

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 甘肃省城市韧性的测度及评价研究

研究生姓名: 王珊

指导教师姓名、职称: 赵煜 教授

学科、专业名称: 统计学 管理统计学

研究方向: 统计质量管理

提交日期: 2022年5月30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：          签字日期： 2022.5.30

导师签名：          签字日期： 2022.5.30

## 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，         （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：          签字日期： 2022.5.30

导师签名：          签字日期： 2022.5.30

# **Quality measurement and evaluation of urban resilience in Gansu Province**

**Candidate : Wang shan**

**Supervisor: Zhao yu**

## 摘要

从韧性理念的不断丰富到与复杂主体城市相结合,城市韧性理念与当代可持续发展理念相契合,成为引领城市发展且备受热议的话题。准确地进行城市韧性量化评估,探究体系间内在机理,寻求适宜的城市韧性提升策略是当前研究的关键。论文对甘肃省各市州城市韧性进行量化评估并探究子系统间相互作用程度,寻求适宜甘肃省城市韧性发展的提升策略。

首先,论文梳理相关文献,基于城市韧性内涵和外延,分别从经济系统、社会系统、基础设施系统和生态系统方面建立城市韧性指标体系。采用熵值法作为指标评价函数,对甘肃省城市韧性现状分别从省域、市域角度进行演化分析,引入耦合协调度模型,从省域、市域角度探索分析甘肃省各市州的经济、社会、基础设施和生态系统耦合协调情况及演变特征,分析城市韧性体系的内在机理。

其次,论文结合遗传算法、极限学习机构建一种基于遗传算法-极限学习机(GA-ELM)的城市韧性模拟方法,基于指标评价函数得到的城市韧性值的基础上,引入遗传算法对模型参数进行寻优,进一步提升ELM模型模拟精度,运用遗传算法优化的ELM模型,结合十四五规划目标对城市韧性进行动态仿真模拟,进一步提出针对甘肃省的城市韧性提升策略。

第三,论文首先通过分析甘肃省城市四大系统的耦合协调情况,与GA-ELM模型模拟的城市韧性提升策略相结合,总结甘肃省城市韧性现状,并尝试对甘肃省城市韧性情况提出思考和展望,为政府制定相应改善政策提供参考。

**关键词:** 城市韧性 耦合协调度模型 GA-ELM 神经网络

## Abstract

From the continuous enrichment of the concept of resilience to the combination with the complex main city, the concept of urban resilience is consistent with the contemporary concept of sustainable development, and has become a leading and hotly discussed topic of urban development. The key of current research is to accurately quantify urban resilience, explore the internal mechanism between systems, and seek appropriate strategies for improving urban resilience. This thesis quantitatively evaluates the resilience of each city in Gansu Province and explores the degree of interaction between subsystems, so as to find the appropriate strategies to improve the resilience of Gansu province.

Firstly, based on the connotation and extension of urban resilience, an index system of urban resilience was established from the aspects of economic system, social system, infrastructure system and ecosystem system. The entropy method is adopted as the evaluation index function, the toughness of city, Gansu province, respectively from the perspective of provincial and regional evolution analysis, introducing the coupling coordination degree model, from the perspective of provincial and regional exploration analysis of Gansu province cities in the state of the economy, society, infrastructure and ecological system coupling coordination situation and evolution characteristics, the analysis of the internal mechanism of urban resilience system.

Secondly, the thesis combines the genetic algorithm and machine learning to build a limit - extreme learning machine based on genetic algorithm (GA) - ELM city, toughness simulation method based on the urban toughness values obtained from index evaluation function, on the basis of introducing the genetic algorithm to optimization of model parameters, further enhance the ELM model simulation precision, using genetic algorithm to optimize the ELM model, Combined with the goals of the 14th Five-Year plan, the dynamic simulation of urban resilience was carried out, and the strategies for improving urban resilience in Gansu province were further proposed.

Thirdly, by analyzing the coupling coordination of the four urban systems in Gansu Province and combining with the urban resilience improvement strategy simulated by GA-ELM model, the thesis summarizes the status quo of urban resilience in Gansu Province, and tries to put forward thoughts and prospects for the urban resilience improvement strategy in Gansu Province, so as to improve the cities in Gansu province for the government.

**Key words:** Urban resilience; Coupling coordination degree model; GA-ELM neural network

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究目的及意义 .....	2
1.2 国内外文献综述 .....	3
1.2.1 基于 CiteSpace 的文本计量研究 .....	3
1.2.2 城市韧性评估研究 .....	8
1.2.3 城市韧性评价模型 .....	9
1.2.4 研究述评 .....	9
1.3 研究内容与框架 .....	10
1.3.1 主要研究内容 .....	10
1.3.2 研究框架 .....	11
1.4 可能的创新点和不足 .....	12
1.4.1 创新点 .....	12
1.4.2 不足之处 .....	13
<b>2 相关理论与方法</b> .....	14
2.1 理论基础 .....	14
2.1.1 韧性理论 .....	14
2.1.2 城市韧性理论 .....	15
2.1.3 可持续发展理论 .....	17
2.1.4 耦合协调理论 .....	18
2.2 模型方法介绍 .....	19
2.2.1 遗传算法 .....	19
2.2.2 ELM 神经网络 .....	19
<b>3 城市韧性统计测度体系</b> .....	21
3.1 甘肃省城市韧性概况 .....	21
3.2 构建原则 .....	21

3.3 城市韧性指标体系构建流程 .....	22
3.4 韧性指标体系的构建 .....	23
3.5 韧性评价函数的确定 .....	27
3.5.1 指标处理 .....	27
3.5.2 测算方法 .....	28
<b>4 甘肃省各市州城市韧性测度与分析</b> .....	<b>29</b>
4.1 城市韧性水平测算与分析 .....	29
4.1.1 省域角度城市韧性水平分析 .....	30
4.1.2 市域角度城市韧性水平分析 .....	31
4.2 城市韧性演化分析 .....	32
4.2.1 省域角度城市韧性演化分析 .....	32
4.2.2 市域角度城市韧性演化分析 .....	39
4.3 城市生态经济系统韧性分析 .....	43
4.3.1 生态经济系统耦合协调度测算 .....	43
4.3.2 省域生态经济系统韧性分析 .....	44
4.3.3 市域生态经济系统韧性分析 .....	45
<b>5 城市韧性特征模拟及提升策略分析</b> .....	<b>49</b>
5.1 模型的构建及验证 .....	49
5.2 基于 GA-ELM 的甘肃省城市韧性模拟仿真 .....	51
5.2.1 策略一：控制城镇化率 .....	51
5.2.2 策略二：策略一的基础上提高生态韧性 .....	52
5.2.3 策略三：策略二的基础上提高基础设施韧性 .....	53
5.2.4 策略四：策略三的基础上提高经济韧性 .....	54
5.3 小结 .....	55
<b>6 结论与建议</b> .....	<b>57</b>
6.1 基本结论 .....	57
6.2 思考与展望 .....	57
<b>参考文献</b> .....	<b>59</b>

**致谢**..... 65

# 1 绪论

## 1.1 研究背景和意义

城市作为人类政治、经济、文化活动的集聚场所，其包罗万象的复杂系统结构，在极大提升人类生产生活便利性的同时，也使其更容易在遭受外部干扰和内部结构变化时脆弱不堪，这些不可抗拒型冲击往往具有高度的不可预测性，现代社会由于城市化和全球化进展的不断加速，城市结构的复合性和多元性不断增强，城市发展所面临的扰动“不断演化”，其破坏性、不可预测性空前复杂，城市系统的互联互通性使其潜在的影响和造成的灾难性后果波及范围及程度愈发显著<sup>[1]</sup>。面对这些不可抗拒因素，韧性成为城市发展必不可少的必备条件，韧性程度不一的城市系统应对不确定扰动的抵抗、适应调整、自我更新与恢复能力显著不同。城市韧性建设为应对城市不确定性扰动提供新的解决路径，提高城市抵抗适应恢复能力，建设新型韧性城市目前成为城市研究热门话题，已被广泛认可和普遍应用。

### 1.1.1 研究背景

甘肃省因其独特的地形地貌，全省约一半以上的地区处于自然灾害高发易发区。近年来，甘肃省重大自然灾害不断发生，地质灾害、极端天气的发生已成为一种常态。2010年的舟曲“8·8”特大山洪泥石流损失惨重，直接经济损失133亿元。2010年以来，因自然灾害造成的直接经济损失高达280亿元，因灾死亡人数更是排名全国第一位<sup>[2]</sup>；2018年因气象灾害原因，农作物受灾面积76.4万公顷，成灾面积52.7万公顷，直接经济损失249.8亿元。2020年8月以来，甘肃省陇东南部不断出现暴雨天气，降雨次数、大雨次数和暴雨次数都比历年同一时期次数更加频繁，绝大多数地区降水量超5成以上，造成严重的洪灾、泥石流灾害，使各方面基础设施和居民房屋等均严重受损<sup>[3]</sup>。

近十年，甘肃省城镇人口由953万人增长为1306万人，而乡村人口由1612万人减少至1194万人，城镇化率得到显著提升，发展的差异和不均衡性也导致了资源利用不合理、资源浪费等问题的出现。甘肃省内部资源倾斜严重，其中旅

游城市嘉峪关市和省会城市兰州市经济发展优势突出,各市州应对冲击时响应能力差距明显,从长远的角度看,甘肃省资源禀赋差,能源、矿物资源、水源等严重不足,加之较为脆弱的生态环境,想要实现经济可持续发展,必须打破资源环境的“双重约束”。国务院发布的《甘肃省循环经济总体规划》中提到甘肃省发展应贯彻落实可持续发展理念,合理优化分配资源,全面致力发展“循环经济”;2019年9月18日,习近平总书记强调将黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大战略层面,推动实施包括黄河甘肃段在内的生态保护修复重大工程项目成为首要任务,可持续发展模式成为甘肃省发展主旋律。

韧性城市应对冲击所体现的抵抗、适应调整、自我更新与恢复能力,与目前我国倡导的可持续发展相符合,因此城市韧性建设研究有着良好的发展前景,同时也是高质量城市化的要求。因此,为推动甘肃省城市可持续发展进程,有必要针对甘肃省区位特征,构建甘肃省城市韧性测度体系,量化甘肃省城市韧性,对甘肃省城市韧性特征进行分析。

### 1.1.2 研究目的及意义

在城市不断面临极端天气、不可预测事件冲击的背景下,城市韧性评估的核心目的是量化城市面对冲击的敏感程度、恢复能力、适应和调整能力以及自我更新能力,以减少冲击带来的损失,维护城市系统内在稳定性,从而实现城市的可持续发展。

在对其发展现状认识的基础上,论文以甘肃省各市州为研究对象,在对城市韧性理论、和韧性评估方法详细论述的前提下,结合相关方法进一步量化城市韧性,结合系统论和甘肃省发展特征,构建甘肃省城市韧性评价体系和动态评价模型,根据耦合协调度模型对其特征分别从省域、市域角度进行探究,通过各市州以及各系统的韧性演变情况分析特定时期内城市韧性演变规律,为进一步制定城市发展策略提供现实依据。

在理论意义上,城市韧性研究是在城市可持续发展理念基础上的进一步提升。论文基于城市韧性内涵、外延以及对国内外相关理论与实践进展的详细概括,在现有城市韧性研究体系框架基础上归纳整理,制定更加全面细致的城市韧性评价体系,结合客观的量化方法,以便对甘肃省城市韧性现状有准确的认识,可以更

深层次的探究甘肃省城市韧性机制，为城市韧性相关研究提供模版。

在现实意义上，一方面客观评价甘肃省城市韧性工作成就，结合实证分析论证出甘肃省在城市韧性构建环节的不足，进一步为甘肃省城市经济发展、社会进步、完善基础设施、生态建设等提出参考意见，探索出适合甘肃省的城市韧性提升路径。另一方面，也为不同区域城市韧性评价和构建工作提供相应参考。

## 1.2 国内外文献综述

### 1.2.1 基于 CiteSpace 的文本计量研究

CiteSpace 是一款以文献为研究对象，用可视化方法描绘热点动态演化和发展趋势的软件，其在文献计量分析中应用较为广泛。本文文献计量中所需的中文文献均来源于中国知网，外文文献均来源于 Web of Science 核心合集数据库，其中中文文献检索条件为：主题=城市韧性 or 韧性城市，期刊来源类别为 SCI 来源期刊、EI 来源期刊、核心期刊、CSSCI 来源期刊和 CSCD 来源期刊。英文文献检索条件为：TS=（“resilient city” or “urban resilience”）AND 文献类型=Article，中文与外文文献选取截止时间为 2021，剔除无关文献后，最终得到中文文献 220 条，外文文献 586 条。在此基础上，从理论与实践进展两方面对城市韧性相关文献进行了定性梳理与综述。

截止 2021 年末，国内外发表年度趋势见图 1.1，由图 1.1 可见，国内有关城市韧性研究相较国外起步较晚，国外首篇文章出现在 2007 年，而国内则出现在 2013 年，国内发文趋势也相对较缓，发文量于 2013-2017 年处于缓慢上升阶段，2017-2019 年基本持平，2019-2021 年快速发展，预测 2022 年仍处于上升趋势；国外于 2007-2011 年处于萌芽阶段，核心期刊较少，2011-2017 年相关问题研究开始受到重视，发文量连年递增，2017-2021 年相关研究已然成为研究热点，发文量迅速上升。

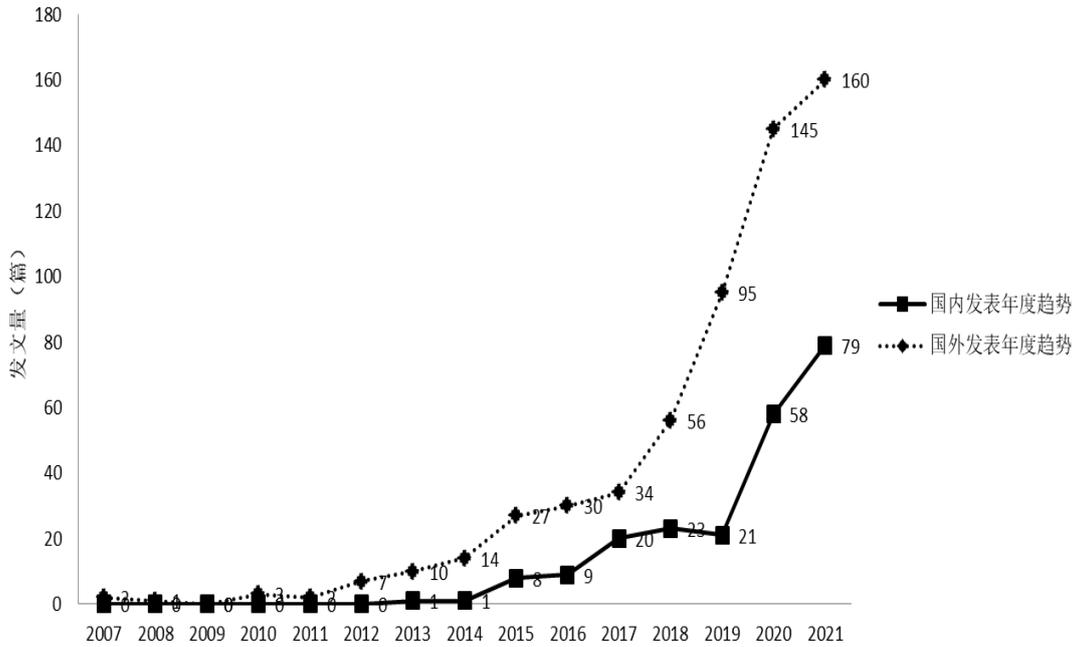


图 1.1 国内外城市韧性相关文献发表年度趋势

通过 CiteSpace 中 keyword 功能对国内外相关主题关键词进行分析，关键词分布情况如图 1.2 所示。其中圆形节点大小代表关键词出现的频次，圆圈越大，其连接的关键词出现频次越高。由图 1.2 可以看出，热门研究关键词主要包括“城市韧性”、“韧性城市”、“韧性”、“经济韧性”、“城市经济韧性”、“智慧城市”、“可持续发展”、“韧性评估”、“抗震韧性”、“交通系统韧性”、“城市公共安全”、“冠状病毒肺炎”、“功能恢复”、“韧性治理”、“应对气候变化”等。在复杂网络分析中评价某个关键词作为连接机制程度的术语就是中介中心性，能为多个关键词之间的互动与信息起到中介作用，其中介性就很高。中介性较高的包括“韧性”、“韧性城市”、“气候变化”、“城市发展”、“国际经验”、“可持续发展”、“智慧城市”、“韧性治理”、“突发公共事件”、“防震减灾”、“灾害韧性”、“疫情”等。



国内城市韧性相关研究关键词共现网络时区图见图 1.4，时区图通过加入时间维度，抓取研究时间线中关键词首次出现时间，将该领域研究关键词聚类，并刻画出该关键词的演进过程。频次高和中心中介性强的“城市韧性”和“韧性城市”在选取的相关文献中首次出现在 2013 年。“山地城市”这一聚类的出现源于 2018 年唐任伍<sup>[4]</sup>等人探究演进韧性对实现乡村振兴，提升乡村治理能力的指导意义；“城市经济韧性”这一聚类源于王世平<sup>[5]</sup>等人于 2016 年探究我国 286 个地级市城市韧性对城市出口的影响，随后出现“城市聚集”、“产业聚集”、“产业多样化”、“数字经济”等关键词；2018 年陈涛<sup>[6]</sup>等从公共卫生应急风险管理角度出发探究如何将雄安新区构建为韧性城市。再如 2020 年春节前后爆发的新型冠状病毒肺炎出现在“城市公共安全”这一聚类演进过程中，李晓宇<sup>[7]</sup>等人从韧性城市角度看待疫情，提出构建韧性城市响应机制。

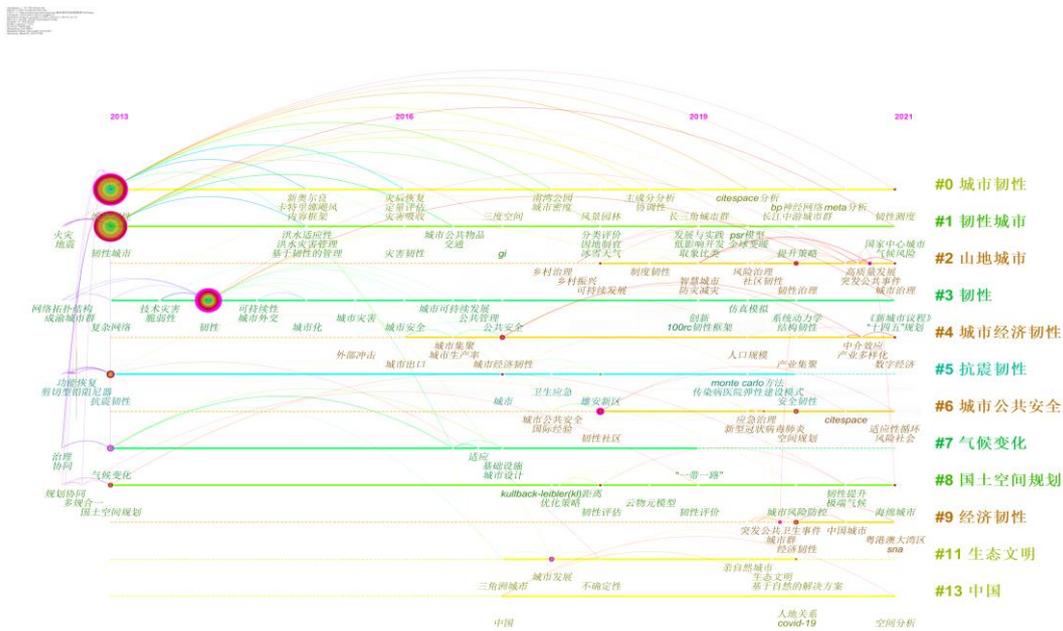


图 1.4 国内城市韧性相关文献国内关键词时区图谱

国外城市韧性相关研究关键词共现网络时区图如图 1.5 所示，Muller<sup>[8]</sup>等认为全球变暖和极端气候会增加“低韧性社区”风险，探究气候变化和水资源配置对城市物质及财政影响，以撒哈拉以南城市为例，并提出“污染者付费”原则。在所选文献中首次提出“climate change”、“urban resilience”、“water”、“financing”等关键词。在“policy implementation”这一聚类中，Rana<sup>[9]</sup>等认为当前迫切需要开

展灾害脆弱性和风险评估,并在减少灾害风险和适应气候变化的理念下制定具体战略。“disaster”这一聚类演化过程中,伴随“tidal wave”、“hurricane sandy”、“disaster risk management”等关键词。Kontokosta<sup>[10]</sup>等通过使用飓风直接影响社会的恢复时间来验证 REDI (应急和灾害抗灾能力指数) 得分。

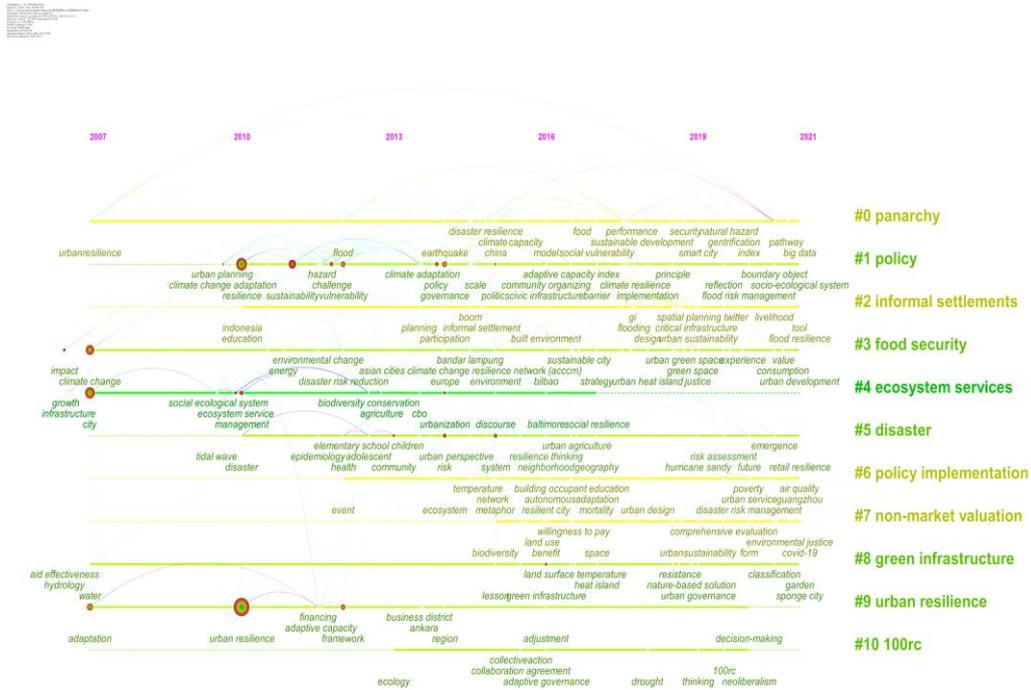


图 1.5 国外城市韧性相关文献国内关键词时区图谱

不难发现,国内外城市韧性相关研究关键词均涉及到经济、社会管理、生态环境、基础设施质量等相关方面,可见其相关研究的复杂性和全面性,其中可持续发展理念作为韧性城市建设的根本思想。第一,国内外城市韧性相关文献前端都集中在生态系统层面,理念相对简单,随着相关理念的不断延伸,进而转向社会生态系统层面;第二,注重突发公共卫生事件对城市韧性造成的冲击;第三,注重极端气候灾害风险管理研究;第四,相较于国外相关文献研究而言,国内对非物质条件对城市韧性的影响研究较少;第五,关于社区韧性、区域韧性等韧性提升策略研究已成为国内外城市韧性研究热点。结合城市韧性国内外相关文献研究发现,城市韧性未来研究趋势主要包括:加强城市群间的相互合作、责任连坐机制建设;更加全面详细的城市韧性评价体系构建研究;未知、不可预测风险冲击下的城市韧性机制研究。

## 1.2.2 城市韧性评估研究

起初的韧性是系统拥有应对、抵抗外界扰动的能力，承受冲击损害的同时依旧可以维持系统内部核心功能的基本运转，着重体现在系统本身的稳定性和恢复性，随后韧性含义逐渐演变为强调主体系统在达到稳定且恢复后所具备的学习及自适应能力，即系统在受到外界干扰后重新使用现存资源使系统进一步完善的能力<sup>[11]</sup>。

随着韧性概念的不断丰富，学科领域的不断扩展，韧性与城市规划相结合，城市韧性应运而生，如何对城市韧性进行合理评估，成为提升城市韧性等后续策略研究的关键所在，韧性概念的不同与城市网络系统的复杂性，导致不同领域的学者在对城市韧性评估上存在分歧。

国外很早就展开了对城市韧性评估体系的研究。Bruneau<sup>[12]</sup>等学者通过工程韧性内涵解析城市韧性，认为城市韧性水平的高低是可以通过基础设施功能随时间损耗变化的曲线来描述；Desouza<sup>[13]</sup>等提出概念韧性框架，认为韧性城市应考虑到城市物理、法律和空间边界内外的过程及交互，旨在评估城市内部的文化与过程动态以及物理元素。2014年，由美国洛克菲勒基金会研究发布的城市韧性评价体系中包含经济与社会、基础设施与环境、健康与福祉、领导力与策略四个层面，该评估体系充分考虑政府、组织、人口、经济、社会等方面因素，致力于构建全面可操作的城市韧性评估体系<sup>[14]</sup>。同年，日本法政大学在调查中，采用了城市指数、行政指标、市民指数和综合指标四类来评估日本城市系统对于人为或天灾的抵御能力。2015年，EMI组织向发展中国家提出了《城市韧性总体规划》，该项内容基于情景分析的方式明确了城市韧性的主要影响因素，分别为能源管理、社会经济、政府法规体制、城市基础设施、信息教育交流等几个层面。

国内学者关于城市韧性评价体系的研究时间线较短。李亚等<sup>[15]</sup>通过分析国内外城市韧性评价体系的研究概况与建设实践，并与国内城市现状相结合，建立包括经济、社会、社区、基础设施、环境与组织6个维度的城市灾害韧性评估体系；李彤玥学者<sup>[16]</sup>通过梳理城市韧性的理论发展和特征，建立了针对洪水灾害的城市韧性评价体系以及基于社会、经济、制度、基础设施体系的社区韧性评价指标框架；方东平<sup>[17]</sup>等从三度空间视角出发，将整个城市空间中物理、社会、

信息看作系统中的系统；詹一虹<sup>[18]</sup>等探究当城市面临危机时，城市文化空间对城市韧性扮演什么样的角色；杨秀平<sup>[19]</sup>等从自然、经济、社会三个维度建立城市旅游环境系统韧性指标体系，并通过系统动力学对不同情形下系统韧性进行仿真模拟；彭翀<sup>[20]</sup>等通过经济、信息、交通等方面对长江中游城市群复杂网络结构韧性情况进行评价；吴楠<sup>[21]</sup>认为政府应对构建智慧城市承担责任，从而提高制度韧性。

### 1.2.3 城市韧性评价模型

Cohen<sup>[22]</sup>等使用多元 logistic 回归分析得出 CCRAM(联合社区恢复力评估测量)对感知到的社区韧性保护因子；Cimellaro<sup>[23]</sup>等提出一种灾后恢复力评估函数，基于一段时间内与功能变化相关，其中包含灾害损失和恢复路径；Ouyang<sup>[24]</sup>等提出一种新的多阶段基础设施韧性分析框架，其中每个阶段都强调基于恢复力的改进策略，并确定复原力相关因素；Alhumaid<sup>[25]</sup>等使用水文模拟系统以评估不同排水方案的城市地区，使用 SewerGEMS 进行水力建模，采用多准则决策(MCDM)方法对所有可持续方案进行评价，层次分析法(AHP)确定权重，优先排序组织富集评价法对雨水最终排序方案进行最终排序。

程皓<sup>[26]</sup>等以我国十大城市群为研究主体，分别从城市韧性以及环境压力角度建立指标评价体系，并使用主成分分析法进行定量评估；张永欢<sup>[27]</sup>等使用 GA-BP 神经网络模拟训练，对京津冀城市未来韧性变化趋势进行探究；张鹏<sup>[28]</sup>等构建城市韧性泰尔指数对山东省城市韧性进行评估，应用探索性空间数据分析对其空间现象进行刻画，并使用空间杜宾模型对其影响因素进行探究；陈为公<sup>[29]</sup>等人结合 DEMATEL(决策试验与评价实验法)和 ISM(解释结构模型法)，对城市灾害韧性影响因素进行探究；朱金鹤<sup>[30]</sup>等以我国三大城市群为研究对象，通过熵值法、ESDA 等对城市韧性时空演化情况进行分析；许兆丰<sup>[31]</sup>等使用云物元方法构建城市灾害韧性综合评价模型；陈长坤<sup>[32]</sup>等通过采用基于 Kullback-Leibler 公式改进后的 TOPSIS 法对武汉市城市韧性进行评价，并构建 KL-TOPSIS 综合评估模型。

### 1.2.4 研究述评

城市韧性相关研究在国外已经形成了大量的理论成就与实战经验,并形成了从理论探究、建立指标体系和评估模型、量化分析,以及到韧性提升路径的体系雏形,但我国城市韧性相关研究较为零散,没有形成体系化、标准化的评估体系。韧性的内涵解析随着研究面的扩大而日益深入,城市韧性的测度及评估、评价主体以及方法都逐渐丰富多样,但总体上现有的城市韧性评价测度体系都包含经济、社会、基础设施、生态环境等四个方面。

首先,我国城市韧性研究目前仍位于理论梳理阶段,缺乏明晰的概念界定,尚未从多学科、多角度形成统一的、综合的、适用范围广的指标评价体系。

其次,目前城市韧性研究多集中在规划和治理方面,多停留在政策研究层面,城市韧性定量评估过于具体化,研究范围较窄,多集中于某子系统。研究角度更多从自然灾害等出发。韧性评价方法较为单一,评价体系中指标较少。

第三,系统的质量动态测度较少,多为系统静态研究,不适于城市韧性复杂系统,几乎没有从宏观管理统计角度对城市韧性进行研究。

第四,研究主体多为中东部城市群,其城市韧性都相对较高,而关于西部城市韧性研究较少,西部城市较多存在环境脆弱、经济落后、基础设施普及率低,社会服务差等情况,多缺乏城市韧性,加强对我国西部地区城市韧性的研究有着重要的实际意义。

## 1.3 研究内容与框架

### 1.3.1 主要研究内容

论文以甘肃省各市州城市韧性相关研究为出发点贯穿全文,从城市韧性的综合评价体系建立到城市韧性的定量测度和演化分析再到城市韧性提升路径研究,全文以甘肃省各市州为研究主体,参照城市韧性理论和可持续发展理论,结合甘肃省区位特征,建立甘肃省城市韧性评价指标体系,从静态到动态、整体到部分综合的对甘肃各市州城市韧性进行分析与评价。论文的研究内容主要分为以下三部分:

第一部分,分析城市韧性研究背景,概括研究发展现状、研究内容、实践进展,并对国内外有关城市韧性评价方法和实证研究进行述评,从而确定论文研究

的出发点。

第二部分，在城市韧性概念与内涵的基础上结合甘肃省区位特征与相关政策，对甘肃省各市州城市韧性进行探究，第二部分具体内容具体展开为三小部分：

(1) 基于城市韧性内涵和外延，在分析评价指标体系构建原则、评价指标构建流程，结合甘肃省区位特征、城市韧性内在特征与可持续发展理论，论文试图构建一套全方面、概括性强的城市韧性评价指标体系，论文分别从经济、社会、基础设施和生态系统层面建立城市韧性评价度量体系。

(2) 使用客观赋权法进行综合评价，得到甘肃省各市州城市韧性情况，从省域、市域角度探索分析甘肃省各市州经济、社会、基础设施和生态子系统的韧性分布状态与格局演变情况，分析城市韧性体系的内在机理。建立城市韧性耦合协调度模型，从省域及市域视角对甘肃省城市韧性的四个子系统分析其耦合协调程度，从而评价甘肃省四个子系统城市韧性发展的协调水平及相互作用情况。

(3) 结合遗传算法、极限学习机，构建遗传算法-极限学习机的城市韧性模拟仿真模型，在验证模型合理的基础上，使用遗传算法-极限学习机为后续提升策略研究提供基础。根据甘肃省十四五规划文件，分别制定四条城市韧性提升策略，进行研究设计，逐步提升优化城市韧性，利用遗传算法优化的 ELM 神经网络对四条策略进行模拟，分析体系在不同策略下对城市韧性的提升效果，从而提出针对甘肃省的城市韧性提升策略，进而为相关政策的实施提供依据。

第三部分，总结实证分析结论，综合考虑甘肃省区位特征和研究现状，罗列出甘肃省城市韧性建设中存在的相关问题，并提出甘肃省城市韧性发展方向、策略的一些可行性建议。

### 1.3.2 研究框架

论文试图从甘肃省实际发展情况出发，根据城市韧性概念的内涵辨析、外延拓展、特征总结等方面建立城市韧性测度体系，对甘肃省各市州城市韧性情况进行探究，本文研究路线如图 1.6 所示。

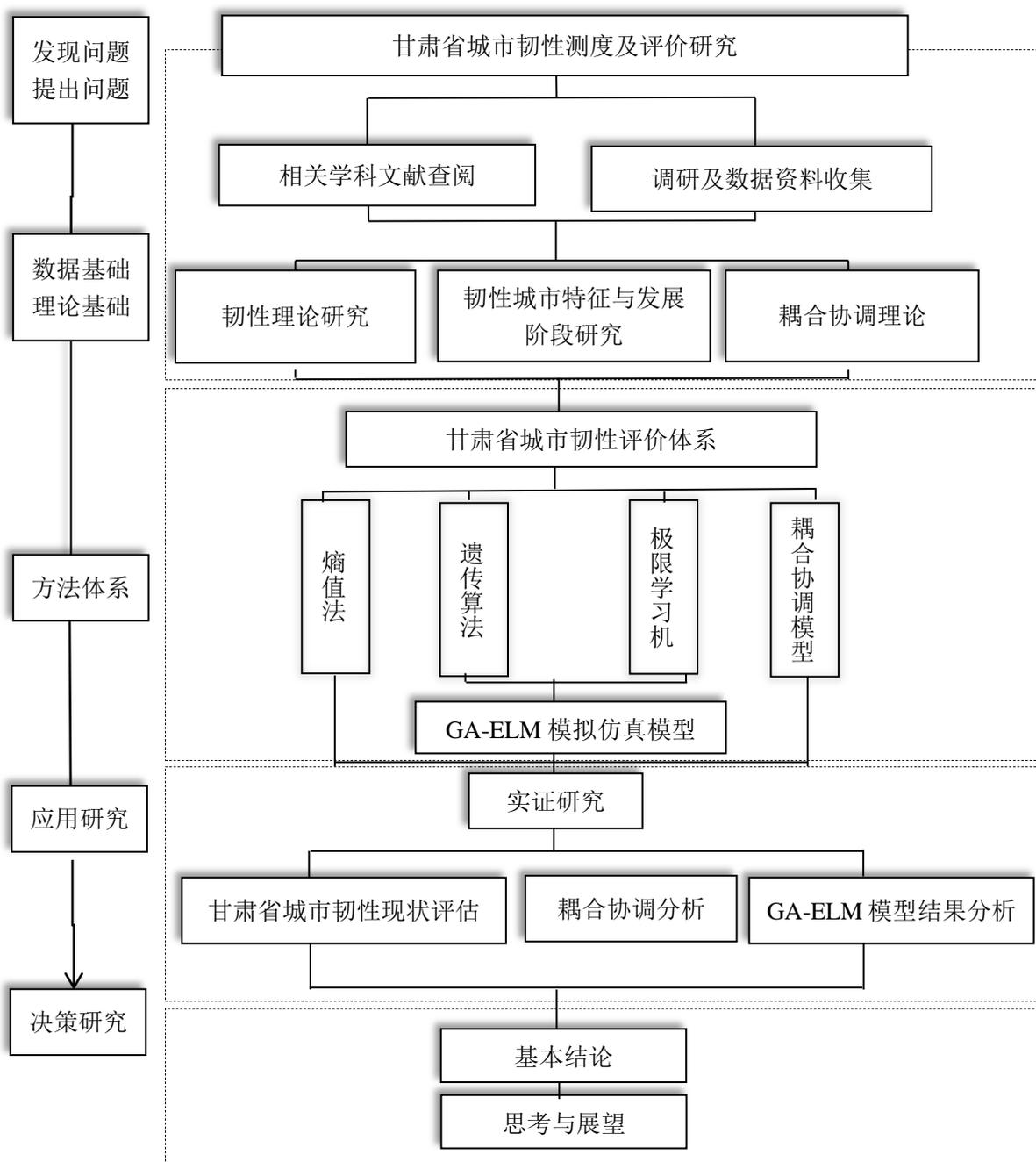


图 1.6 研究路线图

## 1.4 可能的创新点和不足

### 1.4.1 创新点

(1) 基于城市韧性理论基础，结合城市韧性内在特征对城市韧性测度体系

进行概括，针对生态环境脆弱省份甘肃省构建城市韧性评价体系，从不同维度进行全面的城市韧性测度。

(2) 定量解析甘肃省城市韧性特征。一方面，借助耦合协调模型对城市韧性特征进行测度；另一方面，引入机器学习质量动态测度方法对城市韧性系统内部运行特征进行动态模拟测度。

#### 1.4.2 不足之处

(1) 由于指标体系相对庞杂，指标选取考虑不完全，在论文指标体系的构建上仍存在部分指标缺失等问题。

(2) 论文对甘肃省城市韧性指标体系构建中，从选取指标角度上，由于部分数据不易获取，生态子系统层面指标概述不够全面，综合性尚显不足。

(3) 论文采用较多方法如耦合协调模型、机器学习方法结合对城市韧性进行评估，但相关方法的进一步提升尚未考虑，论文城市韧性相关探究相对浅显。

## 2 相关理论与方法

### 2.1 理论基础

#### 2.1.1 韧性理论

最早韧性一词出现在机械学中,用来形容金属形变后恢复为原始形状的能力<sup>[33]</sup>;于 20 世纪,韧性被广泛应用于心理学,用来表述受到创伤后的恢复能力<sup>[34]</sup>;同世纪,生态学家霍林<sup>[35]</sup>首次将韧性引入到生态学中,用来描述生态系统在外界干扰下恢复到稳定状态的能力。随着时代的推移,韧性被引入到机械学、物理学、心理学、生态学以及经济学等学科领域中。关于韧性的概念,其内涵和外延不断丰富,存在三种不同的解读,最早的工程韧性经过不断修正,到生态韧性再发展到演进韧性,在受到冲击时,工程韧性认为韧性是系统受到扰动偏离原始稳态后,重新恢复到原始状态的速度;生态韧性认为韧性是系统形成新的稳态之前所能够吸收的扰动的量;演进韧性认为韧性是与不断调整适应能力联系密切的动态的系统属性。图 2.1 分别模拟系统在工程韧性和生态韧性下的演变情况,清晰的展示出其本质区别。图 2.2 展现出系统在演进韧性理念下所经历的四个阶段。

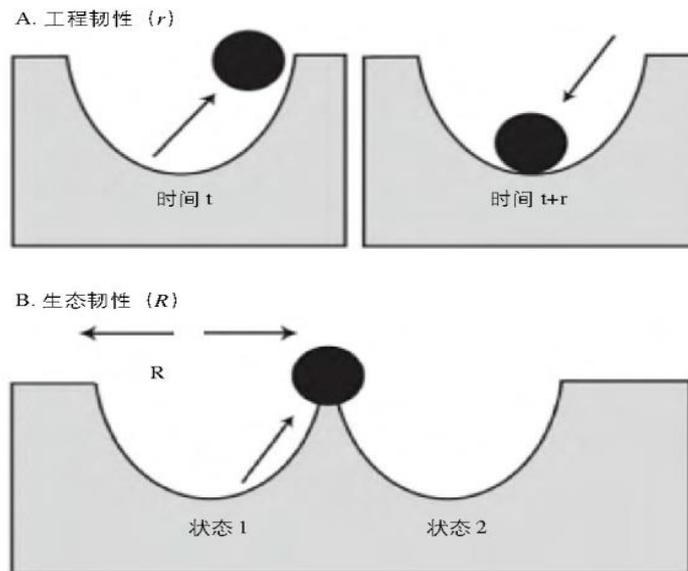


图 2.1 工程韧性与生态韧性对比图<sup>[36]</sup>

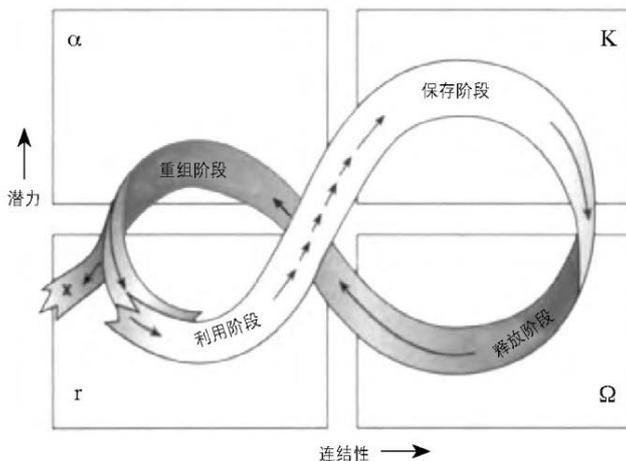


图 2.2 演进韧性的四个阶段<sup>[37]</sup>

表 2.1 三种韧性的比较总结

韧性观点	平衡状态	本质目标	理论支撑	系统特征	参考文献
工程韧性	单一稳态	回到初始状态	工程思维	有序的，线性的	[1,36,38-40]
生态韧性	多种稳态	形成新的稳态，强调抵抗冲击能力	生态学思维	复杂的，非线性的	[1,35,36,40-46]
演进韧性	不再追求稳态	不断进行学习和创新适应能力	系统论、适应性循环、生态交流效应	混沌的	[1,17,37,47-52]

表 2.1 分别从不同方面对工程韧性、生态韧性和演进韧性进行归纳整理，三种韧性解读对城市韧性研究提供了充分的理论依据。韧性理论无论在研究领域、内涵外延还是研究对象上都有所扩展。研究领域涉猎广泛，不再拘束于灾害学、生态学等范畴，内涵以三种韧性解读为基础，强调吸收、适应调整 and 不断学习的能力，研究对象从生态系统、工程系统已扩展到人类系统。

### 2.1.2 城市韧性理论

在自然灾害频发的大背景下结合城市韧性理论，城市韧性研究成为炙手可热的研究话题。当城市系统遭受到自然或社会的缓慢或急性扰动时，韧性城市强调遇到紧急突发事件干扰时，城市能通过系统自身状态、自身保障和系统发展来抵抗压力，实现生存，适应并不断完善、学习、创新。韧性城市能够快速规避风险，

自动适应恢复，从而有效抵御外部冲击，减轻内部灾害。城市韧性理论注重政策可持续性，在充分考虑决策各方面重要价值，完善城市整体系统，达到动态稳态，减少易损性的同时可以增强整个系统的学习能力和更新能力。总之，韧性城市能够预防灾害并迅速从灾害中恢复。有关韧性城市特征研究也备受瞩目，不同学者对韧性城市特征进行研究分析，韧性城市起初与抵抗自然灾害相联系，总结出城市灾害韧性特征，见表 2.2，可以得出灾害韧性更关注内在自身条件，注重非物质条件的提升以及规避风险的能力。通过适应调整以维持其正常运转，并通过更新重建不断提升<sup>[53]</sup>。

表 2.2 城市韧性内在特征

维度	特性	共性
系统状态	独立性、相互依赖性、多样性	不同层面城市系统自身特点
自身保障	抗扰性、冗余性、自组织性	可抵抗扰动，保障系统运行
系统发展	智慧性、创造性、协同性、适应性	系统的不断学习、创新

根据相关文献归纳总结，可将城市韧性内在特征从三个维度进行划分，分别为系统状态、自身保障、系统发展。其中系统状态维度包含独立性、相互依赖性、多样性，均体现韧性城市系统内在特性；自身保障维度包括抗扰性、冗余性、自组织性，均为系统受到扰动后，维持基本运行的特性；系统发展维度包括智慧性、创造性、协同性、适应性，体现在灾后适应与学习更新阶段，代表城市系统的不断完善和提升。

根据城市韧性特征，学者根据城市基本要素将城市韧性评价体系划分为不同方面，最为普遍的划分方式，一级指标包括经济、社会、生态、基础设施<sup>[54,55]</sup>。在经济全球化的大前提下，经济愈发容易受到外界冲击，经济活力是区域发展驱动力，提高经济韧性，保持经济活力，是城市发展的根本所在；社会韧性代表城市抵抗、恢复、适应的综合能力，社会资源的合理使用可以使城市在冲击后快速恢复；生态系统与人类系统相互制约，有限的资源、极端天气频发都极大的加强了对生态韧性的重视；基础设施代表一个城市的物质条件，提高基础设施韧性，可以有效减少或阻止冲击对城市造成的损失。

结合文献归纳概括，见表 2.3，可将城市韧性过程分为抵抗阶段、恢复阶段、

适应阶段和学习更新阶段。

表 2.3 城市韧性发展阶段

阶段	含义	文献来源
抵抗阶段	当发生冲击时，系统抵抗，防止原始状态发生改变的能力	[11,16,56-59]
恢复阶段	遭遇冲击后，系统从混乱中逐渐恢复稳态的能力	[11,16,56,57,60]
适应阶段	在冲击后，系统适应新状态的能力	[11,16,33,56]
学习更新阶段	不断学习，自我更新强化，形成更完善的系统	[11,16,56,61-63]

### 2.1.3 可持续发展理论

资源的加速消耗和生态环境不断恶化，促使新的发展观可持续发展的出现。可持续发展的概念首次于 1987 年世界环境与发展委员会（WCED）的相关报告中提及<sup>[64]</sup>。我国于 1986 年开始创建可持续发展实验区，1991 年创办相关理论研究会刊《中国人口 资源与环境》，贯彻落实可持续发展理念。

可持续发展的关键所在是如何发展。可持续发展要求在经济增长的同时更要注重生态改善，由关注经济发展速度转为强调经济增长质量，在贯彻可持续发展的前提下实现经济增长，经济增长和可持续发展相辅相成，只有经济增长才能解决国家发展的现实问题，为可持续发展奠定基础。

可持续发展需要在合理分配自然资源的前提下兼顾环境承载力，从而实现人与自然和谐共生。经济发展要将保护生态环境作为首要考虑范畴，全面考虑自然资源的可持续能力，使资源损耗速率减缓，并通过相关措施加以实现。

可持续发展不仅考虑当代人对环境资源的需求，也要考虑到后代人对生态环境以及自然资源的需求，不能只顾眼前利益不顾后代人生存发展的需要；不能以威胁到发展中国家、经济落后地带以及贫困群体对环境资源的基本需要为前提，来谋求自身发展。

可持续发展是追求“以人为本”的发展，人是可持续发展的主体。可持续发展重视人类对物质、精神、生活的需要和追求，重视文化社会事业的发展，不断

提高人口素质，从而全面提高社会综合素质<sup>[65]</sup>。

可持续发展需要层层递进，不断积累使成效最大化。在实现经济持续增长的同时兼顾人类与自然的和谐共生，可持续发展内涵丰富，对人类经济活动提出了高标准严要求。可持续发展是城市子系统和谐发展的一种探究思路。只有充分贯彻落实可持续发展，才能实现人与自然和谐共生，城市韧性是城市实现可持续发展的关键驱动力。

#### 2.1.4 耦合协调理论

耦合指两个变量间相互影响、彼此制约的过程。以系统作为基本单位，耦合指两个或多个系统之间相互作用、相辅相成的过程。而协调是一种研究主体间相互协调、彼此促进，形成不断循环的和谐关系，即两个或多个系统间从无序到有序，从单一到整体。耦合和协调的有机融合形成了耦合协调理论，其主要用来衡量各子系统间在发展过程中的相互配合、彼此促进、相互发展的程度。

C 为各子系统间的耦合度值，取值范围为 $[0, 1]$ ，C 值代表系统间相互影响及作用的程度，C 值越大代表各系统间的相互制约、相互作用程度越深。其中多个系统的耦合度模型计算公式如下：

$$C(U_1, U_2, \dots, U_n) = 2 \times \left[ \frac{U_1, U_2, \dots, U_n}{\prod_{i < j} (U_i + U_j)^{\frac{2}{n-1}}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2-1)$$

其推导过程如下<sup>[66]</sup>：

(1) 集合 $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 中随机两个系统综合评价值计算得到算术平均数为 $A(U_i, U_j) = \frac{U_i + U_j}{2} (i < j)$ ，算术平均数个数共有 $C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$ 个。

(2) 对所有 $A(U_i, U_j) (i < j)$ ，求几何平均数，得到下式：

$$\left( \prod_{i < j} \frac{U_i + U_j}{2} \right)^{\frac{1}{C_n^2}} = \left( \prod_{i < j} \frac{U_i + U_j}{2} \right)^{\frac{2}{n(n-1)}} \quad (2-2)$$

(3) 将子系统综合评价值相乘开 n 次跟得几何平均数，除以 2-2 式，得到 C：

$$\frac{(U_1 U_2 \dots U_n)^{\frac{1}{n}}}{\left( \prod_{i < j} \frac{U_i + U_j}{2} \right)^{\frac{2}{n(n-1)}}} = \frac{(U_1 U_2 \dots U_n)^{\frac{1}{n}}}{\left( \prod_{i < j} \frac{U_i + U_j}{2} \right)^{\frac{2}{n(n-1)}}} = 2 \times \left( \frac{U_1 U_2 \dots U_n}{\prod_{i < j} (U_i + U_j)^{\frac{2}{n(n-1)}}} \right)^{\frac{1}{n}} = C(U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (2-3)$$

以上为耦合度模型推导过程。

在耦合度模型的基础上建立一个耦合协调度模型,用来评价系统整体性能和协调程度,计算公式如式(2-4)、(2-5):

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (2-4)$$

$$T = \lambda_1 U_1 + \lambda_2 U_2 + \lambda_3 U_3 + \dots + \lambda_n U_n \quad (2-5)$$

式(2-5)中: T为协调指数, D表示耦合协调度。

## 2.2 模型方法介绍

### 2.2.1 遗传算法

遗传算法引入达尔文“优胜劣汰,适者生存”的生存法则<sup>[67]</sup>。利用适应度函数与遗传中的选择、交叉和变异对个体进行选择,将适应度值较优的个体保留,其余则被淘汰,新的群体不但继承了上一代的信息,而且还优于上一代,不断循环,直至满足条件。遗传算法经常被用来对参数进行全局寻优,以克服传统神经网络模型容易陷入局部极小值和收敛速度慢等问题。

遗传算法基本操作包括:

#### (1) 选择操作

选择操作是指从旧群体中按一定概率计算,选择个体到新群体中,个体被选中的概率跟适应度值有关,个体适应度值越好,被选中的概率越大。

#### (2) 交叉操作

交叉操作是指从个体群中随机挑选两个个体,使两个染色体的基因相互交换进行重组,从而产生新型优秀的个体。交叉过程为从群体中任选两个染色体,随机选择一点或多点染色体位置进行交换。

#### (3) 变异操作

变异操作是指从群体中随机挑选一个个体,任 选染色体中的一处通过变异以产生新的更优秀的个体。

### 2.2.2 ELM 神经网络

分析和对比目前典型的神经网络算法,极限学习机算法结构简单,能克服传

统算法训练时间长,易达到局部最优,不够精确等问题,逐渐被推广在不同领域中。ELM网络的结构:ELM网络是由一层输入层、一层或者多层隐含层和一层输出层组成。在该网络中,输入层和隐含层靠权值进行连接计算,隐含层和输出层则靠阈值进行连接计算,其中权值和阈值具有随机性。ELM网络模型构建构成如下<sup>[68]</sup>:

ELM有N个输入 $(\{x_i\}_{i=1}^N, x_i \in R^d)$ 输出 $(\{t_i\}_{i=1}^N, t_i \in R^d)$ 样本, L个隐含层,其输出是:

$$o_i = \sum_{j=1}^L \beta_j g(a_j, b_j, x_i) \quad (2-6)$$

式中 $i = 1, \dots, N$ ,  $j = 1, \dots, L$ , 学习参数 $a_j \in R^m, b_j \in R^d$ , 其中 $\beta_j \in R^m$ 连接第i个和第j个的隐含层神经元。其中 $g(x)$ 是隐含层的激励函数,  $b_i$ 是隐含层的阈值, 关于第 $x_i$ 个输入样本 $g(a_j, b_j, x_i)$ 的第j个隐含层神经元的输出, 通过j连接到输出节点。在ELM模型中, 其损失函数被定义为:

$$E = \sum_{i=1}^N \|o_i - t_i\| \quad (2-7)$$

使用以下传统的基于梯度的算法, 迭代更新网络参数 $W$ , 以使E最小化。

$$W_{k+1} = W_k - \eta \frac{\partial E(W_k)}{\partial W_k} \quad (2-8)$$

式中,  $\eta$ 是学习率,  $W$ 是 $a_j$ 、 $b_j$ 和 $\beta_j$ 的集合。在ELM中, 激励函数 $g$ 用于近似零误差样本 $\sum_{i=1}^N \|o_i - t_i\|$ 。

$$H\beta = T \quad (2-9)$$

式中,  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ 是输出权重矩阵,  $T = (t_1, t_2, \dots, t_N)$ 是目标矩阵,

$h_{ij} = g(a_j, b_j, x_i)$ 和 $H = h_{ij}$ 是隐含层矩阵。单个隐含层前馈网络通过随机选择隐含节点并根据目标确定输出权重。因此, 通过解决以下最小二乘问题来确定网络的输出权重:

$$\hat{\beta} = H^+T \quad (2-10)$$

式中 $H^+$ 是H的Moore-Penrose广义逆, 即:

$$H^+ = \begin{cases} (H^T H)^{-1} H^T, & \text{if } H^T H \text{ is non singular} \\ H^T (H H^T)^{-1}, & \text{if } H H^T \text{ is non singular} \end{cases} \quad (2-11)$$

### 3 城市韧性统计测度体系

本节通过与上节涉及的相关理论结合,结合甘肃省城市韧性现状、指标体系构建原则与构建流程,构建甘肃省城市韧性统计测度体系。首先,分析甘肃省城市韧性现状及政府相应改进措施,在引入可持续发展理念与韧性城市内在特征的基础上建立适合甘肃省的城市韧性测度框架;其次,整理城市韧性相关文献指标并进行解析,考量适合甘肃省的指标;最后,建立完善全面的甘肃省城市韧性测度体系为论文进一步探究打好基础。

#### 3.1 甘肃省城市韧性概况

甘肃地处我国西北,经济建设相对薄弱、基础设施较差、产业结构简单、就业面相对较窄、生态环境脆弱等严重约束城市的恢复力水平。为提升甘肃省城市韧性,明晰城市韧性建设工作发展方向,构建合理的城市韧性测度体系准确评估甘肃省当前城市韧性现状显得尤为重要。

为提高城市韧性,政府也做了大量工作,2016年国家发展改革委等24部门合作发布了《关于促进消费带动转型升级的行动方案》,提出加快创造培养新供给,形成新动力,加速解决社会供需矛盾,为经济社会发展注入新的源泉,试图将消费升级,增强经济韧性;2018年甘肃省委在十三届四次全会会议中通过《关于构建生态产业体系推动绿色发展崛起的决定》,详细阐述培养发展十大生态产业的重要性,提出坚决走经济发展、生活富裕、生态健康的绿色发展崛起的道路;2021年定西市在甘肃省内率先发布《黄河流域生态保护和高质量发展规划》,全面启动生态扶贫项目,“绿满陇中”专项行动规划提上日程,上半年造林绿化40多万亩,治理水土流失237平方公里。

#### 3.2 构建原则

规范、科学的构建指标体系是进一步进行甘肃省城市韧性评价与水平测度的必要条件,城市韧性测度是通过经济、社会、基础设施、生态系统等子系统对城市复杂系统的全面概述,可持续发展理论和甘肃省内城市的发展状况相结合,选取相关指标进行指标体系的建立。甘肃省城市韧性指标体系的构建需要遵守以下

原则：

(1) 科学性

指标的选取细化需要遵循科学性，明晰指标界定，具备相应理论支撑，且能切实正确的对城市韧性复杂系统特征进行概述提炼。在对城市韧性相关理论及发展演变研究的前提下，参照经济、社会、生态、基础设施系统的地区区位特征，与城市韧性内在特征相结合，建立城市韧性统计测度体系。

(2) 系统性和层次性

城市韧性测度是全面且具有复杂结构的庞杂系统，需要在遵循系统性和层次性原则的基础上，进一步细化系统特征构建指标体系，构建包含目标层、准则层、选取角度、指标层的综合指标体系。

(3) 综合性和统一性

综合性需要指标体系能映射出城市系统整体的特征，不仅要顾及各子系统，还要考虑到子系统内部组成；统一性是指同一指标符合官方认定的内涵、统计口径、计算方式等。

(4) 可操作性和可比性

可操作性需要选取的指标可查询且来源于官方网站，在目前评价指标体系的基础上，要求指标数据便于获取，构建的指标体系总体应易于实现及后续评估。可比性需要使用当前研究统一使用的名称、解析以及计算公式，便于评价体系的进一步提升和相互比较。

### 3.3 城市韧性指标体系构建流程

结合上文对韧性内涵的解读、城市韧性特性及发展阶段的梳理，分层构建城市韧性评价体系：

(1) 目标层，目标层代表甘肃省城市韧性各子系统综合值，是该指标体系构建的终极目标，为城市韧性指标。

(2) 准则层，准则层是参考城市韧性评估研究整理所得，在城市的经济、基础设施和生态方面进行分析。准则层是目标层的第一层解析。

(3) 选取角度，该层是在准则层子系统的基础上，根据城市韧性内在特征，分别从不同维度，对不同子系统的结构进行囊括。选取角度是进一步确定指标的

前提。按照子系统现状特征，响应及相关保障等层面进行细分。城市社会韧性从人口发展、社会服务、社会保障角度进行展开；城市经济韧性从发展水平和发展质量角度选取基层指标；城市基础设施韧性从资源状态和基建保障角度进行评价；城市生态韧性从生态状态和生态响应角度进行评析。

(4) 指标层，该层由从准则层的基础上，与概括的选取角度息息相关的指标构成。指标选取具有代表性，能从选取角度层面体现城市韧性的总体特性与演变趋势；指标选取具有差异性，能在不同选取层面表现出城市韧性不同层面的韧性特征。

### 3.4 韧性指标体系的构建

评价指标体系中的指标要求能准确、全面的概括评估主体，结合上文中城市韧性评估构建原则及流程，汇总筛选出现有文献中城市韧性体系的相关指标，可以发现不同学科领域研究选取的指标在分类角度和代表性上稍有不同，但纵观城市韧性评价体系发展，划分韧性城市系统层面，几乎所有的城市韧性评估都涉及到城市的生态、基础设施、社会、经济几个方面，将在可持续发展理念下城市韧性相关评价指标进行汇总整体，见表 3.1。

表 3.1 城市韧性相关指标汇总表

因素	指标层	参考文献
经济因素	人均 GDP，人均第三产业产值，第三产业占 GDP 比重，人均固定资产投资额，地区生产总值，城乡人均收入比，第三产业占比，第一产业占比，外贸依存度，财政收入增长率，高新技术产业增加值占比，研究与试验发展经费支出占 GDP 比重，城乡居民储蓄年末余额，人均城乡居民储蓄存款，城镇居民可支配收入，农村居民人均可支配收入；	[14,55,69-72]
社会因素	15-64 岁所占人口比例，城市人口密度，社会救助人口比例，万人拥有文化事业机构数，医疗保险覆盖率，养老保险覆盖率，万人拥有卫生机构人员数，失业保险覆盖率，万人拥有养老服务机构数，医院、卫生院床位数，普通高校学生在校人数，万人拥有 R&D 人员，万人拥有的普通中学学校数，城镇化率，总抚养比；	[14,55,69-71]
基础设施因素	人均市容环卫专用车辆设备总数、临时避难所，道路网密度，人均实有道路面积，供水综合生产能力，道路网密度，建成区排水管道网密度，建成区供水管道密度，人均日生活用水量，城市用水普及率，城市燃气普及率；	[14,69-71]

续表 3.1 城市韧性相关指标汇总表

因素	指标层	参考文献
生态因素	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，建成区绿化覆盖率，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，工业固体废物综合利用率，自然灾害生活救助，单位 GDP 废水排放，单位 GDP 工业废气排放量	[14,55,69-71]

结合上文对已有文献指标的梳理，针对甘肃省区位特征、指标构建原则及可获得性，对城市韧性系统分别从社会、经济、基础设施与生态四个方面来呈现。甘肃省城市韧性指标体系见表 3.2。

### （1）经济维度指标

以经济发展水平和经济发展质量衡量经济水平。经济发展水平选取指标主要包括人均 GDP、人均第三产业产值、人均固定资产投资额、第三产业产值占 GDP 比重、人均城乡居民储蓄存款；经济发展质量指标主要包括财政收入增长率、外贸依存度、研究与试验发展经费支出占 GDP 比重、城镇居民人均可支配收入、农村居民人均可支配收入。

其中外贸依存度指一个国家或者区域在一定时期内总的进出口额占其国内生产总值的比例，可直观体现一个国家或区域经济发展对对外贸易的依附程度，虽然对外贸易的提高一定程度上会促进 GDP 增长，但随着经济发展范畴的扩大，其不稳定因素和潜在风险也对应增加，属于负向指标。随着全球化进程不断推进，第二产业比重、第三产业增加值占 GDP 的比重也不断增加，系统抵抗外界对经济领域冲击时维持稳定的时间也就越长。财政收入占国内生产总值（GDP）的比重，被称为财政收入增长率，能直观的反映国家或区域政府对经济发展进行宏观管理的能力<sup>[69]</sup>，财政收入增长率越高，表明政府能够有足够的资金去分配社会资源，从而提升社会保障，提高社会稳定程度。

### （2）社会维度指标

以人口发展、社会服务和社会保障衡量社会发展水平。人口发展选取指标主要包括 15-64 岁所占人口比例、城市人口密度、城镇化率、城镇登记失业率、总抚养比；社会服务指标主要包括万人拥有的普通中学学校数、万人拥有卫生机构人员数、万人拥有文化事业机构数、万人拥有 R&D 人员数、万人拥有养老服务

机构数；社会保障指标主要包括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。

其中，医疗、养老、失业保险等覆盖面越广，可直接反映居民的生活、医疗保障等的完善性以及覆盖率高程度，都能极大的反馈出居民生活的稳定情况，社会系统稳定性越大，其抵御扰动的能力越强，属于正向指标，城镇登记失业率越高，在面对冲击时越容易受到不利影响，属于负向指标，社会服务类指标均属于正向指标，可以在一定程度上说明城市人口的综合素质，城市人群在面对灾害冲击时，对居民心理素质和自救意识上存在相应的提高，对灾后的恢复阶段居民表现积极配合有相应帮助。

### （3）基础设施维度指标

以资源状态、基建保障衡量基础设施发展水平。主要包括人均日生活用水量、城市用水普及率、城市燃气普及率、供水综合生产能力、人均实有道路面积、道路网密度、人均市容环卫专用车辆设备总数、建成区排水管道网密度、建成区供水管道密度。

人均日生活用水量反映为人口对水资源的需求，指标值越大，说明对水资源依赖程度越高，属于负向指标，人均实有道路面积越大，则对与灾后交通疏散、争取救援时间都有较大帮助，该指标值越大，在面对风险冲击时可以在一定程度上规避冲击带来的不利影响，因此属于正向指标。城市在面对外部扰动时，基础设施建设需要一定的抗压性，并需要在强大外部冲击下仍可维持基本的运行能力，因此，没有多样、丰富的基础建设作为支撑，城市韧性也较容易受到外界冲击影响。

### （4）生态维度指标

以生态胁迫、环境压力和改善措施衡量生态质量，主要包括受灾面积（自然灾害）、成灾面积占受灾面积的比重、单位 GDP 废水排放、单位 GDP 废气排放量、城市污水处理厂日处理能力、生活垃圾清运量、空气质量好于二级的天数比例、万人拥有废水治理设施数、工业固体废物综合利用率、城市建成区绿地率、自然灾害生活救助。其中，城镇空气优良天数是可以间接反映出一个区域生态环境是否优良的指标，所在地区生态受到的污染和损害可以间接通过城镇空气质量有所体现，因此属于正向指标；受灾面积（自然灾害）、成灾面积占受灾面积的比重、单位 GDP 废水排放、单位 GDP 废气排放量属于负向指标，指标值越大，

反映城市生态环境越脆弱。其余指标均属于正向指标，指标越大，越有利于城市生态韧性建设。城市污水处理厂日处理能力、生活垃圾清运量、万人拥有废水治理设施数、工业固体废物综合利用率等越高，反映其处理效率越高，那么相对于生态环境的损坏程度就越低，也反映了对生态环境的持续改善的过程，因此属于正向指标。

表 3.2 甘肃省城市韧性指标体系

准则层	选取角度	指标层	单位	指标属性
城市生态韧性	生态状态	受灾面积（自然灾害）	千公顷	负
		空气质量好于二级的天数比例	%	正
		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
	生态响应	城市污水处理厂日处理能力	万立方米	正
		生活垃圾清运量	万吨	正
		城市建成区绿地率	%	正
		万人拥有废水治理设施数	套	正
		工业固体废物综合利用率	%	正
		成灾面积占受灾面积的比重	%	负
城市社会韧性	人口发展	自然灾害生活救助	万元	正
		15-64 岁所占人口比例	%	正
		城市人口密度	%	正
		城镇化率	%	正
		城镇登记失业率	%	负
	社会服务	总抚养比	%	正
		万人拥有的普通中学学校数	所	正
		万人拥有卫生机构人员数	人	正
		万人拥有文化事业机构数	个	正
		万人拥有 R&D 人员	人	正
社会保障	万人拥有养老服务机构数	个	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	
	城市基础设施韧性	资源状态	人均日生活用水量	升
城市用水普及率			%	正
城市燃气普及率			%	正
基建保障		道路网密度	公里/平方公里	正
		人均实有道路面积	平方米	正
		供水综合生产能力	万立方米/日	正
		人均市容环卫专用车辆设备总数	台	正
建成区排水管道网密度	公里/平方公里	正		
建成区供水管道密度	公里/平方公里	正		

续表 3.2 甘肃省城市韧性指标体系

准则层	选取角度	指标层	单位	指标属性
城市经济韧性	发展水平	人均 GDP	元	正
		人均第三产业产值	元	正
		人均固定资产投资额	元	正
		第三产业产值占 GDP 比重	%	正
		人均城乡居民储蓄存款	元	正
	发展质量	财政收入增长率	%	正
		外贸依存度	%	负
		研究与试验发展经费支出占 GDP 比重	%	正
		城镇居民可支配收入	元	正
		农村居民人均可支配收入	元	正

### 3.5 韧性评价函数的确定

#### 3.5.1 指标处理

由于评价指标体系包含较多指标,涉及指标量纲差异等问题,对原始数据直接进行计算无意义,需要对指标原始数据进行预处理,标准化处理计算公式如下:

对于正向指标:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3-1)$$

对于负项指标:

$$p_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3-2)$$

其中 $p_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 是无量纲化处理后的指标数值, $x_{ij}$ 为第 $i$ 个城市第 $j$ 个指标的原始数值, $\max(x_{ij})$ 为该指标数据列的最大值, $\min(x_{ij})$ 为该指标数据列最小值。由于使用标准化处理后存在部分数据为0的情况,因此在对原始数据标准化处理后加上一个略大于零的正数,以保证体系中每个指标存在意义,论文对标准化处理后的数据均加0.001。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.001 \quad (3-3)$$

$$p_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.001 \quad (3-4)$$

### 3.5.2 测算方法

熵值法是一种比较客观的赋权方法,其基本原理是通过计算各项指标的信息熵值来以此来衡量此项指标的离散程度,离散程度越大表示此项指标对研究主体的影响效果越小,反之亦然。

设评价体系中有  $m$  个样本、 $n$  个指标。计算步骤如下<sup>[32]</sup>:

$$(1) \text{ 各项指标的熵值 } e_{ij} : e_{ij} = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}, \text{ 其中 } k = \frac{1}{e_{\max}} = \frac{1}{\ln m} \quad (3-5)$$

$$(2) \text{ 各项指标的权重 } w_j : w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad (3-6)$$

$$\text{各项指标综合评价价值: } c = p_{ij} \times w_j \quad (3-7)$$

通过线性加权的方法分别求出子系统系统韧性和城市韧性:

$$\text{经济韧性为: } R_1 = \sum_{j=1}^{10} w_j p_{ij} \quad (3-8)$$

$$\text{社会韧性为: } R_2 = \sum_{j=11}^{23} w_j p_{ij} \quad (3-9)$$

$$\text{基础设施韧性为: } R_3 = \sum_{j=24}^{31} w_j p_{ij} \quad (3-10)$$

$$\text{生态韧性为: } R_4 = \sum_{j=32}^{42} w_j p_{ij} \quad (3-11)$$

$$\text{城市韧性为: } R = \frac{1}{4}R_1 + \frac{1}{4}R_2 + \frac{1}{4}R_3 + \frac{1}{4}R_4 \quad (3-12)$$

## 4 甘肃省各市州城市韧性测度与分析

本部分从基于构建的城市韧性统计测度体系,对甘肃省城市韧性现状分别从甘肃省整体韧性和各市州城市韧性角度进行评估,引入耦合协调模型,对甘肃省城市韧性系统内部协调性分别从省域和市域层面展开进行分析。

### 4.1 城市韧性水平测算与分析

论文的研究对象为甘肃省各市州,2010-2019 年份数据均来自各年份的《甘肃省发展年鉴》和甘肃省自然资源厅,部分市州指标数据缺失值,通过插值法补充。论文基于甘肃省城市韧性测算方法,计算得到甘肃省 2010-2019 年的城市韧性综合指数,用以反映甘肃省各市州城市韧性,测算结果见表 4.1。

表 4.1 2010-2019 年甘肃省城市韧性综合评价结果

城市	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
兰州市	0.398	0.414	0.462	0.489	0.491	0.518	0.517	0.558	0.576	0.604
嘉峪关市	0.373	0.336	0.371	0.351	0.366	0.383	0.391	0.395	0.445	0.511
金昌市	0.271	0.267	0.315	0.328	0.346	0.360	0.323	0.323	0.305	0.322
白银市	0.161	0.173	0.195	0.209	0.218	0.222	0.227	0.263	0.270	0.280
天水市	0.174	0.173	0.189	0.209	0.198	0.212	0.216	0.257	0.264	0.278
武威市	0.157	0.169	0.181	0.190	0.204	0.214	0.223	0.263	0.246	0.256
张掖市	0.169	0.174	0.191	0.187	0.202	0.227	0.227	0.276	0.277	0.291
平凉市	0.136	0.141	0.156	0.167	0.175	0.182	0.191	0.225	0.233	0.250
酒泉市	0.202	0.214	0.251	0.247	0.257	0.266	0.277	0.296	0.310	0.308
庆阳市	0.152	0.175	0.192	0.217	0.221	0.229	0.239	0.270	0.273	0.282
定西市	0.098	0.107	0.173	0.182	0.158	0.162	0.173	0.208	0.219	0.232
陇南市	0.110	0.102	0.125	0.146	0.141	0.145	0.161	0.218	0.201	0.224
临夏回族 自治州	0.101	0.115	0.130	0.143	0.154	0.169	0.180	0.210	0.230	0.257
甘南藏族 自治州	0.134	0.138	0.146	0.149	0.156	0.150	0.164	0.219	0.211	0.236

自然间断法<sup>[69]</sup>基于数据本身,确定分类间隔,对相似值进行合理分组,使类间差异最大化。使用 Arcgis 中的自然断裂法将综合指数和各子系统韧性指数分别进行等级划分,以保证城市韧性评价标准的统一,如表 4.2 所示,采用 2010-2019 年全样本数据进行分类,按照总体和四个子系统分别进行划分,总共

划分为五类，分别为低韧性、较低韧性、较高韧性和高韧性。

表 4.2 自然断裂法韧性等级划分

韧性分级	低韧性	较低韧性	中等韧性	较高韧性	高韧性
总体	0.182	0.239	0.316	0.414	0.604
经济	0.147	0.232	0.343	0.480	0.687
社会	0.174	0.252	0.334	0.441	0.617
基础设施	0.131	0.194	0.281	0.438	0.629
生态	0.141	0.177	0.211	0.292	0.632

### 4.1.1 省域角度城市韧性水平分析

结合表 4.2 分析 2019 年甘肃省综合韧性水平可知，兰州市、嘉峪关市为高韧性水平，金昌市为较高韧性水平，白银市、天水市、武威市、张掖市、平凉市、酒泉市、庆阳市、临夏回族自治州为中等韧性水平，定西市、陇南市、甘南藏族自治州为较低韧性水平。

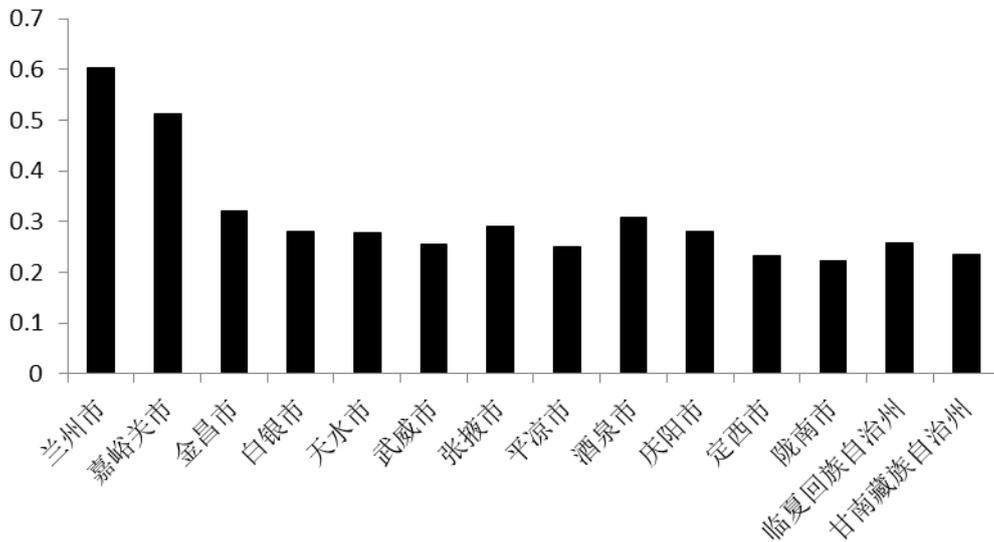


图 4.1 2019 年各市州城市韧性柱状图

结合具体指标来看，从经济准则层结合具体指标来看，嘉峪关市 2019 年人均 GDP 高达 112219 元，作为旅游城市，其经济发展水平和繁荣的旅游业息息相关，临夏回族自治州 2019 年人均 GDP 仅为 14697 元；从人均固定资产投资额来看，酒泉市 2019 年人均固定资产投资额为 58281.31 元，临夏回族自治州 2019

年人均固定资产投资额仅为 8453.22 元。由此可见，甘肃省各市州经济韧性水平分布不均。

从社会准则层结合具体指标来看，嘉峪关市 2019 年城镇化率高达 93.68%，陇南市 2019 年城镇化率仅为 34.82%；从万人拥有文化事业机构数来看，酒泉市 2019 年万人拥有文化事业机构数为 5.808 个，天水市 2019 年万人拥有文化事业机构数仅为 1.348 个；从万人拥有 R&D 人员来看，酒泉市 2019 年万人拥有 R&D 人员为 78.862 人，定西市 2019 年万人拥有 R&D 人员仅为 1.883 人。由此可见，甘肃省各市州社会韧性水平分布不均。

从基础设施准则层结合具体指标来看，兰州市 2019 年供水综合生产能力高达 159.40 万立方米/日，甘南藏族自治州 2019 年供水综合生产能力仅为 0.90 万立方米/日；从道路网密度来看，兰州市 2019 年道路网密度为 6.760 公里/平方公里，张掖市 2019 年道路网密度仅为 0.595 公里/平方公里；从城市燃气普及率来看，酒泉市 2019 年城市燃气普及率为 100%，甘南藏族自治州 2019 年城市燃气普及率仅为 70.7%。由此可见，甘肃省各市州基础设施韧性水平分布不均。

生态韧性系统中包含不可预测的指标，例如受灾面积（自然灾害如旱灾、水灾、风雹灾、霜冻、病虫、其他）。结合具体指标来看，城市污水处理厂日处理能力上看，兰州市 2019 年城市污水处理厂日处理能力高达 72 万立方米，甘南藏族自治州 2019 年城市污水处理厂日处理能力仅为 1 万立方米。甘肃地貌复杂多样，土地类型繁杂且交错分布，参照甘肃省脆弱的生态环境条件，结合综合评价分析结果可见，甘肃省各市州生态韧性水平整体较低。

#### 4.1.2 市域角度城市韧性水平分析

分别提取 2010、2013、2016、2019 年甘肃省各市州城市韧性值进行分析，绘制 2010、2013、2016、2019 年甘肃省各市州城市韧性综合值三维柱状图，如图 4.2 所示。

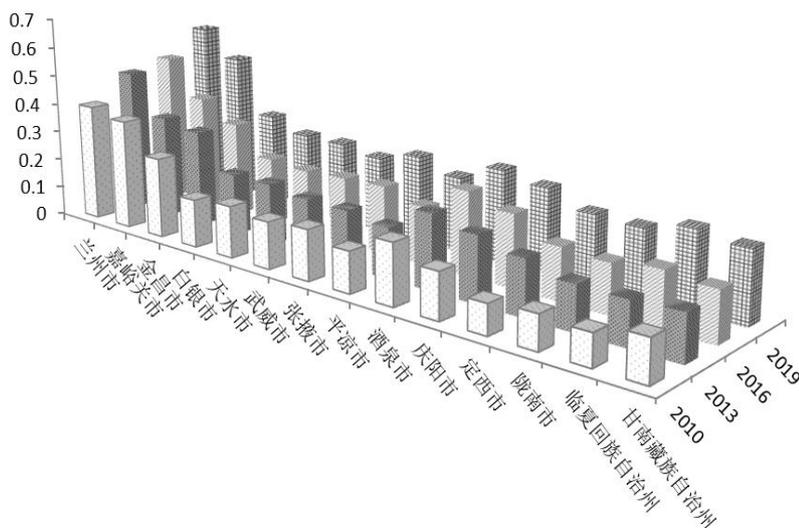


图 4.2 2010、2013、2016、2019 年各市州城市韧性三维柱状图

结合表 4.2 分析 2010、2013、2016、2019 年甘肃省综合韧性水平可知，2010 年兰州市处于较高韧性水平，2013 年韧性水平得到提升转为高韧性水平，2016 和 2019 年持续处于高韧性水平并保持不断上升；嘉峪关市 2010、2013、2016 年均处于较高韧性水平，2019 年得到提升转为高韧性水平；金昌市 2010 年为中等韧性水平，2013、2016、2019 年得到提升转为较高韧性水平；白银市、天水市、武威市、张掖市、庆阳市 2010 年均处于低韧性水平，2013、2016 年得到提升转为较低韧性水平，2019 年与发展为中等韧性水平；平凉市 2010、2013 年均处于低韧性水平，2016 年得到提升转为较低韧性水平，2019 年与发展为中等韧性水平；酒泉市 2010 年为较低韧性水平，2013、2016、2019 年得到提升转为中等韧性水平；定西市、陇南市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州 2010 年均处于低韧性水平，2019 年定西市、陇南市、甘南藏族自治州转为较低韧性水平，临夏回族自治州转为中等韧性水平。

## 4.2 城市韧性演化分析

### 4.2.1 省域角度城市韧性演化分析

#### (1) 甘肃省整体韧性演化分析

论文使用第三节中熵值法相关公式计算得到甘肃省 2010-2019 年的城市综合韧性测度结果，甘肃省整体城市韧性情况如表 4.3、图 4.3。

表 4.3 甘肃省 2010-2019 年城市综合韧性测度结果

年份	城市韧性	变化率	韧性等级
2010	0.188	—	较低韧性
2011	0.193	2.47%	较低韧性
2012	0.220	13.97%	较低韧性
2013	0.230	4.54%	较低韧性
2014	0.235	2.20%	较低韧性
2015	0.246	4.59%	中等韧性
2016	0.251	2.08%	中等韧性
2017	0.284	13.46%	中等韧性
2018	0.290	2.02%	中等韧性
2019	0.309	6.66%	中等韧性
平均数	0.245	5.78%	中等韧性

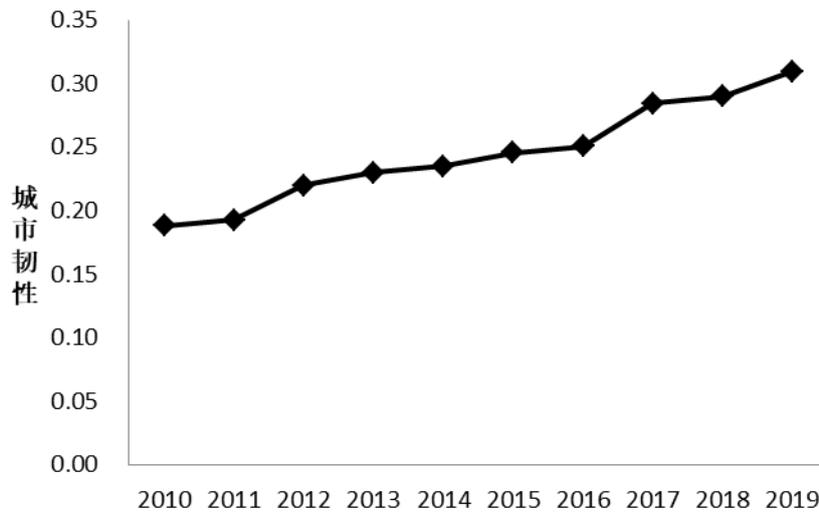


图 4.3 2010-2019 年甘肃省城市韧性演变趋势图

结合表 4.3 具体数值结果可知，2010-2019 年甘肃省城市韧性的平均值为 0.245，整体上属于中等韧性水平。从韧性等级划分情况来看，2010-2014 年属于较低韧性水平，2015-2019 年属于中等韧性水平。根据数据变化得知，近年来，甘肃省在提高城市韧性方面卓有成效，城市韧性实践进展取得突破性进展，从韧性等级分类上看，城市韧性水平得到较为明显的提升，贯彻落实城市可持续发展理念。

从总体趋势上看，2010-2019年甘肃省的城市韧性值整体表现为上升态势，2015年为关键一年，甘肃省城市韧性从较低韧性水平增长至中等韧性水平。平均年增长率为5.78%，肯定了甘肃省城市韧性建设工作的落实，城市韧性系统不断强化完善，受到扰动后，在保障城市系统基本功能运行的基础上，逐步提升抗干扰能力，无论是自然扰动还是人为干扰，城市系统能快速做出响应，最大可能规避风险。从整体上看，甘肃省城市韧性得到了极大的发展，下面分别从各子系统城市韧性演变情况进行分析，进一步探究深层原因。

## (2) 甘肃省子系统韧性演化分析

为具体分析甘肃省城市韧性内部系统结构特征及系统间韧性动态演化特征，论文对城市韧性体系中的经济系统韧性、社会系统韧性、基础设施系统韧性和生态系统韧性情况依次进行详细探究。表4.4为甘肃省2010-2019年城市韧性子系统的韧性综合评价价值。

表 4.4 甘肃省 2010-2019 年子系统韧性测度结果

年份	经济	社会	基础设施	生态
2010	0.144	0.237	0.180	0.192
2011	0.155	0.252	0.181	0.184
2012	0.186	0.298	0.185	0.211
2013	0.209	0.298	0.188	0.224
2014	0.240	0.301	0.199	0.199
2015	0.271	0.306	0.206	0.199
2016	0.290	0.313	0.201	0.199
2017	0.286	0.433	0.226	0.203
2018	0.318	0.417	0.233	0.193
2019	0.338	0.439	0.254	0.207

可以看出四大子系统韧性值都在逐年递增，下面对各子系统韧性演变情况结合具体相关指标进行深入分析，图4.4至图4.7为城市韧性子系统的韧性演变趋势图。下文分别对四个子系统韧性变化情况结合具体指标进行分析。

### 1) 经济子系统韧性演化分析

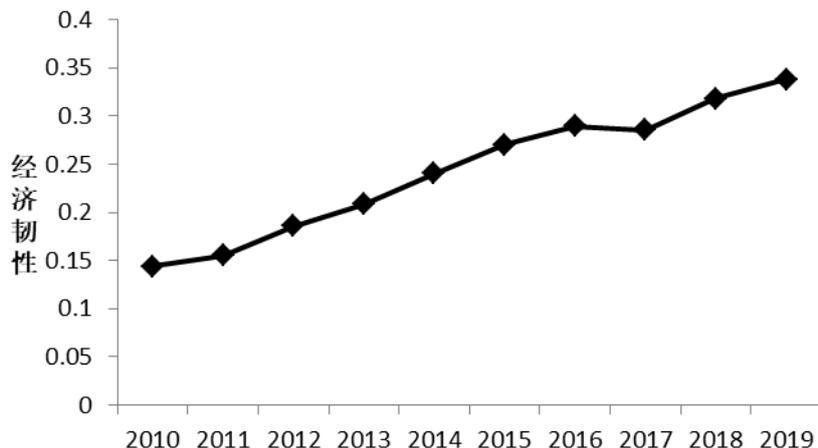


图 4.4 2010-2019 年甘肃省经济子系统韧性演变趋势图

结合表 4.4 和图 4.4 可观察到, 2010-2019 年甘肃省的经济韧性整体上表现为上升态势, 从 2010 年的 0.144 上升到 2019 年的 0.338, 平均年增长率为 10.12%。可以看出, 在甘肃省近些年发展过程中, 经济韧性有着良好的增长态势。

下面将从甘肃省经济韧性发展指标中进一步探究 2010-2019 年甘肃省的经济韧性演化趋势。2010 年, 甘肃省的人均 GDP 为 21945 元, 而 2019 年人均 GDP 则为 49405.571 亿元, 约增长了 1.251 倍。同时, 人均第三产业产值也从 2010 年的 6481.183 元猛增到 2019 年的 18860.260 元。人均 GDP 和人均第三产业产值的持续上升, 表明甘肃省 2010-2019 年内经济实力的不断增强, 当城市受到冲击时, 良好的经济基础是城市系统恢复、响应以及学习更新的必要前提, 为相应政策的制定和实施提供依据。

## 2) 社会子系统韧性演化分析

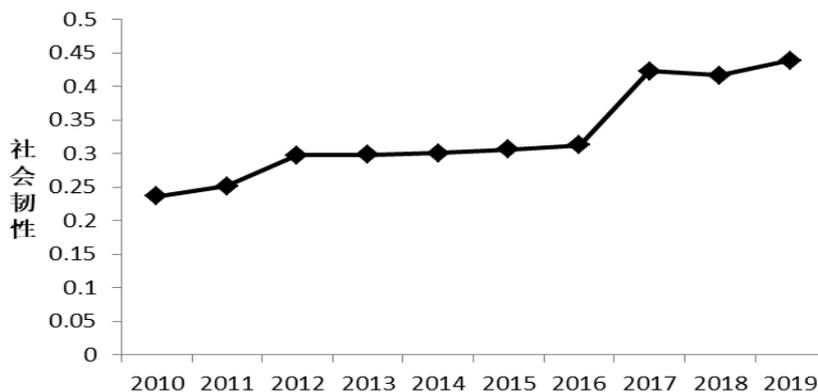


图 4.5 2010-2019 年甘肃省社会子系统韧性演变趋势图

与经济子系统韧性一样，2010-2019年甘肃省的社会子系统韧性整体上呈现上升趋势，图4.5。社会韧性值从2010年的0.237持续上升到2019年的0.439，平均年增长率为7.64%。其中2016-2017年社会韧性有大幅度提升，结合相关指标进一步分析，城镇居民基本医疗保险人数2015年为327.03万人，2016年为328.90万人，2017年增长至2191.97万人，基本医疗保险的普及极大提升了社会韧性，总的来说，甘肃省在城市韧性提升过程中，注重对社会系统韧性构建，社会综合服务水平不断上升，社会保障不断加强，居民生活水平质量不断提升，社会系统韧性明显增强。

根据具体指标的数值变化可知，在度量社会系统韧性的各类指标中，从人口发展层面看，2010年，甘肃省的城镇化率为39.77%，而2019年城镇化率则为51.49%；从社会服务层面看，万人拥有卫生机构人员数从2010年的50.117人增长到2019年的89.857人；从社会保障层面看，城乡居民基本养老保险覆盖率也从2010年的16.72%猛增到2019年的48.97%。由此可见，甘肃省城市的居住条件、社会保障有了很大程度的改善，人民生活水平进一步提升。

### 3) 基础设施子系统韧性演化分析

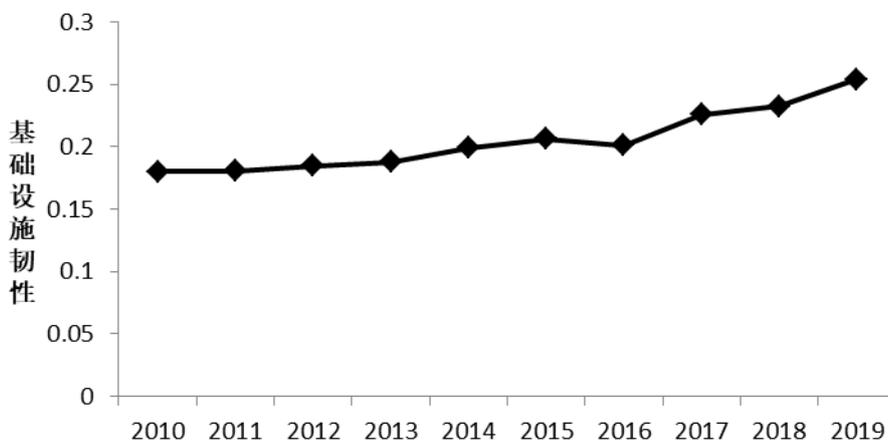


图4.6 2010-2019年甘肃省基础设施子系统韧性演变趋势图

由图4.6可以看出，2010-2019年甘肃省的基础设施子系统韧性整体上呈现上升态势。基础设施韧性值从2010年的0.180上升到2019年的0.254，平均年增长率为3.98%。这说明，甘肃省在城市韧性提升过程中，对基础设施系统保持着高度重视，基础设施建设工作不断被加强，居民生活条件水平得到显著提升，基础设施系统韧性明显上升。

结合具体指标来看,在测度基础设施韧性的各项指标中,从资源状态层面看,2010年,甘肃省的城市燃气普及率为65.74%,而2019年城市燃气普及率则为70.70%;从基建保障层面看,道路网密度从2010年的2.96公里/平方公里增长到2019年的3.02公里/平方公里,建成区排水管道网密度也从2010年的5.21公里/平方公里猛增到2019年的7.95公里/平方公里。由此可见,甘肃省城市的基础建设、基建服务有了很大程度的改善,人民生活水平进一步提升。

#### 4) 生态子系统韧性演化分析

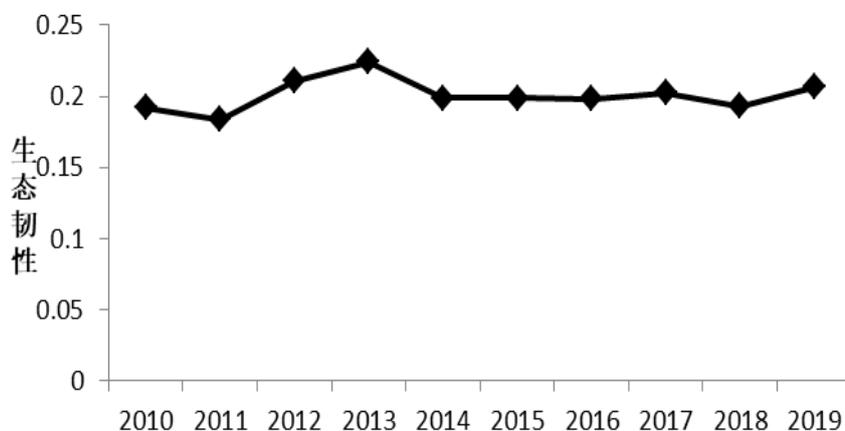


图 4.7 2010-2019 年甘肃省生态子系统韧性演变趋势图

根据表 4.4 和图 4.7 可知,不同于其他子系统,2010-2019 年甘肃省城市生态子系统韧性整体分为四部分,演化过程相对较平缓。2010-2011 年甘肃省生态韧性表现为上升态势,2011-2013 年,甘肃省生态韧性表现为上升态势,2013 年生态韧性到达 0.224,实现数据研究阶段的最大韧性值。从 2013 年到 2014 年,生态韧性呈现下降态势。2014-2019 年,生态韧性表现为平稳态势,其中有短暂小幅度波动状态,平均年增长率为 1.07%。

结合具体指标来看,在测度基础设施韧性的各项指标中,从生态状态层面看,2010 年,甘肃省的单位 GDP 工业废气排放量为 3.04 立方米/元,而 2019 年单位 GDP 工业废气排放量则为 0.000229 立方米/元;从生态响应层面看 2010 年,甘肃省的万人拥有废水治理设施数为 0.24 套,而 2019 年万人拥有废水治理设施数则为 0.40 套。由此可见,甘肃省城市的生态环境、生态响应能力有了很大程度的改善,人民生活水平得到进一步提升。

### (3) 甘肃省韧性演化综合分析

把 2010-2019 年甘肃省的经济子系统韧性、社会子系统韧性、基础设施子系统韧性和生态子系统韧性的演变趋势图进行叠加，如图 4.8，便于从整体角度衡量甘肃省城市韧性子系统间动态演化情况以及不同系统间的相互作用。

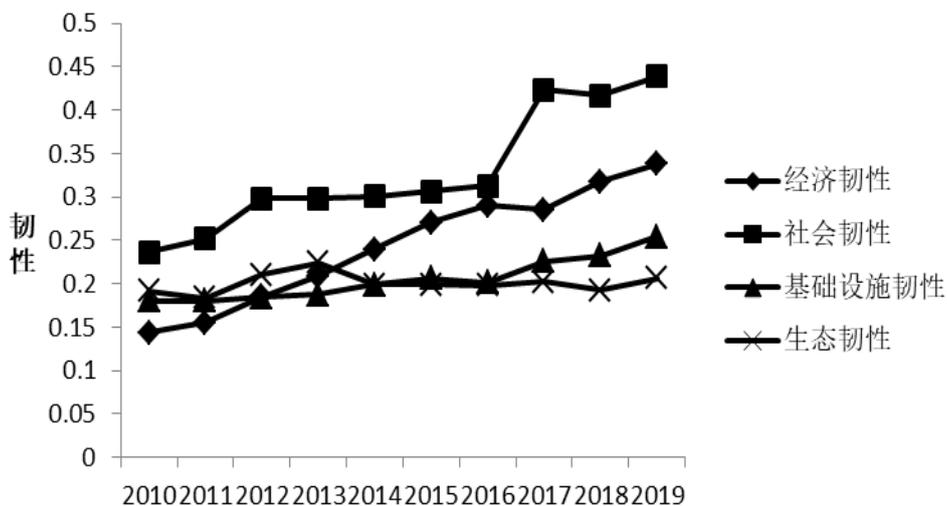


图 4.8 2010-2019 年甘肃省城市各子系统的韧性演变趋势图

基础设施韧性和生态韧性的演化态势基本处于同一发展水平，总体数值变化不大，总体平均值分别为 0.2053 和 0.2009。

显然，基础设施系统和生态系统的发展联系密切，随着基础设施的不断完善，针对突发事件的应对适应能力得到提升，生态韧性也就随着基础设施韧性的提高而提高；经济韧性和社会韧性基本处于同一发展趋势，伴随甘肃省各市州经济韧性的迅速提升，基础设施韧性和生态韧性的逐步发展，社会韧性整体呈现上升趋势，社会服务、人口发展和社会保障的指标数据得到增长。例如，经济韧性的提升使得城镇登记失业率下降，从而有助于社会稳定。可以看出，社会的发展也是经济发展的前提条件，社会服务质量的提升也创造了更多的就业机会，推动经济向前发展。经济韧性与社会韧性的走势大致趋同。

综合比较发现，经济、社会韧性稳定增长且发展态势基本趋同，对甘肃省城市韧性的提升有极大推动作用；基础设施、生态韧性增速相较缓慢，这与甘肃省区位以及地貌特征有极大的关系。这也说明甘肃省基础设施韧性和生态韧性有极

大的发展提升空间。

## 4.2.2 市域角度城市韧性演化分析

### (1) 分市州城市综合韧性演化

为细化分析甘肃省各市州城市韧性演变情况,从市域角度评价各市州的韧性演变发展,进一步探究各市州城市韧性水平,为整体提升甘肃省城市韧性提供分析依据。通过将甘肃省各市州 2010-2019 年城市韧性变化情况绘制三维面积图进行分析,三维面积图如图 4.9 所示,结合甘肃省各市州 2010-2019 年城市韧性水平平均值进行分析,见图 4.10。

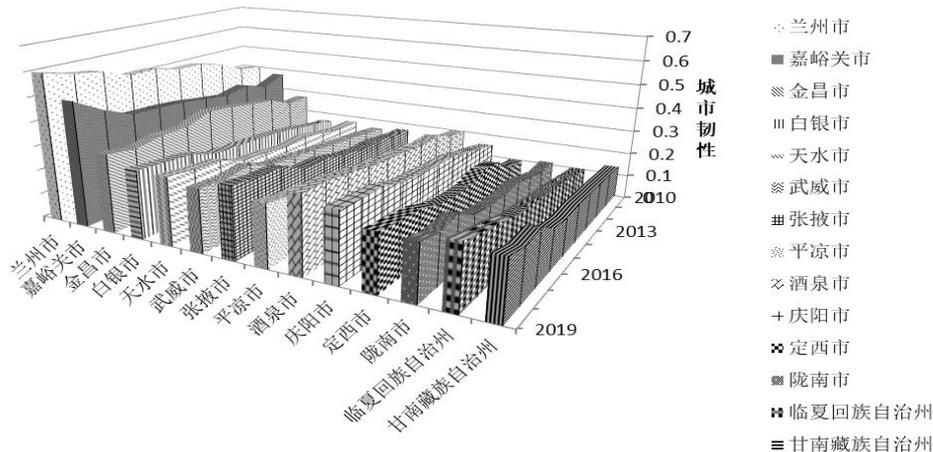


图 4.9 2010-2019 年甘肃省城市韧性三维面积图

由图 4.9 可以看出,2010-2019 年甘肃省各市州城市韧性在经济、社会、基础设施、生态各子系统的共同发展下整体呈现出上升态势。

10 年来,甘肃省各市州城市韧性增长斜率大致趋同,其中波动较大的为嘉峪关市、定西市和金昌市,2010-2011 年,嘉峪关市城市韧性有明显下降,2012 年又迅速恢复,2013 年有短暂下降,随后 2014-2019 年呈持续上升趋势。金昌市城市韧性 2010-2015 年呈上升态势,2015-2018 年呈持续下降趋势,2019 年有所回升。定西市城市韧性 2010-2013 年呈上升态势,2013-2014 年短暂下降,随后 2014-2019 年呈持续上升趋势,2010-2019 年甘肃省各市州城市韧性演变情况需要进一步分析。甘肃省城市韧性水平的平均值为 0.2445,可以看出甘肃省城市韧性综合水平较低,也侧面肯定了未来巨大的发展空间由图 4.10 可知,兰州市、

嘉峪关市、金昌市等 3 个地区城市韧性值高于全省平均韧性水平，其余地区则均低于全省平均韧性水平，进一步说明甘肃省各市州城市韧性水平存在差异。兰州市、嘉峪关市和金昌市在经济、社会、基础设施、生态子系统层面对省内其余城市存在一定的辐射带动作用。甘肃省各市州城市韧性水平存在明显差异，需要结合经济、社会、生态子系统内部变动情况进行深入分析。

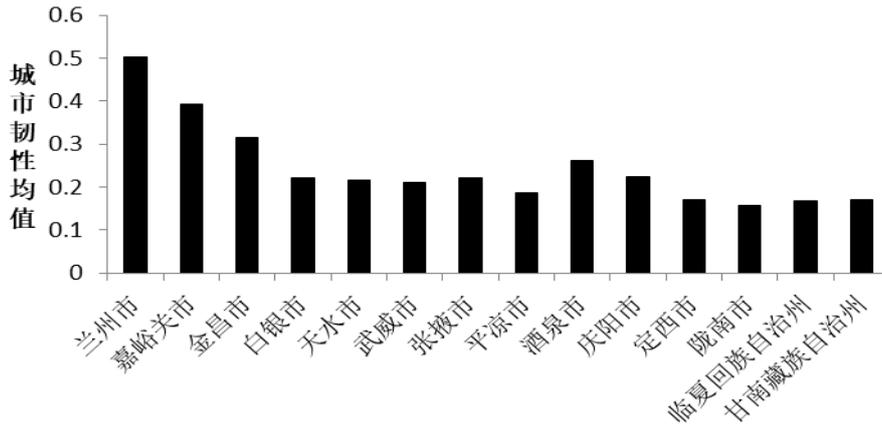


图 4.10 甘肃省各市州 2010-2019 年城市韧性均值柱状图

(2) 分市州城市系统韧性演化

为了进一步对甘肃省各市州城市韧性子系统分别进行分析及对比，论文将 2010-2019 年各子系统的韧性变化情况绘制为三维面积图进行分析，其中经济系统韧性演变情况如图 4.11 所示。

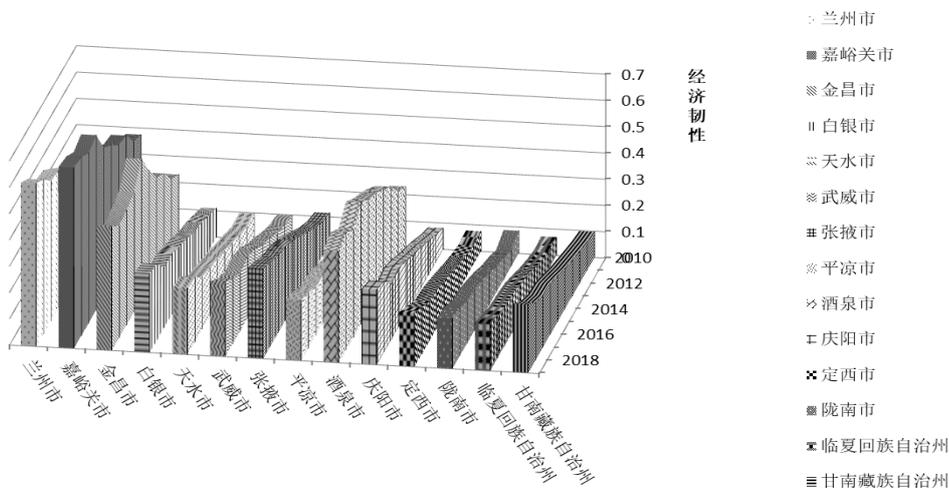


图 4.11 甘肃省各市州 2010-2019 年经济韧性三维面积图

由图 4.11 可以看出，2010-2019 年甘肃省各市州经济韧性总体上表现为上升态势，其中兰州市、嘉峪关市、金昌市和酒泉市在经济韧性子系统起到引领带动作用。

根据自然断裂法分类，兰州市经济韧性在 2010-2012 年处于中等韧性水平，2013-2015 年处于较高韧性水平，2016-2019 处于高韧性水平，嘉峪关市经济韧性在 2010-2012 年处于较高韧性水平，2013-2019 处于高韧性水平，金昌市经济韧性子在 2010 年处于较低韧性水平，2011-2012 年处于中等韧性水平，2015 年处于高韧性水平，其余各年份均为较高韧性水平，酒泉市经济韧性子在 2010 年处于较低韧性水平，2011-2012 年处于中等韧性水平，2013-2019 年均处于较高韧性水平。其余各市州各年份均处于中等韧性水平之下。

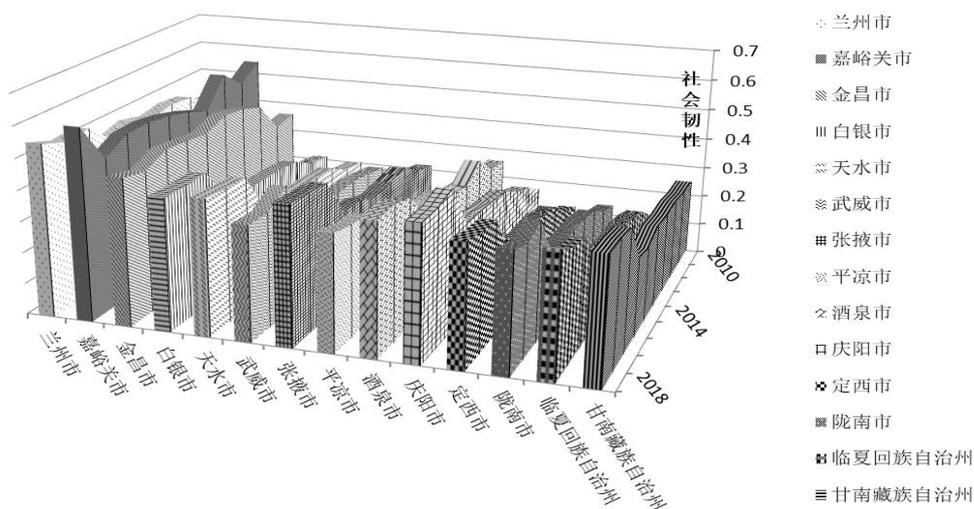


图 4.12 甘肃省各市州 2010-2019 年社会韧性三维面积图

由图 4.12 可以看出，2010-2019 年甘肃省各市州社会韧性总体上表现为上升态势，其中兰州市、嘉峪关市、金昌市在社会韧性子系统起到引领带动作用。

根据自然断裂法分类，兰州市社会韧性在 2010-2011 年处于较高韧性水平，2012-2019 均处于高韧性水平，嘉峪关市社会韧性 2010-2019 均处于高韧性水平，金昌市社会韧性在 2010-2011 年处于较高韧性水平，2012-2019 均处于高韧性水平。其余各市州各年份韧性水平大致趋同。

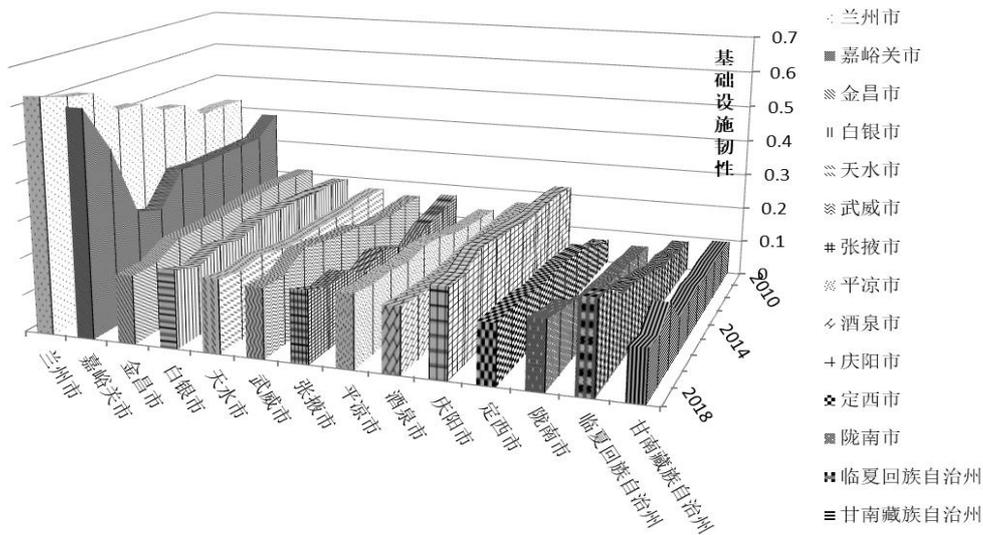


图 4.13 甘肃省各市州 2010-2019 年基础设施韧性三维面积图

由图 4.13 可以看出，甘肃省各市州 2010-2019 年基础设施韧性整体呈上升趋势，其中兰州市、嘉峪关市在基础设施韧性子系统起到引领带动作用。

根据自然断裂法分类，兰州市基础设施韧性在 2010-2012 年处于较高韧性水平，2013-2019 均处于高韧性水平，嘉峪关市基础设施韧性在 2010-2015 年处于较高韧性水平，2016 年有所下降转为中等韧性水平，2017-2019 不断上升处于高韧性水平。各市州各年份均处于中等韧性水平之下。

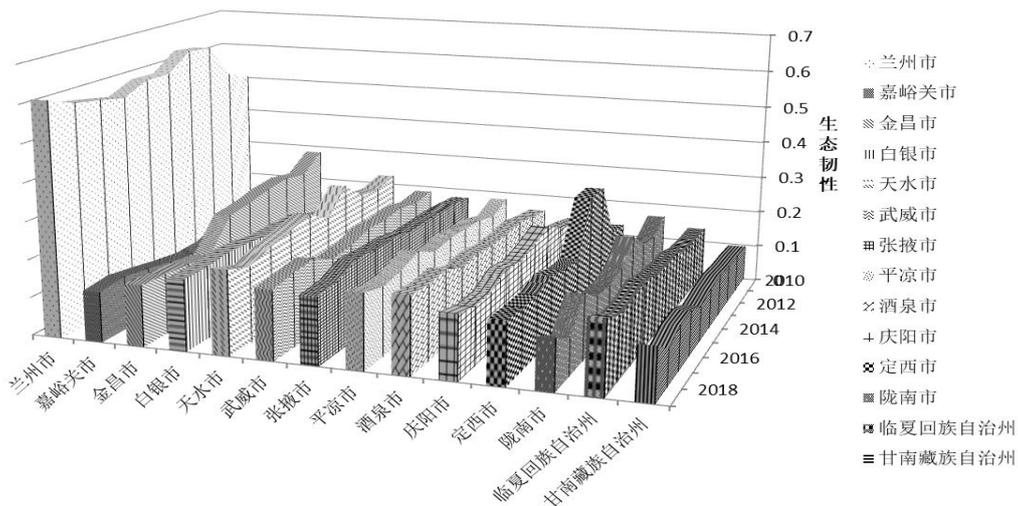


图 4.14 甘肃省各市州 2010-2019 年生态韧性三维面积图

由图 4.14 可以看出，甘肃省各市州 2010-2019 年基础设施韧性整体趋势较为

平缓，其中兰州市在生态韧性子系统起到引领带动作用，根据自然断裂法分类，兰州市生态韧性在 2010-2019 年均处于高韧性水平，其中，2010-2013 年呈上升趋势，2013-2016 年整体呈下降趋势，2016-2019 年转为上升趋势。各市州各年份均处于中等韧性水平之下。

### 4.3 城市生态经济系统韧性分析

#### 4.3.1 生态经济系统耦合协调度测算

在具体评价中，对耦合度，耦合协调度划分标准不一，论文将耦合协调度等级进行详细划分，参考张玉萍<sup>[73]</sup>等学者对吐鲁番的旅游、经济、生态环境间耦合协调分析中对耦合协调度的分类标准进行划分，耦合协调度等级划分标准见表 4.5。

表 4.5 耦合协调度等级划分标准

耦合协调度 D 值区间	协调等级	耦合协调程度
(0.0~0.1)	1	极度失调
[0.1~0.2)	2	严重失调
[0.2~0.3)	3	中度失调
[0.3~0.4)	4	轻度失调
[0.4~0.5)	5	濒临失调
[0.5~0.6)	6	勉强协调
[0.6~0.7)	7	初级协调
[0.7~0.8)	8	中级协调
[0.8~0.9)	9	良好协调
[0.9~1.0)	10	优质协调

参考王成<sup>[74]</sup>等对重庆市乡村三生空间耦合协调研究中对耦合度分级标准进行划分，耦合度分级标准如表 4.6。

表 4.6 耦合度分级标准

耦合阶段	低水平耦合	协调	磨合	高水平耦合
C 值	$0 < C \leq 0.3$	$0.3 < C \leq 0.5$	$0.5 < C \leq 0.8$	$0.8 < C \leq 1$

下面将进行耦合协调度分析，根据上文中模型计算出耦合协调度，分别在省域和市域视角下进行评价分析。

### 4.3.2 省域生态经济系统韧性分析

为了进一步掌握甘肃省城市韧性内在运行规律,分析城市韧性系统内部影响作用,论文引入耦合协调模型,构建经济系统 U1、社会系统 U2、基础设施系统 U3、生态系统 U4 的四元耦合协调模型,结合相关理论与方法中的计算公式,算出甘肃省城市韧性耦合度、协调指数及耦合协调度,进一步对 2010-2019 年甘肃省城市韧性系统进行耦合协调度分析,耦合协调结果见表 4.7。

表 4.7 2010-2019 年甘肃省城市综合韧性耦合协调结果

年份	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调度 D 值	协调等级	耦合协调程度
2010	0.984	0.188	0.430	5	濒临失调
2011	0.984	0.193	0.436	5	濒临失调
2012	0.980	0.220	0.464	5	濒临失调
2013	0.985	0.230	0.476	5	濒临失调
2014	0.985	0.235	0.481	5	濒临失调
2015	0.984	0.246	0.491	5	濒临失调
2016	0.979	0.251	0.495	5	濒临失调
2017	0.959	0.284	0.522	6	勉强协调
2018	0.957	0.290	0.527	6	勉强协调
2019	0.960	0.309	0.545	6	勉强协调

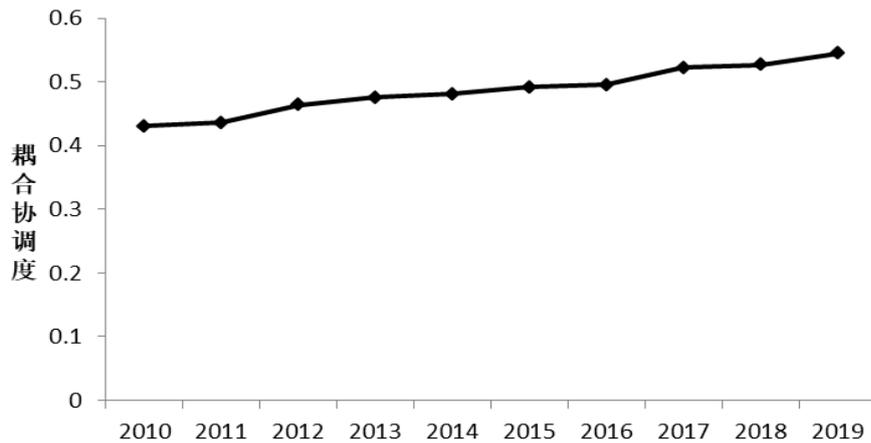


图 4.15 2010-2019 年甘肃省城市综合韧性耦合协调度时序图

根据表 4.7 和图 4.15 的具体结果,结合耦合度分级标准,可以看出 2010-2019 年甘肃省经济、社会、基础设施和生态子系统韧性的耦合度一直处于高水平耦合阶段,这说明在 2010-2019 年间,经济子系统、社会子系统、基础设施和生态子

系统间相互影响程度逐渐增强，各子系统协同发展。与此同时，四个子系统间的耦合协调指数也呈逐年递增趋势，整体上表明子系统间的发展逐步从无序状态到有序状态。

进一步分析根据公式计算出的2010-2019年甘肃省子系统韧性的耦合协调度。伴随着子系统间持续的高水平耦合与耦合协调指数的逐年递增，子系统间的耦合协调度也呈现逐年转好趋势，2010-2016年的耦合发展程度处于濒临失调，2017-2019年处于勉强协调，其耦合协调程度的逐渐转好，与我国近年来关注黄河流域的可持续发展密切相关，作为黄河流域途经省份，政府大力落实生态保护相关措施，使得“绿水青山”得以保证，使四大子系统耦合协调水平快速上升。这表明四个子系统间的相互影响机制在逐年完善。甘肃省城市韧性子系统间的耦合协调发展需维持其发展现状，以保证各子系统间的协同发展。

总的来说，经济、社会、基础设施系统的不断发展在对生态系统造成压力的同时，也为生态系统中环境的治理和改善提供物质基础，所以甘肃省各子系统间协调发展水平逐年递增。

### 4.3.3 市域生态经济系统韧性分析

从市域角度具体分析甘肃省各市州子系统城市韧性耦合协调变化情况，下文分别选取2010年、2013年、2016年和2019年的甘肃省各市州子系统耦合协调度值进一步探究，具体数据见表4.8。

表 4.8 甘肃省各市州子系统耦合协调度

城市	耦合度 C 值			
	2010	2013	2016	2019
兰州市	0.976	0.983	0.997	0.999
嘉峪关市	0.937	0.890	0.818	0.841
金昌市	0.979	0.953	0.887	0.885
白银市	0.965	0.979	0.984	0.948
天水市	0.955	0.955	0.985	0.952
武威市	0.968	0.977	0.982	0.957
张掖市	0.976	0.943	0.952	0.928
平凉市	0.952	0.973	0.997	0.964
酒泉市	0.976	0.943	0.907	0.924
庆阳市	0.939	0.977	0.983	0.944

续表 4.8 甘肃省各市州子系统耦合协调度

城市	耦合度 C 值			
	2010	2013	2016	2019
定西市	0.964	0.913	0.979	0.929
陇南市	0.926	0.909	0.957	0.925
临夏回族自治州	0.967	0.951	0.987	0.950
甘南藏族自治州	0.909	0.928	0.930	0.904

结合表 4.6 分级标准和表 4.8 的具体结果，可以看出甘肃省各市州经济、社会、基础设施和生态子系统韧性的耦合度从 2010 年 2019 年一直处于高耦合水平，发展态势较为稳定，表明甘肃省各市州四大子系统之间有很强的相互作用。其中嘉峪关市、金昌市、张掖市、酒泉市、定西市四大子系统间相互作用有轻微减弱，但仍处于高耦合水平。

表 4.9 甘肃省各市州子系统协调指数值

城市	协调指数 T 值			
	2010	2013	2016	2019
兰州市	0.398	0.489	0.517	0.604
嘉峪关市	0.373	0.351	0.391	0.511
金昌市	0.271	0.328	0.323	0.322
白银市	0.161	0.209	0.227	0.280
天水市	0.174	0.209	0.216	0.278
武威市	0.157	0.190	0.223	0.256
张掖市	0.169	0.187	0.227	0.291
平凉市	0.136	0.167	0.191	0.250
酒泉市	0.202	0.247	0.277	0.308
庆阳市	0.152	0.217	0.239	0.282
定西市	0.098	0.182	0.173	0.232
陇南市	0.110	0.146	0.161	0.224
临夏回族自治州	0.101	0.143	0.180	0.257
甘南藏族自治州	0.134	0.149	0.164	0.236

由表 4.9 的具体结果可知，在协调指数 T 值上，大体上甘肃省各市州均呈现出上升趋势，其中波动较大的为兰州市和嘉峪关市，兰州市从 2010 年的 0.398 上升至 2013 年的 0.489，2016 年持续上升为 0.517，直至 2019 年的 0.604；嘉峪关市从 2010 年的 0.373 下降至 2013 年的 0.351，2016 年升为 0.59，直至 2019 年的 0.511，总体相较 2010 年均呈上升态势。根据协调指数 T 值可将甘肃省各市

州分为两大块，兰州市、嘉峪关市处于较高水平；其余各市州相较兰州市和嘉峪关市协调指数值较低，但均呈现增长趋势，这些数据表明甘肃省各市州四大系统的协同效应正在不断增强。

表 4.10 甘肃省各市州子系统耦合协调度值

城市	耦合协调度 D 值			
	2010	2013	2016	2019
兰州市	0.623	0.693	0.718	0.777
嘉峪关市	0.591	0.559	0.565	0.656
金昌市	0.515	0.559	0.535	0.534
白银市	0.394	0.452	0.473	0.516
天水市	0.407	0.446	0.461	0.514
武威市	0.390	0.431	0.468	0.495
张掖市	0.406	0.420	0.465	0.519
平凉市	0.360	0.404	0.437	0.491
酒泉市	0.444	0.482	0.501	0.533
庆阳市	0.378	0.461	0.485	0.516
定西市	0.307	0.408	0.411	0.464
陇南市	0.320	0.365	0.393	0.455
临夏回族自治州	0.313	0.369	0.422	0.494
甘南藏族自治州	0.349	0.372	0.391	0.462

根据表 4.10 中的耦合协调度 D 值可知，甘肃省各市州耦合协调度呈现稳定上升趋势，波动幅度较大的为嘉峪关市、金昌市，可根据协调情况分为四类。

第一类包含兰州市、嘉峪关市和金昌市，整体耦合协调程度最高。其中 2010 年兰州市四大子系统处于初级协调状态，于 2016 年转为中级协调，2019 年仍为中级协调且数值在不断上升；2010 年嘉峪关市四大子系统处于勉强协调状态，于 2019 年转为初级协调；金昌市四大子系统耦合协调程度于 2010-2019 年均为勉强协调。

第二类包含天水市、张掖市和酒泉市，整体耦合协调程度较高。其中天水市和张掖市耦合协调程度均在 2010-2016 年为濒临失调，2019 年转为勉强协调；酒泉市耦合协调程度在 2010-2013 年为濒临失调，2016 年转为勉强协调且数值在不断上升。

第三类包含白银市和庆阳市，整体耦合协调程度处于中等水平。其中白银市和庆阳市耦合协调程度均在 2010 年为轻度失调，2013-2016 年为濒临失调，2019

年升至勉强协调水平。

第四类包含武威市、平凉市、定西市、陇南市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州，整体耦合协调程度处于较低水平。其中武威市、平凉市、定西市耦合协调程度均在 2010 年处于轻度失调，2013-2019 年转为濒临失调；陇南市、甘南藏族自治州耦合协调程度均在 2010-2016 年处于轻度失调，2019 年转为濒临失调；临夏回族自治州耦合协调程度在 2010-2013 年处于轻度失调，2016-2019 年转为濒临失调水平。

## 5 城市韧性特征模拟及提升策略分析

基于城市韧性评价指标体系数据特征，考虑到体系包含指标量较大，时间线相对较短，以及系统非线性、非平稳等运行特征，论文通过建立神经网络模拟模型，以实现城市韧性模拟仿真，从而提高城市韧性提供可靠的参考依据。针对传统神经网络算法存在的不足，本文采用 ELM 极限学习机算法，引入遗传算法进行优化，帮助 ELM 极限学习机网络快速地选取合理的权值和阈值，进一步提高城市韧性模拟模型的精度及效率，为城市韧性模拟和优化工作提供参考。

### 5.1 模型的构建及验证

ELM 模型应用于城市韧性模拟，可有效避免传统神经网络模型容易陷于局部最优解的问题，从而有效提高城市韧性模型运算速度和结果精度。

#### (1) 优化流程

ELM模型存在任意选取权值与阈值的问题，通过遗传算法对ELM模型中的 $w$ 和 $b$ 参数在全局范围内寻找其最优解，从而提高ELM模型的速度与精度，构建较为合理的城市韧性模拟模型。使用GA-ELM模型进行城市韧性模拟分析，具体模拟步骤如下<sup>[68]</sup>：

- 1) 读入城市韧性模型所需的训练和测试数据；
- 2) 为避免因为参数量纲问题导致城市韧性模型出现较大误差，对数据集进行归一化处理；
- 3) 通过遗传算法对ELM模型中的初始参数 $w$ 和 $b$ 进行寻优，使用适应度函数对个体计算适应度值，然后进行遗传算法中的交叉、选择和变异等操作，以便找到具有最佳适应度值的染色体，标记为初始的 $w$ 和 $b$ 值。其中适应度函数为5-1式。

$$\text{fitness} = \frac{1}{n} \sum_{i,j} |y_{ij} - x_{ij}| \quad (5-1)$$

式5-1中， $n$ 为训练集样本个数， $y_{ij}$ 为实际城市韧性模拟模型输出值； $x_{ij}$ 为输入参数对应的输出值。

- 4) 将最优个体赋值给ELM模型即可完成模型的构建。
- 5) 通过测试集数据模拟，可以进一步了解模型精度。

ELM 模型的模拟精度和隐含层节点个数息息相关。在已知构建 GA-ELM 模型的基础上,采用“试凑法”,以模型均方根误差为判断模型结构是否优良的依据,通过选取均方根误差最小时的结构,确定最终隐含层节点数。具体公式如下:

$$n = \sqrt{n_j + n_k} + \alpha \quad (5-2)$$

在公式 5-2 中,  $n$  代表隐含层节点数,  $n_j$  代表输入层节点数,  $n_k$  代表输出层节点数,  $\alpha$  代表[1,10]之间的常数。通过计算出隐含节点个数范围,不断地改变模型的隐含节点数值,从而得到最优的网络结构。

## (2) 模拟过程及结果分析

将 2010-2019 年 43 个指标甘肃省各市州数据作为输入,2010-2018 年测算的城市韧性数据作为输出,其中 2010-2017 年数据作为训练集,2018 年数据作为测试集,2019 年数据用于模拟,来检验所构建模型的精度,为下面模拟仿真做铺垫。

GA-ELM 城市韧性模拟模型,经过反复实验,选择的 GA-ELM 神经网络各层神经元个数的确定过程如下:

1) 确定输入层节点个数:因为甘肃省城市韧性评价体系中最终指标个数为 43,因此输入层的神经元数设定为 43 个。

2) 确定隐含层节点个数:根据上文 5-2 公式计算,得到隐含层节点数范围为[7,17],设置不同的神经网络结构进行实验,隐含层节点数分别从 7 开始,逐渐叠加 1 进行模拟训练,确定均方根误差最小时的节点数作为隐含层节点数。当隐含层节点数为 16 时,模型对应的均方根误差最小,由此论文 GA-ELM 模型设置 16 个隐含层节点。

3) 确定输出层节点个数:论文输出层为甘肃省城市韧性综合评价值,所以输出层节点个数为 1。

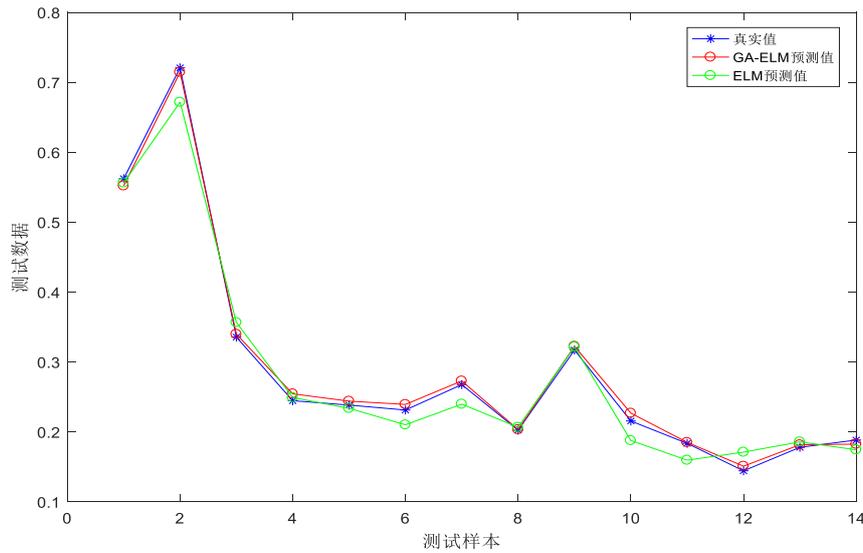


图 5.1 ELM 模型优化前后预测值与真实值对比

从图 5.1 可以看到 ELM 模型使用遗传算法优化前后的预测结果对比，可以发现通过遗传算法进行优化的 ELM 算法，整体趋势与真实城市韧性评价价值总体趋势更为接近，误差相较于未优化模型而言显著变小，可见通过 GA-ELM 模型能够更准确的反映甘肃省各市州城市韧性。

## 5.2 基于 GA-ELM 的甘肃省城市韧性模拟仿真

上文中所述模型可通过控制城市韧性指标体系数据输入，探究在不同情形下，甘肃省城市韧性变化情况，使用 GA-ELM 模型作为探究城市韧性提升策略设计核心，与验证实验模型的模型设计原则一致，将 2010-2019 年 43 个指标甘肃省各市州数据作为输入，2010-2018 年测算的城市韧性数据作为输出，其中 2010-2017 年数据作为训练集，2018 年数据作为测试集，2019 年数据用于模拟仿真。根据政府相关文件制定城市韧性提升策略，通过 GA-ELM 模型实现并进行分析。由于数据差距相对较小，下文小数点后均保留五位数。

### 5.2.1 策略一：控制城镇化率

甘肃省人民政府发布的《甘肃省新型城镇化规划(2021—2035 年)》一文中，力求打造稳定且具有高灵敏性的韧性城市，明确发展目标，要求不断完善城镇化

体系,力求追上全国平均水平,到 2025 年甘肃省常住城镇人口城镇化率达到 58% 以上,到 2035 年常住人口城镇化率达到 70%左右,可见提升城镇化率对创建韧性城市的重要性。其他指标数据不变,只改变城镇化率,即改变社会系统中指标数据。

以 2019 年数据为基础进行模拟仿真,目前 2019 年城镇化率为 49.69%,按照年增长率 3%,将 2019 年城镇化率增长 3%作为新的 2019 年城镇化率指标值,城市韧性指标中其他指标数据不变,使用训练好的 GA-ELM 模型进行模拟仿真,分析模拟结果,判断城镇化率对城市韧性影响,模拟情况如表 5.1 所示。

表 5.1 2019 年各市州城市综合韧性对比

城市	2019 (原模拟)	2019 (策略一)	城市韧性值变化
兰州市	0.58961	0.58980	升
嘉峪关市	0.52352	0.52345	降
金昌市	0.31566	0.31569	升
白银市	0.28759	0.28735	降
天水市	0.28768	0.28731	降
武威市	0.27267	0.27240	升
张掖市	0.27891	0.27846	降
平凉市	0.24313	0.24293	升
酒泉市	0.30402	0.30350	降
庆阳市	0.28557	0.28547	降
定西市	0.23181	0.23161	降
陇南市	0.20934	0.20913	降
临夏回族自治州	0.25338	0.25318	降
甘南藏族自治州	0.23551	0.23527	降

由表 5.1 可以看出,虽然数值变化不明显,但靠简单的提高城镇化率来提高城市韧性并不适用于全部市州,也可以反映出城市韧性系统的复杂性。表中只有兰州市、金昌市、武威市、平凉市城市韧性值有轻微上升,其余市州城市韧性值都有些许下降,但整体甘肃省各市州韧性等级没有得到提升,可以看出要提高城市韧性,策略不能太过片面。

## 5.2.2 策略二：策略一的基础上提高生态韧性

《规划》中提出要改善资源环境条件,全面提高可持续发展能力,提升应对自然灾害风险能力,提高建成区绿化覆盖率,进一步扩大绿化面积,使空气质量

不断好转，地级市城市空气质量优良天数比率达到 93.7%，使城镇环境更加适宜居住。在策略一的基础上，提高建成区绿化覆盖率和空气质量好于二级的天数比例，其他指标数据不变，即改变社会系统和生态系统中指标数据。

分别将建成区绿化覆盖率和空气质量好于二级的天数比例，按照年增长率 3% 以响应政策，2019 年建成区绿化覆盖率、空气质量好于二级的天数比例增长 3% 作为新的 2019 年两项指标值，城市韧性指标中其他指标数据不变，使用训练好的 GA-ELM 模型进行模拟仿真，分析模拟结果，判断策略二对城市韧性影响，模拟情况如表 5.2 所示。

表 5.2 2019 年各市州城市综合韧性对比

城市	2019（原模拟）	2019（策略二）	城市韧性值变化
兰州市	0.58961	0.59209	升
嘉峪关市	0.52352	0.48381	降
金昌市	0.31566	0.31436	降
白银市	0.28759	0.28784	升
天水市	0.28768	0.28822	升
武威市	0.27267	0.27323	升
张掖市	0.27891	0.27809	降
平凉市	0.24313	0.24344	升
酒泉市	0.30402	0.30365	降
庆阳市	0.28557	0.28585	升
定西市	0.23181	0.23309	升
陇南市	0.20934	0.20938	升
临夏回族自治州	0.25338	0.25261	降
甘南藏族自治州	0.23551	0.23562	升

由表 5.2 可以看出，虽然相较于仅靠策略一，各市州城市韧性上升不少，但靠策略二来提高城市韧性也并不适用于全部市州。表中只有嘉峪关市、金昌市、酒泉市、张掖市、临夏回族自治州城市韧性值有轻微下降，其余市州城市韧性值都有上升，可以看出叠加策略，提高城市韧性的效果较为明显，但整体甘肃省各市州韧性等级仍没有得到提升。

### 5.2.3 策略三：策略二的基础上提高基础设施韧性

《规划》中提出要加快市政基础设施完善速度，包含逐步强化城镇道路面积、

供排水管道长度、供燃气等网络布局，提高基础设施规范性，从而形成有序的城市基础设施体系。在策略二的基础上，提高道路网密度、建成区供水管道密度，其他指标数据不变，即改变社会系统、生态系统和基础设施中指标数据。

分别将道路网密度、建成区供水管道密度，按照年增长率 3% 的速度增长，在策略二的基础上，2019 年道路网密度、建成区供水管道密度增长 3% 作为新的 2019 年两项指标值，城市韧性指标中其他指标数据不变，使用训练好的 GA-ELM 模型进行模拟仿真，分析模拟结果，判断策略三对城市韧性影响，模拟情况如表 5.3 所示。

表 5.3 2019 年各市州城市综合韧性对比

城市	2019（原模拟）	2019（策略三）	城市韧性值变化
兰州市	0.58961	0.59044	升
嘉峪关市	0.52352	0.52434	升
金昌市	0.31566	0.31559	降
白银市	0.28759	0.28893	升
天水市	0.28768	0.29002	升
武威市	0.27267	0.27405	升
张掖市	0.27891	0.27882	降
平凉市	0.24313	0.24444	升
酒泉市	0.30402	0.30450	升
庆阳市	0.28557	0.28739	升
定西市	0.23181	0.23405	升
陇南市	0.20934	0.21055	升
临夏回族自治州	0.25338	0.25300	降
甘南藏族自治州	0.23551	0.23626	升

由表 5.3 可以看出，相较于仅靠策略二，仍然是金昌市、张掖市、临夏回族自治州城市韧性值有轻微下降，其余各市州城市韧性值都有上升，各市州城市韧性值有所上升，但靠策略三来提高城市韧性也并没有完全考虑到城市复杂系统。可以看出叠加策略，提高城市韧性的效果更加明显，但整体甘肃省各市州韧性等级仍没有得到提升。

#### 5.2.4 策略四：策略三的基础上提高经济韧性

《规划》中提出全面推动产业技术创新，鼓励企业进一步加大科研经费投入

力度,推动企业技术创新。支持和鼓励企业引进人才,推动产业和人口同步聚集,实现以产促城、依城兴产。在策略三的基础上,提高研究与试验发展经费支出占 GDP 比重、第三产业产值占 GDP 比重,其他指标数据不变,即改变社会系统、生态系统、基础设施系统和经济系统中指标数据。

分别将研究与试验发展经费支出占 GDP 比重、第三产业产值占 GDP 比重,按照年增长率 3% 的速度增长,在策略三的基础上,2019 年研究与试验发展经费支出占 GDP 比重、第三产业产值占 GDP 比重增长 3% 作为新的 2019 年两项指标值,城市韧性指标中其他指标数据不变,使用训练好的 GA-ELM 模型进行模拟仿真,分析模拟结果,判断策略四对城市韧性影响,模拟情况如表 5.4 所示。

表 5.4 2019 年各市州城市综合韧性对比

城市	2019 (原模拟)	2019 (策略四)	城市韧性值变化
兰州市	0.58961	0.59083	升
嘉峪关市	0.52352	0.52521	升
金昌市	0.31566	0.31564	降
白银市	0.28759	0.28932	升
天水市	0.28768	0.28999	升
武威市	0.27267	0.27459	升
张掖市	0.27891	0.27929	升
平凉市	0.24313	0.24519	升
酒泉市	0.30402	0.30466	升
庆阳市	0.28557	0.28770	升
定西市	0.23181	0.23437	升
陇南市	0.20934	0.21107	升
临夏回族自治州	0.25338	0.25511	升
甘南藏族自治州	0.23551	0.23732	升

由表 5.4 可以看出,只有金昌市有轻微下降,其余市州城市韧性值都有上升,经过策略的不断叠加,虽然数据整体上升较小,但是策略的普适性随着系统的不断完善逐渐增强,但靠策略四来提高城市韧性也并没有完全概括城市韧性系统。可以看出叠加策略,提高城市韧性的效果比前三个策略都要明显,但整体甘肃省各市州韧性等级依旧没有得到提升。

### 5.3 小结

建立并验证 GA-ELM 模型，根据十四五规划分别制定四种策略，通过 GA-ELM 模型进行模拟仿真，得到以下结论：

随着策略一到策略四的不断叠加，城市韧性提升效果在逐渐增强，可以看出四个子系统对城市系统的密切联系。在城市复杂系统中，经济系统、社会系统、基础设施系统和生态系统缺一不可，对城市韧性的提升效果逐层体现。

在本章中，先验证了模型的合理性，在通过不同的策略模拟在不同情景下城市韧性的提升效果，明显的体现四个子系统对城市韧性复杂系统的作用。但仅靠几个策略的叠加，仍不适于甘肃省全部城市的韧性提升，虽然甘肃省各市州城市韧性值得到小幅度提升，但根据自然断裂法分类表可以看出，整体上各市州城市韧性等级没有改变，说明城市韧性体系的复杂性，城市韧性复杂系统需要构建完善的指标体系，才能进一步提高甘肃省城市韧性等级，构建新型韧性城市。可见甘肃省城市韧性提升策略不仅要考虑到各个子系统，还要更全面的涉及到子系统的各方面特征。

## 6 结论与建议

### 6.1 基本结论

当城市系统受到自然或人为扰动时,要保障城市系统的基本运作,贯穿城市可持续发展理念,就要求建立高韧性水平城市。论文以甘肃省各市州为研究对象,在结合城市韧性理论、可持续发展理念以及当前的城市韧性评估方式,构建出甘肃省城市韧性指标体系,对甘肃省城市韧性现状进行评估,并且结合耦合协调度模型,分析总结城市韧性系统的内在演变规律,结合神经网络模型进一步优化提升,为后续提升城市韧性策略提供数据支撑。主要结论如下:

(1) 2010-2019 年的城市韧性评价结果来看,甘肃省城市韧性从较低韧性状态上升为中等韧性状态,城市韧性工作获得较大的进展,城市抵抗扰动和风险的能力显著提升。四子系统韧性均得到不同程度的提升,其中经济系统和社会系统对城市韧性提升的占比逐渐增加,成为带动城市韧性发展的主要因素。

(2) 2010-2019 年,从市域角度来看,城市综合韧性以及子系统韧性整体上与甘肃省发展趋势一致。其中城市综合韧性,兰州市和嘉峪关市分别属于高韧性水平和较高韧性水平,带动周边城市韧性发展。经济韧性和社会韧性,嘉峪关市均起带头作用,基础设施韧性和生态韧性,兰州市起主要推动作用。

(3) 2010-2019 年甘肃省城市的各子系统朝着协作共赢方向发展,耦合协调发展类型呈逐年转好趋势。甘肃省各市州四大系统耦合协调发展程度不一,但整体协同效应正在不断增强。

(4) 使用训练好的 GA-ELM 神经网络模型对已得到的测算结果进行模拟,在十四五规划的大背景下,以寻求提升策略,随着策略的不断叠加,对城市韧性提升呈现出逐层递增的效果,甘肃省城市生态韧性整体呈上升趋势,但存在个别城市生态韧性下降,体现出构建全面的城市韧性指标体系的重要性和合理性。

### 6.2 思考与展望

基于对 2010-2019 年甘肃省城市韧性水平分析研究,我们发现:随着时间推移甘肃省各市州韧性的提升较为明显,但人口流失、环境污染、自然灾害频发等

矛盾仍在持续升级,为实现城市健康、稳定和可持续发展,需要不断提升甘肃省城市韧性水平。因此,以城市韧性、可持续发展理论作为依据,通过耦合协调度模型评估了城市韧性复杂系统的耦合协调水平,结合 GA-ELM 神经网络法对城市韧性演变进行模拟分析,结合本文基本结论提出以下三点提升城市韧性的建议和对策。

(1) 以城市韧性发展阶段及特征为依据,面对外界扰动冲击时,能在城市韧性发展的每个阶段充分考虑韧性城市特征,完善并保障城市的自组织、冗余性、适应性、独立性、智慧性等,尤其面对突发公共事件,能在各个阶段后学习更新,不断提升城市韧性水平,根据城市发展现状制定详细韧性提升计划,明确阶段目标。将提升角度多放在冲击扰动前,全面提高面对灾害的反应适应能力,避免灾后大量修复工作,消耗人力财力时间。

(2) 不断提升城市子系统间耦合协调水平,在城市复杂系统中,各子系统相互协调,提升协同性,以确保城市的稳定运作。子系统间耦合协调水平和子系统的韧性水平共同决定了城市总体韧性能力。耦合协调水平及韧性水平的均衡发展,可全面提升城市韧性水平。

(3) 充分认识不同城市发展的内在规律,对照各市州韧性评价结果的不同,针对不同城市制定的策略存在差异,需取长补短,长善救失。例如,一些城市综合韧性值较高,主要集中在核心城市如兰州市、嘉峪关市等,可根据效应辐射性,从协同发展视角出发,结合战略目标,参考、制定相关政策,带动周边城市发展,提高城市韧性水平。

## 参考文献

- [1] 邵亦文,徐江.城市韧性:基于国际文献综述的概念解析[J].国际城市规划,2015,30(02):48-54.
- [2] 郭富赟.甘肃地质灾害风险管理思考[J].甘肃地质,2021,30(01):16-22.
- [3] 甘肃省“8·13”陇东南暴洪灾害损失和应对工作评估总结报告(节选)[J].中国减灾,2021(11):46-47.
- [4] 唐任伍,郭文娟.乡村振兴演进韧性及其内在治理逻辑[J].改革,2018(08):64-72.
- [5] 王世平,赵春燕.城市韧性与城市出口——基于中国地级市面板数据的实证分析[J].山西财经大学学报,2016,38(06):1-14.
- [6] 陈涛,王玉井.安全韧性雄安新区中的卫生应急风险与对策研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(08):18-22.
- [7] 李晓宇,朱京海.韧性城市视角下的新型冠状病毒肺炎疫情解读与响应研究[J].规划师,2020,36(06):65-68.
- [8] Muller M. Adapting to climate change: water management for urban resilience[J]. *Environment and Urbanization*, 2007, 19(1): 99-113.
- [9] Rana I A, Asim M, Aslam A B. Disaster management cycle and its application for flood risk reduction in urban areas of Pakistan[J]. *Urban Climate*, 2021, 38.
- [10] Kontokosta C E, Malik A. The Resilience to Emergencies and Disasters Index: Applying big data to benchmark and validate neighborhood resilience capacity[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 36: 272-285.
- [11] 李彤玥.韧性城市研究新进展[J].国际城市规划,2017,32(05):15-25.
- [12] 戴维 R·戈德沙尔克,许婵.城市减灾:创建韧性城市[J].国际城市规划,2015,30(02):22-29.
- [13] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [14] Desouza K C, Flanery T H. Designing, planning, and managing resilient cities: A conceptual framework[J]. *Cities*, 2013, 35: 89-99.
- [15] 陈丹羽.基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估[D].华中科技大学,2019.

- [16]李亚,翟国方,顾福妹.城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J].城市发展研究,2016,23(06):113-122.
- [17]方东平,李在上,李楠.城市韧性——基于“三度空间下系统的系统”的思考[J].土木工程学报,2017,50(07):1-7.
- [18]詹一虹,龙婷.城市韧性视角下城市文化空间参与城市危机应对的探索[J].理论月刊,2020(07):90-99.
- [19]杨秀平,贾云婷,翁钢民.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.
- [20]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.
- [21]吴楠.政府责任视域中智慧城市的制度韧性[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2019,21(04):74-80+107-108.
- [22]Cohen O, Leykin D, Lahad M. The conjoint community resiliency assessment measure as a baseline for profiling and predicting community resilience for emergencies[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2013, 80(9): 1732-1741.
- [23]Cimellaro G P, Reinhorn A M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [24]Ouyang M, Duenas-Osorio L, Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36-37: 23-31.
- [25]Alhumaid M, Ghumman A R, Haider H. Sustainability Evaluation Framework of Urban Stormwater Drainage Options for Arid Environments Using Hydraulic Modeling and Multicriteria Decision-Making[J]. Water, 2018, 10(5).
- [26]程皓,阳国亮,纪晓君.中国十大城市群城市韧性与环境压力脱钩关系研究[J].统计与决策,2019,35(07):79-83.
- [27]张永欢,薛晔,徐美玲.京津冀城市韧性动态预测及时空演进研究[J].管理现代化,2021,41(05):77-81.
- [28]张鹏,于伟,张延伟.山东省城市韧性的时空分异及其影响因素[J].城市问题,2018(09):27-34.

- [29]陈为公,张娜,张友森.基于 DEMATEL-ISM 的城市灾害韧性影响因素研究[J].灾害学,2021,36(01):1-6+17.
- [30]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(02):72-79.
- [31]许兆丰,田杰芳,张靖.防灾视角下城市韧性评价体系及优化策略[J].中国安全科学学报,2019,29(03):1-7.
- [32]陈长坤,陈以琴,施波.雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J].中国安全科学学报,2018,28(04):1-6.
- [33]Wilson G. Community Resilience and Environmental Transitions[M]. Routledge, 2012.
- [34] Alexander D E. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13(11): 2707-2716.
- [35] Holling C. Resilience and Stability of Ecological Systems[M]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973.
- [36] Gunderson L H. Adaptive Dancing: Interactions Between Social Resilience and Ecological Crises[M] // Navigating Social-Ecological Systems:Building Resilience for Complexity and Change. Cambridge University Press, 2003: 33-52.
- [37] Holling C S, Gunderson L H. Resilience and Adaptive Cycles[M] // Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Island Press, 2001: 25-62.
- [38] A W. Searching for Safety[M]. New Brunswick NJ:Transaction, 1991.
- [39]赵冬月,施波,陈以琴.协同管理对城市韧性增强机制的影响[J].管理评论,2016,28(08):207-214.
- [40] Holling C S. Engineering Resilience versus Ecological Resilience[M] // Engineering Within Ecological Constraints. National Academies Press, 1996.
- [41] Berkes F, Folke C. Linking Social and Ecological Systems for Resilience and Sustainability[M] // Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 13-20.

- [42]Carpenter, Stephen R, Brock William A. Adaptive Capacity and Traps[J]. *Ecology and Society*, 2008, 13(2).
- [43]邴启亮,李鑫,罗彦.韧性城市理论引导下的城市防灾减灾规划探讨[J].*规划师*,2017,33(08):12-17.
- [44]胡啸峰,王卓明.加强“韧性城市建设”降低公共安全风险[J].*宏观经济管理*,2017(02):35-37.
- [45]王祥荣,谢玉静,徐艺扬.气候变化与韧性城市发展对策研究[J].*上海城市规划*,2016(01):26-31.
- [46]周利敏.韧性城市:风险治理及指标建构——兼论国际案例[J].*北京行政学院学报*,2016(02):13-20.
- [47]Walker B,Holling C S, Carpenter,S R. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. *Ecology and Society*, 2004, 9(2).
- [48]Folke C, Carpenter S R, Walker B. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability[J]. *Ecology and Society*, 2010, 15(4).
- [49]Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2006, 16(3): 253-267.
- [50]Liao K-H. A Theory on Urban Resilience to Floods-A Basis for Alternative Planning Practices[J]. *Ecology and Society*, 2012, 17(4).
- [51]Gunderson L H. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*[M]. Island Press, 2001.
- [52] Lam, Nina S. N, Qiang Y, Arenas H. Mapping and assessing coastal resilience in the Caribbean region[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2015, 42(4): 315-322.
- [53]Manyena S B. The concept of resilience revisited[J]. *Disasters*, 2006, 30(4): 433-450.
- [54]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.
- [55]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.

- [56] 徐江, 邵亦文. 韧性城市: 应对城市危机的新思路 [J]. 国际城市规划, 2015, 30(02): 1-3.
- [57] Timmerman P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic [J]. Institute For Environmental Studies: University Of TORONTO 1981.
- [58] Cardona O Va M, Birkmann J. Determinants of risk: Exposure and vulnerability, in managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [59] Adger W N. Social and ecological resilience: are they related? [J]. Progress in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.
- [60] Johnston DPM M D. Community Resilience to Volcanic Hazard Consequences [J]. Natural Hazards, 2001, 24(2): 157-169.
- [61] Bruneau M C S E, Eguchi R T. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake spectra 2003, 19(4): 733-752.
- [62] Wilson G. Multifunctional 'quality' and rural community resilience [J]. Transactions of the Institute of British Geographers, 2010, 35(3): 364-381.
- [63] Ahmed R SM, Van Niekerk A. Discerning Community Resilience in Disadvantaged Communities in the Context of Violence and Injury Prevention [J]. South African Journal of Psychology, 2004, 34(3): 386-408.
- [64] Wced. Our Common Future [M]. World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, 1987.
- [65] 从投入产出表看浙江经济的可持续发展 [EB/OL]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/tzgg/ggkx/200511/t20051128\\_1029103.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/tzgg/ggkx/200511/t20051128_1029103.html?code=&state=123).
- [66] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用 [J]. 经济地理, 2019, 39(04): 18-25.
- [67] 赵星宇. 基于广义回归神经网络的燃煤锅炉 NO<sub>x</sub> 排放预测 [J]. 东北电力技术, 2019, 40(10): 13-16.

- [68]雷磊.基于 GA-ELM 方法的建筑能耗预测研究[D].西安建筑科技大学,2020.
- [69]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.
- [70]徐波.安徽省城市韧性水平测度及提升路径选择[D].安徽财经大学,2018.
- [71]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.
- [72]覃成林,周姣.城市群协调发展:内涵、概念模型与实现路径[J].城市发展研究,2010,17(12):7-12.
- [73]张玉萍,瓦哈甫 哈力克,党建华.吐鲁番旅游—经济—生态环境耦合协调发展分析[J].人文地理,2014,29(04):140-145.
- [74]王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].地理研究,2018,37(06):1100-1114.

## 致谢

时光流逝，转眼之际，研究生生涯即将结束。回顾这三年时光，思绪万千，对母校的不舍之情涌上心头，在这三年时光中，我如嗷嗷待哺的婴儿，汲取母校的知识养分，享受母校对我的无限爱护，在风雨中茁壮成长。在母校之中也有我万分感激的可爱的人。

首先，我要感谢我的导师在学术研究道路上对我的谆谆教诲，对我学习和生活的悉心指导和无限包容，论文从最初的选题、论文大纲、论文写作等的一步步进展都在导师的指导下完成。导师严谨的逻辑体系与不断学习追求更高层次的学术精神不断激励我在学术研究生涯提升自我。

其次非常感谢同门的师兄师姐和师弟师妹，每当学习和生活中遇到困难，你们永远不求回报的伸出你们的援助之手。你们对我的关怀和照顾填补了我无数本该无助的时刻。特别感谢崔丽鸽师姐、于湘和李婷师妹，以及可爱的研一师弟师妹们，每当我遇到困难时，你们总在我生活给与我的支持，对我耐心开导。

最后真诚的感谢默默为我付出的家人，生活从来不是岁月静好，只是你们在替我负重前行，让我能在生活方面没有后顾之忧，有机会不断提升自我。我知道无论我将来发展如何，你们始终会站在我身后给我力量，无条件信任我支持我。

在未来的学习生活中，我将继续承载着你们对我的期望，不断提升自我修养，做一个真正对社会有益的人！