基于 GIS 和 FloodArea 水动力模型的重庆市山洪灾害风险区划

刘晓冉，康 俊，王 颖，李永华
（重庆市气候中心，重庆 401147）

摘 要：[目的] 开展重庆市山洪灾害风险评估与区划，为该地区山洪防灾减灾提供相应参考。[方法] 依据自然灾害风险评估理论，从致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承灾体暴露性、防灾减灾能力 4 个方面选取指标，构建重庆市山洪灾害风险评估模型。结合相关气象、生态和社会经济数据，运用 GIS 空间数据分析完成重庆市山洪灾害风险区划。[结果] 重庆市山洪灾害致灾因子危险性在合川和江津大部地区为高风险区，孕灾环境高脆弱区主要位于长江、嘉陵江沿江河谷地带，承灾体暴露性在重庆市主城区、南川、武隆、涪陵、城口为高暴露区，重庆东北部和东南部大部地区为低防灾减灾能力区。[结论] 总体评估而言，重庆市山洪灾害风险的高风险区主要位于重庆东北部的巫溪、东南部的酉阳和彭水、西南部的江津和西北部的合川。

关键词：山洪灾害；风险评估；水动力模型；区划；重庆市
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0206-06 **中图分类号**：TV877，P694

文献参数：刘晓冉，康俊，王颖，等. 基于 GIS 和 FloodArea 水动力模型的重庆市山洪灾害风险区划[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：206-211. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.033；Liu Xiaoran，Kang Jun，Wang Ying，et al. Risk regionalization of torrential flood disaster in Chongqing City based on GIS and FloodArea model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：206-211.

Risk Regionalization of Torrential Flood Disaster in Chongqing City Based on GIS and FloodArea Model

Liu Xiaoran，Kang Jun，Wang Ying，Li Yonghua
（*Chongqing Climate Center*，*Chongqing* 401147，*China*）

Abstract：[Objective] We carried out an assessment and regionalization of torrential flood disaster in Chongqing City to provide the corresponding reference for disaster prevention and mitigation of torrential flood. [Methods] According to the related theory of natural disaster，we established a risk assessment model of torrential flood disaster in Chongqing City with four assessment index subsystems，containing the dangerousness of disaster risk，the vulnerability of the disaster environment，the exposure of the disaster bearing body，and the ability of disaster prevention and reduction. Based on the meteorological，ecological and social economic data of Chongqing City，the assessment and regionalization of torrential flood disaster risk in Chongqing City were carried out by using the GIS spatial data analysis. [Results] The highly risk regions of the torrential flood disaster-causing factors is located in most areas of Hechuan and Jiangjin area. The highly vulnerable areas of disaster-prone environment are mainly located in the river valley along the Yangtze River and Jialing River. The exposure of torrential flood disaster bearing body is higher in Nanchuan，Wulong，Fuling and Chengkou City. The low disaster prevention and mitigation capacity areas lie in northeastern and southeastern part of Chongqing City. [Conclusion] The highest risk area of torrential flood disasters are largely located in Wuxi，Youyang，Pengshui，Jiangjin and Hechuan area.

Keywords：**torrential flood disaster**；**risk assessment**；**FloodArea model**；**regionalization**；**Chongqing City**

收稿日期：2018-09-17 **修回日期**：2018-10-21
资助项目：公益性行业(气象)科研专项“城市短历时强降水监测和致灾阈值研究及业务系统研发”(GYHY201506014)；重庆市悦来新城海绵城市建设科研项目(城科字 2015 第 2-10 号)；重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-201913)
第一作者：刘晓冉(1982—)，男(汉族)，河南省洛阳市人，博士，高级工程师，主要从事应用气候与灾害评估研究。E-mail：liuxiaoran8283@126.com。
通讯作者：康俊(1982—)，男(汉族)，湖北省钟祥市人，硕士，高级工程师，主要从事 GIS 与气象灾害风险评估研究。E-mail：kaan_508@163.com。

山洪是山区小流域由降水引发的突发性、暴涨暴落的地表径流，山洪灾害多为短历时强降雨造成，具有来势猛、成灾快、破坏力强等特点[1-3]。重庆市山丘广布，类型复杂，地形崎岖，高差悬殊，河流纵横，切割强烈，这种地貌有利于山洪灾害的发展和形成[4]，尤其是夏季受南亚夏季风和东亚夏季风的共同影响，雨量充沛，暴雨频繁，暴雨区域范围广、强度大、发生频率高[5-6]，暴雨是造成山洪灾害的根源[4]。近年来，随着经济的发展和城市化进程的加快，山丘区开发建设活动日益频繁，森林破坏，土地退化，水土流失严重，缩短了雨水产生径流的时间，河道、水库、塘、堰等因泥沙淤积降低了蓄洪滞洪功能，加剧了山洪灾害[4]。重庆市特殊的气候条件、地理环境和人为因素，使之成为山洪灾害的频发区和重灾区。重庆市山洪灾害几乎年年发生，因山洪诱发的各种灾害较多，造成的直接经济损失和人员伤亡较重[7]。全市范围均属于山洪灾害防治区，重点防治区所占比例高达 40%，是制约当地经济社会发展的重要因素之一[8]。山洪灾害风险区划是根据研究区域山洪危险性特征，并参考区域灾害承受能力及社会经济状况，把研究区域划分为不同风险等级的区域，对于防灾减灾决策和管理具有重要意义[9-10]。根据自然灾害风险评估理论，一般从致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承灾体暴露性和防灾减灾能力等方法进行量化分析[11]。随着 GIS 技术的发展，近年来不少学者将山洪灾害风险评估与 GIS 技术相结合，从危险性评价和易损性评价两个方面选择因子，开展了福建闽江上游、清远市瑶安小流域、吕梁地区小流域、曹江上游小流域等小流域区域[12-15]，以及黄山风景区、海南岛、河南省、辽宁省等大范围地区[16-19]的山洪灾害风险评估与区划研究。另一方面，不少工作将 GIS 与水动力模型相结合应用于洪水淹没模拟研究，FloodArea 模型是由德国 Geomer 公司开发的洪水淹没模型，主要基于水动力原理模拟洪水淹没范围和淹没深度[20]。Gemmer[21] 通过 FloodArea 水动力淹没模型发展编制流域风险图技术，国内一些学者[22-27]利用 FloodArea 模型通过模拟大通河流域、渭河流域以及云南、西藏东南部、新疆尼勒克县等不同地区山洪个例来推算致灾临界面雨量，这成为确定山洪致灾临界面雨量的新方法。FloodArea 模型的优势在于既考虑水动力原理又不需要历史观测水文资料，很好地解决了以往水文数据缺乏的问题。由于重庆市大部山洪沟没有水文站，缺乏逐时的淹没水深数据，利用 FloodArea 模型来确定山洪致灾临界面雨量较为适宜。周杰等[28]利用 FloodArea 模型模拟了重庆市清江河流域山洪致灾临界面雨量，取得比较好的效果。本文结合自然灾害风险评估理论和 FloodArea 水动力模型淹没模拟，综合考虑影响山洪灾害风险的主要因子和具体指标，建立重庆市山洪灾害风险评估模型，开展山洪灾害风险评估与区划，这对于政府部门山洪灾害防灾减灾具有一定的科学指导意义。

1　资料与方法

1.1　资料来源

(1) 气象数据为重庆市气象信息与技术保障中心提供重庆市范围内 34 个国家气象站 1981—2015 年气象资料年报表数据及 2005—2015 年逐小时降水资料。

(2) 地理信息数据包括美国 NASA 网站(https://www.nasa.gov/)下载的 STRM1∶5 万的 DEM 数据和 1∶25 万植被指数 NDVI，以及清华大学 2010 年土地利用矢量数据中 1∶25 万土地覆盖类型数据。

(3) 社会经济数据包括分辨率为 1 km×1 km 的重庆市各区县人口、GDP 等经济社会资料，来源于国家综合地球观测数据共享平台(http://www.chinageoss.org/dsp/home/index.jsp)。

(4) 地形坡度、河网密度和临河距离通过 DEM 数据处理得到。

(5) 山洪灾害资料来自重庆市气象台灾情直报系统 1981—2018 年灾情数据。

1.2　重现期计算和雨型分析

基于重庆市 34 个国家气象站 1981—2015 年 24 h最大降水量资料，采用广义极值分布函数进行拟合，计算不同重现期降水的空间分布。基于 2005—2015 年逐小时降水资料，滑动选取最大 4 场不重合的降水，记录每场降水逐小时降水量，计算每小时降水占该场总降水的百分率，最后对多场降水进行平均，得到 1～24 h 逐时的降水平均雨型分布。

1.3　FloodArea 模型

FloodArea 模型是由德国 Geomer 公司开发的基于 GIS 栅格数据构建的二维非恒定流的水文动力学模型，被广泛应用于洪水演进淹没模拟、洪水动态风险评估等，国内的应用表明了其在不同地区山洪淹没模拟具有比较好的适用性[22-28]。FloodArea 模型用 Manning-Stricker 公式计算每个栅格单元与周围 8 个单元间的洪水流量，相邻单元的水流宽度被认为是相等的，位于对角线的单元以不同的长度算法来计算，坡度由单元最低水位和最高高程差异决定，水流方向由栅格间坡度决定，水流的淹没深度为淹没水位高程和地面高程间的差值[20]。

1.4 灾害风险评估方法

1.4.1 灾害风险评估原理 灾害风险评估是基于定量的角度对灾害发生的形式和强度予以评估，一般考虑致灾因子危险性(D)、孕灾环境脆弱性(V)、承灾体暴露性(E)和防灾减灾能力(P)4 个主要评估因子，每个因子包含一系列指标。

1.4.2 指标归一化 自然灾害风险评估及区划评估参数不同，每个评估因子包含了若干指标，由于各个指标具有不同的量纲和不同的数量级，无法直接进行比较。为了使得各个指标间具有可比性，必须对每个具体指标做归一化处理，从而使每个指标数值分布在[0,1]区间范围内。

$$D_{ij}=\frac{A_{ij}-\min_i}{\max_i-\min_i} \tag{1}$$

式中：D_{ij}——第 j 个因子第 i 个指标值的归一化值；A_{ij}——第 j 个因子第 i 个指标值；$\min_i$——第 i 个指标值中的最小值；$\max_i$——第 i 个指标值中的最大值。

1.4.3 加权综合评价法 加权综合评价法是灾害风险综合评估的常用方法，主要是依据每个评估因子对总目标的影响程度，预先分配一个相应的权重系数，然后再与该评估因子相应各指标的量化值相乘后再相加。具体公式为：

$$V_j=\sum_{i=1}^{n}W_i\cdot D_{ij} \tag{2}$$

式中：V_j——第 j 个因子的总值；W_i——第 i 个指标的权重；n——评价指标个数。

1.4.4 自然断点分级法 自然断点分级法是用统计公式来确定属性值的自然聚类，其功能是减少同一级中的差异、增加级间的差异。计算公式为：

$$SSD_{i-j}=\sum_{k=i}^{j}[A(k)-mean_{i-j}]^2 \quad (1\leqslant i\leqslant j\leqslant N) \tag{3}$$

式中：A——一个数组长度为 k 的数组，$mean_{i-j}$——每个等级中的平均值。

1.4.5 专家打分法 专家打分法，也称德尔菲法(Delphi)，是通过匿名方式征询有关专家的意见，对专家意见进行统计、处理和归纳，综合多数专家经验与主观判断，对大量难以采用技术方法进行定量分析的因子做出合理估算，经过多轮意见征询、反馈和调整后，来确定各因子的权重系数。该方法与层次分析法(AHP)、聚类及组合权重法等传统的指标权重确定方法相比，虽存在一定的主观因素，但能较好地反映实际情况下各致灾因子在灾害形成过程的作用。

2 山洪灾害风险分析

2.1 指标体系构建

根据自然灾害风险评估理论和指标体系的构建原则，结合影响重庆市发生山洪灾害的因素，从致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力 4 个方面考虑评估因子，在各指标选取上参考了前人的研究工作，致灾因子危险性指标主要考虑反映山洪频次的灾害频次和反映山洪强度的模拟淹没水深，孕灾环境脆弱性主要考虑地形坡度、河网密度和临河距离，承灾体暴露性主要考虑人口密度、经济密度和耕地比例，防灾减灾能力主要考虑人均 GDP 和植被指数，选取了 10 个指标进行山洪灾害风险分析，并通过专家打分法确定各评价因子及其指标的权重系数，构建重庆市山洪灾害风险评估指标体系(图 1)。最后利用加权综合评价法得到综合山洪灾害风险指数，对山洪灾害风险进行评估。

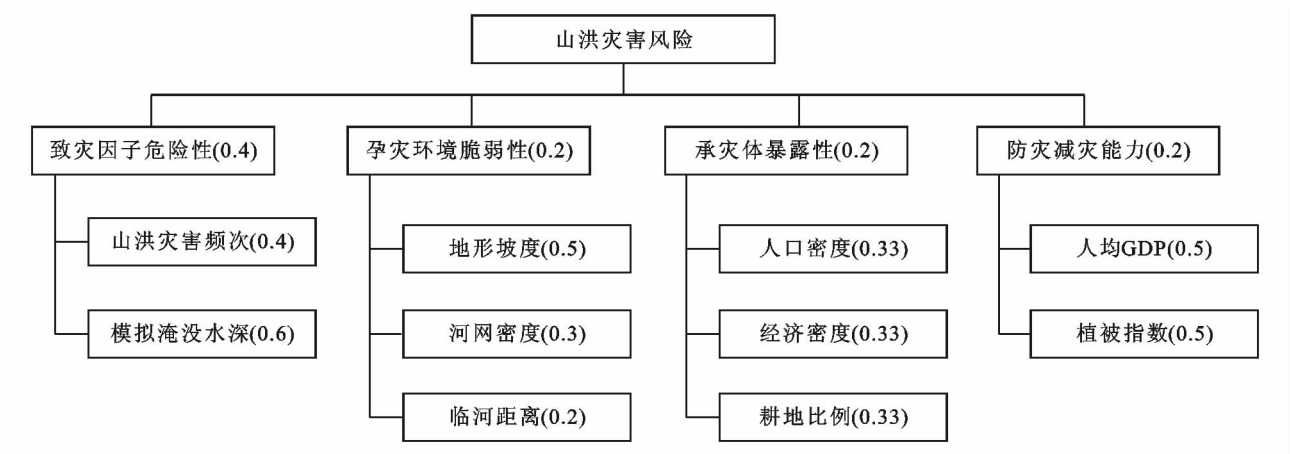


图 1 山洪灾害风险评估指标体系及指标权重

2.2 致灾因子危险性

致灾因子危险性指形成山洪灾害的自然变异因素及其异常程度。一般来说，山洪致灾因子危险性越高，山洪灾害的风险也就越大。这里山洪灾害致灾因子主要考虑山洪灾害频次和 FloodArea 模型模拟 100 a 重现期 24 h 最大降水量的淹没水深。

2.2.1　山洪灾害频次　重庆市山洪灾害频次分布图(图 2)表明，重庆东北部的巫溪、西南部的江津、东南部的酉阳和西北部的合川为高发区，频次每年在 2.2 次以上，重庆西部的铜梁、璧山及主城沙坪坝山洪灾害发生频次较低，每年在 1.1 次以下。

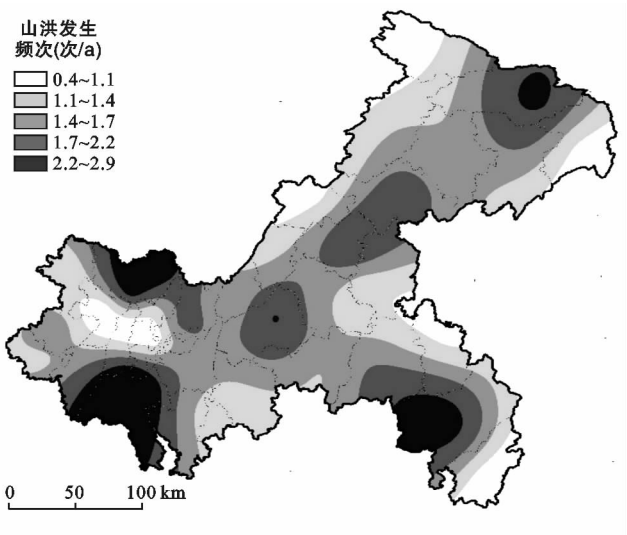


图 2　重庆市 1981－2014 年山洪灾害频次分布

2.2.2　FloodArea 模拟淹没水深　图 3 为采用广义极值分布函数拟合的重庆市 100 a 重现期最大降水量的空间分布，重庆市有 3 个高值中心，分别位于东北部的梁平和开州、西部的铜梁和璧山以及东南部的彭水，均在 300 mm 以上，最大值位于开州，达 339.9 mm。低值区位于在西南部的巴南、涪陵、南川、綦江地区，均在 150 mm 以下。

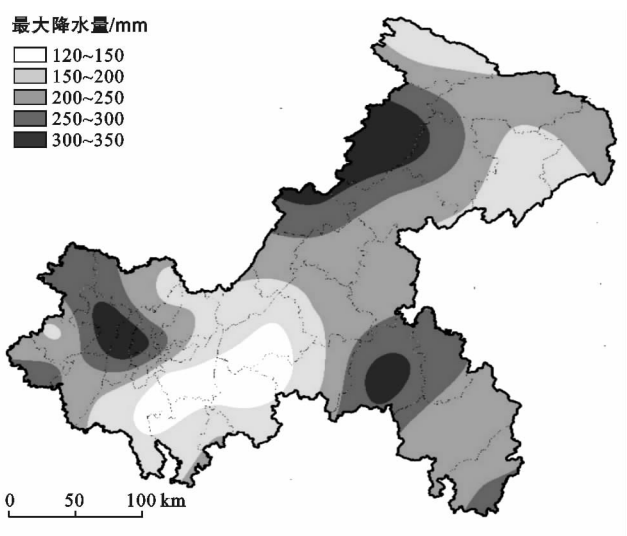


图 3　广义极值分布函数拟合的重庆市 100 a 重现期 24 h 最大降水量分布

根据 24 h 雨型分布和 100 a 重现期最大降水量计算得到 24 h 逐时降水量，将其作为 FloodArea 水动力模型的输入参数，模拟计算降水在地面产生的汇流情况，输出逐小时的淹没水深和范围，并提取最大淹没范围和深度(图 4)，可以看出即使是 100 a 重现期的降水量，淹没水深在河流山谷比较深。

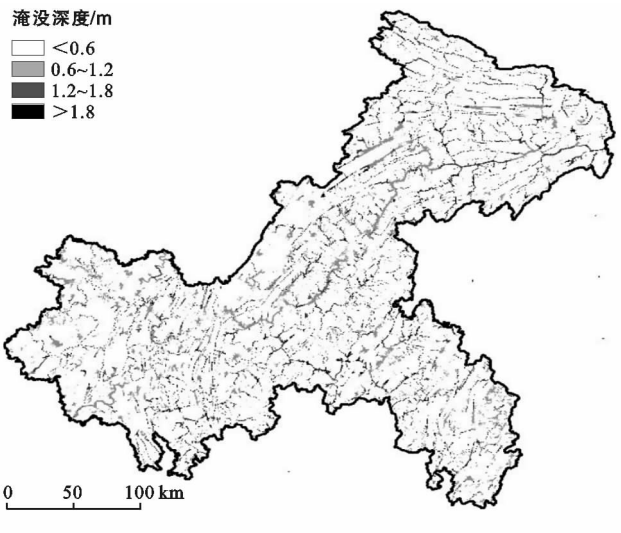


图 4　FloodArea 模拟重庆市 100 a 重现期 24 h 最大降水雨型的淹没范围和深度

2.2.3　致灾因子危险性区划　山洪频率越高、模拟流域淹没水深越深，山洪灾害致灾因子的危险性越高，山洪灾害的风险也就越大。运用自然断点分级法将致灾因子危险性指数 D 划分为低、次低、中等、次高、高 5 个危险区，对应的 D 值依次为 0.50～0.52，0.52～0.54，0.54～0.57，0.57～0.86，0.86～0.96，得出重庆市山洪灾害致灾因子危险性区划图(附图 6)，次高和高危险区主要分布在重庆东北部的巫溪、万州、忠县地区，西南部的江津、永川、綦江，东南部的酉阳、彭水，西北部的合川以及中部的涪陵，其中合川和江津大部地区为高危险区。

2.3　孕灾环境脆弱性

孕灾环境脆弱性是指衡量自然环境发生灾害可能性大小的因子，是地貌、水文等各种自然因素和社会经济因素对山洪灾害影响的敏感度和适应能力的综合反映。在同等致灾强度下，孕灾环境脆弱性高低具有放大或者缩小灾情的作用。因此，孕灾环境脆弱性越高，山洪灾害风险也越大。根据自然环境对山洪灾害的影响能力，并结合重庆市的孕灾环境，主要选取地形坡度、河网密度和临河距离作为孕灾环境脆弱性评价指标。在地心引力作用下，地表径流向低洼地区汇聚，因此地形坡度越大，越容易发生山洪。河网密度是流域结构性特征的重要指标，反映了流域地形切割程度，决定了该流域承受山洪能力的强弱。河网密度越高，临河距离越近，产生山洪灾害的危险性越大。运用 GIS 空间分析功能，并利用自然断点分级法

将孕灾环境脆弱性指数 V 划分为 5 个脆弱区，依次为低、次低、中等、次高、高 5 个脆弱区，对应的 V 值依次为 0.25～0.40，0.40～0.44，0.44～0.47，0.47～0.50，0.50～0.67，得到重庆市山洪灾害孕灾环境脆弱性区划图(附图 7)，可以明显看出，长江、嘉陵江沿江河谷地带的环境脆弱性高，重庆中西部其余广大地区环境脆弱性次高，而东北部城口、巫溪的环境脆弱性较低。

2.4 承灾体暴露性

承灾体暴露性是指可能受到山洪威胁的社会经济和自然环境系统主体。一个地区暴露于山洪灾害危险因素的价值密度越高，可能遭受的潜在损失也就越大，风险也越高。根据重庆市社会经济和农业条件，选取人口密度、经济密度和耕地比例作为承灾体暴露性评估指标。人口密度、经济密度和耕地比例分别为区域内人口总数、国内生产总值和耕地面积与区域总面积之比，人口密度、经济密度和耕地比例越高的地区，可能遭受的损失越大，暴露性越高。运用 GIS 空间分析功能，承灾体暴露性 E 依据自然断点分级法划分为 5 个脆弱性等级，依次为低、次低、中等、次高、高 5 个暴露区，对应的 E 值依次为 0.50～0.52，0.52～0.57，0.57～0.63，0.63～0.74，0.74～0.92，得出重庆市山洪灾害承灾体暴露性区划图(附图 8)。重庆主城区、西南部的綦江、南川、武隆、涪陵地区，以及东北部的石柱、万州、奉节、巫溪和城口的大部地区暴露性较高，为次高和高暴露区，尤其是重庆主城区、南川、武隆、涪陵、城口为高暴露区。重庆东南部的彭水、黔江、酉阳和秀山大部地区暴露性较低。

2.5 防灾减灾能力

防灾减灾能力是指受灾风险区对山洪灾害的抵御和恢复能力，是通过采取工程和非工程性措施来抵御和应对山洪灾害所造成损失和破坏的能力，与地方经济发展水平呈正相关。这里主要考虑人均 GDP 和植被指数作为防灾减灾能力的体现。人均 GDP 越高经济越发达地区，防灾减灾的工程和非工程性措数量相对越多，山洪抗灾能力相对较强。植被指数越高，覆盖越高越广，涵养水源的能效越强。

基于 GIS 空间分析功能，利用自然断点分级法防灾减灾能力 P 划分为 5 个能力区，分别为低、次低、中等、次高、高 5 个防灾减灾能力区，对应的 P 值依次为 0.50～0.63，0.63～0.67，0.67～0.70，0.70～0.75，0.75～0.94，得到重庆市山洪灾害防灾减灾能力区划图(附图 9)。重庆主城区周边大部地区的防灾减灾能力为次高和高能力区，而重庆东北部和东南部大部地区为低防灾减灾能力区。

3 山洪灾害风险综合评估

在定量分析致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承灾体暴露性和防灾减灾能力的基础上，根据山洪灾害风险评估模型综合风险 C 值，运用 GIS 软件并结合自然断点分级法将山洪灾害风险区划分为低、次低、中等、次高、高 5 个风险等级区，依次为 0.39～0.47，0.47～0.48，0.48～0.49，0.49～0.50，0.50～0.61，得出重庆市山洪灾害综合风险等级区划图(附图 10)。重庆东南部、东北部和西南部大部地区的山洪灾害风险性较高，为次高和高风险区，尤其是重庆东北部的巫溪、东南部酉阳和彭水、西南部的江津以及西北部的合川为山洪灾害高风险区。而重庆西部的潼南、铜梁、荣昌、璧山，中部偏北的垫江、梁平大部分地区为低风险性区。

利用重庆市气象台灾情直报系统 2015—2018 年汛期期间的灾情信息，对山洪发生情况进行统计(表 1)，近 4 a 来的山洪灾害发生的地点包括巫溪(2 次)、城口、忠县(2 次)、丰都及武隆，主要分布于重庆的东北部和东南部，与山洪灾害综合风险评估结果的高风险区较为一致，印证了山洪风险区划的合理性。

表 1 重庆市 2015－2018 年灾情直报系统山洪灾害统计结果

受灾时间	受灾地点	受灾情况
2015 年 6 月 24—26 日	巫溪县	大暴雨引发山洪致 1 人死亡 2 人失踪
2015 年 7 月 14—15 日	巫溪县	宁河街道山洪致使 13 辆小车和 3 辆摩托车冲入河中，其中被冲走的一辆小车中有 5 人(3 人被救，1 人死亡，1 人失踪)
2016 年 7 月 19—21 日	丰都县	龙河流域上游受短时强降雨影响，多条支流迅速汇集，流经区域山洪来水迅猛，龙河水位短时内迅猛上涨，致使多地路段水淹严重
2017 年 7 月 3—7 日	忠县	声乡广兴村四社邓家沟河道山洪暴发，河道两岸约 5 hm^2 水稻被淹，直接经济损失 5 万元
2017 年 9 月 23—27 日	城口县	多处出现山洪、泥石流、滑坡等灾害
2018 年 7 月 6 日	武隆区	多地发生山洪、地质灾害、城市内涝，部分房屋、道路、水利、通讯设施及农业受损，死亡 1 人，受伤 1 人
2018 年 8 月 22—24 日	忠县	黄金镇绍溪村、大山村约 100 立方左右公路被暴雨引发的山洪冲毁，部分路段被碎石掩埋，500 人左右出行受到影响

4 结 论

（1）重庆市山洪灾害致灾因子危险性在合川和江津大部地区为高危险区。

（2）山洪灾害孕灾环境脆弱性的高脆弱区主要位于长江、嘉陵江沿江河谷地带，而重庆东北部城口、巫溪的环境脆弱性较低。

（3）山洪灾害承灾体暴露性在重庆主城区、南川、武隆、涪陵、城口为高暴露区，东南部的彭水、黔江、酉阳和秀山大部地区暴露性较低。

（4）山洪灾害防灾减灾能力在重庆主城区及涪陵、万州城区周边为次高和高能力区，而东北部和东南部大部地区为低防灾减灾能力区。

（5）总体评估而言，重庆市山洪灾害风险高风险区主要位于重庆东北部的巫溪、东南部的酉阳和彭水、西南部的江津以及西北部的合川。而重庆西部的潼南、铜梁、荣昌、璧山，中部偏北的垫江、梁平大部分地区为低风险性区。

[参 考 文 献]

[1] 张平仓，任洪玉，胡维忠，等. 中国山洪灾害防治区划初探[J]. 水土保持学报，2006，20(6)：196-200.

[2] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展，2013，24(6)：901-908.

[3] 文明章，林昕，游立军，等. 山洪灾害风险雨量评估方法研究[J]. 气象，2013，39(10)：1325-1330.

[4] 傅春梅，徐刚. 重庆市山洪灾害的危害、成因及防治对策[J]. 太原师范学院学报：自然科学版，2011，10(1)：145-148.

[5] 黄会杰，彭超，徐刚，等. 重庆市区域性暴雨危险性定量分析及其时空分布规律研究[J]. 地球与环境，2018，46(3)：237-244.

[6] 游珍，蒋庆丰，徐刚. 重庆市暴雨规律及其引发的灾害初探[J]. 重庆环境科学，2001，23(3)：13-16.

[7] 张军红，严同金，谢谦，等. 人类活动对山洪沟的影响分析：以重庆市为例[J]. 农技服务，2016，33(3)：13-14，20.

[8] 张乾柱，卢阳，秦维，等. 重庆市山洪灾害空间分布规律及影响因素研究[J]. 人民长江，2018，49(1)：13-22.

[9] 程卫帅，陈进. 山洪灾害风险度评价技术综述[J]. 人民长江，2004，35(12)：5-14.

[10] Norbiato D，Borga M，Degli E S，et al. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions：An assessment for gauged and ungauged basins[J]. Journal of Hydrology，2008，362(3/4)：274-290.

[11] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理[M]. 北京：科学出版社，2012：1-100.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 李栋，吴博，郑秀清，等. 基于 AHP 和 GIS 的吕梁地区小流域山洪灾害风险区划[J]. 水电能源科学，2017，35(7)：85-96.

[15] 罗日洪，黄锦林，唐造造. 基于 AHP 和 GIS 的山区小流域山洪灾害风险区划研究[J]. 灾害学，2018，33(2)：64-69.

[16] 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.

[17] 刘少军，张京红，张明洁，等. 海南岛山洪灾害风险区划研究[J]. 水土保持研究，2013，20(5)：165-169.

[18] 勒梦，刘凤林，李虎星. 基于 GIS 的河南省山洪灾害风险区划研究[J]. 中国防汛抗旱，2017，27(4)：54-59.

[19] 曹永强，郭明，袁立婷. 基于 GIS 技术的辽宁省山洪灾害风险区划研究[J]. 华北水利水电大学学报：自然科学版，2018，39(2)：80-85.

[20] Geomer. Flood area and FloodAreaHPC：ArcGIS-extension for calculating flooded areas(User Manual Version 10.0)[M]. Heidelberg，2011.

[21] Gemmer M. Decision support for flood risk management at the Yangtze River by GIS/RS-based flood damage estimation[M]. Giessen：Shaker，2004：108-127.

[22] 姜智怀，张毅之，蔡哲，等. 基于河道栅格的山洪灾害淹没模拟[J]. 气象，2014，40(8)：1013-1018.

[23] 谢五三，田红，卢燕宇. 基于 FloodArea 模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 暴雨灾害，2015，34(4)：384-387.

[24] 张明达，李蒙，戴丛蕊，等. 基于 FloodArea 模型的云南山洪淹没模拟研究[J]. 灾害学，2016，31(1)：78-82.

[25] 林志强，尼玛吉，黄志诚. 西藏东南部山洪灾害过程水文动力模拟和临界雨量[J]. 水土保持通报，2017，37(1)：183-187.

[26] 吴秀兰，江远安，余行杰，等. 基于 FloodArea 模型的新疆尼勒克县暴雨山洪临界雨量的确定[J]. 水土保持通报，2018，38(1)：159-164.

[27] 王胜，吴蓉，谢五三，等. 基于 FloodArea 的山洪灾害风险区划研究：以滠河流域为例[J]. 气候变化研究进展，2016，12(5)：432-441.

[28] 周杰，陈良吕，徐严平，等. 重庆市清江河流域山洪致灾临界面雨量研究[J]. 西南师范大学学报：自然科学版，2018，43(2)：42-48.