

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

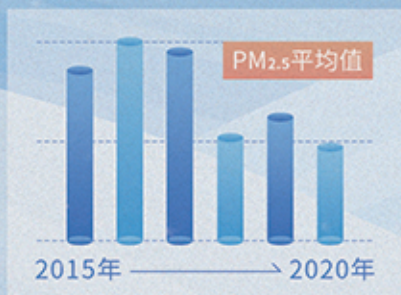
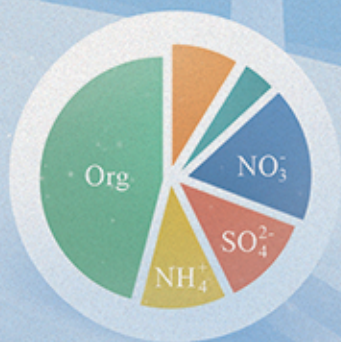
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

天津城区 2019 年 2 ~ 3 月气溶胶粒径分布特征观测分析

郝国^{1,2}, 蔡子颖^{3,4*}, 刘敬乐⁵, 王晓佳^{3,4}, 姚青^{3,4}

(1. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 2. 天津市海洋气象重点实验室, 天津 300074; 3. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 4. 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074; 5. 天津市气象探测中心, 天津 300074)

摘要: 气溶胶粒径分布是反映气溶胶粒子来源、形成过程和污染特征的重要物理参数, 为研究天津城市地区气溶胶数浓度和谱分布特征及其影响因素, 利用扫描电迁移率颗粒谱仪 (SMPS) 对 2019 年 2 ~ 3 月天津河西 10 ~ 600 nm 气溶胶数浓度粒径分布进行了采样分析。结果表明, 冬末春初天津市 10 ~ 600 nm 气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数分别为 $22\ 188.22\ \text{cm}^{-3}$ 、 $1\ 581.08\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $70.76\ \mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数谱均为单峰分布, 峰值粒径分别位于 109.40、269.00 和 429.40 nm。核模态 (10 ~ 20 nm)、爱根核模态 (20 ~ 100 nm) 和积聚模态 (100 ~ 600 nm) 粒子数浓度分别占气溶胶总数浓度的 1.40%、52.44% 和 46.16%。气溶胶数浓度日变化具有明显的周末效应, 工作日为三峰分布, 峰值出现在道路早晚高峰和午后, 周末呈双峰分布, 峰值出现在道路早晚高峰且出现时间比工作日推迟 1 ~ 2 h, 汽车尾气排放对城区气溶胶浓度增加起重要作用。气象条件对天津城区气溶胶粒径分布有明显影响, 气溶胶在偏东风和西南风条件下数浓度较高, 非降水日相对湿度 (RH) 增加导致气溶胶谱分布向大粒径方向移动, 随着 RH 由小于 20% 升高到 50% ~ 60%, 气溶胶数浓度谱峰值粒径由 50 nm 增大到 131 nm, 降水对 100 ~ 200 nm 气溶胶粒子有明显的清除作用, 降水过程导致气溶胶谱峰值粒径减小到 98 nm。

关键词: 天津城区; 气溶胶; 数浓度; 粒径分布; 日变化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3903-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112095

Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area

HAO Jian^{1,2}, CAI Zi-ying^{3,4*}, LIU Jing-le⁵, WANG Xiao-jia^{3,4}, YAO Qing^{3,4}

(1. Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China; 4. CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074, China; 5. Tianjin Meteorological Observation Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: The aerosol size distribution is an important physical parameter reflecting the source, formation process, and pollution characteristics of aerosol particles. In order to study the properties of aerosol number concentration and size distributions in the Tianjin urban area, the aerosol number concentration and size distributions ranging from 10-600 nm were detected using a scanning mobility particle sizer (SMPS) during February and March, 2019. The results showed that in the Tianjin urban area, the aerosol number concentration, surface area concentration, and volume concentration in the size range of 10-600 nm were $22\ 188.22\ \text{cm}^{-3}$, $1\ 581.08\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$, and $70.76\ \mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively, in late winter and early spring. The aerosol number concentration, surface area concentration, and volume concentration spectrum were all unimodally distributed, and the peak value sizes were 109.40, 269.00, and 429.40 nm. The number concentrations of the nucleation mode (10-20 nm), Aitken mode (20-100 nm), and accumulation mode (100-600 nm) aerosols accounted for 1.40%, 52.44%, and 46.16% of the total number concentration. The diurnal variation in aerosol number concentration showed three peaks (06:00-08:00, 12:00-14:00, and 18:00-20:00) on work days and two peaks (07:00-08:00 and 19:00-21:00) on weekends. The peaks appeared 1-2 hours later on weekends, and the increment of aerosol number concentration was attributed to vehicle exhaust emissions. Meteorological factors had a significant influence on the aerosol size distribution in Tianjin; aerosol number concentration values were high in east and southwest wind. On non-precipitation days, the aerosol number size distribution moved to larger size ranges with the increment of relative humidity (RH); as the RH increased from <20% to 50%-60%, the size peak increased from 50 nm to 131 nm. The precipitation removed 100-200 nm aerosol particles discernibly, which resulted in the size peak decreasing to 98 nm.

Key words: Tianjin urban area; atmospheric aerosol; number concentration; spectrum distribution; diurnal variation

气溶胶是悬浮在大气中的固态及液态微粒, 具有环境和气候双重效应。气溶胶增多会降低空气质量和大气能见度, 危害人体健康^[1-5], 还会通过直接和间接辐射强迫影响地球的气候系统^[6-10]。气溶胶通过散射和吸收太阳辐射直接影响地气系统辐射, 并作为云凝结核和冰核通过影响云的宏微观特征进而改变地气辐射。近年来, 随着我国经济的快速发展, 人类活动排放的气溶胶及气溶胶前体物有增无减^[11], 北方城市地区冬季持续多年受到气溶胶污染

天气影响^[12-15]。

京津冀地区作为我国具有代表性的区域复合型大气污染地区之一, 近年来开展了大量气溶胶污染观测试验, 从地基观测^[16-18]和飞机观测^[19,20]到卫

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130513); 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202014); 天津市自然科学基金项目(19JCQNJC08000)

作者简介: 郝国(1988~), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为气溶胶观测和气溶胶环境气候效应, E-mail: 824510059@qq.com

* 通信作者, E-mail: 120078030@163.com

星遥感观测^[21],多角度和全方位研究了气溶胶的污染特征.首先,气溶胶浓度分布具有区域性特征^[21],很大程度上受到地理位置和气候特征影响,例如人类活动频繁的城市地区高于郊区;其次,气溶胶数浓度具有明显的季节特征,北京地区^[19]气溶胶数浓度秋冬季节高于春夏两季,冬季气溶胶散射系数明显高于其他3个季节,而气溶胶光学厚度(AOD)在华北平原表现为春夏高于秋冬^[21];另外,不同污染源造成气溶胶化学组分和粒径分布的差异^[16],且气溶胶在排放后的传输过程中会发生光化学反应等变化,导致其化学组分和粒径分布再次改变.在揭示气溶胶污染特征的科学研究中,气溶胶粒径分布是重要一环.气溶胶粒径分布可以反映气溶胶粒子来源、形成过程和污染特征.通过在我国南方城市地区^[22~23]、南方高山地区^[24]、北方乡村地区^[25]和北方高山地区^[26]等不同海拔不同污染程度地区研究发现,气溶胶谱可表征大气污染状况,例如清洁高山地区气溶胶谱分布常表现为双峰分布,且小粒子较多;污染较为严重的城市地区则多为单峰分布,而且在同一地区,污染日气溶胶粒径分布与清洁日相比明显向大粒子方向拓宽^[18].气溶胶谱分布具有很强的季节变化特征和明显的日变化特征,污染源对气溶胶粒径分布具有最主要影响.风速、温度以及相对湿度等气象要素也会影响气溶胶粒径谱的分布特征.

天津地处太平洋西岸,华北平原北部,东临渤海、北依燕山,西靠首都北京,是中国北方最大的沿海开放城市.作为京津冀协同发展中心一员,近20年发展迅速,机动车保有量快速增长.天津城市地区已经开展了大量气溶胶污染相关的科学研究工作,包括气溶胶光学特征研究^[27~29]和化学成分分析^[30,31],开展了重污染天气垂直方向气溶胶观测研究^[32,33],并分析了气象要素对气溶胶分布特征的影响^[34,35],较为深入地揭示了天津城市地区气溶胶污染特征和成因.但一直以来,天津城市地区缺乏气溶胶谱分布特征的研究,本研究使用扫描电迁移率颗粒谱仪,于2019-02-12~2019-03-31共48个有效观测日获取10~600 nm粒径段气溶胶粒径分布观测数据,结合本站自动气象站收集的温压湿风降水等气象要素数据,分析了天津城市地区气溶胶粒径分布特征及其主要影响因素,通过揭示华北平原北部污染地区气溶胶污染特征,以期气溶胶科学治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点及时间

为揭示天津城市地区气溶胶粒径特征,采样点

选在天津黑牛城国家气候监测站(39°06'N, 117°10'E,海拔2.2 m,站号54517),该站位于天津市河西区,属城市中心区域,站点北侧200 m有快速路,东侧50 m有交通主干道,西侧及南侧均为住宅区.观测点主要受交通源和生活源排放影响.观测时间2019-02-12~2019-03-31,共48个有效观测日.

1.2 观测仪器及数据

气溶胶粒径分布观测仪器采用TSI公司生产的扫描电迁移率颗粒谱仪(scanning mobility particle sizer, SMPS).该仪器由静电分级器(DMA3082)和计数器(CPC 3775)两部分组成,气溶胶粒子通过放射性中和器带电后进入DMA, DMA通过不同电压筛选不同粒径的气溶胶粒子,被选出的粒子进入CPC通过吸收挥发性液体正丁醇增大并被CPC计数^[36].设定探测范围10~600 nm,共100档,时间分辨率5 min.此外,利用54517站点自动气象站获取同时间段气象要素资料,PM_{2.5}质量浓度由天津市前进道环境要素观测站提供,该环境站距观测点直线距离2 km,可代表该区域污染情况.所有数据均经过严格质量控制,最终获得气溶胶浓度有效数据13 703组.

2 结果与讨论

2.1 观测概述

本观测研究跨越冬末春初,观测期间以晴天为主,观测到降水5次,霾天6 d.由图1(b)可知,气温2~3月呈上升趋势,日平均气温由零下上升至10℃左右,观测期间气温最高达25.50℃(表1),最低为-4.90℃,平均气温为8.12℃.图1(b)~1(d)显示相对湿度和气压随时间呈下降趋势,10 min平均风速随时间呈增大趋势.最大相对湿度出现在2月18日(降水日)达89.00%,最低相对湿度只有5.00%,观测期间平均相对湿度37.51%,较为干燥,观测期间平均风速1.61 m·s⁻¹,具有典型冬末低温略干燥和初春温暖干燥多风的气象特征.

由图1可见,观测期间气溶胶质量和数浓度具有较强的时间变化特征,且日变化明显.2月PM_{2.5}为94.43 μg·m⁻³,峰值浓度为366 μg·m⁻³,3月PM_{2.5}为56.04 μg·m⁻³,其变化体现出冬季明显高于春季的季节特征.气溶胶数浓度存在微弱的季节变化特征,2月和3月气溶胶数浓度分别为23 268.94 cm⁻³和21 596.10 cm⁻³,冬季略高.多数情况下气溶胶数浓度与PM_{2.5}变化趋势具有一致性,但变化幅度存在差异,且二者变化趋势呈负相关的情况也有出现,说明观测点处气溶胶来源比较复杂,具有多元性.

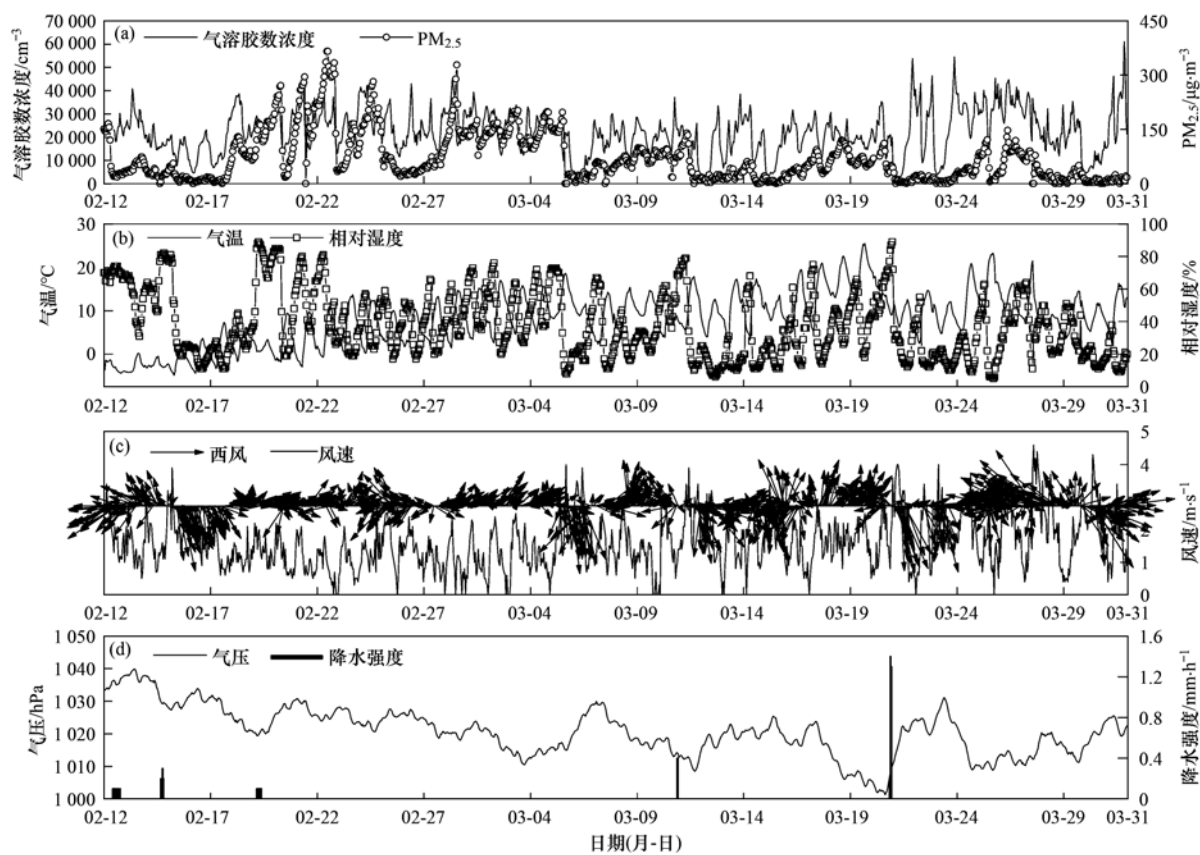


图1 观测期间气溶胶浓度和气象要素时间变化

Fig. 1 Time series of aerosol concentration and meteorological elements during observation period

表1 气溶胶浓度和气象要素统计

Table 1 Statistical values of aerosol concentration and meteorological elements

项目	最大值	最小值	平均值	标准差
数浓度/cm ⁻³	69 057. 91	1 919. 19	22 180. 22	9 621. 18
表面积浓度/μm ² ·cm ⁻³	5 791. 15	105. 07	1 581. 08	1 135. 81
体积分数/μm ³ ·cm ⁻³	313. 42	3. 59	70. 76	60. 60
PM _{2.5} 质量浓度/μg·m ⁻³	366. 00	3. 00	70. 65	66. 73
气温/℃	25. 50	-4. 90	8. 12	6. 13
相对湿度/%	89. 00	5. 00	37. 51	20. 27
风速/m·s ⁻¹	4. 60	0. 00	1. 61	0. 81
气压/hPa	1 039. 90	1 001. 30	1 020. 77	7. 32
降水强度/mm·h ⁻¹	1. 40	0. 10	0. 27	0. 36

由表 1 可见,气溶胶数浓度在 1 919. 19 ~ 69 057. 91 cm⁻³变化,平均值为 22 180. 22 cm⁻³,量级达 10⁴ cm⁻³,与天津郊区观测结果具有相同量级^[25],数值高出 5 × 10³ cm⁻³;气溶胶表面积浓度和体积分数平均值分别为 1 581. 08 μm²·cm⁻³和 70. 76 μm³·cm⁻³,PM_{2.5}平均值为 70. 65 μg·m⁻³.

2.2 天津城区气溶胶谱分布特征

气溶胶的粒径分布特征不仅可以表征气溶胶粒子的来源,也影响气溶胶在大气中的滞留时间和理化特性^[26].由图 2 可知天津城区 10~600 nm 气溶胶数浓度谱分布为单峰型,峰值位于 109. 40 nm.气溶胶表面积浓度谱和体积分数谱也都呈单峰分布,峰值分别位于 295. 50 nm 和 429. 40 nm,100 nm 以上气溶胶粒

子对表面积浓度谱和体积分数谱起主要贡献.

为更加直观地分析天津城区不同粒径段气溶胶分布特征,本文将 10~600 nm 粒径范围气溶胶分为 3 个粒径段进行讨论:10~20 nm(核模态)、20~100 nm(爱根核模态)和 100~600 nm(积聚模态).

由表 2 可知天津城区核模态气溶胶粒子数浓度为 311. 87cm⁻³,占总数浓度的 1. 4%,表面积浓度和体积分数值为 0. 3 μm²·cm⁻³和 0 μm³·cm⁻³,核模态粒子对质量浓度贡献较小.核模态气溶胶主要来自大气中的气-粒转化过程,新粒子生成事件是其重要来源之一^[37],核模态粒子在大气中停留时间短,多数通过碰并过程变成爱根核模态粒子.此外,爱根核模态粒子还主要来自燃烧过程产生的一次排放颗

颗粒物,如汽车尾气的直接排放^[38,39].天津城区爱根核模态粒子数浓度为 $11\,607.83\text{ cm}^{-3}$,占总数浓度的52.3%,在3个模态中位列第一,表面积浓度为 $135.70\text{ }\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-3}$,占总表面积浓度的8.6%,体积分数为 $1.65\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,占总体积分数的2.3%,可见爱根核模态气溶胶粒子对数浓度贡献最大,对质量浓度贡献较小,由于观测点受到交通源影响较大,天津城市地区爱根核模态粒子可能主要来自于机动车尾气排放.

积聚模态气溶胶数浓度为 $10\,260.52\text{ cm}^{-3}$,占总数浓度的46.3%,仅比爱根核模态粒子少6%,也是天津城区气溶胶数浓度的主要来源.表面积浓度和体积分数分别为 $1\,445.08\text{ }\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $69.11\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,分别占总数的91.4%和97.7%,天津城区气溶胶表面积浓度和体积分数几乎全部来自积聚模态粒子.积聚模态粒子主要来自爱根核模态粒子的凝结增长和碰并增长过程以及燃烧过程产生的高温蒸气的凝结核碰并.

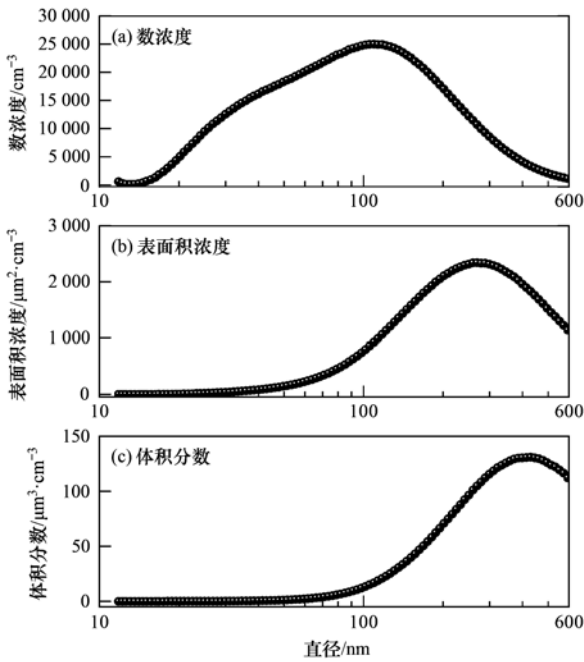


图2 气溶胶数浓度谱、表面积浓度谱和体积分数谱分布
Fig. 2 Aerosol number, surface area, and volume size distributions

表2 不同粒径段气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数

Table 2 Number concentration, surface area concentration, and volume concentration of different sized aerosols									
粒径范围 /nm	数浓度			表面积浓度			体积分数		
	平均值 /cm ⁻³	标准差 /cm ⁻³	占比/%	平均值 /μm ² ·cm ⁻³	标准差 /μm ² ·cm ⁻³	占比/%	平均值 /μm ³ ·cm ⁻³	标准差 /μm ³ ·cm ⁻³	占比/%
10~20	311.87	384.77	1.4	0.30	0.37	0	0.00	0.00	0
20~100	11 607.83	6 253.55	52.3	135.70	69.54	8.6	1.65	0.85	2.3
100~600	10 260.52	6 360.81	46.3	1 445.08	1 116.34	91.4	69.11	60.38	97.7

观测期间天气状况为晴天21 d、霾日6 d、降水日5 d,其余16 d为多云或阴天.由图3可知观测期间所有天气状况下气溶胶数浓度谱均为单峰分布,晴天谱分布峰值粒径为88.20 nm,峰值浓度为 $22\,154.44\text{ cm}^{-3}$,霾日、降水日和多云或阴天谱分布峰值粒径分别为135.80、105.50和117.60 nm,峰值浓度分别为和 $32\,955.32$ 、 $25\,838.09$ 和 $28\,330.64\text{ cm}^{-3}$,气溶胶数浓度谱峰值粒径和峰值浓度由大到小顺序均为霾日、多云或阴天、降水日、晴天,各天气状况下气溶胶数浓度平均值由高到低排序也与上述顺序相同,霾日、多云或阴天、降水日和晴天气溶胶数浓度平均值分别为 $25\,959.47$ 、 $22\,321.63$ 、 $21\,829.41$ 和 $21\,095.30\text{ cm}^{-3}$.各天气状况中,晴天污染最轻,降水日其次,霾日污染最重.

表3给出不同天气状况下核模态、爱根核模态和积聚模态气溶胶数浓度及占比.核模态粒子数浓度最高值为 432.69 cm^{-3} ,出现在晴天,占比为2.05%.核模态粒子次高值为 245.49 cm^{-3} ,占比为1.10%,出现在多云或阴天.核模态粒子数浓度次低值和最低值分别出现在降水日和霾日,数值分别为

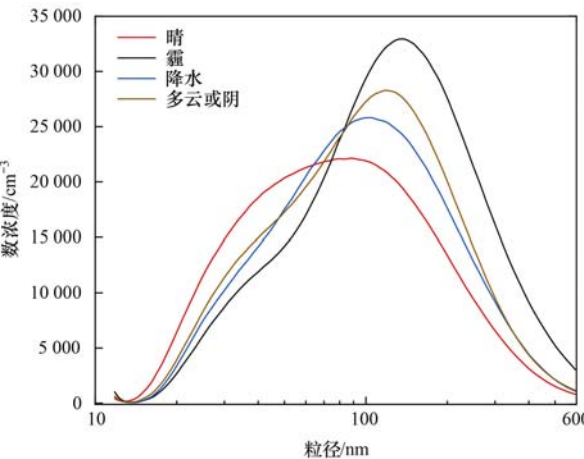


图3 不同天气状况气溶胶数浓度谱分布
Fig. 3 Aerosol number size distributions under different weather conditions

182.04 cm^{-3} 和 166.33 cm^{-3} .核模态气溶胶主要来自气-粒转化过程,新粒子生成事件可产生大量核模态粒子,该事件发生需要较强的太阳辐射条件^[40,41],因此晴天更有利于核模态粒子的生成.降水日太阳辐射较弱,不利于新粒子生成事件的发生,霾日空气中气溶胶浓度较高,核模态粒子在生

成后很快吸附到大粒子上,所以霾日观测到的核模态粒子浓度较低. 爱根核模态粒子数浓度在天气状况由高到底排序与核模态粒子浓度排序相同,为晴天、多云或阴天、降水日和霾日,而积聚模态粒子数浓度排序与前两者相反,在霾日最高,其次是多云或阴天和降水日,晴天最低. 晴天气溶

胶爱根核模态粒子占比最高,为 59.02%,霾天气溶胶的主要组成是积聚模态粒子,占比为 61.15%. 由此可见污染较严重时空气中的大粒子较多,这是由于气溶胶粒子长时间停留在大气中发生老化现象^[42],且发生了较多的碰并过程,消除掉大量爱根核模态粒子.

表 3 不同天气状况下不同粒径段气溶胶数浓度及占比

天气状况	10 ~ 20/nm			20 ~ 100/nm			100 ~ 600/nm		
	平均值/cm ⁻³	标准差/cm ⁻³	占比/%	平均值/cm ⁻³	标准差/cm ⁻³	占比/%	平均值/cm ⁻³	标准差/cm ⁻³	占比/%
晴	432.69	2 930.57	2.05	12 450.60	4 774.78	59.02	8 212.00	5 383.77	38.93
霾	166.33	100.81	0.64	9 919.76	675.17	38.21	15 873.37	4 157.70	61.15
降水	182.04	109.67	0.84	11 083.36	3 013.20	50.77	10 564.01	3 629.11	48.39
多云或阴	245.49	179.84	1.10	11 384.22	2 508.33	51.00	10 691.91	3 752.34	47.90

2.3 天津城区气溶胶时间变化特征

2.3.1 气溶胶日变化特征

图 4(a) 给出天津城市地区气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数以及主要气象要素的日变化,从中可知气溶胶浓度和气象要素具有较强的日变化特征. 气溶胶数浓度从清晨 03:00 开始上升,在 08:00 达到 1 d 中第一个峰值后开始下降. 在午后 14:00,数浓度出现第二个峰值,该峰值相对较小,且在 14:00 ~ 16:00 保持在较为稳定的水平. 从 16:00 开始,数浓度迅速上升,在 20:00 达到 1 d 中最显著的第三个高峰,之后夜间一直平稳下降,直到第 2 d 清晨. 气溶胶表面积浓度和体积分数日变化趋势大致相同,但与数浓度变化规律有所不同. 表面积浓度和体积分数在 07:00 达到峰值,随后一路下降到 16:00 达到 1 d 中最低值. 从 17:00 开始有一个较快的上升过程,直到 23:00. 由图 4(b) 可知,气温、相对湿度和风速也具有很强的日变化. 最低气温出现在 07:00,随后气温一路升高并在 14:00 ~ 16:00 达到 1 d 中最高值,之后一直下降直到 23:00. 最高相对湿度出现在 07:00,正是最低温度出现的时间,观测期间的清晨比较寒冷湿润,随着时间增加相对湿度逐渐下降,16:00 到达最低值,午后天气比较温暖干燥. 观测期间风速整体较低,夜间风速很小,07:00 开始风速增加,12:00 ~ 15:00 达到风速最大值,继而风速减小直到 23:00. 气溶胶浓度的日变化特征受人类活动排放、气象要素和混合层高度日变化影响,下面将详细论述.

图 5 给出气溶胶数浓度谱分布的日变化特征. 与图 4(a) 对比可知,气溶胶数浓度峰值出现都伴随着 20 ~ 50 nm 粒径段小粒子的增加. 夜间气溶胶粒子集中在 70 ~ 180 nm 范围,从 06:00 左右开始直到 08:00,粒径小于 60 nm 的小粒子明显增多. 该时间段对应人类活动开始活跃的时间,也对应道路交通

早高峰,汽车尾气排放物中包含大量燃烧不完全的小粒子,有研究表明,大部分由汽油机燃烧产生的粒子集中在 20 ~ 60 nm 粒径范围,而由柴油机燃烧产生的粒子集中在 20 ~ 130 nm 粒径范围^[43,44]. 随着时间推移,大气湍流活动增强,混合层升高,地面气溶胶由于该过程逐步被稀释,数浓度发生明显减小. 天津郊区夏季观测研究发现气溶胶数浓度日变化于 06:00 到达第一个峰值,比本研究早 2 h,这是由于夏季大气边界层抬升时间早于冬末春初季节所致.

13:00 左右开始,气溶胶数谱分布逐步由单峰分布转变为双峰分布(图略),直到 18:00 数谱分布的双峰合并为单峰. 13:00 气溶胶谱分布的峰值出现在 40 nm 和 120 nm 左右,随着时间推移,小粒径端的峰值粒径逐渐增大,到 17:00 时峰值粒径增长到 60 nm 左右,而大粒径端的峰值粒径在 13:00 ~ 17:00 基本维持在 120 nm. 午后气温升高,相对湿度降低,太阳辐射强度在 1 d 中最大,光化学反应最强,有利于气溶胶气-粒转化过程的发生,从而产生大量粒径极小的二次气溶胶. 这些二次气溶胶在与环境大气的接触过程中老化成为更大的粒子,即出现气溶胶粒径增长的现象.

18:00 ~ 20:00 气溶胶数浓度峰值为 1 d 中最大的,与早高峰时段相比,晚高峰时段的气溶胶谱偏左,晚高峰时段大气相对湿度比早高峰时段低 20%,气溶胶粒子吸湿增大过程弱于早高峰,粒子偏小. 气溶胶谱的峰值粒径和峰值浓度在 18:00 ~ 20:00 间均随时间增大,气溶胶粒子浓度不断累积,与粒子吸湿增长过程加强有一定关系. 与早高峰时段相比,晚高峰期间 10 ~ 90 nm 大小的气溶胶浓度较高,人为活动更加频繁. 该时段气溶胶高值的产生由几个因素共同作用. 一是晚高峰期间机动车排放产生的小粒子,二是混合层高度下降使得气溶胶粒子没有输出途径而不断累积,三是周边小区很多,居

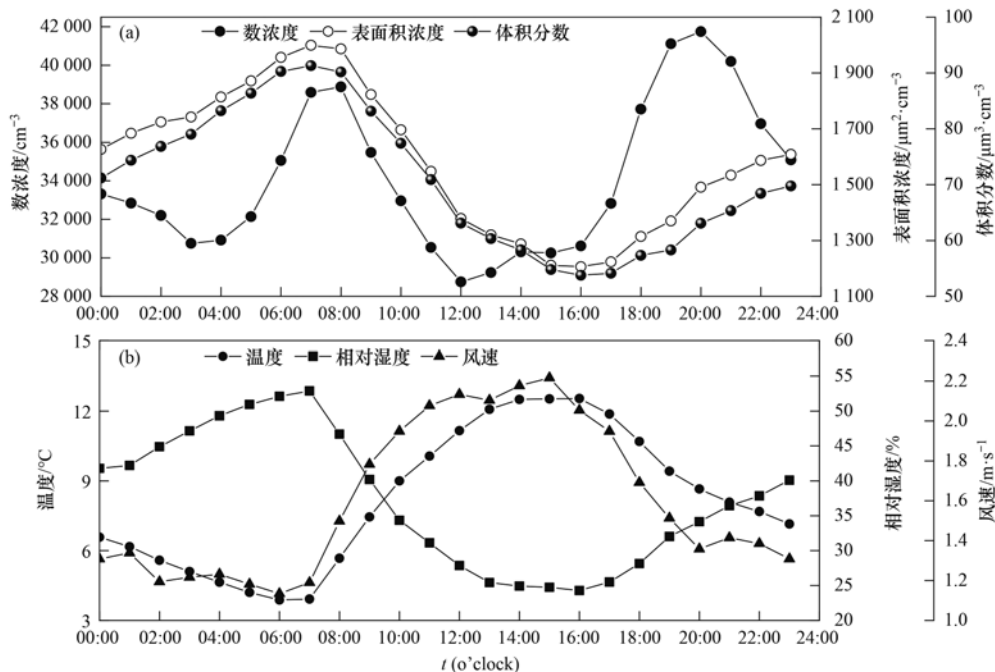


图4 气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数以及温度、相对湿度和风速日变化

Fig. 4 Diurnal variations in aerosol number concentration, surface area concentration, volume concentration, temperature, relative humidity, and wind speed

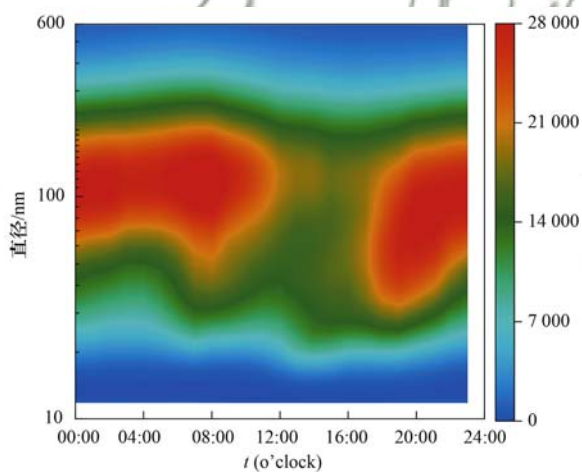


图5 气溶胶数浓度谱分布日变化

Fig. 5 Diurnal variations in spectrum distributions of aerosol number concentration

民烹饪过程中的不完全燃烧产生较多小粒子。

2.3.2 气溶胶周末效应特征

图6给出不同粒径段气溶胶数浓度在工作日与周末的日变化,可以看到由于城市地区工作日和周末人类活动时间和强度都存在一定差异,气溶胶浓度日变化具有很强的周末效应。10~600 nm 工作日气溶胶数浓度从03:00开始升高,到07:00达到1 d中的第一个峰值,且是最明显的峰值,随后一路下降到12:00达到谷值,12:00~14:00出现微弱峰值,并从16:00开始继续升高,19:00出现第三个峰值后持续下降。周末气溶胶数浓度也从03:00开始升高,直到08:00达到第一个峰值,比工作日晚1 h,且

数值低于工作日,随后数浓度一路下降直到15:00达到谷值,之后气溶胶数浓度迅速升高并在晚上21:00达到第二个峰值,比工作日推迟2 h,且数值明显高于工作日的第三个峰值。

图6(b)显示工作日和周末10~20 nm 气溶胶粒子数浓度日变化基本类似,均在10:00前维持在较低水平,从10:00开始快速增加,不过工作日粒子在14:00达到峰值,周末出现峰值时间推迟1 h。核模态气溶胶主要来自气-粒转化过程,其发生强度受太阳辐射和前体物排放强度影响较大,周末峰值出现时间推迟可能与前体物排放时间推迟有关。

20~100 nm 粒子数浓度日变化在工作日呈三峰分布,峰值分别出现于早上08:00,下午15:00和傍晚19:00,早晚峰值对应道路交通早晚高峰时段,午后峰值由道路交通午后小高峰排放所致;周末爱根核粒子数浓度日变化为双峰分布,峰值出现于早上08:00和晚上20:00,晚上峰值出现时间比工作日推迟1 h,周末早上峰值浓度低于工作日,晚上峰值浓度明显高于工作日,且周末不存在午后小高峰,说明该现象主要由于周末人们出行时间与工作日存在差异,造成了机动车一次排放物数量和时间的差别。

由图6(d)可知,积聚模态粒子在工作日早上07:00有一个明显峰值出现,周末则在早上08:00和夜间22:00出现两个明显峰值,且夜间峰值浓度比早晨略高。积聚模态粒子主要来自爱根核粒子的

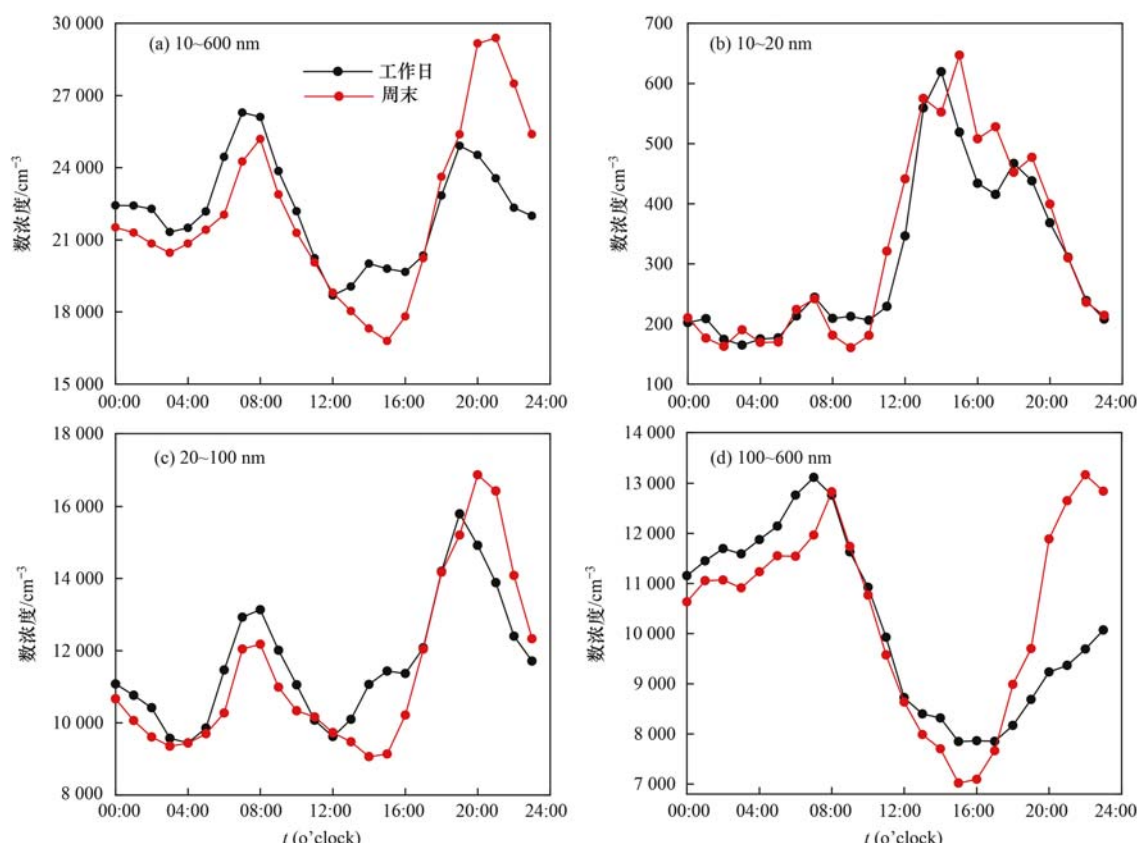


图 6 观测期间工作日和周末不同粒径段气溶胶数浓度日变化
Fig. 6 Diurnal variation in aerosol number concentrations in different size ranges

凝结碰并,且积聚模态粒子在大气中停留时间最长^[45],周末 20:00~21:00 有大量爱根核模态粒子排放,并且大气混合层较低不利于污染物扩散,造成了周末夜间积聚模态粒子的大量增加。

2.4 天津城区气溶胶与气象条件的关系

由图 7 可知风向风速对气溶胶浓度有较大影响。气溶胶数浓度和体积分数随着风速增加逐渐降低,1 m·s⁻¹以下风速条件下,几乎所有风向气溶胶数浓度都较高。1 m·s⁻¹以上风速条件下,气溶胶数浓度和体积浓度高值区主要分布在偏东风方向,其

次是西南风方向,西北风方向气溶胶数浓度较低。

观测点以东 50 m 处有交通主干道,以北 200 m 处有快速路,以南 200 m 处有机动车道,观测期间整体风速不超过 5 m·s⁻¹,气溶胶数浓度和体积浓度在西南风 2 m·s⁻¹以下出现高值,与京津冀区域西南输送对天津影响有关,偏东风气溶胶数浓度较高,更多则是局地影响,观测点东侧的交通主干道有大量机动车一次排放,造成了气溶胶数浓度在偏东风且风速 2~3 m·s⁻¹条件下较高。

由图 8 可知,不同相对湿度下气溶胶谱分布皆

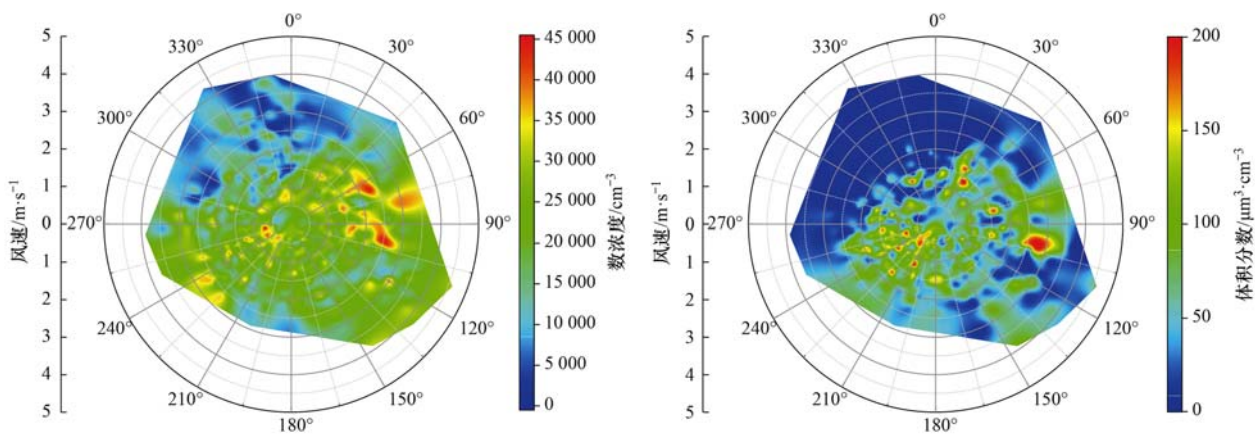


图 7 气溶胶数浓度和表面积浓度与风速风向关系
Fig. 7 Wind effects on aerosol number concentration and volume concentration

为单峰分布,但峰值粒径和峰值浓度特征不尽相同. $RH < 20\%$ 时,气溶胶数浓度大部分集中在 100 nm 以下,峰值粒径在 50 nm 左右,气溶胶主要来自于气-粒转化过程. $20\% \leq RH < 60\%$ 情况下,随着 RH 逐渐增加,气溶胶谱逐渐右移,大粒子越来越多,峰值粒径逐渐由 95 nm 增大到 118 nm ,并继续增大至 131 nm ,说明 $20\% \leq RH < 60\%$ 情况下,气溶胶大粒子占比随着 RH 增大而增加. 当 $RH \geq 60\%$ 时,气溶胶谱左移,峰值粒径减小到 98 nm 左右, $RH \geq 60\%$ 的观测日均有降水过程发生,说明降水过程对大粒子的清除作用大于对小粒子的清除.

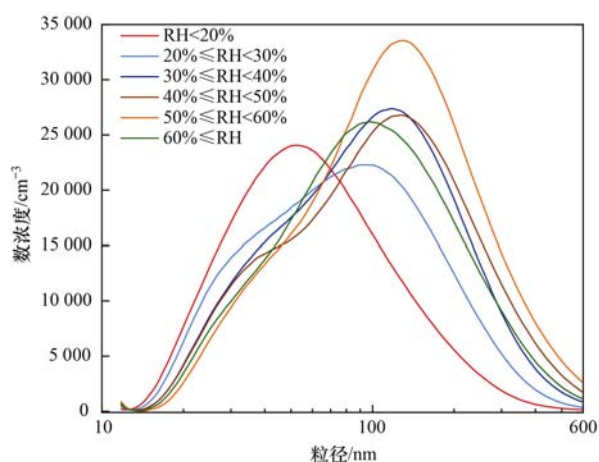


图8 不同湿度下气溶胶数浓度谱

Fig. 8 Aerosol number size distributions in different relative humidities

3 结论

(1) 观测期间天津城市地区 $10 \sim 600\text{ nm}$ 粒径范围的气溶胶数浓度、表面积浓度和体积分数平均值分别为 $22\,180\text{ cm}^{-3}$ 、 $1\,581.08\text{ }\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $70.76\text{ }\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. 数浓度谱、表面积浓度谱和体积分数谱均为单峰分布,峰值粒径分别位于 109.40 、 269.00 和 429.40 nm .

(2) 数浓度的主导粒径为 $20 \sim 100\text{ nm}$, 数浓度值 $11\,607.83\text{ cm}^{-3}$, 占总数浓度的 52.3% . 表面积浓度和体积分数的主导粒径均为 $100 \sim 200\text{ nm}$, 浓度值分别为 $1\,445.08\text{ }\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $69.11\text{ }\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 分别占总浓度的 91.4% 和 97.7% .

(3) 气溶胶浓度具有明显的时间变化特征. 气溶胶数浓度日变化在道路交通的早晚高峰期间和午后太阳辐射最强的时间段出现峰值. 由于周末人类活动时间和强度与工作日存在差异, 机动车尾气排放时间和数量均不同, 爱根核模态和积聚模态气溶胶粒子日变化具有明显的周末效应, 气溶胶夜间出现浓度峰值时间比工作日晚 1 h .

(4) 相对湿度对气溶胶谱分布有显著影响. 随

着相对湿度由 20% 以下升高到 $50\% \sim 60\%$, 气溶胶数浓度谱峰值粒径经历由 50 nm 增大到 131 nm 的过程. 60% 以上相对湿度观测日均出现降水, 降水过程导致气溶胶数浓度谱峰值粒径维持在 98 nm , $100 \sim 300\text{ nm}$ 粒径段气溶胶数浓度由于湿清除过程明显降低.

参考文献:

- [1] Cao J J, Chow J C, Lee F S C, *et al.* Evolution of $\text{PM}_{2.5}$ measurements and standards in the U. S. and future perspectives for China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(4): 1197-1211.
- [2] Liu Y J, Zhang T T, Liu Q Y, *et al.* Seasonal variation of physical and chemical properties in TSP, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ at a roadside site in Beijing and their influence on atmospheric visibility[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(3): 954-969.
- [3] Gupta G P, Kumar B, Singh S, *et al.* Deposition and impact of urban atmospheric dust on two medicinal plants during different seasons in NCR Delhi[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(11): 2920-2932.
- [4] Liang D, Wang Y Q, Ma C, *et al.* Variability in transport pathways and source areas of PM_{10} in Beijing during 2009-2012[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(12): 3130-3141.
- [5] Khaefi M, Geravandi S, Hassani G, *et al.* Association of particulate matter impact on prevalence of chronic obstructive pulmonary disease in Ahvaz, southwest Iran during 2009-2013[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(1): 230-237.
- [6] McCormick R A, Ludwig J H. Climate modification by atmospheric aerosols[J]. *Science*, 1967, **156**(3780): 1358-1359.
- [7] Twomey S. Pollution and the planetary albedo[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1974, **8**(12): 1251-1256.
- [8] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. *Science*, 1992, **255**(5043): 423-430.
- [9] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, *et al.* Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, **294**(5549): 2119-2124.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [11] 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 等. 2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4791-4800. Huo J T, Wang X N, Duan Y S, *et al.* First long-term study of atmospheric new particle formation in the suburb of Shanghai from 2015 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4791-4800.
- [12] Han S Q, Liu J L, Hao T Y, *et al.* Boundary layer structure and scavenging effect during a typical winter haze-fog episode in a core city of BTH region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **179**: 187-200.
- [13] Han F, Xu J, He Y J, *et al.* Vertical structure of foggy haze over the Beijing-Tianjin-Hebei area in January 2013[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **139**: 192-204.
- [14] Shi P J, Zhang G F, Kong F, *et al.* Variability of winter haze

- over the Beijing-Tianjin-Hebei region tied to wind speed in the lower troposphere and particulate sources [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **215**: 1-11.
- [15] Hao T Y, Han S Q, Chen S C, *et al.* The role of fog in haze episode in Tianjin, China; a case study for November 2015 [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **194**: 235-244.
- [16] Wang Y C, Wang Q Y, Ye J H, *et al.* Chemical composition and sources of submicron aerosols in winter at a regional site in Beijing-Tianjin-Hebei region: Implications for the Joint Action Plan [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137547.
- [17] Shang D J, Peng J F, Guo S, *et al.* Secondary aerosol formation in winter haze over the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, **15** (2), doi: 10.1007/s11783-020-1326-x.
- [18] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 2013~2015 年北京市 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 PM_{2.5}, reactive gas and aerosol size distributions of Beijing from 2013 to 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (10): 3647-3657.
- [19] 黄嘉仪, 赵德龙, 陈宝君, 等. 基于飞机观测的北京地区气溶胶特征 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41** (5): 2073-2080.
- Huang J Y, Zhao D L, Chen B J, *et al.* Aircraft observations of aerosol properties in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41** (5): 2073-2080.
- [20] Liu P F, Zhao C S, Liu P F, *et al.* Aircraft study of aerosol vertical distributions over Beijing and their optical properties [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2009, **61** (5): 756-767.
- [21] Sun L, Li R B, Tian X P, *et al.* Analysis of the temporal and spatial variation of aerosols in the Beijing-Tianjin-Hebei region with a 1 km AOD product [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17** (3): 923-935.
- [22] 谭稳, 银燕, 郭莉, 等. 南京夏季清洁与污染区气溶胶微物理特征分析 [J]. *环境科学与技术*, 2010, **33** (S1): 280-286.
- Tan W, Yin Y, Guo L, *et al.* Analysis of the micro-physical characteristics of aerosol particles in clean and pollution area in summer of Nanjing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33** (S1): 280-286.
- [23] 钱凌, 银燕, 童尧青, 等. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28** (1): 18-22.
- Qian L, Yin Y, Tong Y Q, *et al.* Characteristics of size distributions of atmospheric fine particles in the north suburban area of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28** (1): 18-22.
- [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] 梁思, 马楠, 徐婉筠, 等. 天津郊区夏季气溶胶谱分布特征观测研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2012, **48** (2): 246-252.
- Liang S, Ma N, Xu W Y, *et al.* Analysis of particle size distribution measurements from a summer campaign in suburban Tianjin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, **48** (2): 246-252.
- [26] 沈利娟, 王红磊, 银燕, 等. 泰山顶 (1534 m) 夏季气溶胶粒径分布特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (5): 2019-2026.
- Shen L J, Wang H L, Yin Y, *et al.* Size distributions of aerosol during the summer at the summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2019-2026.
- [27] 蔡子颖, 韩素芹, 刘爱霞, 等. 天津夏季大气消光性质的研究 [J]. *高原气象*, 2012, **31** (1): 150-155.
- Cai Z Y, Han S Q, Liu A X, *et al.* Study of extinction property of atmosphere in Tianjin in summer [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, **31** (1): 150-155.
- [28] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津冬季雾霾天气下颗粒物质量浓度分布与光学特性 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27** (5): 462-469.
- Yao Q, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* PM_{2.5} pollution characteristics and aerosol optical properties during fog-haze episodes in Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27** (5): 462-469.
- [29] 刘敬乐, 姚青, 蔡子颖, 等. 基于太阳光度计的天津城区气溶胶光学特性 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37** (11): 4013-4021.
- Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, *et al.* Analysis on aerosol optical characteristics with sun photometer in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (11): 4013-4021.
- [30] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 PM_{2.5} 中重金属元素污染及其生态风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (9): 1596-1600.
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in PM_{2.5} during heating season in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33** (9): 1596-1600.
- [31] 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 等. 天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (12): 4958-4967.
- Yao Q, Liu Z R, Han S Q, *et al.* Characteristics of the size distribution of water-soluble ions during a heavy pollution episode in the winter in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (12): 4958-4967.
- [32] 黄鹤, 孙玫玲, 刘爱霞, 等. 天津城市大气污染物浓度垂直分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29** (12): 2478-2483.
- Huang H, Sun M L, Liu A X, *et al.* Vertical distribution of air pollutants in the atmosphere in Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29** (12): 2478-2483.
- [33] 孙韧, 肖致美, 韩素芹, 等. 天津市冬季近地层颗粒物垂直分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37** (6): 2248-2254.
- Sun R, Xiao Z M, Han S Q, *et al.* Vertical distributions characteristics of particulate matter at surface layer in winter of Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37** (6): 2248-2254.
- [34] 蔡子颖, 韩素芹, 邱晓滨, 等. 基于 255 m 气象塔天津地区污染天气高空风特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38** (9): 3406-3413.
- Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, *et al.* The characteristics of high-altitude wind about the analysis of pollution weather by 255 meters meteorological tower in Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (9): 3406-3413.
- [35] 姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等. 天津一次雾-霾天气过程的近地层温湿结构和湍流特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38** (10): 3856-3867.
- Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, *et al.* Analysis of temperature and moisture structure and turbulence characteristics of a smog and

- haze weather process in Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(10): 3856-3867.
- [36] 杜盈盈, 陈军, 张家洛, 等. 长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3932-3940.
Du Y Y, Chen J, Zhang J L, *et al.* Observation of aerosol optical properties and new particle formation in the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3932-3940.
- [37] 郝团, 银燕, 肖辉, 等. 黄山大气气溶胶新粒子生长特性观测分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 13-22.
Hao J, Yin Y, Xiao H, *et al.* Observation of new particle formation and growth on Mount Huang[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 13-22.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 等. 青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2133-2142.
Sun Y, Zhu Y J, Meng H, *et al.* New particle formation events in summer and winter in the coastal atmosphere in Qingdao, China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2133-2142.
- [41] 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 等. 鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5295-5305.
Kong X C, Wang H L, Zhang L X, *et al.* Factors influencing new atmospheric particle formation in Ordos during summer and autumn 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5295-5305.
- [42] 李立伟, 肖致美, 杨宁, 等. 天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4158-4167.
Li L W, Xiao Z M, Yang N, *et al.* Extinction characteristics of aerosols and the contribution of pollution sources to light extinction during three heavy pollution episodes in the winter of 2020 in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4158-4167.
- [43] Morawska L, Bofinger N D, Kocis L, *et al.* Submicrometer and supermicrometer particles from diesel vehicle emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(14): 2033-2042.
- [44] Ristovski Z D, Morawska L, Bofinger N D, *et al.* Submicrometer and supermicrometer particulate emission from spark ignition vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(24): 3845-3852.
- [45] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)