

小河坝（三）水文站径流演变特征分析

李姝乐 田家俊

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6728

[摘要] 小河坝水文站受下游水电站顶托影响,水位-流量关系复杂。长江上游水文局引入Ridar-200侧扫雷达测流仪,开展高洪水文在线监测。比测期间水位235.53~237.32m,流量1600~7160m³/s,含沙量0.34~9.45kg/m³。雷达测流在中高水时稳定性好,流量大于1400m³/s时与缆道流速仪法误差为-14%~9%,吻合较优。通过多模型计算提升精度,克服H-ADCP在浑浊、高流速及恶劣天气下的局限,实现全自动采集与全量程覆盖,推动测验革新,为川渝水资源管理与生态安全提供可靠数据支撑。

[关键词] 小河坝水文站; 水电站; 水资源管理; 创新

中图分类号: TV731 文献标识码: A

Analysis of Runoff Evolution Characteristics and Driving Mechanism of Xiaoheba (III) Hydrological Station

Shule Li Jiajun Tian

Yangtze River Water Resources Commission Hydrological Bureau, Yangtze River Upper Reaches Hydrological and
Water Resources Survey Bureau

[Abstract] The Xiaoheba hydrological station is affected by the top support of downstream hydropower stations, and the water level flow relationship is complex. The Hydrological Bureau of the upper reaches of the Yangtze River has introduced the Ridar-200 side scan radar flow meter to carry out online monitoring of high flood hydrology. During the comparison period, the water level was 235.53–237.32m, the flow rate was 1600–7160m³/s, and the sediment concentration was 0.34–9.45kg/m³. Radar flow measurement has good stability in medium to high water conditions, and when the flow rate is greater than 1400m³/s, the error with the cableway current meter method is -14 to 9, which is in good agreement. By using multiple model calculations to improve accuracy and overcome the limitations of H-ADCP in turbidity, high flow rates, and adverse weather conditions, fully automatic collection and full range coverage can be achieved, promoting testing innovation and providing reliable data support for water resource management and ecological security in Sichuan and Chongqing.

[Key words] Xiaoheba Hydrological Station; hydropower station; Water resource management; innovation

引言

小河坝水文站位于涪江下游重庆潼南区,是国家基本站和省界水量监测断面,控制流域面积28901km²。受水电站运行及人类活动影响,水位流量关系复杂,径流变化显著。1952—2024年数据显示,多年平均径流量143亿m³,实测最大流量28500m³/s(1981年),最小22.5m³/s(2019年),洪水多发于6—10月。水位、流速和含沙量波动大,断面形态因滨江路建设、淤积及施工等改变,传统测流方法难以适应。研究其径流演变及驱动机制,对优化水资源管理、应对气候变化、保障生态与用水安全具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 水文气象数据

水文气象数据是分析小河坝(三)站径流演变及驱动机制的基础,涵盖水位、流量、降水、气温与蒸发等要素。该站自1951年建站以来,记录最高水位245.35m(2020年),最低215.74m(1993年);实测最大流量28500m³/s(1981年),最小22.5m³/s(2019年),多年平均径流量143亿m³。流量测验采用H-ADCP与缆道流速仪等方法。多年平均降水量947.5mm(1993—2020年),年际波动显著,如1956年1343mm,2009年仅722.5mm,降水集中期与洪水密切相关。涪江洪水多由暴雨引发,降水时空分布主导径流变化,气温与蒸发量对水热平衡和水资源消耗具有重要作用,需综合多要素分析水文特征与演变规律。

1.2 趋势检验方法

趋势检验是分析水文气象数据变化的关键手段。在小河坝(三)站的研究中,可采用Mann-Kendall检验判断水位、流量、降水等要素的显著趋势,该方法非参数、抗干扰强;线性回归通过斜率识别趋势方向并检验显著性;滑动平均平滑序列以凸显长期变化,小波分析揭示多尺度周期特征。应根据数据特性选择方法,综合评估径流演变,为水资源管理提供科学依据。

1.3 驱动因子识别

小河坝(三)水文站径流演变受自然与人类活动双重驱动。降水、气温及下垫面条件影响产汇流过程,而水利工程建设改变水位流量关系,土地利用变化,水资源利用直接减少河道流量。通过相关分析、回归与主成分分析可定量评估各因子贡献,揭示演变机制,支撑水资源管理。

2 径流时间演变

2.1 年际变化特征

小河坝水文站径流的年际变化显著,反映了区域水资源丰枯波动特征。1952—2020年多年平均径流量为143亿 m^3 ,但年际差异明显,如1981年最大流量达28500 m^3/s ,而2019年最小仅22.5 m^3/s ,凸显水量变化剧烈。这种变化无明显周期性,常出现连续丰水或枯水年,增加了水资源管理与水利工程调度的难度,需在丰水年蓄水以应对枯水年,枯水年则须严格控水。径流变化与区域气候密切相关,降水模式的改变,如暴雨中心移动或降水量增减,直接影响径流量;当涪江上游降水集中时,径流显著增加,反之则减少。因此,径流年际波动既是水文过程的体现,也受气候异常驱动,对区域水资源可持续利用构成挑战。

2.2 季节分配规律

小河坝水文站径流季节分配明显,与当地气候和降水模式密切相关。径流主要集中在6月至10月的雨季,尤以7月至9月最为集中,年最大洪峰有90%以上发生在此期间,多年平均该时段径流量可占全年的60%—70%。充沛降水导致河流流量大幅增加。而11月至次年5月为旱季,降水稀少,河流主要依赖地下水补给,流量稳定但显著减少,冬季流量仅为雨季的几分之一。这一显著的季节变化对水资源管理提出较高要求:雨季需加强防洪并蓄存多余水量,旱季则应注重节水与高效利用,保障居民生活及工农业用水需求^[1]。

2.3 极端径流事件

极端径流事件对水资源系统和社会经济影响重大,小河坝水文站需加强对它的识别与分析,以保障防洪减灾和水资源管理工作。历史记录显示,该站曾发生多次极端高流量事件,如1981年实测最大流量达28500 m^3/s ,易引发洪水,造成农田淹没、房屋损毁和基础设施破坏,威胁生命财产安全;也出现极端低流量,如2019年最小流量仅22.5 m^3/s ,导致水资源短缺,影响居民用水、农业灌溉与工业生产,并恶化河流生态,降低生物多样性。此类事件多与持续暴雨或干旱等气候异常相关,流域内土地利用变化和水利工程建设等人类活动亦可能加剧其频率与强度。因此,强化监测预警,落实有效管理措施,是应对极端径

流的关键。

3 气候变化影响

3.1 降水时空变化

降水是涪江流域水循环的关键,其时空分布不均导致水文响应差异显著。洪水多由6月至10月的暴雨引发,尤以7月至9月为主,年最大洪峰占比超90%。上游暴雨历时短、强度大,易形成尖瘦型洪水;龙门山一带大范围持续暴雨则常致干流及主要支流发生大洪水。上游位于鹿头山暴雨区,降水强、量大;中下游降水较弱,若无强降雨叠加,上游洪峰传播过程中将逐渐衰减。据小河坝站1952—2024年资料,降水格局对流域水资源与水文过程影响持续而深远。

3.2 气温升高效应

气温升高对小河坝(三)水文站的径流与生态环境产生显著影响。气温上升加速地表和土壤水分蒸发,减少地下水补给,影响河流基流;同时可能使降水更多以液态形式出现,改变径流时序。在生态环境方面,植被生长季节和分布随之变化,耐寒植物生存受压,耐热植物扩展,可能导致植被覆盖减少,加剧土壤侵蚀,增加河流泥沙含量,破坏水生生态平衡。此外,气温升高还提升居民用水需求,尤其在夏季高温期,加剧水资源供需矛盾,易引发用水紧张。因此,需加强水资源的统筹调配与节约利用,提升流域适应气候变化的能力。

3.3 蒸发量响应

蒸发量受气温、降水和风速影响显著。涪江流域气温升高加快地表与水面蒸发,尤以夏季明显;降水通过调节土壤湿度和植被覆盖间接抑制或促进蒸发,丰水期土壤湿润、植被茂盛,蒸发受限,干旱期则相反;风速增大加速水汽扩散,增强蒸发,开阔水域及干旱区尤为突出。降水时空分布不均导致蒸发季节与区域差异明显。结合径流与降水变化推断,洪水期蒸发受抑,枯水期可能加剧。加强蒸发监测有助于理解水文过程,支撑水资源管理^[2]。

4 比测分析

4.1 比测工作开展情况

Ridar-200雷达测流仪于2024年9月完成安装调试,获取稳定流速数据。比测期间水位235.53~237.32m,流量1600~7160 m^3/s ,流速0.21~3.18 m/s ,含沙量0.34~9.45 kg/m^3 ,共收集雷达数据26098条,参与比测17次。

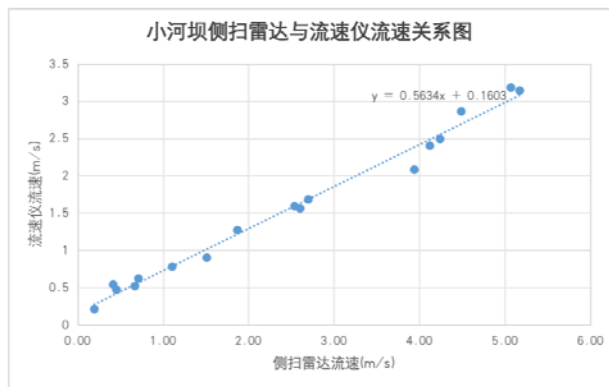
4.2 断面稳定性分析

小河坝站大断面较稳定,左岸为乱石,中泓卵石夹沙,右岸沙土。2021~2022年因滨江路修建致右岸变化;2024~2025年主泓(65.0~220m)淤积,7~9月明显;右岸400~550m因对岸填平基坑发生较大变化,其余时段左岸无显著变化。

4.3 设备稳定性分析及统计

比测期间,因网络安全演练导致水情分中心数据平台关闭,侧扫雷达流速数据无法上传,但本地存储正常,可通过网线连接设备拷贝数据。数据连续稳定,无异常。设备受电压、传输影响有轻微故障,但对整体流速成果影响较小。中高水流时数据稳定

可靠,低水流时脉动较大。流量大于 $1400\text{m}^3/\text{s}$ 时,与缆道流速仪测值吻合较好,误差在 $-14\%\sim 9\%$ 之间。如图一所示:



图一 侧扫雷达测流仪流速关系图

5 下垫面变化作用

5.1 土地利用变迁

土地利用变迁显著影响小河坝(三)水文站的径流过程。随着城市化和工业化推进,农业用地和自然植被被大量转化为建设用地,不透水面积增加,导致雨水下渗减少、地表径流增多,洪水风险上升。同时,植被覆盖减少削弱了降水截留与水源涵养能力。农业耕作改变土壤结构,降低入渗性能;城市建设破坏土壤原有构造,进一步减弱透水性。这些变化共同改变了径流的形成与汇流过程,对区域水文产生了深远影响。

5.2 植被覆盖动态

植被覆盖动态显著调节小河坝(三)水文站的径流,通过截留降水、增强入渗、减少地表径流影响水文循环。其变化受自然因素与人类活动共同作用。气候波动中,降水充沛年份植被生长旺盛,覆盖度上升;干旱则抑制生长,覆盖度下降。人类活动如砍伐森林、过度放牧和开垦荒地导致植被退化,削弱水源涵养能力,增加地表径流。近年来,通过植树造林、退耕还林等生态修复措施,区域植被覆盖逐步恢复,提升了土壤保水能力,有效减少了径流量,增强了对径流的调节功能,改善了流域水文状况。

5.3 水利工程影响

水利工程的建设和运行对小河坝(三)水文站的径流产生显著影响。位于下游约2.5km的潼南水电站,其蓄水和放水活动改变了上游水位与流速,扰乱水位-流量关系,放水时还可能引发洪水。上游约1.6km的三块石水电站运行也影响径流过程。水库在洪水期蓄水可削减洪峰,在枯水期放水能补充流量,起到调节作用,但也影响水温、水质及水生生态。此外,工程建设常伴随河道整治,改变河道宽度、深度和坡度,进而影响水流速度与方向,干扰径流形成与汇流。因此,在规划与运行中需科学评估对水文过程的影响,采取合理措施,兼顾水资源利用与生态保护。

6 人类活动贡献

6.1 农业用水强度

农业用水强度是影响小河坝水文站径流的关键人类活动因素。该区域耕地广布,农业生产高度依赖水资源,尤其在旱季,

为保障作物生长,灌溉用水大幅增加,农业用水占比可达总用水量的70%以上,显著减少河流径流量。同时,灌溉方式直接影响用水效率,当地部分农田仍采用大水漫灌,水资源利用率仅为40%~50%,蒸发与渗漏严重;而滴灌、喷灌等高效技术可将利用率提升至80%以上。因此,推广高效灌溉、提高用水效率,对降低农业用水强度、维持河流径流具有重要意义。

6.2 城镇化进程

城镇化进程加快显著影响小河坝水文站径流。人口聚集推动城镇扩张,生活、工业及公共用水需求持续上升,新建住宅区和工厂大幅增加日用水量,导致城镇总用水量随城镇化率提高而增长。同时,地表大量硬化使雨水下渗减少,排水加快,地表径流增速、洪峰流量增大,地下径流减少,暴雨时易引发内涝并改变河流径流过程。此外,污水处理不当导致污水直排,造成水质恶化,降低水资源可利用性,可能需跨区域调水,进一步影响水文站径流。

6.3 水库调度效应

水库调度显著影响小河坝水文站径流。上下游的三块石、潼南等水库通过蓄放水调节水资源时空分布:洪水期拦蓄洪水,可使下游洪峰流量降低30%~50%,发挥防洪作用;枯水期则放水补充径流,保障农业灌溉和生活用水。但若调度不当,可能导致下游河道流量减少,影响水生生物生存,并改变泥沙输送,引发河道冲淤变化,威胁生态平衡与航运功能。因此,科学合理的调度对维持径流稳定和生态环境健康至关重要^[3]。

7 结束语

小河坝(三)水文站因受下游潼南水电站顶托影响,水位流量关系紊乱,传统测流方式难以满足需求。为此,2024年9月引入Ridar-200侧扫雷达测流仪,实现中高流量在线监测,弥补H-ADCP等设备不足,提升监测自动化与覆盖能力。该设备安装于左岸上游铅鱼台,采用市电与电瓶双供电,运行稳定,流量大于 $1400\text{m}^3/\text{s}$ 时与缆道流速仪数据吻合较好,误差在 $-14\%\sim 9\%$ 。比测期间水位235.53~237.32m,流量 $1600\sim 7160\text{m}^3/\text{s}$,流速 $0.21\sim 3.18\text{m/s}$,含沙量 $0.34\sim 9.45\text{kg}/\text{m}^3$,数据连续完整。未来需优化低水期稳定性,降低故障率,完善数据质控,融合多源数据,深化环境适应性研究,推广新技术应用,提升流域水文监测整体水平。

[参考文献]

- [1]盛菲. 濂水流域降雨变化和景观格局演变的水沙效应研究[D]. 江西农业大学, 2024.
- [2]程潇. 基于集成学习算法的黄河流域中长期径流预报[D]. 西北农林科技大学, 2023.
- [3]胡旭健. 涪江流域时空输沙演变规律及河道冲淤研究[D]. 华北电力大学(北京), 2024.

作者简介:

李姝乐(1996--),女,汉族,四川广安人,助理工程师,研究方向:水文测验,河道勘测。