

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究

黄欢^{1,2}, 毕新慧^{1*}, 彭龙^{1,2}, 王新明¹, 盛国英¹, 傅家谟¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 主要对广州秋季(2014 年 9 月)和冬季(2014 年 12 月~2015 年 1 月)大气 PM_{2.5} 和不同粒径段颗粒物样品中水溶性有机碳(WSOC)的吸光性进行了研究. 结果表明, PM_{2.5} 上 WSOC 的光吸收波长指数(AAE_{abs})秋、冬季分别为 3.72 ± 0.41 和 3.91 ± 0.70 , 低于北京和北美地区测量结果. WSOC 在 365 nm 波长的质量吸收效率(MAE)秋、冬季分别为 $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 两个季节具有明显的差异. 冬季 WSOC 的 MAE 值呈现随粒径增大而降低的趋势; 而秋季所有粒径段颗粒 MAE_{WSOC} 都比冬季低, 特别是 <0.95 μm 粒径段颗粒降低得更多, 这表明秋季颗粒物中 WSOC 二次源的贡献更大一些, 而且主要是富集在亚微米级颗粒物上. 此外, 对比本研究以及文献中报道的元素碳(EC)和 WSOC 的 MAE 值, 可以发现在颗粒物受一次源排放影响较大的情况下, WSOC 对于颗粒消光的贡献是不容忽视的.

关键词: 水溶性有机碳; 棕碳; 质量吸收效率; 光吸收; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0016-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.003

Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou

HUANG Huan^{1,2}, BI Xin-hui^{1*}, PENG Long^{1,2}, WANG Xin-ming¹, SHENG Guo-ying¹, FU Jia-mo¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Light absorption properties of water-soluble organic carbon (WSOC) were investigated in the urban area of Guangzhou. The fine particulate matter (PM_{2.5}) and size-segregated samples were collected in September and December of 2014 and January of 2015. The variation of absorption with wavelength of WSOC was characterized by the absorption Ångström exponent (AAE_{abs}). The AAE values of WSOC in PM_{2.5} were 3.72 ± 0.41 in autumn and 3.91 ± 0.70 in winter, which were lower than those in Beijing and north America. The mass absorption efficiency (MAE) of WSOC at 365 nm wavelength was $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ in autumn and $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ in winter, exhibiting distinct variations between autumn and winter. In winter, the MAE_{WSOC} values exhibited a decreasing trend with increasing particle size, and all size-segregated MAE_{WSOC} values in autumn were lower than those in winter, particularly for the particles <0.95 μm, suggesting more contribution of the secondary formation to WSOC. Comparing the MAE values of elemental carbon (EC) and WSOC, it could be found that the contribution of WSOC to the light extinction of particles couldn't be ignored when the particles were mainly emitted from primary sources.

Key words: WSOC; brown carbon; mass absorption efficiency; light absorption; size distribution

近年来,有机气溶胶因其对能见度、区域及全球气候变化和人体健康有重要影响而受到广泛关注. 水溶性有机碳(WSOC)占气溶胶有机碳(OC)的 20%~70%^[1]. WSOC 的来源比较广泛,机动车尾气排放、化石燃料和生物质燃烧被认为是 WSOC 的重要一次排放源^[1~3]. 同时,大气光化学氧化过程和颗粒表面的多相化学反应也是 WSOC 的另一主要来源^[4~6]. 不同地区由于环境及气候等因素往往造成 WSOC 的物理和化学性质出现明显差异.

棕碳是指具有吸光性的一类 OC,其吸收光谱与波长的关系比黑碳(BC)更强. Chen 等^[7]研究发

现,棕碳在 350 nm 对于气溶胶总的光吸收贡献达到了 20%~40%,说明在短波区内棕碳的光吸收贡献不容忽视. 传统的光学仪器很难将气溶胶中的 BC 和棕碳区分开,有研究用溶剂先把 BC 和棕碳分离,再对萃取液进行分析,这为棕碳吸光性的测定提供了新方法. 研究发现 WSOC 中有很多物质都具有吸光性,所以可用其进行棕碳性质的研究.

收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05020205); 广东省科技项目(2014B030301060)

作者简介: 黄欢(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气气溶胶, E-mail: 1195146483@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: bixh@gig.ac.cn

近期一些研究报道 WSOC 的质量吸收效率 (MAE) 呈现明显的季节性差异. Hecobian 等^[8] 在美国东南部 15 个地区采集了 PM_{2.5} 样品, 研究发现其 MAE_{WSOC} 值均为冬季远高于夏季. 而 Cheng 等^[9] 在亚洲东部城市的研究亦得到类似的结果. 目前对于 MAE_{WSOC} 粒径分布的研究较少. 粒径分布特征是影响有机物在大气中干、湿沉降、迁移和化学转化等过程的重要因素之一. 不同粒径段的 WSOC 由于来源或者形成机制不同, 有可能造成其不同的光学性质.

广州地区气溶胶中 WSOC 含量较高且来源广泛^[10], 但对其吸光性能的研究相对较少. 本研究通过分析广州城区秋、冬两季 PM_{2.5} 和不同粒径段颗粒样品中 WSOC 的 MAE 值, 并结合在线痕量气体数据, 探讨引起 MAE_{WSOC} 季节性变化的原因, 通过更加深入地认识广州市大气 PM_{2.5} 的光学性质, 以期为深入研究灰霾的成因机制提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

采样地点设置在广州市天河区中国科学院广州地球化学研究所标本楼九楼楼顶 (40 m). 采样点距离高速公路 100 m (广园快速路). 本研究于 2014 年 9、12 月和 2015 年 1 月采集 PM_{2.5} 样品和 4 个粒径段 (<0.49、0.49~0.95、0.95~1.5 和 1.5~3.0 μm) 的颗粒物样品, 每天采集一套样品, 每次连续采集 24 h, 共采集样品 125 个. 采样仪器为 Anderson PM_{2.5} 和 Anderson SA235 大流量采样器 (流量均为 1.13 m³·min⁻¹). 采样前将石英纤维滤膜 (QFFs, Whatman) 于 500℃ 下灼烧 4 h, 以除去残留碳和其它杂质. 采样后, 放入 -40℃ 冰柜中储存, 尽快完成所有分析. 将部分样品膜用 >18 MΩ·cm 超纯水超声萃取, 再用一次性注射器加上 0.45 μm 水系滤头进行过滤, 最终得到 WSOC 分析样品. 另有部分样品膜用于 OC 和元素碳 (EC) 分析.

1.2 OC/EC 和 WSOC 吸收波长指数的测定

本研究中 OC/EC 采用 Sunset Laboratory 热光碳分析仪 (TOT) 分析; WSOC 质量浓度用总有机碳分析仪 (TOC, Elementar, 德国) 分析; WSOC 的吸光系数测定主要是应用 Hecobian 等^[8] 的方法. 将 WSOC 萃取液通过紫外分光光度计 (Helios UV-VIS, Thermo, 美国) 测定其紫外吸光系数, 即 Abs_λ, 单位 Mm⁻¹^[11].

WSOC 的吸光系数与波长有关, 二者的关系可用以下公式表达:

$$\text{Abs}_\lambda = K \times \lambda^{-\text{AAE}} \quad (1)$$

式中, K 是常数, AAE 是吸收波长指数. 根据公式 (1), 通过测定不同波长的 Abs_λ, 之后对其进行对数函数的线性拟合即可得到 AAE 值. 本研究中, λ 选取 8 个波段: 300、330、365、390、420、450、480、500 nm. 其中 365 nm 波段 WSOC 的吸光系数用于下面 MAE 值的计算.

1.3 MAE 值测定

本研究中, WSOC 的 MAE 值 (单位: m²·g⁻¹) 可通过下面的公式计算:

$$\text{MAE}_{\text{WSOC}} = \text{Abs}_{365} / c_{\text{WSOC}} \quad (2)$$

式中, MAE_{WSOC} 指的是 WSOC 在 365 nm 波长的质量吸收效率; c_{WSOC} 是 WSOC 的浓度 (单位: μg·mL⁻¹).

EC 的 MAE 值 (MAE_{EC}) 主要根据 Cheng 等^[9] 的方法计算得到:

$$\begin{aligned} \text{MAE} &= \frac{b_{\text{abs}}}{\text{EC}} = \frac{\text{ATN}}{\text{EC} \cdot C \cdot R(\text{ATN})} \times \frac{A}{V} \\ &= \frac{\text{ATN}}{\text{EC}_s \cdot C \cdot R(\text{ATN})} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, b_{abs} 为光吸收系数, EC 为颗粒物中元素碳质量浓度 (μg·m⁻³), C (散射效应系数) 和 $R(\text{ATN})$ (遮蔽效应系数) 是常数, A 和 V 分别为滤膜面积 (cm²) 和空气采样体积 (m³), 光衰减 $\text{ATN} = \ln(I_0/I) \times 100$ (I 和 I_0 为分析前后的透射光强度), EC_s 为热-光碳分析仪测定的单位滤膜面积上的元素碳质量 (μg·cm⁻²).

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 中 WSOC 光吸收 AAE 值

WSOC 的 AAE 值可通过公式 (1) 拟合指数曲线得到. 本研究测得的秋季和冬季 PM_{2.5} 样品中 WSOC 的 AAE 值分别为 3.72 ± 0.41 和 3.91 ± 0.70. 洛杉矶地区气溶胶水萃取液 AAE 值大约 7.60^[12], 北京地区不同季节气溶胶水萃取液 AAE 值都在 5.80~11.70 范围内^[11], 美国东南部地区不同季节气溶胶水萃取液 AAE 值也均在 6.20~8.30 之间^[8], 印度德里地区测得 AAE 值为 5.10 ± 2.00^[13]. 之前文献报道, 不同地区 PM_{2.5} 样品中有机酸类等 WSOC 的种类和含量存在一定差别^[14~16], 这可能是造成 AAE 值出现地区差异的重要原因. 一些源解析研究发现, 生物质燃烧排放的

类腐殖质物质水萃取液 AAE 值为 $7.10^{[17]}$; 大气氧化形成的新、老二次有机气溶胶 (SOA) 水萃取液的 AAE 值分别在 7.00 和 4.70 左右^[18]; 受煤燃烧和生物质燃烧排放影响的气溶胶中 WSOC 的 AAE 值约为 $3.50^{[19]}$; 生物质燃烧排放颗粒物的 AAE 值约为 $2.00^{[20]}$. 由此可见, 广州城区 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 的 AAE 值与煤燃烧、生物质燃烧排放以及老化的 SOA 相对接近, 表明这些可能是广州 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 的主要贡献者.

2.2 秋季和冬季 $PM_{2.5}$ 的 MAE_{WSOC} 差异

图 1 为各地市区不同季节 MAE_{WSOC} 值. 根据报道北美地区和北京地区均为冬季 MAE_{WSOC} 值高于夏季^[8,21]. 本研究中, 广州地区秋季 MAE_{WSOC} 为 $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 冬季为 $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 两个季节存在明显的差异见图 1.

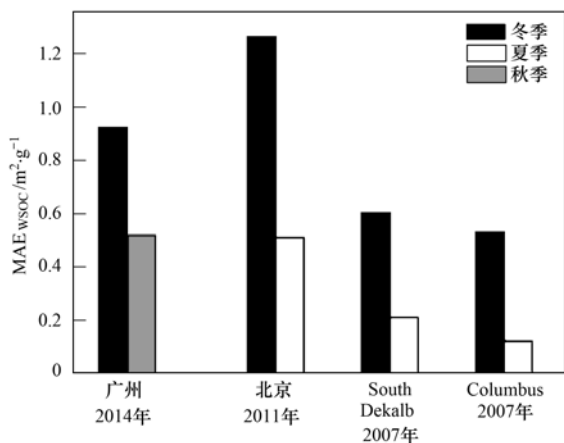


图 1 各地市区不同季节 MAE_{WSOC} 值

Fig. 1 MAE_{WSOC} values in different seasons in different cities

有研究报道不同源排放 WSOC 的 MAE 值不同, 生物质燃烧源为 $1.19 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 柴油机车排放源为 $1.33 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 混合性一次源为 $2.89 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; 二次源影响比较大的地区 MAE_{WSOC} 要低很多, 例如北京受光化学氧化影响较大的地区, $PM_{2.5}$ 的 MAE_{WSOC}

仅为 $0.33 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ^[11]. 这样, 本研究得到的秋季 MAE_{WSOC} 低于冬季, 可能说明秋季有更多二次形成的 WSOC. 图 2 是广州城区站点在线痕量气体季节平均浓度变化数据. 从中可知, 秋季 O_3 平均浓度较高, 这可能是因为广州秋季光照强度高, 大气光化学反应频繁, 大气中的前体有机物也比较多, 因此产生大量的 O_3 ^[22~24]. 同样, 这阶段 WSOC 很可能受二次源影响较大; 冬季数据 O_3 平均浓度不高, 但是 NO_x 、 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度高. 秋冬季相比, WSOC 冬季一次源的贡献可能更大一些. 图 3 为 $PM_{2.5}$ 中 EC 质量浓度与 WSOC 质量浓度的线性关系图. 从中可知, 秋季 EC 质量浓度与 WSOC 质量浓度相关性较低 ($R^2 = 0.21$), 而冬季 EC 质量浓度与 WSOC 质量浓度相关性较高 ($R^2 = 0.54$). 表明秋季 WSOC 受一次排放源影响较小, 而冬季 WSOC 主要受一次源影响. 两个季节 WSOC 来源不同, 从而造成它们的 MAE_{WSOC} 不同.

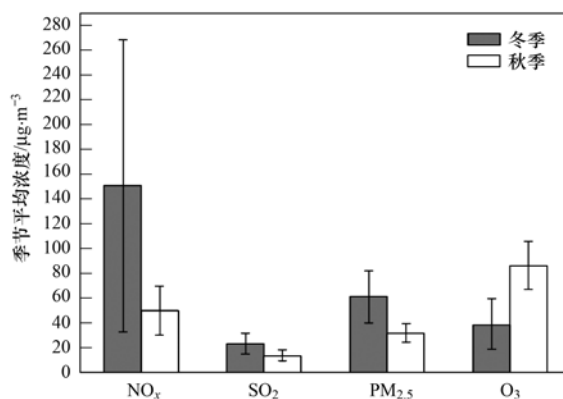


图 2 广州地区在线痕量气体和 $PM_{2.5}$ 秋冬季平均浓度及方差变化情况

Fig. 2 Seasonal variations in average concentration and variance of ambient trace gases and $PM_{2.5}$ in Guangzhou

2.3 MAE_{WSOC} 的粒径分布特征

在颗粒物的不同粒径段上, WSOC 的含量和种类分布往往不同, 其吸光性大小也会存在差异. 为

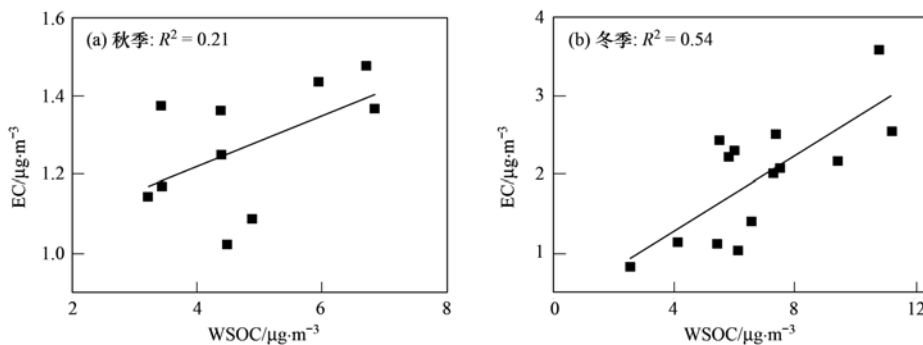


图 3 WSOC 与 EC 浓度的相关性

Fig. 3 Correlation between WSOC and EC

了探究不同粒径段 WSOC 吸光性差异的大小,本研究对两个季节 4 个粒径段颗粒的 MAE_{WSOC} 和 MAE_{EC} 进行了分析. 4 个粒径段 (<0.49 、 $0.49 \sim 0.95$ 、 $0.95 \sim 1.5$ 和 $1.5 \sim 3.0 \mu m$) 的 MAE_{WSOC} 平均值分别为冬季 0.93 、 0.85 、 0.79 和 $0.66 m^2 \cdot g^{-1}$, 秋季 0.61 、 0.54 、 0.57 和 $0.51 m^2 \cdot g^{-1}$; MAE_{EC} 平均值分别为冬季 13.06 、 9.99 、 8.00 和 $5.47 m^2 \cdot g^{-1}$, 秋季 14.46 、 10.36 、 8.66 和 $7.26 m^2 \cdot g^{-1}$. 图 4 (a) 为 MAE_{WSOC} 值的粒径分布. 从中可见, 冬季各粒径段 MAE_{WSOC} 值均高于秋季; 两个季节, 均以 $<0.49 \mu m$ 段 MAE_{WSOC} 值最高 (冬季占 28.79%, 秋季占

27.35%), 且整体呈现 MAE_{WSOC} 值随粒径增大而降低的趋势.

EC 主要来自于一次源排放. 图 4(b) 为 MAE_{EC} 值的粒径分布. 从中可知, 两个季节颗粒物的 MAE_{EC} 值随粒径增大呈递减趋势. 冬季 MAE_{WSOC} 值随粒径的变化趋势与 MAE_{EC} 值相似, 再次说明冬季颗粒物中 WSOC 一次源贡献可能更大一些. 但秋季 MAE_{WSOC} 值的变化趋势与 MAE_{EC} 值存在一定差异, 并没有呈明显的降低趋势; $<0.95 \mu m$ 粒径段颗粒 MAE 值相对冬季降低了很多. 这表明小颗粒上 WSOC 二次源的贡献更大一些.

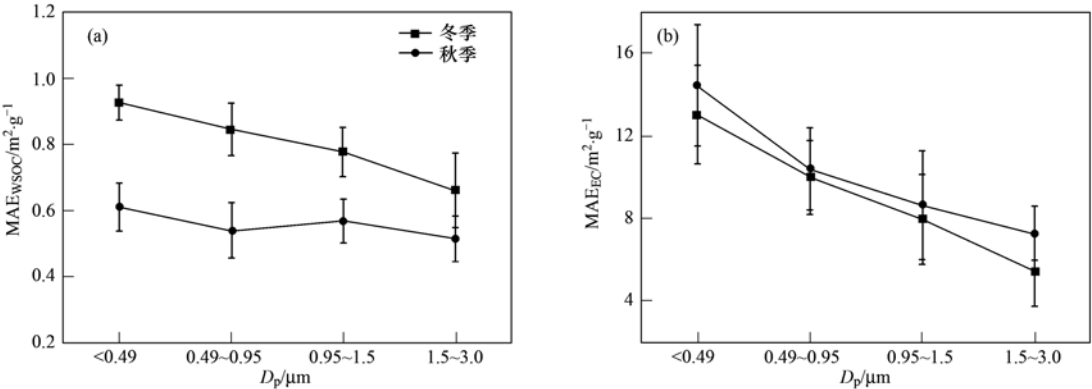


图 4 MAE_{WSOC} 和 MAE_{EC} 的粒径分布
Fig. 4 Size distribution of the MAE_{WSOC} and MAE_{EC}

2.4 颗粒物中 EC 和 WSOC 吸光性对比

本研究中, $PM_{2.5}$ 的 MAE_{EC} 值分别为秋季 $13.53 m^2 \cdot g^{-1}$ 和冬季 $12.82 m^2 \cdot g^{-1}$, MAE_{WSOC} 值分别为秋季 $0.52 m^2 \cdot g^{-1}$ 和冬季 $0.92 m^2 \cdot g^{-1}$, MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值为秋季 26.02, 冬季 13.93. 吸光性最强的 $<0.49 \mu m$ 粒径段颗粒物 ($PM_{0.49}$) 的 MAE_{EC} 值分别为秋季 $14.46 m^2 \cdot g^{-1}$ 和冬季 $13.06 m^2 \cdot g^{-1}$, MAE_{WSOC} 值分别为秋季 $0.61 m^2 \cdot g^{-1}$ 和冬季 $0.93 m^2 \cdot g^{-1}$, MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值为秋季 23.70, 冬季 14.04. 本研究和已有报道的 MAE_{EC} 值和 MAE_{WSOC} 值如表 1 所示, 在北京、广州等地冬季的 MAE_{EC} 值普遍低于夏、秋季, 而相应的

MAE_{WSOC} 值却为冬季远高于夏秋季, MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值均为夏、秋季远高于冬季^[9]. 表 2 为已有报道的源排放结果, 表明受生物质燃烧影响地区 $PM_{2.5}$ 中 MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值为 2.10, 柴油机车排放 MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值为 8.95, 混合型一次源 MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值为 1.83, 木柴和农作物秸秆燃烧 MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值分别为 2.47 ~ 3.81 和 5.24 ~ 7.24, 而受二次源影响地区 $PM_{2.5}$ 中 MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值高达 41.00^[9,11,25,26]. 因此, 在冬季或者是一次源影响较大时, MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值相对较小, WSOC 的吸光性能不容忽视.

表 1 本研究与文献中不同季节的 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{0.49}$ 中 MAE_{EC} 值和 MAE_{WSOC} 值

Table 1 MAE_{WSOC} and MAE_{EC} values in $PM_{2.5}$ and $PM_{0.49}$ in various seasons in previous reports and this work

采样地区	样品说明	$MAE_{EC}/m^2 \cdot g^{-1}$	$MAE_{WSOC}/m^2 \cdot g^{-1}$	MAE_{EC}/MAE_{WSOC}	文献
广州	市区 秋季 ($PM_{0.49}$)	14.46	0.61	23.70	本研究
广州	市区 冬季 ($PM_{0.49}$)	13.06	0.93	14.04	本研究
广州	市区 秋季	13.53	0.52	26.02	本研究
广州	市区 冬季	12.82	0.92	13.93	本研究
北京	市区 夏季	13.70	0.71	19.30	[9]
北京	市区 冬季	12.30	1.79	6.87	[9]

表 2 文献中不同源排放 WSOC 和 EC 的 MAE 值

Table 2 MAE values of WSOC and EC emitted from different sources in previous reports and this work

样品源	MAE _{WSOC} /m ² ·g ⁻¹	文献	样品源	MAE _{EC} /m ² ·g ⁻¹	MAE _{EC} /MAE _{WSOC}	文献
生物质燃烧源	1.19	[11]	生物质燃烧源	2.50	2.10	[26]
受二次源影响的 PM _{2.5}	0.33	[11]	受二次源影响的 PM _{2.5}	13.53	41.00	本研究
混合型一次源	2.89	[11]	混合型一次源	5.30	1.83	[26]
柴油机排放	1.33	[11]	柴油机排放	11.90	8.95	[9]
木柴	0.97	[11]	木柴	2.40~3.70	2.47~3.81	[25]
秸秆	1.05	[11]	秸秆	5.50~7.60	5.24~7.24	[25]
柴草	0.90	[11]	生物质颗粒	6.70~12.00	—	[25]
—	—	—	煤	4.80~11.00	—	[25]

3 结论

(1)广州城区 PM_{2.5}上 WSOC 的光吸收波长指数 AAE 值秋冬季分别为 3.72 ± 0.41 和 3.91 ± 0.7 , 低于北京和北美地区测量结果.

(2)WSOC 的单位质量吸收效率 MAE_{WSOC} 两个季节分别为 $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (秋)和 $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (冬), 具有明显的差异,这是由于两个季节 WSOC 的主要来源和形成机制不同造成的.

(3)WSOC 的 MAE 值在冬季呈现随粒径增大而降低的趋势,而秋季所有粒径段颗粒 MAE_{WSOC} 都比冬季有所降低,特别是 $<0.95 \mu\text{m}$ 粒径段颗粒降低更多,表明二次形成的 WSOC 主要集中在小颗粒上.

(4)PM_{2.5}上 MAE_{EC}值分别为秋季 $13.53 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和冬季 $12.82 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, MAE_{WSOC} 值分别为秋季 $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和冬季 $0.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值为秋季 26.02, 冬季 13.93. 当颗粒物受到一次源影响较大时, MAE_{EC}/MAE_{WSOC} 比值相对较小, WSOC 对于颗粒吸光性的贡献不容忽视.

参考文献:

- [1] Park S S, Cho S Y. Tracking sources and behaviors of water-soluble organic carbon in fine particulate matter measured at an urban site in Korea[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (1): 60-72.
- [2] Park S S, Cho S Y, Kim K W, *et al.* Investigation of organic aerosol sources using fractionated water-soluble organic carbon measured at an urban site[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 64-72.
- [3] Wonaschütz A, Hersey S P, Sorooshian A, *et al.* Impact of a large wildfire on water-soluble organic aerosol in a major urban area: the 2009 Station Fire in Los Angeles County [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (16): 8257-8270.
- [4] Kondo Y, Miyazaki Y, Takegawa N, *et al.* Oxygenated and water-soluble organic aerosols in Tokyo [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (D1): D01203.
- [5] Weber R J, Sullivan A P, Peltier R E, *et al.* A study of secondary organic aerosol formation in the anthropogenic-influenced southeastern United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (D13): D13302.
- [6] 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.
- [7] Chen Y, Bond T C. Light absorption by organic carbon from wood combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (4): 1773-1787.
- [8] Hecobian A, Zhang X, Zheng M, *et al.* Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (13): 5965-5977.
- [9] Cheng Y, He K B, Zheng M, *et al.* Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organic carbon in Beijing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (22): 11497-11510.
- [10] Huang H, Ho K F, Lee S C, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in PM_{2.5}: Pearl Delta River region, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **104-105**: 227-236.
- [11] Du Z Y, He K B, Cheng Y, *et al.* A yearlong study of water-soluble organic carbon in Beijing II: Light absorption properties [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 235-241.
- [12] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, *et al.* Sources, composition and absorption Ångström exponent of light-absorbing organic components in aerosol extracts from the Los Angeles Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (8): 3685-3693.
- [13] Kirillova E N, Andersson A, Tiwari S, *et al.* Water-soluble organic carbon aerosols during a full New Delhi winter: Isotope-based source apportionment and optical properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119** (6): 3476-3485.
- [14] Ho K F, Cao J J, Lee S C, *et al.* Dicarboxylic acids, ketocarboxylic acids, and dicarbonyls in the urban atmosphere of China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (D22), doi: 10.1029/2006JD008011.
- [15] Ho K F, Ho S S H, Lee S C, *et al.* Summer and winter variations of dicarboxylic acids, fatty acids and benzoic acid in

- PM_{2.5} in Pearl Delta River region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(5): 2197-2208.
- [16] 谭吉华, 赵金平, 段青春, 等. 广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1982-1987.
- [17] Hoffer A, Gelencsér A, Guyon P, *et al.* Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3563-3570.
- [18] Bones D L, Henricksen D K, Mang S A, *et al.* Appearance of strong absorbers and fluorophores in limonene-O₃ secondary organic aerosol due to NH₄⁺-mediated chemical aging over long time scales [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(D5), doi: 10.1029/2009JD012864.
- [19] Yang M, Howell S G, Zhuang J, *et al.* Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China-interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(6): 2035-2050.
- [20] Marley N A, Gaffney J S, Tackett M, *et al.* The impact of biogenic carbon sources on aerosol absorption in Mexico City[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(5): 1537-1549.
- [21] Zhang X, Hecobian A, Zheng M, *et al.* Biomass burning impact on PM_{2.5} over the southeastern US during 2007: integrating chemically speciated FRM filter measurements, MODIS fire counts and PMF analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(14): 6839-6853.
- [22] Li Y, Lau A K H, Fung J C H, *et al.* Importance of NO_x control for peak ozone reduction in the Pearl River Delta region [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2013, **118**(16): 9428-9443.
- [23] Wang T, Wei X L, Ding A J, *et al.* Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China, 1994-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(16): 6217-6227.
- [24] Guo H, Jiang F, Cheng H R, *et al.* Concurrent observations of air pollutants at two sites in the Pearl River Delta and the implication of regional transport[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(19): 7343-7360.
- [25] Shen G F, Chen Y C, Wei S Y, *et al.* Mass absorption efficiency of elemental carbon for source samples from residential biomass and coal combustions[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 79-84.
- [26] Xing Z Y, Deng J J, Mu C, *et al.* Seasonal variation of mass absorption efficiency of elemental carbon in the four major emission areas in China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(7): 1897-1905.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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