Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第11期 2020年11月
Vol.41,No.11 Nov.,2020

中国水泥排放清单及分布特征

汤铃[1,2]，薛晓达[1,3]，伯鑫[3*]，郭静[1,3]，王鹏[3,4]，翟文慧[4]，崔维庚[5]，汪寿阳[6,7]，李时蓓[3]，董广霞[8]
(1. 北京航空航天大学经济管理学院，北京 100191；2. 北京化工大学经济管理学院，北京 100029；3. 生态环境部环境工程评估中心，北京 100012；4. 北京化工大学数理学院，北京 100029；5. 长安大学地球科学与资源学院，西安 710054；6. 中国科学院大学经济与管理学院，北京 100190；7. 中国科学院数学与系统科学研究院，北京 100190；8. 中国环境监测总站，北京 100012)

摘要： 本研究基于2018年在线监测数据等，分析中国水泥行业主要工序(窑头和窑尾)排口烟气浓度情况，自下而上建立了2018年中国高时空分辨率水泥行业大气污染物排放清单(high resolution cement emission inventory for China，HCEC)．结果表明，2018年中国水泥行业的PM、SO_2和NO_x排放量分别为72 893、92 568和878 394 t．从时间维度：2018年中国水泥行业主要工序烟气排口月均浓度逐步降低，蓝天保卫战成效显著．从区域维度：2018年京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原，水泥窑年均排放浓度整体低于全国平均水平，但各城市排放浓度存在差异．2018年安徽省水泥行业排放量最大，北京市和天津市水泥行业的单位面积污染排放强度最大．

关键词： 排放清单；水泥；大气污染；排放因子；蓝天保卫战
中图分类号： X51 **文献标识码：** A **文章编号：** 0250-3301(2020)11-4776-10 **DOI：** 10.13227/j.hjkx.202003171

Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China

TANG Ling[1,2], XUE Xiao-da[1,3], BO Xin[3*], GUO Jing[1,3], WANG Peng[3,4], ZHAI Wen-hui[4], CUI Wei-geng[5], WANG Shou-yang[6,7], LI Shi-bei[3], DONG Guang-xia[8]
(1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 4. College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 6. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 7. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 8. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: This study analyzed the concentrations of exhaust gas in the process (kiln head and kiln tail) of China's cement industry, based on data from continuous emission monitoring systems network in 2018. The cement emission inventory for China with high resolution (high resolution cement emission inventory for China, HCEC), using the bottom-up approach, was established. The results indicated that during 2018, the total emissions of PM, SO_2, and NO_x were 72 893, 92 568, and 878 394 t, respectively. In terms of temporal evolution, the exhaust concentration of flue gas in the main process gradually decreased, with obvious emission reduction from the Blue Sky Protection Campaign. Regionally, the exhaust concentrations of flue gas of the kiln head and kiln tail in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas, and the Yangtze River Delta and Fenwei Plain, showed a considerable decline, with a high to average level in China. The flu concentrations of each city differed; the cement industry in Anhui Province generated the largest emission in the country, while Beijing and Tianjin showed the highest emission intensity per unit area.

Key words: emission inventory; cement; air pollution; emission factor; Blue Sky Protection Campaign

中国水泥产量增长迅速，由1985年的1.46亿t增加至2018年的21.77亿t，占到全球市场份额的55.95%[1]．水泥行业已经成为重要的工业污染源，2015年其PM和NO_x排放量分别占工业源排放总量的6.78%和14.45%[2]．为控制其排放，2014年水泥行业实施新的国家排放标准(GB 4915-2013)[3]，随后河北、河南和江苏相继提出，在2018～2020年期间，完成水泥行业超低排放改造工作[4-6]．2018年国家针对重点区域(京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原)，进一步深化水泥行业污染治理，全面执行大气污染物特别排放限值、严禁新增产能和淘汰落后产能[7]．同时2018年各地秋冬季大气污染综合治理攻坚行动全面实施，水泥行业实施精准化错峰生产[8,9]．因此，建立2018年水泥行业大气污染物排放清单，可精确评估政策管控下水泥行业的排放现状，为水泥行业秋冬季错峰生

收稿日期：2020-03-15；修订日期：2020-05-08
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0208101)；大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07，DQGG0304-07)；生态环境部环境工程评估中心创新科研项目(2019-10)；国家自然科学基金项目(71971007，71622011)
作者简介：汤铃(1983～)，女，教授，博士生导师，主要研究领域为能源经济与管理，E-mail：lingtang@buaa.edu.cn
* 通信作者，E-mail：boxinet@gmail.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

产提供精准数据支持.

当前国内外开展的关于水泥行业大气污染排放清单研究,无法反映水泥行业最新的大气污染物排放水平. 已有研究采用排放因子法,分析中国水泥行业 1990 ~ 2016 年的排放量,建立全国[10~13]或区域[14~18]维度的排放清单,如京津冀地区[14~16]、四川省[17]和重庆市[18]等地区清单. 但采用的排放因子均为 2015 年之前,基于有限水泥窑排口的调研数据的估算结果[10~19],无法反映最新标准和政策实施带来的减排影响. 并且其数值计算基于多种假设(如污染物防治技术类型、覆盖率和去除效率等),无法反映水泥行业排放的差异性和随时间变化的特性,导致较高的不确定性[10~19].

引入污染源连续自动监测系统(continuous emissions monitoring systems,CEMS)的实时监测数据,可以直接计算排放因子与排放量,有效规避了传统的排放清单计算方法的不足,显著提高测算精度. 基于 CEMS 计算排放因子的方法,已经在火电和钢铁等行业得到较好的运用[20~24]. 例如,Tang 等[23]基于 CEMS 数据,精确计算了 2014 ~ 2017 年中国火电行业的大气排放清单,结果表明基于 CEMS 的实际排放量比现有研究的排放量低 18% ~ 92%,同时大幅降低了火电排放清单的不确定性. 汤铃等[24]有机融合 CEMS 数据和环境统计数据,自下而上地编制中国 2015 年钢铁企业各工序的大气污染源排放清单,以深入剖析不同工序、不同技术的排放差异,显著提高了钢铁排放清单的精确度. 然而当前研究还未将 CEMS 数据引入水泥行业大气排放清单的编制.

针对上述问题,本研究使用 2018 年中国水泥行业在线监测数据(continuous emissions monitoring systems, CEMS),进行水泥行业大气污染物(PM、SO_2 和 NO_x)浓度分析,并以 2018 年环境统计数据为活动水平基础,按照自下而上的方法,建立了一套 2018 年中国高时(小时维度)空(工序维度)分辨率水泥排放清单(high resolution cement emission inventory for China, HCEC),通过直接估算排放因子和排放量,精确反映了当前的大气污染物排放状况,通过全面的不确定性分析,验证了水泥排放清单的可靠性. 本研究对水泥行业制定进一步的减排政策、产业布局优化、空气质量达标规划、重污染天气应对以及大气区域联控等,提供科学技术支撑.

1　材料与方法

1.1　排放量计算

本研究采用自下而上的方法,基于水泥行业窑头和窑尾工序的实测排放因子,结合相应工序的活动水平,核算 2018 年中国水泥行业的 PM、SO_2 和 NO_x 排放量,见公式(1)[13]:

$$E_{s,i,u} = A_{i,u} EF_{s,i,u} \quad (1)$$

式中,s、i 和 u 分别代表污染物种类、水泥企业和水泥窑工序; E 代表排放量,$t \cdot a^{-1}$; A 代表活动水平,$t \cdot a^{-1}$; EF 代表排放因子(以熟料计),$g \cdot kg^{-1}$.

本研究只涉及 CEMS 进行监测的主要生产工序(窑头和窑尾)[25],未纳入其它生产工艺设备,如水泥磨和破碎机等,会导致 PM 总排放量偏低[11].

1.2　活动水平

中国水泥企业活动水平来源为 2018 年生态环境部环境统计数据(原始数据未公开),包括产品产量、生产原料信息、大气污染防治措施信息和地理位置等. 为保证空间信息的准确性,本研究采用地址坐标识别技术(Baidu Map API)方法,结合卫星遥感数据和人工目视检验,对水泥企业主要工序的空间位置信息逐个校核.

本次共纳入中国1 164家水泥企业,其熟料产量达 14.92 亿 t,占 2018 年中国熟料总产量的 86.67%(中国熟料总产量来自工业和信息化部); 工序涉及窑头和窑尾. 2018 年中国水泥企业分布见图 1. 其中,2018 年水泥熟料年产量小于 100 万 t 的企业数量为 654 家,熟料总产量为35 229.77万 t; 熟料产量在 100 ~ 500 万 t 的企业数量为 485 家,熟料总产量为92 480.34万 t; 熟料产量大于 500 万 t 的企业数量为 25 家,熟料总产量为21 539.00 万 t.

1.3　排放因子

截止 2018 年,全国安装大气污染源在线监测设备(CEMS)的水泥企业数量为 950 家,共涉及 2190 个排口. CEMS 覆盖水泥企业占比达到 81.76%. 国家规定水泥窑窑头和窑尾工序安装 CEMS 进行连续监测[25]. 本研究基于质量控制后的 CEMS 数据[26~28],计算出单个排口 SO_2、NO_x 和 PM 平均排放因子,见公式(2). 对于少数没有安装 CEMS 的企业,用省平均排放因子补充.

$$EF_{s,i,u} = c_{s,i,u} V_{i,u} \quad (2)$$

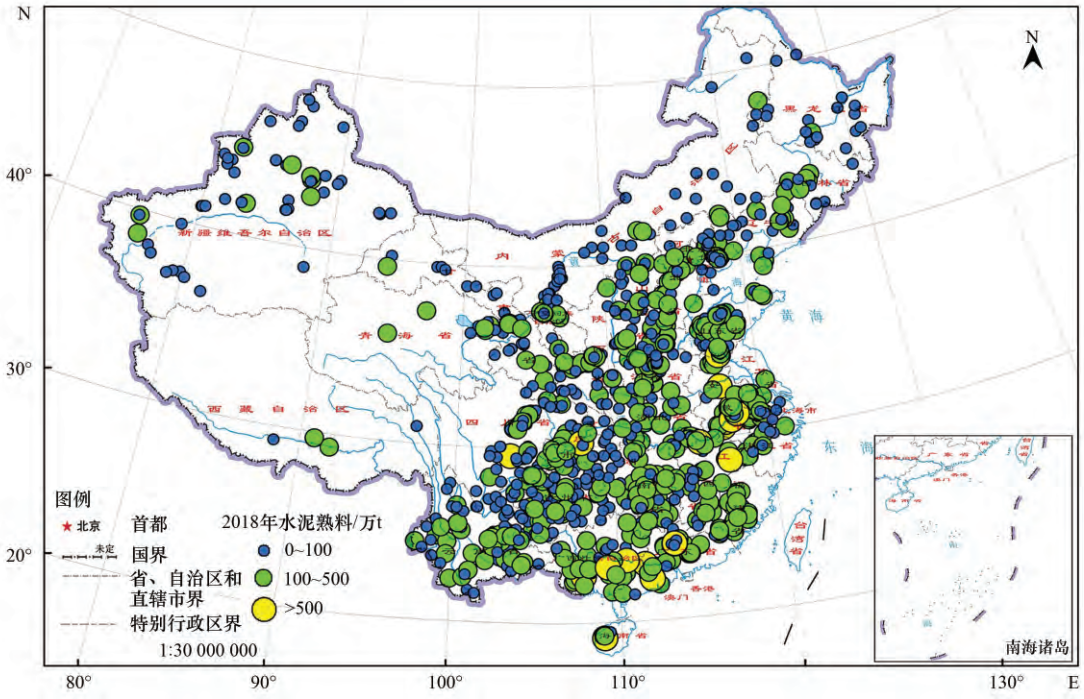
式中,下标 s、i 和 u 表述同(1)式; c 代表排口的 CEMS 监测的污染物浓度,$mg \cdot m^{-3}$; V 代表理论烟气量,$m^3 \cdot kg^{-1}$,来源于文献[25].

2　结果与讨论

2.1　2018 年中国水泥行业排放浓度分析

2018 年,中国水泥大气污染物月均浓度基本保持下降趋势(图 2). 窑头 PM 月均浓度下降 1.73%,窑头 PM 年均排放浓度为 10.01 $mg \cdot m^{-3}$,满足《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915–2013)的重

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



未纳入中国台湾、中国香港和澳门特别行政区的相关数据，下同

图 1 2018 年中国水泥企业分布示意

Fig. 1 Distribution of China's cement enterprises in 2018

点区域特别排放限值(20 mg·m^{-3})[3]. 窑尾 PM、SO_2 和 NO_x 月均浓度下降率分别为 0.77%、2.25% 和 1.03%，其年均排放浓度分别为 13.62、23.96 和 228.67 mg·m^{-3}，远低于特别排放限值(PM: 20 mg·m^{-3}，SO_2: 100 mg·m^{-3}，NO_x: 320 mg·m^{-3})[3]. 2018 年水泥行业排放浓度持续下降有如下原因. 第一，排放标准加严，河北、河南和江苏相继提出，在 2018～2020 年期间，完成水泥行业超低排放改造工作[4-6]. 第二，政策推动，2018 年国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》[7]，深化水泥行业污染治理，持续推进全面达标排放；2018 年各地秋冬季大气污染综合治理攻坚行动全面实施. 第三，执法督查，2018 年中央环保督察、中央环保督察“回头看”、生态环境部督查和省内自查等工作持续推进，监管力度加大，倒逼企业不断加大环保投入.

其中，4 月窑尾 PM 和 SO_2 浓度下降，但 NO_x 浓度上升，可能原因如下：2018 年 4 月全国水泥产量迅速增加(比 3 月产量增加 36.45%)[29]，导致水泥窑运行工况波动较大. 水泥窑采用选择性非催化还原(SNCR)技术或分解炉分级燃烧技术，在窑内进行脱硝[19,30]. 当烟气量迅速增长时，窑内喷射还原剂不易控制，导致还原剂补充不够充分，脱硝设施处理能力未及时跟进；同时分级燃烧的一次风和二次风风量未及时做出相应调整，对脱硝效率造成影响，NO_x 排放浓度较高. 此外，受水泥窑和分解炉的运行控制影响，水泥窑 NO_x 排放浓度波动较大，平均有 20% 的变化幅度[19]. 但水泥窑除尘技术稳定，并且本身具有固硫作用[19]，因此 PM 和 SO_2 去除效率受工况影响较小.

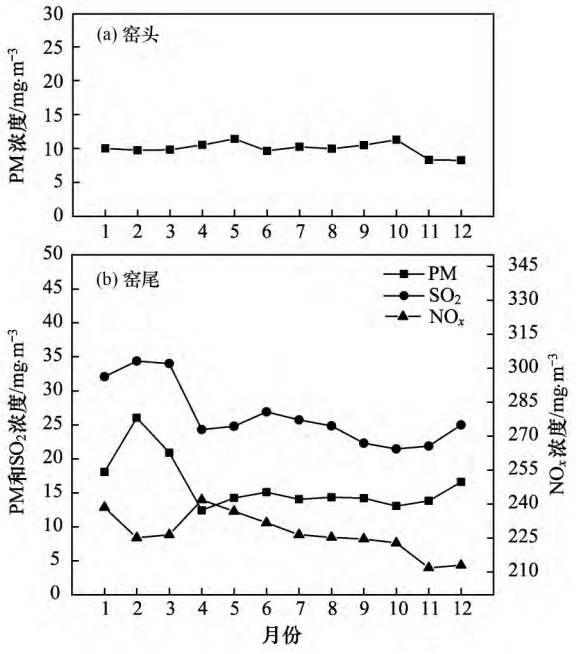


图 2 中国水泥行业窑头和窑尾的污染物浓度月均值变化

Fig. 2 Mean monthly concentration of air pollutants from kiln head and kiln tail in China's cement industry

由于政策和标准的持续加严，2018 年水泥窑大气污染物年均排放浓度比以往年份的实测结果大幅下降[19,31-33](见图 3)，图 3 中 PM 实测浓度未区分窑头和窑尾.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

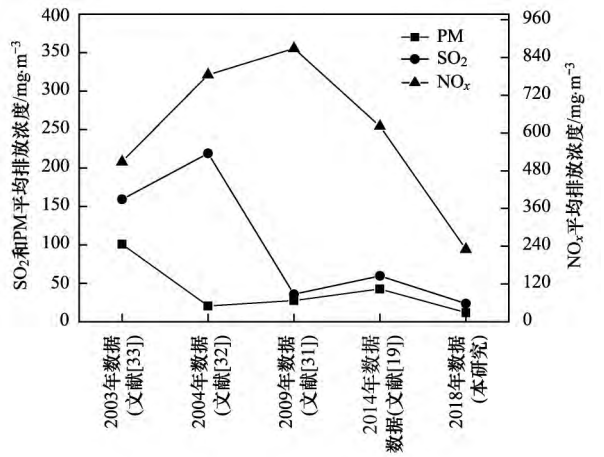


图3　中国水泥企业污染物浓度文献对比

Fig. 3　Comparison of pollutant concentration of Chinese cement enterprises

由图4可知，2018年全国各省(区、市)窑头PM、窑尾PM、窑尾SO_2和窑尾NO_x平均排放浓度范围分别为3.97～19.66、6.97～26.19、3.41～56.94和98.48～292.13 mg·m^{-3}. 2018年各省(区、市)窑头PM年平均浓度均满足特别排放限值[3]；吉林省、甘肃省和重庆市窑尾PM年平均浓度，满足GB 4915-2013中新建标准排放限值(30 mg·m^{-3})[3]，其余省市均满足特别排放限值[3]. 当前水泥行业除尘技术成熟，可实现较低排放水平.

各省(区、市)窑尾SO_2年平均浓度均满足特别排放限值[3]，较高的为重庆市和贵州省. 水泥窑本身具有固硫作用，若原料硫碱比合适，不采取脱硫装置，即可实现较低排放水平[19]. 但西南地区石灰石原料含硫量较高，导致排放浓度较高. 因此建议加强高硫地区SO_2管控，一方面，加强分解炉燃烧过程管控，将风煤比例调整到最佳状态并相互匹配平衡，使富余氧含量充足，提高水泥窑本身的固硫效率；另一方面，加强末端治理，推动脱硫装置的安装和改进.

各省(区、市)窑尾NO_x年平均浓度均满足特别排放限值[3]，较高的为吉林省和黑龙江省. 当前水泥脱硝工艺普遍采用SNCR技术，其脱硝效率在50%左右，可使NO_x排放浓度满足新建标准排放限值(400 mg·m^{-3})[3]；采用工艺控制(低氮燃烧器、分解炉分级燃烧)和SNCR进行协同脱硝[19]，可满足特别排放限值(320 mg·m^{-3})[3].

蓝天保卫战深化京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原水泥行业大气污染治理，2018年3个重点区域水泥窑年均排放浓度整体低于全国平均排放水平，大气污染控制效果显著. 重点地区各城市年均排放浓度分布见图5.

京津冀及周边地区水泥行业污染物年均排放浓度控制较好，低于全国平均排放浓度(窑头PM为10.01 mg·m^{-3}，窑尾PM、SO_2和NO_x分别为13.62、

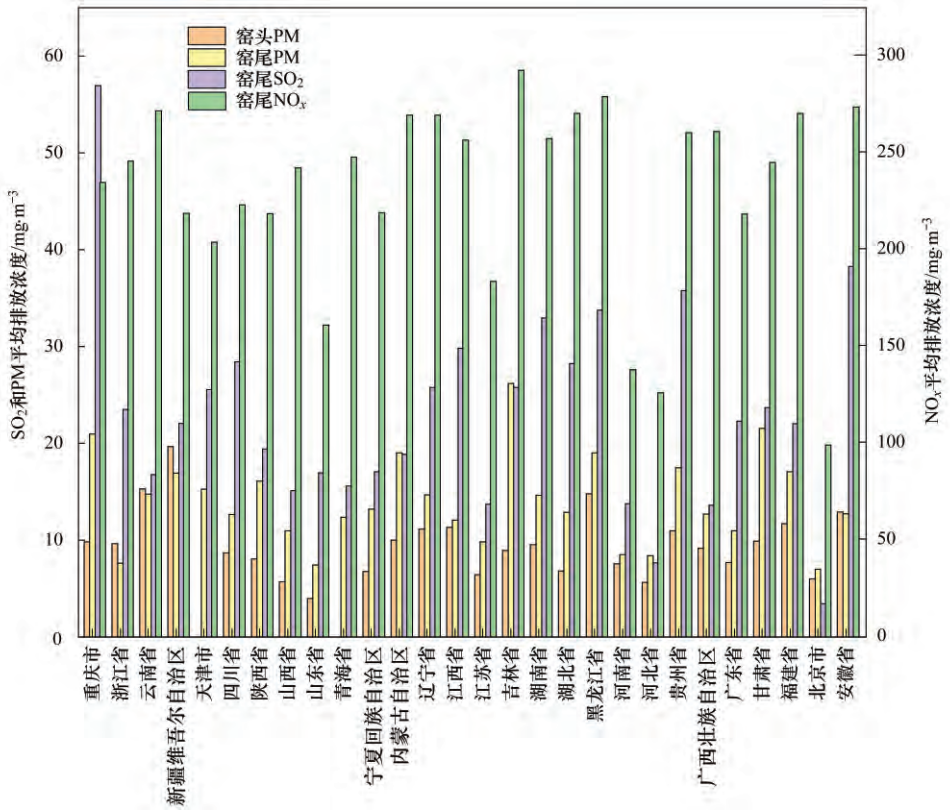


图4　中国各省(区、市)份水泥行业污染物年均浓度

Fig. 4　Average annual pollutant concentration of the cement industry in each province of China

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

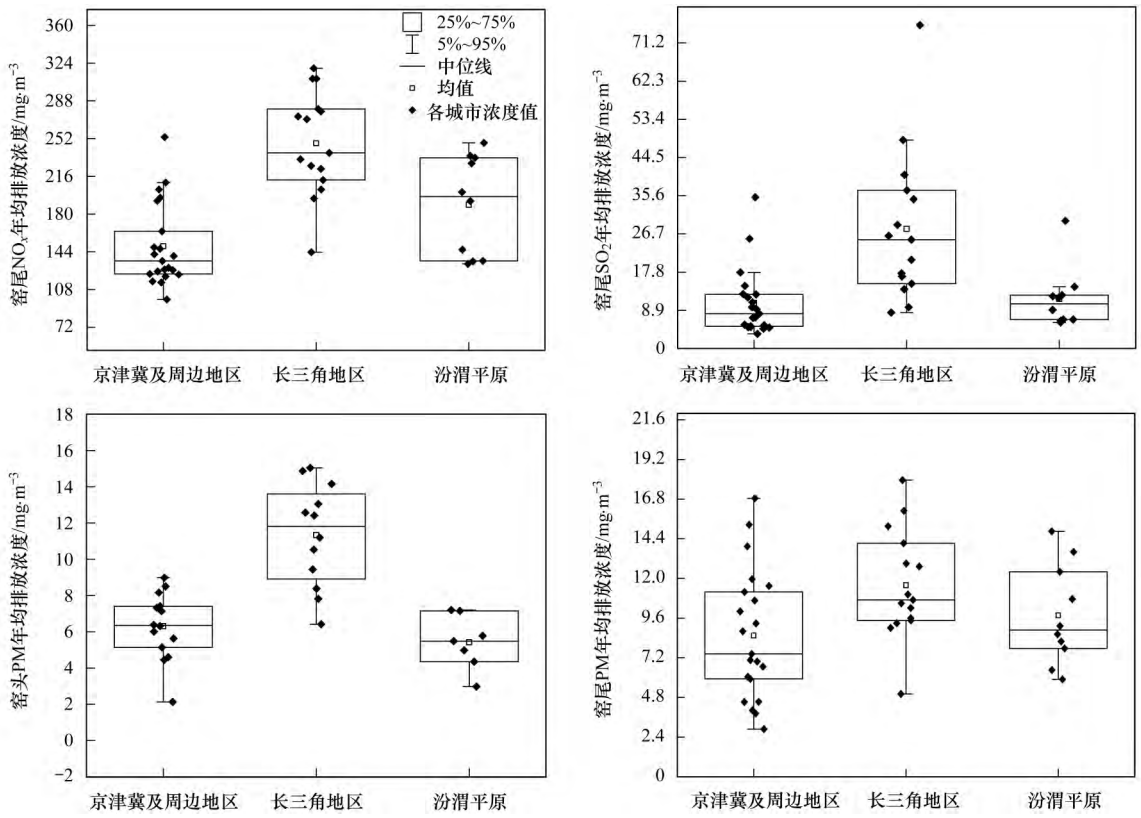


图 5 重点区域各城市水泥行业大气污染物年均浓度分布

Fig. 5 Distribution of average annual concentration of air pollutants in the cement industry in key regions

23.96 和 228.67 mg·m^{-3}). 京津冀及周边地区窑头 PM 年均排放浓度为 5.82 mg·m^{-3},各市年平均排放浓度范围在 2.13 ~ 8.98 mg·m^{-3},均满足特别排放限值[3]. 京津冀及周边地区窑尾 PM、SO_2 和 NO_x 年均排放浓度分别为 8.25、9.13 和 113.19 mg·m^{-3},各市年平均排放浓度范围分别为 2.89 ~ 16.85、3.41 ~ 35.22 和 98.48 ~ 253.47 mg·m^{-3},均满足特别排放限值[3].

长三角地区各城市水泥行业污染物年均排放浓度均满足特别排放限值. 长三角地区窑头 PM 年均排放浓度为 11.88 mg·m^{-3},各市年平均排放浓度范围在 6.42 ~ 15.04 mg·m^{-3},均满足特别排放限值[3]. 长三角地区窑尾 PM、SO_2 和 NO_x 年均排放浓度分别为 11.08、32.15 和 259.82 mg·m^{-3},各市年平均排放浓度范围分别为 5.01 ~ 17.95、8.39 ~ 75.32 和 143.57 ~ 319.17 mg·m^{-3},均满足特别排放限值[3].

汾渭平原水泥行业污染物年均浓度均满足特别排放限值,并且低于全国平均排放浓度. 汾渭平原窑头 PM 年均排放浓度为 6.03 mg·m^{-3},各市年平均排放浓度范围在 2.98 ~ 7.20 mg·m^{-3},均能够满足特别排放限值[3]. 汾渭平原窑尾 PM、SO_2 和 NO_x 年均排放浓度分别为 8.63、10.82 和 180.80 mg·m^{-3},各市年平均排放浓度范围分别为 5.89 ~ 14.85、6.08 ~ 29.75 和 132.30 ~ 247.90 mg·m^{-3},均能够满足特别排放限值[3].

重点区域各城市水泥污染排放浓度总体控制较好,但排放浓度都存在差异,因此要开展深度调研,依据分布特点、燃料品种和控制水平等,提出有针对性的“一市一策”、“一厂一策”精细化管理和深度治理方案.

2.2 2018 年中国水泥行业排放因子对比分析

2018 年,全国水泥窑 PM 的排放因子为 0.002 ~ 0.230 g·kg^{-1},5% ~ 95% 分位数为 0.008 ~ 0.048 g·kg^{-1},平均值为 0.026 g·kg^{-1}(未区分窑头和窑尾); SO_2 排放因子为 0.003 ~ 0.332 g·kg^{-1},5% ~ 95% 分位数为 0.013 ~ 0.140 g·kg^{-1},平均值为 0.059 g·kg^{-1}; 窑尾 NO_x 排放因子为 0.106 ~ 0.905 g·kg^{-1},5% ~ 95% 分位数为 0.314 ~ 0.782 g·kg^{-1},平均值为 0.575 g·kg^{-1}. 本研究基于 CEMS 计算所得 PM、SO_2 和 NO_x 排放因子与文献[15, 31 ~ 35]对比发现(图 6 ~ 8),本研究排放因子水平低于现有研究的结果.

由于近年来中国水泥行业政策和标准的影响,其排放因子发生巨大变化. 而现有研究中的水泥排放因子未考虑具体水泥窑的规模、控制措施和管理水平等差异,且研究的样本存在数据较少以及时间旧的问题,无法有效反映水泥行业由于技术进步和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

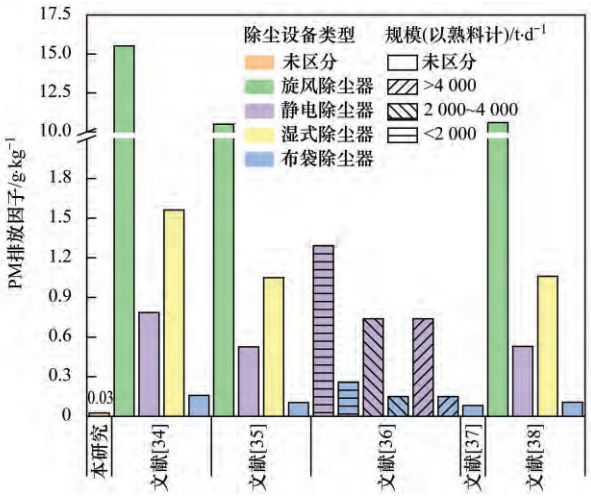


图 6　中国水泥企业排放因子文献对比(PM)

Fig. 6　Comparison of emission factors of Chinese cement enterprises (PM)

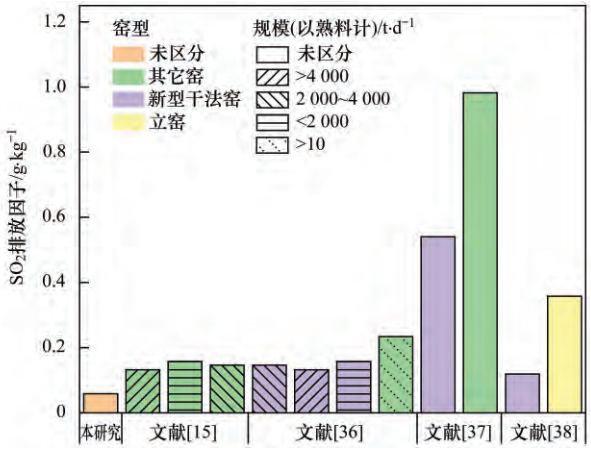


图 7　中国水泥企业排放因子文献对比(SO_2)

Fig. 7　Comparison of emission factors of Chinese cement enterprises (SO_2)

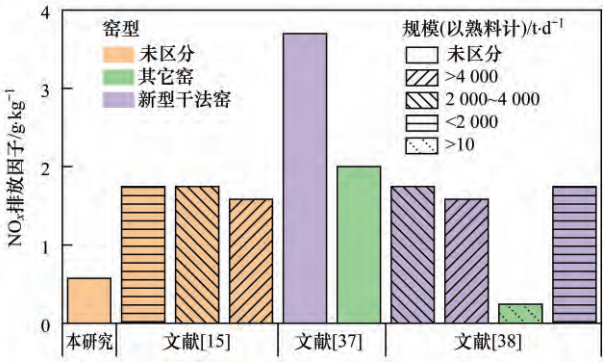


图 8　中国水泥企业排放因子文献对比(NO_x)

Fig. 8　Comparison of emission factors of Chinese cement enterprises (NO_x)

标准加严等因素引起的排放因子变化. 其中，除尘设备的提效改造导致 PM 排放因子下降，例如通过增加静电除尘技术的电场级数等，对静电除尘进行升级改造；进行“电改袋”，增加除尘效率更高的布袋除尘器的占比[19]．SO_2 排放因子大幅下降的主要原因是我国水泥窑型改变，新型干法窑替代 SO_2 排放较高的立窑[19]．然而新型干法窑的 NO_x 排放浓度较高，2013 年以后，大规模安装脱硝设备(主要为低氮燃烧技术和 SNCR)，提高脱硝效率，导致 NO_x 排放因子大幅下降[13]．因此本研究基于中国在线监测数据，真实反映了企业 2018 年最新的排放因子和排放浓度水平.

2.3　2018 年中国水泥行业排放量分析

2018 年中国水泥行业排放的 PM、SO_2 和 NO_x 的总量分别为 7.29、9.26 和 87.84 万 t. 其中窑头 PM 年排放量为 2.55 万 t，窑尾 PM 年排放量为 4.74 万 t. 然而，2018 年中国水泥行业 3 种大气污染物排放量的空间分布不均衡(图 9)．PM 年排放量最大的省份是安徽省，排放量为 0.82 万 t，占全国排放总量的约 11.2%；PM 年排放量最小的省份是天津市、北京市和西藏自治区，排放量均低于 0.1 万 t．SO_2 年排放量最大的省份是安徽省，排放量为 1.47 万 t，

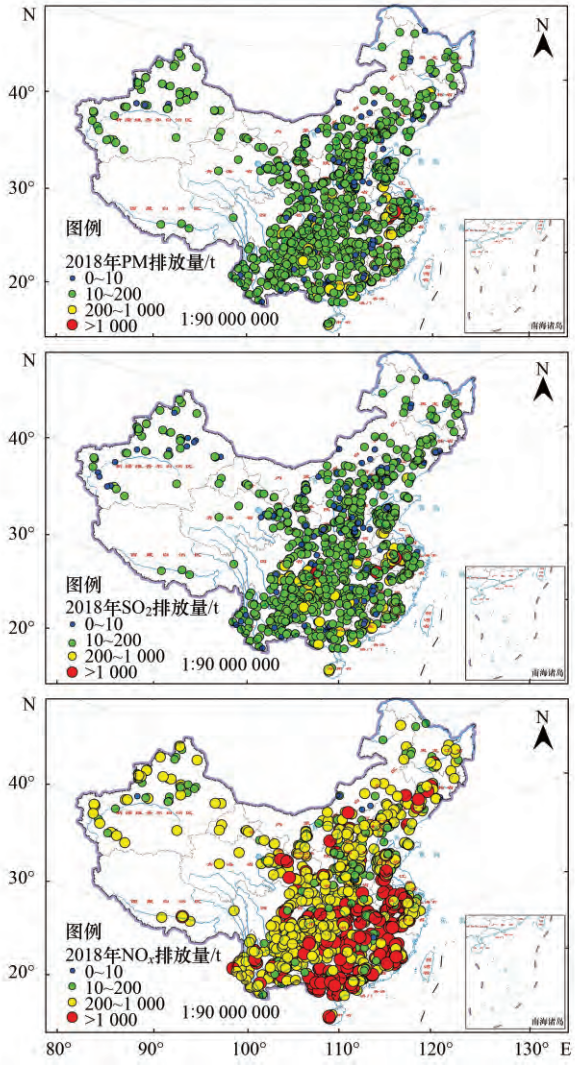


图 9　2018 年水泥行业排放空间分布情况

Fig. 9　Spatial distribution of emissions from the cement industry in 2018

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

占全国排放总量的约 15.9%；SO_2 年排放量最小的省份是北京市、天津市和西藏自治区，排放量均低于 0.1 万 t. NO_x 年排放量最大的省份还是安徽省，排放量为 10.13 万 t，占全国排放总量的约 11.5%；NO_x 年排放量最小的 3 个省份是天津市、北京市和西藏自治区，排放量均低于 1 万 t. 污染物的空间分布特征主要由水泥的熟料产量决定［见公式(1)］[13]. 因此水泥行业在各省(区、市)的大气污染物排放量与熟料产量分布相一致，Pearson 相关系数均超过 0.95. 其中，安徽省、广东省和四川省，水泥熟料产量在中国占比超过 23%，是排放量最大的 3 个省份(图 10).

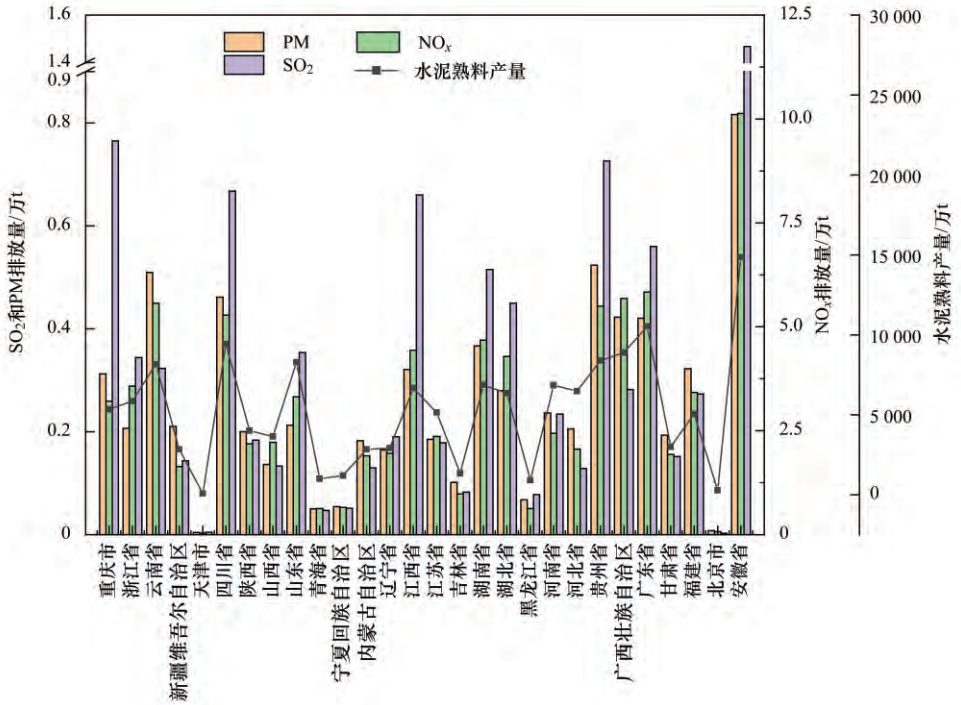


图 10 2018 年中国各省(区、市)污染物排放量与水泥熟料产量

Fig. 10 Emission and cement clinker production in 2018

从重点区域排放量来看，2018 年长三角地区水泥行业 PM、SO_2 和 NO_x 的排放总量分别为 1.21、1.99 和 16.07 万 t，其中安徽省因水泥熟料产量较大，其 PM、SO_2 和 NO_x 的排放量占长三角地区水泥窑排放总量的 67.8%、73.9% 和 63.0%. 相比而言，京津冀及周边地区和汾渭平原地区的排放量较少. 京津冀及周边地区年水泥窑 PM、SO_2 和 NO_x 的年排放总量分别为 0.37、0.28 和 4.22 万 t，汾渭平原水泥窑 PM、SO_2 和 NO_x 的年排放总量分别为 0.20、0.18 和 2.75 万 t.

2018 年中国各省(区、市)单位面积的排放强度见图 11. 天津市 PM、SO_2 和 NO_x 的单位面积的排放强度均为全国最高. PM 单位面积污染物的排放强度较大的省份是天津［1.18×10^6 kg·(t·km^2)$^{-1}$］和北京［0.43×10^6 kg·(t·km^2)$^{-1}$］. SO_2 单位面积污染物的排放强度最大的省份是天津市，其次是重庆市. 天津市单位面积污染物的排放强度水平约为 1.34×10^6 kg·(t·km^2)$^{-1}$. 同样地，NO_x 单位面积污染物的排放强度最大的省份为天津［1.07×10^5 kg·(t·km^2)$^{-1}$］. 由于天津市占地面积小，仅占中国领土面积的 0.12%，水泥厂分布集中，其 PM、SO_2 和 NO_x 排放量分别为 40.40、46.01 和 365.93 t，最终导致单位面积污染物的排放强度相对高. 因此，进一步控制水泥工业的大气污染物排放水平，应加大重点区域大气污染防治力度，促进水泥生产工艺结构的转变与产业结构的调整.

2.4 不确定性分析

本研究使用蒙特卡罗方法对水泥清单的不确定性进行分析[23,39]，按照输入参数(如排放因子)的概率分布，对输入参数进行随机重复抽样，并求解不同参数取值下对应的排放量，获取排放量的分布，从而量化排放清单的误差. 参照 Tang 等[23] 和 Zhao 等[39] 的方法，在蒙特卡罗框架下进行了10 000次模拟实验，求解水泥排放量 95% 的置信区间.

对于 2018 年水泥排放清单计算结果的不确定性主要来源于 CEMS 数据. 本研究基于不同水泥企业的不同工序的各污染物的小时浓度值，得出每月浓度分布的概率密度函数. 通过蒙特卡罗方法，依照各工序的月浓度的概率分布，随机生成小时浓度值，通过公式(1)和公式(2)把浓度的不确定性传播到

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

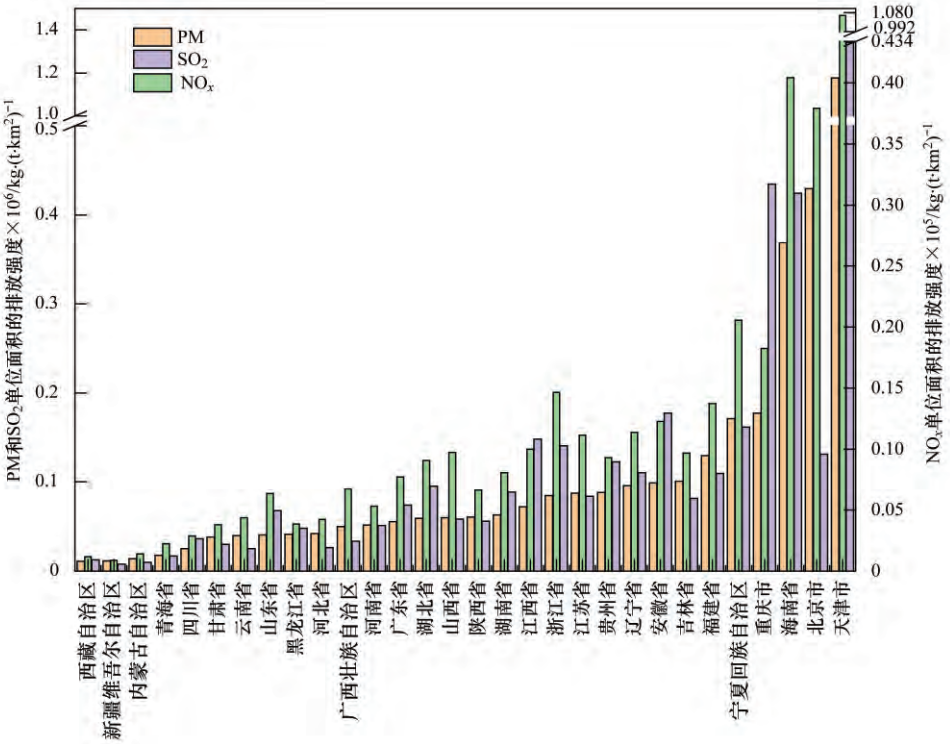


图 11　2018 年中国各省(区、市)污染物单位面积的排放强度

Fig. 11　Emission performance of air pollutants in 2018

模型的输出，并进行了10 000次模拟，进而采用10 000次的模型输出(排放量)构成的概率分布，估计了水泥污染物排放量的不确定范围.

分析结果表明，本研究核算的中国水泥排放清单结果是相对稳定的，2018 年水泥行业排放清单中，3 种污染物(PM、SO_2 和 NO_x)排放总量的95%置信区间分别为 ±0.40%、±0.59% 和 ±0.09%. 同时，已有文献中基于传统排放因子的水泥排放清单的不确定性范围在(−62.5%，110.8%)[12,17]，结果表明基于 CEMS 的清单计算方法，大幅降低了水泥排放清单不确定性.

3　结论

(1) 2018 年，中国水泥行业主要工序烟气排口月均浓度逐步降低，蓝天保卫战成效显著；京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原，水泥窑年均排放浓度整体低于全国平均水平，大气污染控制效果显著，但各城市间排放浓度存在差异，因此有必要开展“一市一策”、“一厂一策”的精细化和差别化管理；西南地区原料含硫量较高，水泥窑 SO_2 排放浓度较高，建议调整分解炉的风煤比例，提高水泥窑本身的固硫效率，同时加快高硫地区脱硫装置的安装和改进；东北地区水泥窑 NO_x 排放浓度较高，下一步要充分基于脱硝技术可行性，合理控制 NO_x 排放浓度.

(2) 2018 年，中国水泥行业排放的 SO_2、NO_x 和 PM 的总量分别为 9.26、87.84 和 7.29 万 t，其中安徽省水泥行业大气污染物排放量最大. 北京市和天津市水泥行业的单位面积污染排放强度最大，因此建议下一步着重管控相关地区的水泥企业数量和产量，优化产业布局，加大搬迁或改造力度. 由于排放标准和政策管控的持续加严，本研究中水泥行业 2018 年的大气污染物的排放因子、排放量均低于以往研究结果.

致谢： 感谢生态环境部生态环境执法局为本研究提供污染源在线监测资料；感谢国家建筑材料工业情报研究所的熊运贵老师和中材地质工程勘查研究院有限公司的隋国舜老师，为本研究提供指导和帮助.

参考文献：

[1] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2019 [EB/OL]. https://doi.org/10.3133/70202434, 2019-02-28.

[2] 国家统计局，环境保护部. 中国环境统计年鉴 2015 [M]. 北京：中国统计出版社，2016.
Department of Ecology and Environment, National Bureau of Statistics. China statistical yearbook on environment 2015 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[3] GB 4915-2013，水泥工业大气污染物排放标准 [S].
GB 4915-2013, Emission standard of air pollutants for cement industry [S].

[4] 河南省人民政府办公厅. 河南省人民政府办公厅关于印发河南省 2018 年大气污染防治攻坚战实施方案的通知 [EB/OL]. https://www.henan.gov.cn/2018/02-23/249520.html, 2018-02-06.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[5] 江苏省环保厅. 关于开展全省非电行业氮氧化物深度减排的通知[EB/OL]. http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2017/6/14/art_1581_6691922.html, 2017-06-14.

[6] 河北省政府办公厅. 河北省人民政府关于印发河北省打赢蓝天保卫战三年行动方案的通知[EB/OL]. http://info.hebei.gov.cn/eportal/ui?pageId=6778557&articleKey=6806185&columnId=329982, 2018-08-23.

[7] 国务院. 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[R]. 北京: 国务院, 2018.

[8] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区2018-2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/sthjbwj/201809/t20180927_630570.htm, 2018-09-21.

[9] 生态环境部. 关于印发《长三角地区2018-2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201811/t20181112_673371.html, 2018-11-02.

[10] 王永红, 薛志钢, 柴发合, 等. 我国水泥工业大气污染物排放量估算[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 207-212.
Wang Y H, Xue Z G, Chai F H, *et al*. Estimation of air pollutants emissions of cement industry in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(2): 207-212.

[11] 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.
Lei Y, He K B, Zhang Q, *et al*. Technology-based emission inventory of particulate matters (PM) from cement industry[J]. Environmental Science, 2008, **29**(8): 2366-2371.

[12] Hua S B, Tian H Z, Wang K, *et al*. Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections[J]. Atmospheric Environment, 2016, **128**: 1-9.

[13] 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 等. 2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4841-4848.
Jiang C L, Song X H, Zhong Y Z, *et al*. Emissions inventory and characteristics of NO_x from cement industry [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4841-4848.

[14] 田刚, 王凡, 束韫, 等. 京津冀水泥工业大气污染状况研究[J]. 中国水泥, 2014, (6): 68-70.

[15] 薛亦峰, 曲松, 闫静, 等. 北京市水泥工业大气污染物排放清单及污染特征[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(1): 201-204.
Xue Y F, Qu S, Yan J, *et al*. Development of an air pollutant emission inventory of cement industry for Beijing and pollution characteristics analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(1): 201-204.

[16] 王彦超, 蒋春来, 贺晋瑜, 等. 京津冀及周边地区水泥工业大气污染控制分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(10): 3683-3688.
Wang Y C, Jiang C L, He J Y, *et al*. Analysis of air pollutants control in cement industry in and around Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(10): 3683-3688.

[17] 何敏, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省2008—2014年水泥行业大气污染物排放清单及时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(1): 34-43.
He M, Chen J H, Han L, *et al*. Cement industrial emission inventories development and their temporal and spatial distribution for Sichuan Province from 2008 to 2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(1): 34-43.

[18] 孙欣, 周欢, 李玲. 重庆市重点工业行业大气污染物排放趋势分析及建议[J]. 环境保护与循环经济, 2018, **38**(1): 55-59.

[19] 任春, 江梅, 邹兰, 等. 水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3632-3638.
Ren C, Jiang M, Zou L, *et al*. Study on feasible emission control level of air pollutions for cement industry [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3632-3638.

[20] 伯鑫, 赵春丽, 吴铁, 等. 京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2554-2560.
Bo X, Zhao C L, Wu T, *et al*. Emission inventory with high temporal and spatial resolution of steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2554-2560.

[21] 伯鑫, 甄瑞卿, 屈加豹, 等. 中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统研究[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(5): 578-582.
Bo X, Zhen R Q, Qu J B, *et al*. Study on the management system of atmospheric pollutant emission inventory for steel industry of China[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, **39**(5): 578-582.

[22] 伯鑫, 屈加豹, 田军, 等. 全国火电排放清单研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018. 10-45.

[23] Tang L, Qu J B, Mi Z F, *et al*. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards [J]. Nature Energy, 2019, **4**(11): 929-938.

[24] 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业大气环境影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 2981-2994.
Tang L, Xue X D, Bo X, *et al*. The contribution of emissions from iron and steel industry to air quality in China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 2981-2994.

[25] HJ 847-2017, 排污许可证申请与核发技术规范 水泥工业[S].
HJ 847-2017, Technical specification for application and issuance of pollutant permit cement industry [S].

[26] 环境保护部. 国家监控企业污染源自动监测数据有效性审核办法[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/200910/t20091022_174629.htm, 2009-07-22.

[27] 环境保护部. 国家重点监控企业污染源自动监测设备监督考核规程[EB/OL]. https://www.doc88.com/p-396948420741.html, 2009-07-22.

[28] HJ 75-2017, 固定污染源烟气(SO_2、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范[S].
HJ 75-2017, Specifications for continuous emissions monitoring of SO_2, NO_x, and particulate matter in the flue gas emitted from stationary sources [S].

[29] 中华人民共和国国家统计局. 2018年中国水泥月度产量[EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/, 2020-05-07.

[30] 魏红旗, 冯浩, 张海英. 降低水泥窑减排NO_x氨水用量的几点措施[J]. 新世纪水泥导报, 2019, **25**(1): 59-60.

[31] 丁新淼, 王雅明, 余学飞, 等. 我国水泥工业大气污染物排放与治理研究[J]. 中国水泥, 2010, (11): 47-50.
Ding X M, Wang Y M, Yu X F, *et al*. China cement industry air pollutants emission and treatment study [J]. China Cement, 2010, (11): 47-50.

[32] European Commission. Reference document on best available techniques in the cement, lime and magnesium oxide manufacturing industries [R]. Seville: European IPPC Bureau (EIPPCB), 2010. 1-189.

[33] 周扬胜, 张国宁, 陈章水, 等. GB 4915-2004 水泥工业大气

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

污染物排放标准编制说明[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2004. 8-14.
[34] 焦永道. 水泥工业大气污染治理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
[35] 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.
[36] 环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm, 2014-08-20.
[37] U.S. Environmental Protection Agency. Compilation of air pollutant emission factors, (Vol 1) stationary point and area sources[M]. 5th ed. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, 1995.
[38] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(第七分册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. 13-20.
[39] Zhao Y, Nielsen C P, Lei Y, *et al*. Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(5): 2295-2308.

欢迎订阅 2021 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持"防治污染,改善生态,促进发展,造福人民"的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex; 医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA; 俄罗斯文摘杂志 AJ; 美国生物学文摘预评 BP; 美国医学索引 IM; 日本科学技术情报中心数据库 JICST; 英国动物学记录 ZR; 剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences; 剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts; 剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等; 国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD); 中文科技期刊数据库(维普); 中国期刊全文数据库(CNKI); 数字化期刊全文数据库(万方); 中国科学引文数据库(CSCD); 中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

国内统一连续出版物号: CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 205

国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱)　邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net