

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

Zhang C Y, Wang S X, Xing J *et al.* 2008 Current status and future projections of NO_x emissions from energy related industries in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(12): 2470-2479

中国能源相关的氮氧化物排放现状与发展趋势分析

张楚莹, 王书肖, 邢佳, 赵瑜, 郝吉明*

清华大学环境科学与工程系, 北京 100084

收稿日期: 2008-04-19 修回日期: 2008-07-10 录用日期: 2008-10-06

摘要: 基于能源相关部门的活动水平和排放因子, 建立了 2000 年和 2005 年中国分行业的氮氧化物 (NO_x) 排放清单. 基于能源预测, 分析了在不同 NO_x 控制方案下 2010~2030 年中国 NO_x 的排放趋势. 结果表明, 我国 2000 年和 2005 年的 NO_x 排放量分别为 12.1×10^6 t 和 19.1×10^6 t. 到 2030 年, 基准情景下中国 NO_x 排放量将达到 35.4×10^6 t 而在政策情景下, 其排放总量可能控制在 $24.6 \times 10^6 \sim 20.4 \times 10^6$ t 之间.

关键词: 氮氧化物; 排放清单; 能源消耗; 情景分析

文章编号: 0253-2468(2008)12-2470-10 中图分类号: X511 文献标识码: A

Current status and future projections of NO_x emissions from energy related industries in China

ZHANG Chuying WANG Shuxiao XING Jia ZHAO Yu HAO Jiming*

Department of Environmental Science and Engineering Tsinghua University, Beijing 100084

Received 29 April 2008 received in revised form 10 July 2008 accepted 6 October 2008

Abstract Emission inventories of nitrogen oxides (NO_x) in 2000 and 2005 were established based on the activity levels of China's energy related sectors and emission factors. Future emissions from 2010 to 2030 were projected under different scenarios of energy consumption and NO_x emission control policies. The NO_x emissions in 2000 and 2005 were 12.1×10^6 t and 19.1×10^6 t respectively. By 2030 the emission would increase to 35.4×10^6 t under the reference scenario and would probably fall to $24.6 \times 10^6 \sim 20.4 \times 10^6$ t under policy scenarios.

Keywords nitrogen oxide emission inventory energy consumption scenario analysis

1 引言 (Introduction)

近 20 年来, 随着污染物排放标准的加严以及除尘装置的普及和脱硫装置的增加, 在煤耗持续增长的情况下, 我国颗粒物排放量基本得到控制, SO_2 的增长趋势有所减缓, 并且在 2007 年 SO_2 排放量出现降低. 根据国际上空气污染与控制的经验和历程, 未来几年, 我国应该进入大规模控制 NO_x 排放的重要阶段. 但是, 目前我国 NO_x 污染控制法规和政策尚不完善. 以排放标准为例, 仅在火电厂和机动车的大气污染物排放标准中规定了 NO_x 排放浓度限值, 对锅炉、工业炉窑、炼焦炉等污染源的排放未规定 NO_x 排放限值. 由于没有相应的控制政策和法

规, 不能从根本上控制其排放量, 造成 NO_x 排放量逐年增加.

氮氧化物 (NO_x) 作为一次污染物本身会对人体健康产生危害, 此外 NO_x 还是臭氧 (O_3)、细粒子和酸沉降等二次污染的重要前体物. NO_x 排放量的剧增使我国城市大气中的 NO_x 污染程度加重. 卫星观测表明, 1996~2004 年间中国东部工业区上空下层大气中 NO_x 浓度增加了约 50%, 并且年增长速度还有加速趋势 (Richter *et al.*, 2005).

在此背景下, 应及时、系统、深入地开展中国 NO_x 排放与控制相关研究, 提出我国 NO_x 污染控制对策建议. 田贺忠 (2003) 对中国 1980~2000 年分部门行业的 NO_x 排放清单进行了计算, 并给出高、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No 2005CB422201); 公益性行业科研专项 (No 200709032)

Supported by the National Basic Research Program of China (No 2005CB422201) and the Project for Public Service (No 200709032)

作者简介: 张楚莹 (1984-), 女, E-mail zhangchuying@gmail.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail hjin-den@tsinghua.edu.cn

Biography: ZHANG Chuying (1984-), female, E-mail zhangchuying@gmail.com; * Corresponding author, E-mail hjin-den@tsinghua.edu.cn

中、低 3 种能源情景下未来 NO_x 排放趋势, 但是未考虑我国现有的 NO_x 控制措施及新近颁发的针对机动车的系列法规, 在进行趋势分析时也没有考虑针对各类燃烧设备和工业过程的控制措施. Ohara 等 (2007) 预测了 3 种情景下中国未来 NO_x 排放状况, 但是在 NO_x 控制措施上仅考虑了电厂和交通两个部门.

本文基于能源相关部门的活动水平和我国实测的排放因子, 建立了 2000 年和 2005 年中国分行业的 NO_x 排放清单. 基于能源预测, 计算了不同 NO_x 控制方案下 2010~2030 年中国 NO_x 的排放趋势, 提出了 NO_x 减排措施和建议, 对缓解我国经济增长过程中的区域大气污染和生态环境破坏有重要意义, 同时可促进我国的能源节约、能源结构的优化调整和清洁化.

2 2000 年和 2005 年中国 NO_x 排放清单 (NO_x emission inventory in 2000 and 2005)

2.1 计算方法

排放清单中包含电力、工业 (包括工业锅炉及其它工业过程)、交通 (包括道路和非道路)、民用 4 个部门, 考虑了煤、油 (包括汽油、柴油、燃料油和其他油品)、气 (包括天然气、液化石油气等) 等能源类别, 覆盖我国除台湾、香港和澳门以外的 31 个省市, 计算公式如下 (Stress *et al.*, 2003):

$$E_k = \sum_l \sum_m \sum_n A_{k l m} e_{k l m} (1 - \eta_{l m, n}) X_{k l m, n} \quad (1)$$

式中, 下标 K 、 l 、 m 、 n 分别表示地区、行业、燃料类型和控制技术; E 是 NO_x 的排放; A 为活动水平; e 为无控制排放因子; η 为去除效率; X 是某控制技术 n 的应用比例.

2.2 活动水平

电力部门和工业部门 (包含工业锅炉和工业过程) 的能耗数据来自《中国能源统计年鉴》(下称《能源年鉴》), 工业锅炉的能耗通过将工业部门总能耗减去工业过程源煤耗得到.

工业过程源包括水泥、石灰和砖瓦的生产, 其产量数据来自《中国统计年鉴》《中国工业经济统计年鉴》《中国矿业年鉴》等统计资料; 单位产品煤耗数据来自文献调研 (中国石灰协会, 2005; 徐鸣等, 2007; 周大地, 2003).

由于《能源年鉴》中“交通运输”一栏的能源消耗仅包含交通运输企业的消耗, 大部分社会运输车

辆的燃油消耗却包含在“农业”、“工业”、“服务业”和“居民生活”项里 (陈善同等, 2004), 因此需要对交通部门的油品消耗量进行重新计算. 此处的交通为广义交通, 包括道路移动源 (重型货车、中型货车、轻型货车、微型货车、重型客车、中型客车、轻型客车、微型客车、摩托车、拖拉机、农用运输车) 和非道路移动源 (内河船舶、铁路、农用机械和工程机械), 航空、近海船舶和远洋船舶的污染物排放在本研究中没有考虑.

机动车的燃油量通过下式计算:

$$FC_{ij} = VP_i \times S_{ij} \times VMT_{ij} \times FE_{ij} \times FD_j \quad (2)$$

式中, 下标 i 和 j 分别表示车型和燃料类型; FC 为燃料消耗量; VP 为 i 型车的保有量; S 为燃料为 j 的 i 型车的比例; VMT 为车辆年平均行驶里程; FE 为 i 型车的 j 燃料的燃油经济性指标; FD 为燃料 j 的密度.

内陆船舶和铁路的燃油量按下式计算:

$$FC_{ij} = B_i \times S_{ij} \times FE_{ij} \times FD_j \quad (3)$$

式中, 下标 i 和 j 分别表示运载工具类型和燃料类型; FC 是燃料消耗量; B 是周转量; S 是燃料为 j 的 i 工具的比例; FE 是单位周转量耗油量; FD 是燃料 j 的密度.

农用和工程机械的燃油量按下式计算:

$$FC_i = P_i \times \frac{T_i}{\eta} \times \rho \quad (4)$$

式中, 下标 i 是机械类型; FC 是燃料消耗量; P 是机械总动力; T 是满负荷工作时间; η 是机械的能源转化效率; ρ 是燃料的热值.

道路机动车保有量数据来自《中国汽车工业统计年鉴》车型分类、年平均行驶里程和燃油经济性数据来自国内的研究 (He *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007). 船舶和铁路的周转量和能耗强度数据来自《中国交通统计年鉴》农用和工程机械的总动力统计分别来自《中国农业统计年鉴》和《中国建筑统计年鉴》内燃机效率和满负荷工作时间来自张强 (2005) 的研究.

民用部门的煤、气和生物质消耗来自《能源年鉴》其燃油消耗则被完全归入交通部门.

由此计算出中国 2000 年和 2005 年各部门能耗, 见表 1.

表 1 中国 2000年和 2005年分部门能源消耗量

Table 1 Sectoral energy consumption in China year 2000 and 2005

M tce

	电厂			工业			民用		交通	
	煤	油	气	煤	油	气	煤	气	汽油	柴油
2000年	385	17	7	365	58	70	84	32	48	99
2005年	731	22	15	620	98	117	98	49	58	139

2.3 排放因子与控制措施

电厂的 NO_x 排放因子受炉型、燃烧状况、燃料类型等因素影响,田贺忠(2003)通过广泛的文献调研和实地测试,认为2000年前后我国燃煤电厂平均排放因子为 $12.4 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$; Zhang等(2007)根据电厂机组大小以及是否应用了低氮燃烧技术,将排放因子取 $7.8 \sim 14.7 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$;赵瑜(2008)综合了100多个实测排放因子结果,将电厂 NO_x 排放因子取为 $16.1 \sim 8.6 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$. 本研究综合以上数据,将燃煤电厂无控制排放因子取为 $13.5 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$,再单独考虑控制技术的普及率及对污染物的去除效果. 目前我国对电厂已经制定了 NO_x 排放标准,但是与欧洲的标准相比还较宽松,低氮燃烧(LNB)是一种在火电厂被较广泛使用的 NO_x 控制技术,从80年代起,我国300MW以上的机组都采用了LNB,而100~300MW的机组也逐步在进行改造(王方群等,2007). 选择性催化还原(SCR)是控制电厂 NO_x 排放的另一种有效技术,在国际上较为流行,其去除效率高,但是投资和运行成本也不低. 截至2004年,我国仅有一家电厂脱硝项目投运,总容量3600MW,仅占当年总装机容量的1%,对电力部门削减 NO_x 排放的贡献度很小;另有计划中的电厂SCR项目32个,总容量29600MW(刘贵云,2005).

工业锅炉的 NO_x 无控制排放因子与炉型和燃料均有关系. 国外燃煤工业锅炉的 NO_x 排放因子范围为 $2.5 \sim 10.5 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$ (USEPA, 2002; Dore *et al.*, 2003); 田贺忠(2003)将燃煤工业锅炉的排放因子取为 $10.2 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$,孙庆贺等(2004)的研究表明,我国工业锅炉的 NO_x 排放因子为 $1.5 \sim 3.7 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$; Zhang等(2007)根据工业锅炉的不同炉型,取 $5.3 \sim 5.6 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$; 王书肖等(2008)测得我国工业链条炉的 NO_x 排放因子为 $2.3 \sim 3.5 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$. 综合以上文献,本研究将工业锅炉的无控制排放因子取为 $8.1 \text{ kg} \cdot \text{tce}^{-1}$. 截至目前,我国还未颁发针对燃煤工业锅炉 NO_x 排放限值的标准.

NO_x 排放的工业过程主要是石灰、水泥和砖瓦

的生产,在此过程中煤炭在工业炉窑中燃烧,释放 NO_x , 排放因子与生产技术有关,故需与工业锅炉区别计算. 该部门的排放因子也主要参考国内实测结果.

民用部门的 NO_x 排放来自茶浴炉、公福炉及生活炉灶,这部分排放因子参考田贺忠(2003)的文献.

交通部门的 NO_x 排放因子与发动机、燃料、行驶速度和保养维护状况等因素相关,近年来,我国学者利用MOBILE、COPERT等模型,结合隧道试验、实际工况测试等方法,获得了各类车型的排放因子(表3),本研究中机动车无控制排放因子主要通过文献调研获得. 机动车对城市大气污染有很大贡献,2000年以来,中国政府颁发了一系列针对各类车型的污染物排放限值标准,大部分参考了欧洲系列标准,其中包括轻型车的国一至国四标准,其执行时间分别为2000年、2004年、2007年和2010年;重型汽车的国一和国二标准,执行时间分别为2003年和2004年;重型柴油车的国一至国五标准,执行时间分别为2001年、2004年、2007年、2010年和2012年;摩托车的国一至国三标准,执行时间为2003年、2004年和2008年;农用运输车的国一和国二标准,执行时间分别是2006和2007年;同时对于拖拉机、农用和工程机械也颁发了国一和国二标准,执行时间分别是2008年和2010年. 同样需要注意的是,北京和上海这两个大城市在执行机动车标准的步伐比其他地区要快一到两年,它们于1999年、2003年和2005年分别开始执行轻型汽车国一至国三标准. 根据标准颁发的时间、适用的车型、不同类型车辆的报废年限,可以得出在2000年和2005年满足不同标准的车辆的燃料消耗量,再结合不同标准对 NO_x 的去除效果,计算交通源的 NO_x 排放情况.

表2和表3为各部门在无控制情况以及不同控制技术下的排放因子.

表 2 电力、工业和民用行业的 NO_x 排放因子

Table 2 Emission factors in power, industry and domestic sectors

部门	燃料	技术	排放因子 / (kg tce ⁻¹)	排放因子来源
电厂	煤	无控制	13.5	田贺忠, 2003; Zhang, 2007; 赵瑜, 2008
	煤	LNB	8.1	按去除效率 40% 计 王方群等, 2007; 王文选等, 2006; 赵瑜, 2008
	煤	SCR	2.7	按去除效率 80% 计 王方群等, 2007; 王文选等, 2006; 赵瑜, 2008
	油	无控制	7.0	田贺忠, 2003
	气	无控制	3.1	田贺忠, 2003
工业锅炉	煤	无控制	8.1	田贺忠, 2003; Zhang, 2007; 孙庆贺等, 2004; 王书肖等, 2008
	煤	LNB	3.7	按去除效率 40% 计
	油	无控制	4.1	田贺忠, 2003
	气	无控制	1.6	田贺忠, 2003
水泥生产 ¹⁾	煤	新型干法	1.10	高长明, 2005; 袁文献, 2005
	煤	新型干法 + SNCR	0.55	按去除效率 50% 计 (高长明, 2007)
	煤	立窑	0.67	李丽, 2007
	煤	旋窑	2.75	袁文献, 2005
砖瓦生产 ¹⁾	煤	无控制	0.32	张强, 2005
石灰生产 ¹⁾	煤	无控制	1.60	扬州环保局, 2007
民用	煤	无控制	4.2	田贺忠, 2003
	气	无控制	0.1	田贺忠, 2003; 孙庆贺等, 2004

注: ¹⁾ 水泥、砖瓦、石灰生产过程的 NO_x 排放因子单位为 kg (产品)⁻¹

表 3 交通行业的 NO_x 排放因子

Table 3 Emission factors in the transportation sector

机动车类型	燃料	不同控制技术下的排放因子 / (t M tce ⁻¹)					
		无控制	欧一	欧二	欧三	欧四	欧五
重型货车 ¹⁾	柴油	73	51	54	47	27	16
中型货车 ¹⁾	柴油	53	36	39	34	19	12
	汽油	13	2	1			
轻型货车 ¹⁾	柴油	25	25	25	25	19	10
	汽油	22	6	3	2	1	1
微型货车 ¹⁾	汽油	32	9	4	3	1	1
重型客车 ¹⁾	柴油	66	46	49	42	24	15
	汽油	18	3	2			
中型客车 ¹⁾	柴油	42	29	31	27	16	9
	汽油	19	3	2			
轻型客车 ¹⁾	柴油	18	18	18	18	13	7
	汽油	23	7	3	2	1	1
微型客车 ¹⁾	柴油	14	14	14	14	11	5
	汽油	22	6	3	2	1	1
摩托车 ¹⁾	汽油	6	6	6	4		
拖拉机 ²⁾	柴油	43	29	22			
农用运输车 ²⁾	柴油	43	29	22			
火车 ²⁾	柴油	29					
内河船舶 ³⁾	柴油和燃料油	38	25	23			
工程机械 ⁴⁾	柴油	16	10	8	5		
农用机械 ⁴⁾	柴油	16	10	8	5		

注: 1) 重型车、轻型车和摩托车的无控制排放因子参考了谢邵东等 (2006)、胡斌祥等 (2002)、李伟等 (2003)、李修刚等 (2001)、王伯光等 (2001)、傅立新等 (2000)、祝昌健 (1997)、田贺忠 (2003) 等的文献, 不同控制技术对排放源 NO_x 的去除效率参考 Cofala 等 (1998) 的文献;

2) 拖拉机、农用运输车和火车的无控制排放因子参考田贺忠 (2003) 的文献, 不同控制技术对排放源 NO_x 的去除效率参考 Cofala 等 (1998) 的文献

3) 内河船舶的无控制排放因子参考丁河清等 (2000)、宋岩 (2007) 的文献, 不同控制技术对排放源 NO_x 的去除效率参考 Cofala 等 (1998) 的文献

4) 农用机械和工程机械的无控制排放因子参考王志新等 (2007)、田贺忠 (2003) 的文献, 不同控制技术对排放源 NO_x 的去除效率参考 Cofala 等 (1998) 的文献

2.4 计算结果

根据上述方法计算得到中国 2000年和 2005年的 NO_x 排放清单. 如图 1所示, 2000年, NO_x 总排放量为 $12.1 \times 10^6 \text{ t}$ 其中电厂、工业、道路移动源的贡献率分别为 38%、26% 和 25%; 到 2005年, NO_x 总排放量上升到 $19.1 \times 10^6 \text{ t}$ 年增长率约 10%, 电厂、工业、道路移动源的贡献率分别为 43%、29% 和 20%.

伴随着近 5年来中国经济的快速发展, 能源消耗的增加, 中国 NO_x 排放量飞速增长, 尤其是电厂部分, 年均增长率高达 12.5%, 必须引起有关方面的高度重视.

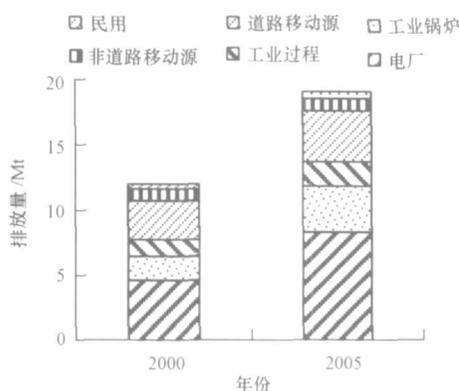


图 1 中国 2000年和 2005年 NO_x 分部门排放量

Fig 1 NO_x emissions by sector in 2000 and 2005

3 2030年中国 NO_x 排放情景分析 (Scenario analysis of NO_x emissions in 2030)

未来 NO_x 的排放既受能源消耗总量和能源结

表 4 2015和 2030年分情景各部门能源消耗量

Table 4 Energy consumption in 2015 and 2030 under different scenarios

能源情景	年份	M tce										
		电厂			工业			民用		交通		
		煤	油	气	煤	油	气	煤	气	汽油	柴油	气
[REF]	2015	1364	22	47	1135	184	299	118	120	161	232	1
	2030	1983	19	115	1432	275	509	104	240	225	330	3
[PC]	2015	1239	22	84	1072	175	281	111	126	158	225	1
	2030	1475	19	211	1287	231	420	80	251	216	306	3

3.1.1 控制方案 [0]、[1]、[2]三个控制方案的基本假设列在表 5中.

1) 电厂 目前我国大型电站锅炉主要通过采用 LNB来满足排放标准, 但随着政府对 NO_x 排放控制的重视, 预计从 2010年开始高效的 SCR 脱硝技术就可能在经济发达地区的大型机组上得到推广

构的影响, 也与工业部门的技术进步、 NO_x 减排技术的推广应用有关.

本研究设计了 2个能源情景 ([REF]和[PC]) 及 3个控制方案 ([0][1][2]). [REF]和[PC]分别是基准能源情景和政策能源情景: [REF]中仅考虑中国能源和工业领域的发展趋势及现有政策法规, 未强化能效提高和结构优化; [PC]则假设在未来, 中国政府会采取更强有力的措施改善能源结构和工业结构, 提高能源利用效率. 3个控制方案中 [0]为基准控制方案, 仅考虑已颁发的污染物控制法规及目前的执法力度; [1]为电厂加强控制方案, 假设未来政府会对电厂施行更严格的排放控制; [2]为综合强化控制方案, 该方案对电厂、工业、交通等部门均采取了更严格的 NO_x 控制措施.

3.1 能源情景

能源情景设定参考了国际能源署 (IEA) 的《2007世界能源展望》(International Energy Agency 2007)中国部分, 但是考虑中国近年来的经济增长速度和能源消费速度, 认为 IEA 的情景过于保守, 因此参考我国历史数据, 对电厂和工业部门的消费量做出调整.

《2007世界能源展望》中未详细列出交通部门分车型的能源消耗, 本研究通过分析不同机动车未来保有量的增长速度、船舶和铁路未来周转量和工程、农用机械总动力的增加情况、重型车和轻型车燃油汽油、柴油和天然气的比例变化、燃油经济性的提高, 对不同情景下交通部门分车型的耗油量进行了预测.

应用, 因此在电厂加强控制方案 [1]和综合加强控制方案 [2]中, 假设 2015年时全国 1% 的电厂应用了 SCR, 主要分布在经济发达的沿海地区, 而 2015年以后, SCR 获得了全面的推广, 新建电厂 SCR 安装比例的全国平均值上升到 80%.

表 5 不同控制方案的基本假设

Table 5 Key assumptions of different control policies

部门	控制方案		
	[0]	[1]	[2]
电厂	2005年后新电厂全部采用 LNB SCR 未得到广泛使用.	2010年~2015年, 东部沿海地区的电厂开始应用 SCR 技术, 截至 2015年, 全国平均应用率 1%, 2015年后全国 80% 的新建电厂使用 SR.	2010年~2015年, 东部沿海地区的电厂开始应用 SCR 技术, 截至 2015年, 全国平均应用率 1%, 2015年后全国 80% 的新建电厂使用 SCR.
工业	工业锅炉无控制. 水泥生产中新型干法比例加大.	工业锅炉无控制, 水泥生产中新型干法比例加大.	2010年~2015年, 全国 50% 的新建锅炉应用 LNB, 2015年后, 该比例上升到 100%. 水泥生产中新型干法工艺于 2010年开始使用选择性非催化还原技术 (SNCR) 进行尾气脱硝, 到 2030年应用比例为 80%.
交通	道路机动车和非道路移动源的生产依据目前已颁发的法律法规 (可见 1.3 节的介绍).	道路机动车和非道路移动源的生产依据目前已颁发的法律法规 (可见 1.3 节的介绍).	在现有标准基础上, 到 2012年轻型车实行欧 5 标准, 轻型柴油车 2015年实行欧 6 标准, 内陆船舶到 2012年开始遵循欧 1 标准, 2014年执行欧 2 农用和工程机械在 2012年执行欧 3 标准.
民用	无控制	无控制	无控制

2) 工业锅炉 工业锅炉对 NO_x 排放也有很高的贡献率, 但是与电厂相比其 NO_x 排放控制有一定难度, 因此只在综合控制方案 [2] 里考虑对工业锅炉的控制. 目前工业锅炉 NO_x 的减排技术有 LNB 和烟气脱硝两种, 由于工业锅炉一般规模较小, 采用烟气脱硝的单位处理成本较高, 故在方案 [2] 里只考虑 LNB 的使用. 假设政府在 2015 年颁发标准, 对新建工业锅炉 NO_x 排放实行控制, 2015~2020 年全国 50% 的新建工业锅炉应用 LNB, 2020 年后, 所有的新建锅炉都采用 LNB 技术, 其普及率由 2020 年的 19% 迅速上升到 2030 年的 84%.

3) 交通运输 随着我国汽车保有量的不断增加, 如不加严控制, 交通部门对 NO_x 的贡献将会非常可观. 中国所颁发的一系列排放标准都是参考欧洲标准, 目前对轻型车实行的是欧 3 标准, 按照计划, 到 2010 年会实行欧 4 标准. 欧 5 标准的实行时间还未确定, 在综合控制方案 [2] 中假设中国比欧洲落后三年, 在 2012 年实行欧 5 标准. 重型柴油车目前也在实行欧 3 标准, 根据已有立法分别在 2010 年和 2012 年实行欧 4 和欧 5 标准. 以汽油做燃料的重型卡车目前实行欧 2 标准, 摩托车实行欧 3 标准, 由于这两类车今后增长缓慢、控制潜力有限, 不考虑未来加严控制. 以农用机械和工程机械为主的非道路移动源对 NO_x 排放也有较大贡献, 在 2008 年, 国家开始对这部分机械实行欧 1 标准, 在 2010 年实行欧 2 标准. 在综合控制方案 [2] 中, 假设到 2012

年, 欧 3 标准得到实行, 同时执行的还有针对内陆船舶的欧 1 标准.

4) 其他 NO_x 的其它排放源包括水泥、砖瓦和石灰生产工艺中的工业窑炉以及民用、商用炉灶和锅炉等. 新型干法为目前水泥生产的主流技术, 但与落后的水泥生产工艺相比, 其 NO_x 排放因子反而更高, 在综合控制方案 [2] 里假设从 2010 年开始, 新型干法水泥生产工艺开始应用 SNCR 技术进行尾气脱硝, 到 2030 年, 其应用比例增加到 80%. 民用、商用部门因为贡献小、标准执行难度高, 故未考虑控制.

3.1.2 情景分析结果 将能源情景与控制方案相结合, 即可对未来 NO_x 排放量进行预测. 本研究共测算了 4 种情况下未来 NO_x 的排放水平, 分别是 [REF] (基准能源情景结合基准控制方案)、[PC0] (政策能源情景结合基准控制方案)、[PC1] (政策能源情景结合电厂加强控制方案)、[PC2] (政策能源情景结合综合强化控制方案). [REF] 为基准情景, 用于展示如果 NO_x 问题没有得到足够重视, 其排放量的增长情况; [PC1] 和 [PC2] 为政策情景, 用于为政府制定 NO_x 减排方案提供参考; [PC0] 情景可用于对能源政策和排放控制政策在 NO_x 减排行动中的效果进行定量分析.

图 2 为不同情景下我国 2005~2030 年 NO_x 排放的情况. 可见, 如果政府不采取更强有力的 NO_x 减排措施, NO_x 的排放将会持续增长, 在 2030 年达到 $35.4 \times 10^6 \text{ t}$, 而经过能源结构调整和效率提高, 可

使 NO_x 排放量降低 17个百分点, 达到 29.4×10^6 t 在 [PC0]情景的基础上对电厂的 NO_x 排放进行控制, 可削减 16% 的 NO_x; 若同时控制电厂、工业部门和交通部门的 NO_x 排放, 则 2030 年的排放量为 20.4×10^6 t 与 [PC0]情景相比削减了 31%. 因此, 在进行 NO_x 减排时, 一方面要调整能源及工业结构, 提高能源利用效率, 另一方面对电厂、工业及交通部门均实行更严格的排放标准.

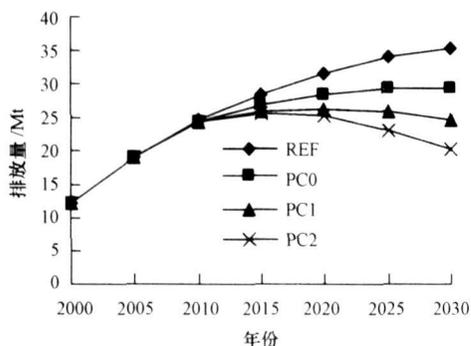


图 2 4种情景下 NO_x 的排放量

Fig. 2 NO_x emissions under different scenarios

对于不同部门, 因为它们的未来发展速度不同, 其末端控制强度也不同, 因此也显示出不同的增长路径 (图 3). 在 [REF]情景下, 电厂排放量由 2005年的 8.3×10^6 t 增加到 2030年的 17.6×10^6 t 但是如果提高能源效率, 降低电力需求, 则排放量可以控制在 13.5×10^6 t 如果进一步推广 SCR 技术, NO_x 排放可降低到 8.8×10^6 t 仅为基础情景下 NO_x 排放量的一半, 可见电力部门具有很大的 NO_x 削减潜力. 如果对工业锅炉不加控制, 其 2030 年的排放量为 10.3×10^6 t 而在 [PC2]情景下, 其排放被降低到 5.8×10^6 t 得益于机动车新车排放标准的不断加严, 未来 25 年交通部门的 NO_x 排放增长缓慢, 即使小轿车的保有量在 2005 年 ~ 2030 年间增长 10 倍, 基准情景下道路移动源 2030 年的排放水平仍与 2005 年基本相当, 政策法规的制定在污染物控制方面所取得的作用在这里得到很好的体现, 但是, 只有加强在用车尾气排放污染的检查 / 维护 (IM) 制度, 鉴别高排放车辆, 促进在用车的维护保养, 才能保障在用车 NO_x 排放控制设备在其整个生命周期内发挥作用.

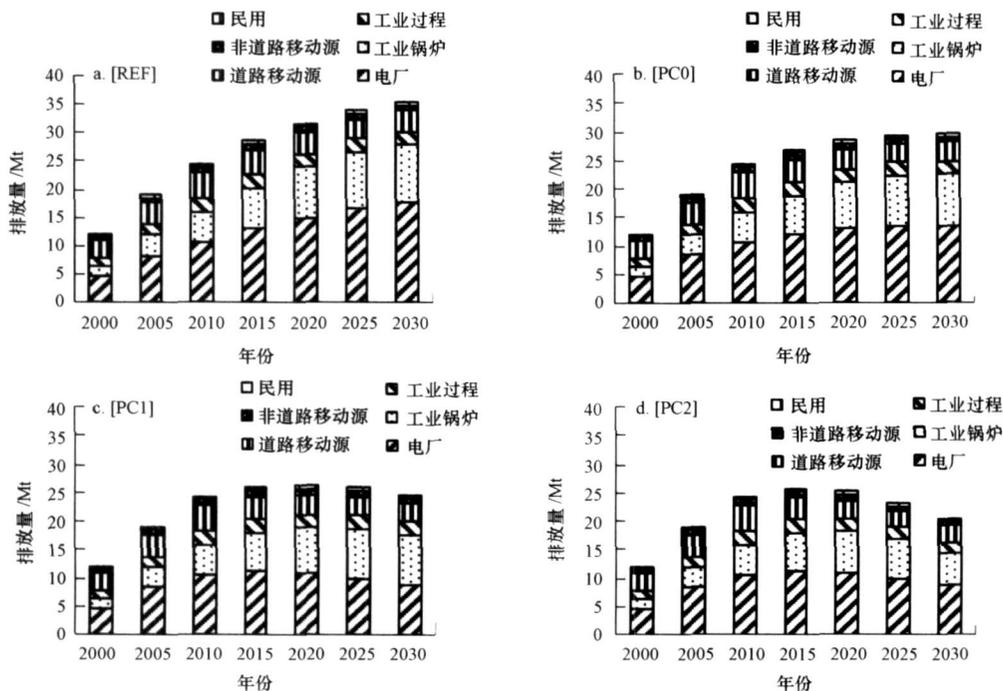


图 3 2000 年 ~ 2030 年各情景 NO_x 分部门排放量

Fig. 3 Emission inventory in China by sector in different scenarios

图 4 为本文的预测结果与文献中其他学者研究的比较. 由于各研究的情景设定存在较大差异, 不

同学者对于 2020 年中国 NO_x 排放量的预测结果差别很大. 而对于 2030 年的 NO_x 排放, 仅有 Klimont

等 (2001) 做过预测, 其结果 14.2×10^6 远低于本研究的结果. 原因是 Klimont 等 (2001) 的预测以 1995 年作为基准年, 对中国 1995~2005 年能源消耗的快速增加估计不足. 本研究的能源情景参考了 IEA 的能源预测, 同时考虑了 2006 年和 2007 年我国能源发展状况, 在进行控制技术假定时考虑了十一五规划及其它可能的控制政策, 因此较为客观地反映中国的发展现状和未来趋势.

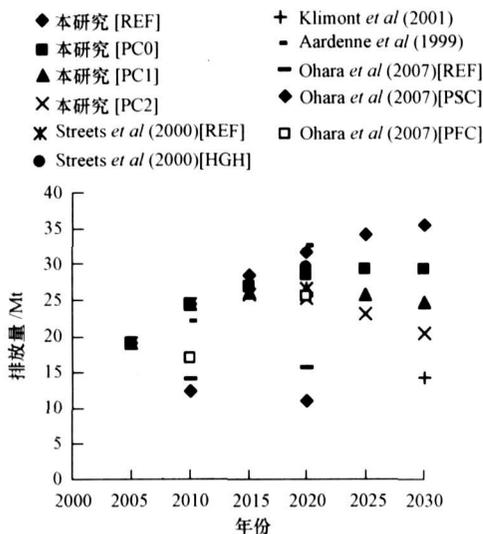


图 4 本研究与其它学者研究结果的比较

Fig. 4 Comparison with other studies

4 结论 (Conclusions)

1) 近年来, 中国大陆能源相关部门的 NO_x 排放量快速上升, 2000 年全国 NO_x 排放量为 12.1×10^6 t, 到 2005 年增加到 19.1×10^6 t, 年均增长 10%.

2) 如果不采取进一步的 NO_x 减排措施, 随着国民经济继续发展、人口增长和城市化进程的加快, 未来中国 NO_x 排放量将继续增长. 按照目前的发展趋势, 到 2030 年我国 NO_x 排放量将达到 35.4×10^6 t, 势必造成严重的环境影响, 因此, 必须切实加强 NO_x 排放控制.

3) 由于 NO_x 排放来源广泛, 只有同时实行节能政策和排放控制, 即一方面实施清洁能源政策, 另一方面加强电厂、工业和交通等重点源的 NO_x 排放末端控制, 才能有效降低 2030 年全国的 NO_x 排放水平. 其中, 电厂的 NO_x 控制应该以 LNB 技术为主, 逐步普及 SCR 技术, 工业锅炉应主要采用 LNB 技术, 对交通源应推进更加严格的排放标准的实施.

4) 我国 NO_x 排放量大, 来源复杂, 已经引起了

酸沉降、细粒子、臭氧等环境问题, 必须进一步加强 NO_x 排放与污染状况分析、法规与标准制定、控制技术评估等方面的研究.

责任作者简介: 郝吉明 (1946—), 男, 1970 年清华大学本科毕业生, 1981 年获清华大学硕士学位, 1984 年于美国辛辛那提大学获博士学位. 现任清华大学环境科学与工程研究院院长, 中国工程院院士. 研究领域为大气污染控制, 承担包括国家科技攻关、“973”课题在内的研究二十余项, 多项成果获国家和省部级奖励.

References

- Aardenne J A, Camichael G R, Levy H, et al. 1999. Anthropogenic NO_x emissions in Asia in the period 1990~2020 [J]. *Atmospheric Environment*, 33(4): 633-646
- Cofak J, Syri S. 1998. Nitrogen oxides emissions abatement technologies and related costs for Europe in the RAINS Model Database [R]. R-98-88. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis
- Chen S T, Liu X Y. 2004. Suggestions on improvement of China's energy balance table [J]. *Energy of China* 26(3): 17-21 (in Chinese)
- China Line Association. 2005. Line industry development report in the first half of 2005 [OL]. 2005-06-21, <http://www.zgshxh.com> (in Chinese)
- Ding H Q, Lu L, Wu J X, et al. 2000. The regulations and control of NO_x from marine diesel engines [J]. *Journal of Wuhan Transportation University*, 24(4): 355-359 (in Chinese)
- Dore C J, Goodwin J W L, Watterson J D, et al. 2003. UK emissions of air pollutants 1970 to 2001 [R]. Abingdon, UK: National Environmental Technology Centre
- Environment Protection Agency of Yangzhou. 2007. Pollutants emission factors of industries [OL]. 2007-01-19 (in Chinese)
- Fu L X, Hao J M, He D Q, et al. 2000. The emission characteristics of pollutants from motor vehicles in Beijing [J]. *Environmental Science*, 21(3): 68-70 (in Chinese)
- Gao C M. 2005. Reflection on serious pollution of China's cement industry [J]. *Cement Industry*, 4: 1-3 (in Chinese)
- Gao C M. 2007. Waste gas denitrogen technology in cement industry [J]. *Cement Technology*, 2: 19-20 (in Chinese)
- He K B, Huo H, Zhang Q, et al. 2005. Oil consumption and CO_2 emission in China's road transport: current status, future trends and policy implications [J]. *Energy Policy*, 33(12): 1499-1507
- Hu B X, Zhu H, Qing W X. 2002. A detailed list for exhaust in development models of automobile technology in China [J]. *Journal of WUT (Information & Management Engineering)*, 24(2): 99-102 (in Chinese)
- International Energy Agency. 2007. World Energy Outlook 2007 [M]. Paris: IEA Publications, 241-420
- Klimont Z, Cofak J, Schopp W, et al. 2001. Projections of SO_2 , NO_x , NH_3 and VOC emissions in East Asia up to 2030 [J]. *Water, Air*

- and Soil Pollution 130: 193—198
- Liu G Y. 2004. NO_x control requirement of newly built power plant [OL]. Beijing China Environment Online 2005-12-22 (in Chinese)
- Li L. 2007. Determination of NO_x and SO₂ emission factors in cement industry in environmental statistic work [J]. Statistics and Consulting 5: 29—30 (in Chinese)
- Li W, Fu L X, Hao J M, *et al*. 2003. Emission inventory of 10 kinds of air pollutants for road traffic vehicles in China [J]. Urban Environment and Urban Ecology, 16(2): 36—38 (in Chinese)
- Li X G, Yang X G, Wang W, *et al*. 2001. Motor vehicles' exhaust emission factors for urban transportation planning [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 1(4): 87—91 (in Chinese)
- 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
- Richter A, Bumrows J P, Nu H, *et al*. 2005. Increase in tropospheric nitrogen dioxide levels over China observed from space [J]. Nature, 437: 129—132 doi 10.1038/nature04092
- Song Y. 2007. Experimental research of emission control for marine diesel engine Z6150ZLCZ-5 [J]. Journal of Nantong Vocational & Technical Shipping College, 6(4): 59—63 (in Chinese)
- Streets D G, Bond T C, Camichael G R, *et al*. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geophysical Research, 108 (D21), 8809 doi 10.1029/2002JD003093
- Sun Q H, Lu Y Q, Fu L X, *et al*. 2004. Adjustment on NO_x emission factors and calculation of NO_x emissions in China in the year 2000 [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control 5(2): 90—94 (in Chinese)
- Tian H Z. 2003. Studies on present and future emissions of nitrogen oxides and its comprehensive control policies in China [D]. Beijing Tsinghua University, 55—93 (in Chinese)
- U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2002. Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42 5th ed [OL]. 2008-01-01. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42>
- Wang B G, Zhang Y H, Wu Z Q, *et al*. 2001. Tunnel test for motor vehicle emission factors in Guangzhou [J]. Research of Environmental Sciences 14(4): 13—16 (in Chinese)
- Wang C, Cai W J, Lu X D, *et al*. 2007. CO₂ mitigation scenario in China's road transport sector [J]. Energy Conversion and Management 48: 2110—2118
- Wang F Q, Du Y G, Liu Y, *et al*. 2007. Development status and recommendations on flue gas denitration in coal fired power plant in China [J]. China Environmental Protection Industry 1: 18—22 (in Chinese)
- Wang W X, Xiao Z J, Xia H X. 2006. A summary of denitration technology of thermal power plants [J]. Electrical Equipment 7(8): 1—5 (in Chinese)
- Wang Z X, Ji X Z, Zhi H B. 2007. Calibration of off highway Euro II diesel engine [J]. Diesel Engine 29(1): 9—11 (in Chinese)
- Xie S D, Song X Y, Shen X H. 2006. Calculating vehicular emission factors with COPERT III mode in China [J]. Environmental Science, 27(3): 415—419 (in Chinese)
- Xu M, Wang Y J. 2007. Potential and countermeasures of energy conservation and pollution reduction of brick industry in China [J]. Brick World (7): 6—11 (in Chinese)
- Yuan W X, Chen Z S, Cao W, *et al*. 2005. Implementation of new emission standards in cement industry [J]. Jiangsu Building Material (2): 16—27 (in Chinese)
- Zhang Q. 2005. Study on regional fine PM emissions and modeling in China [D]. Beijing Tsinghua University, 26—62 (in Chinese)
- Zhang Q, Streets D G, He K B, *et al*. 2007. NO_x emission trends for China 1995—2004: The view from the ground and the view from space [J]. Journal of Geophysical Research, 112, D22306 doi 10.1029/2007JD008684
- Zhao Y. 2008. Study on Air pollutant emission of coal fired power plants in China and its environmental impacts [D]. Beijing Tsinghua University (in Chinese)
- Zhou D D. 2003. China's Sustainable Energy Scenarios 2020 [M]. Beijing China Environmental Science Press 461—470 (in Chinese)
- Zhu C J. 1997. Coefficient of vehicular emission discharge and trend of pollution in Guangzhou City [J]. China Environmental Science 17(3): 216—219 (in Chinese)

中文参考文献

- 陈善同, 刘学义. 2004. 改进中国能源平衡表的建议 [J]. 中国能源, 26(3): 17—21
- 中国石灰协会. 2005. 2005年上半年中国石灰行业发展报告 [OL]. 2005-06-21. <http://www.zs-shxh.com/>
- 丁河清, 吕林, 吴锦翔, 等. 2000. 船舶柴油机 NO_x 的排放法规与控制 [J]. 武汉交通科技大学学报, 24(4): 355—359
- 扬州环境保护局. 2007. 部分行业污染物排放物料衡算系数 [OL]. 2007-01-19
- 傅立新, 郝吉明, 何东全, 等. 2000. 北京市机动车污染物排放特征 [J]. 环境科学, 21(3): 68—70
- 高长明. 2005. 关于我国水泥工业高污染的反思 [J]. 水泥工程, 4: 1—3
- 高长明. 2007. 水泥工业废气脱氮技术 [J]. 水泥技术, 2: 19—20
- 胡斌祥, 朱华, 覃维献. 2002. 我国汽车技术发展模式的排放清单 [J]. 武汉理工大学学报, 24(1): 99—102
- 刘贵云. 2004. 新建火电项目氮氧化物控制要求 [OL]. 北京: 中国环境在线, 2005-12-22
- 李丽. 2007. 在环境统计工作中对水泥行业氮氧化物与二氧化硫排放系数的核定 [J]. 统计与查询, 5: 29—30
- 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 2003. 中国道路机动车 10种污染物的排放量 [J]. 城市环境与城市生态, 16(2): 36—38
- 李修刚, 杨晓光, 王伟, 等. 2001. 用于城市交通规划的机动车污染物排放因子 [J]. 交通运输工程学报, 1(4): 87—91
- 宋岩. 2007. Z6150ZLCZ-5型船用柴油机排放控制的试验研究 [J]. 南通航运职业技术学院学报, 6(4): 59—63
- 孙庆贺, 陆永琪, 傅立新, 等. 2004. 我国氮氧化物排放因子的修正和排放量计算, 2000年 [J]. 环境污染治理技术与设备, 5(2):

90-94

- 田贺忠. 2003 中国氮氧化物排放现状、趋势及综合控制对策研究 [D]. 北京: 清华大学
- 王伯光, 张远航, 吴政奇, 等. 2001 广州市机动车排放因子隧道测试研究 [J]. 环境科学研究, 14(4): 13-16
- 王方群, 杜云贵, 刘艺, 等. 2007 国内燃煤电厂烟气脱硝发展现状及建议 [J]. 中国环保产业, 1: 18-22
- 王书肖, 赵秀娟, 李兴华, 等. 2008 工业燃煤链条炉大气污染物排放特征研究 [J]. 环境科学. 印刷中
- 王文选, 肖志均, 夏怀祥. 2006 火电厂脱硝技术综述 [J]. 电力设备, 7(8): 1-5
- 王志新, 吉学之, 支怀斌. 2007 工程机械用欧 II 柴油机的标定 [J]. 柴油机, 29(1): 9-11
- 谢绍东, 宋翔宇, 申新华. 2006 应用 COPERT III 模型计算中国机动车排放因子 [J]. 环境科学, 27(3): 415-419
- 徐鸣, 王亚娟. 2007 我国砖瓦工业节能减排潜力与对策 [J]. 砖瓦世界, (7): 6-11
- 袁文献, 陈章水, 曹伟, 等. 2005 水泥工业大气污染物排放新标准实施对策 [J]. 江苏建材, 2: 16-27
- 张强. 2005 中国区域细颗粒物排放及模拟研究 [D]. 北京: 清华大学
- 赵瑜. 2008 中国燃煤电厂大气污染物排放及环境影响研究 [D]. 北京: 清华大学
- 周大地. 2003 2020 中国可持续能源情景 [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- 祝昌健. 1997 广州市机动车尾气排放系数及污染趋势探讨 [J]. 中国环境科学, 17(3): 216-219