

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析

毛曳¹, 张恒德^{2*}, 朱彬³

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 2016 年 12 月 16 ~ 21 日我国京津冀地区发生了一次持续重度霾天气过程. 为了进一步加深对霾的认识和提高对霾的分析预报能力, 利用多种资料, 对此次重度霾天气过程的环流背景和气象要素等进行了综合性分析. 结果表明, 此次过程持续时间长, 污染强度大, 影响范围广, 能见度低, 以外来输送为主, 气溶胶主要分布在 600 m 以下高度, 有一定的极端异常性, 静稳天气指数与空气质量指数有较好的对应关系; 京津冀地区高空受高压脊前的纬向环流控制, 维持偏西气流, 冷空气活动弱, 以下沉气流为主, 水汽含量较低, 高空云量较少, 低空有暖脊北伸, 地面位于高压东南部, 受均压场控制, 气压梯度较小, 受偏南风影响, 污染物易于堆积; 地面静小风, 相对湿度较高, 混合层高度较低, 不利于污染物的水平和垂直扩散.

关键词: 霾; 环流背景; 气象要素; 激光雷达; 极端性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3615-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012028

Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei

MAO Ye¹, ZHANG Heng-de^{2*}, ZHU Bin³

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China; 3. Collaborative Innovation Center for Meteorological Disaster Prediction and Assessment, Nanjing 210044, China)

Abstract: From December 16 to 21, 2016, continuous heavy haze occurred in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China. To further understand the development mechanism of haze and improve the forecasting of haze events, a variety of data, background circulation, and the meteorological elements of this severe haze process were comprehensively analyzed. The results show that the process lasted for a long time, pollution intensity was high, influence area was wide, visibility was low, and external transport was the main cause. Aerosols were mainly distributed at a height of 600 m, and there was a certain extreme anomaly. The static weather index and air quality index showed a strong correlation. The air in the Beijing-Tianjin-Hebei region is controlled by zonal circulation in front of a high-pressure ridge, which maintains the westerly airflow. Cold-air activity is weak, and downflow is dominant. The water vapor content is low, the cloud cover is limited at high altitudes, and a warm ridge extends northwards at low altitudes. Limited static wind on the ground, high relative humidity, and low mixing-layer height are not conducive to the horizontal and vertical diffusion of pollutants.

Key words: haze; circulation background; meteorological elements; laser radar; extremity

霾是气溶胶细粒子在低湿度条件下引发的低能见度天气现象, 一般是指大量极细微的干尘粒均匀的悬浮在空中, 使空气普遍浑浊, 水平能见度小于 10 km 的现象. 随着我国城市规模不断扩大, 城市化进程不断发展以及经济飞速增长, 大气污染问题越发严重. 空气污染不仅会对交通出行造成影响, 引起交通事故和航班延误等; 还会严重危害人体健康, 导致心脑血管和呼吸系统等疾病发病率剧增, 给社会安全和人民健康带来巨大威胁. 京津冀地区以 PM_{2.5} 为首要污染物的雾、霾天气由于出现次数较多, 污染物浓度高, 给人民群众生产生活 and 身体健康带来较多不利影响, 成为公众、媒体和相关科研业务单位关注的重点.

国内外许多专家学者都对霾做了研究. 孙彧等^[1]的研究分别根据近 50 年左右我国的雾、霾台站长期观测资料的分析得到我国雾、霾的长期变化特

征, 分析了雾、霾与能见度的关系, 表明我国能见度有明显的下降, 霾日发生的频率总体呈上升趋势. 刘晓慧等^[2]通过统计分析长江三角洲地区近 30 年灰霾分布情况, 计算消光系数, 得出近 30 年来长江三角洲灰霾日数整体呈增长趋势, 能见度与 AQI 呈负相关且相关性随相对湿度的增加而增强. 张小曳等^[3]的研究通过分析 2013 年 1 月中东部地区持续性雾、霾天气的气溶胶特征、污染物成分构成和形成维持机制等, 指出我国雾、霾主要是严重的气溶胶污染, 但气象条件对其形成分布变化作用明显. 有研究指出, 2000 年以来, 京津冀地区霾日数整体呈增加趋势^[4], 京津冀城市群内不同城市污染物相互影响

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-01-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203301)

作者简介: 毛曳(1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为持续重度霾污染分析, E-mail: 511435617@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhanghengde1977@163.com

和沙尘的远距离输送,更加重了霾天气的危害^[5,6]. 朱媛媛等^[7]和沈吉等^[8]的研究结合激光雷达,分析了大气污染物在污染期间区域附近的平流输送和气溶胶的垂直分布状况. 静稳天气中弱风、高湿和稳定的边界层结构既有利于形成雾、霾,又有利于污染物排放量大的地区气溶胶的生成、增长和累积^[9~13]. 沈利娟等^[14]的研究提出副高位置、均压场、地面静小风和边界层中逆温层能为雾、霾过程提供水汽和动、热力条件. 有研究发现^[15~17],影响雾、霾低能见度的因子主要有环流形势^[15]、气溶胶^[18]、水汽^[19]、低层平流^[20]和基础能见度^[21~25]. 张恒德等^[26]建立了静稳天气指数,能有效地描述静稳天气程度对污染物积累的作用,预报污染过程发展至消散的不同阶段.

近年来,我国十分重视雾、霾的监测、分析、预报和防治工作. 本文分析了我国京津冀地区一次典型霾天气过程的环流形势、气象要素和边界层特征等,探讨此类持续重霾天气过程的气象条件,以期为进一步加深对霾的认识和提高对霾的分析预报能力提供支持.

1 材料与方法

1.1 数据资料

中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035>)提供的京津冀逐小时平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 AQI 指数;中国气象局地面气象要素逐小时观测资料,包括温度、相对湿度(relative humidity, RH)、风速、风向和能见度(visibility, Vis)等;中国气象局 CIMISS 气象数据统一服务接口(<http://10.20.76.55/>)提供的气象数据,包括露点温度(dew-point temperature, T_d)和高空风速等;美国国家环境预报中心(NCEP)提供的分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的日平均再分析资料;数值模式预报产品欧洲中期数值预报中心(EC)提供的分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 的日平均细网格资料;位于北京市海淀区中国气象局北京城市气象研究所楼顶、北京健德桥、怀柔国防科技大学和天津武清高村的激光雷达数据.

1.2 技术方法

1.2.1 混合层高度

混合层高度(mixed-layer height, MLH)是反映大气污染物扩散的重要因子,也是影响地面污染浓度的重要因子,混合层高度越低,越不利于污染物在垂直方向的扩散,容易造成污染物堆积,从而发生霾现象,反之,混合层高度越高,越有利于污染物扩散.

计算混合层高度有多种方法,常用的有干绝热

法和罗氏法. 本研究采用罗氏法,罗氏法 1973 年由 Nozaki 等提出,考虑到了大气热力和动力湍流共同作用. 公式为:

$$L = \frac{121}{6}(6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(Z/Z_0)} \quad (1)$$

式中, $T - T_d$ 为温度露点差(K), P 为帕斯奎尔稳定度级别(根据地面观测资料,结合热力因子和动力因子,把太阳高度角、云量和风速分级量化,把大气稳定度分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定这 6 个级别,分别以 A、B、C、D、E 和 F 表示, P 值依次为 1~6), U_z 为 Z 厚度处所观测的平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), Z_0 为地面粗糙度(m,根据不同地区地面的平坦粗糙情况以及城市面积取值,在农村约 0.03~0.2 m,在城市约 0.8~2.0 m), f 为地转参数(s^{-1}), $f = 2\Omega \sin \varphi$, 其中, φ 为观测点地理纬度, Ω 为地转角速度.

和干绝热法相比,罗氏法的计算简便,且不需要探空资料,计算所需的均为常规气象资料,较易获得,更具有普适性,为比较实用的方法.

1.2.2 标准化异常度

同一气象要素在不同时空的异常度是不一样的,为了更直观地比较天气要素异常度,本文采用了“标准化异常度”方法^[27,28],对气象要素进行了标准化异常度计算. 公式为:

$$\text{SA} = \frac{\text{OBS} - \text{Mean}_{(\text{climate})}}{\text{SD}_{(\text{climate})}} \quad (2)$$

式中, OBS 为污染过程期间气象要素资料, $\text{Mean}_{(\text{climate})}$ 和 $\text{SD}_{(\text{climate})}$ 分别为气候均值和气候方差. 根据本文研究的时间,选取了 1981~2010 年这 30a 的 11 月与 12 月的各气象要素的逐日数据,分别计算平均值与方差.

1.2.3 静稳天气指数

静稳天气是在高低层大气的综合作用下形成的,有利于污染物和水汽在排放源附近和近地层累积,造成重污染和低能见度天气. 结合重污染过程气象要素统计分析和预报经验,确定了计算静稳天气指数(static stability weather index, SWI)的气象要素、阈值和权重^[26],如表 1.

2 结果与讨论

2.1 霾过程概况

2016 年 12 月 16~21 日发生的持续性霾天气过程是 2016 年范围最广、持续时间最长和强度最强的霾天气过程. 华北、黄淮和周边共 13 个省(直辖

表 1 计算静稳天气指数的气象要素、阈值和权重		
Table 1 Meteorological factor, threshold value, and weight for SWI		
因子(<i>i</i>)	阈值	权重(<i>W</i>)
地表 24 h 变温/℃	<3	2
海平面气压/hPa	1 010 ~ 1 030	1
24 h 变压/hPa	<3	1
2 m 相对湿度/%	40 ~ 60	1
2 m 相对湿度/%	60 ~ 70	2
2 m 相对湿度/%	70 ~ 80	3
2 m 相对湿度/%	80 ~ 90	4
2 m 相对湿度/%	>90	5
850 hPa 散度绝对值 $\times 10^{-5}/s^{-1}$	<2	1
10 m 水平风速/ $m\cdot s^{-1}$	3 ~ 4	1
10 m 水平风速/ $m\cdot s^{-1}$	2 ~ 3	3
10 m 水平风速/ $m\cdot s^{-1}$	<2	4
850 hPa 垂直速度/hPa $\cdot s^{-1}$	<0.2	2
混合层高度/m	800 ~ 1 500	1
混合层高度/m	300 ~ 800	2
混合层高度/m	<300	4
逆温层	850 ~ 925、925 ~ 1 000 和 850 ~ 1 000 hPa 中存 在一个及以上逆温层	3

市、自治区)出现重度霾(图 1),受霾影响区域面积达到 268 万 km²,重度霾面积达 71 万 km²;环境监测显示,北京、天津、河北、河南、山西、陕西和山东等地的部分地区 PM_{2.5} 峰值浓度高于 500 μg·m⁻³,其中,北京和石家庄局地 PM_{2.5} 峰值浓度分别超过 600 μg·m⁻³ 和 1 100 μg·m⁻³.

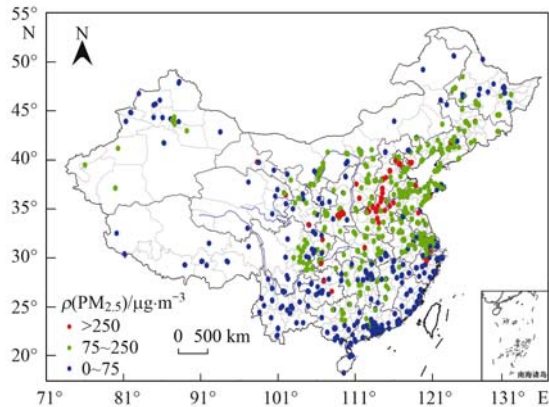


图 1 2016 年 12 月 16 ~ 21 日全国站点 PM_{2.5} 平均浓度

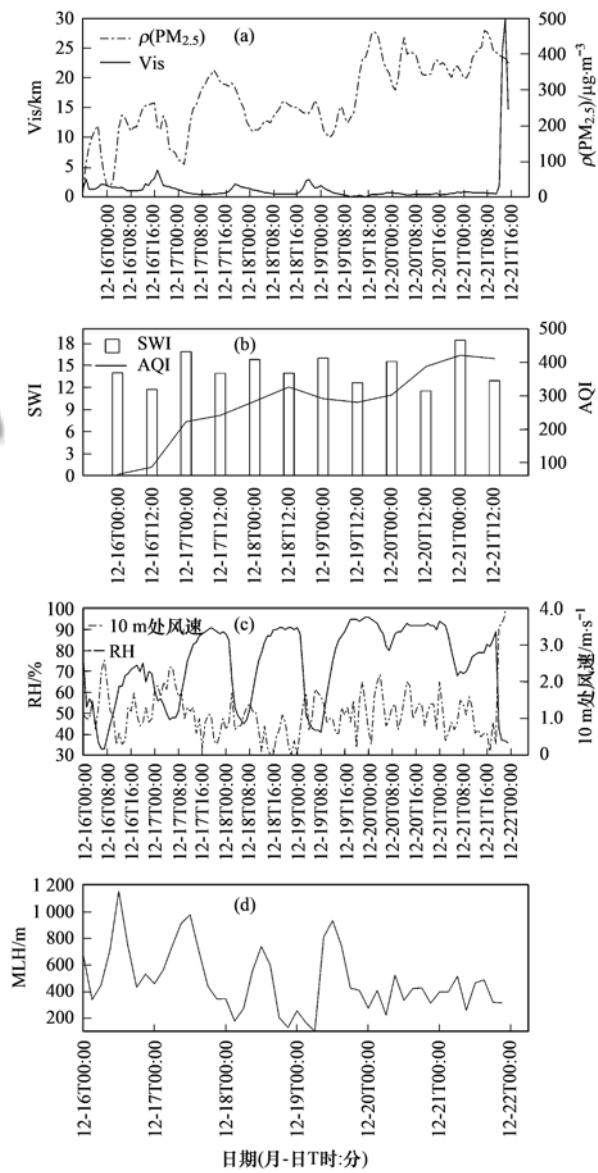
Fig. 1 Average concentration of PM_{2.5} at national stations from December 16 to 21, 2016

图 2 给出了此次过程重点城市北京的单站能见度、PM_{2.5} 浓度、静稳天气指数、AQI 指数、相对湿度、离地面 10 m 处风速和混合层高度的变化特征。

本次过程中,能见度低,最高不到 4 km, 12 月 19 ~ 20 日夜间为最低值,低至 100 m 以下.霾即将结束的 12 月 21 日晚,能见度增大到正常水平.而 PM_{2.5} 的浓度呈波动增长趋势,在 12 月 20 日 02:00 时达到最高值,接近 500 μg·m⁻³.静稳天气指数与

AQI 指数变化具有较好的一致性,可以很好地反映霾天气发展。

相对湿度呈现波动上升趋势,整体数值较大,最大可高于 90%.潮湿空气可以使颗粒物吸湿性增长,导致能见度下降;离地面 10 m 处风速较低,最高为 2.5 m·s⁻¹ 左右,甚至出现无风情况. 12 月 21 日风速剧增,污染物迅速消散,霾天气过程结束.对比曲线发现,PM_{2.5} 浓度较小,能见度较高时相对湿度较低,地面风速较大,PM_{2.5} 浓度较大,能见度较低时则相反.潮湿空气可以使颗粒物吸湿性增长,导致能见度下降.同时,高相对湿度会使 PM_{2.5} 浓度上升得更快.地面风速偏大时,会使污染物向外输送能力偏强,不利于霾的维持和发展,导致 PM_{2.5} 浓度偏小,能见度偏大;反之,地面风速较小则有利于霾的维



(a) 能见度和 PM_{2.5} 浓度; (b) SWI 指数和 AQI 指数; (c) 相对湿度和离地面 10 m 处风速; (d) 混合层高度

图 2 北京单站气象要素

Fig. 2 Meteorological elements from a single station in Beijing

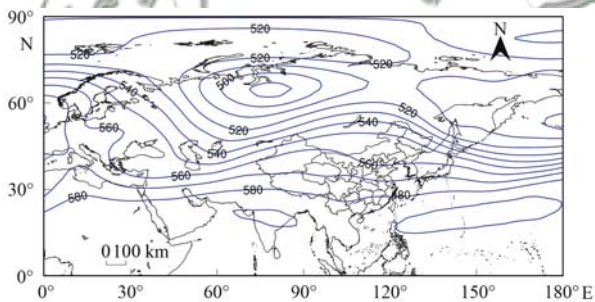
持发展, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏大, 能见度偏小。

混合层高度呈波动下降趋势, 最低时低至 130 m。混合层高度低, 垂直方向污染物难以扩散, 水汽与 $\text{PM}_{2.5}$ 在低层汇聚。过程后期, 混合层高度增加, 不利于污染物的聚集, 霾天气过程结束。

2.2 霾成因分析

从 500 hPa 高度场 (如图 3) 与海平面气压场 (如图 4) 可知, 亚洲中高纬为典型的两槽一脊的环流形势, 贝加尔湖附近受高压脊控制, 环流形势呈现出西高东低的特征, 以纬向环流为主, 冷空气活动偏弱, 气温偏高。随后高压东移, 位于北京北部、山东和河南等地的污染物在东南风作用下汇聚于太行山前, 在偏南风的影响下向京津冀地区输送量增加, 污染程度加重。等高线稀疏, 气压梯度小, 维持偏西气流, 以下沉气流为主, 水汽含量较低, 高空云量较少, 有利于夜间地面辐射降温, 降低边界层高度, 形成稳定的逆温层, 造成污染物堆积, 使霾天气过程的强度和持续时间增大。12 月 22 日东移高空槽加深, 我国东部沿海形成东亚大槽, 带来一股强冷空气, 地面转为 4~5 级偏北风, 大气扩散条件迅速好转, 霾天气过程随之结束。

从低层温度场来看 (如图 4), 850 hPa 等温线密集, 有暖脊的形成, 会导致逆温层厚度向上延伸, 使污染物难以垂直扩散。随后, 随着暖脊的撤退, 霾现象减弱至消散。



等值线表示位势高度, 单位: 位势 10 m

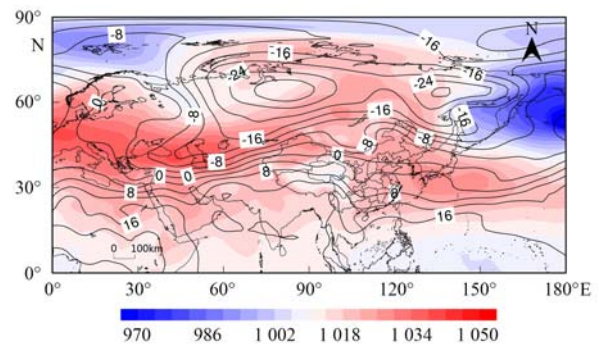
图 3 2016 年 12 月 18 日欧亚 500 hPa 高度

Fig. 3 Geopotential height at 500hPa in Europe and Asia in December 18, 2016

从 925 hPa 风场来看 (如图 5), 风速较小, 偏西风转西南风, 污染物向东向南输送, 出现辐合风现象, 污染物堆积, 难以扩散。过程后期, 风向改变, 北方冷空气南下, 风速增大, 污染物迅速扩散, 污染结束。

2.3 激光雷达分析

根据天津武清、北京健德桥和北京怀柔国防科技大学的激光雷达发现 (如图 6), 12 月 16 日 06:00 时天津处雷达的消光系数为 1.5 km^{-1} , 在 10:00 时减小至 0.9 km^{-1} , 边界层高度较低且比较稳定。12

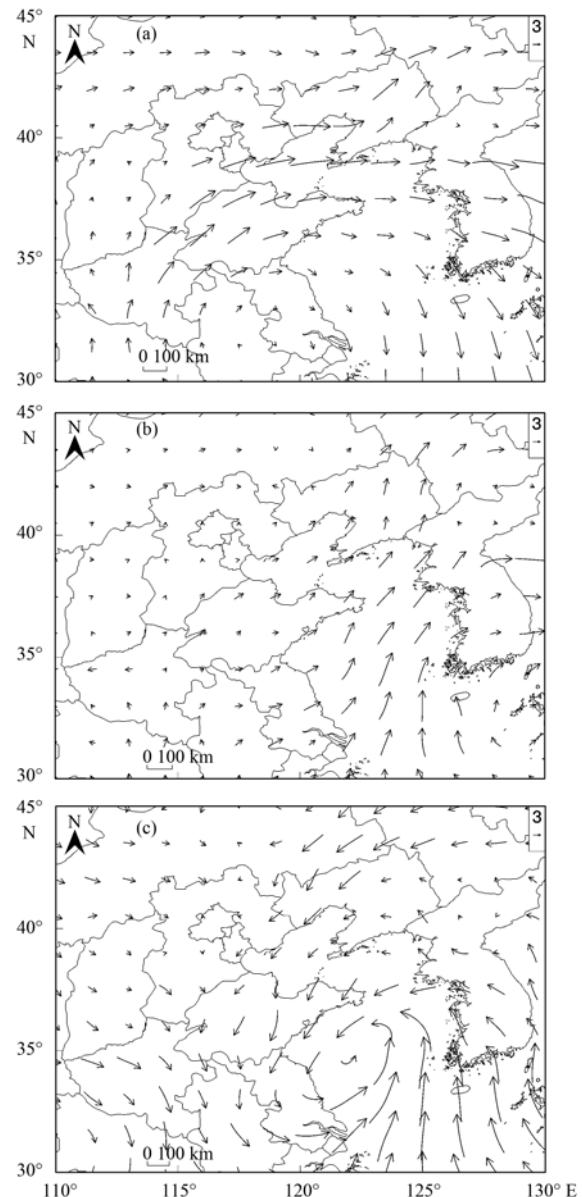


等值线表示 850 hPa 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$;

色块表示海平面气压, 单位: hPa

图 4 2016 年 12 月 17 日 850 hPa 温度和海平面气压

Fig. 4 Temperature at 850 hPa and sea-level pressure in December 17, 2016



(a) 2016 年 12 月 16 日, (b) 2016 年 12 月 18 日, (c) 2016 年 12 月 21 日; 箭头: 风速和风向, 风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

图 5 925 hPa 风

Fig. 5 Wind at 925 hPa

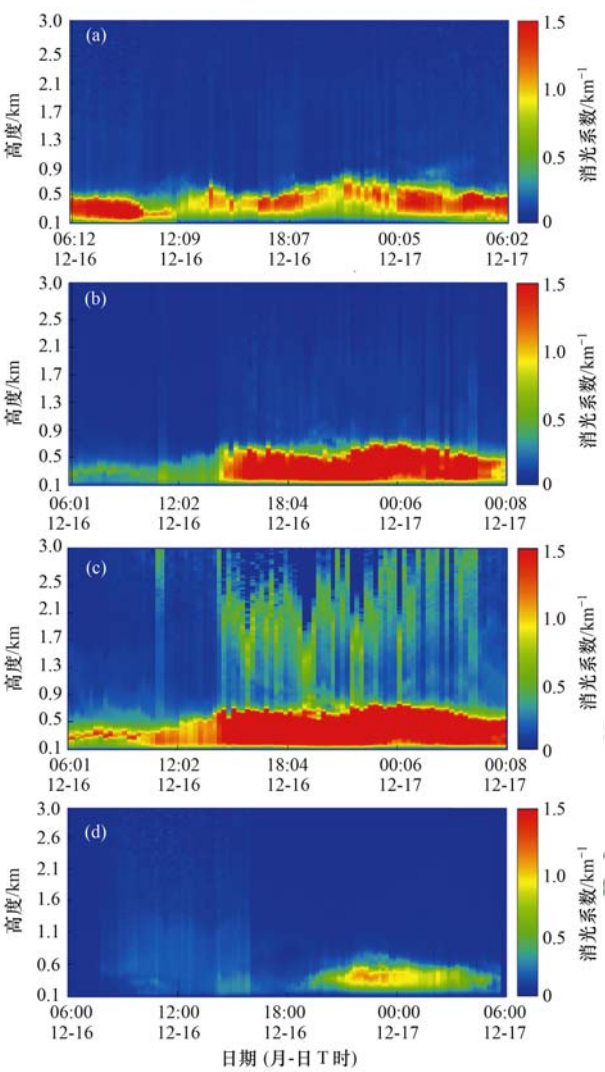
月 16 日 06:00 时北京健德桥 400 m 处有一层污染气团,在 10:00 时左右降至地面,14:00 时左右消光系数从 0.7 km^{-1} 迅速增加至 1.5 km^{-1} ,气溶胶高度主要位于 600 m 以下,边界层高度低且稳定少变. 12 月 16 日 18:00 ~ 23:00,怀柔国防大学处消光系数从 0.2 km^{-1} 增加至 0.9 km^{-1} ,气溶胶主要分布在 600 m 以下高度. 从天津武清、北京健德桥和北京怀柔国防科技大学消光系数变化可知,此次污染过程以外来输送为主,且东南方向为一个污染输送通道.

图 7 为经过距离校正后的激光雷达归一化相对后向散射强度,激光雷达连续观测显示,回波强度高值区位置较为稳定,基本位于 500 m 以下,随时间变幅小,日变化特征较为明显. 北京气象局城市气象研究所激光雷达资料同样显示 14:00 时左右消光系数从 0.6 km^{-1} 迅速增至 1.6 km^{-1} ,和北京健德桥污染快速加重时间一致,说明市区受外来污染输送比较均匀,夜间 22:00 时左右,回波强度明显减弱.

2.4 气象要素极端性分析

本研究选取了能见度、相对湿度、10 m 水平风速、静稳天气指数和混合层高度来计算极端异常值.

本研究能见度的异常度数值都在 3 以上,具有明显的偏差. 10 m 风速的偏差要小一些但仍存在,而相对湿度的异常度数值则更小. 能见度与 10 m 风速的标准化异常度都为负数,说明霾天气过程期间,这两个要素比气候平均要小,而相对湿度则相反,这同时证明了低风速高相对湿度有利于霾发生. 表 2 中的静稳天气指数异常值都是正值,12 月 18 日和 20 日的数值较大,静稳天气指数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有正相关性. 而混合层高度越低,大气层结越稳定,污染物堆积导致霾天气过程越严重. 通过比较发现,



(a)天津武清高村;(b)北京市健德桥;
(c)北京健德桥;(d)北京怀柔国防科技大学

图 6 2016 年 12 月 16 ~ 17 日激光雷达消光系数
Fig. 6 Laser radar extinction coefficient diagram
from December 16 to 17, 2016

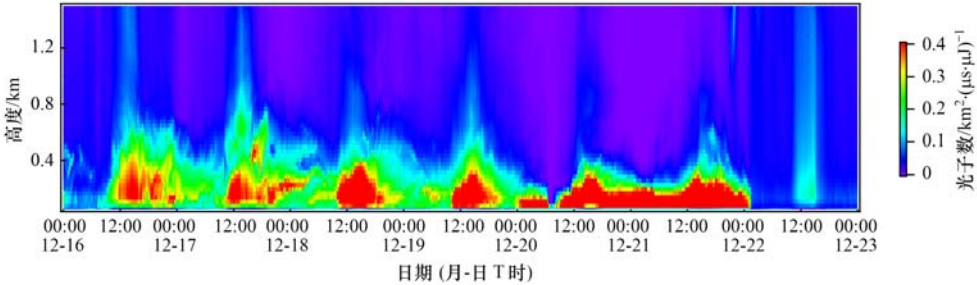


图 7 2016 年 12 月 16 ~ 23 日北京激光雷达后向反射系数

Fig. 7 Time series of laser radar backward reflection coefficient in Beijing from December 16 to 23, 2016

表 2 2016 年 12 月 16 ~ 21 日气象要素极端异常值

Table 2 Extreme outlier of meteorological elements from December 16 to 21, 2016

项目	日期(月-日)						平均
	12-16	12-17	12-18	12-19	12-20	12-21	
能见度/km	-3.1	-3.5	-3.7	-3.6	-3.9	-3.1	-3.5
相对湿度/%	0.2	0.7	0.8	0.7	1.6	1.2	0.8
10 m 水平风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-1.1	-1.0	-1.5	-1.1	-1.8	-1.0	-1.2
静稳天气指数	1.0	1.5	1.6	1.3	1.7	1.2	1.4
混合层高度/km	-1.0	-1.1	-1.6	-1.3	-1.6	-1.3	-1.3

异常度数值在 12 月 16~18 日增加, 12 月 18~19 日降低, 12 月 20 日为峰值且数值最大. 说明本次霾天气过程较为严重, 具有一定的极端性, 风速和混合层高度的影响要大于相对湿度(如表 2).

3 结论

(1) 本研究的霾天气过程, 持续时间长, 污染强度高, 影响范围广, 能见度低. 污染物主要聚集在 600 m 高度以下, 并沉降至地面.

(2) 本研究受高空高压脊前纬向环流控制, 维持偏西气流; 850 hPa 有暖脊北伸, 有利于污染物的堆积; 地面位于高压东南部, 受均压场控制, 气压梯度较小, 高压移速较慢, 冷空气南下较慢; 925 hPa 偏南风, 风速较小, 地面水平静小风, 有利于污染物的前期输送与中期堆积; 高相对湿度, 低混合层高度, 阻止了污染物的水平扩散.

(3) 本研究的静稳天气指数与 AQI 指数变化具有较好的一致性, 可以很好地反映霾天气发展. 激光雷达的连续观测能较好地反映细颗粒物为主的气溶胶在垂直方向的变化趋势及输送和沉降.

(4) 本研究的能见度、10 m 风速、静稳天气指数和混合层高度的异常影响较高, 相对湿度更低, 整体过程具有一定的极端性, 较为严重.

参考文献:

- [1] 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 397-406.
Sun Y, Ma Z F, Niu T, *et al.* Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(3): 397-406.
- [2] 刘晓慧, 朱彬, 王红磊, 等. 长江三角洲地区 1980~2009 年灰霾分布特征及影响因子[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 1929-1936.
Liu X H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Haze variations over 1980~2009 and connecting factors over the Yangtze River Delta Region[J]. China Environmental Science, 2013, 33(11): 1929-1936.
- [3] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [4] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 31-36.
Zhao P S, Xu X F, Meng W, *et al.* Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei[J]. China Environmental Science, 2012, 32(1): 31-36.
- [5] 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 353-363.
Wang Y S, Yao L, Liu Z R, *et al.* Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 353-363.
- [6] 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 等. 北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2582-2594.
Wang Y T, Li Q C, Zheng Z F, *et al.* Research on the pollution characteristics and causality of Haze-sand air pollution in Beijing in spring[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2582-2594.
- [7] 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 等. 京津冀及周边区域 PM_{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 574-586.
Zhu Y Y, Gao Y X, Chai W X, *et al.* Heavy pollution characteristics and assessment of PM_{2.5} predicted model results in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas during November 23 to December 4, 2018[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 574-586.
- [8] 沈吉, 曹念文. 2018 年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4743-4754.
Shen J, Cao N W. Characteristics of aerosol vertical distribution over the Yangtze River Delta region of China in 2018[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4743-4754.
- [9] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 1-9.
Wu D, Liao G L, Deng X J, *et al.* Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(1): 1-9.
- [10] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 等. 北京地区 PM₁₀ 质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 607-612.
Guo L, Zhang Y K, Liu S H, *et al.* Correlation analysis between PM₁₀ mass concentration and meteorological elements of atmospheric boundary layer in Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(4): 607-612.
- [11] 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 等. 2018 年石家庄市秋冬季典型霾污染特征[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4755-4763.
Su W K, Bao X L, Ni S Y, *et al.* Characteristics of haze pollution episodes during autumn and winter in 2018 in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4755-4763.
- [12] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 584-588.
Tong Y Q, Yin Y, Qian L, *et al.* Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area[J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 584-588.
- [13] 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 等. 郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3856-3867.
Guo M M, Jiang N, Wang S B, *et al.* Analysis of air pollution characteristics and meteorological conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 3856-3867.
- [14] 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.
- [15] 樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 北京雾-霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 631-638.
Fan W Y, Hu B, Wang Y S, *et al.* Measurements on the vertical

- distribution of $PM_{2.5}$ concentration in fog and haze days in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2009, **14**(6): 631-638.
- [16] 张立, 王文龙, 王旭东. 东营地区雾霾变化特征及其低能见度影响因子分析[J]. 现代农业科技, 2016, (19): 238-242.
- [17] 徐冉, 张恒德, 杨晓文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration characteristics of $PM_{2.5}$ and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- [18] 彭敏, 储江伟, 李洪亮, 等. 哈尔滨市冬季雾霾天气大气颗粒物污染特征分析[J]. 森林工程, 2007, **33**(1): 33-40.
Peng M, Chu J W, Li H L, *et al.* Analysis on the pollution characteristics of atmospheric particles during haze weather in winter Harbin [J]. Forest Engineering, 2007, **33**(1): 33-40.
- [19] 李芳, 赵京峰, 张熙, 等. 近 30 年济宁市雾和霾的时空分布特征及影响因子分析[J]. 湖北农业科学, 2016, **55**(21): 5488-5491.
Li F, Zhao J F, Zhang X, *et al.* Spatio-temporal characteristics and impact factors of fog and haze days in Jining during thirty years [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, **55**(21): 5488-5491.
- [20] 李晓燕. 京津冀地区雾霾影响因素实证分析[J]. 生态经济, 2016, **32**(3): 144-150.
Li X Y. Empirical analysis of the smog factors in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Ecological Economy, 2016, **32**(3): 144-150.
- [21] 莫日格吉呼, 韩燕丽. 连续雾霾天气污染物浓度变化及天气形势特征分析[J]. 农业科技与信息, 2016, (26): 45.
- [22] 刘佳. 山西省雾霾影响因子分析[J]. 河南农业, 2016, (32): 38.
- [23] 刘瑞芳, 陈小婷, 姚静, 等. 陕西关中持续性雾霾天气的气象条件分析[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(1): 82-88.
- Liu R F, Chen X T, Yao J, *et al.* Meteorological conditions for persistent fog and haze process in Guanzhong area, Shaanxi [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(1): 82-88.
- [24] 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等. 无锡市霾天气特征及影响因子研究[J]. 气象, 2013, **39**(10): 1314-1324.
Guo Y F, Liu D Y, Zhou B, *et al.* Study on haze characteristics in Wuxi and its impact factors [J]. Meteorological Monthly, 2013, **39**(10): 1314-1324.
- [25] 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 等. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J]. 气象学报, 2016, **74**(3): 352-366.
Wu P, Ding Y H, Liu Y J, *et al.* Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, **74**(3): 352-366.
- [26] 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, 等. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. 气象, 2017, **43**(8): 998-1004.
Zhang H D, Zhang B H, Lü M Y, *et al.* Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology [J]. Meteorological Monthly, 2017, **43**(8): 998-1004.
- [27] 杜钧, Grumm R H, 邓国. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨为例[J]. 大气科学, 2014, **38**(4): 685-699.
Du J, Grumm R H, Deng G. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, **38**(4): 685-699.
- [28] 陶亦为, 代刊, 董全. 2016 年 1 月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J]. 气象, 2017, **43**(10): 1176-1185.
Tao Y W, Dai K, Dong Q. Extreme analysis and ensemble prediction verification on cold wave process in January 2016 [J]. Meteorological Monthly, 2017, **43**(10): 1176-1185.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-ni, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)