

文章编号: 1008-2786-(2019)4-538-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000446

福建省山洪灾害危险性评价

熊俊楠^{1,2}, 曹依帆¹, 程维明^{2*}, 郭良^{3,4}, 杨莹辉¹

(1. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;)

摘 要: 福建省山洪灾害频发, 造成的损失十分严重, 开展山洪灾害危险性评价, 对于防灾减灾具有重要意义。本文结合福建省山洪灾害的时空分布特征, 从致灾因子和孕灾环境出发, 选取多年年均降雨量、坡度、NDVI、土壤类型、土地利用类型等 10 类影响因子。利用 CF 模型和 Logistic 回归模型确定各因子与其分类级别的权重, 应用皮尔逊相关系数法对因子间独立性进行检验。并利用历史山洪点与 ROC 曲线对评价结果进行验证。研究结果表明: (1) 100 年一遇最大 24 h 降雨量、土地利用类型及地形起伏度是影响福建省山洪灾害的三个主要因素; (2) 极低危险区、低危险区、中危险区、高危险区、极高危险区占全省总面积的比例分别为 63.1%、14.2%、4.5%、5.9%、12.3%; (3) 福建省东部、南部、东南部的沿海地区以及北部、西部的个别低山地区处于高危险或极高危险区; (4) 在仅占研究区面积 12.3% 的“极高危险区”的较小范围内, 实际发生山洪点数占山洪点总数的比例高达 65.8%, 训练样本和验证样本的 ROC 曲线下面积 AUC 值也分别达到 0.876 和 0.891, 两种方式都说明山洪危险性评价结果较好。可为福建省山洪灾害防治提供科学依据和支持。

关键词: 山洪灾害; 危险性评价; 确定性系数模型; 逻辑回归模型; 福建省

中图分类号: P954; X43

文献标志码: A

山洪灾害已成为我国自然灾害造成人员伤亡的主要灾种^[1]。福建省地处我国东南部, 地形复杂, 降水丰沛, 特殊的地形地貌条件极易诱发山洪灾害。2013 年, 水利部和财政部联合启动了全国山洪灾害调查评价项目, 据该项目统计, 1949—2015 年间福建省内共发生山洪灾害 1566 次, 如 2010 年 6 月的连城县山洪灾害, 全县共 17 个乡镇, 4.23 万人不同程度受山洪灾害影响, 紧急转移 1.42 万人, 造成直

接经济损失约 4.42 亿元。又如 2015 年 8 月的长乐市山洪灾害, 全市共 14 个乡镇, 1666 人受灾, 房屋倒塌 1025 间, 全市累计经济损失约 3.93 亿元。针对福建省山洪灾害的危险性研究, 过去主要关注水文资料、降水单一因素及闽江上游^[2]局部地区的分析, 而对大范围内的山洪灾害进行综合因素分析的研究还尚显不足。对福建省开展山洪灾害危险性评价, 对山洪灾害风险分析与防治规划具有重要意义^[3]。

收稿日期 (Received date): 2019-02-19; **改回日期** (Accepted date): 2019-06-26

基金项目 (Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20030302); 水利部全国山洪灾害调查评价项目 (SHZH-IWHR-57); 数字福建自然灾害监测大数据研究所开放课题 (NDMBD2018003); 西南石油大学科技创新团队项目 (2017CXTD09); 中国地质调查项目 (DD20190637)。[Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA20030302); National Mountain Flood Disaster Investigation Project of China Institute of Water Resources and Hydropower (SHZH-IWHR-57); Open Fund of Big Data Institute of Digital Natural Disaster Monitoring in Fujian (NDMBD2018003); Innovation Team Projects of Southwest Petroleum University Of Science and Technology (2017CXTD09); China Geological Survey Project (DD20190637)]

作者简介 (Biography): 熊俊楠 (1981-), 男, 四川南充人, 在站博士后, 副教授, 主要从事地理信息系统与灾害风险分析方面的研究。[XIONG Junnan (1981-), male, born in Nanchong, Sichuan province, postdoctoral, associate professor, mainly engaged in the research on GIS and disaster risk analysis] E-mail: neu_xjn@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 程维明 (1973-), 男, 博士, 研究员, 主要从事数字地形地貌研究。[CHENG Weiming (1973-), male, Ph. D., professor, specialized in digital geomorphology] E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

早在 20 世纪五六十年代,美国、日本等国家开始对山洪灾害展开危险性研究,而我国却起步较晚^[2]。随着 GIS 等地理信息系统技术的发展,国内外众多学者将专家打分法^[4]、层次分析法^[5-7]、比率法^[8]、主成分分析法^[9]等方法应用到山洪危险性研究中。经过几十年的发展,山洪危险性评价已从定性分析向定量分析转变^[10],但仍存在以下问题:山洪灾害是多种影响因子共同作用的结果,各因子之间、因子与危险性之间的内在关系非常复杂^[11]。这些常用的评价方法在选取评价因子及确定评价因子权重时,并不能较好的解决主观因素的影响。除此之外,仅通过简单线性加权求和的方式也难以揭露各因子间的复杂作用和显著水平^[12]。鉴于此,本文将确定性系数模型和逻辑回归模型相结合的方法应用于山洪危险性研究中,不仅能够较为客观的计算出各因子及其分类级别的权重值,更能揭示评价因子与山洪灾害间的复杂非线性关系^[13]。

本文以福建省为研究区,30 m 格网为评价单元,综合考虑山洪灾害致灾因子和孕灾环境两方面评价指标,建立福建省山洪灾害危险性评价确定性系数和逻辑回归模型,完成全省范围的山洪灾害危险性评价及危险性等级划分,并对结果的合理性和模型的准确性进行验证,以期福建省山洪灾害防治提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

福建省位于我国东南部,陆域介于北纬 23°33′~28°20′、东经 115°50′~120°40′之间,东隔台湾海峡与台湾地区隔海相望,东北、西北、西南三方分别与浙江、江西、广东三省接壤^[14]。全省陆域面积 12.4×10⁴km²。从气候水文上看,福建属于亚热带季风气候,热量丰富,雨量充沛。年平均气温 15℃~22℃,从西北向东南递升。年平均降雨量 1200~2200 mm,沿海和岛屿偏少,西北山地较多^[15],夏秋之交常有暴雨。省内水系密布,河流众多,河网密度达 0.1 km/km²。从地形地貌条件上看,福建主要由山地和丘陵构成,山地、丘陵的总面积占全省陆域面积的 80% 以上^[16]。地势总体上为东南低西北高,横断面略呈马鞍形。研究区概况及历史山洪灾害点空间分布位置如图 1 所示。

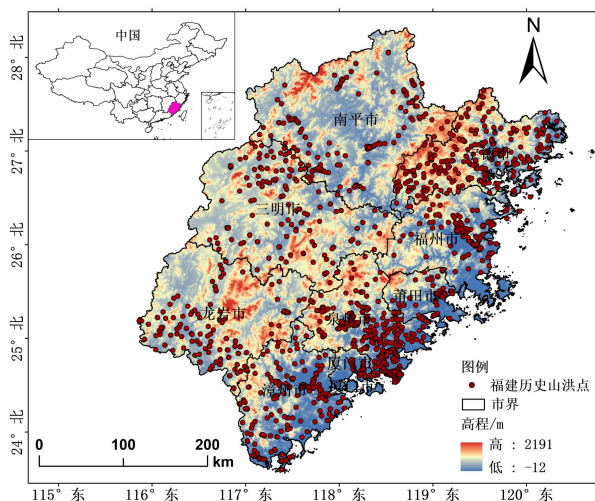


图 1 研究区概况及历史山洪灾害分布

Fig. 1 Survey of the study area in China and distribution of historical mountain torrent disasters

1.2 数据来源

历史山洪灾害点数据及条件因子数据的收集和预处理是山洪危险性评价的首要步骤,也是影响评价结果准确度的重要因素之一。本文所用基础数据的类型、分辨率及获取方式等如表 1 所示。

2 研究方法

2.1 确定性系数模型

确定性系数模型 (Certainty Factor, CF) 最早是由 Shortliffe 和 Buchanan 于 1975 年提出,实质是一个概率函数,后经 Heckerman 优化^[17]。它主要根据已有事件与其影响因子之间的统计关系,计算出未来该事件发生的概率值。因此,现已被广泛应用于各类灾害的敏感性和危险性分析。其表达式如下:

$$C_F = \begin{cases} \frac{pp_a - pp_s}{pp_a(1 - pp_s)}, & pp_a \geq pp_s \\ \frac{pp_s - pp_a}{pp_s(1 - pp_a)}, & pp_a < pp_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, pp_a 为事件在各影响因子的分类级别 a 中发生的条件概率; pp_s 为事件在整个研究区内发生的先验概率,当研究区确定后, pp_s 值保持不变。在山洪危险性研究中, pp_a 由落入各影响因子分类级别 a 中的历史山洪点个数与分类级别 a 的面积比值表示; pp_s 由研究区内的历史山洪点总个数与研究区总面积比值表示^[12]。

表 1 基础数据类型及来源
Tab. 1 Types and Sources of Basic Data

数据名称	数据类型	分辨率或比例尺	获取方式
DEM (ASTER V2)	栅格 (.tif)	30 m	地理空间数据云平台
福建历史山洪灾害点	矢量 (.shp)	—	《全国山洪灾害调查评价》项目
土地利用类型	矢量 (.shp)	—	《全国山洪灾害调查评价》项目
土壤厚度	栅格 (.tif)	1 km	寒区旱区科学数据中心
土壤类型	矢量 (.shp)	—	《全国山洪灾害调查评价》项目
研究区及周边气象站点多年年均降雨量数据	表格 (.xlsx)	—	中国气象数据网
全国各频率暴雨图集 10 km 网格	矢量 (.shp)	10 km	《全国山洪灾害调查评价》项目
NDVI 数据	栅格 (.tif)	1 km	国家地球系统科学数据共享服务平台

由式(1)可知, C_F 的值介于 $[-1, 1]$ 之间, 若结果为正且越接近 1, 则说明事件确定性越高, 即越容易发生山洪灾害; 反之, 若结果为负且越接近 -1, 则说明事件确定性越低, 即越不容易发生山洪灾害; 特殊地, 若结果接近于 0 或等于 0, 则说明先验概率和条件概率非常接近, 因此无法说明山洪灾害是否易发生。

2.2 逻辑回归模型

逻辑回归模型是一种常用的多元统计分析方法, 常用于疾病诊断、数据挖掘、经济预测等领域。它包含自变量 X 和因变量 Y 两种变量。其中, 自变量 X 可以有多个, 而因变量 Y 却只能有两个^[18]。假设发生山洪的概率为 P , 不发生山洪的概率为 Q , 那么发生与不发生山洪和各影响因子之间的关系可表示为:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} = \frac{e^Z}{1 + e^Z} \tag{2}$$

$$Q = 1 - P = \frac{1}{1 + e^Z} \tag{3}$$

$$Z = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \cdots + B_nX_n \tag{4}$$

式中, Z 为中间变量, 表示变量叠加后的线性权重之和。 $B_0, B_1, B_2, \cdots, B_n$ 都为常数, 表示获得的回归系数。 X_1, X_2, \cdots, X_n 表示各影响因子。

2.3 评价指标体系的建立和分级

山洪灾害的形成与发展主要受降雨、地形地质、人类经济社会活动等 3 大因素的影响^[19]。根据山洪灾害危险分析的概念模型及前人研究结果, 从致灾因子和孕灾环境两方面出发, 并考虑到客观性、代表性、可获性等原则, 选取多年年均降雨量、100 年一遇最大 6 h 降雨量、100 年一遇最大 24 h 降雨量、

土壤厚度、坡度、地形起伏度、NDVI、距水体距离、土壤类型、土地利用类型共 10 个影响因子来构建山洪灾害危险性评价的指标体系。山洪灾害危险分析指标体系如图 2。

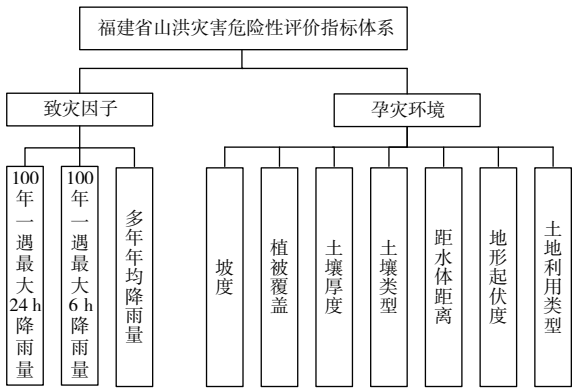


图 2 山洪灾害危险分析指标体系
Fig. 2 Mountain torrent disaster hazard analysis index system

2.3.1 致灾因子

(1) 100 年一遇最大 6 h 降雨量

短时间强降雨是引起山洪灾害的主要原因之一。因此, 本文根据李华威等^[20]的研究成果, 选取 100 年一遇最大 6 h 降雨量和 100 年一遇最大 24 h 降雨量作为致灾因子中的暴雨指标。首先, 将福建省暴雨图集 10 km 网格数据转为点数据, 再利用克里金法进行插值, 得到福建省暴雨分布模拟数据。研究区 100 年一遇最大 6 h 降雨量值介于 134 ~ 305 mm 之间, 将其划分为 <180 mm、180 ~ 220 mm、220 ~ 260 mm、260 ~ 300 mm、>300 mm 五级。观察发现, 历史山洪点除在雨量值 >300 mm 区域分布较少外, 其余四级分布较为均匀(图 3a)。

(2) 100年一遇最大24h降雨量

研究区100年一遇最大24h降雨量值介于228.81~592.57mm之间,将其划分为<250mm、250~350mm、350~450mm、450~550mm、>550mm五级。观察发现,历史山洪点在雨量值介于250~350mm和350~450mm两级中分布较多,其余三级分布较少(图3b)。

(3) 多年年均降雨量

持续降雨也是引起山洪灾害的主要原因之一。因此,选择多年年均降雨量作为致灾因子中的最后一个评价指标。本文利用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的《中国地面累年值年值数据集(1981—2010年)》数据,选取福建省及福建周边浙江、江西、广东三省境内共116个气象站点年均降雨值,同暴雨指标一样,仍利用克里金法进行插值,以获取福建省多年年均降雨量分布模拟数据。最终,多年年均降雨量值介于1408.86~1915.58mm之间,将其划分为<1450mm、1450~1550mm、1550~1650mm、1650~1750mm、1750~1850mm、>1850mm六级。据统计,历史山洪点在多年年均降雨量值<1450mm和>1850mm的区域最少,仅有5个。在1550~1650mm的区域最多,达到596个。而分布在其他四级中的数量相差较小(图3c)。

2.3.2 孕灾环境

(1) 土壤厚度

土壤厚度主要由有效土层厚度和土体厚度两部分构成,能够较为直观的表达土壤性质^[21]。一般来说,土壤厚度越大,越有利于雨水渗透与蓄积,从而

减小地表产流,对山洪灾害的形成起到一定的抑制作用。本文所用土壤厚度数据是从寒区旱区科学数据中心提供的面向陆面模拟的中国土壤数据集([doi:10.3972/westdc.0294.db](https://doi.org/10.3972/westdc.0294.db))中获取。研究区土壤厚度介于10.78~128.8cm之间,将其分为<30cm、30~50cm、50~70cm、70~90cm、90~110cm、>110cm六级。历史山洪点数量在各级中的分布数量差异较大(图4a)。

(2) 坡度

坡度反映了地表单元的陡缓程度,常作为山洪灾害评价指标中微观地形因子之一^[22]。坡度大的区域相对坡度小的区域,汇流时间更短,形成洪峰所需的时间也就更短,因此,山洪灾害的威胁就更大^[23]。本文利用Slope函数从研究区30m DEM中提取坡度,得到坡度范围为0~74.66°之间,并将坡度分为<10°、10~20°、20~30°、30~40°、40~50°、>50°六级。其中,在<20°的区域内,历史山洪点数量占整个研究区山洪点数量的95.5%(图4b)。

(3) 地形起伏度

地形起伏度是指在某一特定的范围内,最高点的海拔高度与最低点的海拔高度的差值,可以间接表达地表形态^[24],计算公式为: $R_f = H_{\max} - H_{\min}$ 。一般来说,高程较低、地形变化较小的区域相对高程较高、地形变化较大的区域更易发生山洪灾害^[25]。在对研究区原始DEM数据填洼处理后,通过ArcGIS中的邻域分析工具计算出最大值与最小值的差值,即得到地形起伏度。其中,最佳统计单元由均值变点法求得,大小为11×11格网^[26]。研究区的地形

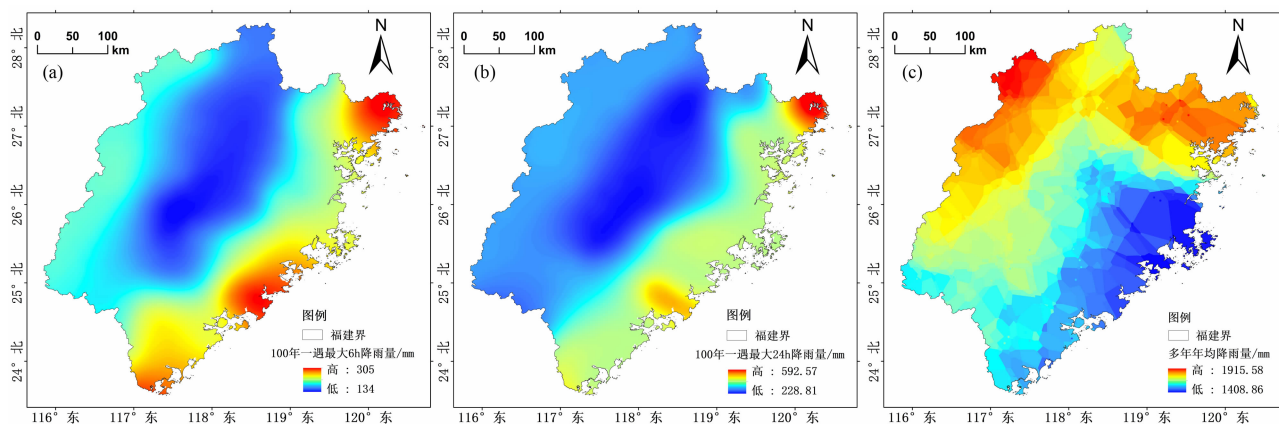


图3 致灾因子指标图:(a)100年一遇最大6h降雨量;(b)100年一遇最大24h降雨量;(c)多年年均降雨量

Fig. 3 Indicators of disaster-causing factors: (a) maximum 6-hour 100-year recurrence rainfall; (b) maximum 24-hour 100-year recurrence rainfall; (c) annual average rainfall

起伏度介于 0 ~ 515 m 之间,将其分为 < 50 m、50 ~ 100 m、100 ~ 150 m、150 ~ 200 m、200 ~ 300 m、> 300 m 六级。在 < 100 m 的区域内,历史山洪点数量占整个研究区总个数的比例高达 94.9% (图 4c)。

(4) NDVI

植被对洪水有着复杂的调节作用,可有效减轻地表径流对坡面的冲刷,对减慢和防治山洪的发生都有较好的效果^[22]。因此,植被被广泛应用于山洪

灾害的分析中。本文采用国家地球系统科学数据共享服务平台 (<http://www.geodata.cn/>) 提供的多年 NDVI 均值来表征植被覆盖度。研究区 NDVI 值介于 0.15 ~ 0.87,将其分为 < 0.5、0.5 ~ 0.6、0.6 ~ 0.7、0.7 ~ 0.8、> 0.8 五级。除在 0.7 ~ 0.8 范围内历史山洪灾害点较多外,其余四级的数量差距较小 (图 4d)。

(5) 土壤类型

土壤类型直接影响土壤的结构,且能和植被共

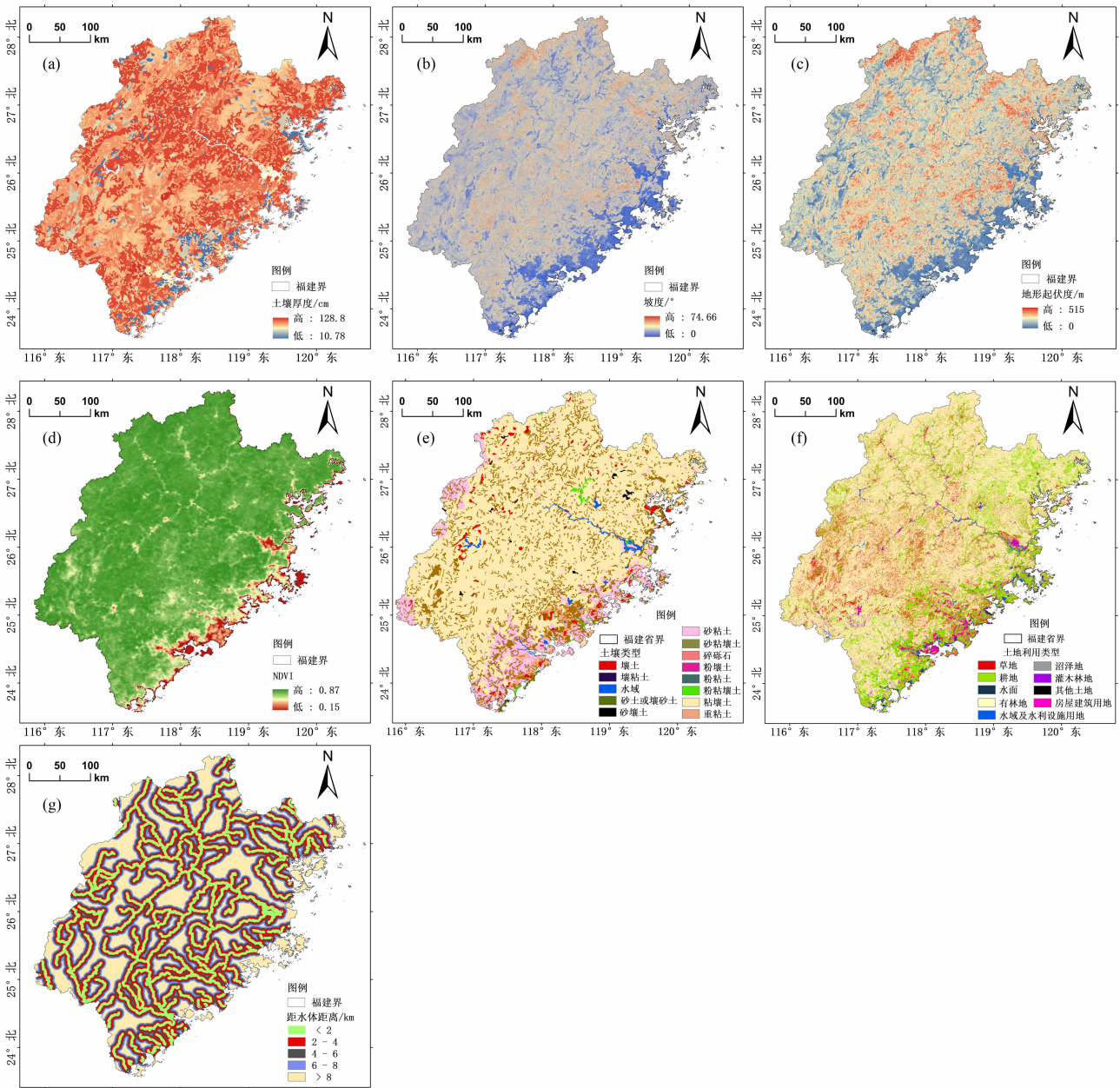


图 4 孕灾环境指标图: (a)土壤厚度;(b)坡度;(c)地形起伏度;(d)NDVI;(e)土壤类型;(f)土地利用类型;(g)距水体距离

Fig. 4 Indicators of disaster-prone environment: (a) thickness of soil; (b) slope; (c) topographic relief; (d) NDVI; (e) soil type; (f) land use type; (g) distance from rivers

同作用,影响渗透能力和抗冲刷能力。当土壤的渗透能力和抗冲刷能力增强时,水土的流失量就会减少,水流中的松散固体物质含量也会减少,从而河道的行洪能力就会增强^[27]。一般而言,颗粒较粗的砂性土壤,因其孔隙度较大,透水性较好,因此不易产生径流。反之,壤质或粘质颗粒较细,孔隙度较小,导致其透水性较差,更易产生径流^[27]。研究区内共有13种土壤,分别为粉壤土、砂壤土、粘壤土、壤土、砂粘壤土、砂粘土、碎砾石、砂土或壤砂、粉粘壤土、水域、壤粘土、粉粘土、重粘土。其中,仅砂粘壤土和粘壤土两种土壤中包含的山洪点数量就高达1223个,占整个研究区的78.1%(图4e)。

(6) 土地利用类型

土地利用类型能影响山洪产汇流过程,《全国山洪灾害调查评价》项目将研究区共分为9种土地利用类型,分别为草地、耕地、房屋建筑用地、有林地、灌木林地、水域及水利设施、水面、沼泽地、其他土地。其中,耕地中发生山洪次数最多,房屋建筑用地次之,两种类型中的历史山洪点数量为1233个(图4f)。

(7) 距水体距离

由于距离湖泊、河流、水库等越近,山洪危险程度就越高^[28]。因此,本文分别以距离研究区内四级河流2 km、4 km、6 km、8 km建立缓冲区,得到距水体距离<2 km、2~4 km、4~6 km、6~8 km、>8 km共五个等级。经统计,除>8 km区域外,其余四级的山洪点个数随着距离的增大而减小(图4g)。

3 山洪灾害危险性评价

本文对福建省山洪灾害危险性评价,首先利用确定性系数模型计算出土壤厚度、坡度、地形起伏度、NDVI、距水体距离、土壤类型、土地利用类型、多年年均降雨量、100年一遇最大6 h降雨量和100年一遇最大24 h降雨量的各分类级别的 C_F 值,然后把计算得到的各 C_F 值作为自变量 X ,是否发生山洪灾害作为因变量 Y 。(若发生山洪灾害,则 $Y=1$;未发生山洪灾害,则 $Y=0$),将数据导入SPSS 21进行逻辑回归分析,得到各因子的回归系数,即权重值。再利用皮尔逊相关系数法对各因子进行相关性检验,筛选出相关性较低的因子并带入逻辑回归方程,从而得到研究区各评价单元未来发生山洪灾害的概

率值。本文所采取的评价单元为30 m×30 m的格网单元。在10个评价因子中,仅NDVI和土壤厚度数据为1 km×1 km分辨率,因此,采取重采样的方式将NDVI和土壤厚度数据转换为与其他因子相同分辨率的格网。

3.1 评价因子各分类级别 C_F 值的确定

据统计,研究区共1566个历史山洪灾害点,根据灾害点在各影响因子中的分布情况,通过确定性系数模型计算出各因子分类级别的 C_F 值,即分类级别在该影响因子间的相对权重大小^[12]。各因子的分类级别 C_F 值如图5所示。

从影响因子对应的各分类级别的 C_F 值可知,在土壤厚度小于30 cm、坡度值小于10°、起伏度小于50 m、土壤类型为水域、土地利用类型为房屋建筑用地、100年一遇最大24 h降雨量介于450~550 mm、多年年均降雨量介于1450~1550 mm、距水体距离小于2 km、100年一遇最大6 h降雨量大于300 mm、NDVI小于0.5的区域, C_F 值最大,说明这些区域最容易发生山洪灾害。相反,在土壤厚度介于30~50 cm、坡度值大于50°、起伏度大于300 m、土壤类型为碎砾石、土地利用类型为有林地、100年一遇最大24 h降雨量小250 mm、多年年均降雨量小于1450 mm、距水体距离介于6~8 km、100年一遇最大6 h降雨量小于180 mm、NDVI大于0.8的区域, C_F 值最小,说明这些区域最不容易发生山洪灾害。

3.2 评价因子权重的确定

本研究基于30 m×30 m的格网,共得到142 619 141个独立的属性单元。在以往利用逻辑回归对山洪危险性进行分析时,大多都只选择正样本(已发生山洪点)作为模型的训练样本:选取一定数量的已发生山洪点作为样本进行训练,剩下的已发生山洪点作为检验样本。这种方式并未考虑各因子与负样本(未发生山洪点)间的关系。为使评价结果更加准确,本文在综合考虑前人研究成果和研究区实际情况基础上,将正样本和负样本同时纳入模型的训练。因此,在研究区范围内随机选取历史山洪点总数的80%,即1253个已发生山洪点(训练正样本),和等量的未发生山洪点(训练负样本),共2506个点作为模型的训练样本;剩下20%的已发生山洪点(验证正样本)和等量的未发生山洪点(验证负样本),共626个点作为模型的验证样本。对于

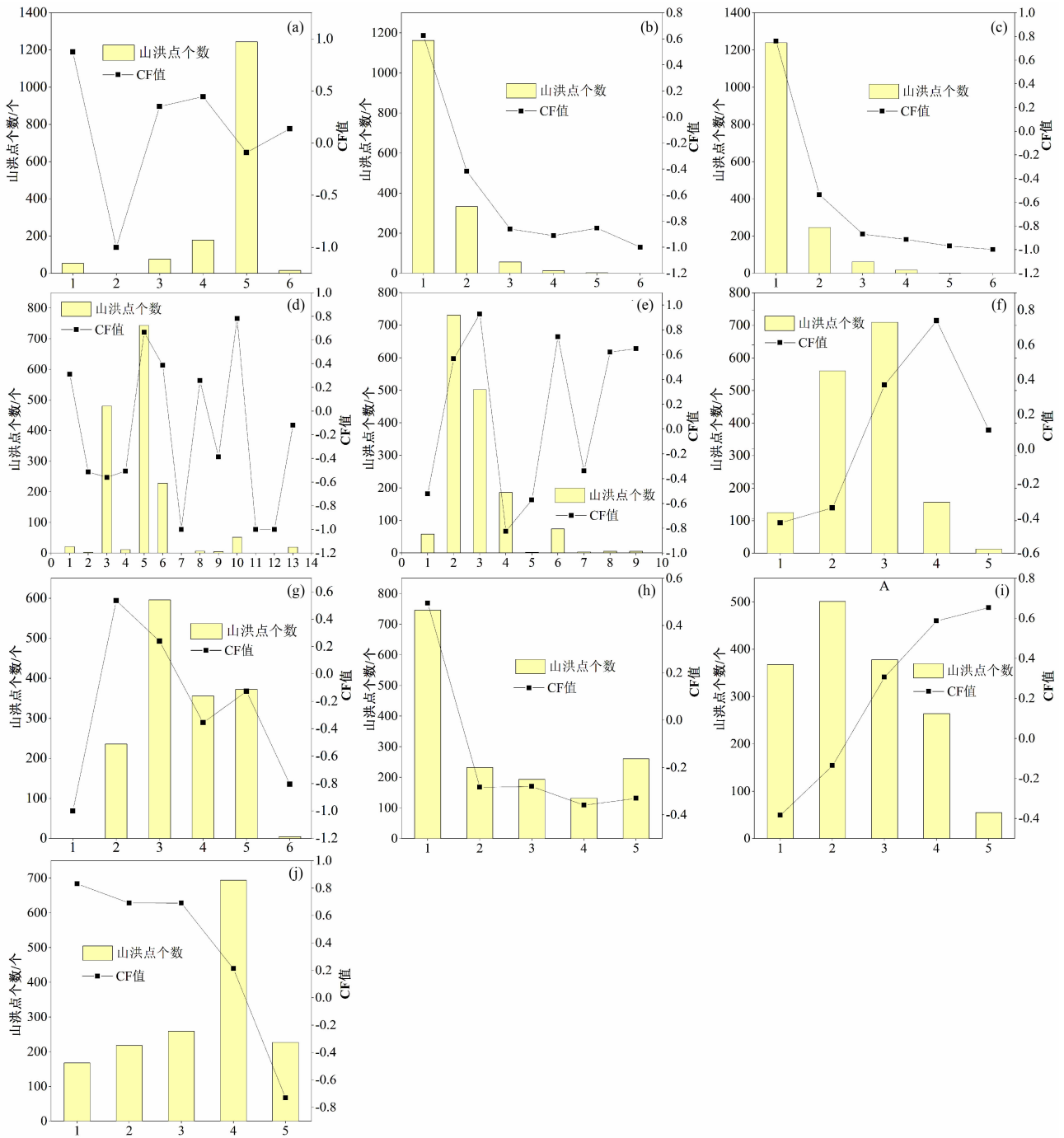


图5 各影响因子分类级别的 C_F 值: (a) 土壤厚度; (b) 坡度; (c) 地形起伏度; (d) 土壤类型; (e) 土地利用类型; (f) 100年一遇最大24 h降雨量; (g) 多年年均降雨量; (h) 距水体距离; (i) 100年一遇最大6 h降雨量; (j) NDVI

Fig. 5 Values of C_F for different classification level of the ten factors: (a) thickness of soil; (b) slope;

(c) topographic relief; (d) soil type; (e) land use type; (f) maximum 24-hour 100-year recurrence rainfall;

(g) annual average rainfall; (h) distance from rivers; (i) maximum 6-hour 100-year recurrence rainfall; (j) NDVI.

逻辑回归模型而言,模型训练就是对逻辑回归系数进行估计^[29]。将训练样本导入 SPSS 21 进行二元逻辑回归分析,输出结果如表 2 所示。其中,各因子的显著性值均小于 0.05,说明各因子通过检验,模

型具有统计意义。常数 B 的值表示各因子的权重大小,反映各因子对山洪灾害的影响大小,因此,研究区内对山洪灾害影响较大的三个因子分别为 100 年一遇最大 24 h 降雨量、土地利用类型和地形起

伏度。

3.3 因子间相关性分析

为使选择的影响因子更合理,利用皮尔逊相关系数法对各因子间的相关性进行分析,筛选出关联较小的因子。各因子间的相关系数矩阵如表 3 所示。一般情况下, $0.8 < r \leq 1.0$ 为极强相关、 $0.6 < r \leq 0.8$ 为强相关、 $0.4 < r \leq 0.6$ 为中等程度相关、 $0.2 < r \leq 0.4$ 为弱相关、 $0.0 \leq r \leq 0.2$ 为极弱相关或无相关^[30]。由表 3 可知,100 年一遇最大 6 h 降雨量和 100 年一遇最大 24 h 降雨量间的相关系数 > 0.8 ,为极强相关。因此,剔除 100 年一遇最大

6 h 降雨量,保留剩下的 9 个因子作为最终的评价指标。各因子间相关系数矩阵如表 3 所示。

3.4 山洪危险性计算

根据表 2 中各因子的回归系数结合公式(4)得到逻辑回归方程为:

$$Z = -0.134 - 0.646X_1 + 0.38X_2 + 1.235X_3 + 0.715X_4 + 0.442X_5 + 0.482X_6 + 0.885X_7 + 1.067X_8 + 0.31X_9$$

其中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 分别表示多年年均降雨量、NDVI、100 年一遇最大 24 h 降雨量、土壤厚度、距水体距离、坡度、地形起伏度、土地利用类

表 2 逻辑回归分析输出
Tab.2 Outputs of logistic regression analysis

回归项	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>Wald</i>	<i>df</i>	<i>Sig</i>
100 年一遇最大 6 h 降雨量	-1.128	0.283	15.848	1	0.000
100 年一遇最大 24 h 降雨量	1.235	0.266	21.51	1	0.000
多年年均降雨量	-0.646	0.232	7.771	1	0.005
坡度	0.482	0.107	20.171	1	0.000
地形起伏度	0.885	0.100	78.44	1	0.000
NDVI	0.380	0.124	9.417	1	0.002
土壤厚度	0.715	0.285	6.309	1	0.012
土壤类型	0.310	0.105	8.802	1	0.003
土地利用类型	1.067	0.083	164.343	1	0.000
距水体距离	0.442	0.145	9.229	1	0.002
常量	-0.134	0.056	5.768	1	0.016

注:*B* 为常数,表示各因子的权重;*SE* 为标准差;*Wald* 为瓦尔德卡方值;*df* 为自由度;*Sig* 为显著性。

表 3 影响因子间的相关系数矩阵
Tab.3 Correlation matrix of ten factors

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1									
X_2	0.410	1								
X_3	0.555	0.439	1							
X_4	0.642	0.440	0.830	1						
X_5	0.027	0.260	0.009	0.032	1					
X_6	0.227	0.442	0.283	0.279	0.154	1				
X_7	0.252	0.572	0.302	0.286	0.272	0.668	1			
X_8	0.222	0.491	0.214	0.237	0.209	0.487	0.638	1		
X_9	0.268	0.440	0.299	0.312	0.206	0.400	0.489	0.423	1	
X_{10}	0.216	0.252	0.239	0.248	0.082	0.144	0.169	0.113	0.172	1

注: X_1 表示多年年均降雨量、 X_2 表示 NDVI、 X_3 表示 100 年一遇最大 6 h 降雨量、 X_4 表示 100 年一遇最大 24 h 降雨量、 X_5 表示距水体距离、 X_6 表示坡度、 X_7 表示地形起伏度、 X_8 表示土地利用类型、 X_9 表示土壤类型、 X_{10} 表示土壤厚度。

型、土壤类型的各分类级别的 C_F 值。将 Z 值代入公式(2),计算出研究区内各评价单元未来发生山洪灾害的概率 P 介于 0.02 ~ 0.98 之间。采用似然比模型将得到的概率值划分为五类:极低危险区(0 ~ 0.2)、低危险区(0.2 ~ 0.42)、中危险区(0.42 ~ 0.55)、高危险区(0.55 ~ 0.75)、极高危险区(0.75 ~ 1)。福建省山洪灾害危险性评价结果及检验点分布位置如图 6 所示。

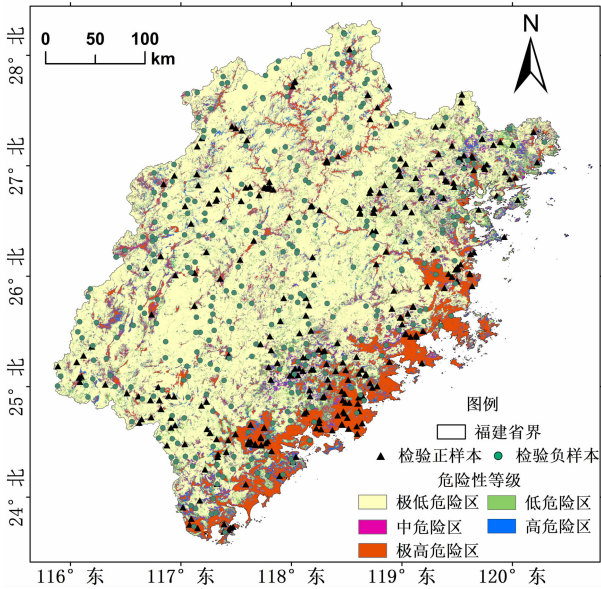


图 6 危险性评价结果及检验点分布
Fig. 6 Results of risk assessment and distribution of checkpoints

4 评价结果分析与验证

4.1 危险区划结果分析

经计算,极高危险区面积占整个研究区面积的 12.3%、高危险区占 5.9%、中危险区占 4.5%、低危险区占 14.2%、极低危险区占 63.1%。从山洪危险性评价结果图来看,福建省南部漳州市的诏安县、东山县、云霄县、漳浦县、龙海市、龙文区、长泰县、芗城区,厦门市的海沧区、湖里区、思明区、翔安区、同安区、集美区,东南部泉州市的南安市、晋江市、石狮市、鲤城区、丰泽区、泉港区、金门县、惠安县,东部莆田市的荔城区、秀屿区、城厢区、涵江区、仙游县,福州市的福清市、长乐市、仓山区、台江区、鼓楼区、马尾区、平潭县等 34 个县市区危险性最高,未来发生山洪灾害的可能性最大。因此,针对这些地区,需增大投入和管理,做好防灾减灾工作。东北部宁德

市的福鼎市、福安市和霞浦县中有较大区域处于中危险及高危险中。相对靠近内陆的南平市、三明市和龙岩市绝大部分地区处于较低危险和低危险中,仅小部分区域处于高危险和极高危险中,未来发生山洪灾害的可能性较小。因此,在做好该地区山洪防治工作的同时更要加强灾害监测的预警预报^[31]。

4.2 山洪灾害危险性结果验证

本文采取历史山洪灾害害点在各级危险区中的分布情况和 ROC 曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC)相结合的方式,对评价结果的合理性和模型评价的精确性进行验证。

4.2.1 历史山洪在各级危险区中的分布

在以往的研究中,选择验证样本时,往往具有很大主观性。为了使建立的回归模型具有更好的稳定性,选取研究区内实际已发生山洪灾害且未参与训练的 313 个点(约占总个数的 20%),以及同等数量的未发生山洪点,共计 626 个点作为验证样本,对模型的精度进行验证。对于危险性分区的合理性检验一般遵循以下 2 条准则:

(1)极低危险区的面积占研究区总面积的比例应该最大,落入极高危险区的验证样本点数占验证样本总数的比例应该最大。

(2)验证样本点落入各级危险区的百分比(G_{ei})与各级危险区面积占研究区总面积的百分比(S_{ei})的比值 R_{ei} 应该是逐级增大的。

$$R_{ei} = G_{ei}/S_{ei} \quad (i = \text{I、II、III、IV、V}) \quad (5)$$

式中, G_{ei} 表示落入 i 级危险区的验证样本数占验证样本总数的百分比; S_{ei} 表示 i 级危险区的面积占研究区总面积的百分比。检验结果如表 4 所示。

表 4 危险性分区合理性检验结果
Tab. 4 Results of verification of hazard zoning

危险区	面积 /km ²	山洪点数 /个	S_{ei}	G_{ei}	R_{ei}
极低(I)	80952.789	21	0.631	0.067	0.106
低(II)	18265.207	23	0.142	0.073	0.521
中(III)	5746.260	17	0.045	0.054	1.200
高(IV)	7634.477	46	0.059	0.147	2.492
极高(V)	15758.495	206	0.123	0.658	5.350

注: S_{ei} 表示 i 级危险区的面积占研究区总面积的百分比; G_{ei} 表示落入 i 级危险区的验证样本数占验证样本总数的百分比; R_{ei} 表示 G_{ei} 与 S_{ei} 的比值。

根据检验结果可知,极低危险区的面积为 80 952.789 km²,占研究区总面积的 63.1%。落入极高危险区的验证样本点数量为 206 个,占验证样本总数的 65.8%。各级危险区的 R_{ei} 值分别为 0.106、0.521、1.200、2.492、5.350,即 $R_{eI} < R_{eII} < R_{eIII} < R_{eIV} < R_{eV}$ 。满足上述两个检验准则,说明本次福建省山洪灾害危险性评价分区结果是合理的。

4.2.2 ROC 曲线

ROC 曲线,即受试者工作特征曲线、ROC 曲线下方面积 (Area under ROC curve, AUC) 常作为评价模型精确性的指标,其取值范围为 [0.5, 1] 之间。一般来说,当 AUC 值越接近 1,表明创建的模型的精度越好,AUC 值介于 0.5 ~ 0.7 之间时,精度较差,AUC 值介于 0.7 ~ 0.9 之间时,精度较好,AUC 值大于 0.9 时,精度极好^[32]。将概率值 P 提取至训练样本和验证样本,并将提取结果分别导入 SPSS 21 进行 ROC 分析,得到训练样本和验证样本的 AUC 值分别为 0.876 和 0.891,如图 7 所示。说明利用确定性系数模型和逻辑回归模型相结合的方式能够较为准确地对福建省山洪灾害危险性进行评价。

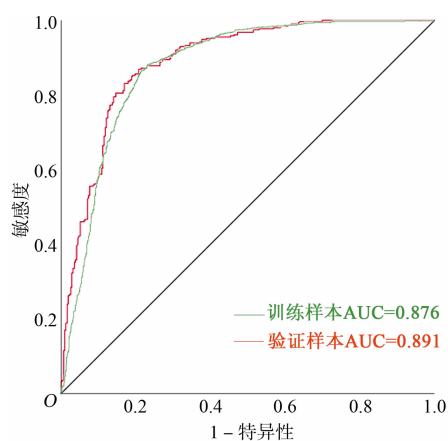


图7 训练样本及验证样本的 ROC 曲线图

Fig.7 ROC curves of training samples and verification samples

5 结论与讨论

本文综合考虑诱发山洪灾害的致灾因子与孕灾环境,将确定性系数模型与逻辑回归模型相结合,利用历史山洪点和 ROC 曲线对评价结果进行验证,对福建省山洪灾害展开危险性评价,提高了评价结果的准确性与可靠度,得到的主要结论如下:

(1) 山洪灾害是由降水、自然因素、人文因素等

共同作用形成的复杂系统,具有显著的非线性特征^[33]。因此,将确定性系数模型与逻辑回归模型相结合的方法应用到山洪危险性评价中,相较以往单一应用层次分析法、线性加权法而言,不仅可以揭露各影响因子间的复杂水平和显著水平,更能较为客观的计算出各因子及其分类级别的权重值,最大限度地降低主观因素对权重的影响。

(2) 从各影响因子的 C_F 值与逻辑回归系数的乘积可以看出:暴雨是形成福建省山洪灾害的直接外动力因素。由危险性评价结果图可知,福建省南部、东部及东南部的沿海地区属于极高危险区或高危险区。这些地区相对更靠近内陆的地区而言,经济更加发达、人口密度更大、城镇化速率更快,因此更多的土地被用作房屋建设和耕地,这也是土地利用类型对形成山洪灾害的影响力仅次于暴雨的主要原因。

(3) 福建作为一个沿海城市,影响山洪灾害危险性的因子众多,本文由于数据受限,并未考虑台风、地质构造等因素,在结果检验时,可能存在一定偏差,沿海地区的实际危险性应该更高。在今后的研究中,希望能考虑更多的影响因子,使用更高分辨率的数据,从而得到更精确的评价结果。

参考文献 (References)

- [1] 熊俊楠,龚颖,程维明,等. 西藏自治区近 30 年山洪灾害时空分布特征 [J]. 山地学报, 2018, 36 (4): 557 - 570. [XIONG Junnan, GONG Ying, CHENG Weiming, et al. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Mountain Floods in Tibet, China in Recent 30 Years [J]. Mountain Research, 2018, 36 (4): 557 - 570]
- [2] 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. [YUE Qi, ZHANG Linbo, LIU Chengcheng, et al. GIS-based Risk Zoning of Flood Disasters in Upstream of the Minjiang River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5 (4): 293 - 298]
- [3] 邹强,崔鹏,杨伟. G318 川藏公路段泥石流危险性评价 [J]. 山地学报, 2013, 31 (3): 342 - 348. [ZOU Qiang, CUI Peng, YANG Wei. Hazard Assessment of Debris Flows along G318 Sichuan-Tibet Highway [J]. Mountain Research, 2013, 31 (3): 342 - 348]
- [4] 宋杨,程维明,柏延臣,等. 密云水库周边山区滑坡泥石流易发区预估 [J]. 地理科学进展, 2011, 30 (3): 343 - 351. [SONG Yang, CHENG Weiming, BO Yanchen, et al. Occurrence Probability Estimation of Landslides and Debris Flows in Mountainous Areas Surrounding the Miyun Reservoir [J]. Progress in Geography, 2011, 30 (3): 343 - 351]

- [5] 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. [LUO Rihong, HUANG Jinlin, TANG Zaozao. Study on freshet disaster risk zonation at small mountainous watershed base on AHP and GIS [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2):64-69]
- [6] 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):85-88. [LI Dong, WU Bo, ZHENG Xiuqing, et al. Risk regionalization of mountain torrent disaster in small watershed of Lvliang area based on AHP and GIS [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7):85-88]
- [7] 唐余学,廖向花,李晶,等.基于 GIS 的重庆市山洪灾害区划[J].气象科技,2011,39(4):423-428. [TANG Yuxue, LIAO Xianghua, LI Jing, et al. Regionalization of Torrential Flood Disasters in Chongqing Based on GIS [J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(4):423-428]
- [8] KOURGIALAS N N, KARATZAS G P. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study [J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(2):212-225.
- [9] 陈真,马细霞,张晓蕾.基于 PCA 和 AHP 的小流域山洪灾害风险评价[J].水电能源科学,2018,36(11):56-59. [CHEN Zhen, MA Xixia, ZHANG Xiaolei. Risk assessment of mountain torrent disaster in small watershed based on PCA and AHP [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11):56-59]
- [10] 邹强,唐建喜,李淑松,等.基于水文响应单元的泥石流灾害易发性分区方法[J].山地学报,2017,35(4):496-505. [ZOU Qiang, TANG Jianxi, LI Shusong, et al. Susceptibility Assessment Method of Debris Flows Based on Hydrological Response Unit [J]. Mountain Research, 2017, 35(4):496-505]
- [11] 冯快乐,周建中,江焱生,等.基于 BP 神经网络的湖北省山洪灾害危险性评价[J].自然灾害学报,2018,27(1):148-154. [FENG Kuaile, ZHOU Jianzhong, JIANG Yansheng, et al. Assessment on the hazard of flash flood disaster in Hubei Province based on BP neural network [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1):148-154]
- [12] 田春山,刘希林,汪佳.基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J].水文地质工程地质,2016,43(6):154-161. [TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(6):154-161]
- [13] 田丰,冉有华,张军,等.河西走廊山洪灾害危险度区划[J].山地学报,2017,35(6):856-864. [TIAN Feng, RAN Youhua, ZHANG Jun, et al. Mountain torrent hazard division along Hexi Corridor [J]. Mountain Research, 2017, 35(6):856-864]
- [14] 宋锐涛,陈志彪,陈志强,等.福建省水土流失重心迁移分析[J].江西农业学报,2011,23(10):160-162. [SONG Ruitao, CHEN Zhibiao, CHEN Zhiqiang, et al. Analysis on Migration of Water and Soil Loss Gravity Center in Fujian Province [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(10):160-162]
- [15] 张坤,洪伟,吴承祯,等.基于地统计学和 GIS 的福建省降雨侵蚀力空间格局[J].山地学报,2009,27(5):538-544. [ZHANG Kun, HONG Wei, WU Chengzhen, et al. Study on the spatial pattern of rainfall erosivity based on geostatistics and GIS of Fujian Province [J]. Mountain Research, 2009, 27(5):538-544]
- [16] 张宜镠.明代福建省疫灾地理规律与环境机理研究[D].武汉:华中师范大学,2014:10-12. [ZHANG Yiliu. Research on the Geographical regularity and Environmental mechanisms of the Epidemic Disasters in Fujian province During the 1368AD-1644AD period [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014:10-12]
- [17] Heckerman D. Probabilistic Interpretations for MYCIN's Certainty Factors[M]//Readings in uncertain reasoning. Morgan Kaufmann Publishers Inc. 1990.
- [18] 李权,曾涛,覃虎,等.基于多元逻辑回归的兰坪县崩塌滑坡敏感性评价[J].测绘与空间地理信息,2015,38(12):36-39. [LI Quan, ZENG Tao, QIN Hu, et al. Landslides susceptibility mapping of Lanping using multivariate logistical regression method [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(12):36-39]
- [19] 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(6):196-200. [ZHANG Pingcang, REN Hongyu, HU Weizhong, et al. An elementary study on Chinese mountain torrents disaster prevention regionalization [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006(6):196-200]
- [20] 李华威,万庆.小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J].地球信息科学学报,2017,19(3):425-435. [LI Huawei, WAN Qin. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(3):425-435]
- [21] 易晨,李德成,张甘霖,等.土壤厚度的划分标准与案例研究[J].土壤学报,2015,52(1):220-227. [YI Chen, LI Decheng, ZHANG Ganlin, et al. Criteria for partition of soil thickness and case studies [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1):220-227]
- [22] 赵刚,庞博,徐宗学,等.中国山洪灾害危险性评价[J].水利学报,2016,47(9):1133-1142. [ZHAO Gang, PANG Bo, XU Zongxue, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9):1133-1142]
- [23] 祁靓雯.基于 GIS 技术的紫阳县山洪灾害风险评价[D].西安:长安大学,2017:38-40. [QI Jingwen. Mountain flood risk assessment of Ziyang County based on GIS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017:38-40]
- [24] 胡最,聂阳意.基于 DEM 的湖南省地貌形态特征分类[J].地理与地理信息科学,2015,31(6):67-71. [HU Zui, NIE

- Yangyi. DEM-Based landform taxonomic features of Hunan Province [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, **31**(6):67–71]
- [25] 熊俊楠,赵云亮,程维明,等. 四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018, **20**(10):1443–1456. [XIONG Junnan, ZHAO Yunliang, CHENG Weiming, et al. Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan Province [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, **20**(10):1443–1456]
- [26] 蔡道明,肖翔,孙金伟. 区域山洪灾害预警难度评价——以长江流域为例[J]. *长江科学院院报*, 2015, **32**(3):84–88. [CAI Daoming, XIAO Xiang, SUN Jinwei. Assessment of the difficulty of warning mountain torrent disasters: case study of the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, **32**(3):84–88]
- [27] 唐姗姗,廖卫红,雷晓辉,等. 基于多态系统理论的山洪灾害危险性评价[J]. *中国农村水利水电*, 2017(4):28–31. [TANG Shanshan, LIAO Weihong, LEI Xiaohui, et al. Mountain Flood Disaster Risk Assessment Based on the Theory of Multi-state System [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(4):28–31]
- [28] 刘少军,张京红,张明洁,等. 基于 GIS 的空间判识技术在海南岛山洪风险普查中的应用[J]. *气象研究与应用*, 2013, **34**(S1):103–105. [LIU Shaojun, ZHANG Jinghong, ZHANG Mingjie, et al. Application of Spatial Identification Technology Based on GIS in Mountain Flood Risk Survey of Hainan Island [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2013, **34**(S1):103–105]
- [29] 谭龙,陈冠,王思源,等. 逻辑回归与支持向量机模型在滑坡敏感性评价中的应用[J]. *工程地质学报*, 2014, **22**(1):56–63. [TAN Long, CHEN Guan, WANG Siyuan, et al. Landslide susceptibility mapping based on logistic regression and support vector machine [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(1):56–63]
- [30] 包美玲,尹红. 基于 SPSS 研究分析我国居民人均消费结构[J]. *软件*, 2018, **39**(12):136–140. [BAO Meiling, YIN Hong. Analysis of Per Capita Consumption Structure of Chinese Residents Based on SPSS [J]. *Computer engineering & Software*, 2018, **39**(12):136–140]
- [31] 方秀琴,王凯,任立良,等. 基于 GIS 的江西省山洪灾害风险评价与分区[J]. *灾害学*, 2017, **32**(1):111–116. [FANG Xiuqin, WANG Kai, REN Liliang, et al. Risk assessment and zoning of mountain torrent disaster based on GIS in Jiangxi Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, **32**(1):111–116]
- [32] 谭龙,陈冠,曾润强,等. 人工神经网络在滑坡敏感性评价中的应用[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(1):15–20. [TAN Long, CHEN Guan, ZENG Runqiang, et al. Application of artificial neural network in landslide susceptibility assessment [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, **50**(1):15–20]
- [33] 张永民,程维明,王楠. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的山洪灾害风险评估[J]. *中国防汛抗旱*, 2018, **28**(10):21–26. [ZHANG Yongmin, CHENG Weiming, WANG Nan. Risk assessment of mountain flood based on GIS and logistic regression model [J]. *China Flood & Drought Management*, 2018, **28**(10):21–26]

Risk Assessment of Mountain Torrent Disasters in Fujian Province, China

XIONG Junnan^{1,2}, CAO Yifan¹, CHENG Weiming^{2*}, GUO Liang^{3,4}, YANG Yinghui¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic and Natural Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China;

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

Abstract: Fujian Province is prone to mountain torrent disaster, and the losses caused by mountain torrents is very serious in recent year. Assessment on the risk of mountain torrent disaster has great significance for disaster prevention and reduction. Based on the temporal and spatial distribution characteristics of mountain torrent disasters in Fujian Province, in this research it selected 10 kinds of influencing factors such as annual average rainfall, slope, NDVI, soil type and land use type to construct risk model from the perspective of disaster-causing factors as

well as disaster-prone environment. The CF model and Logistic regression model were used to determine the weight of each factor and its classification level, and Pearson correlation coefficient method was used to test the independency between factors. Results were verified by historical flash flood points and ROC curves. The results found that: (1) The maximum 24-hour 100-year recurrence rainfall, land use types and topographic relief were the three main factors governing flash floods in Fujian Province; (2) The proportion of extremely low risk area, low risk area, medium risk area, high risk area and extremely high risk area in the total area of the province was 63.1% , 14.2% , 4.5% , 5.9% and 12.3% respectively; (3) The coastal areas in the east, south and southeast of Fujian Province and some low mountain areas in the north and west were at high or extremely high risk; (4) Within the small range of “extremely high risk area” which only accounted for 12.3% of the research area, the proportion of actual flood occurrences to the total number of mountain torrents was as high as 65.8% , and the AUC values of the area under ROC curve of training samples and verification samples also reached 0.876 and 0.891, respectively, which suggested the risk assessment result quite acceptable. Our research would provide a scientific basis and support for mountain flood prevention in Fujian Province.

Key words: mountain torrent disaster; risk assessment; certainty factor model; logistic regression model; Fujian Province