

智慧水利背景下信息化技术在区域水资源优化配置中的应用研究

马小云

新疆维吾尔自治区塔里木河流域喀什噶尔河水利管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6875

[摘要] 智慧水利是推动水资源管理现代化的核心理念,水利信息化技术是实现这一理念的工具支撑,而区域水资源优化配置则是理念与技术共同作用的目标场域。本文聚焦于喀什噶尔河流域,针对其作为典型干旱区内陆河流域所面临的水资源供需矛盾尖锐、配置效率低下等问题,探讨了信息化技术在水资源优化配置中的应用。文章分析了该流域水资源配置的传统困境,阐述了物联网、数字孪生、智能算法等技术在提升水资源感知、模拟与调控能力中的作用机理,并构建了涵盖来水预报-需水预测-优化决策-精准调控全过程的智慧配置框架。

[关键词] 智慧水利; 水资源优化配置; 信息化技术; 喀什噶尔河流域; 数字孪生

中图分类号: TV 文献标识码: A

Application of Information Technologies in Regional Water Resources Optimized Allocation under the Background of Smart Water Conservancy

Xiaoyun Ma

Kashgar River Water Management Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] Smart water conservancy is a key pathway to promoting the modernization of water resources management. This paper focuses on the Kashgar River Basin, addressing the acute contradictions between water supply and demand and the low efficiency of water allocation in this typical arid inland river basin in China. It explores the application of information technologies in the optimized allocation of water resources. The paper analyzes the traditional challenges in water resources allocation within the basin, elaborates on the mechanisms by which technologies such as the Internet of Things, digital twins, and intelligent algorithms enhance the capabilities of water resources perception, simulation, and regulation, and constructs a smart allocation framework encompassing the entire process of inflow forecasting, demand prediction, optimization decision-making, and precise regulation.

[Key words] Smart Water Conservancy; Optimized Allocation of Water Resources; Information Technologies; Kashgar River Basin; Digital Twin

引言

水资源是干旱区绿洲经济社会发展和生态安全的核心制约因素。在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,区域水资源系统的不确定性和脆弱性日益凸显。传统的以水利工程为基础的水资源配置模式,受限于信息感知能力弱、决策响应速度慢,已难以满足新时期水资源刚性约束和高质量发展的要求。智慧水利作为现代信息技术与传统水利深度融合的产物,通过透彻感知、全面互联、深度挖掘和智能应用,为解决复杂水资源系统问题提供了全新范式。它旨在打通“数据-信息-知识-决策”的转化链条,实现从被动应对向主动预知、从经验调度向科学配置的转变。新疆喀什噶尔河流域位于塔里木盆地西缘,是典型的干旱区内陆河流域。该区域光热资源丰富,但降水稀少,水资源极度

匮乏,经济社会发展用水与河道内生态用水矛盾突出。如何利用信息化手段,在摸清“水家底”的基础上,实现水资源的时空调控与优化配置,已成为该区域可持续发展的迫切需求。

1 智慧水利与信息化技术概述

智慧水利是以自然与社会水循环理论为基础,运用物联网、大数据、人工智能等现代信息技术,对水利对象进行透彻感知与智能应用,构建具有预报、预警、预演、预案功能的智慧化管理体系,推动水利管理从被动应对转向主动预知、从经验决策转向科学决策。水利信息化技术是实现这一理念的工具支撑,包括感知层的遥感与自动传感、传输层的5G与北斗通信、处理层的云计算与水文模型、应用层的数字孪生与调度系统,为数据采集、传输分析和业务应用提供可行手段。区域水资源优化配置则是

目标层的具体体现,指在一定区域内运用系统方法对多水源在生活、生产、生态用水间进行时空分配,实现综合效益最大化。三者构成“理念—工具—目标”的逻辑关联:智慧水利为水资源管理提供顶层设计,推动配置从“以需定供”转向“以供定需”;信息化技术为实现透彻感知与智能决策提供支撑,使优化配置从理论走向实践;区域水资源优化配置则是智慧水利“四预”能力与信息化技术应用的核心场域,牵引技术服务于科学配水的最终目标。因此,智慧水利背景下信息化技术的应用,实质是以先进理念为引领,运用现代信息技术破解区域配水难题,实现从“经验配水”向“智慧配水”的根本转变。

2 喀什噶尔河流域水资源配置问题剖析

喀什噶尔河流域位于新疆西南部,由克孜河、盖孜河等多条河流组成,属冰川融水和降雨混合补给型内陆河,多年平均径流量46.1亿立方米,但70%以上集中在夏季,时空分布极不均匀。流域内分布着喀什市等重要人口经济区,是典型的绿洲农业区。随着灌区规模扩大和经济用水增长,流域水资源配置面临严峻挑战:一方面,水资源开发利用率高导致供需矛盾尖锐,干旱年份农业灌溉挤占河道生态基流,造成下游河段断流、地下水位下降和天然植被退化,生态用水被严重挤占;另一方面,由于水文监测站点密度不足,灌区内部斗农渠系、土壤墒情及地下水动态等关键信息缺乏有效感知,无法支撑精准配置决策。同时,配水计划仍依赖历史经验和行政协调,缺乏对实时来水、作物需水的动态响应,渠系闸门人工控制导致指令执行滞后,上游大水漫灌与下游无水可用的现象并存。此外,水利、气象、农业等部门数据分散管理、标准不一,难以实现多源信息融合与协同决策。这些问题相互交织,使得流域水资源配置陷入“数据支撑不足—决策粗放—生态恶化”的恶性循环,亟待引入智慧化手段破解困局。

3 智慧水利技术体系及其在水资源配置中的作用机理

针对上述问题,智慧水利通过构建“感知—传输—处理—应用”四位一体的技术体系,为破解喀什噶尔河流域水资源配置困境提供了系统化解决方案。

3.1 透彻感知:构建天地空立体监测网络

感知是智慧水利的基石。针对喀什噶尔河流域上游山区面积大、海拔高、人迹罕至,平原灌区范围广、用水户分散的特点,需要构建“天—空—地—水”一体化的立体监测网络。具体来讲:(1)卫星遥感层面,利用多光谱、高光谱遥感影像,动态监测流域上游积雪面积、冰川消融状况、植被覆盖度以及灌区作物种植结构和长势。这对于以冰雪融水为主要补给来源的喀什噶尔河上游来水预测尤为关键。有学者利用MODIS积雪产品对塔里木河流域包括喀什噶尔河源区的积雪变化进行监测,为融雪径流模拟提供了数据支撑。(2)无人机层面,在重点河段、重要水利工程周边及典型灌区,利用无人机搭载热红外传感器或激光雷达,弥补卫星遥感受天气影响、重访周期长的不足,实现对渠道渗漏、作物缺水胁迫、非法取水的精细化巡查。(3)地面监测层面,

加密布设自动气象站、雷达水位计、超声波流量计、自动墒情站和地下水自动监测井。特别是在喀什噶尔河灌区内部,需在干支斗渠各级分水口建立计量设施,形成从水源到田间的全过程计量体系,彻底改变“管住干渠、管不住斗农渠”的局面。

3.2 数字孪生:构建流域镜像与模拟推演平台

数字孪生是智慧水利的核心。其基本思想是在数字空间构建与物理流域实时同步、虚实映射的高保真模型,实现对水资源配置过程的模拟、验证和预测。首先,构建几何模型。利用高精度DEM数据和无人机倾斜摄影,构建喀什噶尔河流域三维地形、河网水系、渠系工程、水库大坝的数字化模型。对卡拉贝利水库、布仑口水库等关键控制性工程进行1:1精细化建模,准确模拟其库容曲线和泄流能力。其次,耦合机理模型。将水文模型、水动力模型、水量调度模型与几何模型深度融合。例如,在数字孪生平台中耦合融雪径流模型(如SRM模型),利用实时遥感积雪数据和气象预报数据,滚动预报喀什噶尔河各支流的来水过程;耦合灌区需水模型,结合作物种植结构和实时墒情,动态预测各灌片未来7-15天的需水过程。再次,开展情景模拟。依托数字孪生平台,可开展多种情景下的水资源配置方案模拟与比选。例如,模拟在平水年、枯水年、特枯年等不同来水条件下,采用不同配水策略时,各灌区的缺水程度、河道生态流量的满足程度以及地下水的补给排泄情况,从而选择最优配置方案。

3.3 智能决策:基于多目标优化的配置算法

水资源优化配置本质上是一个多目标、多约束、非线性的复杂决策问题。智慧水利通过引入人工智能算法,提升决策的科学性与时效性。(1)在需水预测方面,传统的基于定额的需水预测方法难以反映气象波动和作物生长的实时变化。可利用长短期记忆神经网络(LSTM)、支持向量机(SVM)等机器学习算法,以历史气象、墒情、遥感植被指数为输入,以实际灌溉引水量为输出,训练建立数据驱动的需水预测模型,实现更高精度的短期需水预报。(2)在配置决策方面,需要建立兼顾经济、社会、生态效益的多目标优化模型。经济目标通常表现为灌溉增产效益最大或供水损失最小,社会目标表现为区域间供水公平性最高,生态目标表现为河道内生态流量满足程度最高或地下水位降幅最小。可采用多目标遗传算法(NSGA-II)等智能优化算法,求解Pareto最优解集,为决策者提供多种权衡方案供其结合实际情况选择。

4 信息化技术在喀什噶尔河流域水资源配置中的应用路径

基于上述技术体系与作用机理,本节构建适用于喀什噶尔河流域实际情况的智慧水资源配置应用路径,涵盖“来水预报—需水预测—优化决策—精准调控”四个紧密衔接的环节。

4.1 基于多源数据融合的来水与需水预报

精准的来水预报和需水预测是优化配置的前提。在喀什噶尔河流域,需重点解决上游山区融雪径流预报和灌区需水预测两个关键问题。(1)上游融雪径流预报。针对流域上游高山区,融合气象部门的中短期降雨预报数据、卫星遥感获取的积雪覆

盖面积和雪水当量数据,以及布设在高山区的自动气象站实测数据,驱动融雪径流模型,滚动预报未来7天、15天、30天进入平原水库和渠首的径流过程。这改变了以往仅依靠历史同期均值估算来水的粗放模式,使来水预报具备了动态响应气象变化的能力。(2)灌区需水预测。针对平原灌区,利用高分辨率遥感影像提取当年度作物种植结构图,识别棉花、小麦、玉米、林果等主要作物的种植面积和空间分布。结合作物生育期模型,利用分布在灌区的自动气象站实时气象数据和自动墒情站实测土壤水分数据,采用作物系数法或遥感蒸散发模型,逐日计算各作物地块的实际需水量,进而汇总得到各灌片、各渠系的需水过程线。

4.2 基于优化算法的水量配置方案生成

在获取来水预报和需水预报的基础上,进入配置决策环节。建立喀什噶尔河流域水资源优化配置模型,模型的决策变量为各水库的下泄流量过程、各干渠分水口的配水流量过程。(1)模型约束条件包括。水库水量平衡约束、渠道过流能力约束、用户最小需水满足度约束、河道最小生态流量约束、地下水开采总量控制约束等。其中,生态流量约束是喀什噶尔流域需要特别重视的环节。根据相关研究,克孜河、盖孜河等主要河流下游需保障一定的生态基流,以维持河谷林草植被的健康。模型中将河道生态流量作为硬约束或高权重目标加以考虑。(2)模型目标函数。综合考虑多个目标。一是各灌区综合缺水率最小(社会公平目标);二是全流域供水经济效益最大(经济目标);三是主要控制断面生态流量保证率最高(生态目标)。采用多目标进化算法求解,得到一组Pareto非劣解,每个解对应一种配水方案及其在不同目标上的表现值。决策者可根据当年干旱程度、作物关键需水期等因素,权衡选择最终实施方案。

4.3 基于远程控制的闸泵群精准调控

决策方案确定后,需要快速、准确地转化为物理世界的操作指令。这有赖于对流域内骨干渠系及关键控制性工程的自动化改造。在喀什噶尔河流域,可对卡拉贝利水库泄洪闸、各干渠渠首进水闸、跨区域分水闸以及重要的节制闸进行自动化升级。在每个闸站部署现地控制单元(RTU/PLC),集成闸位计、荷重传感器、视频监控和远程通信模块。调度中心根据优化配置方案,自动生成各闸门的开启高度和调控时段,指令通过光纤或4G/5G网络下发至现地控制单元,自动调整闸门开度,实现闸门远程控制。同时,在每个分水口下游安装超声波或雷达流量计,实时监测实际过流量并反馈至调度中心,与设定流量进行比对。当出现偏差时,系统自动进行闭环调节,修正闸门开度,确保配水精度。例如,在春灌高峰期,系统可根据下游疏附县、疏勒县不

同作物的需水紧迫程度,动态调整上游盖孜河各分水闸的流量分配比例,优先保障处于需水临界期的作物灌溉。

4.4 用水总量动态监控与预警

落实最严格水资源管理制度中用水总量控制的要求,需要信息化手段提供技术支撑。在喀什噶尔河流域,可构建覆盖所有取水口的在线监控体系。所有农业斗口、工业取水口、城镇供水水厂的取水量数据实时接入流域水资源管理平台。系统为每个行政区域、每个灌区、每个重点用水户设定年度、月度的取用水量控制指标,并进行动态累计。当某区域累计取水量达到预警阈值(如年度指标的80%或90%)时,系统自动向管理者和用水户发送预警信息,提示加强节水。当累计取水量达到红线指标时,系统可自动生成指令,经确认后远程关闭该区域的总进水闸,实现刚性约束。这一机制将“红线指标”从纸面落到了实处,为用水总量控制提供了可靠抓手。

5 结束语

智慧水利背景下,信息化技术的深度应用为解决喀什噶尔河流域水资源供需矛盾突出、配置效率低下等问题提供了新路径。本文研究表明,通过构建“透彻感知-数字孪生-智能决策-精准调控”的技术框架,能够有效提升该流域水资源管理的精细化水平和动态响应能力。具体而言,卫星遥感与地面监测的融合应用,为摸清上游融雪过程和灌区需水规律提供了数据基础;数字孪生平台支持了多情景下的水资源配置方案模拟与比选;多目标智能优化算法兼顾了经济、社会、生态多重目标的权衡;远程自动控制技术实现了从决策到执行的快速闭环。这些技术的综合应用,有助于实现喀什噶尔河流域水资源的时空优化配置,保障经济社会发展用水与河道内生态用水的均衡。未来,随着监测手段的进一步丰富、模型的持续优化以及复合型人才的培养,信息化技术将在喀什噶尔河流域乃至整个西北干旱区的水资源可持续利用中发挥更为关键的作用。

[参考文献]

- [1]陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河流域气候变化与水资源应急调配研究[J].干旱区地理,2020,43(03):569-576.
- [2]艾克热木·吾布力,玉米提·哈力克,塔依尔·艾山.喀什噶尔河流域平原区地下水埋深变化及对天然植被的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32(04):115-121.
- [3]刘蛟,陈曦,包安明,等.基于MODIS积雪数据的塔里木河流域融雪径流模拟[J].干旱区地理,2015,38(01):29-37.

作者简介:

马小云(1990--),女,汉族,甘肃民乐县人,大学本科,工程师,研究方向为水资源管理与调度、河长制工作及水行政执法。