

全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度及其时空趋势分析

严浩原¹, 罗俊韦¹, 田子晗¹, 徐仁恺¹, 魏慧莹²

¹长春理工大学数学与统计学院, 吉林 长春

²长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年6月11日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月15日

摘要

在大数据人工智能背景下, 本文以智能交通运输与经济协调发展为研究对象, 通过网络爬虫技术获取多维度时间序列数据, 经清洗和插值处理后构建评价指标体系, 采用熵权法-TOPSIS法对全国31个省份进行评分, 发现广东、上海等省份经济与交通发展水平存在显著差异。基于耦合协调模型将省份划分为高水平耦合、协调上升、过渡和失调衰退四类, 揭示区域发展不均衡特征。进一步通过灰色GM(1, N)模型对8个代表省份进行协调性预测与时空趋势分析, 结果表明协调度较高省份发展态势良好, 而低协调度省份需优化两者互动关系以实现可持续发展。研究创新性融合多模型方法, 量化了智能交通与经济协同效应, 为政府制定区域差异化政策提供了科学依据。

关键词

熵权-TOPSIS, 耦合协调计算模型, 灰色GM(1, 2)协调性分析模型, 灰色预测GM(1, 1)模型

Statistical Measurement and Spatiotemporal Trend Analysis of the Coordinated Development between Intelligent Transportation and Economy in China

Haoyuan Yan¹, Junwei Luo¹, Zihan Tian¹, Renkai Xu¹, Huiying Wei²

¹School of Mathematics and Statistics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Jun. 11th, 2025; accepted: Jul. 2nd, 2025; published: Jul. 15th, 2025

文章引用: 严浩原, 罗俊韦, 田子晗, 徐仁恺, 魏慧莹. 全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度及其时空趋势分析[J]. 统计学与应用, 2025, 14(7): 62-89. DOI: 10.12677/sa.2025.147186

Abstract

Under the background of big data and artificial intelligence, this study focuses on the coordinated development of intelligent transportation and the economy. Multi-dimensional time-series data were obtained through web crawling technology, and an evaluation index system was constructed after data cleaning and interpolation. The entropy weight-TOPSIS method was employed to score 31 provinces in China, revealing significant disparities in the development levels of the economy and transportation in provinces such as Guangdong and Shanghai. Based on the coupling coordination model, the provinces were categorized into four types: high-level coupling, coordinated rise, transition, and imbalanced decline, highlighting the uneven regional development characteristics. Further, the gray GM(1, N) model was used to predict coordination and analyze spatiotemporal trends for eight representative provinces. The results indicate that provinces with higher coordination degrees exhibit favorable development trends, while those with lower coordination degrees need to optimize their interactive relationships to achieve sustainable development. This study innovatively integrates multiple modeling methods to quantify the synergistic effects of intelligent transportation and economic development, providing a scientific basis for governments to formulate regionally differentiated policies.

Keywords

Entropy Weight-TOPSIS, Coupling Coordination Model, Gray GM(1, 2) Coordination Analysis Model, Gray Prediction GM(1, 1) Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

近年来,随着中国经济的快速增长和城市化进程的加速推进,智能交通运输产业发展迅速,交通运输与经济协调发展的发展结构引起广泛关注。交通运输作为基础和先锋产业,在国民经济中扮演着重要角色,其发展不仅支撑日常社会活动的顺畅运行,还推动经济稳定增长,而良好的经济基础也为交通运输产业起到正向的推动作用,了解交通运输与经济的相互作用和时空趋势具有重要意义。因此,对全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测进行研究,具有重要的学术和实践价值。

首先,全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度有助于客观地评估中国交通运输与经济协调发展情况。经济发展,交通先行,完善交通网建设是实现生产要素自然流通的核心要义。交通运输的进步能够带来“乘数效应”,是经济发展的重要基础和支撑。统计测度可以帮助了解交通运输与经济协调发展的相互关系、不同地区之间的差异,以及变化发展趋势,从而客观地评估各省交通运输与经济协调发展的协调性,为政策制定提供科学依据。

其次,全国智能交通运输与经济协调发展的预测有助于了解未来几年内各省发展趋势和应对挑战。交通运输与经济协调发展的协调性会面临很多挑战,如经济发展滞后、交通运输产业不健全等。通过对智能交通运输与经济协调发展的预测,可以为未来的发展做出合理的判断,及时发现潜在问题和解决可能出现的问题,提前制定相关的政策与措施,推动各地区交通运输与经济协调发展。

此外,全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测还对学术研究和国际具有重要的参考价值。通过研究中国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测,可以探索交通运输与经济的协调发展机制,同时,将中国交通运输与经济协调发展情况与其他国家、地区进行对比,可以了解不同国家及地区协调发展机制的异同,为跨国比较和经验总结提供宝贵的参考价值。

综上所述,全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测在学术和实践上都具有重要意义,通过深入研究和分析各省交通运输与经济协调发展的协调性、差异和未来发展趋势,可以为政府政策的制定、发展规划和学术研究提供科学支持。同时,这一研究也有助于更好地理解交通运输与经济协调发展的协调机制和作用效果,为推动中国现代化建设提供指导和参考,促进中国社会的可持续发展。当下,对各省的智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测具有重要的理论和实践意义。

交通运输具有正外部性特性,健全的交通运输系统能够有效地连接各个生产和消费中心,降低物流成本,提高整体经济效率,从而直接推动地区经济的增长。而交通运输也存在负外部性,如土地资源过度使用等。合理进行交通基础设施建设能够极大推动经济增长,此外,经济对交通运输也具有反作用,两者是相互推动、相互促进的关系,构成耦合的结构体。因此,通过对全国交通运输与经济协调发展的统计测度和预测进行深入研究,能够为各省实践情况提供客观的评估,有助于政策的合理制定,促进产业[1]结构优化,及交通运输与经济协调发展的相互配合,推动中国现代化建设向着更加科学、可持续的方向发展。

1.2. 研究意义

这一研究对于全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测具有以下几方面的研究意义。

1.2.1. 理论意义

在现有的研究中,虽然许多学者倾向于选择一种或几种具体的交通模式来探讨其与经济发展的关系,但很少有研究涉及使用整体的交通运输系统来计算其与经济的耦合作用。本文试图使用一个适用于各省的测度方法来测度智能交通运输与经济协调发展的协调性。同时构建耦合协调度计算模型和灰色动态 GM(1, N)模型对全国代表省份进行交通运输与经济发展协调性的统计测度,该方法有效克服交通运输与经济发展评价指标数据量不大,规律性不强等问题,同时克服滞后性和局限性,具有较好的客观性。理论上为研究全国智能交通运输和经济发展的协调关系提供了测度方法。

1.2.2. 指导决策和管理实践意义

基于对全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测,政府可以作出科学决策,合理安排交通基础设施资源配置,优化公共服务,推动经济社会发展与人民生活水平提升。同时,对于城市交通规划领域的管理实践,也可以依据智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测结果,提供科学依据和参考,从而更好地满足人民群众的需求和期望,推动中国现代化建设。

1.2.3. 评估协调性效果意义

通过对全国智能交通运输与经济协调发展的统计测度和预测,可以深入评估中国各省智能交通运输与经济发展协调性的实际情况,了解各地区协调发展的差异,有助于判断政策实施的效果,并及时作出调整与优化发展战略。推动大数据背景下中国现代化建设朝着利于人民群众的方向进行。

1.3. 研究问题

本文主要研究问题可以概括为:通过选择合适的统计测度和预测方法,全面、客观地评估全国智能交通运输与经济协调发展的协调性和演变趋势,并为政府决策和发展战略的优化与调整提供科学依据。

1.4. 研究内容

本文选取了三十一一个省份的数据，首先采用结合熵权法和 TOPSIS 的综合评价方法对全国各省交通运输与经济发展协调性进行测度与分析，再利用耦合协调度评价模型对不同省份的交通运输与经济发展的协调性进行比较与分类，并从每大类中选择代表性省份，并运用灰色动态 GM(1, N) 预测模型对未来交通运输与经济发展情况进行预测。研究将构建交通运输与经济发展两大类指标的评估体系，运用熵权法对经济与交通的指标权重进行确定，从而得出不同时期三十一个省经济与交通系统的综合评价结果。同时，研究还将利用耦合协调度模型对评估结果进行分类，以交通运输与经济发展的协调性为依据，将三十一个省划分为四个大类，探究中国经济与交通运输发展协调性的分布情况。最后，研究建立灰色动态 GM(1, N) 预测模型，对未来交通运输与经济发展情况进行预测，为政府和决策者提供科学参考和决策支持，促进中国经济和交通的可持续发展，推动了中国现代化进程，为其他地区的研究提供指导和参考(见图 1)。

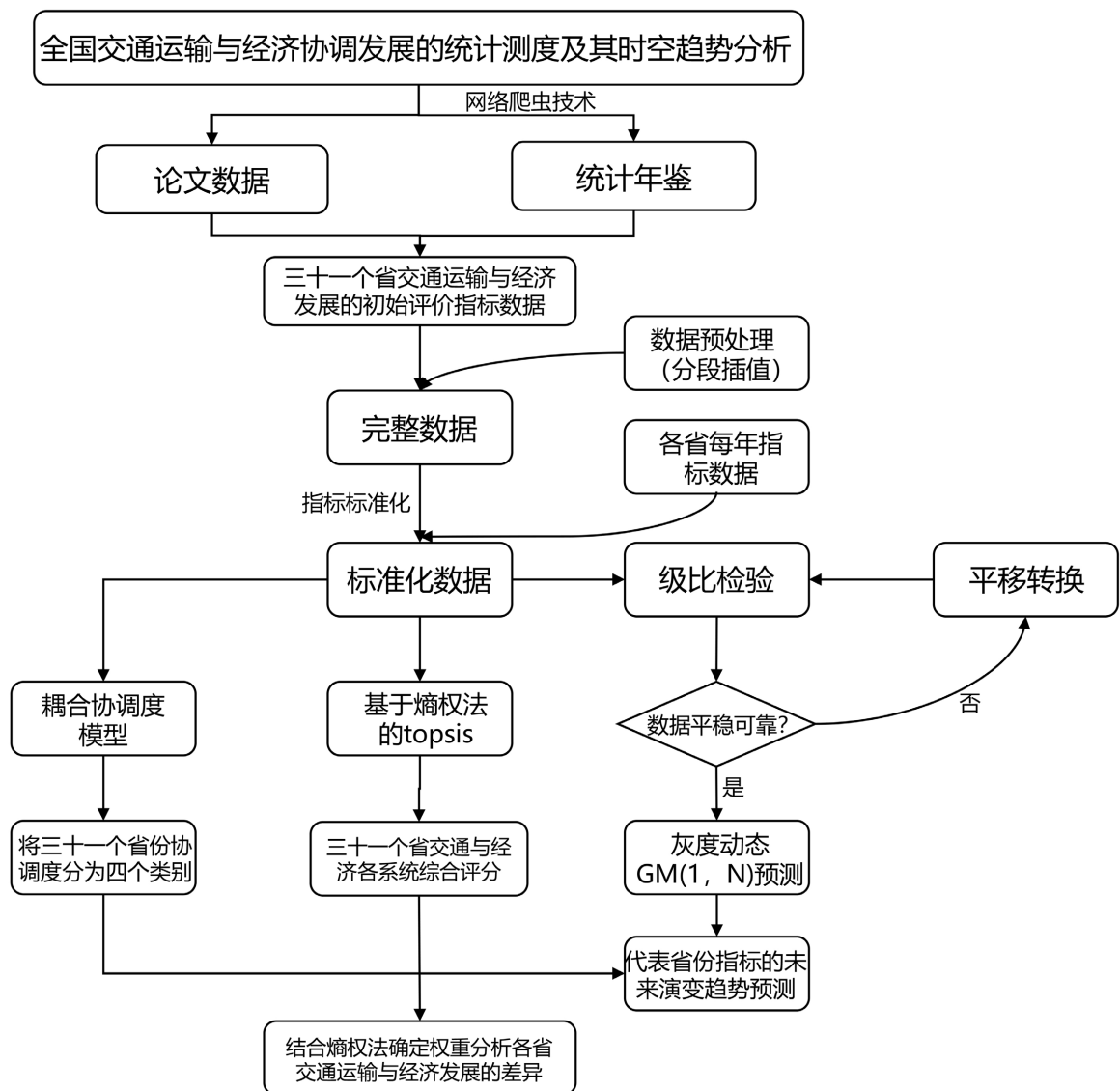


Figure 1. Flowchart of the modeling process

图 1. 建模流程图

2. 文献综述

2.1. 国外研究现状

自古以来, 交通运输在国际经济发展中扮演了至关重要的角色。从古代的陆上丝绸之路到海上的香料路线, 交通运输的发展促进了不同文明之间的经济、文化、技术和政治的交流和互动。随着时间的推移, 现代交通工具如铁路、汽车和飞机的发明, 以及随之而来的基础设施建设, 极大地加快了全球的经济一体化。世界各地的资源和产品可以更快捷、更便宜地进行交换。因此, 学者们已经广泛认识到交通运输的重要性, 并对其与区域经济的影响进行了深入研究。

其中众多学者针对经济与交通运输的协调发展进行了深入研究, 例如 Aschauer [2] (1989 年) 构建了 C-D 生产函数模型分析了美国基础设施的产出弹性, 从中分析出交通对经济发展具有明显的推动作用。之后, Huang Qian 和 Harata Noboru [3] (2010 年) 构建了向量回归和误差修正模型来具体讨论了经济投资对交通运输的影响。Takatsuka Hajime [4] 等(2013 年) 研究了运费降低如何促进企业间竞争、打破行业垄断, 并推动经济和技术进步。这些研究为理解交通运输与经济发展之间的复杂关系提供了多角度的视野和深入的分析。

2.2. 国内研究现状

1978 年后, 改革开放促使中国经济持续快速增长, 中国逐渐成为世界第二大经济体。然而, 这一时期的交通运输发展却相对滞后, 这种不平衡在很大程度上限制了经济的进一步发展。如何改变这一现状, 构建出一个智能协调的交通运输与经济发展体系成为了国内学术界新的重要研究方向。其中关于交通运输推动经济发展的研究中, 刘建强[5] (2020) 与陈古强[6] (2020) 的研究强调交通运输对区域经济的推动与支撑作用, 指出交通基础设施的发展水平是区域经济竞争力的直接体现。秦四平[7] (2007) 指出交通运输的发展不仅带动沿线区域经济增长, 还能通过减少交通时间与成本直接促进经济效益, 产生溢出效应。同时, 研究也显示, 交通运输的发展能够提高区域在招商引资和人才吸引方面的竞争力, 从而推动经济增长(曹小曙[8], 2021)。

同时关于区域经济发展拉动交通发展的研究中, 刘程军[9] (2019) 提出, 随着经济要素的空间转移需求的增强, 对交通运输的需求也随之增大, 进而推动交通运输能力和效率的提升。但与此同时李媛[10] (2018) 指出, 政府在进行交通运输投资时应进行详尽的调查, 过度投资会造成资源的浪费和滥用, 不利于区域的综合发展。同时董晓芳[11] (2018) 观察到, 在经济达到一定较高水平后, 产业内容已经转变为以 IT 技术、金融行业等一系列高端服务领域为核心方向, 与交通运输行业的联系有限。因此, 交通运输能力在这一阶段可能不会对区域经济增长产生显著的推动效果。

综上所述, 交通运输能力和区域经济发展是具有显著密切联系的, 两者在自我发展的同时, 也会对另一方的发展造成影响, 若交通运输[12]能力满足不了该区域的发展需求, 一定程度上也会限制该区域的经济增长, 同时, 经济增长也为交通运输的发展保驾护航。所以如何合理的协调交通运输与经济发展成为了研究的关键。

3. 前期准备工作

3.1. 评价指标的构建

评价指标体系可以帮助我们更全面、更客观地了解事物的发展情况。通过构建合适的评价指标体系, 我们可以对交通运输和经济发展两个系统的综合状况进行全面评估, 并提供可靠的数据基础来支持后续的耦合协调度分析和灰色关联 GM(1, N) 预测。本文在综合现有文献的基础上, 保证指标能客观反映交通

运输与经济发展的核心特征，避免主观偏差、使指标能反映时间趋势变化，支持长期协调性分析。构建了交通运输与经济发展协调性评价指标体系。该体系包含两个子系统：经济系统选取了 8 个指标，主要反映地区经济规模、产业结构和民生水平；交通运输系统选取了 7 个指标，重点覆盖基础设施、运输能力和服务水平等维度。这些指标通过系统编号(如表 1 所示)，完整展现了交通运输与经济在社会生产、居民生活等关键领域的互动关系，为后续协调性测度提供了全面、可靠的量化基础。

Table 1. Classification and labeling of indicators
表 1. 指标分类及标号

系统	一级指标	二级指标	单位	指标属性
经济	经济发展规模	GDP (x1)	元	正
		进出口总额(x2)	美元	正
		一般公共预算(x3)	元	正
	产业发展结构	第二产业产值占 GDP 比重(x4)	%	负
		第三产业产值占 GDP 比重(x5)	%	正
		人均 GDP (x6)	元	正
	经济发展效益	居民人均可支配收入(x7)	元	正
		城镇化率(x8)	%	正
交通 运输	交通运输能力	客运总量(x9)	万人	正
		货运总量(x10)	万吨	正
		旅客周转量(x11)	亿人公里	正
		货运周转量(x12)	亿吨公里	正
	交通运输基础设施 建设	公路总里程(x13)	公里	正
		高速公路总里程(x14)	公里	正
		铁路营业里程(x15)	公里	正

评价指标的选择具有代表性，能够正确地反映交通运输系统与经济系统各自的综合情况，并且可以衡量不同省份之间的差异。因此，合理的指标体系具有重要的应用价值和实践意义，能够为政策制定和决策提供理论依据。

通过科学统计和分析，该评价指标体系的结果可以提供有价值的信息，用于综合评估交通运输系统和经济系统，分析两系统间的协调度，促进交通与运输间的协调发展。

3.2. 数据获取及预处理

3.2.1. 数据的获取

在传统的收集数据方法中，研究者通常依赖于人工收集数据，这种方式不仅效率较低且耗费大量的时间和人力资源。因此，我们采用网络技术爬取数据和收集。网络爬虫技术是一种自动化的网页抓取技术，主要用于从互联网上收集信息，通过模拟人类浏览器的行为，系统地访问网页并提取所需数据。相比于传统的人工查找方式，网络爬虫技术具有以下优势：

- (1) 高效性：网络爬虫可以自动化地访问网页和收集数据，大幅度减少人工干预，提高数据收集的效率和准确性。
- (2) 多样性：网络爬虫能访问互联网上极其庞大和多样的数据源，收集各种类型的数据(文本、图片、视频等)，为数据分析和商业洞察提供丰富的资源。

(3) 实时性：网络爬虫可以提供实时数据抓取和报告，帮助用户快速响应市场和信息变化。

网络爬虫具体步骤可以概括为以下几个关键步骤：

(1) 明确数据和来源的定义：在任何爬虫任务开始之前，首先要确定要抓取的数据类型和具体目标，包括确定目标网站、所需数据的格式及用途。

(2) 解析目标网站的结构：研究和分析目标网站的页面布局和结构，理解其 URL 模式和数据的存放位置，这有助于规划如何有效地爬取所需信息。

(3) 执行 HTTP 请求：使用自动化工具向目标网址发起请求，模仿浏览器行为以访问和获取网页数据。这通常涉及发送 GET 或 POST 请求，并适当处理 cookies 和 headers 等信息。

(4) 内容抓取和数据提取：在获取网页后，使用专门的库(例如 BeautifulSoup 或 lxml)来解析 HTML 内容，并从中提取所需数据。根据页面的编码和结构，可能会用到复杂的 XPath 或正则表达式技术来定位所需数据。

确立评价指标后，我们先从多个数据来源获取相关数据。其中，使用 python 爬虫技术从国家统计局、各级统计年鉴、相关政府部门网站等官方数据库爬取包括经济、交通等多维度指标的时间序列数据，用于构建评估体系和统计测度。此外，本文还参考了相关文献和其他学者的研究成果，获取已有的经济与交通各系统的研究数据。

3.2.2. 数据预处理

在本文中，我们对从数据网站和统计年鉴获得的各级指标数据进行数据预处理。首先，对爬虫的数据进行数据清洗工作，这涉及到验证数据集的完整性、一致性以及准确性。对于那些缺少较少且连续的值的数，采用根据其前后数据点的趋势进行线性插值的方法来补全这些缺失的数据，其公式如下：

$$y_0 = y_1 + (x_0 - x_1) * ((y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)) \quad (1)$$

其中 x_1, x_2 为缺失值前后的自变量， x_0 为代估算缺失值的自变量值； y_1, y_2 为已知缺失值前后的因变量， y_0 为带估算的缺失值的因变量值。对于缺失数据较多或间断性的情况，我们通常采用分段插值法来处理这些缺失值。这种方法的核心是将涉及缺失值的时间范围划分为若干较小的区间，并在这些小区间内分别进行插值，以此来实现数据的补充。下面是一种常见的分段插值公式及符号说明：

设待插值的一段时间为 $[t_1, t_2]$ ，其中 t_1 表示时间段的起始时刻， t_2 表示时间段的结束时刻。

假设在时间段内存在 m 个已知数据点，分别为：

$$(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_i, y_i), \dots, (t_m, y_m) \quad (2)$$

其中 y_i 表示已知数据点在 t_i 时刻的取值。

要对时间段内的缺失值进行插值，可以使用分段插值方法，假设缺失值所在的时间点为 t ，且 $t_1 < t < t_2$ 。则分段插值公式为：

$$y(t) = y_1 + [(y_2 - y_1) / (t_2 - t_1)] * (t - t_1) \quad (3)$$

其中， $y(t)$ 表示在时间点 t 处的插值结果， y_1 和 y_2 分别表示已知数据点在 t_1 和 t_2 时刻的取值， t_1 和 t_2 分别表示时间段的起始和结束时刻。

4. 全国智能交通运输与经济发 展的统计测度

4.1. 数据及变量说明

本文数据均来源于中国统计年鉴、各省统计年鉴和论文数据，见表 2。

Table 2. Notation and descriptions
表 2. 符号说明

序号	符号	符号说明
1	$\widetilde{x}_i$	二级指标
2	p	概率矩阵
3	e_j	信息熵
4	d_j	信息效用值
5	W_j	熵权
6	Z	决策矩阵
7	C	耦合程度
8	U_1	交通运输发展指数
9	U_2	经济发展指数
10	D	耦合协调度
11	$-a_1$	发展系数
12	$a_2, \cdots, a_n$	驱动系数
13	$X^{(0)}$	原始序列
14	E	残差序列
15	$\rho(k)$	相对残差
16	$\rho(k)$	级比偏差

4.2. 基于熵权-TOPSIS 的评价模型及耦合协调度分析模型

4.2.1. 熵权法

熵权法是一种用于多指标决策分析的方法，通过计算指标的熵值来评估它们在决策过程中的重要性。这种方法的核心思想在于指标之间的熵值越高，说明它在决策中具有更大的作用和影响力，应当赋予更高的权重。因此，熵权法通过量化各指标之间的重要性，为决策提供科学的方法论[13]。在实际应用过程中，首先需要选定相关指标和样本数据，接着对数据进行必要处理，然后计算熵权系数和权重，最后进行综合评估，得到最终的评价排名。具体步骤如下：

(1) 正向化：对于 2013~2022 年各省的每个二级指标，我们将其设为一个向量序列 $\{x_i\} (i = 1, 2, \cdots, 15)$ ：

对于正向指标，我们用下面公式对其进行标准化：

对于负向指标，我们用下面公式对其进行标准化：

$$\widetilde{x}_i = \frac{\max \{x_i\} - x_i}{\max \{x_i\} - \min \{x_i\}} \quad (4)$$

由此得到每个指标的正向化向量。

(2) 对于已经正向化的向量，我们构建标准化矩阵 Z ：

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2j} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 i 为省份数量, j 为二级指标个数。 Z 中元素可以表示为:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (6)$$

判断矩阵 Z 中是否包含负数, 若包含, 我对 x 进行额外的标准化, 其方法如下:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (7)$$

(3) 计算第 j 项下第 i 个样本所占的比重, 并作为相对熵中所需要的概率。对于有 n ($n=31$) 个要评价省份, m ($m=15$) 个系统指标, 通过上述计算可得非负矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdots & Z_{2m} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \cdots & Z_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

计算概率矩阵 p , 其中 p_{ij} 计算如下:

$$p_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad (9)$$

可得: $\sum_{i=1}^{31} p_{ij} = 1$, 即每个指标所有评价对象的概率求和为 1。

(4) 计算信息熵和信息效用, 再进行归一化, 获得各指标熵权值。指标信息熵的计算公式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, 15) \quad (10)$$

信息效用值计算公式:

$$d_j = 1 - e_j \quad (11)$$

信息效用值越大, 则所含信息越多。对信息效用值进行归一化, 得到各指标熵权值:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (j=1, 2, \dots, 15) \quad (12)$$

由上述公式可得各二级指标的权重。

4.2.2. 结合熵权法的权重进行 TOPSIS 评价

针对已经构建的决策矩阵 Z 和熵权法确定的各指标权重 w , 首先定义正理想解[14]:

$$\begin{aligned} Z^+ &= (Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+) \\ &= (\max\{Z_{11}, Z_{21}, \dots, Z_{n1}\}, \max\{Z_{12}, Z_{22}, \dots, Z_{n2}\}, \dots, \max\{Z_{1m}, Z_{2m}, \dots, Z_{nm}\}) \end{aligned} \quad (13)$$

其次, 定义负理想解:

$$\begin{aligned} Z^- &= (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-) \\ &= (\min\{Z_{11}, Z_{21}, \dots, Z_{n1}\}, \min\{Z_{12}, Z_{22}, \dots, Z_{n2}\}, \dots, \min\{Z_{1m}, Z_{2m}, \dots, Z_{nm}\}) \end{aligned} \quad (14)$$

定义第 $i(i=1,2,\dots,31)$ 个省份与正理想解的距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - Z_{ij})^2} \quad (15)$$

定义第 $i(i=1,2,\dots,31)$ 个省份与负理想解的距离:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- - Z_{ij})^2} \quad (16)$$

由此, 计算得出第 $i(i=1,2,\dots,31)$ 个省份未归一化的得分:

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (17)$$

最后对每个省得分进行归一化:

$$S'_i = \frac{S_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_i}} \quad (18)$$

4.2.3. 耦合模型

耦合指多个系统之间的相互连接、相互协调, 因此, 我们借助耦合度来观察两个系统之间的协调性。本文结合系统耦合原理, 建立“交通-经济”耦合度模型, 公式如下。该模型可以客观准确地分析各省交通运输和经济之间的协调程度。

$$C = \sqrt{\frac{U_1 \times U_2}{(U_1 + U_2)/2^2}} \quad (19)$$

其中, C 为耦合程度, U_1 为交通发展指数, U_2 为经济发展指数。 C 范围: $[0,1)$, C 趋近 1 时, 说明“交通-经济”耦合度越大, 系统为良性耦合阶段, 向有序方向发展; C 趋近 0 时, 说明“交通-经济”耦合度越小, 系统影响程度变弱, 两者往无序方向发展。

4.2.4. 耦合协调计算模型

Table 3. Evaluation criteria for the coordination degree of the transportation-economy coupling model

表 3. “交通运输-经济”耦合模型协调度评价标准

类型	协调度 D	协调等级
失调衰退型	极度失调	$0 < D \leq 0.099$
失调衰退型	严重失调	$0.099 < D \leq 0.199$
失调衰退型	中度失调	$0.199 < D \leq 0.299$
失调衰退型	轻度失调	$0.299 < D \leq 0.399$
过渡类型	濒临失调	$0.399 < D \leq 0.499$
过渡类型	勉强协调	$0.499 < D \leq 0.599$
协调上升	初级协调	$0.599 < D \leq 0.699$
协调上升	中级协调	$0.699 < D \leq 0.799$
高水平耦合类型	良好协调	$0.799 < D \leq 0.899$
高水平耦合类型	优质协调	$0.899 < D \leq 0.999$

本文建立的耦合模型虽然可以反映两个系统之间的作用程度[15],但并不可以正确展示出“交通运输 - 经济”两者之间是良性作用还是恶性作用。例如,当交通运输与经济都处于较低水平,两者水平较为持平时,耦合度高,但两者属于恶性作用,对此,单单看耦合模型并不能有效解决问题。

为了克服上述问题,我们借助耦合协调度 D ,从影响大小、协调程度两方面评估交通运输与经济发展的协调程度。耦合协调度 D 公式如下:

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{20}$$

$$T = a \times U_1 + b \times U_2 \tag{21}$$

其中, T 表示“交通运输 - 经济”综合评价指数, U_1 为交通发展指数, U_2 为经济发展指数。 a, b 为待定参数,我们取值 $a = 0.5, b = 0.5$ 。

本文参考学者高楠关于耦合协调度等级划分标准,将“交通运输 - 经济”耦合协调度归类为 10 个等级,见表 3。

4.2.5. 问题求解

我们利用上述模型计算出 2013 年至 2022 年期间 31 个省份交通运输系统综合评分和经济系统综合评分,并对其进行均值处理。通过上述操作,我们计算得到每个省份的平均评分。为更好地展示数据结果,我们将评分设定为 100 分,并在此基础上进行均值处理。这样处理得到的结果是各省的评分表,部分数据如表 4 和表 5 所示。

Table 4. Economic system scores by province
表 4. 各省经济系统评分表

省份	2013	2014	...	2021	2022	平均分	排名
北京	54.0895	55.1828	...	53.7712	57.3487	54.3255	4
天津	27.2801	28.5242	...	26.0564	26.4401	27.1352	7
河北	15.2450	15.0509	...	15.9436	16.2571	15.0494	17
山西	9.9969	9.8090	...	10.6592	12.4081	10.2589	26
内蒙古	15.6160	16.2416	...	14.4002	16.3208	14.8804	18
辽宁	20.5009	20.4739	...	16.8071	16.7274	18.1591	10
吉林	9.5466	9.2744	...	10.5737	10.0800	9.6689	29
黑龙江	11.5357	12.6771	...	12.3771	11.2887	12.7204	19
上海	51.9924	54.7521	...	59.4877	60.6585	57.4406	2
江苏	53.2715	54.3321	...	60.7467	62.3969	56.2913	3
浙江	38.4324	39.3487	...	52.3015	56.3257	44.6712	5
安徽	13.3310	13.6483	...	17.3303	18.1115	15.1329	16
福建	23.2025	24.3197	...	28.9411	30.8466	25.5570	8
江西	10.1409	10.5807	...	13.4825	14.7869	11.6510	23
山东	32.6031	33.3472	...	37.9180	39.9658	34.0950	6
河南	16.1417	16.6616	...	19.0697	18.9114	17.4419	13
湖北	16.7010	17.9240	...	19.2143	20.0850	18.1055	12
湖南	14.7733	15.4073	...	17.5134	18.2431	16.2039	15
广东	73.1381	70.9978	...	72.1911	71.9943	70.7770	1
广西	13.0798	13.5118	...	12.7481	12.4400	12.6943	21

续表

海南	18.9795	20.3213	...	17.4202	15.9097	18.3128	9
重庆	15.7903	17.0746	...	18.0526	18.7346	16.7507	14
四川	16.2291	16.8414	...	20.7557	21.3842	18.1115	11
贵州	11.3013	10.3063	...	10.1291	10.0948	9.9706	28
云南	13.6812	14.2512	...	12.1731	11.7578	12.7044	20
西藏	15.9405	16.4368	...	9.5462	8.8930	11.6496	24
陕西	11.7964	12.3617	...	13.5371	15.0358	12.3412	22
甘肃	8.7021	9.3056	...	9.4762	8.6267	10.0554	27
青海	11.8023	12.6530	...	7.7109	6.8817	9.2704	30
宁夏	10.4135	10.4542	...	7.9975	8.3844	8.6852	31
新疆	11.8939	12.3823	...	9.9769	10.0692	11.0593	25

Table 5. Transportation system scores by province

表 5. 交通运输系统评分表

省份	2013	2014	...	2021	2022	平均分	排名
北京	16.7770	15.1478	...	17.8405	18.4911	15.7944	26
天津	13.9021	12.6272	...	10.6340	9.9922	10.6119	27
河北	61.2901	55.8417	...	49.7130	46.6529	52.8172	5
山西	32.6456	30.4517	...	29.1676	28.3502	29.1786	20
内蒙古	42.5092	38.3538	...	34.9576	35.1404	37.3349	13
辽宁	58.8468	52.4652	...	30.9184	30.0576	43.5079	12
吉林	22.6219	20.4436	...	17.6533	16.9266	19.0985	25
黑龙江	31.9549	28.6569	...	20.9711	21.2837	24.5780	23
上海	40.3631	41.5617	...	49.4123	45.8532	46.0170	9
江苏	60.9106	56.1805	...	54.9343	55.7310	53.3955	4
浙江	53.7587	48.3864	...	49.7865	51.6766	49.1977	7
安徽	69.5546	65.9227	...	50.1662	49.1445	54.9507	3
福建	30.1953	28.8538	...	31.5335	35.4611	30.6997	18
江西	37.9909	35.2468	...	36.0225	38.4260	35.5199	14
山东	57.8816	51.5466	...	52.3190	53.4484	52.3039	6
河南	63.3719	58.3224	...	54.4998	55.8021	55.4278	2
湖北	46.8288	45.5163	...	42.0773	46.4526	44.5751	10
湖南	56.7955	53.3814	...	44.5043	49.1668	47.7929	8
广东	70.2589	76.0008	...	76.0761	78.6012	77.2700	1
广西	33.2785	31.3033	...	35.4330	38.7841	33.0820	16
海南	5.1614	6.0960	...	16.8181	18.4493	8.3220	29
重庆	25.8728	24.3671	...	26.7703	26.7028	25.5459	22
四川	49.0081	45.7078	...	45.1208	47.3021	44.1836	11

续表

贵州	30.9379	29.8637	...	28.6703	32.2658	31.2027	17
云南	29.6641	27.8615	...	31.6481	35.7897	29.3222	19
西藏	5.8927	6.1027	...	7.4004	7.3511	6.6564	30
陕西	38.4942	35.5699	...	30.4755	31.3222	33.6289	15
甘肃	24.9809	23.9752	...	23.4333	23.7792	24.0145	24
青海	9.0873	9.6395	...	9.9324	10.3302	10.0525	28
宁夏	7.7783	6.8914	...	6.2446	6.1862	6.5207	31
新疆	29.0633	28.2603	...	26.5804	29.8517	26.2964	21

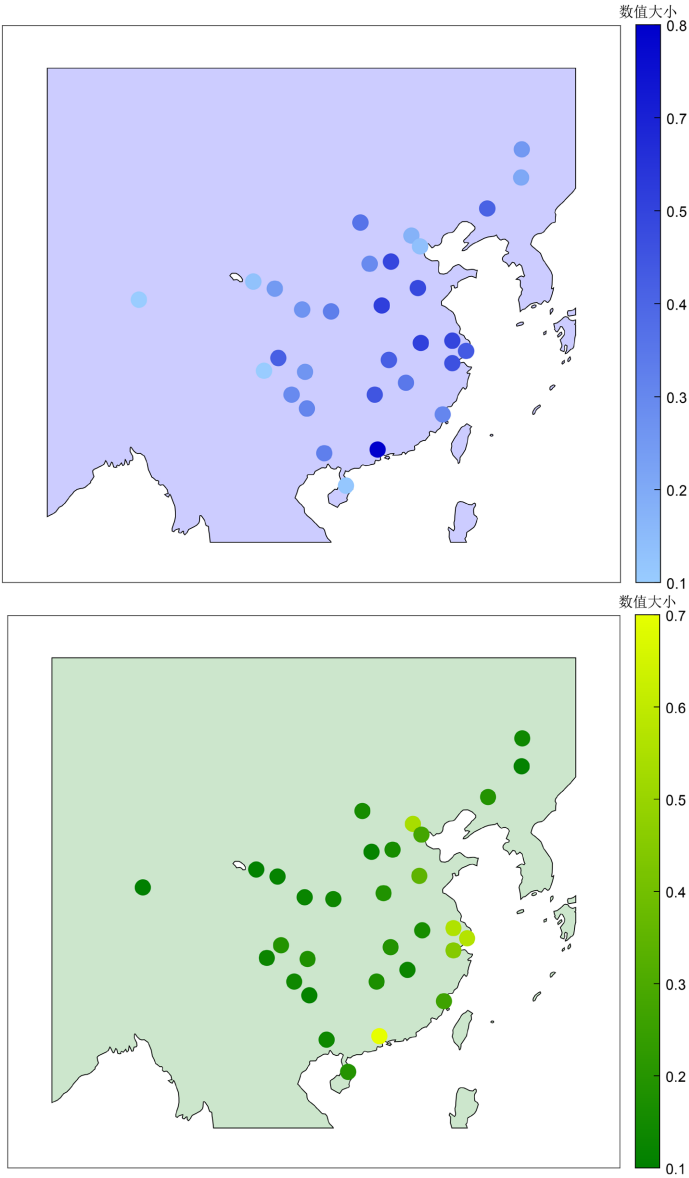


Figure 2. Distribution of comprehensive evaluation scores for economic and transportation systems
图 2. 经济与交通系统综合评价分布图

利用 MATLAB 对上述评分表进行可视化分析, 结果如图 2。

此外, 我们还计算了各省的耦合协调度, 并按照协调度的值进行划分梯队, 结果如表 6 所示。

Table 6. Calculation of coupling coordination degree

表 6. 耦合协调度计算表

省份	2013	2014	...	2021	2022	平均分	协调等级
广东	0.995	0.995	...	0.995	0.995	0.995	10
江苏	0.874	0.848	...	0.867	0.871	0.8431	9
上海	0.775	0.781	...	0.837	0.818	0.8135	9
浙江	0.765	0.736	...	0.808	0.829	0.7686	8
山东	0.74	0.71	...	0.745	0.758	0.7203	8
河南	0.575	0.554	...	0.595	0.601	0.5726	6
北京	0.6	0.564	...	0.592	0.607	0.5724	6
福建	0.546	0.535	...	0.59	0.623	0.561	6
湖北	0.538	0.537	...	0.555	0.583	0.5477	6
四川	0.537	0.521	...	0.583	0.6	0.5447	6
辽宁	0.627	0.593	...	0.479	0.479	0.5428	6
安徽	0.53	0.51	...	0.559	0.57	0.5309	6
湖南	0.533	0.518	...	0.543	0.572	0.5307	6
河北	0.553	0.518	...	0.538	0.539	0.5279	6
内蒙古	0.507	0.486	...	0.463	0.497	0.4767	5
重庆	0.441	0.434	...	0.472	0.482	0.4496	5
广西	0.427	0.409	...	0.437	0.453	0.4228	5
陕西	0.413	0.398	...	0.431	0.464	0.4139	5
云南	0.425	0.409	...	0.411	0.43	0.408	5
江西	0.356	0.337	...	0.452	0.49	0.4014	5
天津	0.451	0.423	...	0.379	0.37	0.3895	4
黑龙江	0.385	0.38	...	0.364	0.358	0.384	4
新疆	0.384	0.371	...	0.338	0.372	0.3596	4
贵州	0.375	0.308	...	0.351	0.381	0.3461	4
山西	0.335	0.284	...	0.367	0.412	0.3437	4
甘肃	0.236	0.229	...	0.31	0.308	0.3141	4
吉林	0.281	0.214	...	0.309	0.308	0.2714	3
海南	0.202	0.208	...	0.397	0.4	0.2537	3
青海	0.251	0.248	...	0.158	0.16	0.2005	3
西藏	0.224	0.188	...	0.178	0.179	0.1855	2
宁夏	0.205	0.157	...	0.109	0.134	0.1382	2

针对上述耦合协调度计算数据和图表信息,我们将 31 个省市划分为四个梯队,第一梯队包括广东、江苏、上海、浙江、山东;第二梯队包括河南、北京、福建、湖北、四川、辽宁、安徽、湖南、河北;第三梯队包括内蒙古自治区、重庆、广西、陕西、云南、江西、天津、黑龙江、新疆维吾尔自治区、贵州、山西、甘肃;第四梯队包括吉林、海南、青海、西藏自治区、宁夏回族自治区。

根据所呈现的图表,可以看出各个省份在经济与交通运输发展方面所处的不同层级,其综合表现也反映了不同地区在交通运输与经济发展之间协调性的优劣势,因此需要采取有针对性的措施来保障各地交通运输与经济之间的平衡和提升社会的可持续发展,为中国现代化发展打下坚实基础。

从上述表格可以看出,处于第一梯队的省份,耦合协调度均值都在 0.7 以上,说明该梯队中的省份交通运输水平与经济发展水平耦合程度较好,为高水平耦合类型,广东省达到了优质协调,耦合协调度平均值为 0.995,远远甩开其他省份;处于第二梯队的省份,为协调上升类型,例如河南省和福建省为 0.5724 和 0.5477,达到初级协调和中级协调的标准;对于处在第三梯队的省份,为过渡类型,例如陕西省和云南省为 0.4139 和 0.408,该梯队省份协调水平属于濒临失调类型。对于处在第四梯队的省份,为失调衰退型,达到中度失调和严重失调,宁夏和西藏属于严重失调,仅为 0.1855 和 0.1382。

综上所述,尽管各省在经济与交通运输方面取得一定的成就,但是仍然各地区存在交通运输与经济发展的不平衡性,为了推动大数据背景下中国的可持续发展,我们需要进一步加大对于经济与交通的智能调控,实现经济与交通的动态平衡,实现交通运输与经济的协调发展。

4.3. 全国交通运输与经济协调发展的时空趋势分析

本文针对时空趋势分析,我们选择灰色动态 GM(1,N)模型。灰色动态 GM(1,N)模型是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法,常用于对存在样本数量少、数据信息少和信息不完整等问题的数据进行建模和预测。因为它可以充分地利用随机原始的离散非负数据列,并通过一次累加的方式得到新的离散数据列,从而建立相应的微分方程模型,再使用一阶线性微分方程的解近似模拟通过时间积累得到新序列的表现规律。在进行该方法之前,我们需要对数据进行级比检验,若数据未通过级比检验,需要对数据进行平移转换处理。

4.3.1. 灰色 GM(1, N)协调性分析模型

针对上述耦合协调性结果,我们并不能完全掌握交通运输与经济间的作用机理,且数据存在模糊和不确定性等问题,因此,在预测之前,我们需要运用 GM(1, N)协调性分析模型量化作用机制。对两者的协调性问题进行分析。

(一) 灰色 GM(1, N)模型

在灰色系统中,因为数据通常可能受到噪声的影响而显示出随机的分散特征,此时,将这些看似无规律的数据转换成更加规律性的序列,并进一步建立微分方程来进行分析和预测,这种模型叫灰色微分方程模型,记为 GM。灰色 GM(1, N)模型是一个一阶 N 个变量的灰色微分方程[16],我们借助方程分析系统中相关行为变量对主行为变量的作用,我们计算出发展系数和驱动系数。这两个系数能够反映系统每个因素之间的相互作用,以此来量化系统协调性。

(二) 模型建立

设有 n 个行为因子 $X_i^{(0)} = \{x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), \dots, x_i^{(0)}(n)\}$, $(i=1, 2, \dots, n)$ 其中第 1 个因子 $\{x_1^{(0)}(t)\}$ 看成主行为变量,其余因子 $\{x_2^{(0)}(t), \dots, x_n^{(0)}(t)\}$ 看成相关行为变量。参考拟合理论,由于数据可能存在负数且不是都为递增数据,因此,我们需要用原始数据做一次累加运算:

$$x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^{(0)}(j), k = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

得到原始数据的一次累加生成序列为:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (23)$$

处理后的新数列规律性大大加强, 提升模型量化的精度。我们用下面的微分方程表示:

$$\frac{dx_1^{(1)}(k)}{dk} + a_1 x_1^{(1)}(k) = a_2 x_2^{(1)}(k) + a_3 x_3^{(1)}(k) + \dots + a_n x_n^{(1)}(k) \quad (24)$$

其中 $-a_1$ 为发展系数, $a_2, \dots, a_n$ 为驱动系数, 可用于反映因素自我发展能力和因素之间的相互作用关系, 此外, 我们可以通过最小二乘法拟合计算估计值 $\hat{a}$:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} (B^T Y) \quad (25)$$

其中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x_1^{(1)}(1) + x_1^{(1)}(2)] & x_2^{(1)}(2) & \dots & x_n^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}[x_1^{(1)}(2) + x_1^{(1)}(3)] & x_2^{(1)}(3) & \dots & x_n^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x_1^{(1)}(n-1) + x_1^{(1)}(n)] & x_2^{(1)}(n) & \dots & x_n^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1^{(1)}(2) \\ x_1^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (27)$$

4.3.2. 灰色预测 GM(1, 1)模型

(一) 级比检验

输入原数据判断是否适用灰色预测 GM(1, 1)模型, 需要进行级比检验, 设原始数据列为:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (28)$$

其中 n 为未知数的个数, 计算数列的级比:

$$\lambda(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)}, k = 2, 3, \dots, n \quad (29)$$

如果所有的级比都落在可容覆盖区间 $X = \left(e^{\frac{-2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}} \right)$ 内, 则数列 $x^{(0)}$ 可以建立 GM(1, N)模型且可以进行灰色预测。否则, 需要对数据进行适当的变换处理, 如对数据进行平移转换:

$$y^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) + c, k = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

(二) 模型建立

首先确定原始数据如下:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (31)$$

其中 n 为未知数的个数，之后对原始数据进行累加得到新数据：

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \\ x^{(1)}(k) &= \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (32)$$

即每一个对应的数值为原始数据序列对应位置的值以及之前的数值的累加和，同时生成一个新数列的邻均值等权数列如下：

$$\begin{aligned} Z^{(1)} &= \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\} \\ z^{(1)}(k) &= \frac{1}{2} [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)] \end{aligned} \quad (33)$$

接着建立 GM(1, 1) 的灰微分方程为：

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (34)$$

从而得到该灰微分方程的白化方程：

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (35)$$

其中， a 为发展系数， b 为内生控制系数。

(三) 后验差比检验

模型建立后，通过后验差比检验法判定模型是否合理，对于得到的

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (36)$$

计算残差，其中

$$e(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k=1, 2, \dots, n \quad (37)$$

原始序列 $X^{(0)}$ 及残差序列 E 的方差分别为 S_1^2 和 S_2^2 ，则

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2 \quad (38)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2 \quad (39)$$

计算后验差比为：

$$C = S_2 / S_1 \quad (40)$$

其中 C 值越小越好，若 $C < 0.35$ ，则模型效果好；若 $C < 0.5$ ，则模型效果合格；若 $C < 0.65$ ，则模型效果基本合格；若 C 值 ≥ 0.65 ，则模型不达标。

(四) 模型求解

在经过后验差比检验后，若 C 值满足精度条件，可以进一步进行对灰色预测模型的求解过程。首先构造矩阵 B 和向量 Y ：

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (41)$$

设 $\hat{a}$ 为待估参数向量, 根据最小二乘法求解得:

$$\hat{a} = [ab]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (42)$$

求解白化方程, 可得到灰色预测的离散时间相应函数:

$$\hat{x}^{(1)}(t) = \left(x^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right) e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (43)$$

那么相应的时间相应序列为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (44)$$

取 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$, 则所得的累加预测值为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a}, k=1, 2, \dots, n-1 \quad (45)$$

将预测值还原, 从而得到最后的预测数据:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\ &= \left(\hat{x}^{(0)} - \frac{b}{a} \right) (e^{-ak} - e^{-a(k-1)}) \\ &= \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) (1 - e^{-a}) e^{-ak} \end{aligned} \quad (46)$$

(五) 数据精度检验

得到预测数据后, 需要对数据进行精度检验, 通常通过残差检验和级比偏差检验对预测数据精度进行检验。

1) 残差检验

$$\varepsilon(k) = \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)}, k=1, 2, \dots, n \quad (47)$$

若对所有残差相对绝对值小于 0.1, 则认为达到较高要求; 小于 0.2 则达到一般要求;

2) 级比偏差检验

$$\rho(k) = 1 - \frac{1 - 0.5a}{1 + 0.5a} \lambda(k) \quad (48)$$

若对所有级比偏差值绝对值小于 0.1, 则认为达到较高要求; 小于 0.2 则达到一般要求。

4.3.3. 问题求解

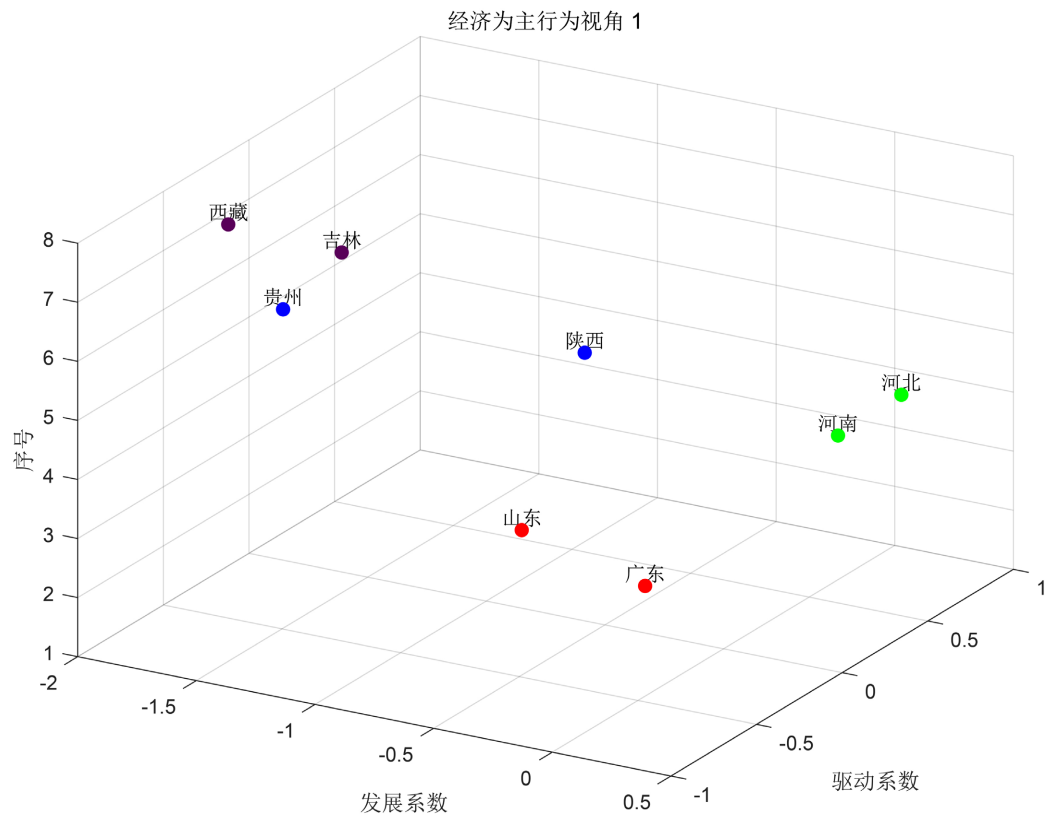
本文由于我们只考虑了交通运输与经济发展两个系统之间的相互作用关系, 故我们选择 $N=2$, 上述模型则为灰色 GM(1, 2)协调性分析模型, 基于上述对 31 个省份的划分, 我们从这四个梯队中分别选取具有代表性的省份进行计算, 第一梯队选取广东、山东, 第二梯队选取河南、河北, 第三梯队选取陕西、贵州, 第四梯队选取吉林、西藏。这八个城市刚好位于中国的七大地理分区, 具有一定的代表性, 经过上述模型的求解, 我们可以分别计算出以经济为主行为和交通运输为主行为所对应的发展系数与驱动系数, 见下表 7。

通过对下述结果分析, 我们发现第一梯队中的广东和山东的发展系数都为负, 经济系统与交通发展系统具有一定的自我发展能力, 且 $a_2^* > a_2$, 则交通运输对经济发展的拉动作用大于经济发展对交通运输

的拉动作用；第二梯队中的河南经济系统和交通运输系统都具有一定的自我发展能力，而河北只有交通具有一定的自我发展能力，经济却没有自我发展能力，两者都是交通运输对经济发展的拉动作用大于经济发展对交通的拉动作用；第三梯队中的陕西、贵州经济与交通都具有自我发展能力，贵州交通运输对经济发展的拉动作用大于经济发展对交通运输的拉动作用，而陕西经济发展对交通运输的拉动作用大于交通运输对经济发展的拉动作用。第四梯队中的吉林、西藏经济与交通运输具有一定的自我发展能力，且交通运输对经济发展的拉动作用大于经济发展对交通运输的拉动作用。

Table 7. Development coefficient and driving coefficient
表 7. 发展系数与驱动系数表

类别	地区	经济为主行为		交通运输为主行为	
		发展系数(a1)	驱动系数(a2)	发展系数(b1)	驱动系数(a2*)
第一梯队	广东	-0.576935	0.341579	-0.300526	1.073803
	山东	-0.950077	0.137941	-0.671089	0.420898
第二梯队	河南	-0.136224	0.857356	-0.190504	0.858896
	河北	0.159735	0.817114	-0.220892	1.126103
第三梯队	陕西	-0.751833	0.231171	-3.054659	-2.571747
	贵州	-1.623094	-0.323160	-0.755085	0.463019
第四梯队	吉林	-1.426561	-0.253180	-0.859196	0.281570
	西藏	-1.622743	-0.643810	-0.824489	0.193283



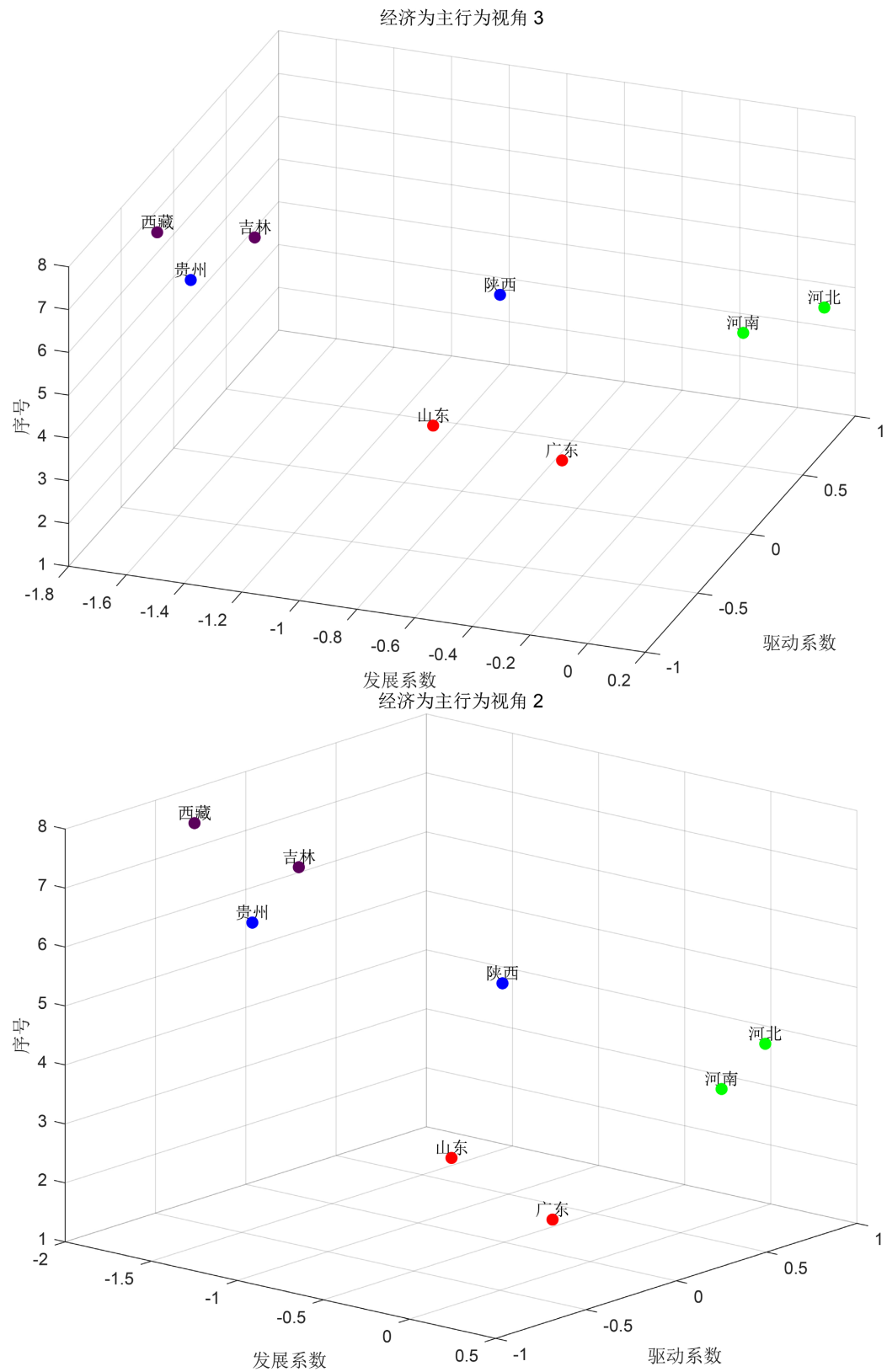
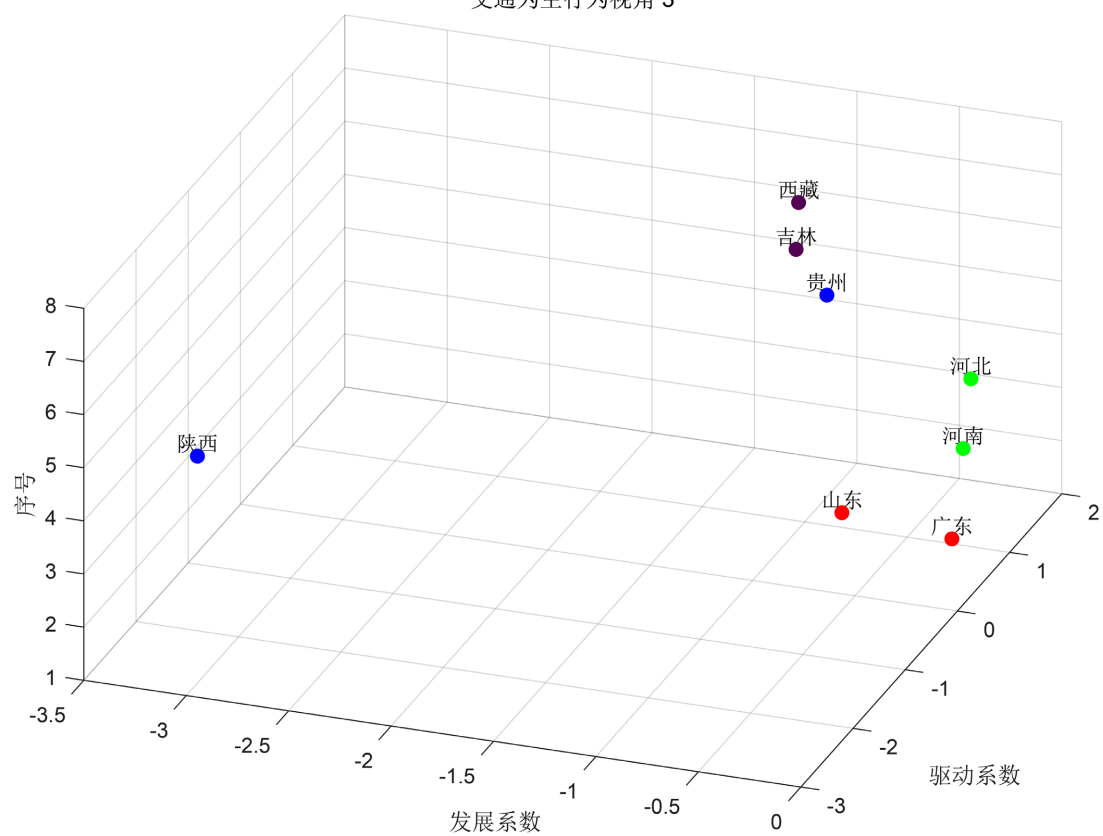
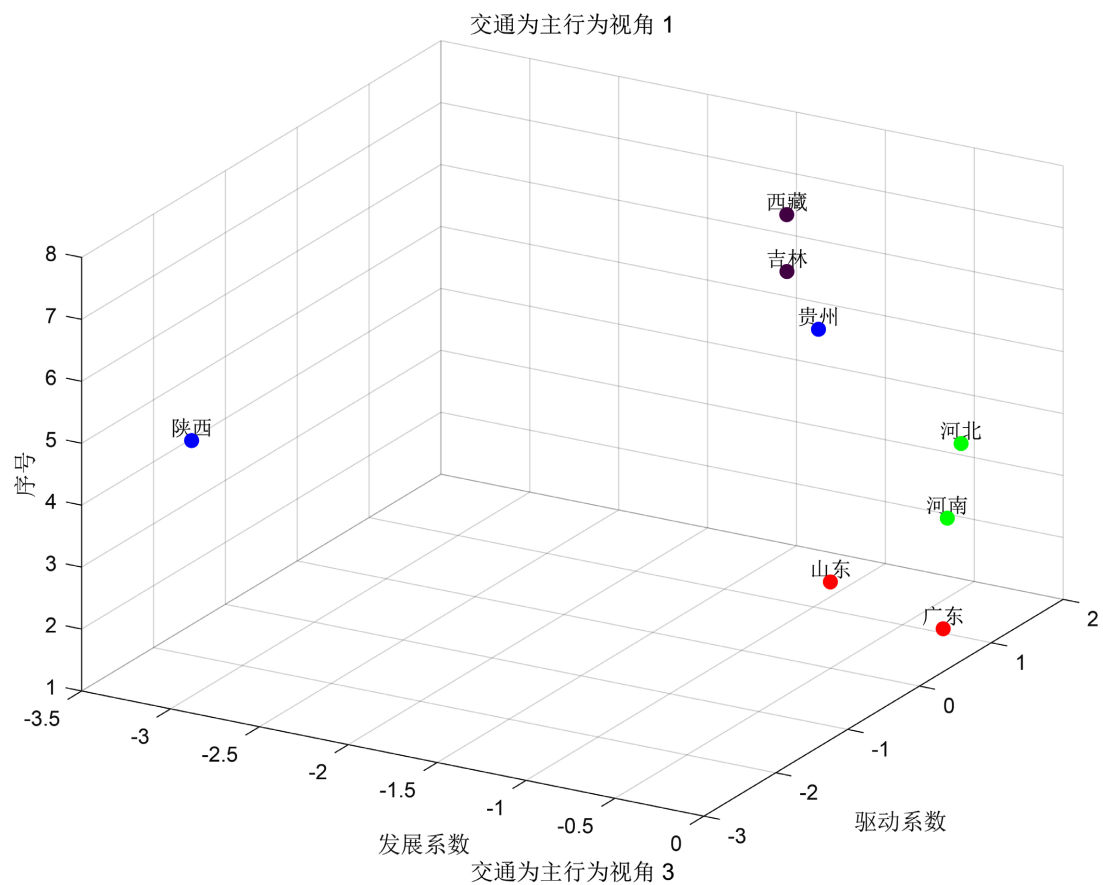


Figure 3. 3D visualization of economy-dominated development coefficient and driving coefficient
图 3. 经济为主行为发展系数与驱动系数三维图



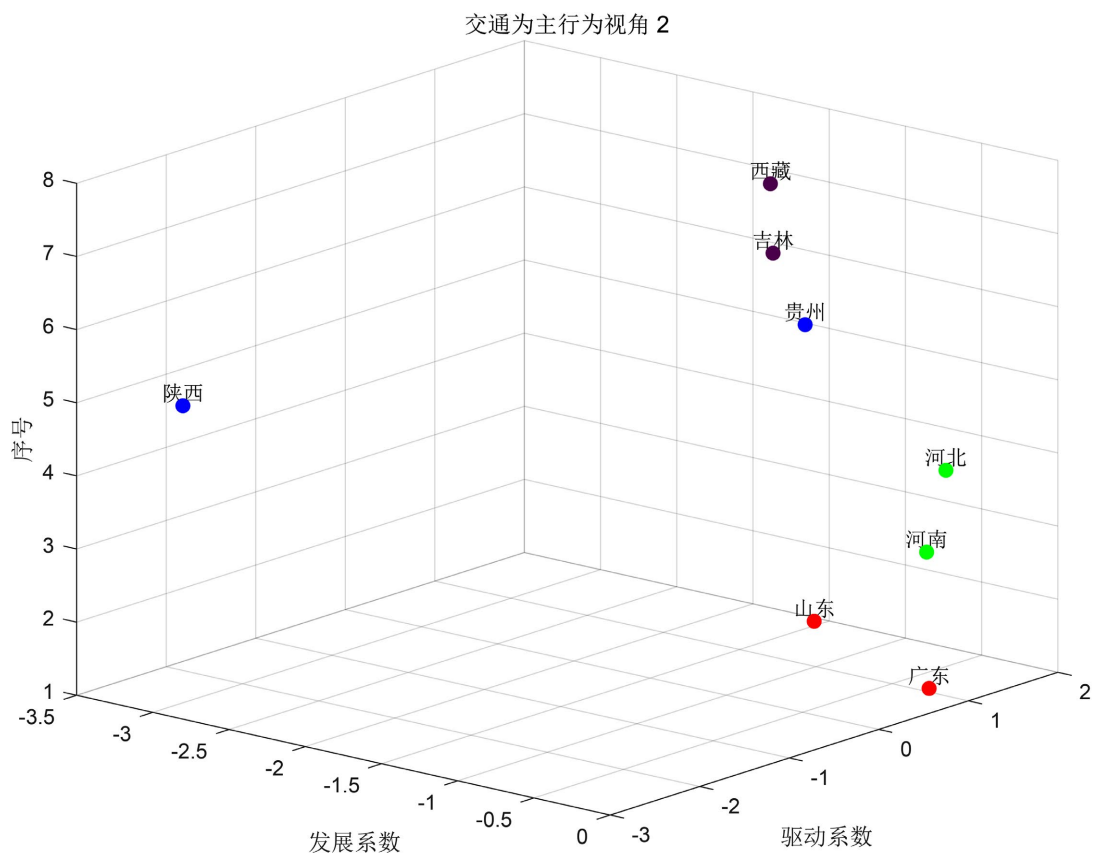


Figure 4. 3D visualization of transportation-dominated development coefficient and driving coefficient
图 4. 交通为主行为发展系数与驱动系数三维图

从协调性角度分析，第一梯队与第二梯队的驱动系数为同号，则说明第一梯队和第二梯队的省份交通运输与经济发展处于协调状态，而第三梯队与第四梯队的驱动系数为异号，则说明第三梯队和第四梯队的省份交通运输与经济发展处于失调状态，具体结果见图 3 和图 4。

接着，我们分析交通运输与经济发展的时空演变趋势，我们先进行了级比检验，发现部分原始数据直接满足了级比检验的要求，其余原始数据在通过平移转换后也均落在可容覆盖区间内，因此可以选取此模型作为我们的预测方法。选取 $n = 10$ 后，对模型进行了后验差比检验，所有数据均满足后验差比检验，因此可以使用灰色预测模型[17]进行对未来数据的预测。这里以广东省经济为例，见表 8。

Table 8. Posterior variance ratio test results of the economic system in Guangdong Province
表 8. 广东省经济后验差比检验结果

广东	GDP (元)	进出口总额(美 元)	一般公共 预算(元)	第二产业产值占 GDP 比重	第三产业产值 占 GDP 比重	人均 GDP(元)	居民人均可 支配收入(元)	城镇化 率(%)
C 值	0.0109	0.5398	0.0753	0.149	0.1795	0.0098	0.0039	0.0411

分析上表数据可得其中最大值进出口总额的后验差比 $C = 0.5398 < 0.65$ ，达到了检验合格需求。后验差比检验合格后对模型进行求解并向后预测了三年的数据，这里取代表性省市的部分指标来进行分析。

GDP (国内生产总值)的提高具有重要的经济和社会意义，反映了一个国家或地区经济发展的总体水平。针对代表性省市的 GDP，进行可视化(见图 5)得：

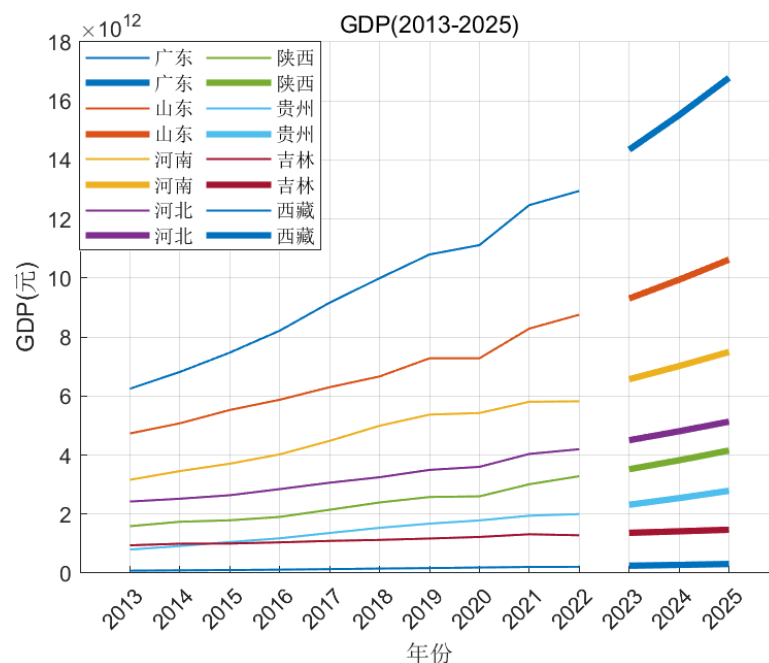


Figure 5. GDP projections for representative provinces and municipalities
图 5. 代表性省市 GDP 预测

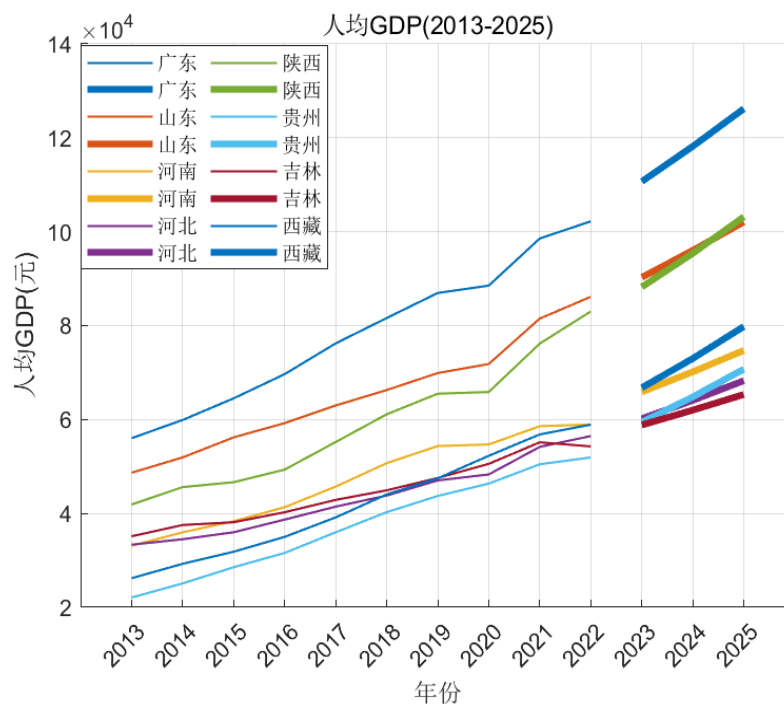


Figure 6. Per capita GDP projections for representative provinces and municipalities
图 6. 代表性省市人均 GDP 预测

由图 5 可清晰的观察到，代表性省市未来三年的 GDP 均稳步上升，其中第一类省市中的广东省增长速度显著高于其余省市，可以说明其交通与经济的智能协调发展进一步推动了广东省整体经济水平的提高，而处于第四类省市中的吉林和西藏整体经济水平有限，其中相对较差的交通运输和经济协调能力也

限制了 GDP 的发展速度。

人均 GDP 常被用作衡量国家或地区居民平均生活水平的一个重要指标。相对与 GDP，较高的人均 GDP 通常意味着更高的生活标准，即居民可以享受更好的服务和商品。针对代表性省市的人均 GDP，进行可视化(见图 6)得：

通过对上图的分析，广东省的人均 GDP 不论是总量还是增速都处于全国较高位置，但通过对其余省市的分析，可以发现处于交通运输与经济协调发展的省份人均 GDP 增速都处于一个相对较高的位置，如山东，陕西。这一数据表示这些省市经济得到了健康发展，不仅 GDP 有增长，还表明人口增长率未必是经济增长的主导因素，经济利益得到了更广泛的分配。而吉林省的人均 GDP 发展速率相对较为缓慢，需要进一步进行发展策略的调整。

城镇化率提高意味着人口从农村向城市集中，推动了经济增长、产业升级和服务业发展，改善了基础设施和居民生活水平。这一过程加速社会现代化，增加了就业机会，提升了教育和医疗服务水平，促进了文化多样性和社会包容性针对代表性省市的城镇化率，进行可视化(见图 7)得：

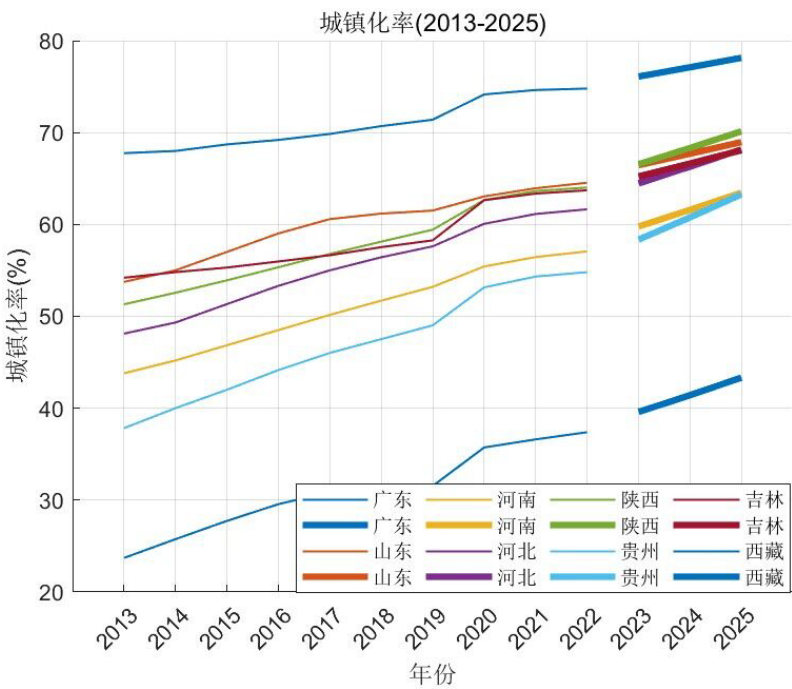


Figure 7. Urbanization rate projections for representative provinces and municipalities
图 7. 代表性省市城镇化率预测

分析上图数据可以发现，随着经济发展，各省市的城镇化率都有较高的提升，其中可以发现交通运输与经济发展协调的河北省的增速尤为明显，从未来三年的预测数据可以发现通过智能协调后的河北省在交通的促进作用下，城镇化率接近了 70%，凸显其经济的加速发展。

公路总里程是指一个国家或地区所有公路加起来的总长度，这是衡量交通基础设施发展水平的重要指标。其发展对提高物流效率，降低运输成本，促进旅游业和其他服务业的发展都具有重要意义，同时也是推动经济增长和提升居民生活质量的关键因素。**高速公路总里程**则反映了一个国家或地区高速交通网络的发展程度。两者的快速发展可以显著提升地区间的通达性，减少旅行和运输时间，从而提高经济效率和竞争力，下图为我们预测的公路总里程和高速公路总里程的可视化图(见图 8，图 9)。

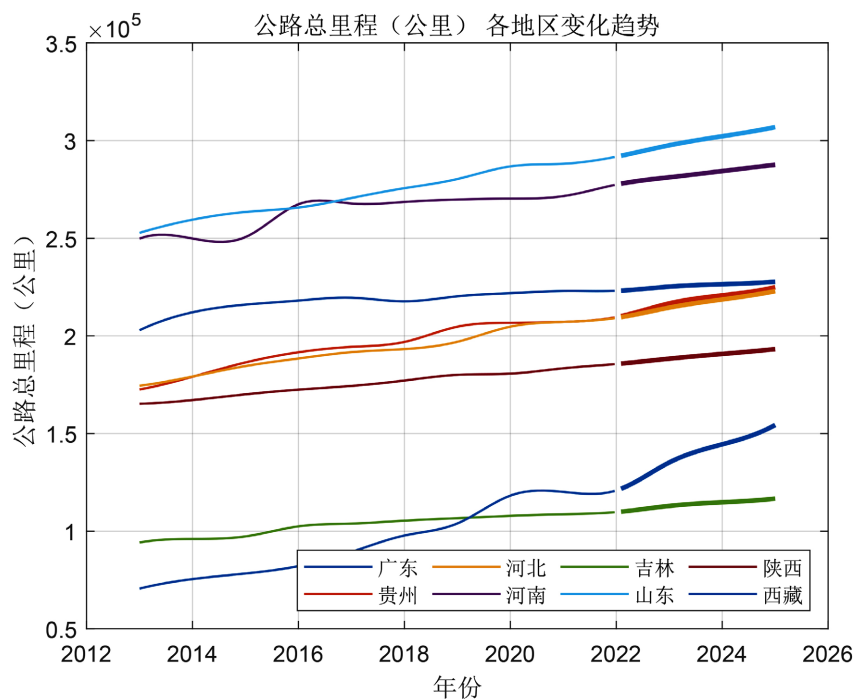


Figure 8. Projections of total highway mileage for representative provinces and municipalities
图 8. 代表性省市公路总里程预测

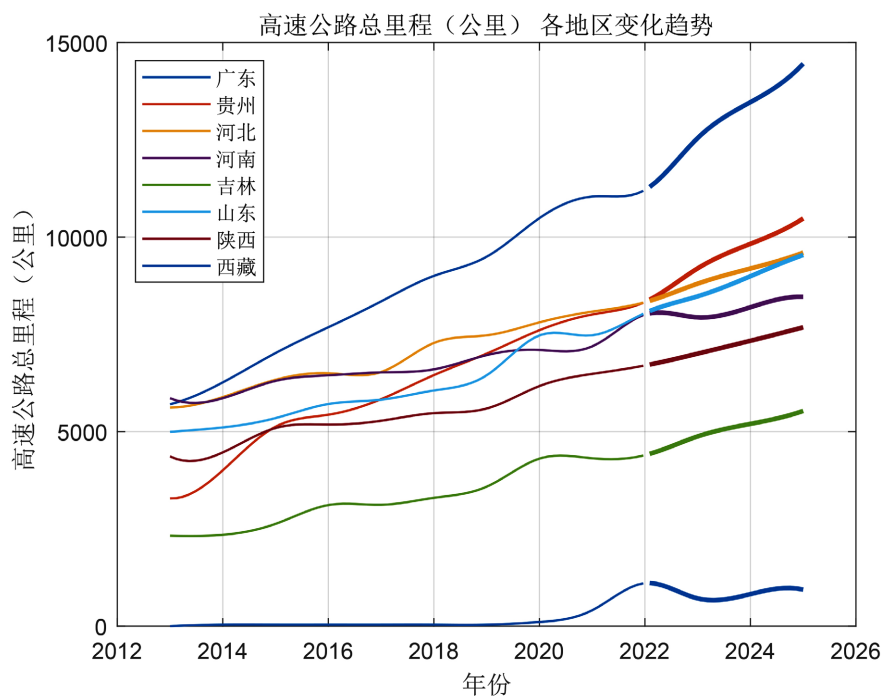


Figure 9. Projections of total expressway mileage for representative provinces and municipalities
图 9. 代表性高速公路总里程预测

分析上述数据可以发现,随着经济的发展,各省市公路总里程和高速公路总里程都持明显上升趋势,进一步分析高速公路总里程可以发现,在经济高速发展的区域其高速公路的建设速率也更高,但同时也

发现处于交通运输与经济发展不协调的西藏在公路建设上也有明显发展，这说明经济的增长对于其交通发展的作用显著高于交通运输对经济的促进作用，这一定程度上也受到国家政策的帮扶作用影响，但总体仍然呈现出交通运输与经济发展协调的省市有更好的发展前景。

得到预测数据后，我们对预测数据进行精度检验，发现各省市的所有指标均符合精度需求，这里以吉林省公路总里程数据为例(见表 9)。

Table 9. Accuracy test of total highway mileage data in Jilin Province
表 9. 吉林省公路总里程数据精度检验

GM(1, 1)模型检验表					
序号	原始值	预测值	残差	残差相对误差	级比偏差
1	94218	94,218	0	0.00%	-
2	96041	97593.649	-1552.649	1.62%	0.003
3	97326	99191.07	-1865.07	1.92%	-0.003
4	102484	100814.637	1669.363	1.63%	0.035
5	103895.729	102464.778	1430.951	1.38%	-0.003
6	105398.933	104141.929	1257.004	1.19%	-0.002
7	106659.942	105846.532	813.41	0.76%	-0.004
8	107848.061	107579.036	269.025	0.25%	-0.005
9	108691.379	109339.898	-648.519	0.60%	-0.008
10	109761.326	111129.582	-1368.256	1.25%	-0.006

从上述数据可知其残差相对误差和级比偏差绝对值都远远小于 0.1，说明模型拟合效果极佳，其预测数据精度较高，有较高的参考价值。

综上分析上述数据，可见在交通运输和经济发展的智能协调下，各地区的经济水平和交通运输能力都有显著的提升，但各省市还存在发展不平衡，不稳定，不充足的情况。我们应在以后的日子里，不断努力，保持高协调省份的快速发展，也帮助非协调省市进一步调整，早日实现全国各省市的交通运输与经济协调的全体协调，使人民的生活越过越好。

4.4. 模型的评价与推广

本文构建了基于熵权法的 TOPSIS 评价模型，该模型综合考虑了多个指标对决策结果的影响，并有效克服了数据的主观性问题。其综合评估能力的高度效果，使其成为一个十分有力的决策评价工具。

在得到了客观合理的评分数据，进行了全国各省市的耦合协调度分析，耦合协调度分析能够全面考察不同系统或变量之间的相互影响和依赖关系，使得评估更加全面和深入。并在耦合协调度分析结果下对全国各省市进行了分类分析，最后将它们分为四个类别，并通过地理位置的综合考虑选取了代表性省市。此外，本文还利用灰色关联度模型分析讨论了各省市交通与经济的自发展能力与相互推动能力，通过将耦合协调度分析的结果与灰色关联度模型[18]进行相互比较来进行论证，使得研究结果更具有说服力。

在上述数据的基础上，本文还利用了灰色 GM(1,N)模型对代表性省市的经济交通指标进行建模和预测，使用近 10 年的数据并进行数据检验和处理，之后建立模型，预测了各指标未来三年的发展情况。该模型在精度检验上都通过了残差检验和级比偏差检验，取得了相当优异的预测效果。因此，本文提出的评价和分类预测方法可以应用在大多数评价和预测任务当中。

5. 结论

5.1. 研究结论

1) 在大数据人工智能背景下，各地区交通运输与经济发展得到进一步提高

尽管不同地区之间存在明显的发展不平衡，但是通过灰色 GM(1, 1)模型所预测出的三年数据可以看出，各地交通与经济总体上正在稳步提高。虽然在 2019~2022 年间，数据受疫情影响波动较大，但是整体趋势表明各省的交通运输与经济发展都在稳步提高。

2) 在大数据人工智能背景下，不同梯队的省份交通与经济发展差异显著

根据熵权法-TOPSIS 法的结果可知，15 个二级指标的分布表现出显著的离散趋势。第一梯队省份主要集中在沿海地区，而第四梯队主要集中在内陆地区，第一梯队与第二梯队的省份差距极大。因此，在大数据人工智能背景下，不同地域之间的发展极其不平衡，地区差异显著。

3) 在大数据人工智能背景下，相同梯队省份交通与经济发展趋同，但还存在一定差异

结合上述数据分析，综合评分排名相近的省份在二级指标上较为相似。处于同一梯队的省份，在经济发展规模、产业发展结构、经济发展效益、交通运输能力、交通运输基础设施建设等方面趋于一致，但是在其他领域可能还存在一定的差异。

5.2. 政策建议

结合上述结论，为大数据人工智能背景下提升各地区交通运输与经济发展水平，我们将从下面几个方面讨论并提出建议：

1) 交通基础设施智能化改造的差异化推进

政府应促进公路、铁路和机场等交通基础设施的智能化升级。

(1) 第一梯队(广东、上海等)：实施“智慧交通领航计划”，重点建设基于 5G 的车路协同系统，在广深高速等主干道部署智能路侧单元，2025 年前实现重点物流园区自动驾驶车辆占比达 30%，智能信号灯覆盖率达 90%。

(2) 第二梯队(河南、河北等)：推进“智能枢纽建设工程”，升级郑州、石家庄等枢纽城市的智能调度系统，建设自动化集装箱码头，2027 年前实现主要港口智能化改造。

(3) 第三、四梯队(西藏、宁夏等)：开展“智慧交通筑基行动”，中央财政每年安排 50 亿元专项用于智能监测设备安装，重点建设边境公路智能监控系统。

2) 区域协调发展的梯度化策略

加强省际间的协调与合作，优化区域物流网络，降低物流成本。建立和完善区域经济合作机制，通过共享资源和信息，增强区域整体竞争力，平衡交通运输与经济发展，实现可持续发展。

(1) 东部沿海地区：建立长三角、珠三角智慧物流大数据平台，实现货运信息实时共享，降低区域物流成本 15%以上。

(2) 中部地区：设立 100 亿元区域协同发展基金，重点支持郑州、武汉等城市的多式联运枢纽建设。

(3) 西部地区：实施“东数西算”交通配套工程，建设 8 个区域性智能交通数据中心，推动东中部技术向西部转移。

3) 推广绿色交通和可持续发展策略

鼓励使用电动汽车和其他低碳交通工具，建设电动车充电站和改善相关基础设施。同时，发展公共交通系统，减少私人车辆的使用，促进经济的绿色发展。

(1) 发达地区：执行“新能源替代计划”，2025 年前实现公交电动化率 100%，高速公路服务区充电桩全覆盖，对新能源货运车辆给予最高 15 万元/辆补贴。

(2) 发展中地区：建设“绿色交通示范区”，每个省份重点打造 2~3 个新能源公共交通示范城市。

(3) 欠发达地区：发展“交通 + 新能源”特色模式，如在青海、西藏建设光伏物流配送中心，配套建设充电基础设施。

5.3. 研究展望

1) 开展探索更加准确的指标体系的相关理论研究

鉴于交通运输与经济协调发展方面影响因素的复杂性，本文所建立的指标可能存在不足之处。因此，我们希望未来的研究能够从更多角度去探索大数据人工智能背景下交通运输与经济发展协调性的指标体系，以此为依据去制定更加全面、客观的政策和措施，推动经济和交通的平衡发展。

2) 深入挖掘交通运输系统与经济系统协调发展的影响因素

随着中国经济的不断发展，智能交通运输产业在中国发展迅速。然而，交通运输与经济的影响因素是不断变化的，随着时间的推移，在不同时期，影响因素也存在着一定的差异。因此，之后对不同时期的影响因素进行深入研究，并采用动态方法分析影响因素，更加准确客观地了解其对智能交通运输与经济发展协调性的影响和改进方式。

参考文献

- [1] 张毅, 张恒奇, 欧阳斌, 达亚彬. 绿色低碳交通与产业结构的关联分析及能源强度的趋势预测[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 24(S3): 5-9.
- [2] Aschauer, D.A. (1989) Is Public Expenditure Productive? *Journal of Monetary Economics*, **23**, 177-200. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(89\)90047-0](https://doi.org/10.1016/0304-3932(89)90047-0)
- [3] Qian, H. and Noboru, H. (2010) Transport Infrastructure and Economic Development: An Empirical Study for China. In: *Traffic and Transportation Studies* 2010, American Society of Civil Engineers, 166-173. [https://doi.org/10.1061/41123\(383\)15](https://doi.org/10.1061/41123(383)15)
- [4] Takatsuka, H. and Zeng, D. (2013) Industrial Configuration in an Economy with Low Transportation Costs. *The Annals of Regional Science*, **51**, 593-620. <https://doi.org/10.1007/s00168-013-0553-5>
- [5] 刘建强, 何景华. 交通运输与国民经济发展的实证研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 2(1): 82-86.
- [6] 陈古强. 浅谈交通运输与经济发展的相互关系[J]. 经济研究导刊, 2020(22): 23-24.
- [7] 秦四平. 运输经济学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [8] 曹小曙, 阎小培. 经济发达地区交通网络演化对通达性空间格局的影响——以广东省东莞市为例[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 305-312.
- [9] 刘程军, 周建平, 蒋建华, 等. 区域创新与区域金融耦合协调的格局及其驱动力——基于长江经济带的实证[J]. 经济地理, 2019, 39(10): 94-103.
- [10] 李媛, 韩峰, 张少谨, 韩姝敏, 贾强. 陕甘宁地区轨道交通与区域经济耦合协调度研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 67-73.
- [11] 董晓芳, 刘逸凡. 交通基础设施建设能带动县域经济发展么?——基于 2004-2013 年国家级高速公路建设和县级经济面板数据的分析[J]. 南开经济研究, 2018(4): 3-20.
- [12] 王晓荣, 荣朝和. 城市化与交通运输的互动发展研究[J]. 经济问题, 2014(1): 52-57.
- [13] 甘浪雄, 张怀志, 卢天赋, 等. 基于熵权法的水上交通安全因素[J]. 中国航海, 2021, 44(2): 53-58.
- [14] 张克飏, 周经耀. 基于 TOPSIS 模型的农业机械产业水平发展评价研究——以安徽省为例[J]. 南方农机, 2024, 55(9): 61-63.
- [15] 沈科杰. 浙江省城市交通运输与区域经济耦合研究[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋大学, 2023.
- [16] 解潇. 西安地区交通运输与经济发展协调性测度研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [17] 姜涛, 李宁, 商舒婷. 基于灰色预测模型 GM(1,1)的鸡西市需水预测研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(4): 26-29.
- [18] 张新宇. 青海省绿色金融与产业结构升级的灰色关联度分析[J]. 中国商论, 2024(7): 109-112.