

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算

丁青青^{1,2}, 魏伟^{1*}, 沈群¹, 孙子罕¹

(1. 中国科学院上海高等研究院温室气体与环境工程中心, 上海 201210; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以 2012 年为基准年, 利用排放因子法估算了长三角地区火电行业主要大气污染物 (SO_2 、 NO_x 、烟尘、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$) 排放。其中, SO_2 、 NO_x 、烟尘、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量分别为 473 238、1 566 195、587 713、348 773、179 820 t。对于 SO_2 和 NO_x , 300 MW 以上机组的贡献分别为 85% 和 82%; 烟尘、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 方面, 100 MW 以下的机组贡献占比分别为 81%、53% 和 40%。地区贡献方面, 由大到小依次为江苏、浙江和上海。另通过对上海地区多家电厂不同等级机组污染排放数据进行统计计算, 得出上海地区 300 MW 以上等级机组的污染物排放因子, 对比分析可知, 上海地区火电厂污染物排放因子水平总体较低。假设长三角地区火电行业同等级机组均与现在上海地区机组排放水平相当, 则行业排放 SO_2 可削减 55.8% ~ 65.3%, NO_x 可以削减 50.5% ~ 64.1%, 烟尘可以削减 3.4% ~ 11.3%。若能提高较小等级机组的发电技术和污染控制水平, 各污染物排放削减量可进一步提高。然而, 根据长三角地区实际污染情况, 应综合因素考虑火电行业削减排放, 以促进区域空气质量不断改善。

关键词: 长三角; 火电行业; 大气污染物; 排放因子; 排放估算

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2389-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.009

Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta

DING Qing-qing^{1,2}, WEI Wei^{1*}, SHEN Qun¹, SUN Yu-han¹

(1. Greenhouse Gases and Environmental Engineering Center, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The emission factor method was used to estimate major air pollutant emissions of coal-fired power plant in the Yangtze River Delta (YRD) region of the year 2012. Results showed that emissions of SO_2 , NO_x , dust, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ were respectively 473 238, 1 566 195, 587 713, 348 773 and 179 820 t. For SO_2 and NO_x , 300 MW and above class units made contributions of 85% and 82% in emission; while in the respect of dust, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, contribution rates of 100 MW and below class units were respectively 81%, 53% and 40%. Considering the regional distribution, Jiangsu discharged the most, followed by Zhejiang, Shanghai. According to discharge data of several local power plants, we also calculated and made a comparative analysis of emission factors in different unit levels in Shanghai, which indicated a lower emission level. Assuming an equal level was reached in whole YRD, SO_2 emission would cut down 55.8% - 65.3%; for NO_x and dust emissions were 50.5% - 64.1% and 3.4% - 11.3%, respectively. If technologies and pollution control of lower class units were improved, the emission cuts would improve. However, according to the pollution realities of YRD, we suggested to make a multiple-cuts plan, which could effectively improve the regional atmospheric environment.

Key words: Yangtze River Delta; coal-fired power plant; air pollutants; emission factor; emission estimate

大气污染物排放清单是了解各地区大气污染物排放及时空分布, 精确模拟该地区空气质量的重要资料^[1]。经过近几十年的发展, 国内大气污染物排放清单已由全国范围逐步精确到典型城市及地区, 涵盖范围也从最早的能源消耗过程逐渐细化到各行业或人为源排放部门。长三角地区作为我国三大经济圈之一, 集中了大量的工业产业, 然而, 其在排放清单建立方面却较京津冀及珠三角进展稍缓。程轲等^[2]最早以 2004 年为基准, 对长三角地区重点行业大气污染物排放进行了研究; 其后 Huang 等^[3]、翟一然等^[4]和 Fu 等^[5]利用类似方法分别研究了 2007 年、2008 年以及 2010 年长三角地区人为源大气污染物排放。根据前人研究, 火电行业作为重要的人为源大气排放之一, 在 SO_2 、 NO_x 以及颗粒物一次排放方面均起重要贡献。同时, 根据莫华等^[6]的研究,

火电行业排放的 SO_2 、 NO_x 和 SO_3 对大气中二次颗粒物的形成也有较大贡献。因此, 有必要对火电集中的长三角地区进行该行业的具体研究。然而, 尽管方法学较为成熟, 但在实际操作过程中, 受限于所获取数据的信息完整性及配套性原因, 目前, 除全国范围外, 区域性的火电行业排放估算较少, 前述前人研究中涉及到火电行业的排放估算也较为粗略。

本研究即在前人研究基础上, 以 2012 年为基准年, 在利用手册及文献数据估算了火电行业总体污染排放及不同机组等级污染排放的基础上, 同时对上海火电企业排放因子情况进行了统计计算, 进而

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2015-02-07

作者简介: 丁青青(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为工业污染源大气污染物排放, E-mail: dingqq@sari.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: weiwei@sari.ac.cn

利用该计算数据估算出长三角地区火电行业可能的减排空间并给出相应的减排建议.

1 材料与方法

1.1 研究区域及研究对象

研究区域包括长三角地区两省一市(江苏省、浙江省和上海市). 对象为长三角地区 311 家电厂, 共计 813 个机组,电厂分布情况见图 1. 其中,电厂

信息主要来源于环保部公开资料^[7, 8]及电厂集团公司主页资料,利用 Google Earth 确定各电厂坐标.

由图 1 可知,长三角地区火电厂分布多集中在江苏中南部及浙江北部,且以小电厂居多. 根据所统计信息,100 MW 以下机组在数量上约占 72%,但就装机容量而言,300 MW 以上机组成装机容量比例约占 87%,说明 300 MW 以上机组是长三角地区的发电主力.

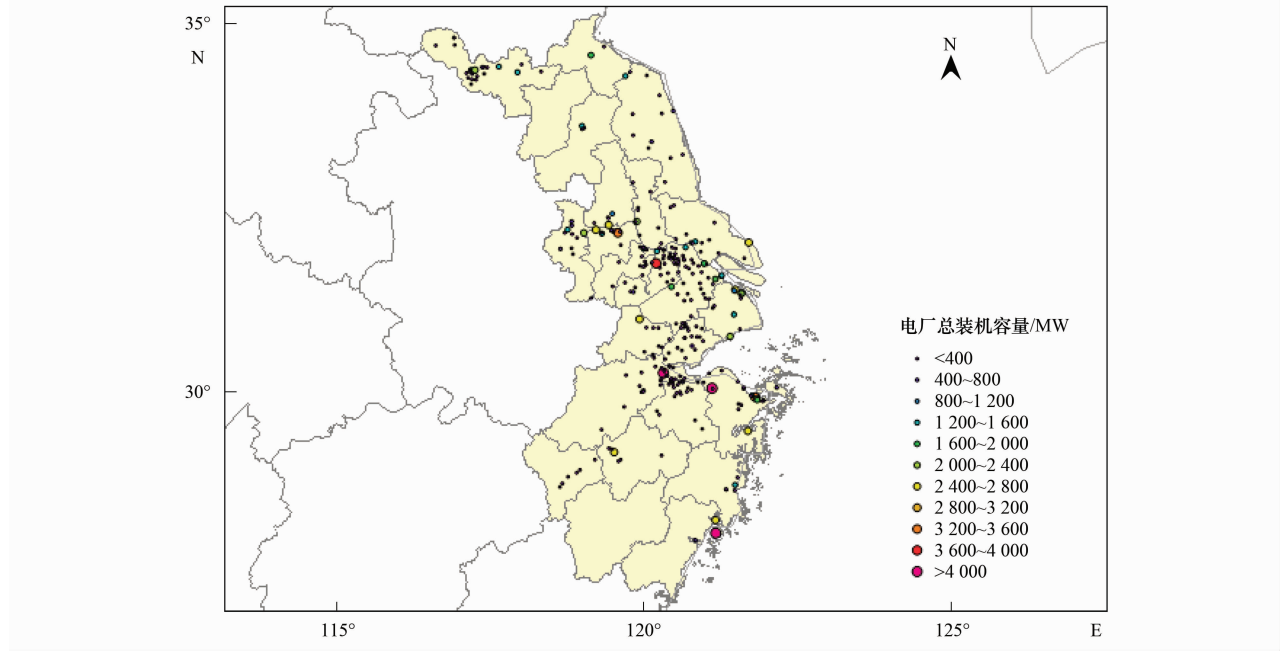


图 1 长三角地区火电厂分布示意
Fig. 1 Location of power plants in YRD

1.2 计算流程及方法

对于区域排放,通常采用排放因子法对其进行污染物排放估算,本研究参考 Zhao 等^[9]和王圣等^[10]的行业分层方法,对长三角地区火电行业污染物进行分层计算,具体流程如图 2 所示.

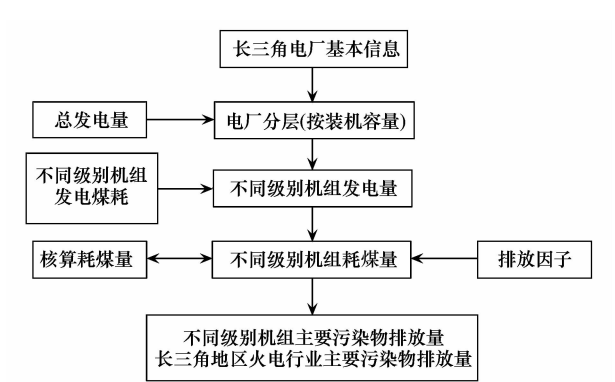


图 2 长三角地区火电行业污染物排放计算流程
Fig. 2 Calculated flow for emissions of coal-fired power plants in YRD

计算公式如下:

$$E_{i,j} = \sum A_{j,k} EF_{i,j,k}$$

式中, E 为污染物排放量, A 为活动水平(及不同级别机组耗煤量), EF 为排放因子. i 、 j 和 k 分别代表污染物种类、机组等级和污染控制技术.

1.3 排放因子

以往利用排放因子法进行排放总量计算的研究中,多采用国外排放因子数据,如 EPA AP-42 数据库中数据. 随着国内学者对大气污染物排放因子本土化研究的进行,2008 年我国发布了《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》,2014 年发布了《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》,共涉及 SO_2 、 NO_x 、烟尘、 PM_{10} 多项污染物的排放因子情况.

鉴于本研究中涉及地域较广,且根据所收集到的基础信息,两省一市电厂情况总体有所差距,因

此,研究中所使用的排放因子首先以具有普适性的手册数据为主,另辅以文献数据,具体见表 1. 其中,硫分 S(%) 和灰分 A(%) 的选取参考文献[2,4,11]的研究,分别取 1.0 和 25.

表 1 不同等级机组排放因子/kg·t⁻¹
Table 1 Emission factor of different class units/kg·t⁻¹

机组等级	SO ₂ ^[12]	NO _x ^[12]	烟尘 ^[12]	PM ₁₀ ^[13]	PM _{2.5} ^[13]
100 MW 以下	1.65	5.14	16.53	6.5	2.5
100 ~ 200 MW	1.537	9.13	0.623	1.625	0.8
200 ~ 300 MW	1.54	5.27	0.4595	1.625	0.8
300 ~ 600 MW	1.542	4.33	0.4035	0.525	0.367 5
600 ~ 1 000 MW	1.547	6.18	0.4025	0.525	0.367 5
1 000 MW 以上	1.564	3.47	0.3975	0.525	0.367 5

1.4 活动水平数据

为降低统计和计算难度,本研究中的活动水平数据主要指不同机组等级层耗煤量. 数据由年鉴基础数据按图 2 中计算方式计算所得,具体见表 2.

表 2 2012 年长三角地区火电行业不同等级机组消耗原煤量¹⁾/万 t

Table 2 Coal consumption of different class units of power plants in YRD in 2012/万 t

机组等级	上海	江苏	浙江
100 MW 以下	147.835 2	1 798.952 3	922.776 9
100 ~ 200 MW	90.020 4	730.283 4	421.425 7
200 ~ 300 MW	0.000 0	179.423 1	207.079 9
300 ~ 600 MW	1 291.068 2	5 067.9 147	1 169.819 5
600 ~ 1 000 MW	1 497.882 3	6 239.935 6	4 169.449 9
1 000 MW 以上	1 019.713 7	2 757.449 2	2 652.075 3
总计	4 046.519 8	16 773.958 3	9 542.627 0

1) 表中数据在文献[14]基础数据上计算所得,各地区总耗煤量对比年鉴数据平均约高 6.18%

2 结果及讨论

2.1 长三角地区火电行业主要大气污染物排放

根据 1.1 节中计算流程和方法,综合上述排放因子和活动水平数据,估算了 2012 年长三角地区火电行业主要污染物排放量(见表 3).

由表 3 可知,污染排放地区贡献方面,从大到小依次为:江苏、浙江和上海. 其中,各污染物排放贡献中,江苏均超过 55%,浙江约在 32% 左右,上海贡献最小,平均在 10% 左右.

对比清华 MEIC 数据库^[15]中 2008 年及 2010 年长三角地区火电行业污染排放量(见图 3),认为除 SO₂ 排放降低之外,NO_x 及颗粒物排放均为增长. 其中,相较于 2010 年,2012 年长三角地区火电行业 SO₂ 排放量约减少 42.7%,NO_x 及 PM_{2.5} 排放分别增加 6.14% 和 30.93%. 另由于目前关于 2012 年的火

表 3 2012 年长三角地区火电行业污染物排放量/t
Table 3 Emission of coal-fired power plant in YRD in 2012/t

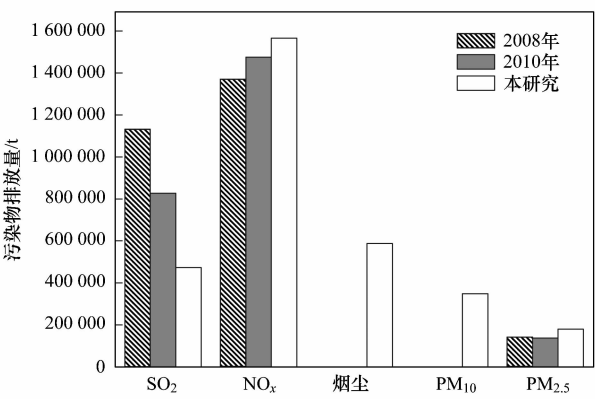
地区	SO ₂	NO _x	烟尘	PM ₁₀	PM _{2.5}
上海	62 851.728	199 674.038	40 289.785	31 067.607	18 412.884
江苏	261 475.838	869 348.830	359 266.572	205 557.453	103 941.435
浙江	148 910.624	497 172.200	188 156.288	112 148.271	57 465.658
总计	473 238.190	1 566 195.068	587 712.645	348 773.331	179 819.977

电行业污染排放的研究较少,本研究中暂无同年对比数据. 然而,根据前人的研究结果^[2,4,9],不同研究者之间由于分层方法、排放因子选取及层活动水平数据差异等原因,其所得结果也存在较明显差异.

图 4 显示了不同机组等级层在污染排放中的贡献. 其中,对于 SO₂ 和 NO_x,300 MW 以上机组起主要排放贡献;而对于颗粒物,100 MW 以下机组则占较大排放比例,且随着颗粒物粒径的减小,100 MW 以下机组的排放贡献比例也相应减小.

长三角地区属于我国重要的经济发展地区,根

据国家数据显示^[16],其能源产品消耗近年来持续保持缓慢增长趋势. 然而,尽管煤炭消耗量在增加,但由研究结果可知,SO₂ 排放量却持续降低,这主要与近年来发电技术的提高以及脱硫设施的投运有关. 据所统计电厂信息,目前长三角地区火电机组脱硫设施投运率为 100%. 相比而言,脱硝设施投运率则较低(2012 年仅为 16.7%,到 2014 年提升到约 28.6%),且主要集中在较大装机容量机组层. 燃料燃烧过程中产生的 NO_x 主要为燃料型 NO_x 和热力型 NO_x,因此,耗煤较多的 300 MW 以上机组层起主



2008 年及 2010 年数据均来自文献[15]

图 3 近几年长三角地区火电行业污染排放对比

Fig. 3 Comparison of air pollutant emissions of coal-fired power plant in YRD in recent years

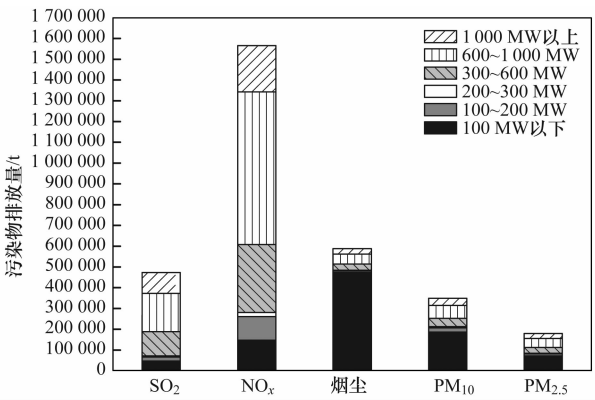


图 4 2012 年长三角地区火电行业不同等级机组污染排放

Fig. 4 Emissions of different class units of coal-fired power plants in YRD in 2012

要排放贡献。NO_x 排放的增加与 Zhao 等^[9] 研究中的预测相吻合,推测造成这种结果的主要原因在于其污染控制措施还不能抵偿由燃煤增加产生的污染排放量增量。参考 SO₂ 控制效果,可以预见,在发电技术不断提高的基础上,继续提高脱硝设施投运率可能会在未来几年使火电行业迎来 NO_x 排放拐点。

另针对颗粒物,根据李超等^[17] 的研究,小型燃煤锅炉现有除尘设备效率较低,且对 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的捕集效果不太理想。而通过对文献[11,13,18] 的数据进行分析,可以发现机组对细颗粒物的去除效率低于对粗颗粒物的去除效率,大型机组除尘装置对颗粒物的去除效率总体高于小型机组除尘装置的去除效率,且两者对细颗粒物的去除效率差异明显大于对粗颗粒物的去除效率差异。然而反映到排放因子上,小型机组与大型机组粗颗粒物排放因子的差异却明显大于细颗粒物排放因子差异。这点也与本研究中所使用的颗粒物排放因子情况相吻合。同时该结果也说明,对于颗粒物,发电技术相对于污染控制技术更能有效影响颗粒物排放。排放总量同时取决于排放因子和活动水平,因此,在层活动水平数据分布合适的情况下,小型机组机组层在颗粒物排放方面可能会起主要贡献,且随着颗粒物粒径的减小,其排放贡献率会逐渐降低,如本研究中结果。这也从侧面说明,可以通过降低 100 MW 以下机组层的耗煤量或提高其颗粒物去除效率两方面入手降低总颗粒物排放,且前者效果应该更佳。

2.2 上海市电力企业实测排放因子

随着发电技术和污染控制技术水平的提高,火电行业污染物排放因子的水平也会有所改变,为了解目前实际排放因子与前述所选取手册及文献排放因子的差距,本研究通过与上海市化工环境保护监测站合作,根据其提供的上海市多家电厂的排污监测数据计算得出上海地区不同等级机组的 SO₂、NO_x 及烟尘排放因子。机组基本信息及对应的排放因子箱形图详见表 4 和图 5。

由图 5 分析可知,机组等级、锅炉类型以及企业技术管理水平等均对污染物排放因子有所影响。同时,根据前人研究,火电厂所用燃煤煤质、污染控制措施类型、控制设备等也是影响排放因子大小的

表 4 上海市多家电厂机组基本信息

Table 4 General information of coal-fired units in Shanghai

机组编号	锅炉类型	装机容量/MW	污染控制措施
1	SG-1025/18.3-M831	300	SCR + ESP + FGD
2	1 025 t·h ⁻¹ 亚临界压力中间再热单炉膛 UP 炉	300	SCR + ESP + FGD
3	SG-1125/17.5-M737	300	SCR + ESP + FGD
4	SG-2008/17.5-M901	600	SCR + ESP + FGD
5	SG-1025/18.3-M316	600	SCR + ESP + FGD
6	2 788 t·h ⁻¹ 超临界一次中间再热塔式直流锅炉	900	SCR + ESP + FGD
7	SG-1025/18.3-M316	1 000	SCR + ESP + FGD
8	超超临界变压直流塔式燃煤锅炉	1 000	SCR + ESP + FGD
9	超超临界变压直流塔式燃煤锅炉	1 000	SCR + ESP + FGD
10	SG-1125/17.5-M737	1 000	SCR + ESP + FGD

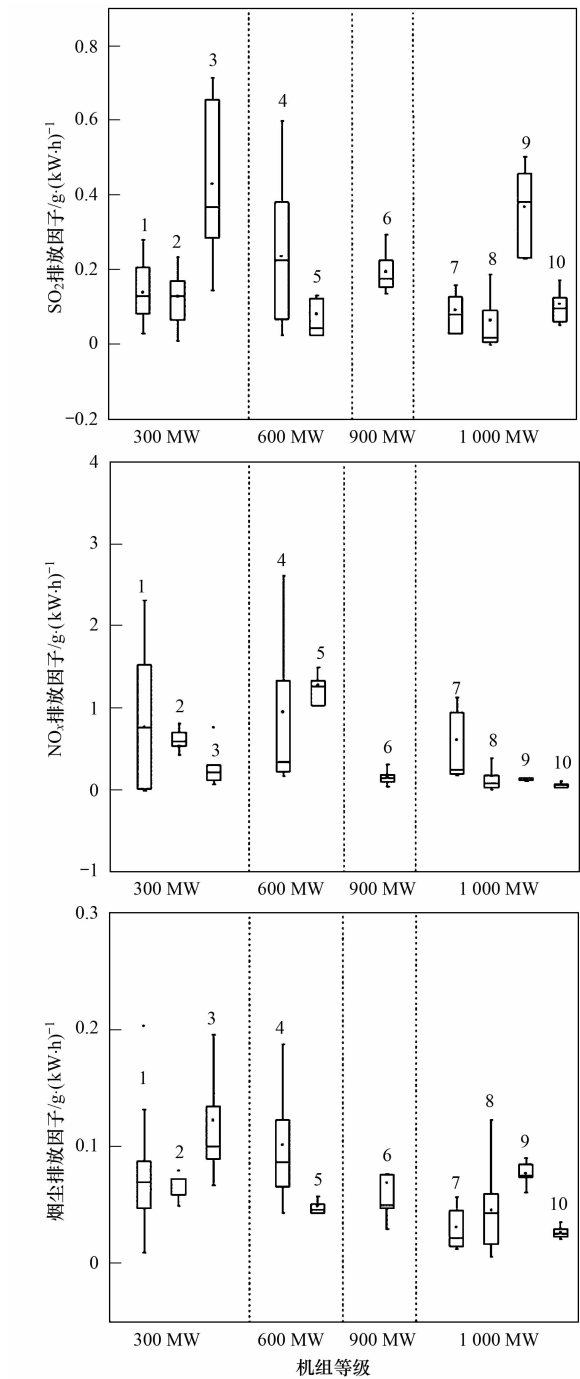


图 5 上海地区不同等级机组排放因子箱形图

Fig. 5 Emission factors of different coal-fired units in Shanghai

相关因素。然而,结合实际操作问题,为使排放因子具有更好的实际操作性,本研究中仅以机组等级及主要污染控制措施作为划分标准,进而对上海市火电行业污染物排放因子进行统计计算,详细结果见表 5。

对比手册及其他研究者的数据^[11, 13, 18, 19]可知,上海地区 SO₂ 排放因子较手册中参数为低,NO_x 和烟尘参数与手册及文献对应范围值相近。总体来讲,上海地区的电力企业,由于发电技术、污染控制和管理技术都较为发达及完善,其污染物排放因子都相对较低。

考虑到参数选取及活动水平数据情况,本研究中关于长三角火电行业污染排放的计算结果总体来说偏大。根据所计算出的上海地区火电企业的排放因子,假设长三角地区火电行业同等级机组均与现在上海地区机组排放水平相当,则 SO₂ 可削减 55.8%~65.3%,NO_x 可以削减 50.5%~64.1%,烟尘可以削减 3.4%~11.3%。若能提高较小等级机组的发电技术和污染控制水平,则削减量可以进一步提高。

根据国家环境统计年报^[20],2012 年长三角地区火电行业 NO_x 排放量约占 NO_x 排放量的 61%,因此,对火电行业 NO_x 的控制可能会明显影响区域环境。而由邢佳^[21]以及 Geng 等^[22]的研究,长三角区域大气环境处于 VOC 控制机制下。该控制机制下单独削减 NO_x 排放量会造成 O₃ 含量的增高,进一步造成臭氧污染。Dong 等^[23]的研究认为,简单的 NO_x 的排放削减将会提高长三角地区无机气溶胶的浓度。Huang 等^[24]基于 2006 年长三角地区排放清单的模拟研究也同样显示,对火电行业进行 NO_x 削减,将会造成长三角地区硫酸盐和有机气溶胶的回弹,但同时对火电行业进行 85% 的 NO_x 和 90% 的 SO₂ 削减则能使能见度提升 4.0 km。因此,在制订长三角地区污染减排政策时,应考虑对 NO_x 和 VOC 同时进行协调控制,以有效改善区域大气环境。具

表 5 上海市不同等级机组污染物排放因子 ¹⁾							
Table 5 Emission factors of different class units in Shanghai							
机组等级/MW	污染控制措施	SO ₂		NO _x		烟尘	
		单位能量排量 /g·(kW·h) ⁻¹	单位原料排量 /kg·t ⁻¹	单位能量排量 /g·(kW·h) ⁻¹	单位原料排量 /kg·t ⁻¹	单位能量排量 /g·(kW·h) ⁻¹	单位原料排量 /kg·t ⁻¹
300~600	SCR+ESP+FGD	0.176 6±0.032 8	0.467 6~0.681	0.636 8±0.141 3	1.611 3~2.530 3	0.152 3±0.102 7	0.161 3~0.829 3
600~1 000	SCR+ESP+FGD	0.215 5±0.041 0	0.583 7~0.858 1	0.790 5±0.214 7	1.926 3~3.362 9	0.089 2±0.012 6	0.256 3~0.340 5
≥1 000	SCR+ESP+FGD	0.131 3±0.031 0	0.359 7~0.581 9	0.301 0±0.126 5	0.625 8~1.533 0	0.050 0±0.008 6	0.148 5~0.210 1

1) 以 g·(kW·h)⁻¹ 为单位的排放因子,其置信区间为 95%; 由于缺乏机组单位时间燃煤量数据,过程中利用以 g·(kW·h)⁻¹ 为单位的排放因子除以该等级机组层煤耗得到以 kg·t⁻¹ 原料为单位的排放因子,机组煤耗数据来自文献[14]

体到火电行业,本研究建议仅以继续投建脱硝设施以配合“十二五”NO_x 削减计划对行业 NO_x 排放进行控制,同时继续推行“上大压小”政策,加强 100 MW 以下机组颗粒物控制,进而降低行业总体颗粒物排放.

3 结论

(1)以 2012 年为基准年,利用排放因子法对长三角地区火电行业主要大气污染物进行了排放估算,并根据统计计算出的上海地区火电行业排放因子估算了整个区域火电行业可能的减排空间.

(2)300 MW 以上机组对长三角火电行业 SO₂ 和 NO_x 排放起主要贡献; 100 MW 以下机组对颗粒物排放起主要贡献,且随着颗粒物粒径减小,其贡献比例也减小.

致谢:感谢清华大学张强副研究员对本研究提供的数据库支持. 感谢上海市化工环境保护监测站对本研究的合作支持.

参考文献:

[1] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1858-1871.

[2] 程轲, 薛志钢, 张增强, 等. 长三角重点行业大气污染物排放及控制对策[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(9): 120-123.

[3] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(9): 4105-4120.

[4] 翟一然, 王勤耕, 宋媛媛. 长江三角洲地区能源消费大气污染物排放特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(9): 1574-1582.

[5] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **70**(2): 39-50.

[6] 莫华, 朱法华, 王圣. 火电行业大气污染物排放对 PM_{2.5} 的贡献及减排对策[J]. 中国电力, 2013, **46**(8): 1-6.

[7] 环境保护部. 关于公布全国燃煤机组脱硫脱硝设施等重点大气污染减排工程名单的公告[EB/OL]. [http://www. zhb. gov. cn/gkml/hbb/bgg/201305/t20130506_251654. htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201305/t20130506_251654.htm).

[8] 环境保护部. 关于公布全国燃煤机组脱硫脱硝设施等重点大气污染减排工程名单的公告[EB/OL]. [http://www. zhb. gov. cn/gkml/hbb/bgg/201407/t20140711_278584. htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201407/t20140711_278584.htm).

[9] Zhao Y, Wang S X, Duan L, *et al.* Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(36): 8442-8452.

[10] 王圣, 王慧敏, 朱法华, 等. 我国火电行业 NO_x 排放因子的样本容量确定方法[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(9): 1067-1072.

[11] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 630-635.

[12] 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[EB/OL]. [http://cpssc. mep. gov. cn/gwgg/200803/t20080329_120423. htm](http://cpssc.mep.gov.cn/gwgg/200803/t20080329_120423.htm), 2008.

[13] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, *et al.* Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(12): 1515-1523.

[14] 《中国电力年鉴》编辑委员会. 2013 中国电力年鉴 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[15] 清华大学 MEIC 团队. MEIC Model [EB/OL]. [http://www. meicmodel. org/](http://www.meicmodel.org/), 2012.

[16] 中华人民共和国国家统计局. 地区数据-分省年度数据[EB/OL]. [http://data. stats. gov. cn/workspace/index;jsessionid=4644C7B4C00EE08CAA8C131BDDF050C3? m=fsnd](http://data.stats.gov.cn/workspace/index;jsessionid=4644C7B4C00EE08CAA8C131BDDF050C3?m=fsnd).

[17] 李超, 李兴华, 段雷, 等. 燃煤工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 650-655.

[18] 许强, 李震宇, 胡斯翰, 等. 不同规模火电机组排污负荷实测分析[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(1): 72-74, 80.

[19] 雷沛. 火电氮氧化物排放因子及排放总量研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.

[20] 中华人民共和国环境保护部. 2012 年环境统计年报[EB/OL]. [http://zls. mep. gov. cn/hjtj/nb/2012tjnb/201312/t20131225_265552. htm](http://zls.mep.gov.cn/hjtj/nb/2012tjnb/201312/t20131225_265552.htm), 2013.

[21] 邢佳. 大气污染排放与环境效应的非线性响应关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.

[22] Geng F, Zhang Q, Tie X, *et al.* Aircraft measurements of O₃, NO_x, CO, VOCs, and SO₂ in the Yangtze River Delta region [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(3): 584-593.

[23] Dong X, Li J, Fu J S, *et al.* Inorganic aerosols responses to emission changes in Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **481**: 522-532.

[24] Huang K, Fu J S, Gao Y, *et al.* Role of sectoral and multi-pollutant emission control strategies in improving atmospheric visibility in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2014, **184**(1): 426-434.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail : journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号 : 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价 : 120.00 元 国外发行代号 : M 205

国 内 外 公 开 发 行