

管卫华, 徐慧, 吴巍, 等. 基于新发展理念的南京城市韧性综合及动态预测研究 [J]. 地理科学, 2024, 44(4): 681-692. [Guan Weihua, Xu Hui, Wu Wei et al. Comprehensive urban resilience and dynamic prediction of Nanjing City based on the new development concept. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(4): 681-692.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20221098

基于新发展理念的南京城市韧性 综合及动态预测研究

管卫华^{1,2}, 徐慧¹, 吴巍³, 吴小妮¹, 张惠¹, 吴连霞⁴

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023;
3. 江西师范大学城市建设学院, 江西 南昌 330022; 4. 华东师范大学人口研究所, 上海 200241)

摘要: 本文基于新发展理念, 从“经济-社会-生态-工程”4 个维度构建城市韧性测度指标体系, 运用熵值法及综合评价法对 2005—2019 年南京市分维度、分阶段的城市韧性进行量化评估; 借助系统动力学构建南京城市韧性动态仿真模型, 对 2020—2035 年南京城市韧性发展水平进行长时序预测及多情景模拟, 以比较不同情景的发展潜力。结果表明: 2005—2019 年, 南京市综合韧性与分维度韧性整体呈波动上升趋势, 各维度韧性占比在 2005—2010 年间存在显著差异, 自 2010 年起位序转换剧烈, 各韧性占比差距开始缩小, 2019 年经济韧性占比超越工程韧性跃居第 1; 相较于 2019 年, 2035 年时南京市综合韧性水平在自然状态发展、人口高速增长、经济快速增长、生态优先发展及综合协调发展情景下将分别提高 25.62%、27.59%、28.40%、27.19% 和 30.29%, 可见, 综合协调发展情景能最大限度提升南京市城市韧性水平, 且最早达成强度韧性, 其余发展情景则会对部分社会经济等典型指标产生不同程度的负向作用。因此, 今后南京市应注重新发展理念, 持续优化综合协调发展路径, 平衡经济、社会、生态、工程子系统间的关系, 打造韧性城市建设的新范式, 助推城市高质量发展。

关键词: 新发展理念; 韧性; 系统动力学; 多情景模拟; 南京

中图分类号: F299.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)04-0681-12

近年来地震、洪水、新冠疫情等灾害频发, 城市作为典型的高复杂、多主体、高聚集动态系统, 面临外源风险的未知扰动和内源结构的持续变异等多重威胁^[1], 如何提高城市面对不确定性因素的抵御力、恢复力和适应力, 已成为当前城市治理领域的重大难题。中国在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)中明确指出要“建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”, 发展城市韧性已上升为国家战略。

“韧性”也称为弹性, 最早来源于拉丁语“re-

silio”, 意为“回复到原始状态”^[2], 此后韧性概念被其他学科采纳和修改^[3-4], 并广泛应用于自然生态学、社会经济学及城市规划建设等多个领域^[5-6], “韧性城市”一词也应运而生, 逐渐成为 21 世纪以来的研究热点。根据韧性联盟定义, “韧性城市”指城市能够消化并吸收外界扰动, 同时保持原有主要特征、结构和关键功能的能力^[7]。既有研究主要聚焦韧性概念辨析^[8-9]、韧性水平测度^[10-11]和韧性规划理论框架^[12]3 方面。在韧性城市建设方面, 国外提出需要经济、社会、生态、工程 4 个领域的共同努力^[13], 并从不同视角对城市韧性水平进行量化评估^[14-15]。中国的韧性城市研究尚处于起步阶段, 仅有部分城市

收稿日期: 2023-01-14; **修订日期:** 2023-03-22

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJAZH023)、国家自然科学基金项目(42161032)、南京市社会科学基金专项(23YB02)资助。[Foundation: Humanities and Social Science Research Planning Fund Project of the Ministry of Education of China (19YJAZH023), National Natural Science Foundation of China (42161032), Project of Social Science Foundation of Nanjing, China (23YB02).]

作者简介: 管卫华(1970—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士, 主要从事城市和区域地理、资源环境研究。E-mail: guanweihua@njnu.edu.cn

将韧性城市写进政府工作报告和城市总体规划,研究主要集中在对国外经验的借鉴^[16]、内涵概念的辨析^[17]以及城市韧性的宏观评价^[18]等方面。

目前学界有关韧性研究不断丰富,但仍存在以下不足:第一,研究尺度涵盖全国、区域、社区等,但城市层面的韧性变化评估有待深化;第二,城市韧性评价指标选取多基于相同维度的要素,而对不同维度间,以及城市系统内和系统外的作用关系考虑尚不足;第三,研究多聚焦于静态韧性城市评价,城市韧性的动态演变未形成系统的研究范式,对多发展情景下韧性城市提升路径的研究尚不多见。从系统论看,城市是一个自然系统与人工系统相复合的灰色系统,是一个由多要素组合的复杂有机体^[19]。因此,对于城市韧性的研究需要引入复杂系统理论,从系统组成要素、结构功能与过程演变分析入手,测度与解析城市韧性^[20]。2015年党的十八届五中全会(http://www.scio.gov.cn/zd gz/jj/202308/t20230816_751195.html)首次提出“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念,党的二十大报告(https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm)中又指出“贯彻新发展理念是新时代我国发展壮大的必由之路”。韧性城市建设不仅涉及城市安全问题,也涉及城市可持续发展问题,推进韧性城市建设需要结合新发展理念。从城市韧性建设的实践来看,创新发展注重增强韧性提升的驱动力,协调发展注重维持韧性发展与各系统的平衡,绿色发展注重保障韧性与生态环境的和谐,开放发展注重拓展韧性发展的平台,共享发展注重解决资源配置问题。鉴于各城市发展条件不同,相对于单纯比较两个或多个城市的韧性差异,研究同一城市的韧性变化及未来发展态势更有意义^[21]。

由于城市系统中各要素、各子系统的作用会影响到城市韧性的变化,利用新发展理念与韧性水平评价的映射关系构建南京城市韧性水平测度指标体系,体现新发展理念指标变化对城市韧性程度的影响。另外,通过系统动力学建模可以对该指标体系中的城市韧性指标进行模拟预测,从而预测城市韧性变化,而不同情景则体现出新发展理念在不同方面的作用变化。因而,本文基于新发展理念,以“经济韧性、社会韧性、生态韧性、工程韧性”作为4维系统对象,集成南京城市韧性水平测度体系,结合系统动力学相关方法,依照南京市“十四五”规划的发展目标,提出5种不同发展情景,对城市韧性进

行模拟预测,以探求南京市未来城市韧性建设的发展路径,为新时期制定城市韧性发展规划提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南京市位于江苏省西南部、长江下游。2021年南京市下辖11个区,常住人口942.34万人,城镇化率为86.9%,地区生产总值达16355.32亿元^[22]。南京市作为中国东部地区重要的中心城市、全国重要的科研教育基地和综合交通枢纽,是长江三角洲特大城市,具有高流动性、复杂性、开放性和集聚性的城市特征,面临着一定的风险挑战和安全压力,因而如何增强城市韧性,成为南京实现可持续发展面临的重要问题。

1.2 数据来源及预处理

本文研究所用主要指标数据均来自2005—2020年《中国城市统计年鉴》^[22]、《中国城市建设统计年鉴》^[23]、《江苏统计年鉴》^[24]、《南京统计年鉴》^[25]、《江苏省国民经济和社会发展统计公报》(<http://www.jiangsu.gov.cn/col/col88351/index.html>)和《江苏省环境状况公报》(<http://sthjt.jiangsu.gov.cn/col/col83555/index.html>)。由于数据搜集过程中存在个别年份部分指标缺失的问题,运用线性回归插值法进行增补^[26]。

2 研究思路和方法

城市韧性的变化是经济、社会、生态、工程各子系统相互联系与协同作用的结果,因而需将经济韧性、社会韧性、生态韧性、工程韧性一并纳入考虑。同时,兼顾城市韧性系统的驱动力、各系统间发展的平衡、城市韧性与生态环境的和谐、系统的开放性,以及系统中资源的合理配置等问题。通过构建基于新发展理念与韧性水平评价的映射关系的多层次、多视角的指标测度体系,对2005—2019年南京市城市韧性水平进行整体及阶段性的全面评估。根据各变量间的因果关系集成SD模型,对南京市自然状态下2020—2035年的韧性发展水平进行模拟预测。基于南京市“十四五”和2035年发展规划目标,通过调整人口出生率、各产业产值增长率、节能环保支出占比、社会保障与就业支出占比等相关参数,设定多种发展情景,并对比不同情景下未来南京城市各维度韧性水平及主要指标变化,从而辨析南京市城市韧性建设的最优发展路径,并据此提出

相应对策和建议。

2.1 南京市城市韧性评价体系构建

当前,对城市韧性评价研究多从自然、经济、社会、物质和制度 5 个维度^[27]及经济、社会、市政设施和生态环境 4 个维度^[28]展开探讨。由于数据可获得性,自然/生态、社会、经济、工程/基础设施环境的指标应用更为广泛^[29]。基于新发展理念构建城市韧性评价指标,不仅能够体现城市系统内各子系统间关系,还能为后面城市韧性优化方案的设定提供依据。据此,本文参照相关研究结果^[18, 30-31],结合新发展理念,从经济、社会、生态、工程韧性 4 个维度选取 49 个二级指标构建起城市韧性综合测度评价体系(表 1),对 4 个维度得分加权求和计算综合韧性水平。

经济韧性体现在经济系统面对经济风险时的稳定性与脆弱性^[17],引外资、扩外贸可以有效增强

经济活力,推动国际交往与合作,从而维持经济系统的稳定性和抗风险能力。结合开放的新发展理念选取国际旅游外汇收入、对外贸易进出口额、实际利用外资投资额等进行表征。城市经济发展差异、产业结构失衡和支配收入较低等会加剧区域发展不平衡不充分的态势^[32],合理的财税政策及产业结构的调整优化可为经济高质量发展提供有力的保障。结合协调的新发展理念选取财政收入、财政支出、人均 GDP、第二产业 GDP 占比、第三产业 GDP 占比等指标。

社会韧性重点在于解决民生问题,为居民提供完善优质的公共资源,防范防控资源的过度集中化分配引发社会结构失序、功能失调^[33],因此不断提升就业创业水平、激发培育城市的创新动能、增强医疗以及养老服务、倡导基础教育优质均衡发展水平,逐步缩小社会差距,是提升社会韧性的重要举

表 1 南京市城市韧性综合评价指标体系及权重

Table 1 Comprehensive evaluation index system and weights of urban resilience in Nanjing City

维度	指标	权重	属性	理念	维度	指标	权重	属性	理念
经济韧性 (0.2487)	国际旅游外汇收入	0.0134	+	开放	社会韧性 (0.3183)	万人大学生数	0.0072	+	创新
	对外贸易进出口额	0.0142	+	开放		高新技术产业产值占比	0.0136	+	创新
	实际利用外资投资额	0.0144	+	开放		城镇失业率	0.0214	-	共享
	国内生产总值	0.0228	+	协调		万人医生数	0.0322	+	共享
	财政收入	0.0238	+	协调		社会从业人员	0.0116	+	共享
	财政支出	0.0129	-	协调		社会从业人员占比	0.0122	+	共享
	人均GDP	0.0228	+	协调		社会福利支出占比	0.0319	+	共享
	人均储蓄余额	0.0501	+	协调		万人养老机构床位数	0.0254	+	共享
	R&D人员占比	0.0233	+	协调		二产从业人员占比	0.0217	+	共享
	第二产业GDP占比	0.0154	+	协调		三产从业人员占比	0.0149	+	共享
工程韧性 (0.2321)	第三产业GDP占比	0.0165	+	协调	生态韧性 (0.2009)	万人医疗机构床位数	0.0217	+	共享
	居民人均可支配收入	0.0189	+	协调		平均每一专任教师负担中小學生数	0.0367	+	共享
	人均供水量	0.0266	+	共享		交通运输、仓储、邮政从业人口占比	0.0332	+	共享
	人均用电量	0.0134	-	共享		公共管理、社会保障从业人口占比	0.0347	+	共享
	公共汽车数量	0.0158	+	共享		污水处理率	0.0306	+	绿色
	综合能源消费量	0.0254	-	共享		废水排放量	0.0210	-	绿色
	移动电话用户数	0.0149	+	共享		环保支出占比	0.0137	+	绿色
	互联网接入用户数	0.0261	+	共享		单位GDP电耗	0.0147	-	绿色
	人均拥有道路面积	0.0104	+	共享		单位面积污染物	0.0199	-	绿色
	地铁运营线路长度	0.0434	+	共享		建成区绿化覆盖率	0.0265	+	绿色
	全社会客运周转量	0.0148	+	共享		废气中SO ₂ 排放量	0.0319	-	绿色
	全社会货运周转量	0.0195	+	共享		污染项目投资额占比	0.0167	+	绿色
	建成区排水管道密度	0.0126	+	共享		城镇空气质量达标率	0.0118	+	绿色
	社会保障支出占比	0.0093	+	共享		生活垃圾无害化处理率	0.0088	+	绿色
						工业固废综合利用率	0.0053	+	绿色

措。结合创新的新发展理念,选取万人大学生数、高新技术产业产值占比,反映城市潜在人力资本及创新能力;结合共享的发展理念,选取社会从业人员占比、万人医疗机构床位数、万人养老机构床位数、平均每一专任教师负担中小学生数、社会福利支出,反映基本教育、医疗、卫生、养老服务水平。

生态韧性与生态系统密不可分,是城市可持续发展的有力保障。南京除面临长江生态保护压力外,还存在污染防治问题。依据绿色发展观念,从自然环境状况及生态环境治理两方面考虑“三废”污染程度、污染物的转化利用和节能环保支出,选取污水处理率、环保支出占比、城镇空气质量达标率、工业固体废物综合利用率等指标加以表征。

工程韧性代表城市基础设施能否保障居民生活和城市的正常运行,表现在城市资源的供需水平、交通运输能力、信息通信网络及排水管道工程建设等方面,旨在通过增强基础设施的承灾能力来提升系统稳定性和安全防护性^[34]。结合共享的新发展理念,选取人均供水量、综合能源消费量、互联网接入用户数、人均拥有道路面积、全社会货运周转量、建成区排水管道密度等指标。

2.2 系统动力学模型的构建

SD模型可以模拟复杂系统的动态行为和评估替代政策的选择,揭示系统组分、管理策略和绩效之间的复杂反馈和非线性交互,适合韧性城市演化模拟^[35]。同时,可以利用系统动力学中的因果循环关系对城市韧性进行评价^[36]。为揭示南京市韧性系统与各要素间的交互关系,本文在构建韧性指标测度体系基础上,采用Vensim仿真软件构建南京市“人口-经济-生态-公共服务”SD模型,从动态视角对不同发展条件下城市系统的韧性变化进行预测,根据韧性及主要指标的演变趋势,提出南京市城市韧性发展的优化路径,为制定实现高质量协调发展的韧性城市建设方案提供参考。其中,人口系统作为社会系统的重要组成部分,其变化影响到经济和社会服务系统的变化,以及生态系统和基础设施承载能力,作用到经济、社会、生态、工程韧性的变化。公共服务系统突出体现在服务城市系统运行中,对社会服务、基础设施服务和生态环境保护的功能。公共服务系统通过提升营商环境、增强人口承载力和吸附力,为经济韧性和社会韧性提升提供动力。经济韧性的发展反过来可以保障和改善民生,促进社会韧性的发展。同时,这也体现出系统中的关键

要素变化对城市韧性的作用,为制定建设韧性城市的不同方案提供依据。

根据南京市韧性系统中“人口-经济-生态-公共服务”各要素和系统间的因果关系,构建南京市城市韧性SD模型存量图,主要分为人口、经济、生态、公共服务等子系统(图1),该SD模型的主要参数及变量特征方程的确定有对历史数据进行算数平均处理,采用回归方法、时间函数、表函数的形式,以及在人口、经济系统中借鉴中国城镇化SD模型中部分方程的原理^[37]。

3 结果与分析

3.1 韧性评价

城市韧性系统由城市巨系统衍生而来,主要由经济、社会、生态、工程韧性4部分构成,各部分相互作用、共同影响南京市综合韧性水平。根据构建的“经济-社会-生态-工程”韧性综合评价体系,得到2005—2019年南京市各维度韧性指标变化(图2)。

结合有关韧性的分级研究^[38],将南京市韧性(R)划分为I级低度韧性($0 < R < 30$)、II级中低度韧性($30 \leq R < 50$)、III级中度韧性($50 \leq R < 70$)、VI级中强度韧性($70 \leq R < 90$)、V级强度韧性($90 \leq R \leq 100$)5个等级。图2a代表四维韧性叠加后的综合韧性水平,可见2005—2019年南京市城市综合韧性水平整体呈上升态势,在15a间由21.70提高到2019年的73.26,年均涨幅3.43,说明南京打造韧性城市的系列举措取得了阶段性成效,综合韧性大幅提升。

为揭示2005—2019年南京市各维度韧性发展差异,需要对城市韧性发展的内部协调性进行研判。图2a显示出南京市经济、社会、工程以及生态韧性的发展与城市综合韧性呈正相关状态,各系统韧性水平均有不同程度的提升,不断向高水平韧性演进。就年均变化而言,经济韧性、工程韧性分别从2005年的2.28、3.20跃升为2019年的20.19、19.34,年均变化值较大,分别为1.19、1.08;社会、生态韧性的年均变化值则较小,分别为0.79、0.45。韧性开始显著提升的两个关键节点为2010年、2015年,与全国和南京市国民经济和社会发展的五年规划纲要发布实施时间一致,体现政策对城市韧性水平的正向影响。比较2010年、2015年前后期间各项指标年度均值变化情况发现:2005—2010年经济、社会、生态、工程韧性分值年均变化0.90、0.58、0.22、1.14,

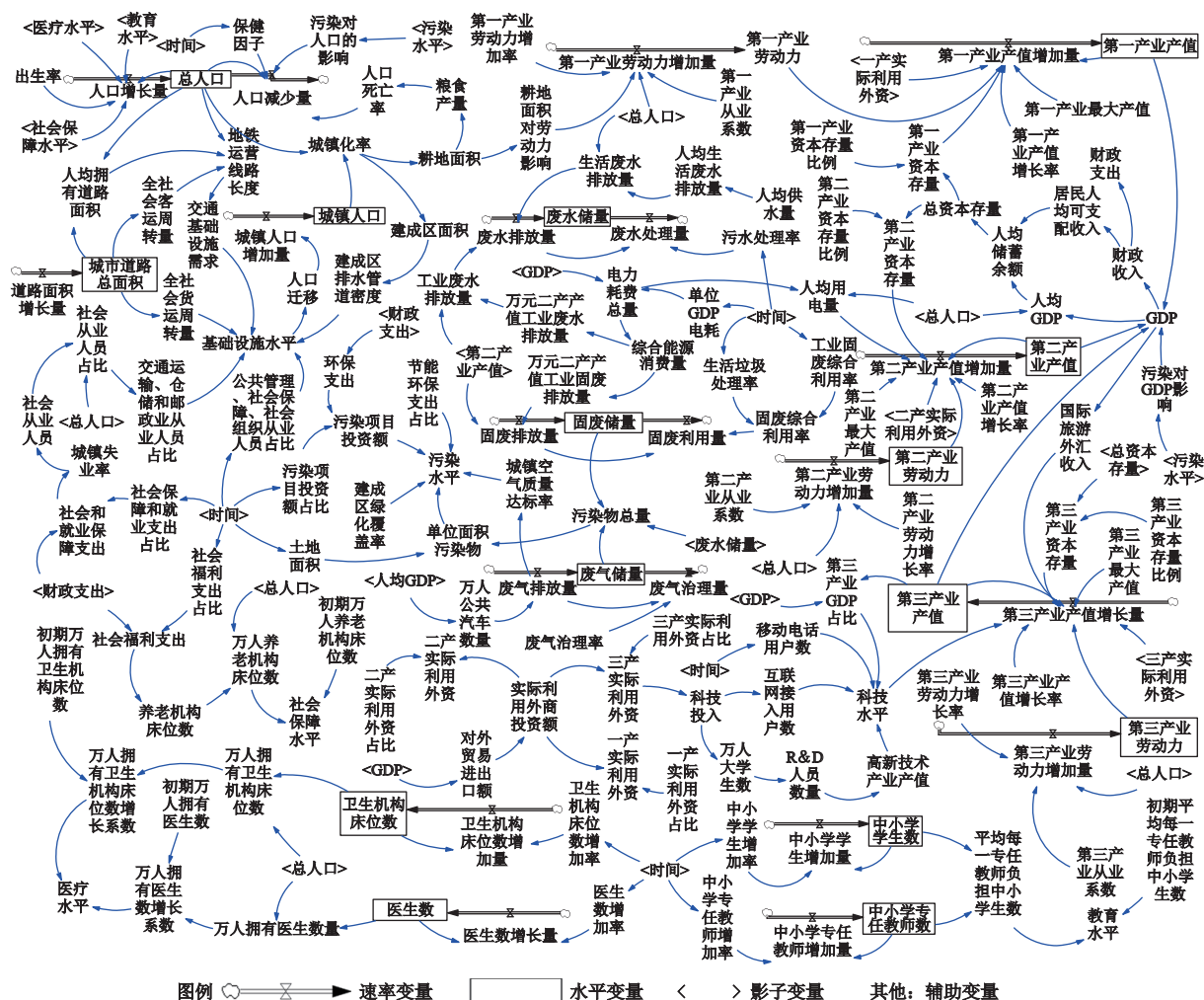


图 1 南京城市韧性 SD 模型存量图

Fig.1 SD model storage flow map of Nanjing City resilience

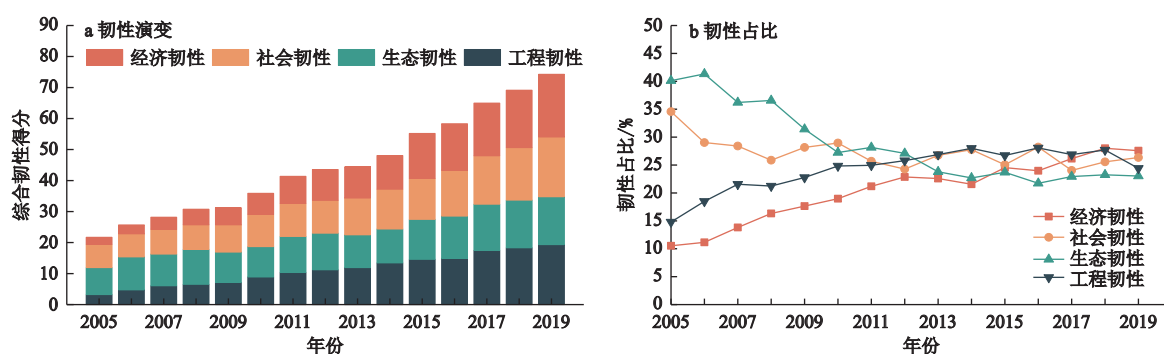


图 2 2005—2019 年南京市各维度韧性演变及占比

Fig.2 Evolution and proportional distribution of resilience across various dimensions in Nanjing City in 2005—2019

2010—2015 年各维度韧性年均变化值分别为 1.35、0.55、0.62、1.13, 2015—2019 年为 2.16、1.54、0.63、1.19, 2015 年前工程韧性年均增幅最大, 2015 年后经济韧性年均变化赶超工程韧性, 城市韧性发展优

势项有所偏移。总之, 现阶段各维度韧性水平相近, 差距缩小, 说明南京市已从单纯追求某一韧性提升逐渐转型为高质量协调发展, 实现各维度韧性均衡发展成为相关政府部门的重要考量。就韧性分级而

言,南京市在 2005—2019 年期间经历了由低度韧性($0 < R < 30$)到中度韧性($70 \leq R < 90$)的转变:2005—2007 年为低度韧性城市,2008—2014 年转为中低度韧性城市,2015—2018 年为中度韧性城市,2019 年达成中度韧性城市,这一趋向也体现出各级政府部门对于韧性发展方向的关注度与日俱增,不断通过增强各系统的韧性,以提升南京城市韧性强度。

从 2005—2019 年各分维度韧性占比的变化(图 2b)可见,2005—2010 年间各维度韧性占比差异化明显,韧性水平位序相对稳定,表现为:生态韧性 > 社会韧性 > 工程韧性 > 经济韧性,初期生态韧性所占比例最大,约 38%,经济韧性占比最小,约 12%,二者相差 26%。自 2010 年起,韧性占比位序开始显著变换,生态韧性和社会韧性占比延续前期变化趋势依旧波动下降,经济韧性和工程韧性在整体中的重要性持续提升,综合韧性各组成部分的比例差异缩小,随后各维度韧性占比均维持在 20%~30% 的区间内。其中,经济韧性占比于 2018 年超越工程韧性跃居第 1 位,占比达 27%,主体地位凸显,2019 年各维度韧性占比为:经济韧性 > 社会韧性 > 工程韧性 > 生态韧性。巩固并强化城市经济韧性成为未来南京城市韧性建设的主要趋势,而生态韧性的下滑趋势也需引起重视,需要通过增强生态环境治理能力等弥补生态韧性短板,协同推进经济高质量发展与生态环境高水平保护。

3.2 模型检验和情景设置

3.2.1 模型检验

1) 历史性检验。借助 Vensim PLE 软件自带的量纲检验工具 UNITSCHECK 进行量纲检验,结果表明本文所构建的城市韧性仿真模型具有量纲一致性。同时通过软件自带的检错和跟踪功能对模型运行情况进行检验,模型试运行并未产生病态结果;其次,选取 2005—2019 年共 15 a 的数据进行历史性检验。将 2005—2019 年作为模型有效性检验时间段,将模拟值与实际值进行比较,若指标的模拟值与实际值之间的误差在 10% 以内,这表明模型的可信度较高,能够用于预测 2020—2035 年南京市的城市韧性状况。

误差计算方法如公式(1)所示,其中 δ 为相对误差, x' 为指标模拟值, x 为实际值。

$$\delta = (x' - x) / x \times 100\% \quad (1)$$

2) 灵敏度检验。通过增加或减小 10% 的关键参数值进行系统灵敏度分析,检验模型中多变量对主要水平变量的影响程度即变化幅度均值^[39]。将每个参数逐年增加或减少 10%,考查 15 个变量对韧性水平的影响,灵敏度分析模型见式(2)和(3):

$$S_Q = \left| \frac{\Delta Q_{(t)}}{Q_{(t)}} \times \frac{X_{(t)}}{\Delta X_{(t)}} \right| \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Q_i} \quad (3)$$

式中, t 即时间; $Q_{(t)}$ 为状态 Q 在时刻 t 的值; $X_{(t)}$ 为参数 X 在 t 时刻的值; S_Q 为状态变量, Q 对参数 X 的敏感度; $\Delta Q_{(t)}$ 、 $\Delta X_{(t)}$ 分别为状态变量 Q 和参数 X 在 t 时刻的增长量; n 是状态变量参数个数; S_{Q_i} 为 Q_i 的灵敏度; S 为参数 X 的平均灵敏度。

3.2.2 模拟情景设定

基于《南京市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》(简称“南京市十四五规划”)(https://www.nanjing.gov.cn/zdgg/202104/t20210408_2874510.html),并结合创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念,从南京市 4 个城市韧性子系统中选取人口出生率、社会从业人口占比、第一、二、三产业产值增长率、人均供水量、电力耗费总量、固体废弃物治理率、建成区绿化覆盖率、节能环保支出 10 个指标作为控制变量,设定自然状态发展、人口高速增长、经济快速增长、生态优先和综合协调发展 5 种发展情景(表 2)。

情景 1: 自然状态发展情景。在该情景中,南京市各子系统维持现有的发展现状,对模型中的相关变量参数不加以干预,以该情景模拟数据作为基准,与其他发展情景作类比。

情景 2: 人口高速增长情景。“南京市十四五规划”中提出“促进人口规模适度增长、结构持续优化”和“完善就业优先政策,持续扩大就业容量”。设定 2025 年人口目标为突破 1 千万。据此,在情景设置中,通过改变人口出生率及社会从业人口占比来体现人口政策对南京市城市韧性的影响,将人口出生率及社会从业人口占比分别提升 10%。

情景 3: 经济快速增长情景。在“南京市十四五规划”中 2025 年的经济目标为 2 万亿元,强调城市经济增长的重要性,据此,适当放大与经济增长相关的参数,该情景将第一、二、三产业产值的增加率分别提高 10%。

表 2 不同模拟情景参数设置

Table 2 Different simulation scenario parameter settings

变量	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5
人口出生率		+10%			+5%
社会从业人口占比		+10%			+5%
第一产业产值增加率			+10%		+5%
第二产业产值增加率			+10%		+5%
第三产业产值增加率			+10%		+5%
人均供水量				-10%	-5%
电力耗费总量				-10%	-5%
固体废弃物治理率				+10%	+5%
建成区绿化覆盖率				+10%	+5%
节能环保支出占比				+10%	+5%

注: 空白处为无此项。

情景 4: 生态优先发展情景。“南京市十四五规划”中提出“市域生态环境明显改善”的目标。据此, 以绿色发展为导向设置生态优先发展情景, 将城市的节能环保支出占比、建成区绿化覆盖率、工业固体废弃物治理率分别提升 10%, 人均供水量及电力耗费总量降低 10%。

情景 5: 综合协调发展情景。该情景结合“南京市十四五规划”, 强调城市各子系统的高质量一体化协同发展, 充分考虑经济、生态、资源的和谐发展, 参数的设置融合人口增长、经济发展、生态环保 3 种情景进行调控, 将原本的 10% 提升幅度均设定为 5%。

3.3 模型检验结果

从南京城市韧性 SD 模型 2005—2019 年历史检验模拟值和实际值及误差率(表 3)来看, 除 2010 年初性指标误差率高于 10% 以外, 其他年份的绝对误差均在 10% 以下, 说明仿真模型的模拟值接近于实际值, 即模型构建合理, 具备较好的行为复

制能力。

对南京城市韧性 SD 模型进行灵敏度检验(表 4), 除第二、三产业产值增长率、节能环保支出占比、人口出生率灵敏度较高外, 其余参数的灵敏度均低于 10%, 通过了灵敏性检验, 说明构建的南京市城市韧性 SD 模型满足稳健性要求。上述几个灵敏度较高的参数, 既是对系统影响较大的关键因素, 同时也是今后影响南京市城市韧性的主要动力。从各要素灵敏度大小也可以看出, 对城市韧性起到较强提升作用的因素依次为第三产业产值增长率、第二产业产值增长率、节能环保支出占比、人口出生率。

综合上述检验, 本文所构建的南京市城市韧性 SD 模型具有良好的模拟效果和稳定性, 是一个兼备较低灵敏度和较高预测强度的仿真模型, 能反映韧性水平与城市系统要素间的交互关系, 用于南京市城市韧性发展状况的模拟及预测, 为衡量城市韧性变化提供重要依据。

3.4 多情景模拟下的南京市城市韧性预测

1) 主要指标预测结果。为体现 5 种不同发展情景下的南京城市韧性的变化, 在城市韧性模拟基础上分别从 4 个子系统中选取了总人口、国内生产总值、单位面积污染物、综合能源消费、交通基础设施需求、科技投入 6 个典型指标进行时序演变分析, 以揭示 2020—2035 年南京市各情景主要指标变化(图 3)。

由单指标模拟仿真结果可见, 在经济快速增长情景下单位面积污染物最高(图 3c); 人口高速增长情景下的交通基础设施需求最高(图 3e), 在综合协调发展情景下, 总人口、GDP、综合能源消费量、科技投入均达到最优仿真结果(图 3a、b、d、f), 能最

表 3 2005—2019 年南京市城市韧性 SD 模型误差检验

Table 3 Error testing of SD model of urban resilience in Nanjing City in 2005—2019

年份	模拟值	实际值	误差率	年份	模拟值	实际值	误差率
2005	21.703 3	20.570 3	5.220 5	2013	44.405 9	43.804 2	1.354 9
2006	25.693 9	24.658 8	4.028 8	2014	48.078 1	47.097 2	2.040 3
2007	28.187 4	27.425 6	2.702 3	2015	50.186 5	49.254 8	1.856 5
2008	30.748 5	29.926 1	2.674 5	2016	58.335 0	57.209 9	1.928 6
2009	31.222 0	29.930 6	4.136 3	2017	64.967 1	61.274 6	5.683 6
2010	35.896 6	32.116 7	10.529 9	2018	66.144 7	64.366 2	2.688 8
2011	41.377 6	37.572 7	9.195 5	2019	73.258 3	67.020 4	8.515 1
2012	43.556 1	42.133 4	3.266 4				

表 4 2005—2019 年南京市城市韧性 SD 模型灵敏度检验

Table 4 Sensitivity test of SD model of urban resilience in Nanjing City in 2005—2019

变量	+10%灵敏度均值	-10%灵敏度均值	变量	+10%灵敏度均值	-10%灵敏度均值
固废处理率	0.33	0.11	第一产业产值增长率	5.87	5.34
人均用水量	2.43	1.03	第二产业产值增长率	14.33	14.11
人口出生率	10.93	10.98	第三产业产值增长率	15.38	15.15
建成区绿化覆盖率	1.06	1.81	第一产业劳动力增长率	0.62	0.56
节能环保支出占比	11.19	11.44	第二产业劳动力增长率	0.27	0.59
第一产业从业系数	1.30	1.10	第三产业劳动力增长率	0.54	0.42
第二产业从业系数	3.15	1.92	社会从业人口占总人口比值	0.27	0.59
第三产业从业系数	4.37	4.13	第一产业产值增长率	5.87	5.34

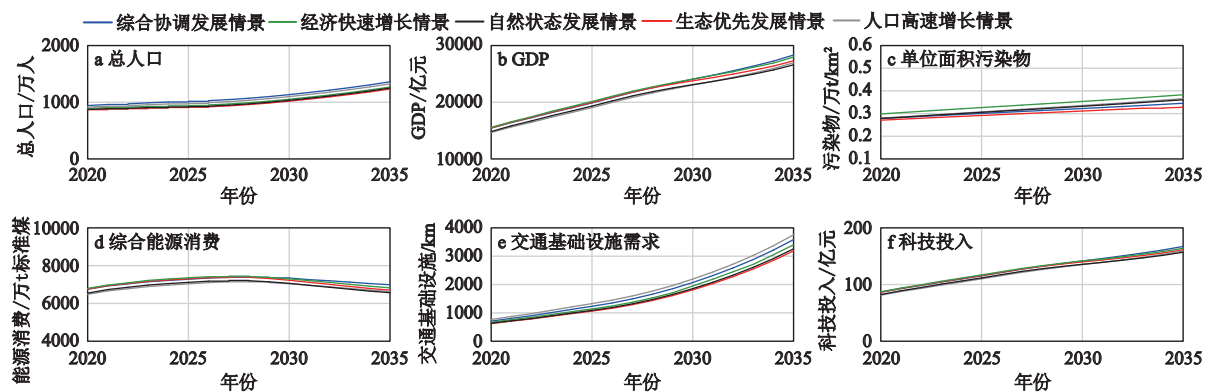


图 3 2020—2035 年不同情景下南京市主要指标预测

Fig.3 Forecast of main indicators under different scenarios in Nanjing City in 2020—2035

好的保障城市人口、经济、生态、公共服务等子系统的协同作用,体现了协调发展路径的优势。

自然状态发展情景下,2035 年的总人口、国内生产总值、单位面积污染物和交通设施需求分别为 1298.39 万人、25 693 亿元、0.36 万 t/km²、3 259.3 km,总人口与单位面积污染物相较于 2019 年分别增加了 44.02%、25.49%,GDP 及交通设施需求分别是 2019 年的 1.92、5.58 倍。人口高速增长情景下,2035 年总人口达到 1 323.98 万人(图 3a),快速人口增长将明显增加对交通基础设施的需求。经济快速发展情景将获取较高的经济发展水平,2035 年 GDP 达到 26 967.8 亿元(图 3b),相比于 2035 年基准情景增加了 4.96%,仅次于协调发展情景,但单位面积污染物将达 0.383 0 万 t/km²,增加了 6.14%,在所有情景中居于首位。这主要由于过度追求高经济效益,产业结构偏重,导致综合能源消耗量(图 3d)急剧增加,2020—2027 年综合能源消耗量年均增长 91.96 万 t 标准煤,给生态环境带来

了严重负荷。南京科技实力雄厚,科技投入持续增加(图 3f),从而提高能源的综合利用效率。生态优先发展情景下经济效益虽不高,但产生的单位面积污染物最少,为 0.3279 万 t/km²,与基准情景相比减少了 7.6%,增强城市生态系统的抵抗能力。从各情景比较来看,人口突破千万大关的年限分别在 2030 年、2027 年、2029 年、2030 年、2024 年,协调发展情景将使南京提前 1 a 实现这一目标。

2)南京城市韧性系统预测。图 4a-e 为 5 种模拟情景下南京市 4 个维度韧性的时序演变结果,分别代表自然状态发展情景、人口高速增长情景、经济快速发展情景、生态优先发展情景及协调发展情景。

在自然状态发展情景下,以 2019 年为基准,到 2035 年,南京市的经济韧性、社会韧性、工程韧性、生态韧性分别增加 27.42%、74.61%、9.28%、50.02%,社会韧性增长幅度最大、其次为工程韧性、生态韧性及经济韧性。经济韧性、生态韧性、工程

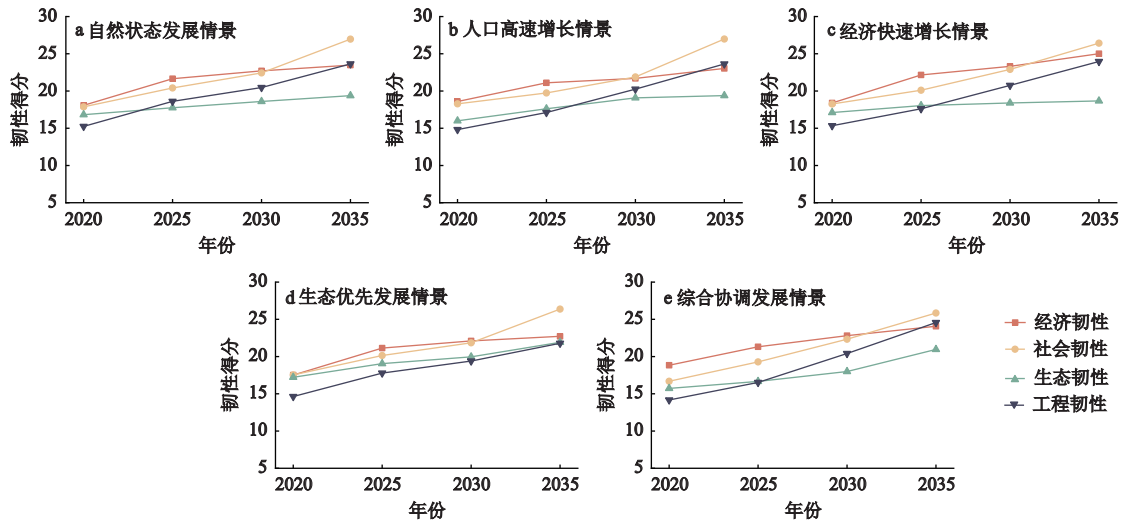


图4 2020—2035年南京市分维度韧性预测结果

Fig.4 Forecast results of fractal resilience of Nanjing City in 2020—2035

韧性上升态势最明显,分别出现在经济快速增长发展情景、生态优先发展情景、综合协调发展情景,增幅分别为38.38%、23.5%、56%。2020—2030年间经济韧性始终占据主导地位,社会韧性和工程韧性也呈现同步高速发展之势,可见,当城市的经济体系具备强有力的承受及调整恢复时,才能更好地支撑起保障改善民生及基础设施服务的工作,对社会韧性及工程韧性起到正向推动作用。2030年后,社会韧性和工程韧性在城市韧性中作用显著,除情景3、4中经济韧性高于社会韧性外,其余情景在2035年的四维韧性位序情况均为社会韧性>工程韧性>经济韧性>生态韧性。社会、工程韧性的发展在一定程度上剥夺了生态韧性的提升空间,生态韧性增长趋势放缓,生态韧性作用稍弱,在情景5中到2030年后南京市的经济、社会、工程韧性逐渐趋近,生态韧性也出现新的增长拐点,极大地提

升了资源环境利用效率,使城市接近全面向好发展的局势,模拟结果最利于实现城市发展目标,体现新发展理念。

表5为自然状态发展情景、人口高速增长情景、经济快速增长情景、生态优先发展情景和综合协调发展5种情景下的综合韧性得分。结果表明以2019年为基准,到2035年各发展情景下城市综合韧性水平达到92.03、93.47、94.07、93.18、95.45,南京市的城市韧性进一步增强,步入强度韧性阶段的时间分别为2035年、2034年、2034年、2034年、2033年,综合协调情景可助力南京市更快达成强度韧性。整体来看,除自然状态发展情景外,生态环保情景的韧性发展潜力最小,综合协调发展情景下的韧性发展潜力最大。可见,基于新发展理念,强调协调与可持续增长的发展目标,将更有助于解决城市稳定发展需求与不确定干扰之间的矛盾,

表5 2020—2035年多情景模拟下的南京城市综合韧性

Table 5 Urban comprehensive resilience of Nanjing City under multi scenario simulation in 2020—2035

年份	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5	年份	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5
2020	66.6814	68.0175	69.1062	66.9103	67.9170	2028	80.3287	81.6864	81.8719	81.8527	81.7077
2021	68.1679	69.5887	70.6355	69.8844	69.4220	2029	81.6436	82.8640	83.2913	82.9099	82.9926
2022	70.2676	71.9500	71.4190	72.3273	70.7301	2030	82.9136	84.2030	85.3650	83.3024	83.5357
2023	72.1984	74.5177	73.0472	74.9883	72.2569	2031	84.3535	85.9640	86.2068	85.8411	86.2759
2024	73.7638	76.6977	74.7723	77.2222	74.4238	2032	85.9790	87.8659	87.9149	87.6643	88.2704
2025	75.5650	78.4267	77.7194	78.1189	76.1788	2033	87.7740	89.6722	89.7792	89.4205	90.1640
2026	77.4146	79.6447	78.7192	79.0555	79.4618	2034	89.8392	91.5301	91.8605	91.2483	92.3176
2027	78.9359	80.6498	80.3676	80.9472	80.5645	2035	92.0303	93.4678	94.0749	92.7848	95.4541

具有良好的发展效果。因此南京应着力落实综合协调发展路径, 兼顾经济、社会、生态、工程系统的全面完善, 最大限度地提升城市综合韧性水平。

4 结论与展望

4.1 结论

本文以 2005—2019 年为韧性考察期, 南京市为案例城市, 建立新发展理念与韧性水平评价的映射关系, 同时兼顾城市经济、社会、生态、工程建设现状, 设计南京城市韧性评价指标测度体系, 对城市韧性变化进行综合评估。从城市系统视角, 构建系统动力模型以体现系统中各要素、各子系统间的相互作用, 对南京市 2020—2035 年各系统特征指标及韧性水平进行多情景预测。所得结论如下:

① 2005—2019 年南京市经济、社会、生态、工程与综合韧性水平整体呈现同步上升趋势, 当前处于中强度韧性阶段, 其中经济韧性、工程韧性占比增长势头强劲, 生态韧性占比下行趋势明显、社会韧性占比则波动于 25% 左右, 强度韧性城市还未形成。② 韧性各维度占比仍处于波动和不断适应调整阶段。分维度韧性的发展趋势有两种, 第一种以生态韧性和社会经济韧性为代表逐年递减, 另一种是以经济韧性和工程韧性为代表的逐年递增。分维度韧性的增幅存在差异, 由生态韧性引领逐渐转换为以经济韧性为主线, 韧性构成部分的主导地位发生改变, 经济韧性逐渐成为未来韧性提升过程的发展重点。各维度韧性占比表现出一种平稳向好趋势, 城市内部的韧性协调性增强, 体现了城市从追求单一韧性提升目标, 到实现韧性高质量全面发展目标的转换。③ 在各情景中, 无论是南京市综合韧性, 还是经济、社会、生态、工程韧性都得到显著增强。相较于 2019 年, 2035 年时南京市综合韧性水平分别提升了 25.62%、27.59%、28.40%、27.19% 和 30.29%, 但人口、经济、生态、公共服务子系统中总人口、GDP、单位面积污染物、综合能源消耗量、交通基础设施需求、科技投入等典型指标变化趋势的可视化结果却侧面反映了不同发展情景的劣势所在: 人口增长、生态环保无法兼得经济发展, 经济发展无法保障生态文明建设, 而综合协调发展情景的韧性发展潜力最大, 既能最大限度发挥城市功能、展现新发展理念, 又能兼顾社会经济发展和资源环境保护, 促进城市经济社会及生态文明建设协调发展, 提高城市系统面临风险冲击的预警、抵抗、适应

与恢复能力, 是实现协同发展、早日迈入强度韧性发展期的最优方案。

4.2 展望

在城市韧性测度评价体系中对自然灾害如雾霾、洪涝、地震等相关安全韧性指标还有待增补完善; 受更精细化时间序列数据获取的限制, 选择以全市数据作为统计对象, 研究单元空间尺度较大, 因此从更加微观的尺度开展韧性水平及其影响因素的分析也将成为后续的研究重点。此外, 由于城市系统的复杂性和不确定性, 各要素和各子系统间的作用关系和作用强度等也处于变动中, 有关城市韧性发展趋势与规律等仍有待进一步深化。

参考文献(References):

- [1] 许振宇, 张心馨, 曹蓉, 等. 基于知识图谱的国内外韧性城市研究热点及趋势分析[J]. 人文地理, 2021, 36(2): 82-90. [Xu Zhenyu, Zhang Xinxin, Cao Rong et al. Research status and trend analysis of resilience city based on knowledge map. Human Geography, 2021, 36(2): 82-90.]
- [2] 肖文涛, 王鹭. 韧性城市: 现代城市安全发展的战略选择[J]. 东南学术, 2019(2): 89-99+246. [Xiao Wentao, Wang Lu. The resilient city: A strategic option for safe development of modern cities. Southeast Academic Research, 2019(2): 89-99+246.]
- [3] Holling S C. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [4] Barasa E W, Mbau R, Gilson L. What is resilience and how can it be nurtured? A systematic review of empirical literature on organizational resilience[J]. *International Journal of Health Policy & Management*, 2018, 7(6): 491-503.
- [5] 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. [Li Ya, Zhai Guofang. China's urban disaster resilience evaluation and promotion. Planners, 2017, 33(8): 5-11.]
- [6] 王倩, 赵林, 于伟, 等. 中国旅游经济系统韧性的时空变化特征与影响因素分析[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 113-118. [Wang Qian, Zhao Lin, Yu Wei et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of resilience of tourism economic system in China. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(6): 113-118.]
- [7] Alexander D E. Resilience and disaster risk reduction: An etymological journey[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2013, 13(11): 2707-2716.
- [8] 杨选梅. 国土空间韧性: 概念框架及实施路径[J]. 城市规划学刊, 2021(3): 112-118. [Yang Xuanmei. Territorial space resilience: A conceptual framework and its implementation path. Urban Planning Forum, 2021(3): 112-118.]
- [9] 彭翀, 袁敏航, 顾朝林, 等. 区域弹性的理论与实践研究进展[J]. 城市规划学刊, 2015(1): 84-92. [Peng Chong, Yuan Minhang,

- Gu Chaolin et al. Research progress on the theory and practice of regional resilience. *Urban Planning Forum*, 2015(1): 84-92.]
- [10] 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 Xiaoqing. A comparative study of urban resilience and economic development level of cities in Yangtze River Delta urban agglomeration. *Urban Development Studies*, 2019, 26(1): 82-91.]
- [11] Du Z W, Zhang H G, Ye Y Y. Urban shrinkage and growth: Measurement and determinants of economic resilience in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(8): 1331-1345.
- [12] 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. [Zhao Ruidong, Fang Chuanglin, Liu Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1717-1731.]
- [13] Woods D D. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 141(7): 5-9.
- [14] Barnes A, Nel V. Putting spatial resilience into practice[J]. *Urban Forum*, 2017, 28(2): 219-232.
- [15] Martin R, Sunley P. On the notion of regional economic resilience: Conceptualization and explanation[J]. *Journal of Economic Geography*, 2015(1): 1-42.
- [16] 陈梦远. 国际区域经济韧性研究进展——基于演化论的理论分析框架介绍[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1435-1444. [Chen Mengyuan. An international literature review of regional economic resilience: Theories and practices based on the evolutionary perspective. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1435-1444.]
- [17] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. *人文地理*, 2019, 34(2): 1-7, 151. [Li Liangang, Zhang Pingyu, Tan Juntao et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience. *Human Geography*, 2019, 34(2): 1-7, 151.]
- [18] 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. [Sun Yang, Zhang Luocheng, Yao Shimou. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River Delta region from a socio-ecological perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(8): 151-158.]
- [19] 徐珏燕, 丁丽, 张乐益. 论城市: 一个自组织演化系统[J]. *东南大学学报(哲学社会科学版)*, 2006, 8(S1): 168-170. [Xu Jueyan, Ding Li, Zhang Leyi. On the city: A self-organizing evolutionary system. *Journal of Southeast University (Philosophy and Social Science)*, 2006, 8(S1): 168-170.]
- [20] 史晨辰, 朱小平, 王辰星, 等. 韧性城市研究综述——基于城市复杂系统视角[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1726-1737. [Shi Chenchen, Zhu Xiaoping, Wang Chenxing et al. Review and prospect of resilient cities: From the perspective of urban complex systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1726-1737.]
- [21] 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. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54.]
- [22] 国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 2005—2020. 北京: 中国统计出版社, 2005—2020. [National Bureau of Statistics. *China city statistical yearbook*. 2005—2020. Beijing: China Statistics Press, 2005—2020.]
- [23] 国家统计局. 中国城市建设统计年鉴[M]. 2005—2020. 北京: 中国统计出版社, 2005—2020. [National Bureau of Statistics. *China urban construction yearbook*. 2005—2020. Beijing: China Statistics Press, 2005—2020.]
- [24] 江苏统计局. 江苏统计年鉴[M]. 2005—2020. 北京: 中国统计出版社, 2005—2020. [Jiangsu Statistical Bureau. *Jiangsu statistical yearbook*. 2005—2020. Beijing: China Statistics Press, 2005—2020.]
- [25] 南京市统计局. 南京统计年鉴[M]. 2005—2020. 北京: 中国统计出版社, 2005—2020. [Nanjing Statistical Bureau. *Nanjing statistical yearbook*. 2005—2020. Beijing: China Statistics Press, 2005—2020.]
- [26] 李维航, 张高军, 陈森, 等. 粤港澳大湾区旅游竞争力与城市化的耦合协调度及其对地方经济的影响[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(3): 701-717. [Li Weihang, Zhang Gaojun, Chen Sen et al. The coupling coordination between tourism competitiveness and urbanization and its impact on local economy. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3): 701-717.]
- [27] Ribiro P J G, Goncalves L A P J. Urban resilience: A conceptual framework[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101625.
- [28] Xun X L, Yuan Y B. Research on the urban resilience evaluation with hybrid multiple attribute TOPSIS method: An example in China[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(1): 557-577.
- [29] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 等. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 6016-6029. [Shi Longyu, Zheng Qiaoya, Yang Meng et al. A review of definitions, influence factors and assessment of urban resilience. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 6016-6029.]
- [30] 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. *World Regional Studies*, 2019, 28(6): 77-87.]
- [31] 谭俊涛, 赵宏波, 刘文新, 等. 中国区域经济韧性特征与影响因素分析[J]. *地理科学*, 2020, 40(2): 173-181. [Tan Juntao, Zhao Hongbo, Liu Wenxin et al. Regional economic resilience and influential mechanism during economic crises in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(2): 173-181.]
- [32] 曾冰, 张艳. 区域经济韧性概念内涵及其研究进展评述[J]. *经济问题探索*, 2018(1): 176-182. [Zeng Bing, Zhang Yan. A re-

- view of the concept connotation and research progress of regional economic resilience. *Inquiry Into Economic Issues*, 2018(1): 176-182.]
- [33] 刘志敏, 叶超. 社会-生态韧性视角下城乡治理的逻辑框架[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(1): 95-103. [Liu Zhimin, Ye Chao. A logical framework of rural-urban governance from the perspective of social-ecological resilience. *Progress in Geography*, 2021, 40(1): 95-103.]
- [34] 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. [Zhu Jinhe, Sun Hongxue. Research on spatial-temporal evolution and influencing factors of urban resilience of China's three metropolitan agglomerations. *Soft Science*, 2020, 34(2): 72-79.]
- [35] Li G J, Kou C H, Wang Y S, Yang H T. System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104954.
- [36] Herrea H, Kopainsky B. Using system dynamics to support a participatory assessment of resilience[J]. *Environment Systems and Decisions*, 2020, 40(3): 342-355.
- [37] Gu C L, Guan W H, Liu H L. Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(6): 1-16.
- [38] 徐耀阳, 李刚, 崔胜辉, 等. 韧性科学的回顾与展望: 从生态理论到城市实践[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5297-5304. [Xu Yaoyang, Li Gang, Cui shenghui et al. Review and perspective on resilience science: From ecological theory to urban practice. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5297-5304.]
- [39] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 1062-1084. [Cao Qiwen, Gu Chaolin, Guan Weihua. China's urbanization SD modelling and simulation based on land use. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 1062-1084.]

Comprehensive urban resilience and dynamic prediction of Nanjing City based on the new development concept

Guan Weihua^{1,2}, Xu Hui¹, Wu Wei³, Wu Xiaoni¹, Zhang Hui¹, Wu Lianxia⁴

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Collaborative Innovation Center for Development and Utilization of Geographic Information Resources of Jiangsu Province, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. College of City Construction, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China; 4. Population Research Institute, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Based on the new development concept, this paper constructs a resilience measurement index system from 4 dimensions of “economy-society-ecology-engineering” and quantitatively evaluates the urban resilience of Nanjing from 2005 to 2019 by dimensions and stages using entropy value method. A dynamic simulation model of Nanjing's urban resilience was constructed with the help of System Dynamics to predict the development level of Nanjing's urban resilience from 2020 to 2035 in a long time series and to compare the development potential of different scenarios. The results show that the overall trend of Nanjing's comprehensive resilience and sub-dimensional resilience fluctuates upward between 2005 and 2019. Compared with 2019, by 2035, Nanjing's comprehensive resilience level will increase by 25.62%, 27.59%, 28.40%, 27.19% and 30.29% under the scenarios of natural state development, high population growth, rapid economic growth, ecological priority development and comprehensive and coordinated development, respectively. It can be seen that the comprehensive coordinated development scenario can maximize the improvement of Nanjing's urban resilience level, and achieve strong resilience earliest, while other development scenarios will have varying degrees of negative effects on certain socio-economic indicators. Therefore, Nanjing should focus on the continuous optimization of the integrated and coordinated development path.

Key words: new development concept; resilience; System Dynamics; multi-scenario simulation; Nanjing