

中国降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展的组态路径分析

任晓松^{1,2,3,4}, 李佳徽¹

(1. 山西财经大学管理科学与工程学院, 太原 030031; 2. 山西财经大学双碳产业研究院, 太原 030031; 3. 北京理工大学管理学院, 北京 100081; 4. 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 北京 100081)

摘要: 面对全球气候变化与环境治理的挑战, 协同推进降碳-减污-扩绿-增长对于推动生态文明建设、实现经济高质量发展与生态环境高水平保护具有重大意义。基于 TOE 理论框架, 以 2008~2023 年中国 30 个省域为研究样本, 运用修正的耦合协调度模型和面板动态 QCA 方法分析了中国降碳-减污-扩绿-增长之间的内在联系和协同机制。结果表明: ① 2008~2023 年我国降碳-减污-扩绿-增长耦合协同水平整体上呈现增长趋势, 东部地区协同程度最高, 之后依次是中部、东北和西部地区, 形成了“东部较高、中西部低”的空间分异格局。② 单一的前因条件不能构成降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同发展的必要条件, 但企业治理赋能的必要性呈现逐年递增趋势, 体现出时间效应特征。③ 各要素交互匹配产生 6 条高耦合协同组态路径, 归纳为技术驱动型、结构-社会主导型和系统协同型这 3 种模式, 其中技术驱动型是实现降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同的核心要素。④ 以技术能力基础和技术应用效能为核心条件的组态在时间上呈现明显上升趋势, 在空间分布上以技术能力基础和社会参与协同为核心条件的组态所能解释案例存在明显区域差异, 更多地分布在东北地区。探究降碳-减污-扩绿-增长协同发展的组态路径有利于推动形成绿色、低碳、循环和可持续的发展模式, 可为制定科学合理的绿色转型政策提供理论支撑和实践指导。

关键词: 降碳-减污-扩绿-增长; TOE 框架; 耦合协调度模型; 动态 QCA; 组态路径

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2026)03-1609-14 DOI: 10.13227/j.hjks.202501124

Analysis of the Configuration Path of the Coupled Coordinated Development of Carbon Reduction, Pollution Reduction, Green Expansion, and Economic Growth in China

REN Xiao-song^{1,2,3,4}, LI Jia-hui¹

(1. School of Management Science and Engineering, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030031, China; 2. Institute of Dual Carbon Industry, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030031, China; 3. School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the face of the challenges of global climate change and environmental governance, the coordinated promotion of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth is of great significance for promoting the construction of ecological civilization, achieving high-quality economic development and high-level protection of the ecological environment. Based on TOE theoretical framework, 30 provinces in China from 2008 to 2023 were used as research samples, and the modified coupling coordination degree model and panel dynamic QCA method were used to analyze the internal relationship and coordination mechanism between carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth in China. The results showed that: ① The coupling synergies of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth in China showed an overall increasing trend from 2008 to 2023, with the highest degree of synergies in the eastern region, followed by the central, northeast, and western regions, forming a spatial differentiation pattern of “higher in the eastern region and lower in the central and western regions”. ② A single antecedent condition cannot constitute the necessary conditions for the high-coupling collaborative development of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth, but the necessity of enterprise governance empowerment showed an increasing trend year by year, reflecting the characteristics of time effect. ③ The interaction and matching of various elements produced six high-coupling collaborative configuration paths, which could be classified into three modes: technology-driven, structure-social oriented, and system collaborative. Among them, technology-driven was the core element to realize the high-coupling collaboration of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth. ④ In terms of time, the configuration based on technical competence and technology application efficiency showed an obvious upward trend. In terms of spatial distribution, the cases that could be explained by the configuration based on technical competence and social participation and cooperation showed obvious regional differences and were more distributed in Northeast China. Exploring the configuration path of coordinated development of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth is conducive to promoting the formation of a green, low-carbon, circular, and sustainable development model and provides theoretical support and practical guidance for formulating scientific and reasonable green transformation policies.

Key words: carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth; TOE frame; coupling coordination degree model; dynamic QCA; configuration path

2025 年政府工作报告明确指出协同推进降碳减污扩绿增长, 加快经济社会发展全面绿色转型, 为改善生态环境质量和实现“双碳”目标指明方向^[1]。在全球气候变化和环境治理的背景下, 降碳-减污-扩绿-增长已成为实现可持续发展目标的关键^[2], 政府、企业和社会各界都在积极探索在保证经济发展的同时

改善人类生存环境和社会福祉的有效途径^[3]。《中国

收稿日期: 2025-01-11; 修订日期: 2025-04-22

基金项目: 国家社会科学基金后期项目(22FGLB051); 山西省科技战略研究专项(202403021221219, 202304031401064); 山西省回国留学人员科研教研项目(2022-131)

作者简介: 任晓松(1986-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为低碳经济与能源政策, E-mail: renxs@sxufe.edu.cn

应对气候变化的政策与行动 2024 年度报告》披露, 2023 年中国应对气候变化取得重大进展, 非化石能源消费比例提高, 可再生能源装机规模超过 15 亿 kW, 森林覆盖率达到 24.02%, 碳市场累计成交额达到 4.64 亿 t, 经济社会发展进入全面绿色转型时期^[4], 为全球环境治理提供了示范效应. 本研究旨在揭示中国降碳-减污-扩绿-增长的多维协同机制与差异化演进路径, 为实现“双碳”目标及经济高质量发展提供理论支撑.

首先, 关于降碳-减污-扩绿-增长, 学者从不同研究视角、研究方法、研究尺度及涉及行业展开. 从研究视角来看, 分析了环境规制^[5]、大气污染治理^[6]、数字政府政策^[7]以及绿色金融制度^[8]等因素对降碳减污扩绿增长的影响机制; 研究方法上, 运用双重差分模型^[7]、全局 Luenberger 生产率指数^[9]、耦合协调度模型^[10]以及多尺度地理加权回归模型^[11]剖析减污降碳与扩绿增长的发展水平及其时空演化特征; 研究尺度上, 探究了长江经济带 110 个城市^[12]、中国 30 个省域的农业领域^[13]以及上市公司^[8]的降碳减污扩绿增长实践路径与成效; 从涉及的行业来看, 对建筑业^[14]、交通运输^[15]、电力^[16]、农业^[17]及工业^[18]等进行了减污降碳协同效应的研究. 其次, 关于组态视角下降碳-减污-扩绿和增长的研究, 韩冬日等^[19]使用 fsQCA 方法研究了全过程治理驱动减污降碳协同的路径. Luo 等^[20]结合 NCA 与 fsQCA 探索低碳发展与生态环境耦合的影响因素, 揭示黄河流域可持续发展的路径. Yin 等^[21]探究了二元绿色创新策略驱动企业碳减排(CER)的协同组态效应. Wang 等^[22]基于 TOE 框架并使用 fsQCA 提出不同国家钢铁行业部门效率提升的异质性政策建议. 最后, 我国在协同推进降碳-减污-扩绿-增长过程中面临着诸多系统性的瓶颈问题: 在技术层面, 低碳技术的研发及其应用成本一直居高不下, 区域间技术扩散机制并不健全, 使得清洁能源替代以及末端治理存在技术锁定效应^[23]; 在制度维度方面, 各个部门之间的政策协同性有所欠缺, Lai 等^[24]揭示了中国市场分割在促进本地可再生能源发展的同时, 通过资源错配机制抑制了邻近地区的可再生能源发展, 且环境监管更严格的地区更倾向于市场分割; 经济结构层面, 传统产业存在着路径依赖并且绿色转型融资也存在缺口, 与此同时, 生态补偿标准相对偏低且覆盖范围有限, 难以平衡环境保护与区域发展之间的动态关系^[25]. 鉴于此, 基于 TOE(技术-组织-环境)理论框架系统性解构降碳减排、污染治理、生态扩容与经济增长组态路径的非线性交互效应, 兼具理论合理性与实践紧迫性, 通过揭示技术革新成本、组织协同效率与环境规制强度

的动态适配机制, 突破传统单一维度研究的局限性, 为跨尺度协同治理提供机制设计依据.

综上所述, 现有研究对降碳-减污-扩绿-增长进行了有益探索, 但仍存在一些不足之处: ①关于降碳-减污-扩绿和增长, 缺乏一个系统性的理论框架来全面阐释降碳-减污-扩绿-增长之间的协同关系. ②传统的耦合协调度模型依赖于系统本身的发展程度, 对于复杂系统或多个子系统的耦合关系, 模型的解释和应用存在局限. ③在探讨降碳-减污-扩绿-增长之间的关系时, 忽视多因素之间的复杂因果关系和动态演变过程. 本文的边际贡献如下: ①基于 TOE 理论, 将技术、组织和环境多个因素纳入其中, 综合考虑其对降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展的影响, 并揭示多因素之间的内在联系和协同机制. ②运用修正的耦合协调度模型对中国 30 个省域的降碳-减污-扩绿-增长进行耦合协调分析, 评估系统内部要素之间的相互作用和协同发展状况. ③使用面板动态 QCA 方法分析降碳-减污-扩绿-增长协同发展路径及其多因素联动效应, 产生技术驱动型、结构-社会主义主导型和系统协同型这 3 种模式, 其中技术驱动型是实现降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同的核心要素.

1 材料与方法

1.1 变量选取

1.1.1 降碳-减污-扩绿-增长指标体系构建

参考崔新蕾等^[10]和 Yang 等^[12]的研究, 基于生态文明建设理念与可持续发展原则, 构建降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展评价指标体系(表 1). 降碳即凭借节约资源以及提高能源使用效率的方式来减少碳排放, 积极推动清洁能源使用, 以此应对气候变化所带来的种种挑战, 采用人均碳排放量和碳排放强度表征^[26], 其衡量碳排放效率和节能减排绩效, 反映减排边际成本. 同时, 减碳重视程度通过词频分析可量化政府对减碳工作的关注程度与投入力度, 对于评估政策导向至关重要^[27]; 减污是指减少污染物的排放, 切实保护水资源、土壤和空气质量, 提升环境污染防治的精准化和科学化, 用氮氧化物排放量、二氧化硫排放量、废水排放总量、一般工业固体废物产生量和逐年 PM_{2.5} 质量浓度表示, 其直接关联到环境质量的改善与污染控制成效, 是评估环境治理效果的核心参数. 降碳与减污同根同源, 通过协同控制可以有效减少资源重复配置^[19, 28]. 扩绿是指增强生态系统的多样性、稳定性和持续性, 促进区域生态环境保护与经济社会协调发展, 采用人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率、森林覆盖率和绿色金融指数表征. 人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率和森林覆盖

率体现绿色植被覆盖情况,是衡量生态环境改善和绿化成效的重要指标.绿色金融指数是通过绿色信贷、绿色投资、绿色保险、绿色债券、绿色支持、绿色基金和绿色权益指标构建并使用熵值法进行测算^[29],反映了金融支持绿色发展的力度.它们共同构成评估绿色生态建设成效的综合维度;增长指实现经济高质量发展,通过绿色低碳化发展路径来提高经济增长质量,减少环境负面影响.人均地区生产总值和人均可支配收入是衡量经济发展水平与民众福

祉的基本指标.同时经济高质量综合指数则是对经济发展质量、效率与可持续性的综合评价^[30],确保经济增长既高效又可持续.降碳、减污、扩绿和增长彼此之间既相互独立又互相关联,降碳和减污同属“双降”目标,即追求碳排放和污染排放的降低;扩绿和增长则属于“双升”目标,即追求生态绿色扩张和经济增长^[5].针对我国长期依赖高耗能、高碳排放的产业结构,亟需推动经济向绿色低碳转型,协同推进降碳-减污-扩绿-增长,可以提升其转型效率^[31].

表 1 降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展评价指标体系

Table 1 Carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth coupling coordinated development evaluation index system

目标层	指标层	基础指标	单位	属性 ¹⁾	权重
降碳	人均碳排放量	CO ₂ 排放量/年末常住人口	t·人 ⁻¹	-	0.080 5
	碳排放强度	CO ₂ 排放量/GDP	t·万元 ⁻¹	-	0.184 1
	减碳重视程度	政府减碳重视程度词频	个	+	0.735 4
减污	氮氧化物排放量	氮氧化物排放总量	10 ⁴ t	-	0.194 3
	二氧化硫排放量	二氧化硫排放总量	10 ⁴ t	-	0.231 5
	废水排放总量	废水排放总量	10 ⁴ t	-	0.166 2
	一般工业固体废物产生量	一般工业固体废物产生总量	10 ⁴ t	-	0.173 7
	PM _{2.5}	逐年PM _{2.5} 质量浓度	μg·m ⁻³	-	0.234 3
扩绿	人均公园绿地面积	公园绿地面积/总人口	m ² ·人 ⁻¹	+	0.198 9
	建成区绿化覆盖率	建成区所有植被的垂直投影面积/建成面积	%	+	0.091 1
	森林覆盖率		%	+	0.388 0
	绿色金融指数	熵值法测算	%	+	0.322 0
增长	人均地区生产总值	GDP/年平均人口	元·人 ⁻¹	+	0.279 3
	人均可支配收入	人均可支配收入	元·人 ⁻¹	+	0.298 1
	经济高质量综合指数	熵值法测算	%	+	0.422 6

1)“+”表示正向指标,“-”表示负向指标

1.1.2 基于TOE框架降碳-减污-扩绿-增长的影响因素选取

本文基于TOE理论构建了降碳-减污-扩绿-增长协同推进的分析框架(图1),通过技术、组织和环境这3个关键维度,捕捉降碳、减污、扩绿和增长过程中涉及的技术革新、组织管理优化以及外部环境适应能力,揭示降碳-减污-扩绿-增长之间的复杂相互关系.

技术维度,选取技术能力基础和技术应用效能作为关键因素.技术能力基础包括研发投入强度和绿色创新水平^[32],技术能力基础提升可以在清洁能源技术和碳捕集与封存等环保技术领域取得更多突破,为降碳提供强有力的技术支撑.技术应用效能使用数字经济发展水平和人工智能水平表征,通过数字技术和人工智能等先进技术赋能环境治理,提升环境治理效能,促进减污降碳目标的实现.同时,数字技术应用也会促进绿色产业发展,为经济增长提供新的动力源泉,进而实现扩绿与增长目标.

组织维度,选取制度创新引擎和企业治理赋能作为衡量标准.制度创新引擎通过政府支持力度^[32]

和环境规制强度^[33]来体现,通过制定和实施严格的环境监管政策,引导企业采用更加环保的生产方式,减少污染物的排放,实现减污目标.同时,政府通过提供财政补贴、税收优惠等支持政策鼓励企业加大环保投入,推动降碳和扩绿目标的实现.企业治理赋能则强调企业在绿色发展中的主体责任,通过提高企业绿色全要素生产率和绿色治理绩效,实现经济增长与环境保护的协调发展.

环境维度,选取结构升级势能和社会参与协同来表征.结构升级势能包括产业结构高级化和全国统一大市场发展水平^[34],通过优化产业结构,促进经济向低碳环保方向转型,减少高耗能、高污染行业占比,为降碳减污提供有力支撑.同时,全国统一大市场建设有助于优化资源配置,提高市场效率,促进绿色产业和技术的扩散与应用,实现扩绿与增长的目标.社会参与协同则强调政府、企业和公众在绿色发展中的共同责任,通过提升政府环境关注度^[35]和公众环保意识,形成对环保行为的监督与激励,促进绿色消费和绿色生活方式的形成,为绿色发展创造良好的社会环境.

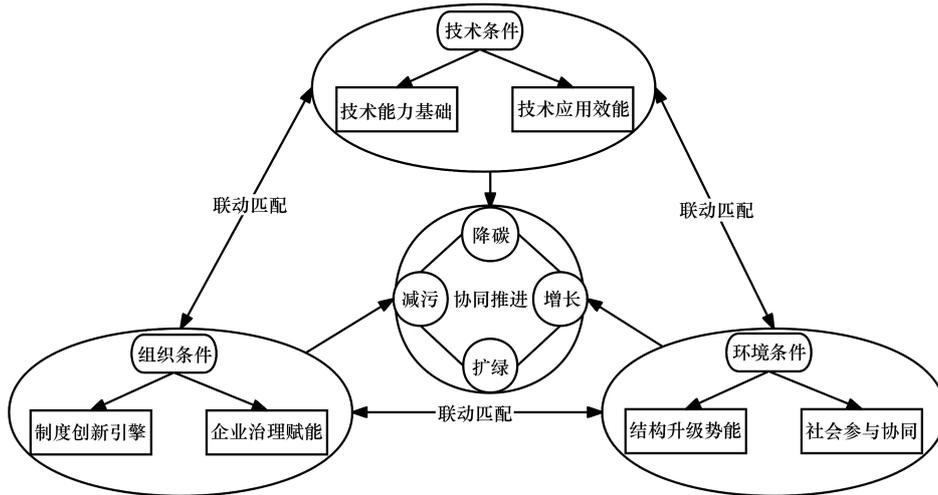


图1 理论分析框架

Fig. 1 Theoretical analysis framework

1.2 研究方法

1.2.1 熵值法

本文选用熵值法对各省降碳-减污-扩绿-增长水平进行测度. 通过将降碳、减污、扩绿和增长各指标客观赋权, 计算其综合得分. 首先, 采取极差标准化方法进行标准化处理, 将各原始数据范围限制在[0, 1]之间. 对于正向指标, 指标数值越大越好. 计算方法为:

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min}(x_j)}{\text{Max}(x_j) - \text{Min}(x_j)} \quad (1)$$

对于负向指标, 指标数值越小越好. 计算方法为:

$$Y_{ij} = \frac{\text{Max}(x_j) - x_{ij}}{\text{Max}(x_j) - \text{Min}(x_j)} \quad (2)$$

其次, 计算熵值和冗余度. 第*i*年第*j*项指标的权重为:

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \quad (3)$$

计算第*j*项指标的熵值, 当 $P_{ij}=0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$. 计算第*j*项指标的冗余度 $r_j = 1 - e_j$, r_j 越大, 其权重也就相应地越大.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

再次, 计算熵权值. 计算第*j*项指标的权重 w_j :

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^n r_j} \quad (5)$$

式中, Y_{ij} 为指原始值的标准化值, 表示第*i*年第*j*项指标的标准值; $\text{Max}(x_j)$ 和 $\text{Min}(x_j)$ 分别为所有年份中第*j*项评价指标的最大值和最小值; m 为评价年数, n 为指标数, $k = 1/\ln m$, 根据熵权法计算得出各指标的权重后, 结合所有评价指标的标准化数值, 构建综合评价函数 $U(x)$.

$$U(x) = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (6)$$

式中, i 为降碳、减污、扩绿和增长的指标数量, x_i 为降碳、减污、扩绿和增长指标的标准化数值, w_i 为指标的权重.

1.2.2 修正的耦合协调度模型

借鉴王淑佳等^[36]和王雅楠等^[37]的研究, 使用修正后的耦合协调度模型. 假设4个子系统 U_1 、 U_2 、 U_3 和 U_4 , $\text{Max} U_i$ 为 U_4 时, 耦合协调模型如下:

$$C = \sqrt[3]{1 - \frac{\sqrt{(U_4 - U_1)^2} + \sqrt{(U_3 - U_1)^2} + \sqrt{(U_2 - U_1)^2} + \sqrt{(U_4 - U_2)^2} + \sqrt{(U_3 - U_2)^2} + \sqrt{(U_4 - U_3)^2}}{6}} \times \sqrt[3]{\frac{U_1}{U_4} \times \frac{U_2}{U_4} \times \frac{U_3}{U_4}} \quad (7)$$

$$T = a_1 U_1 + a_2 U_2 + a_3 U_3 + a_4 U_4, \quad (8)$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

式中, C 表示耦合度; T 表示综合评价指数, D 表示耦合协调度, 其数值越大表明耦合协调程度越高; a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 表示各子系统的权重, 令 $a_1=a_2=a_3=a_4=\frac{1}{4}$,

即4个子系统同等重要. 采用均匀分布函数将耦合协调度分为10种类型, 如表2所示.

1.2.3 面板动态QCA方法

传统静态QCA无法分析时间维度而在处理面板数据时受到局限^[38], 面板动态QCA分析方法是一种基于面板数据的定性比较分析方法, 可以有效解决传统QCA方法的“时间盲区”在理论构建和实证检验

表2 耦合协调度等级划分标准

耦合协调度 D 值区间	协调等级	耦合协调程度
[0.0~0.1)	1	极度失调
[0.1~0.2)	2	严重失调
[0.2~0.3)	3	中度失调
[0.3~0.4)	4	轻度失调
[0.4~0.5)	5	濒临失调
[0.5~0.6)	6	勉强协调
[0.6~0.7)	7	初级协调
[0.7~0.8)	8	中级协调
[0.8~0.9)	9	良好协调
[0.9~1.0]	10	优质协调

阶段所导致的难以识别条件组态如何随时间变化的一系列问题^[39],能够同时揭示个体间差异以及这些差异随时间的变化情况^[40].它将原有的一致性扩展为汇总一致性、组间一致性和组内一致性,并提出组间一致性距离和组内一致性距离,组间一致性距离及组内一致性距离越小则表明解的跨时间和跨个案的稳定性更高^[39].为体现多种影响因素之间的相互作用关系,本文使用面板动态 QCA 方法探讨提升降碳-减污-扩绿-增长 4 个子系统高耦合协同的条件组态.

1.3 数据来源

以中国 30 个省域为研究对象(中国台湾、香港、澳门和西藏资料暂缺),研究时间跨度为 2008~2023 年.本文中所涉及数据主要来源于历年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和各省统计年鉴.绿色专利授权数来源于中国研究数据服务平台(CNRDS),二氧化碳排放量来源于中国碳核算数据库(CEADs)和全球大气研究排放数据库(EDGAR).绿色金融指数指标体系数据来源于统计局、科技部和中国人民银行等权威机构网站及《中国科技统计年鉴》《中国金融年鉴》《中国工业统计年鉴》等,缺失数据采用插值法填补.

2 结果与分析

2.1 降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展的时空分析

利用修正的耦合协调度模型测算了 2008~2023 年我国 30 个省域的降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度值.如图 2 所示,整体上全国的降碳-减污-扩绿-增长协同水平处于不断上升的趋势,反映了我国在生态文明建设与经济绿色发展方面的积极进展.分区域来看,东部地区的耦合协同程度最高,与崔新蕾等^[10]结果相同.从 2009 年起,东部耦合程度达到勉强协调,2018~2023 年处于初级协调程度.得益于发达

的经济发展水平、先进的环保技术和较高的环保意识,东部地区在节能减排、污染治理、生态建设和经济增长方面取得了显著成效.中部地区和东北地区紧随其后,分别于 2014 年和 2016 年达到勉强协调的耦合程度,且东北地区至 2023 年一直处于勉强协调,中部地区于 2022 年进入初级协调的程度.这两大区域产业结构调整和绿色发展转型也取得了一定进展,但相较于东部地区,其经济基础、技术水平和环保投入等方面仍存在一定差距.西部地区的协同程度也在逐年上升但相对较低,于 2021 年才达到勉强协调的耦合程度,与该地区经济基础相对薄弱、环保技术和资金投入不足等因素有关,导致降碳-减污-扩绿-增长协同推进面临较大挑战.因此,未来需要针对不同地区的实际情况,制定差异化的政策措施,加强区域间的合作与交流,共同推动全国降碳-减污-扩绿-增长协同程度的持续提升.

2008 年与 2023 年降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度空间分布如图 3 所示.我国降碳-减污-扩绿-增长耦合协同程度在时序变化上整体呈现增长趋势,空间分布上呈现“东部较高、中西部低”的分异格局.2008 年,除了浙江省、广东省、北京市、福建省、上海市和辽宁省耦合协调度值超过 0.5 即处于勉强协调之外,其他省域均处于失调状态.2023 年,耦合程度达到勉强协调程度的省域占比 90%,其中广东省、江苏省和浙江省的耦合协调度超过 0.7 属于中级协调,宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区处于濒临失调,青海省处于轻度失调.随着国家对中西部地区的支持力度加大,中西部地区耦合协同程度也在逐步提升,其中西部地区的耦合协调度值增幅最大为 56.5%.这一趋势反映了我国政府在生态文明建设持续努力和成效,通过不断推动绿色发展,提高资源利用效率,促进了降碳-减污-扩绿-增长之间的良性互动.

2.2 基于 TOE 框架的降碳减污扩绿增长协同发展的组态路径

2.2.1 变量校准

为进一步探索不同前因条件组合对结果变量的影响路径,使用 R 软件对原始数据进行统一校准.参考唐湘博等^[41]的研究,以降碳、减污、扩绿和增长这 4 个子系统耦合协调度值作为结果变量,以 TOE 框架技术、组织与环境 6 个影响因素作为条件变量.参考 Ragin 等^[42]采用直接校准法,将 95%、50% 和 5% 分位数设为校准锚点,分别表示完全隶属点、交叉点和完全不隶属点,进而将原始变量数据转化为 0~1 的模糊隶属数值.变量说明及校准如表 3 所示.

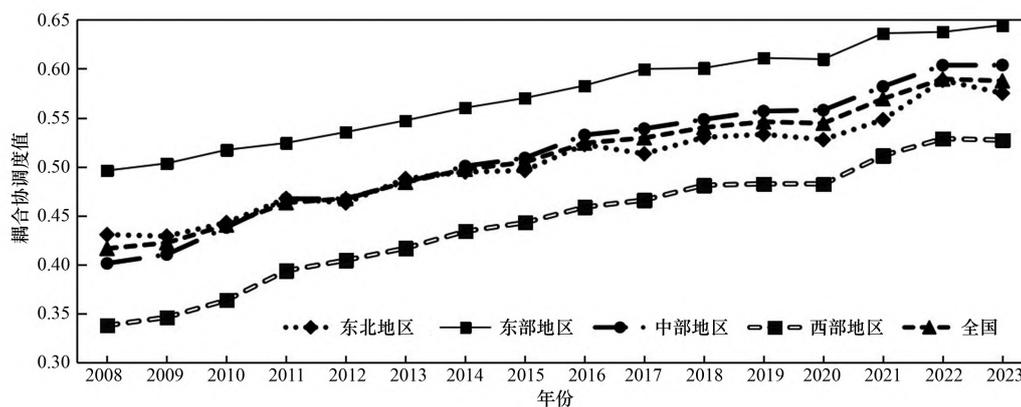


图2 2008-2023年中国四大区域降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度值

Fig. 2 Coupling coordination values of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth in China's four major regions from 2008 to 2023

2.2.2 必要性分析

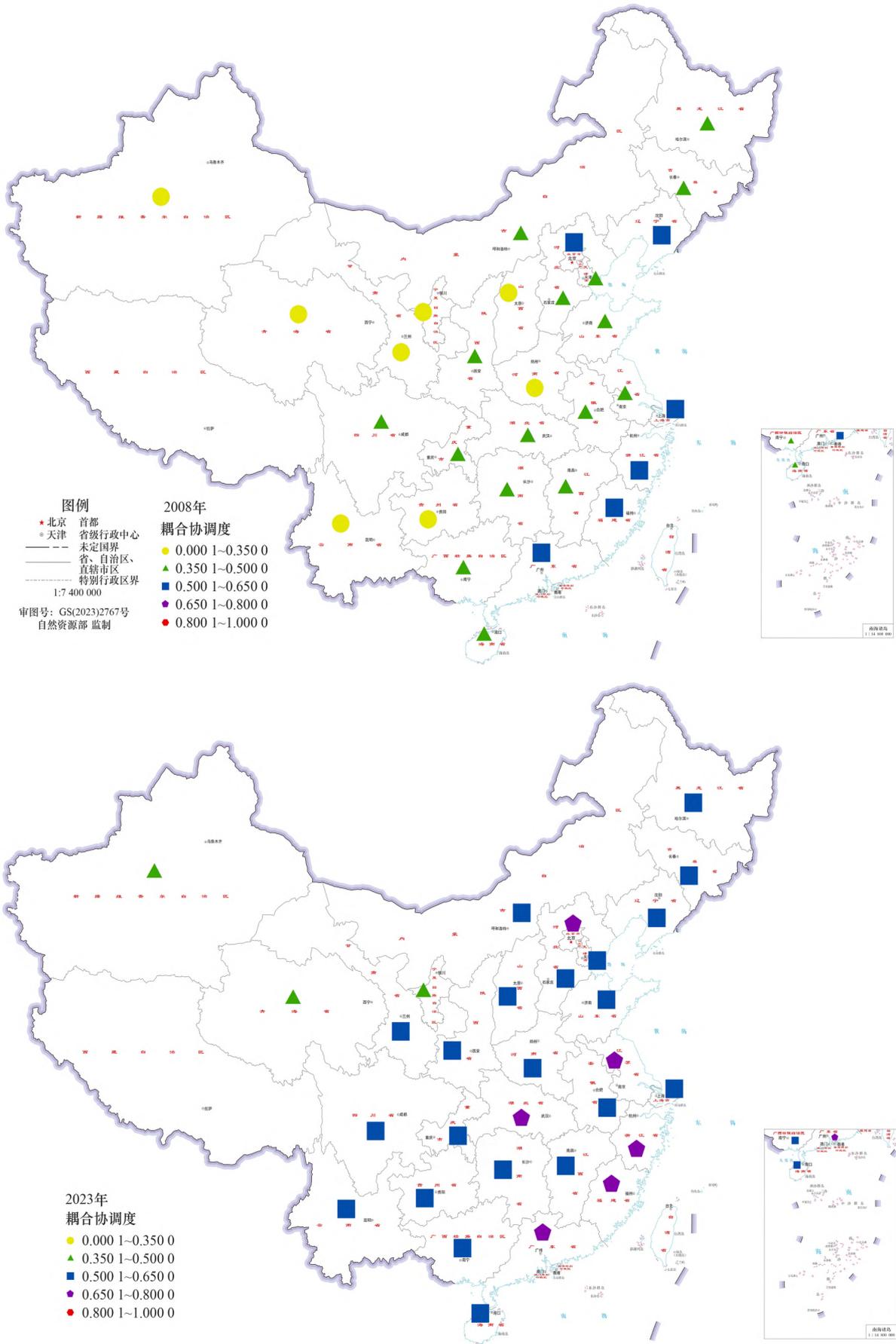
在进行条件变量的组态分析之前需要逐一对各条件必要性检验,以验证单项条件变量是否属于构成结果变量的必要条件,通常使用一致性和覆盖度指标作为判断标准^[43].当一致性大于0.9并具有足够的覆盖度时,该条件变量构成结果变量的必要条件.表4显示,对中国各省域降碳-减污-扩绿-增长高耦合协调度必要条件分析中,各条件变量的一致性均低于0.9,表明单一影响因素不足以构成降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同发展的必要条件.另外,在降碳-减污-扩绿-增长低协同结果中,低技术能力基础($\sim X_1$)和低技术应用效能($\sim X_2$)的一致性均大于0.9,且其覆盖度超过0.5,表明低技术能力基础($\sim X_1$)和低技术应用效能($\sim X_2$)可能是解释降碳-减污-扩绿-增长低耦合协同的必要条件.进一步通过条件变量与结果变量的X-Y散点图发现(图4),接近1/3的案例点均分布在对角线以上,且多数案例点均分布在右侧Y轴附近^[44],表明尽管该条件变量的一致性通过检验,但依然无法构成降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同的必要条件,这一结果表明降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展的复杂性,需要相互间的联动匹配才能影响高耦合协同结果发生.因此,需要对条件变量的组态效应进行研究.

在QCA面板数据分析中,当调整距离小于0.2时,汇总一致性精确度较高,可作为判断依据.当一致性调整距离大于0.2时,前因条件必要性可能存在时间效应或地区效应,参考荆玲玲等^[45]需要进一步探究该条件的必要性,对所有组间一致性调整距离大于0.2的条件变量分析.根据表4组间一致性调整距离大于0.2共有15种情况,其中有5种情况的汇总一致性超过0.9,且组间覆盖度超过0.5,对其进行进一步的散点图分析发现也未通过必要性检验.但是由图5可以看出,企业治理赋能(X_4)与结果变量降

碳-减污-扩绿-增长高协同发展的组间一致性水平呈上升趋势,呈现一定的时间效应,主要源于政策环境、市场机制和技术创新的三重驱动.首先,政策层面加速完善,中国“双碳”目标的确立及《减污降碳协同增效实施方案》等政策文件的出台,强化了环境规制对企业行为的约束性要求,倒逼企业通过绿色技术创新和清洁生产流程优化提升全要素生产率,以应对碳排放配额限制和污染排放标准收紧.其次,市场机制作用凸显,ESG理念在资本市场加速渗透,投资者对企业的环境表现和治理能力关注度显著提升,促使企业通过提升绿色治理绩效获取融资优势.再次,技术进步与产业协同深化,工业园区循环化改造、固废“点对点”利用等实践通过数字技术优化资源配置效率,使得绿色全要素生产率提升与企业减污降碳目标的实现形成正向反馈.例如浙江杭州湾上虞经济技术开发区利用数字孪生应用探索出减污降碳协同创新路径.因此,尽管企业治理赋能(X_4)未构成高协同结果的必要条件,但其在政策约束、市场激励和技术赋能下的边际效应逐年增强,成为推动多目标协同的重要杠杆.

2.2.3 条件组态分析

参考张明等^[46]的研究,运用R展开面板数据的条件组态分析.将一致性、PRI一致性和频数阈值分别设置为0.8、0.7和5,纳入分析的案例保留了总数的75%以上.基于中间解为主、简单解为辅的原则,可将条件分为:核心存在条件(即简单解与中间解共同存在的条件)、核心缺失条件(即简单解与中间解共同缺失的条件)、边缘存在条件(仅存在于中间解中的条件)以及边缘缺失条件(仅存在于中间解中的缺失条件).其中,核心条件对结果有重要影响,而边缘条件则起辅助作用^[42].在条件组态分析中选择取消方向预设,即单个前因条件存在或缺失都可促成降碳-减污-扩绿-增长协同的发展.结合中间解与简约



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2767号的标准地图制作,底图无修改

图3 2008年和2023年降碳-减污-扩绿-增长耦合协同空间分布

Fig. 3 Coordinated spatial distribution of carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth in 2008 and 2023

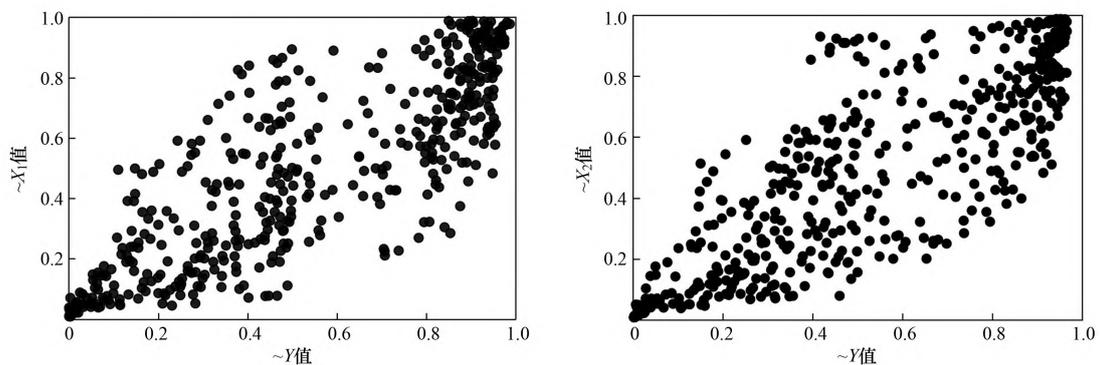
表 3 变量说明与校准
Table 3 Description and calibration of variables

变量类型	一级指标	二级指标	观测变量	完全隶属	交叉点	完全不隶属
条件变量	技术	技术能力基础(X_1)	研发投入强度	0.408 3	0.073 8	0.023 4
			绿色创新水平			
	技术应用效能(X_2)	数字经济发展水平	0.524 4	0.183 3	0.032 1	
		人工智能水平				
	组织	制度创新引擎(X_3)	环境规制强度	0.343 6	0.137 4	0.056 3
			政府支持力度			
环境	企业治理赋能(X_4)	企业绿色全要素生产率	0.893 5	0.475 7	0.126 5	
		企业绿色治理绩效				
环境	结构升级势能(X_5)	产业结构高级化	0.468 8	0.162 9	0.037 6	
		全国统一大市场发展水平				
环境	社会参与协同(X_6)	政府环境关注度	0.538 5	0.252 2	0.044 7	
		公众环保意识				
结果变量	降碳-减污-扩绿-增长	耦合协调度值(Y)	耦合协调度值	0.668 7	0.511 1	0.330 8

表 4 必要条件分析¹⁾
Table 4 Analysis of necessary conditions

条件变量	降碳-减污-扩绿-增长高协同				降碳-减污-扩绿-增长低协同			
	汇总一致性	汇总覆盖度	组间一致性 调整距离	组内一致性 调整距离	汇总一致性	汇总覆盖度	组间一致性 调整距离	组内一致性 调整距离
X_1	0.799	0.898	0.066	0.305	0.432	0.482	0.337	0.592
$\sim X_1$	0.539	0.489	0.241	0.483	0.908	0.817	0.031	0.184
X_2	0.809	0.892	0.219	0.190	0.457	0.500	0.560	0.466
$\sim X_2$	0.546	0.504	0.372	0.403	0.901	0.824	0.136	0.127
X_3	0.526	0.556	0.306	0.403	0.769	0.807	0.136	0.236
$\sim X_3$	0.818	0.781	0.144	0.184	0.577	0.547	0.267	0.408
X_4	0.755	0.779	0.477	0.196	0.519	0.531	0.621	0.121
$\sim X_4$	0.545	0.533	0.586	0.167	0.784	0.760	0.442	0.184
X_5	0.796	0.882	0.153	0.219	0.469	0.516	0.446	0.477
$\sim X_5$	0.563	0.517	0.297	0.408	0.893	0.813	0.066	0.247
X_6	0.791	0.828	0.166	0.288	0.505	0.524	0.280	0.495
$\sim X_6$	0.546	0.527	0.363	0.477	0.835	0.798	0.127	0.242

1)“~”表示逻辑运算中的“非”



“~”表示逻辑运算中的“非”

图 4 必要性条件检验 X-Y 散点图

Fig. 4 Necessity condition test X-Y scatter plot

解确定组态数量和各条件的重要性程度,最终分析结果如表 5 所示,有 6 种促成降碳-减污-扩绿-增长高协同发展的组态。

(1)汇总结果分析 6 条路径组态一致性均超过

0.75 的门槛,表明各组态都是实现高协同发展的充分条件。总体一致性为 0.939,表明在符合这 6 种组态特征的案例中,有 93.9% 的省域降碳-减污-扩绿-增长协同程度较高;总体覆盖率为 0.781,表明上述组态能

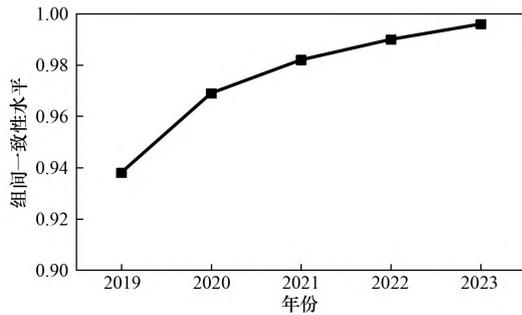


图5 2019-2023年X₄与Y的组间一致性水平变化
Fig. 5 Changes of inter-group consistency levels of X₄ and Y from 2019 to 2023

够对约78.1%降碳-减污-扩绿-增长高协同的案例产生解释作用。同时,单个组态路径的组间一致性调整距离和组内一致性调整距离均低于0.2,表明总体路径具有较高解释力,生成的组态是降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同的充分条件。6个条件组态可归纳为3种类型,分别是技术驱动型、结构-社会主导型和系统协同型。其中技术驱动型包含组态1、组态2和组态5,制度-社会主导型主要是组态4和组态6,组态3为系统协同型。

技术驱动型。组态1、组态2和组态5共性在于以技术能力基础(X₁)和技术应用效能(X₂)为核心条件,其符合创新扩散理论中“技术渗透导致系统性变革”的规律,揭示研发投入与数字技术通过知识溢出效应提升多目标协同效率的核心作用。不同之处在于对边缘条件的适配性,组态1通过结构升级势能(X₅)弥补制度创新引擎(X₃)缺失,其组态路径覆盖降碳-减污-扩绿-增长高协同案例的比例达59.6%,组态2叠加企业治理赋能(X₄)提升技术转化效率,覆盖结果案例的比例为58.6%,组态5则依赖制度创新引擎

(X₃)和社会协同参与(X₆),体现出技术主导下的条件替代效应。

结构-社会主导型。该范式以结构升级势能(X₅)与社会参与协同(X₆)为核心驱动,其逻辑符合制度经济学中“规则重构驱动行为变革”的命题,凸显出结构升级势能与社会参与协同的规范性压力。具体表现为组态4通过结构升级势能(X₅)破除绿色技术壁垒,降低了跨区域环境治理的交易成本,叠加社会参与协同(X₆)倒逼企业采用清洁生产工艺;组态6则在制度创新引擎(X₃)核心缺失时,借助技术能力基础(X₁)与社会参与协同(X₆)倒逼绿色技术研发,形成社会资本补偿机制,通过“绿色创新-社会监督”双轮驱动实现局部协同。

系统协同型。组态3揭示了“技术-结构-社会”协同驱动降碳-减污-扩绿-增长协调发展的核心机制:技术能力基础(X₁)与技术应用效能(X₂)通过“研发-应用”闭环强化绿色技术渗透率,降低减排边际成本;结构升级势能(X₅)依托产业高级化与统一市场优化资源配置效率,同时社会参与协同(X₆)通过政策聚焦与公众监督形成环境治理压力传导,二者共同破解“绿色溢价”约束。该路径证实技术创新与制度变革的互补性,强调绿色转型需以技术经济系统升级为基础,以社会治理嵌入为保障,实现环境目标与经济效率的动态平衡。

整体表明组态1的原始覆盖度最高,表明技术驱动型路径在大多数省域对于提升降碳-减污-扩绿-增长高协同具有较广泛的适用性;而组态6的组态覆盖度较低,说明该发展路径可能只适合部分地区。6条组态路径的唯一覆盖度均不高,说明各省域实现降碳-减污-扩绿-增长高协同发展的路径依赖性不强,

表5 高组态分析¹⁾
Table5 High configuration analysis

条件变量	组态1	组态2	组态3	组态4	组态5	组态6
X ₁	●	●	●		●	●
X ₂	●	●	●	■	●	□
X ₃	□				■	○
X ₄		■		■	■	□
X ₅	■	■	●	●		□
X ₆			●	●	■	●
一致性	0.961	0.968	0.983	0.980	0.978	0.946
PRI	0.922	0.938	0.967	0.958	0.925	0.715
原始覆盖度	0.596	0.586	0.567	0.551	0.334	0.295
唯一覆盖度	0.029	0.009	0.023	0.048	0.005	0.041
组间一致性调整距离	0.026	0.017	0.013	0.017	0.017	0.057
组内一致性调整距离	0.104	0.104	0.075	0.104	0.086	0.109
总体一致性				0.939		
总体PRI				0.883		
总体覆盖度				0.781		

1) ●表示核心条件存在, ■表示边缘条件存在, ○表示核心条件不存在, □表示边缘条件不存在;空白表示条件可能存在也可能不存在

具有可替代性.其次,降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同需依托核心要素的动态适配,不同区域可依据禀赋差异选择技术驱动型、结构-社会主导型和系统协同型路径.同时,制度创新引擎(X_3)边缘化普遍存在,表明当前环境规制与政策支持的“制度势能”尚未充分释放,可能制约长效协同机制的建立.因此,政策设计需突破仅仅依赖单一技术或者市场路径的局限,要进一步强化制度创新与企业治理相互嵌入的程度,以破解多元主体协同惰性与利益冲突瓶颈.

(2)组间结果分析 根据表5高组态结果所示,各组态的组间一致性调整距离分别为0.026、0.017、0.013、0.017、0.017及0.057,均小于0.2,表明不存在显著的时间效应.由2008~2023年各条件组态组间一致性水平发现(图6),6条组态组间一致性水平均超过0.75,即每个组态所包含的前因条件组合均能系统地解释降碳-减污-扩绿-增长高协同发展.进一步分析发现,除了组态1和组态6之外,其它组态路径组间一致性几乎保持在稳定水平,表现为基本重叠.而组态1和组态6在2008~2015年相较于其它组态组间一

致性水平较低,但在2015年之后组态1持续保持波动增长,组间一致性水平接近1;组态6在所有组态中增幅最大,在2015年之后几乎达到所有组态中组间一致性水平最高的组态.究其原因,可能与该时期中国处于经济转型和结构调整的关键时期有关,在此期间,组态1中技术能力基础(X_1)和技术应用效能(X_2)虽作为核心条件存在,但可能受到外部经济环境、政策不确定性等因素的影响,导致其在推动耦合协同方面的作用未能充分发挥.自2015年以来,中国经济步入新常态阶段,绿色发展理念逐渐深入人心,政府也进一步加大对环境保护和生态文明建设的支持力度.在此背景下,技术能力基础和技术应用效能的关键作用逐渐显现,推动了降碳-减污-扩绿-增长耦合协同水平的持续提升.与此同时,随着公众环保意识的提高和政府环境关注度的增加,社会参与在推动绿色发展方面的作用日益凸显.组态6技术能力基础(X_1)和社会参与协同(X_6)的强有力支撑可能在一定程度上弥补了边缘条件缺失的不足,从而实现耦合协同水平的显著提升.

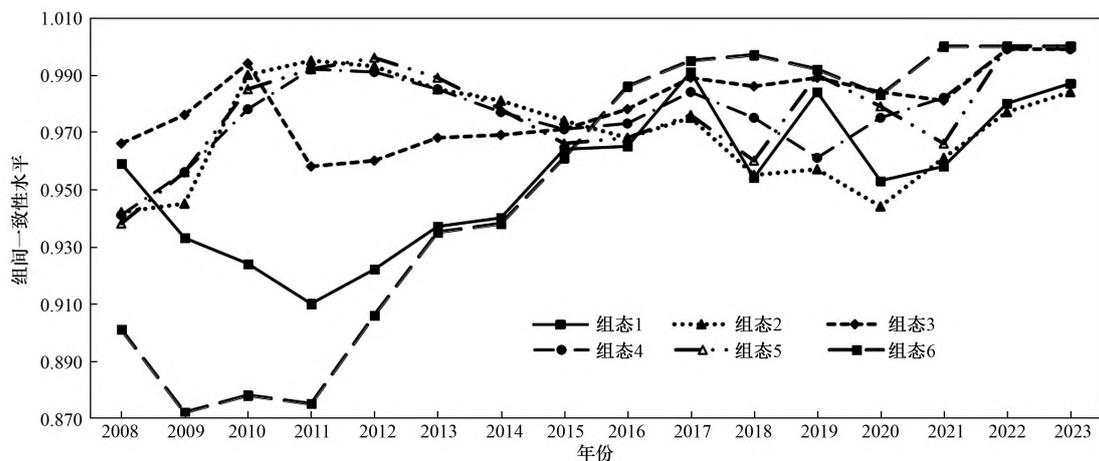


图6 各条件组态组间一致性水平变化

Fig. 6 Consistency level changes among conditional configuration groups

(3)组内结果分析 在表5的降碳-减污-扩绿-增长高协同组态结果中,6个组态的组内一致性调整距离均小于0.2,说明每个组态的解释力度在各省域不存在显著差异.而组内一致性调整距离均大于组间一致性调整距离,表明组态的案例效应强于时间效应,应该根据所在地区降碳-减污-扩绿-增长实际情况协同发展.组内一致性分析基于省级层面,系统检验各条件组态在样本期内是否构成目标结果的充分条件^[47].结果表明,在6个条件组态中,除了新疆维吾尔自治区一致性较低之外,绝大部分省域一致性在0.9以上.而且2008~2023年各个省域并不遵循一致的条件组态,如贵州省在组态2和组态3中一致性水平较高,河南省在组态1中的一致性达到0.9以上,

而青海省在组态5的一致性更高,另外天津市在组态1和组态2中相较于其它的组态一致性较低,宁夏回族自治区在组态3、组态4和组态6中一致性更高.因此,有必要对不同年份的不同区域在适宜路径做进一步深入分析.

为了进一步探索各组态在地理空间区域分布情况,采用组内覆盖度差异反映各组态覆盖案例的地区分布情况^[48],通过单因素方差分析与Kruskal-Wallis秩和检验,探讨各组态在东部地区、东北地区、中部地区和西部地区的覆盖度分布是否具有显著差异^[49].如表6所示,组态5不满足正态性检验,采用Kruskal-Wallis秩和检验;组态1、组态2、组态3、组态4和组态6满足正态性检验和方差齐性检验,采用单

表6 组态覆盖度正态分布检验结果¹⁾

项目	样本量(Obs)	标准误(Se)	统计量(W)	显著性(P)
组态 1	30	0.0362	0.9800	0.8260
组态 2	30	0.0349	0.9793	0.8064
组态 3	30	0.0393	0.9718	0.5887
组态 4	30	0.0363	0.9778	0.7631
组态 5	30	0.0375	0.8805	0.0029***
组态 6	30	0.0269	0.9715	0.5802

1)***表示 $P < 0.01$

因素方差分析。

由表7和表8可知,组态1、组态2、组态3、组态4和组态5所能解释的案例分布并没有显著的地区差异,但各区域存在一定程度的组态偏好差异,结合区域覆盖度均值发现(表9),首先,在东部地区,组态1的显著优势印证了技术创新和数字经济的双轮驱动效应,依托强大的技术能力基础和数字经济先发优势,形成了“研发强度-绿色创新-智能应用”的闭环体系,通过优化要素流动和有效配置资源实现了高耦合协同。该结果与长三角、珠三角等区域的实践高度一致,其技术溢出效应与市场化机制构成了东部绿色转型的核心动能。其次,中部地区的组态2、组态3和组态4集中分布,凸显了产业结构升级与企业治理赋能的支撑作用。中部地区作为传统产业转型的主战场,通过提高绿色全要素生产率和构建高级化产业体系,实现了经济增长与生态改善的兼容。这种“结构升级-企业响应”的协同模式,本质上是通过提高要素替代效率来抵消制度成本的约束,体现了转型期的阶段性特征。最后,西部地区组态2和组态4覆盖度较高,反映了该区域技术应用效能(X_2)与结构升级势能(X_5)的协同驱动作用:一方面,数字技术的应用可以突破传统要素的约束,通过优化资源配置,提高绿色全要素生产率;另一方面,全国统一大市场的建设通过跨区域要素流动加强了技术扩散和产业协同,弥补技术能力基础(X_1)的不足。而组态5的区域覆盖度在西部地区较高源于其嵌套式互补机制:核心层的技术能力与应用效能形成创新闭环,边缘层的制度创新引擎(X_3)与社会参与协同(X_6)通过制度压力与市场激励迫使企业升级绿色治理,这种“内生技术驱动+外生制度助推”的组态特征更符合西部地区技术追赶与生态约束并存的现实情况,表明绿色转型过程需要实现技术创新体系的内生演化与制度环境适应性变化之间的协同互动,通过两者的动态耦合,促进可持续发展。

而组态6所能解释案例的空间分布存在显著地区差异。由表9所示,组态6对应的解释案例主要分布在东北地区,揭示了老工业基地转型的特殊路径

表7 Kruskal-Wallis秩和检验结果

项目	均值(Mean)	标准差(SD)	卡方(Chi-square)	显著性(P)
组态 5	0.393 3	0.205 2	2.653 8	0.448 1

依赖性。技术能力基础(X_1)与社会协同参与(X_6)形成交互补偿,传统工业技术积累通过工艺改进来实现减排。然而,数字经济滞后、产业结构僵化与企业治理缺位导致转型陷入“技术惯性-制度补偿”的闭环,虽然短期内保持了耦合效应,但面临边际效益递减的风险。未来需要突破技术范式转型与全国统一市场建设双重制约,推动绿色转型从路径依赖向范式创新过渡。此外,新疆地区组态路径的检验结果中低一致性、高覆盖度的特征,源于区域治理独特的复杂性。一方面,作为边疆民族地区,新疆政策实践具有显著的“多维目标耦合”特征:经济发展、社会稳定和文化融合等多个政策目标需要同步推进,导致同一组态路径在不同目标场景下产生差异化的效果。例如南疆地区侧重社会稳定目标时,产业政策的就业效应可能因安全考量而被稀释,而北疆地区则更注重经济指标,这种目标权重差异直接削弱了条件组合与结果间的稳定关联。另一方面,新疆“大分散、小聚居”的民族分布格局和绿洲的经济地理结构,形成了“政策响应碎片化”现象:乌鲁木齐都市圈的政策传导效率显著高于偏远牧区,边境口岸城市的开放政策与腹地生态保护区的开放政策形成制度差距,这种空间分异导致相同条件组合在不同子区域引发的结果强度不同。此外,新疆作为“一带一路”枢纽的特殊定位,其政策体系持续面临国际地缘政治变化的外部冲击(如中亚局势波动对边境贸易政策的影响),这种动态外部性进一步模糊了条件组合与结果间的因果关系边界。该矛盾反映了区域转型缺乏路径适应性,需要通过产业结构深度脱碳、治理体系多元协调和创新生态均衡配置等方式进行系统优化。

表8 单因素方差分析结果¹⁾

项目	均值(Mean)	标准差(SD)	统计量(F)	显著性(P)
组态 1	0.590 9	0.198 2	1.519	0.233
组态 2	0.606 6	0.191 4	1.74	0.183
组态 3	0.561 5	0.215 1	1.246	0.313
组态 4	0.600 5	0.198 9	2.033	0.134
组态 6	0.328 2	0.147 5	3.565	0.027 7**

1)** $P < 0.05$

2.2.4 稳健性检验

参考杜运周等^[50]的研究,本文采用3种方法进行稳健性检验:①将一致性阈值由0.8提高至0.85,保持

表9 区域组态覆盖度均值

Table 9 Average regional configuration coverage

区域	组态1	组态2	组态3	组态4	组态5	组态6
东北地区	0.395 0	0.386 7	0.395 0	0.586 7	0.286 7	0.390 0
中部地区	0.605 7	0.673 2	0.668 8	0.673 0	0.448 2	0.385 0
东部地区	0.661 3	0.630 8	0.583 0	0.485 1	0.321 6	0.217 5
西部地区	0.572 2	0.608 4	0.528 7	0.669 7	0.457 1	0.380 9

案例频数和PRI一致性阈值不变,所得到的组态与原结果完全一致.②将PRI一致性阈值由0.7提高至0.75,保持案例频数和一致性阈值不变,得到6条组态路径,其路径与原结果基本一致.③将案例频数阈值设置为5,保留了85%以上的案例,得到4条组态路径,与调整案例频数阈值前的结果完全一致.

3 讨论

建立区域差异化协同机制,加强路径适应.基于组态路径的时空异质性,建议构建“区域-时序”双维策略框架.针对东部地区的技术驱动型路径(组态1、组态2和组态5),依托长三角、珠三角等国家级自主创新示范区,重点加强绿色技术研发和数字化平台建设,建立跨省技术共享联盟,促进技术能力基础(X_1)与技术应用效能(X_2)的协同优化.西部地区依托可再生能源禀赋,构建“绿色技术创新+数字经济”双轮驱动机制,通过光伏制氢、智慧能源管理等场景创新,将组态2的技术优势转化为产业动能;其次,利用全国统一市场扩大“绿电入网”规模,同步强化公众意识,通过碳普惠制度引导居民参与减排,释放组态4的社会协同潜力;再次,针对组态5中制度创新引擎(X_3)的杠杆效应,设计差异化环境税制——对高碳行业实施绿色补贴,对绿色技术企业给予研发加计扣除,形成“政策激励-企业响应-公众监督”的闭环.三重路径需以黄河流域生态补偿机制为纽带,联动西北风光电基地与西南水电资源,构建跨区域绿色低碳产业链.东北地区需突破组态6的路径锁定,建议在沈阳、长春等老工业基地实施“绿色制造技术改造专项”,通过税收优惠引导企业更新清洁生产设备,并建立“东北技术对接平台”,促进成熟绿色技术的梯度转移.

深化制度创新协同效应,解决政策执行难题.针对制度创新引擎(X_3)普遍边缘化的问题,建议从三方面提升:其一,在现有的碳排放交易体系中增加“绿色技术创新积分”,允许企业通过技术减排成果兑换额外配额,激发企业自主创新的动力.其二,强化区域协同治理机制,借鉴京津冀大气污染联防联控经验,在黄河流域、长江经济带等区域建立跨行政区环境治理委员会,赋予统一规划、统一标准及统一执法

权.其三,针对新疆等边疆地区的组态适配矛盾,建立“多目标动态平衡决策系统”,通过大数据平台实时监测经济发展、生态保护与社会稳定指标的协同程度,实施差异化考核权重.同时,在雄安新区、成渝双城经济圈等试点区域探索环境税、绿色信贷和生态补偿的协同机制.

完善技术扩散梯度体系,促进创新要素均衡配置.首先在东部发达地区建立绿色技术创新枢纽,重点突破新储能、智能电网等领域的关键技术瓶颈,通过建立专利开源共享机制,最大限度发挥技术溢出效应.中部地区要根据传统重工业多路径结构升级和企业治理优化的需要,布局产业转型升级试点平台,实施系统的绿色工艺替代工程,配套研发成本和优惠政策抵扣,增强企业创新动力.西部地区着力打造技术应用场景示范带,通过“揭榜挂帅”需求对接机制,实现东部技术供给与西部特色应用场景的精准匹配,例如宁夏的“东数西算”工程枢纽建设实施方案提出鼓励开展分布式能源参与绿电交易.针对东北地区产业结构固化,应将重工业绿色转型纳入老工业基地振兴战略框架,通过设备投资补贴政策引导清洁生产技术采纳,并建立强制性技术对标机制形成产业升级倒逼效应.该体系通过区域协同创新机制,既增强原有技术的创新潜力,又促进技术接受者的吸收和转化,形成“研发-转化-应用”的完整价值链条,有效破解技术扩散的空间断层和产业锁定困境.

4 结论

(1)2008~2023年我国各省域降碳-减污-扩绿-增长耦合协同水平整体上呈现增长趋势,平均水平经历了从2008年的轻度失调到2023年初级协调的阶段式跨越.其中东部地区的耦合协同程度最好,中部地区和东北地区紧随其后,西部地区相较于其他地区协同水平较低,但其耦合协调值增幅最大,达到56.5%,形成了“东部较高、中西部低”的空间分异格局.

(2)单一条件的必要性分析结果中各个前因条件并不单独构成中国降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同的必要条件,但是企业治理赋能因素的必要性呈现逐年递增趋势,体现时间效应特征.各个条件变量与降碳-减污-扩绿-增长耦合协同发展存在复杂因果关系,共产生6条组态路径,每种组态模式需要多个因素协同互动、共同作用.根据组态的核心条件特征,产生技术驱动型、结构-社会主导型和系统协同型3种模式,其中技术驱动型是实现降碳-减污-扩绿-增长高耦合协同的核心要素.

(3)各条件组态的组间一致性均超过0.75,前因条件组合能有效解释降碳-减污-扩绿-增长的高水平协同发展.虽然6条组态的组间一致性距离均小于0.2,并未表现出显著的时间效应,但是组态1和组态6呈现出明显的动态演化特征:2015年之前受经济转型不确定性影响,其协同效能尚未充分释放;2015年之后随着绿色发展理念深化推动技术效能释放及公众参与提升,组态1通过技术双轮驱动稳定性持续增强,组态6则依托技术-社会协同突破制度约束,实现高耦合协同水平跃升,凸显出政策引导与多元共治对生态经济转型的关键支撑作用.

(4)不同省域实现降碳-减污-扩绿-增长的高协同发展具有多元路径,各组态的案例效应强于时间效应,应该根据所在地区降碳-减污-扩绿-增长实际情况协同发展.通过单因素方差分析与Kruskal-Wallis秩和检验,发现组态6所能解释案例存在明显区域差异,更多地分布在东北地区,未来需要突破技术范式转型与全国统一市场建设双重制约,推动绿色转型从路径依赖向范式创新过渡.

参考文献:

- [1] 闫坤,唐丹彤,甘天琦.中国农业减污降碳协同效应的量化评估与动态演化——基于边际减排成本的分析[J].中国农村经济,2024,(9):22-41.
Yan K, Tang D T, Gan T Q. Quantitative evaluation and dynamic evolution of the synergistic effect of agricultural pollution and carbon reduction in China: an analysis based on marginal abatement cost[J]. Chinese Rural Economy, 2024, (9): 22-41.
- [2] 罗良文,雷朱家华.中国碳市场政策的减污降碳协同效应[J].资源科学,2024,46(1):53-68.
Luo L W, Leizhu J H. Synergetic effect of China's carbon market policies on pollution reduction and carbon reduction[J]. Resources Science, 2024, 46(1): 53-68.
- [3] Fujimori S, Krey V, van Vuuren D, et al. A framework for national scenarios with varying emission reductions[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(6): 472-480.
- [4] 陈诗一,祁毓.“双碳”目标约束下应对气候变化的中长期财政政策研究[J].中国工业经济,2022,(5):5-23.
Chen S Y, Qi Y. Research on medium-and long-term fiscal policies to address climate change under the constraints of “carbon peak and neutrality” target[J]. China Industrial Economics, 2022, (5): 5-23.
- [5] 夏学超,孙慧,祝树森,等.多元主体环境规制组合如何实现降碳减污扩绿增长协同推进[J].中国人口·资源与环境,2024,34(8):22-35.
Xia X C, Sun H, Zhu S S, et al. How can a combination of environmental regulations by multiple stakeholders achieve the synergistic advancement of carbon reduction, pollution control, green expansion, and economic growth? [J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(8): 22-35.
- [6] 刘华军,邵明吉,郭立祥.新时代的中国大气污染治理之路——历程回顾、成效评估与路径展望[J].商业经济与管理,2023,(2):66-79.
Liu H J, Shao M J, Guo L X. China's path of air pollution control in the new era: process review, effectiveness evaluation and approach outlook[J]. Journal of Business Economics, 2023, (2): 66-79.
- [7] Li H, Lu J. Driving effect of digital government policy on synergy in corporate pollution reduction, carbon reduction, and green expansion [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 369, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122301.
- [8] 李健,郭一达,王晓祺.绿色金融改革、金融资源配置与企业降碳减污扩绿增长[J].农村金融研究,2024,(10):3-18.
Li J, Guo Y D, Wang X Q. Green finance reform, financial resource allocation, and enterprise carbon reduction, pollution reduction, green expansion, and economic growth[J]. Rural Finance Research, 2024, (10): 3-18.
- [9] 安博文,许培源,黄寰,等.中国协同推进降碳减污扩绿增长的绩效评估及空间差距演变——基于人与自然和谐共生的系统观[J].经济问题探索,2024,(10):115-135.
An B W, Xu P Y, Huang H, et al. Performance evaluation and spatial gap evolution of China's carbon reduction, pollution reduction and green growth —based on the systemic conception of the harmony between humanity and nature[J]. Inquiry into Economic Issues, 2024, (10): 115-135.
- [10] 崔新蕾,王冉冉.中国降碳-减污-扩绿-增长协同发展空间关联网络特征及影响因素研究[J].环境科学研究,2024,37(7):1446-1457.
Cui X L, Wang R R. Research on the spatial correlation network characteristics and influencing factors of coordinated development of carbon emission reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(7): 1446-1457.
- [11] 尹碧波,邝萍,欧阳昕彤,等.中国减污降碳与扩绿增长耦合协调度的时空特征及其驱动因素[J].经济地理,2024,44(11):122-131.
Yin B B, Kuang P, Ouyang X T, et al. Spatio-temporal characteristics and driving factors of the coupling coordination degree between the pollution-carbon reduction, and the green expansion and economic growth in China[J]. Economic Geography, 2024, 44(11): 122-131.
- [12] Yang X, Ran G G. Factors influencing the coupled and coordinated development of cities in the Yangtze River Economic Belt: a focus on carbon reduction, pollution control, greening, and growth [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122499.
- [13] 卢泓钢,王益如,吴伟光.中国农业减污降碳协同增效的水平测度及其时空收敛性研究——基于“减污-降碳-扩绿-增长”的四维分析[J].生态经济,2024,40(12):186-195.
Lu H G, Wang Y R, Wu W G. Environment pollution and carbon emission of agriculture in China: based on the four-dimensional analysis of “pollution reduction, carbon reduction, green expansion and growth” [J]. Ecological Economy, 2024, 40(12): 186-195.
- [14] 任晓松,梁宇琪,赵敏,等.中国建筑业减污降碳协同效应的空间收敛性及驱动因素分析[J].环境科学研究,2025,38(4):724-735.
Ren X S, Liang Y Q, Zhao M, et al. Analysis of spatial convergence and driving factors of synergistic effects of pollution and carbon reduction in China's construction industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(4): 724-735.
- [15] Zeng Q H, He L Y. Study on the synergistic effect of air pollution prevention and carbon emission reduction in the context of “dual carbon”: evidence from China's transport sector[J]. Energy Policy, 2023, 173, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113370.
- [16] Jiang P, Khishgee S, Alimujiang A, et al. Cost-effective approaches for reducing carbon and air pollution emissions in the power industry in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 264, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110452.
- [17] 吴昊玥,陈锐,何艳秋,等.中国农业减污降碳协同效应量化及时空特征:基于减排绩效视角[J].环境科学,2025,46(11):6828-6838.
Wu H Y, Chen R, He Y Q, et al. Estimation and spatiotemporal characteristics of the co-abatement effect of pollution and carbon emissions of agriculture in China: based on the emission mitigation performance [J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 6828-6838.
- [18] Lin B Q, Teng Y Q. Synergistic disparities of pollution reduction and carbon mitigation in the industrial chain: evidence from China's industrial sector[J]. Environmental Research, 2024, 248, doi: 10.1016/j.envres.2024.118226.
- [19] 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(9):1867-1876.
Han D R, Ding L X, Dong H Z, et al. Path selection of whole process governance driving collaboration of pollution control and carbon reduction from configuration perspective [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(9): 1867-1876.
- [20] Luo L, Wang Y A, Liu Y C, et al. Where is the pathway to sustainable urban development? Coupling coordination evaluation and configuration analysis between low-carbon development and eco-environment: a case study of the Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109473.
- [21] Yin J H, Wang T. Carbon emission reduction driven by ambidextrous green innovation strategies: a fuzzy-set qualitative comparative analysis approach [J]. Journal of Business Research, 2024, 182, doi: 10.1016/j.jbusres.2024.114790.
- [22] Wang X L, Zhang T Y, Luo S Y, et al. Pathways to improve energy efficiency under carbon emission constraints in iron and steel industry: using EBM, NCA and QCA approaches [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348,

- doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119206.
- [23] Li F, Liu H, Ma Y H, *et al.* Low-carbon spatial differences of renewable energy technologies: empirical evidence from the Yangtze River Economic Belt [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, **183**, doi: 10.1016/j.techfore.2022.121897.
- [24] Lai A L, Du Q, Wang Q W. One region's gain is another's loss: the impact of market segmentation on renewable energy development in China [J]. *Energy Policy*, 2024, **192**, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114215.
- [25] Yang Y, Zhang Y Y, Yang H, *et al.* Horizontal ecological compensation as a tool for sustainable development of urban agglomerations: exploration of the realization mechanism of Guanzhong Plain urban agglomeration in China [J]. *Environmental Science & Policy*, 2022, **137**: 301-313.
- [26] Lyu H Y, Ma C N, Arash F. Government innovation subsidies, green technology innovation and carbon intensity of industrial firms [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, **369**, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122274.
- [27] 佟岩, 李鑫, 徐国铨. 企业集团碳减排压力与债务分布——来自高耗能上市公司的经验证据 [J]. *管理评论*, 2024, **36**(2): 210-221.
- Tong Y, Li X, Xu G Q. Carbon abatement pressure and debt distribution of business groups: evidence from listed business groups in energy-intensive sector [J]. *Management Review*, 2024, **36**(2): 210-221.
- [28] 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 等. 加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估: 以京津冀鲁地区为例 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3627-3636.
- Yang X, Sun Y S, Chang S Y, *et al.* Assessing the environmental and health Co-benefits of accelerated energy transition and industrial restructuring: a case study of the BTHS region [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3627-3636.
- [29] Xiao Y, Chen K. Green finance, natural resource dependence and environmental quality: evidence from China [J]. *Resources Policy*, 2024, **92**, doi: 10.1016/j.resourpol.2024.104977.
- [30] 孙豪, 桂河清, 杨冬. 中国省域经济高质量发展的测度与评价 [J]. *浙江社会科学*, 2020, (8): 4-14.
- Sun H, Gui H Q, Yang D. Measurement and evaluation of the high-quality of China's provincial economic development [J]. *Zhejiang Social Sciences*, 2020, (8): 4-14.
- [31] Qiu L P, Xia W, Wei S B, *et al.* Collaborative management of environmental pollution and carbon emissions drives local green growth: an analysis based on spatial effects [J]. *Environmental Research*, 2024, **259**, doi: 10.1016/j.envres.2024.119546.
- [32] 李敏杰, 陈毅辉, 吴桐雨. “双碳”背景下数字经济与绿色物流耦合协调发展的时空特征及组态路径 [J]. *环境科学*, 2025, **46**(7): 4159-4174.
- Li M J, Chen Y H, Wu T Y. Spatiotemporal characteristics and configuration paths of the coupling coordinated development between digital economy and green logistics under the background of “dual carbon” [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(7): 4159-4174.
- [33] 刘荣增, 何春. 环境规制对城镇居民收入不平等的门槛效应研究 [J]. *中国软科学*, 2021, (8): 41-52.
- Liu R Z, He C. Study on the threshold effect of environmental regulation on income inequality of urban residents [J]. *China Soft Science*, 2021, (8): 41-52.
- [34] 章印. 全国统一大市场发展水平、空间差异及障碍因素 [J]. *统计与决策*, 2025, **41**(1): 116-121.
- Zhang Y. Development level, spatial differences and obstacle factors of China's unified large market [J]. *Statistics & Decision*, 2025, **41**(1): 116-121.
- [35] 王帅, 马杰华, 李正辉. 政府环境关注度对城市土地资源效率的影响 [J]. *经济地理*, 2022, **42**(12): 186-193.
- Wang S, Ma J H, Li Z H. The impact of government environmental concerns on the land resource allocation efficiency in Chinese cities [J]. *Economic Geography*, 2022, **42**(12): 186-193.
- [36] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正 [J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(3): 793-810.
- Wang S J, Kong W, Ren L, *et al.* Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(3): 793-810.
- [37] 王雅楠, 李冰迅, 张艺芯, 等. 中国减污降碳协同效应时空特征与影响因素 [J]. *环境科学*, 2024, **45**(9): 4993-5002.
- Wang Y N, Li B X, Zhang Y X, *et al.* Spatiotemporal characteristics and influencing factors of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in China [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(9): 4993-5002.
- [38] 孙燕芳, 张淑惠. 区域“创新-生态-经济”耦合协调发展的组态路径——基于动态定性比较分析 [J]. *资源科学*, 2024, **46**(3): 549-564.
- Sun Y F, Zhang S H. Combination path of regional innovation-ecology-economy coupling and coordinated development: based on a dynamic qualitative comparative analysis [J]. *Resources Science*, 2024, **46**(3): 549-564.
- [39] 蒙克, 魏必. 反思QCA方法的“时间盲区”: 为公共管理研究找回“时间” [J]. *中国行政管理*, 2023, (1): 96-104.
- Meng K, Wei B. Rethinking the “time blindness” of the qualitative comparative analysis: bringing back “time” for public management research [J]. *Chinese Public Administration*, 2023, (1): 96-104.
- [40] 金一, 戴慧芳, 李桐, 等. 美丽中国目标下洞庭湖区旅游生态效率时空演化及其影响路径 [J]. *经济地理*, 2024, **44**(8): 222-229.
- Jin Y, Dai H F, Li T, *et al.* Spatio-temporal evolution and influencing paths of tourism eco-efficiency in the Dongting Lake Region under the beautiful China initiative [J]. *Economic Geography*, 2024, **44**(8): 222-229.
- [41] 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.
- Tang X B, Zhang Y, Cao L Z, *et al.* Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(10): 2252-2263.
- [42] Ragin C, Fiss P. Net effects analysis versus configurational analysis: an empirical demonstration [A]. In: Ragin C C (Ed.). *Redesigning Social Inquiry: Fuzzy Sets and Beyond* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 2008. 190-212.
- [43] 杜运周, 贾良定. 组态视角与定性比较分析(QCA): 管理学研究的一条新道路 [J]. *管理世界*, 2017, (6): 155-167.
- [44] 谭海波, 范梓腾, 杜运周. 技术管理能力、注意力分配与地方政府网站建设——一项基于TOE框架的组态分析 [J]. *管理世界*, 2019, **35**(9): 81-94.
- Tan H B, Fan Z T, Du Y Z. Technology management capability, attention distribution and local government website construction: a configurational analysis based on the TOE framework [J]. *Journal of Management World*, 2019, **35**(9): 81-94.
- [45] 荆玲玲, 黄慧丽. 时空双维下数字创新生态系统对区域创新能力的激发与影响研究——基于省域面板数据的动态QCA分析 [J]. *科技进步与对策*, 2024, **41**(16): 13-23.
- Jing L L, Huang H L. The stimulation and impact of digital innovation ecosystem on regional innovation capability in two dimensions of time and space: a dynamic QCA analysis based on provincial panel data [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2024, **41**(16): 13-23.
- [46] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中QCA方法的应用: 定位、策略和方向 [J]. *管理学报*, 2019, **16**(9): 1312-1323.
- Zhang M, Du Y Z. Qualitative comparative analysis (QCA) in management and organization research: position, tactics, and directions [J]. *Chinese Journal of Management*, 2019, **16**(9): 1312-1323.
- [47] 方芳, 张立杰, 赵军. 制度组态视角下提升农业绿色全要素生产率的多元路径探析——基于动态QCA的面板数据分析 [J]. *中国农村经济*, 2024, (2): 44-66.
- Fang F, Zhang L J, Zhao J. Multiple paths of agricultural green total factor productivity improvement from the perspective of institutional grouping: a panel data analysis based on dynamic QCA [J]. *Chinese Rural Economy*, 2024, (2): 44-66.
- [48] 王治, 彭星星. 我国“专精特新”企业新质生产力发展路径研究——基于企业面板数据的动态QCA分析 [J]. *科技进步与对策*, 2025, **42**(19): 96-106.
- Wang Z, Peng X X. The development path of new quality productive forces in “specialized, refined, unique, and innovative” enterprises in China: a dynamic QCA analysis based on enterprise panel data [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2025, **42**(19): 96-106.
- [49] 张放. 影响地方政府信息公开的因素——基于省域面板数据的动态QCA分析 [J]. *情报杂志*, 2023, **42**(1): 133-141, 207.
- Zhang F. Determinants of local governments' information disclosure: a dynamic QCA analysis based on provincial panel data [J]. *Journal of Intelligence*, 2023, **42**(1): 133-141, 207.
- [50] 杜运周, 刘秋辰, 程建青. 什么样的营商环境生态产生城市高创业活跃度?——基于制度组态的分析 [J]. *管理世界*, 2020, **36**(9): 141-154.
- Du Y Z, Liu Q C, Cheng J Q. What kind of ecosystem for doing business will contribute to city-level high entrepreneurial activity? A research based on institutional configurations [J]. *Journal of Management World*, 2020, **36**(9): 141-154.