

分类号 O212/28  
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 基于动力学模型我国生态效率测算及  
影响因素分析

研究生姓名: 李婷

指导教师姓名、职称: 赵煜 教授

学科、专业名称: 统计学 数理统计学

研究方向: 生态统计分析

提交日期: 2023 年 5 月 30 日

## 独创性声明

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

学位论文作者签名： 李婷 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 赵煜 签字日期： 2023.5.30

## 关于论文使用授权的说明

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

- 1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
- 2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 李婷 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 赵煜 签字日期： 2023.5.30

# **Measurement of ecological efficiency and analysis of influencing factors based on dynamic model in China**

**Candidate : Ting Li**

**Supervisor: Yu Zhao**

## 摘 要

“生态兴则文明兴，生态衰则文明衰”。党的十八大报告强调，要把生态文明建设作为一项重大任务，纳入“五位一体”总体布局体系，以促进经济、政治、文化、社会的协调发展，实现可持续发展。通过衡量经济增长的生态效益，我们可以更好地评估它对生态环境的影响，这对于构建一个健康的生态文明来说是非常重要的。因此，为继续走可持续发展道路及推动绿色 GDP，必须研究生态效率测算及其影响因素。

本文主要包括以下几个方面。首先，查阅梳理相关的国内外生态效率文献，构建生态效率测度体系，使用超效率 DEA-SBM 方法，对中国 30 个省（市、区）2005-2020 年进行了生态效率的测算，其中指标体系数据来源于《中国统计年鉴》及各省份统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、国家统计局网站及相关部门发布的统计报表；其次，从动力学的角度，建立能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染的动力学模型，对内在机理进行研究，根据建立的模型，运用非线性动力学方法，进行数值模拟分析，在得到稳定性的情况下，选取测算生态效率的指标作为实证数据，建立生态效率动力学模型，以 2006-2021 年作为样本数据对模型进行参数拟合及实证分析，并给出提高生态效率的策略分析；最后，研究生态效率的影响因素，影响因素指标来自经济、社会、环境和资源四个方面，通过整理学习历史文献得到指标体系，通过动态因子分析法选取核心指标，并选取 Tobit 回归模型进行分析。

生态效率测算结果表明：从省际层面来看，北京、天津、上海、和部分南方省市生态效率值排在前面，而西北地区部分省市排名最末，从区域来看，东部地区生态效率均值最优，中部地区生态效率均值最低。生态效率动力学系统分析表明：动力学系统在不同的环境规制下和不同的能源消耗水平下，会有不同的稳定性，根据逐步对系统的控制，给出实证分析，并对提高生态效率提供相应建议。影响因素分析结果表明：经济发展水平对生态效率有促进作用，产业结构、科技水平及对外开放水平的系数为负数的系数与生态效率关系显著负相关，城镇化对于生态效率的提高抑制作用，环境规制的系数为 5.540，对生态效率产生了显著的促进作用。

**关键字：**生态效率 动态因子分析 动力学模型 超效率 DEA-SBM 策略分析

## Abstract

"When ecology thrives, civilization prospers; when ecology deteriorates, civilization declines." The report to the 18th National Congress of the Communist Party of China stressed that ecological progress should be taken as a major task and incorporated into the "five-sphere integrated" overall layout system, so as to promote coordinated economic, political, cultural and social development and achieve sustainable development. By measuring the ecological benefits of economic growth, we can better assess its impact on the ecological environment, which is very important for building a healthy ecological civilization. Therefore, in order to continue to take the path of sustainable development and promote green GDP, it is necessary to study the measurement of ecological efficiency and its influencing factors.

This article mainly includes the following aspects. Firstly, by consulting and reviewing relevant domestic and foreign literature on ecological efficiency, a measurement system for ecological efficiency was constructed, and DEA-SBM technology was used to evaluate the ecological efficiency of 30 provinces (cities, districts) in China from 2005 to 2020. The indicator system data comes from the "China Statistical Yearbook" and the statistical yearbooks of various provinces from 2006 to 2021, the "China Environmental Statistical Yearbook", the website of the National Bureau of Statistics, and statistical bulletins and reports

issued by relevant departments. Secondly, from a dynamic perspective, a dynamic model of energy consumption-economic growth-investment level-environmental pollution was established to study the internal mechanism. Based on the established model, numerical mode analysis was carried out using nonlinear dynamic methods. After obtaining stability, the indicators for measuring ecological efficiency were selected as empirical data to establish a dynamic model of ecological efficiency. Data from 2005 to 2020 were selected for parameter fitting and empirical analysis of the model, and a strategy analysis for improving ecological efficiency was given. Finally, the influencing factors of ecological efficiency were studied, and the indicator system was obtained by summarizing and studying historical literature from the economic, social, environmental, and resource aspects. The core indicators were selected through dynamic factor analysis, and the Tobit regression model was selected for analysis.

The results of ecological efficiency measurement show that, from the provincial level, Beijing, Tianjin, Shanghai, and some southern provinces and cities rank first in terms of ecological efficiency, while some provinces and cities in the northwest region rank lowest. From a regional perspective, the eastern region has the highest average ecological efficiency, while the central region has the lowest average ecological efficiency. The dynamic system analysis of ecological efficiency shows

that the dynamic system has different stability under different environmental regulations and different energy consumption levels. Based on the gradual control of the system, empirical analysis is provided, and corresponding suggestions are provided to improve ecological efficiency. The analysis results of influencing factors indicate that the level of economic development has a promoting effect on ecological efficiency, and coefficients with negative coefficients for industrial structure, technological level, and level of openness have a significant negative correlation with ecological efficiency. Urbanization has a inhibiting effect on the improvement of ecological efficiency, and the coefficient of environmental regulation is 5.540, which has a significant promoting effect on ecological efficiency.

**Key words:** Ecological efficiency; Dynamic factor analysis; Dynamic model; Super DEA-SBM model; Strategy analys

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	1
1.2.1 生态效率测算方面 .....	1
1.2.2 动力学系统分析方面 .....	3
1.2.3 研究述评 .....	3
1.3 研究目的与意义 .....	4
1.3.1 研究目的 .....	4
1.3.2 研究意义 .....	5
1.4 研究内容及创新 .....	5
1.4.1 主要研究内容 .....	5
1.4.2 创新点 .....	6
<b>2 研究设计与研究方法介绍</b> .....	<b>8</b>
2.1 研究设计 .....	8
2.2 研究方法 .....	9
2.2.1 生态效率测算方法 .....	9
2.2.2 核心指标提取方法 .....	10
2.2.3 面板数据 Tobit 回归方法 .....	11
2.2.4 系统动力学模型 .....	12
<b>3 生态效率测算与分析</b> .....	<b>15</b>
3.1 指标选取与数据处理 .....	15
3.1.1 指标选取 .....	15
3.1.2 数据来源 .....	15
3.2 生态效率测算 .....	16
3.2.1 基于超效率 DEA-SBM 模型的测算过程 .....	16

3.2.2 测算结果 .....	16
3.3 我国生态效率时空变化特征分析 .....	18
3.3.1 时间维度 .....	18
3.3.2 空间维度 .....	20
<b>4 基于生态效率的动力学模型 .....</b>	<b>23</b>
4.1 动力学模型建立 .....	23
4.2 动力学模型稳定性分析 .....	25
4.2.1 均衡点 .....	25
4.2.2 稳定性判别 .....	26
4.2.3 数值模拟 .....	27
4.3 实证模型分析 .....	32
4.4 经验结果与策略分析 .....	36
4.4.1 策略一：改变环境污染率 .....	36
4.4.2 策略二：控制环境污染排放量的同时降低能源消耗量 .....	38
4.4.3 策略三：控制经济增长速度 .....	39
<b>5 生态效率影响因素的分析 .....</b>	<b>42</b>
5.1 指标选取 .....	42
5.2 动态因子法提取核心因素 .....	43
5.2.1 核心要素提取步骤 .....	43
5.2.2 数据来源及处理 .....	44
5.2.3 提取结果 .....	45
5.3 Tobit 回归分析 .....	47
5.3.1 模型假定 .....	47
5.3.2 实证分析 .....	47
<b>6 结论与展望 .....</b>	<b>50</b>
6.1 基本结论 .....	50
6.2 思考展望 .....	51
<b>参考文献 .....</b>	<b>53</b>

**致谢** ..... **56**

# 1 绪论

## 1.1 研究背景

改革开放以来,我国经济发展质量和效益不断提升,然而,工业革命开始,全球经济长期的高投入、高消耗、高排放等导致了环境不断恶化,使得气候灾害不断发生,雾霾天气严重,自然资源过度使用和生态系统问题不断出现。2007年,中国共产党十七大报告强调,把构建生态文明作为实现全民共享美好未来的重大任务。2015年以来,中央环保督察的推进,使全国各地的环境保护意识得到提升。2018年“生态文明”首次被纳入《中华人民共和国宪法》,成为中华人民共和国的基本法律。2019年,中共十九届四中全会更是将环境保护提升到一个更重要的层面,即“坚持和完善生态文明制度体系,促进人与自然的和谐共存”。如何提高生态效率已经成为当前亟待解决的重要课题。因此,建立一个完善的生态文明建设评价指标体系和生态效率测算体系,以此科学地评估我国各地区的生态效率,并分析影响其的因素,以及核心要素之间内在机理的关系,显得尤为重要。本文旨在通过对我国30个省份(西藏除外)的生态效率进行测量,建立生态效率测算指标间的动力学模型,运用动态因子分析法探究各区域生态效率的主要影响因素及其作用机制,从而提出相应的策略和政策建议,推动我国生态文明建设进程。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 生态效率测算方面

1990年,德国学者Schaltegger与Sturm第一次提出了一种新的理论,即以价值观来衡量环境影响,衡量生态效率<sup>[1]</sup>。1992年,WBCSD正式明确生态效率定义,以此来指导人们如何更好地实现可持续发展<sup>[2]</sup>。到目前为止,学术界对效率测度的方法主要有:比值评价法、因子分析法、熵值TOPSIS评价方法、DEA(数据包络分析方法)。现阶段多数运用数据包络分析进行生态效率的测算。

比值评价法是根据生态效率的定义提出的,即经济价值与环境成本的比值。该方法只需要考虑经济和环境两个维度,过程简单易懂,便于理解。但是其缺点是计算时将所有环境影响都转换成同一类型的值,未考虑不同环境的影响,得出的结果不是最优的。此外,比值评价法只能进行单一方面的评价,不能给决策者

提供选择上的弹性，这也是其局限性之一<sup>[3]</sup>。

因子分析法是一种通过分析相关矩阵将多个变量归结为几个因子的方法，其主要思想是通过降维来简化数据。在生态效率评价方面，一些学者如陈武新和吕秀娟<sup>[3]</sup>运用因子分析法评价了中国不同省份的生态效率，而王波等<sup>[4]</sup>不仅通过计算经济、资源和环境的特征因子得分和综合得分对东、中、西部区域的生态效率进行比较，而且就此给出相应的策略建议。杨蕾和杜鹏<sup>[5]</sup>则通过应用因子分析方法，构建了广东省的生态效率评价体系，并对其进行测度研究。尽管因子分析法有其优点，但也存在一些局限性，例如忽略了一些重要的变量或者过多地依赖于数据的准确性。

熵值 TOPSIS 评价方法是一种常用的多目标决策分析方法，可以帮助决策者从多个评价对象中选出最优方案。它的基本思想是通过计算评价对象与目标值之间的距离和接近程度，来评估各个评价对象的优劣。该方法既可以处理定量数据，也可以处理定性数据，适用范围广泛。近年来，在环境保护、能源管理、经济发展等领域中得到了广泛的应用。使用熵值 TOPSIS 评价方法可以有效地解决多个指标之间的矛盾问题，并得出综合评价结果，可以用于各种决策场景<sup>[6]</sup>。以生态效率评价为例，彭迪云、李莎<sup>[7]</sup>用 G1-TOPSIS 法动态评价了我国 11 个省市的区域生态效率，得出结论：制度和政策法规的完善程度、公民参与度的高低对生态文明建设至关重要；张佩琴<sup>[8]</sup>以甘肃白银 2005-2016 年的数据为样本，通过熵值 TOPSIS 法测算资源效率及生态效率，并提出相关对策。

DEA（数据包络分析）是一种非参数测度方法，它的发展始于 1978 年，当时的研究者们分别提出了三种不同的模型：“DEA-CCR”、“DEA-BCC”和超效率 DEA 模型<sup>[9][10]</sup>。超效率 DEA 和 SBM 都于 1993 年提出的，其中前者能够分析和比较效率值为 1 的决策单元<sup>[11]</sup>；而 Tone K 提出的 SBM 模型主要是，通过调整松弛变量，能够有效地消除径向和角度对结果的影响，从而达到预期的结果<sup>[12]</sup>。曹俊文，李湘德<sup>[13]</sup>构建 DEA 组合模型测度长江经济带的生态效率，得出区域差异影响生态效率的结论；陈雯<sup>[14]</sup>在研究 30 个省市 10 年的面板数据时发现，影响生态效率的因素还有研发经费的投入及第三产业占比；李闪闪<sup>[15]</sup>从投入-产出角度出发测度出我国 30 个省市的生态效率；马骏等<sup>[16]</sup>以长江经济带 11 个省市的 2015-2019 年作为样本数据，通过四阶段 DEA 模型测算生态补偿效率，利用

Malmquist 指数分析处于不同时间区间下的效率动态变化，并且比较判断出不同因素对不同年份生态补偿效率的影响程度；涂正革、龙亮军、任梅<sup>[17]-[19]</sup>等采用 SBM 模型更有效地评价中国工业生态效率，明确了改进方向，评价区域生态效率进行，弥补了径向和角度缺陷。

### 1.2.2 动力学系统分析方面

动力系统是数学概念，主要用来研究在时间的变化下，动力系统中状态变量是如何演化的理论过程<sup>[20]</sup>。Fang G , Tian L , Min F 等<sup>[21][22]</sup>找到了控制碳排放和能源强度的方法的从建立的三维节能减排动力系统和碳税约束条件下的四维节能减排系统中；Wenbin Zhang 等<sup>[23]</sup>通过电力市场的三维动力系统：价格-供给-经济增长，研究了电力市场的稳定性，给出稳定电力市场的调控策略；陈乾<sup>[24]</sup>定性分析了碳价、能源消费和经济增长之间的复杂关系，构建碳价动力系统模型，并利用 Matlab 对此模型进行数值模拟，得出相关结论；李文超等<sup>[25]</sup>以中国为例，构建经济-能源-环境系统动力学模型，探索系统可持续发展路径；苏经宇等<sup>[26]</sup>构建了基于系统动力学的城市抗震防灾能力动态评估模型；吴萌<sup>[27]</sup>对于武汉市 1996-2014 年不同政策情景下的土地利用碳排放运用动力学进行模拟，并给出结论；王慧敏等<sup>[28]</sup>构建出四维“水-经济社会”相关的系统动力学模型，进行区域绿色发展政策仿真研究；唐睿等<sup>[29]</sup>以厦门市为例，构建城市生活垃圾的系统动力学模型，对生活垃圾预测管控；王洪礼<sup>[30]</sup>等建立了关于“环境污染-资源消耗-经济发展”的三维动力学模型依据非线性动力学理论，讨论了该模型的稳定性和分叉现象，并在此基础上加入随机因素进行改进；李俊瑞等<sup>[31]</sup>在王洪礼建立的三维动力学模型基础上，加入环境治理因素，研究了不同污染排放率下动力系统的状态，分析了其动态演化行为。通过系统动力学方法，我们可以更好地理解整个系统的结构和各要素之间的相互影响，并且可以通过仿真来预测它们的运行情况。

### 1.2.3 研究述评

总体上看，通过上述可以发现当前国内外对生态的研究已经较为全面，测算生态效率上提出了不同的方法，对于影响因素方面基于不同的角度也给出了分析。理论方面，对于生态效率的概念定义每位学者有不同得界定，但中心都围绕着生态效率内涵：用最少的环境付出换取最大的价值。实证方面，运用不同的方法测算了不同地区的生态效率水平，同时也探究了影响生态效率的因素，这将有助于

指导实践工作。对于系统动力学模型也被广泛应用于各个领域进行仿真预测研究，从三维动力系统到四维动力系统的研究成为现下的热点。

然而，在某些方面仍有不足：第一，已有文献相关评价方法模式相对单一，稳健性不足，在构建面板数据回归模型时，时间序列的长度不够，未对面板数据进行平稳性检验等。第二，现有的研究在选取生态效率测度指标时不够全面，在资源消耗方面，大多数研究没有将土地资源、资本、劳动力资源投入等指标纳入评价体系，并且未对生态效率测算指标内部关联性进行分析。

本文尝试从如下两个方面进行改进，一方面，结合前人研究成果，重新梳理生态效率内涵，确定合理的指标体系，并使用新的测算方法：超效率 DEA 模型，综合考虑多个输入输出指标，避免了以往只注重某一方面或某几部分指标的缺点。以期达到更好的研究结果，引入系统动力学模型，对生态效率的内在机理进行深入探讨，并针对投入-产出测算体系构建动力学模型并进行模拟，具体问题提出不同的策略分析，增强模型的可靠性和适用性；另一方面，从生态效率的概念及指标选取来看，生态效率主要受资源、环境和经济等多方面因素的影响，构建合理的影响因素指标，采用动态因子分析法提取影响生态效率的核心因素，实证研究影响因素对生态效率的影响程度。

## 1.3 研究目的与意义

### 1.3.1 研究目的

论文将研究对象选为我国 30 个省、市区（不包括西藏、香港、澳门、台湾，全文相同），构建我国生态效率测算体系，运用动态因子分析法提取影响生态效率的核心因素，并结合动力学方法，实证研究生态效率测算体系内在的关联性影响，期望能达到以下研究目的：

（1）整理资料，建立合理的生态效率测算体系，结合超效率 DEA 方法对建立的指标体系进行测算，并给出我国生态效率的时空特征分析。

（2）为了提高生态效率，需要知道影响生态效率的内部因素，从构建的测算生态效率指标体系中选取四个指标，建立动力学系统对内部机制方面进行分析，利用非线性动力学理论知识以及数值模拟方法分析该模型的平衡点、稳定性，模拟该动力学模型的动态演化过程，从实证分析入手，选取我国 30 个省（市、区）2006-2021 年具体数据，分析参数在不同数值下对该系统的影响，得出各个维度

之间的关系及动态效应，从影响因素得出相关结论并给出相对的策略。

(3) 结合生态效率测算体系结合历史文献，建立影响我国生态效率因素的指标体系，通过动态因子法，选取更核心的指标，进行回归分析，得出影响因素的作用。

### 1.3.2 研究意义

研究旨在揭示我国各省份生态效率的差异性，找出影响生态效率的主要因素，为制定科学有效的环境保护措施提供参考意见。在生态效率测算的基础上，基于投入-产出选取合理的指标，探讨生态效率内部关联性的作用，通过动力学模型分析可以更清楚的知道指标对生态效率不同程度的影响。对生态效率的影响因素的分析可以合理的、针对性的提出提高生态效率的方面。在研究的过程中选用合理的统计学方法，经济学和生态学内容，对测算生态效率和影响因素分析进行深入研究，具有较强的理论意义和现实意义。

#### (1) 理论意义

论文补充和完善测度指标体系，并在此基础上，研究影响生态效率的影响因素。利用非线性动力学理论知识以及数值模拟方法分析该模型的平衡点、稳定性，模拟该动力学模型的动态演化过程，分析不同参数取值对该系统的影响，最后进行实证分析选取数据对该模型的参数进行估计拟合，对模型各维度间的关系进行深入分析，这些研究不仅有利于深化人们对生态效率的认识，而且还可为政府部门制定相应政策提供决策支持。论文将传统的统计方法与非线性动力学方法相结合，对促进研究生态效率研究进展具有学术研究价值。

#### (2) 实践意义

通过对我国地区的生态效率进行评估，可以更加准确地了解当前的生态状况。在生态效率较高的地方，可以更好地实现经济增长和环境保护，从而为生态效率较低的地方提供可持续的发展模式，从而促进地区的可持续发展。通过深入探索区域生态效率的影响因素，我们不仅可以清楚地认识到外部环境的变化，还可以为政府和企业提供科学的决策依据，以期实现全面、均衡、可持续发展。

## 1.4 研究内容及创新

### 1.4.1 主要研究内容

根据研究的整体规划，论文主要包括以下四个方面：

第一部分，主要包括选题依据，研究背景、目的、意义、思路和创新点，以及对国内外有关生态效率测算、非线性动力学等理论和实证研究做出研究述评，确立论文的研究切入点。基于文献的阅读和相关知识的研究，分析其动力学行为，使得之后建议的提出更符合当下的实际情况。

第二部分，主要包括理论框架和方法介绍：

(1) 基于文献整理，给出论文的基本框架和研究思路。

(2) 基于方法整理，介绍动态因子分析法及降维提取核心要素的理论、非线性系统的研究方法步骤和稳定性判断方法。

第三部分，此部分为本文的核心内容，主要是对中国生态效率测算进行实证分析，具体从以下三个方面展开研究：

(1) 基于中国 30 个省（市、区），从《中国统计年鉴》及各省年鉴中搜集该测算体系中的各项指标数据，进行标准化处理，再运用 stata 软件测算出我国的生态效率值并给出分析结果。

(2) 基于生态效率测算指标体系，为了更进一步分析内部机理作用建立生态效率动力学模型，并结合非线性动力学分析方法、系统稳定性判定方法与数值模拟仿真的方法研究系统方程平衡点的稳定性以及不同参数水平下模型系统运动状态的影响。进行相关变量的统计测度与实证，将实际参数带入动力学模型中，探讨不同参数之间系统运动状态及动态效应，给出提高生态效率的策略建议。

(3) 基于建立的影响生态效率因素指标体系，运用动态因子分析法提取核心影响生态效率的因素，运用 Tobit 进行回归分析，根据回归结果分析出生态效率值与指标之间的关系。

第四部分，结论及展望。根据论文实证分析给出结果，结合我国生态建设现状，提出如何提高生态效率的一些可行性建议。并对论文部分内容进行展望。

## 1.4.2 创新点

论文的创新点有以下三个方面。

(1) 在生态效率测算体系的构建方面，从投入-产出视角出发，并且引入非期望产出，使得指标体系更合理。

(2) 引入非线性动力学模型，在依据投入-产出构建的测算生态效率指标体系中选出合适的指标，分析不同指标之间产生的关联性对生态效率的影响，即分

析生态效率内在机理作用,分析该系统的运动状态,并进行实证模拟和策略分析。

(3) 对于生态效率影响因素分析中,引入动态因子分析法进行核心指标提取,从社会、资源、环境、生态四个方面选取出每一个方面代表指标进行回归分析,使得指标体系更具有说服力。

## 2 研究设计与研究方法介绍

### 2.1 研究设计

根据上述对文章内容的说明，文章大致框架如下：

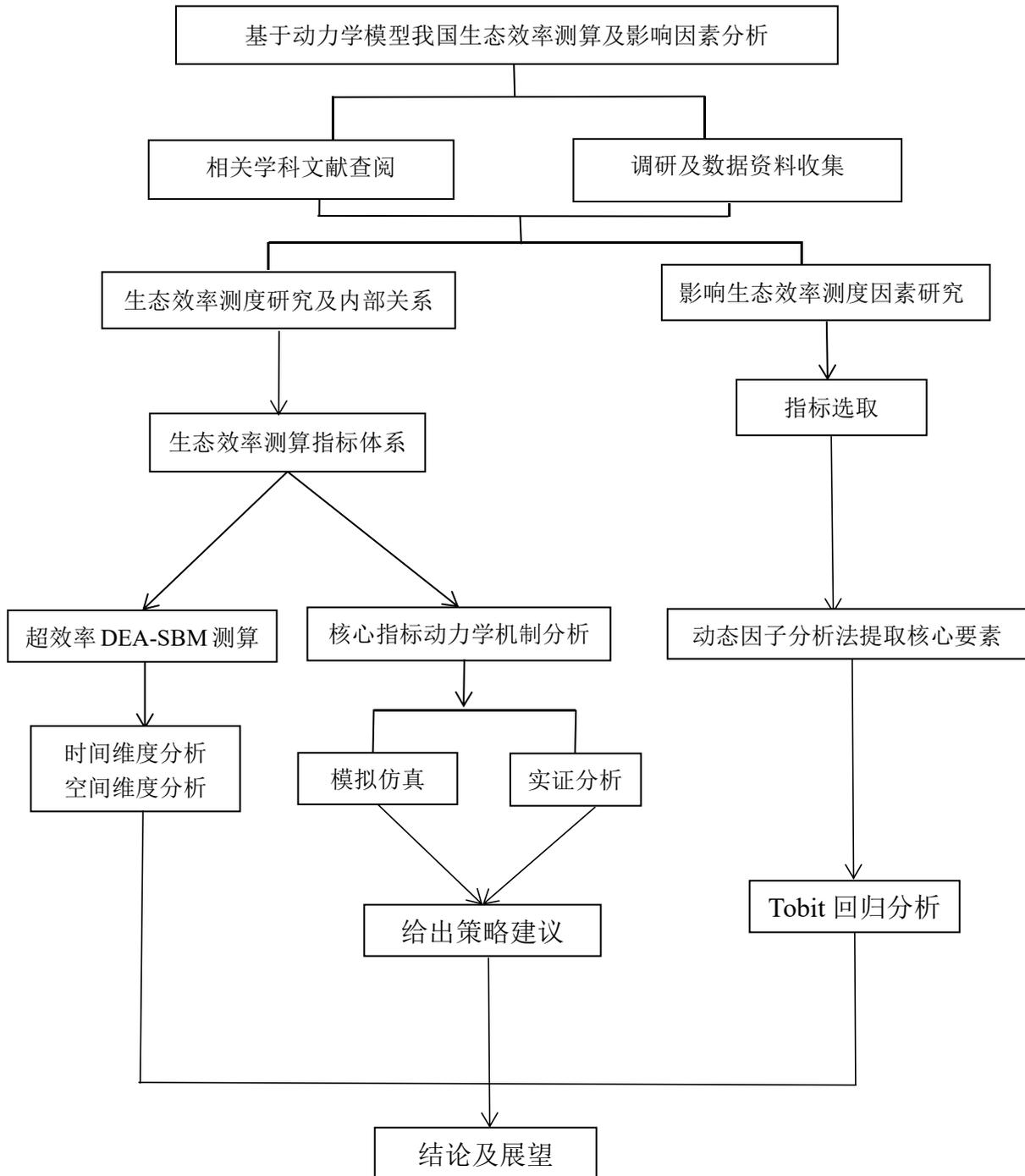


图 2.1 技术路线图

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 生态效率测算方法

生态效率属于效率的一种，它的测算方式来源于效率测算，主要运用的是 DEA（数据包络分析）。DEA 模型可对决策单元进行评价，是一种相对有效性评价的系统分析方法，广泛运用在多投入、多产出决策单元资源配置效率的评价问题中。DEA 方法主要优势是：不需要预先设定生产函数形式；能够同时考虑多种投入和产出之间的相互制约关系；不受样本量大小限制；计算简单方便。因此本文采用 DEA 方法作为主要的生态效率测算方法。DEA 的基本模型包括超效率 DEA、三阶段 DEA、CCR、BCC 及非期望 SBM 模型等。其中，BCC 模型基本假定为规模报酬可变，CCR 模型则反之，假定规模报酬不可变，BCC 模型既能够有效地应对规模限制，也能够有效地应对技术挑战，从而其多应用于资源环境、生态产业等研究<sup>[33]</sup>。超效率 SBM 模型是一种将超效率 DEA 模型与 SBM 模型完美结合的新型模型，它不仅可以更准确地比较和区分处于前沿面的有效率 DMU，而且还可以提供更加灵活的应用，它的优势在于它不受角度限制，也不受量纲限制，可以更好地满足实际应用的需求。

测算生态效率选用超效率 DEA-SBM 模型，能够较好地解决评价中含有非期望产出的效率评价问题，但无法剔除投入产出松弛所造成的非效率成分，为克服 DEA 模型的缺陷，Tone 提出了非径向、非角度的 SBM 模型<sup>[12]</sup>，并结合超效率 DEA 模型和 SBM 模型进一步提出了超效率 SBM 模型，不仅能够有效处理非期望产出，而且能够对处于前沿面的决策单元进行有效评价。其模型如下：其中， $n$  表示生产决策单元个数， $s$  表示投入与投出的松弛变量， $S^-$  表示投入过度， $S^+$  表示产出不足，为权重，下标 0 表示待估算的某个特定的 DMU<sup>[12]</sup>。

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (S_i^- / x_{i0})}{1 - \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n (S_r^+ / y_{r0})} \quad (2.1)$$

$$st. \begin{cases} x_0 - X\lambda - S^- = 0; \\ y_0 - Y\lambda + S^+ = 0; \\ \lambda, S^-, S^+ \geq 0 \end{cases}$$

对于非期望产出时，模型如下：

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x} / x_{ik})}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left( \sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d / y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u / y_{qk}^u \right)} \quad (2.2)$$

$$st. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \\ \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \\ \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j \end{cases}$$

其中， $n$  表示决策单元个数； $m$  表示每个决策单元的投入； $\gamma_1$  表示期望产出； $\gamma_2$  表示非期望产出； $x, y^d, y^u$  为相应的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵中的元素； $\rho$  为生态效率值。

### 2.2.2 核心指标提取方法

动态因子分析法是一种基于时间、样本和变量的三维数据分析技术，它可以有效地帮助我们更好地理解 and 预测资源、环境、生态经济等复杂的社会问题。它也是一种结合了主成分分析得到的截面分析和线性回归模型得到的时间序列分析的分析法<sup>[34]</sup>。动态因子分析方法的优势在于，可以在不用考虑样本量最大程度的情况下，会减少自变量间的多重共线性，并且可以准确估计多变量的共同因子，从而有效地帮助我们分析和评估多主体跨期变化趋势。

DFA 的具体实施过程如下<sup>[35]</sup>：

假设一个既定数据集： $X(I, J, T) = \{X_{ijt}\}, i=1 \dots I, j=1 \dots J, t=1 \dots T$ ，其中  $i$  表示研究对象， $j$  表示指标， $t$  表示时期，代表  $I$  个观察主体的  $J * T$  个观测值。动态因子分析方法的最终目标是先将  $X(I, J, T)$  的方差或协方差矩阵  $S$  分解成如下三个矩阵之和：

$$S = *S_I + *S_T + S_{IT} \quad (2.3)$$

其中： $*S_T$  这个矩阵是研究一个系统的静态特征，反映各主体独立于时间维度的结构变化情况。 $*S_T$  这个矩阵用来描述一个系统的动态特征，它可以用来衡量不同时期内该系统的方差或协方差矩阵，从而更好地理解该系统在不同时间维度上的平均变化情况。 $S_{IT}$  是单个主体的动态差异矩阵，通过计算每个主体的方差或协方差矩阵，我们可以清楚地看到整体的变化趋势，以及由此产生的动态差异。

在上述的基础上， $X_{ijt}$  可进一步表示为：

$$X_{ijt} = X_{.j} + (X_{ij} - X_{.j}) + (X_{.jt} - X_{.j}) + (X_{ijt} - X_{.jt} - X_{ij} + X_{.j}) \quad (2.4)$$

其中： $X_{.j}$  表示单一变量的整体均值， $(X_{ij} - X_{.j})$  表示静态结构对主体产生的影响。 $(X_{.jt} - X_{.j})$  表示平均动态效果， $(X_{ijt} - X_{.jt} - X_{ij} + X_{.j})$  反映的是在主体与时间的交互作用下，显现出来的动态差异。

公式 (2.3) 是一个双因素方差分析模型。也可分解成两个部分：

$$S = (*S_I + S_{IT}) + *S_T = S_T + *S_T \quad (2.5)$$

其中： $S_T$  是在主成分分析的作用下，不同时期下平均离差矩阵； $*S_T$  是在线性回归模型公式作用下得到的不同时期的变异程度。

$$X_{.jt} = a_j + b_j t + e_{jt}, j = 1 \cdots J, t = 1 \cdots T \quad (2.6)$$

其中误差项必须满足以下条件： $\text{cov}(e_{jt}, e_{j't'}) = \begin{cases} \omega_j & j = j'; t = t' \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

系统总体的动态变化与单个变量的动态变化是不同的，所以满足前述条件是必要的，该模型表征了主成分影响下的变量  $j$  之间的关系。

### 2.2.3 面板数据 Tobit 回归方法

通过使用面板数据，我们可以从多个相似的个体中提取出有用的信息。这些信息可以用来研究地理空间的变化趋势，并且可以用来探究不同地区之间的相互作用。使用这种方法，我们可以更加客观、精确地分析每个解释变量对其他变量的影响。面板数据回归模型表示为如下所示：其中， $Y_{it}$  是个体  $i$  在第  $t$  个时刻的

观测值,  $X_{it}$  为  $1 \times k$  向量,  $\beta_i$  为  $k \times 1$  向量,  $i$  为解释变量的系数,  $\beta_i$  为解释变量的系数,  $k$  为解释变量数目,  $\mu_{it}$  为误差项,  $\alpha_i$  为模型的常数项。

$$Y_{it} = \alpha_i + X_{it}\beta_i + \mu_{it}, i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T \quad (2.7)$$

Tobit 回归模型旨在探究被解释变量的取值是否受到限制, 包括上限、下限和极值。人们这种模型为 Tobit 模型, 是为了纪念提出者 Tobin 的杰出贡献。其表示形式如下:

$$Y = \begin{cases} Y' = \alpha + \beta X + \varepsilon & Y' > \alpha \\ 0 & Y' \leq \alpha \end{cases} \quad (2.8)$$

其中,  $X$  表示自变量;  $Y$  表示因变量;  $\alpha$  表示截距项;  $\beta$  是回归参数;  $\varepsilon$  为干扰项。

## 2.2.4 系统动力学模型

生态文明是复杂的多样的系统, 生态效率测度是多维度的复杂问题, 因此, 需要对生态效率内部影响进行深度研究。

系统动力学模型的特点是构建高阶、非线性、时间动态、具有多重反馈机制模型, 即是一种复杂的系统, 被应用到诸多领域进行仿真预测研究。利用非线性动力学理论知识以及数值模拟方法分析该模型的平衡点、稳定性, 模拟该动力学模型的动态演化过程, 分析不同参数取值对该系统的影响, 最后选取数据进行实证分析对该模型的参数进行估计拟合, 对模型各维度间的关系进行深入分析, 提出相应的策略分析。本文将传统的统计方法与非线性动力学方法相结合, 对促进研究生态效率研究进展具有学术研究价值。

动力学系统根据连续性分为两类, 连续的与不连续(离散)动力学系统。当一个物体处于一个特定的状态, 它的运动方式会发生变化。对于一个连续的物体, 一个微分方程的初始值就能够描述它的运动方式; 而对于一个离散的物体, 一个差分方程的初始值就能够描述它的运动方式。如下所示<sup>[20]</sup>:

$$\begin{aligned} F(t, x, x^{(1)}, \dots, x^{(n)}) = 0, x(0) = x^0 & \quad (1) \\ F(t, x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-n}) = 0, x_0 = x^0 & \quad (2) \end{aligned} \quad (2.9)$$

其中,  $x^{(k)}$  表示变量  $x$  的  $k$  阶导数,  $x_{t-n}$  表示变量  $x$  的  $k$  阶滞后,  $x^0$  表示最开始的状态。以连续动力系统方程 (1) 为例, 方程 (2) 表示离散动力系统, 假设方程 (1) 变为  $x^{(n)} = f(t, x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)})$  做替换

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x \\ \dot{x}_2 = x \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (2.10)$$

将一个一元  $n$  阶的差分方程转换为更高级的一个  $n$  元一阶形式, 从而更好地描述和预测复杂的数学现象。形式如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = f_i(t, x_1, \dots, x_n) \\ x_i(0) = x_i^0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

或者

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, X) \\ X(0) = X^0 \end{cases} \quad (2.12)$$

其中  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$  表示状态向量,  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)'$  函数向量可以用来描述动力系统的运动特性和行为特征。

在非线性动力学系统的研究中, 稳定性是衡量一个动态系统的有效性的关键因素, 因此, 对它的稳定性进行全面的评估和研究显得尤为必要。指的是, 当受外界环境变化的影响时, 该系统能够通过一段时间的调整, 使其恢复到最佳的平衡状态, 或者恢复到最初的运动状态。若系统在短期内可以自行恢复至初始的运动状态, 那么它就被认为是稳定的; 然而, 若其后续的变化使得它无法再次恢复至初始的运动状态, 并且其变化幅度也会逐渐增大, 那么它就被认为是不稳定的。

判定系统的稳定性比较著名的稳定性判定方法有: 李雅普诺夫方法和罗斯-霍维兹稳定性判别法。对于一般的不复杂的动力学方程, 采用求解常微分方程的简洁方法来对系统的稳定性进行判断, 通过求解方程, 当特征方程的所有特征值都为负实数或实部为负的复数时, 可以认为系统具有稳定性; 而当特征值仅有一个为正实数或实部为正的复数时, 则可以认为系统具有不稳定性<sup>[36]</sup>。然而, 在一些复杂的动力学问题中, 仅仅依靠特征方程的特征值来判断系统的稳定性是不够的, 必须考虑到系统中可能存在的小扰动量。罗斯和霍维兹提出的霍维兹判据可以有效地避免对方程的求解, 因为它可以确定特征值的实部是否为负, 这种方法

不仅可以应用于线性系统，也可以应用于非线性系统，李雅普诺夫法，它可以有效地检测和分析复杂的非线性系统中的特征值<sup>[20][36]</sup>。

本文主要下面方法为判断稳定性方法。考虑某系统的特征方程：

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n = 0, \text{ 其中系数 } a_i \text{ 为实数, 并且 } a_0 > 0. \text{ 构造以下一}$$

组 Hurwitz 行列式：

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= a_1 \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} \\ \Delta_3 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} \\ \Delta_4 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 \end{vmatrix} \\ &\vdots \\ \Delta_n &= \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & \dots & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & \dots & 0 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{2n-1} & a_{2n-2} & a_{2n-3} & a_{2n-4} & \dots & a_n \end{vmatrix} \end{aligned}$$

只有当方程的所有特征值  $\lambda$  都取负值时，在参考点的解是渐进稳定的，反之只要有一个特征根的实部为正，那么在参考点的解是不稳定的，所以使得参考点的解为稳定的充分必要条件是所有行列式都是正的，即：

$$\Delta_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$$

### 3 生态效率测算与分析

#### 3.1 指标选取与数据处理

##### 3.1.1 指标选取

在生态文明建设的不断发展下,许多学者开始研究生态效率测算指标的选取。例如,王会,王奇,齐岳和赵晨辉等学者从不同的角度出发,构建了较为系统和完善的生态文明建设评价指标体系<sup>[37][38]</sup>。近年来,也有不少研究者从生态效率的内涵出发,从经济发展、资源和环境三个方面选取指标,在投入-产出视角下测度生态效率。在对现有文献进行梳理后,本文选择了较为全面、代表性强的指标来衡量中国区域的生态效率,其中涉及 30 个省(市、区),但不包括西藏、香港特、澳门和台湾省。如表 3.1 详细列出了这些指标。

表 3.1 中国区域生态效率评价指标体系

指标	类型	具体指标
投入指标	资本投入	固定资产投资总额/万元
		用水总量/(万吨)
	自然投入	城市建设用地面积/(平方千米)
	人力资源投入	从业人员数/万人
产出指标	资源投入	能源消耗总量/万吨标准煤
		地区生产总值/亿元
	期望产出	公共财政一般预算收入/万元
		废水排放量/(万吨)
	非期望产出	二氧化硫排放量(万吨)
		一般工业固体废物排放量(万吨)

##### 3.1.2 数据来源

数据来源于 2006-2021 年的《中国统计年鉴》及各省份 2006-2021 年的统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、国家统计局网站以及相关部门发布的统计公报、统计报表,文章数据来源可靠。本文搜集了 2006-2021 年 30 个省(区、市)15 年

跨度的样本数据。其中，城市建筑用地面积及个别省份废水排放量 2021 年数据未公布，采用二次平均法进行预测，对于缺失的个别年份的数据进行填补（采用近邻数据均值法）<sup>[39]</sup>。

## 3.2 生态效率测算

### 3.2.1 基于超效率 DEA-SBM 模型的测算过程

基于超效率 DEA-SBM 模型，根据已建立的生态效率指标体系，本文使用软件计算 DEA 效率，得出 30 个省(区、市)在 2005-2020 年间的生态效率评价结果，如表 3.2 与表 3.3 所示。

### 3.2.2 测算结果

归纳的结果见下面相关表显示。

表 3.2 2005-2012 中国 30 个省（市、区）生态效率值

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
北京	1.400	1.402	1.585	1.711	1.638	1.600	1.678	1.670
天津	1.211	1.140	1.193	1.231	1.356	1.149	1.216	1.182
河北	1.010	1.494	1.005	1.006	1.000	1.003	1.002	1.004
辽宁	0.300	0.363	0.368	0.407	0.420	0.483	0.464	0.466
上海	1.241	1.189	1.204	1.106	1.201	1.128	1.105	1.153
江苏	1.000	0.725	1.000	1.009	1.000	1.026	1.026	1.034
浙江	1.020	1.000	1.017	1.015	1.024	1.028	1.034	1.018
福建	1.033	1.045	1.030	1.030	1.033	1.015	1.011	1.010
山东	1.075	1.054	1.152	1.063	1.056	1.044	1.043	1.035
广东	1.230	1.259	1.218	1.187	1.206	1.204	1.225	1.225
海南	2.423	2.506	2.484	2.463	2.525	2.572	3.170	3.220
<b>东部地区</b>	<b>1.177</b>	<b>1.205</b>	<b>1.205</b>	<b>1.212</b>	<b>1.226</b>	<b>1.205</b>	<b>1.270</b>	<b>1.058</b>
山西	0.461	0.485	0.416	0.465	0.414	0.401	0.415	0.430
吉林	0.321	0.298	0.277	0.281	0.275	0.264	0.298	0.297
黑龙江	1.016	1.001	1.088	1.260	1.275	0.958	0.940	1.034
江西	0.360	0.319	0.301	0.281	0.259	0.362	0.301	0.324
河南	0.512	0.443	0.423	0.509	0.501	0.395	0.411	0.415
湖北	0.301	0.291	0.259	0.331	0.351	0.460	0.297	0.318
湖南	0.430	0.317	0.336	0.415	0.306	0.488	0.394	0.507
<b>中部地区</b>	<b>0.486</b>	<b>0.451</b>	<b>0.443</b>	<b>0.506</b>	<b>0.483</b>	<b>0.475</b>	<b>0.437</b>	<b>0.475</b>
内蒙古	1.009	1.120	1.019	1.020	1.022	1.000	1.000	1.010
广西	0.326	0.325	0.278	0.234	0.270	0.285	0.292	0.307
重庆	0.510	0.507	0.400	0.400	0.468	0.508	0.408	0.496
四川	0.305	0.364	0.392	0.345	0.351	0.366	0.405	0.401
贵州	0.365	0.410	0.354	0.303	0.412	0.412	0.400	0.390

续表 3.2

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
云南	1.010	0.977	0.875	0.767	0.665	0.750	0.810	0.735
陕西	0.561	0.451	0.441	0.421	0.659	1.005	1.015	1.006
甘肃	0.296	0.363	0.349	0.298	0.357	0.350	0.305	0.295
青海	1.365	1.374	1.245	1.489	1.300	1.290	1.298	1.400
宁夏	1.000	1.010	1.000	1.010	1.000	0.601	1.020	1.039
新疆	0.298	0.280	0.328	0.393	0.280	0.280	0.290	0.270
<b>西部地区</b>	<b>0.640</b>	<b>0.653</b>	<b>0.607</b>	<b>0.607</b>	<b>0.617</b>	<b>0.622</b>	<b>0.658</b>	<b>0.668</b>
<b>全国</b>	<b>0.807</b>	<b>0.785</b>	<b>0.794</b>	<b>0.798</b>	<b>0.801</b>	<b>0.808</b>	<b>0.837</b>	<b>0.736</b>

表 3.3 2013-2020 中国 30 个省（市、区）生态效率值

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
北京	1.75	1.68	1.76	1.59	1.51	1.609	1.5	1.66
天津	1.185	1.260	1.136	1.159	1.073	1.11	1.14	1.103
河北	1.001	0.444	0.339	0.281	0.279	0.46	0.234	0.432
辽宁	0.435	0.395	0.287	0.29	0.299	0.298	0.334	0.326
上海	1.181	1.084	1.105	1.148	1.200	1.234	1.198	1.66
江苏	1.034	1.041	1.038	1.029	1.04	1.413	1.124	1.012
浙江	1.016	1.017	1.015	1	1.009	1	0.978	1.03
福建	1.007	1.012	1.008	1.012	1.012	1.102	1.009	1
山东	1.04	1.04	1.03	1.031	1.023	1.032	1.045	1.1
广东	1.22	1.209	1.216	1.222	1.188	1.196	1.187	1.215
海南	3.014	2.998	2.524	2.544	2.613	2.596	2.478	2.604
<b>东部地区</b>	<b>1.262</b>	<b>1.192</b>	<b>1.125</b>	<b>1.119</b>	<b>1.095</b>	<b>1.186</b>	<b>1.112</b>	<b>1.195</b>
山西	0.416	0.408	0.275	0.244	0.412	0.398	0.412	0.405
吉林	0.306	0.304	0.26	0.326	0.209	0.297	0.3	0.302
黑龙江	1.034	1.001	0.984	1.004	1.001	1.007	1.01	0.998
江西	0.395	0.337	0.491	0.329	0.314	0.398	0.345	0.4
河南	0.494	0.434	0.447	0.44	0.339	0.4	0.403	0.501
湖北	0.342	0.467	0.458	0.397	0.324	0.543	0.56	0.6
湖南	0.678	0.657	1.005	1.002	0.602	0.745	1.001	1
<b>中部地区</b>	<b>0.524</b>	<b>0.515</b>	<b>0.560</b>	<b>0.535</b>	<b>0.367</b>	<b>0.541</b>	<b>0.576</b>	<b>0.601</b>
内蒙古	1.003	0.962	0.67	0.885	0.957	0.96	0.97	1.001
广西	0.373	0.309	0.227	0.208	0.219	0.312	0.332	0.376
重庆	0.48	0.516	0.398	0.37	0.33	0.412	0.458	0.677
四川	0.403	0.405	0.441	0.311	0.303	0.452	0.4	0.501
贵州	0.41	0.4	0.409	0.346	0.368	0.298	0.314	0.401
云南	0.607	0.646	1.001	1.003	1.005	1.003	1	1.01
陕西	0.609	0.587	0.585	0.728	0.569	0.551	0.523	0.56
甘肃	0.288	0.286	0.273	0.304	0.32	0.3	0.31	0.324
青海	1.16	1.256	1.156	1.348	1.301	1.29	1.109	1.212
宁夏	1.009	1.044	1.077	1.07	1.079	1.004	1.104	1.009

续表 3.3

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
新疆	0.274	0.269	0.257	0.254	0.211	0.231	0.31	0.278
西部地区	<b>0.601</b>	<b>0.607</b>	<b>0.590</b>	<b>0.621</b>	<b>0.644</b>	<b>0.619</b>	<b>0.621</b>	<b>0.668</b>
全国	<b>0.833</b>	<b>0.793</b>	<b>0.747</b>	<b>0.789</b>	<b>0.740</b>	<b>0.816</b>	<b>0.796</b>	<b>0.852</b>

### 3.3 我国生态效率时空变化特征分析

根据上述表中测算得到的生态效率值，为了更好的分析全国生态效率效果，本文从时间维度和空间维度进行分析。

#### 3.3.1 时间维度

##### (1) 2020 年的生态效率值

如下图 3.1 所示，2020 年中全国各省份生态效率，从图中可以看出海南省、北京及上海的生态效率值最高，与上表中往年的变化趋势不大，海南省位于沿海地区，经济发达，自然环境优美，生态环境好，因此生态效率高，北京和上海作为我国经济发达的地区，多年来我国对于环境污染问题有一系列的措施，尤其是首都北京，改善环境为重中之重，上海是国际都市，沿海地区，产业发展快速，排污系统先进进而使得生态效率比其他省份较高。辽宁、吉林、广西、贵州、甘肃及新疆省份属于生态效率较低的省份，这些省份均为贫困地区，投资水平较低，自然环境恶劣，东北地区是重工业发展的主要区域，其非期望投入较大，影响环境，西部地区资源匮乏，使用量多也是导致生态效率低下的原因。

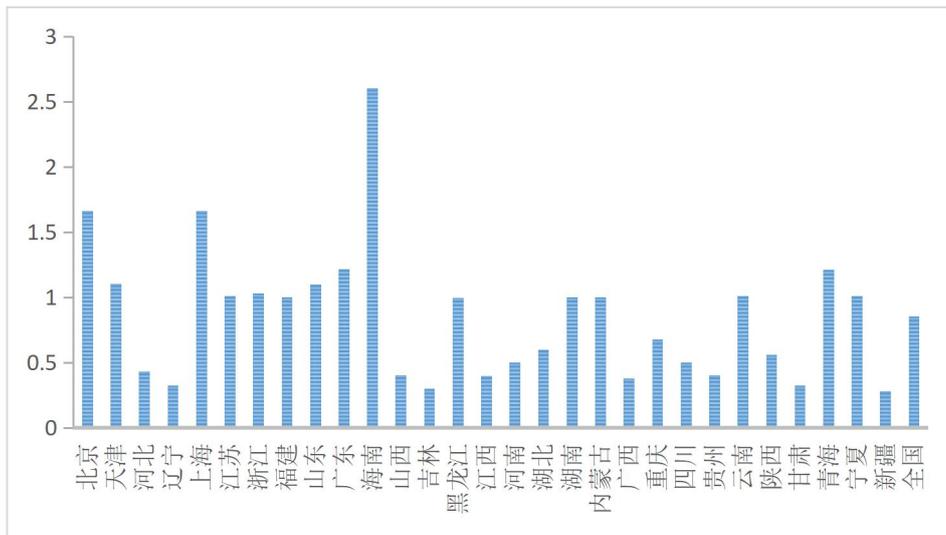


图 3.1 2020 年各省（市）生态效率分布

(2) 2005-2020 年全国生态效率值

上述基于最近一年对全国各省（市）生态效率进行分析，下面是 2005-2020 年全国生态效率变化趋势，如图 3.2 所示。全国的生态效率值在 0.72-0.86 之间，最高是 2020 年，最低为 2012 年。从图可以看出 2006-2011 年生态效率值每年都在逐步增长中，到 2012 年下降，下降范围在合理取值范围内，2012 年光伏产业遭遇寒流，发生黑天鹅事件等导致我国一些产业发生经济危机。还有相关的环境污染问题出现导致生态效率突然下降。2012-2020 年间生态效率波在合理范围内上下幅度不明显，与每年相关的环境、政策执行、经济发展都有联系。

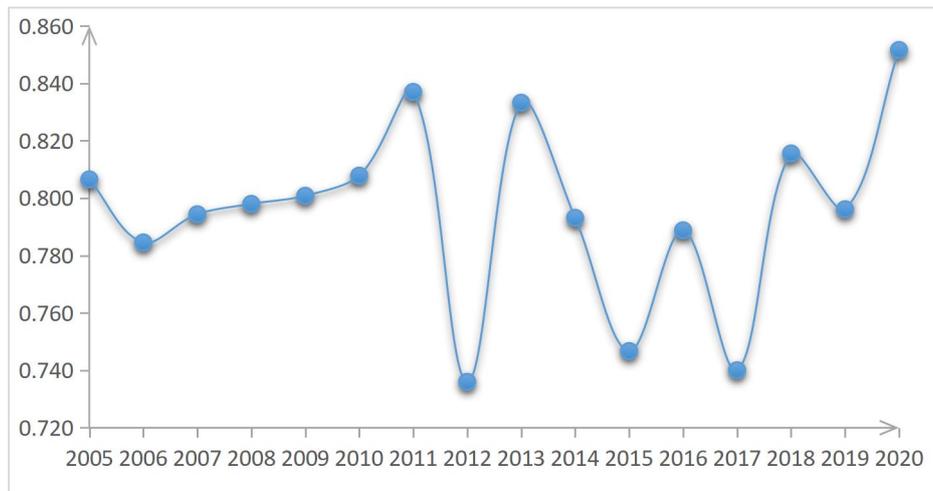


图 3.2 2005-2020 年全国生态效率趋势

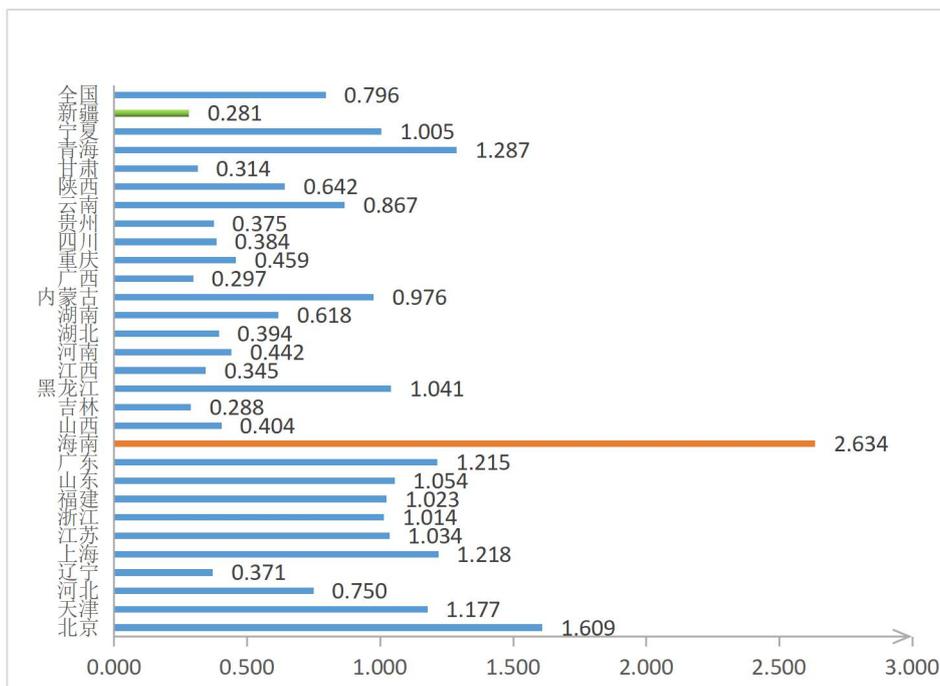


图 3.3 2005-2020 年各省（市）平均生态效率分布

对于从 2005-2020 年各省（市、区）的平均生态效率值来看，主要如图 3.3 所示：最高的地区是海南省，依次为北京市、青海省、上海市、广东等地。最低的是新疆、接下来依次是广西、吉林、甘肃等。与各省（市、区）每年的生态效率变化趋势想接近。

### 3.3.2 空间维度

（1）从区域划分层面来看，生态效率呈上升下降波动的变动趋势

全国生态效率值由 2005 年的 0.807 上升到 2011 年的 0.837，随后下降到 2012 年的 0.736，最后整体在 2020 年上升到 0.852，整体生态效率下降 0.045。从整体上分析出，东部省份的生态效率较高，再下来是西部，最后是中部。其中，沿海经济发达省份的生态效率较高，例如北京、上海、天津、江苏、浙江、广东等，而江西、湖北等中部地区的效率则较低。可以看出，生态效率的地区差异性明显。根据三大区域生态效率值变动趋势图可以看出生态效率值：东部地区>西部地区>中部地区。我国地域辽阔，各个地区在先天自然环境和后天人为环境方面各有不同，比如地理条件、产业发展水平、科技水平、对外开放程度等，都有极大不同，因此存在区域发展不均衡的现象，造成了生态效率差异性原因。可以发现，中西部地区开始缓慢上升，但是与发达的沿海地区相比，差距仍然明显，如下图 3.4 所示。

从整体趋势上看，东、中、地区生态效率值变动趋势与全国生态效率变化趋势基本保持一致。东部地区的生态效率值从 2005 年的 1.177 下降到 2012 年的 1.058，而在 2013 年又有所回升至 1.262，持续下降在 2017 年的 1.095，最后 2020 年的生态效率值为 1.195；西部地区生态效率值由 2005 年的 0.640 上升至 2012 年的 0.668，随后下降至 2013 年的 0.601，最后 2020 年的生态效率值为 0.668；中部地区生态效率值由 2005 年的 0.486 上升至 2008 年的 0.506，随后下降至 2011 年的 0.437，再上升至在 2016 年的 0.535，随后在 2017 年下降到最低值 0.367，最后持续上升，2020 年的生态效率值为 0.601；2011 年以来，东北地区的生态效率显著下降，这主要是由于重工业的迅猛发展，三废排放量大幅增加所致。

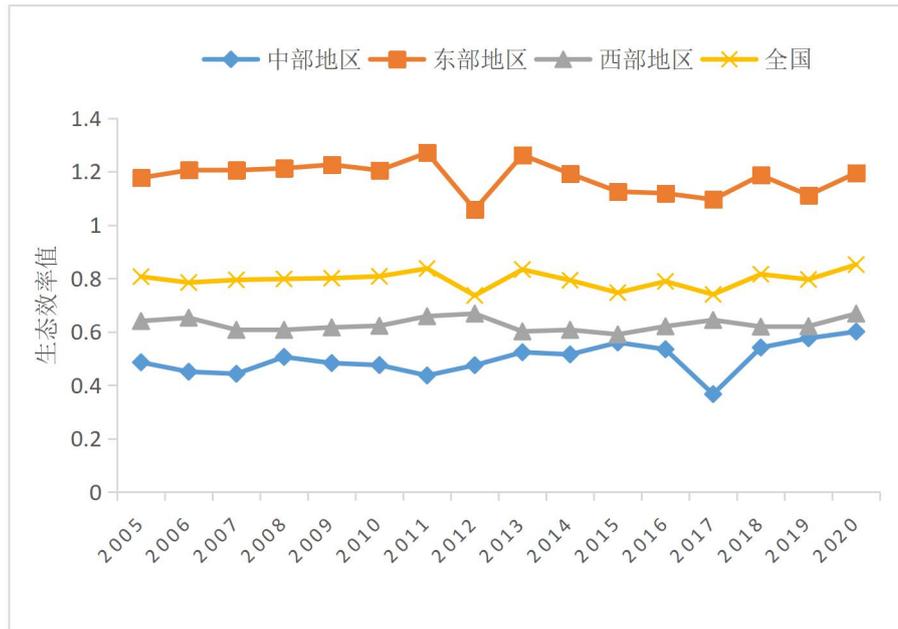


图 3.4 2005-2020 中、东、西部年度平均生态效率趋势

(2) 从省际层面来看，东部沿海地区省份明显高于其他地区省份

2005-2020 年，北京、天津、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南、黑龙江、青海和宁夏等东部沿海地区的生态效率显著提升，其中北京、天津、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南、黑龙江、青海和宁夏的生态效率均值超过 1，表明当地人民对环境的重视程度越来越高，他们采用的绿色生产技术也有助于节约资源和能源，从而使其处于全国领先的位置。其中，北京生态效率均值 1.609，整个东部地区生态效率受北京区域的影响，同时北京的生态效率也对全国起着标杆作用。北京作为首都和全国文化中心，创新能力与技术应用能力强，在经济发展的同时，也可兼顾环境保护和资源节约。海南是生态效率较高的地区，这主要是因为海南第一产业比重过大，而第二产业发展严重不足，2020 年海南工业增加值为 557.4 亿元，处于全国最低水平。因此，海南省的非期望产出相比其他省份较低，但为了维持经济长期稳定增长，加快产业结构的调整是必要的。青海和宁夏的生态效率均值大于 1，表明其在现有资金、劳动力、自然资源的投入水平下达到了有效的产出效率。然而，由于资源开采过多以及资源初加工领域的增加产业，使得其非期望的产出高于同等水平的其他地区，因此，应当提前注意资源保护和产业结构优化，以提高生态效率。

生态效率最低的省份为山西、辽宁、吉林、安徽、江西、湖北、广西、四川、

贵州、甘肃和新疆，这 11 个省份的生态效率均值都较低，这些地区多集中在中、西部经济欠发达地区和东北老工业区。主要是因为中西部地区环境污染严重和资源过度消耗，工厂高耗能、高排放情况加重。

综合考虑中国的经济发展水平和环境保护状况，中国的生态效率呈现出明显的区域分布特征，东部地区的生态效率明显优于其他地区，这种分布特征一定程度上有助于缓解中国的区域发展不均衡，可以发现，在东部生态效率的作用下，生态效率的区域化差异化得到改善，从而促进了经济社会的可持续发展。

## 4 基于生态效率的动力学模型

根据生态效率值的测算结果可以发现,京津带和沿海地区是高生态效率集聚区,西北和东北的一些省份是低生态效率集聚区。在30个省(市、区)中,只有东部沿海地区的生态效率一直保持在有效前沿。换句话说,东部沿海地区在生态保护和可持续发展方面的表现一直是较为优异的,而西北和东北的一些省份则需要更加注重生态环境的保护和建设,以提高生态效率水平。同时也提醒我们需要采取有力措施,加强生态环境保护工作,推动各地区生态效率水平的全面提升,实现经济发展与生态保护的双赢。故为了提高生态效率,需要知道影响生态效率的内部因素,从构建的测算生态效率指标体系中选取四个指标,建立动力学系统对内部机制方面进行分析,并得出相对的策略。

### 4.1 动力学模型建立

在测算生态效率值时,本文基于投入-产出视角,选取固定资产投资总额、能源消耗总量作为生态效率的投入指标,地区生产总值、二氧化硫排放量作为产出指标,其中地区生产总值为期望产出,二氧化硫排放量为非期望产出。以此构建关于生态效率投入-产出四维动力学系统,进行内部间的影响分析。

根据研究运用非线性动力学理论建立关于影响生态效率因素的动力学系统,如下。

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = a_1 N(1 - \frac{N}{H}) + a_2 K + a_3 D + a_4 W & (4.1.1) \\ \frac{dK(t)}{dt} = b_1 N - b_2 K - b_3 D + b_4 w(1 - \frac{W}{C}) & (4.1.2) \\ \frac{dD(t)}{dt} = c_1 NK - c_2 D - c_3 WD & (4.1.3) \\ \frac{dW(t)}{dt} = d_1 N + d_2 K + d_3 D + d_4 (M - W) & (4.1.4) \end{cases} \quad (4.1)$$

其中  $N(t)$  为能源消耗;  $K(t)$  为经济增长;  $D(t)$  为环境污染;  $W(t)$  为投资总额。  $a_1$  为能源消耗自身速度;  $a_2$  为经济增长对能源消耗的影响系数;  $a_3$  为环境污染导致的能源消耗损失率;  $a_4$  为投资总额对能源消耗的影响系数;  $b_1$  为能源消耗对经济增长的影响率;  $b_2$  为经济增长自身消耗速度;  $b_3$  环境污染导致的经济增

长消耗系数； $b_4$ 为投资总额自身影响率； $c_1$ 为随着经济的发展和能源的消耗，污染物的排放量速率； $c_2$ 为环境自身对自己的净化效率； $c_3$ 为在这一时刻的出现的污染与投资总额对环境被污染的影响率； $d_1$ 为能源消耗对投资总额的影响率； $d_2$ 为投资总额对经济增长的影响率； $d_3$ 为衡量环境监管的效果对投资总额的影响；投资回报率可以通过对投资总额的反馈  $d_4$  来衡量；其中， $H$  表示在一段时间内，能源消耗的最高、低限度； $C$  表示投资总额的变化对经济产生最大影响拐点； $M$  表示一定条件下投资总额的最大合理值。 $H$ 、 $C$ 、 $M$  的取值借鉴历史资料，根据其他学者研究所得。模型解释如下：

方程(4.1.1)表示随着经济的发展、环境的恶化以及产业的进步，能源消耗率也会相应地上升， $a_4W$  表示受到投资总额的增加以及能源消耗阈值的影响，导致能源的消耗量大幅度增加。 $a_1N(1-\frac{N}{H})$  表示能源利用效率取决于对能源的需求和可用资源的利用程度。当  $N < H$ ，能源消耗量还未达到该时期的能源消耗的最大值，能源消耗率逐渐升高。当  $N > H$ ，能源消耗量超过了该时期的能源消耗的最小值，能源消耗率降低。 $a_2K$  表示随着经济增长的加快，能源消耗也会受到显著影响，投资增加会导致能源需求的增加，从而推动经济发展。 $a_3D$  表示能源损失与环境污染有一定的关系。

方程(4.1.2)表示随着能源消耗、投资、环境保护以及经济发展的不断推进，可以看到经济的持续增长。其中  $b_4W(1-\frac{W}{C})$  表示投资水平不是持续增加的，会出现一个拐点，当投资增加量小于投资总额的变化对经济产生最大影响拐点时，即  $W < C$  时，投资总额的增加对经济的增长有利；当投资增加量大于投资总额的变化对经济产生最大影响拐点时，即  $W > C$  时，投资总额的上涨紧缩经济增长。 $-b_2K$  表明经济一定程度的衰退率；对于  $b_1N$  表示经济增长与能源的消耗呈正相关； $-b_3D$  表示环境污染过高会影响经济发展，即使在经济发展初期没有污染，经济发展速度也会持续增加，但当污染物达到一定程度时，其带来的社会影响将

会对经济水平产生负面作用,从而导致人们不得不牺牲一定的经济利益来进行污染治理或关闭高耗能、高污染企业以保护环境,从而降低经济水平的增长率。

方程(4.1.3)中,  $c_2NK$  表示环境的污染主要受经济增长和能源消耗影响。然而,由于环境的自我清洁能力  $-c_2D$ ,一旦污染水平超过了它的清洁能力,就可能導致污染物的堆积,从而引发严重的环境问题。此外,随着投资总额的不断増加,这种情况也可能被缓解。

方程(4.1.4)中  $d_4(M - W)$  表示投资总额变化率受投资本身的影响,当投资量小于一定条件下的最大合理值时,投资总额与投资总额的变化率存在正相关;当投资量大于最大合理值时,投资总额与投资总额的变化率存在负相关。 $d_1N$  和  $d_2K$  表示随着经济的发展,经济水平与投资总额呈正相关;能源消耗与投资总额呈正相关。 $d_3D$  为环境污染密度,呈正相关可提高投资总额来减少环境污染情况。

## 4.2 动力学模型稳定性分析

### 4.2.1 均衡点

动力学系统的复杂性非常高,其行为受到系统参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $H$ 、 $C$ 、 $M$  取值的影响。因此,为了更好地研究系统,我们使用 Matlab 进行数值模拟,得出了模拟参数,如下表 4.1 所示。在系统参数确定后,将进一步分析系统的动力学特征,从而深入了解系统的运作机理和特点,为未来的研究和实践提供科学的指导和支持。

表 4.1 数值模拟参数值

参数	取值	参数	取值	参数	取值
a1	0.4	b1	0.6	d1	0.87
a2	0.5	b2	0.04	d2	0.75
a3	0.3	b3	0.5	d3	0.2
a4	0.12	b4	1.8	d4	1.1
c1	0.11	c2	0.1	c3	0.3
M	0.2	H	8.22	C	7.1

进行上述的系统参数确定后,将参数代入动力学系统,代入的结果如下:

$$\begin{cases} 0.4N(1-\frac{N}{8.22})+0.5K+0.3D-0.12W = \frac{dN}{dt} \\ 0.6N-0.04K-0.5D+1.8W(1-\frac{W}{7.1}) = \frac{dK}{dt} \\ 0.11NK-0.1D-0.3WD = \frac{dD}{dt} \\ 0.87N+0.75K+0.2D+1.1W(0.2-W) = \frac{dW}{dt} \end{cases} \quad (4.2)$$

下面进行对上述方程的均衡点求解，通过软件 Matlab 对模型上述方程组进行数值求解，实数域内得到均衡点集如下：

$$s_0 = (0,0,0,0)$$

$$s_1 = (-0.7484,1.0159,-0.6203,0.1161)$$

$$s_2 = (0.7570-0.3214i,-0.1183+0.7813i,-0.7228-0.7788i,-0.5305-0.1069i)$$

$$s_3 = (0.7570+0.3214i,-0.1183-0.7813i,-0.7228+0.7788i,-0.5305+0.1069i)$$

通过已知的均衡点，对方程组进行稳定性判别。

### 4.2.2 稳定性判别

系统在平衡点时，其雅可比矩阵为：

$$J = \begin{bmatrix} -a_1(\frac{N}{H}-1)-a_1\frac{N}{H} & a_2 & a_3 & -a_4 \\ b_1 & -b_2 & -b_3 & -b_4(\frac{W}{C}-1)-b_4\frac{W}{C} \\ c_1K & c_1N & -c_2-c_3W & -c_3D \\ d_1 & d_2 & d_3 & -d_4 \end{bmatrix}$$

令  $|\lambda I - J_1| = 0$ ，得出模型的平衡点  $s_0 = (0,0,0,0)$ ，代入矩阵  $J$  中如下所示：

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.3 & -0.12 \\ 0.6 & -0.04 & -0.5 & 1.8 \\ 0 & 0 & -0.1 & 0 \\ 0.87 & 0.72 & 0.2 & -1.1 \end{bmatrix} \quad |\lambda I - J_1| = \begin{bmatrix} \lambda - 0.4 & -0.5 & -0.3 & 0.12 \\ -0.6 & 0.04 & 0.5 & -1.8 \\ 0 & 0 & \lambda + 0.1 & 0 \\ -0.87 & -0.72 & -0.2 & \lambda + 1.1 \end{bmatrix}$$

$\lambda_1 = -0.11 < 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 < 0, \lambda_4 < 0$ ，根据李亚普诺夫判别法， $s_0$  点被确定为不稳定点。

在平衡点  $s_1 = (-0.7484,1.0159,-0.6203,0.1161)$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0.47 & 0.5 & 0.3 & -0.12 \\ 0.6 & -0.04 & -0.5 & 1.74 \\ 0.11 & -0.08 & -0.133 & 0.186 \\ 0.87 & 0.72 & 0.2 & -1.1 \end{bmatrix}$$

$$|\lambda I - J_2| = \begin{bmatrix} \lambda - 0.47 & -0.5 & -0.3 & 0.12 \\ -0.6 & \lambda + 0.04 & 0.5 & -1.74 \\ -0.11 & 0.08 & \lambda + 0.133 & 0.186 \\ -0.87 & -0.72 & -0.2 & \lambda + 1.1 \end{bmatrix}$$

$\lambda_1 = -0.11 < 0, \lambda_2 < 0, \lambda_3 < 0, \lambda_4 < 0$ , 知  $s_1$  为稳定点。

因为,  $s_2$  和  $s_3$  为复数, 与实际不符则不考虑。

### 4.2.3 数值模拟

研究表明, 能源消耗、经济增长、投资总额和环境污染之间存在着复杂的相互关系, 这种关系可以通过建立四维动力系统来描述。为了更好地理解这种关系, 我们需要进行模拟仿真。

#### (1) 经济增长与能源消耗下污染排放率对系统的影响

通过使用 Matlab 软件, 我们可以模拟系统在初值  $N(0) = 0.8, K(0) = 1.2, D(0) = 0.7, W(0) = 0.6$  等值的状态下,  $c_1$  不同值下的系统的变化情况。其中,  $c_1$  表示经济增长与能源消耗带来的污染排放率, 越高表明污染排放越严重; 而  $c_1$  越小, 则表明经济活动与能源消耗产生的污染越低。见图 4.1-图 4.3 的结果, 当参数  $c_1$  发生变化时, 系统的时间序列发生了显著的变化。当系统的参数设定为  $c_1 = 0.11$  时, 它会经历短暂的波动, 然后达到稳定状态。

当参数设定为 0.01 时, 系统的波动幅度会增强, 波动时间会变长, 之后达到稳定状态。当参数设定为 0.3 时, 系统的波动幅度会更加剧烈, 时间会变短, 之后达到稳定状态。最初, 系统并不稳定。经济发展初期, 由于经济水平较低, 人们可消费的产品较少, 因此产生的污染量也较少, 污染排放率也较低, 对能源消耗及产业发展的影响也较小, 经过短暂的波动后, 系统可以达到稳定状态。

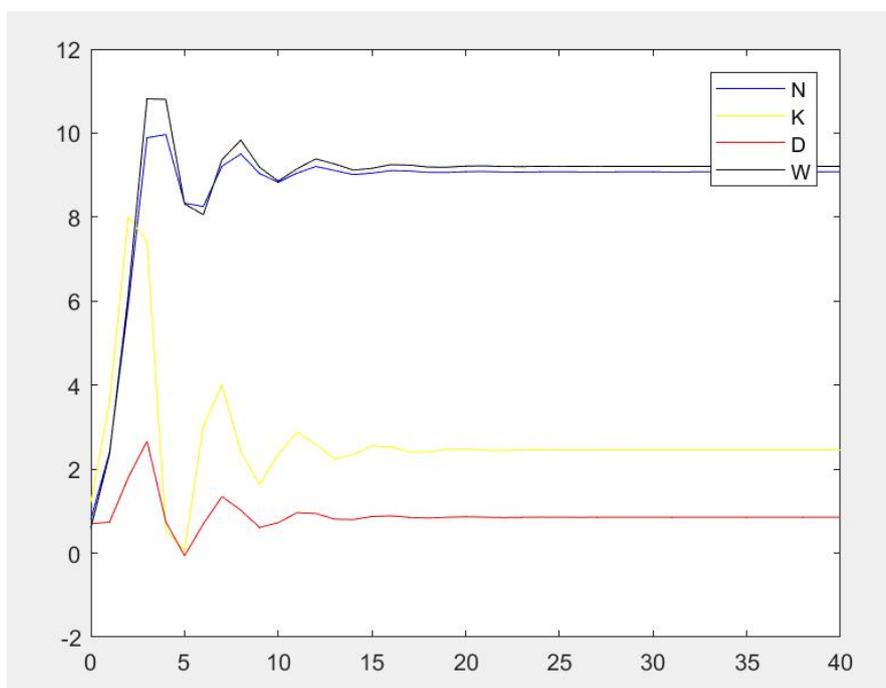


图 4.1  $C1=0.11$  时 N-K-W-D 时序图

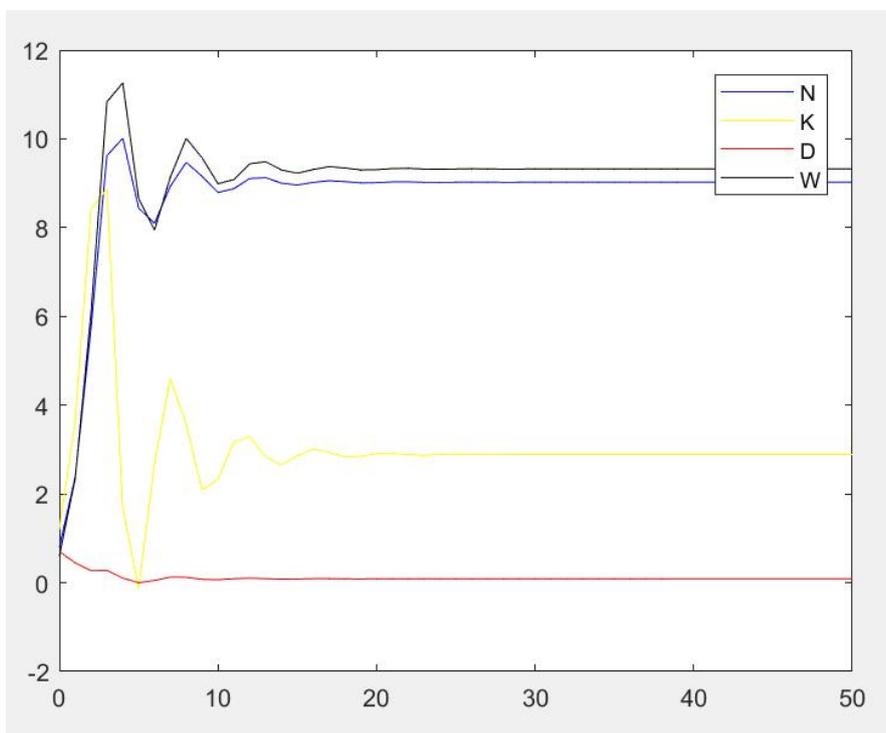


图 4.2  $C1=0.01$  时 N-K-W-D 时序图

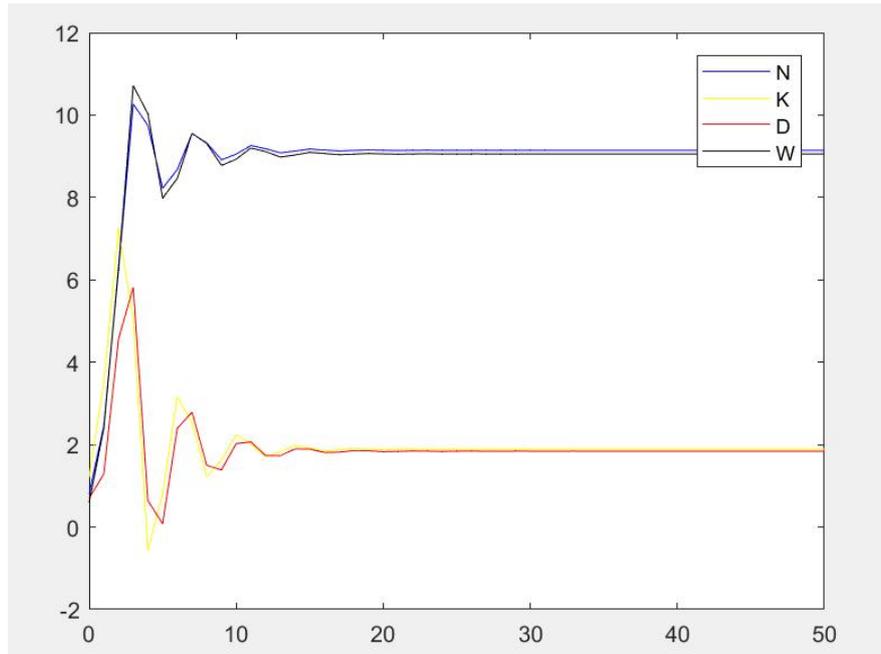


图 4.3  $C_1=0.3$  时 N-K-W-D 时序图

当前,由于环境质量的边际效益不够明显,而消费品的边际效益却相当可观,因此,许多人不得不牺牲自身的利益,以追求更高的经济发展。然而,随着经济的发展,污染物的排放量 $c_1$ 也不断上升,系统性的波动日益加剧,使得经济活动和能源消耗所带来的污染物更加严重,从而抑制了经济的发展。当污染物的数量增多时,它们将会严重破坏自然资源,并且还会增加能源的消耗。但是,第三产业的迅猛发展可以有效地调整产业结构,并且可以改变高能耗行业的生产模式,从而降低污染物的排放,减轻环境污染的影响,并且降低它们给资源带来的损害。当环境污染物的数量减少,经济活动也将开始恢复,并且产业经济也将出现增长的趋势。但是随着时间的推移,发展到一定程度时,环境污染和能源消耗又将加剧,导致经济衰退。这种情况导致了系统的周期性波动,从而使得整个经济体系处于不稳定状态。为了实现可持续的发展,我们必须采取有效的措施来抑制污染物的排放,包括但不限于经济、行政、体制等方面的改革,以免造成不可逆转的损失。

#### (2) 环境规制下投资总额增加对系统的影响

随着 $d_3$ 逐渐升高时,环境规制对投资总额增加的影响率提高。见不同数值时的时序图图 4.4-图 4.6,当系统稳定时 $d_3 < 2.6$ 时,经济规模 $K$ 在 1.5-2 左右

时，环境规制对产业增量的影响率提高，能源消耗  $N$  有着明显变化，先是波动性减缓，最后能源消耗稳定点变低。环境污染也随之出现明显的变化。表明在环境规制响度提高下，对能源有着显著的抑制作用。近年来，我国政府采取了一系列措施来减少环境污染，包括限制排放量、制定排污标准等，但是，仅凭这些措施，很难有效地控制环境污染，从而保持经济的稳定发展。相反，过度的环境规制，可能会抑制经济增长，从而阻碍环境污染的有效控制。

随着环境规制的实施，投资总额的增加可能会在短期内减少污染，但是从长远来看，这种做法可能会导致经济的持续衰退，进而削弱环境管控的效果，并且可能会阻碍产业结构的优化和发展。所以如果我们将环境规制对投资总额的影响系数控制在  $1.2 < d_3 < 2.6$  时，那么就可以在减少污染和能源消耗的同时，保证经济的稳定增长，并确保系统的协调发展。

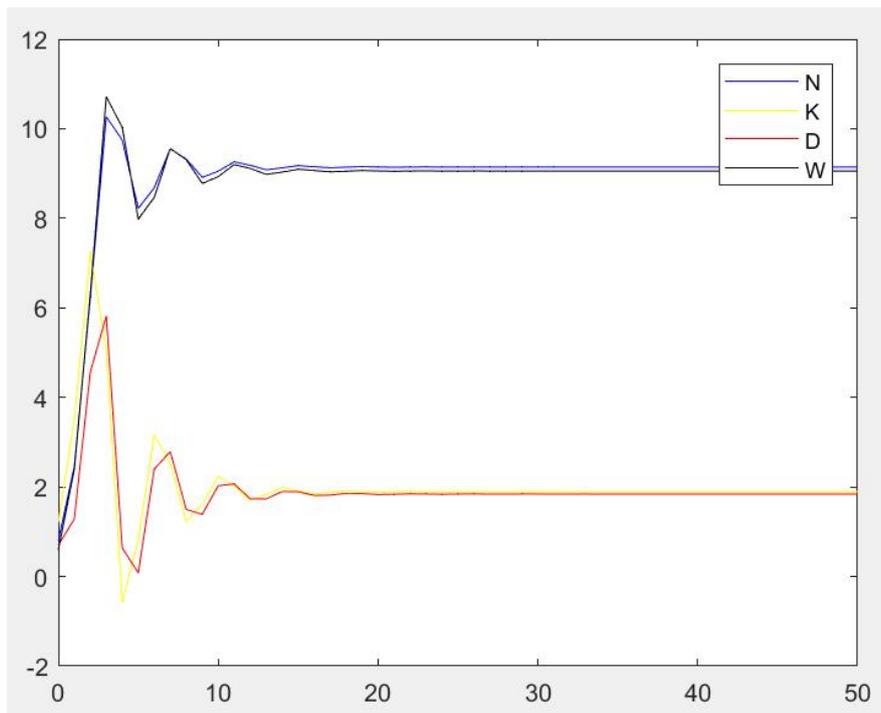


图 4.4  $d_3=0.6$  时 N-K-W-D 时序图

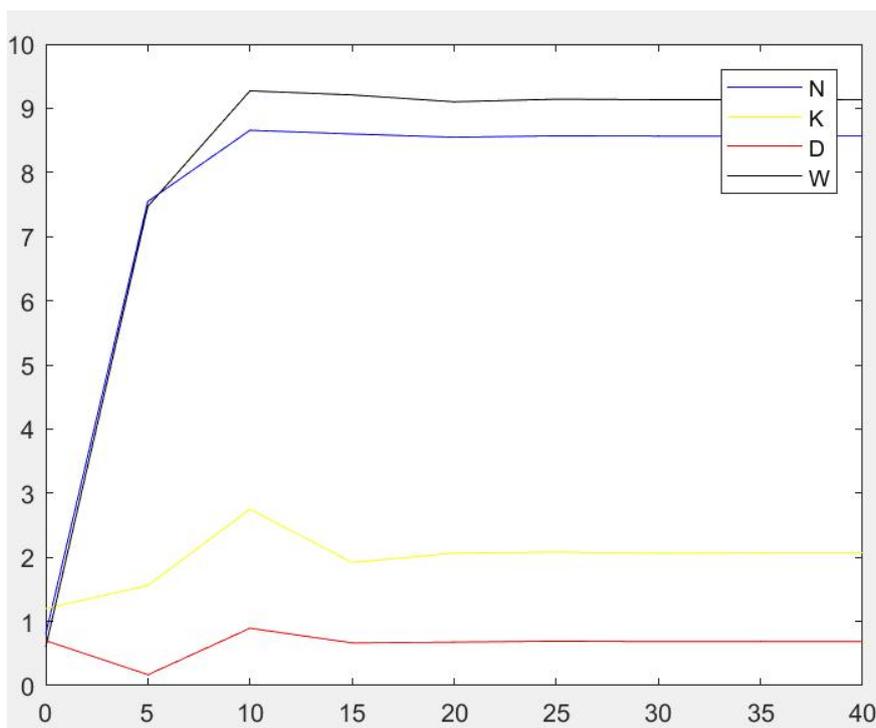


图 4.5 d3=1.2 时 N-K-W-D 时序图

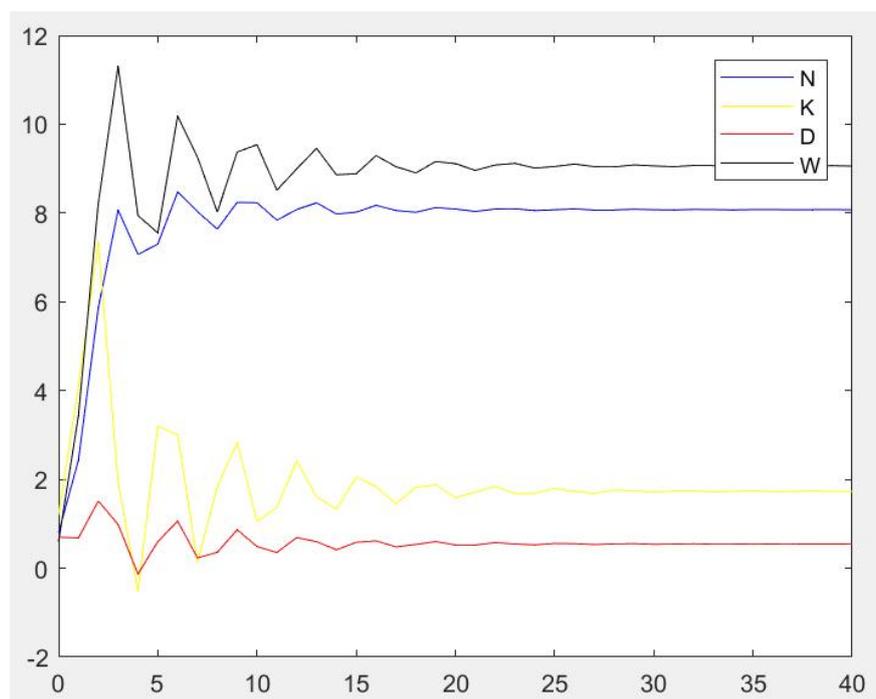


图 4.6 d3=2.6 时 N-K-W-D 时序图

从上述对系统的运动状态进行分析我们得到以下的结论：

- (1) 经过系统分析，当参数水平达到一定程度时，系统的平衡点将会达到稳定，并且会出现周期性的运动变化。

(2) 当经济活动及能源消耗造成的污染排放越小, 对系统的稳定性影响越小, 系统会在短暂的波动后达到稳定状态, 随着污染排放的提高, 系统的波动幅度逐渐变大。

(3) 当环境规制的影响力超越了一个合理的范围, 就会导致更严重的后果。尽管这种情况下, 经济的发展也许会受益, 但它也会带来更多的污染和能源的浪费。因此, 我们应该尽力将环境规制的影响力限制在 $1.2 < d3 < 2.6$ 的范围内, 这样才能够有效地降低环境污染, 降低能源消耗, 促进投资, 从而确保经济的持续健康发展。

所以应该调节好污染排放与能源消耗及经济发展之间的关系, 为了保护环境, 我们应该制定合理的环境管制措施, 并灵活运用污染排放权交易、环保补贴和行政监管等多种环境规制工具。这样可以保护生态系统, 提高生态效率。此外, 我们还可以实施“鼓励引导”机制, 将科技和创新方法融入环境管理, 提高能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染动力系统的运用。通过实施污染治理, 不仅可以提升产业的生产效率, 而且还能够有效地促进经济增长, 从而实现可持续发展。

### 4.3 实证模型分析

在前面的内容中建立了生态效率的动力学模型, 进行了稳定性分析和数值模式, 对于上述的分析, 其参数取值缺乏实际的意义, 为了弥补这一缺陷, 下面将利用实际的数据进行参数估计。将利用该模型分析不同情况下四维动力系统的稳定状况, 结合实际数据, 给出相关参数的阈值。选取 2005-2020 年的数据, 如下表 4.2 可见。对于这四组数据, 去模拟实际系统的情形时, 需要先进行归一化处理。自动控制专家 L.A.Zadeh 在 1962 年首次提出系统辨识, 通过分析输入和输出的时间变化, 可以使用系统辨识技术来准确地捕捉和描述系统的行为特征。系统辨识包括模型阶次辨识和参数辨识<sup>[42]</sup>。参数辨识就是在已知系统结构模型的基础上, 结合输入输出的数据进行参数估计, 找到一组误差最小的能拟合实际系统的结构参数, 其中应用最广的有最小二乘法<sup>[43]</sup>。随着不断地发展系统辨识运用控制理论中, 为了更满足实际需求, 提出了新的方向, 遗传算法和神经网络辨识<sup>[44]</sup>。

本文中的动力学模型是一个多维连续微分方程, 而遗传算法则是用来求解模型参数的主要方法, 以识别系统的实际参数<sup>[44]</sup>。首先使用遗传算法求解系统参数

时，需要初始化一组解决方案，然后通过重复应用突变、交叉、反转和选择运算符来改进这些方案，这已被成功应用于识别实际非线性动力学系统的参数<sup>[45]</sup>。

表 4.2 实证数据

	固定资产投资总额 (亿元)	能源消耗(万吨标 准煤)	人均 GDP (元)	二氧化硫排放量 (万吨)
2005	68514	261369	14368	2549.4
2006	82830	286467	16738	2588.8
2007	101212	311442	20494	2468.1
2008	124434	320611	24100	2321.2
2009	156933	336126	26180	2214.4
2010	189964	360648	30808	2185.1
2011	229693	387043	36277	2217.9
2012	271843	402138	39771	2117.6
2013	318772	416913	43497	2043.9
2014	362881	428334	46912	1974.4
2015	395518	434113	49922	1859.1
2016	424399	441492	53783	854.9
2017	451729	455827	59592	610.8
2018	478460	471925	65534	516.1
2019	504212	487488	70078	457.3
2020	518907	498000	71828	318.2

综上所述，本文采用了遗传算法求解多维连续微分方程中的参数，以识别实际动力学系统的参数，并通过此方法深入了解系统的特性和运行机理。

首先对能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染动力学系统进行离散化处理，得到如下的差分方程：

$$\begin{cases} N(a+1) = N(a) + \Delta T [a_1 N (1 - \frac{N}{H}) + a_2 K + a_3 D + a_4 W] \\ K(a+1) = K(a) + \Delta T [b_1 N - b_2 K - b_3 D + b_4 W (1 - \frac{W}{C})] \\ D(a+1) = D(a) + \Delta T [c_1 NK] - c_2 D - c_3 WD \\ W(a+1) = W(a) + \Delta T [d_1 N + d_2 K + d_3 D + d_4 (M - W)] \end{cases} \quad (4.3)$$

将人均 GDP(元)作为经济增长量  $K(t)$  的实证数据；二氧化硫排放量(万吨)作为环境污染量  $D(t)$  的实证数据；能源消耗量作为能源  $N(t)$  的实证数据；固定资产投资总额(亿元)作为投资总额  $W(t)$  的实证数据。

本章利用 Matlab 进行参数识别<sup>[43]</sup>，本章将 05 年的数据作为初始条件，对表 4.2 数据进行归一化处理，若对数据不进行归一化处理，特征区间会有不同的取值范围，在进行迭代更新较为缓慢，需要经过长间才能达到局部最优解或者全局最优解，因此，需要对数据进行归一化处理，保证梯度下降很快收敛准确度更高。利用识别参数的方法及软件，随机调参，并将输出的数据带入公式(4.3)中。在经过多次调试和运行后，当得的数据与目标输出的数据误差足够小时，得到的参数如下表 4.3:

表 4.3 实际数值模拟参数值

参数	取值	参数	取值	参数	取值
a1	1.798	b1	1.546	d1	1.691
a2	1.69	b2	0.085	d2	1.459
a3	0.964	b3	0.002	d3	0.516
a4	0.335	b4	1.336	d4	1.262
c1	0.908	c2	0.774	c3	2.297
M	0.2	H	2.2	C	4.899

将实际拟合的参数带入能源消耗与经济增长质量的动力学模型中，得到如下(4.4)的实际系统:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = 1.798N(1 - \frac{N}{2.2}) + 1.69K + 0.964D + 0.335W \\ \frac{dK}{dt} = 1.546N - 0.085K - 0.002D + 1.336W(1 - 4.889) \\ \frac{dD}{dt} = 0.908NK - 0.774D - 2.297WD \\ \frac{dW}{dt} = 1.691N + 1.459K + 0.516D + 1.262(0.2 - W) \end{cases} \quad (4.4)$$

利用 Matlab 软件程序，先取 30 个数据点，得到的系统实际的参数拟合动态演化时序图，其结果见图 4.7。我们可以发现在初始状态下，投资总额增量下降时抑制能源的消耗、经济的发展，当投资总额上升时有利于促进能源的消耗、经济的发展。在第三产业发展的阶段，受产业结构的影响，人们对资源的利用率不高，当第三产业发展到一定高度时，会导致能源消耗量增加，提高经济的增长，此时环境污染受到环境规制和整个生态环境影响，环境污染也会提高。中国作为发展中国家，在经历了改革开放的时期，经济高速发展，随之带来了大量的环境污染与经济社会问题。所以如参数拟合动态演化时序图所示，能源消耗-经济增

长-投资水平-环境污染在长期的过程中一致处于波动状态，出现周期化。污染不足以影响经济水平和社会的发展。随着投资总额的上升，能源的消耗开始逐渐增加，同时带动经济水平开始增长，随着经济的发展，环境污染也会随之而来，对经济产生重大影响，为此降低能源消耗有利于环境污染量减少，能够降低环境污染。

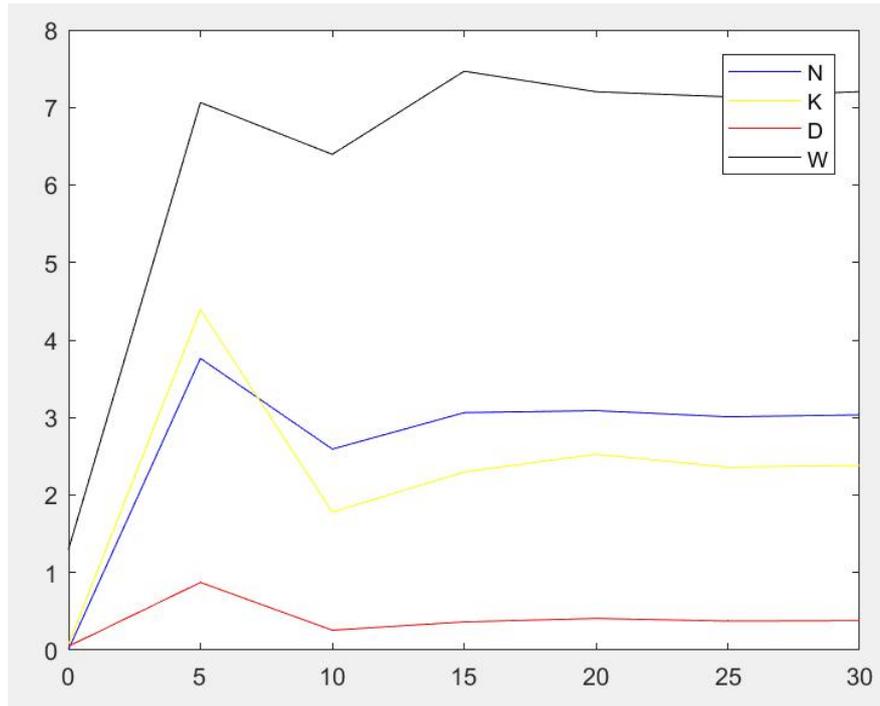


图 4.7 初值情况下 N-K-W-D 时序图

以上数据点较少，进行长期分析需要更多数据点，因此我们选取 500 个数据点，利用程序得出其在目动态演化时序图，其结果见图 4.8 所示，在当前，能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染的发展模式不变的情况下，经过长期发展该系统会越来越稳固，虽然长期保持稳固。但是他们之间的关系不能更好的体现。为此，为找寻如何使得系统稳定、波动变小，周期合理。与上述模拟结合，下面文章将分析了在不同的不同的污染排放水平下和不同环境规制水平下，提出一系列能够使得能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染系统协调稳定发展时，提高生态效率的策略。

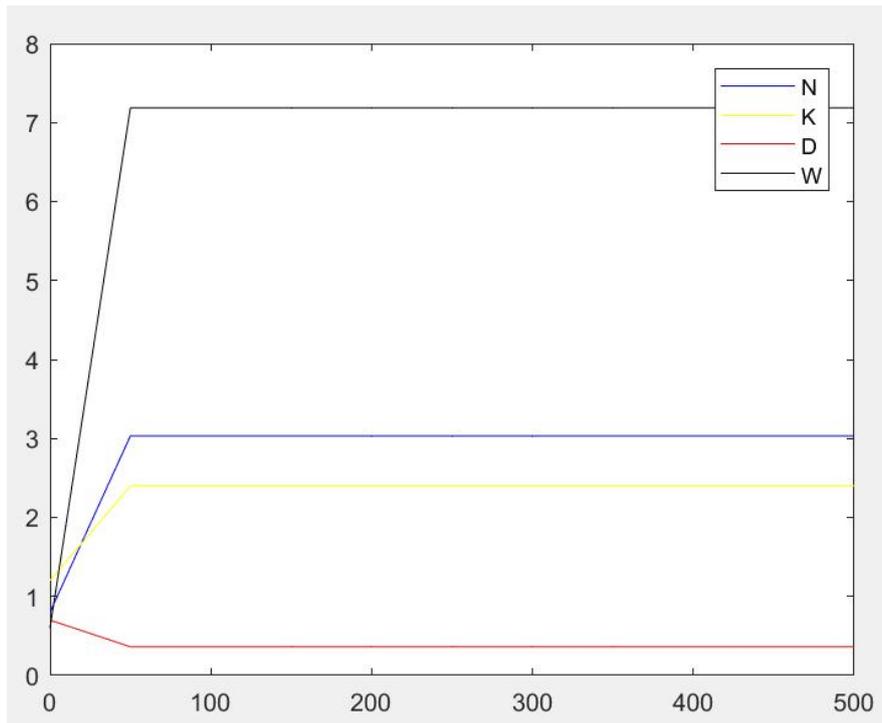


图 4.8 初值情况下 N-K-W-D 时序图

## 4.4 经验结果与策略分析

在进行理论分析时,动力学模型中有些参数在实际过程中是可以进行调整改变的,在此基础上,本节将对代表污染排放率、能源消耗以及环境规制下人均 GDP 的参数进行调整,分析其在不同的排污水平下,对系统周期、波动的影响,并提出相应的实施策略。

### 4.4.1 策略一：改变环境污染率

在经济社会的发展过程中,只要有经济活动那就会产生污染,而污染的排放程度大家都知道是可以进行控制的,如果污染不加以控制,那么将会使得系统不稳定。文章在上节数值模拟分析的过程中得出当污染排放率处于一定的区间内,可以使得系统稳定的运行。在本节中我们利用实际数据拟合了新污染排放率参数,并对新的模型进了动态模拟。接下来我们调整污染排放率,使其减小同时代表着污染物减少。在其他参数不变的情况下,只改变污染排放率参数。当污染排放率等于 0.308 时,取 50 个和 500 个数据点,我们观察在这一水平下动态演化时序图,判断对系统影响,其结果见图 4.9-图 4.10。与上图相比,我们发现能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染的波动振幅变小,波动周期也在变小,也就是代

表其出现稳定的周期震荡加快。说明如果为了经济的快速增长而对污染排放不加以控制，那么将不利于资源与环境的改善，同时对环境污染排放量的降低时，经济增长更趋于稳定增长。

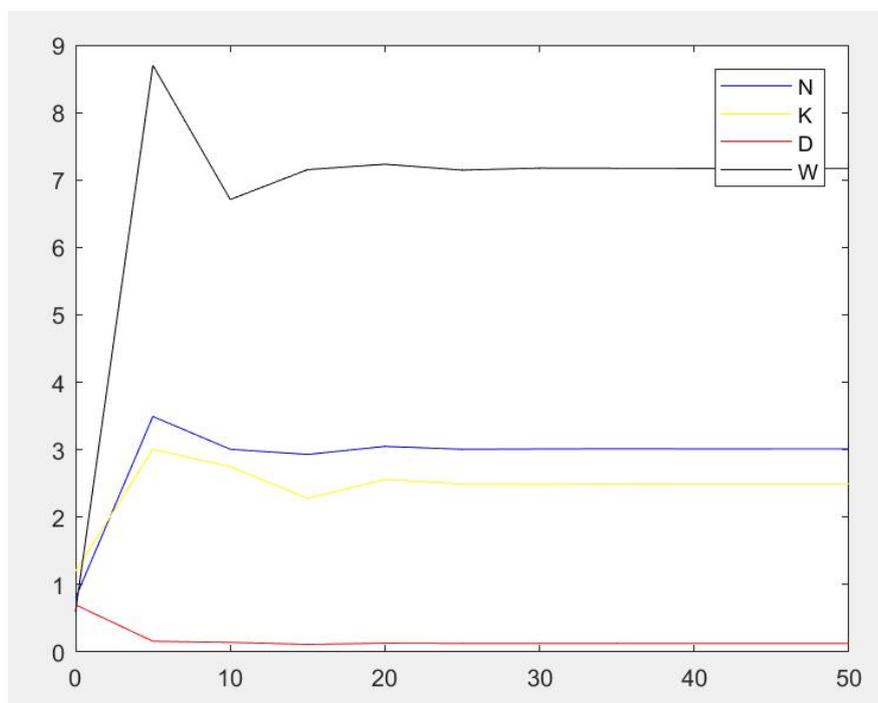


图 4.9  $C_1=0.308$  时实证 N-K-W-D 时序图

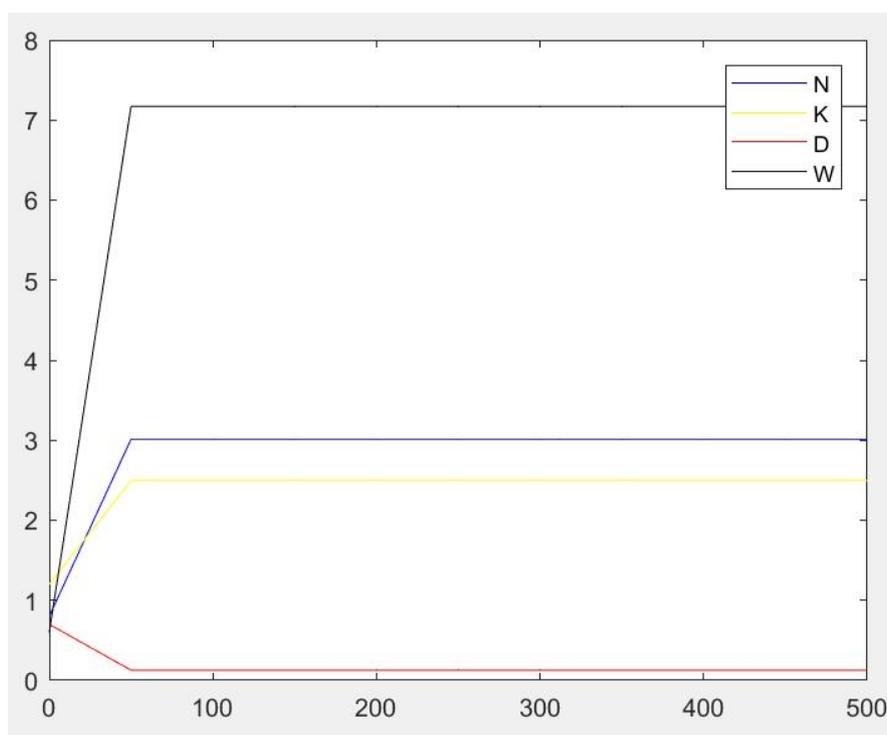


图 4.10  $C_1=0.308$  时实证 N-K-W-D 时序图

减少污染排放，控制污染排放率通常的实施主要为建立污染治理的设施、加治污强设施的运行监管等措施在处理污染物方面进行控制；为了保护环境，我们必须淘汰落后的产能，并采取三大措施来控制污染，包括：结构性减排、工程性减排和管理性减排。此外，排污许可证制度对于控制点源环境污染也至关重要，也是直接有效的制度，在该制度中排污总量设定越严格，污染排放量越小，同时对经济发展的边际影响减少，因此在制定排污总量时应考虑该政策对经济发展的影响，合理的控制污染排放。所以利用行政手段加大淘汰高污染、高消耗企业，严格监督新企业的排污标准进行合理的污染排放率控制对能源消耗与经济增长的动力系统具有重要作用。

#### 4.4.2 策略二：控制环境污染排放量的同时降低能源消耗量

在能源消耗与经济增长的动力学模型系统中，环境是可持续发展的，在策略一中我们控环境污染排放率，将污染物排放率控制到特定区间中，会使得系统振幅减少，形成稳定周期的时间加快，为了能够使得系统更加稳定。接下来我们在策略一的基础上调整环境规制水平，其他参数不变，只改变代表能源消耗水平的参数。如图 4.11-图 4.12 所示，取 50 个和 500 个数据点，我们观察在这一水平下动态演化时序图，判断对系统影响。我们可以得到在控制污染排放率同时降低能源消耗量，我们发现系统的震荡幅度越来越小最终趋于各自稳定点，在实证分析中，我们同样发现当能源消耗降低时，刚开始投资总额较低，经济增长也降低幅度较大，后面当到达一定时间后这种趋势趋于稳定状态，说明经济增量的变化适应了由能源消耗带来的影响。说明合理控制能源消耗对经济增长的影响会使得能源消耗与经济增长质量的动力学系统更加稳定。

中国当前现状是，经济水平的发展仍然是影响能源消费的最重要的因素，其主要原因在于中国经济的发展模式仍处向高质量发展模式转变的过程中，这需要一定时间来转变，所以经济发展水平对能源消费的影响依旧存在且影响力度较大。所以为了保证经济系统的平稳增长具体措施可以适当提高或减少能源消耗。

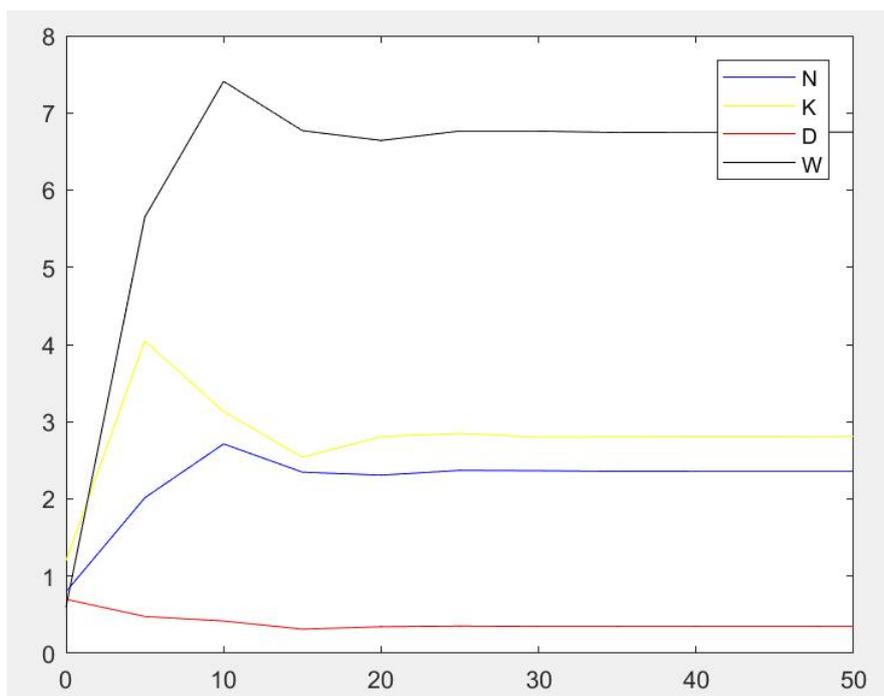


图 4.11  $a_1=0.7$  时实证 N-K-W-D 时序图

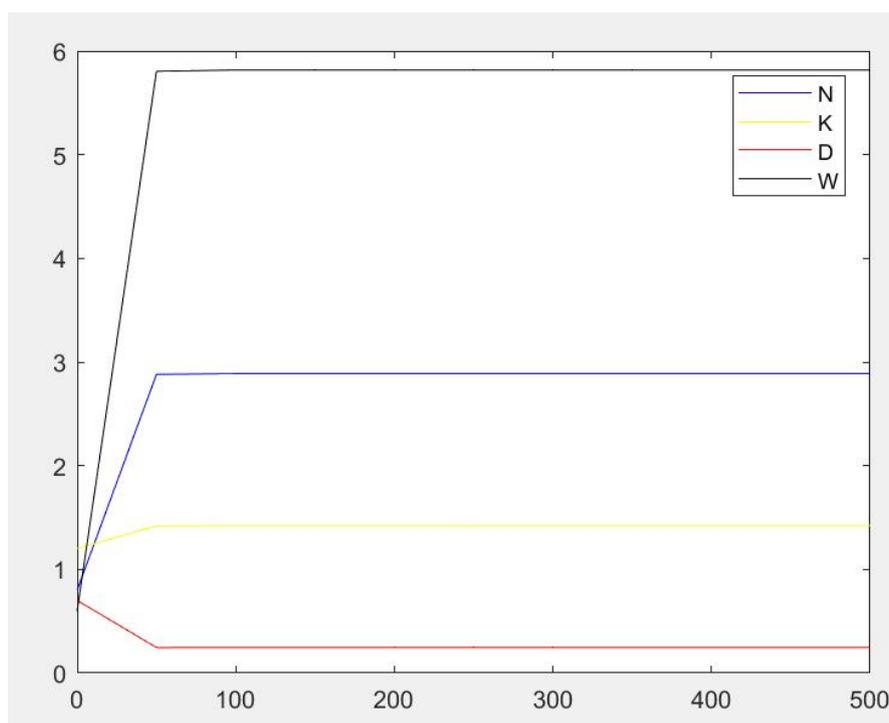


图 4.12  $a_1=0.7$  时实证 N-K-W-D 时序图

### 4.4.3 策略三：控制经济增长速度

在能源消耗与经济增长质量的动力学模型系统中，经济发展水平将会对能源

消耗起一定作用。在策略一中我们控环境污染排放率，将污染物排放率控制到特定区间中，会使得系统振幅减少，在策略二中我们在控制污染排放率同时降低能源消耗，我们得出在其他参数不变情况下，提升代表环境规制水平参数，降低能源消耗水平参数，系统的振幅加速减少。接下来我们在策略一和策略二的基础上调整经济发展水平对投资总额影响的参数，其他参数不变，只改变代表经济发展水平对投资发展水平的参数。取 30 个和 500 个数据点，我们观察在这一水平下动态演化时序图，判断对系统影响。

其结果见下图 4.13-图 4.14。我们得出相比于策略二，能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染的震荡幅度越来越小。最终趋于各自稳定点的时间加快。从经济角度，经济增长对于能源消耗的影响呈现出动态性特征，投资水平趋势与经济增长的趋势呈正相关作用。在合理范围的增加投资总额也可以起到促进经济发展，增加能源消耗的状态。所以不能一味地要求经济发展水平快速增长而过多干预投资，使得能源消耗量增加，环境污染受到加剧影响。在能源消耗与经济增长动力学系统中，能源消耗是基础，环境污染、投资是条件，其目的是为了经济增长可持续增长。

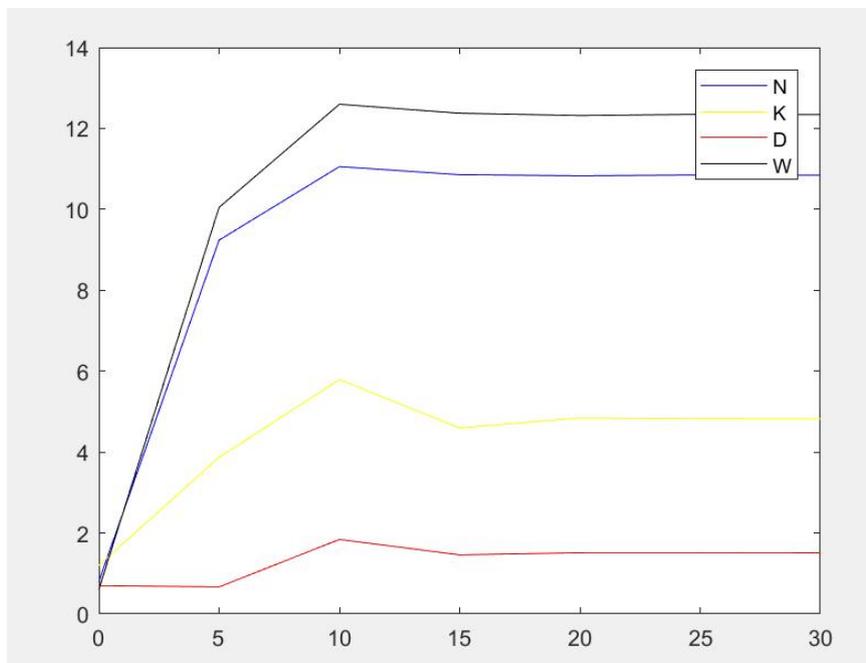


图 4.13  $d_1=1.85$  时实证 N-K-W-D 时序图

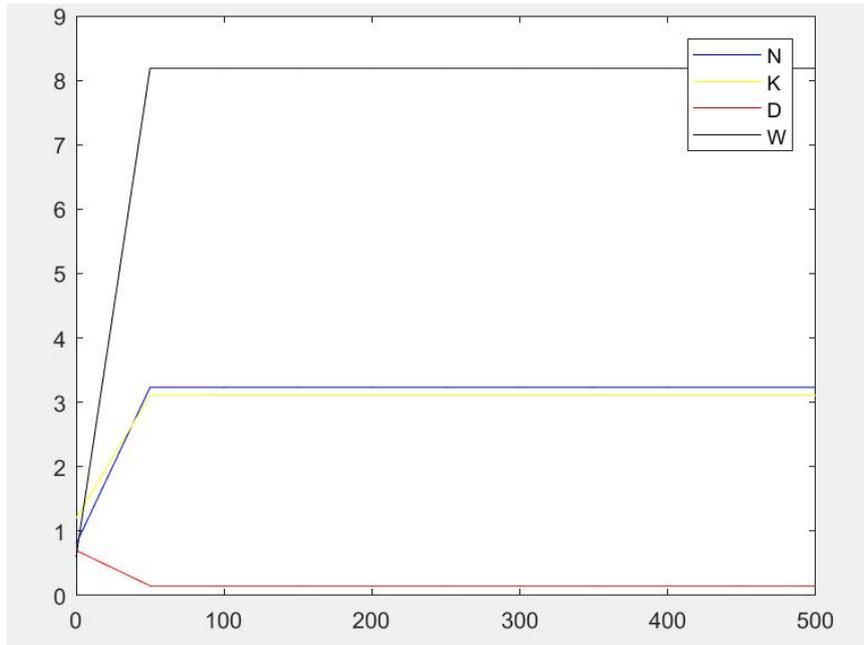


图 4.14  $d_1=1.85$  时实证 N-K-W-D 时序图

本节采用实际数据进行参数估计，证实了第三章中理论分析的合理性，而且还建立了符合实际的动力学模型，从而证实了模型建立的合理性。在此基础上考虑了控制污染排放率、控制污染排放率同时降低能源消耗水平、控制污染排放率及环境规制对能源消耗影响同时改变经济增长与投资之间的影响。三种递推策略的改变使得动力学系统的震荡幅度逐渐减小，达到稳定状态所需的时间缩短，这些合理的系统优化都会对系统趋于稳定和好的方向起到正向作用。同时简单对不同策略下提出实际建议：利用政策措施手段控制高污染企业，严格监督新企业的排污标准进行合理的污染排放率控制；适当减少能源消耗；调整投资总量；加强技术创新。使得能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染动力学系统更加稳定，从中可以更直观的获取内部之间的关系，理清它们之间的相互作用，从而对环境有更进一步的改善，对整个的生态系统的管理和规划有着更清楚的方向，提高生态效率，建设生态文明和实现可持续发展。

## 5 生态效率影响因素的分析

通过第三章对中国生态效率时空格局特征的动态分析,可以发现各省(市、区)生态效率存在明显的时空差异性,为了更合理的提高生态效率值,需要对于造成这些差异性的影响因素进行探究。本文选取经济发展水平(GDP)、产业结构(STRU)、技术水平(TECH)、年末总人口(POP)、城镇化水平(URBA)、对外开放度(OPEN)、环境规制强度(REGU)、能源消耗水平(ECP)等指标作为主要解释变量,研究各因素对生态效率的影响效应。下面主要是在对影响生态效率因素指标的整理中,运用动态因子分析法提取核心的影响指标,最后进行回归分析。

### 5.1 指标选取

区域生态效率受到多种因素共同作用,主要有以下几个方面:

首先,一个省份的经济实力是其发展的关键因素,这与它的经济基础密切相关,要求各省实现其自身价值的最大化,进而对生态效率进行有效影响。经济发展水平可以保证科研投资及环境保护资金等。本文选取的指标符合参考综合发展指数衡量经济发展的指标选取原则。其中,人均GDP作为反映城市经济规模的指标;第二、三产业占GDP的比重以及工业占GDP比重作为反映经济结构优化的指标。这些指标的选择与经济结构的趋势和特点密切相关。随着经济结构的转型和升级,一次产业比重逐渐下降,而第二、三产业比重逐渐上升,因此第二、三产业占GDP的比重也成为重要的衡量指标之一。同时,由于工业活动对环境的影响较大,工业占GDP比重也成为反映生态效率的重要指标之一。

其次,在社会层次,技术创新能够更好的实现环境治理问题,并降低其成本,合理利用资源;城镇化则体现的是地区的人才引进效果,高质量人才作为一切技术创新的起点;对外开放有引进国外先进的清洁生产技术的优势,又存在带来风险劣势,选取规模以上工业企业R&经费占GDP的比重,地区年末总人口数量,城镇人口占常住人口的比重,外资进出口总额占GDP的比重衡量生态效率社会发展水平。

最后,生态效率的建设还需要考察省份的环境保护水平以及能源消耗水平,其中环境规制既可以降低环境污染程度,同时也可以对相关企业的监督作用,能源的消耗我们一直都是特别的关注,不能无限索取,过度开采,选取能源消耗量作为指标来反应对生态效率的影响。

综上所述, 本文基于历史文献<sup>[46]-[50]</sup>的基础上, 选取如表 5.1 所示的影响生态效率指标体系。主要由三级指标构成: 一级指标为影响因素范围, 是反映一定时期内的影响生态效率的综合指数, 下设 4 个二级指标, 即: 经济、社会、生态与资源, 并且选取具有代表性指标的三级指标体系。最终得到指标体系如表 5.1:

表 5.1 影响生态效率核心指标

影响因素	解释变量	具体指标
经济	经济发展水平(GDP)	人均 GDP/(元/人)
	产业结构(STRU)	工业增加值占 GDP 的比重/%
		第二产业增加值占 GDP 比重 (%)
		第三产业增加值占 GDP 比重 (%)
技术水平(TECH)	规模以上工业企业 R&经费占 GDP 的比重/%	
社会	年末总人口 (POP)	地区年末总人口数量/万人
	城镇化水平(URBA)	城镇人口占常住人口的比重/%
	对外开放度(OPEN)	外资进出口总额占 GDP 的比重/%
生态	环境规制强度(REGU)	环境污染治理投资率/%
资源	能源消耗水平(ECP)	能源消耗量/(万吨)

对于上述选取的影响生态效率因素的指标体系, 为了使得影响效果更为准确, 我们运用动态因子的方法取出核心的因素, 来进行回归分析, 主要过程如下。

## 5.2 动态因子法提取核心因素

### 5.2.1 核心要素提取步骤

从动态因子分析的中心思想出发, 整个实施步骤具体如下:

(1) 对选取的指标数据标准化处理。

(2) 通过各年份的方差或协方差矩阵  $S_{(t)}$  计算出总体平均离差矩阵  $S_T$ 。计算公式如下:

$$S_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T S_{(t)} \quad (5.1)$$

(3) 求解  $S_T$  的特征值和特征向量, 各公因子的方差贡献率和累计方差贡献率。

(4) 计算各主体的静态得分矩阵:  $c_{ih} = (z_i - z)' \cdot a_h$

其中： $z_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T z_{it}$  代表单个主体的均向量；

$z_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I z_i, i=1 \dots I, j=1 \dots J, t=1 \dots T$ , 代表总体平均向量。

(5) 计算各主体的动态得分矩阵： $c_{iht} = (z_{it} - z_{jt}) \cdot a_h, h=1 \dots k; t=1 \dots T$

其中  $z_{jt} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I z_{it}$ ,  $z_{jt}$  代表第  $t$  年各指标的平均值。

(6) 计算各主体的平均综合得分值  $E = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c_{iht}$

其中： $c_{iht}$  是各主体的动态得分值

## 5.2.2 数据来源及处理

数据选取来自 2006-2021 年《中国统计年鉴》、各省份的统计年鉴、国家统计局等。

表 5.2 变量描述性统计

变量	观察值	均值	标准差	最小值	最大值
人均 GDP (元)	480	39528.690	27841.3546	5200.8043	164927.3641
第二产业增加值占 GDP 比重 (%)	480	42.51%	8.22%	15.90%	61.96%
第三产业增加值占 GDP 比重 (%)	480	46.87%	9.33%	29.79%	83.87%
工业增加值占 GDP 比重 (%)	480	35.63%	8.51%	10.01%	57.38%
能源消耗 (万吨标准煤)	480	13124.866	9726.8623	3709.37	36186
外资进出口总额占 GDP 比重 (%)	480	32.76%	37.16%	1.19%	169.56%
规模以上工业企业 R&经费占地区 GDP 比重 (%)	480	95.4664	56.8984	5.9456	324.1567
年末总人口数 (万人)	480	4508.2813	2760.8180	543	12624
城镇人口占总人口比重 (%)	480	55.17%	14.01%	26.86%	89.58%
环境污染治理投资率 (%)	16	1.34%	0.23%	1.02%	1.86%

描述样本数据特征运用 stata15 如表 5.2 所示, 在这些指标数据中, 有一些是直接来自相关资料中收集的, 而其他则是经过精心计算和整理得出的。同时, 由于评价结果分析中需要进行横向比较, 因此对原始数据需要事先剔除价格因素的干扰, 人均 GDP 指标, 为了使标准统一, 实证结果不出现偏差, 以 2005 年为基期的人均 GDP 平减指数进行调整。

### 5.2.3 提取结果

#### (1) 公因子选取

通过动态因子分析法应用 stata15 软件对 2006-2021 年的面板数据进行分析, 得到如下表 5.3 的各公因子的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率:

表 5.3 公因子的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率

公因子	特征值	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
F1	49.385	43.60	43.60
F2	24.584	24.59	68.19
F3	13.245	11.09	79.85
F4	8.569	7.16	86.44

由于前 4 个公因子的累计方差贡献率是 86.44%, 根据方差贡献率大于 85% 的原则, 说明这 4 个公因子基本上可以代表原来 4 个方面 10 个指标, 故选取前 4 个公因子计算影响我国生态效率评价体系的指数。需要注意的是, 这里选取的 4 个公因子与原始的指标体系分类标准可能不一致, 原因在于某些指标和公共因素之间有着密切而复杂的关联, 这些关联有时会被忽视, 有时甚至难以察觉。但这不会影响对初始指标体系的分析, 因为提取的公因子已经包含了原始指标体系的绝大部分信息。

#### (2) 因子载荷矩阵即公因子的解释

为进一步解释公因子的实际含义, 采取方差最大法得到旋转因子载荷矩阵表 5.4。观察表发现, 为分析方便, 表中仅显示大于 0.4 的数值。可见, 人均 GDP、第二产业增加值占 GDP 比重在 F1 上均有较高载荷, 其方差贡献率达到 43.60%; 第三产业增加值占 GDP 比重在 F2 有较高载荷, 工业增加值占 GDP 比重在 F2 也有较高载荷, 其方差贡献率共达到 24.59%; 环境污染治理投资率在 F2、F5 上有较高载荷, 因此, 对应指标均放在 F2 与 F5 上考虑。可见, F1 是城市经济社

会综合实力因子，只有发展城市的经济和产业才是提高生态效率的建设的办法，提高城市居民的生活质量也是其中之一。F2 是产业水平及环境规制问题，说明环境质量对生态效率评价的影响较大。能源消耗水平率在 F3 上的方差贡献率为 11.091%，载荷较高，侧面反映我国能源消耗越高对于的环境与生态问题更严重，需要加强关注。环境污染治理投资率与城镇人口占比在 F4 上方差贡献率为 7.16%，说明人口也是生态建设的重要影响因素。

表 5.4 旋转因子载荷矩阵

指标	F1	F2	F3	F4
X1 人均 GDP (元)	0.472			
X2 第二产业增加值占 GDP 比重 (%)	0.431			
X3 第三产业增加值占 GDP 比重 (%)		0.524		
X4 工业增加值占 GDP 比重 (%)		0.552		
X5 外资进出口总额占 GDP 比重 (%)			0.552	
X6 规模以上工业企业 R&经费占地区 GDP 比重 (%)			0.431	
X7 年末总人口数 (万人)				0.423
X8 城镇人口占总人口比重 (%)				0.452
X9 能源消耗 (万吨标准煤)			0.795	
X10 环境污染治理投资率 (%)		0.560		0.672

通过上述的过程，将指标体系范围缩小，取出具体的代表指标，如下表 5.5 就是影响生态效率的主要因素。

表 5.5 中国各省(市、区)生态效率影响因素

影响因素	解释变量	具体指标
经济	经济发展水平(GDP)	人均 GDP/(元/人)
	产业结构(STRU)	工业增加值占 GDP 的比重/%
	技术水平(TECH)	规模以上工业企业 R&经费占 GDP 的比重/%
社会	年末总人口 (POP)	地区年末总人口数量/万人
	城镇化水平(URBA)	城镇人口占常住人口的比重/%
	对外开放度(OPEN)	外资进出口总额占 GDP 的比重/%
生态资源	环境规制强度(REGU)	环境污染治理投资率/%
	能源消耗水平(ECP)	能源消耗量/(万吨)

## 5.3 Tobit 回归分析

### 5.3.1 模型假定

通过使用 DEA 超效率，我们发现生态效率的取值范围为 0~2。为了更好地分析这些数据，我们选择了 Tobit 回归模型<sup>[51]</sup>：

$$EE_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP2_{it} + \beta_3 \ln STEU_{it} + \beta_4 \ln TECH_{it} + \beta_5 \ln POP_{it} + \beta_6 \ln URBA_{it} + \beta_7 \ln OPEN_{it} + \beta_8 \ln REGU_{it} + \beta_9 \ln ECP_{it} + \varepsilon_{it}$$

其中，表示生态效率值， $i$ 表示各省(市、区)， $t$ 表示年份， $\beta_0$ 是常数项， $\varepsilon_{it}$ 为随机误差项。

### 5.3.2 实证分析

运用软件 Stata15.0 对 Tobit 模型最大似然估计，结果如表 5.6 所示。

表 5.6 Tobit 面板回归估计结果

	系数	标准误	Z 值	P 值
lnGDP	-0.3856	0.0828	-3.4100	0.0010
lnGDP2	0.0245	0.0052	-2.7800	0.0050
lnSTRU	-0.553	0.0469	-3.6400	0.0000
lnTECH	-0.8129	0.2586	-3.1400	0.0020
lnPOP	-0.0056	0.0328	-0.1700	0.8640
lnURBAN	-0.5300	0.1730	-3.0600	0.0020
lnOPEN	-0.0003	0.0001	-3.9100	0.0000
lnREGU	5.540	1.90	2.76	0.0050
lnECP	0.0035	0.0024	2.1700	0.0300
Constant	-1.0416	0.3189	-3.2700	0.0000

经过表 5.6 中的回归结果分析可知：

(1) 经济发展水平 lnGDP 的一次项系数为 -0.3856 < 0，二次项系数为 0.0245 > 0，表明随着经济增长，生态效率与经济发展呈现 U 型，这是符合现实预期的，当一个区域刚开始的经济快速发展时，往往伴随着重工业化进程加快，资源过度开采、污染物排放严重等问题，导致生态环境恶化，生态效率值下降。之后，由于经济的稳定，科学技术水平也不断提高，生活质量的提高，环境污染

程度因此逐步下降，生态效率曲线也就不断上升。

(2) 产业结构的系数为-0.553，通过了 5%的显著性检验，对生态效率有负向的影响，且影响较为明显。这意味着，当前我国的产业结构仍存在一定程度的不合理之处，尤其是重工业化的发展模式，不仅加重了环境污染，还造成了大量的资源浪费。因此，应积极推进产业升级转型，大力培育高新技术产业，促进传统产业优化升级，实现可持续发展。大力发展工业也会能源过度消耗，则工业化道路与区域生态效率产生不良的互动。

(3) 科技水平的系数为-0.8129，通过了 5%的显著性检验，对生态效率具有负向的影响。一般来说科技进步能够有效降低环境污染，推动绿色生产，进而改善生态环境状况。但此处结果不符合，原因可能在于科技投入不足，尤其是环境方面，处在较低水平，进而科技人才不能得到支持，科技能力无法体现，表现在中、西部地区。因此需要加大科技投入，提高环保行业的占比，与此同时，也需要注重环境科研成果，真正发挥科技的作用，实现环境保护与经济发展双赢，以此提升生态效率水平。

(4) 年末人口数量的系数为-0.0056，未通过显著性检验，城镇化水平的系数为-0.5300，因此可以看出城镇人口增加抑制了生态效率的提升。人口增减对于生态效率是一把双刃剑，一方面人口增加或许会对环境造成负担，也会影响环境的治理，但是同时人口的增加带来了经济的发展，对应的使得生活水平、教育等等得到了提升以另一种方式促进了生态效率的增长。相同的，人口较少也是一样的道理。而城镇人口的增加会使得城市过于饱和，城市资源过度利用，城市与农村发展不平衡，大量农业转移人口进入城市产生大量生活污水、生活垃圾和汽车尾气等生活型污染，致使城市地区生态环境质量不断恶化，由此导致生态效率不断下降。因此，城镇化对生态效率有一定的压力。

(5) 对外开放水平对生态效率有负面影响。对外开放故而会对经济发展起到促进作用，但是对外开放的高强度发展会导致资源的过度消耗，环境污染加剧，进而对生态效率有抑制作用。并且对外贸易的扩张也会影响国内的经济，我国作为出口大国，产业的高耗能、高污染更是加剧了环境影响，因此在这方面环境治理要提起重视。

(6) 环境规制的系数为 5.540，对生态效率产生了显著的促进作用。全国应

该依据地方特性合理制定环境规制，与此同时注重制度实行过程中问题，更快的适应与改正使环境规制能够更显著促进生态效率的改善。

(7) 能源消耗水平的系数为 0.0035，未通过 5% 的显著性检验。能源的正常消耗是人类生活的需求，需要做到供给合理正常，一旦能源消耗过度就会破坏生态，且过度的能源消耗或燃烧也会带来污染问题。

本节对于影响生态效率的因素做了面板回归分析，但是一般情况下影响因素多而复杂，基于上述的变量选取，在经济、社会、生态与资源方面进行核心要素的提取，得出公因子，以此建立公因子之间的动力学系统，更进一步的探究影响生态效率的核心因素以及他们内部的关系，通过这个给出关于提高生态效率的策略与建议。

## 6 结论与展望

### 6.1 基本结论

本文通过对我国各省（市、区）生态效率的测算，在对生态效率研究的现状中，从时间和空间维度分析了生态效率的特征，并且分析了影响生态效率变化的因素。其中运用回归分析对因素进行研究，在测算生态效率指标体系中选取以投入-产出中的四个指标，以此建立能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染动力系统进行内在机理分析，运用该方法从整体出发对能源消耗、经济增长、环境污染、产业发展的研究现状、研究热点及演进趋势等进行深入且系统地研究。并结合非线性动力学理论与数值仿真的方法研究了系统方程平衡点的稳定性以及参数变化对模型系统运动状态的影响。最后运用实证数据进行参数识别，进行实证研究。得到以下结论。

(1) 2005-2020 年间全国生态效率整体呈先上升后下降的波动趋势，全国生态效率综合评价中，排名较高的省份为海南、北京、天津、上海、浙江、福建、山东、广东、青海和宁夏，较低的省份为山西、辽宁、吉林、安徽、江西、湖北、广西、四川、贵州、甘肃和新疆。从空间区域来看，生态效率差异较为明显，东部地区平均生态效率值最高，均在 0.9 以上，且总体水平高于全国平均值。西部地区和中部地区生态效率值低于全国平均值，但走势与全国平均水平相仿。而中部地区生态效率水平最低，在 0.4-0.6 之间。

(2) 通过建立能源消耗-经济增长-投资水平-环境污染动力学系统，控制变量能源消耗量和污染排放水平，系统的平衡点与稳定性处于不同状态，或波动；或平稳。随着污染排放率越高，系统的波动幅度越大，此时该系统处于不稳定状态，不利于社会的稳定发展。当环境规制对产业结构的影响系数控制合理范围内，在减少环境污染的情况下，减少能源消耗，增加投资总额，能够促进经济稳定增长，系统也处于稳定状态。在影响生态效率内部因素中，选取核心变量进行实证分析，从控制污染排放率、控制污染排放率同时降低能源消耗水平、控制污染排放率及环境规制对能源消耗影响同时减少经济增长三步进行递推模拟，得出整个系统的波动性越来越小，达到稳定的时间增加，说明对内部机理的牵制对系统有正向作用，对生态效率的提高提出了可行性策略，就是上面所说到的三方面。

(3) 从经济、社会、生态、资源等外部因素方面对生态效率影响，基于经

济发展水平、产业结构、技术水平、年末总人口、城镇化水平、对外开放度、及环境规制强度方面得出, 经济发展水平、产业结构、科技水平及对外开放水平的系数为负数的系数与生态效率关系显著负相关。城镇化水平的系数为-0.5300, 因此可以看出城镇人口增加抑制了生态效率的提升, 城镇人口的增加会使得城市过于饱和, 城市资源过度利用, 城市与农村发展不平衡, 大量农业转移人口进入城市产生大量生活污水、生活垃圾和汽车尾气等生活型污染, 致使城市地区生态环境质量不断恶化, 由此导致生态效率不断下降。因此, 城镇化对生态效率有一定的压力。环境规制的系数为 5.540, 对生态效率产生了显著的促进作用, 应该依据地方特性合理制定环境规制, 与此同时注重制度实行过程中问题, 更快的适应与改正使环境规制能够更显著促进生态效率的改善。

## 6.2 思考展望

尽管本文对生态效率测度和影响因素进行了研究分析, 但由于本人能力有限, 在研究过程中存在许多不足, 因此有必要进一步完善和改进。

(1) 在生态效率测算过程中, 对于指标的选取是根据大量的参考文献, 研读学者们建立的评价指标体系, 进而得出本文的生态效率评价指标体系, 不过由于部分数据的不完整, 测度结果存在一定的偏差, 对于本文所采用的测度模型是 DEA-SBM 模型, 测度过程中加入了非期望指标, 因此测算过程较为复杂, 对于测算结果也会有偏差存在。因此, 对于测算方法还需要不断地完善。

(2) 对于建立四维动力学系统方面, 在实证研究中, 依旧需要更进一步的研究和模拟。在系统中, 它所属的子系统的不确定性和随机性太多, 因此需要更进一步的将这部分考虑进去, 本文章通过遗传算法对于参数的选取方法不够准确, 需要将机器学习中的算法在参数的选取方面运用, 本文是基于对生态效率内部机理建立的动力学系统, 选取的核心指标过于表面化, 在后续研究中应当加入更多的因素, 从而确保模型的科学性以及对能够对影响生态效率的因素进行更准确的分析。

(3) 在探讨生态效率的影响因素时, 当我们收集到缺失的指标数据时, 使用了近邻平均值和趋势移动平均法来弥补它们。然而, 由于这些替代值不是真正的, 所以我们的实验结果可能存在一定的偏差。在进行回归分析时, 应当选取不

同的回归方法来进行比较分析，更能看出指标对于生态效率的影响，文章篇幅有限，在后续研究中应当对此内容进行说明。

## 参考文献

- [1] Schaltegger S, Sturn, A Environmental rationality[J]. Die Unternehmung, 1990, 4: 117-131.
- [2] Yue Yuanyuan, Su Jingqin. Eco-efficiency: Foreign Practice and Our Measure[J]. Studies in Science of Science, 2017, 22(2): 170-173.
- [3] 陈武新,吕秀娟.中国区域生态效率差异的实证分析[J]. 统计与决策, 2009(07): 107-108.
- [4] 王波,方春洪.基于因子分析的区域经济生态效率研究——以 2007 年省际间面板数据为例[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(02): 158-162.
- [5] 杨蕾,杜鹏.基于因子分析与超效率 DEA 的城市生态效率评价[J]. 统计与决策, 2017(16): 52-55.
- [6] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey [M]. Berlin: Springer, 1981.
- [7] 彭迪云,李莎.区域生态效率动态评价模型的改进与实证——基于 G1-TOPSIS 法的研究[J]. 云南民族大学学报(哲学社会科学版), 2017, 34(03): 92-99.
- [8] 张佩琴.资源型城市循环经济发展的生态效率测度研究——以甘肃省白银市为例[J]. 西部金融, 2018(02): 75-80.
- [9] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [10] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [11] Andersen P, Petersen N C. A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis[M]. INFORMS, 1993
- [12] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [13] 曹俊文,李湘德.长江经济带生态效率测度及分析[J]. 生态经济, 2018, 34(08): 174-179.
- [14] 陈雯.中国区域生态效率时空测度及影响因素研究——基于新型城镇化的视角[J]. 福建师范大学学报(哲学社会科学版), 2017(03): 8-15+167.
- [15] 李闪闪.基于超效率 DEA 的中国生态效率评价与优化[J]. 农业科学研究, 2018, 39(01): 32-39.
- [16] 马骏,石艳秋,卢玉钦.基于四阶段数据包络分析( DEA )模型的长江经济带生态补偿效率评价[J]. 科技管理研究, 2022, 42(16): 62-69.
- [17] 涂正革,刘磊珂.考虑能源、环境因素的中国工业效率评价——基于 SBM 模型的省级数据分析[J]. 经济评论, 2011(2): 55-65.
- [18] 龙亮军,王霞,郭兵.基于改进 DEA 模型的城市生态福利绩效评价研究——以我国 35 个大中城市为例[J]. 自然资源学报, 2017(4): 595-605.
- [19] 任梅,王小敏,刘忠梅等.中国区域生态效率时空变化及其影响因素分析[J]. 华东经济管

- 理, 2019, 33(09): 71-79.
- [20] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [21] Fang G, Tian L, Min F, et al. Analysis and application of a novel three-dimensional energy-saving and emission-reduction dynamic evolution system[J]. Energy, 2012, 40: 291-299.
- [22] Fang G, Tian L, Min F, et al. The impacts of carbon tax on energy intensity and economic growth - A dynamic evolution analysis on the case of China[J]. Applied Energy, 2013, 110(oct.):17-28.
- [23] Wenbin Zhang et al. The evolution model of electricity market on the stable development in China and its dynamic analysis[J]. Energy, 2016, 114: 344-359.
- [24] 陈乾. 一类碳价、能源消费和经济发展三维动力系统分析[D]. 江苏大学, 2019.
- [25] 李文超, 田立新, 贺丹. 经济—能源—环境可持续发展的系统动力学研究——以中国为例[J]. 系统科学学报, 2014, 22(03): 54-57.
- [26] 苏经宇, 刘晓然, 王威等. 基于系统动力学的城市抗震防灾能力评估[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(05): 709-717.
- [27] 吴萌. 武汉市土地利用碳排放分析与系统动力学仿真[D]. 华中农业大学, 2017.
- [28] 王慧敏, 洪俊, 刘钢. “水-能源-粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(06): 74-84.
- [29] 唐睿, 王晨, 陈雅萌等. 厦门市城市生活垃圾的系统动力学预测管控体系[J]. 环境科学学报, 2019, 39(06): 2071-2078.
- [30] 王洪礼, 葛根, 许佳. 发展中国家的环境经济模型的非线性动力学模型研究[C]//第八届全国动力学与控制学术会议. 2008.
- [31] 李俊瑞, 郭宇鸣. 资源-环境-经济(REE)模型的非线性动力学分析[J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(01): 56-64.
- [32] 方勇纯, 卢桂章. 非线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [33] H. Dyckhoff, K. Allen. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA) [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 132(2): 312-325.
- [34] STOCK JH, WATSON MW. A probability mode of the coincident economic indicators[A]. LAHIRI K, MOORE G H. Leading Economic Indicators: New Approaches and Forecasting Records[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 63-89.
- [35] FEDERICA A, MAZZITELLI A. Dynamic Factor Analysis with Stata [Z].
- [36] Teschl G. (奥)著, 金成桴译. 常微分方程与动力系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [37] 王会, 王奇, 詹贤达. 基于文明生态化的生态文明评价指标体系研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2012, 12(03): 27-31+138-139.
- [38] 齐岳, 赵晨辉, 廖科智等. 生态文明评价指标体系构建与实证[J]. 统计与决策, 2018, 34(24): 60-63.
- [39] 邓建新, 单路宝, 贺德强等. 缺失数据的处理方法及其发展趋势[J]. 统计与决策, 2019,

- 35(23): 28-34.
- [40] 周开利,康耀红.神经网络模型及其 Matlab 仿真程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [41] 陈岚峰,张亚琴,程立英等.基于数据的 Matlab 系统辨识工具箱模型识别[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(04): 527-530.
- [42] 韩放,郭杏林,高海洋.基于改进智能算法的非线性转子系统的参数辨识[J]. 振动与冲击, 2012, 31(17): 111-115.
- [43] Matlab 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京航空航天大学出版社, Matlab 中文论坛, 2010.
- [44] Priya K., Babu T.S., Balasubramanian, K. et al. A novel approach for fuel cell parameter estimation using simple genetic algorithm[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2015, 12: 46-52.
- [45] 遗传算法原理及应用[M]. 国防工业出版社, 周明, 孙树栋编著, 1999.
- [46] 任宇飞,方创琳.京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(1): 87-98.
- [47] 屈文波.中国区域生态效率的时空差异及驱动因素[J]. 华东经济管理, 2018, 32(3): 59-66.
- [48] 马勇,张瑞.县域生态效率空间格局及影响因素研究——以长江经济带为例[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2021, 21(06): 62-76.
- [49] 孙钰,苗世青,崔寅等.京津冀生态环境规制效率测度与驱动因素分析[J]. 统计与决策, 2022, 38(16): 66-71.
- [50] 成金华,李悦,陈军.中国生态文明发展水平的空间差异与趋同性[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(5): 1-9.
- [51] 赵吉,党国英,唐夏俊.基于 SBM-Tobit 模型的中国农业生态效率时空差异及影响因素研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2022, 6(03): 10-18.

## 致谢

时光匆匆如流水，相遇的时间总是短暂的，又一次到了该说再见的时候，与学校再见，与导师再见，与同学再见。我的研究生生活开始与 2020 年闷热又干燥的秋季，如同当时进入学校的急躁与兴奋，结束于 2023 年充满蝉鸣的夏季，三年时光足以变得成熟与稳重，我们也即将奔赴下一段旅程。而在这段旅程中也有属于我自己的回忆与美好！今借此文感谢感恩。

生于盛世，当不负韶华。研究生生涯与疫情相遇，但在国家与学校的保护下，使我可以安心的完成学业。感谢国家，何其有幸入华夏，未有战乱，平安顺遂。感谢学校，三年庇护，将来也必将不忘初心，保持赤诚。昔日情景历历在目，又浮于眼前，感谢我的导师赵煜教授，在这三年生活中的照顾与帮助，尤其在科研学习中给了我极大的帮助，毕业论文中从选题到开题再到初稿等多次指导修改，每一部分都离不导师的耐心指导。在学位论文完成的整个过程中，倾入了她的大量心血，对我一路教导，谆谆教诲，知识与育人同在，今后定将铭记老师的教诲，砥砺前行。难谢师恩，唯有送上真诚的祝福，愿导师健康顺利，一切随心！也感谢其他帮助过我的老师，祝各位老师工作顺利！

感谢我的父母和弟弟对我学业上的支持和理解，父母为我奉献了他们的一切，衣食住行，谆谆教导，保证我求学之路无后顾之忧，遇到困难时，你们是我永远的避风港，给予我最坚强的后盾，希望终有一天我可以成为你们的骄傲。更希望你们一切安好，平安顺遂！最后，感谢陪我一起度过三年的舍友和同窗们，以及我的师姐师兄，师弟师妹们，谢谢在此过程中对我的帮助，祝愿你们前程似锦！

在此也感谢一直给予我力量的偶像肖战先生，他告诉我“哪怕是屋檐与房梁把生活压得再低，也一定有另一片天空的希望”，热爱可抵岁月漫长，明确自己的方向，冲着这个努力就好。不骄不躁不卑不亢，做一个有原则的人，不要被别人的思想左右，对自己有清楚的认知。在拥有这个年纪的轻狂和嚣张时，也尊重身边的每一个人，拥有一颗敬畏的心。我们以星为梦，是要找到值得为之努力的目标，与真同行，是要走好追逐目标的每一步，在仰望星空的同时不要忘记脚踏实地。

凡此过往，铭记于心，沿途的荆棘云淡过后都只会成为成长路上的印记。祝愿我们一切顺顺利利，下次见，我会更挺拔。