

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

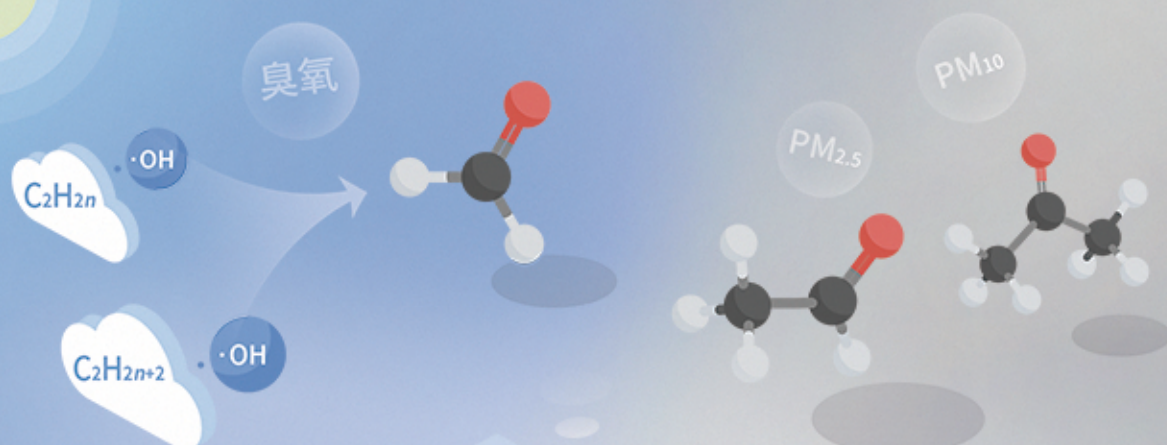
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国 (127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼 (184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦 (195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳 (251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩 (343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒 (378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析

杨旭^{1,2}, 蔡子颖^{1,2*}, 韩素芹^{1,2}, 史静³, 唐颖潇^{1,2}, 姜明³, 邱晓滨⁴

(1. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 2. 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; 3. 天津市气象探测中心, 天津 300074; 4. 天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘要: 污染发生在边界层中, 边界层热力和动力垂直结构对重污染天气形成有显著影响. 本文基于无人机探空、地基遥感观测和数值模式, 开展天津地区 2019 年 1 月 10~15 日重污染过程期间边界层垂直结构及污染成因分析, 以期加强北方沿海城市边界层过程对重污染影响规律认知, 提升重污染天气预报预警准确率. 结果表明: 大气温度层结对重污染天气形成、持续和消散有显著影响, 此次过程伴随逆温层的发展和消散, $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度区白天向大气上层发展, 高度可达 300 m 以上, 夜间向近地面压缩, 高度在 100 m 左右; 雾天气出现并在白天维持, 改变了边界层垂直结构特征, 雾顶逆温的持续存在抑制了污染物向大气上层扩散, 使得白天湍流垂直混合过程贡献明显下降, 导致近地面重污染天气维持和发展; 过程期间区域输送贡献率为 66.6%, 边界层垂直结构与重污染天气区域输送密切相关, 区域污染物输送高度主要出现在边界层顶部以及雾顶逆温层以上的大风速层处, 且随着边界层和雾顶抬升高度的变化, 通过下沉运动影响地面, 形成北部弱高压天气控制下静稳天气区域输送; 边界层垂直结构影响冷空气对空气质量的改善效果, S3 阶段雾顶的强逆温导致冷空气无法通过湍流切应力传导到地面, 在高低空存在明显的风速差, 冷空气影响地面时间延后, 作用减弱, 重污染天气无法彻底缓解.

关键词: 无人机探空; 重污染天气; 数值模拟; 标记法; 过程分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0009-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007068

Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model

YANG Xu^{1,2}, CAI Zi-ying^{1,2*}, HAN Su-qin^{1,2}, SHI Jing³, TANG Ying-xiao^{1,2}, JIANG Ming³, QIU Xiao-bin⁴

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

Abstract: Pollution occurs in the boundary layer, and the thermal and dynamic vertical structure of the boundary layer has a significant influence on the formation of heavy pollution episodes. Based on unmanned aerial vehicle (UAV) sounding, ground-based remote sensing and numerical modeling, this paper analyzes the vertical structure of the boundary layer and the causes of pollution during the heavy pollution episode in Tianjin from January 10 to 15, 2019, with a view to strengthening the understanding of the influence law of boundary layer processes on heavy pollution in northern coastal cities and improving the accuracy of weather forecasts and heavy pollution warnings. The results show that atmospheric temperature stratification had a significant influence on the formation, persistence, and dissipation of heavy pollution episodes. During an episode, accompanied by the development and dissipation of the inversion layer, a high $\text{PM}_{2.5}$ concentration area developed to the upper atmosphere with a height of over 300 m in the daytime and compressed to the ground at night with a height about 100 m. When fog appeared and continued in the daytime, the vertical structure characteristics of the boundary layer changed. A temperature inversion above the fog restrained the diffusion of pollutants to the upper air and made the contribution of turbulence vertical mixing process decrease significantly in the daytime, leading to the persistence and development of heavy pollution near the surface. Regional pollution transport accounted for 66.6% during the episode, which was closely related to regional pollution transport. Regional pollution transport mainly appeared at the top of the boundary layer and above the fog inversion layer where high wind speeds occurred. Pollutants were transported to the ground by a sinking motion as the boundary layer and fog height changed. This is how regional pollution transport occurred when Tianjin was controlled by a weak high pressure field in the north. The vertical structure of the boundary layer also affected the improvement of air quality by cold air. The strong temperature inversion at the top of the fog resulted in the failure of the cold air to transmit to the ground through turbulent shear stress in the S3 stage. There was an obvious difference in wind speed between the upper and lower air. The influence of cold air on the ground was delayed, and the effect of it was weakened. Thus, the heavy pollution episode could not be alleviated completely.

Key words: unmanned aerial vehicle sounding; heavy pollution episode; numerical model; marking method; process analysis

边界层是贴近地球表面、受地面摩擦阻力影响的大气区域,是地气相互作用和大气污染的主要发生地,湍流垂直交换是其最显著的特征.边界层结构对大气污染的扩散、积累和反应影响显著,重污染天气的发生往往伴有逆温、弱湍流、低混合层厚度等边界层特征^[1~6].关于重污染天气边界层探空最常用

的手段是 GPS 探空和 L 波段探空雷达,其可探空高

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(4177012485); 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC23100, 19JCQNJC08000); 天津市重大专项(18ZXJQSF00130, 18ZXSZSF00160)

作者简介: 杨旭(1994~),男,硕士,主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: yangx_tjxx@163.com

* 通信作者, E-mail: 120078030@163.com

度10 000 m以上,一般使用资料为中国气象局探空站一天两次的观测数据,如贾梦唯等^[7]和刘超等^[8]的研究,其时间分辨率和观测均受到限制.系留气艇探空是过去常用的一种外场观测手段,在边界层和大气环境观测中可以通过系留气艇获得高分辨率观测资料^[9~15],考虑载气和人工,系留气艇野外观测费用较高;近年随着地基遥感设备的发展,基于微波辐射计^[16,17]、风廓线雷达^[18~20]、气溶胶激光雷达^[21,22]的边界层和大气环境观测技术越发成熟,在研究中被大量地运用;但相比真实的观测,地基反演仪器在近地面存在盲区,其准确性也比直接观测略差,在一些关键问题和新现象的讨论中,存在一定的不确定性.近年无人机探空^[23,24]被越来越多的人使用,一些高灵敏的气象和环境仪器通过无人机被用于1 500 m以下的大气环境和边界层研究中,取得了良好的效果.如曹云擎等^[25]利用无人机对南京污染过程期间 $PM_{2.5}$ 浓度、气温和相对湿度进行了垂直观测,分析了 $PM_{2.5}$ 垂直分布特征及其与气温和相对湿度之间的关系;Peng等^[26]、Bates等^[27]和Brady等^[28]利用无人机进行了气溶胶数浓度、质量浓度和光吸收系数的垂直观测,证实了无人机在气溶胶垂直观测方面的可行性和有效性;Illingworth等^[29]和Li等^[30]开展了无人机臭氧观测,对臭氧浓度时空分布特征以及气象条件、区域传输等影响因素进行了探讨.

本文通过在天津滨海新区科技园2019年1月10~15日无人机观测,有效地获取了天津地区一次重污染天气期间边界层和大气环境垂直廓线观测,包括温度、湿度、风以及 $PM_{2.5}$ 质量浓度.过程期间无人机观测共获得探空数据23时次,结合地面的气溶胶激光雷达,可有效掌握边界层过程对重污染天气形成、维持和消散的影响.本研究通过无人机观测,结合野外观测试验的空气质量观测、地基遥感观测数据,运用研发的过程分析技术和标记法源追踪技

术^[31],结合数值模拟分析对2019年1月10~15日天津地区重污染天气期间边界层结构及污染成因进行探究,以期加强北方沿海城市边界层过程对重污染影响规律认知,提升重污染天气预报预警准确率.

1 材料与方法

1.1 观测试验介绍

项目组于2018年12月~2019年2月在天津滨海新区科技园开展无人机探空试验,观测地点位于天津东部沿海(117.80°E, 39.17°N),距离海边2 km,距离市区50 km.探空无人机使用CAWS-UAV2000无人机自动气象探测系统,可实现对低空气温度、相对湿度、气压、风向、风速等气象要素的高分辨率连续观测,同时搭载环境监测吊舱,可实时采集 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 等大气成分质量浓度,无人机探空一天6次,分别为05:00、08:00、11:00、14:00、17:00和20:00(BTC).结合无人机探空观测,在地面设有空气质量六要素观测(离观测地点3 km),同步获取生态环境部门全市28个空气质量监测数据.城区依托城市边界层观测站,通过255 m气象塔获取分钟级别0~250 m风、温和湿度廓线观测资料,并根据试验需要,在市区和滨海新区布设气溶胶激光雷达2部,微波辐射计1部,观测相应的污染和气象廓线.

1.2 无人机探空试验检验

探空无人机使用CAWS-UAV2000,具体性能如表1所示,同设备在湖南怀化探空站比对,无人机与探空气球观测温度相关系数 $R^2 > 0.95$,相对湿度线性相关系数 $R^2 > 0.99$. $PM_{2.5}$ 质量浓度观测仪器为TEMOPDR-1500个人颗粒物监测仪,该设备采用浊度测定法,具备实时体积流量控制技术和相对湿度补偿功能,能够实时准确测定颗粒物浓度,测量范围为0.001~400 $mg \cdot m^{-3}$ ^[32].

表1 CAWS-UAV2000 无人机气象探空观测性能

Table 1 Observation performance of CAWS-UAV2000

要素	测量范围	分辨率	准确度	采样频率/次·s ⁻¹
温度	-90~50℃	0.01℃	±0.2℃	≥1
相对湿度	0~100%	0.1%	±3%	≥1
气压	300~1 100 hPa	0.1 hPa	±1 hPa	≥1
风向	0~360°	0.1°	±5°(2~5 m·s ⁻¹); ±2°(>5 m·s ⁻¹)	≥1
风速	0~60 m·s ⁻¹	0.1 m·s ⁻¹	±1 m·s ⁻¹	≥1

1.3 标记法和过程分析大气化学模式建立

WRF/Chem模式是NCAR和NOAA联合一些大学和研发机构开发的中尺度在线大气化学模式,模式考虑大气污染的化学过程、平流输送、湍流扩散和干湿沉降过程,在全球空气质量预报和模拟中有

广泛的运用.为能够使用该模式更好地分析2019年1月10~15日重污染天气期间边界层结构及污染成因研究,在WRF/Chem3.4版本中引入标记法源追踪技术和过程分析技术.模式的天津地区以外人为排放源清单使用清华大学MEIC2016,分辨率

0.25°×0.25°,天津地区使用源谱调查排放源清单数据,其分辨率为1 km,化学过程采用 MOZART-4,长波辐射方案和短波辐射方案均采用 RRTMG,边界层方案使用 YSU 方案,模式采用两层嵌套,水平分辨率分别为27 km和9 km(图1),水平网格数91个×91个和109个×109个,中心经纬度为38.6N°,116.2E°,垂直方向分为27层,气象初始场和背景场均使用 NECP 的 FNL 全球1°×1°数据。

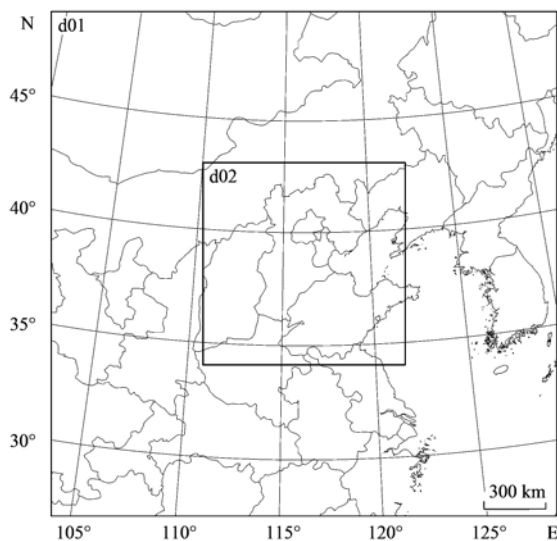


图1 模式模拟区域和范围示意

Fig. 1 Model simulation area and range

开发过程中将一次源 PM_{2.5} 标记方法整合到模型中,以便在污染期间识别不同源区对模拟地区的主要 PM_{2.5} 贡献。标记方法是类似于颗粒物分配技术(PAST)的质量平衡技术,可以将其应用于任何区域,它跟踪并计算了较大模拟区域内各标记区 PM_{2.5} 贡献浓度,这种标记方法中的示踪剂考虑了物理过程(例如平流、垂直混合和对流)的影响,在该方法中,模拟区域被分成31个源区域(包括天津各区、北京和河北地区11个城市以及山东、山西、河南和辽宁等省份),并且将每个源区域识别的主要 PM_{2.5} 作为独立变量进行跟踪。对于每个时间,来自源区*i*识别的一次源 PM_{2.5} 浓度使用以下等式计算:

$$C_i(t + \Delta t) = C_i(t) + \Delta C_i \quad (1)$$

式中, $C_i(t)$ 是在*t*时刻来自源区*i*识别的一次源 PM_{2.5} 浓度, Δt 是时间步长, ΔC_i 是初始 PM_{2.5} 浓度的变化,由下式确定:

$$\Delta C_i = \Delta \text{Chem}_i + \Delta \text{Phy}_i + \Delta \text{Emis}_i \quad (2)$$

式中, ΔChem_i 是由化学反应引起的浓度变化,在气溶胶化学中,一次源 PM_{2.5} 不参与化学计算,因此 ΔChem_i 为0; ΔPhy_i 是物理过程的总和(包括平流、垂直混合、干湿沉降和对流),每个跟踪变量都像正常模拟那样进行物理过程的所有相关计算,但不会干扰

正常模型计算,因此将直接获得物理过程引起的浓度变化。 ΔEmis_i 是区域*i*内的总排放量,由下式确定:

$$\Delta \text{Emis}_i(x, y, x) = \begin{cases} \Delta \text{Emis}(x, y, x) & (\text{在 } i \text{ 区域内}), \\ 0 & (\text{在 } i \text{ 区域外}). \end{cases}$$

对于区域中的任何网格,如果它在区域*i*中,则等于 $\Delta \text{Emis}_i(x, y, z)$ 等于 $\Delta \text{Emis}(x, y, z)$,否则等于0。与传统的灵敏度分析相比,这种一次源 PM_{2.5} 标记模型可以更准确地测量所有相关区域的 PM_{2.5} 浓度,同时减少计算误差。

过程分析技术类似 CMAQ 模型的 IPR^[33,34],即根据数值模式的计算过程,将影响重污染天气的物理化学过程单独输出,通过对单独变量的分析,分析重污染成因。将 ΔPhy_i 的物理量进行单独输出,包含垂直平流(advz)、水平平流(advh)、垂直混合(最下面一层包含干沉降的贡献,vmix)、气相化学过程(与气溶胶无关,该过程量为0,chem)和对流作用(conv),此外针对气溶胶的特性,一些其他的理化过程也会直接或间接影响气溶胶的浓度,因此还增加了一些过程量,包括排放过程(emis)、云化学(cldc)、气溶胶化学(aerc)和湿沉降(wets)。

1.4 大气化学模式检验

对大气化学模式进行检验,2019年全年天津地区 PM_{2.5} 质量浓度模拟值为53 μg·m⁻³,观测值为51 μg·m⁻³,相关系数为0.76,相对误差为35%。对比观测期间天津市平均 PM_{2.5} 质量浓度的实况值和模拟值(图2)(部分时段数据缺测),1月10~13日上午模拟值偏高于实况值,1月13日下午至14日上午模拟值比实况值偏低,重污染过程整体模拟 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势与实况变化基本一致,因此大气化学模式模拟结果能够基本反映此次过程期间天津地区 PM_{2.5} 质量浓度变化特征。1月14日12:00以后模拟值与实况值差异较大,不作分析讨论。

2 结果与讨论

2.1 重污染天气变化趋势和天气形势分析

2019年1月10~15日天津地区出现一次持续性重污染天气过程,期间天津地区连续4日AQI超过200,PM_{2.5}峰值浓度达到296 μg·m⁻³。此次重污染过程先后经历5个阶段(图3):污染发展阶段S1,1月10~11日我国中东部地区高空维持平直环流,地面处于弱高压场控制(图4),污染物首先在河北中南部快速累积,多城市出现中度-重度污染。天津受区域输送和近地面辐合风场等不利气象条件影响,空气质量持续转差,PM_{2.5}质量浓度由1月10日的50 μg·m⁻³上升至11日下午的240 μg·m⁻³;污染维持阶段S2,1月12日02:00天津地区出现全

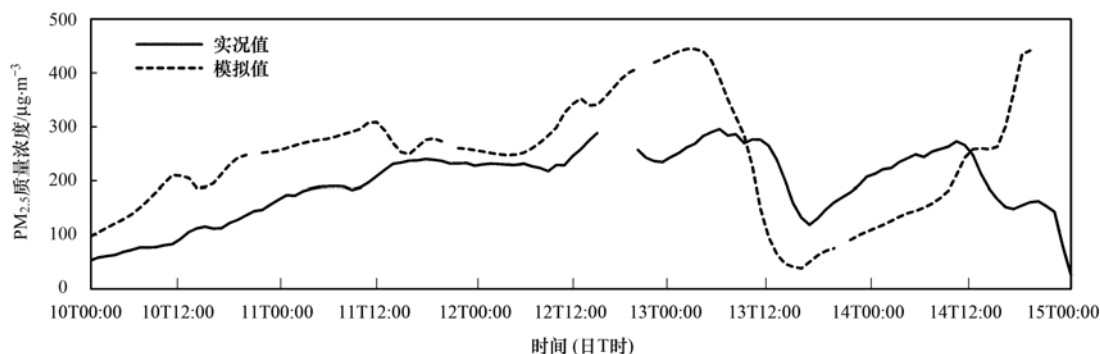


图2 天津地区2019年1月10~15日 $PM_{2.5}$ 实况值和模拟值对比

Fig. 2 Observation and simulation of $PM_{2.5}$ mass concentration in Tianjin from January 10 to 15, 2019

市范围的大雾天气,能见度下降至500 m以下(图3),雾天气持续影响至1月13日上午,期间天津地区近地面风场为西南风1级左右,相对湿度超过90%,大气扩散条件极为不利, $PM_{2.5}$ 质量浓度在230~300 $\mu g \cdot m^{-3}$ 之间,空气质量维持重度-严重污染;弱冷空气影响阶段S3,1月12日后半夜至13日白天,弱冷空气自北向南影响京津冀北部地区,由于冷空气势力偏弱,1月13日11:00天津北部地区空气质量明显好转,而中部和南部地区仍维持重度污染;污染二次暴发阶段S4,1月13日下午至夜间弱冷空气活动结束,地面风场转为西南风,中南部污染物回流,天津空气质量再次迅速转差, $PM_{2.5}$ 质量浓度峰值达到272 $\mu g \cdot m^{-3}$;污染减弱消散阶段S5,1月14日

白天天津地区边界层快速发展,且近地面西南风增强, $PM_{2.5}$ 质量浓度下降至150 $\mu g \cdot m^{-3}$ 左右.夜间随较强冷空气过境(图4),近地面风场转为西北风5~6级, $PM_{2.5}$ 质量浓度迅速下降, PM_{10} 质量浓度短时上升至374 $\mu g \cdot m^{-3}$ 之后迅速下降,污染过程结束.

2.2 边界层结构及 $PM_{2.5}$ 垂直分布分析

为了进一步探讨过程期间天津地区边界层结构和污染物垂直分布及其对应关系,利用无人机开展了边界层探空观测,图5为试验期间无人机探空边界层结构及 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化. S1阶段天津地区夜间贴地逆温层发展明显,厚度较其他阶段更为深厚,1月10~11日贴地逆温层在下午17:00左右建立,在次日凌晨05:00~08:00逆温层厚度最大达到

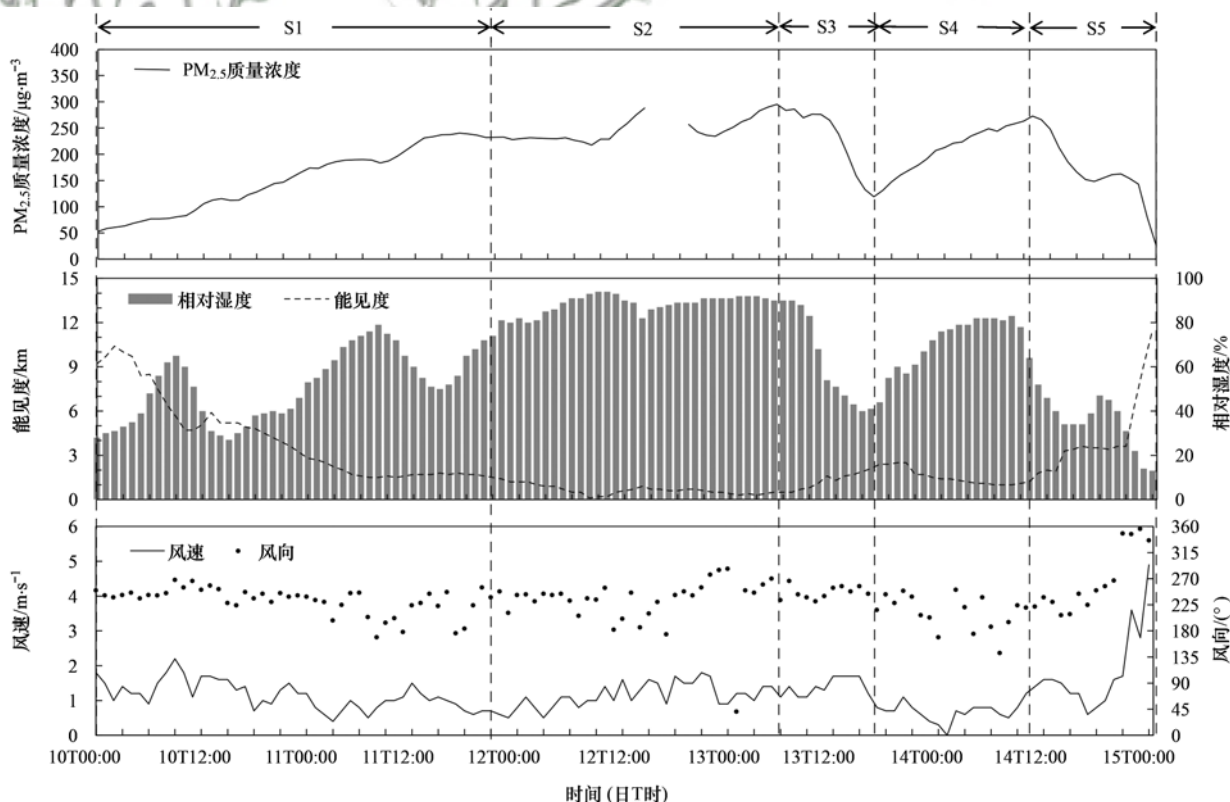
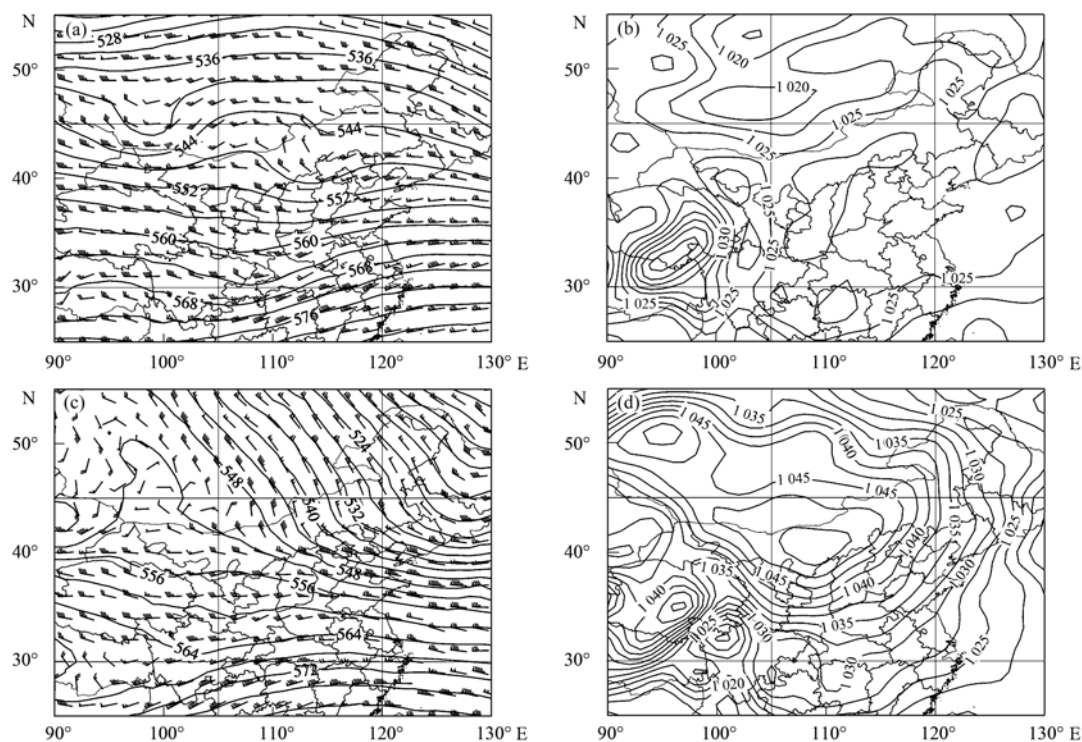


图3 2019年1月10日至15日 $PM_{2.5}$ 质量浓度(天津市平均)及气象要素(城区)变化

Fig. 3 $PM_{2.5}$ mass concentration and meteorological factors in Tianjin from January 10 to 15, 2019



(a) 1月11日08:00 500 hPa 形势场; (b) 1月11日08:00 海平面气压场;

(c) 1月15日08:00 500 hPa 形势场; (d) 1月15日08:00 海平面气压场

图4 2019年1月11日、15日我国中东部地区高空环流形势和海平面气压场

Fig. 4 Upper-air circulation situation and sea level pressure field in central eastern China on January 11 and 15, 2019

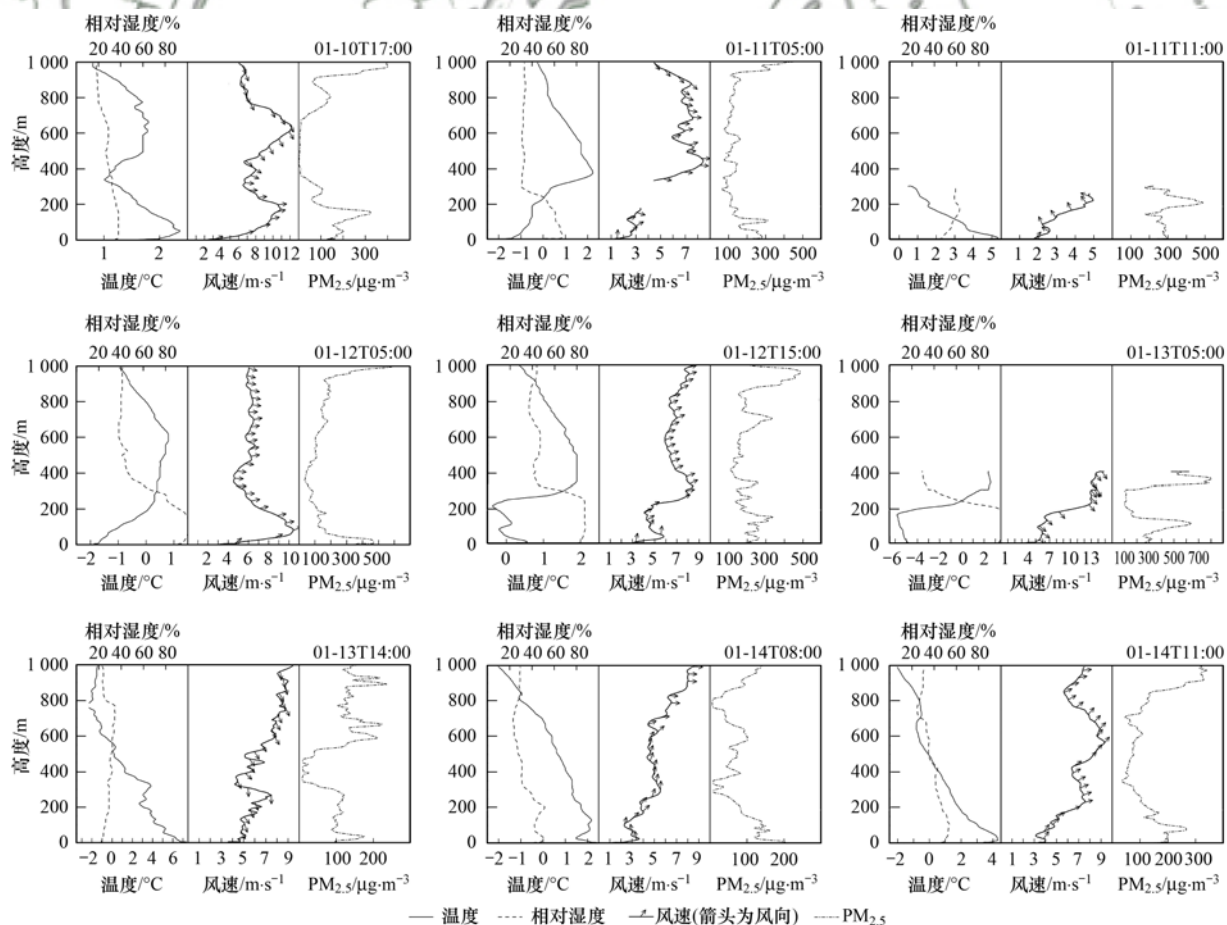


图5 2019年1月10~14日无人机探空边界层结构及 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化

Fig. 5 Changes in the boundary layer structure and $PM_{2.5}$ mass concentration of UAV from January 10 to 14, 2019

600 m. S2 阶段天津地区出现大雾天气,对边界层结构变化产生显著影响. 在 1 月 12 日白天受低层雾区影响, 200 m 以下大气层结呈中性状态, 温度递减率约 $-0.6^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 相对湿度超过 80%, 而雾顶附近则出现强逆温, 间隔 30 m 温度增加 1.1°C . S3 阶段伴随弱冷空气活动, 地面至 1 000 m 整层风场由西南风转为西北风, 且相对湿度明显下降, 1 月 13 日 14:00 整层相对湿度下降至 40% 以下. 但在 S3 阶段初期(1 月 13 日 05:00)雾天气仍持续存在, 雾顶逆温位于 160 ~ 300 m, 逆温强度达到 $5.3^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 雾顶逆温以下大气维持高湿小风条件, 平均风速为 $6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 而逆温层以上西北风风速明显增加至 $13\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; S4 阶段弱冷空气活动结束, 整层风场由低层向高层逐渐转为西南风, 入夜后贴地逆温层建立, 但厚度较为浅薄, 逆温层顶高度距地面约 150 m; S5 阶段 1 月 14 日白天近地面升温明显, 逆温层快速消散, 午后大气温度层结呈递减状态.

从过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直分布变化来看, S1 阶段, 1 月 10 日 17:00 地面至 200 m 高度之间出现 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度层, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到 $200\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 夜间高浓度层顶开始向近地面压缩, 05:00 层顶高度在距地面 110 m 附近, 近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增加至 $250\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右. 1 月 11 日白天高浓度层开始逐渐向上层扩散, 11:00 层顶高度达到 300 m 以上; S2 阶段, 1 月 12 日 05:00 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度层集中在近地面 60 m 内, 浓度达到 $400\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上. 1 月 12 日上午 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度层向上层扩散至 200 m, 下午(14:00 ~ 20:00) 200 ~ 800 m $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度整体迅速增加, 由 $100\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加至 $400\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右; S3 ~ S4 阶段, 1 月 12 日夜間 150 ~ 300 m 高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度明显下降, 近地面和 300 m 以上 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度仍继续维持高值. 1 月 13 日白天低层 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降至 $100\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 高浓度层出现在 600 m 以上. 夜间近地面 100 m 内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度缓慢上升; S5 阶段, 1 月 14 日上午 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度层向上层扩散, 11 时高浓度层顶达到 200 m 左右.

从上述结果可见, 过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度主要出现在边界层低层, 白天高浓度层向大气上层发展, 层顶高度能够达到 300 m 以上, 而夜间高浓度层则向近地面压缩, 层顶高度距地面 100 m 左右或者更低. 这一特征与边界层内温度层结变化, 特别是逆温层的发展和消散有着很好的对应关系. 在夜间贴地逆温层的建立过程中, $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度多出现在逆温层内, 浓度较白天也有所增加, 而白天随着贴地逆温层

的瓦解, 污染物能够向大气上层扩散, 高浓度层也随之向上发展. 但是, 在 S2 阶段雾天气对白天边界层垂直结构变化产生了显著影响, 雾顶逆温的持续存在抑制了污染物向大气上层扩散, 且雾区内的高湿度环境有利于气溶胶吸湿增长, 因此 S2 阶段 1 月 12 日白天 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度出现在 200 m 以内, 与过程期间其他阶段有所不同. 而低层雾区的存在也抑制了 S3 阶段初期弱冷空气对空气质量的改善作用, 在 1 月 13 日 05:00 整层风场转为西北风, 且高层风速明显增加的条件下, 雾区内始终维持高湿小风的不利条件, 重污染天气未出现明显改善. 随着 1 月 13 日白天雾消散, 整层大气风速增加, 相对湿度迅速下降, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也明显下降. 此外, 弱冷空气结束后 S4 阶段 1 月 13 日夜间贴地逆温层发展相对浅薄, 并且随着 1 月 14 日白天近地面升温而快速消散, 也是 S5 阶段近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降, 空气质量显著改善的原因之一.

2.3 边界层结构及区域输送的影响

区域污染物输送对天津地区重污染天气的形成发展具有重要作用^[35,36]. 基于 WRF/Chem 模式标记法污染物来源分析结果表明, 平均而言天津地区 $\text{PM}_{2.5}$ 来源本地排放贡献约为 62.9%, 区域输送贡献约为 37.1%^[31]. 而在此次重污染过程期间天津本地排放贡献为 33.45%, 区域输送贡献为 66.55%, 区域输送特征十分明显, 其主要影响时段为 S1 ~ S3 阶段(图 6), 贡献率分别为 71.0%、74.1% 和 63.0%. 在 S1 ~ S2 阶段, 区域输送影响主要来源于西南方向, 其中沧州市贡献率最大为 15.3%, 河北中南部地区各城市贡献率为 3.1% ~ 8.8%, 总贡献率为 29.8%, 河南省、山东省等地区的长距离输送贡献增加主要出现在 S2 阶段, 贡献率达到 16.7%. 而在 S3 阶段, 随着弱冷空气活动, 地面风场由西南风转为西北风, 区域输送来源转变为西北方向, 北京市贡献率达到 33.9%, 占区域输送贡献的 50% 以上. 此外, 在整个过程期间廊坊市的贡献率维持在 13% ~ 15% 左右, 也是影响天津市的主要污染源区之一.

结合无人机和气溶胶激光雷达观测, S1 阶段随着夜间逆温层的建立和白天边界层发展, 在边界层顶(夜间逆温层顶)附近存在极大风速层(图 5), 上游地区污染物随边界层顶部大风速层输送影响天津地区. 从无人机和气溶胶激光雷达观测(图 7)可以看到, 在 1 月 11 日白天边界层顶部和夜间逆温层顶部 300 ~ 500 m 左右出现高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 污染带. S2 阶段雾天气出现时, 雾区内近地面风速较小, 但在雾顶以上出现风速较大区域, 有利于污染物长距离污染输送, 雾顶之上出现高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 污染带, 1 月 12 日

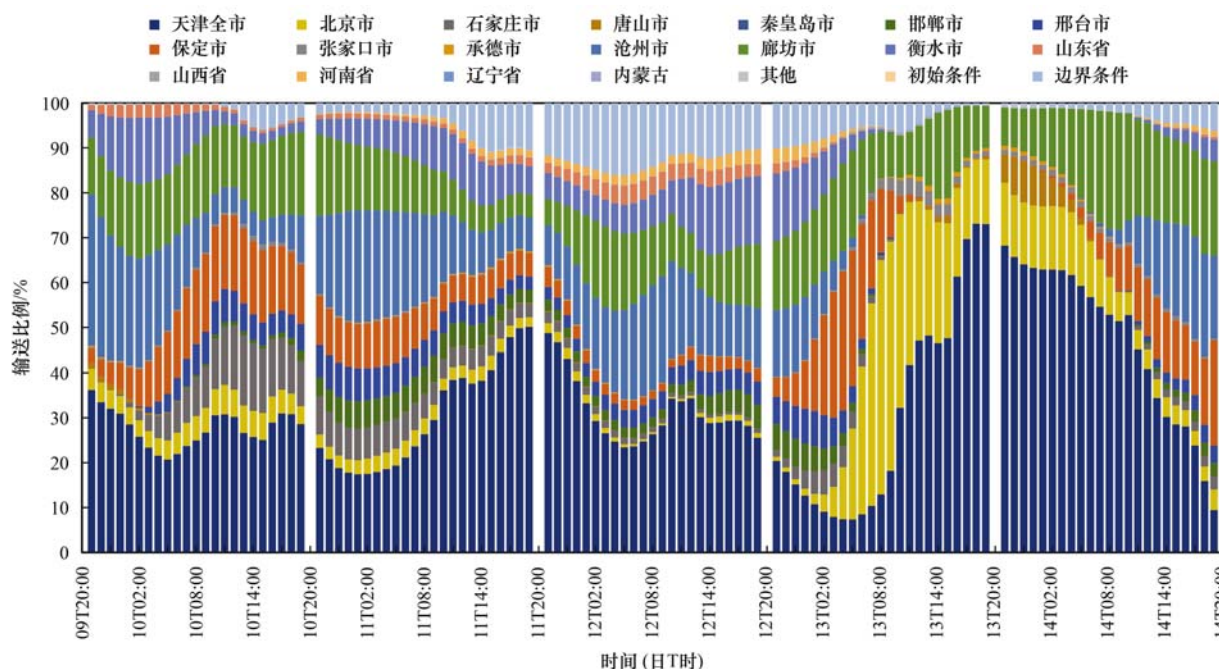


图6 2019年1月10~14日天津地区污染源模拟结果

Fig. 6 Simulation of pollutant sources for Tianjin from January 10 to 14, 2019

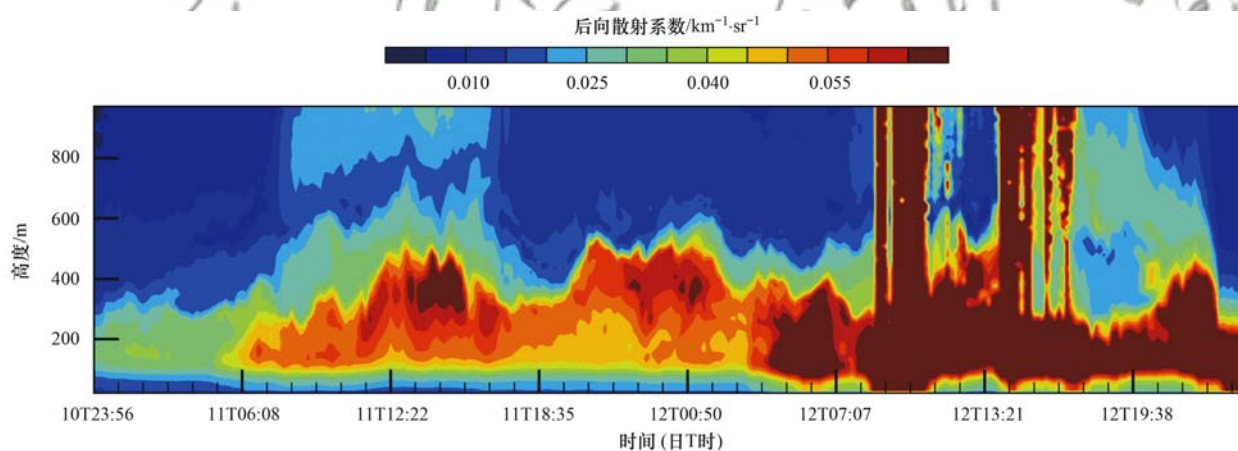


图7 2019年1月11~12日天津地区气溶胶激光雷达后向散射系数

Fig. 7 Backscatter coefficient of aerosol lidar in Tianjin from January 11 to 12, 2019

白天雾顶高度有所增加,与500~800 m高度 $\text{PM}_{2.5}$ 污染带结合,夜间随着边界层高度下降,污染物向近地面输送,使得近地面浓度进一步增加。

2.4 边界层结构及湍流和下沉运动影响

从前述分析可见,此次污染过程期间污染物浓度与边界层结构变化具有很好的对应关系,且过程期间区域污染物输送特征也非常明显,为了进一步探究边界层结构、区域输送等对污染物浓度变化的影响机制,基于WRF/Chem过程分析技术,对此次过程期间不同物理化学过程对天津地区近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的影响贡献进行定量解析。从图8可以看到,此次过程期间影响天津地区近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的主要过程为排放过程、水平平流、垂直

平流和垂直混合(包含干沉降)。排放过程贡献较为稳定,白天贡献量约为 $20 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,夜间下降为 $8 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右。垂直混合过程(包含干沉降)贡献总体为负值,其对于近地面污染物具有清除效应。同时也可以看到,垂直混合过程贡献具有明显的日变化特征,白天贡献量较大,最大可达到 $-30 \sim -40 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,夜间贡献量较白天明显下降,基本在 $-2 \sim -5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间,这主要是由于边界层结构的日变化造成,白天边界层发展,污染物随湍流运动向大气上层扩散能力增强,夜间随着逆温层建立,湍流活动减弱,其对于污染物的扩散作用也明显减弱。此外,在S2阶段1月12日白天由于雾天气影响,白天边界层发展受到抑制,垂

直混合过程贡献量约为 $-8.25 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, 相比其它几个阶段明显下降[1月10日白天平均为 $-15.46 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, 1月11日白天平均为 $-14.4 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, 1月13日白天平均为 $-20.39 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$]. 区域输送对此次过程影响显著, 但从过程分析结果来看, 水平平流对近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的贡献整体为负值, 垂直平流贡献为正值. S1 阶段1月9日20:00至1月11日08:00近地面垂直平流贡献为正值时, 高空300~700 m水平平流贡献为正, 贡献量为 $0.8 \sim 1.1 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, S2 阶段1月11日20:00至1月

13日00:00近地面垂直平流贡献为正值时, 高空700~900 m水平平流贡献为正, 贡献量为 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$. 结合前述分析可知, 此次过程期间区域污染物输送高度主要出现在边界层顶部以及雾顶逆温以上的大风速层处, 而天津地区受北部弱高压影响时多出现下沉运动^[37, 38], 区域污染物通过高空长距离输送至天津地区上空, 进而通过垂直下沉运动向近地面传输, 是此次过程区域输送对天津地区近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度产生影响的主要途径, 也是天津地区北部弱高压型重污染天气的区域输送特征.

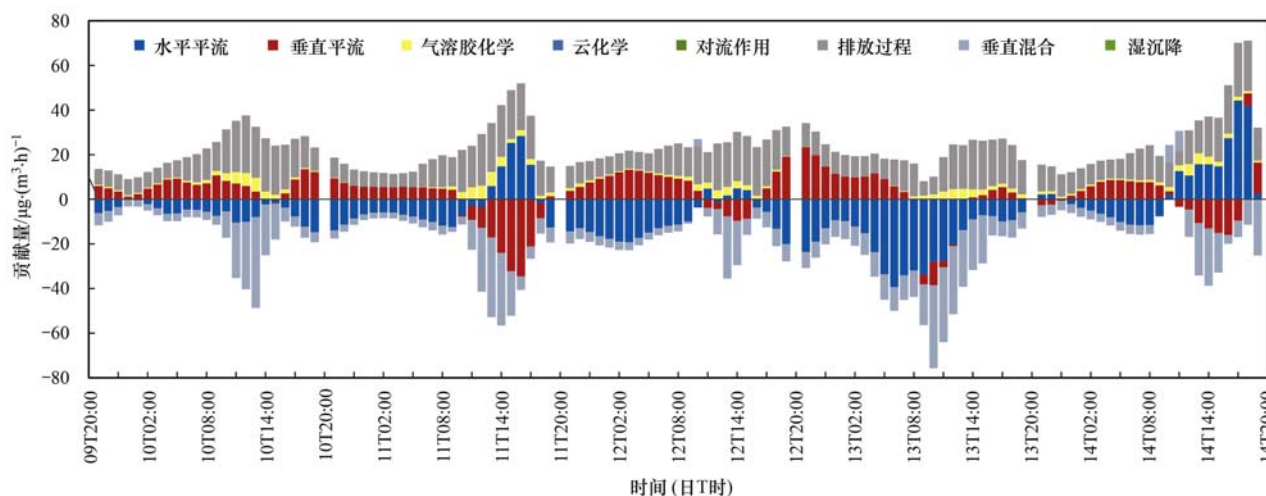


图8 2019年1月10~14日天津地区过程分析模拟结果

Fig. 8 Simulation of process analysis for Tianjin from January 10 to 14, 2019

3 结论

(1) 2019年1月10~15日天津地区出现一次持续性重污染天气过程. 基于无人机和地基遥感观测, 可以较好地把握边界层垂直结构对重污染天气的影响. 重污染天气的形成、持续和消散与大气温度层结密切相关, 伴随逆温层的发展和消散, 过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度区白天向大气上层发展, 高度可达到300 m以上, 夜间向近地面压缩, 高度在100 m左右. 而S2阶段雾天气的出现改变了边界层垂直结构特征, 从而对 $\text{PM}_{2.5}$ 累积和扩散产生影响, 雾天气出现并在白天维持, 使得湍流垂直混合过程贡献明显下降, 雾顶逆温的持续存在抑制了污染物向大气上层扩散, 使得近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 始终维持在 $230 \sim 300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(2) 此次重污染过程期间天津本地排放贡献为33.5%, 区域输送贡献为66.6%, S1~S3阶段均表现出明显的区域输送特征, 贡献率分别为71.0%、74.1%和63.0%. 边界层垂直结构特征与区域输送影响密切相关, 结合无人机和气溶胶激光雷达观测

显示, 区域污染物输送高度主要出现在边界层顶部以及雾顶逆温以上的大风速层处, 且随着边界层和雾顶抬升高度的变化由高空影响到地面. WRF/Chem过程分析结果显示, 此次过程水平平流对近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的贡献整体为负值, 垂直平流贡献为正值, 区域污染物通过高空长距离输送至天津地区上空, 进而通过垂直下沉运动向近地面传输, 是天津地区北部弱高压型重污染天气的区域输送特征.

(3) 边界层垂直结构特征影响冷空气对近地面空气质量的改善. S3阶段初期, 低层存在明显的雾区, 雾区的存在抑制了弱冷空气高空风通过湍流切应力传导到地面, 减缓其对空气质量的改善作用, 13日05时冷空气已经影响观测点上空, 雾顶逆温以上平均风速为 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而逆温层以下平均风速仅为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 13日白天随着雾区消散, 冷空气影响近地面, 天津北部地区空气质量明显好转, 但中部和南部地区仍维持重度污染.

参考文献:

- [1] 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 等. 2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4061-4069.

- Liao Z H, Fan S J, Huang J, *et al.* Characteristic analysis of a multi-day pollution event in Chang-Zhu-Tan metropolitan area during October 2013 [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (11): 4061-4069.
- [2] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [3] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. *环境科学*, 2014, **35** (6): 2031-2044.
- Liao X N, Zhang X L, Wang Y C, *et al.* Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (6): 2031-2044.
- [4] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- Li M, Tang G Q, Huang J, *et al.* Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- [5] 马敏劲, 郭世奇, 王式功. 近 11 年兰州空气污染特征及其边界层结构影响的分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, **48**(6): 69-73.
- Ma M J, Guo S Q, Wang S G. Analysis of the characteristics of air pollution and its boundary layer structural effect in recent 11 years over Lanzhou [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, **48**(6): 69-73.
- [6] 张静, 刘端阳, 钱映月, 等. 一次持续性雾霾天气的边界层结构特征[J]. *干旱气象*, 2018, **36**(3): 483-491.
- Zhang J, Liu R Y, Qian Y Y, *et al.* Boundary layer features of the successional fog and haze episode in Jiangsu Area [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, **36**(3): 483-491.
- [7] 贾梦唯, 康娜, 赵天良. 南京秋冬季典型霾污染过程及边界层特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 105-110.
- Jia M W, Kang N, Zhao T L. Characteristics of typical autumn and winter haze pollution episodes and their boundary layer in Nanjing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, **37** (S2): 105-110.
- [8] 刘超, 花丛, 张恒德, 等. L 波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. *气象*, 2017, **43**(5): 591-597.
- Liu C, Hua C, Zhang H D, *et al.* Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer [J]. *Meteorological Monthly*, 2017, **43**(5): 591-597.
- [9] 何清, 金莉莉, 杨兴华, 等. 秋季南疆沙漠塔中边界层 O₃ 浓度及影响因子分析[J]. *高原气象*, 2010, **29**(1): 214-221.
- He Q, Jin L L, Yang X H, *et al.* Analysis on O₃ concentration and affecting factors for boundary-layer in Hinterland of Taklimakan Desert in autumn [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, **29**(1): 214-221.
- [10] 郭丽君, 郭学良, 栾天, 等. 云辐射效应在华北持续性大雾维持和发展中的作用[J]. *气象学报*, 2019, **77**(1): 111-128.
- Guo L J, Guo X L, Luan T, *et al.* The role of cloud radiative effect in the maintenance and development of persistent heavy fog events in northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2019, **77**(1): 111-128.
- [11] 杨军, 王蕾, 刘端阳, 等. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和消物理机制[J]. *气象学报*, 2010, **68**(6): 998-1006.
- Yang J, Wang L, Liu R Y, *et al.* The boundary layer structure and the evolution mechanisms of a deep dense fog event [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, **68**(6): 998-1006.
- [12] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 南京冬季平流雾的消机制及边界层结构观测分析[J]. *南京气象学院学报*, 2008, **31** (4): 520-529.
- Lu C S, Niu S J, Yang J, *et al.* An observational study on physical mechanism and boundary layer structure of winter advection fog in Nanjing [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, **31**(4): 520-529.
- [13] 王成刚, 李颖, 曹乐, 等. 苏州东山冬季大气边界层结构特征及其对污染物浓度的影响[J]. *热带气象学报*, 2017, **33** (6): 912-921.
- Wang C G, Li Y, Cao L, *et al.* Analysis on atmospheric boundary layer structure and its effect on pollution concentration over Dongshan, Suzhou in winter [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, **33**(6): 912-921.
- [14] Egli S, Maier F, Bendix J, *et al.* Vertical distribution of microphysical properties in radiation fogs-A case study [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **151**: 130-145.
- [15] Li J, Fu Q Y, Huo J T, *et al.* Tethered balloon-based black carbon profiles within the lower troposphere of Shanghai in the 2013 East China smog [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 327-338.
- [16] 李力, 张蓬勃, 戴竹君, 等. 利用微波辐射计对南京 2013 年 12 月霾天大气温湿结构的探测分析[J]. *气候与环境研究*, 2016, **21**(1): 8-16.
- Li L, Zhang P B, Dai Z J, *et al.* Using microwave radiometer data to detect and analyze the atmospheric temperature and moisture structure of the haze weather of Nanjing in December 2013 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, **21**(1): 8-16.
- [17] 杨富燕, 张宁, 朱莲芳, 等. 基于激光雷达和微波辐射计观测确定混合层高度方法的比较[J]. *高原气象*, 2016, **35** (4): 1102-1111.
- Yang F Y, Zhang N, Zhu L F, *et al.* Comparison of the mixing layer height determination methods using Lidar and Microwave Radiometer [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, **35** (4): 1102-1111.
- [18] 刘超, 张碧辉, 花丛, 等. 风廓线雷达在北京地区一次强沙尘天气分析中的应用[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(5): 1663-1669.
- Liu C, Zhang B H, Hua C, *et al.* Application of wind profiler radar in a strong sand dust weather analysis in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(5): 1663-1669.
- [19] 刘超, 花丛, 张恒德, 等. 基于风廓线雷达的北京春季一次“先霾后沙”空气污染过程分析[J]. *中国沙漠*, 2019, **39** (5): 88-96.
- Liu C, Hua C, Zhang H D, *et al.* Analysis of a haze-dust air pollution process in spring of Beijing based on wind profiler radar [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, **39**(5): 88-96.
- [20] 王敏仲, 魏文寿, 何清, 等. 边界层风廓线雷达资料在沙尘天气分析中的应用[J]. *中国沙漠*, 2011, **31**(2): 352-356.
- Wang M Z, Wei W S, He Q, *et al.* Preliminary study on sand-dust weather process detection using boundary wind profile radar [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, **31**(2): 352-356.
- [21] 胡欢陵, 吴永华, 谢晨波, 等. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 59-66, 73.
- Hu H L, Wu Y H, Xie C B, *et al.* Aerosol pollutant boundary layer measured by Lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 59-66, 73.

- [22] 宋明昊, 张小玲, 袁亮, 等. 成都冬季一次持续污染过程气象成因及气溶胶垂直结构和演变特征[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 408-417.
- Song M H, Zhang X L, Yuan L, *et al.* Meteorological effects and aerosol vertical structure and evolution characteristics of a continuous pollution process in winter in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 408-417.
- [23] 鲁斯嘉, 王东生, 李小兵, 等. 基于无人机平台的细颗粒物三维分布监测[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(8): 94-100.
- Lu S J, Wang D S, Li X B, *et al.* Three-dimensional distribution of fine particulate matter measured by an UAV sampling platform [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, **17**(8): 94-100.
- [24] 姜明, 史静, 姚巍, 等. 多旋翼微型无人机气象探测适用性分析[J]. 气象科技, 2018, **46**(3): 479-484.
- Jiang M, Shi J, Yao W, *et al.* Applicability of micro multi-rotor UAV in meteorological observation [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, **46**(3): 479-484.
- [25] 曹云擎, 王体健, 高丽波, 等. 基于无人机垂直观测的南京 PM_{2.5} 污染个例研究[J]. 气候与环境研究, 2020, **25**(3): 292-304.
- Cao Y Q, Wang T J, Gao L B, *et al.* A case study of PM_{2.5} pollution in Nanjing based on unmanned aerial vehicle vertical observations [J]. *Climate and Environmental Research*, 2020, **25**(3): 292-304.
- [26] Peng Z R, Wang D S, Wang Z Y, *et al.* A study of vertical distribution patterns of PM_{2.5} concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles: a case in Hangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 357-369.
- [27] Bates T S, Quinn P K, Johnson J E, *et al.* Measurements of atmospheric aerosol vertical distributions above Svalbard, Norway, using unmanned aerial systems (UAS) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(8): 2115-2120.
- [28] Brady J M, Stokes M D, Bonnardel J, *et al.* Characterization of a quadrotor unmanned aircraft system for aerosol-particle-concentration measurements [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(3): 1376-1383.
- [29] Illingworth S, Allen G, Percival C, *et al.* Measurement of boundary layer ozone concentrations on-board a Skywalker unmanned aerial vehicle [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2014, **15**(4): 252-258.
- [30] Li X B, Wang D S, Lu Q C, *et al.* Three-dimensional investigation of ozone pollution in the lower troposphere using an unmanned aerial vehicle platform [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **224**: 107-116.
- [31] 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 等. 基于天气背景天津大气污染输送特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4855-4863.
- Cai Z Y, Yang X, Han S Q, *et al.* Transport characteristics of air pollution in Tianjin based on weather background [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4855-4863.
- [32] Han S Q, Hao T Y, Zhang Y F, *et al.* Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 135-146.
- [33] 聂滕, 李璇, 王占山, 等. APEC 期间北京市 PM_{2.5} 时空分布与过程分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 349-355.
- Nie T, Li X, Wang Z S, *et al.* Spatial and temporal distribution and process analysis of PM_{2.5} pollution over Beijing during APEC [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 349-355.
- [34] 张强, 薛迪, 王爽, 等. 青岛市 PM_{2.5} 重污染天气演变过程分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3623-3635.
- Zhang Q, Xue D, Wang S, *et al.* Analysis on the evolution of PM_{2.5} heavy air pollution process in Qingdao [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3623-3635.
- [35] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of PM_{2.5} in Jingjinji Region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [36] 王晓琦, 郎建全, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [37] 蔡子颖, 姚青, 韩素芹, 等. 天津地区霾天气特征研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 50-60.
- Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, *et al.* Research on characteristics of haze weather in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(1): 50-60.
- [38] 蔡子颖, 韩素芹, 邱晓滨, 等. 基于 WRF/Chem 模式天津地区重污染天气成因分析[J]. 高原气象, 2019, **38**(5): 1108-1119.
- Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, *et al.* Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on WRF/Chem [J]. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(5): 1108-1119.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i>	(1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i>	(30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i>	(38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i>	(55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i>	(65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i>	(88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i>	(97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i>	(106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i>	(114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo	(127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i>	(136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i>	(147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i>	(159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i>	(166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i>	(175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i>	(184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue	(195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i>	(204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao	(211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i>	(242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i>	(263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i>	(274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i>	(283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i>	(315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i>	(323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i>	(333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i>	(343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i>	(353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i>	(386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i>	(394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i>	(403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i>	(411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i>	(433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i>	(443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i>	(450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i>	(459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i>	(467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i>	(477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i>	(485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i>	(492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i>	(501)