

多维度河道生态流量监测技术判定体系 研究与应用

郭 微, 孙世友, 左 锐, 毕亚然, 付 蔚

(北京师范大学, 100875, 北京)

摘要:生态流量是维持河流生态系统健康与可持续发展的关键指标。当前许多生态流量监测工作在指标设置上过于单一,往往把流量作为唯一监测变量,且监测技术选择缺乏统一标准,加之不同区域的水文特征和监测目标各不相同,各种技术方法的适用性也存在差别,这些因素均会影响监测结果的准确性。因此,构建系统化、标准化的技术优选框架成为提升生态流量监测可靠性的迫切需求。综合分析河道形态、水文情势、流域经济状况、监测场景、频率要求、监测指标和精度要求等多维度影响因素后,建立了生态流量监测技术判定体系,该体系采用“监测需求解析—监测方法匹配—监测设备优选”的三级递进式技术优选流程。为验证该体系的适用性,开发了生态流量监测指标管理平台。平台集成水系空间图谱和长序列基础数据,具有断面形态判定、河流形态判定、河道弯曲系数分析、水文情势分析和流域经济影响分析等功能。基于生态流量监测要求参数库、生态流量监测方法参数库及监测设备性能和工况参数库等数据库,平台能够依据具体河流情况匹配适用的监测方法并优选出监测设备。研究选取赤水河流域开展实证应用,实现了河流生态流量监测方案的动态生成。

关键词:生态流量;影响因子;技术优选;管理平台;动态优选;监测技术;监测指标

Research and application of a multidimensional river ecological flow monitoring technology evaluation system

GUO Wei, SUN Shiyu, ZUO Rui, BI Yaran, FU Wei

(Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Ecological flow is a key indicator for maintaining the health and sustainable development of river ecosystems. Currently, many ecological flow monitoring efforts exhibit overly simplistic indicator settings, often treating flow rate as the sole monitoring variable. Additionally, the selection of monitoring technologies lacks unified standards, and the applicability of various technical methods varies due to differences in hydrological characteristics and monitoring objectives across regions. These factors collectively affect the accuracy of monitoring results. Therefore, establishing a systematic and standardized framework for technology selection has become an urgent need to enhance the reliability of ecological flow monitoring. After comprehensively analyzing multidimensional influencing factors such as river morphology, hydrological conditions, basin's economic conditions, monitoring scenarios, frequency requirements, monitoring indicators, and precision requirements, an ecological flow monitoring technology evaluation system was developed. This system adopted a three-tier progressive technology selection process: “monitoring demand analysis, monitoring

收稿日期:2025-06-18 修回日期:2025-11-03

作者简介:郭微,高级工程师,主要从事水文水资源和智慧水利等工作。

通信作者:孙世友,正高级工程师,主要从事水文水资源、测绘和智慧水利等工作和研究。E-mail: sunsy@bnu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC320001)。

method matching, and monitoring equipment optimization". To validate the system's applicability, an ecological flow monitoring indicator management platform was developed. The platform integrated hydrographic spatial maps and long-term foundational data, featuring functions such as cross-section morphology assessment, river morphology assessment, river meandering coefficient analysis, hydrological condition analysis, and the basin's economic impact analysis. Based on databases including ecological flow monitoring parameter requirements, ecological flow monitoring method parameters, and monitoring equipment performance and operational condition parameters, the platform could match suitable monitoring methods and determine optimal monitoring equipment according to specific river conditions. The study selected the Chishui River basin for empirical application, achieving dynamic generation of river ecological flow monitoring plans.

Keywords: ecological flow; influencing factor; technology selection; management platform; dynamic optimization; monitoring technology; monitoring indicator

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)01-0065-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.01.010

一、引言

随着水资源开发利用程度不断加深,水利工程在产生社会效益、经济效益的同时也影响着河湖生态系统,生态效益为负时,可能导致水环境质量下降、水生生物减少及生态系统功能衰退等问题。这些问题既威胁水资源的可持续利用,又对流域生态安全构成挑战。在此背景下,河湖生态流量成为国内外关注研究热点。

河湖生态流量是指为维系河流、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。近年来,我国接连出台政策文件以强化生态流量管理。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》明确要求加强河湖生态流量监测,建设完善生态流量监测设施,并按要求接入水行政主管部门有关监控平台,到2025年全面落实管理措施。

生态流量的研究虽然在理论上已取得一定进展,但在实际应用中仍然有许多挑战:建设和运行监测系统时需要面对复杂多变的工况条件,现有的理论框架难以直接用于具体操作;不同地区的水文条件差别很大,生态保护的目标也不同;各种监测设备在适用环境、测量精度和数据传输速度上也存在差异。这些因素都会影响监测结果的准确性。因此,迫切需要建立一套科学合理的生态流量监测方法判定体系,从流域特征、监测需求和设备性能等多维度入手,通过规范化流程提升监测工作的实际效能。

本研究构建了一个综合判定体系,该体系整合了河道形态、水文情势、流域经济、监测场景及具体监测

要求等要素,能够系统分析各影响因子如何作用于技术选型,并可考量设备适用性特征,从而优选监测技术和设备,以保证监测数据的准确性。

二、生态流量监测技术判定体系

生态流量监测技术的选择与应用受多种因素共同作用。针对这一情况,建立生态流量监测技术影响因子矩阵,如图1所示。

河道形态和水文情势共同构成决定监测技术适用性的基础因素;流域经济状况会影响技术的功能需求,也会影响技术的复杂程度;不同监测场景各具特性,需要匹配相应监测技术,以保障水资源管理能够有效开展;监测频率直接影响数据采集的时效性;监测指标的设定需全面考虑流量、水位、流速、水温及水质等关键生态参数;精度要求需结合流域自然特征与生态保护目标进行针对性设计。综合考量上述所有因素,并在各影响因子分析的基础上构建了如图2所示的生态流量监测技术判定体系。

1. 河道形态

评估从河流形态、断面形态及深泓水深三个维度展开。

河流形态依据海拔高度和水动力特征可划分成五种类型,这五种类型对监测技术有不同的要求。高山河流(海拔>3000 m)水流湍急,流量变化受冰川融水和季节性降水影响大,所在区域地形陡峭,对此类河流开展监测时,监测设备容易受到恶劣气候的影响,数据传输也易出现中断,监测设备需具备极端气候耐受能力,同时需具备远程传输、低功耗等特征。山区河流(海拔

河道形态		水文情势					流域经济	监测场景	频率要求	监测指标	精度要求	
高山河流	河道宽度	季节河流	0	多沙 > 5	最大	最大	流域人口 流域GDP 流域产业结构	管道下泄式 渠道下泄式 河道下泄式 闸门下泄式 发电机组下泄式	自动监测 人工监测	流量	0~0.5%	
山区河流	河道坡度	溪流	0~1.5	最高	小河流	0~10				流速	0.5%	
山地河流	河道弯曲率	河流	1.5~5	平均	中河流	10~100				水位	1.0%	
低山河流	河床粗糙度	大河	> 5	最低	大河流	100~1000				水深	1.5%	
平原河流		特大河流	> 1000		清水	0~0.1				水温	大于1.5%	
河流形态	断面形态	深泓水深 (m)	河道水位 (m)	河道年均流量 (m³/s)	含沙量 (kg/m³)	降水量 (mm)	蒸发量 (mm)	社会经济	监测场景	频率要求	监测指标	误差精度

图1 生态流量监测技术影响因子矩阵

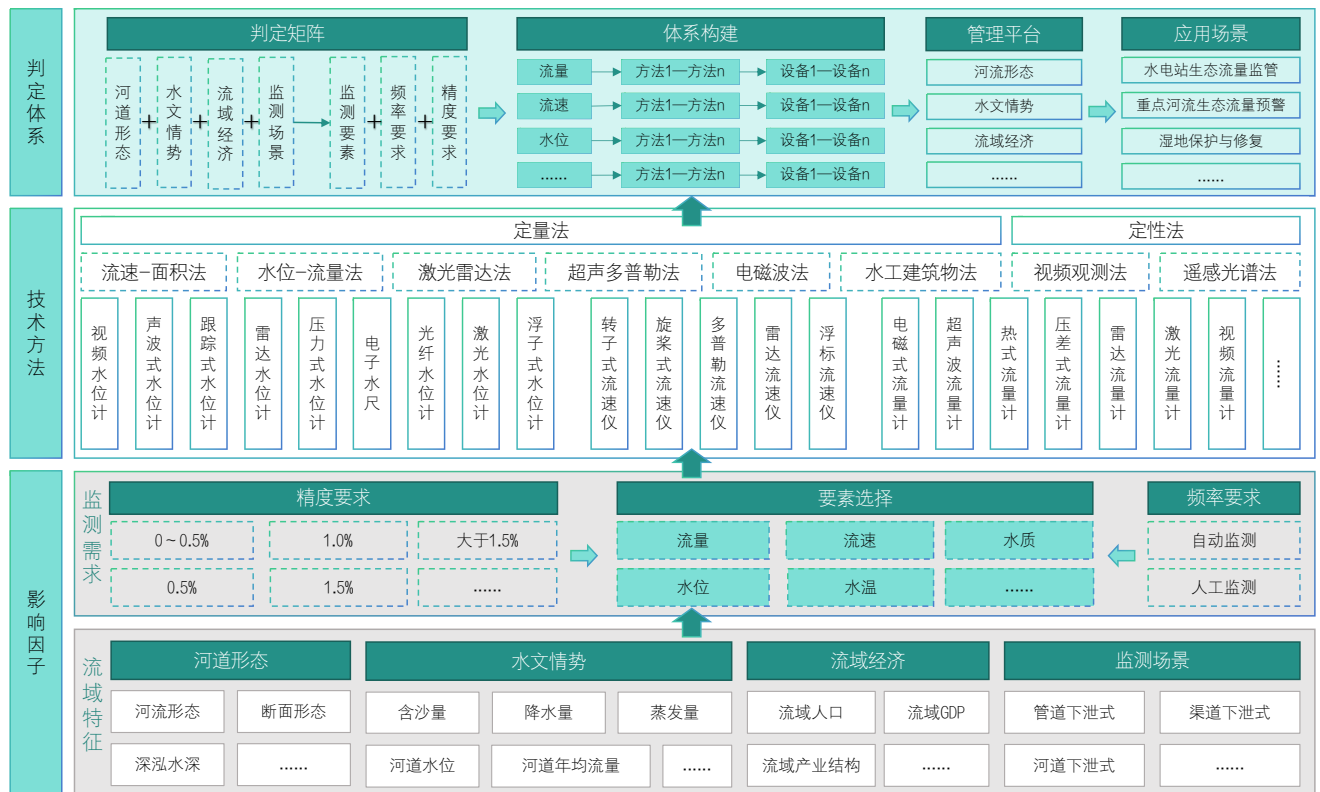


图2 生态流量监测技术判定体系

1000~3000 m)在洪涝期和枯水期的流量差别很大,所以对其监测技术不但要有适应不同流速的能力而且应具备稳定性,即便在低水位条件下也能进行有效测量。山地河流(海拔500~1000 m)含沙量高且断面不规则,所以在选择技术类型时要着重考虑如何应对泥沙淤积的问题。低山河流(海拔100~500 m)受人类活动影响明显且河道形状多变,还需兼顾用水和生态保护两方面,因此用于监测的技术要能够适应河道形态的动态变化且要保证测量精确度。平原河流(海拔<100 m)水文特性比较稳定但是人为调控频繁,河床容易淤积且被

污染风险高,适宜采用能够对流量与水质等多参数进行同步监测的综合技术方案。

断面形态指标中,河道宽度决定着监测技术的空间布置方式,河道坡度、河道弯曲率等影响着监测技术的选择。宽河道条件下,需通过借助多点布设或遥感技术才能覆盖大面积断面,并且能避开风力、潮汐等干扰;窄河道条件下,使用小型设备或接触式传感器就能满足要求且保障精度。河道坡度会影响设备受水流冲击程度,陡坡河道应选用抗湍流设备并配备高频采样功能,以捕捉到快速变化的水位;缓坡河道水流流速较

慢,可以使用高精度的水位监测设备,再通过断面面积法计算流量,但要注意定期清除淤泥,防止设备被堵住。河道弯曲率高容易造成水流不对称,监测技术需修正环流效应带来的影响。河床粗糙度会影响水流阻力分布,对高粗糙度的河床可以选择非接触式监测设备,并对底噪干扰加以校准;对低粗糙度的河床要注意防止淤积,并要定期校平。

根据深泓水深,河流通常划分为三类:溪流(水深 $0\sim 1.5\text{ m}$)易受植被、卵石阻挡,流速多变且河床不规则,常为生态系统的敏感源头区,需采用非接触式设备且设备需具备高频监测能力;河流(水深 $1.5\sim 5\text{ m}$)适合主流监测技术,但需满足鱼类洄游、河岸植被补水等生态目标的高精度数据需求;大河(水深大于 5 m)因流速分布复杂且表层干扰显著,要求监测系统具备全断面覆盖能力,同时需解决长期运行中的生物附着与设备稳定性问题。

2. 水文情势

水文情势是表征水体水文要素时空变化的综合概念,包括水位、流量、含沙量、降水量和蒸发量等重要指标,综合分析这些要素有助于筛选出更契合该区域特征的监测技术。在选择技术时,既要充分考虑其应对突发降水导致流量突变等极端水文事件的能力,也要顾及其对常态水文条件的适应情况,以保证监测系统在各种工况下都能稳定运行。

河道水位是生态流量的重要表征,其中最高水位能反映洪水等极端水文条件给生物栖息地带来的冲击;平均水位则关系到河流整体稳定性,在维持生态系统及保护生物多样性方面起着关键作用;最低水位与枯水期生态基流保障、水生生物栖息环境维系直接相关。水位波动幅度还影响设备量程和安装方式的选择,水位变幅较大的河流适宜选用量程广的非接触式监测技术。

河流因年均流量不同而分成五类,其中季节河流(年均流量 $0\text{ m}^3/\text{s}$)靠雨季补水,其间歇性水流波动需要被精准捕捉,所以设备必须具备耐旱能力和抗暴雨冲击能力;对小河流(年均流量 $0\sim 10\text{ m}^3/\text{s}$)的监测需要达成低流量高精度的目标且不能干扰脆弱生态系统;中河流(年均流量 $10\sim 100\text{ m}^3/\text{s}$)流量相对稳定,但需长期监测灌溉、生态、发电等多目标调控情况;对大河流(年均流量 $100\sim 1000\text{ m}^3/\text{s}$)的监测技术需抵御航运、采砂等人类活动干扰;对特大河流(年均流量 $> 1000\text{ m}^3/\text{s}$)的监测需着重关注监测数据实时传输及流域共享能力。

监测技术选择也会受到含沙量和水质特征的影响。在多沙水体中,声学或光学监测设备容易被干扰,从而影响精度。在水质差的水体中,需预防污染物或藻类堵塞传感器的风险。

降水量和蒸发量是动态调整监测策略的依据。短时的暴雨要高频监测(分钟级),而长时的降雨则需长期连续记录。蒸发量高的地方水位日间变化明显,需区分开自然蒸发和生态用水消耗。

3. 流域经济

流域的经济社会状况,包括人口、GDP和产业结构等,对生态流量监测技术选择具有重要意义。人口密集的地区水资源需求量大,适宜采用具备实时监测和预测功能的技术,从而更好地平衡生活、农业和生态用水。经济发达的地区技术投资能力较强,通常可以考虑采用高精度、多功能的监测设备,以应对工业化和城镇化过程中带来的水污染问题;相比之下,经济欠发达地区更加注重技术的实用性和经济性,可优先选择基础性监测设备来确保生态流量的基本需求得到保障。第三产业发达的流域,尤其是旅游业占主导地位的地区,通常对数据实时性与可视化展示有较高要求,因此在技术选择时,既要考虑流量和水质等多指标的监测效率,也需要兼顾对公众展示的需求。

4. 监测场景

生态流量主要采用管道下泄式、渠道下泄式、河道下泄式、闸门下泄式及发电机组下泄式等水流释放方式,不同释放方式水力特性不同,所以需匹配相应的监测技术,才能达成科学监测的目标。

管道下泄式靠管道输送水流,能精确控制水量,常用于需要精细调节的场合。这种释放方式对监测精度要求很高,需用高灵敏度的计量设备。

人工或天然渠道被用于渠道下泄式引水,这种方式常用于较大范围的水量调控。开放渠道容易受外部因素影响且水流波动明显,所以监测技术需要有很强的适应性。

河道下泄式依靠自然形成或者经人工改造的河道来释放水流,这种释放方式受河道结构和水文条件的影响很大且要保持水流的自然流态,与之相对应的监测技术需具备实时性、持续性及环境适应性,才能应对复杂的河道水力状况。

闸门下泄式靠开启或者关闭闸门来调节水流,这种方式需要监测技术能精准捕捉闸门开度变化所导致的水流细微波动,尤其在闸门启闭时要准确算出过闸

流量。

发电机组下泄式是指在水轮发电机组运行过程中,水历经水轮机做功后排出(下泄)至下游河道/尾水系统的水流释放方式,其流量监测值即为“过机下泄流量”,是水电工程运行中与发电、生态、防洪密切相关的参数。

5. 频率要求

数据的准确性、时效性和应用价值与监测频率的合理设置密切相关。确定监测频次时,应以流域水文动态特征为重要依据。例如,生态水位、生态流量等指标的监测频率需根据水文周期特征进行差异化设计:汛期阶段,水位、流量数据波动剧烈,同时处于生态敏感期(如鱼类洄游、湿地补水等),此时应提高监测频率,捕捉水位、流量的瞬时变化,支撑防洪调度与生态应急响应;非汛期阶段,径流过程趋于平缓,生态流量以维持基础生境稳定为主,监测频率可适当降低,重点跟踪长期变化趋势,兼顾数据连续性与管理成本。

生态流量监测主要靠自动监测和人工监测这两种方式,二者在技术特点和应用场景上互为补充。自动监测系统利用智能化设备,可以在河流动态变化剧烈或者有极端水文事件时高频连续采集数据,实时监测优势明显;而人工监测虽然采样频率较低,但由专业人员现场观测,不仅能获取自动监测系统难以捕捉到的特殊水文信息,还能为设备维护、数据校验及长期趋势分析提供重要支持。将自动监测与人工监测有效结合,可以显著提升生态流量监测数据的可靠性与完整性。

6. 监测指标

国内外生态流量监测体系普遍存在监测指标单一的问题,且大多集中在流量监测上。然而,科学评估河

流生态系统健康,需建立包含流量、流速、水位、水深、水温、水质等的多指标综合监测体系。流量和流速是河流动力核心指标,影响水体物质输送与能量交换过程;水位和水深显著影响水生生物栖息地质量;水温作为重要的环境因子,对水体溶解氧含量和水生生物的新陈代谢具有重要影响;水质指标则是评估水体生态服务功能是否达标的依据。

在选择监测指标时,应结合区域水文特征及历史监测数据的阈值进行系统分析。例如,在宽浅型河道或低流量情况下,传统的流量监测方法常常精度不足,而水位监测操作简便且数据稳定,更能发挥作用。

7. 精度要求

生态流量监测实践中,需依据流域特征与实际管理需求,参照相关技术标准规范,综合判定监测指标的精度要求。由于流域特征、河道形态、水文情势、生态系统类型及监测尺度等因素具有多样性,且实际需求因保护目标、管理层级、考核层级等的不同而各有侧重,因此不能简单地套用统一标准,需以《水位观测标准》(GB/T 50138—2010)、《河流流量测验规范》(GB 50179—2015)等标准及相关政策文件为基础,结合研究尺度、生态保护目标、生态保护红线、水功能区划等管理要求,通过实际监测场景勘察、历史监测数据比对、模型模拟预测等手段,综合分析生态流量监测的时空分辨率、误差允许范围等相关参数,最终形成技术可行、管理有效的精度控制方案,为生态流量保障提供量化依据。

三、生态流量监测技术判定流程

该体系采用三级递进式判定流程,分别是监测需求解析、监测方法选择和监测设备优选(见图3)。

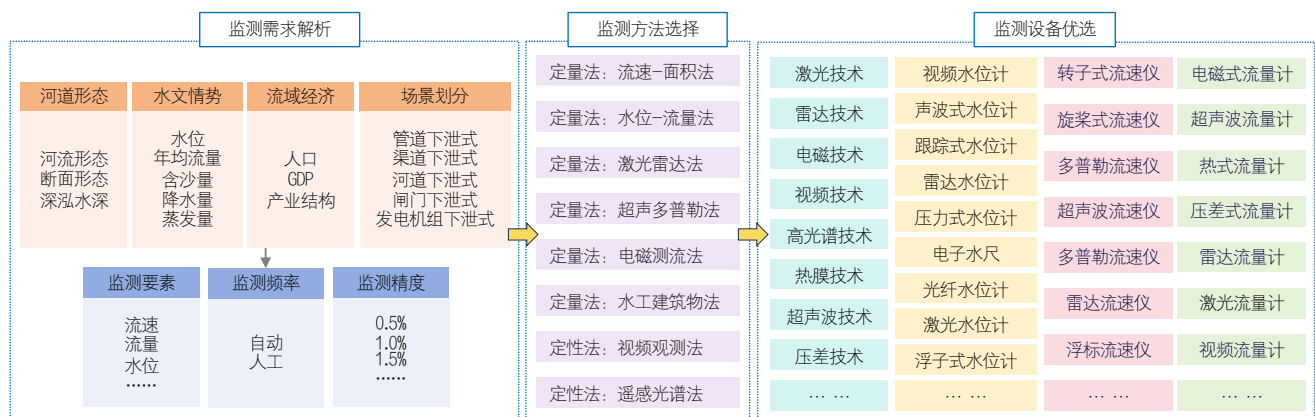


图3 生态流量监测指标管理平台判定流程

在监测需求解析阶段,以河道形态、水文情势、流域经济状况及实际监测场景等基础特征参数为依据,确定监测指标、频率和精度等监测需求。

监测方法选择阶段重点考量方法与流域特征的匹配程度。例如,流速稳定区域比较适用流速-面积法,水位波动大的地方则可使用水位-流量法。

监测设备优选阶段需依据前两个阶段的分析结果,综合考量设备技术参数与环境适应性要求,完成监测设备的最终选型。此阶段需全面把握设备相关参数,例如,不同型号的雷达水位计在测量范围和工作温度方面可能有很大差别,所以挑选时务必保证所选设备能稳定运行且能提供符合精度要求的监测数据。

四、生态流量监测指标管理平台及其验证

1. 生态流量监测指标管理平台

以生态流量监测技术判定体系为理论基础,本研究开发了一个为生态流量监测提供系统化科学决策支持的综合性管理平台——生态流量监测指标管理平台。该平台主要包含断面形态判定、河流形态判定、河道弯曲系数分析、水文情势分析、流域经济影响评估及生态流量监测技术方案生成等核心功能模块。

平台通过整合水系空间图谱与可视化技术方法,对河流空间分布、流域特征及水文条件等多维数据进行集成展示与分析,从而为生态流量监测技术判定提供可靠的数据支撑。平台还构建了生态流量监测要求参数库、监测方法库和监测设备参数库。基于上述数据资源,平台按照预设的动态选取规则,达成生态流量监测方案自动生成的目标。

平台支持用户直接调用历史数据或输入新参数,基于河道形态、水文情势、流域经济特征及监测场景等基础信息判断监测需求,自动推荐监测要素、频率和精度组合,用户可根据实际需求进行选择。系统依据筛选条件匹配适用的监测方法,并结合设备参数库完成型号优选,最终生成完整的生态流量监测方案。

2. 典型区域验证

在长江、黄河流域对提出的方

法进行了应用验证,实现了河流生态流量监测方案的动态生成。本文以长江流域赤水河为例,构建出包含356条河流且集成河道形态、DEM高程、河道坡度、河道弯曲系数及河道纵横断面形态等多维属性信息的水系空间图谱,空间匹配该区域近20年的水文数据及近30年的人口统计、县级GDP和产业结构数据,实现了赤水河流域监测方案的动态生成,流程详见图4。

①进行河道形态调研与分析,确定不同河道形态对生态流量监测的需求。构建出赤水河流域356条河流空间图谱(上下游、左右岸、产汇流的关系及概化图等),分析得出赤水河流域上游及中游主要为山区河道,河谷深切、落差大,下游为冲积型河道,地势平坦、河谷宽阔。

②分析不同河道形态水文情势状况,确定不同水文情势对生态流量监测的需求。空间匹配分析赤水河流域水位、流量特征得知,平均水位的分布特点为西南上游低、东北下游高,且受沿程地形、支流汇入与径流补给影响,水位逐步抬升,流量逐步增大。

③进行研究区经济发展情况分析,确定生态流量监测体系的监测范围、指标设定与优先级。赤水河流域经济社会发展呈现出人口分布不均,GDP总量较大但人均水平低于全国平均的特征。

④根据对监测断面的实际勘测,确定生态流量监测的场景划分。赤水河流域的下泄场景以河道下泄

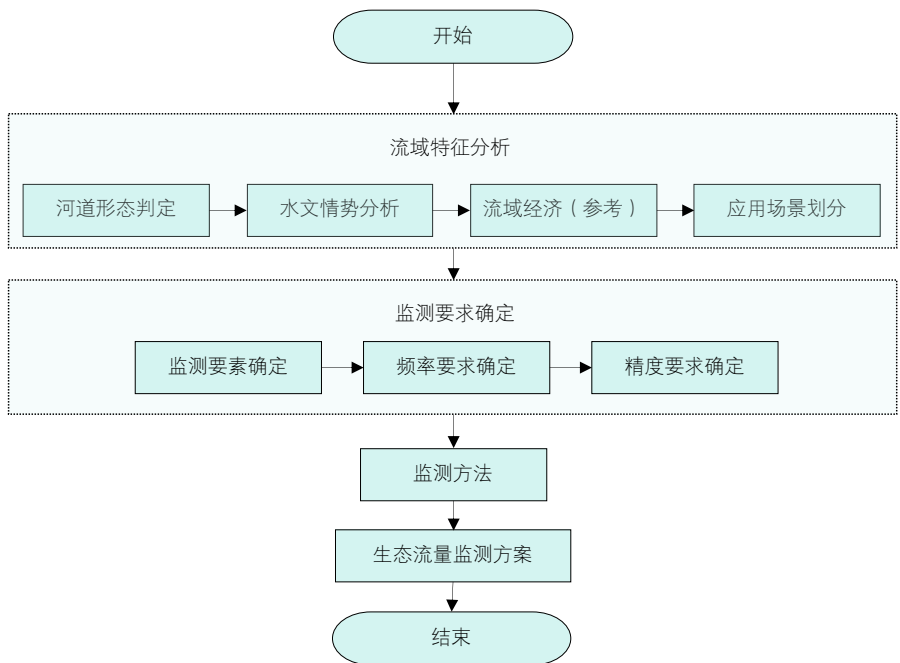


图4 赤水河流域监测方案动态生成流程

式为主,局部区域结合水利工程建设,采用闸门下泄式和发电机组下泄式,管道下泄式与渠道下泄式应用较少。

⑤根据不同的生态流量监测场景及流域经济发展情况,确定监测目标及监测要素。分析得出赤水河流域生态流量监测要素以流量、水位、水质为核心。

⑥根据监测需求分析,确定生态流量监测要素的精度及频率要求。分析得出赤水河流域生态流量监测主要采用自动监测方式,并借助视频监控辅助验证,同时辅以必要的人工巡检和样本实验室检测等方式。

⑦基于以上数据及输入参数,综合分析得出赤水河流域各河流监测方法技术体系,并动态生成了生态流量监测方案。

五、结论

本研究围绕生态流量监测技术的科学选择问题,构建了多维度判定体系,并开发了配套管理平台,为流域生态流量监测提供了系统性解决方案,主要结论如下。

1. 多维度判定体系的创新性与适用性

本研究整合河道形态(含河流形态、断面形态、深泓水深)、水文情势(流量、水位、含沙量等)、流域经济(人口、GDP、产业结构)、监测场景、频率要求、监测指标和精度要求共7类核心影响因子,构建了生态流量监测技术判定体系,形成了“监测需求解析—监测方法匹配—监测设备优选”的三级递进式判定流程。该体系协同考量自然要素与经济社会条件,提升了监测方案与流域特征的匹配度。

2. 管理平台的集成与动态决策能力

生态流量监测指标管理平台集成水系空间图谱、长序列水文数据及流域经济参数,能自动分析河道形态、水文情势等特征;建立起生态流量监测要求参数库、生态流量监测方法参数库及监测设备性能和工况参数库,能依据具体流域特征动态生成监测方案,以确保监测工作科学高效。

3. 流域应用的实践价值与管理启示

以赤水河流域为例,平台生成了356条河流生态流量监测方案,验证了判定体系在复杂流域中的适用性,可为流域生态流量管理提供技术参考。

4. 未来展望

本研究在技术选型标准化和平台功能集成方面已经取得了一些阶段性成果,平台已获得多项软件著作权,技术体系已进行专利申报,但仍有进一步优化的空

间。未来可以从三个方面继续深入研究:①结合赤水河流域重点试点的实测数据,对方案适用性进行量化评估;②扩展数据维度,增加如土地利用、生物多样性、底栖生物指标等生态参数,研究这些因素给生态流量监测带来的影响;③在更多类型流域如内陆干旱区、滨海河口等地测试该体系的适用性,从而在更大区域范围内开展推广研究。

参考文献:

- [1] MA L, ZHANG X, WANG H, et al. Characteristics and Practices of Ecological Flow in Rivers with Flow Reductions Due to Water Storage and Hydropower Projects in China[J]. Water, 2018, 10(8): 1091.
- [2] ZHANG Q, GU X, SINGH V P, et al. Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations[J]. Journal of Hydrology, 2015(529): 711-722.
- [3] TONKIN J D, JÄHNIG S C, HAASE P. The Rise of Riverine Flow-ecology and Environmental Flow Research[J]. Environmental Processes, 2014, 1(3): 323-330.
- [4] 周丽. 关于提高龙台河流域生态流量保障的分析与对策[J]. 四川水利, 2024, 45(1): 121-124+132.
- [5] 朱昊彧, 隗岚琳, 林妙丽, 等. 基于水质达标的派河生态流量分析[J]. 江苏水利, 2021(6): 26-29.
- [6] 孙翀, 王猛, 张建永, 等. 我国重要河湖生态流量保障现状及问题分析[J]. 水利规划与设计, 2021(3): 4-7+28.
- [7] 刘兆孝. 推进长江流域已建水利水电工程生态流量保障与管理的思考[J]. 中国水利, 2024(21): 37-42.
- [8] 刘兆孝, 王孟, 李斐, 等. 推进长江生态流量保障工作的思考与建议[J]. 中国水利, 2022(9): 42-44+51.
- [9] 王冬, 孙英军, 王贝, 等. 浙江省重点河湖生态流量保障现状及问题分析[J]. 水利规划与设计, 2023(4): 51-53+76.
- [10] 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(5-6): 397-441.
- [11] 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(5): 43-49.
- [12] 陈昂, 温静雅, 王鹏远, 等. 构建河流生态流量监测系统的思考[J]. 中国水利, 2018(1): 7-10+17.
- [13] KING A J, GAWNE B, BEESLEY L, et al. Improving Ecological Response Monitoring

- of Environmental Flows[J]. Environmental Management, 2015, 55(5):991-1005.
- [14] 于昕岩,张霄,周思宁.加强新时期环境监测质量管理体系建设的途径探析[J].清洗世界,2023,39(9):190-192.
- [15] 李晓.生态环境保护视角下水资源环境监测的实施[J].智慧中国,2022(11):78-79.
- [16] 水利部.水库生态流量泄放规程:SL/T 819—2023[S].2023.
- [17] 水利部.水利水电工程生态流量计算与泄放设计规范:SL/T 820—2023[S].2023.
- [18] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.水文仪器基本参数及通用技术条件:GB/T 15966—2017[S].2017.
- [19] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.转子式流速仪:GB/T 11826—2019[S].2019.
- [20] 水利部.水工建筑物与堰槽测流规范:SL 537—2011[S].2011.
- [21] 杨明晖,李俊江.基于遥感技术的黄河下游河道形态解译[J].中国防汛抗旱,2024,34(S1):14-18.
- [22] 李薇,朱乐红,胡鹏.三角洲河道发育演变特征与影响机制研究[J].应用基础与工程科学学报,2025,33(1):158-168.
- [23] 刘慰,王随继,王彦君.黄河下游河道断面形态参数变化及其水沙过程响应[J].地理科学,2020,40(9):1563-1572.
- [24] 魏少辉.山区小河流生态流量监测方案研究[J].珠江水运,2025(8):118-121.
- [25] 罗昊,周雪欣,黄亮.河流流量变化的生态效应及水资源管理策略[J].环境科学导刊,2016,35(4):12-16.
- [26] 赵娜,赵乐.黄河内蒙古段水文情势与生态变化研究[J].内蒙古水利,2025(3):50-51.
- [27] 刘兰心,杨舒惠,王舒欣,等.黄河上游梯级水库运行对黄河干流水文情势的影响[J].人民黄河,2025,47(3):42-47+77.
- [28] GUANG L L, LI J F. Study on Ecohydrological Regime Change in Headwaters of the Yangtze River by Using Indicators of Hydrologic Alteration and Range of Variability Approach[J]. 2023, 40(1):37-42+50.
- [29] 于子波,张丽,姚航斌,等.雨源型河流生态流量计算与管控措施分析[J].广东水利水电,2022(11):43-47+54.
- [30] 白音包力皋,角哲也.水库排沙对下游河流生态环境影响研究[C]//中国水利学会青年科技工作委员会.中国水利学会第四届青年科技论坛论文集.北京:中国水利水电科学研究院水力学所,2008:355-359.
- [31] 梁恒德,王启优,崔琴,等.渭河上游水质时空变化及生态流量研究[J].水利规划与设计,2024(7):34-42.
- [32] 刘庆涛,蔡思宇,王旖,等.重点河湖控制断面生态流量监测预警系统设计及应用[J].水利信息化,2022(2):1-5+40.
- [33] 岁磊.黄河流域人口结构—经济—生态环境耦合协调发展研究[J].生态经济,2025,41(4):230-231.
- [34] 水利部.水电工程生态流量实时监测系统技术规范:NB/T 10385—2020[S].2020.
- [35] 徐立尉,李强伟.小水电站生态流量泄放检查率定方法研究及实践[J].小水电,2024(6):35-39+49.
- [36] 王振,林毅鸿,余文森.小型水电站生态流量监测系统的设计[J].现代计算机,2021,27(32):90-94.
- [37] 杨谦.推进生态流量管理全覆盖维护长江健康生态[J].中国水利,2020(15):40-43.
- [38] 孙世友,郭微,付蔚.基于高精度DEM的水系空间图谱提取、分级及可视化方法研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2025,61(5):710-720.

责任编辑 董林玥