

洪水灾害危险性评价方法的研究与改进*

侯静雯¹, 叶爱中¹, 甘衍军², 龚伟¹, 段青云¹

(1. 北京师范大学 地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875; 2. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 洪水风险分析是防洪非工程措施的重要组成部分, 而洪水危险性评价是风险分析的基础。现有的洪水危险性评价方法由于需要获得淹没水深, 在对洪水风险预测时要求复杂的水力学模型和高分辨率数据的支撑, 但业务化过程中常常无法满足数据要求, 为了简化洪水危险性评价的过程, 确保评价结果的准确性, 本文提出了一个新的简单且综合的洪水危险性评价指标 (FHI, Flood Hazard Index)。该指标以 GisNet 和 ArcGIS 为软件平台, 结合分布式水文模型, 依据洪灾的形成机理, 综合考虑分布式流量与地形指数。结合北京山区红螺谷流域的具体情况, 对新指标进行了对比检验。结果显示, FHI 能够真实地反映区域洪灾随空间变化的趋势, 为未来洪水危险性评价与预测的研究, 提供了一个全新的思路, 对洪水风险研究体系的完善具有重要的现实意义。

关键词: 洪水灾害; 危险性评价; 地形指数; 洪灾危险性指标 (FHI)

中图分类号: X43

Research and improvement on assessment method of flood hazard

HOU Jingwen¹, YE Aizhong¹, GAN Yanjun², GONG Wei¹, DUAN Qingyun¹

(1. Faculty of Geographical Science of Beijing Normal University, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Land Surface System Science and Sustainable Development, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Flood risk analysis is an important part of non-engineering flood control measures, and flood hazard assessment is the basis of risk analysis. Due to the need to obtain submerged water depth, the existing assessment methods of flood hazard requires complex hydraulic models and high-resolution data, but during operation, it is often impossible to meet the data requirements. In order to simplify the process of flood hazard assessment and ensure the accuracy of the results, this paper presents a new simple and integrated flood hazard index. The index is based on Gisnet and ArcGIS and combines with the distributed hydrological model. In light of the formation mechanism of flood hazard, the index comprehensively considers the natural attribute of distributed streamflow and topographic index. Based on the specific situation of the Hongluogu in Beijing mountain area, we tested the new index. The results showed that FHI can truly reflect the trend of regional flood with spatial change. It can provide a new idea for the future flood hazard assessment, and has great significance to the improvement of flood risk study system.

Key words: flood disaster; hazard assessment; topographic index; flood hazard index

我国是全球洪水灾害发生最频繁的国家之一。研究表明气候变化将进一步加大我国洪灾发生的风险^[1]。洪灾的发生具有随机性和复杂性, 即洪水不能完全被控制, 洪水的危害仍存

收稿日期: 2017-05-26 修回日期: 2017-09-16

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0102400); 国家自然科学基金项目 (41475093); 灾害天气国家重点实验室基金 (2015LASW-A05)

Funds: Intergovernmental Key International S&T Innovation Cooperation Program (2016YFE0102400); National Natural Science Foundation of China (41475093); Open Research Program of State Key Laboratory of Severe Weather (2015LASW-A05).

作者简介: 侯静雯(1994-), 女, 陕西渭南人, 主要从事水文集合预报研究。E-mail: jingwen_hou@126.com

通讯作者: 叶爱中(1978-), 男, 安徽安庆人, 副教授, 博士, 主要从事水文集合预报研究。E-mail: azye@bnu.edu.cn

在。近年来，洪灾风险分析与预测作为一项非工程措施，被广泛应用在防洪减灾中^[2, 3]。洪灾风险主要包括洪灾的危险性、洪灾的易损性、灾情和设防能力^[4, 5]，其中洪灾的危险性评价是洪灾风险评价的基础。现有的洪水危险性评价方法可分为水力学模型方法和指标综合模型法。水力学方法考虑了淹没范围和淹没水深等因素^[6-10]，优点是计算精度高，缺点是需要高精度、高分辨率的地形、观测降水以及水位数据。在山区小流域，山洪易爆发，但水文气象观测站点稀缺，高分辨率的地形数据人工实地测量成本高，很难大面积地实测，严格限制了水力学模型在山洪危险性评价中的应用。指标综合模型法是近年来洪水危险性评价常用的方法之一^[11]，选取的主要指标有降雨、高程、坡度、集水面积、河网、到河道的距离、土地利用等^[12-18]。周成虎^[19]根据洪水发生的机理，选取了降雨、坡度、人口和土地利用多个指标进行洪水危险性评价。何报寅^[20]综合了降水、高程、河网分布和历史洪涝灾害等因素，通过图层叠加，得到了湖北省洪水危险性评价图。黄诗峰^[21]将河网密度这一单一指标作为洪水危险性的评价指标。指标综合法的优点是计算量小，对数据要求相对较低，所以常用于大区域或者流域尺度的洪水危险性评价。指标法一般要选取多个因素，各个因素需要通过加权给出综合指标，各个指标的权重通常通过专家打分、聚类分析等方案得到，且存在很大的不确定性。不同指标的选取、给不同的权重会得到不同的危险性结果，这将导致用户很难使用。坡度、集水面积、河网等是已有研究提出的洪水危险共性指标，有必要基于这些共性给出一个综合指标，降低洪水危险性评价的不确定性。

本文主要基于 GisNet（数字流域信息提取系统）^[22]和 ArcGIS 软件平台，结合分布式水文模拟，从洪水灾害的形成机制出发，主要考虑洪灾的自然属性特征，找寻一个简单且综合的指标作为洪灾危险性评价指标，并绘制区域洪水危险性分布图，为区域土地资源的利用规划，经济发展和区域建设，防汛决策提供必要的支持。

1. 洪水灾害危险性评价指标模型

洪水灾害的危险性是致灾因子和孕灾环境综合作用的结果^[4, 12, 23]，指标模型需要综合考虑致灾因子和孕灾环境条件的各种自然属性特征。

1.1. 洪灾危险性评价指标的选择

降水是洪水灾害最直接的影响因子，洪水的破坏程度与降水的强度和频率有关^[20]，但受地面具体情况的影响，有降水不一定会成灾，反之，没有降水也有可能产生洪灾，如升温造成的高山融雪。流量是单位时间内通过河道或者渠道断面的水量。给定一个空间位置后，流量的大小将直接反映该地区的洪灾危险程度，即随着流量的增加，洪灾危险程度将增加。本文将直接选择具有空间分布信息的流量作为洪灾危险性评价指标的致灾因子。

孕灾环境即下垫面状况，包括地形、植被、土壤、河网等。Beven and Kirkby(1979) 在发展的 TOPMODEL 中首次提出了地形指数的概念^[24-25]，其能够反映土壤饱和和缺水量、地表的产流面积和产流过程的空间分布特征。地形指数综合考虑了地形因素及土壤本身的特性，其与土壤相对含水量呈线性关系^[26-27]，地形指数和土壤含水量随着汇流面积的扩大和坡度的降低而增加，即在流域的下游和地势平坦的地区，土壤更易达到饱和。下游河道宽，地势平坦，过水能力强且流速缓慢，相应的洪水灾害危险性低。所以，可用地形指数来反映洪水灾害孕灾环境的稳定性，且地形指数同洪灾危险性成反比关系。

1.2. 分布式时变增益水文模型

分布式水文模型始于 20 世纪中期，近年来，随着 GIS 与 RS 技术的发展，其在理论上

得到了发展与完善，且在很多流域已经进行了业务化应用。国内外不同的单位与研究机构提出了数十种分布式水文模型，其中由夏军^[28]提出的分布式时变增益水文模型，在不断的改进与发展^[29-30]中被广泛应用。分布式时变增益水文模型将流域分成子流域进行产汇流计算，这样能够获得每个子流域上的流量。其中产流将径流与土壤、湿度及降水建立关系，可直接通过计算得到每个子流域的实时径流。汇流采用运动波汇流模式^[31-32]。通过子流域的坡面汇流与河道汇流得到每个子流域的出口流量(Q)。利用该模型可获得每个子流域的实时流量数据，为洪灾危险性评价指标提供基础数据。

1.3. 指标模型的构建

根据选取的指标，构建简单且综合的指标模型来反映洪水灾害的危险性。洪灾危险性与流量(Q)成正比，与地形指数(TopIndex)成反比，则洪灾危险性指标(FHI, Flood Hazard Index)如下：

$$FHI = \frac{\ln(Q)}{TopIndex} \quad (1)$$

$$TopIndex = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan \beta}\right) \quad (2)$$

公式(1)中给Q取对数之后不会改变数据的性质和相关关系，压缩了Q的尺度，便于观察Q和FHI之间的关系。公式(2)中 α 为单位等高线上的汇流面积， $\tan \beta$ 为坡度。

流量Q表示的是流域中任意一个点上的流量，所以计算出的FHI也只能是单点的值，为了获得整个流域的FHI，需要将流域划分成多个子流域，计算每个子流域的流量。子流域划分地越小，得到的每个子流域的FHI值相对精度越高。

2. 红螺谷流域洪灾危险性评价分析

2.1. 研究区域概况与数据来源

红螺谷流域位于北京市房山区周口店镇，地理坐标为东经 115°42'-115°52'，北纬 39°40'-39°44'，该流域属于山洪易发小流域，其上游流域包括涑沥水流域和泗马沟流域，主沟道长度为 7.56 km，总汇流面积为 51.7 km²，其中泗马沟流域面积 6 km²，涑沥水流域面积 7 km²（图 1）。红螺谷流域多年平均降水为 500 mm 左右，降水主要集中在 6 月—8 月，且降水强度大。该区域防洪标准偏低，地形坡度大，且下游河谷中或河岸平地处于居民点，洪水危险性较高。在北京 2012 年“7·21”特大暴雨事件中受损严重。

研究所使用的 DEM 数据空间分辨率为 10 m。在该流域通过北京市课题资助，设立了多个雨量站和 2 个流量站。通过 2015—2016 年的观测，共收集到 2 场洪水数据，分别是 2015 年 7 月 17 日降水、2016 年 7 月 20 日降水及其对应的流量数据。

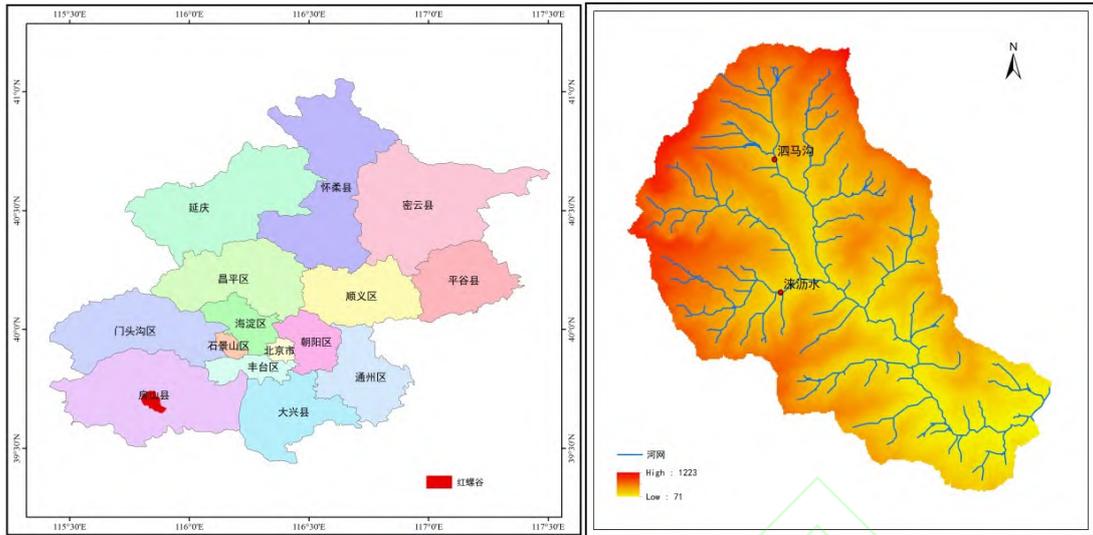


图 1 红螺谷地理位置及流域图
Fig.1 Location and watershed of Hongluogu

2.2. 流域地形指数计算

利用红螺谷小流域 10m 的 DEM 数据，基于数字流域信息提取系统 (GisNet)，计算流域的坡度、流向和水流累计，获得研究区的地形指数分布图 (图 2)。由图 2 可以看出，在河道内的地形指数非常大，坡面由于汇水面积小，地形指数值相对小。地形指数的空间分布和河道的分布高度吻合。

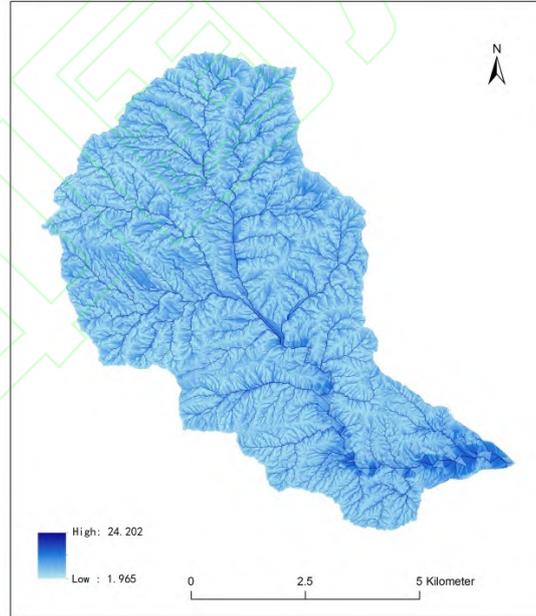


图 2 红螺谷流域地形指数分布图
Fig.2 Distribution of topographic index in Hongluogu watershed

2.3. 分布式水文模型的拟定

采用 10m 分辨率的 DEM 数据，将红螺谷流域划分成 416 个小的子流域，建立分布式水文模型，实现每个小流域上均能产汇流计算。由于小的山洪沟中历史上没有观测降水径流数据，所以只能采用 2015 与 2016 年实验观测到的 2 场降水的径流过程对分布式水文模型进

行拟定。

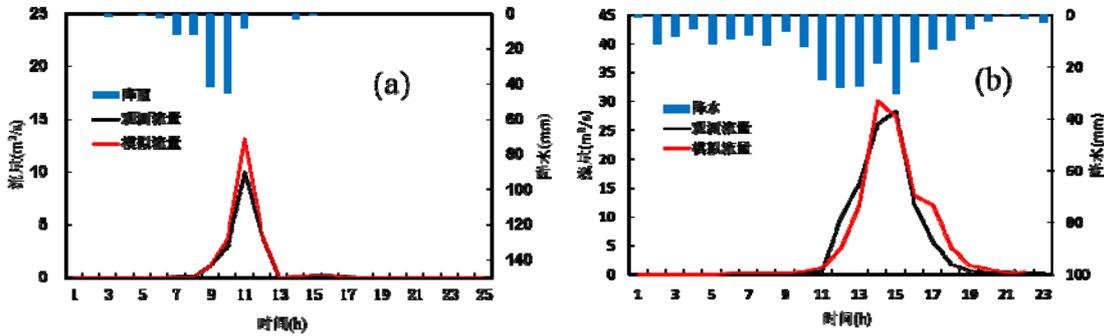


图3 红螺谷流域降水径流过程图 (a): 2015.7.17 泗马沟降水径流过程; (b) 2016.7.20 涑沥水径流过程
Fig.3 Hydrographs in Hongluogu watershed (a) Hydrographs on July 17, 2015 in Simagou watershed, (b) Hydrographs on July 20, 2016 in Lailishui watershed

由图3可知,在红螺谷内的两个小流域上,纳西效率系数、相关系数、洪量模拟与观测比分别为:泗马沟流域为0.91、0.99与1.05;涑沥水流域为0.93、0.97与1.07。所有指标均达到了防洪规范甲级标准,说明该模型可用于对洪水的模拟预报。

2.4. 洪灾危险性(FHI)指标的计算

由于红螺谷流域观测到的洪水均是小洪水,不能产生洪灾,即本文采用设计暴雨来计算洪灾危险性指标。根据北京市水文手册,得到红螺谷流域百年一遇6小时设计暴雨过程,见图4中降雨。利用分布式水文模型,选择重现期为一百年,模拟出全流域的流量,见图4中流量,且其为流域出口处流量过程线。在红螺谷流域,夏季百年一遇6小时场次暴雨能超过200mm,2012年北京“721”暴雨24小时超过了400mm,且流域出口洪峰达到1000m³/s。暴雨会引发泥石流等次生灾害,对山口居民点造成巨大威胁。

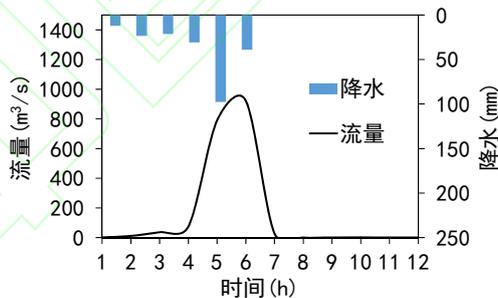


图4 红螺谷流域百年一遇设计暴雨洪水过程图

Fig.4 The diagram of design storm and flood process for hundred-year flood in Hongluogu watershed

结合上文得到的流量数据,根据公式(1)和公式(2),利用ArcGIS的地图代数功能,得到研究区洪水危险性分布图(图5)。

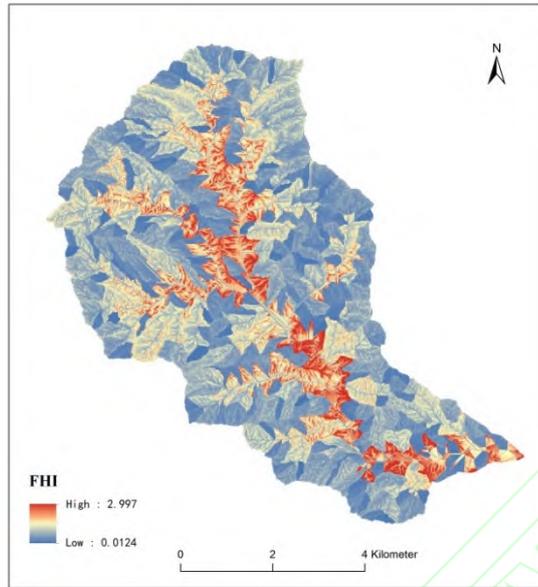


图 5 红螺谷小流域洪水危险性图

Fig.5 Distribution of flood hazard index in Hongluogu watershed

从图 5 可以看出在河道的两边的山坡上会出现很大的危险性，但在河道内危险性要相对较小，这与实际情况一致。因为河床主要是行洪功能，越到下游河道会越宽，过流能力会越强，相对越安全。而居民点一般设置在河道两边的平缓边坡上，一旦发生大洪水将具有极高的危险性。

2.5. 洪灾危险性评价结果对比与分析

传统的洪水风险分析采用水力学模型计算洪水的淹没范围与水深。采用百年一遇的 6 小时设计暴雨，通过模型模拟可以给出流域的淹没范围与水深，见图 6。一般认为水深越深的区域洪水的危险性越高。从图 6 可以看出，在河道中水深较深，尤其在下游河道内水深会更大。给出的危险性信息即是下游河道内最危险。但实际情况是下游河道的过流能力同样最强，不一定是最危险区域。所以采用淹没水深与范围评价洪水危险性不仅过程复杂，而且存在很大的不确定性。

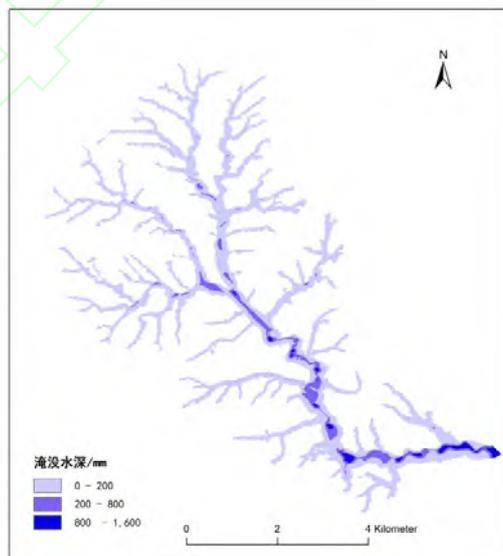


图 6 红螺谷小流域百年一遇洪水漫溢淹没图

Fig.6 Inundated area of hundred-year flood in Hongluogu watershed

将利用指标模型计算得到的研究区洪水危险性图与基于水文水力学模型得到的洪水漫溢淹没图进行叠加得到图 7。由图 7 可以看出：洪水危险性指标（FHI）的分布与洪水淹没范围基本一致，洪水危险性指标（FHI）的大小与淹没水深的深浅相对应。但本文给出的洪水危险性指标不仅仅考虑到了天然的来水情况，同时考虑了流域的地形、土壤含水量等，修正了洪水在河道边坡和河道内的危险性，使其更符合实际洪水危险情况。相对于传统的利用洪水淹没水深和范围对其危险性进行评价，具有更高的精度。

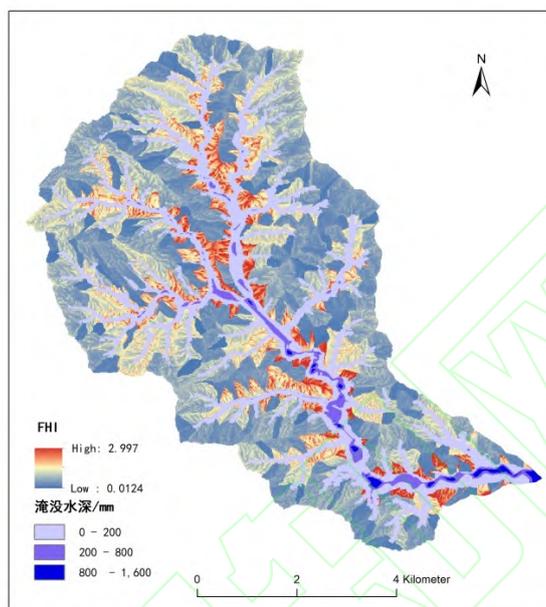


图 7 红螺谷小流域洪水危险性指标分布与百年一遇洪水淹没范围叠加图

Fig.7 Overlay diagram of flood hazard index and inundated area of hundred-year flood in Hongluogu watershed

3. 结论与讨论

本文针对常规洪水危险性评价的局限性，根据洪水灾害的发生机理，综合考虑了致灾因子和孕灾环境的自然属性特征，建立了简单且综合的洪水危险性指标（FHI）。该指标不仅考虑了流量，还考虑了流域的地形特征。流量能够反应水深与淹没面积，大流量通常会带来大面积的淹没和大水深。采用分布式水文模型模拟可以获得流量，相对于水力学模型而言，水文模型计算量小，对资料的需求相对较低。但只用流量无法评价区域的洪水危险性，例如：在河流的上游和下游，同样大小的流量会有不同的影响。河流下游的河道宽并且深，对大流量有一定的抵消作用，不一定会有洪水危险。但是，河流上游的河道窄并且坡度大，一定的小流量也可能带来洪灾。所以选取地形指数作为 FHI 指标的另一个参数。地形指数反应了流域的坡度和上游的集水面积，能够反映整个流域的地形特征。获取地形指数不需要高精度的地形数据，仅需要一定分辨率的 DEM 数据即可，计算过程简单。FHI 即综合了传统指标法的优点，又避免了传统指标法需要确定权重的缺点。

本文以红螺谷流域为例，利用该指标对其洪水危险性进行了评价，得到了流域洪水危险性图。通过对比分析可知，新指标（FHI）指出河道边坡具有高的洪水危险性，这比传统的洪水淹没危险性得到的结果要更接近实际情况。洪水危险性指标（FHI）作为一个简单且全面的指标，计算过程简单，所需原始数据量少，可靠性强。利用 FHI 指标得到的区域洪水危险性图不仅能够真实且准确地反映实际洪水灾害的状况，还能够直观地了解灾害随空间变化的趋势。若使用实时的预报流量作为该指标（FHI）中的流量，则能够对流域的洪水危险

性进行实时预报和预警。本文提出的洪水危险性指标对洪水风险研究体系的完善具有重要的现实意义。

FHI 指标中流量作为洪灾的致灾因子,为了获得高分辨率的流域洪水危险性信息,就需要高分辨率的流量数据。通过分布式水文模型模拟得到每个子流域的出口流量,当划分的子流域太大时,子流域出口处的流量就不能代表整个子流域的流量,平均地形指数也不能代表子流域中每个点的地形信息,最终导致 FHI 给出的危险性信息可能比实际危险性大,可能会把子流域中山脊上的安全区域也变成危险区域。所以使用 FHI 来评价区域洪水危险性时,需要利用分布式水文模型将子流域划分地足够小(建议小于 1km^2)。

由于山洪爆发多在山区小流域中,相对于大江大河,其严重缺乏长时间序列的观测资料。随着对山洪研究与防范的持续关注,需要进一步对水文模型与指标体系进行拟定与验证。

参考文献:

- [1] HIRABAYASHI Y, MAHENDRAN R, KOIRALA S, et al. Global flood risk under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3:816-821. DOI:10.1038/nclimate1911.
- [2] 许有鹏, 李立国, 蔡国民, 等. GIS 技术下中小流域洪水风险图系统研究[J]. *地理科学*, 2004, 24(4): 452-457. (XU Y P, LI L G, CAI G M, et al. Flood risk map system in medium and small basins in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(4):452-457. (in Chinese)) DOI:10.13249/j.cnke.sgs.2004.04.011.
- [3] DOTTORI F, SALAMON P, BIANCHI A, et al. Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 87-102. DOI: 10.1016/j.advwatres.2016.05.002.
- [4] 魏一鸣, 范英, 金菊良.洪水灾害风险分析的系统理论[J].*管理科学学报*, 2001, 4(2): 7-11. (WEI Y M, FAN Y, JIN J L. System theory for risk analysis of flood disaster [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(2):7-11.(in Chinese))
- [5] 张会, 张继权, 韩俊山. 基于 GIS 技术的洪涝灾害风险评估与区划研究—以辽河中下游地区为例[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(6): 141-146. (ZHANG H, ZHANG J Q, HAN J S. GIS-based assessment and zoning of flood/waterlogging disaster risk: a case study on middle and lower reaches of Liaohe River [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(6): 141-146. (in Chinese))
- [6] 马建明. 成都平原岷江流域水灾风险分析信息系统[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1997. (MA J M. Flood risk analysis information system of Minjiang River in Chengdu plain [D]. Beijing:Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1997. (in Chinese))
- [7] 朱元牲. 洪泛区洪灾风险分析和管理[J]. *水利经济*, 1990, (2):55-62. (ZHU Y S. Flood risk analysis and management in flood plains [J]. *Water Economy*, 1990, (2):55-62.(in Chinese))
- [8] 梅亚东. 蓄滞洪区分洪与减灾的理论与应用研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1992. (MEI Y D. Study on theory and application of flood diversion and disaster mitigation in detention basin[D]. Wuhan :Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1992. (in Chinese))
- [9] 姜智怀, 巩志宇, 李嫦, 等. 基于降水时空分布情景模拟的暴雨洪涝致灾危险性评价[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(5): 464-470. (JIANG Z H, GONG Z Y, LI C, et al. Storm flooding disaster risk assessment based on scenarios simulation of spatial and temporal distributions of

- precipitation [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(5): 464-470. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.05.008.
- [10] LÖWE R, URICH C, STO. DOMINGO N, et al. Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations – A new generation of urban planning tools [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550:355-367. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.009.
- [11] SILVA S F, MARTINHO M, CAPITÃO R, et al. An index-based method for coastal-flood risk assessment in low-lying areas (Costa de Caparica, Portugal) [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 144, 90-104. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.04.010.
- [12] NTAJAL J, LAMPTEY B L, MAHAMADOU I B, et al. Flood disaster risk mapping in the Lower Mono River Basin in Togo, West Africa [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 23:93-103. DOI: 10.1016/j.ijdr.2017.03.015.
- [13] WANG Z, LAI C, CHEN X, et al. Flood hazard risk assessment model based on random forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:1130-1141. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.008.
- [14] KAZAKIS N, KOUGIAS I, PATSIALIS T. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 538:555-563. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.055.
- [15] WANG Y, LI Z, TANG Z, et al. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25:3465-3484.
- [16] 刘鑫, 赵鲁强, 刘娜, 等. 伊犁河流域春季融雪型洪水危险性评价与区划[J]. *气象科技进展*, 2016 (6):35-41. (LIU X, ZHAO L Q, LIU N, et al. Risk evaluation of the spring snowmelt flood in Ili River basin and it's mapping [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016(6): 35-41. (in Chinese))
- [17] 潘安定, 刘会平, 陈碧珊, 等. 广州市洪水灾害危险性评价初步研究[J]. *自然灾害学报*, 2010 (4):23-28. (PAN A D, LIU H P, CHEN B S, et al. Primary study on risk evaluation of flood disaster in Guangzhou City [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, (04):23-28. (in Chinese)) DOI :10.13577/j .jnd.2010.0404 .
- [18] 张国芳, 查小春, 石晓静, 等. 汉江上游汉中市洪水灾害风险评价研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2016 (6):28-34. (ZHANG G F, ZHA X C, SHI X J, et al. Flood hazard risk assessment of Hanzhong city at the upper reaches of Hanjiang River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016(6):28-34. (in Chinese)) DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2016.06.004.
- [19] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J]. *地理学报*, 2000, 55(1):15-24. (ZHOU C H, WAN Q, HUANG S F, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1):15-24. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20005.05.004.
- [20] 何报寅, 张海林, 张穗, 等. 基于 GIS 的湖北省洪水灾害危险性评价[J]. *自然灾害学报*, 2002 (4):84-89. (HE B Y, ZHANG H L, ZHANG S, et al. GIS-based risk evaluation for flood disaster in Hubei Province [J]. *Journal of natural disasters*, 2002 (4): 84-89. (in Chinese))
- [21] 黄诗峰, 徐美, 陈德清. GIS 支持下的河网密度提取及其在洪水危险性分析中的应用[J]. *自然灾害学报*, 2001(4):129-132. (HUANG S F, XU M, CHEN D Q. GIS-based extraction of drainage network density and it's application to flood hazard analysis [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2001(4):129-132. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2001.0424.
- [22] 叶爱中, 夏军, 王纲胜. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成 [J]. *水利学报*,

- 2005 , 36(5) : 531-537. (YE A Z, XIA J, WANG G S. Drainage network extraction and sub-catchment delineation based on digital elevation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 531-537. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2005.05.004.
- [23] 魏一鸣, 金菊良, 杨存建, 等. 洪水灾害风险管理理论[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (WEI Y M, JIN J L, YANG C J et al. Theory of risk management of flood disaster [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [24] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24 43-68. DOI: 10.1080/02626667909491834.
- [25] BEVEN K J. TOPMODEL: A critique [J]. Hydrological Processes, 1997, 11:1069-1085. DOI:10.1002/(SICI)10991085(199707)11:9<1069::AID-HYP545>3.0.CO;2-O.
- [26] ZHANG W, MONTGOMERY D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrological simulation [J]. Water Resources Research, 1994, 30(4):1019-1028. DOI: 10.1029/93WR03553.
- [27] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 16-20. (DENG H P, LI X B. Relationship of upslope contribution area and soil water content in topmodel [J]. Progress in Geography, 2002, 21(2):16-20. (in Chinese))
- [28] XIA J, WANG G S, TAN G, et al. Development of distributed time-variant gain model for nonlinear hydrological systems [J]. Science in China Series D:Earth Sciences, 2005, 48(6): 713-723
- [29] YE A, DUAN Q, ZENG H, et al. A distributed time—variant gain hydrological model based on remote sensing [J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(3), 222-230. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2010.03.005.
- [30] 夏军, 叶爱中, 王蕊, 等. 跨流域调水的大尺度分布式水文模型研究与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 1: 1-8.(XIA J, YE A Z, WANG R, et al. Large scale distributed hydrological model of inter-basin water transfer and its application [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 1:1-8. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.01001.
- [31] 叶爱中, 夏军, 王纲胜. 基于动力网络的分布式运动波汇流模型[J]. 人民黄河. 2006(2): 26-28. (YE A Z, XIA J, WANG G S. Dynamic network-based distributed kinematic wave affluent model [J]. Yellow River, 2006, (2):26-28. (in Chinese))
- [32] YE A, DUAN Q, ZHAN C, et al. Improving kinematic wave routing scheme in community land model [J]. Hydrology Research , 2013, 44(5), 886-903. DOI: 10.2166/NH.2012.145.