

气候变化背景下城市韧性测度* ——以长三角城市应对雨洪风险为例

Measurement of City Resilience under the Background of Climate Change: A Case Study of Cities in the Yangtze River Delta Responding to Stormwater

林陈贞 郑艳 孙劲 LIN Chenzhen, ZHENG Yan, SUN Shao

摘要 选取长三角城市群27个地级及以上城市开展城市韧性测度研究。基于复杂适应系统理论,将城市韧性界定为一般韧性和特指韧性,构建城市应对雨洪风险的“雨洪致灾危险性—城市韧性”指标体系。通过因子分析客观赋权方法,选择“十二五”和“十三五”两个规划期,对长三角中心城市开展雨洪韧性评估。结果表明,长三角城市的雨洪韧性主要受到城市发展因子、社会保障和外来人口因子、灰—蓝基础设施因子、交通设施因子、绿色基础设施因子的影响。通过比较致灾危险性指数与城市雨洪韧性指数的关系,得到4类典型城市:脆弱型城市15个,高风险城市6个,低风险城市6个,韧性城市缺失。城市化进程与社会发展能力的提升是增强城市一般韧性和特指韧性的重要基础,海绵城市建设有助于提升雨洪基础设施等特指韧性,处于不同韧性类别的城市应采取发展型、增量型等不同适应路径。

Abstract This paper selects 27 prefecture-level and higher cities in the Yangtze River Delta urban agglomeration for the urban resilience measurement research. Based on the theory of complex adaptive systems, urban resilience is described as generic and specific resilience and an index system of "rainfall flood hazard-urban resilience" is established. Through factor analysis, this paper evaluates the stormwater resilience of main cities in the Yangtze River Delta in two planning periods—the 12th and 13th Five-Year Plan. The results show that the stormwater resilience of cities in the Yangtze River Delta is mainly influenced by the urban development factor, social security and immigrant population factor, gray-blue infrastructure factor, transportation facility factor, and green infrastructure factor. By comparing the relationship between disaster-causing index and urban rainfall resilience index, this paper concludes four types of cities: 15 vulnerable cities, 6 high-risk cities, 6 low-risk cities, and resilient cities are missing. The research points out that the urbanization process and the improvement of social development capacity is an important basis for enhancing the generic and specific resilience of cities. Sponge city construction helps to improve specific resilience such as rainwater infrastructure. Cities in different resilience categories should adopt different adaptation paths such as developmental, incremental and transformational adaptation.

关键词 长三角城市群;城市韧性测度;灰—绿—蓝基础设施;气候适应

Key words Yangtze River Delta urban agglomeration; measurement of city resilience; gray-green-blue infrastructure; climate adaptation

文章编号 1673-8985 (2023) 01-0018-07 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230103

作者简介

林陈贞

环境资助者网络CEGA项目官员
硕士, 13358523678@163.com

郑艳

中国社会科学院生态文明研究所
研究员

孙劲

中国气象局国家气候中心
副研究员

0 引言

世界银行、联合国IPCC等国际机构权威报告均将城市地区列为气候变化风险的热点区域。我国东部沿海地区由于地理区位更易遭受台风、暴雨等极端天气事件的侵扰,长期则面临海平面上升的威胁。提升城市^①的气候韧性,建设韧性城市已成为应对气候变化和实现可持续发展的必然选择。2022年6月,我国生态环境部等17部

门联合发布《国家适应气候变化战略2035》,指出要增强城市与人居环境的气候适应能力,并针对长三角一体化战略区域,提出引领气候智慧型经济转型发展和建成气候适应型社会。

城市群作为城市化未来发展的主体形态,已成为人类活动的重要空间和经济社会发展的核心载体。2019年12月1日印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》(2025—

*基金项目:科技部“气候变化风险的全球治理与国内应对关键问题研究”专项所属课题“我国重点领域和典型脆弱区的气候风险及适应研究”(编号2018YFC1509003)资助。

注释: ①本文的研究对象“城市韧性”指向市域范围的城市。

2035年)^②,明确提出要辐射带动长三角地区高质量发展。长三角城市群是我国沿海低地面积最大的区域,27个核心城市在2011—2018年间历经快速城市化和经济高速发展,人口和财富密集,自然灾害频发且生态环境脆弱,气候风险暴露度大。据统计,2011年长三角地区因受自然灾害而发的生活补助达到3.62亿元^③。提高城市韧性尤其是应对雨洪等气候灾害的韧性,减少气候风险带来的潜在损失,对促进长三角城市群安全、实现可持续发展具有积极作用。

1 城市韧性及其测度研究

1.1 韧性城市与韧性理论

“韧性”(resilience)一词源于拉丁文resilio,始于材料学、工程学,后为霍林应用到生态学领域,用以描述生态系统自组织响应冲击的情形。灾害学领域将韧性具体划分为抵御力、恢复力和适应力,基于系统学习能力,韧性又称为演化韧性,即系统阻止、抵御、吸收、适应外来干扰而保持自身基本结构与功能的能力^[1]。韧性也被译为弹性、恢复力,内涵包括:(1)能够应对并吸收外来冲击和胁迫影响的吸收能力;(2)调整和适应外来的冲击或胁迫,并保持整个系统以大致相同的方式继续运作的适应能力;(3)当原有的结构或运作方式不再有效时,从根本上变革该系统属性的转换能力(转型)^{[2]26}。本文采用IPCC的定义,即韧性是社会、经济和环境系统应对危险事件或干扰的能力,以维持其基本功能、特性和结构的方式做出响应或重组,同时保持适应、学习和变革的能力^[3]。气候变化的复杂性、系统性为传统灾害影响及其风险评估带来诸多挑战,在极端天气气候灾害的冲击下,自然和社会经济系统往往处于被动的应激状态,如果缺乏主动的适应行动,很可能难以顺利实现系统的稳态转化^[4-5]。

在气候变化和灾害管理背景下,城市韧性(urban resilience)成为韧性理论关注的重点领域^[6],关注点涉及城市灾害韧性、生态韧性、基础设施韧性、社会韧性、经济韧性、城市治理韧性(一系列机构、组织参与管理特定城市)等相关概念。韧性城市(resilient city)要求通过

政策、机制设计和人财物等资源配置,能够更加灵活地应对气候变化、管理气候风险。这种灵活应对的能力,不仅包括气候风险的防护能力,也包括快速恢复、可持续发展,以及挖掘新的发展机遇的能力。韧性城市研究推动了应对气候变化研究范式的转型,即从传统的风险管理范式(risk-based)转向韧性范式(resilience-based)。传统风险管理范式研究是通过城市风险的识别和防范来增强城市应对灾害的能力,方法主要是基于历史灾害损失和概率风险评估。韧性范式则要求城市在风险背景下增强能力建设,针对日趋极端性、系统性和复合性的气候变化风险,主动适应气候变化、提升城市韧性,这也成为国际社会的新理念^{[2]26}。

韧性理论将城市视为一个复杂的社会—生态系统,强调城市系统内部的主体、要素构成与功能之间具有复杂的相互作用。仇保兴^[7]认为城市复杂适应系统具有主体性、多样性、自治、适当冗余、慢管理,以及能够标识区分特征的特点。当城市子系统面对外界压力和冲击时会引发系统内部的连锁反应,影响系统的结构和演化进程,形成“系统性风险”。“适应性周期”(adaptive cycle)认为生态系统或人类系统都具有自适应能力,在面对外部冲击时能够进行反馈和应对,实现系统再生和创新。“适应性周期”包括4个相对稳定的发展阶段:K——成熟/保育阶段;Ω——释放/孕育阶段;α——更新/重建阶段;r——开发/成长阶段。系统学习能力越强,就有更多的潜力和机会增长^[8]。因此,气候灾害风险对于提升城市韧性既是危机和挑战,也可借助适应行动转化为发展机遇。《欧盟城市适应气候变化战略》将气候适应、韧性都纳入可持续发展的概念框架之下(见图1)^{[9]34}。

1.2 城市韧性测度与评价方法

城市韧性测度与评价是将韧性理论工具化的一个突破口,同时也是当前的一个研究难点。城市韧性评估是对城市现状综合韧性水平、分类型和分领域韧性水平、特征和内部差异、韧性历史演化规律的探索^[10]。国内外学者对城市韧性评价的作用主要有以下关注视角。

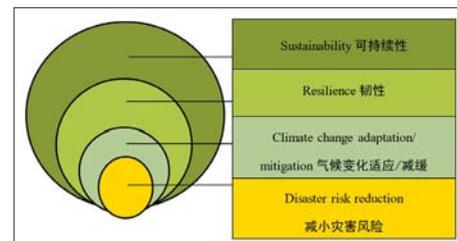


图1 可持续性语境下的当地适应和韧性
Fig.1 Local adaptation and resilience: embedded in the context of sustainability

资料来源:参考文献[9]34。

一是研究城市灾害韧性,发现问题并提出改进对策。例如通过城市应对具体灾害(如洪水、地震、饥荒及高温干旱等)的能力来评估城市系统韧性^[11-12],或者针对能源、道路、水资源管理等城市关键基础设施或子系统进行韧性评价^{[13]1116, [14]1667}。二是探讨城市韧性与城市发展的交互作用。例如城市形态、规模等特征或要素对城市韧性的影响^[15-16],或将韧性与减少贫困、降低脆弱性、更好的城市规划、城市适应气候变化及可持续发展等议题结合^[17-21],研究促进城市应对各种未知风险的韧性之间的因果关联机制。三是提供韧性评价发掘是实现城市韧性管理的有效途径与政策实践等^[22]。将韧性与其他议题关联以期协同解决城市面临的现实问题,表明城市韧性研究的可实践性和价值。

依据韧性与可持续发展的关联,韧性发展出一般韧性和特指韧性两个概念。一般韧性(generic resilience)与发展水平密切相关,指系统吸收任何类型、可预测或不可预测的冲击的能力;特指韧性(specific resilience)指系统特定部分应对特定冲击时的韧性,与城市应对特定风险的治理能力关系密切^[23]。此外,根据城市的构成要素,可将韧性分为硬韧性(关键基础设施韧性等)和软韧性(经济韧性、社会韧性、组织韧性、制度韧性、管理韧性等);根据城市应对的冲击,将特指韧性具体分为如地震、暴雨等类型的灾害韧性;根据城市的职能和部门功能,对如城市经济、社会、生态环境、消防等进行特指韧性评价;或从时空变化来考察城市韧性提升的关键要素^[24]。

城市韧性测度和评估离不开韧性理论的发展。目前学者主要依托已有理论框架开展评价。

注释: ② 中共中央人民政府网, http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm。

③ 数据来源于CNKI—经济社会大数据平台,根据长三角各省市自然灾害损失数额计算加总而得。

例如,将韧性与减少适应主体的脆弱性或增强适应能力关联起来^[25]。脆弱性研究从“脆弱性=(敏感性×暴露度×灾害风险)”的理念出发,辨识城市的慢性威胁(chronic threat)和突发危机(sudden crisis)等,有针对性地保护城市脆弱群体,减少面对灾害风险的暴露度和敏感性,从而提高韧性。在可持续性语境下,可持续性包含韧性,韧性包含气候变化适应(及减缓)和灾害风险降低。适应气候变化能力、风险管理能力是气候变化背景下城市韧性的重要组成部分,表明韧性的丰富内涵与广泛应用^{[9]34}。

目前,国内建设韧性城市仍然只是作为一个政策目标愿景,被决策者纳入规划文件中予以强调,较为欠缺结合中国国情需要、科学适用且具可比性的韧性城市理论和评价方法支撑。研究城市韧性的价值在于城市要完全避免灾害发生的概率较小,应在不确定性下提升自我调整适应能力^[26]。城市韧性测度有助于促进高质量发展,向国际社会倡导的气候韧性发展路径转型。作为我国最重要的战略经济区,长三角一体化发展已上升为国家战略^④。目前对于长三角地区开展了一些初步的气候韧性、适应能力评估研究^[27-29],主要探讨城市社会经济发展与某些城市韧性维度的关联,其结论更多侧重于揭示出一般韧性的发展涵义。本文试图从气候灾害韧性的角度,区分与发展相关的一般韧性及特定风险相关的韧性,依托韧性理论、适应性周期理论,有针对性地辨析处于不同发展阶段、特定气候风险的城市所处的韧性阶段差异,并发掘其背后潜在的影响因素及政策涵义。

2 研究内容与方法

不同学科基于韧性城市的属性、特征或韧性阶段构建评估指标体系开展多尺度及多维度的分析(例如从宏观、中观和微观层面选取城市、区域;从生态环境、基础设施、经济社会发展等维度开展评价)^[30]。本文首先基于适应性周期和韧性城市理论,以城市为复杂适应系统,将城市系统韧性分为一般韧性以及特指韧性,明确城市韧性与发展和适应的关联,为后续的实证分析提供依据。其次,建立城市韧性指标评价体系。多

数指标体系中,各维度选取的指标有可能互有交集,存在较高的相关性,若依据城市应对冲击的关键系统划分维度,维度之间实际不能清楚区分和完全独立。因此本文不通过划分多个子系统的方式构建一级指标体系,而是通过因子分析方法筛选出相关的二级指标,并测算长三角城市群城市的韧性水平。最后,由“雨洪致灾危险性—城市韧性”对城市群进行分类并分析2011年和2018年长三角城市群的韧性表现。

2.1 因子分析方法

探索性因子分析方法(explorative factor analysis)选择一些可观测到的指标(显变量),通过研究多个变量间相关系数矩阵的内部依赖关系,找出能综合所有变量的少数几个随机变量(无法被观测的潜在变量),称之为公因子。根据相关性大小分组,使同组内变量的相关性较高。因子分析的目的是减少变量的数目,用少数因子代替所有变量分析整体问题,以客观赋权的方式获得各因子的权重,通过观测变量,寻找影响城市综合韧性的潜在驱动因素^[31]。

完整的因子分析过程包括数据收集与预处理、公因子提取、指标权重确定和综合韧性指数得分计算。由于气候变化和韧性往往是一个周期性概念,针对政策研究需求,选取“十二五”“十三五”规划期开展对比测度研究。首先,通过各城市统计年鉴、CNKI经济社会发展大数据平台等多渠道收集数据。其次,参考前人研究中的多指标面板数据因子分析方法^[32],通过降维处理,将三维数据表按时间顺序展开为二维表。再次,将长三角城市群的27个城市2年共计54个城市样本^⑤的韧性指标进行软件筛选,剔除公因子提取值不足0.4的指标^⑥。最后,通过各因子方差百分比换算出各因子指标权重。累计方差贡献率表明5个公因子总计能够提取出21个指标共79.558%的信息量。通过方差贡献率为权重计算因子的综合得分。用权重乘以n城市的因子得分 F_{ni} ,叠加之后即可得到最后的综合暴雨洪涝韧性指数。

$$URI_n = \sum_i^n a_i F_{ni} \quad (1)$$

式中:URI为综合暴雨洪涝韧性指数; a_i 为权重; F_{ni} 为n城市在i因子的综合因子得分;n为含时间维度的城市数,共54个;i为软件得出的公因子数,总计5个。

2.2 “雨洪致灾危险性—城市韧性”二维坐标系构建

二维坐标系构建参考郑艳等^{[2]27}、^{[8]35}的城市应对暴雨韧性能力分类方法。

2.2.1 城市雨洪致灾危险性指数

世界气象组织以某个气象要素30年的平均值作为一个气候态。该指数^⑦以1988—2018年作为基准气候态评估期,以暴雨年际变率和暴雨强度两个指标无量纲化^⑧后的平均值为综合雨洪致灾危险性指数 D_i ,即将长三角城市群的雨洪致灾危险性分解为两个层面:(1)暴雨年际变率 σ ,代表城市年暴雨变异日数,使用标准差公式计算可得;(2)暴雨年最大值 R_{max} ,突出极端性,能够反映不同城市的暴雨强度。

暴雨年际变率计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2)$$

式中:n为58年(1961—2018年); x_i 为x城市i年的暴雨日数; μ 为暴雨日数平均值。

城市雨洪致灾危险性指数计算公式如下:

$$D_i = \sigma(n) + R_{max}(n) / 2 \quad (3)$$

式中: $\sigma(n)$ 为无量纲化暴雨年际变率; $R_{max}(n)$ 为无量纲化暴雨年最大值。

2.2.2 城市雨洪综合韧性指数

城市暴雨洪涝综合韧性指数包括一般韧性和特指韧性,城市综合韧性指数={城市一般韧性指数,城市特指韧性指数}。

3 长三角城市韧性评估指标体系

本文从系统韧性角度将韧性分为一般韧性和特指韧性两类。一般韧性对应的是城市的经济韧性和社会韧性。气候变化风险下的经济韧性由人财物等与城市经济活动最密切的生产要素(人力资本、物质资本、经济资本)构成,包括城市经济最活跃且最受气候变化影响

注释: ④据第七次全国人口普查公报数据,2020年末长三角常住人口总量达2.35亿人,土地面积仅占全国的5%,贡献了全国24%的GDP总量。

⑤一般来说,因子分析的样本量至少是变量数的5倍以上,但在实际的情况中,社会经济样本很多时候达不到相应要求,主要通过检验判断结果是否合理可靠。

⑥KMO和Bartlett球形检验中KMO值为0.849>0.5,代表选择的数据指标效果比较好,各变量具有一定的重叠程度,较为合适进行因子分析。Bartlett球形检验显著性为0.000表示拒绝各变量的独立性假设,因子分析的适用性检验通过。

⑦本文采用国家气候中心提供的气象数据。

⑧因篇幅有限此处略去无量纲公式。

的行业领域,也包括城市生命线基础设施,如城市建筑、交通运输、电力、供水等物质基础。社会韧性二维指标参考了联合国“人类发展指标”(HDI)、气候风险认知领域的相关概念和指标。

针对长三角城市群地区暴雨洪涝风险突出的特点,重点评价城市雨洪韧性。针对雨洪灾害特定风险的韧性指标参考海绵城市建设中的“灰、绿、蓝”基础设施的分类。以此区分遭受暴雨洪涝等极端气候事件密切影响的的城市生命线系统。

由于对韧性的理解不同,各个研究在维度选择、指标选择和描述方式上也出现较大的差异。本文进一步在指标体系中突出城市韧性主体。例如,城市居民的气候韧性、适应气候变化的能力和保障自我安全的水平应属于城市韧性研究的一部分(参考年鉴指标,可通过收入、保险购买情况等能反映个人或家庭自我保障能力的方面来表达居民的韧性)。

可供实证分析的评价指标选取原则应具有全面性、导向性和可比性。依据文献和指标可得性等,得到表1的评价指标体系。

表1 城市韧性评估指标体系
Tab.1 Urban resilience assessment index system

城市韧性	维度	一级指标	二级指标
经济韧性	一般韧性	人口	人口密度 [*] (负向)、城镇人口比重、老龄人口比重(负向)、灾害救济情况、外来人口比重 ^{**}
		财富	国内生产总值、对外依存度、人均韧性投入 ^{***}
		物质基础	货运量、人均道路面积、建成区路网密度 ^{****}
社会韧性	一般韧性	卫生健康	公共卫生覆盖率指标、人均预期寿命、空气质量优良率
		收入	城镇居民可支配收入、人均GDP
特指韧性 (以暴雨洪涝韧性为例)	雨洪基础设施韧性	蓝色基础设施	河网密度、湿地面积
		绿色基础设施	森林覆盖率、建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积
		灰色基础设施	防洪堤、建成区排水管网密度、非建成区面积比重
		风险沟通	移动用户占常住人口比重、互联网宽带覆盖率 ^{*****} 、预警信息发布

注: *仅对负向处理的指标进行标注。一般认为,人口密度越大则城市的风险暴露度越高,老龄人口指标同理。 **外来人口比重指该城市(年末常住人口-年末户籍人口)/年末常住人口,表示常住人口以及社会的稳定性。 ***人均韧性投入指城市公共预算中与提升城市韧性相关的财政预算支出/常住人口,包括公共安全、科教卫文、节能环保、农林水事务以及社会保障投入。 ****城市建设年鉴中缺少2018年的建成区路网密度,因此使用道路长度/建成区面积(单位:km/km²)来计算。 *****互联网宽带覆盖率=互联网宽带用户/总户数。

资料来源:CNKI—中国经济社会发展大数据平台、上海统计年鉴、长三角统计年鉴、江苏省统计年鉴、浙江省统计年鉴和安徽省统计年鉴(2012年和2019年)。

4 城市韧性测度实证分析与结果

通过因子分析和坐标系构建得到城市韧性测度的分析结果。

4.1 因子分析结果

4.1.1 城市韧性等级

对韧性指数无量纲化后,使用ArcGIS软件将韧性指数分为5级^①。以2011年、2018年数据分别代表各城市“十二五”“十三五”期间的韧性水平,从城市发展因子来看,各存量性指标7年间均有所增长,对因子得分贡献变大,故2018年的韧性指数普遍高于2011年。对比两年发现,2011年长三角各城市的韧性等级主要分布在1—4级(见图2)。至2018年,韧性等级为4—5级的城市增多(见图3),主要集中在沿海附近地区,形成以上海、南京、杭州为三角形端点的区域。

4.1.2 影响城市韧性的公因子

反映一般韧性的公因子有第1、第2和第4公因子(见表2)。其中,第1公因子包括经济、社会维度的11个相关性较高的指标,被命名为城市发展因子,权重为0.439,对城市综合韧性的影响最为显著。第2公因子简称社会保障与

外来人口因子,权重为0.150,主要指标有养老、医疗保险覆盖率以及外来人口比重,保险覆盖率和人口流动指标表明社会的保障能力和稳定性。第4公因子被界定为交通韧性因子,权重为0.116,由人均道路面积和建成区路网密度构成,体现交通在城市系统中的连接与输送作用。

反映城市特指韧性的是第3和第5公因子,分别被界定为灰—蓝色基础设施因子(权重为0.188)、绿色基础设施因子(权重为0.107)。灰—蓝色基础设施因子表明雨洪设施中蓝色

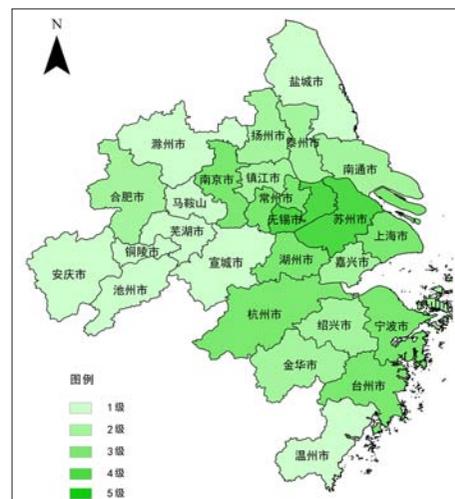


图2 2011年长三角城市暴雨洪涝韧性空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of stormwater resilience in cities in the Yangtze River Delta in 2011
资料来源:笔者自绘。

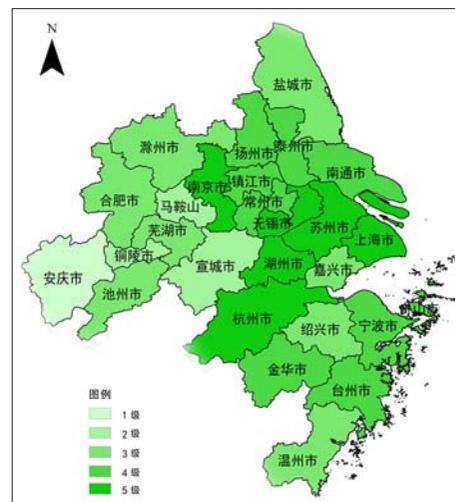


图3 2018年长三角城市暴雨洪涝韧性空间分布图
Fig.3 Spatial distribution of stormwater resilience in cities in the Yangtze River Delta in 2018
资料来源:笔者自绘。

注释: ①按照0—0.180、0.181—0.360、0.361—0.540、0.541—0.744、0.745—1.000范围分为5级。

基础设施河网密度与排水管网和防洪堤代表的灰色基础设施具有较高的相关性,绿色基础设施因子由建成区绿化覆盖率指标和人均公园绿地面积指标构成。

对比一般韧性发现,上海市、江苏省和浙江省各城市的第1公因子都在本次测度的长三角城市平均水平之上,但省内城市水平存在差异,应与各城市发展水平不同有关。总结各省市的一般韧性特点,总体来看上海的城市发展水平最好;江苏省的城市发展和交通韧性水平较好;浙江省各城市城市发展和社会保障及稳定水平较好;安徽省各市的一般韧性中,交通韧性稍显突出,但城市发展和社会保障等水平在长三角城市群中稍显落后。

从特指韧性来看,上海、江苏省大部分城市的灰—蓝色基础设施因子表现好,与其具有高河网密度以及较多的防洪堤设施有关。浙江省和安徽省城市在该因子上的得分次之。安徽省各市的河网密度差异较大,合肥、马鞍山、铜陵及安庆均达到9%以上,而安庆、宣城的排水管网密度不及长三角城市平均水平,安徽省各市防洪堤得分也

较为一般。从绿色基础设施来看,长三角城市总体得分较高,而安徽省各市得分均在长三角平均水平之上,浙江省在城市群总体靠后。

4.2 “雨洪致灾危险性—城市韧性”分类评价结果

将两个指数各取80百分位,得到暴雨致灾危险性指数阈值为0.575,构建暴雨洪涝致灾危险性指数—城市韧性指数二维坐标系,散点图分类结果如图4所示。将暴雨洪涝致灾危险性与综合韧性指数匹配的城市划为韧性城市(高一高)和脆弱型城市(低—低)。二者不匹配的城市划为低风险城市(低—高)和高风险城市(高一低)。由于高致灾危险区域内的城市的韧性指数均未到达前20百分位,所以本次综合韧性评估中在27个城市中没有划分出韧性城市(高一高)。

4.2.1 高风险城市

评价结果筛选出高风险城市6个。高风险城市具有高致灾危险性和低韧性水平,但区内城市韧性水平差距较大。以常州和安庆为例。常州是高风险城市中较为接近韧性城市区间的城

市。其一般韧性在江苏省内为第4位,但在27个城市中仅处在中游;特指韧性得分在第2位,处于27个城市上游。常州的保险密度增长水平高,远超国家2020年预期达到的3 500元的人均额度标准,2018年人均可支配收入及GDP较2011年增长将近一倍,特指韧性中绿色基础设施指标得分也有所上升。常州的暴雨洪涝致灾危险性指数和综合韧性指数并非最高,但相对而言其韧性能力处在长三角城市的中游,特别是特指韧性和暴雨洪涝灾害接近匹配的情况(见图4-图6)。安庆、铜陵、池州一般韧性发展水平较低使其韧性水平较难应对其高致灾风险。安庆的一般韧性在长三角城市中处于较低水平,特指韧性中绿色基础设施较好而处于中等水平。

4.2.2 低风险城市

评价结果筛选出低风险城市6个,具有高韧性—低致灾危险性特征,分别是上海、苏州、无锡、南京、杭州和湖州。这类城市的综合韧性指数居于长三角城市群的前列,大部分城市一般韧性在前20百分位,具有发达的城市发展水平,体现在高度城市化发展、较高水平的社会保障以及交通基础设施。但特指韧性情况有所不同。随着城市化发展,多数低风险城市提高了自身绿色基础设施水平,但灰色基础设施如防洪堤、排水管网密度等指标变化情况略有不同。以杭州为例,杭州的灰—绿—蓝色基础设施指标得分有细微的增长,但绿色基础设施的相对得分却下降,说明评估期内长三角城市群该项得分增速较快,相较之下杭州市的特指韧性在该类型城市中的得分处于相对靠后的位置。

表2 公因子与旋转指标载荷

Tab.2 Common factor and rotation indicator load

因子命名	权重	指标名称	1	2	3	4	5
1. 城市发展因子	0.439	三产占GDP比重	0.912	0.111	0.143	—	-0.107
		保险密度/元	0.899	0.183	0.244	—	—
		城镇常住居民人均可支配收入/元	0.892	0.322	—	—	—
		每万人拥有卫生技术人员	0.870	0.294	—	-0.116	0.217
		互联网覆盖率	0.812	0.466	—	—	0.130
		人均韧性投入	0.741	0.115	0.236	-0.296	—
		移动电话覆盖率	0.716	0.519	—	0.170	—
		城镇人口比重	0.699	0.259	0.401	-0.288	—
		人均图书馆藏书量	0.685	0.349	0.223	-0.398	-0.107
		人均预期寿命	0.643	0.597	0.111	—	—
2. 社会保障与外来人口因子	0.188	GDP	0.642	0.255	0.491	-0.237	-0.291
		城镇职工基本医保覆盖率	0.395	0.787	0.230	-0.146	—
		外来人口比重	0.345	0.719	0.238	-0.208	—
3. 灰—蓝色基础设施因子	0.150	城镇职工基本养老保险覆盖率	0.532	0.717	-0.135	-0.101	—
		河网密度	—	0.339	0.809	—	—
		建成区排水管道密度	0.245	—	0.756	—	—
4. 交通韧性因子	0.116	防洪堤长度	—	—	0.641	0.265	—
		人均道路面积	—	-0.144	—	0.857	0.269
5. 绿色基础设施因子	0.107	建成区路网密度	-0.101	—	0.311	0.766	—
		人均公园绿地面积	—	—	—	0.158	0.873
		建成区绿化覆盖率	—	—	0.162	—	0.870

资料来源:笔者根据实验结果绘制。

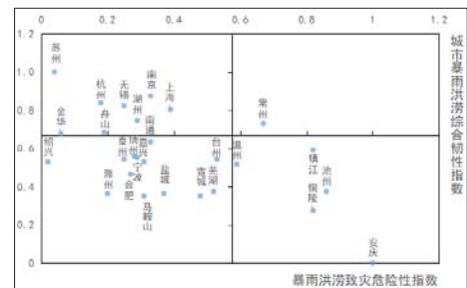


图4 长三角城市群雨洪致灾危险性—城市综合韧性
Fig.4 Rainfall flood risk and comprehensive resilience in cities in the Yangtze River Delta

资料来源:笔者根据实验结果绘制。

注释: ① 排水管网的生长速度小于建成区面积扩展速度则会导致灰色基础设施得分下降。

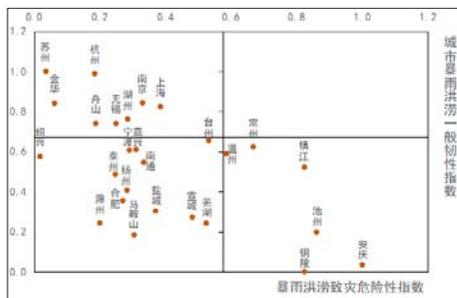


图5 长三角城市群雨洪致灾危险性——城市一般韧性

Fig.5 Rainfall flood risk and generic resilience in cities in the Yangtze River Delta

资料来源:笔者根据实验结果绘制。

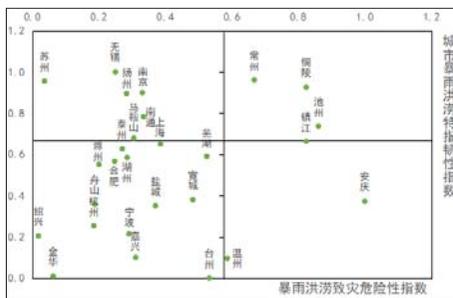


图6 长三角城市群雨洪致灾危险性——城市特指韧性

Fig.6 Rainfall flood risk and specific resilience in cities in the Yangtze River Delta

资料来源:笔者根据实验结果绘制。

4.2.3 脆弱型城市

根据评价结果筛选出脆弱型城市共15个,接近长三角核心城市数量的一半。脆弱型城市雨洪危险性低,但韧性较为不足,其特征主要有两类情况。一类是一般韧性较强但特指韧性不足,主要集中在浙江省城市,如宁波、台州等;另一类是一般韧性和特指韧性都不足的城市,一旦暴雨洪涝致灾危险性高,就转化成高风险城市,如浙江台州以及安徽芜湖、宣城,具体表现为城镇人均可支配收入在省内处于较高水平,但城市外来人口比重、两类保险保障的覆盖率、保险密度以及防洪堤建设水平不高。

5 结论与启示

评价结果表明,长三角城市在省际和区域内呈现梯度分化,且气候风险差异大,应结合《国家适应气候变化战略2035》要求,一方面推进省级适应气候变化方案的编制和实施,从区域层面加强国土空间规划与气候适应需求的衔接;另一方面,鼓励高风险城市、脆弱型城市积极申请第二批气候适应型城市试点。本文提出以下几点具体建议。

5.1 在城市化进程中应兼顾一般韧性与特指韧性建设,提升城市系统的综合韧性

比较发现,韧性在4—5级的城市,其经济社会发展能力基本都比较高。上海、江苏省苏州、南京、无锡以及浙江省杭州和湖州的城市发展得分基本靠前。安徽省各城市的发展水平,尤其是安徽省各城市的GDP、城镇居民人均可

支配收入、城镇人口比重、预期寿命普遍低于上海、江苏省和浙江省城市。其外来人口比重指标也是负值居多,代表各市的人口流动性较强。加上人口的城市化水平不高,致使安徽省的城市发展水平较长三角城市群平均水平略显不足。因此,对比高、低韧性等级的城市发现,提升城市的发展能力是适应气候变化的重要基础。

特指韧性主要体现为与城市水安全综合治理有关的灰—绿—蓝色基础设施水平。从两个五年规划期间的特指韧性来看,长三角城市群半数城市的绿色基础设施得分都有所提升,但特指韧性总体上呈现出下降趋势,许多城市的灰—蓝色基础设施2018年得分低于2011年,可能是由于建成区面积增长较快,灰—蓝色基础设施未能同步增长所致,例如不同城市的防洪堤等设施水平相差较大、海绵城市建设中水面等蓝色基础设施的增长低于城市绿地空间的增长。对此,不同城市可以结合气候风险评估,在高风险区域因地制宜加强海绵城市设计,减小洪涝风险。

5.2 韧性城市建设应重视重点领域和脆弱群体的气候适应投入

长三角城市群作为国家级战略发展区域,未来持续的经济活动和人口增长必将加剧和放大灾害风险,对此应重视提升重点领域和脆弱群体的气候适应能力,加强公共财政投入和市场融资机制。首先,雨洪风险影响最大的是城市交通、电力等基础设施。对于城市群而言,还应加强城市群层面的生命线基础设施风

险防护与协同治理。其次,长三角大部分城市人口密集,老龄化、外来人口众多,对此应加强社区层面的韧性城市试点示范,加强对外来人口的社会保障和保险覆盖面,重视对城市气候脆弱人群的科普教育、应急演练,提高城市居民的风险意识和韧性。除政府提供的公共保障外,个人保险也是一项越来越受到关注的保障机制,但自主保险在有能力支付保险的群体中并非自动触发的机制^[33]。例如安徽省各市的保险服务业(保险密度)水平较低,影响了其一般韧性得分。除合肥的保险密度接近于沿海城市外,安徽省整体的保险密度水平比较低,多数城市不到2 000元/人。按照“新国十条”,到2020年保险密度要从2016年的2 258元/人,上升到3 500元/人^①。最后,与政府科教文卫、生态环境等投入相关的人均韧性投入指标属于一般韧性,地方政府在国民教育、医疗卫生、科技研发的相应投入和建设属于长效机制,难以立竿见影。相比而言,上海、江苏省的城市人均韧性财政支出的平均水平高于浙江和安徽两省。这一公共领域还需要财政的持续投入。

5.3 加强分类指导,不同韧性类别的城市采取不同适应路径

低风险城市的一般韧性较强,城市化发展水平高、交通基础设施良好,应进一步提升特指韧性。大部分低风险城市的特指韧性得分都高于平均水平,例如上海、湖州、杭州、苏州等。对此可以通过识别特定区域的致灾风险、加强增量型适应提高特指韧性。高风险城市需要打造具有暴雨洪涝韧性的安全城市,尤其注重暴雨洪涝影响下的高风险区域、脆弱行业、脆弱群体,例如居住在山洪泥石流高发山区的城乡居民、缺乏住房和社会保障的外来务工群体等。脆弱型城市在长三角地区体现较大的差异和分化,可针对性地采取发展型适应或增量型适应举措,例如沿海的苏浙沪城市台风影响较大、安徽地处山区城市降雨较多,对特指韧性投入不足的城市主要加强增量型适应,对于一般韧性与特指韧性投入均不足的城市,则需要兼顾发展型适应并针对薄弱环节提升特指韧性。^[34]

注释: ① 中华人民共和国国务院办公厅. 国务院印发《关于加快发展现代保险服务业的若干意见》. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/yg/2/Document/1378160/1378160.htm>.

参考文献 References

- [1] 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. SHAO Yiwen, XU Jiang. Understanding urban resilience: a conceptual analysis based on integrated international literature review[J]. Urban Planning International, 2015, 30(2): 48-54.
- [2] 郑艳,林陈贞. 韧性城市的理论基础与评估方法[J]. 城市, 2017 (6):22-28. ZHENG Yan, LIN Chenzhen. Theoretical basis and evaluation methods of resilient city[J]. City, 2017(6): 22-28.
- [3] FIELD C B, BARROS V R, DOKKEN D J, et al. Part a: global and sectoral aspects[M]//The core writing team, PACHAURI R K, MEYER L. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. New York: Cambridge University Press, 2015.
- [4] 高江波,焦珂伟,吴绍洪,等. 气候变化影响与风险研究的理论范式和方法体系[J]. 生态学报, 2017, 37 (7):2169-2178. GAO Jiangbo, JIAO Kewei, WU Shaohong, et al. Theoretical paradigm and a methods system for research on climate change impacts and risks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2169-2178.
- [5] 陈德亮,秦大河,效存德,等. 气候恢复力及其在极端天气气候灾害管理中的应用[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (2):167-177. CHEN Deliang, QIN Dahe, XIAO Cunde, et al. Climate resilience and its implications for China[J]. Climate Change Research, 2019, 15(2): 167-177.
- [6] 翟国方. 我国防灾减灾救灾与韧性城市规划建设[J]. 北京规划建设, 2018 (2):26-29. ZHAI Guofang. China's disaster prevention and mitigation and resilience urban planning and construction[J]. Beijing Planning Review, 2018(2): 26-29.
- [7] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J]. 城市发展研究, 2018, 25 (10):1-3. QIU Baoxing. Methods and principles of designing resilient city based on complex adaptive system theory[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(10): 1-3.
- [8] 郑艳,翟建青,武占云,等. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28 (3):31-38. ZHENG Yan, ZHAI Jianqing, WU Zhanyun, et al. A typology analysis on resilient cities based on adaptive cycle: taking cases of Chinese sponge cities and climate resilient cities pilot projects[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(3): 31-38.
- [9] MORCHAIN D, ROBRECHT H. Background paper for the Council of Europe's report on resilient cities[R]. 2012.
- [10] 杨敏行,黄波,崔翀,等. 基于韧性城市理论的灾害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, 2016 (1):48-55. YANG Minxing, HUANG Bo, CUI Chong, et al. Review and prospect: urban disaster resilience[J]. Urban Planning Forum, 2016(1): 48-55.
- [11] RUS K, KILAR V, KOREN D. Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: a new literature review[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31: 311-330.
- [12] BERTILSSON L, WIKLUND K, DE MOURA TEBALDI I, et al. Urban flood resilience – a multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 970-982.
- [13] ONGKOWIJOYO C S, DOLOIA H. Risk-based resilience assessment model focusing on urban infrastructure system restoration[J]. Procedia Engineering, 2018(212): 1115-1122.
- [14] SHARIFI A, YAMAGATA Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1654-1677.
- [15] SHARIFI A. Resilient urban forms: a macro-scale analysis[J]. Cities, 2019, 85: 1-14.
- [16] DHAR T K, KHIRFAN L. A multi-scale and multi-dimensional framework for enhancing the resilience of urban form to climate change[J]. Urban Climate, 2017, 19: 72-91.
- [17] FRIEND R, JARVIE J, REED S. Mainstreaming urban climate resilience into policy and planning: reflections from Asia[J]. Urban Climate, 2014, 7: 6-19.
- [18] FRIEND R, MOENCH M. What is the purpose of urban climate resilience? Implications for addressing poverty and vulnerability[J]. Urban Climate, 2013, 6: 98-113.
- [19] DEY A, GUPTA A K, SINGH G. Innovation, investment and enterprise: climate resilient entrepreneurial pathways for overcoming poverty[J]. Agricultural Systems, 2019, 172: 83-90.
- [20] JABAREEN Y. Planning the resilient city: concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk[J]. Cities, 2013, 31: 220-229.
- [21] SELLEBERG M M, RYAN P, BORGSTRÖM S T, et al. From resilience thinking to resilience planning: lessons from practice[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 906-918.
- [22] MARANA P, EDEN C, ERIKSSON H, et al. Towards a resilience management guideline—cities as a starting point for societal resilience[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 48: 101531.
- [23] ZHENG Y, XIE X, LIN C, et al. Development as adaptation: framing and measuring urban resilience in Beijing[J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(4): 234-242.
- [24] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.
- [25] MILLER F, OSBAHR H, BOYD E, et al. Resilience and vulnerability: complementary or conflicting concepts?[J]. Ecology and Society, 2010, 15(3): 11.
- [26] 毛炜青,夏兰芳. 城市韧性时空变化监测方法分析[J]. 测绘通报, 2019 (3):141-144. MAO Weiqing, XIA Lanfang. Analysis on spatial-temporal change monitoring of urban resilience[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(3): 141-144.
- [27] 谢欣露,郑艳,潘家华,等. 气候变化下的城市脆弱性及适应:以长三角城市为例[J]. 城市与环境研究, 2013 (1):43-62. XIE Xinlu, ZHENG Yan, PAN Jiahua, et al. Urban vulnerability and adaptation under climate change: taking the Yangtze River Delta cities as an example[J]. Urban and Environmental Studies, 2013(1): 43-62.
- [28] 张恩嘉,张梦洁,彭翀. 长三角城市群经济—社会韧性的时空格局及其关联性研究[C]//共享与品质——2018中国城市规划年会论文集. 北京:中国建筑工业出版社, 2018. ZHANG Enjia, ZHANG Mengjie, PENG Chong. Study on the spatial-temporal pattern and correlation of economic-social resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration[C]//Share and quality: proceedings of 2018 China Annual National Planning Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [29] 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. ZHANG Mingdou, FENG Xiaqing. A comparative study of urban resilience and economic development level of cities in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(1): 82-91.
- [30] 倪晓露,黎兴强. 韧性城市评价体系的三种类型及其新的发展方向[J]. 国际城市规划, 2021, 36 (3):76-82. NI Xiaolu, LI Xingqiang. Three approaches for the assessment on "resilient city" and its new directions[J]. Urban Planning International, 2021, 36(3): 76-82.
- [31] 张文彤. SPSS统计分析高级教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2004. ZHANG Wentong. SPSS statistical analysis advanced tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [32] 任娟. 多指标面板数据融合聚类分析[J]. 数理统计与管理, 2013, 32 (1):57-67. REN Juan. Multi-index panel data fusion cluster analysis[J]. Mathematical Statistics and Management, 2013, 32(1): 57-67.
- [33] LO A Y. The likelihood of having flood insurance increases with social expectations[J]. Area, 2013, 45(1): 70-76.