

水库水流运动规律的研究现状分析

刘江浩 吕新利 崔琳琳 马龙 高健

北方民族大学土木工程学院，宁夏 银川 750021

[摘要]水库属于水资源调控以及防洪管理范畴内的关键设施，其水流运动规律对于安全运行、生态环境还有泥沙输移等方面均会产生直接影响。本论文在对国内外的研究现状加以梳理之后，着重对水库水流运动的基本理论、研究方法以及各类影响因素展开分析，并且结合高精度数值模拟以及大数据技术的发展趋势，对未来的相关研究予以展望，以此为水库运行的优化以及生态调控给予理论方面的参考以及技术层面的支持。

[关键词]水库水流运动；水动力学；运动规律

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18061 中图分类号: TV145 文献标识码: A

Analysis of the Current Research Status of Reservoir Water Flow Movement Law

LIU Jianghao, LYU Xinli, CUI Linlin, MA Long, GAO Jian

School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia, 750021, China

Abstract: Reservoirs are key facilities within the scope of water resource regulation and flood control management, and their water flow patterns have a direct impact on safe operation, ecological environment, and sediment transport. After reviewing the current research status at home and abroad, this paper focuses on analyzing the basic theory, research methods, and various influencing factors of reservoir water flow movement. Combined with high-precision numerical simulation and the development trend of big data technology, it looks forward to future related research, providing theoretical references and technical support for optimizing reservoir operation and ecological regulation.

Keywords: reservoir water flow movement; hydrodynamics; movement law

引言

水库于水资源管理、防洪减灾以及生态保护等方面，均有着无可取代的重要作用。其水流运动规律的研究，一方面属于水力学理论当中的关键内容之一，另一方面也是开展水库安全管理以及实现科学调度所不可或缺的基础所在。水库的水流呈现出非均匀性、非正常性以及分层等明显特征，并且其具体的演变情况是受到库体自身的形态状况、流入水库的条件、所采取的调度策略以及环境方面的诸多因素等综合共同作用而产生的影响。随着水库的规模不断变得更为庞大，同时管理技术也在朝着智能化的方向持续发展进步，在此情形之下，以往的传统经验分析方式已然很难再充分满足针对复杂水动力现象展开精准预测以及有效控制的相关需求了。就国内外的众多学者而言，他们在水库的水动力特性方面、分层结构相关领域以及生态水力学这个范畴内，都收获了颇为丰富的研究成果。本文的主要目的就在于全面且细致地对水库水流运动规律的研究当前的实际状况予以系统的梳理，从而能够为水库的调控工作以及生态管理事宜给予科学层面的依据参考。

1 水库水流运动的基本理论

1.1 水流运动的流体力学基础

水运动学是水力学的一个组成部分，专注于从位移、速度、加速度等运动学物理量研究水流运动，不涉及作用

力分析。水流运动的基本方程是连续方程，即质量守恒原理在流体力学中的表达式。它体现了流体在运动进程里质量维持恒定这一基本属性。借助连续方程，研究者可剖析处在不同水体状况之下的流量分布情况、速度场的具体构造以及水流的演变经过，进而给理解并预测水库水流运动规律给予理论层面的依据。

1.2 水库水动力特性与运动规律

水库水流的动力特性会受到多种多样的因素的影响，其运动所呈现出的是复杂的三维流场结构以及非线性的演变规律。在水库内部，一般存在着较为明显的流速梯度，其中表层的水流速度是比较高的，然而底层的水流因为受到了摩擦以及阻力的作用，其水流速度就会显著地减弱下来，并且水流还会呈现出一定程度的旋涡、回流以及分层等特征。正是这些水动力特性确定了水库的输沙能力、水质扩散的规律以及温度分布的模式。水流运动的规律就表现为随着时间和空间的变化所形成的流量分布规律、分层流的演化情况以及涡旋结构的形成与消散过程。在不同规模的水库以及不同的操作条件之下，水流运动的规律会表现出明显的差异，比如说调节水位的蓄放策略会让库区水体的垂直混合程度以及流向发生改变，而入流量出现季节性的波动又会使水流呈现出周期性的变化趋势。近些年来，研究者们通过将现场观测与数值模拟相结合的方式来开展研究，从而揭示出水库水流在不同操作模式下动量传递、

能量耗散以及分层混合的规律,这为水库的运行管理以及生态水力学分析给予了重要的参考依据。

1.3 水库水流结构类型与分类

水库水流结构的复杂性主要源自库区几何形态、入流条件以及水动力环境之间的相互作用。依据流动特征来看,水库水流可划分成层流、湍流还有分层流等多种类型,其中分层流结构是比较典型的,其表层水体与底层水体在速度和温度方面有着明显的差异,进而形成了热或者密度梯度层。回流区以及旋涡区属于水库所特有的流动结构,常常会出现在库区入流口周边以及坝前区域,对于泥沙沉积、水质混合以及生态环境而言,有着重要的影响。除此之外,水库水流还能按照流向特征来分为主流区、缓流区以及死水区,不同区域的水动力特性存在着显著的差异,这就决定了水库水流运动的空间分布状况以及动力响应情况。通过针对水流结构类型展开分类研究,学者们可以更为精确地去描述水库水动力行为,同时也能够为数值模拟以及工程管理提供分区分析的相关基础。近些年来,将现场监测、数值模拟以及实验研究等方法综合起来运用,对于水库水流结构特征的认识也变得日益深入了,在分层流演化、涡旋形成以及回流区动力特性等方面更是取得了颇为重要的进展。

2 水库水流运动研究方法

2.1 现场观测与测量技术

现场观测乃是研究水库水流运动规律的一把基础利器,借助于对水位、流速、水温、水质等一系列参数展开连续不断的监测活动,便能够获取到水流所呈现出的真实动态方面的相关信息。传统意义上的现场观测涵盖了多种方式,像运用流速计来开展测量工作、使用 ADCP 声学多普勒流速剖面仪以及依托水位观测站等,这些不同的方法都能够较为准确地将水库在不同深度以及各个位置所具有的流动特性给记录下来。凭借着长时间的观测操作,研究者们得以揭示出水库水流所存在的季节性变化规律、分层流的相关现象以及流速的空间分布特点,进而为数值模型的验证事宜以及实验室模拟活动给予相应的数据方面的有力支撑。近些年来随着遥感技术以及水下传感器网络的不断进步,对于水库大尺度流场还有温度分布的监测工作也变得更为高效且更加精确了。综合起来对现场观测所得到的数据加以分析,就能够更为透彻地去理解水流的动力行为以及其给泥沙输移、水质扩散还有生态系统所带来的种种影响,从而为水库的科学管理以及调度工作提供一份可靠的依据。

2.2 数值模拟方法

数值模拟方法算得上是研究水库水流运动规律的一把重要利器。其借助数学模型以及计算机技术来针对水库内部那种复杂的流动状况展开预测与分析。因模拟精度以及计算资源方面存在差异,水库水流模拟一般会选用一维、

二维或者三维模型当中的某一种。一维模型可实现对水位变化以及流量分布的快速预测,它在大规模调度分析当中是比较适用的,然而却没办法将局部流场结构给反映出来。二维模型依靠对水平面速度场展开相关计算,能够描绘出平面流动所具有的那些特征,对于回流区、死水区这类复杂区域的分析而言是适用的。而三维模型则可以全方位地去模拟水库的垂直分层流、涡旋结构以及热盐分布情况,这在精细水动力学的研究当中有着极为重要的价值。数值模拟不但能够预测水流运动规律,而且还能够用来评估不同调度方案给库区水动力特性、水质分布以及泥沙沉积所带来的影响,进而为水库运行的优化给予科学层面的依据。随着计算能力一步步得以提升,并且高精度模型也开始得到应用,数值模拟在水库水动力学研究里所发挥的作用变得日益凸显,已然成为了理论分析同工程实践之间极为重要的一座桥梁。

3 水库水流运动的影响因素分析

3.1 水库形态对水流运动的影响

水库的几何形态属于影响水流运动规律的关键要素之一。就库区来讲,其长度、宽度、深度等维度,再加上水库岸坡的具体形态,这些全都直接左右着水流在空间当中的分布状况以及速度方面的特性表现。一般而言,狭长类型的水库往往呈现出较为明显的主流区以及缓流区,其中主流区的流速处于相对较高的状态,然而缓流区却比较容易滋生出旋涡,甚至会出现死水区的情况,如此一来便会对泥沙的沉积情况以及水质的分布格局产生影响。水库库容的大小以及分区的布置方式同样能够促使水流的垂直混合状态以及分层结构发生改变。像大型水库那样,因为其深度通常都比较大,所以表层水和底层水之间往往存在着颇为明显的速度方面的差异以及温度的梯度情况,进而就会形成一种相对稳定的分层流结构。水库底部要是存在凹凸不平的状况或者有浅滩区域的话,那么就极有可能引发局部出现回流现象以及涡旋的形成,这对于泥沙的沉积状况以及流场的演变进程都会产生颇为显著的影响作用。从整体上来看,水库的形态一方面会影响水流的速度以及流动的方向,另一方面还会给水库的水动力特性、水质的分布情况以及生态环境等方面带来较为深远的影响效果。所以说,在开展水库的设计工作以及后续的运行管理工作期间,务必要全面且细致地去考量形态因素对于水流运动所起到的调控作用。

3.2 水文条件(流量、季节性)影响

水文条件在很大程度上决定了水库水流运动规律,其中入流量的多少、季节性的变化以及径流的波动情况,均会对水流速度、流向还有水体混合状况带来不容忽视的影响。在汛期的时候,随着入流量不断增多,水库主流的流速也会相应加快,混合强度变得更强,甚至底层水还可能出现较为强烈的循环流动态势;而到了枯水期,流量逐渐

减少，水体流动速度也变得越来越慢，分层的现象变得更加突出，底层水的交换能力也随之下降。季节性温度的变化以及降雨模式的不同，还会导致水体出现密度方面的差异，进而形成热或者盐分梯度，最终改变水库的垂直流动以及分层特性。水文条件一方面会影响水动力学的相关特征，另一方面也与泥沙输移、水质演变以及水生态环境的稳定性有着直接的关联。通过对不同水文条件下水流响应规律展开分析，能够为水库蓄放调度以及生态管理给出科学合理的依据。

3.3 水库操作方式与调度策略影响

水库的操作方式以及调度策略，称得上是影响水流运动规律的关键人为要素。其中，蓄放水位的把控情况、闸门开启的具体方式以及调度所处的时间阶段，都有可能使水库内部的流场分布状况以及能量传递情形发生改变。连续放水这一策略和间歇放水这种策略，会致使水体的速度场以及旋涡结构呈现出较为明显的不同之处^[1]。并且，不一样的调度方案，还对分层混合的过程以及底层水的交换效率有所影响。在水库实际运行的这个过程当中，倘若能够做到合理的调度，那么一方面可以对水动力条件予以优化，另一方面也能够有效地对泥沙沉积情况以及水质分布状况加以控制，进而达成防洪、发电以及生态保护等诸多目标。相关研究已经表明，调度策略和水流运动二者之间存在着颇为复杂的非线性耦合关联，这就需要将数值模拟所得到的数据和现场观测所获取的数据相结合，展开科学层面的分析，以此来促使水库运行实现综合意义上的优化。

4 研究发展趋势与展望

4.1 高精度数值模拟与大数据技术融合

随着计算机技术以及水动力学模型不断发展，高精度数值模拟在水库水流运动研究当中所发挥的作用变得愈发显著。传统的数值模型受到计算能力以及网格精度的限制，很难完整地捕捉到水库复杂流场的三维结构以及非线性特征。近些年来，研究者通过引入高性能计算、大数据分析还有人工智能算法，便可以在更大的空间尺度以及更长的时间尺度上精准地模拟出水库内水流运动规律。大数据技术不但能够整合多种来源的监测数据，而且可针对历史流量、水位以及气象条件展开统计分析，从而给模型校准以及验证给予可靠的依据^[2]。数值模拟与大数据相互融合之后，水库水流运动的预测精度有了大幅度提升，并且还能够对不同调度策略以及极端水文条件下的流场变化实现高效分析，进而为水库运行优化、防洪调度以及生态

管理提供科学的决策支持。

4.2 水库生态水力学研究

近些年来，水库生态水力学已然变成水库水流研究的一个极为重要的方向，其关键之处就在于去探寻水流运动同生态系统之间的那种耦合关联。水流呈现出的分层情况、回流状况以及涡旋结构，一方面会对泥沙的输移以及水质的扩散产生影响，另一方面也给水生生物的栖息地、水温的分布还有溶解氧的状况带来了颇为重要的影响。生态水力学方面的研究着重于水流调控以及生态保护这两者协同起来进行优化，借助对不同水库操作方式给生态环境所造成的影响加以分析，就能够达成对水库功能的综合性管理了^[3]。尤其是在大型水库以及复杂的水系当中，水动力学特性跟生态系统状态彼此之间存在着相当复杂的非线性反馈机制，这就得依靠数值模拟、现场观测以及实验模拟等多种多样的手段来展开综合性的研究工作。朝着这个方向不断发展，对于构建水库生态管理模式是有帮助的，能够促使水资源利用、洪水防控以及生态保护实现平衡且协调的发展态势。

5 结语

水库水流运动规律的研究属于水库运行管理以及水动力学理论的关键部分，已经收获了颇为丰富的成果，然而依旧面临着不少的挑战。本文全面且细致地对水库水流运动的基本理论、研究方法还有影响因素加以整理归纳，并且还对其后续发展进行了展望，所涉及的方向包括高精度数值模拟、大数据技术的融合应用、生态水力学方面的研究以及智能调度等。在未来，伴随着监测技术以及计算能力的不断提升，水库水流运动规律的研究将会朝着更为精细化、智能化以及综合化的趋势去发展，这对于达成水库运行优化、生态保护以及资源可持续利用等多重目标是很有帮助的，同时也能够为水库工程管理给予科学的依据以及技术方面的有力支撑。

【参考文献】

- [1]王金洋,假冬冬,杨俊,等.受顶托作用的河道水流运动特征研究进展[J].水运工程,2025(2):101-109.
- [2]孙慧颖.运河大角度连续分汇流河道水流运动特性及其通航影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
- [3]张帅领,张春艳,江承阳,等.矩形狭缝裂隙水流运动特征数值模拟研究[J].地下水,2023,45(5):11-14.

作者简介：刘江浩（2005.5—），男，毕业院校：北方民族大学，所学专业：水利水电工程专业。