

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,万金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究

任春, 江梅, 邹兰, 李晓倩, 魏玉霞, 赵国华, 张国宁*

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 国家修订发布了 GB 4915-2013《水泥工业大气污染物排放标准》, 新建企业自 2014 年 3 月 1 日起实施, 现有企业自 2015 年 7 月 1 日起实施。在修订过程中, 如何确定可行的大气污染物排放控制水平, 成为标准限值确定的关键。标准编制组系统调查分析了我国水泥工业污染排放现状、污染控制技术应用情况、环境管理需求、国外标准控制水平等, 提出了可行的排放控制要求。新标准扩大了标准适用范围, 增加了污染物控制项目, 提高了颗粒物、 NO_x 等指标的排放控制要求, 同时增加了适用于重点地区的大气污染物特别排放限值。新标准的实施将成为水泥工业污染防治、总量减排、调整产业结构、优化布局的重要抓手, 新标准将促进水泥工业生产工艺和污染治理技术的进步。

关键词: 水泥工业; 大气污染物; 排放标准; 排放控制水平; 总量减排

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3632-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.052

Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry

REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, WEI Yu-xia, ZHAO Guo-hua, ZHANG Guo-ning

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The revised National Emission Standard of Air Pollutions for Cement Industry has been issued, which will be effective for the new enterprises and the existing enterprises on Mar. 1st, 2014 and July 1st, 2015, respectively. In the process of revision, the key technical issues on determination of standard limits was how to determine the feasible emission control level of air pollutions. Feasible emission control requirements were put forward, according to air pollutants emission, technologies, environmental management requirements and foreign standards, etc. The main contents of the revised standard include expanding the scope of application, increasing the pollutants, improving the particulate and NO_x emissions control level, and increasing special emission limits applied to key areas of air pollutants. The standard will become the gripper of pollution prevention, total emission reduction, structural adjustment and optimization of the layout, and will promote scientific and technical progression for the cement industry.

Key words: cement industry; air pollutants; emission standard; emission control level; total emission reduction

水泥工业一直是我国大气污染控制的重点, 早在 1985 年就首次发布了《水泥工业污染物排放标准》, 并于 1996 年、2004 年进行了两次修订, 本次为第三次修订, 详见表 1。

在标准修订过程中, 确定可行的大气污染物排放控制水平(即标准限值)需要综合各方面因素进行评估和决策。污染控制技术的可行性评估、现状达标率分析、环境管理需求分析、国外标准对比分析等是排放标准制订中常用的方法。标准编制组在深入调查研究、反复听取意见的基础上, 综合运用这些工具和方法, 提出了可行的排放控制要求。在此就水泥窑颗粒物、 NO_x 、 SO_2 、氟化物、 NH_3 、Hg 排放控制水平的确定进行说明, 作为理解和执行该标准的参考。

1 颗粒物排放控制水平的确定

新型干法窑的颗粒物初始浓度约 $30 \sim 80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 经烟气调质/余热利用 + 布袋或静电除尘, 排放浓度可低于 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 除尘效率大于 99.9%。

布袋除尘器一般采用涤纶、玻璃纤维、聚亚酰胺(P84)滤料, 有些还使用了聚四氟乙烯(PTFE)覆膜; 静电除尘器通常为四、五级电场^[8,9]。

我国现有规模以上水泥生产企业约 4 000 家, 新型干法水泥生产线 1 637 条^[10]。为配合本次标准修订, 标准编制组对全国水泥生产企业的污染排放与控制情况进行了抽样调查, 共获得 160 个有效水泥窑颗粒物排放数据见表 2, 同时还列出了相关研究数据。与 2003 年编制组的抽样调查对比, 窑尾颗粒物排放浓度显著降低, 平均排放浓度从 $100.90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $27.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 接近欧洲的排放水平。从除尘器的使用情况看, 窑尾采用布袋除尘器比静电除尘器略多一些, 较 2003 年 90% 使用静电除尘器的调查结果有了明显变化。从除尘效果看, 布袋除尘器要优于静电除尘器, 平均排放浓度约低 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。

收稿日期: 2014-01-23; 修订日期: 2014-03-28

基金项目: 2012 年国家环境保护标准修订项目

作者简介: 任春(1961~), 女, 工程师, 主要研究方向为环境标准制订, E-mail: renchun@craes.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhanggn@craes.org.cn

表 1 水泥标准制修订历程

Table 1 Revision process of cement standard			
序号	标准号	发布日期(年)	制修订主要内容
1	GB 4915-1985 ^[1]	1985	规定了不同设备的颗粒物以及一氧化碳的控制要求
2	GB 4915-1996 ^[2]	1996	对现有(分两个时间段)以及新建的水泥企业分别规定了控制要求;不同的环境空气质量功能区,执行不同大气污染物排放限值;调整污染物项目,增加了二氧化硫、氟化物和氮氧化物,删除一氧化碳;增加了颗粒物无组织排放限值 ^[5]
3	GB 4915-2004 ^[3]	2004	标准适用范围扩大至水泥工业生产全过程(包括矿山),并增加了水泥窑焚烧危险废物的排放要求;排放限值不再与环境空气质量功能区挂钩;统一了现有生产线排放标准,统一了回转窑、立窑排放限值,加严新建生产线的排放标准;增加了非正常排放和事故排放控制要求等环保相关管理规定 ^[6]
4	GB 4915-2013 ^[4]	2013	扩大了标准适用范围,增加了散装水泥中转站;增加了汞等污染物控制项目;提高了颗粒物、NO _x 等的排放控制要求;根据区域联防联控的最新环境管理要求,增加了适用于重点地区的大气污染物特别排放限值 ^[7]

表 2 水泥窑颗粒物排放统计

Table 2 Statistics of particulates emission from cement kilns						
统计项目	本次标准修订抽样调查			与 2003 年抽样调查对比 ^[11]	中国建材院 2009 年数据 ^[12]	欧洲 2004 年监测数据 ^[13]
	布袋	静电	合计			
水泥窑数量(个)	85	75	160	90	31	253
平均排放浓度/mg·m ⁻³	25.20	30.00	27.40	100.90	42.39	20.30
最大值/mg·m ⁻³	49.30	78.90	78.90	371.50	221.50	227
最小值/mg·m ⁻³	0.23	4.12	0.23	12.60	7.80	0.27

图 1 是窑尾颗粒物排放浓度的累积分布,其中约 92% 水泥窑颗粒物的排放符合 GB 4915-2004 标准 50 mg·m⁻³ 要求,60% 水泥窑颗粒物的排放控制在 30 mg·m⁻³ 以下,甚至有 30% 的水泥窑达到了 20 mg·m⁻³ 以下. 可见随着除尘技术的进步,排放标准具备了加严的条件. 据此本次标准修订将水泥窑颗粒物排放浓度从 50 mg·m⁻³ 加严到 30 mg·m⁻³,达到欧洲标准平均水平或许可证限值水平;而对重点地区水泥企业则要求进一步控制到 20 mg·m⁻³ 以下,达到德国标准水平^[14].

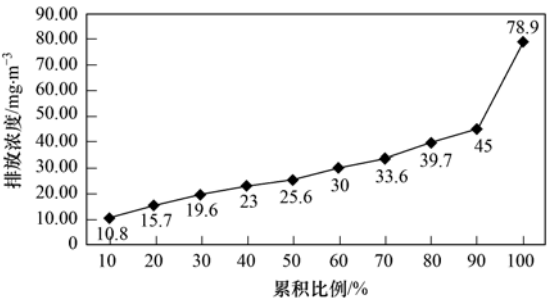


图 1 水泥窑颗粒物排放浓度累积分布

Fig. 1 Cumulative distribution of particulates emission concentration from cement kilns

标准提高后,需要对现有窑尾除尘设备进行技术改造,如布袋除尘器更换为玻纤覆膜或 P84 覆膜滤料;静电除尘器提效改造,如增加电场级数、提高高压电源性能、采用移动电极技术;“电改袋”或

“电改为电袋复合”^[15].

2 NO_x 排放控制水平的确定

2.1 水泥窑 NO_x 控制技术^[13,16-19]

水泥生产中,以热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 的排放为主,NO 和 NO₂ 是水泥窑 NO_x 排放的主要成分,其中 NO 约占 95%. 水泥生产工艺对 NO_x 排放有重大影响. 普通水泥回转窑的烧结温度高、过剩空气量大、废气在高温区停留时间较长,热力型 NO_x 排放较多. 近年来,由于普遍采用了新型干法工艺,60% 的燃料在前端分解炉内无焰燃烧,燃烧温度低,在此几乎没有热力型 NO_x 生成,只产生燃料型 NO_x,因此与普通回转窑(2.4 kg·t⁻¹)相比,新型干法工艺 NO_x 产生量可控制在 1.6 kg·t⁻¹,NO_x 削减了约 1/3. 调查统计的新型干法水泥窑初始 NO_x 浓度通常为 800~1 000 mg·m⁻³.

可行的 NO_x 控制措施包括一次措施和二次措施. 一次措施指通过生产工艺或原(燃)料的改变,如低 NO_x 燃烧器、分解炉分级燃烧、工艺优化控制、添加矿化剂、燃料替代等,减少 NO_x 的产生. 采取这些措施后,大约可降低 20%~30% 的 NO_x 排放量,相应 NO_x 排放浓度通常为 600~700 mg·m⁻³.

二次措施是指选择性非催化还原技术(SNCR)、选择性催化还原技术(SCR)、SNCR-SCR

等烟气脱硝措施. 目前应用较多、相对成熟的末端治理措施是 SNCR, 它是以分解炉膛为反应器, 通过向高温烟气(850 ~ 1 100℃)中喷入还原剂(常用液氨、氨水和尿素), 将烟气中的 NO_x 还原成氮气和水. 该技术系统简单, NO_x 去除效率约 40% ~ 60%, 排放浓度可控制在 400 ~ 500 mg·m⁻³.

欧洲研究认为, 综合使用上述技术措施后(SCR 除外), 排放控制水平应达到 200 ~ 500 mg·m⁻³, 若要进一步控制到 200 mg·m⁻³ 以下, 则需使用 SCR 技术. 表 3 为水泥窑 NO_x 控制措施的效果及大致的排放浓度范围.

表 3 水泥窑 NO_x 控制措施的效果

Table 3 Effects of NO _x control measures for cement kilns			
措施分类	项目	削减效率/%	排放浓度/mg·m ⁻³
一次措施	低 NO _x 燃烧器	5 ~ 30	600 ~ 700
	分级燃烧	10 ~ 30	
	添加矿化剂	10 ~ 15	
	工艺优化控制	10 ~ 20	
二次措施	SNCR	40 ~ 60	400 ~ 500
	SCR	70 ~ 90	100 ~ 200

表 4 水泥窑 NO_x 排放统计

Table 4 Statistics of NO _x emission from cement kilns				
统计项目	本次标准修订抽样调查	与 2003 年抽样调查对比 ^[11]	中国建材院 2009 年数据 ^[12]	欧洲 2004 年监测数据 ^[13]
水泥窑数量/个	148	20	9	258
平均排放浓度/mg·m ⁻³	621.50	508.60	868.70	784.90
最大值/mg·m ⁻³	1 233	920	1 619.50	2 040
最小值/mg·m ⁻³	234	105	376.38	145

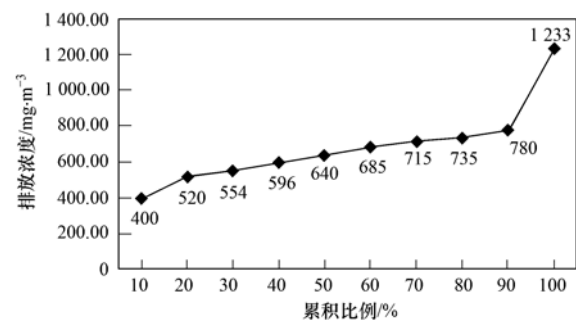


图 2 水泥窑 NO_x 排放浓度累积分布

Fig. 2 Cumulative distribution of NO_x emission concentration from cement kilns

2.2 NO_x 排放与治理现状

本次标准修订开展的抽样调查, 共获得 148 个有效的水泥窑 NO_x 排放样本, 平均排放浓度 621.50 mg·m⁻³, 最低值 234 mg·m⁻³ (采取了分级燃烧 + SNCR), 最高值 1 233 mg·m⁻³, 见表 4. 这些数据源自竣工验收、环保监督检查以及在线监测, 反映了企业在较佳工艺条件下能够达到的 NO_x 控制水平. 水泥窑的 NO_x 浓度是动态变化的, 这与窑和分解炉的运行控制密切相关, 平均会有 20% 左右的变化 (对同一水泥窑不同时期监测统计平均的结果), 企业会根据在线反馈的数据及时调整, 保证窑况的均衡稳定.

从 148 个窑的 NO_x 平均排放浓度累计分布看, 目前约 90% 的水泥窑平均排放浓度在 GB 4915-2004 标准 800 mg·m⁻³ 以下, 近 20% 的水泥窑平均排放浓度控制在 500 mg·m⁻³ 以下, 还有 10% 的水泥窑达到了 400 mg·m⁻³ 以下, 见图 2.

在调查的水泥窑中, 有 45 条线明确报告了采用的 NO_x 控制措施, 见表 5. 有些水泥窑安装了低

NO_x 燃烧器, 特别是近年来新建的水泥窑, 但调查表中并未说明, 因此实际采用低 NO_x 燃烧器的水泥窑数量要远多于表 5 中的 17 个样本. 因采取 NO_x 控制措施, 部分企业对 NO_x 原始浓度进行了摸底, 有 17 条线提供了数据, 原始浓度平均值达 929.10 mg·m⁻³, 按此计算各种措施的 NO_x 去除效果. 由表 5 可见, 即使采用最佳工艺控制措施(低 NO_x 燃烧器 + 分解炉分级燃烧), NO_x 浓度降低到 500 mg·m⁻³ 以下也很困难, 平均为 584.60 mg·m⁻³, 而采用 SNCR 或工艺控制 + SNCR, 则可控制在 300 ~ 400 mg·m⁻³, 甚至更低一些.

表 5 NO_x 控制措施的采用情况

Table 5 Adoption of measures for NO _x control					
NO _x 控制措施	样本数	平均排放浓度/mg·m ⁻³	削减效率/%	最大值/mg·m ⁻³	最小值/mg·m ⁻³
原始浓度	17	929.10	—	1 827	706
低 NO _x 燃烧器	17	668.10	28	798	525
分级燃烧	6	670.80	27	761	520
低 NO _x 燃烧器 + 分级燃烧	9	584.60	37	707	470
SNCR	10	384.30	58	475	267
低 NO _x 燃烧器 + SNCR	2	260.50	72	273	248
分级燃烧 + SNCR	1	234.00	74	—	—

2.3 NO_x 排放限值的制订依据

在先进生产工艺技术和可行污染控制措施的基础上,合理确定水泥窑 NO_x 排放限值. SNCR 是目前较为成熟可行的脱硝技术,脱硝效率一般为 40%~60%. SNCR 脱硝效率与喷氨量(NH₃)密切相关,虽然可通过加大喷氨量的方法,进一步提高脱硝效率,但 NH₃ 与 NO 摩尔比超过 1 后,脱硝效率曲线变平,效率增长缓慢,氨逃逸却显著增加. 根据欧盟水泥行业 BAT 指南, $n(\text{NH}_3):n(\text{NO})=1$ 时,脱硝效率大约 50%,氨逃逸浓度 $<10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,随着 $n(\text{NH}_3):n(\text{NO})$ 增加,氨逃逸浓度迅速增加至 $30\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 甚至 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ [13].

上游合成氨生产是高能耗、高污染行业,其废水中氨氮(“十二五”新增总量控制指标)污染严重,同时,逃逸到大气中的 NH₃ 是形成灰霾的前体物,会产生臭味扰民问题. 一方面不能为解决一个行业的环境问题而增加另一个行业的污染,另一方面不能为解决一个环境问题而产生新的环境问题,因此在水泥窑烟气脱硝中,不宜追求 SNCR 过高的脱硝效率,维持 50% 左右的脱硝效率是合理的,最高不宜超过 60%.

综合考虑前述措施的 NO_x 减排效果及组合采用的可能性,根据已投运的水泥脱硝示范项目可稳定达到的排放水平,确定了 NO_x 排放限值为一般地区 $400\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,重点地区 $320\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 现有及新建企业可采取工艺控制(低氮燃烧器、分解炉分级燃烧、燃料替代等)和末端治理(SNCR 技术)相结合

的措施,达到标准要求. 考虑到部分现有企业工艺改造难度大或不具备改造条件,这些企业可以单纯通过末端采用 SNCR 技术来实现达标排放. 重点地区企业采用目前最可行、最高效的低氮燃烧器、分解炉分级燃烧和 SNCR 组合降氮技术.

由于我国水泥脱硝刚刚起步,建成运行的脱硝示范项目均采用 SNCR 技术,SCR 技术在国内尚无成功应用案例. 国外也是应用 SNCR 技术较多,SCR 仅有 2~3 套装置在示范运行. 因此本次标准制订是基于 SNCR 技术. 未来,随着 SCR 技术的成熟,以及环保要求的进一步提高,将基于 SCR 技术、SNCR-SCR 复合技术等,制订更严格的水泥窑 NO_x 限值.

3 SO₂ 排放控制水平的确定 [20]

SO₂ 排放主要取决于原料和燃料中挥发性 S 含量. 如果硫碱比合适,水泥窑排放的 SO₂ 很少,有些水泥窑在不采取任何净化措施的情况下,SO₂ 排放浓度可以低于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 随着原燃料挥发性 S 含量(硫铁矿 FeS₂、有机硫等)的增加,SO₂ 排放浓度也会增加.

本次标准修订开展的抽样调查,共获得 153 个有效的水泥窑 SO₂ 排放样本,平均排放浓度 $59.60\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,较 2003 年调查结果 $159.20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降显著,其根本原因是水泥窑型发生了显著变化,以往 SO₂ 排放较多的湿法窑、机立窑已被新型干法窑替代. 与欧洲监测数据比,我国的水泥窑 SO₂ 排放浓度更低,见表 6.

表 6 水泥窑 SO₂ 排放统计
Table 6 Statistics of SO₂ emission from cement kilns

统计项目	本次标准修订抽样调查	与 2003 年抽样调查对比 [11]	中国建材院 2009 年数据 [12]	欧洲 2004 年监测数据 [13]
水泥窑数量/个	153	40	31	253
平均排放浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	59.60	159.20	35.52	218.90
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	310	520	391	4 837
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.25	10	0	0

从水泥窑 SO₂ 排放浓度的累计分布看,约 92% 水泥窑都能符合 GB 4915-2004 标准 $200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的要求,77% 的水泥窑可控制在 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,65% 的水泥窑可控制在 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,见图 3. 这是因为水泥窑本身就是性能优良的固硫装置,水泥窑中大部分的 S 都以硫酸盐的形式保留在水泥熟料中,SO₂ 排放不多,特别是预分解窑,因分解炉内有高活性 CaO 存在,它们与 SO₂ 气固接触好,可大量吸收 SO₂,排放浓度相应可控制在 $50\sim200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

以下.

另外,如果将窑尾废气送入正在运行中的生料磨(窑磨一体化运行),会获得额外的 SO₂ 吸收能力(可能高达 80%),因此可作为 SO₂ 的污染削减装置. 表 7 为生料磨开启、停运时的 SO₂ 排放浓度对比.

由于水泥窑自身就是固硫装置,一般不要求采取末端脱硫措施,因此本次标准修订对一般地区水泥窑 SO₂ 排放浓度不做改变,仍维持 $200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,

表 7 生料磨的 SO₂ 控制效果

Table 7 Effects of SO₂ control for Raw meal grinding

水泥窑编号	生料磨未运行/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	生料磨同步运行/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	SO ₂ 去除效果/%
1	247.50	47.90	80
2	181.90	96.40	47

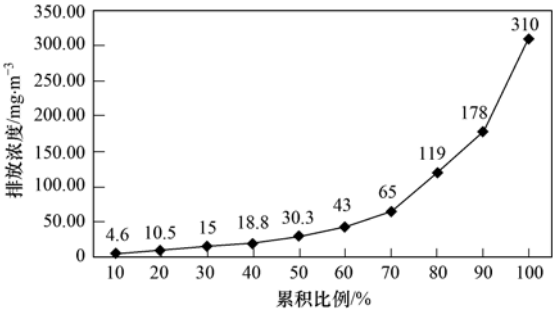


图 3 水泥窑 SO₂ 排放浓度累积分布

Fig. 3 Cumulative distribution of SO₂ emission concentration from cement kilns

保证基本达标. 对重点地区则要求加严控制到 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 只要硫碱比控制合适(这是工艺控制指标, 防止预热器结皮堵塞或窑内结圈)、原料中挥发性 S(如有机 S、 FeS_2) 含量不特别高, 一

表 8 水泥窑氟化物排放统计

Table 8 Statistics of fluoride emission from cement kilns

统计项目	本次标准修订抽样调查	与 2003 年抽样调查对比 ^[11]	
水泥窑数量/个	69	5(干法窑)	6(立窑)
平均排放浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.67	2.48	28.7
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	9.31	5.90	62.56
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.01	0.14	6

本次标准修订仍维持 $5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的标准不变, 约 93% 的水泥窑可达标, 这也是国际上对氟化物排放的普遍要求. 位于重点地区的企业则要求控制在 $3\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 达到德国标准^[14] 的控制水平, 约 83% 的水泥窑可达标, 见图 4.

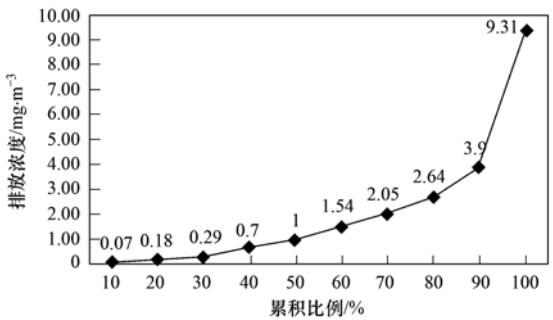


图 4 水泥窑氟化物排放浓度累积分布

Fig. 4 Cumulative distribution of fluoride emission concentration from cement kilns

般不需要采取附加措施, 或通过窑磨一体化运行即可解决.

如原料中挥发性 S 含量很高, 它们在预热阶段会逃逸出悬浮预热器, 此时没有活性 CaO 与之反应, 或生料磨不足以将之完全去除, 可能有较高的 SO₂ 排放, 这时需要采取干、湿法洗涤、活性炭吸附等附加措施.

4 氟化物排放控制水平的确定

水泥生产中, 如不专门使用含氟矿化剂(例如萤石)用于降低烧成温度, 一般窑尾排放的氟化物会很低. 本次标准修订开展的抽样调查, 共获得 69 个有效的水泥窑氟化物排放样本, 平均排放浓度 $1.67\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 与 2003 年编制组开展的抽样调查对比, 由于立窑的淘汰, 以及人们对氟化物危害的认识, 排放有了显著削减, 见表 8.

5 NH₃ 排放控制水平的确定

采用 SNCR、SCR 等二次措施, 需要使用尿素、氨水等还原剂, 它们喷入适宜温度区间的烟气内与 NO_x 反应, 会有部分氨逃逸. 根据国家《水泥工业污染防治最佳可行技术指南》(征求意见稿)^[21] 建议氨逃逸应 $\leq 10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 在《2012 年国家先进污染防治示范技术名录》^[22] 中规定, SNCR 脱硝系统氨逃逸浓度应低于 $8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, SCR 脱硝系统氨逃逸浓度应低于 $5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 为了防止水泥企业过度使用还原剂造成不必要的浪费, 减少臭味扰民, 本标准规定在采用 SNCR 脱硝技术时, 氨逃逸浓度一般不得高于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 重点地区企业则不高于 $8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

编制组收集了一些水泥脱硝工程报道的氨逃逸数据, 现场查看了某脱硝装置氨逃逸浓度在线监测

情况,正常情况均可控制在 $2.28 \sim 3.80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,几乎没有高于 $7.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情况,偶尔出现也能很快恢复正常,可以满足本标准的要求。

6 Hg 排放控制水平的确定

Hg 主要来源于水泥熟料生产中使用的燃煤,另有部分来源于作为生料成分添加的粉煤灰。对粉煤灰的综合利用,除以往作为混合材加入水泥磨外,现在作为生料成分入窑煅烧的应用也较多,由此可能会带来相对较高的 Hg 排放。考虑上述原因以及国际公约履约的需要,此次标准修订增加了 Hg 污染物项目。

目前国内外均缺乏对水泥行业 Hg 排放控制的基础研究,标准编制组对 5 家水泥企业进行了水泥窑 Hg 排放监测,窑尾 Hg 排放浓度波动很大($9.60 \sim 52.30 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),主要取决于生料中添加粉煤灰的量(粉煤灰中通常含 Hg 较高),常规水泥生产的 Hg 排放浓度一般较低($<10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。同时,Hg 的监测技术、数据稳定性等也存在很大问题。

Hg 是易挥发的金属(其他金属大多固化在水泥熟料中),窑尾烟气冷却后 Hg 凝结在颗粒物上,因此目前主要是通过除尘设备协同去除,其排放浓度与颗粒物排放浓度有很大关联。美国水泥厂 HAPs 标准^[23]控制颗粒物浓度较低,要求现源为 $8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,2009 年 5 月 6 日后的新源为 $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,相应 Hg 排放浓度控制在 $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;欧盟的颗粒物控制在 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 水平,相应的 Hg 排放浓度均控制在 $50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下^[24]。我国的颗粒物控制与欧盟相近,兼顾标准编制组对水泥窑 Hg 排放的监测结果,Hg 排放限值确定为 $50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

7 结论与建议

(1)水泥窑的颗粒物和 NO_x 排放是主要环境问题,需要根据污染控制技术的进步、环保要求的提高,及时提高排放控制要求,其他如 SO_2 、氟化物、Hg 等,在原燃料品质较好、运行工况稳定条件下基本可达标排放。

(2)采用覆膜滤料布袋除尘技术或高效静电除尘技术、电袋复合除尘技术,可将水泥窑颗粒物排放控制在 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,达到国际先进的颗粒物排放控制水平。

(3)采用工艺控制(低氮燃烧器、分解炉分级燃烧、燃料替代等)和末端治理(SNCR 技术)相结合的措施,可将水泥窑 NO_x 排放控制在 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

或 $320 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,达到国际最严苛的排放控制水平。如现有企业工艺改造难度大或不具备改造条件,也可以单纯通过末端采用 SNCR 技术来实现。

(4)为防止过量喷氨导致氨逃逸浓度显著提高,并由此衍生新的环境问题,SNCR 脱硝效率不宜超过 60%,一般以 50% 左右为宜。应注意氨水、尿素、液氨等还原剂储存、使用中带来的臭味扰民与化学品安全问题^[25]。

(5)国家排放标准是一条不可逾越的底线,考虑到水泥生产工艺的波动,水泥企业应加强运行管理,保证净化处理装置与生产工艺设备同步运转,实现连续稳定达标排放。可采取在线监测手段保证大气污染物的逐时排放达标(标准规定的排放限值为小时值)。

(6)水泥窑大气污染物排放浓度应折算到统一的基准条件下:温度 273K、压力 101.3 kPa、干烟气、氧含量 10%,以保证监测数据的可比性。

参考文献:

- [1] GB 4915-1985, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [2] GB 4915-1996, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [3] GB 4915-2004, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [4] GB 4915-2013, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [5] 陈绍龙. 中小型水泥企业执行环保新标准的技术要点[J]. 辽宁建材, 2007, (1): 33-38.
- [6] 周扬胜, 张国宁. 《水泥工业大气污染物排放标准》修订的新特点[EB/OL]. http://www.es.org.cn/cn/news/2008-08/14/news_725.html, 2014-03-19.
- [7] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发环境保护部等部门关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知[EB/OL]. http://zfs.mep.gov.cn/fg/gwyw/201005/t20100514_189497.htm, 2014-01-20.
- [8] 徐涛. 袋除尘技术发展及国产滤料使用[J]. 中国水泥, 2011, (6): 71-74.
- [9] 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, (12): 15-18.
- [10] 孔祥忠. 2012 年中国水泥工业概况[J]. 中国水泥, 2013, (5): 26-27.
- [11] 周扬胜, 张国宁, 陈章水, 等. GB 4915-2004 水泥工业大气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.
- [12] 丁新森, 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.
- [13] 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.
- [14] Germany. First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Emission Control Act (Technical Instructions on Air Quality Control - TA Luft) of 24 July 2002 [EB/OL]. <http://>

- www. bmu. de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/taluft_engl. pdf, 2014-01-20.
- [15] 韩战义, 冯建军. 电袋复合式除尘技术在水泥行业的应用[J]. 水泥技术, 2013, (3): 100-101.
- [16] 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: 中国硅酸盐学会. 2012 年中国水泥技术年会暨第十四届全国水泥技术交流大会论文集[C]. 北京: 中国科学文化出版社, 2012. 109-122.
- [17] 高长明. 我国水泥工业氮氧化物排放量及其脱硝力度的探讨[J]. 水泥工程, 2011, (4): 1-2.
- [18] 毛志伟, 杨如顺, 甘昊. 水泥窑脱硝工艺技术的探讨[J]. 中国水泥, 2012, (5): 56-59.
- [19] 富丽. 国内外水泥行业氮氧化物减排比较分析[J]. 建材发展导向, 2012, (10): 9-11.
- [20] 李小燕, 胡芝娟, 叶旭初, 等. 水泥生产过程自脱硫及 SO₂ 排放控制技术[J]. 2010, (6): 16-18.
- [21] 环境保护部. 水泥工业污染防治最佳可行技术指南(征求意见稿)[EB/OL]. <http://www. zhb. gov. cn/gkml/hbb/bgth/201208/W020120807431686251995. pdf>, 2014-01-20.
- [22] 环境保护部. 2012 年国家先进污染防治示范技术名录[EB/OL]. <http://www. zhb. gov. cn/gkml/hbb/bgg/201207/W020120711459027504440. pdf>, 2014-01-20.
- [23] 40 CFR 63 Subpart LLL, National emission standards for hazardous air pollutants from the portland cement manufacturing industry[S].
- [24] 甘昊, 吕忠明. 水泥窑汞排放特征分析及控制措施探讨[A]. 见: 中国硅酸盐学会. 中国硅酸盐学会环保学术年会论文集[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012. 469-471.
- [25] 周荣, 韦彦斐, 张玉根, 等. 氨水应用于水泥脱硝的安全性研究与实践[J]. 水泥, 2013, (9): 55-57.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人