

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0611

施亚岚, 崔胜辉, 许肃, 等. 2014. 需求视角的中国能源消费氮氧化物排放研究[J]. 环境科学学报, 34(10): 2684–2692

Shi Y L, Cui S H, Xu S, et al. 2014. Nitrogen oxide emission in energy consumption in China from a consumption-based perspective [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(10): 2684–2692

需求视角的中国能源消费氮氧化物排放研究

施亚岚^{1,2}, 崔胜辉^{1,2,*}, 许肃^{1,2}, 林剑艺^{1,2}, 黄葳^{1,2}

1. 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

2. 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

收稿日期: 2013-12-30 修回日期: 2014-01-29 录用日期: 2014-01-29

摘要: 基于经济投入产出生命周期评价(EIO-LCA)模型构建了中国1990—2010年能源消费氮氧化物完全排放矩阵,从需求的角度分析了氮氧化物排放分布在部门和不同需求间的分布结构,并通过情景模拟深入探讨了最终需求结构变化对氮氧化物排放的综合影响和拉动效应,以期探索中国氮氧化物减排的多元化途径. 研究结果显示,1990—2010年中国氮氧化物排放总量从878万t上升到2398万t,历年来由工业部门拉动产生的氮氧化物占总量的比重高达70%左右;由最终消费拉动的氮氧化物排放比重逐年下降,资本形成和出口拉动的氮氧化物排放比重逐年上升. 氮氧化物排放强度则从47.0 kg·万元⁻¹降至6.0 kg·万元⁻¹,其中,能源和交通部门的排放强度最高. 通过情景模拟可以看出,提高最终消费比重,扩大内需有利于氮氧化物总量减排,尤其是对工业部门的减排效果显著. 实现氮氧化物总量减排目标,要求在技术进步之外,积极寻求多元减排措施,以强化减排效果,突出能源和交通等重点部门的氮氧化物防治体系建设,并通过扩大内需优化最终需求结构以促进工业部门氮氧化物减排.

关键词: 氮氧化物; 需求视角; 最终需求结构; 经济投入产出生命周期评价模型; 完全排放强度; 中国

文章编号: 0253-2468(2014)10-2684-09 中图分类号: X17 文献标识码: A

Nitrogen oxide emission in energy consumption in China from a consumption-based perspective

SHI Yalan^{1,2}, CUI Shenghui^{1,2,*}, XU Su^{1,2}, LIN Jianyi^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021

2. Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021

Received 30 December 2013; received in revised form 29 January 2014; accepted 29 January 2014

Abstract: This study constructed the total nitrogen oxide (NO_x) emission matrix of China during 1990—2010 based on Economic Input-output Life Cycle Assessment (EIO-LCA) Model. Distribution of NO_x emission among various sectors and types of final demands from a consumption-based perspective was analyzed, and the impacts of final demand structural variation on NO_x emission was discussed through scenario simulation. The results showed that, the NO_x emission increased from 8.78 Tg in 1990 to 23.98 Tg in 2010, and industry sector contributed about 70% NO_x emission. The contribution percentage of final consumption to NO_x emission decreased year by year, while that of capital formation and export increased annually. Over the past twenty years, the NO_x emission intensity decreased from 47.0 to 6.0 kg/10⁴ yuan, and the energy and power generation sectors had the relatively high emission intensity. The results of scenario simulation indicated that increasing the proportion of final consumption was beneficial to reduce NO_x emission, especially in industry sector. Therefore, the fulfilment of NO_x emission reduction requires multiple emission reduction strategies, such as technological innovation, construction of NO_x control system for the key energy and transportation sectors, and optimization of the final demand structure.

Keywords: nitrogen oxide; consumption-based; final demand structure; economic input-output life cycle assessment model; total emission intensity; China

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(No. 2014CB953801); 国家自然科学基金(No. 71273252); 厦门市重点实验室项目(No. 3502Z20130037)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2014CB953801), the National Natural Science Foundation of China (No. 71273252) and the Project of Xiamen Key Lab (No. 3502Z20130037)

作者简介: 施亚岚(1986—)女, E-mail: ylshi@iue.ac.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: shcui@iue.ac.cn

Biography: SHI Yalan (1986—), female, E-mail: ylshi@iue.ac.cn; * Corresponding author, E-mail: shcui@iue.ac.cn

1 引言 (Introduction)

氮氧化物是造成大气污染的主要污染物之一,同时也会对人体健康产生危害。化石燃料燃烧等人类活动及土壤、闪电、生物质燃烧等自然活动均会向大气中排放氮氧化物(Cui *et al.*, 2013)。国际上对氮氧化物排放的关注较早,始于20世纪40年代,欧美等国率先制定氮氧化物排放标准并通过公约签署来实现氮氧化物削减目标,如欧盟的《控制酸沉降、富营养化和臭氧协议》、美国的《洲际清洁空气法案》等。在20世纪80年代后期,这些举措卓见成效,其氮氧化物排放得到有效控制,大气氮沉降开始降低(胡倩等, 2007; NADP, 2000)。然而,中国能源消费伴随经济发展不断增长,氮氧化物排放量居高不下,目前面临着严峻的减排形势。近期,有关环保的政策性文件,如《“十二五”节能减排综合性工作方案》、《国家环境保护“十二五”规划》和《节能减排“十二五”规划》等频频颁布,严格规定了主要污染物总量减排目标。大气中的氮氧化物成为“十二五”规划新增的减排指标之一,相较于“十一五”期间注重“脱硫”减排,“十二五”期间“脱硝”成为减排工作的重点。对污染物排放进行定量分析是研究区域大气复合污染问题、实施污染防治措施的基础。当前,针对中国氮氧化物的量化研究主要集中在估算排放总量的排放因子法(Li *et al.*, 2000; Hao *et al.*, 2002; Ohara *et al.*, 2007; 张楚莹等, 2008; 粮小洛等, 2008),以及估算排放浓度的卫星遥感监测(Lin *et al.*, 2010; 张强等, 2012)等方面。

到目前为止,学术界更多地关注于温室气体减排目标的实现,已从生产减排和需求减排两方面开展系统研究(Davis *et al.*, 2010; Peter *et al.*, 2007; Peter, 2008; Guan *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2012; 杨喜爱等, 2012)。“生产型减排”即立足于探讨产业结构演变对碳排放的影响,“需求(消费)型减排”则探讨需求(消费)方式变化对碳排放的影响。然而,针对氮氧化物减排的研究主要集中在技术层面(Radojevic, 1998; Tayyeb Javed *et al.*, 2007),系统研究尚不多见。在经济转型背景下,中国经济的增长因技术约束的影响,必然带来能源消费和氮氧化物排放的增加。面对日益凸显的资源约束和减排压力,除技术进步外,如何在保持经济适度增长的同时降低能源消费和氮氧化物排放,这是实现可持续发展的科学

和现实问题。因此,本研究借鉴能源消费和温室气体减排的研究思路,通过研究需求结构对能源消费和氮氧化物排放的影响探索新的减排途径。首先采用排放因子法核算中国1990—2010年氮氧化物的排放总量和部门直接排放量,根据经济投入产出模型,从需求的角度分析氮氧化物排放的部门间和不同需求间的分布结构,并通过情景模拟深入探讨最终需求结构变化对氮氧化物排放的综合影响和拉动效应,试图探索中国氮氧化物减排的多元化途径。

2 研究方法 (Study methods)

2.1 氮氧化物排放核算方法

在本研究清单中,只考虑由于化石燃料燃烧所产生的氮氧化物排放。根据《中国统计年鉴》的能源消费统计资料,将能源消费划分为农业、能源(电力、热力生产和供应;燃气生产和供应;石油加工、炼焦和核燃料加工业)、工业(制造业和建筑业)、交通、商业、其他行业和生活消费七大部门,主要涉及的能源类型有原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气。根据能源消费量及其排放因子可估算分部门能源氮氧化物直接排放量,计算公式如下:

$$Q = (1 - P) \sum (F_{ik} \times K_{ik}) \quad (1)$$

式中, Q 为氮氧化物直接排放量(10^4 t); i 为经济部门; k 为燃料类型; F_{ik} 为部门 i 能源 k 的消费量(kg); K_{ik} 为以 NO_2 计的部门 i 能源 k 的氮氧化物排放因子($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)。由于当前还没有一套较完整和成熟的针对中国典型燃烧设备和技术的排放因子参数,本文使用的是Kato和Akimoto(1992)关于西方发达国家在20世纪70年代中期氮氧化物排放因子的研究结果(表1)。根据调查发现,当前中国燃烧设备的平均排放水平与此阶段发达国家的水平相近; P 为平均污染控制水平下氮氧化物的脱除率,由于不同燃烧设备和技术水平下氮去除率的差异很大,基于Hao等(2002)的假设的基础上,本文设定氮氧化物脱除率在1990年以前为0,在此之前,中国对氮氧化物的关注很少,去除水平相当低;20世纪90年代以后才开始制定氮氧化物排放标准,在1995、2000、2005和2010年分别设为5%、10%、15%、30%。本文核算结果与其他各种不同数据库清单,如IIASA GAIN、EDGAR v4、REAS-Asia等,以及《中国环境状况公报》中的关于氮氧化物排放量的结果十分接近。

表 1 分能源分部门氮氧化物排放因子
Table 1 Emission factors of NO_x by sectors and fuel types

排放源		氮氧化物排放因子/(kg·t ⁻¹)							
		煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
能源	电力	9.95		7.24	16.7	21.20	7.40	10.06	41.0
	制气	0.75	0.90	2.19			9.62	5.84	
	炼焦或炼油	0.37		0.24					
工业(建筑业)		7.5	9	5.09	16.7	7.46	9.62	5.84	20.9
建筑业		7.50	9.00		16.7	7.46	9.62	5.84	20.9
交通	公路				21.2	27.40	27.40	27.40	
	铁路	7.50	9.00				54.10	54.10	
	其他	7.50	9.00	5.09	16.7	27.40	36.30	36.3	20.9
生活消费		1.88	2.25	1.70	16.7	2.49	3.21	1.95	14.6
商业		3.75	4.50	3.05	16.7	4.48	5.77	3.50	14.6
其他		3.75	4.50	3.05	16.7	4.48	5.77	3.50	14.6

注: 农业部门的排放因子取其他部门的参数值; 天然气的氮氧化物排放因子单位为 10⁻⁴ kg·m⁻³.

2.2 投入产出模型构建

投入产出模型(Input-output analysis , IOA) 是一个研究经济系统各部门间的投入与产出关系的数学模型, 该方法最早由美国著名的经济学家瓦·列昂捷夫(W. Leontief) 于 1936 年提出, 是目前比较成熟的经济分析方法(Leontief , 1941; 1953) . 以此为基础, 经济投入产出-生命周期评价模型(Economic Input-Output life Cycle Assessment , EIO-LCA) 将投入产出模型和生命周期评价方法相结合, 被广泛应用于研究经济与环境影响之间的相互联系(Hendrickson *et al.* , 1998; CMUGDI , 2010) . 20 世纪 50 年代初, 西方国家开始编制投入产出表, 中国第一张投入产出基本表编制完成于 1987 年, 此后, 每隔 3 年编制 1 张延长表, 每隔 5 年编制 1 张基本表.

在本研究中, 分别对 1990、1995、2000、2005、

2010 年的中国投入产出基本流量表所涉及的多部门进行调整和归并, 与能源消费部门设置相对应, 其中, 将生活消费部门直接列入其他部门中, 最终合并为农业、能源、工业、交通、商业和其他六大经济部门. 利用价值型投入产出表及氮氧化物直接排放数据, 基于 EIO-LCA 模型, 本文建立了中国各行业能源消费氮氧化物完全排放矩阵(表 2, 下文以 2010 年为例进行详述) . 所谓完全排放, 有别于直接排放, 是从需求角度出发, 指某一部门产出对其他各部门投入所消耗的所有原材料和中间产品而产生的氮氧化物直接和间接排放量之和, 这一部门需要对其完全排放负责. 对完全排放的分析, 目的是根据需求责任原则分析能源消费引起的氮氧化物排放, 在部门 and 不同需求间的分布结构, 以及探讨最终需求结构(即国内最终消费、资本形成和出口比重) 的改变对氮氧化物排放的综合影响.

表 2 能源消费氮氧化物完全排放矩阵
Table 2 Total NO_x emission matrix of energy consumption

类型	中间使用	最终需求 Y				总产出
		最终消费 FC	资本形成 FA	出口 FE	其他 FO	
中间投入	AX	$\hat{D} \times B \times FC$	$\hat{D} \times B \times FA$	$\hat{D} \times B \times FE$	$\hat{D} \times B \times FO$	$X = \hat{D} \times B \times Y$
总投入	X ^T					

注: X 为各部门氮氧化物完全排放列向量 X^T 为 X 的转置.

以 2010 年为例, 根据中国 2010 年的多部门价值量投入产出表, 计算完全需求矩阵又称里昂惕夫矩阵 $B = (I - A)^{-1}$, 其元素 b_{ij} 表示部门 i 每单位总产出对部门 j 的完全消耗(需求)(表 2). 其中 I 为

单位矩阵, A 为直接消耗系数矩阵, 其元素 a_{ij} 表示为生产部门 i 单位总产出对部门 j 产品的直接消耗量.

$$B = (I - A)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.1775 & 0.0800 & 0.1304 & 0.0751 & 0.0780 & 0.0411 \\ 0.0754 & 1.4297 & 0.1725 & 0.3396 & 0.0874 & 0.0940 \\ 0.5882 & 1.4295 & 2.3827 & 0.8038 & 0.5631 & 0.6151 \\ 0.0496 & 0.0832 & 0.0972 & 1.1373 & 0.0838 & 0.0664 \\ 0.0403 & 0.0662 & 0.0767 & 0.0670 & 1.0523 & 0.0762 \\ 0.0772 & 0.1614 & 0.1386 & 0.1954 & 0.1625 & 1.1875 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过公式(1)及各部门的总产出,可计算中国2010年分部门单位产出的氮氧化物直接排放量,即

$$\bar{D} = [0.1566 \quad 13.7699 \quad 0.9739 \quad 7.4559 \quad 0.1214 \quad 0.1243] \quad (3)$$

对氮氧化物直接排放强度 D 进行对角化处理,左乘完全需求矩阵 B ,即可得到氮氧化物完全强度

$$R = \hat{D} \times (I - A)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1844 & 0.0125 & 0.0204 & 0.0118 & 0.0122 & 0.0064 \\ 1.0379 & 19.687 & 2.3749 & 4.6766 & 1.2041 & 1.2938 \\ 0.5728 & 1.3922 & 2.3204 & 0.7877 & 0.5484 & 0.5990 \\ 0.3700 & 0.6204 & 0.7247 & 8.4799 & 0.6245 & 0.4948 \\ 0.0049 & 0.0080 & 0.0093 & 0.0085 & 0.1277 & 0.0082 \\ 0.0096 & 0.0201 & 0.0172 & 0.0243 & 0.0202 & 0.1476 \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵 R 中每一列的合计数表示某一部门最终需求每增加1万元对其他各部门产出所需的氮氧化物排放之和,每一行的合计表示某一部门的产出每增加1万元对实现各产业的最终需求所增加的氮氧化物排放量之和。从最终需求的角度看,2010年,各产业部门氮氧化物排放增加量对某部门同样增加1万元最终需求的敏感度排位如下:能源(21.71 kg)、交通(14.0 kg)、工业(5.5 kg)、商业(2.5 kg)、农业(2.1 kg)。这一结果表明,各产业部门提供最终需求对能源消费氮氧化物排放的依赖程度,其中,能源和交通部门的经济活动以能源消费为基础,因此对氮氧化物排放的依赖性最强。

最终需求是指全社会的消费者对社会总产品的最终使用或消费。根据投入产出表,最终需求价值量可以进一步划分为国内最终消费、资本形成、出口与其他4个组分,分别以列向量 FC 、 FA 、 FE 、 FO 表示,其比例构成称为最终需求结构。将氮氧化物排放完全需求矩阵右乘各部门最终需求的各组分的对角矩阵(公式(5)),得到各组分的氮氧化物完全排放系数。

$$R \times FC = \begin{bmatrix} 27.61 \\ 111.7 \\ 316.3 \\ 61.68 \\ 41.79 \\ 255.5 \end{bmatrix} \quad R \times FA = \begin{bmatrix} 8.132 \\ -0.532 \\ 955.7 \\ 4.789 \\ 7.349 \\ 30.22 \end{bmatrix}$$

为部门氮氧化物直接排放强度 D ,单位为 $\text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。其氮氧化物直接排放强度行向量为:

矩阵 R (公式(4)),单位为 $\text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。

$$R \times FE = \begin{bmatrix} 1.841 \\ 19.49 \\ 508.7 \\ 52.42 \\ 18.63 \\ 15.39 \end{bmatrix} \quad R \times FO = \begin{bmatrix} 4.941 \\ -64.60 \\ 1.993 \\ -24.51 \\ 3.882 \\ 8.674 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 情景模拟

本研究通过情景模拟进一步分析最终需求结构如何影响氮氧化物排放,以2010年作为基准年,通过改变国内最终需求中最终消费、资本形成和出口的比重(其他的比重保持不变),进而得到氮氧化物完全放结构和总量的变化,分析需求结构的变化对各产业部门氮氧化物排放量的综合影响和拉动效应。本研究共设置了4个情景。基准情景:根据2010年非竞争型价值量投入产出表,最终消费、资本形成、出口和其他分别占最终需求的38.9%、38.3%、22.2%和0.5%;情景一:扩大内需情景,最终消费的比重增加10%,资本形成和出口的比重各减少5%;情景二:增加投资情景,资本形成的比重增加10%,最终消费和出口的比重各减少5%;情景三:增加出口情景,出口的比重增加10%,最终消费和资本形成的比重各减少5%。

3 结果 (Results)

3.1 中国氮氧化物直接排放分析

中国氮氧化物排放总量从1990年的878 t上升

到 2010 年的 2398 万 t, 年平均增长率为 5.2% (图 1). 从部门来看, 中国氮氧化物的主要排放源为能源、工业和交通部门, 三者贡献了 90% 以上的排放总量. 1990 年能源部门氮氧化物排放量为 306.7 万 t, 占总排放量的 35%, 到 2010 年上升到 1077.1 万 t, 比重也上升到 45%, 成为中国氮氧化物最大的排放源. 总体上, 中国火电行业氮氧化物排放量呈快速增长的趋势; 与世界发达国家比较, 中国火电行业单位发电量的氮氧化物排放水平高出许多 (刘孜等 2008). 因为火电行业的高能耗和低效率, 成为“十二五”期间氮氧化物减排任务最重的经济部门. 同样, 工业部门的排放量居高不下, 从 1990 年的 435.6 万 t 上升到 2010 年的 865.6 万 t. 人民生活水平的提高和出行方式的改变, 使交通部门成为排放量增长最快的经济部门, 2010 年排放量为 380.4 万 t, 较 1995 年增长了 420%, 占总排放量的比重为 15.9%. 尽管如此, 中国交通运输能源消耗量仍低于国际平均水平, 2003 年世界平均运输部门能源消耗比重为 29.6%, 其中, 美国为 40.4%, 欧盟为 28.9%, 日本为 26.3%, OECD 为 33.7% (耿勤等, 2009). 相反, 农业和生活消费部门的氮氧化物消费量则出现轻微的下降趋势, 分别从 1990 年的 15.7 万 t 和 32.3 万 t 下降到 2010 年的 11.5 万 t 和 24.5 万 t. 主要原因是这两个部门中煤炭等高氮能源的削减和天然气等清洁能源的推广使用.

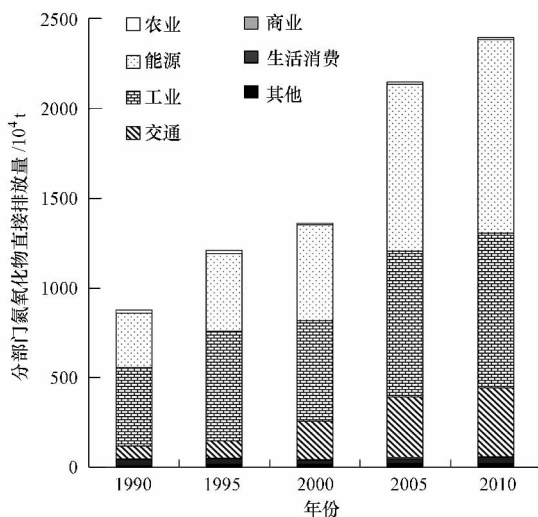


图 1 1990—2010 年中国分部门氮氧化物排放量
Fig. 1 NO_x emission by sectors during 1990—2010

从能源类型来看 (图 2), 中国以煤炭为主的能源结构使其成为氮氧化物最重要的排放源, 1990 年排放量为 698.5 万 t, 2010 年为 1692.5 万 t, 占排放

总量的比例从 80% 下降到 70%. 而柴油和焦炭作为交通运输部门和工业部门主要燃料, 伴随着所属部门能源消耗量的提高, 其氮氧化物排放量也迅速增加, 2010 年分别达到 274.8 万 t 和 211.1 万 t. 值得指出的是, 天然气作为化石燃料中的清洁能源, 其占能源消费结构的比重在 1990 年和 2010 年分别是 2.1% 和 4.4%, 其产生的氮氧化物仅占总排放量的 0.34% 和 0.68%.

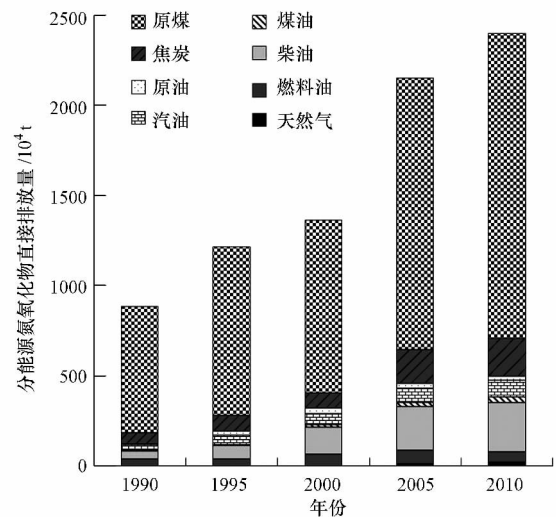


图 2 1990—2010 年中国分能源氮氧化物排放量
Fig. 2 NO_x emission by fuel types during 1990—2010

3.2 基于投入产出法的氮氧化物完全排放分析

基于 EIO-LCA 模型获得的能源消费氮氧化物完全排放矩阵, 下文称其为氮氧化物完全排放量. 从部门来看 (表 3), 1990—2010 年, 中国氮氧化物完全排放量除农业和生活消费部门轻微下降外, 其余各部门均快速增长. 历年来工业部门氮氧化物完全排放量占排放总量的 70% 以上, 排放量从 1990 年的 616 万 t 上升到 2010 年的 1783 万 t, 增加了近 2 倍. 表明中国为满足工业部门需求, 其余各部门为实现价值产出向环境中排放了绝大部分的氮氧化物. 因此, 快速的工业化进程及其当前以工业为主的经济结构是导致能源消费氮氧化物排放的根本原因. 相对来说, 虽然能源部门的直接氮氧化物排放量比重高, 但其完全排放量比重却很低, 仅占总排放量的 2.3% ~ 5.3%. 表明中国能源部门 (主要是火电厂) 虽以化石能源消费为基础, 却是以为其他产业部门提供电力等二次能源为主要任务, 因此, 其完全排放量隐含在于其他部门的经济往来中.

表3 分部门氮氧化物完全排放量和排放结构

Table 3 NO_x emission structure by sectors based on input-output method

部门	排放量/10 ⁴ t					排放结构比例				
	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年
农业	58	76	71	53	43	6.6%	6.3%	5.2%	2.5%	1.8%
能源	25	63	31	113	66	2.8%	5.2%	2.3%	5.3%	2.8%
工业	616	848	962	1429	1783	71.8%	70.0%	70.7%	66.5%	74.4%
交通	42	35	67	169	94	4.8%	2.9%	4.9%	7.9%	3.9%
商业	34	32	49	73	72	3.9%	2.6%	3.6%	3.4%	3.0%
其他	71	131	162	286	310	8.1%	10.8%	11.9%	13.3%	12.9%
生活消费	32	26	19	26	30	3.6%	2.1%	1.4%	1.2%	1.3%
总计	878	1211	1361	2149	2398	100%	100%	100%	100%	100%

从最终需求来看(表4) 2000—2010年国内最终消费的氮氧化物完全排放量从635万t上升到845万t,年平均增长率为2.9%,占总排放量的比例有所下降;1990—2010年,资本形成的氮氧化物完全排放量则从385万t上升到1006万t,年平均增长率为9.0%,占总排放量比例上升,2010年超过国内最终消费需求排放量;出口的氮氧化物完全排放量317万t上升到616万t,年平均增长率为6.9%,占总排放量比例轻微上升。由此可以看出,国内最终消费需求对中国能源消费引起的氮氧化物排放

的贡献率逐渐降低,其优势逐渐向用于资本形成(扩大生产规模)和出口转移。到2010年,国内最终消费氮氧化物完全排放仅占总量的1/3左右,其余为资本形成和出口排放;并且单位资本形成和出口产生的氮氧化物排放量分别为5.2 kg·万元⁻¹和5.5 kg·万元⁻¹,均高于单位国内最终消费产生的排放量4.3 kg·万元⁻¹,生产投资和出口的单位污染值高于消费的单位污染值,侧面反映了中国经济结构呈现一定的“重工业化”趋势。

表4 不同需求氮氧化物完全排放量和排放结构

Table 4 NO_x emission structure by final demands based on input-output method

需求	完全排放量/10 ⁴ t					排放结构比例				
	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年
最终消费	479	671	635	784	845	54.6%	55.4%	46.6%	36.5%	35.2%
资本形成	385	527	426	735	1006	43.8%	43.5%	31.3%	34.2%	42.0%
出口 ¹	-	-	317	657	616	-	-	23.3%	30.6%	25.7%
净出口 ¹	31	13	-	-	-	3.5%	1.1%	-	-	-
其他	-16	0	-17	-27	-70	-1.9%	0	-1.2%	-1.3%	-2.9%
总计	878	1211	1361	2149	2398	100%	100%	100%	100%	100%

注:1. 1990和1995年的投入产出表中只有净出口价值量,没有区分进口和出口价值量,因此,出口用“-”表示数据缺失。

3.3 不同情景下氮氧化物排放分析

图3显示了不同情景模拟方案下氮氧化物完全排放总量及部门结构,在最终需求总量(即国内生产总值)不变的前提下,最终需求结构的调整对能源消费氮氧化物排放总量的影响不大,变动区间仅在-2.5%~1.8%之间。但仍可以看出,除了扩大内需情景下氮氧化物排放总量轻微减少外,其余两个情景排放量均增加。因此,从需求结构调整的角度提高国内最终消费比重有利于氮氧化物减排。

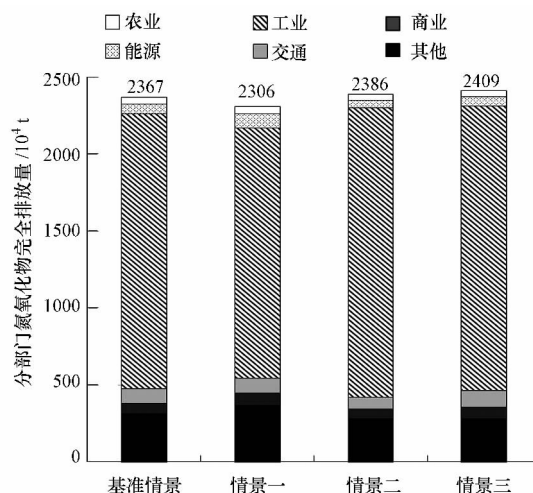


图3 不同情景下分部门氮氧化物完全排放量

Fig. 3 Total NO_x emission by sectors under different scenarios

4 分析与讨论 (Analysis and discussion)

4.1 分部门氮氧化物直接和完全排放强度比较分析

近 20 年来中国氮氧化物排放总量持续增加,而氮氧化物直接排放强度从 $47.0 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$ 降至 $6.0 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$,如图 4 所示各部门直接排放强度同样明显下降,说明单位产出所产生的氮氧化物排放量减少,技术进步成为能效提高的主要原因 (Garbaccio *et al.*, 1999; Peter *et al.*, 2007). 将 1990—2010 年的氮氧化物直接强度变化趋势划分为 3 个阶段: 第一阶段(1990—2000 年) 为显著下降时期,其主要驱动力来自于各产业能源利用效率的提高(韩智勇等 2004),尤其体现在能源部门(直接排放强度从 1990 年的 $210.8 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$ 降到 2000 年的 $30.9 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$),原因是中国自 20 世纪 90 年代以后开始制定氮氧化物排放标准,1991 年颁布了《燃煤电厂大气污染物排放标准》(GB13223—1991),之后历经 1996 年和 2003 年两次修订《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223—2003),对火电厂氮氧化物的控制原则都是基于低氮燃烧技术能达到的排放水平来制订的;第二阶段(2000—2005 年) 为平缓下降时期,其中,农业部门的直接排放强度甚至出现轻微的上升(从 2000 年的 $0.31 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$ 升到 2005 年的 $0.33 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$),这一期间,排放强度下降速度减缓主要归因于能源消费消极的技术进程,而部门能源效率变动和经济结构变动也有一定的影响(张瑞等 2007; Ma *et al.*, 2008);第三阶段(2005—2010 年) 为稳定下降时期,“十一五”期间重点行业先进生产能力比重明显提高,大型、高效装备得到推广应用,以及节能技术进步继续平稳推进能效水平的提高。

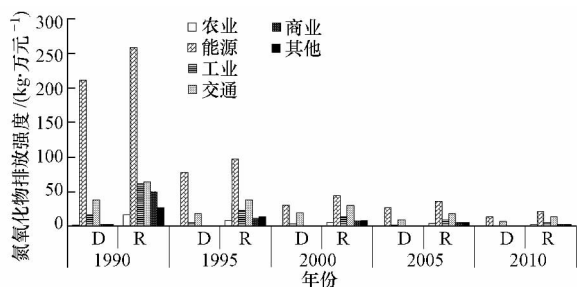


图 4 分部门氮氧化物直接和完全排放强度对比(D 为直接排放强度, R 为完全排放强度)

Fig. 4 Direct and total emission intensity of NO_x by sectors

从氮氧化物排放强度的排名可以看出,排放强度的高低主要取决于不同经济部门对能源生产和消费的依赖程度. 因此,以能源生产为主的能源部门的排放强度远远高于其他各经济部门,其次是交通部门,第三为工业部门. 对比氮氧化物直接排放强度(D: 指某一部单位产出的氮氧化物直接排放量) 与完全排放强度(R: 指某一部单位产出对其他各部门投入所消耗的所有原材料和中间产品而产生的氮氧化物直接和间接排放量之和)(图 4),可以看出,各部门的完全排放强度均比直接排放强度高,尤其是农业、商业和其他部门,完全排放强度高出直接排放强度若干倍. 说明按照排放责任原则,虽然这些部门不是能源终端消费的主要和直接部门,不直接排放氮氧化物,但它们通过与其他部门的经济联系间接造成了能源消费氮氧化物的排放,是氮氧化物排放的需求和责任部门. 例如,金融保险企业没有直接消费煤炭和石油等化石燃料,而是通过向能源部门购买电力满足其需求,因此,氮氧化物排放则隐藏在金融与电力部门之间的经济往来中。

4.2 最终需求结构改变对氮氧化物排放影响分析

能源使用效率和需求方式决定着经济系统中的能源消费需求,除技术手段外,政府可以通过经济、法律等手段促使需求结构优化. 需求结构和产业结构之间存在着密切的联系(沈利生, 2011; 李凯, 2013). 因此,需求结构变动引起产业结构变动,必将对不同产业部门氮氧化物排放产生影响. 不同需求结构的情景模拟方案下对各部门氮氧化物完全排放量的正负拉动效应不尽相同(图 5),根据其影响可以将部门划分为 3 种类型. 第一种类型为工业部门,扩大内需情景(情景一) 中,工业部门氮氧化物完全排放量下降了 9%,相反地,增加投资和出口(情景二) 和出口(情景三) 情景中,工业部门氮氧化物完全排放量分别上升了 5% 和 4%. 因此,这种类型中最终消费比重与氮氧化物排放量呈现负相关的关系. 第二种类型为农业部门、能源部门和其他部门,在扩大内需情景中,这 3 个部门氮氧化物完全排放量分别上升 13%、37% 和 19%,相反地,增加投资和出口情景中,3 个部门氮氧化物完全排放量分别下降 4%、29%、9% 和 9%、8%、10%. 因此,这种类型中最终消费比重与氮氧化物排放量呈现正相关的关系;尤其是对能源部门的拉动效应最显著,上升了 37%. 第三种类型为交通部门、商业部门,增加

投资情景中, 交通和商业部门氮氧化物完全排放量分别下降了 20% 和 11%, 相反地, 扩大内需和增加出口情景中, 交通、商业部门氮氧化物完全排放量分别上升了 4%、8% 和 16%、3%。因此, 这种类型中资本投资比重与氮氧化物排放量呈现负相关的关系。

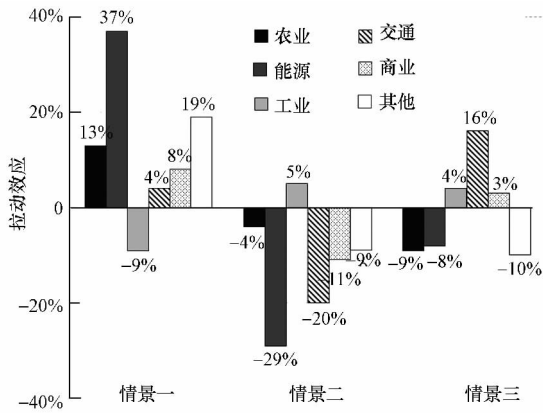


图 5 需求结构变化对部门氮氧化物排放影响

Fig.5 Effects of different final demand structures on sectorial NO_x emissions

为对应产业和经济结构, 进一步将农业部门归入第一产业, 能源和工业部门归入第二产业, 交通、商业和其他部门归入第三产业。图 6 显示了不同需求结构的情景模拟方案下对各产业氮氧化物完全排放量的拉动效应。可以试图得出以下结论: 首先, 资本形成中的投资品和出口中的出口商品主要由第二产业部门提供, 因此, 资本形成和出口比重的持续上升是拉动第二产业快速增长及工业部门氮氧化物完全排放量持续上升的主要原因; 并且, 资本形成和出口比重增加对工业部门氮氧化物排放

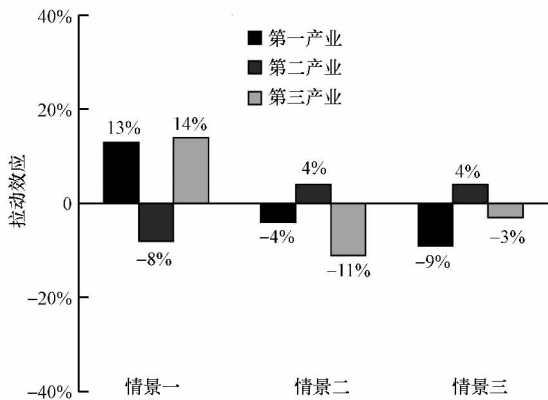


图 6 不同需求结构对产业氮氧化物的拉动效应

Fig.6 Effects of different final demand structures on industrial NO_x emissions

的正向拉动效应相当。其次, 消费品主要由第一和第三产业部门提供, 因此, 最终消费比重持续下降是减缓第一和第三产业增长速度, 以及第一和第三产业部门氮氧化物排放量下降的主要原因; 并且, 最终消费比重下降对第三产业部门氮氧化物排放的负向拉动效应更加显著。

5 结论 (Conclusions)

1) 技术进步有助降低氮氧化物排放强度。1990—2010 年, 中国氮氧化物直接排放强度呈现显著下降的趋势, 从 47.0 kg·万元⁻¹ 降至 6.0 kg·万元⁻¹。技术进步是这段期间能效水平提高的关键因素。尽管如此, 中国生产部门排放的氮氧化物总量仍增长迅速, 从 878 万 t 上升至 2376 万 t, 增长了近 2 倍。可以看出, 尽管技术进步在一定程度上有助于降低排放强度, 如采用低氮燃烧技术和建立烟气脱硝设施, 但从实际看来, 环保政策性文件的相继颁布及强制性(总量) 减排目标的实现, 必定要求在技术进步之外积极寻求多元减排措施, 以强化减排效果。

2) 总量控制要突出重点行业。从氮氧化物直接和完全排放强度的角度可以看出, 能源和交通部门的排放强度均最高, 说明其对能源消费氮氧化物排放的依赖性较高。因此, 氮氧化物的总量控制要突出重点行业, 推行以防治固定源(火电行业) 排放为核心的工业氮氧化物防治体系和以防治移动源(机动车) 排放为核心的氮氧化物防治体系。

3) 最终需求结构调整具有减排潜力。最终需求结构与产业结构关系密切, 在一定程度上影响了氮氧化物的排放水平。资本形成中的投资品和出口中的出口商品主要由第二产业部门提供, 因此, 资本形成和出口比重的持续上升是拉动第二产业快速增长及部门氮氧化物完全排放量持续上升的主要原因。消费品主要由第一和第三产业部门提供, 因此, 最终消费比重持续下降是减缓第一和第三产业增长速度, 以及部门氮氧化物排放量下降的主要原因。1990—2010 年, 国内最终消费需求对中国能源消费引起的氮氧化物排放的贡献率逐渐降低, 资本形成(扩大生产规模) 和出口拉动的氮氧化物排放比重逐年上升。通过不同情境模拟可以看出, 要实现氮氧化物总量减排, 除运用先进技术和提高能效水平外, 还可以通过提高国内最终消费在最终需求中的比重。

责任作者简介: 崔胜辉(1973—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事城市生态过程与调控研究。

参考文献 (References):

- Carnegie Mellon University Green Design Institute (CMUGDI). 2010. Economic input-output life cycle assessment (EIO-LCA) [OL]. 2010-10-02. <http://www.eiolca.net>
- Cui S H, Shi Y L, Groffman P M, *et al.* 2013. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910—2010) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(6): 2052–2057
- Davis S J, Caldeira K. 2010. Consumption-based accounting of CO₂ emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(12): 5687–5692
- Garbaccio R F, Ho M S, Jorgenson D W. 1999. Why has the energy-output ratio fallen in China? [J]. *The Energy Journal*, 20(3): 63–91
- 耿勤, 余湘耘, 朱虹, 等. 2009. 我国交通运输能源消费的初步分析与探讨 [J]. *中国能源*, 31(10): 28–29, 34
- Guan D, Hubacek K, Weber C L, *et al.* 2008. The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030 [J]. *Global Environmental Change*, 18(4): 626–634
- 韩智勇, 魏一鸣, 范英. 2004. 中国能源强度与经济结构变化特征研究 [J]. *数理统计与管理*, 23(1): 1–6
- Hao J M, Tian H Z, Lu Y Q. 2000. Emission inventories of NO_x from commercial energy consumption in China, 1995–1998 [J]. *Environmental Science & Technology*, 36(4): 552–560
- Hendrickson C, Horvath A, Joshi S, *et al.* 1998. Peer reviewed: economic input-output models for environmental life-cycle assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 32(7): 184A–191A
- 胡倩, 张世秋, 吴丹. 2007. 美国和欧洲氮氧化物控制政策对中国的借鉴意义 [J]. *环境保护*, (9): 74–78
- Kato N, Akimoto H. 1992. Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in asia: emission inventories [J]. *Atmospheric Environment (Part A. General Topics)*, 26(16): 2997–3017
- 粮小洛, 曹国良, 黄学敏. 2008. 中国区域氮氧化物排放清单 [J]. *环境与可持续发展*, (6): 19–22
- Leontief W. 1941. *The Structure of American Economy* [M]. New York: IASP Publishing. 1919–1929
- Leontief W. 1953. *Studies in the Structure of the American Economy* [M]. London: Oxford University Press
- 李凯. 2013. 我国最终需求结构变动对产业结构及经济发展的影响 [D]. 合肥: 安徽大学
- Li Y, Lin E D. 2000. Emissions of N₂O, NH₃ and NO_x from fuel combustion, industrial processes and the agricultural sectors in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 57(1): 99–106
- Lin J T, McElroy M B, Boersma K F. 2010. Constraint of anthropogenic NO_x emissions in China from different sectors: a new methodology using multiple satellite retrievals [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(1): 63–78
- Lin J Y, Cao B, Cui S H, *et al.* 2010. Evaluating the effectiveness of urban energy conservation and GHG mitigation measures: The case of Xiamen city, China [J]. *Energy Policy*, 38(9): 5123–5132
- 刘孜, 易斌, 高晓晶, 等. 2008. 我国火电行业氮氧化物排放现状及减排建议 [J]. *环境保护*, (16): 7–10
- NADP (National Atmospheric Deposition Program). 2000. National atmospheric deposition program annual data summary: precipitation chemistry in the United States [R]. Champaign, IL: University of Illinois, NADP Program Office, Illinois State Water Survey
- Ma C B, Stern D I. 2008. China's changing energy intensity trend: A decomposition analysis [J]. *Energy Economics*, 30(3): 1037–1053
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al.* 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 4419–4444
- Peters G P, Weber C L, Guan D, *et al.* 2007. China's growing CO₂ emissions: a race between increasing consumption and efficiency gains [J]. *Environmental Science & Technology*, 41(17): 5939–5944
- Peters G P. 2008. From production-based to consumption-based national emission inventories [J]. *Ecological Economics*, 65(1): 13–23
- Radojevic M. 1998. Reduction of nitrogen oxides in flue gases [J]. *Environmental Pollution*, 102(1): 685–689
- 沈利生. 2011. 最终需求结构变动怎样影响产业结构变动——基于投入产出模型的分析 [J]. *数量经济技术经济研究*, (12): 82–95, 114
- Tayyeb Javed M, Irfan N, Gibbs B M. 2007. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction [J]. *Journal of Environmental Management*, 83(3): 251–289
- Williams J H, DeBenedictis A, Ghanadan R, *et al.* 2012. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity [J]. *Science*, 335(6064): 53–59
- 杨喜爱, 崔胜辉, 林剑艺, 等. 2012. 能源活动 CO₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择 [J]. *生态学报*, 32(22): 7135–7145
- 张楚莹, 王书肖, 邢佳, 等. 2008. 中国能源相关的氮氧化物排放现状与发展趋势分析 [J]. *环境科学学报*, 28(12): 2470–2479
- 张强, 耿冠楠, 王斯文, 等. 2012. 卫星遥感观测中国 1996–2010 年氮氧化物排放变化 [J]. *科学通报*, 57(16): 1446–1453
- 张瑞, 丁日佳. 2007. 中国能源强度变动因素分析 [J]. *中国矿业*, 16(2): 31–34