

特定流域暴雨洪水的水文监测与响应规律研究

陈文豪

新疆维吾尔自治区和田水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6717

[摘要] 干旱区内陆河流域生态环境脆弱,水文过程对气候变化与人类活动响应敏感,暴雨洪水作为流域内主要的极端水文事件,其突发性和破坏性对沿岸绿洲安全、农牧业生产及生态系统稳定构成严重威胁。为揭示干旱区特定流域暴雨洪水的水文监测特征与响应规律,以昆仑山北坡策勒河流域为研究对象,基于流域水文站实测数据、气象观测资料及地貌特征分析成果,系统探讨了该流域暴雨洪水的时空分布特征、水文监测现状及存在问题,并深入剖析了暴雨洪水的水文响应机制。

[关键词] 策勒河流域; 暴雨洪水; 水文监测; 响应规律; 干旱区

中图分类号: P334 文献标识码: A

Research on Hydrological Monitoring and Response Patterns of Rainstorm Floods in Specific River Basins

Wenhao Chen

Hotan Hydrological Survey Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] In arid inland river basins, the ecological environment is fragile, and hydrological processes are highly sensitive to climate change and human activities. Rainstorm floods, as major extreme hydrological events in such basins, pose serious threats to the safety of oasis areas along the riverbanks, agricultural and pastoral production, and ecosystem stability due to their sudden occurrence and destructive nature. To reveal the characteristics of hydrological monitoring and response patterns of rainstorm floods in arid river basins, this study focuses on the Cele River Basin on the northern slope of the Kunlun Mountains. Based on hydrological station measurement data, meteorological observation records, and geomorphological feature analysis, the temporal and spatial distribution characteristics, current status, and existing problems of hydrological monitoring of rainstorm floods in the basin are systematically explored. Furthermore, the hydrological response mechanisms of rainstorm floods are thoroughly analyzed.

[Key words] Cele River Basin; rainstorm floods; hydrological monitoring; response patterns; arid region

引言

策勒河发源于昆仑山中段北坡,是塔里木盆地南缘典型的干旱区内陆河,流域呈现山地-绿洲-荒漠的阶梯式地貌格局,特殊的地理环境与气候条件使得该流域暴雨洪水具有显著的区域独特性。近年来,受全球气候变化影响,昆仑山北坡极端降水事件频发,2018年和田皮山1h降水量达53.8mm,接近当地多年平均降水量,2020年喀什地区4h降雨量达106mm,极端暴雨引发的山洪灾害风险持续上升。策勒河流域曾于2009年遭遇特大旱情,2010年又发生历史最大洪水,极端旱涝事件交替出现,凸显了流域水文过程的不稳定性。水文监测作为掌握洪水过程、揭示响应规律的基础,其数据质量与监测布局直接影响洪水预报预警的准确性。因此,系统梳理策勒河流域暴雨洪水的水文监测现状,深入剖析其响应规律,对于提升流域洪水灾害防控能力、保

障区域水资源安全具有重要的理论与实践意义。

1 策勒河流域概况

1.1 地理位置与地貌特征

策勒河流域位于新疆维吾尔自治区和田地区策勒县境内,发源于昆仑山中段北坡,河流自南向北穿越山地、绿洲、荒漠三大地貌单元,最终汇入塔里木盆地南部边缘的荒漠区。流域总面积2032km²,水文站控制断面高程1552m,流域内山地面积占比大,中海拔地区(1500~3500m)地貌形态多样,涵盖中山带、低山带及山前洪积扇等多种地貌类型。地形坡度以平缓、微缓及缓坡为主,坡度 $\leq 15^\circ$ 的区域占流域总面积的主体部分,流域东北和东两个坡向面积占优势,分别占流域总面积的15.40%和14.19%。

流域切割深度差异显著,最小值为0m,最大值达281m,切割深度大于20m的区域占流域面积的28.68%;切割密度最大值为

7.81km², 大于1km²的区域占流域面积的42.74%, 复杂的地貌格局导致流域内降水汇流路径差异较大, 局部区域易形成集中汇流, 加剧暴雨洪水的突发性。流域下游沙漠区与克里雅河下游地貌相连, 古河道与流动沙丘交错分布, 洪水演进过程中受沙丘阻隔与下渗影响, 水流传播速度减缓, 洪水历时相对延长。

1.2 气候与水文特征

策勒河流域属典型的温带大陆性干旱气候, 气候特征表现为冬季寒冷干燥, 春季升温迅速, 夏季炎热, 秋季气温逐渐下降。全年降水量稀少, 多年平均降水量30~50mm, 降水主要集中在夏季(6月至8月), 占全年降水量的60%~70%, 且多以局部短时暴雨形式出现, 2025年8月1日至2日, 流域南部山区出现局部暴雨, 降水量超24.1mm, 引发部分支流洪水过程。流域气温时空差异明显, 1月平均气温-9℃至3℃, 5月平均气温升至16℃至31℃, 局部地区可达38℃, 7月平均高温达39℃, 部分地区极端高温超40℃, 高温天气加剧山区冰雪消融, 易与暴雨叠加形成混合型洪水。

策勒河径流补给以高山冰雪融水和山地降水为主, 径流年内分配不均, 夏季(6-8月)径流量占全年的主要部分, 春季(3-5月)因冰雪消融出现次高峰。2025年流域来水量较历年同期偏少, 主要河流来水量较历年同期减少2.95%, 较去年同期减少10.1%, 但夏季局部暴雨仍可引发短时洪水。流域洪水类型主要包括暴雨型洪水、冰雪融水型洪水及混合型洪水三类, 其中暴雨型洪水多发生于7-8月, 由局部短时暴雨引发, 具有洪峰高、历时短、突发性强的特点; 混合型洪水多发生于6月中下旬或8月上旬, 由暴雨与高山冰雪融水叠加形成, 洪水历时长、洪量大, 破坏性较强。

2 策勒河流域暴雨洪水水文监测现状

2.1 监测站网布局

策勒河流域水文监测以策勒水文站为核心, 该站为流域出口控制站, 承担着水位、流量、水温等关键水文参数的长期监测任务, 同时结合流域内气象观测站点及支流临时监测点, 构建了“核心站+辅助站”的监测站网体系。气象数据采用中国气象局0.25°×0.25°经纬度分辨率的格点化数据集(CN05.1), 该数据集基于2400余个中国地面气象台站的观测资料插值得到, 涵盖日降水量、平均气温、日最高气温和日最低气温等气象要素, 为暴雨洪水成因分析提供了基础数据支撑。流域内还部署了数字高程模型(DEM)SRTM V3数据, 分辨率为30m, 用于流域地貌特征提取与汇流路径分析; 土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心土地利用遥感监测数据集, 为下垫面条件对洪水响应的影响分析提供数据支持。此外, 针对昆仑山北坡高山流域洪水监测需求, 研究团队还收集了冰川编目数据, 包括中国第一次冰川编目数据集与第二次冰川编目数据集(V1.0), 为冰雪融水型洪水监测与模拟提供了重要依据。

2.2 监测内容与技术方法

策勒河流域水文监测内容涵盖水文要素与气象要素两大方面, 水文要素监测包括水位、流量、径流总量、含沙量等; 气象要素监测包括降水量、气温、蒸发量、风速等。监测技术采用传统观测与现代技术相结合的方式, 水位监测采用雷达水位计,

流速监测采用雷达波流速仪与悬浆式流速仪, 实现对水文参数的实时、连续监测。这些传感器具备高精度、高稳定性和抗干扰能力, 能够在复杂的山区环境下准确捕捉水文变化, 雷达波非接触式测量方式避免了传统机械仪表的磨损问题, 悬浆式流速仪定期校核提高了数据采集的可靠性和长期稳定性。数据传输采用混合通信模式, 结合有线(光纤、以太网)与无线(4G/5G、卫星)通信技术, 确保在极端天气或通信中断情况下仍能保障数据连续性。在偏远山区或无人区, 卫星通信作为备用链路, 确保关键水文数据实时回传至监控中心。数据传输过程采用加密技术, 防止信息泄露和篡改, 保障监测数据的安全性与完整性。

2.3 数据处理与质量控制

由于策勒河流域高山区水文资料稀缺, 水文站日流量数据存在一定缺失。1961-2022年期间, 策勒水文站日流量数据缺失率为0.41%, 缺失年份主要包括1990-2000年、2004年、2006年及2012-2022年。为保障数据连续性, 采用MissForest缺失值插补法对缺失数据进行处理, 该方法基于随机森林算法, 通过迭代插补实现缺失数据的精准填补, 其优势在于对不同类型数据均能有效插补, 且无需对数据进行过多假设或转换。插补过程中, 选取日降水量、平均气温、日最高气温和日最低气温等变量作为输入数据, 每个站点重复插补20次, 采用克林-古普塔效率系数(KGE)、纳什效率系数(NSE)、决定系数(R²)及均方根误差(RMSE)作为评价指标。结果显示, 策勒水文站插补数据的RMSE为2.39, KGE为0.78, NSE为0.70, R²为0.74, 插补数据与实测数据一致性良好, 满足暴雨洪水规律分析的需求。原始数据经插补后, 还需经过清洗、校验和存储等处理流程, 通过算法剔除异常值, 利用数据融合技术将多源数据整合为结构化信息, 生成高质量、可分析的数据资产。

3 策勒河流域暴雨洪水的响应规律

3.1 暴雨时空分布与洪水过程特征

策勒河流域暴雨时空分布不均, 空间上呈现“南部多、北部少”的特点, 暴雨主要集中在南部山区, 北部绿洲与荒漠区降水量极少。夏季6-8月是暴雨高发期, 占全年暴雨场次的80%以上, 暴雨持续时间多为1-6h, 以短时强降雨为主, 单次暴雨降水量占全年降水量的比例较高, 易形成短历时、高强度的洪水过程。2025年8月2日, 受局部暴雨影响, 流域内恰哈河最大来水量34m³/s(警戒流量40m³/s), 乌鲁克萨依河最大来水量40m³/s(警戒流量40m³/s), 奴尔河最大来水量182m³/s(警戒流量100m³/s), 萨依巴格河最大来水量60m³/s(警戒流量40m³/s), 多支流同时涨水, 凸显了暴雨洪水的区域性与同步性。

洪水过程呈现显著的阶段性特征, 可分为起涨段、洪峰段与消退段三个阶段。起涨段历时较短, 受暴雨强度与汇流路径影响, 一般为6-12h, 流速快速上升, 水位急剧上涨; 洪峰段历时较短, 多为1-3h, 洪峰流量集中, 水流携带大量泥沙, 对河道两岸冲刷作用强烈; 消退段历时相对较长, 一般为7-10h, 水位与流速缓慢下降, 洪水过程逐渐结束。对比1961-1992年与1993-2022年两个时段的洪水特征发现, 策勒河平均洪水起涨时间从7.25d缩短至

6.53d, 平均消退时间从7.03d延长至7.50d, 年最大洪水日平均流量从 $18.06\text{m}^3/\text{s}$ 降至 $14.70\text{m}^3/\text{s}$, 表明流域洪水呈现“起涨更快、消退更缓、峰值降低”的变化趋势, 这与全球气候变化背景下极端降水事件增多、下垫面条件变化等因素密切相关。

3.2 地貌对暴雨洪水响应的调控作用

策勒河流域复杂的地貌形态对暴雨洪水响应过程具有显著调控作用, 山地、绿洲、荒漠三大地貌单元的洪水响应特征差异明显。南部山区地势陡峭, 切割深度大, 降水汇流速度快, 洪水起涨迅速, 洪峰流量大, 洪水过程历时短, 易形成突发性山洪; 中海拔平缓区域地势开阔, 汇流路径分散, 洪水起涨相对平缓, 洪峰流量较小, 历时较长; 北部荒漠区地势平坦, 沙丘广布, 洪水演进过程中受下渗与蒸发影响, 水流速度减缓, 洪水历时显著延长, 洪峰流量大幅衰减。坡向与坡度对洪水响应也具有重要影响, 流域东北和东坡向区域面积占优势, 这些区域受季风环流影响相对明显, 降水集中程度较高, 汇流速度较快, 洪水响应更为敏感; 坡度 $\leq 15^\circ$ 的平缓区域汇流时间较长, 洪水峰值较低, 而坡度较大的区域汇流时间短, 洪水峰值较高。此外, 流域内的古河道与洪积扇地貌形成了天然的洪水调蓄空间, 洪水通过洪积扇渗透补给地下水, 同时古河道可分流部分洪水, 减缓洪水对下游绿洲区的威胁, 起到一定的洪水调蓄作用。

3.3 气候因素对暴雨洪水响应的驱动作用

气候变化是驱动策勒河流域暴雨洪水响应的重要因素, 气温升高与极端降水事件增多共同影响流域洪水过程。近年来, 昆仑山北坡高山流域冰川出现退缩、停滞甚至前进的现象, 气候变暖导致山区冰雪消融量增加, 春季与夏季冰雪融水径流量增大, 易与暴雨事件叠加形成混合型洪水, 这类洪水具有流量大、历时长的特点, 破坏性较强。2010年策勒河流域发生的历史最大洪水, 就是由异常天气系统导致的暴雨与冰雪融水叠加形成的, 给流域内农牧业生产造成了巨大影响。极端降水事件的增多增强加剧了暴雨洪水的发生频率与强度, 近10年南疆有30%的台站日最大降水量刷新历史纪录, 策勒河流域作为南疆干旱区的典型流域, 也受到极端降水事件的显著影响。高温天气不仅加剧冰雪消融, 还会导致大气对流运动增强, 促进局部暴雨的形成, 短时间内的低强度降水超过土壤下渗能力, 形成地表径流, 快速汇入河道引发洪水。此外, 秋末和春季期间固态降水的多寡对初夏时段的河川径流量影响较大, 固态降水积累量增加会导致初夏冰雪消融径流量增大, 增加混合型洪水的发生风险。

3.4 下垫面条件对暴雨洪水响应的影响

策勒河流域下垫面类型多样, 包括山地植被、绿洲农田、荒漠沙丘等, 不同下垫面类型的透水性能、植被覆盖度差异较大, 对暴雨洪水的产汇流过程产生显著影响。山地植被具有一定的水土保持与水源涵养功能, 中高海拔山区植被覆盖度相对较高,

能够减缓地表径流速度, 增加土壤下渗量, 减少洪水径流量; 低山带与山前洪积扇植被覆盖度较低, 土壤透水性能较差, 降水易形成地表径流, 汇流速度较快, 加剧洪水过程。绿洲区农田与林地植被覆盖度高, 农田灌溉系统与水利工程可起到一定的洪水调蓄作用, 减缓洪水演进速度; 荒漠区沙丘与裸地占比大, 土壤透水性能差, 植被覆盖度极低, 降水几乎全部形成地表径流, 但由于地势平坦, 水流传播速度缓慢, 且下渗量较大, 洪水峰值较低, 历时较长。此外, 多年冻土活动层的冻融变化对流域产汇流过程也有直接影响, 冻土的隔水作用改变了“降水-土壤水-冻土层上水-地表径流”的水交互迁移转化关系, 冻融期土壤含水量变化显著, 影响洪水的产流机制与响应过程。

4 结束语

本文通过对昆仑山北坡策勒河流域暴雨洪水水文监测现状与响应规律的系统研究, 明确该流域作为干旱区典型内陆河, 呈现山地-绿洲-荒漠阶梯式地貌格局, 夏季局部短时暴雨为主的降水特征催生暴雨型、冰雪融水型及混合型三类洪水, 其中混合型洪水破坏性最强, 且洪水响应呈现“起涨快、消退缓”特征, 受地貌、气候与下垫面条件协同调控。同时发现, 流域以策勒水文站为核心的监测体系虽经数据插补保障了基本分析需求, 但仍存在高山区监测覆盖不足、智能化水平偏低等问题。基于上述研究, 针对性提出洪水防控与监测优化对策: 防控层面需强化河道治理与蓄水工程建设, 优化洪水期水资源调度, 构建多源数据融合的预报预警体系, 同步加强山区水土保持与天然调蓄空间保护; 监测层面应完善高山区及支流站网布局, 推广物联网等智能监测技术, 搭建统一数据共享平台, 健全数据质控机制并强化人才队伍建设。上述对策可有效提升流域洪水防控能力与水文监测水平, 为策勒河流域水资源安全保障、生态保护提供科学支撑。未来研究可聚焦于高山区小尺度暴雨洪水的精细化监测与动态捕捉, 深入解析冻融下垫面的产汇流驱动机制及界面水文过程, 耦合多源数据与地貌-气候协同效应优化洪水预报预警模型, 为干旱区内陆河流域极端水文事件的精准防控提供更具普适性的理论支撑与技术范式。

[参考文献]

- [1]仇泽炜, 方功焕, 陈亚宁, 等. 昆仑山北坡高山流域洪水变化特征[J]. 干旱区地理, 2024, 47(11): 1816-1827.
- [2]董克鹏. 新疆和田策勒河极端旱涝成因分析[J]. 能源与节能, 2017, (9): 113-115.
- [3]冉新量, 董克鹏. 新疆策勒河2010年大洪水成因分析[J]. 内蒙古水利, 2011, (2): 72-73.

作者简介:

陈文豪(1994--), 男, 汉族, 江苏连云港人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水文勘测。