

城市 CO₂ 边际减排成本研究

○ 魏楚

城市是生产活动最主要的聚集地，也是化石能源消耗与碳排放的集中源头。本研究选择了 104 个地级市 2001-2008 年间的数 据，研究了 CO₂ 边际减排成本及影响因素，结果表明：样本城市的 CO₂ 边际减排成本为 967 元 / 吨。从地区看，东部高于中、西部；从省份看，上海最高而宁夏最低；从城市看，最高的上海与最低的张家界比值为 70:1，而且城市间的差异化日趋明显。这些差异主要与城市的经济发展水平、产业结构、对外开放程度、城市化水平以及公共交通工具等显著相关。

作者信息：
魏楚，中国人民大学能源经济系

一、前言

合理分配碳排放权是碳排放交易市场有效运行的基础。一个减排成本最小化的分配方案必须保障各参与方最后一单位减排的边际成本一致，这一原则同样适用于国内不同地区的碳减排目标的分解。因此 CO₂ 边际减排成本信息不仅可以直观反映出各地区潜在的减排效率和减排能力，同时还能为碳权交易市场中初始交易价格提供参考基准，并为政府制定碳税提供依据。

城市作为生产活动的主要聚集地，也是化石能源消耗与碳排放的集中源头。根据世界银行的估计，2012 年中国城市产生的与能源有关的温室气体占总排放量的 70%。IEA 预测到 2030 年，城市能源消耗占全国比重将高达 83%，并由此产生了相当比例的碳排放。因此城市将成为未来我国控制温室气体的主战场。

以城市为基本地域单位，不仅能更加有效的执行和实施环境政策，而且有助于实现国家降低单位 GDP 能源强度和碳强度的总体目标。对于城市管理者而言，可以采取许多控制温室气体排放的具体措施：如土地的使用决策、居住商业规则制定、交通管制以及废物处理；一旦减排措施在城市层面得以有效实施，将会促使上一层级政府学习并实行相似政策，甚至会影响到更小范围内的商业及居民活动。因此，对城市碳减排边际成本进行研究，不仅有利于识别出我国现有城市碳减排的“高地”与“洼地”，同时还可以帮助理解不同城市边际减排成本差异背后的驱动因素。

由于我国城市建制和城市碳清单方法学的不足，我国学者更关注于对城市 CO₂ 排放进行核算和估计，并致力于发展符合我国国情和数据特征的城市温室气体清单编制方法，在此基础上，还进一步地对我国城市 CO₂ 排

放的特征与驱动因素等进行了定量分析，但尚未有研究考察城市的 CO₂ 边际减排成本。从目前来看，有三种主流方法可应用于边际减排成本的研究。

一是基于专家型的 CO₂ 减排成本模型。其基本思路是：以当前最先进的可利用的技术方案为参照基准线，对不同国家、不同行业的各种减排措施进行技术评价，加总后计算出其减排潜力和减排成本，之后按照其成本从低到高顺序进行排序来构成 CO₂ 边际减排成本曲线。这种基于专家型的边际减排成本曲线简便易读，但其基于静态个体的“自下而上”分析难以对减排措施的综合效应进行动态评价。

第二类是基于经济-能源模型的 CO₂ 减排成本。这类方法一般是首先构建局部均衡或者一般均衡模型，然后改变约束条件来得到相对应的影子价格，即可得到不同减排水平上的边际减排成本信息。这种方法估计得到的边际减排成本结果较为稳健，但模型构建复杂，且对模型假设和设定的参数较为敏感，结论缺乏一致性。

第三类是基于微观供给侧的 CO₂ 减排成本曲线。这类模型主要基于微观层面，通过设定详细的生产技术和经济约束限制来定义生产可能集，这类推导出来的 CO₂ 边际减排成本可以解释为：给定市场和技术条件下，减排 CO₂ 带来的机会成本。由于其施加的理论假设较少，且符合现实观察，这类模型已被大量应用于不同层面的 CO₂ 影子价格估计中。本研究将主要基于第三种方法来估计城市 CO₂ 减排的边际成本。

二、模型与数据

1. 污染物影子价格模型

本研究采用方向性距离函数 (Directional Distance Function, DDF) 来推导出污染物的边际减排成本模型。假定投入向量 $x \in \mathfrak{R}_+^N$ ，合意产出向量 $y \in \mathfrak{R}_+^M$ ，非合意产出 $b \in \mathfrak{R}_+^J$ ，生产技术定义为 $P(x) = \{(y, b) : x \text{ can produce } (y, b)\}$ ，它有两个特性：一是合意产出是自由处置的，非合意产出弱处置。二是合意与非合意产出是联合生产的。

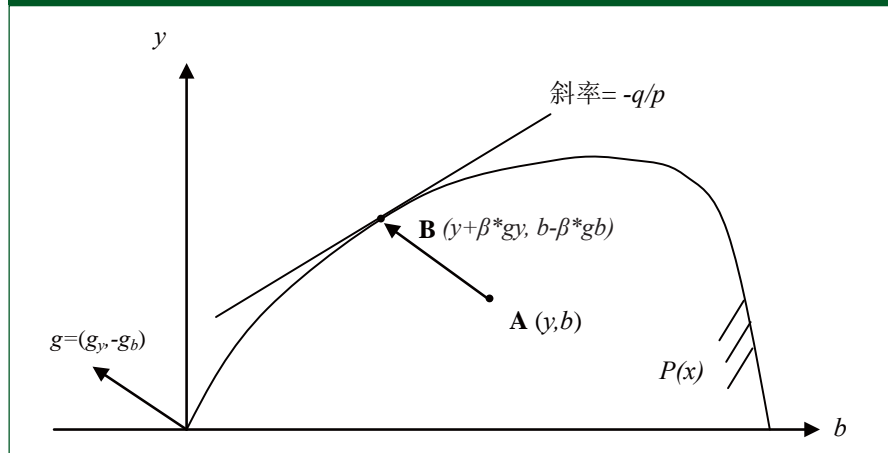
方向性产出距离函数可定义为： $D(x, y, b; g_y, -g_b) = \sup \{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \}$ ，其目的是要求解最大的 β 。图 1 描绘了其基本思路：在生产可能集 $P(x)$ 内的无效点 A，沿着给定方向向量 $g = (g_y, -g_b) \in \mathfrak{R}^M \times \mathfrak{R}^J$ ，可以在扩张合意产出 y 的同时缩减非合意产出 b ，直至移动 β^* 到达产出边界上的 B 点，此时同前沿间的最大距离 β^* 即是方向距离函数值，可用于描述其无效率程度。

假定 $p = (p_1, \dots, p_M) \in \mathfrak{R}_+^M$ 和 $q = (q_1, \dots, q_J) \in \mathfrak{R}_+^J$ 分别是 y 和 b 的影子价格，利用对偶函数的性质并应用谢泼德引理，可以推导出： y 与 b 的影子价格比例等于其边际转换率。在参数化距离函数形式下，假定合意产出的影子价格等于其市场价格，那么非合意产出 b 的价格 q 可以表述为合意产出 y 的显性价格 p 与产出物-污染物的边际转换率的乘积，即：

$$q = p \times \frac{\partial D / \partial b}{\partial D / \partial y} \quad (1)$$

在图 1 中，(1) 式所表述的影子价格即是 A 点沿着方向向量 g 在前沿生产面上投影点 B 的切线斜率，它反映了在合意产出 y 与非合意产出 b 之间的权衡，因此可以作为污染物的机会成本或者是边际减排成本。

图 1：方向性距离函数与影子价格



本研究采用参数化的二次型函数来表述方向距离函数，设定方向向量 $g=(1,-1)$ ，函数设定为：

$$D(x, y, b; g) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 y + \gamma_1 b + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 \alpha_{nm} x_n x_m + \frac{1}{2} \beta_2 y^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 b^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n y + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n b + \mu y b + \phi k + \varphi t \quad (2)$$

其中， x 为劳动、资本和能源投入要素， y 和 b 分别为合意产出和非合意产出， k 和 t 分别为个体差异和时间趋势。采用线性规划方法来估计其中的未知参数。

2. 数据来源与代表性

根据《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》等数据的匹配程度和历史序列的完整性，最终选取了 2001-2008 年间的 104 个地级市。其中，投入包括劳动、资本和能源，而 GDP 与 CO₂ 排放量分别作为合意产出与非合意产出：

劳动力：采用历年《中国城市统计年鉴》中公布的年末单位从业人数；

资本存量：利用“永续盘存法”来估计每年实际资本存量，其中，固定资本折旧率设定为 9.7%，各年固定资产投资额通过各城市历年固定资产投资和相应的平减指数得到，基期资本存量则选择 1994 年估计，并根据稳态条件下恒定的资本-产出假定来估计；

能源消费：《中国城市统计年鉴》并未公布城市层面的能源消耗数据，主要参考以下数据源：一是《中国环境年鉴》中各重点城市工业能源消费中的燃料煤、原料煤、燃料油；二是《中国城市统计年鉴》中各城市家庭煤气和家庭液化石油气消费量；三是《中国能源统计年鉴》中各城市用电量。按照实物消费量和能源折标系数进行转化加总，最终得到城市层面的能源消费总量；

GDP：取自历年《中国城市统计年鉴》，以 2001 年不变价格计算；

CO₂ 排放：根据不同化石能源品的消耗量及其碳排放转换因子来估算城市 CO₂ 排放，其中碳排放系数主要参照 IPCC 的排放清单系数，并结合《中国能源统计年鉴》中公布的我国各种能源品的低位发热量进行调整。

根据上述数据核算，各投入产出变量的描述性统计见表 1

表 1：投入产出变量描述性统计（2001-2008）

变量	单位	全国	# 东部	# 中部	# 西部
劳动力	万人	47.5 (68.7)	62.6 (92.0)	35.8 (33.1)	33.2 (35.1)
资本存量	亿元	1148.8 (1902.6)	1678.1 (2542.4)	723.8 (850.0)	664.3 (877.2)
能源消费	万吨标准煤	920.7 (816.9)	1678.1 (2542.4)	800.5 (628.4)	607.8 (530.3)
GDP	亿元	825.7 (1358.6)	1030.5 (1436.8)	453.3 (514.7)	353.5 (395.7)
CO ₂	万吨	2219.49 (1952.5)	2757.1 (2238.7)	2004.9 (1644.4)	1494.2 (1344.2)

本研究所选择的 104 个样本城市总体上能够较好的代表我国的城市主体（见表 2），以占全国 2.7% 的国土面积集聚了 17% 的人口和 7% 的劳动力，创造了 46% 的经济产出。当然，这些城市在支撑经济高速发展的同时，也消耗了 44% 的能源并排放了 46% 的 CO₂，因此，这 104 个样本城市不仅是我国经济发展的支撑点，同时也是能源密集消耗和污染排放密集地区。

表 2：样本代表性（2008 年）

经济指标	全国 354 个地级及以上城市	104 个样本城市
国土面积	6.5%	2.7%
常住人口	28.3%	17.1%
从业人员	9.5%	7.1%
GDP	59.3%	46.2%
能源消费	-	44.0%
化石能源相关的 CO ₂ 排放	-	46.4%

三、实证结果

1. 边际减排成本讨论

利用 GAMS 软件的 MINOS 5 求解器，对模型（2）、（3）中的未知参数进行求解。为了克服收敛问题，利用投入产出的均值对所有变量进行了标准化，这意味着投入产出集合 $(x,y,b)=(1,1,1)$ ，也是对一个代表性城市而言，其使用平均投入来获得平均产出。在所有 832 个观测值中共有 11 个观测值违背方向距离函数的假设，此外还有 2 个观测值的影子价格无意义，因此最终利用 819 个有效观测值来进行分析。

如表 3 所示，平均而言，城市的无效率生产为 7.67%。由于代表性城市的平均产出为 825.74 亿元，平均 CO₂ 排放是 2219.49 万吨，这意味着如果通过一定

表 3: 方向距离函数和影子价格描述性统计

变量	单位	均值	标准差	最小值	最大值	
方向距离函数	ddf	-	0.0767	0.1370	0.0000	1.5257
影子价格	q	万元 / 吨	0.0967	0.2992	0.0322	5.5799

的效率改善措施,可以增加产出 63.3 亿元,且同时可以减排 170.2 万吨 CO₂。此外,为削减额外一单位的 CO₂,城市的边际减排成本为 967 元 / 吨 (116.8 美元 / 吨)。

图 2 首先按照东、中、西来进行比较,可以看出,考察期内中部和西部城市的边际减排成本接近,且趋势非常一致,呈现缓慢递增趋势,其中西部城市稍低,中部城市稍高于西部城市,而东部城市的边际减排成本波动较大,2001 年同中西部接近,到了 2004 年后出现了急剧攀升,在 2006 年短暂回落后,到 2007 年达到了峰值 2537 元 / 吨,之后又在 2008 年回落到 1804 元 / 吨。尽管有波动,但是东部城市的 CO₂ 边际减排成本仍呈现很明显的增长态势。受此影响,所有样本城市的边际减排成本其走势与东部一致。

图 2: 东中西部地区影子价格比较 (2001-2008)

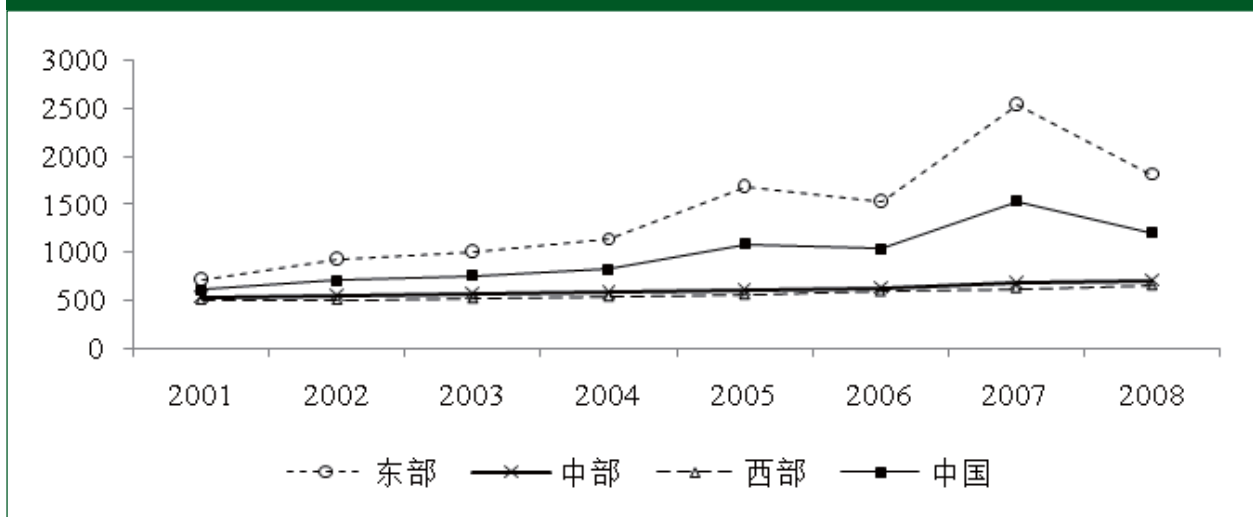


图 3 按照省级层面来进行评价。可以看出,在样本包含的 28 个省份中,宁夏的边际减排成本最低,为 420 元 / 吨,此外还有广西 (460 元 / 吨)、湖南 (465 元 / 吨)、甘肃 (487 元 / 吨)、安徽 (494 元 / 吨) 的边际减排成本较低; 相比之下,上海的减排成本最高,达到了 22990 元 / 吨,是甘肃的 54 倍, 其他省份依次为北京 (15054 元 / 吨)、天津 (2413 元 / 吨)、重庆 (1581 元 / 吨) 和湖北 (1065 元 / 吨)。

最后再将视角转移到城市层面上来, 图 4 列出边际减排成本最高和最低的 15 个城市, 可以看出,除了四大直辖市上海、北京、天津、重庆以外,其他较大的省会城市,如武汉、南京等边际减排成本较高,规模较小的其他地级市,如延安、张家界等城市的边际减排成本居末,最低的张家界市,其边际成本为 324 元 / 吨,跟减排成本最高的上海市相比,仅为其 1/70。

图 3: 省级影子价格排序 (2001-2008)

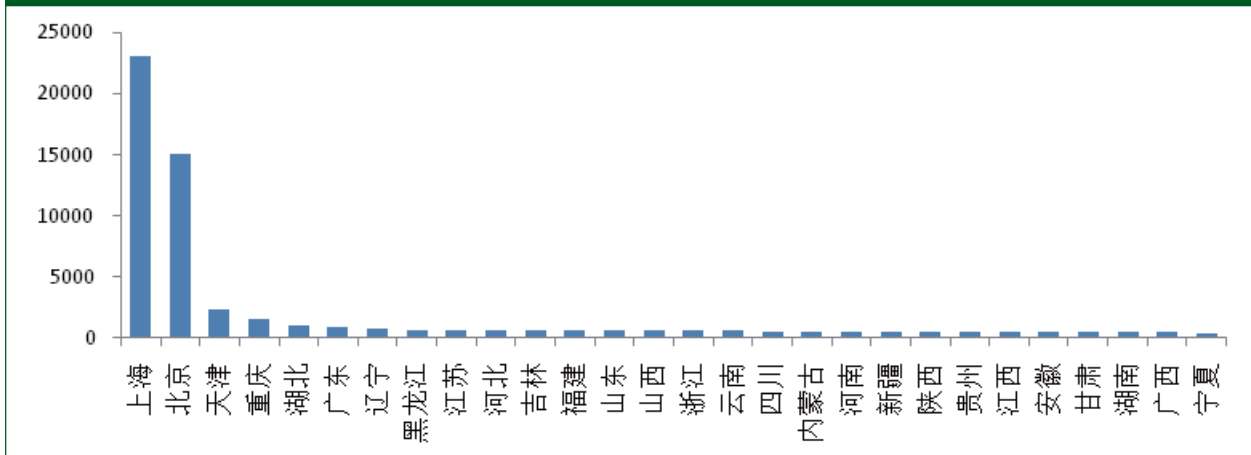


图 4: 边际减排成本最高的 15 个城市和最低的 15 个城市 (2001-2008)

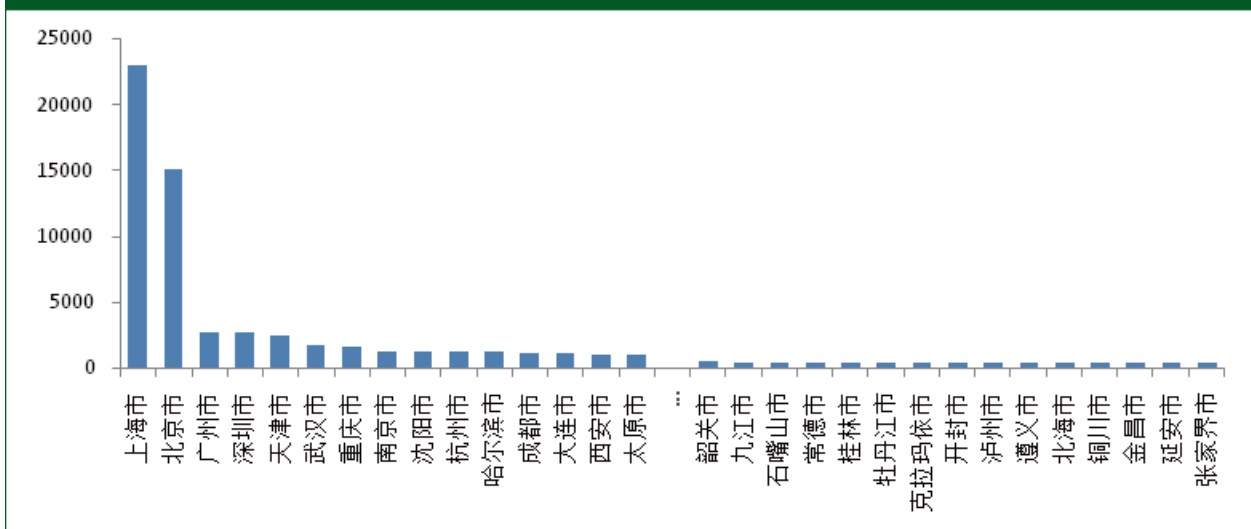


图 5: 城市影子价格变异系数 (2001-2008)

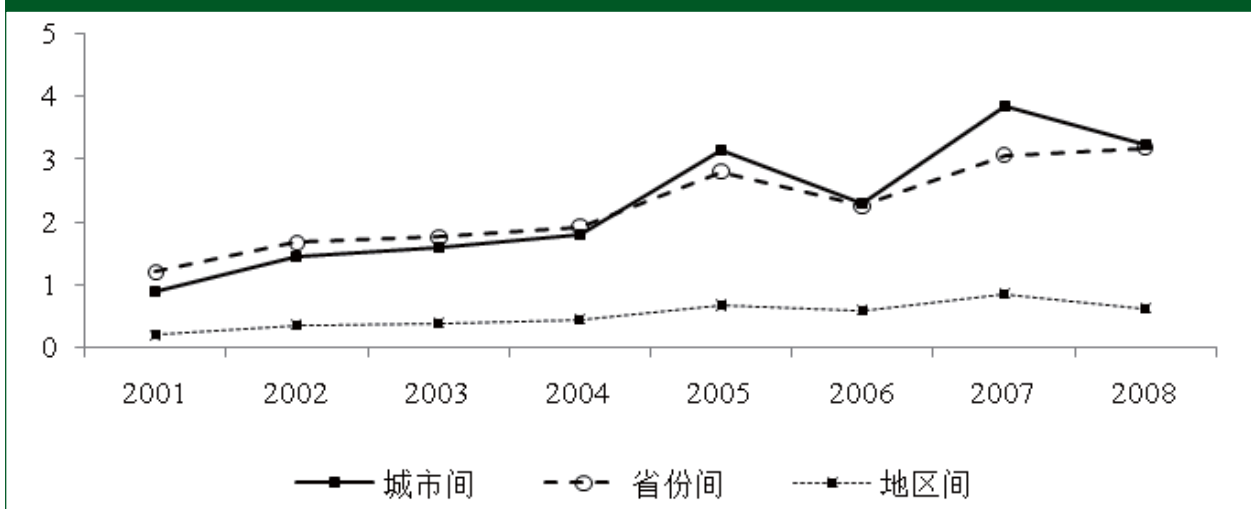


图 5 衡量不同年份城市间边际减排成本的变异系数。可以看出，除了 2006 年有所回落外，其余年份均呈现显著的增加趋势，表明城市的边际减排成本差异化日趋明显。受此影响，各省城市之间的边际减排成本变异系数趋势与之类似，而地区城市间的相对偏差波动幅度要缓和很多。

2. 边际减排成本影响因素

根据文献讨论和数据可得性，以下变量可能会影响边际减排成本：（1）与人均收入水平存在倒 U 型关系；（2）与第二产业比重负相关、与第三产业正相关；（3）与对外开放程度负相关；（4）与城市化率和人口密度正相关；（5）存在减排规模效应，即与排放水平或排放强度负相关；（6）其他可能的因素相关。如城市的公共基础设施、产业布局会产生明显的碳锁定效应，而城市的交通发展水平、居民消费结构、城市平均温度等也可能会对城市碳减排边际成本产生一定影响。

通过相关性检验、多重共线性检验以及分步回归，识别出了相应的显著影响变量，见表 4 第 I 列所示，可以看出：人均 GDP、城市化水平同边际减排成本显著正相关，而第二产业比重、城市对外开放和利用外资程度、人均公共汽车数量则同边际减排成本显著负相关，同时 Hausman 检验识别出固定效应模型估计结果更为一致。为了考察污染物减排效应，第 II-IV 列分别加入三种污染物指标，可

表 4：CO₂ 边际减排成本影响因素

解释变量	I	II	III	IV
人均 GDP	0.353*** (21.08)	0.358*** (20.64)	0.331*** (14.00)	0.0270 (1.26)
第二产业比重	-0.00658*** (-5.33)	-0.00662*** (-5.36)	-0.00662*** (-5.36)	-0.00658*** (-5.32)
外商直接投资占 GDP 比重	-1.853*** (-7.86)	-1.853*** (-7.86)	-1.853*** (-7.86)	-1.846*** (-7.80)
城市非农人口占城市人口比重	0.198** (2.76)	0.206** (2.86)	0.206** (2.86)	0.201** (2.79)
人均公共汽车和出租车数量	-0.188*** (-6.55)	-0.194*** (-6.67)	-0.194*** (-6.67)	-0.184*** (-6.24)
单位 GDP 排放的 CO ₂		0.0270 (1.26)		
人均 CO ₂ 排放			0.0270 (1.26)	
单位国土面积排放的 CO ₂				-0.00891 (-0.59)
<i>Individual Fixed Effect</i>	YES	YES	YES	YES
<i>N</i>	775	775	775	774
<i>Adj.R2</i>	0.42	0.421	0.421	0.419
<i>AIC</i>	-1281.4	-1281.3	-1281.3	-1277.2
<i>BIC</i>	-1253.5	-1248.7	-1248.7	-1244.6
<i>Hausman Chi2</i>	45.86***	14.69**	14.69**	48.59***

以看出，无论是单位 GDP 的 CO₂ 排放强度，或是人均 CO₂ 排放量，以及单位国土面积的 CO₂ 排放浓度，其估计的系数都不显著。这表明，在本研究的城市样本中，城市 CO₂ 边际减排成本同城市经济发展水平、产业结构、对外开放程度、城市化水平以及公共交通工具等变量显著相关，但不存在减排的规模效应。

四、主要结论与启示

本研究以中国 104 个地级市为样本，对其 2001-2008 年间的劳动力、GDP、资本存量、能源消费和 CO₂ 排放量进行了核算，并进而测度出城市层面的 CO₂ 边际减排成本，通过对比分析，发现城市间的减排成本差异极为巨大，这进一步驱动本研究考察了影响边际减排成本的可能因素。本研究的主要结论和启示主要包括两点：

第一是发现我国城市在 CO₂ 减排边际成本上存在巨大的差异性。所有样本城市平均存在 7.67% 的无效率生产和排放，平均边际减排成本为 967 元 / 吨。从地区来看，中部地区（604 元 / 吨）和西部（559 元 / 吨）较为接近且增幅较缓，而东部地区城市则较高（1418 元 / 吨），在波动中上升；以省份来看，上海最高为 22990 元 / 吨，其次为天津和重庆，而最低的宁夏仅为 420 元 / 吨；在所有城市中，四大直辖市和较大的省会城市边际减排成本较高，最低的为张家界市，仅为 324 元 / 吨，减排成本最高（上海）与最低城市（张家界）的边际减排成本比值高达 70: 1，存在巨大的异质性；这种城市间的差异除了 2006 年有所回落外，其余年份均呈现显著的增加趋势，表明城市的边际减排成本差异化日趋明显，而地区城市间的相对偏差波动幅度要缓和很多。

巨大的城市间边际减排成本的差异性意味着存在很大的市场交易空间，也即是在静态条件下，如果城市减排成本异质性越高，那么可以通过市场机制来降低的成本越多，也就意味着有更大的成本下降潜力，反之，如果城市间更具有同质性，那么市场手段的优势会下降。给定中国城市间存在的高达 70: 1 的巨大差异，可以通过诸如排放权交易市场等手段来降低总体减排成本，譬如边际减排成本较高的经济发达城市可以从交易市场购买其发展所需的配额——只要购买排放许可所需的价格低于其自身减排的边际成本，而经济较为落后的城市则由于其边际减排成本较低而从出售排放许可中获利。当然，如果在一个没有设定总量减排的环境中，还可以考虑通过税收转移支付的方式来实现，只不过此时除了交易双方外，还需要一个强有力的中央政府参与，即中央政府对经济发达城市征收税收而允许其增排，之后通过财政转移支付方式转移给欠发达城市以弥补其减排的损失，只要征税税率低于发达城市的边际减排成本且转移支付不低于欠发达城市减排的边际成本，那么对全社会而言这就是一个福利改进，而且这种单边支付方式——在不存在效率损失的情况下——与碳排放交易市场机制是等效的。

第二个结论是识别出了导致城市边际减排成本差异的可能原因。城市经济发展水平同边际减排成本之间存在显著的正向线性关系，EKC 的倒 U 型曲线假说在本研究的城市样本中并未得到验证；城市化水平高低也影响着减排成本，如果城市人口中非农比重越高，减排的代价也会越来越大。给定这两个主要驱动因素，加上中国在未来一段时期内继续高速推进城镇化，以及“到 2020 年城乡居民人均收入倍增”的背景，可以预期在未来很长一段时期内，城市的边际减排成本将继续呈现增长趋势，如果强制性要求经济较为发达的城市（地区）减排，可能造成


我国城市在 CO₂ 减排边际成本上存在巨大的差异性。

城市经济发展水平同边际减排成本之间存在显著的正向线性关系。

充分考虑城市间的减排潜力和成本差异因素，尽可能通过市场机制来实现总体减排目标的实现，而非对个体或某一区域强加约束。

从影响因素分析来看，二产比重、对外开放程度和人均交通基础设施同边际减排成本显著负相关。

的经济成本和代价也会越来越大，因此可以充分考虑城市间的减排潜力和成本差异因素，尽可能通过市场机制来实现总体减排目标的实现，而非对个体或某一区域强加约束。

此外，从影响因素分析来看，二产比重、对外开放程度和人均交通基础设施同边际减排成本显著负相关。这可能会成为城市实施减排的可行领域和洼地，也即是遵循“先易后难”原则，首先对拥有较低减排成本的产业和部门实施减排。譬如，对于第二产业占比较高的城市而言，可以优先考虑在该领域进行减排，同样的，公共交通也是一个可行的和值得关注的部门。另外，对外开放程度与边际减排成本之间负相关，这可能是由于开放程度越高，其可利用、可获取的减排技术选项和手段也会越多，从而使得其减排成本会相对更低，这也为城市管理者提供了其他可行且经济的减排途径。 

本文改编自北大 - 林肯中心工作论文，编号“W183- 中国城市 CO₂ 边际减排成本研究”。详情参看：www.plc.pku.edu.cn/publications_ch.aspx