

引用格式:洪竞科,刘禹彤,陈雨欣.中国省域建筑业碳锁定效应时空演进[J].资源科学,2022,44(7):1388-1404.[Hong J K, Liu Y T, Chen Y X. A spatiotemporal analysis of carbon lock-in effect in China's provincial construction industry[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1388-1404.] DOI: 10.18402/resci.2022.07.07

# 中国省域建筑业碳锁定效应时空演进

洪竞科,刘禹彤,陈雨欣

(重庆大学管理科学与房地产学院,重庆 400044)

**摘要:**建筑业碳中和是实现国家碳中和进程中最重要的部分之一,因此有必要探究区域建筑业在经济发展过程中的高碳依赖规律。本文从技术、制度、经济、社会维度,基于中国30个省份2000—2018年面板数据,采用模糊集定性比较分析法,揭示了建筑业碳锁定形成机理,进而结合面板数据集合论方法,探究区域建筑业碳锁定效应的时空演进规律和高碳依赖规律。结果发现:①驱动建筑业碳锁定形成的6条高碳路径可归纳为制度锁定、产业锁定、技术锁定与社会锁定4种典型碳锁定类型,工业化水平提高、居民消费水平增长、城市化快速扩张及环境规制缺失是导致建筑业高碳锁定的主要驱动因素;②抑制建筑业碳锁定形成的4条低碳路径可总结为低城市化低创新型、高投入低创新型、高投入高创新型3种模式;③区域建筑业碳锁定效应具有较大的时空异质性,时间上表现为高碳锁定趋势的加深及低碳模式的瓦解,空间上不同区域之间的路径依赖存在较大差异。本文研究成果有助于在地方层面制定建筑领域的碳达峰时间图、路线图和施工图,对实现区域自主探索低碳发展路径,顺利实现“双碳”目标具有重要意义。

**关键词:**建筑业;碳锁定;面板数据;模糊集定性比较分析;时空演进;中国

DOI:10.18402/resci.2022.07.07

## 1 引言

气候变化是当今人类面临的重大全球性挑战。中国是第一大碳排放国,在全球气候治理中作用显著。2020年9月22日,习近平总书记在第75届联合国大会上发表重要讲话强调,中国将提高国家自主贡献力度,采取更有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达峰、2060年前实现碳中和。“双碳”目标的提出是中国在后疫情时代加速低碳转型,实现绿色复苏的关键,是中国引领全球低碳技术发展,紧抓绿色经济变革潮流的历史机遇。然而,“双碳”目标实现的背后,仍需来自地方和产业的多元支撑。在地方层面,实现自主探索低碳发展路径,允许有条件的区域率先达峰;在产业层面,制定高能耗产业碳达峰、碳中和的时间图、路线图

和施工图,对尽早实现碳达峰,顺利实现碳中和具有重要意义。因此,有必要探究区域产业在经济发展过程中对碳基能源的依赖,尤其是针对高能耗行业。

建筑业是高能耗、高碳排的典型行业<sup>[1,2]</sup>,占全球最终能源消费量的36%和能源相关碳排放总量的37%<sup>[3]</sup>。到2060年,建筑的能源需求可能增加50%<sup>[4]</sup>,建筑领域控碳降碳压力较大。中国建筑部门的用能及碳排放体量增幅高于其他国家,是全球碳排放的重要来源之一<sup>[5]</sup>。目前,中国建筑部门能耗占全国能源消费总量的45.9%,碳排放量占全国比重为50.6%<sup>[6]</sup>,且表现出高碳锁定特征<sup>[7]</sup>。尽管施工活动产生的直接碳排放量较少,但建材生产和建筑运行阶段具有资源与能源密集型特征,其碳排放量

收稿日期:2022-03-07 修订日期:2022-06-19

基金项目:国家自然科学基金青年项目(71801023);国家自然科学基金项目(72071022)。

作者简介:洪竞科,男,四川金堂人,博士,教授,主要研究方向为城市环境数字化治理、工程项目资源环境复杂性研究、村镇可持续更新。

E-mail: hongjingke@cqu.edu.cn

2022年7月

约为社会总排放的28.0%和21.6%<sup>[6]</sup>。新建建筑消耗大量资源,是中国建筑业高能耗、高碳排放的主要原因之一<sup>[8]</sup>,这也反映出建筑业能耗与碳排放具有高度隐蔽性,即处于下游的建筑业会在上游部门引发大量碳排放<sup>[9]</sup>。相关研究表明,建筑业是石油、天然气开采业等高耗能行业的主要下游部门<sup>[10]</sup>,而下游部门的减排将同时有助于减少其生产相关的上游部门排放<sup>[11]</sup>。因此,寻找实现建筑业低碳发展的合理途径非常重要。

碳锁定作为描述经济系统在技术与制度共同演进过程中由于报酬递增所引起的高碳路径依赖状态,准确把握了产业低碳发展复杂性、系统性和演化性特点,为实现区域可持续发展统筹规划与协同治理提供了全新视角。实际上,以化石燃料为基础的高碳技术随着市场化、社会化和嵌入过程,锁定程度不断加深,并可分为技术锁定、制度锁定和社会锁定<sup>[12]</sup>。建筑业发展依赖高碳化石能源,具有显著的碳锁定特征<sup>[13]</sup>。更重要的是,面对中国城镇化进程的持续推进和人民生活质量不断提高的现实需求,建筑数量仍在新增,建筑业碳排放将在短期内保持增长趋势。同时,建筑业技术更迭缓慢,建造方式的落后和制度转型的缓慢进一步加剧建筑业碳排放的锁定效应。此外,建筑业作为中国各地经济体系中的重要支柱产业,“政治锦标赛”可能催生地方政府为追求经济效应对高碳建筑业进一步给予税收、土地等优势,从而形成从技术、产业到制度的多重锁定效应。

目前理论虽然较完整地阐释了碳锁定的作用机理,但仍存在如下问题:空间维度上,碳排放具有显著的空间交互效应和差异化分布特征,因此不能忽视碳锁定在产业层面的时空异质性,这就需要回顾产业碳锁定的演化特征和变迁规律;政策维度上,当前针对碳锁定所推行的具体解锁方案,大部分过于偏重短期局部目标的实现而缺乏政策设计上的方案衔接和区域统筹;研究方法上,当前对碳锁定的讨论是仍处于较为泛化的状态,停留于质性分析而缺乏量化、系统化分析。

事实上,碳锁定的演进是具有超稳定结构的以化石燃料为基础的高碳技术体制主导经济社会

发展路径的过程<sup>[12]</sup>,具有复杂系统性。而传统的定量归因方法基于还原论思想,着重考察在其他变量不变情况下单个变量的净效应。然而,如前文所述,碳锁定的作用机制是非线性的,是多种因素耦合共振的结果。因此本文采用模糊集定性比较分析法(fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis, fsQCA),从组态视角(Configurational Approach),综合传统研究范式中定性和定量研究的优点,分别在技术、制度、经济、社会4个层面探究不同组态对碳锁定的作用机制,进而挖掘区域建筑业碳解锁路径。

## 2 文献综述

已有众多学者对碳锁定的成因展开研究,其中以逻辑演绎和定性分析为主。逻辑演绎旨在建立碳锁定的系统性解释框架,包括:①基于现有理论模型构建,如张济建等<sup>[14]</sup>基于改进PSR模型提炼碳锁定驱动因素并分析作用机制;②启发式解释性框架构建,如杨玲萍等<sup>[15]</sup>从技术、产业、社会等5个方面对碳锁定的来源深入分析。案例研究则侧重通过案例分析归纳碳锁定特征<sup>[16]</sup>。

少量文献对碳锁定现象展开定量研究。一是对碳锁定效应的量化,现有研究主要采用基于碳排放-碳汇的系数构建方法<sup>[17]</sup>、投入产出技术<sup>[7,18]</sup>、脱钩指数法<sup>[19,20]</sup>等方法测算碳锁定效应;也有部分学者通过构建指标体系进行碳锁定测度,如牛鸿蕾等<sup>[21]</sup>构建碳锁定水平测度评价指标体系,张济建等<sup>[22]</sup>利用非期望超效率模型测算长江经济带的碳解锁效率,并结合Malmquist指数模型进行效率分解及动态分析。二是对驱动因素的实证研究,目前学界大多采用传统计量模型,主要运用多元回归计量<sup>[23]</sup>、空间计量方法<sup>[24]</sup>、通径分析<sup>[25]</sup>、面板回归模型<sup>[26]</sup>、Tobit面板模型<sup>[22]</sup>等方法。

可以发现,学者们已从不同角度对碳锁定机制和成因有了较为清晰的认识,但少有学者聚焦于某行业的碳锁定问题。对建筑业碳锁定来说,一些学者运用脱钩理论测算其碳锁定程度,如蔡海亚<sup>[7]</sup>通过测算各产业的碳锁定状态发现建筑业锁定系数较高,属于高排放、高锁定行业。而大部分学者从碳排放的角度研究建筑业,在碳排放测算、空间特

征和成因等方面形成了一系列研究成果。具体来说,已有研究分别利用投入产出法<sup>[27]</sup>和IPCC碳排放系数法<sup>[28]</sup>测算建筑业的碳排放。Fang等<sup>[29]</sup>提出了一种基于中国配额制的建设过程碳排放源的确定方法。对于建筑业碳排放的空间特征分析,部分学者利用社会网络分析法发现中国省际建筑碳排放呈现空间网络特征<sup>[30]</sup>,经济发达的省份占据主导地位<sup>[31]</sup>。部分学者利用传统的数据包络分析法(DEA)<sup>[32]</sup>或改进的超效率SBM模型<sup>[33]</sup>测算建筑业碳排放效率,进一步运用空间计量模型等方法分析建筑业碳排放的时空特征。实证分析表明建筑业碳排放具有一定的空间聚集效应、溢出效应和区域差异,表现出由东向西逐步递减的趋势<sup>[34]</sup>。对于碳排放成因,部分学者采用因素分解法开展研究,包括结构分解分析(SDA)<sup>[35]</sup>和指数分解分析(IDA)<sup>[36]</sup>。多数学者采用的指数分解法是基于kaya恒等式,利用对数平均迪氏指数分解法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)分解各因子的驱动效应,如蒋博雅等<sup>[36]</sup>基于LMDI模型发现能源强度是碳减排的主要驱动因素,而建筑业产值是导致碳排放增加的主要影响因子。还有学者从IPAT模型或STRPAT模型出发,运用计量方法研究各因素对建筑业碳排放的影响,如刘彤等<sup>[37]</sup>通过拓展的STIRPAT模型分析发现各区域的城镇化水平与建筑业碳排放存在显著的相关关系。

综上,目前对于碳锁定的研究主要以国家或地区为主体,缺乏行业层面碳锁定的探索。其次,鲜有文献从“锁定”视角对具有高碳依赖特性的建筑业展开研究。并且在碳锁定的定量研究中,主要采用因素分解法或回归分析,侧重于探讨单因素对碳排放的边际净效应,忽视了变量间的互相影响和因果复杂性。因此本文从组态视角出发,引入模糊集定性比较分析法探究区域建筑业碳锁定路径及时空演进规律。

### 3 理论基础与研究设计

#### 3.1 理论基础

“碳锁定”是技术、产业、制度和消费形成的“技术-制度综合体”(Techno-Institutional Complex, TIC),具有不可逆的自我强化趋势<sup>[38]</sup>。基于上述概

念,本文主要从技术锁定、产业锁定、制度锁定与社会锁定阐述建筑“碳锁定”效应的不同阶段<sup>[12,38]</sup>。技术因素通常被认为是“碳锁定”形成的内部诱因与直接原因。在技术锁定阶段,高碳技术的规模经济和学习效应会带来报酬递增,加剧对高碳技术的依赖。并且由于瓦解、重构和风险等转化成本,进一步放大了高碳技术的优势,低碳技术被挤出市场,又固化了高碳产业结构。就建筑业而言,高碳技术存在相对复杂的双刃效应<sup>[40]</sup>。一方面,装配式建造技术、建筑信息模型技术等建筑工业化与信息化的技术进步可以提高建筑施工的可控性,有效提高能源的利用效率,抑制碳排放的产生<sup>[41]</sup>。另一方面,技术进步具有“回弹效应”(Rebound Effects),即技术进步在节约能源的同时,也会引致新的能源需求,增大能源消耗<sup>[42]</sup>。此外,受制于中国不同区域在气候条件、资源禀赋和经济发展方面的巨大差异,建筑业技术进步还具有空间差异性和时滞性<sup>[43]</sup>,在空间上由东到西呈现阶梯型锁定差异,在时间上表现出短期时滞、长期减排的特征<sup>[44]</sup>。技术锁定的进一步加深将引发产业锁定。首先表现为在快速城镇化进程中,建设规模持续增长,伴随大量建筑材料消耗以及在施工过程中大重型机械的高含碳油料使用,进而对化石能源的高度依赖将形成对碳排放增长的“拉力”,导致不同程度的高碳产业结构固化。其次是居民消费升级所形成的“推力”,将进一步扩大建筑业的规模效应与集群效应,导致产业结构高碳化,产业向整体锁定状态发展。进一步地,对本地建筑产业经济增长作用的高度依赖使地方政府在制定产业政策和管控机制时呈现利碳化偏好,从而形成技术体制综合体(TIC),制度层次的碳锁定是锁定机制的外部强化。而社会层次的锁定是“碳锁定”的最终阶段,此时公众逐渐接受高碳技术系统并形成了相应的消费模式、使用惯例、行为规范和信念体系,从而强化了现有的高碳技术体系,形成最终的社会锁定,即“技术-产业-制度-社会网络”逐渐嵌入社会系统的过程<sup>[39]</sup>。此时针对建筑业的碳解锁并不仅仅意味着一种物质性的、技术的改变,还涉及到人类社会上层建筑的变革,包括通过城市化发展,改变原来的社会结



2022年7月

构形态、居民的生活方式和行为方式,如居民对住房的改善性需求及对节能、绿色建筑的接受和追求程度等。

综上所述,“碳锁定”的形成受到技术、产业、制度、社会等方面影响,且锁定机制存在着复杂的非对称多重并发因果关系,如图1所示。

### 3.2 研究设计

#### 3.2.1 研究方法

组态是指能够产生既定结果的因素的特定组合<sup>[45]</sup>。组态视角认为多种因素相互依赖并共同决定结果,且存在多条路径可以产生同一结果,结果与因素具有不对称性<sup>[46]</sup>。传统计量分析基于还原论思想,关注单个变量的净效应,仅揭示单向的相关或因果关系。而组态思想突破计量研究局限,聚焦于因素间的非对称多重并发因果关系。定性比较分析(Qualitative Comparative Analysis, QCA)常用于研究组态问题,其基于布尔代数和集合分

析,将案例视为变量构成的组态,通过案例层面比较,揭示条件组态与结果间的因果关系,筛选等效路径,得出最具解释力的条件组态构型。根据不同的变量类型,QCA法可分为清晰集定性比较分析(crisp-set Qualitative Comparative Analysis, csQCA)、多值定性比较分析(multi-value Qualitative Comparative Analysis, mvQCA)以及模糊集定性比较分析方法(fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis, fsQCA)<sup>[47]</sup>,其中fsQCA法结合了集合隶属类别(Kind)和程度(Degree),有质性和定量双重属性优势。该方法可大致分为4步:校准数据;构建模糊集真值表并导入fsQCA软件计算;评估结果可靠性;结果呈现。其中,结果可靠性利用一致性(Consistency)和覆盖度(Coverage)2个指标的公式如下:

$$Consistency(X_i \leq Y_i) = \frac{\sum(\min(X_i, Y_i))}{\sum(X_i)} \quad (1)$$

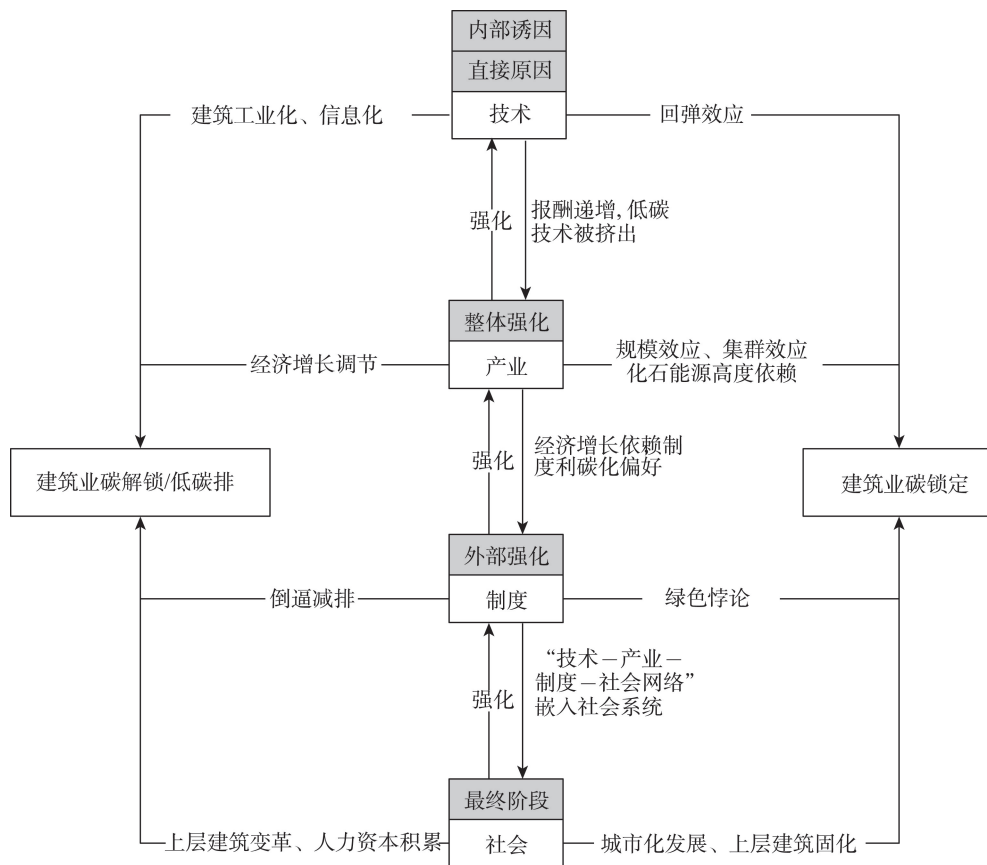


图1 建筑业碳锁定机制

Figure 1 Mechanism of carbon lock-in in the construction industry

$$Coverage(X_i \leq Y_i) = \frac{\sum (\min(X_i, Y_i))}{\sum (Y_i)} \quad (2)$$

式中:  $X_i$  指区域  $i$  在条件(或条件组合)  $X$  中的隶属程度;  $Y_i$  指区域  $i$  在结果  $Y$  中的隶属程度。一致性值越接近 1, 表明  $X$  属于  $Y$  的可能性越大; 覆盖度值越接近 1, 表明  $X$  对  $Y$  的解释力越强。

目前大部分 QCA 方法仅处理截面数据, 无法观测个体效应与时间效应, 因此本文参考 Garcia-Castro 等<sup>[48]</sup>提出的面板数据集合论法, 利用面板数据模糊集定性比较分析法进行数据处理, 在传统的一致性计算上拓展出 3 类一致性公式。第一种为面板一致性(Pooled Consistency, POCONS), 是同时包含了个体效应和时间效应的整体一致性, 计算对象是全部案例集合, 公式如下:

$$POCONS(X_{it} \leq Y_{it}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \min(X_{it}, Y_{it})}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T X_{it}} \quad (3)$$

式中:  $N$  是个体数量;  $T$  是观测年度;  $X_{it}$  是  $i$  个个体的第  $t$  个观测年度在前因条件  $X$  的集合当中的隶属度;  $Y_{it}$  是该个体在结果  $Y$  集合当中的隶属度。

第二种为区间一致性(Between Consistency, BECONS), 计算的对象是特定年份不同省份案例的集合, 即每一年中所有个体计算获得的条件组合对结果的影响程度, 仅包含个体效应, 因此 BECONS 同传统的一致性内涵是一致的。计算公式如下:

$$BECONS(X_{it} \leq Y_{it}) = \frac{\sum_{i=1}^N \min(X_{it}, Y_{it})}{\sum_{i=1}^N X_{it}} \quad (4)$$

第三种为内部一致性(Within Consistency, WCONS), 计算的对象是特定省份不同年份案例的集合, 即每一个体所有统计时间内计算获得的条件对结果的影响程度, 仅包含时间效应。计算公式如下:

$$WCONS(X_{it} \leq Y_{it}) = \frac{\sum_{t=1}^T \min(X_{it}, Y_{it})}{\sum_{t=1}^T X_{it}} \quad (5)$$

此外, 通过计算各维度下一致性之间的距离可以分别表示在时间序列和案例变化下一致性结果的稳定程度, BECONS 和 WCONS 距离可以分别说明相应路径存在较强的时间异质性和个体异质

性, 为方便比较, 进一步将两种距离进行标准化处理, 使其结果处于 0~1 的范围内, 具体计算公式如下:

$$BECONS Dis = d(BECONS, POCONS) =$$

$$\sqrt{\sum_{t=1}^T \left( \frac{BECONS_t}{\sum_{t=1}^T BECONS_t} - \frac{1}{T} \right)^2} \quad (6)$$

$$BECONS Adj Dis = \frac{BECONS Dis}{\sqrt{\frac{T}{T^2 + 3T + 2}}} \quad (7)$$

$$WCONS Dis = d(WCONS, POCONS) =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{WCONS_i}{\sum_{i=1}^N WCONS_i} - \frac{1}{N} \right)^2} \quad (8)$$

$$WCONS Adj Dis = \frac{WCONS Dis}{\sqrt{\frac{N}{N^2 + 3N + 2}}} \quad (9)$$

式中: BECONS Dis 为区间一致性距离, 反映了时间异质性程度; BECONS Adj Dis 为调整后区间一致性距离; WCONS Dis 为内部一致性距离, 反映了个体异质性程度; WCONS Adj Dis 为调整后内部一致性距离。

### 3.2.2 变量测度

本文采用各区域建筑业碳排放, 即建筑物碳排放量<sup>[49]</sup>作为结果变量来衡量建筑业碳锁定程度, 包括建筑现场施工的直接碳排放及建筑材料生产运输阶段的上游产业链的间接碳排放。直接碳排放将原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、热力、电力 10 类能源作为统计对象, 通过 IPCC 清单法测算, 其中热力和电力的系数参考范建双等<sup>[50]</sup>、曹翔等<sup>[51]</sup>的研究, 能源消耗量来自于 2001—2019 年的《中国能源统计年鉴》。间接碳排放的测算对象是水泥、钢材、玻璃、木材、铝材等 5 种建筑材料, 材料消耗量数据源于 2001—2019 年的《中国建筑业统计年鉴》, 缺失数据通过线性回归法补齐。建立中国建筑业碳排放量测算模型如下:

$$C = C_{dir} + C_{ind} = \sum_{j=1}^{10} E_j \times \alpha_j \times f_j + \sum_{k=1}^5 M_k \times \beta_k \times (1 - \varepsilon_k) \quad (10)$$

式中:  $C$  为建筑业碳排放总量, kg;  $C_{dir}$  为建筑业直接碳排放, kg;  $C_{ind}$  为建筑业间接碳排放, kg;  $E_j$  为第  $j$  种能源实际消耗量, kg;  $\alpha_j$  为第  $j$  种能源的平均

2022年7月

低位发热量,  $\text{kJ/kg}$ ;  $f_j$  为第  $j$  种能源的燃烧的缺省二氧化碳排放因子,  $\text{kg/kJ}$ ;  $M_k$  为第  $k$  种建筑材料的消耗量,  $\text{kg}$ ;  $\beta_k$  为第  $k$  种建筑材料的二氧化碳排放系数,  $\text{kg/kg}$ ;  $\varepsilon_k$  为第  $k$  类建筑材料的回收系数。

根据碳锁定的不同特征,进一步选取指标变量开展定量分析。具体而言,将建筑业技术因素根据投入端和产出端分解为技术装备( $TE$ )与技术创新( $TI$ )。产业层面,从供给侧和消费侧考虑,选取产业结构( $IS$ )与消费水平( $CL$ )2个变量。制度方面,地方政府对污染排放治理的管控力度间接体现了制度层面的利碳化偏好,因此选取环境规制作为制度因素的代表。环境规制隶属于政府社会性规制的重要范畴,是指政府通过行政处罚、征收排污税等方式对生产经营活动加以调节<sup>[52]</sup>。主要选取污染投

资治理额占当地 GDP 的比重作为衡量环境规制强度( $EP$ )的指标。社会方面,城市化进程是表征是否形成社会锁定的重要依据。城市化通过基础设施和住房建设,对钢材、水泥等能源密集型产业产生拉动效应。在城市化提升过程中,人力资本的积累将有助于推动清洁化、低碳化的技术进步,从而降低碳排放<sup>[53]</sup>。因此主要考虑城市化率( $UR$ )、居民受教育程度( $ED$ )两个变量。梳理提出建筑业碳锁定的驱动因素及框架构成的理论模型,如图2所示。相关数据来自2000—2018年全国30个省(市、区),因数据缺失,不包括西藏、港澳台地区,具体指标如表1所示。

3.2.3 数据校准

在fsQCA中,每一个条件和结果都分别视为一

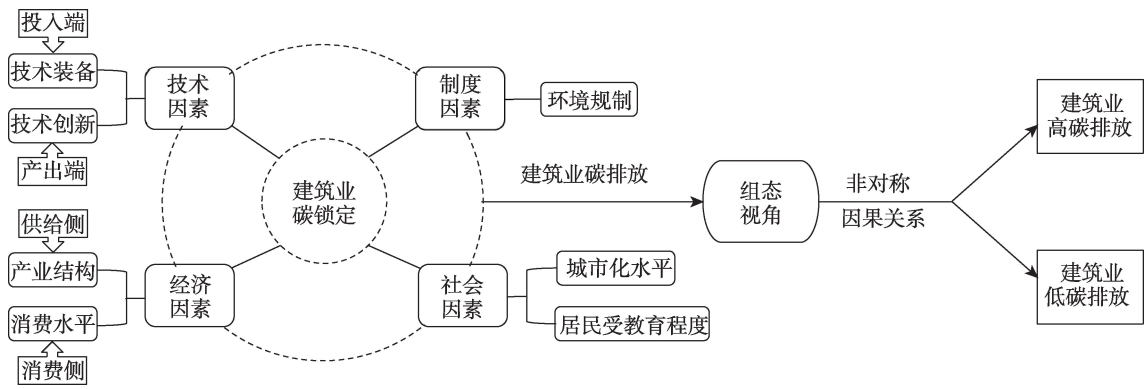


图2 组态视角下建筑业碳锁定驱动因素及框架构成理论模型

Figure 2 A theoretical model of driving factors and framework composition of carbon lock-in in the construction industry from the configuration approach

表1 变量测度及数据来源

Table 1 Variables and data sources

一级指标	二级指标	变量描述	数据来源
技术因素	技术装备( $TE$ )/(元/人)	年末建筑企业自有机械设备净值/年末全部职工或工人数	《中国统计年鉴》
	技术创新( $TI$ )/(件/亿元)	建筑业专利数量/建筑业增加值	《中国统计年鉴》、专利检索与分析网
制度因素	环境规制强度( $EP$ )/%	各省市环境治理投资额/当地GDP	《中国环境统计年鉴》《中国统计年鉴》
经济因素	消费水平( $CL$ )/(元/人)	居民消费总额/年平均人口	《中国农村统计年鉴》
	产业结构( $IS$ )/%	第二产业产值/当地GDP	《中国统计年鉴》《中国建筑业统计年鉴》
社会因素	城市化水平( $UR$ )/%	城镇人口/总人口	《中国统计年鉴》
	居民受教育程度( $ED$ )/%	大专以上人口数/6岁以上人口数	《中国统计年鉴》
碳排放量	建筑业直接碳排放与间接碳排放( $C$ )/kg	IPCC因子法	《中国能源统计年鉴》《中国建筑业统计年鉴》

个集合,每一个案例在这些集合中均有隶属分数,对案例赋予集合隶属分数的过程就是校准<sup>[46]</sup>。使用模糊集将变量转化为集合隶属度需要预设3个锚点:完全隶属、中间点以及完全不隶属,转变后的集合隶属度介于0~1之间。根据以往的研究经验<sup>[54]</sup>,采用直接校准法并将3个锚点分别设定为样本数据的上四分位数、平均值以及下四分位(表2)。

## 4 结果与分析

### 4.1 区域建筑业碳锁定模式

一致性是衡量必要条件的重要指标<sup>[46]</sup>。一般认为单个前因条件对结果变量的一致性达到0.9及其以上时,可以认定该条件为此结果的必要条件<sup>[46]</sup>。必要性分析的结果表明各影响因素作为必要条件的一致性均小于0.76。因此,单个影响因素不能构成区域建筑业碳锁定的必要条件,在一定程度上印证了碳锁定作用机制的因果复杂性。采用fsQCA3.0软件进行数据分析,得到6条高碳路径和4条低碳路径,即时间和空间的共同作用下形成的分别会引致碳锁定和低碳排放结果的前因条件组合。

为保证结论的可靠性,参考已有研究<sup>[54-56]</sup>,采用调整一致性门槛值、频数门槛数和调整校准阈值方法,分别对高碳组态和低碳组态进行稳健性分析。以上检验结果与原始结果所含前因条件组态基本相同,结论稳健。

#### 4.1.1 高碳排放组态分析

各区域建筑业的6条高碳路径(表3),其总体一

致性与个体一致性均大于理论值0.8,说明所有前因条件组态都会导致高碳,并且识别组态类型涵盖了所有可能导致高碳排放的组合。

(1)制度锁定型:C1:~TE×~TI×EP×IS×UR×~ED<sup>①</sup>表明,尽管存在政府对环境的强力规制,但只要该区域处于较高的工业化和城市化水平,人力资本水平较低且建筑业缺乏技术创新,建筑业呈现高碳状态。该路径下工业化和城镇化的双轮驱动是建筑业高碳锁定的主要原因。城市化的快速扩张带来了城镇规模的扩大和经济体量的增长,加剧了工业化进程与基础设施建设体量,导致建筑业碳排放增加。虽然该路径下环境规制力度较强,但民众教育水平较低,环保意识不强,对环保政策的接受程度不高,不利于环境规制政策发挥减排作用。高碳排放组态C1常出现在快速发展的经济社会,以城市化和工业化为动力,处于制度锁定阶段,典型案例有2000—2005年的浙江。

(2)产业锁定型:这一驱动类型包括3个子路径(C2a:~EP×CL×IS×UR×ED, C2b:~TE×TI×~EP×CL×IS×UR和C2c:TE×TI×~EP×CL×IS×~UR)。核心条件均为高工业化、高居民消费水平和低环境规制,在该类模式下,区域建筑业处于产业锁定阶段。工业化和城市化积累的社会财富使民众生活水平和消费水平提高,驱动建筑行业的生产规模扩大。高碳技术主导的工业化及居民消费需求的增长分别通过供给侧与消费端推动了建筑业高碳状态形成。此外,“官员锦标赛”体制促使地方政府热

表2 变量描述性统计及锚点值

Table 2 Variable descriptive statistics and anchor value

变量	平均值	标准差	阈值		
			25%	50%	75%
TE	16801	22536	7816	11104	15704
TI	2.294	1.744	1.179	1.878	2.713
EP	1.312	0.668	0.870	1.170	1.550
IS	45.950	7.974	42.400	47.300	51.600
UR	50.290	15.270	40.020	48.240	58.010
ED	9.750	6.758	5.184	8.205	12.050
CL	11440	8868	4634	9265	15614
C	4.588e+10	7.516e+10	9.972e+09	2.232e+10	5.156e+10

① 这里“~”表示变量不存在,“×”表示“并”。



2022年7月

表3 建筑业高碳排放组态路径结果

Table 3 Configuration results of high carbon emission in the construction industry

前因变量	建筑业高碳排放(High Carbon Emissions)					
	C1	C2a	C2b	C2c	C3	C4
技术装备( <i>TE</i> )	⊗		⊗	●	●	
技术创新( <i>TI</i> )	⊗		●	●	⊗	●
环境规制( <i>EP</i> )	●	⊗	⊗	⊗	⊗	●
消费水平( <i>CL</i> )		●	●	●	●	●
产业结构( <i>IS</i> )	●	●	●	●		
城市化水平( <i>UR</i> )	●	●	●	⊗	●	●
居民受教育程度( <i>ED</i> )	⊗	●			●	●
一致性	0.894	0.961	0.872	0.913	0.870	0.909
原生覆盖度	0.186	0.069	0.298	0.097	0.091	0.086
唯一覆盖度	0.017	0.018	0.166	0.007	0.030	0.013
整体方案一致性				0.868		
整体方案覆盖度				0.487		

注: ●表示核心前因条件存在, ⊗表示核心前因条件缺失, ●表示辅助前因条件存在, ⊗表示辅助前因条件不存在, 空白处表示前因条件为非敏感条件。下同。

衷于实施经济效益见效快但高污染的项目, 建筑业环境管控力度低且制度呈现利碳化偏好, 削弱了低碳技术创新的积极性。典型案例有2011年、2013—2015年的吉林。

(3) 技术锁定型:  $C3: TE \times \sim TI \times \sim EP \times CL \times UR \times ED$  表明, 即使区域并未呈现较高的工业化水平, 当环境规制强度较弱, 技术创新水平较低, 而居民消费仍处于较高水平时, 也能导致建筑业呈现高碳排放。此时区域建筑业碳排放处于技术锁定阶段, 即建筑业所依赖的碳基技术是导致高碳排放的主要原因, 且这类区域的低环境规制将使其有成为“污染天堂”的风险<sup>[5]</sup>。具体来说, 低环境规制的区域由于高碳项目较高的边际报酬水平而对其产生特殊的“拉力”。在此背景下, 宽松的环境政策会进一步抑制建筑企业的低碳创新活动。组态C3常出现于处于发展转型阶段的社会体中, 典型案例有2012—2014年、2017年、2018年的吉林以及2010年、2017年的辽宁。

(4) 社会锁定型:  $C4: TI \times EP \times CL \times UR \times ED$  表明, 即使技术创新产出较高、社会民众教育水平较高并且存在环境规制, 只要有较高的城市化率和消费水

平, 也会产生高碳结果。该类区域建筑业已经处于深度社会锁定阶段。高城市化率和高消费水平的形成意味着社会经济已进入成熟发展阶段。一方面, 高碳关联的技术和设施在建筑业的产业链中已经建立。另一方面, 建筑业的社会利益网络已经形成, 正式或非正式制度相对成熟, 低碳技术的发展面临高额的调整成本。因此, 即使该阶段有较强的技术创新投入与产出, 面对稳定的高碳技术系统, 低碳技术难以通过市场化、制度化和社会嵌入过程实现真正的扩散。典型案例有2006—2010年和2012—2018年的北京。

#### 4.1.2 低碳排放组态分析

建筑业低碳排放共识别了4种组态(表4)。4种组态的总体一致性和个体一致性大于理论值0.8, 表明所有组态均会带来低碳结果。

(1) 低城市化低创新型: 该类型包括2个子路径( $NC1a: \sim TI \times \sim CL \times \sim IS \times \sim UR \times \sim ED$ ,  $NC1b: TE \times \sim TI \times EP \times CL \times \sim IS \times \sim UR \times ED$ ), 核心条件均为低工业化、低城市化和低技术创新。该类型主要表征产业发展、城市化水平落后区域的建筑业碳排放, 因为该区域自然资源禀赋良好或暂未因城市化、工业化发



表4 建筑业低碳排放组态路径结果

Table 4 Configuration results of low carbon emission in the construction industry

前因变量	建筑业低碳排放 (Low Carbon Emissions)			
	NC1a	NC1b	NC2	NC3
技术装备 (TE)		●	●	●
技术创新 (TI)	⊗	⊗	⊗	●
环境规制 (EP)		●		⊗
消费水平 (CL)	⊗	●	⊗	⊗
产业结构 (IS)	⊗	⊗		●
城市化水平 (UR)	⊗	⊗	⊗	●
居民受教育程度 (ED)	⊗	●	⊗	⊗
一致性	0.908	0.860	0.838	0.803
原生覆盖度	0.322	0.055	0.202	0.059
唯一覆盖度	0.197	0.025	0.071	0.036
整体方案一致性		0.878		
整体方案覆盖度		0.459		

展而形成对碳基能源的依赖且尚未承接高碳产业的转移,因此碳锁定发展趋势还未显现。典型案例包括 2000—2006 年期间西南区域(云南、贵州、四川、重庆、广西)及 2012—2015 年新疆。

(2)高投入低创新型:该类型的路径为 NC2:  $TE \times \sim TI \times \sim CL \times \sim UR \times \sim ED$ ,即高技术投入,而技术创新、居民消费、城市化率和人力资本均较低。其仍表征发展较落后区域,但与前一类型的不同之处在于,本路径存在高技术投入,即地方政府未雨绸缪,已经意识到建筑业的高碳趋势,旨在通过高技术投入从“源头”控制建筑业的高碳排放。在该类型下,建筑企业主要依靠引进新方法、新机械、新技术等手段直接提高产出效率,在同样的生产规模下节约能源投入<sup>[58]</sup>。典型案例是 2002 年的青海、2002、2003、2005 年的宁夏及 2003、2005、2006 年的山西。

(3)高投入高创新型:该类型的路径为 NC3:  $TE \times TI \times \sim EP \times \sim CL \times IS \times UR \times \sim ED$ ,即在高城市化、高工业化水平及缺乏环境规制与低人力资本条件下,通过高技术投入与技术创新,可以实现建筑业低碳排放。此路径多出现在处于工业化中期的区域,该时期内城市化和工业化进程加快,对碳基能源的依赖逐步形成,通过技术投入提高能源利用率和低碳

技术创新等,有助于中等发达区域摆脱“碳锁定”困境。典型案例是 200—2007 年的黑龙江。

4.2 区域建筑业碳锁定的时空演进

为利用面板数据分析不同年份和不同区域的组态结果,参考 Garcia-Castro 等<sup>[48]</sup>提出的面板数据集合论研究方法,对面板数据进一步处理和分析。

4.2.1 高碳排放组态分析

图 3 为高碳情境下 6 条路径的 BECONS 图,描述了时间序列下各区域建筑业高碳排放的一致性,可以揭示建筑业碳锁定程度随时间推移的变化情况。可以发现 6 条路径的 BECONS 值在时间序列下均呈现升高趋势,最终围绕在 POCONS 周围波动,证明建筑业的高碳锁定随着时间变化呈现逐步加深趋势。此外, BECONS 的调节距离为 0.225,大于 0.100 的阈值<sup>[48]</sup>,说明高碳路径存在着一定的时间效应,不同时间存在不同的高碳路径。

图 4 为高碳组态的 WICONS 图,描述了不同区域在研究时限内高碳排放的一致性,揭示各区域是否遵循特定因果关系。从图中可以发现,在各条路径中超过 2/3 的区域呈现出较强的一致性,始终遵循前述分析中的 6 条高碳路径,表现出典型的路径依赖特征。其中, C3 路径(技术锁定型)是被最多区域遵循的高碳组态,证明大部分建筑业仍

2022年7月

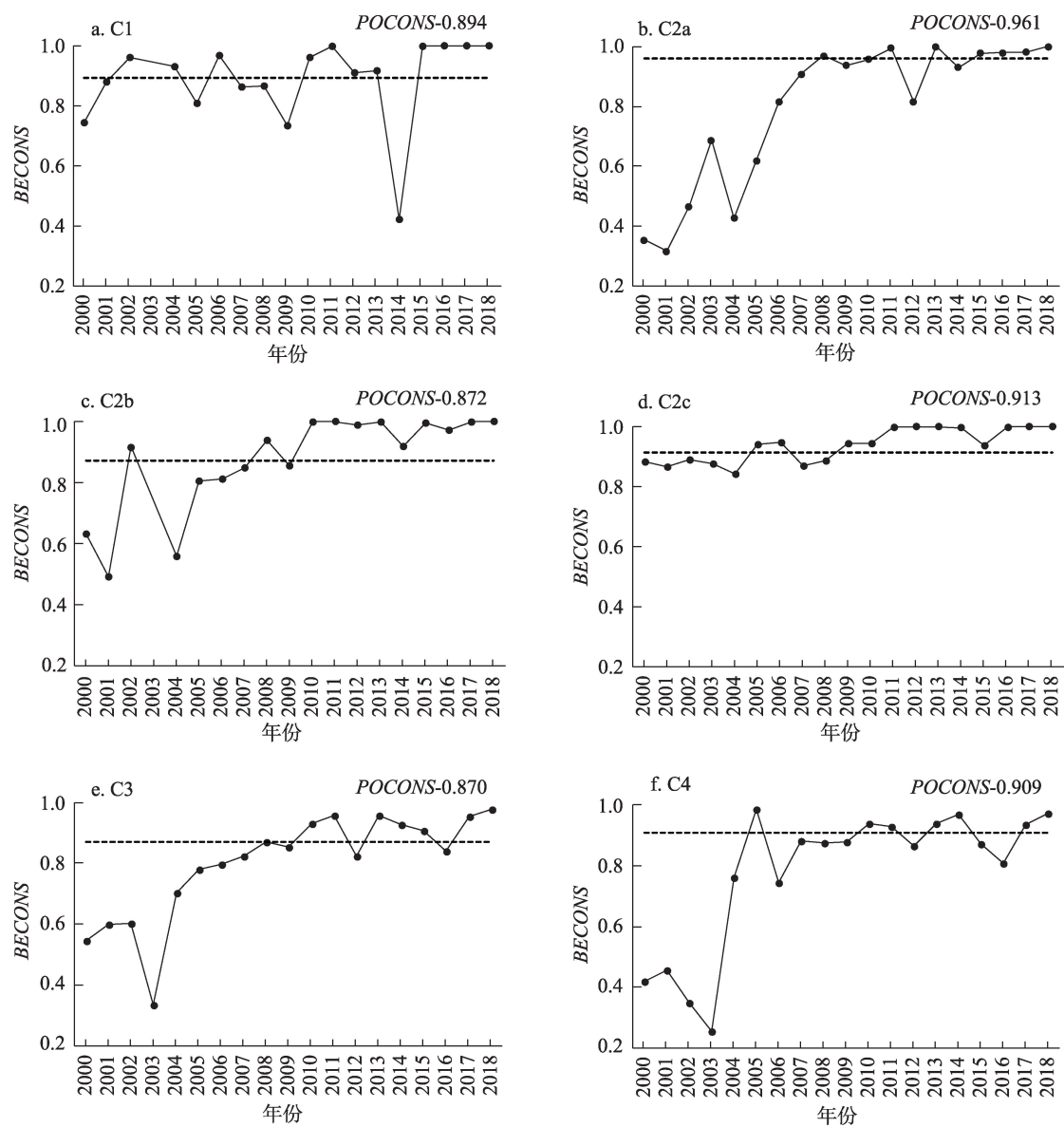


图3 高碳排放各组态路径 *BECONS*

Figure 3 Between consistency (*BECONS*) of high carbon emission configuration

注:图中虚线为 *POCONS* 值,通过表现 *BECONS* 和 *WICONS* 与 *POCONS* 之间的差异,体现时间与区域的异质性。

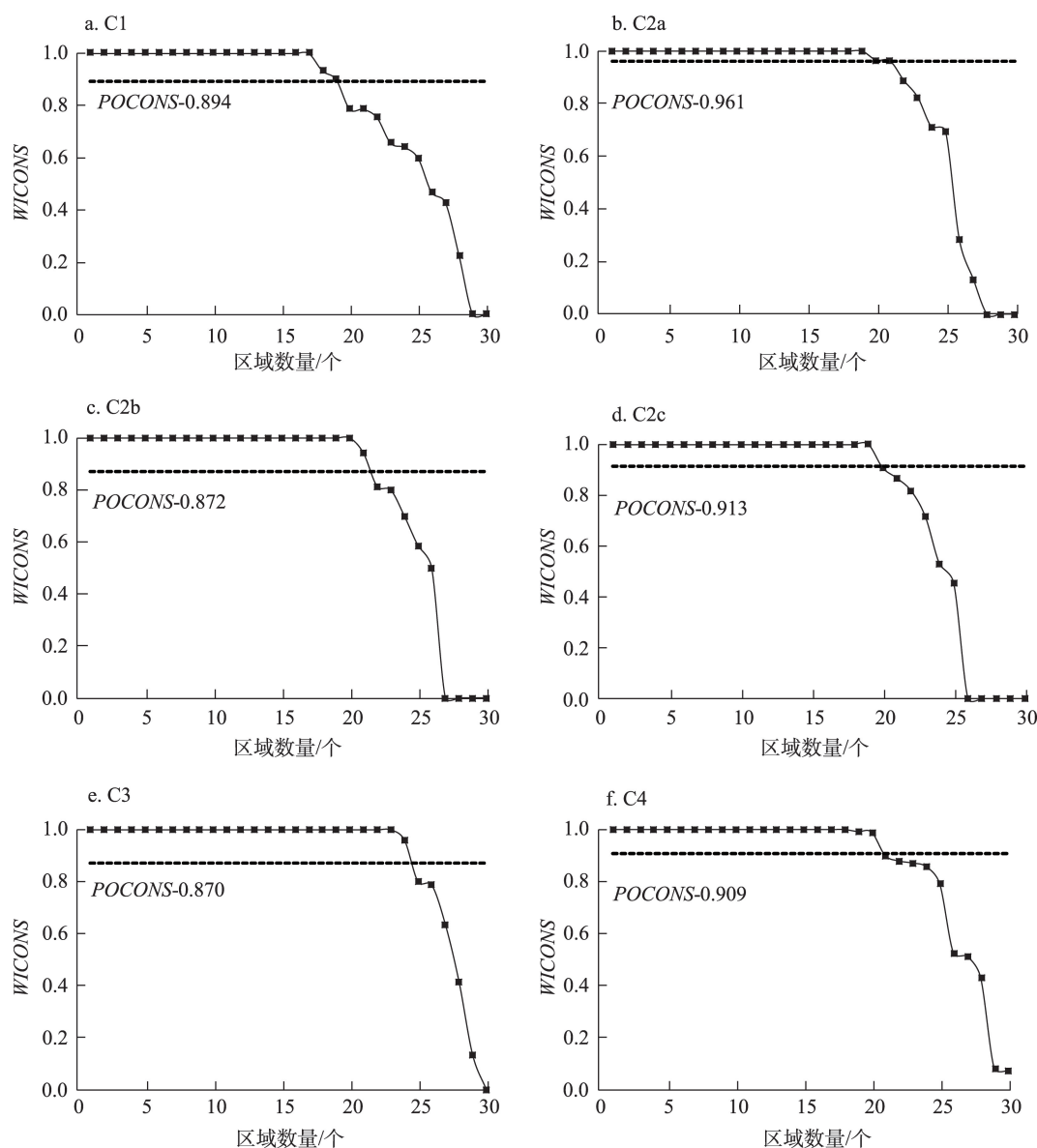
处于碳锁定的初级阶段。该结论说明,地方政府一方面要警惕建筑业高碳趋势向深度锁定发展。另一方面,初始碳锁定意味着相对容易的碳解锁过程,因此在“双碳”目标约束下,建筑业仍存在较大减排潜力。

建筑业高碳排放组态 *WICONS* 的可调距离为 0.330, 高于 0.200 的阈值<sup>[48]</sup>, 表明在这 570 个案例中, 尽管存在路径依赖特征, 但区域异质性仍较为明显, 即不同区域之间遵循的组态类型存在较大差

异, 这与各区域的要素积累、产业结构、资源禀赋与比较优势有关。

4.2.2 低碳排放组态分析

如图 5 所示, 4 条低碳路径的 *BECONS* 值均呈现出不断下降的趋势, 意味着随着社会发展, 工业化、城市化以及居民消费水平均呈现明显上升趋势, 因此由这三者带来低碳路径的一致性不断下降, 建筑业低碳发展模式逐步瓦解。此外, 自 2009 年以后各路径 *BECONS* 值的下降趋势加剧, 结合实际可以推

图4 高碳排放各组态路径 *WICONS*Figure 4 Within consistency (*WICONS*) of high carbon emission configuration

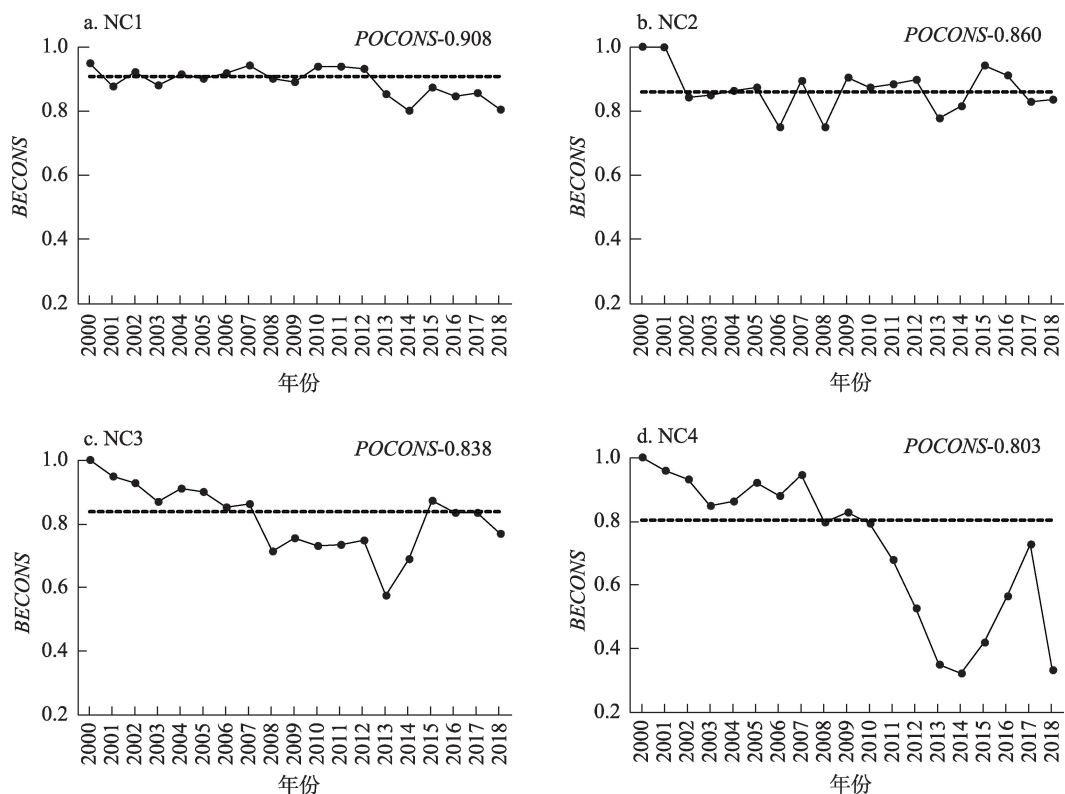
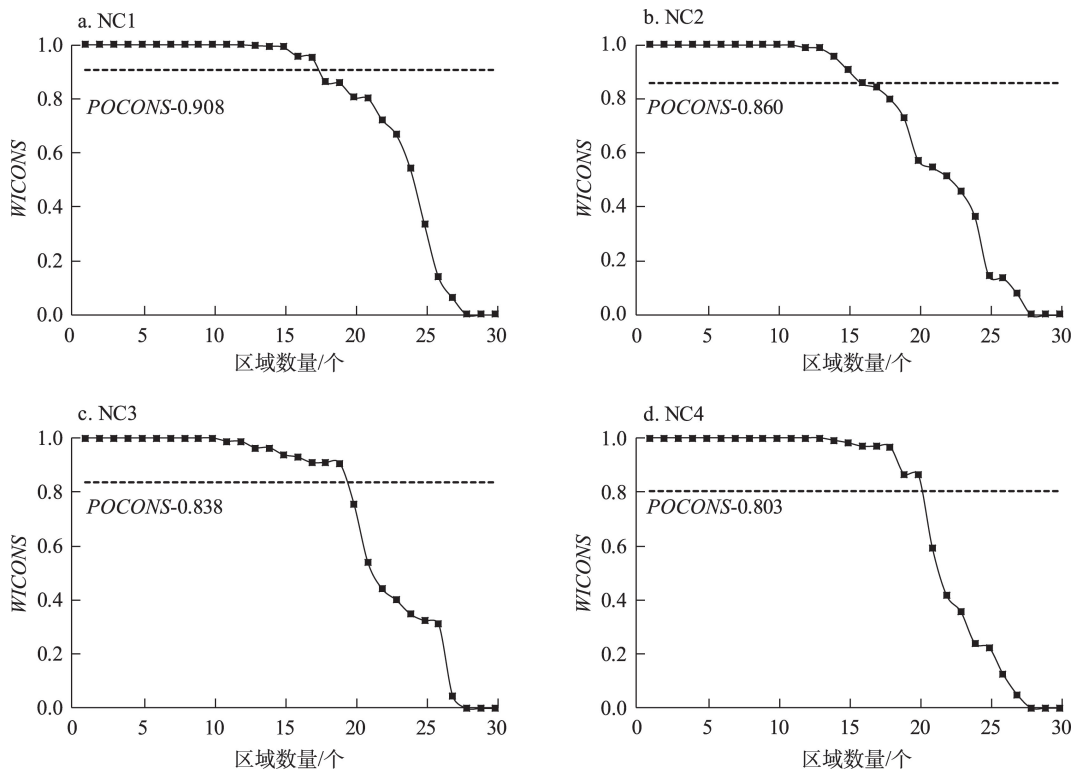
测,国家为应对2008年金融危机提出以基础设施建设为载体的投资战略,导致建筑业呈现高碳锁定,各路径的一致性呈现大幅下降。此外,低碳情境下 *BECONS* 的调整距离为0.092,小于阈值0.100<sup>[48]</sup>,说明随着时间的变化,各低碳路径作用的比重并没有发生明显变化。

低碳路径的 *WICONS* 图(图6)与高碳路径的结果类似,一方面,约有一半区域在各路径中始终保持时间序列下的结果一致性(*WICONS*=1)。其中,NC3 路径(高投入高创新型)是被最多区域遵循的

低碳组态,说明高技术投入与创新水平是区域建筑业低碳的关键驱动力。另一方面,计算得出的建筑业低碳排放组态整体方案的可调距离为0.377,高于0.200<sup>[48]</sup>的阈值,表明案例中不同区域之间的低碳排放路径同高碳路径一样也存在较大差异。

通过对建筑业高碳、低碳路径的时空演进分析可以发现,高碳路径在时间与空间维度均呈现异质性,而低碳路径依赖表现出时间下的同质性锁定和空间下的异质性锁定。因此各地建筑业不仅要因时施策,还要因地制宜。



图5 低碳排放各组态路径 *BECONS*Figure 5 Between consistency (*BECONS*) of low carbon emission configuration图6 低碳排放各组态路径 *WCONS*Figure 6 Within consistency (*WCONS*) of low carbon emission configuration

## 5 结论与政策建议

### 5.1 结论

本文基于碳锁定形成机理,从技术、经济、制度、社会维度解析了区域建筑业的碳锁定效应,以中国30个省(市、区)2000—2018年的面板数据作为样本,通过模糊集定性比较分析识别了不同区域建筑业高碳和低碳排放路径,辨析了各地建筑业碳锁定的锁定阶段与驱动模式。基于面板数据集合论方法,探寻了区域建筑业碳锁定效应的时空演化形态。主要研究结论如下:

(1)识别出6条高碳路径,将中国区域建筑业碳锁定归纳为制度锁定、产业锁定、技术锁定和社会锁定4种典型碳锁定类型。同时发现,工业化水平的提高、居民消费水平的增长、城市化的快速扩张以及环境规制的缺失是导致建筑业高碳锁定的主要驱动因素。

(2)中国区域建筑业的4条低碳路径可以总结为低城市化低创新型、高投入低创新型、高投入高创新型3种模式。建筑业低碳排放的原因,一是区域发展较落后或资源禀赋较好且未承接发达区域的建筑业高碳转移,尚未形成对化石能源的依赖。二是地方政府已意识到建筑业的高碳趋势,旨在通过高技术投入从“源头”控制建筑业的高碳排放。三是在城市化与工业化高速发展的初期,提高技术创新能力有助于实现碳解锁。

(3)通过时空演进分析可以发现,区域建筑业的碳锁定效应总体具有较强的时空异质性。时间上,主要表现为高碳锁定趋势的加深及低碳发展模式的瓦解。空间上,不同区域之间遵循的高碳、低碳组态路径模式存在较大差异。其中,C3路径(技术锁定型)是被最多区域遵循的高碳组态,说明大部分区域的建筑业仍处于碳锁定的初级阶段;NC3路径(高投入高创新型)是被最多区域遵循的低碳组态,说明高技术投入、高创新水平是区域建筑业低碳的关键驱动力。

### 5.2 政策建议

针对本文的研究结论,如何有效缓解碳锁定,破除路径依赖,实现建筑业碳解锁,需要我们从制度、经济、技术、社会4个维度,充分考虑区域异质性,设计差异化的解锁策略。

具体而言,针对建筑业高碳锁定的区域:①需从产业链视角优化工业能源结构,充分利用中国再生能源技术优势及水、风、光和生物质发电产业规模优势,提升可再生能源比例。需在建材生产部门,包括非金属矿物制品、金属冶炼与延压以及化学工业,大力推行原料/燃料与工艺过程替代技术及零碳电力能源技术,尽快实现以化石能源为主的能源结构向低碳多元供能体系转变。发展绿色建材产品认证制度,鼓励绿色建筑材料进入市场,加强建筑材料循环利用。②引导社会树立绿色消费理念,通过加强“绿色金融”发展及开展二手房市场低碳消费信贷等方式,引导金融资源向低碳环保的建筑项目流动。③地方政府需大力推进碳中和技术体系在建筑领域的建设和嵌入,同时完善技术创新的激励机制,通过关键性技术知识产权保护机制、税收减免等政策鼓励建筑企业自主研发绿色建设技术。④着力推进新型建筑工业化、数字化、智能化的低碳技术在建筑领域的应用,通过大数据、物联网等新一代信息技术驱动,带动建筑业全面转型升级,刺激低碳技术逐渐进入建筑市场,实现建筑业高效益、高质量、低消耗、低排放的发展。

针对建筑业低碳发展的区域:①落后型区域应当充分利用当地的资源禀赋和比较优势,引导市场要素发展绿色产业与低碳科技,避免走“先污染、再治理”的老路,实现建筑业低碳发展的“换道”超车。②对于技术创新型区域,要提高技术投入产出效率,避免技术投入的“回弹效应”。③通过自下而上的缝隙创新机制,即政府的财政补贴、专设项目或企业的战略投资以实现高碳锁定技术体制的改变,逆转该类区域建筑业低碳发展的瓦解趋势。④从全国来看,需要进一步依托区域协调发展战略建立健全高碳和低碳建筑业区域绿色发展的协调机制与帮扶机制,构建与资源环境承载能力相匹配的建设用地空间格局,促进区域间建筑业资源的有效配置。

### 参考文献(References):

- [1] Chen X, Shuai C Y, Wu Y, et al. Analysis on the carbon emission peaks of China's industrial, building, transport, and agricultural sectors[J]. Science of The Total Environment, 2020, 709: 135768.
- [2] IEA. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction[R/

2022年7月

- OL]. (2019-12) [2021-9-30]. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.
- [3] Global ABC. 2021 Global Status Report for Buildings and Construction[EB/OL]. (2021-10-19) [2021-12-30]. <https://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>.
- [4] IEA. World Energy Outlook 2019[EB/OL]. (2019-11) [2021-10-02]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- [5] Zhou N, Khanna N, Feng W, et al. Scenarios of energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions reduction potential in the buildings sector in China to year 2050[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(11): 978-984.
- [6] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2021[R/OL]. (2021-12-23) [2022-03-01]. [https://mp.weixin.qq.com/s/tnzXNdf6Tk2Ca3QYtJT1Q?scene=25#wechat\\_redirect](https://mp.weixin.qq.com/s/tnzXNdf6Tk2Ca3QYtJT1Q?scene=25#wechat_redirect). [China Association of Building Energy Efficiency. China Building Energy Consumption Research Report 2021[R/OL]. (2021-12-23) [2022-03-01]. [https://mp.weixin.qq.com/s/tnzXNdf6Tk2Ca3QYtJT1Q?scene=25#wechat\\_redirect](https://mp.weixin.qq.com/s/tnzXNdf6Tk2Ca3QYtJT1Q?scene=25#wechat_redirect).]
- [7] 蔡海亚. 中国碳锁定的行业差异分解与解锁路径分析[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(2): 44-51. [Cai H Y. Analysis on the path of decomposition and release of carbon lock industry in China[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Science Edition)*, 2018, 17(2): 44-51.]
- [8] Zhang Y, Yan D, Hu S, et al. Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach[J]. *Energy Policy*, 2019, DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110949.
- [9] Wang J, Wang Z, Peng S, et al. Tracing CO<sub>2</sub> emissions of China's construction sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124165.
- [10] 韩梦瑶, 刘卫东, 杨茗月. 低碳转型下中国高耗能行业的碳风险传导解析: 基于隐含碳关联网络视角[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 79-91. [Han M Y, Liu W D, Yang M Y. Carbon risk transmission of China's energy-intensive industries under low-carbon transition: From the embodied carbon network perspective[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 79-91.]
- [11] Hou H M, Feng X Y, Zhang Y, et al. Energy-related carbon emissions mitigation potential for the construction sector in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, DOI:10.1016/j.eiar.2021.106599.
- [12] 李宏伟, 郭红梅, 屈锡华. “碳锁定”的形成机理与“碳解锁”的模式、治理体系: 基于技术体制的视角[J]. 研究与发展管理, 2013, 25(6): 54-61. [Li H W, Guo H M, Qu X H. Formation mechanism of “carbon lock-in”, mode of “carbon unlocking” and its governance: Base on the perspective of technological regime[J]. *R & D Management*, 2013, 25(6): 54-61.]
- [13] Murtagh N, Scott L, Fan J L. Sustainable and resilient construction: Current status and future challenges[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122264
- [14] 张济建, 苏慧. 碳锁定驱动因素及其作用机制: 基于改进PSR模型的研究[J]. 会计与经济研究, 2016, 30(1): 120-128. [Zhang J J, Su H. Antecedents and effects of carbon lock-in: A study based on improved PSR model[J]. *Journal of Accounting and Economics*, 2016, 30(1): 120-128.]
- [15] 杨玲萍, 吕涛. 我国碳锁定原因分析及解锁策略[J]. 工业技术经济, 2011, 30(4): 151-157. [Yang L P, Lv T. Analysis of carbon lock-in in China and unlocking strategies[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2011, 30(4): 151-157.]
- [16] 周伟铎, 郑赫然, 庄贵阳, 等. 雄安新区低碳发展策略研究: 基于深圳特区、浦东新区、滨海新区的低碳发展实践[J]. 建筑经济, 2018, 39(3): 13-18. [Zhou W D, Zheng H R, Zhuang G Y, et al. Research on the low-carbon development strategies of Xiong'an New Area: Based on the low-carbon development experience of Shenzhen Special Economic Zone, Pudong New Area and Binhai New Area[J]. *Construction Economy*, 2018, 39(3): 13-18.]
- [17] 孙丽文, 赵鹏, 李少帅, 等. 中国省域碳锁定空间溢出效应及影响因素分析: 基于空间面板模型的实证检验[J]. 科技管理研究, 2020, 40(3): 225-232. [Sun L W, Zhao P, Li S S, et al. Analysis of spatial spill over effects and influencing factors of carbon lock-in of China's provinces: Empirical test based on spatial panel model[J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(3): 225-232.]
- [18] 刘宏筵, 张济建, 张茜. 全球供应链视角下的中国碳排放责任与形象[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 652-668. [Liu H D, Zhang J J, Zhang Q. China's carbon emission responsibility and image from the perspective of global supply chain[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 652-668.]
- [19] 周五七, 唐宁. 中国工业行业碳解锁的演进特征及其影响因素[J]. 技术经济, 2015, (4): 15-22. [Zhou W Q, Tang N. Evolution characteristic and influencing factor of China's industrial carbon unlock[J]. *Journal of Technology Economics*, 2015, (4): 15-22.]
- [20] 张赫, 黄雅哲, 王睿, 等. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 744-755. [Zhang H, Huang Y Z, Wang R, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 744-755.]
- [21] 牛鸿蕾, 刘志勇. 中国碳锁定效应的测度指标体系构建与实证分析[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 22-27. [Niu H L, Liu Z Y. Construction of measurement indicator system of China's carbon lock-in effect and its empirical analysis[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(2): 22-27.]
- [22] 张济建, 刘清, 丁绪辉. 长江经济带碳解锁效率研究: 基于SE-



- DEA-Malmquist 指数[J]. 华东经济管理, 2021, 35(6): 1-10. [Zhang J J, Liu Q, Ding X H. Research on carbon unlocking efficiency of the Yangtze River Economic Belt: Based on SE-DEA-Malmquist model[J]. East China Economic Management, 2021, 35(6): 1-10.]
- [23] 汪中华, 成鹏飞. 中国碳超载下碳锁定与解锁路径实证研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 909-917. [Wang Z H, Cheng P F. China's carbon lock-in and unlocking in the context of carbon loading[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 909-917.]
- [24] Xu Y Z, Dong B Y, Chen Y, et al. Effect of industrial transfer on carbon lock-in: A spatial econometric analysis of Chinese cities [J]. Journal of Environment Planning and Management, 2021, 65(6): 1024-1055.
- [25] 蔡海亚, 徐盈之, 双家鹏. 区域碳锁定的时空演变特征与影响机理[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2016, 18(6): 23-31. [Cai H Y, Xu Y Z, Shuang J P. The study of temporal and spatial evolution characteristics and the effect mechanism of regional carbon lock-in[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2016, 18(6): 23-31.]
- [26] Yan B, Wang F, Dong M R, et al. How do financial spatial structure and economic agglomeration affect carbon emission intensity? Theory extension and evidence from China[J]. Economic Modelling, 2022, DOI: 10.1016/j.econmod.2021.105745.
- [27] Hung C C W, Hsu S C, Cheng K L. Quantifying city-scale carbon emissions of the construction sector based on multi-regional input-output analysis[J]. Construction Research Congress 2020: Computer Applications, 2019, 149: 75-85.
- [28] 卢娜, 冯淑怡, 陆华良. 中国城镇化对建筑业碳排放影响的时空差异[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(3): 8-17. [Lu N, Feng S Y, Lu H L. the tempo-spatial difference of urbanization on construction sector carbon emission in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2018, 20(3): 8-17.]
- [29] Fang Y, Ng S T, Ma Z D, et al. Quota-based carbon tracing model for construction processes in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200: 657-666.
- [30] Li S Y, Wu Q S, Zheng Y, et al. Study on the spatial association and influencing factors of carbon emissions from the Chinese construction industry[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1728.
- [31] Wang Z S, Zhou Y X, Zhao N, et al. Spatial correlation network and driving effect of carbon emission intensity in China's construction industry[J]. Buildings, 2022, 12(2): 201.
- [32] Zhou Z B, Li K, Li Q, et al. Carbon footprint and eco-efficiency of China's regional construction industry: A life cycle perspective[J]. Journal of the Operational Research Society, 2021, 72(12): 2704-2719.
- [33] 宋金昭, 郭芯羽, 王晓平, 等. 中国建筑业碳排放效率区域差异及收敛性分析: 基于SBM模型与面板单位根检验[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 301-308. [Song J Z, Guo X Y, Wang X P. Regional differences and convergence test of carbon emission efficiency of construction industry in China using SBM model and panel unit root test[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(2): 301-308.]
- [34] Du Q, Deng Y G, Zhou J, et al. Spatial spillover effect of carbon emission efficiency in the construction industry of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 29(2): 2466-2479.
- [35] Li X P, Yu Y, Shi X P, et al. Tracking the domestic carbon emission intensity of China's construction industry: A global value chain perspective[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 1-15.
- [36] 蒋博雅, 黄宝麟, 张宏. 基于LMDI模型的江苏省建筑业碳排放影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 202-212. [Jiang B Y, Huang B L, Zhang H. study on influencing factors of construction industry carbon emissions in Jiangsu Province Based on LMDI model[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(10): 202-212.]
- [37] 刘彤, 潘晓梦, 宁欣. 城镇化对建筑业碳排放的影响效应分析[J]. 工程管理学报, 2020, 34(6): 43-48. [Liu T, Pan X M, Ning X. Research on the influence of urbanization on carbon emissions in the construction industry[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(6): 43-48.]
- [38] 梁中. “产业碳锁定”的内涵、成因及其“解锁”政策: 基于中国欠发达区域情景视角[J]. 科学学研究, 2017, 35(1): 54-62. [Liang Z. Industry carbon lock-in: The connotation, causes and unlocking policy: Based on the perspective of less-developed areas in China[J]. Studies in Science of Science, 2017, 35(1): 54-62.]
- [39] 李宏伟. “碳锁定”与“碳解锁”研究: 技术体制的视角[J]. 中国软科学, 2013, (4): 39-49. [Li H W. Carbon lock-in and carbon unlocking: A perspective of technological regime evolution[J]. China Soft Science, 2013, (4): 39-49.]
- [40] Gu W, Zhao X H, Yan X B, et al. Energy technological progress, energy consumption, and CO<sub>2</sub> emissions: Empirical evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 1-15.
- [41] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展: 基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69. [Shao S, Fan M T, Yang L L. economic restructuring, green technical progress, and low-carbon transition development in China: An empirical investigation based on the overall technology frontier and spatial spillover effect[J]. Management World, 2022, 38(2): 46-69.]

2022年7月

- [42] Wang H Q, Wei W X. Coordinating technological progress and environmental regulation in CO<sub>2</sub> mitigation: The optimal levels for OECD countries & emerging economies[J]. *Energy Economics*, 2020, 87: 104510.
- [43] 刘备, 董直庆. 技术进步的能源偏向诱发“碳锁定效应”了吗? [J]. *产经评论*, 2020, 11(4): 133–148. [Liu B, Dong Z Q. Has the energy bias of technological progress induced carbon lock-in? [J]. *Industrial Economic Review*, 2020, 11(4): 133–148.]
- [44] Wen Q, Chen Y, Hong J K, et al. Spillover effect of technological innovation on CO<sub>2</sub> emissions in China's construction industry[J]. *Building and Environment*, 2020, 171: 106653.
- [45] 文杰, 黎红梅. 农田灌溉系统治理绩效增进及组态路径: 基于多因协同联动的QCA方法[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1066–1078. [Wen J, Li H M. Configuration path analysis of farmland irrigation system governance performance improvement: Based on the QCA method of multifactor synergy[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1066–1078.]
- [46] Rihoux B, Ragin C C. *Configurational Comparative Methods: Qualitative Comparative Analysis (QCA) and Related Techniques*[M]. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2009.
- [47] 杜运周, 马鸿佳. 复杂性背景下的创新创业研究: 基于QCA方法[J]. *研究与发展管理*, 2022, 34(3): 1–9. [Du Y Z, Ma H J. Research on innovation and entrepreneurship in the context of complexity: Based on the QCA method[J]. *R&D Management*, 2022, 34(3): 1–9.]
- [48] Garcia-Castro R, Ariño M A. A general approach to panel data set-theoretic research[J]. *Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems*, 2016, 2: 63–76.
- [49] 李静, 刘胜男. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹评价研究[J]. *建筑经济*, 2021, 42(1): 101–105. [Li J, Liu S N. Research on carbon footprint assessment of prefabricated concrete in building stage[J]. *Construction Economy*, 2021, 42(1): 101–105.]
- [50] 范建双, 周琳. 中国建筑业碳排放时空特征及分省贡献[J]. *资源科学*, 2019, 41(5): 897–907. [Fan J S, Zhou L. Spatiotemporal distribution and provincial contribution decomposition of carbon emissions for the construction industry in China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(5): 897–907.]
- [51] 曹翔, 高瑀, 刘子琪. 农村人口城镇化对居民生活能源消费碳排放的影响分析[J]. *中国农村经济*, 2021, (10): 64–83. [Cao X, Gao Y, Liu Z Q. The impact of urbanization of rural residents on carbon emissions from household energy consumption[J]. *Chinese Rural Economy*, 2021, (10): 64–83]
- [52] 熊航, 静峥, 展进涛. 不同环境规制政策对中国规模以上工业企业技术创新的影响[J]. *资源科学*, 2020, 42(7): 1348–1360. [Xiong H, Jing Z, Zhan J T. Impact of different environmental regulatory tools on technological innovation of Chinese industrial enterprises above designated size[J]. *Resources Science*, 2020, 42(7): 1348–1360.]
- [53] 柳清瑞, 唐璐. 城镇化对能源消费的推拉效应及其影响因素: 基于门槛效应模型的实证检验[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1022–1035. [Liu Q R, Tang L. Push-pull effect of urbanization on energy consumption and its influencing factors: An empirical test with threshold effect model[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1022–1035.]
- [54] 张志红, 王露露, 宋艺. 营商环境生态如何驱动城市创新绩效: 基于创新型城市的模糊集定性比较分析[J]. *研究与发展管理*, 2022, 34(3): 24–40. [Zhang Z H, Wang L L, Song Y. How does ecosystem of doing business drive urban innovation performance: A fuzzy set qualitative comparative analysis based on innovative cities[J]. *R&D Management*, 2022, 34(3): 24–40.]
- [55] 程建青, 罗瑾琰, 杜运周, 等. 何种创业生态系统产生女性高创业活跃度? [J]. *科学学研究*, 2021, 39(4): 695–702. [Cheng J Q, Luo J L, Du Y Z, et al. What kinds of entrepreneurial ecosystem can produce country-level female high entrepreneurial activity? [J]. *Studies in Science of Science*, 2021, 39(4): 695–702.]
- [56] 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.]
- [57] Zhao X M, Liu C J, Sun C W, et al. Does stringent environmental regulation lead to a carbon haven effect? Evidence from carbon-intensive industries in China[J]. *Energy Economics*, 2020, 86: 104631.
- [58] 高明, 余玲, 吴雪萍. 技术进步回弹效应的形成路径分析: 以建筑业为例[J]. *科技管理研究*, 2018, (22): 118–127. [Gao M, Yu L, Wu X P. Analysis of the forming path of technology progress rebound effect: An example of construction industry[J]. *Science and Technology Management Research*, 2018, (22): 118–127.]

# A spatiotemporal analysis of carbon lock-in effect in China's provincial construction industry

HONG Jingke, LIU Yutong, CHEN Yuxin

(School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Carbon neutrality in construction industry is one of the most important parts in the process of realizing national carbon neutrality. Therefore, it is necessary to explore the high-carbon dependency pattern of regional construction industry in the process of economic development. This study quantified carbon lock-in effect in provincial construction industry from the four dimensions of technology, environment, economy, and society. Based on the panel data of 30 provinces in China's mainland from 2000 to 2018, this study examined the carbon lock-in effect in provincial construction industry by using the fuzzy-set qualitative comparative analysis method. Furthermore, this study uncovered the spatial-temporal evolutionary process and dependence pathways of carbon lock-in in provincial construction industry by adopting the panel data set theory. The results show that: (1) The six high-carbon paths that drive carbon lock-in effect in provincial construction industry can be categorized into four typical types: Institutional lock-in, industrial lock-in, technology lock-in, and social lock-in. Improvement of industrialization level, growth of residents' consumption, rapid expansion of urbanization, and lack of environmental regulation are the main driving factors leading to the high carbon lock-in of the construction industry. (2) The four low-carbon paths of the construction industry can be categorized into three types: low urbanization and low innovation, high technology investment and low innovation, and high technology investment and high innovation. (3) There exists great temporal and spatial heterogeneity in the carbon lock-in effect of provincial construction industry. The carbon lock-in effect has been strengthened while the low carbon model has been weakened over time. Moreover, there are great differences in the high-carbon dependence pathways between different provinces. The results of this research are helpful for formulating the carbon peaking time map, road map, and implementation map in the construction sectors at the local level, and are of great significance for realizing the regional independent exploration of low-carbon development path and the realization of the carbon peaking and carbon neutrality goals.

**Key words:** construction industry; carbon lock-in; panel data; fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis; spatiotemporal evolution; China