

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

嵊泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系

程娜¹, 钱冠磊², 段炼¹, 赵梦飞¹, 修光利^{1*}

(1. 华东理工大学国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237; 2. 浙江省嵊泗县环境监测站, 舟山 202450)

摘要: 2014 年 11 月 ~ 2015 年 8 月在舟山群岛嵊泗岛上设定采样点采集了 4 个不同季节的大气 PM_{2.5} 样品. 采用微波消解-原子荧光光度法测定了颗粒物中汞及其不同形态, 采用热/光碳分析仪分析样品中有机碳 (OC) 和元素碳 (EC). 结果表明, 嵊泗岛上大气 PM_{2.5} 中总汞 (PBM) 的质量浓度范围为 0.02 ~ 1.25 ng·m⁻³, 而单位质量颗粒物中汞的含量为 (12.46 ± 18.79) μg·g⁻¹, 比陆地城市 PM_{2.5} 的汞含量偏高. ANOVA 分析结果表明, PBM 的季节变化规律为: 秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季. 春秋季节汞的质量浓度较高, 这表明春秋季节嵊泗地区的汞可能受到外来输送的影响. 此外, 大气 PM_{2.5} 中不同形态汞的分析结果表明, 惰性汞 (RPM) 的比例最高, 占 53.1%. OC、EC 均与 PBM 显示出明显的正相关性, 表明碳组分有利于汞的气-粒转化. 由于 OC/EC 比值间接反映了大气光氧化能力的高低, 而 OC/EC 与可溶盐酸汞 (HPM) 呈显著正相关, 这说明高浓度 HPM 主要来自大气中的气-粒转化. char-EC/soot-EC 与形态汞呈现显著负相关, 表明嵊泗地区的大气颗粒汞主要受外界源输入的影响.

关键词: 海岛; PM_{2.5}; PM_{2.5} 中总汞 (PBM); 汞形态; 碳组分

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0438-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607203

Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM_{2.5} in Shengsi Region

CHENG Na¹, QIAN Guan-lei², DUAN Lian¹, ZHAO Meng-fei¹, XIU Guang-li^{1*}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Processes, School of Resources & Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Environmental Monitoring Station of Shengsi, Zhoushan 202450, China)

Abstract: PM_{2.5} samples of four seasons were collected from Nov. 2014 to Aug. 2015 at the site of Shengsi island in Zhoushan islands. Mercury (Hg) and speciated mercury concentrations in PM_{2.5} samples were measured by Atomic Fluorescence Spectrometry (AFS-9130, China) after digestion with CEM Mars Xpress (PyNN Corporation, USA). The concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} samples were determined by thermal/optical carbon analyzer (DRI, USA). The results showed that the daily concentrations of PM_{2.5}-bounded mercury (PBM) ranged from 0.02 to 1.25 ng·m⁻³. Moreover, the mass content of PBM was (12.46 ± 18.79) μg·g⁻¹, which was higher than those in continental cities. ANOVA analysis result suggested that the highest average mass concentrations of PBM occurred in fall, sequentially followed by spring, winter and summer. Higher concentrations of PBM were in fall and spring, which might be related to biomass burning. In addition, RPM took the highest fraction of 53.1% in PBM, followed by HPM (27.3%) and EPM (19.7%), which might be resulted from the complicated composition of marine aerosols. The strong correlations among OC, EC and PBM indicated that carbonaceous composition may affect the transport of Hg in the atmosphere. The ratio of OC/EC represents atmospheric photo-oxidation capacity, so the positive correlation between OC/EC ratio and HPM indicated that HPM was resulted from atmospheric gas-particle transformation. The negative correlation between Char-EC/soot-EC and mercury species indicated that the atmospheric particle-bounded mercury might come mainly from the input of external mercury sources.

Key words: island; PM_{2.5}; PM_{2.5}-bounded mercury (PBM); mercury species; carbonaceous components

大气汞污染是一个全球性问题,汞在大气中的存在形态决定了大气汞的跨界输送和沉降^[1]. 大气汞的存在形态通常分为气态元素汞 (GEM)、活性气态汞 (RGM)、颗粒物态汞 (TPM). 颗粒物作为大气中汞沉降的重要载体,颗粒物中汞的形态对于阐明气态汞的沉降速度和气粒转化规律有重要的意义^[2]. 颗粒物中其他组分对汞形态间的转化具有重

要影响,硫酸盐颗粒物能够促进颗粒物中汞向气态汞转化,硝酸盐颗粒物和碳组分则可以促进汞从气态向颗粒态转化^[3]. 碳组分作为大气颗粒物的重要

收稿日期: 2016-07-28; 修订日期: 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21277044)

作者简介: 程娜 (1991 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: chengna1991@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: xiugl@ecust.edu.cn

组成部分,主要包括有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(element carbon, EC),其中 OC 来源包括一次排放源和二次气溶胶反应等,EC 主要来自于化石燃烧和生物质的不完全燃烧. 为了表征不同燃烧源对汞或者黑碳的影响,有研究将 EC 进一步分成 char-EC 和 soot-EC 两部分^[4].

近年来,大气汞的形态特征以及碳组分对大气颗粒物的贡献引起国内外科研工作者的广泛关注^[5-8]. 相关研究发现大气中汞可能存在跨界输送现象,但是相应的输送机制并不清楚,特别是针对陆地气溶胶与海洋气溶胶之间交换作用的研究还较为匮乏. 本研究通过采集海岛地区的 PM_{2.5} 样品,分析测定颗粒总汞(PBM)、可溶盐酸汞(HPM)、元素汞(EPM)、惰性汞(RPM)以及 OC 和 EC 等组分,探讨海洋气溶胶中汞的形态分布以及碳组分对其转化和输送机制的影响.

1 材料与方法

1.1 采样地点

PM_{2.5} 样品采样点设于浙江省最东部、舟山群岛最北部嵊泗县的菜园中学教学楼(30.73°N, 122.46°E)顶部(净高约 16 m). 该采样点位于杭州湾以东,长江口东南,且属于国家级风景名胜群岛,采样点所在岛屿无大型工业污染源.

1.2 样品采集

PM_{2.5} 样品的采集采用国产武汉天虹智能采样器(TH-150A 型),采样气体流速为 100 L·min⁻¹. 采样时间:2014 年 11 月 1 日~11 月 30 日(秋季)、2014 年 12 月 1 日~2015 年 2 月 28 日(冬季)、2015 年 3 月 1 日~5 月 31 日(春季)和 2015 年 6 月 1 日~8 月 31 日(夏季),每次采样时间为 09:00 到次日 08:00,每 23h 为一个混合样,共采集大气 PM_{2.5} 样品 75 个,其中秋季 16 个样品,冬季 25 个样品,春季 15 个样品,夏季 19 个样品.

1.3 汞形态分析

1.3.1 颗粒态总汞(PBM)的测定

使用微波消解仪(美国 CEM 公司,ARS)消解 PM_{2.5} 样品,然后使用原子荧光光度计(北京吉天,S-9130)测定汞的含量,样品采集及分析均参照美国 EPA Method IO-5 方法^[9]. 具体步骤为:取一定样品滤膜,置于聚四氟乙烯消化管中,加入消解液 20 mL HNO₃ (10% HNO₃),充分反应后置于密封的微波消解仪中,进行消解. 加热条件为 160°C, 70 psi, 20 min. 然后根据 EPA method 1631E^[10] 测定消解液

中汞. 消解液自然冷却至室温后取出,该冷却过程约为 1 h,然后使用超纯水逐渐将消解液稀释至 50 mL. 稀释过程中加入 BrCl (0.5% 消解液体积),使所有的汞氧化为二价汞,加入 0.5 mL 的 NH₂OH·HCl,反应 5 min,处理好的稀释液待测.

1.3.2 形态汞的测定

采用化学序批式提取方法进行形态分析. 依据三步提取方式将 PM_{2.5} 中的汞分 3 种形态:可溶盐酸汞(HPM, 主要以 Hg²⁺ 为主,包括 HgCl₂、HgO₂、HgBr₂),可溶硝酸汞(EPM, Hg⁰),惰性汞(RPM). 首先将部分滤膜加入 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 和 1% 的 CuSO₄ 组成的消解液,超声波振荡 30 min,分离后上清液进入冷蒸气化过程测定,将该部分汞定义为 HPM; 在消解瓶中加入 2 mol·L⁻¹ 的 HNO₃,继续超声波振荡 30 min,测定分离后的上清液中的汞,将该部分汞定义为 EPM; 最后剩余的滤膜重复 1.3.1 节的步骤测定,所测的汞定义最后为 RPM. 具体的操作过程详见文献[11,12].

1.4 碳分析

采用美国沙漠所 DRI(Desert Research Institute)的 DRI2015 热/光碳分析仪分析样品的 OC 和 EC 浓度. 应用 IMPEOVE_A (Interagency Monitoring of Protected Visual Environment _ A) 和 TOR (Thermal Optical Reflectance) 的方法. 在纯氦环境中,于环境温度(25°C 左右)至 140°C (OC1)、140~280°C (OC2)、280~480°C (OC3) 和 480~580°C (OC4) 温度下热解有机碳,然后在含 2% 氧气的氦气环境中,于 580°C (EC1)、580~740°C (EC2) 和 740~840°C (EC3) 逐步加热氧化元素碳. EC 测定过程中反射率回到初值时的部分被认为是 OC 炭化过程中形成的裂解碳(OP). OC 定义为(OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OP), EC 定义为(EC1 + EC2 + EC3-OP). 其中 char-EC 为(EC1-OP), soot-EC 为(EC2 + EC3)^[4,8].

1.5 实验保证

采样滤膜选用石英滤膜(Whatman 公司,直径为 90 mm,孔径为 2.0 μm),采样前将滤膜在马弗炉中 600°C 下灼烧 4 h,去除滤膜中的汞;然后放入恒温、恒湿箱 24 h(温度为 25°C ± 1°C,相对湿度为 35% ± 2%),用精度为 0.01 mg 的电子天平(Sartorius,德国)称重. 每片滤膜称量 3 次取均值,误差小于 0.02 mg. 采样结束后,再放入恒温、恒湿箱 24 h,称重,2 次质量差为 PM_{2.5} 的质量,计算测得颗粒物中汞的浓度,然后滤膜以密封袋封装、冷冻

在 -18°C 下保存至成分分析. 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, 以满足实验要求. 本研究对汞的回收率在 $91\% \sim 104\%$ 之间. 实验均在清洁无污染的操作台上进行, 所有试剂均为优级纯或分析纯.

2 结果与讨论

2.1 汞的季节性变化

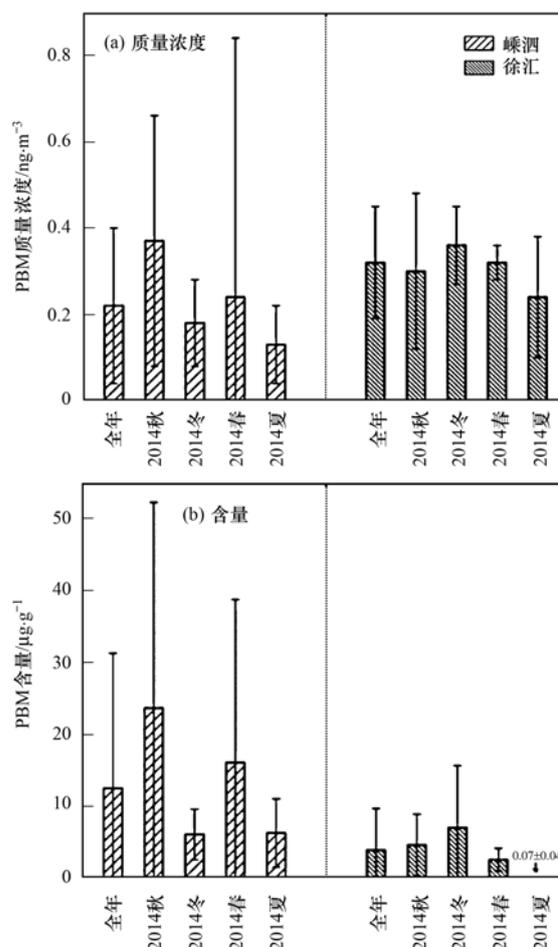
2.1.1 颗粒态总汞 (PBM)

在嵊泗采样期间, 同步在上海市徐汇区华东理工大学实验楼楼顶采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 进行了颗粒物中汞的浓度测定^[13], 因此图 1 给出了嵊泗、上海市徐汇区采样点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中总汞的浓度水平. 采样期间嵊泗地区 PBM 的质量浓度为 $0.02 \sim 1.25 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于上海徐汇 [$(0.56 \pm 0.22) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$]^[12]、贵阳 [$(0.37 \pm 0.68) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$]^[14]、南京 [$(1.10 \pm 0.57) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$]^[15]、与厦门 ($0.17 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[16] 的结果相近. 但是, 嵊泗地区 PBM 的含量为 $(12.46 \pm 18.79) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 远远高于上海徐汇 [$(3.86 \pm 5.79) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$]^[13], 不同 PBM 的质量浓度和含量(质量分数, 下同)可能是由于采样地点、采样时间的不同, 这与不同采样点的污染源特征有关. 嵊泗岛的单位质量颗粒物中汞的含量高于城市地区, 这说明海洋上空的颗粒物可能更容易富集汞.

PBM 的季节变化由高到低依次为秋季、春季、冬季、夏季, 平均浓度依次为 (0.37 ± 0.29) 、 (0.24 ± 0.60) 、 (0.18 ± 0.10) 和 $(0.13 \pm 0.09) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 这种季节变化规律不同于上海城区所得到的冬季浓度最高的结果^[5]. 农业和渔业是嵊泗地区经济的重要来源之一, 春季和秋季是生物质燃烧的高峰期, 因此这可能是造成秋季和春季 PBM 浓度较高的原因.

2.1.2 形态汞

采样期间, 可溶盐酸汞 (HPM) 的质量浓度范围为 $0.03 \sim 0.20 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均质量浓度为 $(0.10 \pm 0.05) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 占总汞的 27.3% ; 元素汞 (EPM) 的质量浓度范围为 $0.02 \sim 0.15 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $(0.09 \pm 0.06) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 占总汞的 19.7% ; 惰性汞 (RPM) 的浓度范围为 $0.04 \sim 1.12 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $(0.23 \pm 0.18) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 占总汞的 53.1% . 该变化规律与上海陆地城市地区^[5] 研究结果不同, 本研究中颗粒中汞主要以 RPM 为主, 其次是 HPM, 含量最低为 EPM, 然而上海地区的研究显示 HPM 占颗粒态汞的 $50\% \sim 65\%$, 其次为 RPM, EPM 仍然



图中徐汇的数据引自文献^[13]

图 1 2014 ~ 2015 年嵊泗、徐汇采样点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PBM 质量浓度和含量

Fig. 1 Mass concentration of PBM and mass content of PBM in atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Shengsi and Xuhui sampling sites from 2014 to 2015

为最低. 造成这种不同的可能原因有: ①上海城区属于煤烟与汽车尾气污染并重的城市, 大气汞的来源多于嵊泗海岛地区; 其次, 较多的汽车尾气排放出的 NO_x 等物质对大气光化学起重要作用, 使得上海城区的大气氧化性高于嵊泗海岛地区, 故而城区大气中的汞更易氧化为 Hg^{2+} ^[17]; ②由于元素汞易受气象因素以及 $\text{PM}_{2.5}$ 中组分的影响, 容易使颗粒物中汞反释放进入大气环境或转化为 $\text{PM}_{2.5}$ 中其他形态汞, 因此元素态汞在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的浓度低于其他两种结合形式的汞; ③海洋气溶胶组分复杂, 使得颗粒态汞更易以 RPM 的形式存在.

$\text{PM}_{2.5}$ 中形态汞的季节变化规律如图 2 所示. 从中可知, 在秋季和冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中, HPM 所占的比例要高于春季和夏季. HPM 极少直接由人为源产生, 主要是由大气中的元素态汞通过二次反应的产物. 在

大气中,元素态汞氧化物如臭氧(O₃)、羟基自由基(·OH)、超氧化氢自由基(HO₂[·])、氮氧化物以及卤素等在气相或液相中反应生成 HgO、HgX₂ (X 为 Cl、Br、I)^[18,19]. 因此,大气环境氧化能力的高低,以及颗粒物中组分可能会影响 HPM 在 PM_{2.5} 中的浓度变化^[5]. 在温度较低的季节,PM_{2.5} 中的内能降低,有利于气态元素汞从气相向固相中迁移,HPM 所占比例增高则可能与颗粒物中的特定成分有关^[5]. 此外,有研究表明,颗粒态汞与温度呈显著正相关,气温较高的白天也常常是人类活动较多的时候,将向环境中释放各种颗粒物,如汽车行驶、施工等^[20]. 因而,EPM 的季节变化规律可能与温度有关.

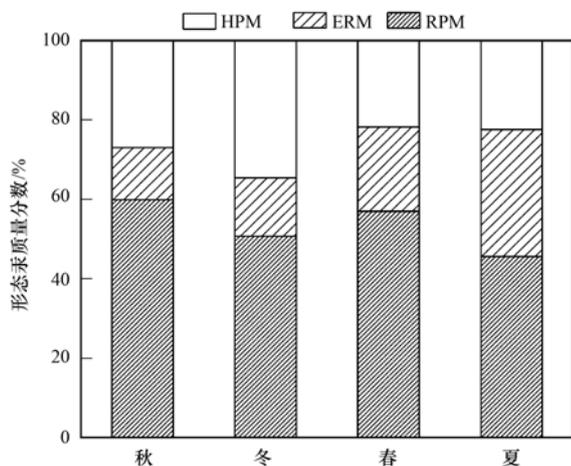


图2 2014~2015 岷泗不同季节大气 PM_{2.5} 中汞的形态变化

Fig. 2 Seasonal variation of mercury species in atmospheric PM_{2.5} from 2014 to 2015 in Shengsi

2.2 碳组分与汞之间的关系

2.2.1 OC、EC 浓度的季节变化

图3为大气 PM_{2.5} 中碳组分的浓度变化. 单因素方差分析的结果表明,OC、EC 具有相同的季节变化规律,且浓度由高低为冬季、春季、秋季、夏季. 碳组分变化规律与上海市的研究结果基本相同,冬季最高,夏季最低^[5]. 春季和秋季具有较高的 EC 浓度可能与收获季节的生物质燃烧有关^[21]. 此外,OC 与 EC 表现出显著的正相关,相关性系数为 0.853 ($P < 0.01$),说明 OC 与 EC 可能有共同的来源.

为研究碳组分对大气汞转化的影响,对采样期间 PM_{2.5} 中 OC、EC 与 PBM 之间的相关性进行分析. 结果表明,OC、EC 与 PBM 均呈显著正相关,相关系数分别为 0.266 ($P < 0.01$) 和 0.339 ($P < 0.05$),这与其他相关研究结果一致^[5],这表明大气

环境中颗粒物的碳含量增加时,汞更容易富集在颗粒物中. EC 与 PBM 的相关性强于 OC 与 PBM 之间的相关性,可能是由于碳组分对大气汞的富集作用主要与元素碳有关. 此外,EC 与 PBM 的正相关性可能预示着 PBM 在秋季和春季较高浓度与收获季节的生物质燃烧有关. 因此在海洋上空气态汞的输送过程中,EC 可能有利于促进汞的吸收进而提高汞形态转化的速度.

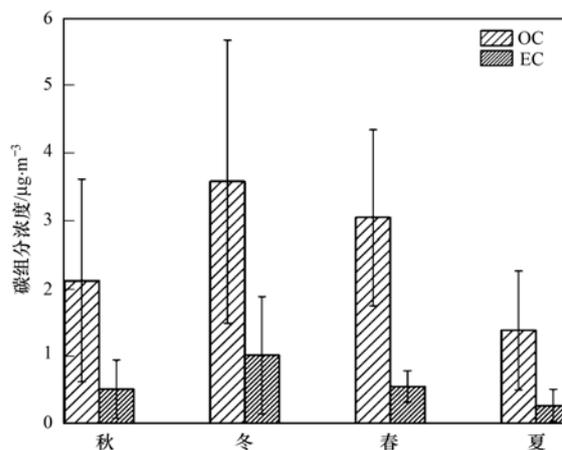


图3 不同季节大气 PM_{2.5} 中碳组分的变化

Fig. 3 Seasonal variation of carbon compositions in atmospheric PM_{2.5}

表1为岷泗大气 PM_{2.5} 中形态汞与 EC 之间的关系. 对于汞的质量含量而言,各形态汞与 EC 之间均表现为显著的正相关性,HPM 与 EC 之间的相关性要显著弱于其他两种形态. 相关研究发现 EC 和形态汞具有不同的来源,其中 EC 通常由化石燃料或生物质的不完全燃烧产生,由污染源直接排放产生;EPM 被认为是大气中的 Hg⁰ 经过物理性吸附作用而富集到颗粒物上;然而 HPM 则极少直接由人为源产生,主要是由大气中的元素态汞通过二次反应的产物^[18];RPM 的来源较复杂,尚不明确. 因此来源的不同是各形态汞与 EC 之间不同相关性的原因之一. 各形态汞与 EC 之间不同相关性,还预示着汞在气-粒相的转化可能不是单一的简单的物理吸附作用,还可能受到化学吸附作用的影响.

表1 2014~2015 年岷泗大气 PM_{2.5} 中形态汞与 EC 的皮尔逊相关系数¹⁾

项目	HPM-EC	EPM-EC	RPM-EC
质量浓度	0.08	-0.3	-0.11
含量	0.17	0.25*	0.27*

1) * 表示 $P < 0.05$

2.2.2 OC/EC 的比值

OC/EC 比值可用于研究碳气溶胶的排放及化学转化的特性^[22],即 OC/EC 比值高,说明二次有机气溶胶的贡献大. 因此 OC/EC 比值可以用来间接表征大气的光氧化能力. 采样期间,OC/EC 比值在 1.02 ~ 18.71 范围内,秋季、冬季、春季、夏季的平均值分别为: 5.71 ± 3.62 、 5.09 ± 3.54 、 6.10 ± 2.88 和 10.05 ± 12.73 . 其中夏季 OC/EC 的比值最高. 这表明夏季生成的二次气溶胶较多,且夏季具有较高的大气氧化能力. 由表 2 所示,大气 $PM_{2.5}$ 中 HPM(M) 与 OC/EC 的比值在秋冬季节均呈现出显著的正相关性,在春季和夏季却没有表现出显著相关性. 一方面,这种现象表明二次有机气溶胶的生成有利于大气汞向颗粒物中汞转化,并且以 HPM 的形式存在;另一方面,这种现象表明在大气光氧化能力较强的时候,大气中的二价汞可能以其他形式直接沉降,比如嵊泗地区夏季雨水丰沛,使得大气中的二价汞直接以湿沉降的形式沉淀. 因此, $PM_{2.5}$ 中的 HPM 占比的最高值出现在夏季.

表 2 2014 ~ 2015 年嵊泗大气 $PM_{2.5}$ 中形态汞与 OC/EC 的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlation coefficient of mercury species and OC/EC in atmospheric $PM_{2.5}$ in Shengsi from 2014 to 2015

相关性	秋	冬	春	夏
OC/EC-HPM(V)	-0.25	-0.04	0.003	0.27
OC/EC-EPM(V)	0.12	0.45*	0.23	-0.35
OC/EC-RPM(V)	-0.24	0.32	0.24	-0.12
OC/EC-HPM(M)	0.70**	0.46*	0.09	0.33
OC/EC-EPM(M)	-0.03	0.42	0.07	0.48
OC/EC-RPM(M)	-0.03	0.42	0.09	-0.22

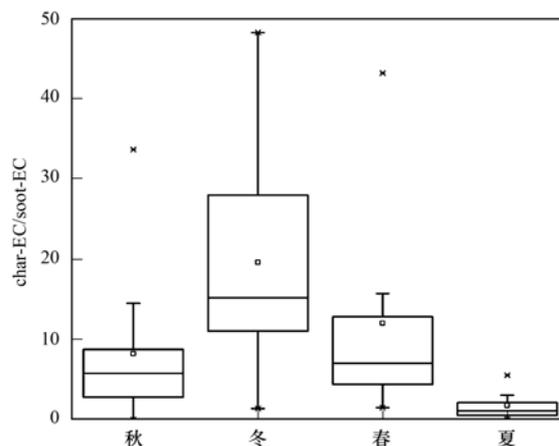
1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, (V) 为质量浓度, (M) 为含量

2.3 来源分析

有研究将 EC 进一步细分为 char-EC(主要来源是生物质燃烧和化石燃料的燃烧)和 soot-EC(主要来源可能是机动车尾气的排放),并且采用 char-EC/soot-EC 的比值来界定不同的一次排放源^[23],探讨二次气溶胶的来源. 根据文献报道,char-EC/soot-EC 比值为 0.60 代表机动车尾气排放源^[24]; char-EC/soot-EC 比值为 11.60 ~ 31.0 代表生物质燃烧源^[25]. char-EC/soot-EC 比值为 1.31 ~ 1.90 代表燃煤源^[26]; char-EC/soot-EC 比值为 0.30 和 0.70 分别代表柴油机和汽油机尾气排放源^[27]. 在不同采样点排放源下,char-EC/soot-EC 比值有所差异,这可能与采样点的地理位置和自然条件有关. 秋季、

冬季、春季、夏季 char-EC/soot-EC 比值分别为: 8.20 ± 8.81 、 19.58 ± 13.82 、 11.99 ± 13.47 和 1.73 ± 1.81 (图 4).

本研究将 char-EC/soot-EC 比值与文献值进行比较,结果表明,春季和秋季大气颗粒物主要与燃烧源有关,特别是受生物质燃烧的影响,并且秋季来源更复杂. 此外,char-EC/soot-EC 与各形态汞均呈现出负相关性(如表 3),这表明嵊泗地区以燃煤源、机动车尾气为主. 柴油车和汽油车等对大气颗粒汞的浓度影响大,而生物质燃烧对颗粒态汞的贡献不大,考虑到嵊泗地区的地理位置,外来汞源的输入可能是主导因素. 但是秋季却发现了高于其他季节的颗粒汞浓度,可能的原因:①秋季是长三角地区灰霾高污染频繁季节,一方面气温持续下降,致使辐射逆温等天气条件频发,一方面秋收秸秆焚烧,此外,秋季长三角地区大雾频发,这些不利影响使得秋季污染物积累;②海洋气溶胶可能更容易吸附大气汞,使得在高污染的季节,嵊泗地区单位质量汞的浓度增高. 夏季 char-EC/soot-EC 比值最低,可能主要受到非生物质源的影响,但夏季大气颗粒态汞质量浓度最低,因此夏季燃煤源比较少. 冬季 char-EC/soot-EC 比值最高,还可能是受外来燃烧源的影响,这还需要进一步的研究.



箱状图上横线从上到下分别代表最大值 75%、50%、25% 和最小值的数值区间; 图中方框为 char-EC/soot-EC 的季节平均值

图 4 2014 ~ 2015 年嵊泗大气 $PM_{2.5}$ 中

char-EC/soot-EC 比值的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of char-EC/soot-EC in atmospheric $PM_{2.5}$ in Shengsi from 2014 to 2015

char-EC/soot-EC 与 HPM(M) 呈现出显著负相关($r = -0.29$, $P < 0.05$),表明在燃煤源对嵊泗地区起主要作用时,大气汞易以 HPM 存在于颗粒物中;而且这一过程有利于汞的沉降,而生物质燃烧

则不利于大气汞以 HPM 形式存在于颗粒物中. 有研究表明^[3, 28], 左旋葡聚糖促使颗粒态中的 HPM 向气态转化, 而左旋葡聚糖是生物质燃烧的示踪物, 因此可能是秋季颗粒物中 HPM 并不是主要存在形式的原因之一. 另外 char-EC/soot-EC 与 EPM(V) 呈现出明显负相关($r = -0.32$, $P < 0.05$), 因此秋

季较高浓度的颗粒态汞, 可能主要以 RPM 的形式存在. 然而 char-EC/soot-EC 与 RPM 并没有明显的相关性, 可能与 RPM 的复杂存在形式有关, 有研究表明^[11], RPM 可能的组成为有机汞或其他不溶于盐酸的汞, 比如 HgTe 和 HgSe. 这些结果表明嵊泗地区汞的气-粒转化机制较城市更为复杂.

表 3 2014 ~ 2015 年嵊泗地区大气 PM_{2.5} 中形态汞与 char-EC/soot-EC 的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Relationship between mercury species and char-EC/soot-EC in atmospheric PM_{2.5} in Shengsi from 2014 to 2015

项目	HPM-char-EC/soot-EC	EPM-char-EC/soot-EC	RPM-char-EC/soot-EC
质量浓度	-0.17	-0.32 *	-0.11
含量	-0.29 *	-0.24	-0.18

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3 结论

(1) 春季和秋季具有较高的 EC 浓度可能与收获季节的生物质燃烧有关.

(2) 大气 PM_{2.5} 中 HPM(M) 与 OC/EC 的比值在秋冬季节均呈现出明显的正相关性, 在春季和夏季却没有表现出明显的相关性, 结果表明, 大气中氧化能力促进大气元素汞以二价汞的形式存在于颗粒物中, 但是, 雨水的冲刷对颗粒物中的二价汞含量具有很大的影响.

(3) char-EC/soot-EC 与各形态汞均呈现出负相关性, 外来汞源输入可能是嵊泗地区大气汞污染的主导因素.

(4) char-EC/soot-EC 与 HPM、EPM 的负相关性表明, 秋季较高浓度的颗粒态汞, 可能主要以 RPM 的形式存在.

参考文献:

- [1] Zhang L M, Wright L P, Blanchard P. A review of current knowledge concerning dry deposition of atmospheric mercury[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(37): 5853-5864.
- [2] Sakata M, Marumoto K. Formation of atmospheric particulate mercury in the Tokyo metropolitan area [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(2): 239-246.
- [3] Rutter A P, Schauer J J. The impact of aerosol composition on the particle to gas partitioning of reactive mercury [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(11): 3934-3939.
- [4] Han Y M, Lee S C, Cao J J, et al. Spatial distribution and seasonal variation of char-EC and soot-EC in the atmosphere over China[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(38): 6066-6073.
- [5] Duan L, Xiu G L, Feng L, et al. The mercury species and their association with carbonaceous compositions, bromine and iodine in PM_{2.5} in Shanghai[J]. Chemosphere, 2016, **146**: 263-271.
- [6] Zhao M F, Qiao T, Huang Z S, et al. Comparison of ionic and carbonaceous compositions of PM_{2.5} in 2009 and 2012 in Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **536**: 695-703.
- [7] 黄众思, 修光利, 朱梦雅, 等. 上海市夏冬两季 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(4): 124-129.
- [8] 王杨君, 董亚萍, 冯加良, 等. 上海市 PM_{2.5} 中含碳物质的特征和影响因素分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1755-1761.
- [9] U. S. EPA. Sampling and analysis for atmospheric mercury, compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air (Compendium Method IO-5.0) [R]. EPA/625/R-96/010a. Cincinnati, OH: Center for Environmental Research Information Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [10] U. S. EPA. Method 1631, revision E: mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence Spectrometry [R]. EPA-821/R-02e019. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 2002.
- [11] Xiu G L, Jin Q X, Zhang D N, et al. Characterization of size-fractionated particulate mercury in Shanghai ambient air [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(3): 419-427.
- [12] 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.
- [13] Cheng N, Duan L, Xiu G L, et al. Comparison of atmospheric PM_{2.5}-bounded mercury species and their correlation with bromine and iodine at coastal urban and island sites in the eastern China [J]. Atmospheric Research, 2017, **183**: 17-25.
- [14] Fu X W, Feng X B, Qiu G L, et al. Speciated atmospheric mercury and its potential source in Guiyang, China [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(25): 4205-4212.
- [15] Zhu J, Wang T, Talbot R, et al. Characteristics of atmospheric mercury deposition and size-fractionated particulate mercury in

- urban Nanjing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(5): 2233-2244.
- [16] Xu L L, Chen J S, Yang L M, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric mercury speciation in a coastal city, Xiamen, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 530-539.
- [17] Ariya P A, Khalizov A, Gidas A. Reactions of gaseous mercury with atomic and molecular halogens: kinetics, product studies, and atmospheric implications [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2002, **106**(32): 7310-7320.
- [18] Lin C J, Pehkonen S O. The chemistry of atmospheric mercury: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(13): 2067-2079.
- [19] Pal B, Ariya P A. Studies of ozone initiated reactions of gaseous mercury: kinetics, product studies, and atmospheric implications [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2004, **6**(3): 572-579.
- [20] 张玉卿, 刘汝海, 崔雪晴, 等. 青岛霾天气下大气汞的污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(8): 1905-1911.
Zhang Y Q, Liu R H, Cui X Q, *et al.* The characteristic analysis of atmospheric mercury during haze days in Qingdao[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 1905-1911.
- [21] Li J F, Song Y, Mao Y, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during the harvest season in eastern China's agricultural regions [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 442-448.
- [22] Han Y M, Han Z W, Cao J J, *et al.* Distribution and origin of carbonaceous aerosol over a rural high-mountain lake area, Northern China and its transport significance[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(10): 2405-2414.
- [23] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D22): D22S11.
- [24] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(2): 185-208.
- [25] Chen L W A, Moosmüller H, Arnott W P, *et al.* Emissions from laboratory combustion of wildland fuels: emission factors and source profiles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4317-4325.
- [26] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [27] 朱梦雅. 基于灰霾评价的 PM_{2.5}组分污染特征研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
Zhu M Y. Study on pollution characterization of PM_{2.5} constituents for haze assessment [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [28] Sullivan A P, Holden A S, Patterson L A, *et al.* A method for smoke marker measurements and its potential application for determining the contribution of biomass burning from wildfires and prescribed fires to ambient PM_{2.5} organic carbon[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D22), doi: 10.1029/2008JD010216.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172