

中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析

张楚莹, 王书肖, 赵瑜, 郝吉明*

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 利用排放因子法, 基于电力、工业、民用、交通等部门的活动水平和排放因子, 建立了 2000 年和 2005 年中国分省、分部门、分粒径的颗粒物(PM)排放清单. 利用情景分析法, 基于能源预测, 分析了在不同颗粒物控制方案下 2010~2030 年中国颗粒物的排放趋势. 结果表明, 我国 2005 年的总悬浮颗粒物(TSP)、可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5})的排放量分别是 29.98、15.30 和 9.79 Mt, 2000~2005 年间的排放增长率分别是 3.4%、4.7% 和 5.4%. 在现有政策情景下, 我国 2030 年 TSP 和 PM_{2.5} 的排放量分别是 23.06 和 10.59 Mt, 工业锅炉成为最大的颗粒物排放源. 通过提高能源利用效率, 2030 年可在基准情景基础上 TSP 和 PM_{2.5} 分别减排 15% 和 16%; 通过增大执法力度, 2015 年可再减排 25% 的 TSP 和 10% 的 PM_{2.5} 排放, 之后通过加严排放标准, 推广高效除尘装置的应用, 2030 年 TSP 和 PM_{2.5} 可再减排 21% 和 19%, 其排放量分别达到 13.81 和 6.88 Mt. 颗粒物的综合控制措施应覆盖电厂、工业、民用等各个领域, 从提高能效、保证执法、强化政策 3 个方面着手.

关键词: 颗粒物; 排放清单; 情景分析

中图分类号: X513; X823 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-1881-07

Current Status and Future Prospects of Anthropogenic Particulate Matter Emissions in China

ZHANG Chu-ying, WANG Shu-xiao, ZHAO Yu, HAO Ji-ming

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The emission inventory of particulate matter (PM) in 2000 and 2005 were established based on the activity data and emission factors of power, industrial, residential and transportation sectors in China. Future emissions from 2010 to 2030 were projected under different scenarios of energy consumption and PM emission control policies. The emissions of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in 2005 were 29.98Mt, 15.30 Mt and 9.79 Mt respectively, and the annual increasing rates were 3.4%, 4.7% and 5.4% during 2000 to 2005. By 2030, the emissions of TSP and PM_{2.5} would be 23.06 Mt and 10.59 Mt under reference scenario, of which industrial boilers are the largest contributor. With improvement of energy efficiency, the emissions of TSP and PM_{2.5} would be reduced by 15% and 16% respectively in 2030 compared with that under reference scenario. By intensifying the enforcement of legislation, 25% of TSP and 10% of PM_{2.5} can be further reduced in 2015. By tightening the emission standard and promoting high-efficiency dust collector after 2015, 21% of TSP and 19% of PM_{2.5} can be further reduced in 2030 and the emissions can become 13.81 Mt and 6.88 Mt separately. The control of particulate matter shall cover power, industrial and residential sectors. Actions shall include improving energy efficiency, enforcing legislation and tightening control policies.

Key words: particulate matter; emission inventory; scenario analysis

大气颗粒物, 即大气气溶胶体系中分散的各种粒子. 根据空气动力学等效直径大小, 可将其分为总悬浮颗粒物(total suspended particles, TSP)、可吸入颗粒物和细粒子. TSP 指的是粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 的所有颗粒物. 可吸入颗粒物是指粒径 $< 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 用 PM₁₀ 表示, 其中粒径范围为 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物被称为粗粒子(coarse particles), 表示为 PM_{2.5~10}; 粒径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物被称为细粒子(fine particles), 表示为 PM_{2.5}. 目前对颗粒物的研究已经延伸至超细颗粒物(PM_{1.0}), 但是由于其排放特征不确定性较大, 本研究暂未涉及.

从 1999~2006 年, 颗粒物一直是影响城市空气质量的首要污染物, 2006 年有 34% 的城市可吸入颗粒物(PM₁₀)浓度超过国家空气质量二级标准^[1].

PM₁₀ 严重影响人体健康, 国外研究发现, PM₁₀ 短期浓度变化与人群逐日死亡数密切相关^[2,3], 在我国太原、抚顺、北京等地的研究均证实了以上结论^[4~6]. 此外, PM_{2.5} 能影响大气能见度^[7]; 其中的不同组分可以直接或间接地影响区域和全球气候^[8]. 例如, 有研究者发现其中的黑碳(BC)是影响我国区域气候变化的一个重要因素, 加速了南涝北旱的趋势^[9].

建立颗粒物排放清单对于分析大气颗粒物污染源并提出有效的控制对策非常重要, 是国内外研

收稿日期: 2008-09-06; 修订日期: 2008-12-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422201); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A309)

作者简介: 张楚莹(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: zhangchuying@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

究的热点问题. Ohara 等^[10] 计算了亚洲 1980 ~ 2003 年的黑碳(BC)和有机碳(OC)排放清单,并对不同情景下 2020 年的排放水平进行预测; Streets 等^[11,12] 估算了 1995 年和 2000 年亚洲 BC 和 OC 的排放清单. 但是,国外的研究大多只关注颗粒物中的 BC 和 OC 组分,而对于不同粒径颗粒物的排放情况关注较少. 在我国,张强等^[13] 曾对 2001 年人为源颗粒物排放清单进行过系统估算. 此外,还有学者对某一区域或行业的颗粒物排放清单进行测算,如 Wang 等^[14] 测算了中国东部省份 2000 年的颗粒物排放清单,并对 2020 年的排放情况进行预测;雷宇等^[15] 建立了基于技术的水泥工业颗粒物排放清单;赵斌等^[16] 对天津市 2003 年 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放清单进行了计算.

综上所述,目前的中国颗粒物排放清单研究不够系统、全面,尚不能满足预测预警、区域调控的要求. 在此背景下,设计各类颗粒物控制方案,分析不同情景下未来颗粒物排放趋势,可为政府制定经济有效的颗粒物排放控制政策提供科学依据.

本研究首先通过计算中国 2000 年和 2005 年的分部门颗粒物排放清单,分析其排放特征;然后在不同的能源情景和控制方案假设下,预测未来排放的变化趋势,从而总结各类控制措施的减排效果.

1 计算方法与研究范围

本研究按颗粒物粒径大小划分了 3 个粒径区间: > 2.5 μm、2.5 ~ 10 μm 和 > 10 μm, 分别计算排放量. 计算公式如下^[17].

$$E_{l,y} = \sum_{j,f,k} \left[A_{l,j,f,k} \sum_n (X_{l,j,f,k,n} F_{l,j,f,k,n,y}) \right] \quad (1)$$

$$F_{n,y} = EF_{TSP} f_y (1 - \eta_{n,y}) \quad (2)$$

式中, E 为排放量; l 、 y 、 j 、 f 、 k 、 n 分别代表省(直辖市, 自治区)、粒径范围、经济部门、燃料类型或产品类型、排放源类别、控制设施类型; A 为排放源活动水平, 如燃料消耗量、产品产量等; X 为控制技术应用比例; F 为排放因子; EF_{TSP} 为 TSP 产污系数; f_y 为排放源产生的总颗粒物中粒径范围 y 的颗粒物所占比例; $\eta_{n,y}$ 为控制技术 n 对于粒径范围 y 的颗粒物的去除效率.

本研究的区域范围包括中国大陆 31 个省、直辖市及自治区. 限于数据可得性, 香港、澳门特别行政区和台湾省暂未考虑.

污染物排放源划分为电厂、工业锅炉、民用、交通和工业过程, 其中工业过程包括了水泥生产、石灰生产、砖瓦生产、炼焦、烧结、炼铁、炼钢等. 能源类别

包括煤、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)、生物质等.

研究的时间跨度是从 2000 ~ 2030 年, 以 5 a 为一间隔. 其中, 根据能源消费现状, 估算 2000 年和 2005 年中国分地区、分部门、分燃料类型的 PM 排放清单; 以 2005 年为基准年, 采用部门分析法对 2010 ~ 2030 年中国的能源消费需求及主要产品产量进行情景预测, 结合控制方案设计, 分析未来中国 PM 排放发展趋势及其地区、部门分布特征.

2 2000 和 2005 年的颗粒物排放清单

2.1 活动水平

活动水平数据主要来自于《中国能源统计年鉴》^[18,19], 数据处理和说明见文献[20]. 工业过程源的活动水平为产品产量数据, 来自《中国统计年鉴》^[21,22]、《中国钢铁统计年鉴》^[23,24] 等统计资料, 少量数据参考了 GAINS-ASIA 模型^[25].

2.2 排放因子

本研究所采用的排放因子均通过文献调研获得, 并尽可能采用国内实测数据, 以反映我国颗粒物排放的真实情况.

对于工业、电力和民用部门的煤粉炉、层燃炉、流化床等大中型燃煤设备, 已有研究表明^[26,27] 物料衡算法是计算 TSP 产污系数的可靠方法, 见式(3).

$$EF_{TSP} = AC \times (1 - ar) \quad (3)$$

式中, AC 为煤中灰份, 是确定燃煤设备 TSP 产污系数的重要参数, 该参数参考了文献[28, 29]; ar 为灰分进入底灰的比例, 取值参考文献[28].

燃煤源排放颗粒物的粒径分布、各类控制技术的应用程度及分级去除效率主要采用了国内实测的结果, 详见文献[28].

工业、电力和民用部门其它燃料燃烧的颗粒物排放因子见表 1.

工业过程源颗粒物排放因子见表 2, 该排放因

表 1 工业、电力和民用部门的其他排放因子/kg·t⁻¹
Table 1 Other PM emission factors of industrial, power and residential sectors/kg·t⁻¹

部门	燃料	排放因子 ^[30]	烟气中颗粒物粒径比例 ^[26] /%		
			> PM ₁₀	PM _{2.5} ~ 10	PM _{2.5}
民用	气	2	0	0	100
	生物质	7 ^[31]	4 ^[26, 32, 33]	3 ^[26, 32, 33]	93 ^[26, 32, 33]
电力	油	12	29	19	52
	气	2	0	0	100
工业锅炉	油	12	14	30	56
	气	2	0	0	100

子既包括有组织排放, 也包含无组织排放.

表 2 工业过程源颗粒物排放因子/kg•t⁻¹

部门 类别		排放因子	烟气中颗粒物粒径比例 ^[26] /%		
			> PM ₁₀	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}
水泥	新型干法	1.50 ^[34]	58	24	18
	立窑	18.9 ^[34]	58	24	18
	回转窑	3.75 ^[34]	58	24	18
石灰	土窑	5.5 ^[27]	88	10	2
	其他	0.5 ^[35]	88	10	2
砖瓦		0.64 ^[36]	80	13	7
烧结	应用电除尘	0.5 ^[27]	85	8	7
	应用多管除尘	4 ^[27]	85	8	7
炼焦	土焦	5 ^[36]	45	20	35
	机焦	0.07 ^[36]	45	20	35
炼铁		4.5 ^[27]	84	6	10
炼钢	平炉	3 ^[36]	42	15	43
	转炉	0.3 ^[36]	33	2	65
	电炉	3 ^[36]	42	15	43

表 3 为移动源颗粒物的排放因子, 其中无控制排放因子来自文献[28], 目前我国关于机动车系列标准对于颗粒物去除比例的研究还较少, 本模型中此数据来自 Gains-Asia 模型^[25]. 机动车尾气排放的颗粒物以细粒子为主, 假设 PM_{2.5} 比例为 100%. 不同年份满足各阶段排放标准的机动车的比例可根据机动车排放标准颁发时间及车辆报废周期计算.

2.3 结果与讨论

我国 2000 和 2005 年的颗粒物排放清单如表 4 所示. 2000 年, 我国共向大气排放 TSP 25.37 Mt, 其中 PM₁₀ 12.19 Mt, 占 TSP 排放总量的 48%, PM_{2.5} 的排放量为 7.52 Mt, 占 TSP 排放总量的 30%. 到 2005 年, 我国共向大气排放 TSP 29.98 Mt, 其中 PM₁₀ 15.30 Mt, 占 TSP 排放总量的 51%, PM_{2.5} 的排放量为 9.79 Mt, 占 TSP 排放总量的 33%. 我国从 2000 ~

表 3 移动源颗粒物排放因子/kg•t⁻¹

交通类型 燃料		不同控制技术下的排放因子						
		无控制	欧 I	欧 II	欧 III	欧 IV	欧 V	欧 VI
重型货车	柴油	3.000	2.256	0.840	0.930	0.198	0.198	0.066
中型货车	柴油	3.000	2.256	0.840	0.930	0.198	0.198	0.066
	汽油	0.400	0.220	0.072	0.068	—	—	—
轻型货车	柴油	5.500	2.393	1.364	1.040	0.523	0.105	0.105
	汽油	0.250	0.138	0.138	0.045	0.045	0.043	0.040
微型货车	汽油	0.250	0.138	0.138	0.045	0.045	0.043	0.040
	柴油	3.000	2.256	0.840	0.930	0.198	0.198	0.066
重型客车	汽油	0.400	0.220	0.072	0.068	—	—	—
	柴油	3.000	2.256	0.840	0.930	0.198	0.198	0.066
中型客车	汽油	0.400	0.220	0.072	0.068	—	—	—
	柴油	5.500	2.393	1.364	1.040	0.523	0.105	0.105
轻型客车	汽油	0.250	0.138	0.138	0.045	0.045	0.043	0.040
	柴油	5.500	2.393	1.364	1.040	0.523	0.105	0.105
微型客车	汽油	0.250	0.138	0.138	0.045	0.045	0.043	0.040
	柴油	6.000	1.950	1.200	0.600	—	—	—
摩托车	汽油	6.000	1.950	1.200	0.600	—	—	—
拖拉机	柴油	13.300	7.528	3.398	3.398	0.798	0.798	0.293
农用运输车	柴油	6.100	3.453	1.559	1.559	0.366	0.366	0.134
火车	柴油	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
内河船舶	柴油和燃料油	1.100	0.734	0.550	0.165	0.033	0.066	0.024
工程机械	柴油	6.700	3.792	1.712	1.712	0.402	0.402	0.147
农用机械	柴油	4.400	2.490	1.124	1.124	0.264	0.264	0.097

2005 年的 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放量增长率分别是 3.4%、4.7% 和 5.4%, 细颗粒的排放增长较快, 应引起重视. 从部门分配看, 民用部门和工业过程是 2 个主要的颗粒物排放源, 2005 年时两者对于 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的贡献率分别是 76%、66% 和 65%. 其中民用部门的 PM_{2.5} 排放有 75% 来自生物质燃烧, 而

工业过程源的 PM_{2.5} 排放有 78.5% 来自水泥生产(图 1), 应加强对这两类污染源排放的控制.

从地区分布来看, 我国颗粒物排放最大的省份是河北、山东和江苏, 以上 3 省都是水泥生产大省, 水泥生产过程的颗粒物排放占排放总量的 25% (如图 2 所示).

表 4 中国 2000 年和 2005 年颗粒物排放/Mt						
Table 4 Emissions of PM emissions in China, 2000 and 2005/Mt						
部门	2000 年			2005 年		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
电厂	1.88	1.45	0.91	2.76	2.01	1.22
工业锅炉	3.29	1.84	1.14	4.12	2.79	1.83
交通	0.38	0.38	0.38	0.42	0.42	0.42
民用	6.92	3.79	3.03	7.06	4.59	3.86
工业过程	12.90	4.73	2.07	15.63	5.49	2.46
合计	25.37	12.19	7.52	29.98	15.30	9.79

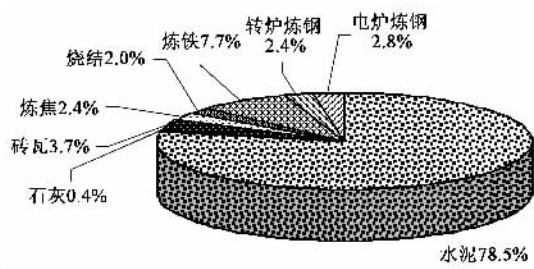


图 1 2005 年各工艺对工业过程源 PM_{2.5} 排放的贡献率

Fig.1 Contributions of different processes to the PM_{2.5} emissions of industrial process sector

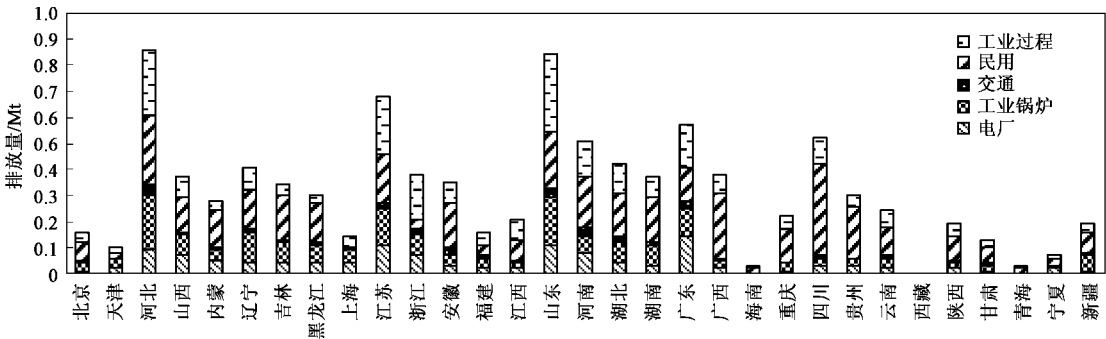


图 2 2005 年分省 PM_{2.5} 排放

Fig.2 PM_{2.5} emissions by province in 2005

3 2030 年的颗粒物排放情景分析

3.1 情景设定

未来的颗粒物排放既受能源消耗总量和能源结构的影响,也与工业部门的技术进步、颗粒物减排技术的推广应用有关.为考察不同的节能和减排政策对减少颗粒物排放的作用,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.

在 3 个控制方案[0]、[1]、[2]中,[0]方案假设未来没有颁发更严格的颗粒物排放标准,仅考虑目前已经颁发的政策标准和现有执法力度;[1]方案假设未来没有颁发更严格的颗粒物排放标准,但是由于执法力度加严,电力、工业、民用等部门的标准法规得到了严格执行;[2]方案假设未来会颁发更严格的颗粒物排放标准,高效除尘器(电除尘、布袋除尘)得到广泛使用.

3.1.1 能源情景

在文献[37]中曾对我国未来的能源发展进行了预测,但是由于该预测基于 2000 年前的能源消耗数据,未能反映出中国近几年来能源消费的迅猛增长.国际能源署(IEA)是专门从事能源供给与需求预测的研究机构,其每年出版的刊物《世界能源展望》在国际上具有较大影响力.本研究中能源情景设定参考了文献[38]中的中国部分,同时考虑中国几年来的经济增长和能源消费,对电厂和工业部门的消费量进行修正.

此外,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,重型车和轻型车燃用汽油、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.能源预测结果见表 5.

未来的工业产品产量数据参考了 GAINS-ASIA 模型^[25].

3.1.2 控制方案

根据各控制方案的基本假设,再结合目前的排放标准及颗粒物控制技术应用情况,就可以设计不同控制方案下各个部门颗粒物控制技术发展情况.如表 6 所示.

表 5 2015 和 2030 年分情景各部门能源消耗量/Mtce

Table 5 Energy consumption in 2015 and 2030 under different scenarios/Mtce

能源情景	年份	电厂			工业			民用			交通		
		煤	油	气	煤	油	气	煤	气	生物质	汽油	柴油	气
[REF]	2015	1 358	27	48	1 149	182	287	126	73	301	161	232	1
	2030	2 004	15	98	1 555	253	408	97	102	258	225	330	3
[PC]	2015	1 262	25	59	1 079	178	299	111	74	292	158	225	1
	2030	1 541	12	129	1 236	221	419	67	99	227	216	306	3

表 6 不同控制方案的基本假设

Table 6 Key assumptions of different control policies

项目	[0]方案(基准方案)		[1]方案(现有标准加严执法)	[2]方案(标准加严)
电厂	使用机械除尘的层燃炉和使用湿法除尘的煤粉炉尽管在 2010 年后难以满足加严的排放标准,但是未进行改造,而 2010 年后新建电厂均采用电除尘和布袋除尘		为满足排放标准,使用机械除尘的层燃炉和使用湿法除尘的煤粉炉在 2010 年完成改造	同[1]方案
工业锅炉	使用机械除尘和无控的工业锅炉尽管不能满足排放要求也不改造,新建工业锅炉均采用湿法除尘		采用机械除尘或无控的工业锅炉由于无法满足排放要求,改造成湿法除尘	2010 年后,由于标准加严,新建锅炉的主流除尘技术工艺为布袋除尘
民用	使用机械除尘和无控的锅炉不满足排放要求也不进行改造,新建民用锅炉均安装湿法除尘		使用机械除尘和无控的锅炉均改造为湿法除尘,新建民用锅炉均安装湿法除尘	2010 年后民用锅炉排放标准加严,布袋除尘成为新建民用锅炉的主流技术
交通部门	根据现有标准,轻型车分别于 2000 年、2004 年、2007 年和 2010 年执行国 1 到国 4 标准;重型柴油车于 2001 年、2004 年、2007 年、2010 年和 2012 年执行国 1 到国 5 标准;重型汽油车在 2003 年和 2004 年执行国 1 和国 2 标准;摩托车在 2003 年、2004 年和 2008 年执行国 1 到国 3 标准;三轮汽车和低速货车在 2006 和 2007 年执行国 1 和国 2 标准;工程机械和农用机械在 2008 和 2010 年执行国 1 和国 2 标准		同方案[1]	在现有标准基础上,到 2012 年轻型车实行欧 V 标准,轻型柴油车 2015 年实行欧 VI 标准;内陆船舶到 2012 年开始遵循欧 I 标准,2014 年执行欧 II;农用和工程机械在 2012 年执行欧 III 标准
工业过程	水泥	立窑和回转窑等落后工艺不能达标排放也不改造,新型干法工艺在 2010 年后通过增加除尘设备,进一步降低颗粒物的排放浓度	立窑和回转窑等落后工艺逐步改造,实现达标排放	同[1]方案
	石灰	石灰土窑不能达标排放也不改造	所有石灰土窑在 2015 年之前完成除尘装置升级	同[1]方案
	烧结	中小型烧结机尽管不能满足排放要求,也不进行改造	为达标排放,安装多管除尘的烧结机改用电除尘或布袋除尘	2015 年后针对烧结机的排放标准被进一步加严,除尘效率被进一步提高
	炼铁	炼铁工艺的排放标准未加严,排放因子保持不变	同[0]方案	2015 年后炼铁工艺排放标准加严,炼铁厂开始对出铁场二次烟尘进行控制,排放因子减小

3.2 情景分析结果

将能源情景与控制方案相结合,即可测算在不同能源消耗水平和控制政策下的颗粒物排放量.能源情景与控制方案的组合方式见表 7.

基准情景[REF]下 TSP 的排放趋势如图 3 所示,从 2010 年后,TSP 排放开始降低,2030 年排放水平为 23.06 Mt,比 2000 年降低 9%;2000 ~ 2020 年,

表 7 能源情景与控制方案的组合方式

Table 7 Combination of energy scenarios and control policies			
能源情景	控制方案	排放情景	简称
[REF]	[0]	基准情景	[REF]
	[0]	节能情景	[PC0]
[PC]	[1]	节能且执行加严	[PC1]
	[2]	节能且标准加严	[PC2]

工业过程是最大的 TSP 排放源,2020 年以后,工业锅炉成为最大的 TSP 排放源,2030 年的贡献率为 32%.因此,短期 TSP 控制应以工业过程源为重点、远期 TSP 控制应重视工业锅炉的排放.

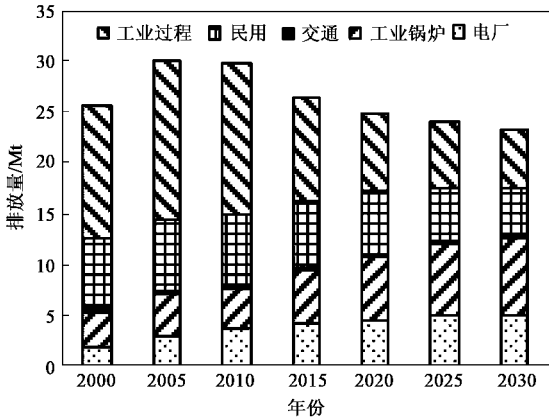


图 3 基准情景下中国 2000~2030 年 TSP 排放
Fig.3 TSP emissions in China in the reference scenario from 2000 to 2030

基准情景[REF]下 $PM_{2.5}$ 的排放趋势如图 4 所示,与 TSP 的排放趋势不同, $PM_{2.5}$ 排放一直呈缓慢上升趋势,2030 年排放水平比 2000 年高 41%,该增长主要由工业锅炉源拉动.工业锅炉部门和民用部门是最大的排放源,2030 年贡献率分别是 39%和 34%. $PM_{2.5}$ 的排放控制应该以工业锅炉部门和民用部门为重点.

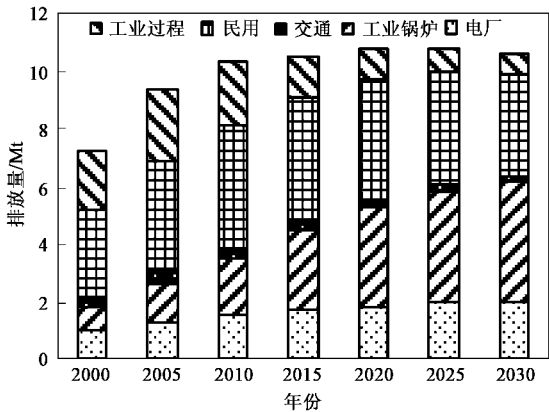


图 4 基准情景下中国 2000~2030 年 $PM_{2.5}$ 排放
Fig.4 $PM_{2.5}$ emissions in China in the reference scenario from 2000 to 2030

图 5 比较了不同情景下未来 TSP 排放的情况.[PC0]显示通过节能降耗措施获得的减排效果从 2020 年开始明显体现,与[REF]相比,2030 年可减排 15%的 TSP 排放;[PC1]显示通过在 2005 年后加大颗粒物控制执法力度,可使 TSP 排放在 2010 年后迅

速下降,在 2015 年,排放量与[PC0]相比降低了 25%,可见目前我国颗粒物排放控制还存在巨大潜力,2005~2015 年间的工作重点应该是增大执法力度,确保各工业过程部门达标排放;[PC2]显示通过在 2015 年加严排放标准,在工业锅炉和民用部门推广高效除尘装置,2030 年可在[PC1]的基础上再减排 21%的 TSP 排放.

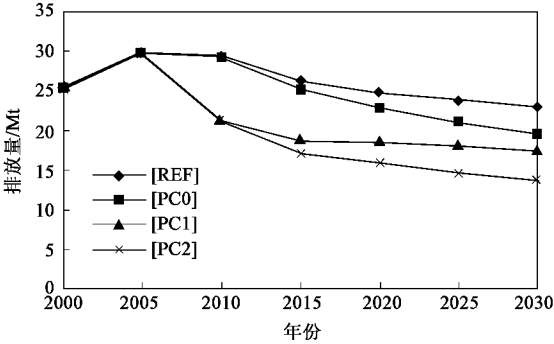


图 5 不同情景下 TSP 排放趋势
Fig.5 Emission trends of TSP in different scenarios

图 6 为不同情景下 $PM_{2.5}$ 的排放趋势.[PC0]显示通过节能降耗可取得非常好的减排效果,与[REF]相比,2030 年可减少 16%的 $PM_{2.5}$ 排放,因为该措施可有效降低工业锅炉的煤耗,而工业锅炉是重要的颗粒物排放源;[PC1]显示通过增大执法力度,确保各工业部门尤其是工业过程源达标排放,可在[PC0]基础上减排 2015 年 10%的 $PM_{2.5}$ 排放,低于对 TSP 的减排效果,这是因为工业过程源排放的粉尘中 $PM_{2.5}$ 的比例较小,故该措施对 $PM_{2.5}$ 的减排效果有限;[PC2]显示通过在 2015 年后加严排放标准,推广高效除尘装置的应用,在 2030 年可在[PC1]基础上减排 $PM_{2.5}$ 排放量的 19%.

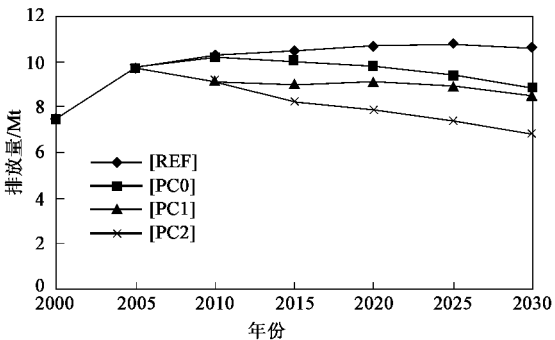


图 6 不同情景下 $PM_{2.5}$ 排放趋势
Fig.6 Emission trends of $PM_{2.5}$ in different scenarios

4 结论

(1)在 2005 年,我国 TSP、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放量

分别是 29.98、15.30 和 9.79 Mt,民用和工业过程是主要的颗粒物排放源.与 2000 年相比,TSP、PM₁₀和 PM_{2.5}排放的年增长速率分别是 3.4%、4.7% 和 5.4%,细颗粒的排放增加较快,必须引起重视.

(2)在现有政策下,未来 TSP 排放量呈现缓慢下降趋势,2030 年的排放量为 23.06 Mt,比 2000 年水平降低了 9%;但是 PM_{2.5}排放呈上升趋势,2030 年排放量比 2000 年水平增加了 41%,因此对颗粒物尤其是细颗粒物的排放控制依然不可松懈.

(3)由于来源广泛,颗粒物排放控制措施应覆盖电厂、工业、民用等各个领域,首先需强化国家的节能减排政策,深化工业结构调整,提高工业和电力部门能效,优化能源结构;其次要保证执法力度,确保各排放标准充分执行;此外可通过加严排放标准,推广高效除尘装置的应用.

参考文献:

[1] 国家环境保护总局.2005 年中国环境状况公报[R].北京:国家环境保护总局,2006.

[2] Samet J M, Dominici F, Currier F C, *et al.* Fine Particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994[J]. *New Eng J Med*, 2000, **343**(24): 1742-1749.

[3] Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C, *et al.* Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from the APHEA project[J]. *Br Med J*, 1997, **314**(7095): 1658-1663.

[4] 张燕萍,张志琴,张晓萍,等.太原市空气污染对心脑血管疾病死亡率急性影响的 Poisson 广义可加模型分析[J]. *环境与健康杂志*,2008, **25**(1): 11-15.

[5] 林刚,都英杰,田村宪治,等.抚顺城区大气悬浮颗粒物污染与呼吸系统疾病死亡率相关性的定量分析[J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(3): 280-283.

[6] 常桂秋,潘小川,谢学琴,等.北京市大气污染与城区居民死亡率关系的时间序列分析[J]. *卫生研究*,2003, **11**(6): 566-569.

[7] Horvath H. Proceedings of the Conference on Visibility and Fine Particles[J]. *Atmos Env*, 1994, **28**(5): 755-1082.

[8] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, **101**(2): 423-428.

[9] Menon S, Hansen J, Nazarenko J, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, (297): 2250-2253.

[10] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al.* An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020 [J]. *Atmos Chem Phys*, 2007, (7): 4419-4444.

[11] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China[J]. *Atmos Env*, 2001, **35**(25): 4281-4296.

[12] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. *J Geophys Res*, 2003, **108** (D21), 8809, doi: 10.1029/2002JD003093.

[13] 张强, Klimont Z, Streets D G, *et al.* 中国人为源颗粒物排放模型及 2001 年排放清单估算[J]. *自然科学进展*, 2006, **16**(2): 223-231.

[14] Wang X P, Mauzerall D L, Hu Y T, *et al.* A high-resolution emission inventory for eastern China in 2000 and three scenarios for

2020[J]. *Atmos Env*, 2005, **39**(32): 5917-5933.

[15] 雷宇,贺克斌,张强,等.基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2366-2371.

[16] 赵斌,马建中.天津市大气污染源排放清单的建立[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 368-375.

[17] Klimont Z, Cofala J, Bertok I, *et al.* Modeling Particulate Emissions in Europe: A framework to estimate reduction potential and control costs[R]. Austria: Institute for Applied Systems Analysis, 2002.

[18] 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. 中国能源统计年鉴(2000~2002) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.

[19] 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. 中国能源统计年鉴(2005) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.

[20] 张楚莹,王书肖,邢佳,等.中国能源相关的氮氧化物排放现状与趋势分析[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(12): 2470-2479.

[21] 国家统计局.中国统计年鉴(2000) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.

[22] 国家统计局.中国统计年鉴(2005) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.

[23] 中华人民共和国冶金部.中国钢铁工业年鉴(2000) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

[24] 中华人民共和国冶金部.中国钢铁工业年鉴(2005) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

[25] International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Gains, A scientific tool that brings air pollution and climate change policies together[EB/OL]. <http://www. iiasa. ac. at/web-apps/apd/gains/>, 2007-12-20.

[26] Klimont Z, Cofala J, Bertok I, *et al.* Modeling Particulate Emissions in Europe: A framework to estimate reduction potential and control costs[M]. Interim report, IR-02-076, Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2002.

[27] 国家环境保护局科技标准司. 工业污染物产生和排放系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.

[28] 张强. 中国区域细颗粒物排放及模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.

[29] 蒋靖坤. 中国大气汞排放和控制初步研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

[30] USEPA. Compilation of air pollutant emission factors[M]. Rep. AP-42, Research Triangle Park, N. C. 1996.

[31] Zhang J, Smith K R, Ma Y, *et al.* Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: A database for emission factors[J]. *Atmos Env*, 2000, (34): 4537-4549.

[32] Andreae M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2001, **15**: 955-966.

[33] Bond T C, Streets D G, Yaber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. *J Geophys Res*, 2004, **109**, D14203, doi: 10.1029/2003JD003697.

[34] 孔祥忠,何宏涛,袁文献. 探析新型干法水泥发展对环境效益改变的影响[J]. *水泥工程*, 2005, (12): 30-32.

[35] 马文选,李学武,师树英. 石灰炉炉气收尘系统的改进[J]. *世界有色金属*, 2003, (7): 18-19.

[36] 扬州环境保护局. 部分行业污染物排放物料衡算系数[EB/OL]. <http://www. yzwyhb. gov. cn/zhxzshow. asp? ID = 642>, 2007-01-19.

[37] 周大地. 2020 中国可持续能源情景[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.

[38] International Energy Agency. World Energy Outlook 2007 [M]. Paris: IEA Publications, 2007.