

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830)	
《环境科学》征稿简则 (846)	
信息 (838, 861, 913, 935)	

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征

刘凤娴¹, 彭林^{2*}, 白慧玲¹, 牟玲¹, 刘效峰¹, 李丽娟¹, 刘欣¹

(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)

摘要: 采集朔州市市区 4 个点位采暖季和非采暖季环境空气 PM_{2.5} 样品, 利用 Elementar Analysensysteme GmbH vario EL cube 型元素分析仪测定其中元素碳 (elemental carbon, EC) 和有机碳 (organic carbon, OC) 含量, 并对碳组分的浓度水平、时空分布特征和主要来源进行分析. 结果表明, 朔州市市区非采暖季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的平均浓度为 $(14.3 \pm 2.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(10.3 \pm 3.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 采暖季 OC、EC 平均浓度分别为 $(23.3 \pm 5.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(20.0 \pm 5.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 4 个点位 OC 和 EC 的浓度均表现为采暖季大于非采暖季, 其中在采暖季, 点位 SW 中 OC 和 EC 浓度分别为 $28.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $28.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于其它采样点, 在非采暖季, 点位 PS 中 OC 和 EC 的浓度分别为 $17.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $14.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 高于其它采样点; 采暖季和非采暖季 PM_{2.5} 中 OC/EC 值均小于 2, 但 OC 和 EC 相关性不好 (在采暖季和非采暖季的相关系数分别为 0.66 和 0.52), 说明 PM_{2.5} 中碳气溶胶来源复杂. 控制碳组分一次排放来源, 如燃煤烟尘、生物质燃烧及机动车尾气排放, 同时关注二次污染是控制朔州市 PM_{2.5} 的关键. 朔州市市区采暖季和非采暖季 PM_{2.5} 中二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC) 浓度分别为 $(6.44 \pm 2.77) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(4.11 \pm 1.92) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

关键词: PM_{2.5}; 元素碳; 有机碳; 相关性; 二次有机碳

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0787-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.005

Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Shuozhou City

LIU Feng-xian¹, PENG Lin^{2*}, BAI Hui-ling¹, MU Ling¹, LIU Xiao-feng¹, LI Li-juan¹, LIU Xin¹

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: PM_{2.5} samples were collected at four sampling sites in Shuozhou during the heating and non-heating periods. Organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} were analyzed by Elementar Analysensysteme GmbH vario EL cube and the concentration, spatial and temporal distribution characteristics and main sources of OC and EC were studied. The results were as following: average concentrations of OC and EC in PM_{2.5} during non-heating period were $(14.3 \pm 2.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(10.3 \pm 3.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ while $(23.3 \pm 5.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(20.0 \pm 5.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ during heating period. The concentrations of OC and EC at four sites during the heating period were higher than those during the non-heating period. The concentrations of OC and EC at SW site during heating were the highest which were $28.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $28.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ while the concentrations at PS sites during non-heating period were the highest, which were $17.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $14.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The ratios between OC and EC during the heating and non-heating period were all below 2 and the correlation between OC and EC was not good with R^2 of 0.66 during heating period and 0.52 during non-heating period which indicated that sources of carbon aerosols were complex. Carbonaceous aerosol pollution should be reduced by controlling the primary emissions such as coal combustion, vehicle exhaust and biomass burning, and by paying attention to secondary pollution at the same time to improve the air quality in Shuozhou City. The concentrations of SOC during heating and non-heating period were $(6.44 \pm 2.77) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(4.11 \pm 1.92) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Key words: PM_{2.5}; elemental carbon; organic carbon; correlation; secondary organic carbon

大气气溶胶 (atmospheric aerosols) 对大气能见度、大气化学过程、气候变化及人体健康有重要影响^[1-4], 含碳气溶胶 (carbonaceous aerosols) 是大气气溶胶的重要组分, 所占比例为 10% ~ 50%^[5]. 碳质气溶胶主要由有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (elemental carbon, EC) 和碳酸盐碳 (CC) 三部分组成^[6]. 其中, EC 是黑色、高聚合、难氧化物质, 由化石燃料或木材等生物质的不完全燃烧产生并由污染源直接排放, 故 EC 只存在于由污染源直接排放

的一次气溶胶中^[7], EC 对可见光和红外光有强烈吸收, 是导致地球变暖的主要物质之一, 同时对大气能见度也有重要影响. OC 指脂肪族、芳香族、酸类等多种有机化合物, 如多环芳烃、正构烷烃、有机酸等, 包括由污染源直接排放的一次有机碳 (POC)

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173002, 41373008)

作者简介: 刘凤娴 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究大气环境化学, E-mail: liufengxian123@126.com

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

和通过光化学反应生成的二次有机碳 (SOC)^[8~11], OC 包括了多种致癌物,对人体健康造成极大的危害,同时也为大气化学反应提供氧化剂,而且对光有散射作用. CC 在碳质气溶胶中含量很低,一般不予考虑^[12].

研究表明,OC、EC 主要存在于细颗粒物上^[13]. 对于碳气溶胶的研究一直是国内外的研究热点,目前国内的研究主要集中在京津冀^[14]、珠三角^[15]、长三角^[16]等大城市,而对于内地中小城市的研究较少,且研究的重点集中在碳组分的沉降上,对于其分布及来源特征研究较少^[17,18]. 朔州市是以煤炭为主要能源的工业小城市,选择朔州市市区细颗粒物 PM_{2.5} 中的碳组分 (有机碳 OC 和元素碳 EC) 作为研究对象,分析其浓度特征和主要来源,该结果对于丰富我国中小城市碳组分的研究以及朔州市环境空气质量的改善具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据朔州市城市结构和功能,分别在市区 4 个方位各设立 1 个采样点,点位名称分别为 PS、SW、QZ 和 SH. 采样点位描述及点位分布图分别见表 1 和图 1. 选用 KB120 型中流量 (100 L·min⁻¹) 采样器和石英膜 (90 mm) 滤膜于 2013 年 3 月 1~7 日和 2013 年 7 月 17~23 日共 14 d 采集环境空气 PM_{2.5} 样品,分别代表朔州市的采暖季和非采暖季. 采样高度为 8~12 m,每个样品连续采集 24 h,共采集样品 56 个. 采样期间避开雨、雪天气,其中,采暖季主导风向为西风和西北风,平均风速为 2.04 m·s⁻¹,平均温度为 4.75℃;非采暖季主导风向为西南风,平均风速为 0.91 m·s⁻¹,平均温度为 23.18℃,与当年当季的气象条件基本一致,保证样品具有代表性.

表 1 采样点位描述

Table 1 Details of the four sampling sites

点位序号	点位名称	点位描述
1	SW	市区东北部,商住混合区,距运煤专线铁路较近且上风向 5~6 km 处有电厂
2	PS	市区中部,居民区,该区域机动车保有量大,受交通影响较大
3	QZ	市区南部,商住混合区,该区域有城中村
4	SH	市区西部,居民文教区,周围有城中村,有主干道通过

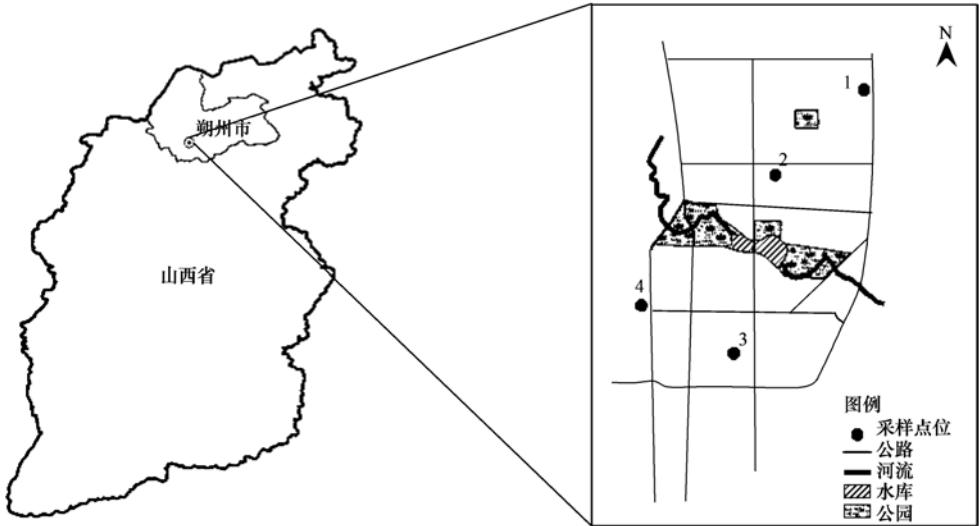


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

1.2 样品处理与分析测试

采用 Elementar Analysensysteme GmbH vario EL cube 型元素分析仪 (德国元素分析系统公司生产) 测定颗粒物中的总碳 (total carbon, TC) 和 OC 的质量浓度. 分析过程为:取 4~5 mg 滤膜样品置于仪器中,加热升温至 1 000℃,通氧助燃 10 min,用气相

色谱柱分离出生成气体中的 CO₂,再通过热导检测 (TCD) 测定 CO₂ 含量,最后转化为 TC 含量;同样取 4~5 mg 滤膜样品置于仪器中,加热升温至 450℃,通氧助燃 10 min,用 TCD 测定 CO₂ 含量,最后转化成 OC 含量. 利用公式 $c_{EC} = c_{TC} - c_{OC}$ (单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 计算颗粒物中 EC 的浓度.

1.3 质量控制和质量保证

采样前,石英滤膜用锡箔纸包裹好置于马弗炉中在 500℃ 条件下烘 4 h,去除滤膜挥发份对称重的影响,之后放入恒温恒湿箱中平衡 3 d 称重,记为 M₁。采样后,滤膜放入恒温恒湿箱中进行和采样前相同时间的平衡干燥后称重,记为 M₂,各点位 PM_{2.5} 的质量即为 M = M₂ - M₁。称重完毕后,滤膜用贴有标签的铝箔纸包好,置于密封袋中,放于 4℃ 的冰箱中保存,以便于后续分析。

每次在进行样品的 OC 与 EC 分析之前,采用高纯氮气作载气在供高纯氧气燃烧下,标准样品对仪器进行校准,当天样品分析结束后仍采用高纯氮气作载气体在供高纯氧气燃烧下,标准样品校准仪器。通过测试空白膜,空白膜上的含碳量未检测出。

2 结果与讨论

2.1 OC 和 EC 浓度水平

朔州市市区 PM_{2.5} 中 OC、EC 的浓度值见表 2。4 个采样点非采暖季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的平均浓度为 (14.3 ± 2.7) μg·m⁻³ 和 (10.3 ± 3.1) μg·m⁻³; 采暖季 OC、EC 平均浓度分别为 (23.3 ± 5.9) μg·m⁻³ 和 (20.0 ± 5.7) μg·m⁻³,大于非采暖季,说明细颗粒物中 OC 和 EC 的质量浓度呈现采暖季大于非采暖季的特点,这与张承中等^[19]、董海燕等^[20] 对西安市、天津市的研究结果一致,这是由于采暖季煤炭和生物质的燃烧,增加了 OC 和 EC 的排放^[21],且该季节风速不大、地面温度较低,易形成逆温层,导致大气层稳定,致使污染物不易扩散^[4]。

表 2 朔州市市区 PM_{2.5} 中 OC、EC 的浓度值/μg·m⁻³

Table 2 Concentrations of OC and EC in PM_{2.5} in Shuozhou/μg·m⁻³

点位	采暖季		非采暖季	
	OC	EC	OC	EC
PS	22.8 ± 4.1	19.7 ± 4.0	17.7 ± 3.7	14.1 ± 2.9
SW	28.5 ± 6.1	28.1 ± 7.9	12.6 ± 1.4	7.7 ± 1.3
QZ	21.5 ± 5.6	16.6 ± 1.8	13.8 ± 1.4	10.7 ± 2.2
SH	20.3 ± 4.8	15.5 ± 3.5	13.0 ± 1.3	8.6 ± 1.3
平均值	23.3 ± 5.9	20.0 ± 5.7	14.3 ± 2.7	10.3 ± 3.1

朔州市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度与其他城市的比较见表 3。从中可见,朔州市采暖季 PM_{2.5} 中 OC 含量高于上海和香港,低于北京、天津和广州,EC 含量均高于以上城市;朔州市非采暖季 OC 含量高于北京、天津和香港,低于广州,EC 含量均高于以上城市。

由以上比较可见,朔州市 PM_{2.5} 中 OC 含量处于中等水平,而 EC 含量较高,这可能是由于朔州市是

以煤炭为主要能源的工业小城市,煤炭的燃烧使得 EC 偏高,另外还有一个重要的原因,即本文所采用的碳分析方法与前述文献中采用的热光学测碳法方法相比有缺陷,即在氧化 OC 的过程中有一小部分 OC 由于较高的温度碳化成 EC^[23],而这部分 EC 和样品本身的 EC 在升温至 450℃ 并通氧助燃 10 min 后并未被氧化,这就使所测得的 OC 值偏低,而 TC 测得数据较为准确,最终导致 EC 偏高。

表 3 朔州市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度与其他城市的比较

Table 3 Comparison of OC and EC concentrations in PM_{2.5} in Shuozhou with other cities

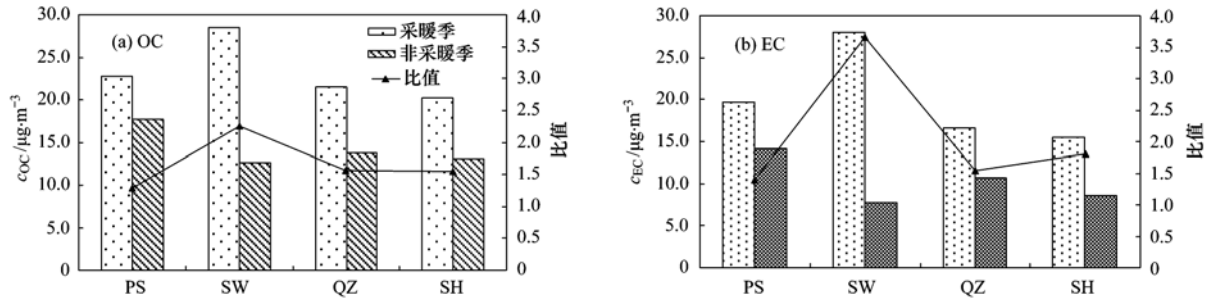
城市	季节	OC 含量/μg·m ⁻³	EC 含量/μg·m ⁻³	文献
朔州	采暖季	23.3 ± 5.9	20.0 ± 5.7	本研究
	非采暖季	14.3 ± 2.7	10.3 ± 3.1	
北京	冬季	26.8	7.1	[14]
	夏季	10.1	5.9	
天津	冬季	24.8	7.0	[14]
	夏季	12.7	5.9	
上海	冬季	14.6	5.03	[22]
	夏季	7.24	3.70	
广州	冬季	23.85	4.2	[15]
	夏季	17.5	5.4	
香港	冬季	10.2	1.9	[15]
	夏季	9.57	5.1	

总碳气溶胶 (total carbon aerosols, TCA) 是指大气气溶胶中的含碳组分,等于有机物与元素碳气溶胶的总和,有机物的量常用 OC 乘以 1.6 来计,所以 TCA 的浓度表示为 TCA = 1.6 OC + EC^[24,25]。计算得知,PM_{2.5} 中 TCA 的质量浓度为 36.2 μg·m⁻³,在 PM_{2.5} 中的平均百分含量为 30.0%,表明碳气溶胶是朔州市细颗粒物的重要组成部分,所以加强对朔州市 OC 和 EC 排放的控制对于有效控制 PM_{2.5} 污染具有重要意义。

2.2 OC 和 EC 浓度时空分布特征

图 2 比较了采暖季和非采暖季各点位 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度。从中可知,OC 和 EC 的浓度均表现为采暖季大于非采暖季,4 个点位 PS、SW、QZ、SH 中 OC 的浓度在采暖季和非采暖季的比值分别为 1.3、2.2、1.5、1.5,而 EC 浓度的比值分别为 1.4、3.6、1.5、1.8,点位 SW 中 OC 和 EC 浓度在采暖季和非采暖季的差别较大。

在采暖季,点位 SW 中 OC 的浓度为 28.5 μg·m⁻³,明显高于其他采样点;点位 PS 中 OC 的浓度为 22.8 μg·m⁻³,仅次于点位 SW;其它两个点位 QZ 和 SH 中 OC 的浓度值分别为 21.5 μg·m⁻³ 和

图2 各点位 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度在采暖季和非采暖季的比较Fig. 2 Concentrations of OC and EC in PM_{2.5} during heating and non-heating periods

20.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中, 点位 SH 中 OC 的浓度为最低值, 该区为居民文教区, 无明显污染源, 故碳气溶胶浓度较低. EC 浓度呈现与 OC 相同的空间分布特征, 各点位浓度大小排序依次为 SW > PS > QZ > SH, 浓度值大小依次为 28.1、19.7、16.6 和 15.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由此说明, 采暖季点位 SW 中 OC 和 EC 的浓度均最大, 该区为商住混合区, 距离铁路较近, 且上风向有电厂, 所以冬季燃煤取暖、工业烟气排放和移动源可能是造成该地区碳气溶胶浓度较大的原因, 应控制污染源以减少污染.

在非采暖季, 点位 PS 中 OC 和 EC 的浓度分别为 17.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 14.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 明显高于其他采样点, 而该区受交通影响较大, 所以机动车尾气的排放可能是 OC 和 EC 浓度较大的原因. 其它 3 个采样点 SW、QZ 和 SH 中 OC 的浓度值差别不大, 分别为 12.6、13.8 和 13.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 点位 SW 中 OC 浓度为最低值, 这和采暖季的结果相反, 可能是由于点位 SW 中的 OC 在采暖季和非采暖季的来源不一致; 点位 QZ 中 EC 的浓度为 10.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅次于点位 PS, 其它两个点位 SW 和 SH 中 EC 的浓度值分别为 7.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 8.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中, 点位 SH 中 EC 的浓度为最低值, 和采暖季结果一致.

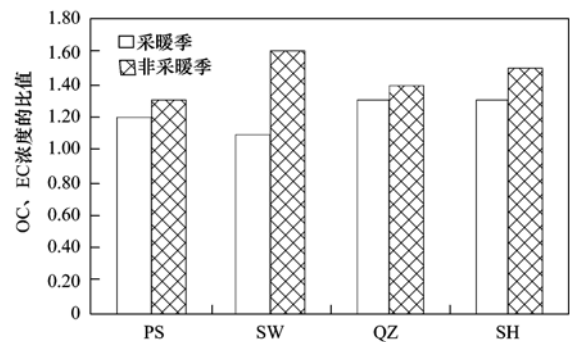
2.3 OC 和 EC 的来源分析

2.3.1 OC、EC 的比值分析

OC 和 EC 的浓度比常被用来评价颗粒物的来源和二次有机物的形成. OC/EC 一般受控于 3 个因素, 包括排放源特征、OC 在空气中转化形成 SOC 及 OC、EC 的清除^[26]. 研究表明, 当 OC/EC 值大于 2 时, 可认为存在二次污染^[27,28].

朔州市市区采暖季和非采暖季 PM_{2.5} 中 OC/EC 平均值值为 1.3, 各点位 OC/EC 值见图 3. 从中可见, 4 个点位 OC/EC 的值均表现为非采暖季大于采暖季, 这可能是由于采暖季燃煤增多, 煤炭的燃烧过程排放的 EC 较高^[11], 同时非采暖季充足的光照为

光化学反应提供有利的条件, 促使 SOC 的生成, 导致 OC 增大. 其中, 采暖季 PM_{2.5} 中 OC/EC 值范围为 0.8 ~ 1.7, 平均值为 1.2, 非采暖季 PM_{2.5} 中 OC/EC 值范围为 0.9 ~ 1.9, 平均值为 1.5. 可见, 采暖季和非采暖季 OC/EC 的最大值均接近 2, 且考虑到元素测碳法本身的缺陷导致 EC 偏大, 所以推测朔州市 PM_{2.5} 中存在二次污染. 朔州市采暖季和非采暖环境空气 PM_{2.5} 中 OC/EC 平均值均小于 2, 所以, 控制碳组分一次排放来源, 如燃煤烟尘、生物质燃烧及机动车尾气排放等是控制朔州市 PM_{2.5} 的关键.

图3 PM_{2.5} 中 OC、EC 浓度的比值Fig. 3 Ratios between OC and EC concentrations in PM_{2.5}

2.3.2 OC 和 EC 的相关性

目前还没有直接的方法可用于测量大气气溶胶中的 SOC 和 POC, 常用的间接方法有 OC/EC 比值法、有机分子示踪法及数值模拟法, 其中, OC/EC 比值法是目前研究中常用来判断是否有二次有机碳生成最简便的方法^[29,30]. 但是, 唐小玲等^[7]、周敏等^[29]学者提出, 只依据 OC/EC 比值的大小来评价是否存在二次污染是不充分的, 因此本研究对朔州市市区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性做了进一步分析.

一般认为, 化石燃料燃烧直接排放的一次有机气溶胶和经过大气光化学反应生成的二次有机气溶胶是 OC 的两大主要来源, 而 EC 主要来源于化石燃料的不完全燃烧, 因此, 可通过 OC 和 EC 相关性, 初

步判断 OC、EC 的来源^[16]。若 OC、EC 相关性很好,说明两者具有相似的来源^[31],则 OC 主要为一

次有机碳,二次有机碳对 OC 贡献较小。朔州市采暖季和非采暖季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性见图 4。

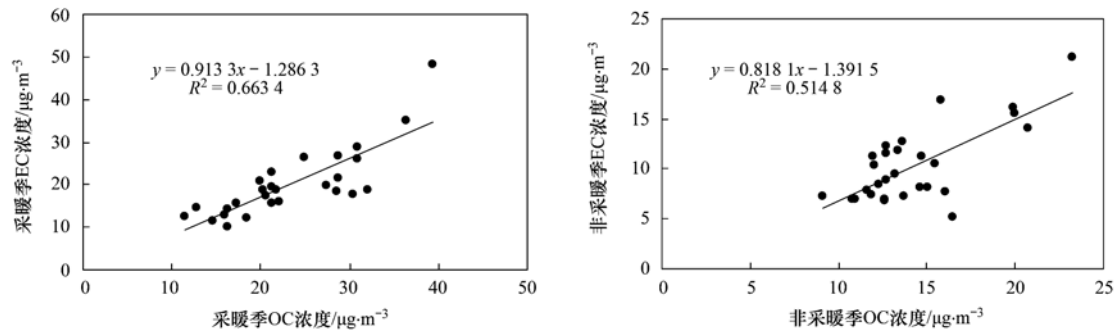


图 4 采暖季和非采暖季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性

Fig. 4 Correlations between OC and EC in PM_{2.5} during heating and non-heating periods

PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关系数为 0.66(采暖季)和 0.52(非采暖季),相关性不好,说明 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 来源较复杂。其中,在采暖季,朔州市的污染源主要为煤烟尘,其他还有生物质的燃烧和机动车尾气的排放,而不同排放源、不同燃料、不同燃烧方式对 OC、EC 贡献程度不同^[32],导致 OC、EC 相关性小;在非采暖季,充足的光照和高温促使 SOC 的形成也是 OC、EC 相关性不好的一个重要原因。

关于 SOC 的计算,Castro 等^[33]和 Strader 等^[34]提出以下计算 SOC 的经验公式:

$$SOC = OC_{tot} - EC \times (OC/EC)_{min}$$

式中,SOC 为二次有机碳,OC_{tot}为总有机碳,(OC/EC)_{min}为所观测到的 OC/EC 最小值。

由公式计算得到,朔州市采暖季 PM_{2.5} 中 SOC 浓度为 (6.44 ± 2.77) μg·m⁻³,占 OC 的比例为 27.64%,非采暖季 PM_{2.5} 中 SOC 浓度为 (4.11 ± 1.92) μg·m⁻³,占 OC 的比例为 28.74%。

朔州市采暖季和非采暖季 PM_{2.5} 中 SOC 的浓度与其他城市的比较见表 4。从中可见,朔州市 PM_{2.5}

中 SOC 浓度呈现采暖季大于非采暖季的特征,其他各城市也有类似的特征,这是由于朔州市冬季取暖燃煤造成的污染较重,且在采暖季城市热岛效应和低风速的协同效应有助于 SOC 的形成^[35],而 SOC 在 OC 中所占比例表现为非采暖季大于采暖季,说明夏季充足的光照和适宜的温度为 SOC 的形成创造了有利条件。与国内其他城市比较,朔州 SOC 浓度高于上海,低于北京和开封。

3 结论

(1)朔州市非采暖季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的平均浓度为 (14.3 ± 2.7) μg·m⁻³ 和 (10.3 ± 3.1) μg·m⁻³;采暖季 OC、EC 平均浓度分别为 (23.3 ± 5.9) μg·m⁻³ 和 (20.0 ± 5.7) μg·m⁻³,大于非采暖季;TCA 的平均质量浓度为 36.2 μg·m⁻³,在 PM_{2.5} 中的百分含量为 30.0%,表明碳气溶胶是朔州市细颗粒物的重要组成部分。

(2)4 个点位 PS、SW、QZ、SH 中 OC 浓度在采暖季和非采暖季的比值分别为 1.3、2.2、1.5、1.5,EC 浓度的比值分别为 1.4、3.6、1.5、1.8,说明各点位 OC 和 EC 的浓度均表现为采暖季大于非采暖季。其中,采暖季各点位 OC 和 EC 浓度大小排列为 SW > PS > QZ > SH;非采暖季点位 PS 中 OC 和 EC 的浓度分别为 17.7 μg·m⁻³ 和 14.1 μg·m⁻³,明显高于其他采样点。由此说明,朔州市 OC、EC 时空分布存在明显差异。

(3)朔州市采暖季 PM_{2.5} 中 OC/EC 的平均值为 1.2,非采暖季 PM_{2.5} 中 OC/EC 的平均值为 1.5,朔州市采暖季和非采暖环境空气 PM_{2.5} 中 OC/EC 平均值均小于 2,所以,控制碳组分一次排放来源,如燃煤烟尘、生物质燃烧及机动车尾气排放等是控制朔

表 4 朔州市 PM_{2.5} 中 SOC 浓度与其他城市比较
Table 4 Comparison of SOC concentration in PM_{2.5} in Shuozhou with other cities

城市	时间	SOC /μg·m ⁻³	SOC/OC /%	文献
朔州	采暖季	6.44 ± 2.77	27.64	本研究
	非采暖季	4.11 ± 1.92	28.74	
北京	冬季	10.7	40	[36]
	秋季	9.20	57	
开封	冬季	8.16	46	[35]
	夏季-秋季	6.67	52	
上海	冬季	5.685	27.5	[21]
	夏季	3.115	39.5	

州市 PM_{2.5} 的关键; OC 和 EC 相关性分析结果显示, 采暖季二者的相关性系数为 0.66, 非采暖季的为 0.52, 相关性不好, PM_{2.5} 中 OC 可能有二次有机碳 (SOC) 的存在. 其中, 采暖季和非采暖季 SOC 浓度分别为 $(6.44 \pm 2.77) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(4.11 \pm 1.92) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

参考文献:

- [1] Penner J E, Novakov T. Carbonaceous particles in the atmosphere: a historical perspective to the fifth international conference on carbonaceous particles in the atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101** (D14): 19373-19378.
- [2] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 气溶胶有机碳元素碳基本特征研究的前沿动向[J]. *环境科学与技术*, 2005, **28**(3): 112-114.
- [3] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409** (6821): 695-697.
- [4] 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.
- [5] Schauer J J, Mader B T, Deminter J T, *et al.* ACE-Asia intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(5): 993-1001.
- [6] Zhou S Z, Wang Z, Gao R, *et al.* Formation of Secondary organic carbon and long-range transport of carbonaceous aerosols at Mount Heng in South China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **63**: 203-212.
- [7] 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.
- [8] Zhang Y L, Liu D, Shen C D, *et al.* Development of a preparation system for the radiocarbon analysis of organic carbon in carbonaceous aerosols in China [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, **268**(17-18): 2831-2834.
- [9] 姚青, 韩素芹, 毕晓辉. 天津 2009 年 3 月气溶胶化学组成及其消光特性研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(2): 214-220.
- [10] 黄虹, 曹军骥, 曾宝强, 等. 广州大气细颗粒中有机碳、元素碳和水溶性有机碳的分布特征[J]. *分析科学学报*, 2010, **26**(3): 255-260.
- [11] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市 PM_{2.5} 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.
- [12] Chow J, Watson J. PM_{2.5} carbonate concentrations at regionally representative interagency monitoring of protected visual environment sites [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2002, **107**(D21): ICC 6-1-ICC 6-9, 16, doi: 10.1029/2001JD000574.
- [13] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Roadside, Urban, and Rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69**(4): 337-349.
- [14] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.
- [15] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [16] 成海容, 王祖武, 冯家良, 等. 武汉市城区大气 PM_{2.5} 的碳组分与源解析[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(9): 1574-1579.
- [17] 霍静, 李彭辉, 韩斌, 等. 天津秋冬季 PM_{2.5} 碳组分化学特征与来源分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 1937-1942.
- [18] 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 等. 福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1988-1994.
- [19] 张承中, 丁超, 周变红, 等. 西安市冬、夏两季 PM_{2.5} 中碳气溶胶的污染特征分析[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(4): 1477-1481.
- [20] 董海燕, 古金霞, 陈魁, 等. 天津市区 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(1): 34-38.
- [21] 贾英韬, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京清华园采暖前与采暖期 PM₁₀ 中含碳组分的理化特征[J]. *中国环境监测*, 2006, **22** (4): 52-56.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏季室内外 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.
- [25] Turpin B J, Lim H J. Species contribution to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35** (1): 602-610.
- [26] 徐永海, 赵雪艳, 姬亚芹. 东营春季 PM₁₀ 中有机碳和元素碳的污染特征及来源[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(1): 8-12.
- [27] 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.
- [28] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30** (12): 2079-2112.
- [29] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征[J]. *环境科学学报*, 2013,

- 33**(1): 181-188.
- [30] 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.
- [31] 周变红, 张承中, 王格慧. 春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 448-454.
- [32] 史美鲜, 彭林, 刘效峰, 等. 忻州市环境空气 PM_{10} 中有机碳和元素碳污染特征分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 458-463.
- [33] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, *et al.* Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2771-2781.
- [34] Strader R, Lurmann F, Pandis S N. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4849-4863.
- [35] Wu L, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Secondary organic carbon quantification and source apportionment of PM_{10} in Kaifeng, China [J]. *Journal of Environment Science*, 2009, **21**(10): 1353-1362.
- [36] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(3): 355-364.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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