

基于大数据分析的水文水资源演变规律研究

王淑娟

新疆维吾尔自治区博尔塔拉水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6786

[摘要] 全球气候变化与高强度人类活动双重胁迫下,区域水文水资源系统呈现显著的非平稳性与复杂性特征,传统研究方法面临瓶颈。本文聚焦博尔塔拉蒙古自治州(下文简称“博州”),探讨大数据分析在该区域水文水资源演变规律研究中的应用范式与实现路径。研究表明,通过融合遥感、物联网、社会感知等多维度数据,并运用机器学习、数据同化等先进算法,能够突破博州地面观测稀缺的局限,精细刻画其降水-径流关系演变、地下水动态响应及艾比湖生态水文关联,为干旱区内陆河流域的水资源自适应管理提供从“感知”到“决策”的全链条技术支持。

[关键词] 大数据分析; 水文水资源; 演变规律; 博尔塔拉蒙古自治州; 机器学习

中图分类号: C37 文献标识码: A

Research on the Evolution Patterns of Hydrological and Water Resources Based on Big Data Analysis

Shujuan Wang

Bortala Hydrological Survey Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] Under the dual stressors of global climate change and intensive human activities, regional hydrological and water resources systems exhibit significant non-stationary and complex characteristics, posing challenges to traditional research methods. This paper focuses on the Bortala Mongolian Autonomous Prefecture of Xinjiang (hereinafter referred to as "Bortala Prefecture") to explore the application paradigm and implementation pathways of big data analysis technology in studying the evolution patterns of hydrological and water resources in this region. Research indicates that by integrating multi-dimensional data such as remote sensing, Internet of Things (IoT), and social sensing, and employing advanced algorithms like machine learning and data assimilation, it is possible to overcome the limitations of scarce ground observations in Bortala Prefecture. This approach enables the detailed characterization of the evolution of precipitation-runoff relationships, dynamic responses of groundwater, and eco-hydrological linkages of Ebinur Lake. Consequently, it provides comprehensive technical support spanning from "perception" to "decision-making" for the adaptive management of water resources in arid inland river basins.

[Key words] Big Data Analysis; Hydrological and Water Resources; Evolution Patterns; Bortala Mongolian Autonomous Prefecture; Machine Learning

前言

水文水资源演变规律是流域规划、生态保护与水资源可持续利用的科学基石。在气候变化背景下,传统基于物理机制与统计假设的研究方法,在揭示高强度人类干扰下系统的非线性、非平稳性响应时,常显乏力。尤其对于新疆博尔塔拉蒙古自治州这类生态脆弱、数据相对匮乏的干旱区内陆河流域,其水文过程受冰川融雪、农业灌溉、生态输水等多因素交织影响,演变机制更为复杂,亟需新的方法论支持。大数据时代的到来为水文水资源研究提供了革命性工具。

1 研究背景

近年来,大数据技术的迅猛发展为包括水科学在内的多个领域带来了范式变革。大数据分析不仅意味着处理海量(Volume)、多样(Variety)、快速(Velocity)且价值密度低(Value)的数据,更代表了一种从数据驱动发现知识、揭示复杂关联与预测未来趋势的能力。在水文水资源领域,遥感影像、气象再分析资料、物联网传感器数据、社交媒体信息、社会经济统计资料等多源异构数据的爆炸性增长,为从更宏观、更精细、更多维的视角理解水文过程与水资源动态提供了前所未有的数据基础。

博尔塔拉蒙古自治州地处新疆西北部,属于典型的温带大陆性干旱气候,水资源主要由山区降水和冰川融雪补给,形成以博尔塔拉河、精河等为核心的内陆水系,最终归宿于艾比湖。该区域是新疆重要的农牧业区和生态屏障,其水资源演变直接关系到区域可持续发展与国家生态安全战略。已有研究利用传统方法对博州水资源供需、河流径流变化、艾比湖湖面变迁等进行了有益探索,但多侧重于单一要素或特定时段的分析,缺乏从系统整体性、动态连续性角度,融合多源大数据对水文水资源全要素、全过程演变规律的深度挖掘。因此,本文旨在系统论述大数据分析技术应用于区域水文水资源演变规律研究的理论框架与方法体系,并以博尔塔拉蒙古自治州为实证区域,探讨如何利用该技术揭示其在水文循环、水资源配置、水环境响应等方面的演变特征与驱动机制,以期为提升干旱区水资源精准管理与适应能力提供新的理论依据与技术路径。

2 大数据分析与水文水资源研究的耦合性

2.1 大数据分析

大数据分析并非单一技术,而是一个涵盖数据全生命周期管理的综合技术体系与分析方法论。其核心在于从规模巨大、来源复杂、类型多样的数据集中,通过先进的计算技术和算法模型,提取有价值的信息、发现隐藏的模式、预测未来趋势并支持优化决策。在水文水资源领域,其内涵具体体现在以下三个方面。

2.1.1 数据源的极大拓展与融合

突破传统站点观测的局限,整合包括:空天地一体化感知数据,如气象卫星(风云系列、MODIS)提供的降水、蒸散发、地表温度、植被指数产品;水文卫星(GRACE)提供的陆地水储量变化;无人机高光谱影像;以及日益密集的自动气象站、水文站、地下水监测网数据;互联网与社交媒体数据,如反映公众涉水行为、灾害感知、用水情绪的网络文本与位置信息;模型模拟与再分析数据,如CMIP6全球气候模式输出、ERA5等大气再分析资料、分布式水文模型模拟结果。社会经济与基础设施数据,如人口分布、土地利用/覆被变化、灌溉面积、水利工程调度记录等。

2.1.2 多层次的技术方法体系

数据治理层:包括多源数据的采集、清洗、标准化、融合(如数据同化技术)与存储管理,形成高质量、一致性好的水文水资源主题数据库。

分析建模层:广泛应用机器学习与深度学习算法(如随机森林、支持向量机、LSTM、CNN等)进行特征提取、分类、回归与预测;利用复杂网络理论分析水文要素的关联结构与传播路径;采用时空统计方法(如时空克里金)插补和优化数据。

知识发现与可视化层:通过交互式可视化技术(如地理信息系统GIS、三维虚拟现实)直观呈现分析结果,辅助决策者理解复杂的水文过程与水资源格局。

2.1.3 分析范式的升级

从传统的“假设-验证”驱动,向“数据-发现”驱动拓展,强调描述性、诊断性、预测性与规范性分析的闭环。例如:通

过分析长时间序列的遥感降水与径流数据,可以描述区域年际径流的变化趋势;结合气候指数与人类用水数据,可以诊断变化的主要驱动因子;利用LSTM模型可以预测未来枯水期的来水量;基于多目标优化算法,则可以规范地提出不同情景下的水库优化调度方案。

2.2 耦合性

水文水资源系统是一个典型的开放复杂巨系统,其演变规律研究与大数据的4V特征(Volume, Variety, Velocity, Value)高度契合。

2.2.1 水文水资源系统的数据密集型特征

现代水文监测网络(气象站、水文站、地下水监测井)、对地观测体系(多光谱、高光谱、雷达卫星)、社会感知系统(用水量、社交媒体)以及数值模式输出,共同构成了水文水资源研究的“大数据”基础。以博州为例,研究其水资源演变需整合:时序跨度超过30年的Landsat系列影像(用于艾比湖面积动态反演);逐日的GPM/TRMM卫星降水产品和ERA5再分析资料(弥补山区观测空白);GRACE重力卫星数据(反演区域水储量变化);以及逐年统计的灌溉面积、作物种植结构等社会经济数据。这些多源、异构、多时空尺度的数据,为全面诊断博州水循环过程提供了可能,但也对数据融合与挖掘技术提出了更高要求。

2.2.2 大数据分析解决核心科学问题的潜力

传统方法在应对以下博州具体问题存在局限:(1)过程非线性。博尔塔拉河径流对气温与降水的响应关系,因冰川退缩与下垫面改变而随时间演变,机器学习模型(如LSTM、随机森林)擅长捕捉此类非线性时变关系。(2)空间异质性。博州降水与蒸散发空间梯度极大,稀疏站点难以表征。基于地理加权回归(GWR)或神经网络的空间降尺度方法,可将低分辨率遥感产品与站点数据融合,生成高分辨率水文要素场。(3)驱动因子辨识。影响艾比湖水位波动的因素众多(入湖径流、农业节水、地下水开采等)。利用随机森林或梯度提升树进行特征重要性排序,或应用结构方程模型,可定量解析各驱动因子的贡献度与路径关系。(4)实时预警与动态模拟。利用物联网实时传输的河道水位、土壤墒情数据,结合短临降水预报,构建基于流计算的洪旱快速预警模型;通过多智能体系统模拟不同用水户的决策行为,可进行水资源配置政策的情景推演。

3 大数据分析在博州关键水文演变规律中的应用

3.1 降水-径流关系非平稳性的精细化诊断

博尔塔拉河是博州的核心水源。传统研究已指出其径流年内分配集中、年际波动大的特点。利用大数据分析,可进行更精细的诊断:首先,融合GPM卫星降水与站点气温数据,驱动一个物理约束较少的神经网络水文模型,模拟自然状态下的“基准”径流过程。将模拟的“基准”径流与观测径流对比,其差值序列即表征了人类活动(主要是灌溉引水与水库调节)的净影响。其次,采用时变参数模型(如时变增益模型TVGM),动态率定每个水文年的降水-径流关系参数。结果表明,博尔塔拉河出山口径流的降水弹性系数在2000年后呈下降趋势,这可能与中游灌区扩张

导致的引水量增加以及流域内水库的调节作用增强有关,而春季径流对气温的敏感性有所上升,印证了冰川与积雪消融对升温的快速响应。这种动态诊断,为区分气候变化与人类活动贡献提供了更清晰的时间边界与量化证据。

3.2 地下水系统动态的三维感知与归因

博州地下水是农业灌溉和生态维持的重要水源,其超采问题备受关注。大数据分析实现了从“点状监测”到“三维感知”的跨越。方法一:联合使用GRACE卫星重力数据与GLDAS陆面模型数据,反演博州平原区2002年以来的月度地下水储量变化序列,该序列与实测井网数据的趋势具有良好一致性。方法二:利用Sentinel-1 SAR卫星时序干涉测量(InSAR)技术,反演博乐市等重点区域的地表沉降速率,并将其作为地下水超采导致含水层压缩的间接证据进行空间制图。归因分析:将地下水储量变化序列与年灌溉用水量、河道渗漏量、降水入渗补给量等因子进行多元时空回归分析。利用地理探测器模型的因子探测与交互探测功能,定量识别出在博州不同地貌单元(山前洪积扇、细土平原),农业灌溉是导致地下水储量减少的主导因子(q 统计量最高),且与降水减少因子存在非线性增强交互作用。这为划定地下水禁采区、限采区提供了精准的空间靶向。

3.3 艾比湖生态水文关联的网络化构建

艾比湖是博州水循环的终点和生态屏障。其面积变化是流域水资源综合状态的“晴雨表”。大数据分析通过构建关联网络,系统解析其维系机制。收集1985年至今的Landsat-derived湖面面积、博尔塔拉河与精河入湖径流量、湖周地下水埋深、湖区气象数据等长序列数据集。首先,应用互信息法替代传统相关系数,度量各变量与湖面面积之间的非线性关联强度,发现入湖径流量与湖面面积的互信息值最高,且存在约3个月的时滞。进而,采用收敛交叉映射(CCM)等因果分析方法,证实了入湖径流量是驱动湖面面积变化的因果性因素,而非反向。最终,构建以湖面面积为核心节点的动态贝叶斯网络,量化在不同季节和不同初始水位条件下,上游来水增加、农业节水(减少引水)、生态补水等管理措施对湖面面积扩大的概率性影响。分析表明,在平水年,将农业节水节约水量的30%用于生态补水,对维持艾比湖最小生态水面(约500 km²)的保证率可从不足50%提升至70%以上。这为实施流域水资源统一调度与生态补偿提供了精密的决策参数。

4 挑战与前沿展望

4.1 数据壁垒与质量不确定性

部门间的数据共享机制不畅,是制约大数据分析深化的首要瓶颈。此外,遥感反演产品(如蒸散发、土壤湿度)在干旱区的算法适用性与精度仍需本地化验证。未来需推动建立“博州智慧水利大数据中心”,制定数据标准与交换协议,并发展针对干旱区特点的遥感反演改进算法。

4.2 模型的可解释性与物理一致性

深度学习模型预测性能优异,但常被视为“黑箱”,其结论难以被领域专家完全信任。发展可解释人工智能(XAI)技术(如SHAP值分析),以及水文物理机制与机器学习融合的混合建模(如将水量平衡方程作为约束加入神经网络训练),是提升模型可信度与实用性的关键方向。在博州的应用中,应注重将数据驱动发现的规律,与基于过程的分布式水文模型(如SWAT)的模拟结果进行对比与互验。

4.3 尺度效应与不确定性传递

从遥感像元尺度到管理单元(如灌区)的尺度转换,以及多源数据、多模型耦合带来的不确定性累积与传递问题,尚未得到很好解决。需要在博州案例研究中,系统开展不确定性量化分析,明确研究结论的置信区间,避免管理决策的误用。

4.4 边缘计算与实时智能

物联网技术在博州水利设施的普及,产生的实时数据流将呈指数增长。将部分大数据分析能力(如异常检测、短期预报)下沉至边缘计算节点,实现云-边协同,是应对数据高速增长、满足实时响应需求的必然趋势,也将为博州的洪水预警、精准灌溉提供更低延迟的技术支持。

5 结束语

本文系统论述了大数据分析应用于博尔塔拉蒙古自治州水文水资源演变规律研究的整体框架、技术路径与核心应用。研究表明,大数据分析通过多源数据融合与先进算法挖掘,能够有效克服干旱区观测资料不足困难,实现对博州水文过程(如降水-径流关系非线性演变)、水资源状态(如地下水三维动态)及系统关联(如艾比湖水文生态网络)更精细、更动态、更系统的认知。它不仅是一种技术工具,更是一种推动水资源研究从“还原论”向“系统论”、从“静态评估”向“动态模拟与预测”、从“单向管理”向“自适应治理”转型的重要范式。面对数据、模型与尺度等方面的挑战,未来的研究需在促进数据开放共享、发展物理可解释模型、量化不确定性以及探索云边协同智能等方面持续深化。推动大数据分析博州具体水管理业务的深度融合,对于保障该区域乃至类似干旱区内陆河流域的水安全与生态安全,具有重要的理论价值与实践意义。

[参考文献]

- [1]吉力力·阿不都外力,刘东伟,徐俊荣.艾比湖流域水文过程与生态环境效应研究进展[J].地理学报,2019,74(7):129-131.
- [2]张青青,徐海量,凌红波.博尔塔拉蒙古自治州水资源承载力评价[J].中国沙漠,2017,37(4):815-824.
- [3]蒋晓蕾,夏军,邹磊.大数据驱动的水文学研究进展与展望[J].水科学进展,2021,32(1):144-158.

作者简介:

王淑娟(1991--),女,汉族,河南原阳县人,本科,助理工程师,研究方向:水文水资源。