

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)
嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)
蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录	(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	
《环境科学》征稿简则(4454)	
信息(4463,4530,4573,4581)	

嘉兴市春季 PM₁₀、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应

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

(1. 嘉兴市环境保护监测站, 嘉兴 314000; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学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-云-降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 为研究嘉兴市周末与工作日主要污染物和气溶胶粒径分布变化的差异, 对2015年5月南湖城区污染气体(SO₂、NO₂、CO和O₃)、PM(PM₁₀和PM_{2.5})和10 nm~10 μm气溶胶数浓度粒径谱分布进行了观测分析. 结果表明, 嘉兴市SO₂、NO₂、CO和O₃存在显著的周末效应, 周末白天O₃浓度低于工作日. O₃在周末峰值出现时间为14:00, 比工作日晚1 h. PM_{2.5}的周末效应要比PM₁₀明显. PM_{2.5}/PM₁₀周末为0.7, 在工作日为0.6. 嘉兴市气溶胶数浓度均集中在500 nm以下, 周末和工作日平均数浓度分别为16 602 cm⁻³和23 309 cm⁻³. 核模态粒子数浓度的周末效应最显著, 核模态和粗模态粒子表面积浓度的周末效应最显著, 积聚模态和粗模态粒子质量浓度的周末效应最显著. 周末和工作日气溶胶数浓度谱分布为单峰型分布, 表面积浓度谱为三峰型分布, 质量浓度谱为四峰型分布.

关键词: 嘉兴; 周末效应; 污染气体; 气溶胶; 粒径分布

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4348-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.004

Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing

SHEN Li-juan^{1,2}, WANG Hong-lei^{3*}, LÜ Sheng¹, LI Li¹, ZHANG Xiao-han¹, ZHANG Guo-jun¹, WANG Fei¹

(1. Jiaxing Environmental Monitoring Station, Jiaxing 314000, China; 2. 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; 3. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the discrepancy of distributions of major gas pollutants and aerosol size between weekdays and weekends, trace gases (SO₂, NO₂, CO and O₃), PM (PM₁₀ and PM_{2.5}) and aerosol spectral distributions at 10 nm-10 μm were monitored in May 2015 at Nanhu district in Jiaxing. The results showed that the gas pollutants of SO₂, NO₂, CO and O₃ had significant weekend effects in Jiaxing. The O₃ concentration on daytime of weekends was lower than that of weekdays. The peak of O₃ occurred at 14:00 on weekends, which was 1 hour later than that on weekdays. The weekend effect of PM_{2.5} was observed to be much more obvious compared to that of PM₁₀. The ratios of PM_{2.5}/PM₁₀ were 0.7 and 0.6 on weekends and weekdays, respectively. The aerosol number concentration was mostly concentrated at particle size below 500nm, with values of 16 602 cm⁻³ and 23 309 cm⁻³ on weekends and weekdays. The most remarkable weekend effect was found for aerosol number concentration in nuclei mode, for surface area concentration in nuclei and coarse mode, and for mass concentration in accumulation and coarse mode. The spectra of aerosol number concentration, surface area concentration and mass concentration showed unimodal, trimodal and four-peak distributions, respectively.

Key words: Jiaxing; weekend effect; gas pollutant; aerosol; size distribution

过去的几十年,快速的工业化、城市化进程以及机动车保有量持续增加导致中国城市地区空气质量日益恶化,这不仅降低城市大气能见度,也对人类健康造成极大的影响^[1~4]. 近年来国内外研究者针对污染物的浓度分布、时空变化、区域输送及其形成机理方面展开了大量的研究. Xu等^[5]研究表明北京夏季下风向的站点O₃浓度峰值的出现时间要晚于上风向站点. Tang等^[6]研究表明北京城区的

高NO_x浓度对O₃生成有抑制作用. 王占山等^[7]观

收稿日期: 2015-07-07; 修订日期: 2015-08-03

基金项目: 江苏省大气环境监测与污染控制高新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

测发现北京臭氧浓度呈现单峰型分布,且呈现较明显的“周末效应”;CO、NO、NO₂和NO_x等前体物多呈现双峰型分布。郑向东等^[8]发现长三角地区春季5 km以下臭氧垂直分布可以分为峰值型、均匀型、分层结构型、低空污染型和线性增长型5个基本类型。赵春生等^[9]对长三角地区对流层臭氧的模拟研究表明天气条件决定的大气动力过程对区域空气质量起着至关重要的作用。吴兑等^[10]认为细粒子污染形成的灰霾天气是导致广州地区能见度下降主要原因。王跃思等^[11]对2013年元月中国中东部地区的强霾污染的成因分析认为,一次排放的气态污染物向颗粒态的快速转化,是本次强霾污染“暴发性”和“持续性”的内部促发因子,特别是大气中燃油排放为主的大量NO_x促发了燃煤排放气态SO₂向颗粒态硫酸盐的快速转化。这些研究对于改善城市空气质量,制定城市污染控制和治理措施都具有重要的科学意义。

Cleveland等^[12]自1974年首次提出“周末效应”概念以来,已有大量的研究发现了大气污染物在工作日与周末的差异,比如图森^[13]、洛杉矶^[14]、旧金山^[15]、马赛^[16]、北京^[17]、南京^[18]和上海^[19]等城市。除了大气污染物存在周末效应外,部分城市气象站观测到的气象要素也存在不同程度的周循环变化特征,Forster等^[20]和段春锋等^[21]研究表明温度也存在显著的周末效应,龚道溢等^[22]发现降水频次也存在7 d周期的显著周循环特征。章志芹等^[23]研究发现空气污染指数和各气象要素的周末效应受到日供电量的影响,同时各气象要素自身和空气污染指数之间有良好的相关性,它们的周末效应相互影响。

以往大气污染物的周末效应的研究多侧重于O₃、SO₂、CO和NO_x等污染气体分布特征,针对气溶胶粒径分布的周末效应研究比较罕见。研究表明,目前城市地区气溶胶污染日益严重,是引发城市灰霾的主要原因^[24,25]。嘉兴作为长三角重要城市之一,与上海、杭州、宁波、绍兴、苏州等城市相距均不到百公里,位于浙江北部的沪杭、苏杭交通干线中枢,东临东海,北靠太湖,城市空气质量受人类活动影响大。本研究使用热电EMS系统、SHARP测尘仪和宽范围气溶胶粒径谱仪(WPS)对嘉兴市2015年5月1~31日的主要污染气体(SO₂、NO₂、CO和O₃)、颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})和10 nm~10 μm气溶胶数浓度粒径谱分布进行了在线观测,分析了工作日与周末主要污染气体及颗粒物的浓度变

化特征,并探讨了气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度的日变化规律和谱分布的周末效应,以期为进一步研究嘉兴市大气污染特征及治理措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 站点与实验实施

观测站点为嘉兴市南湖区残疾人联合会楼顶的监测站点(残联站,北纬30°45′,东经120°47′,海拔高度28.5 m,距地高度约25 m),是3个嘉兴市国控点位之一。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1~31日。

根据香港天文台(<http://gb.weather.gov.hk/>)公布的地面天气图可知,5月2日、8日、11日和29~30日嘉兴主要受低压控制,等压线稀疏,基本为均压场。5月18~19日受到台风“白海豚”外围的影响,嘉兴受低压控制,但是等压线稀疏。嘉兴在其余日均受高压控制,上半月主要受大陆性高压控制,下半月主要受海洋上空的副热带高压控制,高压控制下嘉兴上空等压线较稀疏,多受均压场控制,因此天气形势比较稳定。嘉兴处于北亚热带南缘,属于东亚季风区,为典型的亚热带季风气候,冬夏季季风交替,春季为冬季风转变为夏季风的过渡期,多降雨。由上文分析可知观测期间可以较好地代表嘉兴市春季的气候特征。

根据天气状况和气象条件将观测日分为晴好天气和阴雨天气。气象数据使用嘉兴市常规气象站观测数据(北纬30°73′,东经120°77′),晴好天气对应各气象参数特征(温度、湿度和风速)如表1所示。晴好天气平均温度为21.1℃,相对湿度为72%,平均风速为2.8 m·s⁻¹,气压为1 009.7 hPa。观测期间共出现7次较长时间降水,其中5 d出现在工作日,2 d出现在周末。观测期间共获得有效晴天天气数据24 d,其中周末8 d,工作日16 d。本研究重点针对晴好天气下工作日与周末污染物(SO₂、NO₂、CO、O₃和PM)浓度变化与气溶胶数浓度粒径谱分布的变化特性进行对比分析。

1.2 观测仪器介绍

气溶胶数浓度观测仪器使用美国MSP公司生产的宽范围颗粒粒径谱仪(WPS),测量直径在10 nm~10 μm之间的气溶胶粒子数浓度。仪器原理介

绍参见文献[26]. 由于 WPS 适应的环境湿度为 0%~90% 非冷凝, 根据观测的实施情况, 经数据处理后剔除了部分无效数据.

表 1 晴好天气各气象要素分布

项目	气象要素			
	温度/℃	相对湿度/%	风速/m·s ⁻¹	气压/hPa
最大值	30.5	99	6.7	1 017.4
最小值	12.8	25	0.1	1 001.4
平均值	21.1	72	2.8	1 009.7

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 NO-NO₂-NO_x 分析仪、49i 紫外发光 O₃ 分析仪、43i 脉冲荧光 SO₂ 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[27]. 监测仪器定期进行标定校准, 其中 NO-NO₂-NO_x 分析仪、SO₂ 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, O₃ 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.

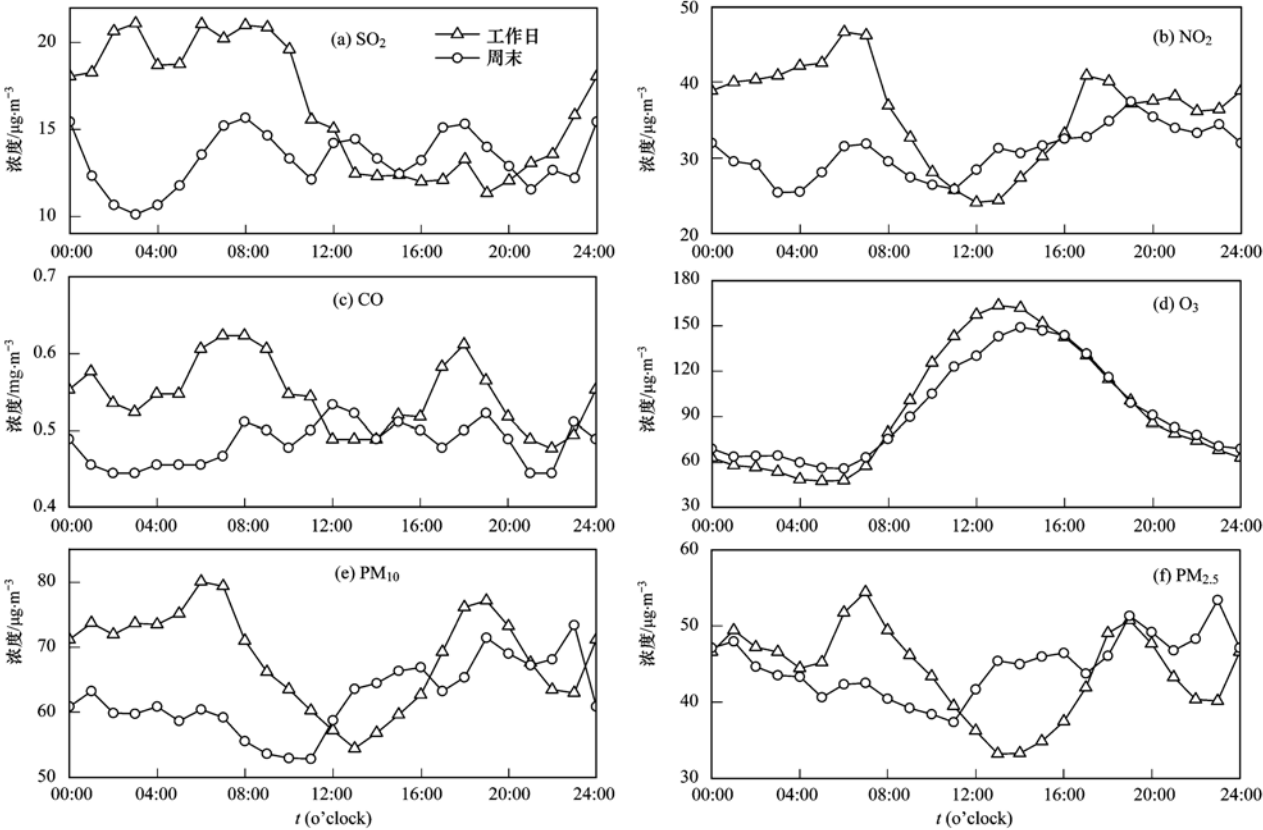


图 1 工作日和周末 PM 和污染气体的日变化

Fig. 1 Diurnal variations of PM and gas pollutants on weekdays and weekends

2 结果与讨论

2.1 主要污染气体和 PM 的周末效应

2.1.1 周末与工作日污染气体日变化特征比较

图 1 给出了晴好天气下工作日和周末主要污染气体、PM₁₀和 PM_{2.5}的日变化, 表 2 给出了各污染物周末与工作日小时浓度的偏差, 偏差的计算公式为:

$$Dev = \frac{c_{周末} - c_{工作日}}{c_{工作日}} \times 100\%$$

式中, $c_{周末}$ 和 $c_{工作日}$ 分别为周末和工作日污染物的浓度.

由图 1 可发现 SO₂ 在周末和工作日日变化分布差异显著. 工作日表现为夜间高, 白天低的日变化特征. 周末呈四峰型分布, 峰值分别出现在 00:00、08:00、13:00 和 18:00. 研究表明, 大气中的 SO₂ 主要来自化石燃料的燃烧及工业生产过程等固定源^[17, 28], 工作日夜间由于边界层稳定且高度较低, 有利于污染物积聚. 由图 2 可知从日出开始, 虽然气温逐渐回升, 风速也逐渐变大, 人类活动造成的污染也增加, 但由于日出前后存在逆温并未消除, 况且此时由于地面被加热破坏了原先的逆温层, 这时逆温层上部积聚的污染物被热对流带到地面, 使该处

表 2 周末与工作日污染物浓度相对偏差
Table 2 Relative deviations of air pollutants
on weekdays and weekends

时刻	偏差 (Dev)/%					
	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}
00:00	-14.5	-17.7	-11.6	9.2	-14.4	1.1
01:00	-32.6	-26.1	-21.0	10.2	-14.2	-3.0
02:00	-48.3	-27.9	-17.0	13.3	-16.8	-5.4
03:00	-52.1	-37.8	-15.1	20.5	-18.8	-6.5
04:00	-43.0	-39.4	-16.7	23.0	-17.1	-2.6
05:00	-37.2	-33.9	-16.7	18.8	-21.9	-10.1
06:00	-35.6	-32.4	-24.8	16.6	-24.5	-18.2
07:00	-24.8	-30.9	-25.2	10.2	-25.3	-21.9
08:00	-25.4	-20.0	-18.0	-5.1	-21.8	-18.2
09:00	-29.7	-16.1	-17.5	-11.0	-18.9	-15.1
10:00	-32.1	-6.0	-12.6	-16.3	-16.6	-11.4
11:00	-22.1	0.2	-8.0	-14.0	-12.2	-5.4
12:00	-5.6	17.9	9.2	-17.3	2.7	15.0
13:00	15.8	28.4	7.0	-12.6	16.7	36.7
14:00	8.3	11.9	0.1	-7.9	13.4	35.2
15:00	0.6	4.7	-1.7	-3.3	11.2	31.9
16:00	10.2	-2.0	-3.4	0.9	6.7	23.9
17:00	24.7	-19.8	-18.0	0.7	-8.8	4.4
18:00	15.3	-13.0	-18.3	1.4	-14.2	-6.0
19:00	23.3	0.7	-7.5	-1.4	-7.4	1.1
20:00	6.9	-5.6	-5.6	6.3	-5.7	3.2
21:00	-11.5	-10.9	-9.0	5.1	-0.5	8.0
22:00	-6.8	-7.9	-6.7	5.1	7.3	19.8
23:00	-22.8	-5.6	3.4	3.7	16.4	33.0

污染物体积分数加大^[29],从而使得在 07:00~08:00 左右 SO₂ 的浓度出现最大值. 此后随着太阳辐射的进一步加强,逆温层彻底破坏,由图 2 可知温度和风速都变大,有利于污染物的扩散,因此 SO₂ 的浓度较低. 周末由于工业源排放的减少,夜间 SO₂ 的浓度较低,边界层的变化导致其在 08:00 出现峰值. 此外研究表明汽车尾气可以产生 100 多种污染物,其

中主要污染物有 CO、NO_x、SO₂ 和颗粒物等^[30~32]. 由表 3 可知 SO₂ 在周末与 CO 的相关性较高,在工作日与 NO₂ 相关性较高,这也说明嘉兴地区 SO₂ 除了来自工业排放外,汽车尾气的排放也是其重要来源. 周末 13:00 和 18:00 出现的 SO₂ 峰值主要来自于周末出行的汽车尾气排放. 白天 SO₂ 浓度在 00:00~12:00 和 21:00~23:00 均为工作日高于周末,13:00~20:00 周末浓度高于工作日. 由表 2 可知在 01:00~6:00 和 16:00~19:00 周末和工作日的偏差相对较大,其中 03:00 负偏差最大为 -52.1%,17:00 正偏差最大为 24.7%.

研究表明汽车尾气产生的 CO 和 NO_x 在大气污染物总量中的分担率可达 63%~86% 和 33%~56%,在市区可达到 90% 和 74%^[30,31,33]. 由表 3 也可以发现在工作日和周末 CO 与 NO₂ 的相关性均

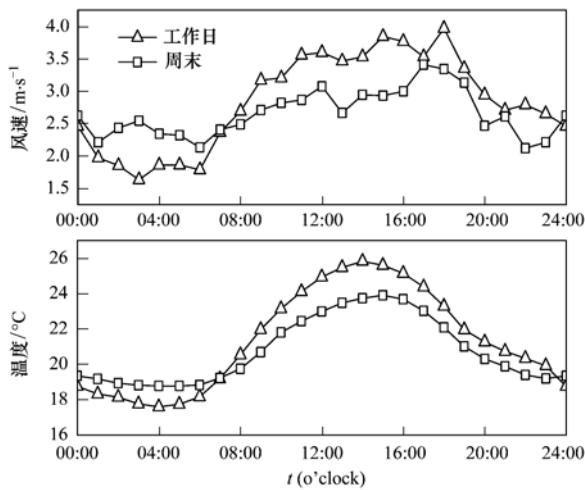


图 2 工作日和周末风速和温度的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of wind speed and temperature on weekdays and weekends

表 3 工作日和周末污染物相关系数
Table 3 Correlation coefficients of air pollutants on weekdays and weekends

	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}
SO ₂	1	0.31 **	0.48 **	0.04	0.37 **	0.42 **
NO ₂	0.53 **	1	0.51 **	-0.30 **	0.42 **	0.36 **
CO	0.23 **	0.52 **	1	0.03	0.42 **	0.44 **
O ₃	-0.19 **	-0.48 **	-0.19 **	1	-0.07	-0.13
PM ₁₀	0.52 **	0.48 **	0.59 **	-0.27 **	1	0.95 **
PM _{2.5}	0.44 **	0.40 **	0.61 **	-0.25 **	0.95 **	1

1) ** 表示 0.01 水平上显著相关,上部加粗为周末,下部为工作日

较高,分别为 0.52 和 0.51,这也说明两者均来自汽车尾气这一共同排放源. 由图 1 可知 NO₂ 在工作日日变化为明显的双峰型分布,峰值分别出现在 06:00~07:00 (平均为 46.4 μg·m⁻³) 和 17:00~18:00

(平均为 40.5 μg·m⁻³),正好为上下班高峰期. NO₂ 在周末早上 06:00~07:00 也出现峰值(平均为 31.6 μg·m⁻³),峰值明显小于工作日,由表 2 可知 00:00~10:00 的偏差均为负值,其中 03:00~07:00

偏差较大,均在 30% 以上. 周末早晨的 NO_2 峰值主要由边界层的日变化特征造成,在工作日则叠加了上班高峰期汽车尾气的影响. 周末 11:00 之后, NO_2 的浓度开始增加,夜间 19:00 达到最大值 $37.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这主要与周末出行时间的变化有关. CO 在工作日的日变化与 NO_2 类似,也呈双峰型分布,峰值出现在 07:00 ~ 08:00 和 18:00. 但是 CO 在周末白天出现多个较小的峰值,这主要是由于周末出行时间变化造成. 此外 CO 除了来自汽车尾气和工厂排放等矿物质燃料的不完全燃烧外,还来自生物质燃烧、海洋、植物排放、 CH_4 的氧化和 NMHC 的氧化等^[34].

O_3 在周末峰值出现时间为 14:00,比工作日晚 1h. 由图 1 和表 2 可知 O_3 浓度在 07:00 之前为周末高于工作日,08:00 ~ 15:00 为周末低于工作日,16:00 之后两者基本一致. 臭氧的日变化可分为积累阶段、抑制阶段、光化学生成阶段和消耗阶段这 4 个阶段^[19, 35]. 本研究中 O_3 的日变化也基本符合这 4 个阶段. O_3 是二次生成物,其浓度变化和 NO_x 和 VOCs 等前体物的浓度密切相关. 由表 3 可知 O_3 在周末和工作日与 NO_2 均为负相关关系,相关系数分别为 -0.30 和 -0.48. 即 NO_2 作为 O_3 的前体物在一定程度上消耗 O_3 ,由图 1 可知工作日夜間 NO_2 的浓度要远大于周末,表明 O_3 夜间的损耗在工作日要大于周末. 工作日 NO_2 在 07:00 达到峰值后迅速降低,在 12:00 达到最低值 $24.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,短短 5 h 内下降了 $22.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,因此对 O_3 的损耗急剧减少,加之日出后太阳辐射加强,光化学作用加强,因此 O_3 的浓度快速增加. 而周末 NO_2 在 07:00 峰值之后,下降缓慢,到 11:00 仅下降了 $6.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,之后又开始增加,因此其对 O_3 的损耗一直较大,故而使得周末白天 O_3 浓度低于工作日. 此外,由图 1 可知在工作日白天 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度要低于周末,工作日中午较低的 PM 浓度可以减少对太阳紫外辐射的消弱作用,进而使得光化学反应的强度加强,可以产生更多的 O_3 ,也是造成工作日 O_3 浓度高于周末的一个原因. 这与以往 O_3 的周末效应不同,有研究表明 O_3 在周末浓度高于工作日^[16, 19, 36].

2.1.2 周末与工作日 PM 日变化特征比较

由图 1 可发现 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的日变化特征基本一致,在工作日均为双峰型分布,峰值出现在 07:00 和 19:00,由上文分析可知峰值分别对应上下班高峰期. 由表 3 可知在工作日 PM 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 呈显著的正相关,相关系数均在 0.40 以上;而与 O_3

呈负相关关系. 在周末 PM 在 11:00 开始升高,并在 15:00 左右出现第一个峰值,此后 16:00 略微下降后又开始升高,并在 19:00 再次出现峰值,这主要是由于周末出行时间的变化造成. 由表 2 可知,12:00 之后 $\text{PM}_{2.5}$ 的偏差均为正值,尤其是在 13:00 ~ 15:00 之间,偏差均超过 30%,而 PM_{10} 的偏差均没有超过 20%,说明 $\text{PM}_{2.5}$ 的周末效应要比 PM_{10} 明显. 由表 3 可知在周末 PM 与气体的相关性与工作日基本一致,但是相关系数要比工作日小. 此外 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在周末为 0.7,在工作日为 0.6. 可能因为周末工业排放的较大粒子浓度显著降低使得 PM_{10} 浓度降低. 此外还可能由于周末道路活动较少(尤其是在早晚高峰期),使得道路扬尘减少,进而使得 $> 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度所占比例降低造成.

2.2 气溶胶数浓度的周末效应

由图 3 可发现无论是周末还是工作日气溶胶数浓度均集中在 500 nm 以下,且周末数浓度(平均为 $16\ 602 \text{ cm}^{-3}$)要明显低于工作日(平均为 $23\ 309 \text{ cm}^{-3}$). 图 4 给出了工作日和周末 4 个不同模态的数浓度平均日变化,分别为核模态(10 ~ 20 nm),爱根核模态(20 ~ 100 nm),积聚模态(0.1 ~ 1.0 μm)和粗模态(1.0 ~ 10 μm). 由图 4 可发现周末和工作日核模态的日变化基本类似,均在日出后快速增加,在 11:00 左右达到最大值. 研究表明,白天日出后,随着太阳辐射的增加,大气气溶胶新粒子生成现象逐渐增强,进而产生大量的核模态粒子^[26, 37]. 由图 1 可知工作日 O_3 的浓度较高,说明工作日光化学反应较强,因此核模态气溶胶在工作日的浓度较高. 17:00 ~ 18:00 核模态数浓度出现较小的峰值,由图 1 可知此时 SO_2 也出现峰值,研究表明 SO_2 在新粒子生成事件中起到非常重要的作用^[38],而此时还存在太阳辐射,在这一时间段内可能又发生了较弱的新粒子生成事件.

爱根核模态数浓度在工作日和周末的日变化均为三峰型分布,峰值分别处于 06:00、13:00 和 18:00. 其中周末早晨的峰值比工作日晚 1 h 出现在 07:00. 爱根核模态粒子主要来自燃烧过程产生的一次排放颗粒物,研究表明柴油、汽油和天然气发动机排放的颗粒物数浓度主要集中在爱根核模态^[39]. 此外,核模态粒子经过凝结和碰并增长过程也可长大为爱根核模态粒子^[40]. 因此爱根核模态粒子的早晚峰值主要是由于汽车尾气的一次排放造成. 虽然午后边界层高度逐渐增加,而爱根核模态粒子的数浓度却逐渐升高(图 4),主要是因为午后

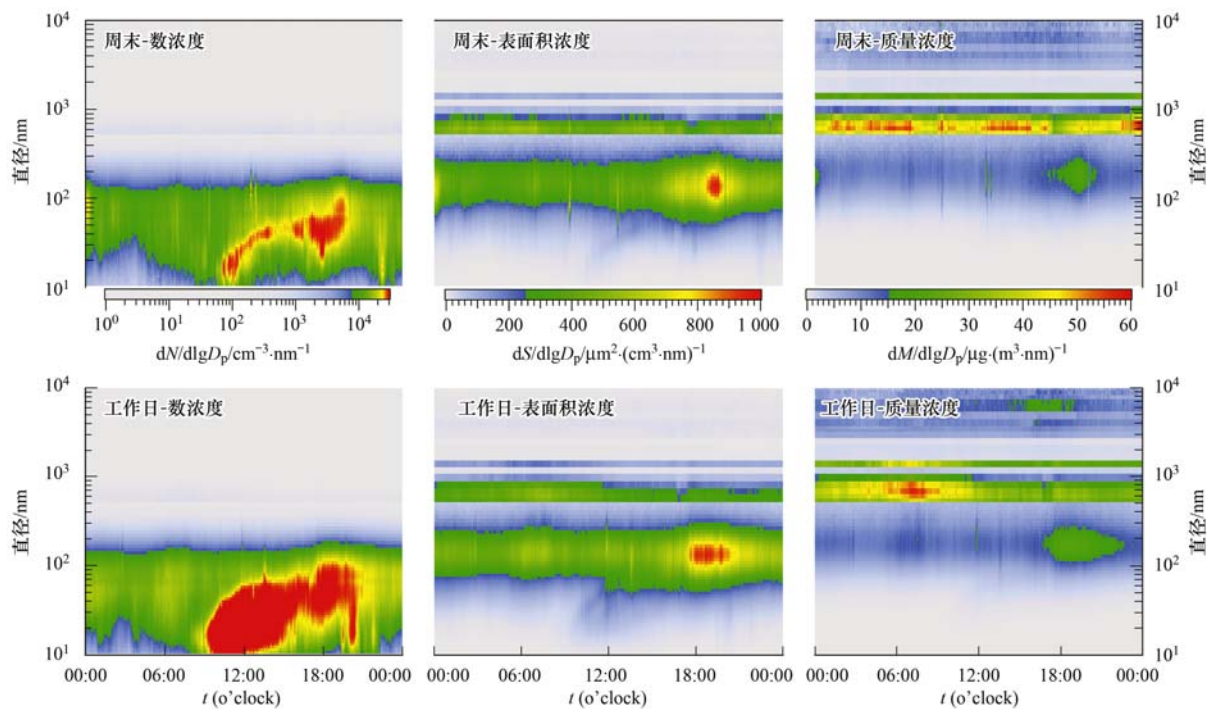


图3 周末和工作日气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度的时间序列

Fig. 3 Time series of aerosol number concentration, surface area concentration and mass concentration on weekdays and weekends

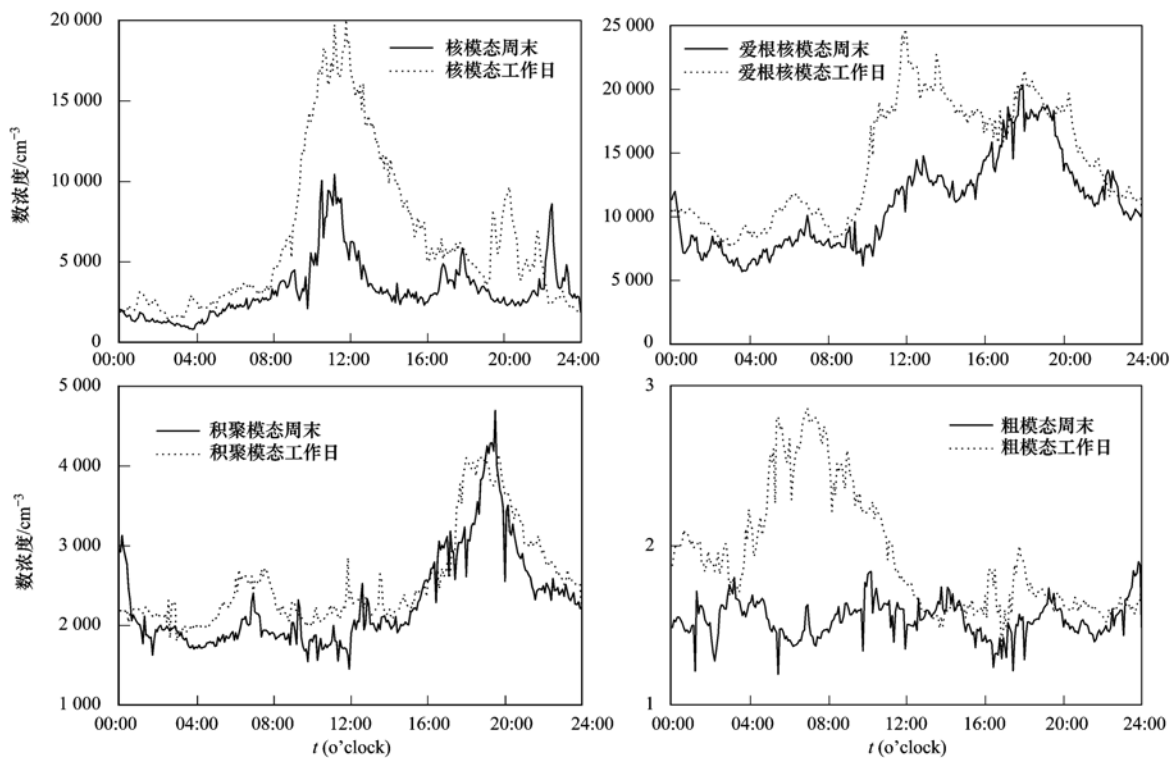


图4 工作日和周末不同模式数浓度的平均日变化

Fig. 4 Diurnal variations of number concentration in different aerosol modes on weekdays and weekends

核模态粒子逐渐增长为爱根核模态粒子。由图4还可发现,爱根核模态粒子在周末15:00开始增加,在工作日要到17:00左右才开始增加,由上文分析可

知这与周末人们出行时间的变化密切相关。

由图4可知周末和工作日积聚模态数浓度基本一致,日变化均为双峰型分布,峰值分别出现在

06:00~07:00 和 18:00~20:00. 积聚模态粒子主要来源于爱根核模态的凝结和碰并,以及燃烧过程产生的高温蒸汽的凝结和碰并,并且积聚模态粒子在大气中的停留时间最长^[41]. 因此周末和工作日积聚模态数浓度几乎没有差异. 白天积聚模态数浓度与爱根核模态数浓度日变化相反,午后由于边界层升高和稀释作用,浓度逐渐降低. 下午由于边界层高度降低,逆温层开始形成,不利于污染物扩散,且此时人类活动较多,因此造成积聚模态数浓度急剧增加.

粗模态粒子主要来自机械过程,以及植物花粉、海盐蒸发和道路扬尘等. 由图 3 和图 4 可知粗模态粒子浓度非常低,对气溶胶数浓度贡献极小. 由图 4

可发现粗模态粒子在周末没有明显的日变化特征,但是在工作日 03:00~10:00 其数浓度远大于周末,主要是由于工业排放和上班高峰期产生的道路扬尘造成.

由图 5(a)可知嘉兴周末和工作日气溶胶数浓度谱分布均为单峰型分布,工作日峰值位于 20~40 nm,周末峰值位于 40~60 nm. 数浓度主要集中在 200 nm 以下,在核模态数浓度差异较大,工作日数浓度是周末数浓度的 2.11 倍,爱根核模态粒子数浓度工作日是周末的 1.39 倍,积聚模态粒子数浓度工作日是周末的 1.05 倍,粗模态粒子数浓度工作日是周末的 1.48 倍. 核模态粒子的周末效应最显著,其次是爱根核模态和粗模态,积聚模态粒子的周末效应最弱.

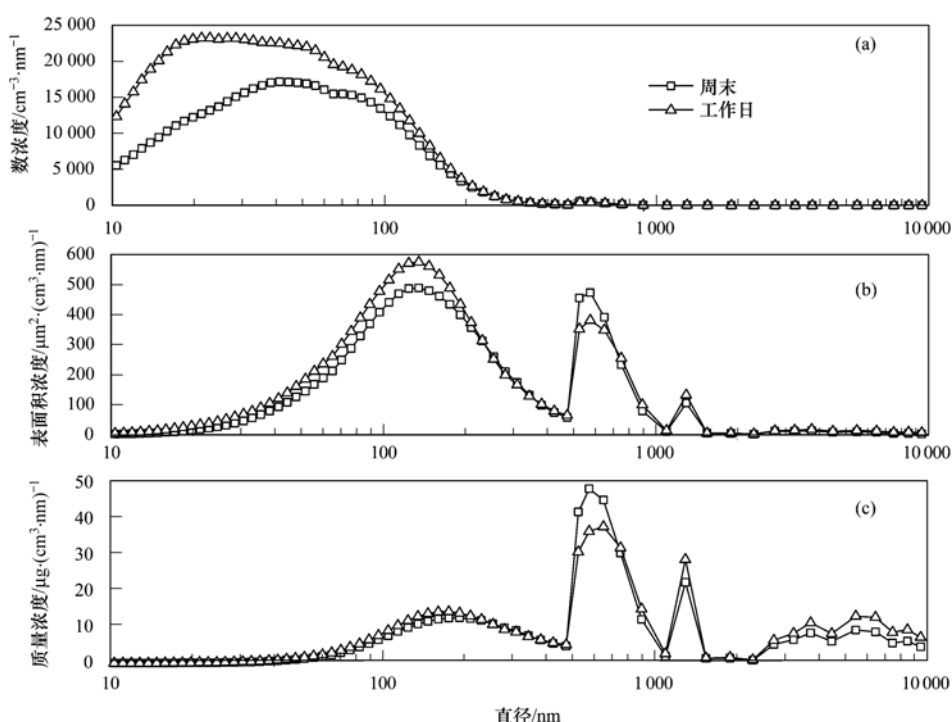


图 5 周末和工作日气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度谱分布

Fig. 5 Spectral distributions of aerosol number concentration, surface area concentration and mass concentration on weekdays and weekends

2.3 气溶胶表面积浓度和质量浓度的周末效应

由图 3 可发现表面积浓度和质量浓度随粒径的分布特征与数浓度差异较大. 表面积浓度主要集中在 100~300 nm 和 0.5~1.0 μm, 质量浓度则在 0.5~1.0 μm 最大. 由图 4 和图 6 发现不同模态粒子的表面积浓度日变化特征与数浓度的变化一致. 但是表面积浓度主要集中在积聚模态. 由图 7 可发现不同模态粒子的质量浓度的日变化特征与数浓度有明显差异. 核模态粒子虽然数浓度较高,但是对质量浓度的贡献基本可以忽略不计. 爱根核模态粒子质量浓度的日变化与数浓度和表面积浓度日变化基

本一致. 积聚模态粒子质量浓度最大,在工作日主要为双峰型分布,峰值分别对应上下班高峰期. 但是在周末积聚模态粒子质量浓度的变化较乱,且在 12:00 之后浓度一直较高,这也说明积聚模态质量浓度的周末效应比较显著. 粗模态粒子质量浓度的日变化在工作日也呈双峰型分布,在周末白天浓度较高,且浓度比较稳定.

由图 5(b)可发现周末和工作日表面积浓度谱分布基本一致,均为三峰型分布,峰值分别位于 150 nm、600 nm 和 1.3 μm 左右. 最大峰值出现在积聚模态,第一个峰值中工作日的表面积浓度较大,第二

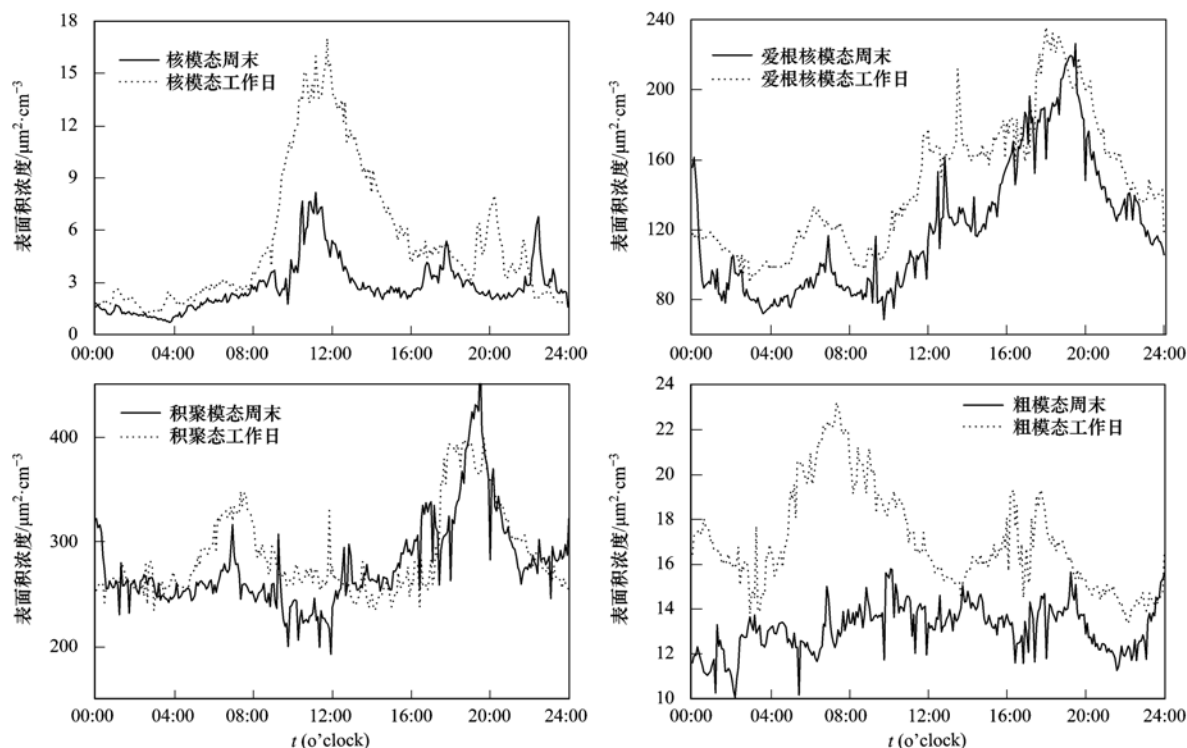


图 6 工作日和周末不同模态表面积浓度的平均日变化

Fig. 6 Diurnal variations of surface area concentration in different aerosol modes on weekdays and weekends

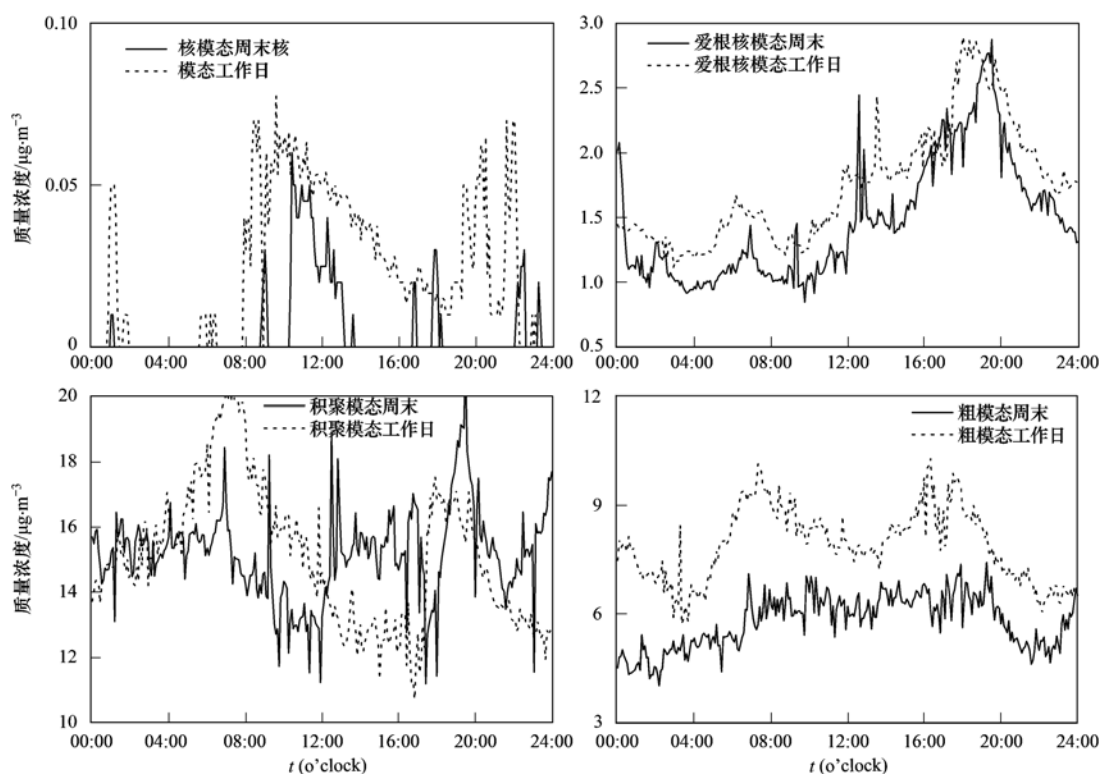


图 7 工作日和周末不同模态质量浓度的平均日变化

Fig. 7 Diurnal variations of mass concentration in different aerosol modes on weekdays and weekends

峰值中周末的表面积浓度较大。由图 5(c) 可发现周末和工作日质量浓度谱分布也基本一致, 为四峰

型分布, 最大峰值位于 600 nm, 且周末的浓度要高于工作日浓度。其余 3 个峰值均为工作日质量浓度

较高.

3 结论

(1)观测期间嘉兴市 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 存在显著的周末效应. SO_2 在工作日表现为夜间高,白天低;周末的日变化呈四峰型分布,峰值分别出现在 00:00、08:00、13:00 和 18:00. NO_2 和 CO 在工作日的日变化为明显的双峰型分布,主要受上下班高峰期汽车尾气以及边界层的日变化特征影响. 受周末出行时间变化的影响, NO_2 在周末 11:00 之后浓度开始增加,夜间 19:00 达到最大值 $37.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; CO 在周末白天出现多个较小的峰值. 嘉兴周末白天 O_3 浓度低于工作日,周末峰值出现时间为 14:00,比工作日晚 1 h.

(2) PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 在工作日日变化均为双峰型分布,峰值出现在 07:00 和 19:00. 在周末 PM 在 11:00 开始升高,并在 15:00 左右出现第一个峰值,此后 16:00 略微下降后又开始升高,并在 19:00 再次出现峰值. 嘉兴市 $\text{PM}_{2.5}$ 的周末效应要比 PM_{10} 明显. 周末 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 为 0.7,在工作日为 0.6.

(3)嘉兴市气溶胶数浓度均集中在 500 nm 以下,周末和工作日平均数浓度分别为 $16\ 602 \text{ cm}^{-3}$ 和 $23\ 309 \text{ cm}^{-3}$. 核模态粒子在日出后快速增加,在 11:00 左右达到最大值. 核模态粒子数浓度的周末效应最显著,其次是爱根核模态数浓度和粗模态数浓度,积聚模态粒子数浓度的周末效应最弱. 核模态和粗模态粒子表面积浓度的周末效应最显著,积聚模态和粗模态粒子质量浓度的周末效应最显著.

(4)周末和工作日气溶胶数浓度谱分布均为单峰型分布,工作日峰值位于 20~40 nm,周末峰值位于 40~60 nm. 表面积浓度谱在周末和工作日均为三峰型分布,峰值分别位于 150 nm、600 nm 和 1.3 μm ,第一个峰值中工作日表面浓度较大,第二峰值周末表面积浓度较大. 周末和工作日质量浓度谱为四峰型分布,最大峰值位于 600 nm,且周末的浓度要高于工作日浓度,其余 3 个峰值均为工作日质量浓度较高.

参考文献:

- [1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [2] Qian Z M, Zhang J F, Wei F S, *et al.* Long-term ambient air pollution levels in four Chinese cities: inter-city and intra-city concentration gradients for epidemiological studies [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2001, **11**(5): 341-351.
- [3] 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.
- [4] 贾璇,王文彩,陈勇航,等. 华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(8): 1009-1014.
- [5] Xu J B, Ma J Z, Zhang X L, *et al.* Measurements of ozone and its precursors in Beijing during summertime: impact of urban plumes on ozone pollution in downwind rural areas [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(23): 12241-12252.
- [6] Tang X, Wang Z F, Zhu J, *et al.* Sensitivity of ozone to precursor emissions in urban Beijing with a Monte Carlo scheme [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(31): 3833-3842.
- [7] 王占山,李云婷,陈添,等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3001-3008.
- [8] 郑向东,陈尊裕,崔宏,等. 长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, **34**(12): 1184-1192.
- [9] 赵春生,彭丽,孙爱东,等. 长江三角洲地区对流层臭氧的数值模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 525-533.
- [10] 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.
- [11] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(1): 15-26.
- [12] Cleveland W S, Graedel T E, Kleiner B, *et al.* Sunday and workday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York [J]. *Science*, 1974, **186**(4168): 1037-1038.
- [13] Diem J E. Comparisons of weekday-weekend ozone: importance of biogenic volatile organic compound emissions in the semi-arid southwest USA [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(20): 3445-3451.
- [14] Elkus B, Wilson K R. Photochemical air pollution: weekend-weekday differences [J]. *Atmospheric Environment*, 1977, **11**(6): 509-515.
- [15] Altshuler S L, Arcadio T D, Lawson D R. Weekday vs. weekend ambient ozone concentrations: discussion and hypotheses with focus on northern California [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(12): 967-972.
- [16] Pont V, Fontan J. Comparison between weekend and weekday ozone concentration in large cities in France [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(8): 1527-1535.
- [17] 雷瑜,张小玲,唐宜西,等. 北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1520-1528.
- [18] 魏玉香,童尧青,银燕,等. 南京 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 变化特征及其与气象条件的关系 [J]. *大气科学学报*, 2009, **32**(3): 451-457.
- [19] 唐文苑,赵春生,耿福海,等. 上海地区臭氧周末效应研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, **39**(1): 99-105.

- [20] Forster P M D F, Solomon S. Observations of a “weekend effect” in diurnal temperature range [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, **100** (20): 11225-11230.
- [21] 段春锋, 缪启龙, 马利, 等. 长江三角洲地区气温变化的周末效应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(4): 482-488.
- [22] 龚道溢, 郭栋, 罗勇. 中国夏季日降水频次的周末效应[J]. *气候变化研究进展*, 2006, **2**(3): 131-134.
- [23] 章志芹, 唐健, 汤剑平. 无锡空气污染指数、气象要素的周末效应 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2007, **43**(6): 643-654.
- [24] Kang H Q, Zhu B, Su J F, *et al.* Analysis of a long-lasting haze episode in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **120-121**: 78-87.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Tan P H, Chou C, Chou C C K. Impact of urbanization on the air pollution “holiday effect” in Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 361-375.
- [29] 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.
- [30] 马涛. 汽车尾气排放与大气污染 [J]. *油气田环境保护*, 2007, **17**(2): 52-53.
- [31] 范秀英, 张微, 韩圣慧. 我国汽车尾气污染状况及其控制对策分析[J]. *环境科学*, 1999, **20**(5): 102-108.
- [32] 倪哲明, 周春晖, 葛忠华. 几类汽车尾气净化催化剂的催化原理与特性 [J]. *浙江工业大学学报*, 2002, **30**(4): 382-386.
- [33] 贺克斌, 郝吉明, 傅立新, 等. 我国汽车排气污染现状与发展 [J]. *环境科学*, 1996, **17**(4): 80-83.
- [34] Kanakidou M, Crutzen P J. The photochemical source of carbon monoxide: Importance, uncertainties and feedbacks [J]. *Chemosphere*, 1999, **1**(1-3): 91-109.
- [35] Fujita E M, Stockwell W R, Keislar R E, *et al.* Weekend/weekday ozone observations in the South Coast Air Basin: Retrospective analysis of ambient and emissions data and refinement of hypotheses, Volume I-Executive Summary [R]. Final report prepared for the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO by the Desert Research Institute, Reno, NV and Sonoma Technology, Petaluma, CA, 2000.
- [36] 石玉珍, 徐永福, 王庚辰, 等. 北京市夏季 O₃、NO_x 等污染物“周末效应”研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2832-2838.
- [37] Wu Z J, Hu M, Liu S, *et al.* New particle formation in Beijing, China: Statistical analysis of a 1-year data set [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (D9), doi: 10. 1029/2006JD007406.
- [38] Berndt T, Stratmann F, Brüsel S, *et al.* SO₂ oxidation products other than H₂SO₄ as a trigger of new particle formation. Part 1: Laboratory investigations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(21): 6365-6374.
- [39] 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.
- [40] Kulmala M, Vehkamäki H, Petäjä T, *et al.* Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, **35**(2): 143-176.
- [41] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1995.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinpo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行