

流域水文模型构建及其在洪水预报中的应用研究

商峻宁 秦玮洪

黄河水利委员会河南水文水资源局 河南 济源 450000

摘要：流域水文模型是模拟和预测流域内水文过程的重要工具，尤其在洪水预报中发挥着关键作用。本文旨在探讨流域水文模型的构建方法及其在洪水预报中的应用，分析现有模型的优缺点，并提出未来发展方向。通过详细阐述模型构建的关键步骤，以及模型在洪水预报中的具体应用，本文期望为流域水文模型的进一步研究和应用提供理论基础和技术参考。

关键词：流域水文模型；构建；洪水预报；应用

引言

洪水是全球范围内频繁发生的自然灾害之一，对人类生命财产安全构成严重威胁。随着气候变化和人类活动的加剧，洪水灾害的频发性和严重性不断增加，对洪水预报的准确性和时效性提出了更高的要求。流域水文模型作为洪水预报的核心工具，能够模拟流域内的水文过程，预测洪水的发生、发展和消退过程，为防洪减灾提供科学依据。

1 流域水文模型构建研究

1.1 模型准备阶段

1.1.1 明确研究目的与范围界定

在着手构建流域水文模型之前，首要任务是精确界定研究区域及流域的地理边界。这一步骤要求综合考虑地形地貌、水系分布及行政划分，确保所选区域具有代表性且便于数据收集与分析。同时，需明确研究的具体目标，比如是侧重于洪水预警、干旱评估、水质监测还是综合水资源管理，这将直接影响模型的设计方向与参数选择。

1.1.2 数据收集与整理

数据是模型构建的基础。需系统搜集包括但不限于地形图（详细标注地貌特征）、土地利用现状图（反映不同土地覆盖类型）、以及高精度的数字高程模型（DEM，用于精确模拟地形起伏）。此外，还需从气象站、水文站等渠道获取长期连续的降雨、气温、湿度、蒸发量、风速等气象水文数据。这些数据需经过严格的质量控制，包括时间序列的完整性检验、缺失数据的合理插补（如采用时间序列内插或基于相邻站点数据的外延）、以及空间上的插值处理，以确保模型输入数据的准确性和空间一致性^[1]。同时，还应详细记录流域内水利设施（如闸坝、堰口、水库）及人工湿地等的关键信息，包括精确位置（经纬度）、设计高程、总容积等，为模型

中的水流调控和生态效应模拟提供基础数据支撑。

1.2 模型构建阶段

1.2.1 流域空间概化

在模型构建阶段的首要环节，是对流域进行空间上的概化，这一过程高度依赖于地理信息系统（GIS）技术的应用。首先，利用GIS软件精确勾勒流域的边界轮廓，确保模型模拟的区域与实际地理范围高度吻合。随后，通过高程数据分析，识别流域内地形的起伏特征，包括山峰、谷地、平原等关键地形元素，以及它们对水流方向和水流速度的影响。坡度信息则用于评估地表径流的潜在速度和侵蚀能力，对于预测洪水演进和土壤侵蚀等具有重要意义。接着，基于高程数据和水文分析算法，识别并描绘出流域内的水系网络，包括主流、支流及其交汇点。特征宽度的确定对于模拟河流水量分配、流速变化及洪水波传播至关重要，它通常根据河流的横断面形态和流量关系进行估算。同时，对土地利用类型进行细致分类，如林地、草地、农田、城市等，因为不同的土地利用方式会显著影响地表覆盖的渗透性、蒸发率和径流产生过程。为了简化模型计算并提高效率，排水系统需进行合理简化，保留主要水系结构，同时合并或忽略次要支流和细微地形变化，以确保模型既能准确反映流域水文特征，又不至于过于复杂而难以处理。

1.2.2 子流域划分

子流域划分是流域水文模型构建中的关键步骤，它直接影响到模型模拟的精度和效率。利用数字高程模型（DEM）数据，通过水文分析工具箱中的流域分析功能，可以自动生成流域水系图，并在此基础上进行子流域的划分。这一过程通常涉及设置最小子流域面积阈值，该值的选择需权衡模型精度与计算成本，既要保证足够数量的子流域以捕捉流域内的水文异质性，又要避免过多的子流域导致计算负担过重。河网节点的编辑是

子流域划分中的另一重要环节，它涉及调整河流交汇点的位置、连接关系以及河流的流向，以确保生成的河网与实际情况相符。此外，还需检查并修正可能出现的异常河段，如断头河、环状河等，以保证水流路径的连贯性和合理性。

1.2.3 模型选择与搭建

根据研究目的和流域特点，选择合适的流域水文模型是构建模型的核心任务。新安江模型、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型、SWMM (Storm Water Management Model) 模型等是常用的流域水文模型，它们各有优势，适用于不同的研究场景和需求。例如，新安江模型适用于湿润地区的降雨-径流模拟，SWAT模型则更擅长于大尺度流域的水资源管理和非点源污染评估，而SWMM模型则专注于城市雨水管理和水质模拟。选定模型后，需在模型平台上构建模型框架，这包括定义子流域的属性（如面积、平均高程、土壤类型等），设置管道网络以模拟水流路径，配置节点以代表水库、湖泊、湿地等水体，并设定出流条件以模拟流域出口的水文过程^[2]。此外，还需根据模型要求，将前期收集的基础地理数据（如DEM、土地利用图）、水文气象数据（如降雨、气温、蒸发等）以及其他相关信息（如水利设施参数）集成至模型数据库中，为后续的模拟分析提供数据支撑。

1.2.4 边界条件与初始条件设定

边界条件和初始条件的设定对于模型模拟结果的准确性和稳定性至关重要。边界条件主要包括入口流量、出口条件以及降雨边界条件。入口流量通常根据上游流域的模拟结果或实测数据确定，用于模拟外部水源对流域内水文过程的影响。出口条件则根据流域出口处的实际情况设定，可以是自由出口（即水位由下游条件决定）或水位控制出口（即出口水位被人为设定或受下游水利设施调控）。降雨边界条件则根据气象预报或历史降雨数据设定，用于驱动模型中的水文循环过程。初始条件则包括水库、水池的初始水位，管道和节点的初始状态（如流量、水质等），以及土壤湿度、地下水位等初始水文状态。这些初始条件的设定应尽可能接近模拟开始时的实际情况，以减少模型启动时的误差和不确定性。

1.2.5 模型参数率定

模型参数率定是模型构建过程中的最后一步，也是确保模型模拟结果可靠性的关键步骤。首先，通过敏感性分析评估模型输出（如流量、水质等）对不同参数变化的反应程度，识别出对模拟结果影响显著的关键参数。随后，利用实测数据（如历史降雨期间的水文与水

质观测记录）对模型参数进行校准和优化。这一过程通常涉及选取多个具有代表性的历史降雨事件作为校准基准，通过逐步逼近策略调整关键参数的值，直到模型模拟结果与实测数据在统计上达到最佳拟合状态。在参数率定过程中，还需注意避免过度拟合现象，即模型在特定校准期内表现良好，但在其他时期或条件下则可能出现较大偏差。因此，除了使用校准期数据外，还应保留一部分验证期数据用于评估模型的泛化能力和预测性能。通过反复迭代和调整参数，最终得到一个既能准确反映流域水文特征，又具有良好预测能力的流域水文模型。

2 流域水文模型在洪水预报中的应用

2.1 洪水模拟与精准预测

流域水文模型作为连接自然水文过程与人类管理决策的桥梁，在洪水模拟与预测中发挥着不可或缺的作用。这些模型基于物理、数学和统计原理，能够全面模拟流域内的水文循环过程，包括降雨的截留、下渗、地表径流、地下径流以及蒸发等关键环节。当降雨数据、蒸发数据以及其他相关气象信息输入模型后，模型便开始计算流域内的产流量，即降雨转化为径流的部分，以及这些径流如何在地表、河道中汇聚，最终形成流域出口断面的流量过程。洪水模拟不仅关注流量的峰值和总量，还细致描绘洪水波的传播速度、洪水历时以及洪水过程中的水位变化等细节，为全面理解洪水事件提供科学依据。通过与实际观测数据的对比，可以客观评估模型的预测精度和可靠性^[3]。这种评估不仅限于单次洪水事件的模拟，更包括对历史洪水序列的回溯模拟，以检验模型在不同气候条件下的稳定性和适用性。准确的洪水预测为洪水预警系统的建立提供了坚实的基础，使得相关部门能够提前做好准备，减少洪水灾害带来的损失。

2.2 洪水预警与高效应急响应

在洪水预警与应急响应领域，流域水文模型的价值尤为凸显。通过实时监测降雨、水位、流速等关键水文气象数据，并结合模型的实时预测结果，可以迅速识别洪水风险区域，及时发布预警信息。预警信息的准确性和时效性对于减少人员伤亡、保护财产安全至关重要。模型还能够根据洪水的发展趋势，预测可能的淹没范围、淹没深度和淹没时间，为紧急疏散和救援行动提供科学依据。在应急响应阶段，流域水文模型成为决策者的得力助手。它能够帮助规划最佳的疏散路线，确保人员安全撤离；同时，还能根据洪水模拟结果，优化救援物资的调配方案，确保救援力量能够迅速到达灾区，为受灾群众提供及时有效的援助。此外，模型还能评估不同应急措施的效果，如临时筑坝、开挖分洪道等，为应

急决策提供技术支持。

2.3 防洪规划与科学调度

流域水文模型在防洪规划与调度中的应用,体现了其作为风险管理工具的重要价值。通过模拟不同防洪措施(如修建水库、加固堤防、疏浚河道等)下的洪水过程,可以科学评估这些措施对洪水控制的效果。模型能够揭示防洪工程在不同洪水频率下的表现,为防洪标准的设定和防洪工程的设计提供科学依据。在防洪调度方面,模型能够模拟水库、堤防等防洪工程的运行状态,预测不同调度方案下的洪水过程,从而优化调度策略。例如,在水库调度中,模型可以模拟不同蓄水位、泄流方式下的洪水影响,帮助决策者制定既能满足防洪需求,又能兼顾兴利目标的水库调度计划。此外,模型还能评估防洪工程在极端气候条件下的安全性能,为防洪工程的安全运行和有效发挥防洪作用提供技术支撑。

3 流域水文模型的优势与挑战

3.1 显著优势

流域水文模型作为现代水文科学的重要工具,其优势主要体现在高精度、灵活性和可扩展性三个方面。首先,高精度是流域水文模型最显著的优势之一。通过精细模拟流域内的水文过程,包括降雨的截留、下渗、地表径流、地下径流、蒸发以及河流的汇流等,模型能够准确预测洪水的发生、发展和消退过程。这种高精度不仅体现在对流量过程的准确模拟上,还体现在对洪水波的传播速度、水位变化等细节的精准捕捉上。其次,流域水文模型具有极高的灵活性。不同流域具有不同的地理、气候和水文特征,模型能够根据这些特征以及数据的可用性,选择合适的模型结构和参数化方案。这种灵活性使得模型能够适应各种复杂多变的流域环境,提高了模型的适用性和实用性^[4]。最后,流域水文模型的可扩展性也是其重要优势之一。模型可以与其他模型(如水质模型、生态模型等)进行耦合,实现多目标模拟和预测。这种耦合不仅能够更全面地反映流域内的水文、水质和生态过程,还能够为流域管理提供更为综合和科学的决策支持。

3.2 面临挑战

然而,流域水文模型在构建和应用过程中也面临着一些挑战。首先,数据不确定性是模型预测性能的重要因素。水文气象数据的不确定性,如降雨量的测量误差、蒸发量的估算不准确等,都会直接影响模型的预测结果。为了降低数据不确定性对模型预测性能的影响,需要加强对水文气象数据的监测和质量控制,同时采用更为先进的数据处理和分析方法。其次,随着模型复杂度的增加,模型参数化和校准的难度也会增大。复杂的模型结构需要更多的参数来描述流域内的水文过程,而这些参数的准确确定和校准需要大量的实测数据和专业支持。为了降低模型复杂度和参数校准的难度,需要加强对模型结构的研究和优化,同时采用更为先进的参数校准方法和技术。最后,对于大规模流域和高分辨率模拟,模型的计算效率成为制约因素之一。随着流域面积的扩大和模拟分辨率的提高,模型需要处理的数据量和计算量也会急剧增加,这可能导致模型运行时间过长或计算资源消耗过大。

结语

流域水文模型在洪水预报中发挥着重要作用,具有高精度、灵活性和可扩展性等优势。然而,模型构建和应用过程中也面临数据不确定性、模型复杂度和计算效率等挑战。未来,流域水文模型将向精细化、智能化和跨学科融合方向发展,为防洪减灾提供更加科学、有效的支持。

参考文献

- [1]沈喆,巫慧林,伍涛,等.水文数据模型构建研究与实现[J].四川水利,2022,43(06):102-106.
- [2]王尊,杨培峰,李荷.小流域SWAT水文模型的构建及规划应用探究——以威远河流域为例[C]//中国城市规划学会,成都市人民政府.面向高质量发展的空间治理——2020中国城市规划年会论文集(08城市生态规划).重庆大学,2021:9.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.037118.
- [3]张志华.黄河中游典型流域水文模型构建及应用[D].郑州大学,2018.
- [4]罗年山.基于大数据的三维水文地质结构模型构建分析[J].世界有色金属,2019,(17):211+213.