他学科的方法和技术进行补充初步克服了上述问题^[11,12]。

生境模拟法的代表方法有河流流量增量法 (Instream Flow Incremental Methodology ,IFIM)、物理栖息地模型 (Physical Habitat Simulation System,PHABSIM)、河流流动规律的计算机辅助模拟模型 (Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Regulations ,CASIMIR)、统计栖息地模型和生物能模型。经中国知网 CNKI 中文总库以及 Web of Science 英文数据库文献检索后分析,对于 IFIM 法和 PHABSIM 模型研究较多,对统计栖息地模型及 CASIMIR 法研究较少,如图 1 所示。

给定主题词“IFIM 法”下,CNKI 数据库中检索相关文献 37 篇,起止年限为 2006-2024,其中期刊论文 25 篇,硕博论文 10 篇,科技成果 2 篇;Web of Science 数据库中检索文献 74 篇,起止年限为 1987-2023,其中 Article 有 67 篇,Meeting 有 6 篇,Review Article 有 1 篇。

给定主题词“PHABSIM 模型”下,CNKI 数据库中检索相关文献 48 篇,起止年限为 2007-2024,其中期刊论文 27 篇,硕博论文 17 篇,中国会议 2 篇,国际会议 1 篇以及科技成果 1 篇;Web of Science 数据库中检索文献共 364 篇,起止年限为 1996-2024,其中 Article 有 294 篇,Meeting 有 19 篇,Review Article 有 11 篇,Book 有 1 篇,Other 有 39 篇。

给定主题词“统计栖息地模型”下,CNKI 数据库中未检索到相关文献,Web of Science 数据库中检索文献共 4 篇,起止年限为 2002-2018,均为 Article 类型。给定主题词“生物能模型”下,CNKI 数据库中检索相关文献 8 篇,起止年限为 1999-2022,其中期刊论文 4 篇,硕博论文 3 篇,中国会议 1 篇;Web of Science 数据库中检索文献 53 篇,起止年限为 2001-2024,其中 Article 有 40 篇,Review Article 有 5 篇,Other 有 8 篇。

给定主题词“CASIMIR”下,CNKI 数据库中未检索到相关文献,Web of Science 数据库中检索文献共 14 篇,起止年限为 2001-2024,其中 Article 类型有 13 篇,Meeting 类型有 1 篇。

	数量、质量与流量 之间的关系		可分析流量与生境 之间的关系	和生物数据
PHABSIM 模型	一种物理栖息地模拟模型;计算微栖息地数量指标的特定模型	适用于水质不是栖息地的限制因素,而物理条件是其限制因素的流域	具有生物学依据,结果较可靠	模型参数的获取较为困难;不适用于群落生态系统水平
统计栖息地模型	一种基于统计生境建模简化鱼类微生境模拟的工具	适用于有两种不同流量水平下的宽度、深度和底质粒度平均值的流域;适用于统计水力建模方面	能考虑到生境适宜性变化所产生的影响及群落中适应不同生境的生物的比例	主要局限于鱼类;需要验证计算质量
生物能模型	基于对净能量摄入的估计,涉及单位面积生物量的百分比	适用于栖息地丧失和退化对物种产生的影响及种群恢复潜力方面的研究	能够预测河流中鱼类丰度	仅被证明适用于漂流进食鱼种
CASIMIR 法	一种计算机辅助的模拟模型;基于模糊逻辑的生态水力建模系统	适用于具有充足水文和生态数据的河流生态系统,同时拥有丰富的专家知识与经验的流域	能够综合考虑多种生态和水力因素;模型具有模块化结构	数据需求量大;模型较为复杂;成本高;生态响应不确定

2.1 IFIM 法

IFIM 法是一种用于评估水资源开发对水生及岸栖生态系统可能产生影响的概念模型,该方法起源于 20 世纪 70 年代的美国,由鱼类和野生动物保护部门开发,旨在解决水资源管理问题并最小化对生态系统需水量的影响^[13]。20 世纪 90 年代,IFIM 法得到广泛应用,随后其他栖息地模型被陆续开发。

IFIM 法是通过结合水力学模型和生物信息模型,建立不同流态和特征物种有效栖息地之间的关系。选择流域内代表性物种,搜集其生活习性等生物信息;利用水力模型预测河流中水深、流速等重要水力参数;根据代表性物种的生态需求确定适宜生境标准;根据水力模型预测的水力参数和生境适宜性标准计算出适宜代表性物种的栖息地面积,并反推河流生态流量。

国内外研究证明了 IFIM 法在生态流量评估和栖息地管理中的实用价值,该方法在河流生态修复工程、特定物种保护需求以及生态流量阈值确定等方面应用效果显著。例如,Zuzana 等通过 IFIM 法研究贝布拉瓦河的河流整治对水生栖息地质量的影响,从而优化河流修复工程设计以最小化生态干扰^[14];张陵蕾等采用 IFIM 法深入研究珍稀鱼类生态需求以支撑物种保护^[15];彭为等基于 IFIM 法确定鱼类关键生活史时期的适宜流量为流域生态调度提供科学依据^[16]。这些研究共同表明,IFIM 法通过量化流量-生境关系,为河流生态系统保护、修复与管理中的关键水文决策提供了坚实的科学支撑。

IFIM 法不仅能够通过模拟不同流量下栖息地的变化,生成动态的水文和栖息地特征时序数据,研究流量变化对水生生物生存和繁衍的影响,还能精确分析不同水生生物在其生命周期各个阶段的适宜流量与生存环境之间的关系,揭示河流生态流量对于栖息地的影响^[17]。然而,该方法对于数据收集有严格的要求,需要采集大量详尽的水文信息和生物数据,也需要精确绘制栖息地适宜性曲线,并且仅适用于计算稳定河流和单种群生态系统的生态流量。

2.2 PHABSIM 模型

PHABSIM 模型是根据 IFIM 概念架构而建立的模型,该模型主要包括两部分:水动力模型与栖息地模型。PHABSIM 模型是以物理栖息地模拟为主要目标,量化评估相关环境因子对生境的影响,计算得出最适合的生态流量以确保物种在自然水体中维持生存和繁衍的一种方法^[18]。使用水力学模型得出河流在不同流量下的水深、流速等参数;基于水力学模型结果,使用单变量的生境因子适宜性曲线计算出可用栖息地的加权可利用面积(WUA);选择一个合适的目标物种,定义其生境适宜性曲线;通过分析不同流量下的 WUA 曲线与目标物种生境适宜性曲线确定河流的最小生态流量。

近年来,PHABSIM 模型在量化河流生物栖息地面积与流量关系方面的应用日益广泛,并趋于标准化。该模型通过模拟栖息地的物理条件,能够满足目标物种特定时期的栖息地需求,有效评估流量

变化对水生生物栖息地的影响,为生态流量计算和水资源管理提供了重要工具。例如,魏卿等运用 PHABSIM 模型确定特定鱼类关键生活史时期的生态流量^[19];陈娟等借助 PHABSIM 模型建立目标物种适应性指标与流量的关系曲线以指导生态水位管理^[20];Wen 等利用 PHABSIM 模型模拟目标鱼类不同生命阶段对流量和栖息地的需求,以分析水电开发与栖息地保护之间的权衡模拟^[21]。这些研究表明,PHABSIM 模型在河流生态流量计算、栖息地保护以及水资源管理领域展现出显著应用价值,能够为生态保护与水资源利用的协调发展提供科学指导。

PHABSIM 模型在分析特定物种对生态流量的需求方面显示出了一定的优势,但该模型并不适用于揭示群落生态系统中错综复杂的相互关系,且在估算种群数量、生物量以及栖息地指数时,其准确性及全面性往往存在局限,这些缺陷需要研究者进一步完善。

2.3 CASIMIR 法

CASIMIR 法是一种基于模糊逻辑的生态水力建模系统,旨在评估河流中鱼类等水生生物的栖息地适宜性。该方法通过模拟不同流量条件下的栖息地适宜性,确定能够满足生物需求的生态流量。CASIMIR 法的应用通常包括以下几个关键步骤:收集水文数据,确定目标物种对水力参数的偏好范围;利用模糊逻辑规则将两者结合;通过模型模拟确定生态流量^[22]。

目前国内学者对 CASIMIR 法的研究虽已颇为关注,但其在生态流量评估的实证研究相对有限,应用多集中于特定地区生态流量的确定。例如,胡淑义等利用 CASIMIR 模型得到研究河段在选定流量下的平均流速、水深和底质类型,构建栖息地适宜性-流量曲线,从而确定生态流量^[23]。相比之下,国外学者在 CASIMIR 法的生态流量应用方面积累了更丰富的经验,如 Hough 等利用该方法评估了小型蓄水工程对大型无脊椎动物栖息地的影响^[24];Chattopadhyay 等利用 CASIMIR 模型预测了流域变化对特定生物群落适宜流量范围的影响^[25];Aude 等利用 CASIMIR 模型分析了不同最小流量情景下对受保护鱼类物种栖息地质量的变化^[26]。这些研究共同验证了 CASIMIR 法在预测复杂环境响应及综合评估多因子栖息地条件方面的适用性。综合国内外研究表明,CASIMIR 法能够有效整合水文模拟与生态响应分析,适用于复杂环境条件下的栖息地适宜性评估和生态流量确定。然而,我国在该领域的实证研究仍需进一步拓展和深化,以更好

地应对我国复杂多样的河流生态系统和水资源管理需求。

CASIMIR 法能够处理生态数据的模糊性和不确定性,通过模糊集和模糊逻辑规则,可以更真实地反映生物对环境的适应性;此外,该方法能够将多个水力参数和生态因素综合考虑,提供一个全面评估栖息地适宜性的框架。然而,CASIMIR 法也存在一些局限性,其需要大量的生态数据来建立和校准模型,这些数据的获取既耗时又昂贵;其次,模糊逻辑规则的建立依赖于专家知识和经验,可能导致模型的主观性较强。

2.4 统计栖息地模型与生物能模型

统计栖息地模型,通过统计分析技术来评估和预测水生生物的栖息地适宜性,即对水力变量进行统计计算,分析其随流量变化的变化趋势,同时在研究区域的平均分布内,将生物数据与传统栖息地模型相结合,进而预测和评估生态流量^[27]。收集水生生物及其栖息地的相关数据,包括水深、流速、物种分布等;基于搜集的数据,选择对水生生物有影响的变量;使用统计学方法,如多元线性回归、模糊逻辑法、广义线性模型等构建物种适宜度模型;通过栖息地适宜性评估结果与径流条件的定量响应关系,确定维持水生生物栖息地所需的最小生态流量。统计栖息地模型操作简便,只需极少的专业知识和实际工作经验即可上手,但是该方法要求对于计算结果的准确性进行严格的验证。

生物能模型,用于评估不同河流流域特定区域的成本效益比,该模型的核心在于对净能量摄入的准确估算,其中涉及到两个关键步骤:一是精确计量从食物来源获得的总能量摄入,二是计算出维持觅食位置所消耗的能量^[27]。根据生态学和生物分类学理论,对生物种群进行功能组划分;为每个功能组设定必要的生态参数,如生物量、生态营养转换效率等;使用生物能模型,即 Ecopath 模型,分析生态系统中各功能组之间的能量流动;通过模型模拟,确定维持生态系统中特定功能组或整个生态系统所需的最低流量,即生态流量。生物能模型在对河流中鱼类种群的丰度进行预测方面具有显著优势,但是主要问题在于模型构建和运行成本较高,需要消耗大量的时间和资源,且仅适用于那些以漂流方式进食的鱼种。

尽管统计栖息地模型和生物能模型在生态流量评估中均有所应用,但其应用场景多集中于评估模型自身性能、分析水资源开发利用活动对河流生态系统的影响或与其他模型耦合以确定生态流量。例如,Mattia 等提出统计栖息地模型(如 ESTIMHAB

模型)在评估耗水影响时表现了最好的性能^[28];Jordan等结合了生物能模型和物理栖息地模拟,对特定鲑鱼种群进行了生态流量优化研究^[29]。这些研究突出了模型的潜力,同时也揭示了在模型选择、多模型耦合及广泛适用性验证方面仍需深入探索。

2.5 其他方法

随着生境模拟法的深入研究,国内外学者也在不断开发新的方法,如:基于MIKE水动力模拟模型以及River 2D模型的方法^[30,31]、法国开发的EVHA(Evaluation of Habitat Method)^[32]、挪威开发的RRS(River System Simulator System)^[33]等,大量栖息地模拟方法逐渐显现,在未来具有较高的应用潜力;但大多数方法仅在特定区域被应用,仍处于开发初级阶段,需要进行严格的检验与校核。

3 生境模拟法在国内外外的应用

3.1 生境模拟法在国外的应用

国外学者在20世纪70年代开展生境模拟法研究,利用丰富多样的生物数据和生态模型深入探索不同类型的生物生存环境,力求精确描绘出各种生态条件下的最佳流量,以此来保护和维持水生生态系统的健康与平衡^[34]。

早期的研究主要集中于模型构建,通过收集流域内水文、水力信息和生物数据,建立初步的生境模拟模型,如García De Jalón团队采用最早出现的IFIM法,结合基本的二维水动力模型,对西班牙北部海岸的生态流量进行了评估,说明了生境增强措施的有效性^[35]。随着研究的深入,学者们逐渐意识到模型的局限性,开始对其进行优化改进。例如,Parasiewicz对PHABSIM模型进行了研究改进,升级为MesoHABSIM(Mesohabitat Simulation Model,中尺度栖息地模拟模型)方法,即将系统尺度的流动水体生态完整性评估与栖息地物理分布的定量信息相结合,模拟流域尺度的栖息地变化,使得所需数据较于PHABSIM模型更加简单^[36];Sedighkia和Abdoli在PHABSIM模型的基础上开发了一种新的生态流量优化框架,通过PHABSIM模型和ANFIS系统(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System,自适应神经模糊推理系统),结合优化算法对河流生态系统中鱼类生境的生态适宜性进行研究^[37]。同时,国外学者在生境模拟法的研究过程中逐步将研究范围从鱼类物种扩展至其他生物物种^[38],Smith和Nestlerode等选择美国阿拉巴马州莫比尔湾褐虾为目标物种,使用栖息地适宜性指数模型来改善栖息地环境

^[39];Beatrice等选取大型无脊椎动物物种对意大利北部的河流进行建模,说明了MesoHABSIM方法可以有效地扩展到不同的生态目标^[40]。

综上所述,国外在生境模拟法对生态流量的研究方面取得一定成功,从模型的初步建立到模型的优化改进,从鱼类物种选择扩展至其他物种的生境研究,为全球生态流量研究提供了宝贵经验与借鉴。

3.2 生境模拟法在国内的应用

目前,我国生态流量的研究仍主要采用水文学和水力学方法,生境模拟法在快速发展阶段。

自21世纪起,国内基于生境模拟的河流生态流量研究正在逐步增加,主要是以鱼类生境模拟为主,针对不同鱼类物种,其研究内容也有所区别。以中华鲟为代表的单鱼类物种,采用IFIM法建立模型对其产卵栖息地的面积变化进行研究,从而确定最佳生态流量决策^[41];以齐口裂腹鱼为目标物种,应用生境模拟法对河流水电工程的生态基流过程进行确定,并对其适宜性进行分析^[42];鲤鱼被选取为单目标物种,基于其流速、水深等参数采用生境模拟法对鲤鱼适宜生态流量数值进行计算,确定生态流量^[43]。同时,也有不少学者针对多种鱼类综合进行生境模拟的生态流量研究^[44]。根据不同季节,选取不同鱼类,融合鲫、泥鳅、棒花鱼、麦穗鱼等鱼类生境,基于生境模拟法确定了小清河干流的多目标生态流量^[45];采用生境模拟法,鲫鱼、伪鱼和鳊鱼被选取为三种多目标鱼类,计算了泗江干流河段的生态流量^[46]。近年来,除鱼类生境研究外,国内学者也针对其它物种开展了诸多生境模拟研究。杨薇、董伟萍等对长江干流满足江豚生境需求的生态流量过程展开了研究,基于其水深、流速指标建立了流量与栖息地面积之间的模型,从而确定了长江铜陵段的适宜生态流量^[47];王领贺、王松毅等选取大型底栖生物作为生态目标的案例,展开生态流量计算研究,对生态流量泄放后减水河段的生态修复效果进行科学评估^[48];何术锋、王清等综合考虑湿地植物及水鸟对关键生境因子水位的需求,构建了栖息地适宜度曲线和综合栖息地模型,为确定合理的生态水位提供依据^[49]。

综上所述,我国基于生境模拟法的生态流量研究虽起步较晚,但发展较快,从单一的鱼类生境模拟逐渐拓展至多鱼类物种综合研究,甚至引入大型底栖生物、植物、候鸟等多种物种的生态流量研究,研究成果丰富了生态流量计算的方法体系。

3.3 生境模拟法在国内外应用的对比分析

近年来,生境模拟法开始引起我国学者广泛关

注,但相较于国外研究来说,我国对于生境模拟法的研究扩展较少。主要体现在两方面:其一,国内对于生境模拟法的理论研究较少,且多数为相对落后的基本方法应用,对生境模拟相关方法进行改进优化较少;其二,国内原有研究多为单一生态流量指标计算,未扩大至生态系统或者生态敏感区整体性的生态需水量研究。这种现状导致了国内在确定生态流量时,往往难以准确地反应自然水体水生生态系统整体需水量及鱼类或者其他水生生物的真实需求和生活习性,从而影响生态保护工作的科学性和有效性。鉴于此,国内急需深入开展生境模拟理论研究、模型改进、研究维度扩展以及多学科交叉等相关研究工作,从而进一步提高生态流量计算准确度。

当前国外对于生境模拟法的研究越来越成熟,在原有方法的基础上进行了改进,使得生态流量的计算更加准确,但这些研究多数为理论层面的探讨,实践应用较少,且在实际应用过程中可能还存在数据信息获取、参数或方法适用性等问题。如某些河流的生物类群信息可能缺失;在进行模拟假设时,参数或者指标选取不合理可能会对模拟结果的代表性产生不利影响。此外,国内外现有方法均主要考虑单一物种生境需求,而忽视整个群落的生态需求和功能,这种片面性可能导致生态流量的获取无法真实反映河流生态系统的整体健康状况,从而在生态流量的确定和应用过程中,无法维持生态系统的完整性和稳定性。因此,亟需开发更具综合性和系统性的方法,以解决当前生态流量研究中存在的问题。

4 结论

目前,我国在生境模拟法研究方面基本借鉴国外已有的模型方法,尚未提出本土化的理论方法。为更准确地计算我国河流生态流量,应加快对生境模拟理论和计算方法研究,不断改进生境模拟的理论模型,整合各模型的优势,从空间维度(敏感区的分布)以及时间维度(敏感目标的生理周期)对生态流量的计算提出精细化要求。

综合国内外研究成果,应开展不同生物物种的实地探索实验,从小流域开始,分流域进行,将理论研究逐一在具体河流中应用,为河流生态流量过程及水资源的利用规划提供合理建议;同时优化生态流量确定与监管,融合遥感、地理信息系统、数字孪生、智能监测、大数据等多学科技术,解决河流中生物物种习性或者水文数据难以获取的问题,能够进行多目标物种的生境模拟,以维护生态系统的完整

性为核心目标,深入探究不同生境斑块之间所存在的连接效应及其相互影响。

总之,未来生境模拟的发展将致力于建立一个更加精确、全面的模型体系,通过模拟不同尺度下的生态过程,更准确地确定流域内最合理的生态流量,能够有效地管理和规划自然资源,以实现可持续发展的目标。

参考文献

- [1] 水利部.水利部关于做好河湖生态流量确定和保障工作的指导意见[J].中国水利,2020(15):1-2.[Ministry of Water Resources.Guiding opinions of the ministry of water resources on the determination and guarantee of ecological flow in rivers and lakes[J].China Water Resources,2020(15):1-2.]
- [2] 刘中培,李鑫,窦明,等.淮河干流河南段基本生态流量保证率研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(2):50-54.[LIU Z P,LI X,DOU M,et al.Research on the guarantee rate of basic ecological flow in the main stream of the Huaihe River in Henan section[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2020,41(2):50-54.]
- [3] WEI N,XIE J,LU K,et al.Dynamic simulation of ecological flow based on the variable interval analysis method[J].Sustainability(Basel,Switzerland),2022,14(13):7988.
- [4] 郭文献,王高振,朱志鹏,等.乌江生态流量及其保障研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(5):31-37.[GUO W X,WANG G Z,ZHU Z P,et al.Research on ecological flow and its guarantee in Wujiang River[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(5):31-37.]
- [5] 范利平,吴利桥,林文杰.韩江流域河湖生态流量保障管理研究[J].水利发展研究,2024,24(5):35-40.[FAN L P,WU L Q,LIN W J.Research on ecological flow guarantee management of rivers and lakes in the Hanjiang River basin[J].Water Resources Development Research,2024,24(5):35-40.]
- [6] 王玉莲,杨泽凡,闫龙,等.基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究[J].水资源保护,2024,40(4):137-147.[WANG Y L,YANG Z F,YAN L,et al.Research on ecological water demand

- in water source area of west route of south-to-north water diversion project based on multi-method comprehensive comparison[J].*Water Resources Protection*,2024,40(4):137-147.]
- [7] 曹文洁.玉龙喀什河水利枢纽工程中生态流量的研究与应用[J].*水利规划与设计*,2020(3):63-66.[CAO W J.Research and application of ecological flow in Yulong Kashgar River water conservancy hub project[J].*Water Resources Planning and Design*,2020(3):63-66.]
- [8] 朱远生,翁士创,杨昆.西江干流敏感生态需水量研究[J].*人民珠江*,2011,32(3):1-2+49.[ZHU Y S,WENG S C,YANG K.Study of sensitive ecological water demand in main stem of Xijiang River[J].*Pearl River*,2011,32(3):1-2+49.]
- [9] 吴春华.雅砻江干流河道内生态需水量生境模拟法研究[J].*生态科学*,2007,26(6):536-539.[WU C H.The habitat simulation method of research on the ecological flow in river course of Yalong mainstream[J].*Ecological Science*,2007,26(6):536-539.]
- [10] 南军虎,刘一安,陈垚,等.裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算[J].*水资源保护*,2022,38(3):189-197.[NAN J H,LIU Y A,CHEN Y,et al.Reconstruction of biological habitat and ecological flow estimation in curving cut-off river channel[J].*Water Resources Protection*,2022,38(3):189-197.]
- [11] 郝增超,尚松浩.基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J].*水利学报*,2008,39(5):557-561.[HAO Z C,SHANG S H.Multi-objective assessment method based on physical habitat simulation for calculating ecological river flow demand[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2008,39(5):557-561.]
- [12] 韩会玲,张剑,朱晓娟,等.面向生态环境复苏的生态流量优化计算研究[J].*环境科学与技术*,2024,47(S1):235-247.[HAN H L,ZHANG J,ZHU X J,et al.Quantitative calculation & optimization of ecological flow for eco-environmental recovery[J].*Environmental Science & Technology*,2024,47(S1):235-247.]
- [13] 董哲仁,张晶,赵进勇.环境流理论进展述评[J].*水利学报*,2017,48(6):670-677.[DONG Z R,ZHANG J,ZHAO J Y.Comments upon progress of environmental flows assessments[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2017,48(6):670-677.]
- [14] ŠTEFUNKOVÁ Z,ŠKRINÁR A,BELČÁKOVÁ I,et al.Determination of the qualitative features of watercourses for restoration in the urban environment[J].*Procedia Engineering*,2016,161:23-29.
- [15] 张陵蕾,吴宇雷,张志广,等.基于鱼类栖息地生态水文特征的生态流量过程研究[J].*水电能源科学*,2015,33(3):10-13.[ZHANG L L,WU Y L,ZHANG Z G,et al.Determination of ecological flow regime based on eco-hydrological characteristics of fish habitat[J].*Water Resources and Power*,2015,33(3):10-13.]
- [16] 彭为,刘丙军,邱江潮,等.基于优先保护鱼类识别的澜沧江中下游生态流量[J].*中山大学学报(自然科学版)*,2020,59(3):43-50.[PENG W,LIU B J,QIU J C,et al.The ecological flow of the middle and lower reaches of the Lancang River based on priority protection fishes identification[J].*Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*,2020,59(3):43-50.]
- [17] 冯颖璇,李怀恩,成波,等.基于改进IFIM法的生态流量应用方法进展[J].*人民珠江*,2022,43(5):21-29.[FENG Y X,LI H E,CHENG B,et al.Development of ecological flow application method based on improved IFIM[J].*Pearl River*,2022,43(5):21-29.]
- [18] ARMAS-VARGAS F,ESCOLERO O,DEJALÓN D G,et al.Proposing environmental flows based on physical habitat simulation for five fish species in the lower Duero River basin,Mexico[J].*Hidrobiológica*,2017,27(2):185-200.
- [19] 魏卿,薛联青,张敏,等.淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J].*水资源保护*,2019,35(4):89-94.[WEI Q,XUE L Q,ZHANG M,et al.Changes of environmental flow in Huaihe River basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake[J].*Water Resources Protection*,2019,35(4):89-94.]
- [20] 陈娟,尤征懿,朱前维,等.无锡市城市防洪大包围生态水位探析[J].*江苏水利*,2023(2):5-8.[CHEN J,YOU Z Y,ZHU Q W,et al.Analysis on ecological water level of urban flood control systems around Wuxi city[J].*Jiangsu Water Resources*,2023(2):5-8.]
- [21] WEN X,FANG G,GUO Y,et al.Adapting the operation of cascaded reservoirs on Yuan River for

- p>fish habitat conservation[J].Ecological Modelling,2016,337:221-230.
- [22] MOUTON A M,SCHNEIDER M,DEPESTELE J,et al.Fish habitat modelling as a tool for river management[J].Ecological Engineering,2007,29:305-315.
- [23] HU S,FENG M,XU S,et al.Environmental flow assessment for benthic macroinvertebrate communities using pseudo-2D hydraulic habitat modelling at a green small hydropower plant[J].Ecohydrology,2024,17(4).
- [24] HOUGH I M,WARREN P H,SHUCKSMITH J D.Designing an environmental flow framework for impounded river systems through modelling of invertebrate habitat quality[J].Ecological Indicators,2019,106:105445.
- [25] CHATTOPADHYAY S,SZAŁKIEWICZ E,DYTKIEWICZ M,et al.Development of an integrated modelling framework to evaluate impacts of pressures on habitat conditions and riverine biota[J].Ecohydrology,2024,17(4).
- [26] ZINGRAFF-HAMED A,NOACK M,GREULICH S,et al.Model-based evaluation of the effects of river discharge modulations on physical fish habitat quality[J].Water,2018,10(4):374.
- [27] 李强,王俏俏,陈红丽,等.生态流量方法应用现状研究[J].生态学报,2024,44(1):36-46.[LI Q,WANG Q Q,CHEN H L,et al.Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China[J].Acta Ecologica Sinica,2024,44(1):36-46.]
- [28] DAMIANI M,NÚÑEZ M,ROUX P,et al.Addressing water needs of freshwater ecosystems in life cycle impact assessment of water consumption:state of the art and applicability of ecohydrological approaches to ecosystem quality characterization[J].The International Journal of Life Cycle Assessment,2018,23(10):2071-2088.
- [29] ROSENFELD J,BEECHER H,PTOLEMY R.Developing bioenergetic-based habitat suitability curves for Instream flow models[J].North American Journal of Fisheries Management,2016,36(5):1205-1219.
- [30] 张祖鹏,张泽贤,刘思远,等.基于一维水动力-水环境耦合模型的长兴港生态流量研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(10):160-169.[ZHANG Z P,ZHANG Z X,LIU S Y,et al.Study on ecological flow of Changxinggang River based on one-dimensional hydrodynamic-water environment coupling model[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(10):160-169.]
- [31] 程香菊,王龙威,林梓宜,等.北江丁坝群对鲫鱼栖息地适宜度的影响[J].人民长江,2024,55(11):10-17+80.[CHENG X J,WANG L W,LIN Z Y,et al.Effect of spur dikes in Beijiang River on habitat suitability index of Carassius auratus[J].Yangtze River,2024,55(11):10-17+80.]
- [32] THARME R E.A global perspective on environmental flow assessment:emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J].River Research and Applications,2003,19(5):397-441.
- [33] ALFREDSEN K,TESAKER E.Winter habitat assessment strategies and incorporation of winter habitat in the Norwegian habitat assessment tools[J].Hydrological Processes,2002,16(4):927-936.
- [34] JEKABSONE J,ABERSONS K,KOLCOVA T,et al.First steps in the ecological flow determining for Latvian rivers[J].Hydrology Research,2022,53(8):1063-1074.
- [35] GARCÍA DE JALÓN D,GORTÁZAR J.Evaluation of instream habitat enhancement options using fish habitat simulations:case-studies in the river Pas (Spain)[J].Aquatic Ecology,2007,41(3):461-474.
- [36] PARASIEWICZ P.The MesoHABSIM model revisited[J].River Research and Applications,2007,23(8):893-903.
- [37] SEDIGHKIA M,ABDOLI A.Optimizing environmental flow regime by integrating river and reservoir ecosystems[J].Water Resources Management,2022,36(6):2079-2094.
- [38] VANBROEKHOVEN E,ADRIAENSSENS V,DEBAETS B,et al.Fuzzy rule-based macroinvertebrate habitat suitability models for running waters[J].Ecological Modelling,2006,198(1):71-84.
- [39] SMITH L M,NESTLERODE J A,HARWELL L C,et al.The areal extent of brown shrimp habitat suitability in Mobile Bay,Alabama,USA:targeting vegetated habitat restoration[J].Environmental Monitoring and Assessment,2010,171(1):611-620.
- [40] PINNA B,LAINI A,NEGRO G,et al.Physical habitat modeling for river macroinvertebrate

- communities[J].Journal of Environmental Management,2024,358:120919-120919.
- [41] 班璇.物理栖息地模型在中华鲟自然繁殖生态流量决策中的应用[J].水生生态学杂志,2011,32(3):59-65.[BAN X.Applying physical habitat simulation model on the ecological flow decision of Acipenser sinensis natural breeding[J].Journal of Hydroecology,2011,32(3):59-65.]
- [42] 李永,卢红伟,李克锋,等.考虑齐口裂腹鱼产卵需求的山区河流生态基流过程确定[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):809-815.[LI Y,LU H W,LI K F,et al.Determination of ecological base flow process of mountainous rivers by taking into account the Prenant's Schizothoracin's spawning requirements[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(5):809-815.]
- [43] 张丽,陈婕汝,万东辉,等.小水电影响下的南方山区河流适宜生态流量[J].水电能源科学,2023,41(4):65-68+64.[ZHANG L,CHEN J R,WAN D H,et al.Suitable river ecological flow in southern mountainous areas under influence of small hydropower[J].Water Resources and Power,2023,41(4):65-68+64.]
- [44] NAN J,LIU Y,CHEN Y,et al.Evaluation of habitat quality and ecological flow in a regulated waterway[J].Water Supply,2023,23(2):546-563.
- [45] 仕玉治,钱秀红,江伟伟,等.融合鱼类生境及航运的河流多目标生态流量研究[J].水利水运工程学报,2024(6):75-85.[SHI Y Z,QIAN X H,JIANG W W,et al.Study on multi-objective ecological flow integrating fish habitat and navigation in rivers[J].Hydro-Science and Engineering,2024(6):75-85.]
- [46] LI X,ZHANG Q,DIAO Y,et al.Ecological flow considering hydrological season and habitat suitability for a variety of fish[J].Ecological Modelling,2024,489:110625.
- [47] 杨薇,董伟萍,丁杰伟,等.面向江豚生境需求的长江干流(铜陵段)生态流量过程研究[J].环境生态学,2024,6(1):71-80.[YANG W,DONG W P,DING J W,et al.Environmental flow process for the habitat demands of finless porpoise in the Tongling section of Yangtze River[J].Environmental Ecology,2024,6(1):71-80.]
- [48] 王领贺,王松毅,冉艳,等.生态流量泄放对小水电坝下河段底栖动物群落的影响[J].生态学报,2024,44(15):6457-6472.[WANG L H,WANG S Y,RAN Y,et al.Effect of ecological flow releases on benthic macroinvertebrate community in reaches downstream dams of small hydropower plants[J].Acta Ecologica Sinica,2024,44(15):6457-6472.]
- [49] 何术锋,王清,林育青,等.基于水禽栖息需求的湿地公园植物空间配置研究——以南京市绿水湾湿地公园为例[J].湿地科学,2024,22(6):902-910.[HE S F,WANG Q,LIN Y Q,et al.Study on plant spatial allocation in wetland park based on waterfowl habitat demand:a case study of Lvshuiwan Wetland Park in Nanjing City[J].Wetland Science,2024,22(6):902-910.]

Research Progress on the Application of Habitat Simulation Methods at Home and Abroad

ZHANG Mengyao¹,WU Qiong²,WANG Ruxing^{3,4},CHU Zhuding¹,LIU Xiaowei^{1,4,5}

(1.School of Biology,Food and Environment,Hefei University,Hefei 230601,China; 2.China Water Huaihe Planning,Design And Research Co.,LTD,Hefei 230601,China; 3.School of Tourism and Exhibition,Hefei University,Hefei 230601,China;4.Management and High-quality Development for Chaohu Lake Basin,Anhui Key Laboratory of Philosophy and Social Sciences,Hefei 230601,China; 5.Collaborative Innovation Center for Environmental Pollution Prevention and Ecological Restoration,Hefei 230601,China)

Abstract:[Objective] Ecological flow is a key indicator for assessing the health of river ecosystems,and its precise determination is crucial for watershed water resource management and ecological protection. The habitat simulation method,as an ecological flow calculation method based on the protection of biological habitats and the quantification of

flow habitat relationships,has received widespread attention.**[Methods]** This study adopts bibliometric analysis method to systematically review relevant research literature,expound the application status,technical means and core value of habitat simulation method in river ecological flow research,summarize the advantages and main challenges of this method,and look forward to its future development trend.**[Results]** Research has shown that the habitat simulation method can effectively integrate key factors such as the impact of external disturbances on the living environment of organisms and the natural hydrological characteristics of rivers when determining the ecological flow of rivers,thereby improving the accuracy of calculation results. However,this method still faces challenges such as model parameter uncertainty,limited data acquisition,and insufficient consideration of differences in adaptability to different ecosystems.**[Conclusion]** The habitat simulation method has both advantages and development potential in the study of river ecological flow. Future research should focus on model optimization,strengthening interdisciplinary integration,and combining with emerging technologies to achieve more accurate and targeted determination of ecological flow,providing more solid scientific support for sustainable utilization of water resources and protection of river ecosystems.

Key words:ecological flow; Habitat simulation; IFIM law; PHABSIM model; River resources