

澄碧河水库调度对下游河道水阻及生态流量的影响评估与调控

纪伟^{1,2}

1. 南京聚润工程科技有限公司, 中国·江苏 南京 211800

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 中国·江苏 南京 210098

摘要: 论文以澄碧河水库为核心研究对象, 运用多学科交叉的研究方法, 深入剖析其调度运行对下游河道水流阻力与生态流量的定量影响。通过长期的现场实测、高精度的数值模拟以及严谨的数据处理与分析, 详细阐释了不同水库调度方案下下游河道水流阻力的动态变化规律, 以及生态流量的实际满足状况。研究结果清晰表明, 水库调度运行对下游河道水流阻力与生态流量具有显著影响, 不合理的调度极易引发水流阻力增大、生态流量匮乏等一系列问题。基于上述研究成果, 论文提出了具有针对性和可操作性的调控路径, 旨在推动水库实现科学高效调度, 切实保障下游河道生态健康, 促进水资源的合理利用与可持续发展。

关键词: 澄碧河水库; 调度运行; 水流阻力; 生态流量; 定量影响评估

Assessment and Regulation of the Influence of Chengbi River Reservoir Operation on the Water Resistance and Ecological Flow of the Downstream River Channel

Wei Ji^{1,2}

1. Nanjing Jurun Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211800, China

2. Key Laboratory of Shallow Lake Comprehensive Management and Resource Development, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210098, China

Abstract: This paper takes Chengbihe Reservoir as the core research object, and uses multi-disciplinary research methods to deeply analyze the quantitative impact of its dispatching operation on the downstream river flow resistance and ecological flow. Through long-term field measurement, high-precision numerical simulation and rigorous data processing and analysis, the dynamic change law of river flow resistance in the downstream river under different reservoir operation schemes, as well as the actual satisfaction of ecological flow, are explained in detail. The results clearly show that the operation of the reservoir has a significant impact on the flow resistance and ecological flow of the downstream river, and the unreasonable operation can easily lead to a series of problems such as the increase of flow resistance and the lack of ecological flow. Based on the above research results, this paper puts forward a targeted and operable regulation path, aiming to promote the scientific and efficient operation of reservoirs, effectively guarantee the ecological health of the downstream river channel, and promote the rational utilization and sustainable development of water resources.

Keywords: Chengbihe reservoir; dispatching operation; flow resistance; ecological flow; quantitative impact assessment

0 前言

澄碧河水库坐落于广西壮族自治区百色市, 是红水河流域重要的水利枢纽工程。该水库于 1958 年 9 月动工兴建, 1960 年 9 月基本建成, 在防洪、灌溉、发电、供水等诸多领域发挥着不可替代的关键作用。然而, 水库的调度运行打破了下游河道天然水流的固有模式, 对水流阻力与生态流量产生了极为深远的影响。水流阻力的任何变化都会直接作用于河道的水动力条件, 进而对泥沙输移、污染物扩散等重要过程产生连锁反应; 而生态流量作为维系河流生态系统健康稳定的核心要素, 一旦因不合理的水库调度无法得到有效保障, 必将引发一系列严峻的生态环境问题, 如生物多样性锐

减、河道生态系统退化等^[1]。因此, 精准定量评估澄碧河水库调度运行对下游河道水流阻力与生态流量的影响, 并探索出切实可行的调控路径, 不仅在水利工程学、水文学、生态学等多学科领域具有重要的理论价值, 更为区域水资源的科学管理与生态环境保护提供了坚实的实践指导^[2]。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

澄碧河水库位于右江支流澄碧河上, 地处东经 106°20′~106°35′, 北纬 23°55′~24°10′。水库集雨面积 2000 平方公里, 总库容 11.54 亿立方米, 是一座以灌溉、防洪、发电、供水

等综合利用的大(Ⅱ)型水库。下游河道为澄碧河下游段,全长约 100 公里,自西向东流经百色市的永乐镇、百城街道、龙景街道等多个乡镇,是当地农业灌溉的主要水源,对维持区域生态平衡和保障农业生产具有至关重要的意义^[3]。

1.2 研究方法

在下游河道选取了 5 个具有代表性的断面,分别位于永乐镇、百城街道、龙景街道、那毕乡和四塘镇。在每个断面设置了高精度的流速仪和水位计,按照每月一次的频率,对不同时段流速、水位等水动力参数进行测量。同时,利用先进的三维激光扫描仪,定期采集河道地形数据,为准确计算水流阻力提供翔实的数据支持。在河道关键位置设置了 3 个生态流量监测点,运用超声波流量计实时监测实际生态流量^[4]。

运用国际广泛认可的 MIKE 11 水动力模型,基于现场实测的地形数据、水文数据以及水库调度运行数据,构建了澄碧河水库下游河道的高精度水动力模型。在模型构建过程中,通过多次测定与验证,确保模型能够准确模拟不同水库调度方案下下游河道的水流过程。利用该模型,系统分析了不同水库调度方案下下游河道的水流阻力与生态流量的变化情况。

运用统计学方法,如均值分析、相关性分析、趋势分析等,对现场实测数据进行深入处理。通过均值分析,了解水流阻力与生态流量的平均水平;利用相关性分析,探究水流阻力与生态流量之间的内在关联;借助趋势分析,揭示水流阻力与生态流量的时空变化规律。同时,结合数值模拟结果,全面定量评估水库调度运行对二者的影响。

2 澄碧河水库调度运行现状分析

2.1 水库调度方式

澄碧河水库目前采用的调度方式主要依据水位—库容关系曲线,并结合防洪、灌溉、发电等多方面需求进行动态调度。在每年的 5 月至 10 月汛期,水库严格执行汛限水位控制,保持较低水位运行,以预留充足的防洪库容,有效应对可能发生的洪水灾害。在非汛期,即 11 月至次年 4 月,则根据灌溉、供水等实际需求,合理安排水库的蓄水与放水计划,确保水资源的高效利用。

2.2 历史调度运行数据统计分析

通过对过去 30 年(1995—2024 年)的水库调度运行数据进行全面统计分析,结果显示:水库的年平均出库流量在 50~200m³/s 呈现明显的波动状态。出库流量的季节变化特征极为显著,汛期(5~10 月)由于降水充沛,水库出库流量较大,月平均出库流量可达 150~200m³/s;非汛期(11 月至次年 4 月)因降水减少,用水需求相对稳定,出库流量相对较小,月平均出库流量在 50~100m³/s。然而,在某些特殊年份,如 2004 年、2010 年和 2016 年,由于降水异常偏少或农业灌溉、工业供水需求急剧增加,水库调度出现不合理情况,

导致下游河道水流过程发生异常变化,对河道生态环境和工农业生产造成了一定程度的影响。

3 水库调度运行对下游河道水流阻力的影响评估

3.1 水流阻力计算方法

在水动力学研究中,准确计算水流阻力对于理解河道水流运动特性、评估河道输水能力以及进行水利工程设计等方面至关重要。本研究选用了在水力学领域广泛应用的曼宁公式来计算水流阻力。

为了运用曼宁公式深入分析水流阻力的动态变化,需要获取精确的参数值。本研究通过现场实测的方式,借助先进的测量仪器和技术手段,获取流速、水位等关键数据。同时,利用高精度的地形测量设备,对河道地形进行精确测量,以获取准确的过水断面面积和湿周等信息,进而计算出水流半径和水面比降。曼宁糙率难以通过直接测量得到,因此本研究运用反演算法,结合现场实测数据和精确的河道地形信息,对曼宁糙率进行反推。这种方法能够根据实际的水流运动情况,更准确地确定曼宁糙率的值,从而为水流阻力的计算和分析提供可靠依据。

3.2 不同调度方案下水流阻力变化规律

水库调度方案的不同会对下游河道的水流过程产生显著影响,进而改变水流阻力的大小。为了深入研究这种影响,本研究通过数值模拟的方法,对不同水库调度方案下下游河道的水流过程进行了全面而细致的模拟分析。

当水库加大出库流量时,大量的水流迅速涌入下游河道,使得下游河道流速显著增大。快速流动的水流对河道床面和岸壁产生更加强烈的冲刷作用,这种冲刷会逐渐改变河道表面的粗糙程度,使得河道糙率逐渐减小。根据曼宁公式,在水流半径和水面比降相对稳定的情况下,糙率的减小会导致流速增大,同时也意味着水流阻力降低。例如,在某次模拟实验中,当水库出库流量从 50m³/s 增加到 100m³/s 时,下游河道的平均流速从 0.5m/s 提升至 1.0m/s,曼宁糙率从 0.035 减小至 0.030,通过计算可以得出水流阻力降低了约 14.3%。这一实例清晰地展示了水库加大出库流量时对水流阻力的影响规律。

相反,当水库减小出库流量时,下游河道的流速随之减小。流速的降低使得水流携带泥沙的能力减弱,泥沙淤积现象加剧。随着泥沙在河道内的逐渐堆积,河道表面变得更加粗糙,导致河道糙率增大。根据曼宁公式,糙率的增大使得水流阻力显著增大。在枯水期,这种情况尤为突出。若水库调度不合理,出库流量过小,如低于 30m³/s,河道内的水流速度会变得极为缓慢,泥沙大量淤积,河道糙率急剧增大,从而导致河道水流阻力急剧增大。这不仅会严重影响河道的正常输水能力,使得水资源的调配和输送受到阻碍,甚至可能引发河道断流等极端情况,对生态环境、农业灌溉、居民

生活用水等方面都将产生严重的负面影响。因此,合理的水库调度对于维持河道的正常水流状态、控制水流阻力以及保障水资源的合理利用具有至关重要的意义。

3.3 水流阻力变化对河道水动力及生态的影响

水流阻力的变化对河道的水动力条件和生态环境产生了多方面的深远影响。当水流阻力增大时,流速减小,泥沙容易在河道内淤积,导致河道逐渐萎缩,行洪能力大幅降低。据统计,在某些水流阻力增大明显的河段,河道行洪能力降低了约 20%~30%。同时,水流的挟沙能力和自净能力下降,使得河道内的污染物难以扩散和降解,严重影响河道生态系统的物质循环与能量流动,导致水质恶化,水生生物生存环境受到威胁。而水流阻力减小虽有利于行洪和污染物扩散,但过大的流速可能对河岸造成强烈冲刷,破坏河岸植被和生态环境,引发水土流失等问题。

4 水库调度运行对下游河道生态流量的影响评估

4.1 生态流量计算方法

本研究综合运用 Tennant 法、最小月平均流量法等多种方法,对澄碧河下游河道的生态流量进行精确计算。Tennant 法根据多年平均流量的百分比确定不同生态保护目标下的生态流量,如在一般生态保护目标下,取多年平均流量的 30% 作为生态流量;最小月平均流量法以历史最小月平均流量作为生态流量的参考值。经过综合分析多种方法的计算结果,确定澄碧河下游河道适宜的生态流量范围为 30~50m³/s。

4.2 不同调度方案下生态流量满足情况

通过对历史调度运行数据和数值模拟结果的详细分析,发现部分年份在枯水期水库调度无法满足下游河道的生态流量需求。特别是在干旱年份,如 2004 年、2010 年和 2016 年,为满足灌溉和供水需求,水库出库流量大幅减小,导致下游河道生态流量严重不足。在 2010 年的枯水期,水库出库流量最低降至 15m³/s,远低于生态流量下限,致使下游河道部分河段出现断流或干涸现象,对水生生物生存、河岸植被生长等造成了严重威胁。

4.3 生态流量不足对河道生态系统的影响

生态流量不足对河道生态系统的结构与功能造成了严重破坏。水生生物因栖息地丧失、水质恶化等面临严峻的生存危机,生物多样性急剧降低。据调查,在生态流量不足的河段,水生生物种类减少了约 30%~50%。河岸植被因缺水而枯萎,影响河岸稳定性,加剧水土流失,导致河道生态系统的自我调节能力大幅下降,易引发一系列生态环境问题,如河道水质恶化、水体富营养化等。

5 调控路径探讨

5.1 基于生态流量保障的水库优化调度模型构建

以保障下游河道生态流量为核心目标,兼顾防洪、灌溉、

发电等多方面需求,构建了水库优化调度模型。模型以水库出库流量为决策变量,以生态流量满足率、发电效益、灌溉供水量等为目标函数,充分考虑水库水位、库容、下游河道安全泄量等约束条件。采用遗传算法等先进的优化算法求解模型,通过多次模拟和优化,得到不同来水条件下的最优水库调度方案。在某一典型来水条件下,经过优化调度后,生态流量满足率从原来的 60% 提升至 90%,发电效益仅下降了 5%,同时灌溉供水量也得到了有效保障。

5.2 水库调度运行管理策略调整

制定科学合理的水库调度计划,明确不同时期的生态流量目标,并严格执行。在枯水期,优先保障生态流量,合理安排灌溉和发电用水,确保生态流量满足率达到 90% 以上。

加强水库与下游河道的联合监测与管理,建立实时监测系统,实时掌握河道水动力、生态流量等变化情况。根据实际监测数据,及时调整水库调度方案,确保河道生态环境的稳定。

建立生态补偿机制,对因水库调度导致的下游生态环境损失进行合理补偿。将补偿资金用于生态修复和保护项目,如河岸植被恢复、河道生态整治等,促进河道生态系统的恢复与重建。

5.3 工程措施与非工程措施结合

在下游河道合适位置建设生态补水工程,如引调水工程。从附近的右江通过泵站和输水管道,在水库无法满足生态流量时,为河道补充生态用水,确保生态流量的稳定供应。对河道进行生态整治,通过种植水生植物、设置生态护坡等措施,改善河道水动力条件,降低水流阻力,提高河道生态系统的稳定性。

加强水资源保护宣传教育,通过开展社区宣传活动、学校教育课程等多种形式,提高公众的水资源保护意识。制定相关法律法规,明确水库调度运行和水资源开发利用的规范和标准,加强执法监督,确保各项措施得到有效落实。

6 结论与展望

6.1 研究结论

澄碧河水库调度运行对下游河道水流阻力与生态流量产生了显著影响。不合理的调度会导致水流阻力增大,严重影响河道水动力和行洪能力;同时,生态流量无法得到有效保障,对河道生态系统健康造成了严重破坏。

通过长期的现场实测与高精度的数值模拟相结合的方法,定量评估了不同调度方案下水流阻力与生态流量的变化情况,为水库科学调度提供了翔实的数据支持和理论依据。

提出的基于生态流量保障的水库优化调度模型和调控路径,具有较强的针对性和可操作性,有助于实现水库调度的科学化、合理化,有效保障下游河道生态健康与水资源合理利用。

6.2 研究展望

未来研究可进一步深化对水库调度与河道生态系统耦合关系的认识，充分考虑气候变化、人类活动等多因素对水库调度和河道生态的综合影响。完善生态流量计算方法，结合不同生态系统功能需求，更加精准地确定生态流量。加强新技术在水库调度和河道生态监测中的应用，如无人机监测、卫星遥感技术、大数据分析等，提高研究的时效性和准确性，为区域水资源的可持续管理和生态环境保护提供更有力的支持。

参考文献：

[1] 万筱宇.考虑河流水文健康评估的梯级水库多目标优化调度决策研究[D].南宁:广西大学,2024.

[2] 汤佩玉.基于粒子群算法的澄碧河水库全运行周期优化调度研究[D].南宁:广西大学,2024.

[3] 包蒙香.考虑径流预报不确定性的澄碧河水库发电优化调度研究[D].南宁:广西大学,2024.

[4] 龙诗婷.澄碧河流域基流演变特征及其影响因素分析[D].南宁:广西大学,2023.