

分类号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 中原城市群减污降碳时空演变、驱动因素及脱钩  
效应研究

研究生姓名: 张凡

指导教师姓名、职称: 王永瑜、教授

学科、专业名称: 应用经济学、统计学

研究方向: 环境与能源统计

提交日期: 2024.6.5

## 独创性声明

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

学位论文作者签名： 张凡 签字日期： 2024. 6. 3

导师签名： 张凡 签字日期： 2024. 6. 3

## 关于论文使用授权的说明

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

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

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

学位论文作者签名： 张凡 签字日期： 2024. 6. 3

导师签名： 张凡 签字日期： 2024. 6. 3

**Research on the spatiotemporal evolution,  
driving factors, and decoupling effects of  
pollution and carbon reduction in the  
Central Plains urban agglomeration**

**Candidate: Zhang Fan**

**Supervisor: Wang Yongyu**

## 摘要

随着城市化、工业化不断加速，中国城市发展面临气候变化、生态环境保护和经济增长的多重压力，如何在经济增长和生态环境保护之间寻求均衡，更好理解城市化与环境的互动关系值得深思。中原城市群是黄河流域生态保护和高质量发展的重要支点，也是遏制区域分化、缩小南北差距，促进地区平衡发展的重要支撑。该地区城市间产业相似性较高，相互合作水平有限，处于发展早期，且主要经济支柱为工业，受自然资源和环境条件制约较为明显，具有显著的代表性。目前的研究多聚焦于评估减污降碳协同效应，检验其实现策略。一些学者探讨了影响减污降碳协同治理因素及其动态变化，但很少有人使用 LMDI 方法对减污降碳进行详细分解，进一步分析两者之间的解耦效应的研究则更为稀缺。基于此，以中原城市群 2006-2021 年相关环境经济数据为研究对象构建减污降碳的综合指标，明确减污降碳在中原城市群的时空演变特点，根据区域间自然禀赋和要素差异使用 LMDI 分解模型研究其减污降碳的驱动因素，深入探索不同功能区域各因素与减污降碳的脱钩努力程度。为研究中原城市群在经济发展不受约束的情况下，如何更好实现其减污降碳协同增效，改善地区生态环境提供科学参考和有效建议，研究结论如下：

(1) 中原城市群减污降碳时间趋势的变化较为一致，空间上存在差异且差异逐渐缩小。从五大区域的时序变化规律可以发现，污染排放在考察期稳步上升；从减污降碳的空间差异视角来看，南部高效生态经济示范区组间、组内减污降碳水平平均较为平衡，核心发展区组内减污降碳差异较为显著，东部承接产业转移示范区组间减污降碳水平发展差异较大。

(2) 中原城市群减污降碳驱动因素分解中，能源强度效应和实体经济人口承载强度有力推动中原城市群减污降碳实现污染减排；经济规模和技术进步则是使污染排放加剧的主要因素。

(3) 中原城市群减污降碳主要处于弱脱钩状态，且城市群整体层面各年份减污降碳不同效应的脱钩努力指数存在差异，其差异原因与 LMDI 分解结果相一致。各区域减污降碳脱钩水平中，核心发展区和南部高效生态经济示范区处于强脱钩状态，西部转型创新发展示范区属于弱脱钩状态；北部跨区域协同发展区和

东部承接产业转移示范区属于无脱钩状态。此外，五大区域中能源消耗强度是有效促进脱钩实现的共同因素，城镇化水平则是抑制强脱钩的公共因素。

**关键词：**中原城市群 基尼系数分解 Kaya-LMDI 分解 脱钩努力指数模型

## Abstract

With the continuous acceleration of urbanization and industrialization, China's urban development is facing multiple pressures from climate change, ecological environment protection, and economic growth. It is worth pondering how to seek a balance between economic growth and ecological environment protection, and better understand the interactive relationship between urbanization and the environment. The Central Plains urban agglomeration is an important fulcrum for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, as well as an important support for curbing regional differentiation, narrowing the gap between the north and south, and promoting balanced regional development. The industrial similarity between cities in this region is high, and the level of mutual cooperation is limited. It is in the early stages of development, and the main economic pillar is industry, which is more significantly constrained by natural resources and environmental conditions, and has significant representativeness. Current research mainly focuses on evaluating the synergistic effects of pollution reduction and carbon reduction, and testing their implementation strategies. Some scholars have explored the factors and dynamic changes that affect the collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction, but few have used the LMDI method to decompose pollution reduction and carbon reduction in detail. Further analysis of the

decoupling effect between the two is even rarer. Based on this, a comprehensive indicator for pollution reduction and carbon reduction is constructed using relevant environmental and economic data from the Central Plains urban agglomeration from 2006 to 2021 as the research object. The spatiotemporal evolution characteristics of pollution reduction and carbon reduction in the Central Plains urban agglomeration are clarified, and the driving factors for pollution reduction and carbon reduction are studied using the LMDI decomposition model based on regional natural endowments and factor differences. The degree of decoupling efforts between each factor and pollution reduction and carbon reduction is explored in depth. To study how the Central Plains urban agglomeration can better achieve its synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction, and improve the regional ecological environment without constraints on economic development, scientific references and effective suggestions are provided. The research conclusions are as follows:

(1) The temporal trend of pollution reduction and carbon reduction in the Central Plains urban agglomeration is relatively consistent, with spatial differences gradually narrowing. From the temporal variation patterns of the five major regions, it can be found that pollution emissions steadily increased during the investigation period; From the perspective of spatial differences in pollution reduction and carbon reduction, the

inter group and intra group levels of pollution reduction and carbon reduction in the southern high-efficiency ecological economy demonstration zone are relatively balanced, while the differences in pollution reduction and carbon reduction within the core development zone are significant. The development differences in pollution reduction and carbon reduction levels between the eastern industrial transfer demonstration zone groups are significant.

(2) In the decomposition of driving factors for pollution reduction and carbon reduction in the Central Plains urban agglomeration, the energy intensity effect and the population carrying capacity of the real economy strongly promote pollution reduction and carbon reduction in the Central Plains urban agglomeration; Economic scale and technological progress are the main factors that exacerbate pollution emissions.

(3) The pollution reduction and carbon reduction in the Central Plains urban agglomeration are mainly in a weak decoupling state, and there are differences in the decoupling effort index of different effects of pollution reduction and carbon reduction in different years at the overall level of the urban agglomeration, which is consistent with the LMDI decomposition results. Among the levels of pollution reduction and carbon reduction decoupling in various regions, the core development zone and the southern high-efficiency ecological economy demonstration

zone are in a strong decoupling state, while the western transformation and innovation development demonstration zone is in a weak decoupling state; The northern cross regional collaborative development zone and the eastern demonstration zone for undertaking industrial transfer are in a non decoupling state. In addition, energy consumption intensity is a common factor that effectively promotes decoupling in the five major regions, while urbanization level is a public factor that suppresses strong decoupling.

**Keywords:** Central Plains Urban Agglomeration; Gini coefficient decomposition; Kaya LMDI decomposition; Decoupling Effort Index Model

# 目 录

<b>1 引 言</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景及研究意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 研究内容与技术路线图 .....	3
1.2.1 研究内容 .....	4
1.2.2 技术路线图 .....	5
1.3 研究方法与主要创新点 .....	6
1.3.1 研究方法 .....	6
1.3.2 主要创新点 .....	7
<b>2 文献回顾与理论基础</b> .....	<b>8</b>
2.1 文献回顾 .....	8
2.1.1 减污降碳的内涵及发展历程 .....	8
2.1.2 减污降碳的测算研究 .....	10
2.1.3 减污降碳的时空演变研究 .....	11
2.1.4 减污降碳的驱动因素研究 .....	12
2.1.5 减污降碳的脱钩效应研究 .....	13
2.1.6 文献述评 .....	16
2.2 理论基础 .....	17
2.2.1 协同效应理论 .....	17
2.2.2 能源-经济-环境（3E）理论 .....	17
2.2.3 脱钩理论 .....	18
2.2.4 可持续发展理论 .....	19
<b>3 中原城市群减污降碳时空演变研究</b> .....	<b>21</b>
3.1 中原城市群发展现状分析 .....	21
3.1.1 经济现状分析 .....	21
3.1.2 绿色发展现状分析 .....	22

3.2 中原城市群减污降碳综合指标构建 .....	22
3.2.1 碳排放测算方法 .....	22
3.2.2 减污降碳综合指标构建 .....	24
3.3 时间趋势分析 .....	25
3.3.1 城市群整体时间趋势分析 .....	25
3.3.2 五大区域时间趋势分析 .....	26
3.4 空间差异性分析 .....	27
3.4.1 基尼系数分解模型构建 .....	27
3.4.2 整体基尼系数结果分析 .....	28
3.4.3 区域内基尼系数结果分析 .....	30
3.4.4 区域间基尼系数结果分析 .....	31
3.5 空间可视化分析 .....	33
<b>4 中原城市群减污降碳驱动因素研究 .....</b>	<b>38</b>
4.1 变量选择和数据来源 .....	38
4.1.1 变量选择的理论依据 .....	38
4.1.2 变量选择 .....	39
4.1.3 数据来源 .....	40
4.2 减污降碳驱动因素分析 .....	41
4.2.1 Kaya-LMDI 分解模型构建 .....	41
4.2.2 驱动因素结果分析 .....	42
<b>5 中原城市群减污降碳脱钩效应分析 .....</b>	<b>46</b>
5.1 脱钩的定义及分类 .....	46
5.2 脱钩弹性分析 .....	46
5.2.1 脱钩弹性指数模型构建 .....	46
5.2.2 脱钩弹性指数结果分析 .....	48
5.3 脱钩努力分析 .....	49
5.3.1 脱钩努力指数模型构建 .....	49
5.3.2 整体脱钩努力指数模型结果分析 .....	50
5.3.3 分区域脱钩努力指数模型结果分析 .....	53

<b>6 结论及建议</b> .....	<b>59</b>
6.1 研究结论 .....	59
6.2 政策建议 .....	60
<b>参考文献</b> .....	<b>63</b>
<b>致 谢</b> .....	<b>68</b>

# 1 引言

## 1.1 研究背景及研究意义

### 1.1.1 研究背景

中国明确提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现“碳中和”的战略目标,从而把“碳达峰”和“碳中和”纳入经济社会发展和生态文明建设的整体布局,同时也对新形势下正确处理经济发展与生态环境的关系提出了新的命题。全面推动实现减污降碳协同增效是新发展阶段我国兑现碳达峰碳中和庄严承诺、深入打好污染防治攻坚战、建设美丽中国的必然要求(郑逸璇等, 2022)。高排碳、高污染的能源结构和产业结构是导致中国生态环境问题的根本原因。中国作为世界上最大的能源消费国,在全球能源结构转型进程中扮演着至关重要的角色,仅中国产业能耗就占中国能源消耗总量的 80%以上(马晓君等, 2021)。因而当前迫切需要落实节能减排相关政策,推动经济结构转型升级,破解资源环境约束突出问题,寻求减污降碳和经济发展之间的平衡(张明斗和闫显睿, 2023)。减污降碳应以统筹经济高质量发展为目标,实现减碳与发展的深度融合。一方面,利用经济转型实现减污降碳;另一方面,基于减污降碳倒逼经济转型,牵引高质量发展,最终目的则是发展绿色低碳经济(高吉喜, 2021)。

区域经济与生态环境的协调发展是我国可持续发展战略的客观要求,经济发展与生态环境保护相辅相成,互相促进,二者的关系应是和谐的、可持续的、双赢的(王维国, 2000)。随着城市化、工业化不断加速,中国城市发展面临气候变化、环境保护和经济增长的多重压力(SHANY L, 2021)。同时,城市也是各类污染物排放相对集中的地区,中国城市人口占比已达 63.98%,城市环境空气质量及其对健康的影响越来越受到关注(DONG F, 2019)。目前,二氧化碳及大气污染物排放已成为制约我国经济社会可持续发展的瓶颈,因此控制其排放已经上升为关系我国民生和战略发展的重大问题(王涵等, 2022)。有研究表明,二氧化碳与环境污染排放具有同根、同源、同过程的特点。因此,利用该特点采取相应的手段同时减少污染物排放(简称“减污”)和降低二氧化碳排放

（简称“降碳”），是一种高效环境管理策略（马伟波等，2022）。然而，该策略在城市群尺度的应用缺乏有效的评价手段。

中原城市群以郑州为中心，横跨河南、河北、山西、山东、安徽五省，包括30座地级市。其作为中部地区承接发达国家及我国东部地区产业转移、西部地区资源输出的枢纽和核心区域，是促进中部崛起、辐射带动中西部地区发展的核心增长极。在经济发展方面，中原城市群的主导职能长期以工业为主，矿业等其他产业为辅（胡益平等，2021）。区域内城市多为资源依赖型，耗能大污染重，生态环境压力大。同时，中心城市发育不足，城市之间产业同质化较高，分工与专业化尚未形成，城市群整体处于产业价值链的中下游（周韬，2020）。从中原城市群各城市发展来看，各城市的三次产业结构与河南省的产业结构具有较大的相似性，产业结构均呈“二三一”特征，且第二产业主要以有色、装备制造、煤炭和钢铁行业为主，偏重工业的结构格局仍未改变，传统产业转型升级任务艰巨，协同推进减污降碳面临较大挑战，对其减污降碳与经济均衡发展的研究迫在眉睫。

在这一背景下，探究中原城市群减污降碳在不同时间趋势下的发展变化，可以更为精准了解该地区减污降碳协同治理效果。同时在不同地区考察减污降碳变动情况能够借鉴环境优质地区减污降碳治理方式，发展地区特色产业经济，为中原城市群经济环境协调发展指明方向。此外，结合地区能源、经济特色，引入减污降碳的驱动因素并将其脱钩分解，能够以具体因素细化中原城市群减污降碳优化治理与经济高质量发展的路径，推动实现中原城市群经济环境“双赢”局面。为此选取中原城市群5省29座地级市（除济源外，济源数据缺失严重，下同）为研究对象，研究其减污降碳的时空演变、驱动因素及脱钩效应，为推动中原城市群经济社会发展全面绿色转型，切实改善环境质量提供科学建议。

### 1.1.2 研究意义

习近平总书记在主持中共中央政治局第二十九次集体学习时强调“十四五”时期，我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期（熊华文，2022）。2022年国家发改委公布了《“十四五”新型城镇化实施方案》，明确提到要推动中原城市群发展。相比京津冀、长三角和粤港澳城市群来

说，中原城市群主要以单个省域为主，虽然也跨省，但群内核心城市只有郑州，经济体量、辐射力、影响力相对有限。因此，在“双碳”背景下研究中原城市群减污降碳与经济的协调发展具有理论和现实意义。

### （1）理论意义

减污降碳与地区经济的相互关系问题一直是学术界关注、研究的重要课题。不可否认目前学界关于减污降碳方面的课题、论文的成果不少，也有关于推进地区经济发展对策的研究，但是相关研究主要聚焦于国家、省市及经济带层面，关于城市群层面减污降碳与经济增长的影响研究进行深入探讨的还比较少。通过文献梳理可知，现有对经济高质量发展的研究大多仅考虑碳排放或环境污染单一因素的约束性，对减污降碳双重约束作用研究得较少，本研究立足新时代减污降碳协同推进新要求，提出减污降碳约束下的高质量发展研究范式，在一定程度上为后续高质量发展研究提供参考。此外，丰富拓展了减污降碳驱动因素的研究方法，较之常用的面板分析，本研究在 LMDI 分解基础上进行脱钩效应研究，可以深入探讨减污降碳与经济协调发展的路径，探讨中原城市群整体和不同功能区域减污降碳与经济协调发展，进一步丰富了相关研究成果。

### （2）实践意义

中原城市群地处全国“两横三纵”城市化战略格局的有利据点，在人力资源、自然资源禀赋、城镇体系建设等方面具有较强优势。但与此同时，二氧化碳排放量加剧、部分城市雾霾天气、资源配置效率低下等问题突出，给中原城市群的可持续发展带来严重的负面影响（韩燕和邓美玲，2020）。如何将减污降碳协同增效更好融入中原城市群经济发展中，在不影响经济发展的基础上推动地区更好实现减污降碳是当下我国面临的难题之一。基于此本文首先构建减污降碳综合评价指标，考虑到中原城市群自然禀赋、经济发展和政策实施情况不同，通过其时空演化规律，研究该地区减污降碳的驱动因素。并对减污降碳与经济的脱钩弹性指数以及其脱钩效应的分解情况进行解释，一定程度上弥补了现有研究的不足，对中原城市群减污降碳进行深入的研究并给出相应的低碳经济发展建议，是中原城市群实现低碳经济转型的突破口，具有重要的现实意义。

## 1.2 研究内容与技术路线图

## 1.2.1 研究内容

本文基于中原城市群 2006-2021 年碳排放和大气污染相关经济环境数据出发,通过构建减污降碳综合指标,研究其时空演变特点、驱动因素和与脱钩效应,理论分析结合实证研究。本文共六个部分,各部分内容具体如下:

第一章:绪论。绪论部分主要阐述本文的研究背景和意义,对文章的研究内容及所采用的研究方法进行概括和梳理,并进一步介绍本文的研究思路与创新之处。

第二章:文献回顾与理论基础。对国内外文献进行归纳,总结已有文献的研究成果,对减污降碳的内涵及发展过程、综合指标的测算、驱动因素与脱钩效应进行概括,梳理本文的研究脉络;并对本研究所依据的相关理论基础进行阐述,以协同理论为前提,3E 理论为基础,脱钩理论为主体,可持续发展理论为目的,为下文深入研究中原城市群减污降碳的时空演变、驱动因素及脱钩效应奠定坚实的理论基础。

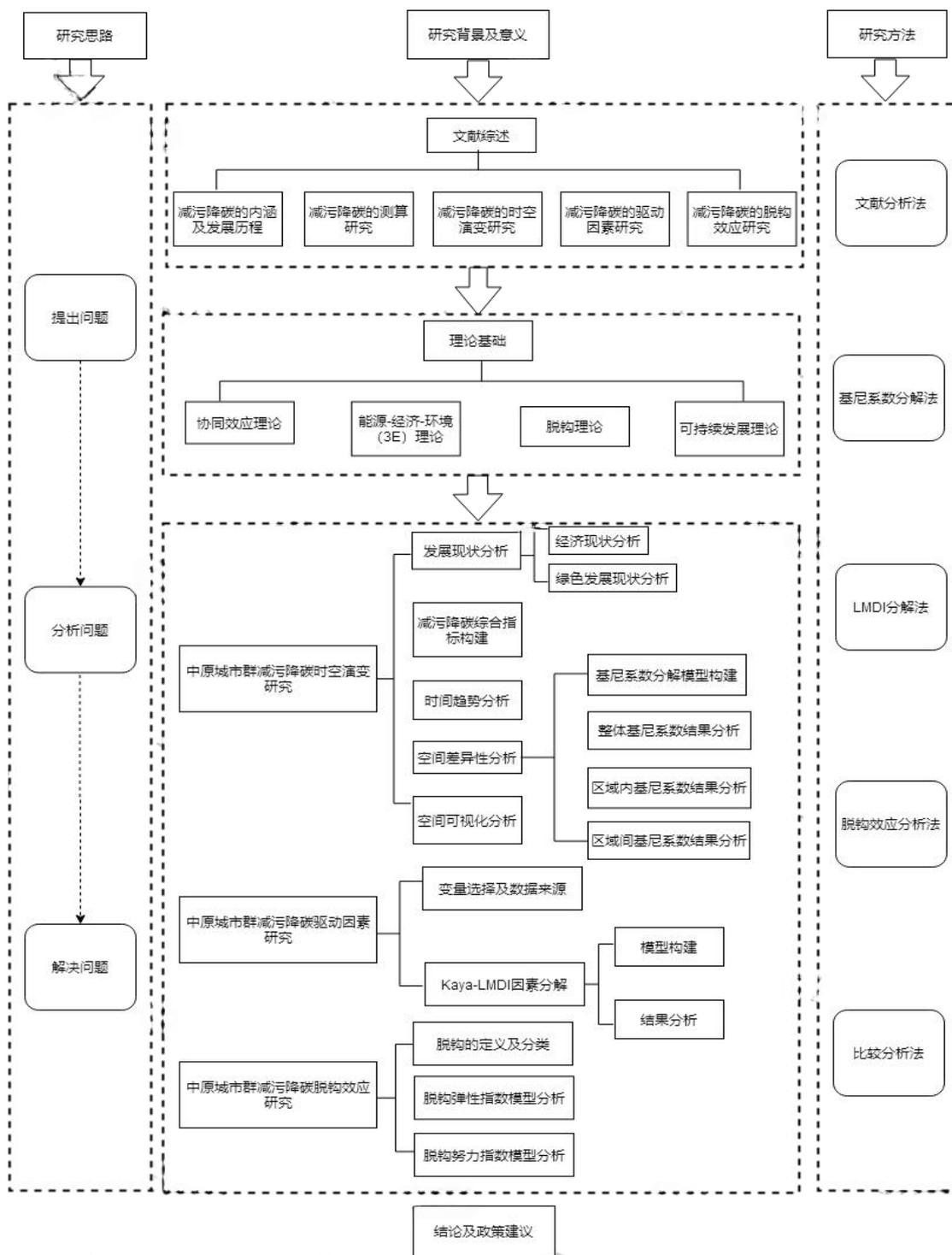
第三章:中原城市群减污降碳时空演变研究。对中原城市群减污降碳的现状进行分析,以此为出发点,使用排放因子法测算中原城市群 29 座地级市的碳排放量,结合大气污染的相关数据构建指标体系,使用平均赋值法将减污和降碳两大指标体系合并成统一指标;对减污降碳在考察期的时间趋势进行分析,并通过基尼系数分解法探究区域内及不同区域间的减污降碳差异,采用 GIS 法对中原城市群减污降碳综合指标进行可视化分析。

第四章:中原城市群减污降碳的驱动因素分析。通过文献梳理并结合中原城市群减污降碳的地区特色和时空演变特点,对该地区减污降碳的驱动因素采用 Kaya-LMDI 分解为八大效应,研究每部分效应对减污降碳的贡献。

第五章:中原城市群减污降碳脱钩效应分析。使用 Tapio 脱钩模型对中原城市群减污降碳与经济的脱钩状态进行说明;在对减污降碳现状了解的基础上,将其驱动因素分解为八大效应,并进一步运用脱钩效应来分析驱动因素的八大效应对中原城市群总体及五大功能区减污降碳与经济脱钩关系是起到正向促进还是逆向抑制作用,根据其作用效果,为未来中原城市群更好实现减污降碳与经济脱钩的“双赢”提供有效路径。

第六章：研究结论与政策建议。根据中原城市群减污降碳的时空演变、驱动因素和脱钩效应分解的实证结果，总结实证结论，并针对性地提出相关政策建议，为中原城市群高质量发展和绿色低碳化发展提供科学参考。

### 1.2.2 技术路线图



## 1.3 研究方法与创新点

### 1.3.1 研究方法

#### (1) 文献分析法

通过全面梳理减污降碳的相关文献及《中原城市群发展规划》，全面正确地掌握中原城市群减污降碳研究现状，总结归纳国内外关于城市群层面减污降碳有待深入研究的地方，提出自己的研究方向。在参考相关文献构建中原城市群减污降碳综合指标的基础上，创新性地对其驱动因素进行分解，以此为基础探讨减污降碳的脱钩效应，为未来经济实现可持续发展做出更全面的分析。

#### (2) 基尼系数分解法

基于空间分析相关理论结合地区自然禀赋和要素差异，采用基尼系数分解法考察中原城市群 29 座地级市减污降碳的空间演化特征。Dagum 基尼系数弥补了其他用于测度地区差距方法因无法解决考察数据存在交重叠现象的不足，可具体分解为组内系数、组间系数和超变密度系数三部分。能够更好地展现考察期中原城市群减污降碳地区差异的趋势变化，并能有效识别造成地区减污降碳差异的来源，为实现中原城市群地区间减污降碳协调治理提供方向。

#### (3) LMDI 分解法

以 LMDI 分解方法为代表的指数分解方法最早是为了量化分解各因素对工业部门能源需求和能源强度的相对影响程度，后来随着人们对气候问题的关注，LMDI 分解方法逐渐应用于对碳排放和其驱动因素分解上。由于碳排放和大气污染物排放具有协同增效，此方法也同样适用于对减污降碳驱动因素的研究。本研究基于 Kaya 恒等式构建 LMDI 模型，分解中原城市群减污降碳的驱动因素，不仅可以满足因素可逆，有效避免伪回归问题，相较于其他分解方法，其操作性和适用性更强，可以有效分析总体指标，保持各个分解指标之间的高度一致性，完全消除残差。

#### (4) 脱钩效应分析法

脱钩是从整体出发，研究环境污染和经济发展间的相互关系；而脱钩效应则是从部分出发，在脱钩的基础上，将影响减污降碳的因素分解成不同的部分，并将经济发展指标剔除后，研究政府为缓解环境污染压力所做出的努力。脱钩在研

究内容上隶属于脱钩效应,本研究从定量分析角度分析减污降碳各效应的脱钩贡献程度,为更好实现中原城市群减污降碳优化治理和经济高质量发展提供科学依据。

### (5) 比较分析法

通过比较国内外不同学者关于减污降碳的研究经验,为本文选择中原城市群减污降碳驱动因素的相关指标提供思路,主要包括能源和经济两方面;在对中原城市群减污降碳驱动因素进行分解时,比较分析不同分解部分对中原城市群减污降碳的贡献程度;在研究中原城市群减污降碳脱钩效应分解时,比较分析时间序列下脱钩状态的演变和不同效应对减污降碳的脱钩努力程度,并与 LMDI 分解结果进行对比分析,为未来中原城市群实现减污降碳和经济增长两者间的“双赢”提供实现路径。

## 1.3.2 主要创新点

(1) 将减污降碳的研究区域扩展至城市群。通过对已有文献梳理发现,基于减污降碳的研究多数是以国家、省市地区及行业为研究对象的,“十四五”新型城镇化实施方案指出,要提升城市群一体化发展和都市圈同城化发展水平,促进大、中、小城市和小城镇协调发展(肖铁桥等,2023)。中原城市群的空间形态表现为单核结构,城市间产业同质化较高,分工协作程度低,总体尚处于初期发展阶段,其主要产业为工业,受资源环境的约束较大,该研究区域具有较好的典型性。综上可知,在城市群层面研究减污降碳,对推动中原城市群经济高质量发展和生态环境进一步改善影响重大。

(2) 采用新视角新方法对减污降碳进行分析。现有研究中对减污降碳的研究大多是对其协同发展进行评估,对其实现路径进行检验分析。也有学者研究减污降碳的影响因素和时空演变,但是较少采用 LMDI 分解对减污降碳进行分解研究,更缺乏进一步研究减污降碳的脱钩效应。因此,本研究将 LMDI 分解法运用于中原城市群减污降碳驱动因素的研究中,基于中原城市群减污降碳因素分解的结果,扩展性地将中原城市群减污降碳以 DPSIR 框架为基础进行脱钩效应研究。阐明各分解效应对减污降碳的脱钩贡献情况,为中原城市群更好实现减污降碳及更彻底践行可持续发展理念提供可行方案。

## 2 文献回顾与理论基础

### 2.1 文献回顾

与一些发达国家基本解决环境污染问题后再转入强化碳排放控制阶段不同，当前我国生态文明建设面临协同推进生态环境根本好转和碳达峰碳中和的战略任务。要发挥后发优势，实施减污降碳共治，实现环境和经济效益共赢（生态环境部新闻发布会，2022）。本研究以协同理论、3E理论、脱钩理论和可持续发展理论为研究基础，涉及空间分析、统计分析等多种研究方法。通过对现有文献梳理可以发现，学者们考察减污降碳大致沿着以下脉络开展：早期研究大多将减污和降碳分割开考察，重点放在两者的治理效果，影响因素及对策研究上。随后，将两者综合考察，全面研究减污降碳协同效果和政策实施影响。近几年，学者们在减污和降碳协同的前提下，构建两者的综合指标，着重研究其空间格局及减污降碳的驱动因素，并逐渐将生态环境目标融入经济发展过程，开始探索减污降碳和经济间的关系。不同学者在进行减污降碳研究时的主要区别在于运用不同的空间分析方法，选择不同的驱动因素指标，考察不同地区，不同行业的减污降碳效果等方面。

#### 2.1.1 减污降碳的内涵及发展历程

“十四五”时期我国明确提出减污降碳，改变了过往两者割裂治理的局面，将“减污”和“降碳”综合考察。“减污”里边的“污”可以指代大气污染物、固体废物、废水污染物等，“碳”则代表碳排放，碳排放是指在能源转换或利用过程中释放出的二氧化碳和其他温室气体的气体。这些温室气体可以包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等，其中二氧化碳是最主要的温室气体。因此，在已有研究中大多将碳排放用二氧化碳排放量表示。

碳排放治理相较于大气污染防治起步较晚，我国在20世纪70年代已开启大气污染治理，而“碳排放”一词在近30年国际社会为应对全球气候变化开始频繁提及（顾斌杰等，2021）。早期相关研究侧重于单方面考察减污或降碳，研究方向主要包括碳排放的测算（蒋金荷，2011）、大气污染特征及对策研究（杨秀

妍, 2015)、时空演变(刘海猛等, 2018; 王少剑等, 2020)、影响因素分析(王锋等, 2010; 李晓飞等, 2012)及路径机制研究(张华和魏晓平, 2014; 黎文靖和郑曼妮, 2016)等方面。对于将二氧化碳减排与大气污染防治结合起来的议题直到 21 世纪初才引起学者关注。2016 年后《巴黎协定》签订后, 关于减污降碳, 协同减排的研究呈爆发式增长, 学者们不仅针对前期的研究领域继续深入开展(XU B 和 LIN B Q, 2016), 而且转向减污降碳相关政策(唐湘博和陈晓红, 2017)及协同减排关键路径研究(LIU L 等, 2018), 在这一时期, 随着中国“双碳”目标提出, 相关中文文献大量涌现(费伟良等, 2021)。

“减污”和“降碳”可以相结合进行研究是以污染物排放和碳排放具有协同增效这一结论为前提条件。学术界分别从“碳污同源”视角、相互间作用效果、作用路径及福利视角等对减污降碳的协同效果进行概述。以“碳污同源”视角来看, 2022 年 2 月生态环境部例行新闻发布会上, 生态环境部环境规划院副院长深入解读了“碳污同源”, 研究表明, 我国主要大气污染物排放源中, 几乎所有的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放源, 50%左右的  $\text{VOCS}$  和 85%左右的一次  $\text{PM}_{2.5}$  (不含扬尘) 排放源, 都与二氧化碳排放源高度一致; 以“污”与“碳”相互作用效果来看, 根据中国环境与经济政策研究中心对减污降碳协同效应的定义, 减污降碳协同效应一方面是指在控制温室气体排放中减少其他污染物的排放, 另一方面是指在污染物排放控制和生态建设中减少或吸收  $\text{CO}_2$  和其他温室气体的排放; 从作用路径来看, 姜华等(2021)对减污降碳协同的内涵进行界定, 认为减少煤炭、石油等化石能源的燃烧和加工利用, 在降低二氧化碳排放的同时, 也可以减少常规污染物排放, 且将减污降碳协同细化为目标协同、路径协同、管理协同、效果协同和部门协同五方面; 从福利视角来看, 减污和降碳的协同是在不给对方造成损失的前提下增加己方的福利, 这有助于在资源利用最小时实现经济和生态效益最优。即实现减污和降碳等多目标的“帕累托改进”或“帕累托最优”。

综上所述, 只要具备和碳排放协同的污染物, 在和碳排放综合考察时均可被称之为“减污降碳”。通过已有文献梳理可知, 学者在研究减污降碳时所涉及的污染物多指代大气污染物, 较少研究中采用污水(蒋富海等, 2022)和固体污染物(减污降碳协同增效实施方案, 2022)。因此, 本研究提及的减污降碳里边的“污”用大气污染物排放量表示, “碳”则用二氧化碳排放量表示, 所涉及到的

减污降碳是承认大气污染物和二氧化碳排放量的协同作用，并建立在两者协同基础之上的综合指标。

## 2.1.2 减污降碳的测算研究

减污降碳的测算主要分为两部分，一部分为二氧化碳排放量的测算，另一部分则为污染物和二氧化碳排放量综合指标的测算。估算能源消费碳排放量的方法一般有三种方式：实测法、质量平衡法和排放因子法。实测法根据排放源实测数据，将其汇总得到相关碳排放量，具体测量方法包括现场测量和非现场测量。二者相比，由于非现场实测采样气体会发生吸附、解离等问题，因此现场测量的准确性要明显高于非现场测量；质量平衡法可以根据每年用于国家生产生活的化学物质和设备，计算为满足新设备或替换去除气体而消耗的新化学物质份额。对于二氧化碳而言，在碳质量平衡法下，碳排放由输入碳含量减去非二氧化碳的碳输出量得到： $\text{二氧化碳}(\text{CO}_2)\text{排放} = (\text{原料投入量} \times \text{原料含碳量} - \text{产品产出量} \times \text{产品含碳量} - \text{废物输出量} \times \text{废物含碳量}) \times 44/12$  其中，44/12 是碳转换成  $\text{CO}_2$  的转换系数；排放因子法是目前运用最为广泛的碳排放测算方法，根据 IPCC 提供的碳核算基本方程： $\text{温室气体}(\text{GHG})\text{排放} = \text{活动数据}(\text{AD}) \times \text{排放因子}(\text{EF})$ 。其中，AD 是导致温室气体排放的生产或消费活动的活动量，如每种化石燃料的消耗量、石灰石原料的消耗量、净购入的电量、净购入的蒸汽量等；EF 是与活动水平数据对应的系数，包括单位热值含碳量或元素碳含量、氧化率等，表征单位生产或消费活动量的温室气体排放系数。EF 既可以采用 IPCC、美国环境保护署、欧洲环境机构等提供的已知数据（即缺省值），也可以基于代表性的测量数据来推算，根据文献梳理，目前更多是基于 IPCC 的《国家温室气体排放清单指南 2006》进行测算。对于污染物和二氧化碳综合指标（即减污降碳综合指标）的测算，文献梳理可知，学者们采取不同的方法选择减污降碳综合指标细分项的权重。马伟波等（2022）在构建减污降碳强度指标时，根据研究区域将污染物分为水污染和大气污染，并采用专家打分法对污染物细分项指标进行赋权；张为师等（2023）采用二元系统的耦合度方法综合测算大气污染和二氧化碳，用城市减污降碳的耦合度作为研究减污降碳影响因素的被解释变量。陈晓红等（2022）和唐湘博等（2022）采用污染物排放当量的方法对各大气污染物指标进行归一化

处理,并使用污染物当量系数作为大气污染物细分项指标。以上学者在构建减污降碳综合指标时,均将二氧化碳和污染物排放的治理视为同等重要,对两者权重的设置均为 0.5,主要区别在于大气污染细分项指标权重的不同。

### 2.1.3 减污降碳的时空演变研究

城市发展的同时也面临着应对气候变化、生态环境保护和经济发展的多重压力,探究城市群尺度减污降碳的时空差异,有助于更好地理解城市化、环境与经济间的互动关系。在时间趋势研究中,相关研究普遍采用时序动态演变,进而对其变化趋势和规律进行总结说明(崔连标和陈慧,2023);空间分析方面,已有研究中,学者们使用不同的空间计量方法对减污降碳的空间分布特点进行分析,常用方法包括引力模型(狄乾斌等,2022)、GTWR(唐湘博等,2022)和随机森林(马伟波等,2022;康哲等,2022)。以此为基础,原伟鹏等(2022)将 GTWR 方法进一步改进,在考察减污降碳空间相关性和差异性中利用空间自相关、冷热点、标准差椭圆和多尺度地理加权回归(MGWR)模型来说明减污降碳的空间布局特点。相关文献梳理可得,减污降碳的空间分析中,较少采用基尼分解研究其空间分布特点。Dagum 基尼系数的优势在于解决了区域间的样本交叉重叠问题,Dagum 基尼系数及其分解方法可以分解为组内基尼系数贡献、组间基尼系数贡献和超变强度贡献,不仅能够描述子样本的分布状况,而且能够有效解决地区差距的来源问题。因此,本文采用基尼分解法对中原城市群减污降碳的空间差异通过组间、组内及超变密度等方面进行全方位探讨,更为全面的对中原城市群减污降碳的空间分布特点进行说明总结。

对上述文献中有关减污降碳时空演变的特征概括可得,从研究对象出发,相关研究多以省、市及三大城市群为主。唐湘博等(2022)以中国 30 个省为研究对象得到大气污染物和碳排放主要集中在东北、北部沿海和黄河中游经济区,我国减污降碳的协同效应整体上明显提高,不同经济区和省份的减污降碳水平存在明显的时空差异。原伟鹏等(2022)通过研究中国 270 个地级及以上城市发现减污降碳水平存在南方优于北方,先减污后降排的发展趋势。崔连标和陈慧(2023)及李云燕和杜文鑫(2023)以京津冀城市群为研究对象,得到减污降碳水平展现出三阶段波动式上升的特点,分别为缓慢上升、徘徊探索和稳步增长阶段。且北

部、中部和南部的减污降碳水平呈收敛性，五大区域呈现中部>东部>西部、北部>南部的空间分布特征。陈小龙等（2023）发现三大城市群减污降碳增效呈稳定增长趋势，增长速度为长三角城市群>京津冀城市群>珠三角城市群。综上可知，减污降碳水平时间上呈现出不同的增长趋势，空间上呈现出不同的演化与关联特征，且内部存在不协调。

#### 2.1.4 减污降碳的驱动因素研究

国内外学者根据减污降碳的时空演变规律进一步研究造成这一差异的驱动因素。在相关研究中，学者采用不同的统计方法分析减污降碳的驱动因素，常用方法包括面板分析模型（陈晓红等，2022）、GTWR 模型（马伟波等，2022；张为师等，2023）、Tobit 模型（崔连标和陈慧，2023；张雪纯等，2023）及 LMDI 分解法（王力等，2022；楚英豪等，2024）。面板分析模型是减污降碳驱动因素分析中使用最常规，最基础，范围最广泛的模型。GTWR 模型在分析减污降碳的驱动因素时，可以充分考虑复杂空间非平稳性、异质性的现实特点。Tobit 模型通过和 SBM 模型结合使用，超效率 SBM 模型测算的减污降碳效率值具有非负截断特征，若采用 OLS 法通常会使估计结果产生偏误，而 Tobit 模型可以有效规避参数有偏等问题。LMDI 因素分析方法具备易于建模的特点，且在消除残差的同时还能满足因素可逆的优势，此方法基于 Kaya 恒等式，能够将减污降碳水平分解为多个因素，定量分析单个因素的贡献程度。本研究减污降碳的脱钩效应分析正是以 LMDI 因素分解得到的多个因素为基础，进而对比研究各部分的脱钩贡献程度。基于此，本研究选用 LMDI 因素分解模型探究中原城市群减污降碳的驱动因素。

通过对地区减污降碳驱动因素进行检验分析，得到能源因素和经济因素普遍被作为影响减污降碳的主要方面。借鉴 IPAT 理论和已有研究成果（陈敏等，2022；ZHANG W 等，2022），证明经济发展加速了能源消耗，同时能源消耗也是经济发展的必要条件。唐湘博等（2022）以 2011—2019 年我国 30 个省（除西藏外）为研究对象，发现能源消费总量、能源消费结构、能源消费强度、产业结构和进出口贸易总额等因素对减污降碳协同效应的影响存在显著的空间异质性。原伟鹏等（2022）以全国地级市为研究对象，得到不同时空尺度减污降碳的主要驱动力

有所差异,认为影响城市减污降碳主要驱动力为降水量、城市创新创业水平、空气流通水平、实际利用外资、地形起伏度、人口密度、产业结构升级。陈晓红等(2022)基于中国工业省际面板数据,得到东部、中部和西部地区工业减污降碳协同效应及影响机制差异明显,其中产业结构因素对各地区协同效应均产生较强的调节效果。马伟波等(2022)基于长三角城市群经济发展、产业结构、土地利用结构、人口以及气候变化对减污降碳强度指标的时空驱动特征及驱动因素重要性变迁特征。张雪纯等(2023)以省级数据为基础,得到产业结构升级水平、人均GDP、专利授权数、地方性法规政策数量在1%水平下显著提高减污降碳效率;单位能耗在1%水平下对减污降碳效率具有显著的抑制作用;污染治理投资占比对减污降碳效率的影响并不显著。综上可知,由于研究区域不同,学者们关于减污降碳驱动因素的选择不同,但经济和能源仍作为其驱动因素的主要部分。结合上述文献可得,其中,经济部分必要指标包括产业结构和GDP(PGDP),能源部分必要指标包括能源强度和能源结构指标。

### 2.1.5 减污降碳的脱钩效应研究

全面了解我国各地区减污降碳与经济发展水平,有助于国家和地方政府因地制宜地制定减污降碳相关政策(王涵等,2022),实现减污降碳和经济发展的“双赢”。减污降碳理念是在“双碳”目标提出后逐步加以明确,学者对于减污降碳的相关研究更多是从减污降碳的协同效应评估、驱动因素和实现路径等方面,而对减污降碳与经济间的关系研究较少,进一步探讨减污降碳脱钩效应的文献数量更为稀少。脱钩最早是由经济合作与发展组织(OECD)提出,用于研究经济发展与环境污染的关系(ANDERSEN M S, 2005)。目前,被广泛用于国家级、省级、县级不同空间尺度,以及不同行业经济发展与碳排放关系的评价。

#### (1) 大气污染物的脱钩效应研究

通过相关文献整理可得,学者们对于大气污染物和经济发展间的脱钩效应研究逐步深化。从早期整体考察两者间的脱钩状态逐渐发展到考察不同地区和不同行业影响大气污染的各因素的脱钩贡献程度。研究前期有学者发现水污染和大气污染密集型产业脱钩主要得益于产业结构调整,而固体废物污染密集型产业脱钩主要得益于技术进步(刘航等,2012)。对于大气污染物,学者们主要以SO<sub>2</sub>、

NO<sub>x</sub> 和烟粉尘为研究对象,得到吉林省 SO<sub>2</sub> 和烟粉尘脱钩状态空间演变趋势并不一致,工业 SO<sub>2</sub> 扩张性负脱钩状态经历中部集聚—周边扩散—中部集聚—扩散的变化,工业烟粉尘扩张性负脱钩状态逐渐由中部向东部扩展(任嘉敏和马延吉,2019);而在全国范围,中国 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 分别在 2006 年、2011 年后与经济实现持续强脱钩(邹凯波等,2020;宋晓聪等,2021)。随着研究深入发展,学者们在 LMDI 分解的基础上进一步研究大气污染的脱钩效应,发现大气污染与工业经济基本实现了从相对脱钩向绝对脱钩的转变,总体趋势有所改善,且在不同研究区域影响大气污染和经济发展脱钩程度的影响因素存在差别。在山东省,规模总量效应和技术效率效应脱钩贡献程度较大(程钰等,2013);在长江经济带,经济发展效应和能源效率效应是促使工业废气排放的主要因素(夏会会等,2017)。京津冀地区,产业结构升级能够有效推动大气污染和经济发展间的强脱钩关系(刘亚清等,2017)。综上可知,大气污染物和经济发展之间由相对脱钩向绝对脱钩过渡,且不同地区由于自然禀赋和政策实施不同,影响脱钩状态的因素存在显著不同。

## (2) 碳排放的脱钩效应研究

学者们从各省份(彭佳雯等,2011)、低碳城市(禹湘等,2020)和产业层面(谢守红等,2016;徐盈之等,2011)考察碳排放的脱钩效应,得到我国绝大部分省区和低碳试点经济增长与碳排放之间呈现弱脱钩状态,经济增长速度大于碳排放增长速度且两者变化趋势上趋于一致(孙耀华和李忠华,2011;刘竹等,2011)。彭佳雯等(2011)发现无论从全国层面还是地区层面经济增长和能源碳排放之间均呈现弱脱钩和扩张性负脱钩状态,且认为弱脱钩状态会持续下去,地区脱钩程度逐渐减缓。冯博和王雪青(2015)以中国建筑业为研究对象,发现大部分省份处于碳排放的弱脱钩状态,其余省份处于扩张负脱钩状态和增长连接状态,尚未出现强脱钩的省份,且在建筑行业,间接碳排放强度效应和产业规模效应对碳排放产生正向影响,是碳排放的主要影响因素。张赫等(2022)研究发现县域碳排放脱钩关系以强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩为主,强脱钩聚集于东部沿海、南部沿海等地区,负脱钩数量逐渐增加且向东北及西北地区集中。胡怀敏等(2022)经考察得到长江经济带交通碳排放脱钩以“弱脱钩”为主,部分年份出现“连接增长”和“扩张负脱钩”,脱钩状态稳定性不高。花瑞祥等(2023)探

究了省际碳排放和经济发展的脱钩情况,得到我国碳排放与经济发展总体呈脱钩状态的省份有 22 个,呈扩张连接状态的省份有 2 个,呈负脱钩状态的省份有 6 个。各省份年度脱钩状态呈现波动变化趋势,且以强脱钩和弱脱钩相互转换为主。袁伟彦等(2022)通过研究中国工业碳排放发现,得益于能源强度、能源消费碳强度和劳动投入碳减排作用增强,碳排放与工业增长正从弱脱钩向强脱钩变化,采矿业和电热燃水业由连接或负脱钩向强脱钩改善,制造业由弱脱钩向强脱钩改进。

在分析脱钩状态的基础上,国内外学者还利用因素分解法、结构分解模型和冗余分析等,进一步分解碳排放脱钩的驱动因素(宋晓辉等,2012;LIN S F 等,2017;陈敏等,2022)。张聪等(2022)在消费者视角采用结构分解模型,将影响碳排放的因素分为能源结构效应、能源强度效应、附加值效应、投入结构效应和最终需求效应并构建研究模型。韩梦瑶等(2023)采用因素分解法发现中国碳排放量与经济增长总体呈现弱脱钩状态,技术进步效应与产业结构效应对碳排放量起到抑制作用,而经济产出效应与人口规模效应起到促进作用。花瑞祥等(2023)采用冗余分析得到中国省级碳排放的主要驱动因素为人口和经济规模,碳排放与经济社会发展脱钩的主要驱动因素是技术水平和能源结构。综上所述,在脱钩分析基础上,影响碳排放的驱动因素可概括为产业结构、能源结构、能源强度、技术进步、经济产出及人口等方面。

### (3) 减污降碳的脱钩效应研究

减污降碳的脱钩效应,本质上是在环境污染领域选取减污降碳指标,作为研究和经济发展关系的对象,进而考察两者的脱钩状态。目前,在减污降碳与经济发展相关领域的研究中,学者们较少考察减污降碳的脱钩效应,但基于不同视角研究考察了减污降碳和经济发展的关系。基于经济绩效考察,李红霞等(2022)经研究发现环境与经济目标设置对减污降碳协同管理绩效有显著影响,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>浓度目标与减污降碳协同管理绩效正相关,而经济增长目标与减污降碳协同管理绩效负相关;基于大气污染、二氧化碳排放和经济发展的耦合作用,黄儒霞等(2022)根据Liang等(2014)定义的解耦指数,发现广东省经济增长与各类大气污染均实现了绝对解耦,与CO<sub>2</sub>排放实现了相对解耦;王涵等(2022)通过灰色关联度法对减污降碳和经济指标进行综合评价,进而测算指标间耦合协

调度因地制宜地提出减污降碳和地区发展建议；基于空间分析方法，乔列成(2022)利用探索性空间分析技术揭示其空间关联及演化趋势，并借助 Dagum 基尼系数考察中国经济绩效地区差异的来源，以期更加全面的把握减污降碳双重目标约束下中国经济绩效的空间格局。综上可知，已有文献中减污降碳的脱钩效应研究较为缺乏，在减污降碳领域，与经济增长的关系研究较少，进一步与经济间的脱钩效应分解更是稀缺。

### 2.1.6 文献述评

已有文献主要从单边视角研究减污或降碳的效果，尤其是相较于降碳，我国减污涉及的相关政策法规起步较早，已经形成了较为成熟的体系。而对于碳排放相关研究则是自我国碳交易试点推行后，逐渐成为学者们关注的重点。中原城市群关于减污和降碳的研究亦是如此，相关文献主要聚焦于单侧视角，在减污和降碳方面以 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 及 CO<sub>2</sub> 为主要研究对象，探索其污染排放的时空演变（卢鋈镭等，2023）、影响因素（周志衡等，2022；周桂芳等，2023）及环境承载力等（于洋等，2018）。缺乏将两者结合起来综合研究减污降碳效果，进一步对经济发展与减污降碳脱钩关系的研究更少。“双碳”目标的提出以及中共中央政治局第二十九次集体学习时提出减污降碳协同效应，使人们的研究角度从单边转向双边，开始将减污和降碳综合考虑。

对现有文献进行梳理，发现已有文献存在以下不足：①多数文献在研究减污降碳问题时，更多是基于国家、省市地区及产业层面，缺乏对城市群的相关研究，中原城市群作为全国经济发展新增长极、支撑中部崛起的核心增长地带、绿色生态发展示范区，具有重大战略地位。因此，研究中原城市群减污降碳协同增效，对改善生态环境，促进其绿色低碳化发展意义深远。②通过对文献整理发现，已有文献中对减污降碳的研究更多是在时空演变的基础上研究其影响因素或实现路径，对于减污降碳与经济发展关系的研究还不够成熟，进一步考察减污降碳脱钩效应的研究较少。因此，本文对中原城市群减污降碳的时空演变进行分析，根据减污降碳驱动因素进行分解，在此基础上考察减污降碳和经济的脱钩弹性指数及其脱钩效应分解情况，进而综合评价中原城市群减污降碳和经济增长的协调发展情况，为中原城市群低碳经济转型献言献策，推动中原城市群经济增长和减污

降碳实现“双赢”。

## 2.2 理论基础

### 2.2.1 协同效应理论

协同效应最早产生于物理学领域,即两个或以上组分调配在一起产生的作用大于各自单独作用的总和(即 $1+1>2$ ) (Haken H, 1977)。生态环境领域中的协同效应是在联合国政府间气候专门委员会第三次评估报告中首次提出,指因不同原因而同时实施的多项政策措施所带来的效益。该观点认为大部分为减缓气候变化而制定的政策也会考虑其他目标,如在制定温室气体排放政策时会将经济可持续发展考虑在内。一项政策或措施的实施必定“事出有因”,而“因”是指该政策直接作用的方面,协同效应是相对于政策对直接作用对象产生的直接效益而言,指政策实施后产生的非意愿性的额外正向影响,是政策正外部性的体现。随着近年来气候变化与环境污染问题受到全世界的巨大关注,针对环境政策的协同效应研究与日俱增。由于引起气候变化的主要物质二氧化碳与大气污染物的产生具有同源性,以减少碳排放为目的的气候政策能够削减大气污染物。在应用于大气污染物与碳减排协同效应时,许多研究对其赋予了新的定义,归纳起来可表述为:在进行大气污染物减排的同时也对产生协同减排或者控制温室气体排放的同时协同减排大气污染物(周丽等, 2020; 郑佳佳等, 2015)。

协同效应的存在使得实施某项政策在达到主要目标的同时产生其他额外效果,这有利于提高政策的经济性。中国在应对气候变化和污染治理的双重挑战时,应基于协同效应视角统筹考虑,尽可能实现在有限的经济资源约束下最大程度的减缓气候变化和减少大气污染物排放,同步推进减污与降碳的双重任务。

### 2.2.2 能源-经济-环境(3E)理论

3E系统是能源、环境和经济子系统在相互作用、相互渗透、相互联系下形成的结构和功能相统一的动态复杂系统(兰天阳, 2016)。3E理论既可以用来对能源、经济和环境的整体发展的动态水平进行评价,也可以从经济学角度反映三者的耦合协调程度。现有研究中主要存在三种主流观点:第一种观点认为环境治

理不利于发展经济 (Watanabe 和 Tanaka, 2007; 陈诗一, 2010; Xia 和 Xu, 2020), 由于资源有限, 环境治理会挤占经济发展所需资源, 且经济生产过程的不环保可能会对污染排放造成严重的外部成本。第二种观点认为环境约束有利于发展经济 (王兵等, 2010; 黄清煌和高明, 2016; Meng 和 Qu, 2022), 并且运用“波特假说”来解释考虑环境约束后经济绩效的提升。第三种观点认为环境治理对经济发展的影响存在时效作用, 短期可以推动经济发展, 长期则起抑制作用 (黄庆华等, 2018; 金刚和沈坤荣, 2018)。

本文以中原城市群碳排放和大气污染物构建综合指标作为研究对象, 深入探索通过何种路径方式更好推进中原城市群减污降碳和经济增长协调发展, 有力阐释了减污降碳协同所体现的“绿水青山就是金山银山”理念, 符合 3E 理论内涵。在研究中根据减污降碳驱动因素 (主要分为能源和经济两方面) 对减污降碳与经济增长的脱钩弹性指数进一步分解, 更好厘清了能源、经济和环境系统三者的相互关系, 有效推动中原城市群减污降碳和经济发展实现“双赢”, 丰富了 3E 理论对减污降碳的实践指导。

### 2.2.3 脱钩理论

脱钩效应理论的基础是 1993 年经济合作与发展组织 (OECD) 提出的 DPSIR 框架—驱动力 (Driver)、压力 (Pressure)、状态 (State)、影响 (Influence) 和反应 (Response) (贺爱忠和刘盼, 2015)。其中, “驱动力”是指对环境造成破坏的根本动力和潜在原因, 是一种经济驱动因子; “压力”是指人类活动对环境造成的直接影响, 如文中的能源消耗; “状态”是指环境在压力因子作用下所处的状态; “影响”是指研究对象在所处状态下对人类及社会发展的影响; “反应”是指人类为限制环境恶化实现可持续发展所作出的努力或积极政策。以此为基础, 本文根据减污降碳驱动因素对中原城市群脱钩指数进一步分解, 将其细化为经济规模效应、技术效应、能源消耗强度和能源结构强度等方面, 在经济得以发展的基础上, 因地制宜地为中原城市群更好实现减污降碳协调治理献言献策。

脱钩理论常被用于衡量经济增长与物质消耗投入及生态环境保护不同步变化的关系, 这种不同步关系主要源自于经济增长驱动力作用下, 政府基于环境成本压力的反应。减污降碳脱钩是经济增长与减污降碳之间关系不断弱化乃至消失

的理想化过程，即实现经济增长基础上，逐渐加强减污降碳协同作用。脱钩指数模型是衡量经济发展和环境保护之间关系的指标，核心思想为经济发展不应该以牺牲环境为代价，而应该通过科技创新和政策调控等手段实现经济增长和环境保护协调发展。其模型主要分为两类：OECD 和 TAPIO，TAPIO 模型由于能够考虑到时间弹性，并且能够规避基期的选取，因此在相关研究中运用广泛。为定量研究减污降碳和经济增长的关系，可以用脱钩弹性指数表示，根据其系数将脱钩状态分为三类—负脱钩、脱钩和连接，以此分析中原城市群减污降碳和经济间的长期演变规律，为改善地区生态，实现地区高质量发展提供依据。

## 2.2.4 可持续发展理论

1980 年 3 月，由联合国环境规划署 (UNEP)，国际自然资源保护同盟 (IUCN) 和世界野生生物基金会 (WWF) 共同组织发起，多国政府官员和科学家参与制定《世界自然保护大纲》，初步提出可持续发展的思想，强调“人类利用对生物圈的管理，使得生物圈既能满足当代人的最大需求，又能保持其满足后代人的需求能力”。1987 年 2 月，联合国在日本东京召开大会，呼吁全球各国将可持续发展纳入其发展目标。1992 年 6 月联合国环境与发展大会在里约热内卢召开，大会通过“里约宣言”，102 个国家首脑共同签署《21 世纪议程》，普遍接受可持续发展理念 (牛文元，2012)。

已有文献研究发现，国内外学者主要从生态学、经济学、环境学、技术学等方面定义可持续发展，主要包括四类：①是从环境入手，认为可持续发展是寻求一种最佳的生态系统以支持生态的完整性和人类的愿望实现，使人类生存环境得以延续；②是从社会学角度出发，认为可持续发展就是要在不突破环境承载能力的情况下提高生活质量；③是从经济角度出发，认为可持续发展是不降低环境质量和不破坏自然资源基础上的经济发展；④是从科学技术角度出发，认为可持续发展是建立在少产生废物和污染物的工艺或技术系统 (于肖肖，2015)。可持续发展理论强调环境与经济的协调发展，追求人与自然的和谐，在人与自然之间寻求一种平衡关系，既要求经济社会和自然界两系统本身的发展，又要维持两系统间的协调发展将人的发展、社会的进步同资源环境的制约相联系。在追求经济高质量发展的同时，保持生态环境不被破坏，达到可持续发展的目标。这是我国

长期发展目标，也契合“双碳”发展的需要，对于更好实现中原城市群减污降碳和经济的协调发展提供指引。

## 3 中原城市群减污降碳时空演变研究

### 3.1 中原城市群发展现状分析

中原城市群位于我国沿海开放地区与西部地区的结合部，是促进中部崛起，带动西部地区高质量发展的国家级城市群，也是落实黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的关键区域之一。中原城市群总面积达 28.71 万 km<sup>2</sup>，占全国总面积的 2.98%，当下正处于新旧动能转换、快速崛起的重要时期。产业结构“二三一”发展特征明显，城市群内主导产业仍是以工业为主。根据 2016 年国家发展改革委员会印发的《中原城市群发展规划》，本研究选取中原城市群 29 个地级市（由于济源数据缺失严重，将其剔除）作为研究对象。

#### 3.1.1 经济现状分析

2022 年，中原城市群有 24 个城市地区生产总值超过 2000 亿元，12 个城市超过 3000 亿元，郑州超过 1.2 万亿元，但最低的济源仅为郑州的 6.2%；从人均 GDP 来看，中原城市群有 17 个城市超过 5000 元，有 7 个城市超过 8000 元，郑州、晋城、济源 3 个城市超过 1 万元，但最低的邢台人均 GDP 仅为济源的 32.7%，差距较为明显。同年，郑州市货物进出口总值为 6070 亿元，占中原城市群的比重超过一半，达到 54.6%，是货物进出口总值最低长治市的 406 倍，开放型经济体量差距悬殊，整体上制约了中原城市群的外贸发展。此外，2022 年中原城市群 30 个城市中，一般公共预算收入低于 100 亿元的有淮北、鹤壁、济源 3 个城市，100—200 亿元的城市有 12 个，200 亿元以上的城市有 15 个，但仅有郑州市超过 1000 亿元，是第二名洛阳的 2.8 倍，是末位济源的 16.9 倍。

区域发展不平衡是中原城市群经济社会发展的突出问题。主要包括三方面问题。一是地区经济发展水平差距大，发展不均衡。从地区生产总值方面来看，济源地区生产总值仅占首位郑州的 6.2%；从人均 GDP 来看，邢台收入水平较低，相较郑州差距明显。这是由于郑州属于中原城市群核心城市，独特的地理位置及政策资源的倾斜使其经济实力雄厚，处于城市群经济发展首位。二是外贸发展呈现郑州“一城独大”的格局。仅郑州一个城市就涵盖中原城市群一半以上进出口

贸易量，河南自贸区郑州片区自成立 2 年以来就吸引了超过 5.5 万多家企业，注册资本超过 6000 多亿，比郑州经济略弱的洛阳和开封城市相比郑州的注册企业相差太多，两者相加不足 1.5 万家，注册资本加起来也不到郑州的 1/3。郑州市外贸经济仍是河南省的外贸支柱。河南省地市中进出口总额超过 100 亿元的地市很少，其他地市外贸体量小，发展不平衡，一定程度上制约了整体外贸水平的提升。三是财政实力差距较大。郑州与其余各城市公共预算收入存在显著差距，应发挥郑州核心城市的辐射带动作用，缩小地区间差距，更好实现区域协调发展。

### 3.1.2 绿色发展现状分析

2022 年中原城市群 30 个城市中，有 10 个城市空气质量居全国城市空气质量排名后 20 名，环境治理压力较大，主要是由于：一是中原城市群产业和工业结构偏重。绿色生态是中原城市群的最大财富、最亮底色和最优品牌。尽管近年来中原城市群大力推动产业结构优化，战略性新兴产业、高技术产业发展较快，但与全国其他城市群相比，中原城市群的产业结构偏重的总体格局尚未改变。二是能源消费高碳高耗能特征明显。中原城市群作为全国重要的能源资源大省和能源消费大省，近年来虽然通过采取电代煤、气代煤、扩大清洁能源消费比例等措施，但以煤为主的能源消费结构短期内难以根本改变。三是绿色生活理念和环境治理能力脆弱。绿色发展理念尚未深入人心，绿色生产和绿色消费尚未形成自觉，环境治理能力还有待提升。

## 3.2 中原城市群减污降碳综合指标构建

### 3.2.1 碳排放测算方法

由于排放因子法更适用于宏观层面，能对区域内碳排放量进行整体把控，本文选用排放因子法对中原城市群碳排放量进行测算，结合中原城市群能源数据统计特点，采用以下公式计算：

$$A = \sum_{i=1}^8 B_i \times C_i \quad (3.1)$$

其中， $A$  是二氧化碳排放量； $B_i$  为能源  $i$  消费量，按标准煤计； $C_i$  为能源  $i$  的碳

排放系数； $i$  为能源种类，取 8 类。各类能源消费碳排放系数来源于 IPCC 既定系数（见表 3.1）。

表 3.1 燃料消耗碳排放系数

能源种类 Energy type	折标煤系数 Standard coal coefficient	碳排放系数 Carbon emission coefficient(t/tce)
煤炭	0.7143kgce/kg	0.7559
焦炭	0.9714kgce/kg	0.8550
原油	1.4286kgce/kg	0.5857
汽油	1.4714kgce/kg	0.5538
煤油	1.4714kgce/kg	0.5714
柴油	1.4571kgce/kg	0.5921
燃料油	1.4286kgce/kg	0.6185
天然气	1.3300kgce/m <sup>3</sup>	0.4483

以《中原城市群发展规划》为划分依据，结合地理位置和区域经济发展程度，将中原城市群划分为五大发展区域，即核心发展区、北部跨区域协同发展区、南部高效生态经济示范区、西部转型创新发展示范区和东部承接产业转移示范区<sup>①</sup>。按照碳排放量的计算公式，本文计算了中原城市群五大区域在 2006-2021 年的碳排放量，具体情况如图 3 所示。

由图 3 可知，五大发展区域从 2006-2021 年碳排放量整体呈现上升趋势，其中核心发展区和北部跨区域协同发展区碳排放水平较高，上升趋势较为明显，碳排放总量分别由 23726.56 万吨上升至 37392.82 万吨、17117.88 万吨上升至 25608.6 万吨。其余区域碳排放总量相对较低，总体呈现平稳上升趋势，年均碳排放量如下：东部为 9519.47 万吨、南部为 7099.99 万吨、西部为 4715.76 万吨。造成碳排放量差异明显的主要原因是由于核心及北部发展区所含城市较多，且其内城市生产能力优越。核心发展区包括亳州、郑州、开封、洛阳、平顶山、鹤壁、新乡、焦作、许昌、漯河、商丘、周口和晋城；北部发展区则包括邢台、邯郸、

<sup>①</sup> 根据 2016 年《中原城市群发展规划》的划分，核心发展区包括亳州、郑州、开封、洛阳、平顶山、鹤壁、新乡、焦作、许昌、漯河、商丘、周口和晋城；北部发展区则包括邢台、邯郸、聊城、菏泽、安阳、濮阳和长治；南部高效生态经济示范区包括南阳、信阳和驻马店；西部转型创新发展示范区包括三门峡和运城；东部承接产业转移示范区包括宿州、淮北、蚌埠和阜阳。

聊城、菏泽、安阳、濮阳和长治。此外，两大区域所含城市在 2015 年后生产能力和生态能力均在中高等水平（肖铁桥和赵子玉，2023），经济发展水平和工业化水平相对较高。

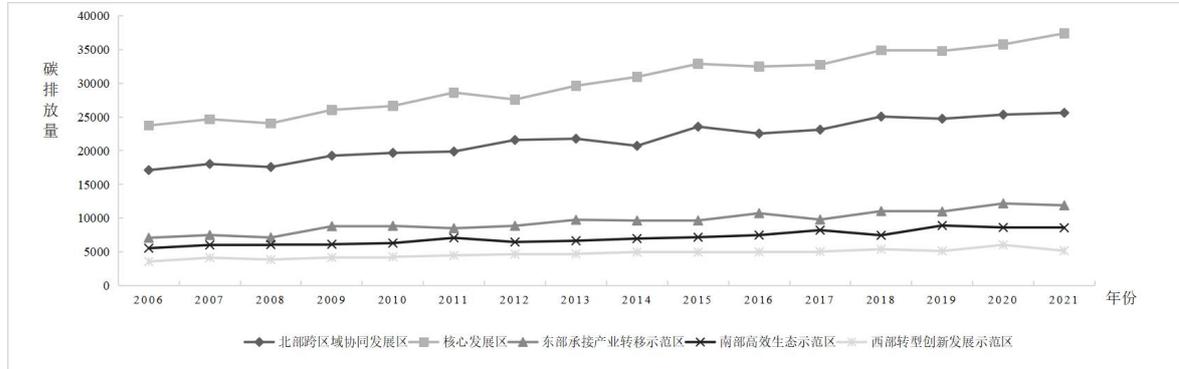


图 3.1 2006-2021 年中原城市群分区域碳排放量

### 3.2.2 减污降碳综合指标构建

为了更好地评价中原城市群减污降碳效果，研究构建减污降碳综合指标，将多种大气污染物和二氧化碳排放以单个综合指标的形式表示，计算公式为：

$$R_{IPC} = \sum_{i=1}^2 E_i \times q_i \tag{3.2}$$

$$x = \frac{(\max(x) - x_i)}{(\max(x) - \min(x))} \tag{3.3}$$

式（3.2）中， $E_i$ 为中原城市群减污降碳细分项指标，采用最大最小标准化方法消除极值的影响，同时细分项结合中原城市群大气污染物特征进行相应调整； $q_i$ 为细分项指标权重，权重指标和为 1，权重确定方法为平均赋权法（王涵等，2022）。 $R_{IPC}$ 为中原城市群减污降碳综合指标，选取二氧化碳排放量和中原城市群主要大气污染物排放量进行均值赋权，同时，考虑到当前减污和降碳工作重要性均非常突出，将二氧化碳和大气污染排放量看作同等重要，对两者权重均设为 0.5（马伟波等，2022）。

由于中原城市群 5 省 29 座地级市均为北方城市，以使用煤炭为主，所排放的大气污染物主要包括  $SO_2$  和烟粉尘。因此，在构建大气污染物综合指标时，其细分项采用  $SO_2$  和烟尘，并参考毛显强等（2021）的研究，利用《环境保护税法》中大气污染物当量系数对综合大气污染物排放当量进行测算，计算方法如下：

$$E_1 = \alpha D_{SO_2} + \beta D_{烟尘} \tag{3.4}$$

其中，SO<sub>2</sub> 的污染当量值为 0.93Kg，烟尘的污染当量值为 2.18Kg，E<sub>1</sub> 代表中原城市群大气污染物排放量，D<sub>SO<sub>2</sub></sub> 表示中原城市群 SO<sub>2</sub> 的排放量，D<sub>烟尘</sub> 表示中原城市群烟尘的排放量；最终所得 R<sub>IPC</sub> 取值范围在 0~1 之间，研究是对减污降碳相关指标的排放量进行加权，所以 R<sub>IPC</sub> 越靠近 1 表示相关污染物排放量越大，减污降碳效果越差；反之，越靠近 0 表示相关污染物排放量越少，减污降碳效果越好。

### 3.3 时间趋势分析

#### 3.3.1 城市群整体时间趋势分析

根据公式（2）对 2006-2021 年中原城市群 29 座地级市减污降碳综合指标计算，并按照区域进行整理，五大区域减污降碳结果如图 3 所示：

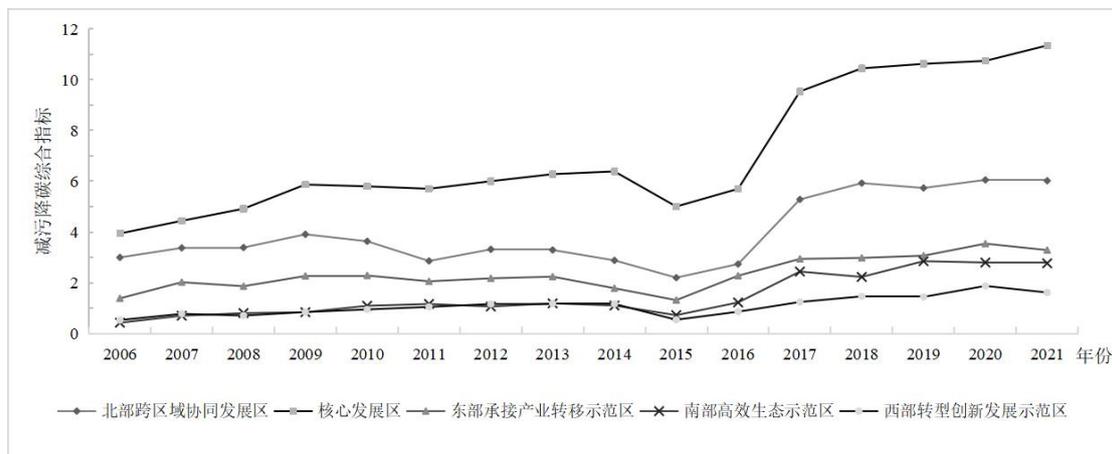


图 3.2 中原城市群 2006-2021 年五大区域减污降碳情况

整体来看，考察期内中原城市群五大区域减污降碳变化趋势较为一致。期末中原城市群减污降碳综合指标相较期初呈现一定上升趋势，这是由于中原城市群在发展经济过程中，不可避免地消耗高排放能源所造成的污染物排放量持续上升。根据其变动特点进行分段考察可发现，2006-2016 年五大区域减污降碳综合指标的变动较为平稳，2016 年之后波动较为剧烈，2016-2018 年减污降碳综合指标增长较为陡峭，随后再次趋于平缓。

### 3.3.2 五大区域时间趋势分析

从单个区域减污降碳综合指标的变动趋势来看,每个区域减污降碳综合指标的变动特点和整体趋于一致,具体表现为 2006-2015 年污染物排放水平核心区>北部跨区域协同发展区>东部承接产业转移示范区>西部转型创新发展示范区=南部高效生态示范区,2016-2021 年污染物排放水平核心区>北部跨区域协同发展区>东部承接产业转移示范区>南部高效生态示范区>西部转型创新发展示范区。2016-2018 年整体及各区域污染物排放水平出现大幅度增长主要原因是国家发展改革委员会于 2016 年颁布《中原城市群发展规划》,在中原城市群的发展中有两大目标—近期目标和远期目标。近期目标为到 2020 年,中原城市群整体经济实力明显增强,布局合理、功能完善、大中小城市和小城镇协调发展的现代化城镇体系基本形成,常住人口城镇化率超过 56%;远期目标为到 2025 年,现代基础设施网络全面形成城市群一体化发展全面实现,综合经济实力和在全国发展大局中的地位快速上升。虽然其中也提出要把中原城市群建成绿色生态发展示范区,把建设优良生态环境作为城市群发展的基本保障,扩大生态空间,减少环境污染,发展低碳经济。但是在《中原城市群发展规划》颁布前期即 2016-2018 年,中原城市群以发展经济为主,生态环境为辅,后期加大环境保护力度使得 2018 年后污染物排放以递减的速度缓慢增加,保持相对稳定。

细分到具体区域的差别,可以发现 2016 年后南部高效生态示范区和西部转型创新发展示范区减污降碳综合指标的变动由完全一致转为 2016 年后南部高效生态示范区减污降碳综合指标高于西部转型创新发展示范区。造成这一不同的原因在于南部生态高效示范区区域内各城市主要以建设高效经济示范区,持续探索以不牺牲农业和粮食、生态和环境为代价的“三化”协调发展之路;西部转型创新发展示范区则主要以创新为依托,构建创新协同的现代产业体系。随着经济技术水平进步,创新在生态保护中的作用日益凸显,对于环境治理的力度和强度相对于生态示范区温和式治理作用更为明显。因此,2016 年《中原城市群发展规划》颁布后,南部高效生态示范区污染物排放水平略高于西部转型创新发展示范区。

### 3.4 空间差异性分析

#### 3.4.1 基尼系数分解模型构建

Dagum 基尼系数作为传统基尼系数的升级，是研究经济变量区域差异的一种方法。本文将中原城市群划分为五大区域，并利用 Dagum 基尼系数分解法将减污降碳综合指标分解为区域内差异贡献、区域间净值差异贡献及超变密度贡献三部分 (Dagum C, 1997)。组内  $G_w$  反映各地区内部水平的差距、组间  $G_b$  反映各地区之间水平的差距，以及超变密度  $G_t$  反映各地区交叉重叠现象，体现相对差距情况。Dagum 基尼系数弥补了其他用于测度地区差距方法因无法解决考察数据存在交重叠现象的不足，能够更好地识别地区差距来源问题，从而实现对总体地区差距贡献的完整识别。

第一步，计算中原城市群减污降碳综合指标的基尼系数：

$$G = \frac{\sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^5 \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n^2 \bar{y}} \quad (3.5)$$

其中， $j$ 、 $h$  代表中原城市群具体的某个区域， $n_j$ 、 $n_h$  分别代表区域  $j$ 、 $h$  所包括的城市个数， $n$  为五大区域所包括的城市总个数， $y_{ji}$  ( $y_{hr}$ ) 代表区域  $j$  ( $h$ ) 第  $i$  ( $r$ ) 个城市的减污降碳综合指标， $\bar{y}$  为中原城市群各地级市减污降碳综合指标的均值。

第二步，计算区域内和区域间基尼系数

$$G_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{m=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jm}|}{2n^2 \bar{y}_j} \quad (3.6)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h \left( \frac{\bar{y}_j + \bar{y}_h}{2} \right)} \quad (3.7)$$

其中， $y_{jm}$  代表区域  $j$  第  $m$  个城市的减污降碳综合指标， $\bar{y}_j$ 、 $\bar{y}_h$  分别代表区域  $j$ 、 $h$  所包含城市减污降碳综合指标的均值。

第三步，结合公式 (3) 至公式 (5)，将中原城市群减污降碳综合指标的基尼系数  $G$  分解为区域内差异贡献  $G_w$ 、区域间净值差异贡献  $G_b$  及超变密度贡献

$G_t$ 三部分:

$$G = G_w + G_b + G_t \tag{3.8}$$

$$G_w = \sum_{j=1}^5 G_{jj} P_j S_j \tag{3.9}$$

$$G_b = \sum_{j=2}^3 \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) D_{jh} \tag{3.10}$$

$$G_t = \sum_{j=2}^3 \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) (1 - D_{jh}) \tag{3.11}$$

其中,  $P_j = \frac{n_j}{n}, S_j = \frac{n_j \bar{y}_j}{n \bar{y}}, D_{jh} = \frac{d_{jh} - P_{jh}}{d_{jh} + P_{jh}}$ ,  $d_{jh}$  和  $P_{jh}$  分别为地区  $j$  和  $h$  间满足

$y_{ji} - y_{hr} > 0$  和  $y_{hr} - y_{ji} > 0$  的所有样本之和的数学期望。

$$d_{jh} = \int_0^{\infty} dF_j(y) \int_0^y (y-x) dF_h(x) \tag{3.12}$$

$$P_{jh} = \int_0^{\infty} dF_h(y) \int_0^y (y-x) dF_j(x)$$

### 3.4.2 整体基尼系数结果分析

图 3.2 虽然描述了中原城市群减污降碳的时序变化,但是未对造成此变化的差异来源进行分解,本文运用 Dagum 基尼系数衡量中原城市群五大区域减污降碳综合指标的差异,并将差异来源分解为区域内差异、区域间净值差异及超变密度贡献三部分,所得结果如表 3.2 所示:

表 3.2 中原城市群减污降碳综合指标基尼系数及其贡献率结果

年份	总体基尼系数	组内基尼系数 $G_w$	组间基尼系数 $G_b$	超变密度基尼系数 $G_t$	组内贡献率%	组间贡献率%	超变密度贡献率%
2006	0.348	0.096	0.131	0.120	27.592	37.823	34.585
2007	0.288	0.074	0.119	0.095	25.795	41.275	32.930
2008	0.285	0.078	0.088	0.119	24.409	30.784	41.807
2009	0.205	0.049	0.092	0.064	24.062	44.889	31.050

续表 3.2 中原城市群减污降碳综合指标基尼系数及其贡献率结果

年份	总体基尼 系数	组内基尼 系数 $G_w$	组间基尼 系数 $G_b$	超变密度 基尼系数 $G_t$	组内贡献 率%	组间贡献 率%	超变密度 贡献率%
2010	0.162	0.044	0.066	0.052	26.963	40.825	32.213
2011	0.164	0.041	0.049	0.074	24.931	29.973	45.096
2012	0.160	0.040	0.057	0.063	25.068	35.409	39.523
2013	0.126	0.028	0.050	0.048	22.411	39.502	38.087
2014	0.169	0.042	0.063	0.064	24.779	37.464	37.758
2015	0.208	0.050	0.078	0.080	24.006	37.383	38.611
2016	0.166	0.047	0.058	0.060	28.350	35.132	36.518
2017	0.081	0.020	0.024	0.037	24.800	29.117	46.083
2018	0.100	0.025	0.027	0.048	25.166	26.946	47.887
2019	0.089	0.024	0.029	0.037	26.390	32.613	40.997
2020	0.084	0.024	0.017	0.035	28.850	29.049	42.102
2021	0.091	0.026	0.041	0.047	28.945	19.127	51.928

通过表 3.2 可以发现，在忽略四舍五入误差的情况下，各年份总体基尼系数等于区域内差异贡献、区域间净值差异贡献和超变密度贡献三者之和。且区域内差异贡献率、区域间净值差异贡献率和超变密度贡献率三者之和等于 100%，这说明此结果是正确的（邓光耀，2023）。

2006-2021 年总体基尼系数介于 0.081-0.348，最小值在 2017 年取得，最大值在 2006 年取得，且考察期后期总体基尼系数相较于前期明显降低，表明中原城市群减污降碳总体差异在缩小。总体基尼系数 2006-2013 年呈下降趋势，随后两年总体基尼系数出现短暂上升后，后续年份在 0.090 的水平趋于稳定。组内基尼系数考察期变动趋势和总体基尼系数较为一致，而组间基尼系数在 2015 年前的变动特点和总体基尼系数趋于一致，即 2006-2013 年波动式下降，2014-2015 年组间基尼系数略微上升，但在 2015 年后总体基尼系数和区域间基尼系数变动趋势不同，造成不同的原因主要是受超变密度影响。综上，通过基尼系数的变动规律可以得到，考察期总体、组内、组间和超变密度基尼系数在 2015 年前基本

一致，2015年后存在差异，组内和超变密度基尼系数较为稳定，组间基尼系数出现下降。

从区域内差异、区域间净值差异和超变密度的贡献值和贡献率来看，三者中组间和超变密度贡献率较大。具体来看，2015年前组间贡献率最大，2015年后超变密度贡献率最大，符合考察期基尼系数的变动趋势。此外，组内贡献率在考察期贡献率最小，变动趋势基本呈现水平态势，稳定在25%左右的水平。造成此结果的主要原因在于郑州作为中原城市群的中心城市，对周围城市的辐射力度还不够强，没有充分带动周围城市的发展。且中原城市群内部除郑州、洛阳和开封等少数城市外，大多城市存在产业层次低，结构不合理的现象。同时，各城市特色产业不尽相同，漯河、济源等城市支持工业基础较好，周口、信阳、驻马店、菏泽、运城等属于传统农区城市，平顶山、鹤壁、濮阳、三门峡、宿州、淮北、亳州、邢台、晋城等属于资源型城市。因此，中原城市群区域间和超变密度贡献率相对较高。

### 3.4.3 区域内基尼系数结果分析

进一步分析核心发展区、北部跨区域协同发展区、南部高效生态经济示范区、西部转型创新发展示范区和东部承接产业转移示范区基尼系数以及各区域间基尼系数，所得计算结果如表3.3、表3.4所示：

表 3.3 中原城市群各区域基尼系数

年份	东部承接产业 转移示范区	北部跨区域 协同发展区	南部高效生 态示范区	核心发展区	西部转型创新 发展示范区
2006	0.247	0.187	0.169	0.389	0.352
2007	0.288	0.139	0.131	0.315	0.221
2008	0.356	0.152	0.045	0.310	0.201
2009	0.198	0.100	0.128	0.194	0.225
2010	0.150	0.085	0.076	0.174	0.128
2011	0.143	0.225	0.037	0.130	0.160
2012	0.138	0.164	0.176	0.122	0.092
2013	0.085	0.154	0.168	0.126	0.044
2014	0.192	0.190	0.064	0.081	0.061
2015	0.207	0.276	0.233	0.128	0.107
2016	0.116	0.114	0.089	0.185	0.060

续表 3.3 中原城市群各区域基尼系数

年份	东部承接产业 转移示范区	北部跨区域 协同发展区	南部高效生 态示范区	核心发展区	西部转型创新 发展示范区
2017	0.092	0.036	0.081	0.074	0.117
2018	0.071	0.097	0.042	0.082	0.173
2019	0.074	0.105	0.007	0.078	0.060
2020	0.085	0.088	0.041	0.092	0.023
2021	0.122	0.073	0.043	0.090	0.010

通过表 3.3 的区域内基尼系数可知, 首先, 从中原城市群五大区域减污降碳综合指标来看, 考察期内核心发展区、北部跨区域协同发展区、南部高效生态经济示范区、西部转型创新发展示范区和东部承接产业转移示范区 Dagum 基尼系数的均值分别为 0.1606、0.1366、0.096、0.1271 和 0.1603。由此可见核心发展区减污降碳发展差异最大, 南部高效生态经济示范区减污降碳发展差异最小。其次, 从各区域减污降碳发展差异的变化趋势来看, 五大区域基尼系数均在 2006-2013 年呈现出一定下降趋势, 之后在 2014-2015 年出现增长。但不同时期的变化趋势呈现出不同特征, 东部承接产业转移示范区在 2006-2008 年组内基尼系数出现暂时性增长; 北部跨区域协同发展区、西部转型创新发展示范区和南部高效生态示范区均在 2008-2009、2011-2012 年出现拐点, 减污降碳发展的不平衡扩大。此后, 在 2016-2021 年间, 东部承接产业转移示范区基尼系数先下降后上升; 北部跨区域协同发展区和西部转型创新发展示范区与之相反, 基尼系数呈先上升后下降的趋势; 南部高效生态示范区组内基尼系数急剧下降后趋于稳定, 整体基尼系数较小; 核心发展区组内基尼系数稳定在 0.85 左右的水平, 相较考察前期, 整体下降水平最为剧烈。

综上, 无论从 Dagum 基尼系数大小还是从其变化趋势来看, 五大区域减污降碳发展的地区内差异表现出明显不同。其中, 地区内减污降碳发展水平较为平衡的是南部高效生态经济示范区, 核心发展区减污降碳发展水平存在显著不平衡, 但在考察期内下降最为剧烈, 即减污降碳区域内不平衡显著降低。且虽然东部承接产业转移示范区减污降碳发展在近年来差异呈现一定扩大趋势, 但观察其整体变动, 其考察期内减污降碳地区不平衡性明显下降。

#### 3.4.4 区域间基尼系数结果分析

通过表 3.4 中原城市群不同区域间基尼系数的测算结果可以发现，东部承接产业转移示范区和其他区域组间基尼差距较大，南部高效生态经济示范区和其余区域间基尼系数差异较小，核心发展区、北部跨区域协同发展区和西部转型创新发展示范区与其他区域的组间基尼系数差别并不明显。此外，除了南部高效生态经济示范区和核心发展区两区域的组间基尼系数虽有波动但未呈现下降趋势，其余不同区域间基尼系数在考察期的变动趋势整体呈现下降态势，虽然在近几年略有反弹，但整体均由考察前期基尼系数 0.3 左右的水平降低到考察后期 0.1 左右的水平。

综上可知，中原城市群五大区域中，东部承接产业转移示范区减污降碳发展水平存在显著不平衡，而南部高效生态经济示范区和其它区域相比较减污降碳发展水平则较为均衡，区域差异较小。从中原城市群不同区域间差异数据变化对比来看，尽管不同年份区域间减污降碳发展水平的差距次序出现交替变化，但各区域间减污降碳发展水平的不平衡性均得到了不同程度的改善。由此可见，随着时间的推移，中原城市群五大区域间减污降碳发展水平的差距在不断缩小。

表 3.4 中原城市群各区域间基尼系数

年份	东部承接产业转移示范区&北部跨区域协同发展区	东部承接产业转移示范区&南部高效生态示范区	东部承接产业转移示范区&核心发展区	东部承接产业转移示范区&西部转型发展示范区	北部跨区域协同发展区&南部高效生态示范区	北部跨区域协同发展区&核心发展区	北部跨区域协同发展区&西部转型发展示范区	南部高效生态示范区&西部转型发展示范区	核心发展区&南部高效生态示范区	核心发展区&西部转型发展示范区
2006	0.379	0.293	0.319	0.392	0.239	0.313	0.336	0.237	0.176	0.319
2007	0.364	0.268	0.312	0.337	0.237	0.291	0.292	0.196	0.155	0.254
2008	0.360	0.340	0.342	0.445	0.265	0.303	0.42	0.35	0.253	0.377
2009	0.278	0.218	0.233	0.266	0.216	0.262	0.281	0.208	0.187	0.249
2010	0.266	0.179	0.233	0.223	0.211	0.294	0.206	0.188	0.203	0.257
2011	0.194	0.15	0.167	0.223	0.113	0.142	0.145	0.206	0.093	0.188
2012	0.158	0.258	0.182	0.194	0.218	0.151	0.145	0.194	0.241	0.165
2013	0.085	0.123	0.117	0.196	0.106	0.126	0.158	0.102	0.125	0.170
2014	0.073	0.052	0.083	0.078	0.061	0.087	0.078	0.07	0.073	0.089
2015	0.133	0.164	0.114	0.07	0.182	0.139	0.112	0.153	0.169	0.088
2016	0.122	0.127	0.124	0.164	0.160	0.161	0.181	0.144	0.133	0.146

续表 3.4 中原城市群各区域间基尼系数

年份	东部承接产业转移示范区&北部跨区域协同发展区	东部承接产业转移示范区&南部高效生态示范区	东部承接产业转移示范区&核心发展区	东部承接产业转移示范区&西部转型发展示范区	北部跨区域协同发展区&南部高效生态示范区	北部跨区域协同发展区&核心发展区	北部跨区域协同发展区&西部转型发展示范区	南部高效生态示范区&西部转型发展示范区	核心发展区&南部高效生态示范区	核心发展区&西部转型发展示范区
2017	0.175	0.189	0.203	0.172	0.182	0.177	0.151	0.182	0.211	0.173
2018	0.092	0.130	0.145	0.082	0.126	0.151	0.077	0.119	0.171	0.147
2019	0.114	0.226	0.113	0.103	0.194	0.135	0.13	0.209	0.203	0.133
2020	0.114	0.08	0.139	0.115	0.127	0.138	0.139	0.081	0.164	0.176
2021	0.164	0.196	0.143	0.116	0.187	0.158	0.154	0.188	0.178	0.132

### 3.5 空间可视化分析

由于自然资源禀赋、社会经济发展水平以及政策支持的不同，使得中原城市群减污降碳发展水平在不同城市间存在差异，这种差异伴随着各城市在不同时间节点因地制宜的发展会发生相应的空间偏移。为了更加直观准确地分析中原城市群减污降碳发展水平的时空格局变化，本文使用 ArcGIS 软件分别绘制了 2006、2009、2012、2015、2018 和 2021 年中原城市群减污降碳综合指标的空间分布图。其中污染水平的划分采用自然断点法，自然断点法本身就是分级的良好界限，用这些断点可以把研究对象分成性质相似的群组。

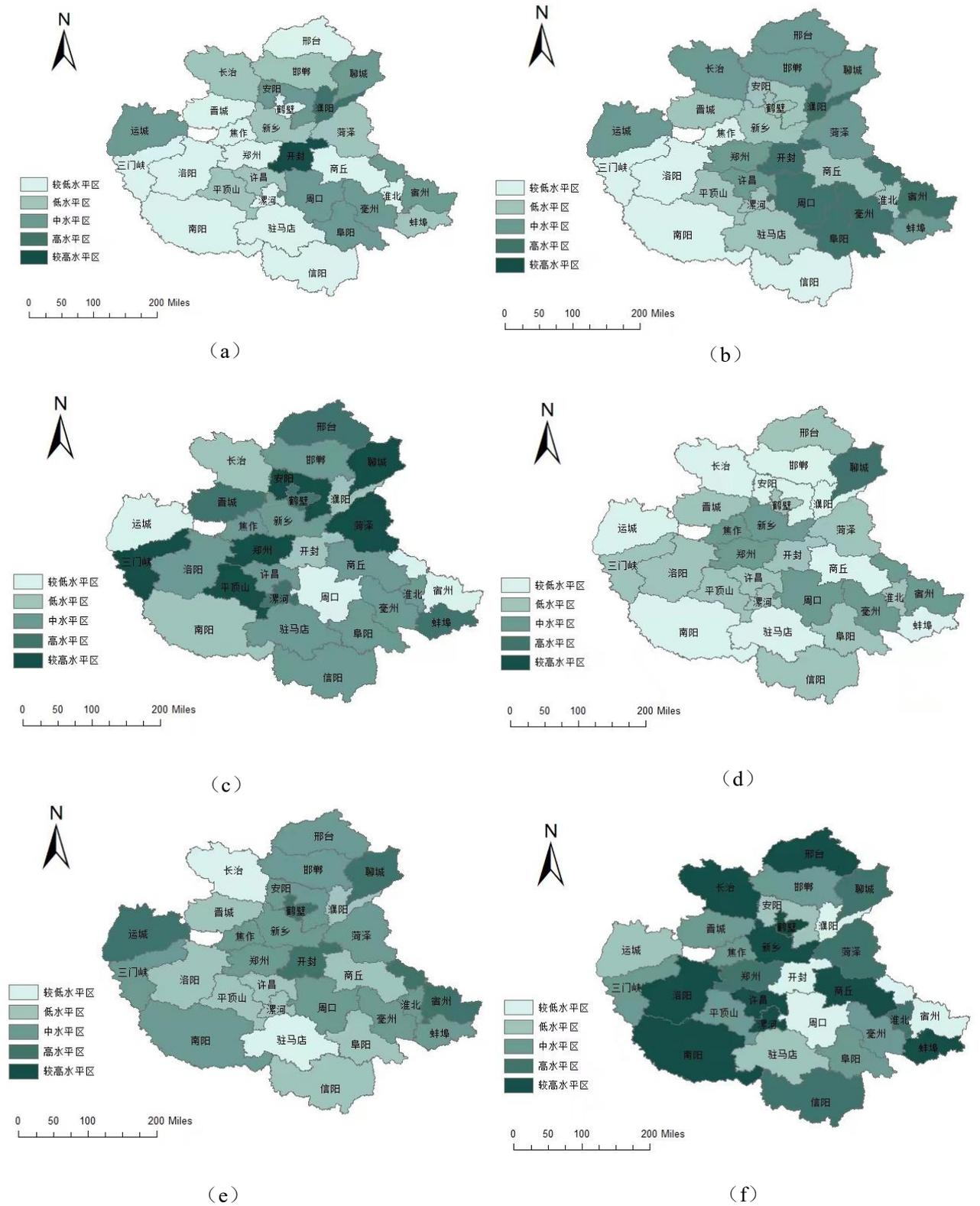


图 3.3 中原城市群减污降碳空间趋势图

从中原城市群减污降碳综合指标的空间演变规律 ((a) - (f)) 可以看出, 除 (d) 图代表的 2015 年污染排放程度, 中原城市群污染排放程度随时间推移不断

加剧。具体体现在，代表浅色的污染低排放地级市数量逐渐消失，代表深色的污染高排放地级市数量则不断增多，中等及以上污染水平所覆盖的面积越来越多。此外，通过不同年份中原城市群减污降碳空间演变可发现，污染较严重的地区分布从 2006 年核心发展区以开封为主的中原城市群中东部地区向西北部地区转移，污染中心同时向郑州、平顶山、安阳、聊城等重工业基地过渡。2015 中原城市群整体污染程度减轻，随后污染扩展到城市群范围且污染程度加剧。2021 年除了南部高效生态示范区，多数经济发展优势地区均处于污染较高水平区域。2015 年中原城市群环境状况得到明显改善的原因在于 2015 年 1 月 1 日新环境保护法的施行。这部中国环境领域的“基本法”，完成了 25 年来的首次修订，开始服务于公众对依法建设“美丽中国”的期待。改变了以往环保部门执法手段相当有限的局面，加大了对污染违法者的处罚力度。同时，将民间力量有序地纳入环境治理的机制中，设立了环保公益诉讼制度，环境诉讼主体进一步扩大。新环保法的出台落实到中原城市群环境保护的具体实施过程中，使得这一年污染得到有效治理。但通过后续年份减污降碳的空间演变图可知，该实施过程并未很好维持下去。

通过表 3.5 可具体得知，从污染水平加深的视角出发，郑州、洛阳、信阳、漯河和新乡整个考察期污染水平自 2006 年污染水平开始由中低程度不断加深，污染程度变动剧烈；三门峡、聊城、平顶山考察前期稳定在中低等污染区，随后污染程度向中高污染区域转移，焦作 2006 和 2009 年处于污染较低水平区域，在后续年份污染稳定在中等水平。此外，邢台、南阳、鹤壁、长治、邯郸、许昌、蚌埠邯郸、聊城、蚌埠和许昌污染水平演变规律在相应年份则呈现为“倒 N”型，污染水平由中低档波动式转向中高档；从污染水平不变的视角出发，亳州一直处于中等污染水平；从污染水平减轻的角度出发，运城、周口、阜阳、宿州、濮阳污染水平逐渐降低，由前期中高污染降低至低污染水平，污染水平逐渐降低。此外，菏泽、淮北和商丘污染程度除在 2015 年存在暂时性好转，考察期整体污染水平由低转高，安阳与之相反，其污染水平除 2018 年出现陡峭下降，其余年份污染程度均稳定在中低水平。晋城考察期前期处于污染低水平区，2016-2018 年污染情况加重，后又得以改善。驻马店考察期污染程度较轻，在低水平区域呈现“W”型变动。开封污染治理成效较好，从 2006 年的污染较高水平持续降低到污染较低水平。表明此类地区当地重视污染治理，并采取相应措施使得污染状况

有效改善。

其中，邢台、长治、鹤壁、新乡、洛阳、许昌、漯河、南阳、商丘和蚌埠在考察期污染水平变动较大，中间虽偶有波动，但整体由低水平向高水平加剧。究其原因：大多城市重化工业集中，周边布局了大量重污染产业，如板材产业、焦化产业、钢铁企业、电厂、水泥厂和玻璃产业等，且能源结构单一，依赖煤炭等高污染能源，导致大气污染物排放量增加。其次，城市扩张导致生态空间减少，污染物扩散条件变差，同时，城市快速发展带来的建设活动，增加了扬尘等污染源。还有一些旅游城市如洛阳、开封等，地区旅游业的发展也会带来交通和生活污染。此外，许昌、漯河、南阳和商丘等地区具备农业发展优势，会产生农业面源污染进而造成污染加剧的状况。因此，这些城市在考察期出现污染水平严重下降现象。

宿州、濮阳、开封和周口在考察期污染变动水平较大，整体由高水平向低水平转移。其主要原因是当地政府的精准治污政策，宿州市公布的《宿州市 2021 年应对气候变化和大气污染防治重点工作任务》压实责任，分解任务，确保环境空气质量持续改善；开封市执行《开封市重污染天气应急减排清单》，落实挥发性有机物、二氧化硫、颗粒物、氮氧化物的减排；濮阳市实行大气污染防治攻坚，形成污染防治攻坚“2+7”格局；周口市则是由于产业结构调整，加强环境基础设施等措施。综上可知，各地区污染防治措施的正确制定、落地实施及全体人民的共同监管极大地促进地区污染防治工作的有效贯彻进行。

表 3.5 中原城市群各地级市污染水平时序演变情况

	2006	2009	2012	2015	2018	2021
污染 较低 水平	邢台、晋城、焦作、郑州、洛阳、三门峡、南阳、驻马店、信阳、漯河、商丘、淮北、鹤壁	焦作、洛阳、三门峡、南阳、信阳	长治、驻马店	长治、邯郸、安阳、濮阳、商丘、驻马店、南阳、蚌埠、运城	周口、宿州、运城	宿州、濮阳、开封、周口
污染 低水 平	长治、邯郸、新乡、菏泽、许昌、平顶山、蚌埠	安阳、鹤壁、新乡、晋城、平顶山、漯河、驻马店、商丘、淮北	晋城、濮阳、洛阳、平顶山、许昌、漯河、商丘、阜阳、信阳	邢台、晋城、菏泽、鹤壁、开封、许昌、漯河、平顶山、洛阳、三门峡、阜阳、淮北、信阳	长治、濮阳、开封、南阳	安阳、运城、驻马店
污染 中等 水平	安阳、聊城、运城、周口、亳州、阜阳、宿州	邢台、邯郸、长治、聊城、菏泽、郑州、许昌、蚌埠、运城	邢台、邯郸、安阳、新乡、焦作、菏泽、郑州、周口、亳州、淮北、蚌埠、三门峡、南阳	新乡、焦作、郑州、周口、亳州、宿州	邯郸、新乡、焦作、洛阳、许昌、驻马店、信阳、阜阳、亳州、淮北、商丘	邯郸、晋城、焦作、三门峡、平顶山、阜阳、亳州
污染 高水 平	濮阳	阜阳、亳州、周口、开封、宿州、濮阳	聊城、鹤壁、运城、开封、宿州		邢台、晋城、鹤壁、蚌埠、漯河	聊城、菏泽、淮北、郑州、信阳
污染 较高 水平	开封			聊城	聊城、安阳、菏泽、郑州、平顶山、三门峡	邢台、长治、鹤壁、新乡、洛阳、许昌、漯河、南阳、商丘、蚌埠

## 4 中原城市群减污降碳驱动因素研究

为进一步实现中原城市群减污降碳与经济的协调发展，必须对中原城市群减污降碳的驱动因素深入分析。本章以 Kaya-LMDI 模型为基础对中原城市群减污降碳的驱动因素进行分解，探究各因素对减污降碳的贡献程度，为下文研究中原城市群减污降碳的脱钩效应进行铺垫。

### 4.1 变量选择和数据来源

#### 4.1.1 变量选择的理论依据

为揭示中原城市群减污降碳强度的时空驱动特征，本文参照马伟波等(2022)和原伟鹏等(2022)对减污降碳驱动因素相关变量的选择，主要考虑经济和能源两大领域。并结合中原城市群地区特色进行变量确定，即中原城市群产业体系完备，装备制造、智能终端、有色金属、食品等产业集群优势明显，物流、旅游等产业具有一定国际影响力；科技创新能力持续增强，国家和省级创新平台数量众多；人力资源丰富，劳动人口素质持续提升。

人口规模主要是指中原城市群的总人口数量，对减污降碳具有间接影响，人口规模越大，中原城市群污染物排放量越大。而中原城市群又因地处南北气候过渡地带和第二阶梯向第三阶梯的过渡地带，自然景观荟萃，动植物资源丰富，气候兼有南北之长，人居环境优良。平原丘陵山地兼具、以平原为主，产业发展、城镇建设受自然条件限制较小。因此，由于中原城市群独特的地形优势，该地区相较其他城市群人口较多，消耗的资源，产生的污染就越多，选取该指标具有研究必要性。

城镇化水平表明了中原城市群人口向城市演变的趋势，城镇相对于乡村在基础设施、生产规模和消费水平方面水平较高，人口向城镇化转移的过程，污染物排放量会随之增加。《中原城市群发展规划》中明确提出其主要目标包括建立协调发展的现代化城镇体系，进一步提高人口城镇化水平和人口集聚度。因此，该指标的选取与中原城市群的发展要求相契合，具有典型代表性。

经济发展水平反映一个国家或地区经济发展的速度和规模，对中原城市群减

污降碳水平有直接影响。我国经济由东向西梯度推进,东中西格局总体没有改变,但地区经济走势分化、南北差异加大现象比较突出,中原城市群所处的中部地区比较典型。此外,中原城市群各城市经济发展水平的高低可以充分体现中原城市群中心城市对于其余城市的辐射和引领效果。且该地区经济发展和减污降碳之间的发展需要加以权衡,达到两者间协调发展,这也和本研究的目的直接相关。

产业结构主要是指各产业所占有的比重,在污染物排放领域,工业作为污染排放的主要产业源,因此主要考察第二产业占比情况,其结构调整会直接造成中原城市群减污降碳发生相应变化。且中原城市群内部除郑州、洛阳和开封等少数城市外,大多城市存在产业层次低,结构不合理的现象,产业结构不合理使得污染加剧,应将其作为研究的主要对象考察。

实体经济人口承载强度是总人口与第二产业增加值的比值(林寿富等,2018),实体经济是我国经济发展的着力点,在此基础上考察其人口承载强度体现了人口高质量发展在实体经济领域的贡献强度,即单位产值所需人口数,单位产值所需人口数越多表明产业性质越偏向劳动密集型,不利于产业结构升级,间接造成污染排放严重的现象,不利于中原城市群更好实现减污降碳治理。

能源强度和单位能源减污降碳强度是隶属能源领域两个不同的评价指标,对中原城市群减污降碳具有直接效应,前者体现单位 GDP 所消费的能源量,后者表明单位能源所排放的污染物,与该区域减污降碳综合指标成正比。中原城市群雾霾现象频发,造成严重的空气污染,其中最主要的污染物为烟尘。中原地区能源消费方式以煤炭为主,发电,供暖都以燃煤为主,且燃煤用量逐年增长,煤烟污染不断增加,日积月累造成了难以控制的雾霾天气。且中原地区气候干燥,雨雪较少,风力小且多沙尘,造成了在空气中悬浮微小的颗粒,并不断聚集,同时空气流动速度慢,不利于污染物的分解消散,使得雾霾问题越发严重。因此,考察中原城市群能源强度和单位能源减污降碳强度对于研究该地区生态经济发展意义重大。

#### 4.1.2 变量选择

基于上述分析,本研究选择人均国内生产总值作为衡量中原城市群经济发展水平的指标;选择总人口作为衡量人口规模的指标;选择第二产业增加值占国内

生产总值的比重作为衡量产业结构的指标；选择城镇人口占总人口的比重作为衡量城镇化水平的指标；选择总人口与第二产业增加值的比值作为实体经济人口承载强度；选择 GDP 与城镇人口的比值作为技术水平能源消费结构（林寿富等，2018）。能源消费主要以煤炭等化石能源为主（煤炭消费量/能源消费总量），主要选择能源消费强度和单位能耗减污降碳强度两个指标作为研究中原城市群减污降碳驱动因素的能源类指标，前者体现单位 GDP 所消费的能源量，后者表明单位能源所排放的污染物。综上，选用以上指标作为研究该区域驱动因素的指标，表 4.1 则是对减污降碳驱动因素涉及的变量进行描述性统计。

表 4.1 样本描述性统计

Variable	变量	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
ind	产业结构	464	0.511	0.121	0.266	0.816
city	城镇化率	464	45.453	10.078	18.67	79.1
pgdp	人均国内生产总值	464	33172.82	17498.225	4483	100092
stre	能源消费强度	464	0.918	0.997	0.03	6.91
pop	总人口	464	550.789	242.843	141.9	1274
lab	技术水平	464	0.096	0.025	0.02	0.15
pci	实体经济人口承载强度	464	0.909	0.85	0.19	7.03

### 4.1.3 数据来源

文章选取 2006-2021 年中原城市群减污降碳综合指标作为研究对象，对中原城市群减污降碳的时空演变、驱动因素和脱钩效应进行分析。在研究过程中主要涉及到的数据包括：CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和烟尘的排放量、能源消费总量、能源消耗强度、第二产业增加值、城镇化率、总人口和 GDP 等。其中，2006-2021 年二氧化碳排放量数据通过《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》采用排放因子法将各地区所消耗的不同能源按照规定的折标煤系数转化为标准煤后乘以对应的排放系数进行加总得到。其余数据均通过各省市统计年鉴、生态环境公报和国家统计局得到。考察期相关指标缺失值则通过线性插值法和移动平均法计算得出。

## 4.2 减污降碳驱动因素分析

### 4.2.1 Kaya-LMDI 分解模型构建

算术平均迪氏指数分解法 (Logarithmic Mean Divisia Index) 是一种常见的指数分解方法, 主要思想就是将被解释变量分解为不同因素的组合进行研究。指数分解方法有 2 种数据分解方式: 时间序列分解和区间分解。目前很多的能源消费研究都是应用区间分解方式, 这种方式是基于 2 个基准年之间进行分解的, 忽略了中间年份的变化。时间序列分解是对每年的能源变化和各因素对能源消耗的影响进行分解, 相对于区间分解方式能够更好地研究变化的机理 (张玲琳和雷黎, 2013)。因此, 本研究采用时间序列分解方式对中原城市群减污降碳各驱动因素进行分解。而 Kaya 恒等式是日本学者 Yoichi Kaya 在上世纪 90 年代首次提出的, 主要是用来研究人口、经济和能源等因素对碳排放的影响。本文以 Kaya 恒等式为基础, 结合中原城市群减污降碳较为显著的驱动因素, 对中原城市群减污降碳综合指标进行分解, 主要分解为八个部分: 人口规模、城镇化水平、经济规模、产业结构、实体经济人口承载强度、技术进步、能耗强度和单位能源减污降碳强度效应, 得到以下公式:

$$Z = \sum_{i=1}^5 P \times \frac{P_u}{P} \times \frac{GDP}{P} \times \frac{ind}{GDP} \times \frac{P}{ind} \times \frac{GDP}{P_u} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{Z_i}{E} \quad (4.1)$$

其中  $Z$  代表中原城市群减污降碳综合指标;  $P$  代表总人口数量, 即人口规模效应; 令  $U=P_u/P$  代表城镇化水平, 用城镇人口比总人口, 即人口结构效应; 令  $A=GDP/P$  为人均 GDP, 用来表示经济规模效应; 令  $S=ind/GDP$  为第二产业增加值和 GDP 比值, 代表产业结构效应; 以下两项参考林寿富等 (2018) 令  $Pci=P/ind$  为总人口与第二产业增加值的比值, 代表实体经济人口承载强度; 令  $Lab=GDP/P_u$  为 GDP 与城镇人口的比值, 定义为技术水平; 令  $T=E/GDP$  为单位生产总值能耗, 即能源强度效应; 令  $D=Z_i/E$  为中原城市群各区域减污降碳综合指标与能源消费总量的比值, 代表单位能源减污降碳强度效应。根据公式 (4.1) 计算 Kaya-LMDI 模型在不同时间段减污降碳综合指标的变化量, 令  $t$  期减污降碳综合指标为  $Z_t$ , 基期的减污降碳综合指标为  $Z_0$ , 基期和  $t$  期的减污降碳综合指标变化量  $\Delta Z$  为:

$$\begin{aligned}
\Delta Z &= Z_t - Z_0 = \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{Z_t}{Z_0} \\
&= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{P_t \times U_t \times A_t \times S_t \times Pci_t \times Lab_t \times T_t \times D_t}{P_0 \times U_0 \times A_0 \times S_0 \times Pci_0 \times Lab_0 \times T_0 \times D_0} \\
&= \Delta Z_P + \Delta Z_U + \Delta Z_A + \Delta Z_S + \Delta Z_{Pci} + \Delta Z_{Lab} + \Delta Z_T + \Delta Z_D
\end{aligned} \tag{4.2}$$

其中：

$$\begin{aligned}
\Delta Z_P &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{P_t}{P_0} \\
\Delta Z_U &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{U_t}{U_0} \\
\Delta Z_A &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{A_t}{A_0} \\
\Delta Z_S &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{S_t}{S_0} \\
\Delta Z_{Pci} &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{Pci_t}{Pci_0} \\
\Delta Z_{Lab} &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{Lab_t}{Lab_0} \\
\Delta Z_T &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{T_t}{T_0} \\
\Delta Z_D &= \frac{Z_t - Z_0}{\ln Z_t - \ln Z_0} \times \ln \frac{D_t}{D_0}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

式中  $\Delta Z_P$ 、 $\Delta Z_U$ 、 $\Delta Z_A$ 、 $\Delta Z_S$ 、 $\Delta Z_{Pci}$ 、 $\Delta Z_{Lab}$ 、 $\Delta Z_T$ 、 $\Delta Z_D$  分别代表人口规模、城镇化水平、经济规模、产业结构、实体经济人口承载强度、技术进步、能耗强度和单位能源减污降碳强度效应所引起的减污降碳综合指标变化量。

## 4.2.2 驱动因素结果分析

通过表 4.2 计算的 Kaya-LMDI 分解结果，可以得出各分解效应对中原城市群减污降碳综合指标的贡献程度。其中，能源强度效应是减少中原城市群污染排放的决定性因素，实体经济人口承载强度次之，两者均起抑制作用。其余效应中，经济规模效应、技术效应和城镇化效应具有显著推动中原城市群污染排放的作用，但前两者的作用效果更大。人口规模也在一定程度上增加了污染物的排放，但是推动力度相对较小。而产业结构效应 2011 年之前促进中原城市群污染物排放，2011 年后转为抑制作用，整体均值存在正效应。观察中原城市群减污降碳驱动

因素分解的总效应可以发现 2015-2016 年该地区总效应和其他年份明显存在差异,但与中原城市群减污降碳 2015 年空间演变趋势图的结果较为一致,该年份中原城市群整体污染程度较考察期其余年份显著降低。

在增加综合污染物排放的众因素中,经济产出增加是中原城市群污染增长的主要因素,说明中原城市群经济发展依赖于能源消费,尤其是以煤炭为主的化石能源。虽然近些年,为改善环境,化石能源的消耗有所降低,转向新型绿色能源,但化石能源消耗仍在中原城市群的发展中占有较大比重;技术效应对污染排放的正向影响正在逐渐显现,成为仅次于经济效应的第二大碳排放增长推动力,尤其是在郑州、洛阳和开封等技术优势地区,拉动作用正在增强,这是由于技术从研发到运用的周期较长,需要投入大量人力、物力和财力支持,前期消耗大量资源会产生较为严重的污染。虽然当新技术、新设备投入使用时可以改善生态环境,但通过表 4.2 结果显示,中原城市群技术研发对环境带来的弊大于利,应着力改进技术研发投入模式,挖掘技术效应对环境的有力影响;城镇化效应对污染排放也具有一定程度促进作用,但观察其考察期整体的变动特点可发现,2012 年以前城镇化水平导致中原城市群污染物排放的增长基本稳定在 1400 万吨,后续年份有所下降,这是因为近几年中原城市群城镇化率增速减缓;Birdsall (1992)认为人口增长对碳排放的影响主要有两方面:一是人口增加,通过需求引导生产扩大,进而导致污染排放增长;二是人口增长破坏生态平衡,改变土地利用方式。虽然中原城市群人口增速已经放缓,但由于人口基数巨大,即使是少量的人口增加,引起的污染排放增加量也相当可观。未来随着中原城市群城镇化进程的进一步加快,中心城市的常住人口规模还将继续加大,所以未来控制人口对减少污染排放的作用不容忽视;单位能源减污降碳效应在考察期对中原城市群污染物的催化作用逐渐降低,主要由于化石能源使用减少,技术进步促进能源利用效率的提高。同时,当地政府重视绿色低碳化发展,对能源开采和使用的监管控制力度加大。产业结构效应并没有对污染排放起到明显的抑制作用,这与部分研究的结果相似(WU 等, 2005; 郭朝先, 2010; 赵奥和武春友, 2010)。由于在 2006-2021 年间,中原城市群大部分地区第二产业比重始终在 45%-60%之间,并且以煤炭为主要能源,这表明各地区经济增长对第二产业的依赖还比较强,所以未来调整产业结构依然任重道远。

在有效抑制污染排放的因素中，能源强度下降是抑制污染排放的最有力因素，实体经济人口承载强度次之。前者起决定性作用是因为我国一直十分重视节能减排工作，技术效率和资源利用效率大幅提高，使得能源强度特别是第二产业的能源强度不断降低。对于以第二产业为主的中原城市群来说能源强度有力地减少了污染排放，考察期综合减排污染物的平均值为 3292.7 万吨。而实体经济人口承载强度体现了以人口高质量发展支撑中国式现代化，加快建设以实体经济为支撑的现代化产业体系的理念。中原城市群在挖掘资源人口承载潜力，提升经济人口承载质量，促进人口资源与环境、经济社会协调发展方面做了大量卓有成效的工作，打下了良好的资源禀赋基础，但随着人口的持续增长，给中原城市群的资源环境带来一定压力，在资源人口承载力和经济人口承载力的双约束下，实体经济人口承载强度对该地区污染排放的抑制作用呈现出波动式下降的趋势。

表 4.2 2006-2021 年中原城市群减污降碳的 Kaya-LMDI 分解结果

年份	总效应	人口规模	城镇化水平	经济规模效应	产业结构效应	实体经济人口承载强度	技术效应	能源强度效应	单位能源减污降碳强度效应
2006-2007	1640.11	-46.60	1331.32	5438.56	416.28	-5854.84	4107.25	-6233.72	2481.88
2007-2008	-833.66	150.16	1471.79	5578.74	1031.22	-6609.97	4106.96	-4481.16	-2081.41
2008-2009	2841.34	135.27	1341.29	2307.33	32.10	-2339.43	966.04	-1855.09	2253.83
2009-2010	659.45	20.88	-209.97	5714.88	489.76	-6204.64	5924.85	-4197.56	-878.75
2010-2011	1440.29	-27.70	1427.04	5603.42	748.53	-6351.95	4176.38	-3000.58	-1134.84
2011-2012	291.54	26.81	1496.59	3179.41	-430.22	-2749.19	1682.83	-3601.69	687.01
2012-2013	1673.49	121.51	988.01	3074.55	-482.19	-2592.37	2086.54	-2402.64	880.07
2013-2014	384.70	113.14	1172.33	2538.37	-1791.82	-746.55	1366.03	-2670.10	403.28
2014-2015	2581.54	167.57	1343.44	1566.05	-2058.91	492.86	222.61	-2329.09	3177.01
2015-2016	-8.76	231.98	1400.05	2711.07	-661.57	-2049.50	1311.03	-3391.60	439.79
2016-2017	196.51	165.48	1292.41	3877.53	-1204.80	-2672.72	2585.12	-4558.51	712.01
2017-2018	2453.91	157.37	1169.28	3301.76	-876.26	-2425.51	2132.49	-3638.93	2633.71
2018-2019	353.66	10.78	1053.24	3181.55	-3428.70	247.16	2128.30	-3340.96	403.29

续表 4.2 2006-2021 年中原城市群减污降碳的 Kaya-LMDI 分解结果

年份	总效应	人口规模	城镇化水平	经济规模效应	产业结构效应	实体经济人口承载强度	技术效应	能源强度效应	单位能源减污降碳强度效应
2019-2020	1684.17	-396.35	543.75	1225.39	-1667.58	442.19	681.64	767.48	87.65
2020-2021	353.62	-205.84	710.45	4626.81	545.63	-5172.44	3916.36	-4456.36	389.03

## 5 中原城市群减污降碳脱钩效应分析

### 5.1 脱钩的定义及分类

“脱钩 (Decoupling)” 源于物理学领域, 就是使具有响应关系的两个或多个物理量之间的相互关系不再存在 (李效顺等, 2008)。20 世纪末, OECD 将脱钩概念引入到农业政策研究, 并逐步拓展到环境等领域 (陈百明和杜红亮, 2006)。OECD 环境研究领域的专家将脱钩定义为阻断经济增长与环境冲击之间的联系或者说使两者的变化速度不同步 (OECD, 2002)。通常, 根据环境库兹涅茨曲线 (EKC) 假说, 经济的增长一般带来环境压力和资源消耗的增大, 但当采取一些有效的政策和新的技术时, 可能会以较低的环境压力和资源消耗换来同样甚至更加快速的经济增长, 这个过程被称为脱钩 (宋伟等, 2009), 其一般表现为倒 U 型曲线关系。脱钩研究思路在环境领域的应用较为广泛, 其脱钩指标设计是基于驱动力-压力-状态-影响-反应框架 (DPSIR), 主要反映前两者的关系也就是驱动力(如 GDP 增长)与压力(如环境污染)在同一时期的增长弹性变化情况(OECD, 2002)。OECD 把脱钩分为绝对脱钩和相对脱钩, 其中绝对脱钩是指在经济发展的同时与之相关的环境变量保持稳定或下降的现象, 又称强脱钩; 相对脱钩则定义为经济增长率和环境变量的变化率都为正值但环境变量的变化率小于经济增长率的情形, 又称弱脱钩。

### 5.2 脱钩弹性分析

#### 5.2.1 脱钩弹性指数模型构建

脱钩分析的基本模型主要有两种, 分别为基于期初和期末值的 OECD 脱钩指数模型和基于增长弹性变化的 Tapio 脱钩状态分析模型 (李忠民和庆东瑞, 2010; 陈百明和杜红亮, 2006)。Tapio 脱钩模型综合了总量变化和相对量变化两类指标, 采用以时期为时间尺度的弹性分析方法反映变量间的脱钩关系, 有效缓解了 OECD 指数模型期初期末值选定的高度敏感性或极端性而导致的计算偏差, 进一步提高了脱钩关系测度和分析的客观性和准确性 (彭佳雯等, 2011)。此外, Tapio

针对 Vehmas 等提出的复钩 (re-linking) 概念, 认为由于在实际中尚未出现经济发展与资源消耗或环境污染从绝对脱钩到复钩 (再次耦合) 的 N 型发展曲线, 因此使用负脱钩 (negative decoupling) 的概念以防止误导认识 (Tapio P, 2005)。依据 Tapio 脱钩模型对脱钩类型的划分, 将经济增长与减污降碳的脱钩状态划分为脱钩、连接和负脱钩 3 种状态, 再根据弹性系数值的大小、减污降碳和总产值的变化情况, 参照马晓君等 (2021) 脱钩状态划分标准, 进一步将减污降碳与经济增长的脱钩状态划分为 8 种不同的脱钩类型, 划分结果见表 5.1。

表 5.1 减污降碳与经济增长脱钩状态划分标准

脱钩分类	状态	$\Delta Z/Z$	$\Delta G/G$	脱钩弹性指数 (t)	意义
	强脱钩	<0	>0	$t < 0$	减污降碳能力增强, 经济增长;
脱钩	弱脱钩	>0	>0	$0 < t < 0.8$	经济增长, 减污降碳能力下降, 且后者下降速度低于前者增速;
	衰退脱钩	<0	<0	$t > 1.2$	减污降碳能力增强, 经济衰退, 前者速度大于后者;
连接	增长连接	>0	>0	$0.8 < t < 1.2$	经济增长, 减污降碳能力下降, 且两者速度相当;
	衰退连接	<0	<0	$0.8 < t < 1.2$	经济减少, 减污降碳能力上升, 且两者速度相当;
	弱负脱钩	<0	<0	$0 < t < 0.8$	减污降碳能力增强, 经济衰退, 前者速度小于经济较差状态;
负脱钩	强负脱钩	>0	<0	$t < 0$	减污降碳能力减弱, 经济衰退;
	扩张负脱钩	>0	>0	$t > 1.2$	减污降碳能力减弱, 经济增长, 前者速度大于为后者;

参考 Tapio 的交通运输量增长与经济发展的脱钩模型, 本文提出经济增长与减污降碳综合指标的脱钩分析模型 (表 5.2), 在 Tapio 弹性脱钩模型中, 减污降碳和经济增长之间的弹性脱钩关系式为:

$$e_t = \frac{\Delta Z / Z}{\Delta G / G} \quad (5.1)$$

## 5.2.2 脱钩弹性指数结果分析

其中，通过观察表 5.2 计算结果可以发现，在考察期内，除了 2007-2008 中原城市群减污降碳与经济增长之间属于强脱钩状态，2008-2009、2014-2015 以及 2019-2020 这三年间减污降碳与经济增长处于衰退脱钩状态，其余年份，中原城市群减污降碳和经济增长之间处于弱脱钩状态，即主要以经济增长为主，减污降碳能力相较于经济发展有所不足，两者间还未达到协调发展。考察期内中原城市群这几种脱钩状态表明在 2007-2008 年间，中原城市群减污降碳和经济发展达到理想状态，即减污降碳能力增强的同时经济也处于快速增长阶段；2008-2009、2014-2015 以及 2019-2020 中原城市群减污降碳的能力增强，但与此同时，经济并未增长而处于衰退状态且减污降碳能力增强的速度大于经济衰退的速度，说明环境治理可能对经济增长具有制约作用，但两者间总效应整体为正；而考察期的其余时间段，中原城市群减污降碳的能力有所下降，但经济处于增长阶段，且经济增长的速度快于减污降碳下降的速度，两者间整体效应仍为正。

出现以上现象的主要原因是 2007 年 6 月 4 日，《中国应对气候变化国家方案》颁布实施，这是我国第一部应对气候变化的全面的政策性文件，也是发展中国家颁布的第一部应对气候变化的国家方案。该方案分析了气候变化对我国的影响与挑战，提出了应对气候变化的指导思想、原则、目标以及相关政策和措施，对中原城市群有效治理大气污染提供方向。在这一年，中原城市群主要污染物排放量首次出现“双拐点”，污染防治由被动应对转向主动防控，环保历史性转变迈出坚实步伐。此外，2008、2014 和 2019 年中原城市群出现衰退脱钩分别是由于，2007 年底美国金融危机的影响使得我国面临严峻的经济形势，在 2008 年国务院出台四万亿经济刺激计划，推动经济复苏和经济增长，经济增长的同时必定带动能源的大量消耗，而且在国家出台的经济刺激计划下，可能出现盲目的粗放型经济增长和经济结构不合理，导致脱钩弹性指数变小，减污降碳能力增强的速度超过经济衰退的速度；郑州市作为中原城市群的核心城市，2014 年郑州市政府工作报告显示，郑州市全市地区生产总值完成 6800 亿元，增长 9.3%，根据对郑州市统计局历年数据整理了解到，郑州市的 GDP 增幅为 2000 年以来的新低，也是

首次回落到两位数以内。且就全国层面来说，2014 年经济增长减慢并低于潜在经济增长速度，既有 2013 年下半年以来积极的财政政策扩张力度不够、稳健的货币政策宽松力度不足的宏观调控政策主动调整原因，更重要的是结构和体制问题制约宏观调控政策的效果，并影响社会预期；2019 年底新冠疫情的出现使区域间封锁，中原城市群交通便利呈“米”字型分布，区域间封锁使中原城市群难以发挥其区位优势，对中原城市群经济产生直接影响，经济增长受到明显抑制。

表 5.2 减污降碳与经济增长间的脱钩指数与脱钩状态

年份	脱钩指数	脱钩状态
2006-2007	0.29	弱脱钩
2007-2008	-0.11	强脱钩
2008-2009	1.22	衰退脱钩
2009-2010	0.14	弱脱钩
2010-2011	0.29	弱脱钩
2011-2012	0.09	弱脱钩
2012-2013	0.63	弱脱钩
2013-2014	0.26	弱脱钩
2014-2015	1.54	衰退脱钩
2015-2016	0.10	弱脱钩
2016-2017	0.13	弱脱钩
2017-2018	0.68	弱脱钩
2018-2019	0.23	弱脱钩
2019-2020	2.28	衰退脱钩
2020-2021	0.13	弱脱钩

## 5.3 脱钩努力分析

### 5.3.1 脱钩努力指数模型构建

脱钩弹性指数只是衡量经济增长与减污降碳的脱钩关系,无法对脱钩状态的驱动因素进行分析,而 LMDI 因素分解模型虽然有助于分析各个因素对减污降碳变化量的贡献作用,但不能具体而客观地分析政府的减污降碳努力对经济增长与减污降碳的脱钩影响程度。因此,在 Kaya-LMDI 因素分解模型与 Tapio 脱钩模型的理论基础上,构建了脱钩努力指数模型。脱钩理论常被用于衡量经济增长与物质消耗投入及生态环境保护不同步变化的关系,这种不同步关系主要源自于经济增长驱动力作用下,政府基于环境成本压力的反应,其理论基础是 1993 年经济合作与发展组织(OECD)提出的 DPSIR 框架(马晓君等,2021)。

在本文中,政府的减污降碳努力是指在经济发展过程中直接或间接增强减污降碳能力所采取的措施,具体包括对人口规模的把控、城镇化水平的优化、产业结构的调整、实体经济人口承载强度的统筹、技术进步、能耗强度和单位能源减污降碳强度效应的提高等方面,即减污降碳总量中排除经济增长因素导致的减污降碳变化量。因此,根据 LMDI 因素分解的结果,政府的减污降碳努力 $\Delta E$ 可以间接表示为:

$$\Delta E = \Delta Z - \Delta Z_A = \Delta Z_P + \Delta Z_U + \Delta Z_S + \Delta Z_{Pci} + \Delta Z_{Lab} + \Delta Z_T + \Delta Z_D \quad (5.2)$$

$$B = -\frac{\Delta E}{\Delta Z_A} = -\frac{\Delta Z_P}{\Delta Z_A} - \frac{\Delta Z_U}{\Delta Z_A} - \frac{\Delta Z_S}{\Delta Z_A} - \frac{\Delta Z_{Pci}}{\Delta Z_A} - \frac{\Delta Z_{Lab}}{\Delta Z_A} - \frac{\Delta Z_T}{\Delta Z_A} - \frac{\Delta Z_D}{\Delta Z_A} \quad (5.3)$$

$$= B_P + B_U + B_S + B_{Pci} + B_{Lab} + B_T + B_D$$

式中, $\Delta E$ 表示现期相对于基期剔除经济增长因素后减污降碳的变动, $B$ 为剔除经济增长效应后的脱钩努力指标, $B_P$ 、 $B_U$ 、 $B_S$ 、 $B_{Pci}$ 、 $B_{Lab}$ 、 $B_T$ 、 $B_D$ 分别表示人口规模、城镇化水平、产业结构、实体经济人口承载强度、技术进步、能耗强度和单位能源减污降碳强度效应的变化对脱钩的努力程度。当脱钩努力导致减污降碳变化量大于或等于 0, $B \leq 0$ 为“无脱钩努力”;当脱钩努力导致减污降碳变化量小于 0, $0 < B < 1$ 为“弱脱钩努力”, $B \geq 1$ 为“强脱钩努力”。

### 5.3.2 整体脱钩努力指数模型结果分析

使用脱钩努力指数测度中原城市群整体经济增长与减污降碳双赢的实际情况以及政府为减污降碳所做努力对经济增长与减污降碳综合指标脱钩的影响程

度,结果如表 5.3 所示。由表 5.3 可知,自 2006 年以来,中原城市群在 2007-2008、2015-2016 减污降碳脱钩努力指数大于 1,处于强脱钩状态;在 2008-2009、2014-2015、2019-2020 年减污降碳脱钩努力指数小于 0,处于无脱钩状态;考察期其余年份减污降碳脱钩努力指数均在 0~1 之间,处于弱脱钩状态。综上可以发现,中原城市群主要还是处于弱脱钩状态,且其弱脱钩状态时减污降碳脱钩努力指数均值为 0.756,距离强脱钩状态最小值 1 还有些许差距,说明中原城市群经济增长和减污降碳之间实现强脱钩状态任重道远。可以发现,中原城市群减污降碳的脱钩努力指数总效应整体波动性较大,在 2008-2009、2014-2015、2019-2020 三年总效应为负值,与 Tapio 脱钩弹性指数处于衰退脱钩的年份相一致,即导致脱钩努力总效应为负值的原因与之相符。由于两者计算方式并不相同, Tapio 脱钩弹性指数是用减污降碳变换率与地区生产总值变化率的比值计算得到,而脱钩努力总效应指数是以 Kaya-LMDI 为基础剔除经济增长后政府为实现减污降碳所做出的各种努力的变化率与代表经济发展的指标——人均 GDP 的变化率的比值,虽然两者计算方式不同,所得脱钩状态有所区别,但本质反映的均为经济增长和减污降碳之间的相互关系。

从人口规模的把控、城镇化水平的优化、产业结构的调整、实体经济人口承载强度的统筹、技术进步、能耗强度和单位能源减污降碳强度效应对总脱钩效应的贡献来看,能源强度效应的贡献最大,实体经济人口承载强度的贡献次之,两者对中原城市群实现脱钩均起到拉动作用。而人口规模效应、城镇化水平、技术进步和单位能源的减污降碳强度考察期脱钩指数总体均值为负,则起到阻碍作用,此结论与 Kaya-LMDI 分解的结果相一致。

此外,通过各效应的变化趋势可以发现,能耗强度效应在 2006-2010 年间,脱钩水平逐步下降,2010-2015 呈现波动上升趋势,后续年份稳步下降,但在 2020 年脱钩水平剧烈下降。出现此现象的原因是 2019 年新冠疫情爆发,为了有效控制疫情蔓延,各地区实行区域封锁,地区内部实体经济及经济贸易往来受到严重影响,虽中原城市群经济仍在增长,但增速为历年最低水平,与此同时该地区能源消耗仍稳步增长使得单位能耗上升,能源消耗效应的脱钩指数在这一年出现剧烈下降;实体经济人口承载强度在 2006-2020 年脱钩水平处于下降趋势,但整体脱钩努力指数均值在各效应贡献中高居第二,2020-2021 年则又呈现出上升趋势,

表明实体经济发展对中原城市群有效实现与经济增长的脱钩作用重大,其趋势下降进一步说明中原城市群减污降碳若要实现强脱钩状态,必须要推动实体经济高质量发展,实现人力资源在产业间的合理配置。此外,在2012-2014、2017-2020年实体经济人口承载强度脱钩努力指数下降幅度陡峭,主要是2012年下半年以来,经济企稳回升的态势基本形成,但基础还不稳固,且我国在这一年出口增长2.9%,同比回落18.2%个百分点,需求不足的情况是近年少有,这一外界环境短期难以缓解,使得中原城市群地区实体经济发展环境紧张,该地区企业经营困难。此后,2015年股市大幅波动退出的资金转入房市,居民实际购房能力显著提升,2016年初以来刚性需求的投资投机购房需求大幅上升造成房价暴涨,2017年处于调整周期的房地产行业面临政策调整带来的下行压力和债务的结构性风险进一步凸显,房地产作为实体经济的重要组成部分,这一现象使得中原城市群实体经济面临的深层次问题进一步深化。在2017-2020年后期,新冠疫情的出现加深了中原城市群消费、投资需求不足的现象,中原城市群在此期间面临着实体经济持续下行的压力;人口规模效应和城镇化水平的脱钩努力均值为负是由于中原城市群城镇化率一直低于全国平均水平,在2021年城镇化率为56%,远低于全国城镇化率平均水平64.72%,人口相对密集,大量农村人口需要转移,城镇化发展基础良好且潜力巨大;技术进步效应脱钩努力的贡献为负,且脱钩均值为-0.63,严重阻碍中原城市群达到强脱钩状态,这是由于中原城市群地区产业主要以工业为主,技术密集型企业相对稀少,人口多但缺乏技术型人才;产业结构的脱钩努力指数自2011-2020起逐渐由负转正,总体均值为0.33,源于2011年后中原城市群第二产业增加值与第三产业增加值的比值逐渐降低,由2011年60.41%降低到2020年26.03%,2021年其比值略有上升为27.02%,使得2021年中原城市群产业结构效应的脱钩努力指数为负值;单位能源的减污降碳强度脱钩努力指数在考察期内基本为负值,这是由于当前中国经济正处于转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期,尽管高污染、高排放化石能源是中国能源消耗的主要燃料,近年来已逐步减少使用,使用清洁能源进行替代,但此类能源消耗模式在短时期内还难以转变,所以要实现经济持续、快速、健康增长,必须寻找可替代的清洁能源,形成能源结构多元化的局面。

表 5.3 2006-2021 年中原城市群减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2006-2007	0.698	0.009	-0.245	-0.077	1.077	-0.755	1.146	-0.456
2007-2008	1.149	-0.027	-0.264	-0.185	1.185	-0.736	0.803	0.373
2008-2009	-0.231	-0.059	-0.581	-0.014	1.014	-0.419	0.804	-0.977
2009-2010	0.885	-0.004	0.037	-0.086	1.086	-1.037	0.734	0.154
2010-2011	0.743	-0.005	-0.255	-0.134	1.134	-0.745	0.535	0.203
2011-2012	0.908	-0.008	-0.471	0.135	0.865	-0.529	1.133	-0.216
2012-2013	0.456	-0.040	-0.321	0.157	0.843	-0.679	0.781	-0.286
2013-2014	0.848	-0.045	-0.462	0.706	0.294	-0.538	1.052	-0.159
2014-2015	-0.648	-0.107	-0.858	1.315	-0.315	-0.142	1.487	-2.029
2015-2016	1.003	-0.086	-0.516	0.244	0.756	-0.484	1.251	-0.162
2016-2017	0.949	-0.043	-0.333	0.311	0.689	-0.667	1.176	-0.184
2017-2018	0.257	-0.048	-0.354	0.265	0.735	-0.646	1.102	-0.798
2018-2019	0.889	-0.035	-0.331	1.078	-0.078	-0.669	1.050	-0.127
2019-2020	-0.374	0.323	-0.444	1.361	-0.361	-0.556	-0.626	-0.072
2020-2021	0.924	0.044	-0.154	-0.118	1.118	-0.846	0.963	-0.084

### 5.3.3 分区域脱钩努力指数模型结果分析

为厘清中原城市群不同功能定位区域的减污降碳效果，针对性地探索不同政策环境、产业背景下区域减污降碳的实现路径。本节将中原城市群细分为五大功能区域，以考察期内各区域减污降碳的脱钩努力指数为着力点，对比不同区域间各效应与减污降碳间的脱钩努力程度及各区域内部不同效应的脱钩贡献情况，为因地制宜实现中原城市群各区域减污降碳和经济增长“双赢”提供科学建议。使用脱钩努力指数测度中原城市群五大区域经济增长与减污降碳双赢的实际情况以及政府为减污降碳所做努力对经济增长与减污降碳综合指标脱钩的影响程度，结果如表 5.4-5.8 所示。

考察期内，观察各区域脱钩总效应均值可以发现，核心发展区脱钩、北部跨

区域协同发展区、东部承接产业转移示范区、南部高效生态经济示范区和西部转型创新发展示范区脱钩总效应均值分别为 21.64、-6.64、-0.11、2.33、0.078。其中，核心发展区脱钩和南部高效生态经济示范区脱钩努力指数大于 1，属于强脱钩状态；西部转型创新发展示范区脱钩努力指数介于 0~1 之间，属于弱脱钩状态；北部跨区域协同发展区和东部承接产业转移示范区脱钩努力指数小于 0，属于无脱钩状态。这是由区域功能侧重点不同所导致的，核心发展区内所属城市较多，包含中心城市郑州、副中心城市洛阳，且地理位置居城市群“米”字型交通中心地带，是城市群经济发展的重心所在，拥有较多的资源，既包括经济发展所需资源的倾斜，又包括生态治理的资源投入。而南部高效生态经济示范区在城市群的功能定位以生态保护为主，在生态保护的基础下发展绿色经济。因此，这两大区域减污降碳处于强脱钩状态。西部转型创新发展示范区之所以处于弱脱钩状态是由于该区域顺应新质生产力的发展，以科技创新为关键，以改造传统产业为目的，大力培育发展新兴产业，加快推动工业和信息化深度融合，强力推进工业经济转型升级，有效减缓了传统重工业高耗能、高排放给生态环境带来的负荷。北部跨区域协同发展区内 7 市地域相邻、文脉相连、历史相通、人缘相亲，具备良好的合作基础，但在区域合作方面尚未达到实质性进展，对减污降碳的区域协同作用还未体现出来，东部承接产业转移示范区内城市产业承接效率整体不高，承接过来的产业大多处于价值链低端的加工制造环节，造成资源和劳动力的低效利用。因此北部跨区域协同发展区和东部承接产业转移示范区减污降碳处于无脱钩状态。

考察期内，五大区域内从人口规模的把控、城镇化水平的优化、产业结构的调整、实体经济人口承载强度的统筹、技术进步、能耗强度和单位能源减污降碳效应对总脱钩效应的贡献来看，五大区域内影响脱钩程度的因素和城市群层面比较相符，个别区域存在差异。其中，核心发展区和南部高效生态经济示范区内排除异常年份数值变动剧烈的情况下，能耗强度效应的贡献最大，实体经济人口承载强度次之，两者在考察期均为正值，脱钩促进作用较为稳定，而技术进步效应和城镇化效应在考察期的脱钩指数均为负值，为阻碍脱钩的两大因素。西部转型创新发展示范区与核心发展区和南部高效生态经济示范区影响脱钩的因素相似，不同之处在于产业结构效应为西部转型创新发展示范区脱钩贡献的第二大促

进因素。此外，对西部转型创新发展示范区总效应及各部分效应脱钩努力指数值进行观察发现，五大区域内西部转型创新发展示范区脱钩努力指数值相对较小，大多处于弱脱钩和无脱钩状态，强脱钩状态下的脱钩指数值相较其余四大区域绝对值较小，强度较弱；北部跨区域协同发展区产业结构效应对经济的脱钩贡献最大，能源消耗强度效应次之，但两者的脱钩状态在考察期分布并不稳定，单位能源减污降碳效应阻碍作用最大但在考察期波动较大，城镇化水平则在整个考察年份起较为稳定的阻碍作用；东部承接产业转移示范区实体经济人口承载强度和能耗强度效应依次推动强脱钩作用的实现，技术进步效应和城镇化效应在考察期稳定阻碍脱钩效果，人口规模效应在考察期由正转负，整体仍发挥推动脱钩的效果。

综上可知，由于五大区域在《中原城市群发展规划》中的功能定位不同，影响减污降碳与经济增长脱钩状态的因素也有所区别。不过，总体上与城市群层面仍存在相同之处。能源消耗强度是有效促进五大区域实现减污降碳脱钩的共同因素，城镇化水平则是抑制强脱钩的公共因素。产业结构效应在城市群层面脱钩努力指数自 2011-2020 起逐渐由负转正，出现这一转折是因为产业结构效应在西部转型创新发展示范区和北部跨区域协同发展区整体推动脱钩状态的实现，而在其余区域变现为阻碍作用。

表 5.4 2006-2021 年核心发展区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2006-2007	10.319	0.155	-5.234	-1.057	14.057	-7.766	27.064	-16.901
2007-2008	14.616	-0.409	-3.235	-1.814	14.814	-9.765	10.489	4.536
2008-2009	1.534	-0.852	-11.857	-3.301	16.301	-1.143	8.527	-6.141
2009-2010	9.221	-3.976	2.035	-2.429	15.429	-15.035	14.784	-1.587
2010-2011	6.948	-0.069	-3.759	-1.227	14.227	-9.241	8.313	-1.296
2011-2012	23.394	0.174	-7.463	4.888	8.112	-5.537	26.098	-2.877
2012-2013	0.332	-0.128	-5.408	3.399	9.601	-7.592	9.441	-8.981
2013-2014	-5.735	-0.297	-6.493	15.564	-2.564	-6.507	20.325	-25.762
2014-2015	-27.180	-1.920	-8.182	7.294	5.706	-4.818	38.323	-63.583
2015-2016	54.774	-1.528	-2.298	-3.057	16.057	-10.072	21.070	35.232

续表 5.4 2006-2021 年核心发展区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2016-2017	11.158	-0.541	-4.231	4.005	8.995	-8.769	17.901	-6.201
2017-2018	6.378	-0.806	-3.225	5.923	7.077	-9.775	15.979	-8.795
2018-2019	13.834	-0.647	-4.284	-2.110	15.110	-8.716	12.200	2.282
2019-2020	204.867	28.400	80.673	-31.211	44.211	-93.679	-27.571	204.038
2020-2021	0.146	0.730	-3.630	7.085	5.915	-9.370	11.077	-11.662

表 5.5 2006-2021 年北部跨区域协同发展区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2006-2007	4.963	-0.056	-1.582	-0.215	7.215	-5.418	2.928	2.091
2007-2008	8.623	-0.231	-1.750	-1.685	8.685	-5.250	7.301	1.553
2008-2009	-65.211	-5.548	-89.564	13.126	-6.126	82.564	67.211	-126.874
2009-2010	5.640	-1.114	-0.746	-1.270	8.270	-6.254	6.373	0.381
2010-2011	6.067	-0.010	-1.874	-0.110	7.110	-5.126	4.480	1.597
2011-2012	0.153	-0.089	-3.456	1.246	5.754	-3.544	7.300	-7.058
2012-2013	-2.324	-0.219	-2.668	10.932	-3.932	-4.332	-5.160	3.055
2013-2014	39.530	0.369	-26.134	67.673	-60.673	19.134	7.739	31.422
2014-2015	-72.461	-5.575	-23.897	38.983	-31.983	16.897	12.574	-79.460
2015-2016	4.672	-1.114	-3.852	4.557	2.443	-3.148	7.280	-1.494
2016-2017	6.768	-0.349	-3.197	4.049	2.951	-3.803	8.623	-1.506
2017-2018	6.472	0.002	-0.967	4.343	2.657	-6.033	8.794	-2.324
2018-2019	6.533	-0.217	-2.676	32.398	-25.398	-4.324	6.629	0.121
2019-2020	-55.288	28.383	36.888	-7.701	14.701	-43.888	-37.562	-46.108
2020-2021	6.325	0.447	-1.007	-2.953	9.953	-5.993	5.334	0.544

表 5.6 2006-2021 年东部承接产业转移示范区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2006-2007	2.685	0.067	1.067	-1.361	5.361	-5.067	0.488	2.130
2007-2008	4.830	0	-0.094	-0.749	4.749	-3.906	1.942	2.889

续表 5.6 2006-2021 年东部承接产业转移示范区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2008-2009	-4.188	0.029	-1.666	-1.486	5.486	-2.334	1.850	-6.067
2009-2010	3.913	0.347	0.429	-0.158	4.158	-4.429	0.600	2.966
2010-2011	4.805	0.054	-0.824	-1.039	5.039	-3.176	1.892	2.859
2011-2012	2.747	0.078	-1.266	-0.643	4.643	-2.734	1.621	1.048
2012-2013	1.028	-0.700	-1.098	0.283	3.717	-2.902	2.460	-0.732
2013-2014	4.671	-0.512	-1.339	0.138	3.862	-2.661	3.981	1.202
2014-2015	-32.477	2.094	3.097	-22.817	26.817	-7.097	-2.016	-32.555
2015-2016	-2.589	-0.596	-1.386	2.533	1.467	-2.614	5.654	-7.646
2016-2017	7.710	-0.421	-1.169	0.114	3.886	-2.831	3.787	4.343
2017-2018	0.323	-0.411	-1.298	0.385	3.615	-2.702	5.164	-4.430
2018-2019	4.735	-0.332	-1.240	-0.049	4.049	-2.760	4.378	0.689
2019-2020	-5.713	2.986	4.786	0.742	3.258	-8.786	-6.967	-1.732
2020-2021	5.864	0.306	0.973	-9.357	13.357	-4.973	6.929	-1.370

表 5.7 2006-2021 年南部高效生态经济示范区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2006-2007	1.574	0.104	-1.140	-0.102	3.102	-1.860	1.226	0.244
2007-2008	2.420	-0.155	-2.284	-1.146	4.146	-0.716	1.285	1.290
2008-2009	3.053	-0.325	-1.769	0.832	2.168	-1.231	3.226	0.152
2009-2010	2.766	0.554	-0.596	-0.082	3.082	-2.404	2.274	-0.062
2010-2011	0.448	0.213	-0.847	-0.298	3.298	-2.153	0.288	-0.053
2011-2012	6.622	-0.564	-1.991	1.124	1.876	-1.009	2.255	4.932
2012-2013	3.765	0.159	-1.347	0.116	2.884	-1.653	3.265	0.340
2013-2014	0.955	0.014	-1.200	1.594	1.406	-1.800	2.264	-1.324
2014-2015	2.483	-0.078	-1.678	1.890	1.110	-1.322	3.982	-1.421
2015-2016	0.867	-0.222	-1.728	0.330	2.670	-1.272	5.668	-4.579
2016-2017	-0.192	-0.005	-1.362	0.958	2.042	-1.638	4.885	-5.072
2017-2018	5.756	-0.039	-1.024	1.444	1.556	-1.976	4.137	1.657

续表 5.7 2006-2021 年南部高效生态经济示范区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2018-2019	-3.513	-0.014	-1.183	1.526	1.474	-1.817	4.386	-7.884
2019-2020	4.436	1.142	-1.964	2.129	0.871	-1.036	1.237	2.057
2020-2021	3.552	0.300	-0.528	0.265	2.735	-2.472	4.192	-0.940

表 5.8 2006-2021 年西部转型创新发展示范区减污降碳的脱钩努力指数

年份	B 总效应	B <sub>P</sub>	B <sub>U</sub>	B <sub>S</sub>	B <sub>Pci</sub>	B <sub>Lab</sub>	B <sub>T</sub>	B <sub>D</sub>
2006-2007	0.457	0.033	-0.433	0.405	1.595	-1.567	1.495	-1.070
2007-2008	3.189	-0.070	-0.537	0.062	1.938	-1.463	2.318	0.941
2008-2009	-9.502	-0.361	-3.528	10.089	-8.890	1.528	11.558	-20.699
2009-2010	1.771	-0.074	-0.067	-0.136	2.136	-1.933	1.008	0.837
2010-2011	1.597	0.027	-0.533	-0.764	2.764	-1.467	0.611	0.960
2011-2012	1.094	0.241	-1.266	0.994	1.006	-0.734	1.827	-0.975
2012-2013	1.312	0.049	-1.037	1.121	0.879	-0.963	2.297	-1.034
2013-2014	-0.269	0.015	-1.534	2.741	-0.741	-0.466	0.089	-0.372
2014-2015	-7.992	-0.300	-0.419	2.406	-0.406	-1.581	0.630	-8.323
2015-2016	1.384	0.102	-1.419	1.114	0.886	-0.581	2.562	-1.279
2016-2017	1.151	-0.032	-0.530	0.564	1.436	-1.470	1.684	-0.501
2017-2018	0.349	0.060	-0.591	0.222	1.778	-1.409	1.182	-1.523
2018-2019	3.580	0.060	-0.692	5.161	-3.161	-1.308	5.399	-1.879
2019-2020	-1.131	0.826	-0.066	0.926	1.074	-1.934	1.527	-3.484
2020-2021	4.177	0.012	-0.198	-0.806	2.806	-1.802	1.136	3.029

## 6 结论及建议

### 6.1 研究结论

首先,通过使用排放因子法测算出中原城市群 29 座地级市(除济源外) 2006-2021 年的碳排放量,在此基础上构建减污降碳综合指标。其次,根据《中原城市群发展规划》将中原城市群 29 座地级市(除济源外)划分为五大区域,对碳排放量和减污降碳综合指标在五大区域考察期的时序演变进行分析说明。此外,为进一步深入了解中原城市群五大区域内部及区域间减污降碳的空间差异性,选用 Dagum-基尼分解法探索中原城市群减污降碳在组间、组内及超变密度的贡献情况,并用 GIS 分析法对中原城市群减污降碳的空间分布及变动情况作可视化分析。最后,通过对已有相关文献的梳理,结合中原城市群自身发展现状,运用 Kaya-LMDI 分解法对中原城市群减污降碳综合指标进行分解,得到经济和能源方面是中原城市群减污降碳的主要因素,使用 Tapio 模型检验中原城市群减污降碳和经济发展间的相互关系,并用脱钩努力模型进一步分析中原城市群剔除经济增长外的各因素对减污降碳的脱钩努力程度,所得结论如下:

(1) 在考察期,中原城市群污染排放情况整体呈现稳定增长趋势,总体基尼系数相较于前期明显降低,其中,组间差异贡献率较大。组内基尼差异方面,减污降碳发展水平较为平衡的是南部高效生态经济示范区,核心发展区减污降碳发展水平存在显著不平衡,在考察期内下降最为剧烈,即减污降碳区域内不平衡显著降低;组间差异方面,东部承接产业转移示范区减污降碳发展水平显著不平衡,南部高效生态经济示范区减污降碳发展水平则较为均衡,区域差异较小。尽管不同年份基尼系数大小出现交替变化,但各区域减污降碳发展水平的不平衡性均得到了不同程度的改善。

(2) 中原城市群减污降碳驱动因素各分解效应中对污染排放起抑制作用的决定因素为能源消耗强度,实体经济人口承载强度次之;对污染排放起推动作用的效应依次为经济规模效应、技术效应。考察期,城镇化水平和单位能源减污降碳水平增加中原城市群污染排放的效果波动式降低,人口规模对污染排放的正效应并不显著,产业结构在考察期前期为负,后期为正,整体并没有对污染排放起到明显的抑制作用。

(3) Tapio 脱钩模型得到中原城市群 2006-2021 年减污降碳和经济发展脱钩弹性指数大多为 0~1 之间, 主要处于弱脱钩状态, 且在城市群层面减污降碳的脱钩效应结果与 LMDI 分解结果较为一致。而从分区域角度出发影响减污降碳脱钩状态的因素既有相同又有区别, 共同之处体现在五大区域抑制强脱钩的公共因素为城镇化水平, 能源消耗强度则是有效促进脱钩实现的共同因素。区别之处则为产业结构效应在城市群层面脱钩努力指数自 2011-2020 起逐渐由负转正, 出现这一转折是因为产业结构效应在西部转型创新发展示范区和北部跨区域协同发展区整体推动脱钩状态的实现, 而在其余区域变为阻碍作用。

## 6.2 政策建议

生态环境优良是中原城市群良好发展的衡量目标之一, 城市群的发展不应仅仅是经济的飞速前进, 环境的不断优化也应是城市群发展的题中之义。基于此, 为实现中原城市群经济发展和生态环境之间的良好协调, 推动城市发展和减污降碳实现“双赢”, 根据实证结果提出以下建议:

(1) 中原城市群区域间减污降碳治理应协调发展, 缩小地区间差异。对于污染持续加深的地区, 诸如洛阳、信阳、漯河和新乡等地, 应充分发挥中原城市群“一核一副一带多点”的空间格局, 加强与周边城市的互动交流, 强化生态环境共保联治, 重点建设有机连通的生态网络。此外, 加快地区产业数字化转型, 对于高污染、高能耗产业使用新能源替代, 例如鹤壁在2020年后, 进一步明确产业定位, 向新能源电子行业转型, 并加快数字化赋能步伐, 但由于鹤壁处于转型起步阶段, 因此考察期污染状态呈倒“N”型加剧。从地区纵向治理的角度, 应从以往针对碳排放或大气污染单方面治理措施转向两者间的协同控制, 以源头防治为重点, 同步推进末端治理; 从地区横向治理的角度出发, 应充分调动各界力量, 发挥各方所长, 治理思路需从以政府为止的单一命令型向“政府-科研机构-市场-社会组织”多方联动模式转变, 构建减污降碳的多元共治体系(王涵等, 2022)。

(2) 中原城市群应在充分挖掘能源强度对污染排放的抑制潜能及大力发展实体经济的基础上, 协调经济发展和环境治理的关系, 改进技术研发应用模式, 优化城市人口空间分布, 加快产业结构升级, 实现能源高效利用。从人口规模方

面来看,应发挥中原城市群“米”字交通和人力资源优势,优化地方人才引进政策,吸引人才落户;从城镇化水平来看,可结合地区特色产业发展当地的职业教育,如焦作、平顶山等地区兴起的石油化工、煤化工行业,以漯河为代表的食品行业,因地制宜根发扬产业优势,提高乡村劳动力素质,为推进城镇化奠定基础;从产业结构角度出发,由于区位及自然禀赋等条件的近似,中原城市群内部各城市的功能定位较为相近,城市间竞争大于合作,应建立政府沟通协调机制,实现各地区优势产业发展,树立产品创新意识增强产品核心竞争力;从单位能源减污降碳强度角度出发,中原城市群内大多城市历史悠久,旅游资源和自然风光丰富,当地可推动这些低碳产业发展,加快产业结构升级,同时加大对新能源的研发投入,使用可替代能源取代高排放、高污染的化石能源。技术进步方面,在中原城市群具备国家级科研机构的地区如郑州、洛阳等地,当地政府应加大对其科研基金的投入,鼓励支持高效人才和科研机构间的合作交流,提高技术产品投入产出效率;对于科研力量薄弱的地区,应加快当地科学院的建立,如2022年开封市科学院正式挂牌,进而以点带面带动当地技术进步。

(3) 由于中原城市群五大区域功能侧重点不同,考察期各区域脱钩指数值均有明显差异,中原城市群若要实现减污降碳的强脱钩,应适当考虑区域禀赋,因地制宜制定减污降碳脱钩实现路径。核心发展区和南部高效生态经济示范区脱钩努力指数大于1,属于强脱钩状态,应充分发挥核心发展区“一主一副”双中心发展模式的优势,形成郑州、洛阳双极带动新格局,同时,建设重要节点城市。支持工业基础较好的漯河、济源等城市发展新质生产力,绿色赋能传统产业,实现产业端多模式发展态势;发挥南部高效生态经济示范区的信阳和驻马店传统农区城市典型示范作用,在保护生态建设、严格控制建设用地总量和开发边界的前提下,加快新型工业化城镇化步伐,大力发展制造业和服务业,加快人口集聚。西部转型创新发展示范区脱钩努力指数属于弱脱钩状态,北部跨区域协同发展区和东部承接产业转移示范区属于无脱钩状态。为推动三大区域向强脱钩转化,中原城市群各区域进行产业协同联动发展时,应充分挖掘地区创新潜力,立足于区域实际选择承接产业,优化承接产业的空间布局,有效规避转移承接产业带来的系统性风险,如开封和漯河适合发展第一产业,郑州、平顶山、新乡和焦作等具有发展第二产业的潜力,洛阳具备发展第三产业的优势。此外,五大区域中能源

消耗强度是有效促进脱钩实现的共同因素，抑制强脱钩的公共因素则为城镇化水平。因此，亟需攻克城镇化水平在实现减污降碳强脱钩中所面临的困难，契合国家城乡融合发展的政策导向，以城促乡，发展城乡产业集聚，产业集群化有利于整合城乡资源，强化城乡联系，增强产业承接吸引力。同时，以科技创新为关键，立足能源消耗强度这一有利因素，进一步增强能源使用效率。随着能源效率的天花板效应逐渐显现，未来技术进步和产业结构的调整还将是节能减排的重要途径。

## 参考文献

- [1] Birdsall N. Another look at population and global warming[J]. Policy Research Working Paper Series, 1992.
- [2] Dagum C. A New Approach to the Decomposition of the Gini Income Inequality Ratio [J]. Empirical Economics, 1997, 22(4).
- [3] Haken H. Synergetics: An Introduction, Nonequilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics, Chemistry and Biology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
- [4] LIU L, WANG K, WANG S S, et al. Assessing energy consumption, CO<sub>2</sub> and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050[J]. Energy Policy, 2018, 116:382-396.
- [5] Meng M, Qu D L. Understanding the green energy efficiencies of provinces in China: A super-SBM and GML analysis [J]. Energy, 2022, 239.
- [6] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressures from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002.
- [7] Standing A, Lidskog R. (How) Does diversity still matter for the IPCC? Instrumental, substantive and co-productive logics of diversity in global environmental assessments[J]. Climate, 2021, 9(6):99.
- [8] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2):137-151.
- [9] Watanabe M, Tanaka K. Efficiency analysis of Chinese industry: A directional distance function approach[J]. Energy Policy, 2007, 35(12):6323-6331.
- [10] WU L B, KANEKO S, MATSUOKA S. Driving forces behind the stagnancy of China's energy-related CO<sub>2</sub> emissions from 1996 to 1999: the relative importance of structural change, intensity change and scale change[J]. Energy Policy, 2005, 33(3):319-335.
- [11] Xia F, Xu J. Green total factor productivity: A re-examination of quality of growth for provinces in China[J]. China Economic Review, 2020, 62.

- [12] XU B and LIN B Q. Reducing carbon dioxide emissions in China's manufacturing industry: a dynamic vector autoregression approach[J]. Journal of Cleaner Production,2016,131:594-606.
- [13]陈百明,杜红亮.试论耕地占用与 GDP 增长的脱钩研究[J].资源科学,2006,28(5):36-42.
- [14]陈诗一.中国的绿色工业革命:基于环境全要素生产率视角的解释(1980-2008)[J].经济研究,2010,(11):21-34.
- [15]陈小龙,狄乾斌,吴洪宇.中国沿海城市群减污降碳协同增效时空演变及影响因素[J].热带地理,2023,43(11):2060-2074.
- [16]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.
- [17]程钰,徐成龙,刘雷等.1991-2011 年山东省工业经济增长的大气污染效应及其时空格局——以 SO<sub>2</sub> 和粉尘为例[J].地理科学进展,2013,32(11):1703-1711.
- [18]楚英豪,李京,王鹏,等.区域减污降碳协同控制——以重庆为例[J].工程科学与技术,2024,56(01):183-194.
- [19]崔连标,陈惠.京津冀城市群减污降碳的时空特征及其驱动因素研究[J].工业技术经济,2023,42(06):87-96.
- [20]杜清浩.中原城市群经济发展现状分析[J].华北水利水电学院学报(社科版),2009,25(03):57-59.
- [21]费伟良,李奕杰,杨铭,等.碳达峰和碳中和目标下工业园区减污降碳路径探析[J].环境保护,2021,49(8):61-63.
- [22]冯博,王雪青.中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(04):28-34.
- [23]龚异,王克岭,谭心.中原城市群文旅合作发展的动能与路径[J].社会科学家,2022(3):42-49.
- [24]顾斌杰,赵海霞,骆新燎等.基于文献计量的减污降碳协同减排研究进展与展望[J].环境工程技术学报,2023,13(01):85-95.
- [25]郭朝先.中国碳排放因素分解:基于 LMDI 分解技术[J].中国人口资源与环境,2010,20(12):4-9.

- [26]韩梦瑶,张泽,廖茂林.生产和消费双重视角下中国省域碳排放脱钩演变及贡献解析[J].区域经济评论,2023(05):120-130.
- [27]贺爱忠,刘盼.中国流通业 CO<sub>2</sub> 排放的因素分解和脱钩分析[J].中国环境科学,2015,35(3):953-960
- [28]胡怀敏,左薇,徐士元.长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(04):862-877.
- [29]胡涛,田春秀,李丽平.协同效应对中国气候变化的政策影响[J].环境保护,2004,32(9):56-58.
- [30]黄清煌,高明.环境规制对经济增长的数量和质量效应—基于联立方程的检验[J].经济学家,2016,(4):53-62.
- [31]黄庆华,胡江峰,陈习定.环境规制与绿色全要素生产率:两难还是双赢?[J].中国人口·资源与环境,2018,(11):140-149.
- [32]蒋金荷.中国碳排放量测算及影响因素分析[J].资源科学,2011,33(04):597-604.
- [33]金刚,沈坤荣.以邻为壑还是以邻为伴?—环境规制执行互动与城市生产率增长[J].管理世界,2018,(12):43-55.
- [34]兰天阳.实证研究我国能源经济环境系统的协调性[J].中国管理信息化,2016,(24):132.
- [35]黎文靖,郑曼妮.空气污染的治理机制及其作用效果——来自地级市的经验数据[J].中国工业经济,2016(04):93-109.
- [36]李小飞,张明军,王圣杰等.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J].环境科学,2012,33(06):1936-1943.
- [37]李效顺,曲福田,郭忠兴,等.城乡建设用地变化的脱钩研究[J].中国人口·资源与环境,2008,18(5):179-184.
- [38]李云燕,杜文鑫.京津冀城市群减污降碳时空特征及影响因素异质性分析[J].环境工程技术学报,2023,13(06):2006-2015.
- [39]李忠民,庆东瑞.经济增长与二氧化碳脱钩实证研究[J].福建论坛(人文社会科学版),2010,(2):67-72.
- [40]林寿富,王善勇, Marinova D,等. STIRPAT 模型的改进及其应用[J].统计与决策, 2018, 16 (8): 32-34.

- [41]刘海猛,方创琳,黄解军等.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J].地理学报,2018,73(01):177-191.
- [42]刘航,赵景峰,吴航.中国环境污染密集型产业脱钩的异质性及产业转型[J].中国人口·资源与环境,2012,22(04):150-155.
- [43]刘亚清,马艺翔,吴振信.京津冀地区产业结构升级对大气污染的影响[J].城市问题,2017(12):65-71.
- [44]卢鋈镞,曾穗平,曾坚,等.基于随机森林的高分辨率 PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化模拟——以中原城市群核心区为例[J].中国环境科学,2023,43(07):3299-3311.
- [45]马伟波,赵立君,王楠,张龙江,李海东.长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1273-1281.
- [46]任嘉敏,马延吉.吉林省工业增长与工业大气污染脱钩关系的时空演变[J].中国科学院大学学报,2019,36(01):72-81.
- [47]宋伟,陈百明,陈曦炜.常熟市耕地占用与经济增长的脱钩(decoupling)评价[J].自然资源学报,2009,24(9):1532-1540.
- [48]宋晓聪,沈鹏,赵慈等.中英两国 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放与经济成长的脱钩关系对比研究[J].生态经济,2021,37(12):178-182+195.
- [49]唐湘博,陈晓红.区域大气污染协同减排补偿机制研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(9):76-82.
- [50]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.
- [51]王兵,吴延瑞,颜鹏飞.中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J].经济研究,2010,(5):95-109.
- [52]王锋,吴丽华,杨超.中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J].经济研究,2010,45(02):123-136.
- [53]王涵,马军,陈民等.减污降碳协同多元共治体系需求及构建探析[J].环境科学研究,2022,35(04):936-944.
- [54]王力,冯相昭,马彤等.典型城市减污降碳协同控制潜力评价研究:以渭南市为例[J].环境科学研究,2022,35(08):2006-2014.
- [55]王少剑,高爽,黄永源等.基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演

- 变格局及预测[J].地理学报,2020,75(06):1316-1330.
- [56]杨秀妍.天津港口区域大气污染特征与对策措施研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(S2):337-340.
- [57]于洋,韩鹏,杨楠,等.中原城市群核心城市资源环境承载力研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(02):407-414.
- [58]原伟鹏,孙慧,王晶等.中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析[J].经济地理,2022,42(10):72-82.
- [59]张聪,汪鹏,赵黛青等.基于结构分解的碳排放驱动因素及行业影响分析——以广东为例[J].科技管理研究,2022,42(16):204-217.
- [60]张华,魏晓平.绿色悖论抑或倒逼减排——环境规制对碳排放影响的双重效应[J].中国人口·资源与环境,2014,24(09):21-29.
- [61]张玲琳,雷黎.基于 LMDI 方法的北京市对外交通运输能耗分解研究[J].山东科学,2013,26(06):63-68.
- [62]张为师,徐颖,惠婧璇.中国城市 CO<sub>2</sub> 排放和空气质量协同变化特征及驱动因素研究[J].中国环境管理,2023,15(02):38-47.
- [63]张雪纯,曹霞,宋林壕.中国减污降碳效率测度及影响因素研究——基于超效率 SBM-Tobit 模型[J].生态经济,2023,39(10):174-183.
- [64]赵奥,武春友.中国 CO<sub>2</sub> 排放量变化的影响因素分解研究——基于改进 Kaya 等式与 LMDI 分解法[J].软科学,2010,24(12):55-59.
- [65]郑佳佳,孙星,张牧吟等.温室气体减排与大气污染控制的协同效应:国内外研究综述[J].生态经济,2015,31(11):133-137.
- [66]周桂芳,周彦兵,胡涛.中原城市群县域碳排放时空演变及影响因素分析[J].管理科学,2023,36(03):19-34.
- [67]周丽,夏玉辉,陈文颖.中国低碳发展目标及协同效益研究综述[J].中国人口·资源与环境,2020,30(7):10-17.
- [68]周志衡,周廷刚,秦宁.中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响[J].环境科学,2022,43(12):5344-5353.
- [69]邹凯波,曹宝,张玉虎等.中美两国大气污染与经济增长关系比较分析[J].生态经济,2020,36(02):131-137.

## 致 谢

研究生三年的时光转瞬即逝，在此期间受益匪浅，生活和学习都是如此。生活中很开心加入师门大家庭，和众多师兄师姐师弟师妹们拥有美好而又鲜活的生活记忆，彼此互帮互助，带来很多温馨时刻；学习中亦是如此，在论文撰写过程中，来自同门、室友和同学朋友们的鼓励帮助使我在面临学业困难时倍感温暖，帮助我解决了很多学习上的疑惑和困难。在此，向他们表示由衷的感谢。

此外，我要感谢统计与数据科学学院的全体老师，尤其是感谢我的导师王永瑜老师，您在学术领域的渊博知识、对研究方法的独到见解以及对学术研究的高标准高要求，一直是我学术追求的楷模。在研究生期间的论文写作中，一直以耐心引导和悉心指导为我提供深刻的启发性建议，这些宝贵的意见对我论文的完善起到了关键作用，使我受益良多。

同样对家人我亦心怀感激。虽然远隔千里，但每当我情绪低落，徘徊不定时，来自家人电话的安慰和鼓励总是令我鼓足干劲，振作精神。是你们的理解和支持让我在学术道路上坚定不移，克服重重困难。

谨以此致谢最后，我要向百忙之中抽时间对本文进行审阅的各位老师表示衷心感谢，对所有在我学术生涯中给予帮助和支持的人们道一声谢谢！