

DOI: 10.20103/j.stxb.202210303078

李强,王俏俏,陈红丽,秦艳丽,张明芳,刘世荣.生态流量方法应用现状研究.生态学报,2024,44(1):36-46.

Li Q, Wang Q Q, Chen H L, Qin Y L, Zhang M F, Liu S R. Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 36-46.

生态流量方法应用现状研究

李 强^{1,*}, 王俏俏¹, 陈红丽¹, 秦艳丽¹, 张明芳², 刘世荣³

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731

3 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

摘要:水资源是制约国家经济社会发展的重要因素。长期以来,水资源的过度开发利用直接影响了流域的生态保护和高质量发展。生态流量(Ecological Flow)是保障流域水生态环境可持续发展和管理的重要指标。然而当前研究方法众多,尚未进行系统性梳理。以生态流量为出发点,归纳总结国内生态流量评估的最新进展,系统地对比水文学法、水力学法、生境模拟法和整体分析法等四大类共 17 种方法进行对比总结,评述其优缺点及适用条件,并根据国内流域的生态流量评估现状,建议在我国流域水系庞杂且气候、水文地质、下垫面和水资源开发利用等条件差异较大的情况下,因地制宜地选择生态流量评估方法。未来的生态流量研究和流域水生态管理应综合考虑气候、水文条件变化和人类活动的影响,依据生态流量目标制定、水利水电工程调度、生态流量监测、流域制度法规建设等方面系统性完善生态流量管理,实现流域水资源的高质量发展。

关键词:生态流量;水资源;流域生态;流域管理;可持续发展

Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China

LI Qiang^{1,*}, WANG Qiaoqiao¹, CHEN Hongli¹, QIN Yanli¹, ZHANG Mingfang², LIU Shirong³

1 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

3 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Water resource is a limiting factor of economic and social development. The overexploitation and utilization of water resources have significantly affected ecological protection and high-quality development in a region. Ecological flow has been treated as an effective and critical index to ensure the sustainable development and management of the ecological environment in a basin. Thus far, numerous research frameworks and methods have been developed and applied across the globe. Yet, they have not been systematically reviewed and compared in China. This paper summarized the latest progress in domestic ecological flow assessment and systematically compared and summarized 17 ecological flow methods within four categories, including the hydrology method, hydraulic rating, habitat simulation modelling, and holistic frameworks. We reviewed their advantages and disadvantages, and their prerequisite for practical application. Based on the current situation of ecological flow assessment in domestic river basins in China, we suggested that the ecological flow assessment method should be selected based on local conditions when the water system was under complex climate, hydrogeology, underlying surface, and water utilization and allocation. Future ecological flow research and watershed water ecological management should comprehensively consider the influences of climate, hydrological conditions, and human activities to improve watershed management and research. To achieve sustainable and high-quality development of water resources, water conservancy, hydropower engineering scheduling, ecological flow monitoring, watershed system and regulations construction should be fully considered in setting the ecological flow of a watershed.

基金项目:青年科学家项目(2022YFF1302200);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-243)

收稿日期:2022-10-30; **网络出版日期:**2023-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Qiang.li@nwfau.edu.cn

Key Words: ecological flow; water resource; ecology of watershed; watershed management; sustainable development

随着社会经济的发展,人们对自然资源的开发和利用逐渐增强,流域生态问题愈发显著,水资源利用成为了限制流域可持续和高质量发展的关键因素^[1-4]。为了减缓流域生态问题,实现流域的高质量发展,国外的研究学者在 19 世纪提出了“生态流量”、“环境流量”、“生态需水”和“生态基流”等一系列概念,后于 20 世纪 70 年代引入我国,用以解决水资源矛盾,缓解用水压力,维持工农业用水和生态需水量之间的平衡^[2, 5]。生态流量是指为了维系河流、湖泊等水生态系统的结构和功能,需要保留在河湖内符合水质要求的流量(水量、水位)及其过程^[6]。如何在水资源刚性需求的巨大压力下,保证流域的生态用水,在改善用水需求和控制节水的同时满足社会经济需水,使流域更好地发挥生态作用是现今流域管理面临的难题。当前,国内外专家学者使用不同的研究方法确定河流生态流量,但系统性地归纳总结研究较少,导致在流域管理中,生态流量的适用性考虑不够,不利于河流生态流量确定和水资源的高效利用。本研究将系统地归纳总结各方法的优缺点,并针对其适用性对研究方法进行评述和现状分析,促进生态流量在国内流域管理领域的研究,对国家流域生态管理和水资源的健康可持续发展具有重要现实意义。

1 生态流量的评估方法

目前,国内外确定河流生态流量的方法共有 200 多种^[7],主要分为水文学方法、水力学方法、生物栖息地法以及整体分析法四类。由于不同河流水文过程和生态需水的复杂性,计算方法的适用性及优缺点各不相同(表 1),代表方法众多(表 2)。最初兴起的方法是水文学法,生态流量设定较为简单,依靠特定物种或水文指标计算,但并未全面考虑河流自然特征,因此水力学法用来弥补水文学法的不足,逐渐得到应用。而随着生态保护理念的发展,传统水文指标或河流自然特征已无法满足水生生物多样性的需求,研究者逐步探索生物栖息地法和整体分析法的应用。随着生态流量评估方法的不断发展,实际应用于流域时所需数据量不断增加,计算更加复杂,对特定物种的针对性和生态系统的整体性越来越强,评估结果的准确性也逐步提高,管理目标也更易实现。

表 1 生态流量评估方法
Table 1 The assessment methods of ecological flow

方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表方法 Representative methods	参考文献 References
水文学法 Hydrology method	1) 算法快速、简单,易于使用 2) 无需现场测定数据 3) 成本低 4) 可检查验证其他方法得出的生态流量,作为增强结论的安全措施或基准	1) 通过较为单一的要害确定生态流量评价标准,并未考虑生态栖息地、水质、水温、季节变化、水域景观及河床形状变化等因素,其标准仍需验证 2) 经常过度简化河流的实际情况,而且未能考虑生物参数及其相互作用 3) 在实践中,更适合于自然河流,具有局限性 4) 需要多年的水文记录 5) 缺乏生态有效性和水文生态关系	Tennant 法, 7Q10 法,流量历时曲线法(FDC 法),水文指标法(IHA 法),变化范围分析法(RVA 法), Texas 法,NGPRP 法,最小月平均流量法	[8—11]
水力学法 Hydraulic rating	1) 操作简单,只需简单的现场测量 2) 所需水文数据较少 3) 易应用于不存在历史流量记录的区域 4) 在水力指标和水生生物栖息地之间建立了简单的关系	1) 不能体现河流的季节性变化 2) 忽略了生态系统中物种各生命阶段的需求 3) 无法评估非自然/受管制河流的河道内生态需水 4) 方程中的常数和指数应根据每条河流或地区的经验得出 5) 适用于具有明确定义的单通道的河流,不适合辫状河流	湿周法, R2-cross 法	[10—13]

续表

方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表方法 Representative methods	参考文献 References
生境模拟法 Habitat simulation modelling	1) 较好地结合河道生态系统及生物种群完整性 2) 相较于水文学法和水力学法能更准确地确定生态流量	1) 需要大量的现场工作和专业知识来收集水力和生物数据,耗费人力和物力 2) 建立水文地貌数据模型和物种-栖息地关联模型,操作复杂,耗时长	河流流量增量法 (IFIM), PHABSIM 模型,统计栖息地模型,生物能模型	[9,11—13]
整体分析法 Holistic frameworks	1) 考虑了水流状况的所有方面,保留了与自然相似的水文状况 2) 探究了河流生态系统的所有相关组成部分,并考虑了相关的社会需求 3) 较好地结合河道生态系统及生物种群完整性	1) 很大程度上依赖于专业判断和专家意见,方法应用可能非常耗时且昂贵 2) 需要大量的/丰富的水文、生态、社会和经济等数据	模块构建法 (BBM), DRIFT 法,水文变化的生态限度法 (ELOHA)	[3,8,11—12]

FDC:流量历时曲线 Flow duration curve;IHA:水文变化指标 Indicators of hydrologic alteration;RVA:变化范围法 Range of variability approach;NGPRP:北部平原资源项目 Northern Great Plains Resource Program;IFIM:河流流量增量法 Instream Flow Incremental Methodology;PHABSIM:物理栖息地模拟系统 Physical Habitat Simulation System;BBM:模块构建法 Building Block Methodology;DRIFT:施加流量变化的下游响应 Downstream Response to Imposed Flow Transformations;ELOHA:水文变化的生态限度 Ecological Limits of Hydrologic Alteration

水文学方法又称快速评价法或标准设定法,是应用最为广泛的一种方法,代表方法众多(表2)。该方法根据自然河流的特征开发,不在特定物种的水平上运行,以河流历史水文数据为基础进行数据分析,根据水文指标确定河道生态流量,并提供旨在保护河流生物完整性的整体流量水平。其中 Tennant 法^[14]因为应用简单在国内外应用较广,但其推荐生态流量较为宽泛,因此需要结合河流的实际情况进行计算修订。例如,李计生等使用结合中位数法和众数法改进的 Tennant 法,在祁连山讨赖河流域将一般用水期和用水高峰期的生态流量划分为7个等级进行评价,确定了更科学合理的生态流量^[15]。但该法尚未考虑时间尺度的流量变化,而流量历时曲线(Flow Duration Curve, FDC)法可构建逐月月均流量和年均流量序列,并划分为丰、平、枯水年,能较好地体现流量年内及年际的空间移植性和时间变异性,避免了极端流量事件和年内分配不均的影响^[19]。以上两种方法应用广泛,但未考虑人类活动对水文要素及河流流量的干扰。因此,Richter 等提出了水文指标法(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)^[22]和变化范围分析法(Range of Variability Approach, RVA)^[25],用以量化人类活动干扰前后河流流量的变化。不同于以上方法,NGPRP(Northern Great Plains Resource Program)法更多地考虑了气候对流量的影响。苏恒等和宋增芳等分别在西江大湟江口河段和黑河干流采用多种水文方法计算生态流量,结果均表明应用 NGPRP 法计算最为准确,验证了在气候变化情况下 NGPRP 法对于我国南方季节性河流的适用性较好^[48—49]。

水力学法是基于河流的一些水力参数和几何参数来描述简单的幂函数,并将水力变量的变化描述为流量的函数,量化河道内生态流量的一类方法。湿周法以河道断面的湿周长为评价指标,在计算时多概化实际河道断面,王明净等在云南海口河流域研究发现矩形概化法得到的河道内生态流量结果偏差最低^[50];夏威等利用这一特性在广州三水区评估河流不同断面所需的生态流量,推进了城市河网生态流量保障工作^[51]。而 R2-cross 法则更多侧重于具体物种或生命阶段,例如李洋等在雅砻江锦屏大河湾流域应用 R2-cross 法研究了汛期能够保护铜鱼产卵场的生态流量^[52];此外,郭新春等根据西南地区山区小型河流梯级水电站实际情况,对 R2-cross 法的水力参数标准进行一定修正,提高了山区小型河流生态流量计算的准确性^[53]。

生境模拟法也称为栖息地法,从生物生态环境状况和生物适宜栖息地特征入手,利用数值模拟方法建立生物栖息地面积与流量的响应关系,计算河流生态流量。代表方法有河流流量增量法(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM)、PHABSIM(Physical Habitat Simulation System)模型、统计栖息地模型和生物能模型等。IFIM 应用多是为保障鱼类的生存繁殖,如周华彬等应用该方法构建四大家鱼在珠江流域西江中上游的产卵场适宜性曲线,保障四大家鱼自然繁殖的生态流量^[54];邵甜等则以齐口裂腹鱼为主要保护对象在大渡河流域应用 IFIM 建立生境适应性曲线,研究了流量变化与鱼类产卵场栖息地生境指标的响应关系^[55]。

PHABSIM 模型更侧重于物理栖息地模拟,其性能在岷江上游流域得到验证,吉小盼等应用 3 种不同方法探讨重口裂腹鱼产卵期生境需水量,对比表明 PHABSIM 模型的结果最优^[56];魏卿等运用 PHABSIM 模型模拟鳅鱼产卵期的栖息地流量,并分析流域环境变化对鱼类栖息地的影响,为淮河流域鱼类繁殖期的生态流量提供参考^[57]。

表 2 生态流量评估代表方法

Table 2 Representative methods of ecological flow assessment

方法 Methods	代表方法 Representative methods	方法介绍 Introduction of methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
水文学法 Hydrology method	Tennant 法 (Montana 法)	以多年的年流量均值为依据,用多年平均流量乘以保护水生态和水环境的河流流量推荐值来表示河流生态流量。一般建议将多年平均流量的 10% 作为大多数水生生物能够存活的最小瞬时流量;30% 作为可以维持良好的栖息地的流量;60%—100% 作为可以提供极好的栖息地的流量	1) 应用简单,容易计算 2) 考虑了部分水生生物生态需水 3) 可作为其他方法的结果验证 4) 建立了水生生物、河流景观、娱乐和河流流量之间的关系	1) 主要适用于北温带河流生态系统 2) 只适用于常年性河流,不适用于季节性断流的河流 3) 消除了生态上重要的流量极值 4) 只针对流量大小,缺乏对流量时间的关注,没有规定流量事件的持续时间或发生频率	[14—16]
	7Q10 法	最初采用 90% 保证率下(等于及大于某流量值在河流中出现的几率)最枯连续 7 天的平均流量作为生态流量,现在国内一般采用 7Q10 改进法,即近 10 年最枯月平均流量或 90% 保证率下最枯月平均流量作为生态流量	1) 可用于保护水质 2) 可用于计算河流污染物允许排放量 3) 可用于大型水利工程建设的环境影响评价	1) 只适用于具有长系列实测水文资料的河流 2) 在制定渔业环境流量标准时缺乏科学支持,可能导致渔业资源退化 3) 没有考虑河流生物和水量的季节性变化 4) 预测结果一般低于实际生态流量,只可维持低水平的栖息地,不能满足生态流量需求	[17—18]
	流量历时曲线法 (FDC 法)	定义特定河流或区域中某个流量阈值水平以及其等于或超过的特定时间比例,并根据多年的数据计算持续时间曲线,然后从描述支持生物完整性所需的流量水平的现场数据中提取流量阈值	能够对不同月份的来水量进行频率分析,以表示不同月份的来水量情况和生态流量需求情况	对全年或多年流量进行分析需要长序列的水文数据	[19—21]
	水文指标法 (IHA 法)	该法主要是以河流流量的均值、极值、发生时间、频率、历时和变动率等水文特征为基础,根据其统计特征划分为 5 组 32 个水文指标来量化流量情况	1) 可用以评价人类活动对水文状况的影响 2) 可用于长期趋势分析或比较统计分析,以量化人类活动前后流量的变化	1) 并未考虑年内不同月份的特征流量(如高流量,特枯流量)的不同,仅从整体来研究其特征 2) 要求 20 年以上连续观测数据	[22—24]
	变化范围分析法 (RVA 法)	该方法基于长系列的日水文数据,利用 33 个不同生态相关流量参数的自然变异范围作为设置基础,从中提取出与生态相关、更容易管理、具有代表性的、多参数的水文指标系列,来评价水文变化的程度及其对生态系统的影响,指导恢复或维持河流自然流量状况的工作	1) 能分析河流在人类活动干扰前后水文要素的变化 2) 提供了多种水文指标刻画与河流生态相关的流量特征,而且在时间上有了明确的划分 3) 适用于水文状况变化较大的河段 4) 相较于生境模拟法能更好地保护原生河流生物多样性和自然生态系统功能	1) 需要至少 20 年的水文数据 2) 流量参数较多,计算复杂 3) 若数据不足,则需延长观测,或利用水文模型模拟	[23,25—26]

续表

方法 Methods	代表方法 Representative methods	方法介绍 Introduction of methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
水力学法 Hydraulic rating	Texas 法	以 50%保证率下月径流量的特定百分比作为生态流量	1) 考虑了季节变化因素 2) 考虑了不同的生物特性和区域水文特征条件下的月需水量	应用时需进一步结合实际情况确定生态流量	[27—28]
	NGPRP 法	将原流量序列分为丰水年、平水年和枯水年三组,取平水年组 90%保证率下的流量作为生态流量	1) 考虑了不同水文年的情况 2) 将生态基流的计算与气候状况和径流状况相结合 3) 在我国南方流域,相较于其他方法更为适用	1) 未考虑水生生物的生态需水 2) 缺乏生物学依据	[17,29]
	最小月平均流量法	以河流每年最枯月平均流量的多年平均值作为河流的基本生态流量	能在河流可恢复范围内保证较低的生态流量水平	不能为水生生物提供较好的生态流量水平	[17,30]
	湿周法	以湿周长为指标来判断一个生境,将湿周与流量关系曲线的转折点所对应的流量作为维持浅滩的最小生态需水量,从而估算最小生态流量	能有效评估某些单个物种的流量需求	只适应于河床稳定的河流	[8,31—32]
	R2-cross 法	根据河流季节性变化及满足栖息地生态功能的水力学指标,如水深、河宽和流速等,计算河流用于维持浅滩栖息地的生态流量,并满足鱼类和水生无脊椎动物大多数生命阶段	1) 为夏季和冬季建立了不同的径流要求 2) 说明了季节性径流的可变性	1) 不适用于河宽 30m 以上的河流 2) 更适用于浅滩式的河流栖息地类型	[33]
生境模拟法 Habitat simulation modelling	河流流量增量法 (IFIM)	使用计算机程序,利用单次排放时的水力信息 (深度、速度、覆盖值,通常还有基底粗糙度或质量等) 特性,计算在一系列排放时通过选定河道的水面轮廓,并模拟水力栖息地,建立河流流量和栖息地值之间的关系来确定生态流量	较好地结合河道生态系统和生物种群	1) 不适用于河道不稳定的河流,如辫状河 2) 需精确推导栖息地适宜性曲线,以保证模型的准确性 3) 需要采集大量水文数据和生物数据,以保证模型的准确性 4) 不适用于群落生态系统水平	[34—36]
	PHABSIM 模型	以物理栖息地模拟为主要目标,量化评估相关环境因子 (流速、水深、泥沙等) 对栖息地的影响,建立适应度曲线,推荐合适的生态流量	1) 能有效评估某些物种的流量需求 2) 较好地结合河道生态系统和生物种群	1) 不适用于群落生态系统水平 2) 估计的种群或生物量和栖息地指数大多存在缺陷	[3,37—38]
	统计栖息地模型 (如 STATHAB, ESTIMHAB)	通过统计计算水力变量随流量变化的变化,并作为研究范围内的平均分布,将生物数据输入类似于传统的栖息地模型来计算生态流量 (数据可以在所研究的河流中收集,也可以从文献中获得)	1) 只需要很少的经验和现场工作 2) 非常易于使用	需要验证计算质量	[11,39—40]
	生物能模型	基于对净能量摄入的估计,计算不同河流位置 (即焦点) 的成本效益比,需要估计总能量摄入 (来自营养) 和维持觅食位置所花费的能量	可以更好地预测河流中的鱼类丰度	1) 模型使用既昂贵又耗时 2) 仅被证明适用于漂流进食鱼种	[41—42]

续表

方法 Methods	代表方法 Representative methods	方法介绍 Introduction of methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
整体分析法 Holistic frameworks	构建模块法(BBM)	将河流的流量组成划分为丰枯年的高低流量等不同流量组分,结合每一个组分不同的地形结构及其生态特性,研究流量、泥沙、河床形态与河岸群落的关系,综合估算满足河流生态的流量要求	使用有限的数量就环境流量标准提供建议	依赖于专业判断和专家意见,较耗时	[3,43]
	DRIFT 法	综合考虑流量参数对生物的物理环境和社会的影响,采用经济学模型进行情景分析来评估生态流量	1) 综合考虑了生物、社会和经济等各方面的影响 2) 可在较广的范围内进行应用 3) 可以评估不满足环境流量目标的影响	1) 依赖于不同专业的专家意见评估 2) 实施成本可能很大	[3,11,44]
	水文变化的生态限度法(ELOHA 法)	按照水文情势特征对河流进行分类和分析,运用统计学方法拟合水文-生态函数关系,经专家组评估,依据水文-生态曲线确定生态流量(通过建立水文情势变化与生态响应定量关系确定生态流量)	1) 可用于确定区域范围内流量变化的生态限制 2) 可用于确定大量“相似”河流	主要针对河流大规模取水以及水库径流调节改变了自然水文情势的河流	[45—47]

整体分析法是从生态系统整体出发,并利用专家的经验来弥补生态资料的缺失,调节河流流量使其能够同时满足栖息地稳定、物种连续、泥沙沉积、水质平衡及水域景观等功能。代表方法有模块构建法(Building Block Methodology, BBM)^[43]、DRIFT 法(Downstream Response to Imposed Flow Transformations)^[44]和水文变化的生态限度方法(Ecological Limits of Hydrologic Alteration, ELOHA)^[45]等。不同学者针对玉龙喀什河流域的水利工程应用 BBM 法计算鱼类产卵敏感期的需水,为水库运营提供了生态借鉴和数据支撑^[58—59]。在南非奥利凡茨河流域,DRIFT 法用于提供河流生态系统的不同流量情景,并阐明了不同流量情景产生的后果,供研究者在研究时间和经费限制、历史数据缺乏以及水资源开发的各要素权衡的情况下保证河流生态系统的稳定^[60]。基于流域变化与生物之间的关系,研究者在美国南加州圣地亚哥河流域应用 ELOHA 评估了未来土地利用变化对流域水生生物的影响,并利用流量—生态关系将流域区域划分为不同的流量管理类别,为子流域或流域规模的未来规划决策提供信息^[61]。DRIFT 法和 ELOHA 法在国内鲜少应用,主要由于这两种方法基于情景或理论框架,需要结合河流相关数据、专家经验等内容进行模拟,在国内流域水系纵横交错的情况下可操作性不高。

除以上四种方法,一些学者针对不同的水文情况提出了许多新的研究方法,并将水量调节、生态服务、水质等因素纳入生态流量的评估。1) 在水量调节方面,生态水力半径法(Adapted Ecological Hydraulic Radius Approach, AEHRA)适用于生态和水文数据有限的河流,在不需要任何流态的情况下能综合考虑河流参数和水生生态系统的信息,并且能反映月生态流量和月河道内生态水位的季节变化^[62]。而可变区间分析法(Variable Interval Analysis Method, VIAM)则综合考虑了时空尺度变化、水文条件变化、生态服务对象变化、计算方法变化等多种可变因素,能够快速适应实际应用中的流量需求变化,为管理者提供可视化的决策支持^[63]。在考虑生态系统与农业灌溉季节性用水冲突的情况下,学者们提出了一种基于贝叶斯网络的环境流量决策方法,根据决策者可接受的经济损失确定河流最佳生态流量^[64—65]。2) 在生态服务方面,Cheng 等则将系统经济服务功能和生态服务功能的总经济价值纳入河流生态基流决策框架,通过量化河流系统经济服务功能和生态服务功能的经济价值变化,在经济和生态服务功能达到最大时,确定该流量为河流生态流量^[66]。Yan 等建立了面向生态流量的水资源配置与模拟框架 E-WAS,模拟流域的生态补水过程,提供优化补水方

案^[67]。3)在水质方面,基于河流生态系统中水生生物群生存所需的水量和水质,Zhao等提出了一种实用的流量调节和污染控制方法,可以动态调控河流流量和控制污染物排放,有助于河流管理和生态系统修复^[68]。Pang等使用水质建模法(Water Quality Modelling Approach, WQMA)计算渭河流域的生态流量,综合考虑了满足水质需求的自净流量和现有水生生物栖息地的流量需求^[69]。以及吕宝阔使用水动力—水质耦合模型,综合分析水文要素和水环境两方面内容,模拟计算了辽河流域中下游平原区干流河道的生态流量^[70]。4)在整体分析方面,国内学者针对北方河流生态流量确定的难点构建了河流生态流量嵌套计算框架,在系统分析河流水文情势和生态保护目标的基础上,识别河段存在的水生态问题,综合考虑生态完整性、生物多样性、形态多样性和生态服务功能;国外为了满足高度发展变化区域的生态流量需求,研究者开发了加州环境流量框架,这是一种在高度修改的系统中确定生态流量需求的方法,可为多样化的物理景观和广泛的管理环境中制定生态流量建议提供指导^[71]。然而,上述方法均需耗费大量的人力或物力且各自适用条件不同。为了简化生态流量的计算方法,Gleeson和Richter提出保障地下水对月基流的90%可作为环境流量的新标准^[72],Graaf等以此在全球进行量化,发现生态流量是限制地下水开采量的主要因素^[73]。

2 中国流域的生态流量及其评估现状

近年来,我国水环境持续向好,但仍存在一些水生态问题。以目前研究较多的流域为例,黄河流域的流量总体呈下降趋势,上游流量主要受到气候变化的影响,中游为气候、植被恢复和农业灌溉等综合作用,下游流量除了人为用水还受到泥沙淤积等影响,生态失衡一直是黄河流域亟待解决的问题^[74-76]。全流域用水结构中农业用水总量远大于生态用水,流域水资源开发利用效率远超一般流域40%的生态警戒线,梯级水库的调控对生态流量变化的影响较大,使下游河流生态系统受到严重威胁^[75, 77-78]。长江流域地域广阔,不同水系水文特征差异明显,全流域各级河流水资源开发利用效率差异较大,上游地区存在工程性缺水问题,中下游地区围湖造田、水利工程建设等削弱了湖泊的蓄调能力,导致部分河流属性和自然水文过程发生改变,水生生境片段化严重,河湖连通性下降,且长江流域物种丰富,生态敏感区流量要求复杂多变,水生生物多样性保护困难,生态流量目标难以准确设定^[79-81]。珠江流域水资源丰富,但近年正处于长时序的枯水期,生态流量保障不足,早期的水电工程未考虑水生生物的生态需求,导致河流原生生境破碎化加剧,水文节律发生明显改变,流域内部分水域水污染问题突出,低流量下水质自净能力不足,导致水生生境萎缩,生物多样性下降^[82-84],流域内生态流量的目标制定尚不明确,地貌特征及水文地质条件则导致河道内生态流量的确定更加困难。辽河流域水资源短缺,但长期开发利用程度远超40%警戒线,水污染严重,且河道持续断流,干流水生态环境严重退化,生态流量保障不足^[45, 85-86]。松花江流域水系复杂,河湖众多,随着流域水资源开发强度逐步提高,区域水资源供需矛盾加剧,大量水利工程使得流域水生生境连通性下降,导致鱼类生境萎缩,水生生物多样性显著下降,生态退化明显,生态流量难以确定^[87-89]。淮河流域水资源短缺但开发利用程度高,经济社会发展占用河流生态用水,在缺水季节或年份严重时会引起河道断流。加之尚未建立流域层面生态流量统一调度的制度,生态流量调度难度大,且尚未构建完整的生态流量监测、预警和考核体系,需进一步加强生态用水保障,提高生态流量保证程度^[90-92]。海河流域河湖修复保护工作有序推进,但流域仍存在河道断流,水体污染,湿地萎缩,生物多样性减少等情况,敏感生态需求达标率低于40%,生态流量满足度较差^[93-95]。

当前国内生态流量研究随着方法复杂程度的增加应用越来越少(图1)。在四大类方法中,水文学法在国内的应用次数远超其他三种方法,为了保证使用此类方法评估生态流量的准确性,研究者在具体应用时会同时使用多种水文学法进行生态流量评估,再对结果进行对比分析,推荐适宜的生态流量;另一部分则是在原有水文方法的基础上进行改进和优化,使其更符合实际的河流情况。流域的生态流量评估多针对流域内部分河流或河段,全流域评估较少。水生态系统的生态流量需求还停留在某单一物种或某一类物种的评估,评估结果只能作为水生态系统保护的宏观参考。现有的生态流量研究与流域水生态保护管理的目标仍存在一定差距,根据国内生态流量的评估现状,有如下建议:1)在未有统一河湖保障管理措施和受人类活动影响较小的

自然流域采用水文学法或水力学法评估生态流量。这类流域多为小型河流,流域面积小,河流流量主要受气候影响,因此应用以河流历史水文数据为基础的水文学法或以河流自然特征为基础的水力学法就可以满足其生态流量需求。2)对于受人类影响较大的流域,则需综合考虑人类活动对流域的影响。在修建梯级水库和水利水电工程的流域,河流流量受水库调节,多会出现生境片段化问题,可根据具体需求选择生态流量评估方法。以保护濒危物种为目标的流域,可选择生境模拟法,通过建立水生生物和流量之间的响应关系保障生态流量;要实现全流域生态调度,保障水生生态系统稳定,可以选择整体分析法综合考虑生态用水、工农用水和气候条件等因素。3)在已经制定河湖管理措施或生态流量保障机制的流域,专家意见可为流域生态流量评估提供参考,这类流域通常情况复杂,水生态问题亟待解决,建立模型能更好地拟合流域的实际情况,为流域生态环境保护和生态流量评估提供决策。

根据国内现有河湖保障措施及流域生态流量管理

提出以下建议:①根据流域的来水量和用水需求,合理制定生态流量目标。构建流域生态功能保护体系,推进以合理水量保护和修复流域生态空间功能,强化流域水量管理。②落实流域内水利水电工程,合理调度保障生态流量。推进生态优先的流域水量分配方案执行和优化调整,适应新形势水资源变化及流域资源保护要求。③增强流域内生态流量监测管理,强化流域水资源统一调度。落实资源与生态保护硬约束要求,对流域水资源进行动态调整和管理监督,坚决遏制流域超指标、超计划用水和生态破坏事件。④推动流域制度法规建设,为水量调度提供制度保障。制定流域生态保护法规政策,推动流域生态补偿制度,强化流域内水量调度工作的系统性、整体性协同^[6, 77, 81, 96]。

3 结论与展望

目前,四种生态流量研究方法中最简单的水文学法广泛应用于全国大部分流域,而复杂的生境模拟法和整体分析法在国内应用较少。随着生态流量研究的深入,学者们的关注点逐渐从河流生态流量确定发展为流域内生物生存需求,再耦合生态流量和社会用水需求,最终实现生态流量调度目标。

传统的生态流量研究大多围绕河流的历史水文数据、河流自然参数和生态调查进行,以水文序列的稳态性作为研究基础。但目前全球环境变化加剧,极端天气频发,水文序列非稳态性突显,气候及水文条件的变化会对河流水生态系统带来极大影响^[97-98]。传统通过单一水文序列的河流生态流量研究可能因为气候环境变化而在实际应用中出现较大误差,已不适用于当前国内的水环境现状。河流原有的生态流量需求,应在环境变化的基础上重新认识和评估。未来的生态流量研究应更多地纳入环境、气候等变化因素,建立适应性更强的研究方法。

虽然在过去的几十年,国内生态流量研究出现大量研究成果,但绝大多数围绕单一河流或大流域部分河段展开,鲜少在大型流域的全流域进行应用。部分研究方法虽无适应性要求,但使用时极其复杂,且不同流域的气候状况、水文条件和生态需求不同,因此生态流量研究存在较大差别,河流生态流量无法用统一的标准衡量^[99-100]。近年水文、气象等相关基础学科的发展将生态流量研究推广至全流域甚至更大尺度,生态水文有极强的空间异质性,生态流量研究更多地需要考虑生态和水文之间的内在机理^[3]。

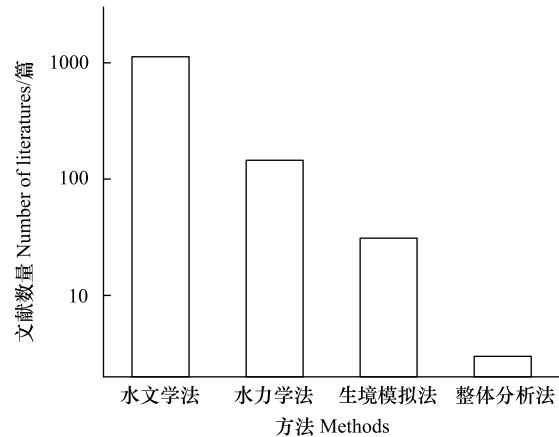


图1 国内各生态流量研究方法文献数量

Fig.1 The number of domestic ecological flow research methods literature

数据来源于中国知网中文总库。采用高级检索功能,主题为“生态流量”、“环境流量”和“生态需水”等,篇关摘为各种方法,再将检索出的文献数量进行整合

在全球性环境变化和日益增长的人类社会需求背景之下,人类活动和频发的极端气候事件对河流生态影响显著。基于外在因素的快速变化,现在的生态流量研究应更多地偏向于适应性更强、应用范围更广、生态系统整体性更高的多因素-生态耦合框架,逐渐从理论研究进入实践管理阶段,通过有效评价河流的生态健康,将其应用于生态管理调度,实现流域水资源的可持续和高质量发展。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z X, Chen Y D. Changes of atmospheric water vapor budget in the Pearl River Basin and possible implications for hydrological cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 102(1): 185-195.
- [2] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战. *水力发电学报*, 2016, 35(4): 1-11.
- [3] 刘悦忆, 朱金峰, 赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿. *水力发电学报*, 2016, 35(12): 23-34.
- [4] Wang Y Z, Liu L, Guo S S, Yue Q, Guo P. A bi-level multi-objective linear fractional programming for water consumption structure optimization based on water shortage risk. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117829.
- [5] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻. *水科学进展*, 2002, 13(4): 507-514.
- [6] 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. *中华人民共和国水利部公报*, 2020(2): 1-3.
- [7] Tharme R. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 2003, 19(5-6): 397-441.
- [8] 王珩, 肖昌虎, 黄站峰. 河流生态流量研究进展. *江西水利科技*, 2018, 44(3): 230-234.
- [9] 王珩. 基于河流鱼类适宜生境控制的梯级水库优化调度方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [10] 郑爱勤. 渭河关中段地下水对河流生态基流的保障研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [11] Linnansaari T, Monk W A, Baird D J, Curry R A. Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada and internationally. DFO Canadian Science Advisory Secretariat, Research Document, 2012, 39: 74.
- [12] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 徐春晓. 河道内生态需水估算方法及其评述. *水科学进展*, 2006, 17(3): 430-434.
- [13] Damiani M, Núñez M, Roux P, Loiseau E, Rosenbaum R K. 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. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(10): 2071-2088.
- [14] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.
- [15] 李计生, 于海超, 张扬, 马金珠. 基于 Tennant 改进法的讨赖河生态流量分析与评价. *节水灌溉*, 2020(8): 72-75, 81.
- [16] 郭利丹, 夏自强, 林虹, 王勇. 生态径流评价中的 Tennant 法应用. *生态学报*, 2009, 29(4): 1787-1792.
- [17] 张强, 崔瑛, 陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1828-1837.
- [18] Singh K P, Stall J B. Hydrology of 7-day 10-yr low flows. *Journal of the Hydraulics Division*, 1974, 100(12): 1753-1771.
- [19] 李昌文, 康玲, 张松, 周丽伟. 一种计算多属性生态流量的改进 FDC 法. *长江科学院院报*, 2015, 32(11): 1-6, 13.
- [20] Smakhtin V, Anputhas M. An assessment of environmental flow requirements of Indian River Basins. *International Water Management Institute*, 2006.
- [21] 吴国峰. 基于改进 FDC 法的河流生态流量研究. *吉林水利*, 2018(3): 16-18.
- [22] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, Braun D P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [23] 常俊超. 基于 IHA/RVA 法的黄河中游环境流量组分与水文情势变化研究. *水电能源科学*, 2022, 40(2): 17-21.
- [24] 张楠, 夏自强, 江红, 陆志华, 黄峰. 生物对河流流量的适宜性. *生态学报*, 2010, 30(20): 5695-5701.
- [25] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, Braun D. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249.
- [26] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 郑超磊, 张守红, 邱建秀. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算. *生态环境学报*, 2010, 19(5): 1151-1155.
- [27] Mathews R C Jr, Bao Y. The Texas method of preliminary instream flow assessment. *Rivers*, 1991, 2: 295-310.
- [28] Opdyke D R, Oborny E L, Vaugh S K, Mayes K B. Texas environmental flow standards and the hydrology-based environmental flow regime methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(3/4): 820-830.
- [29] Dunbar M J, Gustard A, Acreman M C, Elliott C R N. Overseas approaches to setting river flow objectives. R and D Technical Report W6-161. Environmental Agency and NERC, 1998.
- [30] 尹正杰, 杨春花, 许继军. 考虑不同生态流量约束的梯级水库生态调度初步研究. *水力发电学报*, 2013, 32(3): 66-70, 81.
- [31] Leathe S A, Nelson F A, Montana. A Literature evaluation of Montana's wetted perimeter inflection point method for deriving instream flow recommendations. Montana Department of Fish, Wildlife and Parks, 1986.
- [32] 张叶, 魏俊, 黄森军, 王琦, 付意成, 张晶, 赵进勇. 基于湿周法的济南山区中小河流生态流量研究. *人民黄河*, 2022, 44(1): 89-93.
- [33] Mosley M P. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a Braided River, Ohau River, New Zealand. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 800-812.

- [34] 英晓明, 李凌. 河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用. 生态学报, 2006, 26(5): 1567-1573.
- [35] Bovee K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Western Energy and Land Use Team, Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior, 1982.
- [36] 冯颖璇, 李怀恩, 成波, 贾斌凯, 周翔. 基于改进 IFIM 法的生态流量应用方法进展. 人民珠江, 2022, 43(5): 21-29.
- [37] Waddle, T.J. PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises. U.S. Geological Survey Open-File Report. Fort Collins Science Centre, 2012.
- [38] Rosenfeld J, Ptolemy R. Modelling available habitat versus available energy flux: do PHABSIM applications that neglect prey abundance underestimate optimal flows for juvenile salmonids? Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2012, 69: 1920-1934.
- [39] Lamouroux N, Hervé C. Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. Freshwater Biology, 2002, 47(8): 1543-1556.
- [40] Souchon Y, Lamouroux N, Capra H, Chandresris A. La méthodologie Estimhab dans le paysage des méthodes de microhabitat. Note Technique, Cemagref Lyon Unité Bely Laboratoire d'hydroécologie quantitative, 2003.
- [41] Urabe H, Nakajima M, Torao M, Aoyama T. Evaluation of habitat quality for stream salmonids based on a bioenergetics model. Transactions of the American Fisheries Society, 2010, 139(6): 1665-1676.
- [42] Urabe H, Nakajima M, Torao M, Aoyama T. Application of a bioenergetics model to estimate the influence of habitat degradation by check dams and potential recovery of Masu salmon populations. Environmental Biology of Fishes, 2014, 97(5): 587-598.
- [43] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1998, 1(2): 109-124.
- [44] Brown C A, Joubert A R, Beuster J, Greyling A, King J M. DRIFT: DSS software development for Integrated Flow Assessments. Pretoria: South African Water Research Commission Report, 2013.
- [45] Poff N, Richter B, Arthington A, Bunn S, Naiman R, Kendy E, Acreman M, Apse C, Bledsoe B, Freeman M, Henriksen J, Jacobson R, Kennen J, Merritt D, O'Keeffe J, Olden J, Rogers K, Tharme R, Warner A. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. Freshwater Biology, 2010, 55: 147-170.
- [46] 董哲仁, 赵进勇, 张晶. 环境流计算新方法: 水文变化的生态限度法. 水利水电技术, 2017, 48(1): 11-17.
- [47] Arthington A H, Bunn S E, Poff N L, Naiman R J. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America, 2006, 16(4): 1311-1318.
- [48] 苏恒, 徐宗学, 李鹏, 叶陈雷, 王京晶. 基于多种水文学法的生态基流计算——以西江大湟江口河段为例. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2022, 58(2): 269-276.
- [49] 宋增芳, 程玉菲, 李莉, 王文娟. 黑河干流引水式水电站生态流量计算. 人民黄河, 2021, 43(3): 112-115.
- [50] 王明净, 袁鹏, 张帆, 李金城, 高伟. 横断面概化对河道内生态需水计算的不确定性评估——以云南昆明海口河为例. 水生态学杂志, 2021, 42(1): 10-16.
- [51] 夏威, 郑炎辉, 庞家锋. 基于推进城市网河生态流量保障工作的探讨——以三水区左岸涌生态流量保障项目为例. 广东水利水电, 2022(1): 12-18.
- [52] 李洋, 吴佳鹏, 刘来胜, 吴雷祥, 霍炜洁. 基于鱼类产卵场保护的汛期生态流量阈值研究初探——以锦屏大河湾为例. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 306-312.
- [53] 郭新春, 罗麟, 姜跃良, 王庆国. 计算山区小型河流最小生态需水的水力学法. 水力发电学报, 2009, 28(4): 159-165.
- [54] 周华彬, 余春雪, 苏美蓉. 考虑鱼类产卵场健康的生态需水核算——以西江东塔产卵场为例. 人民珠江, 2020, 41(5): 61-72.
- [55] 邵甜, 王玉蓉, 徐爽. 流量变化与齐口裂腹鱼产卵场栖息地生境指标的响应关系. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 85-91.
- [56] 吉小盼, 杨玖贤, 蒋红. 珍稀保护鱼类产卵期生境需水量计算方法探讨. 水力发电, 2013, 39(4): 17-19.
- [57] 魏卿, 薛联青, 张敏, 杨帆, 任磊. 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. 水资源保护, 2019, 35(4): 89-94.
- [58] 曹文洁. 玉龙喀什水利枢纽工程中生态流量的研究与应用. 水利规划与设计, 2020(3): 63-66.
- [59] 艾力亚斯·尤努斯. 玉龙喀什水库建设下泄生态流量分析. 陕西水利, 2022(5): 55-57.
- [60] Brown C, Pemberton C, Birkhead A, Bok A, Boucher C, Dollar E, Harding W, Kamish W, King J, Paxton B, Ractliffe S. In support of water-resource planning-highlighting key management issues using DRIFT: a case study. Water SA, 2006, 32(2): 181-191.
- [61] Stein E D, Sengupta A, Mazon R D, McCune K, Bledsoe B P, Adams S. Application of regional flow-ecology relationships to inform watershed management decisions: application of the ELOHA framework in the San Diego River watershed, California, USA. Ecohydrology, 2017, 10(7): e1869.
- [62] Liu C M, Men B H. An ecological hydraulic radius approach to estimate the instream ecological water requirement. Progress in Natural Science, 2007, 17(3): 320-327.
- [63] Wei N, Xie J C, Lu K M, He S N, Gao Y T, Yang F. Dynamic simulation of ecological flow based on the variable interval analysis method. Sustainability, 2022, 14(13): 7988.
- [64] Pang A P, Sun T. Bayesian networks for environmental flow decision-making and an application in the Yellow River Estuary, China. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(5): 1641-1651.
- [65] Cheng B, Li H E. A Bayesian network approach for determining optimal ecological base flow of rivers in water shortage areas of Northwest China. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(28): 37768-37780.

- [66] Cheng B, Li H E, Yue S Y, Huang K. A conceptual decision-making for the ecological base flow of rivers considering the economic value of ecosystem services of rivers in water shortage area of Northwest China. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124126.
- [67] Yan Z Q, Zhou Z H, Sang X F, Wang H. Water replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 1152-1165.
- [68] Zhao C S, Yang S T, Liu J G, Liu C M, Hao F H, Wang Z G, Zhang H T, Song J X, Mitrovic S M, Lim R P. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows: a practical method for streamflow regulation and pollution control. *Water Research*, 2018, 141: 96-108.
- [69] Pang B, Xu Z X, Wu W. Estimation of the ecological base flow of Wei River in Shaanxi Province. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1559-1568.
- [70] 吕宝阔. 辽河流域中下游平原区干流河道生态流量研究. *人民黄河*, 2021, 43(S2): 96-97.
- [71] Taniguchi-Quan K, Irving K, Stein E, Poresky A, Wildman R A Jr, Aprahamian A, Rivers C, Sharp G, Yarnell S, Feldman J. Developing ecological flow needs in a highly altered region: application of California environmental flows framework in southern California, USA. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 787631.
- [72] Gleeson T, Richter B. How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Research and Applications*, 2018, 34(1): 83-92.
- [73] de Graaf I E M, Gleeson T, (Rens) van Beek L P H, Sutanudjaja E H, Bierkens M F P. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 2019, 574(7776): 90-94.
- [74] 吴昌贤, 薄岩, 黄微尘, 周丰. 黄河干流生态流量赤字及其成因. *南水北调与水利科技: 中英文*, 2020, 18(4): 8-16.
- [75] Zhang H B, Singh V P, Zhang Q, Gu L, Sun W B. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 938.
- [76] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 江涛. 水文变异下的黄河流域生态流量. *生态学报*, 2011, 31(17): 4826-4834.
- [77] 何艳梅. 黄河法中生态保护制度的构建. *中国环境管理*, 2021, 13(2): 110-118, 9.
- [78] Zhuo L, Hoekstra A Y, Wu P T, Zhao X N. Monthly blue water footprint caps in a river basin to achieve sustainable water consumption: the role of reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 891-899.
- [79] 徐力刚, 谢永宏, 王晓龙. 长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望. *中国科学基金*, 2022, 36(3): 406-411.
- [80] 邓志民, 李斐, 邓瑞, 刘金珍, 张登成. 长江流域生态流量满足程度及其保障措施研究. *人民长江*, 2021, 52(7): 71-75.
- [81] 刘兆孝, 王孟, 李斐, 邓志民, 邓瑞. 推进长江生态流量保障工作的思考与建议. *中国水利*, 2022(9): 42-44, 51.
- [82] 苏训. 珠江生态流量保障实践与思考. *中国水利*, 2020(15): 53-55, 43.
- [83] 赵晓晨, 葛晓霞, 周雪欣. 珠江流域水环境水生态安全保障对策. *广东水利水电*, 2022(3): 68-72.
- [84] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 王月, 刘剑宇. 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(19): 6079-6090.
- [85] 杨斌斌, 于金源, 郭瑞鹏. 辽河流域生态修复问题与对策. *中国水利*, 2021(10): 7-8, 10.
- [86] 徐蕾, 丁元芳. 吉林省东辽河流域生态流量探析. *东北水利水电*, 2020, 38(10): 36-38.
- [87] 吴昌贤, 薄岩, 杜悦悦, 周丰. 松辽流域生态流量赤字及其成因. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 151-159.
- [88] 游进军, 薛志春, 林鹏飞, 魏娜, 牛存稳. 二层结构的流域生态调度研究 II: 松花江流域生态调度实践与应用. *水利学报*, 2022, 53(1): 11-19.
- [89] 吕军, 汪雪格, 刘伟, 王彦梅, 魏春风, 吴计生. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境. *水资源保护*, 2017, 33(6): 155-160, 174.
- [90] 夏冬, 梁丹丹. 淮河流域重要河流生态流量(水量)保障性分析. *治淮*, 2018(12): 31-33.
- [91] 付小峰, 庞兴红, 韦翠珍. 淮河流域重要河湖生态流量保障现状与对策研究. *中国水利*, 2022(7): 67-70.
- [92] 顾洪. 淮河流域河湖生态流量确定与保障重点难点分析. *中国水利*, 2020(15): 47-49.
- [93] 孙鹏程, 龚家国, 任政, 胡鹏. 海河流域河湖修复保护进展与展望. *水利水电技术: 中英文*, 2022, 53(1): 135-152.
- [94] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复. *水资源保护*, 2021, 37(2): 1-9.
- [95] 水利部水资源管理司. 2021 年度《中国水资源公报》发布. *水资源开发与管理*, 2022, 8(7): 85.
- [96] 连煜. 坚持黄河高质量生态保护, 推进流域高质量绿色发展. *环境保护*, 2020, 48(Z1): 22-27.
- [97] McCluney K, Poff N, Palmer M, Thorp J, Poole G, Williams B S, Williams M, Baron J. Riverine macrosystems ecology: sensitivity, resistance, and resilience of whole river basins with human alterations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12: 48-58.
- [98] 刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量. *生态学报*, 2015, 35(16): 5477-5485.
- [99] Acreman M C, Ferguson A J D. Environmental flows and the European water framework directive. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 32-48.
- [100] 张小艳, 于建栋, 张芮, 王亮国, 李洁. 基于多种水文学方法的白龙江上游生态流量研究. *水利规划与设计*, 2022(6): 45-49.