

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240266

随机森林模型解析极端暴雨洪峰流量驱动要素 ——以北京“23·7”暴雨为例

车海伦¹ 李华林¹ 张帆^{1,2} 吴凤月¹ 谢晨新¹ 刘晔¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083)

摘要:【目的】为明晰极端暴雨下洪峰流量形成的驱动要素,对北京“23·7”极端暴雨洪峰进行调查,从而揭示洪峰流量的变化规律,为区域灾后重建规划与防灾减灾工作提供科学依据。【方法】在 2023 年北京“23·7”极端暴雨发生后,对位于暴雨中心的门头沟区 56 条沟道 140 个洪痕点位开展调查,在明晰沟道洪峰流量空间变化基础上,使用随机森林模型定量分析各要素对沟道洪峰流量的驱动规律。【结果】(1)门头沟区沟道洪峰流量大小分布与降雨中心分布有较强一致性,整体由北向南递增,洪峰流量范围在 27.5 ~ 1 072.0 m³/s 之间,超过 10、20、50 年一遇洪峰流量水平的沟道分别占总数的 82%、71%、41%。(2)本次降雨条件下,影响门头沟区沟道洪峰流量差异的前 5 个因素依次为流域面积、沟道长度、平均起伏度、径流系数和淤积量,其相对重要值依次为 1.000、0.524、0.471、0.382、0.346,表明地形因素对此次暴雨条件下门头沟区沟道洪峰流量影响最大。(3)各要素与洪峰流量存在复杂的非线性关系。【结论】根据最重要的 5 个驱动因素,建议灾后恢复重建工作中,以沟道为基本单位,实施“一沟一策”管理策略。合理布设防洪措施,提高工程防洪标准,重点关注淤积量、径流系数等关键可控因素。同时完善应急预案,整治侵占沟道行洪空间等问题,以提升区域的抗洪能力。未来研究需扩展至土地使用模式、水利设施建设等人为因素,因地制宜地分析洪峰流量影响机制,为不同地区的防灾减灾工作提供精准的指导。

关键词: 北京“23·7”暴雨; 洪峰流量调查; 门头沟区沟道; 曼宁公式; 驱动要素解析; 随机森林模型

中图分类号: S714.7; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)01-0051-12

引文格式: 车海伦, 李华林, 张帆, 等. 随机森林模型解析极端暴雨洪峰流量驱动要素——以北京“23·7”暴雨为例 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 51-62. Che Hailun, Li Hualin, Zhang Fan, et al. Using random forest model to analyze driving factors of extreme rainstorm peak discharge: taking the “23·7” rainstorm in Beijing as an example [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 51-62.

Using random forest model to analyze driving factors of extreme rainstorm peak discharge: taking the “23·7” rainstorm in Beijing as an example

Che Hailun¹ Li Hualin¹ Zhang Fan^{1,2} Wu Fengyue¹ Xie Chenxin¹ Liu Ye¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To clarify the driving factors of peak discharge formation under extreme rainstorms, an investigation of the extreme rainstorm peak discharge in Beijing’s “23·7” event was conducted, thereby revealing the patterns of peak discharge variation, and providing a scientific basis for regional post-disaster reconstruction planning and disaster prevention and mitigation work. [Method] To analyze the drivers of peak discharge under extreme rainfall conditions, after the extreme rainfall event in Beijing in July, 2023, a research team surveyed 140 flood mark points across 56 gullies in the Mentougou District. Then, the random

收稿日期: 2024-08-20 修回日期: 2024-11-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42330705), 中央高校基本科研业务费(BLX202212)。

第一作者: 车海伦。主要研究方向: 小流域综合治理。Email: 18170404647@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 张帆, 博士, 讲师。主要研究方向: 流域治理与生态修复。Email: Zhang_fan@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

forest model was used to analyze the factors driving peak discharge based on the spatial changes. [Result] (1) In the Mentougou District, the peak discharge of gullies increased from north to south, with values ranging from 27.5 to 1 072.0 m³/s. Gullies exceeding the peak discharge levels for 10-year, 20-year, and 50-year events accounted for 82%, 71%, and 42% of the total, respectively. (2) The main factors influencing peak discharge differences in Mentougou District under rainfall conditions were basin area, gully length, mean relief amplitude, runoff coefficient and sediment accumulation, with importance values of 1.000, 0.524, 0.471, 0.382, 0.346, respectively. The topographic factors had the greatest influence on peak discharge in the gullies of Mentougou District under current heavy rainfall conditions. (3) These factors exhibited a complex nonlinear relationship with peak discharge. [Conclusion] Based on the five key driving factors, it is recommended to implement a “One Gully, One Strategy” management approach for post-disaster recovery and reconstruction, using gullies as the basic unit. The strategy should include rational flood control measures and higher engineering standards, focusing on key controllable factors such as sediment accumulation and runoff coefficient. Additionally, emergency plans should be improved, and actions should be taken to address encroachments on gully flow areas to enhance flood resistance. Future research should expand to include human factors such as land use patterns and water infrastructure construction, analyzing the impact mechanisms of peak discharge in different regions to provide more precise guidance for disaster prevention and reduction efforts.

Key words: “23·7” rainstorm in Beijing; peak discharge investigation; gullies in Mentougou District; Manning formula; analysis of driving factors; random forest model

气候变化增加了极端降雨事件强度与频率,导致全球洪水灾害频发,造成了巨大财产损失和人员伤亡^[1-3]。2023年7月底,北京市及周边地区遭遇特大暴雨(以下称“23·7”暴雨),该暴雨存在累计雨量大,覆盖范围广,降水时间长,极端性突出等特点。该降水事件中,北京市累计平均降雨量331 mm,突破1961年有完整观测记录以来的历史极值。在山区引发严重的洪涝灾害,造成严重财产损失和重大人员伤亡^[4-5]。在此次暴雨中,门头沟区受灾尤为严重。7月31日,该区多条沟道洪峰流量相继超出防洪标准,诱发了山洪灾害,严重威胁了当地居民的生命财产安全^[6-7]。洪水过后当地亟需开展灾后重建工作,而了解暴雨条件下沟道洪峰情况与成因是重建工作的前提^[8-9]。因此,进行极端暴雨事件下沟道洪峰调查与驱动要素解析,对指导门头沟区灾后重建与类似地区防灾减灾有重要意义。

目前,洪峰流量数据主要通过水文站实测^[10-11]、模型模拟^[12-13]和野外调查^[14]等方法获取。水文测站存在覆盖率不足的问题,特别是许多山区沟道通常没有水文测站^[15]。使用模型模拟需要准确数据进行参数率定,但由于洪水过程复杂,行洪通道会随洪峰流量大小与淤积情况发生改变,而水文模型无法捕捉这类条件的动态变化,所以仅使用模型模拟洪峰流量会导致极大的不确定性^[16]。相较于水文站观测和模型模拟,野外调查能够直接获得洪水事件后的沟道洪峰流量,因此被广泛用于沟道洪峰流量研究

中^[17]。此外,沟道山洪暴发集水区面积往往小于1 000 km²,多为资料缺乏地区,难有洪峰流量数据支撑水文数据分析^[18]。因此,山洪发生后的野外洪峰流量调查在山洪洪峰研究中有着不可替代的作用。

洪峰形成受到多因素的共同作用,并且具有明显空间分异特征^[19]。对于洪峰流量的关键影响因素,一些学者认为雨量、雨强是对洪峰流量影响最大的因素^[11-12,20],但在各地常发生小雨有洪,大雨无洪的现象^[8]。因此国内外学者围绕这一问题开展了大量研究,发现洪峰流量的关键影响因素还包括流域面积、坡度、主河道长度、植被等^[21-23]。已有研究也指出,不同地区因为气象、地形、植被等因素的空间异质性会导致洪峰流量的主要影响因素不同。作为中国的政治、经济和文化中心,北京市近年来面临自然灾害的挑战,特别是在门头沟区等山区地带,由于气候变化和地形特点,洪水和泥石流的发生频率有所增加^[24]。对门头沟区山洪及泥石流的相关研究主要聚焦在泥石流的影响因素、发育特征、易发区识别及防治对策等方面^[25-26],而对暴雨引发山洪的沟道洪峰流量全面调查及驱动因素解析研究较少,且使用的方法较难捕捉洪峰流量与影响因素复杂的非线性关系。

为明晰“23·7”暴雨下北京门头沟区洪水情况,明确北京山区沟道洪峰流量的影响因素,助力区域防洪与灾后恢复重建,研究团队在北京“23·7”极端暴雨事件发生后第一时间对北京市门头沟区56条沟道的140个洪痕点展开全面调查,探究洪峰特征,进一

步结合随机森林模型识别洪峰流量的关键因素, 并利用偏依赖分析捕捉复杂的非线性关系。本研究旨在为北京门头沟区灾后重建提供科技支撑, 并提升山区洪水应对能力。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

门头沟区(115°25'00"~116°10'07"E, 39°48'34"~40°10'37"N)位于北京城区西南方向, 属典型的北温带半湿润大陆性季风气候。研究区总面积 1 447.85 km², 海拔 50~2 303 m, 全区山区面积达 98.5%, 是北京市唯一的纯山区行政区。门头沟区地形呈锯齿状, 阶梯状上升, 平缓的山地与陡峭的山坡交替出现, 导致径流流速较快, 河谷深切。特殊的地形使得门头沟区在历史上经常发生洪涝与泥石流等一系列灾害。自 1700 年至 2018 年, 门头沟区有记载共发生 16 次泥石流灾害^[26]。“23·7”暴雨门头沟区平均降雨量为 564 mm, 暴雨中心主要分布在南部(图 1)。该区沟道网络发达, 具有主沟贯穿全境, 支沟遍布各处的树枝状结构, 现有 56 条山洪沟道。

1.2 野外洪痕调查

研究团队于 8 月 4 日起对门头沟区全部 56 条山洪沟道开展洪峰调查, 覆盖了清水、斋堂、潭柘寺、王平、雁翅、大台、妙峰山等 12 个乡镇及其周边的 84 个行政村。调查过程中, 按照《水文调查规范》(SL196—2015)的要求, 进行山洪沟洪水考证记录、洪水痕迹现场调查。选取沟道内不冲不淤沟段的顺直段作为洪痕调查断面, 在每条沟道沟口处及附近调查 2~3 个洪痕点。同时在留有痕迹的建筑物、山体岩石、桥墩或者自立碑牌, 用防水耐用油漆标识做标记进行洪痕划定。沟道调查共记录洪痕断面 140 处。每条沟道筛选一个最靠近沟口的洪痕作为

参考断面, 确定该洪痕断面以上面积, 计算洪峰流量。调查洪痕点分布如图 2 所示。

1.3 洪水特征计算及合理性分析

选择洪峰流量、洪峰模数、设计洪峰流量作为洪水特征进行分析计算。洪峰流量采用曼宁公式^[18]。

$$Q = \frac{S}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1)$$

式中: Q 为洪峰流量(m³/s), S 为过流断面面积(m²), R 为水力半径(m), J 为水面比降(无量纲), n 为糙率系数(无量纲)。水力半径 R 由断面面积除以实测湿周获得, 湿周指流体断面与固体壁面接触的周长; 水面比降 J 通过洪痕点上下约 100 m 处的高程差除以该长度计算得到。

图 3 为现场典型简单梯形断面与包含滩地的复式断面示意图, 不同断面的水力半径与糙率不同, 河道与滩地的糙率系数 n 依据《水文分析与计算》、《洪水风险图编制导则》(SL 483—2017)、《水利工程实用水文水利计算》和《美国地调局—糙率选取指南》, 基于各项影响因素逐项分析后累加得到综合糙率值(表 1)。

洪峰模数是流域内单位面积产生的洪峰流量(Q), 表示流域产洪的能力^[27]。

$$M = Q/A \quad (2)$$

式中: M 为洪峰模数(m³/(s·km²)), A 为流域面积(km²)。

在缺乏实测洪水资料的地区, 洪水计算可以通过《北京市水文手册》(洪水篇)中北京地区经验公式计算。该法适用山区洪水估算, 是根据北京市山区 240 处历史洪水资料调查, 按不同重现期、自然地理条件、洪水分区分析而得, 并与山区水文站实测洪峰流量分析成果及推理公式计算成果等进行校验。

$$Q = KN^m A^p \quad (3)$$

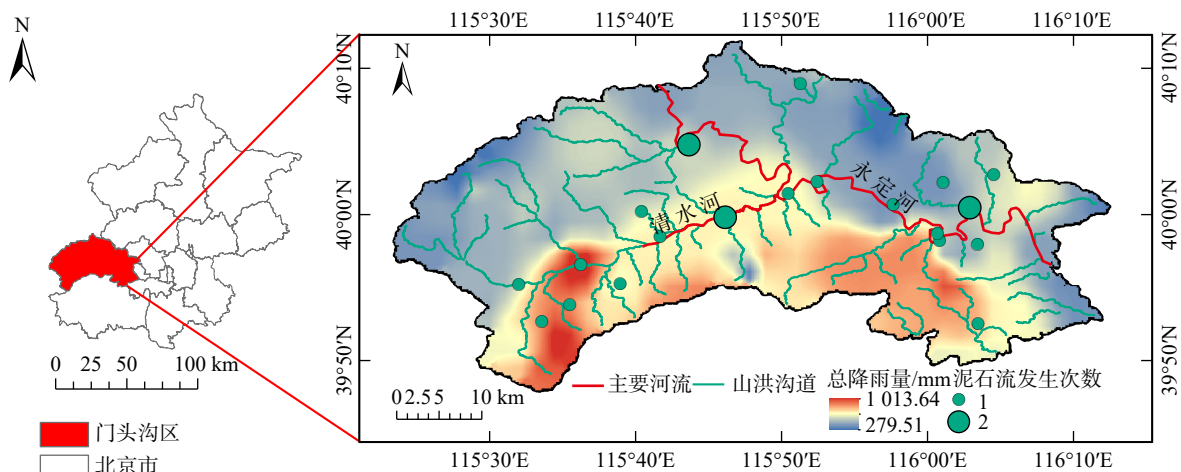


图 1 研究区地理位置及“23·7”暴雨分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of “23·7” rainstorm

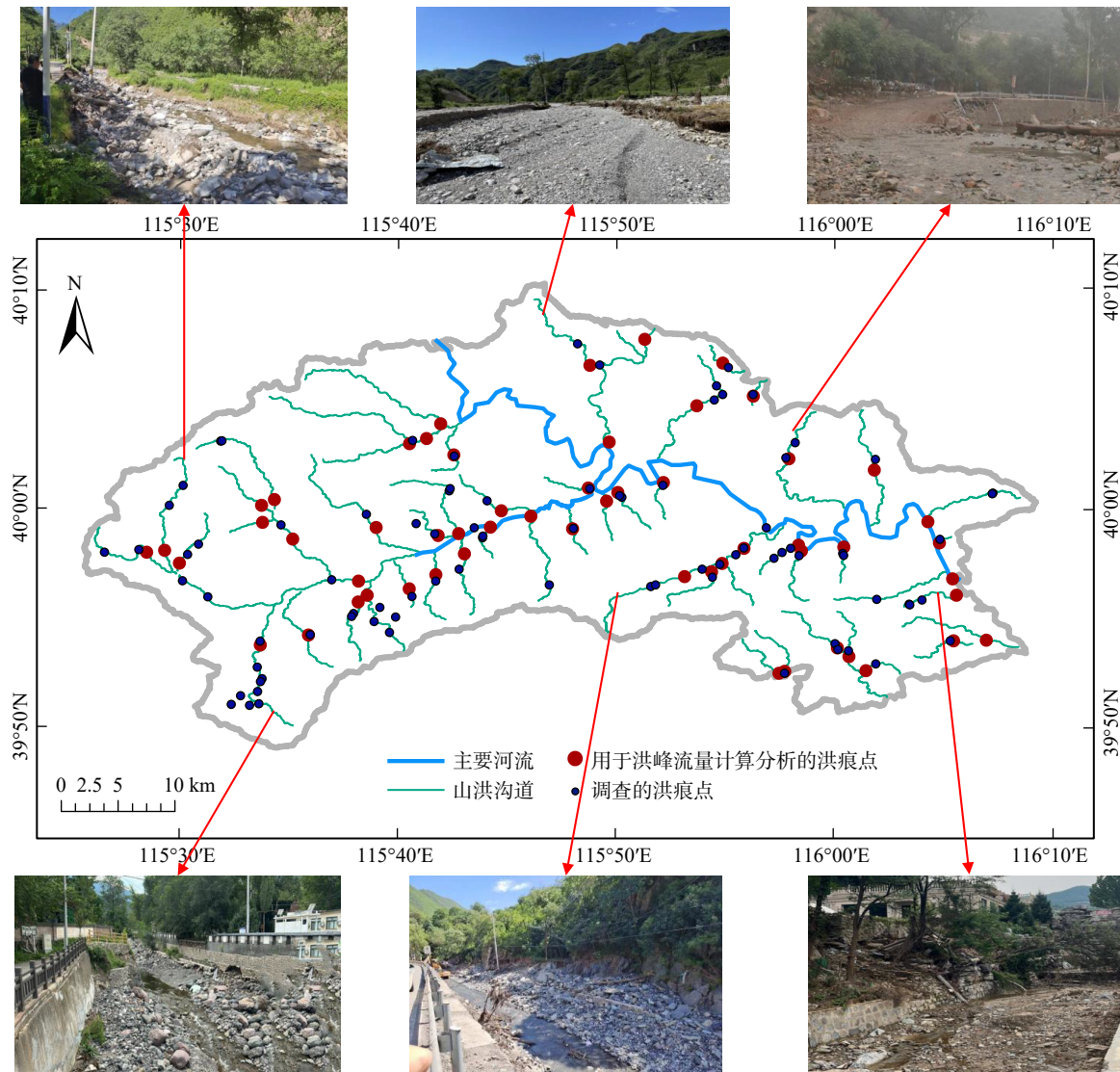


图2 洪痕点分布及现场调查照片

Fig. 2 Distribution of flood mark points and field investigation photos

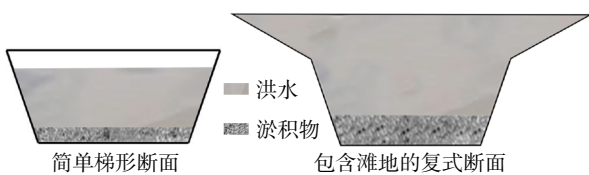


图3 沟道横断面示意图

Fig. 3 Gully cross section diagram

式中： K 为综合系数， N 为重现期(年)， m 和 p 为经验系数。

已知流域面积后，根据设计流域所在分区，采用表2的分区经验公式估算某一设计重现期标准下的洪峰流量。将曼宁公式算得的洪峰流量与经验公式算得的设计洪峰流量对比，可估计沟道洪水重现期范围。

洪水特征的合理性分析是保证结果质量的重要环节。因此，需要对调查结果进行合理性分析。当上、下游气候和地形等条件相似时，洪峰流量的均值由上游向下游递增，洪峰模数则递减。当上、下游气

表1 沟道及滩地糙率取值范围

Tab. 1 Range of roughness values for gullies and beaches

河床材料	n	障碍物的相对影响	n	不规则度	n	植被密度	n
土	0.020	可忽略	0.000 ~ 0.004	光滑	0.000	低	0.005 ~ 0.010
岩石	0.025	较小	0.005 ~ 0.015	轻度	0.001 ~ 0.005	中	0.010 ~ 0.025
细砾	0.024	轻微	0.020 ~ 0.030	中度	0.006 ~ 0.010	高	0.025 ~ 0.050
粗砾	0.028	严重	0.040 ~ 0.050	严重	0.011 ~ 0.020	非常高	0.050 ~ 0.100

注： n 为糙率系数。

表 2 北京山区分区经验公式

Tab. 2 Empirical formula for Beijing mountainous area

分区	公式
I	$Q = 2N^{0.63}A^{0.60}$
II	$Q = 2N^{0.68}A^{0.60}$
III	$Q = 9N^{0.40}A^{0.65}$

注: Q : 洪峰流量; N : 重现期; A : 流域面积。

候和地形等条件不一致时, 洪水特征变化就比较复杂, 需结合具体河流特点加以分析^[28]。对比下游有沟道汇流的沟道洪峰流量、洪峰模数和上游汇入沟道的洪峰流量均值、洪峰模数均值, 进行合理性分析。

1.4 影响因素分析

随机森林(random forest, RF)模型^[29]可以模拟水文变量和影响因素之间复杂的非线性关系, 因其高效、准确的优势在水科学方面有大量的应用^[30-32]。本研究通过 RF 模型量化影响因素的重要性, 进一步确定洪峰流量的关键影响因素。随机种子可确保模型的可重复性。精度平均减少值(IncMSE%)指每个预测变量值被随机替换后, 随机森林模型预测误差相对于原始误差的增加比例。IncMSE% 的值越大, 表明该变量对模型预测的影响越大, 即该变量越重要。节点纯度增加值(IncNodePurity)指每个变量对分类树每个节点观测值异质性的影响程度, 值越大, 说明该变量越重要。不同随机种子构建的模型与同一模型不同指标识别的关键因素均不完全相同, 因此本文选择不同随机种子, 构建 50 次 RF 模型来消除随机性的影响。为综合评估变量的重要性, 使用相对重要性评价指标(relative importance evaluation index, RIEI), 即基于 50 次模型中各个因素的 IncMSE% 和 IncNodePurity, 分别用 Min-Max 归一化法进行归

一化处理, 然后相加取平均值, 量化每个因素的重要性^[33]。此外, 随机森林模型作为一种集成的机器学习方法, 难以对模型中各输入参数的影响进行解释。因此根据随机森林回归结果, 绘制洪峰流量与影响因素的偏依赖图, 分析洪峰流量对各影响因素的响应机制。

考虑到数据的可靠性和可用性, 在梳理相关研究^[34-35]的基础上, 从地形、植被、降雨和其他 4 个方面选取 10 个因素作为洪峰流量的驱动因素(表 3)。地形方面, 选择流域面积、沟道长度、沟道平均比降、平均起伏度、流域形状系数 5 个影响因素。有研究表明, 假设流域某次洪水事件总降雨量相等的情况下, 降雨量在 12 h 内平均分布, 模拟洪峰流量与实际洪峰流量最接近。而在 1~3 h 内分布总是高估洪峰流量, 24 h 分布则总是略微低估洪峰流量^[36]。因此, 降雨指标选择总降雨量和最大 12 h 雨量。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)代表植被。有些因素是综合作用的结果, 如淤积量、径流系数同样对洪峰流量产生较大影响, 因此其他方面选择了淤积量和径流系数。使用 R 语言(v4.3.2)中的“randomForest”“pdp”“ggplot2”“caret”“gridExtra”等包, 对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 结果合理性检验

基于实测洪痕断面数据估算得到各沟道洪峰流量。为确保分析结果的准确性, 在进行沟道洪峰流量分析前, 首先对结果的合理性进行检验。选择研究区具有代表性且上游有沟道汇流的 5 条沟道, 即湫河、清水河下游、大北沟下游、清水涧沟下游和龙门沟进行合理性检验。结果显示, 5 条沟道洪峰流量均符合上游均值小于下游的规律, 有 3 条沟道的洪

表 3 洪峰流量驱动因素

Tab. 3 Driving factors of peak discharge

类别	名称	因素解释	单位
地形	流域面积	本文特指洪痕断面以上的流域面积	km ²
	沟道长度	一条沟道从源头至终点的总长度	km
	沟道平均比降	沟道纵向剖面上单位水平距离内的高程变化与该水平距离的比值	
	平均起伏度	所有相邻高程点的绝对高差相加/(高程点数量-1)	m
	流域形状系数	流域面积与流域长度平方的比值	
降雨	总降雨量	在一个特定地理区域内, 所有流入该区域的降雨总量	mm
	最大12 h雨量	降雨过程中连续的12 h内, 观测到的最大降雨量	mm
植被	归一化植被指数	一种用于评估植被覆盖和健康程度的指标	
其他	淤积量	在水中沉积的固体颗粒物质的总量	10 ⁵ m ³
	径流系数	综合反映降雨径流关系的特征值, 根据《北京市水文手册》(暴雨图集)得到	

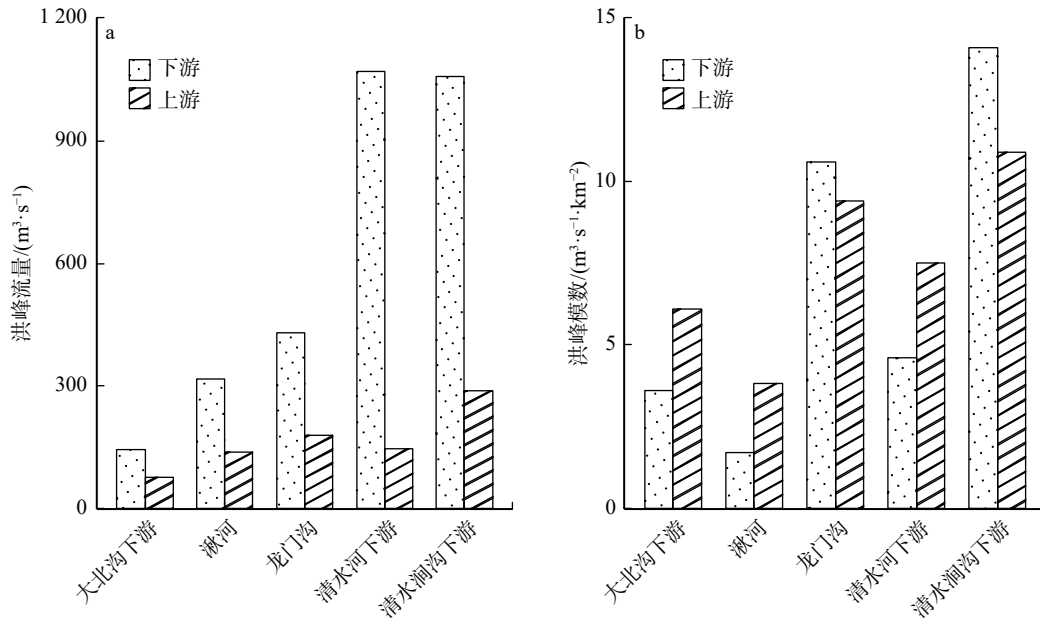


图4 洪痕调查合理性分析

Fig. 4 Rationality analysis of flood mark survey

峰模数满足上游大下游小的规律(图4)。其中清水涧沟下游与龙门沟由于淤积严重,沟道行洪不畅,导致洪峰模数偏大。总体而言,沟道洪峰调查结果基本遵循了洪峰流量由上游至下游递增、洪峰模数由上游至下游递减的原则,调查结果基本合理。

2.2 沟道洪峰空间特征

沟道洪峰流量数值分布范围较广,且差异较大(图5和表4)。沟道洪峰流量主要分布在30.0~200.0 m³/s之间,均值为194.0 m³/s。沟道洪峰流量最大值为1072.0 m³/s,最小为27.5 m³/s。

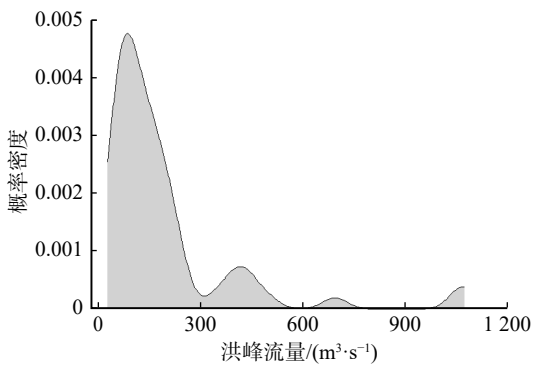


图5 沟道洪峰流量数据分布

Fig. 5 Distribution of gully peak discharge data

门头沟区沟道洪峰流量峰值中心与暴雨中心一致性较高,整体均呈南多北少的空间分布特征(图6)。南部洪峰高值区的沟道流域面积与沟道长度较大,且处于降雨中心位置,总降雨量和最大12 h降雨量远高于北部,因此洪峰流量相对较高。位于降雨中心附近的南部清水河下游、清水涧沟下游、清水涧沟上游的沟道洪峰流量,是所有沟道洪峰

表4 各沟道洪峰流量范围

Tab. 4 Peak discharge range of each gully

洪峰流量范围/ (m³·s⁻¹)	沟道名称
27.5 ~ 92.2	煤窑涧沟、清水河上游、柏瀑寺沟、林子台沟、油库沟
	青龙涧沟、大北沟上游、东港西沟、西达摩沟、苇甸沟
	观涧台沟、白石沟上游、水泉子沟、泗家水沟、盐梨沟
92.2 ~ 165.0	西龙门沟、潭柘寺东沟、王平沟、法城沟、田寺沟
	刘公沟、大北沟下游、南石羊沟、西马涧沟、达摩沟
	白虎头沟、军庄沟、中门寺沟、韭园沟、马栏沟
	灵水沟、双道岔沟、大三里沟、瓦窑沟、七里沟
165.0 ~ 240.0	老峪沟下游
	刺猬河上游、西峰寺沟、黄崖沟、刘家峪沟、桑峪沟
240.0 ~ 693.0	樱桃沟、小龙门沟、北山沟、冯村沟、火村沟
	下马岭沟、南涧沟、沿河城沟、龙门沟、门头沟
693.0 ~ 1072.0	大南沟、湫河
693.0 ~ 1072.0	清水涧沟下游、清水涧沟上游、清水河下游

流量中的前3位。也有沟道降雨量相近,但洪峰流量差异较大,例如沿河城沟与大北沟上游、大南沟与田寺沟降雨量相近,但沿河城沟、大南沟洪峰流量分别是大北沟上游、田寺沟洪峰流量的6倍。这一方面由流域面积与沟道长度所致,另一方面也与流域的水土保持措施密切相关。例如,田寺沟在20世纪60年代由关君蔚院士通过修建谷坊、护村堤和梯田等工程措施进行了治理^[37]。调查显示,这些水保措施在此次极端暴雨事件中仍然发挥了巨大的蓄水保土作用,有效控制了洪峰流量。田寺沟的治理经验为未来的小流域综合治理提供了有益启示。

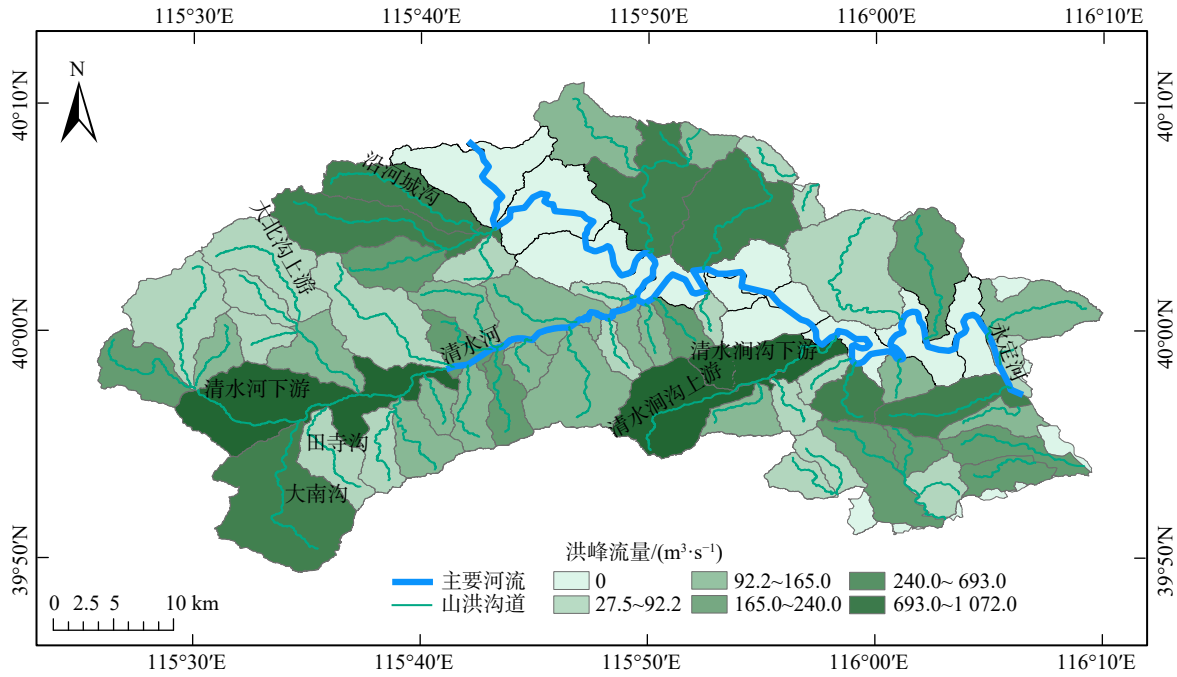


图 6 沟道洪峰流量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of peak discharge in gullies

对比曼宁公式计算得到的洪峰流量和由经验公式计算的不同重现期设计洪峰流量, 可得沟道洪水重现期(图 7)。“23·7”极端暴雨事件中, 门头沟区有 23 条沟道洪水超过 50 年一遇水平, 占比 41%, 包括清水涧沟下游、龙门沟等; 20~50 年一遇的沟道有 17 条, 占比 30%, 如冯村沟、瓦窑沟等; 10~20 年一遇的沟道有 6 条, 占比 11%, 如田寺沟、林子台沟等; 低于 10 年一遇的有 10 条沟道, 占比 18%, 如东港西沟、盐梨沟等。此外, 开展洪痕调查时发现, 部

分横向建筑物及护坡等沿河建筑受损严重, 在河道中形成淤积, 增加了洪水漫溢风险。现行小流域综合治理标准普遍以“20 年一遇”进行设计, 但在未来极端气候发生频率增加背景下, 门头沟区灾后恢复重建中应参考本次暴雨条件下沟道洪水的重现期, 针对性对各种措施进行除险加固, 以提高应对极端暴雨的能力。

2.3 沟道洪峰影响因素

为准确评估各沟道的产流特征, 选取沟道构建

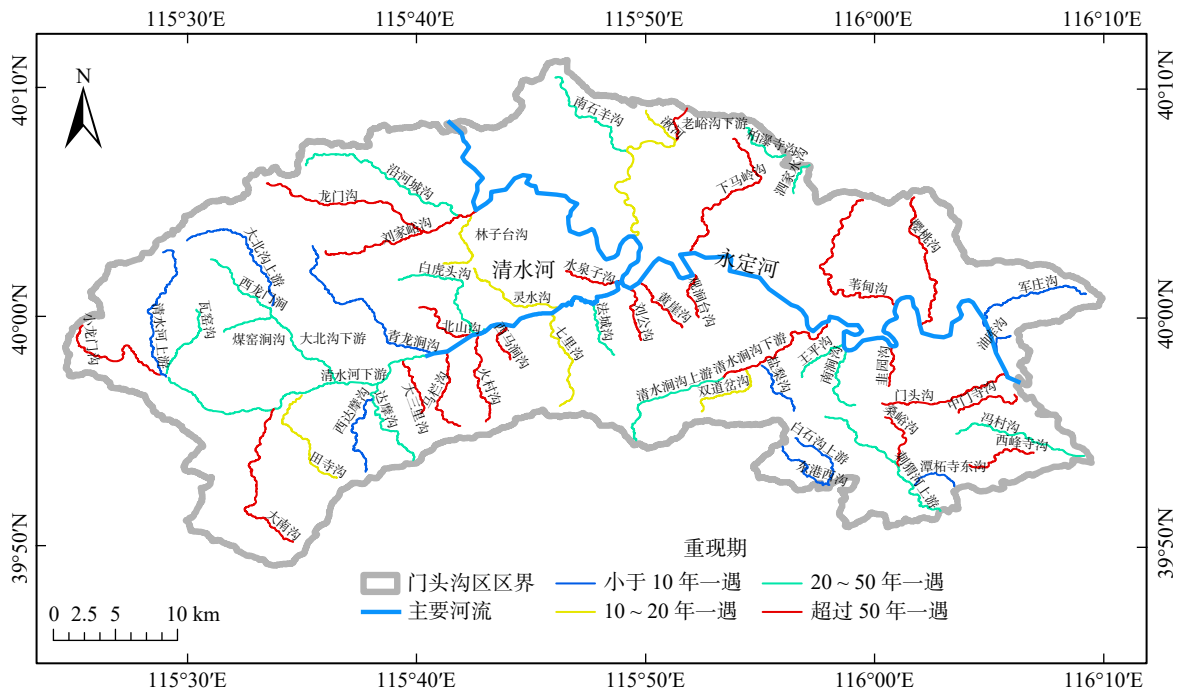


图 7 沟道洪水重现期分布

Fig. 7 Distribution of flood return period in gullies

随机森林模型时剔除了清水河下游、清水涧沟下游、大北沟下游、湫河、龙门沟 5 条存在多个沟道汇流的沟道。各因素重要性排名依次为流域面积、沟道长度、平均起伏度、径流系数、淤积量、最大 12 h 雨量、总降雨量、流域形状系数、NDVI、沟道平均比降, 相对重要性值依次为 1.000、0.524、0.471、0.382、0.346、0.344、0.085、0.030、0.013、0.009(图 8)。其中淤积量通过同一位置灾前灾后地形高程变化来反映。基于立体测绘技术构建各山洪沟流域灾前、灾后数字高程模型, 对比同位置灾前灾后高程变化, 进而计算淤积量。

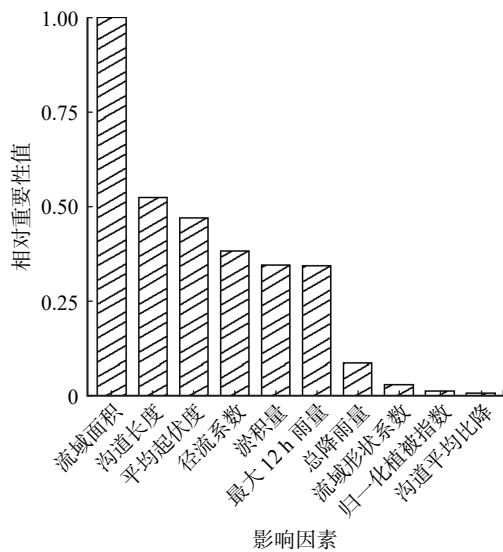


图 8 影响洪峰流量的各因素重要性排名

Fig. 8 Ranking of importance of factors affecting peak discharge

流域面积和沟道长度是表征流域大小的因素。流域大小是影响洪峰流量的重要因素, 因为它直接决定了雨水收集区域的大小。通常情况下, 在降雨强度和降雨量相同条件下, 较大的流域会汇集更多雨水进入沟道, 从而产生更大的洪峰流量。平均起伏度反映了地形的陡峭程度, 通过影响径流路径长度与径流速度影响洪峰流量, 也是影响洪峰流量的重要因素。而流域形状系数对洪峰流量影响较小, 表明暴雨条件下门头沟地区洪峰流量受流域大小影响更大, 而非流域形状。

通常假定在集水区条件不变的情况下, 降雨是洪水形成的主要驱动因素^[38]。但通过对门头沟小流域调查研究发现, 降雨因素重要性排名居中。这表明小流域洪水的形成是多重因素共同作用的结果。一般来说, 由于植被的冠层截留与枯枝落叶拦蓄作用, 植被覆盖越高的地区洪峰流量越小。但对各因素重要性分析(图 8)后发现, 本次暴雨条件下门头沟地区的 NDVI 对洪峰流量的削减作用并不明显。这一现象可能是由于本次降雨持续时间长且强度

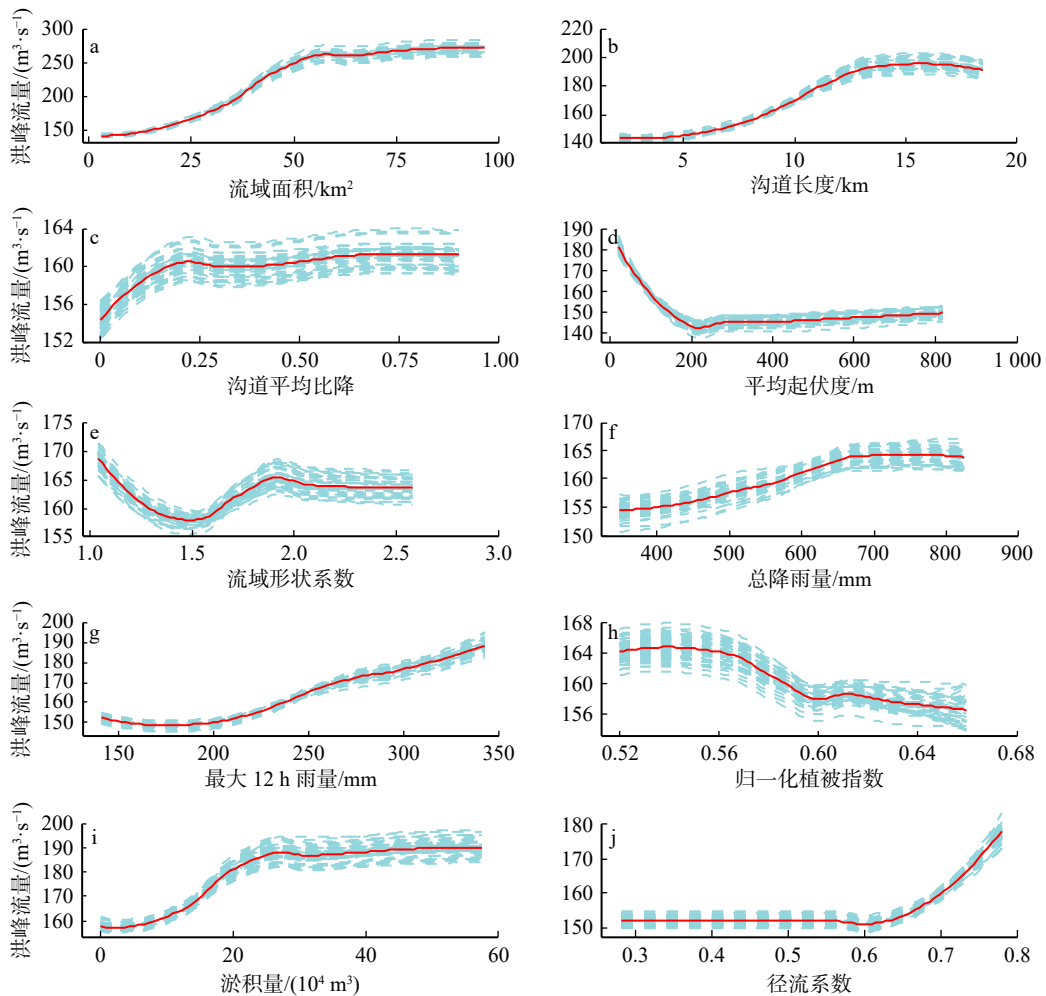
大, 导致前期的降雨已提高了土壤湿度, 土壤含水量较高, 从而限制了植被的减流作用^[39]。淤积量指水体中沉积的固体颗粒物质的总量, 通过改变沟床高度及沟道形态影响洪峰流量。径流系数是指降水量中转化为径流的比例, 反映了流域的产流能力。较高的径流系数意味着更多的降雨量转化为地表径流, 而非下渗到地下。通过了解洪峰流量的重要影响因素, 可以在防洪策略的制定和洪水风险的管理中更加有侧重性, 有利于预洪防洪。

为定量解析不同要素对洪峰流量的影响, 本文通过偏依赖图从地形因素、降雨因素、植被因素、其他因素 4 个方面展示了各影响因素与洪峰流量之间的复杂非线性关系(图 9)。

首先, 当流域面积在 0~60 km² 之间时, 洪峰流量与流域面积呈近似线性增长关系。这是因为随着流域面积增大, 接收雨水区域增大, 汇流时间变长, 从而导致洪峰流量较大。当流域面积超过 60 km² 后, 面积继续增大, 洪峰流量增长变缓。这一结果验证了径流形成的尺度效应, 即流域面积增加到一定时, 径流对流域的响应下降^[40-41]。沟道平均比降对本次暴雨产流作用有限, 比降由 0 增长到 0.75 时, 洪峰流量变化仅在 6 m³/s 范围内。本次暴雨中, 随着平均起伏度增加, 洪峰流量先减后趋于稳定, 这可能是因为平均起伏度较小时, 流域的地貌特征接近平原, 利于接收更多的降雨, 从而形成较大的洪峰流量。当起伏度在 0~200 m 之间增加时, 径流路径延长, 地表径流量减小, 增强了对地下水的补给效应^[42], 导致洪峰流量减少。当起伏度超过 200 m 后, 洪峰流量的变化逐渐平缓。

总降雨量和最大 12 h 雨量与洪峰流量近似线性增长。降雨是洪水的直接来源, 雨量越大, 洪峰流量越大, 相似的结果在前人的研究中^[34]也有报道。从图 9 中可以发现, 随着 NDVI 增加, 洪峰流量持续降低, 表明植被可以削减洪峰^[39], 但削减效率随 NDVI 增加发生了变化。

此外, 从图 9 中也可以看出, 在沟道淤积量增加初期, 洪峰流量迅速增加。这是因为水流携带的泥沙加剧了沟道淤积^[43], 导致抬高河床, 进而增加了洪峰流量。当沟道淤积量接近 27 万 m³ 后, 洪峰流量缓慢下降, 最终变化趋于平缓。实地调查发现, 这一现象的主要原因是沟道淤堵后, 洪水出沟, 形成新的流路或分流, 导致主河道的流量峰值降低。当径流系数较低(小于 0.62)时, 洪峰流量变化微小。当径流系数超过 0.62 后, 洪峰流量明显上升。一方面, 这是因为降雨初期, 大部分降水被土壤吸收或通过蒸发损失, 转化为径流的水量较少。随着降雨的持续,



图中的蓝色虚线表示用 50 个随机种子构建的模型偏依赖曲线, 红色实线是这 50 个模型的平均值。

图 9 各影响因素偏依赖图

Fig. 9 Partial dependence diagram of each influencing factor

土壤逐渐饱和, 产流能力增加, 径流系数逐渐上升。此时额外降水将直接形成表面径流, 从而导致洪峰流量上升。另一方面, 径流系数也和实际的行洪通道情况相关。径流系数较小可能是因为该区主要是林地、草地, 这些区域的截留和土壤蓄水等作用较强^[44-45], 径流下渗速率快, 洪峰流量变化较小。而径流系数超过 0.62 的区域可能是耕地, 相较于林地、草地, 下渗速率慢, 降雨转化为径流的比例较大, 因此洪峰流量也较大。

根据以上的分析, 对以门头沟区为代表的北京市地区开展防灾减灾工程建设和灾后恢复重建工作, 做以下建议。(1) 加强水土保持和生态修复。对于面积较大的小流域, 应优先系统设计和建设洪水控制工程, 如在流域上游区域综合布设水土保持工程措施和植被措施, 增强坡面和沟道的水土保持能力, 从而缓解降水汇集速度过快带来的洪水压力, 减少地表径流量的迅速汇集和沟道淤堵。(2) 优化沟道设计。对于较长的沟道, 通过设计深潭浅滩、分流通道与滞洪池等结构, 有效减轻沟道的水流冲击力, 提

升过水能力, 进而削减洪峰流量。(3) 采取坡地水土保持措施。在起伏度较小的地区, 修建小型水利工程等坡地水土保持措施, 延缓水流速度, 避免洪水迅速汇集。(4) 控制径流系数。针对山区、城乡结合部、城区等不同区域, 结合生态清洁小流域建设技术体系与海绵城市建设技术体系, 利用透水性材料、绿色屋顶、雨水收集系统等方法提高雨水利用效率, 有效控制小流域径流系数, 从而降低洪峰流量。(5) 定期清淤维护沟道。为保证沟道的行洪能力, 应定期对沟道进行清淤维护, 避免沟道淤积形成洪峰。

本研究通过构建洪峰流量的随机森林回归模型, 主要关注了自然环境因素对洪峰流量的影响, 为类似暴雨洪水事件的调查与解析提供参考。未来的研究应当扩展到包括土地使用模式、水利设施建设等其他人为因素, 以全面评估它们对洪峰的影响。此外, 洪痕调查时发现, 大量沟道存在河岸崩塌、道路损毁、跨沟桥涵局部损毁等问题, 并存在应急预案不完善、房屋及横档建筑物侵占沟道行洪空间、山区过度开发以及山体防护薄弱等隐患。未来的研究应

综合考虑各个因素,为防灾减灾工程的设计和实施提供更科学的依据。同时,鉴于气候与地理等因素的影响,不同地区的洪峰流量影响机制可能存在差异,因此在开展防灾减灾工程建设和灾后恢复重建工作时,要充分考虑当地的实际情况,制定符合本地实际的防灾减灾策略和措施。

3 结 论

本研究基于北京市“23·7”极端暴雨事件,调查了暴雨中心门头沟区56个沟道140个洪痕点位,计算其洪峰流量,并通过随机森林模型识别沟道洪峰流量驱动因素及影响机制。

(1)门头沟区沟道洪峰流量由北向南递增。沟道洪峰流量范围在27.5~1 072.0 m³/s之间,超过10年、20年、50年一遇洪峰流量水平的沟道分别占总数的82%、71%、41%。门头沟区进行恢复重建时应参考此次洪水重现期进行设计。

(2)本次降雨条件下,造成门头沟区沟道洪峰流量差异的前5因素依次为流域面积、沟道长度、平均起伏度、径流系数、淤积量,相对重要性值依次为1.000、0.524、0.471、0.382、0.346,各要素与洪峰流量存在复杂非线性关系。

(3)在灾后恢复重建工作中,应秉承“精准应对、系统治理、生态协同”的原则,实施“一沟一策”管理策略,以应对洪峰流量复杂的影响机制。建议加强水土保持、优化沟道设计、控制径流系数等防灾减灾工程建设,同时完善应急预案、整治侵占沟道行洪空间等问题,以提升区域的抗洪能力。未来研究需扩展至土地使用模式、水利设施建设等人为因素,因地制宜地分析洪峰流量影响机制,为不同地区的防灾减灾工作提供精准的指导。

参 考 文 献

- [1] Li Z, Gao S, Chen M, et al. The conterminous United States are projected to become more prone to flash floods in a high-end emissions scenario[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 1–9.
- [2] Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability [J/OL]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 16969[2020–10–07]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>.
- [3] 张海风,孔锋,方建.超常规极端暴雨洪涝灾害应对的国际比较研究:以2021年中美德暴雨洪涝灾害为例[J].*水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 1–13.
Zhang H F, Kong F, Fang J. International comparative study on coping with flood water logging disaster from extraordinary rainstorm: taking rainstorm water logging disaster in China, America and Germany in 2021 as study cases[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(7): 1–13.
- [4] 荆浩,亢妍妍,吴宏议,等.北京“23·7”极端强降雨特征和成因分析[J].*气象*, 2024, 50(5): 616–629.
Jing H, Kang Y Y, Wu H Y, et al. Characteristics and causes of July 2023 extremely torrential rain in Beijing[J]. *Meteorological Monthly*, 2024, 50(5): 616–629.
- [5] 张江涛,何丽华,李江波,等.河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J].*大气科学学报*, 2023, 46(6): 884–903.
Zhang J T, He L H, Li J B, et al. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23.7” extreme rainstorm in Hebei[J]. *Trans Atmos Sci*, 2023, 46(6): 884–903.
- [6] 刘家宏,梅超,王佳,等.北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J].*中国防汛抗旱*, 2023, 33(9): 50–55.
Liu J H, Mei C, Wang J, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(9): 50–55.
- [7] 丛晓红,刘军梅,张建涛,等.永定河卢三区“23·7”洪水调查问题与对策[J].*北京水务*, 2023(6): 6–11.
Cong X H, Liu J M, Zhang J T, et al. Investigation on the flood “23·7” occurred on Yongding River between Lugouqiao and Sanjiadian range of problems and strategies[J]. *Beijing Water*, 2023(6): 6–11.
- [8] 任智慧,桑燕芳,杨默远,等.暴雨山洪灾害预警方法研究进展[J].*地理科学进展*, 2023, 42(1): 187–196.
Ren Z H, Sang Y F, Yang M Y, et al. Progress of research on the methods for the early warning of mountain flash flood disasters[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(1): 187–196.
- [9] 郝思佳,王文川,马强,等.基于水文水动力模型的山洪灾害复盘策略:以河南王宗店村“7·20”山洪为例[J].*水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 1–11.
Hao S J, Wang W C, Ma Q, et al. A numerical rehearsal strategy of flash flood disaster with hydrological and hydrodynamic modelling: a case study of “7·20” flash flood disaster in Wangzongdian Village, Henan Province[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(6): 1–11.
- [10] Yu J, Zou L, Xia J, et al. Investigating the spatial-temporal changes of flood events across the Yangtze River Basin, China: identification, spatial heterogeneity, and dominant impact factors [J/OL]. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129503[2023–05–06]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129503>.
- [11] Luo S, Wang Q, Xu Y, et al. Identifying changes in flood characteristics and their causes from an event-based perspective in the Central Taihu Basin [J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167131[2023–09–18]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167131>.
- [12] Raaj S, Gupta V, Singh V, et al. A novel framework for peak flow estimation in the Himalayan River Basin by integrating SWAT model with machine learning based approach[J]. *Earth Science Informatics*, 2023, 17(1): 211–226.
- [13] Tassew B G, Belete M A, Miegel K. Application of HEC-HMS

- model for flow simulation in the Lake Tana Basin: the case of Gilgel Abay Catchment, upper Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. *Hydrology*, 2019, 6(1): 21–37.
- [14] 刘元昊, 韩剑桥, 焦菊英, 等. 极端暴雨下小流域洪峰对植被和梯田的响应: 以山东临朐台风“利奇马”暴雨为例 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 20–25.
- Liu Y H, Han J Q, Jiao J Y, et al. Response of small watershed peak discharge to vegetation and terraces under extreme rainstorm: a case study of the rainstorm of typhoon “Lekima” in Linqu, Shandong Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 20–25.
- [15] 杜俊, 任洪玉, 林庆明, 等. 山洪灾害防御研究进展 [J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 161–167.
- Du J, Ren H Y, Lin Q M, et al. Research progress on the prevention of flash flood disasters[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(2): 161–167.
- [16] Yatheendradas S, Wagener T, Gupta H, et al. Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semiarid regions[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(5): 1–17.
- [17] Borga M, Gaume E, Creutin J D, et al. Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18): 3883–3885.
- [18] Fu S, Yang Y, Liu B, et al. Peak flow rate response to vegetation and terraces under extreme rainstorms [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 288: 106714[2020–02–01]. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106714>.
- [19] Gaál L, Szolgay J, Kohnová S, et al. Dependence between peak discharges and volumes: a case study on climate and hydrological controls[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(6): 968–984.
- [20] 李建柱, 冯平. 降雨因素对大清河流域洪水径流变化影响分析 [J]. *水利学报*, 2010, 41(5): 595–607.
- Li J Z, Feng P. The influence of rainfall factors on flood runoff change in Daqing River Basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(5): 595–607.
- [21] Iwasaki K, Katsuyama M, Tani M. Factors affecting dominant peak-flow runoff-generation mechanisms among five neighbouring granitic headwater catchments[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 34(5): 1154–1166.
- [22] Wilder B A, Lancaster J T, Cafferata P H, et al. An analytical solution for rapidly predicting post-fire peak streamflow for small watersheds in southern California [J/OL]. *Hydrological Processes*, 2020, 35(1): e13976[2020–11–13]. <https://doi.org/10.1002/hyp.13976>.
- [23] Kalantari Z, Lyon S W, Folkesson L, et al. Quantifying the hydrological impact of simulated changes in land use on peak discharge in a small catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 466/467: 741–754.
- [24] Wang H, Zhou J, Tang Y, et al. Flood economic assessment of structural measure based on integrated flood risk management: a case study in Beijing [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111701[2021–02–15]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111701>.
- [25] 齐干, 张长敏. 达摩沟泥石流形成的物质条件分析及防治对策 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(5): 102–109.
- Qi G, Zhang C M. Analysis on material conditions causing to debris blow and its control countermeasures in Boddhidharma Trench[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(5): 102–109.
- [26] 朱德莉. 北京门头沟区泥石流灾害特征及监测预警研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2018.
- Zhu D L. The characteristics and the studies of monitoring early warning on debris flow in Mentougou District in Beijing area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [27] 李青, 王雅莉, 李海辰, 等. 基于洪峰模数的山洪灾害雨量预警指标研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1643–1652.
- Li Q, Wang Y L, Li H C, et al. Rainfall threshold for flash flood early warning based on peak discharge modulus[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(12): 1643–1652.
- [28] 廖文来, 吴清华, 罗日洪, 等. 山洪灾害洪水计算成果合理性分析 [J]. *广东水利水电*, 2018(3): 35–37, 56.
- Liao W L, Wu Q H, Luo R H, et al. Rationality analysis of mountain torrent disaster flood calculation results[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018(3): 35–37, 56.
- [29] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5–32.
- [30] Xu R, Qiu D, Gao P, et al. Prediction of streamflow based on the long-term response of streamflow to climatic factors in the source region of the Yellow River [J/OL]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 52: 101681[2024–04–01]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101681>.
- [31] 付思佳, 张会兰, 杨军. 清水河流域场次洪水输沙特性及关键影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 49–56.
- Fu S J, Zhang H L, Yang J. Characteristics of sand transport and key driving factors of flooding events in the Qingshui River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 49–56.
- [32] 温馨, 孙艳, 李昱, 等. 流域年径流预报方法及影响因素分析 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2023, 54(11): 113–123.
- Wen X, Sun Y, Li Y, et al. Analysis of annual runoff forecasting methods and the influence of factors in watersheds[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(11): 113–123.
- [33] 杭鑫, 曹云, 杭蓉蓉, 等. 基于随机森林算法与高分观测的太湖叶绿素 a 浓度估算模型 [J]. *气象*, 2021, 47(12): 1525–1536.
- Hang X, Cao Y, Hang R R, et al. Estimation model of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake based on random forest algorithm and Gaofen observations[J]. *Meteorological Monthly*, 2021, 47(12): 1525–1536.
- [34] 沈瑞昌, 张光辉, 张永萱, 等. 黄土高原小流域次暴雨洪峰流量影响因素分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 24–30.
- Shen R C, Zhang G H, Zhang Y X, et al. Factors affecting storm

- peak flow in small watersheds in the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2): 24–30.
- [35] Stanfield L W, Don A J. Understanding the factors that influence headwater stream flows in response to storm events[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, 47: 315–336.
- [36] Sikorska A E, Viviroli D, Seibert J. Effective precipitation duration for runoff peaks based on catchment modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 510–522.
- [37] 张洪江, 崔鹏. 关君蔚先生水土保持科学思想回顾 [J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 1–8.
Zhang H J, Cui P. A review on professor GUAN Junwei's scientific ideologies in soil and water conservation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(1): 1–8.
- [38] Sharma A, Wasko C, Lettenmaier D P. If precipitation extremes are increasing, why aren't floods?[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(11): 8545–8451.
- [39] 李阳, 张建军, 于洋, 等. 晋西黄土区径流含沙量随坡长变化的试验研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(8): 148–155.
Li Y, Zhang J J, Yu Y, et al. Experimental study on the variation characteristics of runoff sediment concentration with slope length in the loess region of western Shanxi Province of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(8): 148–155.
- [40] 刘佳凯, 张振明, 鄢郭馨, 等. 潮白河流域径流对降雨的多尺度响应 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(4): 50–59.
Liu J K, Zhang Z M, Yan G X, et al. Multi-scale analysis on precipitation-runoff relationship in Chaobaihe Basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(4): 50–59.
- [41] 贺亮亮, 张淑兰, 于澎涛, 等. 泾河流域的降水径流影响及其空间尺度效应 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 415–421.
- He L L, Zhang S L, Yu P T, et al. Spatial scale effect of the precipitation influence on runoff in Jinghe Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(3): 415–421.
- [42] 司梦可, 曹建生, 阳辉. 微地形变化对地表水文过程影响的研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(10): 1587–1595.
- Si M K, Cao J S, Yang H. Advances in research on the effects of micro-topography changes on surface hydrological processes[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10): 1587–1595.
- [43] Guan M, Wright N G, Sleigh P A. Multiple effects of sediment transport and geomorphic processes within flood events: Modelling and understanding[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2015, 30: 371–381.
- [44] 王庆妮, 曹晓娟, 刘颖, 等. 沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(10): 81–89.
Wang Q N, Cao X J, Liu Y, et al. Response of runoff and sediment production on sand-covered loess slopes to slope length and sand covering thickness[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(10): 81–89.
- [45] 吴子晗, 计嘉晨, 张帆. 黑河上游年径流模拟模型优选与归因分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(3): 80–90.
Wu Z H, Ji J C, Zhang F. Optimization and attribution analysis of annual runoff simulation models in the upper reaches of the Heihe River, northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(3): 80–90.

(责任编辑 孟瑶 李 契
责任编辑委 孟 平)