

# 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空 演变及其关联性分析

贺山峰<sup>1, 2</sup> 梁爽<sup>2</sup> 吴绍洪<sup>3</sup> 郭浩<sup>11</sup>

(1. 曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276800;

2. 河南理工大学 应急管理学院, 河南 焦作 454000;

3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**【摘要】:** 洪涝灾害是长三角地区主要自然灾害之一。开展长三角地区城市洪涝灾害韧性研究, 可为加快该地区韧性城市建设、实现区域一体化高质量发展提供有力保障。运用强制确定法、熵值法和空间自相关分析, 从社会、经济、基础设施和环境四个维度对 2008~2018 年长三角地区 27 个城市洪涝灾害韧性时空演变特征及其关联性进行研究。结果显示: (1) 时间序列上, 长三角地区城市洪涝灾害韧性水平整体呈上升趋势, 城市韧性指数均值从 0.2565 增加到 0.3542; 城市间韧性指数差异程度有所增大, 韧性水平处于非均衡化发展阶段。(2) 空间格局上, 长三角地区各城市洪涝灾害韧性水平存在明显分异, 呈现“中心-外围”韧性递减的分布特征; 各韧性等级城市数量结构从以上海为核心的单核分布模式向以上海-南京-苏州-杭州为核心的橄榄型分布模式演变。(3) 空间关系方面, 除 2009 年外, 长三角地区城市洪涝灾害韧性指数均具有正向的空间自相关性, 但全局莫兰系数偏低, 空间集聚效应不明显, 并且经历了“分散-集中-分散”的变化过程; 城市洪涝灾害韧性指数局部空间集聚现象显著的城市数量约占 20%, 其中“低-低”集聚类型区持续占据主导地位, 区域一体化发展有待提高。

**【关键词】:** 长三角地区 洪涝灾害 韧性评价 空间自相关

**【中图分类号】:** TU992 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)09-1988-12

城市是人类经济、政治、社会和文化发展中心, 而安全是现代城市的第一要素。近年来, 快速城镇化给城市带来飞速发展的同时, 不可避免地改变了孕灾环境, 加之全球气候变化, 极端天气事件发生的频率和强度随之增加<sup>[1]</sup>, 城市面临多种灾害的风险不断加剧。而城市区域水文气象灾害的发生与快速城镇化和全球气候变化密切相关, 暴雨洪涝作为水文气象灾害的一种表现形式已成为城市的多发灾害, 不仅给城市造成巨大损失, 还严重影响城市的经济社会稳定和生态文明安全, 甚至引发其他公共卫生事件或社会安全问题<sup>[2]</sup>。面对这种状况, 传统的安全理念和防灾措施已无法满足当前及未来城市的发展需求, 提升城市韧性作为一种新的城市治理理念, 为新时代城市防灾减灾工作提供了新的思路。习近平总书记在《国家中长期经济社会发展战略若干重大问题》中指出要打造“韧性城市”, “建立高质量的城市生态系统和安全系统”。加强安全韧性城市建设已成为实现城市治理现

**作者简介:** 贺山峰(1980~), 男, 副教授, 主要研究方向为环境演变与灾害风险、韧性城市。E-mail:heshanfeng@163.com; 郭浩, E-mail:guohao@qfnu.edu.cn

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFC1508800); 国家自然科学基金项目(71673076, 42001363); 山东省泰山学者青年专家计划项目(tsqn202103065); 河南省高校哲学社会科学研究优秀学者资助项目(2016-YXXZ-07)

代化和高质量发展的重要举措<sup>[3,4]</sup>。

韧性城市具备较强的自组织能力、抵抗和吸收外部扰动的能力、快速适应环境变化的能力，以及面对灾害时维持功能和系统结构稳定并快速恢复的能力<sup>[5]</sup>。城市系统缺乏韧性就难以抵抗外力的侵扰，尤其是当外力强度超出城市系统所能承受的上限时，城市的某些功能就会发生不可逆的崩溃。近年来，中外学者从不同角度对城市韧性开展了深入研究，并取得了积极进展。Cutter等<sup>[6]</sup>提出社区基线韧性评价指标体系，将城市韧性划分为社会韧性、经济韧性和社区韧性、制度韧性、基础设施韧性、生态韧性等6个部分，通过赋值完成对美国东南部地区韧性的量化，得出不同地区韧性的空间差异。Ilmola<sup>[7]</sup>通过对洛克菲勒基金会城市韧性框架体系、联合国人居署灾害评估系统、全球X-网络韧性评估系统等韧性评估方法进行分析，进一步将这些方法分成三类：基于调查的收集感知的方法、基于现有统计数据的方法和多元法。Jones等<sup>[8]</sup>采用可通过手机进行管理的主观韧性测量方法，深入研究了自然灾害后不同社会经济群体的适应力和恢复力情况。蔡建明等<sup>[3]</sup>在总结国外弹性理论研究的基础上，系统评述了弹性城市研究的4个领域的内涵与研究重点。陈利等<sup>[9]</sup>基于韧性城市的背景，阐释了韧性城市的概念内涵，并归纳出韧性城市在经济、工程、生态和社会方面的规划诉求。张慧等<sup>[10]</sup>运用计量经济学回归分析方法，深入研究了山西省城市化质量、城市韧性对洪涝灾害风险的影响。张明斗等<sup>[11]</sup>利用层次分析法测算了长三角城市群16个城市的韧性与经济发展水平，并探讨了城市韧性与经济发展水平之间的协调性。黄晶等<sup>[12]</sup>应用系统动力学模型开展城市韧性仿真研究，定量揭示了南京市洪涝灾害韧性系统各要素之间的关系。修春亮等<sup>[13]</sup>依据地理学和景观生态思想方法，构建基于“规模-密度-形态”的三维城市韧性研究框架，对大连市各县市区的城市韧性进行评估。陈轶等<sup>[14]</sup>从微观层面分析了南京老旧小区洪涝韧性及其影响因素，发现社区韧性与自然条件、社会资本、周边设施可及度和社区建设等存在高度正相关关系。

梳理相关文献发现，城市韧性研究已成为国内外城市生态学、城市经济学、城市地理学和城市规划学等领域的研究热点，学者们运用多学科的方法和工具，从定性分析逐渐向评价体系和模型构建等定量研究转变。国内城市韧性研究起步相对较晚，主要集中在城市韧性理论的阐释与解读、韧性城市规划、韧性效应和韧性评价等方面，研究方法有待完善，研究内容有待拓展。已有城市韧性评价研究大多针对灾害总体而言，对于某一具体灾种的城市韧性定量评价相对较少，且主要集中在地震灾害方面<sup>[15,16]</sup>，而针对洪涝灾害的研究多侧重于形成机理<sup>[17,18,19]</sup>、影响因素分析<sup>[20]</sup>、风险评估和风险应对<sup>[18]</sup>，对洪涝灾害韧性的量化分析并不多见，尤其缺少区域尺度层面城市洪涝灾害韧性时空格局演变研究。城市洪涝灾害韧性有两层涵义：一是城市系统抵御和承受洪涝灾害的能力，即城市系统在遭受洪涝灾害压力时，能够抵抗、吸收和适应灾害带来的不利影响，维持城市主要结构和关键功能正常运转；二是城市系统自我恢复的能力，即洪涝灾害结束后，城市系统能够通过自身调整快速恢复至原有状态或达到某种新的平衡。本文以洪涝灾害韧性为切入点，揭示受洪涝灾害影响严重的长三角地区城市韧性在时间序列上和空间格局上的演变特征，并分析其空间关联性，以期为提升长三角地区城市韧性、保障长三角地区城市区域一体化高质量发展提供支撑。

## 1 城市洪涝灾害韧性评价指标体系构建

### 1.1 研究区域概况

《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》指出，长三角地区包括上海市，江苏省南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江、盐城、泰州，浙江省杭州、宁波、温州、湖州、嘉兴、绍兴、金华、舟山、台州，安徽省合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城共27个城市，如图1所示。作为“一带一路”和长江经济带的交汇区域，长三角地区在国家现代化建设大局和全方位开放格局中占有举足轻重的战略地位，是我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的地区之一。

由于长三角地区所处自然地理条件、下垫面性质、地势地貌和气候背景，加上人类活动和土地利用变化，该地区自20世纪80年代以来洪涝灾害日益加剧<sup>[21]</sup>。2020年主汛期长三角地区再次遭遇严重洪涝灾害，仅安徽省就造成1046.53万人受灾，132.88万人紧急转移安置，直接经济损失达600.65亿元，与25年同期(1996~2020年)相比三项指标分别上升了10%、259%、470%，太湖也发生历史第3高水位的流域性大洪水。伴随着全球气候变化、城市化进程和经济社会快速发展，长三角地区城市未来面临的洪涝灾害风险将进一步加大<sup>[22]</sup>。



图 1 长三角地区城市概况图

### 1.2 评价指标体系构建

城市灾害韧性是由自然环境、社会经济和工程设施等要素相互作用形成的综合体系。基于已有城市韧性评价研究<sup>[23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]</sup>, 结合城市洪涝灾害灾前、灾中、灾后的应急管理全过程, 按照社会韧性、经济韧性、基础设施韧性和环境韧性 4 个维度, 初步选出使用频率较高的 25 个洪涝灾害韧性指标。综合考虑指标的代表性、科学性、独立性和可获得性, 依据专家打分最终确定 19 个评价指标, 如表 1 所示。

表 1 长三角地区城市洪涝灾害韧性评价指标体系及权重

目标层 A	准则层 B	B 层权重	指标层 C	权重	组合权重
城市洪涝灾害韧性	社会韧性	0.2187	人口自然增长率 C1	0.1079	0.0236
			男性人口占比 C2	0.2199	0.0481
			卫生技术人员 C3	0.3640	0.0796
			每万人在校大学生数 C4	0.3082	0.0674
	经济韧性	0.3750	地区生产总值 C5	0.2977	0.1117
			城镇居民人均可支配收入 C6	0.1485	0.0557
			农林水事务财政投入比 C7	0.2318	0.0869
			公共安全财政投入比 C8	0.1397	0.0524
			失业率 C9	0.0733	0.0275
			第三产业比重 C10	0.1090	0.0409

	基础设施韧性	0.2813	排水管道密度 C11	0.1228	0.0345
			人均道路面积 C12	0.1175	0.0330
			货物周转量 C13	0.6445	0.1813
			每万人病床数 C14	0.1153	0.0324
	环境韧性	0.1250	建成区绿化覆盖率 C15	0.1345	0.0168
			人均公园绿地面积 C16	0.3064	0.0383
			污水处理率 C17	0.1595	0.0199
			生活垃圾无害化处理率 C18	0.0975	0.0122
			工业固体废物综合利用率 C19	0.3021	0.0378

社会韧性反映了城市居民生命安全在遭遇洪涝灾害冲击时的承受力，以及灾害发生后城市的社会保障能力和未来发展潜能。社会韧性尤其注重长远的恢复力，具体体现在医疗健康保障、人力资源和创新发展能力等方面。因此，选取 4 项指标来表征社会韧性，其中人口自然增长率和男性人口占比反映了城市居民的灾害承受力和人力资源水平；卫生技术人员数量反映了医疗保障能力；在校大学生数反映了城市发展潜能。

经济韧性直观反映出城市在应对洪涝灾害全过程中的经济实力、稳定性与恢复力。在遭受洪涝灾害时，经济韧性越强，社会生产生活就越能在短时间内恢复正常运转。经济韧性维度选取了 6 项指标，其中地区生产总值、城镇居民人均可支配收入、农林水事务财政投入比和公共安全财政投入比分别从政府和个人角度反映城市的经济实力和防灾减灾水平；城镇失业率和第三产业占比分别从就业状况和产业结构方面反映了城市经济的稳定性。

基础设施韧性表现为遭受洪涝灾害侵袭时医疗卫生、交通运输和市政排水等基础设施的承受力以及抵御、缓冲灾害损失并及时恢复的能力。基于此，基础设施韧性选取了 4 项评价指标，其中排水管道密度反映了排水设施对洪涝灾害的抵御和吸收能力；人均道路面积、货物周转量、每万人病床数分别从路网资源配置、物资流通和医疗保障方面反映了洪涝灾害的应对恢复能力。

环境韧性代表着在洪涝灾害冲击时城市所表现出的灾害分解能力、生态安全性和维护环境品质的能力。城镇化过程中，城市的盲目扩张和高速低质的经济发展模式导致环境恶化，增加了生态系统负荷，降低了城市环境对灾害的抵御分解能力和自恢复能力。环境韧性评价包括 5 项指标，其中建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积反映了洪涝发生时的灾害分解能力；污水处理率、生活垃圾无害化处理率、工业固体废物综合利用率反映了城市系统对生态安全性和环境品质的维护能力。

## 2 城市洪涝灾害韧性评价模型构建

### 2.1 数据来源与数据处理

依据数据的可获得性和研究基本单元的一致性原则，文中所使用的指标数据来源于 2009~2019 年的《中国城市统计年鉴》《上海市统计年鉴》《江苏省统计年鉴》《浙江省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》，以及研究区各个城市的《统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》和中经网统计数据库。个别年份缺失的数据采用线性插值法进行估算补齐<sup>[23,24]</sup>。

为使数据具有可比性，选取极值法对各个指标进行无量纲标准化处理，使各指标数据取值均在[0, 1]范围内<sup>[11, 12, 13]</sup>，具体步骤如下：

构建原始指标矩阵数据：有 a 个年份，b 个城市，c 个评价指标，原始指标的矩阵为  $X = \{N_{xij}\} a*b*c (1 \leq x \leq a, 1 \leq i \leq b, 1 \leq j \leq c)$ ，本研究中 a、b 和 c 分别为 11、27 和 19。

对于正向指标：

$$M_{xij} = \frac{N_{xij} - \text{Min}_{(xij)}}{\text{Max}_{(xij)} - \text{Min}_{(xij)}} \quad (1)$$

对于负向指标：

$$M_{xij} = \frac{\text{Max}_{(xij)} - N_{xij}}{\text{Max}_{(xij)} - \text{Min}_{(xij)}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中， $M_{xij}$ 为第 x 个年份第 i 个城市第 j 项指标的标准化数值； $N_{xij}$ 为第 x 个年份第 i 个城市的第 j 项指标的指标值； $\text{Min}_{(xij)}$ 为所有年份所有城市中第 j 项指标的最小值； $\text{Max}_{(xij)}$ 为所有年份所有城市中第 j 项指标的最大值。

## 2.2 城市洪涝灾害韧性计量模型

为降低单一主观赋权方法或客观赋权法的局限，采用主客观结合赋权法计算洪涝灾害韧性指标权重，力求赋权结果的科学性和合理性<sup>[8, 30, 31, 32, 33]</sup>。具体做法是，在计算准则层维度权重时使用强制确定法，在计算各维度内指标层权重时使用熵值法，最后两者组合得到指标最终权重(表 1)。

强制确定法(简称 FD 法)先确定各指标间的相对重要程度，形成权重判别表，并据此来计算各指标的权重。使用  $m_k$  表示第 k 个指标的得分，若两个指标一样重要时，各计 2 分；若某一指标下显示的比另一指标重要，则前者计 3 分，后者计 1 分；若某一指标比另一指标重要很多时，则前者计 4 分，后者计 0 分。强制确定法计算公式如下：

$$W_k = m_k / \sum_{k=1}^n m_k \quad (3)$$

式(3)中：n 为指标个数； $W_k$  为准则层权重； $m_k$  为准则层第 k 个指标的得分； $\sum_{k=1}^n m_k$  为各项指标的总分。

熵值法是用来判断某个评价指标的离散程度的数学方法，离散程度越大，该指标对综合评价的影响越大。为实现不同年份间的比较，使评价结果更具合理性，本文加入了时间变量对熵值法进行改进<sup>[23]</sup>。具体步骤如下：

(1) 计算第 x 个年份第 i 个城市的第 j 项指标的标准化数值所占比重  $Y_{xij}$ ：

$$Y_{xij} = \frac{M_{xij}}{\sum_{x=1}^a \sum_{i=1}^b M_{xij}} \quad (4)$$

(2) 计算各项指标的熵值  $E_j$ :

$$E_j = -k \sum_{x=1}^a \sum_{i=1}^b Y_{xij} \ln Y_{xij}, \quad k = 1/\ln(a * b) \quad (5)$$

(3) 计算各项指标熵值的冗余度  $D_j$ :

$$D_j = 1 - E_j \quad (6)$$

(4) 计算各项指标权重:

$$W_j = D_j / \sum_{j=1}^c D_j \quad (7)$$

据此, 得到各评价指标组合权重  $w_j$ :

$$w_j = W_j W_k \quad (8)$$

城市洪涝灾害韧性指数  $C_{xi}$ :

$$C_{xi} = \sum_{j=1}^c M_{xij} w_j \quad (9)$$

### 2.3 韧性空间关联性分析

采用空间自相关分析的莫兰指数法(Moran' sI), 研究长三角地区特定城市与周围城市洪涝灾害韧性的关系, 确定城市洪涝灾害韧性在空间上的相关性及相关程度, 以便进一步分析核心城市的辐射带动作用及区域城市韧性协调发展潜力。

#### (1) 全局空间自相关分析

全局空间自相关反映了空间邻近或空间邻近单元属性值在一个总的空间范围内相互依赖的程度或相似程度<sup>[10]</sup>, 最常用的关联指标是 Moran' sI。计算公式如下:

$$Moran's I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式(10)中：n为研究单元数量， $x_i$ 、 $x_j$ 为相邻单元i和j的观测值，即相邻城市的洪涝灾害韧性指数， $\bar{x}$ 是城市洪涝灾害韧性指数的平均值， $w_{ij}$ 为空间权重矩阵w的一个元素取值， $S_0$ 是空间权重矩阵中所有元素之和。空间权重矩阵代表了各区域间的空间距离，同时也间接反映出各城市间相互影响的程度，结合本文所研究的观测值的特征，选择邻接空间权重对空间全局自相关进行分析<sup>[29,34]</sup>。其规则如下：如果两个城市存在点或边相邻，我们就将其赋值为1，反之，则赋值为0。

Moran's I的取值范围在-1到1之间，当P值表现为显著且Moran's I>0时，表示区域之间存在正相关性，这一属性值变化与其相邻空间单元具有相同的变化趋势，空间现象有集聚性的存在，其值越大，空间相关性越明显；反之，当P值表现为显著且Moran's I<0时，表示区域之间存在负相关性，空间上呈现分散格局，并且随着空间分布位置的离散，区域之间相关性反而显著，其值越小，空间差异越大；当Moran's I=0时，空间呈随机性分布。

## (2) 局部空间自相关分析

局部空间自相关，描述一个空间单元与其领域的相似程度，能够表示每个局部单元服从全局总趋势的程度，常用 Local Moran's I表示。计算公式如下：

$$Local Moran's I = \frac{Z_i}{S^2} \sum_{j \neq i}^n w_{ij} Z_j \quad (11)$$

$$Z_i = x_i - \bar{x}, Z_j = x_j - \bar{x}, S^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2$$

式中： $w_{ij}$ 为空间权重矩阵w的一个元素取值，n为研究区域城市总数， $x_i$ 、 $x_j$ 为相邻城市的洪涝灾害韧性指数。

局部空间关联模式可分为四种类型：高-高关联、低-低关联、高-低关联和低-高关联。其中，高-高关联和低-低关联都属于正的空间关联，高-高关联表示本身是高值，周围的其他地区也是高值属于高值聚集区域；低-低关联表示本身是低值，周边地区也都是低值，属于低值聚集区域。高-低关联和低-高关联均属于负的空间关联，高-低关联表示本身是高值，但被低值所包围，属性值高于均值的空间单元被属性值低于均值的领域所包围；低-高关联表示本身是低值，但周边地区都是高值，属性值低于均值的空间单元被属性值高于均值的领域所包围。

## 3 长三角地区城市洪涝灾害韧性评价结果分析

### 3.1 长三角地区城市洪涝灾害韧性水平时序演变特征

依据上述评价模型计算，可以得到2008~2018年长三角地区27个城市的洪涝灾害韧性指数。相比于2008年，2018年长三角地区各个城市的洪涝灾害韧性指数均有一定幅度增加，整个地区韧性指数均值也从0.2565上升到0.3542，增加了将近0.1，反映出长三角地区城市洪涝灾害韧性整体水平有所提高，同时也说明随着经济社会的发展，该地区城市系统各项功能日渐完善。

(1) 洪涝灾害韧性水平整体呈上升趋势，大多数城市仍有较大提升空间

为进一步反映不同区域城市洪涝灾害韧性的时序演变特征，图 2 绘制了 2008~2018 年长三角地区三省一市的韧性指数时间演变趋势。上海市在社会经济发展、防洪减灾投入及环境保护与治理等方面的指标大多优于其他城市，因此具有较高的洪涝灾害韧性水平，其洪涝灾害韧性指数远高于长三角地区均值，江苏省和浙江省城市韧性水平相当，与地区韧性指数均值接近，而安徽省城市韧性水平相对较低，韧性指数一直低于地区平均值。除上海市洪涝灾害韧性水平呈现出波动上升趋势外，另外三个省份的城市洪涝灾害韧性水平呈稳步上升态势。在研究时段初期，上海市因其外贸依存度较高，经济和社会发展受金融危机影响较大，部分指标值有所下降，延缓了城市洪涝灾害韧性提升速率。2012~2013 年期间，上海市强大的人口集聚能力，使得其城市建设和管理相对滞后于常住人口增长速度，人均农林水事务和公共安全等方面的财政投入以及人均公共卫生设施和绿地面积等指标均有不同程度降低，致使洪涝灾害韧性有短暂下降。之后，上海市通过深化改革全力破解经济社会发展中的瓶颈问题，强化质量效益、生态环境、安全发展导向，城市功能系统完备性和适应能力不断增强，洪涝灾害韧性明显提高。

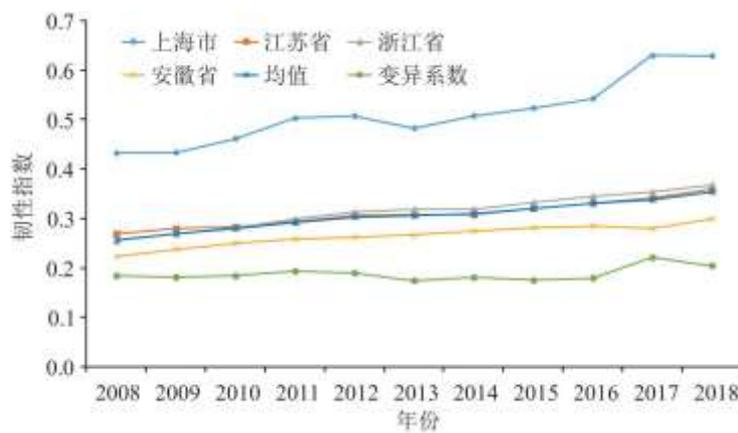


图 2 长三角地区城市洪涝灾害韧性时间序列变化趋势

线性回归方程显示，研究时段内四省市韧性指数均值提升幅度依次为上海市(0.0187)>浙江省(0.0106)>江苏省(0.0082)>安徽省(0.0065)。具体来看，2008~2018 年间，上海市综合韧性指数从 0.4323 上升到 0.6292，增加了 0.1969，浙江、江苏和安徽三省区域内城市韧性均值分别增加了 0.1140、0.0891 和 0.0765，增加幅度均小于 0.12。就城市而言，除上海市外，舟山、温州两个城市韧性指数增加幅度都大于 0.14，而镇江、宣城、常州和芜湖 4 个城市韧性指数增加幅度均低于 0.06，其中镇江市仅增加了 0.0278。由此可见，长三角地区城市洪涝灾害韧性指数增长幅度极不均衡，大多数城市韧性水平仍有较大提升空间。

(2) 区域内城市间韧性指数差异有所增大，韧性水平处于非均衡化发展阶段

参考相关研究<sup>[32]</sup>，采用变异系数表征不同年份各个城市洪涝灾害韧性指数的分异特征和分异程度(图 2)。2008~2018 年长三角地区城市韧性指数的变异系数总体呈增大趋势，且具有一定波动性。具体表现为，在研究时段的前期，变异系数缓慢波动减小，表明这一时期应对洪涝灾害方面，长三角地区各个城市韧性指数在整体有所提升的同时，城市间韧性水平差异也略微缩小。之后变异系数快速增大，表明在研究时段后期上海、南京、苏州、杭州等城市与韧性水平较低的城市间差距又开始拉大，主要是由于各城市的经济实力以及遭遇洪涝灾害的频率和损失程度不同，城市洪涝灾害韧性建设力度也存在明显差异，各城市韧性水平进入非均衡化发展阶段。因此，加强韧性城市建设、缩小城市间韧性水平差异仍是长三角地区城市治理现代化和城市高质量发展的重要任务。

3.2 长三角地区城市洪涝灾害韧性水平空间格局演变特征

借鉴相关研究的分级方法<sup>[33, 34, 35]</sup>,采用自然间断点分级法将长三角地区城市洪涝灾害韧性指数划分为 5 个等级,依次为低韧性(0~0.2602)、较低韧性(0.2603~0.2814)、中等韧性(0.2815~0.3249)、较高韧性(0.3250~0.3988)和高韧性(0.3989~0.6297)。分别绘制出 2008~2018 年长三角地区城市洪涝灾害韧性水平等级图,如图 3 所示。从空间格局分布来看,长三角地区城市洪涝灾害韧性水平发展极不均衡,城市个体之间存在明显的空间分异特征。

(1)洪涝灾害韧性水平空间分异明显,由核心城市向外呈现“中心-外围”递减特征

研究时段内,上海市一直处于高韧性等级,低韧性等级的城市主要集中分布在安徽省和江苏省北部。浙江省(除嘉兴市)城市韧性整体处于相对较高水平,安徽省(除合肥市)城市韧性整体处于中等及以下水平,而江苏省城市韧性则明显呈现出南部高,北部低的格局。就都市圈而言,以上海、南京、苏州、杭州为中心的上海大都市圈、南京都市圈、杭州都市圈和苏锡常都市圈,其四个核心城市韧性水平一直稳居研究区域的前列,韧性水平相对较低的非核心城市分布在这四个城市外围,整体由核心区城市向非核心区城市呈现“中心-外围”韧性递减的空间结构特征。

究其原因在于,上海、南京、苏州、杭州等都市圈核心城市的地区生产总值、城镇居民人均可支配收入、农林水事务财政投入比、公共安全财政投入比、第三产业比重、卫生技术人员、每万人在校大学生数和货物周转量等权重较大的指标数值远高于其他非核心城市,这意味着核心城市拥有更强的经济实力、更多的防灾减灾投入、更完善的社会保障和基础设施体系,能够在洪涝灾害的应对、吸收、恢复和适应中表现出更高的韧性。此外,长三角地区还存在一定的边界壁垒效应<sup>[36]</sup>,自然边界和经济结构边界壁垒阻碍了省级层面跨区域技术转移,从而抑制了资源的跨地区流动和核心城市对非核心城市的溢出效应,进一步加大了城市洪涝灾害韧性的空间差异性。

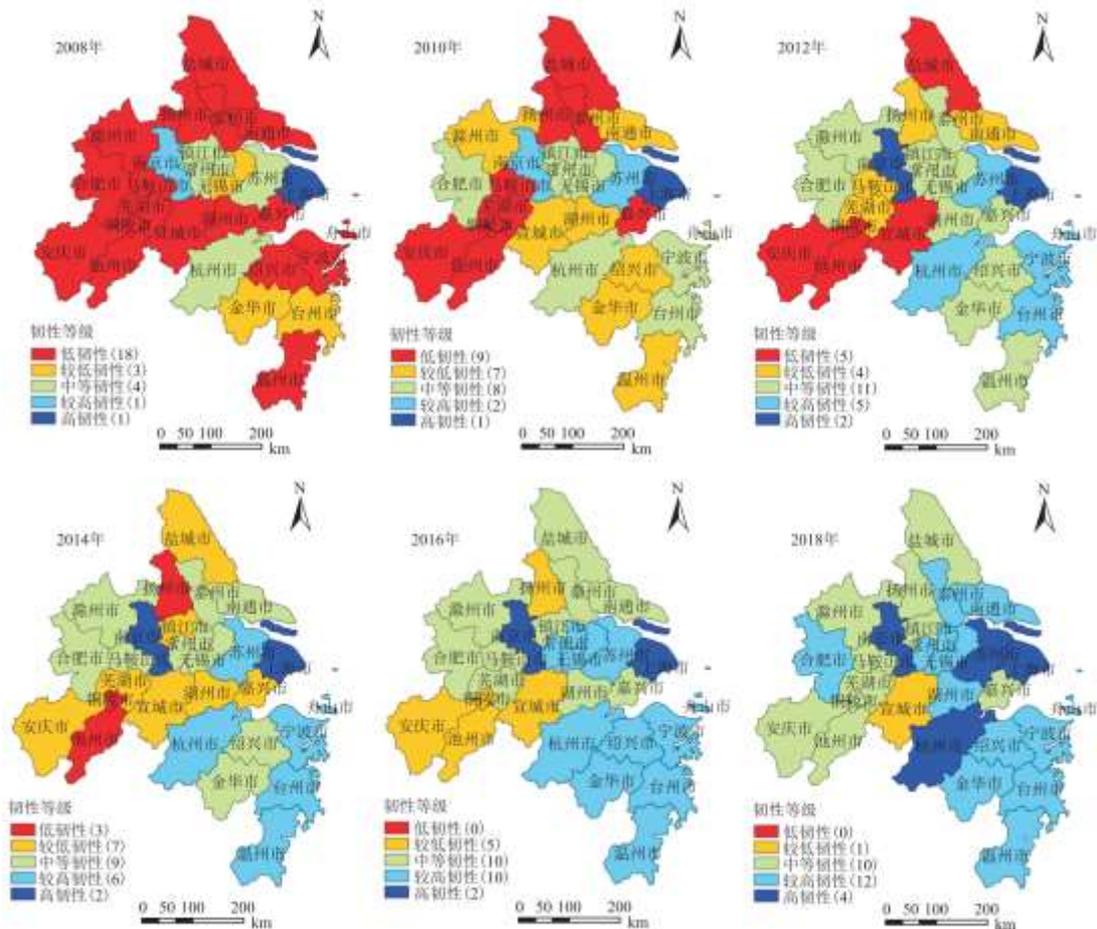


图 3 长三角地区城市洪涝灾害韧性等级空间格局分布图

注：受篇幅所限，仅选取偶数年份城市洪涝灾害韧性指数作图(下同)。

(2) 中高等级韧性城市增多，韧性等级数量结构从单核分布模式向橄榄型分布模式转变

从各韧性等级城市数量来看，2008 年长三角地区高韧性等级城市只有上海市，较高韧性等级城市也只有南京市，而中等韧性及以下城市数量占据主体地位(25 个)，达到城市总数的 92.60%，说明这一时期长三角地区城市韧性水平整体较低，韧性等级数量结构主要是以上海为核心的单核分布模式。到 2018 年，长三角地区城市高韧性等级城市由 1 个逐渐增加至 4 个，较高韧性和中等韧性城市数量也大幅增加，较低韧性及以下等级城市仅有宣城市 1 个，所占比例由 2008 年的 77.78%降至 3.70%。这时在洪涝灾害韧性各等级中处于较低和最高水平的城市数量较少，中等和较高等级的城市数量庞大，呈橄榄型分布模式<sup>1</sup>。可见，长三角地区城市洪涝灾害韧性等级数量结构已从单核分布模式向橄榄型分布模式转变，城市韧性水平整体得到很大程度提升。

## 4 长三角地区城市洪涝灾害韧性的空间关联性特征

### 4.1 全局空间关联特征

应用 GeoDa 软件创建空间权重，并根据公式(11)分别计算出 2008~2018 年长三角地区城市洪涝灾害韧性的全局自相关系数(Moran' sI)。由表 2 可知，11 个年份的 Moran' sI 均为正值，且除 2009 年外其他年份均通过 P 值小于 0.1 显著性检验，说明长三角地区城市洪涝灾害韧性除 2009 年外，其他年份均具有正向的空间自相关性。按 Moran' sI 值的增减变化分为三个阶段，第一个阶段是 2008~2009 年，Moran' sI 值从 0.1466 下降到 0.0920，减小了 0.0546，达到整个研究时段的最小值，空间相关性减弱，空间异质性增强；第二个阶段是 2009~2013 年，Moran' sI 值从 0.0920 增大到 0.2153，增加了 0.1233，达到研究时段的最大值，空间相关性增强，洪涝灾害韧性空间集聚态势和同质性越发显著；第三个阶段是 2013~2018 年，Moran' sI 值从 0.2153 下降到 0.1109，下降了 0.1044，空间分异再次变得明显。

表 2 2008~2018 年长三角地区城市洪涝灾害韧性指数全局莫兰值

年份	Moran' sI	P 值
2008	0.1466	0.0650
2009	0.0920	0.1150
2010	0.1431	0.0710
2011	0.1398	0.0720
2012	0.1914	0.0440
2013	0.2153	0.0310
2014	0.1621	0.0540
2015	0.1594	0.0560
2016	0.1999	0.0460

2017	0.0991	0.0840
2018	0.1109	0.0790

整体来看，长三角地区城市洪涝灾害韧性指数表现为波动式下降的空间集聚模式，全局莫兰系数偏低，空间集聚效应不明显，并且经历了分散-集中-分散的变化过程。其主要原因可能与我国“区域经济协调发展战略”和“沿江经济带以互助互动为中心的协调发展战略”有关，随着一系列协调发展战略的提出，区域之间朝着均衡化方向发展，差异有所减小，灾害韧性的空间异质性的也趋于减弱。然而由于区域协调发展模式还不够成熟，再加上部分城市的城市化起步早、进程快、程度高，如上海、南京、杭州、无锡、宁波等，而有些城市由于自身存在的发展桎梏，导致城市之间的韧性差异短时间内无法减小或消除。城市洪涝灾害韧性在一定程度上能反映出城市发展状况，因此城市洪涝灾害韧性指数的空间集聚呈现出波动下降的特点。由此可见，完善区域协调发展模式，建立更有效的区域协调发展新机制，对缩小区域差异、促进区域一体化发展具有重要意义。

#### 4.2 局部空间关联特征

应用 GeoDa 和 ArcGIS 软件，绘制了长三角地区的韧性指数 LISA 集聚图，如图 4 所示。研究时段内，长三角地区大部分城市的洪涝灾害韧性指数未呈现出明显的局部空间集聚效应，局部空间集聚不显著的城市数量始终占城市总数的 70%以上，集聚显著的城市数量占城市总数的 20%左右，局部空间集聚格局整体表现较为稳定，未出现较大波动。

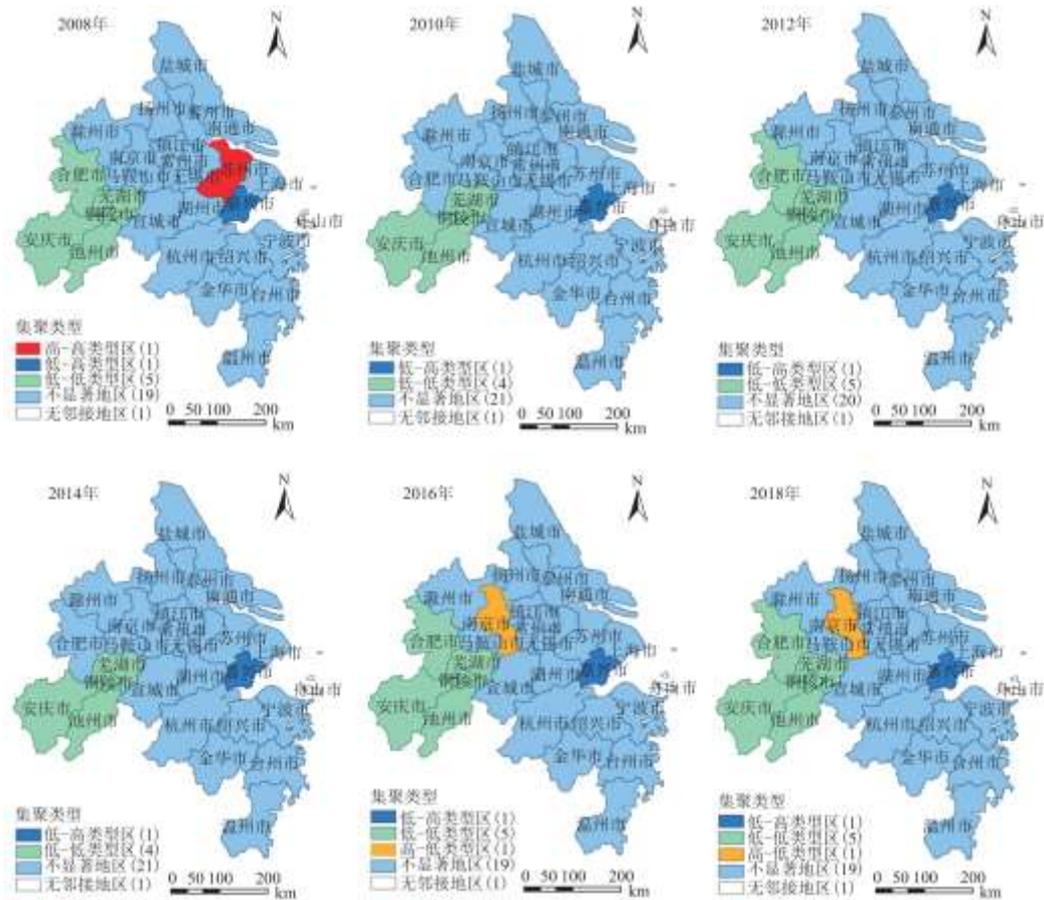


图 4 长三角地区城市洪涝灾害韧性指数 LISA 集聚图

具体来看,多年来局部空间集聚类型中“低-低”类型区一直占主导地位,在空间分布上呈片状分布。除2010和2014年合肥市脱离了“低-低”类型区,其他年份研究区域内“低-低”类型区的范围都未发生变化,主要包括芜湖、铜陵、池州、安庆和合肥五个城市。“高-高”类型区、“高-低”类型区范围较小,在空间分布上呈点状分布。“高-高”类型区仅2008年出现苏州1个城市,之后未出现“高-高”集聚现象;在研究时段的前期无“高-低”类型区,其主要出现在2016年之后的年份,且仅有南京1个城市,说明近年来南京在区域协调发展战略的影响下,社会经济稳步发展,灾害韧性持续提升,逐渐从孕育萌芽阶段迈向成长提升阶段,这类城市对周边城市的影响一般表现为“虹吸效应”大于“辐射效应”,因此高值区被低值区包围,形成“高-低”类型区。“低-高”类型区仅有浙江省嘉兴市,和嘉兴邻近的上海、苏州、杭州等城市都是长三角地区大都市圈(上海大都市圈、杭州都市圈和苏锡常都市圈)的核心城市,经济发展水平相对较高,城市系统较稳定,安全韧性较强,对嘉兴市具有一定的虹吸效应,导致嘉兴的洪涝灾害韧性显著低于周边城市,形成“低-高”类型区。

## 5 结论

本文对长三角地区27个城市2008~2018年洪涝灾害韧性的时空演变特征及空间关联性进行了分析,得出以下结论:

(1)时间序列上,研究时段内长三角地区城市洪涝灾害韧性整体水平呈波动上升趋势,韧性指数均值从0.2565增加到0.3542,发展势头向好;区域内各个城市洪涝灾害韧性差异明显,韧性指数的变异系数波动增大,各城市洪涝灾害韧性水平差异仍可能长期存在,韧性水平处于非均衡化发展阶段。长三角地区城市洪涝灾害韧性水平仍有较大的提升空间,这也表明提升城市韧性仍是长三角地区城市治理现代化和城市高质量发展的一项重要任务。

(2)空间格局上,长三角地区城市洪涝灾害韧性水平存在明显的空间分化特征,西部安徽省除合肥市外,整体处于较低韧性水平,高等级韧性主要集中于上海市和各省会城市;核心区与非核心区城市洪涝灾害韧性差异明显,以上海、南京、苏州、杭州为中心呈现“中心-外围”韧性递减的特征。研究时段内,以上海为中心的核心区内较高韧性水平的城市数量逐渐增加,较低韧性水平城市逐渐减少,处于中高水平的城市数量迅速增多,洪涝灾害韧性等级结构从单核驱动模式向橄榄型结构转变。

(3)空间自相关方面,除2009年外,长三角地区城市洪涝灾害韧性指数均具有正向的空间自相关性,洪涝灾害韧性指数表现为波动式下降的空间集聚模式,全局莫兰系数偏低,空间集聚效应不明显,并且经历了分散-集中-分散的变化过程。研究阶段内长三角地区大部分城市洪涝灾害韧性指数未呈现出明显的局部空间集聚效应,局部空间集聚不显著的城市数量始终占城市总数的70%以上,集聚现象显著的城市数量占20%左右,局部空间集聚类型中“低-低”类型区持续占据主导地位,集聚格局整体表现较为稳定。

通过查阅近些年来《中国气象灾害年鉴》《中国水旱灾害公报》以及研究区洪涝灾情统计资料可以发现,长三角地区各城市中上海市洪涝灾害损失较轻,受灾后能够快速恢复,安徽省城市洪涝灾害损失最为严重,灾后恢复较慢;总体来看,洪涝灾害对经济社会的影响程度和造成损失的相对值呈下降趋势,说明长三角地区城市的灾害防御、适应和恢复能力在不断增强,这也侧面验证了本文评价结果与实际情况基本符合。但由于灾害损失很大程度上还会受到致灾因子和孕灾环境等自然因素影响,而城市韧性也是众多因素共同作用的表现,所以目前城市韧性评价无法做到与实际情况完全一致。

### 参考文献:

[1]WORLD ECONOMIC FORUM.The global risks report 2019.2018,https://www.marsh.com/uk/insights/research/the-global-risks-report-2018.html.

[2]陈军飞,丁佳敏,邓梦华.城市雨洪灾害风险评估及管理研究进展[J].灾害学,2020,35(2):154-159,166.

- 
- [3]蔡建明,郭华,汪德根.国外弹性城市研究述评[J].地理科学进展,2012,31(10):1245-1255.
- [4]邵亦文,徐江.城市韧性:基于国际文献综述的概念解析[J].国际城市规划,2015,30(2):48-54.
- [5]WU S H,GAO J B,WEI B G,et al.Building a resilient society to reduce natural disaster risks[J].Science Bulletin,2020,65(21):1785-1787.
- [6]CUTTER L S,BURTON G C,EMRICH C.Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J].Journal of Homeland Security and Emergency Management,2010(7):1-22.
- [7]ILMOLA L.Approaches to measurement of urban resilience[J].Urban Resilience,2016(8):207-237.
- [8]JONES L,BALLON P.Tracking changes in resilience and recovery after natural hazards:Insights from a high-frequency mobile-phone panel survey[J].Global Environmental Change,2020,62:1-15.
- [9]陈利,朱熹钢,孙洁.韧性城市的基本理念、作用机制及规划愿景[J].现代城市研究,2017(9):18-24.
- [10]张慧,刘耀龙,冯洁瑶.城市化质量、城市韧性对洪涝灾害风险的影响——基于山西 11 个地级市面板数据[J].经济问题,2020(4):114-120.
- [11]张明斗,冯晓青.长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究[J].城市发展研究,2019,26(1):82-91.
- [12]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.
- [13]修春亮,魏冶,王绮.基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J].地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [14]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.
- [15]周侃,刘宝印,樊杰.汶川 Ms 8.0 地震极重灾区的经济韧性测度及恢复效率[J].地理学报,2019,74(10):2078-2091.
- [16]李倩,郭恩栋,李玉芹,等.供水系统地震韧性评价关键问题分析[J].灾害学,2019,34(2):83-88.
- [17]李超超,程晓陶,申若竹,等.城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J].灾害学,2019,34(2):57-62.
- [18]刘建芬,王慧敏,张行南.快速城市化背景下的防洪减灾对策研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(S1):371-373.
- [19]陈昆仑,许红梅,李志刚,等.快速城市化下的武汉城市暴雨渍水空间特征及发生机制[J].经济地理,2020,40(5):129-135.
- [20]丁瑾佳,许有鹏,潘光波.苏锡常地区城市化发展对降雨的影响[J].长江流域资源与环境,2010,19(8):873-877.

- 
- [21]许有鹏, 尹义星, 陈莹. 长江三角洲地区气候变化背景下城市化发展与水安全问题[J]. 中国水利, 2009(9):42-45.
- [22]尹晓东, 董思言, 韩振宇, 等. 未来 50a 长江三角洲地区干旱和洪涝灾害风险预估[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(5):66-75.
- [23]朱金鹤, 孙红雪. 中国三大城市群城市韧性时空演进与影响因素研究[J]. 软科学, 2020, 34(2):72-79.
- [24]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.
- [25]SCHLOR H, VENGHAUS S, HAKE J F. The FEW-Nexus city index-Measuring urban resilience [J]. Applied Energy, 2017, 2(26):1-11.
- [26]SHARIFI A. A critical review of selected tools for assessing community resilience[J]. Ecological Indicators, 2016(69):629-647.
- [27]PHILIP R C, KAREN F, MARCUS J C. Operationalizing urban resilience through a framework for adaptive co-management and design:Five experiments in urban planning practice and policy[J]. Environmental Science & Policy, 2016(62):112-119.
- [28]李亚, 翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J]. 规划师, 2017, 33(8):5-11.
- [29]张婷婷. 长三角区域经济韧性的时空演化及对策研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [30]张鹏, 于伟, 张延伟. 山东省城市韧性的时空分异及其影响因素[J]. 城市问题, 2018(9):27-34.
- [31]赵晓全. 基于“规模—密度—形态”的城市韧性时空演变及影响因素探测——以成德绵经济发展带为例[D]. 成都: 四川师范大学, 2020.
- [32]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.
- [33]殷为华. 长三角城市群工业韧性综合评价及其空间演化研究[J]. 学术论坛, 2019(5):124-132.
- [34]袁金玲. 区域经济韧性的时空演化与影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [35]孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8):151-158.
- [36]鲁飞宇, 殷为华, 刘楠楠. 长三角城市群工业韧性的时空演变及影响因素研究[J]. 世界地理研究, 2021, 30(3):589-600.

#### 注释:

1 橄榄型分布模式指在城市洪涝灾害韧性等级数量结构中, 高韧性与低韧性的城市数量少, 中等韧性的城市数量庞大, 在城市数量分布上其形成的图形类似橄榄球形。