

水利设计中的水文分析与防洪策略

张 尧¹ 童 晗² 吴 健¹ 陈 浩¹

1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司 江苏 扬州 225000

2. 新沂市骆马湖退圩还湖开发有限公司 江苏 徐州 221000

摘 要：全球气候变化与城市化使极端降雨频发，洪涝灾害风险提升，对水利工程提出新挑战。水文分析是水利规划设计的核心，其精度与科学性关乎防洪工程的有效性。本文阐述了水文分析在水利设计中的关键作用，探讨现代水文分析的主要方法与技术进展，如频率分析、暴雨—洪水模拟、分布式水文模型及不确定性量化等。结合“海绵城市”“韧性城市”新理念，构建了以“蓄、滞、渗、净、用、排”为核心的综合防洪策略体系。最后，文章展望未来，强调需融合人工智能、大数据、数字孪生等前沿技术，推动防洪减灾向主动适应与智能调控转型，为保障流域水安全和支撑高质量发展提供坚实支撑。

关键词：水文分析；防洪策略；水利设计；频率分析；分布式水文模型

引言

水是生命、生产与生态之基，但洪涝灾害也是重大自然灾害。21世纪，全球变暖使大气环流改变，极端水文事件增多、增强且范围扩大。同时，城市化使自然地表硬化，削弱土壤能力，加剧城市内涝风险。在此情形下，传统单一工程防洪思路难以满足新时代水安全需求。水利设计关乎水资源开发利用保护与灾害防治，其科学前瞻性影响水安全格局，而水文分析作为水利设计的基础性工作，能揭示流域水文规律、评估关键要素，为防洪工程提供决策依据。所以，深化水文分析理论方法、构建综合防洪策略是水利科技领域核心课题。本文将梳理水文分析在水利设计中的理论和技术路径，剖析其核心价值，探索创新防洪范式，为提升灾害防御能力与推进水利现代化提供参考指导。

1 水文分析在水利设计中的定义与目标

水文分析是指运用物理学、数学、统计学等原理与方法，对流域内降水、蒸发、径流等水文要素的形成、转化、运动及相互关系进行定性描述与定量计算的过程。其根本目标在于揭示水文现象的内在规律，特别是极端水文事件（如设计洪水、设计暴雨）的发生概率、量级及其时空分布特征^[1]。在水利设计的具体实践中，水文分析首先需要根据工程的重要性、失事后果以及国家相关规范（如《防洪标准》GB50201）来确定工程所需抵御的洪水或暴雨的重现期，例如50年一遇或100年一遇。在此基础上，分析人员需基于历史水文气象资料，采用合适的分析方法，计算出对应于该设计标准的设计洪水过程线（包含流量、水位、历时等要素）或设计暴雨雨型（包含雨量、历时、空间分布等特征）。更为重要的

是，现代水文分析还承担着评估水文风险的任务，即通过量化由于资料短缺、模型简化、气候变化等因素带来的不确定性，进而评估工程在实际运行中遭遇超标准洪水的可能性，从而为风险管理提供科学依据。

2 现代水文分析的主要方法与技术进展

2.1 频率分析法：传统基石与现代演进

频率分析是水文分析中最经典、应用最广泛的方法，其核心思想是将水文极值序列（如年最大洪峰流量）视为随机变量，通过拟合概率分布函数（如P-Ⅲ型、Gumbel、Log-PearsonⅢ型等）来外推稀遇事件。传统方法严重依赖长系列、高质量的历史观测数据。对于资料短缺地区（无资料或少资料流域），其适用性大打折扣。此外，该方法隐含了“气候平稳性”假设，即未来水文情势与过去一致，这在全球气候变化背景下正受到严峻挑战。现代演进包括：（1）区域频率分析（RFA）：通过水文相似性原理，将邻近流域的信息“借用”过来，有效解决了单站资料不足的问题。（2）非平稳性频率分析：引入时间、气候变化因子（如全球温度指数）作为协变量，构建非平稳概率模型，使设计洪水能动态反映气候变化的影响。（3）贝叶斯方法：将先验信息（如专家经验、物理约束）与样本信息相结合，不仅能给出点估计，还能提供完整的后验概率分布，更好地刻画不确定性。

2.2 暴雨—洪水模拟：从概念模型到物理机制

当缺乏足够长的流量资料，但有相对丰富的降雨资料时，常采用“暴雨→产流→汇流”的模拟途径来推求设计洪水。（1）产汇流模型：从早期的经验性、概念性模型（如SCS-CN模型、单位线法）发展到如

今更注重物理过程的分布式水文模型（如SWAT,HEC-HMS,MIKESHE,LISFLOOD等）。分布式模型能够精细刻画下垫面的空间异质性（土地利用、土壤类型、地形坡度），模拟降雨在空间上的再分配过程，从而得到更符合实际的洪水过程^[2]。（2）设计暴雨构建：如何将频率分析得到的设计点雨量转化为具有合理时空结构的设计暴雨雨型是关键。常用方法包括同频率放大法、典型暴雨移植法，以及更先进的暴雨—洪水耦合模拟法。后者通过大量随机生成符合统计特性的暴雨序列，驱动水文模型，从中筛选出最不利（即产生最大洪峰或洪量）的暴雨情景作为设计依据，避免了传统方法对“典型暴雨”选择的主观性。

2.3 分布式水文模型与遥感/GIS技术的深度融合

地理信息系统（GIS）和遥感（RS）技术为水文分析提供了强大的空间数据支持。高分辨率DEM（数字高程模型）可用于自动提取河网、子流域、坡度等地形信息；遥感影像则能提供动态的土地利用/覆被、土壤湿度、积雪覆盖等关键参数。这些数据极大地提升了分布式水文模型的建模效率与模拟精度，使其成为复杂流域，尤其是无资料流域水文分析的有力工具。

2.4 不确定性分析与风险评估

认识到水文分析结果固有的不确定性是科学决策的前提。现代水文分析越来越重视对各类不确定性来源（输入数据、模型结构、参数、情景）进行系统识别、量化与传播分析。蒙特卡洛模拟、广义似然不确定性估计（GLUE）、贝叶斯模型平均（BMA）等方法被广泛应用。最终，将不确定性信息转化为工程风险（如失事概率），为决策者提供更全面的信息，支持基于风险的防洪设计与管理。

3 基于水文分析的综合防洪策略体系构建

3.1 “蓄”——强化源头调蓄与洪水资源化

“蓄”核心在于通过工程与非工程手段，在流域上游和城市内部增强对降雨径流的拦蓄能力，实现削峰错峰与洪水资源化的双重目标。这一策略的有效实施高度依赖于精准的水文分析。在流域尺度上，水文分析通过对长系列降雨—径流过程的模拟与频率计算，为水库等大型水利枢纽的防洪库容、汛限水位及动态调度规则提供科学依据。现代水库调度已从静态控制迈向基于预报的预泄腾库和实时优化调度，这要求水文模型能够提供高精度、长预见期的入库洪水预报，从而在保障大坝安全的同时，最大化其对下游洪水的调控效益。在更广阔的生态层面，“蓄”的内涵还延伸至对自然生态系统的保护与修复。通过水文分析评估森林、湿地、湖泊等自然

单元的水源涵养功能，可以指导退耕还林、退田还湖等生态工程的布局，从源头上增强流域的“绿色海绵”效应，减缓产汇流速度，降低洪峰流量。这种将人工水库调蓄与自然生态系统蓄水功能相结合的模式，构成了流域洪水风险管理的第一道防线，也为后续的水资源可持续利用奠定了基础。

3.2 “滞”——构建多层级滞洪空间体系

“滞”的策略旨在通过创造临时性的滞洪空间，延缓洪峰向下游的推进速度，为人员转移、工程调度和应急响应争取宝贵时间。这一理念在不同空间尺度上有着丰富的实践形式。在大江大河流域，蓄滞洪区是国家防洪体系中的战略性工程措施。当干流遭遇超标洪水、堤防安全受到严重威胁时，有计划地启用蓄滞洪区分蓄超额洪水，是保障重点防护对象安全的关键举措。精细化的水文—水动力耦合模型在此过程中至关重要，它能够精确模拟分洪口门开启后的洪水演进路径、淹没范围、水深历时及其对区内社会经济和生态环境的影响，从而为蓄滞洪区的科学规划、安全设施建设以及运用预案的制定提供量化支撑。在城市区域，“滞”的思想则体现为建设多功能的雨水调蓄设施^[3]。这些设施包括公园绿地中的雨水湿地、下沉式广场、地下调蓄池等，它们在平时作为城市公共空间或景观节点，在暴雨期间则临时滞留大量雨水，有效削减管网峰值负荷，防止内涝发生。通过水文模型对不同规模、不同布局的滞洪设施进行情景模拟，可以优化其在城市排水系统中的布设，形成由点到面、由分散到集中的多层级滞洪空间网络，显著提升城市的韧性。

3.3 “渗”——促进地表径流向地下入渗

“渗”目标是改变城市过度依赖地表快速排放的传统模式，通过增加地表透水性，促使更多的降雨就地下渗，从而从源头上减少地表径流的产生量和峰值。这一策略的实施效果直接取决于对城市下垫面产汇流特性的深刻理解，而这正是水文分析的专长所在。利用分布式水文模型，可以精细刻画不同土地利用类型（如建筑、道路、绿地）和土壤条件下的入渗能力差异，并量化各类低影响开发（LID）设施（如透水铺装、植草沟、生物滞留池）的径流削减率、峰值延迟时间等关键水文指标。基于这些分析结果，城市规划者可以在开发建设阶段就将透水性要求纳入地块设计规范，系统性地推广透水材料的应用，并优先保护和恢复具有高入渗能力的自然地表。通过大规模、成体系地实施“渗”的措施，不仅能有效缓解城市内涝，还能补充地下水，改善城市微气候，修复因过度硬化而受损的城市水文循环，实现生

态与安全的协同增效。

3.4 “净”——实现雨洪径流的源头净化

“净”强调在雨水排放或利用之前,对其进行有效的污染控制与水质净化,是连接防洪安全与水环境改善的关键纽带。城市地表径流在汇集过程中会携带大量的污染物,如油污、重金属、氮磷营养盐等,若未经处理直接排入河道,将对水生态系统造成严重破坏。水文分析在此环节的作用,不仅在于计算径流量,更在于揭示污染物随径流迁移转化的规律。通过构建水文—水质耦合模型,可以模拟不同降雨事件下污染物的冲刷、输移和沉降过程,识别出污染负荷的主要来源区域(如交通干道、工业区)^[4]。基于此,可以有针对性地径流路径上布设具有净化功能的绿色基础设施,例如利用雨水花园、人工湿地中的植物、土壤和微生物的物理、化学及生物作用,对径流中的悬浮物、有机物和营养盐进行截留、吸附和降解。这种将“净”的功能融入“渗”“滞”“用”等环节的做法,使得雨洪管理从单纯的水量控制,升级为兼顾水质改善的综合水环境治理,为建设健康、宜居的城市水系提供了重要保障。

3.5 “用”——推动雨洪资源的循环利用

“用”体现了变害为利、资源化利用的先进治水理念,即将原本被视为灾害源的雨洪,转化为可资利用的宝贵水资源。在水资源日益紧缺的背景下,这一策略的战略意义愈发凸显。水文分析为雨洪资源化利用提供了基础数据支撑。通过对区域降雨特征、径流系数、可收集面积等要素的精确计算,可以科学评估一个区域或单体建筑的雨水可收集潜力。在此基础上,可以规划与之匹配的雨水收集、储存与回用系统。例如,将屋顶、广场等硬化面的雨水经初期弃流后,收集至地下储水模块,经过简单处理后用于绿化浇灌、道路冲洗、景观补水甚至作为建筑中水。对于更大尺度的城市或流域,还可以结合“蓄”“滞”设施,将调蓄的雨水在非汛期逐步释放,用于河湖生态补水或农业灌溉。这种以水文分析为前提的精细化、系统化利用模式,不仅减少了外排洪水的压力,也有效缓解了城市供水需求,实现了防洪

减灾与水资源保障的双赢。

3.6 “排”——构建高效可靠的末端排放系统

这里的“排”并非回归传统的单一管道快排模式,而是在前述综合措施基础上的补充与兜底。水文分析在此环节的核心任务是为排水系统的设计提供精准的边界条件。基于设计暴雨和经过源头削减后的净径流过程,利用一维、二维耦合的水动力模型,可以精细模拟洪水在复杂城市河网与街道网络中的演进过程,精准识别出因地形、管网能力或河道瓶颈导致的易涝积水点。这套“绿色”与“灰色”相结合的复合排水系统,确保了在常规降雨下依靠自然力实现良性循环,在超常规降雨下则依靠强大的工程能力保障生命财产安全,从而构筑起一个多层次、有韧性的城市防洪排涝安全保障体系。

4 结语

水文分析是水利设计的科学基石,其内涵与方法正深刻变革,从依赖历史数据的静态分析,迈向融合多源信息、考虑气候变化非平稳性且能量化不确定性的动态智能分析范式,为现代防洪策略体系构建奠定坚实基础。未来,水文分析与防洪策略将呈现新趋势:人工智能与机器学习将在水文预测、模型率定、极端事件识别等方面发挥更大作用,提高分析效率与精度;数字孪生流域平台集多技术于一体,实现真实流域数字化映射与智能化管理;防洪设计融入气候变化情景,推动标准转变,增强基础设施气候韧性;防洪策略打破部门壁垒,与多领域深度融合,实现“山水林田湖草沙”系统治理,追求安全、生态等多赢目标。

参考文献

- [1]白玛西培.水利设计中的水文分析与防洪策略[J].水利电力技术与应用,2024,6(14).
- [2]张红.河道防洪治理工程设计断面水文分析[J].青海农林科技,2021(1):69-73.
- [3]王云芳.气候变化背景下水利工程设计防洪标准的调整与思考[J].大众标准化,2025(15):85-86,89.
- [4]曾丽君.基于水文环境问题的生态水利规划策略分析[J].低碳世界,2024,14(3):118-120.