

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗烜,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中砷形态变化及油菜砷吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

无锡市冬季典型天气 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征

云龙龙¹, 陆钊^{1*}, 张天舒¹, 伍德侠^{1,2}, 盛世杰³, 陆亦怀¹, 刘建国¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所国家环境保护环境光学监测技术重点实验室, 合肥 230000; 2. 江苏物联网研究发展中心, 无锡 214135; 3. 无锡中科光电技术有限公司, 无锡 214135)

摘要: 于2013-12-03~2014-01-03在无锡市对大气细粒子(PM_{2.5})进行了连续采集,并用热/光透射法(TOT)分析了其中有机碳(OC)和元素碳(EC)的浓度,结合气象参数,分析了冬季霾产生过程及霾天气下碳组分的污染特征。结果表明,采样期间共有3次霾产生过程,冷空气、风和降水成为改善空气质量最有效的途径。PM_{2.5}、OC及EC的日均质量浓度分别为(132.38 ± 87.17)、(22.80 ± 9.77)和(2.08 ± 1.63) μg·m⁻³,总碳(TC, TC = OC + EC)占PM_{2.5}的23.57%,同时TC与PM_{2.5}之间存在较好的相关性,相关系数为(R^2)0.730;采样期间,TC在PM_{2.5}中所占的比例与PM_{2.5}的浓度之间存在相反的变化趋势,并且在霾天气下TC所占的比例要比非霾天气小,二次无机气溶胶粒子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺)的快速增长可能是造成霾天气下细粒子浓度较高的原因之一;OC/EC值为12.83,并且相关性较差,可能与二次污染有关,对二次有机气溶胶(SOC)进行估算:得到SOC平均质量浓度为9.04 μg·m⁻³,占OC的40.96%。

关键词: PM_{2.5}; 有机碳; 元素碳; 霾; 二次有机碳

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)09-3280-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2014.09.006

Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM_{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City

YUN Long-long¹, LU Fan¹, ZHANG Tian-shu¹, WU De-xia^{1,2}, SHENG Shi-jie³, LU Yi-huai¹, LIU Jian-guo¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Optical Monitoring Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230000, China; 2. Jiangsu Research and Development Center of Internet of Things, Wuxi 214135, China; 3. Wuxi CAS Photonics Co., Ltd., Wuxi 214135, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the process of haze in winter and the variation of carbonaceous aerosols in haze days. Continuous measurements of PM_{2.5} and meteorological parameters were conducted from Dec 3rd, 2013 to Jan 3rd, 2014, in Wuxi City. The carbonaceous component was quantified with the thermal/optical transmission (TOT) method. The results showed that: Three times of haze progresses occurred during the sampling period. Cold air, wind and rainfall were the most efficient ways to improve air quality. The mass concentration of PM_{2.5}, OC and EC were (132.38 ± 87.17) μg·m⁻³, (22.80 ± 9.77) μg·m⁻³ and (2.08 ± 1.63) μg·m⁻³, respectively. The TC accounted for 23.57% of the PM_{2.5}; at the same time, the TC and PM_{2.5} were found to be strongly correlated (correlation coefficients = 0.730). There was a negative correlation between the ratio of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} and the concentration of PM_{2.5}, and the ratio in haze days was lower than that in normal days, which suggested that secondary inorganic particles (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺) may have a fast growth in haze days. Average OC/EC ratio was 12.83, and there was a poor correlation between OC and EC, indicating that secondary pollutants might exist. The secondary organic carbon (SOC) was estimated to be 9.04 μg·m⁻³, accounting for 40.96% of OC.

Key words: PM_{2.5}; organic carbon; elemental carbon; haze; SOC

大气细粒子(PM_{2.5})已经成为大气污染的重要因素,它对大气能见度、气候变化、辐射强迫和人类健康产生重要影响^[1~4]。碳质气溶胶是大气颗粒物的主要成分之一,而且研究表明含碳气溶胶主要存在于细粒子中^[5~8],是PM_{2.5}的重要组成部分,约占PM_{2.5}的10%~50%^[9]甚至能达到80%^[10]。碳质气溶胶主要包括有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)和碳酸盐碳(carbonate carbon, CC)。OC主要包括污染源排放的一次污染物排放和气态有机物通过光化学反应生成的二次污

染物^[11]。EC是生物或化石燃料不完全燃烧直接排放的产物。CC在颗粒物中的含量比较少,一般可以忽略。近年来,随着雾霾天气出现频率的增加,大气污染问题,尤其是细粒子污染,越来越受到社会各界的关注,2013年12月,我国中东部大范围地区出现了较严重的雾霾天气,江苏省尤为突出,气象台连续

收稿日期: 2014-02-11; 修订日期: 2014-04-04

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05040300)

作者简介: 云龙龙(1988~),男,硕士研究生,主要方向为环境监测技术, E-mail: llyu@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: lufan@aiofm.ac.cn

数日发布雾霾黄色和橙色双预警,达到中度、重度雾霾等级,空气污染指数等级亦达到严重污染. 本实验以江苏省无锡市 12 月 $\text{PM}_{2.5}$ 为研究对象,测定了其中的碳组分浓度,结合了大气能见度,温湿度等气象参数,探讨了霾天气发生的形成机制以及颗粒物的污染特性,以期更好地掌握大气雾霾的污染特征,为大气颗粒物的有效防控提供基础资料和科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样地点及时间

采样时段为 2013-12-03 ~ 2014-01-03,如图 1,采样点位于无锡市新区江苏物联网发展研究中心大楼顶($31^{\circ}30'N$, $120^{\circ}21'E$),距离地面约 20 m,周围无居民区,东南面约 500 m 处为污水处理厂,1 km 处是一座城市生活垃圾焚烧发电厂,北面约 2 km 左右为工业园区,西南方多生态园区,约 8 km 处为太湖.

1.2 实验仪器及方法

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的测量利用的是振荡天平法,使用的是美国热电公司 Model 1405 (Thermo Scientific) 进行测量,该仪器可以获取 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度小时均值数据.

能见度的测量使用的是安光所 HW-N1 型前向散射式能见度仪,每 1 min 可以获得一个能见度数据.

气象参数测量使用的是天津天仪 AWS2-SW 气象仪,每 2 min 获取一组气象数据(包括风速、风向、温度、湿度、气压).

$\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳(OC)和元素碳(EC)的测量采用中科院安徽光机所研制的 AGHJ-1 气溶胶有机碳元素碳在线分析仪,该仪器基于热/光透射法(TOT

法)原理,采用 NIOSH 法 5040 温度廓线,颗粒物被收集在石英炉中直径约 2 cm 的石英纤维滤膜上. 分析分两次升温程序:第一个阶段是在纯氮气环境下阶段性地逐级升温至 310、475、615、870 $^{\circ}\text{C}$,使 OC 加热挥发;第二个阶段是在含有 10% 氧气的氮气环境下逐级升温至 550、625、700、870 $^{\circ}\text{C}$,使 EC 加热挥发. 在升温的第一阶段会有部分 OC 高温裂解为 EC,导致测量的 OC 浓度偏低,EC 浓度偏高,故在升温全程采用 650 nm 激光照射样品,将透射光强回到初始状态时,作为 OC 和 EC 的分割点. 分析过程分解所产生的分解产物都是通过二氧化锰氧化炉(炉温维持在 870 $^{\circ}\text{C}$)转化为 CO_2 后被非色散红外检测器(NDIR)进行定量检测. 采样流量为 8 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样周期 60 min. 与 SUNSET lab 碳分析仪在测量结果上进行对比,两台仪器测得的 TC、OC、EC 浓度值均处在同一浓度水平,多个数据点十分接近,其中两台仪器的 TC 和 OC 数据差异很小,EC 之间略有差异,这是受二者在 OC、EC 分割点选取上的差异造成的. 因为无论是本仪器还是目前较具有代表性的 SUNSET(或 DRI)分析仪,在对石英纤维滤膜(美国 PALL Pallflex)做空白实验时,都会发现随着温度的升高,激光的透射光强会减小,这可能是由于温度使滤膜的质地发生变化造成的,这就需要对激光强度进行温度补偿校正. 温度廓线和激光校正方法的不同,都会造成分割点选取上的差异. 本仪器校正后的激光透射强度变化幅度小于 3%,相对标准偏差小于 1%,该仪器检测限(以 C 计)为 0.37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,精密度 $<5\%$ [12,13].

2 结果与讨论

2.1 霾产生过程分析

图 2、图 3 分别为采样期间主要的气象参数和

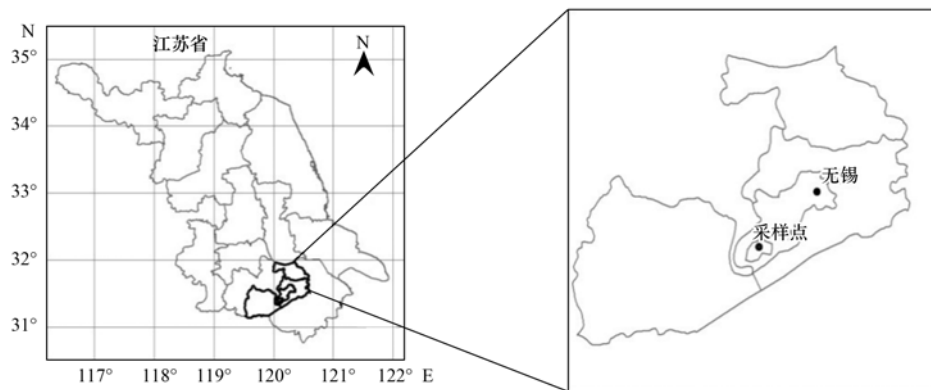


图 1 市采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in Wuxi

颗粒物浓度的时间变化曲线(12月7日进行仪器维护,数据缺失)。根据霾的定义,综合图2、图3,可看出整个采样期间主要存在3次霾产生过程,分别为Ⅰ(12月3~8日)、Ⅱ(12月21~26日)、Ⅲ(12月27日~次年1月3日)。过程Ⅰ污染最为严重,大气能见度均低于7.5 km,最低能见度不足300 m,相对湿度在40%~90%,属于中度、重度雾霾混合型天气。受冷空气和大风影响,9日 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC的日均质量浓度逐渐下降,能见度大于10 km,空气质量得到明显改善,同时受15、16日降水共同影响,各质量浓度在16日降低到最小值($\text{PM}_{2.5} = 13.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{OC} = 9.54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{EC} = 0.84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);降水过后,大气污染物开始逐渐累积,并于20日 $\text{PM}_{2.5}$ 达到较大值($141.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);受来自太湖方向西南风影响,洁净空气不断输入到采样点上空,21~22日 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC质量浓度明显下

降。22日之后,风力减弱,并转为偏北风,污染物再次开始累积,23日便出现霾天气(日均能见度7 658 m,相对湿度73%),第二次霾过程(过程Ⅱ)产生,25日 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均质量浓度已经增长到 $213 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与此同时能见度不断减小至较小值2.7 km。经历27~31日冷空气和大风天气,大气污染物浓度和能见度变化显著,空气质量再次改善,霾过程结束。1日之后再次出现与过程Ⅱ相似的情况,第三次霾过程(过程Ⅲ)开始产生。综上所述,3次霾过程均是在风力较小,温度变化不明显的连续静稳天气条件下产生的;冷空气、降水和大风对颗粒物清除效果显著,清除之后如果再次恢复静稳天气,颗粒物增长迅速,2~3 d便会再次出现霾天气。因此,冬季较多的连续静稳天气,较低的大气边界层^[14],局地排放的污染物持续累积不易扩散极大地推动了霾天气的产生。

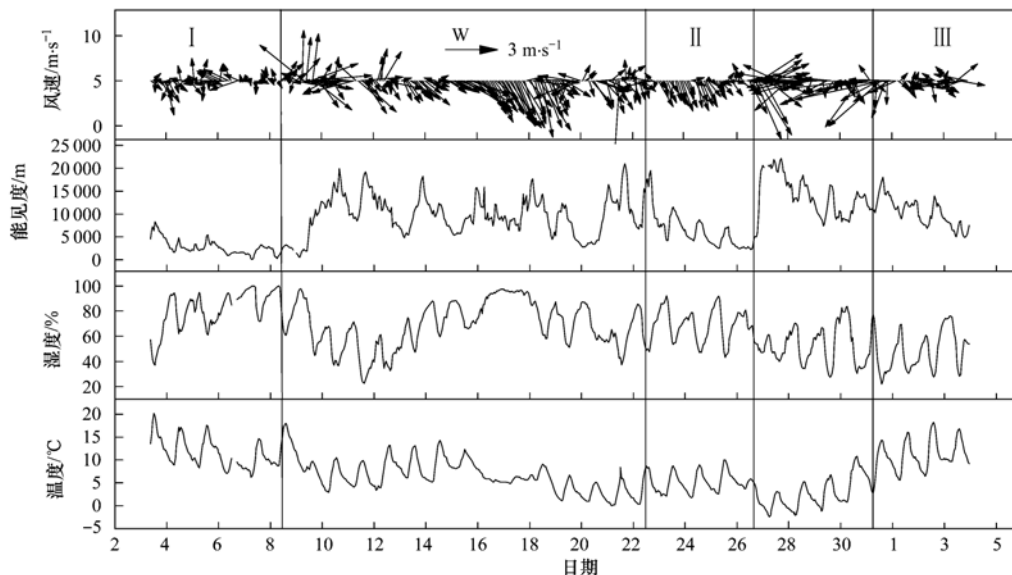


图2 主要气象因子时间变化趋势

Fig. 2 Time series variations of main meteorological factors

2.2 OC、EC、 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度特征

由图3所示,采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均质量浓度为 $(132.38 \pm 87.17) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与国家规定的环境空气质量二级标准(日均值 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)相比,约为二级标准的2倍。其中污染较严重的过程Ⅰ: $\text{PM}_{2.5}$ 的日均质量浓度达到 $(283.60 \pm 52.55) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,约为国家二级标准的4倍,OC和EC的日均质量浓度也比较高,分别为 $(40.07 \pm 5.38) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(4.65 \pm 2.58) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。整个采样期间OC、EC的日均质量浓度分别为 $(22.80 \pm 9.76) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(2.08 \pm 1.63) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 $(21.74 \pm 11.71)\%$

和 $(1.83 \pm 1.04)\%$,总碳(TC, $\text{TC} = \text{OC} + \text{EC}$)在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的所占质量分数(即浓度贡献率)为: $(23.57 \pm 12.58)\%$,同时TC与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间存在较好的相关性(图4),相关系数(R^2)为0.730,可见碳质颗粒物是大气细粒子的重要组成部分之一。从图3中仍可看出,TC对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率与 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度之间存在相反的变化趋势,即在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减小时,TC在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比例变大,而在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增大,污染严重时,TC所占的比例却减小。具体对该现象分析如下:12月15~17日受降水影响TC和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度均较低,为了消除降水等异常天气对测量结果

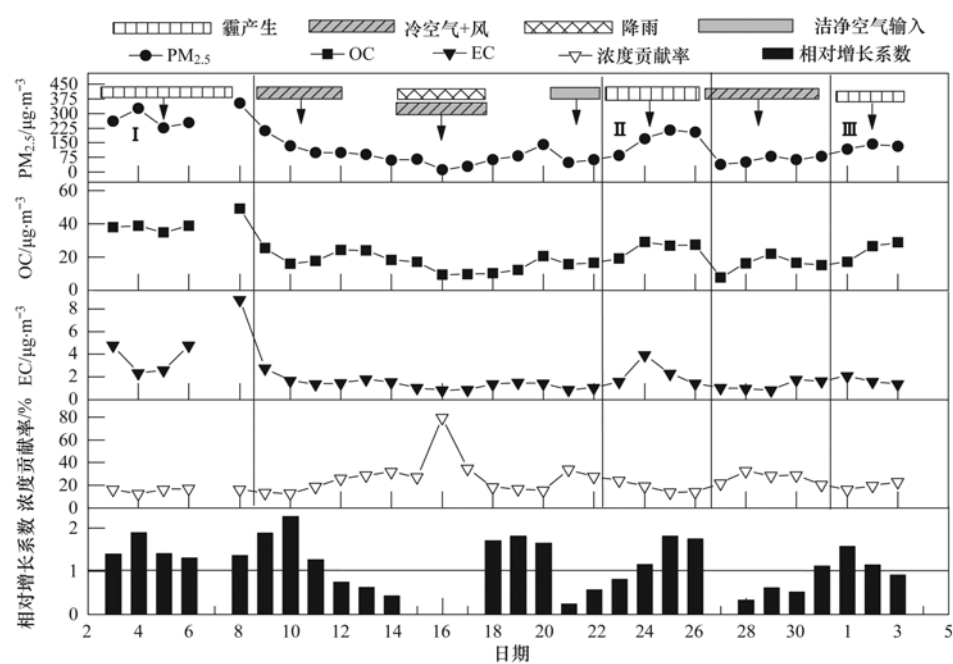


图3 采样期间,PM_{2.5}、OC、EC 日均质量浓度、TC 对 PM_{2.5} 的浓度贡献率以及相对增长系数的时间变化曲线

Fig. 3 Variations of PM_{2.5},OC,EC mass concentrations,ratio of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} and relative growth coefficient during 3 December,2013 to 3 January,2014

的影响,本研究选取 12 月 27 日 TC($8.67\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和 PM_{2.5}($40.01\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的浓度作为本底值. (该浓度仅高于 12 月 15~17 日 TC 和 PM_{2.5} 的质量浓度). 将各时间点(排除 12 月 27 日以及 12 月 15~17 日异常天气数据)的 TC 和 PM_{2.5} 的浓度与各自的本底值做比较,可获得采样期间 TC 和 PM_{2.5} 的浓度增长率. 公式如下:

$$G_{\text{TC}} = \frac{[\text{TC}] - [\text{TC}]_0}{[\text{TC}]_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$G_{\text{PM}_{2.5}} = \frac{[\text{PM}_{2.5}] - [\text{PM}_{2.5}]_0}{[\text{PM}_{2.5}]_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, G_{TC} 和 $G_{\text{PM}_{2.5}}$ 分别代表 TC 和 PM_{2.5} 的增长率, $[\text{TC}]$ 、 $[\text{PM}_{2.5}]$ 为不同日期 TC 和 PM_{2.5} 的质量浓度, $[\text{TC}]_0$ 、 $[\text{PM}_{2.5}]_0$ 为 TC 和 PM_{2.5} 的浓度本底值. 同时定义相对增长系数:

$$R_g = \frac{G_{\text{PM}_{2.5}}}{G_{\text{TC}}} \quad (3)$$

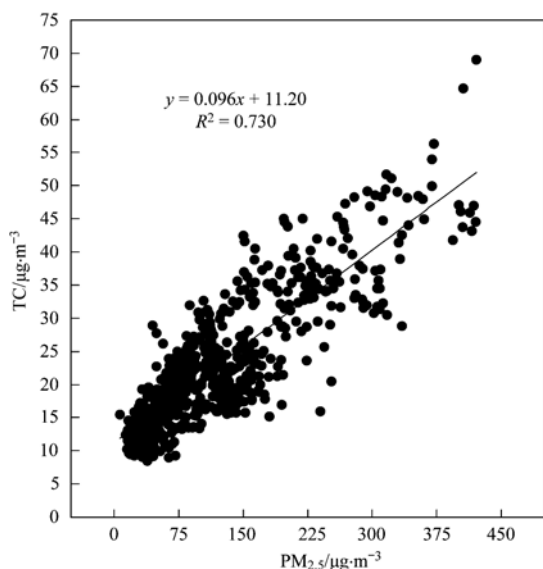
若 $R_g > 1$,表明 PM_{2.5} 的增长率较 TC 的增长率大,反之则说明 PM_{2.5} 的增长率比 TC 的小. R_g 的时间变化序列如图 3 所示,从中可看出一般在霾产生之前或者霾过程结束阶段, $R_g < 1$;而在霾天气条件下, $R_g > 1$. 由此可知,在霾天气条件下,非碳质气溶胶对 PM_{2.5} 浓度的增长的贡献可能要比含碳气溶胶的大. 采样点位于污水处理厂和垃圾焚烧发电厂以

及工业园区附近,这三类污染源除了都能向大气排放有机气溶胶外,还会排放出大量的硫氧化物、氮氧化物^[14,15]等作为水溶性二次无机气溶胶粒子的前体物. 这些前体物在大气层状结构稳定、风力较小的连续静稳天气条件下在大气中停留时间较长,能够进行充分的光化学反应,并能进一步吸湿增长生成无机盐离子(硫酸盐、硝酸盐、铵盐等). Yin 等^[17]指出水溶性二次无机盐离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+)是冬季城市霾天气 PM_{2.5} 的主要成分, Tan 等^[18,19]指出 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 的浓度在霾天气下要比非霾天气增长快,其浓度分别是非霾天气下的 6.5、3.9、5.3 倍. 因此,二次无机气溶胶的快速增长可能是造成无锡市冬季雾霾天气条件下细粒子 (PM_{2.5}) 浓度较高的重要原因之一.

2.3 碳质气溶胶的污染特征

2.3.1 OC 与 EC 的比值特征、相关性 & SOC 的估算

一般来讲,一次有机碳和元素碳在空气中的浓度主要受大气稳定度、风速、扩散能力强弱等稀释因素影响,而上述因素对二者的影响是相似的,二者在空气中浓度的变化也会有相似的趋势. SOC 浓度的变化则要受到更多的其他因素影响,包括光化通量、温度、湿度、前体物的浓度等,当存在二次污染时,SOC 浓度的波动就可能导致 OC/EC 值的变化,这种变化可以用 OC 和 EC 的相关性来表示. 若

图4 TC与PM_{2.5}的相关性Fig. 4 Correlations between TC and PM_{2.5}

相关性好,说明二者可能具有相似的一次来源;相关性差,则可能存在二次污染^[20]. 采样期间 OC 与 EC(质量浓度小时均值数据)之间的相关性如图 5 所示,二者的相关性很差,可能采样期间存在较多的二次有机污染物. 如果将数据按“高浓度”和“低浓度”进行分类,可看出“高浓度”下 OC 和 EC 之间存在一定相关性($R^2 = 0.620$),OC/EC 平均值为 7.7;而“低浓度”下 OC 和 EC 之间相关性仍然很差,OC/EC 平均值为 15.7. 在统计的所有 651 个 OC、EC 质量浓度小时均值数据中:“高浓度”下的数据仅有 28 个,并且这些数据点较分散地呈现在整个采样时间序列中,因此“高浓度”下相关性好并不能说明采样时期污染程度越高越以一次污染为主,更可能是由于在某一时间点或时间段人为焚烧秸秆等生物质,燃烧不彻底造成的. 相比于“高浓度”下少量的数据点,“低浓度”的数据在整个采样阶段更具有代表性,呈现出弱相关性,高 OC/EC 值的特点,这通常与 SOC 的生成或排放源排放的有机污染物特征有关^[21].

目前并没有直接方法对 SOC 进行定量分析,常用的间接方法有:有机分子示踪法、有机碳和元素碳(OC/EC)比值法、模型预测法. 其中 OC/EC 比值法鉴于其简单、直接的特点,常常被用来评价二次污染物的形成以及碳质气溶胶的排放特征. OC/EC 的值一般受控于 3 个因素,排放源特征,OC 在空气中的转化以及 OC 和 EC 的清除. Chow 等^[22]认为,当 OC/EC 超过 2 时,即存在 SOC 的生成. 采样

期间,OC/EC 值的变化范围是 5.61 ~ 26.88,平均值为 12.83,有机碳中可能存在二次来源. 根据 Turpin 等^[23]提出的经验公式,对 SOC 进行定量描述如下:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{primary}} \quad (4)$$

式中,SOC 为二次有机碳,OC 和 EC 为采样期间日均质量浓度, $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{primary}}$ 一般是 OC/EC 比值中的最小值,由于 OC/EC 值容易受到气象条件、日变化波动以及排放源等因素影响,仅通过单一参数来确定 SOC 的生成会存在很大偏差^[24],本研究选取 OC/EC 比值中最小的 3 个值(分别是 12 月 8 日,5.61 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 12 月 18 日,7.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 12 月 27 日,7.35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的平均值作为 $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{primary}}$ 的值,其值为 6.79. 计算得 SOC 的平均质量浓度为 9.04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占 OC 的 40.96%,表明 SOC 是无锡市大气细粒子中 OC 的重要组成部分. 国内许多城市^[25~28]都表现出冬季 SOC 在 OC 中所占的比例要比其他季节高的特点. 相比于其他季节,冬季垂直方向容易形成逆温天气,大气边界层又比较低,水平方向静风现象比较多,均不利于污染物的扩散,有机气溶胶粒子能够在空气中长时间滞留,进行充分的光化学反应,导致二次有机碳生成量增加.

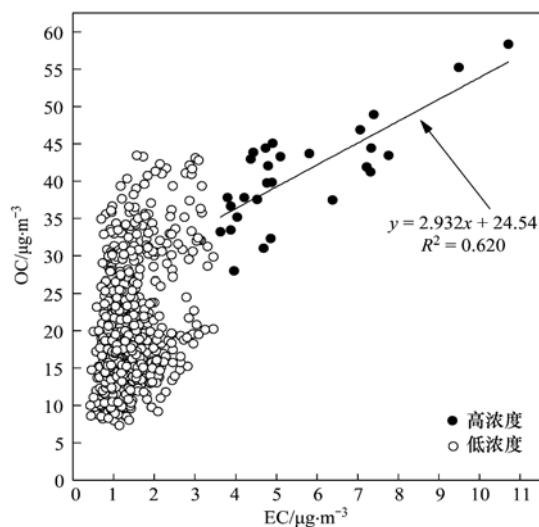


图5 OC、EC 的相关性曲线

Fig. 5 Correlation between OC and EC

2.3.2 与近几年国内其他城市冬季有机碳、元素碳的比较

与近几年国内其他主要城市冬季 PM_{2.5}、OC、EC 质量浓度比较见表 1,无锡市有机碳和元素碳日均质量浓度比北方城市(天津市、西安市)偏低,与南方城市相比较,有机碳的浓度仅低于广州市. 冬季北方进入集中供暖期,燃煤量较多,因此北方城市 OC 和 EC 均具有较高的浓度.

今年我国中东部出现大范围雾霾天气,虽然无锡市没有集中供暖的现象,但在连续数日雾霾双预警天气下 OC 和 EC 日均质量浓度却分别达到 $40.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $4.65\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,有机碳的质量浓度与北方城市相当,甚至高于北方城市.从表 1 中可看出本研究中 OC/EC 的值要比其他城市高,这一方面是由于仪器本身和目前较具有代表性的 SUNSET 和 DRI 生产的分析仪之间存在固有差异造成的;另一方面在无锡市冬季连续静稳

天气、雾霾频发的大气环境中,可能有机气溶胶的污染较往年严重,呈现出浓度较大、在总碳气溶胶中比例较高的特点. Duan 等^[29]指出颗粒物中含碳气溶胶与多环芳烃(PAHs)之间有较强的相关性,而且 OC 与 PAHs 的相关性往往优于 EC 与 PAHs 的相关性,PAHs 是一种强致癌物质,会对人类的生命健康造成很大威胁.因此亟需实施切实可行的措施加强排放源的控制和污染物的处理.

表 1 近几年国内主要城市冬季 OC、EC 浓度水平

Table 1 Level of OC and EC in Chinese cities in winter in recent years						
城市	时间(年)	OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OC/EC	分析方法	文献
无锡市	2013-12	22.80 ± 9.77	2.08 ± 1.63	12.83	TOT	本研究
福州市	2011	12.03 ± 2.87	1.65 ± 0.50	7.30	TOT	[30]
武汉市	2011	20.6 ± 9.9	2.9 ± 1.2	7.10	TOT	[31]
西安市	2010	38.33	7.26	5.27	TOR	[32]
广州市	2008	24.6 ± 19.3	7.9 ± 5.4	3.11	TOR	[33]
上海市	2007~2008	16.02 ± 14.90	5.13 ± 2.86	5.60	TOR	[34]
天津市	2006	40.53	7.49	5.41	TOR	[25]

3 结论

(1)2013 年 12 月 3 日~2014 年 1 月 3 日无锡市冬季共经历 3 次霾产生过程,冷空气、风和降水成为改善空气质量最有效的途径.颗粒物被清除之后,如果再次恢复到静稳天气,颗粒物增长迅速,2~3 d 便会再次出现霾天气.

(2)采样期间,PM_{2.5}、OC 与 EC 的日均质量浓度分别为 (132.38 ± 87.17)、(22.80 ± 9.77) 和 (2.08 ± 1.63) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与近几年国内其他主要城市冬季 OC、EC 质量浓度相比较,偏低北方城市,在南方城市占较高水平.

(3)TC 与 PM_{2.5}之间存在较好的相关性,但在霾天气条件下,随着 PM_{2.5}浓度的增加,TC 所占的比例却在减小,二次无机气溶胶粒子的快速增长,可能是造成霾天气 PM_{2.5}浓度较高的原因之一.

(4)OC 与 EC 之间存在弱相关性,高 OC/EC 值的特征,很有可能是由于二次污染造成的. SOC 在 OC 中所占的比例较高(40.96%),这可能与冬季的气象条件和污染物排放量的增加有很大关系.

致谢:感谢无锡中科光电技术有限公司和江苏物联网研究发展中心光电感知中心提供的 PM_{2.5}、能见度和气象参数等数据,感谢无锡中科光电技术有限公司万学平总经理以及全体职工在实验期间给予的帮助.

参考文献:

[1] 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** (10): 1451-1460.

[2] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等.气溶胶有机碳元素碳基本特征研究的前沿动向[J].环境科学与技术,2005,**28**(3):112-114.

[3] 董雪玲.大气可吸入颗粒物对环境 and 人体健康的危害[J].资源·产业,2004,**6**(5):50-53.

[4] Muir D, Laxen, D P H. Black smoke as a surrogate for PM₁₀ in health studies[J]. Atmospheric Environment, 1995, **29** (8): 959-962.

[5] 唐小玲,毕新慧,陈颖军,等.不同粒径大气颗粒物中有机碳(OC)和元素碳(EC)的分布[J].环境科学研究,2006,**19** (1):104-108.

[6] 李杏茹,王英峰,郭雪清,等.2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征[J].环境科学,2011,**32**(2):313-318.

[7] Offenberg J H, Baker J E. Aerosol size distribution of elemental and organic carbon in urban and over-water atmospheres[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(10):1509-1517.

[8] Chen S J, Liao S H, Jian W J, *et al.* Particle size distribution of aerosol carbons in ambient air[J]. Environment International, 1997, **23**(4):475-488.

[9] Schauer J J, Mader B T, DeMinter J T, *et al.* ACE-Asia Inter-comparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon[J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(5):993-1001.

[10] Nunes T V, Pio C A. Carbonaceous aerosols in industrial and

- coastal atmospheres [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27**(8): 1339-1346.
- [11] Yu S C, Dennis R L, Bhawe P V, *et al.* Primary and secondary organic aerosols over the United States; estimates on the basis of observed organic carbon (OC) and elemental carbon (EC), and air quality modeled primary OC/EC ratios [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(31): 5257-5268.
- [12] 丁晴. 热光法大气有机碳/元素碳监测技术研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2011. 49-52.
- [13] 丁晴, 刘建国, 陆亦怀, 等. 大气有机碳/元素碳测量中的光学校正方法 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208007-1-0208007-6.
- [14] 张剑鸣, 陶俊, 张仁健, 等. 2008 年 1 月广州大气污染特征及能见度观测研究 [J]. *环境科学研究*, **21**(6): 161-165.
- [15] 刘晗, 张培玉, 于春燕. 城市污水处理厂的大气污染治理技术 [J]. *环境工程*, 2009, **27**(3): 75-78.
- [16] 李诗媛, 别如山. 城市生活垃圾焚烧过程中二次污染物的生成与控制 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(3): 63-67.
- [17] Yin L Q, Niu Z C, Chen X Q, *et al.* Chemical compositions of PM_{2.5} aerosol during haze periods in the mountainous city of Yong'an, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(7): 1225-1233.
- [18] Tan J H, Duan J C, He K B, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(6): 774-781.
- [19] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [20] 刘新民, 邵敏, 曾利民, 等. 珠江三角洲地区气溶胶中含碳物质的研究 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(增刊): 54-59.
- [21] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1345-1355.
- [22] 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.
- [23] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantization of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [24] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [25] 董海燕, 古金霞, 陈魁, 等. 天津市区 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析 [J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(1): 34-38.
- [26] 李建军, 沈振兴, 同帆, 等. 西安冬春季 PM₁₀ 中碳气溶胶的昼夜变化特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1506-1513.
- [27] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(3): 355-364.
- [28] 徐昶. 中国特大城市气溶胶的理化特性、来源及其形成机制 [D] 上海: 复旦大学, 2010. 82-93.
- [29] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Roadside, urban, and rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69**(4): 337-349.
- [30] 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 等. 福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1988-1994.
- [31] 成海容, 王祖武, 冯家良, 等. 武汉市城区大气 PM_{2.5} 的碳组分与源解析 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(9): 1574-1579.
- [32] 张承中, 丁超, 周变红, 等. 西安市冬夏两季 PM_{2.5} 中碳气溶胶的污染特征分析 [J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(4): 1477-1481.
- [33] 朱李华, 陶俊, 张仁健, 等. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O₃ 和气象条件的关联 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- [34] 王杨君, 董亚萍, 冯加良, 等. 上海市 PM_{2.5} 中含碳物质的特征和影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1755-1761.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人