

中国城市经济发展与碳中和协同演进研究

李曼琪 陈少强

摘要 城市是推进碳中和目标实现的重要主体。处于不同发展阶段的城市，其碳中和进程与潜力、实现碳中和目标的路线与进度均存在显著差异。深入认识中国城市经济发展与碳中和进程相对趋势变化的异质性，对差异化的碳中和政策和战略制定具有重要意义。本文采用弹性系数法考察2000—2020年中国城市经济发展与碳中和的时空演化进程，根据其相对演化趋势将城市分为四种类型；基于随机森林分类模型得到特征重要性排序，刻画不同类型城市的典型社会经济特征；使用回归模型进一步分析经济与碳中和发展趋势的核心影响因素；最后综合不同类型城市的时空演变和社会经济特征，围绕主要影响因素，结合国内外碳中和先行城市经验，提出实现经济发展与碳中和协同演进的路径建议。研究表明，2000年以来，中国城市经济增速总体上放缓，但与碳中和的差距在加速缩小；2010年以来，越来越多的城市逐步实现经济与碳中和协同发展，空间上呈现出由东部地区和中部地区向西部地区推进的趋势；近年来部分城市尤其是老工业基地和资源型城市开始缺乏经济增长动力，或趋近或背离碳中和，主要分布在东北和西部的部分地区。不同类型城市具有较为鲜明的时空分布、社会经济和资源禀赋特征，应充分发挥各自优势，制定多元化、差异化的碳中和路径，并积极探索区域性的碳中和协同战略。

关键词 碳中和 协同发展 弹性系数 随机森林分类模型

【中图分类号】F062.1 【文献标识码】A 【文章编号】2095-851X(2022)04-0094-17

【基金项目】国家自然科学基金专项项目“面向碳中和的中国经济转型模式构建研究”（批准号：7214001）；中国社会科学院重点项目“碳中和的经济分析与政策研究”（批准号：STWM-ZS-2021-001）；中国社会科学院创新工程项目“资源枯竭型城市转型发展绩效评估及对策研究”（批准号：2020STSB02）。

【作者简介】李曼琪，中国社会科学院生态文明研究所博士后，邮政编码：100710；陈少强，中国财政科学研究院资源环境和生态文明研究中心主任、研究员、博士生导师，本文通讯作者，邮政编码：100142。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

一、引言

气候变化已成为当下最大的环境挑战。《巴黎协定》提出努力将较工业革命前的温度升幅限制在 1.5℃ 以内 (UNFCCC, 2015), IPCC 发布的《全球升温 1.5℃ 特别报告》认为,为实现这一目标,需要在 2050 年左右实现全球层面的碳中和 (IPCC, 2018)。中国也于 2020 年 9 月向世界宣布“努力争取 2060 年前实现碳中和”。国家碳中和目标的实现需要落实到实体层面,以城市为主体推进碳中和具有深刻的实践意义。城市是碳排放的最主要场所,发生在其中的人类活动是造成气候变化的主要因素,虽然其面积仅占地球陆地面积的 3%,但城市产生的碳排放占全球碳排放总量的 70% 以上 (World Economic Forum, 2021)。城市日益成为推进碳中和的重要力量,全球已有一千多个城市承诺实现碳中和,中国的许多城市也正积极探索实现碳中和的策略并制定行动方案 (United Nations, 2022; 洪志超、苏利阳, 2021)。

中国幅员辽阔,不同城市的资源禀赋、经济水平、技术条件等存在较大差异,低碳化发展路径和政策选择各异。城市实现碳中和应充分考虑这种差异 (Sun et al., 2021; 潘家华, 2021),然而当下鲜少出现从碳中和视角提出的城市异质性分析,以及基于这种异质性提出的差异化碳中和方案。近期由城市异质性引发的相关研究焦点包括由非监督聚类方法(如层次聚类、K-means 聚类)得出的碳达峰趋势分类(郭芳等, 2021; 张诗卉等, 2021)、由 Tapio 脱钩模型决定的城市低碳发展特征分类(禹湘等, 2020)、基于我国五大区域划分的碳达峰情景研究(李萌等, 2021)等。国内外持续关注碳减排、低碳化发展相关研究中,方法上常以碳排放与经济水平的定量关系为切入点,主要聚焦于两个方面。一是碳排放驱动因素的定量研究,常用方法包括因素分解法,如指数分解法 (Shan et al., 2021)、结构分解法 (Feng et al., 2012)、生产分解法 (Wang et al., 2015),以及包括 IPAT、STIRPAT 模型和基于这些模型的扩展的计量模型分析 (Lin and Li, 2020)。二是碳排放和经济的发展趋势变化,常用方法包括两者的拟合曲线关系,如线型、倒 U 型和 N 型等 (He et al., 2021; Kaika and Zervas, 2013),以及碳排放弹性系数分析法 (Dogan and Aslan, 2017) 和脱钩模型 (OECD, 2002; Tapio, 2005)。其中基于脱钩模型的讨论在近期研究中广受关注,而脱钩类型本质上由碳排放的经济增长弹性系数决定,因此碳排放弹性系数也成为衡量经济低碳发展状况的重要工具。《全球升温 1.5℃ 特别报告》强调碳中和即“CO₂ 净零排放”,具体指在规定时期内人为 CO₂ 移除在全球范围抵消人为 CO₂ 排放 (IPCC, 2018)。这一解释决定了碳中和相关研究需同时考虑碳排放和碳汇,因此本文在上述围绕碳排放的研究基础上引入碳汇,利用汇源比(碳汇与碳排放的比值)来测度碳中和水平,借鉴弹性系数概念(黄润龙, 2013)及其常见应用,如碳排放弹性系数、能源弹性系数 (Burke and Csereklyei, 2016)、交通弹性系数 (McKinnon, 2007) 等,利用“汇源比弹性系数”揭示汇源比和经济水平之间数量关系的变动趋

势，并基于这种变动趋势发掘城市碳中和与经济协同发展的特征和进程。

具体而言，本文采用弹性系数法综合考察 2000—2020 年中国 330 个地级及以上城市经济发展与碳中和的协同演变进程，根据演变趋势分类讨论城市的社会经济特征；针对不同类型的城市，采用回归模型分析影响其经济发展与碳中和进程的驱动因素，并提出以实现经济与碳中和协同发展为目标的政策建议和实现路径，以期对准确把握碳中和进程、差异化制定碳中和策略提供参考借鉴。

二、研究方法和数据

（一）城市碳排放和碳汇核算方法

城市尺度的人为碳排放包括城市中能源和工业部门的化石能源活动相关碳排放，以及土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF）活动产生的碳排放，后者相对前者所占比例很小。依据《中国能源统计年鉴》的终端能源消费数据，本文选取煤、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油和天然气这几类化石能源，应用 IPCC（2014）的碳排放核算方法计算获得城市化石能源活动相关碳排放量，具体公式如下：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n E_i \times \theta_i \times f_i \quad (1)$$

其中， CO_2 为城市的化石能源活动相关碳排放量， n 表示能源种类数量， E_i 表示第 i 种能源的终端消耗量， θ_i 表示第 i 种能源的折算标准煤系数， f_i 表示第 i 种能源的碳排放系数。

陆地生态系统碳汇主要来自林地、草地、水域和未利用土地这四种土地利用类型，它们在城市中的分布情况基于中国多时期土地利用/覆盖遥感空间数据集经过 GIS 处理和计算获得，数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn>）。本文使用土地利用系数估算方法（Cui et al., 2018；方精云等，2007）计算得到城市的碳汇量，计算公式如下：

$$Seq = \sum T_j \times \delta_j \quad (2)$$

其中， Seq 表示陆地生态系统碳汇量， j 表示土地利用类型， T_j 表示第 j 种土地类型的面积； δ_j 表示第 j 种土地类型的碳汇系数。

（二）城市类型划分

城市作为经济社会运行发展的空间载体，其碳中和进程一方面取决于人为碳排放的削减速率和某一时间节点的排放量，另一方面也取决于人为碳移除的速率和该时间节点的移除量。因此，在城市地域范围内，某一个时间节点碳汇和碳排放的比值（汇源比）可以体现该城市的碳中和水平，表示如下：

$$C = \frac{Seq}{CO_2} \quad (3)$$

由式(3)可知,当汇源比 $C \geq 1$ 时,当前的陆地生态系统碳汇已经可以 100% 抵消其人为碳排放,视为碳中和。城市的减碳和增汇是经济高质量发展的要求,城市经济发展与碳中和相互关联,协同演化,本文以汇源比弹性系数衡量这种协同演化趋势,计算公式如下:

$$e = \frac{\Delta C}{\Delta pcGDP} \quad (4)$$

其中, e 表示汇源比弹性系数, ΔC 和 $\Delta pcGDP$ 分别表示一定时间段内城市的汇源比变化率和人均 GDP 变化率。 $e > 0$ 表示碳中和进程和经济增长的发展趋势协同,且只有当 $\Delta C > 0$ 且 $\Delta pcGDP > 0$ 时,两者正向协同演进。 $e < 0$ 表示碳中和进程和经济增长的发展趋势未协同。由 e 、 ΔC 和 $\Delta pcGDP$ 取值组合决定的城市分类标准如表 1 所示。

表 1 基于汇源比变化率及人均 GDP 变化率的城市分类

城市类型	e	ΔC	$\Delta pcGDP$	演变特征
I	> 0	> 0	> 0	协同演进,经济增长并趋近碳中和
II	< 0	< 0	> 0	未协同,经济增长但背离碳中和
III	> 0	< 0	< 0	协同衰退,经济衰退并背离碳中和
IV	< 0	> 0	< 0	未协同,经济衰退但趋近碳中和

本文基于碳汇和碳排放的相关数据,计算 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年中国 330 个地级及以上城市的汇源比,结合人均 GDP 数据进一步计算得出 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年四个时间段的 ΔC 、 $\Delta pcGDP$ 和 e ,综合计算结果获得各时间段的城市类型划分结果。

(三) 随机森林分类模型

不同类型城市的特征讨论中,以往研究往往同等对待各项指标,相关讨论较为宽泛。为识别各类城市最鲜明的环境、社会和经济特征,本文借用数据科学领域的随机森林分类模型,将如表 1 所示的城市类型作为因变量,将表征环境、社会和经济的特征指标作为自变量,获得各项指标的贡献率。贡献率越高,代表该特征在既定城市类型之间的区别越显著。

随机森林分类模型是一种基于决策树 (Quinlan, 1986) 的机器学习模型,被广泛用于数据驱动的分类和回归问题 (Breiman, 2001)。作为一种集成算法,随机森林分类模型可有效克服单个决策树的性能提升瓶颈,以及过拟合、噪声和异常值等问题 (王奕森、夏树涛, 2018)。作为数据驱动的非参数方法,随机森林分类模型的应用无需先验知识,在发现复杂的非线性关系、有效处理高维数据等方面优于基于统计方法的模型 (Li et al., 2013)。

借助随机森林分类模型处理复杂非线性关系和高维数据的优势,同时考虑数据的

可得性,本文选取三类城市特征变量(见表2),考察它们对城市类型划分的相对贡献。一是自然禀赋变量,表征土地利用/覆盖和绿化水平,共7个变量;二是碳中和变量,包括人均碳排放量、碳汇量和汇源比3个变量;三是社会经济变量,包括表征人口、经济发展水平、城市规模、土地城市化水平、单位经济产出的碳排放、产业结构和工业发展水平的11个变量。

表2 随机森林分类模型的特征变量

类型	序号	变量	含义
自然禀赋	1.1	耕地面积	土地利用/覆盖
	1.2	林地面积	
	1.3	草地面积	
	1.4	水域面积	
	1.5	居民用地面积	
	1.6	未利用土地面积	
	1.7	森林覆盖率	绿化水平
碳中和	2.1	人为碳排放量	环境压力
	2.2	碳汇量	陆地生态系统的固碳能力
	2.3	汇源比	碳中和水平的测度
社会经济	3.1	年末人口总量	人口
	3.2	人口密度	
	3.3	GDP	经济发展水平
	3.4	人均GDP	
	3.5	行政区域面积	城市规模
	3.6	人均建设用地面积	土地城市化水平
	3.7	碳排放强度	单位经济产出的碳排放
	3.8	第一产业比重	产业结构
	3.9	第二产业比重	
	3.10	第三产业比重	
	3.11	规模以上工业增加值	工业发展水平

将三类指标单独或组合使用,可以建立不同的随机森林分类模型。在模型训练过程中,为最大程度保证模型的稳健性和结果的有效性,本文采用分层随机抽样法选取数据的训练集和测试集,并重复实验。根据实验结果精度(包括总体精度和分类别精度),最终选取精度最高、稳健型最好的模型,利用产生的各特征变量的贡献率得到城市类型之间的最显著差异。

(四) 城市经济与碳中和发展趋势的影响因素分析

本文进一步使用多元线性回归模型考察城市经济与碳中和发展趋势的潜在影响因素,为不同类型城市制定适合的经济与碳中和协同发展方案。本文分别以人均GDP

变化率和汇源比变化率作为因变量，因此自变量的选取应充分考虑是否对碳排放及其变化率、碳汇及其变化率、经济水平及其变化率存在潜在影响。Shan 等（2021）的研究表明，对城市碳排放影响较大的因素包括人均 GDP、碳排放强度、第二产业比重、第三产业比重以及人口总量。郭芳等（2021）认为人口总量、人均 GDP、第二产业比重、人均碳排放、GDP 年均增长率和碳排放年均增长率对不同城市碳达峰趋势有显著影响，揭示了动态变量对趋势变化存在影响。综合上述研究结论，本文选取 7 个静态变量和 4 个动态变量（见表 3）作为自变量建立线性回归关系，选择最小二乘法估计模型参数，根据自变量的显著性表现和回归系数，讨论不同类型城市的经济与碳中和发展趋势的主要影响因素。模型如下：

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \varepsilon \quad (5)$$

$$\Delta pcGDP = \sum_{i=1}^n \beta_i y_i + \omega \quad (6)$$

其中， x 和 y 表示表 3 所示自变量，对其中的静态变量取对数处理； α 和 β 分别代表 x 和 y 的系数； n 表示选取的自变量个数； ε 和 ω 为误差项。

表 3 经济发展与汇源比变化趋势的潜在影响变量

类型	变量	定义	表征含义	计算公式
静态变量	POP	人口总量(万人)	人口	
	pcGDP	人均 GDP(元)	经济发展水平	GDP 总量/总人口
	F	森林覆盖率(%)	绿化水平	林地面积/行政区域总面积
	CI	碳排放强度(吨/万元)	单位经济产出的碳排放	碳排放量/GDP 总量
	UR	人均建设用地面积(m ² /人)	土地城市化水平	建设用地面积/总人口
	SI	第二产业比重(%)	产业结构	第二产业增加值/GDP 总量 × 100%
	TI	第三产业比重(%)		第三产业增加值/GDP 总量 × 100%
动态变量	dGDP	过去五年年均 GDP 增长率(%)	经济水平变化	$(\sqrt[4]{GDP_{t5}/GDP_{t1}} - 1) \times 100\%$
	dCO ₂	过去五年年均碳排放增长率(%)	环境压力变化	$(\sqrt[4]{CO_{2,t5}/CO_{2,t1}} - 1) \times 100\%$
	dFA	过去五年年均林地增长率(%)	绿化程度变化	$(\sqrt[4]{FA_{t5}/FA_{t1}} - 1) \times 100\%$
	dPOP	过去五年年均人口增长率(%)	人口规模变化	$(\sqrt[4]{POP_{t5}/POP_{t1}} - 1) \times 100\%$

三、研究结果

（一）城市类型的时空演变特征分析

本文根据不同时段汇源比和人均 GDP 的相对变化趋势将 330 个地级及以上城市划分为表 1 所示的 I、II、III、IV 四种类型，结果如图 1 所示。其中，I 类城市呈现出经济与碳中和协同演进的态势，数量由 2010—2015 年的 38 个（占比为 11.5%）

增长至2015—2020年的53个(占比为16.1%); II类城市处于背离碳中和的经济增长阶段,其数量在四个时段均占多数,但占比从2000—2005年和2005—2010年的99.7%下降至2010—2015年的87.0%和2015—2020年的69.4%; III类城市经济衰退且发展方向背离碳中和,这类城市的占比从2010—2015年的1.5%上升至2015—2020年的10.3%; IV类城市经济衰退但发展方向趋近碳中和,2015—2020年首次出现14个IV类城市(占比为4.2%)。总体而言,2000—2020年,中国城市人均GDP增速逐渐降低,但汇源比则由负增长变为正增长,其增幅也逐渐升高,即中国城市的经济增速放缓但开始加速迈向碳中和。

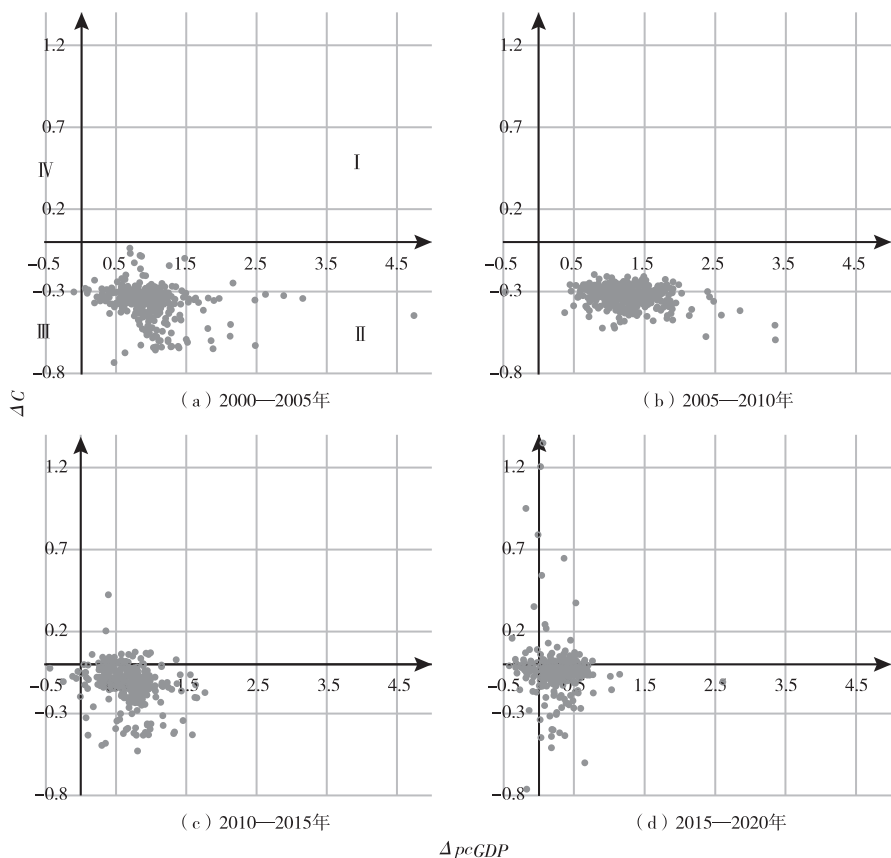


图1 2000—2020年中国城市的协同类型分布

资料来源:作者绘制。

各城市类型随时间的动态变化如图2所示,2000—2020年城市类型的变化越来越活跃。2000—2005年和2005—2010年城市类型的分布一致,除长春之外所有城市均为II类城市。2010—2015年开始出现的I类城市几乎全部由II类城市转变而来,

表明越来越多的城市在保持经济增长的前提下趋向碳中和。2010—2015年的Ⅰ类城市在2015—2020年大部分转换为其他类型，其中50%变为Ⅱ类城市；虽然2015—2020年Ⅰ类城市的数量显著增加，但具体名单已发生较大变化。这表明，虽然有越来越多城市的经济发展与碳中和开始协同演进，但这种协同趋势并不容易维持。2015—2020年Ⅳ类城市首次出现，大部分来源于前一时段的Ⅱ类城市；同一时期还出现了由Ⅲ类城市向Ⅰ类城市的跨越式转变，即由碳中和与经济共同衰退变为共同增长，表明有的城市开始跳出传统发展模式，实现经济与环境的和谐发展。就空间分布而言，2010—2015年，位于东北、东部沿海以及中部的部分城市率先成为Ⅰ类城市，迈入经济和碳中和协同发展阶段。2015—2020年，Ⅰ类城市的数量显著增加，主要分布于东部和中部地区，并开始在西部地区出现；Ⅲ类城市的数量也大量增加，大部分为老工业基地或资源型城市，这一时段首次出现的Ⅳ类城市也有近一半属于老工业基地，两类城市均主要分布在东北地区 and 内蒙古的部分地区。城市类型的时空演变分析表明，2000—2010年，中国大部分城市仍遵循传统工业化发展模式，经济增长的同时产生了大量的CO₂排放，对环境造成压力。2010年之后，开始有城市在保持经济增长的前提下向碳中和迈进，这类城市的数量呈上升趋势，主要分布于东部和中部地区，并且向西部推进。然而这种趋势并不容易维持，仅北京、临汾、舟山、宁波、黄山、东莞和重庆这七个城市在2010—2015年和2015—2020年均为Ⅰ类城市。

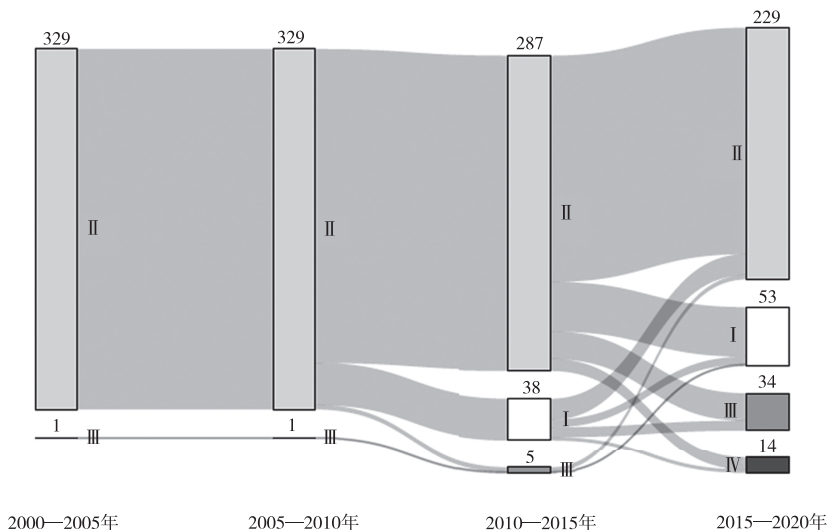


图2 2000—2020年不同协同类型城市的变化

资料来源：作者绘制。

(二) 城市社会经济特征的异质性分析

随机森林分类模型的计算结果表明，单独使用3个碳中和变量获得的模型精度过

低,仅40%左右;由表征自然禀赋的7个变量得到的精度也只有55%左右,且稳定性不佳;若使用全部20个变量,最高模型精度接近65%,贡献率排名靠前的特征变量均为社会经济类指标;最好的模型结果来自单独使用11个社会经济变量,精度可达70%,且变量贡献率排名与使用全部变量时相似。单独使用表2中前两类变量的模型精度过低,不足以支撑特征贡献率结果,基于特征贡献率排序的特征讨论也就不可靠;使用所有变量未获得最高的模型精度,说明这些变量中包含无效和冗余信息。因此,本文综合考虑模型的精度、效率和稳定性,最终选取由11个社会经济变量构建的模型,其变量贡献率排序如图3所示。

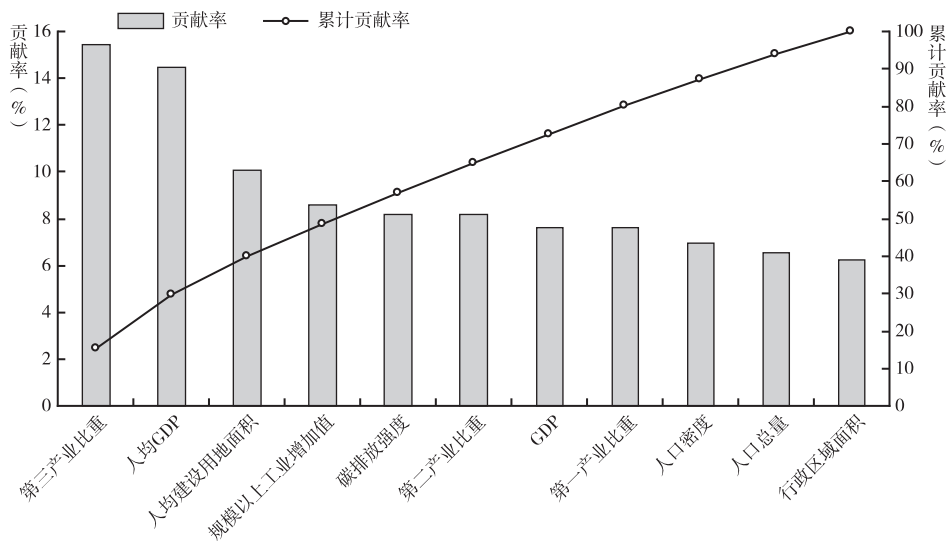


图3 随机森林分类模型的特征贡献率排序

资料来源:作者绘制。

图3显示,第三产业比重、人均GDP和人均建设用地面积是区分度最大的三个变量,对分类的贡献率均在10%以上,三者的贡献率累计达40%。规模以上工业增加值、碳排放强度和第二产业比重次之,前六个变量的贡献率累计达65%,其余五个变量的贡献程度接近。若只使用前六个变量建模,精度仅下降1.3%;再逐步删除这六个变量中排名较低的变量,精度开始明显降低。这说明贡献率处于前六位的变量在四类城市之间的区分度更高。因此,由经济发展变化率与碳中和变化率综合决定的城市类型之间,最显著的特征区别体现在产业结构、经济发展水平、城市化水平、产业发展水平和单位经济产出碳排放这几个方面。社会经济类变量在不同城市类型中的数据分布如图4所示。

I类城市的人均GDP、GDP和规模以上工业增加值均高于其他类型城市,且碳排放强度最低,说明这些城市的经济总量和质量均处于相对领先地位;而其第二产业

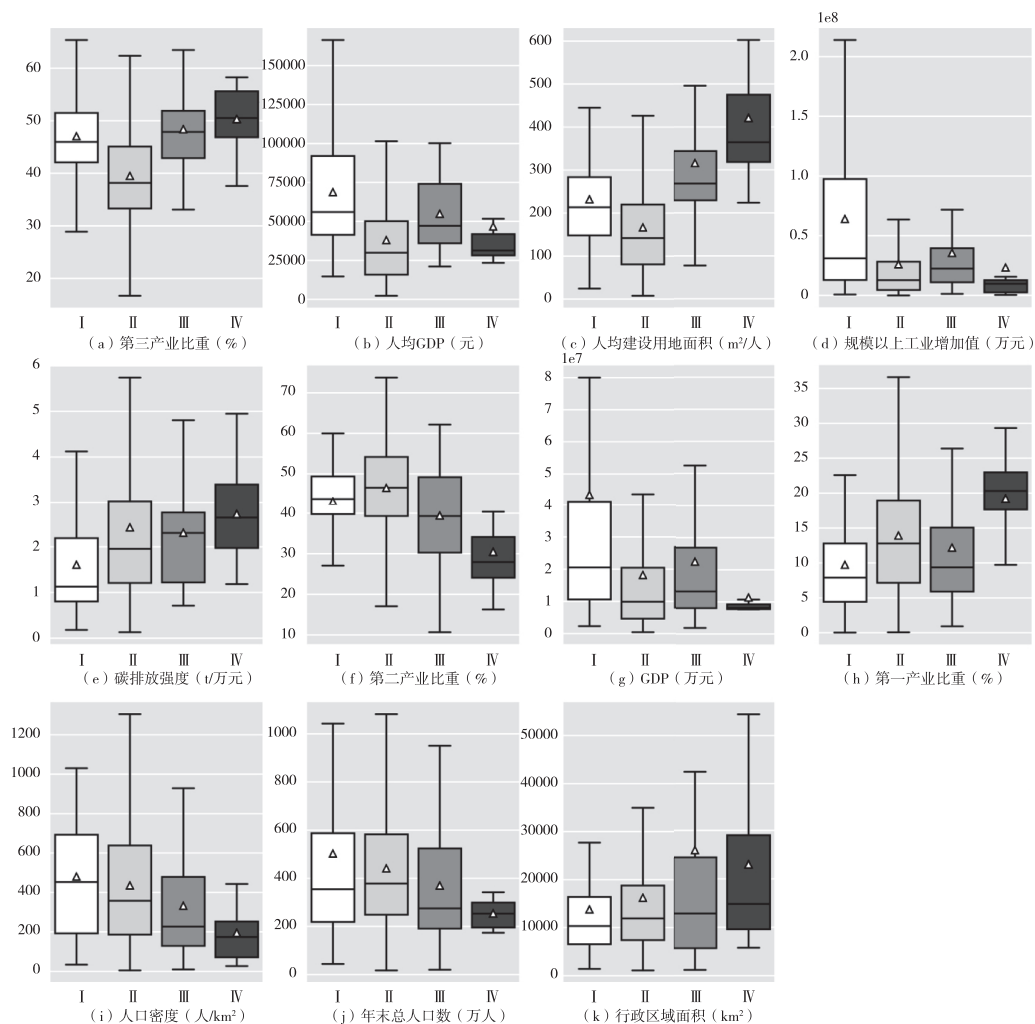


图4 不同城市类型的社会经济指标数据分布

资料来源：作者绘制。

比重和第三产业比重在四类城市中分别排名第二和第三，说明其工业和服务业的发展相对较为均衡，第一产业规模相对较小；人口规模和密度居高，但面积最小。以上特征说明大部分 I 类城市城市化水平较高，已经进入高质量发展阶段，在保持较高经济水平的前提下，开始重视低碳发展和生态改善，在四类城市中以最低的碳排放强度取得了最好的经济效益，并缩小与实现碳中和的差距。

II 类城市第二产业比重普遍较高，第三产业比重、人均建设用地面积和人均 GDP 均垫底，规模以上工业增加值和 GDP 也都相对较低（只略高于 IV 类城市），人

口密度和行政区域面积都处于中游。服务业发展相对落后,较低的人均建设用地面积和人均 GDP 体现出此类城市的居民物质生活与发达水平尚存在距离。这类城市长期占据主导地位,2010年起才陆续有城市跳出这种发展模式,向更高质量的 I 类城市转变。

Ⅲ类城市的第三产业比重、人均 GDP、GDP、人均建设用地面积以及规模以上工业增加值在四类城市中均列第二位,其他社会经济指标也都位居中游。这类城市大部分是老工业基地和资源型城市,经过早年的发展和积累,经济和社会已发展至较好水平,但早期粗放的发展模式对环境造成了一定的负面影响。由于产业和资源逐渐衰败,资本和人口持续流出,经济增速放缓甚至开始衰退,但由于工业和资源依赖的发展惯性,对环境的负面影响仍然存在,单位 GDP 的碳排放量仍处于较高位,导致碳排放水平和经济发展共同衰退的状态。

四类城市中,Ⅳ类城市的经济最不发达,人均 GDP、GDP 总量和规模以上工业增加值均垫底,且碳排放强度最高;人均建设用地面积最大,同时人口总量和密度最小、城市面积普遍较大。这类城市直到 2015—2020 年才开始出现,14 个Ⅳ类城市中有 6 个位于东北地区,其他大部分位于内蒙古自治区。近年来,这些城市由于人口、产业和资本的流出导致经济下行,技术和经济增长受阻导致单位 GDP 的高碳排放,但碳排放量呈降低趋势,同时环境也获得机会恢复,从而缩小了与实现碳中和的差距。

(三) 城市经济与碳中和发展趋势的影响因素分析

基于经济发展与碳中和相对变化率的城市类型划分,本文进一步挖掘人均 GDP 和汇源比变化趋势的主要影响因素。由以人均 GDP 变化率和汇源比变化率为因变量的最小二乘回归结果(见表 4)可以看出,单位 GDP 碳排放对经济增长普遍存在正向影响,大部分城市的碳排放增速对经济增长仍有微弱的驱动作用,这说明中国经济增长仍主要依赖于高碳的发展模式。对大部分城市而言,工业是促进经济增长的主要动力。城市化程度越高的城市,经济增长越快,说明现阶段城市的人口集聚有助于驱动经济发展。大部分城市的绿化水平的提升有利于汇源比的增长,说明即使当下城市的自然固碳潜力有限,也不能忽视其对碳中和的正向促进作用。经济越发达的城市汇源比增长越快,说明较高的经济水平能够促进城市向绿色低碳的生产和生活方式转变,推动经济与碳中和协同发展。

四类城市中,Ⅰ类城市的经济最发达,并且已实现与碳中和的协同演进。这类城市的人口规模、城市化水平和工业水平对经济的增长均没有显著影响;碳排放增长越慢反而经济发展越快,表明其经济增长一定程度上已脱离高碳的发展模式。这类城市的绿化水平越低反而汇源比增长越快,说明碳减排行动已有效推进了碳中和进程,而自然碳汇的贡献相对有限。综合Ⅰ类城市的典型社会经济特征,可以发现它们正处于高度城市化的经济发达阶段,通过技术进步、产业结构优化等手段向低碳化、高质量发展模式转变,向碳中和迈进。

表 4 人均 GDP 变化率和汇源比变化率作为因变量的最小二乘法回归结果

$\Delta pcGDP$	类型			
	I	II	III	所有城市
$\ln POP$	2.54	1.42	-0.64	1.48
$\ln pcGDP$	8.01	2.96	24.23 ***	4.43 **
$\ln F$	-0.76	-0.32	-1.55	-0.09
$\ln CI$	10.55 **	12.52 ***	12.54 **	12.87 ***
$\ln UR$	-6.05	-5.24 ***	-19.03 ***	-5.52 **
$\ln SI$	-5.57	8.92 **	-16.74 **	5.60 ***
$\ln TI$	-33.97 **	-24.91 **	-4.17	-17.45 **
dCO_2	-4.98 ***	0.70 ***	-3.31 ***	0.91 ***
dFA	-0.26	0.23	0.59	0.21
$dPOP$	0.78	-2.27 ***	-0.14	-2.15 ***
Constant	75.55	100.18 ***	-90.53	96.42 ***
Observations	85	996	38	1131
R ²	0.69	0.78	0.54	0.80

ΔC	类型			
	I	II	III	所有城市
$\ln POP$	-0.53	0.06	0.75	0.20
$\ln pcGDP$	8.86	1.45 ***	-0.71	1.90 ***
$\ln F$	-6.93 ***	0.002	3.13 ***	-0.66 ***
$\ln CI$	-1.83	0.06	0.19	0.17
$\ln UR$	-13.87 **	-0.02	3.43 *	-0.01
$\ln SI$	-12.79	-1.22 **	2.52	-1.46
$\ln TI$	5.77	-0.58	5.37	1.53
$dGDP$	-2.70 ***	-0.07 ***	-0.0003	-0.16 **
dFA	0.69	0.98 ***	2.05 ***	0.94 ***
$dPOP$	2.16	-0.13 **	0.32	-0.16
Constant	82.74	-14.64 ***	-37.25 *	-14.94 ***
Observations	85	996	38	1131
R ²	0.39	0.96	0.84	0.79

注：***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著；回归分析仅应用于可获得自变量数据的 283 个城市，其中 IV 类型城市数量过少，不作回归分析。

资料来源：作者计算整理。

四、结论与讨论

2000—2020 年，中国城市经济增速总体上放缓但加速趋近碳中和。由经济发展

与碳中和相对演化趋势决定的不同类型城市的社会经济特征和时空演化规律均存在明显的异质性。首先,不同类型城市之间最显著的差异体现在产业结构、经济发展水平、城市化水平、产业发展水平和单位经济产出碳排放这几个方面,制定碳中和路径应优先将这些基本特征纳入考量。其次,2000—2020年不同类型城市的相互转变愈发活跃,越来越多的城市脱离了传统发展模式。自2010年起,一部分城市先后实现了在经济增长的同时趋近碳中和,空间上呈现出由东部地区和中部地区向西部地区推进的特征;但还有一些城市经济增长乏力,或趋近或背离碳中和目标,数量在2015年后明显增加,空间上多分布于东北和西部的部分地区,多属于老工业基地或资源型城市。基于以上社会经济特征和时空演化规律的差异性表现,结合影响因素回归分析结果以及国内外碳中和先行城市的经验,本文从城市和区域层面分别提出经济与碳中和协同演进的差异化实现路径。

在城市层面,需从根本上改变对化石能源依赖的经济增长模式,大力推进能源转型,并充分挖掘技术进步、产业结构优化和城市绿地碳增汇对实现碳中和的正向作用。时空演变历程表明,对于城市个体而言,维持经济与碳中和协同发展的态势并不容易。回归分析结果表明,当下城市陆地生态系统的固碳潜力十分有限,已取得的碳中和进展主要也不来自于陆地碳增汇。这意味着若要维持经济与碳中和协同发展的态势,持续减少人为碳排放才是关键。经济与碳中和协同发展的城市特征及回归分析结果共同表明,技术进步、产业结构优化、低碳化生产和生活方式以及城市绿地碳增汇,如建设绿地公园、优化园林管理等方法,是推动迈向碳中和的有效手段。北京市是在2010—2015年和2015—2020年均维持经济与碳中和协同发展的七个城市之一,有望率先在经济发达阶段实现碳中和。北京自“十二五”以来,通过控制煤炭消费、推动清洁能源替代、迁出高耗能产业、提升能源利用效率等方式,大幅度、持续降低人为碳排放,2017年成为全国首个实现全面清洁能源发电的城市,低碳发展之路走在全国前列^①。“十三五”期间大力实施碳汇提升工程,城市森林、农业领域碳增汇取得积极成效^②。其他城市可以北京的碳中和路径为样板,尽早迈入并维持经济与碳中和协同演进的发展模式。国际上有不少城市提出了实现碳中和路线图,如丹麦哥本哈根^③、英国埃克塞特^④、美国纽约^⑤等,普遍反映城市达到或接近净零碳排放需要系统性转型(Seto et al., 2021)。路径规划中得到广泛认可的措施包括降低化石燃料的

① 《北京市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》,北京市人民政府网站, http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guohua/wngh/qtgh/201907/t20190701_99981.html [2022-11-20]。

② 张雪晴:《北京走出绿色低碳发展新路径》,《中国环境报》2021年3月17日,第2版。

③ CPH 2025 Climate Plan—Roadmap 2021—2025, https://kk.sites.itera.dk/apps/kk_pub2/pdf/2062_129d045097bb.pdf [2022-11-20]。

④ Net Zero Exeter 2030 Plan, <https://committees.exeter.gov.uk/documents/s74046/TheNetZeroExeter2030Plan%20003.pdf> [2022-11-20]。

⑤ Pathways to Carbon-Neutral NYC: Modernize, Reimagine, Reach, <https://www1.nyc.gov/assets/sustainability/downloads/pdf/publications/Carbon-Neutral-NYC.pdf> [2022-11-20]。

生产和使用、大幅提升可再生能源利用、电力脱碳以及用能终端电气化；重点部门包括能源、建筑、交通和运输；实现路径上可以点带面，自下而上；还普遍强调了新兴技术、行政措施、能力建设及城市间合作的重要性（IEA，2021；Komminos，2022）。以上方法也可为中国城市的碳中和路径规划提供一定的经验借鉴。

在区域层面，需充分利用不同类型城市的区位优势和资源禀赋。一方面加强区域内资源协调，同时拓展外向型、多元化的经济增长点；另一方面借助东部地区的经济规模和人才技术优势，以及东北和西部地区的农林业、土地、光照等禀赋优势，在本地实现低碳化发展的同时，通过更大范围的区域协同合作推动实现全国层面的碳中和。城市类型的空间格局显示，已实现经济与碳中和协同发展的城市主要分布在东部和中部地区。东部地区是中国经济活力最强、经济密度最高的区域，应充分发挥其人才和技术优势，利用经济的集聚效应、规模效应和溢出效应，积极带动其他地区城市发展，形成区域协同的碳中和战略。中部地区的经济实力日渐增强，可在区域内部优化低碳产业要素配置，提升经济发展质量，稳固自身并向外推广经济发展与碳中和协同演进的发展模式。近十年背离协同演进趋势的城市数量持续增多，2015—2020年也开始出现经济衰退但趋向碳中和的城市。这两类城市过往的发展模式相似，空间上也呈现出较为相似的分布特征。就这两类城市经济发展与碳中和协同发展的路径而言，一是要借助东北振兴和西部大开发战略，加强区域合作，承接沿海和中部地区产业转移，激发经济活力，还可拓展与“一带一路”沿线国家的经贸往来，寻求外向型经济突破；二是要尽快摆脱依赖碳基能源的发展模式，可借助所在地区的自然禀赋优势，大力开发太阳能、风能、生物质能等可再生能源，其可再生能源一旦形成规模优势，不仅可以在本地实现低碳清洁化发展，还可通过能源互联网在更大范围实现主体、要素和区域协同，推动全国层面的碳中和进程。

参考文献

- 方精云、郭兆迪、朴世龙等（2007）：《1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算》，《中国科学（D辑：地球科学）》第6期，第804—812页。
- 郭芳、王灿、张诗卉（2021）：《中国城市碳达峰趋势的聚类分析》，《中国环境管理》第1期，第40—48页。
- 洪志超、苏利阳（2021）：《国外城市碳中和策略及对我国的启示》，《环境保护》第16期，第70—73页。
- 黄润龙（2013）：《社会统计学》，北京：对外经济贸易大学出版社，第181—200页。
- 李萌、娄伟、潘家华等（2021）：《基于区域合作的中国五大区域碳达峰情景研究》，《中国能源》第6期，第12—18页。
- 潘家华（2021）：《中国碳中和的时间进程与战略路径》，《财经智库》第4期，第42—66页。
- 王奕森、夏树涛（2018）：《集成学习之随机森林算法综述》，《信息技术》第1期，第49—55页。
- 禹湘、陈楠、李曼琪（2020）：《中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究》，《中国

人口·资源与环境》第7期,第1—9页。

张诗卉、李明煜、王灿等(2021):《中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径》,《中国人口·资源与环境》第9期,第45—54页。

Breiman, L. (2001), “Random Forests”, *Machine learning*, 45 (1), pp. 5 – 32.

Burke, P. J. and Z. Csereklyei (2016), “Understanding the Energy-GDP Elasticity: A Sectoral Approach”, *Energy Economics*, 58, pp. 199 – 210.

Cui, Y., L. Li, and L. Chen, et al. (2018), “Land-Use Carbon Emissions Estimation for the Yangtze River Delta Urban Agglomeration Using 1994 – 2016 Landsat Image Data”, *Remote Sensing*, 10 (9): 1334.

Dogan, E. and A. Aslan (2017), “Exploring the Relationship Among CO₂ Emissions, Real GDP, Energy Consumption and Tourism in the EU and Candidate Countries: Evidence from Panel Models Robust to Heterogeneity and Cross-sectional Dependence”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, pp. 239 – 245.

Feng, K., Y. L. Siu and D. Guan, et al. (2012), “Analyzing Drivers of Regional Carbon Dioxide Emissions for China”, *Journal of Industrial Ecology*, (16) 4, pp. 600 – 611.

He, L., X. Zhang, and Y. Yan (2021), “Heterogeneity of the Environmental Kuznets Curve across Chinese Cities: How to Dance with ‘Shackles’?” , *Ecological Indicators*, 130: 108128.

IEA (2021), *Empowering Cities for a Net Zero Future: Unlocking Resilient, Smart, Sustainable Urban Energy Systems*, <https://www.iea.org/reports/empowering-cities-for-a-net-zero-future> [2022 – 11 – 20].

IPCC (2014), *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*, Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2018), *Global Warming of 1.5 °C*, <https://www.ipcc.ch/sr15/> [2022 – 11 – 20].

Kaika, D. and E. Zervas (2013), “The Environmental Kuznets Curve (EKC) Theory—Part A: Concept, Causes and the CO₂ Emissions Case”, *Energy policy*, 62, pp. 1392 – 1402.

Komninos, N. (2022), “Net Zero Energy Districts: Connected Intelligence for Carbon-Neutral Cities”, *Land*, 11 (2): 210.

Li, M., J. Im, and C. Beier (2013), “Machine Learning Approaches for Forest Classification and Change Analysis Using Multi-Temporal Landsat TM Images over Huntington Wildlife Forest”, *GIScience & Remote Sensing*, 50 (4), pp. 361 – 384.

Lin, B. and Z. Li (2020), “Spatial Analysis of Mainland Cities’ Carbon Emissions of and Around Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area”, *Sustainable Cities and Society*, 61: 102299.

McKinnon, A. C. (2007), “Decoupling of Road Freight Transport and Economic Growth Trends in the UK: An Exploratory Analysis”, *Transport Reviews*, 27 (1), pp. 37 – 64.

OECD (2002), *Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth*, <https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd> (2002) 1/final [2022 – 11 – 20].

Quinlan, J. R. (1986), “Induction of Decision Trees”, *Machine Learning*, 1 (1), pp. 81 – 106.

Seto, K. C., G. Churkina and A. Hsu, et al. (2021), “From Low-to Net-Zero Carbon Cities: The Next Global Agenda”, *Annual Review of Environment and Resources*, 46, pp. 377 – 415.

Shan, Y., S. Fang, B. Cai, et al. (2021), “Chinese Cities Exhibit Varying Degrees of Decoupling of Economic Growth and CO₂ Emissions Between 2005 and 2015”, *One Earth*, 4 (1), pp. 124 – 134.

Sun, T., I. B. Ocko and E. Sturcken, et al. (2021), “Path to Net Zero is Critical to Climate Outcome”, *Scientific Reports*, 11; 22173.

Tapio, P. (2005), “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*, 12 (2), pp. 137 – 151.

UNFCCC (2015), *Paris Agreement*, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> [2022 – 11 – 20].

United Nations (2022), *For a Livable Climate: Net-Zero Commitments Must Be Backed by Credible Action*, <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition> [2022 – 11 – 20].

Wang, Q., Y. H. Chiu, and C. R. Chiu (2015), “Driving Factors Behind Carbon Dioxide Emissions in China: A Modified Production-Theoretical Decomposition Analysis”, *Energy Economics*, 51, pp. 252 – 260.

World Economic Forum (2021), *Net Zero Carbon Cities: An Integrated Approach*, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Carbon_Cities_An_Integrated_Approach_2021.pdf [2022 – 11 – 20].

Synergetic Evolution of Economic Growth and Carbon Neutrality Process of Chinese Cities

LI Man-qi¹, CHEN Shao-qiang²

(1. Research Institute for Eco-civilization, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China;

2. Chinese Academy of Fiscal Sciences, Beijing 100142, China)

Abstract: Cities are essential players in achieving China’s Carbon Neutrality Goals. Differences exist in the carbon neutrality processes, potentials, timetables, and roadmaps among cities at different economic development stages. Therefore, it is critical to understand the heterogeneity of the synergistic evolution of economic development and carbon neutrality process in Chinese cities, in order to formulate differentiated carbon neutrality policies and strategies. In this paper, the elasticity coefficient is used to examine the spatiotemporal evolution of economic development and carbon neutrality in Chinese cities from 2000 to 2020, and cities are classified into four types according to different evolutionary trends. Using the random forest classification model, the ranking of feature importance is obtained and used to portray the typical socioeconomic characteristics of different types of cities. The core socioeconomic influencing factors on the evolutionary trends are further investigated using least squares regression. At last, integrating the spatiotemporal evolution trends and socioeconomic characteristics of different types of cities, major influencing factors on the synergistic development trends, experience of the domestic and foreign pioneer cities’ carbon

neutrality strategies, this paper proposes pathways to achieve the synergistic evolution between economic development and carbon neutrality for each type of cities. The results show that since 2000, Chinese cities have experienced a slowdown in economic growth but have accelerated the reduction of the carbon neutral gap. Since 2010, an increasing number of cities have been progressing towards synergistic economic and carbon neutral development, with a spatial pattern moving from the eastern and central to the western regions. However, in recent years, a small number of cities, especially old industrial bases and resource-based cities, have started to experience economic decline, either moving towards or deviating from carbon neutrality, spatially distributed in the northeastern and western regions of the country. Given the distinct spatiotemporal patterns, socioeconomic characteristics, and resource endowments of the different types of cities, they should give full play to their respective advantages, formulate diversified and differentiated carbon neutrality pathways, and actively explore regional strategies for low-carbon synergy.

Key Words: carbon neutrality; coordinated development; elasticity coefficient; random forest classification model

责任编辑：庄立