

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

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

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娇, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娴 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征

陈秋方, 孙在*, 谢小芳

(中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 利用快速迁移率粒径谱仪(FMPS)对杭州 2013 年 12 月 6~11 日连续灰霾天气和灰霾消退过程超细颗粒进行监测, 分析颗粒物浓度变化和粒径谱分布特征及其与气象的相关性。结果表明, 颗粒物日变化特征为夜晚数浓度较高, 凌晨数浓度开始降低, 08:00 和 18:00 上下班高峰期出现一个小峰值, 体现出明显的交通源峰值, 表明交通排放对大气污染影响较大。灰霾天气下颗粒物最高数浓度达到 $8.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。粒径谱呈双峰分布, 峰值粒径分别为 15 nm 和 100 nm, 粒径在 100 nm 附近的粒子占大多数, 粒子以爱根核模态和积聚模态为主, 平均数量中位径 CMD(count medium diameter)为 85.89 nm。而在灰霾消退过程, 颗粒物数浓度降低, 峰值粒径向小粒径演变, 粒径在 100 nm 附近的粒子逐渐减少, 核模态粒子增多, 大于积聚模态, 平均 CMD 为 58.64 nm。气象因素中能见度和风力与数浓度主要呈负相关, 相关系数 R 分别为 -0.225 和 -0.229, 相对湿度与数浓度正相关, 相关系数 R 为 0.271, 冬季大气比较稳定, 水平温度与数浓度的相关性较小。研究灰霾天气数浓度分布和气象因素的综合影响对其形成机制及控制有重要意义。

关键词: 灰霾; 超细颗粒; 数浓度; 粒径谱; 气象因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-2851-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.002

Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou

CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Atmospheric ultrafine particles (UFPs) were monitored with fast mobility particle sizer (FMPS) in continuous haze weather and the haze fading process during December 6 to 11, 2013 in Hangzhou. Particle concentration and size distribution were studied associated with meteorological factors. The results showed that number concentrations were the highest at night and began to reduce in the morning. There was a small peak at 8 o'clock in the morning and 18 o'clock in the afternoon. It showed an obvious peak traffic source, which indicated that traffic emissions played a great role in the atmospheric pollution. During haze weather, the highest number concentration of UFPs reached $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$. Particle size spectrum distribution was bimodal, the peak particle sizes were 15 nm and 100 nm respectively. Majority of UFPs were Aitken mode and Accumulation mode and the size of most particles concentrated near 100 nm. Average CMD(count medium diameter) was 85.89 nm. During haze fading process, number concentration and particles with size around 100 nm began to reduce and peak size shifted to small size. Nuclear modal particles increased and were more than accumulation mode. Average CMD was 58.64 nm. Meteorological factors such as the visibility and wind were negatively correlated with the particle number concentration. Correlation coefficient R were -0.225 and -0.229. The humidity was correlated with number concentration. Correlation coefficient R was 0.271. The atmosphere was stable in winter and the level temperature had small correlation with number concentration. Therefore, study on distribution of atmospheric ultrafine particles during haze weather had the significance on the formation mechanism and control of haze weather.

Key words: haze weather; ultrafine particles; number concentration; size distribution; meteorological factors

灰霾的气象定义是指悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体, 使空气浑浊, 水平能见度降低到 10 km 以下的一种天气现象。近年来, 随着城市工业化的快速发展以及汽车保有量的持续增高, 我国中东部地区冬半年平均霾日数呈显著的增加趋势^[1], 浙江省各地区灰霾天数也在迅速增加, 尤为突出的是湖州、绍兴、杭州、嘉兴等浙北城市^[2]。超细颗粒是引起心血管疾病的一个重要因素^[3], 有统计显示, 长期 $\text{PM}_{2.5}$ 污染暴露每立方米增加 $10 \mu\text{g}$ 心脑血管引起的死亡风险增加 76%^[4]。2013 年冬季杭州地区频频出现连续几天的灰霾天

气, 杭州市气象台发布多个灰霾橙色预警, 下沙地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高达 $599 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 能见度极低, 给人体健康和生活带来极大危害, 引起人们的广泛关注。

目前, 很多学者对灰霾的研究主要集中在对其化学成分的分析, 光学特性的研究以及来源成因等^[5, 6]。灰霾的产生主要与细粒子有关^[7, 8], 细粒子

收稿日期: 2014-01-06; 修订日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972209); 国家自然科学基金重点项目(11132008); 浙江省自然科学基金项目(Y6090607)

作者简介: 陈秋方(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为室内超细颗粒传输机制, E-mail: qiufang_chen@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunzai@cjlu.edu.cn

污染是影响能见度的主要因素^[9~11],有研究显示能见度和细粒子的污染水平存在一定的非线性相关^[12]. 超细颗粒数浓度季节分布结果显示冬春季超细颗粒数浓度最高^[13]. 为了分析杭州市灰霾天气细颗粒物污染情况,本研究对 2013 年冬季 12 月份灰霾最为严重的几天进行超细颗粒物连续监测,结合气象台发布的能见度等因素分析大气环境与颗粒物粒径分布和数浓度变化特征,对揭示区域灰霾气候的形成机制和控制有积极作用.

1 材料与方法

1.1 采样点和采样时间

采样点位于杭州市下沙经济开发区中国计量学

院仰仪北楼 6 楼,距离地面约 23 m,北面约 200 m 处毗邻交通干道,交通流量较大,该采样点为杭州市城郊,附近主要为教学区和工业区,分布比较集中. 监测时间为杭州冬季 12 月灰霾最严重期间和灰霾消退过程:2013 年 12 月 6~11 日. 采样期间的天气根据杭州气象网站实时发布数据同步记录,天气记录情况如表 1 所示,12 月 6~8 日天气状况均为霾天气,平均温湿度较高,以静风为主,降水极少,空气质量显示重度至严重污染,最低能见度只有 0.8 km; 9~11 日为灰霾消退过程,天气状况由霾天气逐渐好转至晴,空气质量由重度污染转为良和轻度污染,平均温湿度有一定程度下降,风速较高,能见度显著提高.

表 1 采样期间的气象情况

Table 1 Weather condition during sampling period

采样日期 (月-日)	空气质量指数	空气质量状况	平均温度 /℃	平均湿度 /%	平均风速 /m·s ⁻¹	能见度 /km	天气状况
12-06	305	重度污染	10	66	1.4	1.6	霾
12-07	402	严重污染	10	76	0.8	0.9	霾
12-08	391	严重污染	12	81	0.8	0.8	霾
12-09	233	重度污染	8	69	3.1	2.4	霾转阴
12-10	90	良	6	41	1.9	8.1	晴
12-11	126	轻度污染	8	44	2.2	6.1	晴

1.2 采样仪器和方法

采用快速迁移率粒径谱仪(fast mobility particle sizerTM Spectrometer, FMPS)连续在线采样,FMPS 是由美国 TSI 公司生产基于 EAA 原理的细颗粒粒径谱仪,可测量的超细颗粒粒径范围为 5.6~560 nm,粒径分 32 个粒径段,可测浓度范围为 1~10⁷ cm⁻³,采样流量为 10 L·min⁻¹. 每次测量前采用配套过滤装置对 FMPS 进行校准清零,确保数据的准确性,连续 24 h 实时采样,采样时间分辨率为 1 s,即 1 s 每个粒径段获得一个数据,将所有测得的数据按每小时进行平均化处理,连续测量 6 d. 由于测量点在教学楼楼顶,减小地面局部污染源的影响.

2 结果与讨论

2.1 颗粒物粒径谱分布特征

根据颗粒物粒径大小可将其分为核模态(粒径 <20 nm)、爱根核模态(粒径 20~100 nm)和积聚模态(粒径 0.1~1 μm). 图 1 和图 2 为选取杭州 12 月 6~8 日典型灰霾天气和 9~11 日灰霾消退过程的超细颗粒物粒径谱分布和各模态变化图,杭州灰霾天气空气质量污染严重,能见度极低,风速以静风为主,降水少,相对湿度较高,超细颗粒数浓度相对

高于非灰霾天气,颗粒粒径主要集中在 100 nm 附近,夜间数浓度相对较高.

从图 1(a)~1(c)中可以看出,灰霾天气颗粒物呈现明显的对数双峰分布,峰值粒径出现在 15 nm 和 100 nm 附近,粒径在 100 nm 附近的粒子占绝大多数,图 2(a)~2(c)显示灰霾期间爱根核模态和积聚模态颗粒明显大于核模态颗粒,由于灰霾期间湿度较大,核模态颗粒容易吸湿增长生成较大颗粒. 日变化特征为核模态和爱根核模态在 08:00 和 18:00 上下班高峰期变化较大,柴油、汽油发动机排放的颗粒物数浓度主要集中在爱根核模态^[14],表明汽车排放污染源对灰霾天气的形成有一定贡献. 夜晚数浓度较高,变化较剧烈,在 18:00 之后 100 nm 和 15 nm 附近颗粒急剧增加. 新生粒子(核模态)的高低更容易代表本地污染源的强度高低,因此可能是晚上本地污染源排放比较严重. 爱根核模态和积聚模态颗粒的迅速增加可能是由于夜间没有太阳辐射地表温度较低,容易形成逆温层,产生逆温时垂直湍流运动受到抑制,水平静风现象较多,大气比较稳定,对流减弱,颗粒物更容易积累^[15],因此灰霾天气夜间更不适宜外出. 凌晨开始颗粒浓度迅速下降,可能由于汽车尾气排放源和工业污染源排放的减少,地面温度开始回

升,逆温层减弱,有利于颗粒扩散。

灰霾消退过程如图 1(d)~1(f)所示,颗粒物峰值粒径逐渐向小粒径转移,峰值粒径出现在 12 nm 和 60 nm 附近,图 2(d)~2(f)显示积聚模态颗粒迅速减小,日变化保持相对稳定,在夜间由于颗粒物积累其数浓度有所上升,其总体数浓度均小于灰霾期,表明灰霾消退过程对较大粒径颗粒的清除作用较明显。核模态颗粒数浓度呈增加趋势,部分时段核模

态颗粒大于积聚模态,这是由于风速较大时,有利于颗粒扩散,新粒子事件容易发生,随着风速的增加,核模态粒子迅速增加,同时湿度降低,不利于超细颗粒吸湿增长,大颗粒数浓度有所降低,这与 Wu 等^[16]研究结果相一致。核模态和爱根核模态在 08:00 和 18:00 上下班高峰期也体现出明显的交通源峰值,表明汽车排放污染对超细颗粒数浓度的影响较大。

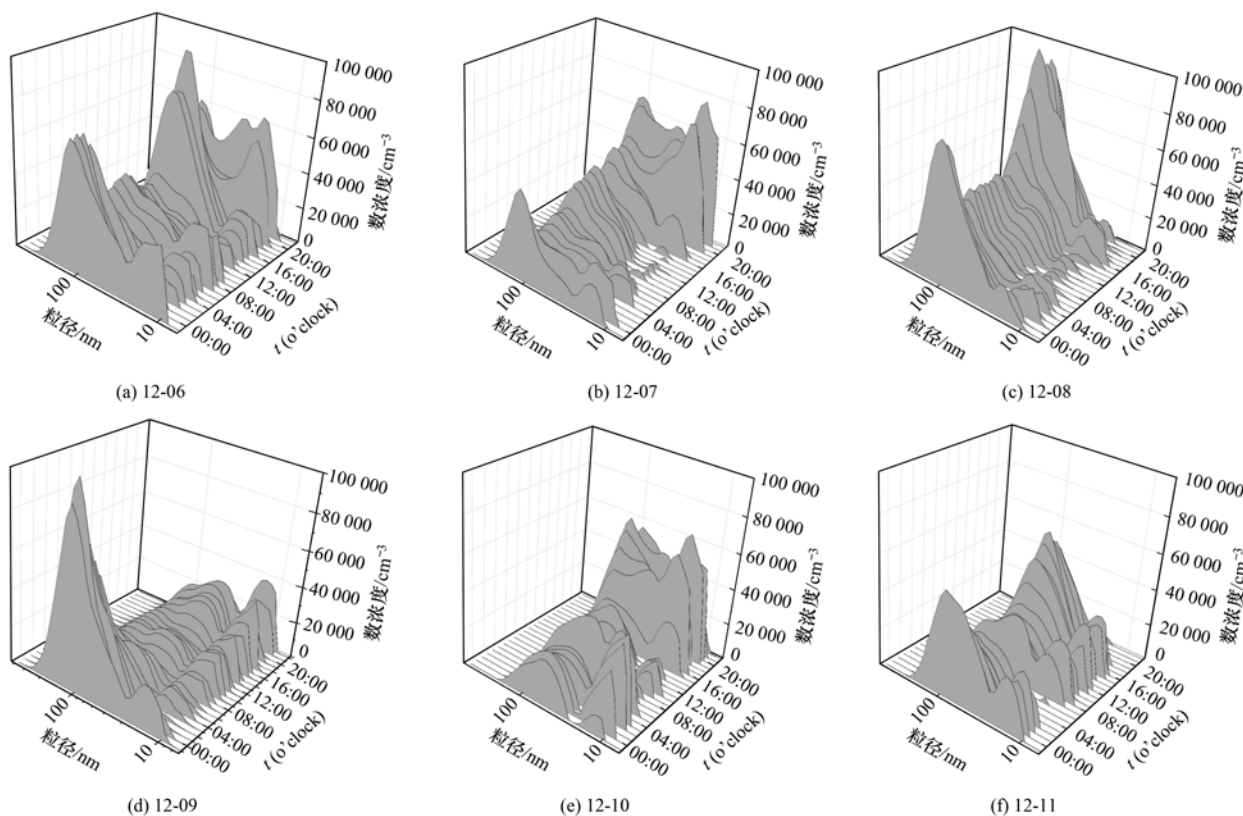


图 1 杭州 12 月 6~8 日典型灰霾天气和 9~11 日灰霾消退过程的超细颗粒物粒径谱分布

Fig. 1 Ultrafine particle size distribution in haze weather during December 6 to 8 and haze fading process during December 9 to 11 in Hangzhou

2.2 颗粒物浓度分布及气象因子的影响

颗粒物浓度受气象环境的影响很大,戴永立等^[17]研究北京、上海、广州等地的气象因子对灰霾的影响,结果表明,PM₁₀和相对湿度是影响能见度下降或霾天气频率的关键因子。图 3 为杭州灰霾期间 12 月 6~8 日典型灰霾天气和 9~11 日灰霾消退过程的超细颗粒物数浓度、质量浓度分布和气象环境变化图,假设所有颗粒为球形,密度为 1 g·cm⁻³,由颗粒数浓度可转换为质量浓度。从图中可以看出,夜间颗粒物数浓度和质量浓度普遍较高,0 点左右达到最高,灰霾期间数浓度最高达 $8.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$,质量浓度高达 $73.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

在灰霾期间颗粒物总数浓度和质量浓度相对较高,大气污染加剧很可能是能见度恶化、霾频发的

一个重要原因^[18]。颗粒污染源排放是内因,气象环境是外因,当源排放超过环境的扩散条件的容量时出现灰霾天气^[19]。冬季北方能源燃烧消耗产生的颗粒通过大气传输,加上本地汽车和工业排放的污染颗粒在静稳天气下容易累积,杭州市主城区低空大气温度层结全年以弱稳定为主,冬半年逆温层发生频率较大^[20],灰霾之前几天降雨少,平均风速较低,使近地层大气更加稳定,较高湿度会使细颗粒吸湿增长,加剧雾霾发展,能见度小于 1 000 m。杭州背山而居,扩散条件弱于平原地区,其地形特征也会对霾的形成造成一定影响^[21]。

12 月 9 日为灰霾消退的过程,颗粒物浓度明显降低,这是由于一股冷空气南下,风速较高,对流活动加强,湿度降低,大气中的污染颗粒在湍流混合和水

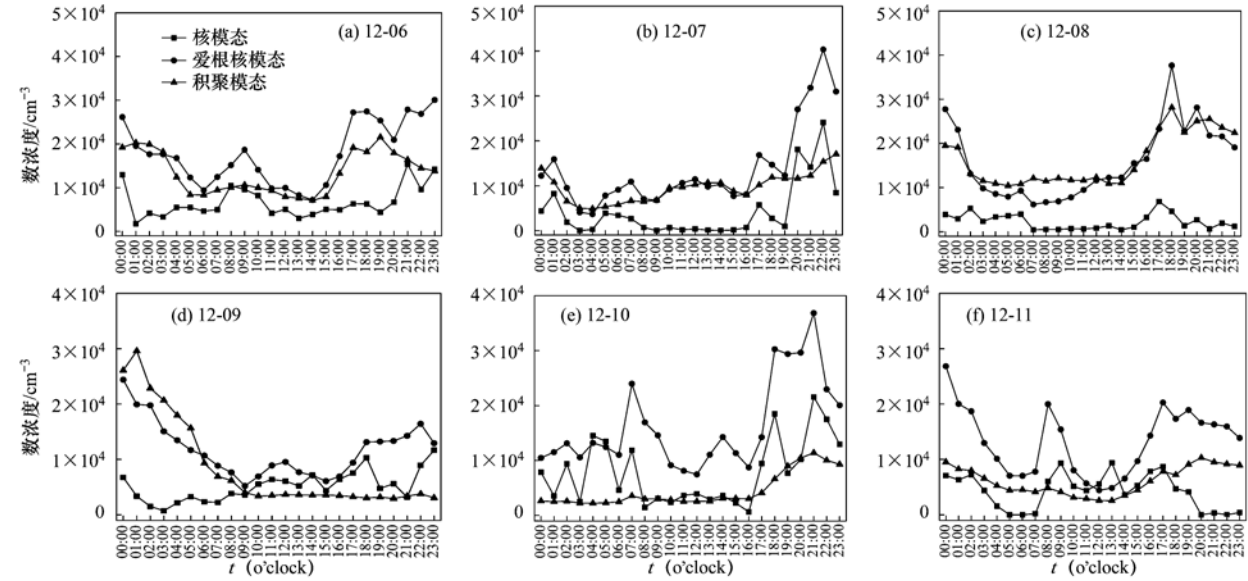


图2 杭州12月6~8日典型灰霾天气和9~11日灰霾消退过程超细颗粒物各模态变化

Fig. 2 Particle mode changes in haze weather during December 6 to 8 and haze fading process during December 9 to 11

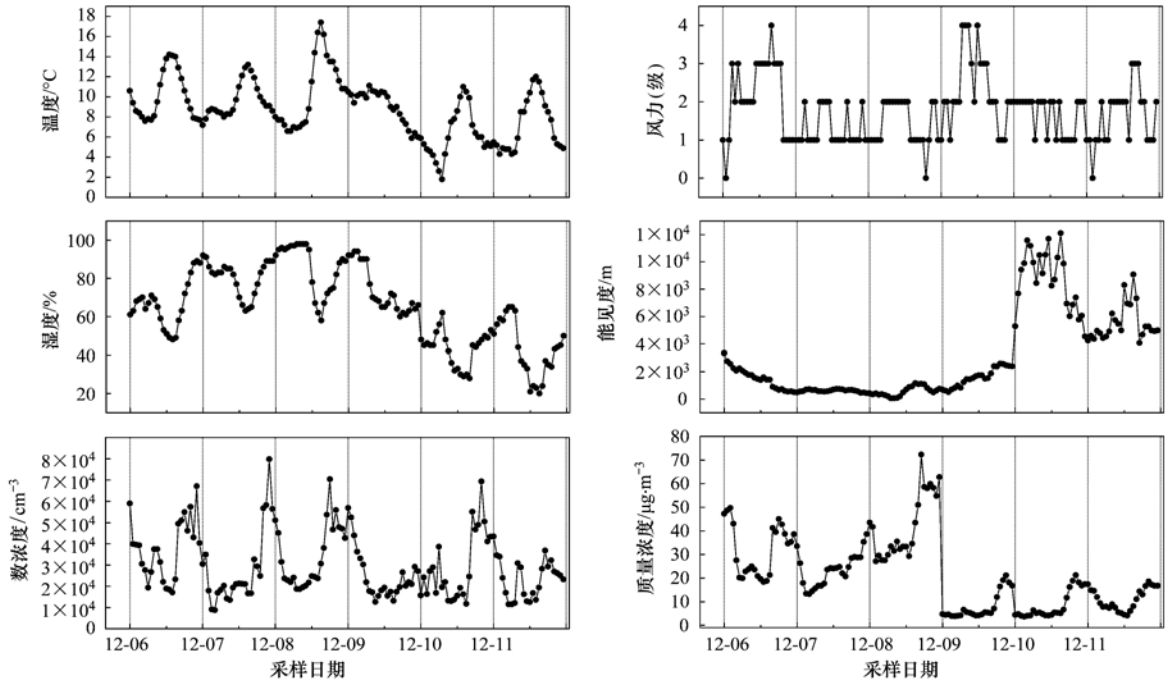


图3 灰霾期间和灰霾消退过程数浓度及气象环境变化

Fig. 3 Number concentration and meteorological environment changes in haze weather and haze fading process

平输送作用下容易扩散. 11 日夜间颗粒物数浓度较高,质量浓度却不高,可能是新生成细粒子较多.

对12月6~8日灰霾期间和9~11日灰霾消退期每小时的数据进行平均,与对应杭州气象站发布的气象因子进行 Pearson 相关性分析,如表2所示,能见度、相对湿度和风力与数浓度在0.05水平上相关性比较显著.能见度和风力与数浓度主要呈负相关,相关系数 R 分别为 -0.225 和 -0.229 ,相对

湿度与数浓度正相关,相关系数 R 为 0.271 . 几种气象因子与颗粒浓度的相关性与史宇等^[22]研究结果相近. 静小风、相对高湿度容易使灰霾产生^[23],吸湿后的气溶胶其消光系数会增加,使得能见度明显恶化.能见度与粒子的散射、吸收能力和气体分子的散射、吸收能力有关,但主要与大气粒子的散射能力关系最密切^[24].冬季温度与数浓度的相关性较弱.

表 2 颗粒物数浓度与气象因子的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis between particle number concentration and meteorological factors					
时间	系数	能见度	相对湿度	风力	温度
12 月 6 ~ 11 日	相关系数 r	-0.225 *	0.271 *	-0.229 *	0.062
	显著性 Sig.	0.006	0.001	0.005	0.458

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关

2.3 总数浓度和 CMD 变化规律

表 3 对杭州冬季灰霾期及灰霾消退期颗粒总数浓度和数量中位径 CMD (count medium diameter) 进行了统计, CMD 的定义为大于此直径和小于此直径的颗粒数是颗粒总数的一半. 灰霾期颗粒物平均总数浓度明显比灰霾消退期大, 平均总数浓度为 $3.31 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 为灰霾消退期的 1.3 倍, 最高数浓度达 $8.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$. 灰霾期数浓度并不总是比非灰霾期大, 最小数浓度只有

$0.88 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$. 灰霾期 CMD 变化范围在 33.5 ~ 123.3 nm, 变化范围较大, 这与排放污染源的种类型、气候环境的综合作用以及颗粒物的成核凝并等反应有关, 平均 CMD 达 85.89 nm, 表明灰霾期空气中聚集的颗粒主要集中在较大粒径处, 灰霾的形成主要与较大粒径颗粒数浓度有关, 灰霾消退期总数浓度减小, CMD 减小为 58.64 nm, 大粒径颗粒减少, 表明灰霾天气的消退过程主要表现在较大粒径颗粒的减少.

表 3 数浓度和 CMD 统计

Table 3 Statistics of number concentration and CMD								
采样期间	总数浓度 $\times 10^4/\text{cm}^{-3}$				CMD/nm			
	平均值	偏差	最小值	最大值	平均值	偏差	最小值	最大值
灰霾期	3. 31	1. 60	0. 88	8. 00	85. 89	20. 86	33. 50	123. 30
灰霾消退期	2. 52	1. 18	1. 27	5. 69	58. 64	21. 80	17. 60	109. 70

目前, 我国对超细颗粒的测量主要集中在质量浓度的测量, 只有少部分地区研究数浓度, 表 4 对部分地区冬季颗粒数浓度进行了比较, 杭州市 2013 年冬季灰霾天气颗粒物数浓度范围为 $8.80 \times 10^3 \sim$

$8.00 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 相对杭州 2011 和 2012 年数浓度较高, 表明杭州灰霾天气的频发与超细数浓度增高有一定关系. 杭州灰霾期间相对其他地区冬季颗粒数浓度较高, 污染较严重.

表 4 部分地区颗粒数浓度比较

Table 4 Comparison of number concentration between selected cities				
地区	天气	监测时间	颗粒物数浓度/ cm^{-3}	文献
成都	浓雾天气	2005-12-28 ~ 29	$(2.7 \sim 3.1) \times 10^4$	[17]
南京	雾霾天气	2007-12-15 ~ 29	2.26×10^4	[25]
南京	灰霾天气	2009-12-24	6.28×10^4	[26]
北京	冬季	2005-02-18 ~ 27, 03-01 ~ 10	$(2.50 \sim 7.51) \times 10^4$	[27]
卡西诺(意大利)	冬季	2010-12 ~ 2011-12	$(2.8 \sim 4.7) \times 10^4$	[28]
地中海东部	冬季	2010-01-12 ~ 02-12	$(0.12 \sim 6.40) \times 10^4$	[29]
杭州	冬季	2011-03 ~ 2012-02	$(2.04 \sim 3.56) \times 10^4$	[30]
杭州	冬季灰霾天气	2013-12-06 ~ 11	$(0.88 \sim 8.00) \times 10^4$	本研究

3 结论

(1) 灰霾期间颗粒物粒径谱呈对数双峰分布, 峰值粒径分别为 15 nm 和 100 nm, 颗粒大部分集中在较大粒径附近, 平均 CMD 为 85.89 nm, 粒子以爱根核模态和积聚模态为主. 而在灰霾消退过程, 颗粒物数浓度降低, 峰值粒径向小粒径演变, 平均 CMD 为 58.64 nm, 爱根核模态和积聚模态粒子迅速减少, 表明灰霾消退过程较大粒径颗粒的清除作用

较明显, 核模态粒子增多, 大于积聚模态, 说明新一轮污染源产生新粒子较多.

(2) 杭州市连续几天灰霾天气及灰霾消退过程颗粒物日变化特征为夜晚数浓度和质量浓度较高, 凌晨开始数浓度逐渐降低, 08:00 和 18:00 上下班高峰期出现一个明显的交通源峰值, 表明汽车排放对大气污染影响较严重. 灰霾期间, 颗粒物数浓度最高达到 $8.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$.

(3) 灰霾天气的形成主要与污染源排放、气候

环境和地形特征的综合复杂作用有关,结合气候环境的研究,气象因子中能见度和风力与数浓度主要呈负相关,相关系数 R 最高达 -0.225 和 -0.229 ,相对湿度与数浓度正相关,相关系数 R 为 0.271 ,冬季水平温度与数浓度的相关性较小。

参考文献:

- [1] 宋连春,高荣,李莹,等. 1961-2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析[J]. 气候变化研究进展, 2013, **9**(5): 313-318.
- [2] 牛彧文,顾骏强,浦静姣,等. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化[J]. 热带气象学报, 2010, **26**(6): 807-812.
- [3] Pope C A, Burnett R T, Thurston G D, *et al.* Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease [J]. Clinical Investigation and Reports, 2004, **109**(1): 71-77.
- [4] Miller K A, Siscovick D S, Sheppard L, *et al.* Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women [J]. The New England Journal of Medicine, 2007, **356**(5): 447-458.
- [5] 于兴娜,李新妹,登增然登,等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1057-1062.
- [6] 魏欣,毕晓辉,董海燕,等. 天津市夏季灰霾与非灰霾天气下颗粒物污染特征与来源解析[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(11): 1193-1200.
- [7] 吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报, 2007, **23**(1): 1-6.
- [8] 侯美伶,王杨君. 灰霾期间气溶胶的污染特征[J]. 环境监测管理与技术, 2012, **24**(2): 6-11.
- [9] Wu D, Tie X X, Li C C, *et al.* An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(35): 6568-6577.
- [10] 王玮,潘志,刘红杰,等. 交通来源颗粒物粒径谱分布及其与能见度关系[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(4): 17-22.
- [11] Cheng Z, Wang S X, Jiang J K, *et al.* Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2013, **182**: 101-110.
- [12] 宋宇,唐孝炎,方晨,等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(4): 468-471.
- [13] Cheng Z, Jiang J K, Fajardo O, *et al.* Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011) [J]. Atmospheric Environment, 2013, **65**: 186-194.
- [14] Harris S J, Maricq M M. Signature size distributions for diesel and gasoline engine exhaust particulate matter [J]. Journal of Aerosol Science, 2001, **32**(6): 749-764.
- [15] 韩才义,许模,李海华,等. 成都市城东区浓雾时大气颗粒物的总数密度及质量变化特征[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, **19**(4): 39-42.
- [16] Wu Z J, Hu M, Lin P, *et al.* Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(34): 7967-7980.
- [17] 戴永立,陶俊,林泽健,等. 2006~2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2925-2932.
- [18] 范新强,孙照渤. 1953-2008 年厦门地区的灰霾天气特征[J]. 大气科学学报, 2009, **32**(5): 604-609.
- [19] 吴兑. 灰霾天气的形成与演化[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(3): 157-161.
- [20] 杜荣光,齐冰,郭惠惠,等. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报, 2011, **27**(4): 49-53.
- [21] 齐冰,刘寿东,杜荣光,等. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J]. 气象, 2012, **38**(10): 1225-1231.
- [22] 史宇,张建辉,罗海江,等. 北京市 2012-2013 年秋冬季大气颗粒物污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(9): 1571-1577.
- [23] 童尧青,银燕,钱凌,等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [24] 吴兑,刘放汉,梁延刚,等. 粤港细粒子($PM_{2.5}$)污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- [25] 杨军,牛忠清,石春娥,等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1425-1431.
- [26] 尚倩,李子华,杨军,等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- [27] Shi Z B, He K B, Yu X C, *et al.* Diurnal variation of number concentration and size distribution of ultrafine particles in the urban atmosphere of Beijing in winter [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(8): 933-938.
- [28] Buonanno G, Fuoco F C, Morawska L, *et al.* Airborne particle concentrations at schools measured at different spatial scales [J]. Atmospheric Environment, 2013, **67**: 38-45.
- [29] Kopanakis I, Chatoutsidou S E, Torseth K, *et al.* Particle number size distribution in the eastern Mediterranean: Formation and growth rates of ultrafine airborne atmospheric particles [J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 790-802.
- [30] 谢小芳,孙在,付志民,等. 杭州市大气超细颗粒数浓度谱季节性特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 434-440.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 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