

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222254

近 30 年四川省山洪灾害风险时空变化及其成因分析

元 媛^{1,2}, 韩剑桥³, 金中武^{1,2}, 郭 超^{1,2}, 刘泓汐⁴

(1. 水利部长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 为探究四川省山洪灾害风险的时空分布规律及归因, 采用层次分析、聚类分析等方法, 研究了 1990、2020 年四川省山洪风险的空间分布差异与高风险重点区域, 探讨了山洪风险的时间变化特征及驱动原因。结果表明, 四川省山洪灾害风险由西部向东部地区逐渐增加, 高风险区域多存在于河网密集, 且暴露性和脆弱性较高的区域, 主要集中在眉山市、自贡市、内江市、资阳市、遂宁市、广安市和南充市; 1990~2020 年, 四川省整体山洪风险呈增加趋势, 较高及以上风险区面积占比由 17% 增至 34%, 风险等级增加的区域集中在四川省中部, 且大部分由中等或较高风险区转变为高风险区; 近 30 年来, 四川省的山洪危险性呈下降趋势, 但较大的 GDP 和人口密度使其脆弱性和防灾能力发生变化, 从而导致局部区域山洪风险等级有所增加。研究结果可为四川省的洪水灾害预报预警及防灾减灾工作提供理论指导和实践支撑。

关键词: 山洪灾害; 时空分布; 防灾减灾; 四川省

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0062-05

1 引言

四川省地处中国西南部, 位于长江上游地区, 面积为 $48.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 辖 21 个市(州)。全省地势呈西北高东南低, 坡度陡, 地貌类型复杂。在季风和地形的影响下, 四川省境内降雨量由东南向西北递减。其中, 嘉陵江、涪江、沱江区内暴雨发生频率较高, 持续时间较长。四川省是我国山洪灾害尤为严重的省份之一, 且由于境内具有易引发山洪的地质地貌特征, “强暴雨”出现的几率较大, 山洪风险增加^[1]。此外, 随着社会发展和气候变化, 山洪灾害风险可能在时空上发生了巨大变化, 给山洪防治带来更大的困难。目前研究大区域尺度自然灾害风险评估的主要方法为指标体系法^[2-3]。丁文峰等^[4]基于 GIS 技术及全国山洪灾害防治规划资料建立指标体系, 对山洪灾害的危险度、易损度和风险度进行量化分析, 进一步实现四川省山洪灾害风险区划; 叶帮莘等^[5]利用山洪危险点、历史灾害点和相关因子, 建立四川省小流

域山洪危险性评价模型。虽然针对四川省山洪灾害风险的研究成果丰硕, 但大部分是关于山洪灾害的静态评估, 对于气候变化条件下的山洪风险变化涉及较少, 不利于山洪防治策略的动态调整。为此, 本文根据不同时期的山洪灾害选取了相关指标, 综合层次分析法和 GIS 技术, 研究了四川省山洪灾害风险的时空变化特征, 探讨了风险增加的重点地区及驱动因素, 为防洪减灾及政府决策提供科学依据^[6]。

2 数据与方法

2.1 数据来源处理

四川省的归一化植被指数 (NDVI) 和土地利用数据来自 1990、2020 年的 LANDSAT 卫星数据; 降雨数据源于 CHIRPS DAILY 数据合成, 选取了 1981~1990、2010~2020 年两个时段下的多年平均最大降雨量及多年平均最长连续降雨天数两个指标; 数字高程模型中分辨率为 30 m 的 DEM 数据由 SRTM 收集; 土壤类型数据来自

收稿日期: 2022-10-27, **修回日期:** 2022-12-19

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510704); 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2021SS01)

作者简介: 元媛(1988-), 女, 博士、高级工程师, 研究方向为河流水沙数值模拟、工程泥沙、江湖演变与治理等,

E-mail: yuanht1020@foxmail.com

通讯作者: 韩剑桥(1987-), 男, 博士、副研究员, 研究方向为流域洪水泥沙灾害等, E-mail: hjq13@163.com

Global_Hydrologic_Soil_Group_1566 数据集;人口、耕地面积、GDP 和床位数等数据来源于中国县域统计年鉴和四川省统计年鉴;数据处理及制图过程使用 ArcGIS 中的 Spatial Analyst 等工具。

2.2 研究方法

山洪风险主要由危险性、易损性、脆弱性和防灾能力综合决定。其中,危险性评价指标包括高程、坡度、多年平均最大降雨量、多年平均最长连续降雨天数、土地利用类型和 NDVI 六个影响因子;易损性主要考虑承灾体的社会经济发展状况;脆弱性分为人口脆弱性和经济脆弱性,主要包括人口密度、单位面积 GDP、单位耕地面积三个影响因子;防灾能力主要由床位数指标表示,床位数越多代表防灾能力越强,山洪灾害风险越低^[7]。

2.2.1 山洪危险性评估

采用多准则评估技术,对危险性评价指标进行标准化。利用分辨率为 1 km 单元大小的光栅层,通过加权叠加进行组合,使用层次分析法确定权重系数。其中,加权特征向量作为各因子图的系数,在 ArcGIS 环境中进行加权叠加分析^[8],最终用于山洪危险计算,并得到山洪危险性分布图。计算公式为:

$$\text{山洪危险性} = \text{坡度} \times 0.08 + \text{海拔高程} \times 0.08 + \text{降雨强度} \times 0.22 + \text{降雨时长} \times 0.22 + \text{土地利用类型} \times 0.22 + \text{水文土壤分组} \times 0.04 + \text{NDVI} \times 0.14 \quad (1)$$

2.2.2 山洪风险评估

基于洪涝灾害风险评估模型,结合山地城市独有的地形地貌特点选取相应的指标,从致灾因子、孕灾环境(脆弱性、防灾能力)对四川省山洪灾害进行风险评估。综合考虑各具体指标对灾害风险的影响程度,可根据下式量化洪灾风险:

$$\text{山洪灾害风险} = \text{山洪灾害危险} \times 0.3 + \text{脆弱性指标} \times 0.6 + \text{防灾能力} \times 0.1 \quad (2)$$

通过洪水风险分析因子的权重(表 1),根据山洪危险图及选定的暴露及脆弱性因子(人口密度、耕地面积、GDP)、防灾能力(床位数),利用栅格插值(反距离加权(IDW))处理为合适的空间数据,再进行分类、加权和栅格计算(叠加技术)处理,生成山洪风险图。

表 1 洪水风险分析因子权重

Tab. 1 Weights of analysis factors of flood risk

指标	因子	权重
危险性	洪水危险	0.3
脆弱性	人口密度	0.3
	GDP	0.2
	耕地面积	0.1
防灾能力	床位数	0.1

2.2.3 高风险区域识别

采用 1 km 单元大小的分辨率对山洪灾害进行整体变化分析,结果对应栅格单元的山洪灾害风险,以市为基础单元分析时,每个市可对应多个风险等级。为更好地识别四川省山洪灾害发生的重点区域(市),采用聚类分析(Custer analysis)方法^[9],将山洪灾害危险和风险的栅格数据以市为单位转换,分析每个市的山洪灾害风险变化。此外,根据四川省山洪危险和风险图中低风险、较低风险、中等风险、较高风险和高风险区域的面积占比,将四川省山洪危险和风险进行聚类,聚类命名与栅格单位的命名相同,并使用 GIS 空间统计工具中(Spatial Statistics Tools)的聚类分布制图。

3 结果与讨论

3.1 不同时期的灾害风险因子变化

3.1.1 危险性指标变化

图 1 为四川省山洪危险性指标变化。由图 1 可看出,四川省的降雨强度由西部向东部地区递增。2020 年最高降雨强度面积比 1990 年增加约 9%,增加区域主要分布在巴东市和达州市;1990、2020 年的土地利用类型结构差异较小,在西部和中部均主要以林地和草地为主,东部分布大量耕地;1990、2020 年的 NDVI 在时间和空间尺度均有明显变化,西部和中部的绝大部分山区与丘陵地区植被覆盖率增加,东部地区变化较小,部分区域植被覆盖率增加。

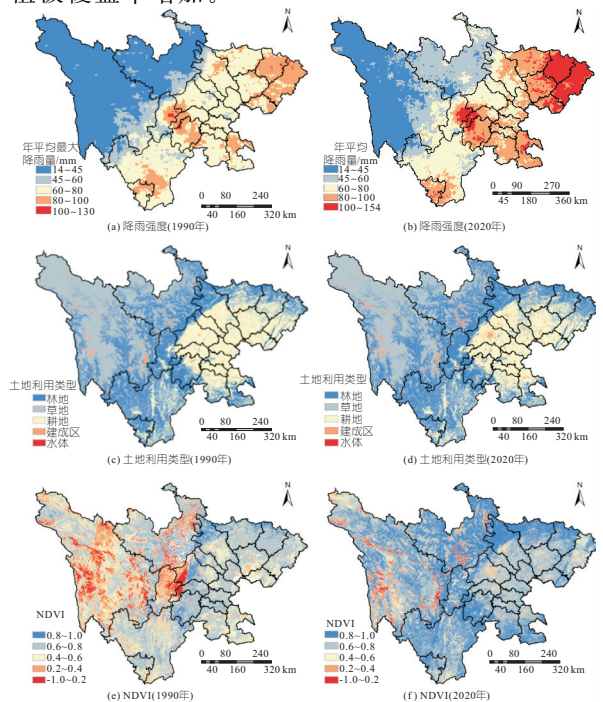


图 1 四川省山洪危险性指标变化

Fig. 1 Changes of flood hazard indicators in Sichuan Province

3.1.2 脆弱性与防灾指标变化

图2为四川省的山洪风险脆弱性和防灾能力指标变化。由图2可知,人口密度、耕地、GDP和床位均呈由西部向东部地区递增的变化特征。1990年与2020年相比,四川省东部耕地面积有所降低,但人口密度、单位面积GDP和床位数呈增长趋势。其中,全省经济显著增长。

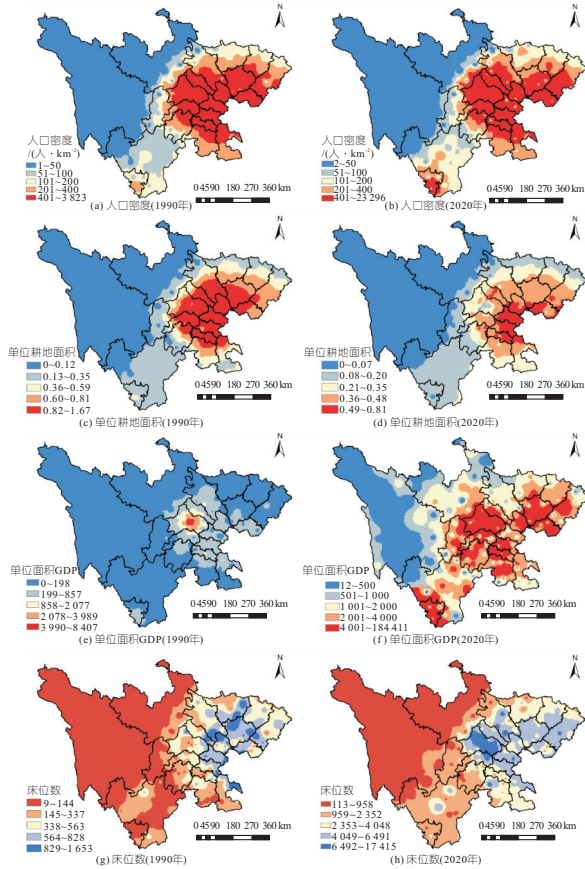


图2 四川省山洪风险脆弱性和防灾能力指标变化

Fig. 2 Changes in indicators of flood risk vulnerability and disaster prevention capacity in Sichuan Province

3.2 四川省山洪风险分析

3.2.1 整体变化

在空间尺度上,四川省的山洪危险性由西部向东部地区逐渐增加(图3)。1990年,中等危险区所占面积比最高(36%),其次为较高危险区(26%)、高危险区(11%)、较低危险区(20%)、低危险区(7%)。

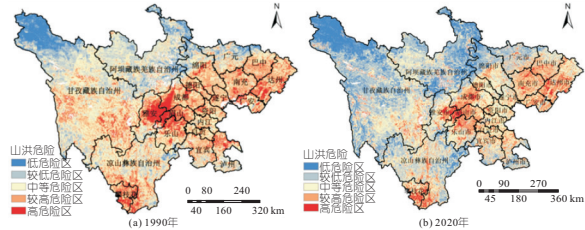


图3 四川省山洪灾害危险性等级分布

Fig. 3 Distribution of hazard levels of mountain torrents in Sichuan Province

2020年,低和较低危险区共同占比由27%升至47%,较高和高危险区的共同占比由37%降至20%,危险等级降低的区域主要集中在四川省中部。

四川省的山洪风险等级呈由西部向东部增加的趋势(图4)。在时间尺度上,相较于1990年,2020年的四川省中部大部分地区由中等、较高风险区向高风险区转变,较高风险区、高风险区的面积占比分别由13%、4%增至17%、16%,低风险区、较低风险区的面积占比分别由24%、45%变为26%、21%。因此,四川省在整体上呈山洪危险性降低、风险性增加的变化趋势。

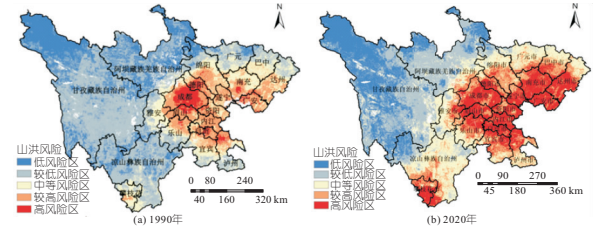


图4 四川省山洪灾害风险等级分布

Fig. 4 Risk level distribution of flood in Sichuan Province

3.2.2 重点风险区域识别

图5为基于市行政单元的四川省山洪危险性的聚类结果。由图5可知,1990年四川省山洪高危险区主要集中在四川省东部城市,即攀枝花、雅安、成都、南充、广安、达州等市;2020年四川省山洪高危险区主要集中在攀枝花、乐山、眉山、成都、南充、广安、达州、巴东等市。

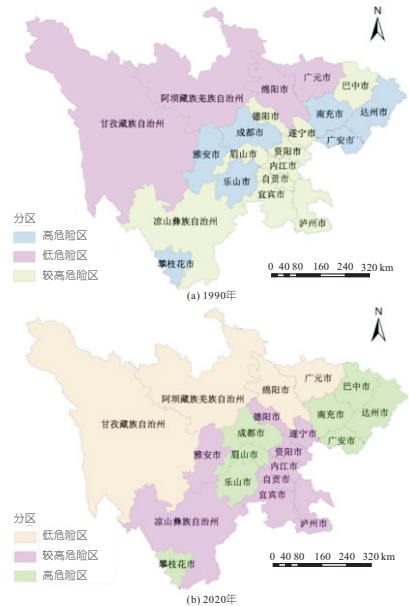


图5 四川省山洪灾害危险重点区域识别

Fig. 5 Identification of important flood hazard areas in Sichuan Province

图6为基于市行政单元的四川省山洪灾害风险性的聚类分布结果。由图6可知,1990年山洪

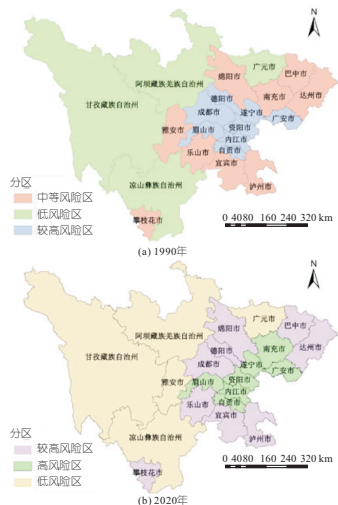


图 6 四川省山洪灾害风险重点区域识别

Fig. 6 Identification of important areas of flood disaster risk in Sichuan Province

较高风险区主要集中在四川省东部城市,即眉山、成都、德阳、自贡、内江、资阳、遂宁、广安等市;2020 年四川省山洪灾害高风险区主要集中在眉山、自贡、内江、资阳、遂宁、广安、南充等市。1990、2020 年四川省大部分城市的山洪灾害风险性呈增加趋势。

3.3 近 30 年来四川省山洪灾害风险变化及成因

图 7 为近 30 年四川省山洪危险、风险变化。图 7 中, Value 值由赋值后的山洪危险(风险)等级(1-5)相减得到。由图 7(a)可知,近 30 年来四川省大部分区域的山洪危险性有所下降,全省约 49% 的区域山洪危险等级降低,43% 的区域无变化,而山洪危险等级增加的区域仅有 8%,其中雅安市危险等级降低区域面积占比最大。由图 7(b)可知,近 30 年来四川省大部分区域的山洪风险性变化有所增加,全省约 46% 区域风险等级增加,42% 的区域风险等级无变化,而山洪风险等级降低的区域仅有 12%。

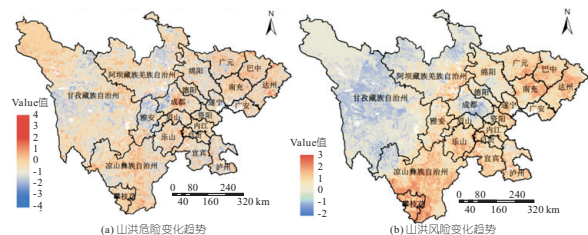


图 7 近 30 年四川省山洪危险、风险变化

Fig. 7 Flood hazard and flood risk changes of Sichuan Province in recent 30 years

由于单位时间内的降水量和降水强度直接决定了地区的山洪强度,四川省内山洪灾害高风险区和较高危险区主要分布在降水量多的四川省东部地区^[10]。与 1990 年相比,2020 年四川省的山

洪灾害危险性降低,区域主要集中在四川中部。植被覆盖变化是主要原因,植被越茂密,径流系数越小,山洪灾害危险性越小^[11]。相较于 1990 年,由于四川省中部大部分地区植被覆盖率增加,尽管 2020 年的最高降雨强度面积增加,但四川省中部仍存在大量山洪灾害危险性降低的区域^[12]。

由于四川省山洪灾害高风险区的地形平坦,河网密集,是四川省的人口和经济的重心,承灾体的暴露性和脆弱性明显,导致山洪灾害风险性较高^[4]。从时间变化来看,山洪风险等级主要在四川省中部城市增加,如凉山州、攀枝花、巴东、达州等市。因此,虽然四川省大部分城市的山洪危险性降低,但山洪灾害风险呈增加趋势^[4,7]。该现象产生主要是由于近年来山洪的脆弱性和防灾能力变化较大,人口密度和 GDP 两个指数在四川省中部城市显著增加,加剧洪水灾害损失^[13]。

4 结论

a. 四川省山洪灾害高风险区和较高风险区均主要分布于四川省东部。2020 年四川省发生山洪灾害危险程度较 1990 年降低,但山洪灾害风险性增加,主要发生于四川省中部。

b. 降雨强度、植被覆盖率、人口密度、GDP 等指标是决定四川省山洪灾害风险程度的关键要素。

c. 为全面分析气候变化下山洪风险的变化,未来应进一步研究山洪风险性及危险性对气候因子的响应。

参考文献:

[1] 朱锡松,黄振国,杨江. 四川省山洪灾害防治非工程措施系统与防灾体制机制关联融合的分析与思考[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(9/10): 123-126.

[2] DING W, WU J, TANG R, et al. A review of flood risk in China during 1950-2019: Urbanization, socioeconomic impact trends and flood risk management[J]. Water, 2022, 14(20): 3246.

[3] PUFFER J H, LASKOWICH C. Volcanic diapiers in the Orange Mountain flood basalt; New Jersey, USA[J]. Journal of volcanology and geothermal research, 2012, 237-238: 1-9.

[4] 丁文峰,杜俊,陈小平,等. 四川省山洪灾害风险评估与区划[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 41-45, 97.

[5] 叶帮苹,冯汉中,刘志红,等. 基于 Logistic 模型的四川山洪流域危险性评价[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(5): 573-578.

