

分类号 C8/91  
UDC \_\_\_\_\_

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 甘肃省生态文明建设统计测度研究

研究生姓名: 陈穗穗

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: 生态统计分析

提交日期: 2020年6月8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： 陈穗穗 签字日期： 2020.6.6

导师签名： 赵煜 签字日期： 2020.6.6

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意

（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

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

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

学位论文作者签名： 陈穗穗 签字日期： 2020.6.6

导师签名： 赵煜 签字日期： 2020.6.6

# **Research on Statistical Measurement of Ecological Civilization Construction in Gansu Province**

**Candidate: Chen Suisui**

**Supervisor: ZhaoYu**

## 摘要

论文以甘肃省各市州为研究对象，立足于多学科领域，如生态经济学、统计学和生物数学等，定量测度甘肃省生态文明建设情况。论文内容分为三方面：

第一，理论构建。从理论角度探讨生态脆弱区生态文明建设统计测度体系，主要包括三方面工作：首先，分析甘肃省各市州生态文明建设现状及面临的挑战，在分析基础上构建适合生态脆弱区甘肃省的生态文明测度框架；其次，分析统计测度体系构建的基本流程，主要包括测度框架的构建思路，测度框架的内涵解析等；最后，构建生态文明指标测度体系为后续实证分析做好理论铺垫。

第二，实证分析。从实证角度对甘肃省各市州生态文明建设水平的现状、潜能和系统运行进行分析，并根据实证结果提出相关建议。主要包括三方面工作：首先，基于甘肃省 14 市州进行实例分析，归纳总结各市州生态文明建设过程中的优势与短板；其次，借助数理统计学方法——核密度估计法和空间统计学方法——重心法和椭圆标准差法探讨甘肃省各市州生态文明建设水平的空间分布形态及格局演变特征；最后，以 Lotka-Volterra 理论为基础，构建甘肃省生态经济耦合巨系统的共生协调度指数，通过分析经济社会系统—生态文明系统的安全运行级别动态判断矩阵，对甘肃省各市州生态经济系统安全运行进行评价，进而对区域生态经济系统的文明、安全运行进行定量评估。

第三，思考与建议。首先对论文采用的生态文明测度体系进行思考，提出论文是基于生态文明测度体系构建的生态经济系统解析框架，在解决生态经济复杂巨系统问题时，要遵循“理论支撑、系统思考、维度全面”的分析思路。其次，依据前文分析所得到的实证分析结果尝试对甘肃省生态文明建设水平提出相关发展建议，以期政府制定各市州生态文明发展对策提供相关参考。

**关键词：**甘肃省；生态文明建设；测度体系；测度方法

## Abstract

The thesis takes the cities and prefectures of Gansu Province as research objects, and based on multidisciplinary fields, such as ecological economics, statistics, and biological mathematics, quantitatively measures the construction of ecological civilization in Gansu Province. The content of the thesis is divided into three aspects:

Firstly, theory constructed. From a theoretical perspective, the statistical measurement system for ecological civilization construction in ecologically fragile areas is mainly composed of three aspects: First, analyze the current status and challenges of ecological civilization construction in cities and prefectures of Gansu Province, and build an ecological civilization suitable for ecologically fragile areas in Gansu Province based on the analysis. The measurement framework; secondly, the basic process of constructing a statistical measurement system is analyzed, mainly including the construction of the measurement framework, the analysis of the connotation of the measurement framework, etc. Finally, the ecological civilization index measurement system is constructed to provide a theoretical basis for subsequent empirical analysis.

Secondly, empirical analysis. An empirical analysis of the current status, potential, and system operation of the level of ecological

civilization construction in cities and prefectures of Gansu Province, and related suggestions based on the empirical results. It mainly includes three aspects of work: first, based on the analysis of 14 cities and prefectures in Gansu Province, summarize and summarize the advantages and shortcomings in the process of ecological civilization construction in each city and prefecture; second, with the help of mathematical statistical methods—kernel density estimation method and spatial statistical method—The center of gravity method and the ellipse standard deviation method are used to explore the spatial distribution patterns and pattern evolution characteristics of ecological civilization construction levels in cities and prefectures of Gansu Province. Finally, based on the Lotka-Volterra theory, construct the symbiotic coordination index of the ecological and economic coupling giant system in Gansu Province. By analyzing the dynamic judgement matrix of the safe operation level of the economic and social system-ecological civilization system, the safe operation of the ecological and economic systems in cities and prefectures of Gansu Province is evaluated, and then the civilized and safe operation of the regional ecological and economic system is quantitatively evaluated.

Thirdly, thinking and suggestions. First of all, think about the ecological civilization measurement system used in the paper, and propose that the paper is an analytical framework of ecological economic system based on the ecological civilization measurement system. When

solving complex ecological economic giant system problems, we must follow "theoretical support, systematic thinking, comprehensive dimensions" Analysis ideas. Secondly, based on the empirical analysis results obtained in the previous analysis, an attempt was made to propose relevant development suggestions for the level of ecological civilization construction in Gansu Province, with a view to providing relevant references for the government to formulate countermeasures for the development of ecological civilization in cities and states.

**Keywords:** Gansu Province; ecological civilization construction; measurement system; measurement method

# 目录

<b>1 引言</b> .....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的和意义.....	1
1.3 国内外研究综述.....	2
1.3.1 国外研究现状.....	2
1.3.2 国内研究现状.....	3
1.3.3 文献述评.....	4
1.4 研究内容与框架.....	5
1.4.1 研究内容.....	5
1.4.2 研究框架.....	6
1.5 创新点和不足之处.....	7
1.5.1 创新点.....	7
1.5.2 不足之处.....	7
<b>2 相关理论与研究方法</b> .....	8
2.1 相关理论.....	8
2.1.1 生态文明理论.....	8
2.1.2 耦合度理论.....	9
2.1.3 Lotka-Volterra 理论.....	10
2.1.4 环境库兹涅茨曲线理论.....	11
2.2 研究方法.....	11
2.2.1 核密度估计法.....	12
2.2.2 标准差椭圆法.....	12
2.2.3 重心法.....	13
<b>3 生态文明建设统计测度框架体系</b> .....	14
3.1 甘肃省生态文明建设现状.....	14
3.1.1 建设现状.....	14



3.1.2 面临的挑战.....	15
3.2 统计测度基本流程.....	15
3.3 统计测度基本框架.....	17
3.3.1 构建思路.....	17
3.3.2 内涵解析.....	18
3.4 统计指标体系构建.....	19
3.4.1 生态文明建设水平评价指标.....	19
3.4.2 生态经济系统运行评价指标.....	22
3.4.3 数据说明与预处理.....	23
<b>4 甘肃省生态文明建设统计测度与分析.....</b>	<b>24</b>
4.1 生态文明建设水平测算.....	24
4.1.1 测算方法及步骤.....	24
4.1.2 测算结果.....	26
4.1.3 生态文明建设特征分析.....	27
4.2 生态经济系统运行测度.....	34
4.2.1 测度方法及步骤.....	34
4.2.2 测度结果.....	37
4.2.3 生态经济系统运行分析.....	38
<b>5 结论与思考.....</b>	<b>41</b>
5.1 结论.....	41
5.2 思考.....	41
5.2.1 对研究方法的思考.....	42
5.2.2 对研究对象的思考.....	43
<b>参考文献.....</b>	<b>45</b>

# 1 引言

## 1.1 研究背景

生态文明建设是中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局的关键环节，也是中华民族永续发展的根本大计。生态兴则文明兴，生态文明建设牵动着中国现代化发展的方方面面<sup>[1]</sup>。党的十八大以来，我国生态环境保护发生了历史性、转折性、全局性变化，当前，生态文明建设正处于“三期叠加”的新阶段，我国生态文明建设的紧迫性不断增强，推广难度日渐加大，实施的机制和路径进一步丰富。因此，充分把握生态文明建设的新体系、新目标和新任务，对于进一步增强生态文明建设的意识和主动性发挥着至关重要的作用。

“黄河宁，天下平”。从某种意义上讲，中华民族治理黄河的历史也是一部治国史。甘肃省作为黄河上游至关重要的省区，承担着涵养水源，生物多样性保护等多种功能，是西北乃至全国的重要生态屏障，起着保障我国生态经济系统安全的重要作用。近年来，甘肃生态文明建设成效显著，但其特有的区位特征，使其在生态文明建设中面临着更加特殊而严峻的建设任务，落后的经济需要发展；脆弱的生态急需保护；生态安全不容忽视……针对甘肃省生态脆弱区生态文明建设的重点任务，构建统计测度体系以全方位量化管理其生态文明建设过程，是当前甘肃省生态文明建设的一个重要工作。统计方法体系的构建，合理测度方法的选取是统计测度的落脚点，论文借助数理统计学方法、空间统计学方法与生物数学方法定量测度甘肃省各市州生态文明建设水平。

“绿水青山就是金山银山”。然而，长期以来，甘肃省发展基本上是以资源消耗为主导的模式。这种资源大量开采、竭泽而渔的粗放发展模式对生态环境的破坏相当严重。生态失衡、生存环境恶化，资源环境对经济增长的制约已成为制约甘肃省发展的重要问题，此时，寻求一个环境与经济相互协调的发展模式成为甘肃省改善发展现状的必需。以“人与自然和谐共生”为基石的生态文明成为时代诉求，甘肃省生态文明建设测度工作势在必行。

## 1.2 研究目的和意义

在中国，生态文明建设迈进了新时代<sup>[2]</sup>，生态文明建设是功在当代，利在千秋的伟大事业<sup>[3]</sup>。长远看来，生态文明建设任重道远，道阻且长，既需要科学规划与统筹管理，又需要对建设过程全方位定量测度与监控，在相关理论与实践研究已有一定成效又需进一步探索的背景下，建设过程中产生的诸如生态经济系统运行测度、发展协调度的量定等生态文明建设相关统计测度问题的研究更是需要进一步的系统化与规范化。

测度区域生态文明的发展水平，是生态文明评价的重要内容，也是生态文明问题由定性分析向定量分析转变的重点。对于区域生态经济系统而言，要想系统得以平稳有序运行，离不开系统中各个影响因素的共生协调发展，只有各个系统之间保持协调发展，相互促进，才能保证系统的良性循环，走可持续发展道路。

甘肃省既是经济欠发达地区，又是生态环境脆弱区、生态位安全屏障区，在国家生态文明发展战略中地位特殊，其生态文明建设更需要统筹兼顾，多方协调以求保持定力均衡发展。因此，注重其区位发展特征与功能，构建测度甘肃省生态文明建设水平的合理指标体系，进而对区域生态经济系统内部运行进行科学评价，具有重要的现实意义。

在此背景下，论文以国家生态文明建设战略规划为指导，立足于生态经济系统，同时结合系统论和甘肃省发展特征，首先构建了甘肃省生态文明建设评价指标体系，采用空间统计方法分析甘肃省 14 市州生态文明的集聚演变趋势；借助重心—标准差椭圆法研究甘肃省生态文明建设水平及协调性的空间分布状态及格局演变特征，而在甘肃省生态文明建设统计测度方法的基础上，引入 Lotka-Volterra<sup>[4-10]</sup>模型，探讨模型的统计学建模路径并进行实证分析，评价系统运行的共生协调性，对区域各系统发展水平的共生协调性进行研究，有助于了解甘肃省生态文明发展进程中各系统间的协调状况，同时认识到系统之间存在相互制约的、不协调的情况，以期为政府工作提供定量分析的依据。

## 1.3 国内外研究综述

### 1.3.1 国外研究现状

在排除了中国在国内举办的国际会议上发表的论文和在中国发表的英文期刊论文之后，国际有关生态文明研究的论文很少。而就在这不多的论文中，大部

分也是中国学者的贡献<sup>[11]</sup>，或者是国内外学者介绍中国生态文明的文章<sup>[12]</sup>，或者是探讨生态与文明关系的论文<sup>[13]</sup>。

查阅相关文献得知，国外有关生态文明测度或评价的论文很少，但却是首先提出生态文明概念。“生态文明”的最早概念可能是德国费切尔<sup>[14]</sup>(Iring Fetscher)提出。但是，学术界公认的国外最早正式研究生态文明的学者是 Roy Morrison，他于 1995 年在《生态民主》一书中专门论述过生态文明的概念<sup>[15]</sup>；2006 年，他在《生态文明: 2140》<sup>[16]</sup>一书中探讨了未来 22 世纪生态文明实现的可能性。

遗憾的是，这些颇有意义的研究与讨论并没有引起国外学术界的广泛关注和响应。但是国外学者在生态环境和可持续发展等领域的评价方法对我国学者的研究工作提供了良好的方法论引导。例如：PSR 模型<sup>[17]</sup>、DPSIR 模型<sup>[18]</sup>、DPSEEA 模型<sup>[19]</sup>、HDI 人类发展指数<sup>[20]</sup>、生态足迹法<sup>[21]</sup>，足迹家族<sup>[22]</sup>等。

### 1.3.2 国内研究现状

相比较而言，尽管我国对生态文明研究起步较晚，但国内学者积极进行生态文明的相关研究工作，通过研究发现，我国是最早的生态文明践行者，在全球也是开创性的局面。

叶谦吉先生<sup>[23]</sup>是我国最早提出“生态文明”概念的学者。最早研究“生态文明评价”的论文是关琰珠<sup>[24]</sup>于 2007 年发表的。随着当前生态文明建设重要性的日益凸显，相关研究论文呈现上升趋势，通过对相关论文的研究发现，关于生态文明研究的文献主要集中在评价主体范围的选取、评价方法的确定、评价标准的衡量等三个方面。

#### (1) 评价范围

对生态文明的测度评价首先要明确测度的主体范围，从现有的研究来看，对生态文明的测度基本上涵盖了国家、省域、市域、县域、城市群研究等。已深入到宏观层面、中观层面、微观层面等。其中，2013 年，成金华<sup>[25]</sup>、2016 年熊曦<sup>[26]</sup>和 2016 年吴慧玲<sup>[27]</sup>等以国家为研究主体，探讨宏观层面的生态文明水平；也有学者对我国城市群的生态文明建设水平进行了相关研究，其中，2016 年，马勇<sup>[28]</sup>对长江中游城市群生态文明水平进行测度；同年，胡悦<sup>[29]</sup>对京津冀城市群生态文明水平进行测度；部分学者以省域为研究主体，开展生态文明工作：2018 年，冯石岗以河北省为研究主体测度生态文明发展水平；2019 年，任传堂<sup>[30]</sup>以山东

省为研究主体，基于 DPSIR 模型构建指标体系，采用熵值法对山东省生态文明建设进行综合评价。

### （2）评价方法

评价方法的选择对于生态文明评价结果的科学性和准确性有着直接的影响，不同评价方法的选取可能产生不同的评价结果。当前，现有的研究集中在如何将众多的指标综合为生态文明综合指标值上，所采用的方法通常有指标法和指数法。常见的指标体系的构建、权重的确定方法主要有：投影寻踪法、模糊灰色统计、熵权法与协调度模型、生态位理论、AHP 和均方差决策综合法、因子分析和聚类分析法、动态因子分析法、主成分分析法、网络层次分析法等。

### （3）评价标准

度量标准的科学确定对生态文明的科学评估具有一定的影响。当前，学术界对生态文明的评价标准并没有形成统一的界定。就目前而言，学者们关于生态文明评价结果的衡量标准主要有三种：一是根据区域生态文明综合得分进行排名；二是根据生态文明综合指数值进行生态文明排名；三是根据生态文明的综合得分和综合指标值对生态文明进行分类，并辅以聚类分析将其分为几个层次。

在得出区域生态文明水平，进一步测度区域生态经济系统内部协调性分析相关研究中，现有的文献均借鉴物理学中的容量耦合系数模型推广得到两个或多个系统相互作用耦合度模型。其中，2016 年胡悦<sup>[29]</sup>引入协调度函数分析京津冀地区各子系统的协调度；2019 年，任传堂<sup>[30]</sup>采用耦合协调模型，对山东省生态文明建设进行综合评价，并分析其耦合协调度。

## 1.3.3 文献述评

通过梳理现有文献，发现学者们对生态文明进行了大量的理论和实证研究，为本文的研究提供了很多参考和借鉴。但是经过深入分析后，仍有较大改进的空间：

（1）在生态文明评价主体中，研究主体多为国家层面、东中部省份、较大城市群或经济特区，对我国西部地区省市的研究较为缺乏，事实上，我国西部地区大部分省市处于生态脆弱区，经济较为落后，生态环境较为脆弱，因此加强对我国西部省市生态文明现状的研究，对于丰富我国西部地区生态文明建设研究工作有着重要的实际意义。

(2) 对于指标的选取方面, 仍然存在着以下问题: 一方面, 在生态经济系统的统计测度研究中, 现有指标完备性不足, 经济指标多, 多数为价值量指标, 实物量指标不足; 另一方面, 指标选取的立足点不足, 主观性和随意性较强, 例如, 部分文献指标是根据在现有文献中出现的频次来筛选, 没有形成科学体系, 缺乏科学性。

(3) 对于生态经济系统内部运行协调性的分析中, 国内外学者对生态经济系统运行协调性进行了一定的研究, 从理论到实证、从定性到定量、从数学模型到系统论角度、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。而从生态经济系统协调运行的相关研究可知, 现阶段的研究存在一定的偏向性, 即学者多采用耦合度模型评价生态经济系统的协调性, 得到的结果无法反映生态经济系统内部各子系统的相互作用, 协调性评价略显不足。

## 1.4 研究内容与框架

### 1.4.1 研究内容

内容研究方面, 论文始终以甘肃省各市州生态文明建设相关问题为主线进行研究, 围绕建设过程与建设结果两个方面展开具体论述: 一方面, 各市州生态文明建设过程问题, 即生态文明建设水平测度问题; 另一方面, 各市州生态文明建设结果问题, 即生态经济系统内部运行平稳性问题。基于此, 论文以甘肃省 14 市(州)为研究对象, 立足于生态经济系统, 在生态文明测度体系框架下, 构建生态文明建设综合指数, 全面综合地度量、监测、评价甘肃各市州生态文明建设问题。文章的研究内容主要包括三部分:

第一部分: 交代研究背景, 梳理相关文献, 确定研究内容和思路以及对相关理论和方法进行回顾。

第二部分, 对甘肃省生态文明建设进行统计测度分析, 具体从以下三个方面展开研究:

第一, 对甘肃省生态文明建设现状及面临的挑战进行分析, 进而展开甘肃省各中心城市生态文明测度工作。

第二, 甘肃省各城市生态文明建设测度评价。通过构建生态文明综合指数,

对甘肃省各中心城市的生态文明水平进行测算分析，定量剖析甘肃省城市生态文明建设特征。

第三，甘肃省各城市生态经济系统内部运行分析。通过构建共生协调度指数，对甘肃省各个中心城市的共生协调性进行分析，进而发现存在的问题。

第三部分：结论及思考。首先对论文提出的生态文明测度体系进行深入剖析，其次，根据得到的实证结果对甘肃省生态文明建设工作的发展提出相关建议。

### 1.4.2 研究框架

论文采用理论分析与实证检验相结合、定性分析与定量分析相结合的研究方法对甘肃省各市州生态文明水平展开研究，研究路线见图 1.1。

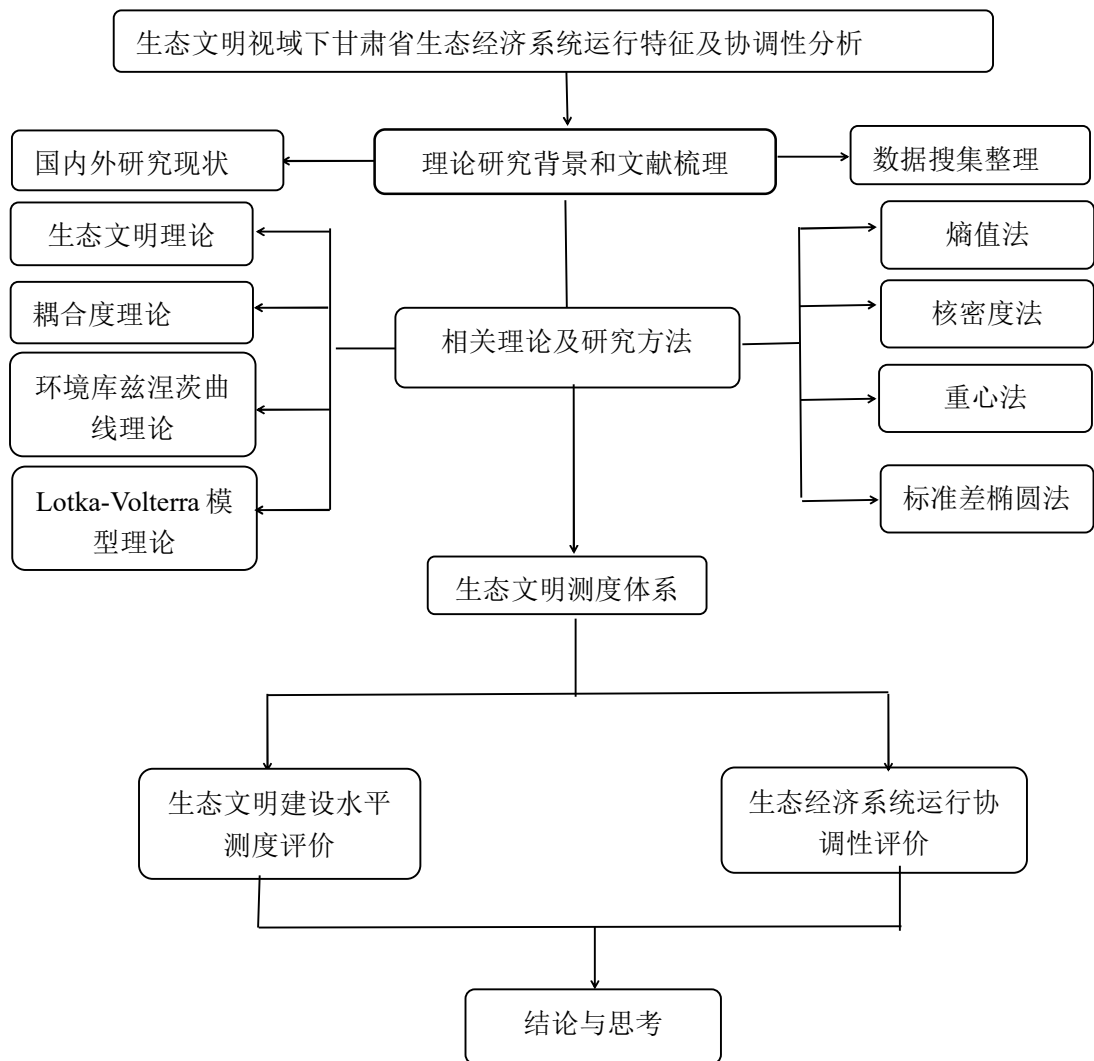


图 1.1 研究框架图

## 1.5 创新点和不足之处

### 1.5.1 创新点

(1) 立足于生态经济系统，对生态文明建设测度体系进行了补充，特别就生态脆弱区甘肃省构建生态文明建设指数进行全方位测度。

(2) 对数理统计方法、空间统计方法和生物数学方法进行科学组合，定量解析甘肃省城市生态文明建设特征。一方面，借助数理统计学方法和空间统计学方法对生态文明建设特征进行测度，属于建设过程测度；另一方面，借助生物数学模型对生态经济系统内部运行特征进行测度，属于建设结果测度。

### 1.5.2 不足之处

(1) 论文的指标体系的选取及权重方法的确定源自课题组相关成果，在指标选取的完备性方面，仍然有较大的改进空间。

(2) 论文只对甘肃省市域层面进行探讨，但综合来说，生态文明测度层面应分为宏观层面，中观层面，微观层面，但由于数据的可获得性，微观层面的研究尚未在论文中展开进一步的论述。

(3) 论文尝试对多种方法如数理统计方法、空间统计方法和生物数学方法进行组合，但有关方法的进一步优化，没有进行深入的探讨。



## 2 相关理论与研究方法

### 2.1 相关理论

#### 2.1.1 生态文明理论

(1) 生态文明提出历程。回顾与梳理生态文明的建设历程对于开展生态文明建设测度工作具有理论指导意义。论文沿着我国政府对生态文明建设的引领路径,探讨其提出历程。

党的十七大报告正式将“生态文明”列入社会主义建设的总体体系中。党的十八大报告提出,建设生态文明,是关系人类福祉,关乎民族未来的长远大计。十八大以来,生态文明理论深入人心。生态文明理念符合人类社会发展规律,顺应人民群众对于美好生活的期盼,推动经济高质量发展,绝不能再走先污染后治理的老路。只要坚持生态优先,绿色发展,锲而不舍,久久为功,就一定能把绿水青山变成金山银山。

党的十九大报告中,习近平总书记进一步提出了“生态文明体制改革”的思想,并做出了总体改革的部署。同时,报告也提出了物质文明、政治文明、精神文明、社会文明、生态文明等“五个文明”的概念,把生态文明有机地融入到“五个文明”当中,尤为引人注目的是,十九大报告把“建设美丽中国”的“美丽”纳入到我国现代化建设的价值目标当中。这时,我国的物质文明、政治文明、精神文明、社会文明、生态文明将全面提升,至此“五个文明”与“五位一体”,现代化的“五个价值目标”相互对应,构成一个完整的社会主义文明建设体系。

总的来说,“五个文明”建设相互依存、相互渗透和相互促进,构成一个有机的文明整体。其中,生态文明是社会文明发展的自然前提,物质文明是社会文明发展的经济基础,精神文明是社会文明发展的思想导向,政治文明是社会文明发展的制度保证,社会文明是社会文明发展的基本条件。五者相辅相成,缺一不可。

(2) 生态文明的重要性。在整个社会文明建设当中,生态文明占有一个特殊的重要地位,首先,它为物质文明提供劳动的对象和劳动的资源。我们的一切经济活动都是依赖于自然界的,所谓工业文明所创造的人工产品,归根揭底不过

是自然资源的一种变形和改装,离开自然界,人类的一切活动都无从进行;其次,它是精神文明建设的有机组成部分。在生态文明建设显得日益重要和紧迫的形势下,把生态伦理、生态意识、生态价值等生态文明观念纳入到精神文明建设的范畴之中,使之成为精神文明建设的一个有机组成部分乃大势所趋,势所必然;再次,它是政治文明建设的重要组成部分。现在各国政府包括我国政府都制定了生态环境保护的法律制度,“生态体制”或“生态制度”已成为一种新的政治概念,被纳入到政治文明的范畴之中;最后,生态文明也是社会文明的应有之义,在社会管理和保障体制当中。保护自然环境、防治生态危机是一项重要的任务。由此可见,生态文明虽然在表述上放在“五位一体”、“五大文明”和现代化的“五大价值目标”的最后,但它的地位却是最为重要。可以试想以下,若生态文明遭到破坏,那么,整个人类的文明就失去赖以立足的前提,因而必然走向衰亡。历史上诸多文明的消亡,莫不与生态环境的毁坏有关,这就是自人类跨入文明社会以来,文明演化留给我们的经验教训和智慧启迪。

## 2.1.2 耦合度理论

论文借助物理学中的容量耦合系数模型分析经济社会系统和生态环境系统的耦合度,其多系统的耦合度模型<sup>[31]</sup>一般化的计算公式如下:

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

其推导过程如下:

(1) 集合  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  中任意两个不同系统值得算数平均数为

$$A(U_i, U_j) = \frac{U_i + U_j}{2} (i < j), \text{ 那么此类算数平均数共有 } C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2} \text{ 个。}$$

(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) 使用所有系统值得几何平均数除以上式, 即可以得到  $C$  :

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

由上述推导过程可知, 耦合度模型成立。

### 2.1.3 Lotka-Volterra 理论

美国生态学家 A.J.Lotka 和意大利数学家 V.Volterra 对逻辑斯蒂模型进行拓展, 构建了 Lotka-Volterra 模型 (以下简称 L-V 模型), 该模型对现代生态学理论与共生理论的发展产生了重大的影响<sup>[32]</sup>。

L-V 模型的基本形式如下<sup>[33]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = r_1 N_1(t) \frac{K_1 - N_1(t) - \alpha N_2(t)}{K_1} \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = r_2 N_2(t) \frac{K_2 - N_2(t) - \beta N_1(t)}{K_2} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中,  $N_1(t), N_2(t)$  分别为某区域内物种  $S_1$  和  $S_2$  种群的个体数量;  $K_1, K_2$  分别为该区域内物种  $S_1$  和  $S_2$  种群所依赖的环境容纳量;  $r_1, r_2$  分别为物种  $S_1$  和  $S_2$  种群的增长率;  $\alpha$  为该区域内物种  $S_2$  对  $S_1$  的竞争系数;  $\beta$  为该区域内物种  $S_1$  对  $S_2$  的竞争系数;  $t$  为时间。

Lotka-Volterra 模型自提出以来, 理论方面不断得到完善与拓展, 同时也较为广泛的应用于实证研究中, 学者一般用来验证产业间耦合关系、能源产业间竞争、经济增长与能源消耗关系和系统间耦合关系。目前, 运用 Lotka-Volterra 模型处理现实问题, 主要有两种方法, 一是从理论角度研究 Lotka-Volterra 模型的持久性、渐进性、稳定性、解的存在性等, 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, 理论研究与实证研究都较为丰富。基于此, 论文以 Lotka-Volterra 理论为基

础，构建测度甘肃省各市州生态经济系统内部运行的共生协调度模型，定量解析生态经济系统内部运行机制。

### 2.1.4 环境库兹涅茨曲线理论

环境库兹涅茨曲线（EKC）理论认为，在经济发展初期，人均 GDP 与环境污染呈现正相关，环境的恶化程度随着经济的增长而加剧，此时环境质量与经济发展处于“两难区间”，但是到达某个临界点以后，两者的关系进入“双赢区间”。

根据国内外已有的相关文献，常用于拟合环境库兹涅茨曲线的一元模型最主要的是二次模型，而在 EKC 不断的发展变化中又形成了三次模型和对数模型等模型形式。1992 年，Bandyopadhyay 和 Shafik<sup>[34]</sup>提出的计量经济模型，是将二次函数、三次函数与对数函数相结合，这是 EKC 模型理论方面一个重大的突破。其模型形式见下表<sup>[35]</sup>：

表 2.1 常见 EKC 模型

模型	模型表达式
二次模型	$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \varepsilon$
三次模型	$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \varepsilon$
对数模型	$y = b_0 + b_1 \ln x + \varepsilon$
对数二次模型	$y = b_0 + b_1 \ln x + b_2 (\ln x)^2 + \varepsilon$

注：x 表示人均 GDP，y 代表污染指标，ε 为误差项。

基于理论研究，论文借助环境库兹涅茨曲线理论对生态文明测度得到的相关结果进行解释说明，分析甘肃省各市州经济发展水平与生态文明建设状况的内在联系。

## 2.2 研究方法

研究方法是理论分析的实践路径，论文的研究对象是生态经济耦合巨系统，仅运用单一、纯粹的统计学方法或数学方法无法解决，因此论文的研究方法涉及多维交叉学科，同时注重统计思想的贯彻与统计方法的应用，主要采取数理统计学方法、空间统计学方法和生物数学方法对甘肃省各市州生态文明发展现状、生

态文明空间分布状态及格局演变特征、各子系统运行平稳性等问题进行综合研究。

### 2.2.1 核密度估计法

核密度估计<sup>[36]</sup>是估计未知密度函数的非参数方法之一,具有函数形势不受限制、避免了因设定的不合理导致的误差、以及估计结果的连续性更好等优点<sup>[37]</sup>。估计式如下:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (2-4)$$

式中,  $f(x)$  为根据生态文明建设水平在  $n$  个地区的值  $X_1, X_2, \dots, X_n$  得到的概率密度函数;  $k$  为核函数, 论文此处选取较为常用的 Gaussian 核函数;  $h$  为带宽, 其取值影响着核密度分布的平滑度。由于核密度估计法具有良好的估计特性, 满足论文对于方法的选取准则, 因此, 论文借助核密度估计法探析甘肃省生态文明建设的空间均衡性。

### 2.2.2 标准差椭圆法

标准差椭圆着重于揭示地理要素空间分布的全局特征<sup>[37]</sup>, 该方法主要借助重心、转角  $\theta$ 、 $x$  轴标准差及  $y$  轴标准差等参数定量的描述地理要素的空间分布特征。计算公式为:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i^* \cos \theta - w_i y_i^* \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i^* \sin \theta - w_i y_i^* \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (2-5)$$

$$\tan \theta = \frac{\left( \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^{*2} - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i^{*2} \right) + \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^{*2} - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i^{*2} \right)^2 - 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^* y_i^{*2}}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^* y_i^*} \quad (2-6)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  为研究区域的空间坐标;  $(x_i^*, y_i^*)$  为各点距离区域重心的相对坐标;  $w_i$  表示权重, 论文中  $w_i$  为各地区生态文明建设综合指数;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  分别为

沿  $x$  轴和  $y$  轴的标准差；论文借助标准差椭圆法分析甘肃省各市州生态文明建设的空间格局演变特征。

### 2.2.3 重心法

基于重心法的甘肃省生态文明水平空间分布主要测度重心位置的变动、偏移的方向和位移等三个维度<sup>[38]</sup>。

(1) 位置的确定：假设某区域由  $n$  个子区域组成，各子区域的中心坐标分别为  $(x_i, y_i)$ ，子区域  $i$  的某一属性值为  $w_i$ ，则该区域在此属性值意义下的重心坐标为  $(X, Y)$ ，分别表示为：

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2-7)$$

(2) 偏移距离的确定： $D_{i-j} = R\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$

式中： $D_{i-j}$  表示不同年份间重心的移动距离； $(x_i, y_i)$ 、 $(x_j, y_j)$  分别表示第  $i$  年和第  $j$  年区域重心的地理坐标； $R$  作为把经纬度转化成平面距离 ( $km$ ) 的系数，取常数 111.111； $R * (x_i - x_j)$  和  $R * (y_i - y_j)$  分别表示区域某种属性的重心从  $i$  到  $j$  在经度和纬度上的实际移动距离。

(3) 偏移方向的确定： $\theta_{i-j} = \frac{n}{2} \pi + \arctg \left( \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j} \right) (n = 0.2)$  (2-8)

式中： $\theta$  表示重心年际偏移的角度 ( $-90^\circ < \theta < 270^\circ$ )， $0^\circ$  表示正东方向，逆时针旋转为整，顺时针旋转为负。因此，论文借助重心法探讨甘肃省各市州生态文明建设水平的重心移动方向，移动距离、移动速度及重心便宜方向，定量解析生态文明建设水平空间特征。

### 3 生态文明建设统计测度框架体系

本部分属于甘肃省生态文明建设测度理论部分，生态文明的测度包括两方面的工作，第一项是对生态文明建设水平的测度，属于宏观层面；第二项是对生态经济系统内部运行的测度，属于微观层面；两者相辅相成，缺少其中一项，都不足以构成完整的生态文明测度体系。而构建合理的生态文明建设测度体系的前提离不开对当前生态文明建设现状的分析。本部分对甘肃省生态文明建设现状进行分析，归纳、总结甘肃省生态文明建设过程中的优势和短板问题，进而有针对性的构建统计测度体系。

#### 3.1 甘肃省生态文明建设现状

##### 3.1.1 建设现状

甘肃省在生态文明建设方面做出较大的努力，生态文明现状较之前有较大的改善，生态文明建设朝向优良方向发展。

第一，建立区域生态安全区。围绕城市群建立北部黄土高原生态屏障区，推进退耕还林政策。支持天水、平凉创建森林级城市。加强保护指白龙江、白水江、西汉水流域建立文化遗产保护区。

第二，加强环境综合治理。甘肃省的环境治理主要从三个方面进行，包括大气污染治理、流域水污染防治和土壤污染治理。大气污染治理。甘肃省大部分的供暖依然是以煤炭供暖为主，尤其在供暖季节，大气污染特别严重。流域水污染治理。控制污染物的排放量，完善城市排水系统的建设。土壤污染治理。石油和煤炭资源的开采，导致大片土壤被污染，实施土壤污染区的治理与修复，加强水源地的保护。

第三，提高政府观念把控。2016年甘肃省环保厅出台了《甘肃省环境保护厅关于做好建设项目环评受理“三个规范”工作的通知》，主要从机构管理、文件受理、评估程序三方面对环评机构的工作规范进行了监督。2017年甘肃省印发了《关于进一步加快推进生态文明制度建设的意见》，从宏观层面而言，甘肃省将着重在生态文明体制改革及绿色产业建设等方面进行生态文明制度的构建，就微观层面而言，甘肃省生态文明制度建设主要涉及环境的监管、资源的节约和有

偿使用、对绿色产业的支持以及各类示范工程的建设等方面。

### 3.1.2 面临的挑战

尽管甘肃省生态文明建设现状向良好的态势发展,但是仍然面临较为严峻的挑战。

第一,自然条件方面的挑战。甘肃位于 3 大高原和西北干旱区、青藏高寒区、东部季风区等 3 大自然区域的交汇处,地貌复杂多样,土地类型齐全,且交错分布,是全国自然生态类型最为复杂、最脆弱的地区之一<sup>[41]</sup>。

第二,经济方面的挑战。甘肃省是我国较贫困的地区其 GDP 仅占全国的 1% 左右,也是我国最为贫困的地区之一,其中有 43 个县被列为国家级贫困县。贫困人口多、贫困程度大、导致贫困的因素比较多,脱贫的难度较大。这些贫困人口经济基础薄弱、交通设施落后,劳动密集型产业相对较少。于是甘肃省贫困区的人口仍以从事第三产业为主,三产业所占的比例不合理,这也是各甘肃省各贫困县所面临的主要问题。大范围的贫困人口、薄弱的经济发展水平、单一的产业结构严重阻碍甘肃省生态文明建设进程。

为梳理甘肃省生态文明建设存在的问题,明确生态文明建设工作未来的发展方向,甘肃省迫切需要构建合理的统计测度体系评估当前生态文明建设现状。论文以下部分将从测度理论构建,实证分析,根据实证分析结果提出合理的发展建议展开具体的论述。

## 3.2 统计测度基本流程

生态文明建设统计测度体系的构建是生态文明建设的一个环节,为生态文明建设提供量化管理或决策依据。图 3.1 给出了生态文明建设统计测度体系构建的一般流程。

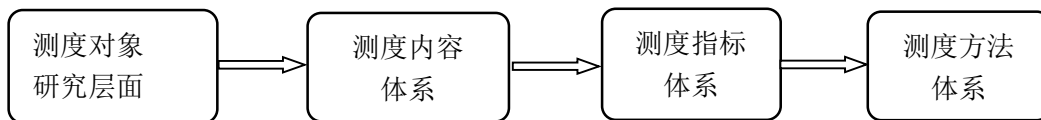


图 3.1 统计测度基本流程

第一步,确定测度对象及研究层面。

生态文明建设的根本追求是“人与自然和谐共生”,由生态经济学基本理论,



生态文明建设的一切活动立足于生态经济系统，因此，生态文明建设的测度对象为生态经济系统。生态经济系统由生态环境系统与经济社会系统两大子系统构成，而生态环境系统又可进一步分为生态系统与环境系统，经济社会系统可进一步分为经济系统与社会系统，构成系统的基本要素为人口、环境、资源及科技。因此，若视生态经济系统为要素集合，则统计测度对象及其为其全集或分层子集。

研究层面简单来说，是指统计指标的测算范围。例如，根据指标测算的空间范围，可分为宏观层面、中观层面及微观层面的研究；若进一步按中国行政区划测算指标并展开研究，则可分为国家层面、省域层面、市域层面、县域层面等。论文立足于市域层面，定量测度甘肃省各市州生态文明建设情况，因此属于微观层面研究。

第二步，构建测度内容体系。

生态文明建设的三个基本问题为“为什么建设生态文明”、“建设什么样的生态文明”、“怎样建设生态文明”。相应地，统计测度内容体系的构建也应围绕这三个问题展开，定量测度生态文明建设实践对上述目标的完成程度、问题的解决方式、解决能力等，从中总结量的规律性或发现问题。从生态经济学角度来看，上述问题也是生态经济系统如何运行及系统内要素的有效配置问题。因此，总体来说，生态文明建设测度内容主要是系统运行、系统内要素结构及配置问题。

第三步，构建测度指标体系。

生态文明建设是一个大型系统工程，对建设过程中任一方面或任一问题的统计测度很难由某一个或某几个量化指标完成，需构建满足测度需要的综合指标体系。指标体系构建的优劣，直接影响后续统计分析的有效性与充分性。根据测度内容、测度重点、测度对象及研究层面，构建合理指标体系是这一环节的重点，也是整个统计测度的重点环节。

第四步，选取并确定测度方法。

统计学作为一门方法论学科，其量化分析方法可应用于各类实质性学科领域，生态文明建设作为一个系统工程，其建设行为跨越多个学科领域；生态经济系统的要素特征也决定其量化分析方法具有生态学、社会学、环境学、经济学、地理学等多学科特色。对于同一个问题，不同方法有自身的切入角度，不同方法的适用条件及有效领域也各有差异。为保证测度结果的可靠性与稳健性，根据测

度目的及测度指标的特征，选择合理测度方法是这一环节的主要任务。

### 3.3 统计测度基本框架

#### 3.3.1 构建思路

生态文明的内涵是对其进行科学度量的理论基础。目前，国内外学者对生态文明确切内涵的定义仍然存在分歧，综合来看，主要可以分为狭义认知的生态文明和广义认知的生态文明两类。其中，“狭义的生态文明”指的是自然和半自然系统的生态文明，注重强调生态系统自身的健康性和可持续性。“广义生态文明”进一步强调了生态系统对人类提供生态服务，并研究了作为一个复合生态系统的经济，社会，自然和生态的总体可持续发展。通过分析相关文献可以看出，在目前的有关生态文明内涵定义中，并没有考虑到人类经济活动对生态系统构成威胁的反向性，人类生产生活对于整个生态经济系统的运行有序运行产生重要的影响，因此分析以人类经济活动为主体的生态—经济系统内部运行特征变得十分有意义。生态经济系统作为一个复杂耦合的系统，仅依赖“狭义”与“广义”的生态文明理论验证其内在耦合关系，得到的结果往往会有失偏颇。

基于以上研究分析，论文提出的生态文明测度体系是站在生态—经济复合系统的角度，从经济社会系统—生态环境系统协调共生性出发，来审视甘肃省生态经济系统生态文明的整体水平，其内涵见图 3.2。

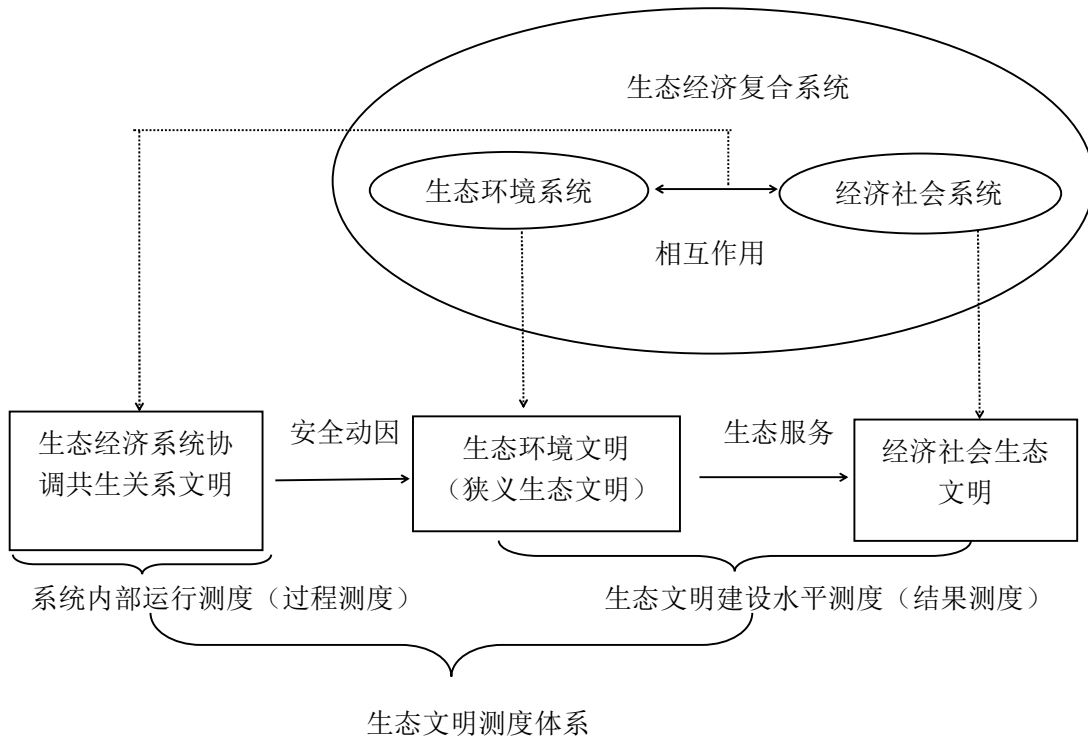


图 3.2 生态文明测度体系

需要说明的是，论文仅提出了一个初步的研究框架，用于定量测度区域生态文明发展的定量测度中，需要借助具体的量化模型。其中，借鉴自然间断聚类法、核密度估计法及重心-标准差椭圆法可能会是一个定量化途径。同时，面对生态经济系统多维度的共生协调关系，如何借助复杂性方法、生物数学方法、常微分方程模型、大数据及人工智能的发展，将不同维度的量化模型进行科学的组合，逐步形成一个集成描述、预测、评价等的统一方法体系，以便于更好的应用于生态文明建设定量测度的问题中，这是一个值得深入研究的问题。

### 3.3.2 内涵解析

生态文明测度体系拓展了传统有关生态文明评价进程中的“狭义”与“广义”的认知，是新时代下生态文明思想的发展与深化，弥补了传统生态文明测度框架的不足。相比与传统的测度方法，主要贡献在于为传统生态文明测度提供了一个跨学科的更加全面系统的理论框架。生态文明测度体系的提出，可丰富可持续性科学研究框架，深化生态经济学与数理统计学综合研究范式，有助于对区域生态文明的演化机制进行多维度，多角度，全面立体的评估，对于探讨区域内部系统作用机理有重要的作用，为可持续发展理念下区域生态文明的评估与测度提出了一个新的分析路径。

“生态文明测度体系”有助于我们形成一种整体性、立体式的多维度认知区域生态文明的系统观。该测度体系强调的是经济社会系统和生态环境系统是对立统一的，是相互矛盾且相互依赖的有机整体。它启示我们在探究区域生态文明问题时，要立足于系统整体观，协调平衡经济发展与生态环境之间的关系，不能只顾追求短暂的经济效益而牺牲生态环境，不能只看表面，应更注重长期的交互作用影响，在政府决策时应注重评估和权衡社会经济与生态环境间的近远程、远近期的耦合效应<sup>[42]</sup>。

生态文明测度体系启发我们对于当前生态文明测度方法的进一步反思。生态文明定量测度不是简单的指数相加，而应全面系统的定量测度，加入协调指数，使得区域生态文明不仅目前状态发展的好，还要在未来发展的更为长远，因此发展完善生态文明测度方法值得进一步思考。

### 3.4 统计指标体系构建

统计指标体系的构建是我国生态文明建设定量研究成果相对丰富的领域，各个学者从不同的角度进行研究，例如，国家层面，以绿色指数为例，该指数可以对生态文明建设的整体程度，质量和水平进行综合评价，并系统地反映生态文明建设各个具体领域的驱动因素，客观状况和政策努力，并且具有规范性和权威性。即使绿色指数的相关研究成果丰硕，但存在问题，在评价过程中，该指数的共性足够但差异性不足，缺乏具有地域特色或功能特色的专门评价体系，这种全国一个标准一刀切的评价体系既不利于地方差异化发展也可能导致一些急功近利的行为。甘肃省位于黄河上游生态脆弱区，生态问题较为突出，仅采用绿色指数的相关衡量指标不足以反映出甘肃省生态脆弱现状，因此构建具有针对性及侧重点的适合甘肃省生态文明评价的指标体系显得尤为重要。

为全面有针对性的分析甘肃省生态文明建设问题，论文从生态文明建设特征与生态经济系统运行评价两方面展开具体研究，分别构建生态文明建设评价指标体系和生态经济系统运行评价指标体系。

#### 3.4.1 生态文明建设水平评价指标

指标体系的合理、科学构建是甘肃省生态文明建设评价与水平测度的核心和基础<sup>[43]</sup>。论文从经济社会和生态环境两个系统、四个维度构建评价指标体系，

较以往研究有较大改进的方面在于生态环境维度指标的选取,在反映甘肃省现状水平的基础上借鉴环境保护标准指标,综合考虑了环境治理与生态保护,注重发展的全面性与均衡性。根据分析构建指标评价体系如下:

表 3.1 甘肃省各市州生态文明指标体系

生态经济系统	领域	评价角度	指标	单位	
经济—社会系统		发展水平	人均 GDP	元(+)	
			人均第三产业产值	元(+)	
			人均固定资产投资额	万元(+)	
		经济维度	发展质量	人均社会消费品零售总额	元(+)
				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	%(+)
				人均城乡居民储蓄存款	元(+)
				人均一般公共预算收入	元(+)
				城镇居民人均可支配收入	元(+)
		人口规模		农村居民人均可支配收入	元(+)
				城镇化率	%(+)
				城镇人口密度	人/平方公里(+)
		社会服务	社会维度	万人拥有卫生机构人员数	人(+)
				万人拥有文化事业机构数	个(+)
				万人拥有的普通中学学校数	所(+)
万人拥有 R&D 人员数	人(+)				
万人拥有养老服务机构数	个(+)				
生态—环境系统	生态维度	生态结构	林地覆盖率	%(+)	
			草地覆盖率	%(+)	
			水域面积比	%(+)	
		生态胁迫		耕地与建设用地面积比	%(-)
				成灾面积占受灾面积的比	%(-)
		生态建设		城市建成区绿地率	%(+)
				万人拥有城镇园林绿地面积	公顷(+)

		万人拥有公园面积	公顷(+)
环境维度	环境治理	空气质量好于二级的天数比例	%(+)
		万人拥有废水治理设施数	套(+)
		工业固体废物综合利用率	%(+)
	污染负荷	化学需氧量排放总量	万吨(-)
		二氧化硫排放总量	万吨(-)
		氨氮排放总量	万吨(-)
	环境压力	人均废水排放量	吨(-)
		人均工业废气排放量	万立方米(-)
		单位 GDP 废水排放	吨/元(-)
		单位 GDP 废气排放量	立方米/元(-)

#### (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。主要包括人均 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、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、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、农村居民人均可支配收入。

#### (2) 社会维度指标

以人口规模和社会服务衡量社会发展水平。主要包括城镇化率、城镇人口密度、万人拥有卫生机构人员数、万人拥有文化事业机构数、万人拥有的普通中学学校数、万人拥有 R&D 人员数、万人拥有养老服务机构数。

#### (3) 生态维度指标

以生态结构、生态胁迫和生态建设衡量生态质量。主要包括林地覆盖率、草地覆盖率、水域面积比、耕地与建设用地面积比、成灾面积占受灾面积的比、城市建成区绿地率、万人拥有城镇园林绿地面积、万人拥有公园面积。

#### (4) 环境维度指标

以环境治理、污染负荷和环境压力衡量环境质量，主要包括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、化学需氧量排放总量、二氧化硫排放总量、氨氮排放总量、人均废水排放量、人均工业废气排放量、单位 GDP 废水排放、单位 GDP 废气排放量。

### 3.4.2 生态经济系统运行评价指标

为了测算生态经济系统运行的协调性问题,需要构建测评经济社会—生态环境复合系统的经济社会子系统的生态文明综合指数、生态环境子系统的生态文明综合指数和环境容量的指标评价体系。在前文生态文明测度体系的理论支撑下,已将相关生态文明指数进行科学合理的测算,其中环境容量指数的计算,需要对相应的指标评价体系在压力—状态—影响—响应(PSIR)结构模型的响应下进行重新测算,基于此,构建指标框架如下:

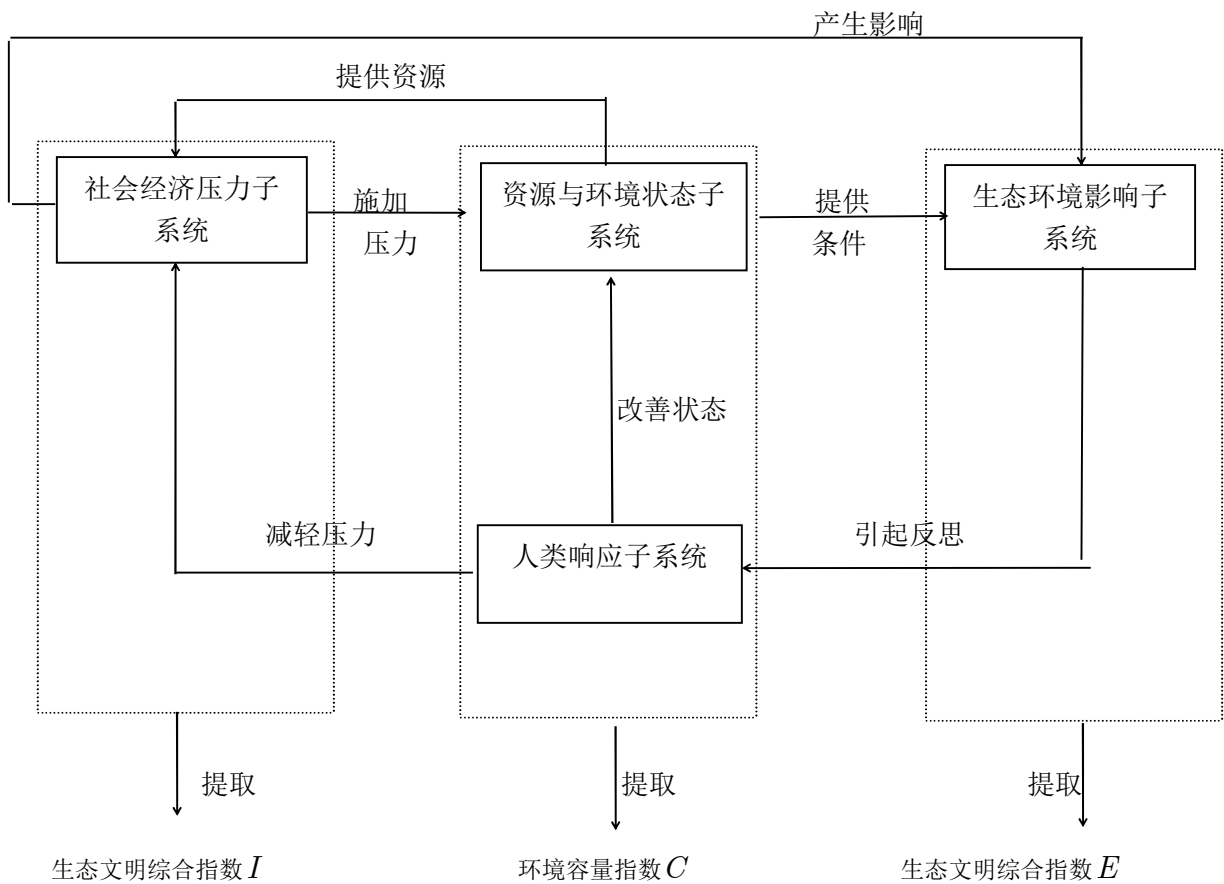


图 3.3 PSIR 结构模型

图 3.3 中的生态文明—PSIR 结构模型主要分为子系统, (1) 经济社会压力子系统, 反映经济社会对自然资源与生态环境造成破坏的压力; (2) 资源与环境状态子系统, 反映自然资源与自然环境的状态; (3) 生态影响子系统, 反映在经济社会压力和资源环境状态的作用下, 生态系统受到的影响; (4) 人类响应子系统, 反映人类为降低生态系统所受到的负面影响而做除的积极回应。

总体分析来看,两套指标评价体系之间相互联系,又存在不同:生态文明建设评价属于生态文明测度宏观层面,因此仅分为经济社会—生态环境两大子系统

研究；但对于系统内部运行评价属于生态文明测度微观层面，着重分析系统内部各子系统的相互作用关系，因此依据 PSIR 结构模型细分为四个系统研究。两套指标因评价角度不同，分类可能存在差异，但经过深入研究发现，两者之间不存在矛盾关系，因此适用于生态文明建设的测度工作。

### 3.4.3 数据说明与预处理

论文的研究对象为甘肃省 14 个市（州），2010-2017 年份数据均来自各年的《甘肃省发展年鉴》和甘肃省自然资源厅，部分数据有所缺失，利用插值法补全。

由于所选取指标的量纲不同，无法直接对原始数据直接进行计算，因此需要对数据进行标准化处理，具体步骤如下<sup>[44]</sup>：

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， $p_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ) 为无量纲化处理后的指标系数， $x_{ij}$  为第  $i$  个城市第  $j$  个指标的实际数值， $\max(x_{ij})$  为指标系列的最大值， $\min(x_{ij})$  为指标系列最小值。由于采用标准化处理的数据有部分数据为 0，因此对指标进行标准化处理，在此类数据的处理结果后需加上一个略大于零的正数，本文采用加 0.001 进行处理，可以避免赋值数的无意义。

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

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

在生态文明统计测度理论基础上，展开对甘肃省生态文明建设的综合评价。主要包括方面工作，一是对甘肃省生态文明建设水平的测度，二是对系统内部运行协调性的分析。



## 4 甘肃省生态文明建设统计测度与分析

### 4.1 生态文明建设水平测算

生态文明建设水平评价属于多变量综合评价,其目的是通过对生态经济系统各子系统的数量表现进行高度抽象综合,得到以定量形式确定的所研究区域生态文明建设综合优劣水平,根据评价得分对全部评价单元进行排序,比较各评价单元在评价期生态文明建设的综合水平。

#### 4.1.1 测算方法及步骤

甘肃省城市生态文明建设水平测算主要包含两方面:一方面是分维度指数测算,主要包括生态文明进步程度评价—进步指数、生态文明建设水平与发展潜力评价—水平指数、生态文明建设有序性评价协调指数;另一方面是综合指数测算,用综合指数反映甘肃省城市生态文明建设水平。

##### (1) 分维度指数测算

水平指数。反映甘肃省各市州生态文明建设的现状水平。假设有  $n$  个评价对象,  $m$  个子指标,第  $i$  个评价对象的第  $j$  项子指标值为  $X_{ij}$ ,首先,对各指标进行无量纲化处理;其次,运用熵值法对分维度指标求得静态权重;最后分维度指标数值乘相应的静态权重并加和,即为评价对象  $i$  的生态文明建设水平指数,见下式:

$$I_{i\text{水平}} = \sum_{j=1}^m w_j X_{ij} \quad (4-1)$$

上式中,  $I_{i\text{水平}}$  表示评价对象  $i$  的生态文明建设水平指数,  $w_j$  表示指标  $j$  的权重。

进步指数。客观上,有效的生态文明建设的的评价,不仅能反映区域当前的生态文明建设程度,还要能反映出区域当前的生态文明状况相比于过去的进步程度,反映出各市州为改善当前生态文明状况所做的努力和进步工作。通过比较甘肃省各市州生态文明建设的进步程度,即可以激励当前生态文明建设进步程度处于领先地位的临夏州和嘉峪关市持续改进,又可以勉励进步程度排名较为落后的平凉市提高积极性,认识自身生态文明建设的不足之处,朝着生态文明建设优良

方向发展；对于生态文明建设进步程度处于中间位置的其他市州可进一步指明发展方向，持续改进当前所处的建设状况。计算过程如下：

$$X_{ij} = \begin{cases} \frac{X'_{ij} - X''_{ij}}{X''_{ij}} (\text{正向指标}) \\ \frac{X''_{ij} - X'_{ij}}{X''_{ij}} (\text{逆向指标}) \end{cases} \quad (4-2)$$

上式中， $X_{ij}$  是评价对象  $i$  第  $j$  项指标的进步率， $X'_{ij}$  是现状指标值， $X''_{ij}$  是  $X'_{ij}$  前一年的指标值。

首先对指标数据进行标准化处理，得到无量纲的指标系数；其次，运用熵值法对分维度指标求权重，得到 2011~2017 年指标数据的动态权重，对各年份动态权重取平均得到分维度指标的静态权重，目的是消除动态权重对进步指数计算的影响，也就是说得到的进步指数完全由指标增长率引起的，最后分维度指标数值乘相应的静态权重并加和，即为评价对象  $i$  的生态文明建设进步指数，见下式：

$$I_{i\text{进步}} = \sum_{j=1}^m w_j X_{ij} \quad (4-3)$$

上式中， $I_{i\text{进步}}$  表示评价对象  $i$  的生态文明建设进步指数， $w_j$  表示指标  $j$  的权重。

协调指数。利用协调度模型构建协调指数。协调度指数影响着生态文明建设到达临界值之后的特征和规律<sup>[45]</sup>，具体构建步骤如下：

构建耦合度模型：建立经济社会系统和生态环境系统二元系统的耦合度模型：

$$C_2 = C(U_1, U_2) = 2 \left[ \frac{U_1 \bullet U_2}{(U_1 + U_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-4)$$

其中， $C_2$  代表耦合度， $U_1$  和  $U_2$  分别代表经济社会系统和生态环境系统综合评价指数。其中  $0 \leq C_2 \leq 1$ 。耦合度  $C_2$  越大，说明耦合性越强；反之则说明耦合性越差，当  $C_2 = 0$  时，说明两系统处于无关状态。

构建耦合协调度模型：耦合度模型只能反映系统之间的作用强度，无法全面反映综合协调水平，因此，引入耦合协调度模型其公式如下<sup>[46-47]</sup>：

$$D = \sqrt{C \times T} \quad \text{其中, } T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (4-5)$$

式中,  $D$  表示经济社会系统和生态环境系统的耦合协调度(以下简称协调度),  $T$  表示区域经济社会系统和生态环境系统的综合指数,  $\alpha$ ,  $\beta$  为待定系数, 由于甘肃省区位特殊, 生态环境较为脆弱, 为在生态文明测度过程中突出其区位特征, 将其经济社会系统权重定为 0.4, 生态环境系统权重定为 0.6。

耦合协调度综合了经济社会与生态环境耦合度及这两者的综合指数, 它的适用性范围更大, 稳定性更强。因此可以用于测度同一区域不同时期或同一时期不同区域的经济社会和生态环境耦合发展定量分析与评价。

## (2) 综合指数测算

综合指数的测算始终聚焦生态文明的本质属性, 以定性科学属性为出发点, 定量科学属性为研究手段, 以经济社会—生态环境复合系统为纽带, 以生态文明测度模型为归宿点, 根据推导演绎的生态文明模型定量测度甘肃省 14 市州生态文明状况。基于以上分析, 论文将进步指数及水平指数的算术平均值作为综合指数的基数, 将协调指数作为修正系数, 综合指数基数乘以修正系数, 即为生态文明建设综合指数, 具体计算公式如下:

$$I_{\text{综合}} = \frac{1}{2}(I_{\text{水平}} + I_{\text{进步}}) \times D_{\text{协调}} \quad (4-6)$$

上式中,  $I_{\text{水平}}$  为水平指数, 衡量生态文明建设水平与发展潜力;  $I_{\text{进步}}$  为进步指数, 衡量生态文明建设的进步程度;  $D_{\text{协调}}$  为协调指数, 反映生态经济系统运行状态。

根据生态文明理论以及上述公式可知, 区域生态文明建设水平越高, 其计算的综合指数越大, 说明所研究的城市在发展过程中有效的兼顾了生态经济系统的协调发展, 生态经济系统处于健康运行状态; 反之综合指数值越小, 说明区域生态经济系统处于亚健康状态, 则需要对其生态文明建设所涉及的短板问题进行着重发展, 提高区域生态文明建设水平。

### 4.1.2 测算结果

论文基于水平—进步—协调视角构建的生态文明综合指数方法, 计算得到甘肃省 2011 年-2017 年的生态文明建设综合指数, 用以反映甘肃省城市生态文明建设水平, 测算结果见下表:

表 4.1 2011-2017 年甘肃省生态文明建设水平综合指数

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
兰州市	0.299	0.289	0.320	0.410	0.329	0.314	0.346
嘉峪关市	0.471	0.421	0.388	0.318	0.425	0.437	0.444
金昌市	0.293	0.281	0.321	0.333	0.317	0.288	0.363
白银市	0.210	0.237	0.205	0.220	0.244	0.233	0.249
天水市	0.220	0.185	0.191	0.233	0.220	0.194	0.235
武威市	0.228	0.191	0.241	0.196	0.230	0.234	0.230
张掖市	0.283	0.209	0.229	0.258	0.285	0.424	0.333
平凉市	0.168	0.162	0.167	0.218	0.201	0.223	0.224
酒泉市	0.297	0.289	0.237	0.306	0.296	0.302	0.286
庆阳市	0.245	0.194	0.221	0.227	0.243	0.184	0.206
定西市	0.189	0.142	0.157	0.228	0.231	0.191	0.205
陇南市	0.215	0.163	0.155	0.284	0.251	0.222	0.239
临夏州	0.211	0.166	0.160	0.226	0.215	0.191	0.160
甘南州	0.211	0.187	0.159	0.233	0.224	0.207	0.271

### 4.1.3 生态文明建设特征分析

#### (1) 生态文明建设水平强度特征分析

根据生态文明建设综合指数模型计算得出的生态文明建设结果,绘制甘肃省 14 市州 2011-2017 年生态文明建设水平均值,如下:

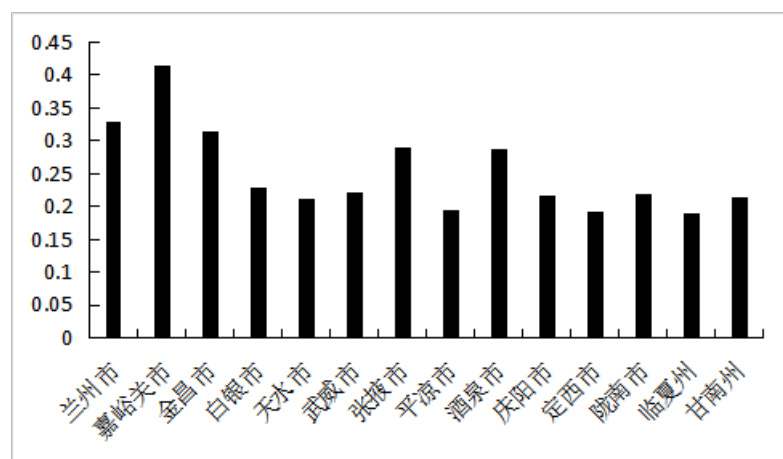


图 4.1 甘肃省 14 市州生态文明建设水平情况

甘肃省生态文明建设水平的平均值为 0.251, 表明甘肃省生态文明建设整体水平不高, 仍存在很大的发展潜力与上升空间。嘉峪关市、兰州市、金昌市、

张掖市、酒泉市等 5 个地区处于全省平均水平之上，其余地区均在全省平均水平之下。处于全省平均水平以上的地区基本都分布在甘肃省西北部河西走廊地区，说明甘肃省生态文明建设水平存在区域差异。

生态文明建设综合指数只能从整体上反映甘肃省生态文明建设水平，无法反映各城市经济发展于与生态文明建设水平之间的关系，基于此，引入环境库兹涅茨曲线理论<sup>[48]</sup>，对造成甘肃省 14 市州生态文明发展水平的差异性进行分析。基于此理论构建生态文明库兹涅茨曲线，使用多项式函数进行拟合，得到 2017 年的拟合曲线，拟合优度  $R^2$  为 0.8116，拟合结果见图 4.2。

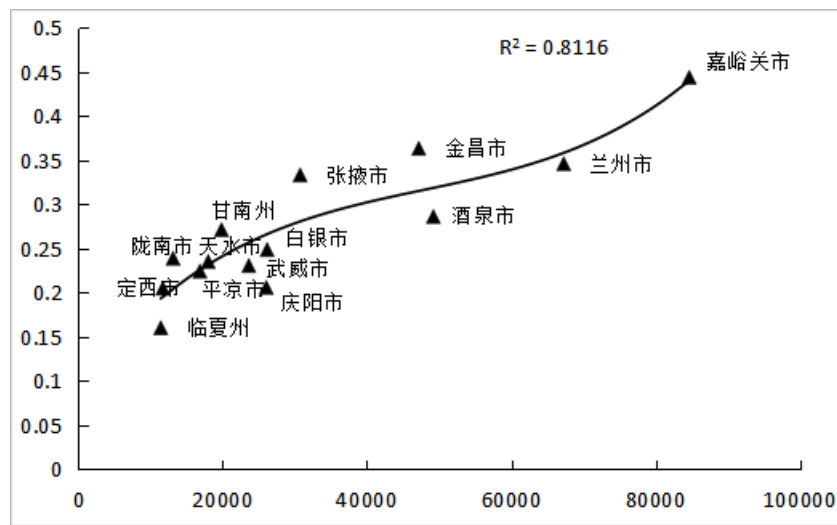


图 4.2 2017 年甘肃省 14 市州生态文明库兹涅茨曲线

由图 4.2 可知，嘉峪关市位于曲线的右上端，处于“双赢区间”，经济的边际贡献较高，显著促进生态文明水平的提高，且人均收入达到较高水平，7 年来一直稳居甘肃省生态文明建设水平前列；兰州市和酒泉市经济发展状况良好，但是却位于曲线的下端，生态文明建设滞后于经济发展速度，经济发展并未对生态文明建设起到驱动作用；临夏州位于“两难区间”，且经济发展较为落后，逐渐偏离曲线发展；金昌市和张掖市位于曲线的中上端，处于“双赢区间”，生态文明建设水平较好，研究期内，两城市一直稳居甘肃省生态文明建设水平前列。

## (2) 生态文明建设空间特征分析

生态文明建设的空间特征分析主要从三个方面展开，第一，空间差异性分析；第二，空间均衡性分析；第三，空间格局演变特征分析。

空间差异性分析。为更清晰的摸清甘肃省城市生态文明建设水平在空间上的差异性，运用 ArcGis 10.0 软件采用 Jenks 自然最佳断裂聚类分析法对甘肃省生

态文明建设水平进行可视化分析。

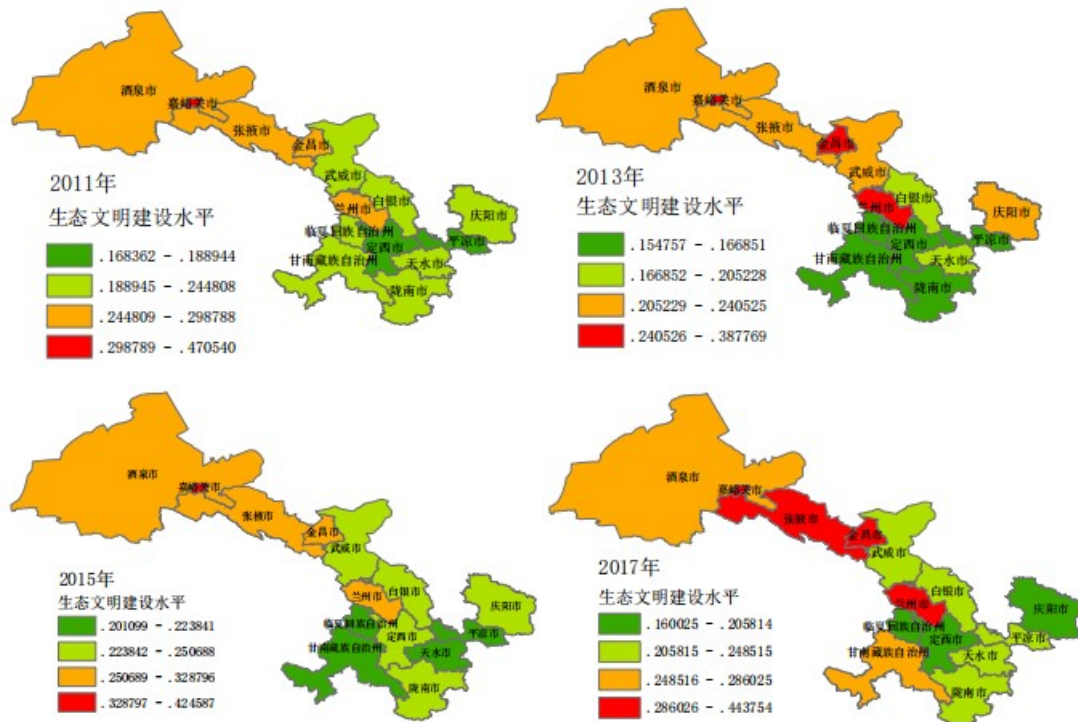


图 4.3 生态文明建设水平

从图 4.3 中可以看出，甘肃省各市州不仅生态文明发展水平差异较大，其空间分布也不均衡，生态文明建设水平大体上呈现出集群化、梯度化、极差化的分异特征。“集群化”特征表明甘肃省生态文明建设可以分为河西走廊、陇中地区、陇东地区、陇东南地区和民族地区，其中，河西走廊地区各市生态文明建设水平较高，这些地区的经济发展较为良好，在不断发展经济的同时也加重了对生态环境的保护力度，且部分地区在不断发展旅游业的同时也改善了当地的生态环境；民族地区和陇东地区生态文明建设较为落后；“梯度化”特征表现为生态文明水平整体上呈现出西北部高东南部低的梯度性差异；“极差化”特征表现为市州之间存在巨大的差异，以 2017 年为例，嘉峪关市、金昌市、张掖市、兰州市生态文明建设水平较高，但与兰州市紧邻的定西市和临夏州，生态文明建设水平较低，这两类型的生态文明建设水平呈现“极差化”分异特征。

空间均衡性分析。为考察甘肃省生态文明建设的空间非均衡状态，本文采用核密度估计法分析甘肃省 14 市州的生态文明建设水平的空间形态，经过相关计算得到 2011 年、2013 年、2015 年、2017 年的生态文明建设水平核密度分布，并绘制核密度分布图。

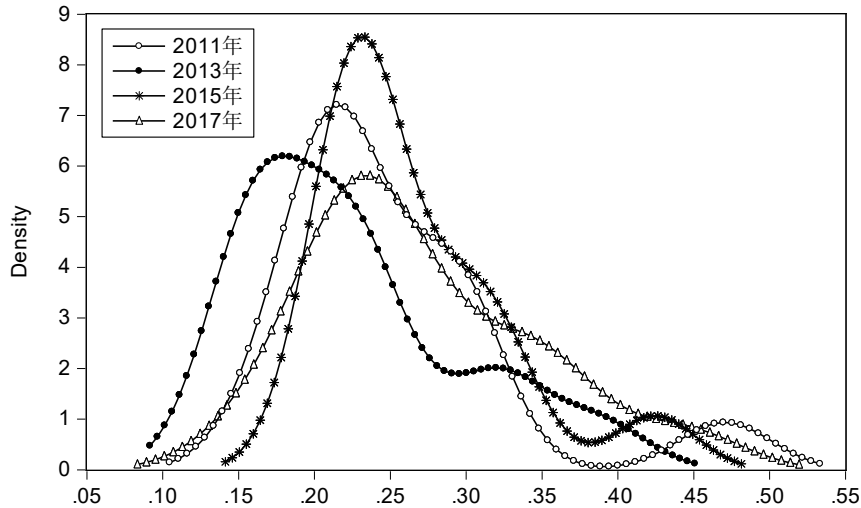


图 4.4 甘肃省生态文明建设水平核密度图

按时间变化趋势来看。2011年，生态文明建设水平存在较为明显的“双峰”分布，第一波峰对应的水平值约为 0.21，第二波对应的水平值为 0.47，说明 2011 年生态文明建设水平存在明显的两极分化；2013 年，第一波峰和第二波峰的峰值分别为 0.17 和 0.33，相对于 2011 年生态文明建设水平有明显降低的趋势，且第一波峰高度变矮，宽度变宽，表明甘肃省部分市州的生态文明建设水平有所降低，且各市州间生态文明建设水平不一，地区非均衡性较大。2015 年，第一波峰对应的水平值为 0.24，第二波峰对应的水平值为 0.42，说明 2013-2015 年以来甘肃省生态文明建设水平有逐渐提高的趋势，但提升幅度较小。2017 年呈单峰分布，且峰值水平为 0.23，较 2015 年呈现略微下降态势。

从整体变化来看。第一，从形状上看，2011 年，2013 年，2015 年均呈现较为明显的双峰态势，说明各市州生态文明建设水平两级分化程度高，甘肃省生态文明建设水平存在明显的空间非均衡性。第二，从峰度看，2011-2013 年，生态文明建设水平出现了尖峰向宽峰的变化趋势，说明这期间，生态文明建设水平的空间非均衡性逐渐扩大；2013-2017 年，生态文明建设水平出现了由宽峰-尖峰-宽峰的变化趋势，这说明空间非均衡性经历先减小再增大的趋势。

空间格局演变特征分析。为进一步了解甘肃省各市州生态文明建设水平的空间分布形态，本文运用重心—标准差椭圆对其空间格局特征进行分析。选取 2011 年、2013 年、2015 年、2017 年 4 个特征时点绘制生态文明建设水平的空间格局分布趋势图。

表 4.2 甘肃省生态文明建设水平重心移动方向和距离

年份	重心坐标 ( $^{\circ}E, ^{\circ}N$ )	方向(度)	移动距离 ( $km$ )	东西方 向距离 ( $km$ )	南北方 向距离 ( $km$ )	速度 ( $km/a$ )	东西方向速 度( $km/a$ )	南北方向速度 ( $km/a$ )
2011	(102.484,37.087)							
2013	(102.606,37.122)	东偏北 19.266 度	14.106	13.551	3.918	7.053	6.776	1.959
2015	(102.649,36.969)	东偏南 70.803 度	17.625	4.874	16.938	8.813	2.437	8.469
2017	(102.568,37.014)	西偏北 25.477 度	10.288	9.031	4.928	5.144	4.516	2.464

为了更直观的看出甘肃省生态文明建设水平的重心移动方向,绘制如下图所示的重心移动轨迹图:

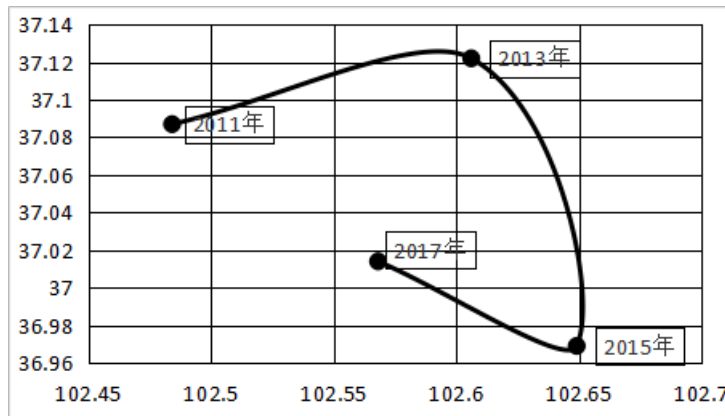


图 4.5 甘肃省生态文明重心移动轨迹图

从重心移动轨迹及方向上来看, 2011-2013 年, 重心逐渐向东北方向偏移, 偏移方向为东偏北  $19.266^{\circ}$ ; 2013-2015 年, 重心总体呈现出向东南方向移动的趋势, 说明在此期间甘肃省东南地区的生态文明建设水平有较大的提升。2015-2017 年, 重心逐渐向西北方向偏移, 偏移量为西偏北  $25.477^{\circ}$ , 说明在此期间西北地区较东南地区生态文明建设水平有较大的提升。总体来看, 甘肃省生态文明建设水平重心呈现出偏东北—偏东南—偏西北的趋势。

从重心移动距离及速度来看, 2011-2013 年, 重心的东进速度为 ( $6.776 km/a$ ), 移动的距离为  $13.551 km$ ; 在整个研究期内, 2013-2015 年重心移动的距离和速度最大, 分别是  $17.625 km$ 、 $8.813 km/a$ ; 2015-2017 年, 移动距离和速度有所下降, 主要归结与南北方向的北进距离和速度的大幅下降, 总体来看重



心的移动速度呈现出“缓慢升高—降低”的态势。

整体分析可得,2011-2017年甘肃省城市生态文明建设水平有以下两个特点:

第一,轨迹曲折,方向多变。从2011-2017年的全部轨迹来看,研究期内甘肃省生态文明水平的重心轨迹曲折迂回,方向多变是个显著的特点。尽管如此,但仍能找出甘肃省生态文明水平重心移动有一定的规律性。首先,在经度变化方面,各年的生态文明水平重心多半是东西往复摆动,应当指出,重心向西的摆幅逐渐减小,向东的摆幅逐渐增大。如果取东经 $102.55^{\circ}$ 为中线,在所测的四个年份的生态文明建设水平重心中有3个年份位于此线的东侧,只有一个位于此线的西侧。这一特点表明,甘肃省生态文明建设水平自2011年后呈现出略向东移动的趋势,甘肃省东部与西部的生态文明不均衡状况有所改善。其次,从重心的纬度变化方向经历了2011年-2013年北上—2013年-2015年南下—2015年-2017年北上三个变化阶段;这一特点表明南北部生态文明建设水平呈现出不均衡态势。

第二,重心没有固定的伸展方向。这一特点表明甘肃省各省市生态文明建设水平在研究期间处于动态变化中,在生态文明建设过程中尚未完全达到很高的水平,空间的非均衡性依然存在。

为了更清晰的观察甘肃省2011-2017年生态文明建设水平的空间格局演变趋势,论文借助Arcgis10.软件,得到生态文明建设水平空间分布的标准差椭圆参数,见表4.3。

表 4.3 甘肃省生态文明空间分布的标准差椭圆参数

年份	2011	2013	2015	2017
转角 $\theta(^{\circ})$	120.749	120.237	121.026	121.523
椭圆覆盖面积	23.924	22.565	23.606	23.373
沿 $x$ 轴长度	5.355	5.192	5.252	5.203
沿 $y$ 轴长度	1.422	1.384	1.431	1.430



图 4.6 甘肃省生态文明建设水平空间分布格局演化趋势

由图 4.6 可知，2011-2017 年生态文明建设水平椭圆标准差主要位于甘肃省中部部分地区，椭圆向东南方向偏移且覆盖范围逐渐缩小。2011 年、2013 年、2015 年、2017 年平均形状指数分别为 3.933、3.808、3.821、3.773，形状指数总体呈现出减小趋势，椭圆形状逐渐偏离正圆，说明甘肃省生态文明建设水平趋于分散；从转角  $\theta$  来看，转角呈现出“略缩小—增大”的过程，2011 年-2013 年转角虽有略微缩小，但是缩小幅度很小，可以视为其空间格局基本保持稳定态势；2013 年-2017 年转角偏转了  $1.286^\circ$ 。总体来看，甘肃省生态文明建设水平空间格局呈现偏西北—偏东南格局。从主轴长度来看，2013 年-2013 年，主半轴由 5.355 缩短至 5.192，说明生态文明建设水平在偏西北—偏东南的空间分布有所极化，2013 年-2015 年，主半轴由 5.192 增加至 5.252，说明生态文明建设水平在主轴方向上由分散的趋势；2015-2017 年，主轴长度由 5.252 缩减至 5.203，虽然间小幅度不大，但却表明了生态文明建设水平在主轴方向上极化的趋势；从辐轴的变化来看，2011-2013 年辅半轴由 1.422 缩减至 1.384，表明生态文明建设水平在偏东北—偏西南方向上有所极化；2013-2015 年辅半轴由 1.384 缩减至 1.431，表明生态文明建设水平在辐轴方向上有分散的趋势；2015-2017 年，辐轴变化幅度很小。可以视其空间格局基本保持稳定态势。

## 4.2 生态经济系统运行测度

生态文明强调的绿色发展观尊重环境承载能力的发展,是坚持人与自然和谐的发展,换句话说,就是追求生态经济系统协调可持续的发展。因此,对生态文明建设实效评估的一个主要内容就是生态经济系统运行的有序协调性。基于此,本章节从系统角度研究甘肃省城市系统内部的协调性,运用 L-V 模型建立区域生态文明发展体系的竞争演化模型,得到各子系统内部的协调性,以期可以为甘肃省城市生态文明的健康有序运行提供可行的理论依据。

### 4.2.1 测度方法及步骤

保护生态环境和发展社会经济从根本上讲是有机统一、相辅相成的,二者之间的协调性评价是生态文明建设统计测度的主要任务。协调体现两层含义,子系统发展质量与系统间运行的均衡性。因此,协调性的评价以区域发展水平定位为前提,是在生态文明建设水平与发展潜力评价基础上展开的进一步的目标追求,因此,协调性评价应静、动态结合,综合测度。

基于此,论文提出了基于生态经济系统的生态文明测度方法的新构想,指出应从在经济社会——生态环境复合系统出发,从共生协调角度展开研究,来审视区域生态文明建设的整体水平,论文在此基础上,借助 Lotka-Volterra 理论模型进一步推导、改进和完善,使之成为可操作的实用技术。

首先建立经济社会—生态环境复合系统的动态模型,经济社会子系统  $S_1$  与生态环境子系统  $S_2$  都是以生态经济复合巨系统中的自然资源作为生存条件,这两个子系统具有资源性竞争的特点,其总体原理与 Lotka-Volterra 理论描述的系统规律相一致。但经过深入分析可知,经济社会—生态环境两个子系统的运动和变化将会导致其赖以生存的自然资源的增加、减少或趋于稳定,从而进一步影响两者的共生状况。换句话说,在生态经济耦合巨系统中,环境容纳量是一个变量。而且,在实际情况下,两个子系统的增长率和竞争系数也处于变动状态。因此,为了便于将 L-V 模型应用于经济社会—生态环境复合系统,可以将生态经济系统中的环境容纳量、增长率和竞争系数在第  $k$  年附近近似的看作常数。构建生态经济复合系统动态共生模型,如下式:

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = r_I(k)I(t) \frac{C(k) - I(t) - \alpha(k)E(t)}{C(k)} \\ \frac{dE(t)}{dt} = r_E(k)E(t) \frac{C(k) - E(t) - \beta(k)I(t)}{C(k)} \end{cases} \quad (4-7)$$

式中,  $I(t)$  为区域内经济社会子系统的生态文明综合指数;  $E(t)$  为该复合系统中生态环境子系统的生态文明综合指数;  $C(k)$  为该复合系统中经济社会子系统与生态环境子系统共同依赖的自然资源在第  $k$  年环境容量指数;  $r_I(k)$  为第  $k$  年经济社会子系统的生态文明综合指数增长率;  $r_E(k)$  为第  $k$  年生态环境子系统的生态文明综合指数增长率;  $\alpha(k)$  为第  $k$  年生态环境对经济社会的竞争系数;  $\beta(k)$  为第  $k$  年经济社会对自然环境的竞争系数;  $t$  为第  $k$  年附近的时间变量。

在上式中, 经济社会子系统的生态文明综合指数  $I$ , 生态环境子系统的生态文明综合指数  $E$ , 环境容量指数  $C$  统称为生态经济系统 L-V 模型的基本指数。为了对经济社会系统和生态环境系统内部运行特征展开分析, 以下将对基本指数和竞争系数的进行测算。

#### (1) 相关指数测算

L-V 共生模型的基本指数测算。在上述的理论分析指导下, 借助 PSIR 结构模型选取相关指标, 并指标进行无量纲化处理, 同时运用熵值法计算基本指数的各项指标的权重系数, 得到各项指标的无量纲化标准值及权重系数后, 通过权重耦合, 得到基本指数。

L-V 共生模型的竞争系数估算。有关于 L-V 模型的研究, 学者试图利用系统稳定条件下的平衡点来求取竞争系数值。但是, 对于 L-V 模型, 平衡点以及环境容纳量是难以求得, 这是因为对于生态经济复合系统而言, 经济社会生态文明综合指数、生态环境生态文明综合指数以及环境容纳量指数等一般总是处于变动状态, 所以, 借助稳定条件下的平衡点计算竞争系数是不可取的。为了解决这一问题, 论文对公式(4-7)进行离散化处理, 离散化时间变量仍取年份  $k$ , 则有:

$$\begin{cases} I(k+1) - I(k) = \frac{I(k) - I(k-1)}{I(k-1)} I(k) \frac{C(k) - I(k) - \alpha(k)E(k)}{C(k)} \\ E(k+1) - E(k) = \frac{E(k) - E(k-1)}{E(k-1)} E(k) \frac{C(k) - E(k) - \beta(k)I(k)}{C(k)} \end{cases} \quad (4-8)$$

可以解得：

$$\begin{aligned} \alpha(k) &= [\varphi_I(k)C(k) - I(k)] / E(k) \\ \beta(k) &= [\varphi_E(k)C(k) - E(k)] / I(k) \end{aligned} \quad (4-9)$$

其中， $\varphi_I(k), \varphi_E(k)$  分别为经济社会系统与生态环境系统的稳定系数，反映子系统达到稳定状态的程度：

$$\begin{aligned} \varphi_I(k) &= 1 - r_I(k+1) / r_I(k) \\ \varphi_E(k) &= 1 - r_E(k+1) / r_E(k) \end{aligned} \quad (4-10)$$

根据前述 L-V 模型中竞争系数的含义，以及类比学者张智光<sup>[49]</sup>2013 年提出的生态与产业共生模式谱系，可以建立经济社会—生态环境复合系统竞争系数与协调共生模式的对应关系。根据 L-V 模型分析得出，共生作用的受力方向与竞争系数的符号正好相反。据此，定义经济社会—生态环境复合系统的共生受力系数：

$$\begin{aligned} S_I(k) &= -\alpha(k) = -[\varphi_I C(k) - I(k)] / E(k) \\ S_E(k) &= -\beta(k) = -[\varphi_E C(k) - E(k)] / I(k) \end{aligned} \quad (4-11)$$

上式中， $S_I(k)$  为经济社会受到生态环境共生作用的受力系数，简称经济社会受力系数； $S_E(k)$  为生态环境受到经济社会共生作用的受力系数，简称生态环境受力系数。

## (2) 测度模型构建

为了便于定量测度甘肃省各市州生态经济系统内部运行的特征，论文利用共生受力指数构造出经济社会—生态环境复合系统的共生度指数  $S(k)$ ，作为甘肃省生态经济系统是否处于健康有序运行的综合特征指数：

$$S(k) = \frac{S_I(k) + S_E(k)}{\sqrt{S_I^2(k) + S_E^2(k)}} \quad (4-12)$$

上式中， $S_I(k)$  和  $S_E(k)$  不同时为 0，根据不等式性质， $|S_I(k) + S_E(k)| / 2 \leq \sqrt{S_I^2(k) + S_E^2(k)} / \sqrt{2}$ ，只有当  $S_I(k) = S_E(k)$  时成立。

$$\text{可知, } |S(k)| = \frac{|S_I(k) + S_E(k)|}{\sqrt{S_I^2(k) + S_E^2(k)}} \leq \sqrt{2}。$$

共生协调度指数  $S(k)$ ，具有较为明确的生态经济涵义，反映了经济社会系统与生态环境系统的共生关系的优劣程度。根据上式可知， $S(k)$  的取值范围为  $[-\sqrt{2}, \sqrt{2}]$ ，取值越大，说明系统内部共生协调状态越好，系统内部运行处于健康运行状态；反之，则说明生态经济系统的共生协调状态越差，生态系统处于非有序运行状态。

#### 4.2.2 测度结果

由于在计算共生协调性结果时，需要对公式进行离散化处理，涉及到进步率问题，2017 年的协调共生指数需要涉及 2018 年的数据，因此，论文只显示 2012-2016 年的共生协调指数。

根据共生度指数公式，定量测得甘肃省 14 市州生态经济系统的共生协调性，结果如下：

表 4.4 甘肃省 14 市州生态经济系统的共生协调性

	2012	2013	2014	2015	2016
兰州市	1.408	1.291	-1.104	0.947	0.774
嘉峪关市	0.905	0.987	0.205	0.998	-0.986
金昌市	-0.062	0.645	-1.413	1.294	1.333
白银市	1.279	-1.168	-0.836	0.156	0.893
天水市	1.313	0.069	-0.458	-1.382	1.414
武威市	1.278	1.347	0.655	1.239	-0.891
张掖市	-0.613	0.918	-1.065	1.001	1.122
平凉市	-1.410	0.117	0.869	-0.023	-1.152
酒泉市	0.715	1.169	-0.189	-0.239	-0.913
庆阳市	-0.472	-1.352	1.028	1.006	1.175
定西市	1.088	1.023	-1.255	0.790	-0.431
陇南市	1.246	0.116	0.995	1.258	0.581
临夏州	-0.080	0.700	-1.245	1.403	-1.154
甘南州	-0.480	-0.759	-0.746	1.012	0.165

由于生态经济耦合巨系统的复杂性,无法用单一的指数反映生态经济系统的运行特征和所处的状态,根据前文分析可知,生态经济系统的安全性可以根据生态环境受力指数和共生协调度指数进行综合判断。

鉴于此,论文借鉴学者张智光提出的林业生态安全级别的双特征动态判断矩阵<sup>[50]</sup>,将其进行演绎推理,在演绎论证结果符合生态经济系统运行安全性的前提下,构建甘肃省生态经济系统安全级别的双特征动态判断矩阵,如下图所示,

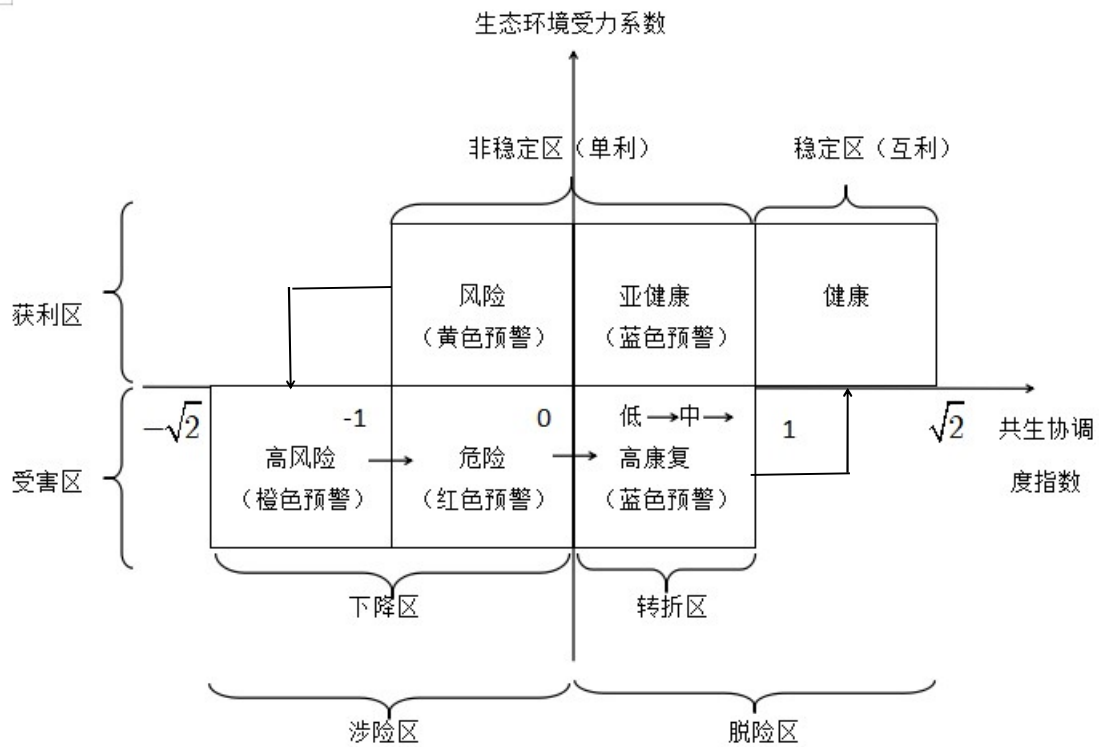


图 4.7 甘肃省生态经济系统安全级别的双特征动态判断矩阵

### 4.2.3 生态经济系统运行分析

根据以上分析,对甘肃省 14 市州生态环境受力指数和共生协调度指数进行可视化分析,得到 2016 年甘肃省生态经济系统安全级别的双特征动态判断矩阵,如下图所示:

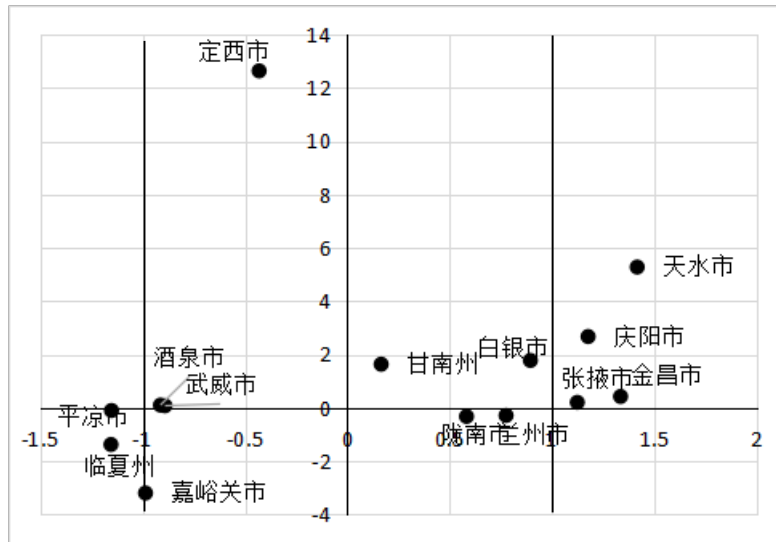


图 4.8 2016 年甘肃省生态经济系统安全级别的双特征动态判断矩阵

为了便于观察 2016 年各市州生态经济系统所处安全的安全级别，用以下表格进行表示：

表 4.5 2016 年甘肃省各市州所处安全级别

		安全级别	市州分类
生态环境系统 获利区	稳定区	健康级	天水市、庆阳市、张掖市、 金昌市
	非稳定区	亚健康级	白银市、甘南州
生态环境系统 受害区	下降区	风险级	酒泉市、武威市、定西市
		高风险级	平凉市、临夏州
	转折区	危险级	嘉峪关市
		康复级	兰州市、陇南市

由图 4.8 可知，2016 年甘肃省生态经济系统安全级别呈现差异性特征，其中，天水市、庆阳市、张掖市和金昌市属于健康级，经济社会系统—生态环境系统互利共生，趋于双赢状态；白银市与甘南州处于亚健康级，经济社会子系统与生态环境子系统共生协调度指数较健康级别城市小，但仍处于生态环境系统获利区；酒泉市、武威市、定西市处于风险级；平凉市与临夏州处于高风险级，生态经济系统出现橙色预警状态；嘉峪关市处于危险级，生态经济系统处于红色预警状态，生态经济系统的运行较差，生态环境系统处于受害区，若不及时对生态环境加以保护，将会进一步下滑至高风险级，但若该区域高度重视并积极推进生



态环境保护，就可能从危险区进入康复区，生态经济系统运行的安全性和有序性将会得到改善；兰州市与陇南市处于康复级，生态经济系统处于转折区，进一步对生态环境系统加以保护，生态经济系统可能达到互利共生的健康状态。

## 5 结论与思考

### 5.1 结论

生态文明建设关乎中华民族的长远发展,理解生态文明的发展水平,尤其是通过测度具体把握区域生态文明发展的变化趋势与内在差异,对于有效的引导生态文明政策的制定具有重要的现实意义。然而,对于生态文明发展水平的判断是基于生态文明内涵与外延定义之上的,既具有哲学思辨的特征,又具有价值评价的意蕴。论文基于生态文明测度体系框架,甘肃省 14 市州为研究对象,构建指标评价体系,对生态文明发展水平的演变及其区域状态进行定量考察,为理解近年来甘肃省生态文明发展状况提供依据。根据分析,得出以下几点结论:

(1) 2011—2017 年甘肃省生态文明建设水平呈现较为明显的“双峰”分布,且出现了尖峰—宽峰—尖峰的发展变化趋势,说明甘肃省生态文明建设水平呈现出明显的两级分化,且空间分布不均衡,高效区和低效区分异明显,空间非均衡性先逐渐降低后又逐渐扩大的动态演变特征。

(2) 2011-2017 年生态文明建设水平重心移动轨迹呈现先偏东南再偏西北的变化格局,重心移动速度呈现“缓慢升高—降低”的态势。

(3) 从标准差椭圆来看,甘肃省生态文明建设水平空间分布格局不断区域分散,转角呈现“略缩小—增大”的过程,表明甘肃省生态文明建设水平空间分布格局呈偏西北—偏东南,并有向西北不断偏移的趋势;从主辅轴变化来看,生态文明建设水平再主轴方向的空间分布呈现极化—分散—极化的过程,而在辐轴方向上呈现出极化—分散—基本稳定态势。

(4) 借助特征动态判断矩阵对甘肃省各市州生态经济系统的运行特征进行分析,可以得出,2016 年甘肃省生态经济系统安全级别级别呈现差异性特征,其中,平凉市和临夏州处于高风险级,说明经济社会系统和生态环境系统处于非健康有序状态,并且有可能发展到危险级方向;嘉峪关市处于危险级,说明该地区的生态经济系统很可能进入不可逆转的严重状态。

### 5.2 思考

## 5.2.1 对研究方法的思考

### 1、对于生态文明测度体系理论框架的思考。

经济社会系统与生态环境系统作为复合生态经济系统中非常重要的一环，两个子系统既有自身的发展演变规律和制约因素，同时又通过不断的物质交换、能量流动和信息传递，形成一个相互联系、相互制约、相互支撑的复杂耦合巨系统，其相互作用关系就是在一定的时间和空间维度中，通过各子系统的相互作用关系，经历着无序性的混沌状态转变为各子系统共生协调达到动态平衡的过程。

借鉴生态经济系统理论、生态文明内涵与共生协调理论，本文提出测度生态文明定量分析方法——“生态文明测度理论框架”，框架中系统与系统、要素与系统、要素与要素之间通过相互作用、相互影响等作用关系，形成一个相互联系的有机整体。生态环境系统与经济社会系统之间相互作用，前者为后者提供生态服务，后者作为限制因素制约前者的发展，两系统相互制约、相互限制，在区域生态文明过程中对于生态环境保护与经济社会发展的利益权衡与博弈策略，只有两系统呈现共生协调演化路径，整个生态经济系统才会向着有序状态运行。

“生态文明测度体系”分析框架在水平—进步—协调三个维度上相互作用，辩证统一。其中，水平维度衡量区域生态文明发展现状，进步维度衡量区域生态文明发展潜力，协调维度衡量生态环境系统与经济社会系统的共生协调性。基于生态文明测度体系形成了生态经济系统的一般性解析框架，提出在解决生态经济复杂巨系统问题时，要遵循“理论支撑、系统思考、维度全面”的分析思路。

### 2、对于共生协调度模型和思考。

论文第五部分借助 Lotka-Volterra 理论和协调度函数对甘肃省生态经济系统的共生协调进行测度，同时借助生态经济系统安全级别的双特征动态判断矩阵，可以有效提高对于系统运行平稳性的测控，论文采用的方法根据经济社会系统—生态环境系统在共生关系上的差异性，可以区分出二者在生态文明进程中的不同阶段，从而可以预测它们未来不同的演化趋势，以便采取针对性控制措施。因此，生态经济系统运行安全级别的测度方法能够提供更加全面的生态经济系统运行的状态、预警和预测信息，对于甘肃省各市州生态经济系统运行状态的测控具有更加实际的应用价值。目前，此种方法尚未应用到生态经济系统运行测控问题中。

## 5.2.2 对研究对象的思考

如何在生态文明建设框架下实现经济增长与生态环境之间的协调有序发展是当前甘肃省实践绿色发展过程中亟需解决的问题。甘肃省近年的区域发展在强调城镇系统经济发展的联动性基础上，对资源的配置和开发更注重可持续理念。就甘肃生态文明建设持续推进、生态经济系统协调运行，结合前述定量分析，还可考虑如下对策与建议：

### 1、坚持生态文明理念，推进区域经济高质量发展

甘肃省生态经济系统脆弱、经济发展水平相对偏低、产业结构升级较慢，发展过程更要坚持“绿水青山就是金山银山”的理念，强调生态环境保护也是发展，积极寻求经济发展与生态保育之间的平衡，将生态优势变为经济优势，实践经济生态两手硬、发展和保护相统一的高质量发展模式。

### 2、优化空间布局、调整产业结构，积极推进区域绿色发展

在生态文明建设进程中，甘肃省应更注重其生态功能区位特征，强调其生态屏障功能，在生态安全阈值内走内涵建设的道路，以生态文明建设发展促进区域绿色空间格局的形成。

甘肃省处于西北内陆，由于特殊的地形地貌，即使在西部各省区中，其生态环境亦处于相对脆弱状态，但在生态文明建设综合评价结果来看，甘肃省尚未在注重经济发展和生态文明进程的同时加大对环境的保护力度。显然，在自然生态、经济发展等各方面均不占优的甘肃省，在其生态文明建设进程中，应更注重其生态恢复和保护为主的生态功能区位特征，强调其生态屏障功能，在生态安全阈值内走内涵建设道路。

在国家主体功能区战略指导下，坚持生态优先，强化生态环境保护，科学度量生态供需，有序开发能源资源，力求生态文明建设速度与区域资源环境承载能力相匹配相协调，深入推进绿色发展，构建科学合理的城市化格局。

### 3、加强与完善生态文明制度建设

一方面，加强对居民生态文明意识的培养，培养民众绿色发展理念。进一步加强生态文明建设，不仅政府，民众亦需提高生态环境保护重视程度，改变原有的传统价值观，倡导走在生态文明理念指导下的崭新道路。

另一方面，完善生态文明制度体系，结合区域特征，建立更严格的生态环境

监管体制与政府绩效考核体系。甘肃省作为国家生态安全重要屏障区，生态环境脆弱，经济发展滞后，民众发展理念落后，使其经济发展与环境保护之间的矛盾相对突出，生态环境保护与监管工作任务艰巨，不能掉以轻心，应多管齐下，全面监督、严格规范。

#### 4、坚持以城市群为主体形态，推动生态文明进程健康有序发展

甘肃省地域面积狭长，生态脆弱，在生态文明建设过程中，可以城市群建设作为发展的出发点，坚持中心带动、多极突破的区域发展战略。

第一，积极实施兰州—西宁城市群发展规划，建立健全城市群协调协商机制。注重提高中心城市精细化管理水平，增强中心城市辐射带动力。

第二，指导省内各市州有序发展，提高一体化建设水平。发挥核心城市资源和区位优势，各城市积极寻求特色发展点。一方面注重拉开城市生态文明建设水平，增加有序竞争，突出重点，形成中心突出、生态良好、分工合理的体系；另一方面注重各城市之间及城市内部统筹规划，使生态环境、社会经济各维度均能协调有序、互相支撑，形成良性互促的局面。

## 参考文献

- [1] 彭玉婷,王可侠.着力推进生态文明国家治理体系和治理能力现代化[J/OL].上海经济研究:1-7
- [2] Xiao L G, Zhao R Q. China's New Era of Ecological Civilization[J].Science,2017, 358( 6366):1008 — 1009.
- [3] 习近平.决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利—在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告 [R].人民日报,2017-10 -28( 01) .
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Wu lifeng ,Wang Yinao.Esimation the parameters of Lotmka-Volterra model based on grey direct modeling method and its application[J].Expert Systemions Applications,2011, 38(6):6412-6416.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] ZHANG W,LI H,AN X. Ecological civilization construction is the fundamental way to develop low — carbon economy[J].Energy procedia,2011( 5) : 839 — 843.
- [12] BRAHIC C.China battles to be first'ecological civilization'[J].New scientist , 2014, 222( 2973) : 12.
- [13] LOWY M. Ecological crisis,capitalist crisis, crisis of civilization: the ecosocialist

- alternative[J].Caderno CRH,2013,26( 67) : 79—86.
- [14] I.费切尔,孟庆时.论人类生存的环境——兼论进步的辩证法[J].哲学译丛,1982(05):54-57.
- [15] MORRISON R. Ecological democracy[M].Boston: South End Press, 1995.
- [16] MORRISON R. Eco civilization 2140: a twenty-second-century history and survivor's journal[M].New York: Writer's Publishing Cooperative, Inc,2006.
- [17] WOLFSLEHNER B,VACIK H . Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure — state-response framework[J].Journal of environmental management,2008,88( 1) : 1—10.
- [18]SEKOVSKI I,NEWTON A,Dennison W C . Megacities in the coastal zone: using a driver-pressure-state-impact-response framework to address complex environmental problem[J].Estuarine,coastal and shelf science,2012,96( 1) : 48—59.
- [19]GENTRY — SHIELDS J,BA R T R AM J.Human health and the water environment: using the DPSEEA framework to identify the driving forces of disease[J].Science of the total environment,2014,468—469: 306—314.
- [20]MORSE S.Stirring the pot.Influence of changes in methodology of the Human Development Index on reporting by the press[J].Ecological indicators,2014,45( 5) : 245—254.
- [21]GALLI A.On the rationale and policy usefulness of ecological footprint accounting: the case of Morocco[J].Environmental science & policy,2015,48( 4) : 210—224.
- [22]GALLI A,WEINZETTEL J,CRANSTON G,et al.A Footprint Family extended M R IO Model to support Europe's transition to a one planet economy[J].Science of the total environment,2013,461—462: 813—818.
- [23] Ye Q J.Ways of Training Individual Ecological Civilization Under Mature Socialist Conditions[J].Scientific Communism,1984,( 2):324 —1331.
- [24] 关琰珠,郑建华,庄世坚. 生态文明指标体系研究 [J] .中国发展, 2007, 7( 2) : 21-27.

- [25] 成金华,陈军,李悦.中国生态文明发展水平测度与分析[J].数量经济技术经济研究,2013,30(07):36-50.
- [26] 熊曦,张闻,尹少华,蔡珍贵.生态文明建设与新型城镇化协调度测度研究——基于全国各省份的数据[J].生态经济,2016,32(03):185-188.
- [27] 吴慧玲,齐晓安,张玉琳.我国区域生态文明发展水平的测度及差异分析[J].税务与经济,2016(03):36-41.
- [28] 马勇,黄智洵.长江中游城市群生态文明水平测度及时空演变[J].生态学报,2016,36(23):7778-7791.
- [29] 胡悦,金明倩,孙丽.基于 PSR 模型的京津冀生态文明指数评价体系研究[J].资源开发与市场,2016,32(12):1450-1455.
- [30] 任传堂,任建兰,韦素琼.山东省生态文明建设综合评价及时空演变研究——基于 DPSIR 模型[J].资源开发与市场,2019,35(05):593-598.
- [31] 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.
- [32] 张智光.林业生态安全的共生耦合测度模型与判据[J].中国人口·资源与环境,2014,24(08):90-99.
- [33] 谢煜. 林业生态与产业共生协调度评价模型及其应用研究[D].南京林业大学,2010.
- [34] SHAFIK N,BANDYOPADHYAY S. Economic growth and environmental quality: time series and cross country evidence. background paper for the world development report[M].The World Bank, Washington,DC. ,1992.
- [35] 彭俊铭,吴仁海.不同工业化阶段环境库兹涅茨曲线研究——以广州、佛山与肇庆市为例[J].城市发展研究,2012,19(01):110-115.
- [36] 任宇飞,方创琳,藺雪芹.中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价[J].地理学报,2017,72(11):2047-2063.
- [37] 王耕,李素娟,马奇飞.中国生态文明建设效率空间均衡性及格局演变特征[J].地理学报,2018,73(11):2198-2209.
- [38] 牟宇峰.长江三角洲产业、就业演进及其耦合性研究[J].经济地理,2013,33(10):95-102.



- [39] A.G. Wilson. Entropy in Urban and regional Modelling[M]. London: Pion, 1970: 28-39.
- [40] E.T. Jaynes. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical review, 106(4) 620-630.
- [41] 陈晓雨婧, 冯舒芮, 夏建新. 基于 P-S-R 模型的甘肃省生态安全评价[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(01): 175-181
- [42] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J]. 地理学报, 2019, 74(8): 1489-1507.
- [43] 孙剑锋, 秦伟山, 孙海燕, 李世泰, 杜岩. 中国沿海城市海洋生态文明建设评价体系与水平测度[J]. 经济地理, 2018, 38(08).
- [44] 舒小林, 高应蓓, 张元霞, 杨春宇. 旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(03): 82-90.
- [45] 宓泽锋, 曾刚, 尚勇敏, 陈思雨, 朱菲菲. 中国省域生态文明建设评价方法及空间格局演变[J]. 经济地理, 2016, 36(04): 15-21.
- [46] 钱丽, 陈忠卫, 肖仁桥. 中国区域工业化、城镇化与农业现代化耦合协调度及其影响因素研究. 经济问题探索, 2012, (11): 10-17.
- [47] 李裕瑞, 王婧, 刘彦随, 龙花楼. 中国“四化”协调发展的区域格局及其影响因素[J]. 地理学报, 2014, 69(02): 199-212.
- [48] Grossman G M, Krueger A B. Environmental Impacts of A North American Free Trade Agreement[M]. National Bureau of Economic Research Working Paper, 1991.
- [49] 张智光. 人类文明与生态安全: 共生空间的演化理论 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23 (7): 1 — 8.
- [50] 张智光. 基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想[J]. 生态学报, 2013, 33(04): 1326-1336.

## 后记

时光匆匆如流水，转眼间又到了毕业时节，春梦秋云，聚散真容易。恰逢新冠病毒肆虐猖狂之期，学校未能如期开学，于是便在家中整理相关数据并完成毕业论文的定稿与修改。翻看着密密麻麻的计算数据、阅读过的篇篇文献，研究生两年半的点点时光跃然于心头。心中虽然感慨万千，但更多的是无尽的感激与依依不舍之情。

首先，感谢我的导师赵煜副教授在学业上的悉心指导与生活中的关心与鼓励，论文从最初的选题、论文设计、研究工作的开展都是在赵煜老师的循循善诱和耐心指导下完成，您严谨治学、精益求精的精神一直鼓励我向更高的目标奋进。在学习关系中总会遇到瓶颈，在这里非常感谢课题组杜飞师兄对我的关怀与鼓励。感谢师姐们的照顾，感谢课题组师弟师妹的陪伴。

感谢统计学院提供的研究平台，感谢赵煜老师的鼓励与支持，使得我有机会外出参加学术会议，与教授、同学交流。使我认识到科研之路，道阻且长，自己距离优秀的教授们仍存在非常大的差距，是鞭策，也是激励。

真诚的感谢我的好朋友们，感谢你们在我论文进展不顺、情绪低落时陪我聊天，帮助我缓解情绪重新激起斗志。

最后，感谢我的父母，这么多年来是他们的支持才让我走到今天。我清楚的知道，不管将来去向何方，经历怎样的事情，就算在这个现实的社会单打独斗败的一塌糊涂乃至失去整个世界，他们也永远默默的站在我的身后，高兴我的高兴，悲伤我的悲伤，无条件无理由的爱我相信我。

冬已去，春可期；山河无恙，人间美好！武汉加油！