

长江中游地区洪涝灾害韧性时空演变与驱动因素

兰雪, 徐瑶, 王辉, 叶洪铭

(西华师范大学地理科学学院, 四川南充 637000)

摘要: [目的] 测度区域洪涝灾害韧性水平, 探究其空间分异性驱动因素, 为增强区域抗灾能力, 实现区域可持续发展提供科学支撑。[方法] 运用CRITIC-熵权组合赋权法、地理探测器等方法, 从社会、经济、基础设施、环境4个维度构建洪涝灾害韧性综合评价指标体系, 对2012—2022年长江中游地区洪涝灾害韧性时空演变及空间分异驱动因素进行分析。[结果] ①2012—2022年长江中游地区洪涝灾害韧性由0.209 1波动增长至0.262 9, 仅在2020年出现小幅度下降, 洪涝灾害韧性结构由“环境—社会—基础设施—经济”演变为“环境—社会—经济—基础设施”; ②区域内部洪涝灾害韧性差异显著, 95.24%的区域为波动增长型, 赣州市、吉安市为持续增长型区域; 区域内部社会韧性差异逐渐缩小; 除恩施州与湘西州外, 其余地区经济韧性等级均有上升; 25个市州基础设施韧性等级提升; 区域西北部环境韧性优于其余地区; ③因子探测结果表明, 2012年洪涝灾害韧性空间分异性的主要影响因素为人口密度、地形起伏度和坡度, 至2022年转变为最低生活保障人数、规模以上工业企业数量和年末公路通车里程; ④交互因子探测结果表明, 人口密度 \cap 第三产业比重为2012年影响力最大的交互因子, 至2022年演变为人均GDP \cap 年末公路通车里程。[结论] 应系统总结、推广城市防洪减灾成功经验, 加强各影响因素动态监测, 对不稳定因素进行风险评估并及时调整城市发展战略。

关键词: 洪涝灾害韧性; CRITIC-熵权组合赋权法; 时空演变; 地理探测器; 长江中游地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0331-12

中图分类号: X43, P426.616

文献参数: 兰雪, 徐瑶, 王辉, 等. 长江中游地区洪涝灾害韧性时空演变与驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 331-342. Lan Xue, Xu Yao, Wang Hui, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of flood resilience in middle reaches of Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 331-342. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.030; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.030.

Spatiotemporal evolution and influencing factors of flood resilience in middle reaches of Yangtze River

Lan Xue, Xu Yao, Wang Hui, Ye Hongming

(School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000, China)

Abstract: [Objective] Flood disaster resilience levels of a region and the factors driving their spatial heterogeneity were measured to provide scientific support for enhancing regional disaster resistance and achieving sustainable quality development. [Methods] Using the CRITIC-entropy weight combination and a geographic detector, a comprehensive evaluation index for flood disaster resilience was constructed using four dimensions: society, economy, infrastructure, and environment. Spatiotemporal evolution and driving factors of the spatial heterogeneity of flood disaster resilience in the middle reaches of the Yangtze River from 2012 to 2022 were analyzed. [Results] ① From 2012 to 2022, flood resilience in the middle reaches of the Yangtze River fluctuated and increased from 0.209 1 to 0.262 9, with only a slight decline in 2020. The structure of flood resilience evolved from ‘environment-society-infrastructure-economy’ to ‘environment-society-economy-infrastructure’. ② Significant differences in flood disaster resilience were observed within the region, with 95.24% of areas exhibiting fluctuating growth.

收稿日期: 2024-10-29

修回日期: 2025-02-23

采用日期: 2025-02-24

资助项目: 四川省自然科学基金面上项目“青藏高原高寒草甸灌丛化对土壤碳的影响及其驱动机制”(CXTD2020-3); 校级创新团队 青藏高原东缘高寒牧区生态保护与高质量发展研究创新团队(CXTD2020-3); 校级创新团队(自然灾害与水土保持)(CXTD2023-11)

第一作者: 兰雪(1998—), 女(汉族), 重庆市垫江县人, 硕士研究生, 研究方向为人文地理学。Email: 954797819@qq.com。

通信作者: 徐瑶(1973—), 女(汉族), 四川省南充市人, 博士, 教授, 主要从事生态遥感研究。Email: 648633501@qq.com。

Ganzhou and Ji'an were identified as continuously growing regions. Social resilience differences within the region gradually narrowed. Except for the Enshi and Xiangxi Prefectures, the economic resilience of other areas improved. The infrastructure resilience levels increased in 25 cities and prefectures. Environmental resilience in the northwestern part of the region was better than that in other areas. ③ The results of factor detection showed that the main factors influencing the spatial differentiation of flood resilience in 2012 were population density, terrain relief, and slope. By 2022, these factors had shifted to the number of people receiving minimum living security, the number of large-scale industrial enterprises, and the end-of-year highway mileage. ④ The results of interaction factor detection showed that the most influential interaction factors in 2012 were population density and the \cap proportion of the tertiary industry. By 2022, it had evolved to per capita GDP \cap end-of-year highway mileage. [Conclusion] The successful experiences in urban flood prevention and disaster reduction should be summarized and promoted. Dynamic monitoring of various influencing factors should be strengthened. Risk assessments should be conducted for unstable factors, and urban development strategies should be adjusted in a timely manner.

Keywords: flood disaster resilience; CRITIC entropy weight combination weighting method; spatiotemporal evolution; geographic detector; middle reaches of Yangtze River region

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标的建议》明确提出“增强城市防洪排涝能力,建设韧性城市”。一方面,受极端天气影响,中国面临着越来越多的自然灾害问题,洪涝灾害已经成为发生频率最高的自然灾害^[1];另一方面,随着中国城市化、工业化进程的不断推进,洪涝灾害造成的直接经济损失呈现出增加趋势,与社会经济因素的关系更为紧密和复杂^[2]。因此,如何增强洪涝灾害韧性,提高防洪减灾成效已经成为实现中国可持续发展的重要战略任务。

韧性(resilience)源于物理学,是指物体承受外力冲击后发生形变但不断裂的性能^[3]。加拿大生态学家^[4]最早将韧性概念引入灾害学进行研究,丰富了研究的内容和范式,促进灾害研究从脆弱性、稳健性到韧性的改变。联合国国际减灾战略认为,洪涝灾害韧性是暴露于风险中的系统、社区或社会通过有效方式对洪灾风险抵抗、吸收、适应的能力,以保持其基本结构和功能^[5]。现有洪涝灾害韧性研究主要侧重于灾害韧性的机制过程^[6-7]、韧性水平测度^[8-9]和灾害治理等^[10-11]方面。其中,洪涝灾害韧性水平测度多采用综合指标法,可分为定性和定量分析两类。问卷调查^[12]和专家评判^[13]是洪涝灾害韧性定性分析研究的主要方式,但在研究结果上存在较主观、说服力不强等不足^[14]。相较于定性分析,定量分析方法因其科学性、直观性、易操作性等优势而广泛运用于洪涝灾害韧性研究。定量分析研究上,国内外学者尚未形成统一的衡量标准。从洪涝灾害全过程角度进行探究,学者们多采用“三维”视角,如“抵抗力—恢复力—适应力”^[15]、“驱动力—状态—响应”^[16]和“压力—状态—响应”等^[17]均是常见的综合评价体系维

度。从洪涝灾害承灾体角度进行研究,学者们更倾向于建立多元化的洪涝灾害韧性综合评价体系。李德智、Chen^[18-19]从“四维”的“社会—经济—环境—基础设施”角度进行探究;Cutter^[20]从社会、经济、社区、制度、基础设施、生态等层面“多维”的建立洪涝灾害韧性评价指标体系。

长江中游地区作为中国重要的商品粮基地和农业生产基地^[21],受亚热带季风气候影响,每年夏季都会遭受不同程度的暴雨洪水威胁,同时,区域为南北支流交汇聚集地带,当径流量突增,在低洼处集聚,会进一步加剧洪涝灾害发生的风险。从《中国水旱灾害公报》统计可知,2012—2022年长江中游地区洪涝灾害年均受灾人口达到1 923.47万人次,年均直接经济损失高达410.55亿元,洪涝灾害已经成为该区域破坏能力最强的自然灾害。从现有长江流域洪涝灾害韧性定量分析研究来看,学者们多采用熵权法进行指标赋权,无法表达各指标间的关联程度和重要程度。同时,少有学者对区域洪涝灾害韧性的时空分异及其影响因素进行研究,未进一步分析其关联性的驱动因素^[22]。因此,本研究采用的CRITIC-熵权组合赋权法更能客观、全面地反映指标的综合权重,并结合利用地理探测器等方法,探测区域洪涝灾害韧性水平空间分异的驱动因素变化,为提高区域洪涝灾害韧性,增强抵御灾害的能力,减少灾害损失,促进可持续发展提供科学理论支持。

1 研究区概况

长江中游地区位于中国中部,由湖北省17个市州,湖南省14个市州,江西省11个城市,共计42个市州组成,总面积达 $5.65 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。区域作为连接中国

南北、东西城市的枢纽地区和长江经济带的重要组成部分,在全方位深化改革开放、推进新型城镇化建设、实施中部崛起战略中发挥着重要作用。长江中游地区位于中国亚热带季风气候区,夏季降水集中,地形以平原、低山丘陵为主,南北支流汇入多,径流量剧增进一步加大洪涝灾害发生的风险。加之人类活动和城镇化、工业化的不断推进,下垫面性质发生显著变化,使得该区域洪涝灾害频发,洪涝灾害损失日趋严重。

2 评价数据与方法

2.1 评价指标体系构建

城市洪涝灾害韧性是一种多维度、跨时期的综合能力体现,其韧性水平主要取决于城市经济结构、社会结构、基础设施结构以及所处的自然环境结构^[23]。本研究基于现有长江流域洪涝灾害韧性研究^[24-25],结合城市洪涝灾害应急管理全过程,综合考虑各指标代表性、科学性、可获取性,从社会韧性、经济韧性、基础设施韧性和环境韧性4个子系统确定评价指标20个。

社会韧性表现为社会结构在遭遇洪涝灾害冲击和破坏时,能够继续维系社会结构恢复和发展的能力,从而使其不被解组和崩溃。失业率可以从区域就业状况反映出城市应对洪涝灾害时的稳定性,失业率上升会导致社会矛盾加剧,引发一系列社会问题。例如,导致区域人口外流,经济活力不足,社会保障压力增大等问题,影响灾后重建工作的顺利进行。人口密度体现为区域人群的集聚程度,人口密度较大的区域,通常面临着社会问题复杂,基础设施负担重,就业压力大,环境污染严重等现象,洪涝灾害所造成的灾害损失就越大。最低生活保障人数是区域社会保障能力的体现,通常情况下社会发展水平越高的区域,越能有效覆盖需要帮助的群体,社会生活保障人数少。公共预算支出包含政府机构正常运转支出、公共安全支出、社会保障与就业支出、卫生健康支出等方面,表现为政府财政政策对区域社会发展的支持力度,是区域洪涝灾害社会韧性的重要方面。

经济韧性能直观反映出区域在遭受洪涝灾害全过程时的经济稳定能力、恢复能力与经济实力。人均GDP是衡量区域经济发展水平和居民生活水平的重要指标,通常情况下区域经济发展水平和居民生活水平的提高往往伴随着防灾减灾能力的增强,在灾害全过程中发挥着关键作用。第三产业比重从产业结构方面反映出区域经济的稳定性,稳定的区域

经济有助于提升区域经济实力、发挥环境优势、灾后恢复重建。规模以上工业企业拥有完善的生产链、雄厚的资金力量,体现出区域发展的经济实力,在受灾后能迅速恢复生产工作,可有效带动经济增长,增加区域财政收入。进出口总额是区域对外贸易总体规模的体现,在发生洪涝灾害时可通过对外贸易缓解经济压力、恢复区域经济。

基础设施韧性主要表现在区域的工程建设方面,如医疗系统、交通运输、排洪泄洪等设施,包含应对、抵御灾害,以及灾害发生后及时恢复城市基础设施功能的能力。医院床位数量主要通过洪涝灾害发生后接收伤病人员、防止疾病传播等方面体现区域医疗保障能力。基础设施投资金额可以反映出洪涝灾害发生前后,区域居民的生活质量、公共服务水平、工程设施的防灾减灾抗灾能力等,是评价区域洪涝灾害韧性的重要指标。年末公路通车里程表现为区域在洪涝灾害全过程,路网资源配置,救援物资流通,受灾群众转移,供应链稳定等方面的运输能力。排水管道能有效收集、排放雨水和生活污水,防止城市内涝现象发生,采用排水管道密度表示区域排水管道的集水、排水能力。水库可通过蓄水、调节水流量等方式,降低洪水对下游地区的影响,能有效减少洪涝灾害发生,采用大中型水库数量表征区域对洪水的积蓄、调节能力。

环境韧性映射为城市生态环境系统在应对洪涝灾害冲击时,对洪涝灾害的抵御、缓解以及维护城市环境品质的能力。绿地可以调节气候、保持水土,具有重要的生态功能,对洪涝灾害具有缓冲、分解作用,采用绿地覆盖率表示区域绿地覆盖情况。通常情况下,坡度越小,高程越低的区域越容易积蓄降雨,引起水位增长,造成洪涝灾害;反之,洪涝灾害发生频率更低,因此坡度和高程也是洪涝灾害韧性的重要评价指标。河网河道可以有效蓄水,调节、分散地表径流,有效防止洪涝灾害发生,采用河网密度表现区域河网蓄水能力。地形起伏大的地区地表径流流速快,不利于积蓄降水,能有效减少洪涝灾害发生频率,通过计算区域地形起伏度表征区域地形起伏状况。高强度的连续降水是洪涝灾害形成的主要原因,且区域降水量表现出明显的空间差异性,因此选取月最大降水量表示区域连续降水情况。

2.2 数据来源与预处理

2.2.1 数据来源 所用行政区划数据来源于国家1:25万基础地理信息数据库。社会经济数据来源于2012—2023年长江中游各市州统计年鉴、各市州国民经济与社会发展统计公报、《中国城市统计年鉴》,

个别缺失数据采用线性插值方法补齐^[26]。大中型水库数据来源于 2012—2022 年各市州水资源公报。区域水土流失面积来源于 2012—2022 年各市州水土保持公报。月最大降水量数据来源于国家气象信息中心。DEM 地形数据来源于 GEBCO 组织的 DEM 栅格数据,精度 30 m;坡度、高程和地形起伏度等数据均通过 ArcGIS 10.6 软件提取 DEM 数据获得。河网密度数据来源于国家地球系统科学数据中心。

2.2.2 数据处理 由于长江中游地区洪涝灾害韧性各指标数据类型、单位数量级等存在差异,不具备可比性,因此选择极差法^[27]对各个指标进行无量纲标准化处理,使各指标数据取值范围为[0,1],具备可比性。正、负向指标标准化计算公式为:

$$\text{正向指标: } X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X'_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (2)$$

式中: X'_{ij} 为第*i*个地区第*j*项指标的标准化处理结果; X_{ij} , $\max X_{ij}$, $\min X_{ij}$ 分别为*i*个地区第*j*项指标的原始值、最大值和最小值。

2.3 评价方法

2.3.1 CRITIC-熵权组合赋权法 熵权法是一种基于信息论的赋权方法。它通过计算熵值来判断数据的随机性及无序程度,以此得出指标间的离散程度^[28],但它无法得到指标的相关程度。CRITIC法兼顾考虑指标间的对比强度和冲突性,并由此综合确定指标的客观权重,可以有效地弥补熵权法的不足,但它不能计算指标间的离散性。因此,采取 CRITIC-熵权组合赋权法的形式,计算长江中游地区洪涝灾害韧性各指标权重(表 1),具体步骤为:

(1) CRITIC 赋权法权重计算公式:

$$W_j^{(1)} = \frac{\sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})}{\sum_{j=1}^n \left[\sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \right]} \quad (3)$$

式中: $W_j^{(1)}$ 为 CRITIC 法求得第*j*项的权重; r_{ij} 为指标*i*与指标*j*之间的相关系数; δ 为指标*j*的标准差。

(2) 熵权法权重计算公式:

$$P_{ij} = \frac{1 + X'_{ij}}{\sum_{j=1}^n 1 + X'_{ij}} \quad (4)$$

$$e_j = \frac{1}{\ln n} \left(\sum_i P_{ij} \ln P_{ij} \right) \quad (5)$$

$$W_j^{(2)} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (6)$$

式中: n 为样本数量; P_{ij} 为第*i*个样本在第*j*个指标上的比重; e_j 为第*j*项指标的信息熵,信息熵越小,说明该指标的离散程度越大,提供的信息量越多,反之,该指标的离散程度越小,提供的信息量越少; $W_j^{(2)}$ 为熵权法求得的第*j*项指标权重。

(3) 假设两种赋权法具有相等地位,并能实现客观赋权法之间的优势互补,得到 CRITIC-熵权组合赋权法计算公式

$$W_j = \frac{W_j^{(1)} + W_j^{(2)}}{2} \quad (7)$$

式中: W_j 表示为 CRITIC-熵权组合赋权法求得的第*j*个指标权重。

2.3.2 洪涝灾害韧性指数 本研究中洪涝灾害韧性指数是基于长江中游地区面向洪涝灾害时,城市的社会、经济、基础设施和环境 4 个维度的综合函数。需根据 CRITIC-熵权组合赋权法对各指标进行赋权后,计算得到长江中游地区洪涝灾害韧性指数 U_R ,计算公式为:

$$U_R = \sum_{j=1}^n X'_{ij} \cdot W_j \quad (8)$$

式中: U_R 为长江中游地区洪涝灾害韧性; X'_{ij} 为第*i*个地区第*j*项指标的标准化处理结果; W_j 为第*j*项指标权重。

2.3.3 地理探测器 地理探测器是中国科学院王劲峰等^[29]提出的一种计算模型,能够解释某一现象的空间分异性并分析其内部驱动因素。文章采用因子探测器和交互作用探测器两种模块,因子探测器模块用于分析单因子对洪涝灾害韧性空间分异的影响力,值越大则表示影响力越大;交互作用探测器则用于判断两个因子共同作用下对 Y 值,即洪涝灾害韧性指数的解释力。洪涝灾害韧性系统中各子系统是相互作用,相互影响的,通过交互因子探测,可以进一步挖掘长江中游城市韧性空间分异背后的机理,两个因子交互作用存在 5 种类型,即非线性减弱,单因子非线性减弱,相互独立,非线性增强,双因子增强。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^w H_i \cdot B_i^2}{H \cdot B^2} \quad (9)$$

式中: q 为自变量 X 对城市洪涝灾害韧性 Y 的解释力,取值区间为[0,1], q 值越大,影响因子对城市洪涝灾害的影响就越大; H 为 ArcGIS 所提取的样本量总数; w 为自变量 X 的分类个数; B^2 为城市洪涝灾害韧性在整个区域内的离散方差; H_i 为自变量第*i*层的样本总数; B_i^2 为城市洪涝灾害韧性第*i*层的离散方差。

表1 长江中游地区洪涝灾害韧性评价指标体系及权重

Table 1 Evaluation index system and weights for flood resilience in middle reaches of Yangtze River

| 目标层 | 准则层 | 指标层 | 属性 | 熵权法权重 | CRITIC 法权重 | 组合权重 |
|-----------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|---------|------------|---------|
| 洪涝灾害韧性 | 社会韧性 (0.287 8) | 失业率/% | 负 | 0.004 3 | 0.053 4 | 0.028 9 |
| | | 人口密度/(人·km ⁻²) | 负 | 0.005 6 | 0.082 3 | 0.043 9 |
| | | 最低生活保障人数/万人 | 负 | 0.000 3 | 0.024 9 | 0.012 6 |
| | | 公共预算支出/亿元 | 正 | 0.390 2 | 0.014 5 | 0.202 4 |
| | 经济韧性 (0.150 7) | 人均GDP/元 | 正 | 0.016 1 | 0.057 8 | 0.036 9 |
| | | 第三产业比重/% | 正 | 0.010 0 | 0.053 4 | 0.031 7 |
| | | 规模以上工业企业数/座 | 正 | 0.014 9 | 0.052 7 | 0.033 8 |
| | | 进出口总额/亿元 | 正 | 0.059 8 | 0.036 7 | 0.048 3 |
| | 基础设施韧性 (0.270 6) | 医院床位数量/万张 | 正 | 0.016 9 | 0.047 1 | 0.032 0 |
| | | 基础设施投资金额/亿元 | 正 | 0.253 8 | 0.014 3 | 0.134 1 |
| | | 年末公路通车里程/km | 正 | 0.015 1 | 0.059 8 | 0.037 4 |
| | | 排水管道密度/(km·km ⁻²) | 正 | 0.007 4 | 0.035 6 | 0.021 5 |
| | 环境韧性 (0.290 9) | 大中型水库数量/座 | 正 | 0.020 2 | 0.071 1 | 0.045 6 |
| | | 月最大降水量/mm | 负 | 0.002 9 | 0.055 6 | 0.029 3 |
| | | 水土流失面积/km ² | 负 | 0.004 2 | 0.076 4 | 0.040 3 |
| | | 绿地覆盖率/% | 正 | 0.099 3 | 0.014 7 | 0.057 0 |
| | | 坡度/(°) | 正 | 0.020 0 | 0.059 5 | 0.039 7 |
| 高程/m | | 正 | 0.034 7 | 0.056 8 | 0.045 7 | |
| 河网密度/(km·km ⁻²) | | 正 | 0.014 6 | 0.062 6 | 0.038 6 | |
| | | 地形起伏度/m | 正 | 0.009 9 | 0.070 8 | 0.040 3 |

3 结果与分析

3.1 长江中游地区洪涝灾害韧性时空演变特征

3.1.1 时间序列演变特征 由CRITIC-熵权组合赋权法计算得出长江中游地区洪涝灾害韧性(表2)。由表2可知,2012—2022年长江中游地区洪涝灾害韧性均值从0.209 1波动上增长至0.262 9,仅在2020年受新冠肺炎疫情影响出现小幅度下降。区域整体洪涝灾害韧性水平较低,呈现缓慢增长趋势,仍有较大的提升空间,表现出在应对洪涝灾害侵袭时,恢复正常生产生活状态能力逐渐增强。结构上看,社会韧性指数由2012年的0.054 9增长至2022年的0.057 3,增长率为4.37%;2012和2022年分别占总韧性的26.15%和22.32%;经济韧性均值由2012年的0.021 5增长至2022年的0.053 4,增长率为149.37%,2012和2022年分别占总韧性的10.23%和20.32%;基础设施韧性均值由2012年的0.034 5增长至2022年的0.047 9,增长率为38.84%,2012和2022年分别占总韧性的16.46%和18.21%;环境韧性均值由2012年的0.098 9增长至2022年的0.102 9;增长率分别为4.04%,2012年、2022年分别占总韧性的47.16%和39.15%。表明长江中游地区洪涝灾害韧性结构已经

从“环境—社会—基础设施—经济”演变成为“环境—社会—经济—基础设施”,且经济韧性比重增长迅速,呈现即将超越社会韧性趋势,对洪涝灾害韧性影响力逐渐增强。

3.1.2 空间演变特征 由图1可以看出,空间上,2012—2022年长江中游地区洪涝灾害韧性增长类型主要可以划分为两类,即波动增长型和持续增长型。波动增长性地区比例95.24%,持续增长型地区仅有2个,即赣州市和吉安市,比例为4.76%。长江中游地区内部洪涝灾害韧性表现出显著的空间分异,2012年洪涝灾害韧性以中韧性占绝对优势,比例为80.95%,集中分布在江西省、湖南省(除长沙市)、鄂中、鄂东地区;中高韧性地区比例16.67%,分布于鄂西山区、武汉市和长沙市;仅天门市表现为中低韧性。此后中低韧性城市消失,中高韧性城市逐渐增加。2014和2016年中高韧性地区比例分别为21.43%和28.57%,集中分布于鄂西、鄂东、湘西地区;其余地区洪涝灾害韧性均表现为中韧性。2018年,出现3个高韧性城市,即长沙市、武汉市和十堰市,洪涝灾害韧性分别为0.336 5,0.329 0,0.324 2。至2020年,十堰市和长沙市因失业率增长,人口密度增大、降水量增加等因素影响,衰退为中高韧性城

市。高韧性城市数量减少至 2 个,分别为武汉市和宜昌市,洪涝灾害韧性分别 0.331 8 和 0.323 5,表现出在应对洪涝灾害时,有更强大的资源调配能力、经济周转能力、社会救援能力。

2022 年区域洪涝灾害中高韧性地区数量激增,比例为 57.14%,集中连片分布在江西省、洞庭湖区、鄂

西山区;高韧性城市增长至 4 个,分别为长沙市、武汉市、宜昌市和襄阳市,洪涝灾害韧性分别为 0.366 2, 0.357 3, 0.344 1 和 0.323 4,表明在社会保障投入、经济高质量发展、创业就业和交通运输建设等方面取得了重大进展,区域预防、抵御洪涝灾害、恢复城市正常功能的能力逐渐增强。

表 2 长江中游地区 2012—2022 年洪涝灾害韧性

Table 2 Flood disaster resilience in middle reaches of Yangtze River from 2012 to 2022

| 年份 | 洪涝灾害韧性 | 社会韧性 | | 经济韧性 | | 基础设施韧性 | | 环境韧性 | |
|------|---------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | | 指数 | 比重/% | 指数 | 比重/% | 指数 | 比重/% | 指数 | 比重/% |
| 2012 | 0.209 1 | 0.054 9 | 26.15 | 0.021 5 | 10.23 | 0.034 5 | 16.46 | 0.098 9 | 47.16 |
| 2013 | 0.215 7 | 0.055 5 | 25.71 | 0.025 0 | 11.59 | 0.035 5 | 16.45 | 0.099 7 | 46.25 |
| 2014 | 0.218 0 | 0.056 4 | 25.88 | 0.026 5 | 12.16 | 0.036 5 | 16.74 | 0.098 6 | 45.22 |
| 2015 | 0.222 8 | 0.058 2 | 26.12 | 0.030 1 | 13.51 | 0.037 8 | 16.96 | 0.096 7 | 43.41 |
| 2016 | 0.229 2 | 0.063 1 | 27.53 | 0.032 2 | 14.05 | 0.038 7 | 16.90 | 0.095 2 | 41.52 |
| 2017 | 0.230 2 | 0.058 4 | 25.38 | 0.035 9 | 15.58 | 0.040 7 | 17.67 | 0.095 2 | 41.37 |
| 2018 | 0.245 2 | 0.060 5 | 24.65 | 0.039 5 | 16.11 | 0.041 9 | 17.09 | 0.103 3 | 42.15 |
| 2019 | 0.246 8 | 0.060 4 | 24.46 | 0.043 0 | 17.42 | 0.044 0 | 17.84 | 0.099 4 | 40.28 |
| 2020 | 0.241 6 | 0.057 3 | 23.74 | 0.046 1 | 19.08 | 0.045 0 | 18.63 | 0.093 1 | 38.55 |
| 2021 | 0.254 8 | 0.059 9 | 23.53 | 0.049 1 | 19.25 | 0.049 8 | 19.56 | 0.095 9 | 37.66 |
| 2022 | 0.262 9 | 0.058 7 | 22.32 | 0.053 4 | 20.32 | 0.047 9 | 18.21 | 0.102 9 | 39.15 |

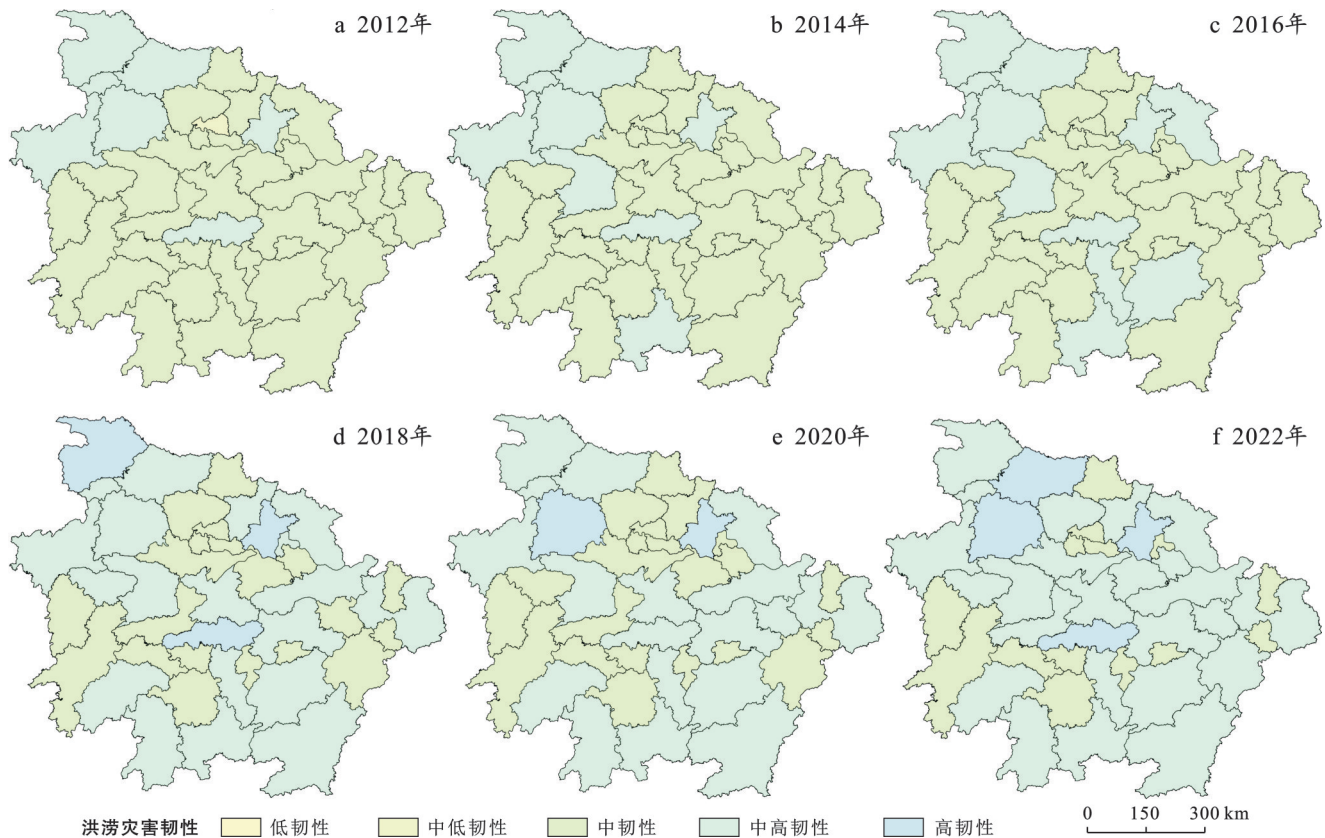


图 1 长江中游地区洪涝灾害韧性时空分布

Fig.1 Spatial and temporal distribution of flood resilience in middle reaches of Yangtze River

对洪涝灾害韧性4个子维度的空间演变过程进行探究,同样表现出明显的空间差异。社会韧性维度(图2),研究期间,区域内部社会韧性差异逐渐缩小,至2022年,以中高韧性区域所占比重较大,为83.33%,连片分布于湖北省、江西省和湖南省东部地

区。受高失业率和人口密度影响,怀化市社会韧性一直处于中低韧性状态。此外,仍有10个高社会韧性地区衰退至中高韧性或中韧性,分析其主要原因是失业率增长和人口密度剧增导致人口、财产的高度集中,洪涝灾害造成的损失增加,社会韧性降低。

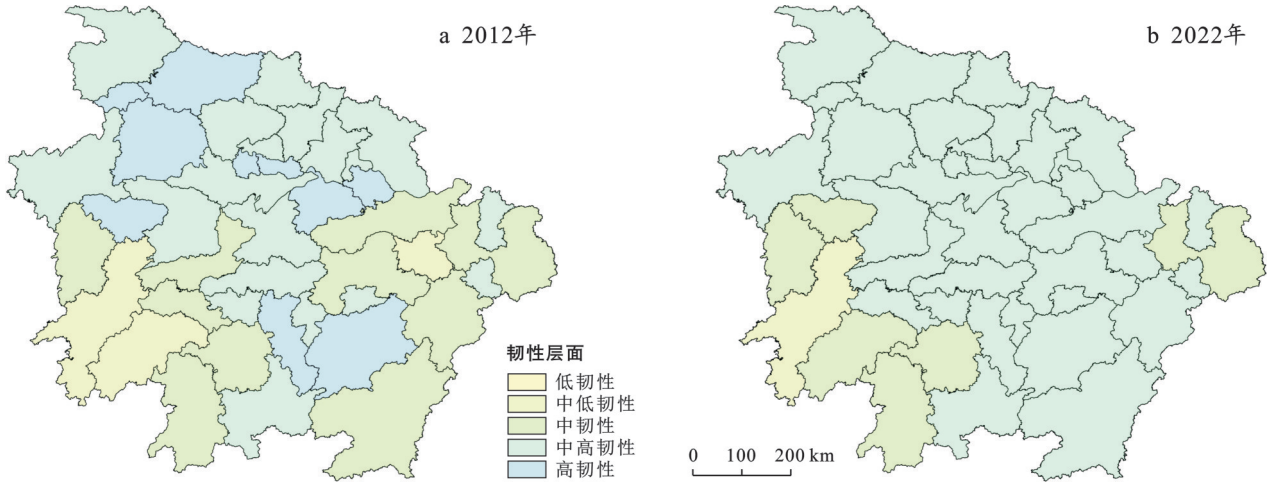


图2 长江中游地区社会韧性维度时空分布

Fig.2 Spatial and temporal distribution of social resilience dimensions in middle reaches of Yangtze River

研究期间,经济韧性维度(图3),仅有恩施土家族苗族自治州与湘西土家族苗族自治州经济韧性保持为低韧性,其余市州经济韧性都呈上升趋势,其中,武汉市和长沙市在2022年成为区域经济高韧性城市,表现出核心城市的经济发展潜能大。2012年

区域经济韧性以低韧性城市为主,比例90.48%,至2022年以中低韧性城市为主,比例76.19%。江西省北部地区经济韧性增长速度更快,形成以南昌为核心的都市圈,区际经济联系更加密切,经济辐射、带动能力更强。

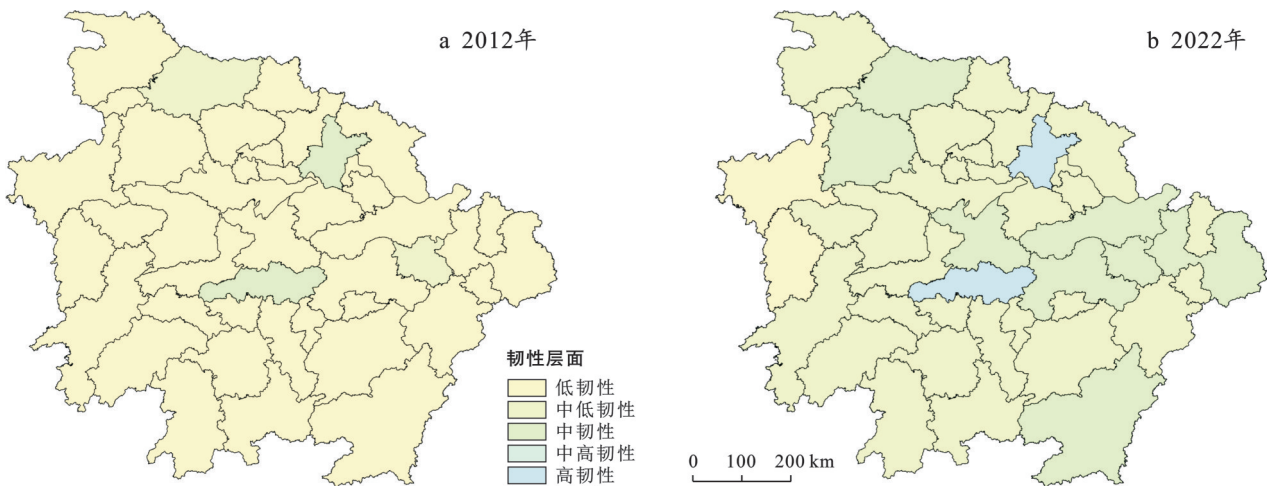


图3 长江中游地区经济韧性维度时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of economic resilience in middle reaches of Yangtze River

基础设施韧性维度(图4),2012—2022年长江中游地区25个市州基础设施韧性等级提升,比例59.52%,主要分布在江西省、鄂西南、鄂北、湘西、湘南地区。其中襄阳市增速最快,由2012年的0.0546增长至2022年的0.0930,增长率为70.27%。其余17个市州基础设施韧性等级不变,比例40.48%,主要分

布在鄂西北地区、江汉平原、长沙盆地。环境韧性维度(图5),2012—2022年长江中游地区环境韧性以中韧性城市为主,比例为80.95%,其中西北地区环境韧性优于区域其他地区,表现为地形起伏度较大,绿地覆盖率高的特征,能够有效分解、吸收暴雨天气引起的地表径流突增,减少洪涝灾害

发生频率。区域内部仅十堰市、鄂州市、湘潭市、新余市 4 个城市环境韧性等级提升, 主要因为水土流

失面积不断减少、绿地面积不断增长, 能有效缓解集中降雨带来的地表水下渗压力。

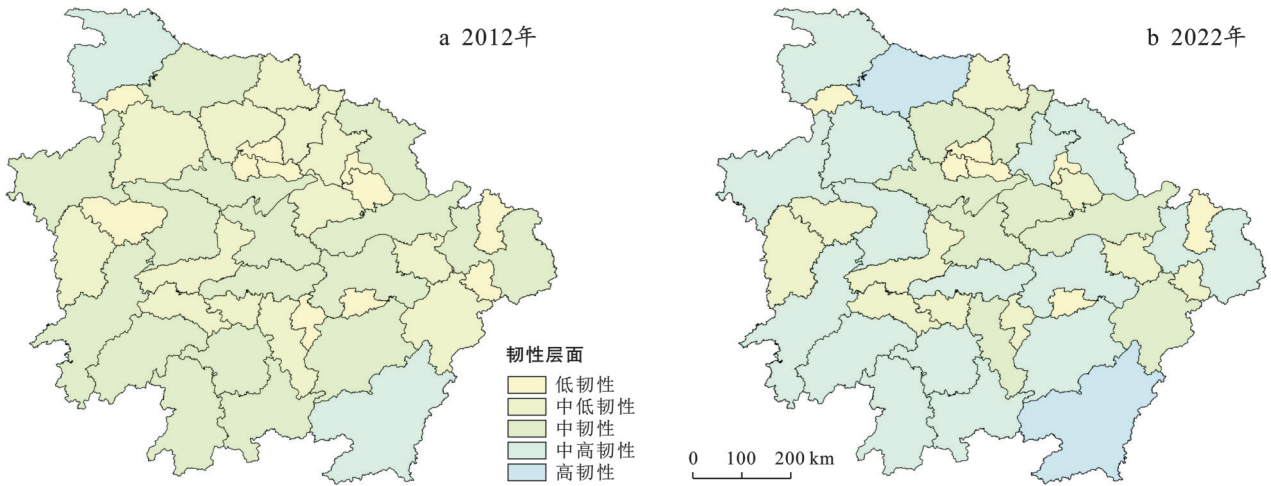


图 4 长江中游地区基础设施韧性维度时空分布

Fig.4 Spatial and temporal distribution of infrastructure resilience dimensions in middle reaches of Yangtze River

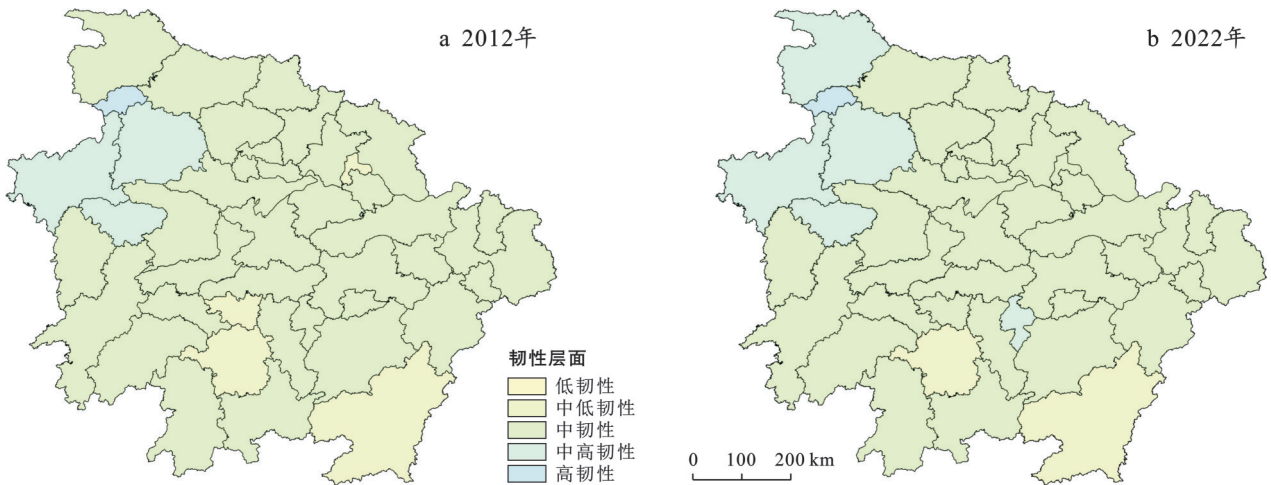


图 5 长江中游地区环境韧性维度时空分布

Fig.5 Spatial and temporal distribution of environmental resilience dimensions in middle reaches of Yangtze River

3.2 长江中游地区洪涝灾害韧性空间分异驱动因素分析

3.2.1 因子探测结果 采用地理探测器中因子探测模块分析 2012 和 2022 年各驱动因子对长江中游地区洪涝灾害韧性空间分异的影响力(表 3)。整体来看, 20 个影响洪涝灾害韧性空间分异的驱动因子均呈显著性水平, 2012 年引起长江中游地区洪涝灾害韧性空间分异的主要驱动因素是人口密度、地形起伏度和坡度等; 至 2022 年空间分异主要驱动因素转变成为最低生活保障人数、规模以上工业企业数量和年末公路通车里程。①人口密度作为负向影响因素, 其影响力可贯穿灾前、灾中、灾后全过程。洪涝灾害发生前人口密度主要是通过加快城镇化水平、破坏区域环境等层面影响韧性指数; 灾害发生时人

口密度主要通过影响救灾救援难度、增加生命财产损失等方面影响韧性指数; 灾害发生后人口密度则会通过增大社会保障难度、增加城市医疗卫生、交通运输等层面的压力来影响洪涝灾害韧性, 因此成为 2012 年洪涝灾害韧性空间分异的主要影响因素。②地形起伏度和坡度会直接影响洪涝灾害的发生频率, 一方面, 地形起伏度和坡度越大的区域, 越难进行生产活动, 主要的土地利用形式为林地, 可以有效地阻止洪涝灾害发生; 另一方面, 地形起伏度和坡度越大, 地表径流流速越快, 不利于雨水蓄积, 发生洪涝灾害的可能性较小, 洪涝灾害韧性提升。③最低生活保障人数是区域社会保障能力的重要体现, 在洪涝灾害发生后, 最低生活保障制度起着兜底作用。洪涝灾害发生后, 受灾地区会面临财产损失与收入

减少,此时政府会实施救援为受灾群体提供更多的经济支持和就业保障,维护区域安定,帮助受灾群众回归正常生产生活。④规模越大、产业链越完善的企业具有更强的抗灾能力和恢复能力,因此,区域内规模以上工业企业数量越多,区域经济实力越稳定、经济恢复能力越强,洪涝灾害韧性越高。⑤随着年末公路通车里程的增加,交通网络韧性也会逐步提升,有助于疏散受灾群众、运输救援物资,提高洪涝灾害应急救援效率,加快灾后重建速度。

3.2.2 交互因子探测结果 采用地理探测器的交互因子探测模块分析2012和2022年洪涝灾害韧性空间分异的双因子影响情况,结果主要分为双因子增强和非线性增强两类,这表明驱动因子两两交互后对洪涝灾害韧性空间分异的解释力均会提升,洪涝灾害韧性的空间分异性是多种因子共同作用的结果。

由图6可知,2012年主要影响洪涝灾害韧性空间分异的交互因子包括: X_2 人口密度 $\cap X_6$ 第三产业比重(影响力0.9889)、 X_1 失业率 $\cap X_{11}$ 年末公路通车里程(影响力0.9837)、 X_5 人均GDP $\cap X_{11}$ 年末公路通车里程(影响力0.9712)。多元化的经济活动、完善的区域经济结构有助于提高区域经济实力、稳定就业环境,同时为区域社会保障、基础设施建设、生态环境保护等提供资金、技术支持,进而影响洪涝灾害韧性空间分异。

表 3 长江中游地区洪涝灾害韧性因子探测(q)值
Table 3 Resilience factor value (q) of flood disaster in middle reaches of Yangtze River

| 驱动因子 | 2012年 | | 2022年 | |
|-------------------|--------|----|--------|----|
| | q值 | 排序 | q值 | 排序 |
| X_1 失业率 | 0.3035 | 11 | 0.3933 | 8 |
| X_2 人口密度 | 0.5732 | 1 | 0.2875 | 15 |
| X_3 最低生活保障人数 | 0.4361 | 4 | 0.5886 | 1 |
| X_4 公共预算支出 | 0.2499 | 15 | 0.4803 | 7 |
| X_5 人均GDP | 0.1765 | 20 | 0.4830 | 6 |
| X_6 第三产业比重 | 0.3844 | 5 | 0.0514 | 20 |
| X_7 规模以上工业企业数量 | 0.2491 | 16 | 0.5853 | 2 |
| X_8 进出口总额 | 0.3193 | 9 | 0.4864 | 5 |
| X_9 医院床位数量 | 0.3322 | 8 | 0.5198 | 4 |
| X_{10} 基础设施投资金额 | 0.2700 | 13 | 0.2893 | 13 |
| X_{11} 年末公路通车里程 | 0.2270 | 17 | 0.5525 | 3 |
| X_{12} 排水管道密度 | 0.1998 | 19 | 0.2146 | 17 |
| X_{13} 大中型水库数量 | 0.2793 | 12 | 0.2959 | 12 |
| X_{14} 月最大降水量 | 0.3658 | 6 | 0.2714 | 16 |
| X_{15} 水土流失面积 | 0.3134 | 10 | 0.2892 | 14 |
| X_{16} 绿地覆盖率 | 0.2590 | 14 | 0.2965 | 11 |
| X_{17} 坡度 | 0.5222 | 3 | 0.3515 | 9 |
| X_{18} 高程 | 0.2093 | 18 | 0.1506 | 19 |
| X_{19} 河网密度 | 0.3478 | 7 | 0.2073 | 18 |
| X_{20} 地形起伏度 | 0.5245 | 2 | 0.3247 | 10 |

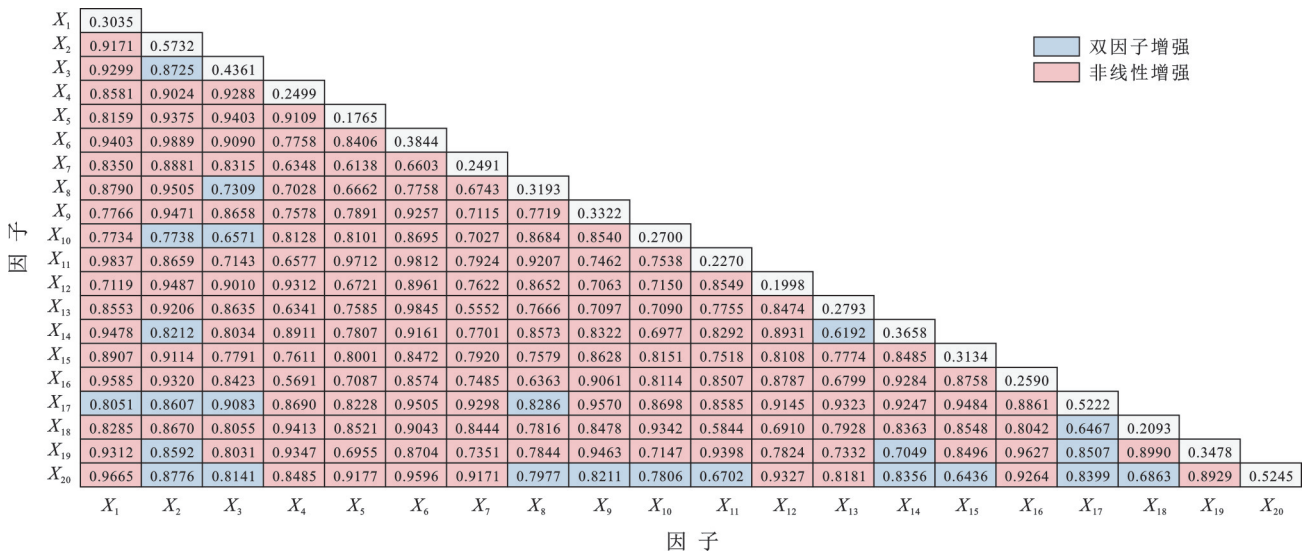


图 6 长江中游地区 2012 年洪涝灾害韧性空间分异驱动因子交互探测结果
Fig.6 Cross-detection results of spatial differentiation driving factors of flood disaster resilience in middle reaches of Yangtze River in 2012

由图7可以看出,2022年长江中游地区主要影响洪涝灾害韧性空间分异的交互因子转变成成为 X_5 人均GDP $\cap X_{11}$ 年末公路通车里程(影响力0.9780)、 X_6 第三产业比重 $\cap X_{11}$ 年末公路通车里程(影响力0.9714)、 X_{10} 基础设施投资金额 $\cap X_{12}$ 排水管道密度

(影响力0.9679)。经济、基础设施因子对洪涝灾害韧性空间分异的影响力逐渐增强,庞大的经济体量、稳定的经济结构对区域基础设施投资带来积极意义,两者相辅相成,与洪涝灾害韧性之间有显著的正向影响意义。

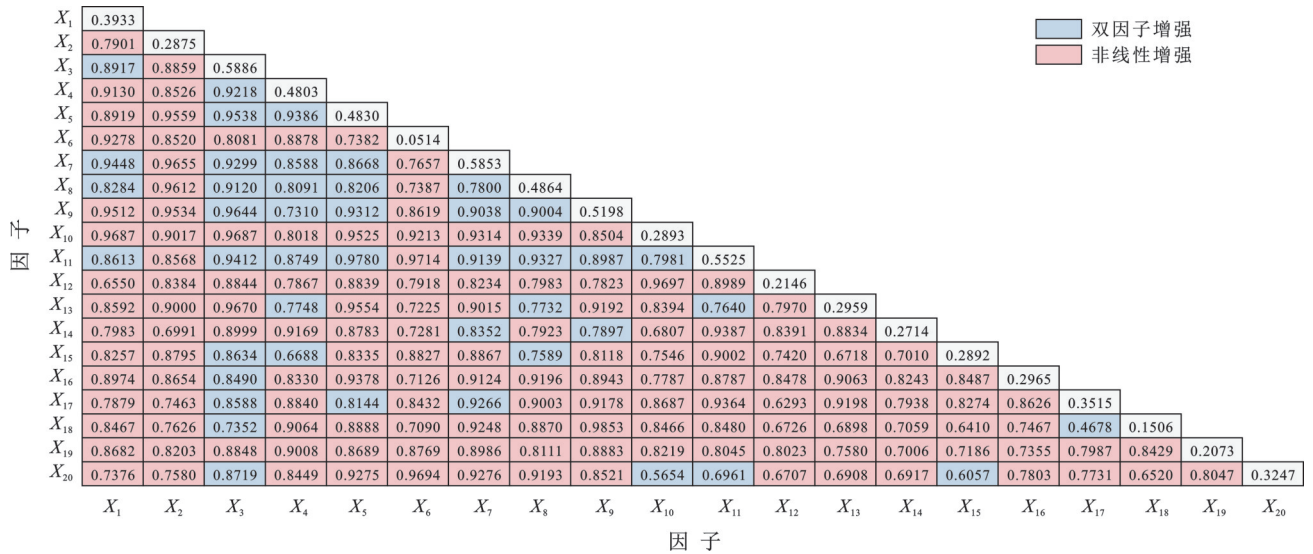


图 7 长江中游地区 2022 年洪涝灾害韧性空间分异驱动因子交互探测结果

Fig.7 Cross-detection results of spatial differentiation driving factors of flood disaster resilience in middle reaches of Yangtze River in 2022

4 讨论

通过对长江中游地区洪涝灾害韧性开展研究发现,区域洪涝灾害韧性整体呈缓慢增长趋势,仍有较大提升空间,这一发现与陈志鼎等^[30]对湖北省洪涝灾害韧性研究结果相吻合,均表现出人口密度、地势起伏度等是影响洪涝灾害韧性空间分异的主要影响因素。同时,受气候变化影响加剧洪涝灾害风险的不稳定性,给区域防洪减灾带来较大难度。因此,为提高长江中游地区洪涝灾害韧性,增强其抵御洪涝灾害能力,针对性地提出以下建议。

洪涝灾害韧性波动增长型区域,应加强对社会、经济、基础设施、环境等多方面因素的动态监测,对其不稳定因素进行风险隐患登记,并及时调整发展战略。①社会因素方面。应促进区域间建立利益共享机制,实现技术、人力、产业、物资等资源交流共享,分散单个城市人口压力,对已暴露于特定时空的受灾人群,也应通过手机、广播等应急预警通知等方式,提供迅速有效的防灾行动指南;提高区域多元化保障能力,不断完善最低生活保障制度,在提高失业保险覆盖率的同时,还需增加就业岗位,降低失业率;通过“评估—识别—排查—建设—再评估”形式加强对困难群体灾后建房、生活帮扶等工作的投资力度^[32],以提升区域社会保障能力与应急管理能力。②经济因素方面。在有效整合区域现有产业资源的基础上,延长产业链,增加产品附加值,优化其产业结构,扩大区域互贸互利能力,推动经济高质量发展;同时,还要发挥大规模工业企业的经济价值和社会效益,辐射带动周边城镇经济,促进中小企业发

展,扩大区域经济规模,提高经济体系的抗灾能力。③基础设施方面。应做到预防为主,防救协同,推动防灾减灾救灾各环节同频运作、同步加固。因此,可系统化推进海绵城市建设,合理规划建设区域排水管道,实现雨污分流管网改造治理。加强水文监测与预报预警平台建设,开展市政、水利、医疗、交通、物流等城市基础设施安全隐患排查,加大基础设施投资力度^[33],提高区域抵御洪涝灾害能力。④环境因素方面。应完善自然灾害检测预警体系,密切关注天气形势,确保洪涝灾害预警的精准性、及时性;不断强化河湖水系综合治理与连通,提高其调蓄、抽排能力,加快其污染降解能力;重视环境保护,通过卫星遥感、无人机监测等技术对生态环境进行实时监测,并通过加强新生湿地培育和天然湿地保护力度、开展大规模植树造林,鼓励公众举报环境违法行为等形式减少区域水土流失面积,提升自然生态系统质量,减少区域洪涝灾害发生频率。

对于持续增长型区域,例如赣州市和吉安市,也应持续提升洪涝灾害韧性,总结其防洪减灾的成功经验,不断强化优势,并在区域内进行交流推广,以提升区域整体洪涝灾害韧性水平,缩小区域韧性差异。

由此可见,影响长江中游地区洪涝灾害韧性的因素众多,在本次研究中,指标选取主要基于数据的可用性和可获取性,未能涵盖所有影响因素,仍存在不足之处。此外,对区域洪涝灾害韧性研究仅落实在市州层面,未对不同地形地势等情况进行差异性研究,这些局限性表明未来研究需进一步探讨和深化。

5 结论

(1) 研究期间,长江中游地区洪涝灾害韧性呈波动增长趋势,由2012年的0.209 1波动增长至2022年的0.262 9,增长率25.73%,仅在2020年出现小幅度下降,降低为0.241 6。洪涝灾害韧性结构由“环境—社会—基础设施—经济”结构演变为“环境—社会—经济—基础设施”。

(2) 区域内部洪涝灾害韧性差异显著,韧性增长情况以波动增长为主,占95.24%,持续增长型城市仅有2个,分别为赣州市和吉安市。结构上,区域内部社会韧性差异逐渐缩小;经济韧性层面,除恩施州和湘西州外,其余地区均表现为韧性等级上升;25个市州在基础设施韧性层面表现出韧性等级提升;西北地区环境韧性优于其他地区,能有效减少洪涝灾害发生频率。

(3) 因子探测结果表明20个驱动因子均呈显著性水平,人口密度、地形起伏度、坡度、最低生活保障人数、规模以上工业企业数量和年末公路通车里程是引起区域洪涝灾害韧性空间分异的主要因素。交互因子对洪涝灾害韧性空间分异的解释力增强,表明洪涝灾害韧性受多重因素共同影响。

参考文献(References)

- [1] 张楚汉,王光谦,李铁键.变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议[J].中国科学院院刊,2022,37(8):1126-1131.
Zhang Chuhan, Wang Guangqian, Li Tiejian. Prevention countermeasures and suggestions for urban rainstorm disasters under changing environment [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022,37(8):1126-1131.
- [2] 李莹,赵姗姗.2001-2020年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J].气候变化研究进展,2022,18(2):154-165.
Li Ying, Zhao Shanshan. Floods losses and hazards in China from 2001 to 2020 [J]. Climate Change Research, 2022,18(2):154-165.
- [3] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4:1-23.
- [4] Abeyasinghe S, De Zoysa C J, Siriwardana C, et al. Integrating disaster resilience into green rating systems: A modification of the Sri Lankan green building rating tool [J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2023,12(4):765-786.
- [5] Natho S, Thielen A H. Implementation and adaptation of a macro-scale method to assess and monitor direct economic losses caused by natural hazards [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018,28:191-205.
- [6] 张金良,罗秋实,王冰洁,等.城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J].水资源保护,2024,40(1):6-15.
Zhang Jinliang, Luo Qiushi, Wang Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024,40(1):6-15.
- [7] Serre D, Barroca B, Balsells M, et al. Contributing to urban resilience to floods with neighbourhood design: The case of Am Sandtorkai/Dalmanckai in Hamburg [J]. Journal of Flood Risk Management, 2016,11:S69-S83.
- [8] 高玉琴,汪键,高见,等.基于组合赋权—云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J].水利水电科技进展,2024,44(2):22-29.
Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(2):22-29.
- [9] Ahmad D, Afzal M. Flood hazards and factors influencing household flood perception and mitigation strategies in Pakistan [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020,27(13):15375-15387.
- [10] 杨帆,许莹,段宁.城市洪涝韧性治理体系的智慧化转型与实现路径创新[J].城市发展研究,2021,28(5):119-126.
Yang Fan, Xu Ying, Duan Ning. Intelligent transformation and path innovation of urban flood resilience management system [J]. Urban Development Studies, 2021,28(5):119-126.
- [11] 陈文龙,徐宗学,张印,等.高密度城市暴雨洪涝治理理论框架及其应用研究[J].水利学报,2022,53(7):769-778.
Chen Wenlong, Xu Zongxue, Zhang Yin, et al. Theoretical framework and application of urban rainstorm flood control in high-density cities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(7):769-778.
- [12] Ghasemzadeh B, Zarabadi Z S S, Majedi H, et al. A framework for urban flood resilience assessment with emphasis on social, economic and institutional dimensions: A qualitative study [J]. Sustainability, 2021,13(14):7852.
- [13] 陈轶,刘涛,陈睿山,等.南京老旧小区居民洪涝韧性及影响因素:以鼓楼区为例[J].地域研究与开发,2020,39(4):67-72.
Chen Yi, Liu Tao, Chen Ruishan, et al. Influencing factors of flood resilience in urban old communities: Taking Gulou district of Nanjing City as an example [J]. Areal Research and Development, 2020,39(4):67-72.
- [14] 李梦杰,刘德林.河南省洪涝灾害的灾后恢复力研究[J].水土保持通报,2020,40(6):200-204.
Li Mengjie, Liu Delin. Resilience of He'nan Province

- after flood disasters [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6):200-204.
- [15] 孟晓静, 陈鑫, 陈佳静, 等. 组合赋权-TOPSIS在洪涝灾害下城市区域韧性评估中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(5):1465-1473.
Meng Xiaojing, Chen Xin, Chen Jiajing, et al. Application of combination weighting and TOPSIS in the assessment of urban regional resilience under flood disaster [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(5):1465-1473.
- [16] 孟晓静, 刘超, 曹莹雪, 等. 基于随机森林优化算法的城市群洪涝灾害韧性时空演变研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(4):784-791.
Meng Xiaojing, Liu Chao, Cao Yingxue, et al. Study on spatiotemporal evolution of flood disaster resilience in urban agglomeration based on random forest optimization algorithm [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(4):784-791.
- [17] Zhu Shiyao, Li Dezhi, Feng Haibo, et al. The influencing factors and mechanisms for urban flood resilience in China: From the perspective of social-economic-natural complex ecosystem [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147:109959.
- [18] 李德智, 聂晓, 朱诗尧, 等. 县城抗涝韧性的定量评价与时空演化研究: 以江苏省为例[J]. *灾害学*, 2023, 38(4):99-106.
Li Dezhi, Nie Xiao, Zhu Shiyao, et al. Quantitative evaluation and spatial-temporal evolution of county-level flood resilience: A case study of Jiangsu Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(4):99-106.
- [19] Chen Xiaobo, Guo Zupei, Zhou Hengyu, et al. Urban flood resilience assessment based on VIKOR-GRA: A case study in Chongqing, China [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(9):4178-4194.
- [20] Cutter S L, Burton C G, Emrich C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions [J]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7(1):1-22.
- [21] 王雪臣, 冷春香, 冯相昭, 等. 长江中游地区洪涝灾害风险分析[J]. *科技导报*, 2008, 26(2):61-66.
Wang Xuechen, Leng Chunxiang, Feng Xiangzhao, et al. Risk analysis of flood disaster in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(2):61-66.
- [22] 周铭毅, 尚志海, 蔡灼芬, 等. 基于VIKOR方法的广东省城市洪涝灾害韧性评估[J]. *灾害学*, 2023, 38(1):206-212.
Zhou Mingyi, Shang Zhihai, Cai Zhuofen, et al. Assessment of urban flood disaster resilience in Guangdong Province based on VIKOR method [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(1):206-212.
- [23] Abenayake C C, Mikami Y, Matsuda Y, et al. Ecosystem services-based composite indicator for assessing community resilience to floods [J]. *Environmental Development*, 2018, 27:34-46.
- [24] 贺山峰, 梁爽, 吴绍洪, 等. 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9):1988-1999.
He Shanfeng, Liang Shuang, Wu Shaohong, et al. Analysis on spatio-temporal evolution and relevance of urban flood disaster resilience in Yangtze River Delta [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9):1988-1999.
- [25] 嵇娟, 陈军飞, 丁童慧, 等. 长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系[J]. *生态学报*, 2024, 44(7):2772-2785.
Ji Juan, Chen Junfei, Ding Tonghui, et al. Coupling coordination between urban flood resilience and ecosystem services in the Yangtze River delta urban agglomerations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7):2772-2785.
- [26] 许兆丰, 田杰芳, 张靖. 防灾视角下城市韧性评价体系及优化策略[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(3):1-7.
Xu Zhaofeng, Tian Jiefang, Zhang Jing. Urban resilience evaluation system and optimization strategy from perspective of disaster prevention [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(3):1-7.
- [27] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method [J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(7):763-770.
- [28] 吴忠, 关娇, 何江. 最低工资标准测算实证研究: 基于CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J]. *当代经济科学*, 2019, 41(3):103-117.
Wu Zhong, Guan Jiao, He Jiang. An empirical study on the calculation of minimum wage standard: Dynamic combination calculation based on objective weight of CRITIC-entropy weight method [J]. *Modern Economic Science*, 2019, 41(3):103-117.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [30] 陈志鼎, 万山涛, 李小龙, 等. 湖北省城市洪涝灾害韧性时空演变及驱动因素分析[J]. *中国农村水利水电*, 2024(6):21-30.
Chen Zhiding, Wan Shantao, Li Xiaolong, et al. Analysis on spatiotemporal evolution and driving factors of urban flood disaster resilience in Hubei Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(6):21-30.