

中小河流突发性暴雨洪水预警与模型探讨

王宪宝

新疆维吾尔自治区伊犁水文勘测中心

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6470

[摘要] 伊犁河谷是典型的暴雨洪水易发区。受独特地形地貌与气候特征影响,该区域中小河流洪水突发性强、破坏性大,汇流时间短,有效预见期常不足一小时,对传统水文模型与预警机制构成严峻挑战。因此,构建一套高效、实用且契合伊犁基层水文业务特点的中小河流突发性暴雨洪水本地化预警体系,对于提升区域防灾减灾效能、保障人民生命财产与生态安全具有至关重要的意义。

[关键词] 暴雨洪水预警; 中小河流; 墒情参数; 多源数据融合

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A

Discussion on Early Warning and Modeling of Sudden Rainstorm Floods in Small and Medium-sized Rivers

Xianbao Wang

Yili Hydrological Survey Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] The Yili River Valley, as a typical area prone to rainstorm floods, exhibits strong suddenness and destructiveness in small and medium-sized river floods due to its unique topography, landforms, and climatic characteristics. Such floods have a short confluence time and an extremely short forecast lead time, posing severe challenges to traditional hydrological models and early warning mechanisms. How to construct an efficient and practical early warning system for sudden rainstorm floods in small and medium-sized rivers that aligns with the characteristics of grassroots hydrological operations in Yili is crucial for safeguarding the local people's lives, property, and ecological security.

[Key words] rainstorm flood early warning; small and medium-sized rivers; soil moisture parameters; multi-source data fusion

引言

伊犁河谷突发性暴雨洪水过程具有高动态、小尺度、短历时的鲜明特征,对预警响应提出了近乎“分钟级”的时效要求。然而,现有技术体系在高分辨率气象水文监测覆盖度、适应复杂下垫面(如融雪暴雨叠加、墒情剧变)的模型适用性、以及自动化/智能化的决策敏捷性等关键维度,均存在明显的“代际差距”,难以满足实际业务需求。要弥合上述业务需求与技术能力间的鸿沟,亟需构建一种深度融合“气象智能感知-历史灾害记忆-墒情动态调控”的本地化预警新范式。其核心在于通过多源数据(天、空、地)的高效协同与基于本地规律的经验模型创新,实现对暴雨洪水风险的更精准、更快速识别与预警。

1 伊犁河谷中小河流暴雨洪水特征

1.1 水文气象强耦合与预见期压缩

伊犁河谷“喇叭口”向西敞开的地形格局,使西风带水汽在北天山(海拔3500-4500m)、南天山(3000-4000m)及阿吾拉勒山(2500-3000m)的强迫抬升作用下,形成高强度、小尺度的局地强

对流系统。此类暴雨系统具有显著的突发性与移动性特征,如2020年8月新源县那拉提山区出现的82.3mm/h极端降雨,其水平尺度不足10km,洪水历时仅2.3小时。受陡峻地形与高河网密度(3.5-4.2km/km²)影响,中小流域水文响应呈现剧烈的时间压缩效应,集水面积200-500km²的支流汇流时间普遍缩短至1-2.5小时,集水面积小于200km²的支流汇流时间则更短,典型如伊犁河干流北山区支流,2025年5月暴雨至形成洪水的洪水历时仅30分钟左右。这种气象-水文过程的紧耦合性,将有效预警预见期压缩至1小时以内,远超常规水文模型的计算时效阈值。

1.2 下垫面异质性主导产流分异

河谷内垂直地带性形成三层级下垫面结构,导致暴雨产流呈现显著空间分异:(1)海拔梯度控制。低山带旱作农田区径流系数0.25-0.40,中山带云杉林区降至0.15-0.30,而高山带草甸裸岩区跃升至0.45-0.65。2018年喀什河流域同步观测显示,同场暴雨在海拔2800m草甸带的径流深达45.3mm,而在1800m森林带仅18.7mm。(2)土壤墒情动态调节。前期土壤含水率(θ)对产

流阈值产生非线性调控。春季融雪期(3-5月) $\theta > 30\%$ 时, 20mm/h雨强即可触发产流; 伏旱期(7-8月) $\theta < 18\%$ 时需 $>40\text{mm/h}$ 雨强方能形成地表径流。2019年昭苏盆地对比案例中, 同场50mm暴雨在墒情饱和区($\theta = 32\%$)产生洪峰 $92\text{m}^3/\text{s}$, 而干旱区($\theta = 15\%$)仅引发基流波动。当前墒情监测网的空间代表性严重不足, 尤其在伊犁河干流北部的霍城县、伊宁县, 尼勒克县东部等垂直高差2000m的关键区, 单站数据难以分辨森林带与草甸带的墒情差异, 导致下垫面状态误判风险激增。

1.3 监测网络结构性缺陷

现有水文站网面临三重维度盲区: (1) 空间覆盖不足。海拔 $>2500\text{m}$ 区域占河谷面积68%, 但雨量站密度仅0.3站/ km^2 , 远低于世界气象组织山洪预警标准(4站/ km^2)。特克斯河源区范围内中小河流水文站点少, 直接导致2021年“7·12”暴雨中心(估测雨量 $110\text{mm}/24\text{h}$)漏监, 下游琼库什台村洪水预警延迟85分钟。(2) 时间分辨率滞后。水文站流量采样间隔30分钟, 但陡坡河道洪水起涨时间可 <15 分钟。2020年喀什河支流洪水从起涨到峰值仅23分钟, 仅获取2组数据, 严重制约预警时效。(3) 要素监测缺失。土壤墒情站仅覆盖6%重点小流域, 且缺乏雪水当量、植被截留量等关键参数监测, 导致下垫面状态评估存在系统性偏差。

1.4 模型应用与业务需求脱节

复杂水文模型在伊犁实践中遭遇三重技术鸿沟: (1) 基础数据-模型失配。HEC-HMS等机理模型需1:10000高精度地形数据, 但河谷60%区域仅有1:50000地形图; MIKE SHE要求的土壤饱和和导水率参数, 仅12%流域开展过钻孔试验。(2) 计算时效瓶颈。典型小流域(300km^2)HEC-RAS二维洪水演进模拟需85分钟CPU时间, 超过半数洪水的有效预见期。2023年汛期喀什河洪水事件中, 模型未完成计算洪峰已过境。(3) 业务承载力不足。SWMM等模型参数率定需20-30场历史洪水资料, 而中小支流平均仅有3-5场记录; 基层水文站普遍缺乏专业建模人员。

2 “天-空-地”协同监测体系构建方法论

2.1 天基气象预警层

气象预警作为第一道防线, 其核心技术在于多源数据融合与短临预报优化。系统集成伊宁C波段多普勒天气雷达反射率产品, 当探测到 $>45\text{dBZ}$ 强回波单体时, 启动基于光流法的三维回波外推算法。该算法通过计算相邻时次反射率场的运动矢量场, 预测未来2小时回波位置, 经2021-2023年汛期验证, 移动路径预测误差控制在15公里/小时以内。同时接入FY-4A静止气象卫星数据, 利用云顶亮温 $<-52^\circ\text{C}$ 的对流云团识别技术, 实现对无雷达覆盖区的补充监测。输出层采用动态Z-R关系($Z=300R^{1.4}$)将反射率转化为定量降水预报(QPF), 生成河谷9大水文单元3公里 \times 3公里网格化降雨预报产品。

2.2 空基雨情监测层

雨情监测的核心创新在于历史暴雨极值的空间化表达。可通过研究系统收集流域内历史暴雨事件, 构建“伊犁河谷最大24小时降雨量等值线图”。对三大暴雨极值中心: 昭苏盆地西缘(150毫米)、尼勒克县东部山区(130毫米)、新源县那拉提山区

(120毫米), 开发暴雨危险性分级系统: 50毫米等值线覆盖区标记为蓝色预警基础区域, 80毫米线内升级为黄色预警区, 100毫米核心区实施橙色预警。实时监测数据与历史特征库的动态关联机制显著提升预警科学性。当实时雨量站记录突破历史同期95%分位数时, 系统自动匹配等值线图定位至高风险网格。如2023年8月喀拉峻站点监测到1小时58毫米降雨, 该点位历史最大值为62毫米(1987年记录), 可立即触发橙色预警信号并启动下游洪水预判流程。

2.3 地基墒情响应层

墒情数据作为预警系统的核心动态调节参数, 其应用机制需解决空间代表性问题。研究提出基于土壤水文相似区的墒情空间扩展方法: 将河谷划分为黄土丘陵区(0-1000米)、中山森林区(1000-2000米)、高山草甸区(>2000 米)三类响应单元, 每类单元内墒情站数据通过土壤质地、植被覆盖度、坡度等权重因子进行空间加权。实时墒情深度融入预警阈值动态调整: 当土壤体积含水率 $\theta \geq 30\%$ (饱和状态), 临界雨量阈值下调30%; 当 $\theta < 20\%$ (干旱状态), 临界雨量阈值上浮20%; 当 $20\% \leq \theta < 30\%$ (正常状态), 启用基准预警阈值。

3 暴雨洪水预警指标与关系模型构建

为提升伊犁河谷中小河流暴雨洪水的预警能力, 克服复杂物理模型对数据与算力的高要求, 本研究基于“天基(气象)-空基(雷达/遥感)-地基(水文/墒情)”三道防线信息融合的理念, 紧密结合伊犁河谷暴雨分布特征、下垫面条件及历史洪水规律, 构建了一套以核心预警指标为基础、以经验关系判别为核心的简易实用型“暴雨-洪水”预警方法(以下简称“关系模型”)。

3.1 核心预警指标体系

模型的有效运行依赖于对关键致灾因子的实时监控与评估。本模型构建了以下多源融合的核心预警指标集: (1) 气象预警等级。直接接入气象部门发布的精细化暴雨预警信息(蓝、黄、橙、红四级)。重点关注预警等级所覆盖的具体河谷区域, 特别是中小流域单元, 作为洪水风险的初步信号。(2) 实时/预报雨量及强度。针对目标中小流域, 融合雷达定量降水估测(QPE)、地面雨量站实测数据以及短临与短期降水预报(QPF), 计算关键时段(1h, 3h, 6h, 24h)的流域面平均雨量(P), 其中1h、3h短历时雨强(I)尤为关键。同时, 结合伊犁本地化的《暴雨等值线图》, 评估当前/预报雨量在该区域的历史重现性, 量化其极端性。(3) 前期土壤墒情指数。利用目标区域内代表性土壤墒情监测站的实时土壤体积含水率数据。若无密集站点, 则基于有限站点数据或结合遥感土壤湿度产品, 进行区域墒情等级评估(划分为: 干旱、适宜、偏湿、饱和四级)。该指标反映降雨产流的初始条件, 直接影响同等雨量下的洪水响应速度和量级。(4) 水文站流量/水位阈值。集成关键控制断面(如流域出口或防洪重点河段)预设的洪水特征水位/流量阈值, 包括警戒水位/流量(H警/Q警)、保证水位/流量(H保/Q保)等。这些阈值基于历史洪水频率分析设定, 是预警发布的直接参照目标。

3.2 简易“暴雨-洪水”关系模型构建与应用流程

基于上述核心指标,构建并应用“关系模型”的流程包含以下四个关键步骤,形成一个动态闭环。

3.2.1 暴雨风险区域识别

依据气象部门发布的暴雨预警落区预报,结合实时雷达回波监测信息(强回波位置、强度、移动方向与速度),初步识别出即将或正在遭受强降雨威胁的重点区域;叠加伊犁本地《暴雨等值线图》,识别历史上暴雨高频发生或易致灾的“高危区”,进一步聚焦可能面临较高洪水风险的中小流域目标。此步骤为后续精细化分析划定空间范围。

3.2.2 降雨-洪水响应关系建立

针对锁定的目标流域,深入分析历史典型暴雨洪水事件数据。重点挖掘在不同前期土壤墒情等级(θ)条件下,流域关键时段(通常为3h或6h)的面平均雨量(P)与下游控制水文站洪峰流量(Q_p)或水位涨幅(ΔH)之间的统计关系。构建形式包括:(1)经验公式。例如,建立幂函数形式的统计关系: $Q_p = a \cdot P^b \cdot \theta^c$ 。其中,a,b,c为通过历史数据回归分析得到的经验系数, θ 可用墒情等级对应的数值化指数表示(如:干旱=0.6,适宜=0.8,偏湿=1.0,饱和=1.2)。(2)查算表格。建立直观的二维或三维查算表,输入不同的P(或I)和 θ 等级,直接输出预估的 Q_p 范围或对应的洪水风险等级。

为快速评估不同规模河流对暴雨的响应敏感性,建立暴雨极值(或预警临界雨量阈值 R_c)与集水面积(A)的经验关系,例如: $R_c = k \cdot A^m$ (k,m为经验系数)。该关系凸显小流域(A小则 R_c 小)更易在短时强降雨下突发山洪的特性,有助于预警资源的优先配置。

基于步骤2建立的关系,结合实时获取的前期墒情(θ),动态计算或查表确定当前条件下触发不同等级洪水(如达到警戒、保证)所需的临界雨量阈值(P_{crit})。湿润/饱和的土壤条件将显著降低所需的临界雨量。

3.2.3 实时预警研判与发布

(1)触发条件。当目标流域同时满足被有效气象预警(黄、橙或红)覆盖,实时监测或临近预报的雨量($P_{obs/for}$)达到或超过基于当前 θ 动态调整后的临界雨量阈值(P_{crit})时,即触发洪水预警。

(2)预警级别研判。预警级别并非机械对应气象预警级别,而是依据以下因素综合研判提升:气象预警级别(基础信号);实测/预报雨量($P_{obs/for}$)超过临界阈值(P_{crit})的幅度(超限越大,风险越高);该雨量在《暴雨等值线图》中的历史重现期(重现期越长,事件越极端);前期土壤墒情饱和程度(θ 越高,预警

级别越需提高)。

(3)预警信息内容。发布的预警信息需清晰明确包含:可能受洪水影响的河流名称/河段。预计洪水发生的主要时段(基于流域汇流时间估算)。预计洪峰流量或水位范围/量级,及其可能达到的警戒/保证等级。综合研判后的洪水预警等级(建议与气象预警颜色协调,如蓝、黄、橙、红,代表风险递增)。简要说明触发预警的关键指标(如“受XX暴雨预警影响,预计XX小时面雨量将达XXmm,超临界值,前期土壤饱和”)。

3.2.4 滚动修正与效果验证

利用实时更新的高时空分辨率降雨监测数据(雷达、站点)、可能获取的动态墒情数据,以及关键水文站点实测的流量/水位信息,对已发布的预警进行滚动跟踪分析。将模型预估的洪水过程(如洪峰、峰现时间)与实测值进行对比验证,评估预警的准确性和时效性。根据验证结果和最新信息,对尚未发生的洪水过程预警进行必要的修正(升级、降级、维持或解除),或对模型参数(如经验系数)进行持续校准,实现模型性能的闭环提升。

4 结束语

展望未来,在伊犁推进此预警体系可重点关注:尽快实现重点中小流域墒情监测的合理覆盖,为模型提供更精准的下垫面状态输入;将气象预警接入、实时雨量/墒情/水情监测、等值线图展示、预警关系模型判别、预警信息制作与发布等功能整合到统一业务平台,提升自动化水平;随着数据积累,可进一步细化不同土壤类型、不同植被覆盖、不同季节下的降雨-墒情-洪水响应关系。在数据基础增强后,可考虑引入机器学习等方法,挖掘更复杂的非线性关系,提升预警精度。通过上述多维度协同发展,伊犁山洪预警体系将逐步实现“监测-分析-决策-发布”全链条智能化,为区域防灾减灾提供更坚实的科技支撑。

【参考文献】

- [1] 邵金鑫,刘旋旋.基于统计分析法的中小河流预警预报研究[J].广东水利水电,2023,(05):57-61.
- [2] 张琦.雷达波流速仪在中小河流量测验中的应用分析[J].黑龙江科学,2017,8(02):47-48.
- [3] 质检出版社.水文情报预报规范:GB/T 22482-2008[S].2008.
- [4] 新疆维吾尔自治区水利厅刊印.新疆维吾尔自治区可能最大暴雨图集.新疆暴雨编图小组编,1983.

作者简介:

王宪宝(1982--),男,汉族,山东郓城人,本科,高级工程师,研究方向为水文分析计算。