

分类号 C8/404
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

(专业学位)

论文题目 我国人口-经济-环境耦合协调关系时空演变
及预测研究

研究生姓名: 石芳瑞

指导教师姓名、职称: 庞智强、教授

学科、专业名称: 统计学、应用统计

研究方向: 经济统计应用

提交日期: 2024年06月03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本研究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：石若瑞 签字日期：2024.06.03

导师签名：张玲 签字日期：2024.6.3

导师(校外)签名：_____ 签字日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定，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：石若瑞 签字日期：2024.06.03

导师签名：张玲 签字日期：2024.6.3

导师(校外)签名：_____ 签字日期：_____

Spatiotemporal evolution and prediction of population-economy-environment coupling and coordination relationship in China

Candidate : Shi Fangrui

Supervisor:Pang Zhiqiang

摘 要

自改革开放以来,我国经济社会发展取得了显著成就,然而,在人口和环境等方面与经济协调性仍存在不少问题。作为一个人口数量庞大、资源相对匮乏的发展中国家,我国正致力于构建以生态文明建设和实现“美丽中国”为目标的发展模式,这关乎人民的福祉和民族的未来。在“十四五”规划中,我国已经明确提出要深化区域协调发展战略,推进绿色发展,促使人与自然和谐共存。中国经济之所以能够快速增长,很大程度上依赖于人口红利和大量资源的投入。但近些年来,随着自然环境的持续恶化和人口红利的逐渐消失,这些因素已对经济发展产生了限制作用,形成了一种恶性循环,加剧了人口、经济、环境三者之间的矛盾。因此,在新的时期,准确分析人口、经济与环境三个系统之间的相互联系和内在制约关系,实现它们之间的协调发展,成为了一个重要的研究课题。

基于此,本文首先通过阐述人口、经济、环境相关的概念、理论,构建人口-经济-环境协调发展的综合评价指标体系,利用耦合协调度模型计算我国人口-经济-环境的协调发展水平,利用探索性空间数据探究各省域协调度在时间和空间上的差异及其变化状况,进而在对其协调度及时空差异研究的基础上分别利用传统及空间马尔科夫链对我国协调发展水平的动态演进趋势展开讨论并进行进一步预测。

综合分析我国 31 个省(市、自治区)的人口、经济、环境耦合协调度及其空间变化差异与长期趋势预测,研究表明:(1)综合发展水平总体上升:我国的人口、经济、环境综合发展水平整体呈现上升趋势,其中经济发展速度显著高于人口和环境的综合发展速度。然而,省域间存在较大差异,显示出两极分化和发展成果普惠性不足的问题。(2)耦合协调度东高西低:通过耦合协调度模型分析,发现我国各省域的人口-经济-环境耦合协调发展水平呈现“东高西低”的空间分布特征,且随时间逐渐向外扩散。尽管各省经历了从不协调到磨合的发展过程,但尚未达到高级协调阶段。(3)地理背景与区域协同:地理背景在耦合协调发展水平的转移中起到了重要作用,区域协调发展水平与邻域地区存在紧密的协同关系。长期趋势显示,人口-经济-环境耦合协调发展水平具有稳定性,存在“俱乐部收敛”现象,且与邻域协调发展水平有较强的协同性。(4)长期趋势向好:总体而言,我国人口-经济-环境耦合协调发展的长期趋势较为乐观,随时间推移,

协调发展水平逐步提升，向高值集中的趋势明显。基于以上结论，本文从提升市场化强度，加强创新投入力度，以环境保护为主导，以区域联动、合作、扶持为思路促进协调发展四个方面提出政策建议。

关键词：人口—经济—环境 耦合协调度 动态演化 马尔科夫链预测

Abstract

Since the reform and opening up, China has made remarkable achievements in economic and social development, but there are still many problems in the coordination between population and environment and economic development. As a developing country with a large population and relatively scarce resources, China is committed to building a development model with the goal of building ecological civilization and realizing "Beautiful China", which is related to the well-being of the people and the future of the nation. In the "14th Five-Year Plan", China has clearly proposed to deepen the strategy of coordinated regional development, promote green development, and promote the harmonious coexistence of man and nature. The rapid growth of China's economy depends to a large extent on the demographic dividend and the investment of a large amount of resources. However, in recent years, with the continuous deterioration of the natural environment and the gradual disappearance of the demographic dividend, these factors have restricted economic development, formed a vicious circle, and exacerbated the contradiction between population, economy and environment. Therefore, in the new era, it has become an important research topic to accurately analyze the interconnection and internal constraints between the three systems of population, economy and environment, and to realize the coordinated development between them.

Based on this, this paper firstly expounds the concepts and theories related to population, economy and environment, constructs a comprehensive evaluation index system for the coordinated development of population, economy and environment, uses the coupling coordination degree model to calculate the coordinated development level of population, economy and environment in China, and uses exploratory spatial data to explore the differences and changes in time and space of the coordination degree of each province. Then, on the basis of the study of the coordination degree and the spatio-temporal differences, the traditional and spatial Markov chains are used to discuss the dynamic evolution trend of China's coordinated development level and further predict it.

This paper comprehensively analyzes the coupling coordination degree of population, economy and environment, the differences in spatial change and the prediction of long-term trend in 31 provinces (municipalities and autonomous regions) in China, the results show that: (1) the overall increase in the comprehensive development level of population, economy and environment in China, and the economic development rate is significantly higher than the comprehensive development rate of population and environment. However, there are large differences between provinces, indicating polarization and insufficient inclusiveness of development outcomes. (2) The coupling coordination degree is high in the east and low in the west: through the analysis of the

coupling coordination degree model, it is found that the level of population-economy-environment coupling and coordinated development in each province in China presents the spatial distribution characteristics of "high in the east and low in the west", and gradually spreads outward with time. Although the provinces have gone through a development process from uncoordinated to run-in, they have not yet reached the stage of advanced coordination. (3) Geographical background and regional synergy: Geographical context plays an important role in the transfer of the level of coupling and coordinated development, and there is a close synergistic relationship between the level of regional coordinated development and the neighboring regions. The long-term trend shows that the level of coordinated development of population-economy-environment coupling is stable, there is a phenomenon of "club convergence", and there is a strong synergy with the level of coordinated development of neighborhood. (4) Long-term trend is improving: In general, the long-term trend of the coupled and coordinated development of population, economy and environment in China is relatively optimistic, and the level of coordinated development gradually improves with the passage of time, and the trend towards high value concentration is obvious. Based on the above conclusions, this paper puts forward policy suggestions from four aspects: improving marketization intensity, strengthening innovation investment, taking environmental protection as the leading factor, and promoting

coordinated development with regional linkage, cooperation and support as the ideas.

Keywords: Population-Economy-Environment; Coupling Coordination Degree; Dynamic Evolution; Markov Chain Prediction

目 录

1 引 言	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 协调发展相关研究.....	3
1.2.2 人口-经济-环境之间的关系研究.....	4
1.2.3 研究述评.....	6
1.3 研究内容	6
1.4 可能的创新点	7
2 相关概念界定与理论阐述	8
2.1 相关概念界定	8
2.1.1 耦合度.....	8
2.1.2 耦合协调度.....	8
2.2 理论阐述	9
2.2.1 系统科学理论.....	9
2.2.2 可持续发展理论.....	10
2.2.3 城市化理论.....	11
2.3 人口-经济-环境作用机理	11
2.3.1 人口与经济的相互作用关系.....	11
2.3.2 人口与环境的相互作用关系.....	12
2.3.3 经济与环境的相互作用关系.....	12
2.3.4 人口-经济-环境的相互作用关系.....	13
3 我国人口-经济-环境系统发展现状	14
3.1 指标体系构建与数据处理	14

3.1.1 指标体系构建原则.....	14
3.1.2 数据来源.....	15
3.1.3 指标体系构建.....	15
3.1.4 数据标准化处理.....	16
3.2 人口-经济-环境发展现状分析	18
3.2.1 人口发展现状.....	18
3.2.2 经济发展现状.....	23
3.3.3 环境发展现状.....	26
3.3.4 人口-经济-环境综合发展水平分析.....	31
4 我国人口-经济-环境耦合协调关系时空演变及趋势预测.....	33
4.1 耦合协调度模型	33
4.2 传统及空间马尔科夫链方法	35
4.3 我国人口-经济-环境耦合协调关系时间演变特征	37
4.4 我国人口-经济-环境耦合协调关系空间演变特征	39
4.3.1 全局空间自相关分析.....	39
4.3.2 局部空间自相关分析.....	41
4.5 我国人口-经济-环境耦合协调关系演进趋势预测	42
5 结论与建议	45
5.1 结论	45
5.2 建议	46
参考文献.....	48

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

推动绿色发展，促进人与自然和谐共生，是“十四五”规划的重要内容，它强调了要在经济社会发展中更加注重环境保护，实现经济发展与环境保护的双赢。习近平总书记指出，要按照人口资源环境相均衡、经济社会生态效益相统一的原则，整体谋划统筹人口分布、经济布局、生态环境保护，科学布局生产空间、生活空间、生态空间，给自然留下更多修复空间。人口、经济 and 环境的协调发展是评价区域可持续发展的重要部分，更是高质量发展的重要体现。

近十年来，我国人口转变进入“三低”阶段，即低出生率、低死亡率和低自然增长率，进而引发一系列突出问题，如劳动力供给减少、老年人口比重增加以及性别结构失衡等。2017年全国生育状况调查数据显示，2006—2017年，我国生育水平长期处于更替水平2.1以下。根据统计年鉴数据显示，2021年出生人口规模仅1062万，生育水平降至1.15。这些数据充分说明，近年来我国低生育率风险持续凸显，人口负增长惯性持续增强。

与此同时，我国经济也进入了“新常态”时期，我国GDP增长率自2010年开始出现了回落的现象，从2010年的10.6%下降到2019年的6.11%。更为严峻的是，2020年第一季度我国GDP甚至出现了负增长。在人口红利逐渐殆尽的背景下，我国同时面临经济转型和中等收入陷阱的双重挑战，实现从人口大国向人才强国的转变已成为国家发展的迫切需求。

20世纪80年代以来，我国经济进入了飞速发展的黄金时期，然而伴随着这种高速的发展，我们也面临着前所未有的资源与环境挑战。长期以来，对资源的过度开采与利用和对环境的忽视与破坏，导致生态平衡严重失调，给未来的可持续发展带来了严重的障碍。习近平总书记指出，我们需要从保护环境和发展机遇，实现生态环境保护和经济高质量发展的双赢，推动经济社会发展全面绿色转型。

在当前社会发展的背景下，人口因素作为推动经济增长和社会进步的关键力量，其规模、结构和质量直接影响着经济的发展态势和社会的进步速度。然而，经济发展和人

口增长带来的资源消耗和环境压力，也对人类的生存环境和社会的可持续发展提出了挑战。资源和环境不仅是经济活动的物质基础，也是保障社会长期稳定发展的前提。因此，通过深入分析人口、经济和环境三个系统之间的相互作用和制约关系，利用科学的方法和策略，促进人口结构的优化、经济的高质量发展以及环境的有效保护和合理利用，实现三者的协调发展，成为了新时期社会发展面临的一个重要课题。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

第一，在研究的核心内容上，随着中国经济进入高质量发展阶段，资源和环境问题成为制约其持续发展的关键因素。特别是在快速工业化和城市化的背景下，以煤炭为主的能源消耗结构不仅加剧了环境污染，也导致了能源利用效率的低下。此外，人口老龄化问题逐渐凸显，传统的人口红利优势正在逐步消失，这对经济的持续增长构成了挑战。对于该问题，学者们主要研究了京津冀地区、长江经济带、粤港澳大湾区等城市群人口-经济-环境协调发展的演变特征，因此，本文对全国整体及我国各省域间区域差异进行研究，有助于理解不同地区在协调发展过程中面临的具体问题和挑战，也为制定地区经济发展策略和环境保护措施提供了科学依据。通过这些研究，可以更好地指导政策制定，促进人口、经济与环境之间的和谐发展，实现社会的可持续发展目标。

第二，研究方法上，多数学者倾向于使用 *Dagum* 系数和核密度估计方法来剖析各系统协调发展水平的时空演进，本文同时考虑时间维度和空间维度对其动态演进机制进行分析，并进行长期趋势的预测，在一定程度上对三系统协调发展研究内容进行了一定的深化。

(2) 现实意义

第一，客观反映了人口、经济、环境以及三者之间耦合关系在时空维度上的演进规律，揭示发展过程中存在的问题。人口是一个国家的核心竞争力，经济是一个国家综合实力的重要体现，习近平总书记强调“绿水青山就是金山银山”。经济的高质量发展，既要注重保护人口的核心竞争力，也不能忽视资源环境的重要性。这有助于我们更加精准地把握国家发展的脉搏，为制定科学合理的发展战略和政策措施提供有力的依据。促进人口-经济-环境协调发展程度的快速提高。

第二，科学合理的区域发展政策是建立在对区域空间结构清晰认识的基础上，通过

对我国人口-经济-环境区域结构演变过程的研究,总结人口-经济-环境空间结构的演变过程规律,试图理清近 20 年来人口-经济-环境向哪些区域和空间集聚,有助于合理预判我国人口-经济-环境空间演变的趋势,为未来的区域人口-经济-环境区域开发与发展战略提供决策参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 协调发展相关研究

(1) 协调发展的内涵和基本问题

在 20 世纪 90 年代初期,国务院组织的深入研究成果《中国区域协调发展战略》一经发布,便在我国学术界引起了广泛关注。该报告是我国较早正式提出的关于区域协调发展的研究成果,为后续的区域经济协调发展研究奠定了坚实的基础。1996 年发布的“九五”计划首次将“促进区域经济协调发展”单列出来进行阐述,自此之后,区域协调发展便成为学术界探讨的热点话题,吸引了众多学者的深入研究与探讨。

区域协调研究可以概括为两个阶段:第一阶段各位学者对区域协调发展的内涵进行了拓展。薄文广等学者(2011)认为区域协调发展不应仅仅包含各地区经济层面的差异,还应包含生活的方方面面,应当是全方位的和谐,包含制度、经济、环境、资源等。第二阶段为对协调发展的动态讨论,对区域协调发展的内涵进行了进一步的深化^[1]。吴殿廷(2006)等指出,区域协调的核心在于人与自然间的和谐共生以及不同地域间的平衡发展,而其本质在于利益的合理配置与调整^[34]。孙久文(2018)进一步阐明,区域协调发展并非旨在消除地域间的差异,而是致力于将这些差异控制在适宜的范围内,确保各地区独特的优势得以充分展现^[27]。“区域协调发展”的内涵,它并非简单地遵循传统区域均衡理论的逻辑,而是进行了深刻的反思与拓展。它不再仅仅聚焦于发展速度的协调,而是更多地关注发展利益的协调;不再单纯追求发展结果的均等,而是致力于实现发展机会的均等(徐康宁,2014)^[37]。这一转变展现了一种更为全面、深入的发展理念,致力于推动各地区实现均衡、可持续的发展,共同迈向更加繁荣与和谐的未来。

(2) 协调发展水平评价

对协调发展水平的评价,其关键在于构建科学的指标体系,来全面准确的衡量各地区的协调发展水平真实成效与状况,我国各地区乃至全国对于协调发展评价已有了广泛而深入的研究成果。中科院在牛文元的研究基础上提出支持城市可持续发展的是生存、

发展、环境、社会、智力五大系统。薄文广等(2011)从人民生活水平和基本公共服务两个子系统、八个方面构建了广义的区域协调发展水平^[1]。徐盈之(2010)等将环境指标作为约束条件,选取经济、科技文化、社会和生态环境四个方面选取27个指标对各区域的协调性进行测度^[39]。冯江茹(2014)等构建包含经济、社会、环境、资源四个子系统的综合评价指标体系,对我国不同区域综合发展水平进行评价分析,研究发现,我国不同地区间差异较大,整体上呈现出东高、中良、西低的现象^[6]。

现阶段研究主要体现在三个方面:一是采用不同的模型、分析工具对系统协调度进行测算和分析;二是对某一特定区域或特定时间内不同系统的协调发展水平进行分析;三是从地理学的视角对协调发展水平的空间相关性与动态演变情况进行分析解读。

(3) 协调发展水平测度指标体系

不同学者对人口、经济与环境的内涵有着不同的认识,因此不同学者在设计指标体系时存在一定的差异,目前尚未形成统一标准。段海燕(2017)利用人口规模、经济水平、经济结构、环境污染等指标对人口-经济-社会协调度进行分析并预测。近两年,学者蔡昭洪(2022)、肖周燕(2023)、张雨乐(2023)等将其细化提炼为人口规模、人口素质、经济水平、经济结构、环境污染、环境治理等方面,更能综合反映人口、经济、环境发展现状及其协调水平。

1.2.2 人口-经济-环境之间的关系研究

亚当·斯密的经典之作《国富论》,不仅仅是一部经济学著作,更是一部深入探索社会运行机理的巨著。它通过详实的论证,展示了经济之于社会发展的巨大影响,以及经济、社会、环境之间的紧密联系。城市发展是一个多维度、高度复杂的开放体系,涵盖了经济繁荣、社会进步与生态环境三大核心要素。这些要素之间既相互关联、又相互依赖,同时彼此间也存在一定的制约关系。要实现城市的可持续发展,核心在于推动经济、社会、环境三者之间的良性互动与协调共进,才能引领整个系统朝着更加和谐、有序的方向稳步前行。

(1) 人口、经济、环境耦合协调发展的空间格局研究

随着 Grossman 在 1995 年提出环境库兹涅茨曲线(EKC)理论,即生态环境与经济增长之间存在一种倒“U”型的曲线。自此,围绕该假说,学者们展开了广泛而深入的研究。通常采用耦合协同模型对经济增长与生态环境之间的相互作用及其作用程度进行

了详细的定量分析。随着社会问题受到公众和学术界越来越多的关注,一些研究者开始将社会因素纳入到经济增长与环境保护协调发展的研究中,试图构建一个更为全面的分析框架。这种研究取向不仅扩大了研究的视角,也使得研究成果能更好地服务于政策制定和实际应用。在研究尺度上涵盖了国家、区域城市群、省份、城市和县域等,详细分析了这种关系随时间的演变趋势及其在空间上的分布特征。在方法上,主要采用的有耦合协调度模型、重心模型、探索性空间数据分析等。付云鹏(2015)利用空间自相关检验研究了我国各地区人口、经济、资源环境协调发展间的空间相关性^[7]。韩云霞(2018)利用不一致指数和重心模型对我国人口、经济聚集与环境污染的空间关联性进行分析^[12]。李恒吉(2020)等以甘肃省人口、经济、社会、资源、环境为研究对象,利用 ArcGIS 和重心偏移,对协调发展的时空演变进行分析。肖周燕(2021)等基于长三角地区面板数据,利用 ArcGIS 软件以及核密度估计方法探究长三角地区的耦合协调状况与动态演进趋势^[17]。高霞(2023)等运用探索性空间分析方法与 Dagum 系数揭示人口发展水平与数字经济耦合协调度的时序走势与空间差异特征,结果表明人口发展水平与数字经济协调度的总体差异逐年减小,呈现一定的空间相关性,但空间相关性有变弱的趋势^[9]。廖东声(2023)运用探索性空间分析方法与灰色预测模型,对长江经济带人口、经济、环境耦合协调发展水平进行了深入剖析,并预测了未来的演进趋势。结果表明,我国各省市协调发展水平预计稳步提升,实现高水平的协调还需要一定的时间发展^[20]。范丽玉(2023)等运用空间计量方法、核密度估计、GM(1,1)模型来探讨我国人口、经济、资源、环境之间的耦合协调关系及其演进趋势^[4]。

(2) 人口、经济、环境耦合协调发展的演进趋势研究

对于协调度的动态演进与预测,多数学者利用马尔科夫链对经济与环境耦合协调度的空间动态演进进行分析。张宇(2018)对泛长三角地区人口与经济协调发展水平时空演变特征进行分析,认为协调度发展变化形成了明显的地理集聚效应,呈现高值和热点城市在太湖流域周边城市集聚,低值和冷点城市在皖北和皖南地区集聚^[43]。纪明(2022)等基于耦合协调度模型、马尔科夫链对民族地区新型城镇化与生态文明建设协调发展协调度测算与动态演进预测,结果表明高度协调城市会对周边城市协调发展起到带动作用^[13]。徐小鹰(2023)等采用核密度估计、BP 神经网络和空间马尔科夫链方法探究长三角城市资源环境与经济高质量发展的协调关系时空变化趋势,地区协调发展水平具有空间溢出效应^[38]。可以看出,较少的学者在考虑空间溢出效应下对人口-经济-环境耦合协调

发展的动态演进分析与预测作出研究，本文试图将马尔科夫链运用到人口-经济-环境耦合协调发展的研究中。

1.2.3 研究述评

经过对协调发展的概念及内涵、协调发展评价、人口-经济-环境相关关系的相关文献的剖析与系统研究，可以发现：（1）在区域协调发展的相关研究中，学者们往往将目光投入人口、经济、环境等子系统以及复合系统中。众多学者倾向于采用定量研究方法来刻画这些系统时空维度上的动态演进。不同学者采用的研究方法存在较大的差异，主要包括耦合协调度模型、空间杜宾模型以及灰色预测模型等。这些模型的应用旨在更精确地揭示区域协调发展的内在机制和影响因素，为政策制定提供科学依据。（2）在研究区域的选择上，多数研究主要聚焦于东部发达地区，特别是长三角、珠三角等经济繁荣地带。当前，众多学者倾向于从时间维度深入剖析人口、经济与环境之间的耦合协调度。然而，在空间维度上，研究多局限于描述协调度的空间分布格局，对于其演化过程及未来趋势的预测，较少考虑空间效应的影响。（3）从系统动态演进方法的选择上，现有研究多采用 Kernel 密度估计等方法，提供了一个宏观的视角来观察区域发展的整体趋势和分布特征，但他较难细致的描述分析区域之间协调发展水平的具体变化。马尔科夫链方法通过分析各水平城市在时间序列上的相对位置变动，能够更细致地捕捉到区域发展过程中的动态变化，空间马尔科夫链则在传统马尔科夫链的基础上进行了扩展，能够揭示空间因素对区域协调水平的影响，弥补了传统马尔科夫链无法体现空间溢出作用的不足。因此，本文以全国为研究对象从时空的角度对系统协调的时空演变格局进行分析，同时考虑时间维度和空间维度对其动态演进机制进行分析，并进行预测，在一定程度上是对三系统协调发展研究内容上的深化。

1.3 研究内容

论文拟研究的主要内容是：首先阐述人口、经济、环境相关的概念、理论及现状；其次通过具体数据，构建综合评价指标体系来衡量各地区综合发展水平，基于各子系统的综合发展水平计算我国人口-经济-环境的耦合协调度，利用探索性空间数据探究各省域协调度在时间和空间上的差异及其变化状况，最后在上文研究的基础上分别利用传统及空间马尔科夫链对我国协调发展水平的动态演进趋势展开讨论并进行进一步预测。最

后, 根据上述实证内容得出的结果, 为我国各省域人口-经济-环境耦合协调发展进一步提出相关政策建议。

第一章, 引言。主要介绍了本文的研究背景、研究意义, 从而得出了本文的选题以及研究内容, 最后总结了与本文相关的国内外研究进展情况。

第二章, 相关概念界定与理论阐述。对本文所需的基本概念、相关理论及人口-经济-环境相互作用机理进行介绍。

第三章, 我国人口、经济、环境系统发展现状。通过构建人口-经济-环境系统评价指标体系, 分别从人口、经济、环境单一指标及所构建的综合指标对我国目前发展现状进行分析。

第四章, 我国人口-经济-环境耦合协调关系时空演变及趋势预测。利用耦合协调度模型, 基于各子系统的综合发展水平对我国各省域人口-经济-环境耦合协调水平进行定量评估, 对评估结果进行时序和空间的整体演变分析。在此基础上, 利用传统和空间马尔科夫链模型分析不同区域地理背景对城市协调发展水平转移的影响, 进一步对其进行预测。

第五章, 结论与建议。对全文的研究内容进行系统的总结, 并基于研究成果提出相关意见建议。

1.4 可能的创新点

(1) 在研究区域的选择方面, 近年来, 现有学者多基于省域或较为发达的城市群为研究主体, 本文基于全国层面对人口-经济-环境耦合协调度进行评价分析, 进而对我国各省域间协调发展水平的差异进行分析。

(2) 在系统动态演进方法的选择方面, 多数学者利用 *Dagum* 系数和核密度估计方法对各系统协调发展水平的时空演进进行分析, 本文同时考虑时间维度和空间维度对其动态演进机制进行分析, 并进行长期趋势的预测, 在一定程度上对三系统协调发展研究内容进行了一定的深化。

2 相关概念界定与理论阐述

2.1 相关概念界定

2.1.1 耦合度

“耦合”一词最先起源于物理学中，通常用来描述自然界中不同系统或运动形式之间复杂的相互作用和影响机制，比如两个振动的弹簧之间的相互影响。随着知识的深入与扩展，不同学科开始相互交织与融汇，耦合度逐渐被应用到地理学与社会经济各学科中，“系统耦合”也主要指的是两个及以上的体系相互间经过共同作用、相互影响和彼此融合而进一步形成的更高层次的功能-结构统一体。这种相互作用可以是正面的，也可以是负面的，分别对应于良性耦合和恶性耦合两种情况。良性耦合也称为系统和谐，系统中的各个要素可以进行合适的动态联系，彼此良性互动，使得整个系统的结构、功能整体都向有序的方向发展。相反，恶性耦合，也成为系统相悖，一个系统的发展可能会对其他系统产生负面影响，甚至阻碍整体的发展。

通过计算耦合度，可以直观地反映出系统间的相互作用关系。耦合度越高，说明系统间的相互作用越明显。但需要注意的是，耦合度并不直接反映系统间发展水平的高低。在实际应用中，即使两个系统的耦合度相同，它们的发展水平和状态也可能因受到不同的外部因素影响而大相径庭。这种情况下，仅仅依靠耦合度的度量是不足以全面评估系统的发展状态和潜力的。因此，为更好的分析系统之间是在高水平上相互促进还是低水平上相互制约，需要引入耦合协调度的概念。

2.1.2 耦合协调度

耦合协调度不仅考虑了系统之间相互作用的强度，还综合考虑了系统的综合发展水平、状态，从而提供了一个更为全面和深入的评估系统综合发展水平的指标。具体来说，耦合协调度强调的是系统内部各模块之间协同的整体效应，通过耦合协调度的分析，可以更准确地识别和评估系统之间的相互作用和影响，进而为系统的优化配置、资源的合理分配以及政策的制定提供科学依据和指导。

在耦合协调度的分析中，通常涉及三个关键指标的计算，即耦合度 C 值、协调指数 T 值以及耦合协调度 D 值。耦合度反映了系统或模块之间的相互影响程度，协调指数则

体现了耦合相互作用关系中良性耦合程度的大小，而耦合协调度则是基于这两个指标综合计算得出的，用于判断系统的协调等级。

2.2 理论阐述

2.2.1 系统科学理论

系统科学理论是一种跨学科的综合研究方法，旨在理解和解释复杂系统的共性和演化过程中遵循的共同规律，它涵盖了众多理论和观点，主要包括系统论、控制论、信息论、运筹学等主要理论，随着系统科学的发展，也出现了许多新的理论与观点，如自组织理论、协同论等。本文后续的研究将主要基于系统论与协同论，以此为支撑，对人口-经济-环境三系统进行深入探讨。

系统论是系统科学理论的核心理论，它强调系统是由相互关联、相互作用的各个部分（或要素）组成的有机整体，并从这个整体的角度出发，通过确定系统的组成部分、它们之间的相互关系以及这些关系如何影响系统的整体行为，研究和理解各个系统（包括自然系统、社会系统等）的结构、功能和行为。系统论遵循三个基本原则，分别为整体性原则、层次性原则与开放性原则。整体性强调系统是由多个相互依赖、相互作用的部分组成的整体，系统的性质不仅由各部分的性质决定，还由部分之间的相互关系决定。层次性原则指系统可以分解为若干层次的子系统，每次层次都有其特定的结构和功能，层次的数量影响着各个系统之间的相互关系，进而影响系统的自我调节能力。开放性原则要求系统和外部环境之间存在交换，这种开放性是系统适应和演化的基础。

系统论认为人口、经济、环境三者构成的系统是一个整体，其中的每一个部分都是整体不可或缺的组成部分。这意味着我们不能单独看待这三个方面，而应当将它们视为一个整体来考虑。人口、经济、环境三者之间存在着紧密的相互联系。例如，人口的增长会促进经济的发展，但同时也会对环境造成压力；经济的发展则为环境保护提供了更多的资源和手段，但也可能加剧环境污染；而环境的改善则有利于人口的健康和经济的可持续发展。这个系统是一个不断变化的动态系统。随着时间的推移，人口、经济、环境三者之间的关系会发生变化，需要我们不断地进行监测和调整。

协同论，作为系统科学理论的一个重要分支，自 20 世纪 70 年代起，在跨学科研究的基础上逐步发展成为一门新兴的学科领域。该学科主要探讨开放系统在远离平衡态、与外界进行物质或能量交换的条件下，如何依靠内部的协同作用自发形成时间、空间及

功能上的有序结构。其显著特征在于，协同论通过建立一系列数学模型和处理方法，类比地解释了从无序到有序的转变现象，并将其应用于广泛的领域。协同论立足于系统论、信息论、控制论、突变论等现代科学的最新进展，并深受结构耗散理论的影响，通过结合统计学与动力学的方法，阐述了各类系统和现象中从无序到有序转变的普遍规律。协同论认为，系统的内部元素之间的相互作用往往是非线性的，这意味着小的变化可以在系统中产生大的效应，且系统内部的元素能够在没有外部指令的情况下，通过局部的相互作用自发地形成有序的结构和模式。

尽管人口、经济、环境三者可能具有不同的特性和目标，但它们可以通过协同作用形成一个有序的整体。这种协同作用可以是积极的，也可以是消极的，但通常我们追求的是积极的协同作用，即三者之间的相互促进和共同发展。在人口、经济、环境耦合协调的系统中，这种整体功能体现在三者之间的相互促进和共同发展上，从而实现整个系统的优化和升级。

2.2.2 可持续发展理论

可持续发展理论旨在指导人类社会的发展方式，确保满足当代人的需求，同时不损害未来世代满足自身需求的能力。可持续发展理论的核心理念包括公平性、持续性和共同性。公平性强调代际之间和同一代内不同群体之间的公平，确保资源、机会和福祉的公平分配。持续性则关注人类活动对自然环境和生态系统的长期影响，强调经济、社会和环境的协调发展。共同性则体现了全球视野，强调各国应共同承担责任，实现全球可持续发展目标。

可持续发展理论提供了一个框架，用于指导人类活动与自然环境之间建立一种平衡和谐的关系。它的实践涉及到经济、社会和环境等多个方面，经济层面，经济可持续是可持续发展理论的核心，它强调在不损害环境和资源的前提下实现经济增长和发展，确保资源的有效利用和长期稳定供应，我们需要建立循环经济的模式，实现资源的循环利用，降低对自然资源的过度依赖。社会层面，建立公平、包容的社会结构，提高人民生活质量，实现社会正义和平，确保每个人都能在可持续发展的过程中受益。环境层面，环境可持续发展是实现社会经济环境资源可持续的基础，保护和恢复自然环境，维持生态系统的健康和多样性，确保自然资源的长期可用性^[5]。

可持续发展理论的最终目标是实现共同、协调、公平、高效、多维的发展。政府应通过综合引导和有力把控，对区域社会、经济、环境等各类要素的合理布局与规划，通

过这样的布局规划，城市能够持续、健康地向前发展，实现生态、经济和社会的和谐共生。

从可持续发展理论的视角来理解人口、经济、环境的耦合协调，我们可以将其视为一个寻求长期、稳定、和谐共生的过程。人口、经济、环境的耦合协调是一个综合性的过程。在可持续发展理论下，需要实现三者的综合协调，确保三者之间的相互促进和共同发展。需要注重公平性、持续性和共同性三大基本原则，需要政府、企业、社会等各方面的共同努力和合作，通过制定相关政策、加强监管、推动技术创新等手段来实现人口、经济、环境的耦合协调发展。

2.2.3 城市化理论

城市化理论是描述和分析人口、经济活动以及社会文化活动从农村地区逐渐转向城市地区集中与扩展的过程。这一进程体现了现代社会从以农业为主的乡村社会向以工业和服务业为主导的现代城市社会的转变。城市化不仅是人口在空间上的重新分布，更是经济结构、社会结构和文化结构的深刻变革。

随着城市化的推进，城市规模不断扩大，城市数量增多，城市功能日益完善，成为国家经济、政治、文化、科技和国际交往的中心。城市化带来了生产效率的提高、生活方式的改变以及社会文明的进步。然而，城市化也伴随着一系列挑战，如环境污染、交通拥堵、住房紧张、资源短缺等问题，需要我们在推动城市化的同时，注重可持续发展，保护生态环境，提高城市治理水平，确保城市化进程的健康、有序和可持续。

2.3 人口-经济-环境作用机理

2.3.1 人口与经济的相互作用关系

经济子系统与人口子系统之间存在着紧密而复杂的关系，彼此之间相互影响、相互促进。

(1) 经济子系统的蓬勃发展对人口子系统的发展起着决定性的作用。经济是物质资料生产、分配、交换、消费关系的总和，它为人口的存在和发展提供了物质基础。没有经济活动，就没有人们所需的物质资料，也就无法维持人口的生存和繁衍。此外，经济的发展水平也直接影响着人口的数量、结构和分布。例如，经济繁荣的地区往往能吸

引更多的人口流入，而经济落后的地区则可能面临人口流失的问题。

(2)与此同时，人口也是经济活动的重要参与者，对经济发展产生着重要影响。人口数量、素质和结构的变化都会对经济产生直接或间接的影响。人口增长直接影响劳动力市场的供需关系，进而影响经济增长。在一定条件下，人口增长可以提供充足的劳动力资源，促进经济发展。然而，过快的人口增长也可能导致劳动力过剩，压低工资水平，增加失业率。人口结构的变化（如年龄结构、性别比例、教育水平）会影响消费模式和经济需求，进而影响经济增长的方向和质量。例如，老龄化社会可能会增加对医疗保健和养老服务的需求，而教育水平的提高可以促进技术创新和经济效率的提升。

2.3.2 人口与环境的相互作用关系

人口与环境之间存在着密切的相互作用关系。人口数量的持续增长和活动的日益频繁，让环境的负担逐渐变重，而环境的质量也反过来影响着人口的生存和发展。

(1)环境子系统是人口子系统得以生存与发展的基石。人口作为地球上的生物群体，其生存和发展都离不开自然环境。自然环境为人口提供了必要的生存空间和资源，如土地、水源、空气等。这些资源是人口生存和发展的物质基础，其质量和数量直接影响着人口的生活质量和可持续发展水平。保护环境子系统的健康不仅是维护人类福祉的必要条件，也是确保社会可持续发展的关键。

(2)人口的增长和活动也对环境产生了显著的影响。随着人口数量的增加，对资源的需求也不断扩大，这导致了对自然环境的过度开发和利用。例如，大规模的农业、工业和城市化进程导致土地资源的过度开发，造成水土流失、土地荒漠化等问题；同时，人口增长也加大了对水资源的需求，导致水资源短缺和水污染问题日益严重。此外，人口活动还会产生大量的废弃物和污染物，对环境造成严重的污染。这些污染物包括工业废水、废气、固体废弃物以及生活垃圾等，它们对大气、水体和土壤造成了严重的污染，破坏了生态平衡，对人类的健康和生存构成了威胁。

2.3.3 经济与环境的相互作用关系

经济发展与环境质量息息相关，二者相互促进又相互制约。

(1)经济发展对环境具有显著影响。在工业化浪潮的推动下，工厂制造所释放的废气、引发的酸雨及工业废料的肆意排放，如同无形的黑手，给大气和水环境蒙上了厚厚

的阴影。与此同时，经济增长的渴求导致了对煤、石油、天然气等能源的过度依赖与消耗，这无疑加剧了能源短缺的困境，也使得环境污染问题愈发严重。此外，城市化进程的快速推进，使得大量土地被用于工厂、矿山和住宅的建设，这不仅导致土地资源的过度开发，还使得土地退化现象日益严重。这些都对土地、水源等自然资源构成了巨大压力，让环境问题愈发凸显。

(2) 环境状况也对经济发展产生着重要影响。环境质量直接关系到人们的生命健康和生活品质，进而影响着家庭和企业的消费与生产活力。环境污染不仅可能引发健康问题，增加医疗支出，还可能降低劳动力的工作效率和出勤率，从而对经济增长构成阻碍。此外，环境质量的恶化还会增加企业的运营成本，降低生产效能和财务状况。为了应对环境污染，企业不得不投入更多资金购买环保设备、采用清洁生产技术等，这无疑增加了经营成本，可能对经济增长产生一定的抑制作用。

2.3.4 人口-经济-环境的相互作用关系

人口、经济与环境，这三大要素宛如一幅细致入微的画卷，相互交织、互为依存，共同构筑了一个复杂而精密的复合系统。它们的和谐共生，犹如一首波澜壮阔的交响乐，各个乐章相互呼应，共同演绎着目标一致的壮丽篇章。在这美妙的旋律中，整个系统从混沌中逐渐走向有序，迈向持续、有序、稳定的发展之路。

在这幅宏伟的画卷中，人口子系统犹如心脏般跳动着，它是整个系统的核心动力。它承载着以人为本的发展理念，将人的福祉和生存视为最高宗旨。作为劳动力和智慧的源泉，人口子系统为经济增长和环境改善提供了源源不断的动力。同时，它也是经济和环境子系统服务的最终归宿，人们不断追求着更高品质的生活和更丰富的资源，推动着整个系统不断向前发展。

然而，人口规模和结构的变化，如同双刃剑一般，既带来了机遇也带来了挑战。一方面，人口的增长和结构的优化为就业和资源的利用提供了活力；另一方面，过度的人口增长和不合理的人口结构也可能引发环境压力和经济发展瓶颈。因此，整个系统的运作，本质上是以满足人口子系统全面需求为核心，形成一个闭环的生态系统，确保各个子系统之间的协调发展。

经济子系统，作为系统的动力源泉，承载着满足其他子系统物质和资金需求的重任。它不仅是经济增长的引擎，更是推动整个系统发展的核心力量。然而，经济子系统的发展并非一帆风顺，它需要在自我发展中寻求平衡与突破。通过不断优化人力、自然资源

和生产环境等要素的配置，提升经济结构和效益，经济子系统间接推动着整个系统的经济增长。对于中国而言，经济子系统的发展更应注重质量而非速度，追求经济效益与结构优化的双重目标，以实现与其他子系统的和谐共生。

环境子系统，则如同大地的母亲般孕育着生命，为人口、经济子系统提供着必要的生存空间和生态服务。它是所有活动的物理基础，承载着经济社会发展的希望与挑战。环境与经济社会发展之间的关系微妙而复杂，既有相互促进的和谐共生，也有相互制约的冲突矛盾。然而，随着经济增长达到一定阶段，人们开始意识到环境保护的重要性，社会将越来越注重环境保护与改善。通过加强环境治理和生态修复，我们可以实现环境与经济社会的协调发展，为整个系统的可持续发展奠定坚实基础。

综上所述，人口、经济与环境三大系统之间的相互促进与制约关系，犹如一张错综复杂的网络，共同构成了实现整体协调和可持续发展的关键所在。它们相互依存、相互影响，共同推动着整个系统的发展。通过加强三者之间的良性互动与协调发展，我们可以共同推动整个系统迈向更加和谐、更加可持续的未来。

3 我国人口-经济-环境系统发展现状

本章通过参考学术界现有较为成熟的指标体系，并结合指标概念及指标性质进行了筛选与整合，构建人口-经济-环境耦合协调发展水平测度的指标体系，对我国 2002 年-2021 年人口子系统、经济子系统、环境子系统的发展现状进行评价分析，最后，结合计算出的权重数据，对三系统综合发展水平进行分析。

3.1 指标体系构建与数据处理

3.1.1 指标体系构建原则

构建一套科学严谨的指标体系是确保系统评价方法精确可靠的核心基础。需要深度考量我国人口、经济、环境的特点、目标 and 需求，明确、清晰的指标体系，可以全方位体现我国人口、经济、环境综合发展水平的实际情况，得出的结果才有参考价值。因此，本文以遵守系统性、科学性、代表性、可获得性、稳定性这五大原则构建评价指标体系，旨在实现对整体与局部、宏观与微观的全面涵盖，并确保在实践应用中具有可行性与操作性。

(1) 系统性原则。它强调整体性与关联性。人口、经济和环境，这三个系统尽管各自独立，但实则构成了一个不可分割的整体，它们之间相互作用、相互影响，因此，构建的指标体系必须全面覆盖这三个系统，并深入揭示它们之间的相互影响制约关系。该体系不仅要体现指标的整体性和全面性，还需充分展示人口、经济、环境系统协调发展的内涵。

(2) 科学性原则。在构建指标体系时，科学性原则至关重要。选择指标应科学严谨，确保每个指标都具有明确的概念导向，既综合全面又避免冗余重复。同时，指标来源必须真实可靠，对于间接指标的计算，需确保其科学性、合理性和规范性，从而真实准确地反映我国整体发展状况以及人口、经济、环境各子系统的具休发展水平。

(3) 代表性原则。它要求在建立指标体系时，应深入分析各系统间的相互作用，筛选出具有强概括性、典型性和可操作性的指标。这些指标应能够代表人口、经济和生态环境的发展水平，为综合评价提供有力支撑。

(4) 可获得性原则。在构建评价指标体系时，可获得性原则是根本所在。使用标准化、一致性的评价指标能够确保数据的可操作性和可比性，从而从数据中挖掘出有价值的信息。同时，所需资料应易于从现有渠道搜集，数据需可量化，以保证研究工作的持续进行。

(5) 稳定性原则。它强调指标应具有稳定的特性。所选指标的各种属性不应因一般因素的变化而轻易改变。选择一个稳定的指标有助于我们从现有数据中预测未来趋势或确定应采取的政策方向。因此，在构建指标体系时，应充分考虑指标的稳定性，以确保评价结果的可靠性和有效性。

3.1.2 数据来源

研究数据采用中国 31 个省、市、自治区（港澳台地区）2002—2021 年的面板数据进行测度与分析，其主要指标数据来源于 2002—2021 年的《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、以及各省份统计年鉴、统计公报和国泰安数据库，缺失数据利用插值法补齐。

3.1.3 指标体系构建

指标体系的构建是评估我国人口-经济-环境综合水平的基础性工作，同时也是探究三大系统耦合关系及其时空演变关系规律的关键。在遵循全面性、系统性、科学性、实

效性、可比性等指标体系构建原则的基础上，参考学术界现有的较为成熟的指标体系^{[4][36][44]}，并结合相关概念及指标性质进行了精心筛选与整合，最终确定我国人口-经济-环境综合发展水平的多指标综合评价体系如表 3.1 所示。

表 3.1 我国人口、经济、环境的多指标综合评价体系

一级指标	二级指标	三级指标	单位	
人口子系统	人口规模	年末常住人口 (+)	万人	
		人口自然增长率 (+)	%	
		城市人口密度 (+)	人/平方公里	
	人口结构	性别比 (以女性为 100) (+)	%	
		平均受教育年限 (+)	年	
		总抚养比 (-)	%	
		城镇人口占比 (+)	%	
	经济子系统	经济水平	第一产业就业人数 (-)	万人
			第二产业就业人数 (+)	万人
			第三产业就业人数 (+)	万人
经济结构		地区生产总值增长率 (+)	%	
		地区生产总值 (+)	亿元	
		工业增加值 (+)	亿元	
		社会消费品零售总额 (+)	亿元	
		财政预算收入 (+)	亿元	
		第三产业占比 (+)	%	
		城乡消费差距 (+)	%	
规模以上工业企业单位数 (+)	个			
环境子系统	环境污染	城乡消费差距 (+)	%	
		对外贸易依存度 (+)	%	
	环境治理	废水排放总量 (-)	万吨	
		二氧化硫排放量 (-)	万吨	
		生活垃圾无害化处理量 (+)	万吨	
	人居环境	城市污水日处理能力 (+)	万立方米	
		工业污染治理完成投资 (+)	亿元	
		人均公园绿地面积 (+)	平方米/人	
	建成区绿化覆盖率 (+)	%		
	人均拥有公共图书馆藏量 (+)	册/人		

3.1.4 数据标准化处理

熵权法是一种多指标权重确定方法，它基于信息熵的概念，用于评估多指标体系中

各指标的重要性。该方法通过计算各指标的熵值来确定其权重，熵值越大，表示不确定性越高，反之则表示指标对整体的影响越大。熵权法的核心思想是根据各指标的信息量大小来确定其权重，从而实现对多指标的合理评价和排序。熵权法在多指标决策、绩效评价、风险分析等领域得到广泛应用，特别是在环境评价、投资决策和资源配置等方面具有重要意义。通过熵权法，可以客观、科学地确定多指标体系中各指标的重要性，为决策提供量化的参考依据。

熵值法的具体计算步骤如下：

第一，分别对正向及负向指标进行标准化，消除指标之间的量纲和数量级的差异。

正向指标：

$$Z_{\lambda ij} = (x_{\lambda ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$$

负向指标：

$$Z_{\lambda ij} = (x_{\max} - x_{\lambda ij}) / (x_{\max} - x_{\min})$$

其中， x_{\max} 、 x_{\min} 分别为所有年份、所有评价对象中不同指标 j 的最大值和最小值；

$Z_{\lambda ij}$ 为指标 $x_{\lambda ij}$ 无量纲化处理后的指标值。

第二，计算指标比重 $P_{\lambda ij}$ 。

$$P_{\lambda ij} = Z_{\lambda ij} / \sum_{\lambda=1}^t \sum_{i=1}^m Z_{\lambda ij}$$

第三，计算第 P 项指标的信息熵。信息熵的计算涉及对指标数据的概率分布进行量化，以得出每个指标的信息量。

$$E_j = -k \sum_{\lambda=1}^t \sum_{i=1}^m P_{\lambda ij} \ln P_{\lambda ij}$$

其中， $k = 1 / \ln(t \times m)$

第四，计算各个指标熵值的冗余度，即指标的信息熵与最大信息熵之比。

$$D_j = 1 - E_j$$

第五，计算各个指标的权重。

$$W_j = D_j / \sum_{j=1}^n D_j \quad (3.1)$$

3.2 人口-经济-环境发展现状分析

3.2.1 人口发展现状

(1) 人口规模

从图 3.1 可以看出,从 2002 年开始,我国人口总量逐年扩大,年增长率在计划生育政策指引下逐年下滑,在 2011 到 2016 年经历小波高峰,2016 年后急速下降。

从人口总量来看,2002 年以来,全国人口始终保持增长的趋势,总量由 2002 年的 128453 万人增长到 2021 年的 141260 万人,共增加了 12807 万人。我国总人口在 2005 年突破 13 亿大关,2017 年跨过 14 亿人口门槛。2020 年年净增人口 204 万人,较 2019 年 467 万人出现大幅下降,同比下降近六成,2021 年净增人口历史性下降至 48 万人,同比下降近八成。

从人口自然增长率来看,我国人口自然增长率并不是逐年下降的。2010 年开展“单独二孩”政策试点工作、2012 年我国 31 个省份全面实施“双独二孩”政策、2013 年末启动“单独二孩”政策、以及 2015 年末明确提出“全面二孩”政策都使人口自然增长率出现了短期回升的状态。但受生育观念、婚育年龄推迟、预期寿命增加、生活成本提高、新冠疫情等因素的影响,人口自然增长率断崖式下跌。自 2016 年以来,截至 2021 年的 6 年内,全国人口自然增长率由 0.65% 下降至 0.034%,累计下降达 0.616 个百分点。

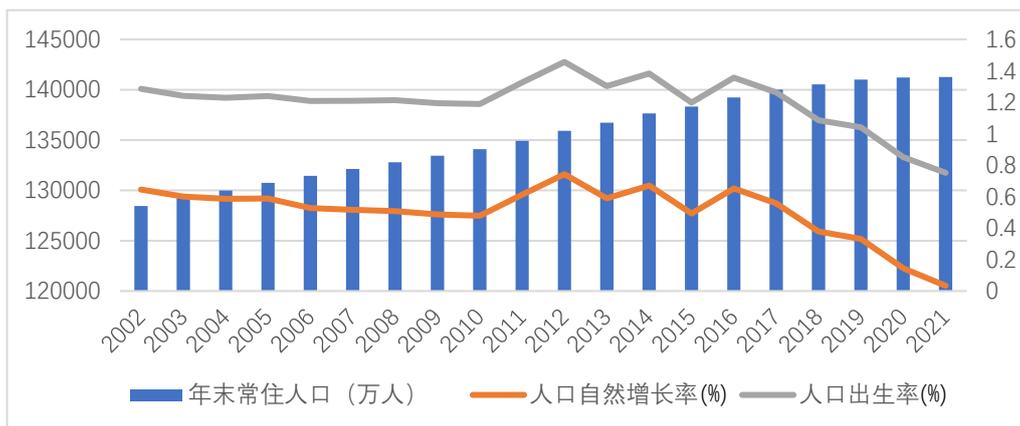


图 3.1 我国年末常住人口、增长率及出生率

(2) 人口年龄结构

如图 3.2 所示,我国在 2002 年至 2021 年期间,不同年龄组人口占比情况有着明显的变化。具体来看,0-14 岁年龄组的人口比重经历了逐渐减少,而后又缓慢增加的趋势;

15-64 岁年龄组的人口比重逐步增长,而后逐渐减少;而 65 岁及以上年龄组的人口比重则是持续上升的趋势。

在 2002 年至 2015 年我国实行“计划生育”政策期间,观察到中国人口年龄结构发生了如下变化:0-14 岁年龄组人口比例逐步下降,儿童和青少年人口的增长放缓;15-64 岁年龄组人口比例先上升后下降,同时 65 岁及以上老年人口比例不断攀升,我国老龄化问题日益严重。在 2015 年“全面二孩”政策正式提出以来,0-14 岁年龄组比例呈波动上升趋势,15-64 岁年龄组比例持续下降,65 岁及以上年龄组人口比例不断增加且增长幅度逐渐扩大。

综上所述,我国 2002-2021 年间人口年龄结构逐渐失衡,表现为出生率有所下降,老龄化问题日益严重。在我国生育政策变化后出生率有所回升,但仍没有达到 2.1 的生育更替水平。

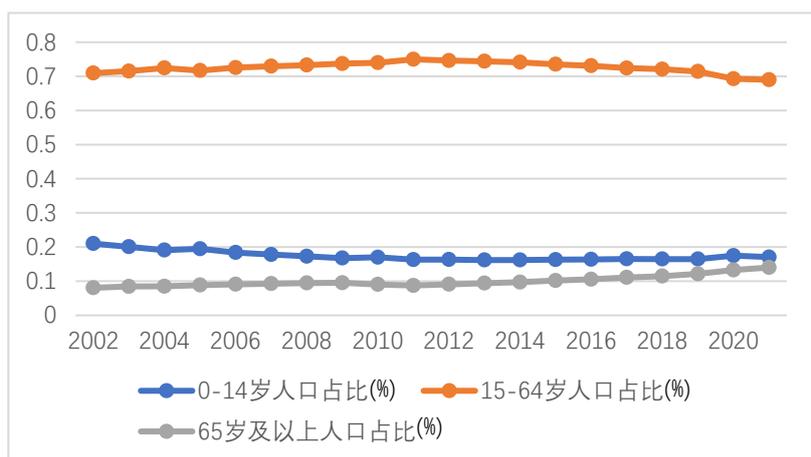
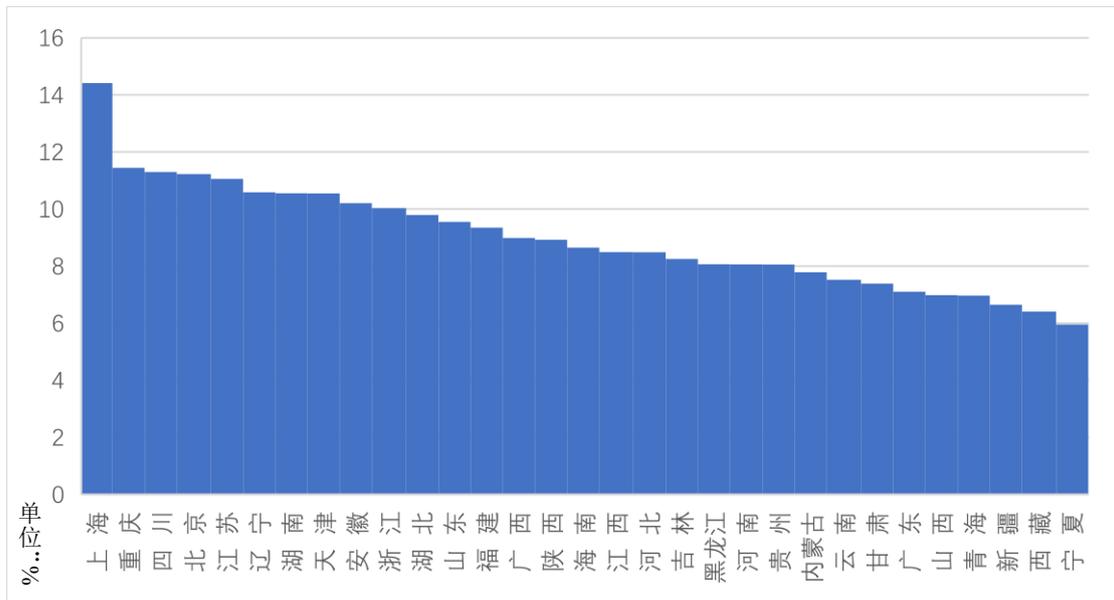


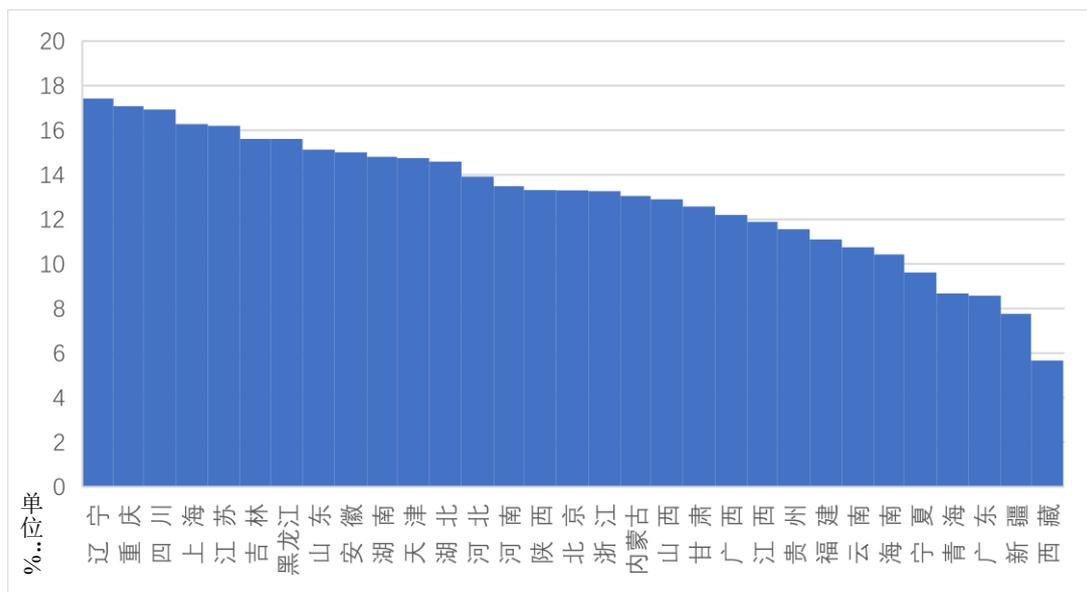
图 3.2 我国各年龄层人口比重

21 世纪以来,我国人口老龄化程度逐渐加深,有着明显的区域差异。如图 3.3 所示,老龄化系数越高则老龄化程度越高。可见,辽宁、上海、江苏、重庆、四川等省市的人口老龄化程度长期居于高位,较早的面临了老年人口比例不断攀升的挑战,而青海、新疆、西藏、宁夏、广东等省市人口老龄化程度则相对较轻,展现出较为年轻的人口结构。20 年间,部分省市的老年人口比例排名产生了显著的变化,如吉林、黑龙江等地 2002 年的人口老龄化程度较低,但 2021 年最新数据显示,已发展为人口老龄化程度较深的地区,在全国排名分别为第六名和第七名,而浙江、北京等地则出现相反的趋势,这些地区凭借着较强的经济吸引力和优质的公共服务,吸引了大量年轻人口流入,为当地经济和社会发展注入了新的活力。综上所述,反映出我国自 2000 年进入老龄化社会

以来各省市老龄化进程的差异，我国人口老龄化的空间格局在不断发生改变。



(a) 2002年人口老龄化情况



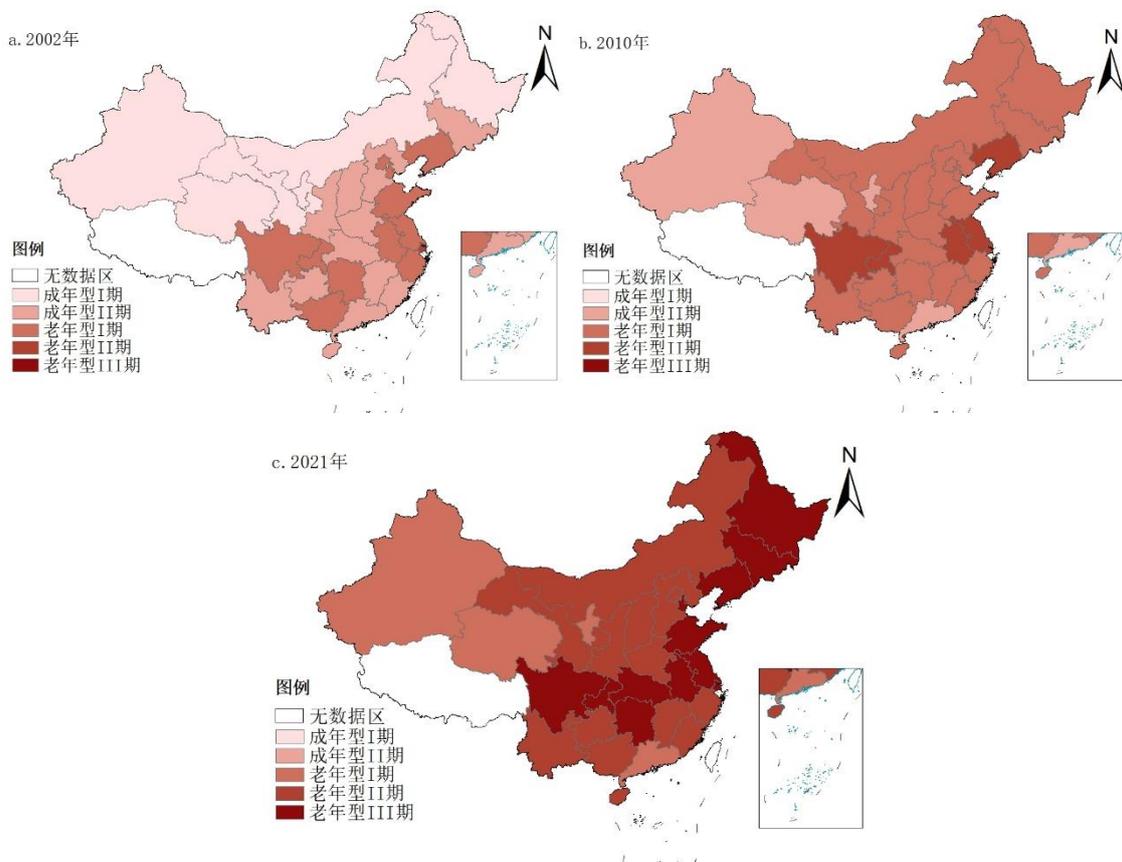
(b) 2021年人口老龄化情况

图 3.3 2002、2021 年人口老龄化情况

关于社会年龄结构的界定，本文根据联合国提出的标准并结合以往研究，选取 65 岁及以上人口占总人口的比例将年龄结构划分为以下六种，即 65 岁及以上人口占总人口的比例小于 4.0%为年轻型；4.0%-5.5%为成年型 I 期；5.5%-7.0%为成年型 II 期；7.0%-10.0%为老年型 I 期；10.0%-14.0%为老年型 II 期；大于 14.0%为老年型 III 期。以第五次、第六次、第七次全国人口普查数据为基础绘制我国各地区年龄结构类型分布图（图

3.4), 可以发现:

2002年-2020年20年间,我国经历了快速的人口年龄结构老化,成年型省市大幅衰减,老年型省市不断增加。具体来看,我国31个省市(不包含港澳台地区)中,2002年-2010年间,成年型省市由19个迅速衰减为5个,2021年仅西藏自治区的年龄结构还是成年型,其他省市均发展为老年型省市,其中,65岁以上人口占总人口比重超过14.0%,成为老年型III期省市,进入深度老龄化的省市有12个,且大多分布在长江经济带以及东北地区。西部地区老龄化进程慢于东中部地区,相对较“年轻”。



注:底图基于自然资源部标准地图服务系统(边界无修改)审图号:GS(2022)1873

图 3.4 我国各地区年龄结构分布

(3) 人口文化结构

本文中,对人口教育结构的界定主要借鉴的是舒尔茨(1960)的关于人力资本的概念并参照应用最为广泛的Barro和Lee(2001)提出的以受教育年限为基准的人力资本测算方法,两位学者认为,受教育年限越长,意味着劳动力的工作技能更加娴熟,从而人力资本水平就越高。因此,本文采用接受正规教育的年限作为衡量人力资本水平的指

标，使用地区平均受教育年限进行衡量。根据姚先国（2008）、骆永民（2014）^{[23][41]}等学者的数据处理方法，将我国接受教育的层次划分为文盲或半文盲、小学、初中、高中、大专及以上高等教育 5 个层次，各层次人口数分别设定为 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 ，将各层次接受教育的权重 p_i 分别设定为：0 年、6 年、9 年、12 年、16 年。则平均受教育年限具体公式为：

$$H = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i h_i}{\text{六岁及以上人口数}}$$

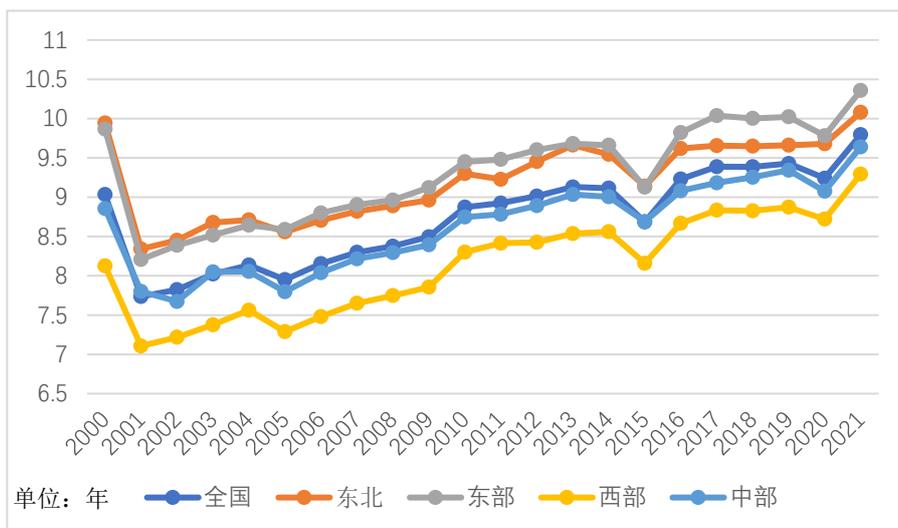


图 3.5 分区域平均受教育年限

图 3.5 显示，2000-2021 年我国各区域人力资本水平整体呈现逐步增长的发展动向，体现了我国整体教育水平的提高，到 2021 年，全国平均人力资本水平提高至 9.79 年。细分到四大区域，东、中、西部及东北地区的人力资本水平分别由 2000 年 9.86、8.85、8.12、9.94 年上升到 2021 年的 10.35、9.63、9.29、10.07 年，对应的年均增长率分别为 0.24%、0.42%、0.67%、0.06%。从四大区域整体人力资本水平来看，东部地区和东北地区整体水平相对较高，西部地区人力资本水平长期落后于其他三个地区，从增长率来看，西部地区年均增长率最高，东北地区增长率最低。可以看出，到 2021 年，我国区域性人力资本水平差距正在逐渐减小，呈现出日益均衡的发展态势。究其原因，我国近年来推行公共服务均衡化策略，教育、医疗资源等向西部地区倾斜，确保我国各地区资源的合理配置，到 2020 年，我国基本公共服务均等化已总体实现。

3.2.2 经济发展现状

(1) 经济规模

我国 2002-2021 年分省域人均地区生产总值以及增长率变化情况如下图 3.6 所示。从人均地区生产总值来看, 各省域人均地区生产总值总体上均呈现上升趋势, 各省域间差异逐步缩小。东部地区人均地区生产总值始终位居第一, 20 年间, 东中西部人均地区生产总值均稳步增长, 特别注意的是, 2014 年开始, 东北地区的经济增长明显放缓, 辽宁、黑龙江、吉林的经济增速分别为 5.8%、5.6%、6.5%。分别位居全国倒数第三、第二和第四。东北地区的工业化和城镇化起步较早, 曾经是中国工业的重镇。然而, 随着时间的推移, “两化”所能带来的增长红利逐渐减少, 新的增长点未能及时形成, 同时随着经济增长放缓, 就业机会减少, 加之生活环境和公共服务等方面的差距, 导致大量年轻人口向东部和南部地区迁移, 形成人才流失。因此, 2008 年金融危机后, 东北地区作为重工业基地的外部需求大幅减少, 而内生增长动力不足, 未能有效填补外部需求的缺口, 因此产生了引起全社会广泛关注的经济坍塌现象。

从地区生产总值增长率来看, 我国地区生产总值增长率东、中、西以及东北地区趋势相近, 总体上呈现“逐渐上升—波动下降”的趋势。我国地区生产总值增长率自 2010 年开始出现了回落的现象, 2011 年地区生产总值增长率从 2010 年两位数 10.6%回落到 9.5%, 一是由于 2008 年国际金融危机爆发给世界经济带来的巨大冲击, 更重要的是中国适时地改变了经济增长的战略, 改变了以牺牲生态环境为代价的高速增长。

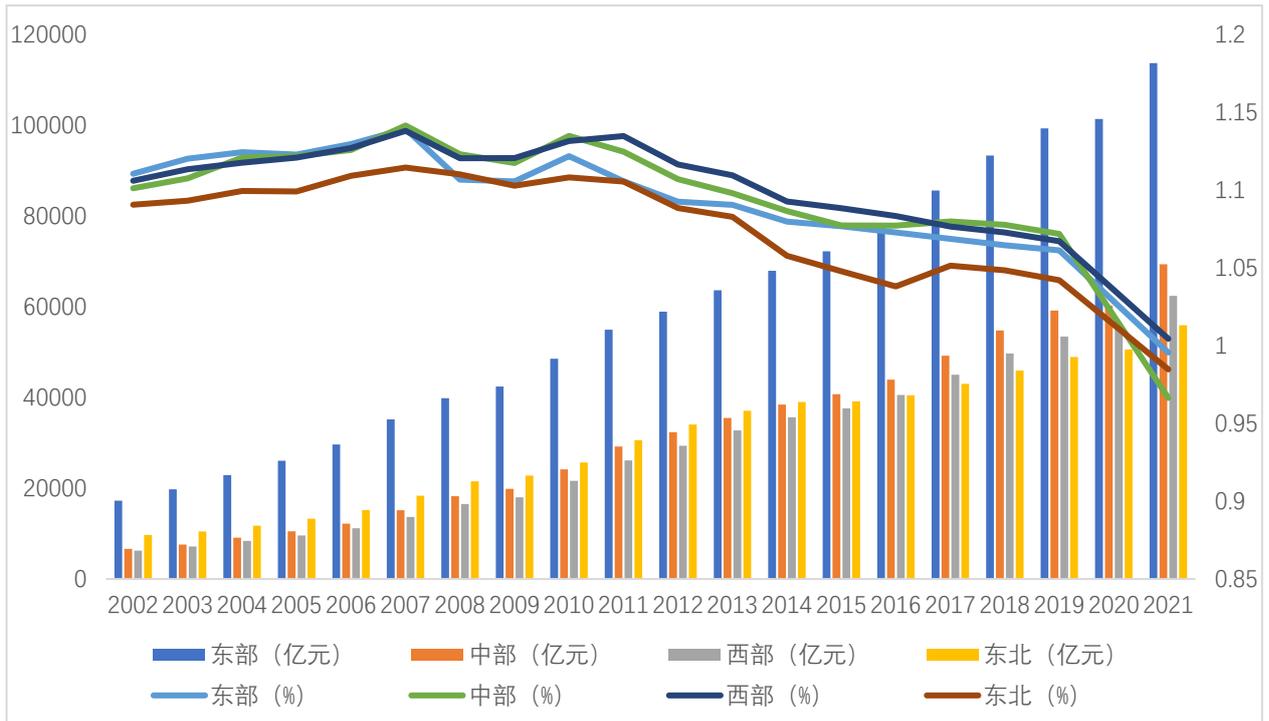
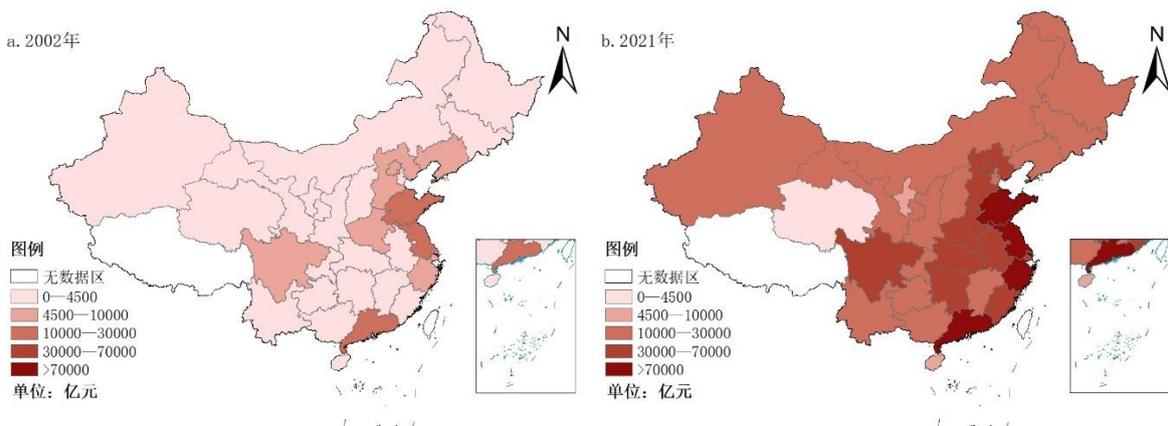


图 3.6 分地区人均地区生产总值及增长率

我国 2002 年、2021 年各省地区生产总值变化情况如下图 3.7 所示。整体来看，2002 年我国地区生产总值高值区主要聚集在东南沿海地区，其余地区生产总值普遍较低，20 年间，我国经济迅猛发展，高值区省份迅速增加。分地区来看，一直处于高等级区的是江苏和广东两个省份；处于较高等级的是河北、上海、浙江以及河南省；一直处于较低等级主要分布在我国西部地区以及海南省，主要包括西藏、青海、宁夏、甘肃。



注：底图基于自然资源部标准地图服务系统（边界无修改）审图号：GS(2022)1873

图 3.7 各省地区生产总值演变趋势

(2) 产业结构

观察我国 2002 年至 2021 年三大产业的总量及增长速度（参见图 3.8），从总体趋势来看，三大产业的产值均呈现出稳步增长的态势。这表明中国的经济在这段时间内持续发展，产业规模不断扩大。我们可以看到第一产业的产值从 2002 年的 16190.2 亿元增长至 2021 年的 83085.5 亿元，其年均增长率为 8.99%，在三大产业中增长率较低，这可能与第一产业受自然条件和资源限制较大有关。第二产业的产值从 2002 年的 54104.1 亿元上升至 2021 年的 450904.5 亿元，年均增长率为 11.8%。这反映了中国在工业化进程中的快速发展，尤其是在制造业和建筑业方面取得了显著成就。第三产业的产值从 2002 年的 51423.1 亿元增加到 2021 年的 609679.7 亿元，年均增长率为 13.90%，增长最为显著，并且在 2013 年开始逐渐超过了第二产业产值，成为中国经济的重要支柱。这表明中国的经济结构正在逐步优化，服务业在国民经济中的地位越来越重要。

在过去的几十年里，我国经济结构经历了显著的变化，这一变化反映在三大产业占比的演进中（图 3.9）。具体数据显示，2002 年第一、二、三产业的占比分别为 13.3%、44.5%、42.2%。到了 2021 年，这三大产业的占比分别调整为 7.3%、39.4%、53.3%。在这 20 年间，第一产业占比下降了 6%，第二产业下降了 5.1%，而第三产业占比上升了 11.1%。2002 年至 2021 年间，三大产业的总值及其占比的变化不仅展示了我国经济产业在规模上的快速增长，也反映了我国产业结构性改革的显著成果。

具体来说，第一产业的占比持续下降，这主要是因为随着社会的发展和科技的进步，农业生产效率得到了极大的提高，同时，更多的劳动力从农业转移到了工业和服务业。第二产业的占比在经历了一个上升期后开始逐年下降，这一趋势反映了我国经济从以重工业和制造业为主向服务导向型经济的转变。最为显著的变化是第三产业的占比持续增加，并且在 2013 年之后，第三产业的占比超过了第二产业，成为我国经济中最大的部分。这一变化标志着我国经济发展进入了一个新阶段，服务业成为推动经济增长的主要力量。第三产业的快速发展不仅提高了人民的生活质量，促进了消费升级，也反映了我国经济结构的优化和升级。随着信息技术的发展，金融、教育、医疗、旅游等服务行业迎来了快速发展的机遇，这些行业的增长为我国经济提供了新的动力。

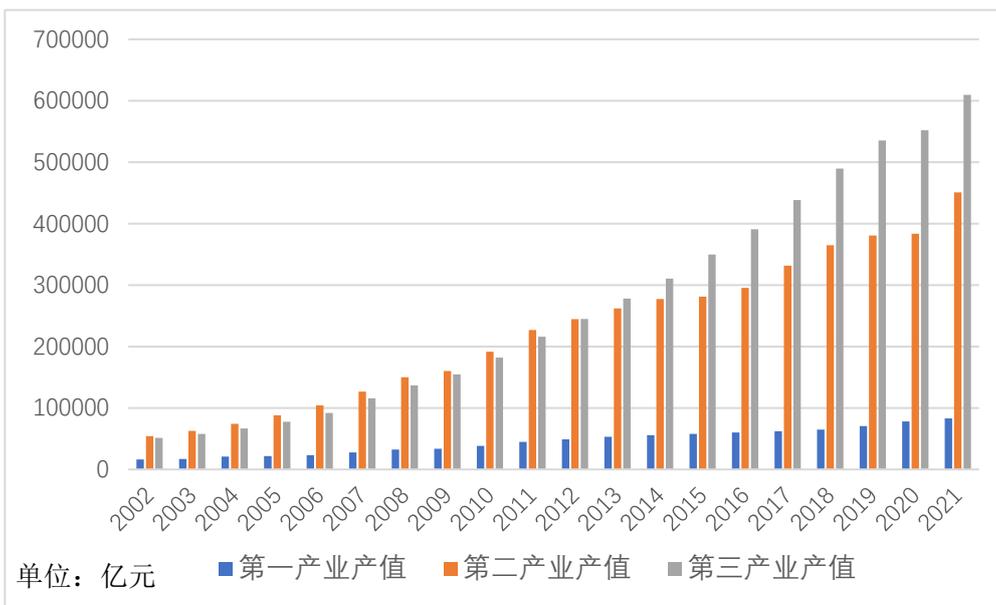


图 3.8 三大产业产值

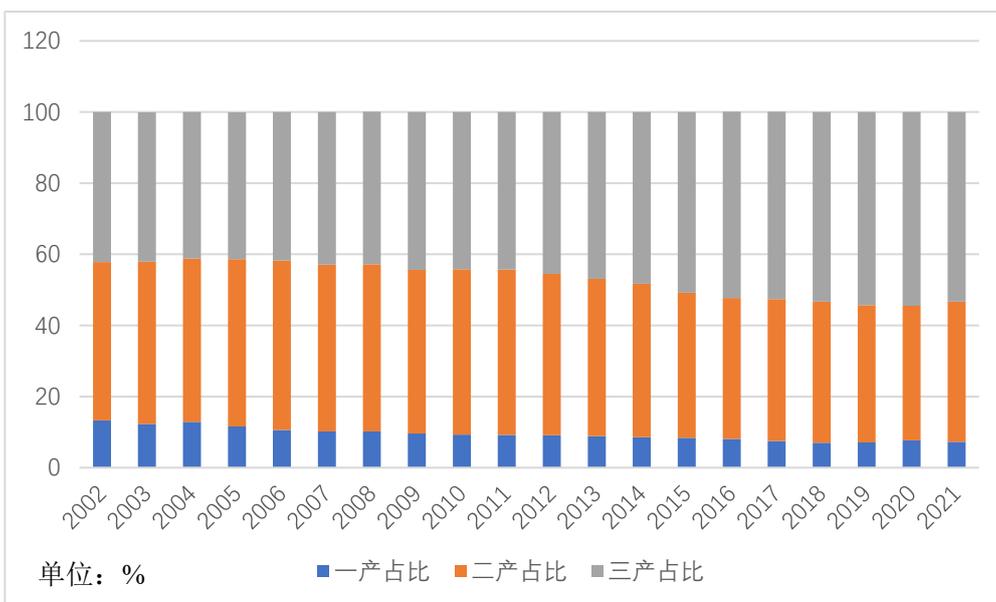


图 3.9 我国三大产业占比

3.3.3 环境发展现状

(1) 环境污染

随着工业化进程的加速，大量未经处理的工业废水和生活污水每日被排放，每日排放量约 1.64 亿立方米，造成了严重的环境问题。特别是，每年工业用水量的大幅增加，使得水体污染问题更加突出。这些废水中，高达 80% 未经过任何净化处理就被直接排放到自然环境中，导致河流和地下水资源遭受了前所未有的污染压力。更加令人担忧的是，

这些废水含有的有害物质，比如重金属和氯乙酸等，不仅对水资源本身构成了严重威胁，也极大地增加了对人类健康的潜在风险。因此，水污染问题已经成为影响公共健康和社会可持续发展的重大挑战，亟需全社会共同努力，采取有效措施加以解决。本文将我国31个省市分为东、中、西、东北地区，选取废水排放量来分析我国水资源污染情况，如下图3.10所示：

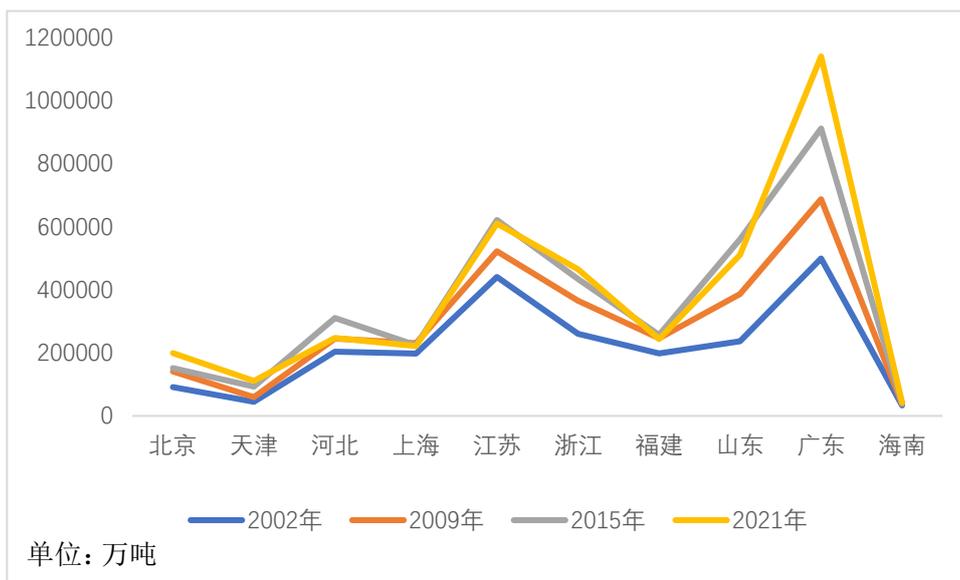


图 3.10 东部地区废水排放总量

整体来看，东部地区相较于其他地区废水排放量高，高于全国平均水平。组内来看，北京、天津、河北、上海、福建、海南的废水排放量总体较少，广东省、江苏省以及山东省排放量相对较多。就各个省市来看，北京市、天津市、河北省、上海市、福建省和海南省废水排放量变化量较小，保持平稳排放。江苏省、浙江省、山东省和广东省排放量有较明显变化。具体而言，浙江省排放量一直有所增长，表现为由2002年的260195万吨上升为2021年的464925万吨，年均增长3.10%。江苏省、山东省呈现出先上升后缓慢下降的趋势，2002年—2015年排放量有较明显上升，江苏省从2002年的440475万吨上升到2015年的621303万吨，年均增长2.68%，山东省从2002年的236658万吨上升到2015年的559908万吨，年均增长6.84%。2015年—2021年排放量缓慢下降，江苏省到2021年排放量下降为610280万吨，年均下降0.29%，山东省到2021年排放量下降到510466万吨，年均下降1.53%，二十年整体来看，江苏省二十年间年均增长1.73%，山东省二十年间年均增长4.13%。广东省排放量变化最为明显，年均增长4.44%。可能是由于随着经济的快速发展，工业企业增多，导致在经济快速增长的同时，废水排放量也有所增多。

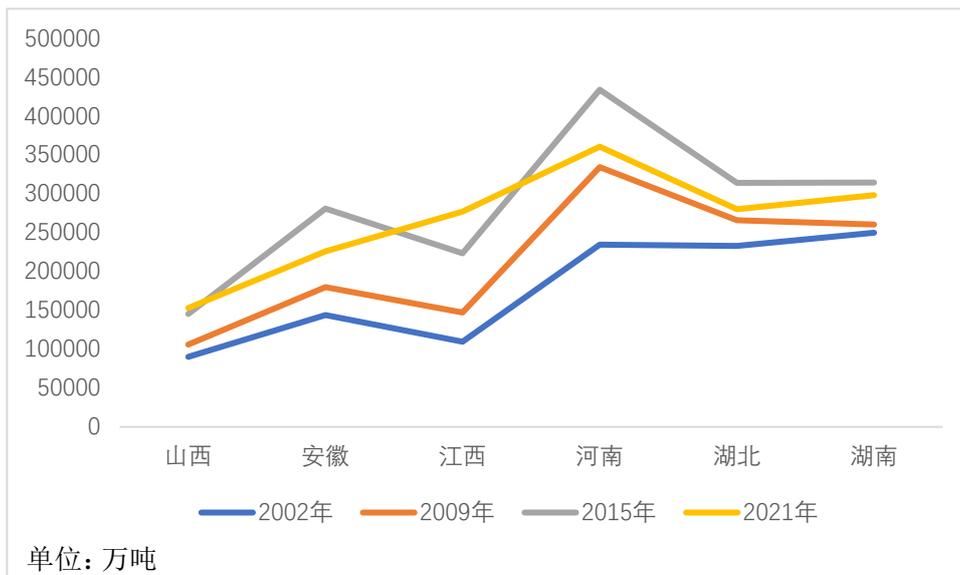


图 3.11 中部地区废水排放总量

从上图 3.11 可知，中部地区较东部地区废水排放量少。就各省市来看，山西、湖北以及湖南二十年间排放总量较为稳定，安徽、江西、河南均有不同变化。具体而言，江西省废水排放总量二十年间一直有所上升，上升幅度较大，由 2002 年的 109599 万吨上升到 2021 年的 276740 万吨，年均增量 4.99%。安徽省和河南省排放总量都呈现出先上升后下降的趋势，均由 2015 年开始排放量有所降低，进入 2015 年，我国治理水体污染的节奏进一步加快，1 月，号称“史上最严”的新修订的环保法开始实施，这是“有牙齿”的环保法，对污染“零容忍”，且惩治措施非常严格；4 月，《水污染防治行动计划》出台，成为当前和今后一个时期全国水污染防治工作的行动指南；5 月，一场声势浩大的水污染防治法执法检查席卷全国。安徽省废水排放量由 2015 年的 280626 万吨下降到 2021 年的 225785 万吨，年均下降 3.56%，河南省废水排放量由 2015 年的 433487 万吨下降到 2021 年的 360298 万吨，年均下降 3.04%。

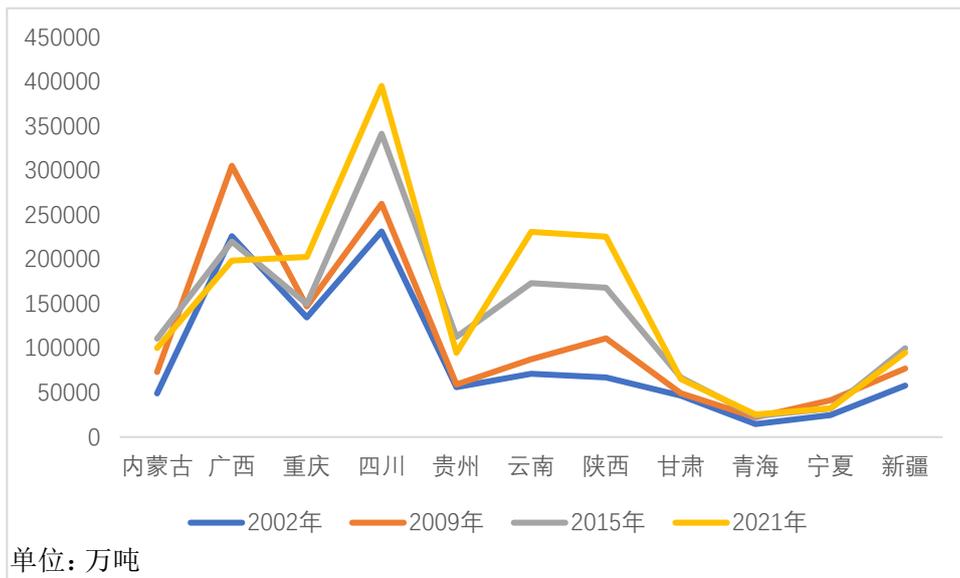


图 3.12 西部地区废水排放总量

如上图 3.12 所示，西部地区各省市废水排放量变化程度以及方式各有不同，内蒙古、甘肃、青海、宁夏、新疆地区废水排放量整体水平较低。分省域来看，内蒙古、重庆、贵州、甘肃、青海、宁夏以及新疆废水排放量无明显变化，广西、四川、云南以及陕西变化较为明显。具体而言，广西 2002 年废水排放量有明显增加，但从 2011 年出现螺旋式下降，到 2021 年下降到 198671 万吨。四川、云南、陕西废水排放量二十年间均有所增加，四川省从 2002 年的 231607 万吨上升到 2021 年的 395529 万吨，云南省从 2002 年的 71259 万吨上升到 2021 年的 231025 万吨，陕西从 2002 年的 67080 万吨上升到 2021 年的 225621 万吨，年均增量分别为 2.86%、6.39%和 6.59%，陕西省年均增量位居西部地区第一。

东北地区三省份废水排放量如下图 3.13 所示，整体来看，三省份排放量二十年间较为平稳，2015 年前后排放量均有所下降。其中，辽宁省排放量较其余两省份高，吉林、黑龙江两地区排放量相当，三省年均增量分别为 0.51%、0.83%、0.79%。

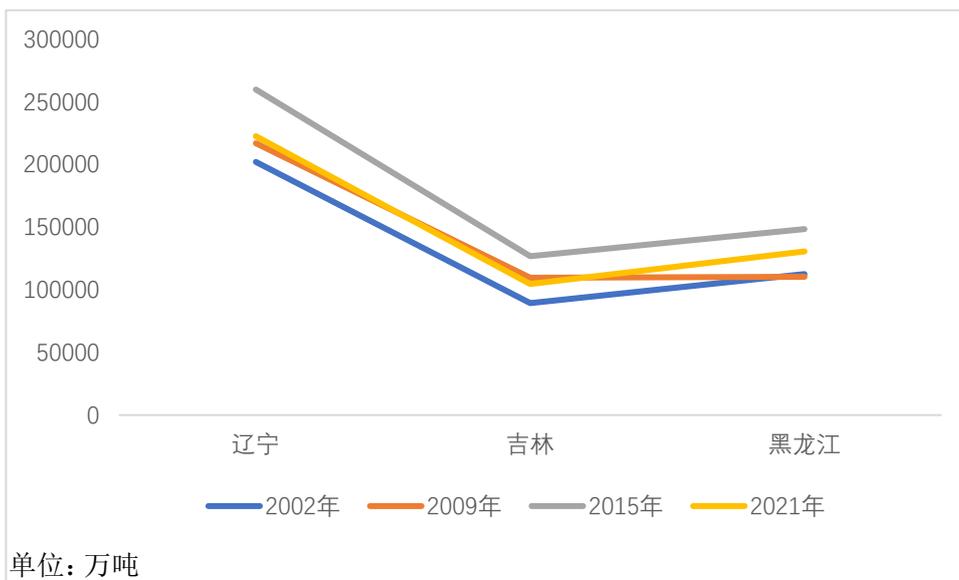


图 3.13 东北地区废水排放总量

(2) 环境保护建设

在生态环境保护建设的进程中，我们不仅要致力于处理现有的环境污染问题，更要深刻认识到保护物种多样性和维持生态系统平衡的重要性。为了守护生态系统的和谐稳定，我国相关部门一直在积极推行一系列生态保护措施。这些举措包括但不限于植树造林、修建公园等，旨在通过多样化的手段，促进生态环境的持续改善，确保自然资源的可持续利用，从而为我们和子孙后代创造一个更加宜居的家园。本文依据生态环境部发布的相关指标选取城市污水日处理能力、生活垃圾无害化处理量、工业污染治理完成投资、人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率、人均拥有公共图书馆藏量等指标 2002—2021 年年相关数据来分析我国的生态环境治理现状，具体见下表 3.2：

表 3.2 生态环境治理相关指标

年份	环境治理			人居环境		
	城市污水日处理能力	生活垃圾无害化处理量	工业污染治理完成投资	人均公园绿地面积	建成区绿化覆盖率	人均拥有公共图书馆藏量
2002	223.26	249.69	188.4	5.4	29.8	0.60
2003	232.85	258.27	221.8	6.5	31.2	0.61
2004	246.24	269.64	308.1	7.4	31.7	0.62
2005	266.32	268.38	458.2	7.9	32.5	0.61
2006	324.47	261.93	483.9	8.3	35.1	0.61
2007	344.55	314.11	552.4	9.0	35.3	0.60
2008	372.42	343.56	542.6	9.7	37.4	0.60
2009	406.13	374.42	442.6	10.7	38.2	0.59

续表 3.2

2010	446.43	410.60	397.0	11.2	38.6	0.60
2011	443.47	436.33	444.4	11.8	39.2	0.59
2012	456.26	482.98	500.5	12.3	39.6	0.66
2013	488.26	513.13	849.7	12.6	39.7	0.61
2014	503.91	546.47	997.7	13.1	40.2	0.65
2015	545.40	610.54	773.7	13.4	40.1	0.68
2016	557.98	654.13	819.0	13.7	40.3	0.71
2017	566.94	699.22	681.5	14.0	40.9	0.75
2018	604.49	749.51	621.3	14.1	41.1	0.80
2019	635.98	798.28	615.2	14.4	41.5	0.84
2020	679.11	779.57	454.3	14.8	42.1	0.89
2021	724.27	824.37	335.2	14.9	42.4	0.94

从环境治理来看,我国各地区相关部门每年都会对污染源进行源头防治,由上表可知,2002—2007年,我国工业污染完成治理投资额逐年增加,由2002年的188.4亿元上升到2007年的552.4亿元,随后波动下降至2012年的500.5亿元,随后工业污染完成治理投资额激增到2014年的997.7亿元,接着投资额持续减少,到2021年的335.2亿元。这种情况的出现,很可能是由于前些年生态环境治理工作刚刚起步,投入资金逐渐增多。随后,随着企业产业结构的升级,污染物的排放量有所减少,因此投资额也逐步减少。正是由于投资额的不断增多以及企业产业结构的升级,可以看到我国2002年—2021年生活垃圾无害化处理量以及城市污水日出力量的不断增多,这样的变化反映了环境治理工作的逐步成熟和产业结构优化的积极影响。从整体上看,人居环境的状况已有所进步,这不仅仅是对现有环境的优化,更是对绿色发展理念的深刻体现。

3.3.4 人口-经济-环境综合发展水平分析

在前文数据预处理的基础上,结合所构建的指标体系,以及计算出的权重数据,分别计算出2002年、2009年、2015年以及2021年人口-经济-环境三系统综合发展水平指数。如下表3.3所示。

表 3.3 人口-经济-环境综合发展水平测度结果

区域	省市	人口子系统			经济子系统			环境子系统		
		2002	2010	2021	2002	2010	2021	2002	2010	2021
东部地区	北京	0.247	0.275	0.185	0.118	0.236	0.280	0.280	0.216	0.282
	天津	0.136	0.147	0.215	0.110	0.147	0.144	0.130	0.173	0.213
	河北	0.381	0.457	0.429	0.069	0.149	0.257	0.097	0.156	0.229
	上海	0.201	0.204	0.214	0.136	0.276	0.375	0.343	0.333	0.391
	江苏	0.454	0.583	0.561	0.150	0.437	0.769	0.220	0.298	0.420
	浙江	0.376	0.441	0.517	0.130	0.356	0.578	0.164	0.229	0.386
	福建	0.270	0.397	0.316	0.087	0.173	0.322	0.159	0.176	0.273
	山东	0.548	0.616	0.610	0.111	0.330	0.537	0.207	0.270	0.404
	广东	0.513	0.711	0.847	0.234	0.491	0.881	0.180	0.351	0.611
	海南	0.199	0.228	0.185	0.039	0.052	0.051	0.116	0.122	0.150
中部地区	山西	0.262	0.309	0.248	0.043	0.078	0.151	0.081	0.144	0.189
	安徽	0.338	0.420	0.391	0.048	0.124	0.285	0.104	0.147	0.249
	江西	0.333	0.345	0.401	0.033	0.089	0.207	0.089	0.137	0.211
	河南	0.485	0.539	0.572	0.067	0.170	0.353	0.112	0.147	0.262
	湖北	0.369	0.379	0.390	0.050	0.140	0.297	0.149	0.189	0.290
	湖南	0.368	0.455	0.428	0.047	0.125	0.283	0.108	0.160	0.248
西部地区	内蒙古	0.211	0.209	0.211	0.028	0.075	0.116	0.073	0.129	0.243
	广西	0.355	0.299	0.337	0.040	0.087	0.151	0.096	0.186	0.234
	重庆	0.259	0.236	0.286	0.057	0.089	0.190	0.056	0.135	0.210
	四川	0.439	0.465	0.456	0.056	0.145	0.333	0.108	0.148	0.272
	贵州	0.306	0.319	0.320	0.037	0.053	0.119	0.070	0.098	0.182
	云南	0.317	0.306	0.331	0.051	0.073	0.157	0.097	0.131	0.181
	陕西	0.265	0.349	0.313	0.046	0.083	0.184	0.072	0.167	0.203
	甘肃	0.254	0.246	0.280	0.031	0.049	0.069	0.099	0.118	0.170
	青海	0.237	0.236	0.180	0.016	0.019	0.022	0.095	0.108	0.152
	宁夏	0.202	0.189	0.212	0.029	0.029	0.028	0.112	0.152	0.199
东北地区	新疆	0.241	0.247	0.218	0.035	0.062	0.093	0.106	0.127	0.187
	辽宁	0.293	0.276	0.260	0.081	0.192	0.184	0.161	0.196	0.299
	吉林	0.200	0.248	0.160	0.037	0.080	0.081	0.109	0.138	0.209
	黑龙江	0.231	0.229	0.207	0.046	0.086	0.090	0.124	0.142	0.212
全国地区	均值	0.310	0.345	0.343	0.069	0.150	0.253	0.130	0.174	0.259

从整体均值来看，人口综合发展指数由 2002 年的 0.310 上升到 2021 年的 0.343，经济综合发展指数由 2002 年的 0.069 上升到 2021 年的 0.253，环境综合发展指数由 2002 年的 0.130 上升到 0.259，表明我国综合发展水平总体向好的基本面没有改变，经

济发展指数增长速度显著高于人口、环境综合发展速度,呈现出更快更强劲的发展趋势。分省域来看,2021年存在较为明显的地区分异和两极分化现象,广东省人口、经济、环境综合发展指数均位于全国前沿,吉林省人口综合发展指数最低,仅为0.16,极差达到0.687;青海省经济综合发展指数最低,仅为0.022,极差达到0.859;贵州环境综合发展指数最低,达到0.15,极差达到0.461,表明我国省域间人口-经济-环境综合发展水平存在较大差异,有两极分化发展不均衡的特点,一些省份被“边缘化”,发展成果的普惠性还不充分,其中,经济综合发展指数极差最大,省域间经济发展不均衡不平衡问题最为严重。分东、中、西、东北地区四大区域来看,东部地区位于全国前列,中部地区略低于东部地区,西部地区与东北地区发展相对落后,处于全国末端。

4 我国人口-经济-环境耦合协调关系时空演变及趋势预测

本章通过第三章所构建的指标体系与三系统综合发展水平计算三系统耦合协调度,并利用空间相关性分析以及马尔科夫链模型实证检验了人口-经济-环境三系统间的协同效应与动态演进趋势。

4.1 耦合协调度模型

耦合协调度模型是一种用于分析和评价两个或多个系统之间相互作用、相互影响及其协调发展水平的模型。它主要通过计算耦合度和协调度来反映系统间的耦合关系和协调发展水平。耦合协调度模型广泛应用于区域经济、环境科学、城市发展等领域,用以评估不同系统或要素之间的相互作用和协调发展程度。其计算主要分为三部分,分别是耦合度(C)、协调度(T)、耦合协调度(D):

1. 耦合度 C 的计算

耦合度是指两个或多个系统之间相互作用和依赖的程度,它反映了系统之间的相互联系强度。

$$C = \frac{\sqrt[3]{X \times Y \times Z}}{\left(\frac{X + Y + Z}{3}\right)^3} = \frac{3\sqrt[3]{X \times Y \times Z}}{X + Y + Z}$$

X 、 Y 和 Z 分别代表三个系统在某一方面的指标值或水平, C 的值越大表示系统之间耦合效果越佳,相互作用更为紧密。

2. 协调度 T 的计算

协调度是指两个或多个系统在发展过程中相互促进、和谐发展的程度。协调度不仅考虑了系统间的耦合关系,还考虑了各系统内部的发展水平和质量。发展度的计算公式:

$$T = \alpha X + \beta Y + \gamma Z$$

其中, α 、 β 、 γ 为待定系数。一般情况下 $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}$ 。

3. 三系统耦合协调度 D

耦合协调度是综合考虑耦合度和协调度,用以评价两个或多个系统协调发展的整体水平。其计算公式为:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (4.1)$$

为了计算 2002 至 2021 年间,除港澳台地区外,我国人口、经济与环境三大系统的耦合协调度,首先需要汇总人口子系统、经济子系统和环境子系统的多指标综合评价体系中一级指标的得分。接着,根据公式 4.1 进行计算,从而得出三系统的耦合协调度值。为了确立三系统耦合类型的判别标准,需要对耦合协调度值进行合理的区间划分。本研究在深入参考现有文献^[32]的基础上,制定了判别三系统耦合类型的标准,如表 4.1 所示。这一步骤旨在通过区间划分,明确不同耦合度值所对应的耦合类型,为进一步的分析提供依据。

表 4.1 人口-经济-环境耦合协调发展分类标准

发展阶段	D 值	耦合协调等级
高水平失调阶段	(0.0 ~ 0.1)	极高度失调衰退
	[0.1 ~ 0.2)	高度失调衰退
	[0.2 ~ 0.3)	中度失调衰退
拮抗阶段	[0.3 ~ 0.4)	轻度失调衰退
	[0.4 ~ 0.5)	极轻度失调衰退
	[0.5 ~ 0.6)	极轻度协调发展
磨合阶段	[0.6 ~ 0.7)	轻度协调发展
	[0.7 ~ 0.8)	中度协调发展
	[0.8 ~ 0.9)	高度协调发展
高水平协调阶段	[0.9 ~ 1.0)	极高度协调发展

4.2 传统及空间马尔科夫链方法

1906年, A.A.Markov 首次提出了马尔科夫链模型, 旨在为自然过程的研究提供一个具有随机性、稳定性及无后效性特征的数学框架。随后, 此模型迅速被应用于地理学和经济学领域, 用以分析自然地理现象的变迁和社会经济中的“俱乐部趋同”效应。马尔科夫链方法将区域现象的演变过程视为马尔科夫过程, 通过使用转移概率矩阵, 马尔科夫链方法能够捕捉区域内个体现象随时间的动态演进, 揭示不同地区状态的流动趋势及其上升或下降的可能性。

基于此, 将各空间单元的 2002—2021 年的人口-经济-环境耦合协调度值进行分级, 记为 k 个等级, 构建一个 $k \times k$ 的状态转移概率矩阵, 以描述耦合协调度值在不同类型间转移的概率分布, 进而绘制出区域经济发展水平时空转换的完整轨迹。其表达式为:

$$M_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (4.2)$$

$$\text{其中, } M_{ij} = \begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & \cdots & n_{ij} \end{bmatrix}_{k \times k}$$

式中, M_{ij} 即为 $k \times k$ 的状态转移概率矩阵, n_{ij} 为研究期内耦合协调度由 t 年份的 i 状态转移为 $t+1$ 年 j 状态的数量总和, n_i 表示在整个研究期内属于类型 i 的数量总和。

而经济活动在空间上的分布并非随机, 而是由资源分配、生产要素配置的不均衡和政策导向等因素所决定, 形成了经济活动在不同区位的集聚与差异。从经济地理学的视角研究区域经济差异现象, 应考虑其空间关联性的内在特征。根据地理学的第一定律, 经济现象在空间上的分布和变化与其地理位置紧密相关, 且邻近单元间的相互作用对区域发展具有显著影响。Sergio J. Rey 教授通过研究指出, 虽然传统马尔科夫链强调不同类别间的转变, 但却忽略了空间关联和区域背景的影响。随着地区间经济联系的加强, 外部环境尤其是临近区域的作用变得日益显著, 忽视这一点会使得分析结果无法准确反映现实情况。因此, Rey 将传统马尔科夫链与局部空间统计方法相结合, 并引入了“空间滞后”的概念, 发展了空间马尔科夫链模型, 以更全面地解释区域经济发展的时空演变过程。

在考虑空间滞后因素影响下, 与传统马尔科夫链模型的转移概率矩阵相比, 引入 k 个空间滞后类别后会形成 k 个 $k \times k$ 的转移矩阵集合 P_{ijk} 。每个矩阵值代表在特定空间滞

后类别 k 下，区域在时刻 t 从状态 i 转移到时刻 $t+1$ 的状态 j 的概率。空间滞后值的大小确定了空间单元所属的空间滞后类别。这一关系可以通过表达式 4.3 描述。

$$Lag_a = \sum_{b=1}^n Y_b W_{ab} \quad (4.3)$$

其中， Y_b 表示区域 b 的观测值， Lag_a 为区域 a 的空间滞后值， n 为城市总个数， W_{ab} 为空间权重矩阵，用以表征区域 a 和区域 b 之间的空间联系。

假定随着时间的推移，系统最终会达到一个稳定的状态，或称为终极状态，这个状态将不再受时间的影响而改变，达到平衡。这一状态下的概率被定义为终极状态概率或平衡状态概率。根据极限的概念，可以通过马尔科夫链的转移概率矩阵计算出这一稳定状态。使用随机过程的平衡分布概率，可以为预测未来可能出现的马尔科夫过程趋势提供关键信息。将极限的定义代入马尔科夫预测模型的递推公式，可获得以下公式。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k+1) = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k)M \quad (4.5)$$

其中， π 代表马尔科夫过程的终极状态矩阵。若 π 满足 $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$ ，且 $0 \leq \pi_i \leq 1$ ，则可达到传统马尔科夫过程的终极状态。同样，计算传统马尔科夫过程的最终状态的方法也可应用于空间马尔科夫链，根据不同的空间滞后状态计算马尔科夫过程的终极状态，为理解空间滞后如何影响区域马尔科夫过程的演变趋势提供了重要信息。

最后，为验证空间因素是否在统计上显著地影响本区域的耦合协调度，可以采用卡方检验方法。公式如下所示。

$$Q = -2 \log \left\{ \prod_{l=1}^k \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{m_{ij}(S)} \right]^{n_{ij}(S)} \right\}$$

其中， m_{ij} 是传统马尔科夫转移概率， $m_{ij}(S)$ 代表在领域状态类型为 S 时的空间马尔科夫转移概率， $n_{ij}(S)$ 表示在领域状态类型为 S 的空间马尔科夫转移中的区域数量， Q 服从自由度为 $k(k-1)^2$ 的卡方分布。这一步骤有助于检验空间维度对区域耦合协调度影响的统计显著性。

4.3 我国人口-经济-环境耦合协调关系时间演变特征

依据前文计算得出的人口-经济-环境综合水平值，利用耦合协调度的公式 4.1，计算出我国 31 个省市（不含港澳台地区）人口-经济-环境耦合协调水平，我国 2002—2021 年间人口-经济-环境的三系统耦合分析结果如表 4.2 所示。

就整体情况而言，绝大多数年份的协调度、发展度和耦合度均高于上一年。耦合度大部分分布在 0.9 附近，属于较高关联，耦合度反映的是三个系统之间的相互作用影响，可以看出三者关系是密切的，三系统之间相互依赖相互制约，但是这种关联度在不同时期表现出的结果不同，例如虽然耦合度在逐年增高，不断趋向于 1，但到 2021 年耦合协调度仅为 0.538，说明人口-经济-环境三者之间虽然有较强的相关关系但处于较低水平的协调状态。2002-2013 年间，三系统耦合协调度不断增强，2005 年实现了由轻度失调衰退到极轻度失调衰退的转变。2014 年，我国人口-经济-环境三系统耦合协调度由失调衰退逐步转变为协调发展，三系统之间开始相互制衡、配合，呈现出协调发展特征。2014-2021 年耦合协调发展水平螺旋上升，值得注意的是，2020 年耦合协调发展水平有所下降，降至 0.523，究其原因，受 2019 年末爆发的新冠疫情的影响，2020 年年净增人口 204 万人，较 2019 年 467 万人出现大幅下降，同比下降近六成，造成人口子系统综合发展水平出现大幅度下降，同时也对经济子系统产生重创，2019 年经济增长率稳定在 6.1% 的水平，而 2020 年经济增长率仅为 2.3%，因此对人口-经济-环境耦合协调发展水平产生影响，在 2021 年开始回升。总而言之，除个别年份外，我国 2002—2021 年间人口-经济-环境三系统耦合发展关系不断得到改善，表明人口分布、经济发展与资源环境之间相互依赖，相互作用。

表 4.2 我国人口分布与经济发展耦合协调类型

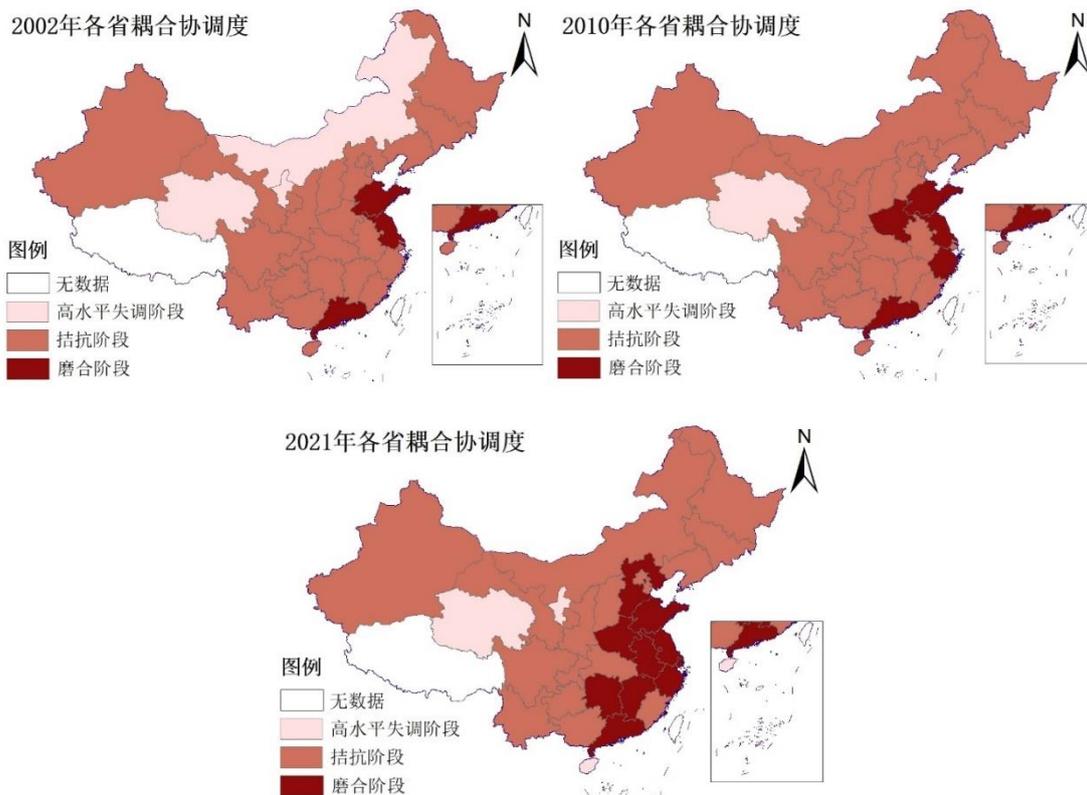
年份	耦合度	发展度	耦合协调度	耦合协调类型
2002	0.832	0.172	0.378	轻度失调衰退
2003	0.853	0.174	0.385	轻度失调衰退
2004	0.877	0.180	0.397	轻度失调衰退
2005	0.888	0.186	0.407	极轻度失调衰退
2006	0.903	0.194	0.418	极轻度失调衰退
2007	0.913	0.207	0.435	极轻度失调衰退
2008	0.932	0.215	0.448	极轻度失调衰退
2009	0.930	0.217	0.450	极轻度失调衰退
2010	0.939	0.230	0.465	极轻度失调衰退
2011	0.947	0.234	0.470	极轻度失调衰退
2012	0.950	0.246	0.483	极轻度失调衰退

续表 4.2

2013	0.961	0.259	0.499	极轻度失调衰退
2014	0.967	0.267	0.508	极轻度协调发展
2015	0.968	0.263	0.505	极轻度协调发展
2016	0.970	0.275	0.517	极轻度协调发展
2017	0.973	0.282	0.524	极轻度协调发展
2018	0.980	0.285	0.529	极轻度协调发展
2019	0.984	0.289	0.534	极轻度协调发展
2020	0.991	0.276	0.523	极轻度协调发展
2021	0.992	0.292	0.538	极轻度协调发展

分地区来看,运用 ArcGIS 将 2002 年、2010 年、2021 年的耦合协调度数据分类后与矢量格式的空间单元链接到地图上,形成 2002 年、2010 年、2021 年耦合协调类型的空间分布图,如图 4.1 所示。整体来看,我国耦合协调度以东南部经济发达区域为核心逐渐向外扩散,呈现出显著的“东高西低”的空间分布特征,其地区分异特征明显。

从时间上来看,人口-经济-环境耦合协调度整体上呈现出由高水平失调阶段向磨合阶段发展的上升特征。2002 年,青海省和内蒙古自治区处于高水平失调衰退状态,山东省、江苏省和广东省已处于磨合阶段,其中,耦合协调度最低值为青海省,最高值为广东省,高水平失调衰退阶段、拮抗阶段、磨合阶段省份分别占比 6.66%、83.33%、10%,整体水平较低,大多处于拮抗阶段。2010 年,山东省、江苏省带动周边浙江省、河南省发展到磨合阶段,内蒙古自治区也由高水平失调衰退阶段转变为拮抗阶段。耦合协调度最低值仍为青海省、最高值广东省,三阶段省份分别占比 3.33%、80%、16.66%,虽然整体水平仍然不高,但与 2002 年相比,磨合阶段省份比例增多,其余两阶段省份比例减少。2021 年,河北省、江西省、湖南省由拮抗阶段发展为磨合阶段,宁夏回族自治区、海南省由拮抗阶段倒退为高水平失调衰退阶段。耦合协调度最低值仍在青海省,但最高值变为广东省与江苏省。宁夏回族自治区处于我国环境脆弱带,对气候波动反应敏感,宁夏生态环境十分脆弱,水土流失严重。相反海南省由于优越的自然条件,成为国内最受欢迎的旅游胜地,海南省的经济发展得益于优美的自然环境。但近年来,随着海南省经济的持续繁荣,橡胶厂、造纸厂的大量树木需求,粗放经济增长模式等问题,近年来海南省生态环境遭到破坏,出现了经济综合发展水平高于生态环境综合发展水平的现象,因此出现了不协调性。整体来看,中国各省份协调发展水平处于一个动态的变化过程,三系统协调度较高的省市由我国东南沿海城市逐渐向内陆扩展,但可以观察到的是,福建省虽位于东南沿海,且逐渐被高协调度省市包围,但其人口-经济-环境耦合协调度似乎并未有所明显改变。



注：底图基于自然资源部标准地图服务系统（边界无修改）审图号：GS(2022)1873

图 4.1 2002、2010、2021 年我国各地区耦合协调度

4.4 我国人口-经济-环境耦合协调关系空间演变特征

4.3.1 全局空间自相关分析

全局空间自相关主要用于分析研究主体是否存在空间集聚或离散，Moran's I 指数是最常用的空间相关性分析方法，其公式如下：

$$Moran's\ I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (D_i - \bar{D})(D_j - \bar{D})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \cdot \frac{n}{\sum_{i=1}^n W_{ij} (D_i - \bar{D})^2} \quad (4.6)$$

其中， n 为研究区域个数， D_i 、 D_j 分别为区域 i 和区域 j 的属性值， \bar{D} 为所有区域属性值的平均值， $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}$ 为空间权重的总和。

计算得到 *Moran's I* 指数后, 对其进行显著性检验, 若通过检验, 认为该区域具有空间自相关性。一般来说, *Moran's I* 指数的值位于 $[-1,1]$ 之间。在通过显著性检验的情况下, 若 *Moran's I* 指数的值大于 0, 则认为存在空间正相关性, 表现为各省市之间的耦合协调度呈现出自身水平高(低)周边省市水平也高(低)的空间集聚特征, 核心地区通过集聚效应对周边地区的带动作用明显, 同时也说明了区域间差异的客观存在; 若 *Moran's I* 指数的值小于 0, 则表示存在空间负相关, 表现为某一地区与其邻近的地区有相反的指标特征; 若 *Moran's I* 指数的值等于 0, 则表示该地区无空间集聚效应, 呈现出随机分布特征, 此时区域实现均衡发展。

我国 2002—2021 年人口-经济-环境耦合协调度的 *Moran's I* 指数及检验结果如表 4.3 所示。观察可知, *Moran's I* 指数均为正值, 且均通过 1% 的显著性检验, 表明研究期间, 我国人口-经济-环境耦合协调度具有显著的空间正相关, 即存在高-高集聚和低-低集聚效应, 且 *Moran's I* 指数值逐年升高, 表明我国人口-经济-环境空间相关性逐渐提高, 空间集聚程度增强。

表 4.3 我国人口-经济-环境耦合协调度全局 *Moran's I* 指数

年份	<i>Moran's I</i>	Z
2002	0.071***	2.826
2003	0.077***	2.972
2004	0.089***	3.300
2005	0.086***	3.211
2006	0.087***	3.248
2007	0.085***	3.223
2008	0.084***	3.199
2009	0.088***	3.301
2010	0.081***	3.124
2011	0.085***	3.229
2012	0.087***	3.291
2013	0.094***	3.450
2014	0.081***	3.123
2015	0.094***	3.617
2016	0.138***	4.605
2017	0.132***	4.445
2018	0.129***	4.357
2019	0.128***	4.338
2020	0.119***	4.086
2021	0.125***	4.255

注: ***表明通过 1% 水平下的显著性检验

4.3.2 局部空间自相关分析

全局空间自相关可以反映整个研究区域空间总体的集聚（离散）特征，并不能反映研究区内局部空间关联性。若进一步反映每个空间单元与其相邻空间单元的空间相似性，则需要利用局部空间自相关分析进一步探索局部空间的分布模式，计算公式如下：

$$I_i = \frac{n(D_i - \bar{D}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (D_j - \bar{D})}{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (4.7)$$

其中， I_i 是局部空间 Moran's I 指数，其余符号与公式 4.6 相同。

计算得到局部空间 Moran's I 指数后，同样，一般选取 0.05 的置信水平对其显著性进行 Z 检验。不同的是，局部空间 Moran's I 指数的取值范围没有限制。在通过显著性检验的情况下，若 Moran's I 指数的值大于 0，则认为该区域单元空间相关性有两种类型，分别为“*High-High*”型和“*Low-Low*”型，称为聚集型空间分布模式；若 Moran's I 指数的值小于 0，则该区域单元空间相关性也有两种类型，分别为“*Low-High*”型和“*High-Low*”型，称为离散型局部空间分布模式。为探究省域内空间自相关关系，2002 年、2010 年、2021 年我国人口-经济-环境耦合协调 *LISA* 集聚结果如表 4.4 所示。

整体来看，随着我国经济社会不断发展，我国“*High-High*”型省市数量在不断增加，已从 2002 年的四个变为 2021 年的七个，表明核心地区通过集聚效应对周边地区的带动作用明显。分省域来看，江苏、浙江从 2002—2021 年一直处于 Moran 散点图的第一象限，即表明这些地区与周围地区的耦合协调水平都较高，形成了耦合协调度的“高值集聚区”，上海市的空间集聚类型由“*High-High*”型逐渐转变为不显著，表明上海市与周边省市的空间相关性在逐步减弱；甘肃、青海、宁夏、新疆地区一直处于 Moran 散点图的第三象限，表明这些区域与周边区域的耦合协调发展水平都较低，形成了耦合协调度相对稳定“低值集聚区”；“*Low-High*”型增加了海南省，说明海南省周边的省域三系统耦合协调水平较高，而海南省耦合协调水平较低，形成了局域高值包围低值的现象；相反地，“*High-Low*”型出现在了广东省，表明广东省耦合协调水平较高，而周边省域耦合协调水平较低，出现了局域低值包围高值的现象。

表 4.4 我国人口-经济-环境耦合协调 LISA 集聚结果

年份	<i>High-High</i> 象限 (高高集聚)	<i>Low-Low</i> 象限 (低低集聚)	<i>Low-High</i> 象限 (低高集聚)	<i>High-Low</i> 象限 (高低集聚)
2002	上海、江苏、浙江、山东	甘肃、青海、宁夏、新疆	—	广东
2010	上海、江苏、浙江、福建	甘肃、青海、宁夏、新疆	海南	广东
2021	江苏、浙江、安徽、福建、河南、湖北、湖南	甘肃、青海、宁夏、新疆	海南	广东

注：仅展示通过显著性水平的省（市、自治区）

4.5 我国人口-经济-环境耦合协调关系演进趋势预测

利用公式 4.3—4.5 探究我国人口-经济-环境耦合协调度的动态演进过程，本文将三系统耦合协调度采用四分位数法（0.25、0.5、0.75）划分为 4 种类型，分别为低水平（I）、中低水平（II）、中高水平（III）和高水平（IV），按数值从小到大划分为 $k=1,2,3,4$ 。其中，从低值向高值转移定义为向上转移，由高值向低值转移定义为向下转移。下表 4.5 为人口-经济-环境耦合协调度的传统马尔科夫转移概率矩阵，根据计算结果可以发现，第一，我国人口-经济-环境耦合协调发展水平整体呈现向更高水平转变的趋势，例如，由中低水平向中高水平转移的概率有 0.125，而向低水平转移的概率为 0.035；由中高水平向高水平转移的概率为 0.12，而向中低水平转移的概率仅为 0.014。第二，对角线的概率值均大于非对角线的值，存在俱乐部趋同效应，表明我国人口-经济-环境协调发展水平具有维持现状的特征，较具有稳定性。例如，在 t 时刻处于中低水平 $t+1$ 时刻仍处于中低水平的概率为 0.840，而向其他状态转移的概率仅为 0.16；在 t 时刻处于中高水平 $t+1$ 时刻仍处于中高水平的概率为 0.866，而向其他状态转移的概率为 0.134。第三，人口-经济-环境协调发展水平只能向邻域发展类型转移，实现“跨越式”发展具有一定难度，例如，由低水平向中低水平转移的概率为 0.142，但向中高水平及高水平转移的概率为 0。

表 4.5 人口-经济-环境耦合协调度的传统马尔科夫转移概率矩阵

$t \setminus t+1$	n	I	II	III	IV
I	148	0.858	0.142	0.000	0.000
II	144	0.035	0.840	0.125	0.000
III	142	0.000	0.014	0.866	0.120
IV	136	0.000	0.000	0.029	0.971

传统马尔科夫链在研究协调发展水平演变趋势时，将各个区域视为独立的个体。随着区域开放水平的提高，周围城市发展水平也会对区域三系统协调发展水平产生一定的影响，通过上文空间相关性分析，发现人口-经济-环境协调发展水平存在空间相关性。在传统马尔科夫链转移概率矩阵中加入空间滞后条件，构建空间马尔科夫转移概率矩阵，通过对比分析在不同邻域背景下城市三系统协调发展水平转移概率探讨邻域背景对城市三系统协调发展水平转移的影响，同时对其进行卡方检验，结果显示， $Q=122.74 > \chi^2(40)=66.77$ ，因此拒绝接受我国人口-经济-环境耦合协调发展水平在空间上是相互独立的假设。

下表 4.6 为人口-经济-环境耦合协调度的空间马尔科夫转移概率矩阵。由计算结果可知，第一，对比传统马尔科夫转移概率矩阵，不同协调发展水平之间的转移概率较小，但是邻域的不同水平对人口-经济-环境耦合协调发展水平的影响不同，说明地理背景对地区内部耦合协调发展水平转移影响显著。第二，进一步来看，对角线以下的元素大多为 0，对角线以上的元素大多为 0.1-0.2 之间，即我国人口-经济-环境耦合协调发展水平向下转移的概率较小，向上转移的概率相对要大，说明我国人口-经济-环境耦合协调发展水平维持现状的可能性>低水平向高水平转移的可能性>高水平向低水平转移的可能性，即无论是维持现有水平，还是转移至高水平，我国人口-经济-环境耦合协调发展水平未来存在进一步提升的可能性。第三，区域协调发展水平与邻域协调发展水平有较强的协同性，例如，当邻域协调发展水平处于低水平时，在 t 时段有较多区域协调发展水平低水平。第四，在不考虑时空背景的前提下，由低水平向中低水平转移的概率为 0.142，考虑时空背景后，由低水平向中低水平转移的概率分别为 $P_{12|1} = 0.000$ 、 $P_{12|2} = 0.129$ 、 $P_{12|3} = 0.235$ 、 $P_{12|1} = 0.200$ ，由此可以看出，当邻域水平高时，受邻域城市空间溢出效应的影响，对该区域协调发展水平有带动向好发展的作用，该区域有更高的概率向高水平转移。

表 4.6 人口-经济-环境耦合协调度的空间马尔科夫转移概率矩阵

领域类型	$t \setminus t+1$	n	I	II	III	IV
I	I	16	1.000			
	II	3		1.000		
	III	0				
	IV	1				1.000
II	I	93	0.871	0.129		
	II	46	0.043	0.804	0.152	
	III	34			0.882	0.118
	IV	16				1.000
III	I	34	0.765	0.235		
	II	95	0.032	0.853	0.116	
	III	90		0.022	0.867	0.111
	IV	81			0.037	0.963
IV	I	5	0.800	0.200		
	II	0				
	III	18			0.833	0.167
	IV	38			0.026	0.974

注：表格中空值为 0 值

通过计算传统马尔科夫和空间马尔科夫的极限分布，可以有效预测我国在人口-经济-环境耦合协调方面的长期演变趋势。极限分布反映了不同类型状态在经过多次转移后达到的平衡状态，从而揭示了耦合协调发展水平的长期趋势。下表 4.7 为我国人口-经济-环境耦合协调长期演变趋势预测结果。在不考虑空间影响的情况下，通过传统马尔科夫转移矩阵求得的极限分布显示，长期来看，处于低水平和中低水平协调发展水平的区域比例呈下降趋势，而中高水平和高水平区域比例则在上升，这表明我国人口-经济-环境耦合协调水平有望逐渐从较低水平协调状态向高水平状态转变，整体协调发展水平逐步提高。

当进一步加入空间因素进行考量时，与高协调发展水平类型（III、IV 类）城市相邻的区域，出现高协调发展水平的城市数量概率要显著高于低协调发展类型的区域，这强调了空间关联性在区域发展中的重要作用。空间因素的考虑进一步强化了协调发展水平向高值聚集的趋势。

综上所述，根据当前的发展趋势分析，我国人口-经济-环境的协调发展在长期内展现出乐观态势，随着时间的推移，整体协调发展水平预期将持续提升，并逐渐聚焦于更高的协调发展水平，表现出由低级向高级（I→IV 类）顺序增长的趋势。

表 4.7 我国人口-经济-环境耦合协调类型演变趋势预测

状态类型		I	II	III	IV	
不考虑空间 滞后	初级状态	0.600	0.200	0.167	0.033	
	终极状态	0.005	0.022	0.192	0.781	
考虑空间滞 后	终极状态	I	0.000	1.000	0.000	0.000
		II	0.000	0.000	0.000	1.000
		III	0.006	0.046	0.237	0.711
		IV	0.000	0.000	0.136	0.864

5 结论与建议

本文通过构建人口-经济-环境耦合协调发展的评价指标体系，并应用耦合协调度模型探究我国各省域人口-经济-环境协调发展情况，进而利用空间探索性分析方法探究其空间相关性，最后利用传统及空间马尔科夫链模型，深入分析了我国 31 个省（市、自治区）在人口、经济、环境综合发展水平的动态演进趋势和长期发展前景。研究主要结果如下：

5.1 结论

（1）我国 31 个省（市、自治区）的人口、经济、环境综合发展水平总体上呈现出上升的状态。根据综合评价指标计算分析我国人口、经济、环境综合发展水平，发现整体上我国综合发展水平呈现上升的趋势，且经济发展指数增长速度显著高于人口、环境综合发展速度，呈现出更快更强劲的发展趋势；我国省域间人口、经济、环境综合发展水平存在较大差异，有两极分化发展不均衡的特点，一些省份被“边缘化”，发展成果的普惠性还不充分。

（2）我国各省域耦合协调度呈现出显著的“东高西低”的空间分布特征，分异特征明显。从时间上看，我国耦合协调度以东南部经济发达区域为核心逐渐向外扩散，各省（市、自治区）的耦合协调模式经历了从不协调期向磨合期发展的过程，但仍然没有达到高级协调阶段。20 年间，大部分省市耦合协调发展水平在不断提升，个别省市经历了先小幅上升后下降的趋势，例如宁夏、海南地区，福建省虽被高值区包围，但其耦合协调发展水平似乎并未发生明显改变；从空间相关性角度分析，我国各省域人口-经济-环境协调度在全局上呈现出较强的空间依赖特征，且各省间耦合协调发展水平的空间相关性逐步增强。

(3) 地理背景在耦合协调发展水平转移过程中发挥重要作用, 区域协调发展水平与邻域地区存在着紧密的协同关系, 但“跨越式”发展难度较大。从长期演变和发展趋势来看, 传统马尔科夫概率转移矩阵结果显示, 我国人口-经济-环境耦合协调发展水平具有稳定性, 且存在“俱乐部收敛”现象, 协调发展水平的转移主要发生在邻近的发展类型之间, 从低水平直接跃升到高水平的概率极低, 在相邻年份较难实现跨越式发展, 矩阵两端类型不变的概率最大。与空间马尔科夫转移概率矩阵进行对比显示, 在不同的地理背景下, 我国人口-经济-环境耦合协调发展水平转移概率发生了明显变化。且区域协调发展水平与邻域协调发展水平有较强的协同性, 当邻域水平高时, 受邻域城市空间溢出效应的影响, 对该区域协调发展水平有带动向好发展的作用, 该区域有更高的概率向高水平转移。

(4) 我国人口-经济-环境耦合协调发展的长期趋势向好。总体来看, 在综合考虑当前发展趋势的基础上, 我国人口-经济-环境协调发展长期演变态势较为乐观, 随时间推移逐步提升, 呈现出向高值集中的趋势, 各类型的城市由等级低至高(I→IV)依次增加。

5.2 建议

为了响应社会发展中追求区域均衡的目标, 并直面人口负增长和发展不均衡性加剧的严峻挑战, 我国各省域必须未雨绸缪, 进行前瞻性的战略规划与积极应对。

首先, 我们应坚持经济与环境保护并重。在推动经济发展的过程中, 我们必须加大环境保护力度。由本文分析可知, 如今我国经济发展势头强劲, 显著高于人口、经济的发展速度, 因此, 应转变发展理念, 深入推广生态文明和绿色发展理念, 增加环境治理和人居环境建设的投资, 建立以环境保护为核心的绿色发展模式, 确保人口、经济、环境的和谐共生。

其次, 区域联动与合作至关重要。鉴于我国不同省份在人口、经济、环境耦合协调发展水平上的差异, 我们应充分发挥东部发达地区的正面影响, 保持其发展优势, 对周边省市起到一个带动向好发展的作用, 耦合协调发展水平出现波动下降的省市, 如宁夏、海南, 要积极采取相应措施提高人与自然的协调发展水平。通过加强区域间的合作与交流, 实现各省市的共同发展, 提升全国协调发展水平。

此外, 我们必须加大创新投入力度。科技创新是推动协调发展的关键动力。地方政府应紧密结合地区工业和产业发展的实际情况, 制定科技政策和技术改革计划, 引导和激励行业及企业积极创新, 为经济增长注入源源不断的动力。同时, 加强对创新的支持

力度，鼓励技术实力强大的企业引领地方产业集群发展，利用先进科技改造提升传统产业，实现人口、经济、环境的协调发展。

最后，我们需要进一步提升市场化水平。通过市场机制的高效运作，合理分配资源，减少地方政府对市场活动的直接干预，加速简政放权和放管结合的进程，并创新政府公共服务。通过实施减税降费政策，简化行政审批流程，确保市场监管的公正性，提升行政服务效率，从而充分激发市场活力。政府应致力于经济调节和市场监管，避免过度干预市场资源配置，以实现人口与经济的和谐增长。

综上所述，通过采取上述措施，我们能够有效应对人口负增长、经济转型与资源环境恶化的挑战，缩小省域间的发展差异，推进区域间的均衡与协调发展，为社会的长期稳定与繁荣奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 薄文广, 安虎森, 李杰. 主体功能区建设与区域协调发展: 促进亦或冒进[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 121-128.
- [2] 陈健, 郭冠清. 马克思主义区域协调发展思想: 从经典理论到中国发展[J]. 经济纵横, 2020, (06): 1-10. DOI:10.16528/j.cnki.22-1054/f.202006001.
- [3] 董亚宁, 顾芸, 杨开忠等. 公共服务、城市规模与人才区位——基于新空间经济学理论的分析[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(01): 132-139.
- [4] 范丽玉, 高峰. 中国省域人口、资源、经济与环境(PREE)系统耦合协调的时空演变特征与预测分析[J]. 生态经济, 2023, 39(03): 168-176.
- [5] 冯刚. 新农村建设中经济与生态保护协调发展模式研究[D]. 北京林业大学, 2008.
- [6] 冯江茹, 范新英. 中国区域协调发展水平综合评价及测度[J]. 企业经济, 2014, (08): 136-139. DOI:10.13529/j.cnki.enterprise.economy.2014.08.029.
- [7] 付云鹏, 马树才. 中国区域人口、经济与资源环境耦合的时空特征分析[J]. 管理现代化, 2015, 35(03): 31-33.
- [8] 高林安. 经济发展与生态环境耦合协调性识别与优化路径研究——以东北地区为例[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(01): 74-81.
- [9] 高霞, 孙兆刚. 区域数字经济与人口发展的耦合协调性空间差异研究[J]. 区域经济评论, 2023, (03): 23-31. DOI:10.14017/j.cnki.2095-5766.2023.0044.
- [10] 戈冬梅, 陈群利, 赖志柱. 中国省域旅游、经济与生态环境的耦合协调分析[J]. 生态经济, 2021, 37(04): 132-139.
- [11] 郭伟, 曾祥静, 杨硕. 区域经济、人居环境与旅游产业耦合协调度时空动态格局与空间溢出效应研究[J]. 生态经济, 2021, 37(09): 117-124.
- [12] 韩云霞. 我国人口、经济聚集与环境污染的空间演变及关联性分析[D]. 首都经济贸易大学, 2018.
- [13] 纪明, 曾曦昊. 新型城镇化与生态文明建设协调发展的时空演化预测及驱动机制研究[J]. 生态经济, 2022, 38(09): 212-220.
- [14] 蒋清海. 区域经济协调发展的若干理论问题[J]. 财经问题研究, 1995, (06): 49-54.
- [15] 蒋天颖, 华明浩, 许强等. 区域创新与城市化耦合发展机制及其空间分异——以浙江省为例[J]. 经济地理, 2014, 34(06): 25-32. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2014.06.024
- [16] 李汉卿. 协同治理理论探析[J]. 理论月刊, 2014, (01): 138-

142. DOI:10.14180/j.cnki.1004-0544.2014.01.021
- [17] 李恒吉, 曲建升, 庞家幸等. 甘肃省人口-经济-社会-资源-环境系统耦合协调及可持续发展时空综合测度研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(06):1622-1634.
- [18] 李佳, 赵伟, 骆佳玲. 成渝地区双城经济圈人口-经济-环境系统协调发展时空演化[J]. 环境科学学报, 2023, 43(02):528-540. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2022.0217.
- [19] 李兰冰. 中国区域协调发展的逻辑框架与理论解释[J]. 经济学动态, 2020, (01):69-82.
- [20] 廖东声, 庄定鹏. 长江经济带人口、经济与环境耦合协调发展分析及预测[J]. 河北环境工程学院学报, 2023, 33(05):43-49. DOI:10.13358/j.issn.2096-9309.2023.0523.01.
- [21] 刘娜娜. 时空效应下我国省域城镇化与生态环境协调值的测度研究[D]. 中国矿业大学, 2018.
- [22] 刘亚楠. 吉林省人口与经济协调发展研究[D]. 吉林大学, 2017.
- [23] 骆永民, 樊丽明. 中国农村人力资本增收效应的空间特征[J]. 管理世界, 2014, No. 252(09):58-76.
- [24] 齐晓娟, 童玉芬. 中国西北地区人口、经济与资源环境协调状况评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, (02):110-114.
- [25] 宋建波, 武春友. 城市化与生态环境协调发展评价研究——以长江三角洲城市群为例[J]. 中国软科学, 2010, (02):78-87.
- [26] 苏荟, 任梦珂, 时晓青. 中国数字经济与乡村振兴协同发展的时空差异及其演变趋势[J/OL]. 重庆大学学报(社会科学版), 1-18[2024-03-26].
- [27] 孙久文. 论新时代区域协调发展战略的发展与创新[J]. 国家行政学院学报, 2018, (04):109-114+151. DOI:10.14063/j.cnki.1008-9314.20180808.005.
- [28] 孙志燕, 侯永志. 对我国区域不平衡发展的多视角观察和政策应对[J]. 管理世界, 2019, 35(08):1-8. DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2019.0101.
- [29] 唐晓灵, 杜莉. 基于引力模型的区域经济发展与生态环境耦合协调研究——以陕西省为例[J]. 生态经济, 2020, 36(07):164-169.
- [30] 王少剑, 高爽, 黄永源等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, 75(06):1316-1330.
- [31] 王伟, 孙雷. 区域创新系统与产业转型耦合协调度分析——以铜陵市为例[J]. 地理

- 科学, 2016, 36 (02) :204-212. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2016.02.006
- [32] 王文波, 李鹏, 逯进. 山东省金融生态与经济增长耦合演化机制研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2016, 29 (03) :128-134.
- [33] 温煜华. 甘南黄河重要水源补给区生态经济耦合协调发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41 (12) :35-43.
- [34] 吴殿廷, 何龙娟, 任春艳. 从可持续发展到协调发展——区域发展观念的新解读[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2006, (04) :140-143.
- [35] 向宏桥, 郭婷. 旅游地复合系统协调发展评价——以焦作市为例[J]. 焦作大学学报, 2018, 32 (02) :54-58. DOI:10.16214/j.cnki.cn41-1276/g4.2018.02.014.
- [36] 肖周燕, 国光虎. 长三角地区人口、经济与环境的协调演变研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44 (09) :196-205. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.0377.21.338.
- [37] 徐康宁. 区域协调发展的新内涵与新思路[J]. 江海学刊, 2014, (02) :72-77+238.
- [38] 徐小鹰, 陈宓. 资源环境与高质量发展的耦合协调及空间关联——基于长三角城市群的数据分析[J]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 2023, 43 (09) :137-147+187. DOI:10.19898/j.cnki.42-1704/c.20230911.01.
- [39] 徐盈之, 吴海明. 环境约束下区域协调发展水平综合效率的实证研究[J]. 中国工业经济, 2010, (08) :34-44. DOI:10.19581/j.cnki.ciejournal.2010.08.004.
- [40] 杨亮洁, 杨海楠, 杨永春等. 基于耦合协调度模型的河西走廊生态环境质量时空格局演化[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30 (01) :102-112.
- [41] 姚先国, 张海峰. 教育、人力资本与地区经济差异[J]. 经济研究, 2008, (05) :47-57.
- [42] 于源, 黄征学. 区域协调发展内涵及特征辨析[J]. 中国财政, 2016, (13) :56-57. DOI:10.14115/j.cnki.zgcz.2016.13.028.
- [43] 张宇. 2000 年以来泛长三角市域人口与经济发展耦合协调过程及其机制研究[D]. 南京师范大学, 2019. DOI:10.27245/d.cnki.gnjsu.2019.000328.
- [44] 张雨乐, 秦峻歧. 基于人口—经济—资源—环境耦合协调度的空间溢出效应研究——以呼包鄂乌城市群为例[J]. 统计与管理, 2023, 38 (07) :80-90. DOI:10.16722/j.issn.1674-537x.2023.07.003.
- [45] 张媛媛, 卢荣旺, 唐波等. 贫困地区生态—经济系统脆弱性时空格局及障碍度研究——以粤北韶关市 8 县为例[J]. 生态经济, 2021, 37 (08) :213-220.
- [46] 赵传松, 任建兰, 陈延斌等. 中国科技创新与可持续发展耦合协调及时空分异研究[J]. 地理科学, 2018, 38 (02) :214-222. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.02.007

- [47] 赵芳. 中国能源-经济-环境(3E)协调发展状态的实证研究[J]. 经济学家, 2009, (12):35-41.
- [48] 赵霄伟. 新时期区域协调发展的科学内涵、框架体系与政策举措:基于国家发展规划演变的研究视角[J]. 经济问题, 2021, (05):24-30. DOI:10.16011/j.cnki.jjw.2021.05.005.
- [49] 甄俊杰, 师博, 张新月. 中国数字创新与经济高质量发展的协同效应及动态演进预测[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2023, 43(03):3-20. DOI:10.19559/j.cnki.12-1387.2023.03.001.
- [50] 张雨乐, 秦峻歧. 基于人口-经济-资源-环境耦合协调度的空间溢出效应研究——以呼包鄂乌城市群为例[J]. 统计与管理, 2023, 38(07):80-90. DOI:10.16722/j.issn.1674-537x.2023.07.003.
- [51] 肖周燕, 张亚飞, 李慧慧. 中国三大城市群高质量发展及影响因素研究——基于人口、经济与环境耦合协调视角[J]. 经济问题探索, 2023, (09):94-109.
- [52] 刘洁, 栗志慧, 周行. 双碳目标下京津冀城市群经济-人口-资源-环境耦合协调发展研究[J]. 中国软科学, 2022, (S1):150-158.
- [53] 李佳, 赵伟, 骆佳玲. 成渝地区双城经济圈人口-经济-环境系统协调发展时空演化[J]. 环境科学学报, 2023, 43(02):528-540. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2022.0217.
- [54] 傅崇辉, 傅愈, 钟柳青, 等. 粤港澳大湾区人口、经济与环境协同的影响机制研究[J]. 生态经济, 2022, 38(02):158-167.
- [55] 蔡绍洪, 谷城, 张再杰. 时空演化视角下我国西部地区人口-资源-环境-经济协调发展研究[J]. 生态经济, 2022, 38(02):168-175.
- [56] 苏胜亮. 宁夏回族自治区生态环境与经济发展耦合协调研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(02):367-374. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20201023.001.
- [57] Antonakakis N, Chatziantoniou I, Filis G. Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 68(Part 1):808-824.
- [58] Bretschger, L. Population Growth and Natural-Resource Scarcity: Long-Run Development under Seemingly Unfavorable Conditions. The Scandinavian Journal of Economics. 2013, 115(3), 722-755.
- [59] Campbell O A, Agbiokoro T C. Human Capital and Economic Growth: A Three Stage

Least Squares Approach[J].Social ence Electronic Publishing, 2014.

[60] Charles Perrings. Resilience in the Dynamics of Economy-Environment Systems. Environmental and Resource Economics 11(3-4):503-520.1998.

[61] Dinda S. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey[J]. Ecological Economics, 2004,49(4):431-455.

[62] Gallo L J .Space-time analysis of GDP disparities among European regions :Amarkov chains approach[J] . International Regional Science Review2004(02): 138-163.

[63] Harris J R, Todaro M P. Migration, Unemployment & Development: A Two-Sector Analysis[J]. American Economic Review,1970,60(1):126-142.

