

定涵盖洪水、干旱、污染、设备故障等多场景应急预案，依托智能调度平台，构建洪旱预警、实时监控、自动报警、风险评估与决策联动的多层防控体系。当触发风险阈值时，系统可自动推送信息并联动调度措施，最大限度减少损失。同时，应强化上下游管理部门、应急指挥与用水单位的协同响应，提升整体应急能力。通过定期演练、动态修订与复盘，持续完善风险管理机制，增强体系韧性与适应性。实践证明，成熟的预警响应机制能有效降低极端事件冲击，是水库群安全高效运行的重要保障。

#### 4.3 多方参与与利益协调运行机制

水库群联合调度涉及防洪、供水、发电、生态、航运等多元主体，利益诉求复杂。建立多方参与、利益协调的运行机制，是实现调度科学性与公平性的基础。应完善流域管理委员会、跨部门联席会议、用水户代表参与等多元共治平台，推动上下游水库、地方政府、用户单位、社会公众等主体的信息公开与利益协商。引入市场机制和激励约束，推进用水权交易、生态补偿、风险分担等制度创新，协调各方关系、优化资源配置。典型流域如黄河流域、珠江流域已初步建立跨区域联合调度与利益补偿机制，实现了多目标多主体的共赢。多方参与机制不仅提升了调度的透明度和执行力，还增强了流域治理的社会基础和公共信任，是推动水库群调度高效有序运行的重要保障。

### 5 上下游两段式水库群调度的创新发展与未来展望

#### 5.1 智能化、数字化调度技术的深化应用

随着数字经济和人工智能技术的快速发展，水库群联合调度正向更加智能、精细、动态的方向演进。基于大数据驱动的调度模型，可自动识别水库运行规律和优化策略，提升调度决策的科学性和自主性。数字孪生流域、虚拟现实模拟等新型手段，将进一步增强调度方案的可视化和交互性。未来智慧流域、水库群智能体等概念有望落地，实现水资源配置的自动感知、智能分析与精准调控，为上下游两段式水库群调度带来革命性提升。

#### 5.2 生态文明背景下的流域协同治理

水库群联合调度不仅是技术优化和管理创新，更是流域生态文明建设的重要组成。推进上下游、左右岸、干支流

一体化治理，强化跨区域、跨行业、跨部门的政策协同，完善流域生态补偿、用水权转让等市场机制，提升流域综合治理能力。多源信息共享、公众参与、社会监督等机制将进一步完善，形成共建共治共享的现代流域治理新格局。上下游两段式水库群调度将在生态保护、绿色转型、社会公正等领域实现更大突破。

#### 5.3 体制机制创新与法规保障完善

水库群联合调度的高质量发展离不开体制机制的创新和法规体系的健全。未来需进一步完善流域管理法制建设，明晰上下游水库权责、利益分配和调度规则。推动流域“行政+市场+社会”多元共治，创新利益协调与风险补偿机制，强化调度合规性、问责性和可追溯性。建立健全绩效考核、激励约束、第三方评估等管理机制，提升流域水库群运行的规范化和透明度。通过不断完善法律法规和政策支持，为上下游两段式水库群联合调度的科学化、精细化、法治化运营提供坚强保障。

### 6 结语

上下游两段式水库群联合调度作为提升流域水资源优化配置和运行保障能力的关键模式，兼顾了防洪安全、供水保障、生态修复和社会经济协调发展等多重目标。本文系统梳理了其理论基础、发展格局与典型实践，构建了多目标优化配置模型，探讨了调度运行的支撑技术与管理机制，并针对未来智能化、生态化、法治化发展提出了创新展望。研究表明，依托上下游协调、信息共享、风险预警、利益平衡等多元机制，能够有效提升水库群整体调蓄能力和调度效益，促进流域水资源的可持续利用。展望未来，随着科技进步与治理理念升级，上下游两段式水库群联合调度将在智慧流域、生态文明、体制创新等领域持续拓展，为中国水资源治理体系和流域可持续发展注入强劲动力。

#### 参考文献

- [1] 杨辉辉,李媛媛,黄锋,等.面向多区域防洪的珠江流域水库群协同调度模型研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(10):27-34.
- [2] 刘园,刘珍珠,鲍正风,等.考虑潮流限值的水库群联合发电调度研究[J/OL].中国农村水利水电,1-12[2025-09-07].
- [3] 童宏福,吴旭树,王兆礼,等.北江流域梯级水库群联合蓄水调度[J].广东水利水电,2025,(01):1-6.

# Study on simulation and optimal scheduling of reservoir water temperature structure in arid northwest China

Zhiyang Guo

Xinjiang Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

As critical projects for water resource regulation and ecological security, reservoirs in the arid regions of Northwest China exhibit water temperature structures that directly influence their ecological effects and water supply functions. Constrained by high temperatures, significant evaporation, scarce precipitation, and pronounced diurnal temperature variations, these reservoirs are prone to marked thermal stratification. This phenomenon enhances vertical temperature gradients, thereby affecting the distribution of dissolved oxygen and biological habitats. In recent years, with increasing regional water scarcity and growing demands for ecological protection, the simulation of water temperature structures and optimized operation strategies have become key research priorities. Using coupled hydrodynamic and thermodynamic models, the formation mechanisms and evolution patterns of thermal stratification in reservoirs can be accurately characterized, providing data support for the scientific design of operational strategies. Building on this, feasible optimized operation schemes that integrate multiple objectives—such as selective water withdrawal, ecological water demand guarantees, and responses to extreme climate events—are proposed. These schemes aim to ensure both the safety of water supply for downstream production and domestic use, and the protection of the ecological environment, thereby offering theoretical guidance and practical pathways for the sustainable operation of reservoirs in arid regions.

## Keywords

arid regions of Northwest China; reservoirs; water temperature structure; numerical simulation; optimized operation

## 西北干旱区水库水温结构模拟与优化调度研究

郭志阳

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘要

西北干旱区水库作为重要的水资源调控与生态保障工程,其水温结构特征直接影响水库的生态效应与供水功能。干旱区受高温蒸发、降水稀少及昼夜温差显著等因素制约,水库内部容易形成显著的热分层现象,导致水体垂向温度梯度增强,进而影响溶解氧分布及生物栖息环境。近年来,随着区域性水资源紧张和生态保护需求的提升,水温结构模拟与优化调度逐渐成为研究重点。通过水动力与热力学耦合模型,可以对库区水温分层的形成机理和演变规律进行精准刻画,为调度方式的科学设计提供数据支撑。在此基础上,结合分层取水、生态需水保障和极端气候响应等多元目标,提出可行的优化调度方案,既满足下游生产生活用水安全,又兼顾生态环境保护,从而为干旱区水库的可持续运行提供理论指导与实践路径。

## 关键词

西北干旱区; 水库; 水温结构; 数值模拟; 优化调度

## 1 引言

西北干旱区的生态环境脆弱,水资源承载力有限,而水库作为调节径流与缓解干旱的关键工程,在区域水资源管理中发挥着不可替代的作用。水温作为水环境的核心物理因子之一,不仅反映了库区水体能量交换的动态过程,也对水质演变和生态系统稳定性产生深远影响。受干旱区特殊气候与复杂地形的共同作用,水库水温常表现出明显的季节性分层特征,这种热力结构在改善供水能力的同时,也可能带来

溶解氧不足、藻类繁殖和生态退化等潜在风险。随着区域经济发展和用水需求增加,单纯依赖传统水库运行模式已难以兼顾供水、发电与生态的多重目标。

## 2 西北干旱区水库水温结构的基本特征

### 2.1 干旱区水文气候条件对水温分层的影响

西北干旱区气候干燥,年均降水量不足 200 毫米,蒸发量普遍超过 2000 毫米,强烈的辐射能使水库表层水体迅速升温。昼夜温差常常超过 15 摄氏度,导致表层水体与深层水体之间形成明显的温度梯度。长时间高温与低降水输入共同作用,促使水库水体垂向分层稳定,表层水温在夏季可达 25 摄氏度以上,而底层常维持在 10 摄氏度左右。风力较

【作者简介】郭志阳(1995-),男,中国新疆乌鲁木齐人,本科,从事水利工程环境影响评价、环保设计研究。

弱或库区地形封闭条件下,扰动不足以打破温跃层的稳定,进一步加剧了热分层效应。干旱区独特的气候条件决定了水温分层具有持续性与显著性特征,并深刻影响了库区溶解氧分布、水体交换及生态系统的动态平衡。

## 2.2 不同季节水温时空变化规律分析

西北干旱区水库的水温在春季逐渐升高,表层与底层温差开始拉大,温跃层逐步形成并趋于稳定。夏季太阳辐射强烈,表层水温升至28摄氏度,深层则保持在12摄氏度左右,形成厚度约5米的稳定温跃层。秋季冷空气入侵,气温骤降,表层水体迅速冷却,温跃层逐渐减弱并下沉,最终被风应力扰动打破,水体呈现垂向混合。冬季气温低于零度,表层可能出现冰封,水库水温趋于垂向均一,维持在4摄氏度上下。空间分布上,近坝深水区分层更为显著,上游浅水区受径流补给影响,水温变化幅度较大。季节性变化规律决定了水库在不同时段对生态和供水安全的不同影响。

## 3 西北干旱区水库水温结构的数值模拟方法

### 3.1 水动力与热力耦合模型的构建思路

数值模拟需要在水动力学与热力学相结合的基础上进行。采用二维或三维水动力模型结合热传输方程,可以描述水体温度在空间与时间上的变化。通过纳维-斯托克斯方程和能量守恒方程的耦合,模型能够反映流速分布与热量扩散的相互作用。在库区尺度,需考虑网格划分精度,通常在水平10米、垂向1米的分辨率下能够保证计算结果的稳定性。耦合模型运行时长设置为365天,时间步长在30秒以内,以捕捉水温细节变化。模拟结果可清晰呈现温跃层形成、稳定与消亡过程,并为调度优化提供基础支撑。

### 3.2 模拟边界条件与参数敏感性分析

模型运行需要输入流量、气温、风速、太阳辐射等边界条件,其中流量控制精度可达0.01立方米每秒,气温和辐射数据以逐小时分辨率输入。参数敏感性分析显示,太阳辐射强度对表层水温的贡献率超过60%,风速变化对温跃层稳定性的影响率在25%左右。底层热传导系数的变化也会显著改变温跃层厚度,敏感性系数约为0.15。通过对比不同参数扰动下的模拟结果,可以识别关键因子并优化模型输入,提高模拟的可靠性。边界条件与参数的合理设置直接决定了模拟的准确性与应用价值。

## 4 西北干旱区水库水温结构对生态环境的影响

### 4.1 水温分层对溶解氧分布的制约机制

水温分层导致上下水体热量交换受阻,溶解氧在垂向分布上呈现明显差异。表层水温升高促进光合作用,氧气浓度常维持在8毫克每升以上,而深层因光照不足和有机物分解作用,溶解氧浓度常下降至2毫克每升以下。温跃层的存在抑制了垂向对流,使得深层缺氧现象长期维持,进而诱发还原性环境的形成。此类环境条件可能导致铁、锰等元素释放,对水质稳定性造成不利影响。缺氧状态还会削弱水体自

净功能,增加底泥内营养盐再悬浮风险,形成对生态系统的压力。溶解氧分布受水温分层的直接制约,是影响库区水生生物多样性与水质演变的重要因素。

### 4.2 水温变化对鱼类与浮游生物的影响路径

鱼类对水温敏感,不同种类适宜生长的水温区间差异明显。水温分层形成后,表层高温可能超过部分冷水性鱼类的耐受极限,而底层缺氧环境又限制其生存空间,导致鱼类栖息区收缩。浮游生物群落结构也受到水温调控,温度升高会加速浮游植物繁殖,使叶绿素浓度显著增加,进而可能引发藻类水华。浮游动物则因食物结构改变和溶解氧不足而数量下降,群落多样性指数降低。水温变化通过直接作用于代谢速率和间接改变食物链结构,影响整个生态系统的稳定性与功能性。过高或过低的水温均可能破坏生态平衡,使得水体环境呈现波动性甚至退化趋势。

### 4.3 库区水温结构对下游水环境的连锁效应

水库运行中若采用单一深层放水,排水水温常低于下游河道自然状态5至10摄氏度,导致水生生物生境突变,抑制下游鱼类繁殖与水生植被恢复。反之,若大量排放表层高温水体,可能使下游水温超出生态阈值,引发生态胁迫。温度异常还会改变下游水体溶解氧分布,使生物多样性受损。长期运行中,这种连锁效应可能改变下游水生态系统的结构与功能,引发营养盐累积、藻类暴发及河流生态退化。水库温度结构与下游环境存在紧密耦合关系,调度方式的不合理选择会在跨区域范围内放大影响,进而影响水资源的综合利用与区域生态安全。

## 5 西北干旱区水库水温结构优化调度策略

### 5.1 分层取水与水温调控技术途径

分层取水技术通过在不同深度布设进水口,灵活调节出库水温,使其更接近自然水文条件。深层水体温度低,含氧量不足,而表层水体温度过高,因此利用可调高度的取水设施将两者按比例混合,能有效改善下游水温与溶解氧水平。部分水库安装了多层取水塔,可在5米至25米水深范围内自由选择出水口位置,满足季节性调控需求。水温调控还可结合生态调度,通过在特定时段改变取水层位,保障下游鱼类繁殖和水生植被生长环境。该技术途径不仅提高水库运行的灵活性,还能在不影响供水安全的前提下兼顾生态需求,为干旱区水库长期稳定运行提供了可行方案。

### 5.2 调度方式对生态需水与供水安全的协调

水库调度需要在满足人类用水需求与维持生态系统稳定之间取得平衡。通过设置分期分区的调度规则,可以在汛期确保防洪和生态补水,在枯水期保证生活与农业灌溉。研究表明,当生态流量维持在下游多年平均径流的40%至60%时,能够有效支撑河道生境功能,同时不会显著影响供水总量。调度方式的优化应将水温结构纳入参数体系,在供水过程中避免过度抽取深层低温缺氧水体或长时间排