

水文站网密度对中小流域暴雨洪水监测精度的影响

金 珊

河北省秦皇岛水文勘测研究中心 河北 秦皇岛 066000

摘 要：站网密度影响监测精度：低密度站网存在监测精度不足等问题；中等密度站网能兼顾监测精度与成本效益；高密度站网虽提升数据丰富度，但存在数据冗余、仪器维护成本与数据质量权衡、空间自相关性干扰等问题。优化策略包括：基于流域特征差异化布设站网，实现站网密度与流域实际需求精准适配；利用多源数据融合补偿；根据实际需求动态调整站网密度，如洪水事件驱动临时部署站点、利用物联网技术构建移动式监测网络、基于风险评估进行密度优先级排序。

关键词：水文站网密度；监测精度；优化策略

引言：在暴雨洪水监测领域，水文站网密度与监测精度紧密相关。站网密度的量化涉及空间分布与密度阈值，监测精度涵盖降雨、洪水要素及过程模拟等多维度。站网密度通过空间代表性、时间分辨率及误差修正等机制影响监测精度，不同密度场景下监测精度有差异。为提升监测效果，需从基于流域特征差异化布设、多源数据融合补偿、动态调整站网密度等方面优化站网布局。

1 水文站网密度与监测精度的理论关联

1.1 站网密度的量化表征

站网密度的量化表征需结合站点空间分布特征与密度阈值规律，其中站点空间分布均匀性是核心表征指标之一。空间分布均匀性可通过多种指标反映，能够直观体现站点布局的合理程度，反映不同区域站点覆盖的均衡性，避免局部区域站点过于密集或稀疏，为密度量化提供基础依据。密度阈值理论是站网密度量化的重要支撑，核心在于明确密度临界值对监测覆盖的饱和效应，即随着站网密度逐步增加，监测覆盖范围和监测数据完整性会不断提升，但当密度达到临界值后，密度继续增加带来的监测效果提升会逐渐减弱，直至趋于稳定，这一规律为站网密度的合理设定提供了理论指导。

1.2 监测精度的多维度定义

监测精度需从多维度进行定义，涵盖降雨量监测、洪水要素监测及洪水过程模拟三个核心层面。降雨量监测精度主要体现在点雨量与面雨量的误差控制，以及空间插值过程中产生的误差大小，误差越小，说明降雨量监测数据越接近实际情况，监测精度越高。洪水要素精度聚焦于洪水关键要素的监测准确性，包括洪峰流量、洪水总量以及洪水到达时间的监测偏差，这些要素的监

测精度直接影响对洪水特征的判断与把握^[1]。洪水过程模拟的动态匹配度是监测精度的重要补充，通过相关指标反映模拟的洪水过程与实际洪水过程的契合程度，匹配度越高，说明监测数据对洪水过程的还原效果越好，监测精度也越高。

2 站网密度对监测精度的直接影响机制

2.1 空间代表性增强效应

空间代表性增强效应是站网密度影响监测精度的核心机制，核心体现在高密度站网对暴雨空间异质性的捕捉能力，以及站点覆盖范围与洪水波传播路径的匹配度提升上。高密度站网能够大幅强化对暴雨空间异质性的捕捉能力，有效弥补低密度站网空间覆盖不足的短板，减少空间信息遗漏，让监测数据更全面、真实地反映不同区域的暴雨分布差异，避免局部暴雨特征被掩盖，从而显著提升降雨量监测的空间准确性。高密度站网可进一步优化站点覆盖范围与洪水波传播路径的匹配度，使站点布局更契合洪水演进的空间规律，能够更及时、精准地捕捉洪水在不同区域的传播状态和变化特征，减少因站点覆盖缺口导致的洪水空间特征监测偏差，进一步夯实整体监测精度的空间基础。

2.2 时间分辨率优化效应

时间分辨率优化效应是站网密度提升监测精度的重要路径，主要依托站点密度与数据采集频率的协同作用，实现对洪水演进过程的精细化刻画。站点密度与数据采集频率存在紧密的协同关系，高密度站网为高频数据采集提供了坚实基础，能够有效消除低密度站网下高频数据采集的盲区，确保监测数据的时间连续性和完整性，为精准分析洪水动态变化提供可靠的数据支撑。高频数据的稳定获取能够显著提升对洪水演进过程刻画的

精细化水平,可精准捕捉洪水从形成、涨水、洪峰到退水的全过程变化细节,清晰呈现洪水演进的动态特征和变化规律,避免因数据采集频率不足导致的洪水过程关键节点遗漏,有效降低洪水要素监测的时间偏差,进而全面提升监测精度。

2.3 误差修正机制

误差修正机制是高密度站网保障并提升监测精度的关键支撑,主要通过多站点数据交叉验证和密度阈值以上冗余数据补偿两种途径,实现对监测误差的有效抑制与修正。多站点数据交叉验证能够有效抑制单站观测误差,通过不同站点监测数据的相互比对、验证和校准,可及时识别单站观测过程中出现的异常数据和偏差数据,通过剔除或修正异常数据,减少单站观测误差对整体监测结果的干扰,显著提升监测数据的可靠性和准确性^[2]。当站网密度达到临界阈值以上时,产生的冗余数据能够对系统误差起到良好的补偿作用,冗余数据可丰富监测信息维度,通过多源数据融合技术,有效降低监测系统本身存在的固有误差,平衡不同区域监测数据的偏差,进一步优化监测结果的准确性,持续提升整体监测精度。

3 站网密度影响监测精度的量化分析方法

3.1 精度评价指标体系构建

降雨监测的精度需通过多维度指标综合评估。点雨量误差反映单站观测值与真实值的偏离程度,直接体现仪器精度与局部环境干扰的影响。面雨量误差通过空间插值计算整体流域的平均降雨量,其准确性取决于站点分布的代表性与插值方法的适用性。空间变异系数则量化降雨场次的空间不均匀性,揭示站网密度对捕捉极端降雨区域的能力。洪水监测指标聚焦关键水文要素:洪峰流量相对误差衡量峰值模拟的偏差程度,洪水总量绝对误差反映水量平衡的准确性,传播时间偏差体现洪水波从上游到下游的传递效率。过程模拟的评估需结合动态指标,Nash效率系数通过比较实测与模拟洪水过程线的吻合度,综合反映模型对洪水形态的刻画能力;洪水历时匹配度则关注涨落水阶段的时序一致性,避免单一峰值优化导致的整体失真^[3]。

3.2 站网密度量化模型设计

站网空间均匀性评估需引入信息熵理论,通过计算站点分布的熵值量化其空间离散程度。熵值越高表明站点分布越均匀,对流域特征的覆盖越全面,反之则存在局部密集或稀疏区域,影响监测数据的空间代表性。密度与精度的非线性关系可通过回归模型拟合,幂函数模型适用于描述密度增加初期精度快速提升的阶段,而S型

曲线则能反映密度达到阈值后精度增长趋缓甚至饱和的现象。机器学习方法为密度-精度关系挖掘提供新路径:随机森林通过构建多棵决策树捕捉变量间的复杂交互作用,避免传统回归模型的线性假设;支持向量机通过核函数将数据映射至高维空间,解决低密度站网数据稀疏导致的分类边界模糊问题。两类方法均需通过交叉验证优化参数,确保模型对不同流域特征的泛化能力。

4 不同站网密度场景下的监测精度差异

4.1 低密度站网的局限性

低密度站网在暴雨洪水监测工作中存在显著的局限性,核心问题集中在监测精度不足、各类误差累积,以及关键信息捕捉不全面,难以满足流域暴雨洪水精准监测和分析的实际需求。空间插值误差会直接造成暴雨中心定位出现明显偏差,由于站点分布过于稀疏,无法全面、细致地捕捉暴雨的空间分布特征,通过插值方法获取的暴雨中心位置与实际情况存在较大差距,进而影响对暴雨强度、影响范围以及降雨历时的准确判断,给暴雨灾害预判带来不利影响。洪水波传播时间估算过程中会产生明显的累积误差,稀疏的站点无法及时、精准地捕捉洪水波在流域不同区域的传播状态和速度变化,导致传播时间估算出现偏差,且这种偏差会随着洪水传播距离的增加不断累积,严重影响洪水预警的及时性和调度决策的科学性。关键变量采样代表性严重不足,无法全面覆盖流域内关键变量的空间分布特征,使得监测数据难以真实反映流域的实际水文状况,进一步降低整体监测精度,限制对暴雨洪水形成、演进全过程的精准分析和研判^[4]。

4.2 中等密度站网的平衡性

中等密度站网是暴雨洪水监测中兼顾监测精度与成本效益的最优选择,其核心优势体现在能够在监测成本与监测精度之间实现良好的动态平衡,同时有效保障对流域关键特征的全面覆盖。中等密度站网的核心工作之一是探索成本效益最优的密度区间,既有效避免了低密度站网监测精度不足、关键信息遗漏的问题,又成功规避了高密度站网监测成本过高、资源浪费的弊端,在合理控制监测人力、物力和财力成本的前提下,能够满足暴雨洪水监测的基本精度要求,实现监测成本与监测效益的最优平衡。与此同时,中等密度站网能够实现对关键流域特征的代表性覆盖,通过科学合理的站点布局,可全面覆盖流域内的关键区域和核心水文特征,能够精准捕捉暴雨的空间分布规律和洪水的演进过程,有效提升监测数据的代表性和准确性,为暴雨洪水的监测分析、预警调度提供可靠的数据支撑。这种兼顾精度与

成本的平衡性,使得中等密度站网成为多数流域暴雨洪水监测工作的首选方案,既保障了监测效果,又合理控制了监测成本。

4.3 高密度站网的潜在风险

高密度站网虽然能够显著提升监测数据的丰富度和空间覆盖度,在一定程度上优化监测精度,但同时也存在诸多潜在风险,这些风险反而可能影响监测工作的效率和最终的监测精度。数据冗余是高密度站网最突出的问题之一,会直接导致计算效率大幅下降,高密度站网会产生海量的监测数据,其中部分数据存在较强的重复性和关联性,过多的冗余数据会大幅增加数据处理、整理和分析的工作量,延长数据计算和结果输出的时间,降低监测数据处理的效率,影响监测结果的及时输出,难以满足暴雨洪水实时监测和应急处置的需求。仪器维护成本与数据质量之间存在难以调和的权衡问题,高密度站网涉及的监测仪器数量众多,仪器的日常维护、检修和校准成本会大幅增加,若维护投入不足、维护不到位,会导致仪器故障频发,反而影响监测数据的连续性和准确性;若投入过多成本用于仪器维护,又会大幅增加监测工作的整体负担,造成资源浪费。

5 站网密度优化策略的技术路径

5.1 基于流域特征的差异化布设

基于流域特征的差异化布设是站网密度优化的核心技术路径,核心是结合流域固有特征,实现站网密度与流域实际需求的精准适配,提升监测精度的同时避免资源浪费。地形地貌是影响站网密度需求的关键因素,不同地形地貌对监测站点的密度要求存在明显差异,需根据流域地形特征合理设定站网密度,确保能够全面捕捉暴雨洪水的空间分布和演进规律,避免因地形影响导致监测盲区。下垫面异质性同样影响站网密度的布设,土地利用和植被覆盖的空间差异会改变流域的产汇流过程,进而影响暴雨洪水的形成和传播,因此站网布设需适配下垫面异质性特征,在异质性较强的区域合理提高密度,在异质性较弱的区域适当降低密度,实现站网布局的科学合理,提升监测数据的代表性和准确性,为暴

雨洪水监测提供可靠支撑。

5.2 多源数据融合的补偿机制

多源数据融合的补偿机制是优化站网密度、提升监测精度的重要技术路径,通过整合不同类型监测数据,弥补单一地面站网的不足,实现监测效果的优化升级。卫星遥感与地面站点的协同监测能够发挥各自优势,卫星遥感可实现大范围、全天候的监测覆盖,弥补地面站点空间覆盖不足的短板,地面站点则能提供高精度的定点监测数据,两者协同融合可提升监测数据的全面性和准确性,减少因站网密度不足导致的监测偏差。雷达测雨可实现对降雨的精准监测,能够在一定程度上替代部分地面雨量站点的功能,通过分析其替代效应,可合理调整地面站网密度,在保障监测精度的前提下降低监测成本^[5]。无人机应急监测可发挥灵活高效的优点,在暴雨洪水等突发情况时进行临时补充监测,填补固定站点的监测空白,进一步完善监测网络,提升监测的及时性和全面性。

结束语:站网密度与监测精度紧密相连,低、中、高密度站网各有特点与局限。优化站网密度需多管齐下,基于流域特征差异化布设,利用多源数据融合补偿,并探索动态调整站网密度的可行性。如此,才能在提升监测精度的同时,兼顾成本效益,实现资源优化配置,让站网更精准适配实际需求,为暴雨洪水监测、预警及调度提供可靠支撑,保障流域安全与可持续发展。

参考文献

- [1]姬晶.深圳水文站网监测现状及对策研究[J].水上安全,2025,(14):145-147.
- [2]徐秋云,周艳.济南市水文站网建设现状与建议[J].山东水利,2025,(07):64-66.
- [3]黄慧敏.山区小流域水文与水动力耦合模型的构建及洪水淹没风险研究[D].江西:南昌大学,2024.
- [4]徐哲溢.基于时空变源混合产流模型的流域洪水模拟--以乌苏里江为例[D].上海:上海海洋大学,2023.
- [5]浅析水利工程对水文测验的影响[J].周永德.山东水利,2023(02).