

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单	梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国 (4767)
中国水泥排放清单及分布特征	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞 (4776)
环境空气 PM _{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立: 以长三角地区为例	张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹 (4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征	张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程 (4803)
郑州市 PM _{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析	张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹 (4813)
山西大学城 PM _{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估	李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇 (4825)
2000~2019 年中国 PM _{2.5} 时空演化特征	夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富 (4832)
北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异	尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军 (4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析	蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐 (4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠 (4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源	孙佳宁, 谢绍东 (4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析	高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜 (4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应	张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双 (4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探	陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫 (4905)
2009~2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素	辛华荣, 朱广伟, 王雪松, 李骏, 陆隽 (4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征	张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆 (4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪	孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强 (4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价	李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一 (4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征	张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程 (4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海 (4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序	苏超, 崔严 (4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价	杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷 (4989)
污水处理厂对漓江桂林市城区河段淡水生物中微塑料累积的影响	谢元汕, 张清科, 张滴杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳 (4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律	卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送 (5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素	朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌 (5016)
水库热分层沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响	王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇 (5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析	韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣 (5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响	郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟 (5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级	李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰 (5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制	潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金鑫, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英 (5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N ₂ O 释放的影响	王丝可, 于恒, 左剑恶 (5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A ² /O 污染物去除特性	荣懿, 邵劲博, 于优城, 石炬, 金鹏康 (5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响	田中科, 王芬, 闫钊 (5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价	韩琳, 徐夕博 (5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险	沈城, 刘馥雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛 (5125)
有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因子	侯静雯, 施维林, 高娟 (5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英 (5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响	闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰 (5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应	王晓宇, 韩辉 (5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响	赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君 (5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响	张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔 (5176)
生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及其细菌群落结构的变化	曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋 (5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响	贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰 (5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展	张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥 (5201)
广告: 国家微生物科学数据中心	(前插)
《环境科学》征订启事 (4785) 《环境科学》征稿简则 (4947) 信息 (5015, 5124, 5132)	

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异

尹晓梅^{1,2}, 乔林^{2*}, 朱晓婉², 郭恒², 刘湘雪², 熊亚军²

(1. 北京城市气象研究院, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089)

摘要: 为探究污染的控制风向特征差异及其长期演变趋势, 对 2014~2019 年北京地区逐小时气象要素和 $PM_{2.5}$ 浓度统计分析. 结果表明, 研究时段内北京地区 67% 的污染发生在偏南风和偏东风的控制下, 且冬季最易出现污染, 其次为春季和秋季, 各自对应的冬、春、秋和夏季平均污染概率为 45.2%、34.1%、32.1% 和 26.1% 及 47.0%、45.8%、39.7% 和 29.6%. 北京偏南风频率更高, 但偏东风下污染概率更大, 污染差异在春季最明显 11.7% (2.8%~18.6%), 冬季最小 1.8% (-7.6%~13.9%). 过去 6 a, 偏南风和偏东风下的污染概率分别以每年 4.6%~8.0% 和 5.5%~7.9% 的速度降低, 很大程度体现在中度及以上程度污染占比的减少. 偏南风下污染发生时, 能见度和混合层高度偏高、风速偏大、小时风速 $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时次偏多、相对湿度和露点温度偏低, 春季、夏季和秋季的 $PM_{2.5}$ 平均、峰值和 75% 百分位浓度显著低于偏东风控制下的污染, 而冬季 $PM_{2.5}$ 浓度则偏高. 这表明, 污染发生时, 偏南风下大气对污染物的承载和扩散能力略好于偏东风, 且偏东风下大气含水量的增加有利于污染的维持和加重. 而冬季, 原有排放加上城市供暖的影响, 偏南风输送的污染气团可能更有助于 $PM_{2.5}$ 浓度的升高. 此外, 春季、夏季和秋季的污染逐渐向“偏东风型”发展, 但冬季一直保持“偏南风型”污染.

关键词: 北京地区; $PM_{2.5}$ 污染; 偏东风; 偏南风; 特征差异

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-4844-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003195

Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing

YIN Xiao-mei^{1,2}, QIAO Lin^{2*}, ZHU Xiao-wan², GUO Heng², LIU Xiang-xue², XIONG Ya-jun²

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environment Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: In this study, the hourly meteorological factors and $PM_{2.5}$ concentrations during 2014-2019 in Beijing were analyzed, in order to explore the characteristics of the prevailing wind direction of pollution, and the corresponding long-term tendency. During the study period, 67% of pollution in Beijing occurred under the influence of southerly and easterly wind, and pollution was most likely to occur in winter, followed by spring and autumn. The average pollution probability of winter, spring, autumn and summer was 45.2%, 34.1%, 32.1%, and 26.1% and 47.0%, 45.8%, 39.7%, and 29.6% for southerly and easterly wind, respectively. In Beijing, the southerly wind appeared more frequently, but the pollution occurrence probability was higher under the control of easterly wind, with the maximum difference of 11.7% (2.8%-18.6%) in spring and the minimum difference of 1.8% (-7.6%-13.9%) in winter. During the past six years, the pollution probability decreased at a rate of 4.6%-8.0% and 5.5%-7.9% per year under the southerly and easterly wind influence, respectively. This was clearly reflected in reduced moderate and above levels of pollution. An analysis of both the pollution and meteorological factors under the two wind directions indicates that the visibility, mixing layer height, wind speed, and the frequency of hourly wind speed greater than $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ were higher, and the relative humidity and dew point temperature were lower, when pollution occurred under the southerly wind, while the $PM_{2.5}$ concentration of pollution was higher in winter and significantly lower in other seasons compared to that of the easterly wind. These findings show that when pollution occurred under the southerly wind, the carrying capacity and diffusion capacity of pollutants in the atmosphere was slightly better than that of the easterly wind, and the increased atmospheric water content under the easterly wind was more conducive to the maintenance and aggravation of pollution. Moreover, under the background of original emission levels, when adding urban heating in winter, the air mass transported by the southerly wind may be more conducive to increased $PM_{2.5}$ concentration. Furthermore, pollution in Beijing tended to be an “easterly wind type” in spring, summer and autumn, but remained a “southerly wind type” in winter.

Key words: Beijing; $PM_{2.5}$ pollution; easterly wind; southerly wind; characteristic differences

污染天气的形成与气象条件和大气中的气溶胶浓度有关^[1~3]. 基于太阳光度计资料分析发现, 北京地区雾和霾天气发生时, 气溶胶光学厚度较高且主要以细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 为主, 气溶胶体积尺度谱分布为双峰型结构^[4]. 针对北京地区空气污染的气象成因已有较多研究成果和结论: 近地面弱风或静风、稳定的大气边界层结构、逆温出现的频率、逆温层厚度及强度等都是污染天气形成和维持的有利条

件^[5~9]. 此外, 具有较强吸湿性的气溶胶粒子在相对潮湿的大气环境条件下, 会在一定程度上促进污染排放量大的地区的气溶胶的生成、增长和累

收稿日期: 2020-03-18; 修订日期: 2020-05-20

基金项目: 北京市气象局科技项目 (BMBKJ201901004); 北京市气象局科技项目 (BMBKJ201702008)

作者简介: 尹晓梅 (1988~), 女, 博士, 高工, 主要研究方向为大气污染机理分析及预报预警, 数值模拟及卫星数据应用, E-mail: yinxiaomei2010@163.com

* 通信作者, E-mail: qiaolin0016@sina.com

积^[10, 11]; 另一方面, 干气溶胶粒子吸湿增长并部分活化为凝集核参与雾滴的形成, 导致雾和霾的转换或雾和霾混合共存的情况^[12~15], 从而引起水平能见度的进一步降低和污染的继续发展。

特定的风向条件对污染的发生和发展也具有重要的作用。安徽省冬季城市区域有 5 条气团路径, 而来自东北和西北路径的缓慢移动气团经常导致 PM_{2.5} 污染^[16]。郑州市冬季超过 60% 的气团来自西北方, 对应的污染物浓度最低; 来自南边和东边的气团只占 13.6%, 对应较高的 PM_{2.5} 浓度^[17]。上海地区为西南风向控制时, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度较高, 而北风和西北风控制下出现高浓度颗粒物的频率最高^[18]。众多学者针对北京进行了长期观测和典型污染过程的综合研究, 目前南风对北京空气污染的热力和动力效应是人们普遍认识到的。尤其在秋冬季的重污染时段, 西南和东南路径为典型的污染传输通道, 当对流层低层维持西南风或东南风时, 气溶胶会以城市烟羽的形式被输送到下游数百公里范围内, 与北部山区的偏北风形成风场辐合, 有利于污染物在平原地区汇聚, 再配合边界层低层顺时针方向风切变, 导致 PM_{2.5} 爆发性增长, 污染过程明显加重。此外, 也有研究指出, 强的西南风作用下气溶胶散射系数分布均匀, 弱的偏北风则会造成散射系数从城区到郊区明显降低的空间分布差异^[19~23]。北京特有的地形也易受偏东风影响, 且偏东风的变化会对气溶胶理化特征产生影响, 改变大气边界层内的气溶胶浓度分布^[24, 25]。如在 PM_{2.5} 污染较重的 2013 年冬季, 北京重度污染以上面积占比最大的为南风 (87%), 其次即为东风 (81%), 且严重的污染常与东风和南风交替有关, 而东风、南风、西南风和南风的前期对 PM_{2.5} 浓度的影响均为正^[25~27]。因此, 偏东风也是需要加强研究的一类特殊风系。

目前已有的研究主要着眼于典型过程和污染高发季节 (如秋冬季), 而针对北京多年以来偏南风和偏东风控制下大气污染的分布特征、季节差异、时间变化趋势、及边界层内要素差异的系统分析探讨较少, 尤其忽略了偏东风下的污染探究。本研究将以 2014~2019 年污染发生频率、污染程度与风向的季节变化为切入点, 给出污染控制风向的长期演变趋势。这对全面认识北京污染发生机制和重污染天气预报技术的建立具有重要支撑意义, 也将为决策部门提供准确、及时和全面的信息, 以便积极应对和科学防控。

1 材料与方法

1.1 资料

本研究中 PM_{2.5} 站点监测数据来源于中国环境

监测总站全国城市空气质量实时发布平台 (逐小时)。选择的站点为东城区的天坛站 (116.43°E, 39.87°N), 处于北京市平原地区的中心区域, 能较好地展示污染过程中偏南风和偏东风的影响。因无法获取天坛站同时段内较完整、高质量和长时间序列的气象观测资料, 本研究选择国家级气象观测站点南郊观象台 (116.47°E, 39.81°N) 逐小时数据进行分析。观象台离天坛站较近 (位于天坛站东南方 10 公里左右点位处), 其气象数据质量高、代表性强和完整度好。

1.2 混合层高度计算

混合层厚度根据罗氏法计算, 该方法是由 Nozaki^[28] 于 1973 年提出的一种利用地面气象资料估算混合层高度的方法。考虑到大气混合层是热力和动力湍流共同作用的结果, 且边界层上部大气运动常与地面气象要素间存在着相互联系和反馈。因此, 可以利用地面气象参数来估算混合层高度 (H)。计算公式如下:

$$H = \frac{121}{6} (6 - P) \times (T - T_d) + \frac{0.169P(u_z + 0.257)}{12f \ln(z/z_0)}$$

式中, H 为混合层高度 (m), T 为地面气温 (°C), T_d 为地面露点温度 (°C), u_z 为 z 高度处的平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), z_0 为地面粗糙度 (m), f 为柯氏参数 (s^{-1}), $f = 2\Omega \sin\Phi$, Ω 为地转角速度, Φ 为地理纬度, P 为帕斯圭尔稳定度级别, 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~F 表示, P 值依次设置为 1~6)^[29, 30]。

2 结果与分析

2014 年春季至 2019 年冬季 (即 2014-03~2020-02) 天坛站逐时 PM_{2.5} 质量浓度和观象台逐时气象要素统计分析显示: 研究时段内发生污染 (PM_{2.5} 浓度 $\geq 75.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 时, 近地面风向以偏南风和偏东风为主, 两者总频次总占比达 67.8%; 其中, 偏南风居多, 频率占比超过 40%。因此, 本文着重对偏南风和偏东风下的污染特征、差异及影响机制分析研究。

2.1 2014~2019 年偏南风、偏东风下污染差异

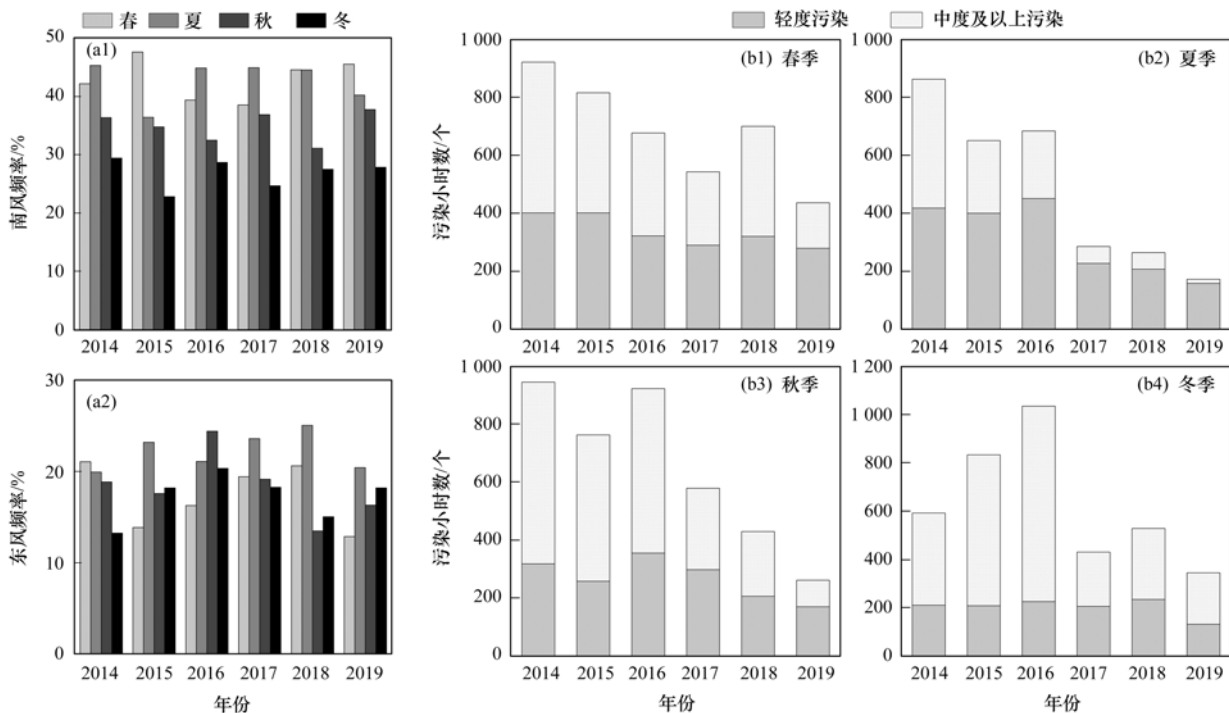
图 1(a) 是北京不同季节偏南风和偏东风的频率统计。过去 6 a, 偏南风的频率均高于同期的偏东风。偏南风在春季和夏季频率最高, 占比约为 36.0%~48.0%。虽然各季节的偏南风没有明显的年际变化趋势, 但 2016 年和 2017 年春季、2016 年和 2018 年秋季以及 2015 年和 2017 年冬季, 偏南风

频率明显降低. 2015 年和 2019 年的春季、2018 年的秋季以及 2014 年和 2018 年的冬季, 偏东风频率明显偏低. 研究时段天坛站各季节出现污染的小时数统计结果如图 1(b1~4). 春季、夏季和秋季, 污染时次明显减少, 更大程度体现在中度及以上程度污染的减少, 且中度及以上污染时次逐渐由“秋冬季”向“春秋型”转换. 空气质量整体转好的趋势下, 2018 年春季污染出现一定反弹, 尤其是中度及以上程度的污染频次超过 2016 年和 2017 年同期, 导致 2018 年春季污染较重, 且偏东风和偏南风的频次占比为过去 6 a 同期第二高值. 秋季, 在污染缓解的大背景下, 2016 年和 2017 年轻度污染较多, 且 2016 年中度及以上程度污染也较 2015 年同期增加约 12.5%, 而 2016 年和 2017 年秋季的偏东风为过去 6 a 中最高. 值得注意的是, 冬季与其他季节不同: 2014~2018 年轻度污染频率持平, 2019 年较过去 5 a 同期减少约 39.5%. 中度及以上程度的污染先增加后减少, 即 2016 年冬季污染时次最多、程度最重, 之后出现“断崖式”转好. 根据中国气象局发布的《大气环境气象公报》(2017~2019), 京津冀 2017 年冬季扩散条件偏有利, 2018 年冬季扩散条件偏差, 2019 年 12 月扩散条件偏好, 2020 年 1~2 月人为排放大量减少, 但二次转化增加, 而二次转化通常与较高的相对湿度有关^[31~35]. 针对京津冀“2+26”城市的研究, 气象条件同期变差时, 根据预报结

果启动应急预案的联防联控措施可以有效减少区域性重污染过程的发生^[36]. 在大气对污染物的清除扩散能力相对较好的背景下, 纵使不利于污染物清除的气象条件依然多发, 污染的极端性将明显下降^[37]. 虽然气象条件的逐年差异可以导致冬季 $PM_{2.5}$ 浓度强烈变化, 但 2013-11~2018-01 的 $PM_{2.5}$ 浓度下降量中, 76% 是因减排防控引起的^[38]. 可见, 减排措施成效突显, 但当不利的气象条件出现时, 应急减排可能不足以抵消不利气象条件带来的污染反弹^[39], 因此要不断推进长效措施减排.

表 1 给出了过去 6 a 近地面偏东风、偏南风控制下污染分布的年际变化. 当污染发生时, 偏南风主导时次最多, 春季和夏季占比达 47.0% 以上, 秋季和冬季超过 35.0%; 而偏东风占比仅为 23.4%~30.8%. 不同季节多年对比显示: 春季、夏季和秋季, 污染发生在偏南风的频率占比有降低趋势(2019 年春季除外), 而偏东风下为增加态势. 可见, 近 6 a 春季、夏季和秋季的污染逐渐向“偏东风型”靠拢, 而冬季一直以“偏南风型”污染为主, 且偏南风下的污染频率在整体维持的情况下略有增加, 污染在偏东风下的概率逐渐降低.

综上, 2016 年秋冬季北京污染形势严峻, 对应的偏东风频率最高, 但偏南风与其他年份持平; 2014 年空气质量整体较差, 但冬季污染情况与 2017~2019 相当, 偏东风也为多年同期最少, 南风处于



(a) 偏南风和偏东风频率; (b) 污染情况

图 1 北京 2014~2019 年不同季节的偏南风和偏东风频率和污染情况

Fig. 1 Southerly and easterly wind frequencies and pollution in different seasons during 2014-2019 in Beijing

表 1 春季、夏季、秋季和冬季污染概率随风向的年际变化/%

Table 1 Seasonal variations of pollution probabilities for easterly and southerly wind during 2014-2019/%

年份	春季		夏季		秋季		冬季	
	偏南风	偏东风	偏南风	偏东风	偏南风	偏东风	偏南风	偏东风
2014	45.4	29.4	54.5	25.7	32.2	25.6	41.2	19.1
2015	56.1	20.0	49.3	32.4	42.1	21.0	30.7	31.1
2016	41.8	25.7	53.2	26.0	39.4	26.8	36.1	27.8
2017	49.5	27.1	50.2	28.8	41.6	25.6	34.2	27.0
2018	39.1	30.1	41.7	40.2	34.3	21.9	42.0	18.4
2019	50.2	19.3	36.6	32.0	20.3	25.7	38.1	16.9
多年平均	47.0	25.3	47.6	30.8	35.0	24.4	37.1	23.4

平均水平. 是否北京地区偏东风下大气扩散条件更差, 从而导致污染加重? 在北京大气污染综合防治工作取得明显成效的情况下, 气象对空气质量的影响有多大? 为进一步探究北京的污染特点及其趋势变化, 下面将针对偏南风 and 偏东风下污染物及气象要素的特征分析总结.

2.2 偏南风 and 偏东风控制下污染的差异

针对北京 2014 ~ 2019 年近地面偏南风 and 偏东风控制下污染的出现概率分季节讨论, 结果见图 2. 多年均值显示, 偏南风下污染最易在冬季出现 (45.2%), 其次为春季 and 秋季 (34.1% and 32.1%), 夏季污染概率最低 (26.1%); 偏东风与其类似, 冬、春、秋 and 夏季的多年平均污染概率分别为 47.0%、45.8%、39.7% and 29.6%. 可见, 虽然偏东风的频率

低于偏南风, 但偏东风下更易发生污染; 尤其春季, 偏东风下污染概率比偏南风高 11.7%. 多年变化趋势显示, 无论偏南风 or 偏东风控制, 各季节的污染出现概率均呈降低态势; 春、夏、秋 and 冬季两者发生污染的概率分别以每年 4.6%、8.0%、6.3% and 6.9% 以及 5.7%、7.6%、7.9% and 5.5% 的速率降低. 4 个季节中, 2016 ~ 2017 年偏南风 and 偏东风控制下污染发生概率大幅减少. 以冬季为例, 偏南风 and 偏东风下的污染概率年际差异分别为 33.1% and 36.5%. 但 2018 年春季, 偏东风控制下的污染概率反弹至 2016 年水平, 2018 年冬季偏南风下污染概率也明显高于 2017 年 and 2019 年.

图 3 是 2014 ~ 2019 年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时次的 PM_{2.5} 小时浓度对比. 春季、夏季 and

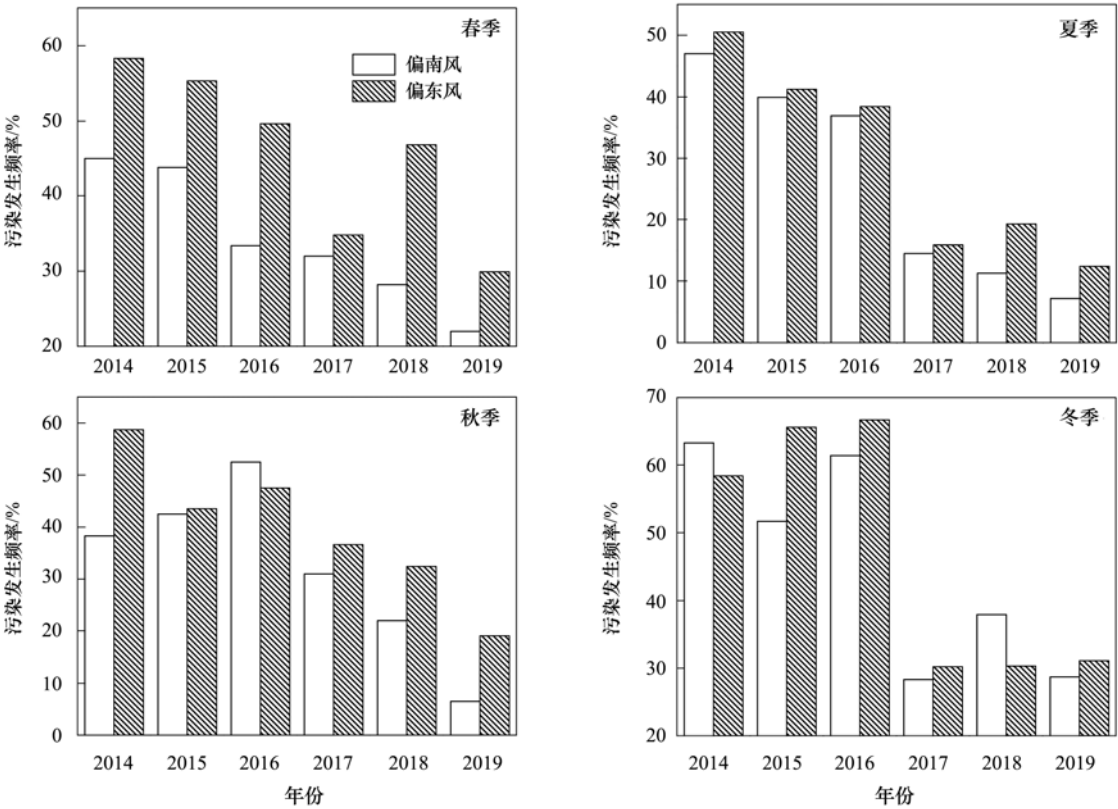


图 2 北京 2014 ~ 2019 年不同季节偏南风 and 偏东风下的污染发生频率

Fig. 2 Pollution occurrence frequencies in different seasons for southerly and easterly wind during 2014-2019 in Beijing

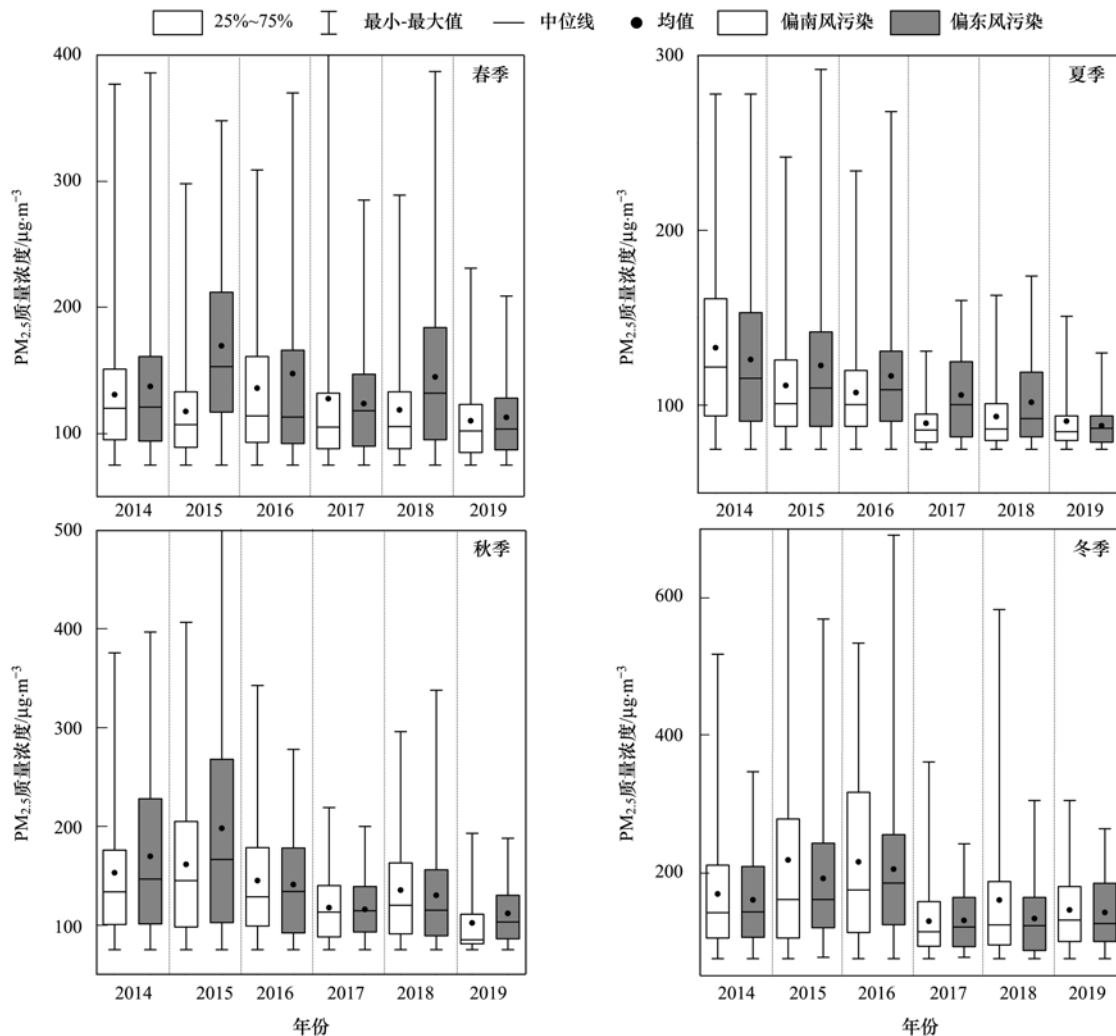


图3 北京 2014~2019 年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时次对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

Fig. 3 $\text{PM}_{2.5}$ concentration of pollution times for southerly and easterly wind in different seasons during 2014-2019 in Beijing

秋季偏南风控制下的污染, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值整体上低于偏东风的情况, 且峰值和 75% 百分位浓度值也明显偏低, 即偏东风下污染程度更重. 冬季, 偏南风污染的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高, 个别年份与偏东风持平. 年际变化显示, 春季、夏季和秋季, 偏南风和偏东风下污染对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈逐渐降低趋势, 峰值浓度削减更明显, 这应该与政府制定严格的减排措施和区域联防联控举措有很大关系. 但 2018 年春季和秋季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所反弹、峰值浓度明显增加, 但仍低于 2015 年水平. 而冬季, 偏南风和偏东风控制下污染对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 2015 年和 2016 年最高, 2017 年下降后小幅波动, 且冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 峰值浓度的降幅在 4 个季节中最大. 其中, 偏南风污染下 2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 小时峰值浓度为 $821 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2017 年降低至 $361 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 偏东风污染下, 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 小时峰值浓度是 $691 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2017~2019 年维持在 $242 \sim 305 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 峰值浓度降低了 55.9%~65.0%.

2.3 引起污染差异的气象机制分析

图 4 是 2014~2019 年偏南风和偏东风污染对应的能见度季节分布. 偏南风控制时, 污染时次的平均能见度明显高于偏东风, 且两者的差异在春季、夏季和秋季大, 冬季小. 季节表现上, 秋冬季污染的能见度显著低于春夏季; 春夏季偏南风和偏东风污染的最低能见度为 0.7~1 km, 能见度 75% 百分位值可达 6~7 km, 而秋冬季的最高能见度不足 0.1 km, 且 75% 百分位的值低于 5 km. 春季, 偏南风下污染的能见度年际波动小, 降低速率仅为 $0.07 \text{ km}\cdot\text{a}^{-1}$; 偏东风下的年际波动大, 以 $0.13 \text{ km}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度降低. 夏季能见度的变化与春季相似, 偏南风下污染时次的能见度年际波动较小, 偏东风控制下的能见度表现为先降低后增加的趋势, 即 2017 年夏季最小 (2.9 km). 秋季, 偏南风和偏东风下污染时次的能见度明显增加, 增长幅度分别为 $0.23 \text{ km}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.17 \text{ km}\cdot\text{a}^{-1}$; 可见, 偏南风控制下能见度的增速更快; 至 2019 年, 偏南风和偏东风下污染的能见度达

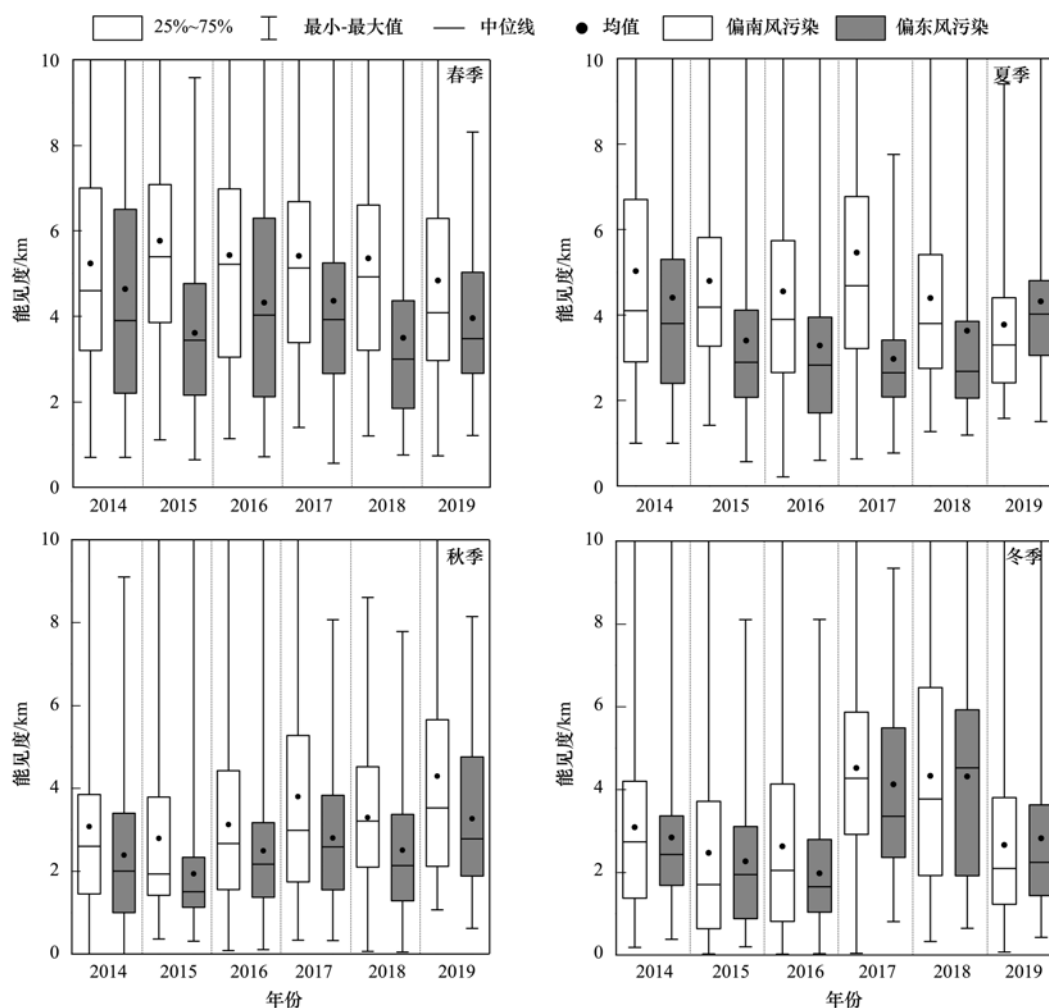


图4 北京 2014~2019 年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时次对应的能见度

Fig. 4. Visibility of pollution times for southerly and easterly wind in different seasons during 2014-2019 in Beijing

到多年最大值,分别为 4.22 km 和 3.25 km. 冬季能见度的变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 正好相反,呈先增长后降低的趋势,能见度最大值在 2017~2018 年,最小值出现在 2015 年,但 2019 年有一定程度回落.

图 5 为 2014~2019 年不同季节偏南风 and 偏东风控制下污染时次的混合层高度. 所有季节中,春季的混合层最高,过去 6 a 偏南风 and 偏东风污染对应的年均混合层高度分别为 1 033~1 200 m 和 763~927 m; 其他 3 个季节相对较低,以秋季为例,偏南风和偏东风的混合层高分别为 655~888 m 和 607~713 m. 当污染发生在以偏南风控制的情况下,混合层高度大于偏东风的情况,春、夏、秋和冬季偏南风控制下的 75% 百分位混合层高度较偏东风分别偏大 26.9%、19.8%、23.2% 和 15.8%. 过去 6 a,春季、夏季和秋季偏南风下污染的混合层高度先增加后降低,冬季呈增加趋势,但 2019 年有明显回落. 而偏东风影响下的污染,对应的混合层高度仅在秋季逐年增加,春季和夏季表现为一定程度的降低,冬季则表现为先降低后增加.

图 6 为 2014~2019 年风速统计结果. 春季、秋季和冬季,偏南风下污染时次的平均风速较偏东风的情况偏大,两者的差异夏季最小. 春季,偏南风和偏东风下污染时次的年均风速分别为 $2.1 \sim 2.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.8 \sim 2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,前者的 75% 百分位风速较后者偏大约 21.3%. 秋季和冬季,偏南风下污染时次的年均风速分别为 $1.5 \sim 1.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.4 \sim 1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应的偏东风为 $1.2 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.3 \sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,前者的 75% 百分位风速较后者偏大 13.7% 和 7.2%. 已有研究表明,北京地区风速达 2 级时,扩散能力开始增加,3 级和 4 级的风速对污染物的清除扩散能力明显^[26]. 因此,本研究统计了小时风速 $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时次:偏南风下的污染,小时风速 $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频次明显多于偏东风,尤其春季,前者比后者偏多 14.5%,且偏东风下污染时次中, $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的占比逐年减小,2018 年和 2019 年不足 10%,而偏南风下仅 2017 年降至 18.6%,其他年份都较高. 夏季,两个风向下污染的小时风速 $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占比逐渐降低,且风向间差异很小. 秋季和

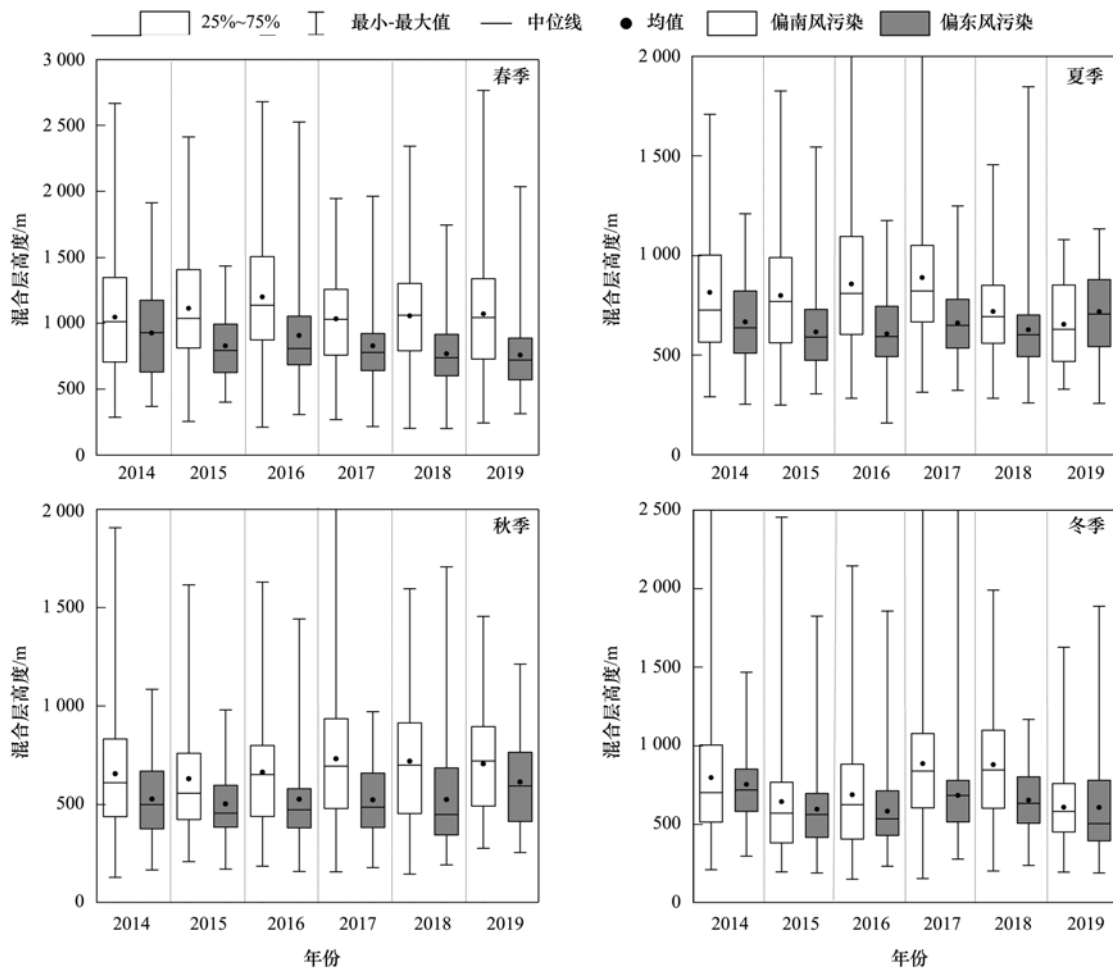


图5 北京 2014~2019 年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时次对应的混合层高度

Fig. 5 Mixed layer height of pollution times for southerly and easterly wind in different seasons during 2014-2019 in Beijing

冬季污染发生时,小时风速 $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频次显著少于春季和夏季,偏南风 and 偏东风各自统计值不超过 7% 和 5%,对水平扩散能力没有太大影响,且过去 6 a 有逐渐减少的趋势,尤其在 2019 年秋冬季.

北京地区,偏东风控制下污染的相对湿度要明显大于偏南风的情况(图 7),这是因为偏东风可以带来更多海洋上的水汽.春季、夏季、秋季和冬季,偏南风污染的年均湿度分别为 39.9%~47.5%、61.2%~72.0%、60.9%~71.2% 和 45.2%~69.4%,偏东风下分别为 52.9%~60.3%、70.45%~76.1%、70.8%~78.4% 和 54.1%~70.5%,且前者 75% 百分位湿度较后者的偏低幅度分别为 24.5%、9.4%、8.9% 和 4.7%. 两组合风向发生污染时,春季的湿度差异较大,冬季差异最小.春季,偏南风和偏东风污染下相对湿度年际变化表现为先降低后增加,的 2016 年相对湿度最小、2019 年最大.秋季,偏南风和偏东风污染下的湿度分别以 $1.3\% \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.1\% \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率降低,且峰值也在下降.此外,2018 年和 2019 年的秋季,两个风向控制下污染的相对湿度都是过去 6 a 以来最低值.冬季的相对湿

度年际变幅最大,2017 年和 2018 年污染时次的湿度明显低于其他年份.偏南风和偏东风控制下,上述两个年份的相对湿度平均值为 45.6% 和 58.0%,分别较其他年份的平均值偏小约 16.4% 和 7.6%;而冬季污染发生时湿度最高的为 2015 年和 2019 年.

2014~2015 年,偏南风下污染的露点温度高于偏东风(图 8),但 2016 年后趋势转变,尤其是 2018 年和 2019 年的春季、秋季和冬季,反超更明显.春季,偏南风和偏东风控制下污染的露点温度都表现为先减小后增加的态势,而两者的差异在 2015 年和 2019 年最大,偏东风较偏南风的平均露点温度分别偏低 2.2°C 和偏高约 2.1°C .夏季,偏南风和偏东风污染的露点温度逐渐增加,但 2019 年回落到过去 6 a 以来的最低值.秋季,2014 年和 2017 年露点温度最高、2018 年露点温度最低.冬季,偏南风和偏东风在 2015~2018 年出现降低趋势,尤其 2017 年和 2018 年,偏南风和偏东风污染的露点温度与 2015~2016 年的均值相比,分别降低了 46.0% 和 36.5%,但 2019 年露点大幅回升,达到过去 6 a 的最大值.

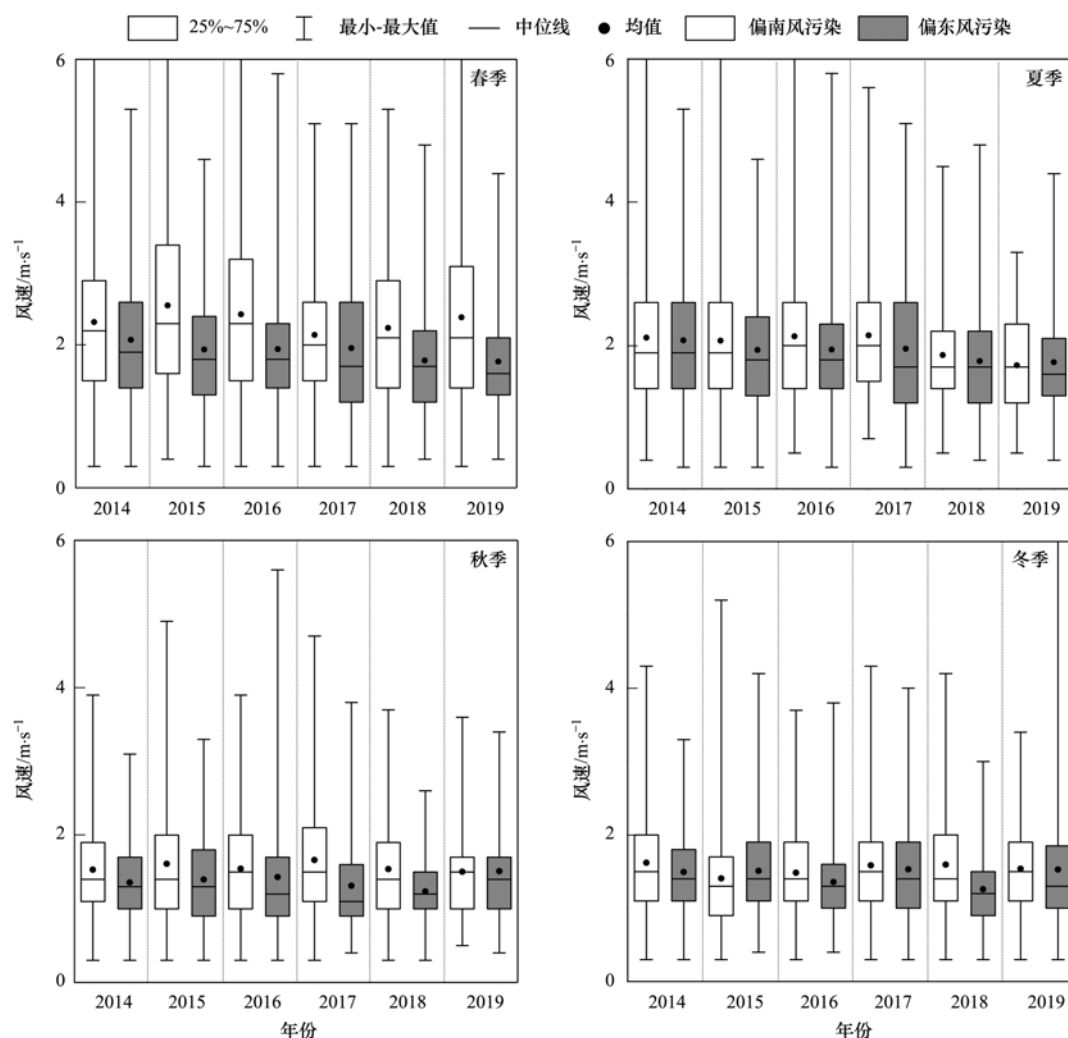


图6 北京2014~2019年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时次对应的风速

Fig. 6 Wind speed of pollution times for southerly and easterly wind in different seasons during 2014-2019 in Beijing

3 讨论

北京地区空气质量整体转好的背景下, 2018年春季, 偏东风和偏南风控制下污染概率和 $PM_{2.5}$ 浓度出现反弹. 经统计, 2018年春季的偏东风时次显著增加, 较2016年和2019年偏多28.5%和60.5%, 且该时段的污染时次较2017年和2019年分别增加了28.9%和60.6%, 与2016年持平. 与其他年份相比, 2018年春季有更多的污染出现在偏东风控制下. 气象要素显示, 2018年春季的混合层高度最低、风速最小、相对湿度和露点温度偏高, 这也反映了大气本身对污染物的承载和扩散能力较弱, 与前述的研究结果一致. 但需指出的是, 2019年春季偏东风下的污染气象要素与2018年类似, 但其污染时次、偏东风频率及污染出现在偏东风的时次均大幅减少, 故 $PM_{2.5}$ 浓度偏低、能见度偏好. 此外, 对比2018年和2019年同期偏南风污染及其气象要素特征发现, 春季, 北京的污染和能见度很大程度受偏东风时长和

污染出现在偏东风下的频率的影响, 这应该与大气湿度、污染物的吸湿增长和二次转化有关, 因而对 $PM_{2.5}$ 平均和峰值浓度产生较大影响.

2018年冬季的偏南风时次仅低于2016年同期, 污染在偏南风控制下的占比为过去6a最大, 而偏东风下的污染比例减少. 偏南风下污染时次的相对湿度和露点低、风速大和小时风速 $\geq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的频次多、混合层高度高、平均能见度和最低能见度也较好. 2019年同期, 偏南风、偏东风和总污染时次均减少, 但露点和相对湿度达到过去6a最大, 且风速低、露点温度差小、大气饱和程度高、混合层高度低, 因此扩散条件相对不利; 但因减排和疫情防控等影响, $PM_{2.5}$ 平均、峰值及75%百分位的浓度均低于2018年同期, 但能见度却显著降低. 此外, 2014年和2017年的冬季气象因素表现相似, 甚至前者的偏南风和偏东风的时次都偏少, 但因两年的排放基础水平和减排力度不同, 虽然2014年比2015年和2016年同期的 $PM_{2.5}$ 浓度低, 但与2017年相比仍偏

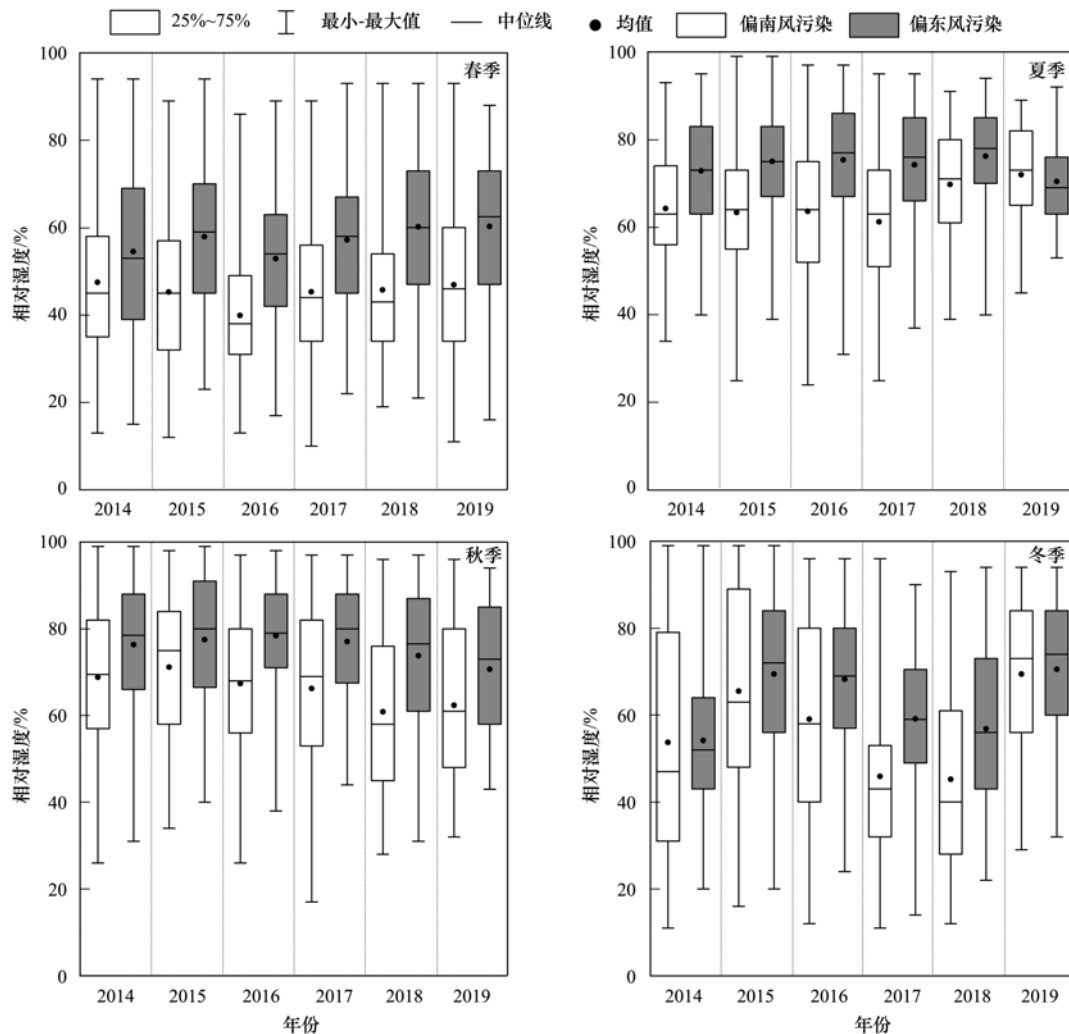


图7 北京2014~2019年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时段对应的相对湿度

Fig. 7 Relative humidity of pollution times for southerly and easterly wind in different seasons during 2014-2019 in Beijing

高较多.可见,冬季污染较大程度受 $PM_{2.5}$ 浓度影响,本地排放加上偏南风对污染物的区域输送贡献较大,而能见度在 $PM_{2.5}$ 的基础上大气的水汽含量更敏感.

4 结论

(1)北京地区近地面偏南风 and 偏东风控制下的污染时段总占比为67.8%.2014~2019年偏南风和偏东风频次整体上分别表现为波动增长和下降,季节的年际变化不显著.近4a,偏南风频次在春季和秋季有增加态势,偏东风在秋季和冬季明显减少.

(2)2014~2019年中度及以上程度污染频次大幅降低,冬季表现最明显,且有“秋冬季”向“春秋”的转换态势.春季、夏季和秋季,污染逐渐向“偏东风型”靠拢,冬季保持“偏南风型”且略有发展.

(3)北京受偏南风和偏东风控制时,污染最易在冬季出现,其次为春季和秋季.排放相当时,偏东风通过增加大气含水量和降低混合层高度,导致污

染加重, $PM_{2.5}$ 浓度均值和峰值升高,能见度降低;偏南风则影响污染物的区域输送和本地累积,从而扰动 $PM_{2.5}$ 峰值浓度.气象条件相当时,排放和减排力度的差异成为关键影响要素,但较少的偏南风和偏东风频次会明显缓解 $PM_{2.5}$ 峰值浓度的增加和最低能见度的下降.

参考文献:

- [1] Marazzan G M, Vaccaro S, Valli G, *et al.* Characterisation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter in the ambient air of Milan (Italy)[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(27): 4639-4650.
- [2] Li L, Wang W, Feng J L, *et al.* Composition, source, mass closure of $PM_{2.5}$ aerosols for four forests in eastern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(3): 405-412.
- [3] 张小曳, 廖宏, 王芬娟. 对 IPCC 第五次评估报告气溶胶-云对气候变化影响与响应结论的解读[J]. *气候变化研究进展*, 2014, **10**(1): 37-39.
- [4] Zhang X Y, Liao H, Wang F J. The effects of aerosols and clouds on climate change and their responses[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, **10**(1): 37-39.
- [4] 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1057-1062.

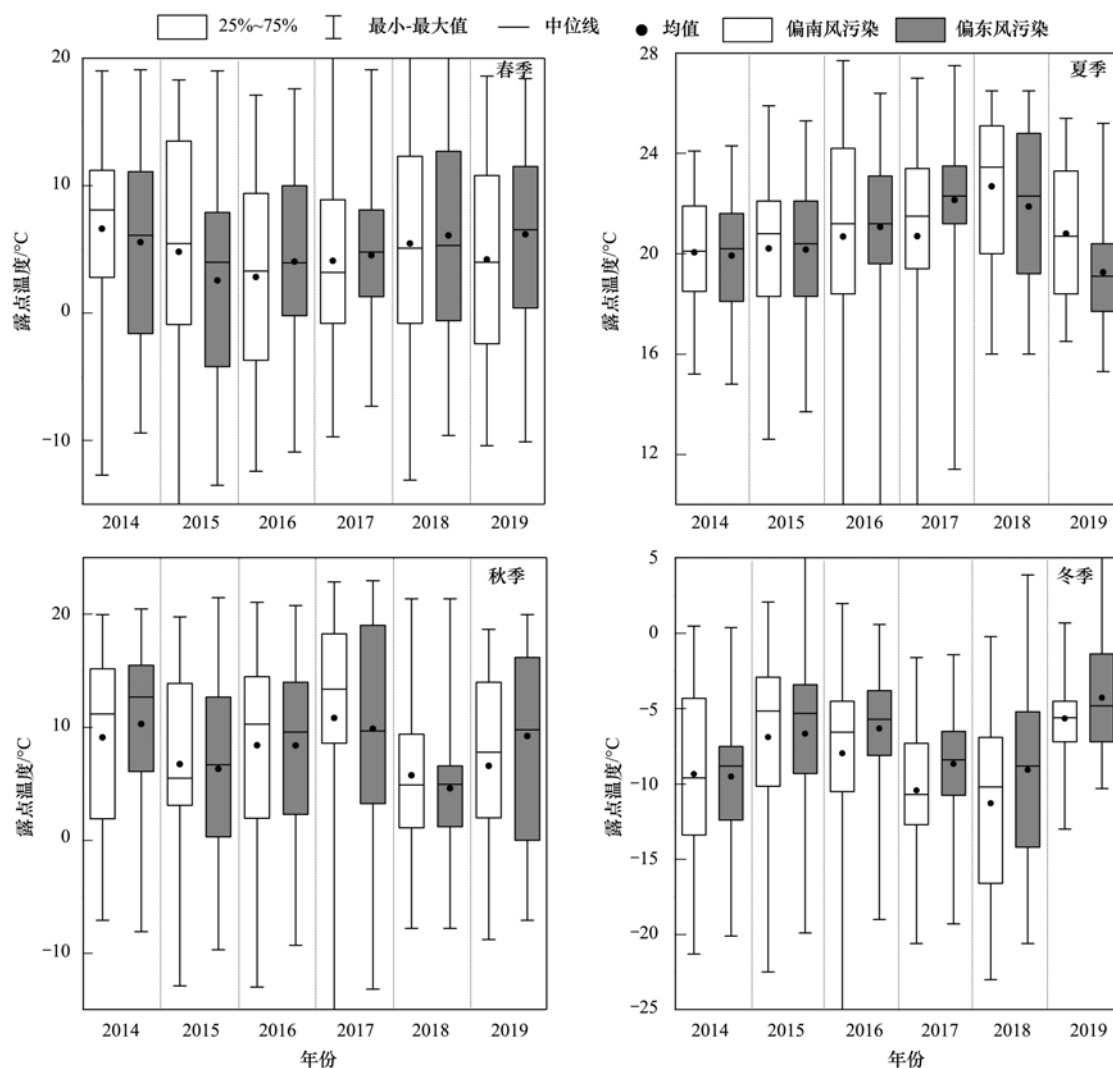


图8 北京2014~2019年不同季节偏南风 and 偏东风下污染时段对应的露点温度

Fig. 8 Dew-point temperature of pollution times for southerly and easterly wind in different seasons during 2014-2019 in Beijing

Yu X N, Li X M, Deng Z R G, *et al.* Optical properties of aerosol during haze-fog episodes in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1057-1062.

[5] Davis R E, Kalkstein L S. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations[J]. *Physical Geography*, 1990, **11**(4): 320-342.

[6] 戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2006~2009年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2925-2932.

Dai Y L, Tao J, Lin Z J, *et al.* Characteristics of haze and its impact factors in four megacities in China during 2006-2009[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2925-2932.

[7] 李瑞, 李清, 徐健, 等. 秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1520-1534.

Li R, Li Q, Xu J, *et al.* Regional air pollution process in winter over the Yangtze River Delta and its influence on typical northern cities[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1520-1534.

[8] Shi Y, Hu F, Lü R, *et al.* Characteristics of urban boundary layer in heavy haze process based on Beijing 325m tower data[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2019, **12**(1): 41-49.

[9] Sun Y, Song T, Tang G Q, *et al.* The vertical distribution of PM_{2.5} and boundary-layer structure during summer haze in

Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 413-421.

[10] 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 等. 北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1067-1077.

Zeng W, Hao Q J, Zhao Z J, *et al.* Characteristics of aerosol optical depth in the urban area of Beibei and its correlation with particle concentration[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1067-1077.

[11] Molnár A, Imre K, Ferenczi Z, *et al.* Aerosol hygroscopicity: hygroscopic growth proxy based on visibility for low-cost PM monitoring[J]. *Atmospheric Research*, 2020, **236**: 104815.

[12] Chen J, Li Z Q, Lv M, *et al.* Aerosol hygroscopic growth, contributing factors, and impact on haze events in a severely polluted region in northern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(2): 1327-1342.

[13] 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.

[14] Zhang Q, Meng J, Quan J, *et al.* Impact of aerosol composition on cloud condensation nuclei activity[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(8): 3783-3790.

- [15] Peng Y, Wang H, Hou M L, *et al.* Improved method of visibility parameterization focusing on high humidity and aerosol concentrations during fog-haze events: application in the GRAPES_CAUCHE model in Jing-Jin-Ji, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**: 117139.
- [16] Shi C E, Yuan R M, Wu B, *et al.* Meteorological conditions conducive to PM_{2.5} pollution in winter 2016/2017 in the Western Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 1221-1232.
- [17] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 86-93.
Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [18] 吴健, 齐晓宝, 苏敬华, 等. 2015 年上海崇明岛 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度变化特征及气象因素影响分析[J]. *气象与环境科学*, 2019, **42**(3): 1-8.
WU J, QI X B, SU J H, *et al.* Analysis on variation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration and influence of meteorological factors in Shanghai Chongming island in 2015[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, **42**(3): 1-8.
- [19] Zhao X J, Zhang X L, Pu W W, *et al.* Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 799-808.
- [20] 邱昀, 李令军, 姜磊, 等. 京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1111-1119.
Qiu Y, Li L J, Jiang L, *et al.* Analysis of a pollution process in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on satellite and surface observations[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1111-1119.
- [21] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 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.
- [22] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 173-184.
Wang Y, Wang L L, Zhao G N, *et al.* Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM_{2.5} heavy pollutions in Beijing during winter [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(2): 173-184.
- [23] Hanna S R, Ramsdell J V, Cramer H E, *et al.* Urban Gaussian diffusion parameters [A]. In: *Modeling the Urban Boundary Layer* [C]. Boston: American Meteorological Society, 1987. 337-379.
- [24] 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 等. 北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3679-3685.
Sun Z B, Liao X N, Wang Z S, *et al.* Scavenging effect of rime and east wind on PM_{2.5} under air heavy pollution in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3679-3685.
- [25] Sun Z B, Zhang X L, Zhao X J, *et al.* Oscillation of surface PM_{2.5} concentration resulting from an alternation of easterly and southerly winds in Beijing: mechanisms and implications [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32**(2): 288-301.
- [26] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 风向对北京市重污染日 PM_{2.5} 浓度分布影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(3): 143-149, 161.
Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Effects of wind direction on spatial distribution of PM_{2.5} during heavy pollution days in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(3): 143-149, 161.
- [27] 梅波, 田茂再. 基于时空模型北京市 PM_{2.5} 浓度影响因素研究[J]. *数理统计与管理*, 2018, **37**(4): 571-586.
Mei B, Tian M Z. Analysis of Influential Factors on PM_{2.5} in Beijing Based on Spatio-Temporal Model [J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2018, **37**(4): 571-586.
- [28] Nozaki K Y. Mixing depth model using hourly surface observations [R]. USAF Environmental Technical Applications Center, Report 7053. 1973.
- [29] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014 年 2 月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4340-4351.
Zhang H D, Lü M Y, Zhang B H, *et al.* 2016. Analysis of the stagnant meteorological situation and the transmission condition of continuous heavy pollution course from February 20 to 26, 2014 in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **36**(12): 4340-4351.
- [30] 廖晓农, 孙兆斌, 何娜, 等. 边界层低空急流导致北京 PM_{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 51-59.
Liao X N, Sun Z B, He N, *et al.* A case study on the rapid cleaned away of PM_{2.5} pollution in Beijing related with BL Jet and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 51-59.
- [31] 中国气象局. 2017 年大气环境气象公报 [R]. 2017.
- [32] 中国气象局. 2018 年大气环境气象公报 [R]. 2018.
- [33] 中国气象局. 2019 年大气环境气象公报 [R]. 2019.
- [34] NASA Goddard Space Flight Center. Airborne nitrogen dioxide plummets over China [EB/OL]. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china>, 2020-03-02.
- [35] Guan L, Liang Y L, Tian Y Z, *et al.* Quantitatively analyzing effects of meteorology and PM_{2.5} sources on low visual distance [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 764-772.
- [36] 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 等. 2019 年 10~12 月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
Zhu Y Y, Gao Y X, Wang W, *et al.* Assessment of emergency emission reduction Effect during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, and surrounding: “2 + 26” cities from October to December 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- [37] 梅梅, 朱蓉, 孙朝阳. 京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J]. *气候变化研究进展*, 2019, **15**(3): 270-281.
Mei M, Zhu R, Sun C Y. Study on meteorological conditions for heavy air pollution and its climatic characteristics in “2 + 26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *Climate Change Research*, 2019, **15**(3): 270-281.
- [38] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al.* Significant reduction of PM_{2.5} in eastern China due to regional-scale emission control: evidence from SORPES in 2011-2018 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(18): 11791-11801.
- [39] 陶士康, 张清爽, 安静宇, 等. 基于地基观测及源清单的 2017-2019 年德州市秋冬季大气污染防治效果评估[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1739-1746.
Tao S K, Zhang Q S, An J Y, *et al.* Assessment of air pollution control effect from ground-based observation and emission inventory for the prevention and control of air pollution in autumn and winter of Dezhou city from 2017 to 2019 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1739-1746.

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta	 ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ...	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section	 XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China	 GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism	 PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source	 RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules	 ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bathriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area	 JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)