

城市群经济-能源-碳排放系统协同状态提升的条件组态与驱动路径——基于 NCA 与动态 fsQCA 的京津冀证据

谭娟

管理学院, 天津理工大学, 天津 300384, 中国

摘要: 城市群经济-能源-碳排放系统协同状态的提升路径具有显著因果复杂性, 传统回归框架下的单因素净效应难以刻画多重条件并发的驱动逻辑。以京津冀城市群 13 个城市 2010—2024 年面板为样本, 以耦合协调度作为协同状态的代理测度, 集成必要条件分析与动态模糊集定性比较分析方法, 从规模、结构、效率三维框架遴选经济规模、产业结构、能源结构、能源效率、清洁技术与碳效率 6 项前因条件, 识别高协同与非高协同状态的条件组态及其跨期演化。研究发现: 单一条件不构成协同状态提升的严格必要条件, 但经济规模、产业结构、能源结构与清洁技术呈大效应量必要性特征, 各条件瓶颈水平随协同目标提高呈阶梯式陡增; 高协同状态存在多维复合驱动与规模-技术补偿驱动两条等效路径, 非高协同状态由要素缺失联合与效率失衡联合两条路径锁定, 两类结果的生成逻辑呈显著因果非对称性; 组态跨期一致性稳健, 条件作用强度呈持续增强、持续衰减与倒 U 型三类演化模式。研究结论为城市群差异化低碳协同治理提供了组态证据。

关键词: 城市群; 经济-能源-碳排放系统; 协同状态; 组态路径

Conditional Configurations and Driving Paths for Synergistic State Enhancement of the Economy-Energy-Carbon Emission System in Urban Agglomerations: Evidence from the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on NCA and Dynamic fsQCA

Juan Tan

School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, Tianjin, China

Abstract: The enhancement of the synergistic state of the economy-energy-carbon emission (EEC) system in urban agglomerations exhibits significant causal complexity, and the net effects of single factors under traditional regression frameworks fail to capture the driving logic of multiple concurrent conditions. Taking panel data of 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2010 to 2024 as the research sample, this study employs the coupling coordination degree as a proxy measure of the synergistic state, integrates Necessary Condition Analysis (NCA) with dynamic fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA), and selects six antecedent conditions,

namely economic scale, industrial structure, energy structure, energy efficiency, clean technology and carbon efficiency, from the scale-structure-efficiency framework to identify the conditional configurations leading to high and non-high synergistic states as well as their temporal evolution. The results show that: no single condition constitutes a strictly necessary condition for synergistic state enhancement, but economic scale, industrial structure, energy structure and clean technology exhibit necessity characteristics with large effect sizes, and the bottleneck levels of all conditions rise in a stepwise manner as the synergy target increases; two equivalent paths exist for high synergistic states, namely multi-dimensional composite driving and scale-technology compensating driving, whereas non-high synergistic states are locked in by two paths featuring the joint absence of endowments and the imbalance of efficiency, revealing significant causal asymmetry between the two types of outcomes; the configurations are temporally robust, and the action intensity of conditions evolves in three patterns, namely continuous strengthening, continuous decay and inverted-U fluctuation. The findings provide configurational evidence for differentiated low-carbon synergistic governance of urban agglomerations.

Keywords: Urban agglomeration; Economy-energy-carbon emission system; Synergistic state; Configurational path

一、引言

在碳达峰碳中和目标约束下，城市群作为承载经济产出与能源消费的主要空间单元，其经济、能源与碳排放子系统之间的协同状态，直接决定区域低碳转型的整体进程。京津冀城市群内部核心城市与外围城市在人均产出、能耗强度与碳排放效率上存在数倍级差距，系统协同状态长期处于低水平区间，如何通过条件组合的配置优化推动协同状态提升，是区域低碳治理亟待回答的现实问题，也是复合系统协同研究需要深化的理论问题。

围绕经济-能源-环境复合系统的协同状态，既有研究已积累较为丰富的测度成果。耦合协调度模型因其形式简洁与结果可比的特性，成为刻画系统协同状态的主流工具，相关研究在指标体系构建、权重确定与时空演化刻画方面日趋成熟。然而，测度研究回答的是协同状态处于何种水平的问题，无法回答协同状态何以提升的问题。就后者而言，既有机制研究多在回归范式下展开，将协同状态差异归因于经济规模、产业结构、能源效率等因素的边际净效应。此类分析隐含因果对称性与变量独立性假设，其逻辑前提是单一因素的边际变化可以独立于其他因素而解释结果差异。对于由多子系统非线性相互作用构成的复合系统而言，上述假设与系统的真实生成逻辑之间存在张力：协同状态的提升并非单一因素线性改善的加总，而是多重条件并发组合的产物。

组态理论与定性比较分析方法的兴起为突破上述局限提供了方法论基础。组态视角主张以条件组合的整体构型而非孤立变量作为分析单元，承认多重并发因果、等效性与因果非对称性的存在[1-2]，已在营商环境、区域创新与城市高质量发展等议题中展现出对复杂管理问题的解释力[3-4]。但就低碳领域而言，组态方法的应用尚处于起步阶段，且已有应用多为截面数据下的静态分析，条件组合的时间稳定性与条件作用强度的动态演化未获充分讨论[5]。面板数据的集合论分析框架虽已具备方法雏形[6]，其与必要性分析相集成并应用于城市群复合系统协同研究的成果仍属空白。

据此，本文以京津冀城市群 13 个城市 2010—2024 年面板为样本，以耦合协调度作为协同状态的代理测度，集成必要条件分析与动态模糊集定性比较分析，从规模、结构、效率三维框架遴选 6 项前因条件，依次执行必要性门槛识别、充分性组态提取与跨期稳健性检验，回答如下问题：何种条件组合驱动城市群经济-能源-碳排放系统协同状态提升，其生成逻辑是否具有时间稳定性。本文的边际贡献在于：第一，将组态因果复杂性引入复合系统协同研究，在方法论层面实现从净效应逻辑向组态逻辑的转换，拓展了协同状态提升机制的分析视角；第二，将必要条件分析与面板数据集合论框架相集成，使必要性判定从有无深化至程度，使组态结论接受时间

维度的系统检验；第三，对高协同与非高协同状态分别识别其生成路径，揭示两类结果的非对称生成逻辑，为差异化治理提供组态证据。

二、理论基础与分析框架

（一）协同状态提升的复杂因果性

城市群经济-能源-碳排放系统是由异质性城市主体及其子系统相互作用构成的开放复杂系统。协同理论揭示，此类系统的宏观有序状态并非微观行为的线性加总，而是子系统间竞争与协同辩证统一的涌现结果[7]：城市主体在资源禀赋约束下围绕要素展开竞争，又在区域分工与政策协调下形成功能耦合，系统演化动力正来自竞争所维持的非均衡性与协同所赋予的整体性之间的张力。这一生成机制决定了协同状态的提升不存在单一因素的线性决定关系，而呈现典型的复杂因果特征。

组态理论为刻画上述复杂因果特征提供了系统的概念体系。**Ragin** 提出的组态分析范式突破了变量中心主义的净效应逻辑，强调将案例视为条件组合的整体构型[8]；**Fiss** 进一步将其提炼为三条核心命题[2]。其一，多重并发因果，即结果由条件的组合而非孤立条件所导致，同一条件在不同组合中可能发挥截然不同的作用；其二，等效性，即通往同一结果的路径可以多元，不同禀赋的主体可经由差异化的条件组合实现相同结果；其三，因果非对称性，即导致结果出现与导致结果缺席的条件组合并非简单镜像，需分别加以识别。**Misangyi** 等将上述命题概括为组态新范式的理论内核[9]，**杜运周**和**贾良定**则论证了其对管理学复杂问题的适配性[1]。

将协同理论与组态理论并置，可以发现二者在因果观上的内在同构。竞争协同机制所蕴含的演化路径非唯一性，对应组态理论的等效性命题；子系统间非线性相互作用所决定的条件作用情境依赖性，对应多重并发因果命题；系统向高有序区间跃迁与向低有序区间锁定的非互逆性，对应因果非对称性命题。据此，本文将协同状态提升的机制分析置于组态视角之下，以条件组合作为基本分析单元，分别考察高协同与非高协同两类状态的生成逻辑。这一处理既避免了还原论假设与复杂系统现实之间的矛盾，也使协同理论的定性命题获得可操作的经验检验形式[5]。

（二）前因条件的遴选与组态功能定位

组态分析要求前因条件的遴选兼顾理论覆盖与信息独立：条件数量过多将导致真值表逻辑余项急剧膨胀，条件信息重叠则模糊组态的因果结构[10]。本文从规模-结构-效率三维框架出发，沿经济驱动、能源转化、碳排放约束的传导链条遴选 6 项条件，使条件体系在结构上对应子系统间的耦合关系。**STIRPAT** 模型及其扩展研究将环境负荷分解为规模、结构与技术渠道的联合作用[11-12]，**Kaya** 分解亦将碳排放归因于经济产出、能源强度与碳强度的乘积关系，表明上述渠道构成碳排放驱动机制的公认维度；脱钩理论进一步提示，各渠道的相对强度决定经济增长与碳排放的分离程度[13]。6 项条件据此定位，其机制功能与组态角色如下。

经济规模以人均地区生产总值测度，表征经济活动的要素密度与资本积累能力。该条件处于传导链条的驱动端，为能源结构转型与清洁技术投入提供财政空间与物质基础，属于组态中的使能型条件：其单独扩张可能同时拉动能源消费，其作用方向依赖于结构与技术条件的配合。产业结构以第三产业占 GDP 比重测度，处于经济子系统与能源子系统的耦合界面，通过改变产出的部门构成弱化增长与排放的正向耦合，属于结构配置型条件。能源结构以煤炭消费占比测度，直接决定能源消费与碳排放之间的耦合强度，属于结构约束型条件，其功能在于通过品种替代改变排放的源头结构。能源效率以单位 GDP 能耗测度，表征能源向经济产出转化的反馈回路响应效率，属于效率转化型条件，其改善可压缩增长对能源投入的依赖。清洁技术以新能源企业数量测度，表征技术供给对系统有序度演化的驱动，属于技术赋能型条件，其功能在于创造新的生产可能性边界以突破高

碳路径锁定。碳效率以碳生产率测度，综合反映能源强度与碳强度的联合改善，处于连接三个子系统的枢纽位置，属于效率枢纽型条件，其提升意味着系统整体脱钩程度的改善。

需要强调的是，组态视角下条件的上述角色定位仅为理论预判，其实际作用须在与其他条件的组合中方能确定：使能型条件可能在部分组态中居于核心、在另一部分组态中退居边缘，约束型条件的缺失亦可能被其他条件的组合所补偿。这正是组态分析区别于净效应分析的关键所在，也构成下文充分性分析需要逐一检验的经验问题。

（三）理论预期：协同状态提升的多元驱动模式

规模、结构、效率三个维度为条件组合提供了三个相对独立的作用来源，而不同城市在三维度上的初始禀赋并不均衡。路径依赖与收益递增机制表明，早期发展选择经正反馈被锁定为差异化的演化轨迹[14-15]：资源禀赋与产业基础的差异不会被时间抹平，反而可能演化为稳定的模式分化。据此推断，城市群经济-能源-碳排放系统协同状态的提升不存在唯一最优的条件配置，而可能呈现四类可辨识的驱动模式。其一，规模主导驱动模式，即经济基础雄厚的城市依托经济规模的使能作用，在结构转型相对滞后的情形下仍可实现协同状态提升；其二，效率提升驱动模式，即城市依托能源效率与碳效率的联合改善，在规模与结构条件不占优的情形下压缩增长的环境成本；其三，结构转换驱动模式，即城市依托产业结构服务化与能源结构清洁化的双重转换，重塑子系统间的耦合路径；其四，多维复合驱动模式，即规模、效率与技术条件形成均衡协同的组合，推动系统进入高有序区间。上述四类模式并非互斥的理论标签，而是有待组态证据检验的理论预期，其实际形态、数量与组合结构由充分性分析识别（图1）。

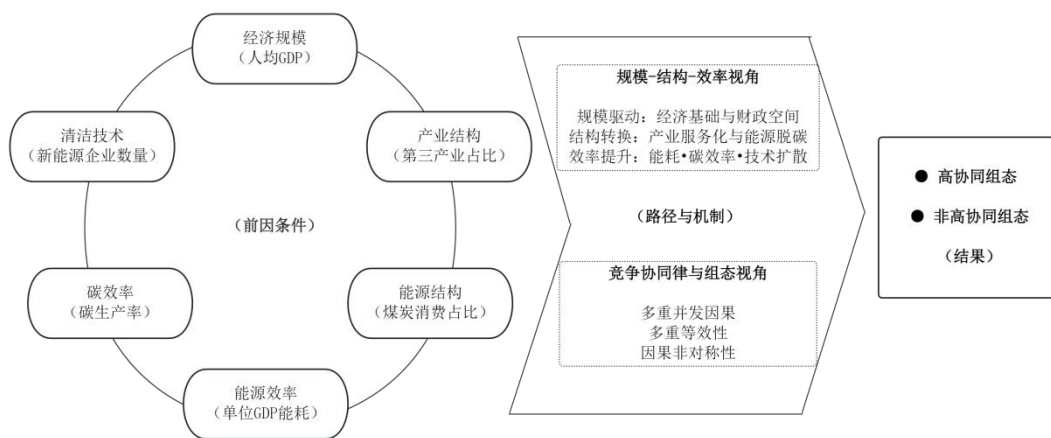


Figure 1 Analytical Framework

图1 分析框架

三、研究设计

（一）研究方法

社会科学研究需区分平均效应、必要性与充分性三类因果关系，并采用与之匹配的方法[16]。传统回归分析处理平均效应关系，基于变量独立性假设，难以识别必要与充分关系。本文集成必要条件分析（NCA）与模糊集定性比较分析（fsQCA），构建门槛识别、路径提取与稳健性检验的分析链条。首先，NCA专门处理必要性关系，能够识别结果发生所必需的条件门槛水平，回答某一前因条件需达到何种程度高协同状态方具备发生可能的问题[16]；fsQCA的必要性检验则从集合论层面判定条件集合是否构成结果集合的超集。二者互补，使必

要性判定从有无深化至程度。其次，fsQCA 将案例视为条件组合的整体构型，通过真值表分析与布尔最小化提取导致结果的充分性组态，适用于多重并发因果、等效性与因果非对称性的识别[2,8]。最后，鉴于本文数据为 13 个城市 15 个年度的面板结构，引入面板数据集合论分析框架[6]，通过组间一致性与组内一致性的双重分解，检验必要性关系与组态路径的跨期稳定性与案例异质性，克服截面 QCA 静态分析的局限。

（二）样本、数据来源与结果变量测度

本文以京津冀城市群 13 个地级及以上城市为研究单元，样本期为 2010—2024 年，共形成 195 个城市-年观测。经济数据来源于历年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北经济年鉴》及各城市国民经济和社会发展统计公报；能源数据来源于历年《中国能源统计年鉴》与分省市能源平衡表；碳排放数据以中国碳核算数据库（CEADs）城市级碳排放清单为基础[17]，研究期内缺失年份依据同一核算边界与活动水平数据来源进行方法论同质性延长，确保时间序列口径一致。涉及货币的指标均以基期不变价格平减，个别缺失值采用邻近年份插值补齐。

结果变量为城市群 EEC 系统协同状态，以耦合协调度作为其代理测度。具体测度路径为：基于规模-结构-效率框架构建涵盖经济、能源、碳排放 3 个子系统共 20 项指标的评价体系，指标选取经 42 篇核心文献的频率统计筛选；采用熵权法确定客观权重[18]，以 TOPSIS 测算各子系统综合水平[19]，进而依据耦合协调度模型测度系统协同状态[20]。限于篇幅，指标体系明细与模型设定从略，备索。需要说明的是，下文 6 项前因条件与结果变量的构成指标存在部分重叠，但耦合协调度系 20 项指标经非线性耦合结构合成的系统层面构念，任一单一指标对结果的贡献均受权重分配与耦合关系的双重衰减；组态分析考察的正是部分条件的组合对整体状态的支撑关系，属于组态研究中构成性前因的标准处理[1,9]，不构成条件与结果的机械同义反复。

（三）前因条件测量与校准

6 项前因条件的测度口径如下：经济规模以人均地区生产总值测度；产业结构以第三产业增加值占地区生产总值比重测度；能源结构以煤炭消费量占能源消费总量比重测度；能源效率以单位地区生产总值能耗测度；清洁技术以新能源企业数量测度；碳效率以碳生产率即地区生产总值与净碳排放量之比测度。各指标的数据来源与预处理口径与结果变量测度保持一致。

采用直接校准法将变量转化为模糊集隶属度[8]。鉴于各条件与协同状态均缺乏公认的外部标准，以 15 年全样本的全局分位数设定锚点：第 95 百分位数为完全隶属阈值，第 50 百分位数为交叉点，第 5 百分位数为完全不隶属阈值。全局锚点校准使各年度案例在同一集合标准下比较，保证组态分析的跨期可比性。校准采用不对称尺度算法，对交叉点上下数据段分别设定尺度参数，以保留中间过渡带的演化特征。人均 GDP、第三产业占 GDP 比重、新能源企业数量、碳生产率与耦合协调度为正向指标，直接计算隶属度；单位 GDP 能耗与煤炭消费占比为负向指标，先计算高能耗与高煤炭占比集合的隶属度，再经取反运算获得低能耗与低煤炭占比集合的隶属分数，确保真值表中条件方向与理论预期一致。为避免隶属度恰好为 0.5 的案例被自动剔除，对其加上极小常数 0.001[21]。各变量校准锚点见表 1。

Table 1 Measurement and Calibration Anchors of Variables

表 1 变量测量与校准锚点

类别	变量	测度口径	完全隶属阈值	交叉点	完全不隶属阈值
前因条件	经济规模	人均 GDP（元）	122912.549	45413.219	22222.003

前因条件	产业结构	第三产业占 GDP 比重 (%)	82.395	46.600	31.288
前因条件	能源结构	煤炭消费占比 (%)	77.710	57.000	10.046
前因条件	能源效率	单位 GDP 能耗 (吨标准煤/万元)	2.153	1.327	0.332
前因条件	清洁技术	新能源企业数量 (家)	1661.200	263.000	32.400
前因条件	碳效率	碳生产率 (元/吨)	26950.153	4495.626	2065.614
结果变量	协同状态	耦合协调度	0.620	0.395	0.309

注：能源结构与能源效率为负向指标，表中为其原始口径锚点，校准后经取反运算转化为低煤炭占比与低能耗集合；锚点基于 2010—2024 年 195 个城市-年观测的全样本分位数设定。

四、实证分析

（一）必要条件分析

1. 集合论必要性检验

依据一致性不低于 0.90 的判定标准[10]，对 6 项前因条件及其非集分别检验其作为高协同状态与非高协同状态必要条件的充分性，结果见表 2。就高协同状态而言，全部 12 种条件状态的汇总一致性均未跨越 0.90 门槛：高人均 GDP 的一致性最高（0.850），高新能源企业数量（0.825）与高第三产业占 GDP 比重（0.772）次之，表明经济规模、清洁技术与产业结构虽与高协同状态关联最强，但任一条件均不构成结果发生的刚性前提。从时间维度审视，低第三产业占 GDP 比重与低新能源企业数量的组间一致性调整距离分别为 0.410 与 0.441，超过 0.20 的警戒阈值，提示两类条件与高协同状态的关联强度在研究期内存在显著时序波动，其条件-结果关系不具备跨期稳定性，此现象留待本节第 3 部分解析。就非高协同状态而言，低人均 GDP（0.874）、低新能源企业数量（0.862）与低第三产业占 GDP 比重（0.808）的一致性接近门槛但仍未达标，高单位 GDP 能耗（0.682）与高煤炭消费占比（0.613）亦不具备必要性资格。高协同与非高协同两侧的一致性结构并不对称，初步印证了因果非对称的理论预期。

Table 2 Set-Theoretic Necessity Test of Single Conditions

表 2 单条件集合论必要性检验结果

条件变量	高协同状态			非高协同状态		
	汇总一致性	汇总覆盖度	组间调整距离	汇总一致性	汇总覆盖度	组间调整距离
高人均 GDP	0.850	0.865	0.080	0.451	0.537	0.059
低人均 GDP	0.460	0.452	0.180	0.874	0.860	0.138
高第三产业占 GDP 比重	0.772	0.788	0.120	0.522	0.621	0.159
低第三产业占 GDP	0.530	0.518	0.410	0.808	0.795	0.121

比重						
高单位 GDP 能耗	0.574	0.561	0.185	0.682	0.733	0.071
低单位 GDP 能耗	0.657	0.642	0.149	0.604	0.652	0.169
高煤炭消费占比	0.554	0.538	0.179	0.613	0.799	0.245
低煤炭消费占比	0.645	0.628	0.112	0.658	0.603	0.146
高新能源企业数量	0.825	0.841	0.145	0.445	0.564	0.318
低新能源企业数量	0.480	0.465	0.441	0.862	0.807	0.139
高碳生产率	0.672	0.689	0.165	0.585	0.729	0.195
低碳生产率	0.607	0.591	0.139	0.737	0.699	0.049

2. NCA 门槛效应与瓶颈分析

集合论必要性检验回答条件是否不可或缺的有无问题，NCA 进一步回答条件需达到何种水平的程度问题。基于上限回归（CR）方法的效应量估计与瓶颈水平测算结果见表 3。人均 GDP（0.312）、第三产业占 GDP 比重（0.298）、煤炭消费占比（0.276）与新能源企业数量（0.258）的效应量均处于大效应区间且达统计显著，构成高协同状态的必要条件候选；单位 GDP 能耗的效应量为 0.185，处于中等效应水平且边缘显著（ $p=0.032$ ）；碳生产率效应量为 0.142，未达显著性要求。该结果与集合论检验形成互补：后者在 0.90 的严格标准下未识别出必要条件，前者则揭示多项条件存在显著的程度化约束，表明协同状态提升虽无刚性门槛，但存在柔性约束结构。

Table 3 NCA Effect Sizes and Bottleneck Levels

表 3 NCA 效应量与瓶颈水平

条件变量	效应量	显著性	效应等级	瓶颈水平（各协同状态目标水平下）				
				0.3 目标	0.4 目标	0.5 目标	0.6 目标	0.7 目标
人均 GDP	0.312	<0.001	大	NN	15.2%	38.6%	62.4%	81.5%
第三产业占 GDP 比重	0.298	<0.001	大	NN	18.6%	42.1%	68.7%	86.3%
单位 GDP 能耗	0.185	0.032	中等	NN	22.4%	48.5%	76.2%	92.4%
煤炭消费占比	0.276	<0.001	大	NN	20.1%	45.3%	71.8%	88.6%
新能源企业数量	0.258	<0.001	大	NN	16.8%	39.2%	64.5%	82.1%
碳生产率	0.142	0.156	不显著	12.5%	28.3%	46.7%	65.1%	81.9%

注：瓶颈水平指达到相应协同状态目标水平时各条件需满足的隶属度下限；NN 表示该目标水平下条件未形成约束。

瓶颈水平随目标提高呈现非线性陡增的阶梯结构。当协同状态目标为 0.3 时，仅碳生产率出现 12.5% 的瓶颈值，其余条件均未形成约束，表明碳效率构成低水平协同状态的早期门槛，即使进入较低协同区间亦需碳效率维度的基础性支撑。目标提升至 0.5 时，各条件瓶颈值升至 38.6%—48.5% 区间；进一步升至 0.6 的协调类门槛时，瓶颈值陡增至 62.4%—76.2%，其中单位 GDP 能耗的瓶颈水平在各目标上均为最高，表明能源效率约束是跨越协调类门槛的首要瓶颈。瓶颈显现的时序差异为阶梯式治理提供了量化依据：碳效率约束最先显现，经济结构约束居中，能源效率与能源结构约束在迈向协调类门槛时最终成为决定因素。

3. 条件作用强度的时序演化

组间一致性调整距离超限的四组条件-结果组合，其时序轨迹呈现三类可辨识的演化模式（图 2）。其一，

持续增强型。低新能源企业数量与高协同状态的组间一致性由 2010 年的 0.250 单调升至 2024 年的 0.920（线性拟合斜率 0.048），低第三产业占 GDP 比重与高协同状态的组间一致性由 0.280 升至 0.943（斜率 0.058）。二者同步上升映射了传统工业城市非传统协同路径的制度化：研究期初新能源企业与高第三产业占比高度集聚于核心城市，随着绿色技术扩散与工业内部结构优化，部分工业城市在不具备技术集聚与产业服务化优势的情形下，依托经济规模扩张与效率边际改善实现协同状态提升，唐山即为此类轨迹的典型。其二，持续衰减型。高煤炭消费占比与非高协同状态的组间一致性由 0.852 单调降至 0.402（斜率-0.030），表明能源结构高碳特征对非高协同状态的锁定效应持续衰减，高碳依赖正由锁定变量转化为可调控因素，邯郸、邢台长期高煤炭占比但协同状态未陷深度失调可为佐证。其三，倒 U 型波动型。高新能源企业数量与非高协同状态的组间一致性由 2010 年的 0.550 升至 2015 年的峰值 0.796 后持续降至 2024 年的 0.350，映射了清洁技术集聚与协同状态之间从脱节到整合的阶段性转换：中期部分城市曾因经济规模与产业配套滞后陷入技术集聚与协同状态失衡，后期随系统整合推进，技术集聚对非高协同的解释力逐步消解。三类模式共同表明，前因条件的作用强度并非时间不变量，静态截面分析将系统性遗漏条件角色的动态信息。

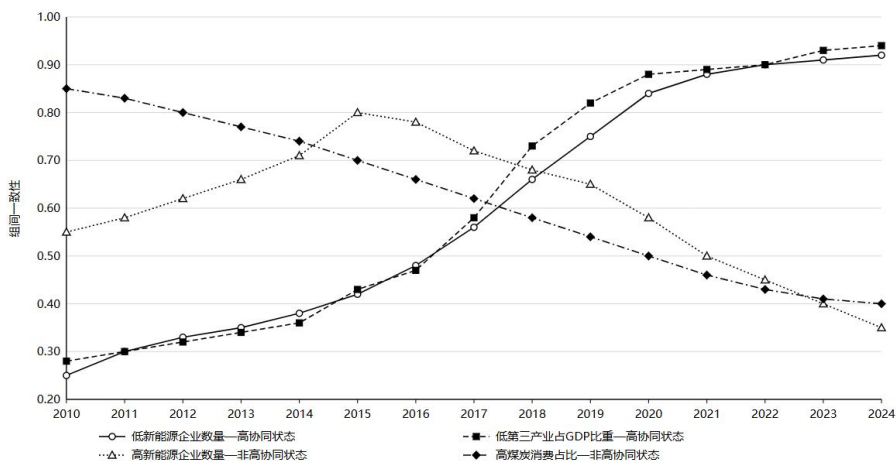


Figure 2 Between-Group Consistency Trajectories of Key Condition-Outcome Combinations (2010—2024)

图 2 关键条件-结果组合的组间一致性时序轨迹（2010—2024 年）

（二）组态充分性分析

1. 高协同状态的组态路径

以 0.5 隶属度截点对 6 项条件进行 crisp 编码后，195 个观测分布于 64 行理论配置空间中的 34 种实际配置。设定案例频数阈值不低于 2、原始一致性阈值不低于 0.80、PRI 阈值不低于 0.65[10]，高协同状态的充分配置覆盖 42 个案例（21.5%），经布尔最小化提取的两条组态路径见表 4。

Table 4 Configurational Paths for the High Synergistic State

表 4 高协同状态的组态路径

前因条件	H1	H2
人均 GDP	●（核心）	●（核心）
第三产业占 GDP 比重	●（边缘）	⊗（核心缺失）
单位 GDP 能耗	⊗（核心缺失）	—

煤炭消费占比	⊗ (边缘缺失)	—
碳生产率	● (核心)	⊗ (边缘缺失)
新能源企业数量	● (核心)	● (核心)
一致性	0.910	0.925
原始覆盖度	0.468	0.405
唯一覆盖度	0.199	0.136
解的一致性	0.928	
解的覆盖度	0.604	

注：●表示条件存在，⊗表示条件缺失；核心条件指同时出现于简约解与中间解的条件，边缘条件指仅出现于中间解的条件；—表示该条件对路径可有可无。低碳生产率在 H2 中作为补充性边缘条件出现于复杂解。

H1 的一致性为 0.910，原始覆盖度 0.468，覆盖北京（2010—2024 年）、天津（2019—2023 年）、石家庄（2022—2024 年）、廊坊（2022—2024 年）共 26 个典型城市-年。该路径以高人均 GDP、低单位 GDP 能耗、高新能源企业与高碳生产率四项条件为核心，高三产占比与低煤炭占比为边缘增益，规模、效率与技术三类机制形成枢纽组合，本文将其命名为多维复合驱动型。H2 的一致性为 0.925，原始覆盖度 0.405，覆盖唐山（2017—2024 年）、承德（2020—2023 年）、邯郸（2022 年）、天津（2024 年）共 14 个典型城市-年。该路径以高人均 GDP、低第三产业占比与高新能源企业为核心，产业结构重型化的约束客观在场，其充分性并非来自结构短板的消除，而是来自经济规模与清洁技术集聚对结构短板的补偿，本文将其命名为规模-技术补偿驱动型。

对照第二部分（三）的理论预期：多维复合驱动模式由 H1 直接验证；规模主导驱动模式以规模-技术补偿的经验形态由 H2 验证；效率提升机制未以独立路径出现，而是嵌入 H1 的核心条件组合；结构转换驱动模式未获得独立的组态证据，其对应的理论配置在样本中缺乏充分性支持。四类预期中两类获得直接验证、一类以嵌入形态存在、一类未获支持，这一分布本身即构成对理论推演的经验修正。

2. 非高协同状态的组态路径

非高协同状态的充分配置覆盖 111 个案例（56.9%），经布尔最小化提取的两条路径见表 5。L1 的一致性为 0.937，原始覆盖度 0.743，覆盖保定（2010—2016 年）、衡水（2010—2018 年）、邢台（2010—2017 年）、沧州（2010—2015 年）、张家口（2010—2016 年）、承德（2010—2016 年）等 51 个典型城市-年，其核心条件为低人均 GDP 与低第三产业占 GDP 比重的联合缺失，本文命名为要素缺失联合型。L2 的一致性为 0.958，原始覆盖度 0.533，覆盖保定（2010—2020 年）、衡水（2010—2018 年、2020 年）、沧州（2011 年、2013—2019 年）等 42 个典型城市-年，其核心条件为高单位 GDP 能耗与高碳生产率的联合，高煤炭消费占比与低新能源企业数量为边缘条件，本文命名为效率失衡锁定型。L2 中高碳生产率与高能耗强度的并存看似矛盾，实则反映低排放基数城市碳生产率的相对性：在排放分母较小的情形下，即使能耗强度居高，碳生产率仍可处于高位，碳效率的表观改善并未转化为协同状态的提升。同一条件在 H1 中构成高协同的核心驱动、在 L2 中嵌入非高协同的锁定结构，为条件作用依组合而定的组态逻辑提供了直接例证。

Table 5 Configurational Paths for the Non-High Synergistic State

表 5 非高协同状态的组态路径

前因条件	L1	L2
人均 GDP	⊗ (核心缺失)	—

第三产业占 GDP 比重	⊗ (核心缺失)	—
单位 GDP 能耗	—	● (核心)
煤炭消费占比	—	● (边缘)
碳生产率	—	● (核心)
新能源企业数量	—	⊗ (边缘缺失)
一致性	0.937	0.958
原始覆盖度	0.743	0.533
唯一覆盖度	0.258	0.048
解的一致性		0.933
解的覆盖度		0.791

注：同表 4。

对比两类结果的组态结构，因果非对称性显著。高协同路径呈现替代性特征：H1 与 H2 依托差异化机制，城市可依据自身禀赋选择适宜的条件组合，体现殊途同归的等效性逻辑。非高协同路径呈现联合性特征：L1 要求经济规模与产业结构的双重缺失联合，L2 要求能耗强度约束与低基数碳效率的失衡联合，单一条件的缺失均不足以将系统锁定于非高协同状态。这从组态层面解释了本部分（一）无严格必要条件的检验结果：非高协同的生成机制是条件联合而非条件孤立，相应的治理含义是单点干预难以解锁，需以条件组合为干预单元。

3. 组态路径的跨期稳定性

基于面板数据集合论框架对各路径逐年计算组间一致性，检验组态结论的时间稳健性（图 3）。H1、H2、L1 与 L2 的组间一致性调整距离分别为 0.164、0.152、0.073 与 0.121，均低于 0.20 的警戒阈值，表明各组态与结果的关联在 2010—2024 年间未发生系统性漂移。具体轨迹上，H1 由 2010 年的 0.990 降至 2018 年的 0.830 后回升至 2024 年的 0.917，H2 由 0.981 降至 2017 年的 0.835 后恢复至 0.947，两条高协同路径在外部冲击年份前后出现幅度有限的集体波动，未改变其充分性地位；L1 由 0.918 稳升至 0.983，为四条路径中时间稳定性最强者；L2 的年度波动相对明显，但各年度一致性均未跌破充分性阈值。组内一致性方面，四条路径的中位数均为 1.000，H1、H2 的下界分别为 0.215 与 0.217，系少数边界案例所致；L1 的下界为 0.391、下四分位数为 0.973，L2 的下界为 0.448，非高协同路径的组内一致性整体优于高协同路径，与两类解的一致性水平相一致。

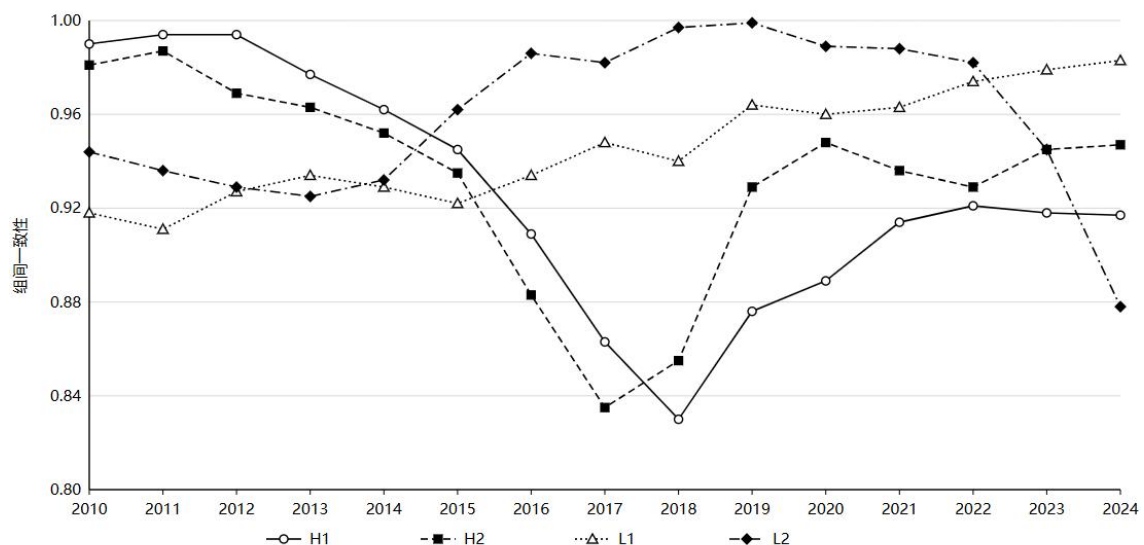


Figure 3 Annual Trajectories of Between-Group Consistency of Configurational Paths (2010—2024)**图 3** 组态路径组间一致性的年度轨迹（2010—2024 年）

（三）稳健性检验

参照组态分析的稳健性检验框架[22]，实施两项扰动测试。方案一将原始一致性阈值由 0.80 上调至 0.85、PRI 阈值由 0.65 上调至 0.70；方案二将真值表行的案例频数阈值由不低于 2 上调至不低于 3。两项方案分别对应一致性判定与案例纳入标准两类主要不确定性来源，扰动后的求解流程与基准分析完全一致。检验结果显示：各基准解的核心条件结构在参数扰动下保持稳定，未出现新的竞争性替代路径，H1 路径与 L1、L2 两类锁定模式具备跨阈值、跨频数标准的稳健性；H2 对应的真值表行 PRI 介于 0.675—0.691 之间，低于方案一 0.70 的调整阈值而未能通过，表明 H2 路径对 PRI 阈值具有敏感性，其真值表行存在一定程度的同时子集关系，路径稳健性弱于 H1。这一结果构成组态结论适用的参数边界：多维复合驱动路径与两类非高协同锁定模式的结论可稳健推广，规模-技术补偿路径的引用需限定于基准参数设定。扰动明细数据备索。

五、结论与讨论

（一）研究结论

本文以京津冀城市群 13 个城市 2010—2024 年面板为样本，集成 NCA 与动态 fsQCA 方法，识别驱动 EEC 系统协同状态提升的条件组态及其演化特征，形成四项结论。

第一，单一条件不构成协同状态提升的严格必要条件，但存在程度化的柔性约束结构。集合论检验在 0.90 的严格标准下未识别出必要条件，NCA 则揭示经济规模、产业结构、能源结构与清洁技术的大效应量必要性特征；瓶颈分析进一步显示各条件约束随协同目标提高呈非线性陡增，碳效率构成低水平协同状态的早期门槛，能源效率构成跨越协调类门槛的首要瓶颈。无刚性门槛与有柔性约束并存的发现，修正了门槛思维下单一因素优先的治理直觉。

第二，协同状态提升存在多元等效路径，禀赋异质性决定路径选择。高协同状态识别出多维复合驱动与规模-技术补偿驱动两条路径：前者以规模、效率与技术条件的枢纽组合为充分性基础，后者以经济规模与清洁技术集聚对产业结构与碳效率短板的补偿为生成逻辑。理论预期的四类驱动模式中，两类获得直接验证，效率提升机制以嵌入形态存在于多维复合路径的核心条件，结构转换模式未获独立的组态证据。

第三，高协同与非高协同状态的生成逻辑呈因果非对称。高协同路径呈替代性特征，非高协同路径呈联合性特征：要素缺失联合型要求经济规模与产业结构的双重缺失，效率失衡锁定型要求能耗强度约束与低基数碳效率的失衡联合，单一条件的缺失均不足以将系统锁定于非高协同状态。联合性锁定的识别从组态层面解释了单点干预难以解锁非高协同状态的原因。

第四，组态机制呈现跨期稳定性与参数边界性。各路径组间一致性在十五年观测期内未发生系统性漂移，条件作用强度呈现持续增强、持续衰减与倒 U 型波动三类演化模式；稳健性检验表明多维复合驱动路径与两类锁定模式可稳健推广，规模-技术补偿路径对 PRI 阈值具有敏感性，其结论适用以基准参数设定为界。

（二）理论贡献与政策含义

理论贡献体现为三方面。其一，将组态因果复杂性引入复合系统协同研究，在方法论层面实现从净效应逻辑向组态逻辑的转换，回应了测度研究刻画状态而不解释生成、回归机制研究的假设与复杂系统现实相矛盾的双重局限。其二，将 NCA 与面板数据集合论框架相集成，使必要性判定从有无深化至程度，使组态结论接受时

间维度的系统检验，为动态 QCA 在低碳与城市研究领域的应用提供了可复制的分析流程。其三，高协同替代性与非高协同联合性的非对称识别，为协同理论关于竞争与协同辩证统一的定性命题提供了可操作的经验表达，条件作用依组合而定的证据亦丰富了组态理论对条件角色情境化的理解。

政策含义依据组态证据展开。第一，差异化路径选择。城市应依据自身禀赋在两条高协同路径中对标定位：具备多维条件基础的城市宜巩固规模、效率与技术的枢纽组合；产业结构重型化城市无须等待结构转换完成，可参照规模-技术补偿逻辑，以经济规模集聚与清洁技术投入先行驱动协同状态提升。第二，阶梯式干预次序。瓶颈水平的时序结构表明，干预资源应按碳效率、经济结构、能源效率与能源结构的显现次序安排强度与节奏：低水平阶段优先保障碳效率的基础性改善，迈向协调类门槛阶段则须将能源效率提升置于约束解除的核心位置。第三，组合式解锁干预。非高协同状态的联合性锁定特征表明，针对单一条件的政策难以奏效：要素缺失联合型城市须同步改善经济规模与产业结构，效率失衡锁定型城市须协同推进能耗强度压降与清洁技术培育，以条件组合而非单一条件为干预单元。

（三）研究局限与展望

本文存在三方面局限。其一，样本边界。13 个城市 195 个观测构成中小样本，组态结论属于分析性概括而非统计推断，向其他城市群推广的适用性有待更大样本的再检验。其二，条件集边界。本文条件体系限于规模、结构、效率三维的内部条件，环境规制强度、区域政策协同等制度性条件未纳入组态，未来研究可在控制逻辑余项膨胀的前提下扩展条件集。其三，静态充分性向动态干预的转换尚待完成。组态结论识别了条件组合的充分性，但未回答各条件应以何种幅度、依何种时序调整的干预标定问题；将组态路径转化为可计算的政策参数并嵌入系统动态模型，是机制研究走向决策支持的后续方向。

参考文献

- [1] 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. 管理世界, 2017(6): 155-167.
- [2] Fiss P C. Building better causal theories: A fuzzy set approach to typologies in organization research. *Academy of Management Journal*, 2011, 54(2): 393-420.
- [3] 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. 管理世界, 2020, 36(9): 141-155.
- [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. 管理世界, 2022, 38(9): 127-145.
- [5] 杜运周, 李佳馨, 刘秋辰, 等. 复杂动态视角下的组态理论与QCA方法: 研究进展与未来方向. 管理世界, 2021, 37(3): 180-197.
- [6] Garcia-Castro R, Ariño M A. A general approach to panel data set-theoretic research. *Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems*, 2016, 2(2): 63-76.
- [7] Haken H. *Advanced synergetics: Instability hierarchies of self-organizing systems and devices*. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [8] Ragin C C. *Redesigning social inquiry: Fuzzy sets and beyond*. Chicago: University of Chicago Press, 2008.
- [9] Misangyi V F, Greckhamer T, Furnari S, et al. Embracing causal complexity: The emergence of a neo-configurational perspective. *Journal of Management*, 2017, 43(1): 255-282.
- [10] Schneider C Q, Wagemann C. *Set-theoretic methods for the social sciences: A guide to qualitative comparative analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

- [11] Dietz T, Rosa E A. Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94(1): 175-179.
- [12] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [13] 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. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [14] David P A. Clio and the economics of QWERTY. *The American Economic Review*, 1985, 75(2): 332-337.
- [15] Arthur W B. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The Economic Journal*, 1989, 99(394): 116-131.
- [16] Dul J. Necessary condition analysis (NCA): Logic and methodology of "necessary but not sufficient" causality. *Organizational Research Methods*, 2016, 19(1): 10-52.
- [17] Shan Y, Guan D, Zheng H, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [18] SHANNON C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [19] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making: Methods and applications. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [20] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例. *热带地理*, 1999, 19(2): 171-177.
- [21] 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. *管理学报*, 2019, 16(9): 1312-1323.
- [22] Greckhamer T, Furnari S, Fiss P C, et al. Studying configurations with qualitative comparative analysis: Best practices in strategy and organization research. *Strategic Organization*, 2018, 16(4): 482-495.