

# 殊途同归：组态视角下降碳减污协同推进路径研究\*

孙慧<sup>1,2</sup>, 杨巨星<sup>1,2</sup>, 罗添<sup>1,2</sup>, 薛进军<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 新疆创新管理研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 经济与管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要**: 测算中国31个省份2012—2021年降碳减污耦合协调度并分析其时空演化特征; 基于TOE研究框架, 运用必要条件分析法(NCA)和模糊集定性比较分析法(fsQCA), 从组态视角探究多因素驱动区域降碳减污协同推进的“殊途同归”路径。结果表明: 1) 研究期内各省降碳减污耦合协调度在0.605~0.973之间, 均属协调发展类别, 在胡焕庸线以东以中级协调为主, 以西以良好协调为主; 2) 降碳减污协同推进具有复杂性, 高协同度是多因素联动作用的结果; 3) 降碳减污协同推进的实现路径有技术-环境驱动型(河北、安徽、江苏、辽宁)、组织-环境驱动型(吉林)、技术-组织-环境均衡驱动型(山东、新疆); 4) 对比组态路径发现, 绿色技术创新、产业结构调整和数字经济发展在降碳减污协同推进过程中起主导作用。

**关键词**: 降碳减污; 协同推进; TOE框架; 组态分析; 殊途同归

**DOI**: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2023.12.26.0001

**中图分类号**: X321; F124.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 2096-7675(2024)06-0672-015

**引文格式**: 孙慧, 杨巨星, 罗添, 薛进军. 殊途同归: 组态视角下降碳减污协同推进路径研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(6): 672-686.

**英文引文格式**: SUN Hui, YANG Juxing, LUO Tian, XUE Jinjun. Different paths lead to the same destination: A study on synergistic promotion paths for carbon reduction and pollution reduction from a group perspective[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(6): 672-686.

## Different Paths Lead to the Same Destination: A Study on Synergistic Promotion Paths for Carbon Reduction and Pollution Reduction from a Group Perspective

SUN Hui<sup>1,2</sup>, YANG Juxing<sup>1,2</sup>, LUO Tian<sup>1,2</sup>, XUE Jinjun<sup>1,2</sup>

(1. Xinjiang Innovation Management Research Center, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China;

2. School of Economics and Management, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China)

**Abstract**: Measure the degree of coordination of carbon reduction and pollution reduction coupling in 31 provinces in China from 2012 to 2021, and analyze its spatial and temporal evolution characteristics; Based on the TOE research framework, use the Necessary Condition Analysis (NCA) method and fuzzy set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA) method to explore the “different paths” paths of the multifactors-driven synergistic promotion of carbon reduction and pollution reduction in the region from the perspective of the group state. The results show that: 1) The degree of coordination of carbon reduction and pollution reduction coupling in each province during the study period ranges from 0.605 to 0.973, which belongs to the category of coordinated development, with intermediate coordination dominating to the east of the HU Huanyong line, and good coordination dominating to the west of the HU Huanyong line; 2) The synergistic advancement of carbon reduction and pollution reduction is complex, and the high degree of synergy is a result of the combined effect of multifactors; 3) The paths of realization of the synergistic advancement of carbon reduction and pollution reduction include the technology-environment driven (Hebei, Anhui, Jiangsu, Liaoning), organization-environment driven (Jilin), and technology-organization-

\* 收稿日期: 2023-12-26

**基金项目**: 国家自然科学基金“新疆资源型产业污染集聚、损益偏离与包容性绿色增长”(71963030); 科技部重大科技项目暨第三次新疆综合科学考察课题“吐哈盆地国家能源基地建设调查与碳减排潜力评估”(SQ2021xjkk01800-5); 新疆维吾尔自治区社会科学基金“碳中和背景下新疆能源发展路径研究”(21BJY05)。

**作者简介**: 孙慧(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事资源与环境经济的研究, E-mail: shui@xju.edu.cn.

environment balanced driven (Shandong, Xinjiang); 4) Comparison of the group paths reveals that green technological innovation, industrial structure adjustment, and the development of the digital economy play a dominant role in the synergistic promotion of carbon reduction and pollution reduction.

**Key words:** carbon reduction and pollution reduction; synergistic advancement; TOE framework; group analysis; different routes to the same aim

## 0 引言

降碳减污协同推进既是实现“双碳”目标的着力点,也是经济高质量发展的重点任务。一方面,我国经济已进入加快低碳化、绿色化的高质量发展阶段,但是以煤炭为主的能源消费造成产业结构、能源结构转型任务重,在工业化仍快速发展的情况下实现降碳具有难度。另一方面,我国区域资源禀赋、经济发展、技术水平存在差异,各省面临不同的环境治理矛盾<sup>[1]</sup>,降碳减污的协同发展需考虑实际情况。党的二十大报告提出“协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”。在此背景下,深入探究降碳减污协同推进的差异化路径,实现殊途同归,对于绿色低碳发展具有重要的现实意义。

降碳减污具有“同根同源”性,二氧化碳与污染物主要来自能源活动与工业生产<sup>[1]</sup>,以煤炭为主的化石能源消费会同时产生二氧化碳、氮氧化物、颗粒物、有机化合物等多种物质。协同推进降碳减污作为减排和环保方面的综合策略,可以实现减少温室气体排放,同时也能降低污染物的排放<sup>[2]</sup>。降碳减污两个系统的治理可以深度耦合、协同促进、提质增效,表现出“同过程同治”性。针对降碳减污协同推进问题,学界也进行了大量的有益探索。大多数研究以某一影响因素或政策视角为切入点,以“降碳减污协同发展水平测度与评价-降碳减污影响机制-实现降碳减污协同发展的路径”为分析框架,探讨了特定行业和区域降碳减污领域内的体制机制构建<sup>[3]</sup>,并在此基础上提出应对策略和优化路径。

组态分析方法可以考虑到影响降碳减污因素之间的综合效应,适合研究复杂驱动机制<sup>[4]</sup>。本文在已有文献研究的基础上,在技术-组织-环境(Technology-Organization-Environment, TOE)研究框架下识别降碳减污的影响因素,结合必要条件分析(Necessary Condition Analysis, NCA)和模糊集定性比较分析(fuzzy set Qualitative Comparative Analysis, fsQCA)方法,探究影响区域降碳减污各因素间的复杂互动关系。在评价降碳减污协同水平的基础上,归纳不同因素组态对降碳减污协同推进的“殊途同归”路径。本文可能存在的边际贡献有两方面:一是引入TOE研究框架,基于组态视角更广泛系统地整合了影响降碳减污的因素,探究多因素下如何更好地实现降碳减污协同推进,为降碳减污协同增效的实证研究提供新思路。二是结合NCA与fsQCA方法,定量确定影响降碳减污的单个因素在多大程度上是高协同度的必要条件,并发现高协同度是多因素联动作用的结果,并且识别哪些因素在降碳减污协同推进中起主导作用。

## 1 文献综述与研究框架

实施降碳减污协同治理已成为我国新发展阶段促进经济社会全面绿色低碳转型、一体实现美丽中国与“双碳”战略目标的必然选择。众学者对降碳减污协同的研究主要包括协同效应的测度与评价、实现协同的机制与路径、环境政策对协同的影响三个方面。

降碳减污协同水平的测度评价层面,主要用STIRPAT模型<sup>[5]</sup>、耦合协调模型<sup>[6]</sup>、Tapio脱钩模型<sup>[7]</sup>、SBM效率模型<sup>[8]</sup>、双层嵌套SDA模型<sup>[9]</sup>等测度降碳减污协同程度。比较典型的是利用耦合协调模型测算降碳减污协同程度,耦合协调模型能够综合评价降碳与减污两个子系统间协同变化的趋势,以及各子系统间的整体协同效果<sup>[10]</sup>。并利用核密度估计和马尔可夫链<sup>[11]</sup>、达古姆基尼系数法<sup>[12]</sup>、引力模型<sup>[13]</sup>等分析降碳减污协同度的时空演变和区域差异。降碳减污协同效率在空间上呈现“东部-中部-西部”阶梯式递减的异质性特征<sup>[14]</sup>;王慧等<sup>[15]</sup>在双重损益偏离识别的基础上研究发现碳达峰约束下降碳减污协同效应在西部城市、资源型城市、环保重点城市、先发城市中具有更强作用。

实现协同的机制与路径层面,学者们主要从绿色技术<sup>[16]</sup>、能源<sup>[17]</sup>、环境规制<sup>[18]</sup>、产业<sup>[19]</sup>、数字经济<sup>[20]</sup>、环境关注<sup>[21]</sup>等方面回答了降碳减污协同发展的路径。绿色技术能够有效提高能源效率并推动能源结构转变<sup>[22]</sup>,长期内一直作为碳减排的主导路径<sup>[19]</sup>。通过绿色技术创新,可以提升光伏、风力、水能、氢能等可再生能源发电效率。绿色技术也可以清洁生产工艺,推动企业向可持续的能源方向发展,优化产业结构<sup>[23]</sup>,提高企业生产力<sup>[24]</sup>,从而实现降碳减污的目标。环境政策能够通过源头预防、过程控制和末端治理抑制大气污染物排放,在源头预

防和过程控制中抑制碳排放<sup>[25]</sup>。Lin等<sup>[26]</sup>研究发现,环境政策的实施通过资源再配置、能源结构优化、绿色技术创新和能效提升等机制显著降低了工业碳排放强度。政府可以通过环境规制,约束企业排污行为,引导企业低碳转型。在地方政府环境规制的影响下,高碳企业的碳排放量显著下降<sup>[27]</sup>,产业结构不断合理化、高级化。产业结构调整优化促进资源合理配置,减少对化石能源的依赖<sup>[17]</sup>。大多数学者认为数字化对环境问题的积极影响大于其负面影响<sup>[28]</sup>,数字经济能够激发新的能源消费方式和理念,并促进技术多样化,有效提升能源利用效率,实现环境保护与经济增长互利共赢的局面<sup>[29]</sup>。公众环境关注度能够对政府和企业施加压力,并降低政府与企业之间的信息不对称<sup>[21]</sup>,推动其采取更有力的降碳减污措施,对环境治理产生积极影响<sup>[30]</sup>。

环境政策对降碳减污的影响层面,现有研究聚焦碳排放权交易<sup>[31]</sup>、用能权交易<sup>[32]</sup>、排污费征收<sup>[25]</sup>等,通过研究政策试点,利用双重差分的方法,评估试点政策对降碳减污的协同效应。碳排放权交易政策通过促进绿色技术创新和污染产业转移实现污染减排<sup>[33]</sup>。用能权交易制度通过提升能源效率、提升创新产出、激励技术进步、推动绿色金融、加强能源投资等渠道提升降碳减污水平<sup>[33]</sup>。排污费的征收能够促进产业结构高级化、提升能源利用效率、提高技术创新水平,从而起到减污与降碳协同治理的效果<sup>[25]</sup>。朱思瑜等<sup>[34]</sup>研究发现在排污权交易、碳排放权交易和组合政策三种政策情景下,排污权交易和碳排放权交易能有效提升降碳减污协同水平。政策协同管理视角下,组合政策比各类政策的单独实施更有利于减少污染,碳排放权交易比排污权交易和组合政策更有利于降低碳排放。

此外,也有文献利用组态分析方法研究了降碳减污实现路径,但数量有限。孙秀梅等<sup>[35]</sup>以我国108个资源型城市为研究对象,从组态视角对资源型城市低碳转型驱动路径展开研究;闫华飞等<sup>[36]</sup>研究发现碳排放强度是多个条件变量交互作用的结果,低碳排放强度驱动模式有三种,分别为绿色创新-结构协同型、结构主导型、绿色创新主导型;Luo等<sup>[37]</sup>分析了黄河流域地级市降碳减污系统之间的协调发展水平,探究影响耦合协调度的因素,进一步探索了黄河流域降碳减污可持续发展路径。

由已有文献的梳理和分析可以发现,学者们对降碳减污协同效应进行了详细探讨,但可借鉴的差异化路径的典范或参照样本仍然较少。现有研究存在一些不足:一方面,现有文献主要借助传统线性回归分析,更多考虑了相关因素的单一作用对降碳减污的影响。但是传统回归分析无法解决降碳减污的因果复杂性问题,不同因素对降碳减污协同推进的影响并不独立,这些因素是否以及多大程度上构成降碳减污高协同度的必要条件?多个因素影响降碳减污的联动影响和联合机制是什么?先前研究有待回答这些问题。另一方面,已有文献局限于对碳减排一个系统的实现路径研究或局部区域的降碳减污协同路径研究,缺乏对全国层面降碳减污两大系统耦合协调的时空演变及其实现协同推进的路径分析。因而,有必要深入分析驱动降碳减污协同增效的组态,有效区分影响降碳减污协同推进的核心与边缘条件,从而探究实现降碳减污协同发展的不同路径。

前文根据现有文献梳理总结了驱动降碳减污发展的关键影响因素,为本文构建TOE研究框架提供了重要支撑。TOE研究框架综合考虑技术、组织和环境因素之间的相互作用,具有综合性、可量化和可应用性的优势<sup>[38]</sup>。发展低碳经济,实现“碳达峰、碳中和”目标,必须从技术水平、能源效率、产业结构、环境关注等方面共同着手<sup>[35]</sup>。综上所述,首先,推进降碳减污需要技术支持,绿色技术创新才能提高能源使用效率,促进可再生能源发展,加快能源结构转型,减少污染,降低碳排放;其次,政府和企业作为两大组织,在降碳减污进程中发挥至关重要的作用;最后,降碳减污离不开公众参与以及经济发展背景。因此,识别与分析影响降碳减污协同效应的因素时,从技术、组织、环境三个层面展开更为全面、更具优势。本文基于TOE研究框架的整体性分析有助于深入理解影响降碳减污协同的复杂性因素及差异化路径,并为制定相应的政策和措施提供重要的参考。研究框架如图1所示。

## 2 研究设计、方法与数据来源

### 2.1 研究设计

首先,对中国31个省份的降碳减污协同水平进行测度和评价。确定降碳与减污两个系统,选取对应指标,用熵权法计算指标权重,得出2012—2021年各省降碳减污耦合协调度,用来分析协同水平的时空差异与相对发展状况。其次,对降碳减污协同推进路径进行组态分析。将耦合协调度作为结果变量,在已有文献研究的基础上,以TOE为研究框架识别条件变量,运用NCA和fsQCA方法,从结构角度寻找多因素驱动降碳减污耦合协调

度提升的差异化路径.

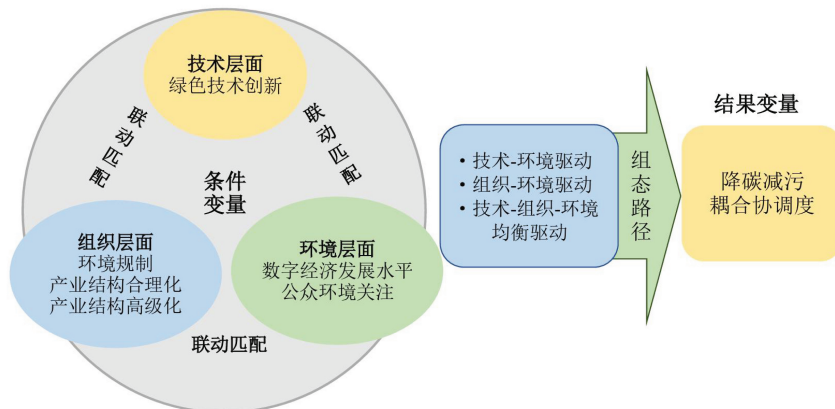


图 1 TOE研究框架

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 耦合协调模型

耦合协调模型是用于分析系统中相互关联的变量和条件之间关系的一种模型。降碳和减污两个系统之间相互作用、相互影响,借鉴唐湘博等<sup>[6]</sup>的方法,将二者纳入耦合协调模型,用来衡量降碳减污协同水平。通过式(1)构建:

$$C_{it} = 2 \times \sqrt{\frac{CR_{it} \times PR_{it}}{(CR_{it} + PR_{it})^2}} \quad (1)$$

式中:  $C_{it}$ 表示第*i*个省份在第*t*年降碳与减污两个系统间的耦合度,  $0 \leq C_{it} \leq 1$ ;  $CR_{it}$ 表示第*i*个省份在第*t*年的降碳综合得分;  $PR_{it}$ 表示第*i*个省份在第*t*年的减污综合得分。

$$T_{it} = \alpha \times CR_{it} + \beta \times PR_{it} \quad (2)$$

式中:  $T_{it}$ 表示第*i*个省份在第*t*年降碳与减污两个系统间的综合协调指数,因为降碳减污协同推进,故本文认为两个子系统在整个综合体系中的地位均衡,碳减排和大气污染物控制同等重要,将系数 $\alpha$ 与 $\beta$ 均取为0.5,  $\alpha + \beta = 1$ 。

$$D_{it} = \sqrt{C_{it} \times T_{it}} \quad (3)$$

式中:  $D_{it}$ 表示第*i*个省份在第*t*年降碳与减污两个系统间的耦合协调度水平,  $0 \leq D_{it} \leq 1$ ,  $D_{it}$ 越大,表明降碳与减污耦合协调发展水平越高。

基于任喜萍等<sup>[39]</sup>的研究,采用均匀函数分布法来界定耦合协调度的等级类型和判断标准,如表1所示。

### 2.2.2 NCA和fsQCA

NCA是一种基于定性比较分析的方法,用于研究某个结果发生的必要条件,即在这个因素存在的情况下,结果才能发生<sup>[40]</sup>。NCA通过两种估计方法(CR-FDH和CE-FDH)计算各条件变量的效应量*d* ( $0 \leq d < 1$ ),比较条件因素存在与结果发生间的关系,揭示结果的必要条件。效应量也称瓶颈水平,代表产生特定结果需要必要条件的最低水平<sup>[41]</sup>。fsQCA由Ragin在1987年提出,是一种基于模糊集的定性比较分析的方法,用于探究因果关系以及条件因素对某一结果的影响<sup>[42]</sup>。

fsQCA结合了模糊集理论和布尔代数的思想,旨在通过模糊逻辑运算,对多个因素的不同组合进行定性比较和分析。本文结合NCA和fsQCA方法,不仅可以定量确定影响降碳减污的条件变量在多大程度上是结果变量耦合

表 1 耦合协调度等级类型与判断标准

协调大类	耦合协调度	等级类型
失调衰退类	$0.000 \leq D < 0.100$	极度失调
	$0.100 \leq D < 0.200$	严重失调
	$0.200 \leq D < 0.300$	中度失调
过渡调和类	$0.300 \leq D < 0.400$	轻度失调
	$0.400 \leq D < 0.500$	濒临失调
	$0.500 \leq D < 0.600$	勉强协调
协调发展类	$0.600 \leq D < 0.700$	初级协调
	$0.700 \leq D < 0.800$	中级协调
	$0.800 \leq D < 0.900$	良好协调
	$0.900 \leq D \leq 1.000$	优质协调

协调度的必要条件,而且通过找出QCA后的核心条件与边缘条件,可以归纳驱动耦合协调度提升的多重路径,实现“殊途同归”,有助于不同地区因地制宜制定降碳减污政策。

### 2.3 指标体系与数据来源

本文选取31个省、自治区、直辖市(港澳台数据缺失)为样本,将案例的时间跨度确定为2012—2021年。首先对2012—2021年各省降碳减污耦合协调度的时空变化进行分析,之后为了更准确识别降碳减污耦合协调度提升的路径,计算2012—2021年各个指标的平均值,对31个省份样本进行组态分析。主要原因有:一方面,选取31个样本十年的平均值进行分析,符合QCA方法分析原理,也能提高结果的科学性;另一方面,2012年中国发布节能减排“十二五”规划,提出要调整优化产业结构、推动能效水平提高、强化主要污染物减排,中国由此进入“绿色发展时代”,选取2012—2021年的数据,能够保证研究的客观性和时效性。

#### 2.3.1 结果变量

降碳减污耦合协调度 $D_{it}$ 。从降碳与减污两个维度出发进行构建。降碳层面:碳排放“双控”直接促进绿色低碳发展,借鉴孙慧等<sup>[25]</sup>的研究,用二氧化碳排放量和碳排放强度两个指标衡量降碳系统综合指数。二氧化碳排放量数据来源于《中国碳核算数据库》(CEADs),碳排放强度由各省二氧化碳排放量与GDP比值得到。减污层面:传统研究只考虑空气污染指标过于单一,本文关注固液气三种形态减污,同时借鉴Nie<sup>[43]</sup>和易兰<sup>[44]</sup>等的研究。减污系统综合指数用废水中化学需氧量排放量、废气中氮氧化物排放量、二氧化硫排放量、 $PM_{2.5}$ 均值、一般工业固体废物产生量衡量,数据来源于2012—2021年国家统计局数据和中国各省统计年鉴。

单一的Critic权重法未能考虑指标间的离散性,熵权法可以有效弥补这一不足<sup>[45]</sup>。因此,为了更加客观确定各二级指标在降碳与减污系统内的权重,本文借鉴吴忠等<sup>[45]</sup>的研究,将两种方法进行结合,基于Critic-熵权法的客观赋权,得出二者赋权的平均值作为最终组合权重。通过组合权重计算降碳系统各案例综合得分 $CR_{it}$ 与减污系统各案例综合得分 $PR_{it}$ ,最终利用耦合协调模型计算降碳与减污两个系统间的耦合协调度 $D_{it}$ 。降碳减污耦合协调度的测量指标体系及描述性统计如表2所示。

表2 结果变量测量指标体系及描述性统计

一级指标	二级指标	指标属性	单位	组合权重	均值	标准差	最大值	最小值
降碳系统	二氧化碳排放量	负向	万吨	0.521	44 128.050	24 061.120	110 527.800	4 385.700
	碳排放强度	负向	千克/万元	0.479	2 473.230	1 799.210	11 230.190	503.160
减污系统	废水中化学需氧量排放量	负向	万吨	0.219	54.220	1.760	192.120	1.760
	废气中氮氧化物排放量	负向	万吨	0.170	51.160	3.410	176.110	3.410
	二氧化硫排放量	负向	万吨	0.182	35.570	0.140	174.880	0.140
	$PM_{2.5}$ 均值	负向	毫克/立方米	0.203	35.810	4.320	85.630	4.320
	一般工业固体废物产生量	负向	万吨	0.227	11 541.510	232.360	52 037.000	232.360

#### 2.3.2 条件变量

技术条件变量:用绿色专利申请数量衡量绿色技术创新水平。数据来源于国家知识产权局。

组织条件变量:用环境规制强度、产业结构合理化指数和产业结构高级化指数衡量。参考刘荣增等<sup>[46]</sup>的方法,采用工业污染治理投资完成额占第二产业比重衡量环境规制;参考干春晖等<sup>[47]</sup>的方法,测算产业结构合理化、高级化水平。数据来源于2012—2021年国家统计局数据与《中国统计年鉴》。

环境条件变量:用数字经济发展指数与公众环境关注度衡量。数字经济发展水平的测算包含多维度指标,参照赵涛等<sup>[48]</sup>的方法,选取每百人互联网用户数、计算机服务和软件从业人员占比、人均电信业务总量、移动电话基站数等指标的基础上,继续选取邮政业务总量、包裹数、移动电话年末用户、互联网宽带接入端口、互联网宽带接入用户、电信业务总量、数字普惠金融指数、互联网普及率、移动互联网用户数等指标,利用主成分分析法对各省数字经济发展水平进行更为全面客观的测算。参考吴力波等<sup>[21]</sup>的方法,整理各省“雾霾”和“环境污染”的百度指数、资讯指数、媒体指数,衡量各地区的公众环境关注度。

### 2.4 变量校准

参考已有研究<sup>[41]</sup>,本文根据所研究的案例分布和样本量,运用直接校准法,分别设置样本数据的75%、50%、25%作为“完全隶属”“交叉点”和“完全不隶属”的锚点,将原始数据转化为[0, 1]之间的模糊隶属度值。条件和结果变量的校准与描述性统计如表3所示。

表3 条件与结果变量校准及描述性统计

	变量	完全隶属	交叉点	完全不隶属	均值	标准差	最大值	最小值	
条件变量	技术								
		绿色专利申请量	495.000	87.000	14.000	326.000	666.000	2 856.000	1.000
		环境规制强度	0.005	0.003	0.002	0.003	0.002	0.013	0.001
	组织								
		产业结构合理化指数	0.308	0.150	0.086	0.220	0.202	0.982	0.024
		产业结构高级化指数	1.482	1.186	1.022	1.383	0.702	4.633	0.884
环境									
		数字经济发展指数	0.242	0.215	0.203	0.223	0.025	0.284	0.180
结果变量									
		公众环境关注度	144.517	109.626	81.379	107.960	37.780	181.300	10.890
	降碳减污耦合协调度	0.860	0.851	0.851	0.817	0.020	0.876	0.807	

### 3 数据分析与实证结果

#### 3.1 降碳减污协同水平分析

表4展示了各省2012—2021年降碳与减污两大系统的耦合协调度。整体来看,各省降碳减污耦合协调度的水平相对较高,在0.605~0.973之间,区域降碳减污各年度均处协调发展类别,说明自我国“十二五”规划提出促进绿色发展,以及十八大后深入推进生态文明建设以来,各省在污染减排方面高强度治理,取得良好成效。

从各年均值来看,全国耦合协调度平均水平在2012—2019年处于逐年增长的态势,但是在2020年耦合协调度由前一年的0.870下降至0.858。从各省均值来看,东部地区省份降碳减污耦合协调度水平呈现两极分化的状态。其中:浙江、福建、海南耦合协调水平高,海南和福建更是达到优质协调状态。但山东、河北等省份耦合协调水平相对较低,可能原因是这些地区存在重化工行业,且部分企业在冬季承担协同供暖任务,短期内产业布局调整达不到理想水平。中部地区省份耦合协调度极差较小,整体处于良好协调等级。西部地区西藏、云南、青海三个省份由于重化工业等高污染企业布局少,而且青藏高原光热资源丰富,云南水力资源富裕,煤炭等化石燃料消费量少,耦合协调度历年处在高位,整体属于优质协调等级;而西部地区其它省份耦合协调水平呈现良好状态。东北地区吉林降碳减污耦合协调程度高,而辽宁和黑龙江处于良好协调等级。

从各省每年耦合协调度与均值的比较来看,2012—2015年有16个省份的耦合协调水平高于全国同期平均水平,期间全国平均耦合协调水平上升缓慢,河北、山东耦合协调度较其它省份表现出更低水平,属于初级协调等级。2016年全国耦合协调度均值为0.858,增长速度明显快于2012—2015年平均水平。2016—2019年全国耦合协调度均值继续处于稳步增长的态势,与2012年相比,各年度均值以上的省份数量增加,河北降碳减污耦合协调度在此时期超过0.800,达到良好协调水平。说明随着生态环境部门全面落实《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,2017年中国启动碳排放权交易、推进碳市场建设,2018年《中华人民共和国环境保护税法》等一系列环保制度施行,企业等创新主体加快绿色技术创新,推动可再生能源快速发展,我国降碳减污取得成效,实现了2019年全国28个省份耦合协调度达到了良好协调的水平。

分析各地区降碳减污耦合协调度的时空分布可以发现,2012年各省耦合协调度大致以胡焕庸线为界分布,在胡焕庸线以东以中级协调为主,以西以良好协调为主。究其原因,“十二五”早期中国东部地区的经济发展较为集中,煤炭为主要能源,工业粗放型排放导致空气污染严重。尤其是环渤海地区作为中国重要的工业基地,能源消耗和碳排放集中;加之人口稠密,汽车尾气排放对空气污染产生很大影响,导致2012年河北和山东降碳减污耦合协调度为初级协调等级。到2016年,耦合协调度处于初级协调等级的省份消失,同时吉林、云南、浙江、福建上升为优质协调等级,山西、河南、湖北、湖南、广东、重庆由之前的中级协调水平上升为良好协调水平。到2019年,全国降碳减污耦合协调度基本上处于良好和优质水平,其中河北从2012年到2019年实现跃迁。然而2020年后同经济恢复过程产生新矛盾,部分地区为实现地方经济复苏、促进经济增长,放松对高排放、高耗能项目的监管,使得降碳减污耦合协调度出现了短期回落。

#### 3.2 必要条件分析

QCA组态分析之前,需要进行必要条件分析,检查TOE框架中诸多条件变量是否为产生降碳减污高耦合协调度的必要条件。即在某个条件变量的情况下,高耦合协调度是否会产生,所有变量均为非必要条件就可认为通过NCA检验。本文用R语言软件进行NCA分析,表5为采用CR-FDH和CE-FDH两种估计方法计算的NCA对单个条件的必要性分析结果。可知绿色技术创新、环境规制强度、产业结构合理化、产业结构高级化、数字经

济发展水平、公众环境关注度等条件的效应量均小于0.1,因此,它们不构成降碳减污高耦合协调度的必要条件.鉴于条件变量均为连续变量,本文使用CR-FDH方法进行瓶颈水平分析.表6为瓶颈水平分析结果,瓶颈水平(%)指达到结果最大观测范围的某一水平,前因条件最大观测范围内需要满足的水平值(%)<sup>[42]</sup>.如表6所示,若要达到90%的降碳减污耦合协调度水平,需要2.1%水平的环境规制强度、3.2%水平的产业结构合理化程度、28.3%水平的产业结构高级化程度、13.9%水平的数字经济发展指数、10.7%水平的公众环境关注度,而绿色发明专利申请不存在瓶颈水平.

表 4 各省2012—2021年降碳减污耦合协调度

地区	省份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值
东部地区	北京	0.834	0.831	0.832	0.837	0.844	0.847	0.851	0.853	0.849	0.855	0.843
	天津	0.842	0.835	0.835	0.847	0.857	0.863	0.876	0.876	0.870	0.874	0.858
	河北	0.624	0.635	0.659	0.708	0.793	0.804	0.818	0.828	0.805	0.791	0.747
	上海	0.789	0.774	0.775	0.773	0.792	0.794	0.793	0.793	0.785	0.789	0.786
	江苏	0.772	0.772	0.780	0.795	0.826	0.839	0.845	0.848	0.848	0.856	0.818
	浙江	0.860	0.858	0.859	0.867	0.900	0.902	0.907	0.909	0.902	0.906	0.887
	福建	0.885	0.887	0.893	0.897	0.911	0.915	0.917	0.915	0.911	0.920	0.905
	山东	0.605	0.619	0.641	0.641	0.754	0.782	0.787	0.787	0.778	0.792	0.719
	广东	0.735	0.745	0.752	0.767	0.814	0.810	0.817	0.811	0.790	0.797	0.784
	海南	0.953	0.956	0.957	0.961	0.968	0.968	0.971	0.973	0.971	0.973	0.965
中部地区	山西	0.773	0.775	0.787	0.797	0.824	0.834	0.841	0.837	0.839	0.862	0.817
	安徽	0.825	0.824	0.829	0.834	0.862	0.871	0.871	0.875	0.857	0.866	0.851
	江西	0.865	0.866	0.869	0.878	0.889	0.896	0.905	0.904	0.897	0.898	0.887
	河南	0.708	0.704	0.734	0.744	0.842	0.859	0.859	0.857	0.836	0.850	0.799
	湖北	0.789	0.787	0.796	0.802	0.840	0.839	0.845	0.841	0.806	0.823	0.817
	湖南	0.799	0.802	0.809	0.818	0.859	0.863	0.867	0.867	0.845	0.851	0.838
西部地区	内蒙古	0.804	0.815	0.815	0.822	0.894	0.902	0.901	0.893	0.893	0.904	0.864
	广西	0.804	0.805	0.810	0.822	0.841	0.844	0.846	0.850	0.837	0.846	0.831
	重庆	0.765	0.766	0.776	0.785	0.810	0.823	0.821	0.818	0.817	0.827	0.801
	四川	0.813	0.816	0.818	0.830	0.864	0.870	0.873	0.870	0.847	0.850	0.845
	贵州	0.820	0.828	0.841	0.850	0.877	0.885	0.887	0.895	0.870	0.878	0.863
	云南	0.885	0.893	0.897	0.901	0.918	0.930	0.926	0.927	0.915	0.923	0.912
	西藏	0.825	0.843	0.854	0.885	0.888	0.909	0.919	0.915	0.916	0.933	0.889
	陕西	0.827	0.836	0.838	0.844	0.877	0.877	0.883	0.888	0.880	0.879	0.863
	甘肃	0.729	0.742	0.741	0.748	0.763	0.774	0.785	0.787	0.766	0.786	0.762
	青海	0.917	0.914	0.913	0.918	0.931	0.929	0.936	0.941	0.931	0.941	0.927
	宁夏	0.920	0.926	0.923	0.928	0.943	0.947	0.953	0.954	0.951	0.956	0.940
新疆	0.843	0.835	0.840	0.854	0.877	0.892	0.897	0.908	0.894	0.892	0.873	
东北地区	辽宁	0.735	0.744	0.739	0.738	0.820	0.816	0.826	0.822	0.794	0.784	0.782
	吉林	0.879	0.880	0.881	0.877	0.916	0.919	0.927	0.926	0.913	0.908	0.903
	黑龙江	0.766	0.774	0.764	0.760	0.799	0.809	0.812	0.812	0.778	0.802	0.788
各年均值		0.806	0.809	0.815	0.824	0.858	0.865	0.870	0.870	0.858	0.865	-

注:东部、中部、西部和东北地区依据国家统计局统计制度及分类标准划分

### 3.3 条件组态分析

采用fsQCA3.0软件对影响降碳减污耦合协调度的条件变量进行组态分析.由于案例数为31,属于小样本,故将频数阈值设置为1,一致性阈值设置为0.8,将PRI一致性小于0.7的结果变量赋值为0.软件输出的简单解表示只含有核心条件的路径,中间解为基于反事实分析基础上的包括核心条件的路径.将简单解与中间解进行嵌套对比,就能区分每条组态路径的核心条件与边缘条件,得到4种条件组态结果,如表7所示.表中每一列表示一种组态路径,结果显示总体覆盖度为0.559,表示4种条件组态覆盖了55.9%的案例数.总体一致性为0.838,表示

满足这4种条件组态的省份中有83.8%的地区降碳减污高度耦合协调. 通过有效分析, 最终梳理出3种类型的4条组态路径, 分别是: 以公众环境关注度为核心的技术-环境驱动型、以数字经济发展水平为核心的技术-环境驱动型、以产业结构合理化为核心的组织-环境驱动型、以绿色技术创新和环境规制强度为核心的技术-组织-环境均衡驱动型.

表 5 NCA对单个条件的必要性分析

条件变量	方法	精确度	上限区域	范围	效应量 ( $d$ )	$P$ 值
绿色技术创新	CR	100%	0.000	969.381	0.000	1.000
	CE	100%	0.000	969.381	0.000	1.000
环境规制强度	CR	99%	0.000	0.003	0.006	0.889
	CE	100%	0.000	0.003	0.003	0.937
产业结构合理化	CR	99%	0.002	0.303	0.007	0.845
	CE	100%	0.003	0.303	0.009	0.716
产业结构高级化	CR	89%	0.084	1.343	0.063	0.029
	CE	100%	0.058	1.343	0.044	0.000
数字经济发展水平	CR	98%	0.026	0.920	0.028	0.820
	CE	100%	0.026	0.920	0.029	0.833
公众环境关注度	CR	97%	1.435	66.877	0.021	0.912
	CE	100%	1.596	66.877	0.024	0.851

注: 条件变量采用校准前的变量数值;  $0 \leq d < 0.1$ 表示低水平,  $0.1 < d < 0.3$ 表示中水平,  $0.3 < d < 0.5$ 表示中高水平,  $d \geq 0.5$ 表示高水平;  $P$ 值为NCA分析中置换检验(重复抽样次数为10 000); CR指上限回归分析; CE指上限包络分析

表 6 NCA对单个条件必要性瓶颈水平(%)的分析

降碳减污 耦合协调度	绿色发明 专利申请	环境规制 强度	产业结构 合理化	产业结构 高级化	数字经济 发展指数	公众环境 关注度
0	NN	NN	NN	NN	NN	NN
10	NN	NN	NN	NN	NN	NN
20	NN	NN	NN	NN	NN	NN
30	NN	NN	NN	NN	NN	NN
40	NN	NN	NN	NN	NN	NN
50	NN	NN	NN	NN	NN	NN
60	NN	NN	NN	NN	NN	NN
70	NN	NN	NN	NN	NN	NN
80	NN	NN	1.6	13.5	1.6	0.2
90	NN	2.1	3.2	28.3	13.9	10.7
100	NN	9.7	4.8	43.2	26.3	21.2

注: 瓶颈水平用CR方法进行计算, NN表示不必要

### 3.3.1 技术-环境驱动型

由于组态1与组态2由技术条件和环境条件构成, 故将该类别命名为技术-环境驱动型. 组态1路径指出高公众环境关注度、非高产业结构合理化、非高产业结构高级化为核心条件, 高绿色技术创新水平为边缘条件, 可以导致区域降碳减污高耦合协调度. 组态1表明在产业结构合理化和高级化水平不高的地区, 产业结构对降低污染和减少碳排放具有约束效应, 环境规制强度和数字经济发展水平对高降碳减污耦合协调度的作用并不必要. 这种情况下, 当地主要通过提高绿色技术创新水平, 以及迫于高公众环境关注度来改善环境, 促进降碳减污协同增效. 体现该组态路径的省份主要有河北和安徽. 以河北为例, 其是中国的重要工业基地之一, 早期钢铁、化工、制药等行业的快速发展带来严重的环境污染问题. 随着信息传播渠道的增多和信息公开的加强, 公众对环境保护的关注度不断提高<sup>[49]</sup>, 社会监督力量的增强, 推动了政府和企业更加注重环境保护工作, 加快推进绿色技术创新, 促使产业结构调整优化, 提高资源利用效率和环境效益<sup>[50]</sup>.

表 7 组态分析结果

类别 条件组态	技术-环境驱动型		组织-环境驱动型	技术-组织-环境均衡驱动型
	组态1	组态2	组态3	组态4
绿色技术创新	○	○	△	●
环境规制强度		△	△	●
产业结构合理化	△	△	●	○
产业结构高级化	△		○	○
数字经济发展水平		●	○	○
公众环境关注度	●	○	⊗	⊗
原始覆盖度	0.453	0.181	0.149	0.103
唯一覆盖度	0.272	0.005	0.055	0.025
一致性	0.871	0.849	0.809	0.826
典型案例	河北、安徽	江苏、辽宁	吉林	山东、新疆
总体覆盖度			0.559	
总体一致性			0.838	

注：●表示核心条件存在，○表示边缘条件存在；△表示核心条件缺失，⊗表示边缘条件缺失；空白代表条件可存在也可不存在；下同

组态2路径指出以高数字经济发展水平、非高环境规制强度、非高产业结构合理化为核心条件，以高绿色技术创新水平和高公众环境关注度为边缘条件，可以实现区域降碳减污耦合协调度的提升。组态2表明在环境规制强度不高、产业结构不太合理的省份，如果有较高的绿色技术创新水平、数字经济发展水平和公众环境关注度，产业结构高级化对降碳减污的作用并不必要。符合这种组态路径的省份有江苏和辽宁。以辽宁为例，其数字化总体发展水平居全国前列，充分发挥场景资源优势、数据资源优势，推动产业数字化、数字产业化，实现数字经济与实体经济深度融合。同时加快低碳工艺革新，推进低碳技术创新，积极开展低碳-零碳-负碳集群全产业链示范项目的前瞻性研究，搭建碳计量、碳数据和碳管理三大涉碳服务平台，推进绿色制造和智能制造相结合，着力促进绿色低碳发展<sup>[51]</sup>。

### 3.3.2 组织-环境驱动型

组态3路径由组织条件和环境条件构成，故将该类别命名为组织-环境驱动型。组态3路径指出以高产业结构合理化、非高绿色技术创新、非高环境规制强度为核心条件，以高产业结构高级化、高数字经济发展水平、非高公众环境关注度为边缘条件，可以实现区域降碳减污耦合协调度的提升。该路径表明即使区域绿色技术创新水平和环境规制强度弱，公众环境关注意识不强，但若有良好的产业布局、优化的产业结构，依旧可以实现降碳减污协同增效。可能的原因在于数字技术广泛应用，数字经济与实体经济深度融合，加快了产业结构调整 and 转型升级步伐<sup>[52]</sup>。体现该路径的省份主要是吉林，其把清洁生产作为实现降碳减污协同增效的重要手段，支持工业、建筑等重点行业领域降碳减污增效，构建行业产业绿色制造体系，提高资源能源利用效率。同时全面推进“数字吉林”建设，推动数字化智能化绿色化融合，扩大绿色低碳产品供给，加快制造业绿色低碳转型和高质量发展。

因此，当区域产业发展协调合理、产业结构升级明显、数字经济创新活跃时，可以借助发达的数字产业，实现数字技术与能源电力、工业、交通等高排放高污染重点领域深度融合，提升能源与资源使用效率，推动产业数字化，转换新旧动能，发挥实际减排效果。

### 3.3.3 技术-组织-环境均衡驱动型

组态4同时包括技术、组织、环境三大条件，故命名为技术-组织-环境均衡驱动型。该路径中，高绿色技术创新水平、高环境规制强度成为促进降碳减污耦合协调度提升的核心条件，高产业结构合理化、高产业结构高级化、高数字经济发展水平、非高公众环境关注度为其边缘条件。该组态路径下代表性省份有山东和新疆两大资源型省份。山东受资源开发压力影响，制定了一系列有力的环境保护政策和法规，并在省级重点研发计划中加大对绿色低碳科技研发支持力度，在政策扶持和需求驱动下，创新发展绿色技术受到重视并被大力推进。而且山东有序推进产业结构深度调整，持续完善绿色制造体系，聚焦数据价值化培育，产业数字化应用为传统产

业塑造优势。新疆能源资源富集,但生态系统脆弱,高强度环境规制才能抑制人类活动对自然环境带来的损害。同时在对口援疆背景下,新疆受益于东部地区先进绿色技术的流入<sup>[53]</sup>,应用绿色新技术不断调整优化产业结构、能源结构,升级传统产业,推进延链、补链、强链,推动数字技术与工业降碳融合发展,促进降碳、减污、扩绿、增长协同推进。

资源型地区通常面临更严重的资源开发和利用所带来的环境问题,更加严格的环保政策和法规可以有效防止和减少二氧化碳和污染物的排放,保护生态环境的稳定性和可持续性<sup>[54]</sup>。并且通过引进和推广绿色技术,可以降低资源型地区对传统高碳能源的依赖,推动能源结构的转型升级,提高资源利用效率,减少污染物和碳排放。此外,数字化技术能够在资源开采中建立数值模型,自适应优化决策,动态监测预测,助力构建清洁低碳、安全高效的产业体系。

### 3.3.4 进一步分析

对比4条组态路径可以发现,绿色技术创新、产业结构调整和数字经济发展在区域降碳减污协同推进过程中发挥着更为重要的作用。说明绿色技术创新是推动绿色低碳发展的必然选择,可以显著提高能源利用效率,并促进可再生能源发展,减少经济社会对化石能源的依赖,改善能源结构,从而有效降低碳排放与污染物排放。产业结构调整是推动绿色低碳发展的重要举措,通过优化产业结构,可以加快传统高耗能、高污染行业向绿色低碳方向转型升级。数字经济的发展对区域降碳减污协同推进也起到关键作用,数字技术的应用可有效提高能源资源利用效率,数字化转型可为现代化产业体系提供规模、效率和融合效应等多维赋能作用。而数字经济和绿色经济良性互动、融合发展所生成的“数字红利”则能够为现代化产业体系提供新的增长点,实现在绿色低碳中可持续发展<sup>[55]</sup>。

### 3.4 稳健性检验

首先,借鉴李晓娣等<sup>[56]</sup>的方法,将一致性阈值调整至0.85,得到的组态结果与原结果完全一致。其次,为排除对变量校准分位数的不同而产生的差异,调整校准锚点,用90%、50%、10%的分位数代替之前85%、50%、15%的分位数重新对变量进行校准,频数阈值为1,一致性阈值为0.8,PRI一致性为0.7,再进行组态分析,结果如表8所示。产生的组态与前文结果高度一致,组态类别未发生变化,且解的覆盖度和一致性变化很小。说明本文研究结果稳健。

表 8 组态分析稳健性检验结果

类别 条件组态	技术-环境驱动型		组织-环境驱动型	技术-组织-环境均衡驱动型
	组态1	组态2	组态3	组态4
绿色技术创新	○	○	⊗	●
环境规制强度		⊗	○	●
产业结构合理化	△	△	△	○
产业结构高级化	△		○	○
数字经济发展水平		●	●	○
公众环境关注度	●	○	⊗	⊗
原始覆盖度	0.465	0.211	0.172	0.137
唯一覆盖度	0.251	0.006	0.062	0.036
一致性	0.884	0.880	0.824	0.876
典型案例	河北、安徽	江苏、辽宁	黑龙江	山东、新疆
总体覆盖度			0.574	
总体一致性			0.829	

## 4 结论与启示

### 4.1 研究结论

在贯彻新发展理念背景下,降碳减污协同推进成为我国新发展阶段生态文明建设的重要内容和必然选择,提升降碳减污协同水平对于实现人与自然和谐共生具有重要意义。本文基于TOE研究框架,以绿色技术创新、环境规制强度、产业结构合理化、产业结构高级化、数字经济发展水平和公众环境关注度等影响因素作为条件变量,结合NCA和fsQCA方法,从组态视角分析了区域降碳减污协同推进的差异化路径。得出以下结论:

1) 2012—2021年各省降碳减污耦合协调度整体水平相对较高,在0.605~0.973之间,各年度均处于协调发展类别.全国耦合协调度平均水平在2012—2019年处于逐年增长的态势,到2019年,各省基本上处于良好和优质水平,但是2020年耦合协调度由前一年的0.870下降至0.858.东部地区省份降碳减污耦合协调水平呈现两极分化的状态;中部地区省份耦合协调度极差较小,整体处于良好协调等级;西部地区西藏、云南、青海耦合协调度历年处于高位,整体属于优质协调等级,西部其它省份耦合协调度水平呈现良好状态.

2) 必要条件分析发现绿色技术创新、环境规制强度、产业结构合理化/高级化、数字经济发展水平、公众环境关注度等因素不单独构成降碳减污高耦合协调度的必要条件,区域降碳减污高耦合协调度是技术、组织、环境三方面因素多重作用的结果,体现了降碳减污协同推进的复杂性.

3) 组态分析发现区域降碳减污协同推进共有4条路径,分别是:以公众环境关注度为核心的技术-环境驱动型,典型省份有河北、安徽;以数字经济发展水平为核心的技术-环境驱动型,典型省份有江苏、辽宁;以产业结构合理化为核心的组织-环境驱动型,典型省份是吉林;以绿色技术创新和环境规制强度为核心的技术-组织-环境均衡驱动型,典型省份有山东、新疆.

4) 对比组态路径发现,绿色技术创新、产业结构调整和数字经济发展在降碳减污协同推进过程中起主导作用,均能提高能源资源使用效率.绿色技术创新与产业结构升级能够在长期内实现持续的碳减排效应,数字经济与传统产业的绿色融合也对降碳减污具有重要意义.

#### 4.2 政策启示

1) 地方政府可以从降碳减污耦合协调度水平去考察当地降碳减污协同推进的成果,借鉴不同地区降碳减污经验,加强省际合作,保持已有成果,争取最佳效果.鉴于东部地区降碳减污耦合协调水平出现两极分化的情况,可以鼓励省份之间加强交流合作,分享最佳实践,以提高整体协调水平.为进一步改善中部地区的降碳减污耦合协调水平,政府可以同东部高耦合协调度地区加强联系,推进绿色技术创新与合作,引导企业采用更高效、低排放的生产技术和设备.针对西部地区部分省份的良好协调等级,可以加强对清洁能源项目的支持和投资,推动可再生能源的开发和利用,进一步降低碳排放和污染物排放水平.西部地区西藏、云南、青海等,虽然已经处于优质协调等级,但仍需加强环境治理和保护,保障生态环境质量,继续加强降碳减污协同增效工作.

2) 地方政府应重视区域降碳减污协同推进的组态效应并选择合适的驱动路径,同时发挥路径中核心因素的关键作用.多条组态路径的存在,说明只靠单一因素无法实现区域降碳减污协同增效,只有将多种因素联动匹配才能实现降碳减污更好效果.同时组态路径中存在核心因素,应发挥核心因素在节能减排、绿色低碳转型中的关键作用和引领作用,实现降碳减污边际效益最大化.政府和企业应深入了解本地区的产业结构、能源结构、环境状况以及发展需求,推动技术、组织和环境三个层面的协同互补,制定符合实际情况的政策和措施,从而实现降碳减污的目标.

3) 降碳减污协同推进过程中应更加重视绿色技术创新、产业结构调整和数字经济发展对节能减排的重要作用.政府和相关利益方应加大对绿色技术研发和应用的支持,提供资金和税收优惠,鼓励企业增加研发投入,培育绿色创新型企业 and 科研机构.重视和引导产业结构调整,推动传统高耗能、高污染行业的优化升级,引导企业绿色低碳转型.在数字经济发展方面,政府应加大数字基础设施建设的投资,鼓励企业采用数字技术提高能源资源利用效率,降低能源消耗强度,推动产业数字化转型,促进数字化转型和绿色低碳转型有机结合,实现降碳减污协同增效.

#### 参考文献:

- [1] WANG H, GU K Y, SUN H, et al. Reconfirmation of the symbiosis on carbon emissions and air pollution: A spatial spillover perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159906.
- [2] SHI X R, ZHENG Y X, LEI Y, et al. Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148784.
- [3] 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(1):85-95.  
GU B J, ZHAO H X, LUO X L, et al. Research progress and prospect of collaborative reduction of pollution and carbon dioxide based on bibliometrics[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1): 85-95. (in Chinese)
- [4] 杜运周,刘秋辰,陈凯薇,等.营商环境生态、全要素生产率与城市高质量发展的多元模式:基于复杂系统观的组态分析[J].*管理世界*,2022,38(9):127-145.

- DU Y Z, LIU Q C, CHEN K W, et al. Ecosystem of doing business, total factor productivity and multiple patterns of high-quality development of Chinese cities: A configuration analysis based on complex systems view[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(9): 127-145. (in Chinese)
- [5] 刘茂辉,岳亚云,刘胜楠,等. 基于STIRPAT模型天津减污降碳协同效应多维度分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1277-1286. LIU M H, YUE Y Y, LIU S N, et al. Multi-dimensional analysis of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin based on the STIRPAT model[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1277-1286. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 苗安康,袁越,吴涵,等. 中国省域碳达峰路径与政策[J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4623-4636. MIAO A K, YUAN Y, WU H, et al. Pathway and policy for China's provincial carbon emission peak[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4623-4636. (in Chinese)
- [8] 涂正革. 降碳减污增效的协同研究: 基于SBM方法对高能耗企业的硫碳减排效率测度[J]. *华中师范大学学报(人文社会科学版)*, 2023, 62(5): 161-174. TU Z G. On the synergy of carbon reduction, pollution reduction and efficiency enhancement: Measurement of sulfur and carbon emission reduction efficiency for high energy consumption enterprises based on SBM model[J]. *Journal of Central China Normal University(Humanities and Social Sciences)*, 2023, 62(5): 161-174. (in Chinese)
- [9] 姜钰卿,唐旭,任凯鹏,等. 基于双层嵌套SDA的中国减污降碳驱动因素研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(12): 3294-3304. JIANG Y Q, TANG X, REN K P, et al. Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double-layer nested SDA[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2022, 42(12): 3294-3304. (in Chinese)
- [10] 宋德勇,陈梁,王班班. 环境权益交易如何实现减污降碳协同增效: 理论与经验证据[J]. *数量经济技术经济研究*, 2024, 41(2): 171-192. SONG D Y, CHEN L, WANG B B. How environmental trading achieve the synergistic effects of pollution and carbon reduction: Theoretical and empirical evidence[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2024, 41(2): 171-192. (in Chinese)
- [11] CHEN X L, MENG Q G, WANG K K, et al. Spatial patterns and evolution trend of coupling coordination of pollution reduction and carbon reduction along the Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110797.
- [12] HU C Q, MA X Y, YANG L, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of the synergy of "pollution reduction, carbon reduction, green expansion and economic growth": Evidence from 243 cities in China[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1202898.
- [13] 狄乾斌,陈小龙,侯智文. "双碳"目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1155-1167. DI Q B, CHEN X L, HOU Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbone mission reduction in the three major urban agglomerations of China under the "Double-Carbon" targets[J]. *Resources Science*, 2022, 44(6): 1155-1167. (in Chinese)
- [14] 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. ZHANG X C, CAO X, SONG L H. Study on measurement and influencing factors of air pollution and carbon reduction efficiency in China based on super SBM and Tobit models[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(10): 174-183. (in Chinese)
- [15] 王慧,孙慧,肖涵月,等. 碳达峰约束下减污降碳的协同增效及其路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 96-108. WANG H, SUN H, XIAO H Y, et al. Synergistic effects and paths of pollution and carbon reduction under the constraint of carbon peak goal[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(11): 96-108. (in Chinese)
- [16] JAHANGER A, OZTURK I, ONWE J C, et al. Do technology and renewable energy contribute to energy efficiency and carbon neutrality? Evidence from top ten manufacturing countries[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 56: 103084.
- [17] ZHU X W. Have carbon emissions been reduced due to the upgrading of industrial structure? Analysis of the mediating effect based on technological innovation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(36): 54890-54901.
- [18] 刘亦文,周韶成. 正式与非正式环境规制政策协同的减污降碳效应研究[J]. *财经论丛*, 2023(8): 103-112.

- LIU Y W, ZHOU S C. The coordination mechanism of formal and informal environmental regulation reducing pollution and carbon emission benefits[J]. *Collected Essays on Finance and Economics*, 2023(8): 103-112. (in Chinese)
- [19] LI Z G, WANG J. The dynamic impact of digital economy on carbon emission reduction: Evidence city-level empirical data in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 351: 131570.
- [20] 杨刚强, 王海森, 范恒山, 等. 数字经济的碳减排效应: 理论分析与经验证据[J]. *中国工业经济*, 2023(5): 80-98.  
YANG G Q, WANG H S, FAN H S, et al. Carbon reduction effect of digital economy: Theoretical analysis and empirical evidence[J]. *China Industrial Economics*, 2023(5): 80-98. (in Chinese)
- [21] 吴力波, 杨眉敏, 孙可贺. 公众环境关注度对企业和政府环境治理的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(2): 1-14.  
WU L B, YANG M M, SUN K G. Impact of public environmental attention on environmental governance of enterprises and local governments[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(2): 1-14. (in Chinese)
- [22] SHARIF A, KARTAL M T, BEKUN F V, et al. Role of green technology, environmental taxes, and green energy towards sustainable environment: Insights from sovereign Nordic countries by CS-ARDL approach[J]. *Gondwana Research*, 2023, 117: 194-206.
- [23] KHAN Z, ALI S, UMAR M, et al. Consumption-based carbon emissions and international trade in G7 countries: The role of environmental innovation and renewable energy[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 138945.
- [24] ALVAREZ-HERRANZ A, BALSALOBRE-LORENTE D, SHAHBAZ M, et al. Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels[J]. *Energy Policy*, 2017, 105: 386-397.
- [25] 孙慧, 邓又一. 环境政策“减污降碳”协同治理效果研究: 基于排污费征收视角[J]. *中国经济问题*, 2022(3): 115-129.  
SUN H, DENG Y Y. The effect of “reducing pollution and carbon emissions” in environmental policy: A study based on the perspective of pollution fee collection[J]. *China Economic Studies*, 2022(3): 115-129. (in Chinese)
- [26] LIN B Q, ZHANG A X. Can government environmental regulation promote low-carbon development in heavy polluting industries? Evidence from China’s new environmental protection law[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 99: 106991.
- [27] 周行, 马延柏. 地方政府“降碳减污”协同治理的减排效应研究: 基于环境规制策略的调节效应[J]. *经济与管理*, 2023, 37(3): 40-48.  
ZHOU H, MA Y B. Research on emission reduction effect of local government’s “reduction of pollution and carbon emissions” coordinated governance: Moderation effect based on environmental regulation strategy[J]. *Economy and Management*, 2023, 37(3): 40-48. (in Chinese)
- [28] LI G Q, JIN Y P, GAO X. Digital transformation and pollution emission of enterprises: Evidence from China’s micro-enterprises[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 552-567.
- [29] LYU C C, SONG J, LEE C C. Can digital finance narrow the regional disparities in the quality of economic growth? Evidence from China[J]. *Economic Analysis and Policy*, 2022, 76: 502-521.
- [30] 严太华, 朱梦成. 技术创新、产业结构升级对环境污染的影响[J]. *重庆大学学报(社会科学版)*, 2023, 29(5): 70-84.  
YAN T H, ZHU M C. The impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution[J]. *Journal of Chongqing University(Social Science Edition)*, 2023, 29(5): 70-84. (in Chinese)
- [31] 陆敏, 徐好, 陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 121-133.  
LU M, XU H, CHEN F X. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emissions trading mechanism in the context of the “dual carbon” goals[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(11): 121-133. (in Chinese)
- [32] 王芝炜, 孙慧, 张贤峰, 等. 用能权交易制度能否实现减污降碳的双重环境福利? [J]. *产业经济研究*, 2023(4): 15-26+39.  
WANG Z W, SUN H, ZHANG X F, et al. Can the energy quota trading system achieve the double environmental benefits of reducing pollution and carbon emissions? [J]. *Industrial Economics Research*, 2023(4): 15-26+39. (in Chinese)
- [33] 叶芳羽, 单汨源, 李勇, 等. 碳排放权交易政策的减污降碳协同效应评估[J]. *湖南大学学报(社会科学版)*, 2022, 36(2): 43-50.  
YE F Y, SHAN M Y, LI Y, et al. An evaluation of the synergistic effect of air pollutants and carbon reduction of the carbon emissions trading policy[J]. *Journal of Hunan University(Social Sciences)*, 2022, 36(2): 43-50. (in Chinese)
- [34] 朱思瑜, 于冰. “排污权”和“碳排放权”交易的减污降碳协同效应研究: 基于污染治理和政策管理的双重视角[J]. *中国环境管理*, 2023, 15(1): 102-109.  
ZHOU S Y, YU B. Research on the co-benefits of pollution reduction and carbon reduction of “emissions trading” and “carbon emissions trading”: Based on the dual perspectives of pollution control and policy management[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2023, 15(1): 102-109. (in Chinese)

- [35] 孙秀梅,闫肃. TOE框架下资源型城市低碳转型驱动路径:基于我国108个资源型城市的fsQCA研究[J]. 科技进步与对策, 2023, 40(23): 72-81.  
SUN X M, YAN S. The driving path for low-carbon transformation of resource-dependent cities under the TOE framework: An fsQCA research based on 108 resource-dependent cities in China[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2023, 40(23): 72-81. (in Chinese)
- [36] 闫华飞,牛兰兰,肖静. TOE框架下地区碳减排的组态路径研究[J]. 管理学报, 2023, 36(3): 35-48.  
YAN H F, NIU L L, XIAO J. Research on the configuration path of regional carbon emission reduction under the framework of TOE[J]. Journal of Management, 2023, 36(3): 35-48. (in Chinese)
- [37] LUO L, WANG Y N, 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: 109473.
- [38] BRYAN J D, ZUVA T. A review on TAM and TOE framework progression and how these models integrate[J]. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2021, 6(3): 137-145.
- [39] 任喜萍,殷仲义. 中国省域人口集聚、公共资源配置与服务业发展时空耦合及驱动因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 77-86.  
REN X P, YIN Z Y. Spatial-temporal coupling and driving factors of provincial population aggregation, public resource allocation and service industry development in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 77-86. (in Chinese)
- [40] DUL J. Necessary condition analysis (NCA): Logic and methodology of “necessary but not sufficient” causality[J]. Organizational Research Methods, 2016, 19(1): 10-52.
- [41] 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): 141-155.  
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): 141-155. (in Chinese)
- [42] RAGIN C C. Redesigning social inquiry: Fuzzy sets and beyond[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2008.
- [43] NIE C F, LEE C C. Synergy of pollution control and carbon reduction in China: Spatial-temporal characteristics, regional differences, and convergence[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 101: 107110.
- [44] 易兰,杨田恬,杜兴,等. 减污降碳协同路径研究:典型国家驱动机制及对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(9): 53-65.  
YI L, YANG T T, DU X, et al. Collaborative pathways of pollution reduction and carbon abatement: Typical countries' driving mechanisms and their implications for China[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(9): 53-65. (in Chinese)
- [45] 吴忠,关娇,何江. 最低工资标准测算实证研究:基于CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J]. 当代经济科学, 2019, 41(3): 103-117.  
WU Z, GUAN J, HE J. An empirical study on the calculation of minimum wage standard: Dynamic combination calculation based on objective weight of CRITIC-entropy weight method[J]. Modern Economic Science, 2019, 41(3): 103-117. (in Chinese)
- [46] 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. (in Chinese)
- [47] 干春晖,郑若谷,余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011, 46(5): 4-16+31.  
GAN C H, ZHENG R G, YU D F. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China[J]. Economic Research Journal, 2011, 46(5): 4-16+31. (in Chinese)
- [48] 赵涛,张智,梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展:来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 2020, 36(10): 65-76.  
ZHAO T, ZHANG Z, LIANG S K. Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. Journal of Management World, 2020, 36(10): 65-76. (in Chinese)
- [49] 王勇,郝翠红,施美程. 环境污染激发公众环境关注了吗? [J]. 财经研究, 2018, 44(11): 106-124.  
WANG Y, HAO C H, SHI M C. Does environmental pollution provoke public environmental concern? [J]. Journal of Finance and Economics, 2018, 44(11): 106-124. (in Chinese)
- [50] 伊志宏,陈欣,田柳. 公众环境关注对企业绿色创新的影响[J]. 经济理论与经济管理, 2022, 42(7): 32-48.  
YI Z H, CHEN X, TIAN L. The effect of public environmental concerns on corporate green innovation[J]. Economic Theory and

Business Management, 2022, 42(7): 32-48. (in Chinese)

- [51] 王娟娟, 余干军. 我国数字经济发展水平测度与区域比较[J]. 中国流通经济, 2021, 35(8): 3-17.  
WANG J J, SHE G J. Measurement and regional comparison of digital economy development level in China[J]. China Business and Market, 2021, 35(8): 3-17. (in Chinese)
- [52] 陈雨露. 数字经济与实体经济融合发展的理论探索[J]. 经济研究, 2023, 58(9): 22-30.  
CHEN Y L. Theoretical exploration on the integration and development of digital economy and real economy[J]. Economic Research Journal, 2023, 58(9): 22-30. (in Chinese)
- [53] 徐明. 中国省际合作帮扶政策的经济效应: 对21世纪“19省市对口援疆大型区域扶贫项目”的评估[J]. 经济学(季刊), 2023, 23(3): 1202-1225.  
XU M. Economic effects of China's inter-provincial cooperation and assistance policy: Evaluation of the “19 provinces and cities counterpart aid Xinjiang large-scale regional poverty alleviation project” in the 21 century[J]. China Economic Quarterly, 2023, 23(3): 1202-1225. (in Chinese)
- [54] LI W Q, SUN H P, TRAN D K, et al. The impact of environmental regulation on technological innovation of resource-based industries[J]. Sustainability, 2020, 12(17): 6837.
- [55] 蒋金荷. 可持续数字时代: 数字经济与绿色经济高质量融合发展[J]. 企业经济, 2021, 40(7): 23-30+161.  
JIANG J H. Sustainable digital era: High-quality integration and development of digital economy and green economy[J]. Enterprise Economy, 2021, 40(7): 23-30+161. (in Chinese)
- [56] 李晓娣, 饶美仙, 原媛. 数智情境下如何提升区域创新生态系统能级? [J]. 科学学研究, 2024, 42(9): 1988-1999.  
LI X D, RAO M X, YUAN Y. How to enhance the regional innovation ecosystem's energy-level in the context of “data and intelligence”? [J]. Studies in Science of Science, 2024, 42(9): 1988-1999. (in Chinese)

责任编辑: 张自强

(上接第 656 页)

### 3 Concluding Remark

The hypercube is one of the most commonly studied interconnection network models. Therefore, it is of great interest to study the graphical behavior of hypercubes, including the investigation of the  $r$ -hued chromatic number of the hypercubes. In this paper, we determine the value or upper bounds of the  $r$ -hued chromatic number of hypercubes for smaller values of  $r$ . As  $3 = 2^2 - 1$  and  $7 = 2^3 - 1$  are Mersenne primes. The results obtained seem to suggest that the following.

**Conjecture 1** For any integer  $n$  between two consecutive Mersenne primes  $\ell$  and  $k$  with  $\ell < k$ , the  $r$ -hued chromatic number of  $Q_n$  is always  $k + 1$ .

### References:

- [1] CHEN Y, FAN S H, LAI H J, et al. Graph  $r$ -hued colorings: A survey[J]. Discrete Applied Mathematics, 2022, 321: 24-48.
- [2] AKBARI S, GHANBARI M, JAHANBEKAM S. On the dynamic coloring of Cartesian product graphs[J]. Ars Combinatoria, 2014, 114: 161-168.
- [3] JAHANBEKAM S, KIM J, SUIL O, et al. On  $r$ -dynamic coloring of graphs[J]. Discrete Applied Mathematics, 2016, 206: 65-72.
- [4] SUIL O. Matchings, connectivity, and eigenvalues in regular graphs[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [5] SHAO R F, ZUO L C.  $r$ -hued coloring of cartesian product of path with its square[J]. Advances in Mathematics, 2019, 48(1): 21-28.
- [6] LAI H J, LIN J L, MONTGOMERY B, et al. Conditional colorings of graphs[J]. Discrete Mathematics, 2006, 306(16): 1997-2004.
- [7] RIX J G. Hypercube coloring and the structure of binary codes[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2008.

责任编辑: 张自强 刘敏