

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

2010~2015年我国水泥工业 NO_x 排放清单及排放特征

蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇*

(环境保护部环境规划院总量控制与排污交易研究中心, 北京 100012)

摘要: 基于我国2011~2015年水泥企业逐条生产线基础信息、活动水平及控制技术数据, 建立了水泥工业 NO_x 排放量计算方法 and 动态排放数据库。利用该方法, 计算了2011~2015年逐条水泥生产线 NO_x 排放量, 分析了2010~2015年我国水泥工业 NO_x 排放特征。结果表明, 我国水泥工业 NO_x 排放量变化范围为168~199万t, 自2010年的169万t增加到2012年的199万t, 达到排放峰值, 随后逐年下降, 到2015年与2010年基本持平。水泥工业 NO_x 排放的地区分布不均衡, 2015年安徽、四川、河南、湖南、云南、山东是排放量最大的省份, 占全国排放总量的40%, 上海、内蒙、山西、新疆、湖南、云南、四川是单位熟料 NO_x 排放强度最大的省份。从生产线规模来看, 规模 $\geq 4000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的熟料生产线产量占比和 NO_x 排放量占比均最大, 分别为68.5%和66.5%, 单位熟料 NO_x 平均排放强度最低。水泥生产工艺结构的转变及水泥工业降氮脱硝工作的开展是影响水泥工业大气 NO_x 排放特征的主要因素。

关键词: 水泥; NO_x ; 排放特征; 排放清单; 新型干法

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4841-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 201802141

Emissions Inventory and Characteristics of NO_x from Cement Industry

JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, SUN Ya-mei, LEI Yu*

(Research Center of Total Emission Control and Emission Trading, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Activity data and technical information of cement production lines in China from 2011 to 2015 were collected. A NO_x emissions calculating model and emissions database were developed for the cement industry, and the NO_x emissions characteristics of cement production lines in China from 2011 to 2015 were analyzed. The results showed that NO_x emissions increased from 1.69 million tons in 2010 to 1.99 million tons in 2012, and then decreased in the subsequent three years to 1.68 million tons in 2015. The provincial-level emissions are significantly uneven. Anhui, Sichuan, Henan, Hunan, Yunnan, and Shandong provinces rank among the top six contributors in the country and together accounted for about 40% of the national emissions in 2015. Shanghai, Inner Mongolia, Shanxi, Xinjiang, Hunan, Yunnan, and Sichuan were the top seven by emissions factor. Lines with capacity of more than $4000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ contributed the largest part of NO_x emissions. The average NO_x emissions factor of more than $4000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ lines was $1.24 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$. The rapid spread of pre-calcining kilns in China and a higher pollution abatement level were the main factors leading to variations in NO_x pollution characteristics in China.

Key words: cement industry; NO_x ; emissions characteristics; emissions inventory; pre-calcining kilns

我国从“十二五”时期开始对大气 NO_x 实行总量控制, 其中水泥行业是仅次于火电行业的 NO_x 第二大工业排放源, 是控制的重点。水泥生产过程中的 NO_x 主要来源于水泥窑系统, 其排放类型按照生成机理分为热力型 NO_x 、燃烧型 NO_x 和激发型 NO_x ^[1~4], 目前新型干法窑相对立窑释放的 NO_x 浓度较高^[5], 随着新型干法窑对立窑的替代, 如果不实行严格的减排措施, 即使在水泥产量不增长的情况下, 我国水泥工业 NO_x 排放量也会持续升高。高精度的水泥工业排放清单是使用模型工具及评估 NO_x 排放控制成效的基础, 目前我国大部分水泥工业 NO_x 的排放是作为工业的一部分根据煤炭消耗量进行宏观估算或者基于分省的水泥产量和水泥技术分布调查相结合的方法进行估算^[6~12], 以每条生产线为单元的自下而上的全国水泥工业排放量估算

几乎为空白。因此, 笔者基于2011~2015年全国水泥企业逐条生产线的基本信息、活动水平、控制技术数据, 构建了基于生产线的自下而上的水泥工业大气 NO_x 排放计算模型, 测算了历年 NO_x 的排放量和建立了 NO_x 排放动态数据库, 并分析了水泥工业 NO_x 的时空分布特征, 以期为我国水泥工业 NO_x 排放控制提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 计算方法

基于2011~2015年大陆地区30个省(区、市)

收稿日期: 2018-02-27; 修订日期: 2018-05-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208400)

作者简介: 蒋春来(1979~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: jiangcl@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: leiyu@caep.org.cn

(不含西藏)及兵团总量减排的水泥企业的每条生产线的基本信息、工艺类型、活动水平、排放因子、控制水平等数据,并结合历年现场调研和文献调研,构建了大气 NO_x 排放量计算模型,测算了每条生产线的 NO_x 排放量,建立了全国水泥生产线的动态排放数据库.水泥企业 NO_x 排放量按照新型干法窑和立窑两种生产工艺进行测算.水泥工业 NO_x 2010年排放量为我国第一次污染源普查更新数据.现场调研发现,“十二五”期间中国水泥企业安装烟气排放连续在线监测系统(CEMS)烟道的取样布点规范性较差,直接影响烟气流量流速测定结果的准确性,只有少量安装规范的水泥窑可以采用在线监测直接测量法测算 NO_x 排放量,为了结果具有系统可比性,所有 NO_x 排放量均采用排污系数法进行测算.2011~2015年企业新型干法窑 NO_x 排放量根据水泥熟料产量、治理工程建设和运行情况采用排污系数法分生产线逐一进行测算.

$$E_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \times ef_{ij} \times (1 - \eta_{ij}) \times 10 \quad (1)$$

式中, E_i 表示第*i*个水泥企业 NO_x 排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; P_{ij} 表示第*i*个水泥企业第*j*条生产线水泥熟料产量,万t; ef_{ij} 表示第*i*个水泥企业第*j*条生产线 NO_x 排污系数(以熟料计), $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; η_{ij} 为 NO_x 去除率,% .根据治理设施投运前后 NO_x 排放浓度比确定,治理设施包括新建脱硝设施和进行低氮燃烧技术改造; n 表示第*i*个水泥企业新型干法生产线条数.对于现役水泥窑新建治理工程的, NO_x 排放量根据治理设施投运前后水泥熟料产量分时间段进行测算.

1.2 参数确定

1.2.1 水泥熟料产量

“十二五”期间,由于我国水泥工业生产工艺全面升级,2010年熟料煅烧主要采用新型干法窑及立窑,占水泥熟料产量的98%以上,预热器窑、干法中空旋窑、立波尔窑、湿法窑等基本全面淘汰,因此本研究仅对新型干法窑和立窑熟料煅烧过程的 NO_x 排放量进行测算.本研究全国水泥熟料产量为全国各省每条水泥熟料生产线产量数据加和,2010~2015年我国分生产技术的水泥熟料产量见图1所示.2010年熟料产量为 $11.9 \times 10^8 \text{ t}$,2014年达到峰值,为 $14.0 \times 10^8 \text{ t}$,2015年为 $13.2 \times 10^8 \text{ t}$.立窑熟料产量的占比逐年下降,由2010年的18.0%下降到2015年的0.6%.

1.2.2 水泥生产过程的 NO_x 产生系数

本研究所采用的产生系数主要根据第一次全国

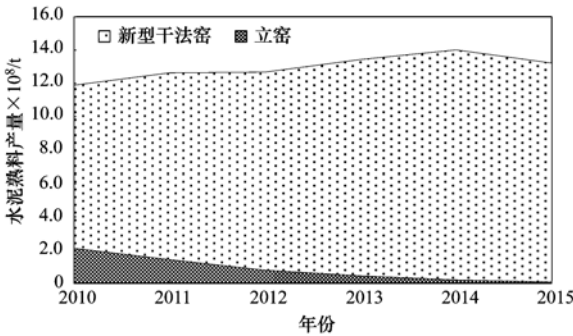


图1 2010~2015年我国分生产技术的水泥熟料产量

Fig. 1 Cement clinker production in China from different types of kiln from 2010 to 2015

污染源普查工业污染源产排污系数手册确定^[13],如表1所示.

表1 水泥工业 NO_x 产污系数

Table 1 NO_x pollution factors of cement industry

工艺名称	生产规模	产污系数(以熟料计) $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
新型干法	$\geq 4000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (以熟料计)	1.584
新型干法	$< 4000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (以熟料计)	1.746
立窑	$\geq 10 \text{ 万t} \cdot \text{a}^{-1}$ (以水泥计)	0.243

1.2.3 NO_x 控制技术及 NO_x 去除率

水泥工业的 NO_x 控制可行技术主要包括工艺控制和选择性非催化还原法(SNCR)^[14~16].从全国来看,目前所有的水泥窑采用的脱硝技术均为低氮燃烧技术和SNCR.2010~2015年水泥窑脱硝规模(以熟料计,下同)由 $0.6 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到 $4.8 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,占全国水泥产能的比例由0.1%增加到92.3%.2015年全国已建脱硝设施的水泥生产线为1454条,占总条数的79.6%, NO_x 去除率约为23.1%.已建设脱硝设施的水泥生产线中约有42.8%的脱硝设施基本不运行,去除不运行的水泥生产线全国已建脱硝设施的水泥生产线的 NO_x 去除率约为37.2%,效率分布见图2所示.

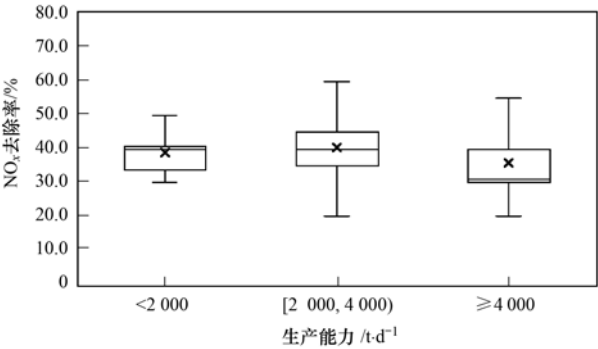
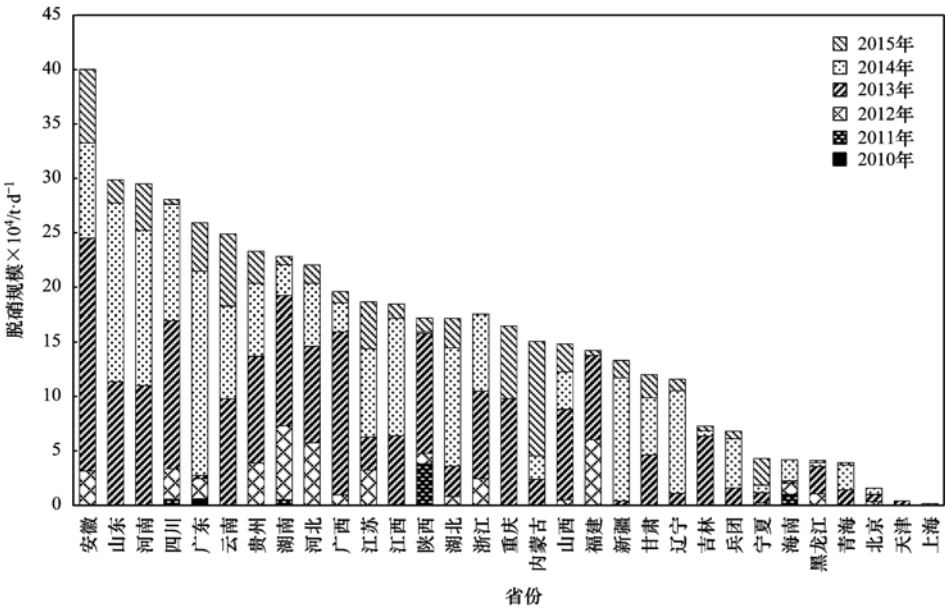


图2 2015年不同生产能力的水泥生产线 NO_x 去除效率

Fig. 2 Distribution of denitration efficiency with different scales in 2015

从各省的脱硝情况来看，全国各省“十二五”期间脱硝设施建设呈快速增长趋势，脱硝设施安装时间集中在 2013 年和 2014 年，两年安装规模占总脱硝规模的 76%（见图 3）。截至 2015 年底，脱硝规模超过 $20 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上的省份有 9 个，分别为安徽、山东、河南、四川、广东、云南、贵州、湖南和河北。脱硝规模占比达 95% 以上的省份有 10 个，分别为北京、天津、海南、湖

南、广东、贵州、福建、安徽、山东和河南，安装比例在 50% 及以下的仅上海市。从脱硝效率的情况来看，NO_x 去除率在 35% 以上的省份主要有天津、北京、河北、陕西、海南、重庆、广西这 7 省，NO_x 去除率在 10% 以下的省份主要有云南、新疆、湖南、内蒙古、山西、宁夏和上海，其中上海、宁夏两地已建脱硝设施基本处于不运转状态（见图 4）。



按照《十二五节能减排综合性工作方案》的划分原则，将兵团作为一个单独的省份进行考虑，下同

图 3 2010 ~ 2015 年不同省份水泥工业脱硝规模变化

Fig. 3 Distribution of denitration scale by provinces during 2010-2015

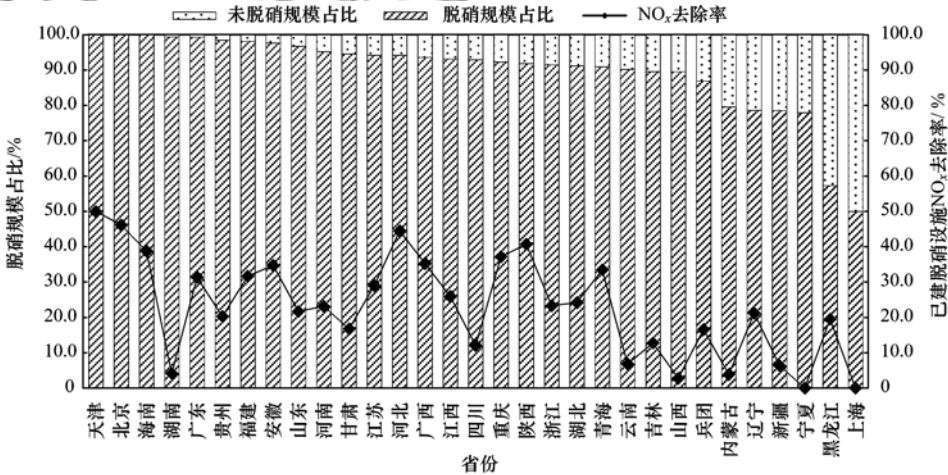


图 4 2015 年各省水泥工业脱硝规模占比及 NO_x 去除率

Fig. 4 Proportion of denitration scale and denitration efficiency by provinces in 2015

2 结果与讨论

2.1 大气 NO_x 排放量

2010 ~ 2015 年我国水泥工业 NO_x 排放量变化

范围为 168 ~ 199 万 t，自 2010 年的 169 万 t 增加到 2012 年的 199 万 t，达到排放峰值，2012 年的排放量测算结果与 Hua 等^[17]的研究结果基本一致。自 2012 年水泥工业 NO_x 排放量开始逐年下降，到

2015 年与 2010 年基本持平, 为 168 万 t, 未完成《节能减排“十二五”规划》中水泥工业 NO_x 减排 12% 的目标. 水泥工业的单位产品排放强度范围为 $1.26 \sim 1.55 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 自 2010 年的 $1.52 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 增加到 2012 年的 $1.55 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 随后逐年下降, 到 2015 年为 $1.26 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 较 2010 年下降 17% (见图 5).

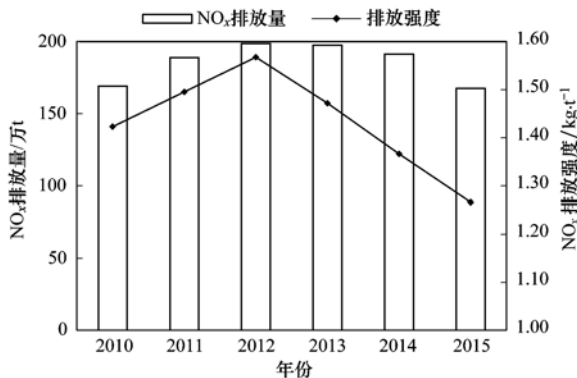


图 5 2010~2015 年水泥工业 NO_x 排放量变化趋势

Fig. 5 NO_x emissions from cement industry in China during 2010-2015

“十二五”水泥工业 NO_x 排放量呈现先升高后下降的趋势主要是由于以下 3 个原因: ①水泥工业熟料产量整体呈现上升趋势, 2015 年相比 2010 年增加了 20%; ②水泥工业技术水平不断提升, 立窑等落后产能基本被淘汰, 按照排放系数估算, 新建的新型干法水泥窑若配备先进的脱硝设施且高效运转, 排放水平仍是立窑的 2.5~3 倍^[8], 导致“十二五”初期 NO_x 排放量不断增加^[18]. ③2013 年后 GB

4915-2013 对水泥企业 NO_x 排放控制提出了更高要求, 标准中对 NO_x 的控制要求已经达到了国际最先进的水平^[19, 20]. 《“十二五”节能减排综合工作方案》也将 NO_x 排放列为约束性控制指标, 要求水泥工业开展减排工作. “十二五”期间新建水泥窑全部采用了低氮燃烧技术和安装了脱硝设施, 大批现役水泥窑在 2013 和 2014 年集中开展了低氮燃烧技术及脱硝技术改造, 脱硝机组安装比例大幅提高 (见图 3 和图 4), 到 2015 年底, 水泥窑脱硝比例达 92.3%. 水泥工业 NO_x 排放控制效果开始显现, 到 2015 年相比 2012 年峰值排放量下降 16%, 排放强度下降 19%.

2.2 大气 NO_x 排放的空间分布

2.2.1 分地区排放量

2010~2015 年我国水泥工业 NO_x 排放地区分布不平衡 (见图 6). 2015 年水泥工业 NO_x 年排放量最高的省份依次为安徽、四川、河南、湖南、云南和山东, 约占全国排放总量的 40%, 年排放量均在 9 万 t 以上. 排放量最低的省份为上海、天津和北京, 年排放量均在 1 万 t 以下. 本研究还分析了各省水泥工业 2010~2015 年 NO_x 排放的变化趋势, 相比于 2010 年, 安徽作为水泥熟料生产大省, “十二五”期间 NO_x 排放量基本没有变化, 13 个省排放量呈上升趋势, 上升最大的 5 个省为贵州、新疆、海南、云南和湖南, 升幅在 45% 以上. 17 个省排放量呈下降趋势, 下降最大的省市为北京、天津、河北和辽宁, 降幅在 40% 以上.

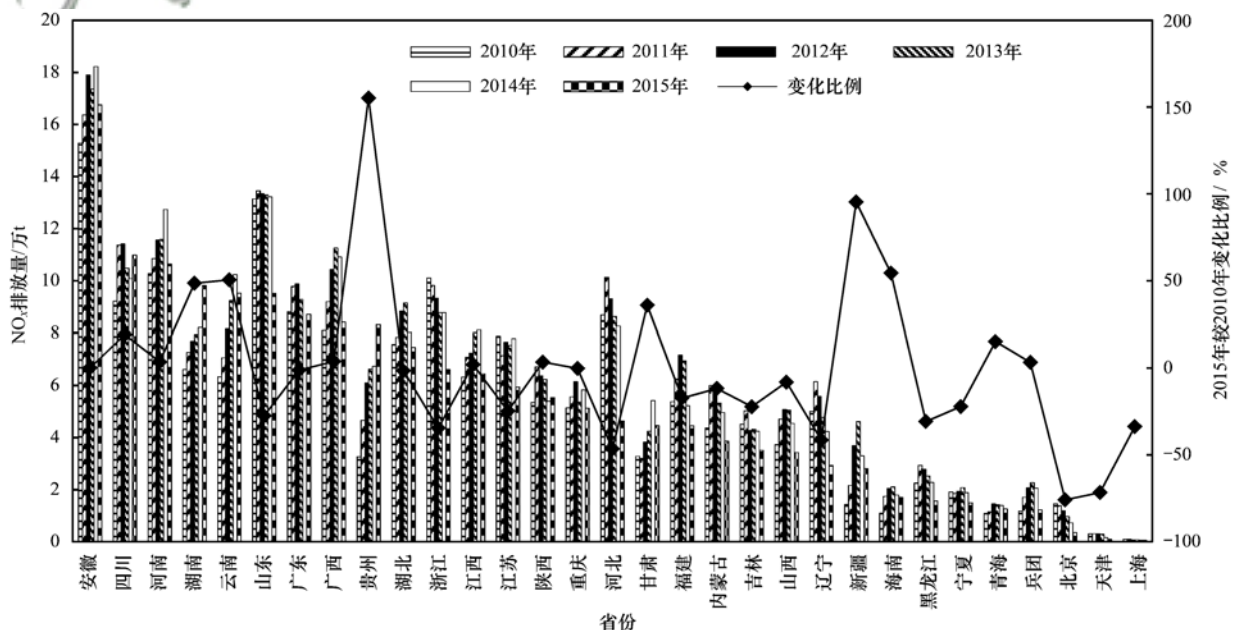


图 6 2010~2015 年各省水泥工业 NO_x 排放量的变化趋势

Fig. 6 NO_x emissions from the cement industry by provinces during 2010-2015

2010 ~ 2015 年各地区水泥工业 NO_x 排放水平波动与水泥熟料波动趋势基本一致(见图 7), 熟料产量增幅较大的省份为贵州、兵团、新疆和甘肃, 他们的排放量增幅也位居前列, 这与 Cui 等^[21]研究的我国西部地区 NO_x 排放量整体增加较快的结果一致. 山西、湖南、四川熟料产量变化

幅度小于 NO_x 排放量变化幅度, 这主要是由于水泥生产工艺结构的转变, 2010 年 3 个省份的立窑熟料产量占比较大, 基本都在 30% 以上, 2015 年立窑基本全部被淘汰, 而且已建脱硝设施的脱硝效率相对不高(见图 3), 导致 NO_x 增长幅度高于熟料增长幅度.

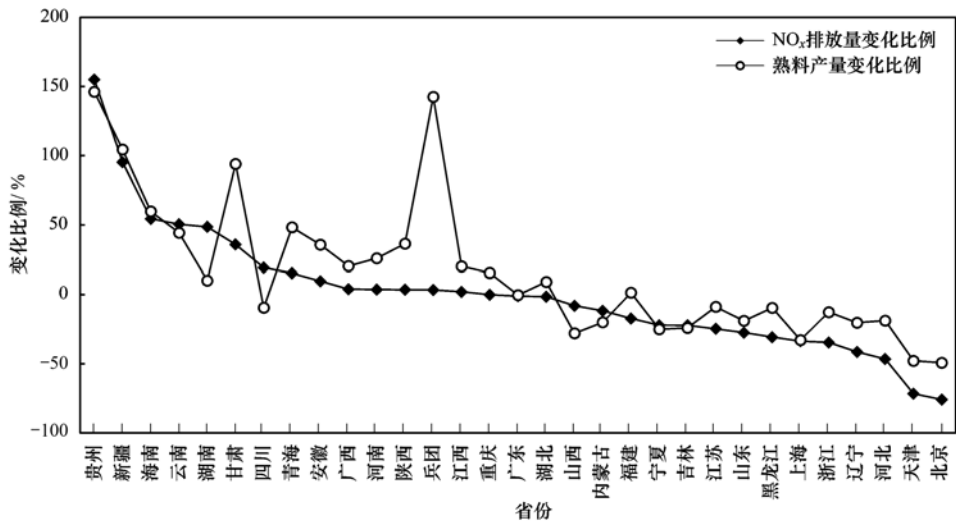


图 7 2010 ~ 2015 年各地区水泥工业 NO_x 排放量与熟料产量的变化趋势

Fig. 7 Growth rate of productions and NO_x emissions of the cement industry by provinces during 2010-2015

2.2.2 分地区排放强度

由于各省水泥生产工艺和污染治理水平的差异, 水泥工业单位熟料 NO_x 排放强度存在明显差异(见图 8). 2015 年 14 个省份水泥工业 NO_x 排放强度高于全国平均水平, 其中上海、内蒙、山西、新疆、湖南、云南、四川 NO_x 排放强度在 1.50 kg·t⁻¹ 以上. 与 2010 年相比, 湖南、四川、山西、内蒙、云南、贵州和吉林这 7 省 NO_x 排放强度有所升高, 这主要与水泥生产工艺结构的转变及当地水泥工业的污染控制水平较低相关.

2.3 不同生产能力的排放特征

2015 年我国新型干法水泥生产线共 1 827 条. 水泥装备水平以及企业管理能力都对 NO_x 排放有不同程度的影响^[22]. 将水泥生产线按照规模划分为 $\geq 4\,000\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $2\,000 \sim 4\,000\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ (不含)、 $< 2\,000\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 这 3 种, 全国不同省份 3 种规模水泥熟料生产企业 NO_x 排放情况见图 9 所示. 规模 $\geq 4\,000\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 的熟料生产线产量占比和 NO_x 排放量占比均最大, 分别为 68.5% 和

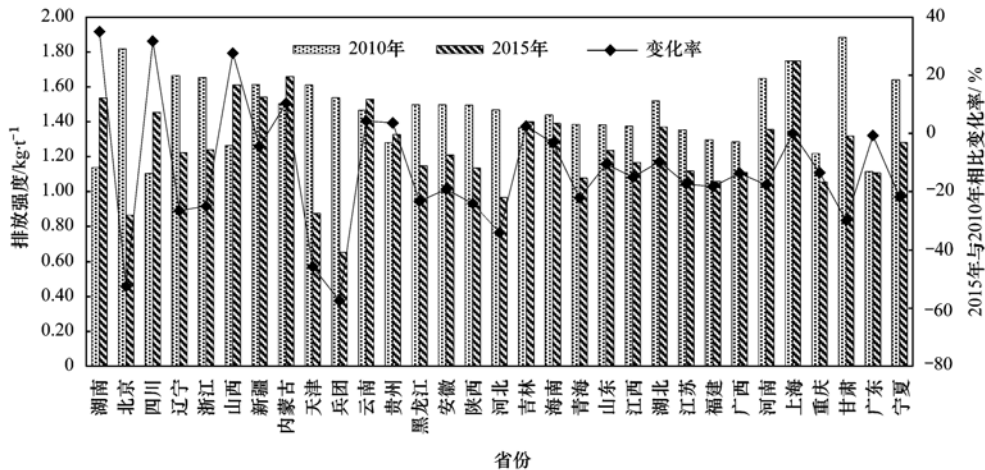


图 8 2010 ~ 2015 年各地区水泥工业 NO_x 排放强度变化

Fig. 8 NO_x emissions factors of the cement industry by provinces during 2010-2015

66.5%, NO_x 排放量为 112 万 t, 其次为规模 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (不含) 的熟料生产线, 熟料生产线产量占比和 NO_x 排放占比分别为 28.8% 和 30.6%, 规模 $< 2\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的熟料生产线产量和 NO_x 排放占比最小, 分别为 2.7% 和 2.9%。从 3 种规模的排放强度来看, $2\,000 \sim$

$4\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (不含) 和 $< 2\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的排放强度基本一致, 约为 $1.37 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 规模 $\geq 4\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的熟料生产线排放强度约为 $1.24 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 与它们的产污系数相比(表 1), 不同生产规模的水泥熟料生产线排放强度降幅基本一致, 说明不同规模的生产线污染控制水平相差不大。

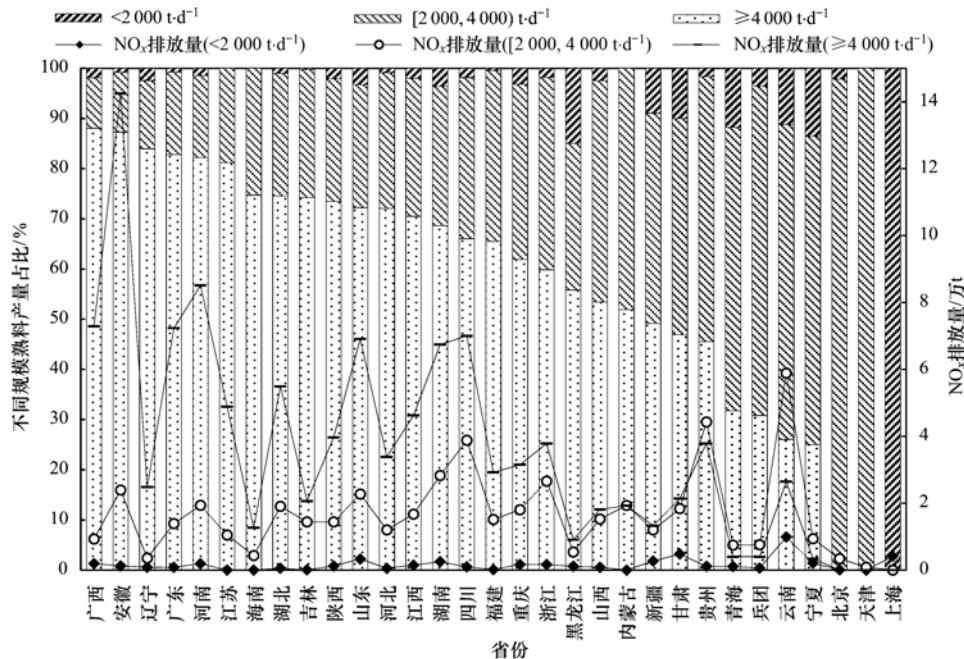


图9 2015年全国各省不同规模新型干法水泥熟料产量占比及 NO_x 排放量

Fig. 9 Production ratio of pre-calcining kilns with different scales and NO_x emissions by provinces in 2015

2.4 不确定性分析

排放量测算的相关参数的准确性不可避免地给排放量的估算带来了不确定性。该研究的不确定性有:①第一次全国污染源普查工业源-水泥制造业产排污系数是根据大量实测数据得到的经验系数,并考虑了生产工艺、规模等级等因素,但具体到各个水泥厂还受到生产工况、企业管理水平、原材料及清洁生产水平等因素的影响,排放因子与实际排放仍存在差异,存在一定的不确定性^[23-25];②该研究所采用的 NO_x 去除率主要是根据国家历年总量核查核定的效率,由于核查过程中部分企业不完全符合总量减排要求,包括减排台账的规范性、治污设施的运转稳定性较差等,综合脱硝效率的认定可能过于严格,会给部分机组 NO_x 的排放量测算带来一定的偏差。

3 结论与建议

(1)“十二五”期间水泥行业熟料产量呈现上升态势,2015年相比2010年增加了20%, NO_x 排放

量基本持平,大气 NO_x 控制水平的提高使水泥工业大气 NO_x 排放强度由2010年的 $1.52 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 下降至 $1.26 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

(2)我国水泥工业大气 NO_x 排放量的地理分布不均衡,2015年安徽、四川、河南、湖南、云南、山东是排放量最大的省份,占全国排放总量的40%,上海、天津和北京是排放量最低的省份,年排放量均在1万t以下。与2010年相比,17个省排放量呈下降趋势,下降最大的省为北京、天津、河北和辽宁,降幅在40%以上,各省水泥熟料产量、 NO_x 排放控制技术水平等是影响排放量的主要因素。

(3)随着我国水泥生产技术的不断提升,环境管理水平日益增强。当前,规模 $\geq 4\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的熟料生产线产量占比和 NO_x 排放量占比均最大,分别为68.5%和66.5%, NO_x 排放量为112万t,单位熟料 NO_x 平均排放强度最低。

(4)我国水泥工业 NO_x 控制的重点应该放在环境行为较差的小规模水泥窑上,同时提高脱硝设施的整体运行管理水平,使已有的治污设施切实发挥

减排效益。此外应根据 NO_x 排放的区域特征, 加强安徽等排放大省及贵州、四川等排放强度较高的省份的控制力度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 崔素萍, 叶文娟, 兰明章, 等. 水泥窑炉 NO_x 形成机理及处理技术[J]. 中国水泥, 2010, (5): 55-59.
Cui S P, Ye W J, Lan M Z, *et al.* Formation mechanism and disposal of NO_x in the kiln[J]. China Cement, 2010, (5): 55-59.
- [3] 李相国, 马保国, 胡贞武, 等. 烧成系统 NO_x 的形成及排放控制技术介绍[J]. 水泥工程, 2007, (1): 39-41.
Li X G, Ma B G, Hu Z W, *et al.* NO_x formation and emission control technology in the coal burning system [J]. Cement Engineering, 2007, (1): 39-41.
- [4] Akama H, Matsushita K. Recent lean NO_x catalyst technologies for automobile exhaust control[J]. Catalysis Surveys from Asia, 1999, **3**(2): 139-146.
- [5] 嵇鹰, 田耀鹏, 徐德龙. 水泥工业 NO_x 排放控制探讨[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, **41**(3): 397-403.
Ji Y, Tian Y P, Xu D L. Comments on NO_x emission abatement in cement industry [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2009, **41**(3): 397-403.
- [6] 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]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D21): 8809.
- [7] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa K, *et al.* An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, **7**(16): 4419-4444.
- [8] Lei Y, Zhang Q, Nielsen C, *et al.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(1): 147-154.
- [9] 王永红, 薛志刚, 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.
- [10] 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.
- [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] 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.
- [13] 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.
- [14] 凌庭生, 张长乐, 周金波, 等. 水泥行业脱硝技术方案的评估与选择[A]. 见: 2012 年中国水泥技术年会暨第十四届全国水泥技术交流会论文集[C]. 柳州: 建筑材料工业技术情报研究所, 中国硅酸盐学会科普工作委员会, 2012. 109-122.
- [15] Fan W Y, Zhu T L, Sun Y F, *et al.* Effects of gas compositions on NO_x reduction by selective non-catalytic reduction with ammonia in a simulated cement precalciner atmosphere [J]. Chemosphere, 2014, **113**: 182-187.
- [16] 唐君实, 宋蕾, 高攀, 等. SNCR 应用于水泥窑氮氧化物控制的氨氧化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, **51**(6): 831-835.
Tang J S, Song Q, Gao P, *et al.* NH₃ oxidation using SNCR to control cement kiln NO_x [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, **51**(6): 831-835.
- [17] 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.
- [18] 蒋春来, 杨金田, 金玲, 等. “十二五”水泥行业 NO_x 总量减排形势分析及对策探讨[J]. 环境与可持续发展, 2012, **37**(6): 26-32.
Jiang C L, Yang J T, Jin L, *et al.* Tendency analysis and countermeasures for total emission control of NO_x in cement industry during “the twelfth five-year” period [J]. Environment and Sustainable Development, 2012, **37**(6): 26-32.
- [19] 江梅, 李晓倩, 纪亮, 等. 国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4752-4758.
Jiang M, Li X Q, Ji L, *et al.* A comparative study on domestic and foreign emission standards of air pollutants for cement industry [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4752-4758.
- [20] 江梅, 李晓倩, 纪亮, 等. 我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4759-4766.
Jiang M, Li X Q, Ji L, *et al.* Revision process and thinking of emission standard of air pollutants for cement industry [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4759-4766.
- [21] Cui Y Z, Lin J T, Song C Q, *et al.* Rapid growth in nitrogen dioxide pollution over Western China, 2005-2013 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(10): 6207-6221.
- [22] 丁平华, 田学勤, 郎营. 基于减排形势和技术应用分析的水泥工业污染减排研究[J]. 环境保护, 2014, **42**(21): 46-50.
Ding P H, Tian X Q, Lang Y. The research on pollutants emission reduction of cement industry by analyzing it's

- developmental status and technique applying[J]. *Environmental Protection*, 2014, **42**(21): 46-50.
- [23] 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.
- [24] Zhao Y, Nielsen C P. The effects of recent control policies on trends in emissions of anthropogenic atmospheric pollutants and CO₂ in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(2): 487-508.
- [25] Zhao Y, Zhou Y D, Qiu L P, *et al.* Quantifying the uncertainties of China's emission inventory for industrial sources: from national to provincial and city scales[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 207-221.

欢迎订阅 2019 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,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 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。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

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:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)