

文章编号:1672-3031(2019)04-0299-06

福建省山洪灾害风险识别与定量分析

张晓蕾^{1,2}, 刘荣华^{1,2}, 刘 启^{1,2}, 李昌志^{1,2}, 郭 良^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 受极端天气、复杂下垫面和人类活动多重因素影响, 山洪灾害在我国频发高发, 且预测预报难度较大。本文基于全国山洪灾害调查评价成果, 着眼于15-20 km²的小流域, 从降雨、下垫面、社会经济、现状防洪能力、涉水工程及监测预警设施配置率6个方面, 提取了54个备选指标, 运用主成分分析法进行降维处理, 筛选了10个核心且独立的指标, 构建了风险评估指标体系, 建立了风险立方体模型, 并运用福建省2306场历史山洪场次数据进行了模型验证。结果表明, 基于小流域的山洪灾害风险识别可有效反映灾害对降雨和下垫面的响应关系; 沿海台风暴雨高发区和内陆山区短时强降雨高值区是山洪灾害高风险区, 涉及小流域1151个, 面积近2万 km², 人口608万。

关键词: 山洪灾害; 小流域; 风险识别; 风险立方体

中图分类号: P694

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.04.008

1 研究背景

对于山洪灾害风险分析, 国内外都进行了大量研究。从基于临界雨量的统计分析^[2], 到基于指标体系的定量分析, 到基于遥感数据的空间分析, 综合天、空、地信息, 计算方法趋于多元化。Wieczorek G F^[3]应用临界雨量去预测山洪灾害风险, 并进行预警。S.Peruccacci等在1980年Nel Caine降雨时间和强度分析的基础上, 发展了临界雨量方法, 收集全球数据库的2626场场次降雨数据, 进行了统计分析, 并进行了区域划分。谭徐明等^[4]利用近300年的水灾资料及自然、社会经济基础数据, 利用GIS技术, 完成了区域洪水风险的分析。韩松等^[5]构建了太湖流域洪水灾害系统各因素之间的洪水风险动因响应关系, 判断了各因素的重要性和不确定程度。樊建勇等^[6]研究了小时雨量与山洪灾害发生时间及小流域参数之间的关系, 并运用2009年的场次山洪过程模拟, 准确预报了山洪风险等级。美国水文研究中心HRC(2010)提出了动态山洪临界雨量计算模型, 并嵌入其国家山洪预警系统(FFGS)^[7]。Totschnig^[8]分析了阿尔卑斯山的山洪灾害风险脆弱性, Holub^[9]从建筑物的建筑结构、风暴降雨特征、冰雪覆盖等方面, 评估了欧洲中部山丘区建筑物的脆弱性。Guzzetti^[10-11]基于1279—2002年的洪水及山洪灾害损失, 分析了意大利北部山区的因灾死亡高发地, 季节高发期的时空分布特征。Elkhrachy Ismail^[12]基于SPOT和SRTM的DEM数据, 分析了沙特阿拉伯地区Najran市的山洪风险, 构建了径流、土壤类型、坡度、糙率、河网密度和距主河道距离等指标体系, 评估了地区山洪风险。

目前, 国内外对于山洪灾害风险的研究多集中在大尺度, 比如山洪灾害区划, 或者以栅格为单元进行评估, 以自然小流域单元的评估方法较少, 而自然流域单元的产汇流是山洪形成的基本条件, 为此, 基于山丘区地形地貌和下垫面条件等小流域属性进行山洪风险评估是具有一定物理机理的评估方法。

收稿日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51579131); 国家重点研发计划项目(2017YFB0203104); 中国博士后科学基金资助项目(2017M620839)

作者简介: 张晓蕾(1987-), 博士, 高级工程师, 主要从事山洪灾害防治研究。E-mail: zhangxl@iwhr.com

通信作者: 刘荣华(1979-), 博士, 高级工程师, 主要从事水信息学、洪水预报预警和防洪减灾研究。E-mail: liurh@iwhr.com

为此,本文基于全国山洪灾害防治项目形成小流域基础数据集和产汇流特征参数集,结合山洪灾害调查评价成果,以福建省为例,探讨了基于小流域单元的山洪灾害风险因子选取、风险评估指标体系构建和风险评估模型建立等问题,并通过历史山洪事件的对比分析,检验了方法的有效性和结果的合理性。

2 研究区域概况

福建省位于我国的东南沿海,境内峰岭耸峙,丘陵连绵,山丘区面积占90%,远高于全国平均水平(66.7%)。复杂的地形地质条件、暴雨多发的气候特征、密集的人口分布和人类活动的影响,导致山洪灾害发生频繁,造成巨大的经济损失和大量人员伤亡。2010—2016年,福建省85个区县中的74个区县实施了全国山洪灾害防治县级非工程措施项目建设,涉及68574个自然村(图1),人口2347万人,防治区总面积达9.96万 km^2 ,约占福建省陆地面积的81.55%。其中受山洪威胁县城74个,受山洪威胁乡镇949个,受山洪威胁严重的沿河村落10922个,受山洪威胁的企事业单位5478个。

根据全国山洪灾害调查评价成果^[13],福建省建国后共发生历史山洪灾害2306场(图2)。2016年福建泰宁“5·8”大型泥石流灾害造成1座4层办公楼、5处工棚推倒掩埋,39名施工人员失联。

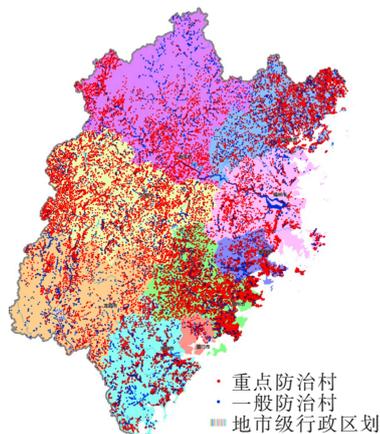


图1 福建省山洪灾害防治村分布

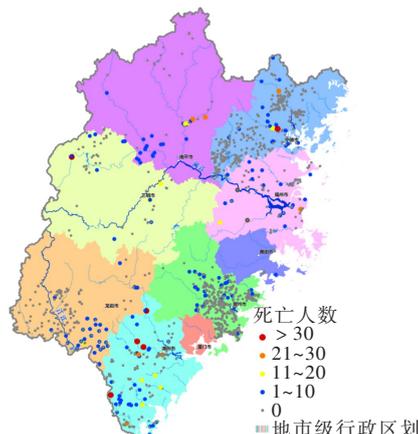


图2 福建省历史山洪灾害分布(1949—2015年)

3 风险评估模型

3.1 风险识别与指标体系构建 根据福建省降雨、下垫面和人类活动的特点,选择山丘区降雨特性、小流域特性参数及下垫面特征、社会经济情况、现状防洪能力评价结果、涉水工程及监测预警设施设备调查成果,对指标进行归类,并按照小流域进行数据整理和指标筛选,得到备选指标共54个。主要包括:

(1)降雨指标8个:各年型设计暴雨绝对值(5年一遇、10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇)、设计暴雨变差系数(1h、3h、6h);

(2)下垫面指标9个:土地利用和植被类型、土壤类型、土壤质地类型、洪峰模数(10 min30 mm、10 min35 mm、60 min50 mm)、汇流时间(10 min30 mm、10 min35 mm、60 min50 mm);

(3)社会经济指标23个:小流域人口、村落数、财产类型(I类财产、II类财产、III类财产、IV类财产)、房屋类型统计及占比(I类房屋、II类房屋、III类房屋、IV类房屋、坚固房屋比例、脆弱房屋比例)、企事业单位数、小流域内距河网的高程(3 m、5 m、10 m、30 m)及距离因子(50 m、100 m)组合10组;

(4)现状防洪能力指标7个:小于5年一遇的村落数、5~10年一遇的村落数、10~20年一遇村落数、20~50年一遇村落数、50~100年一遇村落数、大于100年一遇村落数、临界雨量与设计暴雨

比值小于1的村落数；

(5)涉水工程指标3个：小流域内桥梁数、路涵数、塘(堰)坝数；

(6)监测预警配置率指标4个：小流域内自动监测站数量、简易雨量站、水位站及无线预警广播站数量。

运用SPSS工具采用主成分分析法对54个备选指标进行了降维处理，筛选出核心且独立的指标用于风险评估，得到了10个主成分(表1)，成分主要集中在自然村落与河网位置关系，小流域短历时强降雨特性、汇流时间、洪峰模数、涉水工程、房屋类型、现状防洪能力、监测预警设施设备等方面。

根据风险分析理论(ADRC, 2005)^[14]，将以上指标整合构建了山洪灾害风险分析指标体系(表1)，从危险性、暴露性和易损性三个维度进行指标体系构建和分析。

风险(risk)=危险性(Hazard)×暴露性(Exposure)×易损性(Vulnerability)

危险性：(1)降雨因子：短历时强降雨是山洪事件的激发因子，是山洪危险性的初始来源，主成分分析表明，历时为3h和6h的稀遇降雨量及变率是非常突出的主成分，故选择100年一遇3h、6h设计暴雨值及变差系数 C_v 作为降雨因子；(2)地形因子：流域形状、坡度、植被覆盖、土壤类型及分布、沟道比降等因素，都会对产汇流造成影响，是山洪危险性的主要来源，洪峰模数及汇流时间是综合考虑了以上因素分析计算后得到的结果，在流域尺度可反映下垫面特征及产汇流特性，故选择这两项指标综合为危险性的地形因子。

暴露性：山洪灾害调查评价对受山洪威胁的沿河村落进行了详查和分析评估，主成分分析结果表明了村落与山洪沟的空间关系对山洪事件影响突出，故选择受山洪威胁的沿河村落的人口、房屋及居民家庭财产类型为承险体暴露性的具体指标。

易损性：表现为在风险事件中容易遭受损害的特性及其程度(也可以理解为承险体所具备防灾力的相对面)。根据山洪灾害调查评价内容，主成分分析结果表明，沿河村落房屋结构及各种监测预警设施的信息可以大致直接反映易损性的基本情况，故选择Ⅲ类和Ⅳ类房屋占比、自动监测站和简易监测站的站点密度作为表征易损性的指标。

表1 山洪风险评估指标体系及主成分分析结果

风险项	指标类型	指标项	主成分相关性结果
危险性H	降雨因子	100年一遇6h设计暴雨、变差系数 C_v	0.742
		100年一遇3h设计暴雨、变差系数 C_v	0.694
	地形因子	小流域洪峰模数	0.968
		小流域汇流时间	0.691
暴露性E	人口	小流域人口数	0.974
	房屋	小流域房屋数	0.828
	家庭财产	小流域居民家庭财产类型	0.891
易损性V	弱房比例	Ⅲ类和Ⅳ类房屋占比	0.602
	监测预警设施	自动监测站点密度(个/km ²)	0.729
		简易监测站点密度(个/村)	0.712

3.2 权重设定 权重设定时，危险性、暴露性和易损性都是风险要素的组成，同等重要，三者权重均为1/3。在确定二级指标权重时，危险性指标中短历时强降雨特征明显，降雨赋予权重较高；暴露性指标由小流域人口数、房屋类型和居民家庭财产类型组成，人口数权重相对较高；易损性指标包括Ⅲ和Ⅳ类房屋比例、自动监测站和简易监测站的密度，考虑到监测站点对与应急避险转移的重要性，权重相对较高。各指标权重如表2。

3.3 风险等级计算 对数据进行归一化处理，构建风险立方体模型，将危险性、暴露性、易损性要素叠积。计算方法如式(1)：

$$Risk = H \cap E \cap V = \left(\sum_1^m W_i H_i \right) \cap \left(\sum_1^n W_j E_j \right) \cap \left(\sum_1^l W_k V_k \right) \quad (1)$$

其中，危险性、暴露性、易损性三要素计算方法如式(2)一式(4)：

表2 指标权重设置表

指标体系	一级指标		二级指标		三级指标			
	权重	指标项	主成分相关性	权重调整	指标项	主成分相关性	权重调整	
危险性 H	1/3	降雨因子	0.942	0.200	100年一遇6h设计暴雨变差系数 C_v	0.742	0.100	
			0.913		0.133	100年一遇3h设计暴雨变差系数 C_v	0.694	0.100
		地形因子	0.974	0.133	小流域单位洪峰模数	0.968	0.080	
			0.828		0.100	小流域汇流时间	0.691	0.053
暴露性 E	1/3	人口	0.974	0.133	小流域人口数	0.974	0.133	
		房屋	0.828		0.100	小流域房屋数量	0.828	0.100
		家庭财产	0.891		0.100	小流域居民家庭财产类型	0.891	0.100
易损性 V	1/3	弱房比例	0.602	0.100	Ⅲ类和Ⅳ类房屋占比	0.602	0.100	
		监测预警设施	0.910		0.233	自动监测站点密度(个/km ²)	0.729	0.117
						简易监测站点密度(个/村数)	0.712	0.117
指标权重合计	1			1			1	

$$H = \sum_{i=1}^m W_i H_i = \sum_{i=1}^m W_i \left(\sum_{k=1}^{m'} w_{ik} H_{ik} \right) \quad (2)$$

$$E = \sum_{j=1}^n W_j E_j = \sum_{j=1}^n W_j \left(\sum_{k=1}^{n'} w_{jk} E_{jk} \right) \quad (3)$$

$$V = \sum_{k=1}^l W_k H_k = \sum_{k=1}^l W_k \left(\sum_{k'=1}^{l'} w_{kk'} V_{kk'} \right) \quad (4)$$

式中： H_i 、 E_j 、 V_k 为各指标项指标； m 、 n 、 l 为指标项数量； m' 、 n' 、 l' 为指标项的各要素数量； i 、 j 、 k 、 k' 为累计求和中间变量； W 为要素和指标的权重。

对危险性、暴露性、易损性三要素样本量的计算值进行降维排序，以每类要素的1/3、2/3处设为划分节点，将三要素计算值分别划分为低、中、高3个等级风险，综合风险需由三个要素组合叠加，即27个等级组合，如图3所示，具体分类方法如表3：

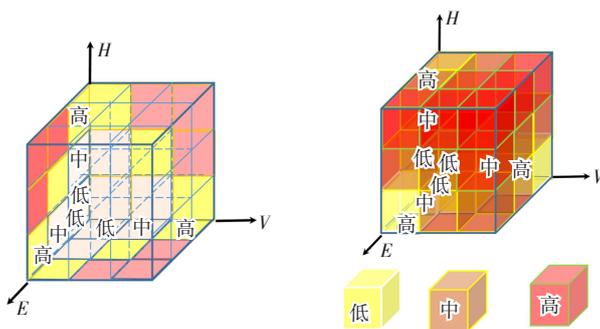


图3 风险等级阈值

表3 风险等级阈值组合

风险等级组合	组合项	数量
高风险	$H_H E_H V_H; H_H E_H V_M; H_H E_H V_L; H_M E_H V_H; H_M E_H V_M; H_M E_H V_L; H_L E_H V_H; H_L E_H V_M; H_L E_H V_L; H_H E_M V_H; H_H E_M V_M; H_H E_M V_L; H_H E_L V_H; H_H E_L V_M; H_H E_L V_L; H_M E_M V_H; H_M E_M V_M; H_M E_M V_L; H_M E_L V_H; H_M E_L V_M; H_M E_L V_L; H_L E_M V_H; H_L E_M V_M; H_L E_M V_L; H_L E_L V_H; H_L E_L V_M; H_L E_L V_L;$	9组
中风险	$H_H E_L V_H; H_H E_L V_M; H_H E_L V_L; H_M E_H V_L; H_M E_M V_M; H_M E_L V_H; H_L E_H V_H; H_L E_H V_M; H_L E_H V_L; H_L E_M V_H; H_L E_M V_M; H_L E_M V_L; H_L E_L V_H; H_L E_L V_M; H_L E_L V_L;$	12组
低风险	$H_M E_L V_M; H_M E_L V_L; H_L E_M V_M; H_L E_M V_L; H_L E_L V_M; H_L E_L V_L;$	6组

注：表中 HEV 为风险要素的危险性、暴露性和易损性，HML为数值的高、中、低，故 $H_H E_H V_H$ 为危险性高、暴露性高且易损性高的组合。

4 评估结果及分析

根据本文提出的风险评估模型对福建省山洪灾害综合风险进行了评价，结果如图4所示。图中红

色为高风险区，黄色为中风险区，蓝色为低风险区。高风险区主要集中在福建沿海台风高发区及内陆暴雨高值山区，如武夷山脉、玳瑁山、博平岭等，涉及小流域1151个，流域面积近2万 km^2 ，人口608万人，占比为19.9%；中风险区在省内分布较为广泛，以人口密集区为主，涉及小流域3280个，流域面积4.7万 km^2 ，人口1227万人，占比为40.2%；低风险区涉及小流域4480个，流域面积5.7万 km^2 ，人口1215万人，占比为39.8%。高、中风险区分布与山洪灾害防治区范围基本一致。图5是福建省典型山区，即闽江千岭水库以上流域的山洪灾害综合风险分布图。

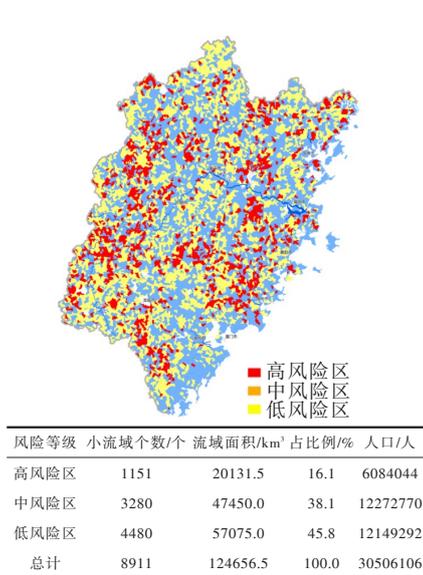


图4 福建省山洪灾害综合风险分布

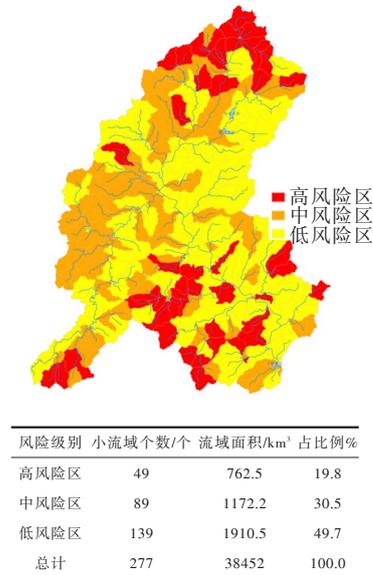


图5 闽江千岭水库以上流域山洪防治区综合风险图

根据福建省山洪灾害调查评价成果中的历史山洪灾害资料计算小流域山洪灾害事件发生密度，并与风险评估结果对照，结果显示，80%的历史山洪落在高风险区和中风险区，高风险区密度为221场/万 km^2 ，中风险区密度为202场/万 km^2 ，低风险区密度为66场/万 km^2 。高风险区的山洪灾害发生密度是低风险区的3倍，验证结果说明基于小流域的山洪灾害风险评估模型指标选择具有较好的代表性，权重设定合理，风险早期识别结果可靠。

5 结论

本文构建了山洪灾害早期识别与定量分析模型，构建了指标体系和风险立方体模型，并以福建省为例，分析了全省的山洪灾害综合风险，并运用2306历史山洪场次数据对评估结果进行验证，结论如下：(1)基于小流域的山洪风险识别和灾害风险分析，可反映山洪灾害对短时强降雨、流域下垫面与人类活动的响应关系，以自然流域为单元的风险评估方法具有一定的物理机制。(2)评估结果表明福建省山洪灾害高发区集中在沿海地区受台风暴雨影响的区域和内陆山区的强对流暴雨高值区，山洪灾害发生频度受自然环境和人类活动双重因素影响。评估结果统计得到高发区人口为608万，面积近2万 km^2 。(3)通过历史山洪场次数据验证，80%的历史山洪落在高风险区和中风险区，高风险区的山洪灾害发生密度是低风险区的3倍，风险识别结果可靠，风险评估模型可较为准确的反映山洪灾害风险。

参 考 文 献：

- [1] 郭良,丁留谦,孙东亚,等.中国山洪灾害防御关键技术[J].水利学报,2018,49(9):101-114.
 [2] 王振忠,王国新.基于水位流量反推法确定山洪灾害雨量预警指标探讨[J].吉林水利,2016(8):33-35.

- [3] WIECZOREK G F, GLADE T, JAKOB M, et al. Climatic factors influencing occurrence of debris flows[M]. Debris-flow hazards and related phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] 谭徐明, 张伟兵, 马建明, 等. 全国区域洪水风险评价与区划图绘制研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 50-60.
- [5] 韩松, 程晓陶, 梅青, 等. 流域未来洪水风险动因响应关系定性分析方法的研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(4): 251-256.
- [6] 樊建勇, 单九生, 管珉, 等. 江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J]. 气象, 2012, 38(9): 1110-1114.
- [7] GEORGAKAKOS K P, GRAHAM R, JUBACH R, et al. Global flash flood guidance system, phase I[R]. HRC Technical report No.9, 2013, Hydrologic Research Center, San Diego, CA.
- [8] TOTSCHNIG R, SEDLACEK W, FUCHS S. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport [J]. Natural Hazards, 2011, 58(2): 681-703.
- [9] HOLUB M, JÜRGEN SUDA, FUCHS S. Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(7): 1853-1870.
- [10] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update[J]. Landslides, 2008, 5(1): 3-17.
- [11] GUZZETTI F, STARK C P, SALVATI P. Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy[J]. Environmental Management, 2005, 36(1): 15-36.
- [12] ELKHRACHY, ISMAIL. Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2015, 18(2): 261-278.
- [13] 郭良, 张晓蕾, 刘荣华, 等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1548-1556.
- [14] ADRC. Total Disaster Risk Management: Good Practice 2005[R]. Kobe, Japan: Asian Disaster Reduction Center, 2005.

Flash flood risk identification and quantitative analysis: a case study in Fujian province

ZHANG Xiaolei^{1, 2}, LIU Ronghua^{1, 2}, LIU Qi^{1, 2}, LI Changzhi^{1, 2}, GUO Liang^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Under the influence of extreme weather, complex underlying surface and human activities, flash flood disasters occur frequently in China and are very difficult to predict. Based on national flash flood disaster investigation and assessment results, this article focused on 15-20 km² watershed level, from the aspects of rainfall, underlying surface, social and economic situation, flood control capacity, wading engineering and monitoring early warning facilities, first extracted 54 alternative indicators, using principal component analysis (PCA), and then, obtained 10 independent indexes to build flash flood risk index system, and finally, established risk cube model with 2306 historical flash disaster events in Fujian province for model validation. The results showed that flash flood risk identification based on small watershed can effectively reflect the response relationship between rainfall and underlying surface caused by disasters, and in Fujian Province, coastal typhoon and storm flooding areas and short duration heavy rainfall inland hilly areas are flash flood disaster high-risk areas, involving 1151 small basins, with an area of 20,000 km² and a population of 6.08 million. The results provided sufficient data support and played an important role in improving the accuracy of flash flood forecasting and early warning in Fujian province.

Keywords: flash flood; small watershed; risk identification; risk cube

(责任编辑: 耿庆斋)