

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按 (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM_{2.5}中碳气溶胶的污染特征及来源解析 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O₃生成潜势的相关性分析 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄煊芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A²O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸附特征及影响因素 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe₃O₄微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N₂O产生的影响 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

关中地区冬季 PM_{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析

田鹏山^{1,2}, 曹军骥^{1*}, 韩永明¹, 张宁宁¹, 张蓉¹, 刘随心¹

(1. 中国科学院地球环境研究所, 气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061; 2. 深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司, 深圳 518055)

摘要: 为研究关中地区冬季 PM_{2.5} 中碳气溶胶的污染特征和来源, 于 2012 年 12 月至 2013 年 2 月在西安、宝鸡、渭南和秦岭进行 PM_{2.5} 的采集, 并利用热光反射法测定了样品中的有机碳 (organic carbon, OC) 和元素碳 (elemental carbon, EC). 结果表明, 4 个采样点 OC 的平均质量浓度分别为 47.8、45.8、31.2 和 37.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, EC 分别为 8.5、6.7、7.6 和 5.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 总碳气溶胶 (total carbonaceous aerosol, TCA) 分别占 PM_{2.5} 的 36.4%、46.2%、36.9% 和 33.4%. OC 和 EC 的相关性在西安 ($R^2 = 0.93$) 和秦岭 ($R^2 = 0.91$) 高于宝鸡 ($R^2 = 0.58$) 和渭南 ($R^2 = 0.62$), 表明 OC 和 EC 在西安和秦岭可能具有更为相似的来源, 也可能具有更高的混合程度. 所有样品的 OC/EC 比值均大于 2.0, 表明有二次气溶胶 (secondary organic carbon, SOC) 的生成, 4 个采样点 SOC 分别占 OC 的 21.6%、40.3%、23.2% 和 27.8%. 正定矩阵因子分析法 (positive matrix factorization, PMF) 解析结果显示, 燃煤是关中地区冬季碳气溶胶的首要来源, 占 45.3%~47.9%, 汽油车和生物质燃烧是次要来源, 分别占 26.1%~33.1% 和 14.3%~20.1%, 此外柴油车也有一定贡献.

关键词: PM_{2.5}; 有机碳; 元素碳; 来源解析; 正定矩阵因子分析法; 关中地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0427-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.004

Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM_{2.5} During Winter in Guanzhong Area

TIAN Peng-shan^{1,2}, CAO Jun-ji^{1*}, HAN Yong-ming¹, ZHANG Ning-ning¹, ZHANG Rong¹, LIU Sui-xin¹

(1. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 2. IER Environmental Protection Engineering Technique Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

Abstract: To study the characteristics and sources of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} during winter in Guanzhong area, PM_{2.5} samples were collected from December 2012 to February 2013 in Xi'an, Baoji, Weinan and Qinling, and then organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) were analyzed following the thermal/optical reflection protocol. The average concentrations of OC in the four sites were 47.8, 45.8, 31.2 and 37.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, while EC concentrations were 8.5, 6.7, 7.6 and 5.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. Total carbonaceous aerosol (TCA) accounted for 36.4%, 46.2%, 36.9% and 33.4% of PM_{2.5}, respectively. OC was strongly correlated with EC in Xi'an ($R^2 = 0.93$) and Qinling ($R^2 = 0.91$), while weakly correlated in Baoji ($R^2 = 0.58$) and Weinan ($R^2 = 0.62$), which indicated that OC and EC had more similar sources or higher mixing degree in the former two sites. All OC/EC ratios exceeded 2.0, which indicated the formation of secondary organic carbon (SOC). In Xi'an, Baoji, Weinan and Qinling, SOC accounted for 21.6%, 40.3%, 23.2% and 27.8% of OC, respectively. Positive matrix factorization (PMF) was used to analyze the sources of carbonaceous aerosol and four sources were obtained. Coal burning was the major source, contributing 45.3%-47.9% in Guanzhong area. Gasoline vehicle and biomass burning were the minor sources, contributing 26.1%-33.1% and 14.3%-20.1%, respectively. In addition, diesel vehicle also had some contribution to carbonaceous aerosol.

Key words: PM_{2.5}; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); source apportionment; positive matrix factorization (PMF); Guanzhong area

大气颗粒物对能见度^[1]、辐射平衡^[2]以及人体健康^[3]等有着重要影响,因而受到了研究者越来越多的关注. 碳气溶胶是大气颗粒物的重要组成部分,它是指大气颗粒物中的含碳组分,主要存在于细颗粒物中,PM_{2.5}中的碳气溶胶可占 PM₁₀中碳气溶胶的 70% 以上^[4,5]. 碳气溶胶包括有机碳 (organic carbon, OC) 和元素碳 (elemental carbon, EC). EC 主要是由化石燃料和生物质的不完全燃烧产生的,只存在于污染源直接排放的一次气溶胶中. OC 是一种含有上百种有

机物的混合物,既包括污染源直接排放的一次有机碳 (primary OC, POC),又包括天然源和人为源排放的 VOCs 等气态前体物经过复杂的光化学反应后生成的二次有机碳 (secondary OC, SOC)^[6,7].

收稿日期: 2015-04-06; 修订日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41473119); 科技部科技基础性工作专项 (Y31Z021018); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05100402)

作者简介: 田鹏山 (1989~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境、生态规划等, E-mail: tianps@ieecas.cn

* 通讯联系人, E-mail: cao@loess.llqg.ac.cn

近年来,随着我国大气颗粒物污染问题的突显, $PM_{2.5}$ 受到了政府和民众的广泛关注,作为 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分,碳气溶胶的研究也越来越多. 目前,京津冀、长三角和珠三角等区域均已开展了多项相关研究^[8-14],探讨碳气溶胶的浓度水平、粒径分布、形成机制和来源特征等. 关中地区也已有一定研究基础^[4,15-17],然而这些研究主要集中在西安,针对关中地区尚缺乏区域性的整体研究.

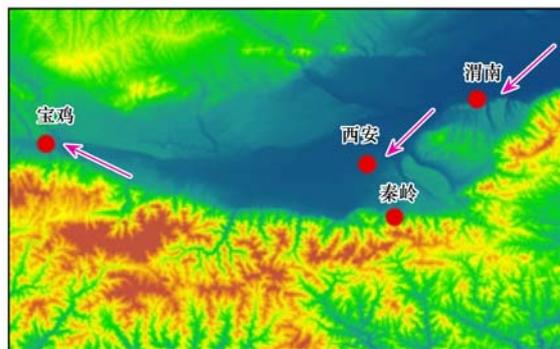
关中地区地处陕西省中部,南依秦岭,北接黄土高原,东起渭南市潼关,西至宝鸡市宝鸡峡,平均海拔约 500 m,属于温带季风气候,冬季寒冷干燥,日照时间短,风速较小,边界层较低. 2012 年关中地区常住人口约 2 358.2 万人,占陕西省总人口的 62.8%. 大量污染物的排放和不利的扩散条件导致关中地区近年来雾霾天气频繁发生,并逐渐由点状污染发展为面状污染,成为我国空气污染最为严重的“三区十群”之一. 本研究通过对 2012 年冬季关中地区大气 $PM_{2.5}$ 中碳组分的分析,了解碳气溶胶的污染状况,利用 PMF 受体模型解析了碳气溶胶的来源,以期为其有效控制提供科学依据.

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

在关中地区主要城市西安、宝鸡和渭南以及对照点秦岭分别采集大气 $PM_{2.5}$, 采样点位置如图 1 所示. 其中,3 个城市采样点位于市区内,分别位于中国科学院地球环境研究所 (34. 23° N, 108. 89° E)、宝鸡市环境保护局 (34. 36° N, 107. 24° E) 和渭南市环境保护局 (34. 49° N, 109. 47° E), 样品的采集均在楼顶进行,距离地面约 10 m; 对照采样点位于秦岭翠华山北麓 (34. 00° N, 109. 02° E), 海拔 1 200 m 左右. 各采样点周围视野开阔,通风良好,监测结果能够反映周边的大气污染状况. 采样时间为 2012 年 12 月至 2013 年 2 月,其中 3 个城市点每 6 d 采样 1 次,秦岭点每 12 d 采样 1 次,每次从当日 10:00 到次日 10:00 持续采集 24 h. 西安、宝鸡、渭南和秦岭点分别采集有效样品 14 个、15 个、14 个和 8 个.

采样仪器为配有 2.5 μm 切割头的便携式采样器 (Airmetrics, 美国), 流速为 5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 所用采样滤膜为直径 47 mm 的石英滤膜 (Whatman, 英国). 采样前空白石英滤膜在 800°C 马弗炉里高温烘烤 3 h 以去除可能的碳污染. 所有样品在分析前均放在聚苯乙烯皮氏皿中,并冷藏 (~4°C) 保存,以防有机物的挥发,并避免样品交叉污染.



红色箭头代表主导风向,数据来源于 <http://cdc.nmic.cn/home.do>

图 1 关中地区采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Guanzhong area

1.2 样品分析

1.2.1 称重分析

采样前后需对滤膜进行称重,所用仪器为精度 1 μg 的电子微量天平 (Sartorius, 德国). 所有空白滤膜和样品滤膜至少称 2 次,直至 2 次称量结果小于允许误差,空白滤膜和样品滤膜的允许误差分别为 15 μg 和 20 μg . 每次称量前滤膜均在恒温恒湿箱 (温度 20 ~ 23°C, 相对湿度 35% ~ 45%) 平衡 24 h 以上. 每日 $PM_{2.5}$ 的质量浓度即为对应滤膜采样前后的质量差除以采样体积,其中采样体积统一换算为标准状况 (0°C, 101.3 kPa) 的体积.

1.2.2 碳组分分析

采用 DRI2001 型热光碳分析仪 (Atmoslytic, 美国) 进行碳组分的分析,所用仪器为 IMPROVE 热光反射仪 (thermal/optical reflection, TOR)^[18,19]. 具体程序为:截取 0.526 cm^2 的样品放入仪器,在热光炉中,先通入 He,在无氧环境下程序分阶段逐步升温至 120、250、450 和 550°C,分别产生 OC1、OC2、OC3 和 OC4;之后通入 2% O_2 /98% He 的混合气体,分阶段逐步升温至 550、700 和 800°C,分别产生 EC1、EC2 和 EC3. 无氧加热释放的 OC 经催化氧化炉转化生成 CO_2 和 有氧加热时生成的 CO_2 ,均在还原炉中被还原成 CH_4 ,再由火焰离子化检测器 (FID) 定量检测. 在此过程中,无氧加热时的焦化效应可使部分有机碳 (OC) 裂解为元素碳 (EC),这部分碳称为裂解碳 (optically detected pyrolyzed carbon, OP),其可通过 633 nm He-Ne 激光反射光强的变化测定分离点. 最终,将有机碳 OC 定义为 $\text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OP}$,元素碳 EC 定义为 $\text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} - \text{OP}$,总碳 (total carbon, TC) 定义为 $\text{OC} + \text{EC}$.

仪器每天在样品分析前和分析后均用 CH_4/CO_2 标准气体进行校准. 分析样品时,每测定 10 个

样品任意复检 1 个, 其中 TC 的允许偏差为 $\pm 5\%$, OC 和 EC 的允许偏差为 $\pm 10\%$. 此外每周需做一次系统空白, 确保仪器在样品分析过程中不含有其它气体杂质.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 及其碳组分的质量浓度

表 1 为采样期间 4 个采样点 PM_{2.5} 及其碳组分的质量浓度和比值. 从中可知西安、宝鸡、渭南和秦岭 PM_{2.5} 的平均质量浓度分别为 (239.4 \pm 121.3)、(190.9 \pm 98.1)、(178.4 \pm 77.1) 和 (199.7 \pm 83.5) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级日均标准 (75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 2.4 ~ 3.2 倍, 其中西安污染最为严重. 秦岭翠华山地区作为非城市点, 周边较少有工业生产和居民生活, 然而其

北麓 PM_{2.5} 质量浓度并不低于城市点, 甚至高于宝鸡和渭南, 因而其污染物可能主要来自其它地区的输送. 由主导风向 (图 1) 可知, 秦岭北麓冬季的污染物可能主要来自于渭南和西安.

关中地区冬季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的质量浓度分别为 31.2 ~ 47.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 5.7 ~ 8.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, OC 的空间分布表现为西安 > 宝鸡 > 秦岭 > 渭南, EC 表现为西安 > 渭南 > 宝鸡 > 秦岭, 这与 PM_{2.5} 的分布略有差异. 总碳气溶胶 (total carbonaceous aerosol, TCA) 是衡量 PM_{2.5} 中碳组分的重要指标, 它是由有机物 (organic matter, OM) 和元素碳两部分构成的, 其计算方法^[20] 如公式 (1) 所示. 计算结果表明, 关中地区 TCA 占 PM_{2.5} 的 33.4% ~ 46.2%, 其中宝鸡所占比例最大, 秦岭最小.

$$\text{TCA} = 1.6 \times \text{OC} + \text{EC} \quad (1)$$

表 1 关中地区 PM_{2.5} 及其碳组分的质量浓度和比值

Table 1 Concentrations and ratios of PM_{2.5} and carbonaceous components in Guanzhong area

| 采样点 | PM _{2.5} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | OC/EC | TCA/PM _{2.5} /% | SOC/OC/% |
|-----|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------|--------------------------|----------|
| 西安 | 239.4 \pm 121.3 | 47.8 \pm 26.2 | 8.5 \pm 4.4 | 10.5 \pm 9.1 | 5.8 | 36.4 | 21.6 |
| 宝鸡 | 190.9 \pm 98.1 | 45.8 \pm 16.8 | 6.7 \pm 2.1 | 19.0 \pm 11.5 | 7.1 | 46.2 | 40.3 |
| 渭南 | 178.4 \pm 77.1 | 31.2 \pm 9.5 | 7.6 \pm 2.6 | 7.4 \pm 5.7 | 4.3 | 36.9 | 23.2 |
| 秦岭 | 199.7 \pm 83.5 | 37.0 \pm 15.4 | 5.7 \pm 3.3 | 8.7 \pm 4.8 | 7.4 | 33.4 | 27.8 |

由表 2 可知, 与西安已有的研究结果相比, 关中地区 OC、EC 的质量浓度和 TCA/PM_{2.5} 的比值整体上有所下降, 表明关中地区冬季碳气溶胶的污染程度有所降低. 然而与国内其它地区相比, 关中地区

OC 的质量浓度仍高于其它城市, EC 仅次于成都, TCA 占 PM_{2.5} 的质量分数也位居前列. 这表明, 关中地区的碳气溶胶仍处于较高浓度, 污染状况不容忽视.

表 2 中国主要城市 PM_{2.5} 中碳组分的质量浓度和比例¹⁾

Table 2 Concentrations and percentages of carbonaceous components in PM_{2.5} in different cities of China

| 采样点 | 时间 | 测量仪器和方法 | OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | TCA/PM _{2.5} /% | SOC/OC/% | 文献 |
|------|----------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------|------|
| 关中地区 | 2012 年冬季 | DRI, TOR | 31.2 ~ 47.8 | 5.7 ~ 8.5 | 33.4 ~ 46.2 | 21.6 ~ 40.3 | 本研究 |
| 西安 | 2003 年冬季 | DRI, TOR | 61.9 | 12.3 | 45.9 | — | [15] |
| 北京 | 2011 年冬季 | DRI, TOR | 21.9 | 5.0 | 44.2 | 37.3 | [8] |
| 上海 | 2010 年冬季 | DRI, TOR | 11.8 | 3.0 | 31.3 | 39.4 | [11] |
| 天津 | 2009 年冬季 | DRI, TOR | 18.2 | 3.4 | 24.6 | 35.7 | [21] |
| 成都 | 2009 年冬季 | DRI, TOR | 31.5 | 11.6 | 27.5 | — | [22] |
| 福建沿海 | 2010 年冬季 | SUNSET, TOT* | 14.8 ~ 19.3 | 2.0 ~ 3.4 | 26.4 ~ 33.1 | 13.1 ~ 45.7 | [23] |
| 广州 | 2005 年冬季 | SUNSET, TOT* | 23.8 ~ 23.9 | 4.0 ~ 4.4 | 32.9 ~ 35.4 | 36 ~ 42 | [24] |
| 珠三角 | 2001 年冬季 | DRI, TOR | 14.7 | 6.1 | 40.2 | 42.6 | [12] |

1) * 为热光透射法 (thermal/optical transmission, TOT); “—” 表示文章中没有相关数据

2.2 OC 和 EC 的关系及 OC/EC 比值分析

通过研究 OC 和 EC 之间的关系, 可以在一定程度上定性判断碳气溶胶的来源, 其相关性分析可用于初步判断 OC 和 EC 来源的一致性和稳定性. 一般地, 若 OC 和 EC 的相关性好, 则表明二者可能具有相同来源. 对于大城市来说, 混合均匀也会导致 OC 和 EC 具有较好的相关性. 图 2 为 4 个采样点冬

季 OC 和 EC 的相关性分析, 由图可知, OC 和 EC 的相关性在西安和秦岭较高, R^2 分别为 0.93 和 0.91, 表明 OC 和 EC 在西安和秦岭可能具有较为一致的来源, 也可能具有较高的混合程度; 相比而言, OC 和 EC 的相关性在宝鸡和渭南较低, R^2 分别为 0.58 和 0.62, 表明其 OC 和 EC 的来源相对复杂.

OC/EC 的比值主要与排放源类型、SOC 的生

成以及降水清除作用等有关^[25]. 不同污染源排放的 PM_{2.5} 中 OC/EC 比值一般不同, 因此利用 OC/EC 比值可定性判断碳气溶胶的来源^[26]. 研究表明, 机动车尾气、燃煤和生物质燃烧的 OC/EC 比值分别

为 1.0~4.2、2.5~10.5 和 8.1~12.7^[27-31]. 采样期间关中地区的 OC/EC 比值在 3.1~11.2, 4 个采样点的平均值分别为 5.8、7.1、4.3 和 7.4, 表明燃煤可能是关中地区碳气溶胶的最主要来源.

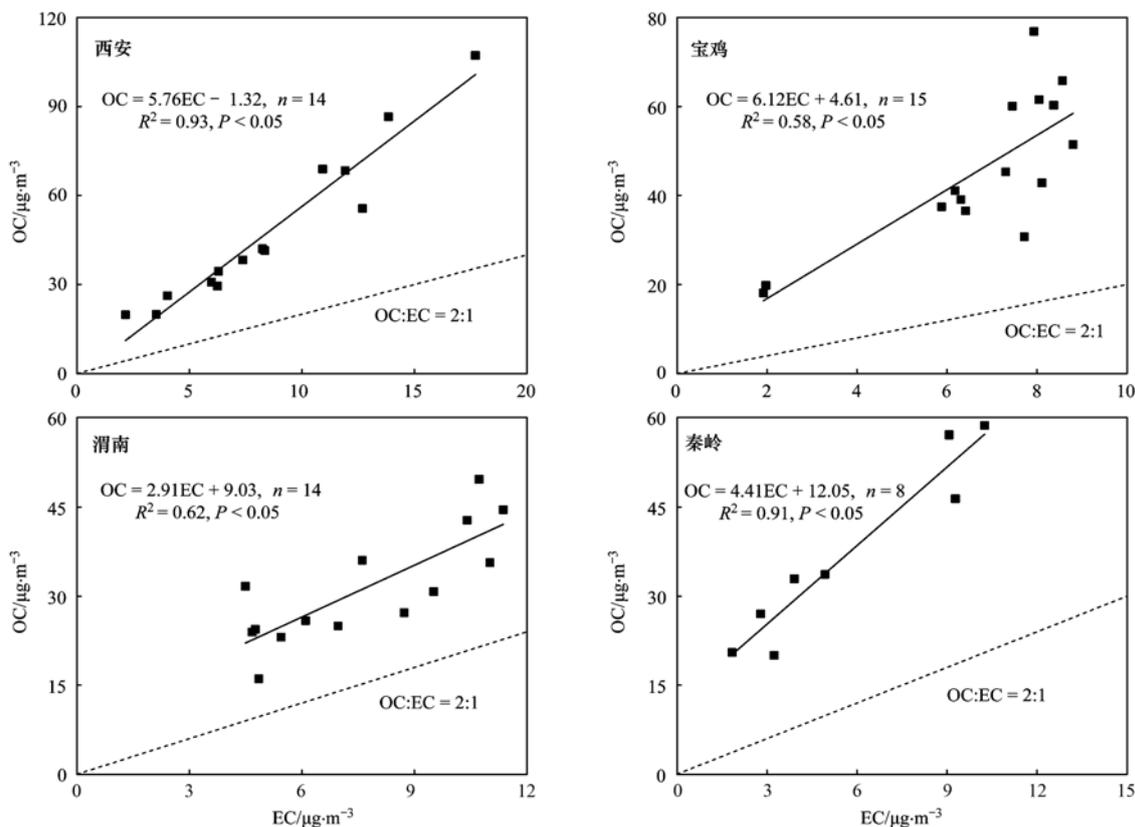


图 2 OC 和 EC 的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between OC and EC

2.3 SOC 的估算

SOC 的生成会导致碳气溶胶的构成发生变化, 针对 SOC 的研究是当前碳气溶胶研究的热点和难点之一. SOC 的估算有多种方法, 其中最简便最常用的为 EC 示踪法, 即以 OC/EC 的比值大于 2.0 表示 SOC 的存在^[32,33]. 由图 2 可知, 采样期间所有 OC/EC 比值均大于 2.0, 表明关中地区冬季 SOC 的形成不可忽视. 根据 Castro 等的研究^[34], SOC 可利用经验公式(2)进行估算.

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

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 为各采样点采样期间 OC/EC 的最小值.

由表 1 可知, 西安、宝鸡、渭南和秦岭 SOC 的质量浓度分别为 10.5、19.0、7.4 和 8.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中宝鸡最高, 并且其 SOC/OC 的比值高达 40.3%, 这可能与地形和气象条件有关. 由图 1 可知, 宝鸡地处关中地区最西侧, 冬季主导风向为东南

风, 宝鸡本地的污染物以及来自关中地区东部的污染物在此累积, 难以扩散, 大气滞留时间较长, 因而更有利于 SOC 的生成. 秦岭作为非城市点, 受人为一次排放影响较小, 冬季时植物排放也较弱, 因此 SOC 是其 OC 的重要来源, 占 27.8%. 西安和渭南 SOC 的贡献相对较小, 分别占 OC 的 21.6% 和 23.2%. 与国内其它城市相比(表 2), 除宝鸡外, 关中地区整体上 SOC/OC 的比值小于北京、上海、天津和珠三角等沿海发达城市 and 地区, 这可能是由多种因素共同引起的, 例如温度和 O₃ 浓度等^[35-37].

2.4 碳气溶胶的来源解析

中国区域大气中 OC 和 EC 主要有 3 个人为排放源, 即燃煤、机动车尾气和生物质燃烧^[38], 先前在西安的研究也证明了这一点^[15,16]. 研究表明, 不同排放源排放的 8 种碳组分具有不同的分布特征, 其中 OC2、OC3、OC4、OP 和 EC1 的高载荷可用来指示燃煤排放源, OP 和 EC1 的高载荷可用来指示

汽油车排放源, OC1 和 OP 的高载荷可用来指示生物质燃烧排放源, EC2 和 EC3 的高载荷可用来指示柴油车排放源^[8,17,27]. 因此, 对碳气溶胶的 8 种组分进行因子分析可以在一定程度上实现对碳气溶胶的定量源解析.

图 3 为关中地区冬季 PM_{2.5} 中 8 种碳组分的质量分数分布特征. 整体上, 4 个采样点的碳组分分布较为相似, 主要集中在 OC2、OC3、OC4 和 EC1, 占 TC 的 80.5% ~ 86.6%, 表明燃煤和机动车尾气是碳气溶胶的主要来源. 与城市点相比, 秦岭的 OP 所占比例较大, 这可能与秦岭受到了更多生物质燃烧的影响有关.

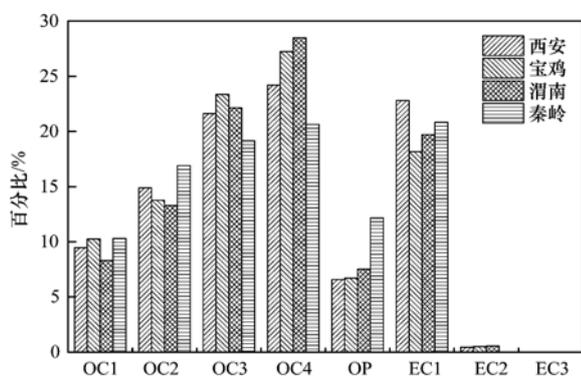


图 3 8 种碳组分的质量分数

Fig. 3 Mass fractions of eight carbonaceous components

为定量研究 4 个采样点采样期间 PM_{2.5} 中碳气溶胶的来源, 本研究利用正定矩阵因子分析法 (positive matrix factorization, PMF) 对样品中的碳组分进行了解析. PMF 具有无需输入污染源源谱数据, 分解矩阵中元素非负, 可利用数据标准偏差进行优化等优点, 是美国国家环保署推荐的源解析工具, 目前已被广泛应用于大气颗粒物污染源解析中^[22,39-41]. 由于本研究中西安、宝鸡和渭南的样品未检测出 EC3, 秦岭未检测出 EC2 和 EC3, 因此在 PMF 模型应用过程中, 3 个城市点未输入 EC3 的数据, 秦岭未输入 EC2 和 EC3 的数据. 分析结果如图 4 所示.

在因子 1 中, OC2、OC3 和 OC4 所占比例最大, 是该因子的特征组分, 此外, OP 和 EC1 也占较大比例, 这与燃煤排放的碳组分特征较为相似, 因此推断为燃煤排放源.

在因子 2 中, OP 和 EC1 最为突出, OC1、OC2、OC3 和 OC4 所占比例相对平均, 这与汽油车尾气排放的碳组分特征较为相似, 因此推断为汽油车排放源.

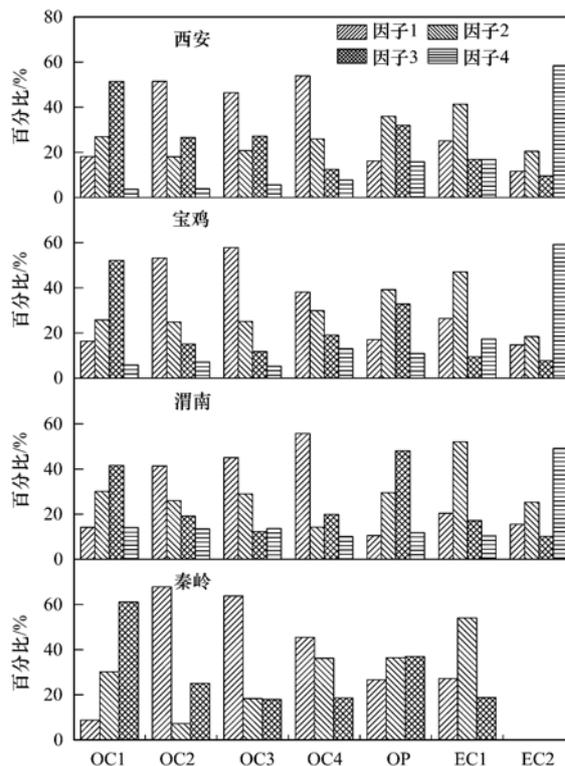


图 4 PMF 解析出的因子特征

Fig. 4 Source profiles derived from PMF

在因子 3 中, OC1 和 OP 所占比例最大, 其它组分相对平均, 这与生物质燃烧源排放的碳组分特征较为相似, 因此推断为生物质燃烧排放源.

在因子 4 中, EC2 对因子 4 的贡献明显高于其它因子, 占 EC2 总量的一半以上, 而其它组分的贡献相对较小, 这与柴油车排放的碳组分特征较为相似, 因此推断为柴油车排放源. 由于秦岭未检测出 EC2, 因此其柴油车排放源可忽略不计.

根据以上分析结果, 西安、宝鸡、渭南和秦岭各污染源对 PM_{2.5} 中碳气溶胶的贡献如图 5 所示. 其中, 燃煤是最大贡献源, 对西安、宝鸡、渭南和秦岭的贡献分别为 45.3%、46.1%、47.9% 和 46.8%, 这与冬季取暖用煤导致用煤量激增有着密切的联系. 汽油车是第二大贡献源, 对西安、宝鸡、渭南和秦岭的贡献分别为 32.3%、29.6%、26.1% 和 33.1%, 这是由近年来私家车保有量的不断增长造成的. 生物质燃烧也是关中地区重要的污染源, 对西安、宝鸡、渭南和秦岭的贡献分别为 14.3%、18.6%、19.5% 和 20.1%, 冬季时农村地区存在较多的燃烧生物质取暖和烹饪活动, 在此过程中大量碳组分被排放到大气中. 此外, 柴油车对城市地区的碳气溶胶也有一定贡献, 约占 5.7% ~ 8.1%. 对比 3 个城市点发现, 机动车对西安的贡献高于宝鸡

和渭南,而燃煤和生物质燃烧对宝鸡和渭南的贡献高于西安,这可能是由燃料结构、工业分布和机动车保有量等的差异引起的.与城市点相比,秦岭没有解析出柴油车排放源,而其汽油车和生物质燃烧的贡献略高于城市,一方面可能与不同燃料排放的污染物传输扩散程度不同有关,另一方面可能还受到了秦岭过往车辆以及森林野火的影响.

由于本研究采集样品量偏少,尤其是秦岭点,因此 PMF 的解析结果存在着较大的不确定性.此外,与主分量分析方法类似,PMF 缺乏源谱的输入,而是从解析谱来判断其污染来源,这与污染源的實際源谱存在一定差异,这也导致其不确定性进一步增加.未来,可在关中地区深入开展全面的源谱测量工作,利用化学质量平衡法等进一步解析关中地区碳气溶胶的来源,以期為污染减排提供更加精确的科学依据.

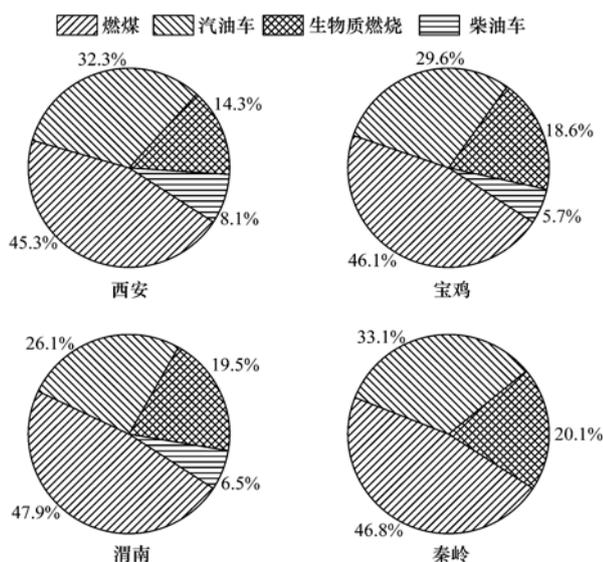


图 5 各污染源对关中地区 PM_{2.5} 中碳组分的贡献

Fig. 5 Contribution of each pollution source to carbonaceous components of PM_{2.5} in Guanzhong area

3 结论

(1) 2012 年冬季西安、宝鸡、渭南和秦岭 PM_{2.5} 的平均质量浓度分别为 239.4、190.9、178.4 和 199.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, OC 分别为 47.8、45.8、31.2 和 37.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, EC 分别为 8.5、6.7、7.6 和 5.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, TCA 分别占 PM_{2.5} 的 36.4%、46.2%、36.9% 和 33.4%. 秦岭作为非城市点,污染也十分严重,其污染物可能主要来自西安和渭南的输送.

(2) OC 和 EC 的相关性在西安 ($R^2 = 0.93$) 和秦岭 ($R^2 = 0.91$) 高于宝鸡 ($R^2 = 0.58$) 和渭南 ($R^2 =$

0.62),表明 OC 和 EC 在西安和秦岭可能具有更为相似的来源,也可能具有更高的混合程度.

(3) SOC 是关中地区冬季碳气溶胶的重要组成部分,西安、宝鸡、渭南和秦岭 SOC 分别占 OC 的 21.6%、40.3%、23.2% 和 27.8%.

(4) PMF 解析结果显示,燃煤是关中地区冬季碳气溶胶的首要来源,占 45.3% ~ 47.9%,汽油车和生物质燃烧是次要来源,分别占 26.1% ~ 33.1% 和 14.3% ~ 20.1%,此外柴油车也有一定贡献.

致谢:本研究在采样过程中得到了宝鸡市环境保护局和渭南市环境保护局的支持,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Watson J G. Visibility: Science and regulation[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, **52**(6): 628-713.
- [2] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. Nature, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [3] Schwartz J, Dockery D W, Neas L M. Is daily mortality associated specifically with fine particles? [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1996, **46**(10): 927-939.
- [4] 刘随心,张二科,曹军骥,等.西安 2005 年春季大气碳气溶胶的理化特征[J].过程工程学报,2006, **6**(增刊 2): 5-9.
- [5] Ho K F, Lee S C, Yu J C, et al. Carbonaceous characteristics of atmospheric particulate matter in Hong Kong[J]. Science of the Total Environment, 2002, **300**(1-3): 59-67.
- [6] 郑玫,闫才青,李小滢,等.二次有机气溶胶估算方法研究进展[J].中国环境科学,2014, **34**(3): 555-564.
- [7] 白志鹏,李伟芳.二次有机气溶胶的特征和形成机制[J].过程工程学报,2008, **8**(1): 202-208.
- [8] 程水源,刘超,韩力慧,等.北京市采暖期 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征与来源解析[J].北京工业大学学报,2014, **40**(4): 586-591, 597.
- [9] 董海燕,古金霞,陈魁,等.天津市 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.
- [10] 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.
- [11] 张懿华,王东方,赵倩彪,等.上海城区 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J].环境科学,2014, **35**(9): 3263-3270.
- [12] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(11): 1451-1460.
- [13] Cao J J, Zhu C S, Tie X X, et al. Characteristics and sources of carbonaceous aerosols from Shanghai, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(2): 803-817.
- [14] Zheng M, Wang F, Hagler G S W, et al. Sources of excess

- urban carbonaceous aerosol in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (5): 1175-1182.
- [15] 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.
- [16] 李建军, 沈振兴, 同帆, 等. 西安冬春季 PM₁₀ 中碳气溶胶的昼夜变化特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1506-1513.
- [17] 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.
- [18] 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*, 2007, **112** (D22), doi: 10.1029/2006JD008205.
- [19] Chow J C, Watson J G, Chen L W A, *et al.* Refining temperature measures in thermal/optical carbon analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 2961-2972.
- [20] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass[J]. *Aerosol Science & Technology*, 2001, **35**(1): 602-610.
- [21] 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.
- [22] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 PM_{2.5} 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 2947-2952.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Cachier H, Lioussé C, Pertuisot M H, *et al.* African fire particulate emissions and atmospheric influence[A]. In: Levine J S (Ed.). *Biomass Burning and Global Change*[M]. London, England: MIT Press, 1996. 428-440.
- [26] 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.
- [27] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 810-819.
- [28] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [29] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(17): 6052-6058.
- [30] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C₁ through C₃₀ organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [31] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [32] Gray H A, Cass G R, Huntzicker J J, *et al.* Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon particle concentrations in Los Angeles[J]. *Environmental Science & Technology*, 1986, **20**(6): 580-589.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Strader R, Lurmann F, Pandis S N. Evaluation of Secondary organic aerosol formation in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4849-4863.
- [36] 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 O₃ 和气象条件的关联[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- [37] Wang X, Shen Z X, Cao J J, *et al.* Characteristics of surface ozone at an urban site of Xi'an in Northwest China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(1): 116-126.
- [38] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(25): 4281-4296.
- [39] Song Y, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(8): 1526-1537.
- [40] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [41] Tan J H, Duan J C, Chai F H, *et al.* Source apportionment of size segregated fine/ultrafine particle by PMF in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **139**: 90-100.

CONTENTS

| | |
|--|--|
| Editor's comment | (403) |
| Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China | WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404) |
| Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution | WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413) |
| Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010 | HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420) |
| Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area | TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427) |
| Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS | LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434) |
| Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District | YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443) |
| Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area | MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452) |
| Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing | DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459) |
| Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China | ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466) |
| Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha | XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475) |
| Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau | SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482) |
| Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet | GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490) |
| Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika | YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499) |
| Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang | SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507) |
| Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China | ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513) |
| Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch | LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520) |
| Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed | WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527) |
| Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province | HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534) |
| Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake | XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542) |
| Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China | PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548) |
| Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay | ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558) |
| Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou | LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565) |
| Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors | LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573) |
| Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas | JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580) |
| Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate | WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588) |
| Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe | ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595) |
| Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property | WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602) |
| Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic | YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609) |
| Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water | ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615) |
| Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria | JING Ming, WANG Lei (622) |
| Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02 | SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630) |
| Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology | TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638) |
| Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment | SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647) |
| Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe | SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655) |
| Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water | XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662) |
| Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions | FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668) |
| Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions | WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680) |
| Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge | ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689) |
| Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period | LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697) |
| Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland | CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703) |
| Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City | WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710) |
| Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas | ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717) |
| Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil | WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726) |
| Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies | LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734) |
| Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province | WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740) |
| Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment | LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750) |
| Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms | WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756) |
| Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls | HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765) |
| Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor | LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775) |
| Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method | DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782) |

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

| | | | | |
|---------|--|------------------|----|---|
| 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