

河流生态需水量计算方法与生态流量调控研究

张笑楠

辽宁昌鑫环境工程咨询有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要: 随着全球水资源开发强度的持续加剧, 河流生态系统正面临着前所未有的压力。过度取水、水利工程调度不当等因素导致河流断流、水质恶化、生物多样性锐减等一系列生态问题。科学确定并保障河流生态需水量(或称生态流量)已成为维系河流健康、实现水资源可持续利用的核心议题。本文系统梳理了河流生态需水量的概念内涵与理论基础, 深入剖析了当前主流的四类计算方法——水文学法、水力学法、生境模拟法及整体法(Holistic Methods)的原理、优缺点及适用条件。在此基础上, 探讨了从单一目标向多目标协同、从静态评估向动态适应性管理转变的生态流量调控策略。研究表明, 构建融合多学科知识、整合多源数据、耦合自然-社会复合系统过程的综合性、动态化、智能化的生态流量评估与调控体系, 是未来该领域研究与实践的关键路径。

关键词: 河流生态需水量; 生态流量; 计算方法; 调控策略; 生态系统健康; 水资源管理

引言

河流是地球重要生命线, 为人类提供多种服务, 还是生物多样性的天然载体。但过去一个世纪, 大规模水利工程和无节制开发改变河流自然水文情势, 导致“生态缺水”, 引发河道萎缩、生物栖息地破坏等一系列灾难性后果, 使河流生态系统崩溃。因此, 科学界定并保障“河流生态需水量”成为全球水资源管理前沿热点。中国人口多、发展快, 对水资源需求大, 北方长期缺水, 南方局部季节性缺水, 多流域生态功能退化。虽相关法律法规提出维持江河合理流量等要求, 但将其转化为可操作标准和管理措施仍是挑战。本研究系统回顾河流生态需水量研究进展, 聚焦计算方法与调控策略, 为国内外河流生态保护修复提供理论与技术支撑。

1 河流生态需水量的概念与内涵

1.1 核心定义

广义上, 河流生态需水量是指在特定时空尺度下, 为维持河流生态系统结构完整性和功能正常发挥(包括生物多样性保护、物质能量循环、自净能力等)所必需的水量及其时空分配过程。它不仅仅关注“有多少水”, 更强调“何时有水”、“水流如何变化”。世界自然保护联盟(IUCN)将其定义为“为维持淡水和河口生态系统及其依赖的人类生计和福祉所需的各种水文特征的水量、水质和时间”。

1.2 关键内涵

河流生态需水的本质体现为一种动态的过程性需求, 而非一个静态的总量指标。这意味着, 生态需水不是一个年均径流量的简单百分比, 而是一个完整的、具有自然变异性的时间序列过程。例如, 春季的涨水脉冲

对于触发鱼类产卵至关重要, 而秋季的低流量期则有助于控制某些水生植物的过度生长。同时, 这种需求具有明确的功能指向性, 旨在保障一系列关键的生态功能, 如维持栖息地连通性、支持食物网基础(如藻类、浮游生物)、促进营养物质循环、稀释和输送污染物、塑造河道形态等^[1]。此外, 生态系统对水文变化的响应通常是非线性的, 存在一个临界阈值, 超过此阈值, 生态系统的状态可能发生不可逆的突变, 因此生态需水的目标就是确保水文情势不越过这些生态阈值。最后, 生态需水的评估具有显著的尺度依赖性, 需要考虑不同的空间尺度(从河段到流域)和时间尺度(从小时、日到年际、年代际), 不同尺度上的需求可能不同, 需要进行综合协调。

2 河流生态需水量的主要计算方法

自20世纪70年代以来, 国际上发展了多种用于评估生态流量的方法。根据其复杂程度、数据需求和理论基础, 可大致分为以下四类。

2.1 水文学法

这是最简单、应用最广泛的一类方法, 其核心思想是将历史自然径流序列的某个统计指标直接作为生态流量的推荐值。这类方法中最著名的当属Tennant法(又称Montana法), 它提出了一套经验性标准, 认为年均流量的10%可维持“最小生存”状态, 30%可提供“良好”栖息地条件, 60%则能维持“优秀”状态。其优点在于简单易行, 对数据要求极低, 便于在初步规划阶段快速应用。然而, 这种方法的缺陷也十分明显, 它过于粗放, 完全忽略了水文过程固有的季节性和年际变异性, 也未能考虑具体河流的独特生态特性, 本质上是一种“一刀

切”的经验法则。其他常见的水文学法还包括7Q10法，即连续7天的年最小流量的10年一遇值，常用于保障水质稀释容量，但对维持生物栖息地的全面需求考虑不足；以及流量历时曲线（FDC）法，通过分析流量历时曲线，选取某个高保证率（如95%、90%）对应的流量作为基流保障目标。总体而言，水文学法适用于数据匮乏地区的初步评估或作为其他复杂方法的起点，但由于其缺乏生态机理支撑，难以满足精细化管理的需求。

2.2 水力学法

这类方法试图建立河道物理形态（如宽度、深度、面积、湿周长）与流量之间的关系，并假设某些物理参数的变化可以间接反映栖息地质量的变化。其中，R2-Cross法通过回归分析建立流量与水面宽度、平均水深、流速等参数的关系，管理者可以根据期望维持的河道物理状态反推所需流量。另一种广泛应用的是湿周法，该方法认为湿周长（水流与河床接触的周长）与水生生物，特别是底栖生物的栖息地可用面积密切相关。通过绘制湿周长-流量关系曲线，寻找曲线上斜率发生显著变化的“拐点”，该点对应的流量被认为是维持有效栖息地的最小生态流量。水力学法相较于水文学法更具物理意义，能够反映局部河段因流量变化引起的形态响应^[2]。但它仍然是一种间接的代理方法，未能建立起物理参数与具体生物响应之间的直接因果联系，且其有效性高度依赖于河道处于相对稳定状态的假设，在冲淤变化剧烈的河段应用效果有限。

2.3 生境模拟法

这是目前理论上最严谨、应用最深入的一类方法。它直接将水文情势、水力学条件与目标物种（通常是关键种或指示种）的生境适宜性联系起来。其代表性范式是IFIM/PHABSIM模型（Instream Flow Incremental Methodology / Physical Habitat Simulation Model）。该方法的核心流程首先选择关键目标物种及其特定生命阶段（如产卵、索饵、越冬），然后通过野外调查和文献研究，建立该物种在不同水深、流速、底质等环境因子下的生境适宜度曲线。接着，利用水力学模型（如HEC-RAS）模拟不同流量情景下河道的水力学参数分布。随后，将水力学模拟结果与生境适宜度曲线进行叠加计算，得出加权可用面积（Weighted Usable Area, WUA）。最后，通过绘制WUA-流量关系曲线，据此确定能最大化或满足特定阈值生境面积的生态流量。生境模拟法能够提供高度定制化的、基于物种保护的生态流量建议，科学性强，说服力高。然而，其高昂的成本和复杂性构成了主要障碍，它需要大量的水文、地形和生物调查数

据，建模过程繁琐耗时。此外，其结果高度依赖于所选目标物种，可能忽略群落或生态系统层面的整体需求，且对非流量因素（如水质、水温）的考虑也相对有限。

2.4 整体法

面对前述方法的局限性，近二十年来，整体法应运而生。这类方法强调采用系统思维，综合考虑水文、地貌、水质、生物、社会经济等多维度信息，通过专家判断、利益相关方协商和定性-定量相结合的方式，制定全面的生态流量方案。起源于南非的DRIFT法（Downstream Response to Imposed Flow Transformation）是一个高度参与式的决策支持框架，它组织跨学科团队共同构建一个概念性的“响应链”模型，预测不同流量情景下对物理、化学、生物和社会经济各子系统的影响，最终通过多方协商达成共识。由美国环保署（EPA）主导开发的ELOHA框架（Ecological Limits of Hydrologic Alteration）则首先对流域内的河流进行水文分类，然后为每一类河流建立“水文改变-生态响应”的关系模型，管理者可以根据期望的生态状态反推出允许的最大水文改变程度，从而确定相应的流量管理目标。同样源自南非的BBM法（Building Block Methodology）将生态流量分解为多个“构建模块”，如基本生态流量、高流量脉冲、洪水事件、低流量期等，分别评估每个模块的需求后再进行整合。整体法最大的优势在于其包容性和综合性，能够处理复杂的权衡关系，将社会价值纳入考量，产出的结果更具可接受性和可实施性。但其过程往往主观性较强，对专家水平和协调能力要求高，且难以进行严格的量化验证。

3 河流生态流量的调控策略

计算出生态需水量只是第一步，如何通过有效的工程和非工程措施将其落实到实际的水资源调度管理中，才是实现生态保护目标的关键。

3.1 调控理念的演进

早期的生态流量调控多采用“预留”模式，即在水库调度或取水许可中，简单地划出一部分水量作为生态基流，常年不变。这种静态、单一目标的模式无法满足河流生态系统的动态需求。现代调控理念正经历深刻的变革，其核心是从保障“基流”转向恢复“全水文过程”，不仅要确保枯水期不断流，更要努力重现对生态系统至关重要的高流量脉冲、洪水事件和季节性流量变化^[3]。同时，调控目标也从聚焦于“单一物种”扩展到关注“生态系统整体”，力求兼顾水生、陆生、河岸带等不同生态组分的综合需求。更为重要的是，管理模式正从僵化的“刚性约束”向灵活的“适应性管理”演进，承认人类认知的不确定性，通过建立监测-评估-反馈-调

整的闭环循环,动态优化调控方案,以应对不断变化的内外环境。

3.2 主要调控手段

为了实现上述先进的调控理念,需要综合运用多种工程与非工程措施。在工程层面,可以在大坝底部设置专用的生态泄流设施,如多层取水口,以灵活控制下泄水的流量、水温 and 水质,从而更精准地模拟自然水文过程。针对大坝造成的栖息地碎片化问题,建设鱼道与过鱼设施是恢复河流纵向连通性的有效途径。此外,在主干道外构建人工湿地或旁路系统,可以为特定生命阶段的生物提供替代性庇护所^[4]。在非工程层面,优化水库调度规则是核心,即将生态目标正式纳入水库多目标优化调度模型中,与防洪、供水、发电等传统目标进行协同优化,例如在关键鱼类的产卵季节主动制造人工洪峰。制度创新同样不可或缺,通过水权制度改革,确立“生态水权”的法律地位,使其与其他用水户的水权处于平等甚至优先的地位。市场机制的引入,如探索水权交易、生态补偿等,可以激励上游或用水户节约用水,将节约的水量用于生态目的。最终,所有这些措施都应在流域综合管理的框架下统筹实施,打破行政区划限制,在整个流域尺度上协调水资源的开发与保护。

3.3 中国的实践与挑战

中国已在多个流域开展了生态流量保障的积极探索。黄河流域通过实施全流域统一调度,成功实现了自2000年以来的连续不断流,并为各主要控制断面设定了明确的生态基流目标。长江流域在三峡水库的调度实践中,也开始尝试考虑四大家鱼的产卵需求,进行专门的生态调度试验,释放人造洪峰以刺激鱼类繁殖。然而,这些实践依然面临着严峻的挑战。首先,国家层面尚未建立起统一、科学、权威的生态流量计算技术导则和评估标准体系,导致各地实践缺乏规范指导。其次,生态流量的监测与监管体系普遍薄弱,许多关键河段缺乏实

时、可靠的监测站点,监管手段落后,难以有效约束违规取水行为。再次,部门间的协调困难是长期存在的体制性障碍,水利、生态环境、农业农村、能源等部门在目标设定和利益诉求上时常存在冲突,高效的跨部门协调机制尚不健全。最后,气候变化带来的不确定性日益凸显,未来水文情势可能发生根本性改变,这要求现有的生态流量方案必须具备更强的韧性和适应性,而这正是当前研究和管理中的一个薄弱环节。

4 结语

河流生态需水量的科学评估与调控是实现人水和谐的关键。本文梳理现有计算方法,揭示其发展脉络。未来研究与实践应多管齐下:推动方法融合创新,发展“混合方法”,利用新兴技术降低数据获取成本;深化“社会-生态系统”耦合研究,将社会维度纳入评估框架,发展综合集成模型;构建动态、智能的适应性管理体系,依托前沿技术建立智慧化管理平台,实时感知、模拟并优化调度策略;完善法规政策与制度保障,加快制定管理办法和技术标准,明确责任主体,确立生态水权优先地位,探索多元化生态补偿机制,为生态流量长效保障筑牢制度根基。

参考文献

- [1]于露.辽河干流河流生态需水评估整合计算研究[J].东北水利水电,2023,41(01):10-13+71.
- [2]杜龙飞,侯泽林,李彦彬,等.城市河流生态需水量计算方法研究[J].人民黄河,2020,42(02):34-37+47.
- [3]刘俊秀,郭威.城市河流生态水位和生态流量计算与应用研究[J].河南水利与南水北调,2025,54(05):4-6.
- [4]曹佳荣,薛家麟.河湖生态流量保障的水文情势测度与适应性调控策略研究[C]//河海大学.《水资源保护》创刊40周年学术交流暨2025(第十三届)水生态大会论文集.黄河水利委员会河南水文水资源局,2025:760-767.