

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2016.0102

中国火电产业环境外部成本分析

赵晓丽¹, 蔡琼², 胡雅楠³

(1. 中国石油大学(北京) 工商管理学院, 北京 102249; 2. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206;
3. 昆山华润城市燃气有限公司, 江苏 昆山 215316)

摘要:对环境外部成本的量化评估是构建节能减排政策机制的重要基础。采用选择试验法,对火电产业污染物和CO₂排放减少的居民支付意愿(WTP)进行计算;采用生命周期法计算火电产业的CO₂排放量,并结合碳交易价格计算火电产业排放的CO₂外部成本市场值。研究发现,人们愿意为电力产业的清洁化发展支付更高电费,基于选择试验法得到的火力发电的环境外部成本是0.12~0.19元/千瓦时。研究还发现,影响火电产业环境外部价值的因素,包括公众的环境意识、相关社会因素以及对不同环境属性的偏好。

关键词: 环境外部成本; 火电产业; 选择试验法; 生命周期

中图分类号: F062.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2016)01-0010-08

中国正处于快速工业化进程中,与此伴随的是大量资源消耗和环境污染。火电厂(主要指燃煤电厂)排放的烟尘、SO₂、NO_x、汞及其化合物对人体健康、生态系统、气候变化等方面造成的损害,产生了较大的环境外部性。与其他国家相比,中国发电产业的外部性更为明显。中国电力装机中,近80%为火电机组,火电机组发电量高达80%以上。中国CO₂排放总量的近40%、SO₂排放量的近60%来自于发电产业。因此,对发电产业环境外部成本进行量化评估是制定节能减排政策、实现节能减排目标的重要保障。此外,重点关注发电产业的环境外部性,还基于另外两个原因:第一,火电产业在能源替代方面比其他行业相对更具有灵活性,并且不同技术水平的选择对环境影响具有显著差异(Stern N, 2007)^[1];第二,发电厂相对比较集中,数量相对有限,更易于进行管制(Soderholm P和Sundqvist P, 2003)^[2]。目前,国外对环境外部性进行量化研究的文献中,也主要集中于发电产业(Lee J S和Yoo S H, 2009)^{[3]5069-5074},国外对电力行业环境外部性的主要研究方法有:选择试验法(Choice Experiment, CE)(Lee J S和Yoo S H, 2009)^{[3]5069-5074}、CVM(Contingent Valuation Method)(Mozumder等, 2011)^[4]和ExternE project的方法(Georgakellos和Dimitrios, 2010)^[5]。但是对中国发电产业发展的环境外部性进行量化研究的文献还很少,主要是基于现有排污收费标准的计算(陆华和周浩, 2004)^[6],更多是从技术层面研

究减轻其环境污染的途径。

与已有的研究相比,本文的贡献是:第一,采用选择试验法(Choice Experiment, CE)对火电产业环境外部性进行量化评估。CE最初应用最广泛的领域是市场和交通运输领域,由Admowicz等(1994)^{[7]413-428}进一步将其应用于解决环境问题。目前CE已经广泛地应用于环境价值评估上(Lee J S和Yoo S H, 2009)^{[3]5069-5074},相对于其余评估方法更有优势(Rolfe等, 2000)^[8],其优势主要是可以对环境商品的属性价值进行评估,并能计算属性的边际价值,从而计算可支付意愿(Willingness to Pay, WTP)。在对中国环境外部性进行评估的相关研究中,CE的应用研究较少。第二,进一步运用生命周期法分析了火电产业的碳足迹,结合现有排污标准,计算火电产业CO₂环境成本,与CE计算的非市场评估值进行了相互验证。

一、研究方法及模型

(一) 选择实验法

1. 选择模型

采用离散选择模型之一的多项Logit模型(Multinomial Logit, MNL)来定量评估火电产业的环境外部性。MNL模型是一个在西方发达国家应用比较成熟的离散选择模型,也是最基础的模型,应用也最为广泛(Hensher等, 2005)。MNL模型假设备选方案之间不相关(Hensher等, 2005)^[9]。选择模型

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“发电产业环境成本非市场评估及节能减排政策模型”(71373078)

作者简介: 赵晓丽(1970—),女,博士,教授, E-mail: email99zxl@vip.sina.com

是以随机效用理论为基础,个人随机效用由确定部分和随机部分组成(Admowicz等,1994)^[7413-414],效用方程可以写为

$$U_{nji}=V_{nji}(Z_{nj},S_n)+\varepsilon_{nji} \quad \forall j,t \quad (1)$$

其中, U_{nji} 是消费者 n 选择选择集 t 中的方案 j 的效用方程; V_{nji} 是属性变量和受访者社会经济变量 S_n 的方程; ε_{nji} 反映对个人选择影响的不可观测因素。如果 $U_{ni}>U_{nj}(i \neq j)$,那么消费者 n 将选择方案 i 。如果进一步假设随机误差 ε_{nji} 服从独立同分布(Independent and Identically Distributed,IDD)的类型I的极值分布,那么概率方程为(McFadden,1974)^[10]

$$P_{ni}=\frac{\exp(V_{ni})}{\sum_j \exp(V_{nj})} \quad j=0, \dots, J \quad (2)$$

选择模型的特征之一是可以估计各属性之间的边际替代率,即通过估计单个变量的边际价值变化,即边际支付意愿(Marginal Willingness to Pay,MWTP),也称为隐含价格,来表示受访者为了得到更多的环境属性而愿意支付的金额(Carlsson等,2007)^[11]。参照Hensher等(2005)的研究,其计算公式为

$$MWTP_{\text{attribute}}=-\frac{\beta_{\text{attribute}}}{\beta_{\text{payment}}} \quad (3)$$

其中, $\beta_{\text{attribute}}$ 和 β_{payment} 分别表示环境属性和成本属性的系数。

选择试验法在福利计量(Welfare Measure)方面的典型应用是计算补偿剩余(Compensating Surplus,CS),即消费者需要为此支付的货币。因此补偿剩余可以用来表征排放减少的总支付意愿(Total Willingness to Pay,TWTP)。根据Hanemann(1984)^[12]和Jeff Bennet等(2011)^[13],CS的公式可以表示为

$$CS=\frac{1}{-\beta_{\text{payment}}}[\ln \sum \exp(V_j^0)-\ln \sum \exp(V_j^1)] \quad (4)$$

其中, β_{payment} 为商品价格属性系数; V_j^0 和 V_j^1 分别表示环境商品属性 j 状态改变前后的两个效用函数, $j=1,2,3, \dots, n$ 。

2.选择试验设计及问卷调查

本文通过文献研究,如Lee等(2009)^{[3]5069-5074}、黄德生等(2012)^[14]、谭永忠等(2012)^[15],以及专家访谈和课题组讨论,确定评价火电产业环境外部性的属性为:温室气体排放减少量、空气质量和酸雨。此外,本文还选取受访者每月额外支付电费来表示成本属性,用来诱导受访者的支付意愿。属性和属性水平如表1所示。

表1 环境属性及属性水平

属性		属性水平			
温室气体排放减少	排放减少 11%~20%	排放减少 6%~10%	排放减少 1%~5%	排放不减少	
空气质量(PM2.5)	优	良	轻度污染	中度污染	重污染
酸雨	非酸雨	轻酸雨	中度酸雨	较重酸雨	重酸雨
每月额外支付电费	零支付	多付 10%	多付 20%	多付 30%	多付 50%

表2 选择集示例

属性	方案1	方案2	方案3	保持现状
空气质量	良好	优	优	中度污染
酸雨等级	非酸雨区	非	轻度酸雨	较重酸雨区
温室气体排放减少	排放减少 6%~10%	排放减少 1%~5%	排放减少 6%~10%	排放不减少
每月额外支付账单	50%	50%	50%	0
您的选择	方案1	方案2	方案3	保持现状 0

采用正交因子法(orthogonal factorization method)设计选项卡中所需选项,去除不合实际的选项和强势的备选项(即显著优于其他方案的选项),只保留正交项,最后确定18组选择题,将其分成3版,每一版有6组选择题。在调查访问中,3版选择题将被均匀地使用(选择集示例如表2所示)。

最终的问卷包括三部分:第一部分是介绍本次问卷调查的目的,并向受访者询问对火电厂环境污染的认知。第二部分是选择实验部分,包括6组选择题。第三部分统计受访者社会经济属性,如年龄、

性别、受教育程度等。根据廉价磋商法(Bulte E等,2005)^[16],在问卷中加入:“我们将根据您的选择,在某一地区开展试点进行电价调整,并有可能今后按此调整后的电价向您收费。”本文采用面对面、电子邮件和电话访问的形式,随机发放问卷,对不同年龄、不同职业、不同省份的居民进行问卷调查。

本次问卷调查共完成问卷320份,收回有效问卷300份,无效问卷20份,问卷回收率达到93.75%。每份问卷可以形成有效分析数据18个^①,共有5400个数据量。样本数据分别来自于东部,51%;

①每份问卷中包含6组选择集,每个选择集中有3种不同的选择方案(方案1、方案2和方案3),所以每份问卷都会形成18个有效分析数据。

中部,29%;西部,19%;样本中还考虑了不同年龄段、不同教育层次和收入层次等的受访者。

(二)生命周期法及数据来源

本文进一步采用生命周期评价法对火电产业碳足迹进行分析,再结合碳交易价格计算火电产业CO₂外部成本的市场值。根据PAS2050标准,用生命周期法来评估火力发电产业碳足迹,就是核算火电厂在其各自生命周期中,包括生产使用和废置各个阶段所排放CO₂及其他温室气体的总量。根据该标准,计算全生命周期中的碳足迹主要包括4个基本步骤:一是建立全生命周期流程图;二是评估边界及重要性水平;三是收集数据信息;四是计算碳足迹。式(5)列出了生命周期法核算碳足迹的具体方式

$$\text{Emission} = \sum_i^n \text{Emission}_i = \sum_i^n \sum_j^n \text{Consumption}_{ij} \times \text{EmissionFactor}_{ij} \quad (5)$$

其中,Emission为生命周期内总CO₂排放;Emission_i为第i阶段的CO₂排放;Consumption_{ij}为第i阶段第j种材料的消费量;EmissionFactor_{ij}为第i阶段第j种材料的CO₂排放因子(消耗单位质量能源伴随的温室气体的生成量)。

火电厂的整个生产系统包括:燃烧系统、汽水系统、电气系统,生产工序主要是制粉、燃烧、加热、做功和转化,最终将煤炭的热能转化为电能。按照生命周期评价法,详细的火电厂生命周期系统边界如表3所示。

表3 各系统边界的定义及假设

系统边界	定义与假设
煤炭开采	此阶段包括煤炭的开采、洗选以及将煤炭运输到火电厂。假设各煤场均能达到行业均值
火电厂建设	包含火电厂设备的制造、设备运输、火电厂基础设施建设。设备制造的碳排放以设备所耗钢材来估算,火电厂基础设施用混凝土、钢铁及铝的耗用量来核算
火电厂运行	火电厂正常运行阶段,包括煤炭燃烧、尾气脱硫、废物处置环节的碳排放。不考虑设备零部件的老化以及更换等因素
火电厂废弃处置	火电厂达到服役年限之后,电厂设备的拆除和处理过程。参照Naser A. Odeh等人的研究,假设此阶段碳排放是火电厂建设阶段碳排放的10% ^[17]

本文选取的分析对象火电厂为华能九台电厂二期工程。华能九台电厂位于吉林省九台市,安装国产首台具有自主知识产权的超临界褐煤塔式炉,是吉林省率先投产的单机容量最大、运行参数最高的火电机组,二期工程装机容量为2×660×10⁶千瓦,机组设计年利用小时数为5500小时。根据《2013年电力工业统计资料汇编》,全国单机6000千瓦及以上的火电机组总共有7223台,其中超过600×10⁶千瓦的机组仅有522台,占总机组数量的7.2%。这说明华能九台电厂二期工程代表了国内火电发展的一个较高水平。为了使本文的计算更具有一般性,在

计算燃煤发电中产生的CO₂排放时,同时采用该电厂的煤耗水平和是全国的平均煤耗水平。

为了估算中国火电产业生命周期内的碳足迹,在煤炭的开采和洗选中本文采用全国煤炭开采和洗选的总量和总能耗量来计算,煤炭的运输距离采取全国煤炭的平均运距,上述相关数据来自《中国统计年鉴》(2014)。火电厂建设和运行部分的数据来自《华能九台电厂二期工程环境影响报告书简本》。核算过程中所涉及到的材料的碳排放因子采用IPCC2006和中国原子能科学研究所公布的数据,如表4所示。

表4 各种材料碳排放因子

材料种类	钢 ¹	铜 ¹	混凝土 ²	油料 ³
排放因子	2.2	3.5	0.12	2.26

数据来源:(1)张燕红,余冰,张舒扬. 风力发电机组用发电机碳足迹分析[J]. 中国船检,2013(3):97-99;(2)郭敏晓,蔡闻佳,王灿,陈吉宁. 风电场生命周期CO₂排放核算与不确定性分析[J]. 中国环境科学,2012(4):742-747;(3)IPCC 2006。

二、模型结果及分析

(一)选择模型结果及分析

1. MNL模型回归结果

如表5所示,加入协变量的模型(模型B)更能充分体现受访者的选择行为,故本文接下来分析模型B的结果。从模型检验的结果可以看出:

1)模型B的ASC系数

模型B的ASC系数显著为正,表明受访者对火电产业污染物排放减少的持支持态度,即更愿意通过支付一定金额的电费改变现有的污染排放水平。

2)属性变量对选择的影响

通常情况下,受访者都倾向于支付较少的金额获得更高质量的生活环境。从表5可以看出,空气

表5 MNL模型的检验结果和参数估计

变量	模型 A: 不含协变量的模型			模型 B: 含有协变量的模型		
	系数	隐含价格	标准差	系数	隐含价格	标准差
ASC	15.366***	—		15.942***	—	
空气质量优	0.001		0.311	0.112		0.320
空气质量良	0.490*	2.51	0.277	0.739*	3.52	0.285
空气轻度污染	0.024		0.204	-0.025		0.208
非酸雨区	0.693***	3.55	0.356	0.816***	3.89	0.370
轻度酸雨区	0.692***	3.55	0.335	0.706***	3.36	0.346
中度酸雨区	0.688***	3.53	0.329	0.705***	3.35	0.336
CO ₂ 减少 1%~5%	0.399**	2.05	0.309	0.472		0.132
CO ₂ 减少 6%~10%	0.454**	2.33	0.177	0.594**	2.83	0.114
CO ₂ 减少 11%~20%	0.460***	2.36	0.110	0.465		0.103
额外支付电费	-0.195***			-0.210***		
性别[男]				0.178**		
年龄 39~30 岁				0.533*		
年龄 29~20 岁				0.279*		
人均年收入 10 万以上				0.532**		
人均年收入 5~10 万				0.368*		
小孩年龄 1 周岁以下				1.125**		
小孩年龄 1~6 周岁				1.369***		
对污染物危害的了解程度				0.057		
温室效应是否正在发生				0.172**		
样本数据量	5 400			5 400		
对数似然估计函数值	-1 263.800			-5 643.370		
P 值	0.000			0.000		
Pseudo R ²	0.241			0.244		

注: *、**、*** 分别表示在 0.1、0.05、0.01 水平上显著。

质量、酸雨和 CO₂ 排放 3 个属性都显著,说明这些属性对受访者的选择都有影响。与预期相同的是,支付变量的符号显著为负,表明受访者愿意支付较少的金额获得更大的效用。

3) 社会经济变量对支付意愿的影响

回归结果显示,性别、人均年收入、年龄、小孩年龄和对温室效应的意识都显著影响受访者的支付意愿。男性比女性更愿意为改善环境进行支付。家庭人均年收入在 5 万元以上的受访者支付意愿结果显著。这说明,高收入人群在物质生活保证的前提下,对环境质量的要求也更高。受访者年龄在 39~30 岁和 29~20 岁区间段,对结果的影响显著。这是因为这个区间段的大部分群体,孩子的年龄普遍偏小,这一结果和孩子在 6 周岁以下的受访者对结果的影响显著,可以相互验证。这是因为年幼的孩子抵抗力更弱,因此其家长对环境问题更为关注。受访者对环境保护的态度显著影响行为选择,这表现在其对温室效应的态度上,即认为温室效应正在发生的受访者更愿意选择“改变现状”而不是“维持现状”。

根据式(3)计算出居民对各个属性的边际支付意愿(表 5 中的隐含价格)。研究发现:居民愿意为空气质量从中度污染改善良好每月支付 3.52 元。空气质量为优和空气质量轻度污染不显著,这表明居民认为空气质量良好已经能够达到要求,不需要为空气质量优支付额外的费用。空气质量轻度污染,并不能满足生活质量的要求。居民对酸雨 3 个等级的支付意愿全部显著,依次为 3.89 元/月,3.36 元/月,3.35 元/月。这表明受访者对酸雨危害的关注度很高。CO₂ 排放减少 6%~10%显著,支付意愿为 2.83 元/月,温室气体排放减少 1%~5%、11%~20%不显著。

2. 中国火电产业的环境外部成本

基于式(4)可以计算得到受访者(每个受访者代表一个居民用户)愿意为火电产业环境改善所支付的总的额外电费。在此基础上除以家庭每月生活用电量,便可以得到火电产业单位发电量的环境外部成本。如式(6)所示

$$C_E = \frac{CS}{E_q} \quad (6)$$

表6 边际支付意愿、总支付意愿和火电产业单位发电量的环境外部成本

属性	边际支付意愿/(元/月)	总支付意愿/(元/月)	每度电外部成本/(元/千瓦时)
空气质量良好	3.52	7.04	0.05
非酸雨区	3.89	11.66	0.09
轻度酸雨区	3.36	6.72	0.05
中度酸雨区	3.35	3.36	0.03
CO ₂ 排放减少 6%~10%	2.83	5.65	0.04
合计		16.05~19.41~24.35	0.12~0.15~0.19

其中, CS 为居民每月额外电费总支付意愿; E_q 为家庭每月生活用电量。

根据式(6)计算得到的居民支付意愿和火电产业单位发电量的环境外部成本如表6所示。若空气质量良好、酸雨改善为中度酸雨区、CO₂ 排放减少 6%~10%，总支付意愿为 16.05 元/月，单位外部成本为 0.12 元/千瓦时^①；若酸雨改善为轻度酸雨区，总支付意愿为 19.41 元/月，单位外部成本为 0.15 元/千瓦时；若酸雨改善为非酸雨区，总支付意愿为 24.35 元/月，单位外部成本为 0.19 元/千瓦时。魏学好等(2009)运用污染物折价标准计算出超过社会基准供电煤耗以上的发电外部成本为 0.12 元/千瓦时^[18]，与本文酸雨改善到中度酸雨区的结果基本一致。

(二) 基于价格导向的中国火电产业 CO₂ 环境成本计算结果及分析

1. 火电产业碳足迹计算结果

根据火电厂系统边界,火电厂碳足迹核算分为 4 个阶段:

1) 煤炭开采与运输阶段的 CO₂ 排放

根据《中国统计年鉴》(2014),2012 年煤炭开采和洗选业能源消耗总量为 12 339.12 万吨标准煤,煤炭生产总量 364 500 万吨,标准煤的 CO₂ 排放系数参考刘韵等(2012),为 2.493^{[19]653-658},可计算出单位煤炭生产量的碳排放系数为 0.084 4。由于华能九台电厂二期工程每年煤耗量为 421.3 万吨,因此该工程每年用煤量在开采和洗选过程中产生的 CO₂ 排放量为 35.55 万吨。

根据《中国统计年鉴》(2014),2013 年全国煤的平均运距为 647 公里。铁路运输 CO₂ 排放当量为 0.016 5 吨/公里(赵晓丽和王顺昊,2014)^{[20]154-160}。由此可以得到煤炭运输阶段产生的 CO₂ 排放为 4.50 万吨。

2) 火电厂建设阶段 CO₂ 排放

火电厂建设阶段的 CO₂ 排放主要包括主要设备(锅炉、汽轮机、发电机)生产过程中的 CO₂ 排放和厂房建设过程中产生的 CO₂ 排放。火电厂主要设备的材料消耗均以耗钢量来估算(如表7所示);厂房建设材料消耗参考 2×600 兆瓦火力发电厂建设标准(如表8所示)^②。

表7 主要设备碳排放量核算

电厂主要设备	锅炉	汽轮机	发电机	合计
设备生产耗用钢材/吨	509.42	1 052.52	490.00	2 051.94
碳排放量/吨	1 120.72	2 315.55	1 078.00	4 514.27

数据来源:上海 600~660 兆瓦级发电机说明书;<http://www.docin.com/p-335996903.html>;<http://www.docin.com/p-450639808.html>。

表8 火电厂厂房碳排放量核算

主厂房建设	混凝土/立方米	网架/吨	钢结构/吨	钢筋/吨	加气混凝土砌体/立方米	合计
数量	69 406	248	2 749	7 925	5 610	—
CO ₂ 排放/吨	19 572.49	545.60	6 047.80	17 435.00	370.26	43 971.15

数据来源:<http://www.doc88.com/p-9522934644806.html>。

①2011 年的家庭人口数据参照第六次人口普查数据,定为 4.02 亿户。根据《全国电力工业统计快报(2013)》,2012 年全年居民生活总用电 6 224×10⁸ 千瓦时,据此计算每户家庭每年用电为 1 548 度电,每月为 129 度电。

②计算过程中涉及到的混凝土和混凝土砌体密度采用混凝土和混凝土砌体密度均值,分别为 2 350 千克/立方米、550 千克/立方米,数据来源于《中国土木工程手册》《建筑材料标准汇编——混凝土(上)(第 4 版)》。

表9 设备安装过程中的碳排放

设备安装	钢材	铁	油料	铜	合计
质量/吨	106.95	7.15	1 410.24	0.05	—
CO ₂ 排放量/吨	235.28	15.74	3 187.15	0.18	3 438.34

数据来源: <http://wenku.baidu.com/view/c6d413c1f61fb7360b4c6542.html>。

根据《电力建设工程概算定额(2006年版)》,计算锅炉、汽轮机、发电机安装过程中的碳排放,结果如表9所示。

根据表7、表8、表9可知,火电厂建设阶段总的CO₂排放量为5.99万吨^①。按照《火力发电工程经济评价导则》(DL/T 5435—2009),火电厂生命周期一般按20年计算,则每年火电厂的CO₂排放量为0.30万吨。

3)火电厂运行阶段CO₂排放

此部分主要包括燃煤与脱硫过程中直接产生的CO₂,以及固废处理时,由于运输而产生的CO₂。华能九台电厂二期电厂运行阶段发电标准煤耗为282.4克/千瓦时,脱硫石膏生产量为4.86万吨/年,灰渣量为41.04万吨/年,灰场距离4.5公里,根据《2013年电力工业统计资料汇编》,2013年中国发电标准煤耗为302克/千瓦时。

电厂运行过程中,锅炉燃煤是最主要的CO₂排放源。根据发电标准煤耗及标煤碳排放系数2.493吨CO₂/吨(刘韵等,2011)^[19],可知华能九台电厂二期锅炉燃煤阶段CO₂排放量为704.02克/千瓦时,若此阶段按照全国水平,则单位发电量的CO₂排放量为752.89克/千瓦时。

由于煤炭中含有硫元素,尾气排放时需要进行烟气脱硫,但由于煤炭中具体含量没有给定,本文中用脱硫石膏的产生量来推算脱硫过程中CO₂的排放量。根据化学方程式SO₂+CaCO₃→CaSO₃+CO₂,通过脱硫石膏产生量,可以推出CO₂排放量。可以计算得到尾气脱硫置换阶段CO₂排放量为17 820吨/年。

废弃物运输及处理产生的CO₂。电厂运行中产生的废物主要可以分为固体废物和废水。由于废水通过管道排放,不涉及运输问题,此环节分为固体废物运输和废气物处理。九台电厂二期灰场位于厂址东南约4.5公里处,石膏厂在灰场南部沟内,灰渣与石膏处置的运输距离为4.5公里,公路运输CO₂

排放当量为0.055 6千克/吨公里(赵晓丽和王顺昊,2014)^[20](154-160)。可以计算得到废弃物运输及处理产生的CO₂排放为0.013万吨/年。

4)火电厂废弃处置阶段CO₂排放

参照Naser A. Odeh等(2008)的研究,假设此阶段碳排放是火电厂建设阶段碳排放的10%^[17],即该阶段的CO₂排放为300吨/年。

综上所述,每年华能九台电厂二期工程CO₂排放总量553.30万吨,该电厂的年设计发电量为2×660兆瓦5 500小时=7.26×10⁶兆瓦时,则生命周期内每单位的发电量的碳足迹为762.12克/千瓦时。

上述结果是在火电厂的发电标准煤耗282.4克/千瓦时基础上计算得到的,若以全国火电厂发电的标准煤耗(302克/千瓦时)为标准,则中国火电产业的碳足迹为810.57克/千瓦时。本文火电产业碳足迹计算结果应略低于实际值,因为本文火电厂建设阶段只考虑了主体工程建设和安装过程中CO₂的排放。刘韵等(2008)采用生命周期评价法对山西省吕梁市某燃煤电厂的碳足迹进行了计算,计算结果为730克/千瓦时^[19]653-658;陈建华等(2009)采用生命周期的方法核算的火力发电的碳足迹为690.01克/千瓦时^[20];本文研究方法刘韵等(2008)和陈建华等(2009)的类似,但是计算结果高于刘韵等(2008)和陈建华等(2009)的结果,原因是刘韵等(2008)没有考虑电厂建设阶段的碳排放,陈建华等(2009)计算中采用的标准煤的CO₂排放系数只有1.72吨CO₂/吨,低于本文采用的数值(2.493吨CO₂/吨)^②。

2.基于中国碳交易价格的火电产业CO₂外部成本

CO₂不是污染物,中国没有CO₂排污费。但中国已有7个省市启动碳交易试点,从2015年3月4日截止到6月1日,全国碳交易成交价均值为30.97元/吨^③。以往研究中陈建华等(2009)的研究中,采用减排CO₂引起的GDP损失值来衡量CO₂外部成本,CO₂减排的边际成本约为0.11×10⁻³元/吨^[21]。Fankhauser(1995)从温室效应损失的角度,

①4 514.272×2+43 971.15+3 438.342×2=59 876.38吨。

②国家发改委能源研究所单位标准煤CO₂排放系数参考值为2.456 7吨CO₂/吨,日本能源经济研究所标准煤CO₂排放系数参考值为2.493吨CO₂/吨,美国能源部能源信息署参考值为2.53吨CO₂/吨,这些值均高于陈建华等(2009)采用的1.72吨CO₂/吨,所以本文采用的标准煤CO₂排放系数(2.493吨CO₂/吨)更加合理。

③数据来源:中国碳交易网(<http://www.tanjiaoyi.com/>)。

估算碳排放的经济价值为20美元/吨^[21]。陈建华等(2009)和Fankhauser(1995)的研究都较早,因此本文采用国内碳交易成交价均值来估算CO₂的环境成本,即30.97元/吨,约0.031元/千克。结合上文火电厂碳足迹的计算,中国火电产业CO₂外部成本为0.03元/千瓦时。低于选择试验法对火电产业环境评估结果中CO₂的外部成本0.04元/千瓦时,可能是由于选择试验中仍然存在假设偏差,使选择试验的结果略高于实际值,但是考虑到直接市场价格评估往往低估有消费者剩余的物品的价值(闻德美,2014)^{[23]0670-0681},以及本文在采用生命周期法计算火电产业碳足迹时火电厂建设阶段只考虑了主体工程建设和安装过程中CO₂的排放,导致火电产业碳足迹计算结果偏低,从而导致火电产业CO₂外部成本的市场值偏低,以及目前碳交易市场发展的不完善等因素,本文选择试验的结果应该更加合理。

三、结论

本文同时运用基于价值导向的选择试验法,以及基于价格导向的生命周期法与碳价格的乘积,对中国火电产业环境外部成本进行了量化评估。研究结果表明:

1. 影响火电产业环境外部价值的因素包括:第一,公众的环境意识。公众对环境的改善所愿意多支付的金额与其对温室效应的意识成正相关,

认识到温室效应正在发生的人愿意支付的金额越高。第二,相关社会因素。影响居民的支付意愿的因素除认知态度以外,还有性别、年龄、人均年收入、孩子的年龄4个因素。第三,对不同的环境属性的偏好影响着不同排放物的环境价值。公众对不同的环境属性的偏好存在差异:对粉尘排放减少和酸雨(SO₂、NO_x)排放减少的偏好明显大于对温室气体(CO₂)排放减少的偏好,因此,粉尘排放和SO₂、NO_x排放的外部成本大于CO₂排放的外部成本。

2. 基于选择试验法得到的火电产业的环境外部成本是0.12~0.19元/千瓦时,其中火电产业产生的CO₂的外部成本是0.04元/千瓦时。

3. 基于生命周期法得到的中国火电厂的碳足迹为823.44克/千瓦时,在此基础上计算得到的火电产业CO₂排放的环境外部成本为0.03元/千瓦时。

4. 本文认为基于选择实验法计算的结果更合理,这是因为一方面基于生命周期法与碳价格的乘积是一种直接市场的评估方法,由于存在消费者剩余,市场价格低于真实的经济价值(闻德美等,2014)^{[23]0670-0681};另一方面本文选择试验法中采用了廉价磋商法来减轻假设偏差,提高了模型结果的可信度。所以基于选择试验法评估的中国火电产业环境外部成本更可信。

参考文献:

- [1] Stern N. The economics of climate change: the stern review[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Soderholm P, Sundqvist P. Pricing environmental externalities in the power sector: ethical limits and implications for social choice[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 333-350.
- [3] Lee J S, Yoo S H. Measuring the environmental costs of tidal power plant construction: a choice experiment study[J]. Energy Policy, 2009, 37(12): 5069-5074.
- [4] Mozumder, Pallab, William F. Consumers' preference for renewable energy in the southwest USA[J]. Energy Economics, 2011, 33(6): 1119-26.
- [5] Georgakellos, Dimitrios A. Impact of a possible environmental externalities internalisation on energy prices: the case of the greenhouse gases from the Greek electricity sector[J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 202-209.
- [6] 陆华, 周浩. 发电厂的环境成本分析[J]. 环境保护, 2004(4): 51-54.
- [7] Hanley N, Wright R E, Adamowicz V. Using choice experiments to value the environment[J]. Environmental and Resource Economics, 1998, 11(3-4): 413-428.
- [8] Rolfe J, Bennett J, Louviere J. Choice modeling and its potential application to tropical rainforest preservation[J]. Ecological Economics, 2000, 35(2): 289-302.
- [9] Hensher D A, Rose J M, Greene W H. Applied choice analysis: a primer[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [10] McFadden D, Zarembka P. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior[J]. Frontiers in Econometrics, 1974, 10, 105-142.
- [11] Carlsson F, Frykblom P, Lagerkvist C J. Consumer willingness to pay for farm animal welfare: mobile abattoirs versus

- transportation to slaughter[J]. *European Review of Agricultural Economics*, 2007, 34(3): 321-344.
- [12] Hanemann W M. Welfare evaluations in contingent valuation experiments with discrete responses[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1984, 66(3): 332-341.
- [13] Bennet J, Blamey R. The choice modeling approach to environmental valuation[M]. Gloucester: Edward Elgar Publishing, 2001.
- [14] 黄德生, 谢旭轩, 穆泉, 等. 环境健康价值评估中的年龄效应研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(8): 63-70.
- [15] 谭永忠, 陈佳, 王庆日, 等. 基于选择试验模型的基本农田非市场价值评估——以浙江省德清县为例[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(11): 1981-1994.
- [16] Bulte E, Gerking S, List J A, et al. The effect of varying the causes of environmental problems on stated WTP values: evidence from a field study[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2005, 49(2): 330-342.
- [17] Odeh N A, Cockerill T T. Life cycle analysis of UK coal fired power plants[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(2): 212-220.
- [18] 魏学好, 李瑞庆, 陈宇晨. 具有节能减排内核的电力市场新模式[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(15): 24-28.
- [19] 刘韵, 师华定, 曾贤刚. 基于生命周期评价的电力企业碳足迹评估——以山西省吕梁市某燃煤电厂为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 653-658.
- [20] 赵晓丽, 王顺昊. 基于CO₂减排效益的风力发电经济性评价[J]. *中国电力*, 2014, 47(8): 154-160.
- [21] 陈建华, 郭菊娥, 席西民, 等. 秸秆替代煤发电的外部效应测算分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(4): 161-167.
- [22] Fankhauser S. Valuing climate change: the economics of the greenhouse[M]. London: Earthscan Publications, 1995.
- [23] 闻德美, 姜旭朝, 刘铁鹰. 海域资源价值评估方法综述[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 670-681.

Analysis on Environmental Externality of China's Thermal Power Industry

ZHAO Xiaoli¹, CAI Qiong², HU Yanan³

(1. School of Business Administration, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Kunshan China Resources City Gas Co., Ltd, Kunshan Jiangsu 215316, China)

Abstract: It is necessary and fundamental to construct the mechanism of energy conservation and emission reduction by making quantitatively analysis of environmental externality. This paper first applies choice experiment to elicit resident willingness to pay for thermal power industry pollutant and carbon dioxide reduction. Then, combining with carbon dioxide emission of thermal power industry that is assessed by life cycle method and carbon trading price, the actual market value of carbon dioxide externality is calculated. The results show that respondents have the willingness to pay more for cleaner power generation, and the environmental externality of China's thermal power industry is 0.12~0.19 Yuan per kWh. Moreover, the results also indicate that the factors affecting the evaluation results of environmental externality include public environmental sense, socioeconomic variables and preference for environmental attributes.

Key words: environmental externality; thermal power industry; choice experiment method; life cycle method

[责任编辑:孟青]