

基于 PSR-SPA 模型的成都市文化 遗产洪涝灾害风险研究

曾雅婕¹, 傅红¹, 税玥²

(1.四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2.成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 评估文物保护单位的洪灾风险,为提升遗产防洪减灾能力提供科学依据。[方法] 以四川省成都市 311 处文物保护单位为例,通过构建 PSR-SPA 模型研究文物保护单位洪灾风险的分布规律,并通过空间自相关性分析确定洪灾风险的空间分布特征。[结果] 成都市文物保护单位洪灾风险为西高东低、北高南低,城市高于郊区、平原高于山地。洪灾风险等级与遗产级别呈正相关,全国重点文物保护单位遭受洪水灾害的风险高,中等风险以上文保单位以古建筑和近现代重要史迹及代表性建筑为主,年代多为宋元明清时期,洪灾风险高发区域为青羊、武侯和锦江等主城区。文保单位洪灾风险在空间分布上呈微弱的正相关关系,存在一定的空间集聚性。[结论] 全国重点文物保护单位受灾后易损,应针对性地提高遗产自身抵御灾害的能力;应关注古建筑和近现代重要建筑、宋元明清时期的文物保护单位的洪灾风险防治问题,发挥文物预警防控功能;受洪灾威胁较大的区县应进一步加强防汛信息化建设。

关键词: 文物保护单位; 洪灾风险; PSR 模型; SPA 集对分析法; 空间自相关性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0296-08

中图分类号: P426.616, G112

文献参数: 曾雅婕, 傅红, 税玥. 基于 PSR-SPA 模型的成都市文化遗产洪涝灾害风险研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 296-303. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210809.004; Zeng Yajie, Fu Hong, Shui Yue. Research on flood risk of cultural heritage in Chengdu City based on a PSR-SPA model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 296-303.

Research on Flood Risk of Cultural Heritage in Chengdu City Based on a PSR-SPA Model

Zeng Yajie¹, Fu Hong¹, Shui Yue²

(1.College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2.College of Tourism and Urban Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The flood risk related to cultural relics on protected sites was evaluated in order to provide a scientific basis for improving flood control measures and disaster reduction ability for heritage sites. [Methods] The study used data from 311 cultural relics protection units in Chengdu City, Sichuan Province to determine the distribution law of flood risk for cultural relics protection units. A PSR-SPA model was constructed, and the spatial distribution characteristics of flood risk were determined by spatial autocorrelation analysis. [Results] The flood risk of cultural relics protection units in Chengdu City was high in the west, low in the east, high in the north, and low in the south. Flood risk was higher in the urban area than in the suburbs, and higher in the plain than in the mountains. The flood risk level was positively related to the heritage level. The national key cultural relics protection units had a high risk of flood disaster. The cultural protection units with above medium risk were mainly ancient buildings, important modern historical sites, and typical buildings. Most of these units were in the areas associated with the Song, Yuan, Ming, and Qing Dynasties. The areas with high flood risk were Qingyang, Wuhou, Jinjiang cities, and other primarily urban

收稿日期: 2021-06-02

修回日期: 2021-07-29

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“山地灾害风险视角下川西南山区聚落空间重构的驱动机制研究”(41671529); 四川大学 2020 年校级项目(2020skscuzx-pt83)

第一作者: 曾雅婕(1993—), 女(汉族), 四川省乐山市人, 硕士研究生, 主要从事风景名胜区和遗产保护规划方面研究。Email: 765613405@qq.com。

通讯作者: 傅红(1966—), 女(汉族), 重庆人, 硕士, 副教授, 主要从事风景区旅游设计研究、传统村落保护研究。Email: 625060772@qq.com。

areas. There was a weak positive correlation in the spatial distribution of flood risk in cultural and social protection units, and there was a certain spatial agglomeration. [Conclusion] National cultural relics protection sites are vulnerable to disasters, and their ability to withstand disasters should be improved. Attention should be given to flood risk prevention and control for ancient buildings, important modern buildings, and cultural relics protection units in areas associated with the Song, Yuan, Ming, and Qing Dynasties, and give full attention to the early warning, prevention, and control of disasters. Districts and counties threatened by floods should further strengthen the construction of flood control information.

Keywords: cultural relics protection units; flood risk; PSR model; SPA set pair analysis; spatial autocorrelation

文化遗产作为民族文化的象征以及赋能产业的资源要素,对传承民族精神、丰富文化多样性、展示国家名片具有重要意义^[1]。然而在全球气候变暖和极端天气变化等多因素影响下,文化遗产面临着频繁和严峻的洪涝灾害问题^[2],其突发性强、淹没时间长、受灾面广^[3],不仅造成了严重的经济财产损失,更威胁着文化遗产的存续安全。文物保护单位是文化遗产的重要组成部分,包括古文化遗址、古墓葬、古建筑、石窟寺、石刻、壁画、近代现代重要史迹和代表性建筑等不可移动文物^[4]。由于它们常处于开放或半封闭的保存状态,受洪涝灾害威胁尤为严重^[5]。据国家文物局不完全统计,2020 年洪涝灾害已致中国南方 11 省份 500 余处不可移动文物受损,遗产保护安全形势严峻。

目前,关于文化遗产的研究在文化遗产传承保护、旅游开发、体制建设以及管理经验等^[6-8]方面成果颇丰,而对文物保护单位的研究主要集中在文物时空分布特征^[9]、文物单体修缮保护^[10]、专项规划编制^[11]以及资源活化利用等^[12]方面,部分学者以不可移动文物洪涝灾害风险评估为研究视角进行了初步探索。乔文慧等^[13]综合考虑灾害系统的致灾因子、孕灾环境、承灾体和调控响应因子,对城市文物保护单位进行了洪涝灾害风险评估;梁龙等^[14]关注暴雨的季节性特点,建立了不可移动文物季节性暴雨洪涝灾害风险评估方法。总体来说,现有文化遗产研究多侧重于历史考古、建筑修复以及规划管理等角度,从灾害角度进行的研究较少。

关于洪涝灾害风险评估的量化方法有数理统计法、指标体系法、不确定性分析法和情景模拟法^[15],其中常以致灾因子、孕灾环境、承灾体^[16]三者构建评价指标体系进行风险评估。以往研究大多未能考虑评价指标间的差异性,且研究结论尚停留在风险等级划分层面,未能进行更深入的规律探讨。洪灾风险评估是一个复杂的系统,其实质上是把确定性的评价标准与不确定性的评价因子及其变化相结合的分析过程^[17],为更好地处理系统确定性与不确定性因

素间的联系和转化关系,采用集对分析法对评价指标间同、异、反的联系作用进行分析。此外,在涉及社会—生态系统风险评估的研究中,PSR 模型具有很强的灵活性和实用性^[18],在识别研究区遗产现状与环境特征的基础上,通过 PSR 模型构建风险评估指标体系,可以更好的反映风险系统间的相互关系。

基于此,本文以成都市文物保护单位为例,运用 PSR-SPA 模型对成都市文物保护单位进行洪涝灾害风险分析,研究不同遗产级别、遗产年代和遗产类型的文物保护单位洪灾风险的分布规律,并通过空间自相关性分析确定文保单位洪灾风险的空间分布特征,以为文化遗产洪涝灾害防治和减灾防灾战略制定提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

成都市位于四川省中部,四川盆地西部,成都平原腹地,经纬度为东经 $102^{\circ}54'$ — $104^{\circ}53'$ 和北纬 $30^{\circ}05'$ — $31^{\circ}26'$,境内地势较为平坦,总体呈西北高,南部低。区内河流水系纵横,岷江及沱江干流穿越市境,中小河流及都江堰渠系密布全市^[19],气候类型属亚热带季风气候,全年降雨充沛。成都市辖 11 区 5 市 4 县,2019 年全年实现地区生产总值 GDP 1.70×10^{12} 元,常住人口 1.66×10^7 人,旅游人次 2.80×10^8 人,旅游总收入 4.66×10^{11} 元。成都历史文化资源丰富,境内有世界遗产地 2 处,国家级历史文化名城 2 座,省级历史文化名城 3 座,历史文化街区 12 片,全国重点和省市级文物保护单位 311 处。成都市降水年内分配不均,雨季多暴雨,江河水量系发达,洪涝灾害频繁发生^[19],常出现水利设施受损、农田被淹以及城市积水等灾害问题,境内文化遗产也受到不同程度的影响。本文以成都市 311 处文物保护单位为研究对象,包括 41 处全国重点文物保护单位,108 处省级文物保护单位以及 162 处市级文物保护单位,其分布情况见图 1。

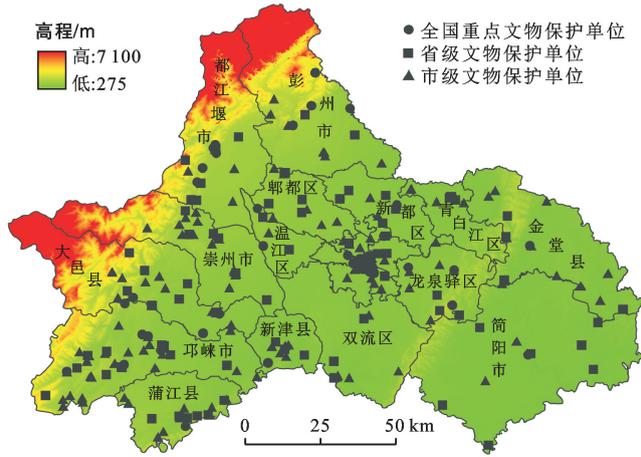


图 1 成都市地形及文物保护单位分布

1.2 数据来源及处理

本文所用数据包括地理数据、气象水文数据、遗产数据以及社会经济数据 4 类。

(1) 地理数据。2019 年成都市 Landsat 8 遥感影像(分辨率 30 m), 成都市 DEM 高程数据(分辨率 30 m)以及成都市交通道路矢量图。运用 ENVI5.3 和 ArcGIS 10.2 对遥感影像进行辐射定标、大气校正、图像融合等预处理, 获取土地利用、高程、坡度等地形数据。

(2) 气象水文数据。2019 年成都市一般站点和基准站点逐日降水量数据以及成都市水系分布图。运用 ArcGIS 对降水量进行克里金插值, 获取降水栅格数据。

(3) 遗产保护数据。2019 年成都市市级以上文物保护单位统计数据。利用 Google Earth 对文保单位进行空间定位, 并结合高德地图坐标校准, 确定其经纬度坐标, 建立成都市文物保护单位地理信息数据库。将带有坐标信息的文物保护单位点位导入 ArcGIS 进行处理。

(4) 社会经济数据。《成都市 2019 年统计年鉴》及成都市各区县 2019 年度国民经济和社会发展统计公报。

1.3 研究方法

1.3.1 PSR 评估模型 压力—状态—响应模型 (pressure-state-response, PSR) 是一种用于研究环境问题的模型, 常用于生态安全、生态健康评估框架的构建。从灾害理论视角, 现有洪灾研究^[13-14, 20]多从致灾因子、孕灾环境、风险受体和减灾措施 4 个方面建立洪灾风险评价指标体系。

以 PSR 模型为基础构建风险评估指标体系, 可以对社会—生态系统的状态、变化原因以及减灾措施进行评估, 更好的反映风险系统间的相互关系^[18]。本文

通过借鉴相关研究成果^[13, 21-22]与研究区实际情况, 按照可量化性、典型性以及操作性的原则(见表 1)。其中压力(P)指标是指灾害风险受体在自然致灾因子和社会致灾因子的影响下承受的风险压力。本文指自然灾害因子; 状态(S)指标包括风险受体状态指标以及孕灾环境危险状态指标两类; 响应(R)指标表示区域面临洪灾风险压力时所采取的对策与措施。

表 1 基于 PSR 模型的洪灾风险评价体系

准则层 A	准则层 B	指标层	类型
压力指标	自然致灾因子 p	极端天气最大降水量 p_1	正向
		极端天气降水频率 p_2	正向
		年平均降水量 p_3	正向
状态指标	孕灾环境状态 s_1	高程 s_{11}	逆向
		坡度 s_{12}	逆向
		植被覆盖 s_{13}	逆向
		土地利用 s_{14}	正向
	风险受体状态 s_2	地表径流 s_{15}	正向
		水系密度 s_{16}	正向
		遗产级别 s_{21}	正向
		遗产年代 s_{22}	正向
响应指标	响应应对指标 r	旅游人次 s_{23}	正向
		人口密度 s_{24}	正向
		道路密度 r_1	逆向
		公共支出预算 r_2	逆向
		旅游收入 r_3	逆向
		遗产保护管理机构 r_4	逆向
		每千人床位数 r_5	逆向

1.3.2 SPA 集对分析法 集对分析法 SPA 是处理不确定性问题的系统分析方法, 将不确定性系统中的两个有关联的集合构造为集对, 用联系度 μ 描述集对的同一性、差异性、对立关系分析, 研究确定性与不确定性之间的联系、转换和制约^[23]。本文以成都市 311 处文物保护单位为评价单元, 基于 ArcGIS 提取每个文物保护单位的评价指标栅格数据实值, 设定 5 级评价等级, 通过计算各指标联系度, 按照置信度准则确定研究区文物保护单位的洪灾风险等级。具体计算步骤如下:

(1) 联系度 μ 计算。集合 A 表示评价指标的集合, 集合 B 表示评价指标等级标准的集合, $H(A, B)$ 构成集对, 对其进行分析得到 N 个特性, 用联系度 μ 描述集对^[23], 则有:

$$\mu_{AB} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中: S 为共有的特性个数; P 为两个集合对立的特性个数; 其余的 F 个特性关系不确定; i 表示差异度系数 $\in [-1, 1]$; j 为对立度系数, 取 -1 。令 $a = S/$

$N, b = F/N, c = P/N$, 根据研究对象数量的不同, 可将式(1)进一步扩展至五元联系度公式:

$$\mu_{AB} = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_3 + c j \quad (2)$$

式中: a 为同一度; b_1, b_2, b_3 为差异度分量, c 为对立

度, 满足 $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$; i_1, i_2, i_3 表示差异度分量系数。

利用模糊分析法求取联系度 μ , 对于评价指标越大越危险型联系度的计算:

$$\mu_m = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 0j & (x_m \leq S_1) \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_m}{S_2 - S_1} + \frac{2x_m - 2S_1}{S_2 - S_1} i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 0j & (S_1 < x_m \leq \frac{S_1 + S_2}{2}) \\ 0 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_m}{S_3 - S_1} i_1 + \frac{2x_m - S_1 - S_2}{S_3 - S_1} i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 0j & (\frac{S_1 + S_2}{2} < x_m \leq \frac{S_2 + S_3}{2}) \\ \vdots & \vdots \\ 0 + 0i_1 + \dots + \frac{2S_{k-1} - 2x_m}{S_{k-1} - S_{k-2}} i_{k-2} + \frac{2x_m - S_{k-1} - S_{k-2}}{S_{k-1} - S_{k-2}} j & (\frac{S_{k-2} + S_{k-1}}{2} < x_m \leq S_{k-1}) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 1j & (x_m \geq S_{k-1}) \end{cases} \quad (3)$$

对于评价指标越小越危险型联系度的计算:

$$\mu_m = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 0j & (x_m \geq S_1) \\ \frac{2x_m - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2x_m}{S_1 - S_2} i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 0j & (\frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_m < S_1) \\ 0 + \frac{2x_m - S_2 - S_3}{S_1 - S_3} i_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2x_m}{S_1 - S_3} i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 0j & (\frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_m < \frac{S_1 + S_2}{2}) \\ \vdots & \vdots \\ 0 + 0i_1 + \dots + \frac{2x_m - 2S_{k-1}}{S_{k-2} - S_{k-1}} i_{k-2} + \frac{S_{k-1} + S_{k-2} - 2x_m}{S_{k-2} - S_{k-1}} j & (S_{k-1} \leq x_m < \frac{S_{k-1} + S_{k-2}}{2}) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{k-2} + 1j & (x_m > S_{k-1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_1, S_2, S_3, S_4 为评价因子的门限值; x_m 为评价因子的实测值。

(2) 综合联系度 μ_{AB} 计算。得出指标实际值与各级评价标准的联系度后, 则可建立各级评价等级集对 $H(A, B)$ 的五元综合联系度:

$$\mu_{AB} = \sum_{m=1}^n \omega_m \mu_m \quad (5)$$

式中: ω_m 为指标的权重, 本文用层次分析法确定各评价指标权重。

(3) 置信度准则确定危险等级。引入置信度准则确定评价单元隶属的风险等级^[24]。

$$\begin{aligned} f_1 &= \sum_{m=1}^n \omega_m a_m \\ f_2 &= \sum_{m=1}^n \omega_m b_{1m} \\ f_3 &= \sum_{m=1}^n \omega_m b_{2m} \\ f_4 &= \sum_{m=1}^n \omega_m b_{3m} \\ f_5 &= \sum_{m=1}^n \omega_m c_m \end{aligned} \quad (6)$$

若 $f_1 > \lambda$, 则洪灾风险为低, $f_1 + f_2 > \lambda$, 则洪灾

风险为较低, $f_1 + f_2 + f_3 > \lambda$, 则洪灾风险为中等, 若 $f_1 + f_2 + f_3 + f_4 > \lambda$, 洪灾风险为较高, $f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 > \lambda$, 则洪灾风险为高。 λ 为置信度, 一般取 0.5~0.7, 该值越大, 评价结果越保守, 本文 λ 取 0.5。

1.3.3 空间自相关性分析 空间自相关性是指在空间上越靠近的事务或现象越相似。进行空间自相关性分析的主要目的是确定某一变量在空间上是否相关及其相关程度如何, 常用空间自相关性系数来度量物理或生态学变量在空间上的分布特征及其对其领域的影响作用^[25]。变量值随测定距离的缩小表现出相似性, 则变量为空间正相关, 若随测定距离的缩小表现出不同性, 则变量呈空间负相关, 若变量值不表现空间依赖关系, 则为空间不相关性或空间随机性。

本文对文物保护单位洪水灾害风险指数进行空间自相关性分析, 确定其在空间上的分布特征和空间上的依赖关系, 通过 Moran's I 指数和 LISA 指数的计算反映全局空间自相关性和局部空间自相关性分析^[26]。其中 Moran's I 指数的计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中: x_i 和 x_j 表示变量 x 在相邻空间单元的值; \bar{x} 是变量的平均值, w_{ij} 是相邻权重; n 是空间单元总数。 I 系数的取值在 $[-1, 1]$; 小于 0 表示负相关, 等于 0 表示不相关, 大于 0 表示正相关。 LISA 指数的计算公式为:

$$LISA = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n^{j=1}} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (8)$$

LISA 指数可反映观测值的聚类或异常情况, 主要体现在高高聚集(H-H)、低低聚集(L-L)、高低聚集(H-L)和低高聚集(L-H)。

2 结果与分析

2.1 基于 PSR-SPA 的洪灾风险计算

2.1.1 指标构建及权重 依据 PSR 洪灾风险评价模型, 对压力、状态以及响应 3 类指标进行评估。

(1) 压力指标。压力(P)指标指自然致灾压力指标。降雨是洪水形成的直接因素, 本文选取极端天气最大降水量、极端天气降水频率(统计降水量 ≥ 30 mm 的天数)、年平均降水量 3 类指标表征自然致灾压力, 通过 ArcGIS 的克里金插值分析确定压力指标的风险等级程度。

(2) 状态指标。状态(S)指标包括孕灾环境危险状态指标以及风险受体状态指标两类。孕灾环境危险状态指标综合考虑地形影响、植被覆盖、土地覆被、地表径流影响和水系分布密度的作用。高程越低坡度越小的地方越易受灾; 参考梁龙等^[14]对不同土地覆盖类型的粗糙度大小赋值, 将研究区土地覆被分为林地、田地、建设用地、未利用地和水域 5 类, 分别赋值为 1, 2, 3, 4, 5; 用 NDVI 反映植被覆盖情况, 植被覆盖度越高对洪水阻隔越大, 受灾风险越小; 地表径流表示降雨下径流汇流路径分布, 对地表径流进行缓冲处理, 表示不同等级的灾害风险; 水系分布密度对研究区洪灾侵害影响有直接作用, 水系分布越密集, 受灾风险越高。风险受体状态指标考虑文物保护单位本体的级别和年代, 遗产建成年份越久、级别越高, 其价值越高, 更易受灾。遗产级别按照历史、艺术和科学价值将市级、省级以及全国重点文物保护单位分别赋值为 1, 3, 5; 遗产年代分为史前、先秦、秦汉隋唐、宋元明清以及近代以来 5 类, 赋值 1, 2, 3, 4, 5; 用旅游人次和人口密度来反映研究区内承灾体数目, 游人越多, 人口越密集的区域灾害损失越大。

(3) 响应指标。响应(R)指标表示面临洪灾风险压力时所采取的对策与措施, 认为路网完善、经济发达、收入越高的区域抗灾能力越强; 遗产保护机构越健全越专业, 应灾响应越及时。将遗产保护管理机构分为文物主管部门代管、附属其他保护管理机构管理、设立专门机构保护管理 3 类, 赋值为 1, 3, 5。

结合研究区实况按照自然断点分级法^[21-22]将洪灾风险值划分为 5 个等级: 低风险等级、较低风险等级、中等风险区域、较高风险等级和高风险等级, 确定各指标不同风险等级的门限值(表 2)。通过 20 位遗产保护、灾害管理及规划方面的专家对指标体系进行权重赋值, 建立目标评价的层次结构模型确定各指标权重。

表 2 洪灾风险评价指标门限值和指标权重

指标	评价因子门限值				权重
	S_1	S_2	S_3	S_4	
p_1/mm	48.66	51.35	52.02	56.19	0.134 4
p_2/d	3.756	5.277	7.371	10.219	0.164 5
p_3/mm	1.83	2.12	2.41	2.71	0.053 6
s_{11}/m	750	650	550	450	0.025 6
$s_{12}/(^{\circ})$	53.66	31.56	17.89	8.42	0.019 1
s_{13}	0.4	0.3	0.2	0.1	0.038 3
s_{14}	1	2	3	4	0.043 8
s_{15}/km	6.30	3.46	2.27	1.12	0.067 3
$s_{16}/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	0.015	0.032	0.047	0.063	0.103 6
s_{21}	1	2	3	4	0.029 0
s_{22}	1	2	3	4	0.051 5
$s_{23}/(10^4 \text{人} \cdot \text{次})$	1 262.15	1 634.03	1 782.78	2 005.91	0.030 5
$s_{24}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	2 513.46	4 630.38	6 747.29	8 864.21	0.031 2
$r_1/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	0.432	0.259	0.137	0.051	0.038 5
$r_2/10^8 \text{元}$	77.96	59.2	50.89	33.98	0.041 9
$r_3/10^8 \text{元}$	168.75	121.82	80.48	49.19	0.031 0
r_4	5	4	3	2	0.070 4
$r_5/(\text{千人} \cdot \text{床})$	8.34	6.51	5.28	3.44	0.025 9

注: 表中指标具体含义见表 1。下同。

2.1.2 联系度计算 依据指标联系度的计算方法, 基于 ArcGIS 提取评价指标栅格数据值至文物保护单位, 按照公式(3)~(4)计算出各评价指标的联系度 μ 。以全国重点文物保护单位——永陵王建墓为例, 计算出该文保单位的单指标联系度和联系度分量 a, b_1, b_2, b_3, c 的值(表 3)。

2.1.3 确定风险等级 依据置信度准则确定洪灾风险等级的计算方法, 由公式(6)计算出 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 , 本文将置信度 λ 设定为 0.5。同样以全国重点文物保护单位——永陵王建墓为例, 计算出 f_1 为

0.097, f_2 为 0.298, f_3 为 0.154, $f_1 + f_2 + f_3 = 0.549 > 0.5$, 故该文保单位属中风险等级(表 4)。

表 3 永陵王建墓点位单指标联系度

指标	指标					
	a	b_1	b_2	b_3	c	μ
p_1	0	0	0	0	1.00	-1.00
p_2	0	0.93	0.07	0	0	0.47
p_3	0	0	0.31	0.69	0	-0.69
s_{11}	0	0	0.02	0.98	0	-0.98
s_{12}	0	0	0	0.92	0.08	-0.54
s_{13}	0	0.28	0.72	0	0	0.28
s_{14}	0	0	0.50	0.50	0	-0.50
s_{15}	0	0	0	0	1.00	-1.00
s_{16}	0	0.64	0.36	0	0	0.32
s_{21}	0	0	0.00	0	1.00	-1.00
s_{22}	0	0	0.50	0.50	0	-0.50
s_{23}	0	0.87	0.12	0	0	0.44
s_{24}	0	0	0.33	0.67	0	-0.67
r_1	1.00	0	0	0	0	1.00
r_2	0.03	0.96	0	0	0	0.52
r_3	1.00	0	0	0	0	1.00
r_4	0	0	0	0	1.00	-1.00
r_5	1.00	0	0	0	0	1.00

表 4 永陵王建墓点位洪灾风险等级

指标	数值	灾害风险等级
f_1	0.097	中风险等级
f_2	0.298	
f_3	0.154	
f_4	0.148	
f_5	0.303	

2.2 洪灾风险结果与分析

按照公式(3),(4),(6)计算研究区其余 310 处文物保护单位的洪灾风险等级,统计各个风险级别的文物保护单位数量及所占百分比,其空间分布见图 2,数量和比例统计见表 5。总体来说,成都市文物保护单位洪灾风险分布具有较大的空间差异性和不均衡性,呈西高东低、北高南低,城市高于郊区、平原高于山地的空间分布形态。研究区文物保护单位大部分属中等洪灾风险,具体分布如下。

(1) 低风险等级。文物保护单位数量仅为 6 处,占比小为 1.93%,其中省级 2 处,市级 4 处,分布在研究区南侧郊区,主要为蒲江县和双流区等地。

(2) 较低风险等级。有文物保护单位 60 处,占比 19.29%,其中全国重点文物保护单位 3 处,省级 18 处,市级 39 处,集中分布在研究区中部和西南部,邛崃市、大邑县、龙泉驿区等区域。这些区域整体距水系

较远、降水量较小,洪水灾害活动小,故风险较低。

(3) 中风险等级。文物保护单位数量最多,共有 218 处,占比 70.10%,有全国重点文物保护单位 20 处,省级 82 处,市级 116 处,密集分布在主城青羊区、武侯区和锦江区范围,其余点位较为平均分散在研究区西侧,东侧区县如简阳市、青白江区等分布少且离散。该等级文物保护单位受极端天气降水量和水系密度分布的影响较大。

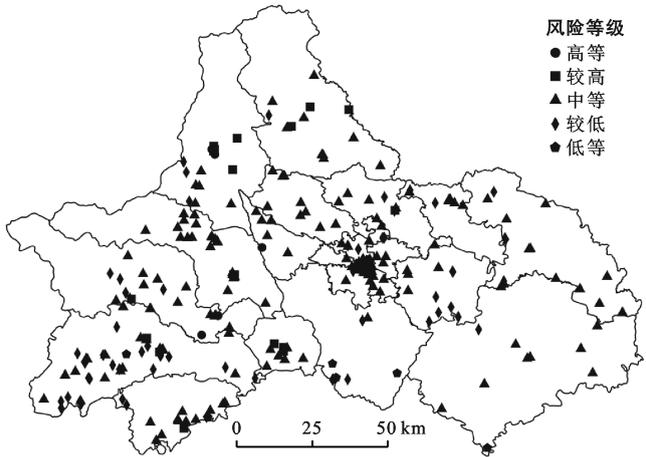


图 2 成都市文物保护单位洪灾风险等级空间分布特征

(4) 较高风险等级。文物保护单位数量较少为 21 处,占比 6.75%,以全国重点文物保护单位为主有 12 处,省级 6 处,市级 3 处,分布离散不集中,都江堰市、崇州市以及新津县分布最多。该区域极端天气降水量大、距水系较近且大部分属于汇流区,整体洪灾风险较高。

(5) 高风险等级。文物保护单位有 6 处,且全部为全国重点文物保护单位,其中都江堰市有 2 处,大邑县 2 处,青羊区 1 处,温江区 1 处。这些地区地势平坦,降水较多同时旅游业发达,旅游人次较多,易受洪灾威胁且受灾损失较大,洪灾风险级别高。

表 5 成都市文物保护单位风险等级

危险性等级	总数	文物保护单位级别			比例/%
		全国重点	省级	市级	
低风险等级	6	0	2	4	1.93
较低风险等级	60	3	18	39	19.29
中风险等级	218	20	82	116	70.10
较高风险等级	21	12	6	3	6.75
高风险等级	6	6	0	0	1.93

结合文物保护单位级别可以看出,全国重点文物保护单位遭受洪水灾害风险高,中风险等级以上的文物保护单位共 38 处,占全国重点文物保护单位总量的

92.68%，省级和市级文物保护单位，中等洪灾风险以上分别为 88,119 处，分别占省、市级文物保护单位总量的 81.48%，73.46%。基于类型上看，研究区中等洪灾风险以上文保单位类型以古建筑和近现代重要史迹及代表性建筑为主，其中古建筑有 112 处，近现代重要史迹及代表性建筑 77 处，分别占总量的 36.01%，24.76%。从遗产年代上看，宋元明清时期的文保单位数量多，洪灾风险高，中风险等级以上文物保护单位中宋元明清时期有 130 处，近代以来有 66 处，秦汉隋唐有 21 处，分别占比 41.8%，21.22%，6.75%。

从空间分布上看，研究区文物保护单位洪灾风险高发区域位于青羊区、武侯区和锦江区等主城区内，有唯一极值核心区，主城区内中风险等级以上文物保护单位 62 处，占比 19.39%，文保单位分布密集，旅游人次多，受灾损失大，风险大；崇州市、邛崃市和大邑县等地文保单位中等洪灾风险等级以上较为集中；简阳市、双流区、龙泉驿区以及成华区洪灾风险相对较小。

2.3 洪灾风险空间自相关性分析

2.3.1 全局相关性分析 运用 Geoda 软件的空间自相关分析工具对 2019 年成都市文化遗产点位洪灾风险值进行全局空间自相关性分析，计算出全局 Moran's I 指数为 0.068， p 为 $0.001 < 0.01$ ，通过 99% 的置信度检验， Z 为 4.108 4，大于 1.65，说明 Moran's I 指数显著有效，文物保护单位洪灾风险在空间分布上呈微弱的正相关关系，存在一定的空间集聚性。

2.3.2 局部相关性分析 局部相关性分析可表征一个单元与邻近单元属性值的相关程度，通过 Geoda 软件计算 LISA 指数，得到成都市文物保护单位洪水灾害风险 LISA 聚集特征(图 3)。

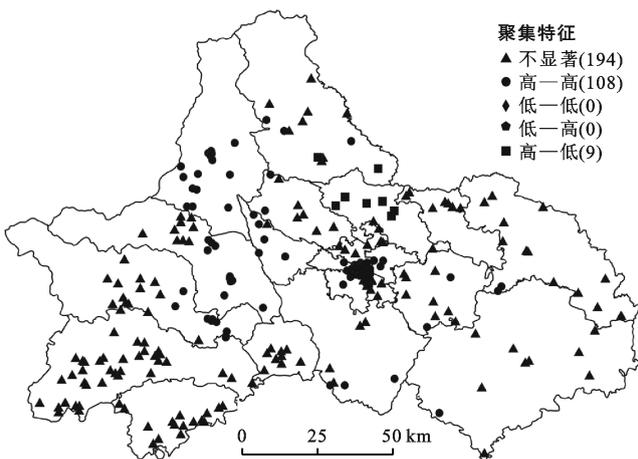


图 3 成都市文物保护单位洪灾风险 LISA 聚集特征

由图 3 可知，局部相关性分析仅存在两种类型，高一高型聚集点位和高一低型聚集点位，说明洪灾风险较高的点位更易聚集。其中高一高型聚集点位有 108 处，主要集中分布在成都市主城青羊区、武侯区和锦江区，该区域内风险点及周边邻域表现出较强的聚集特征；西侧都江堰市、大邑县以及崇州市等地洪水灾害较高风险和高风险点位多表现为高一高聚集型，区域周边点位具有一定的随机性；东部高一高聚集型点位分布少又散，仅龙泉驿区、简阳市以及金堂县有少量分布，区域点位表现出较强的随机性。高一低型聚集点位有 9 处，全部分布在研究区北侧新都和彭州市区域内。其他 194 处文物保护单位点位表现为不显著。

3 讨论与结论

本文将 PSR 模型引入传统灾害评价体系中，使得风险系统间的相互关系更为明晰，在洪灾风险评估时，用 SPA 集对分析法确定风险等级，有效分析了指标间的差异性，以成都市文物保护单位为例，建立了一套基于文化遗产的洪灾风险评价模型，为其灾害防治、应急管理和发展规划提供理论依据。

(1) 成都市文物保护单位洪灾风险分布差异性显著，呈西高东低、北高南低，城市高于郊区、平原高于山地的空间分布形态，大部分属中等洪灾风险，中风险等级及以上文物保护单位数量占比 78.78%。

(2) 成都市文物保护单位遗产级别和洪灾风险等级正相关，从数量上看，文物保护单位以省市级为主，全国重点文物保护单位虽数量少，但其遗产价值高、本体脆弱性强，受灾后易损，应进一步加强其保护与灾害防治措施，开展文物防灾减灾技术研究，针对性提高遗产自身抵御灾害的能力。

(3) 中等洪灾风险以上文保单位类型以古建筑和近现代重要史迹及代表性建筑为主，年代则多为宋元明清时期，应更加关注此类文保单位的洪灾风险问题，突出防御重点，加强监测防控，定期组织文物保护单位的排查和修缮工作，发挥文物预警防控功能。

(4) 成都市文物保护单位洪灾风险高发区域集中在青羊、武侯和锦江等主城区内，东部区县如简阳市、双流区、龙泉驿区等洪灾风险相对较小。受洪灾威胁较大的区县应进一步加强防汛信息化建设，提前研判可能发生的洪涝灾害，针对性安排部署防范应对工作。

(5) 成都市文物保护单位洪灾风险在空间分布上呈微弱的正相关关系，存在一定的空间集聚性，洪灾风险较高的文物保护单位更易聚集。

在后续工作中可以进一步深入探索评价指标的全面性,特别是历史性洪涝灾情以及文物保护单位本体的抗灾性质等要素,加强评价体系的综合研究。同时可以加强文化遗产洪涝灾害的影响机制分析,探讨文化遗产周边环境变化、社会公共管理、城市基建提升等因素对文化遗产灾害风险的驱动影响,以期为文化遗产的保护和利用提供更有价值的参考。

[参 考 文 献]

- [1] 杜华君,张继焦.文化遗产的“传统—现代”转型与乡村振兴的内源性动力:基于新古典“结构—功能论”的人类学分析[J].广西民族大学学报(哲学社会科学版),2020,42(6):103-111.
- [2] 王思思,王昊玥.国际城市及遗产地洪水风险管理的启示[J].人民黄河,2020,42(5):40-46.
- [3] 罗海婉.城市洪涝灾害风险评估方法及其应用研究[D].广东广州:华南理工大学,2020.
- [4] 国家文物局.中华人民共和国文物保护法[M].北京:法律出版社,2017.
- [5] 李会彬.文化遗产地风险可视化技术的研究[D].天津:天津大学,2019.
- [6] 周玉翠,邓祖涛,郑晓云,等.长三角世界遗产旅游目的地城市的旅游可达性评价[J].经济地理,2020,40(2):217-226.
- [7] 苗海强,刘丰华.自然文化遗产视角下中国保护地规划:评《中国国家公园生态系统和自然文化遗产保护措施研究》[J].世界林业研究,2020,33(5):128.
- [8] 杨涛.国土空间规划视角下的国家文化遗产空间体系构建思考[J].城市规划学刊,2020(3):81-87.
- [9] 田小波,胡静,徐欣,等.历史时期全国重点文物保护单位时空分布特征及影响机理[J].经济地理,2021,41(1):191-201.
- [10] 王景慧.从文物保护单位到历史建筑:文物古迹保护方法的深化[J].城市规划,2011,35(S1):45-47,78.
- [11] 杨群.文化遗产保护视角下深圳传统村落的保护与活化[J].特区实践与理论,2021(1):117-122.
- [12] 张威,冯志敏,冯亚西.历史文化遗产的保护与活化探索:以武汉古德寺为例[J].华中建筑,2021,39(2):137-141.
- [13] 乔文慧,王强.城市文化遗产洪涝灾害风险评估模型构建:以广州市为例[J].地域研究与开发,2020,39(2):127-131,150.
- [14] 梁龙,宫阿都,孙延忠,等.不可移动文物季节性暴雨洪涝灾害风险评估方法研究:以福建省国保古遗址为例[J/OL].武汉大学学报(信息科学版):1-17. [2021-05-07] <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200600>.
- [15] 李超超,田军仓,申若竹.洪涝灾害风险评估研究进展[J].灾害学,2020,35(3):131-136.
- [16] 龚艳冰,向林,刘高峰.基于高斯过程回归模型的洪涝灾害损失预测研究:以重庆市为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1502-1510.
- [17] 宋振华,赖成光,王兆礼.基于集对分析法的洪水灾害风险评价模型[J].水电能源科学,2013,31(4):34-37.
- [18] 王国萍,闵庆文,丁陆彬,等.基于PSR模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J].生态学报,2019,39(22):8232-8244.
- [19] 陈渭忠,高瑞虎.四川成都市近30年洪涝灾害回顾及防御对策探讨[J].中国防汛抗旱,2014,24(3):52-55.
- [20] 李宛谕,黄显峰,金国裕,等.基于ANP-PP-SPA的区域洪灾风险评价模型研究[J].水利经济,2020,38(4):45-50,83.
- [21] 黄国如,李碧琦.基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):1-6.
- [22] 张耀文,李海君,李浩,等.京津冀地区县域单元洪涝灾害风险评价[J].水电能源科学,2020,38(10):44-47.
- [23] 王文圣,金菊良,李跃清.基于集对分析的自然灾害风险度综合评价研究[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(6):6-12.
- [24] 宋振华,赖成光,王兆礼.基于集对分析法的洪水灾害风险评价模型[J].水电能源科学,2013,31(4):34-37.
- [25] 肖笃宁,李秀珍,高峻.景观生态学[M].2版.北京:科学出版社,2010.
- [26] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价[J].水土保持通报,2020,40(4):303-311,345.