

毛显强,曾桢,刘胜强,等. 2012. 钢铁行业技术减排措施硫、氮、碳协同控制效应评价研究[J]. 环境科学学报, 32(5): 1253-1260
Mao X Q, Zeng A, Liu S Q, et al. 2012. Assessment of SO₂, NO_x and CO₂ co-control effects by technological reduction measures in iron & steel industry [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(5): 1253-1260

钢铁行业技术减排措施硫、氮、碳协同控制效应评价研究

毛显强^{1,*}, 曾桢¹, 刘胜强¹, 胡涛², 邢有凯¹

1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875
2. 环境保护部环境与经济政策研究中心, 北京 100029

收稿日期: 2011-07-02 修回日期: 2011-08-16 录用日期: 2011-09-01

摘要: 随着我国污染减排形势的日趋严峻, 在高污染行业采用协同控制措施实现多种污染物控制目标不仅十分必要而且非常迫切, 而合理评价减排措施的协同控制效应是实施协同控制的基础. 基于此, 本研究从环境-经济-技术角度系统地提出了钢铁行业技术减排措施对硫、氮、碳的协同控制效应评价方法, 包括: 协同控制效应坐标系分析、污染物减排量交叉弹性 ($Els_{a/b}$) 分析和单位污染物减排成本评价, 3 种评价方法相互配合, 可以从多角度检验不同减排措施的协同控制效应. 协同控制效应坐标系和污染物减排量交叉弹性分析的结果表明, 末端治理措施不具有协同控制效应或协同控制效应不佳, 而绝大多数过程控制措施都具有较好的协同控制效应. 单位污染物减排成本评价的结果表明, 末端治理措施优先度排序靠后, 而过程控制措施排序靠前, 且针对不同污染物的排序结果有所不同. 在进行钢铁行业协同减排方案设计和规划时, 应根据决策需要选择适宜的评价方法, 参考评价结果选择最为成本有效的措施.

关键词: 多污染物控制; 协同控制效应坐标系; 污染物减排量交叉弹性; 成本-效果评价

文章编号: 0253-2468(2012)05-1253-08 中图分类号: X192 文献标识码: A

Assessment of SO₂, NO_x and CO₂ co-control effects by technological reduction measures in iron & steel industry

MAO Xianqiang^{1,*}, ZENG An¹, LIU Shengqiang¹, HU Tao², XING Youkai¹

1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875
2. Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029

Received 2 July 2011; received in revised form 16 August 2011; accepted 1 September 2011

Abstract: As the situation of pollution control becoming pressing in China, it is not only necessary but also urgent to take co-control measures to obtain multi-pollutant control target. Development and application of the right assessment methods to evaluate the co-control effects of emission reduction measures is the basis of choosing the best available reduction measures and implementing co-control. Innovative and systematic methods are proposed to assess SO₂, NO_x and CO₂ co-control effects by technological reduction measures in iron & steel industry. Co-control effects coordinate system, pollutant reduction cross elasticity ($Els_{a/b}$) and unit pollutant reduction cost are deliberately designed and applied to examine the co-control effects of SO₂, NO_x and CO₂ for optional technological reduction measures in iron & steel industry. The analytical results of co-control effects coordinate system and $Els_{a/b}$ show that end-of-pipe control measures either do not have co-control effects at all or only have poor co-control effects, while most of the in-the-process control measures can reduce SO₂, NO_x and CO₂ emission simultaneously. Moreover, the unit pollutant reduction cost calculation also show that end-of-pipe measures are less prior than the in-the-process control measures. We suggest that policy makers should use appropriate assessment methods according to their policy targets, and then choose the most cost-effective technological reduction measures when conducting co-control planning for iron & steel industry.

Keywords: multi-pollutant control; co-control effects coordinate system; pollutant reduction cross elasticity; cost-effectiveness analysis

基金项目: 美国能源基金会中国可持续能源项目 (No. G-0911-11642); 环境保护行业性公益项目 (No. 201009051)

Supported by the China Sustainable Energy Program of Energy Foundation (No. G-0911-11642) and the Environmental Protection Gongyi Project (No. 201009051)

作者简介: 毛显强 (1970—), 男, 教授 (博士), E-mail: maqxq@bnu.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: MAO Xianqiang (1970—), male, professor (Ph. D.), E-mail: maqxq@bnu.edu.cn; * Corresponding author

1 引言 (Introduction)

我国政府在2011年3月公布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中设定了一系列大气污染物控制目标:单位国内生产总值(GDP)CO₂排放比2010年下降17%;主要污染物排放总量比2010年显著减少,其中,SO₂减少8%,NO_x减少10%。相较于“十一五”规划,不仅增加了NO_x总量控制目标,而且将CO₂减排纳入规划中,大气污染减排向多目标方向发展。由于单一的末端治理措施难以实现多污染物控制目标,因此,采用协同控制手段实现多污染物控制目标的理念应运而生。研究表明,SO₂、NO_x与温室气体的排放大多来自化石燃料的燃烧,具有“同源性”(丁一汇等,2009),一些减排局地大气污染物的措施对温室气体具有协同控制效应(王金南等,2010),这就为协同控制提供了可能。协同控制措施多具有“一举两得”的特点,采用适宜的协同控制措施有助于有效地实现多污染物控制目标。随着我国污染减排形势的日趋严峻,以及大气污染物减排工作的日益深化,在钢铁、电力等高污染行业采用协同控制手段实现多污染物控制目标,不仅十分必要而且非常迫切。

国际上对协同控制效应的研究最早起源于对温室气体减排效益的评估。IPCC最初的评估报告使用了次生效益(secondary benefits)、伴生效益(ancillary benefits)等概念(IPCC,1995;2006),将协同效应描述为在控制温室气体的同时所产生的局地大气污染物减排效益。在协同效应的定量化评价方面,已有研究大多着眼于协同减排潜力及由此产生的环境、健康、社会福利效益。例如,Tollefsen等(2009)估算了欧洲实施大气污染控制措施所产生的减缓气候变化协同效益;Wang和Smith研究了温室气体减排措施在短期内对人群健康的协同效应(Wang *et al.*,1999);Rypdal等(2007)研究了欧盟地区在6种气候变化政策情景下所产生的大气污染物和温室气体减排、环境质量、社会福利和人群健康协同效应;Gielen等(2007)研究了能源环境政策对CO₂、SO₂和NO_x的协同控制效应,并以上海为案例进行了分析。此外,也有学者从环境经济学角度研究了减排措施的协同效应相关关系,并进行了成本-效果评价(Chae,2010)。一般认为,协同控制效应应包括两个方面:一方面是在控制温室气体排放的

过程中减少了其他局地大气污染物排放(例如SO₂、NO_x、CO、VOC及PM);另一方面是在控制局地大气污染物排放过程中减少CO₂及其他温室气体排放,或者生态建设过程中增加碳汇(李丽平等,2009)。

虽然利用协同控制措施同时减排大气污染物和温室气体的理念已得到认同(胡涛等,2004;田春秀等,2009),但目前国内关于协同控制效应评价方面的研究还处于起步阶段,相关研究较少,仅见李丽平等(2010)以攀枝花市为例开展的初步研究。

近年来,我国钢铁行业发展迅速,2009年生铁、粗钢和成品钢材的产量分别达56863万t、57707万t和69340万t,相比2005年分别增长了65.42%、63.36%和83.58%(中国钢铁工业协会,2009;2010)。钢铁行业为高污染行业,产品产量的快速增长加剧了环境污染形势。2009年,钢铁行业SO₂和CO₂的排放量分别为170.18万t和13.52亿t,相比2005年分别增长了19.64%和51.74%(SO₂排放量来自于《2009中国环境统计年鉴》中“黑色金属冶炼及压延加工业”的数据,不包括炼焦环节。CO₂排放量为本研究估算,根据《中国能源统计年鉴2010》中“黑色金属冶炼及压延加工业”的能耗统计数据,以及《2006年IPCC国家温室气体清单指南》给定的排放因子估算得出,不包括炼焦环节)(国家统计局,2010;2011)。作为污染控制和节能减排的重点行业,钢铁行业面临着日益严峻的污染减排形势,开展协同控制研究对于实现行业减排目标具有非常重要的意义。

多污染物协同控制的途径主要有:技术减排、结构减排和规模减排,其中,技术减排措施是行业性协同控制方案设计的基础。技术减排措施数量众多,进行技术减排措施的环境-经济-技术评估是合理选择协同控制措施,实现行业减排目标的基础。因此,本研究以钢铁行业为例,开展技术减排措施协同控制效应评价研究,分析钢铁行业技术减排措施的硫、氮、碳协同控制效应,旨在丰富国内协同控制效应研究方法,并为行业和区域层面的协同控制方案设计提供借鉴和参考。

2 钢铁行业技术减排措施及其技术经济属性 (Technological emission-reduction measures in iron & steel industry and their properties)

根据《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2002),钢铁行业(黑色金属冶炼及压延加工业)包括炼铁、炼钢、钢压延加工、铁合金冶炼4个子行业,

也有研究将铁矿石开采、烧结、炼焦等环节都归入钢铁行业. 炼焦行业属于“石油加工、炼焦及核燃料加工业”,但因为焦炭主要用于炼铁过程,而且我国大部分大型钢铁厂都配套建有焦化厂,因此,本研究将直接供给钢铁行业的焦化部门纳入研究范围,但不包括与钢铁生产无关的独立焦化厂.考虑到统计数据的可得性及主要大气污染物来源,本研究将烧结和炼焦纳入研究范围,即本文所研究的生产链包括原材料准备过程在内的炼焦、烧结、炼铁、炼钢(包括连铸)、轧钢五大环节(中国钢铁工业协会,2010).

钢铁行业技术减排措施数量众多,根据措施的减排机理可分为:末端治理措施、节能和余热利用措施、资源回收利用措施等;根据措施所处生产环节可分为过程控制措施和末端治理措施.本文所列举的主要候选技术措施来源于:发改委推出的《国家重点节能技术推广目录》、钢铁行业的清洁生产技术及末端治理技术.通过文献查阅、资料分析、行业调研和措施筛选,对减排效果较好且具有一定推广潜力和应用前景的技术减排措施进行分析,最终确定了11项钢铁行业技术减排候选措施,各项措施及其环境-经济-技术属性如表1所示.

表1 钢铁行业技术减排措施及其环境-经济-技术属性

Table 1 Technological emission-reduction measures in iron & steel industry and their properties

措施分类	措施名称	措施简称	减排系数/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)			单位产品总减排成本 /($\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$)
			SO ₂	NO _x	CO ₂	
过程控制 措施	干熄焦技术	干熄焦	0.07	0.02	54.46	-3.92
	煤调湿技术	煤调湿	0.01	0.004	10.50	-4.24
	烧结合余热发电	烧结发电	0.05	0.04	11.91	-6.26
	高炉顶压发电技术	TRT	0.14	0.12	36.50	-4.15
	高炉煤气燃气-蒸汽联合循环发电(CCPP)	CCPP	0.03	0.02	6.92	-3.87
	干法转炉煤气回收	转炉煤气	0.01	-0.002	11.76	-4.01
	转炉低压饱和蒸汽发电	转炉发电	0.04	0.03	9.60	-5.01
	能源管理中心	能源管理	0.04	0.01	31.96	-2.17
	末端治理 措施	烧结烟气脱硫	烧结脱硫	2.51	-0.02	-6.07
烧结烟气联合脱硫脱硝		脱硫脱硝	2.75	1.07	-7.15	12.21
二氧化碳捕集与封存(CCS)		CCS	-1.05	-0.86	1334.91	546.00

注:“减排系数”既包括直接减排效果,也包括节能或节电所带来的间接减排效果;“单位产品总减排成本”由建设成本、运行成本和投资收益构成,其中,运行成本包括设施运行过程中所产生的运行维护费用;投资收益是指由技术减排措施附带产生的节能、提高产品产量和质量等收益,是“负的成本”,但由于提高产品产量和质量等收益难以计算,本文在此仅计算了措施所带来的节能收益.运行成本和投资收益都是年度数据;建设成本为一次性投资成本,根据减排技术的使用年限折算为年度折旧(成本)值;最后根据产品年产量将减排成本折算到单位产品(t)上,就得到了以“ $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ ”为单位的“单位产品总减排成本”.本研究的数据均以中国钢铁工业2008年数据为基线.

3 协同控制效应评价方法 (Assessment methods of co-control effects)

钢铁行业技术减排措施协同控制效应评价方法包括:协同控制效应坐标系分析、污染物减排量交叉弹性分析和成本-效果评价.协同控制效应坐标系能够较为直观地反映技术减排措施对于不同污染物的减排效果,污染物减排量交叉弹性则可将协同控制效应进一步量化.成本-效果评价在前述两种方法的基础上将技术减排措施的减排效果和减排成本结合起来,进行综合的环境-经济分析.由于SO₂、NO_x是我国“十二五”期间的主要大气污染控制对象,也是钢铁行业的主要大气污染物,故本研究评价钢铁行业技术减排措施对这2种污染物及CO₂

的协同控制效应.

3.1 协同控制效应坐标系分析

在二维或多维欧氏空间坐标系中,以不同的坐标表达某技术减排措施对于不同污染物的减排效果,可称为“协同控制效应坐标系”.某技术减排措施在坐标系中所处的空间位置,可以直观地反映其减排效果及其“协同”状况.

以二维坐标系为例(图1),横坐标表示技术减排措施对某种大气污染物的减排效果,纵坐标表示对温室气体的减排效果.坐标系中的每个点分别对应一项技术减排措施,点的横、纵坐标则直观地表达了该措施对大气污染物和温室气体的减排效果:位于第一象限表示该措施可同时减排两类污染物,位于第二象限表示减排温室气体但增排大气污染

物,位于第四象限表示减排大气污染物但增排温室气体,位于第三象限表示同时增排两类污染物.在第一象限中,某点到原点连线与横坐标的夹角越大,表明该点所代表的措施在减排等量大气污染物的同时,对温室气体的减排效果越好(如图1中点E所代表的措施优于点A所代表的措施);该连线与横坐标夹角相同时,距原点越远则表明该措施对大气污染物和温室气体的减排强度越大(如图1中点N所代表的措施优于点M所代表的措施).同理,协同控制效应三维坐标系可用于直观地反映减排措施对3种污染物的减排效果及其“协同”状况,分析方法与协同控制效应二维坐标系类似.

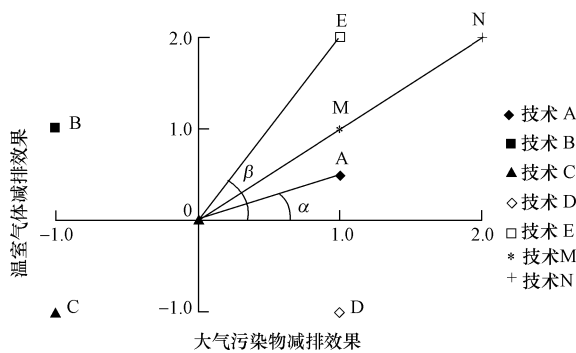


图1 技术减排措施协同控制效应坐标系示意图

Fig. 1 Co-control effects coordinate system of technological emission-reduction measures

3.2 污染物减排量交叉弹性分析

污染物减排量交叉弹性用于评价技术减排措施对大气污染物和温室气体减排的协同程度,记为 $Els_{a/b}$,下标 a, b 分别代表不同的污染物.与协同控制效应坐标系一样,这一指标也能够反映各项技术减排措施对于不同污染物是否具有协同控制效应及其“协同程度”.污染物减排量交叉弹性的计算公式如下:

$$Els_{c/s} = \frac{\Delta c/C}{\Delta s/S}, Els_{s/c} = \frac{\Delta s/S}{\Delta c/C} \quad (1)$$

$$Els_{c/n} = \frac{\Delta c/C}{\Delta n/N}, Els_{n/c} = \frac{\Delta n/N}{\Delta c/C} \quad (2)$$

$$Els_{n/s} = \frac{\Delta n/N}{\Delta s/S}, Els_{s/n} = \frac{\Delta s/S}{\Delta n/N} \quad (3)$$

式中, Els 为污染物减排量交叉弹性, $\Delta c/C$ 为 CO_2 排放量变化率, $\Delta s/S$ 为 SO_2 排放量变化率, $\Delta n/N$ 为 NO_x 排放量变化率.

式(1)表示技术减排措施对 SO_2 和 CO_2 减排的

交叉弹性,式(2)表示技术减排措施对 NO_x 和 CO_2 减排的交叉弹性,式(3)表示技术减排措施对 SO_2 和 NO_x 减排的交叉弹性. $Els_{c/s}$ 与 $Els_{s/c}$ 、 $Els_{c/n}$ 与 $Els_{n/c}$ 、 $Els_{n/s}$ 与 $Els_{s/n}$ 分别互为倒数.由于本文着重考虑控制局地大气污染物的同时减少 CO_2 排放,因此公式(1)、(2)中将以局地大气污染物 SO_2 和 NO_x 排放量变化率为分母的公式列在前面以示强调.

如果 $Els_{a/b} < 0$,表明此项技术减排措施对一种污染物有减排作用而对另外一种污染物没有减排作用,不具有协同控制效应;如果 $Els_{a/b} > 0$,表明此项技术减排措施对 a, b 均有减排作用(排除分子分母均为负数的情况),具有协同控制效应;如果 $Els_{a/b} = 1$,表明此项技术减排措施对 a, b 两种污染物的减排程度相同;如果 $0 < Els_{a/b} < 1$,表明此项技术减排措施对 b 的减排程度高于 a ;反之,如果 $Els_{a/b} > 1$,表明此项技术减排措施对 a 的减排程度高于 b .

3.3 技术减排措施成本-效果评价

本文使用“单位污染物减排成本”指标进行技术减排措施的成本-效果评价.单位污染物减排成本的计算公式如下:

$$C_{i,j} = \frac{CC_i - MB_i}{Q_{i,j}} \quad (4)$$

式中, $C_{i,j}$ 为 i 措施减排单位 j 污染物的成本(元· kg^{-1}), CC_i 为 i 措施的污染物控制成本(包括建设成本和运行成本,实际运算中折算成生产单位钢产品的成本,元· t^{-1} ,下同), MB_i 为 i 措施的节能增效收益(元· t^{-1} ,以钢产品计), $Q_{i,j}$ 为减排措施 i 对污染物 j 的减排量($kg \cdot t^{-1}$,以钢产品计).

单位污染物减排成本在前述两种评价方法的基础上,将技术减排措施的减排效果和减排成本综合考虑,反映了减排单位量的污染物所必须付出的成本.单位污染物减排成本较低的措施成本有效性较好,具有较高的优先度;单位污染物减排成本较高的措施成本有效性较差,优先度较低.

4 协同控制效应评价结果(Assessment results of co-control effects)

4.1 协同控制效应坐标系分析

钢铁行业技术减排措施协同控制效应二维坐标系和三维坐标系的分析结果分别如图2、图3所示,其中,图3中左图是包含所有技术减排措施的协同控制效应三维坐标系图,右图是除 CCS 以外的协同控制效应三维坐标系图.

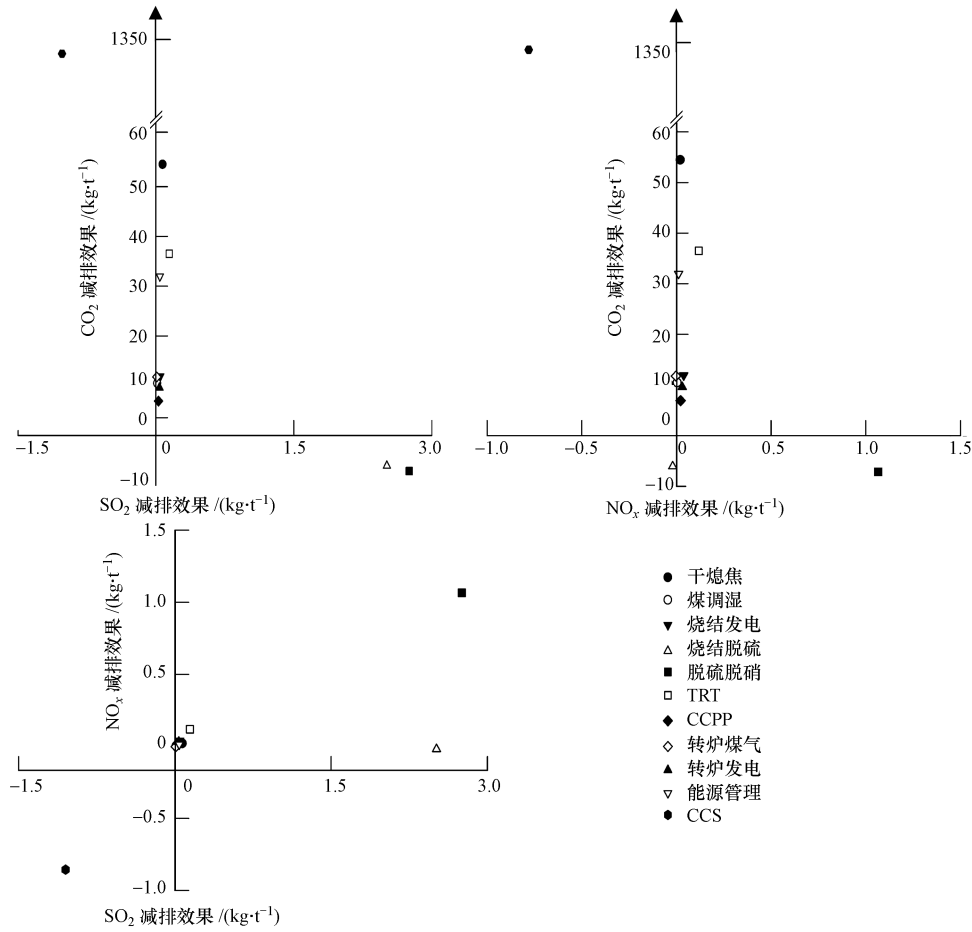


图2 钢铁行业技术减排措施 SO₂、NO_x与 CO₂协同控制效应二维坐标系

Fig. 2 SO₂, NO_x and CO₂ co-control effects planar coordinate system of technological emission-reduction measures in iron & steel industry

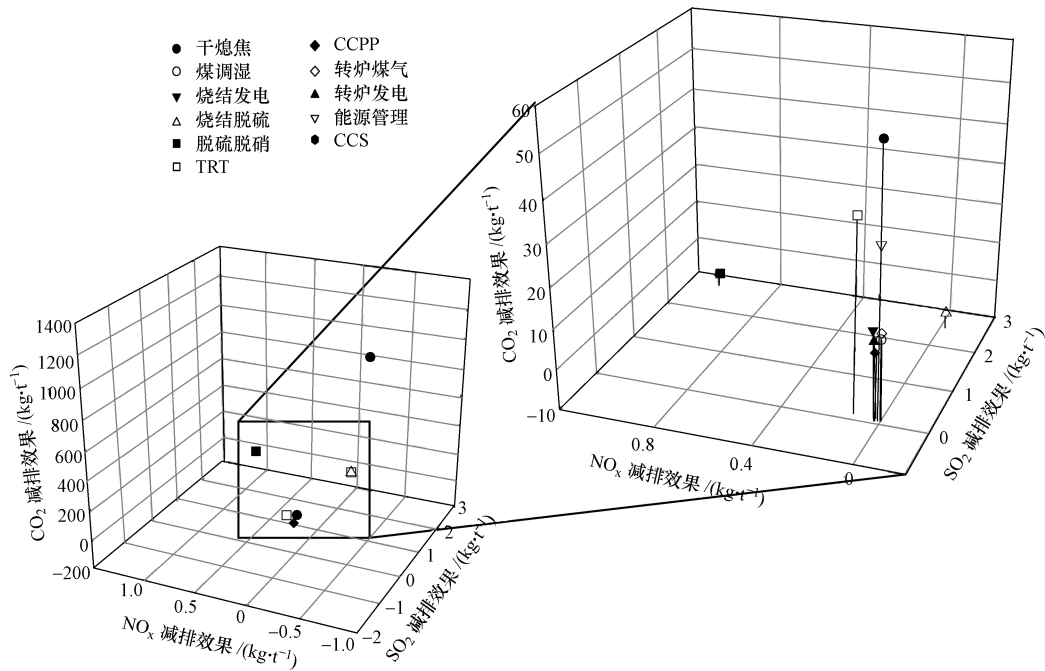


图3 钢铁行业技术减排措施 SO₂、NO_x与 CO₂协同控制效应三维坐标系

Fig. 3 SO₂, NO_x and CO₂ co-control effects three-dimensional coordinate system of technological emission-reduction measures in iron & steel industry

从钢铁行业技术减排措施协同控制效应坐标系分析的结果来看,末端治理措施中,除烧结烟气联合脱硫脱硝技术能同时减排 SO₂ 和 NO_x 且增排 CO₂ 外,其余的末端治理措施在减排一种污染物的同时都会增排其余两种污染物,不具有协同控制效应,说明末端治理措施或没有协同控制效应或协同控制效应不佳;而绝大多数过程控制措施在减排一种污染物的同时也会减排其余两种污染物,具有较好的协同控制效应。

4.2 污染物减排量交叉弹性分析

钢铁行业技术减排措施污染物减排量交叉弹性分析的结果如表 2 所示. 从 Els_{a/b} 值的正负来看,

表 2 钢铁行业技术减排措施污染物减排量交叉弹性 Els_{a/b} 结果汇总

Table 2 Els_{a/b} of technological emission-reduction measures in iron & steel industry

措施简称	Els _{c/s}	Els _{s/c}	Els _{c/n}	Els _{n/c}	Els _{n/s}	Els _{s/n}
干熄焦	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
煤调湿	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
烧结发电	0.33	3.02	0.14	7.40	0.41	2.45
TRT	0.33	3.02	0.14	7.40	0.41	2.45
CCPP	0.33	3.02	0.14	7.40	0.41	2.45
转炉煤气	1.69	0.59	-2.14	-0.47	-1.27	-0.79
转炉发电	0.33	3.02	0.14	7.40	0.41	2.45
能源管理	1.00	1.00	1.17	0.86	1.17	0.86
烧结脱硫	-0.003	-	-	-	-42.68	-
脱硫脱硝	-0.003	-	-0.003	-	0.86	1.16
CCS	-	-0.60	-	-1.47	-	-

注:对于以某种污染物为特定减排对象的技术减排措施(表中粗体标注的措施),仅计算以该污染物减排比率为分母的污染物减排量交叉弹性。

末端治理措施中,除烧结烟气联合脱硫脱硝技术的硫、氮交叉弹性为正之外,其他 Els_{a/b} 值均为负,同样说明这些措施或不具有协同控制效应或协同控制效应不佳;而过程控制措施中,除干法转炉煤气回收技术部分 Els_{a/b} 值为负之外,其他 Els_{a/b} 值均为正,说明这些措施具有较好的协同控制效应. 从 Els_{a/b} 的数值来看,干熄焦技术和煤调湿技术等属于节能措施,Els_{a/b} 值均为 1,说明这些措施不仅具有协同控制效应,而且协同程度很高,这是因为节能措施能够等比例地减排具有同源性的 SO₂、NO_x 和 CO₂ 等污染物;烧结发电和 TRT 等属于节电措施,各项 Els_{a/b} 值对应相等,且对硫、氮的减排程度高于碳。

4.3 成本-效果评价

钢铁行业技术减排措施的单位污染物减排成本及优先度排序结果如图 4 所示,其中,对于末端治理措施只列出其所针对污染物的减排成本. 从钢铁行业技术减排措施成本-效果评价的结果来看,技术减排措施对 SO₂、NO_x 和 CO₂ 的单位减排成本区间分别为 -439.66 ~ 7.61 元·kg⁻¹、-1079.19 ~ 1675.70 元·kg⁻¹ 和 -0.56 ~ 0.41 元·kg⁻¹. 各项措施的优先度排序结果表明,过程控制措施排序靠前,如煤调湿和 CCPP 总是排在前 4 位,而末端治理措施均排在末尾;不同污染物的优先度排序结果表明,由于针对的污染物不同,排序结果差异较大。

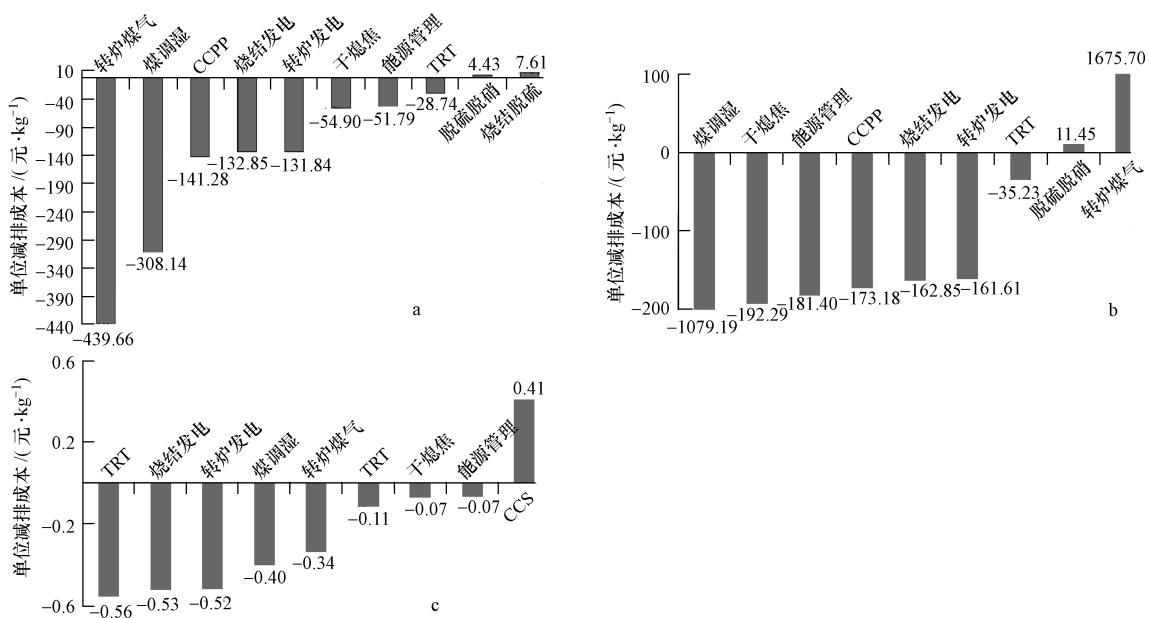


图 4 钢铁行业技术减排措施单位污染物减排成本及优先度排序(a. SO₂, b. NO_x, c. CO₂)

Fig. 4 Unit pollutant reduction cost and priority order of technological emission-reduction measures in iron & steel industry(a. SO₂, b. NO_x, c. CO₂)

5 结论 (Conclusions)

1) 协同控制效应坐标系能够较为直观地反映技术减排措施对于不同污染物的减排效果, 污染物减排量交叉弹性则可将协同控制效应进一步量化. 从这两种评价方法的结果来看, 末端治理措施一般不具有协同控制效应或协同控制效应不佳; 而绝大部分过程控制措施都能同时减排大气污染物和温室气体, 具有良好的协同控制效应.

2) 在前述两种方法的基础上, 利用单位污染物减排成本指标对各项技术减排措施进行成本-效果综合评价. 结果表明, 末端治理措施的“单位污染物减排成本”指标值不具优势, 优先度排序靠后; 而过程控制措施都排在前列, 说明过程控制措施具有很好的成本有效性. 实际开展钢铁行业协同减排规划时, 应根据决策需要选择适宜的评价方法, 并依据评价结果设计协同减排路线图.

6 建议 (Suggestion)

在我国污染减排的严峻形势下, 为实现多污染物控制目标, 需要逐渐由针对单一污染物的末端治理措施转向具有协同效应的控制措施. 钢铁行业是我国工业污染排放大户, 也是大气污染控制和节能减排的重点对象. 为了成本有效地实现硫、氮、碳多种污染物控制目标, 在钢铁行业开展协同控制不仅十分必要而且非常迫切. 在选择协同控制措施时, 合理评价措施的协同控制效应就显得非常重要.

由于篇幅所限, 本文集中探讨了钢铁行业技术减排措施的协同控制效应评价方法, 尚未涉及结构减排和规模减排以及其他行业的研究成果(这部分成果将在其他文章中讨论). 此外, 本研究中只考虑了 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 的协同控制, 实际技术减排措施协同控制效应可包括更多种类的污染物. 进一步完善协同控制效应评价方法, 并在此基础上开展行业和区域协同减排规划, 是作者下一步努力的方向.

责任作者简介: 毛显强 (1970—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要研究方向为环境经济与政策、环境评价与规划等. E-mail: maoxq@bnu.edu.cn.

参考文献 (References):

丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 2009. 空气污染与气候变化[J]. 气象, 35(3): 3-15

Ding Y H, Li Q P, Liu Y J, et al. 2009. Atmospheric aerosols, air

pollution and climate change[J]. Meteorological Monthly, 35(3): 3-15(in Chinese)

Gielen D, Chen C H. 2001. The CO_2 emission reduction benefits of Chinese energy policies and environmental policies: A case study for Shanghai, period 1995-2020[J]. Ecological Economics, 39(2): 257-270

国家统计局. 2010. 中国能源统计年鉴 2009 [M]. 北京: 中国统计出版社

National Bureau of Statistics of China. 2010. China Energy Statistics Yearbook 2009[M]. Beijing: China Statistics Press(in Chinese)

国家统计局. 2011. 中国能源统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社

National Bureau of Statistics of China. 2011. China Energy Statistics Yearbook 2010[M]. Beijing: China Statistics Press(in Chinese)

胡涛, 田春秀, 李丽平. 2004. 协同效应对中国气候变化的政策影响[J]. 环境保护, (9): 56-58

Hu T, Tian C X, Li L P. 2004. Influence of co-benefit on policy in China[J]. Environmental Protection, (9): 56-58(in Chinese)

IPCC. 1995. IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995 [R]. Switzerland: IPCC

IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES)

李丽平, 周国梅. 2009. 切莫忽视污染减排的协同效应[J]. 环境保护, (24): 36-38

Li L P, Zhou G M. 2009. Do not ignore the co-benefits of pollution reduction [J]. Environmental Protection, (24): 36-38 (in Chinese)

李丽平, 周国梅, 季浩宇. 2010. 污染减排的协同效应评价研究——以攀枝花市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 20(5): 91-95

Li L P, Zhou G M, Ji H Y. 2010. Study of co-benefits assessment of pollution reduction: A case study in Panzhihua [J]. China Population, Resources and Environment, 20(5): 91-95 (in Chinese)

Rypdal K, Rive N, Astrom S, et al. 2007. Nordic air quality co-benefits from European post-2012 climate policies[J]. Energy Policy, 35(12): 6309-6322

田春秀, 李丽平, 胡涛, 等. 2009. 气候变化与环保政策的协同效应[J]. 环境保护, (12): 67-68

Tian C X, Li L P, Hu T, et al. 2009. Co-benefits of climate change and environmental protection policy [J]. Environmental Protection, (12): 67-68(in Chinese)

Tollefsen P, Rypdal K, Torvanger A, et al. 2009. Air pollution policies in Europe: Efficiency gains from integrating climate effects with damage costs to health and crops[J]. Environmental Science and Policy, 12(7): 870-881

王金南, 宁森, 严刚, 等. 2010. 实施气候友好的大气污染防治战略

- [J]. 中国软科学, (10): 28-37
- Wang J N, Ning M, Yan G, *et al.* 2010. Implementing climate-friendly strategy for air pollution prevention and control [J]. *China Soft Science Magazine*, (10): 28-37 (in Chinese)
- Wang X D, Smith K. 1999. Secondary benefits of greenhouse gas control: Health impacts in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 33(18):3056-3061
- Yeora Chae. 2010. Co-benefit analysis of an air quality management plan and greenhouse gas reduction strategies in the Seoul metropolitan area [J]. *Environmental Science and Policy*, 13 (3): 205-216
- 中国钢铁工业协会. 2009. 中国钢铁工业年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社
- China Iron and Steel Industry Association. 2009. *China Iron and Steel Industry Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- 中国钢铁工业协会. 2010. 中国钢铁统计 2010 [M]. 北京: 中国钢铁工业协会
- China Iron and Steel Industry Association. 2010. *China Iron and Steel Statistics 2010* [M]. Beijing: China Iron and Steel Industry Association (in Chinese)