

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5

第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

泰山顶(1 534 m)夏季气溶胶粒径分布特征

沈利娟¹, 王红磊^{1, 2*}, 银燕¹, 陈魁¹, 陈景华^{1, 3}, 施双双¹

(1. 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; 2. 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室, 上海 200000; 3. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050000)

摘要: 使用宽范围粒径谱仪对泰山顶2017年6月1~25日10 nm~10 μm气溶胶数浓度粒径分布进行观测, 结合PM(PM_{2.5}和PM₁₀)以及气象要素数据, 分析了泰山顶气溶胶粒径分布特征及其主要影响因素。结果表明, 观测期间泰山PM_{2.5}和PM₁₀的平均浓度分别为20.7 μg·m⁻³和82.4 μg·m⁻³, PM_{2.5}/PM₁₀仅为25.1%。数浓度、表面积浓度和体积分数平均为8 672.8 cm⁻³、408.3 μm²·cm⁻³和24.2 μm³·cm⁻³。数浓度谱分布为单峰型分布, 表面积浓度和体积分数谱分布均为三峰型分布。数浓度和表面积浓度的主导粒径分别为10~20 nm和100~500 nm, 体积分数的主导粒径为100~500 nm和2.5~10 μm。风向对PM和数浓度的影响要比风速的影响大。随着RH的增加, 气溶胶数浓度谱由双峰型分布转变为单峰型分布, 表面积浓度谱由单峰型分布转变为三峰型分布。

关键词: 泰山; 数浓度; 粒径分布; 气溶胶; 气象要素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2019-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809196

Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1 534 m) in Central East China

SHEN Li-juan¹, WANG Hong-lei^{1, 2*}, YIN Yan¹, CHEN Kui¹, CHEN Jing-hua^{1, 3}, SHI Shuang-shuang¹

(1. 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; 2. Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution and Prevention, Shanghai 200000, China; 3. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In this study, the size distribution of aerosol number concentration (10 nm-10 μm), particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), and meteorological data were collected from June 1 to 25, 2017, at the summit of Mountain Taishan by using a wide-range particle spectrometer (WPS), a β-ray continuous ambient particulate monitor, and an automatic weather station. Consequently, the characteristic of the aerosol size distribution and their impact factors were analyzed. The results indicated that the average mass concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ were 20.7 μg·m⁻³ and 82.4 μg·m⁻³, respectively, and the ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ was only 25.1%. The average number concentration, surface area concentration, and volume concentration were 8 672.8 cm⁻³, 408.3 μm²·cm⁻³, and 24.2 μm³·cm⁻³, respectively. The spectrum distribution was unimodal for number concentration, and trimodal for surface area and volume concentration. The dominant sizes of the number concentration and the surface area concentration were located at 10-20 nm and 100-500 nm, respectively. The volume concentration had dominant sizes at 100-500 nm and 2.5-10 μm. Wind direction was proved to have a greater influence on PM and number concentration compared with wind speed. With the enhancement of RH, the spectrum of number concentration was converted from bimodal to unimodal distribution, while the surface area concentration changed from unimodal to trimodal distribution.

Key words: Mountain Taishan; number concentration; size distribution; aerosol; meteorological element

气溶胶作为重要的大气成分之一,可以降低能见度形成霾污染^[1~3],其重金属和有机物等有毒有害的化学组分还会影响人体健康^[4,5],还可作为云凝结核影响云的特性和生命周期^[6,7],并可通过直接和间接辐射效应影响全球辐射平衡进而对全球气候变化造成影响^[8~10]。近年来,随着经济的快速发展,我国工业化和城市化进程加快,但能源利用率仍然较低,因此工业、民用及汽车尾气等人为源大气污染物排放有增无减,导致城市、城市群和区域空气质量严重恶化。目前,大气气溶胶已成为导致我国城市空气质量恶化的首要污染物,我国气溶胶污染问题受到了国内外的广泛关注。

目前以京津冀、长三角、四川盆地和珠三角地区为代表的区域复合型大气污染日益凸显。除珠三角外,其他3个地区细颗粒物尤其是二次气溶胶颗粒的污染持续加重,造成霾污染天气日益增加,严重影响大气能见度和人体健康^[2,11~16]。除气象要素(主要为相对湿度)外,气溶胶粒子的消光效应与气

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41590873, 41805096, 41705118); 江苏省自然科学基金项目(BK20180801); 江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJB170011); 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室开放课题(FDLAP18006); 河北省气象与生态环境重点实验室开放研究基金项目

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

* 通信作者, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn

溶胶的浓度、粒径和化学组成密切相关。江祺等^[17]的研究发现, 2013~2015 年北京市污染日较清洁日气溶胶的粒径分布均有不同程度地向大粒子一侧拓宽的现象。周瑶瑶等^[18]的研究发现, 南京市霾日中 NH_4NO_3 对大气消光的贡献最大, 其次为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、有机碳(OC)和元素碳(EC)。Kang 等^[19]的研究发现, 长三角霾过程中 $0.6 \sim 1.4 \mu\text{m}$ 粒径段气溶胶数浓度的增加是造成能见度下降的主要原因。Wang 等^[20,21]进一步研究发现, 霾过程中含碳气溶胶粒子的增加是造成能见度下降的主要影响因素, 其中又以 EC 混合二次成分(EC-secondary)粒子为主, 其在霾天可占总含碳粒子的 16.6%, 是干净天的 4 倍。杨洋等^[22]的研究发现, 边界层内不同粒径段的气溶胶浓度随高度的变化不同, 逆温层的存在阻碍了近地层气溶胶粒子向高层的传输。

气溶胶粒子由地面传输到边界层顶后, 则可随着大气流场进行远距离的输送。孟静静等^[23]的研究发现, 黄山光明顶积聚模态颗粒物数浓度的潜在源区主要来自一些工业发达人口密集的城市群: 湖北东部、安徽中部、河南、江西境内、两广交界处、湖南南部以及浙江北部地区。目前, 受到观测技术以及观测条件的限制, 我国在边界层顶附近的气溶胶观测多集中在高山山顶。近年来, 在黄山^[23~26]、泰山^[27,28]、衡山^[29]、庐山^[30]和华山^[31]等山脉进行了一些气溶胶的短时综合观测。这些观测极大地丰富了人们对于气溶胶垂直分布的认识, 尤其是对于边界层顶附近气溶胶的理化特性的理解。

泰山作为中国中东部的最高峰, 位于京津冀和长三角气团传输通道的中间位置, 泰山顶海拔为 1 534 m, 基本位于中东部地区边界层顶部, 因此对于泰山顶气溶胶粒径分布的观测研究, 有利于加深人们对于中国中东部气溶胶区域分布特征的认识。在本研究中, 使用宽范围颗粒粒径谱仪(WPS)、 β -射线测尘仪和自动气象站收集了 2017 年 6 月 1~25 日泰山顶 $10 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ 气溶胶粒径分布、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 和气象数据, 分析了泰山顶气溶胶粒径分布特征及其主要影响因素, 以期了解中东部地区边界层顶附近气溶胶污染特征提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 观测站点介绍

观测点位于泰山日观峰的泰山气象站(36.25°N , 117.10°E ; 1 534 m), 泰山是中国中东部的最高峰, 绵亘于泰安、济南、莱芜三市之间, 东西长约

200 km, 南北宽约 50 km。许多燃煤电厂、炼油厂、钢铁厂、水泥厂分布在泰山周边(100 km)的工业城市(济南、淄博、莱芜、聊城、济宁、泰安等)。泰山位于泰安市以北 6 km, 省会济南市以南约 60 km, 因此, 当地和区域的污染源排放可能影响到泰山山顶的空气质量。泰山的海拔高度接近华北平原的边界层顶部, 在夏季山顶经常出现地形云。本次观测时间为 2018 年 6 月 1~25 日。

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), 测量粒径范围为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 。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 $0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$, 后者为 $0.35 \sim 10 \mu\text{m}$ 。由于测量原理的不同, 因此在其交叉测量范围内($0.35 \sim 0.5 \mu\text{m}$)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 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 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, 对仪器鞘气进行干燥, 以去除高相对湿度对数据的影响, 经数据处理后剔除了部分无效数据。

$\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 使用安徽蓝盾光子股份有限公司生产的蓝盾 LGH-01E 和 LGH-01B 型大气颗粒物监测仪。仪器采用 β 射线法原理, 结合动态加热系统(DHS)及动态数字滤波技术, 实现对 PM 进行连续自动监测。时间分辨率为 1 h, 根据仪器厂家要求剔除部分无效数据。气象数据使用 CSI-CR1000 自动气象站进行观测, 主要包括风速风向、温度、相对湿度和能见度等气象要素。气象数据质量控制参照中国气象局地面观测要求。

2 结果与讨论

2.1 观测概述

由图 1 可发现泰山山顶夏季气象要素波动较大, 整个观测期风速较大, 平均值可达 $5.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1), 6 月 5 日 17:00 达到最大值 $17.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于观测点海拔高度为 1 534 m, 接近边界层顶的位置, 由图 1(a)可发现观测期间风向多变, 但是以西南风为主。由图 1(b)可发现泰山顶部 RH 变化剧烈, 经常在几小时内有较大起伏, 比如 6 月 5 日 09:00 RH 仅为 19.6%, 而到 6 月 6 日 00:00 则增大到 99%, 在这十几个小时内 RH 几乎为直线上升。由图 1(b)可发现类似的 RH 变化在观测期间经常出现, 主要是因为观测点位于山顶, 容易受到地形云的影响。当地形云移动到观测站点时, RH 就会急剧升高, 而到地形云离开站点时, RH 则会迅

速下降. 由表 1 可知观测期间 RH 最小值仅为 9.6%, 但是最大值可达到 100%, 中值和平均值分别为 72.2% 和 71.5%. 由于泰山夏季降水较多, 山

顶地形云出现几率较大, 因此 RH 较高. 由图 1(b) 可知泰山顶温度变化与 RH 相反, 由表 1 可知观测期间平均温度为 15.5℃.

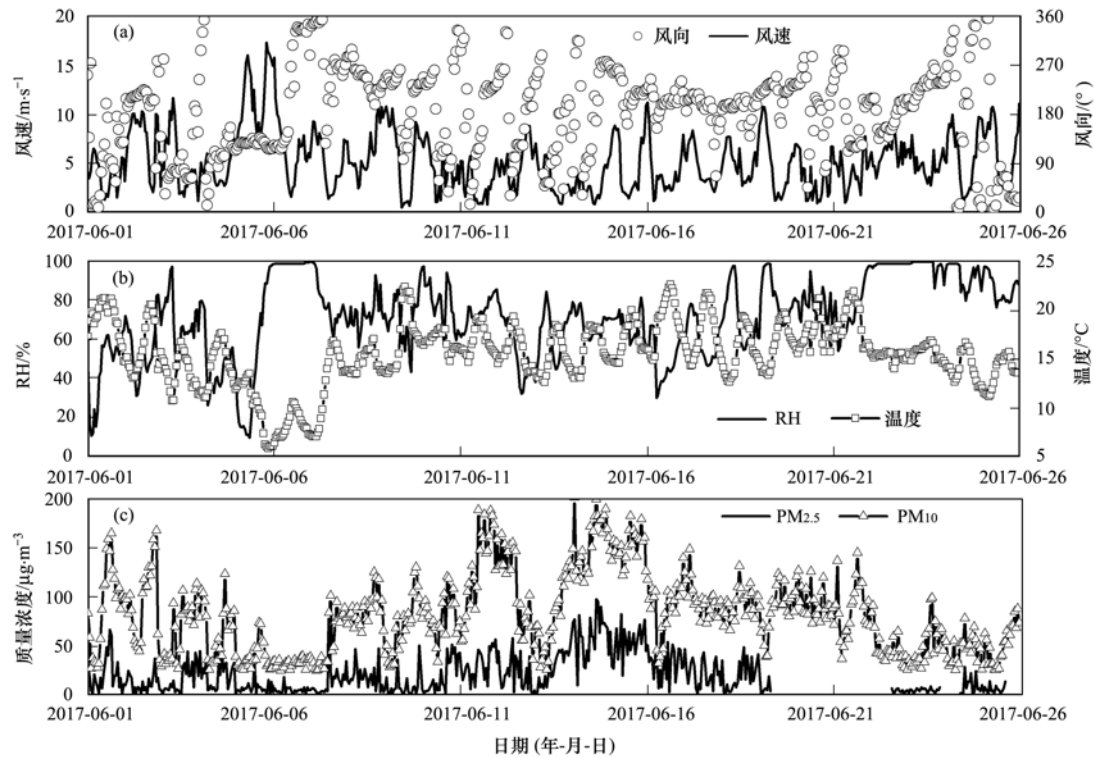


图 1 观测期间 PM 和气象要素时间变化

Fig. 1 Time series of PM and meteorological elements during the observation period

表 1 气象要素、PM 和数浓度统计

Table 1 Summaries of meteorological elements, PM and aerosol number concentration during the observation period					
项目	最大值	最小值	中值	平均值	标准偏差
温度/℃	22.7	5.8	15.6	15.5	3.2
RH/%	100.0	9.6	72.2	71.5	20.0
风速/m·s ⁻¹	17.4	0.5	4.7	5.2	3.0
能见度/km	35.0	0.0	11.5	13.9	11.0
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	97.9	1.0	13.5	20.7	19.6
PM ₁₀ /μg·m ⁻³	202.4	25.0	80.7	82.4	40.7
数浓度/cm ⁻³	46 682.0	743.5	6 737.1	8 672.8	6 721.0
表面积浓度/μm ² ·cm ⁻³	1 885.8	10.8	409.2	408.3	225.5
体积分数/μm ³ ·cm ⁻³	1 124.8	0.2	20.0	24.4	46.7

由图 1 可知泰山 PM_{2.5}除了在 6 月 13~15 日浓度较高外, 其余观测期浓度均较低. 而在整个观测期内, PM₁₀ 的浓度较高, 最高可达 202.4 μg·m⁻³. 由表 1 可知观测期间, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的平均浓度分别为 20.7 μg·m⁻³ 和 82.4 μg·m⁻³, PM_{2.5}/PM₁₀ 为 25.1%. 一方面由于泰山顶部风速较大, 而植被覆盖相对较少, 因此裸露的地面较多, 容易使得土壤扬尘等粗粒子进入大气. 另一方面泰山顶部寺庙较多, 游客焚香烧纸过程也会燃放大量粗颗粒, 也会使得泰山顶部 PM₁₀ 浓度较高.

2.2 泰山顶气溶胶谱分布特征

气溶胶的粒径分布特征决定了它们在大气中的

滞留时间以及物理、化学特性, 通过对气溶胶颗粒物的数浓度谱和化学组成等的研究可以确定气溶胶颗粒物的来源信息. 由图 2 可知观测期间泰山数浓度谱分布为单峰型分布, 峰值位于 40 nm. 此外从中可发现气溶胶数浓度主要集中在 500 nm 以下粒径段, 大于 500 nm 气溶胶数浓度非常低. 由表 1 可知观测期间数浓度平均为 8 672.8 cm⁻³. 由图 2 可知泰山表面积浓度谱和体积分数谱分布均为三峰型分布. 表面积浓度的峰值分别位于 250 nm、520 nm 和 10 μm, 体积分数的峰值分别位于 310 nm、520 nm 和 10 μm. 由表 1 可知观测期间表面积浓度和体积分数平均为 408.3 μm²·cm⁻³ 和 24.2

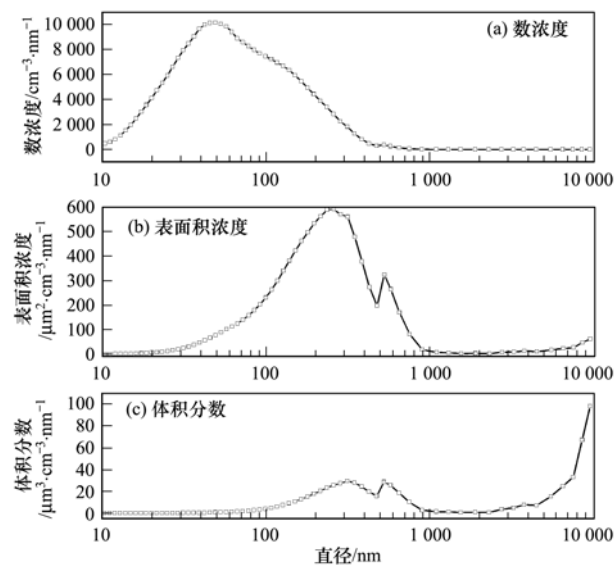


图2 观测期间气溶胶数浓度谱、表面积浓度谱和体积分数谱分布

Fig. 2 Spectral distribution of the aerosol number concentration, surface area concentration and volume fraction during the observation period

$\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

由图2可知在数浓度最大时,表面积浓度和体积分数反而较小.在5~10 μm 的粗粒子段,虽然数浓度非常低,但是体积分数非常高,在10 μm 左右体积分数的峰值最大,这也与泰山 PM_{10} 的浓度较

表2 观测期间各粒径范围内气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数

Table 2 Summaries of aerosol number concentration, surface area concentration, and volume concentration in different size-ranges during the observation period

粒径范围	数浓度/ cm^{-3}		表面积浓度/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$		体积分数/ $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
10~20 nm	582.6	1 159.9	0.5	1.1	0.002	0.003
20~100 nm	5 770.8	7 920.2	59.1	85.0	0.7	1.0
100~500 nm	2 481.3	1 514.5	298.0	175.2	12.2	7.4
0.5~1.0 μm	37.4	33.4	41.9	38.6	4.3	4.1
1.0~2.5 μm	0.7	0.9	3.9	5.0	0.9	1.1
2.5~10 μm	0.1	0.6	10.3	78.8	11.0	98.4

积聚模态粒子主要来源于爱根核模态粒子的凝结和碰并增长过程以及燃烧过程产生的高温蒸汽的凝结核碰并.由表2可知观测期间100~500 nm气溶胶数浓度为2 481.3 cm^{-3} ,占总数浓度的28.0%;表面积浓度和体积分数分别为298.0 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和12.2 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,分别占总浓度的72.0%和41.9%.这个粒径段粒子贡献了绝大多数的表面积浓度,但是经计算其与能见度的相关系数仅为-0.16,并不是影响能见度的主要粒径段.0.5~1.0 μm 数浓度为37.4 cm^{-3} ,占总数浓度的0.4%,但是却贡献了10.1%和14.8%的表面积浓度和体积分数.此外,该粒径段粒子数浓度与能见度的相关系数为-0.49,为所有粒径段中与能见度

高相吻合.

为了更加直观地分析泰山不同粒径段气溶胶分布特征,本文将观测到的10 nm~10 μm 粒径范围的气溶胶分为6个粒径段进行讨论:10~20 nm(核模态)、20~100 nm(爱根核模态)、100~500 nm和0.5~1.0 μm (积聚模态)、1.0~2.5 μm 和2.5~10 μm (粗模态).

表2可知泰山核模态粒子数浓度为582.6 cm^{-3} ,可占总数浓度的6.6%;但是表面积浓度和体积分数仅为0.5 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和0.002 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,几乎可以忽略,也就是说核模态粒子对质量浓度几乎没有贡献.爱根核模态粒子数浓度为5 770.8 cm^{-3} ,占总数浓度的65%;表面积浓度为59.1 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$,占总表面积浓度的14.3%.但是体积分数仅为0.7 $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,占总体积分数的2.4%.核模态粒子主要来自气-粒转化过程,大气中新粒子生成事件是其重要的来源之一^[32],虽然其停留时间较短,但是大气中爱根核模态粒子的重要来源.爱根核模态粒子还主要来自燃烧过程所产生的一次排放的颗粒物,比如汽车尾气的直接排放^[33,34].泰山由于海拔较高,因此汽车尾气的影响较小,而爱根核模态粒子数浓度又非常高,可能主要来自核模态粒子增长以及烹饪等燃烧过程.

相关性最高的粒径段.主要是因为该粒径段为可见光谱段,因此气溶胶粒子的消光系数最高^[19].

粗模态粒子主要来自机械过程.由表2可知粗模态粒子数浓度几乎可以忽略不计,但是表面积浓度和体积分数较高.2.5~10 μm 粒径段粒子平均数浓度仅为0.1 cm^{-3} ,但是却贡献了2.5%和37.8%的表面积浓度和体积分数.

2.3 泰山顶气溶胶日变化特征

由图3可发现数浓度和表面积浓度的日变化特征基本类似,均为白天高,夜间低.尤其是数浓度,在10:00~12:00达到最大值,此后浓度呈现显著地下降趋势.由图4可知风速在白天远低于夜间,10:00~13:00风速最小.一方面此时太阳辐射较

强,有利于气溶胶新粒子的生成.另一方面,此时风速较低,大气扩散条件较弱,因此气溶胶粒子容易积聚.13:00之后,风速开始增加,大气扩散条件开始增强.14:00温度达到最大值、RH达到最低值,此后温度开始迅速降低,RH开始迅速升高.随着太阳辐射的减弱,气溶胶新粒子的生成速率逐渐减弱直至消失.此外,高RH的大气环境,也使得大气中的气溶胶粒子更容易发生凝结和碰并过程.因此,气溶胶数浓度开始持续降低.由图3可发现15:00~17:00虽然数浓度持续下降,但是表面积浓度却出现一个峰值,这也说明在该时间段气溶胶粒子发生了凝结或者碰并增长.

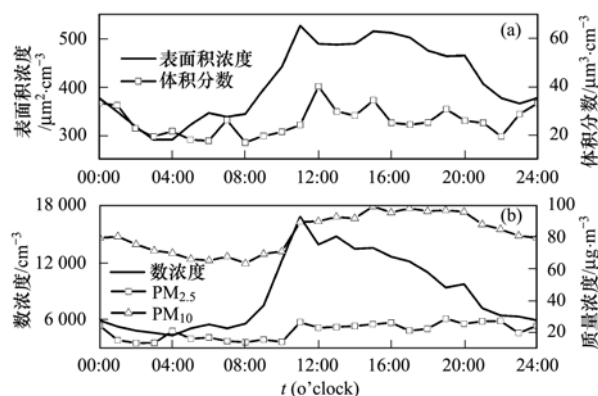


图3 观测期间PM、气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of PM, aerosol number concentration, surface area concentration and volume concentration during the observation period

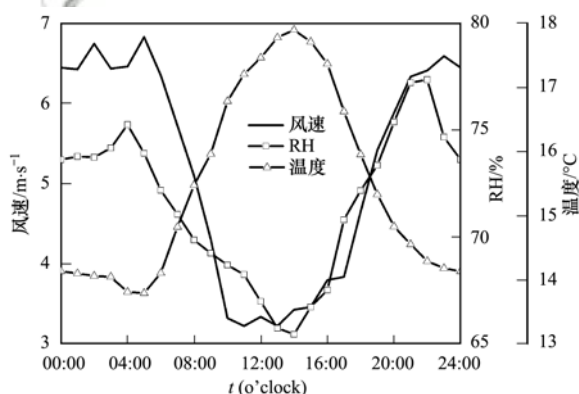


图4 观测期间主要气象要素日变化

Fig. 4 Diurnal variations of the main meteorological elements during the observation period

由图3可发现体积分数的日变化比较复杂,为多峰型分布,峰值主要出现在07:00、12:00、15:00和19:00.由图4可知表面积浓度早晚峰值期间,对应的RH分别为71%和75%,温度均为14.8℃,即多为高湿低温的环境,此时多为晨雾消散和晚雾生成的阶段,因此虽然数浓度较低,但是体积分非常高.

由图3可发现PM_{2.5}和PM₁₀的日变化特征比较类似,均为白天高,夜间低.一方面是因为白天风速较低,另一方面白天泰山人为活动较多,因此造成白天PM的浓度较高.由图3可发现PM₁₀全天浓度均远大于PM_{2.5},由图4可知泰山全天风速均超过3 m·s⁻¹,夜间甚至超过6 m·s⁻¹,而观测点周边植被相对较少,多裸露的沙土,因此PM₁₀的浓度较高.此外,泰山风景区寺庙较多,白天多焚香烧纸的祭祀活动,而这些燃烧过程排放的颗粒物又以粗粒子为主,这也是造成PM₁₀浓度较高的一个主要原因.

2.4 泰山顶气溶胶与主要气象条件的关系

由图5可发现PM_{2.5}和PM₁₀的高值区主要分布在偏西风方向,东北风方向PM的浓度比较低.观测点的西部分散众多宾馆和寺庙,人为活动频繁,人为源较多.观测点东北方向为景区后山,人为活动稀少,因此PM污染源相对较少.此外由图5可发现当东风时,PM₁₀存在一个非常明显的高值区,并且高值区分布位于风速为6~12 m·s⁻¹区间,由表1可知远大于观测期间的平均风速,因此高浓度的PM多为景区外输送影响.此外,在观测点东部50km范围内分布较多的钢铁厂、化工厂和冶金厂等,这些工厂的高架点源排放的污染物,在大风天也会向观测点输送大量的气溶胶.当风速小于6 m·s⁻¹时,在所有方向上PM的浓度均较高,这主要是由于景区内自身污染源排放影响.但是当风速大于9 m·s⁻¹时,PM的浓度较低,主要是因为大风速下扩散条件较好,有利于污染物扩散.

数浓度在偏北风时较低,其余风向下浓度较高.此外,风向对数浓度的影响要比风速的影响大.当风速较大时,数浓度也会较高,比如当风向为120°时,虽然风速超过15 m·s⁻¹,但是数浓度仍然比较大.此外由图5可知当东风风速为9~12 m·s⁻¹时,数浓度最高.表面积随风速风向的分布与数浓度的分布类似.

不同RH下气溶胶的理化特性存在显著差异,大气气溶胶粒子的吸湿增长会增强其消光特性,使大气能见度降低.本研究将RH分为0~30%、30%~60%、60%~80%、80%~90%和90%~100%这5个档,对应平均能见度分别为34.6、30.2、21.0、14.2和3.4 km.

由图6可知不同RH下气溶胶谱分布不同.当RH<30%,数浓度谱分布为双峰型分布,峰值分别位于40 nm和90 nm;表面积浓度谱分布为单峰型分布,峰值位于160 nm.当30%<RH<60%时,数浓度谱分布还为双峰型分布,但是第一个峰值浓

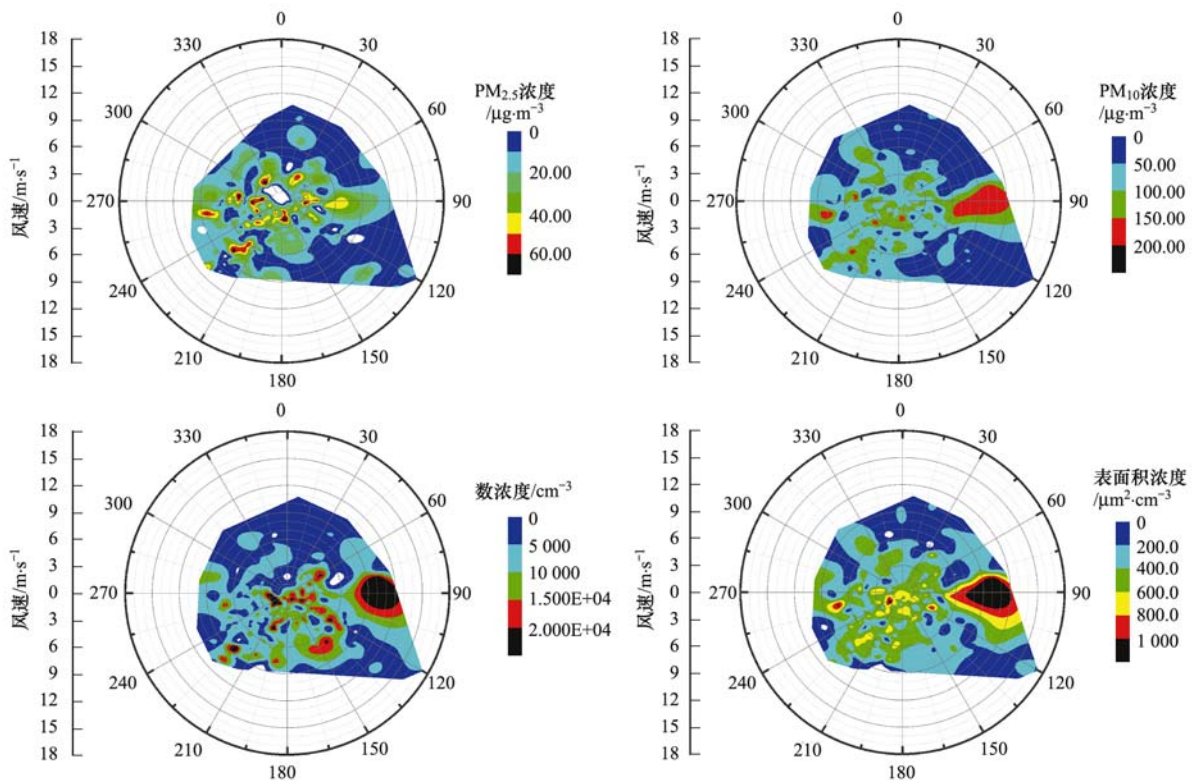


图5 观测期间PM、数浓度和表面积浓度与风速风向关系

Fig. 5 Wind effects on PM, aerosol number concentration, and surface area concentration during the observation period

度明显增大,位于90 nm处的峰值几乎观测不到.此时,表面积浓度谱为双峰型分布,峰值分别位于230 nm和520 nm.随着RH的增加,表面积浓度谱开始向大粒径段偏移,但是此时 $RH < 60\%$,气溶胶粒子的吸湿增长还不明显,平均能见度几乎没有降低.

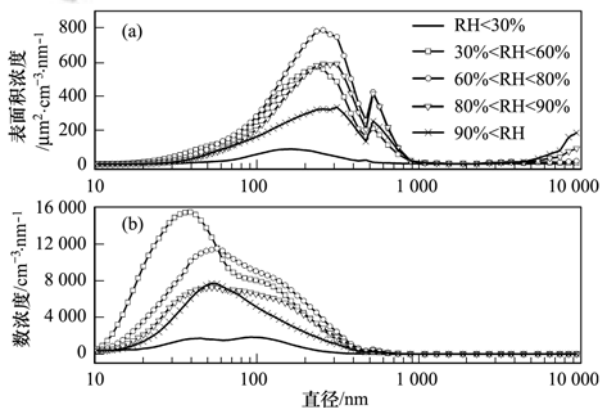


图6 不同RH下数浓度谱和表面积浓度谱分布

Fig. 6 Spectral distributions of aerosol number concentration and surface area concentration in different RH

当 $60\% < RH < 80\%$ 时,气溶胶粒子吸湿增长加速,由图6可知此时气溶胶数浓度谱为单峰型分布,峰值位于60 nm.此时,表面积浓度谱为双峰型分布,峰值分别位于260 nm和520 nm.可发现,数浓度谱和表面积浓度谱的最大峰值均向大粒径段偏移.说明气溶胶粒子在此RH下吸湿增长较为明

显,气溶胶粒子粒径增大,造成其消光系数增加,因此能见度下降较多,平均能见度为21.0 km.

当 $80\% < RH < 90\%$ 时,一般为雾-霾转换过程.由图6可发现数浓度在此RH下有所降低,数浓度谱为单峰型分布,但是峰宽较大,可横跨30~160 nm.此时表面积浓度谱呈现三峰型分布,峰值分别位于260 nm、520 nm和10 μm.当 $RH > 90\%$ 时,即为云雾过程时,由图6可发现气溶胶数浓度谱为典型的单峰型分布,峰值位于50 nm.但是此时可发现表面积浓度谱为三峰型分布,峰值分别位于300 nm、520 nm和10 μm.由于云雾过程对于小粒子的清除作用,使得表面积浓度的第一个峰值往大粒径段偏移.

3 结论

(1)观测期间泰山 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的平均浓度分别为 $20.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $82.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 仅为25.1%.数浓度、表面积浓度和体积分数平均为 8672.8cm^{-3} 、 $408.3 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $24.2 \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$.数浓度谱分布为单峰型分布,峰值位于40 nm.表面积浓度和体积分数谱分布均为三峰型分布.表面积浓度的峰值分别位于250 nm、520 nm和10 μm,体积分数的峰值分别位于310 nm、520 nm和10 μm.

(2)数浓度和表面积浓度的主导粒径分别为10

~20 nm 和 100 ~ 500 nm, 分别为 $5\,770.8\text{ cm}^{-3}$ 和 $298.0\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, 占总浓度的 65% 和 72.0%。体积分数的主导粒径为 100 ~ 500 nm 和 2.5 ~ 10 μm , 分别为 $12.2\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $11.0\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, 占总体积分数的 41.9% 和 37.8%。

(3) 受人为活动和气象要素的影响 PM ($\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10})、数浓度和表面积浓度的日变化分布为白天高, 夜间低。体积分数的日变化比较复杂, 为多峰型分布, 峰值主要出现在 7:00、12:00、15:00 和 20:00。

(4) 风向对 PM 和数浓度的影响要比风速的影响大。当风速小于 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, PM 和气溶胶数浓度主要受到景区自身污染源的影响。东风风速为 $9\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 外来输送对景区 PM 和数浓度的影响较大。不同 RH 下气溶胶谱分布不同。随着 RH 的增加, 气溶胶数浓度谱由双峰型变为单峰型分布, 表面积浓度谱由单峰型转变为三峰型分布。

参考文献:

- [1] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [2] 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.
- [3] 胡睿, 银燕, 陈魁, 等. 南京雾、霾期间含碳颗粒物理化学特征变化分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2007-2015.
Hu R, Yin Y, Chen K, *et al.* Insights into characteristics of carbonaceous particles during haze and fog events in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2007-2015.
- [4] Lighty J S, Veranth J M, Sarofim A F. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(9): 1565-1618.
- [5] 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.
- [6] Duan J Y, Wang Y Y, Xie X, *et al.* Influence of pollutants on activity of aerosol cloud condensation nuclei (CCN) during pollution and post-rain periods in Guangzhou, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 1008-1019.
- [7] Ma N, Zhao C S, Tao J C, *et al.* Variation of CCN activity during new particle formation events in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(13): 8593-8607.
- [8] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(1): 12-16.
Zhang X Y. Aerosol over China and their climate effect[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(1): 12-16.
- [9] Penner J E, Dickinson R E, O'Neill C A. Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget[J]. *Science*, 1992, **256**(5062): 1432-1434.
- [10] Rosenfeld D, Sherwood S, Wood R, *et al.* Climate effects of aerosol-cloud interactions[J]. *Science*, 2014, **343**(6169): 379-380.
- [11] 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.
- [12] Wang M Y, Cao C X, Li G S, *et al.* Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **102**: 112-121.
- [13] Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Regional characteristics of air pollutants during heavy haze events in the Yangtze River Delta, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**: 2159-2171.
- [14] Zhang J K, Huang X J, Wang Y S, *et al.* Characterization, mixing state, and evolution of single particles in a megacity of Sichuan Basin, southwest China[J]. *Atmospheric Research*, 2018, **209**: 179-187.
- [15] Liu Z R, Gao W K, Yu Y C, *et al.* Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations and chemical species in urban and background areas of China: emerging results from the CARE-China network[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(12): 8849-8871.
- [16] 沈利娟, 王红磊, 李莉, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2871-2880.
Shen L J, Wang H L, Li L, *et al.* Observation analysis on the characteristics of meteorological elements and pollutants during a continuous fog and haze episode in spring in Jiaxing city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2871-2880.
- [17] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 2013~2015 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、反应性气体和气溶胶粒径的特性分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3647-3657.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$, reactive gas and aerosol size distributions of Beijing from 2013 to 2015[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3647-3657.
- [18] 周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊冬季霾天 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性离子的污染特征与消光作用研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1926-1934.
Zhou Y Y, Ma Y, Zheng J, *et al.* Pollution characteristics and light extinction effects of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ during winter hazy days at north suburban Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- [19] 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.
- [20] Wang H L, Zhu B, Zhang Z F, *et al.* Mixing state of individual carbonaceous particles during a severe haze episode in January 2013, Nanjing, China[J]. *Particuology*, 2015, **20**: 16-23.
- [21] 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.
- [22] 杨洋, 王红磊, 侯雪伟, 等. 石家庄一次持续性霾过程形成原因及气溶胶垂直探空分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 824-832.
Yang Y, Wang H L, Hou X W, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a long-term haze episode and the vertical distribution of aerosol concentration in Shijiazhuang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 824-832.
- [23] 孟静静, 侯战方, 张二勋, 等. 黄山 PM_{10} 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2688-2697.

- Meng J J, Hou Z F, Zhang E X, *et al.* Seasonal variation and sources of dicarboxylic acids and related compounds in PM₁₀ from Mt. Huangshan [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (7): 2688-2697.
- [24] 银燕, 陈晨, 陈魁, 等. 黄山大气气溶胶微观特性的观测研究[J]. *大气科学学报*, 2010, **33**(2): 129-136.
Yin Y, Chen C, Chen K, *et al.* An observational study of the microphysical properties of atmospheric aerosol at Mt. Huang [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, **33**(2): 129-136.
- [25] 文彬, 银燕, 秦彦硕, 等. 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34** (5): 1973-1981.
Wen B, Yin Y, Qin Y S, *et al.* Chemical characteristics of water-soluble components of aerosol particles at different altitudes of the mount Huang in the summer[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1973-1981.
- [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] 徐宏辉, 王跃思, 杨勇杰, 等. 泰山顶夏季大气气溶胶中水溶性离子的浓度及其粒径分布研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 305-309.
Xu H H, Wang Y S, Yang Y J, *et al.* Concentrations and size distributions of water soluble ions of atmospheric aerosol at the summit of Mount Tai [J]. *Environmental Science*, 2008, **29** (2): 305-309.
- [28] Deng C, Zhuang G, Huang K, *et al.* Chemical characterization of aerosols at the summit of mountain Tai in central east China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (14): 7319-7332.
- [29] Gao X M, Xue L K, Wang X F, *et al.* Aerosol ionic components at Mt. Heng in central southern China: abundances, size distribution, and impacts of long-range transport[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**: 498-506.
- [30] Li W J, Chi J W, Shi Z B, *et al.* Composition and hygroscopicity of aerosol particles at Mt. Lu in south China: implications for acid precipitation [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 626-636.
- [31] Li J J, Wang G H, Zhou B H, *et al.* Chemical composition and size distribution of wintertime aerosols in the atmosphere of Mt. Hua in central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (6): 1251-1258.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Ristovski Z D, Morawska L, Hitchins J, *et al.* Particle emissions from compressed natural gas engines [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2000, **31** (4): 403-413.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)