

深圳市非电企业锅炉能源替代环境效益分析*

杨 蕾¹ 霍杰鹏² 庄大昌¹

(1. 广东财经大学公共管理学院, 广东 广州 510320; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要 2011年深圳市实施了高污染工商业锅炉淘汰、改造与清洁能源替代工程,作为大气污染防治控制、保障城市空气质量的重点工作之一。以深圳市除发电厂之外的工商业锅炉为研究对象,应用排放系数法对该工程实施前后锅炉大气污染物及温室气体排放量变化进行了估算和分析。研究表明,通过锅炉改造、关停与能源替代工作的开展,深圳锅炉PM₁₀、SO₂、NO_x、CO₂等污染物排放量分别下降了30.0%、57.3%、33.1%和15.8%,实现了大气环境质量的改善。建议“十二五”期间应进一步实施高污染锅炉淘汰与改造,加强区域集中供热,并提出应针对不同类型锅炉进行不同的替代能源选择,给出了燃煤、燃木材及燃油锅炉替代能源选择的具体建议。

关键词 锅炉 能源替代 环境效益 深圳市

Environmental benefits assessment on energy substitution of boilers in Shenzhen's non-power plants YANG Lei¹, HUO Jiepeng², ZHUANG Dachang¹. (1. School of Public Administration, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou Guangdong 510320; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640)

Abstract: Shenzhen implemented the project of high polluting commercial boilers elimination, transformation and clean energy substitution in 2011, as one of the important issue to control atmospheric pollution and protect urban air quality. This study takes all boilers exclusive of those in power plants as objects, conducts the emission-factors method to estimate and analyze the changes of air pollutants and greenhouse gas emissions before and after the project implementation. The result shows that the coal, heavy oil consumption of boilers decreased, while the light oil, natural gas, firewood and electricity consumption increased through the implementation of the project, which caused the emission of PM₁₀, SO₂, NO_x and CO₂ reduced by 30.0%, 57.3%, 33.1% and 15.8% respectively. The decrease of air pollutants emission contributed a lot to Shenzhen's atmospheric environment improvement. It was suggested that in the period of the 12th Five-year Plan, Shenzhen should implement further transformation and elimination of the high polluting boilers, strengthen regional central heating, and gives specific advices for the energy substitution of coal burning boilers, firewood burning boilers and heavy oil fired boilers.

Keywords: boiler; energy substitution; environmental benefit; Shenzhen

作为高耗能的特种设备之一,锅炉每年消耗的能源约占我国能源消耗的1/4,而其燃料的燃烧是大气环境污染的重要来源之一,对人体健康、空气质量和气候变化产生重要的不良影响^[1]。我国现有锅炉以燃煤锅炉为主,锅炉的煤炭消耗量远高于钢铁、石化、建材等高耗能工业行业,每年排放烟尘约200万t,SO₂约600万t,是仅次于火电厂的第二大煤烟型污染源^[2]。因此,在国家《节能中长期专项规划》、《节能减排十二五规划》中,燃煤工业锅炉(窑炉)改造均被列为十大重点节能工程之首。另外,燃木柴锅炉排放大量粉尘,燃重油锅炉因重油含硫量达2%(质量分数,下同)~3%,对环境的污染较大。因此,天然气、柴油、液化天然气(LNG)、液化石油气

(LPG)以及电力等能源在锅炉清洁能源替代中扮演着重要的角色^[3-6]。

深圳市是我国改革开放的前沿地,在经济社会持续高速发展的同时也面临着资源环境的约束。近年来,深圳市将发展低碳经济、推进节能减排作为建设城市生态文明建设的重要抓手,先后出台了《深圳市节能减排综合性实施方案》、《深圳市节能中长期规划》等政策法规,强调应优化能源结构,不断提高清洁能源的比例。以2011年第26届世界大学生夏季运动会举办和创建全国文明城市标兵为契机,深圳市进一步制定了《环境空气保障专项行动计划》,将淘汰或改造高污染工商业锅炉(窑炉)、加强锅炉(窑炉)清洁能源替代作为大气污染防治控制、保障城市空

第一作者:杨 蕾,女,1985年生,博士,讲师,研究方向为资源环境与区域可持续发展。

* 中国可持续能源项目(No. G1010-13511);广东商学院博士启动项目(No. 11BS48001)。

气质量的重点工作之一。本研究以深圳市除发电厂以外所有工商业锅炉(以下简称非电企业锅炉)为研究对象,估算锅炉改造与能源替代前后其大气污染物及温室气体排放量的变化,全面反映锅炉能源替代的环境效益,为深圳市进一步实施能源结构调整、制定大气污染控制策略、探索低碳发展路线等宏观决策提供科学依据,也可为其他城市提供参考与借鉴。

1 深圳市非电企业锅炉能源利用调查分析

1.1 总量及分布

经调研统计,2010年深圳市原有锅炉约2400台,随着深圳市环境空气质量保障工程的推进,部分企业实施了锅炉改造、能源替代或关停(以下简称能源替代工程),截至2011年11月,深圳市现有锅炉约2100台。

按锅炉大小进行分类统计,深圳市锅炉主要以小容量锅炉为主(见图1),能源替代工程实施前后,容量 ≤ 4 t/h的锅炉始终占锅炉总量的约90%,其中又以 ≤ 2 t/h为主体;4~10 t/h的锅炉占7%;而 >10 t/h的锅炉占比仅为3%左右。从锅炉利用的产业分布来看,主要集中在工业制造业,其锅炉总数占深圳市锅炉总量的90%。锅炉按照燃料分类主要分为燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉、电加热锅炉和新能源(太阳能、生物质能等)锅炉等,对应消费的燃料品种主要包括煤(水煤浆)、柴油、重油、天然气、LNG、LPG、电、木材等。深圳工业企业以燃油锅炉为主,使用柴油等轻油为燃料的企业约占工业企业总数的35.2%,使用重油为燃料的企业数量则约占31.2%。第三产业企业锅炉燃料使用种类则更为清洁,主要

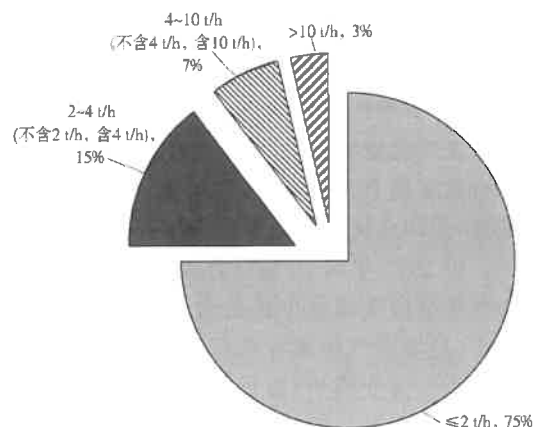


图1 深圳市锅炉在不同额定出力间的分布
Fig.1 Distribution of different rated load of boilers in Shenzhen

以电力、天然气为主体(见表1)。可见,深圳市非电企业锅炉总体上消费结构相对清洁。随着能源替代工程的开展,燃煤、燃重油锅炉的比重明显下降,以电、柴油、LNG、LPG等清洁能源为燃料的锅炉比例则大幅上升,从42.0%上升至69.4%(见图2),为能源消费结构的进一步清洁化奠定了良好的基础。

表1 深圳工业企业与第三产业企业单位燃料使用类型及占比

Table 1 Fuel types and corresponding proportions using in industrial enterprises and tertiary industry enterprises of Shenzhen

燃料类型	工业企业个数比例/%	第三产业企业个数比例/%
煤	13.3	16.7
重油	31.2	14.7
柴油等轻油	35.2	14.1
天然气、液化气等	6.5	17.3
木材	8.7	12.2
电	5.0	25.0

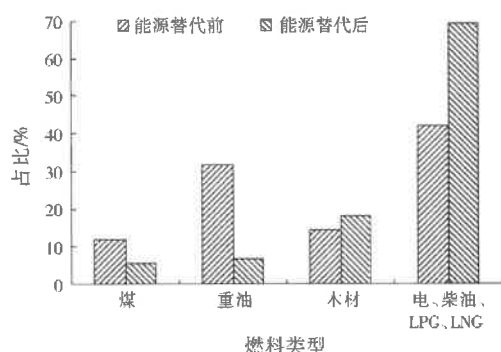


图2 深圳市不同燃料类型的锅炉分布
Fig.2 Distribution of different fuel type of boilers in Shenzhen

1.2 能耗估算

根据锅炉的参数对各能源品种的消耗量进行估算,主要估算方法具体步骤如下:(1)设100℃、1个大气压下的1 t饱和蒸汽的热量相当于0.09 t标准煤,标准煤热值是29307 kJ/kg;(2)根据各种燃料的热值与锅炉效率参数设定,得出各燃料每小时的消耗量;(3)假设每台锅炉平均一年工作300 d,每天工作12 h,计算各燃料的年消耗总量;(4)采用折算系数将各燃料的年消耗总量统一折算为以标准煤为单位的综合能源消费量。

估算结果表明,能源替代工程开展之前,煤和重油是深圳企业锅炉燃料动力的主要能源品种,分别占总能源消费量的约28%,其次是木材占18.0%,柴油等轻油和天然气等清洁能源消费分别占14.2%和10.6%,电力则仅占1.0%。能源替代工程实施后,企业用作燃料动力的能源消耗总额有所减少

(见表2),总的能源消耗中燃煤和燃重油的比例得到较大的下降,柴油等轻油、木材的消耗比例则大幅上升,电力比例也出现小幅的上升,能源消耗整体呈清洁化方向发展。

表2 能源替代工程前后深圳市锅炉各能源品种年消耗量估算值及占比
Table 2 Energy consumption estimates of boilers and corresponding proportions before and after the energy substitution project in Shenzhen

燃料类型	能源替代前		能源替代后	
	年消耗总量 /万 t 标准煤	占比 /%	年消耗总量 /万 t 标准煤	占比 /%
煤	46.9	28.2	24.2	17.7
重油	46.6	28.0	16.0	11.7
柴油等轻油	23.6	14.2	29.8	21.8
天然气等	17.6	10.6	24.1	17.6
木材	29.9	18.0	39.7	29.0
电	1.7	1.0	3.0	2.2

2 锅炉能源替代的环境效益分析

2.1 大气污染物排放量估算方法

采用排放系数法对深圳锅炉的常规大气污染物(SO₂、NO_x、PM₁₀)以及主要温室气体(CO₂)产生量进行估算。因天然气、LNG、LPG等燃料以及电力在利用过程中产生大气污染物数量较少,在此仅以煤、重油、轻油及木材等高污染能源为燃料的锅炉为计算对象。其中NO_x、PM₁₀的排放量估算方法如式(1)所示,各能源品种的NO_x、PM₁₀排放系数及燃料中的C或S元素含量百分比数据引自文献[7~11],具体数据见表3。

$$M=AE(1-\eta)/1\,000 \quad (1)$$

式中:M为污染物年排放量,万t/a;A为燃料年消耗量,万t/a;E为污染物排放系数,即单位燃料产生的污染物量,g/kg; η 为末端治理措施的污染物去除率。

SO₂和CO₂的排放量根据物料平衡的方法估算,估算方法如式(2)所示:

$$M=ACP(1-\eta) \quad (2)$$

式中:C为燃料中C或S元素的质量分数,%;P为燃料中C或S元素转化成CO₂或SO₂的质量转化系数。

完全燃烧状态下,该质量转化系数分别为3.67和2^[12]。一般的,工业燃煤与燃木柴锅炉平均燃烧效率约为80%,燃油锅炉约90%。考虑到不完全燃烧工况,本研究采用的质量转化系数由完全燃烧状态下C和S元素的质量转换系数乘以平均燃烧效率计算得出,其中燃煤与燃木柴锅炉的C和S元素的质量转换系数分别为2.94和1.60,燃重油和燃轻

油锅炉则为3.30和1.80。

表3 锅炉主要大气污染物排放系数
Table 3 Main atmospheric pollutant emission coefficients of boiler

燃料类型	煤	重油	轻油	木柴
PM ₁₀ /(g·kg ⁻¹)	6.3 ²⁾	2.3 ³⁾	1.0 ³⁾	5.7 ⁴⁾
NO _x ¹⁾ /(g·kg ⁻¹)	7.5	5.8	7.5	1.9
C _S ⁵⁾ /%	2.0	2.5	0.6	0
C _C ⁵⁾ /%	55	90	90	80

注:1)引自文献[7];2)引自文献[8];3)引自文献[10];4)引自文献[9];5)C_S、C_C分别表示燃料中S、C元素的质量分数,数据引自文献[11]。

2.2 计算结果与分析

根据式(1)、式(2)所得能源替代前后4种不同燃料污染物排放量的估算结果如表4所示。从排放总量来看,深圳锅炉的各大气污染物排放量均有不同程度的下降,PM₁₀总排放量下降约30.0%,SO₂排放量下降57.3%,NO_x下降33.1%,CO₂则下降15.8%,可见通过锅炉能源替代工程的开展,有效削减了大气污染物的排放,实现了大气环境质量的改善。

从各燃料的污染物排放情况看,能源替代前,燃煤对3类常规污染物的排放贡献均最大,其PM₁₀、SO₂、NO_x的排放量分别占锅炉排放总量的51.6%、56.2%、54.7%,燃木材则对CO₂的排放贡献最大,其CO₂排放量占锅炉排放总量的32.9%,燃煤位居第二,约占28.4%,同时燃木材锅炉的PM₁₀排放量也相对较大,约占锅炉PM₁₀排放总量的37.1%。燃重油则对SO₂和NO_x排放贡献较大,仅次于燃煤,位居第二。能源替代后,各燃料对大气污染物排放的贡献率出现了变化,燃煤对SO₂、NO_x的排放贡献仍最大,分别占锅炉排放总量的55.5%、42.1%;因木材消费量及消费比例的上升,使得燃木材引致的PM₁₀、NO_x及CO₂排放量均增加,其中其PM₁₀及CO₂排放量占锅炉相应污染物排放总量的63.0%和52.3%,位居第一。

综合而言,因煤和重油的消耗量的下降,对锅炉的3类常规污染物及CO₂排放量下降有着重要的贡献(见图3),柴油等轻油和木材消耗量增加,因而对大气污染物排放量的下降起了负向的影响。值得注意的几点是:

(1)燃木材对PM₁₀排放有较大影响。虽然木柴含硫量及含氮量较低,燃烧产物中的SO_x、NO_x少,对大气污染较少,本身较为清洁,但由于一般使用燃木柴锅炉的企业蒸发量较少,没有安装烟气除

表 4 能源替代前后不同燃料的大气污染物排放情况

Table 4 Atmospheric pollutant emission of different fuels before and after the energy substitution project 万 t

项目	PM ₁₀		SO ₂		NO _x		CO ₂	
	能源替代前	能源替代后	能源替代前	能源替代后	能源替代前	能源替代后	能源替代前	能源替代后
煤	0.414	0.163	2.10	0.89	0.494	0.254	106.2	54.7
重油	0.075	0.025	1.47	0.50	0.189	0.065	96.8	33.3
轻油	0.016	0.020	0.17	0.22	0.121	0.153	48.2	60.6
木材	0.298	0.354	0	0	0.099	0.132	123.0	163.1
合计	0.803	0.562	3.74	1.61	0.903	0.604	374.2	311.7

尘环保措施,木柴燃烧产生的粉尘较轻、较小,悬浮在环境中,造成较大悬浮颗粒物污染。尤其对于深圳市等沿海地区,木柴的露天堆放使其容易潮湿,湿木柴的热效率很低,其用量可以是干木柴的 2~3 倍。目前,废木料只有很少部分以层燃燃烧方式加以利用,其效率严重偏低,造成燃料资源的极大浪费与环境的污染。因此,木柴实为高污染燃料,应予以重视,逐步淘汰。短期内对使用燃木材类锅炉需严格要求企业安装相应的除尘设施。

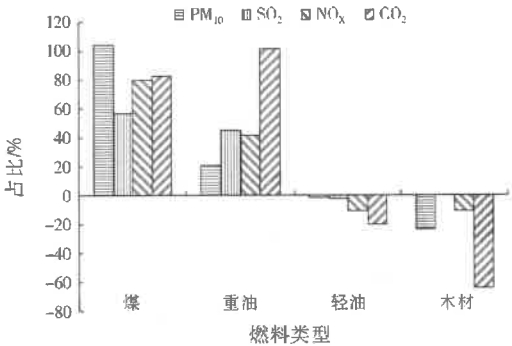


图 3 各燃料对大气污染物排放下降的贡献百分比
 Fig. 3 Contribution percentage of each fuel in the decrease of atmospheric pollutant emission

(2) 对 NO_x 排放量变化的计算,未考虑天然气消费量变化对其的影响。据资料表明,天然气的燃烧也是 NO_x 排放的来源之一,工业行业天然气燃烧的 NO_x 排放因子达 20.85 kg/万 m³[7]。由于数据不包括燃烧天然气锅炉 NO_x 前后排放量的统计,可能造成本次计算结果中对 NO_x 排放下降率的高估。因而,为净化环境,必须强化烟气脱硝排放治理。一方面包括采用吸附法、液体吸收法、催化还原法等净化方法净化处理烟气中的 NO_x; 另一方面则需要通过改善燃烧状态和烟气尾部治理脱硝促进 NO_x 排放的下降。

(3) 深圳市的中小型锅炉改造与能源替代的污染治理措施未能有效地去除 CO₂。从表 3 不同燃料的碳排放系数可以看出,不仅各类化石矿物燃料燃烧会产生较高的碳排放,木材等生物质燃料的碳排

放系数同样较高。目前,虽然煤、重油等能源品种的 CO₂ 排放量下降较大,但总体排放量的下降幅度仍较为有限。因此,CO₂ 的减排不仅需要发展洁净燃煤、使用更为清洁的天然气和电力等能源品种,积极促进 CO₂ 回收利用技术的开发也是后续节能减排工作中应持续关注重点。

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 深圳市锅炉分布呈现量大面广、平均容量小的特点。≤4 t/h 的小锅炉运行效率整体偏低,且环保措施相对落后,是深圳市锅炉污染治理的一大重点。

(2) 深圳市非电企业锅炉总体上能源消费结构相对清洁,这与深圳近年来重视节能减排、关注环境质量密不可分。通过能源替代工程的开展,煤、重油年消耗总量分别由 46.9 万、46.6 万 t 标准煤下降至 24.2 万、16.0 万 t 标准煤,占锅炉能源消耗总量比例也由 28.2%、28.0% 分别降至 17.7% 和 11.7%。柴油等轻油、天然气、木材等的消耗比例相对有了较大上升,锅炉的能源消费结构进一步清洁化。因而深圳锅炉的各大气污染物排放量也均有不同程度的下降,PM₁₀ 总排放量下降约 30.0%,SO₂ 排放量下降 57.3%,NO_x 下降 33.1%,CO₂ 则下降 15.8%,实现了大气环境质量的改善。

(3) 能源替代工程实施后,当前燃煤对 SO₂、NO_x 的排放贡献最大,其排放量分别占锅炉相应污染物排放总量的 55.5%、42.1%,燃油位居第二;燃木材对 PM₁₀ 及 CO₂ 的排放贡献最大,其排放量分别占锅炉相应污染物排放总量的 63.0% 和 52.3%。因此,未来在能源替代时要注意避免燃木材、燃油比例较高,导致污染物减排不力的问题,同时应将锅炉能源替代与环保改造、产业调整相结合,更好地削减大气污染物的排放,持续改进深圳市空气质量。

3.2 建议

目前,深圳市非电企业锅炉能源替代工作的开

展已取得一定成效,“十二五”期间,锅炉能源替代工作的进一步推进过程中,一方面应进一步关停一些使用年数较高、无力改造的锅炉;有条件的地区应加强集中供热,取代旧有分散小锅炉,提高热效率、集中处理污染。另一方面,应针对不同类型锅炉改造经济成本与环境成本的不同,进行不同的替代能源选择建议,配合相应的政策激励与惩罚措施,以提高企业进行能源替代与污染控制的积极性。

对于燃煤中小型锅炉,可考虑采用固体洁净燃料替代,因其不需要对原有的锅炉结构做很大的改动,改造成本较低。如使用目前较成熟的生物质成型燃料或生物质型煤。生物质燃料具有易运输、燃烧效率高、灰分少、含硫量少和 CO_2 零排放等优点,用于燃煤锅炉中,不需要改动炉膛结构,由于其热值比煤稍低,只需要修改炉子的配风系统和给料系统即可。虽燃料成本比煤约高 55%,但相比天然气、柴油和电等燃料的使用成本较低,而且对环境造成的污染比煤大幅减少。燃用型煤同散煤相比,锅炉效率能提高约 5%~8%,节煤 7%~13%,烟尘排放量可减少 50%左右,若型煤中加入固硫剂,还可使 SO_2 排放量显著减少,能较好达到节能减排的效果。如若采用液体或气体燃料替代,可使燃烧效率更高,更环保,但改造成本较高,难度较大,燃料的价格也较高,短期内企业的接受程度较低。同样,燃木柴锅炉最为经济的替代能源为生物质成型燃料,且应增加旋风除尘、水膜除尘、布袋除尘与在线监测等除尘设备与环保设施。燃油锅炉因其热效率高、运行耗能低,本身具有节能减排的优势。其中,燃重油锅炉因重油含硫量较大、杂质较多,会对环境造成较大的污染,而轻油的硫质量分数在 0.6%左右,对环境的污染较小,因此燃油锅炉应尽量改用柴油等轻油作为燃料,或对锅炉本体做改造使其使用气体燃料。

参考文献:

- [1] GAFFNEY J S, MARLEY N A. The impact s of combustion e-missions on air quality and climate-from coal to bio-fuels and beyond[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(1): 23-36.
- [2] 国家电网公司营销部. 能效管理与节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] 施泉生, 庄丰翥. 试论能源替代与电力市场开拓[J]. 上海电力学院学报, 2006(1): 97-100.
- [4] 邱莉萍. 浅谈兰州天然气替代燃煤的效益分析[J]. 甘肃科技, 2006(1): 26-27.
- [5] 李亚军, 华贲, 李国庆. 我国液化石油气资源的优化利用[J]. 石油炼制与化工, 2005(3): 46-50.

- [6] 张文清. 加热炉中轻质煤焦油替代原油的环保节能研究[J]. 中国高新技术企业, 2008(16): 46.
- [7] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6): 493-497.
- [8] 郭欣, 陈丹, 郑楚光, 等. 燃煤锅炉可吸入颗粒物排放规律研究[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 587-592.
- [9] 王小刚, 李海滨, 向银花, 等. 燃烧源中可吸入颗粒物排放特征及测量方法的研究进展[J]. 能源环境保护, 2006, 20(2): 14-18.
- [10] 姚芝茂, 邹兰, 王宗爽, 等. 燃油锅炉颗粒物排放因子的研究[J]. 环境工程, 2009, 27(S1): 237-241.
- [11] 韩昭沧. 燃料及燃烧[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [12] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. [2013-05-16]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/chinese/vol1.html>.

编辑: 陈泽军 (修改稿收到日期: 2013-08-25)

(上接第 92 页)

参考文献:

- [1] 国务院. “十二五”国家战略性新兴产业发展规划[R]. 北京: 国务院, 2012.
- [2] 国务院. “十二五”节能环保产业发展规划[R]. 北京: 国务院, 2012.
- [3] 泰勒尔. 产业组织理论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.
- [4] 王俊豪. 现代产业经济学[M]. 北京: 经济科学出版社, 2004.
- [5] 杨学津, 刘明. 基础产业市场绩效评价与衡量[J]. 首都经济贸易大学学报, 2000, 2(4): 17-20.
- [6] 胡川. 企业产权制度创新对市场结构及绩效演进影响的研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 98-107.
- [7] 陈君君, 马生鹏, 蔡华. 产权制度差异对水务产业绩效影响的分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 16-20.
- [8] 屈晓婷, 姚念衡, 杨杨. 国有企业绩效评价方法的中外比较研究[J]. 山东农业大学学报: 社会科学版, 2006, 8(4): 90-94.
- [9] SINGH R K, MURTY H R, GUPTA S K, et al. Development of composite sustainability performance index for steel industry[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(3): 565-588.
- [10] 谢洪军. 市场化进程中中国电力产业绩效评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [11] 程亮, 吴舜泽, 孙宁, 等. 论中央环境保护专项资金项目绩效评价指标体系构建[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(11): 189-194.
- [12] 李建, 胡海青, 张道宏, 等. 环保企业绩效评价体系构建及模糊综合评判[J]. 统计与决策, 2008(6): 186-188.

编辑: 丁 怀 (修改稿收到日期: 2013-02-06)