

# 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,刘凤娟,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 .....                            | 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,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价 .....                           | 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价 .....                         | 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 .....              | 吴菲,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)                                          |                                         |

# 太原市 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征

刘珊<sup>1</sup>, 彭林<sup>2\*</sup>, 温彦平<sup>3</sup>, 白慧玲<sup>1</sup>, 刘凤娴<sup>1</sup>, 史美鲜<sup>1</sup>, 李丽娟<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206; 3. 太原市环境监测中心站, 太原 030002)

**摘要:** 采集了太原市4个点位冬季和夏季PM<sub>2.5</sub>样品, 利用元素分析仪测定了PM<sub>2.5</sub>中有机碳(OC)和元素碳(EC)的质量浓度, 并对碳气溶胶污染水平、时空分布、二次有机碳(SOC)以及OC和EC相关性等特征进行了分析。结果表明, 太原市冬季有机碳(OC)、元素碳(EC)平均质量浓度为22.3 μg·m<sup>-3</sup>和18.3 μg·m<sup>-3</sup>, 夏季OC、EC平均质量浓度为13.1 μg·m<sup>-3</sup>和9.8 μg·m<sup>-3</sup>, 冬季和夏季总碳气溶胶(TCA)占PM<sub>2.5</sub>的比例分别为56.6%和36.5%; 各点位OC和EC质量浓度均呈现冬季>夏季的季节特征, 冬季OC、EC浓度呈现出较好的均一性, 夏季OC、EC质量浓度存在较明显的空间分布差异; 太原市SOC污染较轻; 冬季OC、EC相关性较强, 夏季OC、EC相关性差。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 有机碳; 元素碳; 二次有机碳; 太原市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0396-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.02.004

## Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan

LIU Shan<sup>1</sup>, PENG Lin<sup>2\*</sup>, WEN Yan-ping<sup>3</sup>, BAI Hui-ling<sup>1</sup>, LIU Feng-xian<sup>1</sup>, SHI Mei-xian<sup>1</sup>, LI Li-juan<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Taiyuan Environment Monitoring Central Station, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** PM<sub>2.5</sub> samples were collected at four sampling sites to study pollution characteristics of carbonaceous aerosols in Taiyuan during winter and summer. Organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> were analyzed by carbon analyzer, and the characteristics including pollution levels, temporal and spatial distributions of OC and EC, secondary organic carbon (SOC) and relationships of OC and EC were discussed in detail. The average concentrations of OC and EC in winter were 22.3 μg·m<sup>-3</sup> and 18.3 μg·m<sup>-3</sup>, respectively, while in summer were 13.1 μg·m<sup>-3</sup> and 9.8 μg·m<sup>-3</sup>, respectively. The concentrations of total carbon aerosol (TCA) accounted for 56.6% of PM<sub>2.5</sub> in winter, and 36.5% in summer; the concentrations of OC and EC at four sites in winter were higher than those in summer, OC and EC levels showed a good uniformity in winter while in summer, the spatial distributions of OC and EC were obviously different; SOC levels were lighter than other cities; the correlation between OC and EC was stronger in winter than that in summer.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; organic carbon(OC); elemental carbon(EC); secondary organic carbon(SOC); Taiyuan

含碳物质是大气颗粒物的重要成分之一, 主要包括有机碳(OC)、元素碳(EC)和碳酸盐碳(CC)<sup>[1,2]</sup>, PM<sub>2.5</sub>中碳酸盐碳(CC)的含量通常很小, 在进行碳组分分析时常被忽略<sup>[3]</sup>. OC的来源比较复杂, 既包括污染源直接排放的一次有机碳(POC), 也包括有机气体经光化学反应等途径生成的二次有机碳(SOC)<sup>[4,5]</sup>, EC则主要来自含碳原料的不完全燃烧, 只存在于由污染源直接排放的一次气溶胶中, 具有良好的化学稳定性, 通常可作为人为一次源排放的示踪物<sup>[6]</sup>. OC中的部分二次粒子具有很强的反应活性和氧化性, 是大气光化学反应发生的基础, 部分OC中还含有PAHs等具有毒性和致癌作用的芳香族化合物粒子, 危害人体健康<sup>[7]</sup>. EC常呈蜂窝状, 比表面积大和吸附性强的特性, 是污染物转化的反应床和触媒<sup>[8]</sup>. EC可以吸收和散射光线, 是大气

中光线衰减和视程降低的主要因素. 研究表明, 当EC占气溶胶粒子的15%时, 对大气能见度降低的贡献率为38%<sup>[9]</sup>. 碳气溶胶对人体健康和大气能见度产生不利影响, 已经成为大气研究中的重要领域之一.

太原市位于山西省中部, 三面环山, 工业布局不合理且燃煤污染严重, 故本文以太原市PM<sub>2.5</sub>为研究对象, 探讨OC和EC的污染特征, 以期有效控制城市大气中碳污染提供科学依据.

收稿日期: 2014-06-23; 修订日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173002, 41373008)

作者简介: 刘珊(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空气污染化学, E-mail: lsherley@foxmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: plin123@eyou.com, penglin6611@163.com

1 材料与方法

1.1 样品的采集

根据太原市功能区特点,共设置 4 个采样点,点位详细信息如图 1、表 1 所示,采样高度为 10 ~ 18 m,监测点周围无明显污染源,能够典型地代表该区域的空气情况. 采样时间分别为 2012 年 2 月(冬季)和 7 月(夏季),其中,2 月连续采样 14 d,7 月连续采样 7 d,每天采样 1 次,每次持续采样 20 h. 样品通过 TH-150C 型中流量环境空气采样器采集,流量为 100 L·min<sup>-1</sup>,各采样点同步采样,共采集环境样品 84 个.



图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

表 1 环境空气颗粒物采样点位信息

Table 1 Descriptions of the sampling locations

| 采样点位 | 环境特征           | 类型        |
|------|----------------|-----------|
| 1    | 市区中部,居民商业文教混合区 | 一般城市区域采样点 |
| 2    | 市区北部,工业园区      | 工业区采样点    |
| 3    | 市区南部,南临龙城大街    | 道路旁采样点    |
| 4    | 市区西北部,校园园区     | 清洁区采样点    |

1.2 样品的处理与分析

1.2.1 滤膜处理

采样滤膜为石英滤膜,采样前滤膜用锡箔纸包裹置于马弗炉中在 400 ~ 500℃ 条件下烘 3 ~ 5 h,去除滤膜上残留的挥发性有机物,冷却后放入恒温恒湿箱中平衡 3 d 称量;采集后的滤膜放入恒温恒湿箱中进行和采样前相同时间的干燥平衡后称量,称重完毕后,滤膜用贴有标签的铝箔纸包好,置于密封

袋中,于 -20℃ 冰柜中保存待分析.

1.2.2 样品分析

PM<sub>2.5</sub> 浓度由滤膜称量差减法获得,使用精度为十万分之一克的电子天平称量,滤膜在采样前后均称重 3 次,取 3 次平均,PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度等于采样前后滤膜质量差与采样空气标态下体积的商.

碳分析由德国元素分析系统公司的 Analysensysteme GmbH vario EL cube 型元素分析仪直接测定颗粒物中的总碳和有机碳的质量浓度. 分析过程为:取 4 ~ 5 mg 滤膜样品置于仪器中,在通氧助燃条件下于 1 000℃ 充分燃烧,将生成气体中的二氧化碳用气相色谱柱分离出来,并通过热导检测器测定,最后转化为总碳含量;同样取 4 ~ 5 mg 样品置于仪器中,在通氧助燃条件下于 450℃ 燃烧,用 TCD 测定生成气体中二氧化碳含量,最后转化为有机碳含量. 由迟旭光等<sup>[10]</sup>的研究结果,有机碳在燃烧炉温度为 450℃ 时能够完全分解,而元素碳无分解现象,因此,元素碳含量可通过计算总碳与有机碳的差值得出. 研究还表明,使用该方法测量有机碳、元素碳的标准偏差平均值分别为 0.25% 和 0.50%.

1.3 质量控制

样品采集前校准采样器流量,其相对偏差小于 5%;TCD 检测器检测限 < 40 × 10<sup>-6</sup>;每天分析测定 TC 和 OC 前,在高纯氦气作载气在供高纯氧气燃烧下,采用已知碳含量的乙酰苯胺标准样品对仪器进行校准,当天样品分析结束后仍在高纯氦气作载气体在供高纯氧气燃烧下,采用标准样品校准仪器. 每批实验均同步进行空白膜实验,结果表明,空白膜中被检测碳的含量低于检出限,对实验结果无影响.

2 结果与分析

通过采样及化学分析,得到太原市 4 个采样点冬季和夏季 PM<sub>2.5</sub> 中 ρ(TC)、ρ(OC)、ρ(EC)、ρ(TCA)、ρ(SOC) 值,以及 ρ(TCA)/ρ(PM<sub>2.5</sub>)、ρ(SOC)/ρ(OC) 比值,如表 2 所示.

其中,总碳气溶胶(TCA)是大气气溶胶中的含碳组分,是大气气溶胶中最复杂的一部分. 基于 Turpin 等<sup>[11]</sup>的研究结果,总碳气溶胶的质量浓度等于有机物与元素碳浓度的总和,而城市中总有机物的量约为 OC 浓度的 1.4 倍,因此可利用公式(1)估算 TCA 的质量浓度.

$$\rho(\text{TCA}) = 1.4\rho(\text{OC}) + \rho(\text{EC}) \tag{1}$$

式中,  $\rho(\text{TCA})$  指总碳气溶胶的质量浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(\text{OC})$  指有机碳的质量浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(\text{EC})$  指元素碳的质量浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

通过  $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$  最小比值法<sup>[12]</sup>, 利用公式 (2) 来估算二次有机碳 (SOC) 污染.

$$\rho(\text{SOC}) = \rho(\text{OC}) - \rho(\text{EC}) \times [\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\min} \quad (2)$$

式中,  $\rho(\text{SOC})$  为二次有机碳的质量浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\min}$  为各采样点所观测到的  $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$  的最小值.

表 2 太原市冬季和夏季各采样点  $\text{PM}_{2.5}$  中含碳组分浓度及比值

Table 2 Mass concentration and specific values of compounds containing carbon in  $\text{PM}_{2.5}$

| 季节 | 项目                                               | 采样点 1       | 采样点 2       | 采样点 3       | 采样点 4       | 平均          |
|----|--------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 冬季 | $\rho(\text{TC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  | 41.9 ± 15.0 | 42.8 ± 14.2 | 42.2 ± 19.7 | 35.0 ± 10.0 | 40.5 ± 15.1 |
|    | $\rho(\text{OC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  | 22.4 ± 7.4  | 23.8 ± 8.1  | 22.7 ± 9.6  | 20.5 ± 5.5  | 22.3 ± 7.8  |
|    | $\rho(\text{EC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  | 19.5 ± 7.9  | 19.1 ± 6.4  | 19.5 ± 10.2 | 14.5 ± 4.9  | 18.3 ± 7.7  |
|    | $\rho(\text{TCA})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 50.7 ± 18.0 | 52.4 ± 17.4 | 51.2 ± 23.5 | 43.2 ± 12.2 | 49.4 ± 18.1 |
|    | $\rho(\text{TCA})/\rho(\text{PM}_{2.5})/\%$      | 52.7        | 51.6        | 57.6        | 64.6        | 56.6        |
|    | $\rho(\text{SOC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 3.4 ± 3.0   | 3.6 ± 3.1   | 4.4 ± 2.6   | 4.7 ± 2.9   | 4.0 ± 3.0   |
|    | $\rho(\text{SOC})/\rho(\text{OC})/\%$            | 16.2        | 14.8        | 21.4        | 23.7        | 19.1        |
| 夏季 | $\rho(\text{TC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  | 19.2 ± 5.0  | 30.5 ± 5.9  | 23.1 ± 4.3  | 18.9 ± 4.2  | 22.9 ± 6.7  |
|    | $\rho(\text{OC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  | 12.1 ± 3.3  | 16.9 ± 4.2  | 12.0 ± 2.8  | 11.4 ± 2.3  | 13.1 ± 3.8  |
|    | $\rho(\text{EC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  | 7.1 ± 2.0   | 13.6 ± 3.0  | 11.1 ± 2.8  | 7.5 ± 2.4   | 9.8 ± 3.7   |
|    | $\rho(\text{TCA})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 24.1 ± 6.3  | 37.3 ± 7.5  | 27.9 ± 5.2  | 23.5 ± 5.1  | 28.2 ± 8.0  |
|    | $\rho(\text{TCA})/\rho(\text{PM}_{2.5})/\%$      | 31.4        | 43.6        | 35.1        | 35.9        | 36.5        |
|    | $\rho(\text{SOC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 3.4 ± 1.9   | 6.3 ± 4.2   | 5.0 ± 3.0   | 4.0 ± 2.0   | 4.6 ± 3.0   |
|    | $\rho(\text{SOC})/\rho(\text{OC})/\%$            | 27.4        | 34.7        | 39.2        | 34.8        | 34.0        |

3 讨论

3.1 OC、EC 及 TCA 水平

太原市冬夏两季  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC、EC、TCA 和  $\text{TCA}/\text{PM}_{2.5}$  值见表 2. 从中可知, 冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 和 EC 平均质量浓度分别为  $(22.3 \pm 7.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(18.3 \pm 7.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 夏季分别为  $(13.1 \pm 3.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(9.8 \pm 3.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 与国内主要城市碳气溶胶研究结果相比 (见表 3), 太原市冬夏两季 OC 浓度低于北京、广州、天津, 但高于上海和南京, 处于中等水平, 而 EC 浓度不论是冬季还是夏季, 都高于其他城市, 这可能与太原市以燃煤为主的能源结构和以工业为

主导产业有较大关系. 需要指出的是, 本研究所采用的元素分析法未对 OC 在受热过程中可能产生的裂解碳校正, 会导致 EC 结果偏高<sup>[13]</sup>.

TCA 冬季和夏季的浓度分别为  $(49.4 \pm 18.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(28.2 \pm 8.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占  $\text{PM}_{2.5}$  的质量分数分别为 56.6% 和 36.5%, 平均为 46.5%, 与其他城市如上海<sup>[19]</sup> (60%)、广州<sup>[20]</sup> (52.9%)、西安<sup>[21]</sup> (47.3%)、天津<sup>[17]</sup> (51.8%) 相比, 太原市 TCA 对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献率处于中等水平, 近一半的物质是碳气溶胶, 说明 OC、EC 等含碳物质是  $\text{PM}_{2.5}$  的重要组成部分, 同时也说明太原市  $\text{PM}_{2.5}$  的碳污染比较严重, 应加强碳污染源控制以减轻  $\text{PM}_{2.5}$  排放.

表 3 国内主要城市细颗粒物中有机碳和元素碳浓度水平

Table 3 Level of OC and EC concentrations in fine particles in urban cities in China

| 城市 | 样品类型              | 季节 | OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 文献   |
|----|-------------------|----|-------------------------------------|-------------------------------------|------|
| 太原 | $\text{PM}_{2.5}$ | 冬季 | 22.3                                | 18.3                                | 本研究  |
|    | $\text{PM}_{2.5}$ | 夏季 | 13.1                                | 9.8                                 |      |
| 北京 | $\text{PM}_{2.5}$ | 冬季 | 32.2                                | 11.3                                | [14] |
|    | $\text{PM}_{2.5}$ | 夏季 | 14.9                                | 8.4                                 |      |
| 上海 | $\text{PM}_{2.5}$ | 冬季 | 13.2                                | 4.9                                 | [15] |
|    | $\text{PM}_{2.5}$ | 夏季 | 5.5                                 | 3.4                                 |      |
| 广州 | $\text{PM}_{2.5}$ | 冬季 | 24.2                                | 7.9                                 | [16] |
|    | $\text{PM}_{2.5}$ | 夏季 | 14.0                                | 4.5                                 |      |
| 天津 | $\text{PM}_{2.1}$ | 冬季 | 32.1                                | 3.7                                 | [17] |
|    | $\text{PM}_{2.1}$ | 夏季 | 14.4                                | 2.1                                 |      |
| 南京 | $\text{PM}_{2.1}$ | 冬季 | 13.5                                | 4.6                                 | [18] |
|    | $\text{PM}_{2.1}$ | 夏季 | 10.5                                | 2.0                                 |      |

3.2 OC、EC 时空分布特征

由表 2 可知,太原市 4 个采样点 OC 和 EC 浓度的季节分布特征均为冬季 > 夏季,冬季 OC、EC 浓度分别是夏季的 1.70 倍和 1.87 倍. OC 和 EC 夏季浓度相较于冬季低主要是由于夏季降水较多,稀释清除了大气颗粒物<sup>[22]</sup>,且夏季 PM<sub>2.5</sub> 中 OC 和 EC 的排放源单一,主要为机动车尾气排放<sup>[23]</sup>,冬季燃煤量增加,排放大量 OC,部分煤的不完全燃烧也使 PM<sub>2.5</sub> 中 EC 含量较高,同时冬季大气稳定,地表大气污染物不易扩散<sup>[24]</sup>,加重了空气污染.

本研究中 4 个采样点冬季和夏季 OC、EC 的质量浓度见图 2. 从中可知,冬季 OC 质量浓度工业区 > 道路旁 ≈ 城区 > 清洁区, EC 浓度工业区 ≈ 道路旁

≈ 城区 > 清洁区,上述结果显示,冬季 OC、EC 浓度呈现出较好的均一性,中心城区范围内的空间分布无明显差异,但明显大于清洁区,说明冬季中心城区碳污染较重. 夏季 OC 浓度工业区 > 道路旁 ≈ 城区 > 清洁区, EC 浓度工业区 > 道路旁 > 城区 ≈ 清洁区,夏季城区与清洁区 OC、EC 相差不大,说明城区夏季空气质量较好,道路旁采样点 OC 浓度与城区相近,而 EC 浓度较高,这与机动车尾气大量排放有关. 无论是冬季还是夏季,OC 和 EC 质量浓度在工业区采样点均较高,该采样点受周围工业污染源排放、机动车尾气排放等影响,碳污染严重. OC 和 EC 浓度最低值均出现在清洁区采样点,这与其周围环境无明显污染源相符.

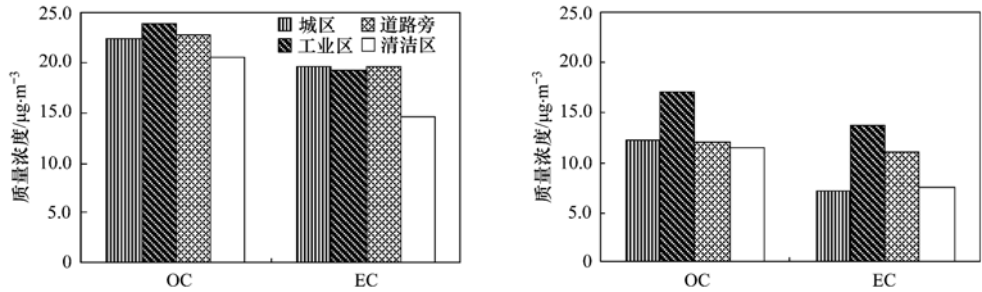


图 2 4 个采样点冬季和夏季 OC、EC 质量浓度

Fig. 2 OC and EC mass concentrations during winter and summer at the four sampling sites

3.3 二次有机碳(SOC)含量的估算

OC 主要包括污染源直接排放的一次有机碳(POC)和经过光化学反应生成的二次有机碳(SOC),OC 中 SOC 的含量可由 Turpin 等<sup>[11]</sup>提出的经验公式即公式(2)进行估算,估算结果见表 2. 从中可知,太原市冬季 SOC 平均浓度为  $4.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占对应 OC 的质量分数为 19.1%,夏季 SOC 平均浓度为  $4.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占所对应 OC 的质量分数为 34.0%,SOC 在 OC 中所占比例均呈现夏季 > 冬季的特点,夏季强烈的光照使 OC 通过光化学反应生

成了更多的 SOC<sup>[25]</sup>,而冬季与夏季 SOC 平均浓度相差不大,这可能是由于冬季有机前体物浓度较高,颗粒物在空气中滞留时间较长导致. 与南京<sup>[18]</sup>(38.1%)和广州<sup>[20]</sup>(45.5%)相比,太原市的 SOC 污染较轻,表明太原市碳污染主要来自污染源的直接排放.

3.4 OC 和 EC 的相关性分析

通过研究 OC 和 EC 之间的关系,可以推测碳气溶胶的来源,若两者相关性较好,则表明 OC 和 EC 来自于相似的污染源<sup>[26]</sup>. 图 3 为冬季和夏季 PM<sub>2.5</sub>

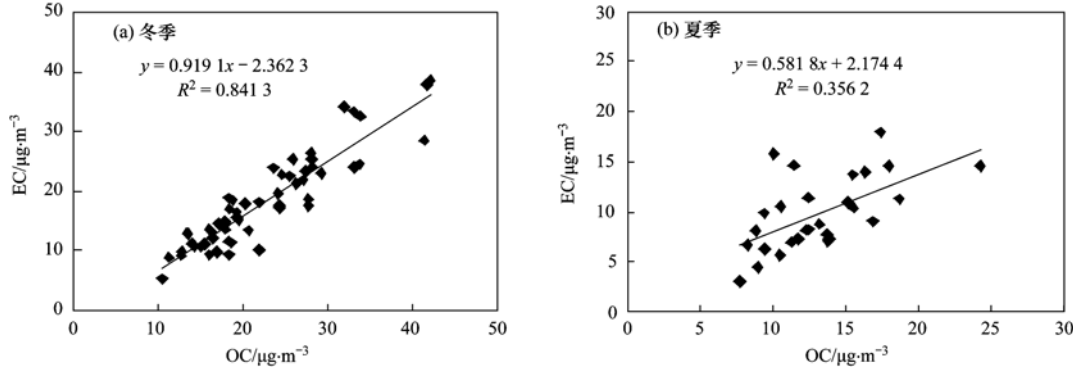


图 3 冬季和夏季 OC 与 EC 的相关性

Fig. 3 Correlations between OC and EC in winter and in summer



中 OC 和 EC 的相互关系,从中可知,OC、EC 在冬季相关性较好,相关系数达到了 0.841 3,说明冬季含碳气溶胶来源相对简单,可能主要来自于冬季采暖燃煤和机动车尾气。而夏季 OC、EC 的相关系数为 0.356 2,相关性较差,说明夏季含碳气溶胶来源相对复杂,除受到机动车尾气影响外,受二次有机碳的生成和降雨的清除作用的影响较大。

#### 4 结论

(1)太原市冬季 OC、EC 平均质量浓度分别为  $(22.3 \pm 7.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(18.3 \pm 7.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,夏季分别为  $(13.1 \pm 3.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(9.8 \pm 3.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,冬季和夏季 TCA 的浓度分别为  $(49.4 \pm 18.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(28.2 \pm 8.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占  $\text{PM}_{2.5}$  的质量分数分别为 56.6% 和 36.5%,说明 OC、EC 等含碳物质是  $\text{PM}_{2.5}$  中重要的组成成分。

(2)各点位 OC 和 EC 质量浓度均呈现冬季 > 夏季的季节特征,冬季 OC、EC 平均浓度分别是夏季的 1.70 倍和 1.87 倍。冬季 OC、EC 浓度呈现出较好的均一性,中心城区范围内的空间分布无明显差异,但明显大于清洁区,说明冬季中心城区碳污染较重;夏季不同点位 OC、EC 质量浓度存在较明显的空间分布差异。

(3)SOC 在 OC 中所占比例均呈现夏季 > 冬季的特点,夏季强烈的光照使 OC 更容易发生光化学反应生成 SOC,而冬季有机前体物浓度较高,颗粒物在空气中滞留时间较长,SOC 平均浓度与夏季相差不大。与其他城市相比,太原市 SOC 污染较轻,表明太原市碳污染主要来自污染源的直接排放。

(4)冬季 OC 和 EC 的相关系数较高,表明冬季含碳气溶胶来源相对单一,可能主要来自于冬季采暖燃煤和机动车尾气;夏季 OC 和 EC 的相关性较差,说明夏季含碳气溶胶来源相对复杂,受机动车尾气污染、二次有机碳的生成、降雨的清除作用以及大气扩散条件等的影响较大。

#### 参考文献:

- [1] 杨毅红,陶俊,高健,等. 中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4152-4158.
- [2] Niu Z C, Zhang F W, Kong X R, *et al.* One-year measurement of organic and elemental carbon in size-segregated atmospheric aerosol at a coastal and suburban site in Southeast China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, **14**(11): 2961-2967.
- [3] 李杏茹,王英锋,郭雪清,等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 313-318.
- [4] 崔虎雄,吴迺名,段玉森,等. 上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 2003-2009.
- [5] 吴琳,冯银厂,戴莉,等. 天津市大气中  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  及其碳组分污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(11): 1134-1139.
- [6] 段卿,安俊琳,王红磊,等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2460-2467.
- [7] 段凤魁,贺克斌,刘贤德,等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 1-8.
- [8] 唐小玲,毕新慧,陈颖军,等. 不同粒径大气颗粒物中有机碳(OC)和元素碳(EC)的分布[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(1): 104-108.
- [9] 王玮,陈宗良. 大气气溶胶中无机碳和有机碳[J]. 环境科学丛刊, 1991, **12**(2): 27-34.
- [10] 迟旭光,狄一安,董树屏,等. 大气颗粒物样品中有机碳和元素碳的测定[J]. 中国环境监测, 1999, **15**(4): 11-13.
- [11] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [12] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1345-1355.
- [13] 吴琳,冯银厂,叶文媛,等. 大气颗粒物中碳组分测定结果比较: 元素分析和热光反射方法[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(12): 1481-1487.
- [14] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  in Beijing, China 2001-2002 [J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 264-275.
- [15] 王杨君,董亚萍,冯加良,等. 上海市  $\text{PM}_{2.5}$  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.
- [16] 朱李华,陶俊,张仁健,等. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与  $\text{O}_3$  和气象条件的关联[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- [17] 程萌田,金鑫,温天雪,等. 天津市典型城区大气碳质颗粒物的粒径分布特征和来源[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(2): 115-121.
- [18] 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,等. 南京市  $\text{PM}_{2.1}$  中有机碳和元素碳污染特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1160-1166.
- [19] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of  $\text{PM}_{2.5}$  in Shanghai for a 1-year period [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 499-510.
- [20] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等. 广州市夏季室内外  $\text{PM}_{2.5}$  中有机碳、元素碳的分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(9): 1242-1249.
- [21] 曹军骥,李顺诚,李杨,等. 2003 年秋冬季西安大气中有机

- 碳和元素碳的理化特征及其来源解析[J]. 自然科学进展, 2005, **15**(12): 1460-1466.
- [22] 赖森潮, 叶计朋, 张颖仪, 等. 广州夏季大气中碳气溶胶浓度水平及污染特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(5): 61-65.
- [23] 樊晓燕, 温天雪, 徐仲均, 等. 北京大气颗粒物碳质组分粒径分布的季节变化特征[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 742-747.
- [24] 霍静, 李彭辉, 韩斌, 等. 天津秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 碳组分化学特征与来源分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(12): 1937-1942.
- [25] 李伟芳, 白志鹏, 魏静东, 等. 天津冬季大气中 PM<sub>2.5</sub> 及其主要组分的污染特征[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(6): 481-486.
- [26] 古金霞, 白志鹏, 刘爱霞, 等. 天津冬季 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 中有机碳、元素碳的污染特征[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(8): 33-36.

## 欢迎订阅 2015 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

《环境科学》2015 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期.

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn



## 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-rui, 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-qing ( 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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