

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析

沈利娟^{1,2}, 王红磊^{3*}, 李莉², 吕升², 袁婧², 张孝寒², 章国骏², 王翡²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 2. 嘉兴市环境保护监测站, 嘉兴 314000; 3. 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: 2015 年 5 月 17~20 日嘉兴市发生了一次持续性雾霾过程, 本研究根据 5 月 17~22 日污染气体(O_3 、 SO_2 、 NO_2 和 CO)、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、10 nm~10 μm 气溶胶数浓度、气象要素及边界层探空数据, 分析了这次过程的成因及其不同污染物的变化特征。结果表明, 副高位置北抬、均压场结构、地面静小风和边界层中逆温层为这次雾霾过程的发生和维持提供了水汽、动力和热力条件。这次雾霾过程包含 1 次降雨和 2 次雾过程(雨雾和辐射-平流雾)。雾霾过程中 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度较高, SO_2 和 O_3 的浓度较低。强降雨对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 SO_2 清除作用较大, 弱降雨会加重污染过程。雨雾的发展过程中, PM 的浓度持续积聚; 辐射-平流雾过程中, PM 浓度先快速下降然后再增加。不同过程中气溶胶数浓度谱均为单峰型分布, 但是谱型差异较大, 干净天、降雨、雾霾过程、雨雾和辐射-平流雾过程中气溶胶数浓度谱峰值分别位于 20~30 nm、100 nm、30~60 nm、120 nm 和 90 nm。表面积浓度谱在干净天、降雨、雾霾和雨雾过程中均为三峰型分布, 辐射-平流雾为四峰型分布。

关键词: 气溶胶; 雾霾; $PM_{2.5}$; 粒径分布; 污染气体

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2871-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.007

Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaxing City

SHEN Li-juan^{1,2}, WANG Hong-lei^{3*}, LI Li², LÜ Sheng², YUAN Jing², ZHANG Xiao-han², ZHANG Guo-jun², WANG Fei²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control (AEMPC), School of Environmental Sciences and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiaxing Environmental Monitoring Station, Jiaxing 314000, China; 3. 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: A continuous fog and haze episode occurred on 17-20 May, 2015 in Jiaxing. Trace gases (O_3 , CO , SO_2 and NO_2), PM_{10} , $PM_{2.5}$, aerosol number concentration in the range of 10 nm-10 μm , meteorological elements, and radiosonde data from the 17st to the 22st of May were used to analyze the formation mechanism and pollutant characteristics during this episode. The results showed that subtropical high pressure lifted northward, a field pressure was dominant over Jiaxing leading to a weak ground wind speed, and a strong inversion layer occurred, this supplied moisture, power and thermal conditions for the occurrence and maintenance of the event. The episode included one precipitation process and two fog processes (rainy fog and radiation-advection fog). During the fog and haze process, the concentrations of NO_2 , CO , PM_{10} and $PM_{2.5}$ were high and the levels of SO_2 and O_3 were low. Strong precipitation had greater scavenge effects on PM_{10} , $PM_{2.5}$ and SO_2 , while weak precipitation aggravated the pollution degree. The PM concentrations increased continuously during the rainy fog process, while it decreased firstly and then increased during the radiation-advection fog process. The spectral distributions of aerosol number concentration were unimodal and differed significantly under different types of weather conditions. The peaks of number concentration were located at 20-30 nm, 100 nm, 30-60 nm, 120 nm, 90 nm under clean, precipitation, fog and haze, rainy fog, radiation-advection fog conditions, respectively. The spectra of surface area concentration were trimodal under clean, precipitation, fog and haze, rainy fog conditions, and had four peaks under radiation-advection fog condition.

Key words: aerosol; fog and haze; $PM_{2.5}$; size distribution; trace gases

收稿日期: 2016-01-26; 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室开放基金项目(KHK1408); 嘉兴市大气细颗粒物($PM_{2.5}$)来源解析及控制技术项目(2014AY21012); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05020206); 国家自然科学基金项目(41275143, 41305135); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 沈利娟(1987~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: shenlijuan_428@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hongleiwang_2009@163.com

近年来随着城市化和经济的快速发展,中国城市地区气溶胶浓度迅速增加,导致雾霾事件频发,对能见度和人体健康造成危害^[1~3]. 长江三角洲地区作为中国经济增长最快的地区之一,雾霾污染尤为严重,近30年来,长江三角洲地区的雾霾日数整体呈增长趋势^[3~5]. Gao等^[6]研究表明1981~2005年长三角地区能见度每10年降低2.4 km,远高于全国平均水平($-2.1\text{ km}/10\text{ a}$)^[7]. 雾和霾都可以导致能见度降低,却有显著差异^[8~11]. 雾一般指近地面空气中的水汽凝结成大量悬浮在空气中的微小水滴或者冰晶,导致水平能见度低于1 km的天气现象,多为乳白色,相对湿度(RH)较高,多接近100%,按照水平能见度来区分又分为雾($<1\ 000\text{ m}$)、大雾($<500\text{ m}$)、浓雾($<200\text{ m}$)以及强浓雾($<50\text{ m}$)^[8,10~12]. 霾为大量极细微的气溶胶颗粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10 km的空气混浊现象,可使远处光亮物体微带黄、红色,使黑暗物体微带蓝色,相对湿度一般小于80%^[9~11,13]. 但是当相对湿度大于80%时,很难将二者进行明确的区分.

目前,我国已分别针对雾和霾的时空分布、生成机制和影响因素等方面进行了大量的研究^[12~24]. 李子华等^[14,15]分析发现雾滴谱暴发性拓宽都是在降温情况下发生的,湍流混合引起的热量、动量及水汽的垂直输送对辐射雾暴发性发展具有重要作用. 刘小宁等^[17]和王丽萍等^[18]分析认为我国大部分地区大雾日数呈减少趋势,大多数雾区秋冬季雾日最多,春夏季雾日较少. Lu等^[19]、刘端阳等^[25]和李一等^[26]则对南京地区冬季浓雾的化学组成、微物理结构以及形成原因进行了详细的分析. Yue等^[27]分析了我国南海海雾过程中雾水的化学组成. 国内对于霾天气的研究相对稍晚,吴兑等^[28]研究表明我国20世纪80年代以后霾日增加明显,而且与经济活动密切相关. Wang等^[20]研究了长三角地区一次区域霾过程的形成机制及气溶胶的微物理特征. Sun等^[21]研究了北京夏季霾过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直分布和边界层结构变化特征. Wang等^[22]认为稳定的气象条件和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的增加是造成2013年1月中国东部地区霾过程的主要原因. Du等^[29]和江琪等^[30]发现灰霾期间二次无机离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)和有机物的浓度显著增加.

以往的研究多针对雾过程或者霾过程,但是随着大气复合污染的加剧,越来越难以将雾和霾明确地区分开来. 目前中国城市地区出现的低能见度事

件往往兼具了雾和霾的双重特性,相较于单纯的雾过程或者霾过程,其形成机制更加复杂,影响范围更广,持续时间更长,因此危害更大. 目前,已经针对雾-霾过程开展了许多研究,如Quan等^[31]分析了华北平原雾霾的形成原因, Sun等^[32]分析了北京雾-霾过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的化学组成变化,于兴娜等^[33]、赵秀娟等^[34]和颜鹏等^[35]分析了北京地区雾-霾期间气溶胶的光学特征,刘端阳等^[36,37]分析了淮河下游一次连续雾-霾过程的形成原因、转化机制以及污染物的变化特征. 目前针对长三角沿海地区雾-霾过程的研究还相对较少,嘉兴位于长江三角洲杭嘉湖平原的腹地,市区距离杭州湾仅32 km,是长三角地区典型的沿海城市. 2015年5月17~20日长三角地区发生了一次持续性雾-霾事件,本研究根据嘉兴市5月17~22日污染气体(O_3 、 SO_2 、 NO_2 和CO)、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $10\text{ nm} \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 气溶胶数浓度、气象要素及杭州市边界层探空数据,分析了这次过程发生的气象条件、不同阶段污染物的变化特征和气溶胶粒径分布,以期为更好地理解雾-霾天气的污染物变化特性及其形成的机制提供依据.

1 材料与方法

1.1 观测点与观测时间

观测点位为嘉兴市残疾人联合会(残联)监测站点(北纬 $30^\circ45'$,东经 $120^\circ47'$),是最早建设的3个国控点之一. 站点位于嘉兴市南湖区残联大楼楼顶实验室,周围以居民区为主,监测点北侧260 m是南溪西路,东侧100 m是双溪路,西侧760 m是中环东路,南侧630 m是凌公塘路,站点周围没有明显的污染排放源. 本次观测时间为2015年5月17~23日.

1.2 观测仪器

观测仪器使用美国MSP公司生产的宽范围颗粒粒径谱仪(WPS),测量直径在 $0.01 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子数浓度. 仪器主要由静电分级器(DMA)、凝结核计数器(CPC)和激光颗粒物分光计(LPS)3个部分组成,前两者的测量范围为 $0.01 \sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$,后者为 $0.35 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$. 由于测量原理的不同,因此在其交叉测量范围内($0.35 \sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$)的观测值也有所差异. 观测中使用的时间分辨率为5 min,即5 min内仪器扫描 $0.01 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 粒径范围并测量出气溶胶粒子的个数. 根据观测的实施情况,由于WPS适应的环境湿度为 $0 \sim 90\%$ 、非冷凝,经数据处理后剔除了部分无效数据.

污染气体的观测采用美国热电环境设备公司的

EMS 系统(包括 42i 化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪, 49i 紫外发光 O_3 分析仪, 43i 脉冲荧光 SO_2 分析仪和 48i 气体滤光相关法 CO 分析仪)。颗粒物采用美国热电公司生产的 5030 型 SHARP 监测仪。仪器原理介绍参见文献[38]。监测仪器定期进行标定校准, 其中 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪、 SO_2 分析仪和 CO 分析仪每周进行一次校零和校标, 每季度进行一次多点校准, O_3 分析仪每半年校标一次。颗粒物监测仪定期更换纸带, 清洗外置采样头。数据审核时剔除异常点, 所有数据均符合国家环境保护局的数据质量控制标准。

1.3 气象要素和垂直探空数据

气象数据使用嘉兴市常规气象站观测数据(北纬 $30^\circ 73'$, 东经 $120^\circ 77'$), 气象参数分别为温度、相对湿度、降水、能见度、风速和风向, 时间分辨率为 1 h。边界层探空数据取自浙江省杭州市高空站(北纬 $30^\circ 23'$, 东经 $120^\circ 16'$) 每天 2 次(08:00 和 20:00) 的探空资料。

2 结果与讨论

2.1 雾霾过程天气形势和边界层垂直结构分析

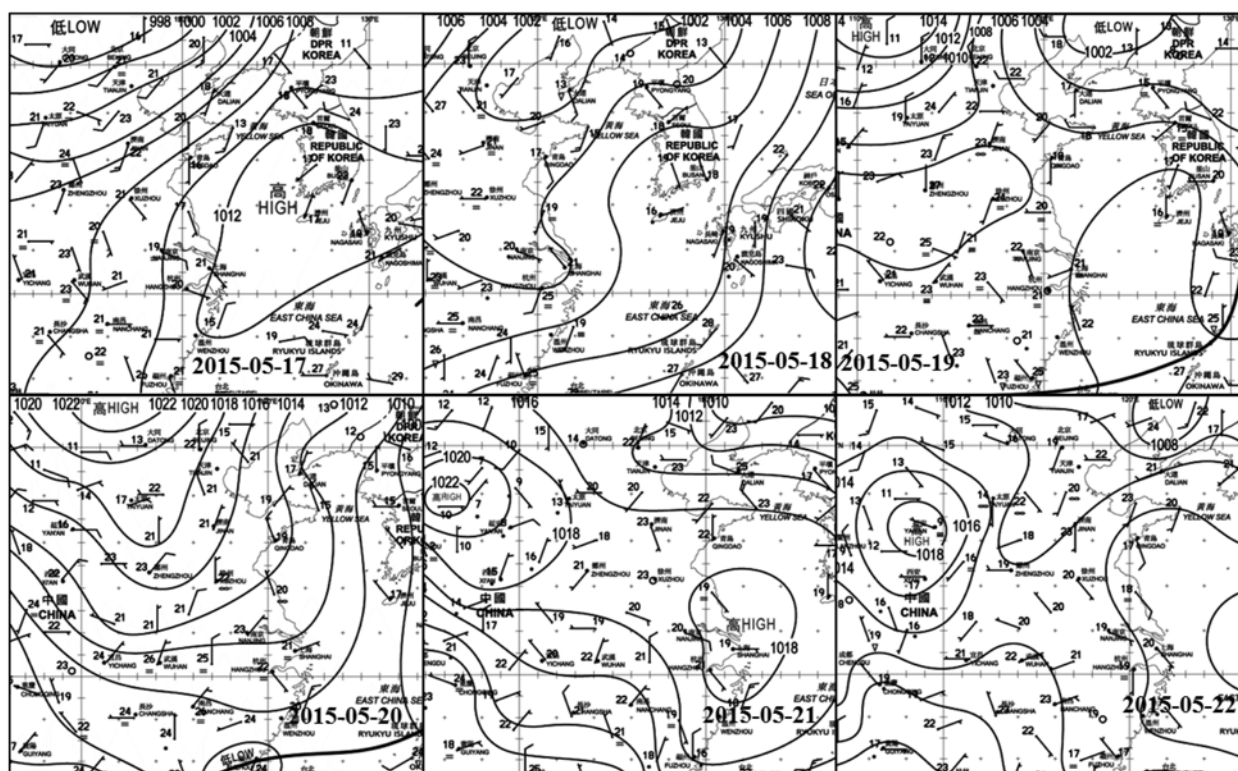
2.1.1 天气形势分析

2015 年 5 月 18~20 日长三角地区发生了一次

典型的低能见度雾霾事件, 嘉兴、杭州、上海和南京等城市分别发布了大雾黄色或橙色预警, 嘉兴市最低能见度仅为 130 m, 此次雾霾天气的产生、演变过程与复杂天气系统的变化密切相关。由香港天文台(<http://gb.weather.gov.hk>) 公布的地面天气图(图 1) 可知, 2015 年 5 月 17 日长三角地区地面受高压后部控制, 18 日东北冷低压南移, 长三角地区为高低压交汇区。由 500 hPa 平均位势高度场(中央气象台: <http://www.nmc.cn>) 可知 5 月中旬副高强度增强, 位置北抬, 其外围西南暖湿气流与槽后冷空气在我国江南华南一带交汇。受高空槽和低层切变系统影响, 5 月 18 日长三角地区出现强降水过程, 降水结束后出现大雾天气。由图 1 可知 5 月 19 日长三角上空有一低压槽过境, 等压线稀疏, 地面处于均压场控制, 为大雾的持续提供了有利的气象条件。5 月 20 日东北冷高压南移, 长三角位于高压前部, 低压槽的后部。因此在 20 日凌晨又出现了大雾天气。由图 1 可知 5 月 21 日长三角位于高压中心, 5 月 22 日长三角受副高外围控制, 天气晴朗, 雾霾过程结束。

2.1.2 雾霾过程分析

根据能见度和 RH 将观测期间分为干净天(能见度 > 10 km), 雾(能见度 < 1 km, $\text{RH} > 90\%$), 霾



来源: <http://gb.weather.gov.hk>

图 1 5 月 17~22 日地面天气

Fig. 1 Ground weather condition during 17-20 May, 2015

(能见度 < 10 km, $RH < 80\%$) 和雾霾过程 (1 km $<$ 能见度 < 10 km, $80\% < RH < 90\%$)^[8~10,34,36,37]. 由图 2 可知 5 月 17 日风速较大, 最大风速可达 4.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均为 3.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 有利于污染物扩散. 风向

比较稳定, 以偏东风为主, 风来自海洋, 气团比较清洁. 温度较高, 最高温度可达 23.6°C ; 湿度较低, 平均为 73.9% , 不利于雾霾的形成. 因此能见度较高, 均在 10.0 km 以上, 平均能见度为 13.0 km.

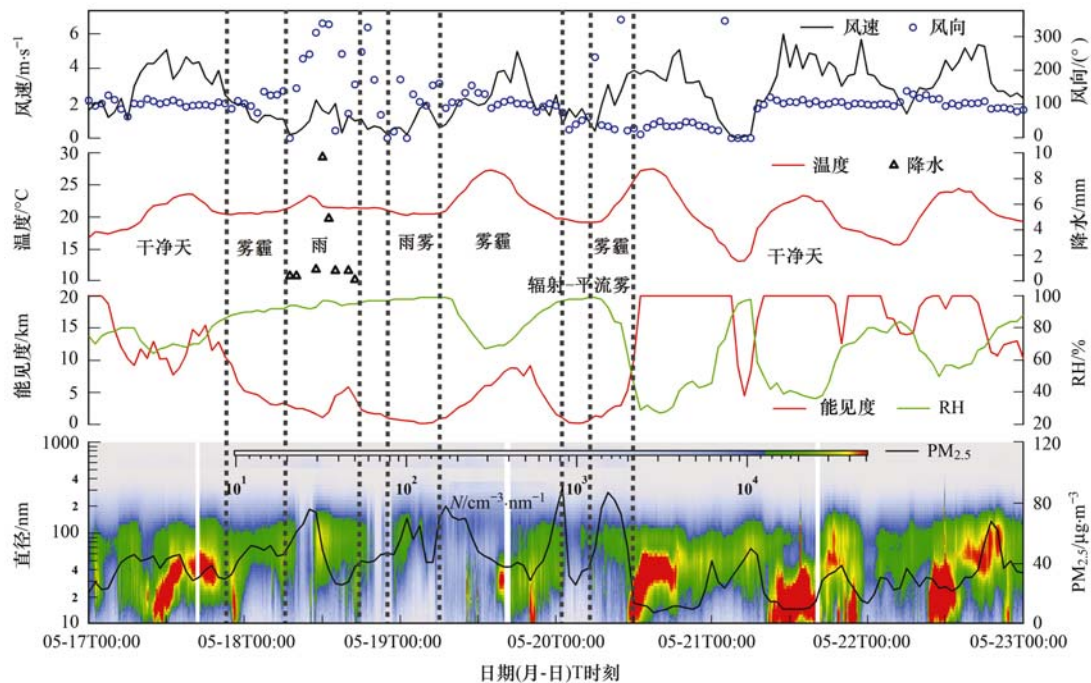


图 2 气溶胶粒径、 $\text{PM}_{2.5}$ 和气象要素的时间序列变化

Fig. 2 Time series of aerosol number concentrations, $\text{PM}_{2.5}$ and meteorological elements

5 月 17 日 21:00 风速开始降低, 有利于颗粒物的积聚, $\text{PM}_{2.5}$ 在 5 月 18 日 01:00 达到 52.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是 5 月 17 日 21:00 的 1.7 倍. 同时湿度增加, 5 月 18 日 00:00 达到 90% , 此后一直维持在 90% 以上. 此外, 期间温度略有下降. 高湿低温的环境, 有利于雾霾天气的形成和维持. 因此, 能见度迅速下降, 3 h 内下降了 5.4 km, 雾霾过程开始. 18 日 04:00 能见度降至 3.1 km, 此后能见度一直维持 3.0 km 左右.

5 月 18 日 07:00 开始降雨, 但是直到 11:00, 降雨量都在 1 mm 以下, 期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度持续增大, 能见度降低, 11:00 能见度为 1.6 km. 12:00 ~ 13:00 雨量变大, 12:00 雨量高达 9.7 mm, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 1 h 内下降了 25.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 但是能见度仅为 1.1 km, 主要是因为强降雨过程中雨滴造成能见度降低. 14:00 开始降雨逐渐减弱, 到 17:00 降雨基本结束, 随着降雨减弱, 能见度开始好转. 18:00 降雨结束后 RH 较高, 均在 95% 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度开始增加, 雾霾过程再次发生, 能见度持续降低. 22:00 能见度降为 980 m, 雾霾过程转化为雾过程. 5 月 19

日 03:00 能见度达到最低值 130 m, 标志此次雾过程已经发展成熟. 此后能见度开始逐渐好转, 07:00 能见度达到 1020 m, 雾过程开始消散.

此后随着太阳辐射的加强, 温度开始升高, RH 开始快速降低, $\text{PM}_{2.5}$ 也开始降低, 能见度逐步好转. 5 月 19 日 20:00 能见度达到最大值 9.2 km 后又开始快速下降, RH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 也快速升高, 5 月 20 日 01:00 能见度再次降到 1 km 以下, 雾过程再次出现. 5 月 20 日 03:00 能见度降至 171 m, 此次雾过程发展成熟; 之后能见度开始好转, 06:00 能见度达到 1.3 km, 此次雾过程开始消散. 此后由于太阳辐射的作用, 边界层内湍流活动加强, 风速变大, RH 降低. 5 月 20 日 11:00 风速为 3.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度为 24.2°C , RH 降为 64% , 能见度为 5.3 km; 12:00 风速为 3.9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度为 25.8°C , RH 为 45% , 能见度为 10.2 km, 雾霾过程结束. 此后风速多维持在 3.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 能见度较高, 雾霾过程彻底结束. 此外, 由图 2 可发现 5 月 21 日 04:00 ~ 06:00 出现了能见度突变的现象, 期间风速较小, 风向由北风转变为偏东风, RH 较高, 这主要是由于长三角上空天气系统

转换造成.

由上文分析可知,5月17日22:00~5月20日11:00嘉兴市出现了一次持续性雾霾过程,该过程中包含了1次降水过程和2次雾过程.两次雾过程中均可观测到明显的生成、发展、成熟和减弱的过程.但是两次雾过程的形成原因不同,5月18日22:00~5月19日06:00是一次典型的雨雾过程,5月20日01:00~05:00是一次典型的辐射-平流雾过程.

2.1.3 边界层垂直结构分析

由图3可发现5月17日08:00在近地面100~800 m存在一弱逆温层,近地层的风速较小,逆温层内风速较大,以偏南风为主.3.0 km高度内RH和比湿较高,RH随高度的变化与温度相反,比湿随高度的变化较小.5月17日20:00和18日08:00近地层1.0 km内温度差异较小,边界层内风速较大,且以西北风为主,5.0 km内比湿随高度的变化较小,近地层RH较高,不利于污染物扩散.

5月18日20:00随着降水过程结束,天气放晴,此时1.0~1.5 km高度出现逆温层,3.0 km内RH和比湿的垂直分布变化较小,空气湿度较大.此外,近地面的风速垂直变化较小,因此湍流活动较弱,有利于地面雾霾过程的形成.5月19日08:00温度随高度递减,RH随高度先缓慢增加然后快速降低,说明雾层随着湍流过程的加强开始消散抬升.

由图3可发现5月19日20:00在1.0~1.5 km

有一个微弱的逆温层结,3.0 km以内温度在4.4℃以上.150 m以下RH随高度升高而降低,但是在150~800 m RH随高度迅速升高,800~3 000 m高度RH变化较小,均在92%以上.长三角上空低压槽过境,带来大量水汽,夜间地面辐射冷却使得近地层水汽达到饱和,有利于雾霾过程的形成.5月20日08:00和20:00探空曲线比较类似,在800~1 500 m高度存在一弱的逆温层,RH和比湿在3.0 km以下均维持在较高的浓度,风速较小,以偏西北风为主,雾霾过程开始消散.由图2中5月21日08:00~5月22日20:00的RH和比湿垂直结构可发现,边界层内水汽含量迅速减少,边界层内逆温层结较弱,雾霾过程彻底结束.

2.2 雾霾过程中污染气体和PM的变化特征

由图4可发现在观测期间SO₂的浓度较低,尤其是在雾霾过程中,由表1可知在两次雾过程中SO₂的浓度分别为7.8 μg·m⁻³和10.2 μg·m⁻³,SO₂易溶于水,在雾过程中空气中水汽较多,因此雾过程对SO₂的清除作用较大.雾霾过程中NO₂和CO的浓度较高,是因为雾霾过程天气形势比较稳定,有利于污染物积聚.雾霾天O₃的浓度较低,是因为雾霾天太阳辐射较低,光化学反应较弱造成.雾霾过程中PM的浓度相对较高,由表1可知在雾霾过程中PM₁₀的浓度多在70.0 μg·m⁻³以上,是干净天的1.2~1.8倍;PM_{2.5}的浓度多在44.0 μg·m⁻³以上,是干净天的1.2~2.1倍.

表1 不同过程中污染气体和PM平均值

Table 1 Mean concentration of trace gases and PM under different types of weather conditions						
项目	SO ₂ /μg·m ⁻³	NO ₂ /μg·m ⁻³	CO/mg·m ⁻³	O ₃ /μg·m ⁻³	PM ₁₀ /μg·m ⁻³	PM _{2.5} /μg·m ⁻³
雨前干净	14.3	34.6	0.5	124.0	60.0	36.0
雾霾	13.1	38.6	0.8	69.2	66.5	45.3
雨	18.5	73.7	1.2	15.9	73.8	48.5
雨雾	7.8	77.9	1.4	2.9	83.8	54.7
辐射-平流雾	10.2	32.2	0.8	42.8	74.8	44.2
雨后干净	12.4	34.5	0.5	121.2	47.5	25.9

由图4可发现降雨量较小时,污染物的浓度并没有降低,反而呈现增加趋势.当5月18日12:00降雨量达到9.7 mm时,PM₁₀、PM_{2.5}和SO₂的浓度迅速降低,分别为78.0、49.0和17.0 μg·m⁻³,1 h内减少了31.0、25.0和10.0 μg·m⁻³,但是NO₂和CO的浓度变化不大.

由图4可发现两次雾过程中污染物的变化不同.随着雾过程的发展,雨雾中颗粒物浓度持续积聚,但是辐射-平流雾中颗粒物浓度先快速下降之后

再增加.由图2和图4可发现PM₁₀和PM_{2.5}在雨雾发展过程中显著增加,在成熟阶段达到最大值,此后随着雾的消散浓度开始降低.但在辐射-平流雾过程中,PM的变化正好相反,在开始发展阶段浓度急剧降低,在雾发展到最旺盛时达到最低值,此后随着雾的减弱浓度开始增加.气体的变化较为复杂,由表1可知雨雾过程中NO₂和CO的浓度较大,分别是辐射-平流雾的2.4和1.8倍.但是雨雾的SO₂和O₃的浓度较低,主要是因为雨雾过程发生在雨后,

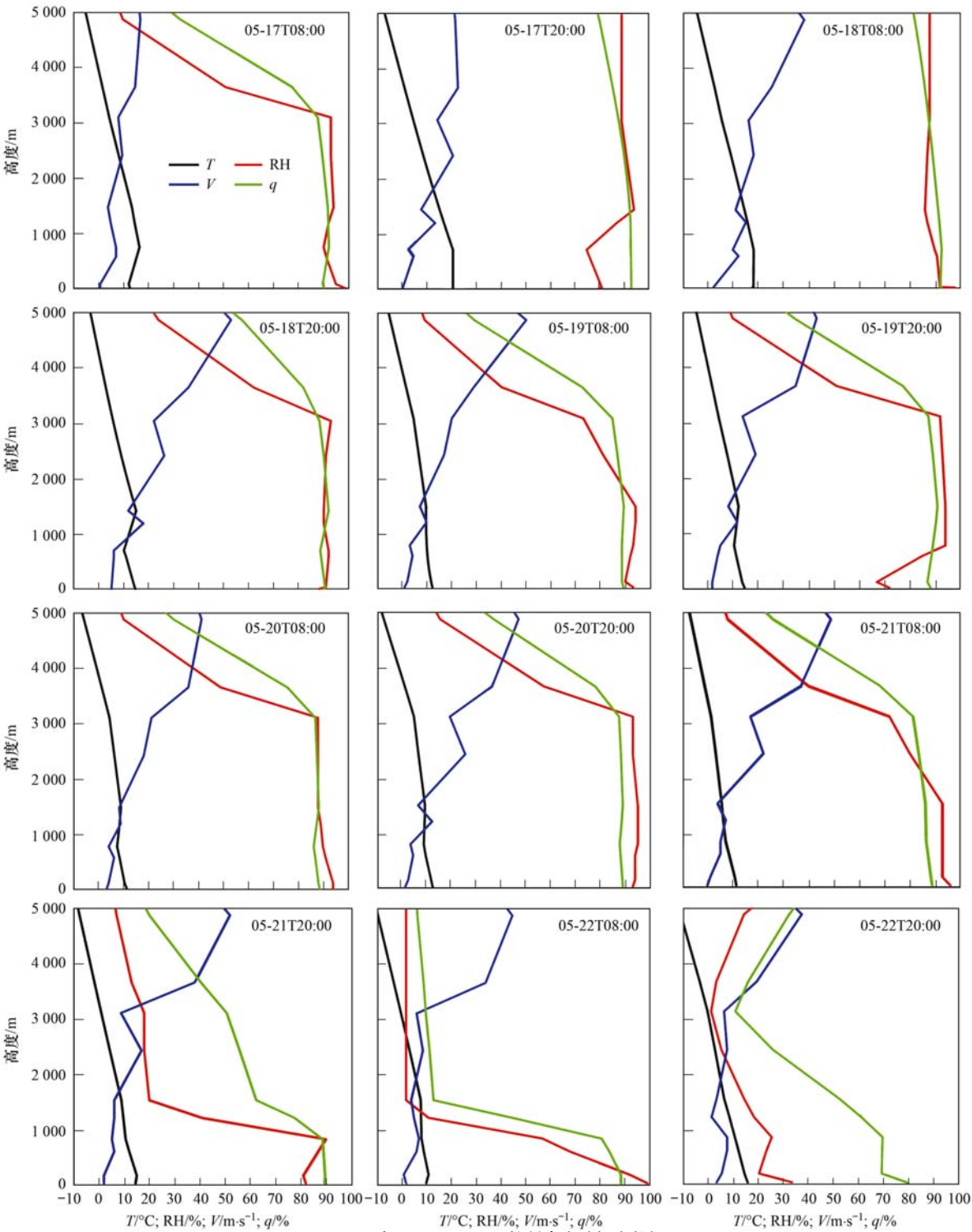


图3 2015年5月15~22日杭州高空站探空数据

Fig. 3 Description of radiosonde data on May 15-22, 2015 at Hangzhou station

降雨对 SO_2 和 O_3 的清除作用造成。

由图4可发现 NO_2 和 CO 的相关性较高,相关系数可达0.79,主要是因为两者均主要来自汽车尾气的排放。 SO_2 与其他污染物的相关性较差, SO_2 主要来自工业燃煤排放^[39],高湿度下容易从大气中清除。 O_3 与其他污染物呈负相关关系。 PM 与 NO_2 、

CO 呈较高的正相关关系,说明观测期间 PM 多来自汽车尾气的排放。由表2可知能见度与 O_3 呈较好的正相关,能见度较高时,太阳辐射较强,光化学反应剧烈。能见度与 SO_2 的相关性较差,与其他污染物呈较好的负相关,说明观测期间能见度主要受到汽车尾气排放的影响。

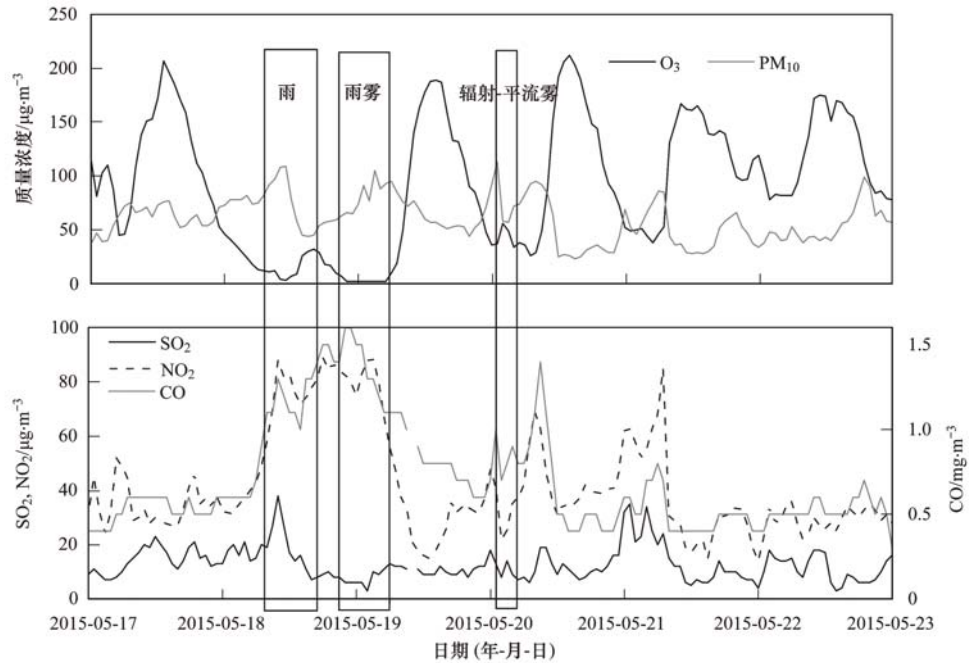


图4 观测期间污染气体和PM₁₀时间变化

Fig. 4 Time series of trace gases and PM during the observation period

表2 观测期间不同污染物之间的相关系数¹⁾

	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	能见度
SO ₂	1	0.25 **	0.04	-0.21 *	0.31 **	0.21 *	-0.07
NO ₂		1	0.79 **	-0.74 **	0.46 **	0.40 **	-0.51 **
CO			1	-0.63 **	0.53 **	0.58 **	-0.75 **
O ₃				1	-0.58 **	-0.51 **	0.64 **
PM ₁₀					1	0.92 **	-0.73 **
PM _{2.5}						1	-0.75 **
能见度							1

1) * 表示 0.05 水平下显著相关, ** 表示 0.01 水平下显著相关

2.3 雾霾过程中气溶胶粒径分布特征

由图2可知观测期间不同阶段中气溶胶粒径分布差异较大,在干净天气溶胶主要集中在100 nm以下,尤其是50 nm以下气溶胶数浓度较高.在雾霾天和降雨过程中气溶胶粒子主要集中在50~200 nm粒径段.为了更好地分析雾霾过程中气溶胶数浓度变化特征,本研究将观测到的10 nm~10 µm粒径段气溶胶分为7个粒径段进行讨论:10~20 nm(核模态),20~50 nm和50~100 nm(爱根核模态),100~200 nm、200~500 nm和0.5~1.0 µm(积聚模态),1.0~10 µm(粗模态).

由图5可发现10~20 nm气溶胶数浓度在干净天中较高,在降水和雾霾过程中浓度较低,核模态粒子主要来自气-粒转化过程^[40,41],晴天太阳辐射较强,有利于气溶胶新粒子的形成^[42,43],因此在晴天的浓度较高.由图5可发现不同强度的降水过程对

气溶胶数浓度的影响不同,降水初期降雨量为0.4 mm,10~500 nm气溶胶数浓度明显降低,但是0.5~10 µm气溶胶浓度却呈现增加趋势.康汉青等^[44]研究表明雨强较小时,降水对气溶胶的清除作用较小.小雨期间大气中RH较高(>90%),因此气溶胶粒子容易吸湿增长为大粒子,进而造成大气中0.5~10 µm气溶胶粒子的增多.此外,大粒子浓度增多后通过碰并过程对小粒子的清除作用也变大,这也是气溶胶小粒子浓度变低的原因之一.5月18日12:00降水量高达9.7 mm,由图5发现0.5~10 µm浓度迅速降低,此时100~500 nm的浓度迅速增加达到高值后又迅速降低.在强降水初期由于粗粒子浓度迅速降低,对细粒子的碰并清除作用减弱,因此细粒子浓度迅速增加.但是随着强降水过程的清除作用,气溶胶细粒子浓度又迅速减小.

由图5可发现在雨雾的发生过程中,10~500 nm

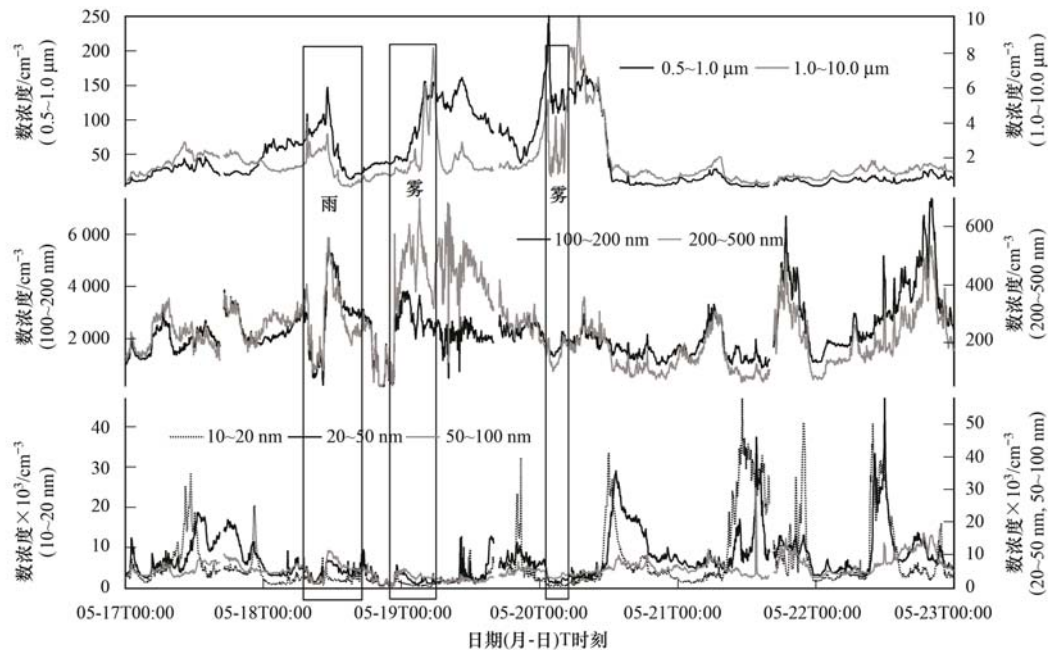


图5 观测期间不同粒径段气溶胶时间变化

Fig. 5 Time series of number concentration for aerosols in different size ranges during the observation period

气溶胶浓度迅速增加,在30 min内其浓度增加了6~10倍左右,但是 $0.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 数浓度并没有显著变化.随着雾过程的发展, $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 气溶胶数浓度开始迅速增加,1 h内其浓度增加了2.5倍,此时 $10 \sim 200 \text{ nm}$ 气溶胶浓度开始降低,但是 $200 \sim 500 \text{ nm}$ 和 $1.0 \sim 10 \mu\text{m}$ 气溶胶粒子浓度变化较小.03:20开始 $1.0 \sim 10 \mu\text{m}$ 数浓度开始暴发式增加,20 min内增加了5倍, $10 \sim 200 \text{ nm}$ 粒子浓度继续降低,此时雾过程发展到成熟阶段,能见度达到最低值.此后 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 气溶胶维持在高浓度, $200 \sim 500 \text{ nm}$ 气溶胶浓度迅速降低,雾过程开始消散.此后随着温度升高, $1.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 粒子浓度迅速下降,在1 h内降低了6倍,雾过程结束.但是 $200 \text{ nm} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 气溶胶浓度一直维持在较高浓度,在12:00之后它们的浓度开始降低,能见度得到快速好转但仍维持在10 km以下,雾过程转变为雾霾混合过程.

随着太阳辐射消失,RH开始变大, $0.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 气溶胶从5月19日20:00开始增加, $10 \sim 500 \text{ nm}$ 气溶胶浓度迅速降低,能见度开始降低.此次雾过程中气溶胶的变化与前一次过程明显不同:在雾发生阶段粗粒子迅速增加,一旦雾过程形成,粗粒子浓度迅速降低,之后 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒子维持在一个比较稳定的浓度. $100 \sim 500 \text{ nm}$ 气溶胶浓度在雾的发生到成熟阶段减少,在消散阶段开始增加.在日出后,随着太阳辐射的加强, $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 气溶胶浓度迅速降低,1 h内浓度减少了3倍,能见度迅速好

转,1 h内增加了5.0 km.

由图6可发现不同过程中气溶胶数浓度谱均为单峰型分布,但是谱型差异较大.干净天气气溶胶数浓度谱峰值位于 $20 \sim 30 \text{ nm}$.降雨过程中数浓度谱峰值向大粒径段偏移位于 100 nm 左右,此外,降雨过程中 $<100 \text{ nm}$ 和 $>1 \mu\text{m}$ 粒径段的数浓度较低, $100 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 粒径段的数浓度较高,说明降雨过程对不同粒径段气溶胶粒子的清除作用不同.雾霾过程中气溶胶谱峰宽最大, $20 \sim 100 \text{ nm}$ 气溶胶数浓度均较高,峰值位于 $30 \sim 60 \text{ nm}$.辐射-平流雾气溶胶数浓度谱峰值位于 90 nm ,雨雾气溶胶数浓度谱峰值位于 120 nm ,此外辐射-平流雾过程中, $>4 \mu\text{m}$ 气溶胶浓度较高,而雨雾过程中的粗粒子浓度较低.具体原因已在上文分析,在此不再赘述.

表面积浓度是反映气溶胶光学特性的重要特征之一.由图6可发现干净天、降雨、雾霾和雨雾过程的表面积浓度谱均为三峰型分布.干净天峰值分别位于 120 nm 、 520 nm 和 $1.3 \mu\text{m}$,表面积浓度主要集中在第一个峰值,可占总表面积浓度的92.3%.降雨过程峰值分别位于 130 nm 、 570 nm 和 $1.3 \mu\text{m}$,雨雾过程表面积浓度谱与降雨过程类似,唯一不同的是第一峰值位于 160 nm .雾霾过程的峰值位于 150 nm 、 570 nm 和 $1.3 \mu\text{m}$,其第二个峰值略大于第一个峰值.辐射-平流雾的表面积浓度谱为四峰型分布,峰值分别位于 120 nm 、 750 nm 、 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$,其中第二个峰值最大,是雨雾的1.7倍.

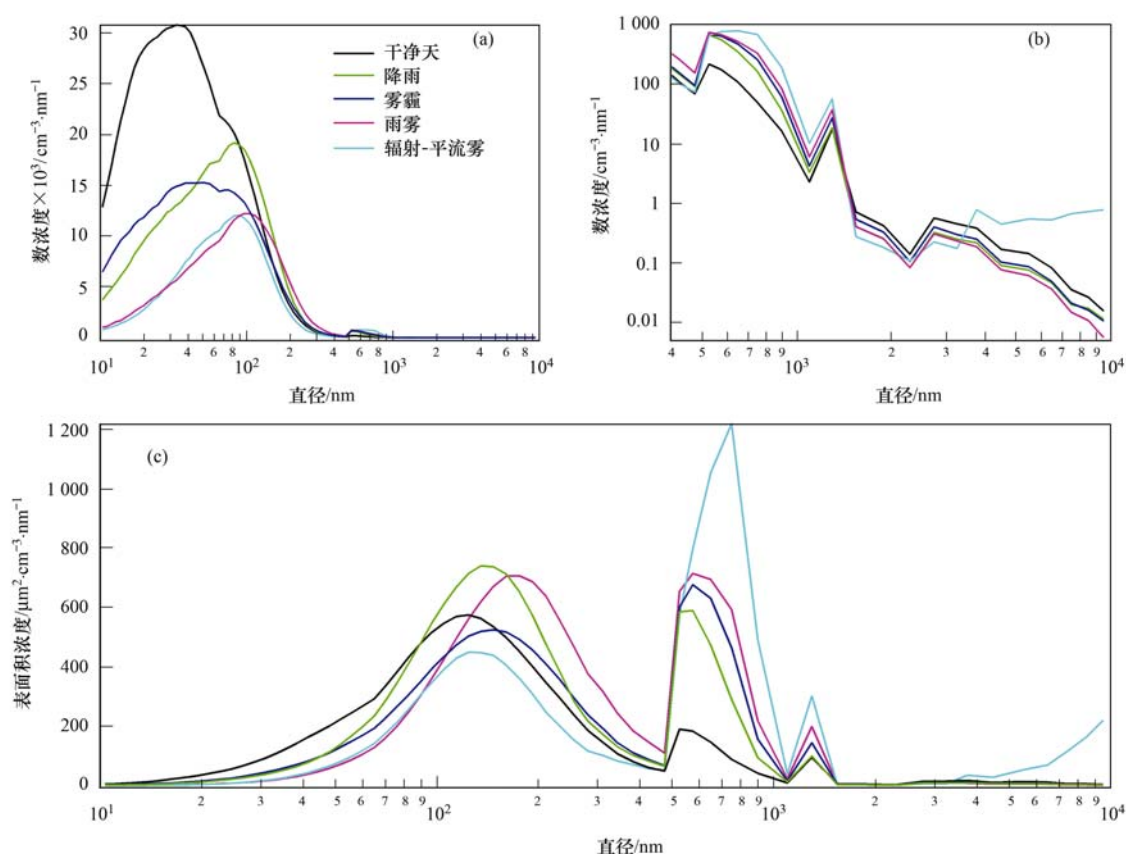


图6 观测期间不同过程中气溶胶数浓度谱和表面积浓度谱分布

Fig. 6 Spectral distributions of aerosol number concentration and surface area concentration under different types of weather conditions during the observation period

3 结论

(1) 2015年5月17~20日嘉兴地区出现了一次持续性雾霾过程,这次过程包含1次降水过程和2次雾过程。副热带高压强度增强,位置北抬,为这次雾霾过程提供了水汽条件。长三角地区上空均压场结构、地面静小风和边界层中逆温层为雾霾过程的维持提供了动力和热力条件。两次浓雾过程的发生原因不同,第一次为雨雾,是由于降水过程与适度降温的先后发生导致。第二次为辐射-平流雾,由于长三角上空低压槽过境,带来大量水汽,以及夜间地面辐射冷却使得近地层水汽达到饱和造成。

(2) 不同污染物在不同过程中变化特征不同,雾霾过程中 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度较高, SO_2 和 O_3 的浓度较低。不同强度的降水对污染物的影响不同,强降雨对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 清除作用较大,对 NO_2 和 CO 的清除作用较小,弱降雨反而会加重污染过程。雨雾的发展过程中,PM浓度持续积聚;辐射-平流雾过程中,PM浓度先快速下降然后再增加。

(3) 不同粒径段气溶胶数浓度在不同过程中的

变化不同。降雨过程对不同粒径段气溶胶粒子清除作用不同, $<100\text{ nm}$ 和 $>1\text{ }\mu\text{m}$ 粒径段数浓度较低, $100\text{ nm}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 数浓度较高。 $0.5\sim 10.0\text{ }\mu\text{m}$ 气溶胶在雨雾过程中浓度一直增加;但在辐射-平流雾中先迅速增加,一旦雾过程形成,其浓度迅速降低。 $100\sim 500\text{ nm}$ 气溶胶数浓度在雨雾中先增加后减少;但在辐射雾的发展阶段减少,在消散阶段增加。

(4) 不同过程中气溶胶数浓度谱均为单峰型分布,但是谱型差异较大,干净天、降雨、雾霾、雨雾和辐射-平流雾过程中气溶胶数浓度谱峰值分别位于 $20\sim 30\text{ nm}$ 、 100 nm 、 $30\sim 60\text{ nm}$ 、 120 nm 和 90 nm 。表面积浓度谱在干净天、降雨、雾霾和雨雾过程中均为三峰型分布,辐射-平流雾为四峰型分布。

参考文献:

- [1] Wu D, Bi X Y, Deng X J, *et al.* Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, **21**(2): 215-223.
- [2] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(14): 2375-2377.
- [3] 刘晓慧, 朱彬, 王红磊, 等. 长江三角洲地区1980~2009年灰霾分布特征及影响因子[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**

- (11): 1929-1936.
- [4] 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(3): 397-406.
- [5] 符传博, 丹利. 重污染下我国中东部地区 1960~2010 年霾日数的时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 219-226.
- [6] Gao L N, Jia G S, Zhang R J, *et al.* Visual range trends in the Yangtze River Delta Region of China, 1981-2005[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2011, **61**(8): 843-849.
- [7] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Horizontal visibility trends in China 1981-2005[J]. Geophysical Research Letters, 2007, **34**(24): 124706.
- [8] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [9] QX/T 113-2010, 霾的观测和预报等级[S].
- [10] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, **31**(4): 3-7.
- [11] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, **32**(4): 9-15.
- [12] Niu S J, Lu C S, Yu H Y, *et al.* Fog research in China: an overview[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, **27**(3): 639-662.
- [13] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 257-269.
- [14] 李子华, 黄建平, 孙博阳, 等. 辐射雾发展的爆发性特征[J]. 大气科学, 1999, **23**(5): 623-631.
- [15] 李子华, 刘端阳, 杨军. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件[J]. 大气科学, 2011, **35**(1): 41-54.
- [16] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, **59**(5): 616-624.
- [17] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005, **16**(2): 220-230.
- [18] 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 中国雾区的分布及其季节变化[J]. 地理学报, 2005, **60**(4): 689-697.
- [19] Lu C S, Niu S J, Tang L L, *et al.* Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics[J]. Atmospheric Research, 2010, **97**(1-2): 47-69.
- [20] Wang H L, An J L, Shen L J, *et al.* Mechanism for the formation and microphysical characteristics of submicron aerosol during heavy haze pollution episode in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **490**: 501-508.
- [21] Sun Y, Song T, Tang G Q, *et al.* The vertical distribution of PM_{2.5} and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2013, **74**: 413-421.
- [22] Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 14-25.
- [23] Wang T J, Jiang F, Deng J J, *et al.* Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region[J]. Atmospheric Environment, 2012, **58**: 70-83.
- [24] 吴蒙, 范绍佳, 吴兑, 等. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1409-1415.
- [25] 刘端阳, 濮梅娟, 杨军, 等. 2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象学报, 2009, **67**(1): 147-157.
- [26] 李一, 张国正, 濮梅娟, 等. 2006 年南京冬季浓雾雾水的化学组分[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 395-400.
- [27] Yue Y Y, Niu S J, Zhao L J, *et al.* Chemical composition of sea fog water along the South China Sea[J]. Pure and Applied Geophysics, 2012, **169**(12): 2231-2249.
- [28] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, **68**(5): 680-688.
- [29] Du H H, Kong L D, Cheng T T, *et al.* Insights into summertime haze pollution events over Shanghai based on online water-soluble ionic composition of aerosols[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(29): 5131-5137.
- [30] 江琪, 孙业乐, 王自发, 等. 应用颗粒物化学组分监测仪 (ACSM) 实时在线测定致霾细粒子无机和有机组分[J]. 科学通报, 2013, **58**(36): 3818-3828.
- [31] Quan J, Zhang Q, He H, *et al.* Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP)[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(15): 8205-8214.
- [32] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [33] 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.
- [34] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 416-423.
- [35] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性[J]. 应用气象学报, 2010, **21**(3): 257-265.
- [36] 刘端阳, 濮梅娟, 严文莲, 等. 淮河南下游连续雾-霾及转换成因分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1673-1683.
- [37] 刘端阳, 张靖, 吴序鹏, 等. 淮安一次雾霾过程的污染物变化特征及来源分析[J]. 大气科学学报, 2014, **37**(4): 484-492.
- [38] 沈利娟, 李莉, 吕升, 等. 2013 年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1662-1670.
- [39] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 SO₂, NO_x, CO 和 O₃ 体积分数变化分析[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1585-1589.
- [40] Kulmala M, Kontkanen J, Junninen H, *et al.* Direct observations of atmospheric aerosol nucleation[J]. Science, 2013, **339**(6122): 943-946.
- [41] Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Number size distribution of aerosols at Mt. Huang and Nanjing in the Yangtze River Delta, China: effects of air masses and characteristics of new particle formation[J]. Atmospheric Research, 2014, **150**: 42-56.
- [42] Yue D L, Hu M, Zhang R Y, *et al.* The roles of sulfuric acid in new particle formation and growth in the mega-city of Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(10): 4953-4960.
- [43] Birmili W, Wiedensohler A. New particle formation in the continental boundary layer: meteorological and gas phase parameter influence[J]. Geophysical Research Letters, 2000, **27**(20): 3325-3328.
- [44] 康汉青, 朱彬, 樊曙光. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(5): 523-530.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行