

基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单

雷宇¹, 贺克斌^{1*}, 张强², 刘作毅³

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 美国阿贡国家实验室, 阿贡 60439; 3. 中国水泥协会信息工作部, 北京 100831)

摘要: 针对我国水泥工业的生产技术及生产过程中的大气颗粒物排放控制技术分类, 建立了一个基于技术、自下而上的大气颗粒物排放模型. 通过分析我国水泥工业不同生产工艺所占比重的历史变化趋势, 以及不同时期水泥工业大气颗粒物控制标准的影响, 利用此模型计算了 1990~2004 年全国水泥工业大气颗粒物的排放系数和排放量. 我国水泥工业的大气颗粒物的排放系数由 1990 年的 $27.9 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 水泥下降至 2004 年的 $8.05 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 水泥; 大气颗粒物排放量自 1990 年起逐年增加, 于 1997 年达到最高值 $1\ 044 \times 10^4 \text{ t}$, 其中 PM_{10} 排放量为 $716 \times 10^4 \text{ t}$, $\text{PM}_{2.5}$ 排放量为 $436 \times 10^4 \text{ t}$; 此后逐年降低, 到 2001 年后又有缓慢增加. 我国水泥工业大气颗粒物排放量的地理分布很不均衡, 山东、广东、河北、江苏、浙江和河南的排放量超过了全国总排放量的 50%. 新型干法水泥生产线替代立窑生产线的进程以及 2004 年《水泥工业大气污染物排放标准》的颁布将很可能大幅降低我国水泥工业的大气颗粒物排放量, 从而在很大程度上影响我国的大气颗粒物污染特征.

关键词: 大气颗粒物; 水泥工业; 排放系数; 排放清单; 基于技术

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2366-06

Technology-Based Emission Inventory of Particulate Matters (PM) from Cement Industry

LEI Yu¹, HE Ke-bin¹, ZHANG Qiang², LIU Zuo-yi³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA; 3. Department of Information, China Cement Association, Beijing 100831, China)

Abstract: A bottom-up PM emission model was developed based on the production technologies and PM emission control devices in Chinese cement industry. Through analyzing the historical distribution of technologies in cement producing and the impact of standards on PM emission control from cement industry, emission factors of cement industry in China during 1990-2004 were generated by this technology-based model, and emission inventories were developed thereby. Emission factor decreased from $27.9 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ cement in 1990 to $8.05 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ cement in 2004. Emissions of PM from cement industry in China reached the peak value in 1997, with $1\ 044 \times 10^4 \text{ t}$ of TSP, $716 \times 10^4 \text{ t}$ of PM_{10} , $436 \times 10^4 \text{ t}$ of $\text{PM}_{2.5}$ emitted, then decreased until 2001, and increased slowly again during 2001-2004. The distribution of PM emissions among provinces is uneven. Shandong, Guangdong, Hebei, Jiangsu, Zhejiang, and Henan contribute more than 50% of emissions of China. Rapid spread of pre-calcining kilns in China and implementation of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry in 2004 will probably decrease PM emissions from cement industry to a large extent, leading to obvious variation on PM pollution characteristics in China.

Key words: particulate matters; cement industry; emission factor; emission inventory; technology-based

大气颗粒物是影响我国城市空气质量的主要污染物, 2006 年空气质量未达到国家二级标准的城市中, 可吸入颗粒物 (PM_{10}) 未达标的占 89%^[1]. 细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 会危害人体的呼吸系统, 降低能见度, 并有可能通过长距离传输影响区域空气质量. 大气颗粒物中的盐基阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+) 作为碱性物质, 是影响酸沉降量的重要因素^[2].

综合使用模型工具和地面、卫星观测, 研究我国大气颗粒物, 尤其是细颗粒物对区域大气环境的影响, 并用于空气质量管理决策, 已经成为大气环境研究的热点之一. 了解大气颗粒物的源排放量、排放特征、排放地理分布, 以及部门、技术分布对排放的影响, 对此类研究具有重要意义. 然而, 目前中国大气

颗粒物排放清单的研究刚刚起步. 张强等^[3]以 2001 年为基准年计算了我国人为源各种粒径范围大气颗粒物 (TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$) 的排放量, 指出水泥工业是我国最主要的人为 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源.

目前的排放清单在计算中对所有的水泥工艺都采用了统一的排放系数^[3]. 而我国的水泥工业存在着多种生产工艺并存的现象, 发达国家早已淘汰的立窑在 1985~2004 年的 20 a 间一直占据了我国水泥产量的 60% 以上, 在 20 世纪 90 年代中期一度高

收稿日期: 2007-07-16; 修订日期: 2007-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB422201)

作者简介: 雷宇 (1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: leiyu98@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hekb@tsinghua.edu.cn

达 81%^[4];近年来先进的新型干法水泥生产线迅猛发展,其产量在 2000~2004 年间翻了两番.由于不同的水泥生产工艺在颗粒物产生、除尘设施的应用上都有巨大差异,统一的排放系数不能反映水泥生产工艺的空间分布和随时间的变化对水泥工业大气颗粒物排放的影响,也不能对水泥工业大气颗粒物排放控制政策的提出提供足够的科学支持.鉴于此,本研究在对水泥工业的工艺分布及除尘设施的应用调研基础上,建立了一个基于技术、自下而上的动态水泥工业大气颗粒物排放计算模型,利用该模型计算了 1990~2004 年我国水泥工业各种粒径范围大气颗粒物(TSP、PM₁₀和 PM_{2.5})的排放量,并探讨了水泥生产工艺及颗粒物控制技术对我国水泥工业大气颗粒物排放特征的影响.

1 方法与数据

1.1 计算方法

参照国际应用系统分析研究所的大气颗粒物排放计算方法^[5],建立了一个列表模型,采用自下而上的方法计算中国水泥工业大气颗粒物排放量.模型将颗粒物分为 >PM₁₀、PM_{2.5-10}和 PM_{2.5} 粒径范围,分别计算排放量.计算公式如下:

$$E_{i,y} = \sum_m A_{i,m} \cdot ef_{m,y} \quad (1)$$

$$ef_{m,y} = EF_m \cdot F_{m,y} \cdot \sum_n C_{m,n} \cdot (1 - \eta_{n,y}) \quad (2)$$

式中, i 为省(直辖市,自治区); y 为粒径范围; m 为水泥生产技术类型; n 为颗粒物排放控制技术类型; $E_{i,y}$ 为 i 地区粒径范围 y 的颗粒物排放量; $A_{i,m}$ 为 i 省 m 技术对应的水泥产量; $ef_{m,y}$ 为 m 生产技术下粒径范围为 y 的颗粒物的排放系数. EF_m 为 m 技术的 TSP 产污系数; $F_{m,y}$ 为 m 技术所产生的总颗粒物中粒径范围 y 的颗粒物所占比例; $C_{m,n}$ 为颗粒物控制技术 n 在生产技术 m 中的应用比例; $\eta_{n,y}$ 为控制技术 n 对于粒径范围 y 的颗粒物的去除效率.

模型的研究区域包括中国大陆的 31 个省、自治区和直辖市.根据我国水泥生产工艺的分布现状,模型研究的水泥生产技术包括新型干法窑、预热器窑、干法中空带余热发电窑、立波尔窑、湿法窑和立窑等 6 种窑型,以及其它生产工艺设备,如熟料冷却机、煤磨、生料磨、水泥磨、破碎机等.颗粒物排放控制技术考虑了布袋除尘器、静电除尘器、湿式除尘器、旋风除尘器等.

1.2 模型参数的确定

根据式(1)和式(2),模型计算各粒径范围颗粒物排放时需要确定的参数包括:各种生产技术对应的分省水泥产量,各种生产技术的 TSP 产污系数及其中不同粒径颗粒物的质量百分比,不同水泥生产技术所对应的颗粒物排放控制技术分布,以及这些控制技术对颗粒物的分级去除效率.以下逐一讨论这些模型参数的确定过程.

1.2.1 水泥产量

模型需要输入分省的分窑型水泥产量.其中,1979 年以来分省的新型干法水泥产量和水泥总产量通过中国水泥协会的历年分省产能统计和中国统计年鉴得到;根据水泥协会统计资料及相关文献^[4,6,7]中统计的中国立窑和除新型干法外的旋窑产量,以及这些旋窑的产能比重,利用分段插值的方法得到历年中国立窑和其他旋窑的水泥产量.1979~2004 年我国各种窑型的水泥产量如图 1 所示.

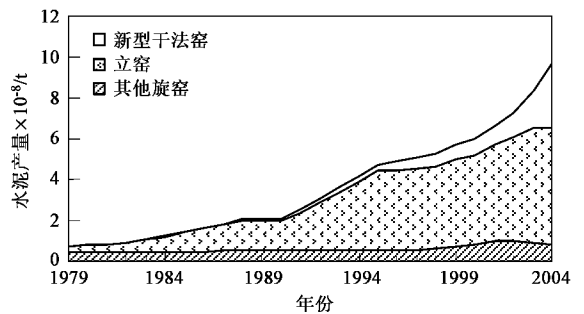


图 1 1979~2004 年我国分生产技术的水泥产量

Fig.1 Productions of cement by production technologies during 1979~2004

1.2.2 水泥生产过程的颗粒物产生系数

水泥生产的全过程,每一步都产生颗粒物污染,其中水泥窑是最主要的大气颗粒物排放源.通过文献调研^[8-10],获取了不同水泥窑及其他水泥生产工序的大气颗粒物产生系数,以及不同窑型和工序所产生的大气颗粒物中不同粒径颗粒物所占的质量分数,如表 1 所示.

1.2.3 除尘措施对颗粒物的去除效率

自 20 世纪 80 年代以来,机械除尘器(沉降室、旋风除尘器)、湿式除尘器、静电除尘器及布袋除尘器先后广泛用于我国水泥工业的颗粒物排放控制上.本研究使用文献^[3,11]中的各种除尘器对不同粒径大气颗粒物的去除效率作为模型的输入参数,如表 2 所示.

1.2.4 除尘措施的技术分布

我国 2004 年以前共颁布了 2 版针对水泥工业

表 1 文献调研所获取的水泥生产大气颗粒物产生系数及粒径分布¹⁾

Table 1 Unabated emission factors of PM and its size distribution in cement productions

| 窑型/工序 | 模型采用的 产生系数 | 不同粒径颗粒物的质量分数/% | | | 文献 | 文献中的 产生系数 |
|--------|---------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------|
| | | PM _{2.5} | PM _{2.5-10} | PM _{>10} | | |
| 新型干法窑 | 105 | 18 | 24 | 58 | [8] ²⁾ | 317.87 |
| | | | | | [9] ^{3,4)} | 58.18 ~ 155.14 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 布袋除尘 | 0.083 |
| 预热器窑 | 120 | 18 | 24 | 58 | [8] ²⁾ | 330.03 |
| | | | | | [9] ^{3,4)} | 64.68 ~ 172.47 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ | 108.33 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 电除尘 | 0.108 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 布袋除尘 | 0.108 |
| 中空干法窑 | 100 | 18 | 24 | 58 | [8] ²⁾ | 204.41 |
| | | | | | [9] ^{3,4)} | 24.35 ~ 194.8 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 电除尘 | 0.417 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 布袋除尘 | 0.083 |
| 立波尔窑 | 80 | 7 | 17 | 76 | [8] ²⁾ | 167.63 |
| 湿法窑 | 80 | 7 | 17 | 76 | [9] ^{3,4)} | 41.33 ~ 123.98 |
| | | | | | [8] ²⁾ | 242.12 |
| 立窑 | 30 | 11 | 20 | 69 | [9] ^{3,4)} | 34.37 ~ 171.83 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ | 54.17 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 电除尘 | 0.32 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 布袋除尘 | 0.19 |
| 熟料冷却机 | 15 | 0.54 | 8.06 | 91.4 | [8] ²⁾ | 91.22 |
| | | | | | [9] ^{3,4)} | 14.36 ~ 43.08 |
| | | | | | [9] ^{3,4,5)} | 4.17 ~ 20 |
| 生料磨/煤磨 | 56 | 13 | 26 | 61 | [10] ⁴⁾ , 电除尘 | 0.04 |
| | | | | | [10] ⁴⁾ , 布袋除尘 | 0.057 |
| | | | | | [9] ^{3,5,6)} | 33 ~ 81 |
| 水泥磨 | 50 | 4 | 12 | 84 | [10], 布袋除尘 | 0.033 8 |
| | | | | | [9] ^{3,5)} | 16 ~ 96 |
| 破碎机 | 20 | 1 | 10 | 89 | [10], 布袋除尘 | 0.0251 |
| | | | | | [9] ^{3,5)} | 9.58 ~ 38.30 |
| | | | | | [10], 布袋除尘 | 0.000 6 |

1) 产生系数单位为 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$, 无说明时均为无控制措施时的大气颗粒物产生系数; 2) 整条生产线的大气颗粒物产生系数, 除指定的窑炉以外还包括其他工序; 3) 利用设备排出气体的平均含尘浓度($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)及单位产品的废气排放量($\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$)计算; 4) 由文献中的 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (以熟料计)排放系数折算; 5) 按最大可能废气排放量的 80% 进行计算; 6) 为通过旋风分离器回收后的排放系数

表 2 不同除尘器的分级去除效率/%

Table 2 Size-fraction specific removal efficiencies for abatement options/%

| 除尘器种类 | 去除效率 | | |
|-------|-------------------|----------------------|----------------------|
| | PM _{2.5} | PM _{2.5-10} | PM _{>10} |
| 旋风除尘器 | 10 | 70 | 90 |
| 湿式除尘器 | 50 | 90 | 99 |
| 静电除尘器 | 93 | 98 | 99.5 |
| 布袋除尘器 | 99 | 99.5 | 99.9 |

的大气污染物排放标准^[12, 13]. 根据标准开始实施的时间, 本研究将 2005 年以前我国水泥工业的颗粒物控制分为 3 个阶段: ①1985 年以前由于没有水泥工业的大气污染物排放标准, 专用的除尘装置较少, 但是有较多的旋风除尘器作为回收装置用于水泥工业; ②1986 ~ 1996 年间多数旋窑水泥由于规模较大,

污染控制较好, 基本能达到 GB 4915-85^[12] 的排放要求, 电除尘器被广泛用于旋窑水泥厂, 而立窑水泥厂开始大规模使用湿式除尘器, 排放超标较严重; ③1996 年以后 GB 4915-1996^[13] 的要求使布袋除尘器开始在旋窑, 尤其是新型干法水泥厂大规模推广, 而立窑水泥的电除尘技术也开始成熟并大规模使用.

模型中假设每个水泥厂在运行 15 a 后进行改建, 按照当时的技术分布更新除尘措施. 另外, 从 1999 年开始的淘汰“小水泥”工作, 至 2003 年底淘汰落后产能 1 亿 $\text{t}^{[14]}$, 这部分产能由当年新建水泥厂代替.

根据不同阶段新建水泥厂的颗粒物控制措施分布以及新建水泥厂技术分布, 得到 1990 ~ 2004 年我国水泥工业的颗粒物控制措施分布, 如图 2 所示.

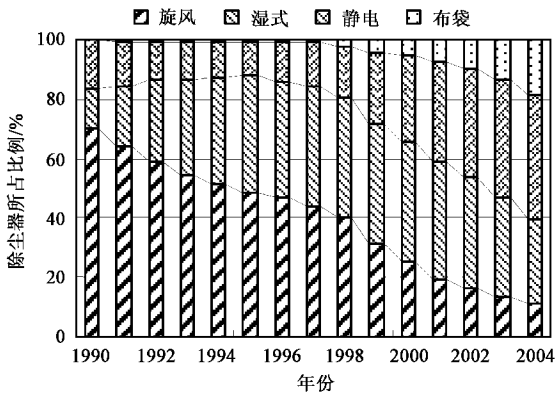


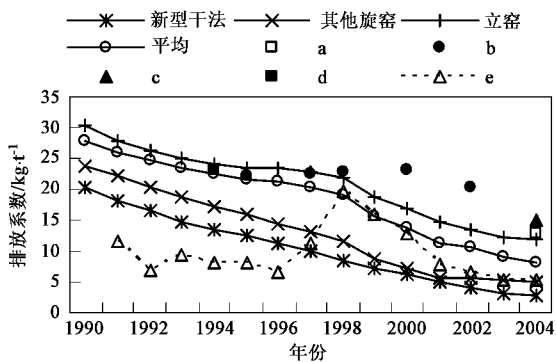
图2 1990~2004年我国水泥工业大气颗粒物排放控制技术分布

Fig.2 Distribution of PM emission abatement technologies in cement industry during 1990~2004

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物排放系数

根据不同阶段水泥工业除尘措施的运用情况,本研究通过模型估算了不同水泥生产工艺的大气颗粒物排放系数,并与其他文献^[8,15~17]中获取的排放系数进行了比较,如图3所示.由于新型干法和旋窑水泥厂的规模往往较大,高效颗粒物控制措施的应用率较高,排放系数明显低于立窑水泥厂.1997年以后,小立窑的大规模淘汰使立窑水泥厂的排放系数迅速下降,同时新型干法水泥得以高速发展,致使水泥工业平均颗粒物排放系数明显下降.



来源:a. 文献[15]; b. 文献[16]; c. 文献[17]; d. 文献[8]; e. 根据环境统计(水泥行业粉尘排放量)计算

图3 1990~2004年我国水泥工业大气颗粒物排放系数

Fig.3 PM emission factors of cement industry in China during 1990~2004

模型计算结果显示,1990~2004年间我国水泥工业的大气颗粒物排放系数由 $27.9 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (以水泥计,下同)下降至 $8.05 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$,年均降幅为8.5%。国

家环境保护局科技标准司在20世纪90年代前半段通过对200余个水泥厂的实测,得到当时的水泥排放系数为 $23.2 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ^[8],本研究的模型计算结果与之非常接近.利用我国水泥年产量数据和环境统计数据中的水泥行业粉尘排放量数据计算得到的排放系数低于模型计算值,这可能是由于环境统计中缺失了很多规模小、排放恶劣的水泥生产企业.根据2003年以来为修订《水泥厂大气污染物排放标准》所进行的现场实测^[14]和水泥工业协会的调研,近年来大多数新型干法水泥厂的大气颗粒物都能够达到或接近排放标准,某些立窑水泥厂通过使用布袋或静电除尘器也能达到排放标准,由此估算得到的水泥工业大气颗粒物排放系数低于文献^[15~17]的值,而与本研究的模型结果接近.文献^[15~17]中的排放系数下降趋势与模型结果相似,但是比模型结果滞后4~5a,可能是由于这些文献中使用的排放系数时效性不足所造成的.

2.2 大气颗粒物的排放量

根据本研究建立的模型,计算出的1990~2004年全国水泥工业大气颗粒物排放量如图4所示.1990年以来,我国水泥工业大气颗粒物排放量快速增加,并于1997年达到最高值 $1044 \times 10^4 \text{ t}$,其中 PM_{10} 排放量为 $716 \times 10^4 \text{ t}$, $\text{PM}_{2.5}$ 排放量为 $436 \times 10^4 \text{ t}$;此后逐年降低,到2001年减少至 $747 \times 10^4 \text{ t}$,其中 PM_{10} 排放量为 $544 \times 10^4 \text{ t}$, $\text{PM}_{2.5}$ 排放量为 $343 \times 10^4 \text{ t}$;2001年后排放量又有所增加,2004年排放量为 $781 \times 10^4 \text{ t}$,其中 PM_{10} 排放量为 $579 \times 10^4 \text{ t}$, $\text{PM}_{2.5}$ 排放量为 $367 \times 10^4 \text{ t}$.

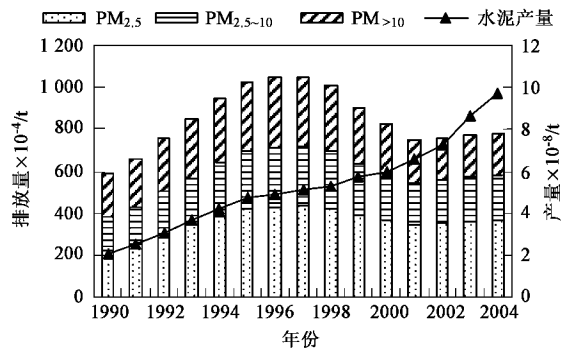


图4 1990~2004年我国水泥工业大气颗粒物排放量

Fig.4 PM emissions from cement industry in China during 1990~2004

水泥排放量增加的2个阶段对应着我国水泥工业的跨越式发展的2个阶段,如表3所示.20世纪90年代前半段,旺盛的水泥需求导致水泥产量飞速

增加,工艺简单、建设周期短、排放控制措施差的立窑在这段时间大量投入使用,由此造成了水泥工业大气颗粒物排放的快速增长.20世纪90年代后半段,水泥产量增长明显变慢,与此同时,GB 4915-1996的颁布和实施对水泥工业颗粒物排放控制提出了更高要求,颗粒物排放总量有所下降.2001年以后,虽然水泥产量再次高速增长,但是排放控制较好的新型干法生产线是这段时间水泥发展的主流,因此颗粒物排放量以较低的速度增长.

表3 不同阶段的水泥工业产量增长率与颗粒物排放增长率/%

Table 3 Growth rate of productions and PM emissions of cement industry/%

| 年份 | 产量年均增长率 | 排放年均增长率 |
|-----------|---------|---------|
| 1990~1995 | 17.8 | 11.9 |
| 1995~2001 | 5.6 | -5.2 |
| 2001~2004 | 13.7 | 1.5 |

我国已于2004年颁布了新的水泥工业大气污染物排放标准,要求所有现有水泥厂的大气颗粒物排放不超过 100 mg/m^3 ,新水泥厂的排放不超过 50 mg/m^3 ,相当于水泥生产的大气颗粒物排放系数控制在 2 kg/t 水泥以下^[14].若我国的水泥厂的大气颗粒物排放都达到此标准,按我国年产 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 水泥计,则全国水泥工业的大气颗粒物排放量将低于 $200 \times 10^4 \text{ t}$,减排量约为2004年水泥工业排放量的75%.2001年全国人为源大气颗粒物排放量为 $2651 \times 10^4 \text{ t}$ ^[3],因而水泥工业的达标排放将使全国的人为源大气颗粒物减排22.6%,大幅改善我国的空气质量.与此同时,碱性颗粒物排放量的大幅降低将可能改变颗粒物的酸碱平衡,减弱颗粒物对酸雨的中和能力,进而可能影响到我国的酸雨污染程度及空间分布特征.

2.3 排放的地理分布

利用本研究的模型计算得到我国各省水泥工业的大气颗粒物排放量.分省的排放量结果显示山东、广东、河北、江苏、浙江和河南是我国水泥行业大气颗粒物排放量最大的6个省,这6个省排放量占全国总排放量的百分比从1990年的44.9%上升至2004年的54.5%,反映了随着经济的发展,我国的水泥行业大气颗粒物排放更加集中.

自2001年以来,新型干法窑在我国得到了很大的发展,新型干法窑的地理分布对我国水泥工业大气颗粒物排放的地理分布及变化趋势造成了很大的影响.图5显示了2001年和2004年大气颗粒物排放

量的省际分布.图6比较了2001~2004年间我国水泥工业的产量及大气颗粒物排放量的变化情况.可见,山东、广东、河北、江苏、浙江和河南的水泥工业大气颗粒物排放量都在 $50 \times 10^4 \text{ t}$ 以上,而且山东和河北是2001~2004年间颗粒物排放增量最大的2个省份.2001~2004年间,各省的水泥产量都有18%以上的增长,但是13个省的水泥工业大气颗粒物排放量有所下降.降幅最大的是安徽和北京,水泥生产工艺结构的转变是排放大幅下降的主要原因.大气颗粒物排放量增加的有18个省,增长幅度最大的是上海和青海,水泥产量的大量增加是其颗粒物排放增加的主要原因.

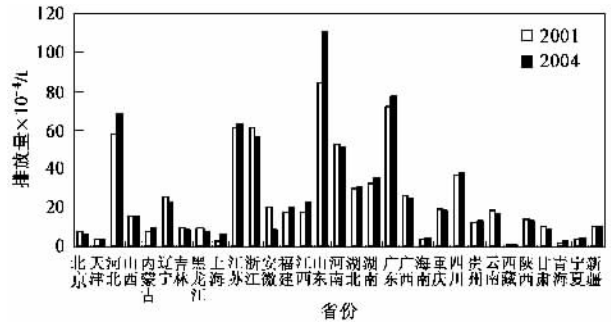


图5 2001年和2004年分省水泥工业大气颗粒物排放量

Fig.5 PM emissions from cement industry by provinces in 2001 and 2004

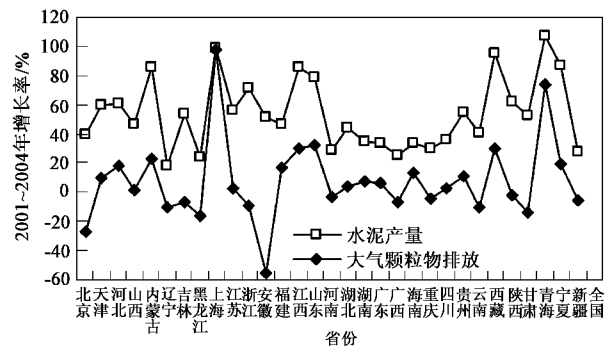


图6 2001~2004年分省水泥产量及大气颗粒物排放量增长率

Fig.6 Growth rate of productions and PM emissions of cement industry during 2001~2004 by provinces

3 结论

(1)我国水泥工业大气颗粒物控制水平的提高使水泥工业的大气颗粒物排放系数由1990年的 $27.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 水泥下降至2004年的 $8.05 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 水泥.立窑水泥厂的大气颗粒物排放系数一直大大高于新型干法水泥厂.

(2)我国水泥工业大气颗粒物排放量于1997年

达到最高值 $1\ 044 \times 10^4$ t, 其中 PM_{10} 排放量为 716×10^4 t, $PM_{2.5}$ 排放量为 436×10^4 t; 此后逐年降低, 到 2001 年后又有所增加. 2004 年排放量为 781×10^4 t, 其中 PM_{10} 排放量为 579×10^4 t, $PM_{2.5}$ 排放量为 367×10^4 t. 2004 年水泥工业大气污染物排放标准的颁布可能会大幅降低我国水泥工业的排放量, 这将在很大程度上影响我国的大气颗粒物污染特征.

(3) 我国水泥工业大气颗粒物排放量的地理分布很不均衡, 山东、广东、河北、江苏、浙江和河南的排放超过了全国总排放的 50%. 2001 ~ 2004 年间, 大量立窑水泥生产线由新型干法生产线代替使北京、安徽的大气颗粒物排放量明显降低, 而水泥产量的大幅增长使山东、河北等省的水泥工业大气颗粒物排放量有所升高.

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 2006 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.sepa.gov.cn/zxbd/sjhjr/2007hjr/tpbd56/200706/P020070611461716557487.pdf>.
- [2] 安俊岭, 黄美元. 盐基离子沉降量变化的不确定性对酸沉降临界负荷的影响 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(增刊): 8-11.
- [3] 张强, Klimont Z, Streets D, 等. 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.
- [4] 雷前治. 中国预分解窑的发展空间 [J]. 河南建材, 2002, (4): 3-6.
- [5] Klimont Z, Cofala J, Bertok I, *et al.* Modeling Particulate Emissions in Europe: A framework to estimate reduction potential and control costs [R]. Laxenburg, Austria: Institute for Applied Systems Analysis, 2002. 7-8.
- [6] 曾学敏. 中国水泥百年回顾(II) [J]. 中国水泥, 2004, (11): 35-39.
- [7] 孔祥忠. 中国水泥行业规模和技术装备现状 [J]. 中国建材, 2005, (5): 34-38.
- [8] 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. 172-182.
- [9] 焦永道. 水泥工业大气污染治理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 9-20.
- [10] EPA (Environmental Protection Agency). Compilation of air pollution emission factors, Chapter 11. 6, Vol. 1, 5th edition [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch11/final/c11s06.pdf>.
- [11] 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. 45-47.
- [12] GB 4915-85, 水泥工业污染物排放标准 [S].
- [13] GB 4915-1996, 水泥厂大气污染物排放标准 [S].
- [14] 《水泥厂大气污染物排放标准》修订组. 《水泥工业大气污染物排放标准》标准编制说明 [R]. 北京: 国家环境保护总局科技标准司, 2003. 1-9.
- [15] 何宏涛, 毛志伟, 曹伟. 水泥工业应用大型高效电、袋除尘器分析 [J]. 中国环保产业, 2005, (10): 15-18.
- [16] 陈绍龙. 水泥环保标准与国际接轨的技术经济分析 [J]. 新世纪水泥导报, 2004, (增刊): 35-40.
- [17] 张人为. 循环经济与建材产业发展 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005. 175-190.