

分类号 _____
U D C _____

密级 _____ 公开
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 甘肃省城市化与生态环境协调性分析

研究生姓名: 钟添添

指导教师姓名、职称: 赵煜 副教授

学科、专业名称: 统计学 数理统计学

研究方向: 生态经济统计

提交日期: 2019年6月10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：_____

导师签名：_____ 签字日期：_____

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：_____

导师签名：_____ 签字日期：_____

Analysis on the Coordination between Urbanization and Ecological Environment in Gansu Province

Candidate: Tiantian Zhong

Supervisor: Yu Zhao

摘 要

改革开放以来,我国经济取得巨大发展,综合国力持续稳定上升,进一步推动了城市化的发展,使得整个城市人口不断增长,城市空间快速扩展,人们的生活水平得以改善。但是城市化进程也会给城市带来诸多弊端,如交通拥挤、住房紧张、资源匮乏和环境污染等问题,这些都是城市可持续发展过程中阻碍物。城市化过程不可避免地影响和改变着城市的生态环境水平,所以有必要对城市化和生态环境间协调关系进行分析,处理好二者之间的协调关系,避免区域内各类问题频出,促进区域城市化可持续发展。

甘肃省位于西北内陆,经济发展处于欠发达状态,同时又是生态环境相对脆弱地区,既需要快速发展经济又必须要保护脆弱的环境。如何协调城市化与生态环境的关系,已经成为西部地区在城市化过程中不能回避且亟需解决的问题。基于以上考虑,论文在深入分析甘肃省的城市化和生态环境研究现状的基础上,结合城市生态系统理论和共生演化理论,构建涵盖城市系统与生态环境系统的城市生态系统评价指标体系,运用熵值法对各项指标赋予相应的权重,加权求和得到两个系统的发展水平。借助 Lotka-Volterra 模型对城市化发展和生态环境二者之间的动态竞争关系进行研究,根据协调关系测算公式得出二者间协调关系;之后根据协调水平测算公式得出二者间协调水平,利用层次聚类分析方法将协调水平分为三类;最后根据城市生态系统协调发展评判准则,得出协调度综合评价,剖析出当前甘肃省城市化发展格局,以期为未来甘肃省城市化协调性发展提供可操作性的对策和建议。

关键字: 甘肃省 城市化 生态环境 Lotka-Volterra 模型 协调

Abstract

Since the reform and opening up, China's economy has achieved tremendous development, and its comprehensive national strength has continued to rise steadily, further promoting the development of urbanization, making the population of the entire city continue to grow, the urban space is expanding rapidly, and people's living standards are improved. However, the urbanization process will also bring many disadvantages to the city, such as traffic congestion, housing shortages, resource scarcity and environmental pollution, which are obstacles in the process of sustainable urban development. The urbanization process inevitably affects and changes the level of the city's ecological environment. Therefore, it is necessary to analyze the coordination relationship between urbanization and the ecological environment, and to handle the coordination relationship between the two to avoid frequent problems in the region. Promote the sustainable development of regional urbanization.

Gansu Province is located in the northwest of China, and its economic development is underdeveloped. At the same time, it is a relatively fragile ecological environment. It needs to develop the economy rapidly and protect the fragile environment. How to coordinate the relationship between urbanization and ecological environment has become an issue that cannot be avoided and urgently needed to be solved

in the process of urbanization in the western region. Based on the above considerations, based on the in-depth analysis of the status quo of urbanization development and ecological environment research in Gansu Province, combined with urban ecosystem theory and symbiotic evolution theory, the paper constructs an urban ecosystem evaluation index system covering urban systems and ecological environment systems. The entropy method assigns corresponding weights to various indicators, and the weighted summation obtains the development level of the two systems. With the Lotka-Volterra model, the dynamic competition relationship between urbanization development and ecological environment is studied. According to the coordination relationship calculation formula, the coordination relationship between the two is obtained. Then, according to the coordination level calculation formula, the coordination level between the two is obtained. The hierarchical level analysis method is used to classify the coordination level into three categories. Finally, according to the evaluation criteria of coordinated development of urban ecosystem, the comprehensive evaluation of coordination degree is obtained, and the current urbanization development pattern of Gansu Province is analyzed, in order to coordinate the urbanization of Gansu Province in the future. Develop countermeasures and recommendations that provide operability.

Keywords:Gansu province; Urbanization; ecological environment;
Lotka-Volterra model; coordination

目 录

1 引 言	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	4
1.2.3 文献述评.....	5
1.3 研究内容及可能的创新点.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 研究路线.....	7
1.3.3 可能的创新点.....	7
2 相关理论和方法	9
2.1 城市生态系统理论.....	9
2.1.1 城市化理论.....	9
2.1.2 城市化与生态环境间关系.....	10
2.2 共生演化理论.....	11
2.3 方法介绍.....	12
2.3.1 统计指数分析.....	12
2.3.2 熵值赋权法.....	12
2.3.3 Lotka-Volterra 模型.....	13
2.3.4 灰色建模估计.....	14
2.3.5 协调度函数的构建.....	16
2.3.6 层次聚类分析.....	18
3 甘肃省城市生态系统现状与特征	19
3.1 甘肃省自然生态状况.....	19

3.2 甘肃省经济发展状况.....	20
3.3 甘肃省城市化发展状况.....	21
3.3.1 城市化发展历程.....	21
3.3.2 城市化发展基本特征.....	22
4 甘肃省城市生态系统运行评价.....	26
4.1 指标体系的构建.....	26
4.1.1 指标的选取及说明.....	28
4.1.2 数据的获得及预处理.....	29
4.2 甘肃省城市化与生态环境综合指数测算.....	30
4.2.1 指标权重的计算.....	30
4.2.2 测算结果.....	31
4.3 甘肃省城市化发展与生态环境动态评价.....	32
5 甘肃省城市化与生态环境关系分析.....	36
5.1 甘肃省城市化与生态环境内在关联性分析.....	36
5.1.1 Lotka-Volterra 模型的建立.....	36
5.1.2 结果分析.....	42
5.2 甘肃省城市化与生态环境协调性分析.....	45
5.2.1 协调关系的测算.....	45
5.2.2 协调水平的测算.....	46
5.2.3 协调性综合评价结果.....	48
6 结论与建议.....	50
6.1 结论.....	50
6.2 建议.....	51
参考文献.....	54
附表.....	59

后 记.....66

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

由于人类在工业革命时期过于追求经济发展,造成了一系列的生态被破坏的问题,使得生态系统为人类提供的生态服务不断减少,导致人与自然的的关系极度不协调。1962年卡逊的《寂静的春天》一出引起了巨大反响,提醒人们可能要为经济增长付出代价,也认识到传统经济学的局限性^[1]。美国经济学家肯尼斯·鲍尔丁在《一门新兴科学—生态经济学》中首次正式提出生态经济学概念,明确阐述了生态经济学的研究对象,并对人口控制、资源利用、环境污染以及国民经济与福利核算等问题作了原创性研究,生态经济学应运而至^[2]。生态经济学是一门研究和解决生态经济问题、探究生态经济系统运行规律的经济科学,旨在实现经济生态化、生态经济化和生态系统与经济系统之间的协调发展^[3]。探讨人类发展的可持续性 & 城市发展与生态环境的协调性,已成为当前的热点问题。

城市化作为社会经济发展过程中必不可少的阶段,产生于工业革命时期,已走过 200 多年历史。城市化作为集开放性和系统性于一体的系统,主要包含经济、社会、人口和空间各方面的影响,城市化是国家的经济社会发展的关键一环,而城市化的可持续发展离不开系统中各个影响因素的协调平衡发展。近年来,伴随着我国城市化的发展,出现了一系列的环境问题和社会问题,不可避免地给城市的生态环境造成压力,影响和改变着城市的生态环境水平,实现经济与环境的协调发展成为当今社会发展的当务之急。

甘肃省地域狭长,地处黄河上游,绝大部分区域处于我国地势二级阶梯上,地貌复杂多样,主要以高原和山地为主,它决定了甘肃省生态环境正在脆弱的阶段。目前,甘肃省经济发展仍处于欠发达状态,迫切需要加快改革开放和现代化建设的步伐,但由于现阶段生态环境相对脆弱,同时面临高难度的开发条件限制,有很大可能性面临生态环境失衡的局面。如果继续采用传统的粗放型发展模式,即以破坏生态环境的基础上发展经济,势必会对整个省份乃至黄河上游造成危

害，所以甘肃省亟需改善现阶段发展模式上的欠缺，使得可持续发展道路科学有序走下去。

为了实现甘肃省城市化可持续发展，迫切需要发展经济和加强生态环境保护 and 建设，坚持经济发展、社会稳定与生态环境相协调，走一条既能保护生态环境、又能有效推进城市化的发展道路。探讨如何应对当前城市化发展现状以及如何对城市化与生态环境间的协调性进行科学度量，这是一个值得研究的选题。

1.1.2 研究意义

城市化发展是国家的经济社会发展的关键环节，而城市化的可持续发展离不开系统中各个影响因素的协调平衡发展。城市系统和生态环境系统共生于生态经济系统中，只有各系统间保持协调发展，才能确保生态经济系统的整体协调性。为了确保城镇化的可持续发展，不仅需要经济的发展，而且需要社会稳定发展和良好的生态环境，只有当城市系统和生态环境系统两个系统之间相互协调，相互促进，才能保证系统的良性循环，走城市化可持续发展道路。

为此，本文立足于城市生态系统理论和共生演化理论，构建涵盖城市系统和生态环境系统的协调发展指标体系，选择合理的统计学方法，对各系统发展水平的协调程度进行研究，有助于了解甘肃省城市化发展进程中各系统间的协调状况，同时认识到系统间存在相互制约的、不协调的情况，以期为政府提供定量分析依据。此外，关于甘肃省城市化与生态环境协调性的研究期望能为区域相关研究提供新的研究思路。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外学者对城市化与生态环境关系的研究比较早，大致可分为三个阶段说明，分别为：起始阶段、成长阶段和多元化阶段。

(1) 起始阶段

1898年英国城市规划学家 Howard 在其著作《田园城市》中，第一次明确解释出城市化与生态环境间的关系，其中人们对城市环境保护的积极态度受到社会

广泛关注^[4]。20 世纪初,伴随着城市化迅速发展,学者们尝试运用新的方法解决城市生态环境出现新问题。英国生物学家 Geddes 在《城市开发》和《进化中的城市》中正式提出“集合城市”这个概念,并将生态学原理应用到城市规划和城市环境卫生领域中^[5]。美国城市生态学者 Park 在《城市——对都市环境研究的提议》中首创关于城市生态学的研究,推动学者对城市化与生态环境关系研究的进一步发展^[6]。

(2) 成长阶段

二战结束后经济得以快速发展,进一步推动城市化的发展,所以学者关于城市化与生态环境关系有更深入的研究。英国经济学家博尔丁提出了两种不同的经济模式,“牧童经济”就是把地球看成取之不尽的资源库进行无限制的索取,同时造成废物大量累积,使环境污染日益严重;“宇宙飞船经济”就是把地球看成一个巨大的宇宙飞船,除了能量要依靠太阳供给外,人类的一切物质需要靠完善的循环来得到满足^[7]。1971 年联合国教科文组织就提出了“城市生态问题”和“关于人类居住地的生态”。1972 年罗马俱乐部所发表的研究报告《增长的极限》中提出了均衡发展的概念,即经济增长与生态环境相对均衡的发展局面。紧接着 1974 年发表的《生命的蓝图》是对整个世界城市化发展态势的探索,有力支撑了城市生态学的分析和探讨。

(3) 多元化阶段。

1987 年,世界环境与发展委员会关于人类未来的研究报告《我们共同的未来》正式提出“可持续发展”这一概念,切实将环境保护与人类发展结合起来,并为生态文明建设的研究和发展提供了参考^[8]。1995 年, Grossman 和 Krueger 研究发现当人均收入达到一定程度后,随着城市经济发展水平的提高,城市生态环境质量呈现倒“U”型的演变规律^[9]。加拿大国家环境与经济圆桌会议的可持续发展检测课题组为解决监测、评价和报告可持续发展能力的问题而建立了 NRTEE 指标体系,并对生态系统的运行状况,人文经济协调发展以及人类和生态系统之间的相互作用进行多方位测度。2001 年 Daly^[10]以博尔丁思想为基础,在《超越增长:可持续发展的经济学》中提出,城市经济的发展不仅受自身影响,而且还受到生态系统的约束,经济的发展对自然资源的不可能是取之不竭的,当达到某个临界值时,经济的发展达到极限,同时生态环境的恶化也达到极限。进

入 21 世纪，世界经济论坛协同美国哥伦比亚大学和耶鲁大学研发出了环境可持续发展指数（ESI），虽然 ESI 体系经过多次修改和更新，仍然存在不足，但对于各个国家的生态文明建设和研究提供了重要的参考和依据^[11]。2011 年，Pulselli^[12]等运用能值价值分析法对全球范围内的能值价值进行分析，研究结果表明生物圈自身的生态服务功能的效率远超过人工系统，因此应当合理的利用和开发生物圈，最大限度的创造生态价值，并实现与经济系统的自由转换。Sueyoshi 和 Wang^[13]等通过 DEA 模型对环境效率进行评估，为达到环境与经济的协调发展。Xiaobo He^[14]等聚焦于城市化与经济关系的正向关系，而非其协调性水平。

1.2.2 国内研究现状

相比较而言，我国对城市化与生态环境关系的研究起步较晚，大致始于 20 世纪 70 年代，但进展速度快，主要集中在理论研究方面和实证研究方面。

（1）理论研究方面

关于理论研究，大多沿用国外的理论，同时也有结合中国自身实际情况提出的相关理论。“城镇化”的概念首次出现在 1979 年吴友仁先生的文章《关于我国社会主义城市化问题》中，文章对社会主义城市化问题进行了细致的论述，并对我国的未来城镇化发展水平进行了预测^[15]。1984 年，生态学家马世俊^[16]结合我国自身发展情况，提出以人类与环境为主导的社会—经济—自然复合生态系统思想。1988 年，王如松^[17]提出城市生态系统的自然、社会、经济结构，运用生态系统中的优化原理、控制论方法和泛目标规划方法具体研究城市生态系统。1992 年以后，在世界环境与发展大会的推动下，不断涌现出优秀的城市化与生态环境关系文章。黄金川^[18]等运用几何代数对环境库兹涅茨曲线和城市化对数曲线进行逻辑回归，推导出城镇化与生态环境交互耦合的数理函数和几何曲线。陈波翀^[19]采用一般均衡方法，从供给和需求角度，得出自然环境是中国城市化发展的硬约束。刘耀彬^[20]首次推导出在资源环境约束下城市化水平的一般模型，同年王家庭^[21]运用数理经济分析方法，在综合索罗生产函数和拉姆齐—卡斯—库普斯曼效用函数，将生态环境因素引入到城市化问题分析中，构建在生态环境这个约束条件下的最佳城镇化规模模型。荣宏庆^[22]认为在新型城镇化进程中，转变经济发展方式，推进生态城市化建设，加强生态环境制度体系构建是城市生态文明建

设的最优路径选择。

(2) 实证研究方面

实证研究作为城市化领域的重要研究问题,城市化发展协调性取得国内学者的普遍重视,现已累计了较多的相关研究。从研究方法来看,可分为两种进行阐述。一是运用传统的统计分析方法对城市化发展协调性进行研究。张妍^[23]等运用因子分析的方法,对吉林省9个城市经济与环境的发展层次和协调程度进行了定量分析与耦合机制的评价。刘小林^[24]构建区域协调发展的评价指标体系,运用主成分分析法,评估各子系统发展状况,并提出区域这三个系统的协调系数、协调发展系数和协调发展趋势指数的计算模型等。李静^[25]等运用主成分分析和模糊数学法对大连市城市化与城市生态环境发展协调。史亚琪^[26]等以连云港为例,把发展潜力与发展水平两变量相结合得到的综合发展指数纳入经济与环境协调评价模型中,并运用GM(1,1)灰色模型预测系统,对未来的协调发展状态进行预测。

二是运用目前较前沿的统计分析方法对城市化发展协调性进行研究。孙平军^[27]等从人口、经济、空间三个维度出发,运用均方差赋权法以及协调度评价模型对东北地区34个地级市的城市化协调发展状况进行综合测度评价。熊柴^[28]等通过固定效应模型、随机效应模型和分位数回归模型,证实了财政分权对于人口城镇化滞后于空间城镇化的不协调问题具有显著影响,并相应的提出了改革财政体制、调整政绩考核机制等一系列促进人口城镇化与空间城镇化协调发展的合理化建议。冯兴华^[29]利用数理统计方法和GIS空间分析方法对江西省城市人地协调关系进行深入分析。程晓红^[30]构建环境-经济-社会系统评价体系,运用ArcGIS对齐齐哈尔的生态文明指数和内部协调化进行可视化分析。

1.2.3 文献述评

综观国内外学者对城市化发展协调性做出了一定的研究,从理论到实证、从定性到定量、从数学模型到系统角度、从现状研究到未来趋势预测,成果丰富,为以后的研究提供了一定的理论基础。由城市化协调发展的相关研究可知,现有研究也存在一定的偏向性。从立论基础来看,国内外大多基于经济学和城市生态学,而缺乏从生态经济学理念出发,将经济理性和生态理性二者有机结合起来;从时空分析来看,国内外主要是从时间和空间单一的维度对城市化现状进行分

析，而从时间和空间两个维度同时进行分析的文献相对匮乏。此外，在实证分析中对方法的选择和运用略显不足。

1.3 研究内容及可能的创新点

1.3.1 研究内容

基于所研究的问题和不足，论文立足于生态经济学理论，以甘肃省 14 市(州)为研究对象，构建城市生态系统评价指标体系，拟采用相对合理的统计方法对甘肃省城市化与生态环境协调性进行研究，期望能为甘肃省未来城市化发展提供新的研究思路。论文一共分为五个部分，各部分研究内容设计如下：

第一部分：主要包括研究背景与意义、相关国内外文献综述、论文研究思路以及相关理论和方法。

第二部分：对甘肃省城市生态系统现状与特征。

第三部分：甘肃省城市生态系统运行评价，以甘肃省 14 个市（州）为研究对象，构建城市生态系统协调发展评价指标体系，分析出甘肃省 14 个市（州）在不同阶段下城市化和生态环境的基本特征。

第四部分：对甘肃省城市化与生态环境关系分析，从以下两个方面进行分析

（1）确定 Lotka-Volterra 模型，利用灰色理论对数据进行离散化处理，将城市化和生态环境的综合指数代入路径中确定出经验模型。

（2）甘肃省城市化发展与生态环境协调性分析，借助 Lotka-Volterra 模型对城市系统和生态环境系统二者之间的动态竞争关系进行研究，得出协调度综合评价，剖析出当前甘肃省城市化发展格局。

第五部分：结论及建议，归纳总结文章结论，并提出相关的政策建议。

1.3.2 研究路线

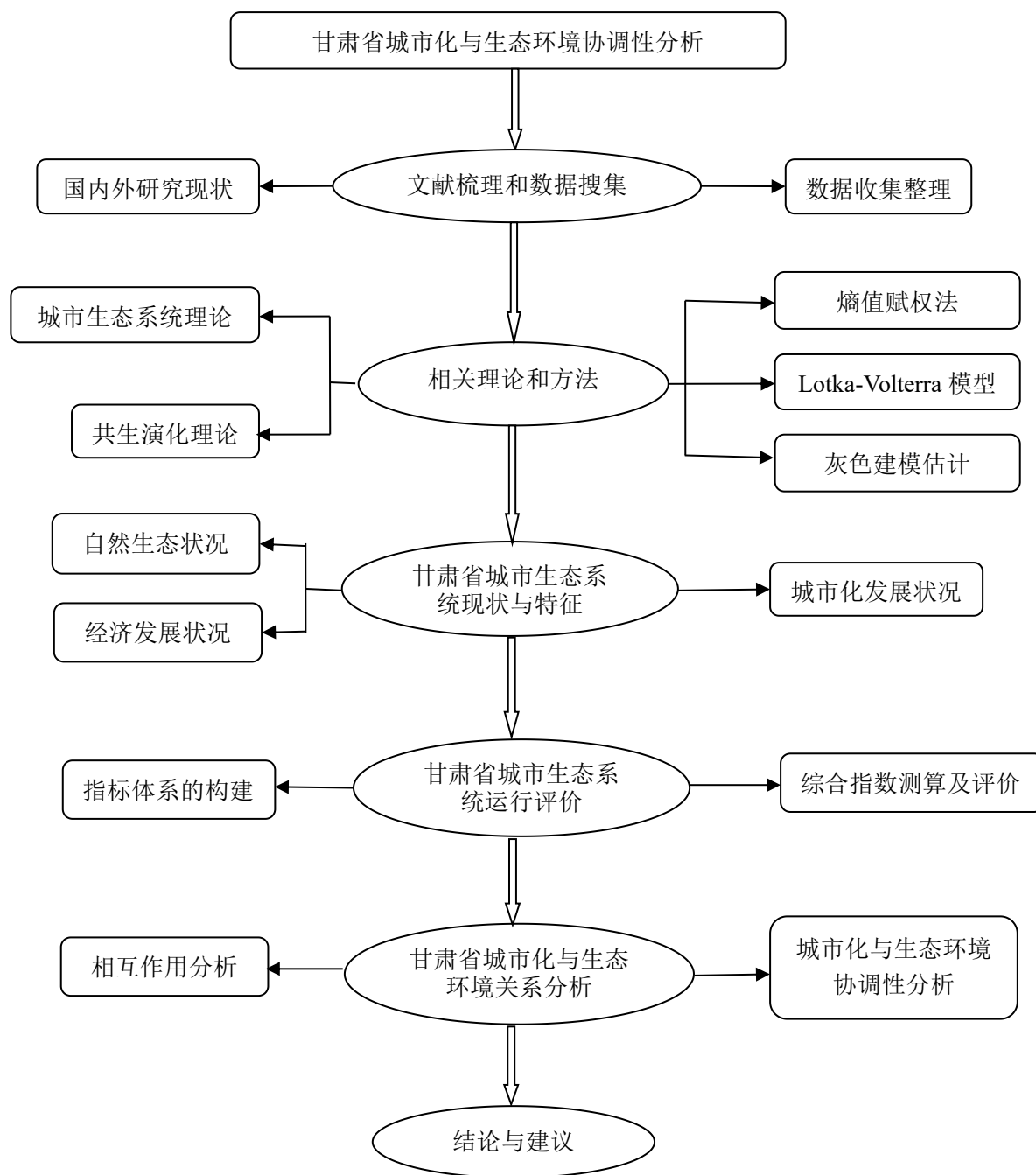


图1.1 研究路线图

1.3.3 可能的创新点

(1) 对城市化与生态环境协调性进行研究，大多文献以传统经济学为立论基础，研究经济与生态环境间的协调关系或者是研究人口、经济与生态环境三者

间的协调关系,而以生态经济学为立论基础对城市化与生态环境间协调性进行研究相对匮乏。论文以生态经济学为立论基础,构建城市生态系统协调发展评价指标体系,对城市化发展与生态环境协调性进行分析。

(2) 本文运用生态学中的 Lotka-Volterra 模型对城市化与生态环境的协调性进行研究,从方法论角度,进行一定的尝试。Lotka-Volterra 模型常用来描述生物种群之间的竞争关系,之后很多学者将其广泛应用于其它领域^[31]。如产业间耦合关系^{[31]-[34]}、能源产业间竞争、期货指数竞争、股东种群中大小股东^{[35]-[38]}、经济增长与能源消耗关系的研究中。论文将城市系统与生态环境系统的二者关系与生物学的种群之间的关系(共生、寄生、竞争)进行类比分析,借助种群竞合理论,研究子系统间的关系,期望对后续的研究提供新的研究思路。

2 相关理论和方法

2.1 城市生态系统理论

城市生态系统是人类对自然环境的不断适应、加工、改造而建设起来的人工生态系统，它是由自然系统、经济系统和社会系统这三个系统构成的。自然系统包括居民得以生存的基本物质条件；经济系统包括生产、分配、流通和消费的各个环节；社会系统包括人与人之间、个人与集体之间以及集体与集体之间的各种关系^[39]。城市的整体是一种复合生态系统，人类活动与其物质环境之间是一个不可分割的有机体^{[40]-[43]}。而当前城市存在的环境问题主要有环境污染、生态失衡、人口拥挤和资源匮乏等几大类，这些问题都与人类活动密不可分。论文依据该理论构建指标体系，指标体系中包含城市系统和生态环境系统。城市系统分为经济发展、人口结构、社会保障和基础设施四个准则层，这里面包含经济系统和社会系统等。而生态环境系统分为环境治理、生态容量和环境压力三个准则层。

2.1.1 城市化理论

城市化也称为“城镇化”，非农产业不断在城市聚集、农村人口不断向城镇集中的过程，是人类社会发展的客观结果，是国家实现现代化的重要标志。城市化的本质是农业人口向非农产业转移和城镇文明向农村渗透，是地理、经济和社会的整体性变迁。

2014年3月中共中央、国务院正式公布《国家新型城镇化规划(2014-2020年)》，文件提出，新型城镇化是指坚持以人为本、全面协调可持续发展理念，以全面改善民生水平、提升城镇化内涵和质量为目标，促进城镇化与新型工业化、信息化和农业现代化协同互动，经济发展、社会和谐、生态优美、生活幸福、区域统筹和城乡一体的城镇化发展模式^{[44]-[45]}。换句话说，新型城镇化建设由注重数量转向注重质量发展，使得城镇向城乡一体化、功能完善合理发展，之后以城镇综合承载力为支撑，实现“以人为本、四化同步、优化布局、生态文明、文化传承的”这样的中国特色新型城镇化。之后魏后凯^[46]等人认为，中国特色新型城镇化的内涵包括大中小城市和小城镇协调发展、高效集约节约利用资源、城镇化

与人口资源环境相协调、城镇特色和优势得到充分发挥等方面的内容。

2.1.2 城市化与生态环境间关系

(1) 城市化与生态环境的对立统一性

根据城市生态系统理论，城市化侧重于获取城市的经济效益，以及由经济价值派生出的社会效益；而生态环境侧重于获取城市的生态效益，以及由生态价值而派生的社会效益。所以城市化与生态环境是相互交织的，是不可分割的。

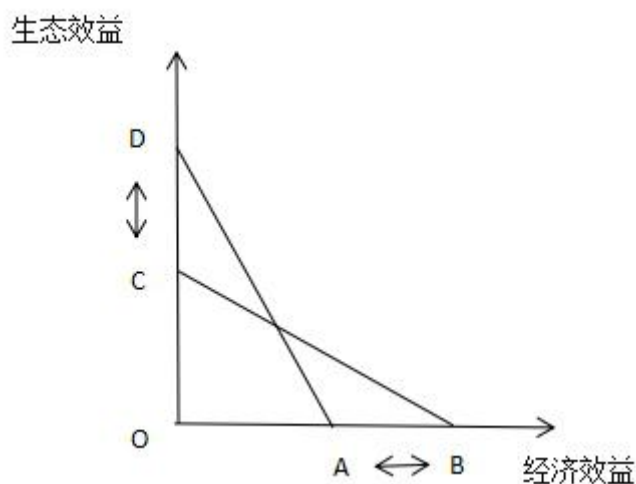


图2.1 经济效益与生态效益的对立关系图

城市化与生态环境存在一定的对立性，在我国具体实际运行过程中有两种情况出现，一种是只要经济效益，导致生态恶化，集中表现为资源短缺、环境污染、土地退化等环境问题；另一种是只要生态效益，造成经济发展低下。从经济学角度，如图 2.1 所示，将城市生态系统视为独立系统来看，由于城市资源是获取经济效益和生态效益的基础，在资源一定的前提下，能够产生的生态效益和经济效益是固定的。横坐标代表经济效益，纵坐标代表生态效益。 OA 和 OC 表示在生态平衡情况下的经济效益和生态效益。为了得到更多的经济效益，则从 A 点向 B 点移动，从而导致城市的生态效益的降低，实现生态效益从 D 点向 C 点的移动；相反，如果降低的经济效益，即 B 点向 A 点移动，增加生态利用，城市的生态效益将由 C 点提高为 D 点。

城市化与生态环境存在一定的统一性，整个复合系统是相互关联的有机整体，城市系统和生态环境系统是相互交叉、相互渗透的。

(2) 城市化与生态环境相互作用关系

表 2.1 城市化发展与生态环境相互作用

作用方向	正作用	负作用
城市化→生态环境	1、保护环境资金增多 2、对生态资源需求增多	1、环境污染 2、生物多样性减少 3、土地资源短缺
生态环境→城市化	1、提供可持续发展的环境 2、提供更多的生态资源	1、有限生态资源约束 2、国家大力环境政策的束缚

由表 2.1 知，城市化和生态环境相互作用有正作用，也有负作用，仅重视某一方面的作用是不合理的。要协调两者之间的作用关系，须明白如何使正作用扩大化，同时降低负作用造成的影响。

2.2 共生演化理论

共生演化的概念是由 Ehrlich 和 Raven 提出的，他们以蝴蝶食之间的相互关系为例，提出说明之前学者对单向关系过分重视，从而忽略了物种相互之间的演化过程^[47]。前苏联 Faminstsim 等学者对共生演化的更深入研究，他对物种之间相互影响及变化做出的分析，为该理论奠定了坚实的基础；德国 Paul Bukna 提出内共生是物种之间内在互补性机制的作用，推进共生演化理论在生物进化领域的进程^[48]。Caullery 和 Lewils 提出的种间共生理论认为各种物种之间的演化均是在环境中进行的，且具有一定的发展模式，而共生则是物种之间相互作用的结果。同时他们认为生物种群有种间竞争、捕食、寄生、偏利共生、互利共生等不同的关系，这使得共生演化理论具有了社会历史效用。而共生协调度^[48]就是一种定量测度共生演化水平的指标，它是在种间竞争模型的基础上，是对两事物间的共生关系及其共生发展水平进行判断。两种群间的共生关系有种间竞争、捕食、寄生、偏利共生、互利共生等不同的关系，将所有的种群间共生关系归纳总结为协调关系，所谓的协调关系是指两个事物在发展过程占用同种资源，相互之间存在正向和负向作用，将它分为相互竞争、偏害共生、偏利共生和相互促进这四类。互利共生是一种协同发展的模式，两者良性互动，最终将导致变量间的协调发展；偏利共生和偏害共生都是一种单方面抑制的发展模式，但存在抑制程度不一致的状

况，偏利共生是短期内变量间存在一定程度的互补性，但是从长期来看，总体是不可持续的，而偏害共生是个别变量抑制作用太强，向对自身有害的方向转变，从长期和短期来看，都是不可持续发展；相互竞争则是一种恶性循环的发展模式，双方变量的增长均对另一方的发展造成压力，所以导致变量间的不协调发展。为了区分不同的发展水平，所以将协调水平划分为三个水平：低水平、中等水平和高水平。共生协调度具体包含内容如图 2.1 所示：

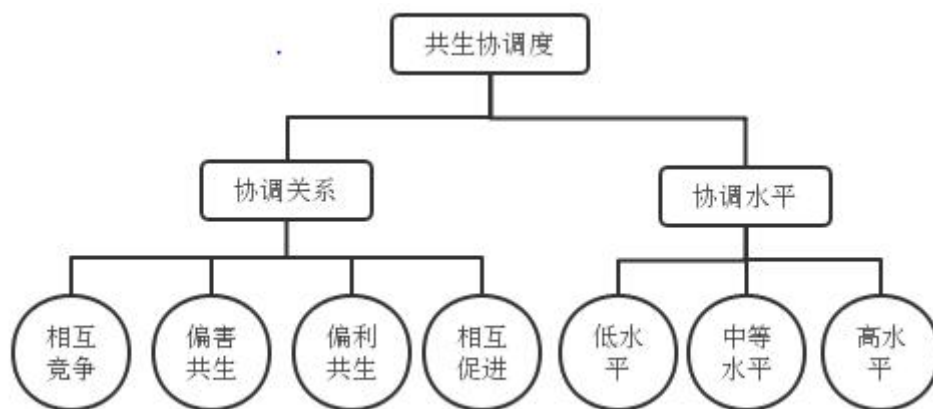


图2.2 共生协调度的内涵

2.3 方法介绍

2.3.1 统计指数分析

统计指数，简称指数，其最早产生于对物价变化水平进行反映的物价指数。现今统计指数在经济领域研究较为广泛，主要是对社会经济现象的数量关系进行研究，从时间和空间角度对社会经济现象的数量变动关系进行分析。按照不同的研究目的和要求，可以将统计指数分为：个体指数和总指数、数量指标指数和质量指标指数、动态指数和静态指数、定基指数和环比指数^[66]。随着经济社会的发展，统计指数已经渗透到社会经济研究等领域，这是由于统计指数具有独特的功能，能够发挥重要的作用。

2.3.2 熵值赋权法

目前主要确定指标属性权重的方法可分为：主观赋权法和客观赋权法^[49]。主观赋权法是根据决策者或专家主观上对各指标属性的重要性大小来确定各权重

系数，而客观赋权法是依据客观收集到的实际数据确定指标权重系数^[50]。论文采用客观赋权法中的熵值法，因为熵值法不仅具有确定权重的客观性，而且还可以有效的克服多指标变量间信息重叠的问题。

熵^{[51]-[52]}的概念最初是在物理学当中的热力学中提出的，它由 n 个待评方案、 m 个评价指标所构成的指标数据矩阵，如下式

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

如果数据之间的差异较大，则信息熵提供的信息量较多，表明该指标的信息对综合评价的影响较大，其对应的权重也较大；反之亦然，数据之间的数值差异较小，则其信息量较少，说明该指标对综合评价的影响较小，所对应的权重比较小。

熵值法的特点有以下几点：

(1) 熵值赋权法比较凸显局部差异性，由实际数据可以得到最优权重，反映指标信息熵值的效用价值，避免了人为的影响因素，所以给出的权重更具有客观性；

(2) 赋权过程具有全程透明性和重复性；

(3) 采用归一化方法对数据进行无量纲化处理，具有单调性、缩放无关性和稳健性较好^[53]。

2.3.3 Lotka-Volterra 模型

Lotka 于 1925 年提出在生物体内的各种化学元素发生反应会影响到种群系统的动力学行为，而 Volterra 于 1926 年提出了一个关于捕食者与被捕食者的简单模型来解释 Adriatic 海某些鱼群变化规律，他们各自建立了捕食—被食系统模型和竞争系统模型。1971 年，Odum 把前述模型推广到互惠系统，生态学中将这三种模型统称为 Lotka-Volterra 模型，用来描述种群间的竞争关系^{[54]-[55]}。其推导过程如下：

假定在同一环境下的单种群增长符合 Logistic 方程：

$$\frac{dX}{dt} = rX \left(1 - \frac{X}{K} \right) \quad (2-2)$$

其中 t 为时间, X 为种群大小, r 为种群的内禀增长率, K 为种群的最大值, 即环境容纳量。当两个种群在相同的环境下, 必然存在着共存竞争关系, 满足以下方程:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = r_1 X_1 \left(1 - \frac{X_1}{K_1} \right) + r_1 \theta_{12} \frac{X_1 X_2}{K_1} \\ \frac{dX_2}{dt} = r_2 X_2 \left(1 - \frac{X_2}{K_2} \right) + r_2 \theta_{21} \frac{X_2 X_1}{K_2} \end{cases} \quad (2-3)$$

其中 t 为时间, X_i 为 i 种群的种群大小, r_i 为 i 种群的内禀增长率, K_i 为 i 种群的最大值, θ_{ij} 为 j 种群对 i 种群的竞争系数, $i, j = 1, 2, i \neq j$ 。

Lotka-Volterra 模型一般用来产业间耦合关系、能源产业间竞争、期货指数竞争、经济增长与能源消耗关系和系统间耦合关系。现阶段运用 Lotka-Volterra 模型处理现实问题, 一般有两种方法, 一是从理论角度研究 Lotka-Volterra 模型的持久性、渐进性、稳定性、解的存在性、全局吸引性等, 已推导或模拟 Lotka-Volterra 模型的平衡点, 基于此分析实际问题中种群最佳关系, 为后期解决控制问题提供依据; 另一种是从实证角度利用样本数据构建经验模型, 以量化种群间的内在竞合关系, 以测度研究对象内部的现实运行关系, 进而为解决控制类问题提供依据。

2.3.4 灰色建模估计

灰色系统理论^[56]是由我国控制论专家邓聚龙教授在 1982 年提出的, 它是系统思想的一种深化和发展。传统系统理论研究的是信息比较充分的系统, 而灰色系统理论研究一部分信息清楚, 部分信息不清楚的系统。如果某一系统的全部信息已知为白色系统, 全部信息未知为黑箱系统, 部分信息已知, 部分信息未知, 那么这一系统就是灰色系统^[55]。一般来讲, 社会系统、经济系统、生态系统都是灰色系统。灰色建模估计是通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度, 即进行关联分析, 并对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律, 生成有较强规律性的数据序列, 利用这种规律建立相应的微分方程模型, 从而了解事物发展趋势

的状况。灰色系统理论中最核心的模型为 $GM(1,1)$ 和 $GM(1,N)$ ，下面对 $GM(1,N)$ 进行介绍。

$GM(1,N)$ 模型主要用于 N 个时间序列的动态预测，具体过程是：

设存在 N 个非负原始序列

$$X_i^{(0)} = \{x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), \dots, x_i^{(0)}(n), i = 1, 2, \dots, N\} \quad (2-4)$$

之后对原始时间序列数据作累加生成序列

$$X_i^{(1)} = \{x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(n)\} \quad (2-5)$$

其中 $x_i^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x_i^{(0)}(m), i = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, n$ 。

将序列 $X_i^{(1)}$ 的时刻 $k = 1, 2, \dots, n$ 看作连续的变量 t ，而将序列 $X_i^{(1)}$ 转而看成时间 t 的函数 $X_i^{(1)} = X_i^{(1)}(t)$ 。如果序列 $X_2^{(1)}, \dots, X_N^{(1)}$ 对 $X_1^{(1)}$ 的变化率产生影响，则可建立白化式微分方程

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt} + aX_1^{(1)} = b_1X_2^{(1)} + b_2X_3^{(1)} + \dots + b_{N-1}X_N^{(1)} \quad (2-6)$$

公式 (2-6) 称为 $GM(1,N)$ 模型，这是一阶 N 个变量的微分方程模型。

记公式 (2-6) 中参变量为 $\hat{a} = (a, b_1, b_2, \dots, b_{N-1})^T$ ，设 $Y_N = [x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), \dots, x_1^{(0)}(n)]^T$ ，将公式 (2-6) 按差分法离散得

$$Y_N = B\hat{a} \quad (2-7)$$

根据最小二乘原理，令残差 $e = Y_N - B\hat{a}$ 估计 \hat{a} 。则要求残差 e 的平方和

$$\|e\|^2 = e^T e = \left\| Y_N - B\hat{a} \right\|^2 \quad (2-8)$$

达到最小，所以 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ 。

其中，利用两点滑动平均的思想，其中最终可得矩阵 B 的形式

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{x_{1(1)} + x_{1(2)}}{2}, \dots, x_{i(2)}, \dots, x_{N(2)} \\ -\frac{x_{1(2)} + x_{1(3)}}{2}, \dots, x_{i(3)}, \dots, x_{N(3)} \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ -\frac{x_{1(n-1)} + x_{1(n)}}{2}, \dots, x_{i(n)}, \dots, x_{N(n)} \end{bmatrix}$$

求出 \hat{a} 之后，微分方程 (2-7) 便可确定。

论文为何采用灰色建模估计参数，是因为数理统计中参数估计方法往往需要大量的数据样本，且服从某个典型分布，而灰色建模估计方法弥补了采用数理统计中的方法的缺憾，它对样本量的多少和样本有无规律都同样适用，同时它把离散数据视为连续变量在其变化过程中所取的离散值，从而可利用微分方程式处理数据；而不直接使用原始数据而是由它产生累加生成数，对生成数列使用微分方程模型。这样，可以抵消大部分随机误差，显示出规律性。

2.3.5 协调度函数的构建

(1) 协调关系函数

对于整个城市生态系统来说，如果想要实现均衡协调发展，即使得系统内实现互利共生，如果一方发展压迫和阻碍了另一方发展，造成另一方面衰退，势必造成发展的失衡与无序，其于这种思路，可以设计协调关系函数^[48]，以判断系统运行是否会走向良性互动，协调发展的方向。为了定量分析整个系统发展的协调关系，了解变量之间关系，需构造函数

$$C = f(\theta_{ij}, \theta_{ji}) = \frac{\theta_{ij} + \theta_{ji}}{\sqrt{\theta_{ij}^2 + \theta_{ji}^2}} \quad (2-9)$$

来表示变量之间的协调关系。其中 θ_{ij} 表示 i 对 j 的竞争阻碍作用， θ_{ji} 表示 j 对 i 的竞争阻碍作用。

由所构造函数的性质可知，

第一，用 $\theta_{ij} + \theta_{ji}$ 表示两者的作用系数之和，若 θ_{ij}, θ_{ji} 二者都大于 0，说明二者处于相互促进的关系；若 θ_{ij}, θ_{ji} 二者中一个大于 0，另一个小于 0，说明二者处

于单方面抑制的关系；若 θ_{ij}, θ_{ji} 二者都小于 0，说明二者处于相互竞争的关系。

第二， C 的值域范围为 $[-\sqrt{2}, \sqrt{2}]$ ，而且不同 C 的有不一样的结果。

当 $C \in [-\sqrt{2}, -1]$ 时，表示出一种协同发展的模式，两者良性互动，最终将导致两变量的协调发展。

当 $C \in [-1, 1]$ 时，有两种情况存在：第一种情况：若 $\theta_{ij} + \theta_{ji} > 0$ ， $C \in [0, 1]$ ，则两变量是短期内存在一定程度的互补性，但是从长期来看，总体是不可持续的；第二种情况：若 $\theta_{ij} + \theta_{ji} \leq 0$ ， $C \in [-1, 0]$ ，则其中一个变量抑制作用太强，向对自身有害的方向转变。

当 $C \in [1, \sqrt{2}]$ 时，说明两者处于不良协调关系，它们相互胁迫导致发展落后。

(2) 协调水平函数

对于整个城市生态系统来说，只计算出协调关系是不够的，因为两个子系统可能都处于正的作用中，也就是说两者发展协调的，但发展水平较低，这种情况下，虽然整个系统是互利共生的，但是发展水平是低下的。为了定量分析整个系统发展的协调水平^[48]，构造函数

$$L = f(X, Y) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2} \quad (2-10)$$

来衡量在特定的时间下城市生态系统的发展水平。在假定 X 和 Y 均大于零的情况下，如果 L 值越大，说明城市化与生态环境复合系统的发展水平越高。

(3) 评判准则

在上文对共生协调关系函数 C 和共生协调水平函数 L 定义的基础上，在评判标准起立原则的指导下，结合现实情况得出评定标准见表 2.2。

表 2.2 城市生态系统协调发展评判标准

序号	竞争系数	共生协调关系	共生关系分类	共生协调水平	共生协调度评判
1	$\theta_{12} < 0, \theta_{21} < 0$	$C \in [-\sqrt{2}, -1]$	相互促进	$[0, I_1]$	低水平，协调发展
				$[I_1, I_2]$	中等水平，协调发展
				$[I_2, 1]$	高水平，协调发展
2	θ_{12}, θ_{21} 一正一负	$C \in [-1, 1]$	不协调	$[0, I_1]$	低水平，不协调
				$[I_1, I_2]$	中等水平，不协调
				$[I_2, 1]$	高水平，不协调

续表 2.2 城市生态系统协调发展评判标准

序号	竞争系数	共生协调关系	共生关系分类	共生协调水平	共生协调度评判
3	$\theta_{12} > 0, \theta_{21} > 0$	$C \in [1, \sqrt{2}]$	相互竞争	$[0, I_1]$	低水平, 退化
				$[I_1, I_2]$	中等水平, 退化
				$[I_2, 1]$	高水平, 退化

注: I_1, I_2 为聚类得到的

2.3.6 层次聚类分析

层次聚类分析法隶属多元统计方法中的一种, 是通过某种相似性的度量来对一组特定的样本或变量进行层层分类方法。它的基本思想是: 首先将所有的样本看成一类, 然后对所有样本按照某种相似性度量方法测算其之间的相似程度, 并把其中相似程度最高的样本现聚为一类; 然后, 采用同样的方法对剩余的样本和小类的样本进行相似性度量, 并将当前相似程度最高的样本或者小类再聚为一类; 如此进行下去, 直到将所有样本聚成一类为止^[66]。其中类与类的距离的计算方法有: 最短距离法, 最长距离法, 中间距离法, 类平均法等。采用最小距离的层次聚类算法流程:

- (1) 将每个对象看作一类, 计算两两之间的最小距离;
- (2) 将距离最小的两个类合并成一个新类;
- (3) 重新计算新类与所有类之间的距离;
- (4) 重复 (2)、(3), 直到所有类最后合并成一类。

因为层次聚类分析法可以很直观的反映出分类结果, 同时结果简单明了, 所以论文采用层次聚类分析法对共生协调水平进行分类。

3 甘肃省城市生态系统现状与特征

3.1 甘肃省自然生态状况

甘肃省处于青藏、黄土、内蒙古三大高原交汇地带，地形呈南北扁平、东西狭长的特征，地势自西南向东北倾斜。甘肃省土地面积约为 45.44 万平方公里，大约占全国的 4.7%，境内地形复杂，其中戈壁和沙漠的面积约占全省面积的 15%，山地和高原的面积约占全省面积的 70%，偏少的平川使得全省土地产出能力较低。而且甘肃省风沙线全长 1600 多公里，沙漠总面积 30530 平方公里，占全省总土地面积的 6.7%。虽然全省土地资源比较宽裕，但大部分城镇及人口集中分布于河谷地区，用地空间狭窄，自然环境容量有限，所以土地利用率较差。

甘肃省内富含丰富的煤炭、石油、天然气等自然资源，还有太阳能、风能等新能源，是我国太阳能资源最为丰富的三个区域之一^[57]。同时省内森林面积少，天然林资源呈数量少、质量差、分布不均等特点，所以森林生态系统生态功能较弱。根据全国第七次森林资源清查资料知，甘肃省的森林面积为 468.78 万公顷，森林覆盖率为 13.5%，排在全国倒数第五位，森林蓄积量为 19363 万立方米，人均占有森林蓄积仅为 7.6 立方米，低于全国平均水平。甘肃省拥有的草地面积占全省总面积的 31%，占全国草地总面积都不到 1%，但全省草原退化、荒漠化严重，荒漠化草地已占全省草地总面积的 38.5%，草原生产力严重不足。甘肃省的大部分地区处于干旱半干旱地区，常年干旱少雨，降水极不稳定，且水资源时空分布不均，资源性缺水严重。

甘肃省处于黄河上游，是我国重要的生态安全屏障区域。甘肃省地处中国三大自然地理区域的过渡区，生态环境脆弱，水土流失、沙漠化等问题已经严重影响到了甘肃省的区域可持续发展^[58]。甘肃省的生态环境脆弱区域分布比较广泛，水土流失区域主要集中在黄土高原，甘南高原北部，陇南山地^[59]。主要包括庆阳市的庆城县、镇原县、环县、华池县、平凉市的庄浪县、静宁县、白银市的会宁县，定西市的通渭县，天水市的张家川县。该地区降雨偏少，植被稀疏，水土流失现象极为严重。沙漠化区域主要集中在瓜州县中部地区和肃北的东南部地区，民勤县这些黄土高原北部地区。土壤盐渍化区域主要集中在疏勒河中下游、黑河中游以及石羊河下游区域^[60]。

3.2 甘肃省经济发展状况

甘肃省是丝绸之路经济带上的黄金地段，也是西北地区连接中、东部地区的桥梁和纽带。如果横向比较甘肃经济的发展情况，其在全国始终处于落后位次，是我国内陆经济发展落后的欠发达省份，与东中部经济发展存在显著差距。从1949年甘肃经济确有较快发展，经济实力明显上升，尤其是改革开放以来，经济发展保持稳定增长且增幅较高^[61]。特别是2000年以来，GDP年均增长13.2%促使甘肃经济进入了快速发展的新阶段。根据《甘肃发展年鉴2017》，2016年甘肃省生产总值为7200.37亿元，人均生产总值27643元。在甘肃省生产总值中，第一产业产值为983.39亿元，占全省生产总值的比重为13.65%；第二产业产值为2515.56亿元，占全省生产总值的34.93%；第三产业产值3701.42亿元，占全省生产总值的51.40%。经济社会取得长足发展，经济整体水平增长较快。为更加准确的描述甘肃省城镇化发展特征，论文从与全国水平的比较和甘肃省内部的横向比较两方面对甘肃省经济发展水平进行分析。

(1) 与全国水平的比较

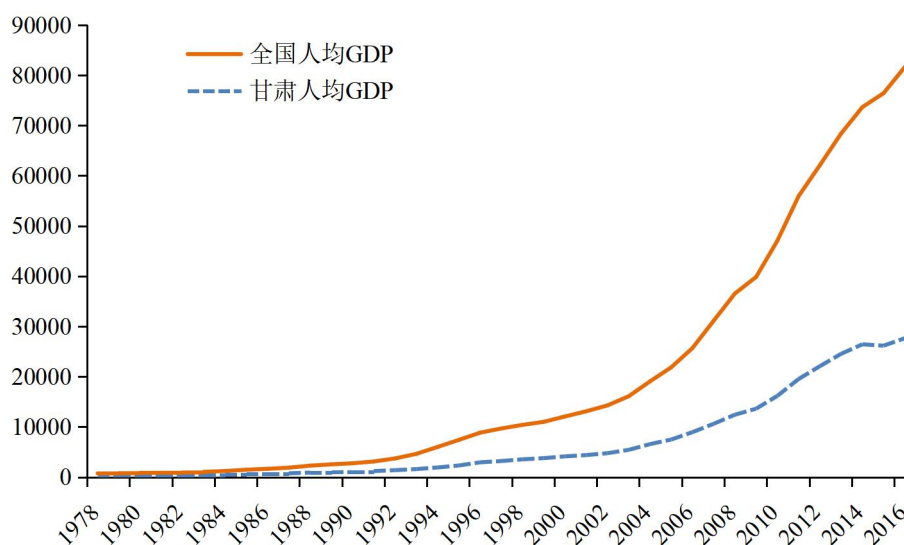


图3.1 甘肃省与全国人均GDP变化趋势图（单位：元）

图3.1为甘肃省与全国人均GDP变化趋势图，利用1978-2016年的人均GDP数据反映甘肃省经济发展的纵向变化过程。整体来看，甘肃省和全国的经济水平都有不断提高的趋势。从1992年开始，全国的经济水平开始加快，而甘肃省的经济水平则从2002年开始加速。虽然甘肃省的人均GDP每年都在

提高,但仍较全国水平存在差距,且从1995年开始差距不断的变大。2000年全国人均GDP为7942元,甘肃的人均GDP仅为4129元,低于全国3813元;2005年,甘肃省和全国的人均GDP分别为7477元和14368元,低于全国6891元;2010年,甘肃省和全国的人均GDP分别为16172元和30876元,低于全国14704元;至2016年,全国人均GDP为53980元,甘肃省的人均GDP仅为27643元,低于全国26337元,表明甘肃的人均GDP仅为全国人均GDP一半,进一步说明甘肃省为我国的欠发达地区。

(3) 甘肃省内部的横向比较

2016年底,甘肃省的人均GDP已经达到27643元,由图3.2可知,2016年嘉峪关市的人均GDP最高,达到62641元,其次是兰州市,其人均GDP为61207元,排在第三位的是酒泉市,人均GDP达到51721元,接随其后的是金昌市,人均GDP达到44202元,其余10个市(州)的人均GDP相比这三个市仍存在较大差距,其中,定西市和临夏州城镇化率分别仅为11892元和11395元,排名靠后且较嘉峪关市、兰州市、酒泉市和金昌市差距明显。

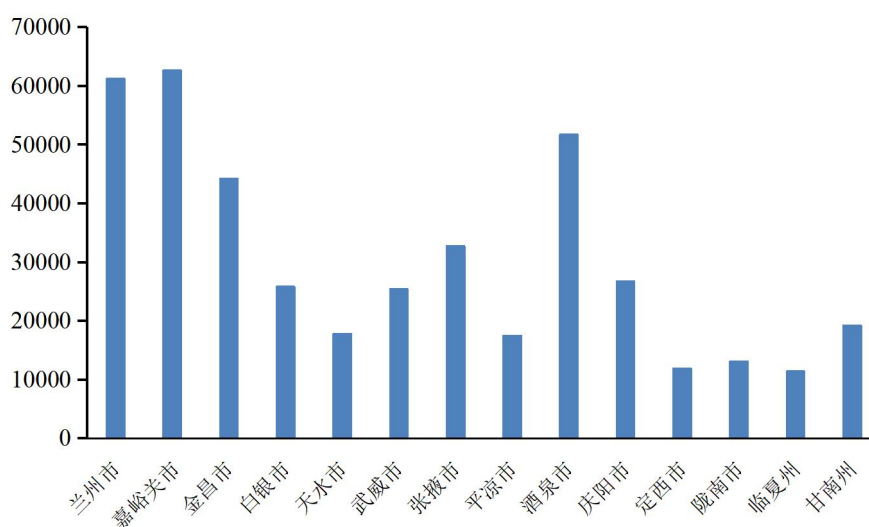


图3.2 2016年甘肃省14个市(州)人均GDP条形图(单位:元)

3.3 甘肃省城市化发展状况

3.3.1 城市化发展历程

甘肃省由于受到自然条件限制,导致其历史上社会经济发展缓慢,其城镇发

展规模普遍较小，直到 1941 年才有了省内第一座城镇兰州市，也就是现在的省会城市。1949 年以后，甘肃省的经济才逐渐发展起来，其城镇发展也随之正式开始。

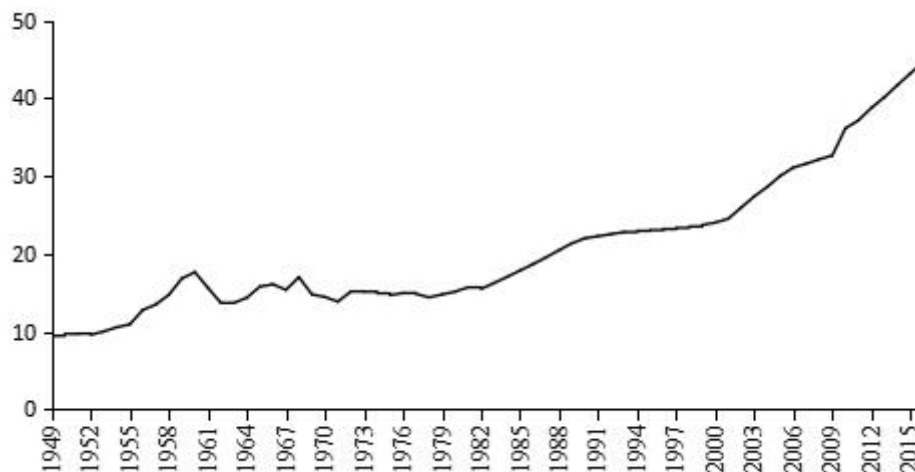


图3.3 甘肃省城镇人口比例图（单位：%）

由图 3.3 可知，新中国建立初期，由于国家重点工程建设使甘肃省的经济得到短期内的迅速增长，同时城镇化水平也得到了大幅度的提高；但在上世纪 70 年代，由于受到全国经济发展水平及发展战略与政策的影响，城镇化水平出现明显的阶段性和较强的波动性特征。直到改革开放以后，随着经济快速发展，甘肃城镇化才进入稳步、持续发展的阶段。从 20 世纪中期到 20 世纪的末期，由于东部沿海地区是国家政策重点指定的经济发展区，从 1978 年开始的改革开放也主要从东部沿海城镇开始。而甘肃省缺少经济贸易，城镇化发展非常缓慢。甘肃省的城镇化率从 1978 年的 14.41% 上升到 2000 年的 24.01%，增长速度相对缓慢。伴随着 21 世纪的到来，国家对西部大开发愈发重视，对西部城镇的资金投入逐渐增多，从 2000 年开始，甘肃省无论是人均 GDP 还是城镇化率，均呈现大幅度的增长，截止 2016 年，甘肃省城镇人口达到 1166.39 万人，城镇人口比重为 44.69%，相比于 2000 年的 24.01%，提高了 20.28%。

3.3.2 城市化发展基本特征

甘肃省城市化水平与经济增长取得了瞩目的成绩，但仍然落后于全国平均水平，为更加准确的描述甘肃省城镇化发展特征，报告从时间维度和空间维度两方

面对甘肃省城市化特征进行分析。

(1) 从时间维度看

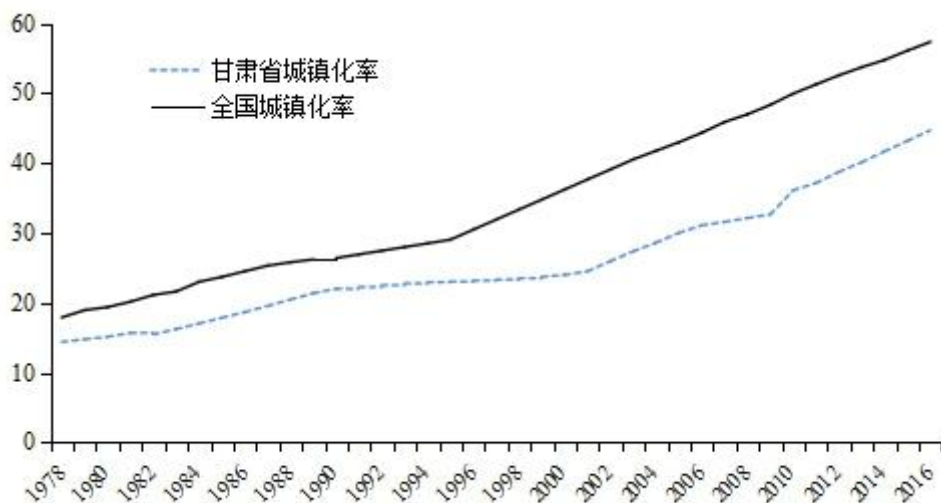


图3.4 甘肃省与全国城镇化率变化趋势图 (单位: %)

利用 1978 年到 2016 年的数据研究甘肃省城镇化率的纵向变化过程, 图 3.4 为甘肃省与全国 1978-2016 年城镇化率变化趋势比较图。整体来看, 甘肃省和全国的城镇化水平都有不断提高的趋势。从 1995 年开始, 全国的城镇化水平开始加快, 而甘肃省的城镇化水平则从 2002 年开始加速。虽然甘肃省的城镇化率每年都在提高, 但仍较全国水平存在差距, 且从 1995 年开始差距不断的变大。2000 年全国城镇化率平均水平为 36.1%, 甘肃仅有 24%, 低于全国 12.1%; 2005 年, 甘肃省和全国平均水平的城镇化率分别为 30.02%, 42.99%, 低于全国水平 12.97 个百分点; 随着经济的不断发展, 2011 年, 甘肃省和全国平均水平的城镇化率分别为 37.15%, 51.27%, 此时, 低于全国平均水平 14.12% 个百分点, 城镇化率的差距在不断增大; 至 2014 年, 全国 54.77%, 甘肃城镇化率增长到 41.68%, 但与全国的差距却进一步拉大到 13.09%。2016 年其城镇化水平达到 44.69%, 57.35%, 此时两者差 12.66 个百分点, 说明从 2011 年发展至今, 甘肃省城镇化发展得到了提高。

(2) 从空间维度看

第一, 与全国水平的比较, 甘肃省城镇化率低, 2016 年甘肃城镇化率仅为 44.69%, 较全国城镇化平均水平低 12.66%; 与上海、北京、天津、广东等地区相比, 差距更为明显。比全国城镇化率最高的上海市低 43.21%, 在全国 31 个省、

市、自治区排名中居 29 位，城镇化率处于落后水平；在西部 12 省区居西部省区第九位，排名靠后，具体数值结果见表 3.1。

表 3.1 2016 年全国 31 个省、市、自治区的城镇化率（单位：%）

地区	城镇化率	排名	地区	城镇化率	排名
上海	87.9	1	吉林	55.97	17
北京	86.5	2	陕西	55.34	18
天津	82.93	3	河北	53.32	19
广东	69.2	4	江西	53.1	20
江苏	67.72	5	湖南	52.75	21
辽宁	67.37	6	安徽	51.99	22
浙江	67	7	青海	51.63	23
福建	63.6	8	四川	49.21	24
重庆	62.6	9	河南	48.5	25
内蒙古	61.19	10	新疆	48.35	26
黑龙江	59.2	11	广西	48.08	27
山东	59.02	12	云南	45.03	28
湖北	58.1	13	甘肃	44.69	29
海南	56.78	14	贵州	44.15	30
宁夏	56.29	15	西藏	29.56	31
山西	56.21	16	全国	57.35	

第二，甘肃省内部的横向比较

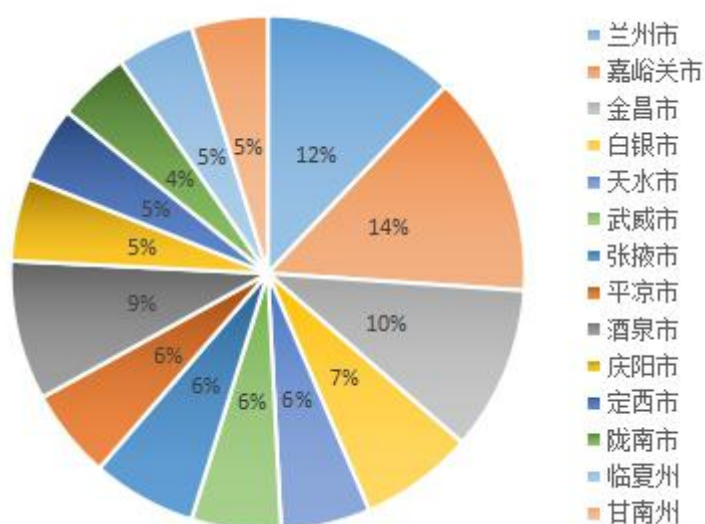


图 3.5 2016 年甘肃省 14 个市（州）城镇化率占比图

由图 3.5 可知，2016 年底，甘肃省城镇人口 1166.39 万人，占总人口比重的

44.69%。以 2016 年甘肃省 14 个市（州）的城镇化率为指标，研究其在空间分布上的变化，可以看出，2016 年嘉峪关市的城镇化率最高，达到 93.44%，其次是兰州市，其城镇化率为 81.01%，排在第三位的是金昌市，达到 69.09%，其余 11 个市（州）的城镇化率相比这三个市仍存在较大差距，其中，定西市和甘南州城镇化率分别仅为 31.9%，32%，排名靠后且较嘉峪关市、兰州市和金昌市差距明显。

4 甘肃省城市生态系统运行评价

城市作为人类聚居地，是经济和社会活动最集中的场所。城市生态系统是以人为中心的环境系统，是一个不断发展的多层次系统，由城市居民以及城市居民生产、生活有关的各种因素组成。城市生态系统的可持续发展是经济环境、社会环境、自然环境的协调发展。因此，论文基于城市生态系统理论对甘肃省城市化发展与生态环境协调性进行分析。

4.1 指标体系的构建

城市化与生态环境的协调发展是我国的可持续发展的基础，也是生态文明建设的要求，因此分析经济增长与生态环境协调性对区域可持续发展具有重要的现实意义。参考已有对城市生态系统指标体系构建的经验^{[62]-[65]}，结合城市生态系统理论和甘肃省的发展现状，遵循科学性、代表性、可操作性、可比性等原则，城市生态系统指标体系包含四个层次，分别是目标层、系统层、准则层和指标层，由目标层到指标层，层层递进，最终呈现详细、具体的指标体系。

目标层：以城市生态系统作为目标层，用以衡量城市整体发展水平。在对城市整体发展状况测评时，需要选择不同类型指标，使其可以在时间尺度上反映城市生态系统的发展速度和变化态势，在空间尺度上反映整体布局 and 结构优化特征，在数量上反映总体发展规模和现代化水平，在质量尺度上反映城市的综合素质、能力、潜力。

系统层：由反映目标层的指标构成，为了实现城市各领域协调发展目标，系统层被划分为两个系统，分别为城市系统和生态环境系统。

准则层：准则层将系统层中的城市系统和生态环境系统细分至详细内容，从而指导指标层的构建。城市系统从城市的不同功能因子入手，将其分为经济发展、人口结构、社会保障和基础设施四个准则层。而将生态环境系统看为自然环境和人工环境两部分组成，人工环境包括人类对自然环境的正向作用和负向作用。所以将生态环境系统划分为生态容量、环境治理和生态压力三个准则层。

指标层：指标层是用来反映各准则层的具体内容，它由单项指标体现。为了使数据不受各城市所在地、人口数量等方面存在的悬殊差异的影响，选取的指标

均是比重指标、结构指标和人均指标。

综上所述,论文在城市生态系统评价指标体系的构建中,目标层城市生态系统作由2个系统层指标构成,在系统层指标之下共有7个准则层指标,7个准则层指标则由37个指标层指标构成,具体见表4.1。

表 4.1 甘肃省城市生态系统评价指标体系

目标层	系统层	准则层	指标层	编号	指标类型
城市生态系统	城市系统	经济发展	人均 GDP	U1	元(+)
			人均第三产业产值	U2	元(+)
			人均固定资产投资额	U3	万元(+)
			人均社会消费品零售总额	U4	元(+)
			人均城乡居民储蓄存款	U5	元(+)
			人均一般公共预算收入	U6	元(+)
			城镇居民人均可支配收入	U7	元(+)
			农村居民人均可支配收入	U8	元(+)
		人口结构	15-64 岁人口占比	U9	%(+)
			总抚养比	U10	%(+)
			城镇化率	U11	%(+)
			城市人口密度	U12	人/平方公里(+)
	社会保障	人均社会服务民政经费	U13	元(+)	
		在岗职工平均工资	U14	元(+)	
		万人拥有文化事业机构数	U15	个(+)	
		万人拥有 R&D 人员数	U16	人(+)	
		万人拥有卫生机构床位数	U17	张(+)	
		万人拥有卫生机构人员数	U18	人(+)	
		万人拥有养老服务机构数	U19	个(+)	
		万人拥有社区服务中心单位数	U20	个(+)	
		基础设施	万人拥有公园面积	U21	公顷(+)
			万人拥有公共厕所数	U22	座(+)
	万人拥有城市园林绿地面积		U23	公顷(+)	
	建成区绿化覆盖率		U24	%(+)	
	人均实有道路面积		U25	公顷(+)	
	生态环境系统	生态容量	生物丰度指数	U26	(+)
			植被覆盖指数	U27	(+)
			水网密度指数	U28	(+)
			环境质量指数	U29	(+)
			人均全年供水总量	U30	立方米/人(+)
	环境治理	空气质量好于二级的天数比例	U31	%(+)	
		人均工业固体废物综合利用量	U32	吨(+)	

续表 4.1 甘肃省城市生态系统评价指标体系

目标层	系统层	准则层	指标层	编号	指标类型
			万人拥有废水治理设施数	U33	套(+)
		环境压力	人均废水排放量	U34	吨(-)
			人均工业固体废物产生量	U35	吨(-)
			人均工业废气排放量	U36	万立方米(-)
			人均日生活用水量	U37	升(-)

注：表中(+)表示该指标为正向指标，(-)表示该指标为逆向指标

4.1.1 指标的选取及说明

(1) 城市系统

城市系统共分为经济发展、人口结构、社会保障以及基础设施 4 个准则层，为各类行动者提供了一个宏观背景和行动空间，通过人口规模激增、生产方式转变、生活方式转变以及城市建设用地扩张等路径作用于行动者的环境意识和环境行为。经济发展层面包括的指标有人均 GDP、人均第三产业产值、人均固定资产投资额、人均社会消费品零售总额、人均城乡居民储蓄存款、人均一般公共预算收入、城镇居民人均可支配收入及以及农村居民人均可支配收入。人口结构层面包括的指标有 15-64 岁人口占比、总抚养比、城镇化率及城镇人口密度。社会保障层面包括的指标有人均社会服务民政经费、在岗职工平均工资、万人拥有文化事业机构数、万人拥有 R&D 人员数、万人拥有卫生机构床位数、万人拥有卫生机构人员数、万人拥有养老服务机构数以及万人拥有社区服务中心单位数。基础设施层面包括的指标有万人拥有公园面积、万人拥有公共厕所数、万人拥有城镇园林绿地面积、建成区绿化覆盖率以及人均实有道路面积。

(2) 生态环境系统

生态环境系统共分为生态容量、环境治理和环境压力 3 个准则层，生态容量是目前城市的生态承载力，环境治理体现城市对环境污染的治理能力水平，而环境压力反映的是人类对环境的破坏程度，是唯一的含有逆向指标的角度，指标越小，对系统的发展越有利。生态容量层面包括的指标有生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、环境质量指数和人均全年供水总量；环境治理层面包括的指标有空气质量好于二级的天数比例、人均工业固体废物综合利用量和万人拥有废水治理设施数；环境压力方面包括的指标有人均废水排放量、人均工业固体废

物产生量、人均工业废气排放量及人均日生活用水量。

其中，

$$\begin{aligned} \text{环境质量指数} = & 0.4 \times \left(100 - ASO_2 \times \frac{SO_2 \text{排放量}}{\text{区域面积}} \right) + 0.4 \times \left(100 - ACOD \times \frac{COD \text{排放量}}{\text{区域年均降雨量}} \right) \\ & + 0.2 \times \left(100 - Asol \times \frac{\text{固体废物排放量}}{\text{区域面积}} \right) \end{aligned}$$

式中： ASO_2 表示 SO_2 排放量的归一化系数， $ACOD$ 表示化学需氧量的归一化系数， $Asol$ 表示固体废物排放量的归一化系数。

$$\text{生物丰度指数} = \frac{Abio \times (0.5 \times \text{森林面积} + 0.3 \times \text{水域面积} + 0.15 \times \text{草地面积} + 0.05 \times \text{其他面积})}{\text{区域面积}}$$

式中： $Abio$ 表示生物丰度指数的归一化系数。

$$\text{植被覆盖指数} = \frac{Aveg \times (0.5 \times \text{林地面积} + 0.3 \times \text{草地面积} + 0.2 \times \text{农田面积})}{\text{区域面积}}$$

式中： $Aveg$ 表示植被覆盖指数的归一化系数。

$$\text{水网密度指数} = Ariv \times \frac{\text{河流长度}}{\text{区域面积}} + Alak \times \frac{\text{湖库(近海)面积}}{\text{区域面积}} + Ares \times \frac{\text{水资源量}}{\text{区域面积}}$$

式中： $Ariv$ 表示河流长度的归一化系数， $Alak$ 表示湖库面积的归一化系数， $Ares$ 表示水资源量的归一化系数。

4.1.2 数据的获得及预处理

本文研究对象为甘肃省 14 个市(州)，2009-2016 年份数据均来自各年的《甘肃省统计年鉴》、《甘肃省发展年鉴》以及《甘肃省环境质量概要》，个别年份缺失数据，利用数据插补法补全数据，文中出现数据均保留小数点后三位。

由于指标体系中的指标性质不统一，有正向指标和逆向指标，因此在对数据处理的过程中指标数据的方向不同往往会造成结果的误差，影响经济解释，所以有必要对原始数据进行标准化处理。常用的方法有 min-max 法、z-score 法和指数变换法，因为指数变换法更加适宜处理该数据，所以采用其对原始数据进行处理，将指标统一为同一个方向同时，以消除各个指标的计量单位影响。方法如下：

(1) 正向指标，指标越大，对系统的发展越有利。则有：

$$\bar{x}_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq x_{sj} \\ x_{ij} / x_{sj} & x_{ij} < x_{sj} \end{cases} \quad (4-1)$$

(2) 逆向指标, 指标越小, 对系统的发展越有利。则有:

$$\bar{x}_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq x_{sj} \\ x_{sj} / x_{ij} & x_{ij} > x_{sj} \end{cases} \quad (4-2)$$

其中, \bar{x}_{ij} 为用指数化方法标准化后的值, x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个观测值, x_{sj} 为第 j 个指标的目标值。

4.2 甘肃省城市化与生态环境综合指数测算

4.2.1 指标权重的计算

指标权重的计算步骤为

(1) 将甘肃省 14 个市(州)的城市化系统与生态环境系统各个指标原始数据按照公式 (4-1) 正向处理数据或者公式 (4-2) 逆向处理数据;

(2) 计算第 i 个市份第 j 项指标值的比重:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4-3)$$

(3) 计算指标的信息熵;

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (y_{ij} \times \ln y_{ij}) \quad (4-4)$$

(4) 计算信息熵冗余度;

$$d_j = 1 - e_j \quad (4-5)$$

(5) 计算指标权重。

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \quad (4-6)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个市份第 j 项标准化后的评价指标的数值, $k = 1 / \ln m$, 其中 m 为市份数, n 为指标数。

根据上面指标权重计算步骤，得到评价指标体系中 37 个指标的权重，2016 年指标权重结果见表 4.2，其余年份权重见附表 1。

表 4.2 2016 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.025	0.031	0.023	0.032	0.044	0.039	0.003	0.010	0	0.001	0.012	0.032	0.005
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	U26
权重	0.001	0.013	0.095	0.005	0.006	0.055	0.114	0.136	0.099	0.132	0.012	0.074	0.033
指标	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37		
权重	0.032	0.045	0.001	0.129	0.002	0.314	0.048	0.038	0.237	0.104	0.017		

4.2.2 测算结果

本文采用熵值法对指标体系中各个指标的求取权重，加权求和得到甘肃省 14 市（州）2009-2016 年城市化和生态环境的发展水平，如表 4.3 和表 4.4 所示。

表 4.3 甘肃省 14 市（州）城市化发展水平

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
兰州市	0.396	0.396	0.414	0.359	0.456	0.537	0.458	0.488
嘉峪关市	0.932	0.925	0.924	0.833	0.849	0.726	0.870	0.858
金昌市	0.374	0.387	0.384	0.346	0.449	0.371	0.405	0.410
白银市	0.180	0.191	0.204	0.201	0.246	0.203	0.219	0.216
天水市	0.153	0.162	0.168	0.140	0.168	0.145	0.158	0.156
武威市	0.170	0.183	0.188	0.154	0.183	0.149	0.183	0.191
张掖市	0.199	0.219	0.234	0.198	0.236	0.216	0.233	0.306
平凉市	0.154	0.164	0.166	0.150	0.170	0.116	0.153	0.151
酒泉市	0.315	0.314	0.322	0.399	0.409	0.250	0.413	0.409
庆阳市	0.150	0.169	0.187	0.218	0.228	0.185	0.177	0.175
定西市	0.086	0.098	0.103	0.100	0.117	0.220	0.113	0.128
陇南市	0.101	0.108	0.108	0.085	0.083	0.172	0.087	0.087
临夏州	0.096	0.103	0.105	0.098	0.116	0.110	0.110	0.104
甘南州	0.132	0.138	0.156	0.137	0.154	0.142	0.139	0.134

从表 4.3 可知，2009-2016 年甘肃省 14 市（州）在城市化发展水平的整体发展基本保持稳定。嘉峪关市城镇化发展水平居首位，最高水平达到 0.932，其次是兰州市、金昌市和酒泉市这三个城市，嘉峪关市最低水平为 0.726 比其余三个

市最高水平 0.537 整整高出了 0.189，所以嘉峪关市带动了整个甘肃省的经济发展，同时该市有下降的趋势。另外 10 个城市的城镇化发展水平基本保持在 0.1-0.3 区间内。而临夏、定西和陇南这三个城市的城市化发展水平排在最低，最低水平为 0.083，这也与现阶段其发展状况相符合。

表 4.4 甘肃省 14 市（州）生态环境水平

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
兰州市	0.196	0.182	0.235	0.206	0.197	0.202	0.200	0.201
嘉峪关市	0.519	0.425	0.399	0.399	0.408	0.419	0.441	0.429
金昌市	0.413	0.436	0.316	0.281	0.305	0.291	0.253	0.246
白银市	0.139	0.148	0.173	0.170	0.169	0.171	0.173	0.170
天水市	0.191	0.199	0.296	0.310	0.317	0.265	0.291	0.308
武威市	0.151	0.162	0.171	0.148	0.141	0.147	0.164	0.203
张掖市	0.121	0.138	0.235	0.207	0.204	0.233	0.217	0.277
平凉市	0.168	0.177	0.160	0.155	0.152	0.165	0.168	0.209
酒泉市	0.119	0.117	0.192	0.186	0.138	0.130	0.151	0.152
庆阳市	0.419	0.443	0.405	0.470	0.424	0.455	0.447	0.396
定西市	0.324	0.344	0.450	0.416	0.398	0.254	0.379	0.323
陇南市	0.227	0.266	0.320	0.246	0.229	0.220	0.211	0.218
临夏州	0.211	0.220	0.361	0.391	0.343	0.406	0.414	0.425
甘南州	0.200	0.216	0.261	0.232	0.235	0.257	0.267	0.318

由表 4.4 可知，2009-2016 年甘肃省 14 市（州）在生态环境的整体发展趋于稳定。其中有金昌市有明显的下降趋势，由 2009 年的 0.413 下降为 2016 年的 0.246，而临夏州有明显的上升趋势，由 2009 年的 0.211 上升为 2016 年的 0.425。同时嘉峪关市和庆阳市的生态环境水平稳居前列，其中最高水平达到 0.519，最低水平也达到 0.396。定西市是一个特例，发展水平有增有减，在 2014 年发展水平竟然低到 0.254。而武威市和酒泉市排在尾部，其中最高水平为 0.203，最低水平为 0.117，二者差别比较小，仅仅有 0.086。所以这两个城市在环境治理方面亟需提高，这说明在今后的发展过程中，要更加注重环境的保护。

4.3 甘肃省城市化与生态环境动态评价

由上可知，清楚了解甘肃省 14 个市（州）城市化和生态环境各自的水平，但仍不清楚二者在空间上的分布特征，所以利用 ArcGIS 得到甘肃城市化和生态

环境空间分布情况如图 4.1 和图 4.2 所示。

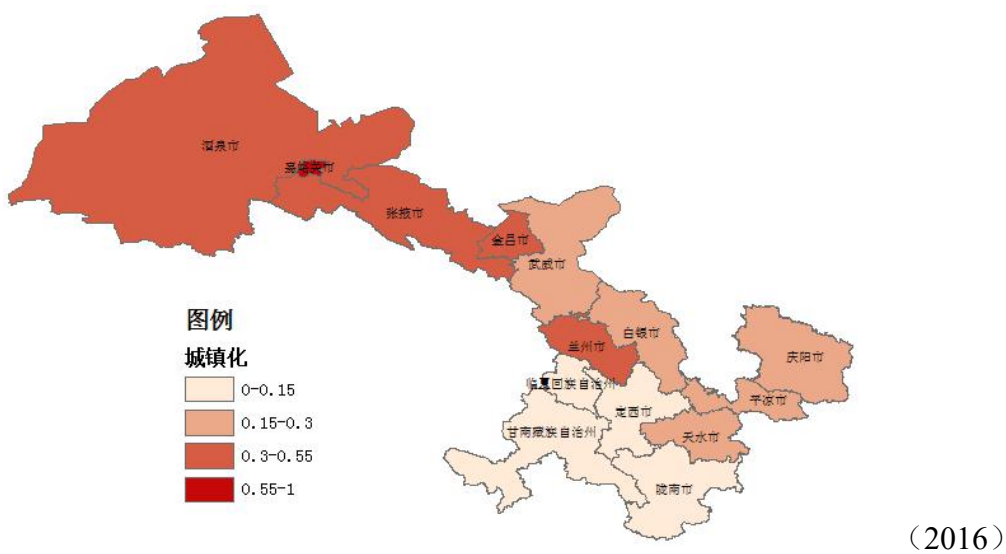
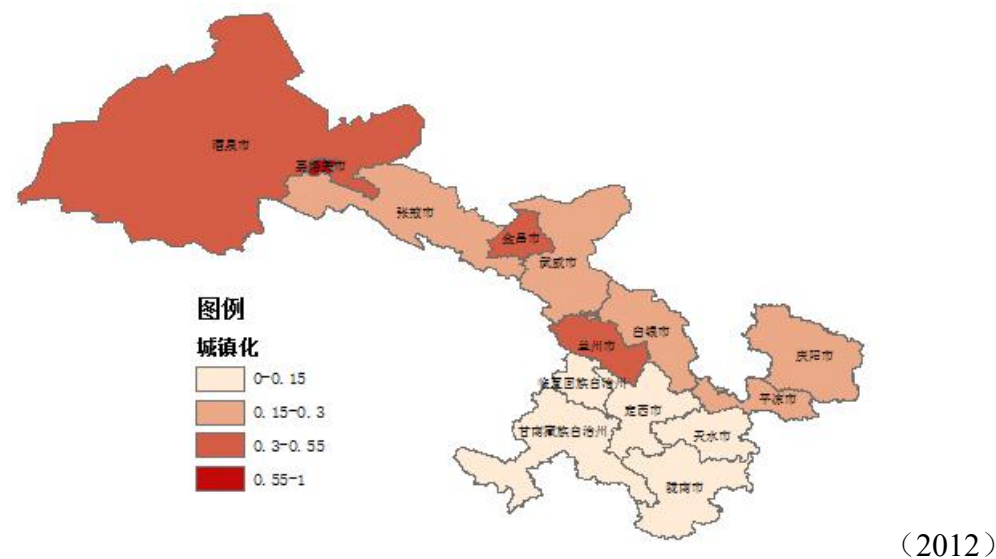
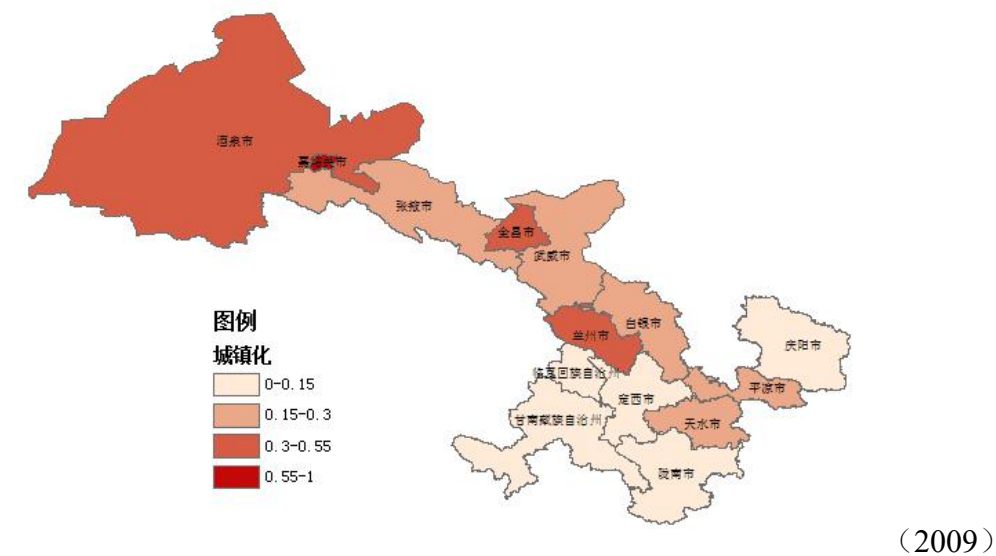


图4.1 2009年、2012年和2016年甘肃城市化发展分布状况

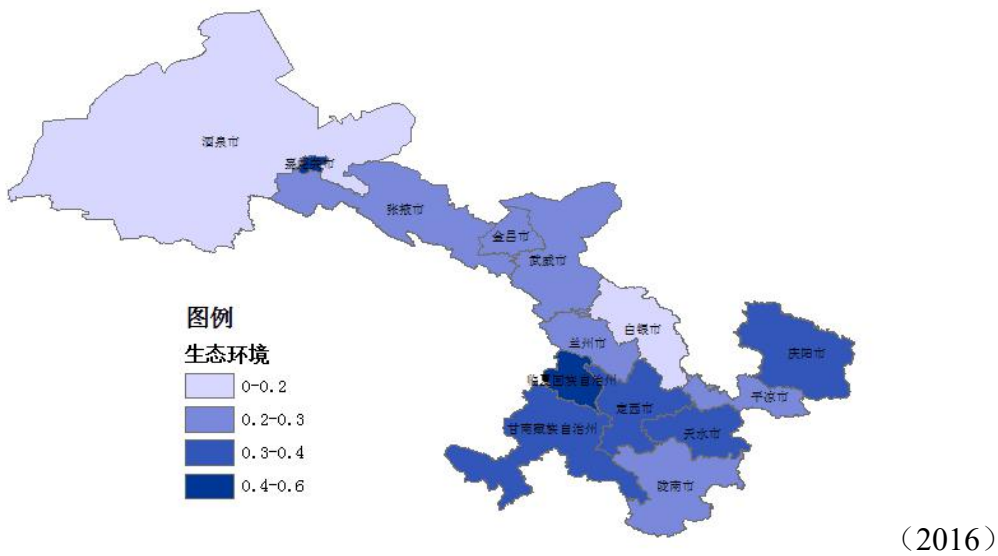
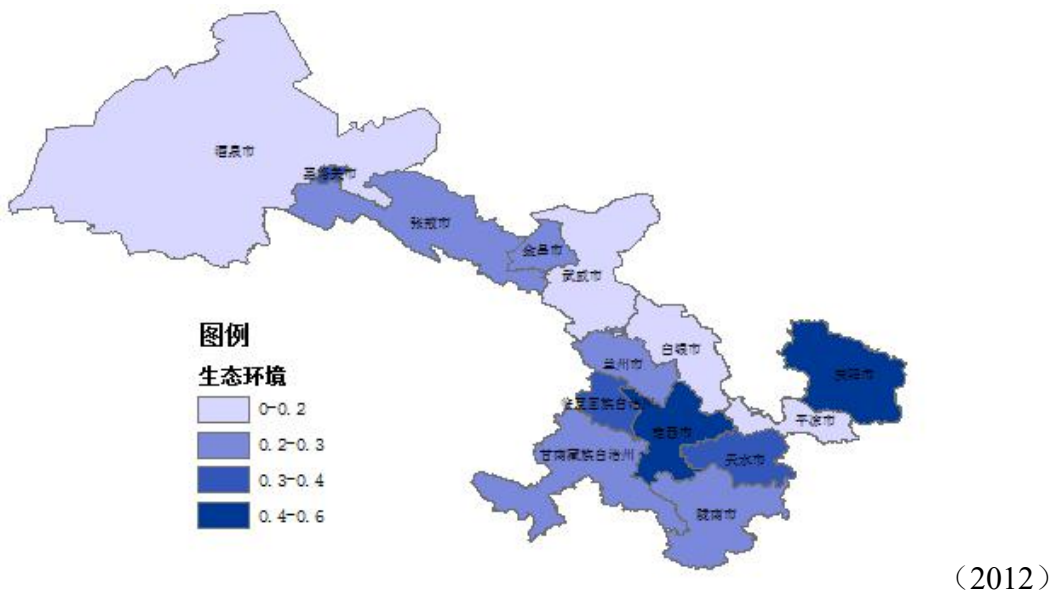
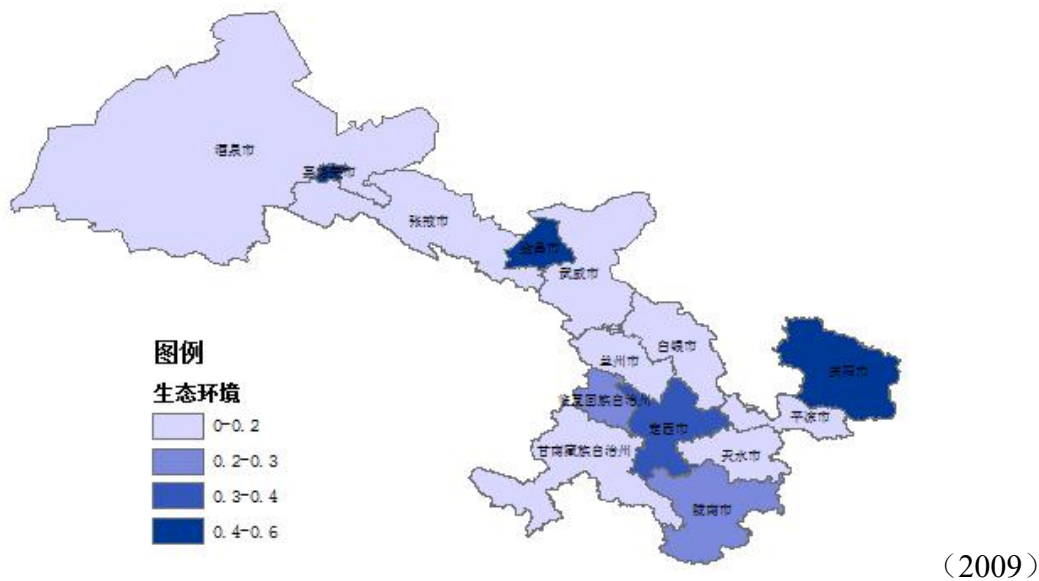


图4.2 2009年、2012年和2016年生态环境分布状况

由图 4.1 可见，甘肃省西北地区颜色比东南地区的颜色较重，所以甘肃省西北地区的城市化综合发展水平明显高于东南地区，甘肃省河西地区城市化水平普遍较高，其中以酒泉市和嘉峪关市为代表的西北地区城市化综合发展水平最高。从时间维度来看，2009 年和 2012 年甘肃省 14 个市（州）的城市化综合发展水平无明显变化，只有天水市和酒泉市有下降，但从 2012 年和 2016 年甘肃省的城市化综合发展水平有较为明显的提升，尤其是西北地区。

由图 4.2 可见，甘肃省西北地区颜色比东南地区的颜色较浅，所以甘肃省西北地区的城市化综合发展水平明显低于东南地区，定西为代表的中东部和庆阳为代表的南部地区生态环境水平最高。从时间维度来看，2009-2012 年甘肃省中部的生态环境水平有一定的提升，但从 2012-2016 年甘肃省的中南地区生态环境水平有稍稍下降，而甘肃省的西北地区生态环境水平有较为明显的提升。

而综合图 4.1 和图 4.2 可知，首先要知道城市化发展越好其对应的颜色越深，生态环境也是对应的颜色越深发展越好。城市化和生态环境的分布状况截然不同，城市化发展是西北地区的颜色比较深，西北地区的代表性城市有酒泉市、嘉峪关市、张掖市和金昌市；而生态环境是东南地区的颜色比较深，东南地区的代表性城市有临夏州、定西市、庆阳市、陇南市、天水市和甘南州。由此可知甘肃省整体分布类型大致为城市化发展比较高，则生态环境比较低，反之生态环境比较高，则城市化发展比较低。

5 甘肃省城市化与生态环境关系分析

由以上分析可知,甘肃省 14 个市(州)城市化和生态环境各自的发展水平特征和空间分布特征,并不能进一步具体揭示城市化发展和生态环境之间协调关系,因此论文借助 Lotka-Volterra 模型来模拟甘肃省城市化发展和生态环境之间协调关系,进一步揭示出甘肃省 14 个市(州)城市化发展和生态环境之间协调性。

5.1 甘肃省城市化与生态环境内在关联性分析

5.1.1 Lotka-Volterra 模型的建立

(1) 理论模型的设定

城市系统与生态环境系统是在对共同资源进行利用。生态环境系统由自然环境和人工环境两部分组成,自然环境是城市系统发展的基础,所以自然环境影响着整个城市的建设和发展,而城市的发展使得自然环境遭到破坏,在这其中人类活动扮演者重要作用。人类活动对自然环境改造两种情况,一是为了更好地发展使得环境遭到污染,二是人类发挥其主观能动性对环境进行保护,这两种情况得到环境为人工环境。人工环境对整个城市的发展的影响有正向作用和负向作用。这就体现出系统间的竞争与合作关系。Lotka-Volterra 模型是强调种间的竞争和合作,竞争系数通常表示协调水平的强弱。Lotka-Volterra 模型是一个微分方程模型,借助灰色建模理论计算出竞争系数,以便进一步构造出共生协调度的评价模型。所以城市生态系统可以用 Lotka-Volterra 模型来描述子系统之间的竞争与合作关系。

本文将城市系统与生态环境系统间的关系与生物学的种群之间的关系进行类比分析。则用两种群相互作用的 Lotka-Volterra 模型:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F_1(X, Y) = \gamma_1 X \left(1 - \frac{X}{K_1}\right) + \gamma_1 \theta_{12} \frac{XY}{K_1} \\ \frac{dY}{dt} = F_2(X, Y) = \gamma_2 Y \left(1 - \frac{Y}{K_2}\right) + \gamma_2 \theta_{21} \frac{YX}{K_2} \end{cases} \quad (5-1)$$

(5-1) 式中: X, Y 分别表示城市化发展与生态环境水平; 下标 1 表示城市

化发展水平，下标 2 表示生态环境发展水平； γ_i 表示 i 的发展水平增长率； $\frac{1}{K_i}$ 表示 i 的发展水平对自身的阻碍作用； θ_{12} 表示城市化对生态环境水平的作用系数； θ_{21} 表示生态环境对城市化发展水平的作用系数； $\theta_i > 0$ 表示促进作用， $\theta_i < 0$ 则表示抑制作用。将 (5-1) 式写成一般形式：

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F_1(X, Y) = X(a_0 + a_1X + a_2Y) \\ \frac{dY}{dt} = F_2(X, Y) = Y(b_0 + b_1X + b_2Y) \end{cases} \quad (5-2)$$

(2) 模型的转化

为实现 Lotka-Volterra 样本模型的建立，可借助灰色建模理论。灰理论的思想是以定性为前提，定量为后盾，采用微分方程描述研究对象的动态行为，并直接对方程中的参数进行估计，考虑到灰理论适用于小样本数据，且对样本信息提取全面，因而采取该思想对数据进行离散化处理。假设城市化发展的原始序列为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ ，而 $Y^{(0)} = \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(n)\}$ 为生态环境的原始序列。

按照微分的定义可知

$$\frac{dX}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X(t+\Delta t) - X(t)}{\Delta t} \quad (5-3)$$

假设原始序列的采样间隔相对于种群变化的时间间隔足够小，当种群很大时，则有

$$\frac{dX}{dt} \approx X(t+\Delta t) - X(t) \quad (5-4)$$

由灰色理论中灰导数和偶对数的映射关系可知， $\frac{dX}{dt}$ 可以表示为城市化发展水平的一次累减。假设在 $X(t)$ 到 $X(t+\Delta t)$ 的 Δt 时段内，城市化发展水平没有发生大的改变，取 t 时刻 $\frac{dX}{dt}$ 的背景值为 $X(t)$ 和 $X(t+\Delta t)$ 的平均值，即

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(t) + X(t+\Delta t)}{2} \quad (5-5)$$

假设原始序列的采样间隔相对于种群变化的时间间隔足够小，当种群很大

时, 取单位时间间隔 $\Delta t \approx 1$, 则 $\frac{dX}{dt} = \frac{X_{(t)} + X_{(t+1)}}{2}$, 由灰色系统理论知识, 对其离

散化得

$$x_{(t+1)} - x_{(t)} = a_0 \frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} + a_1 \left[\frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} \right]^2 + a_2 \frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} \frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} \quad (5-6)$$

将 $t=1, 2, \dots, n-1$ 的数据代入得方程:

$$\begin{cases} x_{(2)} - x_{(1)} = a_0 \frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} + a_1 \left[\frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} \right]^2 + a_2 \left[\frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} \right] \\ x_{(3)} - x_{(2)} = a_0 \frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} + a_1 \left[\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} \right]^2 + a_2 \left[\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} \right] \\ \vdots \\ x_{(n)} - x_{(n-1)} = a_0 \frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} + a_1 \left[\frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} \right]^2 + a_2 \left[\frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} \right] \end{cases}$$

用矩阵表示为

$$Y_N = B \hat{a} \quad (5-7)$$

其中 $Y_N = [x_{(2)} - x_{(1)}, x_{(3)} - x_{(2)}, \dots, x_{(n)} - x_{(n-1)}]^T$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2}, & \left[\frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} \right]^2, & \left[\frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} \right] \\ \frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2}, & \left[\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} \right]^2, & \left[\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} \right] \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2}, & \left[\frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} \right]^2, & \left[\frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} \right] \end{bmatrix}$$

$$\hat{a} = [a_0, a_1, a_2]^T$$

根据最小二乘原理, 令残差 $e = Y_N - B \hat{a}$ 估计 \hat{a} 。则要求残差 e 的平方和达到最小, 所以 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ 。可求得 a_0, a_1, a_2 的值。

同理对 $\frac{dY}{dt} = F_2(X, Y) = Y(b_0 + b_1 X + b_2 Y)$ 进行灰色估计, 可得到方程:

$$y_{(t+1)} - y_{(t)} = b_0 \frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} + b_1 \frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} \frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} + b_2 \left[\frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} \right]^2 \quad (5-8)$$

将 $t=1,2,\dots,n-1$ 的数据代入得方程:

$$\begin{cases} y_{(2)} - y_{(1)} = b_0 \frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} + b_1 \left[\frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} \right] + b_2 \left[\frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} \right]^2 \\ y_{(3)} - y_{(2)} = b_0 \frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} + b_1 \left[\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} \right] + b_2 \left[\frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} \right]^2 \\ \vdots \\ y_{(n)} - y_{(n-1)} = b_0 \frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} + b_1 \left[\frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} \right] + b_2 \left[\frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} \right]^2 \end{cases}$$

用矩阵表示为

$$Y_N = B \hat{b} \quad (5-9)$$

其中 $Y_N = [y_{(2)} - y_{(1)}, y_{(3)} - y_{(2)}, \dots, y_{(n)} - y_{(n-1)}]^T$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2}, & \left[\frac{x_{(1)} + x_{(2)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} \right], & \left[\frac{y_{(1)} + y_{(2)}}{2} \right]^2 \\ \frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2}, & \left[\frac{x_{(2)} + x_{(3)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} \right], & \left[\frac{y_{(2)} + y_{(3)}}{2} \right]^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2}, & \left[\frac{x_{(n-1)} + x_{(n)}}{2} \right] \left[\frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} \right], & \left[\frac{y_{(n-1)} + y_{(n)}}{2} \right]^2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{b} = [b_0, b_1, b_2]^T$$

根据最小二乘原理, 令残差 $e = Y_N - B \hat{b}$ 估计 \hat{b} 。则要求残差 e 的平方和达到最小, 所以 $\hat{b} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ 。可求得 b_0, b_1, b_2 的值。

(3) 参数估计

通过最小二乘估计出 Lotka-Volterra 模型 (公式 (5-2)) 中的参数值 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$, 文章只以兰州为例得出 OLS 估计结果进行说明, 如表 5.1 和 5.2 所示。

表 5.1 兰州市城市化发展 Lotka-Volterra 模型参数估计结果

变量	估计值	标准误差	t 统计量	p 值
a_0	-1.406951	2.047392	1.687192	0.05297
a_1	0.395619	1.476773	1.267894	0.0802
a_2	5.928386	8.589542	1.690186	0.0528
R^2	0.907372			
\bar{R}^2	0.8838941			

从表 5.1 的结果可知，得出兰州市城市化发展 Lotka-Volterra 模型的样本回归方程为

$$x_{(t+1)} - x_{(t)} = -1.407 \frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} + 0.396 \left[\frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} \right]^2 + 5.928 \frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} \frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2}$$

在 10% 的显著性水平下，参数值 a_0, a_1, a_2 三者的 p 值 0.05297、0.0802 和 0.0528 都小于 0.1，所以都通过 t 检验。采用 Lotka-Volterra 模型拟合兰州市城市化发展的拟合优度的值分别为 0.907372，说明兰州市城市化发展的拟合程度比较好。

表 5.2 兰州市生态环境 Lotka-Volterra 模型参数估计结果

变量	估计值	标准误差	t 统计量	p 值
b_0	0.080304	1.702232	1.047176	0.09646
b_1	-0.26087	1.349033	1.193376	0.08561
b_2	0.14637	6.821396	1.021457	0.09839
R^2	0.861756			
\bar{R}^2	0.852366			

从表 5.2 的结果可知，得出兰州市生态环境 Lotka-Volterra 模型的样本回归

方程为

$$y_{(t+1)} - y_{(t)} = 0.08 \frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} - 0.261 \frac{x_{(t)} + x_{(t+1)}}{2} \frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} + 0.146 \left[\frac{y_{(t)} + y_{(t+1)}}{2} \right]^2$$

在 10% 的显著性水平下，参数值 b_0, b_1, b_2 三者的 p 值 0.09646、0.08561 和 0.09839 都小于 0.1，所以都通过 t 检验。采用 Lotka-Volterra 模型拟合兰州市生态环境的拟合优度的值分别为 0.861756，说明兰州市生态环境的拟合程度比较好。

同理，可得出甘肃省其余 13 市（州）的参数估计结果，具体数值如表 5-3 所示。

表 5.3 甘肃省 14 个市（州）的 Lotka-Volterra 模型参数估计值

地区	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
兰州市	-1.407	0.396	5.928	0.080	-0.261	0.146
嘉峪关市	0.233	0.364	-1.263	-1.599	1.001	1.804
金昌市	-0.231	0.437	0.148	1.065	-2.292	-0.290
白银市	-0.424	1.341	0.713	-0.707	1.282	2.476
天水市	-0.731	3.295	0.768	2.755	-19.430	0.781
武威市	0.291	-2.413	0.718	0.849	-0.835	-4.701
张掖市	1.057	-6.924	2.216	0.852	-9.696	5.959
平凉市	0.517	-0.706	-2.436	0.462	3.664	-6.332
酒泉市	0.292	1.086	-4.742	-1.339	4.217	-1.265
庆阳市	-1.061	0.536	2.151	0.954	0.479	-2.378
定西市	0.831	-1.007	-2.080	-0.766	2.804	1.158
陇南市	0.182	-0.939	-0.251	0.305	-2.036	-0.347
临夏州	-0.219	-1.699	0.532	-0.131	-3.730	1.176
甘南州	-0.694	1.710	1.817	-0.499	3.829	-0.440

(4) 模型适用性检验

通过之前对参数的估计和检验，还需对整个模型的估计精度进行检验，所以进行误差检验。模型中实际数据用 $x_{(k)}, y_{(k)}$ 表示，而估计数据用 $\hat{x}_{(k)}, \hat{y}_{(k)}$ 表示。所以残差 $\varepsilon_{(k)} = x_{(k)} - \hat{x}_{(k)}, \varepsilon_{(k)} = y_{(k)} - \hat{y}_{(k)}$ ，相对误差 $\Delta_{(k)} = \frac{|\varepsilon_{(k)}|}{x_{(k)}}$ ， $\Delta_{(k)} = \frac{|\varepsilon_{(k)}|}{y_{(k)}}$ 。兰州市

误差检验表结果见表 5.3，其余甘肃省 13 个市（州）误差检验表结果见附表 2。

表 5.5 兰州市灰色建模的误差检验表

市(州) 年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
	$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
2010	0.396	0.392	0.004	1.05%	0.182	0.196	-0.013	7.37%
2011	0.414	0.390	0.024	5.88%	0.235	0.193	0.042	17.94%
2012	0.359	0.400	-0.042	11.59%	0.206	0.235	-0.029	13.92%
兰州市 2013	0.456	0.387	0.069	15.15%	0.197	0.206	-0.009	4.52%
2014	0.537	0.454	0.083	15.47%	0.202	0.197	0.005	2.36%
2015	0.458	0.437	0.021	4.59%	0.200	0.201	-0.002	0.91%
2016	0.488	0.456	0.032	6.60%	0.201	0.199	0.002	0.81%

由表 5.5 的结果可算出残差平方和为

$$s = \varepsilon^T \varepsilon$$

平均相对误差为

$$\Delta = \frac{1}{7} \Delta_{(k)}$$

所以兰州市的城市化发展的 $s = 0.0155$, $\Delta = 0.221\%$, 而兰州市的生态环境的 $s = 0.0029$, $\Delta = 0.0413\%$, 因为得到相对平均误差只有 0.000413, 所以模型的估计精度是准确的。

5.1.2 结果分析

通过最小二乘估计出参数值 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$, 再利用式 (5-1) 和式 (5-2)

间的关系求得 $\gamma_1 = a_0$, $K_1 = -\frac{a_0}{a_1}$, $\theta_{12} = -\frac{a_2}{a_1}$ 。同理可得 $\gamma_2 = b_0$, $K_2 = -\frac{b_0}{b_2}$, $\theta_{21} = -\frac{b_1}{b_2}$,

具体数值如表 5.6 所示, 进而分析出城市系统与生态环境系统之间的相互作用。

表 5.6 甘肃省 14 个市(州)的 Lotka-Volterra 模型参数值

地区	γ_1	K_1	θ_{12}	γ_2	K_2	θ_{21}
兰州市	-1.407	3.556	-14.985	0.080	-0.549	1.782
嘉峪关市	0.233	3.640	3.465	-1.599	0.886	-0.555
金昌市	-0.231	0.528	-0.338	1.065	0.671	-7.904
白银市	-0.424	0.316	-0.532	-0.707	0.285	-0.518
天水市	-0.731	0.222	-0.233	2.755	-0.528	24.884

续表 5.6 甘肃省 14 个市（州）的 Lotka-Volterra 模型参数值

地区	γ_1	K_1	θ_{12}	γ_2	K_2	θ_{21}
武威市	0.291	0.120	0.298	0.849	0.181	-0.178
张掖市	1.057	0.153	0.320	0.852	-0.143	1.627
平凉市	0.517	0.732	-3.450	0.462	0.073	0.579
酒泉市	0.292	0.269	4.368	-1.339	-1.058	3.334
庆阳市	-1.061	1.979	-4.014	0.954	0.401	0.202
定西市	0.831	0.826	-2.066	-0.766	0.662	-2.422
陇南市	0.182	0.194	-0.268	0.305	0.879	-5.863
临夏州	-0.219	-0.011	0.313	-0.131	0.112	3.171
甘南州	-0.694	0.406	-1.062	-0.499	1.132	8.694

在表 5.6 中各个指标对应生态经济学含义为， γ_1, γ_2 表示在没有竞争存在的情况下，各个城市的城市系统与生态环境系统自身的增长率，反映出它们各自对资源的利用； $\frac{1}{K_1}, \frac{1}{K_2}$ 表示城市系统与生态环境系统的对自身的阻碍作用，则 K_1, K_2 表示城市系统与生态环境系统最高发展水平； θ_{12}, θ_{21} 表示两系统间相互的影响系数，代表因竞争产生的竞争阻碍作用。 θ_{12} 表示城市系统对生态环境系统的作用系数，即城市化发展的增长对生态环境的抑制作用； θ_{21} 表示生态环境系统对城市系统的作用系数，即生态环境的增长对城市化发展的抑制作用。

由表 5.6 中数据可得出， γ_1 的大致取值范围在 $[-2, 2]$ 之间，取值在 $[-2, 0]$ 表示城市系统对资源的利用较低，取值在 $[0, 2]$ 表示城市系统对资源的利用较高； γ_2 的大致取值范围在 $[-2, 3]$ 之间，取值在 $[-2, 0]$ 表示生态环境系统对资源的利用较低，取值在 $[0, 3]$ 表示生态环境系统对资源的利用较高。因为兰州市 $\gamma_1 = -1.407, \gamma_2 = 0.08$ ，所以兰州市的生态环境系统比城市系统对资源的利用高。因为白银市 $\gamma_1 = -0.424, \gamma_2 = -0.707$ ，所以白银市的城市系统与生态环境系统对资源的利用都比较低。因为武威市 $\gamma_1 = 0.291, \gamma_2 = 0.849$ ，所以武威市的城市系统与生态环境系统对资源的利用都高。

K_1, K_2 的大致取值范围在 $[0, +\infty]$ 内, 表示城市系统与生态环境系统最高发展水平, 只有少部分 K 值小于 0, 具体有临夏州 $K_1 = -0.011$, 这说明临夏州 2016 年在 14 个市 (州) 城市化发展水平最低; 而兰州市 $K_2 = -0.549$, 张掖市 $K_2 = -0.143$ 和酒泉市 $K_2 = -1.339$, 说明这三个城市 2016 年在 14 个市 (州) 生态环境最低。

θ_{12}, θ_{21} 的大小直接关系两者之间的竞争强度。在这里我们分以下几种情况讨论:

(1) 若 $\theta_{12} > 0, \theta_{21} > 0$ 时, 则城市系统与生态环境系统间相互的影响系数都为正数, 这种情况是市场中最常见的纯粹竞争现象, 在城市生态系统内部二者间的竞争十分激烈。如果 θ_{12} 大于 θ_{21} , 则代表城市化发展相对于生态环境更有竞争力, 城市化发展的自身增长率 γ_1 , 也会大于生态环境的自身增长率 γ_2 。

(2) 若 $\theta_{12} < 0, \theta_{21} < 0$ 时, 则城市系统与生态环境系统间相互的影响系数都为负数, 这种情况表示在城市生态系统内部二者间的关系为典型的互利共生现象, 即为城市化发展与生态环境的互为有利, 城市化发展的增长也会促进生态环境的增长, 反之生态环境也会促进城市化发展的增长。

(3) 若 $\theta_{12} > 0, \theta_{21} < 0$ 或 $\theta_{12} < 0, \theta_{21} > 0$ 时, 则城市系统与生态环境系统间的作用系数都为一正一负。若 $\theta_{12} > 0, \theta_{21} < 0$ 时, 则代表城市化发展的增长给生态环境带来的是积极效应, 即生态环境增加的更多, 但是反过来, 生态环境增加将会引起城市化发展的降低。而若 $\theta_{12} < 0, \theta_{21} > 0$ 时, 则代表城市化发展的增长给生态环境带来的是消极效应, 但是反过来, 生态环境增加将会引起城市化发展的增长。

综上所述, 由表 5.6 的结果可知, 有以下三个结论:

(1) 属于在城市生态系统内部二者间的竞争十分激烈的城市有张掖市、酒泉市和临夏州, 它们的 θ_{12}, θ_{21} 都为正数。同时张掖市和酒泉市这两个城市的 θ_{12} 大于 θ_{21} , 分别为 $0.32 > 1.627 > 0$ 和 $4.368 > 3.334 > 0$, 则代表它们的城市化发展相对于生态环境更有竞争力。而临夏这个城市的 θ_{21} 大于 θ_{12} , 即 $0 < 0.313 < 3.171$, 则

代表它的生态环境相对于城市化发展更有竞争力。

(2) 属于在城市生态系统内部二者间的关系为互利共生的城市有金昌、白银、定西和陇南，它们的 θ_{12}, θ_{21} 都为负数。说明这四个城市的城市系统与生态环境系统互为有利，城市化发展的增长也会促进生态环境的增长，反之生态环境也会促进城市化发展的增长。

(3) 在城市生态系统内部作用系数一正一负的城市有兰州市、嘉峪关市、天水市、武威市、平凉市、庆阳市和甘南州。其中作用系数 $\theta_{12} > 0, \theta_{21} < 0$ 的城市有嘉峪关和武威市，而作用系数 $\theta_{12} < 0, \theta_{21} > 0$ 的城市有兰州市、天水市、平凉市、庆阳市和甘南州。

5.2 甘肃省城市化与生态环境协调性分析

由以上分析可知，甘肃省 14 个市（州）城市化发展和生态环境二者之间的动态竞争关系，为了进一步具体揭示城市化发展和生态环境之间协调性，所以运用协调关系函数和协调水平函数进行分析。

5.2.1 协调关系的测算

根据之前计算出来的变量间作用系数 θ_{12} 和 θ_{21} 的值，运用协调关系 C 公式

$$C = f(\theta_i, \theta_j) = \frac{\theta_i + \theta_j}{\sqrt{\theta_i^2 + \theta_j^2}} (i \neq j), \text{ 计算出结果如表 5.7 所示。}$$

表 5.7 甘肃省 14 个市（州）城市化与生态环境的作用系数和协调关系

市（州）	θ_{12}	θ_{21}	C	市（州）	θ_{12}	θ_{21}	C
兰州市	-14.985	1.782	-0.875	平凉市	-3.450	0.579	-0.821
嘉峪关市	3.465	-0.555	0.829	酒泉市	4.368	3.334	1.402
金昌市	-0.338	-7.904	-1.042	庆阳市	-4.014	0.202	-0.949
白银市	-0.532	-0.518	-1.414	定西市	-2.066	-2.422	-1.410
天水市	-0.233	24.884	0.991	陇南市	-0.268	-5.863	-1.045
武威市	0.298	-0.178	0.346	临夏州	0.313	3.171	1.093
张掖市	0.320	1.627	1.174	甘南州	-1.062	8.694	0.871

由表 5.7 可知，甘肃省 14 个市（州）的城市化和生态环境一方对另一方的作用关系，负值表示一方对另一方有促进作用，反之则有抑制作用，表中数据有正有负，说明不同的市（州）城市化发展和生态环境有不同的作用。要具体分析其共同协调关系，需根据协调度 C 可将分为四类：互利共生、偏利共生、偏害共生和互相抑制。分类结果如表 5.8 所示。

表 5.8 甘肃省 14 个市（州）城市生态系统的协调关系

两变量关系	协调关系类别	市（州）
相互促进	互利共生	金昌，白银，定西，陇南
单方面抑制	偏利共生	嘉峪关，天水，武威，甘南
	偏害共生	兰州，平凉，庆阳
相互抑制	相互竞争	张掖，酒泉，临夏

由表 5.8 可知，甘肃省 14 个市（州）的城市生态系统中城市系统和生态环境系统二者协调关系。二者相互促进的市有金昌、白银、定西和陇南，可以考虑同时发展二者，使得当地的各方面得以发展，现阶段这四个市城市化和生态环境发展相对均衡；二者相互抑制的市有张掖，酒泉和临夏，二者发展不一致有所偏颇；单方抑制（促进）且促进作用强于抑制作用的市有嘉峪关，天水，武威和甘南，此时三者存在一定的互补性，向相互促进的关系转变，而抑制作用强于促进作用的市有兰州，平凉和庆阳，长此以往向相互抑制的关系转变，在今后的发展过程中，要更加注重经济发展过程中对环境的保护。甘肃省 14 市（州）的城市化和生态环境发展的协调关系基本上与现阶段二者关系相符合，如果出现内部不协调发展情况，应该采取具体措施尝试改变这种现状。

5.2.2 协调水平的测算

对于城市生态系统来说，只计算出协调关系是不够的，所以还需研究协调水平。通过第 4 章对甘肃省 14 个市（州）2009-2016 年的城市化发展和生态环境的计算，运用共生协调水平 L 的公式 $L = f(X, Y) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$ 计算出结果，之后因为以 2016 年的共生协调水平 L 为研究对象，所以计算出共生协调水平 L 的平均值，具体数据如表 5.9 所示。

表 5.9 甘肃省 14 个市（州）城市生态系统协调水平

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
兰州市	0.442	0.436	0.476	0.414	0.497	0.573	0.499	0.549
嘉峪关市	1.067	1.018	1.007	0.923	0.941	0.839	0.976	0.959
金昌市	0.557	0.583	0.498	0.445	0.543	0.472	0.477	0.478
白银市	0.227	0.242	0.267	0.263	0.298	0.265	0.279	0.275
天水市	0.244	0.257	0.341	0.340	0.359	0.302	0.331	0.346
武威市	0.228	0.244	0.254	0.213	0.231	0.209	0.246	0.279
张掖市	0.233	0.259	0.332	0.287	0.312	0.318	0.319	0.413
平凉市	0.228	0.242	0.230	0.216	0.228	0.202	0.227	0.258
酒泉市	0.336	0.335	0.375	0.441	0.432	0.282	0.440	0.436
庆阳市	0.445	0.474	0.446	0.518	0.482	0.491	0.481	0.433
定西市	0.336	0.358	0.462	0.427	0.415	0.336	0.395	0.347
陇南市	0.248	0.288	0.338	0.261	0.244	0.279	0.228	0.235
临夏州	0.231	0.243	0.375	0.403	0.362	0.420	0.429	0.463
甘南州	0.240	0.256	0.305	0.269	0.281	0.294	0.301	0.333

为了便于分析甘肃省城市生态系统协调水平的差异，本文采用系统聚类分析法，以 2016 年的协调水平 L 平均值为研究对象，使用 SPSS21.0 软件计算，可得到图 5.1 聚类分析树形图。

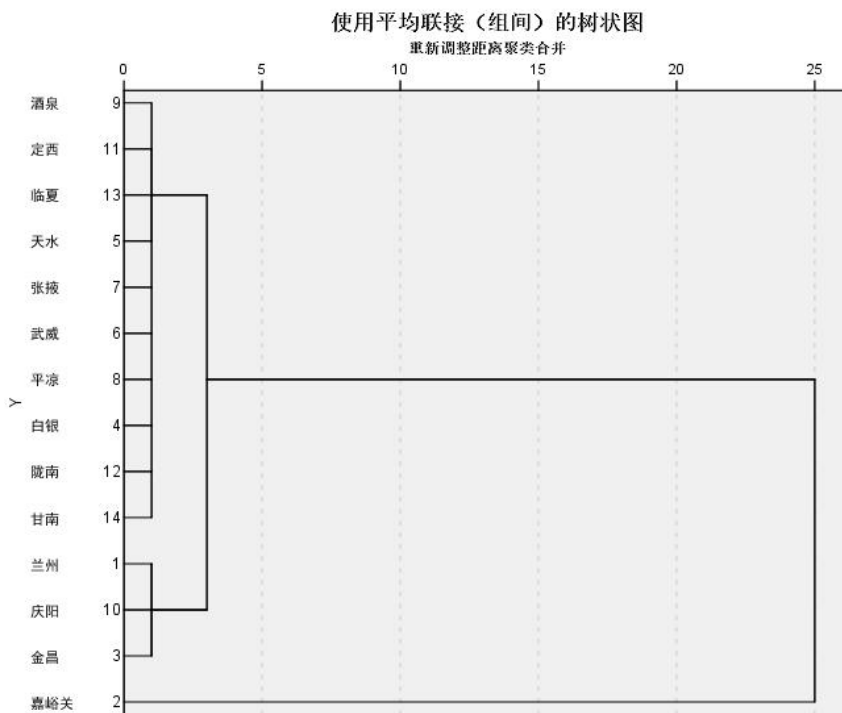


图5.1 甘肃省14个市（州）的协调水平聚类分析的树形图

由表 5.9 和图 5.1 可知,甘肃省 14 个市(州)城市生态系统协调水平的聚类分析的结果,不同城市的发展水平是不同的,第一类只有一个嘉峪关市,协调水平 L 达到 0.959,协调水平数值远远高于其他 13 个市(州),城市化发展水平遥遥领先,比协调水平 L 排在第二的兰州市 0.549,高出 0.41,属于经济发达地区,居民的收入、就业、教育乃至消费水平都很高,对生态环境保护也比较支持;第二类是城市化发展与生态环境比较落后,协调水平较低,占比规模较大,这 14 个城市中有 71%的地区归属这一类,这一类的协调水平 L 平均值在[0.2,0.4]区间范围内,说明甘肃省整体城市化发展与生态环境相对落后。第三类城镇是介于第一类和第二类之间的地区只有三个,兰州、庆阳和金昌,这一类的协调水平 L 平均值在[0.4,0.6]区间范围内,发展水平相对适中。

5.2.3 协调性综合评价结果

深入分析协调关系和协调水平之后,需要将协调分析结果进行整理、归类和总结,前文已说明,共生协调是协调关系和协调水平共同作用的结果。要对共生协调进行综合分析,就需要根据表 2.2 评判标准,具体分类的结果可见表 5.10。

表 5.10 甘肃省 14 个市(州)城市生态系统的协调性类别

协调水平	变量关系	协调关系	市(州)
高水平	相互促进	互利共生	无
	单方面抑制	偏利共生	嘉峪关
		偏害共生	无
中等水平	相互抑制	相互竞争	无
	相互促进	互利共生	金昌
	单方面抑制	偏利共生	无
		偏害共生	兰州,庆阳
	相互抑制	相互竞争	无
低水平	相互促进	互利共生	白银,定西,陇南
	单方面抑制	偏利共生	天水,武威,甘南
		偏害共生	平凉
	相互抑制	相互竞争	张掖,酒泉,临夏

根据城市生态系统协调发展的评判标准,可将甘肃省 14 市(州)的共生协

调度分为 12 个类别:

首先依据高水平划出 4 个类别:第一类是协调发展水平高且协调关系互利共生,甘肃省不存在这样的城市;第二类是协调发展水平高且协调关系偏利共生,只有一个嘉峪关市;第三类是协调发展水平高且协调关系偏害共生,甘肃省不存在这样的城市;同样的第四类是协调发展水平高且协调关系相互竞争,甘肃省不存在这样的城市。在甘肃省 14 市中嘉峪关是共生协调度最高的城市,与其经济蓬勃发展是分不开的,虽然城市化发展与生态环境之间不是相互促进关系,是二者一方抑制一方促进,但是整体来说促进作用强于抑制作用。

之后依据中等水平划出 4 个类别:第一类是协调发展水平中等且协调关系比较协调,只有金昌一个城市;第二类是协调发展水平中等且协调关系偏利共生,甘肃省不存在这样的城市;第三类是协调发展水平中等且协调关系偏害共生的城市有兰州市和庆阳市;第四类是协调发展水平中等且协调关系相互竞争,甘肃省不存在这样的城市。金昌市的城市化发展与生态环境城之间是正向影响,与其经济蓬勃发展和对环境的保护是分不开的,但是整体发展水平与高水平城市还有一段距离,所以应该大力发展经济和利用环境使其不断提升,这样使得整个城市的发展得以提升。兰州市和庆阳市整体发展水平适中,城市化发展与生态环境之间为不协调发展关系,虽然二者之间不是相互竞争关系,是二者一方抑制一方促进,但是整体来说抑制作用强于促进作用。

最后依据低水平划出 4 个类别:第一类是协调发展水平较低,子系统要素之间发展较协调的有白银市、定西市和陇南市;第二类是协调发展水平较低且共生协调关系偏利共生的有天水市,武威市和甘南州;第三类是协调发展水平较低且协调关系偏害共生的有平凉市;第四类是协调发展水平较低且协调关系相互竞争,有张掖市、酒泉市和临夏州。白银市、定西市和陇南市这三个城市整体发展水平比较低,而城市化发展与生态环境之间为协调发展关系,这样使得城市总体发展水平很难在短时间内得到提升。天水市,武威市、甘南州和平凉市这四个城市都是整体发展水平比较低,同时城市化发展与生态环境之间为不协调发展关系,这样使得城市发展存在很大的问题。张掖市、酒泉市和临夏州这三个城市在甘肃省 14 市中是共生协调度最低的城市,这与其经济发展和生态环境间关系是密不可分的,子系统之间的协调度很低,并且到达了退化的水平。

6 结论与建议

6.1 结论

论文以甘肃省 14 市（州）为研究对象，深入分析甘肃省的城市化发展和生态环境研究现状，结合城市生态系统理论和共生演化理论，构建城市生态系统评价指标体系。首先对城市化发展与生态环境水平进行分析，之后借助 Lotka-Volterra 模型对甘肃省城市化发展与生态环境协调关系进行分析，利用层次聚类分析方法对协调水平进行分类，最后根据城市生态系统协调发展评判准则，得出协调度综合评价。通过以上分析，可以得出以下几点结论：

（1）2009-2016 年甘肃省 14 市（州）在城市化整体发展基本保持稳定。其中嘉峪关市排在首位，发展水平最高达到 0.932，紧随其后的是兰州市、金昌市和酒泉市这四个城市，它们整体城市化发展水平有轻微上升的趋势，从 2009 的 0.315 上升到 2016 年的 0.488。其余的 10 个城市的城镇化发展水平基本保持在 0.1-0.3 水平区间内。其中在 2009-2016 年期间内临夏州、定西市和陇南市这三个城市的城市化发展水平排在最低，最低发展水平为 0.083。

（2）2009-2016 年甘肃省 14 市（州）在生态环境的整体发展趋于稳定。同时嘉峪关市和庆阳市的生态环境水平稳居前列，基本保持稳定不变，其中最高水平达到 0.519，最低水平也达到 0.396。定西市算是一个特例，发展水平有增有减，在 2014 年发展水平竟然低到 0.254。金昌市有明显的下降趋势，由 2009 年的 0.413 下降为 2016 年的 0.246，而临夏州有明显的上升趋势，由 2009 年的 0.211 上升为 2016 年的 0.425。而武威市和酒泉市排在尾部，它们中最高发展水平为 0.203，最低发展水平为 0.117，二者差别比较小，仅仅有 0.086。

（3）在甘肃省区域内城市化发展和生态环境的分布状况截然不同，城市化发展比较好的地区主要集中在西北地区，而生态环境比较好的地区主要集中在东南地区。其中只有嘉峪关市这个特例，它的城市化发展和生态环境水平在 14 个市（州）中都排在前列。由此可知甘肃省整体分布类型大致为城市化发展比较高，则生态环境比较低，反之生态环境比较高，则城市化发展比较低。

（4）从甘肃省城市化发展与生态环境协调关系来看，相互促进的城市为金昌市、白银市、定西市和陇南市，可以考虑同时发展二者，使得当地的发展可以

可持续发展；相互竞争的城市为张掖市、酒泉市和临夏州，城市化发展对当地生态环境是一种威胁竞争的态势，而生态环境也会阻碍到城市化建设；互利共生的城市为嘉峪关市、天水市、武威市和甘南州，此时而二者存在一定的互补性，向相互促进的关系转变，但整体来说二者仍是不协调状态；偏害共生的城市为兰州市、平凉市和庆阳市，长此以往发展必然向相互竞争的关系转变，在今后的发展过程中，要更加注重经济发展过程中对环境的保护。

(5) 从甘肃省城市化发展与生态环境协调发展水平来看，不同城市的发展水平是不同的。协调发展水平最高的城市为嘉峪关市，当地的发展水平在 14 个市（州）中处于领先地位；协调发展水平中等的城市为兰州市、庆阳市和金昌市，它们的发展水平处于适中地位；协调发展水平落后的城市为其余 10 个市（州），占规模较大，在甘肃省中有 71% 的城市处于这个阶段，这与现阶段甘肃省的发展状况相符合。

(6) 从甘肃省城市化发展与生态环境共生协调度来看，甘肃省中没有既协调发展水平高又协调关系互利共生的城市，说明整个甘肃省发展属于欠发展状态，需要大力发展经济，在城市化进程的同时要加大对环境的保护。共生协调度最高的城市为嘉峪关市，协调发展水平达到高水平，这与其经济蓬勃发展是分不开的，虽然城市化发展与生态环境之间不是相互促进关系，是一方抑制一方促进，但是整体来说促进作用强于抑制作用。共生协调度最低的城市为酒泉市和临夏州，协调发展水平较低，同时协调关系为相互竞争，这与其经济发展和生态环境间关系是密不可分的，子系统之间的协调度很低，并且到达了退化的水平。其余城市的共生协调度处于中间状态，协调发展水平适中且协调关系为不协调关系，这说明城市化发展对当地生态环境是一种妨碍发展的态势，而生态环境也会阻碍到城市化建设。

6.2 建议

由以上的结论可知，甘肃省 14 个市（州）的城市化发展与生态环境间的协调性存在明显的差异性，因此论文将从不同类别对城市协调性发展提出具体的建议：

第一类：嘉峪关市。嘉峪关市作为丝绸之路现代化区域中心城市，同时也是

甘肃省重要的工业旅游城市和交通枢纽,这些都为城市的可持续发展提供了有利保证,因此基于以上分析,嘉峪关市的协调发展水平高且协调关系互利共生,需将协调关系进一步提升,使之转化成互利共生的关系。嘉峪关市的生态环境比城市化发展水平低,所以是两方一方抑制一方促进,但是整体来说促进作用强于抑制作用。因此可以在保持原有的生态环境的情况下,可以大力倡导旅游业的发展,以旅游业带动经济的发展,以此将生态环境的劣势补齐,使得嘉峪关市向协调发展水平高且协调关系互利共生发展。

第二类:金昌市、兰州市和庆阳市。金昌市是新兴的资源型城市,自然资源丰富,它的协调发展水平中等,但是协调关系互利共生,这与金昌市自身经济与环境共同发展密不可分,最大的劣势是处于甘肃省欠发达区域限制着整个城市的发展,需根据自身情况,重新调整产业结构,进行产业升级,从而促进经济的发展。同时注重第三产业的建设,吸引大量人口向城市方向发展,通过人口的增加和城市化水平的提升来带动城市整体经济的发展。兰州市作为省会城市,是甘肃省政治、经济、文化中心,同时也是西北地区的交通枢纽之一。它的协调发展水平中等且协调关系偏害共生,兰州市的生态环境比城市化发展水平低,所以是两方一方抑制一方促进,如果长此以往发展必然向相互竞争的关系转变,所以必须转变这个颓势,制定环境管理体制,无论现阶段经济发展情况如何,都应以保护生态环境为大前提,做好经济发展。庆阳市是能源化工基地核心区,能源资源蕴藏富集。它的协调发展水平中等且协调关系相互竞争,比兰州市的协调关系更差,具体措施与兰州市一致。

第三类:白银市、定西市、陇南市、天水市、武威市、甘南州、平凉市、张掖市、酒泉市和临夏州。白银市、定西市和陇南市这三个城市整体发展水平比较低,而城市化发展与生态环境之间为协调发展关系,这样使得城市总体发展水平很难在短时间内得到提升。所以应该大力发展经济和利用环境使其不断提升,改变发展水平低这个颓势,使得整个城市的发展得以提升。天水市、甘南州和平凉市这三个城市整体发展水平比较低且城市化发展与生态环境为不协调关系,是城市化发展促进生态环境,而生态环境也会阻碍到城市化建设。所以必须保护生态环境,不能只注重本地区的利益,而不会考虑付出多少环境成本,这样只会让地区的生态环境更加恶劣,承受更大的压力。武威市是生态环境会促进城市化建设,

而城市化发展阻碍生态环境，所以调整产业结构促进经济的发展，加大对城市空间、人口城市化、教育、医疗卫生等要素的投入。张掖市、酒泉市和临夏州协调发展水平较低且协调关系为相互竞争，协调度达到了退化的水平，这表明城市化对当地生态环境是一种妨碍发展的态势，而生态环境也会阻碍到城市化建设。所以必须从实际情况出发，实事求是，对出现的问题找出根源，从经济、文化、社会等不同的角度，全方位发展。

参考文献

- [1] [美]蕾切尔·卡逊.寂静的春天[M].长春:吉林大学出版,1997.
- [2] 严茂超.生态经济学新论:理论、方法与应用[M].北京:中国经济出版,2001.
- [3] 沈满洪.生态经济学的定义、范畴与规律[J].生态经济,2009(01):42-47.
- [4] 霍华德著,金经元译.明日,一条通向真正改革的和平道路书[M].石家庄:河北冠林数字出版有限公司,2010.
- [5] Patrick Geddes 著,倪文彦等译.进化中的城市[M].北京:中国建筑工业出版社,1989:23-26.
- [6] 海热提·涂尔逊,杨志峰.试论城市环境可持续发展[J].环境科学进展,1998,6(6):22-48.
- [7] 李周.论生态经济研究视野的拓展[J].企业经济,2018(01):5-12.
- [8] Renaud B.National urbanization policy in developing countries[M]. Oxford University Press, 1981.
- [9] Grossman G, Krueger A. Economic Growth and the Environment [J]. Quarterly Journal of Economics,1995(110):353-77.
- [10] Herman E.Daly,Joshua Farley.Ecological Economics:Principles and Applications [M].New York,2001.
- [11] ALIG R J, KLINE J D, LICHTENSTEIN M. Urbanization on the US landscape: looking ahead in the 21st century[J]. Landscape and Urban Planning,2004,69(2-3): 219-234.
- [12] Pulselli FM, Luca C,Bastianoni S. Ecosystem services as a counter-part of energy flows to ecosystems [J]. Ecological Model, 2011,222(16): 2924-2928.
- [13] Sueyoshi T., Wang D. Sustainability Development for Supply Chain Management in U.S. Petroleum Industry by DEA Environmental Assessment [J]. Energy Economics,2014, 46(06): 360-374.
- [14] XIAO B H, NICHOLAS C S S. Does economic growth affect urbanization New evidence from china and the Chinese national congress[J].Journal of asian economics,2015 (36) :62-71.
- [15] 吴友仁.关于我国社会主义城市化问题[J].城市规划,1979(05):13-25.

- [16] 马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J].生态学报,1984(01):1-9.
- [17] 王如松.高效和谐—城市生态调控原理和方法[M].长沙:湖南教育出版社,1988.
- [18] 黄金川,方创琳.城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J].地理研究,2003(02):211-220.
- [19] 陈波翀,郝寿义.自然资源对中国城市化水平的影响研究[J].自然资源学报,2005(03):394-399.
- [20] 刘耀彬,刘莹,胡观敏.资源环境约束下的城市化水平的一般均衡分析模型与实证检验[J].财贸研究,2011,22(05):10-17.
- [21] 王家庭,郭帅.生态环境约束对城市化的影响:基于最佳城市规模模型的理论研究[J].学习与实践,2011(01):5-17.
- [22] 荣宏庆.论我国新型城镇化建设与生态环境保护[J].现代经济探讨,2013(08):5-9.
- [23] 张妍,尚金城,于相毅.城市经济与环境发展耦合机制的研究[J].环境科学学报,2003(01):107-112.
- [24] 刘小林.区域人口、资源、环境与经济系统协调发展的定量评价[J].统计与决策,2007(01):64-65.
- [25] 李静,李雪铭.大连市城市化与城市生态环境发展协调性评价与分析[J].现代城市研究,2008(02):29-35.
- [26] 史亚琪,朱晓东,孙翔,李杨帆,魏婷.区域经济-环境复合生态系统协调发展动态评价——以连云港为例[J].生态学报,2010,30(15):4119-4128.
- [27] 孙平军,丁四保,修春亮,魏冶.东北地区“人口-经济-空间”城市化协调性研究[J].地理科学,2012,32(04):450-457.
- [28] 熊柴,高宏.人口城镇化与空间城镇化的不协调问题——基于财政分权的视角[J].财经科学,2012(11):102-108.
- [29] 冯兴华,钟业喜,吴巍,李波.新型城镇化背景下江西省城市人口增长与土地扩张协调性研究[J].地理与地理信息科学,2016,32(03):81-88.
- [30] 陈晓红,周宏浩,王秀.基于生态文明的县域环境—经济—社会耦合脆弱性与协调性研究——以黑龙江省齐齐哈尔市为例[J].人文地理,2018,33(01):94-101.
- [31] 周甜甜,王文平.基于 Lotka-Volterra 模型的省域产业生态经济系统协调性研究

- [J].中国管理科学,2014,22(S1):240-246.
- [32] 卞曰塘,何建敏,庄亚明.基于 Lotka-Volterra 模型的生产性服务业发展机理研究[J].软科学,2011,25(01):32-36.
- [33] Wu lifeng ,Wang Yinao.Esimation the parameters of Lotmka-Volterra model based on grey direct modeling method and its application[J].Expert Systemions Applcations,2011, 38(6):6412-6416.
- [34] 高长元,杜鹏.基于 Lotka-Volterra 的高技术虚拟产业集群成员间合作与竞争模型[J].科技进步与对策,2009,26(23):72-75.
- [35] 王砚羽,谢伟.电子商务模式模仿者与创新者竞争动态研究——当当网和亚马逊中国竞争演变分析[J].科学学与科学技术管理,2013,34(06):44-51.
- [36] 陈瑜,谢富纪.基于 Lotka-Voterra 模型的光伏产业生态创新系统演化路径的仿生学研究[J].研究与发展管理,2012,24(03):74-84.
- [37] 钟琪,戚巍,张乐.Lotka-Volterra 系统下的社会型危机信息扩散模型[J].系统工程理论与实践,2012,32(01):104-110.
- [38] 龙跃,顾新,张莉.产业技术创新联盟知识交互的生态关系及演化分析[J].科学学研究,2016,34(10):1583-1592.
- [39] 刘力.可持续发展与城市生态系统物质循环理论研究[D].东北师范大学,2002.
- [40] 杨小波,吴庆书.城市生态学[M].北京:科学出版社,2006.65-67.
- [41] 王发曾.城市生态系统基本理论问题辨析[J].城市规划汇刊,1997(01):15-20+66.
- [42] 郑世英.城市生态系统的特征[J].生物学通报,2001(05):8.
- [43] 陈尧华.城市发展与城市生态系统评价[J].城市环境与城市生态,1994(03):27-30.
- [44] 宋才发,黄捷.民族地区新型城镇化建设中乡土文化保护的法治探讨[J].北方民族大学学报(哲学社会科学版),2017(02):101-106.
- [45] 王伟伟.新型城镇化推进中的政社合作问题研究[D].华中师范大学,2018.
- [46] 魏后凯,关兴良.中国特色新型城镇化的科学内涵与战略重点[J].河南社会科学,2014,22(03):18-26.
- [47] 张丹霞.旅游城镇共生协调度模型的实证研究[D].贵州财经大学,2016.

- [48]谢煜,张智光.林业生态与产业体系共生协调机理与模式研究[J].林业经济,2014,36(10):8-11.
- [49]赵萱,张权,樊治平.多属性决策中权重确定的主客观赋权法[J].沈阳工业大学学报,1997(04):98-101.
- [50]张连龙.组合赋权法在高校排名中的应用研究[D].江西财经大学,2017.
- [51]A.G.Wilson.Entropy in Urban and regional Modelling[M].London:Pion,1970:28-39.
- [52]E.T.Jaynes.Information theory and statistical mechanics[J].Physical review,106(4) 620-630.
- [53]孙利娟,邢小军,周德群.熵值赋权法的改进[J].统计与决策,2010(21):153-154.
- [54]陈海俊,娄喜娟,刘洁,吴利丰.Lotka-Volterra 模型参数的灰色估计法及其应用[J].数学的实践与认识,2011,41(23):108-113.
- [55]李兴莉,申虎兰,冯玉广.Logistic 和 Lotka-Volterra 模型参数的灰色估计方法研究[J].大学数学,2004(06):82-87.
- [56]邓聚龙.灰色控制系统[M].武汉:华中理工大学出版社,1988.
- [57]王贯杰.甘肃城乡收入差距与经济增长的实证研究[D].兰州大学,2011.
- [58]李国柱,牛舒文,杨振等.陇中黄土丘陵地区农村生活能源消费的环境经济成本分析.自然资源学报,15-24:
- [59]欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究.生态学报,2000,20(1):9-12.
- [60]王效科,欧阳志云,肖寒,等.中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究.生态学报,2001,21(1):14-19.
- [61]史德明,梁音.我国脆弱生态环境的评估与保护.水土保持学报,2002,16(1),6-10.
- [62]胡晓群,沈琦,徐恭位.城镇化与农业现代化协调度评价与分析——以重庆市五大功能区为例[J].中国农业资源与区划,2015,36(04):16-22.
- [63]田宝龙,刘尚俊.新疆新型城镇化发展协调度时空变化及动力因素分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(05):193-199.
- [64]王淑强.草地生态脆弱区经济与环境协调性关系定量研究[D].中国农业科学院,2006.
- [65]张蕊,白永平,马卫.新型城镇化质量与协调性研究——以“新丝绸之路”经济带

为例[J].资源开发与市场,2015,31(02):204-206+244.

[66]杜飞.基于生态位理论的甘肃省城市竞争力分析[D].兰州财经大学,2018.

附表

附表 1 列出 2009-2015 年熵值赋权法的指标权重，如附表 1-1 到附表 1-7 所示。

附表 1-1 2015 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.031	0.030	0.024	0.032	0.019	0.036	0.003	0.011	0.000	0.001	0.014	0.033	0.005
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.001	0.011	0.096	0.005	0.005	0.023	0.128	0.160	0.102	0.141	0.015	0.073	
指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	
权重	0.031	0.029	0.039	0.000	0.172	0.000	0.235	0.102	0.036	0.225	0.110	0.021	

附表 1-2 2014 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.033	0.022	0.013	0.025	0.017	0.031	0.002	0.012	0.009	0.001	0.013	0.029	0.091
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.001	0.009	0.085	0.012	0.008	0.044	0.067	0.180	0.092	0.128	0.013	0.062	
指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	
权重	0.031	0.029	0.041	0.000	0.185	0.000	0.198	0.117	0.036	0.219	0.119	0.025	

附表 1-3 2013 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.043	0.030	0.023	0.032	0.023	0.043	0.003	0.014	0.000	0.001	0.016	0.035	0.007
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.001	0.012	0.094	0.005	0.007	0.022	0.096	0.149	0.104	0.147	0.018	0.075	
指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	
权重	0.030	0.029	0.038	0.001	0.180	0.000	0.186	0.113	0.040	0.226	0.137	0.020	

附表 1-4 2012 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.049	0.028	0.021	0.029	0.021	0.040	0.003	0.013	0.000	0.001	0.016	0.025	0.004
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.002	0.015	0.126	0.006	0.007	0.020	0.106	0.156	0.092	0.136	0.015	0.069	
指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	
权重	0.030	0.029	0.038	0.000	0.182	0.001	0.176	0.106	0.039	0.236	0.138	0.025	

附表 1-5 2011 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.053	0.030	0.022	0.031	0.025	0.045	0.003	0.013	0.000	0.001	0.019	0.034	0.005
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.003	0.014	0.113	0.007	0.007	0.025	0.062	0.158	0.096	0.145	0.016	0.073	
指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	
权重	0.032	0.031	0.042	0.000	0.187	0.002	0.169	0.115	0.041	0.244	0.117	0.020	

附表 1-6 2010 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.052	0.028	0.023	0.029	0.026	0.045	0.003	0.013	0.000	0.001	0.019	0.032	0.004
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.003	0.014	0.133	0.009	0.012	0.024	0.060	0.156	0.093	0.133	0.015	0.071	
指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37	
权重	0.028	0.027	0.038	0.001	0.191	0.001	0.196	0.106	0.069	0.231	0.082	0.030	

附表 1-7 2009 年熵值赋权法的指标权重

指标	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13
权重	0.052	0.032	0.022	0.032	0.029	0.053	0.003	0.012	0.000	0.003	0.020	0.031	0.003
指标	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	U22	U23	U24	U25	
权重	0.003	0.016	0.129	0.010	0.012	0.020	0.061	0.157	0.095	0.123	0.014	0.069	

续附表 1-7 2009 年熵值赋权法的指标权重

指标	U26	U27	U28	U29	U30	U31	U32	U33	U34	U35	U36	U37
权重	0.026	0.025	0.034	0.000	0.189	0.001	0.242	0.096	0.071	0.204	0.078	0.033

附表 2 列出甘肃省其余 13 个市（州）灰色建模的误差检验表，如附表 2-1 到附表 1-13 所示。

附表 2-1 嘉峪关市灰色建模的误差检验表

市（州）	年份	城市系统（X）				生态环境系统（Y）			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
嘉峪关市	2010	0.925	0.925	0.000	0.01%	0.425	0.433	-0.008	1.82%
	2011	0.924	0.928	-0.004	0.39%	0.399	0.429	-0.031	7.68%
	2012	0.833	0.930	-0.097	11.69%	0.399	0.401	-0.002	0.48%
	2013	0.849	0.836	0.013	1.52%	0.408	0.397	0.011	2.62%
	2014	0.726	0.851	-0.125	17.17%	0.419	0.407	0.012	2.90%
	2015	0.870	0.724	0.146	16.81%	0.441	0.414	0.027	6.11%
	2016	0.858	0.870	-0.012	1.38%	0.429	0.444	-0.015	3.47%

附表 2-2 金昌市灰色建模的误差检验表

市（州）	年份	城市系统（X）				生态环境系统（Y）			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
金昌市	2010	0.387	0.374	0.014	3.51%	0.436	0.417	0.019	4.34%
	2011	0.384	0.387	-0.003	0.77%	0.316	0.338	-0.022	7.04%
	2012	0.346	0.384	-0.038	11.00%	0.281	0.319	-0.038	13.46%
	2013	0.449	0.444	0.004	0.96%	0.305	0.286	0.019	6.21%
	2014	0.371	0.449	-0.078	20.94%	0.291	0.304	-0.012	4.29%
	2015	0.405	0.370	0.034	8.48%	0.253	0.295	-0.042	16.55%
	2016	0.410	0.404	0.006	1.58%	0.246	0.255	-0.009	3.69%

附表 2-3 白银市灰色建模的误差检验表

市（州）	年份	城市系统（X）				生态环境系统（Y）			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
白银市	2010	0.191	0.178	0.013	6.63%	0.148	0.137	0.011	7.71%
	2011	0.204	0.190	0.014	7.02%	0.173	0.147	0.026	14.90%
	2012	0.201	0.204	-0.002	1.06%	0.170	0.172	-0.003	1.58%

续附表 2-3 白银市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
白银市	2013	0.246	0.201	0.045	18.33%	0.169	0.169	0.000	0.21%
	2014	0.203	0.216	-0.013	6.62%	0.171	0.169	0.001	0.81%
	2015	0.219	0.202	0.017	7.69%	0.173	0.170	0.003	1.55%
	2016	0.216	0.219	-0.003	1.47%	0.170	0.173	-0.003	1.72%

附表 2-4 天水市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
天水市	2010	0.162	0.151	0.011	6.62%	0.199	0.189	0.010	4.78%
	2011	0.168	0.161	0.007	3.90%	0.296	0.294	0.002	0.79%
	2012	0.140	0.169	-0.029	20.40%	0.310	0.288	0.022	7.08%
	2013	0.168	0.140	0.029	17.02%	0.317	0.319	-0.001	0.45%
	2014	0.145	0.170	-0.025	17.24%	0.265	0.309	-0.043	16.32%
	2015	0.158	0.144	0.014	8.77%	0.291	0.269	0.021	7.34%
	2016	0.156	0.158	-0.002	1.00%	0.308	0.288	0.020	6.48%

附表 2-5 武威市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
武威市	2010	0.183	0.170	0.013	7.14%	0.162	0.151	0.010	6.45%
	2011	0.188	0.183	0.006	3.03%	0.171	0.161	0.011	6.19%
	2012	0.154	0.168	-0.014	9.06%	0.148	0.169	-0.021	14.25%
	2013	0.183	0.154	0.028	15.59%	0.141	0.148	-0.007	5.27%
	2014	0.149	0.162	-0.012	8.23%	0.147	0.141	0.005	3.53%
	2015	0.183	0.150	0.034	18.28%	0.164	0.147	0.017	10.19%
	2016	0.191	0.183	0.009	4.49%	0.203	0.173	0.031	15.02%

附表 2-6 张掖市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$

张掖市	2010	0.219	0.198	0.021	9.44%	0.138	0.117	0.021	15.47%
	2011	0.234	0.215	0.019	8.01%	0.235	0.232	0.003	1.19%
	2012	0.198	0.233	-0.035	17.53%	0.207	0.234	-0.027	13.27%
	2013	0.236	0.201	0.035	14.72%	0.204	0.210	-0.006	2.75%
	2014	0.216	0.233	-0.017	7.85%	0.233	0.200	0.033	14.31%
	2015	0.233	0.218	0.016	6.71%	0.217	0.237	-0.020	9.02%
	2016	0.306	0.282	0.025	8.03%	0.277	0.275	0.003	0.91%

附表 2-7 平凉市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
平凉市	2010	0.164	0.154	0.011	6.54%	0.177	0.167	0.010	5.48%
	2011	0.166	0.164	0.002	1.35%	0.160	0.176	-0.016	10.30%
	2012	0.150	0.166	-0.016	10.65%	0.155	0.161	-0.005	3.33%
	2013	0.170	0.151	0.019	11.21%	0.152	0.156	-0.004	2.77%
	2014	0.116	0.110	0.006	5.22%	0.165	0.154	0.012	7.06%
	2015	0.153	0.147	0.006	4.24%	0.168	0.163	0.005	2.98%
	2016	0.151	0.153	-0.002	1.18%	0.209	0.187	0.023	10.74%

附表 2-8 酒泉市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
酒泉市	2010	0.314	0.317	-0.003	0.85%	0.117	0.117	0.000	0.31%
	2011	0.322	0.316	0.006	1.87%	0.192	0.175	0.017	8.98%
	2012	0.399	0.384	0.016	3.95%	0.186	0.188	-0.002	0.86%
	2013	0.409	0.393	0.016	3.82%	0.138	0.139	0.000	0.09%
	2014	0.250	0.262	-0.012	4.93%	0.130	0.141	-0.011	8.48%
	2015	0.413	0.408	0.005	1.20%	0.151	0.144	0.006	4.08%
	2016	0.409	0.414	-0.005	1.33%	0.152	0.154	-0.001	0.84%

附表 2-9 庆阳市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
庆阳市	2010	0.169	0.149	0.020	11.75%	0.443	0.420	0.023	5.10%
	2011	0.187	0.168	0.019	10.06%	0.405	0.442	-0.037	9.08%
	2012	0.218	0.185	0.033	14.97%	0.470	0.408	0.062	13.19%

2013	0.228	0.219	0.009	3.78%	0.424	0.467	-0.043	10.16%
2014	0.185	0.208	-0.023	12.22%	0.455	0.427	0.028	6.16%
2015	0.177	0.185	-0.008	4.59%	0.447	0.453	-0.006	1.32%
2016	0.175	0.177	-0.002	0.99%	0.396	0.446	-0.050	12.55%

附表 2-10 定西市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
定西市	2010	0.098	0.087	0.011	11.48%	0.344	0.319	0.025	7.15%
	2011	0.103	0.098	0.004	4.31%	0.450	0.441	0.009	2.07%
	2012	0.100	0.100	0.000	0.48%	0.416	0.452	-0.036	8.78%
	2013	0.117	0.099	0.018	15.56%	0.398	0.415	-0.017	4.25%
	2014	0.220	0.215	0.004	1.93%	0.254	0.299	-0.045	17.75%
	2015	0.113	0.121	-0.009	7.69%	0.379	0.358	0.021	5.49%
	2016	0.128	0.112	0.016	12.27%	0.323	0.338	-0.016	4.85%

附表 2-11 陇南市灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
陇南市	2010	0.108	0.102	0.007	6.26%	0.266	0.227	0.039	14.64%
	2011	0.108	0.108	0.000	0.08%	0.320	0.266	0.054	16.95%
	2012	0.085	0.098	-0.013	15.67%	0.246	0.250	-0.003	1.25%
	2013	0.083	0.085	-0.002	2.37%	0.229	0.248	-0.019	8.18%
	2014	0.172	0.184	-0.012	6.73%	0.220	0.230	-0.010	4.73%
	2015	0.087	0.092	-0.005	5.91%	0.211	0.217	-0.006	2.75%
	2016	0.087	0.087	0.000	0.12%	0.218	0.212	0.006	2.74%

附表 2-12 临夏州灰色建模的误差检验表

市(州)	年份	城市系统 (X)				生态环境系统 (Y)			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
临夏州	2010	0.103	0.095	0.007	7.29%	0.220	0.206	0.015	6.71%
	2011	0.105	0.102	0.003	2.81%	0.361	0.315	0.046	12.68%
	2012	0.098	0.105	-0.006	6.42%	0.391	0.357	0.034	8.72%
	2013	0.116	0.099	0.018	15.10%	0.343	0.390	-0.047	13.62%
	2014	0.110	0.116	-0.006	5.69%	0.406	0.337	0.068	16.87%
	2015	0.110	0.110	0.001	0.72%	0.414	0.403	0.011	2.66%

2016 0.104 0.111 -0.006 6.11% | 0.451 0.412 0.039 8.59%

附表 2-13 甘南州灰色建模的误差检验表

市（州）	年份	城市系统（X）				生态环境系统（Y）			
		$x_{(k)}$	$\hat{x}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$	$y_{(k)}$	$\hat{y}_{(k)}$	$\varepsilon_{(k)}$	$\Delta_{(k)}$
甘南州	2010	0.138	0.131	0.008	5.64%	0.216	0.198	0.018	8.16%
	2011	0.156	0.137	0.019	12.07%	0.261	0.215	0.047	17.91%
	2012	0.137	0.157	-0.020	14.38%	0.232	0.261	-0.029	12.66%
	2013	0.154	0.137	0.017	11.18%	0.235	0.230	0.005	2.04%
	2014	0.142	0.154	-0.012	8.12%	0.257	0.234	0.023	8.82%
	2015	0.139	0.143	-0.003	2.47%	0.267	0.255	0.012	4.46%
	2016	0.134	0.140	-0.005	3.83%	0.304	0.265	0.039	12.90%

后 记

转眼之间，感觉我还是刚入校的学生，却在不知不觉中研究生三年就要结束了，我马上毕业了，这也说明着我即将步入社会，彻底退出学生这个角色，未来还有许多未知在等着我。

在我研究生三年中，我印象最深的是写论文这个阶段，这是一个痛苦的过程，从去年六月份的定题开始到目前完成终稿，将近半年的时间我都在完成这件事情，在这期间我有许多感谢的人，最应该感谢的是我的导师赵煜老师。论文的任何任何一个阶段都离不开赵煜老师对我的教导，老师每次都不厌其烦说明论文中的不足之处，如果没有老师耐心帮助修改了一稿又一稿，我的论文能否完成也未可知。我还要感谢我最可爱的舍友们，她们一直陪在我身边，跟我一同学习一同玩耍，同时在我论文书写困难的时候多次给出有用的意见。从我这次写论文让我更加认清自己，清楚自己目前的境况，知道自己的上学之路就要结束了，我没有任何遗憾，只有几丝留恋，留恋我的同学和朋友。

最后我要感谢我的亲人们，你们一直是我最坚实的后盾，让我在这个年龄还能如此没有压力。马上我就要毕业了，开始自己工作之旅了，你们要放宽心我会努力地工作，不让你们为我担心了。

致谢人：钟添添

2019年6月10日