

分类号 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 基于系统动力学方法的甘肃省城市韧性运  
行特征及提升路径分析

研究生姓名: 李晨欣

指导教师姓名、职称: 赵煜、教授

学科、专业名称: 统计学、数理统计学

研究方向: 生态统计分析

提交日期: 2024年6月3日

## 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对论文所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 李晨帆 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 赵煜 签字日期： 2024.6.3

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 李晨帆 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 赵煜 签字日期： 2024.6.3

# **Analysis of urban characteristics and improvement path in Gansu Province based on system dynamics method**

**Candidate :Li Chenxin**

**Supervisor:Zhao Yu**

## 摘要

近年来,我国城镇化进入到快速发展阶段,城市是一个复杂多样的系统,在遭受内外各种冲击影响下,系统内部存在越来越多不确定、城市韧性的提升显得至关重要。在此背景下,越来越来多学者和政策制定者将重点放在抵御外界因素干扰、推动城市韧性可持续发展上。论文对甘肃省各市州城市韧性进行定量评估,将城市韧性分为经济、生态、社会和基础设施四个子系统,找出城市韧性各子系统的冲击关系,及系统内部各因素之间相互作用关系和动态变化过程,探讨城市韧性系统运行机制,进而预测甘肃省城市韧性 2010-2030 年发展趋势,得出适合甘肃省城市韧性发展的提升方案。

首先,通过概括城市韧性发展的理念,总结相关的研究成果,在可持续发展、韧性理论、及复杂系统理论视角,为论文研究与分析奠定理论基础。从四个子系统层面(经济、生态、社会和基础设施)构建城市韧性发展水平指标体系,对甘肃省城市韧性发展进行评估,为后续韧性的分析提供新视角。

其次,从时间和空间维度对甘肃省城市韧性进行测度分析,引入 PVAR 模型,分析甘肃省城市韧性四个子系统间的互动和影响关系情况。为进一步找出城市韧性内部指标间因果关系及动态变化过程,将甘肃省各市州韧性分为三大类:高韧性、中低韧性和低韧性,借助系统动力学模型对三类城市进行仿真模拟,设定四种情景方案进行模拟分析,综合甘肃省城市实际情况,得出最优方案,进而提高甘肃省各市州城市韧性。

最后,论文根据各子系统间的影响关系情况,结合系统动力学模型模拟结果,提出最佳提升方案,从而针对甘肃省城市韧性现状,对甘肃城市韧性情况提出思考和展望,试图为城市韧性提升给予相关参考。

**关键词:** 城市韧性; 熵值法; PVAR 模型; 系统动力学; 仿真模拟

## Abstract

In recent years, China's urbanization has entered a stage of rapid development. City is a complex and diverse system. Under the influence of various internal and external shocks, there are more and more uncertainties within the system, and the improvement of urban resilience is crucial. In this context, more and more scholars and policy makers are focusing on resisting the interference of external factors and promoting the resilience and sustainable development of cities. Paper quantitative assessment of Gansu province cities city toughness, the urban toughness is divided into economic, ecological, social and infrastructure four subsystems, find out the impact of the urban toughness system, and internal factors interaction and dynamic change process, explore the urban toughness system operation mechanism, and predict the city toughness in Gansu province in 2010-2030 development trend, is suitable for the development of urban toughness in Gansu province.

First of all, by summarizing the concept of urban resilience development, summarizing the relevant research results, and laying a theoretical foundation for the research and analysis of the paper from the perspective of sustainable development, resilience theory, and complex system theory. Build the index system of urban resilience development level from the four subsystem levels (economic, ecological, social and infrastructure), evaluate the urban resilience development of cities in

Gansu Province, and provide a new perspective for the subsequent analysis of resilience.

Secondly, the measure of urban resilience in Gansu Province was analyzed from the temporal and spatial dimensions, and the PVAR model was introduced to analyze the interaction and influence relationship among the four subsystems of urban resilience in Gansu Province. Urban toughness to further find out the causal relationship between internal indicators and dynamic change process, the cities in Gansu province state toughness is divided into three categories: high toughness, low toughness and low toughness, with the help of system dynamics model of city simulation simulation, set four scenarios simulation analysis, comprehensive city actual situation in Gansu province, the optimal scheme, and improve the cities of Gansu province state city toughness.

Finally, according to the influence relationship between each subsystem and the simulation results of the system dynamic model, the paper proposes the best improvement scheme, so as to put forward thinking and prospects on the resilience of cities in Gansu province according to the current situation of urban resilience in Gansu Province, and try to give relevant reference for the improvement of urban resilience.

**Key words:** Urban resilience; Entropy method; PVAR model; System dynamics; Simulation

# 目 录

<b>1 绪论</b>	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的及意义	2
1.2.1 研究目的	2
1.2.2 研究意义	3
1.3 研究综述	3
1.3.1 城市韧性相关研究	3
1.3.2 城市系统动力学相关研究	6
1.3.3 文献述评	7
1.4 研究内容与技术路线	8
1.4.1 研究内容	8
1.4.2 技术路线	9
1.5 创新点	10
<b>2 相关理论与方法</b>	12
2.1 基本理论	12
2.1.1 城市韧性理论	12
2.1.2 可持续发展理论	12
2.1.3 复杂适应系统理论	13
2.2 研究方法	14
2.2.1 核密度估计法	14
2.2.2 PVAR 模型	15
2.2.3 系统动力学模型	15
<b>3 甘肃省城市韧性水平测算与特征分析</b>	17
3.1 甘肃省城市发展概况	17
3.1.1 经济系统发展	17
3.1.2 生态系统发展	18
3.1.3 社会系统发展	18

3.1.4 基础设施系统发展 .....	18
3.2 测算思路 .....	19
3.2.1 构建基本原则 .....	19
3.2.2 指标选取依据 .....	19
3.2.3 指标体系的确定 .....	20
3.2.4 测算方法 .....	23
3.3 测算结果及特征分析 .....	24
3.3.1 数据来源与处理 .....	24
3.3.2 测算结果 .....	25
3.3.3 变动趋势分析 .....	26
3.3.4 时空演变特征分析 .....	32
<b>4 城市韧性系统动态关联性分析 .....</b>	<b>35</b>
4.1 子系统间的动态关联性 .....	35
4.1.1 理论模型设定 .....	35
4.1.2 经验模型的构建 .....	36
4.1.3 模型结果分析 .....	37
4.2 要素间的动态关联性 .....	39
4.2.1 理论模型设定 .....	40
4.2.2 经验模型的构建 .....	42
4.2.3 模型结果分析 .....	46
<b>5 城市韧性提升策略分析 .....</b>	<b>54</b>
5.1 情景设定 .....	54
5.2 结果对比分析 .....	55
5.2.1 现状延续型 .....	55
5.2.2 经济发展型 .....	56
5.2.3 基础设施导向型 .....	57
5.2.4 韧性建设型 .....	58
5.3 提升策略研究 .....	60
<b>6 结论与展望 .....</b>	<b>62</b>



6.1 基本结论 .....	62
6.2 思考与展望 .....	63
<b>参考文献 .....</b>	<b>64</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>64</b>

# 1 绪论

## 1.1 研究背景

21 世纪以来，随着时代的变迁、城市规模的不断扩大，自然灾害、公共安全等突发事件不断涌现，对城市发展提出新的要求，如城市应具有较强的环境适应性和较好的恢复能力等。2002 年 ICLEI 首次提出“韧性城市”议题，被列为城市与防灾的主要研究对象；2005 年“韧性”概念被纳入《兵庫宣言》灾害讨论的重点，减少城市脆弱性等也被纳入可持续发展政策；2013 年美国洛克菲勒基金会关于“全球韧性百城计划”的提倡于 2015 年在城市网络安全进行初始合作，推动城市网络空间更具韧性；2015 年 EMI 组织在《城市韧性总体规划》中指出，在情景分析的背景下，城市韧性主要受政府法规体制、社会经济信息教育交流等因素影响；2020 年，中国十九届五中全会首次正式提出建设“韧性城市”；《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》第二十九章提出“建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”；2020 年，联合国 2030 五大全球框架之一《可持续发展目标 11》（SDG11）为“建设包容、安全、有抵御灾害能力和可持续的城市和人类住区”，成为其他四大全球框架的直接推动力。

甘肃省位于中国的西北部，东部是黄土高原，中部是河西走廊，西部则是青藏高原。近年来，甘肃省发生过一些重大自然灾害，如 2010 年甘肃周至县发生了泥石流灾害，造成数十人死亡、上百人受伤，大量房屋、农田和基础设施被毁。2013 年甘肃省多地遭遇特大洪水，如甘南州夏河县、舟曲县等地严重受灾，造成了严重的人员伤亡和财产损失。2021 年甘肃甘南藏族自治州临潭县发生了 7.4 级地震，造成约 8 人死亡、70 余人受伤，数万人被紧急转移安置。此次地震对当地社会经济和生态环境造成了严重影响。故城市韧性的提升对甘肃省的发展有推进作用。

城市是复杂多样的系统，城市韧性的测度是多维度的复杂问题，其内在机制的研究需要多方面考虑。现有研究运用的统计方法相对单一，较少有对城市韧性系统的进行动态模拟分析。系统动力学（SD）与其他评价模拟方法相比较，其

在应用中显示出很多的优点,比如能够非常直观地表现系统内部变量之间的关系以及内部变量与外部变量之间的因果关系。关于城市发展的研究是在实践过程中探索的,因而城市体系具有实践性、综合性、系统性等特点。依据以上特点,SD方法通过构建动态模型,并进行政策模拟和因素敏感性分析,尤其在决策层面,基于一种有效的数学方法来选择政策参数,破解政策效果难以量化的难题,具有其他方法无法替代的地位。

综上所述,对甘肃省城市韧性进行测度分析,并进行具体的仿真研究,探索出适合甘肃省的城市韧性提升策略,可为促进城市可持续发展,科学分析和提升城市韧性系统提供参考。

## 1.2 研究目的及意义

### 1.2.1 研究目的

根据甘肃省区位特征,构建评价体系,在了解现状和特征的基础上,融入系统动力学方法,建立城市韧性系统动力学模型,分析城市韧性系统影响因素和反馈关系并通过系统分析和仿真模拟进一步探究甘肃省城市韧性提升策略。具体分为以下三个方面:

(1) 构建统计指标体系,对甘肃省城市韧性水平进行测算,了解现状和特征。对城市韧性理论进行文献梳理与理论研究,结合甘肃省特殊区位特征,构建城市韧性评价指标体系,结合客观的量化方法,探索甘肃省城市韧性机制,对其进行测算和分析,为城市韧性相关研究提供参考。

(2) 基于 PVAR 模型探索四个系统(经济、生态、社会和基础设施)间的冲击和影响关系;借助系统动力学方法,从因果关系反馈和动态变化,确定城市韧性系统的影响因素和结构特征。基于城市韧性指标评价体系,分析城市韧性系统中各指标的因果关系,由因果关系图和存量流量图,明确影响城市韧性中各个指标变量间的动态变化过程,提出确定指标变量间的系统动力学方程,进而构建城市韧性系统动力学模型,为提高城市韧性提供理论支撑和量化依据。

(3) 通过系统稳定性和敏感性分析,确定几种发展方案,进行模拟分析,探索甘肃省城市韧性提升策略,为城市韧性建设提供参考。

## 1.2.2 研究意义

### (1) 理论意义

论文首先从韧性的概念出发,基于相关文献研究,从理论层面进一步丰富城市韧性指标评价体系,同时有较强的时效性,结合动力学理论构建城市韧性的动力学模型,运用 PVAR 模型和动力学方法,分析城市韧性各子系统之间的互动关系及系统中各指标的因果关系和反馈关系,明确影响城市韧性中各个指标变量间的动态变化过程,提出确定指标变量间的系统动力学方程,进而构建城市韧性系统动力学模型,对不同情景方案下甘肃省城市韧性进行模拟仿真,最终为甘肃省城市韧性发展制定提升策略。论文将传统的统计方法、文本计量分析方法、系统动力学方法相结合,促进甘肃省城市韧性发展,试图为实现可持续发展城市提供理论参考。

### (2) 现实意义

近年来,随着经济建设不断发展、生命线工程不断增多、城市化快速发展、城市规模不断扩大,发展过程中出现诸多不“韧性”的现象,城市灾害如洪水、地震爆发等的频率逐渐增高。而甘肃省作为生态脆弱区,对城市韧性发展的提升是必要的。针对模型的关键研究成果,结合其特殊区位特征,借助统计手段,探索科学提升策略,为有效提高城市韧性提供量化依据。

## 1.3 研究综述

### 1.3.1 城市韧性相关研究

在不同历史阶段,韧性这个概念在不同领域有着不同的应用。从最初在工程学中定义为系统受到扰动后恢复到初始状态的速度,到心理学中描述精神创伤后的恢复能力,再到生态学领域中用于定义生态系统稳定状态的特征。近年来,学者们将韧性的研究扩展到人类生态学领域,强调系统在改变结构之前能够吸收的扰动量以促使新平衡的形成,这一过程具有复杂性和非线性特征,并强调缓冲能力的重要性。随着对系统构成和变化机制认知的深入,学者们提出了新的韧性观点——演进韧性,强调韧性是与持续调整能力密切相关的动态系统属性。演进韧

性强调持续适应、学习和创新，城市作为人类生态学研究的重要对象，城市韧性理论自然而然地被引入城市研究中。城市韧性指城市系统通过协调、优化和重组来抵抗风险因素的负面影响，保障城市系统的正常运行。运用文献计量分析方法，以下分别对 2000-2022 年国内和国外城市韧性研究现状和趋势进行汇总分析。

### (1) 城市韧性国内相关研究

如图 1.1，梳理国内关于城市韧性研究，由关键词共现分析得到国内城市韧性研究热点可分为以下三个方面：第一方面，经济因素，具体研究城市韧性水平（经济韧性、评估指标的构建、城市群等<sup>[1-4]</sup>）；第二方面，灾害因素，城市防灾治理（灾后恢复、智慧城市等<sup>[5-8]</sup>）；第三方面，其他因素，如社区韧性<sup>[9]</sup>、空间结构<sup>[10,11]</sup>等。

国内城市韧性研究趋势大致可分为三个阶段，第一阶段，以“脆弱性”、“城市规划”、“气候变化”、“公共安全”等关键词，为加强城市韧性对气候变化适应性进行治理<sup>[12]</sup>、对人口和财富聚集<sup>[13]</sup>、采取协同措施进行规划<sup>[14]</sup>等；第二阶段，以“韧性”、“城市韧性”、“城市评估”、“提升策略”等关键词，对中国城市发展借鉴国外政策制定策略<sup>[15]</sup>，构建符合中国国情的韧性城市<sup>[16]</sup>，由理论讨论转到实际应用中<sup>[17]</sup>，城市韧性被认为是风险社会背景下城市安全发展的战略导向<sup>[18]</sup>；第三阶段，以“社区韧性”、“数字经济”、“经济韧性”、“影响因素”、“黄河流域”等关键词，从长期规划、减灾教育、灾后重建 3 方面，完善中国韧性社区建设<sup>[19]</sup>，通过加强社区、区域尺度的对比研究，对城市韧性评估方法进一步改进<sup>[17]</sup>，为更好的提升城市韧性，也应加快推动数字产业与传统产业的融合发展<sup>[20]</sup>，多领域、全方位的促进城市韧性的发展。

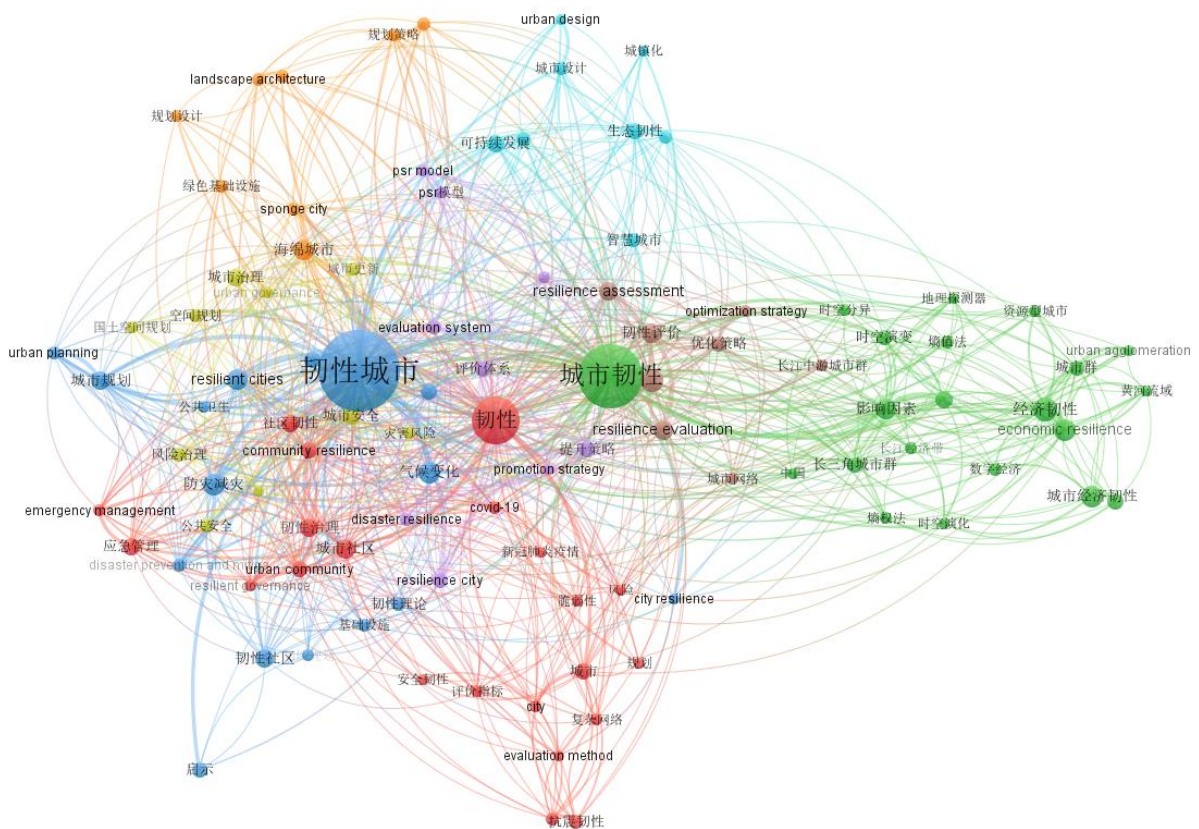


图 1.1 国内城市韧性高频关键词共现网络图

## (2) 城市韧性国外相关研究

如图 1.2，梳理国外关于城市韧性研究，国外研究热点也可分为三方面：第一方面，气候变化与城市规划，具体研究城市脆弱性评估及城市风险测评等<sup>[21-26]</sup>；第二方面，经济韧性及城市韧性风险管理等<sup>[27,28]</sup>；第三方面，可持续发展热点，生态系统服务及城市可持续性<sup>[29-31]</sup>。

国外关于城市韧性的研究大致可分为三个阶段，第一阶段，以关键词“posttraumatic stress disorder（创伤后应激反应）”、“violence（巨大破坏力）”、“trauma（心理创伤）”、“New York City（纽约市）”等，强调韧性与心理学中现有的互动实践模型有关，并根据教育心理学家的核心功能检查对实践的影响<sup>[32]</sup>，认为现阶段城市韧性是从持续性、适应性和转变性三个方面着手的<sup>[33]</sup>，同样在大都市区如纽约市制定相关城市韧性发展措施进行考察<sup>[34]</sup>。第二阶段，以关键词“vulnerability（脆弱性）”、“management（管理）”、“climate change（气候变化）”、“ecosystem services（生态系统服务）”、“resilience（韧性）”



等, 通过使用软件协助, 确定和计划城市应急安全干预措施<sup>[35]</sup>, 侧重关注气候变化, 并提出实践框架等<sup>[36]</sup>。第三阶段, 以关键词“COVID-19 (2019 冠状病毒病)”、“smart city (智慧城市)”、“Sustainable Development Goals (可持续发展目标)”、“reilience assessment (韧性评估)”等, 城市本身就是冠状病毒大流行的主要来源, 以综合计划及其监管区划条例为实施工具, 有效重构未来城市韧性系统的意义, 此阶段采用多标量城市治理方法, 形成科学-政策-实践对话探究机制<sup>[37]</sup>, 另外通过城市韧性的发展同时也促进和响应了可持续发展的目标。

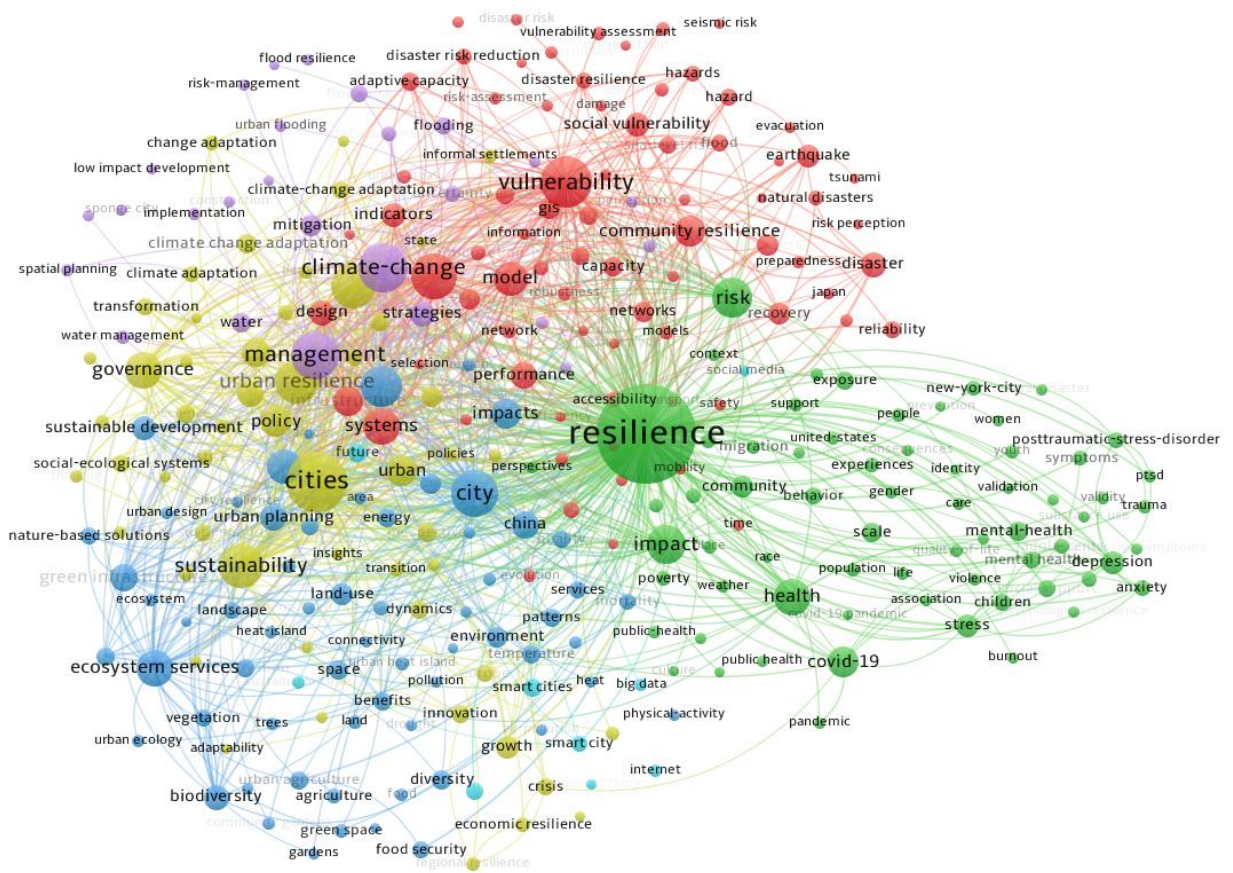


图 1.2 国外城市韧性高频关键词共现网络图

### 1.3.2 城市系统动力学相关研究

系统动力学(system dynamics. SD)是一种方法, 通过将系统科学理论与计算机仿真相结合, 基于因果关系的数学模型, 展示系统内部结构。这一方法首创于 1957 年由麻省理工学院的 J.W. Ferrester 教授, 他在 1961 年的著作《工业动力学》

中详细阐述了其原理和典型应用,奠定了系统动力学的科学基础<sup>[38]</sup>。后来在 1969 年出版《城市动力学》对城市动力学模型进行了扩充,介绍了其在社会科学领域的应用前景<sup>[39]</sup>。此后,系统动力学逐渐成熟,并广泛应用于生态、经济和社会关系的研究。如今,系统动力学几乎涵盖了各个领域,并在社会经济发展的各个系统中发挥着重要作用。

学者们将系统动力学应用到城市韧性研究中,研究角度在近几年较之前更加宽泛,纳入更多影响因素到系统中。主要包括以下三方面的研究:

**(1) 环境科学管理领域。**构建了基于系统动力学的城市抗震防灾能力动态评估模型<sup>[40]</sup>;于小兵等构建了考虑市民恐慌程度和损失率的多目标动力学模型,探索台风灾害应急管理策略<sup>[41]</sup>。

**(2) 可持续发展领域。**吴萌等利用系统动力学模型模拟了武汉市 2017-2030 年不同政策情景下的土地利用碳排放<sup>[42]</sup>;王慧敏等构建了“水—能源—粮食—经济社会”纽带关系下的系统动力学模型,对区域绿色发展政策进行仿真研究<sup>[43]</sup>;李文超等以中国为例,构建经济-能源-环境系统动力学模型,探索系统可持续发展路径<sup>[44]</sup>;杨秀平等以兰州市为例,基于 SD 模型,构建城市旅游环境承载潜力模型并进行仿真<sup>[45]</sup>。

**(3) 城市管理系统领域。**唐睿等以厦门市为例,构建城市生活垃圾的系统动力学模型,对生活垃圾预测管控<sup>[46]</sup>;刘夏等选取我国最大的内陆干旱区流域,结合其特殊的地理环境和供水与需水特征,构建系统动力学模型,基于实地调研、统计年鉴与水资源公报数据,以水资源红线为约束,对塔里木河流域水资源承载力的历史状况与未来趋势进行了定量评估和预测<sup>[47]</sup>;陈伟等对客流流动等属性特征建立系统动力学模型,对列车的运行进行动态分析,对城市轨道交通客流拥堵做出判断<sup>[48]</sup>;薛晴等以江苏省为例,构建系统动力学模型,对水资源承载力进行动态模拟,以实现在未来几年的稳步提升<sup>[49]</sup>;凤亚红等对城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素从三维度建立系统动力学模型,对常量进行系统动力学仿真分析,识别关键影响因素<sup>[50]</sup>。

### 1.3.3 文献述评

上述文献从城市韧性和系统动力学两方面进行阐述,国内外城市韧性研究形



成了被学术界普遍认可的城市韧性概念：城市系统在内外各种冲击下的抵御能力、恢复能力和学习适应能力的综合体现。城市系统的动力学模型也被广泛运用于各个领域，进行仿真预测研究。

**城市韧性方面**，国内外研究均处于探索阶段。国外研究主要基于城市生态学理论，研究内容从城市评估转为经济韧性，又加入诸多热点话题，如流行病等研究上，城市韧性研究呈现多学科交叉、领域广、发展相对快速。国内研究相较国外缓慢，但研究侧重点不同，由最开始的概念性了解到城市韧性评估到气候、环境、政策等因素的研究，尤其在灾害防治方面有显著成果。**系统动力学方面**，多从环境科学、绿色可持续发展、工程、水资源、计算机、交通等领域建立城市管理系统，基于系统研究不同问题。

现有国内外城市韧性的研究领域较为广泛，一般认为城市韧性是指城市系统通过协调、优化和重组来应对、抵抗风险因素产生的不利影响，进而实现城市系统的正常运行。分析运用相关定量方法多样，主要有结构方程法、熵权法、层次分析法等。系统动力学模型也被广泛应用于各个领域进行仿真预测研究。然而，在某些方面仍有不足：第一，目前对城市韧性的研究缺乏清晰的核心机理解析，实证研究支持不足。第二，目前城市韧性研究主要集中在现状评估和规划方面，缺乏系统模拟工具的支持。

## 1.4 研究内容与技术路线

### 1.4.1 研究内容

论文从推进甘肃省城市可持续发展方面入手，为提高城市韧性构建具有针对甘肃省实际的城市韧性评价体系，要梳理出城市韧性各子系统之间的影响关系，以及内部各指标之间的反馈关系和动态发展过程，从而找到适合甘肃省提升城市韧性的策略。根据研究框架，论文的主要内容包括三个部分：

第一部分为理论研究。对应框架第一章和第二章，为提升甘肃省城市韧性，提出可持续发展、城市韧性和系统动力学理论，搜集数据，确立论文的研究切入点。基于文献计量分析研究，运用该方法从整体出发对国内外城市韧性、城市系统动力学进行深入且系统地研究，在之后的影响因素动态分析中，结合研究热点

分析其动力学行为，使得之后策略的提出更符合当下的实际情况。

第二部分为实证研究。对应框架第三章和第四章，引入 PVAR 模型和系统动力学模型，对甘肃省 14 市州城市韧性系统进行全面分析，具体从以下三个方面展开研究：

(1) 基于前人的经验，结合甘肃省实际，构建基本指标体系。论文在确定了评价指标体系构建原则和指标筛选方法后，旨在建立一个科学、可操作且符合甘肃省城市韧性特点的评价指标体系。这里使用熵值法和线性加权函数进行综合评价。

(2) 基于综合评价结果，探索甘肃省各市州及各子系统的韧性变动趋势和时空演变情况，分析城市韧性内在机理。

(3) 基于 PVAR 模型，建立四个子系统的韧性与甘肃省城市韧性之间的互动影响关系的回归方程，然后通过脉冲响应和方差分解方法，具体分析各变量之间的影响关系和贡献度；运用动力学方法，分析城市韧性系统中各影响因素的因果关系和反馈关系，明确影响城市韧性中各个影响因素间的动态变化过程，进而构建城市韧性系统动力学模型。

第三部分为甘肃省提升策略分析。对应框架第五章，通过改变模型参数进行敏感性分析，进而选取敏感性较高的核心影响因素进行组合进行模拟仿真，结合政策文件，得出几种方案，对比分析城市韧性系统变化过程，给出结果分析。

第四部分为结论与展望。对应框架第六章，根据实证和仿真分析的结果，结合甘肃省的地域分布和发展状况，提出关于甘肃省城市韧性发展方向和策略的可行性建议。此外，对论文的未来研究内容进行展望。

## 1.4.2 技术路线

论文通过分析甘肃省的实际发展情况，以城市韧性的概念内涵、外延和特征为基础，建立城市韧性的评估体系，对甘肃省城市韧性状况进行研究。论文的技术路线如图 1.4 所示。

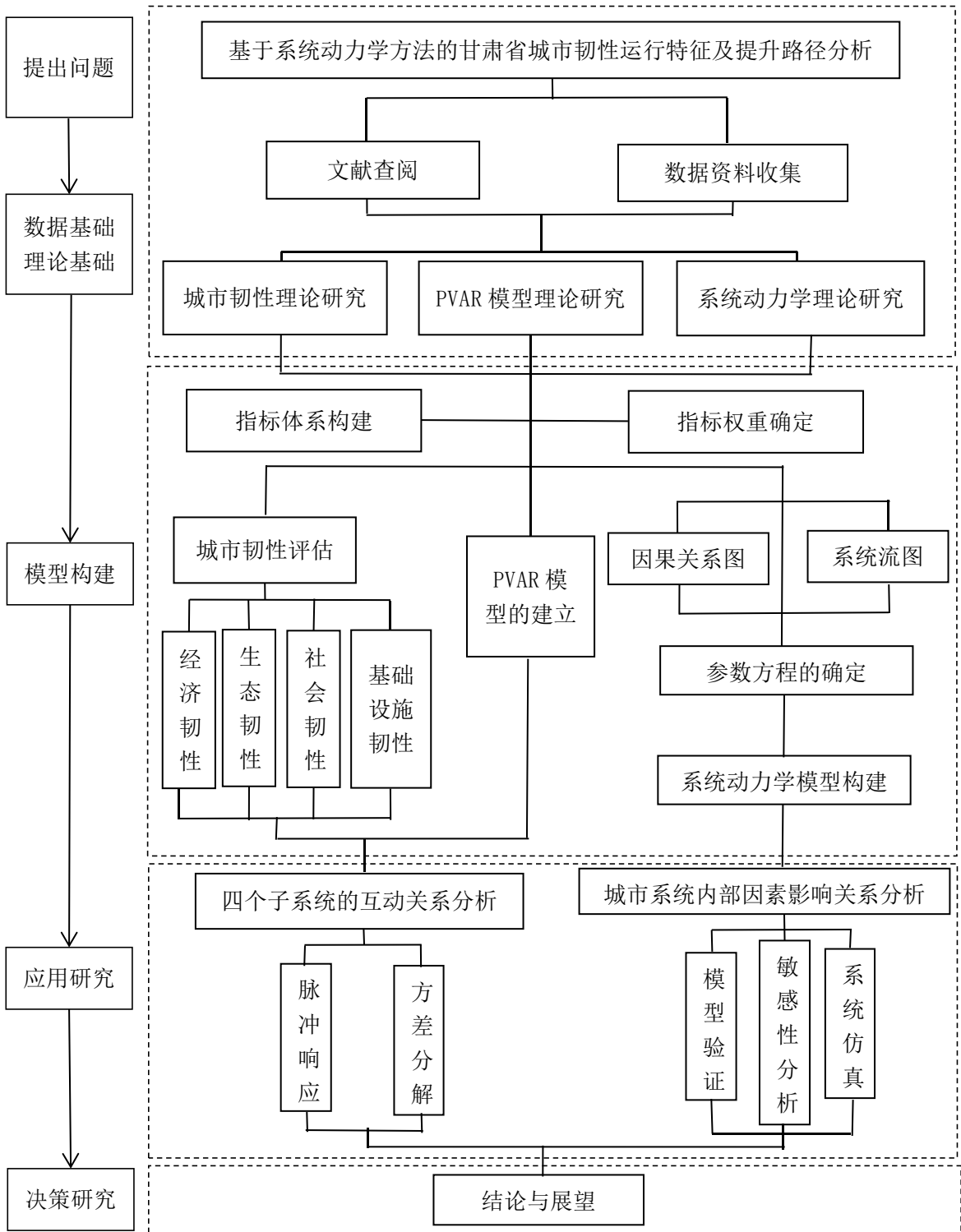


图 1.4 技术路线图

### 1.5 创新点

(1) 基于城市韧性和可持续发展理论、学者经验并结合甘肃省城市发展，构建甘肃省城市韧性指标体系，对城市韧性内在机理进行不同维度的分析。

(2) 基于复杂适应系统理论, 定量分析甘肃省城市韧性运行特征, 运用面板向量自回归模型探索城市内部各系统间的冲击互动关系, 并基于系统动力学模型, 对甘肃省城市韧性各要素设定情景进行仿真模拟, 将情景效果量化, 为甘肃省城市韧性提升策略提供参考。

## 2 相关理论与方法

### 2.1 基本理论

#### 2.1.1 城市韧性理论

城市韧性理论是指研究城市在面对各种压力和冲击时,保持其功能的能力和适应能力的理论框架。这些压力和冲击包括自然灾害、气候变化、经济衰退、社会动荡等。城市韧性理论的核心是通过提高城市系统的适应性、弹性和复原力,使城市能够在压力和冲击下持续发展和恢复。

城市韧性涉及多个学科领域,包括城市规划、城市经济学、社会学和环境科学等。下面介绍几种与城市韧性相关的学术性理论和概念:第一,社会-生态系统韧性,该理论关注城市社会和生态系统之间的相互作用,认为城市韧性取决于社会和生态系统的相互适应能力和互补性。这一理论强调城市的社会和生态系统要有良好的互动和协调,以提高城市系统的抗压能力和适应能力。第二,脆弱性-适应性-转型框架:该框架认为城市韧性可以通过脆弱性、适应性和转型性三个方面来评估和提升。脆弱性研究城市面临的风险和脆弱性因素;适应性探索城市系统应对压力和冲击的能力;转型性研究城市系统面临重大冲击时的根本性变化和转型。第三,嵌入式韧性理论:强调城市韧性的社会和制度层面,认为韧性需要建立在城市社会和制度的正式和非正式规则之上。这一理论研究城市社会和制度对压力和冲击的感知和响应,以及城市系统的复原力和适应性。第四,政治生态学:该理论探讨城市韧性与政治力量和环境正义之间的关系。政治生态学研究城市政治经济体制对资源分配和环境决策的影响,以及这些决策对城市韧性的影响。

这些理论为城市韧性的研究和实践提供了理论框架和方法论。通过深入理解城市韧性的学术性理论,可以帮助我们更好地评估城市韧性水平、制定相应政策措施,并提高城市系统的抗压能力和适应能力。

#### 2.1.2 可持续发展理论

可持续发展理论是一种以平衡经济、社会和环境三个维度为核心的发展理念。该理论倡导资源的有效利用、环境的保护和社会的公正，通过综合规划、社会参与和国际合作等手段，实现经济增长与环境保护的协调，并解决社会不平等和贫困问题。该理论的目标是建立一个可持续发展的社会体系，实现经济、社会 and 环境的持续健康发展，以确保我们的未来能够持续提供人类所需的资源和环境。

可持续发展在城市韧性方面的是指城市在面对各种压力和冲击时，能够迅速恢复并适应变化的能力。具体来说，可持续发展可以通过社会、经济、环境和基础设施四个方面来体现城市韧性。第一，社会韧性：城市社会系统的韧性包括社区组织能力、社会资本、社会凝聚力等。第二，经济韧性：城市经济系统的韧性包括经济多样性、创新能力和适应能力。一个具有高度经济韧性的城市能够在经济危机或其他冲击下迅速恢复，并且能够适应新的经济环境。第三，环境韧性，包括对自然灾害的容忍能力、环境可持续性和资源利用效率。城市需要有适应性和灵活性，以应对气候变化、自然灾害和生态系统崩溃等环境挑战。第四，基础设施韧性：城市的基础设施系统韧性包括城市交通、水资源、能源系统等等的稳定性和可持续性。韧性的基础设施能够减少灾害风险，提高城市的应对能力。

总的来说，可持续发展在城市韧性的概念界定是通过提高城市社会、经济、环境和基础设施系统的韧性，实现城市在面临各种挑战时的快速恢复和适应能力，从而打造更加可持续和韧性的城市。

### 2.1.3 复杂适应系统理论

城市作为一个复杂适应系统，具有多样性、相互作用和自适应的特性，这使得城市具备了一定的韧性来应对外部冲击和挑战。复杂适应系统理论提供了解释和研究城市韧性的框架和工具。主要有以下几个方面：第一，自组织和自适应性：城市作为一个自组织和自适应的系统，能够通过内部调整和改变来应对不同的挑战。城市具备一定的弹性和灵活性，能够在面临冲击时快速适应和恢复。第二，多样性和适应性：城市中的多样性是指城市内部各组成部分的多样性，例如经济结构、生态环境、基础设施等。多样性使得城市能够在面对挑战时有更多的选择和应对策略，增强了城市的韧性。第三，分布式决策和合作：城市的决策和管理应该是分布式的，通过不同利益相关者的合作和协同来实现。分布式的决策能够

提高决策的效率和灵活性，增强城市系统的韧性。第四，混沌和非线性效应：复杂适应系统理论认为城市系统是一个非线性和动态的系统，小幅度的变化可能引起系统的巨大改变。在城市中，一些小规模的冲击可能导致系统的剧烈变化，因此要提高城市的韧性需要考虑这种非线性效应。

复杂适应系统理论提供了一种理论框架来研究城市韧性，帮助我们理解城市系统的复杂性和适应能力。这一理论可以指导城市规划和管理，提供策略和措施来增强城市的韧性，使城市能够更好地应对各种挑战和冲击。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 核密度估计法

核密度估计是一种非参数统计方法，用于估计随机变量的概率密度函数。它通过在每个观测点周围放置一个核函数（通常是高斯核函数），来计算在整个数据集上的概率密度分布<sup>[64]</sup>。选取核密度估计方法主要是它不需要对概率密度函数做出任何假设，并且不受特定函数形式的限制，这使得核密度估计可以适用于各种类型的数据分布，可直观地观察到甘肃省城市韧性在空间上的分布情况，进一步了解城市韧性情况。具体推导公式如下：

对于一个样本集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，其中 $x_i$ 是样本点。设该样本数据的累积分布函数为 $F(x)$ ，概率密度函数为 $p(x)$ ，则有：

$$F(X_{i-1} < x < x_i) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} p(x) dx \quad (2.1)$$

$$p(x_i) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x_i+h) - F(x_i-h)}{2h} \quad (2.2)$$

引入累积分布函数的经验分布函数：

$$F_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i \leq t) \quad (2.3)$$

上式为使用  $n$  次观测中 $x_i \leq t$ 出现的次数与  $n$  的比值来近似描述 $P(x \leq t)$ ，其中 $I(\cdot)$ 为示性函数。将该函数代入（2.1）得：

$$p(x_i) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2nh} \sum_{i=1}^n I(x_i - h \leq x_j \leq x_i + h) \quad (2.4)$$

其中， $h$ 为核密度估计中的带宽。确定带宽后，可得 $p(x)$ 的表达式：

$$p(x) = \frac{1}{2nh} \sum_{i=1}^n I(x-h \leq x_i \leq x+h) = \frac{1}{2nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{|x-x_i|}{h}\right) \quad (2.5)$$

其中, 令  $t = \frac{|x-x_i|}{h}$ , 则当  $0 \leq t \leq 1$  时,  $K(t) = 1$ , 且:

$$\int p(x)dx = \int \frac{1}{2nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{|x-x_i|}{h}\right)dx = \int \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n K(t)dt = \int \frac{1}{2} K(t)dt \quad (2.6)$$

式中, 累积符号指的是  $n$  次实验, 不是累计, 因此计算值为  $n$ 。令  $K_0(t) = \frac{1}{2}K(t)$ , 且当  $0 \leq t \leq 1$  时,  $K_0(t) = \frac{1}{2}$ 。此时,  $K_0(t)$  就称为核函数。那么,  $p(x)$  的表达式为:

$$p(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K_0\left(\frac{|x-x_i|}{h}\right) \quad (2.7)$$

### 2.2.2 PVAR 模型

面板向量自回归模型 (Panel Vector Autoregression, 简称 PVAR) 是一种用于分析多个经济变量之间相互关系的模型, 最早是 Holtz Eakin(1988)提出的, 它结合了面板数据的信息和向量自回归 (VAR) 模型的优势, 将内生变量作为系统中所有内生变量滞后值, 充分考虑了个体间的异质性和动态特征以及时间效应, 通过引入滞后项来捕捉经济变量之间的动态关系, 并估计长期均衡关系和短期动态关系。一般公式如下:

$$y_{it} = \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^p \alpha_{ij} y_{i,t-j} + \gamma_i + \theta_t + \varepsilon_{it} \quad (2.9)$$

其中  $i, t$  表现为区域和时间,  $j$  为滞后期,  $\gamma_i$  为个体效应,  $\theta_t$  为时间效应,  $\varepsilon_{it}$  为随机扰动项。

### 2.2.3 系统动力学模型

系统动力学是一种描述动态系统行为的建模方法, 通过建立系统中各个变量之间的关系, 可以模拟和预测系统的动态行为。在系统动力学中, 变量的变化率是由各个变量之间的相互作用所决定的, 这些相互作用可以是线性的、非线性的、时滞的等。具体建立系统动力学模型时, 需要根据具体问题来确定关系函数  $F(x)$  的形式。关系函数可以包括线性方程、非线性方程、微分方程或差分方程等。通过解析或数值方法求解这些方程, 可以获得系统中各个变量随时间变化的轨迹和趋势。论文将传统的统计方法与非线性动力学方法相结合, 对促进研究生态效率



研究进展具有学术研究价值。一般公式可以表示为：

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = F(x) \quad (2.10)$$

其中， $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 表示系统中某个变量 $x$ 随时间的变化率， $F(x)$ 表示系统中各个变量之间的关系函数。

在系统动力学中，确定系统参数是建立准确和可靠模型的关键步骤。具体的参数确定表达式是根据系统的特点和模型的形式而定的，以下是确定系统参数的一些可行表达式及方式：

(1) 最小二乘法拟合：对于非线性模型，可以使用最小二乘法来拟合模型和实际观测数据。最小二乘法的思想是找到使得模型预测值与观测值之间误差平方和最小的参数值，具体的拟合函数和误差函数将因模型而异。

(2) 优化算法：当系统模型存在约束条件或非线性关系时，可以使用优化算法来确定参数。优化算法包括梯度下降、遗传算法、粒子群优化等，其目标是通过迭代计算，找到使模型误差最小或目标函数最优的参数值。

(3) 领域专家判断和经验公式：在某些情况下，参数的确定可能依赖于领域专家的判断和经验公式。例如，一般情况下 SD 模型与变化率相关的参数可采用如式 (2.11) -- (2.12) 所示。

#### a. 历年增长率

$$S_n = \frac{X_n}{X_{n-1}} - 1 \quad (2.11)$$

式中， $X_{n-1}$ 是第  $n$  年前一年的初值； $X_n$ 是第  $n$  年的取值； $S_n$ 是历年增长率。

#### b. 年均增长率

$$P_n = \sqrt[n-1]{\frac{X_n}{X_1}} - 1 \quad (2.12)$$

式中， $X_1$ 为初始设置值； $X_n$ 是第  $n$  年的取值； $P_n$ 为年均增长率。

#### c. 年均降低率

$$Q_n = 1 - \sqrt[n-1]{\frac{X_n}{X_1}} \quad (2.13)$$

式中， $X_1$ 为初始设置值； $X_n$ 是第  $n$  年的取值； $Q_n$ 为年均降低率。

### 3 甘肃省城市韧性水平测算与特征分析

本节首先结合相关理论，分为城市韧性指标体系构建和实证分析两个部分。第一部分，根据甘肃省城市韧性现状和指标构建原则，确定了城市韧性指标体系的构建流程；第二部分则基于构建的城市韧性测度体系，利用甘肃省各市州的具体数据测定了它们的韧性水平，并详细研究分析了各市州的特征。

#### 3.1 甘肃省城市发展概况

##### 3.1.1 经济系统发展

2010-2021年，甘肃经济总量取得重大突破，全省经济发展稳中向好。其中，地区生产总值由2010年的4119.46亿元，上升至2021年的10243.3亿元，年均增长8.6%。12年来，甘肃省第三产业比重也在不断提高，甚至超过了第一产业和第二产业的总和。由图3.1可知，据甘肃省统计局统计，2010年甘肃第三产业比重为37.3%，2014年其比重提高到44%，第一次超过第二产业42.8%的比重，产业结构也由“231”调整成“321”。自此以后，从2014年到2021年，甘肃省的第三产业比重一直高于第二产业，并且第二产业与第三产业之间的差距越拉越大。与2010年相比，2021年发生了三大变化：一是第一产业比重由14.5%降低到13.32%；二是第二产业比重由48.2%下降到33.84%；三是“三产”比重由37.3%提高到52.83%。

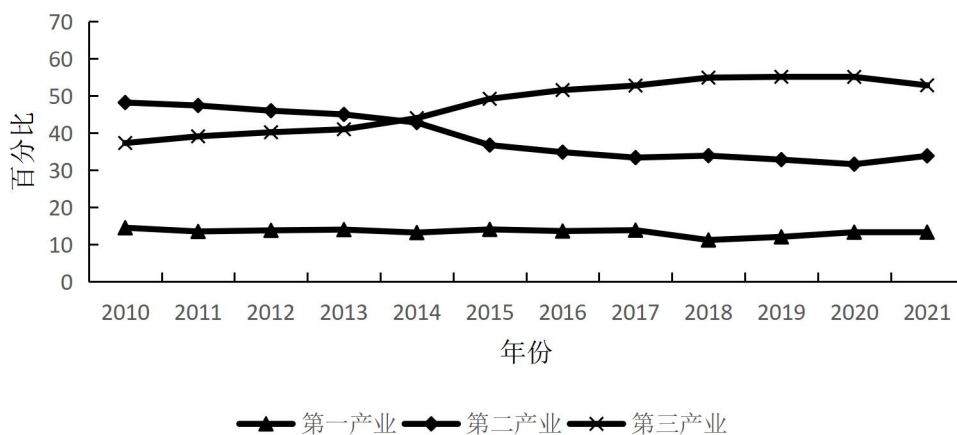


图 3.1 甘肃省产业发展趋势图

### 3.1.2 生态系统发展

党的十八大以来,甘肃省致力于加强生态文明建设,重点发展十大生态产业,包括节能环保、清洁生产和清洁能源等领域,取得了显著成效。根据甘肃日报报道,2021年,十大生态产业的增加值达2852.9亿元,占地区生产总值的27%。特别是在黄河流域生态保护和高质量发展方面取得乐观的进展,沿黄流域41个国家断面水质优良比例达到92.68%。此外,14个地级城市及兰州新区的细颗粒物浓度达到国家二级标准,全省环境空气质量综合指数为3.36;到2021年,全省空气质量平均优良天数比率达90.2%,地表水国考断面水质优良比例达95.9%;而全省草原综合植被盖度达53.04%,湿地面积保持在169.3万公顷左右。

### 3.1.3 社会系统发展

甘肃省一直秉承以人民为中心的发展理念,每年将民生支出占财政支出比例保持在80%左右。根据“中国这十年·甘肃”主题新闻发布会的报道,截至2021年底,常见普通病就诊有九成在基层医疗卫生机构得到解决。市级和县级中医医疗机构覆盖率分别达到92.85%和95.34%,乡镇卫生院(社区卫生服务中心)中医馆建设覆盖率也达到91.77%。全省城乡低保平均标准自2010年的204元和850元提高到2021年的6288元和4020元,确保困难群众得到充分保障和精准帮助。

### 3.1.4 基础设施系统发展

2010-2021年间,甘肃省积极利用国家政策,实施了大量基础设施项目,使得甘肃的城乡面貌发生了巨大变化。根据“中国这十年·甘肃”主题新闻发布会的报道,截至2021年底,公路总里程增加了2.54万公里,铁路运营里程增加了2710公里,兰州地铁、兰渝铁路等标志性工程相继建成投入使用;引洮供水一期工程已全面通水,二期骨干工程也已全线通水,受益人口约占全省总人口的四分之一。

总体来说,甘肃省城市发展在经济、生态、社会和基础设四个子系统上得了一定成绩,为实现可持续发展奠定了基础。未来,甘肃省将继续加大投资力度,推动城市发展实现更高水平、更平衡的发展。

## 3.2 测算思路

### 3.2.1 构建基本原则

评价甘肃省城市韧性的测算和分析需要遵循一定的原则，不能盲目进行。总结并参考其他学者在构建指标体系时所遵循的原则，可以概括为以下几点：

(1) 科学性：在建立城市韧性指标体系时，需要确保指标基于科学分析，具有明确定义和含义，能够客观准确地反映城市韧性的发展程度，以确保评估的客观性和可信度。

(2) 系统性和层次性：包括全面而有机的结构，以及不同层次的指标之间的关联和衔接，可以形成一个完整的评估体系，从而更全面地了解城市韧性的各个方面和层次。

(3) 关键性：在选择指标时，需要优先考虑具有重要性和关键性的指标，同时保持数量适中，以突出重点，易于理解和操作，能够有效地反映城市韧性的核心特征，为决策者提供清晰的指导和优先方向。

(4) 可操作性和可比性：指标数据应来源可靠且易获取，评价体系应易于实施和应用，同时能够与其他评价体系进行比较，为城市发展提供更有力的支持。

### 3.2.2 指标选取依据

城市韧性是城市系统在面对多样干扰和灾害时，具备保持稳定、适应变化、恢复并调整的能力，以促进经济、生态、社会和基础设施的持续稳定发展。城市韧性不仅是城市对负面影响的抵抗能力，更是城市在不确定性环境下的灵活适应和弹性发挥。引入韧性概念将城市系统看作一个复杂整体，从经济、生态、社会、基础设施等多个角度进行评估，以在不断变化的环境中找到平衡并取得持续进步为城市韧性指标体系的选择提供经验借鉴时，可以从多个方面考虑。首先，需要涵盖多个维度，包括经济、生态、社会和基础设施等方面。其次，在选择主要指标时，应考虑各个维度中具有代表性和关键性的指标，确保全面评估城市韧性水平。通过这种综合考虑和权衡，可以建立一个科学、全面的城市韧性指标体系，为城市的可持续发展提供有效支持和指导。论文结合现有学者研究成果<sup>[51-61]</sup>，如下表 3.1 所示。

表 3.1 城市韧性相关指标汇总表

维度	主要指标	参考文献
经济韧性	人均 GDP、人均固定资产投资额、第三产业产值占 GDP 比重、GDP、GDP 增速、城市居民收入水平、城乡居民储蓄年末余额、城镇居民可支配收入增长率、财政收入、财政收入增长率、高新技术产值占 GDP 比重、研究发展经费支出占 GDP 比重、公共财政预算支出、城镇私营和个体从业人员占比、当年实际使用外资金额、第一产业从业人数比重、规模以上企业的个数、经济开放度、外贸依存度	[51, 53-55, 57-60]
生态韧性	单位 GDP 废水排放、单位 GDP 工业废气排放量、城市建成区绿地率、城市污水处理厂日处理能力、生活垃圾清运量、工业固体废物综合利用率、空气质量好于二级的天数比例、未开发森林的土地比例、受灾面积、森林覆盖率、受灾面积、工业废水排放总量、污水处理率、生活垃圾无害化处理率自然灾害生活救助、成灾面积占受灾面积的比重、自然灾害生活救助	[53-55, 57-59, 61]
社会韧性	城镇化率、城市人口密度、万人拥有卫生机构人员数、城乡居民基本养老保险覆盖率、城乡居民基本医疗保险覆盖率、失业保险覆盖率、人均城乡居民储蓄存款、万人拥有文化事业机构数、万人拥有 R&D 人员、社会救助人口比例、万人拥有文化事业机构数、医院床位数、万人拥有养老服务机构数、万人拥有的普通中学学校数、普通高校学生在校人数、总抚养比	[53-55, 57-59, 61]
基础设施韧性	每万人拥有公共交通工具、人均城市道路面积、单位建成区供水管道长度、单位建成区污水排放管道长度、建成区排水管道密度、道路的长度、电视节目综合人口覆盖率、互联网用户数、货物周转总量、每平方公里的公共设施的数量、每平方公里公立学校的数量、每平方公里公路的长度、每万人拥有病床数、每万人医院床位数、年末移动电话用户数、燃气普及率、人均公用设施面积、人均生活日用水量、天然气普及率、无线网络覆盖率、学校数	[52, 53, 55, 57, 59]

### 3.2.3 指标体系的确定

论文首先从城市的经济韧性、生态韧性、社会韧性和基础设施韧性四个维度出发，基于数据的可获得性及上文文献计量高频指标，结合指标的科学性、可行

性、全面性和甘肃省发展现状的实际结合，以稳定能力和适应能力为选取角度，最终选择了 24 个指标来衡量甘肃省城市韧性发展。甘肃省城市韧性发展水平指标体系见表 3.2。

表 3.2 甘肃省城市韧性发展水平指标体系

准则层	选取角度	领域层	指标层	单位	属性	
城市经济韧性	稳定能力	实力	人均 GDP	元/人	正	
			人均固定资产投资额	万元	正	
	适应能力	多样性	第三产业产值占 GDP 比重	%	正	
		成长能力	研究发展经费支出占 GDP 比重	%	正	
城市生态韧性	稳定能力	压力	单位 GDP 废水排放	吨/元	负	
			单位 GDP 工业废气排放量	立方米/元	负	
	适应能力	状态	城市建成区绿地率	%	正	
			城市污水处理厂日处理能力	万立方米	正	
	适应能力	响应	生活垃圾清运量	万吨	正	
			工业固体废物综合利用率	%	正	
城市社会韧性	稳定能力	现状	城镇化率	%	正	
			城市人口密度	人/km <sup>2</sup>	正	
	保障	保障	万人拥有卫生机构人员数	人	正	
			城乡居民基本养老保险覆盖率	%	正	
			城乡居民基本医疗保险覆盖率	%	正	
			失业保险覆盖率	%	正	
适应能力	潜力	人均城乡居民储蓄存款	元	正		
		万人拥有文化事业机构数	个	正		
基础设施韧性	稳定能力	资源储备能力	万人拥有 R&D 人员	人	正	
			预警能力	移动电话年末用户数	万户	正
			城市用水普及率	%	正	
		城市燃气普及率	%	正		
		自救互救能力	人均城市道路面积	m <sup>2</sup> /人	正	
			15-64 岁所占人口比例	%	正	

### (1) 经济韧性相关指标

经济韧性使城市能够适应经济变化和冲击。一个多元化、具有创新能力和弹性的经济系统可以吸收冲击、快速调整，并实现可持续的经济发展。经济韧性还促进就业机会和经济增长，提供重要的资源和资金支持，为城市复原和发展提供保障。以经济发展实力、经济发展多样性和经济发展能力衡量经济水平。经济发展水平选取指标主要包括人均 GDP 和人均固定资产投资额，经济发展多样性选取指标主要包括第三产业产值占 GDP 比重，经济发展质量指标主要包括研究与试验发展经费支出占 GDP 比重。

其中经济子系统以人均 GDP 和人均固定资产投资为主要经济实力，通过研究发展经费支出和第三产业在 GDP 中的占比从而获得经济效益，该系统直接决定城市投资及就业水平，同时经济的发展也是生态的代价。

### (2) 生态韧性相关指标

生态韧性保护城市的自然资源和生态系统，使城市能够应对环境变化和自然灾害。具有健康的生态系统和可持续的资源管理有助于减轻环境压力、提高城市的适应能力，并提供基础设施和生活质量的基本保障。以生态压力、生态状态和生态响应表示生态韧性发展水平。生态压力选取指标主要包括单位 GDP 废水排放和单位 GDP 工业废气排放量；生态状态选取指标主要包括城市建成区绿地率；生态响应指标包括城市污水处理厂日处理能力、生活垃圾清运量和工业固体废物综合利用率。

生态韧性子系统通过生态压力、生态状态和环境响应能力反映生产生活造成的环境代价，生态子系统与其他系统存在相互影响、互为补偿的关系；

### (3) 社会韧性相关指标

社会韧性强调社会公平、社区凝聚力和社会资本。一个具有高度社会凝聚力和包容性的城市能够更好地应对挑战，并提高社区的抵抗能力和社会安全。社会韧性还包括建立强大的社会网络、提供高质量的社会服务以及促进公民参与和社区自治。以社会现状、社会保障和社会潜力代表社会韧性发展水平。社会现状选取主要指标包括城镇化率和城市人口密度；社会保障选取主要指标包括万人拥有卫生机构人员数、城乡居民基本养老保险覆盖率、城乡居民基本医疗保险覆盖率和失业保险覆盖率；社会潜力选取主要指标包括人均城乡居民储蓄存款、万人拥有文化事业机构数和万人拥有 R&D 人员。

社会子系统一方面通过社会现有和社会保障协调人类活动与生态环境的均衡性问题，保障城市系统顺利运行，另一方面通过社会所存在的潜力运行对提高居民生活水平、提升旅游体验及改善城市环境等方面的贡献。

#### (4) 基础设施韧性相关指标

基础设施韧性涉及城市的物理基础设施，包括交通网络、供水系统、能源供应和通信网络等。韧性基础设施能够快速适应和调整，以降低灾害和应对紧急情况的影响。强大和可靠的基础设施网络能够确保城市的连通性和基本服务的提供，促进城市的可持续发展。以预警能力、资源储备能力和自救互救能力来表示基础设施韧性发展水平。预警能力选取指标主要包括移动电话年末用户数；资源储备能力选取指标主要包括城市用水普及率、城市燃气普及率和人均城市道路面积；自救互救能力选取指标主要包括 15-64 岁所占人口比例。

基础设施子系统通过预警、疏散和安置及自救互救能力反映城市韧性系统的基建资源和风险防范，基础设施子系统为其他子系统提供安全和韧性。

### 3.2.4 测算方法

#### (1) 权重的确定

论文选用熵值法来测度甘肃省城市韧性水平，熵值法基于信息熵的原理，通过对指标数据的变异程度进行量化和分析，能够消除主观因素的干扰，使权重的确定更加客观和科学。核心理念是：随着信息量的增加，系统的不确定性会减小，熵值也会减小；反之亦然。熵值法能够减少主观因素对决策结果的影响，特别适用于指标之间关联性较弱的情况。熵值法下甘肃省城市韧性测算步骤如下：

1) 对数据进行极值标准化处理指标层次上的指标维度不同而带来的影响，设评价体系中有  $m$  个样本、 $n$  个指标。计算公式如下：

正向指标：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3.1)$$

负向指标：

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3.2)$$



式中,  $x'_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m$ ) 是无量纲化处理后的数值, 为了消除量纲的影响, 便于进行数据运算和比较, 对这些数据进行整体平移, 即  $p_{ij} = x'_{ij} + \alpha$ , 为不破坏数据的原始用意, 最大限度保留原始数据,  $\alpha$  的取值应该尽可能的小, 即最接近  $p_{ij}$  的最小值, 本文取  $\alpha = 0.0001$ 。

2) 计算各项指标的熵值  $e_{ij}$ :  $e_{ij} = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$ , 其中  $k = \frac{1}{e_{max}} = \frac{1}{\ln m}$

$$\text{各项指标的权重 } w_j: w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad (3.3)$$

## (2) 评价函数

论文选用线性加权函数法来作为评价函数, 线性加权函数法将指标的值与权重直接相乘并求和, 使得评价结果具有直观性。权重反映了各个指标在评价中的重要性, 通过简地加权求和, 可以直观地了解各个指标对总体评价结果的贡献程度, 便于理解和解释。运用线性加权函数法得到的综合评价价值和韧性值如下:

$$\text{各项指标综合评价价值 } C_{ij}: C_{ij} = p_{ij} \times w_j \quad (3.4)$$

$$\text{经济韧性: } R_1 = \sum_{j=1}^4 w_j p_{ij} \quad (3.5)$$

$$\text{生态韧性: } R_2 = \sum_{j=5}^{10} w_j p_{ij} \quad (3.6)$$

$$\text{社会韧性: } R_3 = \sum_{j=11}^{19} w_j p_{ij} \quad (3.7)$$

$$\text{基础设施韧性: } R_4 = \sum_{j=20}^{24} w_j p_{ij} \quad (3.8)$$

$$\text{城市韧性}^{\text{①}}: R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (3.9)$$

## 3.3 测算结果及特征分析

### 3.3.1 数据来源与处理

数据主要来源于 2010-2021 年《甘肃省统计年鉴》、甘肃省自然资源厅、各市州统计年鉴、各市州统计公报、《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》以及其他各类数据库, 对于部分城市缺失的或无法从官方获取的数据, 如临夏州的

<sup>①</sup>本文各二级指标经过标准化和熵值法赋权后, 各指标权重已经确定, 子系统则是根据指标属性对其进行了分类, 不再涉及到子系统层的二次加权, 因此此处直接采用了各指数加和的方式作为城市经济韧性测度值。

移动电话年用户数，有三年缺失数据，通过比对往年数据，发现其呈现出一定的递增规律，因此采用线性插值法补充。

### 3.3.2 测算结果

城市是一个复杂多样的系统，城市韧性是对复杂城市出现风险的应对能力。城市韧性作为一种能力，那么就有作用于城市韧性的因素存在，论文城市韧性综合得分是采用熵值法和线性加权汇总得来，依托 24 个指标的具体数据对甘肃省 14 个市州 2010-2021 年综合评价结果进行计算并排名，如表 3.3 所示。接着以城市韧性测算结果的数据特点为依据，在参照脆弱性与韧性等级研究的基础上<sup>[71]</sup>，城市韧性综合值分级为 5 个等级，由低至高分别是低韧性、较低韧性、中等韧性、较高韧性和高韧性(见表 3.4)。

表 3.3 2010-2021 年甘肃省城市韧性综合评价结果及平均综合值排名

城市	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
兰州市	0.44	0.47	0.51	0.54	0.53	0.53	0.54
嘉峪关市	0.38	0.36	0.40	0.36	0.38	0.38	0.43
金昌市	0.25	0.26	0.33	0.35	0.38	0.38	0.36
白银市	0.13	0.15	0.16	0.18	0.18	0.18	0.19
天水市	0.15	0.15	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19
武威市	0.12	0.14	0.14	0.16	0.17	0.17	0.18
张掖市	0.12	0.13	0.15	0.16	0.17	0.17	0.21
平凉市	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.15
酒泉市	0.18	0.19	0.22	0.22	0.24	0.24	0.25
庆阳市	0.10	0.13	0.14	0.16	0.17	0.17	0.17
定西市	0.06	0.07	0.10	0.11	0.11	0.11	0.13
陇南市	0.06	0.07	0.08	0.08	0.10	0.10	0.11
临夏州	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13
甘南州	0.10	0.11	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13

续表 3.3 2010-2021 年甘肃省城市韧性综合评价结果及平均综合值排名

城市	2017	2018	2019	2020	2021	平均	排名
兰州市	0.57	0.59	0.63	0.59	0.62	0.55	1
嘉峪关市	0.41	0.38	0.48	0.39	0.44	0.40	2
金昌市	0.34	0.29	0.32	0.32	0.42	0.33	3
白银市	0.24	0.24	0.26	0.26	0.30	0.21	7
天水市	0.26	0.27	0.28	0.30	0.34	0.22	5
武威市	0.24	0.23	0.24	0.28	0.31	0.20	8
张掖市	0.27	0.26	0.27	0.30	0.32	0.21	6
平凉市	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27	0.17	10
酒泉市	0.27	0.29	0.28	0.31	0.39	0.26	4
庆阳市	0.23	0.23	0.25	0.24	0.34	0.19	9
定西市	0.18	0.21	0.20	0.22	0.29	0.15	13
陇南市	0.17	0.16	0.19	0.20	0.26	0.13	14
临夏州	0.18	0.20	0.22	0.22	0.28	0.15	12
甘南州	0.19	0.19	0.20	0.21	0.29	0.16	11

表 3.4 城市韧性测度分级标准

韧性分级	I 级 低韧性	II 级 较低韧性	III 级 中等韧性	IV 级 较高韧性	V 级 高韧性
韧性综合值 I	$I < 0.2$	$0.2 \leq I < 0.3$	$0.3 \leq I < 0.4$	$0.4 \leq I < 0.5$	$I \geq 0.5$

由表 3.3 和表 3.4 知，在 2010-2021 年的甘肃省城市韧性综合评价结果及平均得分排名中，兰州市平均排名第一（0.55），处于高韧性水平，在 2010-2021 年城市韧性水平均为最高。下面依次为嘉峪关市（0.40），金昌市（0.33），前三个城市具有中等以上的城市韧性水平，而其他城市的平均排名为 4-14 名，城市韧性综合值较低，属于较低和低韧性城市。

根据上述，可大致将甘肃省 14 个市州按城市韧性平均综合值分为三大类：第一类，兰州市和嘉峪关市，属于高韧性城市；第二类，金昌市、酒泉市、天水市、张掖市、白银市、武威市属于中低韧性城市；第三类，庆阳市、平凉市、临夏州、甘南州、定西市和陇南市，属于低韧性城市。

### 3.3.3 变动趋势分析

### (1) 总体演变特征

如表 3.5 所示，2010-2021 年甘肃省城市韧性均值呈逐年递增趋势，从 2010 年的 0.163 提升到 2021 年的 0.306，从低韧性提升到中等韧性。2010-2021 年甘肃省各市州韧性水平的标准差增长幅度不大，说明该时期甘肃省各市州韧性水平均衡平稳发展，没有大幅度波动。说明甘肃省在过去的 12 年在城市韧性发展中取得了较水平的发展，这是对甘肃省在可持续发展和社会进步方面努力的肯定。

表 3.5 甘肃省城市韧性水平描述性统计

年份	均值	标准差	中位数	最大值	最小值
2010	0.163	0.110	0.123	0.407	0.060
2011	0.171	0.104	0.142	0.425	0.069
2012	0.189	0.116	0.148	0.463	0.081
2013	0.194	0.115	0.153	0.488	0.085
2014	0.203	0.117	0.163	0.481	0.095
2015	0.203	0.116	0.164	0.476	0.096
2016	0.217	0.129	0.171	0.498	0.104
2017	0.236	0.096	0.211	0.502	0.150
2018	0.236	0.094	0.209	0.518	0.142
2019	0.253	0.108	0.222	0.559	0.167
2020	0.183	0.095	0.159	0.468	0.105
2021	0.306	0.085	0.276	0.547	0.228

### (2) 各市州演变特征

为了更直观的体现甘肃省各市州不同时期的城市发展特征，论文将 2010-2021 年划分为三个阶段，分别是 2010-2013 年、2014-2017 年、2018-2021 年。其中 2010-2013 年甘肃省各市州的城市韧性如图 3.2a 所示，在甘肃省 2010-2013 年的城市韧性发展情况中，张掖市、武威市、白银市、庆阳市、天水市、定西市、平凉市、临夏州、甘南州和陇南市这 10 个市均处于低韧性阶段；金昌市和酒泉市处于较低韧性；嘉峪关市处于中等韧性阶段；兰州市处于较高韧性。原因可能是张掖市等 10 个市在经济转型和产业结构调整过程中，出现部分

行业的衰退和岗位流失，这些地区地区发展困难，可能存在就业困难、基础设施不完善等问题。而兰州市的经济保持了持续稳定增长的态势。GDP 均增速达到了 10.6%，经济总量逐年增加，并且修建了一批重要的交通和基础设施项目，在其他方面也有显著的成就。

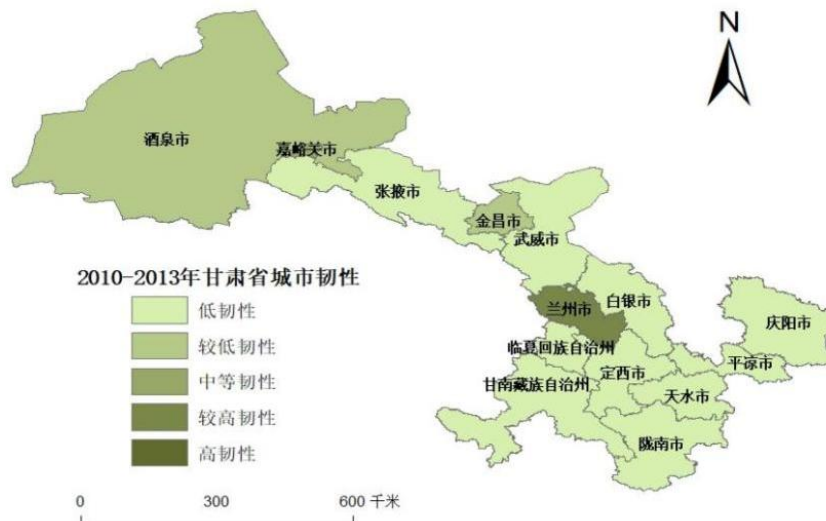


图 3.2a 2010-2013 年甘肃省各市州韧性发展情况

由图 3.2b 所示，2014-2017 年，甘肃省白银市、武威市、庆阳市、天水市、定西市、平凉市、临夏州、甘南州和陇南市处于低韧性阶段，酒泉市、张掖市和天水市处于较低韧性阶段，金昌市处于中等韧性阶段，嘉峪关市处于较高韧性阶段，兰州市处于高韧性阶段。说明这一时间段，酒泉市、张掖市、天水市、金昌市、嘉峪关市和兰州市这六个城市快速发展。原因可能是这六个城市工业化进程推进、生态环境保护<sup>②</sup>和城乡建设力度加大、基础设施不断完善<sup>③</sup>等工作的加速推进，使得城市韧性有了阶段性的提升。而白银市等 8 个城市的韧性提升程度较低，其原因可能是经济、教育、基础设施发展相对滞后，农业主导产业，结构单一，交通不便等。

<sup>②</sup>源自 2014 年的酒泉市政府工作报告。（<http://www.jiuquan.gov.cn/.html>）

<sup>③</sup>源自 2014 年的张掖市政府工作报告。（<https://www.zhangye.gov.cn/.html>）

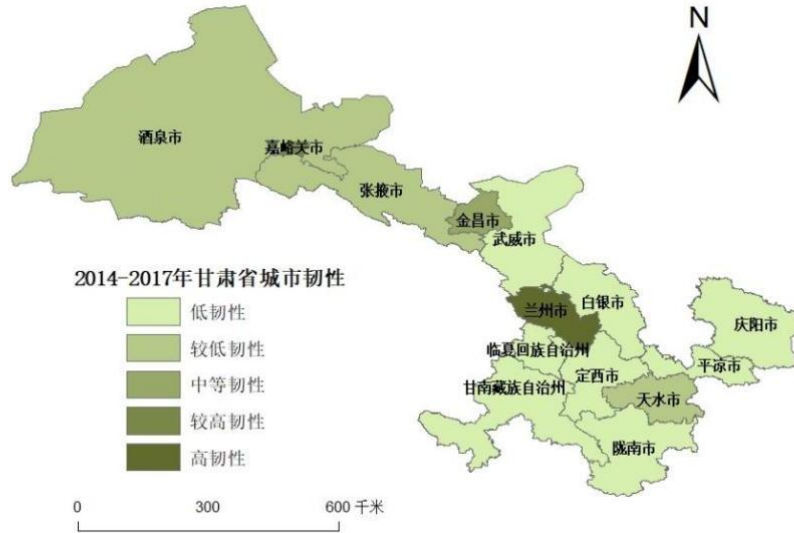


图 3.2b 2014-2017 年甘肃省各市州韧性发展情况

由图 3.2c 所示，2018-2021 年，白银市、武威市、庆阳市、天水市、定西市、平凉市、临夏州、甘南州和陇南市 9 个城市均上升为较低韧性阶段，金昌市和嘉峪关市较上一个阶段没有变化；酒泉市上升为中等韧性阶段；兰州市处于高韧性阶段。甘肃省 14 个市州在 2018-2021 年的平均城市韧性均达到较低韧性水平以上，说明甘肃省在这四年整体向上发展，大多数市州经过四个子系统的发展使得每个城市都在一定的领域上有着较为全面的提升和发展，但增长速度相对缓慢。

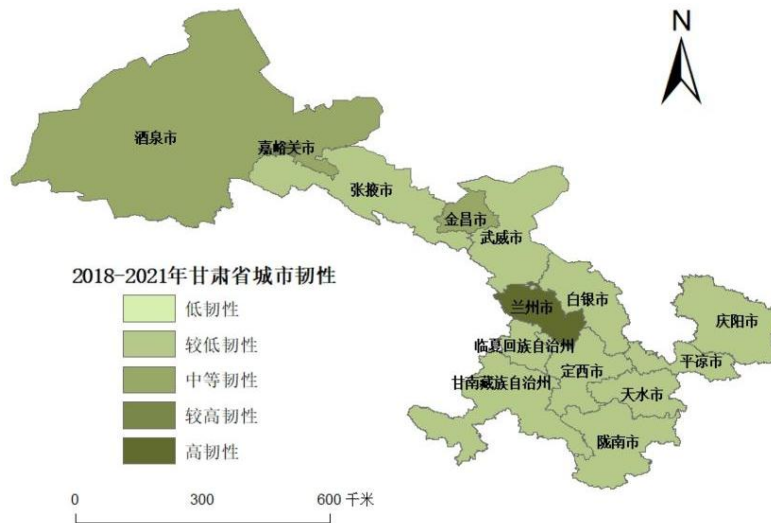


图 3.2c 2018-2021 年甘肃省各市州韧性发展情况<sup>④</sup>

<sup>④</sup> 论文中地图均来源于测绘地理信息 (<https://zwfw.ch.mnr.gov.cn/index>)

综上所述,通过观察不同时间段的甘肃省各市州韧性发展情况,不难发现每一个城市都上升了一个韧性等级,原因可能是甘肃省的经济以农业、工业和旅游业为主导,12年间在不断向上发展,加大基础设施建设的力度,非常重视生态环境保护工作,如退耕还林还草、生态湿地保护等的投入,并且甘肃省一直致力于扶贫工作,采取了一系列的政策和措施,努力改善贫困地区的条件,推动甘肃省整体城市韧性提升,随着国家政策的引导和甘肃省的努力,相信甘肃省在经济、生态保护、社会和基础设施等多方面将继续取得更多进步。

## (2) 子系统演变特征

如图 3.3 所示,将 2010-2021 年甘肃省经济子系统、生态子系统、社会子系统和基础设施子系统的韧性演变趋势图叠加在一起,有助于评估甘肃省城市韧性子系统的动态变化情况,以及各子系统的发展水平。

从经济韧性来看,2010-2021 年甘肃省的经济韧性整体呈上升趋势,从 2010 年的 0.0258 上升到 2021 年的 0.0465,年平均增长率为 5.21%,增长速率相对缓慢,在这个时间段经济韧性的波动较为频繁。从具体指标来看,2017 年全部工业增加值 1769.7 亿元,比上年下降 1.5%,全年固定资产投资 5696.3 亿元,比上年下降 40.3%,2018 年固定资产投资比上年下降 3.9%,2021 年固定资产投资比上年增长 11.1%,从这些数据来看,甘肃省经济韧性在 2016-2021 年的不断下降和上升有了可能的原因。

从生态韧性来看,2010-2021 年甘肃省的生态韧性整体呈上升趋势,从 0.0437 上升到 0.0569,年平均增长率为 2.08%,生态韧性增长速率相较经济韧性更为缓慢,从具体指标来看,2014 年二氧化硫排放量 57.56 吨,比 2013 年增加 2.43%,并且 2014 年全省森林覆盖率 11.28%,相比上一年下降 0.02%,全省气温较常年偏高 0.6℃,日最高气温大于 32℃高温日数比常年偏多<sup>⑤</sup>,可能会出现干旱等情况使得甘肃省 2013 年到 2014 年的生态韧性降低。此外,甘肃省生态韧性也取得了一些发展,从生态响应层面来看,2010 年甘肃省生活垃圾清运量和城市污水处理厂日处理能力为 278.25 万吨和 108.3 万立方米,而 2021 年,生活垃圾清运量和城市污水处理厂日处理能力为 26707.5 万吨和 170.4 万立方米,年平均增长率为 2402.66 万吨/年和 5.65 万立方米/年。说明甘肃省生态响应能力有了一定程

<sup>⑤</sup> 源自 2014 年甘肃省环境状况公报 (<http://cn.chinagate.cn.htm>)

度的提升，为可持续发展增添动力，但仍需要在其他方面进行全面高效的提升。

从社会韧性来看，2010-2021年甘肃省的社会韧性逐年呈上升趋势，社会韧性从2010年的0.070上升到2021年的0.179，年平均增长率为15.73%。可见，甘肃省对社会韧性的提升有着高度的重视，增强社会稳定、经济适应和发展能力。从社会现状来看，2010年甘肃省城市人口密度为3793人/平方公里，2021年甘肃省城市人口密度为5698.76人/平方公里。说明通过提升甘肃省的社会韧性，可以增强该甘肃省的抗风险能力、促进可持续发展，为实现经繁荣、社会稳定和民生改善做出重要贡献。

从基础设施韧性来看，2010-2021年甘肃省的基础设施韧性整体呈上升趋势，其中基础设施韧性从2010年的0.022上升到2021年的0.0655，年均增长率为10.37%，说明甘肃省基础设施韧性总体提升较快。从资源储备能力来看，2010年甘肃省人均城市道路面积12.2平方米，2021年甘肃省人均城市道路面积22.2平方米。说明甘肃省基础设施韧性的提升将对整体发展产生积极影响，甘肃省城市的基础设施资源储备能力有了一定程度的改善，促进经济发展，改善居民生活品质，促进甘肃省协调发展。

综上所述，甘肃省社会韧性增长速率相对较快，其他三个子系统增长幅度和增长率都相对持平，从发展趋势来看，四个子系统的处于同一发展水平，可能的原因是甘肃省在城市韧性的发展方面相对平衡，注重各个子系统的均衡发展。这意味着在城市发展过程中，甘肃省政府和相关部门将社会、经济、生态和基础设施等方面的韧性发展视为整体，力求保持各个方面的均衡，避免单个方面表现过于突出而导致整体韧性的不平衡。



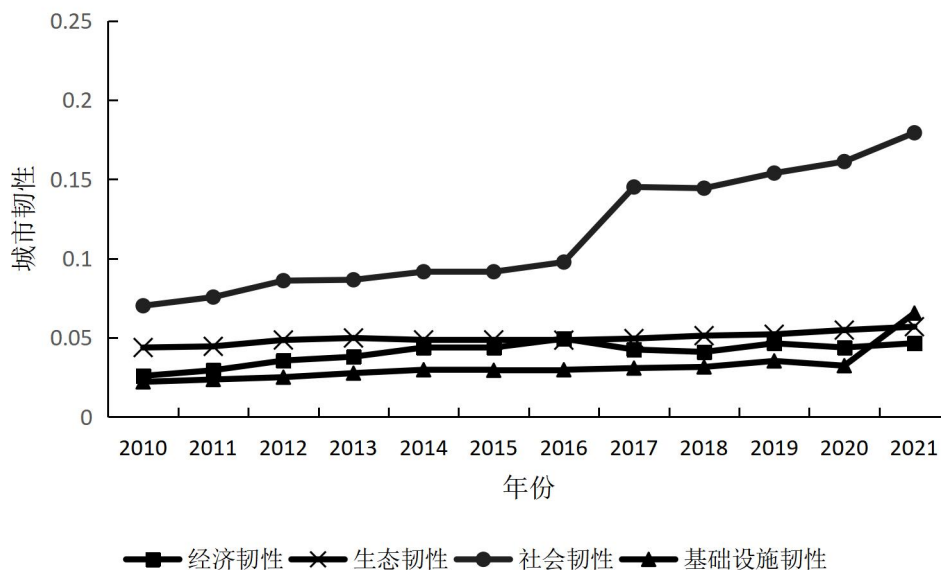


图 3.3 2010-2021 年甘肃省城市各子系统韧性演变趋势图

### 3.3.4 时空演变特征分析

#### (1) 总体来看

为形象直观地展示甘肃省城市韧性发展水平情况，论文将其三维动态 Kernel 核密度绘制如图 3.4 所示。甘肃省 14 个市州 2010-2021 年城市韧性发展水平、分布演化、极化趋势以及延展性具有以下特点：

第一，从密度曲线的变化情况可以观察到，2010-2021 年甘肃省城市韧性发展水平整体呈现向左移动的趋势，主峰在 2016-2017 年期间急剧上升并扩大，随后在 2018 年之后逐渐上升并继续扩大，这表明城市韧性发展水平趋于降低。甘肃省城市韧性发展差距出现收窄态势，呈现动态收敛的特征。

第二，通过波峰的变化趋势可以观察到，甘肃省城市韧性的的发展程度分布呈现出“多峰-双峰-多峰”的变化模式。具体来看，2010-2019 年间的分布形态为一个主峰和多个侧峰，2020 年变为一个主峰和一个侧峰，而 2021 年再次呈现一个主峰和多个侧峰的形态。这表明甘肃省城市韧性发展水平存在两极分化问题，并且这一现象正在逐渐加剧。

第三，甘肃省城市韧性分布表现出右拖尾的趋势，即延展性有拓宽之势，表明全省范围内城市韧性发展水平空间上绝对差异越来越大，发展水平高的城市与平均水平之间的差距持续增加。

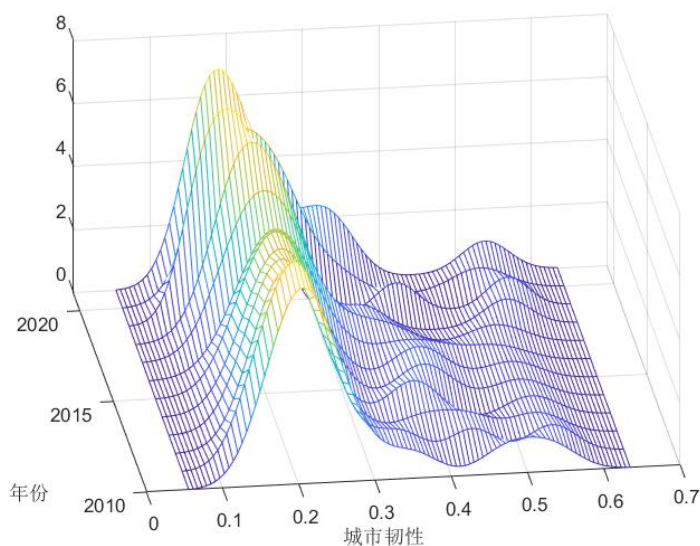


图 3.4 2010-2021 年甘肃省城市韧性发展水平核密度图

## (2) 分区来看

为形象地显示各市州城市韧性在甘肃省的发展情况，论文将甘肃省 14 个市州按城市韧性平均综合值分为高韧性城市、中低韧性城市、低韧性城市，并绘制核密度图如图 3.5 所示。从城市分级来看，各市州 2010-2021 年城市韧性发展水平、分布演化、极化趋势具有以下特点：

第一，从曲线的分布位置可以看出发展水平分布中心及变化区间有所区别，高韧性城市和低韧性城市分布中心均缓慢左移，高韧性城市波峰垂直高度下降，低韧性城市波峰垂直高度呈波动起伏趋势；中低韧性城市分布中心不断向右移动，这说明中低韧性的各城市的城市韧性发展水平呈现不断上升的趋势。

第二，从分布的形态可以看出，高韧性城市的主峰高度在 2010 年骤然下降，2015 年开始上升，随后呈现波浪形趋势，表明高韧性城市的绝对差异浮动趋势不断变化；对于中低韧性城市，其主峰高度与高韧性城市的波动幅度一致；低韧性城市的主峰高度在 2013 年和 2017 年骤然下降，其余几年稳定上升。

第三，从分极化现象可以看出，三大类城市表现各有不同。高韧性城市始终处于单峰状态，表明中高韧性城市发展水平未表现出显著的两极趋势，两极化现象不明显；中低韧性城市发展水平呈现“双峰-单峰-双峰”状态，说明两极分化现象先减弱后上升；低韧性城市始终处于双峰状态，说明低韧性城市韧性发展始

终存在两极化现象。从整体上看，甘肃省各市州随着时间的推移均出现程度不一的分散化倾向。

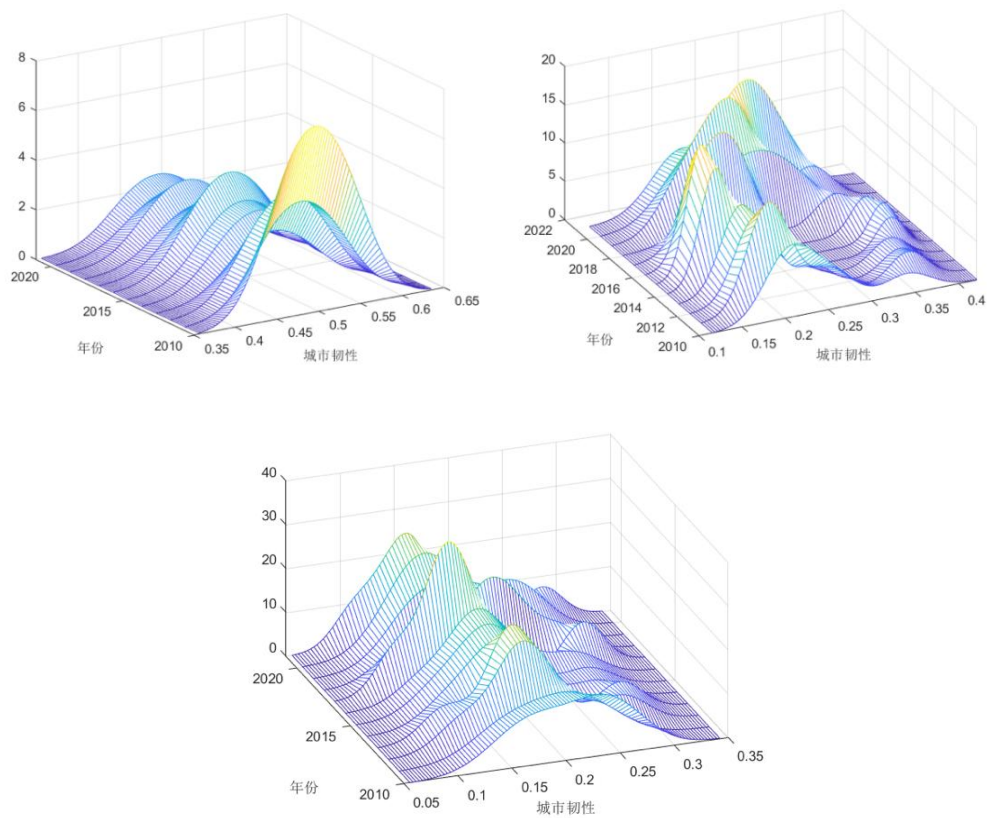


图 3.5 2010-2021 年甘肃省高、中低、低韧性城市水平核密度图

## 4 城市韧性系统动态关联性分析

前文分析了甘肃省各市州和各个子系统韧性状况,韧性发展水平和变化趋势,但各子系统之间的相互作用及各要素之间的因果关系需要进一步的进行分析。本节对城市韧性系统动态关联性进行分析,可以更好的判断城市系统的脆弱点和潜在风险,通过模拟仿真最终得出不同情景下的方案,结合结果和上文分析给出合理的方案。

### 4.1 子系统间的动态关联性

不同子系统韧性发展水平基本相同也不意味着没有发展差异,可能仍存在一定的差异,但整体上接近相同水平。需要对各子系统之间的相互作用及各子系统发生变化时城市群韧性受到的冲击状况。城市群韧性冲击受到各子系统的影响,而各个子系统相互关联,一个子系统变化可能对其他子系统产生连锁影响。通过各个子系统的变化对整个城市系统的影响,可以更好地理解各个子系统如何随着时间的推移而互相影响,揭示甘肃省城市韧性内部子系统的相互依赖关系。

#### 4.1.1 理论模型设定

PVAR 模型是在 VAR 模型基础上发展而来,综合考虑个体固定效应和时间效应,并利用模型脉冲响应、方差分解等方法,直观解析不同变量之间的联系。论文构建了城市韧性、经济韧性、生态韧性、社会韧性和基础设施韧性等变量之间的 PVAR 模型,从而探究各变量之间的动态传导效应。模型如下:

$$Y_{it} = A_1 Y_{it-1} + A_2 Y_{it-2} + \dots + A_p Y_{it-p} + B X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4.1)$$

其中,  $Y_{it}$  是由经济韧性  $R_1$ 、生态韧性  $R_2$ 、社会韧性  $R_3$  和基础设施韧性  $R_4$  四个内生变量构成的向量,  $i$  表示城市,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $t$  表示年份,  $t \in \{1, 2, \dots, T_i\}$ ,  $p$  为滞后期数,  $B$  和  $A_1, A_2, \dots, A_p$  为系数矩阵,  $Y_{it-p}$  为滞后  $p$  期的变量,  $X_{it}$  为外生协变量矩阵,  $\varepsilon_{it}$  为随机扰动误差向量。

模型展开式为:

$$\begin{bmatrix} Y_{1t} \\ Y_{2t} \\ \dots \\ Y_{it} \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} Y_{1t-1} \\ Y_{2t-1} \\ \dots \\ Y_{it-1} \end{bmatrix} + A_2 \begin{bmatrix} Y_{1t-2} \\ Y_{2t-2} \\ \dots \\ Y_{it-2} \end{bmatrix} + \dots + A_p \begin{bmatrix} Y_{1t-p} \\ Y_{2t-p} \\ \dots \\ Y_{it-p} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} X_{1t} \\ X_{2t} \\ \dots \\ X_{it} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{2t} \\ \dots \\ \varepsilon_{it} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

即不含外生变量 $X_{it}$ 的非限制性模型表达式为<sup>[65]</sup>:

$$Y_{it} = A_1 Y_{it-1} + A_2 Y_{it-2} + \dots + A_p Y_{it-p} + \varepsilon_{it} (t = 1, 2, \dots, T_i) \quad (4.3)$$

## 4.1.2 经验模型的构建

### (1) 平稳性检验

在对四个子系统韧性数据进行单位根检验时,发现部分数据未通过平稳性检验,因此,在对 PVAR 模型进行一阶差分,通过该操作,可以消除数据序列中的非平稳性,对上述模型回归之前,为了避免出现伪回归,需要确保所有变量都可以通过平稳性检验。论文利用 LLC 检验方法、IPS 检验、HT 检验和 PP 检验四种方法对模型中的变量进行单位根检验,结果如表 4.1 所示。结果显示,  $D.R_1$ 、 $D.R_2$ 、 $D.R_3$ 、 $D.R_4$  四个变量均在 1% 的水平下通过了显著性检验。由此判定,论文中所采用的变量都是平稳序列,可以进行下一步 PVAR 建模分析。

表 4.1 单位根检验结果

变量	LLC		IPS		HT		PP		结论
	统计值	p 值	统计值	p 值	统计值	p 值	统计值	p 值	
$D.R_1$	-9.99	0.0000***	-4.43	0.0000***	-0.10	0.0000***	110.50	0.0000***	平稳
$D.R_2$	-10.69	0.0000***	-5.02	0.0000***	-0.07	0.0000***	137.07	0.0000***	平稳
$D.R_3$	-7.15	0.0000***	-4.13	0.0000***	-0.14	0.0000***	105.81	0.0000***	平稳
$D.R_4$	-7.80	0.0000***	-5.91	0.0000***	-0.21	0.0000***	172.54	0.0000***	平稳

注: 上角标\*\*\*代表在 1% 的显著水平下变量数据为平稳序列数据。

### (2) 滞后期选择

为了确保回归分析的结果不会受到估计偏差的影响,在进行 PVAR 模型回归分析之前,需要使用信息准则来选择最适合的滞后期。论文中首先对所有变量进

行 Helmert 变换,接着构建 AIC、BIC 和 HQIC 统计量,并比较它们的大小,以综合考虑各统计量来确定最优的滞后期。根据表 4.2 中显示的结果,甘肃省各州市的城市韧性子系统在 AIC 和 HQIC 统计量下显示最优的滞后期为 3 期,而 BIC 统计量下为 1 期。为了保证模型的准确性和解释性,论文选择了滞后期为 3 期的模型进行后续分析。

表 4.2 模型最优滞后期确定

lag	AIC	BIC	HQIC
1	-24.79	-23.17*	-24.13
2	-23.58	-21.45	-22.71
3	-25.27*	-22.53	-24.16*
4	-25.1743	-21.70	-23.78

注:上角标\*表示该准则选择的最优滞后阶数。

### (3) 模型的建立

由上面的分析得,在 PVAR 模型参数估计时对各变量进行一阶差分后,最优滞后阶数为 3 阶,其经验方程表示为:

$$\Delta Y_{it} = \Delta A_1 Y_{it-1} + \Delta A_2 Y_{it-2} + A_3 Y_{it-3} + \Delta \varepsilon_{it} (t = 1, 2, \dots, 12) \quad (4.4)$$

其中,  $\Delta Y_{it}$  是由经济韧性  $R_1$ 、生态韧性  $R_2$ 、社会韧性  $R_3$  和基础设施韧性  $R_4$  四个内生变量构成的向量,  $i$  表示城市,  $i \in \{1, 2, \dots, 14\}$ ,  $t$  表示年份,  $t \in \{1, 2, \dots, 12\}$ ,  $p$  为滞后期数,  $A_1, A_2, A_3$  为系数矩阵,  $Y_{it-p}$  为滞后  $p$  期的变量,  $\varepsilon_{it}$  为随机扰动误差向量。

## 4.1.3 模型结果分析

### (1) 脉冲响应

脉冲响应函数能够定量地描述变量受到某种冲击时所产生的动态影响关系。在其他内生变量保持不变的情况下,图 4.1 提供了两个内生变量之间的动态关联特征。通过红色实线表示某一变量受到冲击后另一变量的脉冲响应值,而上下的

绿色和蓝色线则代表通过 200 次蒙特卡洛模拟得出的 95%置信区间。横轴表示冲击作用的滞后期数，纵轴表示响应程度，这有助于直观地展示两个变量之间的动态关联特征。分析各内生变量在当期和未来期的动态如下：

1) 城市韧性、经济韧性、生态韧性、社会韧性和基础设施韧性对于自身的信息冲击响应在第二期后为正向响应，表明甘肃省城市韧性及四个子系统均存在一定的自我惯性。但经济韧性响应曲线一直在 0 附近，说明经济韧性子系统对城市韧性能力不足。

2) 甘肃省经济韧性变量的一个标准差冲击，生态韧性、社会韧性和基础设施韧性变量响应为负向，说明甘肃省经济韧性可能存在躲避经济韧性较好的城市（如兰州市），也就意味着甘肃省经济韧性存在“污染避难所”效应。而除了经济韧性外，其他三个子系统韧性变量相互之间的一个标准差冲击，其响应均为正向响应，且在不断上升，说明生态韧性、社会韧性和基础设施韧性三个子系统之间有相对持久的吸引关系。

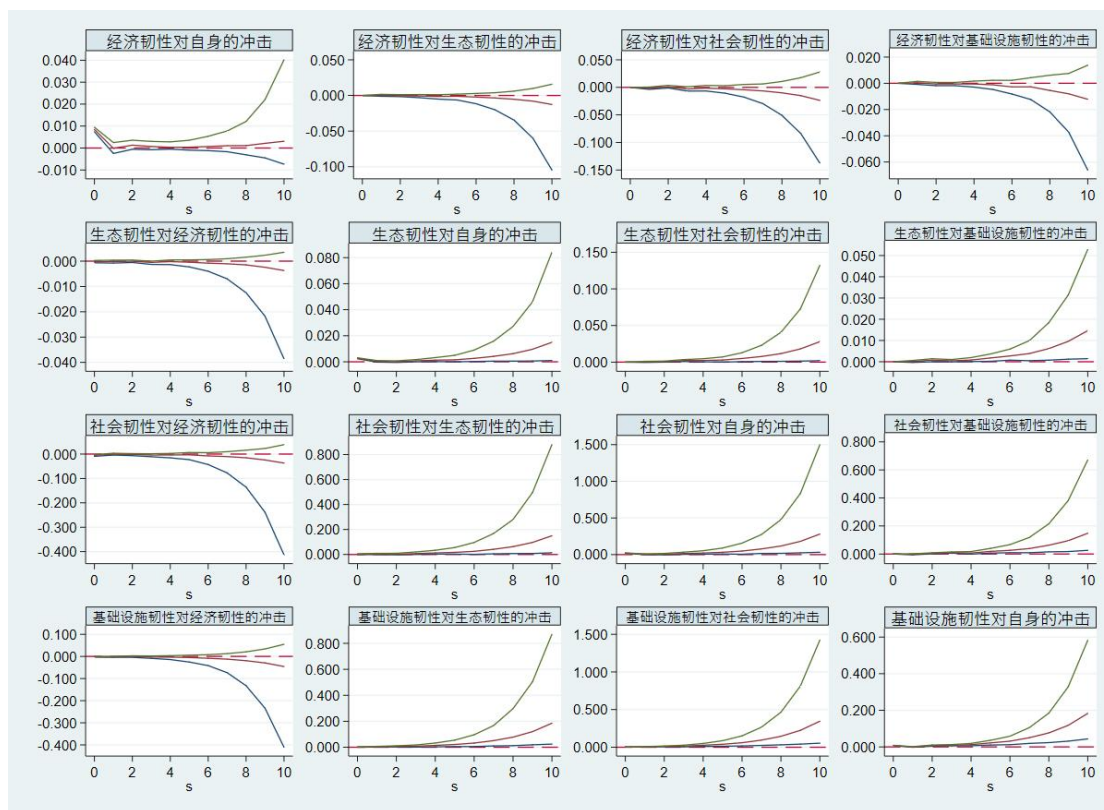


图 4.1 甘肃省城市韧性及子系统韧性脉冲响应图

## (2) 方差分解

方差分解可揭示变量间相互关系对整体波动的贡献程度,通过比较各变量对同一个内生变量的相对重要性,分析不同预测期内,同一变量对该内生变量的累计贡献程度。论文选择 20 个预测期进行 PVAR 方差分解,得到城市韧性在第 1-20 期的方差分解结果(表 4.3)。

总体来看,四个变量在第 17 期时候达到稳定值,其中,社会韧性的贡献度为 63.1%,其他三个子系统韧性的贡献度均不到 20%,说明甘肃省社会韧性对城市韧性的冲击较大,对城市韧性产生长期的作用。经济韧性、生态韧性和基础设施韧性贡献度相对较低,说明这三个子系统韧性对甘肃省城市韧性冲击的吸收速度较为缓慢。

表 4.3 方差分解结果

滞后阶数	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
1	1.000	0.933	0.924	0.758
...	...	...	...	...
5	0.805	0.451	0.701	0.193
...	...	...	...	...
10	0.116	0.187	0.633	0.176
...	...	...	...	...
15	0.013	0.181	0.631	0.176
16	0.012	0.181	0.631	0.176
17	0.011	0.181	0.631	0.176
18	0.011	0.181	0.631	0.176
19	0.011	0.181	0.631	0.176
20	0.011	0.181	0.631	0.176



## 4.2 要素间的动态关联性

通过上一节的分析，得出甘肃省各市州四个子系统之间的冲击关系，但对于城市韧性系统内部要素之间的相互关系，分析内在机理仍需要进一步研究。通过系统动力学模型可以更好地理解城市系统之间的相互影响关系，帮助制定相关政策和方案。在探索甘肃省城市韧性指标之间复杂关系时，SD方法考虑了线性、非线性和反向关联，旨在模拟各种背景下城市的可持续发展趋势，并研究提升城市韧性的方法和策略。这种分析方法包括五个主要步骤：（1）研究边界的确定；（2）系统内部的结构分析；（3）SD方程的构建；（4）模型检验；（5）情景分析与评估。

论文从三类城市中各选取一座城市代表，通过构建系统动力学模型，直观全面的表现系统内部结构和动态特征，并为政策参数的选择提供了一种有效的数学方法，通过城市韧性模拟仿真的方式，制定有效策略，为提升城市韧性提供可靠的参考依据。

### 4.2.1 理论模型设定

#### （1）边界的确定

在测算城市韧性综合值时，论文从经济韧性、社会韧性、生态韧性、基础设施韧性四个子系统出发，选取24个指标来衡量甘肃省城市韧性发展，基于此，论文以2010-2021为历史仿真时间段，基期年为2010年，2022-2023年则为模拟预测时间段，基期年为2022年。

#### （2）因果关系和动态流图

基于表3.2构建的指标体系，从甘肃省城市韧性系统的经济韧性、社会韧性、生态韧性、基础设施韧性四个子系统出发，构建城市韧性主要指标间的因果关系（图4.2），探讨其对应的城市韧性系统的稳定能力和适应能力，并建立城市韧性系统动力学模型（图4.3）。

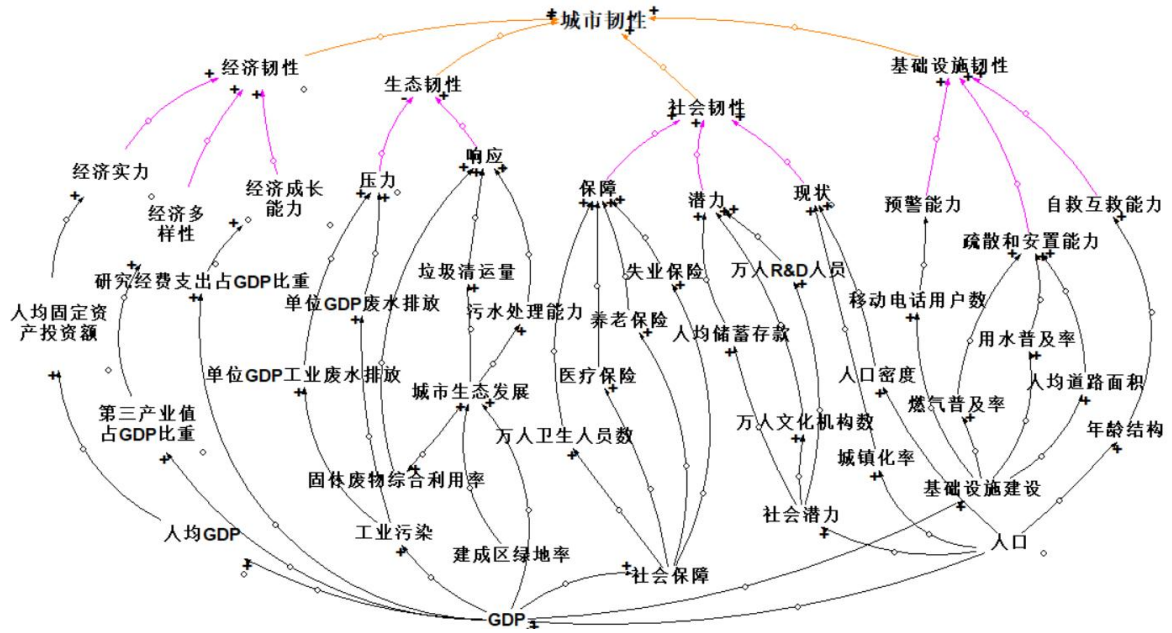


图 4.2 甘肃省城市韧性系统的因果关系图

注：+表示正的反馈关系，代表自变量的增加或减少导致因变量的同向变化；-表示负的反馈关系，代表自变量的增加或减少导致因变量的反向变化；→表示因果关系影响方向。

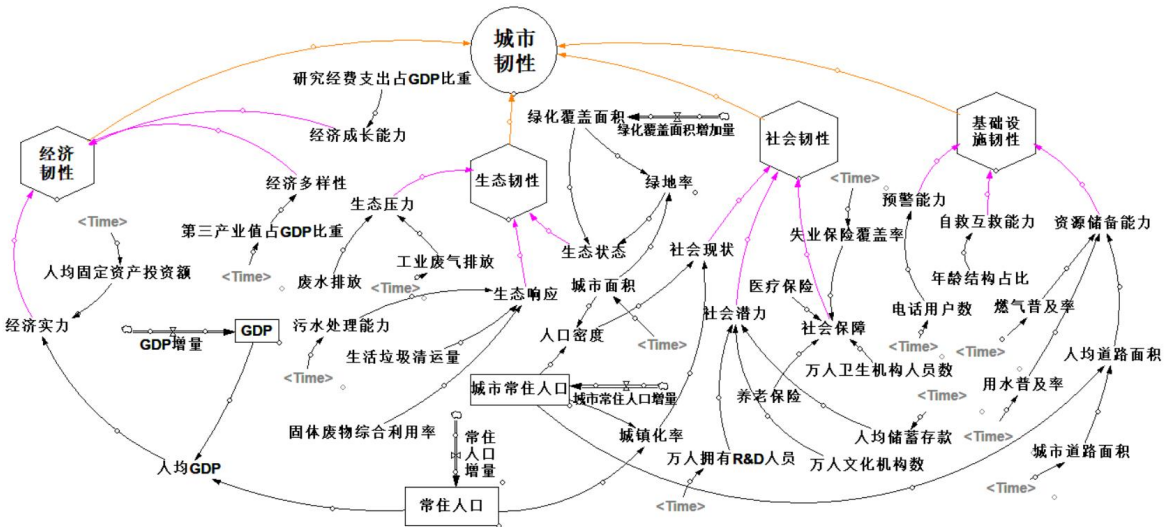


图 4.3 甘肃省城市韧性系统动力学建模

注：云团代表流量起点的存量；⊗代表水平流量受其他因素影响可以变化；Time 代表时间函数，表示自变量与因变量之间的非线性关系。

图 4.2 中，城市韧性系统指标间的反馈关系，以 GDP 为例，包含 GDP 的反馈关系有：

GDP→(+ )人均 GDP→(+ )人均固定资产投资额→(+ )经济实力→(+ )经济韧性→(+ )城市韧性；

GDP→(+)**第三产业值占 GDP 比重**→(+)**经济多样性**→(+)**经济韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**研究发展经费支出占 GDP 比重**→(+)**经济增长能力**→(+)**经济韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**工业污染**→(+)**单位 GDP 废水排放**→(+)**生态压力**→(+)**生态韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**城市生态发展**→(+)**工业固体废物综合利用率**→(+)**生态响应**→(+)**生态韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**城市生态发展**→(+)**生活垃圾清运量**→(+)**生态响应**→(+)**生态韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**城市生态发展**→(+)**污水处理能力**→(+)**生态响应**→(+)**生态韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**社会保障**→(+)**万人拥有卫生机构人员数**→(+)**保障**→(+)**社会韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**社会保障**→(+)**医疗保险**→(+)**保障**→(+)**社会韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**社会保障**→(+)**养老保险**→(+)**保障**→(+)**社会韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**社会保障**→(+)**失业保险**→(+)**保障**→(+)**社会韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**基础设施建设**→(+)**移动电话年末用户量**→(+)**预警能力**→(+)**基础设施韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**基础设施建设**→(+)**燃气普及率**→(+)**疏散和安置能力**→(+)**基础设施韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**基础设施建设**→(+)**用水普及率**→(+)**疏散和安置能力**→(+)**基础设施韧性**→(+)**城市韧性**;

GDP→(+)**基础设施建设**→(+)**人均道路面积**→(+)**疏散和安置能力**→(+)**基础设施韧性**→(+)**城市韧性**;

由上述, 共有 16 条包含 GDP 的反馈关系, 说明 GDP 在城市韧性系统中的不可忽视的作用。另外, 同时也体系出城市韧性中各个指标是有因果相关关系的, 相互影响的。

#### 4.2.2 经验模型的构建

### (1) SD 方程的分类

为了科学研究复杂系统内各要素指标之间的相互关系,并进行精确的定量描述,需要设定合理的初始数值,以便对当前和未来的发展趋势进行仿真模拟。因此,在系统流程图上的变量上制定系统的动力学方程是必要的。

#### 1) 状态方程 (L)

又称水平方程,在 SD 模型中,状态变量通常通过微分方程来描述其时间演化的规律,描述模型中存量以及影响变量之间的互动关系。基本方程如下式(4.5)、(4.6)所示:

$$\begin{cases} \frac{L(t)}{dt} = f(t, L(t), u(t)) \\ z(t) = g(t, L(t), u(t)) \\ L(t_0) = L(0) \end{cases} \quad (4.5)$$

其中,  $L(t)$ 表示系统的状态变量,即系统的状态随时间的变化,  $t$ 表示时间,  $u(t)$ 表示系统的输入变量,即系统对外部的响应,  $f(t, L(t), u(t))$ 表示系统的状态更新函数,描述了状态随时间变化的规律,  $z(t)$ 表示系统的输出变量,即系统对外部的反映,  $g(t, L(t), u(t))$ 表示系统的输出函数,描述了输出与状态和输入之间的关系,  $t_0$ 表示系统的初始时刻,  $L(0)$ 表示系统在初始时刻的状态值。

状态变量是描述系统状态的变量,它的值可以是在某个时刻的取值,这是可以用一阶差分方程来表示,即描述离散时间系统的动态行为的方程,它表示当前时刻的状态变量值与上一个时刻的状态变量值之间的关系。一阶差分方程的一般形式为:

$$L(t) = f(L(t-1), u(t)) \quad (4.6)$$

其中,  $L(t-1)$ 表示上时刻的状态变量值。

#### 2) 速率方程 (S)

速率方程表示系统状态变量随时间变化的速率,通过对状态变量求导数来表示,它描述了系统中不同变量之间的相互作用和演化规律。基本形式如式(4.7)所示:

$$LS = f(L, Constant) \quad (4.7)$$

#### 3) 辅助方程 (F)

辅助方程是指在系统动力学中,用来描述系统中辅助变量或约束条件的方程,通常与主要的状态方程一同使用,以完整地描述系统的动态行为。

## (2) 参数的确定

1) 线性回归分析：如果系统的模型是线性的，可以使用线性回归分析来确定参数。线性回归模型如式(4.8)所示：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (4.8)$$

其中， $y$ 是因变量， $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 是自变量， $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ 是回归系数， $\varepsilon$ 是误差项。通过最小化残差平方和，可以得到回归系数的估计值。

## 2) 表函数法

对于上述提到的非线性关系的变量，还可以利用 Vensim 软件函数库中的函数工具来量化和描述变量之间的关系，比如 LN 函数、INTEG 函数等。当数据存在缺失或相关变量间的影响关系不够明显时，可以使用特殊函数来表达变量之间的关系，例如 WITH LOOKUP 函数。

## (3) 城市韧性的系统动力学模型中的变量

根据表 3.2 进一步确定模型构建中的水平变量 L、速率变量 S、辅助变量 F (见表 4.4)；其中 A 为稳定能力，B 为适应能力， $C_i$ 表示经济实力、经济多样性、经济成长能力、生态压力、生态状态、生态响应、社会现状、社会保障、社会潜力、预警能力、疏散和安置能力、自救互救能力， $D_i$ 代表指标层变量。

## (4) 历史性检验

通过比较模型预测值与历史数据之间的相对误差，可以评估所建立的模型是否有效。通常情况下，相对误差保持在 10%以下可以确保系统动力学模型的仿真结果是真实有效的。如公式(4.9)所示：

$$D = \frac{X' - X_t}{X_t} \times 100\% \quad (4.9)$$

式中， $X_t$ 为 t 时刻的历史取值， $X'$ 为 t 时刻的仿真模拟值，D 为偏差程度。

## (5) 灵敏性检验

论文选取模型中的城市韧性内部变量进行灵敏度分析，其测度方法如公式(4.10)所示：

$$S_t = \frac{\frac{Y'_t - Y_t}{Y_t}}{\frac{X'_t - X_t}{X_t}} \quad (4.10)$$

式中， $X_t$ 和 $X'_t$ 分别代表参数调整前后值， $Y_t$ 和 $Y'_t$ 则分别表示 t 时刻的拟合值， $S_t$ 代表变量在 t 时刻与其对应参数变化的灵敏度。

表 4.4 甘肃省城市韧性的系统动力学模型中的变量

准则层	选取角度	领域层	变量编号	类型
经济韧性 (R1)	A	实力 (C1)	人均 GDP (D1)	S
		多样性 (C2)	人均固定资产投资额 (D2)	F
	B	成长能力 (C3)	第三产业产值占 GDP 比重 (D3)	F
		压力 (C4)	研究发展经费支出占 GDP 比重 (D4)	F
生态韧性 (R2)	A	状态 (C5)	单位 GDP 废水排放 (D5)	F
		响应 (C6)	单位 GDP 工业废气排放量 (D6)	F
	B	现状 (C7)	城市建成区绿地率 (D7)	F
		保障 (C8)	城市污水处理厂日处理能力 (D8)	L
社会韧性 (R3)	A	现状 (C7)	生活垃圾清运量 (D9)	F
		保障 (C8)	工业固体废物综合利用率 (D10)	S
	B	现状 (C7)	城镇化率 (D11)	S
		保障 (C8)	城市人口密度 (D12)	S
基础设施韧性 (R4)	A	保障 (C8)	万人拥有卫生机构人员数 (D13)	F
		预警能力 (C10)	城乡居民基本养老保险覆盖率 (D14)	F
	B	潜力 (C9)	城乡居民基本医疗保险覆盖率 (D15)	F
		资源储备能力 (C11)	失业保险覆盖率 (D16)	F
基础设施韧性 (R4)	A	潜力 (C9)	人均城乡居民储蓄存款 (D17)	F
		资源储备能力 (C11)	万人拥有文化事业机构数 (D18)	F
	B	预警能力 (C10)	万人拥有 R&D 人员 (D19)	F
		自救互救能力 (C12)	移动电话年末用户数 (D20)	F
基础设施韧性 (R4)	A	资源储备能力 (C11)	城市用水普及率 (D21)	F
		自救互救能力 (C12)	城市燃气普及率 (D22)	F
基础设施韧性 (R4)	A	资源储备能力 (C11)	人均城市道路面积 (D23)	F
		自救互救能力 (C12)	15-64 岁所占人口比例 (D24)	F

### (6) 系统动力学方程的构建

论文根据系统边界设定,以 2010 年为时间起点,2021 年为时间终点建立城市韧性系统动力学模型关键变量,未在表中呈现的变量直接使用统计年鉴的值,

运用 Vensim 软件对系统进行模拟和仿真预测，得到的城市韧性系统关键变量及方程如下表 4.5 所示，L 为状态变量，S 为速率变量，F 为辅助变量：

表 4.5 系统关键变量及方程

名称	单位	性质	方程
GDP 总量	亿元	L	$\int_{t_0}^t F(t)dt + F(t_0)$
人均 GDP	元/人	S	GDP 总量/常住人口
人均固定资产投资额	万元	F	$y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0)$
常住人口	万人	L	$\int_{t_0}^t F(t)dt + F(t_0)$
城市常住人口	万人	L	$\int_{t_0}^t F(t)dt + F(t_0)$
绿化面积	万公顷	L	$\int_{t_0}^t F(t)dt + F(t_0)$
第三产业产值占 GDP 比重	Dmnl	F	第三产业产值/GDP 总量
研究发展经费支出占 GDP 比重	Dmnl	F	研究发展经费支出/GDP 总量
单位 GDP 废水排放	吨/元	F	废水排放量/GDP 总量
单位 GDP 工业废气排放量	立方米/元	F	工业废气排放量/GDP 总量
城市污水处理厂日处理能力	万立方米/日	L	$y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0)$
失业保险覆盖率	Dmnl	F	$y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0)$
人均城乡居民储蓄存款	万元	F	$y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \times (x - x_0)$

其中，在 GDP 总量、常住人口、城市常住人口和绿化面积方程中，表示变量随时间积分变化的过程，F(t)表示 t 时刻的 GDP 总量、常住人口、城市常住人口和绿化面积， $\int_{t_0}^t$  表示函数 F(t)对 t 的导数，即 GDP 增加值、常住人口增加值、城市常住人口增加值和绿化面积增加值的变化率；在人均固定资产投资、城市污水处理厂日处理能力、失业保险覆盖率等变量的方程中，均表示通过已知数据点

之间的线性或者非线性关系，利用插值方法来求解中间或新的数据点的值， $x_0$ 和 $x_1$ 表示已知数据点的自变量（横坐标）， $y_0$ 和 $y_1$ 是已知数据点的因变量（纵坐标）， $x$ 是需要查询的特定时间点。

### 4.2.3 模型结果分析

论文研究对象为甘肃省各市州，各市州之间的发展趋势差别较大，因此将甘肃省 14 个市州按城市韧性平均综合值分为高韧性城市：兰州市和嘉峪关市；中低韧性城市：金昌市、酒泉市、天水市、张掖市、白银市、武威市；低韧性城市：庆阳市、平凉市、临夏州、甘南州、定西市和陇南市。从大三类城市中各一类作为代表城市，这里分别选取兰州市、金昌市和陇南市。其原因如下：

兰州市（高韧性城市）：兰州市作为省会城市，是甘肃省的政治、经济、文化中心。兰州市具有较为发达的交通网络和基础设施、成熟的产业体系和较高的经济实力。此外，兰州市还拥有丰富的历史文化遗产和旅游资源。因此，兰州市作为甘肃省城市韧性的代表，可以展示出高韧性城市的特点。

金昌市（中低韧性城市）：金昌市位于甘肃省西北部，经济基础相对薄弱，但该市积极推动经济转型升级和城市建设。通过吸引投资、提升基础设施、促进人才流动等举措，金昌市正努力实现经济可持续发展和提升城市的综合竞争力。选择金昌市作为中低韧性城市的代表，可以展示这类城市在面对困难时的努力，同时也能够促进对中低韧性城市的关注和支持。

陇南市（低韧性城市）：陇南市地处甘肃省东南部，是甘肃省的脱贫攻坚重点地区之一。陇南市的经济相对较为薄弱，但在近年来，陇南市积极推动农业产业化和乡村振兴战略，加大对农业、旅游和生态保护的投入。同时，陇南市还积极开展对口帮扶和扶贫协作，加强社会保障和基础设施建设。选择陇南市作为低韧性城市的代表，可以展示出这类城市在贫困地区发展和社会保障方面的努力。

#### （1）参数赋值

确定方程后，模型内各参数需要进行合理赋值。论文包含常数、表函数、初始值，以兰州市为例进行展示赋值方法，如表 4.6 和表 4.7 所示。首先，可以直接使用真实调查或公开发表的数据，例如在统计年鉴中发布的 GDP 总值、常住



人口等参数，将这些数据直接赋值给模型中相应的变量；其次，对于那些具有规律性递增或递减趋势的参数，可以通过设定合适的增长率或递减率来模拟其变化趋势，如绿化面积，可根据拟合效果确定其增长率进行赋值；最后，用算术平均法、经验值法直接获得。变量参数相对稳定，根据 2010-2021 年的平均值进行部分变量数据值的确定。

表 4.6 水平变量赋值

变量	单位	属性	增加值	初始值
GDP 总量	亿元	L	2130.6102	1100.3898
常住人口	万人	L	76.52	361.91
绿化面积	公顷	L	6638	4441
城市常住人口	万人	L	12.46	323.54
城市面积	平方公里	L	153.53	205.74

表 4.7 间接获取的主要变量赋值

名称	单位	性质	赋值
城市建成区绿地率	Dmnl	F	30.04
生活垃圾清运量	万吨	F	108.96
工业固体废物综合利用率	Dmnl	S	95.01
城镇化率	Dmnl	S	80.26
万人拥有卫生机构人员数	人	L	97.75
城乡居民基本养老保险覆盖率	Dmnl	F	21.41
城乡居民基本医疗保险覆盖率	Dmnl	F	37.78
万人拥有文化事业机构数	个	F	2.07
万人拥有 R&D 人员	人	F	58.38
移动电话年末用户数	万户	F	457.97
城市用水普及率	Dmnl	F	95.79
城市燃气普及率	Dmnl	F	94.34
人均城市道路面积	平方米/人	F	10.55
15-64 岁所占人口比例	Dmnl	F	75.86

## (2) 适用性检验

为检验模型运行的精度,现将结果与历史数据进行对照分析,借助 2010-2021 年的数据,对“GDP”、“常住人口”和“城市常住人口”这三个变量进行检验,通过观察模拟值与真实值的相对误差大小,来检验模型的有效性。由结果知,2010-2021 年三个变量的相对误差均呈较低水平,表明所构建的系统动力学模型结构合理,运行结果可靠,如表 4.8 所示。

表 4.8 使用较多变量误差检验结果

年份	兰州市 GDP		兰州市常住人口		兰州市城市常住人口	
	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差
2010	1100.39	0.000	361.91	0.000	323.54	0.000
2011	1294.08	-0.0485	368.866	0.0187	324.685	0.0043
2012	1487.77	-0.0486	375.823	0.0352	325.831	0.0135
2013	1681.47	-0.0534	382.779	0.0511	326.976	-0.1129
2014	1875.16	-0.0629	389.735	0.0634	328.122	-0.1243
2015	2068.85	-0.0129	396.692	0.0741	329.267	0.0229
2016	2262.54	-0.0007	403.648	0.0893	330.413	0.0198
2017	2456.23	-0.017	410.605	0.1009	331.558	0.017
2018	2649.92	-0.0304	417.561	0.1124	332.704	0.0143
2019	2843.62	0.0023	424.517	0.1198	333.849	0.0056
2020	3037.31	0.0521	431.474	-0.0131	334.995	0.003
2021	3231	0.000	438.43	0.000	336.14	0.000
年份	金昌市 GDP		金昌市常住人口		金昌市城市常住人口	
	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差
2010	210.51	0.000	46.44	0.000	28.84	0.000
2011	228.68	-0.017	46.19	0.001	29.28	0.006
2012	246.85	0.014	45.94	0.000	29.72	0.009
2013	265.02	0.052	45.69	0.003	30.16	0.010
2014	283.19	0.106	45.44	0.004	30.6	0.010
2015	301.36	0.342	45.19	0.005	31.04	0.031
2016	319.53	0.538	44.94	0.004	31.48	0.018
2017	337.70	0.525	44.69	0.001	31.92	0.020
2018	355.87	0.347	44.44	0.002	32.36	0.035
2019	374.04	0.100	44.19	0.002	32.8	0.049

续表 4.8 使用较多变量误差检验结果

年份	金昌市 GDP		金昌市常住人口		金昌市城市常住人口	
	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差
2020	392.21	0.096	43.94	0.004	33.24	-0.019
2021	410.38	-0.043	43.69	0.006	33.68	-0.011

年份	陇南市 GDP		陇南市常住人口		陇南市城市常住人口	
	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差
2010	169.43	0.000	256.77	0.000	50.59	0.00
2011	199.71	0.010	255.13	-0.004	54.01	-0.01
2012	229.99	0.018	253.49	-0.013	57.43	-0.04
2013	260.27	0.043	251.85	-0.022	60.84	-0.04
2014	290.55	0.004	250.21	-0.033	64.26	-0.07
2015	320.84	0.018	248.57	-0.041	67.68	-0.07
2016	351.12	0.033	246.93	-0.052	71.10	-0.10
2017	381.40	0.113	245.29	-0.065	74.52	-0.13
2018	411.68	0.086	243.65	-0.075	77.93	-0.13
2019	441.96	-0.007	242.01	-0.084	81.35	-0.12
2020	472.24	0.045	240.37	0.000	84.77	-0.06
2021	502.53	0.000	238.73	0.000	88.19	-0.01

### (3) 稳健性检验

通过调整时间间隔，并观察数值波动范围来评判模型的准确性，这种方法被称为稳健性检验。如果结果显示在不同时间间隔下，模型对 GDP、常住人口和城市常住人口等变量没有出现大幅度波动，那么可以认为该模型的稳健性较高。从图中可以看出，当改变时间间隔为 3 个月、半年和 1 年时，模型的运行结果都没有出现明显波动，表明模型具有较好的稳健性。结果如图 4.4a,b,c 所示。



图 4.4a 兰州市城市韧性系统模型稳健性检验结果



图 4.4b 金昌市城市韧性系统模型稳健性检验结果

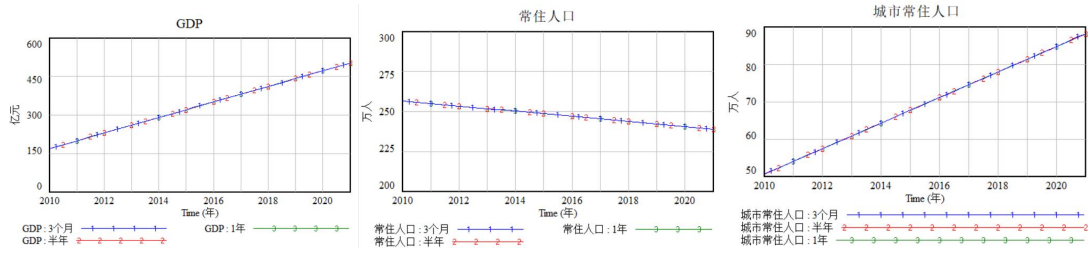


图 4.4c 陇南市城市韧性系统模型稳健性检验结果

### (4) 敏感性分析

#### 1) 领域层面

敏感性分析是一种通过改变模型中部分参数或结构来评估变量对模型影响程度的方法。在系统动力学模型中，通常会逐一针对各个因素进行敏感性分析。具体做法是修改一个因素的数值，同时保持其他因素恒定，然后比较修改后的模型结果和修改前的结果之间的区别。如果有较大差异，说明该因素对模型具有较高的敏感性。以 C1-C12 12 个重要因素为例，分别将三座城市各个领域层韧性值提高 20%。灵敏性分析结果如图 4.5a,b,c 所示。

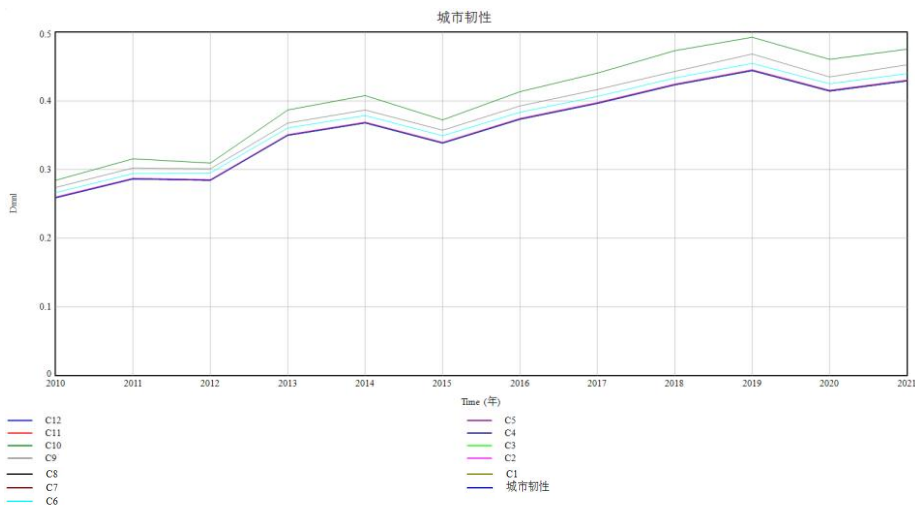


图 4.5a 兰州市敏感性分析结果

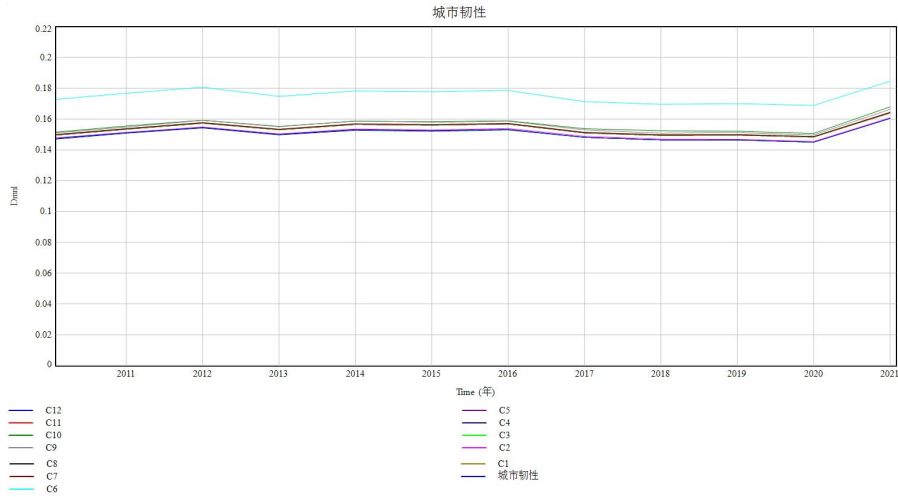


图 4.5b 金昌市敏感性分析结果

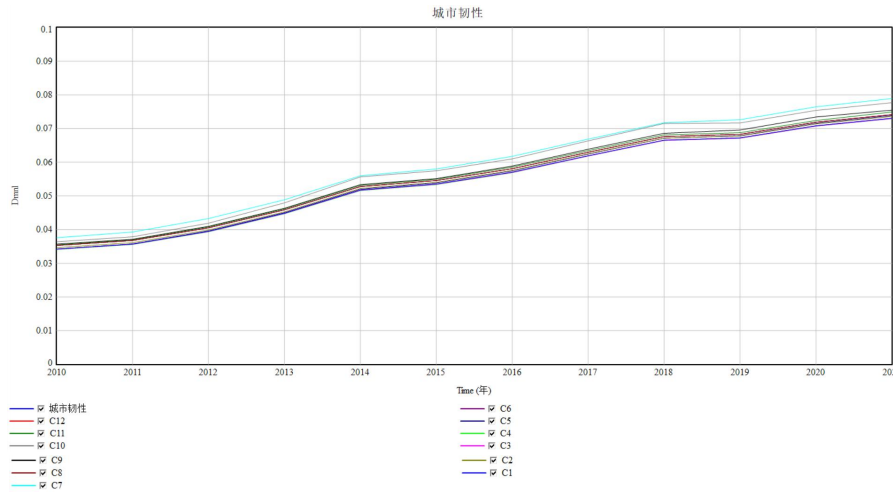


图 4.5c 陇南市敏感性分析结果

从灵敏性分析结果可以得到分析的 12 个因素的敏感度，兰州市、金昌市和陇南市最终时间的城市韧性水平依次为 0.4290、0.1604 和 0.073，观察发现，12 个领域层韧性值均高于原来的城市韧性值，所以均能有效提高城市韧性水平。

## 2) 要素层面

采用相同的方法对模型中的其他指标进行敏感度分析，考虑到指标数量较多且单个因素对模型影响有限的情况，为增加指标间的可比性，可以将每个指标的值增加 50%。通过分析修改后的模型结果，可以确定各个指标对城市韧性的影响程度，并进而确定三个城市在各指标城市韧性方面的敏感度排名前十。具体结果如表 4.9 所示，兰州市的敏感度排序为：D20>D19>D8>D16>D9>D17>D3>D7>D1>D13；金昌市的敏感度排序为：D8>D20>D1>D9>D19>D2>D17>D23>D3>D16；陇南市的敏感度排序为：D12>D23>D22>D21>D24>D20>D7>D19>D17>D3。

表 4.9 三座城市各指标敏感性分析结果

编号	处理措施	兰州市韧性水平	增长幅度 (%)	金昌市韧性水平	增长幅度 (%)	陇南市韧性水平	增长幅度 (%)
R	保持不变	0.429	-	0.1604	-	0.1038	-
D1	提高 50%	0.4303	0.305	0.1723	7.38	0.0743	1.875
D2	提高 50%	0.4295	0.117	0.166	3.472	0.0742	1.730
D3	提高 50%	0.4328	0.897	0.1649	2.787	0.0757	3.738
D4	提高 50%	0.429	0.003	0.1639	2.174	0.0742	1.644
D5	提高 50%	0.429	-0.005	0.1594	-0.623	0.0741	-1.606
D6	提高 50%	0.429	-0.005	0.1590	-0.873	0.0741	-1.606
D7	提高 50%	0.4306	0.379	0.1639	2.181	0.0764	4.670
D8	提高 50%	0.4501	4.919	0.2095	30.599	0.0743	1.810
D9	提高 50%	0.4349	1.381	0.1707	6.415	0.0742	1.768
D10	提高 50%	0.429	0.008	0.164	2.236	0.0741	1.631
D11	提高 50%	0.4293	0.063	0.1641	2.257	0.0745	2.057
D12	提高 50%	0.4298	0.197	0.164	2.241	0.0887	21.590
D13	提高 50%	0.43	0.235	0.1641	2.299	0.0753	3.219
D14	提高 50%	0.429	0.012	0.1639	2.185	0.0744	1.986
D15	提高 50%	0.4291	0.027	0.164	2.202	0.0756	3.601
D16	提高 50%	0.4376	2.01	0.1646	2.593	0.0747	2.439
D17	提高 50%	0.4345	1.285	0.1652	2.966	0.0757	3.763
D18	提高 50%	0.4295	0.115	0.1643	2.427	0.0743	1.855
D19	提高 50%	0.4821	12.389	0.1683	4.888	0.0757	3.810
D20	提高 50%	0.5452	27.085	0.174	8.478	0.0784	7.464
D21	提高 50%	0.429	0.003	0.1641	2.271	0.0784	7.492
D22	提高 50%	0.429	0.003	0.1642	2.372	0.0785	7.607
D23	提高 50%	0.4293	0.063	0.1649	2.797	0.0792	8.531
D24	提高 50%	0.429	0.002	0.1641	2.275	0.0784	7.477

## 5 城市韧性提升策略分析

### 5.1 情景设定

根据论文 4.2.3 中三个城市各指标的敏感度排序，选取三个城市敏感度排名靠前和复现次数高的指标，确定敏感度排序靠前的 6 个指标：移动电话年末用户数、人均城乡居民储蓄存款、第三产业占 GDP 比重、人均 GDP、人均城市道路面积和城市污水厂日处理能力。基于现有文献的研究基础，通过对 6 个敏感指标相互组合，提出了四种不同的发展策略：现状延续型、经济发展型、基础设施导向型和韧性建设型。通过对这四种策略的模拟预测，分析甘肃省在 2010 年至 2030 年期间城市韧性发展的趋势。如表 5.1 为四种仿真情境下的指标值设置。

表 5.1 四种仿真情境指标取值设置

指标	现状延续型	经济发展型	基础设施导向型	韧性建设型
年末移动电话用户数	保持不变	保持不变	提高 50%	提高 30%
人均城乡居民储蓄存款	保持不变	保持不变	保持不变	提高 30%
第三产业产值占 GDP 比重	保持不变	提高 50%	保持不变	提高 50%
人均 GDP	保持不变	提高 50%	保持不变	保持不变
人均城市道路面积	保持不变	保持不变	提高 50%	保持不变
污水处理厂日处理能力	保持不变	保持不变	保持不变	提高 50%

(1) 现状延续型策略：假设三个城市将继续按照目前的发展趋势进行，基于 2010 年至 2021 年的数据，设定其参数值，并据此进行模拟预测。

(2) 经济发展型策略：《甘肃省新型城镇化规划（2021-2035 年）》（简称《规划》）中，提出不断完善城镇化体系，以推动产业和人口同步聚集，实现以产促城、依城兴产。在以经济发展为重点的策略中，模型将通过将第三产业占 GDP 比重和人均 GDP 这两个指标值提高 50%，来表征城市的经济发展水平。其他参数保持不变。

(3) 基础设施导向型策略：《规划》中提出要加快基础设施完善速度，包含逐步强化城镇道路面积等网络布局，提高基础设施规范性，进而有序的基础设

施体系。即以提高资源储备能力、自救互救能力和监测预警能力为导向的发展策略，体现在模型中，将分别移动电话年末用户数和人均道理面积提高 50%，模型中其他参数保持不变。

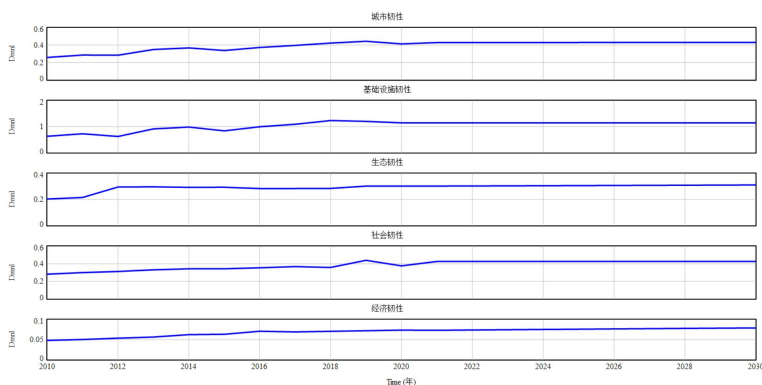
(4) 韧性建设型策略：在韧性建设型策略的仿真预测中，考虑城市四个子系统的共同发展，通过将年末移动电话用户数和人均城乡居民储蓄存款提高 30%，以及将第三产业产值占 GDP 比重和污水厂日处理能力分别提高 50%，来综合提升城市的发展水平，其他参数保持不变。

## 5.2 结果对比分析

### 5.2.1 现状延续型

根据所述 SD 模型和仿真方案的设定，对甘肃省的兰州市、金昌市和陇南市进行了模拟分析（如图 5.1 所示）。在现状延续情景下，2021 年至 2030 年，三个城市的城市韧性均呈现逐步提升的趋势。其中，兰州市作为高韧性城市，在经济韧性方面一直保持高水平且持续增长。到 2030 年，兰州市的城市韧性水平已经达到 0.432，金昌市为 0.172，而陇南市仅为 0.087。

总体而言，兰州市在经济、生态、社会 and 基础设施韧性方面都表现出色，城市韧性水平较高；相比之下，金昌市和陇南市的城市韧性整体水平较低，需要在未来的发展规划中加强提升城市韧性，特别是在经济和基础设施方面的发展。





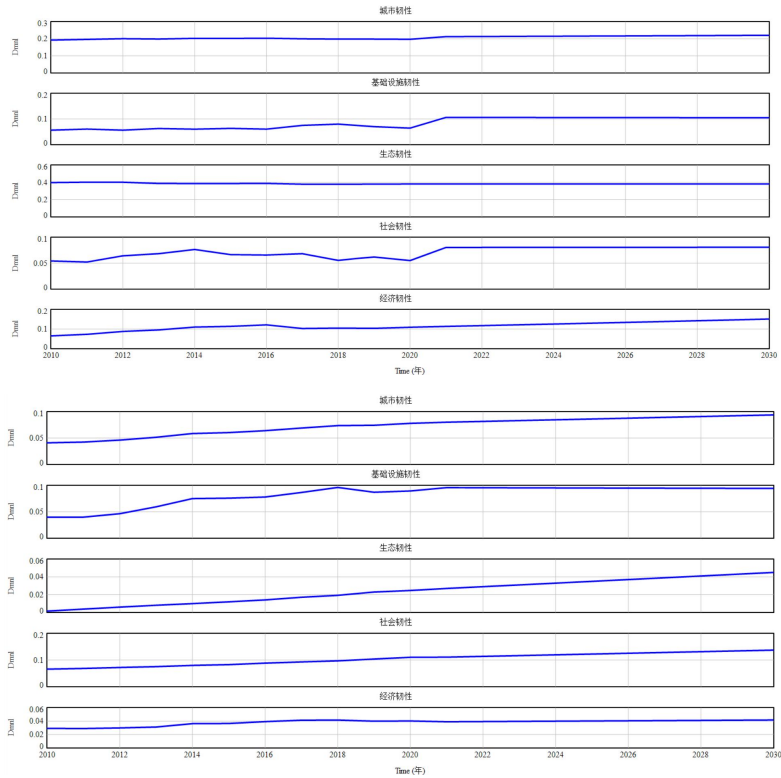


图 5.1 甘肃省三类城市现状延续发展情景的仿真结果

### 5.2.2 经济发展型

根据经济发展型情景下的城市韧性模拟结果（如图 5.2 所示），可以看出在《规划》背景下，甘肃省的三个代表城市的城市韧性呈现逐步上升的趋势。在这种情景下，城市韧性值及其增速均略高于现状延续型发展情景下的模拟结果。到 2030 年，甘肃省三类城市的城市韧性分别达到了 0.438、0.187 和 0.089。

从甘肃省三类城市的仿真结果可以看出，城市韧性持续增强，这表明有效的政策和行为对支撑城市韧性的稳步提升起到了积极作用。在经济发展型情景下，城市韧性的提升为城市未来可持续发展提供了有力支撑。

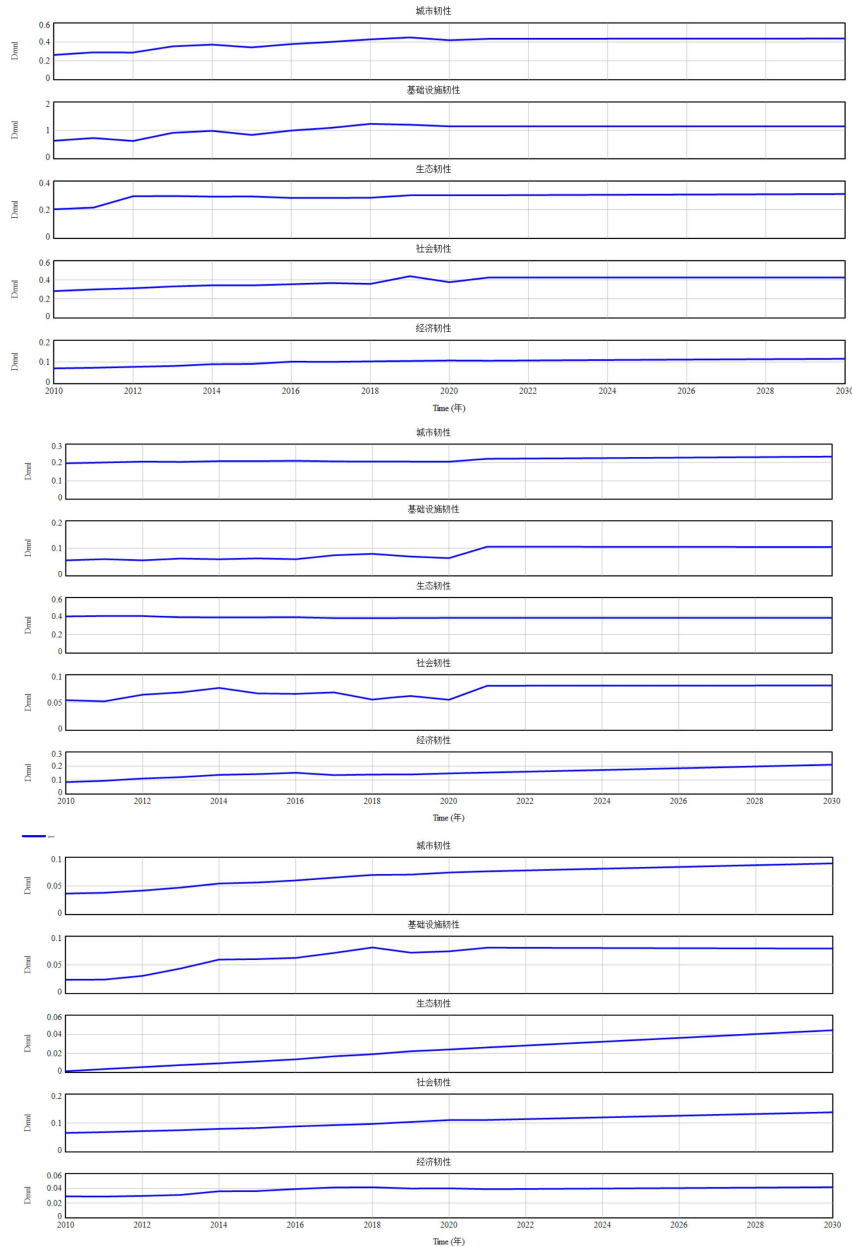


图 5.2 甘肃省三类城市经济发展型发展情景的仿真结果

### 5.2.3 基础设施导向型

根据基础设施导向型情景下的城市韧性模拟结果（如图 5.3 所示），甘肃省三类代表城市的城市韧性呈现逐步上升的趋势。到 2030 年，这三类城市的城市韧性值分别达到了 0.548、0.183 和 0.093。在基础设施导向型情景下的模拟结果中，高韧性和低韧性城市的城市韧性略高于经济导向型和现状延续型情景的模拟结果。但是，中低韧性城市在经济导向型情景下的城市韧性高于基础设施导向型情景，这表明相对于发展基础设施韧性，中低韧性城市更有可能通过强化经济韧

性来促进整体城市韧性的提升。

与现状延续型发展情景相比，基础设施导向型情景下城市的基础设施韧性有明显提升，加速了城市的建设进程，因此整体城市韧性值较高。这说明在城市规划和发展中，合理有序地发展基础设施在提升城市韧性方面起到了重要作用。

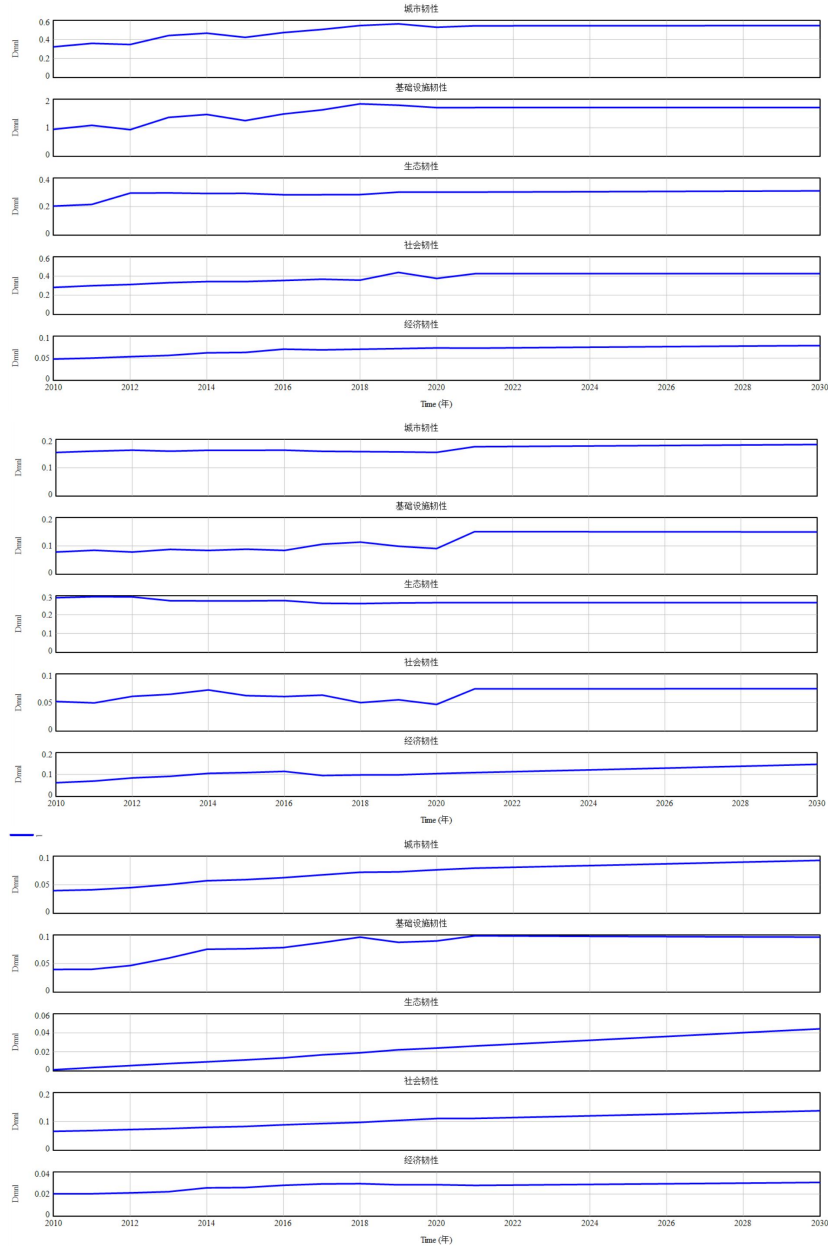


图 5.3 甘肃省三类城市基础设施导向型发展情景的仿真结果

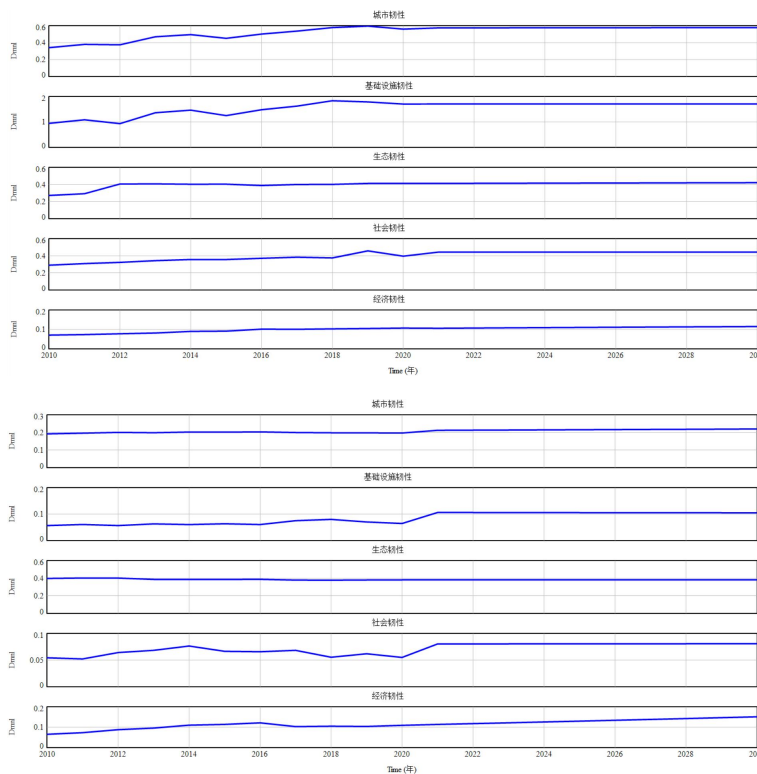
### 5.2.4 韧性建设型

根据韧性建设型情景下的城市韧性模拟结果（如图 5.4 所示），甘肃省三类

代表城市的城市韧性呈现逐步上升的演化趋势。在该情景下的模拟结果表现优于现状延续型和经济导向型情景下的仿真。到 2030 年，甘肃省的三类城市的城市韧性分别增至 0.462、0.221 和 0.094。

从甘肃省高、中低、低韧性城市的韧性变化趋势来看，都呈现稳定上升的演变趋势。其中，高韧性城市兰州市在韧性建设型情景下优于现状和经济发展情景，虽然不如基础设施导向型，但其他两类城市在这种情景下均表现优于其他三种仿真方案。

在韧性建设型情景下，经济韧性、社会韧性、生态韧性及基础设施韧性都呈现平稳上升的状态。通过设置相应的参数，将各子系统韧性的指标要素都包含在内，具有整体性。这种发展理念符合城市韧性的演化规律，有助于提升城市韧性及各子系统韧性。在这种情景下，各韧性子系统间的差距逐步减小，基本都呈现稳步上升的趋势。



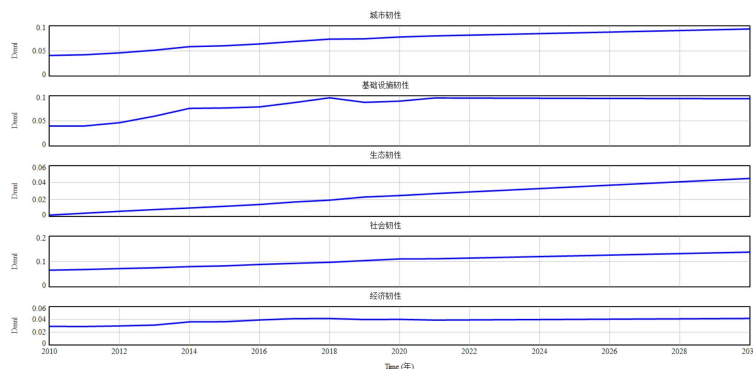


图 5.4 甘肃省三类城市韧性建设型发展情景的仿真结果

### 5.3 提升策略研究

从韧性等级来看，对甘肃省高韧性城市（兰州市和嘉峪关市）和低韧性城市（庆阳市、平凉市、临夏州、甘南州、定西市和陇南市）而言，基础设施导向型情景要优于经济发展型情景，原因可能是高韧性城市在基础设施方面如交通、通讯、供水等方面提高韧性，让基础设施有较高水平的建设和发展，能够在突发事件中保持正常运转；低韧性城市本身的基础设施发展水平相对较低，对于突发事件的应对能力较差，通过有效提高基础设施韧性，进一步提升城市韧性。而对于中低韧性城市（金昌市、酒泉市、天水市、张掖市、白银市、武威市）来说，比起基础设施导向型情景，经济发展型情景更能带动中低韧性城市的韧性发展，从上面的分析和代表城市金昌市的图来看，不难发现，整体上升较为缓慢，需要加强产业结构的调整和创新，提高经济发展的韧性和适应性，进而提升中低韧性城市的韧性水平。

从各市州来看，大多数城市基础设施导向型情境中的社会韧性提升要优于经济导向型，但经济导向型情境的生态韧性要略高于基础设施导向型。因此，在实际实践中，甘肃省的大多数城市通常需要首先通过基础设施导向型或经济导向型情景，寻求在某一方面显著提升城市韧性，随后逐步推动社会韧性和生态韧性的发展。在发展过程中，不断尝试探索，逐步转向韧性建设型模式，致力于提高经济、社会、基础设施和生态韧性，最终实现各子系统韧性的统一提升，推动甘肃省城市韧性的演进。

综上四种仿真情景模拟结果可知，对比大多数城市韧性变化值，发现甘肃省总体城市韧性提升幅度最大的为韧性建设型发展情景，其次是基础设施导向型或

经济导向性发展情景，最后是现状延续型发展情景。因此，韧性建设型是最适合城市经济韧性提升的情景。原因在于该情景符合甘肃省各类城市韧性的演化特征，该情景可通过提升四个子系统内的关键影响因素从而提升各子系统韧性，同时采取积极有效政策措施，从而实现四个子系统韧性的多重提升效果。

## 6 结论与展望

### 6.1 基本结论

为了确保城市系统在面对自然或人为干扰时能够维持基本运作并实现可持续发展,就需要建立高韧性水平的城市。论文以甘肃省各市州为研究对象,结合城市韧性理论、可持续发展理念以及当前的城市韧性评估方法,构建了甘肃省城市韧性发展水平指标体系,对甘肃省城市韧性现状进行评估,利用 PVAR 模型分析了城市韧性各子系统之间的相互作用关系,运用系统动力学模型研究了城市系统内各指标之间的影响关系和动态变化,建立了系统动力学模型,并通过情景仿真模拟甘肃省城市韧性发展,提出了提升城市韧性的最优方案。主要结论如下:

(1) 城市韧性评估结果显示,甘肃省的城市韧性已从低韧性状态提升至中等韧性状态,城市韧性工作取得了显著进展,城市的适应能力和稳定性显著提高。四个子系统的韧性都得到了不同程度的提升,其中经济系统和基础设施系统对城市韧性提升的贡献逐渐增加,成为推动城市韧性发展的主要因素。

(2) 从变动趋势来看,城市各州市韧性以及子系统韧性整体上与甘肃省发展趋势相对一致,整体为上升趋势;根据韧性等级划分,可将甘肃省各市州分为三类:高韧性城市、中低韧性城市和低韧性城市,其中兰州市为高韧性城市,带动周边城市发展。从时空演变看,甘肃省城市韧性发展差距在逐渐缩小,呈动态收敛性,但两极分化的问题仍旧严峻,表明城市韧性发展水平空间上绝对差异越来越大,高韧性和低韧性城市之间的差距较大。

(3) 通过 PVAR 模型得到甘肃省城市韧性经济、生态、社会和基础设施之间相互影响,城市的各子系统朝着协作共赢方向发展,共同为促进甘肃省城市韧性作出一定的贡献,在甘肃省,社会子系统的韧性对其他三个子系统的影响程度最显著。社会、生态和基础设施三个子系统之间相互之间的吸引力较强,甘肃省各市州的四个主要系统韧性的发展水平总体相似,它们之间的协同效应也在持续增强。

(4) 基于系统动力学,对已构建的指标体系进行内部指标影响关系和动态模拟,构建系统动力学模型,进行情境仿真(2010-2030年),在《规划》的大背景下,给出四种提升方案进行分析,得出韧性建设型方案为甘肃省城市韧性提

升最优方案，四个子系统的协同发展更能推进甘肃省城市韧性的发展。

## 6.2 思考与展望

随着城镇化加速推进，各种突发事件频繁发生，加之新冠疫情的影响，城市韧性研究成为当前热门话题。论文对 2010-2021 年甘肃省各市州城市韧性的测度、各子系统间的冲击关系以及各指标影响因素关系分析，进一步仿真模拟，确定出甘肃省城市韧性提升的策略方案，但由于时间和个人研究水平的限制，论文还有一些不足之处，需要进一步完善和改进。

(1) 对于甘肃省城市韧性的测算，指标选取是在参考大量文献并结合甘肃省特殊区位特征构建的，由于一些市州的年份数据存在缺失，只能通过线性插值等方法来填补数据，导致无法准确计算得到真实的数据。因此，未来研究可以筛选具有可获得和与实际城市发展情况相关的指标，综合考虑宏观、中观、微观层面的城市韧性测度框架和方法。

(2) 在进行系统动力学模拟仿真时，只考虑了内部指标之间的因果逻辑关系，探索了形成机理，没有考虑其他外部影响因素，并选取了甘肃省中不同韧性等级的代表城市作为研究对象进行模拟。实际情况中，城市各子系统之间关系复杂，影响因素众多，下一步可以立足于城市系统，综合考虑内部和外部多种因素，构建更加立体、现实的仿真模型。

(3) 论文制定的城市韧性提升方案多出于政府角度，从《规划》中的政策建议和敏感度分析共同得出的四种情景方案。在实际情况中，提高城市韧性更需要政府、企业和市民之间的协作，因此未来研究可以从社会层面入手，从包括政府、居民和企业在内的城市韧性主要利益相关者的角度提出相应的提升方案。



## 参考文献

- [1]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(01):82-91.
- [2]修春亮,魏冶,王绮.基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J].地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [3]彭翀,林樱子,顾朝林.长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J].地理研究,2018,37(06):1193-1207.
- [4]赵渺希,黎智枫,钟烨等.中国城市群多中心网络的拓扑结构[J].地理科学进展,2016,35(03):376-388.
- [5]郭小东,苏经宇,王志涛.韧性理论视角下的城市安全减灾[J].上海城市规划,2016,No.126(01):41-44+71.
- [6]张纯,张洋,吕斌.唐山大地震后重建与恢复的反思:城市规划视角的启示[J].城市发展研究,2012,19(05):119-126.
- [7]詹正茂,卜勇.信息传播与防灾减灾[J].中国减灾,2009(07):9-13.
- [8]武胜起.城市的减灾管理与智能建筑关系研究[J].智能建筑与智慧城市,2018(09):23-24.
- [9]朱华桂.论社区抗逆力的构成要素和指标体系[J].南京大学学报(哲学.人文科学.社会科学版),2013,50(05):68-74+159.
- [10]吴康,方创琳,赵渺希.中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征[J].地理研究,2015,34(04):711-728.
- [11]张荣天,焦华富.江苏省城市网络空间结构演化特征与驱动机制[J].世界地理研究,2015,24(01):68-75.
- [12]E B.为了城市韧性的气候变化适应性治理[J].城市规划学刊,2015,No.223(03):125.
- [13]郑艳.推动城市适应规划,构建韧性城市——发达国家的案例与启示[J].世界环境,2013,No.145(06):50-53.
- [14]郑艳,王文军,潘家华.低碳韧性城市:理念、途径与政策选择[J].城市发展研究,2013,20(03):10-14.
- [15]廖茂林.韧性城市建设的国际经验及启示[J].城市,2016,No.197(08):21-25.

- [16]翟国方.韧性城市建设须提上议事日程[J].城市规划,2016,40(04):110-112.
- [17]林沛毅,王小璘.韧性城市研究的进程与展望[J].中国园林,2018,34(08):18-22.
- [18]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,No.2  
70(02):89-99+246.
- [19]陈阳.加拿大 2030 年应急管理战略及对我国韧性社区建设的启示[J].中国煤炭,  
2020,46(02):106-111.
- [20]赵彬,陈彬森,吴晓静,等.数字经济对城市韧性的影响机制研究——以长三角  
城市群为例[J].重庆文理学院学报(社会科学版),2023,42(05):93-105.
- [21]Guofang Zhai,Shasha Li,Jing Chen.Reducing Urban Disaster Risk by Improving  
Resilience in China from a Planning Perspective[J].Human and Ecological Risk  
Assessment:An International Journal.2015,21(5):1206-1217.
- [22]Shannon Van Zandt et al.Mapping social vulnerability to enhance housing a  
nd neighborhood resilience[J].Highfield,Samuel D. Brody. Housing Policy D  
ebate.2012,22(1),29-55.
- [23]Philip Berke et al.Evaluation of Networks of Plans and Vulnerability to Hazards  
and Climate Change: A Resilience Scorecard[J].Journal of the American  
Planning Association.2015,81(4),287-302.
- [24]Fikret Berkes.Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from  
resilience thinking[J].Natural Hazards.2007,41(2),283-295.
- [25]Cutter et al.Social Vulnerability to Environmental Hazards[J].Social Science  
Quarterly.2003,84(2),242-261.
- [26]Raymond J.Burby et al.Unleashing the Power of Planning to Create Disaste  
r-Resistant Communities[J].Journal of the American Planning Association.19  
99,65(3),247-258.
- [27]G.S.Cumming et al. An Exploratory Framework for the Empirical Measurem  
ent of Resilience[J].Ecosystems.2005,8(8),975-987.
- [28]Lu, YW et al.Risk reduction through urban spatial resilience: A theoretical  
framework[J].Human and Ecological Risk Assessment.2021,27(4),921-937.
- [29]Kilkis SS.ustainable Development of Energy, Water and Environment Syste  
ms (SDEWES) Index for policy learning in cities[J].International Journal O

- f Innovation and Sustainable Development,2018,12(1-2)87-134.
- [30]Holling C S. Resilience and Stability of ecological systems[J]. Ecology, Evolution, and Systematics, 1973, 4(1): 1-23
- [31]Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [32]Toland J, Carrigan D. Educational psychology and resilience: New concept, new opportunities[J]. School Psychology International, 32(1), 95-106.
- [33]Folke C et al. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability[J]. Ecology and Society, 2010, 15(4): 20.
- [34]廖茂林. 韧性城市建设的国际经验及启示[J]. 城市, 2016, No. 197(08): 21-25.
- [35]Francini M et al. To support urban emergency planning: a GIS instrument for the choice of optimal routes based on seismic hazards[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31: 121-134.
- [36]Plough A et al. Building community disaster resilience: perspectives from a large urban county department of public health[J]. American Journal of Public Health, 2013, 103(7): 1190-1197.
- [37]Caldarice Ombretta et al. The relevance of science-policy-practice dialogue. Exploring the urban climate resilience governance in Italy[J]. City, Territory and Architecture, 2021.08(01).
- [38]Forrester J W. Industrial dynamics.[M]. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1961.
- [39]Forrester J W. Urban dynamics[M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969.
- [40]苏经宇, 刘晓然, 王威等. 基于系统动力学的城市抗震防灾能力评估[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(05): 709-717.
- [41]于小兵, 曹杰, 王旭明等. 基于系统动力学的台风灾害应急策略研究[J]. 管理评论, 2018, 30(02): 222-230.
- [42]吴萌, 任立, 陈银蓉. 城市土地利用碳排放系统动力学仿真研究——以武汉市为例[J]. 中国土地科学, 2017, 31(02): 29-39.
- [43]王慧敏, 洪俊, 刘钢. “水-能源-粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J].

- 中国人口·资源与环境,2019,29(06):74-84.
- [44]李文超,田立新,贺丹.经济—能源—环境可持续发展的系统动力学研究——以中国为例[J].系统科学学报,2014,22(03):54-57.
- [45]杨秀平,贾云婷,翁钢民等.城市旅游环境系统韧性的系统动力学研究——以兰州市为例[J].旅游科学,2020,34(02):23-40.
- [46]唐睿,王晨,陈雅萌等.厦门市城市生活垃圾的系统动力学预测管控体系[J].环境科学学报,2019,39(06):2071-2078.
- [47]刘夏,张曼,徐建华等.基于系统动力学模型的塔里木河流域水资源承载力研究[J].干旱区地理,2021,44(05):1407-1416.
- [48]陈伟,李宗平.基于系统动力学的轨道交通客流拥堵传播研究[J].计算机仿真,2022,39(12):160-164.
- [49]薛晴,杨侃.基于 BP 神经网络-系统动力学耦合模型的江苏省水资源承载力预测与调控研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(11):86-99.
- [50]凤亚红,马慧圆,刘瑞华.城市轨道交通 PPP 项目系统脆弱性研究[J].都市快轨交通,2023,36(01):65-72.
- [51]李刚,徐波.中国城市韧性水平的测度及提升路径[J].山东科技大学学报(社会科学版),2018,20(02):83-89+116.
- [52]肖翠仙.中国城市韧性综合评价研究[D].江西财经大学,2022.
- [53]Desouza K C, Flanery T H. Designing, planning, and managing resilient cities: A conceptual framework[J]. Cities, 2013, 35: 89-99.
- [54]张明斗,冯晓青.中国城市韧性度综合评价[J].城市问题,2018(10):27-36.
- [55]郭祖源.城市韧性综合评估及优化策略研究[D].华中科技大学,2018.
- [56]张明顺,李欢欢.气候变化背景下城市韧性评估研究进展[J].生态经济,2018,34(10):154-161.
- [57]杨玉竹.京津冀城市韧性测度与影响主因素研究[D].河北地质大学,2020.
- [58]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(08):151-158.
- [59]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(08):5-11.
- [60]胡志强,段德忠,曾菊新.武汉城市圈经济-社会-资源环境系统脆弱性研究[J].湖

- 北大学学报(自然科学版),2014,36(06):487-494.
- [61]刘江艳,曾忠平.弹性城市评价指标体系构建及其实证研究[J].电子政务,2014(03):82-88.
- [62]焦娅男.陕西省城市韧性水平测度及提升策略研究[D].西安建筑科技大学,2023.
- [63]苗红,马金涛,张欢.基于网络文本分析的嘉峪关市游客感知形象研究[J].西北师范大学学报(自然科学版),2014,50(02):99-104+120.
- [64]袁凤萍,毛燕清,傅玮佳.采用核密度分析方法对山洪灾害风险区划进行研究[J].江西测绘,2023(03):30-32.
- [65]贾春香,张燕.基于 PVAR 模型的绿色技术创新对企业绩效的影响[J].生态经济,2023,39(03):63-69.

## 致 谢

大道如砥，奋斗如歌。我的硕士研究生生涯即将结束，在这三年的时间里，我收获了许多宝贵的经验和知识，遇到了润物细无声的导师，也结交了许多优秀又可爱的朋友。在即将毕业之际，我想向所有曾经帮助过我的人表达我最真挚的感谢。

首先，我要向我的导师赵煜致以最诚挚的感激。“随风潜入夜，润物细无声”，无论是在论文的选题、研究方法的选择，还是在论文的撰写与修改过程中，您都给予了我悉心的指导与关怀，让我能够不断突破自我，取得优异的成绩。在此，我衷心地感谢您，愿您的学术事业蒸蒸日上，桃李满天下！

其次，我要感谢我的家人。是你们在我身后默默地支持着我，给予我无尽的关爱与鼓励。“谁言寸草心，报得三春晖”，我深知自己的每一次成长都离不开你们的付出。在未来的日子里，我会更加努力，用优异的成绩回报你们的养育之恩。

此外，我还要感谢我的朋友们，在我研究生期间，你们的陪伴与支持让我的生活充满了阳光与欢乐。我们一起分享生活的点滴，一起度过了许多难忘的时光。“海内存知己，天涯若比邻”，虽然我们已经各奔东西，但我坚信我们的友谊将永远长存。在未来的日子里，无论我们身处何方，都要保持联系，相互支持，共同追逐自己的梦想。

最后，我要感谢我的师门家庭，耐心且热情的师姐师兄们、同门们和可爱的师弟师妹们。在这个充满凝聚力的大家庭里，我们相互学习、相互帮助、共同进步。“相逢意气为君饮，系马高楼垂柳边”，让我们珍惜这份难得的情谊，在未来的日子里继续携手前行，共同创造更加美好的明天！

在即将告别这段充满美好回忆的研究生生涯之际，我想再次向所有曾经帮助过我的人表达我最真挚的感谢。在未来的日子里，我将带着你们的期望与祝福，勇敢地面对生活的挑战，不断追求自己的梦想，为社会做出自己的贡献。