[文章编号] 1003－4684(2025)02-0107-07

基于因果森林的低碳试点政策效应及异质性分析

李淑玉，胡二琴

（湖北工业大学理学院，湖北武汉，430068）

[摘　要] 利用正交因果森林对政策效应进行反事实推断，结果显示低碳试点政策具有减排作用，然而政策存在显著的异质性；采用基于路径、经济因素分组的 t 检验和 K-W 检验分析异质性来源，结果显示碳排放试点政策在人均生产总值高、公共支出多、城市消费能力强、高校密集、绿色创新技术发展快、第三产业占比高的城市更有效，启示未来政策应向华北、西南及西北地区的城市倾斜，并应围绕产业转型、能源转型、人才培养与技术研发等方向推进。

[关键词] 碳排放试点政策；因果推断；正交因果森林；异质性分析

[中图分类号] F062.2　　[文献标识码] A

随着全球气候变暖，由温室效应引起的一系列危机已经严重影响到了全球人民的生产生活。因此，世界各国都在积极推进碳减排工作。国家自 2010 年至 2017 年，开展了三批低碳省、市试点工作，持续探索和推进各产业绿色发展和城市绿色生活，并进一步在全国范围内推广实施，以如期实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标[1]。近年来，为了探索低碳发展模式和发展路径，寻找针对不同地区的碳减排策略，学者们对碳减排政策展开了深入研究。例如，2013 年，鲁万波等[2]采用两层完全分解法（LMDI）分析多个影响因素在不同的时间阶段对全国碳排放量的影响；2015 年，戴嵘等[3]用双重差分（DID）方法，考察第一批低碳试点省份的减排效果，研究发现试点政策效果明显；相反地，2017 年冯彤等[4]发现试点政策对部分地区的碳排放有阻碍作用；2022 年，冷成英等[5]采用倾向得分与双重差分相结合（PSM-DID）的方法，发现低碳试点政策在东部实施效果较好。本文选择 2007 年至 2020 年的城市碳排放数据，首先对城市碳排放量及强度随时间的变化趋势和空间区域差异进行初步分析；然后，本文采用基于正交森林与双重学习机的正交因果森林（DMLOrthoForest）方法对政策进行反事实推断，估计政策的平均处理效应和异质性效应；最后，为解释和验证试点政策效应的异质性来源，由果溯因，探究导致碳排放试点政策在各地区表现出差异性的原因，进一步结合实际情况对因素的影响方式和作用路径进行分析，为未来碳排放政策的实施提供参考。

1　指标选取与数据处理

1.1　指标选取

本文采用了 2007 年至 2020 年国内 35 个重要城市的面板数据作为研究样本，样本数据包括碳排放量，碳排放强度，低碳试点城市政策，影响碳排放的路径因素、经济因素及其他因素，具体指标如表 1 所示。

表 1　参与碳排放政策效应因果推断的变量表示

指标类别	变量名称	变量符号表示
碳排放指标	城市碳排放总量/百万吨	*Y*1
	城市碳排放强度/%	*Y*2
政策指标	碳排放试点城市政策	*T*
路径因素	绿色创新技术/件	GP
	能源强度/%	EP
	产业结构/%	IS
	能源结构/%	ES
经济因素及其他因素	人均生产总值/元	AG
	人口规模/万人	*P*
	城市消费能力/%	CI
	财政支持力度/%	FP
	本专科在校学生数/万人	*S*
	金融深化程度/%	FN

1）被解释变量　本文选取了自 2007 年至 2020 年的城市碳排放量、碳排放强度（指单位 GDP 产生

[收稿日期] 2023－07－25
[基金项目] 国家社会科学基金（22BTJ042）
[第一作者] 李淑玉（1997－），女，河南焦作人，湖北工业大学应用统计研究生，研究方向为数据科学与决策。
[通信作者] 胡二琴（1980－），女，湖北浠水人，湖北工业大学副教授，研究方向为贝叶斯统计、统计决策。

的碳排放量)为被解释变量 Y_1、Y_2。

2)政策变量 根据国家公布的三批低碳城市试点名单与试验城市具体政策生效时间,本文将试点城市政策实施后的政策处理变量 T 取值为 1,试点城市实施政策之前,以及非试点城市的政策处理变量取值为 0。

3)影响碳排放的路径因素、经济因素和其他因素 关于低碳政策的路径影响因素,本文选取地级市绿色发明及实用专利数作为低碳政策的技术创新政策传导效力的表征,即绿色创新技术 GP 因素,绿色发明及实用专利数量越多,城市的绿色创新技术水平越高;能源强度 EP,由全市用电量比社会生产总值表示,能源强度 EP 值越大,表示的含义是单位生产总值的能源消耗量越多;能源结构 ES,本文采用的是用电量与单位热值的乘积与天然气量和液化石油气供气总量乘上对应单位热值的比值来表示,用电量的总产热值的占比越高,则表示该城市的能源结构更趋于清洁化;产业结构 IS,由城市每年的第三产业增加值与第二产业增加值之比表示,根据不同产业的资源消耗情况,第三产业占比越高,说明旅游餐饮等服务业占比较大。

关于经济背景因素,本文选用了城市人均生产总值 AG、人口规模 P;城市消费能力 CI,由社会消费品零售总额与城市生产总值之比表示;金融深化程度 FN,由城市金融机构贷款余额与生产总值之比表示;财政支持力度 FP,由政府公共支出金额与生产总值之比表示;其他影响因素还有本专科在校学生数 S。

1.2 数据来源

本文采用的是中国碳核算数据库(CEADs)提供的中国主要城市的碳排放量数据,该数据为联合国成立的 IPCC 组织提出碳排放系数法算得[6-9]。

本文中的低碳试点政策变量,是根据国家发改委文件与地方政府文件得到;绿色发明专利数与绿色实用专利数是根据中国知识产权局,通过专利检索平台检索得到;经济及其他影响因素均由中国历年统计年鉴及城市统计年鉴中查询得到。

1.3 数据处理

由于收集到的原始数据集中存在一些缺失值,本文采用 K- 最邻近插补法进行填充。对于给定的两个数据样本 i 和 j,使用式(1)计算邻近值:

$$d(i,j)=(\|x_1-y_1\|^p+\|x_2-y_2\|^p+\cdots+\|x_k-y_k\|^p)^{1/p} \tag{1}$$

KNN 插补算法利用距离测量的方法来寻找数据集中与缺失数据点相似或相近的 k 个样本,并通过这 k 个样本的均值来估计缺失数据点的值。

2 模型设定与研究假设

2.1 模型设定

根据因果推断原理,本文对城市碳减排试点政策、路径及经济因素与碳排放量、碳排放强度的关系进行以下模型假设:

$$Y_i^{j,t}=\tau_i^{jt}(X)\cdot T_i^{j,t}+f_i^{j,t}(X)+\varepsilon_i^{j,t} \tag{2}$$

其中,因变量 $Y_i^{j,t}$ 为碳排放指标,$i=1$ 时,为城市碳排放量;$i=2$ 时,为城市碳排放强度,j 表示地区,t 表示年份,政策变量 T 的系数 $\tau_i^{j,t}(X)$ 为因果效应,$\varepsilon_i^{j,t}$ 为误差项,协变量 X 具体为:

$$X=(\mathrm{GP},\mathrm{EP},\mathrm{IS},\mathrm{ES},\mathrm{AG},\mathrm{P},\mathrm{CI},\mathrm{FP},\mathrm{S},\mathrm{FN}) \tag{3}$$

且有 $E(\varepsilon_i^{jt}\,|X)=0$,误差项与解释变量无关,假设被解释变量不存在其他混淆因素和混淆政策影响,样本数据以各个城市各年份是否实施试点政策作为实验组与对照组,其他因素遵循了随机化原则,可以看作准自然实验。

2.2 研究假设

由于碳排放试点政策的实施目的是为了减少城市碳排放量,因此对试点政策的预期假设为负,即政策实施具有碳减排的效果;其次,由于城市间的经济发展、产业结构及地理环境等差异,碳排放政策的效果并不相同,即预期碳排放政策具有异质性,因此作出以下假设:

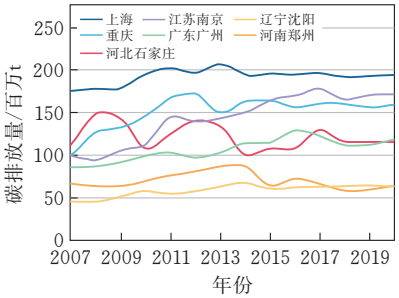
假设 H_{01}:低碳试点城市政策对城市碳排放量及碳排放强度的效应符号为负,即低碳试点城市政策有效降低城市碳排放量。

假设 H_{02}:低碳试点城市政策效果存在显著异质性,不同区域碳排放量及强度的政策效果存在差异。

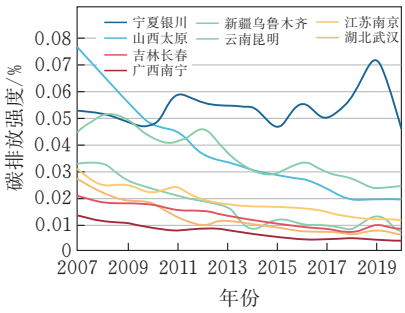
3 碳排放时空特征演变分析

3.1 城市碳排放的时间演变趋势

首先,从收集到的 2007—2020 年 35 个主要城市的碳排放量及碳排放强度数据中,选取了具有区域代表性的城市碳排放数据,绘制了碳排放随时间的演变趋势图,如图 1 所示。



(a)城市碳排放量随时间变化趋势



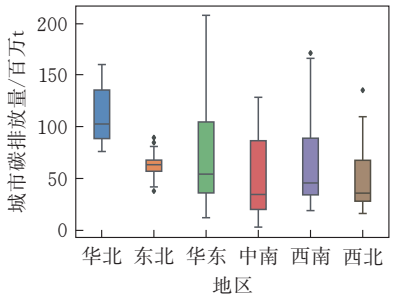
(b)城市碳排放强度随时间变化趋势

图 1　2007 至 2020 年城市碳排放量及碳排放强度随时间变化情况

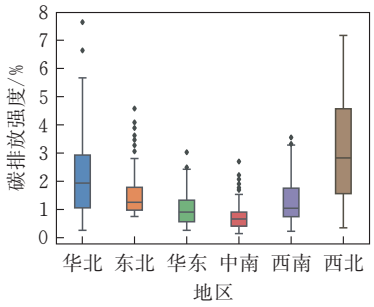
图 1a 为城市碳排放量随时间变化的趋势，可以看出大部分城市的碳排放量随时间不断起伏波动；图 1b 为城市碳排放强度随时间变化的趋势，其中代表宁夏银川碳排放强度的曲线先随时间波动，然后在 2017—2020 年曲线变化为倒 U 型，其余城市的碳排放强度是随时间而下降的。

3.2　区域碳排放的空间分布特征

本文将 35 个主要城市根据地域划分为华北、东北、华东、中南、西南和西北 6 个区域，各区域碳排放量及碳排放强度分布如图 2 所示。



(a)各区域碳排放量



(b)各区域碳排放强度

图 2　各区域城市碳排放量及碳排放强度分布情况

根据图 2，观察不同地区的碳排放差异，可初步对碳排放政策的发展潜力进行预测分析。其中，华北地区城市碳排放量及碳排放强度都比较高，则在该地区实施碳减排政策有巨大的潜力空间；西北地区碳排放强度较高，而碳排放量不高，其分布特点是由于经济发展较其他地区更缓慢；然而，华东、中南、西南地区城市的碳排放量方差较大，而碳排放强度较小，预估这些地区减排政策实施效果可能并不明显。

3.3　区域碳排放路径影响因素及碳排放量对比分析

本文统计了六个区域的能源强度、绿色创新技术、产业结构及能源结构四个碳排放路径影响因素的均值和最大最小值[10-11]，指标分布如表 2 所示。由表 2 中数据可知，华北、西北地区城市的能源强度相比于其他地区更高；绿色专利技术数量对比，华北地区专利技术最多，华东、中南地区的专利数量也高于其他地区；西北地区的能源结构数值比其他地区更小；华北及中南地区的产业结构偏向于第三产业占比较高的结构特征。

表 2　各地区路径因素分布情况

地区	能源强度			绿色创新技术			产业结构			能源结构		
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
华北地区	0.67	1.26	0.30	5918.93	34670	113	2.73	5.24	1.74	0.63	0.76	0.36
东北地区	0.45	1.03	0.26	1087.19	2927	40	1.94	2.99	1.21	0.75	0.81	0.69
华东地区	0.49	0.87	0.22	3539.64	18410	88	1.79	2.79	1.06	0.79	0.91	0.61
中南地区	0.48	0.89	0.18	3563.73	22742	29	2.47	5.34	1.47	0.76	0.84	0.69
西南地区	0.59	1.65	0.23	2545.52	12034	138	1.80	2.15	1.33	0.76	0.87	0.65
西北地区	0.91	2.19	0.41	964.05	6996	14	1.93	2.65	1.27	0.58	0.72	0.46

4　基于因果森林的政策效应及异质性分析

4.1　因果森林原理

与随机森林模型相似，因果森林是由多棵“因果树”构成的集成模型，它在随机森林的基础上融入了因果推断的思想[12-13]，是对决策树、随机森林等机器学习算法的一种改进。因果森林算法引入了诚实树(双样本树)划分法，将可用的训练数据分成两部分，一半用于估计每片叶子内部的期望响应，另一半用于放置分割，提高了结果的准确性和抽样的随机性。虽然因果森林采用了近似随机森林的因果树模型和均方误差分割准则，但是回归森林的预测目标是因变量均值，而因果森林的预测目标是政策变量 T 对被解释变量 Y_i 的处理效应 $\hat{\tau}(x)$。

4.1.1　政策平均处理效应 ATE 的估计　根据 Wa-

ger 等[14] 在 2017 年的研究，政策的处理效应定义为：

$$\tau(x) = E[Y_i^{(1)} - Y_i^{(0)} \mid X_i = x] \tag{4}$$

利用因果森林方法估计低碳试点政策 T 对样本城市碳排放量、碳排放强度的平均处理效应 ATE，具体公式如下所示[15-16]。对任意的 $x \in L$，因果树 $r \in R$，政策 T 的处理效应为式(5)：

$$\hat{\tau}_r(x) = \frac{1}{|\{i:T_i = 1, X_i \in L\}|} \sum_{\{i:Ti=1, Xi \in L\}} Y_i - \frac{1}{|\{i:T_i = 0, X_i \in L\}|} \sum_{i:Ti=0, Xi \in L} Y_i \tag{5}$$

然后，通过求所有因果树的平均来汇总预测处理效应：

$$\hat{\tau}(x) = R^{-1} \sum_{r=1}^{R} \hat{\tau}_r(x) \tag{6}$$

4.1.2 异质性处理效应 HTE 的估计 为了消除高维影响因素和局部误差干扰，更稳健地估计政策的异质性效应(heterogeneoustreatment effects)，本文采用了基于正交随机森林与双重学习机(DML)的组合方法——正交因果森林进行政策异质性效应的估计。

该模型通过双机器学习法建立两阶段预测模型，根据无混淆假设，对因变量 Y_i 基于协变量 X_i 的条件期望 $E(Y_i \mid X_i)$、政策变量 T_i 基于协变量 X_i 的倾向得分期望 $E(T_i \mid X_i)$ 分别进行预测，并建立残差等式：

$$\begin{aligned} \widetilde{Y}_i &= Y_i - E(Y_i \mid X_i) = Y_i - q(X_i) \\ \widetilde{T}_i &= T_i - E(T_i \mid X_i) = T_i - s(X_i) \\ \widetilde{Y}_i &= \widetilde{T}_i \cdot \tau_i(X) + \eta_i \end{aligned} \tag{7}$$

其中，$q(X_i)$ 为 Y_i 关于协变量的条件期望，$s(X_i)$ 为随机分组时的倾向性得分。再根据基于 Robinon 标准 PLR 模型所建立的局部矩条件，对政策异质性效应 $\tau_i(X)$ 进行估计：

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i &= argmin_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{n} K_x(X_i)[Y_i - \hat{q}_x(X_i) - \\ &(\beta_i \cdot X_i + \alpha_i)(T_i - \hat{s}_x(X_i))]^2 + \lambda_i \|\beta_i\|_2^2 \\ \hat{\tau}_i(x) &= \hat{\beta}_i \cdot x + \hat{\alpha}_i \end{aligned} \tag{8}$$

其中，函数 $K_x(X_i)$ 为核密度估计函数，$\hat{\alpha}_i$，$\hat{\beta}_i$ 为异质性效应 $\hat{\tau}_i(x)$ 的参数，$\hat{q}_x(X_i)$ 为 Y_i 的条件期望的预测，$\hat{s}_x(X_i)$ 为 T_i 的倾向得分估计值，其取值范围为(0,1)。此外，在各个因果树进行分裂时，采用二阶段的正交化准则用于计算所有候选分割点的得分，遵循最大差异化原则选取分割点[17-18]。

4.2 政策的平均处理效应结果分析

根据 4.1 节因果森林对政策的平均处理效应进行估计，最终得到表 3 中的结果。从表 3 可以看出，两个碳排放指标的平均处理效应的值均为负，与假设中预期的符号相符，即整体上低碳试点政策从整体上对碳减排有促进作用；其次，从指标的方差与置信区间可以看出，对于不同城市，低碳试点政策效果是不同的，政策具有明显异质性作用；从 P 值也可以看出，平均处理效应 ATE 由于个体处理效应存在异质性，因此并不显著。想要对政策效应进行深入研究，需要估计政策的异质性效应，并对异质性作进一步的分析。

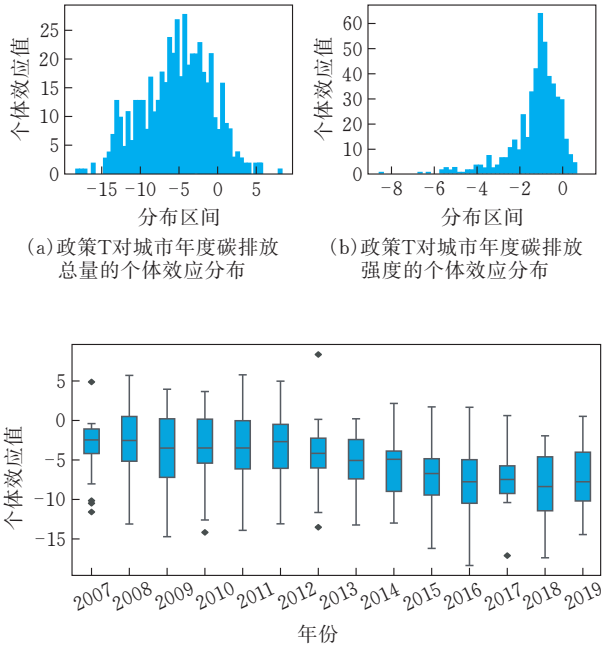
表 3 低碳试点城市政策的平均处理效应(ATE)的参数

	参数指标	
	碳排放总量	碳排放强度
训练集 ATE	−4.157	−1.369
标准差	5.228	1.785
置信区间	[−14.404,6.091]	[−4.869,2.13]
测试集 ATE	−3.498	−1.471
标准差	5.104	1.859
置信区间	[−13.5,6.505]	[−5.114,2.173]
P 值	0.437	0.209

4.3 政策的异质性效应结果分析

为验证政策的异质性，利用 4.1 节基于双重学习机的正交因果森林对政策的异质性效应进行计算，结果绘制如图 3 所示。

由图 3a、3b，可以看出政策 T 对于不同城市的不同年度碳排放总量、强度的影响有一定差异，试点政策对于大部分城市有减少碳排放作用，部分城市政策作用效果不显著或对碳排放量有正向影响，因此碳试点政策效应的异质性显著。而政策的异质性是如何产生的，需要结合碳排放影响因素的情况进行分析。



(a)政策T对城市年度碳排放总量的个体效应分布

(b)政策T对城市年度碳排放强度的个体效应分布

(c)个体效应随时间变化的趋势与分布情况

图 3 个体处理效应的分布情况

图 3c 为反事实推断下的个体效应随时间变化的差异情况，可以看出政策效应随时间波动，印证了存在运动式碳减排现象，说明城市碳减排的效益并不是持续且稳定的，即使是同一城市，每年的环境及发展状况都不相同，且每年的政策倾向及实施情况都存在差异，为了研究减排在时间上的差异来源，也需要进行影响变量对政策的异质性作用分析。

5　变量对政策的异质性作用分析

为进一步分析哪些协变量对政策的异质性分布产生了影响以及如何影响，本文对分组的政策效应进行差异分析。据正态性检测结果显示，人均产出、本专科在校学生数、城市消费能力、绿色创新技术、能源结构及金融深化程度六个变量，均值分组样本服从近似正态分布且满足方差齐性检验，因此通过基于均值分组的 t 检验对以上变量进行政策异质性识别；其中能源强度、人口规模、财政支持力度及产业结构四个变量，分组后不服从近似正态分布，通过三分位数分组的 Kruskal-Wallis 检验对政策异质性作用进行识别。结果如表 4、表 5 所示。根据检验结果，本文分别对经济变量和路径变量对试点政策的异质性作用做出分析。

表 4　均值分组的协变量对个体政策效应的异质性作用 t 检验

协变量	指标	基于变量均值分组的显著性 t 检验				
		低值组	高值组	t 值	P 值	Cohen's d 值
人均产出 AG	均值	−4.566	−6.294	4.308	0.000***	0.392
	标准差	4.638	4.095			
本专科在校学生数 S	均值	−4.838	−5.874	2.566	0.011**	0.232
	标准差	4.543	4.366			
城市消费能力 CI	均值	−4.38	−6.401	5.10	0.000***	0.462
	标准差	4.417	4.329			
绿色创新技术 GP	均值	−4.88	−6.434	3.504	0.001***	0.35
	标准差	4.635	3.889			
能源结构 ES	均值	−7.123	−4.051	−7.92	0.000***	0.727
	标准差	4.043	4.353			
金融深化程度 FN	均值	−3.807	−7.619	10.11	0.000***	0.933
	标准差	4.366	3.613			

第一，本文对经济及其他因素对政策效应的异质性作用进行分析，得到了以下结论。

从表 4 中可以看出，人均产出 AG、城市消费能力 CI 的异质性作用显著，结果反映在人均生产总值越高、城市消费能力越强的城市，政策效应越显著，说明在经济发展较快的城市和地区，碳排放试点政策的实施效果更明显，减排效率更高。

根据表 5 的检验结果，影响因素人口规模 P 与政策效应的关系呈左偏的“U”型，即在人口低值组和高值组的城市政策的估计效应值要高于中值组，且在具体的两两比较中，低值组与其他两组的差异更大，说明了人口规模对碳排放政策的存在显著异质性，当人口规模相对较小时，人口对碳减排为促进作用，随着人口增加碳排放量会逐渐升高，政策作用相对降低，当人口增长到一定程度，试点政策的作用效果反而会有所提高，这说明了对于样本中不同人口规模的城市，试点政策的实施策略有所不同，实施效果具有异质性。

表 5　三分位数分组的协变量对个体政策效应的异质性作用 Kruskal-Wallis 检验

协变量	指标	基于三分位数分组的 Kruskal-Wallis 差异性检验				
		低值组	中值组	高值组	P 值	统计量
能源强度 EP	中位数	−3.006	−6.672	−5.637	0.000***	72.309
	标准差	3.748	4.586	3.988		
人口规模 P	中位数	−6.154	−3.226	−5.637	0.000***	32.294
	标准差	4.449	3.991	4.603		
财政支持力度 FP	中位数	−1.777	−5.56	−8.312	0.000***	161.088
	标准差	3.372	4.031	3.731		
产业结构 IS	中位数	−2.714	−5.077	−8.619	0.000***	118.064
	标准差	3.732	3.627	4.335		

经济因素中，金融深化程度 FN 与公共财政支持力度 FP，对于碳排放试点政策的异质性作用都较显著，说明政府对于公共建设投入占比越高，政策效果越好；此外，城市金融机构的发展也影响碳排放政

策的实施效果，城市金融机构保持稳定增长，不仅促进了经济社会的发展，还加快了碳减排工作稳定高效的实施和推进。

综合上述经济因素及其他因素的异质性作用分析结果，碳排放试点政策在人均生产总值高、城市公共支出多、城市消费能力强、高校密集的城市政策效应更明显，高校为城市绿色建设带来了科技人才及相关行业从业人才，政府的公共财政支持力度及城市金融发展状况也对碳减排政策有正向影响。

第二，本文对路径因素的异质性作用有以下分析结论。

能源强度 EP 对碳排放政策有显著异质性作用。在每组结果的两两比较中，低值组的相对差异最大，其他两组差异较小，结果说明在城市用电量与 GDP 比值相对较小的城市，碳排放试点政策的减排作用不明显。结合表 2，华北、西南及西北地区的能源强度较其他地区偏高，因此，在其他因素相似的情况下，EP 值较高的华北、西南及西北地区的城市碳排放政策实施效果更显著。

绿色专利创新技术 GP 的差异性分析结果显著，GP 值高的城市碳减排政策效果强于其他城市。绿色专利数量越多，相关方面的人才越多，有利于从技术层面改进生产生活中能源消耗的方式，从而提高城市碳减排工作的实施效率。从表 2 可知，华北、华东、中南地区的绿色专利数整体高于东北和西北地区，即试点政策通过绿色创新技术传导的实施效果在华北、华东、中南地区比较明显，而东北、西南及西北地区城市存在更大的绿色科技发展潜力。

能源结构因素的异质性作用显著，且能源高值组的政策效应弱，而低值组的政策效应强。说明了能源结构值越低的城市政策效果反而越好，即利用天然气与液化石油气供能占比较高而用电占比较低的城市，政策的实施效果更显著。产业结构因素的异质性作用显著，结果说明第三产业占比较高的城市碳减排政策更有效，即城市可以通过调整产业结构，促进产业转型等途径推动碳减排。

综合上述对碳排放路径影响因素的分析可知，碳排放试点政策在绿色创新技术发展快、第三产业占比高的城市更有效，因此，未来城市需通过推动绿色创新技术发展，促进产业结构转型来有效减少碳排放量；另一方面，试点政策在能源结构比值较低、能源强度相对较高的城市实施效果更好，结合地区经济与环境的差异，未来政策实施应向华北、西南及西北地区城市倾斜，推进整体政策效益最大化。

6 结论及建议

通过对三批低碳试点城市政策的因果效应分析及异质性分析，本文得到了与预期相符的结论，即试点政策对城市碳排放量及碳排放强度有负向作用，政策提高了城市碳减排效率；另一方面，不同城市政策效果差异显著，路径因素及经济因素对政策有显著异质性作用。

根据对政策及因素的分析，本文得到了一些关于碳减排政策的启示：

1)结合不同地区的碳排放路径因素及经济因素的分析结论，为了使碳减排总效益达到最高，未来国家的碳减排政策重心应向华北、西南及西北地区城市倾斜。

2)随着每个城市的经济、环境、人口等情况的不断发展变化，碳排放政策实施不仅要因地制宜，也需要“因时制宜”，要根据城市当下及未来的环境、经济等方面的特点制定行之有效的减排计划，避免不考虑实际情况的盲目推崇，陷入运动式减排的误区。

3)不同发展类型的城市需分别围绕产业转型、能源转型、人才培养与技术研发等路径探索合适的减排体系。加快新能源、氢能源产业链建设，推动企业生产方式低碳转型，提高数字化、智能化技术水平，同时以绿色低碳理念引导人民的生产、生活、出行及消费方式，全面推进能源的节约与循环利用，为如期实现“双碳”目标打下坚实基础。

[参 考 文 献]

[1] 邓荣荣. 我国首批低碳试点城市建设绩效评价及启示[J]. 经济纵横，2016(08)：41-46.

[2] 鲁万波，仇婷婷，杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究[J]. 经济研究，2013，48(04)：106-118.

[3] 戴嵘，曹建华. 中国首次“低碳试点”政策的减碳效果评价：基于五省八市的 DID 估计[J]. 科技管理研究，2015，35(12)：56-61.

[4] 冯彤. 低碳试点城市项目对碳强度的影响评估[J]. 云南民族大学学报(自然科学版)，2017，26(02)：174-178.

[5] 冷成英，柳剑平. 低碳试点的政策效应、减排路径及其对碳达峰的启示：基于中国 275 个城市的 PSM-DID 检验[J]. 湖北大学学报(哲学社会科学版)，2022，49(06)：159-168.

[6] SHAN Y，LIU J，LIU Z. An emissions-socioeconomic inventory of Chinese cities[J]. Scientific Data，2019，6(01)：190027.

[7] SHAN Y，GUAN Y，HANG Y，et al. City-level emission peak and drivers in China[J]. Science Bulletin. 2022，67(18)：1910-1920.

[8] SHAN Y，GUAN D，HUBACEK K，et al. City-level

climate change mitigation in China[J]. Science advances. 2018, 4(06): 0390.

[9] SHAN Y, GUAN D, LIU J, et al. Methodology and applications of city level CO_2 emission accounts in China[J]. Journal of Cleaner Production. 2017, 161:1215-1225.

[10] 韩传峰，宋府霖，滕敏敏. 长三角地区碳排放时空特征、空间聚类与治理策略[J]. 华东经济管理，2022，36(05)：24-33.

[11] 孙蒙，李长云，邢振方，等. 碳中和目标下中国碳排放关键影响因素分析及情景预测[J]. 高电压技术，2023，3：1-12.

[12] 杜明军.绿色金融对碳减排的因果森林处理效应及影响因素识别[J].金融理论与实践，2023，522(01)：82-97.

[13] ATHEY S, IMBENS G. Recursive partitioning for heterogeneous causal effects[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016 113(27):7353-7360.

[14] WAGER S, ATHEY S. Estimation and inference of heterogeneous treatment effects using random forests [J]. Journal of the American Statistical Association, 2018, 113(523): 1228-1242.

[15] OPRESCU M, SYRGKANIS V, WU Z S. Orthogonal random forest for causal inference[C]. // Neil Lawrence, Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, published online on the PMLR web site, 2019, 97: 4932-4941.

[16] HILL, JENNIFER. Causal inference: overview[J]. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition), 2015: 255-260.

[17] FRIEDBERG R, TIBSHIRANI J, ATHEY S, et al. Local linear forests[J]. Journal of computational and graphical statistics: A joint publication of American Statistical Association, Institute of Mathematical Statistics, Interface Foundation of North America, 2021, 2:30.

[18] ATHEY S, TIBSHIRANI J, WAGER S. Generalized random forests[J]. The Annals of Statistics, 2019, 47(02): 1148-1178.

Analysis of Low-carbon Pilot Policy Effects and Heterogeneity Based on Causal Forests

LI Shuyu[1], HU Erqin[1]

(*School of Faculty of Science, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: The results of counterfactual extrapolation of policy effects using orthogonal causal forests showed that low carbon pilot policies have emission reduction effects, but there is significant heterogeneity in policies. Using the t—test and the K W test based on pathway, economic factors grouping to analyze the sources of heterogeneity, the results showed that the carbon emission pilot policy is more effective in cities with high per capita GDP, high public expenditure, strong urban consumption capacity, dense universities, rapid development of green innovative technologies, and high proportion of tertiary industry, suggesting that future policies should be tilted towards cities in northern, southwestern and northwestern China, and should promote industrial transformation, energy transformation, talent training and technology research and development. The research conclusions provided some references and enlightenments for the implementation of carbon emission policies in the future.

Keywords: carbon emission pilot policy; causal inference; orthogonal causal forests; heterogeneity analysis

[责任编校：闫　品]