

城市 CO₂ 边际减排成本研究

研究报告

中国人民大学课题组

课题负责人：魏楚

2013 年 6 月

内容摘要

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。根据世界银行的估计，中国城市产生的与能源有关的温室气体占总排放量的 70%，未来 20 年内中国仍将不断推进城市化、现代化进程，预计届时中国将新增 3.5 亿城市居民。IEA 预测到 2030 年，中国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。

为了研究中国城市 CO₂ 排放状况、边际减排成本分布以及影响因素，本课题选择了 104 个代表性地级市 2001-2008 年间的投入产出数据进行定量分析。这些城市国土面积仅有全国面积的 3%，集聚了 17% 的人口和 7% 的劳动力，但却创造了 46% 的 GDP，同时也消耗了 44% 的能源消费和贡献了 46% 的 CO₂ 排放量。这 104 个城市不仅是我国经济增长的支撑点，同时也是能源密集消耗和污染密集排放源。

本课题利用方向距离函数推导出污染物影子价格模型，在此基础上设定了二次型函数，基于各城市劳动力、资本存量、能源消费量、GDP 和化石能源相关的 CO₂ 排放数据，对城市层面的 CO₂ 边际减排成本进行了估计和评价。研究发现：

一，东部城市在要素投入、经济产出和 CO₂ 排放上显著高于中部城市和西部城市；在考察期内，所有城市的年均增速为 14%，能源消费和 CO₂ 排放量年均增速为 10%。平均而言，城市的无效率生产和无效率排放为 7.67%，这意味着代表性城市可以通过效率改善来增加产出 63.3 亿元，同时还可以减排二氧化碳 170.2 万吨。

二，所有城市 CO₂ 边际减排成本为 967 元/吨（116.8 美元/吨）。从地区来看，中部和西部边际减排成本较为接近，且增速缓慢，中部城市在 2001-2008 年间从 532 元/吨增至 704 元/吨；西部城市从 502 元/吨增至 655 元/吨，东部的边际减排成本波动很大，从 2001 年的 706 元/吨攀升至 2007 年峰值 2537 元/吨。从省级层面来看，上海平均边际减排成本最高，为 22990 元/吨，依次为北京和天津；宁夏的平均边际减排成本最低，仅为 420 元/吨，广西、湖南、甘肃和安徽的边际减排成本均低于 500 元/吨。从城市层面来看，四大直辖市上海、北京、天津、重庆，以及大的省会城市，如武汉、南京等城市的边际减排成本较高，北海、铜川、金昌、延安、张家界等城市边际减排成本较低，其中最低的张家界边际减排成本仅为 324 元/吨，与最高的上海相比，仅为其 1/70。

从时序上来看，边际减排成本从 2001 年的 603 元/吨增加到 2007 年的 1529 元/吨，到 2008 年回落到 1198 元/吨。而城市边际减排成本的变异系数除了 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。而地区间的相对偏差波动幅度要缓和很多。

三，城市之间巨大的边际减排成本差异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。其中，城市人均收入水平与城市化程度与边际减排成本正相关；而城市二产比重、对外开放程度和人均公共交通工具数同边际减排成本负相关。此外，人均 CO₂、单位 GDP 的 CO₂ 排放强度以及 CO₂ 空间浓度与边际减排成本关系不显著。

目录

一、	前言	1
二、	前期文献综述	4
1.	城市二氧化碳排放研究	4
2.	二氧化碳边际减排成本研究	5
三、	边际减排成本模型	10
1.	基于产出的方向距离函数	10
2.	污染物影子价格模型	11
3.	经验模型设定与求解	13
四、	城市层面的投入产出数据	16
1.	数据来源与处理	16
2.	主要变量	16
3.	数据特征统计	19
五、	实证结果	22
1.	参数估计	22
2.	边际减排成本讨论	24
六、	城市 CO ₂ 边际减排成本影响因素识别	28
1.	对影响因素的文献讨论	28
2.	模型设定与变量选择	29
3.	实证结果讨论	31
七、	主要结论与启示	35
八、	附录	38
九、	参考文献	48

图目录

图 1 麦肯锡全球二氧化碳边际减排成本曲线.....	6
图 2 方向性距离函数与影子价格.....	11
图 3 各投入产出变量趋势图（2001-2008）	20
图 4 东中西部地区影子价格比较（2001-2008）	25
图 5 省级影子价格排序（2001-2008）	25
图 6 边际减排成本最高的 15 个城市和最低的 15 个城市（2001-2008）	26
图 7 城市影子价格变异系数（2001-2008）	27

表格目录

表 1 中国 2010 年碳边际减排成本研究结果.....	8
表 2 国内外方向性距离函数基于参数化模型求解的文献比较.....	14
表 3 各种能源标准煤折算系数与碳排放系数.....	18
表 4 投入产出变量描述性统计（2001-2008）.....	19
表 5 投入产出变量的地区比较（2001-2008）.....	20
表 6 本课题样本代表性比较（2008 年）.....	21
表 7 方向距离函数参数估计值.....	22
表 8 方向距离函数和影子价格描述性统计.....	23
表 9 不同文献关于 CO ₂ 影子价格测算结果的比较.....	24
表 10 边际减排成本影响因素汇总.....	30
表 11 解释变量的描述性统计.....	31
表 12 初步回归结果.....	32
表 13 对污染物的进一步检验.....	33

附录表目录

附录表 A 样本城市对照表.....	38
附录表 B 城市个体效应参数.....	41
附录表 C 省级边际减排成本（2001-2008）.....	42
附录表 D 城市边际减排成本（2001-2008）.....	43
附录表 E 变量相关系数（Spearman 相关系数和显著度）.....	46
附录表 F 解释变量多重共线性检验.....	47

城市 CO₂ 边际减排成本研究

一、前言

气候变化是人类面临的共同挑战。为应对气候变化，我国提出了“到 2020 年 CO₂ 排放强度在 2005 年基础上削减 40-45%”的相对减排目标。但在分解区域性碳减排目标时，却面临着公平和效率问题。我国幅员辽阔，各地区资源禀赋、产业发展、能源结构等方面存在较大差异，区域经济发展极不均衡(刘明磊 et al., 2011; 刘树成, 2008)。此前我国“十一五”节能减排指标的省级分解中，大多省份选择了与国家目标相近的区域性节能减排目标，由于缺少“至下而上”的地区减排成本与减排潜力分析(Price et al., 2011)，这种一刀切的分配方案实质上有悖于公平与效率原则(World Bank, 2009)，并导致了一些政策设计者未曾考虑到的后果，如：个别省份对工业企业甚至居民进行拉闸限电，甚至伪造统计数据。

气候变化问题的核心是碳排放权的分配(Metz et al., 2007)，一个成本有效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，欧盟的二氧化碳许可证交易市场 (EU-ETS) 和北欧等国实施的碳税制度即是两种主要的市场手段。在长期均衡条件下，碳排放权交易市场中的许可证价格等于企业的边际减排成本，或者是政府征收的碳税等于企业的边际减排成本，此时减排总成本最小化(Baumol and Oates, 1988)。我国政府在设计碳减排目标的地区分解方案时，不仅需要考虑到地区间的公平性问题，更要考虑方案的成本-有效性，即：对那些边际减排成本较低、拥有较大减排潜力的地区，应给予较多的减排任务，才能满足总体减排成本最小化。

如何揭示出各地区碳减排的真正潜力与成本，从而规避地方政府在减排问题上的敷衍态度(Kousky and H.Schneider, 2003)，是值得深入探讨的现实问题。二氧化碳边际减排成本 (Marginal Abatement Cost, MAC) 可以直观反映出不同国家和地区减排的潜在空间和实施成本，在过去二十年中，IPCC、世界银行、联合国等国际性组织都广泛运用二氧化碳边际减排成本信息来对不同的减缓气候变化的政策集进行经济性评估(Kesicki and Strachan, 2011)。这一信息同样适用于国内不同地区的碳减排目标的分解，即：各地区的

CO₂ 边际减排成本可以直观反映出地区碳减排的潜在效率，同时还能够为即将建立起来的碳权交易市场中初始交易价格提供参考基准，并为政府制定碳税等财税手段提供现实依据(Wei et al., 2013)。正因为其具有重大的现实意义，对二氧化碳边际减排成本的研究已成为理论界研究的重点和热点。一般来说，由于二氧化碳并非是可以交易的正常商品，因此无法借助市场交易来反映出其稀缺程度，也即是对二氧化碳这一特殊“产出物”而言，缺少价格信号；由于二氧化碳同其他污染物一样，存在着“负”的外部性，其对经济、生态以及人体健康造成的损害难以通过市场价格进行衡量与加总，这将导致对现有经济产出水平的高估，以及对二氧化碳的真实损害无法进行定量评价。因此，对二氧化碳的边际减排成本研究成为绿色国民经济核算、环境治理成本收益分析、环境政策制定与评价等诸多理论与实践工作的基础。

城市，作为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(张金萍 et al., 2010)。根据世界银行的估计，中国城市产生的与能源有关的温室气体占总排放量的 70%，随着城市化和现代化的不断推进，未来 20 年内中国将增加 3.5 亿城市居民(世界银行, 2012)。IEA 预测到 2030 年，中国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(IEA, 2007)。因此城市将成为未来我国控制温室气体的主战场。

此前研究普遍将省级行政区划作为基本单元来进行考察(Guo et al., 2011; 刘明磊 et al., 2011; 王群伟 et al., 2011)，也有部分基于国家及产业层面的文献(Chen, 2005; 陈诗一, 2010d)，但却鲜有对城市层面的研究。实际上，OECD 和世界银行等机构对中国的研究均认为：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(Hallegatte et al., 2011; 世界银行, 2012)。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(Kousky and H.Schneider, 2003)。因此，以城市为基本地域单位进行碳减排的考量有着重要意义，而城市碳减排的边际成本研究则是前期基础性研究，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。

本报告即是针对上述背景展开的研究，旨在回答以下三个科学问题：一是我国城市层面的 CO₂ 排放水平有多高？二是我国城市 CO₂ 减排的边际成本是多少？三是影响城市 CO₂ 边际减排成本的因素有哪些？

本报告的结构安排如下：第二章针对此前研究文献进行综述；第三章构建出 CO₂ 边际减排成本模型，并设定相应的函数式；第四章基于统计年鉴和相关信息，对城市层面的投入产出数据进行核算和估计；第五章是对城市 CO₂ 边际减排成本进行计算、比较和分析；第六章对城市 CO₂ 边际减排成本的差异进行定量分析，识别出影响城市碳减排成本的主要影响因素；最后第七章概括相关研究结论，并对其政策启示和可行的对策进行讨论。

二、前期文献综述

1. 城市二氧化碳排放研究

国外对城市 CO₂ 的研究较早，除了对城市层面的 CO₂ 排放进行科学核算以外，还发展出不同的方法对其影响因素进行识别和定量评价。譬如 Glaeser and Kahn (2010) 以美国 66 个大都会城市为研究样本，分别利用 2001 年全国居民旅行调查、2000 年人口与居住普查数据，按照汽油、燃料油、天然气和电力消费四种能源种类，对家庭在交通、供暖以及日常能源消费中排放的 CO₂ 进行了估计，结果表明：San Diego 平均每户家庭 CO₂ 排放最低，为 19 吨/年，而 Memphis 则最高，达到了 32 吨/年；城市 CO₂ 排放水平同人口密度、中心聚集程度、冬季温度负相关，与所在地区夏季温度、地区电厂燃料中煤炭比重正相关。

中国的城市 CO₂ 排放也吸引了大量学者的关注。由于我国城市建制和城市碳清单方法的不足，众多学者首先对城市 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。如 Dhakal (2009) 对中国城市能源消费和 CO₂ 排放进行估计和分析，结果发现，城市消费了全国 84% 的商业能源，其中，最大的 35 个城市容纳了 18% 的人口，消耗了全国 40% 的能源和贡献了 40% 的 CO₂ 排放。在 4 个直辖市中，人均能源消费和人均 CO₂ 排放自 90 年代以来增长了 7 倍，未来急需进一步的政策措施以缓解温室气体的进一步排放。谢士晨 et al. (2009) 基于 2007 年上海市能源平衡表数据和 IPCC 的核算方法，对上海市化石能源燃烧产生的 CO₂ 排放进行了估计，并绘制了 CO₂ 流通图，结果显示：1995-2007 年间，上海市能源相关的 CO₂ 排放量年均增速为 5%，2007 年所有排放源中，电力部门贡献最大为 35.4%，其次为第二产业（34.4%）和交通业（23.8%），商业、居民与农业部门贡献相对较小，分别为 4%、2% 和 0.4%。蔡博峰 (2011) 界定了城市边界和城市碳排放范围，并且基于 GIS 模型，对我国 2005 年地级市的 CO₂ 排放进行了估算，其中直接排放达到了 17.7 亿吨，而总排放量为 27.34 亿吨，占当年全国总排放量的 48.9%。许聪 et al. (2011) 依据日本产业技术综合研究所开发的 NICE 模型，对传统的能源消费所致的 CO₂ 排放方法进行了修正，综合考察了农业、工业、建筑业、第三产业、交通运输业和居民生活 6 大部门的二氧化碳排放量，并给予统计数据对苏州市 2005-2008 年城市 CO₂ 排放量进行了估计。蔡博峰 (2012a) 详尽比较了国际上城市温室气体清单编制与国家温室气体编

制的特征和差异，前者往往采用消费模式，而后者主要采用生产模式编制。针对我国城市温室气体清单研究的不足，提出了我国城市温室气体清单编制可采取的模式，并利用北京和纽约的数据进行了实际对比，结果表明纽约市的总排放量略低于北京，而人均CO₂排放量则略高于北京市。

在对城市CO₂排放科学估计的基础上，学者们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。如张金萍 et al (2010)利用BP神经网络法，选取北京、天津、上海和重庆四个直辖市为研究样本，对其1995-2008年间的CO₂历史排放量、排放结构和低碳水平进行了测度和预测分析，结果发现，这四个直辖市的CO₂排放逐年增加，其排放趋势取决于城市的CO₂排放结构，产业结构优化升级对减缓碳排放存在显著作用。蔡博峰(2012b)基于中国0.1°大尺度的CO₂排放网格数据进行了分析，其结果表明，全局Moran指数为0.27且显著，表明在空间上CO₂排放存在正的自相关，同时局部Moran指数揭示出，重点城市是CO₂排放核心区域，对周边地区有显著的正向外溢效应，这些重点城市直接决定着我国CO₂排放的空间格局。此外，基于对349个城市的分析，发现存在显著的经济-CO₂排放之间的倒U型EKC曲线，即随着人均GDP的增加，人均CO₂呈现先升后降的趋势。

2. 二氧化碳边际减排成本研究

按照推导二氧化碳边际减排成本的方法，可以将目前研究分为三类：

(1) 基于专家型的二氧化碳减排成本

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二氧化碳边际减排成本曲线。这种思路主要是基于工程方案进行评价并进行加总，因此是一种“自下而上”的研究思路。最典型的案例是麦肯锡发布的全球的二氧化碳边际减排成本曲线(McKinsey&Company, 2009)，此外还有不同研究机构（如世界银行）和学者利用二氧化碳边际减排成本曲线对波兰、墨西哥、爱尔兰等国的二氧化碳减排潜力和减排成本进行评价和分析（Motherway and Walker, 2009; Poswiata and Bogdan, 2009; Johnson et al.,2009）。一个典型的专家型二氧化碳减排成本曲线如图 1 所示，

其中每个柱体代表着某种减排手段，如核能发电技术、废水循环技术等，横轴刻画了每个减排措施带来的减排空间和潜力，纵轴代表的是每个减排措施实施的减排成本（每吨 CO₂ 当量），这些不同的减排措施按照其减排成本从低到高进行排列，对于减排成本为“负”的措施，一般被认为是可以优先采取的减排举措，或者被称为“无悔的选择”。

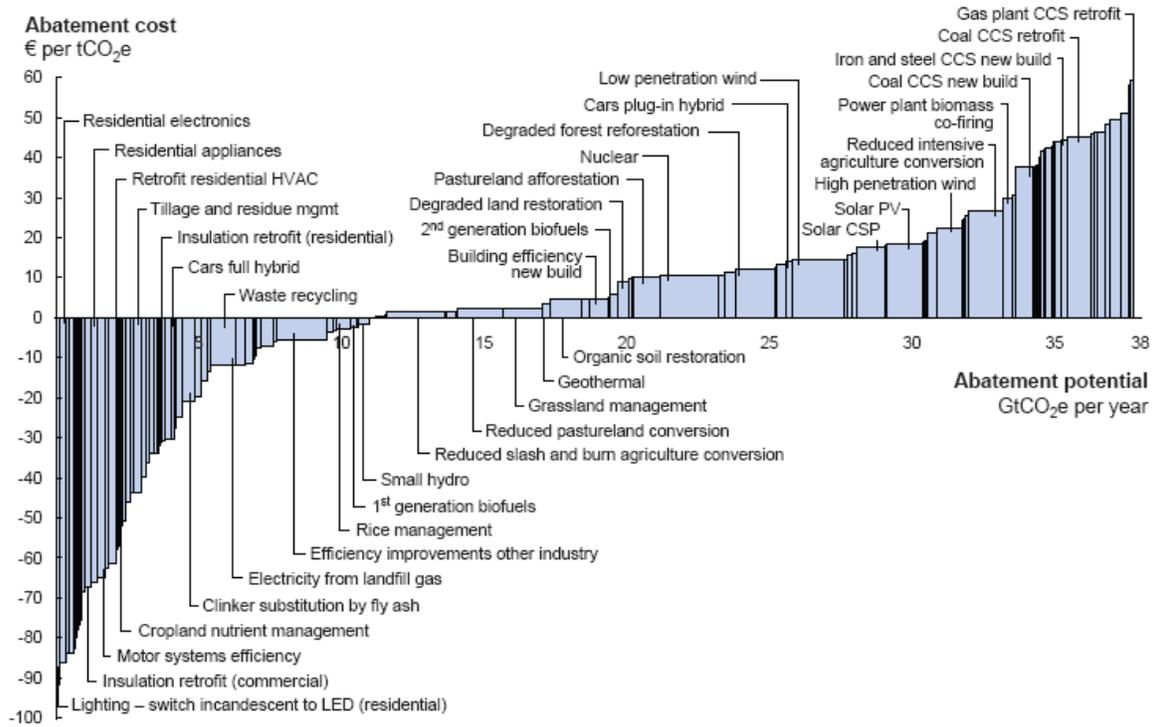


图 1 麦肯锡全球二氧化碳边际减排成本曲线

尽管基于专家型的边际减排成本曲线易于理解，且为政策制定者提供了丰富的工具集以及各自的优先顺序，但理论界对此争论很大，认为其存在诸多不足(Kesicki and Strachan, 2011)，譬如，对成本和收益界定的边界和内涵上存在差异，导致其忽略了其他潜在的成本和收益 (Ekins et al.,2011)；没有考虑到减排措施之间存在相互影响；忽略了可能的回弹效应 (Greening et al.,2000)；没有评价实施减排措施所相应的体制性障碍和交易成本，由此导致存在“负”的减排成本 (Brechet and Jouvet, 2009)，此外，专家型的边际减排成本曲线大多基于静态技术特征进行评价，没有考虑到不同减排措施的跨期动态性和惯性特征(Adrien and Stéphanie, 2011)。

(2) 基于经济—能源模型的二氧化碳减排成本

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，如增加减排量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(Kesicki and Strachan, 2011)。按照模型设定，又可进一步分为两种：一种是采用“自下而上”的能源系统模型，如 MARKAL、POLES 模型等(Criqui et al., 1999; 高鹏飞 et al., 2004)，该类模型更多关注能源部门，采用非加总数据，通过线性规划和设定一定约束来实现最优技术集，大多数能源系统模型用于分析一国情况，也有部分可用于国际排放交易分析；另外一类模型是采用“自上而下”的可计算一般均衡分析，如 EPPA、GEM-E3、GREEN 模型等(Ellerman and Decaux, 1998)，采用的是所有部门的加总数据，通过模拟经济系统在受到外部干扰（如碳税）后的新均衡状态来推导出边际减排成本。

基于经济—能源模型的边际减排成本可以显示不同部门的减排潜力，但是受限于推导的模型本身特点，存在一些内在的缺陷。如采用能源系统模型推导边际减排成本时，能源的需求是外生的，且仅限于能源部门本身，忽略了与其他经济部门的联系；当采用 CGE 模型推导边际减排成本时，能够捕捉到能源政策对其他部门和国际贸易的影响，但 CGE 在计算扰动后的新均衡时，不能精确提供其调整路径，因此可能会低估了边际减排成本(Springer, 2003)。此外，不同的经济—能源模型估计的边际减排成本差异很大，这主要是源于这类经济—能源模型本身，如设定较高的阿明顿贸易弹性系数，或者假定要素间替代弹性较高将使得二氧化碳边际减排成本偏低，对地区和部门的划分更宏观将导致对二氧化碳边际减排成本高估(Fischer and Morgenstern, 2006)，因此，对于经济—能源模型施加的假设，以及参数的设定将影响最终推导的二氧化碳边际减排成本分布(Marklund and Samakovlis, 2007)。

以国内外不同模型对中国 2010 年的二氧化碳边际减排成本为例（见表 1），可以看出，由于不同模型参数假定、模型结构的设定以及数据来源等多方面存在差异性，因此使得模型评估结论往往不一致（高鹏飞等，2004）；从现有的该类模型的研究进展来看，尚不足以为决策者提供可靠和足够的信息，理论模型仍有待改进（陈迎，2006）。

表 1 中国 2010 年碳边际减排成本研究结果

研究者 (机构)	模型	碳减排量 (Mt)	边际减排成本(美元/t)	减排率 (%)	边际减排成本(美元/t)
美国麻省理工学院	EPPA	100	4	10	9
澳大利亚农业与资源经济局	GTEM	100	8	10	18
Zhang, Z.X(1996)	CGE	288	23	20	23
贺菊煌等 (2002) ^a	CGE			10.5	11
高鹏飞等 (2004)	MARKAL -MACRO	100	18	10	35
王灿等 (2005) ^a	TED-CGE			10	12.5

注 a: 原文中以人民币表示, 为便于比较按当时汇率进行折算

(3) 基于微观供给侧的二氧化碳减排成本曲线

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, 这类推导出来的二氧化碳边际减排成本可以解释为: 给定市场和技术条件下, 减排二氧化碳带来的机会成本(De Cara and Jayet, 2011)。该类模型大多借助生产函数来定量刻画二氧化碳边际减排成本与减排量之间的关系。比较典型的是诺德豪斯定义的线性二氧化碳边际减排成本函数: $MC(r) = \alpha + \beta \ln(1-r)$, 该函数可用于国家层面的研究, MC 是边际成本, r 是减排率, 未知参数 α 和 β 则通过观察到的工程成本等数据来拟合估计 (Nordhaus, 1991)。该模型尽管能够描述出边际减排成本的趋势, 但对于各国的真实数据很难获取。

这一类模型在最近出现了新的分支和发展, 随着生产理论的扩展以及与环境经济学的交叉, 已有研究者基于生产理论框架, 将包括二氧化碳在内的污染物纳入到生产模型中, 通过构建出环境生产技术来对二氧化碳的影子价格进行估计(Färe et al., 1993), 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二氧化碳影子价格估计中。如 Rezek and Campbell (2007)采用广义最大熵估计了美国火电厂二氧化碳、二氧化硫等大气污染物的边际减排成本, 并讨论了针对不同污染物构建排放权交易市场的可行性; Marklund and Samakovlis (2007)采用方向距离函数对欧盟各成员国的二氧化碳减

排成本进行了估计，在此基础上探讨了欧盟碳减排目标分配的公平性和效率性问题；Park and Lim(2009)基于超越对数形式的距离函数对韩国火电厂的二氧化碳边际减排成本进行了估计，并讨论了不同减排方案的成本；Choi et al.(2012)采用非径向基于冗余的数据包络分析法，对中国省际二氧化碳边际减排成本进行了评价。国内学者也开始尝试采用这一思路评价工业边际减排成本，如陈诗一(2010c, 2011)对我国工业不同部门的二氧化碳边际减排成本进行了评价，并初步探讨了环境税的问题；涂正革(2012)也对我国八大工业部门二氧化碳减排成本进行了考察，并讨论了减排战略的选择。

综上所述，上述三种研究方法和视角各有其适用范围和缺陷。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；经济—能源模型估计得到的边际减排成本结果较为稳健，但模型构建复杂，且对假设和参数敏感，结论缺乏一致性；基于生产供给侧推导的边际减排成本简洁直观，但目前研究仍处于离散的“点”状。

本报告将主要基于第三种方法，即运用生产函数推导的污染物影子价格模型来估计 CO₂ 减排的边际成本。

三、 边际减排成本模型

1. 基于产出的方向距离函数

本报告将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。该模型是 Chung et al (1997) 提出的, 其基本思想是: 在考查合意性产出增加的同时, 还考查非合意性产出的减少, 只有当合意性产出无法继续扩张、非合意性产出无法继续减少时, 观测点才处于效率前沿。对中国的具体应用可见胡鞍钢 et al (2008) 对包含不同污染物的中国省际全要素生产率的测度、涂正革 (2008, 2009), 涂正革 and 刘磊珂 (2011) 对工业生产率及工业 SO₂ 影子价格的测度、王兵 et al. (2010), 王兵 et al. (2011) 对环境管制下的省际 Malmquist-Luenberger 生产率的测度, 以及陈诗一 (2010a, b, 2011) 对中国工业 CO₂ 减排成本以及绿色生产率的测度等文献。其模型基本表述为:

假定投入向量 $x \in \mathfrak{R}_+^N$, 合意性产出向量 $y \in \mathfrak{R}_+^M$, 非合意性产出 $b \in \mathfrak{R}_+^J$, 生产技术定义为 $P(x) = \{(y, b) : x \text{ can produce } (y, b)\}$, 它有两个特性:

(i) 合意产出是自由处置的, 非合意产出弱处置。这意味 $(y, b) \in P(x)$, $y' \leq y$ 时, 则 $(y', b) \in P(x)$; $(y, b) \in P(x)$, $0 \leq \theta \leq 1$ 时, 则 $(\theta y, \theta b) \in P(x)$ 。

(ii) 合意与非合意产出是联合生产的。其数学表达式是: $(y, b) \in P(x)$, 如果 $b=0$, 那么 $y=0$ 。它表明: 如果想要零污染, 就只能停产, 否则只要生产, 就会产生非合意产出。

方向性距离函数首先需要构造 $g=(g_y, -g_b)$ 的一个方向向量, 且 $g \in \mathfrak{R}^M \times \mathfrak{R}^J$, 该向量用以约束合意性产出与非合意性产出的变动方向与变动大小, 即在方向矢量所规定的路径上增加 (减少) 合意性 (非合意性) 产出, 方向向量的具体选择则要根据研究需要或政策取向的偏好等因素。方向性产出距离函数可定义为:

$$D(x, y, b; g_y, -g_b) = \sup \{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \} \quad (1)$$

β 表示与前沿生产面上最有效的单元相比, 给定单元合意性产出 (非合意性产出) 可以扩张 (缩减) 的程度。如果 $\beta=0$, 表示这个决策单元在前沿生产面上, 也就是最有效率的。 β 值越大, 表明该决策单元合意性产出继续增加的潜力较大, 同时非合意性产出缩小的空间也较大, 因此其效率越低。

方向距离函数继承了距离函数的基本属性(Färe et al., 2005), 包括对合意产出单调递减、对非合意产出单调递增, 此外, 还满足转换属性, 即:

$$D(x, y + \alpha, b - \alpha; g_y, -g_b) + \alpha = D(x, y, b; g_y, -g_b) \quad (2)$$

方向性距离函数是 Shephard 产出距离函数的一般形式(Chung et al., 1997)。当方向向量 $g=(1,0)$ 时, Shephard 产出距离函数即是方向性距离函数的特例。图 2 描绘了两者的关系: $P(x)$ 是生产可能集, 产出距离函数沿着由原点与观测点 A 所确定的射线, 将合意性产出 y 与非合意性产出 b 同比例扩张到前沿面上的 C 点; 而方向性产出距离函数的思路则是: 给定方向向量 $g=(g_y, -g_b)$ 的路径, 扩张合意性产出 y , 同时缩减非合意性产出 b , 从而到达产出前沿面的 B 点上。显然, 对于距离函数而言, 从无效点 A 移动到前沿上的 C 点, 要么存在“过度”的非合意性产出, 要么存在合意性产出“不足”, 而方向性距离函数则不仅考虑合意性产出的扩张, 而且使得非合意性产出最大缩减。

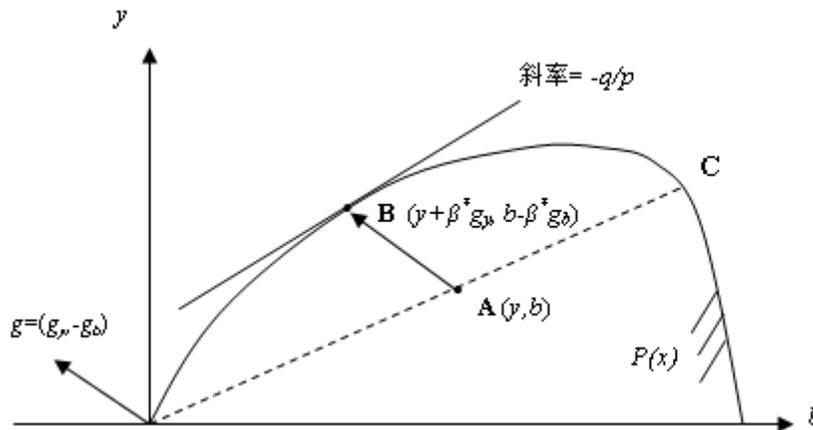


图 2 方向性距离函数与影子价格

2. 污染物影子价格模型

如 Chambers et al.(1998), Färe et al.(2001)所指出的, 在基于产出径向的方向距离函数和收益函数之间存在对偶关系, 因此如果对其对偶式应用谢泼德引理 (Shepard's Lemma), 则可以获得产出物的影子价格。收益函数可以表示为:

$$R(x, p, q) = \max\{py - qb : D(x, y, b; 1, -1) \geq 0\} \quad (3)$$

其中, $p = (p_1, \dots, p_M) \in \mathfrak{R}_+^M$ 和 $q = (q_1, \dots, q_J) \in \mathfrak{R}_+^J$ 分别是合意产出 y 和非合意产出 b 的影子价格, 在给定合意产出价格 p 和非合意产出价格 q 条件下, 函数 $R(x, p, q)$ 表示生产者所能获取的最大收益。由于方向距离函数是非负的(Chambers et al., 1998), 即:

$$D(x, y, b; g) \geq 0 \rightarrow (y, b) \in P(x) \quad (4)$$

因此, 收益函数(3)可以用方向距离函数表达为

$$R(x, p, q) = \max \{py + qb : \bar{D}(x, y, b : g) \geq 0\} \quad (5)$$

由于产出的扩张无法超过非参数前沿生产曲面, 因此可以得到边界收益函数与收益函数间的关系式, 并用(5)式中的方向距离函数形式表述为:

$$D(x, y, b : g) \leq \{R(x, p, q) - (py + qb)\} / \{pg_y - qg_b\} \quad (6)$$

一旦取得极值点, 则可以应用谢泼德引理得到产出物和污染物的影子价格关系式, 最终可以得到非合意产出与合意产出的影子价格比例等于其边际转换率(Färe et al., 1993)。在参数化距离函数形式下, 可以表述为距离函数分别对非合意产出与合意产出一阶导数的比例, 在非参数化形式下, 则是对偶线性规划中非合意产出与合意产出约束条件的对偶值:

$$\frac{q}{p} = \frac{\partial D(x, y, b : g) / \partial b}{\partial D(x, y, b : g) / \partial y} = \frac{\partial y}{\partial b} = MRTT_{y,b} \quad (7)$$

在(7)式中, 产出物与污染物的价格相对比值等于变化 1 单位污染物所导致的产出物的相对变化量, 也即是放弃 1 单位污染所减少的产出(或增加 1 单位污染所增加的产出), 这样就可以得到污染物的影子价格模型。如果再进一步假定: 合意产出的影子价格等于其市场价格(或者标准化为 1), 那么非合意产出的价格 q 可以表述为显性价格 p 与产出物-污染物的边际转换率的乘积, 即:

$$q = p \times \frac{\partial D / \partial b}{\partial D / \partial y} \quad (8)$$

在图 2 中, (8) 式所表述的影子价格即是任意一点在前沿生产面上投影点的切线斜率, 它反映了在合意产出 y 与非合意产出 b 之间的权衡, 即: 减少污染物时所放弃的产出物的

价值，因此可以作为污染物的机会成本或者是边际减排成本(Färe et al., 1993; Murty et al., 2007)。

3. 经验模型设定与求解

按照方向性距离函数的具体表述形式，其主要分为参数化模型和非参数化模型两类，其中参数化模型中，主要有超对数、二次型和随机前沿模型等形式；而在非参数化效率前沿的环境敏感性生产率模型中，主要运用了 DEA 模型和 SBM 模型(魏楚 et al., 2011)。参数化模型与非参数化模型相比，两者各有所长。一般而言，非参数 DEA 不需要对生产函数结构做先验假定，但是对样本数据较敏感，异常样本值误差会影响生产前沿的位置；此外，非参数 DEA 方法多用于生产率测度，由于难以获得一阶导数，因此很少用于估计非合意性产出的影子价格(Färe and Grosskopf, 1998)。相比较而言，参数法需要将生产前沿预设为一定的函数表达式，其优势在于该参数表达式可以进行微分和代数处理(Hailu and Veeman, 2000)，可计算得到各决策单元的非合意产出影子价格，因而参数化求解方法被大量运用于实证研究。

此外，在参数化模型形式的选择上，一般可选择超对数 (Translog) 和二次型 (Quadratic) 函数进行拟合。表 2 比较了国内外运用方向性距离函数进行参数化模型求解的相关文献的模型形式与假设条件的异同。可以看出，国际上利用方向性距离函数参数化模型进行碳影子价格的测度已十分普遍，其预设函数形式主要有超对数与二次型两种形式。而国内关于碳减排成本研究还比较少，在现有的基于方向性距离函数测算影子价格文献中，大多采用的是非参数距离函数方法 (陈诗一, 2010; 涂正革, 2008, 2009; 刘明磊等, 2011)，在参数方法的应用中，陈诗一 (2010) 通过 Translog 函数形式，测算了我国工业 38 个行业的 CO₂ 的影子价格。

表 2 国内外方向性距离函数基于参数化模型求解的文献比较

作者	样本	变量	函数形式	模型假设				
				D ≥ 0	D0 ≤ 0	dD/d y ≤ 0	dD/d B ≥ 0	dD/dx ≥ 0
Salnykov & Zelenyuk (2004)	50 个国家	投入:劳动/资本/能源/土地;合意产出:GNP;非合意产出:CO ₂ /SO ₂ /NO _x	Translog_LP	√				
Fare et al. (2005)	209 个美国电厂 1993/1997	投入:劳动/资本/能源;合意产出:发电量;非合意产出:SO ₂	Quadratic_LP	√		√	√	
			Quadratic_COL S	√				
Fare et al. (2006)	36 个美国州 1960-1996	投入:劳动/资本/能源/土地;合意产出:牲畜/庄稼;非合意产出:浸出/径流	Quadratic_LP	√		√	√	√
Marklund & Samakovl_is(2007)	15 个 EU 国家 1990-2000	投入:劳动/资本/能源;合意产出:GDP;非合意产出:CO ₂	Quadratic_LP	√	√	√	√	√
			Quadratic_COL S	√				
Kumar et al.(2007)	5 个印度电厂 1996-2004	投入:劳动/资本/能源;合意产出:发电量;非合意产出:SO ₂ /NO _x	Quadratic_ML	√				
陈诗一 (2010)	中国 38 个工业行业 1980-2008	投入:劳动/资本/能源/中间投入;合意产出:工业总产值;非合意产出:CO ₂	Translog_LP	√		√	√	

注释: Translog、Quadratic 分别是方向性距离函数参数的两种预设函数形式; LP、COLS、ML 分别指线性规划法(Linear program)、修正普通最小二乘法(corrected ordinary least square)及最大似然法(maximum likelihood)。

在对函数形式选择的理论性研究中, Färe et al.(2010), Vardanyan and Noh(2006)在利用蒙特卡罗方法比较了这两类函数的性能后发现, 无论生产技术类型如何设定, 二次型函数均优于超对数函数, 而且超对数函数往往会违反方向距离函数所要求的相关假设, 其结果往往会远低于二次型函数的结果, 存在一定偏差。因此综合相关研究结论, 本研究最终采用参数化的二次型函数来表述方向距离函数。

本研究设置方向向量 $g=(1,-1)$, 此时方向向量的选择满足一般的环境管制要求, 即合意性产出的扩展与非合意性产出的减少是对称性的。在投入产出变量选择上, 投入主要包

括：资本（ x_1 ）、劳动（ x_2 ）和能源（ x_3 ）三种要素，合意产出为各地区的经济产出（ y ），非合意产出为 CO₂ 排放量（ b ），并考虑了城市的个体差异（ k ）和时间趋势（ t ）。具体的方向距离函数设定为：

$$D(x, y, b; g) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 y + \gamma_1 b + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{n'=1}^3 \alpha_{nn'} x_n x_{n'} + \frac{1}{2} \beta_2 y^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 b^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n y + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n b + \mu y b + \phi k + \varphi t \quad (9)$$

为了求解经验模型（9）中的未知参数，本研究采用线性规划方法来进行估计(Färe et al., 1993; Färe et al., 2005; Hailu and Veeman, 2000)，具体而言，包括以下目标函数和约束条件：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k=1}^K [D(x_k, y_k, b_k; 1, -1) - 0] \\ & s.t. \\ & (i) \quad D(x_k, y_k, b_k; g) \geq 0, k = 1, \dots, K \\ & (ii) \quad \partial D(x_k, y_k, b_k; g) / \partial b \geq 0, k = 1, \dots, K \\ & (iii) \quad \partial D(x_k, y_k, b_k; g) / \partial y \leq 0, k = 1, \dots, K \\ & (iv) \quad \partial D(x_{n,k}, y_k, b_k; g) / \partial x_{n,k} \geq 0, n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \\ & (v) \quad \beta_1 - \gamma_1 = -1, \beta_2 = \mu = \gamma_2, \delta_n = \eta_n, n = 1, 2, 3 \\ & (vi) \quad \alpha_{nn'} = \alpha_{n'n}, n, n' = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (10)$$

（10）式中，目标函数式要最小化所有样本同前沿的离差和(Aigner and Chu, 1968)，约束条件（i）确保所有的观测点是可行的，也即是满足方向距离函数的非负特征；约束（ii）施加了非合意产出 b 单调递增性，即在其他条件不变情况下，如果非合意产出 b 增加，则方向距离函数值 D 不会减少；约束（iii）是对合意产出 y 的单调递减性，即其他条件不变，如果合意产出 y 增加，无效率 D 将不会增加；约束（iv）是对每种投入要素施加的单调性约束，即在其他条件不变时，如果投入 x 增加，那么方向距离函数不会递减 (Marklund and Samakovlis, 2007)；约束（v）和（vi）分别对应的是方向距离函数具有的转换属性和对称性。

四、城市层面的投入产出数据

1. 数据来源与处理

本研究取用“三投入-两产出”数据进行模型实证。其中，资本、劳动和能源作为投入要素，GDP 与 CO₂ 排放量分别作为合意产出与非合意产出。

我国城市样本的选择以《中国城市统计年鉴》中所统计公布主要的 354 个地级及以上城市为依据，为防止所由于行政区划变更所带来的统计口径变化，筛选掉历年有过行政区划变更的城市。由于《中国城市统计年鉴》中并未公布各地级市的能源消费信息，唯一公开可获取的数据源是《中国环境年鉴》中的城市能源消耗数据，但《中国环境年鉴》中选取的是重点城市，与《中国城市统计年鉴》覆盖的城市范围不一样，因此根据数据可得性，最终变量匹配的城市样本缩减为 113 个地级市。此外，由于海南省三亚市、海口市，西藏自治区拉萨市，青海省西宁市等 9 个城市的历史固定资产投资数据缺失，因此本文最终选取的城市样本数量为 104 个城市。

样本的时间段选择也由于不同数据源的差异而有所不同。在估计资本存量时，需要尽可能较长的时间序列来消除初始资本存量的偏误对后续序列的影响，因此根据《中国城市统计年鉴》中的固定资产投资数据回溯至 1994 年；而《中国环境年鉴》直到 2001 年才开始公布较为完整的全国重点城市能源消耗数据。此外，中国的地级市历经多次调整，因此导致了《中国城市统计年鉴》中的地级市数量不断变化，而《中国环境年鉴》中公布的重点城市基本不变，因此为了保证数据前后一致性，最终数据起止年份序列确定为 2001-2008 年。具体城市列表见附录表 A。

2. 主要变量

劳动力数据 (L)：国外一般采用工作小时数来作为劳动力的投入变量，但受限于数据可得性，本文采用历年《中国城市统计年鉴》中公布的年末单位从业人数，单位为万人；

GDP 数据 (Y)：各城市经济产出数据均取自历年《中国城市统计年鉴》，以 2001 年不变价格计算，单位为亿元。

资本存量 (K)：可利用“永续盘存法”来估计每年实际资本存量，具体方法如下：

$$K_{i,t} = I_{i,t} + (1 - \delta_i)K_{i,t-1} \quad (11)$$

其中, $K_{i,t}$ 是城市 i 第 t 年的资本存量, $I_{i,t}$ 是城市 i 第 t 年的投资, δ_i 是固定资本折旧率。当选定基期年份, 则可以通过迭代将上式转换为:

$$K_t = K_0 1 - \delta^t + \sum_{k=1}^t I_k (1 - \delta)^{t-k} \quad (12)$$

要计算各年资本存量, 需要确定三个重要参数:

一是资本折旧率 δ_i , 参照相关文献, 可以假定我国固定资本折旧率各年均为 9.7% (张军 et al., 2004);

第二个参数是基期初始资本存量 K_0 , 根据 King and Levine (1994) 的方法进行估算, 假定在稳态条件下资本-产出比是恒定的, 则可表示为:

$$k_i = i_i / (\delta + \lambda g_i + (1 - \lambda) g_w) \quad (13)$$

其中, i_i 是城市 i 在稳态时的投资率, 可以用该城市的平均投资率来表示, $\lambda g_i + (1 - \lambda) g_w$ 是在稳态时的经济增长率, 通过该城市的增长率与全国城市平均增长率的加权获得, 其中 λ 为增长率均值的一个测度, 根据文献一般取值为 0.25 (Easterly et al., 1993), g_i 是该城市平均增长率, g_w 是全国城市平均增长率, 以 1994 年为初始年份, 则当年的初始资本存量可以表示为 $K_{i,94} = k_i \times Y_{i,94}$, 其中, Y 为 1994 年城市 i 的真实 GDP。

第三个参数是各年固定资产投资额 $I_{i,t}$, 可通过各城市历年固定资产投资和城市固定资产投资价格指数得到, 但由于《中国城市统计年鉴》并未公布投资价格指数, 遂以各城市 GDP 平减指数进行代替。

通过上述方法即可计算出完整的资本存量序列, 所用数据均来源于历年《中国城市统计年鉴》中所公布数据, 并以 2001 年不变价格计算, 单位为亿元。

能源消费数据 (E): 由于历年《中国城市统计年鉴》并未公布城市层面的能源消耗数据, 因此在选取能源数据时, 参考和利用了不同数据源的相关能源数据: 一是历年《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 (单位为万吨) 三种主要化石能源消耗数据; 二是《中国城市统计年鉴》中公布了各城市家庭煤气消费量和

家庭液化石油气消费量；此外还参考了历年《中国能源统计年鉴》中各城市用电量数据（单位为万千瓦时）。因此，城市的能源消费量基本包括工业用能、生活用能以及电力消费三部分，对于交通用能信息，由于无法获取各城市层面的汽车数量、耗油标准及出行频率，因此无法进行精确核算。这也可能是未来在拥有汽车出行数据后有待改进的地方。

本研究对能源消费的测算公式为：

$$E_{i,t} = E^{industry} + E^{household} = \sum E_{i,t} \times coef_{i,t} \quad (14)$$

在公式（12）中， E_i 是城市 i 各种化石能源的消费总量， $coef$ 是不同能源品的折标系数。参照《中国能源统计年鉴》上公布的标准煤折算系数，将各种能源消耗量根据不同能源的燃烧热值，换算为吨标准煤的统一单位（能源折标系数见表 3）。

表 3 各种能源标准煤折算系数与碳排放系数

能源品	单位	标准煤折算系数	碳含量缺省值 (kgC/GJ)	平均低位发热量 (Kcal/kg, Kcal/m ³)	CO ₂ 排放系数 (Kg CO ₂ /kg, Kg CO ₂ /m ³)
燃料煤	吨	0.7143	25.8	5000	1.980
原料煤	吨	0.9	25.8	6300	2.495
燃料油	吨	1.4286	21.1	10000	3.239
煤气	万立方米	5.714	12.1	4000	0.743
液化石油气	吨	1.7143	17.2	12000	3.169
用电量	千瓦时	0.1229	-	860	-

CO₂ 排放数据 (b)： 现尚未有研究机构公布关于城市层面的 CO₂ 排放数据，但由于 CO₂ 排放主要来源于化石能源的消费以及转换，因此本文根据上述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。具体核算公式如下：

$$CO_2 = \sum E_i \times CF_i \times CC_i \times COF_i \times \frac{44}{12} \tag{15}$$

其中，CO₂表示估算的各种化石能源消费产生的二氧化碳排放总量；*i*表示各种消费的能源，*E_i*是城市*i*各种化石能源的消费总量，*CF_i*是转换因子，即各种燃料的平均发热量，*CC_i*是碳含量(Carbon Content)，表示单位热量的含碳水平，*COF_i*是氧化因子(Carbon Oxidation Factor)，反映了能源的氧化率水平，44/12则表示将碳原子质量转换为二氧化碳分子质量的转换系数。其中，*CF_i×CC_i×COF_i*被称为碳排放系数，而*CF_i×CC_i×COF_i×44/12*则是二氧化碳排放系数。各类排放源的碳排放系数主要参照(IPCC, 2006)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。本研究所包含的城市能源品的折算系数和排放系数见表3。

3. 数据特征统计

根据上述数据核算，各投入产出变量的描述性统计见表4

表4 投入产出变量描述性统计 (2001-2008)

变量	单位	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
劳动力 (<i>L</i>)	万人	832	47.46	68.74	2.32	696.25
资本存量 (<i>K</i>)	亿元	832	1148.80	1902.63	44.31	17784.69
能源消费 (<i>E</i>)	万吨标准煤	832	920.66	816.89	16.61	5694.50
GDP (<i>Y</i>)	亿元	832	825.74	1358.56	19.29	13560.44
CO ₂ (<i>b</i>)	万吨	832	2219.49	1952.49	31.58	12825.78

为了更好的反映出地区差别，对东、中、西部地区的投入产出变量进行了比较，见表5所示。可以看出，东、中、西部地区呈现明显的差异性。在投入要素上，均呈现了东部城市高于中部城市，中部城市高于西部城市的特征，在产出和污染排放上，也同样呈现出显著的东→中→西递减趋势，这也同已有的基于省级层面的分析结论一致。

表 5 投入产出变量的地区比较 (2001-2008)

单位	东部	中部	西部
劳动力	62.6 (92.0)	35.8 (33.1)	33.2 (35.1)
资本存量	1678.1 (2542.4)	723.8 (850.0)	664.3 (877.2)
能源消费	1169.2 (962.2)	800.5 (628.4)	607.8 (530.3)
GDP	1030.5 (1436.8)	453.3 (514.7)	353.5 (395.7)
CO ₂	2757.1 (2238.7)	2004.9 (1644.4)	1494.2 (1344.2)

备注：报告的是均值，括号内是标准差

此外，为了了解各投入产出变量的时间变动趋势，令 2001 年各变量=1 处理，其趋势见图 3 所示。可以看出，劳动力变动较为平缓，变动很小，而在高速的资本存量拉动下，GDP 获得了较快增长，如果 2001 年为 1，到 2008 年增至 2.5，年均增速为 14%，能源消费与 CO₂ 排放的趋势高度吻合，年均增长率为 10% 左右，且均低于 GDP 增速，这也同时表明这些城市的能源消费强度 (=能源消费/GDP) 和 CO₂ 排放强度 (=CO₂ 排放/GDP) 两个指标在逐年下降。

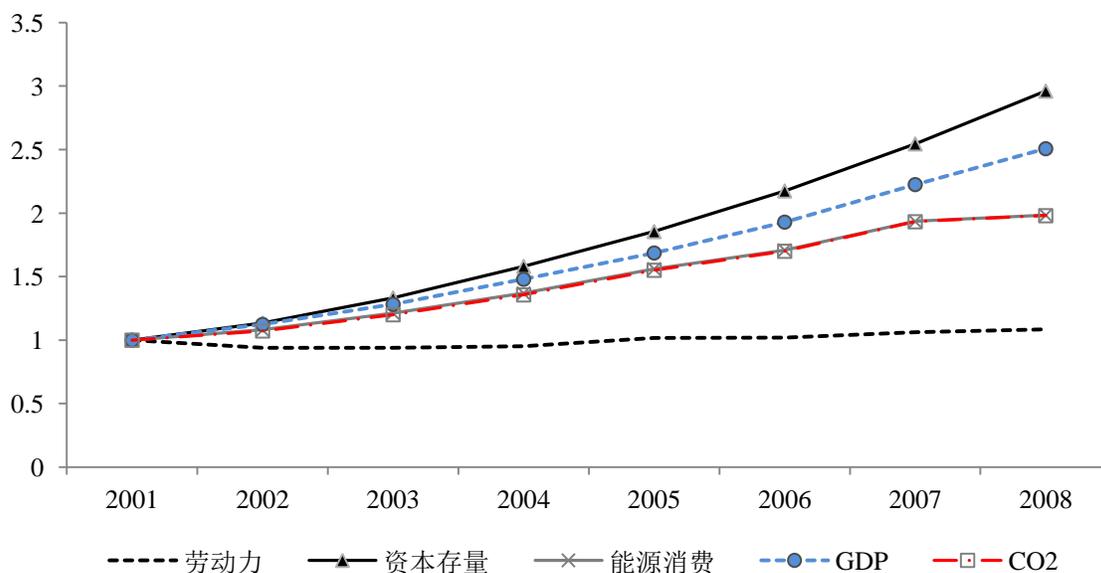


图 3 各投入产出变量趋势图 (2001-2008)

表 6 同时对比了 2008 年本课题样本城市同所有 354 个地级市特征。可以看出，本课题所选择的 104 个样本城市总体上能够较好的代表我国的城市主体，其国土面积是所有城市的 41.8%，集聚了所有城市人口的 60%，劳动力占有所有城市劳动的 74%，创造了所有城市 78% 的生产总值。此外，这 104 个样本城市也是支撑我国经济高速增长的动力源，以不到全国 3% 的国土面积，这些城市集聚了 17% 的全国人口和 7% 的劳动力，但创造的经济价值却达到了 46%。当然，这些城市在支撑国民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，本课题研究所选择的这 104 个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 6 本课题样本代表性比较（2008 年）

指标	本课题样本城市	所有地级市 ^(a)	全国 ^(b)
国土面积 (平方公里)	261923	626361 (41.8%)	9600000 (2.7%)
人口 (万人)	22773.05	37619.34 (60.5%)	132802 (17.1%)
从业人员 (万人)	5343.48	7186.3 (74.4%)	75564 (7.1%)
GDP (亿元)	145001.5	186189.7 (77.9%)	314045.4 (46.2%)
能源消费 (万吨标准煤)	128231	-	291448 (44%)
CO ₂ 排放 (万吨)	310092.9	-	668465.1 ^(c) (46.4%)

备注：括号内报告的是 104 个样本城市所占比重

(a)数据来源于中经网城市年度数据库，包括所有地级市、副省级市和直辖市共 354 个城市；

(b)数据来源于中经网数据库，是全国加总数据；

(c)数据来源于美国能源署 International Energy Statistics，口径为化石能源导致的碳排放量 (<http://www.eia.gov>)

五、实证结果

1. 参数估计

基于上述理论模型和数据，利用 General Algebraic Modeling System (GAMS 22.0) 软件的 MINOS 5 求解器，首先对模型 (9) (10) 中的未知参数进行求解。为了克服线性规划求解中的收敛问题，利用投入产出的均值对所有变量进行了标准化(Färe et al., 2005)。标准化处理后的数据意味着投入产出集合 $(x,y,b)=(1,1,1)$ ，也即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。所有求解的参数结果见表 7。由于城市样本较多，其个体效应被估参数值见附录表 B。

表 7 方向距离函数参数估计值

待估参数	变量	估计结果	待估参数	变量	估计结果
α_0	constant	-0.62264	ϕ	城市	附录表 B
α_L	L	0.09458			
α_K	K	0.48296	ϕ	2001	0.0000
α_E	E	0.00000		2002	-0.00203
β_y	y	-0.91111		2003	-0.00410
$\gamma_b = \beta_y + 1$	b	0.08889		2004	-0.00234
α_{LL}	L^2	-0.08220		2005	0.00000
α_{LK}	LK	0.00503		2006	0.01013
α_{LE}	LE	0.08634		2007	0.03674
α_{KK}	K^2	-0.05478		2008	0.08665
α_{KE}	KE	0.00311			
α_{EE}	E^2	-0.08944			
$\beta_{yy} = \gamma_{bb} = \mu_{yb}$	y^2, b^2, yb	0.01960			
$\delta_{Ly} = \eta_{Lb}$	Ly, Lb	0.04137			
$\delta_{Ky} = \eta_{Kb}$	Ky, Kb	0.01151			
$\delta_{Ey} = \eta_{Eb}$	Ey, Eb	0.00000	Obs		832

根据表 7 估计的参数值即可估计出不同城市在不同年份的无效率值、影子价格等信息。由于方向距离函数还需要满足 Null-jointness 假设，即：如果污染物 $b=0$ 且 $y>0$ ，那么 DDF 应不可行，即 $DDF<0$ 。利用估计出来的参数对该假设进行了验证，在所有 832 个观

测值中共有 11 个观测值违背该假设，此外还有 2 个观测值在计算影子价格时，由于分母为 0 而导致无意义，因此最终保留了满足所有假设的 819 个观测值来进行分析。

表 8 报告了样本城市的方向距离函数、影子价格的描述性统计信息。可以看出，在 819 个观测值中，方向距离函数均值为 0.0767，这意味着平均而言，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的效率改善，可以增加产出为 $825.74 \times 0.0767 = 63.3$ 亿元，且同时可以减少 $2219.49 \times 0.0767 = 170.2$ 万吨 CO₂。

表 8 方向距离函数和影子价格描述性统计

变量	单位	样本	均值	标准差	最小值	最大值
方向距离函数 <i>ddf</i>	-	819	0.0767	0.1370	0.0000	1.5257
影子价格 <i>q</i>	万元/吨	819	0.0967	0.2992	0.0322	5.5799

根据影子价格信息可以看出，为削减额外一单位的 CO₂，城市的边际减排成本为 967 元/吨，按照 2001 年美元汇率为 8.277 人民币来折算，一吨 CO₂ 平均减排成本为 116.8 美元/吨。表 9 列举了本课题与近年已有的关于 CO₂ 影子价格测算的文献比较结果。由于模型方法、数据获取的不同，CO₂ 影子价格的估算结果也大相径庭，Rezek and Campbell (2007) 主要是由于采用的距离函数模型，因此导致了其估计的 CO₂ 影子价格较低，这与 Vardanyan and Noh(2006) 的发现一致，即如果采用 Shephard 距离函数模型来估计影子价格，将显著低于方向距离函数所估计的值。Marklund and Samakovlis(2007)，Salnykov and Zelenyuk(2005) 测算的影子价格远高于本课题结果，这主要是与样本选择有关，他们选择西方发达国家为减排样本，相比较而言其边际减排成本会更高。

在对中国样本的研究中，秦少俊 et al. (2011) 对上海电厂的估计结果是，CO₂ 边际减排成本为 234.2 元/吨；Wei et al. (2013) 在类似的研究中，以浙江的火电厂企业为样本，用最大似然估计法得到的边际减排成本为 612 元/吨，如果用线性规划法求解，其边际减排成本为 2059 元/吨；而陈诗一(2010b) 主要基于工业行业层面来进行分析，他估计的 3.27 万元/吨的结果显著高于本研究基于城市层面的结果。此外，刘明磊 et al. (2011) 基于非参

数 DEA 法测算的 2005-2007 年间中国省际边际减排成本结果均值为 1739 元/吨，同本研究结论也较为接近。

表 9 不同文献关于 CO₂ 影子价格测算结果的比较

作者	时间	样本	模型	方法	CO ₂ 影子价格均值
Rezek and Campbell (2007)	1998	260 个美国煤炭发电厂	DF	OLS,GME	18.3-20.9(美元/吨)
Salnykov and Zelenyuk (2005)		50 个国家	DDF	LP	331.89(美元/吨)
Marklund and Samakovlis (2007)	1990-2000	15 个欧盟国家	DDF	LP, COLS	490-510(欧元/吨)
秦少俊 et al (2011)	2007	上海 19 家火电厂	DF	LP	234.2 元/吨
Wei et al (2013)	2004	浙江 124 家火电厂	DDF	LP, ML	612-2059 元/吨
陈诗一 (2010b)	1980-2008	中国工业 38 个两位数行业	DDF	LP	3.27(万元/吨,1990 年不变价)
刘明磊 et al (2011)	2005-2007	中国 30 省份	DDF	DEA	1739 元/吨
本研究	2001-2008	中国 104 个城市	DDF	LP	967 元/吨 (116.8 美元/吨,2001 年不变价)

2. 边际减排成本讨论

从表 8 还可以看出，影子价格的差异性很大，最小值为 0.0322 万元/吨，而最大值则为 5.5799 万元/吨，这反映出城市间的减排成本存在巨大的差别。下面将进行详尽分析。

首先对东、中、西部城市影子价格进行了时序比较。从图 4 可以看出，在考察期内，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，从 2001 年的 502 元/吨缓慢增至 2008 年的 655 元/吨，中部城市稍高于西部城市，从 2001 年的 532 元/吨增至 2008 年的 704 元/吨；与中西部相比，东部城市的边际减排成本波动较大，2001 年同中西部接近，为 706 元/吨，到了 2004 年后出现了集聚攀升，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，在 2001 年平均为 603 元/吨，在 2007 年达到顶峰为 1529 元/吨，2008 年回落至 1198 元/吨，但仍然高于 2006 年水平。

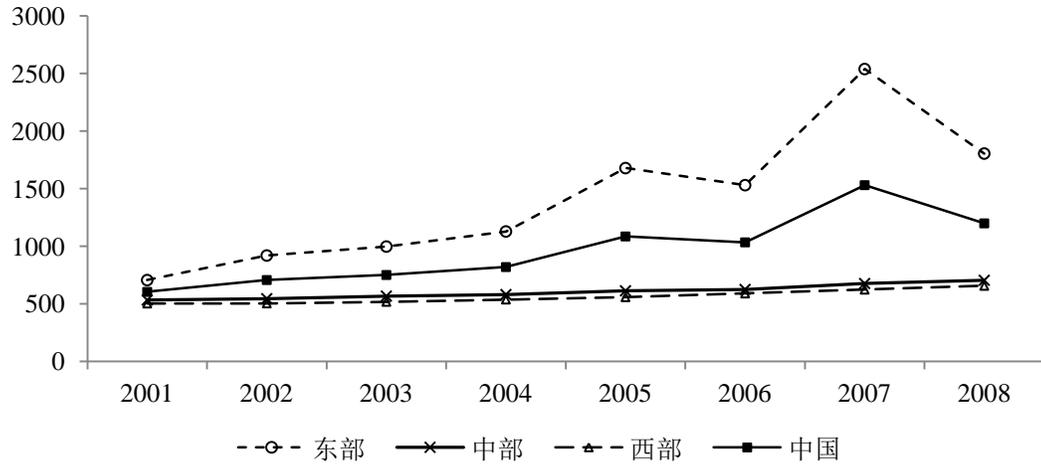


图 4 东中西部地区影子价格比较 (2001-2008)

其次，按照省级层面来对边际减排成本进行评价。见图 5 所示。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；相比而言，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)。所有 28 个样本省份逐年的边际减排成本数据见附录表 C。

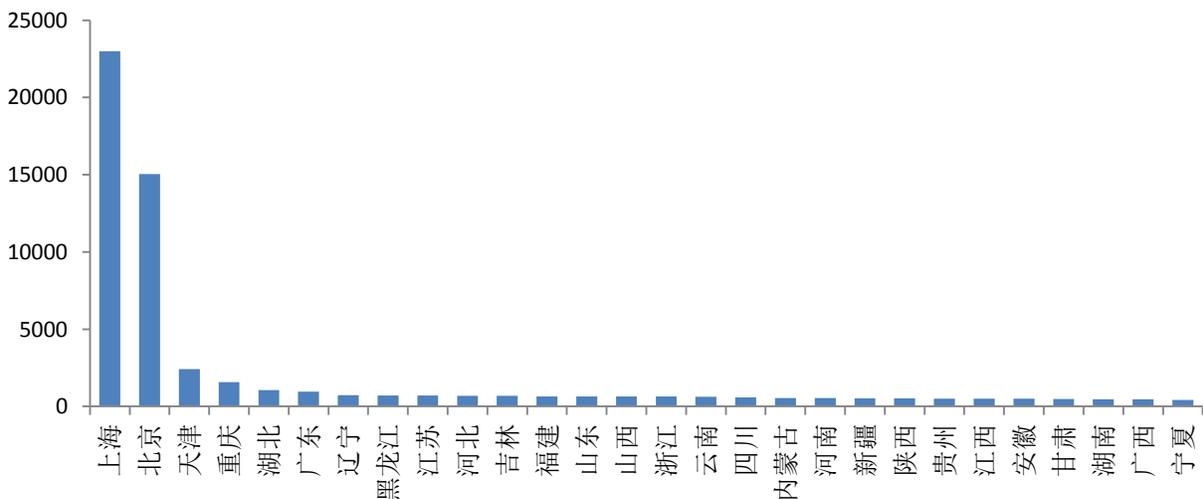


图 5 省级影子价格排序 (2001-2008)

最后再将视角转移到城市层面上来，受限于篇幅，图 6 仅列出边际减排成本最高和最低的 15 个城市，具体各个样本城市边际减排成本见附录表 D。

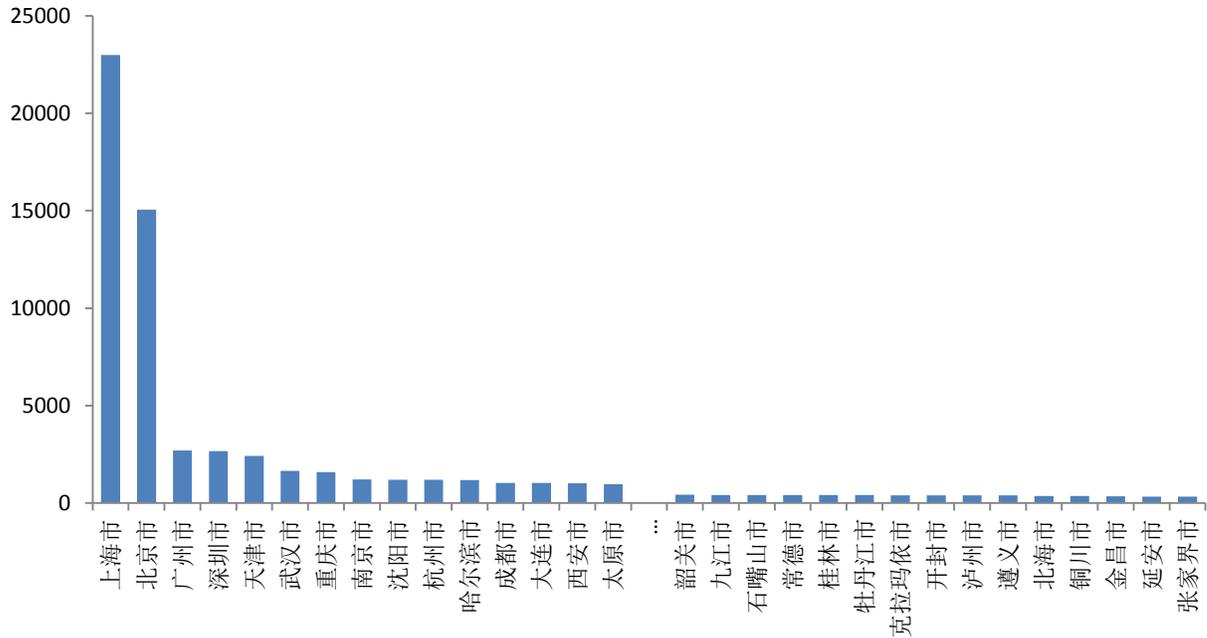


图 6 边际减排成本最高的 15 个城市和最低的 15 个城市 (2001-2008)

从图 6 可以看出，除了四大直辖市上海、北京、天津、重庆以为，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。因此，在各城市间的减排成本状况差异非常巨大。

为了衡量不同年份城市间差异状况，采用了每年城市间边际减排成本的变异系数 (coefficient of variation) 来衡量其相对偏差。从图 7 可以看出，城市间的变异系数除了 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。

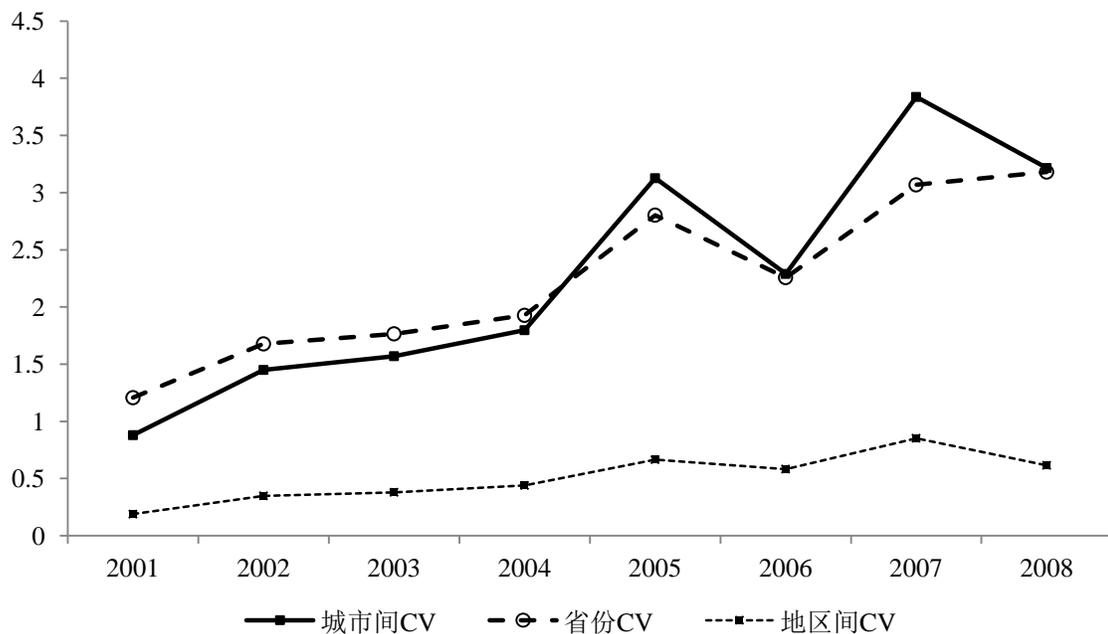


图 7 城市影子价格变异系数（2001-2008）

以上分析表明，在城市 CO₂ 边际减排成本上存在很大的差异性，这种差异性可能受到多种因素的驱动，对此将在下一章进行更为深入的讨论。

六、城市 CO₂ 边际减排成本影响因素识别

1. 对影响因素的文献讨论

在对普通污染物的边际减排成本分析上，Dasgupta et al. (2001)认为企业边际减排成本函数的斜度随着污染量下降而从右至左变得更为陡峭，因此边际减排成本函数的位置和斜度受到以下因素影响：生产规模和部门构成、企业运作效率、可利用的技术和废水处理技术的效率等。为了经验上获得定量分析，他们利用中国环保部和天津环保局提供的 370 家工厂数据对多污染物（悬浮物/COD/BOD/其他污染）的减排成本进行了研究，基于固定弹性的 log-long 函数式，发现污染物减排具有规模经济性特征，会受到企业减排规模和减排程度影响，不同行业的边际减排成本差异很大，此外，企业所有制和年龄对边际减排成本影响不显著。涂正革(2009)采用非参数 DEA 方法对我国省级规模以上工业的 SO₂ 边际减排成本进行了测度和因素识别，他认为 SO₂ 的边际减排成本取决于污染物排放水平和生产率水平高低。袁鹏 and 程施(2011)基于 2003-2008 年城市数据，对城市工业污染物边际减排成本进行了分析，结果发现污染物边际减排成本同污染排放规模（污染排放量）、污染监管强度（污染处理量/污染排放量）和污染治理的规模经济（污染处理量，即：工业废水排放达标量、工业 SO₂ 去除量、工业烟尘去除量）之间呈现显著负相关。

有关碳减排的边际成本问题上，文献中也有较多理论假设和实证检验。Criqui et al. (1999)，Klepper and Peterson(2006)在讨论全球各国边际减排成本时认为，碳减排的边际成本会受到一些因素的影响，包括：初始能源价格水平，能源供应结构，发展低碳/无碳型能源资源的潜力等；Maradan and Vassiliev (2005)以 76 个国家为样本，基于非参数 DEA 方法估计了 CO₂ 影子价格，并以此来验证环境库兹涅兹（Environment Kuznet Curve, EKC）曲线，结果发现收入水平同 CO₂ 边际减排机会成本负相关，由此认为高收入国家同低收入国家相比，其减排所导致的产出损失要较低。Hoeller and Coppel (1992)发现，OECD 国家的碳价（终端用户化石燃料消费价值/碳排放）和碳强度（CO₂/GDP）有很强的相关性。因此(Bohm and Larsen, 1994)提出了关于边际减排成本的假设，即：碳减排的边际成本同化石燃料消费价格正相关，而与该国的 CO₂ 排放强度负相关。Murty et al. (2007)考察了印度 Andhra Pradesh 省 5 个电厂 1996-2004 年的月度数据，并测算了火电厂

的污染物影子价格，其计量回归表明，影子价格同单位发电量污染物产出（强度指标）和电厂污染量显著负相关，也即是：电厂越脏，其边际减排成本越低；

在对中国的碳排放及减排成本因素分析中，Du et al. (2012)对中国省际 CO₂ 排放进行了估算和预测，并通过计量模型识别出影响碳排放的因素包括：经济发展水平、技术进步、产业结构、能源消费结构、贸易开放度和城市化等因素，但他们并没有对减排的成本进行讨论。刘明磊 et al. (2011)对中国省级 CO₂ 边际减排成本估计后发现，碳排放强度低的地区，影子价格较高，也即是 CO₂ 边际减排成本同 CO₂ 排放强度呈现负相关关系。秦少俊 et al. (2011)研究了上海的火电厂数据，发现电厂的 CO₂ 边际减排成本与企业的装机容量正相关，其解释是由于大机组发电效率高于小机组，因此进一步减排空间较小，从而导致了装机容量规模大的电厂其边际减排成本会更高。Wei et al. (2013)在对中国微观火电厂 CO₂ 边际减排成本的分析中，采用逐步回归方法和模型检验，识别出排放规模、电厂年龄和资本折旧率三个主要影响因素。

综上所述，现有文献揭示出，碳减排边际成本可能会：（1）与经济发展水平或人均收入水平存在 EKC 的倒 U 型关系；（2）与污染水平或强度存在负相关。也即是存在减排的规模效应(Hettige et al., 1996)；（3）与技术水平或者生产效率存在正相关(Wei et al., 2013)。也即是效率越高，边际减排代价越大；（4）与化石能源燃料价格正相关；（5）与污染监管和治理强度负相关；（6）与其他可能的因素相关。譬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。

2. 模型设定与变量选择

为了检验影响城市边际减排成本的驱动因素，可以根据计量模型来进行甄别和检验。一个基本的模型为：

$$q_{i,t} = \alpha + Z\beta + \varepsilon_{i,t} \quad (16)$$

其中 q 是城市 i 在 t 年的碳减排边际成本， Z 是可能的解释变量， β 是待估系数， α 和 ε 分别是截距项和随机误差项。解释变量的选取一方面依赖于理论文献的讨论，另一方面

取决于研究可获得的数据支撑，各解释变量将依次进入模型（16）进行估计，并根据相应统计指标来进行最优模型识别。

根据已有的文献研究和数据特征，设定下述解释变量，见表 10：

表 10 边际减排成本影响因素汇总

类别	变量	变量定义	解释	预期符号
被解释变量	边际减排成本	<i>y_mac</i>	log(边际减排成本)	
解释变量： 经济信息	人均收入水平	<i>x_rgdp</i>	log(人均 GDP)	经济越发达，MAC 越高 +
	产业结构	<i>x_2c</i>	二产占经济比重	二产比重越高，MAC 越低 -
		<i>x_3c</i>	三产占经济比重	三产比重越高，MAC 越高 +
	对外开放程度	<i>x_fdi</i>	外商直接投资占 GDP 比重	?
人口信息	城市化率	<i>x_urban</i>	城市非农人口占城市人口比重	?
	人口密度	<i>x_popden</i>	log(单位国土面积人口数量)	?
污染物信息	CO ₂ 排放强度	<i>x_CO2int</i>	log(单位 GDP 排放的 CO ₂)	-
	人均 CO ₂	<i>x_rCO2</i>	log(人均 CO ₂ 排放)	越脏的城市，MAC 越低 -
	CO ₂ 浓度	<i>x_CO2den</i>	log(单位国土面积排放的 CO ₂)	-
基础设施	人均铺装道路面积	<i>x_rroad</i>	log(人均铺装道路面积)	存在基础设施的锁定效应 +
	人均公共车辆数	<i>x_rbus</i>	log(人均公共汽车和出租车数量)	+
	建成区绿地覆盖率	<i>x_grecov</i>	建成区绿地占国土面积比重	碳汇效应 -
	网络用户比重	<i>x_rnet</i>	log(因特网用户数占人口比重)	?

上述潜在的解释变量描述性统计见表 11 所示。

表 11 解释变量的描述性统计

变量	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
<i>x_rgdp</i>	832	0.939	0.617	-0.968	3.169
<i>x_2c</i>	831	53.281	11.563	14.370	91.470
<i>x_3c</i>	831	42.844	11.064	8.040	73.600
<i>x_fdi</i>	799	0.0384	0.0363	0.000	0.2411
<i>x_urban</i>	811	0.706	0.178	0.191	1.000
<i>x_popden</i>	831	6.879	0.862	3.401	8.767
<i>x_CO₂int</i>	832	1.639	0.938	-1.090	4.158
<i>x_rCO₂</i>	832	2.577	0.828	-0.473	5.156
<i>x_CO₂den</i>	831	0.246	1.225	-3.958	3.568
<i>x_rbook</i>	831	1.984	0.773	-2.379	4.114
<i>x_rbed</i>	830	4.001	0.325	1.283	4.839
<i>x_rdoc</i>	830	3.368	0.332	2.151	4.482
<i>x_rroad</i>	831	2.116	0.514	0.432	4.159
<i>x_rbus</i>	832	3.402	0.537	1.368	5.286
<i>x_grecov</i>	830	35.446	8.322	4.000	70.300
<i>x_rtel</i>	827	-0.854	0.481	-3.912	4.038
<i>x_rmob</i>	825	8.607	0.778	1.787	11.372
<i>x_rnet</i>	717	7.000	0.881	3.339	9.628

3. 实证结果讨论

首先对上述变量进行相关性分析，其相关系数和显著程度见附录表 E。可以发现，影子价格同设定的解释变量之间均存在显著的相关性，但是不同的解释变量之间也有较强的相关性，如二产比重同三产比重之间严重负相关，而人口密度同 CO₂ 排放浓度之间也有很强的正相关，因此为了克服多重共线性，需要从上述设定的潜在解释变量中选择最具有代表性的指标。为此，首先诊断解释变量之间的共线性，利用方差膨胀因子 (vif) 以及条件数 (condition number) 等指标，从每一大类中识别出最能携带最多信息量的解释变量。从附录表 F 可以看出，设定的三个污染物排放指标存在很严重的多重共线性，我们将首先保留文献中常用的 CO₂ 排放强度指标 (*x_CO₂int*) 来进行分析；此外，由于城市一产比重相对固定不变，因此二产和三产比重呈现显著的相关性，在产业结构变量中，首先选择了第二产业比重 (*x_2c*) 进行考察。为了进一步从上述变量中识别出显著的影响因素，依次加入解释变量，此外，在估计方法上采用了 Hausman 检验来识别是采用固定效应模

型或是随机效应模型，其统计值表明固定效应模型估计结果更为一致，考虑到截面数量（104 个城市）大大高于时期跨度（8 年），因此主要考察个体固定效应而非双向固定模型。具体的回归结果见表 12。

表 12 初步回归结果

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9	模型 10
<i>x_rgdg</i>	0.343*** -22.59	-0.0136 (-0.48)	0.353*** -23.42	0.346*** -23.14	0.351*** -23.35	0.340*** -19.95	0.341*** -19.37	0.373*** -15.71	0.365*** -14.94	0.335*** -11.03
$(x_rgdg)^2$		0.190*** -14.45								
<i>x_2c</i>			-0.00624*** (-5.09)	-0.00616*** (-4.95)	-0.00624*** (-5.03)	-0.00639*** (-5.04)	-0.00640*** (-5.04)	-0.00647*** (-5.22)	-0.00653*** (-5.23)	-0.00638*** (-4.54)
<i>x_fdi</i>				-1.874*** (-8.17)	-1.836*** (-8.01)	-1.899*** (-7.84)	-1.900*** (-7.83)	-1.795*** (-7.61)	-1.785*** (-7.58)	-2.256*** (-8.00)
<i>x_popden</i>					-0.0536* (-2.55)	-0.0613** (-2.83)	-0.0614** (-2.84)	-0.0388 (-1.81)	-0.0382 (-1.79)	-0.0226 (-0.96)
<i>x_urban</i>						0.150* -2.03	0.151* -2.04	0.214** -2.93	0.220** -3.02	0.188* -2.36
<i>x_CO2int</i>							0.00705 -0.32	0.0274 -1.28	0.0274 -1.29	0.0292 -1.22
<i>x_rroad</i>								-0.021 (-0.87)	-0.0233 (-0.97)	-0.00336 (-0.12)
<i>x_rbus</i>								-0.183*** (-6.21)	-0.180*** (-6.10)	-0.174*** (-5.32)
<i>x_grecov</i>									0.000709 -0.9	0.00147 -1.7
<i>x_rnet</i>										0.0112 -1.08
<i>_cons</i>	-3.09*** (-208.2)	-2.99*** (-204.5)	-2.765*** (-42.50)	-2.679*** (-40.40)	-2.309*** (-14.49)	-2.339*** (-14.49)	-2.352*** (-14.17)	-1.953*** (-11.15)	-1.985*** (-11.04)	-2.214*** (-10.07)
<i>N</i>	830	830	829	796	795	774	774	773	772	657
<i>Adj.R2</i>	0.329	0.478	0.351	0.407	0.412	0.39	0.389	0.419	0.417	0.409
<i>AIC</i>	-1257.1	-1465.4	-1282.2	-1277.8	-1280.7	-1239.8	-1237.9	-1282.4	-1285.8	-1067.5
<i>BIC</i>	-1247.7	-1451.3	-1268	-1259	-1257.3	-1211.5	-1205.3	-1240.5	-1239.3	-1018.1
<i>Hausman Chi2</i>	1.79	3.75	7.22**	18***	28.03***	26.75***	30.66***	33.82***	32.24***	49.72***

首先，从模型 1 和模型 2 可以看出，在考虑人均收入的二次项后，其一次项系数并不显著，因此表明对于 CO₂ 边际减排成本而言并不存在倒 U 型曲线形态。而人均收入的一次项在模型 1、模型 3-10 中均显著为正，表明城市经济水平越高，其减排的边际代价也越大，因此在其后的回归中，不保留人均收入二次项。其次，产业结构中的二产比重、FDI 占经济规模比重在所有模型中均显著为负，表明二产比重较高、对外开放程度较高的城市，其边际减排成本也较低；人口密度变量系数为负，表明城市人口聚集程度与边际减排成本存在负相关，但这一结论仅在部分模型中显著；城镇人口比重显著为正，表明城市化水平越高，减排的代价越大；单位 GDP 的 CO₂ 排放强度变量在所有回归中均不显著，这表明在城市减排中可能并不存在显著的规模效应；在基础设施相关变量中，只有人均公共汽车和出租车数量显著负相关，表明交通设施较发达的城市，其边际减排成本相对较低。此外，Hausman 检验结果表明，在模型 3-10 中，固定效应模型更为合适。

通过上述初步的回归，可以识别出相关的显著变量，但对于污染物的回归并不理想，由于表 12 中选择的是 CO₂ 排放强度指标，为了避免由于变量选在带来的问题，在已有识别的显著变量基础上，利用人均 CO₂、CO₂ 排放的空间浓度两个变量再次进行回归，结果见表 13。Hausman 检验均建议采用固定效应模型进行估计，其中第 I 列是在上表分析的基础上识别出来的显著影响因素，第 II-IV 列分别加入三种污染物指标，可以看出，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，不存在减排的规模效应。而其他的变量，依旧显著。

表 13 对污染物的进一步检验

	I	II	III	IV
<i>x_rgdp</i>	0.353*** (21.08)	0.358*** (20.64)	0.331*** (14.00)	0.360*** (17.40)
<i>x_2c</i>	-0.00658*** (-5.33)	-0.00662*** (-5.36)	-0.00662*** (-5.36)	-0.00658*** (-5.32)
<i>x_fdi</i>	-1.853*** (-7.86)	-1.853*** (-7.86)	-1.853*** (-7.86)	-1.846*** (-7.80)
<i>x_urban</i>	0.198** (2.76)	0.206** (2.86)	0.206** (2.86)	0.201** (2.79)

	I	II	III	IV
<i>x_rbus</i>	-0.188 ^{***} (-6.55)	-0.194 ^{***} (-6.67)	-0.194 ^{***} (-6.67)	-0.184 ^{***} (-6.24)
<i>x_CO2int</i>		0.0270 (1.26)		
<i>x_rCO₂</i>			0.0270 (1.26)	
<i>x_CO2den</i>				-0.00891 (-0.59)
<i>_cons</i>	-2.165 ^{***} (-18.53)	-2.199 ^{***} (-18.34)	-2.199 ^{***} (-18.34)	-2.184 ^{***} (-17.93)
<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 ^{***}

综上所述，通过计量模型的定量分析，最终识别出城市 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。其中，城市人均收入水平与城市化程度与边际减排成本正相关；而城市二产比重、对外开放程度和人均公共交通工具数同边际减排成本负相关。此外，人均 CO₂、单位 GDP 的 CO₂ 排放强度以及 CO₂ 空间浓度与边际减排成本关系不显著。

七、主要结论与启示

本研究对城市二氧化碳边际减排成本的相关理论和方法进行了系统性综述，在此基础上构建了基于产出的方向距离函数以及参数化二次函数，并利用线性规划方法对未知参数进行了求解。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，这进一步驱动我们更为深入的考察了影响边际减排成本的可能因素。

本课题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投入、排放以及减排边际成本上存在巨大的差异性。首先在各种投入要素上，均呈现了东部城市>中部城市>西部城市的特征，在产出和污染排放上，也同样呈现出显著的东、中、西递减的趋势。其次，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 (Newell and Stavins, 2003)，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。

本研究局限于时间和精力，在以下方面存在不足之处：首先是在数据上，由于城市数据相关变量来源较为分散，因此仅包括了 104 个代表性城市，且数据更新到 2008 年，给定更多的信息源，譬如化石能源消费、城市私人汽车数量、城市平均温度等信息，将可以更为精准的估计能源及碳排放数量，并识别出温度等自然条件对边际减排成本的影响；此

外在研究方法上，本研究采用的是线性规划方法来求解模型，尽管可以直接施加相关约束条件，但对于求解参数无法获得其统计量，未来可以考虑通过其他方法，如最大似然估计，或者最大熵估计来获得更为稳健的参数估计结果。

八、附录

附录表 A 样本城市对照表

北京	地级市	北京																				
	样本市	北京																				
天津	地级市	天津																				
	样本市	天津																				
河北	地级市	石家庄	唐山	秦皇岛	邯郸	邢台	保定	张家口	承德	沧州	廊坊	衡水										
	样本市	石家庄	唐山	秦皇岛	邯郸	保定																
辽宁	地级市	沈阳	大连	鞍山	抚顺	本溪	丹东	锦州	营口	阜新	辽阳	盘锦	铁岭	朝阳	葫芦岛							
	样本市	沈阳	大连	鞍山	抚顺	本溪	锦州															
上海	地级市	上海																				
	样本市	上海																				
江苏	地级市	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁								
	样本市	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	扬州													
浙江	地级市	杭州	宁波	温州	嘉兴	湖州	绍兴	金华	衢州	舟山	台州	丽水										
	样本市	杭州	宁波	温州	嘉兴	湖州	绍兴	台州														
福建	地级市	福州	厦门	莆田	三明	泉州	漳州	南平	龙岩	宁德												
	样本市	福州	厦门	泉州																		
山东	地级市	济南	青岛	淄博	枣庄	东营	烟台	潍坊	济宁	泰安	威海	日照	莱芜	临沂	德州	聊城	滨州	菏泽				
	样本市	济南	青岛	淄博	枣庄	烟台		潍坊	济宁	泰安	威海											
广东	地级市	广州	韶关	深圳	珠海	汕头	佛山	江门	湛江	茂名	肇庆	惠州	梅州	汕尾	河源	阳江	清远	东莞	中山	潮州	揭阳	云浮
	样本市	广州	韶关	深圳	珠海	汕头	佛山	湛江														
海南	地级市	海口	三亚																			
	样本市																					

中部	山西	地级市	太原	大同	阳泉	长治	晋城	朔州	晋中	运城	忻州	临汾	吕梁							
		样本市	太原	大同	阳泉	长治														
	吉林	地级市	长春	吉林	四平	辽源	通化	白山	松原	白城										
		样本市	长春	吉林																
	黑龙江	地级市	哈尔滨	齐齐哈尔	鸡西	鹤岗	双鸭山	大庆	伊春	佳木斯	七台河	牡丹江	黑河	绥化						
		样本市	哈尔滨	齐齐哈尔				大庆				牡丹江								
	安徽	地级市	合肥	芜湖	蚌埠	淮南	马鞍山	淮北	铜陵	安庆	黄山	滁州	阜阳	宿州	巢湖	六安	亳州	池州	宣城	
		样本市	合肥	芜湖			马鞍山													
	江西	地级市	南昌	景德镇	萍乡	九江	新余	鹰潭	赣州	吉安	宜春	抚州	上饶							
		样本市	南昌			九江														
	河南	地级市	郑州	开封	洛阳	平顶山	安阳	鹤壁	新乡	焦作	濮阳	许昌	漯河	三门峡	南阳	商丘	信阳	周口	驻马店	
		样本市	郑州	开封	洛阳	平顶山	安阳			焦作										
	湖北	地级市	武汉	黄石	十堰	宜昌	襄樊	鄂州	荆门	孝感	荆州	黄冈	咸宁	随州						
		样本市	武汉			宜昌														
	湖南	地级市	长沙	株洲	湘潭	衡阳	邵阳	岳阳	常德	张家界	益阳	郴州	永州	怀化	娄底					
		样本市	长沙	株洲	湘潭			岳阳	常德	张家界										
西部	内蒙古	地级市	呼和浩特	包头	乌海	赤峰	通辽	鄂尔多斯	呼伦贝尔	巴彦淖尔	乌兰察布									
		样本市	呼和浩特	包头		赤峰														
广西	地级市	南宁	柳州	桂林	梧州	北海	防城港	钦州	贵港	玉林	百色	贺州	河池	来宾	崇左					
	样本市	南宁	柳州	桂林		北海														

四川	地级市	成都	自贡	攀枝花	泸州	德阳	绵阳	广元	遂宁	内江	乐山	南充	眉山	宜宾	广安	达州	雅安	巴中	资阳
	样本市	成都		攀枝花	泸州		绵阳												
重庆	地级市	重庆																	
	样本市	重庆																	
贵州	地级市	贵阳	六盘水	遵义	安顺														
	样本市	贵阳		遵义															
云南	地级市	昆明	曲靖	玉溪	保山	昭通	丽江	思茅	临沧										
	样本市	昆明	曲靖																
陕西	地级市	西安	铜川	宝鸡	咸阳	渭南	延安	汉中	榆林	安康	商洛								
	样本市	西安	铜川	宝鸡	咸阳		延安												
甘肃	地级市	兰州	嘉峪关	金昌	白银	天水	武威	张掖	平凉	酒泉	庆阳	定西	陇南						
	样本市	兰州		金昌															
青海	地级市	西宁																	
	样本市																		
宁夏	地级市	银川	石嘴山	吴忠	固原	中卫													
	样本市	银川	石嘴山																
新疆	地级市	乌鲁木齐	克拉玛依																
	样本市	乌鲁木齐	克拉玛依																

附录表 B 城市个体效应参数

城市代码	城市名称	系数	城市代码	城市名称	系数	城市代码	城市名称	系数	城市代码	城市名称	系数
c0101	北京	0	c0901	上海	-2.02221	c1503	淄博	1.13827	c1906	佛山	0.61833
c0201	天津	0.3907	c1001	南京	0.77753	c1504	枣庄	0.63243	c1908	湛江	0.85005
c0301	石家庄	0.53426	c1002	无锡	1.48579	c1506	烟台	0.73598	c2001	南宁	0.72123
c0302	唐山	0.48135	c1003	徐州	0.75819	c1507	潍坊	0.70125	c2002	柳州	0.69044
c0303	秦皇岛	0.70679	c1004	常州	0.66525	c1508	济宁	0.56476	c2003	桂林	0.69127
c0304	邯郸	0.35466	c1005	苏州	0.95044	c1509	泰安	0.74562	c2005	北海	0.69205
c0306	保定	0.61357	c1006	南通	0.62124	c1510	威海	0.72554	c2201	重庆	0.47202
c0401	太原	0.26179	c1007	连云港	0.58684	c1601	郑州	0.59689	c2301	成都	0.94475
c0402	大同	0.54568	c1010	扬州	0.80706	c1602	开封	0.62702	c2303	攀枝花	0.52054
c0403	阳泉	0.57003	c1101	杭州	1.68934	c1603	洛阳	0.61916	c2304	泸州	0.67017
c0404	长治	0.5974	c1102	宁波	0.55053	c1604	平顶山	0.53869	c2306	绵阳	0.84332
c0501	呼和浩特	0.68878	c1103	温州	0.8999	c1605	安阳	0.56828	c2401	贵阳	0.54869
c0502	包头	0.64256	c1104	嘉兴	0.54651	c1608	焦作	0.53136	c2403	遵义	0.68014
c0504	赤峰	0.58892	c1105	湖州	0.70465	c1701	武汉	0.85296	c2501	昆明	0.76549
c0601	沈阳	1.28187	c1106	绍兴	0.63682	c1704	宜昌	0.60126	c2502	曲靖	0.5978
c0602	大连	1.23958	c1110	台州	0.88326	c1801	长沙	0.83302	c2701	西安	0.90677
c0603	鞍山	0.99806	c1201	合肥	0.72409	c1802	株洲	0.69862	c2702	铜川	0.60781
c0604	抚顺	0.65054	c1202	芜湖	0.66978	c1803	湘潭	0.67409	c2703	宝鸡	0.60846
c0605	本溪	0.59309	c1205	马鞍山	0.60986	c1806	岳阳	0.80214	c2704	咸阳	0.59409
c0607	锦州	0.67877	c1301	福州	0.82782	c1807	常德	0.93969	c2706	延安	0.61781
c0701	长春	1.64336	c1302	厦门	1.06117	c1808	张家界	0.62659	c2801	兰州	0.62504
c0702	吉林	0.58292	c1305	泉州	0.8142	c1901	广州	1.95591	c2803	金昌	0.62283
c0801	哈尔滨	0.8403	c1401	南昌	0.98668	c1902	韶关	0.62449	c3001	银川	0.58968
c0802	齐齐哈尔	0.62836	c1404	九江	0.64682	c1903	深圳	2.99697	c3002	石嘴山	0.56872
c0806	大庆	1.9518	c1501	济南	1.19891	c1904	珠海	0.98615	c3101	乌鲁木齐	0.73596
c0810	牡丹江	0.6424	c1502	青岛	1.12994	c1905	汕头	0.76707	c3102	克拉玛依	0.69322

附录表 C 省级边际减排成本 (2001-2008)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	省份均值	排序
北京	5223	6960	8182	10381	12141	14799	23507	39241	15054	2
天津	1754	1813	1968	2157	2433	2612	3018	3548	2413	3
河北	579	595	618	652	711	746	800	813	689	10
山西	577	578	602	613	640	676	757	760	650	14
内蒙古	500	473	487	516	546	591	632	681	553	18
辽宁	638	634	643	672	714	766	839	917	728	7
吉林	509	512	646	671	822	741	774	802	685	11
黑龙江	640	687	700	677	689	713	754	777	705	8
上海	-	8312	9406	11526	32989	19908	55799	-	22990	1
江苏	577	593	618	656	718	774	834	859	704	9
浙江	514	528	561	594	639	715	788	851	649	15
安徽	445	447	458	472	488	515	546	581	494	24
福建	511	554	579	618	655	709	782	823	654	12
江西	458	458	471	493	513	543	550	565	506	23
山东	545	558	573	603	661	704	759	803	651	13
河南	499	510	520	537	559	570	597	615	551	19
湖北	883	901	960	1021	1108	1107	1207	1332	1065	5
湖南	420	428	431	444	458	470	524	546	465	26
广东	651	701	763	826	888	1159	1296	1416	962	6
广西	447	423	433	444	483	476	480	497	460	27
重庆	1137	1199	1275	1399	1463	1781	2063	2330	1581	4
四川	514	532	540	556	579	614	641	682	582	17
贵州	465	477	481	497	513	542	558	569	513	22
云南	544	554	582	617	618	674	733	754	634	16
陕西	468	478	493	502	516	531	556	583	516	21
甘肃	461	467	474	485	491	497	505	518	487	25
宁夏	391	393	404	421	425	431	448	448	420	28
新疆	482	490	492	500	514	529	553	565	516	20

附录表 D 城市边际减排成本 (2001-2008)

城市名称	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	均值	排序
北京市	5223	6960	8182	10381	12141	14799	23507	39241	15054	2
天津市	1754	1813	1968	2157	2433	2612	3018	3548	2413	5
石家庄市	721	728	786	829	863	909	970	986	849	22
唐山市	669	718	758	832	998	1087	1195	1237	937	18
秦皇岛市	443	446	453	464	469	479	502	510	471	72
邯郸市	621	643	648	673	730	748	812	796	709	29
保定市	439	441	444	462	496	506	521	539	481	66
太原市	866	833	883	891	952	997	1143	1168	966	15
大同市	551	553	560	584	573	586	609	623	580	44
阳泉市	429	438	440	447	467	472	485	489	458	75
长治市	461	487	527	529	568	650	792	761	597	43
呼和浩特市	455	461	471	516	549	589	609	656	538	52
包头市	533	544	569	603	648	732	807	895	666	34
赤峰市	512	414	421	430	441	452	480	492	455	76
沈阳市	977	976	980	1038	1134	1300	1491	1707	1200	9
大连市	821	834	882	941	1009	1086	1249	1447	1033	13
鞍山市	625	612	617	642	661	690	733	768	669	33
抚顺市	502	488	491	506	516	529	543	552	516	55
本溪市	473	463	465	473	529	551	570	569	511	56
锦州市	431	429	423	433	439	441	450	458	438	83
长春市			773	803	1095	912	954	994	922	19
吉林市	509	512	520	539	549	571	593	610	550	49
哈尔滨市	1028	1197	1231	1121	1117	1158	1238	1281	1171	11
齐齐哈尔市	488	490	488	475	495	505	523	523	498	61
大庆市	642	655	678	713	746	790	845	892	745	28
牡丹江市	402	405	403	399	400	400	410	412	404	95
上海市		8312	9406	11526	32989	19908	55799		22990	1
南京市	951	988	1031	1103	1210	1325	1449	1580	1204	8
无锡市	643	662	705	773	847	935	1054	1147	846	23
徐州市	596	604	621	648	728	730	750	645	665	35
常州市	458	484	493	507	534	560	594	608	530	54
苏州市	655	678	742	836	995	1169	1289	1315	960	17
南通市	459	465	477	495	506	521	542	561	503	59
连云港市	400	404	407	412	430	446	451	468	427	89
扬州市	454	459	465	473	494	507	547	546	493	63

城市名称	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	均值	排序
杭州市	835	868	924	989	1131	1358	1573	1825	1188	10
宁波市	671	683	746	794	832	974	1121	1202	878	20
温州市	475	497	542	567	580	626	658	671	577	45
嘉兴市	407	418	432	455	506	543	565	572	487	65
湖州市	392	398	409	439	456	491	513	529	453	77
绍兴市	397	402	424	448	481	512	525	537	466	74
台州市	421	427	447	466	486	501	562	623	491	64
合肥市	497	499	515	533	557	603	643	688	567	46
芜湖市	409	411	418	430	440	461	479	507	444	81
马鞍山市	428	431	441	452	465	480	515	549	470	73
福州市	589	594	607	650	679	725	811	879	692	30
厦门市		626	668	718	782	866	963	994	802	24
泉州市	433	442	461	487	505	535	572	596	504	58
南昌市	537	534	549	573	600	633	669	698	599	40
九江市	379	381	394	413	426	453	430	431	413	91
济南市	755	781	814	855	983	1052	1181	1263	960	16
青岛市	735	758	770	808	878	947	1011	1080	873	21
淄博市	635	653	673	709	807	879	942	995	787	26
枣庄市	488	490	494	514	529	557	589	604	533	53
烟台市	519	547	573	614	705	760	836	885	680	32
潍坊市	466	473	484	521	566	599	639	669	552	48
济宁市	472	469	484	508	536	563	634	704	546	50
泰安市	428	431	436	456	483	506	519	530	474	71
威海市	408	416	427	442	464	476	486	501	453	78
郑州市	668	700	726	772	824	826	912	922	794	25
开封市	393	391	392	392	397	402	399	395	395	97
洛阳市	537	547	547	562	610	635	652	697	598	42
平顶山市	489	496	507	518	538	563	582	617	539	51
安阳市	465	470	483	499	498	509	542	554	502	60
焦作市	445	457	467	482	485	487	494	506	478	69
武汉市	1309	1337	1455	1567	1727	1719	1921	2162	1650	6
宜昌市	457	464	465	475	490	495	492	503	480	67
长沙市	586	610	618	651	687	727	773	844	687	31
株洲市	422	421	429	448	460	463	474	478	449	79
湘潭市	412	414	416	425	439	450	464	484	438	84
岳阳市	394	411	408	417	429	439	462	471	429	87

城市名称	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	均值	排序
常德市	380	390	392	397	408	420	445	454	410	93
张家界市	324	323	322	326	326	324			324	104
广州市	1734	1887	2159	2431	2721	3015	3550	4064	2695	3
韶关市	400	401	402	418	423	443	467	460	427	90
深圳市						2373	2671	2957	2667	4
珠海市	483	507	539	574	607	646	698	734	599	41
汕头市	431	430	469	480	485	505	511	521	479	68
佛山市	445	566	579	608	636	673	707	701	614	39
湛江市	414	416	432	444	453	459	468	474	445	80
南宁市	476	490	498	527	647	588	609	639	559	47
柳州市	477	469	493	498	513	536	517	546	506	57
桂林市	390	396	400	406	412	416	422	421	408	94
北海市		338	341	346	361	365	370	382	358	100
重庆市	1137	1199	1275	1399	1463	1781	2063	2330	1581	7
成都市	822	890	909	954	1008	1104	1224	1369	1035	12
攀枝花市	449	450	456	466	488	502	486	493	474	70
泸州市	371	375	378	383	389	403	408	421	391	98
绵阳市	416	412	418	421	433	446	445	445	429	86
贵阳市	567	581	594	621	645	662	701	721	636	36
遵义市	362	372	367	372	380	422	415	418	389	99
昆明市	686	692	725	720	749	831	882	892	772	27
曲靖市	402	417	439	513	487	516	585	615	497	62
西安市	841	882	916	953	1022	1082	1183	1264	1018	14
铜川市	346	352	352	351	352	352	356	376	355	101
宝鸡市	408	410	442	446	448	449	459	472	442	82
咸阳市	414	414	424	428	424	432	443	459	429	85
延安市	328	329	330	331	335	338	339	342	334	103
兰州市	578	590	604	619	633	643	657	674	625	38
金昌市	343	343	345	350	349	351	354	361	349	102
银川市	398	400	425	430	433	441	445	453	428	88
石嘴山市	384	385	383	411	416	422	452	444	412	92
乌鲁木齐市	576	593	596	606	625	648	686	704	629	37
克拉玛依市	388	387	389	394	404	410	421	426	402	96

附录表 E 变量相关系数 (Spearman 相关系数和显著度)

	<i>y_mac</i>	<i>x_rgdg</i>	<i>x_2c</i>	<i>x_3c</i>	<i>x_fdi</i>	<i>x_urban</i>	<i>x_popden</i>	<i>x_CO₂int</i>	<i>x_rCO₂</i>	<i>x_CO₂den</i>	<i>x_rroad</i>	<i>x_rbus</i>	<i>x_grecov</i>	<i>x_rnet</i>
<i>y_mac</i>	1													
<i>x_rgdg</i>	0.5378	1												
<i>x_2c</i>	0		1											
<i>x_3c</i>	-0.1128	0.0424		1										
<i>x_fdi</i>	0.0038	0.278			1									
<i>x_urban</i>	0.2633	0.1186	-0.9362			1								
<i>x_popden</i>	0	0.0023	0				1							
<i>x_CO₂int</i>	0.3662	0.5102	-0.0747	0.1641				1						
<i>x_rCO₂</i>	0	0	0.0558	0					1					
<i>x_CO₂den</i>	0.2366	0.3273	0.04	0.1398	0.1082					1				
<i>x_rroad</i>	0	0	0.3065	0.0003	0.0055						1			
<i>x_rbus</i>	0.247	0.1791	0.02	0.1253	0.2578	0.3834						1		
<i>x_grecov</i>	0	0	0.6097	0.0013	0	0							1	
<i>x_rnet</i>	-0.3579	-0.4759	0.3499	-0.3833	-0.4103	-0.0466	-0.0172							1
	0	0	0	0	0	0.2331	0.6605							
	-0.0555	0.1143	0.4476	-0.3774	-0.1565	0.164	0.0909	0.7903						
	0.1557	0.0034	0	0	0.0001	0	0.0197	0						
	0.0915	0.2165	0.3169	-0.1649	0.102	0.3312	0.687	0.5229	0.7418					
	0.0189	0	0	0	0.0089	0	0	0	0					
	0.2597	0.6502	0.0856	0.0361	0.449	0.3025	0.1812	-0.2162	0.1987	0.2785				
	0	0	0.0283	0.3557	0	0	0	0	0	0				
	0.3307	0.3568	-0.195	0.3548	0.0778	0.5302	0.1296	-0.161	0.0501	0.0975	0.2516			
	0	0	0	0	0.0462	0	0.0009	0	0.1992	0.0124	0			
	0.0973	0.3436	0.0915	-0.0514	0.2961	0.2006	0.0933	-0.0745	0.1539	0.1759	0.3834	0.0116		
	0.0125	0	0.019	0.1884	0	0	0.0168	0.0562	0.0001	0	0	0.7661		
	0.5128	0.6789	-0.1392	0.3075	0.4469	0.3611	0.3488	-0.367	0.0209	0.2442	0.4994	0.3712	0.2654	
	0	0	0.0003	0	0	0	0	0	0.5927	0	0	0	0	1

附录表 F 解释变量多重共线性检验

Variable	VIF	VIF	VIF	VIF
<i>x_rgdg</i>	4.95E+13	4.95E+13	3.96	3.84
<i>x_2c</i>	19.95	1.99E+01	19.94	1.44
<i>x_3c</i>	20.17	20.14	20.14	
<i>x_fdi</i>	1.4	1.38	1.38	1.38
<i>x_urban</i>	1.97	1.97	1.97	1.78
<i>x_popden</i>	4752.33	1.49	1.49	1.34
<i>x_CO₂int</i>	1.16E+14	1.16E+14	1.78	1.75
<i>x_rCO₂</i>	9.26E+13	9.26E+13		
<i>x_CO₂den</i>	11340.83			
<i>x_rroad</i>	2.16	2.15	2.15	2.15
<i>x_rbus</i>	1.98	1.97	1.97	1.84
<i>x_grecov</i>	1.25	1.25	1.25	1.22
<i>x_rnet</i>	2.33	2.33	2.33	2.29
Mean VIF	1.99E+13	2.15E+13	5.3	1.9

九、参考文献

- [1] Adrien, V.-S., Stéphane, H., 2011. When Starting with the Most Expensive Option Makes Sense: Use and Misuse of Marginal Abatement Cost Curves, Policy Research Working Paper. World Bank.
- [2] Aigner, D. J., Chu, S. F., 1968. On estimating the industry production function. *The American Economic Review* 58 (4), 826-839.
- [3] Baumol, W. J., Oates, W. E., 1988. *The theory of environmental policy*. Cambridge Univ Pr.
- [4] Bohm, P., Larsen, B., 1994. Fairness in a tradeable-permit treaty for carbon emissions reductions in Europe and the former Soviet Union. *Environmental and Resource Economics* 4 (3), 219-239.
- [5] Chambers, R., et al., 1998. Profit, directional distance functions, and Nerlovian efficiency. *Journal of Optimization Theory and Applications* 98 (2), 351-364.
- [6] Chen, W., 2005. The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China MARKAL-MACRO modeling. *Energy Policy* 33, 885-896.
- [7] Choi, Y., et al., 2012. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: A slacks-based efficiency measure. *Applied Energy* 98 (10), 198-208.
- [8] Chung, Y. H., et al., 1997. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management* 51 (3), 229-240.
- [9] Criqui, P., et al., 1999. Marginal abatement costs of CO₂ emission reductions, geographical flexibility and concrete ceilings: an assessment using the POLES model. *Energy Policy* 27 (10), 585-601.
- [10] Dasgupta, S., et al., 2001. Water pollution abatement by Chinese industry: cost estimates and policy implications. *Applied Economics* 33 (4), 547-557.
- [11] De Cara, S., Jayet, P.-A., 2011. Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement. *Ecological Economics* 70 (9), 1680-1690.
- [12] Dhakal, S., 2009. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy* 37 (11), 4208-4219.
- [13] Du, L.-M., et al., 2012. Economic development and carbon dioxide emissions in China:

- Provincial panel data analysis. *China Economic Review* 23 (2), 371-384.
- [14] Easterly, W., et al., 1993. Good policy or good luck? *Journal of Monetary Economics* 32 (3), 459-483.
- [15] Ellerman, A. D., Decaux, A., 1998. Analysis of post-Kyoto CO₂ emissions trading using marginal abatement curves.
- [16] Färe, R., Grosskopf, S., 1998. Shadow Pricing of Good and Bad Commodities. *American Journal of Agricultural Economics* 80 (3), 584-590.
- [17] Färe, R., et al., 1993. Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach. *The review of economics and statistics* 75 (2), 374-380.
- [18] Färe, R., et al., 2005. Characteristics of a polluting technology: theory and practice. *Journal of Econometrics* 126 (2), 469-492.
- [19] Färe, R., et al., 2001. Shadow Prices of Missouri Public Conservation Land. *Public Finance Review* 29 (6), 444-460.
- [20] Färe, R., et al., 2010. On functional form representation of multi-output production technologies. *Journal of Productivity Analysis* 33 (2), 81-96.
- [21] Fischer, C., Morgenstern, R. D., 2006. Carbon abatement costs: Why the wide range of estimates? *The Energy Journal* 27 (2), 73-86.
- [22] Glaeser, E. L., Kahn, M. E., 2010. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics* 67 (3), 404-418.
- [23] Guo, X.-D., et al., 2011. Evaluation of potential reductions in carbon emissions in Chinese provinces based on environmental DEA. *Energy Policy* 39 (5), 2352-2360.
- [24] Hailu, A., Veeman, T. S., 2000. Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1959-1994: An Input Distance Function Approach. *Journal of Environmental Economics and Management* 40 (3), 251-274.
- [25] Hallegatte, S., et al., 2011. The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: a conceptual framework. *Climatic Change* 104 (1), 51-87.
- [26] Hettige, H., et al., 1996. Determinants of pollution abatement in developing countries: Evidence from South and Southeast Asia. *World Development* 24 (12), 1891-1904.
- [27] Hoeller, P., Coppel, J., 1992. Energy taxation and price distortions in fossil fuel markets: some implications for climate change policy. *Organisation for Economic Co-operation and Development*.

- [28] IEA, 2007. World energy outlook 2007—China and India insights. OECD/IEA, Paris.
- [29] IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [30] Kesicki, F., Strachan, N., 2011. Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy* 14 (8), 1195-1204.
- [31] King, R. G., Levine, R., 1994. Capital fundamentalism, economic development, and economic growth. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 40 (0), 259-292.
- [32] Klepper, G., Peterson, S., 2006. Marginal abatement cost curves in general equilibrium: The influence of world energy prices. *Resource and Energy Economics* 28 (1), 1-23.
- [33] Kousky, C., H.Schneider, S., 2003. Global climate policy: will cities lead the way? *Climate Policy* 3 (4), 359-372.
- [34] Maradan, D., Vassiliev, A., 2005. Marginal Costs of Carbon Dioxide Abatement: Empirical Evidence from Cross-Country Analysis. *REVUE SUISSE D ECONOMIE ET DE STATISTIQUE* 141 (3), 377.
- [35] Marklund, P.-O., Samakovlis, E., 2007. What is driving the EU burden-sharing agreement: Efficiency or equity? *Journal of Environmental Management* 85 (2), 317-329.
- [36] McKinsey&Company, 2009. Pathways to a Low-Carbon Economy: version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve.
- [37] Metz, B., et al., 2007. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [38] Murty, M., et al., 2007. Measuring environmental efficiency of industry: a case study of thermal power generation in India. *Environmental and Resource Economics* 38 (1), 31-50.
- [39] Newell, R. G., Stavins, R. N., 2003. Cost Heterogeneity and the Potential Savings from Market-Based Policies. *Journal of Regulatory Economics* 23 (1), 43-59.
- [40] Park, H., Lim, J., 2009. Valuation of marginal CO₂ abatement options for electric power plants in Korea. *Energy Policy* 37 (5), 1834-1841.
- [41] Price, L., et al., 2011. Assessment of China's energy-saving and emission-reduction accomplishments and opportunities during the 11th Five Year Plan. *Energy Policy* 39, 2165-2178.
- [42] Rezek, J. P., Campbell, R. C., 2007. Cost estimates for multiple pollutants: A maximum

- entropy approach. *Energy Economics* 29 (3), 503-519.
- [43] Salnykov, M., Zelenyuk, V., 2005. Estimation of environmental efficiencies of economies and shadow prices of pollutants in countries in transition. EERC Research Network, Russia and CIS.
- [44] Springer, U., 2003. The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies. *Energy Economics* 25 (5), 527-551.
- [45] Vardanyan, M., Noh, D.-W., 2006. Approximating pollution abatement costs via alternative specifications of a multi-output production technology: A case of the US electric utility industry. *Journal of Environmental Management* 80 (2), 177-190.
- [46] Wei, C., et al., 2013. An empirical analysis of the CO₂ shadow price in Chinese thermal power enterprises. *Energy Economics* forthcoming.
- [47] World Bank, 2009. Mid-term evaluation of China's 11th five year plan.
- [48] 世界银行, 2012. 中国可持续性低碳城市发展. 世界银行, 北京.
- [49] 刘明磊, et al., 2011. 我国省级碳排放绩效评价及边际减排成本估计:基于非参数距离函数方法. *中国软科学* (3), 106-114.
- [50] 刘树成, 2008. 渐进式, 一条符合中国国情的改革之路, 光明日报, 北京.
- [51] 张军, et al., 2004. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000. *经济研究* (10), 35-44.
- [52] 张金萍, et al., 2010. 城市 CO₂ 排放结构与低碳水平测度——以京津沪渝为例. *地理科学* (6), 874-879.
- [53] 涂正革, 2008. 环境、资源与工业增长的协调性. *经济研究* (02), 93-105.
- [54] 涂正革, 2009. 工业二氧化硫排放的影子价格: 一个新的分析框架. *经济学 (季刊)* 9 (1), 259-282.
- [55] 涂正革, 2012. 中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析. *中国社会科学* (03), 78-94.
- [56] 涂正革, 刘磊珂, 2011. 考虑能源、环境因素的中国工业效率评价——基于 SBM 模型的省级数据分析. *经济评论* (2), 55-65.
- [57] 王兵, et al., 2010. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长. *经济研究* (5), 95-109.
- [58] 王兵, et al., 2011. 环境约束下中国省际全要素能源效率实证研究. *经济评论* (4), 31-43.
- [59] 王群伟, et al., 2011. 基于环境生产技术的二氧化碳规制成本研究——以我国 28 个省区

- 的面板数据为例. 科研管理 (2), 114-121.
- [60] 秦少俊, et al., 2011. 上海市火电企业二氧化碳减排成本估算——基于产出距离函数方法. 工程管理学报 25 (6), 704-708.
- [61] 胡鞍钢, et al., 2008. 考虑环境因素的省级技术效率排名(1999—2005). 经济学(季刊) (3), 933-960.
- [62] 蔡博峰, 2011. 中国城市二氧化碳排放研究. 中国能源 (6), 28-32.
- [63] 蔡博峰, 2012a. 中国城市温室气体清单研究. 中国人口·资源与环境 (1), 21-27.
- [64] 蔡博峰, 2012b. 基于 0.1°网格的中国城市 CO₂ 排放特征分析. 中国人口·资源与环境 22 (10), 151-157.
- [65] 袁鹏, 程施, 2011. 我国工业污染物的影子价格估计. 统计研究 (9).
- [66] 许聪, et al., 2011. 城市 CO₂ 排放量审核方法初探. 环境科学导刊 30 (2), 19-21.
- [67] 谢士晨, et al., 2009. 上海市能源消费 CO₂ 排放清单与碳流通图. 中国环境科学 (11), 1215-1220.
- [68] 陈诗一, 2010a. 中国的绿色工业革命: 基于环境全要素生产率视角的解释 (1980-2008). 经济研究 (11), 21-34.
- [69] 陈诗一, 2010b. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法. 世界经济 (8), 93-111.
- [70] 陈诗一, 2010c. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法. 世界经济 (8).
- [71] 陈诗一, 2010d. 节能减排与中国工业的双赢发展: 2009—2049. 经济研究 (3), 129-143.
- [72] 陈诗一, 2011. 边际减排成本与中国环境税改革. 中国社会科学 (3), 85-100.
- [73] 高鹏飞, et al., 2004. 中国的二氧化碳边际减排成本. 清华大学学报(自然科学版) 44 (9), 1192-1195.
- [74] 魏楚, et al., 2011. 环境敏感性生产率研究综述. 世界经济 5, 136-160.