

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价

耿静^{1,2}, 任丙南¹, 吕永龙², 王铁宇²

(1. 三亚学院海南省生态文明研究基地, 三亚 572022; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 结构减排是我国污染物减排的主要措施, 是海南省推进产业结构升级、实现建成“全国生态文明建设示范区”的必然选择. 为评价该政策产生的环境效应, 采用海南省 2006~2013 年“十一五”和“十二五”期间淘汰落后产能数据, 运用排放因子法, 估算各年份由于淘汰水泥、炼铁、炼钢、造纸和实心黏土砖落后产能带来的多种污染物协同减排效应. 结果表明, 研究期间氮氧化物(NO_x)、二噁英类污染物、大气汞累计削减量分别达到 2 826.0 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、10 462.5 $\text{mg}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 280.8 $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$. 淘汰落后产能对海南省 NO_x 减排的影响不是很显著, 但对降低新型污染物二噁英类和大气汞的排放起到有效的源头控制作用, 累计效应显著. 该研究为评估淘汰落后产能政策对常规污染物和新型污染物协同控制效应提供了方法和思路.

关键词: 落后产能; 氮氧化物; 二噁英类; 汞; 协同减排; 海南省

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2401-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.051

Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province

GENG Jing^{1,2}, REN Bing-nan¹, LÜ Yong-long², WANG Tie-yu²

(1. Hainan Research Center for Ecological Civilization, Sanya University, Sanya 572022, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Industrial structural adjustment plays a significant role in achieving the pollution reduction goals in China. It is an optimal choice for Hainan Province to promote industrial structure upgrading and build a “national demonstration area for ecological civilization construction”. The emission factor method was used to estimate co-benefits of pollution emission reduction through closure of backward production capacities as a result of industrial structural adjustment policies. The results showed that in Hainan Province the cumulative reduction emissions of NO_x , dioxins and mercury were 2 826.0 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 10 462.5 $\text{mg}\cdot\text{a}^{-1}$ and 280.8 $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ respectively from 2006 to 2013, taking into consideration of cement, iron & steel, paper making and solid clay bricks sectors. The impact of eliminating backward production capacities on reductions of NO_x was not remarkable, but the impacts on control over dioxins and mercury emissions were significant. The paper provided a new approach for estimating co-benefits from reducing the conventional pollutants and emerging pollutants.

Key words: backward production capacity; NO_x ; dioxin; mercury; pollution emission reduction; Hainan Province

结构减排、工程减排、监督管理减排是我国实现污染物减排的三项主要措施. 结构减排是通过调整经济结构、产业结构和生产结构来实现污染物减排, 主要包括抑制高耗能、高排放行业过快增长, 加快淘汰落后生产能力, 推动传统产业的技术改造等手段.

结构减排已经被证明是我国实现“十一五”环境保护目标的有效手段^[1]. 2007 年, 全国化学需氧量(COD)和二氧化硫(SO_2)排放总量分别下降 3.14% 和 4.66%, 其中淘汰落后产能对 COD 和 SO_2 减排的贡献率分别约为 25% 和 30%^[2]. 2008 年和 2009 年的《中国环境状况公报》指出, 通过淘汰关停落后产能, 全国新增 COD 减排量分别为 34 万 t 和 26.3 万 t, SO_2 减排量分别为 81 万 t 和 84.2 万 t^[3]. 2011 年, 工业和信息化部又下达了“十二五”期间工

业领域 19 个重点行业淘汰落后产能目标任务, 淘汰落后产能被提到更重要的日程上, 成为实现“十二五”环境目标的重要举措.

海南省作为我国第一个生态示范省, 多年来生态环境质量持续保持全国领先水平, 优良的生态环境成为海南的金字招牌. 2009 年 12 月出台的《国务院关于推进海南国际旅游岛建设发展的若干意见》从战略定位上提出把海南建设成为“全国生态文明建设示范区”, 为全国生态文明建设当范例, 谱写美丽中国海南篇章. 但海南省经济增长方式还较粗放, 污染物减排压力较大. 因此, 以淘汰落后产能

收稿日期: 2015-12-29; 修订日期: 2016-03-04

基金项目: 海南省自然科学基金项目(413129); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-12)

作者简介: 耿静(1980~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境管理, E-mail: smallgeng@163.com

为手段的结构减排是海南省推进产业结构升级、提高经济增长质量和效益的重要举措,是完成国家下达的节能减排任务的有效手段,是实现建成“全国生态文明建设示范区”的必然选择。

海南省在“十一五”和“十二五”期间,不仅完成了国家下达的淘汰落后产能任务,还结合实际,主动增加了造纸和实心黏土砖行业的淘汰任务,淘汰落后产能所带来的减排效应较为突出。而准确、全面地评价关闭落后产能所产生的环境效应可以帮助人们认识政策的积极效应,同时可以为今后政府制定政策、企业更好地执行政策提供有力的支撑。目前评估该项政策所产生的环境效应时未将减排的新型污染物纳入评价指标体系,而低估了政策的效益,因此,全面综合地评价该政策产生的环境效应,核算其对多种污染物协同减排效应是本文的主要内容。

国际组织和学者对“协同效应”的研究与评价主要集中在分析地区采取减少大气污染物(如 COD、SO₂、NO_x)和温室气体排放的一系列政策措施所产生的所有正效益^[4~6]。“中日污染减排与协同效应研究示范项目”就四川省攀枝花市和湖南省湘潭市开展“十一五”大气污染物总量减排措施对温室气体减排的协同效应做了定量评价^[7]。而对环境政策措施产生的常规大气污染物和新型污染物协同控制效应进行的研究较少。因此,本研究采用排放系数法对海南省“十一五”和“十二五”期间淘汰产能政策协同减排的 NO_x、二噁英类持久性有机物和重金属汞进行估算。NO_x是“十二五”国家污染物总量控制指标之一,且为新增指标,其排放量的控制对完成“十二五”减排任务具有重要意义;二噁英类持久性有机污染物的控制和削减是我国履行《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》的难点和重点^[8];汞在《重金属污染综合防治“十二五”规划》中被列为重点防控的重金属污染物。因此,选取上述3类典型污染物估算淘汰落后产能带来的污染物减排协同效应具有重要意义。

1 海南省淘汰落后产能情况

根据海南省工业和信息化厅提供的数据资料显示,海南省在“十一五”期间和“十二五”期间淘汰落后产能情况见表1。

从淘汰落后产能的行业看,落后产能主要集中在水泥行业。水泥产业是海南省重要的工业支柱产业,产业关联度高,产品覆盖面广,对促进全省经济增长有举足轻重的作用,但装备水平还比较低,对生

态环境造成的压力较其它工业行业突出。“十一五”期间累计淘汰水泥产能329.8万t,“十二五”2011~2013年共淘汰水泥产能(熟料及磨机)314.0万t。而据海南省统计数据显示,2012年海南省规模以上的水泥企业的水泥产量是1672万t。可见,从2006年开始到目前,海南省淘汰落后水泥的累计产能约占到2012年规模以上企业水泥产量的40%。到2013年年底,海南省新型干法窑水泥熟料比重达到了100%,落后产能已经全部淘汰。此外,实心黏土砖企业是关停落后产能较为突出的行业,在此期间海南省制定发布了《海南省人民政府办公厅关于淘汰实心黏土砖规范新型墙体材料行业发展的通知》(琼府办[2010]159号),2010年和2011年分别有199家和66家实心黏土砖生产企业列入了海南省淘汰落后产能责任企业名单,累计淘汰实心黏土砖产能约10亿块。

从淘汰企业的生产线设备来看,水泥企业淘汰的基本是小型机立窑生产线,平均产能15.6万t·a⁻¹;炼铁企业淘汰的生产线是两座50m³高炉;炼钢企业淘汰的生产线主要是进行废钢冶炼产能小于10万t·a⁻¹的中频感应电炉;造纸企业淘汰的均是产能小于1万t·a⁻¹的造纸机及制浆设备,其中以幅宽1575mm和1600mm造纸机为主;实心黏土砖生产均是就地取材,通过毁损林地、耕地在未采取环保措施的简陋窑内进行烧制,能耗高、污染相当严重。

从淘汰落后时段来看,淘汰落后产能主要集中在2010~2012年,相关政策也是在这一时期集中颁布。为贯彻落实《国务院关于进一步加大淘汰落后产能工作的通知》(国发[2010]7号)精神,海南省政府2010年制定出台了《海南省人民政府关于进一步加强淘汰落后产能工作的通知》(琼府[2010]44号),进一步明确了海南省淘汰落后产能目标、工作保障措施、约束和激励机制。此外,海南省物价局、省工业和信息化厅发布《关于扩大差别电价政策实施范围的通知》(琼价价管[2010]380号),对落后产能实施差别电价,在现行目录电价基础上淘汰类每千瓦时加价0.80元;海南省财政厅、省工业和信息化厅、省发改委发布了《海南省淘汰落后产能资金管理暂行办法》(琼财建[2011]2273号),制定了淘汰落后产能奖励办法。海南省工业和信息化厅从2010年起,每年分批公布淘汰落后产能企业名单。淘汰落后产能作为海南省“十二五”节能减排调整优化产业结构的重要手段,在《海南省“十二五”主要污染物总量减排工作

方案》(琼府办[2011]232号)和《海南省“十二五”节能减排总体实施方案》(琼府[2012]25号)中均确定了淘汰落后产能的工作任务。

截至目前,列入国家淘汰计划的高能耗高污染落后工业企业的淘汰任务海南省已基本完成。根据《海南省2014~2015年节能减排低碳发展行动方

案》(琼府办[2014]161号),海南省“十二五”收官之年在结构减排方面的主要任务是严禁增加过剩产能,加快发展低能耗低排放产业,调整优化能源消费结构。对于落后产能主要是坚决查处已经淘汰的落后产能死灰复燃,完成落后电机、锅炉等重点设备淘汰任务。

表1 海南省关停落后产能情况(2006~2013年)

Table 1 Phase-out of backward production capacities in Hainan Province from 2006 to 2013

行业	项目	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	合计
水泥	熟料产能/万t	18.8	38.0	45.0	57.0	171.0	78.0	8.0	0.0	415.8
	企业数(个)	2	3	2	3	11	5	1	0	27
	磨机产能/万t	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	120.0	108.0	0.0	228.0
	企业数(个)	0	0	0	0	0	7	7	0	14
炼铁	产能/万t	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
	企业数(个)	0	0	0	0	1	0	0	0	1
炼钢	产能/万t	0.0	6.0	40.0	0.0	30.0	8.0	0.0	0.0	84.0
	企业数(个)	0	1	1		1	1	0	0	4
造纸	产能/万t	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.1	0.0	4.6	7.8
	企业数(个)	0	0	0	0	3	2	0	2	7
实心黏土砖	产能/万块标砖	0	0	0	0	50 000	51 080	1 500		102 580

2 协同减排效应评价方法

本研究采用排放系数法对污染物协同减排效应进行估算。根据关停企业的产能及污染物排放因子,估算了海南省“十一五”和“十二五”期间关停落后产能减排的 NO_x 、二噁英类污染物和重金属汞,并详细论述了该政策对海南省此类污染物减排的贡献及对全国评估淘汰落后产能污染物协同减排的意义。

排放因子的选取对评价结果产生较大影响。因子的选取主要根据关停企业的规模、生产设备类型来选择,其次以该行业污染物排放估算中使用较普遍的因子为计算依据,下文对因子的选取做了阐述。

2.1 NO_x 排放因子的选择

国家对 NO_x 总量减排核算制定了核算细则,并针对不同行业、不同工艺提出了建议性排放系数以支撑核算。因此,在对 NO_x 削减进行估算时,本研究为了方便将削减量和地区 NO_x 排放量进行比较来说明政策效应,选用的是国家 NO_x 排放核算时采用的因子,以《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010修订)》中提出的排放因子为主。表2列出了不同行业生产过程排放系数的选取情况。需要说明的是,表2的因子仅反映工业生产过程中 NO_x 削减量。而与之配套的锅炉设备,由于锅炉的类型、燃烧方式等没有公布的资料,因此没有核算该部分减排的污染物。

表2 淘汰落后产能行业生产过程 NO_x 排放因子选取情况

Table 2 Selection of NO_x emission factors of backward production capacities

行业	排放因子	针对工艺	文献
水泥(熟料)	$0.243 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$	立窑水泥生产,规模 $\geq 10 \text{ 万t}\cdot\text{a}^{-1}$	[9]
炼铁	$0.192 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$	高炉法炼铁,规模 $< 350 \text{ m}^3$	[9]
炼钢	$1.16 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$	粗钢生产	[10]
造纸	$1.5 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$	制浆和造纸	[11]
实心黏土砖	$6.874 \text{ kg}\cdot(\text{万块标砖})^{-1}$	烧结类砖瓦及建筑砌块产品用砖瓦窑(轮窑)工艺	[9]

2.2 二噁英类排放因子的选择

在估算淘汰落后产能削减的二噁英类排放时,主要采用的是联合国环境规划署(UNEP)发布的《二噁英和呋喃排放识别和量化标准工具包2

版》^[12](UNEP二噁英类《工具包》)和全国持久性有机污染物统计年报制度中提到的二噁英类排放因子相结合的方法。如果两者差别较大,就采用已发表的学术期刊中相似生产线所测数据。对于实心砖、

炼铁、炼钢和制浆造纸企业, UNEP 二噁英类《工具包》所给的排放因子和我国在进行二噁英类年报统计制度选用的排放因子一致。

而水泥行业,我国目前主要对大型干法水泥生产线二噁英类排放进行了报道^[13],针对小型机立窑水泥生产线二噁英类排放的报道较少。UNEP 二噁英类《工具包》建议水泥立窑生产二噁英类向大气的排放因子是 $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$,我国在进行年报统计制度选用的普通立窑和机械立窑二噁英类向大气的排放因子是 $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 。2011 年美国劳伦斯伯克利国家实验室发布的报告中,报道了其在山东一家水泥企业的立窑生产线检测的烟气中二噁英类排放数值为 $0.518 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[14],年产小于 10 万 t 的立窑工艺中水泥熟料煅烧过程排放的烟气量约为 $3\ 275 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ ^[15], $0.518 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 的排放浓度折算成排放因子约为 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 。本课题组 2010 年发表文章对全国淘汰落后水泥产能二噁英类减排估算时采用的是 $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 的排放因子^[16],由于文献[14]实测数据的报道,课题组 2015 年发表的文章对全国 2006 ~ 2013 年淘汰落后水泥产能二噁英类减排效应分析时采用的是 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 的排放因子^[17]。本研究在估算水泥企业的减排量时依然选取 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 进行估算。水泥、实心砖、炼铁和炼钢企业,由于二噁英类的排放介质主要是废气,因此这四类企业是计算为向大气的减排。制浆造纸行业的排放介质主要是废水,因此制浆造纸企业是计算为向水体的减排。表 3 列出了估算二噁英类削减量时,不同行业排放因子的选取情况和针对的生产线。

表 3 淘汰落后产能行业二噁英类排放因子选取情况

Table 3 Selection of dioxin emission factors of backward production capacities

行业	排放因子(以 TEQ 计)/ $\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	针对工艺	文献
水泥(熟料)	1.7(向大气)	立窑水泥生产	[14]
炼铁	0.1(向大气)	配备良好尾气处理系统的高炉	[12]
炼钢	3(向大气)	电弧炉炼钢,清洁废料,配有布袋除尘器	[12]
实心黏土砖	0.2(向大气)	操控较差,没有尾气净化系统的小型砖窑	[12]
造纸	4.5(向水体)	CEH 三段漂白,自制硫酸盐浆	[12]

2.3 重金属汞排放因子的选择

大气汞主要有 3 种形态:气态元素汞(GEM 或 Hg^0)、气态二价汞(RGM 或 Hg^{2+})和颗粒态汞(TPM 或 Hg_p)。其中,GEM 和 RGM 合称为气态总汞(TGM)。此处计算大气汞排放削减时采纳的是总排放因子。排放因子选用该行业排放估算中普遍使用较多的排放因子为依据。水泥行业,针对立窑生产线汞排放的实测数据较少,更多实测数据主要是围绕新型干法水泥窑展开^[18,19]。张乐^[20]测试显示立窑加湿式洗涤除尘器水泥生产线汞排放因子是 $140\ 489.8 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$,而立窑加布袋除尘器水泥生产线汞排放因子是 $6\ 915.3 \mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 。王书肖等^[21]对我国非燃煤大气汞排放量估算时,对全国水泥工业大气汞排放量估算采用的是 $0.040 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ (剔除了燃煤排放汞)的排放因子。AMAP/UNEP^[22]在估算我国水泥大气汞排放时采用的是 $0.087 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 的排放因子。本研究为和文献[21]的数据比较来说明淘汰落后产能对减少地区大气汞排放的影响,选用文献[21]提到的排放因子 $0.040 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 计算水泥生产过程汞的减排量。我国在计算水泥行业大气汞时排放因子的选取比发达国家要低,如德国、日本和美国分别是 0.273 、 0.074 和 $0.146 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$,这可能的原因是我

国原料石灰石汞的含量虽然存在部分地区偏高,但是因为大部分地区的石灰石汞含量很低,使得我国石灰石汞含量的平均值要偏低^[19]。

文献[21~23]在估算非燃煤大气汞排放量时针对钢铁冶炼统一选取 $0.04 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 排放因子,本研究也选用了该排放因子。针对砖窑企业,国内没有相应的测试数据,UNEP 发布的《汞排放识别和量化工具包》中也没有为该类别建立默认排放因子,Tikul 等^[24]对泰国月生产能力为 $2\ 900 \text{ m}^2$ 的中型瓷砖企业的瓷砖生产过程大气污染物排放进行测试,数据显示大气汞排放为 $0.0323 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 。尽管我国实心黏土砖生产工艺落后,污染治理投入很少,砖瓦窑炉烟气一般均未进行治理,但由于汞排放因子的缺乏,此处选用 Tikul 等^[24]所测数据 $0.03 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 估算实心黏土砖企业大气汞削减量。造纸企业尽管由于锅炉燃煤也会造成大气汞的排放,但由于不是重点排放源,因此不计算该行业的削减量。

3 淘汰落后产能污染物协同减排效应

3.1 NO_x 排放削减估算及影响

随着经济的快速发展和能源消费的增加,我国 NO_x 的排放量在 2000 ~ 2010 年显著上升,排放量由

2000 年的 1 181 万 t 上升到 2010 年的 2 433 万 t^[25]. “十一五”期间 NO_x 排放的快速增长部分抵消了我国在 SO₂ 减排方面所付出的巨大努力^[26]. 因此, “十二五”期间国家将 NO_x 纳入总量减排指标体系, 制定区域和重点城市 NO_x 污染总量控制目标. NO_x 的排放在此期间得到了控制, 2014 年全国 NO_x 排放总量为 2 078 万 t, 较 2010 年下降 8.6%^[27]. 尽管 NO_x 的排放量有所控制, 但排放量仍远高于环境容量, 目前全国的排放超过环境容量 81%^[28].

根据表 2 所选排放因子和淘汰企业的落后产能, 2006~2013 年海南省关停落后产能带来的各年新增 NO_x 削减量见表 4, 共累计新增 NO_x 削减量 2 826.0 t. 文献[29]显示, 海南省工业 NO_x 排放为 66 830.52 t, 其中电力生产和水泥生产排放最多, 分别占到 46.6% 和 37.4%. 从数值上可以看出淘汰落后产能对降低海南省 NO_x 排放的作用不是很显著、贡献相对较低. 这主要是由于淘汰产能涉及量最高的水泥行业中, 淘汰的立窑生产系统的 NO_x 排放要明显低于新型干法水泥生产系统的排放^[9,30].

文献[9]建议新型干法水泥窑选取的 NO_x 排放因子(以熟料计)是 1.584 kg·t⁻¹ 和 1.746 kg·t⁻¹, 而立窑仅为 0.243 kg·t⁻¹. Hua 等^[31]研究 1980~2012 年水泥行业大气污染物排放变化趋势显示由于新型干法水泥比重的上升, 在 2000 年以后我国水泥行业每年氮氧化物排放增长显著上升, 而同时期的其它常规污染物如 SO₂ 和 PM_{2.5} 都呈现降低态势. Zhang 等^[32]在对 1995~2004 年 NO_x 进行估算时, 水泥行业 NO_x 排放强度取值(以燃煤计)由 1995 年 4.6 g·kg⁻¹ 提到高 2004 年的 7.4 g·kg⁻¹, 而同期的其它行业如电力、交通的排放强度均是下降的趋势. 因此, 和淘汰落后立窑生产线相比对产能较大的新型干法水泥窑生产线进行 NO_x 工程减排将会使水泥行业 NO_x 削减更为显著. 据报道, 2014 年海南省昌江县的 3 家大型水泥企业共 9 条生产线全部完成脱硝工程建设, 综合脱硝效率达到 40% 以上, 每年可实现 NO_x 减排量最高为 9 000 t^[33]. 可见, 海南省今后工业 NO_x 减排的重点应该是针对工业排放源实施降氮脱硝治理工程.

表 4 海南省淘汰落后产能新增 NO_x 削减量¹⁾/t·a⁻¹

Table 4 Reduction of NO_x by eliminating backward production capacities in Hainan province/t·a⁻¹

行业	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	合计
水泥	45.7	92.3	109.4	138.5	415.5	189.5	19.4	0.0	1 010.3
炼铁	0.0	0.0	0.0	0.0	19.2	0.0	0.0	0.0	19.2
炼钢	0.0	69.6	464.0	0.0	348.0	92.8	0.0	0.0	974.4
造纸	0.0	0.0	0.0	0.0	31.5	16.5	0.0	69.0	117.0
实心黏土砖	0.0	0.0	0.0	0.0	343.7	351.1	10.3	0.0	705.1
合计	45.7	161.9	573.4	138.5	1 157.9	649.9	29.7	69.0	2 826.0

1) 水泥行业生产过程仅熟料生产排放 NO_x, 因此计算时只考虑淘汰熟料产能

3.2 二噁英类排放削减估算及影响

郑明辉等^[34]估算我国 2004 年二噁英类的排放总量(以 I-TEQ 计)为 10.2 kg, 排放源主要集中在废弃物焚烧、钢铁生产、有色金属冶炼、发电和供热和含氯化学品的生产和使用方面. 任志远^[35]对 97 个编制了二噁英类排放清单的国家排放量进行比较研究得出我国是排放量最大的国家. 海南省为有效开展持久性有机污染物污染防治工作, 根据环境保护部《关于开展省级 POPs “十二五” 污染防治规划编制工作的通知》(环办[2009]84 号)的要求, 编制了《海南省持久性有机物污染物 (POPs) “十二五” 污染防治规划》, 其中针对二噁英类的减排和控制是规划的重要组成部分. 在规划中着重强调了通过产业结构调整, 淘汰落后产能减少二噁英类的排放. 根据文献[36], 海南省共有二噁英类排放企业

31 家, 涉及 7 类排放源. 2008 年海南省二噁英类总排放量为 4 366.89 mg (以 TEQ 计, 下同), 各类排放源按二噁英类排放量从大到小排列分别为废弃物焚烧、水泥生产、制浆造纸、铁矿石烧结、遗体火化、炼钢生产和铸铁生产.

根据表 3 所选排放因子和淘汰企业的落后产能, 2006~2013 年海南省关停落后产能带来的各年新增二噁英类削减量见表 5, 累计使二噁英类年排放量向大气减少约 10 111.5 mg, 向水体减少约 351.0 mg, 共计 10 462.5 mg. 累计减排量约是 2008 年海南省二噁英类总排放量 (4 366.89 mg) 的 2.4 倍, 关停落后产能对海南省二噁英类排放削减影响较为显著. 关停企业生产技术落后, 环境污染控制设施非常差, UNEP 二噁英类《工具包》中提供的排放因子显示, 技术落后的生产企业的排污系数要比同样产

能先进生产线的企业排污系数高达百倍以上。因此,如水泥立窑生产企业,尽管关停产能占行业产能

比重小,但其排放系数较新型干法水泥高很多,对行业和地区减少二噁英类排放均可起到重要作用。

表 5 海南省淘汰落后产能二噁英类削减量¹⁾/mg·a⁻¹

Table 5 Reduction of dioxins by eliminating backward production capacities in Hainan province/mg·a⁻¹

行业	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	合计
水泥	319.6	646.0	765.0	969.0	2 907.0	1 326.0	136.0	0.0	7 068.6
炼铁	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
炼钢	0.0	180.0	1200.0	0.0	900.0	240.0	0.0	0.0	2 520.0
实心黏土砖	0.0	0.0	0.0	0.0	250.0	255.4	7.5	0.0	512.9
合计(向大气)	319.6	826.0	1 965.0	969.0	4 067.0	1 821.4	143.5	0.0	10 111.5
造纸(向水体)	0.0	0.0	0.0	0.0	94.5	49.5	0.0	207.0	351.0

1) 水泥行业仅熟料生产排放二噁英,因此计算时只考虑淘汰熟料产能;实心黏土砖的每块重量按 2.5 kg 计算

3.3 重金属汞排放削减估算及影响

全球人为源无意大气汞排放主要来自化石燃料燃烧、有色金属冶炼、钢铁冶炼、水泥制造和石油精炼,我国大气汞排放量约占世界 30% 左右^[37]。2010 年我国人为源大气汞排放量估算约为 538 t,最主要的四大排放源是燃煤工业锅炉、燃煤电厂、有色金属冶炼和水泥生产^[38]。我国的重金属污染防治处于起步阶段,2011 年国务院批复了《重金属污染综合防治“十二”规划》,成为我国第一个“十二五”专项规划,包括汞在内的 5 种重金属成为此期间重点防控的对象,淘汰落后产能转变发展方式成为实现规划目标的主要手段。2013 年 1 月国家环境保护部印发了《汞污染防治技术政策》(征求意见稿)。2013 年 10 月 10 日包括我国在内的 87 个国家和地区签署了旨在控制和减少全球汞排放的《水俣公约》。海南省自 2012 年以来每年均印发重金属污染综合防治实施方案,安排部署重金属污染防治工作。

根据所选排放因子和淘汰企业的落后产能,2006~2013 年海南省关停落后产能带来的各年大气汞削减量见表 6,累计使大气汞年排放量减少约 280.8 kg。海南省工业污染源较少,大气汞排放量较低。蒋靖坤等^[39]估算我国 2000 年各省燃煤大气汞排放和王书肖等^[21]估算我国 2003 年非燃煤大气汞

排放量的数据显示,海南省均是大气汞排放量最低的省份之一,非燃煤大气汞排放量为 0.23 t。淘汰落后产能大气汞累计年削减量和海南省 2003 年非燃煤大气汞年排放量相比,达到其 1.2 倍,削减效应较显著。

由于本研究选取的水泥行业大气汞排放因子较保守,而水泥行业淘汰任务重,排放因子选取的差别对减排量的估算产生的影响较大。此处试采用 AMAP/UNEP 估算中国水泥汞排放时选用的排放因子 0.087 g·t⁻¹ 计算^[22],2006~2013 年海南省关停落后产能,累计使大气汞年排放减少量将提高为 476.2 kg。

Zhang 等^[38]最近更新了我国大气汞排放清单,据 2010 年的排放数据显示,海南和西藏是我国人为源大气汞排放最少的两个省份。雷育涛等^[40]曾对海南五指山大气 TGM 进行了连续 1 a 的观测,五指山的 TGM 含量与全球大气汞背景值相当,但 TGM 具有明显的季节性特征,高含量 TGM 明显是受大气汞的长距离迁移影响,广东地区方向气团贡献最大。Tseng 等^[41]对南海 GEM 的观测发现汞在季风作用下的长距离迁移是影响南海大气汞分布的主要因素。尽管海南省目前大气汞的浓度较低,但随着我国重金属污染综合防治工作的启动,应该未雨绸缪关注这类污染物排放问题。

表 6 海南省淘汰落后产能大气汞削减量¹⁾/kg·a⁻¹

Table 6 Reduction of mercury by eliminating backward production capacities in Hainan province/kg·a⁻¹

行业	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	合计
水泥	7.5	15.2	18.0	22.8	68.4	31.2	3.2	0.0	166.3
炼铁	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	4.0
炼钢	0.0	2.4	16.0	0.0	12.0	3.2	0.0	0.0	33.6
实心黏土砖	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	38.3	1.1	0.0	76.9
合计	7.5	17.6	34.0	22.8	121.9	72.7	4.3	0.0	280.8

1) 水泥行业计算时只考虑淘汰熟料产能;实心黏土砖的每块重量按 2.5 kg 计算

海南省尽管在生态环境建设方面已经走在了全国的前列^[42],但更多地是依赖于自身良好的生态基础和产业结构的优势. 要进一步完善国家的节能减排目标,实现建成“全国生态文明建设示范区”这个国家战略,面临压力还比较大. 淘汰落后产能对降低海南省新型污染物的排放起到了有效的源头控制作用,累计效应显著.

本研究在估算时,由于二噁英类污染物和汞的排放研究有限,尤其是针对落后生产工艺的排放研究更少. 不像 NO_x 排放估算时我国已经针对不同生产工艺、不同规模的企业给出了建议的排放因子. 因此排放因子的选取给估算的准确性造成了很大影响. 随着我国对此类污染物研究的深入,排放因子的建立将会不断更新与完善. 本研究通过对不同排放因子的比较和解释,均是希望估算能更具有合理性和科学性. 在今后的研究中,可以参照一些最新研究,将排放因子的选取以适当的区间范围表示,对应估算的减排量也使用区间范围表示,同时分析其不确定性^[37]. 这将是本研究今后待提高和完善的方面.

4 对全国淘汰落后产能政策污染物协同减排效应评价的启示

通过对海南省淘汰落后产能多种污染物协同减排的评价可以认识到淘汰落后产能对常规污染物和新型污染物均起到有效削减作用. 我国对二噁英类和重金属污染防治的原则之一就是充分发挥新型污染物与常规污染物削减控制的协同性,将其与节能减排和淘汰落后产能等工作统筹推进. 污染物协同减排可以降低环境保护的实施成本,优化资源配置. 评价淘汰落后产能政策污染物协同减排效应可以帮助人们清晰地认识到政策产生的综合效益,在资源投入有限的情况下,可以为更经济地选择减排方式,实现资金在结构减排、工程减排、监督减排的最优配置.

我国在“十一五”和“十二五”期间淘汰落后产能涉及行业近 20 个,淘汰力度之强、淘汰规模之大是空前的. 每个省份由于产业结构的差异,淘汰的行业、企业数量均有很大差别,因此,所产生的污染物协同减排效应也大相径庭. 虽然本次评价的海南省淘汰落后产能涉及行业少、淘汰产量较小,但为今后在全国范围内评价淘汰落后产能带来的污染物协同减排效应可以起到一定的示范作用,可以提高对该项政策污染物协同减排效应的认识,为建立协

同效应的量化评价做方法上的探索.

5 结论

利用排放因子法对海南省在“十一五”和“十二五”期间通过关停落后产能协同削减的 NO_x、二噁英类持久性有机污染物和重金属汞的排放量进行估算,并根据海南省此类污染物总体排放量分析了淘汰落后产能政策的减排影响力. 从估值上可以看出,淘汰落后产能对海南省 NO_x 减排的贡献相对较低,而对新型污染物二噁英类和重金属汞的减排贡献显著. 2006~2013 年淘汰落后产能二噁英类累计年削减量是 2008 年海南省二噁英类总排放量的 2.4 倍,大气汞累计年削减量是海南省 2003 年非燃煤大气汞年排放量的 1.2 倍. 淘汰落后产能对常规污染物和新型污染物的协同减排效应需予以重视.

参考文献:

- [1] Schreifels J J, Fu Y, Wilson E J. Sulfur dioxide control in China: policy evolution during the 10th and 11th Five-year Plans and lessons for the future[J]. *Energy Policy*, 2012, **48**: 779-789.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 主要污染物减排工作简报: 2008 年第 5 期 [EB/OL]. <http://zls.mep.gov.cn/gzjb/200805/P020080512463928659741.pdf>, 2008-04-18.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2008~2009 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://jes.mep.gov.cn/hjzl/zkgb>. 2009-06-09, 2010-06-03.
- [4] 胡涛, 田春秀, 李丽平. 协同效应对中国气候变化的政策影响[J]. *环境保护*, 2004, (9): 56-58.
- [5] Bollen J, Guay B, Jamet S, et al. Co-benefits of climate change mitigation policies: literature review and new results[R]. Paris: OECD Economics Department Working Papers, 2009.
- [6] Nemet G F, Holloway T, Meier P. Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, **5**(1): 75-82.
- [7] 中日污染减排与协同效应研究示范项目联合研究组. 污染减排的协同效应评价及案例研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [8] 国家履行斯德哥尔摩公约工作协调组办公室. 中华人民共和国履行《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》国家实施计划[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [9] 中国环境科学研究院. 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010 修订) 中册 [EB/OL]. http://www.cnemc.cn/publish/105/news/news_12893.html. 2011-01-07.
- [10] 中华人民共和国环境保护部. “十二五”主要污染物总量减排核算细则 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201206/t20120605_230944.htm, 2012-06-05.
- [11] 中国环境监测总站. 2006 年全国氮氧化物排放统计技术要求[R]. 北京: 中国环境监测总站, 2006.

- [12] UNEP. Standardized toolkit for identification and quantification of dioxin and furan releases (2nd ed.) [M]. Geneva: UNEP Chemicals Branch, 2005.
- [13] Li Y Q, Chen T, Zhang J, *et al.* Mass balance of dioxins over a cement kiln in China[J]. *Waste Management*, 2015, **36**: 130-135.
- [14] Price L, Hasanbeigi A, Zhou N, *et al.* Increasing energy efficiency and reducing emissions from China's cement kilns: Audit report of two cement plants in Shandong Province China (LBNL-5583E) [R]. Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [15] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染物普查工业污染源产排污系数手册(第七分册)[EB/OL]. <http://cpsc.mep.gov.cn>. 2008-02.
- [16] Geng J, Lü Y L, Wang T Y, *et al.* Effects of energy conservation in major energy-intensive industrial sectors on emissions of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in China [J]. *Energy Policy*, 2010, **38**(5): 2346-2356.
- [17] Lü Y L, Geng J, He G Z, *et al.* Industrial transformation and green production to reduce environmental emissions: Taking cement industry as a case[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, **6**(3-4): 202-209.
- [18] 苗杰, 张辰, 王相凤, 等. 水泥窑烟气汞排放特征的研究[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(4): 13-16.
- [19] 杨海. 中国水泥行业大气汞排放特征及控制策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [20] 张乐. 燃煤过程汞排放测试及汞排放量估算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [21] 王书肖, 刘敏, 蒋靖坤, 等. 中国非燃煤大气汞排放量估算[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2401-2406.
- [22] AMAP/UNEP. Technical background report for the global mercury assessment 2013 [R]. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme and Geneva: UNEP Chemicals Branch, 2013.
- [23] Pacyna E G, Pacyna J M, Steenhuisen F, *et al.* Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(22): 4048-4063.
- [24] Tikul N, Srichandr P. Assessing the environmental impact of ceramic tile production in Thailand[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, **118**(1382): 887-894.
- [25] Shi Y, Xia Y F, Lu B H, *et al.* Emission inventory and trends of NO_x for China, 2000-2020[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2014, **15**(6): 454-464.
- [26] 吴晓青. 我国大气氮氧化物污染控制对策[J]. *环境保护*, 2009, (16): 9-11.
- [27] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部发布 2014 年度全国主要污染物总量减排考核公告[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201507/t20150722_307020.htm, 2015-07-22.
- [28] 王金南, 蒋洪强, 刘年磊. 关于国家环境保护“十三五”规划的战略思考[J]. *中国环境管理*, 2015, **7**(2): 1-7, 95.
- [29] 海南省国土环境资源厅. 2013 年海南省环境统计公报[EB/OL]. <http://www.dloer.gov.cn/info/1297/19271.htm>, 2015-06-17.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Zhang Q, Steets D G, He K B, *et al.* NO_x emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22): D22306, doi: 10.1029/2007JD008684.
- [33] 黄能, 黄玉宁. 昌江三大水泥企业 9 条生产线完成脱硝工程建设最高每年减排氮氧化物 9000 吨[N]. *海南日报(数字版)*, 2014-10-19(A02).
- [34] 郑明辉, 孙阳昭, 刘文彬. 中国二噁英类持久性有机污染物排放清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [35] 任志远. 二噁英类排放源分析与典型工业城市区域污染研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [36] 海南省人民政府办公厅. 海南省持久性有机污染物(POPs)“十二五”污染防治规划[EB/OL]. <http://www.er-china.com/PowerLeader/html/2011/08/20110830143850.shtml>, 2011-08-30.
- [37] UNEP. Global mercury assessment 2013: sources, emissions, release and environmental transport [R]. Geneva: UNEP Chemicals Branch, 2013.
- [38] Zhang L, Wang S X, Wang L, *et al.* Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(5): 3185-3194.
- [39] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴焯, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 34-39.
- [40] 雷育涛, 刘明, 陈来国, 等. 海南五指山大气气态总汞含量变化特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 817-823.
- [41] Tseng C M, Liu C S, Lamborg C. Seasonal changes in gaseous elemental mercury in relation to monsoon cycling over the northern South China Sea [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012, **12**(16): 7341-7350.
- [42] 严耕. 生态文明绿皮书: 中国省域生态文明建设评价报告 (ECI 2014)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	Ji Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行