

doi: 10.12097/gbc.2022.07.059

“双碳”目标下资源型城市韧性发展

刘玲娜^{1,2}, 雷涯邻^{3,4*}, 张万益⁵, 付婧锐³

LIU Lingna^{1,2}, LEI Yalin^{3,4*}, ZHANG Wanyi⁵, FU Jingrui³

1. 北京化工大学文法学院, 北京 100029;

2. 北京化工大学中国工业碳中和研究院, 北京 100029;

3. 中国地质大学(北京) 经济管理学院, 北京 100083;

4. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029;

5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

1. College of Humanities and Law, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Institution for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

5. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要: 依赖高碳发展模式的资源型城市在绿色低碳转型、实现“双碳”目标过程面临诸多风险。通过提升城市韧性将减排压力转化为城市内部减排动力,更好处理“双碳”目标与高质量发展间的协同关系,是最终实现可持续发展的关键。将城市韧性作为资源型城市应对“双碳”目标的实际响应,通过构建资源型城市韧性评估体系,在量化评估 2010—2019 年中国 30 个资源型城市韧性水平的差异基础上,比较了碳排放变化与资源型城市韧性二者间变化关系,主要结果如下:①2010—2019 年中国 30 个资源型城市韧性水平均有提升,但差距在不断扩大;在空间演变方面,资源型城市韧性水平整体呈现东部高、西部低的特征,2013 年之后的表现更明显;从城市内部韧性系统看,经济韧性与生态韧性的协调度较高,为“双碳”目标下资源型城市韧性提升的良好基础;②资源型城市韧性与碳排放的比较研究表明,二者绝对值变化趋势均呈上升状态,增长速率呈现先下降、后上升的趋势,虽然尚未实现“碳达峰”,但城市韧性的增加速率远高于碳排放增速,城市韧性有望成为应对气候变化、实现“双碳”目标的重要手段。基于上述内容,提出构建“双碳”目标下资源型城市韧性评估体系与保障政策体系建设相关建议。

关键词: 资源型城市;城市韧性;“双碳”目标;协调度

中图分类号: P5; F124; X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)08-1361-12

Liu L N, Lei Y L, Zhang W Y, Fu J R. Resilient development of resource-based cities under the dual carbon goals. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1361–1372

Abstract: Resource-based cities that rely on high-carbon development models face many risks in the process of green and low-carbon transformation and achieving the dual carbon goals. Transforming the pressure of emission reduction into the driving force for emission reduction within the city by improving urban resilience, and better handling the synergistic relationship between the dual carbon goals and high-quality development, is the key to the ultimate realization of sustainable development. This study regards urban resilience as the actual response of resource-based cities to the dual carbon goals. By constructing a resource-based city resilience assessment

收稿日期: 2022-07-30; 修订日期: 2023-03-15

资助项目: 国家自然科学基金项目《双碳目标下资源型韧性城市建设路径及保障政策研究》(批准号: 72203210)、中国科协青年人才托举工程项目《气候变化对中国城市韧性的影响机制研究》(编号: 2022QNR001)和中央高校基本科研业务费专项资金资助《气候变化对京津冀地区城市韧性的冲击及其应对策略》(编号: buctrc202313)

作者简介: 刘玲娜(1993-), 女, 博士, 副教授, 从事资源型城市转型研究工作。E-mail: daisyliu1993@163.com

* 通信作者: 雷涯邻(1966-), 女, 博士, 教授, 从事资源环境经济学研究工作。E-mail: leiyalin@cugb.edu.cn

system, it quantitatively evaluates the differences in resilience levels of 30 resource-based cities in China from 2010 to 2019, and compares changes in carbon emissions with resource-based cities. The main results of the relationship between urban resilience are as follows: ①In terms of time evolution, the resilience of 30 resource-based cities increased over time, and the gap in resilience levels between cities continued to expand; in terms of spatial evolution, the resilience of resource-based cities show the characteristics of high in the east and low in the west, which is more obvious since 2013; in terms of the coordinated development of urban resilience, the degree of coordination between economic and ecological resilience is high, which is the resilience of resource-based cities under the dual carbon goals. ②Comparing the urban resilience with the carbon emissions of resource-based cities, the trend of their absolute values is rising, and the growth rate is decreasing first and then rising. Although the resource-based cities have not reached the peak, the growth rate of urban resilience is much higher than the growth rate of carbon emissions. Urban resilience is expected to be an important means of tackling climate change and achieving the dual carbon goals. Based on the above content, suggestions on building a resource-based urban resilience assessment system and safeguarding policy system with the dual carbon goals are put forward.

Key words: resource-based cities; urban resilience; dual carbon goals; coordination degree

中国政府于 2020 年向世界承诺努力实现在 2030 年前“碳达峰”和 2060 年前“碳中和”的目标(以下简称“双碳”目标)。这意味着中国发展模式由化石能源支撑向非化石能源支撑转变,经济增长要实现绿色低碳转型,并逐渐与二氧化碳排放和化石能源、矿产资源脱钩。城市作为人口和经济高度密集的区域,是实现经济社会高质量发展的主阵地,也是应对外界变化风险的主要场所(朱一姝等, 2024)。作为承担中国经济社会发展所需要的 90% 以上的煤炭和石油, 70% 以上的天然气和重要矿产资源的资源型城市,伴随自然资源的持续消耗,会出现产业结构失衡、生态环境破坏等矛盾和问题。据相关测算,在正常达峰情景下,2030 年 126 个资源型城市(地级市)将以 72.65×10^8 t 的 CO_2 排放量达峰,约占当年全国 CO_2 排放总量的 60%(白玮, 2020)。

上述矛盾和问题的积累加大了资源型城市维持自身发展的难度和实现“双碳”目标的挑战。第一,对高碳化石能源的依赖及高成本退出是碳中和革命的最大障碍,特别是资源依赖程度较高的产业和城市将面临发展的根本性变革,并在客观上加速了资源型城市的衰竭步伐(潘家华, 2013; Wang et al., 2018, 2022)。第二,集聚在资源型城市的资源密集型企业面临较大的减排成本压力,对其发展产生难以估量的影响(Janssen et al., 2006; McGlade et al., 2015; Johansson et al., 2016)。第三,资源行业属于敏感行业,“双碳”目标政策必然对资源型城市产生严重影响(Wang et al., 2022; 孙永平等, 2022)。

韧性城市是通过提升城市在面临内、外部风险扰动时有效预测、应对并从中恢复的综合能力,将各类风险带来的损失降到最低,确保城市各方面的基

本运转。“韧性城市”理念已经写入中国《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》。加强城市经济、社会、生态、资源等维度的韧性能力,有望为“双碳”目标下资源型城市转型与发展提供新思路,同时也是经济社会高质量发展的重要保障。总体看,它提供了一套新的工具和方法,以探索城市系统各组成部分之间的非线性互动,并抵御和应对、恢复和适应内部和外部的风险冲击。

“韧性”最初于 20 世纪 70 年代应用于生态学领域,以确定替代生态系统的稳定状态,然后被引入社会科学,以研究社会生态系统的复杂动态性(Adger, 2000)。2002 年,倡导地区可持续发展国际理事会(ICLEI)在联合国可持续发展全球峰会上将“韧性”引入城市建设与防灾减灾领域,有关韧性的相关研究应运而生。2015 年,联合国可持续发展目标(UN-SDGs)将提升城市韧性作为全球可持续发展的目标之一。近年来已转向整合治理、基础设施、资源、环境和生态学方面的跨学科研究(Nathwani et al., 2019; Li et al., 2020)。在欧盟范围内,约 66% 的城市基于“韧性”理念提出气候变化减缓计划(潘家华, 2013; Reckien et al., 2018)。基于城市系统视角,学者们将城市视为一个复杂巨系统,从系统论角度研究和评价城市韧性。2014 年,美国洛克菲勒基金会基于城电系统设计了城市韧性的 4 类评价指标,重在评价城市韧性的行动结果,是一种绩效式评价,主要指标包括城市健康与福祉、经济和社会、体系及其服务、领导力与战略(Rockefeller, 2014)。同年,日本北九州城市中心和很多学者也对城市韧性评估指标体系进行了诸多探讨(Premakumara, 2014; Sharifi et al., 2014)。

中国韧性城市建设还处于起步阶段,重点任务

实施和项目管理经验不足(白玮, 2020; 刘玲娜等, 2022)。作为一个综合、系统而复杂的概念, 韧性城市是社会、经济、生态、治理等方面相互作用的结果, 它能够成为城市应对外界变化的响应方式(Tan et al., 2020)。目前中国学者对于韧性城市的研究分为 2 类, 一是城市规划学者从韧性视角对城市规划设计提出探讨(仇保兴, 2018; 周伟, 2021); 二是社会科学学者对韧性城市的理论和案例进行了研究(高恩新, 2016; 陈玉梅等, 2017)。

虽然韧性理念逐步深入到城市发展与区域管理领域, 但关于资源型城市的相关研究较少, 同时, 以往学者较少深入研究城市各系统韧性及其发展水平。在实际城市发展中, 不同城市系统间的发展各有侧重, 其是否协调发展对相关决策者有重要的参考价值。

“双碳”目标带来一场深刻而广泛的社会经济系统性变革, 在实践中需要运用系统的思维和方法分析如何实现目标。城市韧性是社会、经济、工程、生态等方面相互作用的结果, 是城市应对外界变化的响应方式。“双碳”目标下, 资源型城市建设需要更强的系统观: 需要处理风险与安全的关系、经济高质量发展与碳排放约束的关系等。从发展目标看, 城市韧性建设与“双碳”目标高度一致。两者的共同点均为致力于使社会经济环境发展保持可持续性和繁荣, 提升生态文明、美丽中国、健康中国水平。将两者关联运作, 能够实现“双碳”目标和可持续发展的协同, 达到双赢甚至多赢的局面。从发展路径看, 城市韧性建设是城市实现“双碳”目标的重要条件。“双碳”具有的约束作用, 将对城市产业结构及经济发展带来不同程度的影响。提升城市韧性是缓解和响应这种影响的重要途径或手段。本次研究将资源型城市韧性作为资源型城市应对“双碳”目标的响应, 明确资源型城市韧性水平的差异, 比较碳排放变化与资源型城市韧性二者间的增长差异, 对破解资源型城市可持续发展的实践难题、实现“双碳”目标具有重要的实际应用价值。

1 研究方法 with 数据说明

1.1 指标选取

本文的评价体系基于 2013 年洛克菲勒基金会在美国纽约提出的用于指导城市韧性评价的思想, “用一种可衡量的、基于可获取数据的方式阐述城市

韧性, 这种方式可以为城市规划、实践和投资模式提供建议, 从而更好地使城市在内外干扰中生存和繁荣”(Rockefeller Foundation, 2014), 基于此, 对中国城市韧性在一定程度上进行量化研究。城市韧性评价要在遵循客观和准确原则的基础上, 充分考虑数据可获取性。由此产生的评价结果在一定程度上能够探究中国资源型城市韧性发展的客观规律。在对城市韧性评价指标体系的构建中, 选取指标遵循了科学性、全面性、可获取性、动态性等原则。

城市作为社会经济活动的中心, 是人口高度聚集的自然社会生态系统, 会同时受到多个因素的影响与制约。由于城市韧性评价在不同国家间存在着政治、经济的差异性, 因此在评价过程中要针对不同国家有针对性地评价(Rockefeller Foundation, 2014)。在刘玲娜等(2022)构建的评价指标基础上, 充分考虑资源型城市由于其依托自然资源为主导产业, 将采掘业产值占工业总产值的比重纳入指标体系评价中(表 1)。

在指标体系中, 社会韧性相关指标中具体包含城镇化率、人口自然增长率、城镇失业率、医疗水平和教育相关指标, 能够反映城市社会系统应对风险的能力(Walker et al., 2012); 经济韧性相关指标包含人均 GDP、第三产业占比、城镇居民人均可支配收入等相关指标, 充分体现经济韧性中的经济禀赋和经济结构, 强调多样化的经济行为和经济创新在资源型城市中的重要作用。工程韧性主要包括公共交通客运量、公路线路里程、互联网接入量、移动电话数、用电相关指标等, 选用技术水平和创新能力来反映城市应对变化基础设施的稳健能力, 城市必要的基础设施在应对风险或灾害中能够发挥重要的作用, 是城市韧性的关键资源和基本保障。基础设施的建设能够改善对风险和灾害的防护, 避免城市造成伤害、损坏或损失; 可靠的通信和城市居民的快速移动性, 建立居民和城市服务之间的日常连接, 能够在紧急情况下迅速地大规模疏散和广泛地沟通。生态韧性包含建成区绿化覆盖率、人均水资源、工业固体废物利用率等指标, 较高的资源利用水平和环境治理水平能够满足城市居民应对外界干扰时的基本资源保障, 为保护城市应对变化提供天然的屏障。

1.2 数据来源

选取的 36 个指标主要来源于国家统计局、中国城市统计年鉴、各省市统计局网站、各省市统计年

表 1 中国资源型城市韧性评价体系

Table 1 Chinese resource-based city resilience assessment system

准则层-I	准则层-II	指标层	权重	单位	指向
社会系统 (URS)	人类发展水平	城镇化率	a_1	%	正向
		自然增长率	a_2	%	正向
		人口老龄化程度	a_3	%	负向
	社会发展水平	R&D人员占从业人员比重	a_4	%	正向
		人均文艺活动	a_5	个	正向
	社会治理水平	期末失业率	a_6	%	负向
		每万人社区数量	a_7	个	正向
		人均医院床位数量	a_8	张/10万人	正向
		每万人本专科学生在校数量	a_9	万人	正向
经济系统 (URE)	经济禀赋	规模以上工业企业数占总企业数量比重	b_1	%	正向
		居民存款占居民总收入比重	b_2	%	正向
		人均社会消费品零售总额	b_3	%	正向
		采掘业产值占工业总产值的比重	b_4	%	负向
		人均固定资产投资	b_5	%	正向
		人均GDP	b_6	元	正向
		城镇恩格尔系数	b_7	%	负向
	经济结构	第三产业贡献率	b_8	%	正向
		外贸依存度	b_9	%	负向
工程系统 (URT)	基础设施水平	人均全社会用电量	c_1	kW·h	正向
		人均公路线路里程	c_2	km	正向
		人均供水管道长度	c_3	km	正向
		人均避难场所面积	c_4	m ²	正向
		人均公共交通客运量	c_5	万人次	正向
		人均汽车拥有量	c_6	辆	正向
		人均移动电话数量	c_7	个	正向
		互联网用户占总人口比率	c_8	%	正向
	技术创新能力	人均农业机械总动力	c_9	kW	正向
		人均专利授权量	c_{10}	件	正向
生态系统 (URC)	资源利用水平	能源强度	d_1	吨标准煤/万元	负向
		人均水资源	d_2	m ³	正向
	环境治理能力	生活垃圾无害化处理率	d_3	%	正向
		绿化覆盖率	d_4	%	正向
		污水处理率	d_5	%	正向
		工业固体废物利用率	d_6	%	正向
		PM10浓度	d_7	μg/m ³	负向
		人均二氧化硫排放量	d_8	t	负向

鉴、各省市统计公报等。其中,环境数据主要来源于中华人民共和国生态环境部网站、各省市《环境保护公报》;能源数据主要来源于中国能源统计年鉴;人口数据主要来源于中国人口统计年鉴;专利数据来

源于国家知识产权局;绿化覆盖率主要来自全国土地调查及其年度变化调查、地理国情调查(监测)和偏远地区传感监测数据。极少数缺失数据则使用插补法拟合数据。

1.3 基于改进后的 CRITIC 模型的评价指标权重计算

由于城市韧性测度框架中各指标量纲(单位)的不一致,在对城市韧性测度之前,首先需要对原始数据进行标准化处理,测算各指标及社会、经济、工程和生态子系统的权重,最终计算城市韧性。

(1) 标准化处理

将指标进行标准化处理,能够避免某些极端数据对最终结果造成影响。数据标准化处理方法具体如下,正向指标:

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (1)$$

负向指标:

$$Y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

式中, x_{ij} 表示第 j 个指标的第 i 年实际值, $\max x_{ij}$, $\min x_{ij}$ 分别表示 j 指标在 30 个资源型城市中第 i 年份内的最大值和最小值。同时由上面公式可知, Y_{ij} 为标准化后的指标,且 $Y_{ij} \in [0, 1]$, 其值越大,则表示 x_{ij} 对子系统发展贡献越大,反之,则越小。

(2) 指标权重设置

在指标权重实际计算中,客观赋权法是通过在多种数学模型基础上,利用决策矩阵信息,依靠实际数据计算现实数据的权重。常用方法包含主成分分析法、熵值法、CRITIC 等,在以往的研究中有较多学者使用(张立军, 2015)。CRITIC 模型相较于其他模型,能够更好地考虑评价指标间的对比强度及其冲突性。本次研究基于改进后的 CRITIC 模型(张立军, 2015; 刘玲娜等, 2022), 优化其刻画离散程度的能力,用标准差和平均数的比值反映指标的对比强度和离散程度。改进后的差异程度公式为:

$$d_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \quad (3)$$

式中, d_j 表示第 j 个指标的差异程度, σ_j 为标准差, $\bar{x}_j$ 为该指标的平均数。

确定指标间的相关系数,以积方差方法计算,其数学公式为:

$$r_{jk} = \frac{\sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})(Y_{ij} - \bar{Y}_{ij})}{\sqrt{\sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 \sum (Y_{ij} - \bar{Y}_{ij})^2}} \quad (4)$$

式中, r_{jk} 表示第 j 个评价指标与第 k 个评价指标之间的相关系数。 $\bar{x}_{ij}$ 、 $\bar{Y}_{ij}$ 为平均数。

其次,确定指标对体系的影响,其数学表达式为:

$$C_j = d_j \sum_{k=1}^n (1 - |r_{jk}|), j = 1 \dots n \quad (5)$$

式中, C_j 表示 j 个评价指标对相应体系的影响程度, d_j 表示第 j 个评价指标的标准差,传统模型中 r_{jk} 测算结果存在着正值和负值,其实际反映相关程度并不受指标正负符号的影响,因此在实际测算中,引入绝对值概念的相关系数能够更加准确地测算指标间的相关系数。

确定指标的权重,即将差异性系数归一化处理,则:

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_j}, j = 1 \dots n \quad (6)$$

式中, W_j 为 j 个评价指标的客观权重。

(3) 资源型城市韧性测度模型

A_1, A_2, A_3, A_4 分别代表城市社会韧性权重、经济、工程、生态韧性权重, UR 代表城市韧性总体水平, URS 代表城市社会韧性水平, URE 代表城市经济韧性水平, URT 代表城市工程韧性水平, URC 代表城市生态韧性水平。由此,韧性总体最终测算表达式为:

$$UR = A_1 * URS + A_2 * URE + A_3 * URT + A_4 * URC \quad (7)$$

将 4 个系统计算后的权重带入到公式,则:

$$UR = 0.26 * URS + 0.23 * URE + 0.24 * URT + 0.25 * URC \quad (8)$$

1.4 城市韧性系统协调度计算

城市是一个由多元系统所构成的复杂系统,其中包含了社会、经济、工程和生态系统。各系统间相互依赖、相互发展,同时也相互影响、相互制约,这使得系统发展水平存在差异。城市韧性发展总体水平必然也会受到多元系统韧性水平的影响,多元系统韧性水平的差异又影响着系统间的协调发展。如何在城市韧性提升的同时,保证内部多元系统发展过程中相互协调也是资源型城市韧性需要解决的难题。本文用城市系统的韧性协调度来衡量系统间发展水平,为资源型城市转型提供具体的方向。在衡量的过程中,基于数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)方法,通过数学的规划方法判断决策单元相对有效性。若处于生产前沿面上,决策单元则达到有效(魏权龄, 2000; 吴丹, 2009)。DEA 的基

本模型是 CCR 模型,是在规模报酬不变的假设下得出的协同效率(CRS)。该模型包括投入和产出 2 个导向,本文主要研究投入导向的模型。在实际操作中,将 3 个系统作为输入向量,将其余的 1 个系统作为结果既能够衡量城市系统间的发展协同程度,又能够衡量城市整体转型发展水平。具体模型如下:

$$\min \left| \theta - \epsilon \left(\sum_{r=1}^t s_r^+ + \sum_{i=1}^m s_i^- \right) \right| \quad (9)$$

s.t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- - \theta x_{i0} = 0, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ - y_{r0} = 0, \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \\ s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中,有 n 个决策单元,其输入为 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij})^T$, x_{ij} 为第 j 个决策单元对第 i 种类型投入的投入量。输出为 $y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{rj})^T$, 为第 j 个决策单元对第 r 种类型产出的产出量。 $x_j, y_j \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots, n$)。 s_i^- 和 s_r^+ 分别为松弛变量和剩余变量。 ϵ 为非阿基米德无穷小量,可取 $\epsilon = 10^{-6}$, $\lambda_j, s_i^-, s_r^+, \theta$ 为待估计参量。

在此基础上,本文构建城市韧性系统协调发展的 DEA 模型(魏权龄,2000):

$$\begin{cases} \text{Max} C_h(a/b, c, d) = \frac{U^T y_{bc,d}}{V^T x_a} \\ \text{s.t.} \\ h_j = \frac{U^T y_{(b,c,d)j}}{V^T x_{aj}} \leq 1 \\ U \geq 0, V \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

引入非阿基米德无穷小量 ϵ , 则:

$$\begin{cases} \text{Min}[C_h(a/b, c, d) - \epsilon(e^T s_r^+ + e^T s_i^-)] = V \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_{a/(b,c,d)j} x_{ij} + s_i^- = C_h(a/b, c, d) x_{i0}, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_{a/(b,c,d)j} y_{rj} - s_r^+ - y_{r0} = 0, \\ \lambda_{a/(b,c,d)j} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \\ s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中,输入、输出向量分别为 $V = (V_1, V_2, \dots, V_m)^T$, $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$; $e^T = (1, 1, \dots, 1)^T$ h_j 为效率指数, a, b, c, d 分别为社会、经济、工程和生态系统韧性。 $C_h(a/b, c, d)$ 代表社会子系统与其他 3 个系统的协调度,其余同理。

1.5 研究对象

选取涵盖中国 24 个省份的 30 个资源型城市, 30 个城市涵盖中国东中西部地区。同时,基于《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020)》将城市划分为成长型、成熟型、衰退型和再生型。其中,成长型城市处于资源开发的初始阶段,资源开发行业正在蓬勃兴起;成熟型城市的资源开发行业已经步入正轨,可以很好地支撑中国能源资源的需求;衰退型城市处于第三阶段,资源已经趋于枯竭,难以支撑资源开发行业持续发展;再生型城市处于第四阶段,此阶段的城市依赖于新兴产业的发展,经济社会步入了可持续发展的良性轨道(表 2)。

考虑到不同资源型城市资源禀赋的差异,即矿产资源的种类、数量、密集程度等特征,本次研究依据 30 个资源型城市的支柱产业进一步划分不同类型资源型城市,包含煤炭型、油气型、金属非金属矿产资源型,具体分类见表 3。

表 2 按生命周期资源型城市分类

Table 2 Classified by life cycle resource-based cities

城市类型	资源型城市
成长型城市(5个)	朔州市、南充市、毕节市、榆林市、松原市
成熟型城市(13个)	张家口市、大同市、本溪市、大庆市、宿州市、南平市、百色市、攀枝花市、曲靖市、克拉玛依市、潮州市、东营市、衡阳市
衰退型城市(6个)	乌海市、景德镇市、焦作市、黄石市、韶关市、白银市
再生型城市(6个)	包头市、鞍山市、徐州市、洛阳市、唐山市、张掖市

表 3 按资源禀赋资源型城市分类

Table 3 Classified by resource endowment resource-based cities

城市类型	资源型城市
煤炭型城市(12个)	大同市、朔州市、包头市、乌海市、焦作市、攀枝花市、毕节市、曲靖市、榆林市、宿州市、徐州市、唐山市
油气型城市(5个)	大庆市、东营市、克拉玛依市、南充市、松原市
金属非金属矿产资源型城市(13个)	景德镇市、黄石市、韶关市、白银市、张家口市、南平市、百色市、潮州市、衡阳市、洛阳市、本溪市、鞍山市、张掖市

2 结果与分析

2.1 资源型城市韧性发展水平

2.1.1 数据统计性描述

通过统计描述可以发现,城市韧性值最高与最低区间为 0.18~0.53(表 4)。社会韧性值最高与最低区间为 0.09~0.18,经济韧性值最高与最低区间为 0.02~0.11,工程韧性值最高与最低区间为 0.01~0.12,生态韧性值最高与最低区间为 0.06~0.21。从标准差结果看,城市韧性标准差远高于社会、经济、工程和生态韧性,其中经济韧性标准差最低。

2.1.2 资源型城市韧性时空变化

从时间方面看,2010—2019 年,中国 30 个资源型城市韧性水平整体呈上升趋势,城市间变化规律则存在一定的差异(图 1)。从平均韧性值看,30 个城市平均韧性从 0.30 上升至 0.38,增长率为 26.7%。2010 年韧性水平超过平均韧性水平的城市共有 13 个;至 2019 年,超过韧性平均水平的城市共有 13 个,城市韧性超过平均韧性城市数量持平。其中,唐山市、朔州市、徐州市、湖州市、韶关市、百色市、榆林市、攀枝花市等城市韧性水平始终高于平均水平。

2010 年和 2019 年城市韧性最高和最低的城市分别为韶关市和白银市,这与现阶段城市经济社会发展水平较一致。其中,韶关市城市韧性水平由 0.43 上升至 0.53,涨幅约为 23.3%,低于平均韧性增长水平;白银市城市韧性水平由 0.18 上升至 0.31,涨幅约为 72.2%,增长率远高于平均水平。值得一提的是,30 个城市中黄石市作为“全球 100 韧性城市”试点城市,以构建繁荣、健康、安全和宜居城市为目标,在 2010—2019 年城市韧性水平整体呈上升态势。

表 4 资源型城市韧性结果统计性描述

Table 4 Statistical description of resilience results of resource-based cities

变量	样本容量	均值	标准差	最小值	最大值
总韧性	300	0.33	0.05	0.18	0.53
社会韧性	300	0.13	0.03	0.09	0.18
经济韧性	300	0.04	0.02	0.02	0.11
工程韧性	300	0.06	0.03	0.01	0.12
生态韧性	300	0.09	0.04	0.06	0.12

从空间方面看,资源型城市韧性水平呈东部高、西部低的特征,中西部地区资源型城市韧性增速水平增加逐渐超过东部地区(东中西部地区资源型城市划分依据:沿用 1986 年全国人大六届四次会议、1997 年全国人大八届五次会议及 2000 年国家制定的在西部大开发战略对于地区划分的依据,资源型城市与其对应省份所在区域相同)。这一特征从 2013 年之后表现更明显,表明《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》的政策在一定程度上促进了资源型城市可持续发展水平,但整体效果有限(Wang et al., 2022)(图 2)。

2.1.3 资源型城市各系统间韧性协调度总体评价

城市韧性的发展需要各系统韧性水平不断整体提升及其协调发展。通过对 30 个资源型城市 2010—2019 年社会、经济、工程和生态系统韧性的协调度比较发现,对于经济韧性协调度,其变化从 0.28 到 0.69,涨幅达 146.5%。在 2010 年,它的协调水平处于 4 个系统的末尾,但在 10 年间实现了飞跃式增长(图 3)。一方面,近年来中国经济增长迅速的大环境为经济韧性整体水平的提升夯实了基础;另一方面,伴随着资源型城市转型发展,城市依托技术水平提升、能源效率提高,转变了可持续发展方式,城市社会韧性、工程韧性、生态韧性间的相互作用促进了城市经济的整体发展。

对于生态韧性协调度,30 个资源型城市在起始年份就处于较高水平。协调度从 0.72 增加到 0.84,涨幅达 16.7%。党的十八大提出:“把生态文明建设放在突出地位,融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程,努力建设美丽中国,实现中华民族永续发展”。国家致力于推进资源型城市环境污染治理工程,投入巨资改善资源型城市环境状况。近年来,中国资源型城市资源补偿费持续增长,由 2008 年的 100 多亿元增加到 2013 年的 200 多亿元,增幅巨大。生态韧性协调度的提升意味着中国资源型城市从整体水平上理顺了生态系统与经济、社会、工程系统间的关系,只有在经济稳健发展、社会高效运行、工程技术水平不断提升的情况下,才能更好地提升生态水平。

对于社会韧性协调度,30 个城市整体水平呈下降趋势,降幅达 43.8%。一般来讲,经济韧性、工程韧性、生态韧性的提升能够让城市发展拥有更好的经济基础、更完善的基础设施和交通通讯、更领先的

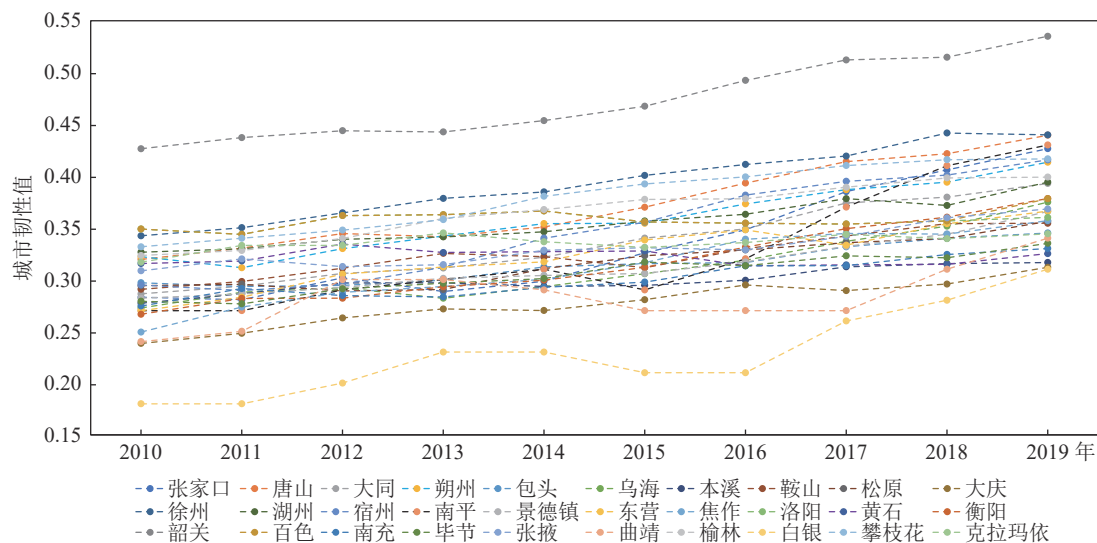


图1 资源型城市韧性发展水平

Fig. 1 The level of resilient development of resource-based cities

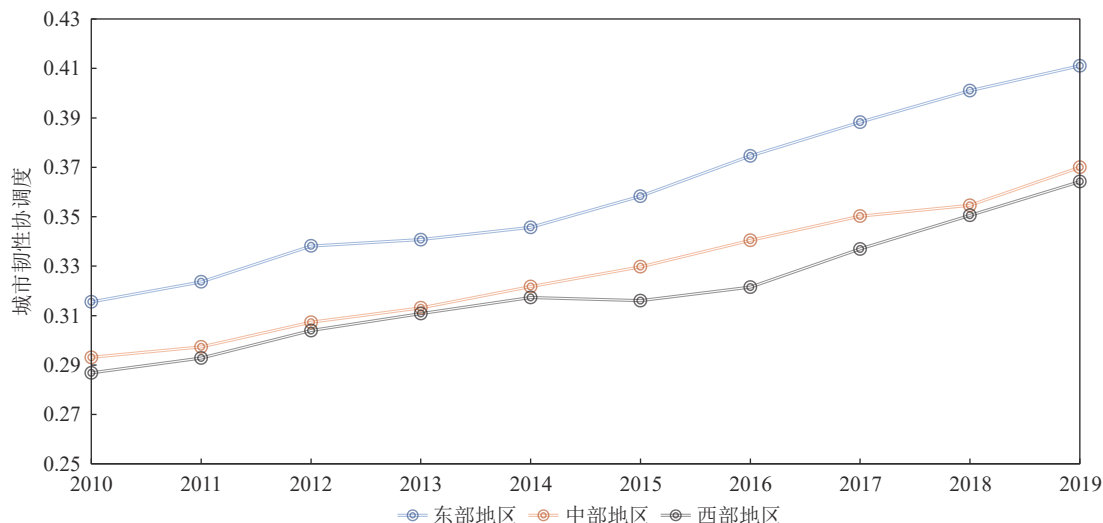


图2 东中西部资源型城市韧性变化情况

Fig. 2 Changes in resilience of resource-based cities in eastern, central and western regions

技术水平和更良好的生态环境,让人们的生活更加快捷和便利,但伴随着城市快速发展,其他系统韧性水平的提升无法较好地解决城市面临的社会问题,诸如人口老龄化、人口流失、医疗保障、社会保障等问题,而这些问题一方面是由于社会发展自身需要面临的问题,另一方面也是伴随着城市其他韧性水平提升,社会发展和社会治理出现了新的挑战。

对于工程韧性协调度,其平均效率在过去10年间整体变化幅度较小,平均效率值从0.55降至0.42,降幅约23.6%。这表明工程韧性与社会韧性、经济韧性和生态韧性的协调发展能力较薄弱,较多城市

在经济发展的过程中虽然不断完善当地的基础设施建设,提升自身的科技创新能力、交通通讯能力,但这种能力在一定程度上没有与经济社会发展相协调,还需要更多的投入。

2.2 “双碳”目标下资源型城市韧性发展

通过城市韧性内部各系统协调发展测算结果可知,经济韧性和生态韧性的协调度较高。面对中国提出“双碳”目标,资源型城市的碳减排行动势在必行。国家在设置合适的城市碳约束目标,促使地方政府积极解决碳问题,降低高污染、高能耗产业的比重,促进产业结构低碳化发展的同时需要适应资源

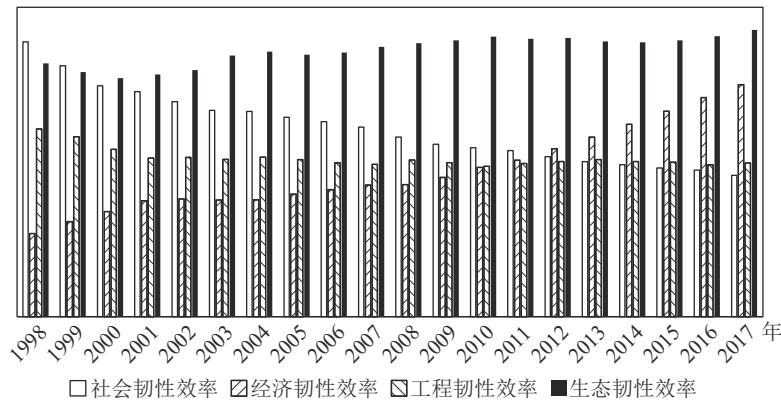


图 3 2010—2019 年 4 个系统韧性协调度动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in resilience coordination of four systems from 2010 to 2019

型城市高质量发展的需要。保障资源型城市内部生态-经济系统的协调发展能够为资源型城市韧性提高、实现资源型城市高质量发展打下良好的基础。为研究“双碳”目标下资源型城市韧性,还需明确碳排放发展趋势,随后进一步比较资源型城市碳排放与当前城市韧性发展水平,为“双碳”目标下资源型城市韧性发展提供有效支撑。

基于 IPCC 碳排放核算法,计算 2010 年与 2019 年 30 个资源型城市的碳排放总量,总体看,近 10 年资源型城市碳排放总量呈上升趋势(图 4)。其中碳排放最高的城市为唐山市,从 2010 年的 $2134.85 \times 10^4 \text{ t}$ 上升至 2019 年的 $2603.63 \times 10^4 \text{ t}$ 。碳排放最低的城市为南平市,从 2010 年的 $180.32 \times 10^4 \text{ t}$ 上升至 2019 年的 $220.28 \times 10^4 \text{ t}$ 。截至 2019 年,碳排放排名前五的资源型城市分别为唐山市、榆林市、大同市、大庆市、徐州市,均位于北方地区,主要为煤炭

型和油气型,且处于成长型和成熟型的资源型城市。由于成长型和成熟型这 2 类城市分别处于资源开发上升阶段和成熟阶段,都需要依赖资源能源的消耗保障经济社会发展,这与现阶段现实情境较为一致。

通过绝对值变化趋势和增长速率变化趋势比较(图 5)可以发现,城市韧性与碳排放整体均呈上升状态,且城市韧性的增加速率远高于碳排放增速,这表明城市韧性有望成为应对气候变化、实现“双碳”目标的重要手段。“双碳”目标要求各国对化石能源的依赖程度逐渐降低,客观上会加速资源城市的衰竭步伐,过快实施偏紧的碳约束政策必然对资源型城市社会经济发展产生严重影响,并传导至资源密集型产业和区域,加剧地区发展的不平衡现象。城市韧性作为资源型城市应对“双碳”目标的响应方式,在城市发展中形成“双碳”目标-经济发展-韧性城

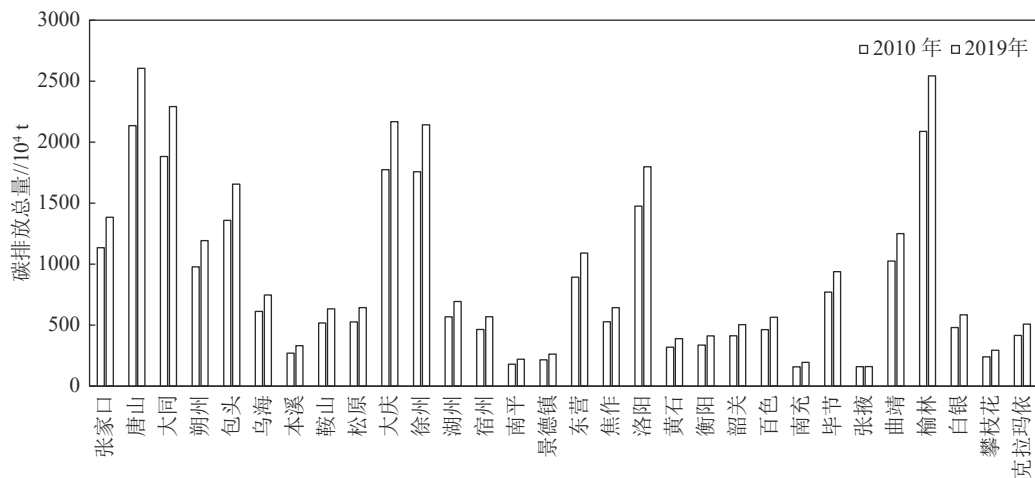


图 4 资源型城市碳排放变化图

Fig. 4 Carbon emissions changes in resource-based cities

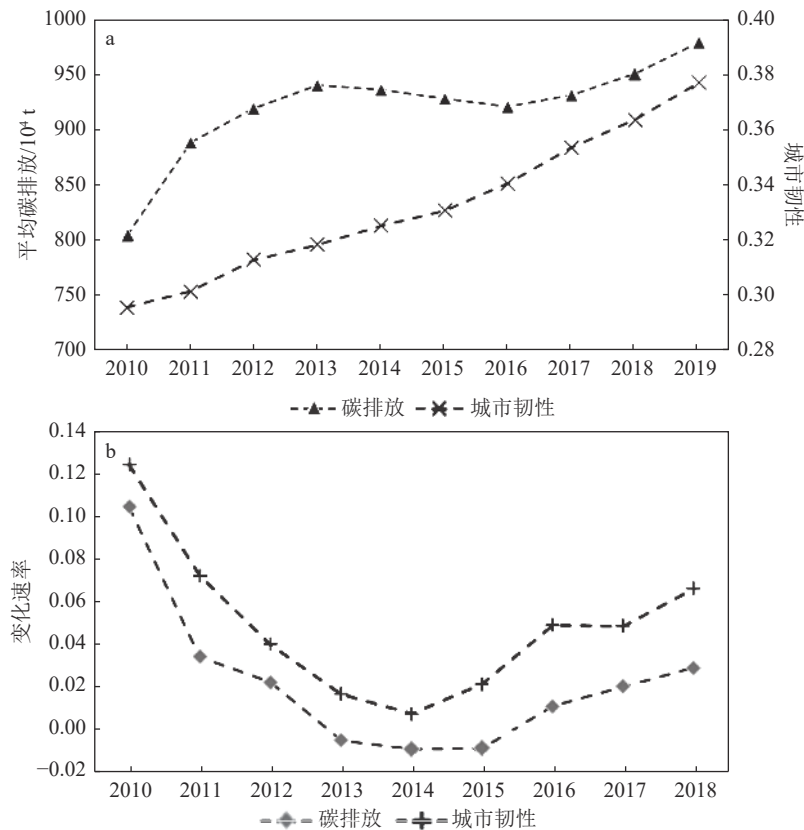


图5 资源型城市碳排放与城市韧性绝对变化趋势图(a)及资源型城市碳排放与城市韧性增长速率变化趋势图(b)

Fig. 5 Absolute change trend of carbon emissions and urban resilience in resource-based cities (a) and trend chart of carbon emissions and urban resilience growth rate of resource-based cities (b)

市”的传导机制,通过城市各系统的协调发展,推动资源型城市健康安全发展。

3 结论与建议

3.1 结论

通过对2010—2019年中国30个资源型城市韧性水平的评估,探讨了资源型城市韧性的时空演变规律及其与碳排放间的关系。主要结论如下。

(1)在时间演变方面,30个资源型城市韧性随时间变化而增加,城市间差距不断扩大;在观测年份城市韧性最高和最低的城市分别为广东韶关市和甘肃白银市,这与现阶段城市经济社会发展水平较一致;在空间演变方面,资源型城市韧性水平呈现东部高、西部低的特征,这一特征从2013年之后的表现更明显。

(2)在城市韧性内部协调发展方面,结果表明经济韧性、生态韧性协调度整体呈现大幅增加,其中经济韧性协调度涨幅高达146.5%,在10年间实现了飞跃式增长,表明资源型城市在发展过程中逐渐转向经济高质量发展阶段。但是,社会韧性、工程韧性协调

度整体呈现小幅下降,其中社会韧性协调度降幅达43.8%,工程韧性协调降幅达23.6%,社会治理和相关基础设施建设是未来资源型城市提升韧性的关键。

(3)在碳排放总量方面,近10年30个资源型城市碳排放总量呈上升趋势,且碳排放较高城市多数为煤炭型和油气型城市,处于成长型和成熟型阶段。进一步将城市韧性与资源型城市碳排放二者绝对值变化进行比较,结果表明,整体趋势呈上升状态且城市韧性的增加速率远高于碳排放增速。未来,城市韧性有望成为应对气候变化、实现双碳目标的重要手段。

3.2 建议

“双碳”目标下城市韧性为资源型城市的可持续发展提供了新的思路,亟需建立新时期下的评估体系。城市韧性是一个城市抵御各种风险的综合能力,将提升城市韧性、发展韧性城市上升国家层面发展规划,能够前瞻性地应对城市发展的各种变化,化挑战为机遇。政府可以推进“韧性城市”建设,将“韧性城市”作为资源型城市应对“双碳”目标的响应,同

时也是实现“双碳”目标、城市安全和高质量发展的的重要手段,从社会、经济、工程、生态等多维度建立城市韧性评估机制,设立完善的绩效评级与考核办法,将更有助于丰富双碳目标评估相关理论方法与技术的空白,最终为实现资源型城市可持续发展提供强有力的政策支持。

“双碳”目标下资源型韧性城市的建设需要优化决策支撑解决方案。“双碳”目标的提出,不仅是对于碳排放量的约束,也意味着经济社会发展方式的变革。最新关于资源型城市的规划性文件是国务院于 2013 年颁布的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》,将 262 个城市确立为资源型城市,并提出了促进其可持续发展的相关内容。新形势下,相关规划对资源型城市转型发展和中国经济高质量发展至关重要。这需要在资源型韧性城市的建设中采取新型决策支撑解决方,即在靠政府层面的规划或指导意见基础上,根据资源型城市的产业结构、生态环境、地理区位等特质,通过多种决策支撑手段,如财政转移支付、税收、金融等多种政策手段,最终建立起涵盖“发展与减排”、“减碳与安全”、“整体与局部”、“近期与长远”、“政府与市场”理念下的新型政策体系及其保障机制。

References

- Adger W N. 2000. Social and ecological resilience: Are they related[J]. *Progress in Human Geography*, 24(3): 347–364.
- Bai W. 2020. The practice and enlightenment of resilient city construction[J]. *Macroeconomic Management*, 12: 77–84 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y M, Li K C. 2017. Overseas studies progress and practice exploration on resilient city –Based on the perspective of public administration[J]. *Chinese Public Administration*, 33(1): 137–143 (in Chinese with English abstract).
- Feng X Z, Cai B F, Wang M, et al. 2017. A comparative study on CO₂ emission of resource-based cities in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 27(2): 5–9(in Chinese with English abstract).
- Gao E X. 2016. Defensiveness, vulnerability and resilience: three paradigms of urban safety studies[J]. *Chinese Public Administration*, (11): 105–110(in Chinese with English abstract).
- Janssen M A, Ostrom E. 2006. Resilience, vulnerability, and adaptation: A cross-cutting theme of the International Human Dimensions Program on Global Environmental Change[J]. *Global Environmental Change*, 16(3): 237–239.
- Johansson C, Abreu P C, Carstensen J, et al. 2016. Human activities and climate variability drive fast-paced change across the world's estuarine-coastal ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 22(2): 513–529.
- Li G, Kou C, Wang Y et al. 2020. System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 161: 104954.
- Liu L N, Lei Y L. 2022. Research on the resilience changes and influencing factors of China's provincial capital cities[J]. *Science & Technology and Economy*, 35(205): 1–5(in Chinese with English abstract).
- McGlade C, Ekins P. 2015. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C[J]. *Nature*, 517(Jan. 8 TN. 7533): 187–190.
- Nathwani J, Lu X, Wu C, et al. 2019. Quantifying security and resilience of Chinese coastal urban ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 672: 51–60.
- Premakumara J, Maeda T, Huang J. 2014. Building Resilient Cities: Lessons Learned from Four Asian Cities[R]. ISAP.
- Pan J H. 2013. Low-carbon: the symbol of building an ecological city[J]. *Informatization of China Construction*, (23): 14–15(in Chinese with English abstract).
- Pan J H. 2022. Transformation of development paradigm and overall coordination of carbon neutrality revolution[J]. *Yuejiang Academic Journal*, 14(1): 19–33, 171–172(in Chinese with English abstract).
- Qiu B X. 2018. Methods and principles of designing resilient city based on complex adaptive system theory[J]. *Urban Development Studies*, 25(10): 1–3(in Chinese with English abstract).
- Reckien D, Salvia M, Oliver C, et al. 2018. How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU–28[J]. *Journal of Cleaner Production*, 191: 207–219.
- Rockefeller Foundation. 2014. City resilience framework [EB/OL]. <http://www.rockefellerfoundation.org/app/uploads/City-Resilience-Framework1.pdf>.
- Sharifi A, Yamagata Y. 2014. Major principles and criteria for development of an urban resilience assessment index[C]//International Conference & Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development. IEEE.
- Sun Y P, Liu L N. 2022. Actively respond to the impact of climate risks on economic resilience[N]. *GuangMing Daily*, 011(in Chinese with English abstract).
- Tan J, Zhang X, Liu L, et al. 2020. Research on the urban transformation performance of China's resource-Based cities[J]. *Economic Geography*, 40(4): 57–64.
- Walker B, Salt D. 2012. Resilience Practice—Describing the System[M]. Island Press/Center for Resource Economic.
- Wang Z, Deng X, Wong C, et al. 2018. Learning Urban Resilience from a Social-Economic-Ecological System Perspective: a case study of Beijing from 1978–2015[J]. *Journal of Cleaner Production*, 183: 343–357.
- Wang Y, Chen H, Long R, et al. 2022. Has the Sustainable Development Planning Policy Promoted the Green Transformation in China's

- Resource-based Cities? [J]. Resources, Conservation and Recycling, 180: 106181.
- Wei Q L. 2000. Data envelope analysis(DEA)[J]. Chinese Science Bulletin, 17: 1793–1808(in Chinese with English abstract).
- WHO. 2016. WHO household energy database[C]. Retrieved from <https://www.who.int/airpollution/data/household-energy-database/en/>.
- Wu D. 2009. Study on the coordinated development evaluation of integrated transportation system based on DEA [D]. Master's thesis of Beijing Jiaotong University (in Chinese with English abstract).
- Zhang L J, Zhang X. 2015. Weighted clustering method based on an improved CRITIC method[J]. Statistics & Decision, 22: 65–68(in Chinese with English abstract).
- Zhou W, Liu L N, Ge J P. 2021-10-29. To enhance ecological resilience and protect urban security[N]. China Natural Resources News, 003(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y S, Wu H Y, Ma M, et al. Multi-scale Spatial Relationship Between Carbon Emissions and Influencing Factors in the Yangtze River Delta[J/OL]. Geological Bulletin of China: 1-10[2024-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240319.0933.003.html>(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 白玮. 2020. 韧性城市建设的实践与启示[J]. 宏观经济管理, 12: 77–84.
- 陈玉梅, 李康晨. 2017. 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, 33(1): 137–143.
- 高恩新. 2016. 防御性、脆弱性与韧性: 城市安全管理的三重变奏[J]. 中国行政管理, (11): 105–110.
- 刘玲娜, 雷涯邻. 2022. 中国省会城市韧性时空演变及影响因素研究[J]. 科技与经济, 35(205): 1–5.
- 潘家华. 2013. 低碳: 建设生态城市的标志[J]. 中国建设信息, (23): 14–15.
- 仇保兴. 2018. 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, 25(10): 1–3.
- 孙永平, 刘玲娜. 2022. 积极应对气候风险对经济韧性的冲击[N]. 光明日报理论版, 011.
- 魏权龄. 2000. 数据包络分析 (DEA)[J]. 科学通报, 17: 1793–1808.
- 吴丹. 2009. 基于 DEA 的综合交通运输系统协调发展评价研究 [D]. 北京交通大学硕士学位论文.
- 张立军, 张潇. 2015. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. 统计与决策, 22: 65–68.
- 周伟, 刘玲娜, 葛建平. 2021. 提升生态韧性, 守护城市安全[N]. 中国自然资源报, 003.
- 朱一姝, 吴涵宇, 马明, 等. 长江三角洲城市群碳排放及其影响因素的多尺度空间关系研究[J/OL]. 地质通报: 1-10[2024-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240319.0933.003.html>.