

中国碳排放交易市场的覆盖范围与行业选择

——基于多目标优化的方法

张继宏, 郅若平, 齐绍洲

摘 要: 如何确定覆盖范围与行业选择是建设碳交易市场的关键问题, 覆盖范围与行业选择同时影响交易市场的活跃性、减排成本及减排效果。在非参数的方向性距离函数方法测算出我国 40 个工业行业的二氧化碳减排成本基础上, 通过多目标优化的方法仿真出我国碳交易市场的覆盖范围应占我国二氧化碳总排放量的 45%~50%, 即约 50 亿吨可达到市场活跃性、减排成本与减排效果三目标的最佳平衡点。主要的覆盖行业分别为电力、热力生产和供应业, 石油加工、炼焦和核燃料加工业, 黑色金属冶炼和压延加工业, 非金属矿物制品业, 化学原料和化学制品制造业, 有色金属冶炼和压延加工业, 造纸和纸制品业, 农副食品加工业以及食品制造业。该方法可为国家或地方政府优化碳交易市场纳入行业与企业提供方法学的参考。

关键词: 碳交易市场; 减排成本; 覆盖范围; 行业选择; 多目标优化

中图分类号: F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2019)01-0034-12

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2019.01.004

一、引 言

为驱动经济转型、生态文明建设与实现国际承诺, 我国政府先后出台多项政策以推动碳交易市场的建设。2011 年发布了《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》, 随后北京、上海、天津、重庆、深圳、广东与湖北 7 个省市于 2013 年至 2014 年间先后启动了碳交易试点工作。在试点基础上, 我国政府于 2016 年先后发布《国家发展改革委办公厅关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知》(后文简称为《通知》)与《“十三五”控制温室气体排放工作方案》两个重要文件, 明确提出建设全国碳交易市场。2017 年底, 《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》发布, 标志着全国碳交易体系建设正式启动。

碳交易体系包括覆盖范围、行业选择、总量目标、配额分配、交易管理、MRV^①(排放监测、报告与核查)条例与法律框架。其中, 碳交易的覆盖范围与行业选择直接决定了碳交易市场未来的运行效率。虽然在《通知》中, 明确了全国碳交易市场第一阶段将涵盖石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、电力、航空等重点排放行业, 参与主体为八大重点行业中 2013 至 2015 年任意一年综

基金项目: 清洁发展机制(CDM)赠款项目“武汉市温室气体排放峰值预测与减排路径研究”(2014037)

作者简介: 张继宏, 武汉大学质量发展战略研究院副教授(湖北 武汉 430072); 郅若平, 武汉大学质量发展战略研究院硕士研究生

^① MRV 是 Monitoring(监测)、Reporting(报告)与 Verification(核查)的缩写。可监测、可报告、可核查是国际社会对温室气体排放和减排监测的基本要求, 也是碳交易市场建设的基础。

合能源消费总量达1万吨标准煤以上(含)的企业法人单位或独立核算企业单位,但是在2017年全国碳交易市场启动时,由起初的8个重点行业缩减为数据基础较好、产品结构单一的电力、水泥与电解铝3个行业,最终仅纳入了MRV基础最好的火电行业。由于我国地区发展不平衡,各地行业分布存在较大差异,为弥补这一不足,本文基于多目标优化提出一个一般性方法,以优化碳交易市场的覆盖范围与行业选择,同时本文使用国家层面二位数工业行业的数据进行碳市场覆盖范围与行业选择的仿真与模拟。

二、文献综述

Wettestad等^[1]、Kallbekken等^[2]在研究欧盟碳交易市场的成本问题时指出,如何确定碳交易市场覆盖范围与行业选择是一个重要的问题。在贸易部门的排放比例问题、纳入碳交易市场行业的数据真实性问题以及强制纳入企业的成本收益问题中,覆盖范围与行业选择都是决定性因素^{[3][4]}。但减排成本是决定覆盖范围与行业选择的关键问题,减排成本不仅决定了碳交易市场带来的社会影响,而且减排成本的差异性也决定了碳交易市场的活跃度。Betz等^[5]通过调查减排成本数据对碳交易市场进行了经验分析,发现减排成本对碳市场的交易量有显著影响。在理论模型方面,Dijkstra等^[6]发现仅当纳入交易的行业与非纳入交易的行业间的边际收益(边际成本)不同时,扩大碳交易市场的覆盖范围对国家或区域才都是有利的。

由于碳交易市场不能覆盖所有的部门,一些市场参与者想操纵市场,从而导致效率下降。Böhringer等^{[7][8]}发现,每个参与者都会战略性地使用其配额以影响碳价格,使履约成本最小化,但这会导致整个市场效率下降。Hahn^[9]最先指出,具有市场能力的参与者将通过操纵价格达到配额数量偏离市场均衡数量,从而导致市场效率损失。Helm^[10]研究了非合作国家碳交易市场覆盖行业的战略划分问题。由于交易市场不可能覆盖所有的行业,更多的学者主要实证地研究了EU ETS第一阶段与第二阶段配额分配的结构问题。在这一过程中,欧盟成员国可以在各部门间分配减排的责任目标后再确定分配计划,并向欧盟委员会提交报告。由于信息不对称,尤其是关于补贴价格与减排潜力的信息不对称,会导致欧盟分配方案的效益受损^[11]。在一个权力下放的结构中,每个地区或国家都会通过调整交易行业与非交易行业的结构尽量减少其履约成本^[12]。对于中国碳交易市场覆盖范围与行业选择的研究还较少。彭斯震等^[13]、范英等^[14]、谢晓闻等^[15]、邵鑫潇等^[16]、曹静等^[17]、Frankhauser等^{[18][19]}对于中国碳交易市场的覆盖范围与行业选择给出了一些原则性建议。Alex认为,对于地区间发展不平衡导致地区覆盖范围与行业选择的差异应给予足够的重视^[20]。崔连标等估计了碳交易市场成本节约的影响,但是其假定是将所有行业全部纳入碳交易市场^[21]。Fan^[22]借鉴Böhringer等^[8]的模型,仿真了中国碳交易市场的覆盖范围与行业选择,但是此模型仅以减排成本最小化为目标进行模拟。

综上所述,以上研究要么以成本最小化为目标来确定碳交易市场的覆盖范围与行业选择,要么是给出碳市场覆盖范围与行业选择的原则性建议。建立碳交易市场的基本目的是通过市场化手段完成碳减排,不仅要考虑减排成本问题,还要考虑碳市场本身的发展问题。这是因为当碳交易市场本身发展不成熟的时候,无法激发企业积极创新,使其在达到碳减排的同时从交易中获得补偿。中国的排污权交易市场就是因为本身发展的不完善,导致驱动企业绿色创新的动力不足,没有成为一种有效的减排措施^[23]。本文的主要贡献是在分析建立碳交易市场目的的基础上,提出一个多目标优化的方法,通过构建数学模型,寻找碳交易市场最优的覆盖范围与行业选择,以期在碳交易市场活跃度、减排成本最小化与减排量最大化三个目标间达到最佳平衡点。

三、理论模型

(一) 基本模型

依据公平性原则,理论上全部行业或企业,甚至个人都应纳入到碳排放权交易市场之内。然而,如果纳入一些排放量很小的行业或企业,其减排贡献率不但低而且增加了碳交易市场的交易与管理成本。此外,通过欧盟 EU ETS 与我国 7 个碳交易试点的情况,可以发现碳交易市场也不宜覆盖所有的行业^[24],由于碳交易市场建立在碳排放的历史数据基础之上,因此只能将 MRV 基础较好的行业首先纳入其中。即使具有较好 MRV 基础的行业,也并非需要全部纳入其中^[25]。建立碳交易市场的目的是通过市场交易来降低减排成本,促进碳相关产业,诸如碳资产管理、碳管理咨询等的发展。但是如果覆盖范围扩大,减排成本的差异不仅不会增大,反而可能会减小,不利于碳排放权市场的建设与发展。

因此,碳交易市场的覆盖范围及行业选择的确定应尽可能使碳市场交易活跃度最大化、碳减排成本最小化与减排量最大化三个目标同时达到,但这往往不可能实现,那么就需要寻找一个妥协解,使得该妥协解的效率损失最小。基本模型设置如下:

$$\min D = (Z_{emi} - Z_{emi}^*)^2 + (Z_{cost} - Z_{cost}^*)^2 + (Z_{act} - Z_{act}^*)^2 \quad (1)$$

其中, D 表示欧几里得空间距离,代表效率损失的度量。 Z_{cost} 、 Z_{emi} 、 Z_{act} 分别表示减排成本、碳交易市场的减排总量以及碳交易市场交易的活跃度。 Z_{cost}^* 、 Z_{emi}^* 、 Z_{act}^* 分别表示减排成本、减排量与市场交易活跃度的最优值或者理想值。公式(1)可写为:

$$\min_{C \in [0, 100\%]} D = (Z_{emi}(C) - Z_{emi}^*)^2 + (Z_{cost}(C) - Z_{cost}^*)^2 + (Z_{act}(C) - Z_{act}^*)^2 \quad (2)$$

其中, $C \in [0, 100\%]$ 表示纳入碳交易的配额总量占总排放量的比例,即覆盖范围。由公式(2)可知,右边每一项达到最小值,公式(2)即可达到最小值。这需要首先确定 Z_{cost}^* 、 Z_{emi}^* 与 Z_{act}^* 三个最优值。

(二) 对 Z_{cost}^* 、 Z_{emi}^* 与 Z_{act}^* 的讨论

Z_{emi}^* 表示减排量的无约束条件最优值,最大减排量就是全社会的总排放量, $z_{emi}^* = z_{emi}(100\%)$; Z_{cost}^* 表示减排成本的无约束条件最优值; Z_{act}^* 表示市场活跃度的无约束条件最优值,减排成本的方差越大,表明减排成本的离散度越高,产生交易的概率就会越大。市场活跃度模型可表示为:

$$\begin{aligned} \max_{p_i} \text{Var}(c) &= \sum_{i=1}^n p_i (c_i - (\sum_{i=1}^n p_i c_i))^2 \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m p_i &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\text{Var}(c)$ 表示减排成本方差, n 表示覆盖行业的数量, c_i 代表行业 i 的减排成本, p_i 代表行业二氧化碳排放量占纳入交易市场总排放量(或总配额)的比例。

根据公式(3)可知,要求得 Z_{act}^* ,首先需要核算各行业的二氧化碳排放量,其次求解各行业的减排成本。接下来在本节先讨论碳减排成本的理论模型,而后在第四部分,使用我国两位数工业行业数据核算二氧化碳排放量,并根据减排成本的理论模型估算各行业减排成本,再根据公式(3)求解 Z_{act}^* ,最后将 Z_{act}^* 代入公式(2),而后进行求解。

(三) 碳减排成本理论模型

近年来,方向性距离函数在污染物减排成本或影子价格估计上得到了广泛应用^[26]。参照 Färe 等^[27]的定义,假设 $y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \in R_+^m$ 表示期望产出向量,如 GDP、工业增加值等; $b = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in R_+^n$ 表示非期望产出向量,如二氧化碳、二氧化硫等; $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$

$\in R_+^m$ 表示技术条件不变情况下的投入向量,如资本存量、能源消费量、劳动力投入等。此外,由一个凸的有界闭集 $P(x)$ 来表示所有可能产出的集合,记为 $P(x) = \{(y, b) \in R_+^{m+n}; x \text{ 能生产 } (y, b)\}$ 代表环境技术的可能产出集合。 $P(x)$ 具有如下性质:(1) 当 $x=0$ 时,则有 $y=0$ 。(2) 投入是强可处置性的,即如果投入增加了,产出不会减少。也就是说,如果有 $x' \leq x$,那么 $P(x') \subseteq P(x)$ 。(3) 期望产出具有强可处置性,即如果 $(y, b) \in P(x)$ 且 $y' \leq y$,则有 $(y', b) \in P(x)$ 。(4) 期望产出与非期望产出满足联合弱可处置性,即工厂同等比例地同时缩减期望产出与非期望产出是可能的。也就是说,如果 $(y, b) \in P(x)$,并且 $0 \leq \theta \leq 1$,那么 $(\theta y, \theta b) \in P(x)$ 。(5) 期望产出满足强可处置性,即对“好”产品产出量的减少没有限制,可以在其他条件不变的情况下降低“好”产品的产出量。如果 $(y, b) \in P(x)$,并且 $(y_0, b) \leq (y, b)$,那么 $(y_0, b) \in P(x)$ 。

令 $g = (g_y, g_b)$ 为方向性向量,并且 $g \neq 0$,环境方向性距离函数定义为:

$$\vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b) = \max\{\beta: (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x)\}$$

从某种意义上来说,产出距离函数的值可以反映企业的生产效率。如果 $\vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b) = 0$,说明企业在 $(g_y, -g_b)$ 方向上有效率;如果 $\vec{D}_0 > 0$,说明企业在该方向上存在一定程度的无效率。

根据 Lee 等^[28]、Khoshnevis^[29],求解 $\vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b)$ 可转化成线性规划问题,具体表示为:

$$\begin{aligned} \vec{D}_0(x_i, y_i, b_i; y_i, -b_i) &= \max_{\beta, \lambda} \beta \\ \text{s. t. } & Y\lambda \geq (1 + \beta)y_i; \\ & B\lambda \leq (1 - \beta)b_i; \\ & X\lambda \leq x_i; \\ & I^T \lambda \leq 1, \beta, \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, X 、 Y 和 B 分别代表所有决策单位的投入矩阵和好、坏产出矩阵。 I 为单位列向量, λ 为强度列向量,表示 1 个单位的资源在多大程度上被用来投入生产,即把前沿内决策单位映射到该生产前沿之上的权重。Lee 等^[28]提出了利用基于 DEA(数据包络分析)的方向距离函数测度非期望产出经济价值的方法,并把计算结果作为非期望产出的影子价格或边际减排成本。根据包络定理,二氧化碳影子价格模型为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b)}{\partial y} &= \frac{-P}{Pg_y + Qg_b} \leq 0 \\ \frac{\partial \vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b)}{\partial b} &= \frac{-Q}{Pg_y + Qg_b} \geq 0 \end{aligned}$$

其中, $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 表示期望产出的价格向量, $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 表示非期望产出的价格向量。如果期望产出 m , p_m 给定,则非期望产出 q_j 价格可按(5)式计算:

$$q_j = -p_m \left[\frac{\partial \vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b) \cdot \partial y_m}{\partial b_j \cdot \partial \vec{D}_0(x, y, b; g_y, g_b)} \right] \times \frac{\sigma_b}{\sigma_y}, j = 1, \dots, J \quad (5)$$

其中, (y_m, b_j) 是一个无效率行业沿着方向向量在生产前沿面上的对应点。根据 Färe 等^[27],距离函数对非期望产出及期望产出偏导数的比值表示在生产前沿面上两种产出的边际替代率,即要减少非期望产出所需放弃的期望产出量。本文中期望产出是行业 GDP ($p=1$),非期望产出是行业碳排放,(5)式计算结果的经济意义就是边际减排量所对应的行业 GDP 产出减少量,也就是经济

意义上的边际减排成本。

四、数据与仿真

（一）工业行业 CO₂ 排放量

1. 方法学与排放因子。与其他环境污染物不同，CO₂ 排放主要来源于化石能源燃烧排放与工业生产制程排放（主要为水泥生产），两项排放占总排放的 85% 左右^[30]。目前，计算各地区 CO₂ 排放量有两种基本做法：其一是“占比法”，通过计算各地区消耗化石能源与水泥产量占全国比例来推算碳排放量^[31]，而全国总体碳排放数据来自于美国能源部橡树岭国家实验室二氧化碳信息分析中心（CDIAC）或国际能源署（IEA）估算的中国 CO₂ 排放数据；其二是根据 IPCC（2006）的计算公式专门估算各省区 CO₂ 排放量^{[26][32][33]}。

本文主要参考方法二，估算各行业 CO₂ 排放量。在水泥工业生产过程中，从生料转化为熟料环节排放的二氧化碳约占整个水泥工业排放量的 2/3，因此对于非金属矿物制品行业应加入水泥生产所排放的二氧化碳量。估算水泥生产过程排放，首先要确定水泥熟料的碳排放因子。综合 Marland 等^[31]、李锴等^[33]与 IPCC（2006）^[34]并结合中国实际情况，本文选择中国水泥制程 CO₂ 排放因子为 0.395 4，即每生产一吨水泥因非化石燃料燃烧产生的 CO₂ 排放为 0.395 4 吨。水泥产量数据来自于《中国统计年鉴》。化石能源消费的碳排放主要由一次能源终端消费排放，因此，能源消费碳排放总量即为各类化石能源的消费终端消费（不包括作为原料的化石能源）、能源转换及能源损失所产生的相应碳排放。

化石能源消费活动的 CO₂ 排放量数据根据公式（6）估算而得：

$$E_{CO_2} = S_C \beta_C + S_O \beta_O + S_G \beta_G \quad (6)$$

其中， E_{CO_2} 表示各种能源消费产生的 CO₂ 排放总量。 S_C 、 S_O 和 S_G 分别表示煤炭、石油和天然气三种能源消费量； β_C 、 β_O 和 β_G 为相应煤炭、石油与天然气的 CO₂ 排放系数（如表 1 所示）。

表 1 二氧化碳排放系数

品种	煤炭	石油	天然气	水泥（万吨/万吨熟料）
万吨/万吨标准煤	2.741 2	2.135 8	1.626 2	0.395 4

数据来源：Marland 等^[31]、李锴等^[33]与 IPCC（2006）^[34]。

2. CO₂ 排放核算结果。根据国家工业行业分类，工业按照二位数分类又可分为 40 类行业。按照 2015 年《中国能源统计年鉴》分行业能源平衡表中各行业能源消费量进行二氧化碳排放核算，其中非金属矿物制品行业加上水泥生产过程排放如表 2 所示。

根据表 2 所示，其中二氧化碳排放前十的工业行业排放总和占全国工业行业排放总量的 97% 左右，且前十位的工业行业在前五年保持不变，分别是电力、热力生产和供应业，石油加工、炼焦和核燃料加工业，黑色金属冶炼和压延加工业，煤炭开采和洗选业，非金属矿物制品业，化学原料和化学制品制造业，有色金属冶炼和压延加工业，造纸和纸制品业，石油和天然气开采业、农副食品加工业以及食品制造业。

（二）工业行业减排成本测算

在工业行业层面，我国各工业行业需要资本存量和劳动作为投入，并且同时消耗一次能源进行生产，在产出 GDP 的同时，也会引起二氧化碳的排放。根据减排成本理论模型，选择各工业行业的能源、劳动力和工业中间投入品作为投入变量，期望产出与非期望产出分别为工业总产值与各行

表 2 2014 年工业行业 CO₂ 排放量

单位: 万吨

工业二位数行业	CO ₂ 排放量	工业二位数行业	CO ₂ 排放量
煤炭采选业	49 406. 30	医药制造业	1 639. 47
石油和天然气开采业	6 730. 18	化学纤维制造业	1 364. 62
黑色金属采选业	378. 76	橡胶制品业	1 612. 54
有色金属矿采选业	210. 92	塑料制品业	48 214. 19
非金属矿采选业	1 178. 56	橡胶和塑料制品业	57 739. 59
木材及竹材采运业	602. 11	非金属矿物制品业	12 630. 92
农副食品加工业	3. 60	黑色金属冶炼及压延加工业	835. 98
食品制造业	3 335. 17	有色金属冶炼及压延加工业	663. 09
饮料制造业	2 573. 05	金属制品业	952. 36
烟草加工业	1 461. 38	通用设备制造业	1 391. 05
纺织业	156. 16	专用设备制造业	677. 17
服装业	448. 87	交通运输设备制造业	1 053. 47
纺织服装、服饰业	153. 51	汽车制造业	610. 68
皮羽制品业	800. 63	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	69. 45
木材加工业	78. 91	电气机械及器材制造业	1 030. 57
家具制造业	8604. 75	计算机、电子与通信设备制造业	31. 46
造纸及纸制品业	81. 59	仪器仪表制造业	33. 59
印刷业	85. 99	电力热力生产和供应业	332 890. 10
文教体育用品制造业	198 841. 78	燃气生产和供应业	2 224. 09
石油加工及炼焦业	48 117. 04	水的生产和供应业	123. 82
废弃资源综合利用业	49 406. 30	化学原料及化学制品制造业	1 639. 47
金属制品、机械和设备修理业	6 730. 18	其他工业	1 364. 62
		合计	848 178

业二氧化碳排放。所有和价值有关的变量, 如工业、资本存量和工业中间投入的单位为亿元, 并且都平减为以 2005 年为基年的可比价序列。工业二氧化碳、从业人员和能源消耗量的单位分别为万吨、万人和万吨标准煤。具体变量说明如表 3 所示。

表 3 投入产出变量描述表

分类	变量	说明
投入变量	煤炭	煤炭消费量
	石油	石油类产品消费量
	天然气	天然气消费量
	劳动力	从业人员与劳动报酬
	资本	资本存量 (永续盘存法)
产出变量	工业总产值	各行业总产值
	二氧化碳排放量	使用 IPCC 方法核算

其中, 能源消费数据来自相应年份《中国能源统计年鉴》中分行业的能源平衡表, 劳动从业人员与劳动报酬来自《中国统计年鉴》, 各行业二氧化碳排放数据来自表 2。资本存量采用永续盘存法进行核算^[35]。

根据二氧化碳减排成本理论模型, 利用数据规划工具包 lingo-lindo 进行求解, 具体结果如表 4 所示。

表 4 2014 年我国工业分行业二氧化碳减排成本估计

单位：万元/吨二氧化碳

工业二位数行业	影子价格		工业二位数行业	影子价格	
	I	II		I	II
煤炭采选业	0.02	0.038	医药制造业	0.77	1.07
石油和天然气开采业	0.04	0.05	化学纤维制造业	0.15	0.26
黑色金属采选业	0.65	0.68	橡胶制品业	0.85	—
有色金属矿采选业	1.19	1.31	塑料制品业	3.80	—
非金属矿采选业	0.36	0.47	橡胶和塑料制品业	—	2.78
木材及竹材采运业	0.23	0.37	非金属矿物制品业	0.10	0.13
农副食品加工业	0.74	0.92	黑色金属冶炼及压延加工业	0.09	0.11
食品制造业	0.40	0.53	有色金属冶炼及压延加工业	0.42	0.54
饮料制造业	0.41	0.64	金属制品业	2.92	3.44
烟草加工业	1.92	2.57	通用设备制造业	3.13	4.11
纺织业	0.89	—	专用设备制造业	1.30	1.97
服装业	3.91	—	交通运输设备制造业	1.95	—
纺织服装、服饰业	—	2.69	汽车制造业	—	1.17
皮羽制品业	3.86	3.73	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	—	7.19
木材加工业	0.74	1.21	电气机械及器材制造业	8.79	9.23
家具制造业	5.82	5.49	计算机、电子与通信设备制造业	22.01	30.74
造纸及纸制品业	0.20	0.24	仪器仪表制造业	16.21	18.45
印刷业	5.46	5.91	电力热力生产和供应业	0.01	0.01
文教体育用品制造业	11.03	10.56	燃气生产和供应业	0.02	0.02
石油加工及炼焦业	0.01	0.01	水的生产和供应业	0.69	1.07
废弃资源综合利用业	—	3.12	化学原料及化学制品制造业	0.12	0.16
金属制品、机械和设备修理业	—	12.81	其他工业	2.68	2.98

注：I 表示陈诗一^[26]的计算结果，II 表示本研究的计算结果。

表 4 是本文与陈诗一^[26]计算结果的比较，两者使用的理论模型一致且选取的投入与产出变量也是相似的。从表 4 可以看出，总体上本文的计算结果高于陈诗一的计算结果。本文核算结果较高是因为陈诗一使用的数据截止到 2008 年，而本文使用的数据截止到 2014 年。减排成本上升是一个自然的结果，但是有一些行业减排成本保持不变，比如电力、燃气生产等行业减排成本保持不变，说明这些行业碳排放效率水平基本保持不变，这与我们的调研结果一致。尤其是电力行业，由于实行价格管制，并没有反映其市场应有的价值。而对于调整的行业，本文在此也给出了减排成本的估计，如 2008 年的交通运输设备制造业，到 2014 年变为汽车制造业与铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业两个行业。

根据表 4 的计算结果，可以发现各工业行业边际减排成本的差异性较大，这可有效地促进碳市场的活跃度。碳排放量排在前十位行业的边际减排成本如图 1 所示。从图中可以看出，前十位行业存在明显的差异性；另外，活跃度函数式（3）是一个递减函数。因此，首批纳入碳交易的企业从前十位排放行业中选取，不但有利于碳交易市场交易与管理，同时可保持碳交易市场的活跃度。

（三）活跃度 Z_{act}^* 最优值确定

由于前十大行业 CO_2 排放量约占工业行业总排放的 97%，因此，不失一般性，下面的讨论仅在前十大行业中进行，扩展到 40 个行业只会增加计算工作量而不会对结果产生影响。根据活跃度理论模型（3），函数（3）的值不仅与减排成本相关，还与覆盖比例直接相关，因此在不同覆盖比例约束下进行求值。其中，公式（3）中的 $p_i \leq \frac{R_i}{B}$ ， R_i 表示行业 i 占整体工业行业排放的比例， $B \in [30\%, 100\%]$ 表示纳入工业行业的比例。之所以选择从 30% 的覆盖率开始，第一是因为比较

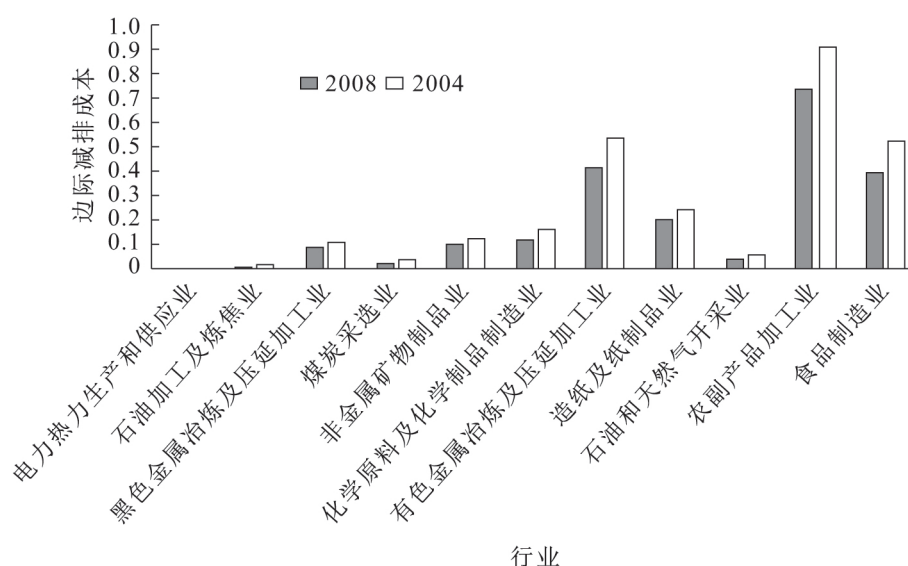


图1 2008年与2014年排放前十位工业行业减排成本比较

国际国内碳交易市场，基本都在 40% 以上的水平；第二，因为本文讨论的是工业行业层面，起码要覆盖一个行业以上；第三，在 0~30% 之间的结果对最终结果没有影响。具体结果如表 5 所示。

（四）覆盖范围与行业选择的仿真计算

由表 4 的计算结果，可以确定 $z_{emi}^* = z_{emi} (100\%) = 822\,732.66$ ，为前十大排放行业的总排放量。由表 5 的计算结果可知， Z_{act}^* 的最优值应取值 0.171。由此，公式 (2) 可具体写为：

$$\min_{C \in [30\%, 100\%]} D = (Z_{emi}(C) - 822\,732.66)^2 + (Z_{cost}(C) - 0)^2 + (Z_{act}(C) - 0.171)^2 \quad (7)$$

表5 不同覆盖比例下的 Z_{act}^* 值

覆盖比例	电力、热力生产和供应业	石油加工、炼焦和核燃料加工业	黑色金属冶炼和压延加工业	煤炭开采和洗选业	非金属矿物制品业	化学原料和化学制品制造业	有色金属冶炼和压延加工业	造纸和纸制品业	石油和天然气开采业	农副食品加工业	Z_{act}^*
30%	22.84%	0	0	0	0	3.92%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.017 1
35%	25.54%	0	0	0	0	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.015 1
40%	30.54%	0	0	0	0	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.013 5
45%	34.17%	0	0	0	1.37%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.012 3
50%	30.57%	6.12%	0	0	3.85%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.011 2
55%	32%	7.15%	0	0	6.39%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.010 4
60%	39.52%	4.5%	0	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.009 6
65%	41.51%	6.12%	1.39%	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.009 1
70%	25.07%	25.01%	3.94%	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.008 5
75%	26.86%	25.52%	6.64%	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.008 1
80%	40.36%	15.93%	7.73%	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.007 6
85%	35.77%	25.52%	7.73%	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.007 3
90%	40.77%	25.52%	7.73%	0	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.007 0
95%	43.43%	25.52%	7.73%	2.43%	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0	0.45%	0.006 3
100%	43.43%	25.52%	7.73%	6.4%	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0.94%	0.45%	0.006 3

要求解公式 (7)，还必须知道 $Z_{emi}(C)$ 、 $Z_{cost}(C)$ 与 $Z_{act}(C)$ 的函数表达。那么，

$$Z_{emi}(C) = \sum_i R_i \times TE \quad (8)$$

$$Z_{cost}(C) = \sum_i c_i \times R_i \times TE \quad (9)$$

$$Z_{act}(C) = \sum_{i=1}^n p_i (c_i - (\sum p_i c_i))^2 \quad (10)$$

$$R_i \leq A_i, \sum R_i = C, p_i = \frac{R_i}{C} \quad (11)$$

其中, $C \in [30\%, 100\%]$ 表示总量设置的比例。 c_i 表示第 i 个行业的减排成本, R_i 表示第 i 个行业所占的比重, A_i 表示第 i 个行业所占比重的上限, $i \in \{1, 2, \dots, 10\}$, 例如, $A_1 = 43.43\%$ 表示电力、热力生产和供应业全部排放纳入碳交易市场。 TE 表示碳排放总量, 这里表示前十位行业的总排放量。将式 (8)、(9)、(10) 代入式 (7), 并在约束条件 (11) 下, 进行求解。为计算方便, 假设碳排放总量 TE 为 1, 仿真结果如图 2、表 6 所示。

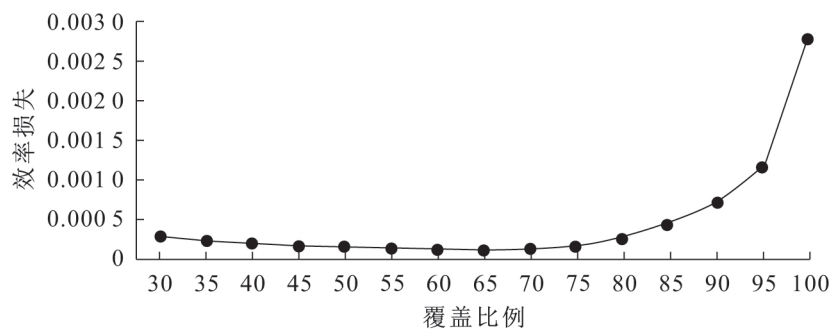


图 2 不同覆盖比例与行业选择下的效率损失值

表 6 不同覆盖比例与行业选择的效率损失最小值

覆盖比例	电力、热力生产和供应业	石油加工、炼焦和核燃料加工业	黑色金属冶炼和压延加工业	煤炭开采和洗选业	非金属矿物制品业	化学原料和化学制品制造业	有色金属冶炼和压延加工业	造纸和纸制品业	石油和天然气开采业	农副食品加工业	效率损失最小值
30%	26.42%	0	0	0	0	1.96%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 301 41
35%	30.27%	0	0	0	0	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 240 26
40%	35.27%	0	0	0	0	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 198 25
45%	38.80%	0.79%	0	0	0.69%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 171 54
50%	37.00%	6.35%	0	0	1.93%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 150 44
55%	37.72%	9.36%	0	0	3.20%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 138 41
60%	41.48%	10.54%	0	0	3.26%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 128 16
65%	42.47%	13.85%	0.70%	0	3.26%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 125 06
70%	34.25%	25.27%	1.97%	0.53%	3.26%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 125 452
75%	35.15%	25.52%	3.32%	3.03%	3.26%	3.11%	0.82%	0.58%	0	0.23%	0.000 150 14
80%	41.90%	20.73%	5.72%	3.20%	3.26%	3.11%	0.82%	0.58%	0.47%	0.23%	0.000 250 359
85%	39.60%	25.52%	7.73%	3.20%	3.75%	3.11%	0.82%	0.58%	0.47%	0.23%	0.000 436 431
90%	42.10%	25.52%	7.73%	3.20%	6.25%	3.11%	0.82%	0.58%	0.47%	0.23%	0.000 728 853
95%	43.43%	25.52%	7.73%	4.42%	6.52%	5.34%	0.82%	0.58%	0.47%	0.23%	0.001 189 714
100%	43.43%	25.52%	7.73%	6.40%	6.52%	6.22%	1.63%	1.16%	0.94%	0.45%	0.002 791 112

由图 2 和表 6 可以清楚得出, 当覆盖范围为工业排放量的 65%~70% 之间时, 整个碳交易市场带来的效率损失是最小的; 若将工业排放全部纳入碳交易市场, 其效率损失反而最大。因此, 我国

碳交易市场建立初期覆盖范围应为工业行业总排放量的 65%~70%,具体行业分布为电力、热力生产和供应业,石油加工、炼焦和核燃料加工业,黑色金属冶炼和压延加工业,非金属矿物制品业,化学原料和化学制品制造业,有色金属冶炼和压延加工业,造纸和纸制品业,农副食品加工业以及食品制造业。各行业排放量纳入比例可根据表 6 的结果与各地企业的情况做一定调整。

五、结论与讨论

通过多目标优化的方法,本文确定我国碳交易市场的覆盖范围在工业排放总量的 65%~70%之间时,其效率值损失最小。由于我们的讨论是基于前十大工业行业排放量进行的,不包含农业、生活消费等领域的排放,而工业行业排放量约占全社会排放量的 75%~78%,前十大工业行业又占工业总排放的 97%,所以,建设全国碳交易市场,在总量设置上较为理想的比例是将全社会碳排放总量的 45%~50%纳入到碳交易市场,此时效率最高,即约 50 亿吨左右,并且主要在电力、热力生产和供应业,石油加工、炼焦和核燃料加工业,黑色金属冶炼和压延加工业,非金属矿物制品业,化学原料和化学制品制造业,有色金属冶炼和压延加工业,造纸和纸制品业,农副食品加工业以及食品制造业八大行业内选择。

从结果看,我们测算出的结果与《通知》中确定的八大行业,主要区别在于本文结果多了食品行业,而《通知》多了航空业。这是由于本文的讨论仅在工业行业内,没有将航空业纳入讨论。航空业在我国的统计体系中并没有作为一个单列的行业,缺乏相关数据。对于我国碳市场第二阶段的行业选择,应该优先增加煤炭开采和洗选业,而后增加石油与天然气开采业。由于并没有减少数据统计与核查的工作量,若将一些小微企业全部纳入,无形中会增加交易成本,降低效率。根据十二五期间开展的“万家企业节能低碳行动”,我国共有 17 000 家重点用能单位(重点用能单位是指年综合能源消费量 1 万吨标准煤以上以及有关部门指定的年综合能耗 5 000 吨标煤以上),其能源消费总量占全国总消费量的 60%以上,且这些重点用能单位前期都有较好的数据基础。因此,应以八大工业行业中年综合能耗 1 万吨以上企业为基础,并适当纳入其他行业部分大型企业,这样不仅可以弥补覆盖范围的减少,还可以增加市场活跃度。

如果能获得企业层面详细的数据,可以估算出更为精确的结果。因此,建议地方政府重视本地企业数据统计基础工作与 MRV 体系的建设,在此基础上才能根据产业发展情况提出本地纳入碳交易市场行业与企业的最优决策。

如下问题值得进一步研究与讨论:

第一,本文中假设每个行业内各企业的减排成本相同,这一点是不符合实际情况的。即使在同一行业内部,由于每个企业所用的技术设施、能源结构及管理效率的不同,其减排成本也是不同的。秦少俊等^[36]基于类似的产出距离函数方法,测算了上海火电企业的减排成本,减排最低的为 22.4 元/吨,最高的为 471.3 元/吨,相差约 20 倍。这个假设会影响碳交易市场的活跃度,最终影响研究结果,但这一工作必须建立在良好的数据基础上才能完成。

第二,由于每一个行业的减排成本是动态变化的,一般而言,减排成本会随着减排量的增加呈阶梯型的加速增长,甚至是指数级增长。这就使得本文结论放在长期而言存在一定的偏误,需要在估计出各行业减排成本动态变化曲线的前提下,使用动态多目标优化的方法进行进一步的研究。

参考文献

- [1] Wetttestad, J. The making of the 2003 EU emissions trading directive: An ultra-quick process due to entrepreneurial proficiency[J]. *Global Environmental Politics*, 2006(1).

- [2] Kallbekken, S. The cost of sectoral differentiation in the EU emissions trading scheme[J]. *Climate Policy*, 2005(1).
- [3] Hood, C. *Reviewing Existing and Proposed Emissions Trading Systems*[Z]. IEA Energy Papers, 2010.
- [4] Kerr, S., C. Leining, J. Sefton, et al. Roadmap for implementing a greenhouse gas emissions trading system in Chile: Core design options and policy decision-making considerations[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2013.
- [5] Betz, R., T. Sanderson, T. Ancev. In or out: Efficient inclusion of installations in an emissions trading scheme[J]. *Journal of Regulatory Economics*, 2010(2).
- [6] Dijkstra, B. R., E. Manderson, T. Y. Lee. Extending the sectoral coverage of an international emission trading scheme[J]. *Environmental & Resource Economics*, 2011(2).
- [7] Böhringer, C., K. E. Rosendahl. Strategic partitioning of emission allowances under the EU Emission Trading Scheme[J]. *Resource & Energy Economics*, 2009(3).
- [8] Böhringer, C., B. Dijkstra, K. E. Rosendahl. Sectoral and regional expansion of emissions trading[J]. *Resource & Energy Economics*, 2014, 37.
- [9] Hahn, R. W. Market power and transferable property rights[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1984(4).
- [10] Helm, C. International emissions trading with endogenous allowance choices[J]. *Journal of Public Economics*, 2003(12).
- [11] Kruger, J. Decentralization in the EU emissions trading scheme and lessons for global policy[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2007(1).
- [12] Viguié, L., M. Vielle, A. Haurie, et al. A two-level computable equilibrium model to assess the strategic allocation of emission allowances within the European Union[J]. *Computers & Operations Research*, 2006(2).
- [13] 彭斯震, 常影, 张九天. 中国碳市场发展若干重大问题的思考[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014(9).
- [14] 范英, 莫建雷. 中国碳市场顶层设计重大问题及建议[J]. *中国科学院院刊*, 2015(4).
- [15] 谢晓闻, 方意, 李胜兰. 中国碳市场一体化程度研究——基于中国试点省市样本数据的分析[J]. *财经研究*, 2017(2).
- [16] 邵鑫潇, 张潇, 蒋惠琴. 中国碳排放交易体系行业覆盖范围研究[J]. *资源开发与市场*, 2017(10).
- [17] 曹静, 周亚林. 行业覆盖、市场规模与碳排放权交易市场总体设计[J]. *改革*, 2017(11).
- [18] Fankhauser, S., C. Hepburn. Designing carbon markets. Part I: Carbon markets in time[J]. *Energy Policy*, 2010(8).
- [19] Fankhauser, S., C. Hepburn. Designing carbon markets. Part II: Carbon markets in space[J]. *Energy Policy*, 2010(8).
- [20] Alex, Y. L. Challenges to the development of carbon markets in China[J]. *Climate Policy*, 2016(1).
- [21] 崔连标, 范英, 朱磊, 等. 碳排放交易对实现我国“十二五”减排目标的成本节约效应研究[J]. *中国管理科学*, 2013(1).
- [22] Fan, Y. Which sectors should be included in the ETS in the context of a unified carbon market in China? [J]. *Energy & Environment*, 2014(3).
- [23] 涂正革, 谌仁俊. 排污权交易机制在中国能否实现波特效应? [J]. *经济研究*, 2015(7).
- [24] Fang, G., L. Tian, M. Liu, et al. How to optimize the development of carbon trading in China—Enlightenment from evolution rules of the EU carbon price[J]. *Applied Energy*, 2018, 211.
- [25] Zhao, X. G., G. W. Jiang, D. Nie, et al. How to improve the market efficiency of carbon trading: A perspective of China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59.
- [26] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010(8).
- [27] Färe, R., S. Grosskopf, D. W. Noh, et al. Characteristics of a polluting technology: Theory and practice[J].

- Journal of Econometrics*, 2005(2).
- [28] Lee, J. D., J. B. Park, T. Y. Kim. Estimation of the shadow prices of pollutants with production/environment inefficiency taken into account; A nonparametric directional distance function approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002(4).
- [29] Khoshnevis, S., T. Gross, C. Rotte, et al. Financial allocation strategy for the regional pollution abatement cost of reducing sulfur dioxide emissions in the thermal power sector in China[J]. *Energy Policy*, 2010(5).
- [30] 岳超, 胡雪洋, 贺灿飞, 等. 1995—2007 年我国省区碳排放及碳强度的分析——碳排放与社会发展 III [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010(4).
- [31] Marland, G. *Global, Regional, and National Fossil fuel CO₂ Emissions*[Z]. Trends A Compendium of Data on Global Change, 2000.
- [32] Liu, Z., D. Guan, W. Wei, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015(7565).
- [33] 李锴, 齐绍洲. 贸易开放、经济增长与中国二氧化碳排放[J]. *经济研究*, 2011(11).
- [34] Lanza, R., T. Martinsen, A. K. W. Mohammad, et al. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*[M]. Tokyo: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [35] 陈昌兵. 可变折旧率估计及资本存量测算[J]. *经济研究*, 2014(12).
- [36] 秦少俊, 张文奎, 尹海涛. 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[J]. *工程管理学报*, 2011(6).

The Coverage and Sector Selection of China's Carbon Trading Market: Based on Multi-Objective Optimization Approach

ZHANG Ji-hong, ZHI Ruo-ping, QI Shao-zhou

Abstract: How to determine the coverage and industry selection is a key issue in building a carbon trading market. The coverage and industry selection will affect the activity of the trading on the cost of emission reduction and the effect of emission reduction. In this paper, the non-parametric directional distance function is used to calculate the CO₂ reduction cost of 40 industrial sectors in China. Then we used a multi-objective optimization method to estimate the coverage and sector selection of China's carbon market. When the coverage accounts for 45%~50% of China's total CO₂ emissions, or about 5 billion tons, the result is the best. The sectors selected include electricity, heat production and supply, oil processing, coking and nuclear fuel processing, ferrous metal smelting and rolling processing, non-metallic mineral products, chemical raw materials and chemical manufacturing industry, non-ferrous metal smelting and rolling processing, paper and paper products, agro-food processing and food manufacturing. At the same time, the method could be used as a reference for the national or local governments to optimize the carbon trading market.

Key words: carbon trading market; reduction cost; coverage; sector selection; multi-objective optimization

(责任编辑 朱 蓓)