

# 基于PSR模型的中国直辖市基础设施韧性评估

周欣婷

华东政法大学政府管理学院, 上海

收稿日期: 2024年11月29日; 录用日期: 2024年12月10日; 发布日期: 2025年1月3日

## 摘要

城市基础设施的韧性水平直接关系到城市防灾减灾的能力, 气候变化和人类活动对城市基础设施造成日益增加的压力。选取北京、天津、上海、重庆四个华北、华东和西南地区的中心城市作为研究对象, 基于PSR模型从压力、状态、响应3个韧性维度构建评估指标体系, 使用熵权TOPSIS法赋权并计算2017~2022年间四座城市的基础设施综合韧性水平, 提出相应的对策建议。研究结果表明: 2017~2022年四座直辖市的基础设施韧性水平总体呈上升趋势, 北京的综合韧性水平最高; 不同层级对基础设施韧性水平的影响力有所差异, 状态韧性的影响最为显著, 响应韧性最容易通过人为行动提升。

## 关键词

城市韧性, PSR模型, 基础设施韧性

# Assessment of Infrastructure Resilience Based on PSR Model in China's Four Municipalities

Xinting Zhou

School of Government, East China University of Political Science and Law, Shanghai

Received: Nov. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 10<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2025

## Abstract

The resilience level of urban infrastructure, under increasing pressure caused by climate change and human activities, is directly related to the ability of disaster prevention and mitigation. Beijing, Tianjin, Shanghai, and Chongqing are respectively four central cities in North China, East China, and Southwest China, whose infrastructure resilience level have effect on surrounding areas. Therefore, we select four municipalities as study object, take 2017~2022 as the time dimension, formulate the

evaluation index system based on the Pressure-State-Response Model, and calculate the weights of each index by the Entropy-Weight-Method. The results of the study show that: The infrastructure resilience level of the four municipalities in 2017~2022 is generally on the rise, and Beijing gets the highest score; the score of various dimensions have different impact on the comprehensive infrastructure resilience level, with the state resilience having the most significant impact, and the response resilience being easiest to improve through artificial measure.

## Keywords

Infrastructure Resilience, Urban Resilience, Pressure-State-Response Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

城市是一个集生态、经济、社会、基础设施为一体的复杂系统，且各方面相互依存[1]。随着现代化和城市化的推进，城市逐渐成为政治、经济、文化活动的中心，人们对城市安全的关注也不断加深。“韧性”的概念最初起源于生态学，也被称为“弹性”、“恢复力”，其内涵经历了从工程韧性到生态韧性再到演进韧性的变化[2]，核心仍是抵御、吸收、适应不确定风险的能力[3]。2002年，联合国可持续发展全球峰会上将“韧性”的概念引入到城市建设和防灾减灾领域中，灾害学、地理学、公共管理学、城市规划学等多学科开始将韧性理论作为研究复杂城市系统的新思路，城市韧性的概念在韧性理论的基础上应运而生，成为城市公共安全研究的新主题。

Stanton 等学者将城市韧性划分为制度韧性、经济韧性、社会韧性、基础设施韧性四个组成部分[4]。城市基础设施对维持城市的安全运行至关重要，随着城市的扩张，城市人口增加，生产活动增加，对城市基础设施的运转带来巨大压力，频发的自然灾害也对基础设施造成了威胁。2022年，《“十四五”全国城市基础设施建设规划》中明确指出要“持续增强城市基础设施安全韧性能力”，如何完善城市基础设施建设、提升城市基础设施韧性在城市防灾减灾领域具有重要的研究意义。由于不同城市的内外环境不同，选取北京、上海、重庆、天津四个直辖市的数据，基于压力-状态-响应(PSR)模型构建城市基础设施韧性评估指标体系，以探究各城市基础设施的韧性发展水平，为加强城市建设水平提供对策建议。

## 2. 城市基础设施韧性评价指标体系构建

### 2.1. PSR (压力-状态-响应)模型

PSR 模型，即压力-状态-响应(Pressure-State-Response)模型，最早于 1979 年由加拿大统计学者 David J. Rapport 和 Tony Friend 首次提出，是基于人类、城市系统和环境之间的关系提出的应对环境问题、持续性发展的方法。后逐渐被应用于基础设施脆弱性评价[5]、生态韧性评估[6]、灾害风险评估[7]等研究领域中，是一种较为成熟的研究框架。PSR 模型中的压力、状态和响应三个维度将外部环境系统与系统受到的压力之间的因果关系、压力造成的影响和系统为了适应采取的措施三者联系起来并阐释其相互制约的链式关系，突出了人类活动对系统适应性的影响。

城市基础设施系统是一个开放的系统，包括电力系统、供水系统、道路交通系统等，在受到突发事件冲击后，基础设施系统会经历从平稳到被扰动的动态过程[8]。基于 PSR 模型，将基础设施韧性分为压

力韧性、状态韧性和响应韧性三个维度。压力韧性指基础设施系统面对自然灾害、人类活动等内外部风险时降低负面影响，提升自身抵抗能力；状态韧性指基础设施系统面对突发事件时，维持社会系统日常运转、回复到灾害前日常状态的动态过程；响应韧性指人类社会面对突发事件造成或可能造成的负面影响，采取防御、减缓以及恢复措施，同时不断优化自身结构，以提升防灾减灾能力的动态过程。

2.2. 研究区域与数据来源

北京作为政治中心，上海作为金融、经济中心，天津作为现代海洋城市、北方国际性综合交通枢纽城市，重庆作为内陆兼具水、陆、空、生产服务、商贸服务的“五型”物流枢纽，其基础设施建设水平具有代表性，对附近城市具有辐射作用，四个直辖市所处地理位置和面临的自然灾害类型亦有所差异，作为基础设施韧性的评估对象具有参考意义。

选取 2017 至 2022 年间我国四个直辖市的数据以评估其基础设施韧性水平，数据主要源于四个直辖市的统计年鉴、《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》、生态环境统计年报、水务发展统计公报、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)等，其中气象数据根据学者 Guo K 等[9]的方法划定极端天气标准并计算得出。四大直辖市的数据可获取性较高，原始数据有效值为 100%，并对原始数据进行 Min-Max 标准化处理。

2.3. 评估指标体系构建

遵循客观性、可获取性、全面性和合理性原则，从道路交通系统、供排水系统、能源系统、经济系统等基础设施子系统选取指标，结合文献和直辖市现有基础设施情况，构建城市基础设施韧性水平评估指标体系(如表 1 所示)。

Table 1. Assessment system of urban infrastructure resilience  
表 1. 城市基础设施韧性评估指标体系

目标层	一级指标 (权重)	二级指标(权重)	指标含义(单位)	指标 属性
压力层 (0.228)	自然压力 (0.085)	极端低温天数(0.018)	低于历史日平均气温的最低 10% (天)	-
		极端高温天数(0.022)	高于历史日平均气温的最高 90% (天)	-
		极端降雨天数(0.023)	多于历史日降雨量的最高 95% (天)	-
		极端干旱天数(0.022)	低于历史日湿度的最低 5% (天)	-
	人为压力 (0.143)	人口密度(0.042)	常住人口与行政区面积之比 (人/平方公里)	-
		人均交通事故受损(0.034)	交通事故直接造成损失与常住人口之比 (万元)	-
		人均污水排放量(0.060)	污水排放总量与常驻人口之比 (立方米/人)	-
		人均工业二氧化硫排放量(0.007)	二氧化硫排放总量与常住人口之比 (吨/万人)	-
	能源供应状态 (0.037)	燃气普及率(0.017)	市辖区内的燃气普及率(%)	+
		人均居民生活耗电量(0.020)	市辖区内电力消耗状况(千瓦时)	-
状态层 (0.429)	供水排水状态 (0.031)	人均生活用水量(0.007)	居民生活总用水量与常住人口之比 (立方米/人)	-
		排水管网密度(0.024)	排水管道总长度与行政区面积之比 (公里/平方公里)	+

续表

响应层 (0.342)	交通运输状态 (0.141)	人均道路面积(0.053)	城市道路面积与常住人口之比(平方米/人)	+
		每万人拥有公共交通工具数(0.046)	城市公共交通工具标台数与常住人口之比(辆/万人)	+
		城市轨道交通建成线路长度(0.042)	反映城市轨道交通建设水平(公里)	+
	环境状态 (0.113)	建成区绿化覆盖率(0.051)	绿化覆盖面积与总面积之比(%)	+
		污水处理率(0.030)	经过处理的生活污水、工业废水量与总量排放之比(%)	+
		生活垃圾无害化处理率(0.013)	经过处理的生活垃圾量与生活垃圾产生量之比(%)	+
		PM2.5 平均浓度(0.019)	大气中直径小于或等于 2.5 微米的颗粒物浓度(微克/立方米)	-
	社会经济状态 (0.107)	人均 GDP(0.036)	反映城市经济发展水平(万元)	+
		第三产业 GDP 占比(0.044)	反映城市产业结构和社会化水平(%)	+
		地区生产总值增长率(0.027)	反映城市经济发展水平(%)	+
	预警能力 (0.072)	移动电话普及率(0.043)	反映城市居民获取、传递信息能力(部/百人)	+
		互联网普及率(0.029)	反映城市居民获取、传递信息能力(%)	+
适应能力 (0.171)	每万人中公共管理、社会保障和社会组织人员(0.048)	反映社会治理能力(人)	+	
	本专科在校学生数(0.091)	反映城市居民受教育水平(人)	+	
	科学技术支出占地方一般公共预算支出比(0.032)	反映政府对科技创新的支持程度(%)	+	
	恢复能力 (0.099)	城市公用设施建设固定资产投资额占 GDP 比(0.021)	反映政府对基础设施的投资投入(%)	+
		医疗卫生机构床位数(0.045)	反映城市医疗水平(张)	+
每万人拥有执业医师数(0.033)		反映城市医疗水平(人)	+	

依据来源从自然压力和人为压力两类选取压力层的指标，共 2 个一级指标和 8 个二级指标，包括极端高温、低温、降雨和干旱，人口密度、人均交通事故受损、人均污水排放量等。压力韧性维度的指标展现基础设施韧性系统遭受的负荷，压力值越大，系统应对内外部干扰的能力越弱，指标属性皆为负向。

依据基础设施系统的构成从经济、环境、能源等方面选取状态层的指标，共 5 个一级指标和 14 个二级指标。基础设施的自身的普及率、人均资源消耗量以及对生态环境能够体现基础设施的功能状态和城市居民的生活质量，因此通过排水管网密度、人均耗电量、PM2.5 浓度等指标来评估基础设施的状态韧性。

依据政府和居民应对突发事件的流程从预警能力、适应能力和恢复能力三方面选取响应层的指标，共 3 个一级指标和 8 个二级指标。状态韧性的指标展现基础设施整体系统防灾减灾的能力，能力越强，系统遭遇突发事件后响应和恢复的速度越快，指标属性皆为正向。

2.4. 指标权重计算

采用熵值法来定量计算指标权重，熵值代表其离散程度，熵值越大，离散程度越小，权重越小[10]，反之亦然。具体步骤如下：

第一步，构建原始矩阵。选取  $n$  个年份的数据作为样本，共  $m$  项评估指标，得到矩阵  $X$ ：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个年份的第  $j$  项评估指标的值。

第二步, 数据标准化。由于不同指标的计量单位和维度不同, 所以采用极差法对原始数据进行无量纲处理。

正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

负向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

其中,  $\max(x_j)$  和  $\min(x_j)$  分别为指标  $j$  的最大值和最小值。

第三步, 得到新矩阵:

$$X' = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1m} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \cdots & x'_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ,  $x'_{ij}$  表示标准化后第  $i$  个年份的第  $j$  项评估指标的值。

第四步, 计算各指标熵值, 第  $j$  项指标的熵值为  $E_j$

$$E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m [P_{ij} \ln(P_{ij})] \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (6)$$

第五步, 计算各指标去做那种, 第  $j$  项指标的权重为  $W_j$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (7)$$

基于以上步骤, 计算城市基础设施韧性评估各指标权重, 得到对应相关指标赋值如表 1 所示。

### 3. 研究结果与分析

#### 3.1. TOPSIS 综合评价法

PSIS 法将评估目标视为无限空间中的某个点, 结合计算得到的权重得到每个点与正、负理想解间的相对距离, 计算各项评价指标与理想解的贴近度, 并进行排序。具体步下:

第一步, 将熵权法得到的权重与标准化后的数据相乘得到加权标  $Z$ ,  $Z_{ij}$  表示加权标准化后第  $i$  个年份的第  $j$  项评估指标的值:

$$Z_{ij} = W_j \times x'_{ij} \quad (8)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i1} & \cdots & z_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

第二步, 确定正负理想解, 正理想解为标准化矩阵中的最大值, 记为  $Z^+$ ; 负理想解为最小值, 记为  $Z^-$ ;

$$Z^+ = (\max\{z_{11}, \dots, z_{i1}\}, \dots, \max\{z_{1j}, \dots, z_{ij}\}) = (z_1^+, \dots, z_j^+) \quad (10)$$

$$Z^- = (\min\{z_{11}, \dots, z_{i1}\}, \dots, \min\{z_{1j}, \dots, z_{ij}\}) = (z_1^-, \dots, z_j^-) \quad (11)$$

第三步, 计算不同评估单元与正负理想解之间的距离, 如式(12)、(13)所示

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (13)$$

第四步, 计算指标贴近度  $C$ , 表示当前城市基础设施韧性水平,  $C$  值的取值区间在 0 到 1 之间, 越接近 0, 表示该城市的基础设施韧性水平越低, 反之则表示韧性水平越高。

$$C_j^+ = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (14)$$

### 3.2. 关键贡献指标识别

根据熵值法得到的权重, 准则层对直辖市基础设施韧性水平的相对重要程度排序为状态韧性 > 响应韧性 > 压力阶段。一级指标中, 适应能力(17.1%)、人为压力(14.3%)和交通运输状态(14.2%)权重占比较高。筛选出对直辖市基础设施韧性具有关键贡献的二级指标, 即权重占比排名前十的二级指标, 其中压力韧性维度占 1 个, 状态韧性维度占 5 个, 响应韧性维度占 4 个。

压力韧性维度是人均污水排放量(6.01%); 状态韧性维度依次是人均道路面积(5.32%)、建成区绿化覆盖率(5.07%)、每万人拥有公共交通工具数(4.61%)、第三产业 GDP 占比(4.36%)和城市轨道交通建成线路长度(4.24%); 响应韧性维度依次是本专科在校学生数(9.08%)、公共管理人员(4.84%)、医疗卫生机构床位数(4.50%)和移动电话普及率(4.33%)。

### 3.3. 四个直辖市基础设施韧性水平演变分析

#### 3.3.1. 压力韧性

由图 1 可见, 2017~2022 年间, 四个直辖市中的基础设施压力韧性都维持在相对稳定的范围内, 重庆、北京和上海的基础设施压力韧性都呈现出下降的趋势, 天津在 2022 年有小幅度的上升。重庆的压力韧性一直处于最高水平, 重庆的人口密度低, 废气排放量较少, 极端低温、干旱气象发生频率低, 压力韧性一直较高压水平波动。北京的压力韧性处于较高水平、波动范围较大, 随着近年来人口增速的降低、极端气候的改善和产业结构的优化, 北京的内部压力降低, 压力韧性水平得到改善。上海压力韧性一直处于较低水平, 人口密度是最大的影响因素, 垃圾分类政策的出台和实行、大气污染物排放限值、对人口规模的严格控制都缓解了人类活动对基础设施造成的压力。天津的压力韧性始终处于较低的水准, 高能耗高污染行业聚集导致天津的污染物排放量一直比较高, 对基础设施造成巨大压力, 2019 年后工业二



二氧化硫排放量大幅下降、极端气象发生频率降低，压力韧性水平有所提升。

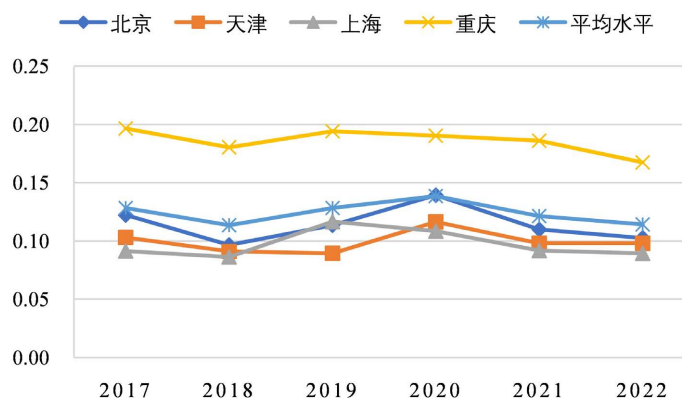


Figure 1. Development trends of stress resilience level in 2017~2022

图 1. 2017~2022 压力韧性水平发展趋势

### 3.3.2. 状态韧性

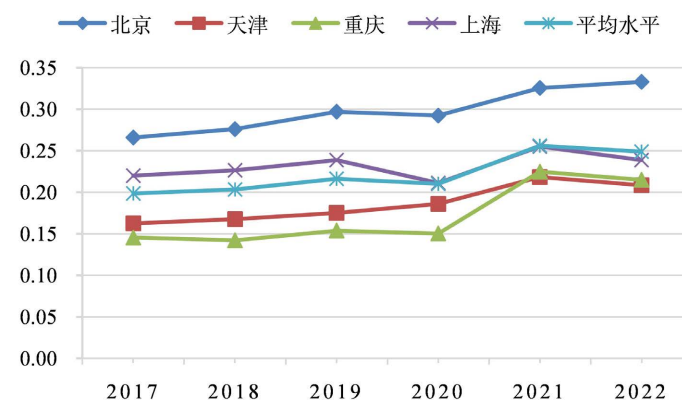


Figure 2. Development trends of state resilience level in 2017~2022

图 2. 2017~2022 状态韧性水平发展趋势

由图 2 可见，2017~2022 年间，四个直辖市的基础设施状态韧性呈现波动上升的趋势，其中北京的状态韧性水平最高，随后依次是上海、天津和重庆。北京的基础设施配备较为完善，绿化、轨道交通等建设完备。上海的基础设施建设受到高密度人口和有限的城市空间限制，在供水排水系统上有所体现。天津的道路建设和排水管道密度排名较高，但绿化和水资源相对较少且资源消耗量远高于其他城市。重庆的状态韧性水平提升最为显著，主要源于社会经济状态和交通运输状态的提升，2020 年重庆重点打造西南地区交通枢纽，交通基础设施建设水平提升、GDP 增速快，基础设施建设水平得到提升。与其余三座直辖市相比，重庆的基础设施状态韧性仍存在较大差距，主要体现在燃气普及率、污水处理率、公共交通工具数和产业结构等方面。

### 3.3.3. 响应韧性

由图 3 可见，2017~2022 年间，四座直辖市的基础设施响应韧性都呈现稳步上升的趋势，北京在 2020 年有所波动，天津一直处于较低状态，重庆的提升速度最快。北京和上海的移动电话、互联网普及率一直处于较高水平，城市居民获取危机信息的能力较强，科技、医疗水平发达，但上海的人口过多、人均

资源较少，在城市公用设施建设上投入的资金也低于其他三座城市。近年来，重庆的互联网成为重庆经济发展的重要产业，网络基础设施不断完善，2022 年重庆的互联网普及率已经超越其他三座城市，在公用设施、医疗卫生上的投资也有大幅提升。天津在通信基础设施、医疗卫生水平上远远落后与其他三座城市，制约了突发事件发生后的应对能力，工业产业聚集给城市的基础设施带来负担且在公共管理上投入的资金、人力也相对较少，响应韧性始终处于较低水平。

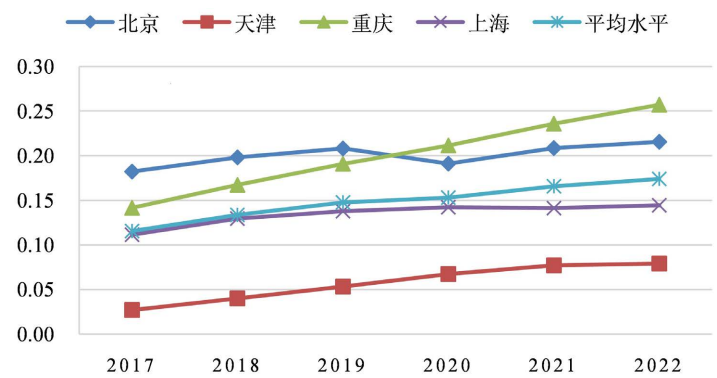


Figure 3. Development trends of response resilience level in 2007~2022  
图 3. 2017~2022 响应韧性水平发展趋势

3.3.4. 直辖市基础设施韧性水平分析

Table 2. Infrastructure resilience levels of municipalities in 2017~2022  
表 2. 2017~2022 年直辖市基础设施韧性水平

城市	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
上海	0.423	0.443	0.494	0.462	0.488	0.473
重庆	0.484	0.490	0.539	0.553	0.647	0.640
天津	0.293	0.299	0.318	0.370	0.394	0.386
北京	0.570	0.571	0.619	0.623	0.644	0.651
平均水平	0.442	0.450	0.492	0.502	0.543	0.537

Table 3. Hierarchy of infrastructure resilience levels  
表 3. 基础设施韧性水平的等级划分

城市	2017	2018	2019	2020	2021	2022
上海	中等级	中等级	中等级	低等级	中等级	高等级
重庆	中等级	中等级	中等级	低等级	中等级	高等级
天津	中等级	中等级	高等级	低等级	中等级	高等级
北京	中等级	中等级	高等级	低等级	中等级	高等级

计算得到的四个直辖市的基础设施韧性综合水平如表 2 所示。根据均值标准差分级法，将四个直辖市 6 年的基础设施韧性水平划分为 3 个等级，即低等级( $0.38 > \text{综合得分} \geq 0.29$ )、中等级( $0.61 > \text{综合得分} \geq 0.38$ )、高等级( $0.65 \geq \text{综合得分} \geq 0.61$ )，结果如表 3 所示。除去 2020 年，四个直辖市的综合得分较为稳定，除去 2020 年大部分处于中级水平，且随时间逐渐提升。

对四个直辖市的基础设施韧性进行纵向评估，探究其韧性水平随时间的变化，2017~2022 年四个直



辖市的基础设施韧性水平见图 4。四个直辖市的基础设施韧性水平总体呈上升趋势，其中北京的基础设施韧性水平最高，重庆其次，二者皆高于四个城市的平均水平；上海在 2020 年前接近平均水平，2020 年后韧性水平提升的速度下降，略低于平均水平；天津的基础设施韧性水平较低，有待提升。

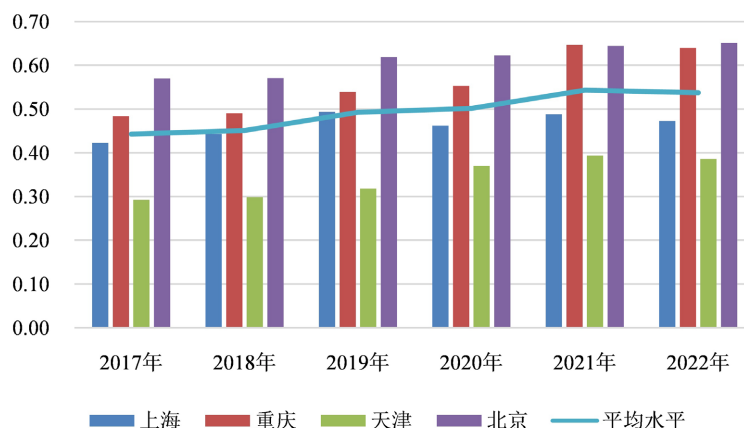


Figure 4. Infrastructure resilience levels in 2007~2022

图 4. 2017~2022 年四个直辖市基础设施韧性水平

2017~2022 年，四座城市的平均压力韧性水平在 0.114~0.139 之间稳定波动；状态韧性从 0.199 提升到 0.256，增长率为 28.95%；响应韧性由 0.116 提升至 0.174，增长率为 50.69%。200 年所有城市的韧性水平下降一方面源于疫情带来的经济指数低，另一方面也受到汛期南方自 1998 年以来最终汛情的影响。城市的内外部压力是客观环境，取决于地理条件、人口密度，压力韧性水平很难被改善；相对的，状态韧性和响应韧性水平都可通过人为方式提升，如优化产业结构、加入对基础设施的投资等。

## 4. 结论与建议

### 4.1. 结论

基于北京、上海、重庆、天津四个直辖市的数据构建以 PSR 模型为基础的城市基础设施韧性评估指标体系，通过熵值法确定指标权重并计算 2017~2022 年四座城市的综合韧性得分和各层级韧性水平，分析影响城市基础设施的因素，并提出相关优化路径。研究发现：

1) 四个直辖市的基础韧性水平有所差异，总体上呈现稳定范围内波动上升的趋势。其中，北京六年的平均得分最高，为 0.613，作为首都，北京的基础设施建设较为完善，在医疗、经济、交通邮电等方面都处于领先水平，状态韧性水平最高，16 年后的人口增速降低和京津冀的产业转移减缓了北京面临的压力，其综合韧性水平稳步提升且处于四个直辖市中最高水平。重庆位居第二，为 0.559，重庆的基础设施水平是四座直辖市中提升最快的，最主要的影响因素是重庆近几年的产业结构优化，大力发展互联网，且在公用设施上的投资也在增加，韧性水平稳步提升。上海第三，为 0.464，四座直辖市中，上海的经济最为发达、基础设施建设相对完善，尤其是在供水排水、轨道交通等方面，然而，上海的人口压力较大、行政土地面积有限，基础设施的提升受到空间上的限制，固定资产投资占财政支出比重少，即使已经通过户籍政策等方式减缓人口增长的速度，其韧性水平提升的难度较大，需要引入更多科技创新技术。天津居于最末，为 0.343，天津的产业结构给天津的基础设施系统带来巨大压力，工业聚集对供排水、电力、环境等状态韧性因素造成压力，且天津的医疗水平、通信网络水平相对落后，即使近年来随着公用设施投资额的提升而有所回缓，也需要更多时间来进一步加强。

2) 压力、状态、响应三个维度对基础设施韧性水平地影响程度有所差异, 占比分别为 22.8%、42.9% 和 34.2%。四座城市在不同层级展现的韧性水平也有所差异, 其中响应韧性水平提升的速度最快。基础设施系统受到的扰动难以改变, 压力韧性随时间变化的幅度不大; 而针对较其他城市更发达的直辖市而言, 人类活动对韧性水平的影响更明显, 包括人口密度、产业结构、邮电基础设施、医疗水平等。

## 4.2. 建议

第一, 加强生态环境保护和交通基础设施建设。在所有一级指标中, 交通运输状态(0.142)和环境状态(0.112)所占权重较高, 对基础设施综合韧性水平的影响较大。此外, 自然环境的改善有助于减缓极端气候带来的自然压力, 优化现有交通基础设施也可以有效缓解城市系统遭受的人为压力。

第二, 实行差异化政策扶持。基于不同城市的实际情况制定财政补贴、税收等因城制宜的政策, 推动产业结构优化和基础设施建设, 如: 上海的基础设施建设水平较高但因人口密度过大导致韧性水平不高, 应加大对公用设施维护、升级的资金扶持, 以提升基础设施运行的效率; 天津在所有层级都处于落后状态, 更需要多管齐下、均衡发展, 首先需要解决的就是工业化对基础设施系统带来的压力, 压力层可以通过控制废气排放、增建污水处理设施建设等措施来缓解, 状态层可以通过推动发展新材料开发、加大科技投入, 优化产业结构等方式来改善, 响应层则需要注意医疗水平的提升。

第三, 建立监测机制, 完善危机响应流程。应加强对气候和地质灾害的实时监测, 定期对重大基础设施进行风险评估, 提升城市基础设施系统本身应对灾害的能力。建立健全的应急管理体系, 制定应急预案、进行危机演练, 提升政府和城市居民的应急响应能力。

## 参考文献

- [1] 陈玉梅, 李康晨. 国外公共管理视角下韧性城市研究进展与实践探析[J]. 中国行政管理, 2017(1): 137-143.
- [2] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [3] 程朋根, 付家能, 李聪毅, 等. 城市韧性量化评估研究进展[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 139-147.
- [4] Jha, A.K., Miner, T.W. and Stanton-Geddes, Z. (2013) Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice. World Bank Publications.
- [5] 张嘉敏, 韩宝明. 基于压力-状态-响应的城市轨道交通客流预测综合后评估体系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(8): 31-35.
- [6] 蒋文鑫, 吴军, 徐建刚. 城市生态韧性与经济发展水平耦合协调关系研究——以江苏省为例[J]. 资源开发与市场, 2023, 39(3): 299-308, 318.
- [7] 史维良, 李博雅. 黄河流域三大城市群城市韧性空间网络结构研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(10): 1767-1780.
- [8] 焦柳丹, 邓佳丽, 吴雅, 等. 基于 PSR+云模型的城市韧性水平评价研究[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 114-120.
- [9] Guo, K., Ji, Q. and Zhang, D. (2024) A Dataset to Measure Global Climate Physical Risk. *Data in Brief*, **54**, Article ID: 110502. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110502>
- [10] 尹萌萌, 刘梦婷, 朱伟, 等. 城市内涝灾害韧性评估及影响因子分析——以福州市为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(10): 61-66.