

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

**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

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 ..... 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华( 373 )  
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 ..... 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰( 379 )  
近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究 ..... 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明( 388 )  
太原市 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟( 396 )  
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 .....  
..... 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军( 402 )  
北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究 ..... 王兵,张维康,牛香,王晓燕( 408 )  
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 ..... 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩( 415 )  
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 ..... 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海( 421 )  
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 ..... 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权( 430 )  
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 .....  
..... 张奎,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进( 438 )  
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 ..... 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮( 448 )  
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 ..... 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升( 457 )  
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 ..... 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕( 464 )  
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 .....  
..... 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童( 471 )  
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 ..... 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟( 481 )  
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 ..... 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清( 490 )  
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评估 .....  
..... 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷( 497 )  
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评估 ..... 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳( 507 )  
UV 协同 ClO<sub>2</sub> 去除三氯生及其降解产物的研究 ..... 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新( 516 )  
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中 As( V ) 的去除机制研究 ..... 康英,段晋明,景传勇( 523 )  
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中 Cr( VI ) 的研究 ..... 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁( 530 )  
磁性石墨烯吸附水中 Cr( VI ) 研究 ..... 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉( 537 )  
TiO<sub>2</sub>@ 酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL 的研究 ..... 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞( 545 )  
MnO<sub>2</sub>/CFP 复合电极的制备及电吸附 Pb<sup>2+</sup> 特性的研究 ..... 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟( 552 )  
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂 TiO<sub>2</sub> 催化剂 ..... 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光( 559 )  
掺铁 TiO<sub>2</sub> 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚 A 的研究 ..... 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫( 568 )  
天然矿物负载 Fe/Co 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化降解阳离子红 3R ..... 马楠,刘华波,谢鑫源( 576 )  
臭氧微气泡处理酸性大红 3R 废水特性研究 ..... 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊( 584 )  
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 ..... 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪( 590 )  
低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 ..... 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽( 597 )  
O 池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 .....  
..... 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙( 604 )  
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 ..... 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇( 612 )  
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 ..... 杨世东,陈霞,刘操,肖本益( 619 )  
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 .....  
..... 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹( 625 )  
地表臭氧浓度升高对旱作农田 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛( 636 )  
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 ..... 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭( 644 )  
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 ..... 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕( 652 )  
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 ..... 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖( 661 )  
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 ..... 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟( 669 )  
土壤电动修复的电极空间构型优化研究 ..... 刘芳,付融冰,徐珍( 678 )  
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 ..... 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊( 686 )  
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 ..... 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒( 694 )  
植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 ..... 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华( 700 )  
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 ..... 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏( 706 )  
1 株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 ..... 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民( 712 )  
CdSe/ZnS 量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 ..... 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽( 719 )  
锯齿新米虾对 Cu<sup>2+</sup> 和毒死蜱毒性的生理响应 ..... 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华( 727 )  
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 ..... 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新( 736 )  
热水环境中 Na<sup>+</sup> 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 ..... 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军( 744 )  
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 ..... 樊新刚,米文宝,马振宁( 751 )  
《环境科学》征订启事( 401 ) 《环境科学》征稿简则( 437 ) 信息( 489,522,726,735 )

# 霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征

朱琼宇,程金平\*,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华

(上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240)

**摘要:**在我国高速经济增长过程中,霾污染日趋突出,同时大气汞污染也十分严重,而颗粒汞对于汞在大气中的循环演化意义重大.为了探讨霾污染期间汞在不同粒径颗粒物中的分布特征,采用 Nano-moudi 12 级(6.2~9.9  $\mu\text{m}$ 、3.1~6.2  $\mu\text{m}$ 、1.8~3.1  $\mu\text{m}$ 、1.0~1.8  $\mu\text{m}$ 、0.56~1.0  $\mu\text{m}$ 、0.32~0.56  $\mu\text{m}$ 、0.18~0.32  $\mu\text{m}$ 、0.10~0.18  $\mu\text{m}$ 、0.056~0.10  $\mu\text{m}$ 、0.032~0.056  $\mu\text{m}$ 、0.018~0.032  $\mu\text{m}$ 、0.010~0.018  $\mu\text{m}$ )大气颗粒物采样器,对上海霾与非霾期间不同粒径大气颗粒物中的汞进行分析.结果表明,颗粒态汞含量与颗粒物含量正相关;采样期间霾天颗粒态汞平均浓度  $0.31 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  是非霾天颗粒态汞平均浓度  $0.11 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的 2~3 倍;霾和非霾天颗粒态汞浓度以及颗粒物质量浓度随粒径分布呈双峰型,霾期间峰值分别出现在 0.56~1.0  $\mu\text{m}$  粒径段和 3.1~6.2  $\mu\text{m}$  粒径段,而非霾期峰值分别出现在 0.32~0.56  $\mu\text{m}$  和 3.1~6.2  $\mu\text{m}$  粒径段;霾天较非霾天颗粒态汞和颗粒物的粒径分布均出现了向大粒径方向偏移;颗粒态汞主要分布在粒径  $\leq 1 \mu\text{m}$  粒子上,能够长时间停留和长距离输送;非霾期间颗粒态汞在颗粒物中的平均含量为  $0.029 \text{ ng}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ ,而霾期间为  $0.015 \text{ ng}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ ;霾污染过程中其他污染物迅速成长,而汞成长较慢;霾天积聚核模态粒子中颗粒态汞质量浓度为  $2.06 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而非霾天为  $0.55 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,积聚态颗粒物的大幅增加,是灰霾形成的主要原因.本地源燃煤等的排放以及风沙扬尘的增加和外地源的输送是导致霾天污染严重的重要原因.

**关键词:**霾;颗粒态汞;粒径分布;大气颗粒物;ICP-MS

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0373-06 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.02.001

## Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days

ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping\*, WEI Yu-qing, BO Dan-dan, CHEN Xiao-jia, JIANG Xuan, WANG Wen-hua  
(School of Environmental Science & Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the rapid economic development, China suffers from the severe haze and atmospheric mercury pollution. Particulate mercury transport has an important significance in its global cycle. In order to investigate the distribution characteristics of particulate mercury, 12 degrees Nano-moudi (6.2-9.9  $\mu\text{m}$ , 3.1-6.2  $\mu\text{m}$ , 1.8-3.1  $\mu\text{m}$ , 1.0-1.8  $\mu\text{m}$ , 0.56-1.0  $\mu\text{m}$ , 0.32-0.56  $\mu\text{m}$ , 0.18-0.32  $\mu\text{m}$ , 0.10-0.18  $\mu\text{m}$ , 0.056-0.10  $\mu\text{m}$ , 0.032-0.056  $\mu\text{m}$ , 0.018-0.032  $\mu\text{m}$ , 0.010-0.018  $\mu\text{m}$ ) impactor was used to measure the size distributions of atmospheric particulate mercury on both haze and non-haze days in Shanghai. The results indicated that particulate mercury levels were positively correlated with those of the particles. The average concentration of particulate mercury ( $0.31 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ) on haze days was 2-3 times than that on non-haze days ( $0.11 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ). The mass size distributions of aerosols and particulate mercury showed bimodal distributions. The peak shifted from 0.56-1.0  $\mu\text{m}$  and 3.1-6.2  $\mu\text{m}$  on haze days to 0.32-0.56  $\mu\text{m}$  and 3.1-6.2  $\mu\text{m}$  on non-haze days. The particles with aerodynamic diameter smaller than 1  $\mu\text{m}$  which could stay for a long time and transport for a long distance, had higher particulate mercury concentrations. The average contribution of particulate mercury to total PM aerosol were higher on haze days ( $0.029 \text{ ng}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ ) than on non-haze days ( $0.015 \text{ ng}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ ), indicating that secondary particles typically grew faster than mercury during the haze pollution events. The particulate mercury concentration in accumulation mode was  $2.06 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  on haze days, while it was  $0.55 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  on non-haze days. The large increase of the accumulation mode particles was a main reason for the formation of haze. Emissions from the coal burning as well as road surface dust and dust from long-range transport accounted for the serious pollution on haze days.

**Key words:** haze; particulate mercury; size distribution; atmospheric particle; ICP-MS

大气汞主要有 3 种形态,分别为气态单质汞( $\text{Hg}^0$ )、活性气态汞和颗粒态汞,其中  $\text{Hg}^0$  占 90% 以上,可以远距离传输参与全球汞的循环;颗粒态汞和活性气态汞在大气中的停留时间短,一般为数天,容易沉降,是大气汞沉降的主要部分<sup>[1]</sup>,颗粒态汞通过干沉降或湿沉降的形式再进入土壤、水体和底泥中,对生态系统造成危害影响.虽然颗

粒态汞在大气汞中小于 10%<sup>[2]</sup>,但是大气颗粒物是气态汞吸附和化学转化的重要场所.颗粒态汞

收稿日期: 2014-08-21; 修订日期: 2014-10-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430005);国家自然科学基金项目(21177087);教育部新世纪优秀人支持计划项目(NCET-12-0362)

作者简介: 朱琼宇(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境化学,E-mail: zqyshining@sjtu.edu.cn

\* 通讯联系人,E-mail: jpcheng@sjtu.edu.cn

的传输距离主要由其粒径和质量决定<sup>[1]</sup>,不同粒径的颗粒物,从大气中的清除过程不同. 因此,目前在我国某些城市每3 d就有一次霾污染的大气环境背景下,研究汞在不同粒径颗粒中的分布特征,了解中国对全球汞污染的贡献是否会因为我国大气环境的变化而发生改变等问题具有重要的意义. 目前国内外对颗粒态汞的研究主要集中在夏冬季节、城市郊区以及海上陆地的比较,缺乏霾与非霾天颗粒态汞的研究,0.1  $\mu\text{m}$  以下颗粒态汞的粒径分布研究也较少<sup>[3-9]</sup>.

本文研究了霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征,对颗粒成长过程中汞的分布特征进行初步分析,以期为准确估算区域性霾污染频繁发生情况下颗粒态汞对人类健康危害以及对全球的汞循环贡献提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验方法

分别于2013年12月3日、12月4日、12月18日、12月22日、12月28日、12月30日在上海交通大学闵行区进行样品采集,每次前一天22:00左右开始连续24 h采集颗粒物. 仪器采用Model 122R Nano-moudi 12级大气颗粒物采样器,流量为 $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,采样粒径分布分别为:6.2~9.9  $\mu\text{m}$ 、3.1~6.2  $\mu\text{m}$ 、1.8~3.1  $\mu\text{m}$ 、1.0~1.8  $\mu\text{m}$ 、0.56~1.0  $\mu\text{m}$ 、0.32~0.56  $\mu\text{m}$ 、0.18~0.32  $\mu\text{m}$ 、0.10~0.18  $\mu\text{m}$ 、0.056~0.10  $\mu\text{m}$ 、0.032~0.056  $\mu\text{m}$ 、0.018~0.032  $\mu\text{m}$ 、0.010~0.018  $\mu\text{m}$ . 采样同时记录温度、湿度、气压等气象参数. 滤膜采用聚四氟乙烯膜(PTFE)和铝膜.

### 1.2 样品分析

样品中的总汞经酸消解和微波分解后采用ICP-MS(Agilent 7700 Series, USA)法测定汞的浓度,具体见参考文献[10~13]. 测定方法的检出限为 $3 \times 10^{-3} \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,空白值 $<3 \times 10^{-3} \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 1.3 实验保证

滤膜采样前在烘箱中进行预处理以去除汞,降低本底值. 样品称重前,置于 $25^\circ\text{C}$ 、相对湿度50%的恒温恒湿箱中平衡24 h,称量后在 $-4^\circ\text{C}$ 的冰箱中保存. 每采集一批样品后,进行一次现场空白. 分析前,项目的回收率、精密度、检测限等均进行实验,能够满足实验要求,回收率在84%~112%之间. 分析实验均在洁净的实验台进行操作,所用试剂均为优级纯或者分析纯.

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒物浓度与大气颗粒态汞浓度相关性

将采样期间不同粒径颗粒物的质量浓度以及相应颗粒态汞质量浓度取平均值,分析二者的相关性,可得图1~3.

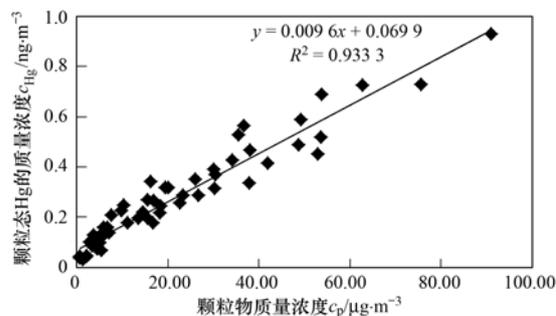


图1 颗粒物质量浓度和颗粒态汞质量浓度的关系

Fig. 1 Correlation of the concentrations of particulate mercury and particles

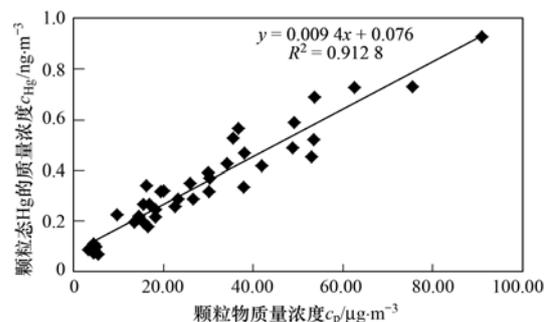


图2 霾期间颗粒物质量浓度和颗粒态汞质量浓度的关系

Fig. 2 Correlation of the concentrations of particulate mercury and particles during haze days

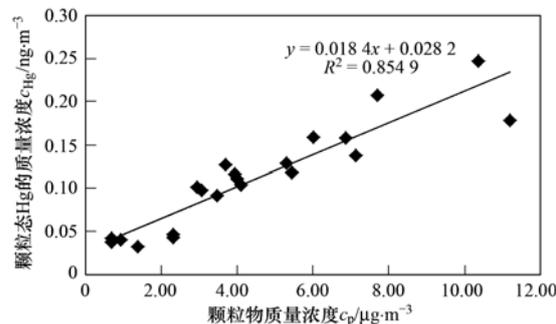


图3 非霾期间颗粒物质量浓度和颗粒态汞质量浓度的关系

Fig. 3 Correlation of the concentrations of particulate mercury and particles during non-haze days

由图1~3可以发现,颗粒态汞的质量浓度与颗粒物的质量浓度呈正相关关系,即颗粒物浓度升高,大气颗粒汞浓度也明显升高,反之则降低. 采样期间总相关系数、霾天与非霾天相关系数 $r$ 分别为

0.966 1、0.955 4和0.924 6,相关性显著.一方面上海冬季燃煤、风沙道路扬尘的增加,导致颗粒物及汞排放量的增加,而冬季逆温层的存在,大气混合高度降低不利于污染物(包括汞)的扩散,即导致颗粒物浓度增加的条件同样也会导致颗粒态汞的含量的增加.另一方面也为颗粒汞参与了颗粒物的成长提

供了科学依据.

## 2.2 霾和非霾期间颗粒态汞质量浓度和颗粒物质量浓度的粒径分布

根据段玉森<sup>[14]</sup>提出的霾污染评价体系,如表 1 所示,判别各采样日属于霾或者非霾,可以得到采样期为 2 个霾天-2 个非霾天-2 个霾天.

表 1 霾污染评价体系<sup>[14]</sup>

Table 1 Evaluation system of haze pollution

类别	项目	判别依据	备注
小时霾污染判别指标	能见度	< 10 km	同时满足 3 个条件则判断出现霾污染
	PM <sub>2.5</sub>	> 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	> 50%	
霾污染日判别依据	06:00 ~ 17:00 小时霾污染状况	任何 1 h 出现霾污染则判定当天为霾污染日	

霾天和非霾天颗粒态汞质量浓度和颗粒物质量浓度在不同粒径大气颗粒物中的分布存在显著差异,分别如图 4 和图 5 所示.

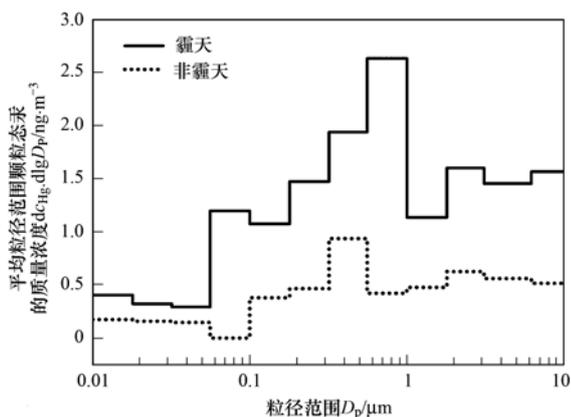


图 4 霾天和非霾天颗粒态汞的粒径分布

Fig. 4 Size distributions of particulate mercury during haze and non-haze days

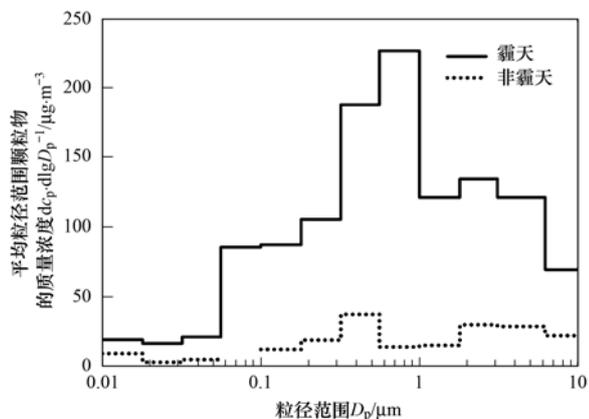


图 5 霾天和非霾天颗粒物的粒径分布

Fig. 5 Size distributions of particulate matters during haze and non-haze days

采样期间霾污染天的颗粒态汞平均质量浓度  $0.31 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  是非霾期间颗粒态汞平均质量浓度  $0.11 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的 2~3 倍.霾和非霾天大气中颗粒汞的质量浓度均呈双峰分布,霾污染天一个峰值在粒径范围  $0.56 \sim 1.0 \mu\text{m}$  的颗粒物上,另一个峰值在粒径范围为  $3.1 \sim 6.2 \mu\text{m}$  的颗粒物中,这与修光利等<sup>[15]</sup>的研究结果(颗粒态汞浓度随粒径分布呈双峰型,2 个峰值分别出现在粒径  $1.0 \mu\text{m}$  和  $4.0 \mu\text{m}$  左右)相一致.而非霾天汞浓度的一个峰值在粒径范围为  $0.32 \sim 0.56 \mu\text{m}$  的颗粒物上,另一个在粒径范围为  $3.1 \sim 6.2 \mu\text{m}$  的颗粒物中.由图 5 可以发现,颗粒物质量浓度随粒径呈现同样的分布特征.霾期间颗粒态汞随粒径分布情况随非霾期略向大粒径方向偏移,这说明了灰霾时颗粒态汞在积聚成长.图 5 中,颗粒物质量浓度也出现粒径位移,北京<sup>[16]</sup>和广州<sup>[17]</sup>的研究中也观测到清洁天到污染天颗粒物的分布向大粒径的方向偏移的情况.颗粒态汞主要分布在  $\leq 1.0 \mu\text{m}$  的颗粒物上,霾和非霾天分别占测定总量的 62.1% 和 55.1%,与台湾<sup>[18]</sup>和北京<sup>[7]</sup>等地区的监测结果相似.由于 PM<sub>1</sub> 能够在大气中长时间停留以及长距离传输<sup>[19]</sup>,而上海冬季盛行西北风,所以上海以北的地区排放的细粒子传输到上海,可能是导致 PM<sub>1</sub> 中颗粒态汞含量较高的原因之一.另一方面,细颗粒物是汞吸附和转化的重要场所,细颗粒物的增加也是颗粒态汞含量增加的重要因素.

## 2.3 单位质量不同粒径颗粒物中颗粒汞的含量

从图 6 中可以发现,霾和非霾天单位质量不同粒径颗粒物中颗粒态汞的含量存在差异.非霾期间颗粒态汞在颗粒物中的平均含量为  $0.029 \text{ ng}\cdot\mu\text{g}^{-1}$  较霾期  $0.015 \text{ ng}\cdot\mu\text{g}^{-1}$  偏高,这是因为污染的过程中其他污染物迅速成长,而汞相对稳定成长较慢,其

在颗粒物中的比重下降. 例如大气中的挥发性有机物(VOCs)会通过氧化形成低挥发性物质而吸附在颗粒物上形成二次气溶胶<sup>[20]</sup>. 在粒径范围为0.018~0.032 μm的颗粒物上霾天和非霾天的颗粒态汞含量分别为0.02 ng·μg<sup>-1</sup>和0.057 ng·μg<sup>-1</sup>,差异尤为显著,而在0.010~0.018 μm粒径范围内霾天与非霾天颗粒态汞含量差异较小,表明霾污染过程中排放的其他污染物迅速反应进一步转化形成的二次细颗粒物. 霾污染日,细颗粒物上颗粒态汞的含量最高值出现在最小粒径范围的颗粒物上(0.010~0.018 μm)为0.021 ng·μg<sup>-1</sup>,其他较大粒径范围颗粒物上的颗粒态汞的含量均较小,再一次说明了其他污染物的成长速度较快. 无论是霾污染日还是非霾日,单位质量颗粒中汞含量的最高值均在纳米级的颗粒物上,说明粒径较小的颗粒物对Hg的载带能力较强,这与Keeler等<sup>[21]</sup>的研究结果一致.

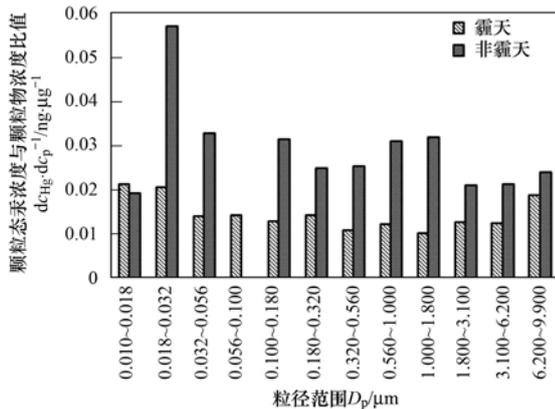


图6 不同粒径颗粒态汞浓度与颗粒物浓度比值

Fig. 6 Ratio of the concentrations of particulate mercury and particles with different diameters

#### 2.4 霾和非霾期间不同模态颗粒态汞质量浓度

由于不同粒径范围的颗粒物来源以及环境行为的差异,可以将颗粒物分为以下4种模态进行来源和成长分析:凝结核模态(condensation nuclei mode, 10~18 nm)、爱根核模态(aitken mode, 18~100 nm)、积聚核模态(accumulation mode, 100~1800 nm)和粗粒子模态(coarse mode, 1800~18000 nm)<sup>[22]</sup>. 其中凝结核模态的颗粒物主要是由一次排放的气态前体物的凝结产生的,爱根核模态主要来源于一次气溶胶粒子和气体分子通过化学反应均相成核转换成的二次气溶胶粒子,积聚核模态粒子主要为爱根核模态的凝聚,而粗粒子模态主要是本地来源扬尘、风沙等<sup>[23]</sup>. 图7为霾与非霾天不同模态颗粒态汞的质量浓度比较.

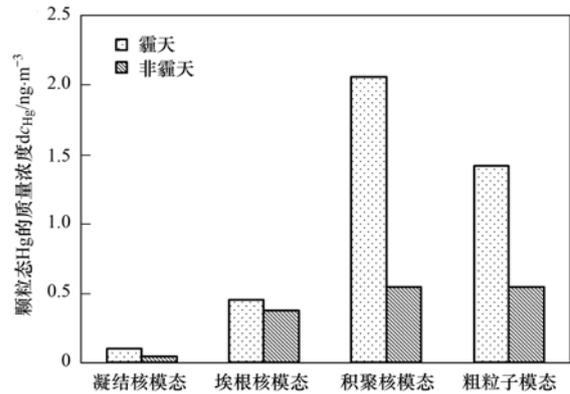


图7 霾天和非霾天不同模态颗粒态汞含量比较

Fig. 7 Mode distribution of particulate mercury during haze and non-haze days

由图7可以发现,不同模态的颗粒态汞质量浓度存在显著差异. 霾天凝结核模态和爱根核模态粒子中颗粒态汞质量浓度为0.56 ng·m<sup>-3</sup>略高于非霾天0.42 ng·m<sup>-3</sup>,说明霾天一次和二次气溶胶粒子中颗粒态汞质量浓度高于非霾天,由于燃煤是上海市大气汞的最主要来源<sup>[24]</sup>,可推知霾污染天的燃煤的排放量较高. 霾天积聚核模态粒子中颗粒态汞质量浓度为2.06 ng·m<sup>-3</sup>明显高于非霾天0.55 ng·m<sup>-3</sup>,这是因为霾天积聚核模态粒子中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度较高,而颗粒态汞质量浓度与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度存在显著相关性<sup>[15]</sup>,也说明了颗粒态汞参与了颗粒物的成长,颗粒态汞的成长是导致污染天的颗粒物浓度增加的重要因素之一. 灰霾期积聚态颗粒汞的质量浓度明显比粗粒子态颗粒汞质量浓度高;而在非灰霾期,积聚态颗粒汞与粗粒子态颗粒汞的质量浓度相当. 这是因为粗颗粒物沉降速度较快,可以通过干沉降去除,而积聚态颗粒物粒径较小,难沉降,导致积聚态颗粒物大幅增加,而积聚态颗粒物具有较大的消光系数<sup>[25]</sup>,这是灰霾形成的主要原因. 另外,霾天粗粒子模态粒子的颗粒态汞的质量浓度高于非霾天,也侧面证明扬尘或者风沙中含有颗粒汞以及本地扬尘风沙的增加也是导致颗粒物污染加重的原因之一.

#### 2.5 霾和非霾期间不同粒径颗粒物质量浓度变化率和颗粒态汞变化率比值

为了方便作图与表达,本研究分别把不同粒径范围0.010~0.018 μm、0.018~0.032 μm……6.2~9.9 μm记作M1、M2……M12. 计算不同粒径范围间颗粒物质量浓度变化率与颗粒态汞变化率间,得到二者的比值,作出图8.

由图8可以发现,不同粒径颗粒物质量浓度变化率和颗粒态汞变化率比值波动变化. 霾天的

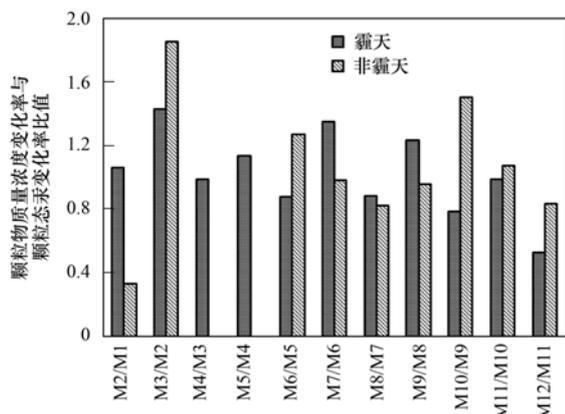


图8 霾天和非霾天不同粒径颗粒物质量浓度变化率和颗粒态汞变化率比值

Fig. 8 Ratio of the rate changes of the concentrations of particles and particulate mercury during haze and non-haze days

M2/M1、M3/M2、M5/M4、M7/M6、M9/M8 比值均大于1,说明颗粒物在相应粒径变化情况下颗粒物的变化速率大于颗粒态汞的变化速率. 霾和非霾天最高值均在 M3/M2,即颗粒物从粒径范围 M3 到 M2,颗粒物的成长速率明显高于颗粒态汞的成长速率,主要因为均相成核反应迅速,二次气溶胶粒子形成较快. 霾天最小值在 M12/M11,为0.53,这可能是因为风沙扬尘中含有颗粒汞,颗粒汞出现较大的变化. 非霾天,由于污染物排放较少,其凝结物较少,导致最低值0.34出现在 M2/M1.

### 3 结论

(1)颗粒态汞含量与颗粒物含量正相关;采样期间霾天颗粒态汞平均浓度  $0.31 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  是非霾天颗粒态汞平均浓度  $0.11 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  的2~3倍;霾和非霾天颗粒态汞浓度以及颗粒物质量浓度随粒径分布呈双峰型,霾期间峰值分别出现在  $0.56 \sim 1.0 \mu\text{m}$  粒径段和  $3.1 \sim 6.2 \mu\text{m}$  粒径段,而非霾期峰值分别出现在  $0.32 \mu\text{m} \sim 0.56 \mu\text{m}$  和  $3.1 \sim 6.2 \mu\text{m}$  粒径段;霾天较非霾天颗粒态汞和颗粒物的粒径分布均出现了向大粒径方向偏移. 颗粒态汞主要分布在粒径  $\leq 1 \mu\text{m}$  粒子上,能够长时间停留和长距离输送.

(2)非霾期间颗粒态汞在颗粒物中的平均含量为  $0.029 \text{ ng} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ,而霾期间为  $0.015 \text{ ng} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ ;霾污染过程中其他污染物迅速成长,而汞成长较慢.

(3)霾天积聚核模态粒子中颗粒态汞质量浓度为  $2.06 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而非霾天为  $0.55 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ,积聚态颗粒物的大幅增加,是灰霾形成的主要原因.

(4)本地源燃煤等的排放以及风沙扬尘的增加

和外地源的输送是导致霾天污染严重的重要原因.

### 参考文献:

- [1] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury—an overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [2] Poissant L. Total gaseous mercury in Québec (Canada) in 1998 [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **259**(1-3): 191-201.
- [3] 王章玮, 张晓山, 张逸, 等. 汞在不同粒径大气颗粒物中的分布[J]. *环境化学*, 2005, **24**(1): 72-75.
- [4] 陈作帅, 王章玮, 张晓山. 北京市典型地区大气可吸入颗粒物中汞的浓度水平和粒径分布[J]. *环境化学*, 2007, **26**(5): 680-683.
- [5] Feddersen D M, Talbot R, Mao H, *et al.* Size distribution of particulate mercury in marine and coastal atmospheres [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(22): 10899-10909.
- [6] Xiu G L, Cai J, Zhang W Y, *et al.* Speciated mercury in size-fractionated particles in Shanghai ambient air [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(19): 3145-3154.
- [7] Wang Z W, Zhang X S, Chen Z S, *et al.* Mercury concentrations in size-fractionated airborne particles at urban and suburban sites in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(12): 2194-2201.
- [8] Kim P R, Han Y J, Holsen T M, *et al.* Atmospheric particulate mercury: Concentrations and size distributions [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 94-102.
- [9] Fernández Álvarez F, Ternero Rodríguez M, Fernández Espinosa A J, *et al.* Physical speciation of arsenic, mercury, lead, cadmium and nickel in inhalable atmospheric particles [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **524**(1-2): 33-40.
- [10] Karthikeyan S, Joshi U M, Balasubramanian R. Microwave assisted sample preparation for determining water-soluble fraction of trace elements in urban airborne particulate matter: Evaluation of bioavailability [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, **576**(1): 23-30.
- [11] Quraishi T A, Mir B P, Schauer J J. Comparison of two extraction methods for metals from atmospheric particulate matter [J]. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 2009, **31**(5): 750-756.
- [12] Feng X B, Lu J Y, Grègoire D C, *et al.* Analysis of inorganic mercury species associated with airborne particulate matter/aerosols: method development [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, **380**(4): 683-689.
- [13] Richaud R, Lachas H, Healey A E, *et al.* Trace element analysis of gasification plant samples by i. c. p. -m. s.: validation by comparison of results from two laboratories [J]. *Fuel*, 2000, **79**(9): 1077-1087.
- [14] 段玉森. 上海市霾污染判别指标体系初步研究 [J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(3): 49-54.
- [15] 修光利, 施双燕, 张大年. 大气微小颗粒物中汞的污染特性初步研究 [J]. *上海环境科学*, 2003, **22**(5): 310-312.
- [16] Tian S L, Pan Y P, Liu Z R, *et al.* Size-resolved aerosol

- chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **279**: 452-460.
- [17] Yu H, Wu C, Wu D, *et al.* Size distributions of elemental carbon and its contribution to light extinction in urban and rural locations in the pearl river delta region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(11): 5107-5119.
- [18] Tsai Y I, Kuo S C, Lin Y H. Temporal characteristics of inhalable mercury and arsenic aerosols in the urban atmosphere in southern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(24): 3401-3411.
- [19] Andreae M O, Andreae T W, Annegarn H, *et al.* Airborne studies of aerosol emissions from savanna fires in southern Africa; 2. Aerosol chemical composition [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1998, **103**(D24): 32119-32128.
- [20] 谢绍东, 于森, 姜明. 有机气溶胶的来源与形成研究现状 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1933-1939.
- [21] Keeler G, Glinsom G, Pirrone N. Particulate mercury in the atmosphere: its significance, transport, transformation and sources[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **80**(1-4): 159-168.
- [22] Whitby K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1978, **12**(1-3): 135-159.
- [23] Steinfeld J I. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change [J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1998, **40**(7): 26.
- [24] 修光利, 张爱东, 金庆西, 等. 大气中不同粒径颗粒态汞污染的时空分布特征[J]. *华东理工大学学报 (自然科学版)*, 2005, **31**(4): 466-470.
- [25] Jung C H, Kim Y P. Numerical estimation of the effects of condensation and coagulation on visibility using the moment method[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, **37**(2): 143-161.

## CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days .....	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> ( 373 )
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station .....	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> ( 379 )
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan .....	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> ( 388 )
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Taiyuan .....	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> ( 396 )
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China .....	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 402 )
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing .....	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> ( 408 )
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands .....	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> ( 415 )
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring .....	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> ( 421 )
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China .....	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> ( 430 )
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China .....	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> ( 438 )
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China .....	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> ( 448 )
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary .....	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> ( 457 )
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis .....	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> ( 464 )
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake .....	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> ( 471 )
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch .....	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> ( 481 )
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China .....	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing ( 490 )
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region .....	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> ( 497 )
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China .....	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> ( 507 )
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO <sub>2</sub> and Its Degradation Products .....	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> ( 516 )
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration .....	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong ( 523 )
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution .....	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> ( 530 )
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution .....	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> ( 537 )
Adsorption of the TiO <sub>2</sub> @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed .....	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> ( 545 )
Preparation and Pb <sup>2+</sup> Electrosorption Characteristics of MnO <sub>2</sub> /CFP Composite Electrode .....	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> ( 552 )
Preparation of Weak Light Driven TiO <sub>2</sub> Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis .....	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> ( 559 )
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO <sub>2</sub> Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation .....	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> ( 568 )
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co .....	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan ( 576 )
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles .....	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> ( 584 )
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal .....	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> ( 590 )
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition .....	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 597 )
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater .....	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> ( 604 )
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement .....	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> ( 612 )
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant .....	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> ( 619 )
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China .....	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> ( 625 )
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N <sub>2</sub> O Emission from Arid Farmland .....	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> ( 636 )
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest .....	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 644 )
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin .....	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> ( 652 )
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China .....	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> ( 661 )
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake .....	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> ( 669 )
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation .....	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen ( 678 )
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation .....	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> ( 686 )
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice .....	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> ( 694 )
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons .....	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> ( 700 )
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L. ....	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> ( 706 )
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel .....	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> ( 712 )
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos .....	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> ( 719 )
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu <sup>2+</sup> and Chlorpyrifos .....	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> ( 727 )
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors .....	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> ( 736 )
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na <sup>+</sup> -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening .....	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> ( 744 )
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District .....	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning ( 751 )

# 《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 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. 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