

基于多情景的巫山县山洪灾害危险评价

林孝松¹, 崔梦瑞¹, 牟凤云¹, 余情², 徐州¹

(1. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:以重庆市巫山县为研究区,构建了静态动态山洪灾害危险评价指标,按照48 h降雨量为50,100,150,200,250 mm这5种情景,模拟获取了研究区地表汇流累积量;采用空间叠加法计算了各网格单元山洪灾害危险指数值并将山洪灾害危险划分为高、中、低危险和基本安全4个等级。研究结果表明:巫山县山洪灾害以低危险和中危险等级为主,但中、高危险面积相对较大,达总面积的39%;在48 h降雨量由50 mm增加到250 mm的过程中,基本安全面积基本不变,低危险面积稍有降低,中危险面积减少10.425 1 km²,而高危险区面积则显著增加13.727 5 km²;从各乡镇来看,中、高危险面积所占比例超过40%的达10个乡镇,且危险指数相对较高的乡镇主要集中在研究区的南部和西部;从各行政村来看,评价结果与历史灾害分布情况吻合相对较好,同时危险指数值大于1.7的村占总数的54.11%。研究结果从不同尺度、多情景体现了巫山县山洪灾害的危险分布,可为研究区山洪灾害防治提供科学依据,具有一定借鉴和指导意义。

关键词:环境水利; 危险评价; 情景模拟; 山洪灾害; 巫山县

中图分类号:P426.616; P954

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0370-07

Assessment of Hazard of Flash Flood Disaster in Wushan County Based on Multi-Scenarios

LIN Xiaosong¹, CUI Mengrui¹, MOU Fengyun¹, YU Qing², XU Zhou¹

(1. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Taking Wushan County of Chongqing as the research area, we constructed static and dynamic hazard assessment index for flash flood disaster. Based on the five conditions of precipitation (50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm and 250 mm in 48 hours), we took the land use and soil type factors into account and simulated the cumulative amount of surface runoff in the study area. We calculated the flash flood disaster hazard index value of each evaluation unit in the research area by using the spatial superposition method, and classified the risk of flash flood disaster into four levels of high hazard, medium hazard, low hazard and basic security based on the threshold value. The results showed that mountain flash flood disasters in Wushan County were dominated by low risk and medium risk areas, but areas with the medium and high risks were relatively large, up to 39% of the total area, while the precipitation increased from 50 mm to 250 mm within 48 hours, the area with basic security was basically unchanged, the area with low risk slightly reduced, the area with medium risk reduced by 10.425 1 km², the area with high risk significantly increased by 13.727 5 km². On the township scale, there were 10 townships which contained medium and high risk areas accounting for 40% of the total area. The towns which held relatively high risk indices were mainly located in the south and west of the study area. On the administrative village scale, the results of the evaluation were in good agreement with the distribution of historical disasters, while the risk index value more than 1.7 of the total number of villages accounted for 54.11%. The results from different scales and multi-scenarios reflected the hazards distribution of mountain torrents in Wushan County, which could provide the scientific basis for the prevention and control of mountain torrential disasters in the research area and had some guiding significances.

Keywords: environmental hydraulics; hazard assessment; scenario simulation; flash flood disaster; Wushan County

山洪灾害是山丘区经济社会发展面临的突出问题,每年均会造成重大人员伤亡和巨大财产损失。由于我国山丘区山洪孕灾、致灾因子复杂多变,空间异质性强,山洪形成机理不确定性显著,人类活动不利影响加剧,山丘区建设与发展将长期面临紧迫的山洪灾害防灾减灾重任。当前国内外科技工作者在山洪灾害孕灾致灾、风险评估以及灾害预警等方面取得了较丰硕成果。Garambois 等^[1]基于面向过程水文模型对降雨触发山洪进行了深入研究;杜俊等^[2]分析基本因子和一般因子对不同类型山洪灾害的影响程度;蔡维英等^[3]基于分布式中小流域山洪灾害模拟模型分析了各因素对山洪形成影响;Azmeri 等^[4]对印度尼西亚典型山区小流域山洪灾害进行危险区识别研究;林孝松等^[5]对跳石镇山洪灾害危险进行了综合分区;Zhang 等^[6]对中国霞浦流域进行山洪风险制图研究;黄国如等^[7]对瑶安小流域山洪灾害进行风险评估;岳琦等^[8]完成了闽江上游山洪灾害风险区划;赵瑜等^[9]对黑龙江省各区县山洪灾害风险进行等级区划;刘少军等^[10]应用 DEA 模型对海南岛山洪灾害危险性大小进行排序,根据成灾效率进行山洪灾害危险性的等级划分;叶金印等^[11]提出采用降雨径流相关法进行产流计算,采用 Nash 汇流模型进行汇流计算的山洪预警方法。当前以及将来全球气候变化将使高强度降雨发生频率、强度和区域分布变得更加复杂,所造成的山洪灾害也将更为严重。

以重庆市巫山县山洪灾害为研究对象,针对山区县域山洪灾害形成特点及尺度差异,构建由微地貌类型、地形坡位、地形指数、土地利用综合程度和地表汇流累积量等组成的山洪灾害静态、动态危险评价指标;在 GIS 软件支持下,获取研究区各危险评价静态指标 30 m 分辨率数据,同时按照 48 h 降雨量为 50, 100, 150, 200, 250 mm 这 5 种强度值,考虑不同土地利用和土壤类型的下渗和产水特性,模拟获取研究区地表汇流累积量;采用综合指数法计算得到各网格单元山洪灾害危险综合指数并进行综合分区;利用 GIS 区域汇总功能,将网格评价结果平均汇总到巫山县各乡镇区和行政村,以利于各行政管理部门应急响应和实际应用。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

巫山县位于重庆市东北部,地处三峡库区腹心,位于东经 109°33′—110°11′,北纬 30°45′—23°28′,幅员面积 2 958 km²,全县辖 25 个乡镇和 9 个林、农场,2016 年末常住人口 45.55 万人,地区生产总值 101.79 亿元。地形

以深谷、中山和低山为主,海拔高度为 75~2 690 m(图 1)。气候属亚热带季风性湿润气候,常年降水量 1 041~1 600 mm,最大月降雨量达 300 mm。2014 年 8 月 30 日—9 月 2 日,巫山县普降暴雨,最大降雨量达 384.6 mm,高强度降雨导致山洪暴发,95 616 人受灾,793 间房屋倒塌,6 187 hm² 农作物受灾,36 处道路中断,直接经济损失超过 2.4 亿元。1978—2016 年巫山县历史山洪灾害点共 770 处(图 2)。

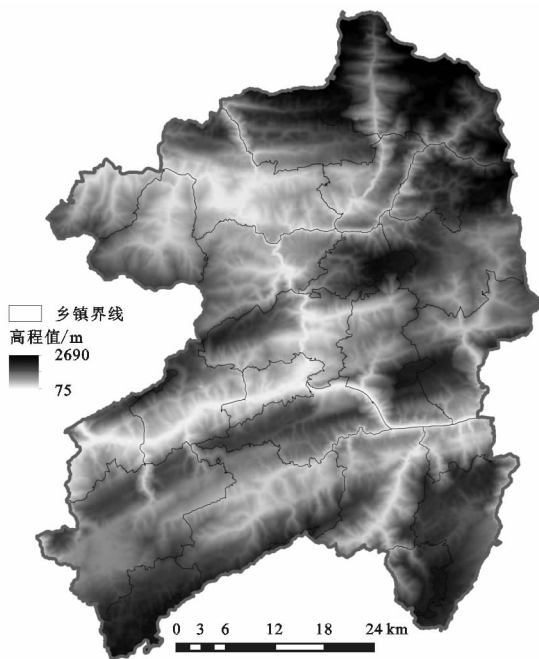


图1 巫山县数字高程模型

1.2 研究数据

研究所采用的数据主要包括巫山县 2015 年土地利用类型图、巫山县 1:5 万 30 m 分辨率数字高程模型数据、巫山县土壤类型图、包含有乡镇(街道)和行政村(居委会)的 2015 年行政区划图、巫山县历史山洪灾害点数据、2017 年巫山县统计年鉴等。

2 评价指标与数据获取

2.1 评价指标选取

国内外相关研究者针对不同的研究尺度,选用不同的评价指标开展山洪灾害危险评价。在大尺度方面,岳琦等^[8]选用多年降水均值、高程、坡度、土壤类型、糙率、稳定下渗率、最长汇流路径长度、最长汇流路径比降、植被覆盖度 9 个指标,进行了闽江上游山洪灾害风险区划;刘少军等^[10]选用地形因子、水系因子、暴雨日指数、滑坡和泥石流流密度、综合灾度作为海南岛山洪灾害危险性评价指标;唐川等^[12]采用地形坡度、暴雨天数、河网缓冲区、标准面积洪峰流量、泥石流分布密度和综合灾度 6 个指标,完成了红河流域山洪灾害危险评价图;杜俊等^[13]选用暴雨综合指标、

地形起伏度、土地利用产汇流能力、岩性软硬程度 4 个指标对长江流域山洪灾害危险进行评估。在小尺度方面,黄国如等^[7]选用最大 3 d 降雨、高程、坡度、土壤类型等危险指标对瑶安小流域山洪灾害进行风险评估;高展等^[14]采用不同等级降水量及频次、高程、高程标准差等指标对黄山风景区暴雨山洪灾害进行风险区划研究;左倩云等^[15]采用年均降雨量、地形坡度、起伏度、植被覆盖度、路网密度、居民点密度、历史灾害点密度、汇流累积量、暴雨强度、河网密度 10 个指标对接龙镇山洪灾害危险进行综合评价。



图 2 巫山县山洪灾害点分布

综合上述研究来看,基本上是从气象、地形地貌、水文、人类活动、历史灾害情况等方面遴选相关指标进行山洪灾害的危险评价,不足之处在于所有指标均是静态的历史性数据,未考虑降雨尤其是暴雨这一指标的动态性对山洪灾害形成的影响。论文根据巫山县山地丘陵地形特点以及研究区尺度差异特征,从地形地貌、水动力条件、人类活动强度等方面选用微地貌类型、地形坡位、地形指数、土地利用综合程度等作

2.3 地形指数

地形指数 (Topographic Index, TI) 是综合考虑区域地形坡度和流域水文特性的一个综合指标。其空间分布可用于确定土壤饱和缺水量的空间分布情况以及产流区空间位置和范围。计算公式为:

TI=ln(α/ tanβ) (1)

为山洪危险评价的静态指标,从不同降雨强度下洪水汇集差异角度选用地表汇流累积量作为山洪危险评价的动态指标。

2.2 微地貌类型与地形坡位

利用研究区 30 m 分辨率 DEM 数据,采用地形坡位指数 (Topographic Position Index, TPI) 法^[16]可获取巫山县微地貌类型和地形坡位类型数据。首先,利用巫山县 30 m×30 m 栅格 DEM 数据,采用 90 m×90 m 尺度矩形邻域计算得到巫山县 TPI 指数;然后,按照 Weiss 划分标准,采用 90 m×90 m 和 330 m×330 m 尺度矩形邻域提取到巫山县 10 种微地貌类型 (图 3);最后,采用标准偏差 (SD) 方法对 TPI 值进行分等,并结合坡度值大小 (表 1) 划分得到巫山县地形坡位类型 (图 4)。

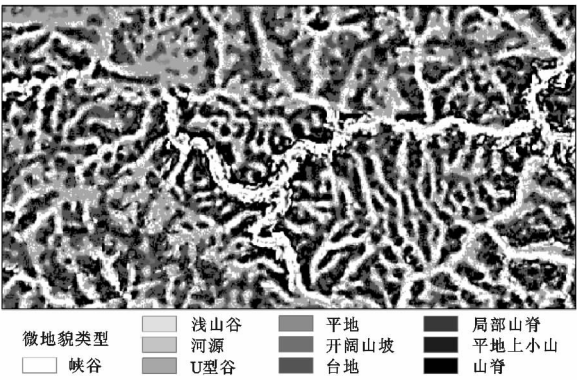


图 3 巫山县微地貌类型分布局部示意图

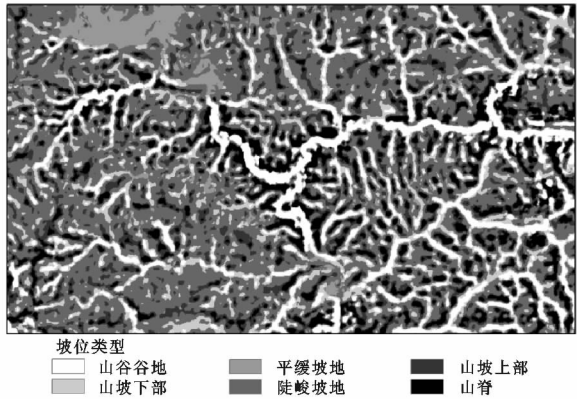


图 4 巫山县地形坡位分布局部示意图

表 1 巫山县地形坡位类型

地形坡位	山谷谷地	山坡下部	平缓坡地	陡峻坡地	山坡上部	山脊
TPI 标准偏差值	≤-1	(-1,-0.5]	(-0.5,0.5]	(-0.5,0.5]	(0.5,1]	>1
坡度	—	—	≤5°	>5°	—	—

式中:TI 为地形指数;α 为汇流面积;β 为坡度。

地形指数 TI 值越大,则表征土壤越容易达到饱和而产流,从而有利于发生山洪灾害。故可利用该值作为暴雨后地表产流并由此引发山洪的综合评价指标。首先利用巫山县 DEM 数据得到其坡度图;然后利用 GIS 水文分析功能得到巫山县各网格坡面汇流

面积;最后基于公式(1)利用栅格计算器可得到巫山县地形指数分布数据。

2.4 土地利用综合程度

不同强度的人类活动直接或间接影响山洪灾害的形成或强度大小。人类活动对地表形态造成一定的破坏作用,减弱对雨水的渗透和截留作用,土地利用程度不同其对地表破坏程度也会有所差异。由此可用土地利用综合程度来表征人类活动强度大小以及其对山洪灾害形成的影响。按照人类利用程度的大小差异,将城镇村及工矿用地、交通过用地界定为高度利用等级,耕地、园地为中度利用等级,林地、草地、水域及水利设施用地为低度利用等级,其他用地为未利用等级。将巫山县土地利用类型矢量数据按照利用等级标准进行栅格转化即可得到研究区土地利用综合程度栅格数据。

2.5 地表汇流累积量

结合巫山县夏半年多年平均降雨情况,按照 48 h 降雨量 50,100,150,200,250 mm 这 5 种降雨强度模拟计算地表汇流累积量。首先基于研究区 DEM 数据,利用 ArcGIS 水文分析功能进行洼地填充、水流方向计算、汇流累积量(栅格数)模拟;然后根据巫山县 2015 年各土地利用类型(图 5)和土壤类型(图 6)的下参与产水特性,按照表 2 中系数赋予各土地利用类型和土壤类型相应的径流系数值,并将两个图层进行相乘叠加得到巫山县各栅格单元径流系数;最后按照 5 种降雨强度值,基于以网格数量为单位的汇流累积量图层,通过单位换算得到以 m^3 为单位的汇流累积量,并以巫山县径流系数分布栅格数据为权重进行修正,最终得到不同降雨强度下巫山县地表汇流累积量模拟分布数据。从模拟结果来看,随着降雨量的增大,研究区各个网格单元地表汇

流累积量均有不同程度增多。

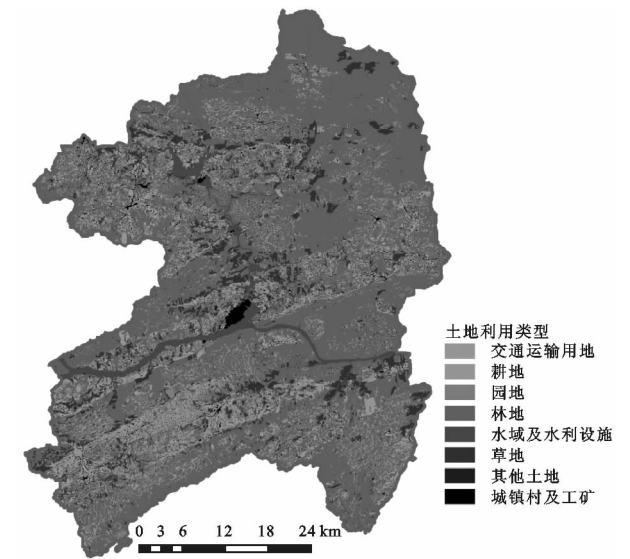


图 5 巫山县土地利用类型

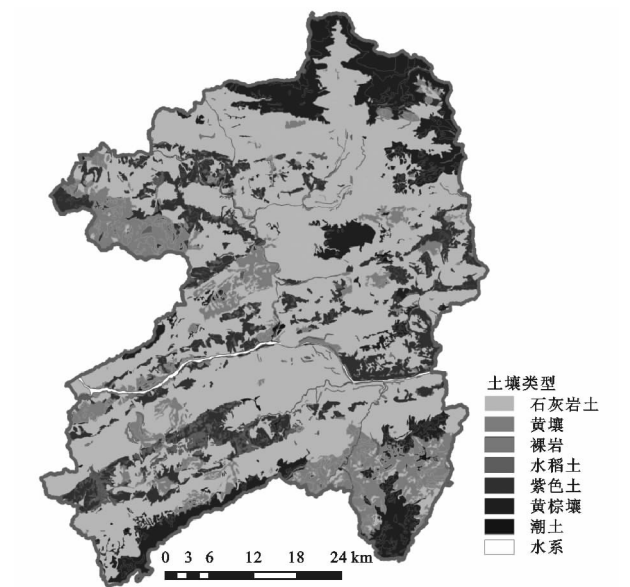


图 6 巫山县土壤类型

表 2 巫山县土地利用类型和土壤类型径流系数

土地利用类型	径流系数值	土地利用类型	径流系数值	土地利用类型	径流系数值	土壤类型	径流系数值
建制镇	1	果园	0.60	坑塘水面	1	紫色土	0.88
村庄	0.99	茶园	0.65	水工建筑用地	1	黄棕壤	0.90
采矿用地	0.99	其他园地	0.70	水库水面	1	黄壤	0.91
风景名胜及特殊用地	0.96	有林地	0.45	河流水面	1	潮土	0.92
公路用地	1	灌木林地	0.55	裸地	0.90	石灰岩土	0.94
水田	0.95	其他林地	0.60	设施农用地	0.95	裸岩	0.95
灌溉水田	0.90	其他草地	0.70	沙地	0.65	水稻土	0.96
旱地	0.75	内陆滩涂	0.95				

3 结果与分析

巫山县山洪灾害危险评价 5 个指标中,微地貌类型、地形坡位、土地利用综合程度为定性指标,地形指

数和地表汇流累积量为定量指标。为进行综合量化评价,将研究区山洪灾害危险等级划分为高、中、低风险和基本安全 4 个级别,并依据表 3 标准对各指标进行分等级标准化赋值处理。

表 3 巫山县山洪灾害危险评价指标量化表

指标		高危险	中危险	低危险	基本安全
微地貌类型	分级	峡谷、U 形谷	浅山谷、	开阔山坡、台地、平地上小山	河源、局部山脊、山顶
	赋值	4	3	2	1
地形坡位	分级	山谷谷地	山坡下部、平缓坡地	陡峻坡地、山坡上部	山脊
	赋值	4	3	2	1
地形指数	分级	≥5	2~5	0~2	<0
	赋值	4	3	2	1
土地利用综合程度	分级	城镇村及工矿用地、交通用地	耕地、园地	林地、草地、水域及水利设施用地	其他用地
	赋值	4	3	2	1
地表汇流累积量	分级	≥500 m ³	200~500 m ³	100~200 m ³	<100 m ³
	赋值	4	3	2	1

采用层次分析法对评价指标权重进行计算,得到微地貌类型、地形坡位、地形指数、土地利用综合程度和地表汇流累积量的权重值依次为 0.178 5,0.111 0,0.290 7,0.075 1,0.344 7。

基于评价指标标准量化栅格数据,利用栅格计算器功能计算得到不同降雨强度下巫山县山洪灾

害危险指数综合值(表 4),并按照阈值 1.2,1.8,2.4 进行等级划分(图 7—8);最后利用区域汇总功能可得到不同降雨强度下巫山县各乡镇和各行政村的平均危险评价价值,其中巫山县 48 h 降雨量为 250 mm 时各乡镇和各行政村的危险评价结果如图 9—10 所示。

表 4 不同降雨强度下巫山县山洪灾害危险评价

危险等级	50 mm		100 mm		150 mm		200 mm		250 mm	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
基本安全	513.8862	17.37	513.7756	17.37	513.6595	17.37	513.5624	17.36	513.4742	17.36
低危险	1286.3389	43.49	1285.5491	43.46	1284.8564	43.44	1284.1349	43.41	1283.4486	43.39
中危险	917.7846	31.03	914.1360	30.90	911.3365	30.81	909.1910	30.74	907.3595	30.67
高危险	239.9903	8.11	244.5394	8.27	248.1476	8.39	251.1117	8.49	253.7177	8.58
合计	2958	100	2958	100	2958	100	2958	100	2958	100

由表 4 可知,巫山县山洪灾害以低危险和中危险为主,分别占总面积的 43.4%和 31.0%,而中危险和高危险面积占总面积的 39%。在 48 h 内,降雨量由 50 mm 增加到 250 mm 的情况下,基本安全区面积基本不变,仅减少 0.412 0 km²;低危险区面积稍有降低,降低了 2.890 3 km²;中危险区面积变化较明显,减少了 10.425 1 km²;而高危险区面积增加较显著,面积增加了 13.727 5 km²。由此可预见,在降雨量不断增加的情况下,巫山县山洪灾害高危险区的面积在不断增加,防治任务加剧。

从巫山县各乡镇山洪灾害危险评价结果来看(图 9),34 个乡镇(林、农场)各危险等级面积占各自面积的比重分别为 10.91%~27.87%(基本安全),27.87%~52.64%(低危险),25.47%~35.25%(中危险)和 5.38%~10.32%(高危险);中、高危险两者总和比例超过 40%的乡镇有邓家、抱龙、金坪、龙溪、平河、竹贤、庙堂、当阳、巫峡和官阳 10 个乡镇。此外,按照自然断点分类法将各乡镇危险综合值分为 4 个等级,危险指数最高的第四等级乡镇主要集中在研究区的南部和西部,共 11 个;而危险等级较低的第一和第二等级主要为研究区内植被相对较好的林农场。

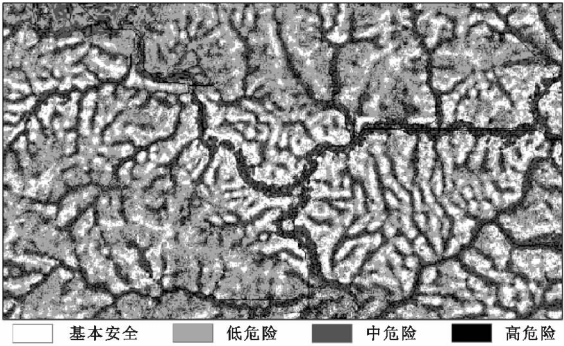


图 7 巫山县山洪灾害危险评价局部示意图(降雨量 50 mm)

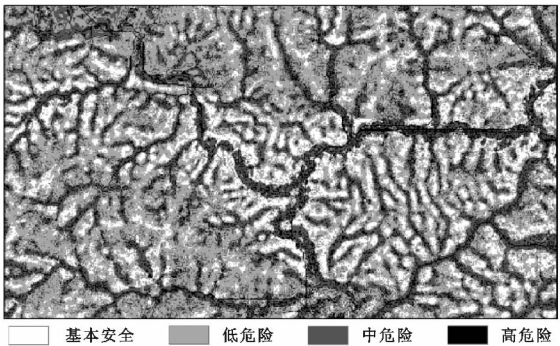


图 8 巫山县山洪灾害危险评价局部示意图(降雨量 250 mm)

从巫山县各行政村山洪灾害危险分布来看(图 10),巫山县 316 个行政村(居委会)中,危险指数值大

于 1.80 的有 23 个,1.71~1.80 的有 148 个,1.61~1.70 的有 140 个,小于 1.60 的有 5 个,同时各行政村山洪灾害危险评价结果与历史灾害分布情况吻合相对较好。

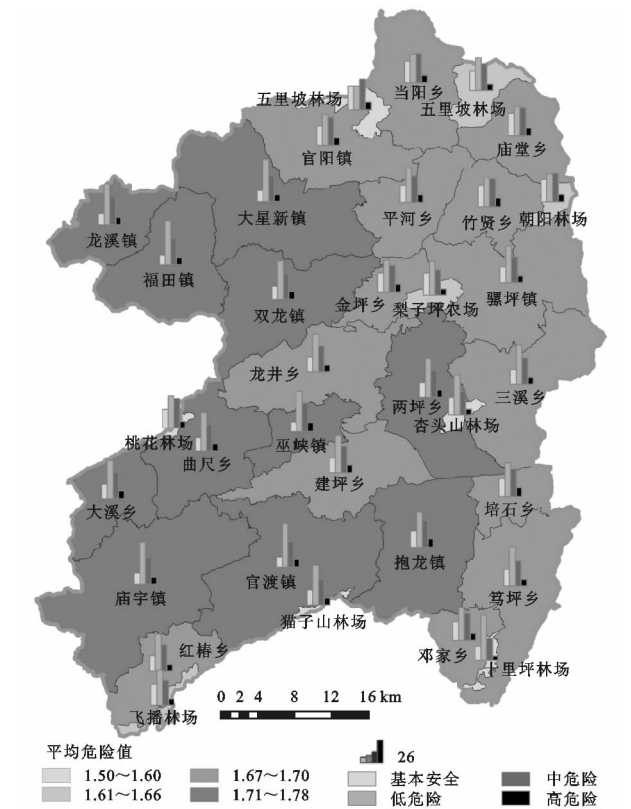


图 9 巫山县各乡镇山洪灾害危险评价

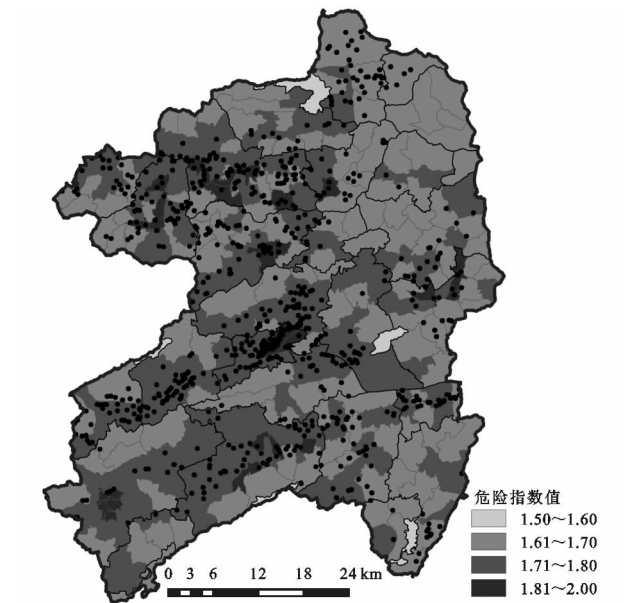


图 10 巫山县各行政村山洪灾害危险评价

4 讨论与结论

(1) 在对各评价指标进行分级赋值量化的基础上,采用多因素综合指数法计算得到各评价单元山洪灾害危险综合指数值并据此将山洪灾害危险划分为

高危险、中危险、低危险和基本安全 4 个等级;从总体来看,巫山县山洪灾害以低、中危险为主,占比分别为 43.4% 和 31.0%,而中、高危险面积占比为 39%。

(2) 在研究区 48 h 降雨量由 50 mm 增加到 250 mm 的情况下,基本安全区面积基本不变,低危险区面积稍有降低,中危险区面积变化较明显,面积减少 10.425 1 km²,而高危险区面积则增加较显著,面积增加 13.727 5 km²。由此可见,采用动态的地表汇流累积量既可进行动态评价,也可进一步开展不同降雨强度下的山洪灾害空间预警研究。

(3) 从各乡镇山洪评价结果来看,中、高危险两者总和比例超过 40% 的乡镇达 10 个,且危险指数值相对较高的乡镇主要集中在研究区的南部和西部;从各行政村山洪危险分布来看,危险指数值大于 1.7 的行政村占总数的 54.11%,且评价结果与历史灾害分布情况吻合相对较好,可为研究区山洪灾害防治提供借鉴。

论文研究成果可为巫山县山洪灾害防灾减灾提供科学依据,但也存在以下需要进一步研究之处。

首先,地表汇流累积量指标的赋值量化问题。将地表汇流累积量由通常的网格数或面积变为具体汇水量,可以模拟不同降雨条件下的地表汇流情况,并由此进行山洪灾害危险的动态评价。但在对该指标进行分级赋值时是按照研究区河流整体特征确定的固定数额,未充分考虑河流上下游间河道宽度的差异,故按照此分级标准会使得对上游的评价结果偏轻,而对下游地区的评价会相应偏重,使得评价结果与实际情况存在一定偏差。

其次,地表汇流累积量的精确性问题。在进行不同降雨强度下地表汇流累积量的模拟时,充分考虑了不同地表下垫面尤其是不同土地利用类型和土壤类型对洪水形成的差异影响,但在确定各土地和土壤类型的径流系数时主要借鉴专家经验和少量试验参数确定,其结果也会与实际情况存在一定误差。

再次,山洪灾害形成关键指标作用的均化问题。山洪灾害的形成受各种因素的综合影响,是一个复杂的综合过程。虽然在进行危险评价时尽量选择综合性和关键性指标,但采用综合指数方法通过线性组合计算山洪灾害危险指数值,在一定程度上平滑了部分关键性指标所起的主要作用。

参考文献:

[1] Garambois P A, Larnier K, Roux H, et al. Analysis of flash flood-triggering rainfall for a process-oriented hydrological model[J]. Atmospheric Research, 2014, 137:14-24.

[2] 杜俊,丁文峰,任洪玉. 四川省不同类型山洪灾害与主要

- 影响因素的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11):1977-1983.
- [3] 蔡维英, 刘兴朋, 张继权. 基于分布式 SCS 模型的山地景区山洪灾害模拟研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2):15-18.
- [4] Azmeri, Hadihardaja I K, Vadiya R. Identification of flash flood hazard zones in mountainous small watershed of Aceh Besar Regency, Aceh Province, Indonesia[J]. Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Sciences, 2016, 19(1):143-160.
- [5] 林孝松, 林庆, 王梅力, 等. 山区镇域山洪灾害危险性分区研究:以跳石镇为例[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3):90-96.
- [6] Zhang D, Quan J, Zhang H, et al. Flash flood hazard mapping: A pilot case study in Xiapu River Basin, China[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(3):195-204.
- [7] 黄国如, 冼卓雁, 成国栋, 等. 基于 GIS 的清远市瑶安小流域山洪灾害风险评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6):43-47.
- [8] 岳琦, 张林波, 刘成程, 等. 基于 GIS 的福建闽江上游山洪灾害风险区划[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(4):293-298.
- [9] 赵瑜, 喻块块, 张建伟. 基于县域的山洪灾害风险区划研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1):61-64.
- [10] 刘少军, 张京红, 张明洁, 等. DEA 模型在山洪灾害危险性评价中的应用:以海南岛为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4):227-234.
- [11] 叶金印, 李致家, 吴勇拓. 一种用于缺资料地区山洪预警方法研究与应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3):15-19.
- [12] 唐川, 朱静. 基于 GIS 的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报, 2005, 60(1):87-94.
- [13] 杜俊, 任洪玉, 张平仓, 等. 大空间尺度山洪灾害危险评估的比较研究[J]. 灾害学, 2016, 31(3):66-72.
- [14] 高展, 许剑勇, 王胜, 等. 黄山风景区暴雨山洪灾害风险区划研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3):281-285.
- [15] 左倩云, 林孝松, 韩曠, 等. 山区镇域山洪灾害危险评价研究[J]. 绿色科技, 2014(2):223-227.
- [16] Weiss A. Topographic Position and Landforms Analysis[R]. San Diego, Ca: Ersi User Conference, 2001.



(上接第 369 页)

- [5] 韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 等. 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益[J]. 生态学报, 2010, 30(19):5185-5193.
- [6] 李庆旭, 张彪, 史芸婷, 等. 张承地区生态系统服务及其区域关联分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1):38-46.
- [7] 陈璐. 太湖滨湖区重要生态功能区生态服务功能的研究[D]. 江苏苏州:苏州科技大学, 2016.
- [8] 韩永信, 高吉喜, 刘成程. 重要生态功能区及其生态服务研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [9] 陈翔舜, 魏金平. 甘南黄河重要水源补给区生态功能服务价值评价[J]. 甘肃林业科技, 2007, 32(1):28-30.
- [10] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3):351-360.
- [11] 李佳, 邵全琴, 刘纪远. 基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算:以江西兴国县为例[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4):83-87.
- [12] 秦嘉励, 杨万勤, 张健. 岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4):453-458.
- [13] Larson W E, Gupta S C, Useche R A. Compression of agricultural soils from eight soil orders [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(3):450-457.
- [14] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 等. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算[J]. 生态环境学报, 2013(3):451-457.
- [15] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4):1019-1030.
- [16] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. 世界林业研究, 2005, 18(1):49-54.
- [17] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016(4):603-611.
- [18] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 等. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算[J]. 生态环境学报, 2013(3):451-457.
- [19] 辛慧. 泰山森林涵养水源功能与价值评估[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2008.