

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM _{2.5} 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 PM _{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 PM _{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/NH ₄ ⁺ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干草耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征

康晖, 朱彬*, 王红磊, 施双双

(南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 对2015年1月9日~2015年1月31日临安、南京和苏州3个站点采集的PM_{2.5}样品(共计279组), 使用热光反射法(thermal/optical reflectance, TOR)分析了样品中有机碳(OC)与元素碳(EC)的含量, 并研究了长三角地区冬季PM_{2.5}中OC和EC的污染特征。结果表明, 采样期间临安、南京和苏州的PM_{2.5}平均质量浓度分别为(123.56 ± 61.11)、(144.77 ± 62.91)和(156.5 ± 68.97) μg·m⁻³, 均超过我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)规定的PM_{2.5}日均值75 μg·m⁻³; 其中3个站点OC与EC的平均质量浓度依次分别为(21.93 ± 11.69)/(6 ± 3.6)、(20.32 ± 10.3)/(5.39 ± 3.07)和(27.08 ± 14.35)/(6.4 ± 4.29) μg·m⁻³。临安作为长三角大气环境背景点, OC与EC的污染也较为严重。3个站点OC与EC的相关性为临安($R^2 = 0.83$)、南京($R^2 = 0.72$)和苏州($R^2 = 0.72$), 表明冬季长三角地区的碳质气溶胶的来源较为一致和稳定。3个站点样品中的OC/EC值均大于2.0, 样品的OC/EC值主要分布在2.5~6.0这个区间内, 表明燃煤源和机动车尾气排放源是OC与EC的主要来源。使用EC示踪法估算临安、南京和苏州3个站点的二次有机碳(SOC)平均质量浓度分别为(9.23 ± 5.26)、(6.82 ± 4.36)和(12.56 ± 7.52) μg·m⁻³, 在OC中占比为42%、34%和46%, 表明SOC是OC的重要组成部分。后向轨迹显示, PM_{2.5}、OC和EC的质量浓度与主要气团的传输路径有较好的相关性, 自空气质量较差区域气团的PM_{2.5}、OC和EC的质量浓度是来自空气质量较好区域的1.14~1.7倍、1.55~2.1倍和1.94~2.47倍。

关键词: PM_{2.5}; 长三角; 有机碳; 元素碳; 浓度分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-0961-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706178

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM_{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China

KANG Hui, ZHU Bin*, WANG Hong-lei, SHI Shuang-shuang

(Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Two hundred seventy-nine PM_{2.5} samples were collected from January 9, 2015 to January 31, 2015 in Lin'an, Nanjing, and Suzhou. They were analyzed for organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) following the thermal/optical reflection protocol. The pollution characteristics of OC and EC in PM_{2.5} during the winter in the Yangtze River Delta were discussed in detail. The average mass concentrations of PM_{2.5} in the three sample sites were (123.56 ± 61.11), (144.77 ± 62.91), and (156.5 ± 68.97) μg·m⁻³, respectively, which were in excess of the Ambient Air Quality Standard (GB 3095-2012) 24-hr mass-based standard of 75 μg·m⁻³. The average mass concentration of OC and EC were (21.93 ± 11.69)/(6 ± 3.6), (20.32 ± 10.3)/(5.39 ± 3.07), and (27.08 ± 14.35)/(6.4 ± 4.29) μg·m⁻³, respectively. Lin'an, which is regarded as the background site for the atmospheric environment in the Yangtze River Delta, is also polluted seriously. The OC was strongly correlated with EC in Lin'an ($R^2 = 0.83$), Nanjing ($R^2 = 0.72$), and Suzhou ($R^2 = 0.72$). This shows that the carbonaceous aerosols have similar sources during the winter in the Yangtze River Delta. All of the samples' OC/EC ratios exceeded 2.0, with the sample OC/EC ratios mainly distributed in the range of 2.5-6.0, indicating that coal combustion and vehicle exhaust are the main sources of OC and EC. The estimated mass concentrations of SOC were (9.23 ± 5.26), (6.82 ± 4.36), and (12.56 ± 7.52) μg·m⁻³, respectively, which contributed 42%, 34%, and 46% to the OC, indicating that SOC is an important part of OC. Backward-trajectory shows that the mass concentrations of PM_{2.5}, OC, and EC have a good correlation with the transmission path of the main air mass. The mass concentrations of PM_{2.5}, OC, and EC controlled by the air mass from poor air quality areas are 1.14-1.7 times, 1.55-2.1 times, and 1.94-2.47 times higher than that in the air mass from good air quality areas.

收稿日期: 2017-06-19; 修订日期: 2017-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(91544229); 国家重点研发计划项目(2016YFA0602003); 南京信息工程大学人才启动经费资助项目(2016r040)

作者简介: 康晖(1989~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: kanghui@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

Key words: PM_{2.5}; Yangtze River Delta; organic carbon(OC); elemental carbon(EC); concentration distribution

碳质气溶胶是大气气溶胶中的重要含碳组分,主要由有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)组成^[1]. 元素碳 EC 在一些文献中也称为黑碳(black carbon, BC)或石墨碳(graphitic carbon)^[2],是一种性质类似石墨的混合物,具有良好的化学稳定性和吸光性,可以作为人为一次排放源的标识物质^[3],主要是由化石燃料和生物质的不完全燃烧产生^[4]. OC 则是一种具有光散射性,含有上百种有机物的混合气溶胶,来源比较复杂,既包括由排放源直接排放的一次有机碳,又包括一些大气中气态前体物(如 VOCs 等)经过光化学反应、二次凝结凝聚及吸湿增长后生成的二次有机碳气溶胶(secondary carbon, SOC)^[5-7]. 由于碳质气溶胶对大气能见度、辐射强迫及空气质量有着重要的影响,对其研究也越来越多. 例如, Menon 等^[8]指出, BC 是大气气溶胶中最主要的吸光成分,其光学特性能够使大气能见度降低. Jacobson^[9]使用全球模式估算得出,就直接辐射强迫而言, BC 所引起直接辐射强迫($0.55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)超过 CH₄ ($0.47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),是仅次于 CO₂ ($1.56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)的第二高的全球增温组分. 而 OC 的散射特性使其对大气能见度降低的贡献与硫酸盐的贡献相接近,甚至超过硫酸盐^[10,11]. OC 中通常含有多环芳烃、酞酸酯和醛酮类羧基化合物等有毒有害物质,会对人体健康产生极大的危害^[12]. 因此,研究大气气溶胶中碳质气溶胶的污染特征对大气污染有着很重要的意义.

碳质气溶胶是我国大气气溶胶的重要组成部分之一^[13],约占我国城市大气气溶胶的 20% ~ 50%^[14]. 随着我国大气气溶胶污染愈发严重,大量学者对气溶胶中含碳组分进行了研究^[15-20]. 长三角地区是中国经济最为发达、城市化程度最高、人口迁移最大的地区之一. 卫星观测显示,长三角区域是中国和世界 PM_{2.5} 污染最为严重的区域之一^[21]. 近年来,关于长三角地区及其周边地区的碳质气溶胶也展开了许多的相关研究. 例如,吴梦龙等^[22]分析了 2011 年南京市区和南京北郊工业区全年 PM_{2.1} 中 OC 与 EC 的含量,发现工业区污染更加严重,春冬两季由于燃煤量增加和气候原因导致 OC、EC 的含量和 OC 与 EC 的相关性更高. Wang 等^[23]则对嵊泗列岛中花鸟岛中 PM_{2.5} 和总悬浮颗粒物中的 OC、EC 和正构烷烃进行了分析,发现总悬浮颗粒物中的 OC、EC 和正构烷烃主要集中于

PM_{2.5} 中. 张懿华等^[24]使用主成分分析法分析上海城区 OC 与 EC 的来源得出,上海城区 OC 与 EC 的主要来源是机动车尾气、燃煤排放、道路扬尘和生物质燃烧,其中机动车尾气在 4 个季节贡献最高,春季道路扬尘贡献明显,冬季燃煤贡献高于其它季节. 云龙龙等^[25]分析了无锡市 PM_{2.5} 与总碳气溶胶 TCA(total carbonaceous aerosol)的关系,发现 PM_{2.5} 与 TCA 存在较好的相关性,但是在霾天气的条件下,随着 PM_{2.5} 的增加, TCA 所占的比例却在减少,推断出二次无机气溶胶离子的快速增长是造成霾天气的重要原因之一. 目前长三角地区单站关于碳质气溶胶的研究已经较为丰富,但对于该地区整体性研究还较为有限. 冬季是长三角地区空气污染天气多发期,因此深入研究冬季长三角地区碳质气溶胶的污染及变化特征对了解和解决长三角地区冬季空气污染成因有着重要意义. 本文于 2015 年 1 月同步采集了临安、南京和苏州这 3 个站点 23d 的 PM_{2.5} 样本,分析样本中 OC 与 EC 浓度变化,探讨了长三角地区冬季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的浓度水平和区域差异以及与变化规律的关系,并定性分析了 OC 与 EC 的来源,以期有效控制冬季长三角地区 PM_{2.5} 中的碳质气溶胶提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

PM_{2.5} 样品采自位于长三角区域内南京、苏州、临安这 3 个城市的 3 个站点,站点位置如图 1 所示. 其中,作为背景点的临安站点设在临安大气本底站. 南京站点设在南京北郊南京信息工程大学气象楼顶,东面约 400 m 处为南京市市区通向南京市六合区的主要公路宁六路,属于受交通影响较大的城市郊区. 苏州站点设在苏州南门,城市中心位置,属商业居民混住区,可见 3 个站点在长三角具有一定的典型代表性,3 个站点详情见表 1. 采样时间为 2015 年 1 月 9 日至 2015 年 1 月 31 日,各站点同步采样,采样模式为膜采样形式,采样仪器为 KC-120H 型智能中流量 TSP 采样器,使用美国 Pall 公司的石英滤膜采集 PM_{2.5} 样品,滤膜使用前在马弗炉中以 800℃ 焙烧 5 h,冷却后放入恒温恒湿箱中平衡 72 h,用 1/100 000 的精密电子天平称重后放入冰箱低温保存,每 6 h 换一次膜,采样后将样品放入恒温恒湿箱中平衡 72 h,称重后同样将样品低温保

存在冰箱中直至分析. 临安、南京和苏州站点分别获得 93、90 和 96 个样品.

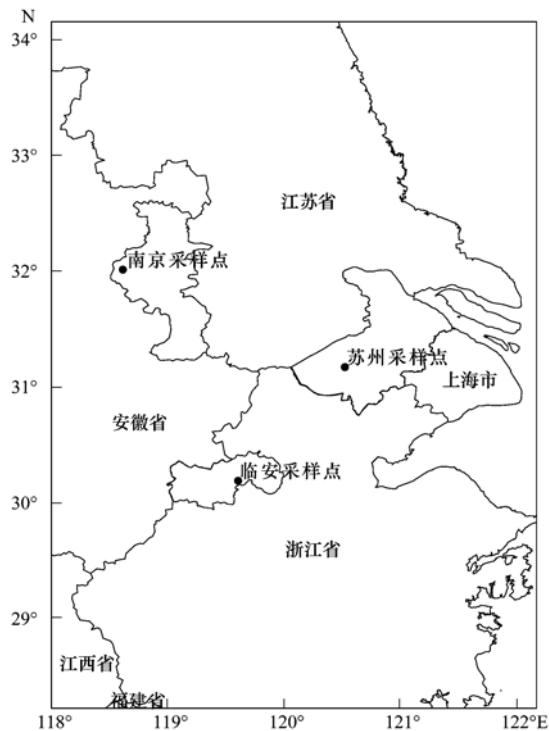


图1 3个站点的位置示意
Fig. 1 Location of the three sampling sites

1.2 样品碳组分分析

采用美国沙漠所 DRI2001 型热光分析仪进行碳组分的浓度测定, 分析方法为热光反射法 (thermal/optical reflection, TOR^[26]). 仪器的分析原理: 首先, 采集的样品在纯氦气 (He) 的非氧环境下进行阶段性升温, 是碳组分中的有机碳 OC 在不同温度下析出, 后又分别经过催化氧化炉转化生成 CO₂, 一部分 OC 由于焦化作用在仪器内转化成裂解碳 (optically detected pyrolyzed carbon, OPC). 之后通入 2% 氧-98% 氦组分的混合气, 在有氧环境下继续阶段性升温, 在有氧环境下样品内元素碳 EC 在不同温度下燃烧生成 CO₂. 不同温度下生成的 CO₂ 分别进入还原炉被还原成 CH₄, 再由火焰离子化检测器 (flame ionization detector, FID) 进行检测. 检验过程中, 因为 OC 焦化转化成的 OPC 性质表现为 EC 的性质, OPC 可以通过 633 nm He-Ne 激光反射光强的变化来确定分割点, 把分割点前分析出的碳质气溶胶定性为 OC, 分割点后分析出的碳质气溶胶定性为 EC.

1.3 质量控制

在样品分析的过程中, 每天开始和结束均使用 He/CH₄ 标准气体进行校准, 校准基线信号漂移量

表1 3个站点的详细描述
Table 1 Specific description of three sampling sites

采样城市	采样位置	E/(°)	N/(°)	采样高度/m	站点描述
临安市	临安大气本底站	119.44	30.18	约 139	站点设在临安大气本底站, 观测区附近的以林地为主, 周围 3 km 范围内无大型村落
南京市	南京信息工程大学气象楼顶	118.47	32.00	约 40	站点设在南京北郊南京信息工程大学气象楼顶, 东面约 400 m 处为宁六快速公路, 为南京市通往六合区主要公路之一, 附近 5 ~ 10 km 为南京沿江工业开发区.
苏州市	苏州南门	120.36	31.16	约 5	站点设在苏州南门, 位于城市中心位置, 属于商住居民区.

在 ±3 以内, 3 个校准峰面积的标准偏差在 5% 以内. 实验开始前, 对仪器进行检漏, 5 s 内样品炉的压力不变即为不漏气. 每日分析样品前, 对仪器进行高温烘烤并做空白检验以确保仪器中无残留杂质. 为保证数据精确可靠, 对每套样品的空白膜进行分析, 且每 10 个样品随机抽取其一进行再分析, 前后误差 10% 内可再进行后续分析.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 及其碳组分的浓度水平

由图 2 可知, 采样期间临安、南京和苏州 3 个站点 PM_{2.5} 的日浓度变化范围分别为 26.4 ~ 224、67.5 ~ 257.2 和 59.4 ~ 253.1 μg·m⁻³, 均值为

(123.56 ± 61.11)、(144.77 ± 62.91) 和 (156.5 ± 68.97) μg·m⁻³ (表 2). 3 个站点 PM_{2.5} 平均质量浓度均超过我国 2012 年 2 月公布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级日均标准 (75 μg·m⁻³), 其中苏州污染最为严重. 在采样期间的 23 d 内, 3 个站点日浓度 PM_{2.5} 超标率高达 78%、87% 和 87%. 即便在代表长三角大气背景的临安本底站, PM_{2.5} 平均质量浓度也达到了二级日均标准的 1.65 倍, 这也表明冬季长三角地区整体大气污染较为严重, 呈现区域污染特征. 临安、南京和苏州 3 个站点的 OC、EC 质量浓度分别为 (21.93 ± 11.69)/(6 ± 3.6)、(20.32 ± 10.3)/(5.39 ± 3.07) 和 (27.08 ± 14.35)/(6.4 ± 4.29) μg·m⁻³. OC 与 EC 的空间分

布为苏州高于临安和南京,总碳气溶胶 TCA 为 $PM_{2.5}$ 中所有有机物和元素碳的总和,根据 Turpin 等的研究^[27],城市大气气溶胶中的有机物约为 OC 的 (1.6 ± 0.2) 倍,非城市大气气溶胶中的有机物约为 OC 的 (2.1 ± 0.2) 倍,经验公式如公式(1)和(2)所示. 3 个站点中,将南京站点和苏州站点归为城市站点,使用公式(1)估算 TCA,临安站点归为非城市站点,使用公式(2)估算 TCA,估算结果显示 3

个站点的 TCA 占 $PM_{2.5}$ 的 26.2% ~ 42.1%. 由此可见,含碳物质是冬季长三角地区 $PM_{2.5}$ 中的重要组成部分. 由图 2 可知,3 个站点的 OC、EC 日浓度变化趋势较为相似,表明长三角地区的大气污染在同一天气系统和类似气象条件控制下存在大体一致的变化特征.

$$TCA = 1.6 \times OC + EC \tag{1}$$

$$TCA = 2.1 \times OC + EC \tag{2}$$

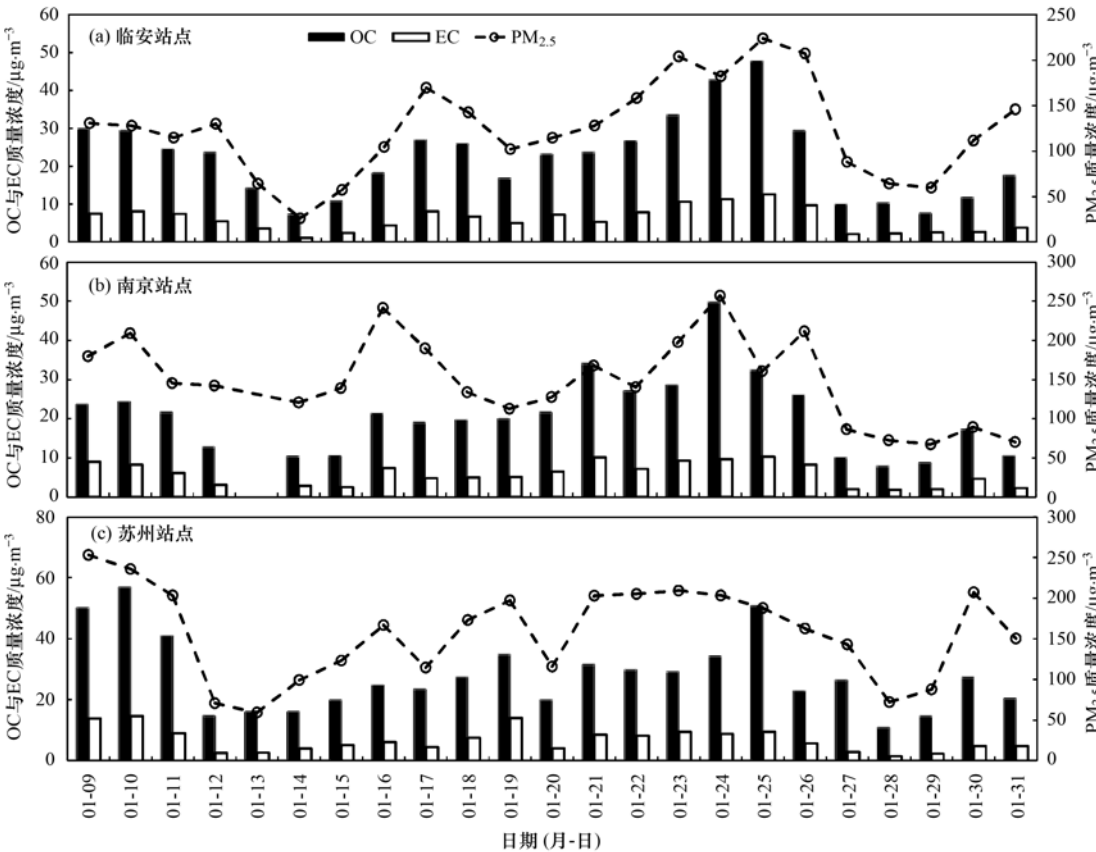


图 2 采样期间 3 个站点 $PM_{2.5}$ 、OC 和 EC 日均浓度序列

Fig. 2 $PM_{2.5}$, OC, and EC concentration daily variation from the three sample sites during the sampling period

表 2 3 个站点 $PM_{2.5}$ 及其中碳组分的质量浓度和污染特征

Table 2 Average concentrations of $PM_{2.5}$, OC, and EC and the characteristics of carbonaceous components for the three sample sites

站点	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	$OC/\mu g \cdot m^{-3}$	$EC/\mu g \cdot m^{-3}$	$SOC/\mu g \cdot m^{-3}$	$TCA/PM_{2.5}/\%$	OC/EC	SOC/OC
临安	123.56 ± 61.11	21.93 ± 11.69	6 ± 3.6	9.23 ± 5.26	42.1	4.3	42
南京	144.77 ± 62.91	20.32 ± 10.3	5.39 ± 3.07	6.82 ± 4.36	26.2	4.0	34
苏州	156.5 ± 68.97	27.08 ± 14.35	6.4 ± 4.29	12.56 ± 7.52	32	5.1	46

表 3 为本研究和国内其它城市 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 的平均质量浓度及其在 $PM_{2.5}$ 中占比,采样期间 3 个站点的 OC、EC 质量浓度均远高于南京、上海、宁波等长三角城市的年平均值^[24,28,29],虽然长三角地区没有中国北方明显的采暖季,但是由于较低的气温,为了取暖居民和单位的供暖活动增加,这样增加了煤的燃烧量,而冬季期间机动车的热车行为

也会使机动车的启动时间变长^[30,31],导致了冬季本地源排放有所增强. 同时,冬季气候条件也不利于污染物的稀释和扩散. 长三角地区属于亚热带季风气候,冬季盛行偏北风,偏北风在途经我国华北和华中上游污染地区时,会将当地的污染物带到长三角地区. 而冬季大气边界层高度相对其他季节较低,也不利于污染物的垂直扩散,这些不利条件导

致了长三角地区冬季污染较为严重. 与国内其它城市冬季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶相比, 本研究中的 3 个站点的 OC、EC 浓度则处于中间水平, OC、EC 浓度均低于京津冀及西北等采暖季明显的城市. 与东南沿海城市相比, OC 与 EC 的浓度明显高于厦门城区和郊区, 而与深圳、广州等城市规模明显大于本研究 3 个站点的一线城市相接近, 这可能是由于近年来珠三角地区大气环境得到较大改善^[32], 以及

上述几个城市受洁净的海洋气流影响较大, 对本地排放的大气污染物起到了一定的稀释作用. 从 OC 与 EC 在 PM_{2.5} 中的占比来看, 国内城市中 OC 在 PM_{2.5} 中的占比范围为 11.3% ~ 21.3%, EC 在 PM_{2.5} 中占比范围为 1.4% ~ 12.8%, 本研究的 3 个站点的 OC 占比低于大部分城市, 仅高于南京全年和厦门冬季, 与上海全年接近, EC 在 PM_{2.5} 中占比则处于中间水平.

表 3 国内主要城市中 PM_{2.5} 质量浓度和 OC、EC 在 PM_{2.5} 中占比

Table 3 Concentrations of PM _{2.5} and ratios of OC and EC in different cities in China						
城市	日期(年-月)	仪器和方法 ¹⁾	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	OC/μg·m ⁻³ (PM _{2.5} /%)	EC/μg·m ⁻³ (PM _{2.5} /%)	文献
长三角地区	2015-01	DRI,TOR	123.56~156.5	20.32~27.08(14~17.8)	5.39~6.4(3.7~4.9)	本研究
南京	2012-08~2013-06	DRI,TOR	122.7	15.4(12.6)	3.6(2.9)	[28]
上海	2010-06~2011-05	DRI,TOR	55	8.6(15.6)	2.4(4.9)	[24]
宁波	2012-12~2013-10	DRI	51.6	9.0(17)	2.9(6)	[29]
天津	2006-12~2007-01	SUNSET	223	45.94(20.6)	7.58(3.4)	[33]
北京	2011-12~2012-02	DRI,TOR	90.96	21.91(24.2)	5.03(5.6)	[34]
西安	2012-12~2013-02	DRI,TOR	239.4	47.8(19.9)	8.5(3.6)	[35]
宝鸡	2012-12~2013-02	DRI,TOR	190.9	45.8(24)	6.7(3.5)	[35]
厦门城区	2014-12~2015-01	SUNSET,TOR	74.38	9.77(13)	1.87(1.4)	[17]
厦门郊区	2014-12~2015-01	SUNSET,TOR	81.19	9.17(11.3)	2.43(3.0)	[17]
深圳	2004-11~2004-12	DRI,TOT	99	20.3(20.5)	12.7(12.8)	[36]
广州	2002-01~2002-02	DRI,TOR	105.9	22.6(21.3)	8.3(7.8)	[37]

1) DRI 为美国沙漠研究所研制的热光分析仪; SUNSET 为美国 Sunset Lab 公司生产的半连续有机碳/元素碳气溶胶分析仪; TOR 为热光反射法 (thermal/optical reflection, TOR); TOT 为热光透射法 (thermal/optical transmission, TOT)

2.2 OC、EC 的相关性及其来源分析

研究 OC 与 EC 的关系, 可以在一定程度上对碳质气溶胶的来源进行定性分析. OC 与 EC 的相关性分析可以用来判别二者来源的一致性^[38,39], 图 3 为临安、南京和苏州这 3 个站点冬季 PM_{2.5} 中 OC 与 EC 的相关性分析. 从中可知, 3 个站点的 R² 分别为 0.83、0.72、0.72, 并均在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, 相关性较好, 说明冬季长三角地区的碳

质气溶胶的来源较为一致和稳定. 而根据经验^[14], OC 与 EC 的回归方程 OC = b × EC + a 中, b × EC 项代表了燃烧源直接排放的 OC, 而 a 项则代表了非燃烧源产生的 OC. 在图 4 的 OC 与 EC 的回归方程中, 临安、南京和苏州站点的 a 项分别为 4.6、4.5 和 8.9 μg·m⁻³, 其中苏州站点明显高于另外两个站点, 表明苏州站点可能受到非燃烧源的影响较另外两个站点大. 另外, 3 个站点的 a 项相对 b × EC

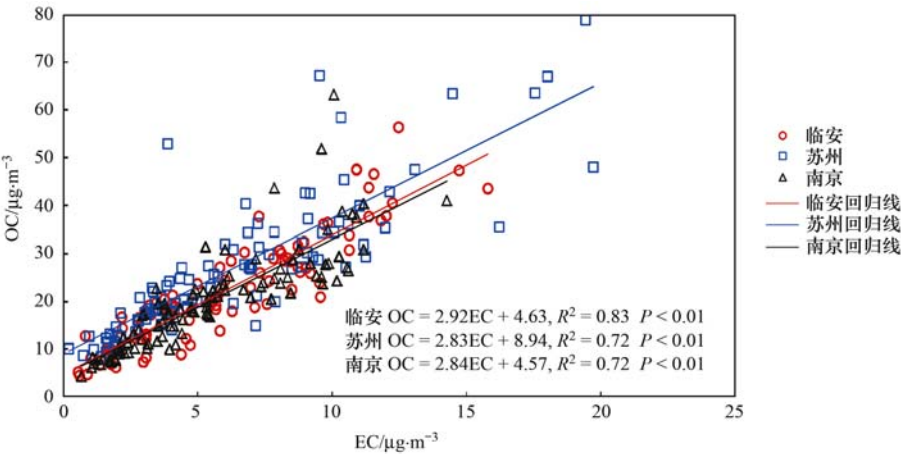


图 3 3 个站点 OC 与 EC 相关性分析

Fig. 3 Correlations between OC and EC in winter for the three sample sites

项较小, 这表明冬季长三角地区的 OC 主要来源于燃烧源排放。

OC 与 EC 的比值分析对分析碳质气溶胶的污染源有一定的指示意义, 可定性地分析 OC 与 EC 的来源和判断有无 SOC 生成. Chow 等^[40]研究认为当 OC/EC 值大于 2 时, 大气中存在二次有机碳 (SOC). 3 个站点的 OC/EC 比值范围为 2.0 ~ 13.6, 均值分别为临安 4.3、南京 4.0 和苏州 5.1. 图 4 为 3 个站点中 OC/EC 值在不同分布区间占总样品数的比例. 从中可以看出, 样品中的 OC/EC 值均大于 2.0, 表明冬季 3 个站点均受到一定程度的二次污染. 3 个站点样品的 OC/EC 值主要分布在 2.5 ~ 6.0 这个区间内, 介于机动车尾气源 (1.0 ~ 4.2)^[41,42]和燃煤源 (2.5 ~ 10.5)^[43]之间, 这表明采样期间 3 个站点在多数时间里 OC 与 EC 的主要来源为机动车尾气和燃煤燃烧. 另外, 3 个站点中都有少部分样品的 OC/EC 值高于 6.0, 苏州站点和临安站点的部分样品 OC/EC 值甚至超过 9.0, 这表明冬季 3 个站点的 OC 与 EC 也会受到生物质燃烧源 (3.8 ~ 13.2)^[44]和烹饪源 (32.9 ~ 81.6)^[45]等高 OC/EC 源的影响. 单站分布来看, 南京站点的样品中 OC/EC 值在 2.5 ~ 4.5 之间明显高于其它区间, 杨辉等^[46]和薛国强等^[47]对该站点大气环境中挥发性有机物 (VOCs) 和 PM_{2.5} 中水溶性离子来源进行了分析, 发现机动车尾气源是这两类污染物的最主要来源, 这说明南京站点周围的大气环境受机动车尾气源的影响较大, 导致了样品中的 OC/EC 值更多地分布于 2.5 ~ 4.5 之间. 而苏州站点 OC/EC 值的分布则成双峰分布, 在 5 ~ 6 这个区间内的样本数明显高于另外两个站点, 这表明苏州站点受到高 OC/EC 排放源的影响要高于另外两个站点, 根据 3 个站点所在地级市 (苏州市、南京市和杭州市) 的 2016 年统计年鉴中的 2015 年煤炭消耗数据, 苏州市 2015 年的原煤消耗量为 49 313.3 kt, 在 3 个站点所在城市中最高, 这可能是造成样品双峰分布一方面原因; 另一方面原因则是由于苏州站点所在区域南面为苏州南门商圈, 东西两侧为居民区, 居民活动密集, 受居民日常生活中的烹饪源影响较大导致。

2.3 SOC 的估算及影响因素分析

OC 一般被分为两个部分: 一次排放的一次有机碳 POC 和在大气中二次污染生成的二次有机碳 SOC. 目前来说, 精确的分离和计算 POC 和 SOC 很难实现, 常用的分析方法有以下几种: EC 示踪法、

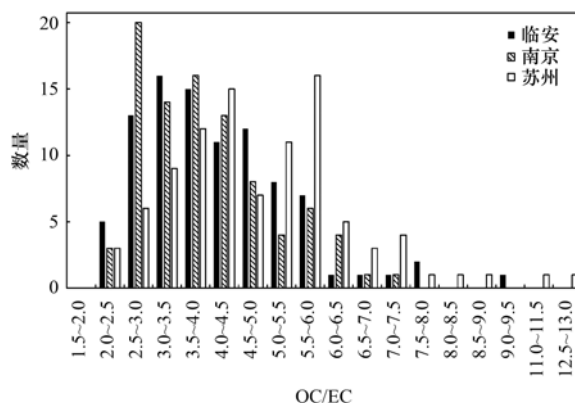


图 4 3 个站点中各样品 OC/EC 值在不同分布区间占比

Fig. 4 Distribution of OC/EC for the three sample sites

AMS-PMF 法、有机分子示踪法, 模型预测法^[48~51], 这些方法中 EC 示踪法的使用最为广泛. 由于 EC 的化学性质稳定, 其来源主要为一次排放, 而一次源排放出的 POC 与 EC 具有较好的相关性, 一般假设监测到的 EC 全部来自于一次源, 基于这一假设, Lim 等^[52]提出了以下经验公式用来识别 SOC^[29]:

$$\text{POC} = \text{EC} \times (\text{OC/EC})_{\text{POC}} + N \quad (3)$$

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{POC} \quad (4)$$

式中, POC、 $(\text{OC/EC})_{\text{POC}}$ 、N 和 SOC 分别代表一次有机碳、一次燃烧源产生的 OC 与 EC 的比值、一次非燃烧源产生的有机碳和二次有机碳. 在公式 (3) 中, 得到 1 个准确的 $(\text{OC/EC})_{\text{POC}}$ 值是估算 POC 的关键. Lim 等^[52]的研究指出, 使用样品 (数据样品应不少于 20 个) 中 OC/EC 值最小的 5% ~ 10% 的样品估算 $(\text{OC/EC})_{\text{POC}}$ 可以得到相对准确的结果, 故本研究取 3 个站点 OC/EC 比值最小的 5 个样本. 来进行 OC 与 EC 质量浓度做线性回归分析, 回归方程的斜率为 $(\text{OC/EC})_{\text{POC}}$, 截距为 N, 结果见图 5. 从中所知, 3 个站点选取的样本的 R^2 分别为 0.98、0.99 和 0.97, 拟合结果良好, 可以假定这 15 个样品都来源于一次排放, 没有受到二次污染。

将各拟合曲线的斜率和截距代入 (3)、(4) 公式中对 3 个站点的 SOC 进行估算, 由表 2 可知, 临安、南京和苏州这 3 个站点的 SOC 的平均质量浓度分别为 9.23、6.82 和 12.56 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 OC 的 42%、34% 和 46%, 这说明 SOC 是冬季长三角地区碳质气溶胶的重要组成部分. 3 个站点的 SOC 在 OC 中占比均高于上海全年 (27.0% ~ 33.2%)^[53], 这一方面是由于冬季稳定的大气和较低的温度会加速大气中的半挥发性有机物凝结凝聚向 SOC 的转化^[54]; 而另一方面, 冬季燃煤和生物质燃烧等高

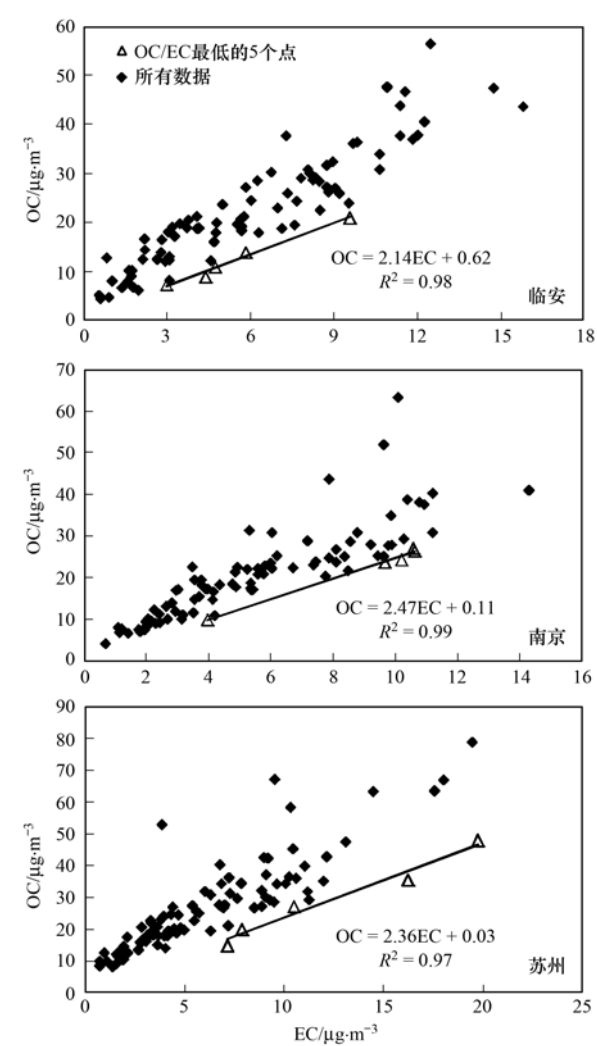


图5 3个站点中OC与EC一次源线性回归方程
Fig. 5 Linear fit between OC and EC from the primary source for the three sample sites

OC/EC 值排放源相对其它季节占比更高,使部分样品中 OC/EC 值偏高,这可能会导致在使用 EC 示踪法估算冬季 SOC 相对于其它季节更为高估。3 个站点中,南京站点 SOC 贡献较小,说明其受到的 SOC 污染的影响在 3 个站点中较为轻微,这可能是由于南京站点主要受到东面宁六高速公路影响,大量机动车排放的新鲜气溶胶可能是该站点的主要来源。而苏州站点 SOC 占比则最高,这与 2.2 节中分析的苏州站点非燃烧源产生的 OC 占比在 3 个站点中最高结果相一致,这可能是因为一方面苏州站点污染为最严重,气态前体物的浓度相对较高,更容易发生光化学反应生成 SOC,临安站点由于周围植被较多,人为活动相对较少,受到外界传输影响较大,气溶胶在传输过程中,出现了持续老化和氧化过程^[55],形成 SOC,因此 SOC 也是临安站点 OC 的一个重要来源。

2.4 碳质气溶胶与气象条件关系分析

2.4.1 碳质气溶胶与气象条件的相关性

表 4 为采样期间 3 个站点的 OC、EC 和 OC/EC 值与风速、气温和相对湿度的相关性,可以看出风速与 3 个站点的 OC/EC 值有显著的正相关性,其中临安站点的正相关性最高。风速的大小,会在一定程度上反映出污染物水平输送的强弱, Saarikoski 等^[56]的研究表明,长距离输送的污染物中 OC/EC 值为 12。当风速较大时,水平输送较强,长距离传输来的高 OC/EC 值污染物会使得样品整体的 OC/EC 比值有所提高,这说明采样期间 3 个站点存在不同程度上的区域传输。有研究发现^[7,22],风速对碳质气溶胶的浓度影响较大,通常为负相关,较大的风速会对 OC、EC 的浓度起到一定的稀释作用,但是在本研究的 3 个站点中,风速仅与苏州站点的 EC 存在 0.05 水平上的显著相关,这可能是因为采样期间的风向多为北到西北风,风速较大时往往会将上游地区的污染物传输至长三角地区,与风对污染物的稀释作用相互抵消,从而使风速与污染物浓度相关性并不显著。气温则与 3 个站点的 OC 与 EC 都呈显著负相关,这可能也与冷空气南下有关,冷空气南下的降温过程中,上游污染地区带来的污染物直接输入长三角地区,使得污染物浓度升高。

表 4 3 个站点的 OC、EC 和 OC/EC 值与风速,气温和相对湿度的相关性¹⁾

Table 4 Correlation between OC, EC, and OC/EC and wind velocity, humidity, and temperature for the three sample sites

项目	站点	风速	气温	相对湿度
OC	临安	-0.19	-0.47 **	-0.13
	南京	-0.19	-0.44 **	0.20
	苏州	-0.21	-0.36 **	-0.11
EC	临安	-0.15	-0.44 **	-0.14
	南京	-0.19	-0.40 **	0.15
	苏州	-0.26 *	-0.36 **	-0.14
OC/EC	临安	0.49 **	0.16	-0.13
	南京	0.28 *	0.08	0.08
	苏州	0.29 *	0.08	-0.11

1) ** 表示在 $P < 0.01$ 的显著相关; * 表示在 $P < 0.05$ 的显著相关

2.4.2 后向轨迹分析

有研究表明^[23,29,57],当主要气团来自不同地区时,会对本地污染物起到很大的影响。使用后向轨迹软件(Hysplit 4)后向轨迹的方法分析了采样期间(1月9日~1月31日)3个站点的逐日主要气团来源,模拟高度为500 m,模拟时间为72 h后向轨迹,轨迹路径每隔12 h计算一次,每日每个站点得到一条轨迹,3个站点得到的结果如图6所示。结合图2

可以发现, $PM_{2.5}$ 、OC 和 EC 的质量浓度与主要气团的传输路径有着很好的相关性, 在 1 月 12 ~ 15 日和 1 月 27 ~ 30 日两个时间段, 3 个站点的空气质量有着较大的改善, 这是由于这两个时段 3 个站点主要受到来自洋面和东北部沿海地区气团的影响. 于是将得到的所有轨迹分为两类: A 类轨迹定义为当日受到来源或途经长三角地区西部和西北部等地区的气团控制, 在图 6 中为红线轨迹表示; B 类轨迹定义为当日受到来源或途经于洋面和长三角地区东北部沿海等地区的气团控制, 在图 6 中为黑线轨迹表示, 由于轨迹较多, 每个站点按照气团移动距离分别两张图表示. 表 5 统计了 3 个站点受两类轨

迹影响的污染物浓度平均值, 受到 A 类轨迹影响时 $PM_{2.5}$ 浓度为受 B 类轨迹影响的 1.14 ~ 1.7 倍, 这可能是因为当气团来自洋面或者沿海地区时, 海洋上的清洁气团会对本地排放源排放的污染物起到稀释作用, 从而使碳质气溶胶浓度有所降低, 而 A 类轨迹的气团在传输过程中会积累沿途不同地区排放的污染物, 与本地源排放的污染物进行混合, 对污染物浓度产生影响. 比较 3 个站点在受到两类类轨迹影响时的碳质气溶胶浓度时发现, 受到 A 类轨迹影响时的 TCA 在 $PM_{2.5}$ 中的占比相对 B 类轨迹影响时的比例有所提高, OC/EC 值则低于 B 类轨迹, 这说明相比于 $PM_{2.5}$ 中的其它

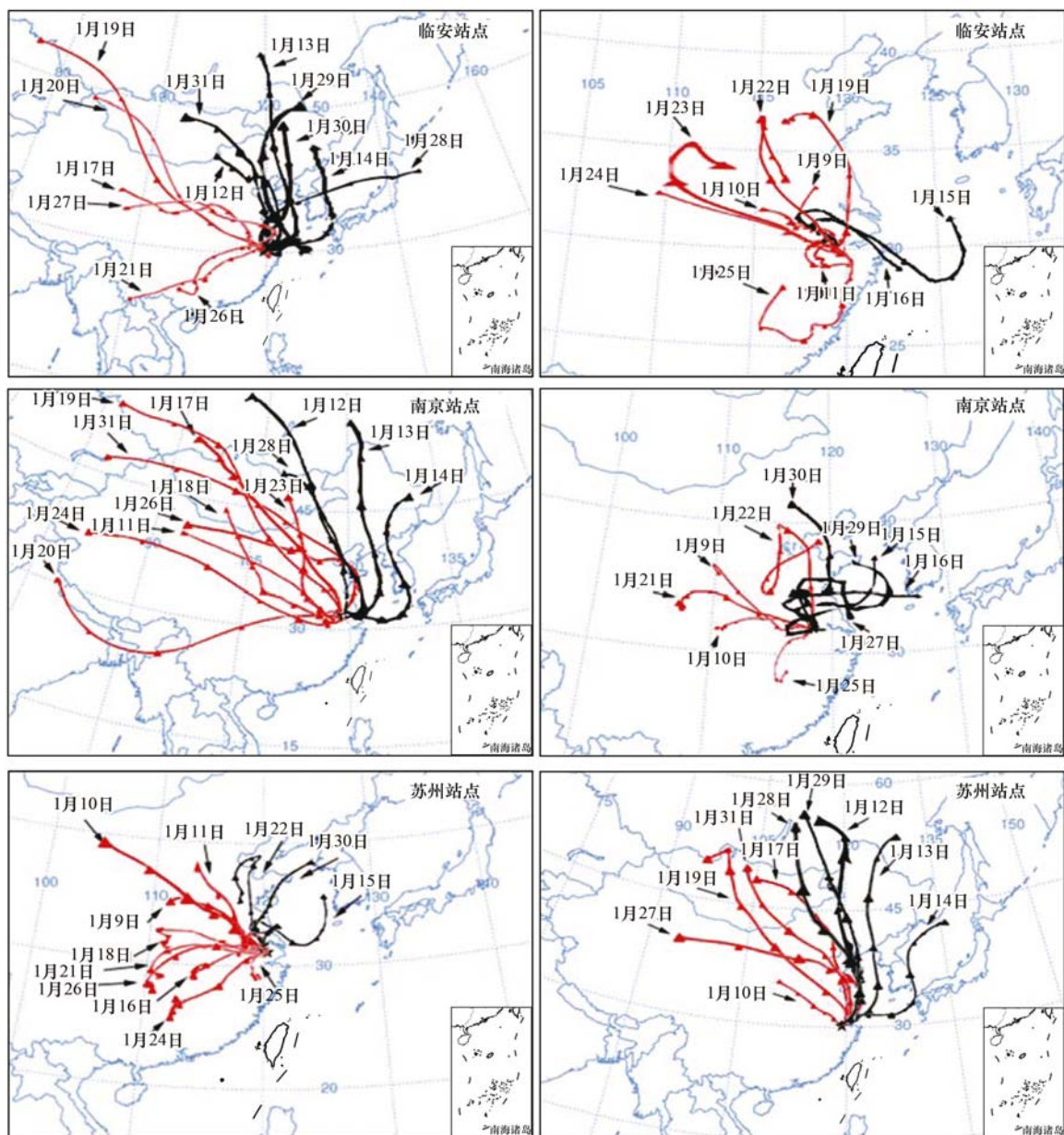


图 6 3 个站点采样期间每日 72 h 后向轨迹分析

Fig. 6 Daily 72 h backward-trajectory of air mass during the sampling period for the three sample sites

组分, 冬季内陆气团传输过来了更多的含碳物质. 而两种样本中的 OC 的浓度差异为 1.55 ~ 2.1 倍, EC 的浓度差异为 1.94 ~ 2.47 倍, EC 的变化率更大, 从 OC/EC 值来看, 3 个站点的 B 类轨迹中 OC/EC 值偏高, 这可能与 B 类轨迹的传输路径中 EC 的排放源较少有关.

表 5 2 类气团影响下的 PM_{2.5} 质量浓度和碳质气溶胶的污染特征

Table 5 Concentrations of PM _{2.5} and characteristics of carbonaceous components for the two types of air masses						
类型	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	TCA/μg·m ⁻³	OC/μg·m ⁻³	EC/μg·m ⁻³	OC/EC	TCA/PM _{2.5} /%
临安 A 类	155.96	55.83	29.6	8.47	3.61	35.8
临安 B 类	91.92	26.45	14.1	3.43	4.93	28.8
南京 A 类	155.57	46.31	24.64	6.89	3.58	29.8
南京 B 类	136.62	28.4	15.93	3.56	4.5	20.8
苏州 A 类	185.01	63.02	33.88	8.8	4.17	34.1
苏州 B 类	128.43	35.85	19.96	3.92	6.6	27.9

3 结论

(1) 2015 年冬季临安、苏州和南京 PM_{2.5} 的平均质量浓度为 123.56、144.77 和 156.5 μg·m⁻³, OC 分别为 21.93、20.32 和 27.08 μg·m⁻³, EC 分别为 6、5.39 和 6.4 μg·m⁻³. TCA 分别占 PM_{2.5} 的 33.3%、26.2% 和 32%. 其中临安站点作为长三角地区背景点, 污染也较为严重, 说明冬季长三角地区的大气污染是区域性污染.

(2) OC 与 EC 相关性分别为临安($R^2 = 0.83$)、南京($R^2 = 0.72$)和苏州($R^2 = 0.72$), 相关性较好, 说明冬季长三角地区的 OC 和 EC 来源较为一致. 3 个站点的 OC/EC 平均值分别为临安(4.3)、南京(4.0)和苏州(5.1), 在样品的 OC/EC 值的分布中, 3 个站点样品的 OC/EC 值主要分布在 2.5 ~ 6 这个区间范围内, 说明冬季长三角地区的主要污染源为燃煤、机动车尾气.

(3) 使用 EC 示踪法对各站点的 SOC 进行估算, 临安、南京和苏州的 SOC 平均质量浓度为 9.23、6.82、12.56 μg·m⁻³, 分别占 OC 的 42%、36% 和 46%, 是 3 个站点中 OC 的重要组成部分.

(4) 利用后向轨迹模式对各站点的气团来源进行逐日分析, 发现当受到来自空气质量较差地区的气团控制时, 3 个站点的空气污染加重, PM_{2.5}、OC 和 EC 的质量浓度是受到来自洋面和沿海气团控制时的 1.14 ~ 1.7 倍、1.55 ~ 2.1 倍和 1.94 ~ 2.47 倍. 同时, 在受到控制时, PM_{2.5} 中的 TCA 占比和 OC/EC 值也相应升高.

致谢: 感谢临安大气本底污染检测站和苏州南门气象站的工作人员在现场观测中的大力协助.

参考文献:

[1] 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.

[2] Chow J C, Watson J G, Chen L-W A, et al. Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(16): 4414-4422.

[3] Andreae M O, Schmid O, Yang H, et al. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6335-6350.

[4] Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, et al. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, **21**(2): GB2018.

[5] Mkoma S L, Chi X G, Maenhaut W. Characterization of carbonaceous materials in PM_{2.5} and PM₁₀ size fractions in Morogoro, Tanzania, during 2006 wet season campaign[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, **268**(10): 1665-1670.

[6] Balachandran S, Pachon J E, Lee S, et al. Particulate and gas sampling of prescribed fires in South Georgia, USA[J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 125-135.

[7] 段卿, 安俊琳, 王红磊, 等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2460-2467.

[8] Duan Q, An J L, Wang H L, et al. Pollution characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric particles in Nanjing northern suburb in summer[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2460-2467.

[9] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, **297**(5590): 2250-2253.

[10] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. Nature, 2001, **409**(6821): 695-697.

[11] Macias E S, Zwicker J O, Ouimette J R, et al. Regional haze case studies in the Southwestern U. S—I. Aerosol chemical composition[J]. Atmospheric Environment (1967), 1981, **15**(10-11): 1971-1986.

[12] Vasconcelos L A D P, Macias E S, White W H. Aerosol composition as a function of haze and humidity levels in the

- southwestern U. S. [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28** (22): 3679-3691.
- [12] 甘婷, 李梅, 黄正旭, 等. 不同季节广东鹤山超级站大气颗粒物中有机碳(OC)和元素碳(EC)粒径分布研究[J]. *分析化学*, 2015, **43**(12): 1934-1941.
- Gan T, Li M, Huang Z X, *et al.* Study on size distribution of organic carbon and elemental carbon in different seasons in Guangdong atmospheric supersite [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2015, **43**(12): 1934-1941.
- [13] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12** (14): 779-799.
- [14] 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 Atmospheres*, 2007, **112** (D22): D22S11.
- [15] 古金霞, 白志鹏, 刘爱霞, 等. 天津冬季 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中有机碳、元素碳的污染特征[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31** (8): 33-36.
- Gu J X, Bai Z P, Liu A X, *et al.* Pollution characteristics of OC and EC in PM_{2.5} and PM₁₀ in Tianjin winter[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, **31**(8): 33-36.
- [16] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (29): 4959-4970.
- [17] 胡起超, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市冬季大气 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(3): 336-341.
- Hu Q C, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} in winter in Xiamen City, China [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44** (3): 336-341.
- [18] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al.* Characteristics and origins of carbonaceous aerosol in the Sichuan basin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 215-223.
- [19] 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.
- [20] Yuan Z B, Yu J Z, Lau A K H, *et al.* Application of positive matrix factorization in estimating aerosol secondary organic carbon in Hong Kong and its relationship with secondary sulfate [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(1): 25-34.
- [21] Watson J G, Zhu T, Chow J C, *et al.* Receptor modeling application framework for particle source apportionment [J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(9): 1093-1136.
- [22] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市 PM_{2.1} 中有机碳和元素碳污染特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(7): 1160-1166.
- Wu M L, Guo Z B, Liu F L, *et al.* Pollution characteristics and influencing factors of organic and elemental carbon in PM_{2.1} in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33** (7): 1160-1166.
- [23] Wang F W, Guo Z G, Lin T, *et al.* Characterization of carbonaceous aerosols over the East China Sea: the impact of the East Asian continental outflow [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **110**: 163-173.
- [24] 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.
- Zhang Y H, Wang D F, Zhao Q B, *et al.* Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shanghai urban area [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3263-3270.
- [25] 云龙龙, 陆钊, 张天舒, 等. 无锡市冬季典型天气 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3280-3286.
- Yun L L, Lu F, Zhang T S, *et al.* Pollution characteristics of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} during typical winter days in Wuxi city [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3280-3286.
- [26] 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.
- [27] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35** (1): 602-610.
- [28] 王荔, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊 PM_{2.5} 中含碳物质和水溶性离子的污染特性[J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(17): 91-99.
- Wang L, Ma Y, Zheng J, *et al.* Characterization apportionment of carbonaceous aerosol and water-soluble ions in PM_{2.5} at suburban Nanjing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(17): 91-99.
- [29] 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3128-3134.
- Du B H, Huang X F, He L Y, *et al.* Seasonal and spatial variations of carbon fractions in PM_{2.5} in Ningbo and the estimation of secondary organic carbon [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3128-3134.
- [30] 陈魁, 银燕, 魏玉香, 等. 南京大气 PM_{2.5} 中碳组分观测分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- Chen K, Yin Y, Wei Y X, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- [31] Singer B C, Kirchstetter T W, Harley R A, *et al.* A fuel-based approach to estimating motor vehicle cold-start emissions [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, **49** (2): 125-135.
- [32] 廖志恒, 孙家仁, 范绍佳, 等. 2006~2012年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2015, **35** (2): 329-336.
- Liao Z H, Sun J R, Fan S J, *et al.* Variation characteristics and influencing factors of air pollution in Pearl River Delta area from 2006 to 2012 [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 329-336.
- [33] Li W F, Bai Z P, Liu A X, *et al.* Characteristics of major PM_{2.5} components during winter in Tianjin, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, **9**(1): 105-119.
- [34] 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.
- Cheng S Y, Liu C, Han L H, *et al.* Characteristics and source apportionment of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} during the heating season in Beijing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, **40**(4): 586-591, 597.
- [35] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 关中地区冬季 PM_{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 427-433.
- Tian P S, Cao J J, Han Y M, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} during winter in Guanzhong area[J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 427-433.
- [36] 牛彧文, 何凌燕, 胡敏, 等. 深圳冬、夏季大气细粒子及其二次组分的污染特征[J]. 中国科学 B 辑, 2006, **36**(2): 173-180.
- Niu Y W, He L Y, Hu M, *et al.* Pollution characteristics of atmospheric fine particles and their secondary components in the atmosphere of Shenzhen in summer and in winter[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2006, **49**(5): 466-474.
- [37] 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.
- [38] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon[J]. Aerosol Science and Technology, 1990, **12**(1): 161-171.
- [39] Turpin B J, Huntzicker J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1991, **25**(2): 207-215.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings[J]. Journal of Environmental Science, 2007, **19**(2): 167-175.
- [45] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(38): 6557-6564.
- [46] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- Yang H, Zhu B, Gao J H, *et al.* Source apportionment of VOCs in the northern suburb of Nanjing in summer[J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- [47] 薛国强, 朱彬, 王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- Xue G Q, Zhu B, Wang H L. Size distributions and source apportionment of soluble ions in aerosol in Nanjing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [48] Turpin B J, Huntzicker J J, Larson S M, *et al.* Los Angeles summer midday particulate carbon: primary and secondary aerosol [J]. Environmental Science & Technology, 1991, **25**(10): 1788-1793.
- [49] Zhang Q, Worsnop D R, Canagaratna M R, *et al.* Hydrocarbon-like and oxygenated organic aerosols in Pittsburgh: insights into sources and processes of organic aerosols [J]. Atmosphere Chemistry and Physics, 2005, **5**(12): 3289-3341.
- [50] Kleindienst T E, Jaoui M, Lewandowski M, *et al.* Estimates of the contributions of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosol at a southeastern US location [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(37): 8288-8300.
- [51] Pun B K, Wu S Y, Seigneur C, *et al.* Uncertainties in modeling secondary organic aerosols: Three-dimensional modeling studies in Nashville/Western Tennessee [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(16): 3647-3661.
- [52] Lim H J, Turpin B J. Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: Results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(21): 4489-4496.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 徐伟, 傅宗玫, 陈晋轩, 等. 天津武清冬季 PM_{2.5} 含碳组分的逐时观测及分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, **52**(3): 409-419.
- Xu W, Fu T M, Chen J X, *et al.* Ground-based measurement and variation analysis of carbonaceous aerosols in Wuqing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, **52**(3): 409-419.
- [56] Saarikoski S, Timonen H, Saarnio K, *et al.* Sources of organic carbon in fine particulate matter in northern European urban air [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, **8**(20): 6281-6295.
- [57] Huang X F, He L Y, Xue L, *et al.* Highly time-resolved chemical characterization of atmospheric fine particles during 2010 Shanghai World Expo [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(11): 4897-4907.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocculation-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)