

# 长三角城市群洪涝韧性时空演化及影响因素

陈军飞<sup>1,2,3</sup>, 张玉琦<sup>1</sup>, 嵇娟<sup>1</sup>, 阎晓东<sup>1</sup>

(1. 河海大学商学院, 江苏南京 211100; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098;  
3. 河海大学江苏长江保护与高质量发展研究基地, 江苏南京 210098)

**摘要:**为加快长三角城市群韧性城市建设,助力区域一体化高质量发展,基于压力-状态-响应框架,利用2015—2021年长三角城市群面板数据,采用熵权-TOPSIS法、核密度估计法、空间马尔科夫链和地理探测器模型,分析了长三角城市群洪涝韧性时空演化规律及影响因素。结果表明:长三角城市群洪涝韧性呈波动式上升趋势,由2015年的0.393提升到2021年的0.441,但中低韧性城市比例较高;区域洪涝韧性发展不均衡,呈现以省会城市为中心的多中心态势,存在极化现象;城市洪涝韧性呈低韧性向高韧性转移的态势,高韧性城市维持自身状态概率较高且对周边城市表现出正向空间溢出效应;城市洪涝韧性的空间异质性是多因子综合作用的结果,因子间的交互作用具有双因子增强效应。

**关键词:**城市洪涝韧性;核密度估计;空间马尔科夫链;影响因素;长三角城市群

**中图分类号:**TU992;TU984.11+6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)06-0058-11

**Spatiotemporal evolution and influencing factors of flood resilience in Yangtze River Delta urban agglomeration//** CHEN Junfei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yuqi<sup>1</sup>, JI Juan<sup>1</sup>, YAN Xiaodong<sup>1</sup> (1. *Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China*; 2. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Jiangsu Research Base of Yangtze Institute for Conservation and High-quality Development, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** To accelerate the construction of resilient cities in the Yangtze River Delta urban agglomeration, with the goal of facilitating the integrated and high-quality development, this study used the panel data of the Yangtze River Delta urban agglomeration from 2015 to 2021 and adopted the entropy weight-TOPSIS method, kernel density estimation, spatial Markov chains, and geodetector model to explore the spatiotemporal evolution characteristics of flood resilience and the influencing factors of cities in the Yangtze River Delta based on the pressure-state-response framework. The results show that the flood resilience of the Yangtze River Delta urban agglomeration shows a fluctuating upward trend, with the data increasing from 0.393 in 2015 to 0.441 in 2021, but the proportion of cities in the state of medium and low resilience is high. The development of regional flood resilience is uneven, presenting a polycentric situation centered at the provincial capital city, with the occurrence of polarization phenomenon. Urban flood resilience is transferred from low resilience to high resilience, and high resilience cities demonstrate a high probability to maintain their own state and have a positive spatial spillover effect on neighboring cities. Spatial heterogeneity in urban flood resilience is the result of the combined effect of multiple factors, and the interaction between factors has a double factor enhancement effect.

**Key words:** urban flood resilience; kernel density estimation; spatial Markov chain; influencing factor; Yangtze River Delta urban agglomeration

全球气候变化引发了更多诸如暴雨、洪涝等自然灾害,冲击着城市的脆弱性,给世界各大城市造成了严重的社会经济损失<sup>[1-2]</sup>。2023年8月京津冀地区遭遇了罕见的持续暴雨,大量降雨导致河流水位

急剧上涨,引发了严重的洪灾以及土地滑坡、内涝等灾害,给城市安全和人民生活造成了巨大的威胁。京津冀暴雨事件再次敲响警钟,体现出建立韧性城市的重要性<sup>[3]</sup>。洪涝韧性指洪涝灾害背景下的城

**基金项目:**国家自然科学基金重大项目(19ZDA084);国家自然科学基金项目(42071278);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B240207033, B240207117)

**作者简介:**陈军飞(1973—),男,教授,博士,主要从事洪旱灾害风险管理研究。E-mail:chenjunfei@hhu.edu.cn

**通信作者:**张玉琦(1999—),女,硕士研究生,主要从事灾害风险管理研究。E-mail:zhangyuqi@hhu.edu.cn

市韧性,反映了城市抵御洪涝灾害并且从中恢复的能力<sup>[4]</sup>,其概念的提出为有效管控城市洪涝灾害、促进城市可持续发展提供了新的思路。2021年国务院办公厅《关于加强城市内涝治理的实施意见》提出要因地制宜建设韧性城市,增强城市的防洪排涝能力。可见,提高城市洪涝韧性是进行城市建设与风险管理的重要路径。

为缓解灾害不确定性和城市化发展对城市安全的影响,众多学者对城市洪涝韧性展开了研究。在框架构建方面,由于对韧性的理解不同,学者们进行城市洪涝韧性研究采用的理论框架与视角有很大差异。例如:刘钢等<sup>[5-7]</sup>基于压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)视角,对城市洪涝系统的压力、状态、响应过程进行分析,从刺激性、敏感性、适应性3个角度构建城市洪涝韧性评估体系;陈长坤等<sup>[8]</sup>基于城市的抵抗力、恢复力和适应力3个视角,构建了暴雨洪水环境下城市韧性评价指标体系;李德智等<sup>[9-10]</sup>基于城市洪涝韧性的鲁棒性、谋略性、及时性、冗余性量化了城市洪涝韧性;贺山峰等<sup>[11-16]</sup>从经济、社会、环境和基础设施维度构建了洪涝韧性评价指标体系。在韧性评估方面,常用的评估方法有综合指数法、GIS分析法、社会网络分析法、函数模型法、机器学习法等。例如:孟晓静等<sup>[17]</sup>利用组合赋权-TOPSIS法构建城市韧性评估模型,对西安市城市韧性进行了评估;李正兆等<sup>[18]</sup>运用地理信息系统与层次分析法评估了城市洪涝韧性;方东平等<sup>[19]</sup>绘制了可反映社区要素对自然灾害抵抗能力的城市韧性社区结构图,对自然灾害下社区韧性进行了评价;侯兰功等<sup>[20]</sup>借助网络分析工具,运用复杂网络理论对城市群网络韧性进行了分析;刘明阳等<sup>[21]</sup>利用可变模糊集理论构建了考虑内涝周期的城市内涝韧性评估模型;程朋根等<sup>[22-23]</sup>利用随机森林算法对洪涝相关指标数据进行了重要性测算,以此改进指标权重,构建评估模型;Sun等<sup>[24]</sup>优化了基于贝叶斯网络的隐马尔可夫模型,在没有训练集的情况下实现了洪水抗灾能力的准确评估;Liu等<sup>[25]</sup>运用支持向量机模型对区域洪涝灾害抗灾能力进行了测度。在影响因素方面,现有研究主要应用灰色关联度分析<sup>[26]</sup>、因子分析<sup>[27]</sup>、社会网络分析法<sup>[28]</sup>、地理加权回归<sup>[29]</sup>以及空间计量模型<sup>[30]</sup>等方法,根据因子的关联性或贡献度大小判断指标因素的影响力。

目前城市洪涝韧性相关研究主要聚焦于框架构建、定量评估和影响因素等方面。城市群在经济发

展、基础设施建设、政策制定等方面紧密联系、相互影响<sup>[31]</sup>,以城市群为主体,深入分析洪涝韧性的时空分布格局及演化规律,可以为挖掘区域薄弱环节,掌握区域发展动态提供有力的支撑,同时为实现城市协调发展,提升城市群整体防涝韧性能力提供决策参考。基于此,本文从城市群角度,基于PSR框架建立城市洪涝韧性评价体系,结合熵权-TOPSIS法对长江三角洲城市群(以下简称“长三角城市群”)2015—2021年城市洪涝韧性进行评估;利用核密度估计法、空间马尔科夫链分析长三角城市群洪涝韧性时空分布和动态演进趋势,并运用地理探测器模型识别城市洪涝韧性主要影响因素,以期为建设韧性城市、提高区域安全提供科学的理论依据。

## 1 研究区概况

长三角城市群包括上海、南京、苏州、杭州、宁波、合肥、芜湖等27个城市(图1),是我国最重要的两大经济交汇地带,其地理位置独特,社会经济发展迅速。据统计,长三角城市群的经济规模约占全国经济总量的1/4。长三角城市群为亚热带季风气候,部分城市年降水量大于2000 mm,是暴雨多发地区之一。2020年长三角地区汛期降雨集中,发生了严重洪涝灾害,造成江苏、安徽、浙江、上海共1188万人受灾,直接经济损失达271.9亿元。长三角城市群地处平原河网地区,河道比降小,易涝、易洪的特征比较明显。随着人类活动和城市化发展,该地区汛期发生洪涝灾害的风险攀升<sup>[32]</sup>。在全球气候变化、城镇化进程加快和经济社会快速发展的背景下,保障城市发展安全,提升长三角城市群洪涝韧性尤为重要和迫切<sup>[33]</sup>。

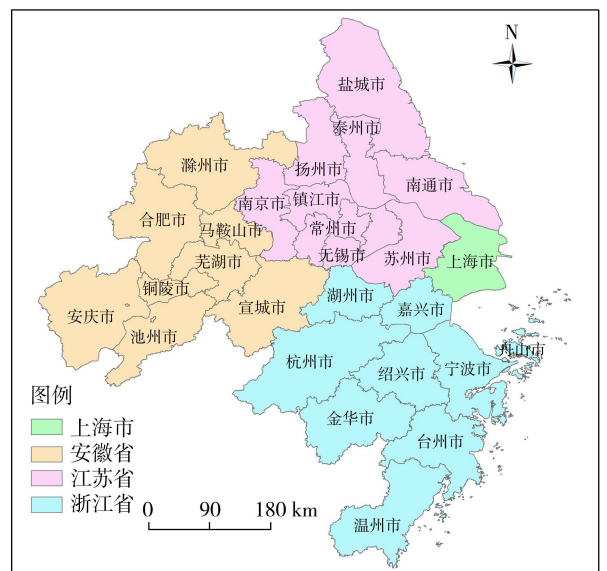


图1 研究区域  
Fig. 1 Study area

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标体系

以 PSR 框架为基础,参考现有研究<sup>[34-35]</sup>,构建长三角城市群洪涝韧性评价指标体系(图 2,图中加星号(\*)的为负向指标,其他均为正向指标,括号内数据为指标权重)。压力指城市系统所承受的压力,包括自然灾害等外在压力和由经济发展导致的内在压力,如年降水量、城市人口密度、14 岁以下和 65 岁以上人口占比以及政府公共安全支出。城市人口密度表示发生洪涝灾害时影响的人口数量;14 岁以下和 65 岁以上人口占比反映城市人口结构,表示易受灾人群的脆弱性压力。有研究表明,公共安全支出与社会稳定性存在协整关系,人口流动和其他社会不稳定因素会导致公共安全支出增加<sup>[36]</sup>,因此选取公共安全支出指标表示社会不稳定性。状态指研究期内城市经济环境、社会环境、生态环境等子系统呈现出的状态,主要包含建设现状和资源条件,其中,人均公园绿地面积和建成区绿化覆盖率反映城市对于降雨的涵养能力,人均道路面积、建成区面积率及排水管道密度反映城市基础设施建设对于暴雨的适应性<sup>[37]</sup>,固定资产投资额和城镇人均住房面积则反映城市经济和民生的稳定性。响应指政府和公众为提高城市韧性,推进城市可持续发展做出的努力,包括人均可支配收入等经济韧性响应能力、医疗卫生条件及舆情响应能力,反映洪涝灾害发生时迅速协调和规划应急资源<sup>[38]</sup>,采取措

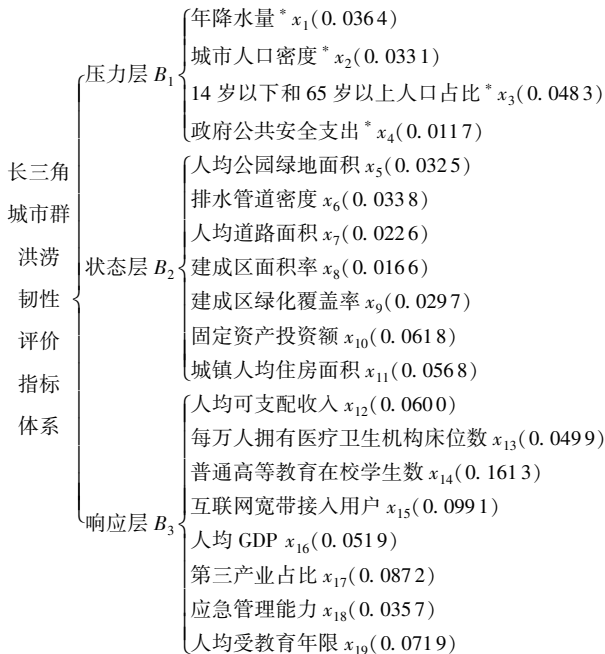


图 2 长三角城市群洪涝韧性评价指标体系

Fig. 2 Indicator system for flood resilience evaluation of Yangtze River Delta urban agglomeration

施保障城市安全和社会稳定,以及灾害后迅速恢复正常秩序,进一步提升城市洪涝韧性的能力。

根据构建的评价指标体系,基于数据可获得性,选取 2015—2021 年长三角城市群 27 个城市的 PSR 指标数据作为数据样本,研究数据主要来自《中国城市建设统计年鉴》、各省市统计年鉴和年度发展公报,部分缺失数据运用插值法、相邻年份均值法补充。

### 2.2 熵权-TOPSIS 法

利用熵权法对各城市洪涝韧性评价指标进行权重计算,运用信息熵,通过各指标的变异程度计算熵权,得到客观的指标权重<sup>[39-40]</sup>。再使用 TOPSIS 法<sup>[41-42]</sup>计算第  $i$  个城市各项指标与理想解的贴近度  $C_i$ 。贴近度表示评价对象与最优状态的接近程度,  $C_i \in (0,1)$ ,  $C_i$  越接近 1,表示该城市 PSR 综合水平距离最优水平越近,洪涝韧性越高,反之则洪涝韧性越低<sup>[43-44]</sup>。本文以  $C_i$  值衡量城市洪涝韧性大小。

### 2.3 核密度估计法

核密度估计法是一种非参数统计方法,能够清晰地反映洪涝韧性的空间分布密度,展现城市群洪涝韧性的空间分布特征及动态演进趋势。本文参考文献<sup>[45]</sup>的计算方法,运用核密度估计法对各城市洪涝韧性的时空演化规律进行研究,系统考察长三角城市群洪涝韧性时空分布态势、演化及极化情况。

### 2.4 空间马尔科夫链

空间马尔科夫链是在传统马尔科夫链的基础上,充分考虑了空间因素对城市洪涝韧性时空演化的影响,能更深层次地展示城市洪涝韧性的时空演化规律<sup>[46]</sup>。长三角城市群中每个城市的发展会受到周边城市的影响,反过来每个城市的发展也都影响了周边城市。因此,空间关系是分析城市洪涝韧性时空演化规律不可缺少的重要因素。根据城市洪涝韧性数据分布区间,将城市洪涝韧性分为  $k$  个类型,即  $k$  种状态,在分解传统  $k \times k$  的马尔科夫矩阵的基础上,形成了  $k$  个  $k \times k$  的状态转移概率矩阵,矩阵中的概率值表示在不同邻域空间滞后类型下,  $t$  年到  $t+1$  年城市洪涝韧性状态转移的可能性。通过分析状态转移概率矩阵中的城市状态类型及转移概率数值,可以了解城市洪涝韧性类型在周边城市状态影响下的转移概率与趋势,从而得到各洪涝韧性状态的时空演化特征。

### 2.5 地理探测器模型

地理探测器既可以分析单个因素对城市洪涝韧性的影响程度,也可以分析两个因素的交互作用对城市洪涝韧性的作用效果,被广泛应用于影响机理

研究<sup>[47]</sup>。交互作用探测器的主要原理是识别两个变量交互作用时是否会增加或减弱对城市洪涝韧性的解释力,交互作用类型包括非线性增强与双因子增强、减弱或独立作用关系。应用地理探测器模型进行分析没有假设条件,因而具有较好的灵活性和适用性,本文参考文献[48]的计算方法,用 $q$ 表示影响因素对洪涝韧性的解释力, $q \in [0, 1]$ , $q$ 值越大,表示影响因子对洪涝韧性的解释力越强,反之越弱。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城市洪涝韧性总体分析

采用熵权法计算得到各评价指标的权重(图2),可以看出,指标权重在维度间与同一维度内部均存在较大差异。从维度间比较来看,响应层指标的平均权重为0.0771,远超其他层,表明城市响应能力对洪涝韧性的影响最大;压力层对洪涝韧性量化影响的权重最小,平均权重为0.0323。从维度内部比较来看,压力层中14岁以下和65岁以上人口占比指标的权重最大,状态层中固定资产投资额指标的权重最大,响应层中权重最大的指标是普通

高等教育在校学生数。可见,提高城市洪涝韧性,应更多地考虑人口结构、完善市政建设、加强教育投入,从基础设施和人员受教育程度上减少洪涝等自然灾害对社会生活的影响。

根据不同指标权重,利用TOPSIS法计算出长三角城市群27个城市2015—2021年城市洪涝韧性并对其进行排序(表1)。整体来看,相比于2015年,各城市2021年洪涝韧性有所上升,南京、合肥、上海、杭州、苏州、无锡等城市排名较前,结合评价指标来看,这几个城市的社会发展、社会保障和公共服务能力均排在前列。

对韧性测度值进行描述性统计分析(表2)可知,2015—2021年长三角城市群洪涝韧性均值呈波动上升趋势,由2015年的0.393提升到2021年的0.441,但总体韧性仍然偏低。变异系数波动式下降,从2015年0.207下降到2021年0.200,说明城市群内部的韧性差异不断缩小。偏度波动式上升趋势明显,说明较高韧性城市的比例有所增加。峰度呈先上升后波动式下降的趋势,说明长三角城市群城市洪涝韧性相似地区呈现先集中分布、后逐渐减弱的现象。

表1 长三角城市群洪涝韧性及排名

Table 1 Flood resilience and its ranking of Yangtze River Delta urban agglomeration

城市	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	均值	排名
上海	0.562	0.574	0.553	0.563	0.562	0.553	0.584	0.564	3
南京	0.581	0.624	0.698	0.713	0.721	0.709	0.700	0.678	1
无锡	0.468	0.480	0.492	0.493	0.492	0.469	0.505	0.486	6
常州	0.385	0.405	0.424	0.433	0.424	0.475	0.471	0.431	8
苏州	0.508	0.538	0.569	0.559	0.551	0.534	0.555	0.545	5
南通	0.355	0.384	0.439	0.431	0.424	0.395	0.420	0.407	12
盐城	0.315	0.371	0.414	0.389	0.389	0.372	0.394	0.378	21
扬州	0.368	0.348	0.410	0.388	0.404	0.396	0.417	0.390	19
镇江	0.377	0.380	0.403	0.413	0.421	0.419	0.413	0.404	13
泰州	0.363	0.344	0.401	0.401	0.409	0.434	0.409	0.394	17
杭州	0.487	0.546	0.580	0.557	0.562	0.570	0.563	0.552	4
宁波	0.436	0.458	0.453	0.462	0.458	0.486	0.468	0.460	7
温州	0.397	0.401	0.430	0.413	0.412	0.455	0.427	0.419	10
绍兴	0.343	0.377	0.379	0.384	0.390	0.401	0.395	0.381	20
湖州	0.386	0.379	0.427	0.414	0.403	0.389	0.413	0.401	14
嘉兴	0.297	0.306	0.319	0.317	0.317	0.322	0.330	0.315	26
金华	0.401	0.412	0.444	0.446	0.431	0.445	0.431	0.430	9
舟山	0.372	0.385	0.401	0.407	0.384	0.403	0.385	0.391	18
台州	0.382	0.406	0.401	0.401	0.381	0.413	0.385	0.396	15
合肥	0.525	0.529	0.599	0.565	0.597	0.580	0.596	0.570	2
芜湖	0.377	0.370	0.411	0.408	0.404	0.380	0.418	0.395	16
马鞍山	0.323	0.301	0.349	0.346	0.345	0.332	0.367	0.337	24
铜陵	0.297	0.297	0.350	0.366	0.346	0.334	0.359	0.335	25
池州	0.324	0.342	0.362	0.370	0.373	0.350	0.375	0.357	22
安庆	0.279	0.283	0.291	0.347	0.334	0.291	0.347	0.310	27
宣城	0.304	0.298	0.349	0.365	0.353	0.340	0.375	0.341	23
滁州	0.401	0.406	0.428	0.406	0.422	0.411	0.419	0.413	11



表 2 长三角城市群洪涝韧性描述性统计

Table 2 Descriptive statistics on flood resilience of Yangtze River Delta urban agglomeration

年份	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数
2015	0.393	0.082	0.863	0.077	0.207
2016	0.405	0.090	0.870	0.109	0.223
2017	0.436	0.093	1.141	1.328	0.213
2018	0.435	0.088	1.519	2.556	0.202
2019	0.434	0.093	1.515	2.415	0.214
2020	0.432	0.094	1.114	1.547	0.218
2021	0.441	0.088	1.382	1.589	0.200

### 3.2 城市洪涝韧性时空演化特征

#### 3.2.1 空间分布特征

为了更直观地展现长三角城市群洪涝韧性的空间分布特征,综合考虑自然断点分类法和等间隔分类法原理,根据洪涝韧性值的分布区间,将城市洪涝韧性划分为 4 个等级:较低韧性( $\leq 0.35$ )、中等韧性( $>0.35 \sim 0.45$ )、较高韧性( $>0.45 \sim 0.55$ )和高韧性( $>0.55$ ),以此得出 2015—2021 年长三角城市群城市洪涝韧性分布(图 3)。

从时空分布来看,整体上长三角城市群洪涝韧性随着时间推移逐渐改善,除 2019 年和 2020 年低韧性城市数量小幅增长外,总体上研究期中中低韧性城市数量不断减少,较高韧性和高韧性城市数量不断增加。究其原因,从评价指标数据情况看,新冠疫情对城市经济产生了影响<sup>[49-50]</sup>,影响了城市洪涝韧性的状态,除此之外,突发公共事件导致医疗机构床位需求变大,降低了洪涝韧性的响应程度。在政府调控以及城市恢复力作用下,2021 年各城市洪涝韧性开始稳步提升。从年份来看,2015 年只有南京和上海市处于高韧性状态,中低等韧性城市呈大范围片状分布,到 2021 年高韧性城市数量显著增加,低韧性城市数量明显变少,形成了以各省会城市为

中心的多中心态势,带动周边城市洪涝韧性提高。从省份来看,江苏省总体韧性较高,安徽省总体韧性较低,这和各省经济发展状况、市政建设状态和人口状况密切相关。相比之下,安徽省城市人口密度较大,暴露危险性大,互联网用户和普通高等教育在校学生数较少,对于洪涝等自然灾害的舆情关注度较低,群众响应度较低,影响了省内洪涝韧性。但总体而言,长三角城市群中等韧性城市的数量仍占城市群城市数量的一半以上,说明长三角城市群整体韧性仍有很大的提升空间。

#### 3.2.2 核密度估计曲线

长三角城市群整体韧性核密度估计动态演进如图 4(a)所示。整体分布曲线的主峰位置先右移、后逐渐左移、又小幅度右移,表明长三角城市群城市洪涝韧性呈先上升、后下降、再上升的螺旋上升态势;主峰高度呈小幅上升、小幅下降、大幅上升、大幅下降、再次上升的波浪形变化,主峰宽度先收缩、后扩大、再收缩,说明城市洪涝韧性的地区间差异先缩小、后小幅增加、再逐渐缩小,表现出长三角城市群洪涝韧性分布不均衡的现象;核密度曲线呈现多峰分布,说明长三角城市群整体洪涝韧性存在极化态势。

图 4(b)~(d)分别为江苏、浙江、安徽省城市洪涝韧性核密度估计动态演进。从主峰位置来看,江苏省和浙江省曲线主峰位置呈现逐渐右移的变化过程,安徽省则呈现右移、左移、右移的变化过程,说明各省城市洪涝韧性都呈现波动性。从分布形态上看,江苏省主峰高度先下降、后上升、又下降、再上升,波动性较大;浙江省主峰高度虽有波动变化,但整体相对平稳;安徽省主峰高度呈现平稳、上升、下降、平稳、上升的变化过程,整体略微上升;各地区主峰宽度基本不变,说明各省洪涝韧性绝对差异变化甚微。从波峰数目来看,江苏省曲线右侧存在多个

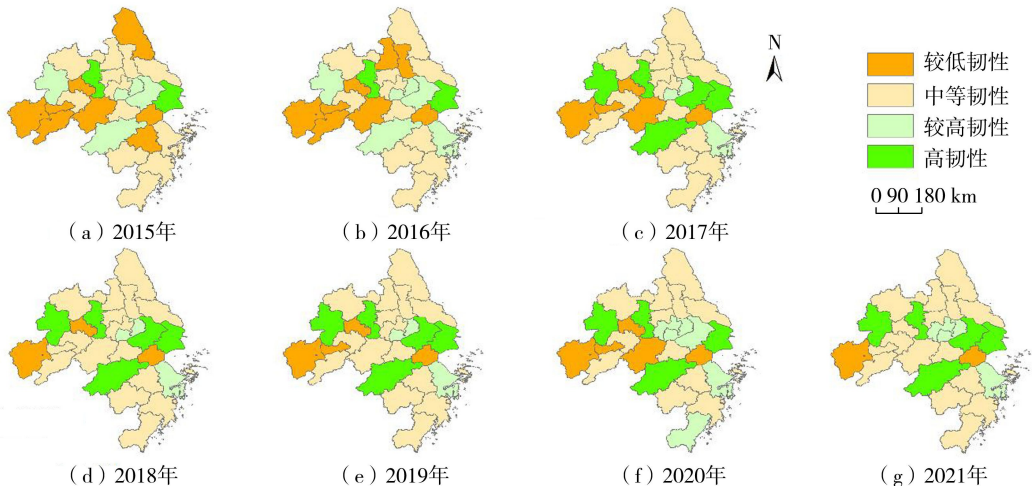


图 3 长三角城市群洪涝韧性分布

Fig. 3 Flood resilience distribution of Yangtze River Delta urban agglomeration

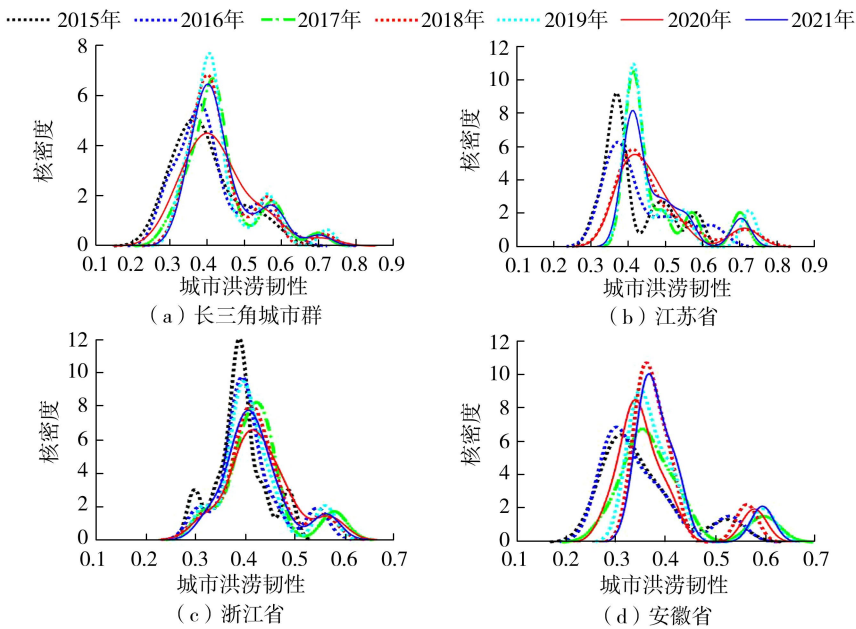


图4 长三角城市群和分地区城市洪涝韧性核密度估计动态演进

Fig. 4 Dynamic evolution of urban flood resilience by kernel density estimation in the Yangtze River Delta urban agglomeration and subregions

波峰,单主峰、右侧峰形态显著,且主峰与侧峰高度差相对较大,说明江苏省部分城市洪涝韧性高于其他城市,存在梯度效应,表现出一定程度的极化现象;浙江省曲线主峰两侧都存在波峰,说明浙江省城市洪涝韧性也呈现出明显的极化特征;安徽省也存在右侧单峰,但极化现象相比其他两省较弱。

### 3.2.3 空间马尔科夫链分析

城市洪涝韧性受到周边城市洪涝韧性及发展状态的影响,在马尔科夫链中引入空间要素可以更好地考察空间要素对各城市洪涝韧性状态转移的作用。传统及空间马尔科夫链转移概率矩阵如表3所示。

由无滞后即传统马尔科夫链转移概率矩阵可以看出,主对角线上的数值比其他数值大,表明城市洪涝韧性在下一阶段保持原有状态的可能性更大,尤其是高韧性城市的保持概率最大;状态转移主要发生在由较低韧性向中等韧性和较高韧性向高韧性转移;状态转移主要发生在对角线两侧,即洪涝韧性转移大多发生在相邻等级之间,跨级转移的概率较小,说明洪涝韧性转移是一个相对稳定持续的过程,在短时期内难以实现跃迁式转移。

引入空间关系后,当滞后类型为较低韧性时,较低韧性城市有50%概率转移为中等韧性城市,其他类型城市均维持原有状态。当滞后类型为中等韧性时,空间不稳定性增强,但总体上是由低韧性向高韧性迁移。当滞后类型为较高韧性和高韧性时,基本表现为空间稳定特征,仅有较低韧性和中等韧性城市发生迁移。

表3 传统及空间马尔科夫链转移概率矩阵 单位:%

Table 3 Traditional and spatial Markov chain transfer probability matrices		unit:%			
空间滞后类型	原韧性状态	较低韧性	中等韧性	较高韧性	高韧性
无滞后	较低韧性	69.7	30.3	0	0
	中等韧性	4.6	91.8	3.6	0
	较高韧性	0	5.0	75.0	20.0
	高韧性	0	0	4.3	95.7
较低韧性	较低韧性	50.0	50.0	0	0
	中等韧性	0	1.0	0	0
	较高韧性	0	0	1.0	0
	高韧性	0	0	0	0
中等韧性	较低韧性	64.7	35.3	0	0
	中等韧性	6.8	88.6	4.5	0
	较高韧性	0	5.6	72.2	22.2
	高韧性	0	0	4.3	95.7
较高韧性	较低韧性	80.0	20.0	0	0
	中等韧性	2.7	94.6	2.7	0
	较高韧性	0	0	1.0	0
	高韧性	0	0	0	0
高韧性	较低韧性	75.0	25.0	0	0
	中等韧性	0	1.0	0	0
	较高韧性	0	0	0	0
	高韧性	0	0	0	0

通过以上分析发现,空间要素对城市洪涝韧性的演化有重要影响,某一城市洪涝韧性的演化会受到邻近城市的影响。当滞后类型为较低韧性时,较低韧性城市向中等韧性城市转移的概率为50%,而不考虑空间因素时其转移概率仅为30.3%。整体来看,较低韧性和中等韧性城市更容易受到邻近城市的影响,在不同邻域空间滞后类型中,城市状态由

较低韧性向中等韧性转移的概率分别为 50%、35.3%、20%和 25%，中等韧性向较高韧性转移的概率分别为 0、4.5%、2.7%和 0，较高韧性向高韧性转移的概率分别为 0、22.2%、0、0，表明城市洪涝韧性等级越高，受邻近城市的影响越小，维持原有状态的概率越大，同时也体现了加快对较低韧性和中等韧性城市的建设和发展是实现均衡发展的关键。

### 3.3 城市洪涝韧性空间分异影响因素分析

采用 k-means 聚类算法对原始指标数据进行离散化处理，根据不同数据维度将每个指标数据分为 3 或 4 层，利用地理探测器模型对 2021 年城市洪涝韧性和指标数据进行计算，得到每个影响因子的  $q$  值(表 4)。结果显示，在独立因子层面，对长三角城市群整体洪涝韧性空间分异影响较大的因素由强到弱依次为普通高等教育在校学生数、第三产业占比、固定资产投资额和人均受教育年限， $q$  值依次为 0.821、0.691、0.675、0.655，影响因子的解释力均超过 60%，与前文熵权法指标权重占比结果一致，相互验证了结果的准确性。同时，分省探测结果显示了同一影响因子对不同省份城市洪涝韧性空间分异的影响效果不同，人均可支配收入对江苏省和上海市洪涝韧性空间分异解释力较强，其  $q$  值为 0.861；政府公共安全支出对安徽省洪涝韧性空间分异解释力较强，其  $q$  值为 0.920；14 岁以下和 65 岁以上人口占比对浙江省洪涝韧性空间分异的解释力较强，其  $q$  值为 0.688。

表 4 城市洪涝韧性影响因子的探测结果

Table 4 Detection results of influencing factors of urban flood resilience

影响因子	长三角城市群		江苏省和上海市		浙江省		安徽省	
	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序
$x_1$	0.208	13	0.298	14	0.156	15	0.339	10
$x_2$	0.136	15	0.086	18	0.081	16	0.324	11
$x_3$	0.356	8	0.650	9	0.688	4	0.895	7
$x_4$	0.594	6	0.733	6	0.661	5	0.920	3
$x_5$	0.231	12	0.322	12	0.364	11	0.619	9
$x_6$	0.061	16	0.117	17	0.020	19	0.320	13
$x_7$	0.250	11	0.311	13	0.572	7	0.895	6
$x_8$	0.302	9	0.575	10	0.286	13	0.145	18
$x_9$	0.028	17	0.156	16	0.051	18	0.189	17
$x_{10}$	0.675	3	0.783	4	0.836	1	0.906	5
$x_{11}$	0.021	19	0.673	7	0.206	14	0.307	15
$x_{12}$	0.294	10	0.861	2	0.413	10	0.323	12
$x_{13}$	0.145	14	0.179	15	0.463	9	0.270	16
$x_{14}$	0.821	1	0.880	1	0.815	2	0.932	2
$x_{15}$	0.595	5	0.496	11	0.543	8	0.895	8
$x_{16}$	0.488	7	0.653	8	0.339	12	0.313	14
$x_{17}$	0.691	2	0.747	5	0.705	3	0.907	4
$x_{18}$	0.025	18	0.066	19	0.070	17	0.074	19
$x_{19}$	0.655	4	0.801	3	0.657	6	0.987	1

就不同因子的交互效应(图 5)而言，因子交互后均呈现出显著的双因子增强或非线性增强效应，各影响因子在交互探测后均增强了对城市洪涝韧性的解释程度，表明长三角城市群洪涝韧性的形成演化和空间异质性是多因子共同驱动的结果。解释力最强的主导交互因子有：普通高等教育在校学生数与建成区面积率、普通高等教育在校学生数与人均可支配收入、政府公共安全支出与普通高等教育在校学生数、第三产业占比与年降水量， $q$  值依次为 0.94、0.92、0.92、0.88，体现了城市发展潜力、城市经济实力和城市经济稳定性的协同作用对提高城市洪涝韧性的主导作用。同样，不同省份城市洪涝韧性影响因子的交互作用效果也不同，从分省交互作用探测结果来看，江苏省和浙江省年降水量、排水管道密度和建成区绿化覆盖率等因子与其他因子交互后增强效应更显著。安徽省城市人口密度、人均可支配收入、人均 GDP 和每万人拥有医疗卫生机构床位数等因子与其他因子交互后增强效应更明显。

由地理探测结果可知，城市洪涝韧性的时空分异特征是压力、状态、响应各层面因素综合作用的结果，要想全面提高长三角城市群洪涝韧性，应着力全面建设，实现韧性城市高质量发展。

## 4 结论

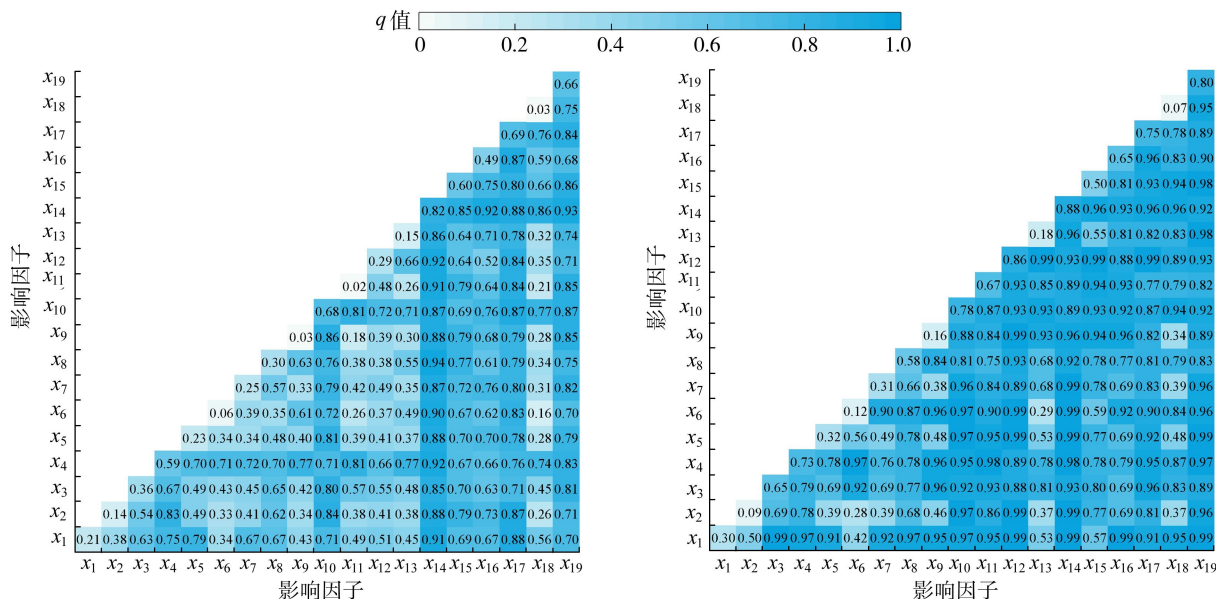
a. 从时间发展来看，2015—2021 年长三角城市群城市洪涝韧性整体呈波动式上升的趋势，城市群内部的洪涝韧性差异不断缩小，高韧性城市在城市群中的占比有所增加，但不同城市洪涝韧性的差异仍可能长期存在，长三角城市群抵御洪涝灾害的总体韧性依然需要得到提升。

b. 在空间分布格局上，长三角城市群洪涝韧性具有显著的空间分异特征，区域内城市洪涝韧性发展不均衡且存在极化现象。安徽省除省会城市外，整体处于中等或较低韧性等级，上海市和各省会城市洪涝韧性等级高，城市群洪涝韧性呈现以省会城市为中心的多中心辐射态势。

c. 从空间演变趋势来看，高韧性城市保持原有状态的概率较大，状态转移的主要趋势为城市向更高韧性等级发展，一定程度上体现了高韧性城市的正向空间溢出效应，也表明加快对较低韧性和中等韧性城市的建设是实现区域均衡发展的关键。

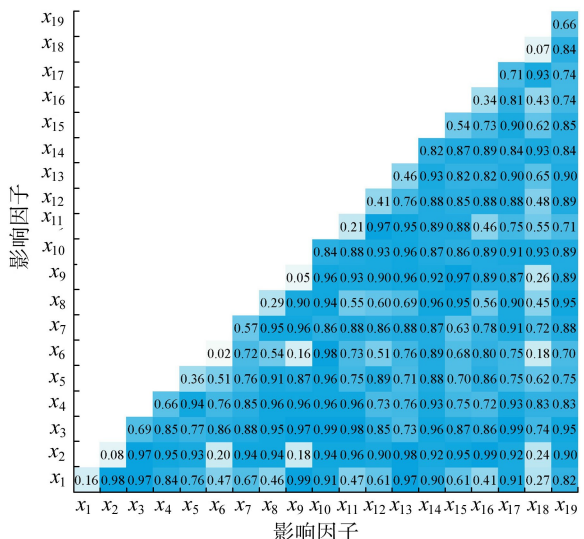
d. 对长三角城市群整体韧性影响较大的因素由强到弱依次为普通高等教育在校学生数、第三产业占比、固定资产投资额和人均受教育年限，且均呈现出显著的双因子增强或非线性增强效应，表明城市洪涝韧性的时空演化是各种因素综合作用的结果。



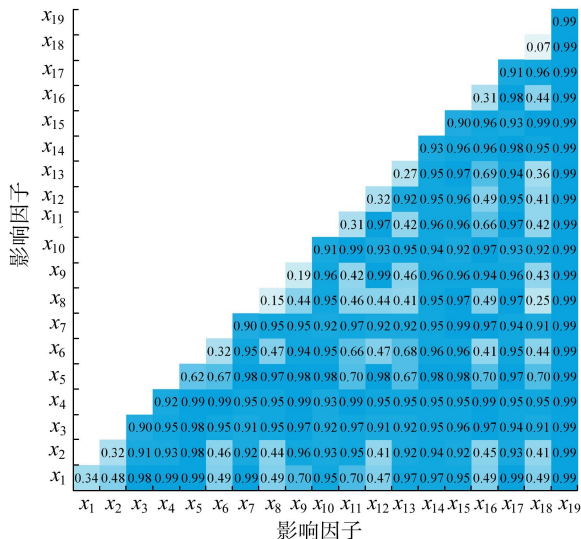


(a) 长三角城市群

(b) 江苏省和上海市



(c) 浙江省



(d) 安徽省

图 5 城市洪涝韧性空间分异影响因素的交互作用结果

Fig. 5 Interaction results of factors influencing spatial heterogeneity of urban flood resilience

参考文献:

[ 1 ] 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. ( in Chinese ))

[ 2 ] 李廉水,蔡洋,谭玲.基于动态 CGE 模型的中国暴雨洪涝灾害综合经济损失评估研究[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2020,22(1):28-36. (LI Lianshui,CAI Yang,TAN Ling. Comprehensive economic loss assessment of rainstorm and flood in China based on dynamic CGE model[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and

Social Sciences),2020,22(1):28-36. (in Chinese))

[ 3 ] 高玉琴,郑航,王子睿,等.基于 DSR 模型的秦淮河流域防洪能力变化及成因分析[J].水利水电科技进展,2023,43(3):1-8. (GAO Yuqin,ZHENG Hang,WANG Zirui,et al. Analysis of flood control capacity changes and causes of Qinhuai River Basin based on DSR model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(3):1-8. (in Chinese))

[ 4 ] 黄晶,余靖雯,袁晓梅,等.基于系统动力学的城市洪涝韧性仿真研究:以南京市为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(11):2519-2529. (HUANG Jing,SHE Jingwen,YUAN Xiaomei,et al. Simulation of urban flood resilience based on a system dynamic model:a case study in Nanjing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(11):2519-2529. (in Chinese))



- [ 5 ] 刘钢,袁晓梅,黄晶,等.基于PSR框架的城市洪涝弹性评估:以苏锡常地区为例[J].资源开发与市场,2018,34(5):593-598. (LIU Gang, YUAN Xiaomei, HUANG Jing, et al. Evaluation of urban resilience to flood based on PSR framework; a case of area in Suzhou-Wuxi-Changzhou [J]. Resource Development & Market, 2018, 34(5): 593-598. (in Chinese))
- [ 6 ] XIAO Shuai, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Assessment of the urban waterlogging resilience and identification of its driving factors: a case study of Wuhan City, China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 866: 161321.
- [ 7 ] JI Juan, CHEN Junfei. Urban flood resilience assessment using RAGA-PP and KL-TOPSIS model based on PSR framework: a case study of Jiangsu Province, China [J]. Water Science and Technology, 2022, 86 ( 12 ): 3264-3280.
- [ 8 ] 陈长坤,陈以琴,施波,等.雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J].中国安全科学学报,2018,28(4):1-6. (CHEN Changkun, CHEN Yiqin, SHI Bo, et al. An model for evaluating urban resilience to rainstorm flood disasters [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(4): 1-6. (in Chinese))
- [ 9 ] 李德智,洪靖芝,朱诗尧,等.基于复杂适应系统的城市抗涝韧性演化机理研究:以昆山市为例[J].系统科学学报,2023,31(2):63-68. (LI Dezhi, HONG Jingzhi, ZHU Shiyao, et al. Evolution mechanism of urban flood resilience from the perspective of complex adaptive system; a case study of Kunshan [J]. Journal of Systems Science, 2023, 31(2): 63-68. (in Chinese))
- [ 10 ] XU Tong, XIE Zhiqiang, JIANG Fengshan, et al. Urban flooding resilience evaluation with coupled rainfall and flooding models: a small area in Kunming City, China as an example [J]. Water Science & Technology, 2023, 87 ( 11 ): 2820-2839.
- [ 11 ] 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. (in Chinese))
- [ 12 ] 李德智,聂骁,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. (in Chinese))
- [ 13 ] 白立敏,修春亮,冯兴华,等.中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J].世界地理研究,2019,28(6):77-87. (BAI Limin, XIU Chunliang, FENG Xinghua, et al. A comprehensive assessment of urban resilience and its spatial differentiation in China [J]. World Regional Studies, 2019, 28(6): 77-87. (in Chinese))
- [ 14 ] CAO Feifeng, XU Xinfu, ZHANG Conglin, et al. Evaluation of urban flood resilience and its space-time evolution: a case study of Zhejiang Province, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110643.
- [ 15 ] ZHANG Zhen, ZHANG Jiquan, ZHANG Yichen, et al. Urban flood resilience evaluation based on GIS and multi-source data: a case study of Changchun City [J]. Remote Sensing, 2023, 15(7): 1872.
- [ 16 ] WANG Peng, LI Yabo, ZHANG Yuhu. An urban system perspective on urban flood resilience using SEM: evidence from Nanjing City, China [J]. Natural Hazards, 2021, 109 ( 3 ): 2575-2599.
- [ 17 ] 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. (in Chinese))
- [ 18 ] 李正兆,傅大放,王君娴,等.应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(2):266-276. (LI Zhengzhao, FU Dafang, WANG Junxian, et al. Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application [J]. Journal of Tsinghua University ( Science and Technology ), 2022, 62(2): 266-276. (in Chinese))
- [ 19 ] 方东平,李全旺,李楠,等.社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J].工程力学,2020,37(10):28-44. (FANG Dongping, LI Quanwang, LI Nan, et al. An evaluation system for community seismic resilience and its application in a typical community [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 28-44. (in Chinese))
- [ 20 ] 侯兰功,孙继平.复杂网络视角下的成渝城市群网络结构韧性演变[J].世界地理研究,2022,31(3):561-571. (HOU Langong, SUN Jiping. Evaluation of network structure resilience of Chengdu-Chongqing urban agglomeration from the perspective of complex networks [J]. World Regional Studies, 2022, 31(3): 561-571. (in Chinese))
- [ 21 ] 刘明阳,王群英,徐向舟,等.考虑内涝周期的郑州市内涝韧性评估[J].水资源保护,2024,40(4):48-55. (LIU Mingyang, WANG Qunying, XU Xiangzhou, et al. Assessment of waterlogging resilience in Zhengzhou City considering waterlogging cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 48-55. (in Chinese))
- [ 22 ] 程朋根,黄毅,郭福生,等.基于多源数据的城市洪涝灾害风险评估[J].灾害学,2022,37(3):69-76. (CHENG Penggen, HUANG Yi, GUO Fusheng, et al. Urban flooding risk assessment based on multi-source data [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(3): 69-76. (in Chinese))

- [23] CHEN Junfei, LIU Liming, PEI Jinpeng, et al. An ensemble risk assessment model for urban rainstorm disasters based on random forest and deep belief nets; a case study of Nanjing, China [J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(3):2671-2692.
- [24] SUN Tianyu, LIU Deping, LIU Dong, et al. A new method for flood disaster resilience evaluation; a hidden Markov model based on Bayesian belief network optimization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 412:137372.
- [25] LIU Dong, WANG Chunqing, JI Yi, et al. Measurement and analysis of regional flood disaster resilience based on a support vector regression model refined by the selfish herd optimizer with elite opposition-based learning [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300:113764.
- [26] 嵇娟, 陈军飞, 周子月. 江苏省城市洪涝韧性评价及影响因素研究 [J]. *水利经济*, 2022, 40(4):48-54. (JI Juan, CHEN Junfei, ZHOU Ziyue. Research on evaluation and influencing factors of urban flood resilience in Jiangsu Province [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2022, 40(4):48-54. (in Chinese))
- [27] LI Jiake, JIANG Yishuo, ZHAI Mengmeng, et al. Construction and application of sponge city resilience evaluation system; a case study in Xi'an, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(22):62051-62066.
- [28] JIAO Liudan, LI Dongrong, ZHANG Yu, et al. Identification of the key influencing factors of urban rail transit station resilience against disasters caused by rainstorms [J]. *Land*, 2021, 10(12):1298.
- [29] 李连刚, 张平宇, 程钰, 等. 黄河流域经济韧性时空演变与影响因素研究 [J]. *地理科学*, 2022, 42(4):557-567. (LI Liangang, ZHANG Pingyu, CHENG Yu, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of economic resilience in the Yellow River Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(4):557-567. (in Chinese))
- [30] 应超, 李加林, 刘永超, 等. 东海海岸带县域城市韧性演化及影响因素 [J]. *地理学报*, 2024, 79(2):462-483. (YING Chao, LI Jialin, LIU Yongchao, et al. The spatiotemporal evolution and influencing factors of resilience of county-level cities in the East China Sea coastal zone based on "background-operation-efficiency" [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(2):462-483. (in Chinese))
- [31] 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. (in Chinese))
- [32] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2):78-86. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Spatiotemporal variation of flood distribution and influencing factors in provinces in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2):78-86. (in Chinese))
- [33] 黄晶, 余靖雯. 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评估及影响因素分析 [J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, 22(6):39-45. (HUANG Jing, SHE Jingwen. Vulnerability assessment and influencing factors analysis of urban flood disaster in Yangtze River Delta city cluster [J]. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*, 2020, 22(6):39-45. (in Chinese))
- [34] JIAO Liudan, WANG Lvwen, LU Hao, et al. An assessment model for urban resilience based on the pressure-state-response framework and BP-GA neural network [J]. *Urban Climate*, 2023, 49:101543.
- [35] 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.
- [36] 李宏. 新形势下公共安全支出与社会稳定维护的实证分析 [J]. *广州大学学报(社会科学版)*, 2018, 17(4):16-24. (LI Hong. On the public security expenditure and social stability maintenance under the new situation [J]. *Journal of Guangzhou University (Social Science Edition)*, 2018, 17(4):16-24. (in Chinese))
- [37] 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. (in Chinese))
- [38] 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. (in Chinese))
- [39] 何伟, 陈素雪, 仇沪毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(6):1208-1219. (HE Wei, CHEN Suxue, QIU Luyi. Comprehensive Evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Three Gorges ecological and economy corridor of Yangtze River [J]. *Resources and Environment in The Yangtze River Basin*, 2022, 31(6):1208-1219. (in Chinese))
- [40] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*,

- 2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))
- [41] ZHU Yun, ZHANG Changzheng, FANG Junmin, et al. Paths and strategies for a resilient megacity based on the water-energy-food nexus [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 82:103892.
- [42] 朱洁, 冯建刚, 高玉琴, 等. 基于 BWM-CRITIC-TOPSIS 的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):8-14. (in Chinese))
- [43] 邹秀清, 谢美辉, 肖泽干, 等. 基于熵权-TOPSIS 法的乡村发展评价及障碍因子诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(10):197-206. (ZOU Xiuqing, XIE Meihui, XIAO Zegan, et al. Evaluation of rural development and diagnosis of obstacle factors based on entropy weight TOPSIS method [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(10):197-206. (in Chinese))
- [44] 赵佳慧, 许红师, 王田野, 等. 基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法的都市洪涝风险评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10):58-73. (ZHAO Jiahui, XU Hongshi, WANG Tianye, et al. Improved entropy weight-TOPSIS-grey correlation method-based urban flood-waterlogging risk assessment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10):58-73. (in Chinese))
- [45] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8):51-61. (WANG Songmao, NIU Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2022, 42(8):51-61. (in Chinese))
- [46] 方叶林, 王秋月, 黄震方, 等. 中国旅游经济韧性的时空演化及影响机理研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3):417-427. (FANG Yelin, WANG Qiuyue, HUANG Zhenfang, et al. Spatial and temporal evolution of tourism economic resilience and mechanism of impact in China [J]. Progress in Geography, 2023, 42(3):417-427. (in Chinese))
- [47] WANG Jinfeng, LI Xinqu, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1):107-127.
- [48] 孙克, 张信为, 聂坚, 等. 中国省域水资源利用绩效评价及空间分异和驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4):102-110. (SUN Ke, ZHANG Xinwei, NIE Jian, et al. Evaluation of provincial water resources utilization performance in China and its spatial differentiation and driving factor analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4):102-110. (in Chinese))
- [49] 安树伟, 黄艳. 突发公共卫生事件对区域经济韧性的影响机制与应对: 来自中国新冠病毒感染疫情的证据[J]. 中国软科学, 2024(1):76-85. (AN Shuwei, HUANG Yan. Impact mechanism of public health emergencies on regional economic resilience and its response: evidence from the COVID-19 in China [J]. China Soft Science, 2024(1):76-85. (in Chinese))
- [50] 李连刚, 胡晓辉. 新冠肺炎疫情下中国区域经济韧性时空格局与影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2023, 32(3):64-75. (LI Liangang, HU Xiaohui. Analysis on the spatial-temporal pattern and influencing factors of regional economic resilience in China under the COVID-19 pandemic [J]. World Regional Studies, 2023, 32(3):64-75. (in Chinese))

(收稿日期:2024-02-24 编辑:施业)

(上接第 27 页)

- [16] 朱锦干, 周建中, 张勇传. 金沙江下游梯级汛前联合消落控制方式研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7):61-64. (ZHU Jingan, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan. Research on control method of cascade joint fading before flood in lower Jinshajiang River [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7):61-64. (in Chinese))
- [17] 曹瑞, 程春田, 申建建, 等. 考虑蓄水期弃水风险的水库长期发电调度方法[J]. 水利学报, 2021, 52(10):1193-1203. (CAO Rui, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Long-term optimal operation of reservoir considering the water spillage risk during the impoundment period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10):1193-1203. (in Chinese))
- [18] ZHANG Xinyi, FANG Guohua, YE Jian, et al. Risk control in optimization of cascade hydropower: considering water abandonment risk probability [J]. Sustainability, 2022, 14(17):10911.
- [19] WU Chengjun, FANG Guohua, LIAO Tao, et al. Integrated software development and case studies for optimal operation of cascade reservoir within the environmental flow constraints [J]. Sustainability, 2020, 12(10):4064.
- [20] FANG Guohua, WU Chengjun, LIAO Tao, et al. A two-layer improved invasive weed optimization algorithm for optimal operation of cascade reservoirs [J]. Water Supply, 2020, 20(6):2311-2323.

(收稿日期:2024-03-26 编辑:王芳)