

山区小流域径流洪水形成机制与模拟研究

何超

巴音郭楞水文勘测局

DOI:10.12238/hwr.v8i7.5619

[摘要] 研究山区小流域的洪水形成机制和模拟方法具有重要的理论和实际意义。通过揭示洪水形成的关键因素和过程,建立适用于山区小流域的洪水预警预报模型,可以提高洪水预警的准确性和及时性,减少洪水灾害的损失。同时,研究成果可以为防洪工程的设计和建设提供科学依据,优化防洪减灾措施,提升防洪能力。

[关键词] 山区小流域; 径流洪水; 模拟研究

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A

Research on Formation Mechanism and Simulation of Runoff Floods in Small Mountainous Watersheds

Chao He

Bayingolin Hydrological Survey Bureau

[Abstract] The study of the formation mechanism and simulation methods of floods in small mountainous watersheds holds significant theoretical and practical importance. By revealing the key factors and processes of flood formation, establishing a flood early warning and forecasting model suitable for small mountainous watersheds can improve the accuracy and timeliness of flood warnings, thereby reducing the losses caused by flood disasters. Additionally, the research findings can provide a scientific basis for the design and construction of flood control projects, optimize flood prevention and mitigation measures, and enhance flood control capabilities.

[Key words] small mountainous watersheds; runoff floods; simulation research

引言

山区地形复杂,水系发达,加之其独特的自然环境和气候条件,使得这些区域对暴雨等极端天气的响应尤为敏感。暴雨发生时,山区小流域内的降水迅速汇集,形成地表径流,并在短时间内汇聚成洪水,对下游地区构成严重威胁。山区小流域洪水还往往伴随着滑坡、泥石流等次生灾害,进一步加剧了灾害的破坏性和难以预测性。因此,深入研究山区小流域径流洪水的形成机制,掌握其演变规律,对于提高洪水预报精度、制定有效的防灾减灾措施具有重要意义。

1 研究背景

在全球气候变化和极端天气事件频发的背景下,山区小流域的洪水灾害问题日益凸显,成为影响区域可持续发展和居民生活安全的重要因素。近年来,山区小流域洪水的研究面临诸多挑战。一方面,由于山区地形复杂,数据获取难度大,使得洪水模拟的精度受到限制;另一方面,山区小流域的洪水形成机制复杂多样,涉及降水、下渗、产流、汇流等多个环节,需要综合运用多学科知识和技术手段进行深入研究。鉴于此,本文对山区小流

域径流洪水的形成机制进行深入剖析,并构建相应的洪水模拟模型。通过模拟不同重现期的洪水径流过程,揭示洪水在时间和空间上的动态演进规律,为山区小流域的洪水预报、风险评估和防灾减灾提供科学依据和技术支持。

2 山区小流域径流洪水形成机制

2.1 地理环境

山区小流域的地理环境极为复杂,其独特性对径流洪水的形成具有深远的影响。首先,地形因素是关键。这些流域通常位于山脉之间,山高谷深,坡度陡峭,形成了众多深切的山谷和沟壑。这种地形不仅加速了降水向低处的汇集速度,还使得水流在流动过程中获得了巨大的势能,增强了洪水的冲刷力。此外,河流在山区中往往蜿蜒曲折,增加了水流路径的复杂性和不确定性,进一步影响了洪水的演进过程。土壤条件也是不可忽视的因素。山区小流域的土壤多为疏松的砂土、碎石土或风化岩屑等,这些土壤颗粒间空隙大,保水能力差,易于被水流侵蚀和搬运。在暴雨冲刷下,这些土壤材料会迅速被剥离地表,形成大量的泥沙和碎石,与水流混合后形成浑浊的洪水。这种洪水不仅流量

大、流速快,还携带了大量的固体物质,对下游地区造成了严重的冲刷和淤积。

2.2 水文过程

山区小流域的水文过程是一个复杂而精细的自然现象,它涵盖了降水、入渗、产流、汇流等多个阶段。这些阶段相互关联、相互影响,共同构成了山区小流域独特的水文循环和洪水形成机制。

(1) 降水。降水是山区小流域水文过程的起点,也是径流洪水形成的直接驱动力。此类型地区降水通常具有突发性强、历时短、强度大的特点,这些特性使得降水在短时间内能够迅速转化为地表径流。降水量的多少直接决定了后续水文过程的规模和强度。

(2) 入渗。降水落到流域表面后,会经历一个入渗过程。在入渗过程中,一部分雨水被植被截留,通过蒸腾作用返回大气;另一部分雨水则通过土壤孔隙向下渗透。土壤的渗透能力、植被覆盖情况、土壤前期含水量等因素都会影响入渗过程。当土壤含水量达到饱和或降水强度超过土壤入渗能力时,多余的降水将不再入渗,而是形成地表径流。

(3) 产流。产流是指降水扣除损失(包括蒸发、入渗等)后形成径流的过程。在山区小流域中,产流过程受多种因素影响,包括土壤类型、植被覆盖、地形坡度等。当降水强度超过土壤入渗能力时,地表开始积水并形成径流。径流的产生标志着水文过程从垂直方向(降水、入渗)向水平方向(径流)的转变。

(4) 汇流。汇流是指径流在流域内汇集和流动的过程。在山区小流域中,汇流过程包括坡面汇流和河槽汇流两个阶段。坡面汇流是指径流在坡面上沿着地形向低处汇集的过程。由于山区地形陡峭,坡面汇流速度通常较快,且容易形成冲刷和侵蚀。河槽汇流则是指径流进入河道后在河道中流动和汇集的过程。在河道中,径流受到河道形态、水流阻力等因素的影响,其流速、水深等特征会发生变化。

3 山区小流域径流洪水模拟

山区小流域径流洪水模拟研究是一个综合性的水文科学领域,它旨在通过数学模型和计算机技术,对山区小流域在降雨条件下的径流产生、汇集和洪水演进过程进行模拟和预测。

3.1 数据收集与处理

在山区小流域径流洪水模拟研究中,数据收集与处理是至关重要的第一步,它直接影响到后续模型构建的准确性和模拟结果的可靠性。

(1) 基础数据收集。地形地貌数据: DEM(数字高程模型)提供流域内的高程信息,是分析地形特征、水流路径和汇流区域的基础。DEM数据可以通过卫星遥感、航空摄影测量或地面测量等方式获取;等高线图是传统地形图的一种表示方式,通过等高线可以直观地了解地形的起伏变化。在现代GIS(地理信息系统)中,等高线数据通常被转换为DEM数据进行处理。

土壤类型数据: 土壤类型数据描述了流域内不同区域的土壤类型及其物理、化学特性。这些数据对于分析土壤入渗能力、

产流机制以及水土流失等过程至关重要。土壤类型数据可以通过土壤普查、土壤分类图或遥感解译等方式获取。

植被覆盖数据: 植被对径流过程具有重要影响,它可以通过截留降水、增加土壤入渗和减缓水流速度等方式影响径流的产生和汇集。植被覆盖数据可以通过遥感卫星图像、无人机航拍或地面调查等方式获取。

气象数据: 气象数据是径流洪水模拟的重要输入之一,包括降雨、气温、湿度、风速等要素。其中,降雨数据是模拟径流过程的关键,因为它直接决定了流域内水分的补给和径流的产生。气象数据可以通过气象站观测、雷达探测或卫星遥感等方式获取。

水文观测数据: 水文观测数据提供了流域内水文要素(如水位、流量、泥沙含量等)的实测值,是验证和校准模型的重要依据。水文观测数据通常通过水文站、雨量站或水位站等观测设施获取。

(2) 数据预处理。数据清洗: 数据清洗是指识别和纠正数据中的错误、不一致和异常值的过程。在山区小流域径流洪水模拟中,需要对收集到的各种数据进行仔细检查,去除重复、错误或无效的数据记录,确保数据的准确性和可靠性。

数据插值: 由于数据收集条件的限制,往往无法获得流域内每个点的精确数据。因此,需要通过数据插值技术来估算未知点的数据值。常用的插值方法包括反距离加权插值、克里金插值、样条插值等。这些方法可以根据已知点的数据值来估算未知点的数据值,从而得到流域内更完整的数据集。

数据格网化: 数据格网化是指将离散的数据点转换为规则的网格数据的过程。在山区小流域径流洪水模拟中,通常需要将地形、土壤、植被等数据转换为规则的网格形式(如栅格数据),以便与模型进行匹配和计算。数据格网化可以提高模型计算的效率和准确性,并便于进行空间分析和可视化展示。

3.2 模型选择与构建

(1) 模型选择。在选择适合山区小流域径流洪水模拟的模型时,应根据研究区的具体情况、数据可得性、模型特点以及研究目的等因素进行综合考虑。不同的模型各有优势,选择合适的模型对于提高模拟结果的准确性和可靠性至关重要。

水箱模型(Tank Model): 水箱模型,又称坦克模型或黑箱模型,是一种通过降雨过程来计算径流过程的降雨径流模型。它特别适用于山区小流域,因为山区地形复杂,小河流众多,水箱模型可以较好地概括流域的蓄水和出流关系,能够简化复杂的降水径流过程。同时,该模型在小流域的径流模拟中较为准确,且可以与水质模型结合使用,提高模拟的综合性。

HEC-HMS模型: HEC-HMS是综合性水文模拟系统,适用于多种尺度的流域水文模拟。它提供了丰富的组件和算法,能够灵活构建和配置模型,以适应不同的研究需求。特别是在山区小流域中,可以较好地模拟降雨、产流、汇流和洪水演进等过程。该模型综合性强,灵活性强,能够处理复杂的水文过程。

TELEMAC-MASCARET模型: TELEMAC-MASCARET是一个强大的

开源水动力学模拟系统,广泛应用于河流、海洋、湖泊及洪水等水文学和水力学的模拟。它能够处理复杂的水流条件和水动力过程,适用于需要高精度模拟复杂水流条件和水动力过程的研究,特别是在山区小流域中,可以模拟洪水演进过程中的水流动力特性。该模型高精度、开源性强,适用于复杂水流条件的模拟。

新安江模型:新安江模型是由中国学者提出的以蓄满产流为基础的概念性流域水文模型。它结构简单有效、参数有限、适应性广。在山区小流域中,当水文资料相对较少时,新安江模型能够较好地模拟径流过程。

(2)模型构建。模型构建是基于选定的模型框架和收集处理的数据,将模型具体化为可操作的模拟工具的过程。

数据准备:收集并处理地形地貌数据(如DEM、等高线)、土壤类型数据、植被覆盖数据、气象数据(如降雨、气温等)以及水文观测数据等。数据进行清洗、插值、格网化等处理,以满足模型输入的要求。

模型参数设置:根据研究区的实际情况和模型的需求,设置模型的各项参数。这些参数可能包括地形参数(如坡度、糙率)、水文参数(如下渗率、土壤含水量)、气象参数(如降雨强度、分布)以及模型特定的控制参数等。

模型结构搭建:根据研究区的流域特征和模拟需求,构建模型的物理结构和逻辑结构。划分流域为不同的水文单元或子流域,设定水流路径和汇流节点。配置模型组件和算法,如产流模块、汇流模块、河道演进模块等。

模型边界条件确定:设定模型的输入和输出边界条件。输入边界条件通常包括降雨数据、蒸发数据等气象数据,以及初始土壤含水量、河流水位等水文条件。输出边界条件则根据研究目的而定,可能包括流量过程线、水位变化曲线、洪水淹没范围等。

3.3 模拟与验证

在山区小流域径流洪水模拟研究中,模拟与验证是确保模型准确性和可靠性的关键环节。这一过程不仅涉及模型的运行和结果的生成,还包括将模拟结果与实测数据进行对比,以评估模型的性能并进行必要的调整。

(1)模拟过程。模型运行:将准备好的数据输入到模型中,包括降雨数据、地形数据、土壤数据、植被数据等。设置模型的运行参数,如模拟时间步长、模拟时长等。启动模型进行径流洪水模拟,生成模拟结果。这些结果可能包括流量过程线、水位变化曲线、洪水淹没范围图等。

结果分析:对模拟结果进行深入分析,了解流域内径流洪水的时空分布特征。分析不同降雨条件下的径流响应规律,评估流域的产流和汇流能力。识别潜在的洪水风险区域,为防洪减灾提

供科学依据。

(2)验证过程。数据对比:将模拟结果与实测数据进行对比。这包括将模拟得到的流量过程线、水位变化曲线等与水文站、雨量站等观测设施提供的实测数据进行逐一对比。对比时需注意数据的时空匹配性,确保模拟结果与实测数据在时间和空间上的一致性。

误差分析:计算模拟结果与实测数据之间的误差指标,如均方根误差(RMSE)、纳什效率系数(NSE)、相关系数(R)等。分析误差的来源和分布特征,评估模型的模拟精度和性能。特别注意极端事件(如大暴雨、洪水峰值)的模拟效果,因为这些事件对防洪减灾具有重要影响。

模型校准:根据验证结果对模型参数进行调整和优化。这通常是一个迭代过程,需要多次运行模型并调整参数值。校准的目标是使模拟结果与实测数据之间的误差达到可接受的范围,提高模型的模拟精度。在校准过程中,可以采用敏感性分析等方法来确定哪些参数对模拟结果的影响较大,从而优先调整这些参数。

结果解释与应用:在验证和校准完成后,对模拟结果进行合理解释。这包括分析流域内径流洪水的成因、演变规律以及可能的影响因素等。将模拟结果应用于防洪减灾实践中。例如,根据模拟结果制定防洪预案、优化防洪工程布局、提高防洪减灾能力等。同时,还可以将模拟结果用于未来洪水预警和预报系统的开发和改进中,提高洪水预警的准确性和时效性。

4 结束语

山区小流域径流洪水模拟研究在未来将迎来显著的发展,它将深度融合最新科技如人工智能、大数据分析及遥感技术,实现模型精度与预测能力的飞跃。跨学科合作将促进对复杂地形、多变气候及人类活动综合影响的深入理解,构建更加全面和精确的洪水模拟系统。同时,随着数据获取与处理技术的革新,实时监测与预警系统将更加完善,为防洪减灾提供即时有效的信息支持。

[参考文献]

- [1]翟晓燕,郭良.基于洪水行为特征指标的我国山洪类型辨识与模拟[J].中国科学(地球科学),2021,51(7):1092-1106.
- [2]彭为,刘丙军,廖叶颖,等.基于强度与形态指标的洪水分类研究[J].水文,2018,38(6):7-11,76.
- [3]四川大学.基于雨-水-沙变化的山区小流域山洪灾害预警方法:CN202010178730.6[P].2020-03-15.

作者简介:

何超(1991—),男,汉族,四川省南部县人,研究生,工程师,研究方向:水文水资源。