

河流生态流量监测指标体系构建与应用

吕 萍

河南迅佳检测有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：维持河流生态健康的关键在于保障其适宜的生态流量，而科学监测是实施有效管理的基础。当前生态流量监测多集中于水文水量指标，未能全面反映流量变化对生态系统结构与功能的综合影响。因此，构建一套系统、多维、可操作的生态流量监测指标体系，对于精准评估河流生态状况、支撑水资源精细化调度与管理具有重要的理论与实践价值。

【关键词】：河流生态；流量监测；指标体系；构建；应用

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.062

引言

随着水资源开发利用强度加大与生态保护需求提升，传统水文监测已难以满足河流生态系统完整性保护的要求。生态流量监测需从单纯的水文要素扩展至水文情势、水环境质量及水生生物响应等多维度。系统研究指标筛选原则、体系构建方法及其在管理决策中的应用路径，是实现河流生态保护从定性描述向定量评估跨越的核心环节。

1 生态流量的概念界定与生态学机理

生态流量是指维持河流生态系统结构完整、功能健康及生物多样性所必需的水文过程集合，而非单一固定的流量数值。其概念已从早期保障不断流的“最小流量”，演变为维持河流自然脉冲特征的“适宜水文情势”，强调流量在时空上的动态变化与多维属性。

其生态学机理核心在于“水文-生境-生物”的级联效应。首先，流量是塑造物理生境的原动力，适宜的基流维持河道连续性，而周期性的洪水脉冲则创造洪泛区湿地，极大丰富了栖息地异质性。其次，流量驱动着物质循环与能量流动，通过输移泥沙和营养盐，维持河床形态稳定及食物链基础。最后，特定的水文节律是水生生物生活史的触发信号，如春季涨水诱导鱼类产卵，水位波动决定底栖动物羽化。因此，生态流量监测旨在通过量化这些关键水文要素，反向推演其对生态系统健康状况的支撑能力。

2 河流水文情势与栖息地完整性关联分析

河流水文情势与栖息地完整性之间存在深刻的耦合共生关系，二者互为表里、相互依存。水文情势作为河流生态系统的主导生态因子，通过流量、水位、流速及泥沙输移等物理变量的时空分配，直接定义了河流栖息地的边界与质量。完整的栖息地结构要求河流维持纵向的连续性、横向的连通性以及垂向的渗透性，而这正是自然水文脉冲所能达成的核心效果。

当水文情势保持天然波动时，丰水期洪水淹没漫滩，创造临时性的湿地与回水区，极大扩充了水生生物的觅食与繁殖空间；枯水期基流则维持主河道的基本形态，保障物种越冬安全。这种周期性的水陆交替过程，动态更新着底质结构，防止河道淤积僵化，从而维持了浅滩与深潭序列的多样性。

反之，一旦水文情势被水利工程或过度取水人为均化，河流将失去其自然韵律。基流枯竭导致河道断流，切断纵向连通；水库调度导致的下泄流量过程线平直化，则剥夺了洪泛区的淹没机会，造成横向连通丧失。随之而来的是栖息地破碎化、底质板结、水温分层及水陆交错带消失，最终导致生物多样性锐减。因此，维护栖息地完整性的本质，在于恢复并维持接近自然状态的河流水文情势。

3 监测指标体系构建的原则

3.1 科学性与生态学机理相符原则

监测指标体系的构建必须建立在坚实的河流生态学理论基础之上，确保所选指标能够真实反映水文过程对生态系统的作用机制。这一原则要求摒弃单纯的水文视角，转而采用水文学与生态学交叉融合的思路。指标选取不能仅停留在流量、水位等基础水力学参数上，还必须涵盖对生物栖息地有直接影响的综合指标，如湿周、流速、水力半径及生境多样性指数。同时，指标应体现河流的时空异质性，区分枯水期、丰水期及平水期的不同生态需水特征。只有深刻揭示流量变化如何引起底质重组、水温分层及食物网响应的内在逻辑，才能构建出既符合自然规律又具备科学解释力的评价体系，避免监测数据与实际生态状况脱节。

3.2 系统性与层次结构分明原则

河流生态系统是一个包含水文、水力学、水化学及生物群落的多维复杂系统，指标体系必须具备完整的系统架构。在构建时，应遵循宏观到微观、主控因子到辅助因子的层次化设计思路。通常可分为目标层、准则层和指标层：目标层聚焦生态

流量保障的总体健康度；准则层涵盖水文情势、物理生境及生态响应等关键维度；指标层则细化到具体可测的参数，如流量历时曲线、频率变异系数及连通性指数等。这种树状结构不仅厘清了各指标间的隶属关系与权重分配，还保证了监测内容的全覆盖而无冗余。

3.3 可操作性与动态适应性原则

指标体系的生命力在于能否在实际监测中落地应用，因此必须坚持可操作性与经济性原则。在指标筛选时，应优先考虑那些能够通过现有水文站网、遥感技术或便携式仪器便捷获取的参数，避免过度追求理论完美而陷入数据采集困难或成本过高的窘境。同时，考虑到河流生态系统对外界干扰的适应性循环特征，指标体系不应是一成不变的静态标准，而应具备动态调整机制。针对不同流域的气候特征、河流类型及管理水平，应建立差异化的指标阈值与评价标准。这种弹性设计确保了指标体系在面对气候变化和人类活动双重压力下的长期适用性与指导意义。

4 河流生态流量监测指标体系的构建

4.1 核心水文情势指标的选取与量化

构建监测体系的首要环节是确立表征水文节律的核心指标，旨在捕捉流量的时空变异特征。这包括流量幅度指标，如年均流量、枯水期最小流量及汛期峰值流量，直接反映水资源丰歉程度；频率指标，如低水与高水的发生次数，揭示水文事件的稀有性；以及历时指标，即特定流量等级的持续时间，关乎生物耐受极限。特别重要的是引入流量变率指标，量化相邻时段流量的相对变化率，以评估水文过程的脉冲强度。这些指标共同构成了生态流量的骨架，通过对比实测水文过程线与参考基准的偏离度，定量评估人类活动对河流自然脉搏的扰动程度。

4.2 水力学与生境适宜性指标的集成

单纯的水量数据不足以表征生态效应，需耦合水力学参数以反映栖息地物理质量。该维度重点纳入湿周、平均水深、流速及水面宽度等指标。湿周反映了河岸带栖息地的可利用面积，对两栖类和岸边植物至关重要；流速则直接影响鱼类的游泳能耗与产卵场选择。通过构建水力几何形态关系，将流量数据转化为具体的生境参数，并进一步计算生境适宜性指数。这种转化使得监测结果能直接与生物需求挂钩，解决了水文数据与生态响应之间的脱节问题，为评估生态流量对生物栖息地的实际支撑能力提供了直观的物理度量。

4.3 水质理化参数与连通性指标的补全

完整的生态流量监测必须涵盖水质要素及水文连通性，这

是维持河流生态功能的基础保障。指标体系中应包含水温、溶解氧、电导率及主要营养盐浓度，因为流量过程直接影响水体稀释能力与热容量，进而影响水生生物代谢。同时，引入纵向连通性指数和横向连通性指标。这些指标弥补了传统水文监测的盲区，能够敏锐捕捉因流量不足导致的河流碎片化、水体黑臭或咸淡水入侵等生态风险，确保监测体系能全面反映河流生态系统的水文-水动力-水环境耦合状态。

4.4 基于多源数据的指标获取与融合技术

现代监测体系的构建依赖于天地一体化的数据采集与融合技术，地面站点通过自动水位计、超声波流量计及多参数水质探头，提供高频、原位的点状监测数据；遥感技术则利用卫星影像反演大范围的水体面积与表面温度，解决无资料地区的监测空白；无人机低空遥感可获取高分辨率的河岸带影像。关键技术在于建立多源异构数据的同化与融合算法，消除不同平台数据的时空分辨率差异，生成连续、无缝的生态流量监测数据集。这种技术集成不仅大幅提升了监测的时空覆盖率，还降低了人工巡测的成本与风险。

4.5 综合评价指标模型与阈值判定体系

零散的指标需通过数学模型整合成综合决策依据，采用层次分析法或熵权法确定各指标权重，构建生态流量综合健康指数。核心是建立基于流量历时曲线(FDC)的偏离度评价模型，计算实测流量与生态基流、适宜流量及洪水脉冲的匹配程度。同时，依据《河湖生态流量保障实施方案》等规范，设定不同等级生态流量目标的预警阈值。当监测指标跌破阈值时，系统自动触发分级响应机制。这种从单一指标监测向综合指数评价的转变，为管理部门提供了直观、定量的决策抓手。

5 多源异构监测技术与数据采集方法

5.1 地面定点自动监测站网技术

地面监测站网是获取生态流量基础数据的核心手段，利用布设在关键断面的自动化仪器实现全天候数据采集。主要采用雷达水位计和超声波多普勒流速仪进行非接触式测量，有效避免了水体含沙量和漂浮物对传感器的干扰。数据采集频率可设定为分钟级甚至秒级，能够精准捕捉洪水涨落过程和生态基流的微小波动。同时，配套的多参数水质分析仪可同步监测水温、电导率、溶解氧及pH值。这种定点监测方式具有数据精度高、连续性强、受天气影响小的优势，是验证其他监测手段准确性的基准参照系，为生态流量核算提供了最直接的一手水文要素数据。

5.2 卫星遥感与光学影像反演技术

偏远山区及无资料流域的监测盲区，卫星遥感技术提供了

广域覆盖的解决方案。利用光学卫星影像,通过水体指数模型提取河流水面宽度和表面积信息,结合数字高程模型数据估算水深,从而反演河流流量。合成孔径雷达卫星则能穿透云雾,实现全天候的水体识别与变化监测,特别适用于多云多雨的南方地区。遥感技术的优势在于大尺度、长时序的宏观监测能力,能够捕捉河网水系的整体连通性和季节性变迁。虽然其垂向精度不及地面站点,但通过多源数据融合,可有效填补地面监测网络的空白区域。

5.3 无人机低空遥感与热红外监测

无人机平台搭载高清可见光相机和热红外传感器,为中小尺度河流提供了高机动性的监测方案。低空遥感能够获取厘米级分辨率的河道影像,精确识别浅滩、深潭及河岸带植被覆盖变化。热红外相机则可监测水温空间分布,这对于评估生态流量对鱼类产卵场热环境的影响至关重要。无人机还可携带小型流速仪进行定点悬停测量,或在洪水期无法靠近断面时执行应急监测任务。这种技术兼具卫星的宏观视野和地面站点的灵活性,是连接天地监测数据、进行局部精细化调查的理想工具。

5.4 物联网传感网络与边缘计算架构

为了实现海量监测数据的实时传输与初步处理,需构建基于窄带物联网技术的分布式传感网络。沿河道纵向梯度布设微型智能传感器节点,采集水位、流速及水质数据。边缘计算技术被引入节点端,在数据上传云端前进行本地清洗、压缩和异

常值剔除,仅将关键特征值或告警信息发送至服务器。这种架构大幅降低了通信带宽需求和云端计算压力,提高了系统的响应速度和能效比。即使在网络信号不稳定的偏远河段,也能通过北斗短报文等方式实现数据的断续传输,确保了监测系统的鲁棒性和数据完整性。

5.5 多源异构数据的融合与同化技术

单一监测手段存在时空分辨率不匹配和数据质量参差不齐的问题,必须通过数据融合技术生成统一的监测产品。利用地理信息系统空间插值算法,将离散的地面站点数据与点状的遥感反演结果进行配准和融合。采用集合卡尔曼滤波等数据同化方法,将实时监测数据同化到水文模型中,修正模型预报误差,生成时空连续的水文情势分布图。这一过程消除了不同来源数据的系统偏差,实现了从点到面、从定性到定量的跨越,最终输出高精度的生态流量达标率和栖息地适宜性评估结果,为流域生态调度提供科学依据。

6 结语

总而言之,河流生态流量监测指标体系的构建与应用,其目标是建立连接水文过程与生态响应的桥梁。该体系应兼具科学性与实用性,能动态反映流量变化下的生态效应,并为流域水资源统一调度与生态修复提供定量化决策支持。通过持续监测与评估,最终推动河流管理从流量保障向生态健康维护的深刻转变。

参考文献:

- [1] 魏少辉.山区小河流生态流量监测方案研究[J].珠江水运,2025,(08):118-121.
- [2] 王文种,李广源,宁斌武,李颖,伍雪玲,唐炜,杜红娟,蔡钊.我国生态流量监测技术方法研究进展[A]2024(第三届)城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集[C].河海大学、浙江水利水电学院、河北工程大学、浙江省水利学会,北京沃特咨询有限公司,2024:6.
- [3] 杨文丽,蔡小璐,王小娟.漳河河流特征与水生态评价分析[J].治淮,2023,(06):44-45.
- [4] 管秀娟,杨戈,熊开容.广东省某河段健康状况调查、监测与评价[J].干旱环境监测,2023,37(02):77-81.
- [5] 吴艺涵,王煜.河流生态流量监测研究现状与展望[J].人民珠江,2022,43(05):43-49.
- [6] 王光磊,李志文.流域河流生态流量保障方案编制研究[J].东北水利水电,2021,39(12):29-31.