

极端降雨情境下小型河流防汛抢险物资调度优化模型

何春霖 董嘉晨 吴晨鹏

江苏省防汛防旱抢险中心（江苏省防汛抢险训练中心） 江苏 南京 210000

【摘要】：极端降雨情境下，小型河流防汛抢险物资调度面临时效性强、需求分散等挑战，现有调度存在需求预判偏差、响应机制僵化等问题。本文基于应急管理、系统工程等理论，构建含需求预测、路径优化等模块的调度优化模型，嵌入多主体协同机制并采用多目标优化算法求解。历史与实时数据支撑的验证显示，模型可测算物资需求、优化运输路径。研究提出储备体系建设、信息共享等保障措施及长效迭代机制，为小型河流防汛物资调度效率与可靠性提升提供理论与实践支撑。

【关键词】：极端降雨；小型河流；防汛抢险；物资调度；多主体协同

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.045

引言

极端降雨事件频发，小型河流防汛形势愈发严峻。河流涨势迅猛、险情分散，对抢险物资调度的快速性与精准性提出极高要求。当前物资调度因需求预判失准、储备布局不合理等，导致关键物资短缺或积压，影响防汛成效。优化极端降雨下小型河流防汛抢险物资调度体系至关重要。本文聚焦这一现实难题，结合多学科理论构建调度优化模型，探索物资调度效能提升路径，为小型河流防汛安全防线筑牢提供支撑。

1 极端降雨情境下小型河流防汛抢险物资调度基础分析

(1) 小型河流防汛抢险物资调度核心特征：极端降雨情境下，小型河流防汛抢险物资调度呈现应急响应导向特征，需与降雨覆盖范围广、涨势迅猛的水文特点匹配^[1]。调度需突出时效性，应对强降雨引发的中小河流超警洪水、山洪地质灾害等突发险情，兼顾分散性，针对小型河流流域内乡镇分布零散、危险区域点多面广的特点，实现物资向多个转移安置点、抢险作业点的快速分流。调度核心围绕“应转尽转”的群众转移需求和“严防死守”的抢险固堤需求，构建快速响应、精准投放的物资流转体系，确保受灾群众基本生活物资与抢险急需物资同步到位。(2) 极端降雨对物资调度的关键影响因素：极端降雨改变水文情势，直接影响物资调度全流程。其累计雨量大、局部雨强超历史极值，导致小型河流水位暴涨速度快，物资需求从预判到实际产生的时间差大幅缩短，增加调度决策紧迫性。强降雨空间分布不均，不同流域、乡镇的险情等级和物资需求类型存在显著差异。部分区域需重点保障救生器材、抢险机械，受灾群众集中区域则急需食品、饮用水、临时安置物资。持续降雨可能引发道路损毁、交通中断等次生问题，破坏物资运输通道连续性。极端天气对运输工具通行能力形成限制，进一步加剧调度难度，物资调度需充分考量气象

水文预报的动态变化。(3) 当前物资调度存在的突出问题：当前小型河流防汛抢险物资调度存在需求预判与实际需求脱节的问题。极端降雨不确定性影响下，物资种类、数量测算缺乏依据，易出现部分物资积压与关键物资短缺并存的情况。调度响应机制灵活性不足，应急响应提级后，各级部门间信息传递存在滞后，物资调配指令下达与一线险情变化不同步。物资储备布局不合理，多集中于县级或重点区域，未能覆盖乡镇级小型河流沿线薄弱环节，储备物资类型与小型河流防汛的针对性适配不足。基层组织在物资接收、分发环节衔接不够顺畅，运输通道保障能力不足，物资从储备点到使用点的“最后一公里”配送效率偏低。

(4) 防汛抢险物资调度的理论支撑：防汛抢险物资调度以应急管理理论为基础，遵循“预防为主、防抗救相结合”原则，将风险预警、应急响应与物资调配有机衔接。系统工程理论提供整体优化思路，将物资储备、需求预测、运输配送、多主体协同等环节视为相互关联的有机整体，实现调度资源最优配置。物流优化理论为物资流转提供技术支撑，通过路径规划、运力分配等方法提升运输效率，应对极端降雨下的交通约束。协同治理理论为多主体参与调度提供指导，明确省级统筹、市县主导、基层落实的层级责任体系，强化防汛指挥部、水利、气象、交通、民政等部门及基层组织的协同联动，确保调度指令高效执行、物资流转无缝衔接。

2 极端降雨情境下小型河流防汛抢险物资调度优化模型构建

(1) 模型构建目标与约束条件设定：模型构建以“精准匹配需求、高效流转物资、保障安全底线”为核心目标，满足极端降雨下小型河流防汛抢险对物资的时效性、针对性需求，确保抢险作业顺利推进和受灾群众基本生活得到保障，实现物资调度成本与效率

的平衡,避免资源浪费^[2]。约束条件需充分考虑气象水文约束,以短期降雨预报、河流水位监测数据为依据,限定物资调度时间窗口;兼顾资源约束,结合现有物资储备总量、储备点分布及运输运力上限,合理分配物资;遵循安全约束,确保物资运输路线避开高风险区域,满足物资存储、运输过程中的安全标准;落实协同约束,明确各级各部门在物资调度中的职责边界与衔接要求,保障调度流程顺畅。(2)物资需求预测与库存动态评估模块:物资需求预测模块以历史降雨强度、河流超警情况、受灾区域人口数量、险情类型等数据为基础,结合实时气象水文监测信息,构建多因素耦合的需求预测模型。分析不同降雨强度下小型河流防汛的物资消耗规律,测算救生器材、抢险物料、生活保障物资等各类物资的需求数量与投放优先级,针对超历史极值雨强情境,预留应急备用物资的需求弹性空间。库存动态评估模块实时追踪各储备点的物资库存状态,包括现有库存、在途物资、损耗情况等,结合需求预测结果,动态更新库存缺口信息,明确需补充的物资种类和数量,建立库存预警机制,重点物资库存低于安全阈值时自动触发补给指令,确保库存水平与险情发展态势动态适配。(3)调度路径优化与运力配置模块:调度路径优化模块基于GIS地理信息系统,整合小型河流流域内的道路网络、桥梁状况、风险区域分布等数据,结合实时交通通行信息,采用动态路径规划算法,生成最优运输路线。针对极端降雨可能导致的部分路段中断问题,预设多条备选路径,根据路况变化实时调整,确保运输通道可靠性。运力配置模块根据物资运输量、运输距离及道路通行条件,合理搭配不同类型运输工具,明确车辆、船只等运力的分配方案,考虑抢险人员与物资的协同运输,提高运力利用率。跨区域调度需求出现时,建立运力统筹协调机制,实现不同区域间的运力互补,保障物资在多个受灾点之间的均衡投放。(4)多主体协同调度机制嵌入:模型嵌入多主体协同调度机制,构建以防汛抗旱指挥部为核心的统筹协调平台,整合水利、气象、交通、民政、应急管理等部门及基层乡镇、村社组织的调度资源。气象部门实时共享降雨预报、水位监测数据,为需求预测和路径规划提供依据;水利部门提供河流险情动态、薄弱环节分布信息,明确物资投放重点区域;交通部门负责保障运输通道畅通,及时清理路障、抢修损毁道路;民政部门对接受灾群众转移安置需求,反馈物资使用情况;基层组织负责物资接收、分发与使用信息上报,形成“信息共享—指令下达—执行反馈”的闭环协同体系。建立跨层级的调度会商

机制,定期通报物资储备、需求变化、运输进展等情况,协调解决调度过程中的堵点问题。(5)模型求解算法选择与设计:模型采用多目标优化算法求解,以物资调度时间最短、需求满足率最高、调度成本最低为优化目标,兼顾多个目标的均衡实现。针对极端降雨下物资调度的动态性和不确定性,引入动态规划算法,将调度过程划分为多个时间阶段,根据每个阶段的降雨强度、水位变化、物资消耗等实时数据,动态调整调度方案。结合遗传算法的全局搜索能力,优化物资储备点与受灾点之间的匹配关系,以及运输路径的组合方案,提高调度方案的全局最优性。算法设计充分考虑小型河流防汛的实际场景,简化不必要的复杂运算,确保算法快速响应,短时间内输出可执行的调度方案,满足应急响应的时效性要求。

3 模型验证与应用保障

3.1 模型验证指标与数据来源说明

模型验证需构建科学全面的指标体系与数据支撑体系,评估调度优化模型在极端降雨情境下的实用性与可靠性。核心指标选取聚焦小型河流防汛抢险的关键需求,调度响应时间细化为从基层险情上报至防汛指挥部、指令下达至储备点、物资装载出发及最终送达受灾点的全流程时长,重点考核“指令传达—物资启运”的衔接效率,这是应对小型河流水位暴涨的核心指标^[3]。物资需求满足率按优先级分类评估,抢险急需物资需达到100%到位标准,群众基本生活物资满足率不低于95%,统计物资错配、积压等情况作为辅助评估依据。运输路径合理性通过路径通行时长、绕行距离、安全系数等子指标衡量,多主体协同效率则以部门信息响应时间、跨层级指令执行偏差率为核心考核内容。数据来源采用“历史沉淀+实时动态”的双维度架构,历史数据涵盖近5-10年小型河流流域的逐小时降雨数据、河流断面超警记录、不同险情下的物资调度台账及受灾区域人口、房屋分布等基础数据,用于模型参数校准与场景模拟;实时数据依托气象部门的短时临近降雨预报系统、水利部门的水位自动监测站、基层防汛网格员的险情上报平台及交通部门的道路实时监控系,实现数据分钟级更新,为模型验证提供动态输入支持,确保验证结果与实际防汛场景高度契合。

3.2 不同降雨强度下的模型适配性测试

全面检验模型在不同极端降雨场景下的适配能力,需设计梯度化降雨强度测试方案,覆盖小型河流防汛的各类典型情境。中等降雨强度场景(24小时降

雨量 50-100mm) 下, 模拟小型河流出现常规超警洪水、险情集中在局部河段的情况, 验证模型需求预测模块对物资种类、数量的测算精度, 分析库存动态评估模块在物资缓慢消耗过程中的调整及时性, 考察基层储备点与县级储备点的物资联动响应效率, 确保模型在常规险情下实现物资精准调配。强降雨场景 (24 小时降雨量 100-250mm) 下, 模拟降雨覆盖整个流域、多个乡镇同时出现险情的情况, 测试模型调度路径优化模块的多目标规划能力, 评估运力有限时物资向多个受灾点的快速分流效果, 验证备选路径在部分乡村道路积水情况下的启用效果, 以及多主体协同机制中跨部门信息共享的实时性。局部特强降雨场景 (24 小时降雨量超 250mm) 下, 模拟雨强突破历史极值、引发山洪地质灾害导致部分区域交通中断的极端情况, 验证模型的应急响应速度 (见图 1), 包括需求预测模块对突发增量需求的快速捕捉能力、路径优化模块对断道区域的绕行方案生成效率, 以及多主体协同机制中跨区域运力支援的协调效果。每个场景测试均设置 3 组平行实验, 对比模型输出方案与实际处置案例的差异, 优化模型参数阈值与算法权重, 确保模型在各类极端降雨情境下均能输出科学可行、高效精准的调度方案。



图 1 山洪地质灾害预警器

3.3 模型落地实施的保障措施

确保调度优化模型从理论落地实际并发挥效能, 需构建全方位的实施保障体系。物资储备体系建设方面, 摒弃传统布局模式, 结合小型河流流域的历史险情分布、人口密集度及地形特点, 在乡镇级关键节点增设标准化储备点, 每个储备点配备 50-100 人的基础

参考文献:

- [1] 李瑞国,王荷茵,陈彬,等.极端降雨作用下抗滑桩加固塔基边坡稳定性分析[J].科学技术创新,2025,(23):37-40.
- [2] 赵琛,王煜,张方宁,等.极端降雨条件对防洪堤渗流稳定性的影响研究[J].水利规划与设计,2025,(12):48-54.
- [3] 夏志宇.极端降雨下水域救援风险与应对策略[J].今日消防,2025,10(10):48-50.
- [4] 杨金顺,高晓涵,王强,等.降雨情景下道路交通系统韧性研究综述[J].综合运输,2025,47(09):104-112.

抢险物资与生活保障物资, 重点储备适合小型河流抢险的轻便型设备, 建立储备物资定期盘点、轮换机制, 避免物资老化失效, 提升物资供应的前置性与针对性^[4]。信息共享平台建设上, 以现有政务数据平台为基础, 整合气象、水利、交通、民政等部门的数据接口, 实现降雨预报、水位监测 (见图 2)、道路通行、受灾情况等数据的实时互通与可视化展示, 平台支持移动端访问, 确保基层防汛人员能随时上传险情信息、查询物资动态, 为模型运行提供全面准确的输入数据。基层执行能力提升方面, 每季度组织乡镇、村社防汛人员开展专项培训, 内容涵盖模型操作流程、物资接收分发规范、应急运输协调技巧等, 每年开展 1-2 次实战化演练, 模拟极端降雨场景下的物资调度全流程, 提升基层组织的实操能力。运输通道保障上, 汛前联合交通部门对小型河流沿线的乡村道路、桥梁进行全面排查, 标记薄弱路段并制定针对性加固方案, 组建应急抢修队伍, 配备小型挖掘机、装载机等设备, 确保降雨期间道路出现损毁时能在 2 小时内启动抢修, 保障物资运输通道畅通。



图 2 水位监测仪

4 结语

本文系统分析极端降雨下小型河流防汛物资调度的特征与问题, 构建的优化模型整合需求预测、路径优化等核心模块, 嵌入多主体协同机制, 可提升调度的精准性与效率。模型验证及保障措施为实践应用提供可行路径, 长效迭代机制确保其适配防汛形势变化。极端降雨情境复杂多变, 后续需进一步融合先进技术, 强化模型在极端突发场景下的适应能力, 持续完善调度体系, 为小型河流防汛抢险工作提供更坚实的保障。