

分类号：F205

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2220720126



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 数智融合对长三角城市减污降碳
协同管控效率的影响研究

论 文 作 者 李安琪

指 导 教 师 刘芳 副教授

学 科（专业） 管理科学与工程（管）

研 究 方 向 系统优化与智能决策

论文提交日期：2025 年 5 月 15 日

题 目 数智融合对长三角城市减污降碳协同管控效率的
影响研究

英文并列

题 目 Research on the Impact of Digital-Intelligent Integra
tion on the Collaborative Management Efficiency of
Pollution Reduction and Carbon Mitigation in Yan
gtze River Delta Cities

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：李安谦

日期：2025年5月15日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：李安谦

指导教师签名：叶芳

日期：2025 年 5 月 15 日

日期：2025 年 5 月 15 日

数智融合对长三角城市减污降碳协同管控效率的影响研究

摘 要

“十四五”规划明确提出，我国生态文明建设已进入减污降碳协同增效的关键攻坚期。面对美丽中国建设目标与“双碳”愿景，长三角等重点区域空气质量亟需优化，高能耗、高污染、高排放行业亟待调整，时间紧迫、任务艰巨，统筹环境污染物与温室气体排放的多维度协同治理成为缓解环境治理困境的重要突破口。随着新一代信息技术革命的深入推进，数据要素与传统生产要素的融合重构催生出数智化发展的新范式，其开放、共享的特性为构建减污降碳智慧治理体系提供了可行思路，那么如何释放数智融合潜能推动区域绿色转型、实现生态环境与经济系统的协同优化，成为亟待破解的时代命题。

本文围绕长三角城市数智融合与减污降碳协同管控效率的关系展开深入研究，聚焦于以下三大核心问题：一是实证检验区域数智融合发展水平与减污降碳协同管控效率间是否存在显著的正向效应；二是深入剖析数智融合赋能减污降碳协同管控的具体机制；三是提出适配长三角发展特征的减污降碳智慧治理优化路径。

首先，测度并分析了长三角城市数智融合发展水平和减污降碳协同管控效率。一方面，构建数智融合发展评价指标体系，利用熵值法测算 2011-2023 年长三角 41 个地级市的数智融合发展水平。时空分析显示，区域数智融合发展水平呈现“沿海集聚—内陆扩散”的梯度演

进特征，上海、苏南、杭甬等核心城市已形成数智化发展的增长极。另一方面，超效率 SBM 模型测算的减污降碳协同管控效率表明，长三角减污降碳协同管控效率存在显著差异，江浙沪地区减污降碳协同成效较好，安徽地区特别是皖北城市的减污降碳存在一定滞后性。

其次，检验了长三角城市数智融合对减污降碳协同管控效率的影响效应。长三角数智融合的发展对区域减污降碳协同管控效率存在正向促进作用，经过回归模型、指数测算及数据结构三个维度的稳健性检验后，回归结果仍具有稳健性；同时，技术创新与能源转型发挥了重要的中介效应。

仿真模拟进一步验证了数智融合提升减污降碳协同管控效率的路径。通过构建系统动力学模型，考察人口、经济、技术、能源、数智融合发展等子系统对减污降碳协同管控效率的交互影响机制。结果显示，通过数智技术的深度赋能、能源结构的系统优化与技术创新的持续驱动，系统能够在保持经济增速的同时，实现污染物排放强度下降的治理目标。

最后，根据研究结论，围绕数智化体系建设、技术创新驱动、能源结构调整以及区域协同发展四个方面提出减污降碳协同管控效率提升的对策建议。未来可进一步聚焦数智融合在微观层面的影响机制和作用路径，持续完善减污降碳协同管控效率测度方法论体系。

关键词：数智融合，减污降碳，长三角，Tobit 回归，系统动力学

RESEARCH ON THE IMPACT OF DIGITAL-INTELLIGENT
INTEGRATION ON THE COLLABORATIVE
MANAGEMENT EFFICIENCY OF POLLUTION
REDUCTION AND CARBON MITIGATION IN YANGTZE
RIVER DELTA CITIES

ABSTRACT

The “14th Five-Year Plan” explicitly emphasizes that China's ecological civilization construction has entered a critical period for synergistic enhancement of pollution reduction and carbon mitigation. Confronting the dual imperatives of Beautiful China initiative and dual carbon goals, key regions like the Yangtze River Delta urgently require air quality optimization, with high-energy-consumption, high-pollution, and high-emission industries demanding immediate structural adjustments. Given the pressing timeline and complex challenges, implementing

multi-dimensional coordinated governance of environmental pollutants and greenhouse gas emissions has emerged as a critical breakthrough for alleviating ecological governance dilemmas. As the new generation of information technology revolution advances, the fusion and reconstruction of data elements with traditional production factors have spawned a digital-intelligence integration paradigm. The open and shared nature of this paradigm provides feasible pathways for constructing smart governance systems that integrate pollution reduction and carbon mitigation. How to unleash the potential of digital-intelligence integration to drive regional green transitions and achieve synergistic optimization between ecological systems and economic development has become an urgent proposition demanding innovative solutions.

This study delves into the relationship between digital-intelligence integration development and collaborative governance efficiency of pollution-carbon mitigation in the Yangtze River Delta, focusing on three core research questions: First, verifying the existence of significant positive effects between regional digital-intelligence integration levels and collaborative governance efficiency; second, dissecting the specific mechanisms through which digital-intelligence integration empowers pollution-carbon mitigation governance; third, proposing optimized pathways for smart governance of pollution-carbon mitigation tailored to

the development characteristics of the Yangtze River Delta.

The study measures and analyzes the development levels of urban digital-intelligent integration and the collaborative control efficiency of pollution-carbon reduction in the Yangtze River Delta. On one hand, we construct a comprehensive evaluation index system for digital-intelligent integration development, employing the entropy method to quantify the integration levels across 41 prefecture-level cities from 2011 to 2023. Spatiotemporal analysis reveals that regional digital-intelligent integration exhibits a “coastal agglomeration-inland diffusion” gradient evolutionary pattern, with core cities like Shanghai, southern Jiangsu, and Hangzhou-Ningbo forming growth poles of digital-intelligent development. On the other hand, super-efficiency slack-based measure model measurements demonstrate significant regional disparities in pollution-carbon synergy control efficiency, showing better performance in Jiangsu-Zhejiang-Shanghai regions compared to Anhui, particularly northern Anhui cities.

The research verifies the impact effects of urban digital-intelligent integration on pollution-carbon synergy control efficiency in the Yangtze River Delta. Empirical results confirm that digital-intelligent integration development positively promotes regional pollution-carbon synergy control efficiency. This conclusion remains robust after comprehensive

robustness tests across three dimensions — regression models, index calculations, and data structures. Meanwhile, technological innovation and energy transition are identified as significant mediating factors.

Simulation modeling further verified the pathways through which digital-intelligence integration improves synergistic management efficiency. By constructing a system dynamics model, we investigated the interactive influence mechanisms of subsystems such as population, economy, technology, energy, and digital-intelligence integration on synergistic management efficiency. The results showed that through deep empowerment of digital-intelligence technologies, systematic optimization of energy structures, and sustained technological innovation, the system can achieve governance goals of reducing pollutant emission intensity while maintaining economic growth.

Based on the research conclusions, we proposed countermeasures and suggestions for improving synergistic management efficiency of pollution reduction and carbon abatement from four aspects: digital-intelligence system construction, technological innovation drive, energy structure adjustment, and regional coordinated development. Future research can further focus on the impact mechanisms and action pathways of digital-intelligence integration at the micro level, continuously refining the methodological system for measuring synergistic management efficiency.

KEY WORDS: Digital-Intelligent Integration, Pollution Reduction and Carbon Mitigation, Yangtze River Delta, Tobit Regression, System Dynamics

Author: An-qi Li (Management Science and Engineering)

Supervised by- Professor Fang Liu

目录

摘 要	IV
ABSTRACT	VI
第 1 章 绪论	15
1.1 研究背景及意义	15
1.1.1 研究背景	15
1.1.2 研究意义	17
1.2 文献综述	18
1.2.1 数智融合的测度及其经济社会效应的相关研究	18
1.2.2 减污降碳协同管控效率的测度及其影响因素的相关研究	20
1.2.3 数智融合影响减污降碳协同管控效率机理及效应的相关研究	22
1.2.4 文献评析	23
1.3 研究思路、内容及框架	24
1.3.1 研究思路	24
1.3.2 研究内容	25
1.3.3 研究框架	27
1.4 研究方法与创新点	28
1.4.1 研究方法	28
1.4.2 创新点	28
第 2 章 概念界定与理论基础	30
2.1 数智融合与减污降碳协同管控效率的概念界定	30

2.1.1 数智融合的概念界定	30
2.1.2 减污降碳协同管控效率的概念界定	31
2.2 数智融合驱动减污降碳协同管控的理论基础	32
2.2.1 低碳经济理论	32
2.2.2 系统理论	33
2.2.3 协同理论	33
2.3 研究区域概况	34
2.4 本章小结	36
第 3 章 长三角城市数智融合与减污降碳协同管控效率的测度及时空演变.....	37
3.1 长三角城市数智融合发展指数的测度与时空演变	37
3.1.1 指标体系构建	37
3.1.2 测算方法	38
3.1.3 数智融合发展指数的时空演变规律分析	40
3.2 长三角城市减污降碳协同管控效率的测度与时空演变	42
3.2.1 数据来源及效率模型构建	42
3.2.2 测算方法	43
3.2.3 减污降碳协同管控效率的时空演变规律分析	44
3.3 本章小结	46
第 4 章 长三角城市数智融合发展对减污降碳协同管控效率的影响.....	48
4.1 数智融合影响减污降碳协同管控效率的作用机制	48
4.1.1 数智融合对减污降碳协同管控效率的直接影响	48
4.1.2 数智融合对减污降碳协同管控效率的间接影响	49
4.2 研究设计	50
4.2.1 模型构建	50

4.2.2 变量选取	51
4.2.3 变量的描述性统计	51
4.2.4 数据来源及处理	52
4.3 数智融合发展对减污降碳协同管控效率的影响	52
4.3.1 基准回归分析	52
4.3.2 中介效应检验	54
4.3.5 内生性分析	55
4.3.4 稳健性检验	56
4.4 本章小结	57
第 5 章 基于 SD 模型的减污降碳协同效率驱动路径解析.....	59
5.1 系统动力学原理	59
5.1.1 系统动力学的内涵	59
5.1.2 系统动力学的建模工具	59
5.1.3 系统动力学的适用性及优势分析	60
5.2 数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的系统性动态模型构建	61
5.2.1 系统边界界定	61
5.2.2 子系统分析	62
5.2.3 因果关系回路图	64
5.2.4 系统动力学流图	66
5.2.5 模型主要变量说明	66
5.3 模型检验与灵敏度分析	68
5.3.1 可靠性检验	68
5.3.2 灵敏度分析	70
5.4 数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的情景模拟和路径解析	71

5.4.1 情景方案设定	71
5.4.2 不同情景下的系统模拟结果与分析	73
5.5 本章小结	75
第 6 章 研究结论与展望	77
6.1 研究结论	77
6.2 政策建议	77
6.3 研究不足与展望	79
参考文献	81
附录	93
攻读学位期间发表的学术论文目录	97
致谢	98

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

随着工业化和城市化的加速推进，环境污染与气候变化问题愈发严峻，全球正面临着实现经济社会可持续发展的重大考验。与发达国家已迈入强化碳排放控制阶段不同，发展中国家需同时应对减污和降碳的双重挑战，这既是对全球气候变化的积极回应，也是提升生态质量、驱动经济转型升级的关键所在^[1]。作为工业大国，中国能源结构与经济发展呈现出显著的“高碳”特征。2023 年，中国碳排放量约 126 亿吨，煤炭占能源消费比重仍有 55.3%，钢铁、水泥等高耗能产业转型升级困难。二十大报告中明确提出要“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”，促进减污降碳协同增效，引领经济社会全面绿色转型。尽管近年来我国大气环境质量有所改观，2023 年全国地级及以上城市 PM_{2.5} 平均浓度较 2019 年下降了 16.7%，但减污降碳依然任重而道远，“双碳”目标的实现仍面临诸多挑战^[2]。资源压力加剧、环境问题累积、治理能力待提升，这些因素共同增加了经济绿色转型的不确定性。如何提升减污降碳协同管控效率，以最大限度地提高不同污染物治理的协同作用，已成为中国等发展中国家共同面临的紧迫而现实的挑战。

在全球技术经济范式转变的大背景下，数字化、信息化、智能化技术作为新质生产力，正逐步摆脱传统的经济增长模式和生产力路径，为新兴产业发展注入强大动能。2023 年，数字经济总量在我国生产总值中的比重显著提升，占比达到 60%左右，比 2019 年增加了约 8 个百分点^[3]。同时，新一代信息技术的发展、产业数字化程度的加深更是改变了传统产业生产方式。尤其是信息技术与数字经济的深度融合，催生了“数智融合”这一经济新生态，成为推动新质生产力发展的核心驱动力^[4]。习近平总书记多次强调要加速数字化绿色化协同发展，推动经济社会绿色发展。党的二十届三中全会中也提到，支持企业用数智技术改造传统产业，推动制造业高端化、智能化发展。前沿数字技术在能源系统优化、产业结构重塑以及消费模式升级中的创新实践，不仅实现了能效水平的跃升，更是通过深

度开发数据要素促进了碳中和技术的不断革新，形成数智化转型与可持续发展相互促进的新路径。可以看到，不论是从理论研究还是政策实践，数智融合发展对减污降碳协同管控效率的提升都具有可行性。因此，在推动经济社会绿色发展的进程中，深入探究数智融合对减污降碳协同管控效率的内在作用机制具有重要的意义，强化其对污染防控与碳减排的多维度渗透作用，分析数智融合驱动减污降碳协同管控的实现路径，也能够释放数智融合对经济、社会 and 环境的赋能价值。

打好蓝天保卫战，实现“双碳”目标，是中国迈向经济社会高质量发展必不可少的环节。如何提高大气污染物治理效率，降低碳排放水平成为当前亟待解决的核心问题。二十届三中全会中提出，让新质生产力推动生态文明建设与经济高质量发展深度融合。作为新质生产力的数智融合发展，具有高科技、高效能、高质量的特征，为经济发展和环境治理开辟了新的发展空间^[5]。众所周知，减污降碳协同管控是一场广泛而深刻的系统性工作，突显治理对象的整体性、治理内容的关联性和治理效果的协同性。数智融合通过科技创新加速绿色产业规模化发展，推动产业结构由高污染、高能耗向低碳、高效能的绿色产业体系深度转型，以实现环境污染治理短期目标与生态建设长期愿景的相统一^[6]。在产业数字化、智能化与绿色化的不断融合中，传统产业打破空间局限性，新兴产业赋能绿色技术创新，能源等资源配置效率得到优化，产业生产效率不断提升，缓解产业结构性问题^[7]。然而，不同地域的经济发展差异使数智融合发展水平在空间上呈现多级分化态势，东部地区数智融合发展较为成熟，而其他地区缺乏相应的技术、资金等发展基础，自身动力难以支持本地区数智融合大规模发展。

因此，作为中国城镇化率最高、经济总量占比最高的经济圈，长三角在承担国家战略使命的同时，其产业结构偏重、能源结构高碳、污染排放强度偏高的特征，使其成为减污降碳协同管控的攻坚区。长三角不仅是“一带一路”与长江经济带的重要交汇点，更是全球资源配置的亚太门户。该区域的数智融合水平究竟达到何种程度？其减污降碳协同管控又呈现出哪些特征？数智融合是否真正提升了减污降碳协同管控的效率？这些问题的解答，对促进长三角一体化高质量发展、提升全国减污降碳协同管控效率具有重要意义。

1.1.2 研究意义

在理论价值方面，数智融合和减污降碳协同管控具有鲜明的时代特征。从数智技术赋能的视角切入，研究其对减污降碳协同管控效率的作用机制及影响效应，已成为环境科学、经济学和公共管理等领域亟待突破的跨学科研究命题。该研究方向不仅拓展了相关学科交叉融合的理论边界，也为新时代探索生态优先、绿色低碳的高质量发展路径提供了理论支撑。一方面，本文结合国内外相关研究基础以及低碳经济理论、系统理论和协同理论，论述数智融合影响减污降碳协同管控效率的理论基础。通过构建“技术—结构—制度”三维分析框架，将环境科学领域的污染治理理论、经济学领域的资源配置理论以及公共管理领域的协同治理理论进行有机整合，突破了传统研究单一学科范式的局限。另一方面，深入剖析数智融合赋能减污降碳协同管控效率的理论机理，识别效率提升的关键路径。数智融合作为新质生产力，通过数据深度挖掘与智能分析贯穿减污降碳协同管控全过程，实现精准赋能。数智技术的深度融合有效突破了传统资源要素的时空约束，重构能源、技术和人才管理模式，以资源配置效率优化提升减污降碳协同管控效能。同时，科技创新与能源转型通过结构变革驱动减污降碳协同管控，为数智融合效能释放提供支撑。为此，从系统视角出发，进一步识别并论证数智融合发展提升协同管控效率的路径机制。

在现实意义方面，数智融合是新时代中国经济社会绿色转型的新动能，也是中国基于“五位一体”总体布局推进高质量发展的重要动力^[8]。首先，本文运用熵值法测度数智融合发展水平，构建科学的评价指标体系衡量数智融合发展现状。其次，全面考察长三角城市的数智融合发展水平和减污降碳协同管控效率，对区域数智融合发展和减污降碳协同管控时空演变规律进行分析，为减小地区间数智发展鸿沟与减污降碳治理效率差异的政策提供意见。最后，探究数智融合提升减污降碳协同管控效率的路径，重点分析其赋能机理与实践模式，提出相应的政策优化建议。由此可见，深入探究数智融合对减污降碳协同管控效率的影响机制，对于促进经济、社会、环境三大效益的和谐统一，具有深远的理论与实践价值。

立足于当前理论与实践的双重视角，本文的研究目标围绕以下三个维度展开：

- （1）阐述数智融合对区域减污降碳协同管控效率的驱动效应。
- （2）揭示数智融合

影响减污降碳效率的作用路径。以长三角为实证对象，重点分析技术创新与能源转型在数智赋能环境治理中的中介机制。（3）构建数智驱动的减污降碳多主体协同治理框架，探索数智技术赋能下跨区域、跨领域的系统性解决方案，以实现治理效率的持续提升。

1.2 文献综述

1.2.1 数智融合的测度及其经济社会效应的相关研究

（1）数智融合发展指数测度的相关研究

当前数智融合发展指数的测度研究仍处于探索阶段，尚未形成统一标准。现有研究主要采用两种测度方法：一类是通过构建多维指标体系进行量化评估，另一类则基于宏观数据开展规模测算。

国内外学者与机构深入研究数智融合发展情况，建立了一系列的指标体系，旨在全面分析数智融合在不同层面的发展与应用状况。欧盟统计局从宽带接入端口、数字经济人力资本、互联网应用、数字技术应用、公共服务数字化五个指标出发构建数字经济与社会指数^[9]。经济合作与发展组织采用智能化基础设施、数字创新能力、数字治理以及经济发展情况 4 个一级指标并细化为各个二级指标计算数字经济统计指标体系^[10]。中国信息通信研究院则从大数据投融资情况、信息技术主营业务收入和产业增加值出发计算国内各省份数字经济发展指数^[11]。由于数字经济相关指标体系发展较为完善，也为学者们研究数智融合发展水平提供了一定的启发，不少学者基于现有数字经济发展指标体系继续深入扩展为数智融合发展指标体系。范合君和吴婷^[12]从经济社会不同角度出发构建数字化指标体系，通过生产数字化、消费数字化、流通数字化和政府数字化 4 个维度和 23 个二级指标对中国省级数字化水平进行评估。任保平和迟璐婕^[13]以基础支撑能力、创新驱动能力、人才供给能力和产业互联能力为综合评价维度，探究长三角区域产业数字化转型能力。何琨玟等^[14]将数智赋能分为数智基础、赋能应用和环境支撑三方面进行指标体系的构建，着重凸显数字化与智能化融合的过程。不少学者从数字基础、数字产业、数字创新和数字应用四个维度构建指标体系^[15]，可以看到

从基础设施、产业发展、应用情况和创新要素出发构建指标体系是许多学者的共识^[16]，一方面这几个层次既包含宏观角度也有微观层面，能够较好地反映数智技术与其他产业融合发展的程度^[17]，另一方面也能够体现数据作为生产要素的特征和数智技术的平台效应^[18]。

规模测算是基于统计核算方法衡量地区数智融合发展趋势和规模水平。随着数智技术的不断发展，研究人员逐渐重视数智融合发展的规模测度方法。向书坚和吴文君^[19]对 OECD 数字经济核算方法进行梳理，结合数字经济的内涵和特征对中国数字经济核算工作提供优化方法。许宪春和张美慧^[20]基于国际比较视角，构建数字经济规模核算框架，包括数字化赋权基础设施、数字化媒体、数字化交易和数字交易产品四项内容，测算相关产业总产出、增加值等总量指标核算发展规模大小。蔡跃洲和张钧南^[21]依托 OECD 增长核算框架，将信息通信技术对中国经济增长的效应进行分解，测算数字技术发展水平。也有部分学者使用投入产出法测算数智发展指数，吕祥等^[22]以制造业与信息服务业以及智能设备的投入产出完全消耗系数进行衡量，反应制造业整体和信息技术的融合程度，以此来测算数字赋能指数。

（2）数智融合发展的经济社会效应相关研究

数智融合催生了新产业、新业态、新模式，为新质生产力的发展提供了重要的产业支撑与经济载体，其发展深刻改变了经济生产模式，推动生产组织和社会分工方式向网络化转型，也为经济社会的创新发展提供了基础和动力。促进数智融合已成为新质生产力发展的未来趋势，关乎我国产业、经济和国家安全等重要领域^[23]。

从宏观视角出发，现有研究主要分析了数智融合对经济社会产业、业态和模式等多个层面的创新效应。一是数智技术对传统产业转型升级具有核心驱动作用。一方面，智能制造促进传统产业朝着技术层次高端、价值链高端的方向跃升，通过技术创新集群、技术资源集聚与人力资源集聚优化制造业格局^[24]。另一方面，数智技术介入传统产业链，使得产业内各主体的互动方式革新，推动产业链“去中心化”，激发不同主体的主观能动性，综合统筹区域资源流动效率^[25]。二是数

智技术推动各行业交叉融合衍生出新产业、新业态^[26]。数据、算力和算法已成为现代经济体系运行的主要引擎，催生了云计算、物联网、大数据等一系列战略新兴产业^[27]。同时，随着实体经济的数智化发展，数智技术的应用场景不断拓展，在生产、管理、营销等领域获得更广泛的应用，形成多元化的产品和服务^[28]。三是数智融合助推经济社会高质量发展。数智化技术嵌入社会治理，实现治理的智能化、精准化与协同化，提升了公共服务的效率质量^[29]。城市数智化转型能够从生态环境、社会生活和产业治理三个方面推动城市高质量发展，数智赋能环境管理、优化环境规制、打破信息壁垒推动城市绿色发展^[30]。

从微观视角出发，现有研究多集中于数智融合在社会工作和生产生活的应用和作用。一方面，在数智融合发展的过程中，对居民的工作方法和生活质量也产生了潜移默化的影响^[31]。随着线上办公、网络教育和远程医疗等数智软件的应用，人们的工作生活方式也发生改变。数智化赋能生产全过程，打破了自动化生产形势下商品、企业和行业的相对独立性，带来了就业的替代效应和创造效应，在一定程度上提高了劳动收入份额^[32]。同时，数智融合发展下衍生的平台经济等新业态使得消费市场下沉，提升农村居民收入水平，促进社会消费升级和内需扩大^[33]。数智技术赋能教学实践活动，改变传统教育模式，促进教育内容与形式创新，推动构建更加精准化、协同化、个性化的育人格局^[34]。另一方面，数智融合对企业的商业模式及资源配置效率等方面也有存在一定的影响。随着价值链的变化转移和数智融合程度的加深，企业在进行贸易时呈现出数字化和服务化的特征，降低了生产交易的成本，同时增加了个性化定制功能^[35]。能源密集型企业利用物联网、大数据分析等关键技术构建全生命周期管理框架，实现对能源和生产原料的精细化管理^[36]。数智化时代，跨行业竞争成为常态，而大数据技术能够为企业活动提供知识支持，挖掘客户潜在需求，提前预判市场变化，提升企业竞争力^[37]。

1.2.2 减污降碳协同管控效率的测度及其影响因素的相关研究

（1）减污降碳协同管控效率测度的相关研究

在减污降碳协同管控研究领域，现有学者们采用坐标系法、评价指标体系法以及效率评估模型等多种手段，以工业、农业等关键行业为突破口，从区域差异

视角深入剖析协同治理效应。首先,从测算方法出发,高庆先等^[38]基于二维四象限图构建了大气污染控制和温室气体减排协同效应的评估指标,量化评估中国能源结构和产业结构调整产生的减排协同效应。狄乾斌等^[39]从环境污染、环境治理、生态保护、资源利用、经济发展等五方面出发构建减污降碳协同治理评价指标体系,评价中国三大城市群减污降碳协同治理的发展趋势与区域差异。李汶豫等^[40]基于二氧化碳和大气污染物的同根同源性,构建耦合协调模型衡量长江经济带城市减污降碳协同效应。Yang et al.^[41]以资本、劳动力和能源为投入指标,以减污降碳协同度为期望产出,量化区域减污降碳协同推进能力。其次,从行业端口切入,张彬等^[42]结合工业重点行业污染物和碳排放特征,从过程、效率和状态三个方面解析评价重点行业减污降碳协同度。减污降碳协同效应的量化评估需要从农业生产全过程开展,应在要素减量、增产、减污和降碳四者间找到平衡, Wang et al.^[43]采用清单分析法对中国各省份种植业污染物进行测度。同样,建筑业减污降碳协同效应也体现在减污生产、施工、运营乃至拆除等全生命周期视角下,采用社会网络分析法探究中国省级建筑碳排放量,为建物业绿色高质量发展提供建议^[44]。最后,从时空演变特征角度看, Yang et al.^[45]采用生命周期评估模型量化中国省域减污降碳协同治理效率,并通过 LMDI 方法分解综合排放值,发现综合排放强度效应和技术水平效应能够提升减污降碳协同治理效率。Chen et al.^[46]探究中国三大城市群减污降碳与经济高质量发展的耦合协调关系,发现城市群内部存在明显的核心-边缘结构,城市群内部可划分为不同的凝聚子群,子群内部联系紧密,但子群间联系较弱。

(2) 减污降碳协同管控效率影响因素的相关研究

目前,学者们对减污降碳协同管控效率的影响因素主要从技术、结构和政策三大核心要素展开。技术路径方面,重点探讨污染物与温室气体协同治理技术^[47]、能源清洁利用技术^[48]、工业绿色制造技术^[49]等的创新与应用,分析技术迭代如何驱动减污降碳的协同治理效率的提升。曹宏斌等^[50]从分子、单元和系统多个尺度创建综合成本最小化、兼顾减污降碳需求的集成优化模型,实现钢铁冶金、煤化工等多个重化工行业的工艺快速评价和优化升级。结构路径则聚焦于产业结构优

化^[51]、能源结构调整^[52]以及区域结构协同^[53]三个层面,力求找到实现减污降碳协同治理的最佳结构配置。韩冬日等^[54]剖析源头预防、过程控制及末端治理三环节,分析产业结构合理化、用能权、能源利用率等六要素对减污降碳协同治理的组态效用。刘娜和高新伟^[55]认为能源结构调整是提升减污降碳协同度的主要传导机制,且非资源性城市的能源结构优化幅度更大。郑洁等^[56]通过对比不同国家经济发展中的污染物排放情况,发现经济体的要素禀赋结构内生决定最优生产结构,最优生产结构进一步界定污染排放结构。政策设计方面,学者们探究了单一领域治理政策的协同性和动态性出发,评估碳市场交易试点政策对减污降碳的双重效应^[57],以及不同政策组合对减污降碳治理效果的协同影响^[58],为政策的协同优化提供了宝贵参考。黄海昕和郭俊华^[59]从规模和效率双重视角探究低碳城市试点和碳排放权交易试点政策对减污降碳的影响作用,以期更好释放国家低碳政策的减污降碳效应。赵玉焕等^[60]考察绿色财政政策对城市低碳发展的影响,证明绿色财政政策在推动城市减污降碳、促经济增长方面的重要作用。

1.2.3 数智融合影响减污降碳协同管控效率机理及效应的相关研究

随着人工智能技术的快速崛起与广泛应用,新质生产力已成为驱动经济社会高质量发展的新引擎。数智融合,作为新质生产力的核心要素,为生态文明建设开辟了崭新路径^[61]。从宏观视角审视,数智融合发展通过催化产业结构和能源结构的优化升级,有效削减了大气污染物排放^[62]。刘耀彬等^[63]刻画长江经济带城市的数字产业时空格局及减污降碳时空演化特征,发现数字产业集聚能够通过规模经济效应促进区域减污降碳协同增效。第三产业比重的增加对于减污降碳具有积极作用,数智融合可通过提升金融科技发展水平和生产性服务业聚集水平促进区域绿色发展水平^[64]。范合军等^[65]实证研究发现数字经济发展能够助推社会低碳技术改进,提升能源环境效率,优化城市能源结构,助力城市碳减排目标实现。从微观层面看,数智技术的应用显著降低了企业生产过程中的能源消耗和污染排放,提生了企业的环保绩效^[66]。刘启雷等^[67]针对制造业“双碳”发展问题,强调企业应充分利用数据挖掘、高阶智能算法等数智技术,构建产品全生命周期评估模型,以精准施策助力制造业实现碳减排目标。方颖和余兴锦^[68]从要素生产效率的视角实证考察行业数字化投入对碳排放和污染排放的影响机制,证明了数字化投入对

中高能耗行业、制造业、资源密集型行业以及高出口依赖度企业具有显著的减污降碳效应。在电力行业，人工智能等数智技术通过精准预测、柔性调度、自主学习助力电力企业减污降碳^[69]。同时，城市数字化转型是碳减排引至大气污染物减排的重要机制，通过城市数据及信息化基础设施的建设能够有效提升协同减排治理效率^[70]。此外，宽带中国等数字基础设施的建设，通过促进绿色技术应用显著降低了区域碳排放，进一步印证了数智融合在减污降碳中的关键作用^[71]。因此，加速数智融合发展，既是破解资源环境约束下经济增长难题的当务之急，也是实现“双碳”目标的长远之策。

1.2.4 文献评析

随着数字化与智能化技术的深度结合，各行各业也通过数据要素驱动和智能算法赋能不断迸发新能量。同时，我国正在加快推进数智技术与经济社会系统的深度融合，特别是在新发展理念的指引下，生态文明建设被置于更加突出的战略地位。政策导向与实践需求共同推动形成“数字驱动、智慧治理”的新模式，为破解环境治理难题提供创新路径。在数智融合的测度及其经济社会效应方面，国内外学者从指标体系和规模测算两类方法出发，为准确评估数智融合发展水平提供了科学依据和方法启示，并且对数智融合在经济社会发展中的重要作用进行了分析。在减污降碳协同管控效率的测度及其影响因素方面，学者们采用坐标系法、评价指标体系法以及效率评估模型等多种手段，对减污降碳协同管控效率进行了量化评估。同时，从技术、结构以及政策三大核心要素出发，探讨了减污降碳协同管控效率的影响因素。这些研究为制定科学合理的减污降碳政策提供了理论支撑和实践指导。在数智融合影响减污降碳协同管控效率机理及效应方面，研究表明数智融合通过优化产业结构和能源结构、降低企业生产过程中的能源消耗和污染排放等方式，推动了减污降碳协同管控效率的提升。现有研究揭示了数智融合在生态文明建设中的重要作用，为实现“双碳”目标提供了有力支撑。

现有研究成果已初步构建了数智融合作用于减污降碳协同治理的理论框架、方法体系及逻辑脉络，为本文探究数智融合的环境治理效能提供了重要依据。但值得关注的是，当前研究仍存在需深化拓展的空间：一是，数智融合发展指数与

减污降碳协同管控效率的测度标准均未统一，不同学者和机构所构建的指标体系及采用的评估方法存在差异，导致评估结果可比性不强；且相关研究多集中于宏观层面的定性分析，微观层面的影响机制、作用路径及深入的定量研究探讨较少。二是，数智融合对减污降碳协同管控的影响效应需要进一步加强理论探索和实证研究。宏观政策与微观主体的互动机制仍需完善，进一步厘清政策、技术、治理之间协同增效的内在逻辑。

1.3 研究思路、内容及框架

1.3.1 研究思路

本文按照“机理分析—水平测度—效应评估”的分析思路开展具体研究，重点回答三个问题：“如何科学测度长三角城市数智融合发展水平和减污降碳协同管控效率？为什么要评估数智融合对减污降碳协同管控效率的影响作用？如何利用数智融合提升长三角城市减污降碳协同管控效率？”。从长三角地区数智融合发展与减污降碳协同管控效率的基本现实出发，首先，构建数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的理论分析框架与机制路径；其次，测算分析长三角地区数智融合发展指数与减污降碳协同管控效率；再次，实证检验数智融合对减污降碳协同管控效率的影响机制；此外，构建多回路反馈模型模拟不同情景下的系统效率状态动态解析数智融合对减污降碳协同管控效率的非线性作用机制。最后，提出数智融合赋能减污降碳协同管控效率提升的现实路径和政策建议。具体技术路线如图 1-1 所示：

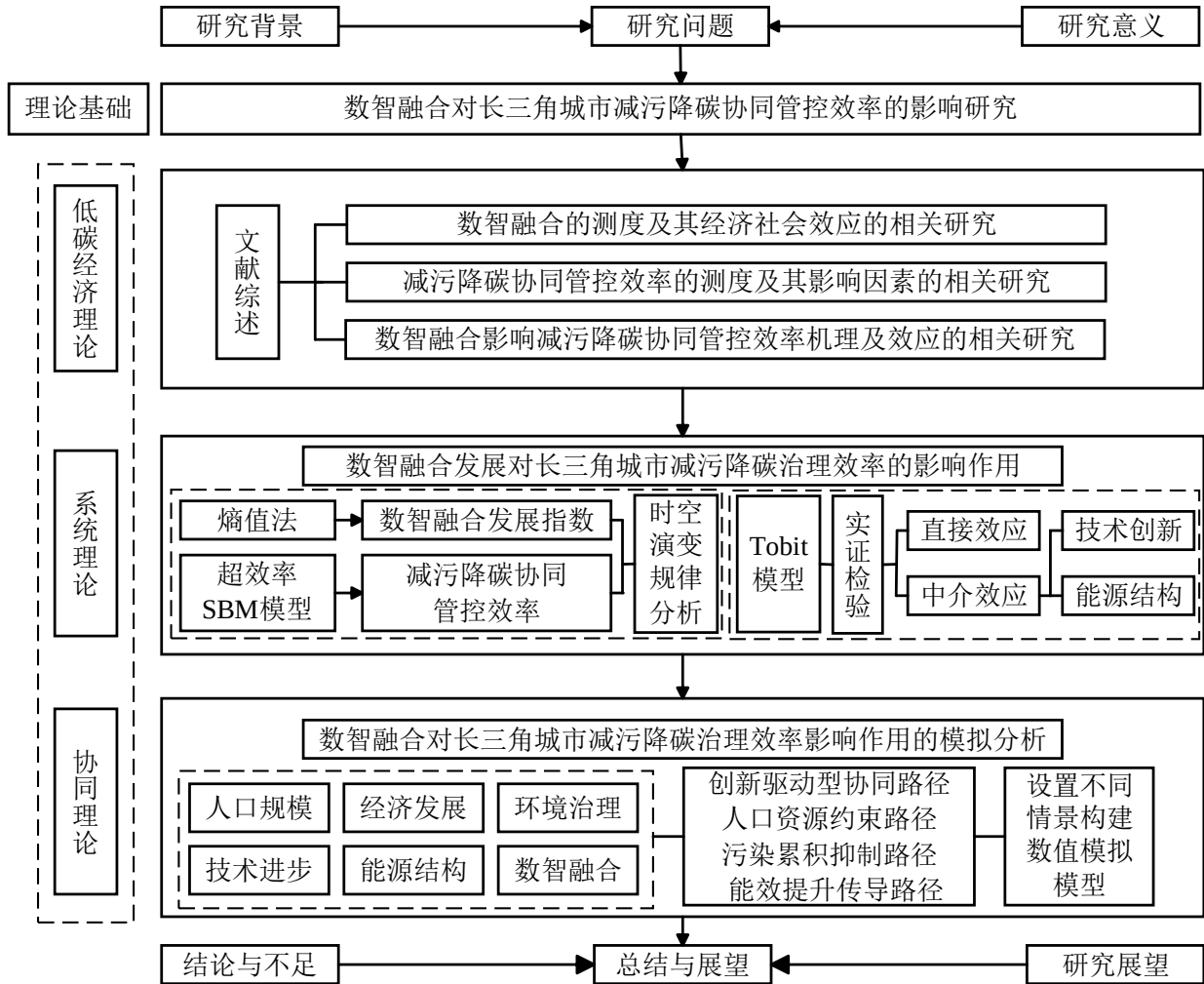


图 1-1 技术路线图

1.3.2 研究内容

本文围绕数智融合对减污降碳协同管控效率的影响机制这一关键命题开展具体研究，主要研究内容如下：

一是科学合理测算数智融合发展水平和减污降碳协同管控效率，这是本文研究的重要内容。减污降碳与数智融合都具有系统性，与经济社会紧密关联，只有对二者现状进行全方位了解，对其所呈现的时空演变特征进行深入分析才能够更好推进数智融合发展，有效提升减污降碳协同管控效率。

二是数智融合影响减污降碳协同管控效率的理论分析与实证检验。一方面，数智融合的高渗透性和广覆盖性优化了资源配置，有助于协同管控效率的提升。另一方面，数智融合发展前期投入的大量资源也影响着协同管控效率水平。此外，

经济社会各领域的数智化涉及技术创新与能源优化，从结构出发实现减污降碳协同管控效率的提升，从而确保效率提升的长期性与稳定性。关于数智融合对减污降碳协同管控效率的不同作用机制与路径需要系统探究，以此精准识别数智融合助力减污降碳协同管控的优势与短板。

三是数智融合对减污降碳协同管控效率提升的政策路径与选择。提出治理效率提升的实践路径和政策建议是本文最终的落脚点，也能够体现本文的实际应用价值。从数智化体系建设、技术创新驱动、能源结构调整以及区域协同发展等多维度提出政策建议，为长三角产业发展提供绿色发展路径，同时也为实现“美丽中国”目标提供可复制的智慧化协同治理模式。

具体章节安排如下：

第一章为绪论部分。本章聚焦研究背景阐释与理论意义定位，系统梳理国内外相关学术成果，把握研究脉络与前沿动态，介绍本文的研究思路、研究内容、研究框架、研究方法，凝练研究创新点。

第二章是数智融合影响减污降碳协同管控效率的理论基础与作用机理。本章基于数智融合的理论阐述其基本内涵；从减污降碳协同管控效率的生成逻辑出发，凝练其内涵与特征；最后在低碳经济理论、系统科学理论和协同效应理论等基础上，构建理论分析框架，解析数智融合对减污降碳协同管控效率的作用机理。

第三章是长三角城市数智融合与减污降碳协同管控效率的测度及时空演变。一方面，从层面构建数智融合评价指标体系，对 2011-2023 年长三角 41 个城市的数智融合发展水平进行统计测度，分析长三角数智融合发展水平在时空上的演变特征。另一方面，选取非期望产出的超效率 SBM 模型测算长三角各城市减污降碳协同管控效率，解析其时空演变规律。

第四章是长三角城市数智融合对减污降碳协同管控效率的影响。采用 Tobit 模型对影响作用进行实证分析，并通过中介效应进一步探究其对减污降碳协同管控效率的作用机制。

第五章是数智融合发展对减污降碳协同管控效率的系统性动态分析。通过构

建系统动力学模型，考察复杂多情境中大气污染物以及二氧化碳的减排效果，探索区域减污降碳的最佳措施。

第六章是结论与展望。对论文的研究工作进行系统性总结，将以上章节所得结论在本章进行统一呈现，并基于研究结论提出相关的政策建议；同时，也对未来研究的方向和内容进行展望，指出本研究的不足之处，为后续进一步深入研究指明方向。

1.3.3 研究框架

本文研究主体框架逻辑如图 1-2 所示，可归纳为以下几点：首先,介绍研究背景、意义、理论以及现有相关研究；其次,对数智融合和减污降碳治理效率的内涵进行学术概念界定，系统阐述数智融合对减污降碳协同管控效率的作用机制；在此基础上,构建评价指标体系，分析长三角地区的数智融合发展和减污降碳协同管控效率，进行实证检验研究假设；最后，构建系统动力学模型，设置多情景方案模拟分析数智融合提升减污降碳协同管控效率的最优路径；根据实证检验与仿真模拟的结果提出相应的政策建议。

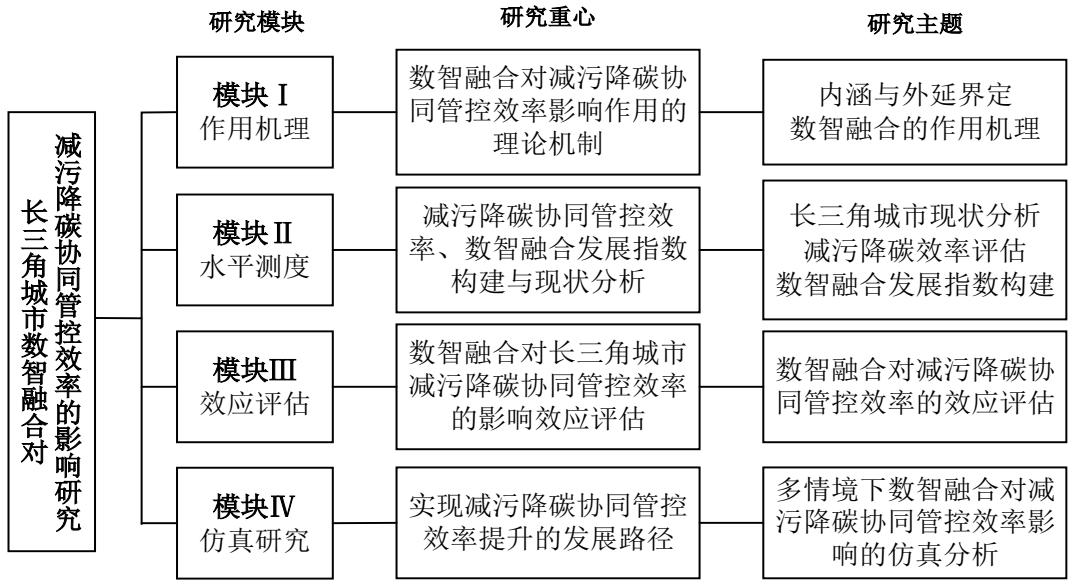


图 1-2 研究框架图

1.4 研究方法与创新点

1.4.1 研究方法

本文立足于管理学、系统科学、计量经济学及公共管理等多学科交叉视角，构建多维度协同的研究逻辑体系，形成以下方法论架构：

（1）文献梳理法。文献梳理法作为基础研究工具，通过对学术文献的系统收集、结构化整理与批判性分析，提炼具有理论深度的科学认知。本文通过搜集、梳理国内外关于数智融合和减污降碳协同管控的相关研究和述评，了解现有研究成果，系统地掌握研究发展趋势和方向。

（2）描述统计法。描述统计是通过描述数据特征，揭示研究对象的分布与发展规律。本文通过查找分析数据、构建指标体系，测算长三角地区数智融合发展指数与减污降碳协同管控效率，对二者的发展现状进行分析。

（3）实证研究法。实证研究将理论假设转化为可操作、可验证的模型，通过分析数据验证假设的有效性。本文构建 Tobit 模型、中介效应模型、系统动力学模型，检验相关理论假设，探讨数智融合对减污降碳协同管控效率的影响作用。

1.4.2 创新点

本文的潜在创新性贡献主要体现在以下两个层面：

第一，构建多维评价体系，揭示区域协同效率的演进规律。利用熵值法与超效率 SBM 模型，构建数智融合发展水平与减污降碳协同管控效率测度体系，通过 2011-2023 年面板数据的时空演化，分析揭示“沿海聚集—内陆滞后”的空间特征，为区域差异化治理提供方向。

第二，使用多系统协同演进的动态仿真模型，刻画数智融合赋能减污降碳协同管控效率的非线性传导机制。针对传统静态分析难以捕捉复杂反馈的局限，创新构建人口、经济、技术、能源与数智融合的多情景系统动力学模型，动态模拟技术赋能、能源转型与效率提升的作用路径。

第三，针对长三角一体化进程中环境压力与数智技术优势并存的特殊性，创

新性地将数智化体系建设、技术创新驱动、能源结构调整以及区域协同发展纳入政策建议框架，为破解数字鸿沟与污染转移的跨区域治理困局提供可量化、可复制的方案，推动长三角减污降碳从分散治理向系统协同转型。

第 2 章 概念界定与理论基础

本章重点对数智融合和减污降碳协同管控效率的基本内涵予以界定，阐述低碳经济理论、系统理论及协同理论等相关知识基础，以此揭示数智融合对减污降碳协同管控效率的影响机理，进一步构建基本理论分析框架。

2.1 数智融合与减污降碳协同管控效率的概念界定

2.1.1 数智融合的概念界定

Brynjolfsson et al.^[72]提出“数字智能连续体”理论，将数智融合视为机器智能与人类认知在数据流动中的动态耦合过程。程学旗等^[73]将数智融合界定为数据科学与计算智能的深度协同，强调数据作为“人—机—物”三元世界的桥梁，以数据驱动科学为基础，探索第有人机融合智能的演进，实现数据价值与智能技术的双向赋能。结合国内外研究学者的观点可知，数智融合，即指数字化与智能化技术深度融合应用，其中数字化是利用数字技术将信息转化为可被计算机处理的数据形式，实现信息的存储、传输和处理；智能化则是通过机器学习、人工智能等先进技术，使系统具备自主学习、决策和优化的能力^[74]。数智技术的融合，不仅提升了数据处理和应用的效率，更赋予了系统以智能，使其能够更好地适应复杂多变的环境和需求。从深层次看，数智融合是数字化转型更高层级的发展，即“智能数字化转型”。在这一过程中，人工智能推动了社会资源融合引擎、生产流程优化升级以及传播生态创新改革，能够协同产业链、供应链、价值链和创新链共同发展^[75]。

2015 年，中国首次在政策层面提出“互联网+”行动计划，旨在利用互联网技术与思维带动经济社会创新发展，在这一时期，移动互联网、云计算、大数据等信息技术与现代制造业相结合，促进了工业互联网和金融互联网蓬勃发展^[76]。2024 年，我国将“人工智能+”写入政府工作报告中，意味着我国已逐渐从移动互联网阶段迈向智能革命阶段^[77]。在这一背景下，人工智能、大数据等新一代信息技术的研发与应用不断深化，数智技术为培育新质生产力注入不竭动力，带领各个行业进行创新变革，例如数智融合在新型工业化中的深度应用，通过对研发

设计、生产制造^[78]和经营管理^[79]等各个环节进行数智改革，逐步突破资源利用效率瓶颈，推动产业链向更高层次攀升^[80]。

由此可见，数智融合也为我们的经济社会带来了前所未有的机遇。首先，高创新性、高渗透性、广覆盖性等特征，使得数智技术逐渐成为重要生产要素和核心生产资源，通过数智融合应用，传统产业可以实现智能化改造升级，提高生产效率和质量^[81]。同时，新技术催生的新产业新业态新模式也为经济社会高质量发展带来活力。其次，数智技术赋能创新，一方面通过数据挖掘、机器学习等方式挖掘市场需求，推动创新创业；另一方面产生创新互补效应，数智技术与生物、材料、能源等领域交叉融合，重构优化不同领域的技术创新方式，加速各领域颠覆性技术的涌现^[82]。同时，数智技术在社会治理领域的应用显著提高了政府决策的科学性，大数据分析能够做到精准施策、智能监管，大大减少了治理的人力物力成本^[83]。最后，在生态环境保护领域，数智融合发展不仅能够监测分析环境数据，及时发现环境治理隐患，提高治污效率，也能够联动信息技术为生态修复和环境保护提供更多方案^[84]。

2.1.2 减污降碳协同管控效率的概念界定

效率在经济学中通常指在给定社会资源的条件下，最有效地使用这些社会资源以满足人类需求，核心是资源的有效利用和产出的最大化。延伸至环境经济学中，效率的概念界定更为复杂与宽泛，指在满足人类经济需求的同时，尽量减少对环境的负面影响，实现经济效益与生态效益的双赢。因此，减污降碳协同管控效率即指在实现污染物排放减少和温室气体排放降低的过程中，以最低经济成本、最高生态效益和最优社会公平性，实现污染减排与碳排放控制的“双重目标”向“协同增效”跃迁^[85]。

减污降碳协同管控是指在污染防治过程中通过一系列的政策措施和技术手段实现污染物减排与碳排放减少的协同推进。其核心在于实现环境效益、经济效益和社会效益的协同提升。减污降碳协同管控的高效性与可持续性使其成为环境治理工作重要方向。一方面，环境治理时间紧迫、任务繁重，如何在有限的实践内取得最大的成效一直是社会各界关注的重点。另一方面，环境治理需要久久为功，

长期持续的进行下去才能够让生态环境不断改善。减污降碳协同管控重点在于治理效率的提升,那么如何使用最低的投入带来效率的最大提升,可以从三点出发:第一,治理目标协同。大气污染物减排与碳排放减少是两个相互关联的目标,它们之间存在着共同的排放源和治理路径,这种目标协同性为减污降碳协同管控提供了重要基础。例如,化石燃料的使用不仅会产生二氧化碳等温室气体,还会带来二氧化硫、氮氧化物等大气污染物^[86]。第二,治理手段协同。为了实现减污降碳需要综合运用政策、技术、经济等多种手段,不论是制定减排政策、加强环境监管,还是推广清洁能源技术、提高能源利用率,亦或是建立碳排放权交易市场、实施绿色金融政策,只有将各种治理手段协同起来形成合力才能够更好地提升环境治理的效率与效果。第三,管理体系协同。环境治理涉及多个部门、多个层级和多个利益主体,需要建立有效的协同管理机制。对于政府来说,打破部门和地区间的壁垒刻不容缓;对于企业来说,需要加强内部对环境治理方面的管理工作,提升自身的环境治理水平;对于社会公众来说,树立绿色的生活理念与方式至关重要,铢积寸累,日就月将,全民共治亦是全民共享^[87]。

2.2 数智融合驱动减污降碳协同管控的理论基础

2.2.1 低碳经济理论

低碳经济是在全球气候变暖、资源短缺加剧的背景下提出的,以减少温室气体排放为核心的经济学理论,是可持续发展理论在经济层面的扩展^[88]。在《联合国气候变化框架公约》和《京都协议》框架下,全球开始建立应对气候变化的规则体系。1999年,莱斯特·R·布朗(Lester R. Brown)首次提出低碳经济,指出要应对全球变暖危机必须尽快转变经济发展模式,减少化石能源的使用,增加太阳能、氢能等清洁能源的占比^[89]。2003年,英国颁布能源白皮书,将低碳经济纳入国家发展政策。早期的低碳经济理论主要从能源结构出发,将降碳重点放在能源需求侧^[90]。20世纪以来,低碳经济理论更多以资源利用效率和能源利用效率为出发点,强调环境、社会和经济三方面的协同发展,通过改进技术和管理手段提高生产效率和资源利用效率,从而降低碳排放。

低碳经济理论注重经济效益与生态效益同步提升,是一种人与自然和谐共生

的发展。数智融合依托信息技术实现生产与管理的效率同步提升，以降低化石能源消耗量，减少多种污染物排放。并且数智融合加速产业转型升级，促进经济高质量发展。由此可见，低碳经济的目标与数智融合的目标是一致的，数智融合对减污降碳协同管控效率的影响也进一步体现在低碳经济理论层面上^[91]。

2.2.2 系统理论

系统理论是一种研究系统的一般模式、结构和规律的管理学理论，在系统论的视角下，任何复杂现象或问题都是一个动态平衡的系统，其内部存在着反馈机制、自组织性和层次性等特征，可以通过调整系统内部要素结构和系统外部环境来优化整个系统的功能和效率^[92]。将系统理论应用于数智融合与减污降碳协同管控的研究中，关键在于识别并分析构成这一复杂系统的关键要素、它们之间的相互作用以及系统整体的动态变化。具体而言，数智融合作为技术创新的驱动力，通过优化资源配置、提升决策效率、增强监管能力等种种方式直接或间接地影响减污降碳协同管控效率。同时，为实现减污降碳这一目标又需要对数智融合提出更高的要求，进一步促进数智技术迭代升级。在这一过程中，政府、企业、公众等多方主体的参与和互动构成了系统的多层级结构，在研究过程中也需要结合系统理论来分析子系统变化对整个系统功能所产生的影响^[93]。

可以看到，以系统理论为基础，结合数智融合的特点，能够构建一个全面、动态的理论框架，为深入探索数智融合对长三角地区减污降碳协同管控效率的影响机制提供坚实的理论基础。

2.2.3 协同理论

协同理论是对系统科学的进一步深化应用。协同理论最初由德国物理学家赫尔曼·哈肯（Hermann Haken）提出，其核心在于揭示复杂开放系统中的子系统通过非线性相互作用产生有序结构的内在机制^[94]。协同理论的核心包括三点：一是关键变量决定系统整体行为；二是快变量受慢变量支配，子系统服从宏观序参量调控；三是协同效应主要体现为要素整合产生的效能跃升，即“ $1+1>2$ ”^[95]。相较传统系统论，协同理论更强调系统自组织过程中内生动力的生成逻辑，同时协同论的普适性使得其广泛应用于各种不同学科中的现象分析。也正因如此，协同

论对管理理论的发展以及解决现实管理领域相关问题具有重要意义，能够带来新的思维模式，这也为解析数智技术驱动下的环境治理系统转型提供了独特视角。

本文研究对象减污降碳协同管控效率具有典型的复杂系统特征，污染控制与碳减排双重目标，长三角三省一市行政主体的差异化，共同构成了多层级镶嵌的耗散结构^[96]。数智融合技术本质上是协同增效工具。物联网实现的对环境数据实时采集，人工智能支持多目标的决策优化，区块链技术能够保障跨域信息共享，这些技术集群通过增强子系统间物质、能量与信息的交换效率，降低系统协同熵值^[97]。利用协同理论，破除传统环境治理研究的单一视角，通过协同作用链条为区域环境治理现代化提供新的分析范式，后续研究结合超效率 SBM 模型定量测度长三角城市减污降碳协同管控效率，并识别数智融合影响效率的关键路径。

2.3 研究区域概况

本文选取长三角城市群作为研究对象，空间范围覆盖上海市、江苏省、浙江省以及安徽省，共计 41 个地级及以上城市。其中，江苏省包含南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、宿迁等 13 个城市，浙江省涵盖杭州、宁波、温州、嘉兴、湖州、绍兴、金华、衢州、舟山、台州、丽水等 11 个城市，安徽省涉及合肥、淮北、亳州、宿州、蚌埠、阜阳、淮南、滁州、六安、马鞍山、芜湖、宣城、铜陵、池州、安庆、黄山等 16 个城市。研究区域空间分布如图 2-1 所示。

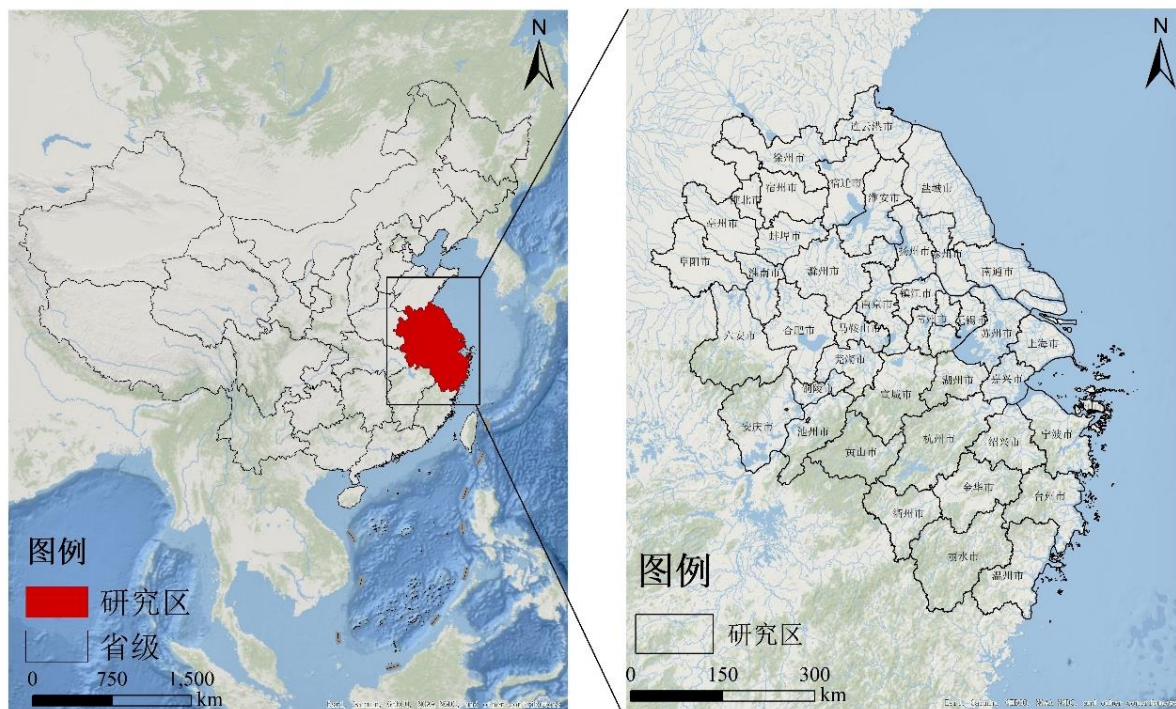


图 2-1 研究区域示意

长三角区域依托“一核多级”的空间格局，以上海为核心，南京、杭州、合肥、苏州等中心城市为枢纽，构建了多层级、网络化的城市体系。在政策层面，长三角是首个以“一体化”与“高质量”双目标驱动的国家战略区域，其发展路径是探索跨省级行政边界协同治理的典型范本。在经济层面，2024 年长三角地区生产总值突破 33 万亿元，占全国比重约 24%。上海以其国际金融、贸易、航运与科创中心功能，承担资源配置与全球链接枢纽角色；江苏聚焦集成电路、生物医药等高端制造领域，；浙江在数字贸易、民营经济等领域建立显著优势；安徽以合肥综合性国家科学中心为引擎，推动新能源、量子科技的技术突破。在创新层面，建设张江、合肥等科学城，形成基础研究—技术转化—产业应用的全链条创新体系。

在当前发展阶段中，长三角正经历从效率优先向可持续发展范式的转型。长三角以其高密度、高复杂性、高政策协同性的特征，使之成为我国研究可持续发展的样板地区，研究该区域既能揭示数智化发展与环境治理深度融合的作用机制，又能为我国实现低碳转型提供现实路径。

2.4 本章小结

本章通过核心概念界定与理论框架搭建，为后续分析打下理论基础。数智融合发展指数字化与智能化技术的深度融合与创新应用。数字化以数据采集、传输与处理为核心，智能化通过机器学习等技术赋予系统自主决策与优化能力。其本质是“智能数字化转型”，通过重构产业链、优化生产流程、创新社会治理等方式，推动技术渗透与产业变革。数智融合具有高创新性、强渗透性特征，通过数据驱动赋能传统产业升级、催生新业态，并在环境治理中实现精准监测与高效管控。减污降碳协同管控效率强调污染物减排与碳减排目标的系统性协同，以环境、经济与社会效益统一为导向。协同性体现于目标的协同、手段的协同以及管理的协同三方面。

低碳经济理论、系统理论与协同理论为解析数智技术驱动下的区域环境治理转型提供了方法论依据。低碳经济理论以可持续发展为导向，强调通过能源结构优化与技术革新减少碳排放。数智融合通过提升资源利用效率、加速产业绿色转型，与低碳经济目标形成理论契合，为减污降碳提供技术支撑。系统理论能够将环境治理视为动态复杂系统，关注数智技术对系统要素的整合作用。数智融合通过实时数据采集、智能决策与跨域协同，优化系统资源配置与运行效率，推动减污降碳目标实现。协同理论揭示了子系统非线性互动产生的协同效应。数智技术通过增强跨层级、跨领域协同，降低系统熵值，提升治理效能。

最后简述长三角概况，长三角地区数智技术基础雄厚、数据资源丰富且环境问题紧迫，与本文的研究问题关联性强，不论从宏观区域还是微观城市，长三角地区的发展经验都具有迁移性，使得该地区成为探讨数智融合发展对减污降碳协同管控效率影响路径的理想区域。综上所述，本章为后续研究形成了必要的理论铺垫，也为研究区域的划定提供了明确的导向。

第3章 长三角城市数智融合与减污降碳协同管控效率的测度及时空演变

本章基于第二章从理论层面分析的数智融合对减污降碳协同管控效率的影响作用，构建数智融合水平评估指标体系，运用熵值法对各项指标赋权，分析其动态演变规律，同时采用投入产出分析方法对长三角城市减污降碳协同管控效率及其时空演变规律进行测度分析，为后续实证检验奠定基础。

3.1 长三角城市数智融合发展指数的测度与时空演变

3.1.1 指标体系构建

基于 2011-2023 年长三角地区 41 个地级市面板数据，考察数智融合对减污降碳协同管控效率的影响效果和作用机制。鉴于当前数智融合指数尚未形成公认的度量标准，且现有研究大多仅采用数字经济发展指数这一单一指标进行探讨，未能充分融入智能化相关指标。因此本章在指标体系构建上进行了创新尝试，借鉴张雪玲和焦月霞^[98]、Wang et al.^[99]的研究成果，同时充分考虑了数据的可得性，从数智业务、数智产业、数智基础设施和人文素质四个方面出发，构建了一个全面测度数智融合水平的指标体系，如表 3-1 所示。这一指标体系的构建不仅丰富了数智融合的研究视角，还为后续深入分析数智融合对减污降碳协同管控效率的影响提供了坚实的数据支撑。

表 3-1 数智融合指数测算指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标度量	指标属性	权重
数智融合指数	数智业务	软件业务	信息传输、软件和信息技术服务业产值（亿元）	正向	0.070
		电信业务	电信业务总量（亿元）	正向	0.030
			通信技术制造业主营业务收入（亿元）	正向	0.046
		电商业务	快递业务量（万件）	正向	0.045

数智产业	产业聚集	信息传输、软件和信息技术服务业就业人数/行政区划面积（万人/平方公里）	正向	0.160
		科学研究和技术服务业就业人数/行政区划面积（万人/平方公里）	正向	0.180
	产业规模	第三产业增加值占 GDP 比重（%）	正向	0.003
		通信设备、计算机及电子设备制造业法人单位数（个）	正向	0.035
		科学研究和技术服务法人单位数（个）	正向	0.030
数智基础设施	数智基建	互联网宽带接入用户数/常住人口数（万户/万人）	正向	0.130
		移动电话年末用户数（万人）	正向	0.014
	普惠金融	电话普及率（部/百人）	正向	0.007
		北京大学数字普惠金融指数	正向	0.004
数智人文素质	人力资本	高等学校在校生人数/年末总人口（%）	正向	0.100
		人均受教育年限（年）	正向	0.004
	科教投入	地方教育投入支出占财政支出比重（%）	正向	0.003
		地区科技投入支出占财政支出比重（%）	正向	0.008
	创新投入	规模以上工业企业 R&D 经费（亿元）	正向	0.130

3.1.2 测算方法

为计算各城市的数智融合指数，采用熵值法对各项指标进行赋权。熵值法作为一种多指标综合评价的数学方法，其依据各项指标的离散程度，通过信息熵来客观计算各指标的权重。该方法因具有客观性强、灵敏度高、适用性广等显著优点，已被广泛应用于各领域的综合评价中。具体计算步骤公式为(3.1)-(3.7)：

第一步，数据标准化处理：

正向指标：

$$X_{ij} = \left[\frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})} \right] \quad (3.1)$$

负向指标:

$$X_{ij} = \left[\frac{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}) - x_{ij}}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})} \right] \quad (3.2)$$

式中, X_{ij} 表示标准化后的各指标值, x_{ij} 表示原始指标值, i 和 j 分别表示年份和指标。

第二步, 计算各指标占比:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij}} \quad (3.3)$$

式中, P_{ij} 表示权重, n 表示研究年份的数量, m 表示度量指标的数量。

第三步, 计算信息熵和差异系数:

$$E_j = \frac{-1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3.4)$$

$$G_j = 1 - E_j \quad (3.5)$$

式中, E_j 表示信息熵, 其取值范围为[0,1], G_j 为第 j 项指标的信息熵冗余度, 信息熵冗余度越大表示该指标权重越大。

第四步, 计算权重:

$$W_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j} \quad (3.6)$$

式中, W_j 表示各项指标权重, m 表示指标的个数。

第五步, 计算各城市数智融合发展指数:

$$S_{ij} = \sum_{j=1}^m W_j X_{ij} \quad (3.7)$$

式中， S_{ij} 表示第 i 年 第 j 个城市的数智融合发展指数。

3.1.3 数智融合发展指数的时空演变规律分析

核密度估计作为一种非参数化的概率密度估计方法，通过构建平滑的密度函数曲线，直观且量化地展现数据的分布特性，无需依赖数据分布的先验假设，能精确捕捉数据的高密度区、低密度区以及分布变化趋势，在数据分析中具有重要的应用价值。运用 MATLAB 软件对 2011-2023 年长三角 41 个城市在数智融合发展水平进行了动态演示（见图 3-1），揭示长三角区域 12 年间数智融合的演变轨迹与特征。结果显示，密度函数分布逐渐右移，表明区域数智融合水平整体上升，平均值由 0.017 提升至 0.079。同时，密度曲线的波峰降低，宽度增加，意味着数智融合水平的分布由集中趋于分散，城市间数智融合发展的差异扩大，呈现多样化模式。核密度曲线波峰数量的增多，则显示出数智融合发展呈现出多极化趋势，城市间竞争加剧，新兴增长极不断涌现。此外，核密度曲线的右侧拖尾的显著延展，进一步印证了区域数智融合水平的整体提升，部分城市实现超平均的显著增长，形成“长尾效应”。

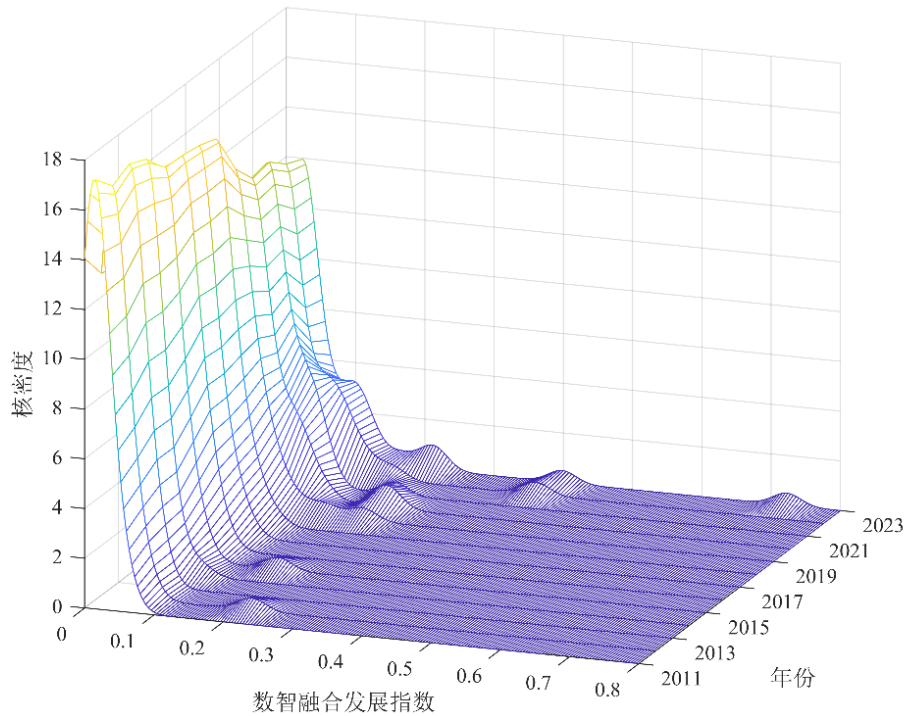


图 3-1 2011-2023 年长三角数智融合核密度曲线

对长三角 41 个城市的数智融合水平动态变化情况进行可视化分析,结果如图 3-2 所示。2011 年,数智融合的前沿阵地主要集中在上海、苏州和杭州,其指数分别为 0.059、0.053 和 0.042。至 2016 年,省会城市及上海的数智融合水平显著跃升,形成由省会向外围逐渐减弱的空间分布格局。而安庆、淮南、淮北、亳州和池州的数智融合水平较低,指数分别是 0.01、0.01、0.010、0.009 和 0.008。此阶段,上海、杭州、苏州领跑,尤为值得注意的是,杭州的发展指数已超越苏州。进入 2021 年,长三角区域各城市的数智融合水平实现了全面飞跃,空间上呈现出由内陆地区向沿海递增的趋势。其中,浙江的城市占据了高发展水平 80% 的份额,彰显了其在数智融合领域的蓬勃活力。浙江省在此进程中采取了卓有成效的策略,在数字政府建设、数字经济发展、数字基础设施和推进浙江数商高质量发展等多方面形成“十四五”规划的顶层设计,围绕数字政府转型、经济提振、社会治理创新、科技进步、大数据要素市场生态到保障体系建设等多维度布局,明确勾勒了推动全方位数智融合的发展蓝图,为数字技术与实体经济的深度融合塑造了良好政策生态。相比而言,安徽省大部分的数智融合水平比较低,原因在于该省数字经济总量规模相对较低,在融合设施建设方面相对滞后,如 2020 年全国跨行业

领域平台中长三角入选重点平台中，安徽无一上榜，已建大型数据中心数量相较于浙江还有较大差距，投产机架数量约为上海的 1/5,这限制了数智融合所需的算力支持。而且城市间和城乡间的数字经济鸿沟显著，六安、淮南、淮北、池州这些经济欠发达城市数字基础建设投入与合肥相差较大，这种不均衡现象制约了数智融合在省内的均衡发展，此外，相较于沪、浙两地，安徽省数据要素市场培育偏滞后，数智融合市场层面的发展受到限制。

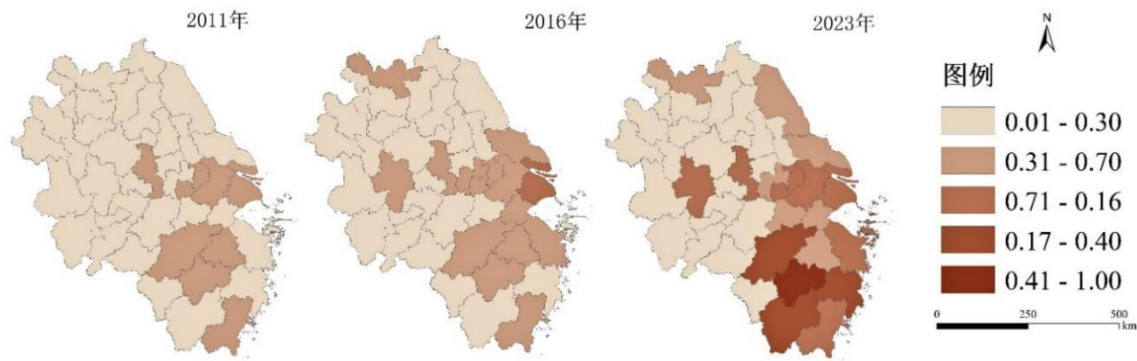


图 3-2 长三角数智融合空间动态演变

3.2 长三角城市减污降碳协同管控效率的测度与时空演变

3.2.1 数据来源及效率模型构建

构建长三角城市减污降碳协同管控效率的评价指标体系如表 3-2 所示。投入要素包括资本、能源和劳动力。其中，以资本要素按照以永续盘存法计算的长三角各城市的资本存量表征；以转化为标准煤当量的各类能源消耗总量衡量能源要素；以年末从业人数衡量劳动力要素。产出分为期望产出和非期望产出两部分，以全面反映减污降碳的协同管控效果。期望产出主要关注地区经济产值，用国民生产总值表征。为排除价格变动影响，以 2010 年为基期对各城市生产总值进行了可比价换算，以增强数据可比性。非期望产出则涵盖了以 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 为代表的大气污染物排放，以及以 CO_2 为代表的温室气体排放，其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度采用各城市月度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的算术平均值来表示，以科学反映空气污染状况。

表 3-2 减污降碳协同管控效率测度指标体系

目标层	准则层	指标类型	具体指标
减污降碳 协同管控效率	投入要素	资本	资本存量/亿元
		能源	能源消耗量/吨标准煤当量
		劳动力	年末从业人数/万人
	期望产出	地区产值	地区国民生产总值 GDP/亿元
	非期望产出	大气污染物	SO ₂ 、NO _x /吨
			PM _{2.5} 浓度
		碳排放	CO ₂ 排放量/百万吨

3.2.2 测算方法

与传统径向 DEA 模型相比,超效率 SBM 模型全面考虑松弛变量,能够处理数据中的非零松弛情况,使得评估结果更为全面^[100]。基于此,本文构建了超效率 SBM 减污降碳协同管控效率模型,对决策单元 (DMU) 进行效率测度,其中每个 DMU 的效率表达式为:

$$\begin{aligned}
 \rho^* = \min & \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{ik}}}{1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \frac{S_r^+}{y_{rk}} + \sum_{t=1}^{q_2} \frac{S_t^-}{b_{tk}} \right)} \\
 \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} x_{ik} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - S_i^- \\ y_{rk} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + S_r^+ \\ b_{tk} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n b_{tj} \lambda_j - S_t^- \\ 1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \frac{S_r^+}{y_{rk}} + \sum_{t=1}^{q_2} \frac{S_t^-}{b_{tk}} \right) &> 0 \\ \lambda_j &\geq 0, S_i^- \geq 0, S_r^+ \geq 0, S_t^- \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

式中: ρ^* 为目标效率值; k 为被测算的 DUM; λ_j 为 DUM 的权重; 每个 DUM

有 m 个投入指标: $x_i(i=1,2,\cdots,m)$; q_1 个期望产出指标: $y_r(r=1,2,\cdots,q_1)$; q_2 个期望产出指标: $b_t(t=1,2,\cdots,q_2)$; 这里 $m=3, q_1=1, q_2=2$ 。 S_i^- 、 S_r^+ 、 S_t^+ 分别表示投入 x_i 、期望产出 y_r 和非期望产出 b_t 的松弛变量; ρ^* 越大说明减污降碳治理效率越高, 反之则越低。

3.2.3 减污降碳协同管控效率的时空演变规律分析

基于核密度图的数据剖析, 长三角地区减污降碳管控效率的整体演进趋势与内部结构变迁得以清晰展现。图 3-3 揭示, 研究期间内, 减污降碳管控效率的密度分布显著右移, 标志着区域管控效率全面提升, 呈现稳步上扬态势。具体而言, 效率均值由 0.10 大幅跃升至 0.62, 既彰显了数量上的显著增长, 也映射出各地区在环境管理、污染防治及碳减排方面取得的实质性进步与成就。进一步观察密度曲线的形态变化, 可见波峰降低且宽度拓宽, 意味着高效管控区域由集中走向分散, 更多地区迈入高效行列, 形成了更为均衡、全面的发展格局。同时, 波峰数量的增加预示着减污降碳管控效率呈现多极化趋势, 各地政府根据自身实际, 采取差异化策略, 催生了多个增长极。核密度曲线的右延展特征尤为显著, 不仅拓宽了延展性, 更进一步证实了区域管控效率的整体提升。右延展表明, 高效管控区域不仅在数量上扩容, 更在质量上实现了飞跃, 对整体管控效率产生了强大的拉动效应。

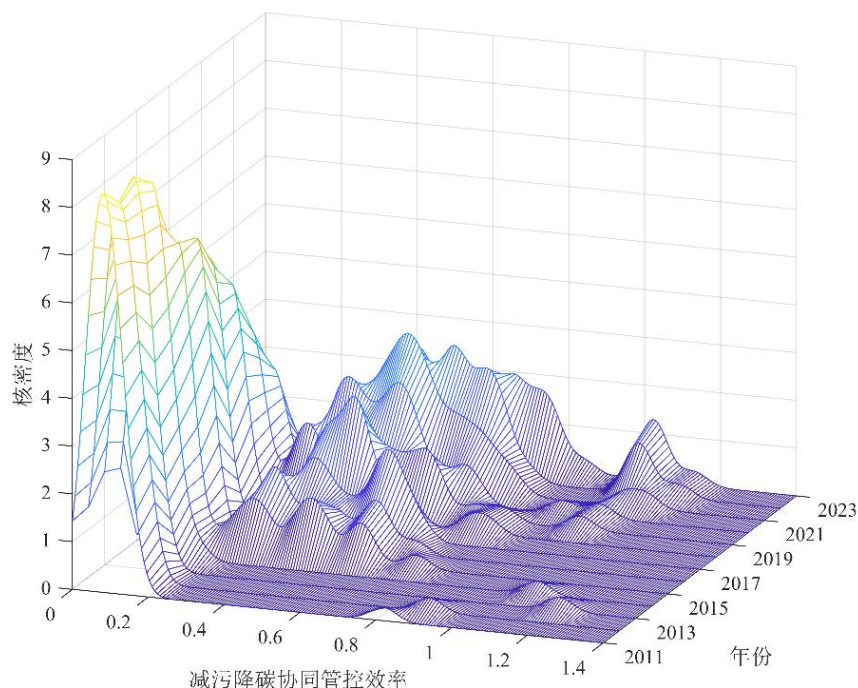


图 3-3 2011-2023 年长三角减污降碳协同管控效率核密度曲线

图 3-4 为长三角 41 个城市减污降碳管控效率动态变化的可视化呈现。随时间推移，减污减碳管控效率前沿面由零星单一城市扩展为上海及苏浙两省大部分的沿海城市。2011 年，长三角区域减污降碳管控效率普遍偏低，半数城市效率不足 0.1。至 2016 年，虽整体有所提升，73% 的城市效率超过 0.1，但多数仍集中在 0.1-0.2 区间，保持低位徘徊。此现象与“十二五”规划期间经济结构优化缓慢、新兴产业规模有限及生态环境压力加剧等因素相关。步入 2021 年，长三角各城市减污降碳管控效率迎来显著提升。江苏省率先垂范，发布《江苏省重点行业建设项目碳排放环境影响评价技术指南（试行）》，将电力、石化等六大行业纳入，推动污染物与碳排放评价管理深度融合。浙江则强化金融支持，出台指导意见，加大减污降碳领域资金投入，构建多元激励机制，提升金融服务普惠性与适配性。上海为污染防治攻坚，发布《上海市 2020 年节能减排和应对气候变化重点工作安排》，加速产业、能源等结构调整，完善能源“双控”制度，推进煤炭替代与垃圾分类，加快生态绿化与污染治理基础设施建设。安徽则统筹污染防治，出台水泥工业排放标准，加强监管，构建智慧监管体系，打造“数字江淮—生态环境”平台。这些措施都有利于长三角城市减污降碳效率的不断提高。

从减污降碳协同管控效率均值来看，黄山、温州、上海、宿迁和泰州位居前五。在效率提升幅度上，上海、杭州、宿迁、黄山、泰州及宁波南通表现突出，分别提升了 0.98、0.97、0.94、0.93、0.92 和 0.74。这凸显了地区间在减污降碳治理效率上的显著差异。江浙沪地区凭借服务经济的高占比、绿色发展理念的先行一步、产业结构的合理规划、节能减排技术的显著成果以及环境监管体系的完善，减污降碳成效斐然。相比之下，安徽因承接长三角部分高污染高耗能产业，经济发展水平相对滞后，产业结构不尽合理，加之温室气体及污染物排放管控措施不够有力，治理力度欠缺，导致减污降碳效果不够显著。

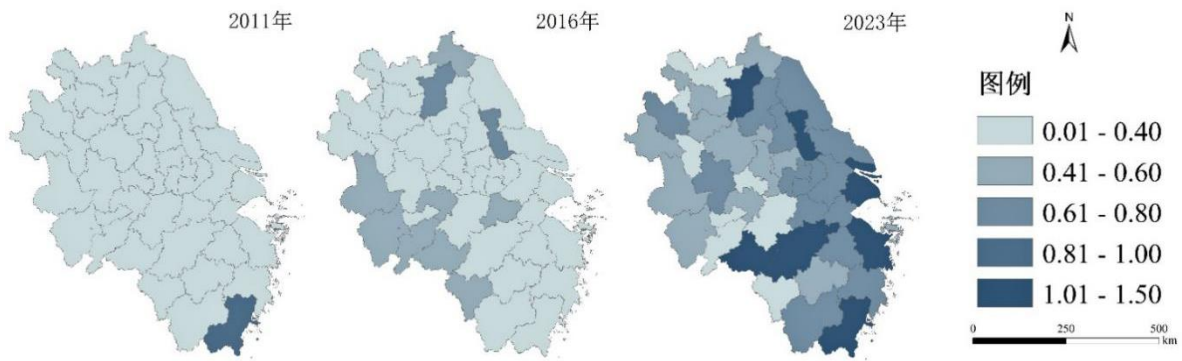


图 3-4 长三角减污降碳协同管控效率空间动态演变

3.3 本章小结

本章节首先从数智业务、数智产业、数智基础设施和人文素质四个方面出发，构建测度数智融合水平的指标体系，通过熵值法进一步测算数智融合发展整体水平，并对其进行时空演变规律分析。其次，根据投入产出方法构建超效率 SBM 模型测算长三角地区减污降碳协同管控效率，最后对地区减污降碳协同管控效率的时空演变进行分析。

从结果上看，第一，长三角城市数智融合发展指数的空间分布与对应地区经济发展水平具有密切联系。第二，从数智融合发展指数的细分指标来看，长三角城市数智业务、数智产业、数智基础设施和数智人文素质四个方面在样本期内均有所提高。第三，从减污降碳治理效率的结果可知，上海以及江浙沿海城市在治理效率提升较快，安徽地区对减污降碳的协同管控效率相对较低，城市间治理效

率存在明显差距。基于上述结论，长三角三省一市应继续突出数智融合基础设施建设，加大数智产业发展的扶持力度，进一步强化区域协同减排机制，构建联动的减污降碳治理体系，在数智融合全面发展的基础上推动区域生态环境质量实现全面提升。

本章通过构建全面的数智融合指数和减污降碳协同管控效率评价体系，揭示了长三角地区在数智融合与减污降碳协同管控方面的动态变化和发展趋势。数智融合的深化为减污降碳提供了新的动能，而各城市在政策执行和资源配置上的差异则导致了减污降碳效率的显著差异。未来，进一步加强区域间的协调与合作，推动数智融合与减污降碳工作的协同发展，将有助于实现可持续发展目标。

第4章 长三角城市数智融合发展对减污降碳协同管控效率的影响

本章聚焦于数智融合与减污降碳协同管控效率的关联机制，采用理论建模与实证检验相结合的研究方法。首先考察数智融合对减污降碳协同管控效率的直接促进效应，在此基础上探究数智融合能否通过优化能源消费结构、促进绿色技术创新两条路径影响减污降碳协同管控效率。

4.1 数智融合影响减污降碳协同管控效率的作用机制

4.1.1 数智融合对减污降碳协同管控效率的直接影响

数智融合发展是技术、数据、场景、生态和产业深度交融的过程，引领产业向“低能耗、高产出、高回报”的转型之路迈进。低碳经济理论表明，数智融合发展通过提升低碳技术创新水平，促进全要素碳生产率增长，将经济增长与碳排放分离脱钩。数智技术，凭借其绿色低碳、融合创新和开放共享的特性，对环境产生正向效应^[101]。首先，数智融合发展将数据要素融入到劳动力、资本和技术等传统生产要素中，优化资源配置效率，提升生产效率，有效减少工业生产过程中的非期望产出，从而减少环境污染、缓解气候问题^[102]。其次，数智化技术助力大数据产业、人工智能产业等新兴产业的蓬勃发展，通过产业关联、技术扩散等效应，推动传统产业转型升级。伴随产业结构的优化，高污染、高能耗产业逐渐被淘汰，新兴产业将更倾向于采用绿色、清洁的生产要素，实现减污降碳的治理效果^[103]。最后，数智融合发展催生的新模式、新产业悄然改变着消费者的选择偏好，数智基础设施的不断完善，为培养消费者绿色低碳生活方式提供了坚实基础。通过大数据识别消费者消费习惯，形成消费碳足迹数据，既满足消费需求，又激励低碳消费^[104]。同时，信息技术、智能技术与传统畜牧业相融合，通过智慧养殖系统提高家畜出栏率，提高农业生产效率；物流业借助人工智能算法实现车辆自动驾驶和智能调度，优化物流运输和仓储管理效率，降低碳排放^[105]。基于上述分析，本文提出如下假设：

H1: 数智融合发展有利于提高减污降碳协同管控效率

4.1.1.2 数智融合对减污降碳协同管控效率的间接影响

数智融合能够消除信息壁垒，加速资源整合与创新边界的拓展，将数据资源与信息技术深度融合于产品创新与生产过程中^[106]。从宏观层面来看，数智深度融合为产业发展带来新局面。大数据、云计算、人工智能等前沿技术极大地加速了知识的生产与传播效率，丰富了社会的知识存量，吸引人才、资本等创新要素聚集，有力推动了社会技术创新能力的跃升^[107]。它不仅催生了新兴产业的蓬勃发展，还通过优化资源配置与创新生态，为传统产业的数智化转型注入强劲动力。从微观层面来看，大数据、互联网的普及打破了数据孤岛现象，促进了企业间的信息流通与资源共享。这不仅加速了传统行业的数智化步伐，还促成了企业间创新联盟的构建，共同提升创新效率^[108]。通过汇聚创新要素、提高创新效率，数智融合在生产源头上激发了绿色技术的研发与应用，为实现减污降碳的协同高效管理提供了有力支撑。基于上述分析，本文提出如下假设：

H2: 数智融合通过技术创新效应提高减污降碳协同管控效率。

我国产业长期依赖高耗能模式，形成了以煤炭、石油等化石能源为主导的能源消费格局。这种能源结构存在化石能源占比高、能源效率偏低及产能过剩等问题，致使单位 GDP 碳排放居高不下，大气污染问题严峻。因此，优化能源结构、提高能源利用率是减污降碳协同管控的首要任务。在能源供给侧出，数智化发展正驱动能源生产部门的数字化改革，通过物联网、大数据等数智技术，对能源生产、传输、分配及消费实施全链条数字化管理，实现能源跨区高效调配，进而优化能源消费结构。周孝信等指出，将人工智能等数智技术接入智能电网^[109]，助力能源互联网构建，是推进能源结构转型的新路径^[110]。从产业结构视角看，以产业智能化为引擎的新型服务业正带动产业结构绿色转型，间接优化了能源结构^[111]。詹帅等^[112]发现农业数智化发展不仅能够有效提高农产品供给效率，降本增效，还能促进农村现代服务业发展，减少农业活动碳排放。同时，Kamble et al.^[113]认为智能生产系统助力企业实现精益化生产，有效减少资源浪费与能源消耗。基于上述分析，本文提出如下假设：

H3: 数智融合通过促进能源生产部门数字化转型、带动产业结构绿色转型等机制, 优化能源结构, 进而提高减污降碳协同管控效率。

4.2 研究设计

4.2.1 模型构建

鉴于超效率 SBM 模型所得效率值具有非负截断性, 本章采用 Tobit 回归模型分析数智融合对长三角城市减污降碳协同管控效率的影响, 以规避参数估计偏差。构建的 Tobit 回归模型如下方程所示:

$$RPCE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DIF_{it} + \alpha_2 Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4.1)$$

式中: $RPCE_{it}$ 表示减污降碳协同管控效率; DIF_{it} 表示数智融合指数; $Controls_{it}$ 是一组控制变量。参考刘亦文^[114]和罗能生^[115]的研究, 选取人均 GDP 表征经济发展水平, 城镇人口比重衡量城市化水平, 研究与试验发展经费占 GDP 的比重反映科技投入强度, 用进出口贸易总额与 GDP 比值表征贸易能力, 以人均道路面积表示基础设施建设。 i 和 t 分别表示城市和年份; α_0 、 α_1 、 α_2 为待估回归系数; ε_{it} 为随机误差项。

为探讨数智融合对减污降碳协同管控效率的潜在影响机制, 根据前文所述, 对能源结构调整和技术进步是否作为二者之间的中介变量进一步验证。参考江艇的方法^[116]构建中介效应模型检验: 在数智融合发展指数(DIF)对减污降碳协同管控效率($RPCE$)的回归结果显著的基础上, 进一步构建 DIF 对与中介变量绿色发明专利 (Pat) 的回归方程, 以及 DIF 和 Pat 对 $RPCE$ 的回归方程, 通过回归系数的显著性判断中介效应是否存在。同理, 对中介变量能源消费结构 ($Coal$) 进行检验。具体形式设定如下:

$$RPCE_{it} = \rho_0 + \rho_1 DIF_{it} + \rho_2 Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4.2)$$

$$Pat_{it} = \beta_0 + \beta_1 DIF_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4.3)$$

$$RPCE_{it} = \delta_0 + \delta_1 DIF_{it} + \delta_2 Controls_{it} + \delta_3 Pat_{it} + \varepsilon_{it}'' \quad (4.4)$$

$$Coal_{it} = \beta_3 + \beta_4 DIF_{it} + \beta_5 Controls_{it} + \varepsilon_{it}' \quad (4.5)$$

$$RPCE_{it} = \delta_4 + \delta_5 DIF_{it} + \delta_6 Controls_{it} + \delta_7 Coal_{it} + \varepsilon_{it}'' \quad (4.6)$$

其中：技术创新能力(*Pat*)以地区年度绿色实用新型发明专利申请占比衡量，能源消费结构(*Coal*)则以煤炭在能源消费中的比例表示。数智融合对减污降碳协同管控效率影响的总效应记为 ρ_1 ，其对中介变量的影响效应为 β_1 ，控制中介变量后数智融合对减污降碳协同管控效率的直接效应分别为 δ_1 、 δ_5 ，而 δ_3 、 δ_7 则代表控制数智融合后，中介变量对减污降碳协同管控效率的影响程度。

4.2.2 变量选取

(1) 解释变量与被解释变量

研究选取的被解释变量为减污降碳协同管控效率(*RPCE*)，核心解释变量为数智融合发展指数(*DIF*)，具体测度结果在第三章已经进行详细说明。

(2) 中介变量

本章以地区年度绿色实用新型发明专利申请占比衡量技术创新能力(*Pat*)，绿色发明专利占例越大，则技术创新水平越高；以煤炭在能源消费中的比例表示能源消费结构(*Coal*)，煤炭占比越低，则能源消费结构更加绿色化、清洁化。

(3) 控制变量

参考刘亦文^[114]和罗能生^[115]的研究，选取人均GDP表征经济发展水平，城镇人口比重衡量城市化水平，研究与试验发展经费占GDP的比重反映科技投入强度，用进出口贸易总额与GDP比值表征贸易能力，以人均道路面积表示基础设施建设。

4.2.3 变量的描述性统计

从表4-1可知，减污降碳协同管控效率的标准差为0.24，平均值为0.23，最小值为0.03，最大值为1.27，表明该变量的数据分布较为集中，但存在一定的波

动性，表明不同样本之间的减污降碳效率存在差异。其次，数智融合发展指数的标准差为 0.05，平均值为 0.03，最小值为 0.01，最大值为 0.72。标准差和平均值较小，说明指数整体波动较小，样本间的数智融合发展程度相对较为一致。科研投入强度的标准差表明科研投入强度整体波动较小，但仍有部分样本在科研投入上表现出较高的强度。各变量在样本中的表现呈现出不同程度的波动性和差异性，这反映了不同地区在减污降碳、数智融合、经济发展、城市化水平、科研投入、贸易能力以及基础设施建设等方面的多样化特征。

表 4-1 变量描述性统计

变量名称	符号	样本量	标准差	平均值	最小值	最大值
减污降碳协同管控效率	RPCE	533	0.24	0.23	0.03	1.27
数智融合发展指数	DIF	533	0.05	0.03	0.01	0.72
经济发展水平	lnEconomic	533	0.58	11.13	9.32	12.24
城市化水平	Urban	533	12.10	62.73	31.30	89.60
科研投入强度	GTE	533	0.01	0.02	0.00	0.12
贸易能力	Trade	533	2.05	0.44	0.00	45.36
基础设施建设	Infrastructure	533	7.27	23.30	3.80	46.40

4.2.4 数据来源及处理

本研究的数据指标主要源自 2012-2023 年的《中国环境统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国信息产业年鉴》、《中国统计年鉴》以及各城市统计局发布的官方数据，普惠金融指数则引用北京大学数字金融研究中心的研究成果。缺失数据采用线性插值或取平均值进行补足。

4.3 数智融合发展对减污降碳协同管控效率的影响

4.3.1 基准回归分析

为确保模型回归结果的精准度，本文进行了 VIF 检验以考察自变量间的多重共线性，结果显示 VIF 值低于 10，证实自变量间不存在多重共线性，模型构建科

学合理。

考虑异方差与序列自相关的影响,增强模型的稳健性,本研究对长三角数智融合指数与经济发展水平进行取对数处理,采用 Tobit 回归对系数进行估计。使用逐步引入控制变量的做法验证回归结果的可靠性。由表 4-2 结果可知,无论控制变量是否加入,核心解释变量的估计参数均通过了 1%显著性水平的检验,且呈现正向效应,与原假设一致。然而,控制变量的加入导致模型解释力有所下降,数智融合变量的系数由 1.7689 降至 1.123。这表明经济发展水平、城镇化进程、科研投入力度、对外贸易及基础设施建设等因素,在一定程度上削弱数智融合发展对长三角地区减污降碳协同管控效率的促进作用。这主要在于长三角区域城镇化与工业化仍高度依赖煤炭等化石能源,短期内能源消耗需求持续旺盛,而化石能源正是大气污染物与碳排放的主要源头。因此,通过产业结构调整、能源清洁利用及末端治理等措施推进减污降碳协同管控,其生态环境治理成效具有一定的滞后性,需经过较长时间周期方能显现。

表 4-2 Tobit 回归实证结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	RPCE	RPCE	RPCE	RPCE	RPCE	RPCE
DIF	1.768*** (0.210)	1.132*** (0.190)	1.151*** (0.192)	1.086*** (0.192)	1.120*** (0.195)	1.123*** (0.196)
lnEconomic		0.320*** (0.026)	0.357*** (0.050)	0.345*** (0.050)	0.343*** (0.050)	0.338*** (0.055)
Urban			-0.003 (0.003)	-0.004 (0.003)	-0.004 (0.003)	-0.004 (0.003)
GTE				2.202** (0.794)	2.174** (0.794)	2.177** (0.795)
Trade					-0.004 (0.004)	-0.004 (0.004)

Infrastructure						0.001
						(0.002)
_cons	0.165***	-3.374***	-3.623***	-3.459***	-3.431***	-3.394***
	(0.020)	(0.292)	(0.408)	(0.408)	(0.409)	(0.442)
N	533	533	533	533	533	533

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平下显著，括号内数值为标准误，下同。

4.3.2 中介效应检验

如表 4-3 所示，模型 I 验证了数智融合对长三角减污降碳协同管控效率的正面影响，系数显著为正，与前文结论相符。模型 II 则揭示了数智融合对技术创新的促进作用，结果显示长三角数智融合发展能显著激发技术创新活力。模型 III 中，数智融合与技术创新均呈现显著回归系数，表明存在部分中介效应。中介效应分析进一步揭示了技术创新对长三角减污降碳协同管控效率的积极影响，具体而言，长三角区域企业绿色技术专利申请占比每增加 1%，管控效率将提升 0.559%。这一效应得益于长三角新一代数智技术深化的深化应用，这些技术通过知识挖掘和信息处理的智能化，为技术创新提供了强大支撑，推动生产过程向自动化和数智化转型，减少了能耗和污染物排放，进而提升了减污降碳管控效率。模型 IV 探讨了长三角数智融合对能源消费结构的影响，结果显示数智融合系数为负且通过 10% 显著性检验，说明数智融合发展有助于降低能源结构中煤炭等化石燃料的占比，可能的解释是数智技术有利于降低长三角地区可再生能源发电不确定性和波动性影响，有力促进其大规模消纳，这有助于清洁能源使用占比提高，在一定程度上减少对化石能源的依赖。模型 V 中，数智融合、能源消费结构分别在 1% 水平和 10% 水平上显著，表明存在部分中介效应。考虑能源结构效应后，数智融合对长三角减污降碳协同管控效率的正向影响力度从 1.044 上升至 1.397，这显示能源结构是数智融合影响长三角减污降碳协同管控效率的重要传导路径。

表 4-3 中介效应检验结果

	I	II	III	IV	V
	RPCE	Pat	RPCE	Coal	RPCE
DIF	1.044*** (0.454)	0.0517* (0.88)	1.392*** (4.151)	-0.057* (-0.745)	1.397*** (4.149)
Pat			0.559* (1.864)		
Coal					-0.318*** (-2.699)
Controls	YES	YES	YES	YES	YES

4.3.5 内生性分析

鉴于模型可能存在因解释变量与随机扰动项相关而导致的内生性偏误问题，本文采用工具变量法进行修正，将核心解释变量的多期滞后项（滞后一期、二期、三期）及被解释变量的前置一期项作为工具变量引入模型。由表 4-4 的估计结果可知，在有效缓解内生性干扰后，数智融合仍显著促进了长三角城市群减污降碳协同管控效率的提升，且核心变量的系数值较基准模型有所增大，表明基础回归的结论具有稳健性。

表 4-4 内生性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	RPCE	RPCE	RPCE	RPCE	IV4
DIF	1.123*** (0.196)				1.802*** (0.323)
IV1		1.717*** (0.319)			

IV2	2.318***				
	(0.403)				
IV3	2.467***				
	(0.447)				
Controls	YES	YES	YES	YES	YES
_cons	-3.394***	-3.787***	-4.099***	-4.478***	-3.532***
	(0.442)	(0.489)	(0.535)	(0.584)	(0.475)
N	533	492	451	410	492

4.3.4 稳健性检验

为进一步验证数智融合对长三角减污降碳协同管控效率的影响，本文从回归模型、指数测算及数据结构三个维度进行了稳健性检验，结果见表 4-4。首先，运用最小二乘法进行回归分析，结果显示数智融合在 5%显著性水平上显著促进长三角减污降碳协同管控效率。其次，采用主成分法重新测度数智融合水平，检验发现，该方法下的数智融合水平同样对减污降碳协同管控效率产生显著正向影响，与基准回归结果高度一致。最后，从指标体系的二级指标出发，将长三角减污降碳协同管控效率细分为污染物排放量与碳排放量两个维度进行结构稳健性检验，以更精细地剖析数智融合的作用机制。回归结果表明，数智融合对长三角大气污染物排放量及碳排放量均呈现负向效应，即数智融合程度越高，减污降碳协同效应愈发显著，与基准回归结果相吻合。

表 4-5 稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)
	OLS 回归	指数测算方法	污染物排放量	碳排放量
DIF	1.044**	0.182***	-0.295***	-0.071**

	(0.454)	(0.028)	(0.041)	(0.025)
ln Economic	0.363**	0.058	-1.102***	0.186
	(0.140)	(0.046)	(0.157)	(0.097)
Urban	0.00155	-0.001	-0.008	0.011*
	(0.00794)	(0.002)	(0.008)	(0.005)
GTE	1.691	2.020**	-5.341**	-0.178
	(1.382)	(0.677)	(1.999)	(1.231)
Trade	-0.00184	0.000	-0.007	0.001
	(0.00339)	(0.003)	(0.008)	(0.005)
Infrastructure	-0.00542	0.004*	-0.027***	-0.008
	(0.005)	(0.002)	(0.008)	(0.005)
_cons	-0.738*	-0.754*	27.245***	6.952***
	(0.971)	(0.364)	(1.219)	(0.763)
N	533	533	533	533

4.4 本章小结

本章首先通过理论分析建立研究假设，其次构建计量模型系统检验了长三角城市数智融合发展对减污降碳协同管控效率的影响机制，并深入探讨了能源结构优化和技术创新在其中的中介作用。研究基于 2012-2023 年长三角城市面板数据，采用 Tobit 回归模型、中介效应模型及多维度稳健性检验方法，得出以下核心结论：

基准回归结果表明，数智融合发展对长三角地区减污降碳协同管控效率具有显著正向影响。通过 Tobit 模型分析，无论是否引入控制变量，数智融合指数(DIF)

的回归系数均在 1%水平上显著为正。在未加入控制变量时，DIF 系数为 1.768，表明数智融合水平每提升 1 单位，减污降碳效率可提升 176.8%。引入经济发展水平（lnEconomic）、城市化率（Urban）、科研投入强度（GTE）等控制变量后，DIF 系数虽降至 1.123，但依然保持高度显著性，验证了数智技术通过智能化、数据化手段优化资源配置的核心作用。值得注意的是，控制变量的引入削弱了数智融合的边际效应，反映出长三角地区当前城镇化与工业化仍依赖化石能源的阶段性特征，传统发展模式与新兴技术驱动的绿色转型之间存在一定张力。

中介效应结果显示，数智融合通过促进技术创新和优化能源消费结构两条路径间接提升减污降碳效率。具体而言：数智融合发展显著提升了绿色发明专利占比，系数为 0.0517。当同时纳入数智融合发展和绿色发明专利占比两个变量时，绿色发明专利占比系数为 0.559，在 10%的程度上显著，表明绿色技术每提升 1%，减污降碳效率可提高 0.559%。同时，数智融合发展能够显著降低煤炭消费在能源中的占比，系数为-0.057，同样在 10%的程度上显著。引入能源结构变量后，数智融合发展的系数从 1.044 升至 1.397，印证了数智技术通过提升清洁能源消费水平、优化能源管理系统对减污降碳协同管控效率的间接作用。在现实中，智能电网技术的应用能够有效缓解可再生能源的波动性，促进风电、光伏替代传统煤电，形成"结构优化型减排"路径。

为确保结论的可靠性，本章使用三个方法进行稳健性检验：首先，采用 OLS 回归替代 Tobit 模型，数智融合发展的系数仍保持 5%的显著水平且方向一致；其次，改用主成分分析法重构数智融合指数，核心解释变量系数仍然显著为正；最后，将减污降碳效率分解为污染物排放和碳排放两个维度，发现数智融合对两者分别产生-0.295 和-0.071 的负向影响，分别呈现 1%的显著水平和 5%的显著水平。三重检验均证实基准结论的稳健性。

第5章 基于SD模型的减污降碳协同效率驱动路径解析

前文评估了数智融合发展水平和减污降碳协同管控效率，分析了数智融合对减污降碳协同管控效率的影响作用。然而，传统回归模型在研究数智融合对减污降碳协同管控效率的提升作用时存在局限性：一方面，减污降碳作为多维驱动的非线性复杂系统，其演进过程涉及经济发展、人口规模、技术革新及能源消费等多要素的动态关联；另一方面，静态回归模型缺乏对非线性动态机制的刻画，无法实现情景的动态推演与策略优化。基于此，本章通过界定复杂系统的边界条件，建立包含人口增长、经济产出、科技创新与能源结构等核心要素的因果反馈网络，构建系统流图模型对数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的路径进行模拟仿真。

5.1 系统动力学原理

5.1.1 系统动力学的内涵

系统动力学是一门以控制论、信息论等相关理论为基础的学科，主要通过构建数学模型揭示系统内部组成要素的因果反馈关系，从而对复杂社会经济系统进行定量研究。

作为一种因果关系的机理性模型，系统动力学能够研究经济、社会、生态等多学科系统问题，建立整体与部分、宏观与微观、当前与未来相结合的调节机制，综合性地研究系统问题。

5.1.2 系统动力学的建模工具

系统动力学的基本思想是基于系统中的反馈和延迟，从而按照一定的规律构建因果逻辑关系，建立系统动力学流程图，对复杂系统构造和动态行为进行研究，主要运用因果关系图、系统流图和变量系统方程定量分析问题。

（1）因果关系回路图

系统动力学使用因果关系图描述系统内部要素间的因果反馈关系。因果关系回路图能够直观清晰揭示系统基本结构，由变量、因果链、极性构成。变量代表

了系统内的关键要素，因果链以箭头链接变量，箭头极性符号“+”和“-”，其中“+”为正向关系链，表示变量间的变化方向相同，“-”为负向关系链，变量间变化方向相反。在多元变量构成的复杂系统中，当变量间形成闭环因果链时，其相互作用产生两种不同的反馈机制：反馈路线分为正反馈与负反馈回路。正反馈回路即自我增强过程，回路中各个元素值的初始变化通过反复不断加强，系统出现指数增长趋势；负反馈回路即自我调整过程，回路中元素受干扰偏离原有状态，调节系统趋于一定值，使系统保持稳定状态。

（2）系统流图

系统流图是在因果关系图的基础上绘制的，以图形语言展示系统中状态变量、速率变量和辅助变量间的动态关系，刻画系统中要素的积累与流动过程。系统流图由存量、流量、辅助变量、信息链组成，其中存量表示系统内随着时间积累的实体，是系统状态的量化表征；流量是描述存量增减速率的变量；辅助变量是影响流量的中间变量，通过因果链与流量连接。

（3）变量系统方程

变量系统方程是系统动力学模型的核心，量化系统中状态变量随时间变化的规律，一般由微分方程或差分方程组成，每个方程都反映了状态变量、控制变量以及外部输入之间的关系。通过求解变量系统方程，预测系统在未来时间点的状态，从而优化系统性能，为决策提供依据。

5.1.3 系统动力学的适用性及优势分析

当系统存在多重反馈回路且交互作用显著时，传统线性模型难以分析其作用机制，而系统动力学可通过因果回路图与系统流图显性化反馈结构，因此系统动力学能够处理高阶次、多回路、非线性的动态复杂系统问题。且系统动力学的动态性、广泛性为长周期动态演化、多主体协同决策和不确定情景推演等问题的研究提供了有力支持。

现有研究对数智融合赋能环境治理的机制探索主要以要素识别与路径分析为主，普遍采用静态分析模型，缺乏从系统角度出发的动态分析。而数智融合对减

污降碳协同管控效率的作用机制本质上是一个动态演化的系统性过程，其效能释放依赖于经济、技术、能源和环境等多个子系统的协同作用。传统回归分析框架与线性规划方法存在一定局限，其静态分析范式难以有效捕捉多要素交互的非线性特征及时空滞后效应。系统动力学方法能够深入剖析系统内部复杂要素的反馈结构^[117]，通过构建状态变量、速率方程和反馈回路的集成模型，处理不同要素间的多重反馈问题以及要素流动形成的累积效应。不仅量化了子系统间的协同演化路径，提供了多情景的政策模拟方案，并且能够为制定动态适配的政策工具包提供理论支撑。

5.2 数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的系统性动态模型构建

5.2.1 系统边界界定

长三角地区减污降碳系统是一个复杂多反馈系统，该系统主要包括污染物的来源、处理和排放机制。根据已有研究^[118]和 3E 系统概念框架^[119]，确定人口规模、经济发展、环境治理、能源结构、技术进步和数智发展六个子系统^[120]，其中人口规模、经济发展、技术进步和数智发展为输入系统，能源结构、环境治理为输出系统和成效表现形式。本章通过分析子系统与变量间的因果关系与数量关系，构建长三角地区 41 个城市 2011-2030 年数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的系统性动态仿真模型，将 2011-2023 年设定为系统模型的校验期，2023-2030 年作为情景预测期，模拟时间间隔设定为 1 年。

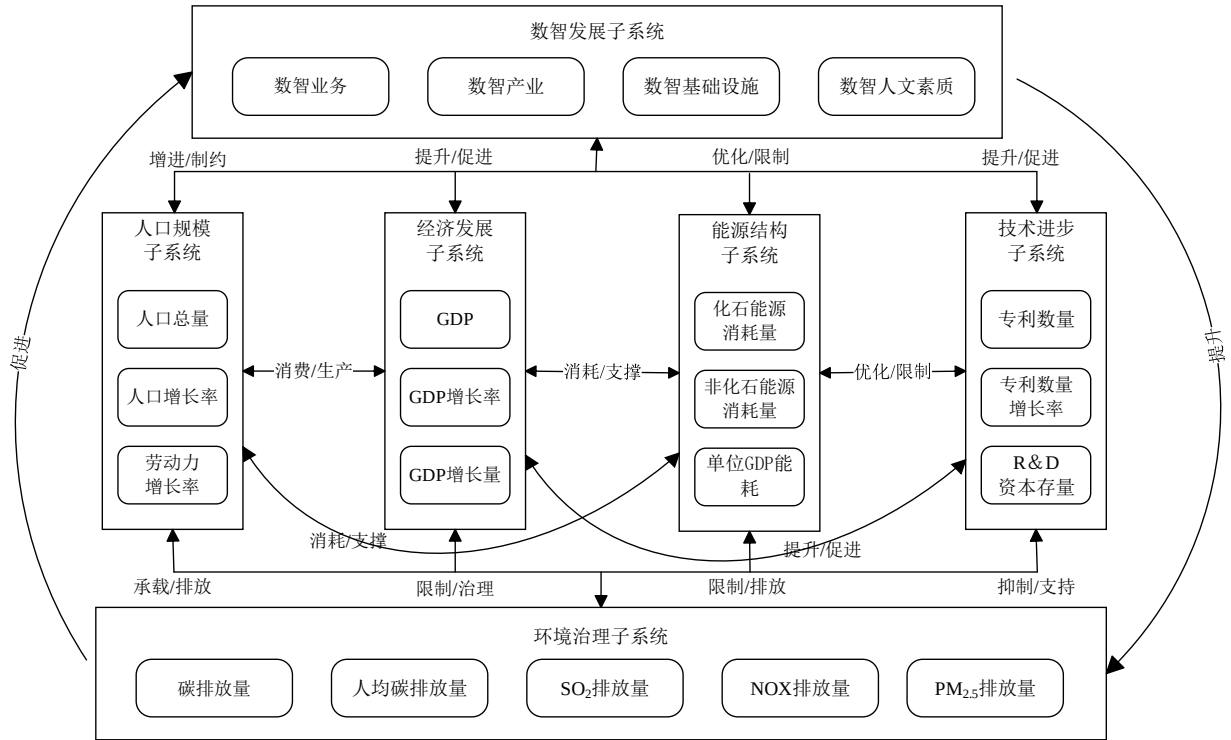


图 5-1 长三角地区减污降碳系统理论模型

5.2.2 子系统分析

（1）人口规模子系统：人口规模对减污降碳协同管控具有多方面的影响。首先，人口规模的扩大意味着人类活动的范围与规模相应增加，直接导致能源消耗和污染物排放的增加。其次，随着人口数量的增加，城市化进程加快，产业现代化水平提高，进而影响社会经济结构间接加剧环境压力。该子系统主要包括人口总量、人口增长率、劳动力数量、劳动力增长率、城镇人口、城镇人口比重。

（2）经济发展子系统：经济发展对减污降碳的影响作用具有阶段性。在经济发展的初期，通常伴随着工业化与城镇化进程的加速，这在一定层面加剧了大气污染、增加了碳排放。随着经济发展，政府和社会对环境治理投入增加，技术创新进步，产业优化升级，从而促进减污降碳协同增效。该子系统主要包括 GDP、GDP 增长率、GDP 增长量。

（3）环境治理子系统：环境治理通过一系列措施直接减少大气污染物和碳排放，推动减污降碳协同增效。该子系统主要包括碳排放量、SO₂ 排放量、NO_x 排放量、PM_{2.5} 排放量。

- (4) 能源结构子系统：能源消费结构对大气污染物与温室气体排放具有显著影响，优化能源消费结构是实现减污降碳协同管控的重要途径。该子系统主要包括化石能源消耗量、非化石能源消耗量、单位 GDP 能耗。
- (5) 技术进步子系统：通过技术进步进行源头治理和结构调整，提升能源利用效率，降低单位能耗和碳排放，推动行业绿色转型，实现减污降碳协同管控。该子系统主要包括专利数量、专利数量增长率、R&D 资本存量。
- (6) 数智发展子系统：数智技术在资源配置、决策支持和环境监测等方面具有积极作用，推动区域协同和信息共享，打破资源配置的壁垒效应，实时监控污染排放，强化政策执行与监管力度，为减污降碳协同管控提供全面有力的支持。该子系统主要包括数智业务广度、产业数智化程度、数智基础设施建设水平、数智人文素质覆盖深度。

表 5-1 子系统主要变量指标体系

子系统	主要变量
人口规模子系统	人口总量、人口增长率、劳动力数量、劳动力增长率、城镇人口、城镇人口比重
经济发展子系统	GDP、GDP 增长率、GDP 增长量、人均 GDP
环境治理子系统	减污降碳协同管控效率、CO ₂ 排放量、SO ₂ 排放量、NOX 排放量、PM _{2.5} 浓度
能源结构子系统	能源消耗量、化石能源消耗量、非化石能源消耗量
技术进步子系统	绿色专利数量、R&D 资本存量
数智发展子系统	数智融合发展指数、数智业务广度、产业数智化程度、数智基础设施建设水平、数智人文素质覆盖深度

复杂系统的仿真模型涉及众多相关要素，往往无法覆盖所有细节。因此，遵

循系统最简原则，在清晰界定研究边界的基础上，通过设定合理假设把握复杂系统的核心驱动要素，保障系统运行的稳定性。基本假设的作用如下：一是聚焦关键影响要素，推动系统向最优状态演进；二是将变量与反馈的具象化，简化复杂系统，提高系统模型的构建与分析的准确性。

基于此，提出以下假设：

（1）假设社会环境处于稳定状态。仿真模型在预测突发事件以及事件处理方面存在局限性，因此设定一个相对稳定的内外部社会环境十分重要。具体而言，在模拟期间假定数智融合发展持续稳定增长，未出现显著波动；经济稳定持续增长，无较大经济波动。

（2）假设社会经济发展是一个独立个体，不考虑外部发展因素。经济社会发展是由内部因素与外部因素共同作用，由于数据获取问题，本章将排除一些外部因素以提高模型构建的可行性和可操作性。

（3）假设在模拟期内，人口增长率按现有水平演进。为确保仿真模拟过程中人口规模变化幅度不出现显著波动，假设我国人口增长率一直处于现有状态，即持续降低趋势。

（4）假设环境子系统的系统边界具有可描述性，即具有一定的范围。由于本研究的关键是数智融合发展对减污降碳协同管控效率的影响作用，对教育、文化等其他要素将简化。

5.2.3 因果关系回路图

基于系统要素间的因果反馈关系，结合系统边界，运用 Vensim 软件建立因果关系图，通过搭建多组相互关联的作用回路，形成复杂的反馈网络结构。

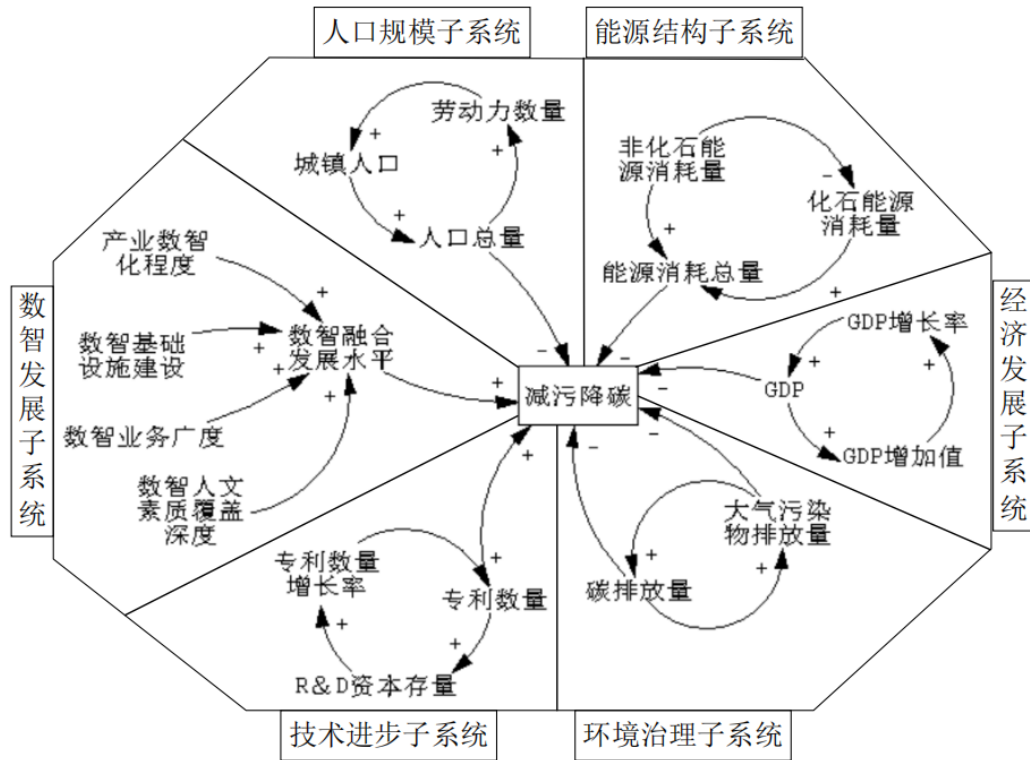


图 5-2 长三角数智融合-减污降碳因果关系反馈图

系统动力学模型中的关键因果回路主要归纳为以下四类作用路径：

（1）创新驱动型协同路径：数智发展水平提升通过正向促进 R&D 资本积累，加速绿色专利产出与技术创新扩散，进而降低单位能耗强度，减少碳排放和污染物排放。该路径通过“环境污染损失降低→经济产出增长→数智投入增加”的正向因果链，形成技术—经济—环境协同增效的正反馈回路。

（2）人口—资源约束路径：人口规模扩张通过“劳动力供给增加→研发人员规模扩大→技术创新能力提升”路径产生环境改善效应，形成正反馈回路。但同时“能源需求增长→碳排放/污染物排放量上升→环境质量恶化”路径造成资源约束效应，形成负反馈回路。两股作用力的动态博弈决定系统演化方向。

（3）污染累积抑制路径：人口增长驱动的碳排放与污染物排放增量，通过加剧环境污染程度，负向抑制减污降碳治理效能，形成负反馈回路。该机制表现为环境承载力对人口规模的非线性影响。

（4）能效提升传导路径：技术创新通过降低能耗强度形成双重减排机制，直

接效应体现为能源消费总量下降引致的排放减少，间接效应通过“能源成本降低→经济产出增长→绿色技术研发投入增加”形成持续改进的正反馈回路。

5.2.4 系统动力学流图

系统动力学建模要求全面考量系统中各要素的交互作用与状态变化，其核心在于通过因果反馈分析，构建存量流量图表征要素间的协同作用机制。在此基础上，对模型变量进行属性分类与数学表达，明确其相互影响关系。最终通过仿真模拟揭示系统运行的内在规律，直观呈现要素间的逻辑关联与动态演化路径。如图 5-3 所示，本文系统流图的主要状态变量包括人口总量、数智融合发展水平、减污降碳协同治理，通过速率变量和辅助变量调控系统行为。

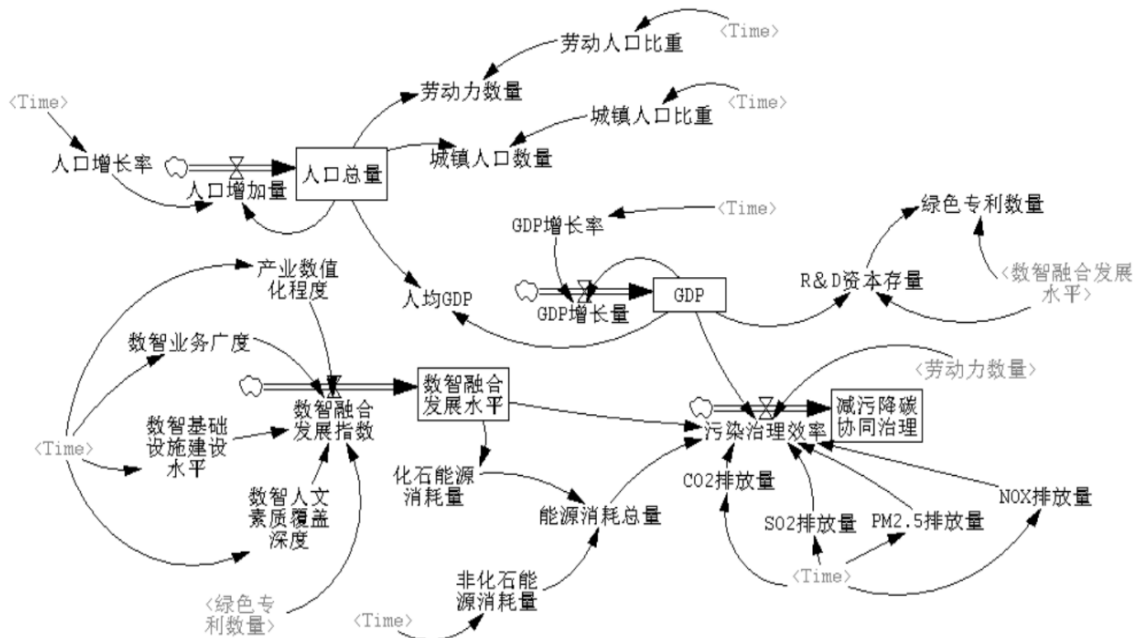


图 5-3 长三角数智融合-减污降碳系统流图

5.2.5 模型主要变量说明

建立系统动力学模型时，需先确定常数值和状态变量的初始值，对这些变量的合理赋值能够提高模型仿真分析的准确性^[120]。变量赋值可以采取统计数据与实际情况相结合的方法^[121]，在变量的历史波动范围内，选择恰当的模式参数^[122]。

(1) 状态变量初始值

根据 2011-2023 年期间各变量间的影响关系，确定模型中的状态变量初始值

如表 5-2 所示：

表 5-2 长三角数智融合-减污降碳系统动力学模型状态变量初始值

状态变量	2011 年初始值	2023 年初始值
人口总量（万人）	15778.3	23761.45
数智融合发展水平	0.03	0.096
减污降碳协同管控	0.12	0.62

（2）模型常数值

根据数智融合-减污降碳系统结构以及子系统间的相互作用关系，将模型中的常数值分为以下三类：

第一类：变动趋势稳定的参数，利用趋势外推法计算常数值，主要包括：人口增长率、劳动力比重、城镇人口比重、GDP 增长率。计算结果如表 5-3 所示：

表 5-3 长三角数智融合-减污降碳系统动力学模型常数值

状态变量	年均值	最大值	最小值
人口增长率（%）	0.0617	0.067	0.01
劳动力比重（%）	0.68	0.73	0.63
城镇人口比重（%）	0.62	0.67	0.56
GDP 增长率（%）	0.08	0.11	0.03

第二类：对于数量关系明确的变量，利用历史数据和相关函数进行计算。利用函数方法计算的参数主要包括：人口增长量、劳动力数量、城镇人口、GDP 增长量、人均 GDP、R&D 资本存量、绿色专利数量、污染治理效率、化石能源消耗量。

以回归方程与表函数设立变量的定量方程。现有研究显示当数智融合发展促进了创新驱动的重要作用力，带动 R&D 资本投入^[123-124]。以 2011-2023 年的统计

数据为基础，对 R&D 资本存量、数智融合发展水平进行回归拟合，测算变量关系。污染治理效率与生产总值、劳动力数量、能源消耗总量、数智融合发展水平以及二氧化碳与大气污染物排放量相关，在模型参数设定过程中采用多元线性回归进行变量关系的拟合。

第三类：对于数量关系不明确或统计数据不完善的变量，采用表函数形式表示。表函数是系统动力学建模中的特殊函数，根据自变量与因变量的坐标点所构成的曲线反应变量间的函数因果关系。利用表函数表示的变量主要有：CO₂ 排放量、SO₂ 排放量、NO_x 排放量、PM_{2.5} 浓度、数智业务广度、产业数智化程度、数智人文素质覆盖深度、数智基础设施建设水平。

建模过程中主要采用状态变量（L）、速率变量（R）、表函数（T）、辅助变量（A）以及常量（C）五种形式表示方程中的各种要素，共设置 28 个主要方程（参见附录 1）。

5.3 模型检验与灵敏度分析

模型检验的核心目的在于评估模型的有效性、可行性与准确性，判断仿真模型是否与实际系统相符合，验证仿真模型能否有效解决实际问题。以 Vensim 软件中的模型检验功能对仿真模型进行初步检验，全面分析模型的结构、方程及变量，检验可知数智融合-减污降碳系统动力学模型通过了语法检验和单位检验，模型具有可行性与有效性。

5.3.1 可靠性检验

本文选取长三角城市群作为研究对象，以 2011-2023 年间的历史观测数据为基础，引入平均绝对百分比误差（MAPE）作为关键度量指标，评估预测结果与实测数据的偏差幅度，从而验证系统推演结果的稳健性。公式如下：

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \quad (5.1)$$

其中，n 为样本容量，x 与 y 分别表示变量的真实值与仿真值。MAPE ≤ 10%

为高精度模拟， $10\% < \text{MAPE} \leq 20\%$ 为有效预测区间， $20\% < \text{MAPE} \leq 50\%$ 为可用性基准， $\text{MAPE} > 50\%$ 则需模型结构优化。如表 5-4 所示，关键变量的 MAPE 值主要分布于 0-20%区间，表明系统动力学模型具有较高的参数校准精度与结果可靠性。为进一步检验模型稳定性，通过设置不同时间步长进行多次仿真实验，图 5-4 显示各次仿真结果的变化趋势保持高度一致性，证明模型在不同时间尺度下均能保持稳健运行。

表 5-4 模型 MAPE 检验结果

序号	变量	MAPE 值	结果	序号	变量	MAPE 值	结果
1	人口总量	11%	良好	15	SO ₂ 排放量	12%	良好
2	人口增长量	12%	良好	16	NO _x 排放量	6.8%	高精度
3	人口增长率	1.76%	高精度	17	PM _{2.5} 浓度	15%	良好
4	劳动力数量	2.32%	高精度	18	能源消耗总量	8.9%	高精度
5	劳动力比重	2.79%	高精度	19	化石能源消耗量	9.5%	高精度
6	城镇人口	2.19%	高精度	20	非化石能源消耗量	13%	良好
7	城镇人口比重	3.89%	高精度	21	绿色专利数量	25%	可行
8	GDP	15%	良好	22	R&D 资本存量	25%	可行
9	GDP 增长率	1.2%	高精度	23	数智融合发展指数	21%	可行
10	GDP 增长量	9.52%	高精度	24	数智业务广度	19%	良好
11	人均 GDP	5.38%	高精度	25	产业数智化程度	19%	良好
12	减污降碳协同治理	19%	良好	26	数智基础设施建设水平	17%	良好

					数智人文素质	
13	污染治理效率	19%	良好	27	覆盖深度	14% 良好
14	CO ₂ 排放量	8%	高精度	28	数智融合发展水平	22% 可行

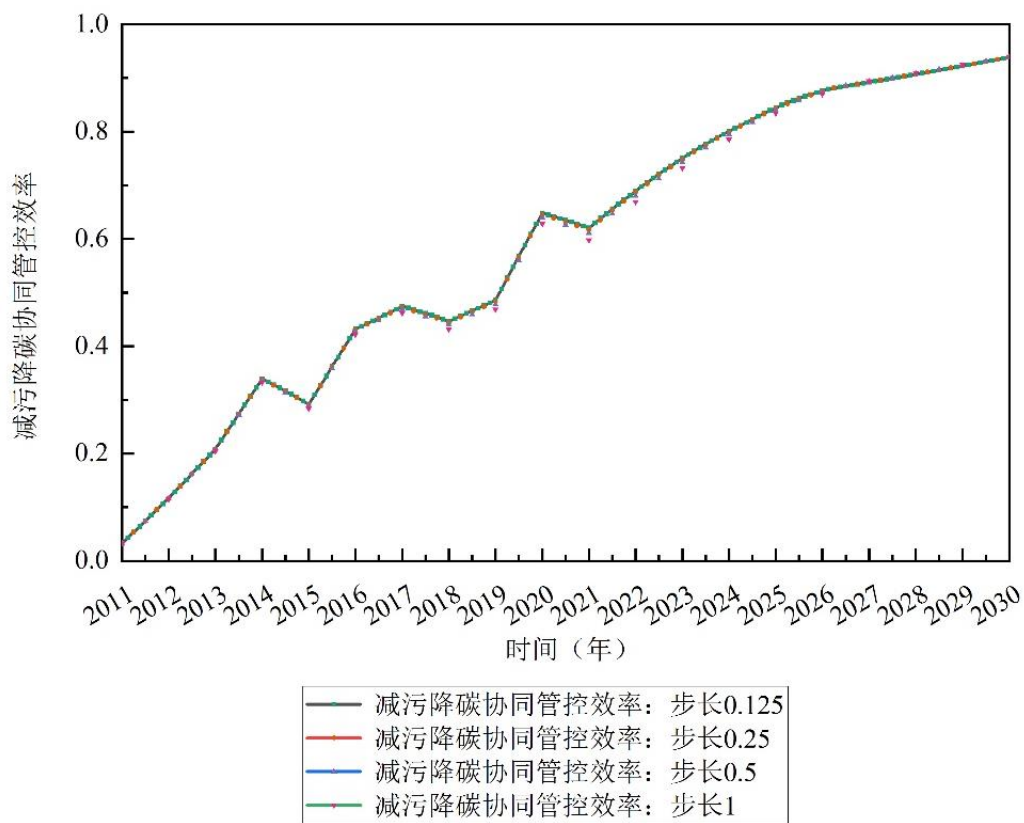


图 5-4 步长检验图

5.3.2 灵敏度分析

灵敏性分析需在明确控制变量与观测指标的前提下开展，其核心是通过系统调整控制变量参数值，观测目标指标在合理范围内的波动响应，据此判定模型对相关参数的敏感程度。本文采用参数扰动法进行灵敏度检验，具体将灵敏度界定为：

$$\text{灵敏度} = \frac{\left| \frac{\text{行为的变化量}}{\text{参数的变化量}} \right|}{\left| \frac{\text{行为的变化量}}{\text{参数的变化量}} \right|}$$

(5.2)

若系统动力学模型对参数变动表现出较低敏感性，则表明模型具备较强的鲁棒性。为消除量纲差异对灵敏度分析的影响，本研究采用百分比变化率来统一量纲，将 t 时刻的灵敏度系数定义为：

$$S_t = \left| \frac{\Delta Y(t)}{Y(t)} \right| / \left| \frac{\Delta X(t)}{X(t)} \right| \quad (5.3)$$

式中， S_t 代表变量 Y 对参数 X 变动的灵敏度。 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 分别表示参数和对应变量在 t 时刻的真实值， $\Delta X(t)$ 与 $\Delta Y(t)$ 分别表示二者的变化量。选取城镇人口比重、GDP 增长率、数智业务广度、产业数智化程度、数智基础设施建设水平、数智人文素质覆盖深度、非化石能源占比作为引起变化的参数，根据对应状态变量的变化检验参数灵敏度，可以发现各参数的灵敏度基本处于较低水平，均为超过 0.5，即模型对参数变化不敏感，具有强壮性。

经过可靠性检验与灵敏度测试，本文构建的长三角城市数智融合—减污降碳系统动力学模型被证实基本能够复现现实系统的运行特征，具备可靠性和有效性。

5.4 数智融合发展影响减污降碳协同管控效率的情景模拟和路径解析

本文对长三角城市数智融合—减污降碳系统动力学进行多情景动态模拟，以探求数智融合发展对减污降碳协同管控效率的作用机制，为区域减污降碳提供科学政策建议。

5.4.1 情景方案设定

基于不同情景模型的发展特征调整参数配置，分析观测变量的变化趋势，选定最优情景，以此为现实发展制定策略。具体情景方案与相关解释如下：

(1) 基准情景 (A0)：自然演进型发展情景，即各调控变量保持既有发展趋势不变，按照现有系统行为发展规律仿真模拟未来长三角城市减污降碳协同管控效率的发展，将此情景模式作为其他情景参数调整的基本标准。

(2) 人口规模调整情景 (A1)：控制劳动人口比重，设置高、中、低三种速率增长情景，并将大气污染物排放量相应设置为高、中、低三种发展模式，其余

变量和变化率选择中速率发展模式。

（3）数智融合发展情景（A2）：以促进数智融合发展为主要调节路径，研究提高数智融合发展水平对系统未来变化趋势的影响，将数智业务广度、产业数智化程度、数智基础设施建设水平和数智人文素质覆盖深度选择为高速率发展模式，其余变量和变化率选择中速率发展模式。根据《数字长三角发展报告(2024)》以及全国数字经济同比增长率，本文将 10%的增速定为高速率，取 8%为中速率。

（4）能源结构优化情景（A3）：将非化石能源消耗量选择高速提升模式，其余变量和变化率选择中速率，以探究能源结构优化对减污降碳协同管控效率的影响。

（5）科学技术进步情景（A4）：将 R&D 资本存量、绿色专利数量选择高速率发展模式，其余变量和变化率选择中速率，以探究技术进步对减污降碳协同管控效率的影响。

（6）协调发展情景（A5）：同时提升 GDP 增长率、数智业务广度、产业数智化程度、数智基础设施建设水平、数智人文素质覆盖深度、非化石能源消耗量、R&D 资本存量、绿色专利数量，适当控制人口增长率、城镇化比重和劳动人口比重。该情景意在探究人口、数智融合发展、能源结构和技术进步的综合优化调控作用下，长三角城市减污降碳协同管控效率的发展趋势，预测并分析协调发展的治理效果。

表 5-5 长三角城市减污降碳协同管控情景设定

情景	劳动人口比重	GDP	数智融合发展指数	非化石能源消耗量	技术进步	污染物排放水平
A1	高/中/低	中	中	中	中	高/中/低
A2	中	中	高	中	中	中
A3	中	中	中	高	中	中
A4	中	中	中	中	高	中

A5	高/中/低	高	高	高	高	低
----	-------	---	---	---	---	---

表 5-6 长三角城市参数增长速率设定（%）

情景	劳动人口比重	GDP	数智融合发展指数	非化石能源消耗量	技术进步	污染物排放水平
						7%（-3%） /
A1	1.2%/1%/0.8%	6%	8%	8%	8%	5%（-5%） /
						3%（-7%）
A2	1%	6%	10%	8%	8%	5%
A3	1%	6%	8%	10%	8%	5%
A4	1%	6%	8%	8%	10%	5%
A5	1.2%/1%/0.8%	8%	10%	10%	10%	3%（-7%）

长三角城市城镇人口比重增长速率高值为 1.2%，中值为 1%，低值为 0.8%；GDP 增长速率高值为 8%，中值为 6%；数智融合发展水平增长速率高值为 10%，中值为 8%；非化石能源消耗量增长速率高值为 10%，中值为 8%；技术进步增长速率高值为 10%，中值为 8%；污染物排放水平增长速率高值为 7%，中值为 5%，低值为 3%。

5.4.2 不同情景下的系统模拟结果与分析

长三角城市群作为中国经济发展的核心引擎，其减污降碳协同管控效率的提升对实现“双碳”目标具有战略意义。根据上文设计的不同情景，运用 Vensim 软件对长三角城市减污降碳协同管控效率进行系统性动态仿真模拟，通过考察数智融合发展水平、技术进步水平、非化石能源占比的动态变化，对比不同情境下的系统发展趋势，从单因素作用与多因素协调两方面展开论述分析区域减污降碳协同管控效率的提升路径。

劳动人口比重直接影响城市的经济结构和能源消耗模式。在情景 A1 中，劳动人口增加短期内可能推动工业和服务业扩张，但若缺乏绿色就业引导，高能耗

产业占比上升会导致减污降碳效率下降。劳动人口过度集中可能加剧交通、居住等领域的碳排放压力。

GDP 增速反映经济规模，但其结构决定减污降碳协同管控的治理效果。在 A0 基准情景中，GDP 增速为 6%，但依赖传统工业，清洁能源占比和技术进步水平平均较低。说明单纯追求经济规模难以实现减排目标。在 A1-低情景中，GDP 增速 6%，尽管清洁能源占比 8%，但劳动人口密集导致交通、建筑等领域排放增加，效率值仅 0.25。这表明，若缺乏结构性改革，单一因素优化可能被其他因素抵消。

数智化技术通过优化资源配置和提升管理效率，成为减污降碳协同管控的关键工具。A1 和 A3 情景中，数智化指数为 8%，效率提升有限（0.5-0.6）。A3 情景通过提升清洁能源占比至 10%，效率仅小幅增长，说明单一技术应用效果受限。A2 和 A5 情景中，数智化指数提升至 10%，结合技术进步与清洁能源，污染物排放下降 5%-7%，效率值突破 0.75。

非化石能源占比直接决定碳排放总量，但区域资源禀赋影响实施效果。A3 和 A4 情景显示，清洁能源占比增长率从 8%提升至 10%，减污降碳协同管控效率提升约 0.1。A3 情景中清洁能源占比 10%，效率达 0.65，较 A0 提升 30%。

技术进步通过提高能效和开发低碳技术，降低减排成本。A1 和 A4 情景中，技术进步水平为 8%，贡献约 25%的效率提升。A5 情景中，减污降碳协同管控效率提高至 0.85。

单一因素优化对效率提升存在边际递减效应，而多因素协同发展能够打破单一优化情景的局限性。在 A5-高效率情景中，数智化（10%）、清洁能源（10%）、技术进步（10%）与高 GDP 增速（8%）协同作用，污染物排放下降 7%，效率值稳定在 0.8 以上。由此可见，高数智化发展水平、高清洁能源占比以及高技术创新水平的组合，能够有效优化资源配置，减少污染源头排放，提升末端治理能力，对减污降碳工作进行全过程布署，能够使效率值长期维持在 0.8 以上。

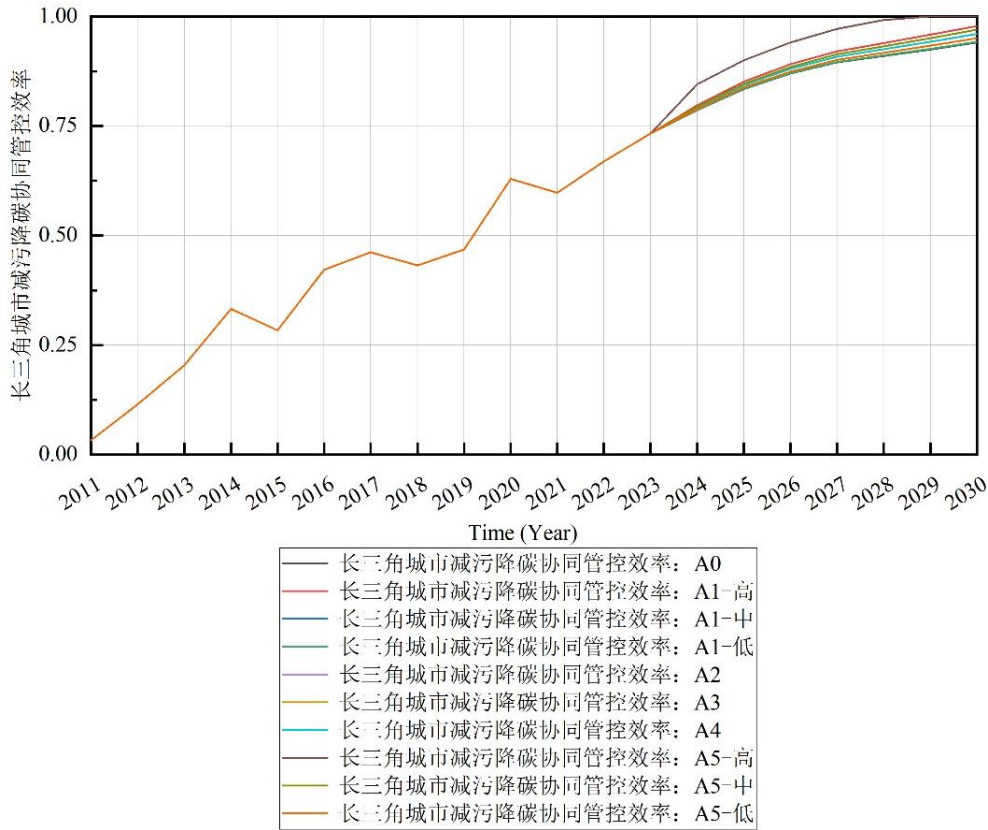


图 5-5 长三角城市减污降碳协同管控效率多情景仿真模拟

5.5 本章小结

本章通过构建系统动力学模型，从动态视角揭示了数智融合发展对减污降碳协同管控效率的作用机理与路径特征，突破了传统静态分析方法的局限性。研究基于长三角地区 41 个城市 2011-2023 年的面板数据，通过系统边界的科学界定、因果反馈网络的深度解析以及多情景的动态模拟仿真，系统考察了人口、经济、技术、能源、数智融合发展等子系统与的减污降碳系统的交互影响机制，为区域减污降碳协同治理提供了理论依据与政策启示。

本章构建了包含六大子系统的复杂动态模型：首先，通过人口规模、经济发展、技术进步三个输入系统与能源结构、环境治理两个输出系统的协同作用，构建了"压力-状态-响应"的完整逻辑链条；其次，基于 Vensim 软件绘制了包含 10 条核心反馈回路的因果关系图，揭示了数智融合通过 R&D 资本积累→绿色技术创新→能耗强度降低的传导路径，以及人口增长→能源消耗→污染排放的负向循

环机制；最后，采用定量与定性相结合的参数设定方法，通过趋势外推、回归拟合和表函数三种模式对 28 个核心变量进行赋值，确保模型兼具理论严谨性与实践可操作性。

通过可靠性检验与灵敏度分析，证实了模型具有较高预测精度：一方面，MAPE 检验显示，28 个核心变量中有 16 个达到高精度预测标准（ $MAPE < 10\%$ ）；另一方面，灵敏度系数分析表明，系统对城镇人口比重、GDP 增长率等关键参数的变动敏感性均低于 0.5，证明模型具有稳健性。动态仿真结果表明：在自然演进情景（A0）下，2023-2030 年减污降碳效率仅从 0.73 增至 0.94，难以实现减污降碳协同管控效率的大幅提升；而在协调发展情景（A5）中，通过数智融合（10% 增速）、技术创新（10% 增速）与能源结构优化（非化石能源占比 10%）的协同作用，效率值可突破 1。通过多情景模拟的路径解析，设置六类差异化情景，系统揭示了关键要素的协同作用机制：一是，单一要素优化具有局限性。单纯提高数智融合水平（A2）或非化石能源占比（A3）仅能使效率值提升至 0.96 区间，存在显著的边际递减效应；二是，系统协同具有一定的倍增效应。在 A5 情景下，数智技术优化了能源配置效率，提升了绿色专利转化率，形成“技术赋能-结构优化-效率提升”的正向循环；三是，人口经济系统具有双刃剑作用，劳动人口增长虽能促进技术创新，但若城镇化率超过 67% 的临界值，交通、建筑等领域的排放增量将抵消技术进步带来的减排效益。

研究证明，通过数智技术的深度赋能、能源结构的系统性优化与技术创新的持续驱动，可在保持 6%-8% 经济增速的同时，实现污染物排放强度年均下降 7% 以上的治理目标，为区域高质量发展与生态文明建设的协同推进提供了科学范式。

第 6 章 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文立足理论与实践深度融合，在现有文献研究基础上，系统探讨数智融合与减污降碳协同管控效率的内在关联。通过理论推演、实证检验和系统动力学仿真模拟的多维研究范式，揭示两者间的作用机理，得出以下结论：

第一，研究期间，长三角城市数智融合水平和减污降碳协同管控效率整体呈现上升趋势，但空间分布呈现显著异质性。上海、苏州和杭州等东部沿海城市凭借技术优势与政策支持，成为数智融合与减污降碳协同发展的“双高地”；而皖西、皖北地区因基础设施薄弱、产业转型滞后，导致两者发展水平均处于低位。同时，通过核密度曲线分析，数智融合的“极化效应”与减污降碳效率的“多极化”趋势，表明长三角内部呈现“核心引领、多点突破”的发展格局。

第二，回归分析表明，数智融合对长三角城市减污降碳协同管控效率具有显著促进作用，这种正向效应通过技术创新应用和能源结构优化实现。长三角技术创新能力每提高 1%，减污降碳协同管控效率就会提高 0.559%，能源结构中煤炭等化石能源占比每降低 1%，减污降碳协同管控效率会提高 0.318%。

第三，系统动力学模型的仿真模拟结果显示，单一要素的优化作用具有局限性，单纯提高数智融合水平或非化石能源占比存在一定的边际递减效应。多要素协同可产生 $1+1>2$ 的倍增效应，形成“技术赋能—结构优化—效率提升”的正向循环。同时，人口经济系统具有双刃剑效应，劳动人口增长虽能促进技术创新，但若城镇化率超过临界值，交通、建筑等领域的排放增量将抵消技术进步带来的减排效益。

6.2 政策建议

数智融合为长三角地区减污降碳协同管控效率的提升提供了新方法和新路径。根据已有的发展特征、研究结论和影响机制，从数智融合赋能减污降碳协同管控

效率提升的数智化体系建设、技术创新驱动、能源结构调整以及区域协同发展等多维度提出政策建议。

第一，深化数智融合，赋能长三角减污降碳协同治理。长三角地区作为我国经济最活跃、产业体系最完备的城市群，其电子信息、高端装备、生物医药等优势产业集群既是经济增长的核心引擎，也是减污降碳的主战场。然而，传统制造业转型困难、现有污染治理模式难以应对环境风险，亟需通过数智化体系建设破解产业升级需求迫切与治理效能低下的困境。一方面，针对电子信息产业污染排放隐蔽性强、高端装备制造业能耗检测难等问题，政府应扩大工业互联网平台应用范围，推动“一企一策”智能解决方案落地，整合重点企业生产数据、排污许可证信息与电网实时荷载，将污染监测智能化系统覆盖至各个企业，提升环境治理效率。另一方面，政府可以设置数智化减污降碳专项基金，为区域内企业提供资金扶持，支持中小企业部署智能化环保管理系统，降低数智转型的门槛和成本。

第二，强化技术创新，助力长三角减污降碳目标实现。依托于长三角 G60 科创走廊与上海张江、苏南、杭州、合芜蚌、宁波温州多个国家自主创新示范区，长三角创新资源十分丰富。但同时，长三角的重化工业、纺织印染等传统产业集群也存在清洁生产技术改造滞后、技术迭代能力弱等问题，且研发成果转化率较低，部分研发成果难以匹配区域产业实际需求。因此，构建一条高校协同的“研发—转化—扩散”创新链至关重要。利用好绿色低碳创新技术联合实验室和长三角国际绿色发展联盟，搭建产学研融合平台，重点攻克关键技术。针对江苏的重化工业以及浙江的纺织印染产业集群，积极开发人工智能优化工艺算法与智能脱碳减污装置，通过智能化手段提升生产效率，减少污染排放。

第三，优化能源消费结构，多措并举提高可再生能源使用比例。作为经济发展重地，长三角也是能源消耗大户，化石能源比重偏高，能源消费需求量大且高度依赖其他省份输入。因此，长三角应加速推进产业结构向绿色低碳转型，重点在钢铁、化工、纺织等高能耗行业实施“绿色改造”计划。一方面，依托沿海风电与内陆光伏资源互补，协调地区能源资源，做好清洁能源的梯度替代。推动工业余热回收、能源梯级利用等先进技术应用，形成多能互补、系统优化的能源消

费新模式。另一方面，通过区块链等数智技术加速电网跨省互联，助力长三角电力一体化，实现电力的跨省高效交易与电力负荷的智能精准匹配。同时，加强长三角大数据中心对能源数据的管理利用，科学分配碳配额，倒逼企业绿色转型。

第四，加强区域协调发展，缩小地区数智融合水平差距，助力减污降碳效率提升，实现长三角一体化高质量发展。首先，制定数智融合赋能减污降碳的政策时应充分考虑区域发展的差异性。根据不同地区发展的实际特征实行不同的发展政策，发达地区聚焦技术溢出与原始创新，中等水平地区积极探索数智融合提升减污降碳协同管控效率的现实传导路径，欠发达地区强化数智基础设施赋能机制。其次，在技术创新方面，构建区域协同创新网络；在源头防控方面，推动建立基于物联网的区域一体化污染监测网络。最后，推动跨域数智治理框架形成，将政务数据、企业生产数据与生态监测数据等多源异构数据融合，开发长三角区域一体化数智治理平台。同时，强化市场激励与制度保障，完善相关法律法规的适配性。

6.3 研究不足与展望

本文系统探讨了长三角地区数智融合与减污降碳协同管控的关联机制，但受限于方法与数据，仍存在以下三方面不足，有待未来研究进一步完善。

第一，本文关于数智融合指数的评价指标设计偏重基础设施与宏观技术应用，对技术迭代速率及社会嵌入性的刻画不足，评价指标对技术动态效应的解释力存在局限性。未来需要进一步探索更加科学全面的数智融合发展水平测度方法，以更准确地反映实际情况。

第二，本文虽验证了技术创新与能源转型的中介作用，但未能揭示企业、民众等微观主体的行为反馈。其中，数智融合对高耗能企业减排的倒逼效应和对服务业的赋能效应也需进一步深入研究。未来研究可以加深对微观层面的机制分析，揭示个体决策差异对环境治理效率的影响作用。

第三，本文系统动力学模拟路径中未纳入外生冲击的影响，未考虑减污降碳目标调整对数字化投入的逆向激励，同时，模型未引入区域竞争情境，未能揭示长三角城市在数字治理领域的标杆效应对邻近区域的扩散规律。未来研究可以将

研究对象拓展为多个城市群，探索区域间数智融合对减污降碳协同管控效率的异质化作用路径。

参考文献

- [1] 易兰,杨田恬,杜兴,等.减污降碳协同路径研究: 典型国家驱动机制及对中国的启示[J].中国人口·资源与环境,2022,32(09):53-65.
- [2] 易兰,赵万里,杨历.大气污染与气候变化协同治理机制创新[J].科研管理,2020,41(10):134-144.
- [3] 张瑜,田开兰,高翔,等.投入产出框架下数字经济核心产业赋能我国经济和就业增长的测算研究[J].统计研究,2025,42(01):45-60.
- [4] Xu C , Zhang H L , Lin B .Achieving pollution abatement and carbon reduction synergistically: How can industrial robots play a role?[J].Journal of environmental management, 2025, 373:123816.
- [5] 任保平,司聪.以科技创新与产业创新的深度融合推动形成新质生产力研究[J].经济学家,2025,(02):76-86.
- [6] 杜传忠,疏爽,李泽浩.新质生产力促进经济高质量发展的机制分析与实现路径[J].经济纵横,2023,(12):20-28.
- [7] 卢鹏.数实融合驱动新质生产力涌现的逻辑与实践进路[J].电子政务,2024,(09):27-37.
- [8] 米加宁,李大宇,董昌其.算力驱动的新质生产力: 本质特征、基础逻辑与国家治理现代化[J].公共管理学报,2024,21(02):1-14+170.
- [9] Banhidi Z, Dobos I, Nemeslaki A. What the overall Digital Economy and Society Index reveals: A statistical analysis of the DESI EU28 dimensions[J]. Regional Statistics, 2020, 10(2): 42-62.
- [10] 张美慧.国际新经济测度研究进展及对中国的借鉴[J].经济学家,2017,(11):47-55.
- [11] 许宪春,张美慧.中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J].中

- 国工业经济,2020,(05):23-41.
- [12] 范合君,吴婷.中国数字化程度测度与指标体系构建[J].首都经济贸易大学学报,2020,22(04):3-12.
- [13] 任保平,迟璐婕.长三角区域数字化转型能力的测算与空间网络结构分析[J].学术界,2024,(11):51-66.
- [14] 何琨玟,张文彬,张楠.数智赋能与中国节能降碳效率: 机制与效应[J].中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(01):82-99.
- [15] 杨佩卿,白媛媛.黄河流域数字经济与新型城镇化耦合协调及驱动机制[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2024,24(04):114-126.
- [16] 陈伟光,张嘉渭,刘彬.G20 国家数字经济发展水平测度及中国的提升策略[J].亚太经济,2023,(05):11-21.
- [17] 任保平,王昕.数字中国建设的绩效评价及其推进策略[J].统计与信息论坛,2024,39(09):23-34.
- [18] 沈洋,周鹏飞.中国数字经济发展水平测度及时空格局分析[J].统计与决策,2023,39(03):5-9.
- [19] 向书坚,吴文君.OECD 数字经济核算研究最新动态及其启示[J].统计研究,2018,35(12):3-15.
- [20] 许宪春,张美慧.中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J].中国工业经济,2020,(05):23-41.
- [21] 蔡跃洲,张钧南.信息通信技术对中国经济增长的替代效应与渗透效应[J].经济研究,2015,50(12):100-114.
- [22] 吕祥,路驰,杨水利.数字赋能制造业智能化水平的影响研究——技术创新能力的中介效应[J].科学学与科学技术管理,2024,45(07):149-166.
- [23] 王军,刘小凤,朱杰.数字经济能否推动区域经济高质量发展?[J].中国软科

- 学,2023,(01):206-214.
- [24] 朱娅.智能制造驱动传统产业转型升级逻辑理路与策略研究[J].河南社会科学,2019,27(12):61-66.
- [25] 潘瑶.数智化转型下产业链的“去中心化”重构及应对——基于“双碳”产业视角[J].财会通讯,2025,(02):94-102+138.
- [26] 孙绍勇,李诗.培育和发展新质生产力的数智化逻辑旨要及驱动路向[J].政治经济学评论,2024,15(06):101-114.
- [27] 任保平,张雪珂.数字新质生产力培育高质量发展新动能的机制与路径[J].广东社会科学,2025,(01):54-65.
- [28] 任保平,王昕.人工智能与实体经济深度融合形成新质生产力的框架与路径[J].社会科学,2024,(07):120-127.
- [29] 宋俭,李伦.数智化治理:新质生产力驱动高质量发展的政治行动[J].河南师范大学学报(哲学社会科学版),2024,51(06):1-7.
- [30] 周建平,徐维祥,宓泽锋,等.数字经济对城市 ESG 发展的影响——基于双重机器学习方法的检验[J].地理研究,2024,43(06):1407-1424.
- [31] Tranos E, Kitsos T, Ortega-argiles R. Digital economy in the UK: regional productivity effects of early adoption[J]. Regional Studies, 2021, 55(12): 1924-1938.
- [32] 卢江,王煜萍,郭子昂.数字经济对劳动收入份额的影响:机制与检验——基于马克思两部类生产模型的研究[J].当代经济研究,2025,(02):5-16.
- [33] 熊劼,赵先明.平台经济赋能消费市场下沉的影响效应——基于四大城市群的实证分析[J].商业经济研究,2025,(02):66-69.
- [34] 邢占军,王晶心.高等教育数智化转型赋能新质生产力的内在机理与实现路径[J].南京社会科学,2024,(12):155-162.

- [35] 詹晓宁,欧阳永福.数字经济下全球投资的新趋势与中国利用外资的新战略[J].管理世界,2018,34(03):78-86.
- [36] Chinnathai M K , Alkan B .A digital life-cycle management framework for sustainable smart manufacturing in energy intensive industries[J].Journal of cleaner production, 2023, 419:138259.1-138259.14.
- [37] 戚聿东,蔡呈伟.数字化对制造业企业绩效的多重影响及其机理研究[J].学习与探索,2020,(07):108-119.
- [38] 高庆先,高文欧,马占云,等.大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J].气候变化研究进展,2021,17(03):268-278.
- [39] 狄乾斌,陈小龙,侯智文.“双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J].资源科学,2022,44(06):1155-1167.
- [40] 李汶豫,文传浩,苏旭阳,等.长江经济带城市减污降碳协同效应时空演化及驱动因素研究[J].环境科学研究,2024,37(08):1641-1653.
- [41] Yang X H, Yang X Y, Zhu J G, et al. Synergic emissions reduction effect of China's "Air Pollution Prevention and Control Action Plan": Benefits and efficiency[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157564.
- [42] 张彬,李可心,李丽平,等.重点行业减污降碳协同度评价研究[J].环境保护,2024,52(19):34-37.
- [43] Wang H, Liu C, Xiong L C, et al. The Spatial Spillover Effect and Impact Paths of Agricultural Industry Agglomeration on Agricultural Non-point Source Pollution: A Case Study in Yangtze River Delta, China[J].Journal of Cleaner Production,2023,401:136600.
- [44] 任晓松,李昭睿.全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析[J].环境科学,2024,45(03):1243-1253.
- [45] Yang Y T, Xu H, Yang X, et al. Exploring synergistic efficiency of air pollution

- and carbon reduction and its influencing factors: Insights from China[J]. Resources, Conservation and Recycling,2025,212:107973.
- [46] Chen X L, Di Q B, Jia W H, et al. Spatial correlation network of pollution and carbon emission reductions coupled with high-quality economic development in three Chinese urban agglomerations[J]. Sustainable Cities and Society,2023,94:104552.
- [47] 唐湘博,张野,曹利珍,等.中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J].环境科学研究,2022,35(10):2252-2263.
- [48] 李可心,杨儒浦,李丽平,等.燃煤电厂减污降碳协同增效综合评价体系构建及实证研究[J].环境科学研究,2024,37(07):1483-1491.
- [49] 吴戈,张月池,苗壮.我国工业减污降碳的绿色偏向技术进步:要素贡献、偏向识别与影响因素[J].统计研究,2024,41(05):3-14.
- [50] 曹宏斌,赵赫,赵月红,等.工业生产全过程减污降碳:方法策略与科学基础[J].中国科学院院刊,2023,38(02):342-350.
- [51] 陈晓红,张嘉敏,唐湘博.中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J].资源科学,2022,44(12):2387-2398.
- [52] 俞珊,韩玉花,牟洁,等.北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素[J].环境科学,2024,45(04):1917-1925.
- [53] 戴静怡,曹媛,陈操操.城市减污降碳协同增效内涵、潜力与路径[J].中国环境管理,2023,15(02):30-37.
- [54] 韩冬日,丁丽鑫,董会忠,等.组态视角下全过程治理驱动减污降碳协同的路径选择[J].环境科学研究,2024,37(09):1867-1876.
- [55] 刘娜,高新伟.“蓝天保卫战”如何影响减污降碳协同度? [J].中国人口·资源与环境,2024,34(07):66-75.

-
- [56] 郑洁,张博,朱欢,等.经济发展中污染排放结构的理论初探——新结构经济学视角[J].经济问题探索,2024,(07):1-14.
- [57] 张瑜,孙倩,薛进军,等.减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J].中国人口·资源与环境,2022,32(05):1-13.
- [58] 曾元,张文港,孙靖文,等.基于系统动力学的京津冀区域减污降碳政策仿真研究[J].环境科学研究,2023,36(11):2210-2220.
- [59] 黄海昕,郭俊华.国家低碳战略协同的减污降碳效应[J].经济问题,2024,(12):45-57.
- [60] 赵玉焕,樊顺安,刘思源.“双碳”目标下绿色财政政策的碳生产率效应研究[J].北京工业大学学报(社会科学版),2025,25(01):68-84.
- [61] 郎元柯,范柏乃,黄素勤.数字经济对新质生产力的作用路径及政策效应——基于产业生态的视角[J].社会科学家,2024,(04):107-116.
- [62] 李俊明,魏雯琪,张鹏,等.中国市域数字经济发展对减污降碳协同的促进效应及其空间分异[J].经济地理,2023,43(12):169-180.
- [63] 刘耀彬,邓伟凤,李硕硕,等.数字产业集聚对减污降碳协同的影响——以长江经济带为例[J].资源科学,2024,46(04):744-760.
- [64] 刘亮,阮俊杰,庄海涛.数智化赋能长三角城市群绿色发展的效应研究[J].经济地理,2024,44(09):123-132.
- [65] 范合君,潘宁宁,吴婷.数字经济发展的碳减排效应研究——基于 223 个地级市的实证检验[J].北京工商大学学报(社会科学版),2023,38(03):25-38.
- [66] 李静,周孟艳.数字化转型的环境治理效应——来自中国制造业上市公司年报文本分析的证据[J].兰州大学学报(社会科学版),2024,52(01):52-65.
- [67] 刘启雷,赵威,苏锦旗,等.基于数智化转型的制造业“双碳”发展:逻辑、路径与政策[J].科学管理研究,2023,41(03):79-88.

- [68] 方颖,余兴锦.产业数字化的减污与降碳效应——基于“生产率悖论”的研究视角[J].系统工程理论与实践,2024,44(09):2795-2818.
- [69] 陈晓红,唐润成,胡东滨,等.电力企业数字化减污降碳的路径与策略研究[J].中国科学院院刊,2024,39(02):298-310.
- [70] 王军,王杰.城市数字化转型与“减污降碳”协同增效[J].城市问题,2024,(02):46-56.
- [71] 薛飞,周民良,刘家旗.数字基础设施降低碳排放的效应研究——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J].南方经济,2022,51(10):18.
- [72] Brynjolfsson E., Rock D., Syverson C., Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics, In The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda, Chicago: University of Chicago Press,2019.
- [73] 程学旗,梅宏,赵伟,等.数据科学与计算智能: 内涵、范式与机遇[J].中国科学院院刊,2020,35(12):1470-1481.
- [74] 郑勇华,孙延明,尹剑峰.智能化转型、智能化能力与制造企业转型绩效——战略匹配的调节作用[J].科技进步与对策,2022,39(18):99-109.
- [75] 杨东,毛智琪.公共数据开放与价值利用的制度建构[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2023,36(02):36-45.
- [76] 陈磊,王柏村,黄思翰,等.“互联网+”行动计划的政策体系研究[J].中国工程科学,2020,22(04):131-138.
- [77] 陈龙,刘刚,戚聿东,等.人工智能技术革命: 演进、影响和应对[J].国际经济评论,2024,(03):9-51+4.
- [78] 黄庆华.西部地区产业转型升级趋势及主攻方向[J].人民论坛,2025,(02):62-67.

- [79] 余东华,李云汉.数字经济时代的产业组织创新——以数字技术驱动的产业
链群生态体系为例[J].改革,2021,(07):24-43.
- [80] 邵婧婷.数字化、智能化技术对企业价值链的重塑研究[J].经济纵
横,2019,(09):95-102.
- [81] 马琴.数字技术赋能区域创新能力提升——理论机制与实证检验[J].技术经
济与管理研究,2025,(02):97-102.
- [82] 杨赞.中国信息通信研究院院长余晓晖：数智技术为新质生产力注入源源动
力[N].人民邮电,2024-12-26(002).
- [83] 王佃利,滕蕾.数字社会治理的场景构建、运行逻辑与公共价值实现[J].山东大
学学报(哲学社会科学版),2024,(05):125-133.
- [84] 陈少威,贾开.数字化转型背景下中国环境治理研究：理论基础的反思与创新
[J].电子政务,2020,(10):20-28.
- [85] 叶芳羽.环境经济政策的减污降碳协同效应与优化研究[D].湖南大学,2021.
- [86] 黄欣,凌能祥.基于排放权交易与减排研发补贴的政企减排微分博弈模型.
系统管理学报, 2020, 29(6): 1150-1160.
- [87] 刘芳,徐慧慧.中国政府区域环境治理的影响因素组态与路径研究[J].中国人
口·资源与环境,2023,33(09):98-110.
- [88] 严佳佳,介琼楠.低碳城市试点政策对中国低碳经济转型的影响研究——基
于中介渠道的门槛效应分析[J].经济问题探索,2025,(02):144-163.
- [89] 陈兵,朱方明,贺立龙.低碳经济的含义、特征与测评:碳排放权配置的视角[J].
理论与改革,2014,(05):63-68.
- [90] 张文彬,宋建波.中国低碳经济协同效率的区域差异及其影响因素[J].经济地
理,2024,44(03):22-32+54.
- [91] 洪剑涛.中国城市数字经济对减污降碳的影响研究[D].安徽建筑大学,2023.

- [92] 樊志宏,杨瑜娴,周阳.基于复杂适应系统理论的“人机交互”:演进方向与原则遵循——以智能网联汽车为例[J].学习与实践,2025,(02):34-44.
- [93] 杨翠.跨域环境治理中的地方政府合作研究[D].东北师范大学,2023.
- [94] 叶金生.我国数字普惠金融与实体经济协同发展研究[D].江西财经大学,2021.
- [95] 蓝楠.协同治理视角下黄河流域综合治理机制研究[J].中国软科学,2024,(12):196-204.
- [96] 金晗.区域协同视角下经济增长、产业结构变迁对环境污染的影响效应与治理策略研究[D].浙江大学,2024.
- [97] 杨翠.跨域环境治理中的地方政府合作研究[D].东北师范大学,2023.
- [98] 张雪玲,焦月霞.中国数字经济发展指数及其应用初探[J].浙江社会科学,2017,(04):32-40+157.
- [99] Wang Y, Kang M, Liu Y, et al. Can Digital Intelligence and Cyber-Physical-Social Systems Achieve Global Food Security and Sustainability?[J].Journal of Automatica Sinica,2023,10(11):2070-2080.
- [100] Tone K.A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J].European Journal of Operational Research,2002,143(1):32- 41.
- [101] Jiang P, Khishgee S, ALIMUJIANG A, Dong H J. Cost-effective approaches for reducing carbon and air pollution emissions in the power industry in China[J].Journal of Environmental Management, 2020, 264:110452.
- [102] 黄宇宁.数字经济、低碳技术创新与全要素碳生产率[J].技术经济与管理研究,2023,(08):26-32.
- [103] 杨昕,赵守国.数字经济赋能区域绿色发展的低碳减排效应[J].经济与管理研究,2022,43(12):85-100.
- [104] 魏丽莉,侯宇琦.数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J].数量经济

- 技术经济研究,2022,39(08):60-79.
- [105] 张杰,魏振琪.数字经济能否驱动家庭消费低碳转型?——基于中国家庭追踪调查的经验证据[J].现代财经(天津财经大学学报),2023,43(09):3-19.
- [106] Guo B N, Wang Y, Zhang H, et al. Impact of the digital economy on high-quality urban economic development: evidence from Chinese cities[J]. Economic Modelling,2023,120:106194.
- [107] 马淑琴,徐苗,张陈宇.数据要素应用与企业创新效应——来自中国 A 股上市公司的经验证据[J].商业经济与管理,2024,(02):50-67.
- [108] John N, Wesseling J H, Worrell E ,et al. How key-enabling technologies' regimes influence sociotechnical transitions: The impact of artificial intelligence on decarbonization in the steel industry[J]. Journal of cleaner production, 2022,370: 133624.
- [109] 金祥义,张文菲.人工智能与企业污染减排: 智能治理的环境效应[J].中国人口·资源与环境,2023,33(08):138-145.
- [110] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(07):1893-1904+2205.
- [111] 高振娟,赵景峰,张静,等.数字经济赋能消费升级的机制与路径选择[J].西南金融,2021,(10):44-54.
- [112] 詹帅,万志蓝.数智服务赋能农业高质量数实融合的现实逻辑、实践路径与保障对策[J].西南金融,2024,(01):81-92.
- [113] Kamble S S, Gunasekaran A, Gawankar S A. Sustainable Industry 4.0 Framework: A Systematic Literature Review Identifying the Current Trends and Future Perspectives[J]. Process Safety and Environmental Protection,2018,117:408-425.
- [114] 刘亦文,陈熙钧.数智融合发展对中国减污降碳协同治理的影响研究[J].环境

- 科学研究,2023,36(11):2189-2199.
- [115] 罗能生,熊少平,李建明,等.数字普惠金融对城市减污降碳的影响效应与机制研究[J].管理学刊,2024,37(03):95-111.
- [116] 江艇.因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J].中国工业经济,2022(05):100-120.
- [117] Forrester, J W. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers[J]. Harvard Business Review, 1958(4):37.
- [118] Forrester J W. Counterintuitive behavior of social systems[J]. Theory & Decision, 1971,2(2):109-140.
- [119] Fang C L, Cui X G, Li G D, et al. Modeling regional sustainable development scenarios using the Urbanization and Eco-environment Coupler: case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J].Science of the Total Environment,2019,689:820-830.
- [120] Jia S, Bi L, Zhu W, Fang T. System dynamics modeling for improving the policy effect of traffic energy consumption and CO₂ emissions[J].Sustainable Cities and Society,2023,90:104398.
- [121] Karamouz M, Zare M, Ebrahimi E. System dynamics-based carbon footprint assessment of industrial water and energy use[J]. Water Resources Management, 2023, 37(5):2039-2062.
- [122] Chen L, Li X, Liu W, et al. System dynamics-multiple the objective optimization model for the coordinated development of urban economy-energy-carbon system[J]. Applied Energy, 2024,371: 123710.
- [123] 马树才,李亮,代金辉.中国省际 R&D 资本存量及对经济增长贡献的测度研究 [J].经济问题探索,2023,(08):36-50.
- [124] 周文光,黄瑞华.创新绩效、R&D 资本存量与吸收能力的增长路径[J].科研管

理,2012,33(11):24-31.

附录

附表 1 系统主要结构方程

序号	变量类型	方程	单位
1	L	人口总量=INTEG（人口增加量，人口总量初始值）	万人
2	R	人口增长量=总人口*人口增长率	万人
3	C	人口增长率= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)], (2011,0.056),(2012,0.057),(2013,0.059),(2014,0.06),(2015,0.06),(2016,0.061), (2017,0.063),(2018,0.064),(2019,0.065),(2020,0.067),(2021,0.067) ,(2022,0.04), (2023,0.001)))	Dmnl
4	A	劳动力数量=劳动人口比重*人口总量 劳动力比重= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)],	万人
5	C	(2011,0.63),(2012,0.65),(2013,0.68),(2014,0.73),(2015,0.67),(2016,0.72),(2017,0.71), (2018,0.65),(2019,0.64),(2020,0.70),(2021,0.65) ,(2022,0.068),(2023,0.0688)))	Dmnl
6	A	城镇人口=人口总量*城镇人口比重 城镇人口比重= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)],	万人
7	C	(2011,0.56),(2012,0.57),(2013,0.58),(2014,0.60),(2015,0.60),(2016,0.61),(2017,0.63), (2018,0.64),(2019,0.65),(2020,0.67),(2021,0.67) ,(2022,0.068),(2023,0.069)))	Dmnl
8	A	GDP= INTEG (GDP 增长量,69872)	亿元
9	C	GDP 增长率= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)],(2011,0.11), (2012,0.1),(2013,0.097),(2014,0.09),(2015,0.073),(2016,0.078),(2017,0.076),	Dmnl

		(2018,0.0717),(2019,0.068),(2020,0.03),(2021,0.084) ,(2022,0.021),(2023,0.058)))	
10	A	GDP 增长量=GDP*GDP 增长率	亿元
11	L	减污降碳协同治理=INTEG (污染治理效率,0.12)	Dmnl
		污染治理效率=LN(GDP/16309+劳动力数量/69+能源消耗总量/3.02869e+06+	
12	A	数智融合发展水平/1.435-0.589-SO ₂ 排放量/27439-"PM2.5 排放量"/40.8- NOX 排放量/25065-CO2 排放量/13431)	Dmnl
		CO ₂ 排放量= WITH LOOKUP	
13	T	(Time,([(2011,13342.4)-(2030,20000)],(2011,13342.4),(2012,13712.5),(2013,14128.2) , (2014,14623),(2015,13861.8),(2016,13431.1),(2017,14404.5),(2018,14718.9), (2019,14212.1),(2020,13820.9),(2021,15082.4),(2022,205113.6),(2023,195238.81)))	万吨
14	T	SO ₂ 排放量= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,60000)], (2011,57462.2),(2012,55448.8),(2013,51643.1),(2014,50241),(2015,45498.2), (2016,26000.7),(2017,17967.5),(2018,13084.2),(2019,10630.9),(2020,6528.85), (2021,5082.15) (2022,4910.45),(2023,4502.73)))	万吨
15	T	NO _x 排放量= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,50000)],(2011,44686.4), (2012,39114.6),(2013,34745.4),(2014,30882.4),(2015,27760.2),(2016,24792.8), (2017,23529.2),(2018,20199.6),(2019,16524.5),(2020,12252.3),(2021,10930.1) , (2022,8626.24),(2023,7553.45)))	万吨
16	T	PM _{2.5} 浓度= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,60)],(2011,52.97), (2012,49.41),(2013,54.70),(2014,55.23),(2015,49.62),(2016,44.42),(2017,44.16), (2018,39.93),(2019,39.76),(2020,33.23),(2021,31.39),(2022,30.7),(2023,31.7)))	μ g/m ³

17	A	能源消耗总量= WITH LOOKUP (化石能源消耗量+非化石能源消耗量,([(2011,66475.6)-(2030,90000)],(2011,66475.6),(2012,68857),(2013,70432.2), (2014,71339.9),(2015,73215.9),(2016,75389.9),(2017,77032.7),(2018,78058.2),(2019, 80485.2),(2020,83130),(2021,88329.3),(2022,86025),(2023,91482))) 化石能源消耗量= WITH LOOKUP (63683.6-0.763*数智融合发展水平, ([(2011,0)-(2030,90000)],(2011,63683.6),(2012,65551.8),(2013,66840.1), (2014,67344.9),(2015,68822.9),(2016,70489.6),(2017,71717.4),(2018,72281.9), (2019,74207.3),(2020,76479.6),(2021,80821.3),(2022,81034),(2023,84042))) 非化石能源消耗量= WITH LOOKUP (Time,([(2011,2791.97)-(2030,8000)], (2011,2791.97),(2012,3305.13),(2013,3592.04),(2014,3995.03),(2015,4392.95), (2016,4900.35),(2017,5315.25),(2018,5776.31),(2019,6277.84),(2020,6650.4), (2021,7507.99) ,(2022,7991),(2023,9440)))	万吨
18	A		万吨
19	T		万吨
20	T	人均 GDP=GDP/人口总量	万元/ 万人
21	A	绿色专利数量=3.086*LN(R&D 资本存量)+0.517*数智融合发展水平-0.238	个
22	A	R&D 资本存量= WITH LOOKUP (0.1959*GDP+0.681533*数智融合发展水平, ([(2011,5578)-(2030,9000)],(2011,5578),(2012,5829),(2013,6091),(2014,6365), (2015,6652),(2016,6952.28),(2017,7347.04),(2018,7822.63),(2019,8156.87), (2020,8483),(2021,8822) ,(2022,8910),(2023,9103)))	亿元
23	A	数智融合发展水平= INTEG (数智融合发展指数,0.03)	Dmnl
24	L	数智融合发展指数=数智业务广度+产业数值化程度+数智基础设施建设水平	Dmnl

+数智人文素质覆盖深度

25	T	数智业务广度= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)],(2011,0.0023), (2012,0.011),(2013,0.0026),(2014,0.0033),(2015,0.0067),(2016,0.0040), (2017,0.0041),(2018,0.0053),(2019,0.0067),(2020,0.0084),(2021,0.0125), (2022,0.0134),(2023,0.0156)))	Dmnl
26	T	产业数智化程度= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)],(2011,0.013), (2012,0.0034),(2013,0.0037),(2014,0.0043),(2015,0.0049),(2016,0.0056), (2017,0.0067),(2018,0.0066),(2019,0.0075),(2020,0.0093),(2021,0.013), (2022,0.015),(2023,0.016)))	Dmnl
27	T	数智人文素质覆盖深度= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)], (2011,0.0046),(2012,0.0048),(2013,0.0048),(2014,0.0048),(2015,0.0049), (2016,0.0052),(2017,0.0046),(2018,0.0048),(2019,0.0048),(2020,0.014),(2021,0.014) , (2022,0.016),(2023,0.017)))	Dmnl
28	T	数智基础设施建设水平= WITH LOOKUP (Time,([(2011,0)-(2030,1)], (2011,0.0033),(2012,0.0039),(2013,0.0044),(2014,0.0046),(2015,0.0048), (2016,0.0049),(2017,0.0053),(2018,0.0058),(2019,0.0128),(2020,0.0062),(2021,0.013) ,(2022,0.0136),(2023,0.0154)))	Dmnl

攻读学位期间发表的学术论文目录

发表或录用论文

- [1] Liu, F., Li, A., Bilal, M. et al. Synergistic effect of combating air pollutants and carbon emissions in the Yangtze River Delta of China: spatial and temporal divergence analysis and key influencing factors. *Environmental Science And Pollution Research* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32197-1>
- [2] Liu, F., Li, A., Khan Y. PM2.5 Neutrality goals: the role of government strengthen and digitalization in BRICS Countries. *Air Quality, Atmosphere, and Health* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01592-5>
- [3]刘芳,李安琪.退役动力电池回收研究进展及未来趋势——基于 CiteSpace 可视化分析[J].*环境工程技术学报*,2024,14(02):551-561.
- [4]李安琪,刘芳.数字经济对碳排放影响研究热点与进展分析[J].*河北环境工程学院学报*,2023,33(03):15-20+25.

参与科研项目

- [1]国家社科基金一般项目“长三角城市减污降碳协同管控障碍识别及治理机制优化研究”（项目批准号：23BGL221，参与）
- [2]安徽工程大学研究生教育创新基金项目“数字经济对长三角地区工业碳排放的影响研究：机理分析与实证检验”（项目批准号：YJS2023CX019，主持）

致谢

窗外春深，行文至此，我的硕士生涯也即将落下帷幕，这一次是真的要对学生时代的自己说一声再见了。二十余载求学路，我深感这一路走来实属不易，纵然有万般不舍，但也要继续向前走。

首先，我要由衷地感谢我的导师刘芳老师，感谢老师在研究生生涯里对我的指导和帮助。在读研期间，老师渊博的专业知识和平易近人的处事态度让我受益良多。在我做学术研究遇到困难时，为我指引方向；在我对未来迷茫时，给予我很多人生建议。老师以身作则、严于律己的人生态度让我发自内心的敬佩。同时也感谢给予我帮助的所有老师以及同学朋友们。愿老师工作顺利、身体健康，愿大家前程似锦，万事胜意。

其次，父母之恩，常记于心。漫漫求学路离不开父母的无条件支持，感谢父母对我每一次选择的理解与支持，家永远是最温暖的港湾和最坚硬的后盾。希望未来我能够像你们于我一样，成为你们的依靠，愿父母身体健康、万事顺意。

同样也要感谢这三年里迷茫、焦虑、内耗、遗憾以及努力、幸福、感动快乐过的自己，尽管一路跌撞前行，但也未曾想过放弃。无数个自我否定、自我治愈的日子里，让我发现并接纳了自己的平庸。感谢读研这段人生经历，让我不断地了解自己、认识自己，也能够让我以更从容、更平和的心态迎接人生的新篇章。

最后，感谢所有百忙之中抽出时间参与我论文评阅、评议和答辩的专家们，谢谢你们的宝贵意见和建议！

李安琪

2025 年 3 月于芜湖

