ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第11期
2017年11月15日

目 次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 …… 张意,Andre Michel,李东,张欣,吴琳,张衍杰,马超,邹超,毛洪钧(4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 …… 彭霞, 佘倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶(4454)
鄂东典型工业城市大气 PM_{10} 中元素浓度特征和来源分析 …… 占长林,张家泉,郑敬茹,姚瑞珍,刘红霞,肖文胜,刘先利,曹军骥(4463)
常州夏秋季 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶特征及来源 …… 叶招莲,刘佳澍,李清,马帅帅,许澎(4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 …… 范美益,曹芳,张园园,鲍孟盈,刘晓妍,张雯淇,高嵩,章炎麟(4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 …… 刘慧琳,陈志明,李宏姣,蒋靖坤,张强,黄炯丽,毛敬英,梁桂云,杨俊超,张达标,莫招育(4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 …… 李婉欣,路瑞,谢铮胜,王金龙,范春兰,刘鹏霞,李彦鹏(4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 …… 唐永,孙语嫣,石晓勇,韩秀荣,苏荣国(4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 …… 张明,鲍征宇,陈国光,雍太健,朱意萍,梁晓红(4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 …… 李大鹏,张硕,张中发,罗娜,魏青青,张瑞,黄宏(4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 …… 张涛,蔡五田,李颖智,张智印,耿婷婷,边超,赵淼,蔡月梅(4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 …… 杨思远,赵剑,余华章,彭亮,肖利娟(4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 …… 张晓娇,柏杨巍,张远,马淑芹,郭昌胜,张莉(4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 …… 何肖微,储瑜,曾巾,赵大勇,陆建明,曹萍,吴庆龙(4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 …… 张莉,林佳宁,张远,王书平,臧小苗,张晓娇(4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根氮磷养分淹水浸泡释放的影响 …… 肖丽微,朱波(4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 …… 滕泽栋,李敏, 朱静,宋明阳(4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 …… 李如忠,郑侠,高苏蒂,叶舟(4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 …… 蔡顺智,李大鹏,唐鑫煜,李浩冉,朱伟,黄勇(4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 …… 王浩,李正魁,张一品,丁帮璟(4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(Ⅴ) …… 周孜迈,邓文娜,杨艺琳,孙艳秋,王悦,柳听义,王中良(4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 …… 蒋婷,鲍玥,李威,方荣业,史惠祥(4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 …… 于莉芳,杜倩倩,张茹,杨秀玲,李韧,滑思思,冯云堂(4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 …… 孙洪伟,陈翠忠,吴长峰,赵华南,于雪,方晓航(4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 …… 刘宏,彭永臻,卢炯元,李慧,南彦斌,王瑾,陈永志(4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 …… 马娟,王谨,俞小军,张伟,魏雪芬,陈永志,田文清(4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 …… 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 …… 信欣,管蕾,郭俊元,刘洁, 冯梅,余婷婷(4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 …… 黄佳路,王小龙,高大文(4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 …… 高景峰,王时杰,樊晓燕,潘凯玲,张丽芳,张树军,高永青,张帅(4696)
硫酸盐和Fe(Ⅱ)EDTA-NO/Fe(Ⅲ)EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 …… 张玉,万方,周集体(4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 …… 耿淑英,付伟章,王静,郑书联(4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 …… 杜泽瑞,郝春博,裴理鑫,卫朋飞,张壹,鲁艳春(4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 …… 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(4733)
表层沉积物中 6:2氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 …… 王丹,侯珍,张琪,周萤,卢晓霞(4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 …… 刘艳秋,赵嫣然,刘梦娇,樊灏,黄艺(4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 …… 牟东阳,靳鹏飞,彭永臻,李夕耀,张琼,何建中(4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 …… 杨光,孙涛,安思危,马明(4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO_2、CH_4 排放通量的短期影响 …… 李冬冬,仝川,谭立山,陈坤龙,孙东耀,黄佳芳(4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 …… 石将来,郝庆菊,冯迪,张凯莉,石孝均,江长胜(4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 …… 周燕, 卢新卫(4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 …… 代豫杰,郭建英,董智,李锦荣,李红丽(4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 …… 蒋梦蝶,王秋敏,徐鹏,周维,邬磊,胡荣桂(4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子 …… 梁月明,苏以荣,何寻阳,陈香碧,胡亚军(4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 …… 段然,胡红青,付庆灵,寇长林(4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 …… 杨洁,钱赵秋,王旌(4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 …… 叶涛,黄丽,张克强,张斌,常红,刘智杰,杜连柱(4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 …… 王锐,朱朝菊,向文军,方敦,杨小洪,吴少尉,魏世勇(4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 …… 印红玲,刘琴,廖林群,王震,罗怡,邓旭,丁浚刚,唐铭(4868)
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响 …… 陈耀宁,苟宇,黎媛萍,伍艳馨,陈艳容,李辉,刘耀,汪元南,张道利,朱福造,曾光明(4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 …… 李标,孔晓英,李连华,李颖,袁振宏,孙永明,吕鹏梅(4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 …… 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰(4889)
《环境科学》征稿简则(4462) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

常州夏秋季 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶特征及来源

叶招莲[1,2],刘佳澍[1],李清[1],马帅帅[1],许澎[1]
(1. 江苏理工学院化学与环境工程学院,常州 213001; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院,江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室,南京 210044)

摘要: 为更好地了解碳质组分的特点和来源,在常州市采集了夏季(7~8 月)和秋季(10~11 月)60 个细颗粒物($PM_{2.5}$)样品. 采样期间,夏季 $PM_{2.5}$、OC、EC 平均浓度分别为 73.0、14.3 和 3.3 μg·m^{-3}, 秋季为 84.2、13.2 和 3.5 μg·m^{-3}. 总碳质组分(OC + EC)占 $PM_{2.5}$ 总质量的 24.3%(夏季)和 20.7%(秋季). 采用 IMPROVE-A 热/光反射法测定的碳质 8 组分结果表明,OC2、OC3、OC4 和 EC1 相关性好($r > 0.92$), EC2 和 EC3 相关性较好($r > 0.65$),说明可能的相似来源. OC 与 EC 相关性中等,表明碳质组分来源复杂. 秋季 WSOC/OC(60.9%)略高于夏季(57.4%),而夏季 SOC/OC(52.5%)略高于秋季(49.0%). 夏季和秋季 SOC/OC 都低于 WSOC/OC,说明部分水溶性有机碳是一次源. WSOC 和 SOC 相关性强,进一步验证了大部分 SOC 具有水溶性. 碳质组分之间的关系及主成分分析表明,采样期间燃煤和机动车尾气排放是碳质组分的两个主要来源. 后向轨迹分析表明,采样点 $PM_{2.5}$ 和碳质组分主要受当地排放源和短距离传输的影响,长距离传输贡献较小.

关键词:常州地区; $PM_{2.5}$; 碳质组分; 水溶性有机碳; 二次有机碳
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)11-4469-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201704295

Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ Measurements During Summer and Fall in Changzhou

YE Zhao-lian[1,2], LIU Jia-shu[1], LI Qing[1], MA Shuai-Shuai[1], XU Peng[1]
(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To better understand the characterization and sources of carbonaceous components, a total of 60 fine particle ($PM_{2.5}$) samples were collected in Changzhou during summer (July to August) and fall (October to November) of 2016. The average mass concentrations of $PM_{2.5}$, organic carbon (OC), and elemental carbon (EC) during this study period were observed to be 73.0, 14.3 and 3.3 μg·m^{-3} in summer and 84.2, 13.2, and 3.5 μg·m^{-3} in fall, respectively. The average mass fraction of carbonaceous aerosols (OC + EC) in the $PM_{2.5}$ measurement was estimated to be 24.3% in summer and 20.7% in fall. Eight carbonaceous fractions, resolved by following the IMPROVE-A thermal/optical reflectance protocol, showed strong correlation ($r > 0.92$) between OC2, OC3, OC4 and EC1 and close correlations between EC2 and EC3 ($r > 0.65$), indicating probable similar contributors. OC and EC were moderately correlated, suggesting complex contributions to carbonaceous aerosol. The water soluble organic carbon (WSOC) to OC ratio (WSOC/OC) in the fall (60.9%) was slightly higher than that in the summer (57.4%), while secondary organic carbon (SOC) to OC ratio (SOC/OC) was lower in the fall (49.0%) compared with the summer (52.5%). The SOC/OC ratio was lower than the WSOC/OC for both seasons, suggesting that part of WSOC component originates from primary emissions. The significant correlation of WSOC and SOC confirms that most SOC is water soluble. Relationships between each carbonaceous species and the principal component analysis indicate that vehicle emissions and coal combustion are the two main emission sources of carbonaceous aerosols from the observation period. Back trajectory analysis was used to indicate that carbonaceous components at sampling site are mainly affected by local emission sources and short distance transport, whereas the contribution of long-distance transmission is small.
Key words: Changzhou City; $PM_{2.5}$; carbonaceous aerosol; water soluble organic carbon; secondary organic carbon

大气细颗粒物($PM_{2.5}$)对空气质量、全球气候、和人类健康等起着至关重要的作用. 碳质气溶胶是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分,包括元素碳(EC)和有机碳(OC),受气溶胶来源和气象条件的影响[1], 对 $PM_{2.5}$ 的贡献范围为 20% ~50%[2~4]. EC 主要来自化石燃料或生物质的不完全燃烧,具有较强的吸光特性,对大气能见度及气候有一定影响[5]. OC 主要包括汽车或生物质燃烧等产生的一次有机碳(POC)

收稿日期: 2017-04-29; **修订日期**: 2017-05-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(91544220); 江苏省政策引导类计划项目(产学研前瞻性联合研究)(BY2016030-15); 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室开放基金项目(KHK1409); 江苏省重点研发计划项目(社会发展)(BE2016657); 江苏省普通高校专业学位研究生实践创新计划项目(SJLX16_0666)
作者简介: 叶招莲(1978~), 女,博士,副教授,主要研究方向为大气化学及污染控制,E-mail: bess_ye@jsut.edu.cn

和其排放的 VOCs 通过光化学反应或液相反应生成的二次有机碳(SOC),具有光散射性[6,7]. 碳质气溶胶还可作为云凝结成核物进而间接影响全球气候. OC、EC 通过呼吸进入人体肺部至肺泡,可带来各种呼吸性疾病,严重的甚至导致死亡[8]. 近年来,中国各城市持续遭遇霾,许多学者在北京[9]、兰州[10]、长三角[11,12]、珠三角[13]等地开展 $PM_{2.5}$ 碳质组分特性及来源的研究. 然对,对于二次有机碳(SOC)和水溶性有机碳(WSOC)之间的关系及来源的报道还不多,尽管有文献表明大部分二次有机气溶胶(SOA)是水溶性的[14,15]. 对于 WSOC/OC 和 SOC/OC 的季节性变化还存在争议,多数研究表明 WSOC/OC 春夏季高,而 SOC/OC 秋冬季高[16],少数研究得出相反的结论[11,17].

长三角地区位于中国的东部,随着经济的快速发展正在经历严重的大气污染. 目前主要围绕吸湿性、季节性变化、尺寸分布和来源解析[18~20]等开展研究. 然而,已有的研究大部分局限在南京和上海[3],周边中小城市开展得较少. 常州位于长三角的西部,南京和上海之间,是一个重要的制造业基地. 由于污染物排放量的增加,近年来常州地区 $PM_{2.5}$ 污染现象愈发严重,霾天的天数也有所上升. 至今,还没有关于常州 $PM_{2.5}$ 碳质组分特性和来源解析相关的研究报道.

本研究通过采集 2016 年常州夏季(7~8 月)和秋季(10~11 月)大气中 $PM_{2.5}$ 样品,探讨碳质组分包括季节变化特征及相关性. 结合同期的气象资料分析、气态污染物浓度及相关性分析,利用主成分分析法、后向轨迹对 OC、EC 的来源进行解析,以期为有效控制常州市大气污染提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于常州西南部的江苏理工学院 9 层公寓楼的楼顶,离地面大约 40 m. 紧邻京杭大运河和居民区,离最近的交通要道中吴大道仅 0.5 km 左右,周围没有明显的工业污染源. 夏季和秋季风向和风速见图 1. 从中可知,常州夏季以东南风和东风为主,秋季以东北风和东风为主. 夏季平均风速为 2.0 $m\cdot s^{-1}$, 秋季为 1.9 $m\cdot s^{-1}$. 采用大流量采样器(KB-1000,青岛金仕达电子科技有限公司)1.05 $m^3\cdot min^{-1}$ 采集 20 h,采样滤膜为 20.3 cm × 25.4 cm 石英滤膜(Whatman, QM-A). 采样前,将石英滤膜置于 500℃ 马弗炉中焙烧 4 h,采样前后,放置在恒温恒湿干燥箱(温度 22℃,湿度 45%)中平衡 48 h,用精度为 0.01 mg 的天平称重,然后用铝箔封装储存在 -20℃ 低温冰柜中保存待分析. 共获得有效样品 60 个,其中夏季 24 个,秋季 36 个. 采样期间,同步记录气温(T)、风速(WS)、相对湿度(RH)、能见度(visibility)和大气压(P)等气象参数. 采样期内的气态污染物(SO_2、NO_2、CO、O_3)来自采样点附近国家空气质量监测站点的在线监测数据.

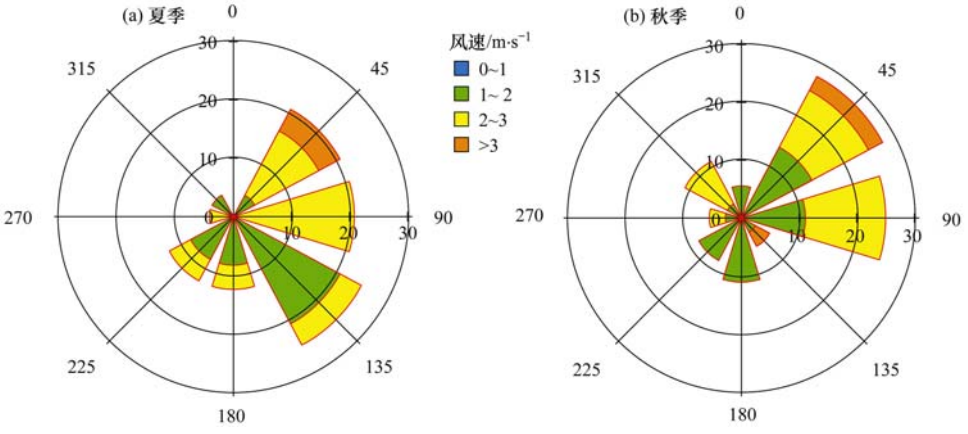

图 1 采样期间风玫瑰图

Fig. 1 Plot of wind rose results during the sampling period

1.2 样品分析

采用 DRI Model 2001A 热/光反射碳分析测定样品中的 OC 和 EC. 测定采用程序升温,分 4 个阶段升温,第 1 阶段为纯氦气环境下升温热解测出 140℃(OC1)、280℃(OC2)、480℃(OC3)、580℃(OC4),接着在 2% O_2/98% He 环境中,分 3 个阶段升温 580℃(EC1)、740℃(EC2)和 840℃(EC3)氧化元素碳物质. 在纯氦气环境的加热过程中,部分有机碳(OP)被裂解成黑炭. 根据 IMPROVE-A 协议:OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OP; EC = EC1 +

EC2 + EC3-OP. WSOC 采用总有机碳分析仪(TOC-L,岛津)测定. SOC 根据下式计算：

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

式中,$(OC/EC)_{min}$为采样期间 OC/EC 的最小值,本研究取秋季和夏季分别为 1.58 和 2.51.

1.3 质量控制

样品分析前,对仪器进行检查,每周进行一次流量平衡校正. 为保证测量精度,每个膜样品进行 3 次平行样分析,每测定 10 个样品进行一次平行和空白分析,两次测量误差在 10% 以内再进行后续样品测定. 测定20 张空白膜,取3 倍的标准偏差为仪器的最小检测限,OC 和 EC 仪器检测限分别为 0.82 $\mu g \cdot cm^{-2}$和0.20 $\mu g \cdot cm^{-2}$(以 C 计). 空白膜的 OC 和 EC 占测定的样品浓度的1% 以下,因此样品中的 OC、EC 均没有扣除空白膜的值.

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$和 OC、EC 的浓度水平

表1 为采样期间 $PM_{2.5}$和 OC、EC、WSOC 等的浓度水平及占比. 从中可知,夏季 $PM_{2.5}$的日均浓度水平为(73.0 ± 19.5) $\mu g \cdot m^{-3}$,变化范围为 37.8 ~ 118.3 $\mu g \cdot m^{-3}$; 秋季 $PM_{2.5}$的日均浓度水平为(84.2 ± 49.4) $\mu g \cdot m^{-3}$,变化范围为 30.0 ~ 229.4 $\mu g \cdot m^{-3}$,远低于太原[21]. 夏季温度(平均温度 31.7℃)较秋季高(平均温度 15.9℃),辐射强,相对湿度低,有利于大气颗粒物的扩散,表现为能见度(11.1 km)高于秋季(6.5 km)(图2). 采样期间,夏秋两季风速差距小,$PM_{2.5}$整体水平差距不大. 但是秋季 11 月 5 日和 11 月 13 日两天 $PM_{2.5}$浓度极高(250 $\mu g \cdot m^{-3}$),能见度低,风速低,受多日持续霾天的影响. 10 月 23 日,10 月 27 ~ 30 日,11 月 7 ~ 9 日,均出现雨天,雨天过后 $PM_{2.5}$浓度都较低(30 ~ 60 $\mu g \cdot m^{-3}$).

OC、EC 浓度总体上呈现随着 $PM_{2.5}$浓度的增大而增大的趋势,OC 浓度相对较高且波动幅度较大,OC 的变化范围分别为 7.5 ~ 21.7 $\mu g \cdot m^{-3}$(夏季)和 4.5 ~ 47.0 $\mu g \cdot m^{-3}$(秋季),EC 变化范围分别为 1.1 ~ 5.6 $\mu g \cdot m^{-3}$(夏季)和 0.7 ~ 9.0 $\mu g \cdot m^{-3}$(秋季). 夏秋季 OC 日均浓度水平分别为 14.3 $\mu g \cdot m^{-3}$和 13.2 $\mu g \cdot m^{-3}$,EC 为 3.3 $\mu g \cdot m^{-3}$和 3.5 $\mu g \cdot m^{-3}$, 浓度水平季节变化小. 夏季 OC/EC 比为 4.7,秋季为 4.3,季节性差异不大. 两个季节 SOC 对 OC 的平均贡献为 50% 左右, 与北京两年的观测结果(56.5%)[22]和珠海观测结果相似(53.9%)[23].

以总碳质气溶胶(total carbonaceous aerosol, TCA = 1.6 × OC + EC)来衡量,常州市夏季和秋季的 TCA 分别占 $PM_{2.5}$总质量的(36.3% ± 5.4%)和(30.2% ± 10.1%),与上海报道值[24, 25]接近. 可见,碳气溶胶是常州市大气细颗粒物 $PM_{2.5}$的重要组成部分,所以加强对常州市 OC 和 EC 的排放的控制对于控制 $PM_{2.5}$的污染具有重要意义.

表 1　$PM_{2.5}$, OC, EC, WSOC 日均浓度及所占质量分数

Table 1　Summary of averaged daily concentrations of $PM_{2.5}$, OC, EC, WSOC and mass fraction

组分	单位	夏季		秋季	
		平均值 ± 标准偏差	范围	平均值 ± 标准偏差	范围
$PM_{2.5}$	$\mu g \cdot m^{-3}$	73.0 ± 19.5	37.8 ~ 118.3	84.2 ± 49.4	30.0 ~ 229.4
OC	$\mu g \cdot m^{-3}$	14.3 ± 3.7	7.5 ~ 21.7	13.2 ± 10.2	4.5 ~ 47.0
EC	$\mu g \cdot m^{-3}$	3.3 ± 1.2	1.1 ~ 5.6	3.5 ± 1.8	0.7 ~ 9.0
OC/EC		4.7 ± 1.3	2.5 ~ 7.2	4.3 ± 2.9	1.6 ~ 13.7
$OC/PM_{2.5}$	%	19.8 ± 3.1	14.4 ~ 25.6	16.0 ± 6.0	7.2 ~ 29.7
$EC/PM_{2.5}$	%	4.5 ± 1.3	2.4 ~ 7.1	4.7 ± 2.2	1.6 ~ 9.3
TCA	$\mu g \cdot m^{-3}$	26.1 ± 6.7	13.1 ~ 38.6	24.6 ± 17.0	8.0 ~ 78.6
$TCA/PM_{2.5}$	%	36.3 ± 5.4	26.2 ~ 46.6	30.2 ± 10.1	14.6 ~ 56.0
SOC	$\mu g \cdot m^{-3}$	7.5 ± 3.0	2.5 ~ 13.6	7.7 ± 9.7	0 ~ 41.6
SOC/OC	%	52.5 ± 14.0	18.0 ~ 71.2	49.0 ± 24.7	0 ~ 88.5
WSOC	$\mu g \cdot m^{-3}$	8.5 ± 3.8	3.4 ~ 18.4	6.6 ± 2.7	3.3 ~ 16.4
WSOC/OC	%	57.4 ± 14.1	40.4 ~ 98.2	60.9 ± 18.6	25.5 ~ 98.8

图2 为碳质组分、$PM_{2.5}$、气象参数及气态污染物随时间序列的变化. 从中可知,OC、EC 与 $PM_{2.5}$浓度之间正相关,三者与风速负相关,说明风速是影响大气污染水平的一个重要因素. SO_2、NO_2 和 CO 之间呈一定的正相关,而与 O_3 有一定的负相关性. 有研究表明,OC、SO_2、CO 与燃煤相关,EC、NO_2 与机动车尾气和燃煤相关[26].

2.2 OC、EC 组分占比及相关性分析

图3 为碳质 8 组分包括 OC(OC1 ~ 4)、EC(EC1 ~ 3)及 OP 之间的相关性. 从中可以看出,夏

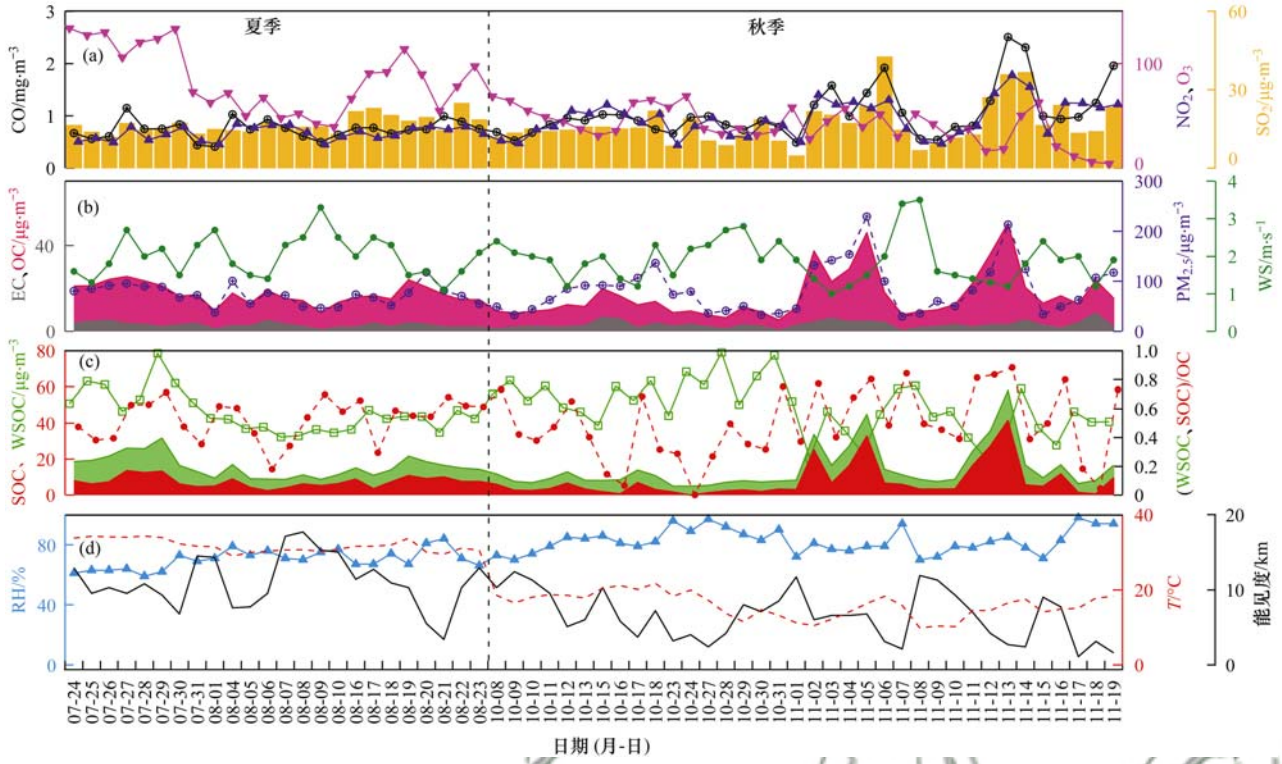

图 2 碳质组分(OC、EC、WSOC、SOC)、$PM_{2.5}$、气象参数(*T*、RH、WS、visibility)及气态污染物(SO_2、NO_2、CO、O_3)随时间序列的变化

Fig. 2 Variation of daily average carbonaceous components (OC, EC, WSOC, SOC), $PM_{2.5}$ loading, meteorological parameters and gaseous pollutants (SO_2, NO_2, CO, O_3) with a time series

季 OC2、OC3,OC4、EC1 之间显示了很好的相关性($r>0.92$),上述 4 组分与 OC1 有一定相关性($r>0.68$),EC2 和 EC3 相关性较强($r>0.65$). 秋季 OC2 与 OC3、OC3 与 EC1 相关性强($r>0.91$),EC1、EC2、EC3 相关性强($r>0.85$),OC4 与 EC1 相关性弱($r=0.92$). 文献[11]指出,OC1 主要来源于生物质燃烧,OC2 和 OC3 主要来源于燃煤和机动车的混合排放,OC3 和 OC4 主要代表了道路扬尘或燃煤、汽油等排放源的贡献,OP 主要来源于生物质汽油燃烧排放,EC1-OP 指示了汽油车尾气的贡献,EC2 和 EC3 则主要代表了柴油车尾气的贡献. 图 4 显示了 $PM_{2.5}$ 中 8 组分(OC1、OC2、OC3、OC4、OP、EC1-OP、EC2、EC3)占比(质量分数),夏季,8 个组分平均占比分别为 OC1(1.0%)、OC2(22.6%)、OC3(24.6%)、OC4(21.8%)、OP(11.3%)、EC1-OP(16.4%)、EC2(2.1%)、EC3(0.2%);相比之下,秋季为:OC1(4.7%)、OC2(18.3%)、OC3(19.9%)、OC4(20.6%)、OP(15.7%)、EC1-OP(19.0%)、EC2(1.4%)、EC3(0.4%). 总体来说,OC2、OC3、OC4 和 EC1-OP 占比较高,说明机动车

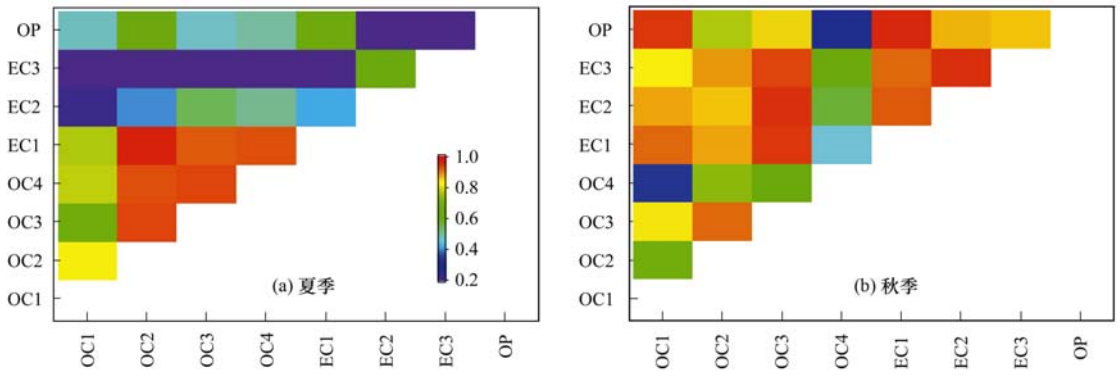

图 3 夏秋季节碳质 8 组分的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient between eight carbonaceous species in the summer and fall

尾气和燃煤对碳质贡献较大,道路和工地扬尘污染次之,柴油车尾气排放和生物质燃烧贡献较低. 秋季生物质燃烧的排放占比(OC1:4.7%)明显高于夏季(1.0%),可能是由于秋季农作物的秸秆焚烧引起.

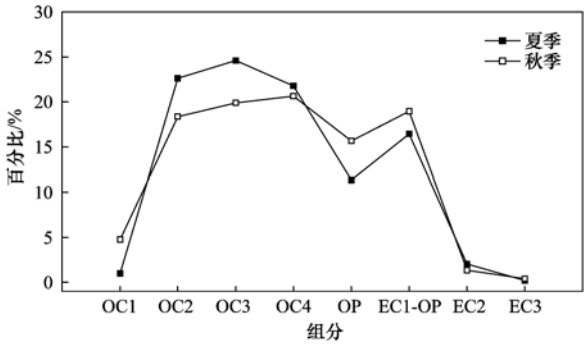

图 4　夏秋季节碳质 8 组分的占比

Fig. 4　Mass fraction of eight carbonaceous species to total carbon in the summer and fall

2.3　WSOC、SOC、OC、O_3 关系分析

图 5 显示了 WSOC、OC、SOC 之间的相关性及相对比值. 由图 5(a)和 5(d)可知,夏季和秋季 WSOC 与 OC 都显示较高的相关性(r = 0.85, 0.86). 夏季 OC 与 O_3 相关性较好(r = 0.72),而秋季与 O_3 相关性较差(r = 0.33)(图 6),证明夏季光化学反应是 WSOC 及 OC 的一个重要的来源. 图 5(b)和 5(e)表明,夏季 SOC 与 OC 的相关性(r = 0.76)明显低于秋季(r = 0.96). 从表 1 可知,受光化学反应的影响,夏季 SOC/OC 比(52.5%)略高于秋季(49.0%)(表 1),与文献[27]研究结果相似,但与北京报道的结果相反[17]. 原因是 SOC 的形成受来源和气象条件的影响:秋季温度较低,半挥发性/挥发性 VOCs 容易凝结在颗粒上发生老化、凝聚反应,导致 SOC 升高,同样夏季光化学反应导致 SOC 升高. 当然,使用传统的 EC 示踪物方法估算 SOC 的量也不完全适用于所有区域. 有研究表明[28],EC 示踪物方法高估了 POC 的含量,而低估了 SOC 的含量,因为该方法假定 POC 是不挥发、无任何化学反应活性. 而事实上,新鲜的 POC 蒸发到空气中,氧化后成为 SOC,一次和二次的 VOCs 进一步氧化和老化也会形成 SOC,而这些在采用 EC 示踪物方法时都被当作 POC,导致 SOC 被低估. 同时,根据表 1 的结果,夏季和秋季 SOC/OC 都低于 WSOC/OC,说明部分水溶性有机碳是一次源,而非二次来源. WSOC 和 SOC 具有较强的相关性[图 5(c)、5(f)],进一步证实绝大部分 SOC 具有水溶性.

2.4　OC、EC 与 $PM_{2.5}$ 的关系

OC、EC、$PM_{2.5}$ 之间的相关性可以用于推断 OC、EC 来源的相似性,OC/EC 比值可以用于示踪碳质气溶胶排放源及 SOC 的形成. 当 OC/EC 值大于 2,一般认为存在 SOC 生成[29]. 从图 7(a)可以看出,OC/EC 比值基本都大于 2,说明 OC、EC 来源非常复杂,受光化学反应、液相反应等二次源的影响. 高的 OC/EC 比及两者弱的相关性进一步说明光化学反应等二次污染源的影响. 图 7(a)还表明,夏季 OC 和 EC 相关性较好(r = 0.82),暗示交通排放源对碳组分有一定的贡献,而秋季两者没有明显的相关性,说明 OC 与 EC 来源不一致,这个与中国北部

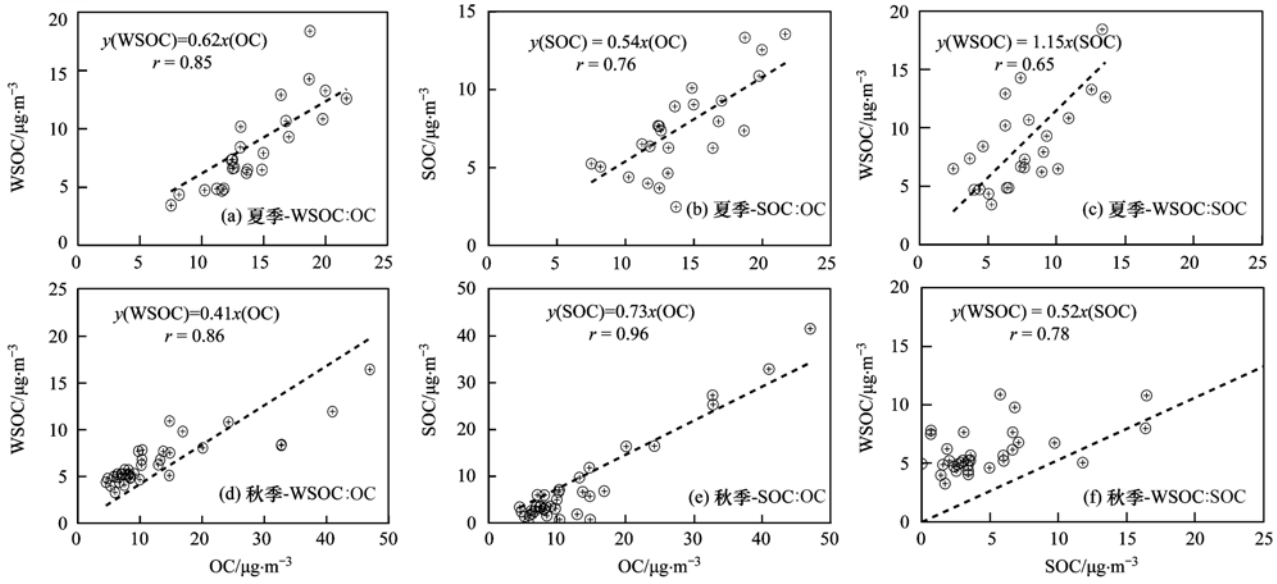

图 5　$PM_{2.5}$ 中 WSOC、SOC、OC 相关性

Fig. 5　Correlations between WSOC, SOC, and OC in $PM_{2.5}$

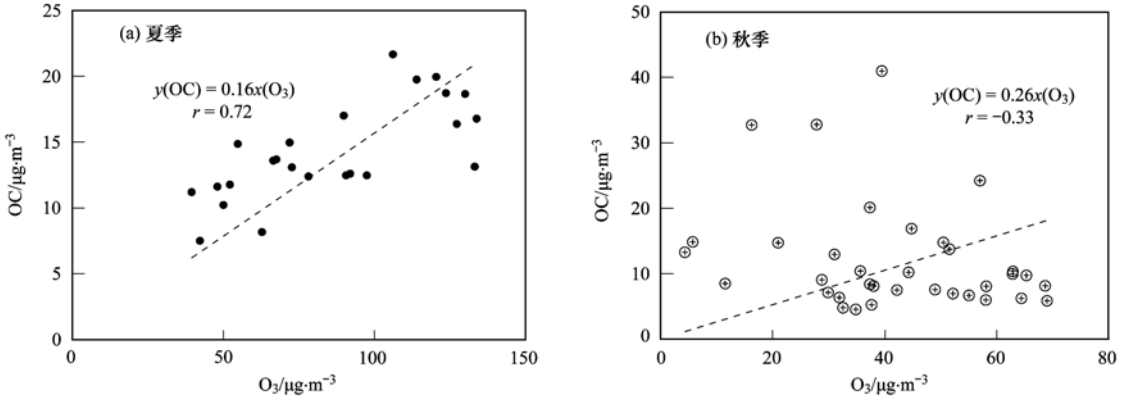

图 6 夏秋季 OC 与臭氧的相关性

Fig. 6 Correlations between OC and O_3, in the summer and fall

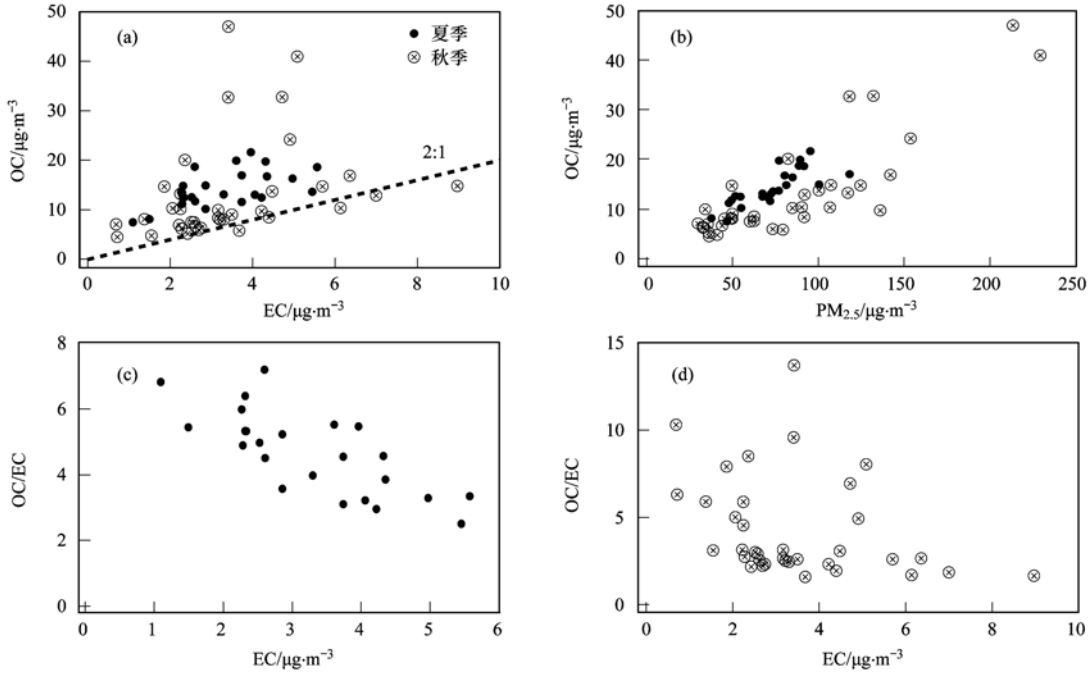

图 7 相关系分析散点图

Fig. 7 Scatter plots of the correlation analyses

研究结果一致(OC vs. EC, $r = 0.64$)[30]. 图 7(b)表明夏秋两季 OC 与 $PM_{2.5}$相关性较好, 说明碳质气溶胶是形成霾的因素之一. OC/EC 比值受污染源、气象条件等因素的影响. 研究表明:OC/EC 比值为 1.0 ~ 4.2 表明有柴油和汽油车的尾气排放[31],比值为 2.5 ~ 10.5 表明是燃煤排放[3],16.8 ~ 40.0 表明木材燃烧排放,7.7 表明生物质燃烧排放,长距离传输 OC/EC > 12[27]. 本研究观测期间(表 1),夏季 OC/EC 值在 2.5 ~ 7.2 之间(平均值为 4.7),说明主要受柴油、汽油车的尾气排放和燃煤排放的影响; 秋季 OC/EC 值在 1.6 ~ 13.7 之间变化(平均值为 4.3),说明秋季大气中 OC、EC 的来源比较复杂,包括尾气排放、燃煤排放和地面扬尘等多种来源. 图 7(c)和 7(d)为 OC/EC 与 EC 的关系,从中可知,夏季 OC/EC 与 EC 呈负相关性,而秋季两者没有明显的相关性,可能的原因是:EC 主要来源于交通污染,而 OC 来源于燃煤、交通和二次生成.

图 8 显示了 OC、EC 在 $PM_{2.5}$中的占比及 OC/EC 与 $PM_{2.5}$平均浓度的关系. 从中可知,随着 $PM_{2.5}$浓度的增加,$EC/PM_{2.5}$逐渐下降,而 OC/EC 逐渐增高. 当 $PM_{2.5}$高于 200 $\mu g \cdot m^{-3}$即重污染的霾天气条件下,OC/EC 值迅速升高到 10 以上,表明二次源的影响在重污染条件下更明显.

2.5 OC 和 EC 来源分析

2.5.1 主成分分析

利用主成分分析(PCA)的方法分析碳质组分的

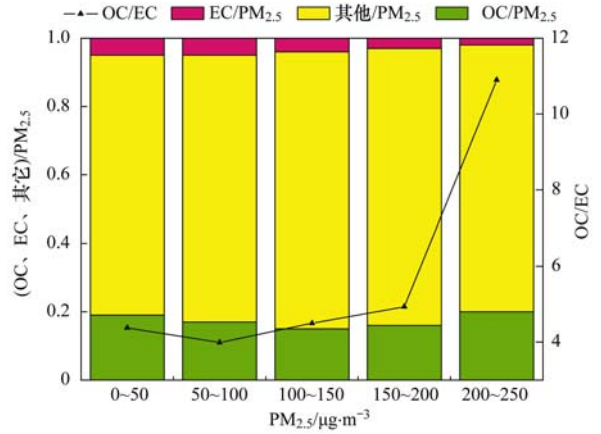

图 8　OC、EC 在 $PM_{2.5}$ 中的占比及 OC/EC 与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系

Fig. 8　Relationship between mass percentages of OC, EC with $PM_{2.5}$, as well as OC/EC ratios with $PM_{2.5}$ concentrations

主要来源. 选择颗粒物中的 8 种组分,以它们的质量浓度作为因子分析变量代入模型进行计算. 表 2 为经方差极大旋转后的因子荷载. 从中可知,夏秋季 $PM_{2.5}$ 中碳质组分主要受 2 个因子的影响,夏季因子 1 载荷值较大的变量为 OC1、OC2、OC3、OC4 和 EC1 等,方差贡献率高达 60.1%,代表了燃煤和汽油车尾气排放的影响[32]; 因子 2 的载荷贡献率为 21.2%,其中载荷值较大的变量为 EC2 和 EC3,说明因子 2 受柴油车尾气的影响[33],以上因子方差总贡献率为 81.2%,基本解释了 $PM_{2.5}$ 中 OC 的主要来源. 相比之下,秋季来源为燃煤、交通和扬尘.

2.5.2　后向轨迹分析

图 9 为采样期间 100 m 处 72 h 气团后向轨迹

表 2　夏秋季 $PM_{2.5}$ 中碳质组分主成分分析[1)]

Table 2　Principle component analysis (PCA) of carbonaceous species in $PM_{2.5}$ during summer and fall

成分	夏季		秋季	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
OC1	**0.816**	−0.001	**0.951**	0.166
OC2	**0.831**	0.292	0.660	0.694
OC3	**0.923**	0.240	**0.801**	0.561
OC4	**0.946**	0.206	0.147	**0.970**
EC1	**0.981**	−0.009	**0.921**	0.350
EC2	0.386	**0.830**	**0.838**	0.487
EC3	−0.118	**0.918**	**0.815**	0.515
OP	0.663	−0.330	**0.968**	0.163
方差贡献率/%	60.1	21.1	83.1	11.5
累积方差贡献率/%	60.1	81.2	83.1	94.6
来源	燃煤源和汽油车尾气	柴油车尾气	燃煤源、交通源	扬尘源

1)黑体字表示载荷值大于 0.8

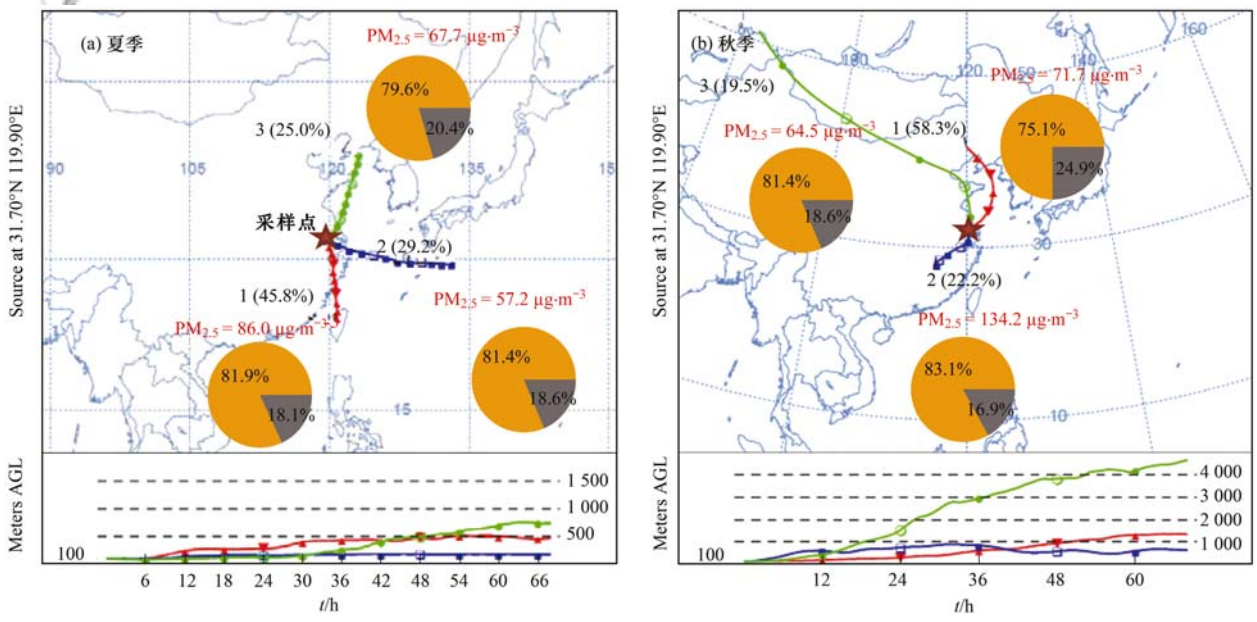

图 9　72 h 后向轨迹图及相应的 $PM_{2.5}$ 浓度及 OC、EC 比例

Fig. 9　The 72 h backward trajectories of air mass and $PM_{2.5}$ concentrations and the ratio between OC and EC in each cluster

图(采用当地时间 08:00 的数据). 是结合美国国家海洋和大气管理局发布的全球数据管理系统(global data assimilation system, GDAS)数据,采用混合单粒子拉格朗日综合轨迹软件(HYSPLIT 4.9),对采样期间的气团进行后向轨迹模拟,推测 $PM_{2.5}$ 中碳质组分可能的传输路径和来源. 总共分为 3 个聚类(代表 3 个气团方向). 夏季:聚类 1 占比最大(45.8%),属于短距离传输,从正南方向(福建)过来,经过福建和杭州后到达采样点,$PM_{2.5}$ 平均浓度最高(86.0 $\mu g \cdot m^{-3}$);聚类 2(占 29.2%)来自东海,代表海洋来源,因此 $PM_{2.5}$ 浓度最低(57.2 $\mu g \cdot m^{-3}$);聚类 3(占 25.0%)来自东北方向,起源于哈尔滨,途径沈阳,最后经过上海到达常州. 秋季主导风向为东北风(图 1),因此东北方向的气团聚类 1 中比最高(58.3%),起源于北京和天津,总体污染水平中等(71.7 $\mu g \cdot m^{-3}$);来自西南方向的聚类 2 占比 22.2%,属于短距离传输,途径江西和浙江省到达采样点,$PM_{2.5}$ 浓度最高(134.2 $\mu g \cdot m^{-3}$);聚类 3 属于远距离传输,起源于西北方向的银川、内蒙,途径太原和济南到达采样点. 后向轨迹分析表明,采样点 $PM_{2.5}$ 和碳质组分主要受当地排放源和短距离传输的影响,长距离传输贡献较小,秋季受北方长距离输送影响大于夏季[34]. 不同气团方向 OC 与 EC 占比,夏季没有明显的区别,秋季来自东北方向的气团中 OC/EC 低于短距离传输的西南方向气团.

3 结论

(1) 常州市夏季 $PM_{2.5}$ 的日均浓度水平为(73.0 ± 19.5) $\mu g \cdot m^{-3}$,秋季 $PM_{2.5}$ 的日均浓度水平为(84.2 ± 49.4) $\mu g \cdot m^{-3}$,夏季和秋季的 TCA 分别占 $PM_{2.5}$ 总质量的 36.3% 和 30.2%.

(2) 夏季 WSOC 日平均值占 OC 的 57.4%,秋季占 60.9%. 然而,夏季 SOC/OC 占比(52.5%)略高于秋季(49.0%). 夏季和秋季日平均 SOC/OC 都低于 WSOC/OC,说明部分水溶性有机碳是一次源. WSOC 和 SOC 具有较强的相关性,说明绝大部分 SOC 具有水溶性.

(3) 主成分分析及 WSOC,OC,SOC 之间的相关性及占比分析表明,采样期间夏季碳质组分主要来源于燃煤、机动车尾气排放,秋季来源包括燃煤、交通和扬尘.

(4) 后向轨迹分析表明,采样点 $PM_{2.5}$ 和碳质组分主要受当地排放源和短距离传输的影响,长距离传输贡献较小. 短距离传输方向气团中 $PM_{2.5}$ 和碳质组分总体浓度高于长距离传输.

参考文献:

[1] 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): D22S11.

[2] Cao J J, Lee S C, Ho K F, *et al*. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River Delta Region, China[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(27): 4447-4456.

[3] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, *et al*. Characteristics of organic and elemental carbon in $PM_{2.5}$ samples in Shanghai, China[J]. Atmospheric Research, 2009, **92**(4): 434-442.

[4] He Q S, Guo W D, Zhang G X, *et al*. Characteristics and seasonal variations of carbonaceous species in $PM_{2.5}$ in Taiyuan, China[J]. Atmosphere, 2015, **6**(6): 850-862.

[5] 安欣欣, 张大伟, 冯鹏, 等. 北京城区夏季 $PM_{2.5}$ 中碳组分和二次水溶性无机离子浓度特征[J]. 环境化学, 2016, **35**(4): 713-720.
An X X, Zhang D W, Feng P, *et al*. Characteristics of carbon components and secondary water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in summer in urban Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(4): 713-720.

[6] Sudheer A K, Aslam M Y, Upadhyay M, *et al*. Carbonaceous aerosol over semi-arid region of western India: heterogeneity in sources and characteristics[J]. Atmospheric Research, 2016, **178-179**: 268-278.

[7] 陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 等. 中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2815-2822.
Chen Z, Liu J F, Tao W, *et al*. Spatiotemporal distribution and source attribution of SOA in China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2815-2822.

[8] 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京地区大气 $PM_{1.1}$ 中 OC、EC 特征及来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 774-779.
Jiang W J, Guo Z B, Liu F L, *et al*. Characteristics and sources apportionment of OC and EC in $PM_{1.1}$ from Nanjing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 774-779.

[9] 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.

[10] 马丽, 余晔, 王博, 等. 兰州春夏季 PM_{10} 碳组分昼夜变化特征与来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1289-1297.
Ma L, Yu Y, Wang B, *et al*. Day-night variation and source apportionment of carbonaceous aerosols in PM_{10} during spring and summer of Lanzhou[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1289-1297.

[11] Li B, Zhang J, Zhao Y, *et al*. Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **106**: 223-231.

[12] 郭安可, 郭照冰, 张海潇, 等. 南京北郊冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子以及碳质组分特征分析[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 248-256.
Guo A K, Guo Z B, Zhang H X, *et al*. Analysis of water soluble

ions and carbon component in $PM_{2.5}$ in the northern suburb of Nanjing in winter[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 248-256.

[13] 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.

[14] Ram K, Sarin M M. Day – night variability of EC, OC, WSOC and inorganic ions in urban environment of Indo-Gangetic Plain: implications to secondary aerosol formation [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(2): 460-468.

[15] Ge X L, Li L, Chen Y F, *et al*. Aerosol characteristics and sources in Yangzhou, China resolved by offline aerosol mass spectrometry and other techniques[J]. Environmental Pollution, 2017, **225**: 74-85.

[16] Cui H, Mao P, Zhao Y, *et al*. Patterns in atmospheric carbonaceous aerosols in China: emission estimates and observed concentrations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(15): 8657-8678.

[17] Xiang P, Zhou X M, Duan J C, *et al*. Chemical characteristics of water-soluble organic compounds (WSOC) in $PM_{2.5}$ in Beijing, China: 2011-2012[J]. Atmospheric Research, 2017, **183**: 104-112.

[18] Chen D, Cui H F, Zhao Y, *et al*. A two-year study of carbonaceous aerosols in ambient $PM_{2.5}$ at a regional background site for western Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Research, 2017, **183**: 351-361.

[19] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 451-457.
Wu M L, Guo Z B, Liu F L, *et al*. Size distributions of organic carbon and elemental carbon in Nanjing aerosol particles[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 451-457.

[20] Ye Z L, Liu J S, Gu A J, *et al*. Chemical characterization of fine particulate matter in Changzhou, China, and source apportionment with offline aerosol mass spectrometry [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(4): 2573-2592.

[21] 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 等. 太原市大气 $PM_{2.5}$ 中碳质组成及变化特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 780-786.
Zhang G X, Yan Y L, Guo L L, *et al*. Composition and variation characteristics of atmospheric carbonaceous species in $PM_{2.5}$ in Taiyuan, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 780-786.

[22] Xu Z J, Wen T X, Li X R, *et al*. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing based on two – year observation [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, **6**(2): 202-208.

[23] 杨毅红, 瞿群, 刘随心, 等. 夏季珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及其对大气能见度的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2758-2767.
Yang Y H, Qu Q, Liu S X, *et al*. Chemical compositions in $PM_{2.5}$ and its impact on visibility in summer in Pearl River Delta, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2758-2767.

[24] Zhou J B, Xing Z Y, Deng J J, *et al*. Characterizing and sourcing ambient $PM_{2.5}$ over key emission regions in China I: water-soluble ions and carbonaceous fractions[J]. Atmospheric Environment, 2016, **135**: 20-30.

[25] Qiao T, Zhao M F, Xiu G L, *et al*. Simultaneous monitoring and compositions analysis of PM_1 and $PM_{2.5}$ in Shanghai: implications for characterization of haze pollution and source apportionment [J]. Science of the Total Environment, 2016, **557-558**: 386-394.

[26] Zhou H J, He J, Zhao B Y, *et al*. The distribution of PM_{10} and $PM_{2.5}$ carbonaceous aerosol in Baotou, China[J]. Atmospheric Research, 2016, **178-179**: 102-113.

[27] Wang J Z, Ho S S H, Cao J J, *et al*. Characteristics and major sources of carbonaceous aerosols in $PM_{2.5}$ from Sanya, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, **530-531**: 110-119.

[28] Day M C, Zhang M H, Pandis S N. Evaluation of the ability of the EC tracer method to estimate secondary organic carbon[J]. Atmospheric Environment, 2015, **112**: 317-325.

[29] 刘凤娴, 彭林, 白慧玲, 等. 朔州市市区 $PM_{2.5}$ 中元素碳、有机碳的分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 787-793.
Liu F X, Peng L, Bai H L, *et al*. Characteristics of organic carbon and elemental carbon in $PM_{2.5}$ in Shuozhou city[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 787-793.

[30] Guo Y H. Carbonaceous aerosol composition over northern China in spring 2012 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 10839-10849.

[31] Ali K, Panicker A S, Beig G, *et al*. Carbonaceous aerosols over Pune and Hyderabad (India) and influence of meteorological factors[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2016, **73**(1): 1-27.

[32] Li P H, Wang Y, Li T, *et al*. Characterization of carbonaceous aerosols at Mount Lu in South China: implication for secondary organic carbon formation and long-range transport [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(18): 14189-14199.

[33] Jia H Y, Wang L, Li P H, *et al*. Characterization, long-range transport and source identification of carbonaceous aerosols during spring and autumn periods at a high mountain site in south china [J]. Atmosphere, 2016, **7**(10): 122.

[34] Hou B, Zhuang G S, Zhang R, *et al*. The implication of carbonaceous aerosol to the formation of haze: revealed from the characteristics and sources of OC/EC over a mega-city in China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 529-536.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 11

Nov. 15, 2017

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin ····· ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, *et al.* (4447)

Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China ····· PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, *et al.* (4454)

Characteristics and Sources of Elements of a PM_{10} Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province ····· ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, *et al.* (4463)

Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ Measurements During Summer and Fall in Changzhou ····· YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, *et al.* (4469)

Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou ····· FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, *et al.* (4478)

Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China ····· LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, *et al.* (4486)

Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China ····· LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, *et al.* (4494)

Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn ····· TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, *et al.* (4501)

Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China ····· ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, *et al.* (4513)

Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics ····· LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, *et al.* (4525)

Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin ····· ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, *et al.* (4537)

Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer ····· YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, *et al.* (4546)

Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China ····· ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, *et al.* (4553)

Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu ····· HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, *et al.* (4562)

Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China ····· ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, *et al.* (4570)

Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region ····· XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)

Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of *Phragmites communis* in the Yeyahu Wetland in Beijing, China ····· TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, *et al.* (4589)

Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios ····· LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, *et al.* (4598)

Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances ····· CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, *et al.* (4607)

Effect of *Elodea nuttallii*-Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water ····· WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, *et al.* (4617)

Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (Ⅴ) Form Aqueous Solutions ····· ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, *et al.* (4623)

Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites ····· JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, *et al.* (4632)

Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation ····· YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, *et al.* (4641)

Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) ····· SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, *et al.* (4648)

Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor ····· LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, *et al.* (4656)

Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns ····· MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, *et al.* (4664)

Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants ····· LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, *et al.* (4673)

Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System ····· XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, *et al.* (4679)

Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature ····· HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)

Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System ····· GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, *et al.* (4696)

Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(Ⅱ)EDTA-NO/Fe(Ⅲ)EDTA ····· ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)

Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) ····· GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, *et al.* (4715)

Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province ····· DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, *et al.* (4725)

Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area ····· YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, *et al.* (4733)

Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment ····· WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, *et al.* (4747)

Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil ····· LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, *et al.* (4756)

Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 ····· MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, *et al.* (4763)

Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing ····· YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, *et al.* (4774)

Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO_2 and CH_4 Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary ····· LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, *et al.* (4782)

Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation ····· SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, *et al.* (4790)

Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China ····· ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)

Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert ····· DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, *et al.* (4809)

Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields ··· JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, *et al.* (4819)

Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems ····· LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, *et al.* (4828)

Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock ····· DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, *et al.* (4836)

Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil ····· YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)

Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features ····· YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, *et al.* (4850)

Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex ····· WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, *et al.* (4860)

Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products ····· YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, *et al.* (4868)

Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste ····· CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, *et al.* (4874)

Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste ····· LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, *et al.* (4882)

Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models ····· CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, *et al.* (4889)