

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婍娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度评价模型建立及案例分析

史妍婷, 杜谦, 高建民, 边昕*, 王知溥, 董鹤鸣, 韩强, 曹阳

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为评价燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放的危害度, 根据颗粒的形成机制及对环境对人体健康的影响程度, 将 $PM_{2.5}$ 进行了粒径分段, 综合考虑不同粒径段颗粒物的质量浓度、粒数浓度、汞相对富集因子及汞元素在煤灰分中含量, 建立了燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度综合评价模型, 最后利用已有文献现场实验测得的数据对评价模型进行了案例分析, 并提出了危害度削减系数概念, 可用于对除尘装置进行评价。

关键词: $PM_{2.5}$; 危害度评价模型; 质量浓度; 粒数浓度; 汞; 相对富集因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0470-05

Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis

SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, BIAN Xin, WANG Zhi-pu, DONG He-ming, HAN Qiang, CAO Yang

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to evaluate the hazard of $PM_{2.5}$ emitted by various boilers, in this paper, segmentation of particulate matters with sizes of below $2.5 \mu m$ was performed based on their formation mechanisms and hazard level to human beings and environment. Meanwhile, taking into account the mass concentration, number concentration, enrichment factor of Hg, and content of Hg element in different coal ashes, a comprehensive model aimed at evaluating hazard of $PM_{2.5}$ emitted by coal-fired boilers was established in this paper. Finally, through utilizing filed experimental data of previous literatures, a case analysis of the evaluation model was conducted, and the concept of hazard reduction coefficient was proposed, which can be used to evaluate the performance of dust removers.

Key words: $PM_{2.5}$; hazard evaluation model; mass concentration; number concentration; Hg; enrichment factor

$PM_{2.5}$ 细颗粒物是大气中影响灰霾和人体健康的主要污染物之一。燃煤电厂锅炉是我国 $PM_{2.5}$ 的主要排放源之一, 故控制燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 的排放是减少 $PM_{2.5}$ 大气含量的有效途径之一。

目前, 无论是世界卫生组织还是美国, 对燃烧源颗粒物的研究和控制大多侧重质量浓度控制和总量控制, 即对颗粒物危害的控制仅局限于质量浓度, 对粒径分布、粒数浓度、痕量有毒物质的富集程度(单颗粒的毒害性)等研究较为匮乏, 所以, 为实现有效控制, 本研究综合考虑 $PM_{2.5}$ 排放质量浓度、粒数浓度、颗粒粒径分布及痕量有毒物质的富集程度, 建立了燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 排放危害度综合评价模型。

1 危害度影响因素的确定

1.1 粒径划分依据

研究表明: 不同粒径的大气颗粒物对环境和人体健康的影响不同。在颗粒物对大气能见度影响方面, 粒径不同对大气能见度的影响不同, 大气气溶胶

中, 粒径分布在 $0.1 \sim 1.0 \mu m$ 的颗粒物通过光的散射作用会降低能见度; 在颗粒物的生存时间方面, 大气颗粒物粒径越小, 在空气中停留时间越长, 传输距离越远, 波及范围越广, 危害度越大。在颗粒物对人体健康的危害方面, 大气颗粒物在人体呼吸系统的沉积情况不同, $PM_{2.5}$ 细颗粒物细小而不受人鼻腔阻挡, 可直接进入人肺部并存留在肺深处, 不易排出体外。尤其是粒径 $0.38 \mu m$ 以下的细微颗粒物通常携带有二噁英、重金属、多环芳烃等有毒物质, 90% 的细微颗粒物可深入到肺泡区, 并可进入血液输往全身, 对人体健康威胁大^[1, 2]。

另外, 煤粉燃烧过程中产生的颗粒物, 包括超细模态、粗模态和中间模态。超细模态颗粒粒径在 $0.38 \mu m$ 以下, 主要是气化凝结机制形成的一次可凝结颗粒物。粗模态颗粒粒径通常大于 $2.5 \mu m$, 主

收稿日期: 2013-05-21; 修订日期: 2013-09-20

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201009006); 中央高校基本科研业务费专项(HIT-NSRIF.2013095)

作者简介: 史妍婷(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究为细颗粒物排放危害度评价, E-mail: tt593lg@163.com

* 通讯联系人, E-mail: bianxin2006@gmail.com

要是焦炭燃烧后的残灰颗粒. 位于 0.38 ~ 2.5 μm 粒径之间的颗粒物为中间模态,其形成机制较复杂,主要可能是气态组分在细小残灰颗粒上的异相冷凝/反应形成^[2]. 不同形成机制的颗粒物具有不同的物理化学性质,对环境对人体造成不同程度的危害.

因此本研究在建模时,以不同粒径颗粒物对环境和人体影响程度及其形成机制为标准,将粒径段分为 PM_{0.38} 以下和 PM_{0.38~2.5}.

1.2 粒数浓度的影响

一般燃烧源排放细微颗粒的质量浓度虽然很低,粒数浓度却很高. 事实上,粒数浓度也是反应细颗粒物对环境和人体健康影响的重要因素^[3]. 于是本研究在建模时,考虑了质量浓度和粒数浓度的综合影响.

但质量浓度和粒数浓度对 PM_{2.5}危害度的影响程度必将存在的一定的差异,但由于涉及因素较多,需要近一步深入研究,本研究在初级建模阶段,暂取二者的权重系数都为 1,简单将二者做几何平均^[4],为以后研究做基础.

1.3 痕量元素的影响

煤的组成异常复杂^[5,6],根据其元素含量多少,可分为主量元素、次量元素、痕量元素. 痕量元素虽然含量最少,但毒性大、化学稳定性好,具有迁徙性和沉积性,对环境和人体健康危害很大. 在煤燃烧过程中痕量元素会部分或全部挥发成气态,在温度较低的炉膛尾部烟道中痕量元素蒸气通过一系列物理化学变化,富集在细微粒子表面,且粒径越小,富集程度越大,对人健康危害也大. 但痕量元素的研究非常复杂,本研究在建立危害度评价模型时,颗粒的毒害性差别仅考虑受到关注与研究最多的汞元素.

已有研究表明,燃煤是大气中汞的主要人为污染源,其中约 75% 来自燃料燃烧,特别是煤炭燃烧,

随着煤炭年消耗量逐年增加,通过烟尘排放进入大气的汞也在逐年增加^[7]. 故原煤灰分中汞元素的含量 Hg_i 是影响细颗粒物危害度的一个重要因素.

同时因煤燃烧过程的复杂性,痕量元素汞会因温度、含氧量、空气动力场及不同组织的燃烧方式,使元素汞、一价汞、二价汞在不同粒径颗粒物下实现再分配^[8]. 且小粒径颗粒物比表面积大,吸附痕量元素的能力更强^[9],因而汞在不同粒径颗粒物上的相对富集因子也是影响其危害度的重要因素之一^[10,11].

于是,本研究在建模时,单颗粒的毒害性差异综合考虑了原煤灰分中汞元素的含量和烟尘中汞的相对富集因子.

关于痕量元素对 PM_{2.5}危害度的影响,本研究在建立 PM_{2.5}危害度评价模型时,对单颗粒毒害性仅考虑了 Hg 的影响,模型较为简单,但作为颗粒危害度综合评价的初步探究,将为以后更深入的危害度评价模型的建立提供一定基础.

2 模型的建立

依据不同粒径段颗粒的质量浓度、粒数浓度、汞相对富集因子及煤灰分中汞的含量,建立燃煤电厂大气颗粒物综合排放危害度评价模型. 由于以上因素综合影响 PM_{2.5}的危害度且变化规律复杂,故本文进行模型建立时,主要进行了简单的权重系数为 1 的乘积处理^[12].

本研究建立的颗粒物危害度综合评价模型主要包括两部分,即 $\sqrt{M_i \times N_i}$ 和 $REF_i \times Hg_i$. 其中 $\sqrt{M_i \times N_i}$ 表征质量浓度和粒数浓度的共同作用, $REF_i \times Hg_i$ 表征单颗粒的毒害性、煤燃烧前后有毒元素再分配现象及不同粒径颗粒物有毒元素相对富集因子(本研究仅以汞为例). 不同粒径颗粒物的评价因子见表 1,颗粒物危害度综合排放评价模型公式见式(1). REF_i 的公式由 Meij 提出^[13].

表 1 不同粒径颗粒物评价因子

Table 1 Evaluation factors of particles with different sizes

序号	排放危害度指数	质量粒数	粒数浓度	Hg 相对富集因子	汞在灰中的含量
1	PM _{0.38} 以下	M_1	N_1	REF_1	Hg_1
2	PM _{0.38~2.5}	M_2	N_2	REF_2	Hg_2
	PM _{2.5}	M	N	REF	Hg

$$AI = \sum_{i=1}^n \sqrt{M_i \times N_i} \times REF_i \times Hg_i \quad (1)$$

式中,AI:排放危害度评价指标; REF_i :Hg 的相对富集因子,见式(2); M_i :不同粒径颗粒物质量浓度 ($mg \cdot cm^{-3}$); N_i :不同粒径颗粒物的粒数浓度

($粒 \cdot cm^{-3}$); Hg_i :汞在灰中的质量分数 ($\mu g \cdot g^{-1}$); n :不同粒径颗粒物的粒径段数.

$$REF_i = \frac{c_{fi}}{c_{oi}} A_i \quad (2)$$

式中, c_{oi} :Hg 在煤中的质量分数($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); c_{fi} :Hg 在第 i 个粒径区间颗粒物上的质量分数($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); A_i :煤中灰分的含量(%).

该模型的建立可将危害度指标值与排放交易、排污税等相联系做基础,对危害性大的燃煤电厂锅炉进行经济刺激,有效促进其改进技术措施,减少 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放.

模型建立的同时,本研究提出一个新概念:危害度削减系数 λ ,即除尘器进出口危害度指标的差与除尘器入口危害度指标的比值,具体计算公式见式(3).该概念的提出可对除尘器除尘性能进行更深一层的评价.

$$\lambda = (AI_{\text{入}} - AI_{\text{出}})/AI_{\text{入}} \quad (3)$$

式中, λ :危害度削减系数; $AI_{\text{入}}$:除尘器入口危害度指标; $AI_{\text{出}}$:除尘器出口危害度指标.

3 案例分析

应用上述大气颗粒物综合排放危害度评价模型,选取文献[14]中7个电厂的现场实验数据进行评价模型计算,并对其结果进行分析.表2是所选7个炉子的基本情况.表3和表4分别是各炉子除尘器入口和出口的原始数据.

应用上述大气颗粒物综合排放危害度评价模型,计算7个电厂除尘器入口和出口的危害度 AI

表 2 各电厂锅炉基本情况

Table 2 Basic condition of the power plant boilers

项目	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5	锅炉 6	锅炉 7
工艺名称	煤粉炉	煤粉炉	煤粉炉	煤粉炉	循环流化床	煤粉炉	煤粉炉
装机容量/MW	50	600	600	220	15	100	140
原料名称	山西大同口泉煤	准格尔煤	山西混煤	无烟煤	煤矸石	山西大同煤	混合烟煤
末端除尘技术	四电场静电除尘器	五电场静电除尘器	五电场静电除尘器	布袋除尘器	三电场静电除尘器	四电场静电除尘器	三电场静电除尘器

表 3 除尘器入口原始数据

Table 3 Original data at the entrance of the dust removers

项目	指标	单位	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5	锅炉 6	锅炉 7
$\text{PM}_{0.38}$	质量浓度	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.49	14.01	44.58	4.33	5.58	9.94	1.89
	粒数浓度	$\times 10^4 \text{ 粒}\cdot\text{cm}^{-3}$	87.80	1 347.8	1 954.1	201.42	160.32	293.38	194.11
	REF		2.52	5.38	6.92	5.03	3.57	3.06	3.64
$\text{PM}_{0.38\sim 2.5}$	质量浓度	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	948.47	358.74	354.31	410.48	1 386.4	925.19	227.67
	粒数浓度	$\times 10^4 \text{ 粒}\cdot\text{cm}^{-3}$	73.72	39.66	60.10	31.31	148.81	89.42	21.72
	REF		1.63	1.68	3.98	1.20	0.31	0.20	0.46
$\text{PM}_{2.5}$	质量浓度	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	950.96	372.75	398.89	414.81	1 392.0	935.13	229.56
	粒数浓度	$\times 10^4 \text{ 粒}\cdot\text{cm}^{-3}$	161.52	1 387.5	2 014.2	232.73	309.12	382.80	215.83
	REF		1.63	3.31	5.82	3.90	1.71	2.86	1.62
Hg_i		$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.96	1.26	1.33	1.29	0.55	0.65	0.80

表 4 除尘器出口原始数据

Table 4 Original data at the exit of the dust removers

项目	指标	单位	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5	锅炉 6	锅炉 7
$\text{PM}_{0.38}$	质量浓度	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.36	0.15	1.86	0.01	1.06	0.91	0.14
	粒数浓度	$\times 10^4 \text{ 粒}\cdot\text{cm}^{-3}$	10.00	10.65	113.08	0.47	39.17	19.66	9.14
	REF		8.13	6.86	9.54	4.81	3.55	15.59	7.08
$\text{PM}_{0.38\sim 2.5}$	质量浓度	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	37.58	2.97	10.79	1.17	174.78	45.55	16.87
	粒数浓度	$\times 10^4 \text{ 粒}\cdot\text{cm}^{-3}$	5.16	0.49	1.98	0.12	20.46	7.40	2.25
	REF		3.25	4.81	11.85	5.64	0.62	5.00	2.94
$\text{PM}_{2.5}$	质量浓度	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	37.94	3.12	12.65	1.18	175.84	46.45	17.01
	粒数浓度	$\times 10^4 \text{ 粒}\cdot\text{cm}^{-3}$	161.52	1 387	2 014.2	232.73	309.12	382.80	215.83
	REF		4.00	4.36	11.24	7.63	3.12	2.82	3.00
Hg_i		$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.49	0.64	1.18	1.59	0.88	0.18	0.42

值,如表 5,表 6 所示。
根据表 3 数值,以除尘器入口 PM_{2.5}粒径的颗粒物为例作图,各电厂 PM_{2.5}总质量浓度和粒数浓度见图 1; 各电厂 PM_{2.5}汞的总相对富集因子见图 2。

表 5 除尘器入口 AI 值

Table 5 AI value at the entrance of the dust removers							
项目	电厂 1	电厂 2	电厂 3	电厂 4	电厂 5	电厂 6	电厂 7
PM _{0.38}	3 578. 8	93 222. 8	272 521. 4	19 117. 6	5 916. 1	10 682. 6	5 599. 4
PM _{0.38~2.5}	44 788	15 881. 4	43 489. 4	10 559. 3	25 446. 5	37 590. 4	4 011. 3
PM _{2.5}	66 381	189 139. 2	390 813. 4	94 144. 7	202 040. 9	265 047. 9	44 963. 3

表 6 除尘器出口 AI 值

Table 6 AI value at the exit of the dust removers							
项目	电厂 1	电厂 2	电厂 3	电厂 4	电厂 5	电厂 6	电厂 7
PM _{0.38}	1 482. 8	1 101. 3	18 469. 0	43. 2	1 271. 8	4 254. 0	649. 1
PM _{0.38~2.5}	4 712. 7	462. 0	4 104. 4	164. 7	6 663. 0	8 704. 7	2 253. 8
PM _{2.5}	9 999. 9	2 040. 2	32 121. 7	493. 0	57 548. 4	15 460. 7	5 192. 0

分析图 1 图 2,不同电厂锅炉产生颗粒物的质量浓度、粒数浓度及汞相对富集因子的变化规律不统一,难以直接评价其排放危害度,故有必要建立综合 AI 值模型,

根据表5数值,各电厂除尘器入口PM_{2.5}的AI

值见图 3; 各电厂除尘器入口 PM_{0.38},PM_{0.38~2.5}不同粒径段的 AI 值见图 4。

由图 3 可看出, 3 号电厂危害度较大, 7 号电厂危害度最小。分析图 4, 3 号电厂 0.38 μm 以下颗粒物的危害度明显高于其他电厂,这也是 3 号电

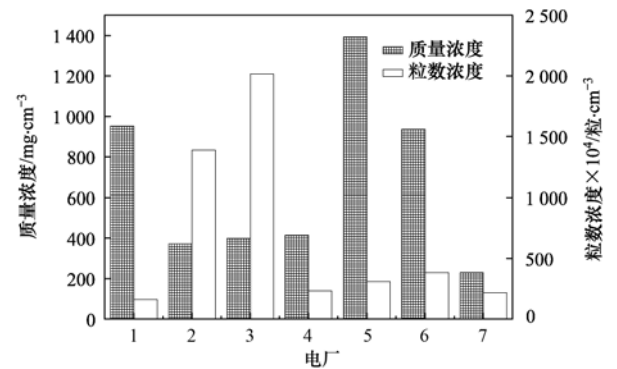


图 1 PM_{2.5}总质量浓度和粒数浓度

Fig. 1 Mass concentration and number concentration of PM_{2.5}

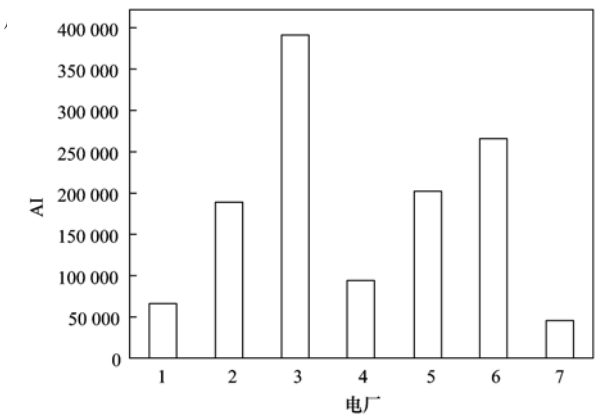


图 3 除尘器入口 AI 值

Fig. 3 AI value at the entrance of the dust removers

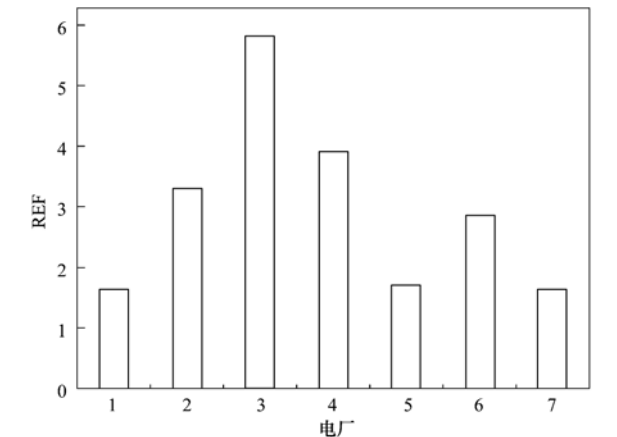


图 2 PM_{2.5}汞的总相对富集因子

Fig. 2 Enrichment factor of Hg in PM_{2.5}

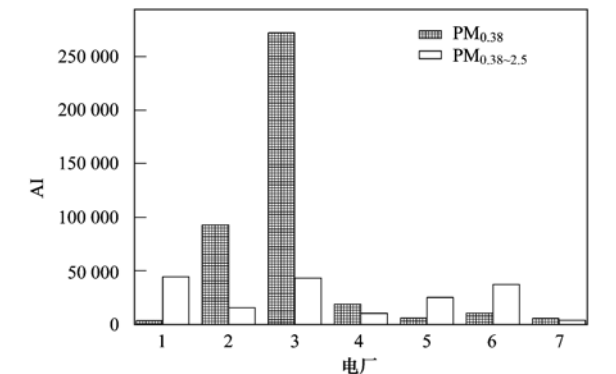


图 4 除尘器入口不同粒径段的 AI 值

Fig. 4 AI value of different size segments at the entrance of the dust removers

PM_{2.5}综合危害度较高的原因.同时,锅炉排放PM_{2.5}的危害度指标与锅炉的燃烧工艺、装机容量、煤种及在燃烧过程中的燃烧温度、炉内含氧量、空气动力场等因素有关,比较复杂,有待进一步研究分析.

对比表3~6各电厂除尘器入、出口数据,由于除尘器的作用,无论是质量浓度、粒数浓度、还是危害度都有不同程度的降低.

各电厂除尘器除尘效率及危害度削减系数如图5所示.分析图5,对于同一类型的除尘器,危害度削减系数低于质量浓度削减系数和粒数浓度削减系数,说明经过除尘器之后大部分大粒径颗粒物被脱出,此时微小粒径颗粒物的危害更为突出,汞的富集量也相对增加,即无论是布袋除尘器还是电除尘器对粗模态颗粒物的除尘效果都优于对细模态的除尘效果,细颗粒物含量相对增加.

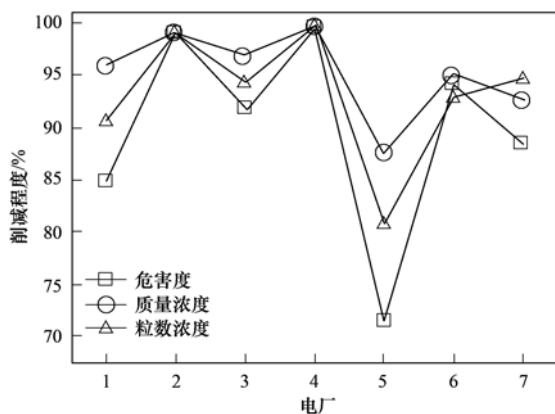


图5 除尘器除尘效率及危害度削减系数

Fig. 5 Collection efficiency and hazard reduction coefficient of the dust removers

同时,不同除尘器的危害度削减系数不同,根据文献[14]中7个电厂的比较发现,对于危害度削减系数,布袋除尘器高于静电除尘器,电场数越多静电除尘器的危害度削减系数越大.

4 结论

(1) AI初级模型的建立,综合考虑了PM_{2.5}粒径分布、质量浓度、粒数浓度、单颗粒的危害性等综合因素,比只考虑颗粒物的质量浓度更具科学性.

(2)通过实例计算发现,PM_{0.38}的危害度指标是影响PM_{2.5}危害度大小的主要原因. AI初级模型的建立为未来颗粒物的控制提出更为严峻的挑战.

(3)危害度削减系数概念的提出,可用于对除尘装置进行评价. 案例分析表明,对于同一类型除尘器,危害度削减系数较质量浓度削减系数和粒数浓度削减系数对除尘器的要求更为严格.

(4)就危害度削减系数而言,布袋除尘器的危害度削减系数高于静电除尘器,电场数越多静电除尘器的危害度削减系数越大,这为不达标锅炉的除尘设施改进提供了一定的技术参考.

参考文献:

- [1] 温新欣. 济南市环境空气细颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})污染特征研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [2] 徐明厚, 于敦喜, 刘小伟. 燃煤可吸入颗粒物的形成与排放[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对PM₁₀排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1921-1927.
- [4] 张广敬. 谈谈加权几何平均法[J]. 上海统计, 2001, (11): 43-44.
- [5] 徐明厚, 郑楚光, 冯荣, 等. 煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 34-39.
- [6] 李超, 李兴华, 赵瑜, 等. 燃煤电厂可吸入颗粒物中痕量元素的排放规律研究[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(5): 334-340.
- [7] Pacyna E G, Pacyna J M. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995 [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 137(1-4): 149-165.
- [8] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 煤中汞燃烧过程析出规律试验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 289-293.
- [9] 晏蓉, 欧阳中华, 曾汉才. 电厂燃煤飞灰中重金属富集规律的实验研究[J]. 环境科学, 1995, 16(6): 29-32, 93.
- [10] 刘迎晖, 郑楚光, 程俊峰, 等. 燃煤烟气中汞的形态及其分析方法[J]. 燃烧化学学报, 2000, 28(5): 463-467.
- [11] 郭欣, 郑楚光, 刘迎晖, 等. 煤中汞, 砷, 硒赋存形态的研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 763-766.
- [12] 毛保华. 评价指标体系分析及其权重系数的确定[J]. 系统工程, 1991, 9(4): 37-41.
- [13] Meij R. Trace element behaviors in coal-fired power plants[J]. Fuel Processing Technology, 1994, 39(1-3): 199-217.
- [14] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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