

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

2014~2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估

尹晓梅^{1,2}, 李梓铭², 熊亚军^{2*}, 乔林², 邱雨露^{2,3}, 孙兆彬¹, 寇星霞¹

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 3. 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 2014~2017年北京地区霾日数和污染日数逐年减少, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 年平均质量浓度下降, 污染程度缓解, 采暖期中的11~12月尤为明显. 针对空气质量的显著改善, 从气象条件的改善和减排措施两方面进行探讨分析, 并结合数值模式和大数据挖掘技术实现气象和排放对大气污染贡献率的量化研究. 结果表明, 2017年与过去3 a相比, 平均风速增加7.9%, $\geq 3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速频次最高(10.6%), $\geq 70\%$ 湿度日占比最小(25.1%); 其中, 采暖期与过去3 a同期相比, 小风日数减少8.6%、大气环境容量指数和通风指数平均增加约11%, 边界层高度以 $3.2\% \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率升高, 尤其11~12月各要素改善更显著, 且该时段内2014年各因子变化与2017年相似. 非采暖期(4~10月)累积降水量558.3 mm, 仅次于2016年, 有利于污染物的清除和湿沉降. 利用WRF-CHEM对霾和污染频发的12月进行模拟发现, 气象要素的改变导致2017年12月北京 $PM_{2.5}$ 质量浓度较2014~2016年同期分别降低5%、38%和25%. 因缺少政府实际实施的减排方案, 无法利用WRF-CHEM量化气象和减排的具体贡献率, 因此借助大数据挖掘算法, 基于K近邻算法(KNN)和支持向量机(SVM)模型对气象和减排对空气质量改善的贡献进行评估, 结果显示2017年减少的霾日和重污染日, 65.0% 归因于减排的贡献, 35.0% 归因为气象条件的改善. 可见, 气象与生态环境部门应继续加强数据开放共享, 科学开展气象条件预报与减排评估.

关键词: 空气污染; 气象条件; 排放; K近邻算法(KNN); 支持向量机(SVM); 贡献率

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1011-13 DOI: 10.13227/j.hjks.201807067

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017

YIN Xiao-mei^{1,2}, LI Zi-ming², XIONG Ya-jun^{2*}, QIAO Lin², QIU Yu-lu^{2,3}, SUN Zhao-bin¹, KOU Xing-xia¹

(1. Institute of Urban Meteorology, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: During 2014-2017, the number of haze days and air pollution days declined year by year obviously in Beijing. The average mass concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , and NO_2 also decreased with the alleviated pollution level. These decreases were more obvious during the heating period, especially in November and December. In order to analyze the reasons for the improvement of air quality, changes of the meteorological factors and emission-reduction have been discussed and quantified in this study. This work was based on the numerical simulation model WRF-CHEM and the large data mining technologies of k-nearest neighbor (KNN) and support vector machines (SVM). Meteorological observations indicated that the mean wind speed of 2017 increased by 7.9% compared with the last three years. The frequency of hourly wind speed higher than $3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ was the highest (10.6%), and frequency of daily relative humidity higher than 70% was lowest (25.1%), in 2017. Meanwhile, the number of low wind days (daily wind speed lower than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), environmental capacity, ventilation index, and height of the boundary layer showed that the diffusion conditions were better in the heating period of 2017 than those of 2014~2016, especially in November and December. The accumulated precipitation during the non-heating period was 558.3 mm in 2017, which is conducive to pollutant removal and wet deposition. Inter-annual changes of meteorological conditions are important to the air quality. A simulation for December 1~19 by WRF-CHEM during 2014-2017 was performed, and the results demonstrated that changes of meteorological conditions led to a reduction of the $PM_{2.5}$ concentration of 2017 by 5%, 38%, and 25% compared with that of 2014-2016, respectively. However, it was not possible to quantify the specific contributions of meteorology conditions because of the lack of real emission reduction options. The KNN and SVM models are applied in this study based on the observed meteorology factors, haze days, and pollution days, and it was found that for the reduced haze days and heavy pollution days in 2017, 65.0% could be attributed to emission reduction and 35.0% was caused by improvement of the meteorological conditions.

Key words: air pollution; meteorological conditions; emission; K-nearest neighbor (KNN); support vector machines (SVM); contribution

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-09-04

基金项目: 北京市气象局科技项目(BMBKJ201702008); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-003); 中国气象局大气化学重点开放实验室开放课题项目(2017b04); 国家重点研发计划项目(2016YFC0202100)

作者简介: 尹晓梅(1988~), 女, 博士, 工程师, 主要方向为大气物理学与大气环境, E-mail: yinxiaomei@lasg.iap.ac.cn

* 通信作者, E-mail: xyajun78@163.com

近 30 年来,社会经济和工业迅速发展、城市化进程加快、人口增加等共同导致了大气污染物排放量的增长,同时极端雾-霾天气和空气重污染过程频发,对空气质量、能见度、人体健康、天气和气候变化等产生较大影响^[1~4]. 吴兑等^[5]对北京 60 余年的霾日变化特征进行统计分析表明,2000 年至北京奥运会前后,霾日略有下降,2012 年后又存在一定程度的反弹,年平均霾日为 150 d. 2013 年 1 月中国中东部经历大范围雾-霾天气过程,京津冀地区 PM_{2.5} 小时峰值浓度达到 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[6],引起了公众和政府的广泛关注. 京津冀地区污染成因复杂,但总结而言,污染物源排放是造成空气污染的主要诱因,气象条件是污染发生的触发因子,地形和光化学反应等对污染物的输送和累积也具有重要影响^[5,7~10]. 有研究指出^[11],自然沙尘源、燃煤源、生物质燃烧源、垃圾焚烧源、工业源和二次无机气溶胶源对北京城区 PM_{2.5} 贡献比分别为 15%、18%、12%、25% 和 26%. 国内学者对重大污染过程的气象原因也进行了深入地探讨,高空 500 hPa 纬向特征明显、地面为弱气压场或低压辐合区的高低空配置是大气污染发生的主要系统型,但不同季节污染发生机制不尽相同^[12~14]. 大气边界层内,较低的风速、近地层充足的水汽、风场辐合线及局地环流等是影响污染物区域输送、局地累积、气溶胶液相反应和气粒转化等的重要因素^[15~19];逆温层的存在抑制低层对流,不利于污染物的垂直扩散^[20~23],发展层次低于 700 m 的偏南风 and 700 m 以上的弱下沉气流可能共同导致颗粒物爆发性增长^[24].

2013 年 9 月,中国国务院颁布《大气污染防治行动计划》和《大气污染防治十条措施》,呼吁实施区域联动降低大气 PM_{2.5} 质量浓度. 理解污染源排放和气象要素的区域差异及其对污染过程的贡献是客观合理地实施减排的重要前提. 翟世贤等^[25]利用 Model-3/CMAQ 设置不同时刻减排方案并根据气象条件预报,指出提前 1、2 和 3 d 减排,城六区 PM_{2.5} 峰值浓度分别下降 30%、39% 和 38%. 张人禾等^[8]针对 2013 年 1 月的污染事件分析时发现,气象要素对污染的作用超过 2/3,二次气溶胶的形成与变化受气象条件影响更大. 何建军等^[26]采用多种统计方法量化局地气象条件对廊坊市颗粒物质量浓度变化的贡献,结果显示气象条件可以解释 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 日均值变化的 56% 和 49%. 张周祥^[27]通过引入颗粒物污染气象条件 PLAM 指数分析 2015 年秋冬季一次重污染过程,发现气象条件对 PM 浓度上涨的平均贡献率达 80%,是污染发生的主导原因. 熊亚军等^[28]利用 KNN (K-nearest

neighbor, K 近邻算法)和 WRF-CHEM 数值模拟算法,指出 2018 年 3 月 11 ~ 14 日减排使过程平均 PM_{2.5} 浓度下降 25.3%.

根据北京市环境保护局《环境状况公报》(<http://www.bjepb.gov.cn/>),2014 ~ 2017 年北京 PM_{2.5} 年平均质量浓度由 85.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 58.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,大气污染得到显著改善. 在此期间,较多研究成果集中在污染过程的发生、发展机制及化学过程分析,对气象和人为减排的定量化研究成果相对不足. 本研究采用气象和环保常规观测数据,结合数值模式和大数据挖掘技术,量化气象条件和减排措施对空气质量改善的贡献,对明确北京大气污染成因、科学指导下一步大气污染防治工作具有重要的现实意义.

1 材料与方法

本研究中使用的数据主要包括大气污染物质量浓度观测数据和模拟结果、近地面气象要素观测数据以及计算得到的综合表征指数.

1.1 霾日及重污染日

北京 2014 ~ 2017 年污染物浓度及 AQI 数据取自中华人民共和国生态环境部(<http://www.zhb.gov.cn/>)及北京市环境保护局《空气质量月报》(<http://www.bjepb.gov.cn/>). 霾天气最基本的特征为能见度下降^[14],本研究依照中国气象局国家气象中心霾日算法:剔除降水、沙尘等视程障碍现象,以每日 08:00、14:00、20:00 这 3 个时次的能见度和相对湿度平均值作为判别阈值,当能见度低于 7.5 km 且相对湿度低于 80% 记作 1 个霾日. 根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633-2012),污染日以 AQI 和 PM_{2.5} 质量浓度进行规范,指日平均 AQI > 100 即 PM_{2.5} 日均浓度 > 75.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;重污染日(重度污染和严重污染日)为日平均 AQI > 200 即 PM_{2.5} 日均浓度 > 150.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[29,30]. 本文用到的霾日站点信息与生态环境部污染日监测站信息见表 1.

1.2 气象要素与综合指数

地面气象要素数据(小风日数、2 min 风速、风向、相对湿度、降水量等)来自北京市气象局站点观测数据,站点信息见表 1.

(1) 小风日数是指日均风速小于等于 2.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的日数.

(2) 边界层高度利用罗氏算法和观象台观测的相关气象要素计算得到^[31],计算方法为:

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

式中, H 为边界层高度 (m), $(T - T_d)$ 为温度露点差 ($^{\circ}\text{C}$), P 为帕斯奎尔稳定度值, U_z 为 10m 高度处平均风速观测值 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), z_0 为地面粗糙度, f 为地转参数 (s^{-1}).

(3) 大气环境容量指数表征大气自身对污染物的容纳能力, 指示大气污染变化趋势, 与近地面层空气流动性、垂直方向上大气的稳定性、稳定层的厚度、降水等要素有关. 值越小, 表示大气对污染物的容纳能力越低^[23], 计算方法为:

$$A = \pi VH/2$$

式中, A 是大气环境容量指数, H 为混合层厚度 (m), V 为平均风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

(4) 大气通风系数反映大气边界层内通风情况的物理量, 能较好地表征大气的扩散能力. 计算方法为大气边界层 (混合层) 高度乘以边界层 (混合层) 内平均风速, 是混合层高度内风速的积分, 单位为 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 值越小越不利于大气污染物扩散.

表 1 气象数据观测站点与生态环境部站点信息
Table 1 Information on meteorological sites and atmospheric sites

气象观测站点信息				生态环境部测点信息			
站号	站名	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)	测点编码	测点名称	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)
54398	顺义	40.13	116.62	1001A	万寿西宫	39.87	116.37
54399	海淀	39.98	116.28	1002A	定陵	40.29	116.17
54406	延庆	40.45	115.97	1003A	东四	39.95	116.43
54410	佛爷顶	40.60	116.13	1004A	天坛	39.87	116.43
54412	汤河口	40.73	116.63	1005A	农展馆	39.97	116.47
54416	密云	40.38	116.87	1006A	官园	39.94	116.36
54419	怀柔	40.37	116.63	1007A	海淀区万柳	39.99	116.32
54421	上甸子	40.65	117.12	1008A	顺义新城	40.14	116.72
54424	平谷	40.02	117.12	1009A	怀柔镇	40.39	116.64
54431	通州	39.92	116.63	1010A	昌平镇	40.20	116.23
54433	朝阳	39.95	116.05	1011A	奥体中心	40.00	116.41
54499	昌平	40.22	116.22	1012A	古城	39.93	116.23
54501	斋堂	39.97	115.68				
54505	门头沟	39.92	116.12				
54511	北京	39.80	116.47				
54513	石景山	39.95	116.20				
54514	丰台	39.87	116.25				
54594	大兴	39.72	116.35				
54596	房山	39.68	116.13				
54597	霞云岭	39.73	115.73				

1.3 区域化学传输模式 WRF-Chem

本研究使用新一代天气/气候与大气化学在线耦合模式 WRF-Chem(3.6.1) 对华北地区进行模拟, 水平分辨率 9km. 物理方案包括 YSU 边界层、WSM 6-class 云微物理、Goddard 短波方案和 RRTM 长波方案, 化学方案设置为 CBM-Z 气相化学和 MOSAIC-4bins 气溶胶方案^[4,32~34]. 人为排放清单采用清华大学研发的 MEIC_2012, 该系列清单已被广泛应用于中国地区大气化学模式研究中, 模拟效果较好^[35,36]. 本研究针对 2014 ~ 2017 年 PM_{2.5} 污染频发的 12 月 (1 ~ 19 日), 气象场和化学场的初始条件和边界条件分别采用 FNL 1° × 1° 再分析资料和 MOZAR-4T 全球化学模式结果^[37]. 模式采用相同的排放清单, 可以得到因气象场差异引起的 2014

~ 2017 年 12 月污染物浓度变化情况.

1.4 KNN 与 SVM 评估模型

KNN 与 SVM (support vector machines, 支持向量机) 是经典的分类与回归分析的监督式算法, 属于大数据挖掘技术, 在空气污染和霾等级分类预报中的准确率达到 80% ~ 90%^[28,38,39].

假定霾日和重污染日由气象条件和污染源排放共同引发, 则霾日和重污染日的发生必然包含气象条件和排放强度信息. 在已知实际的气象条件、霾日数和重污染日数的条件下, 基于 KNN 与 SVM 模型对霾日和重污染日发生频次进行模拟, 并利用观测数据验证, 得到气象条件对霾日和重污染日的影响, 其反作用即为排放强度的影响. 本研究旨在结合 KNN 和 SVM 模型, 研究气象条

件改变和排放变化对北京空气质量改善中的影响并将其定量化,属于大数据挖掘算法在空气污染领域的较新尝试。

KNN 采用测量不同特征值之间的距离方法进行分类,对异常值不敏感,无数据输入假定。其基本算法为:

$$S = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} & L_1 \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} & L_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \cdots & X_{im} & L_i \end{bmatrix}$$

训练样本集 S 是由 i 个天气样本组成的历史天气个例集合,每个样本由 m 个属性变量及 L 个标志量构成。属性变量 X_{im} 分别代表均海平面气压、日均相对湿度、日均风速、日均温度、日均变温、日均变压及南风频次; L_i 称为标志量(label)。假设霾日数各要素的集合为预测样本 $Y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$; 进行预测时,首先在 S 中找到与预测样本 Y_i 最相似的 K 个近邻(K 通常为奇数,本研究中 $K=5$)及对应的 K 个标志量集合 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_K\}$,按照投票多数原则,选取最多的标志量 L_i 作为 Y_i 预测结果。 K 近邻选取采用欧氏距离法进行判定,故 KNN 本质上是一种相似算法^[28,38,39]。

SVM 可以对训练集之外的数据点做出合理的分类决策,具有较好的鲁棒性,泛化错误率较低,结果易解释,在气象预报领域已广泛应用^[40]。其基本算法如下:

$$\min_{w,b} \Phi(a,b) = \frac{1}{2}(w \cdot w)$$

约束条件为:

$$y_i(w \cdot x_i) + b \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

引入拉格朗日乘子 α_i , 上式求解方程为:

$$\min_{w,b,\alpha} L(w,b,\alpha) = \frac{1}{2}(w \cdot w) - \sum_{i=1}^k \alpha_i \{y_i[(w \cdot x_i) + b] - 1\}$$

约束条件为:

$$y_i(w \cdot x_i) + b \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

得到最优解 $w = \sum_{i=1}^k \alpha_i^* y_i x_i$, 取任一 $\alpha_i \neq 0$, 即可求出 b 。结果中大部分 α_i 为 0, 而 α_i 不为 0 的样本称为支持向量。

对于高维空间,若要将原特征空间变换到高维特征空间,则需将最优分类面中的点积替换成内积 $K(x, x')$, 此时优化函数为:

$$\max w(\alpha) = \sum \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j)$$

约束条件为:

$$\sum_{i=0}^k y_i \alpha_i = 0, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中, α_i 为拉格朗日乘子,与每一个样本对应。这是一个二次函数最优化问题,约束条件为不等式,其解存在且唯一,通常仅有小部分 α_i 不为 0, 所对应样本点即为支持向量。

最终应用的最优分类函数为:

$$f(x) = \text{sgn}[(w \cdot x) + b] \\ = \text{sgn}\left[\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x_i \cdot x) + b^*\right]$$

基于上述支持向量机的基本原理,本研究选用高斯核函数。

2 结果与讨论

2.1 2014~2017 年北京地区大气污染变化

图 1(a)是北京地区 2014~2017 年霾日和空气污染日的空间分布及变化;过去 4 a 霾日呈减少的趋势。2014 年~2015 年霾日数较多,南部地区每年霾日数约 130~140 d,霾日出现频率达 35%。2016 南部地区霾日数继续维持,但北部地区霾日呈减少态势,霾日约 60~90 d。2017 年北京霾日数较过去 3 a 显著减少,霾多发的南部和东南部等地霾日少于 100 d,北部和城区不足 50 d。将所有站点进行平均,2017 年霾日较 2014、2015 和 2016 年分别减少 41.2%、39.8% 和 36.4%,霾日数减少最显著的地区为石景山和丰台。图 1(b)是生态环境部公布的每年污染日数站点分布;2014~2017 年城区及平原西南部污染日数偏多,其次为东南部,污染日数大值区自西南向城区伸展,类似于“舌状”。逐年对比表明各站点污染日数呈逐年减少态势。以古城为例,2014、2015 和 2016 年污染日数分别为 197、170 和 164 d,污染日占比约 45%~54%;2017 年污染日数仅 113 d,污染占比降至 31.0%。对站点进行平均发现,2017 年北京污染日数 139 d,较过去 3 a 分别减小 28.0%、22.4% 和 17.3%。

图 2 给出了空气污染日出现频次的统计结果。2014~2017 年北京空气污染日比例逐年下降,2017 年空气质量优良率为 61.9%,较过去 3a 分别提高 14.8%、11.0% 和 7.8%;其中,重污染日数(重度污染和严重污染)23 d,占总污染日数的 16.6%,比 2014、2015 和 2016 年重污染日分别减少 24、23 和 16 d,占比下降 24.4%、25.7% 和 23.2%。这表明随着污染日数的逐年减少,北京地区的污染程度也在逐年减轻。

2014~2017 年北京 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 年平均质量浓度逐年下降(图 3)。2017 年 4 种污染

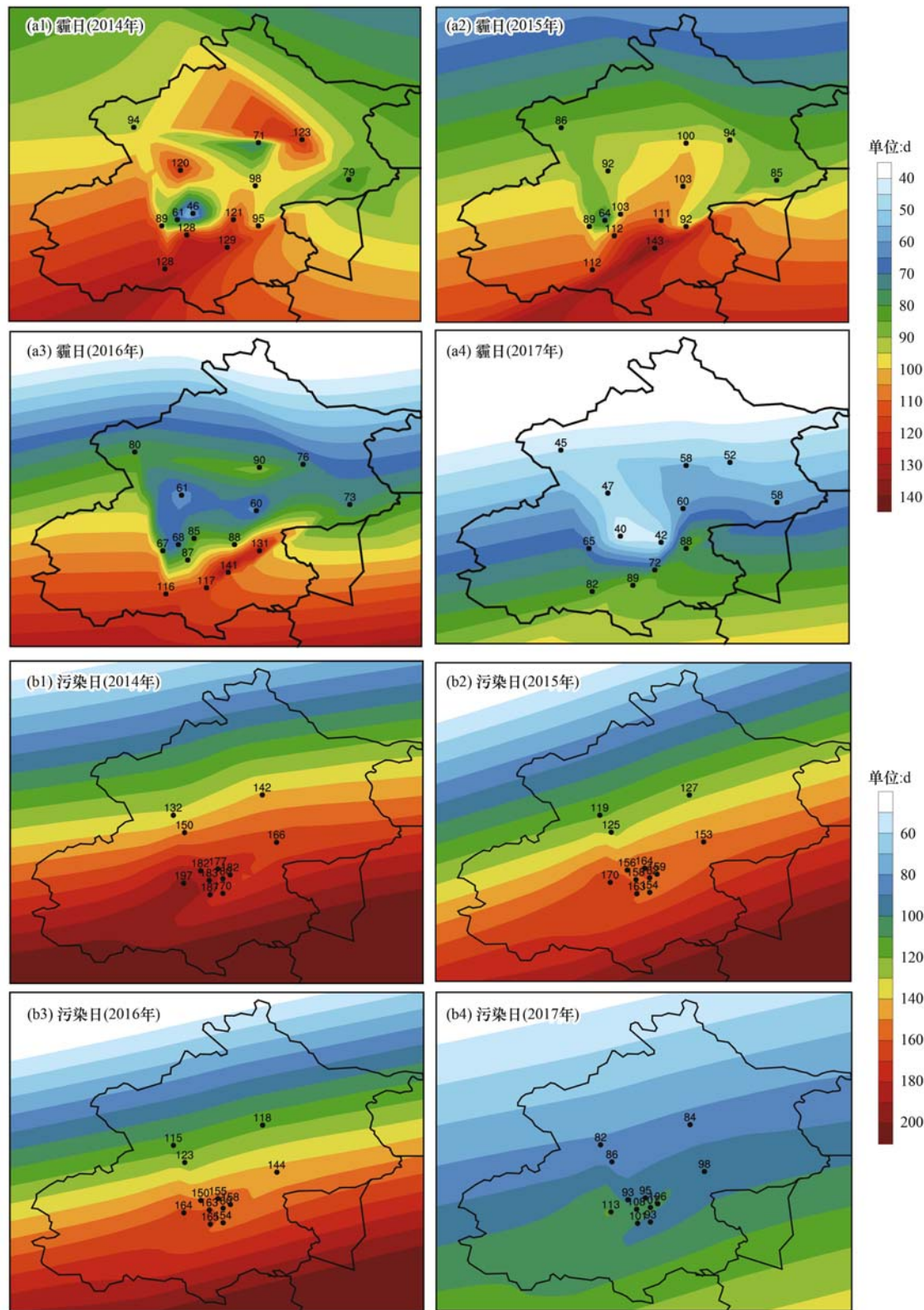


图1 2014 ~ 2017 年北京地区霾日和污染日空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of haze days and pollution days in Beijing during 2014-2017

物年平均浓度分别为 58、87、8 和 46 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，较过去 3 a 平均值分别下降 19.1%、49.1% 和 10.9%。采暖期(1 ~ 3 月、11 ~ 12 月)污染物浓度在 2017 年最低， $\text{PM}_{2.5}$ 较过去 3a 同期平均值降低 30.85%。对 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度进行分析，1 月最低值出现在 2016

年，污染日数为 4 a 同期最少；5 月和 9 月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度年际差异较小；其它月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最低值都出现在 2017 年，最高值在 2014 年。值得注意的是，2017 年和 2014 年秋季(尤其 11 ~ 12 月)的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和污染天数低于 2015 ~ 2016 年。

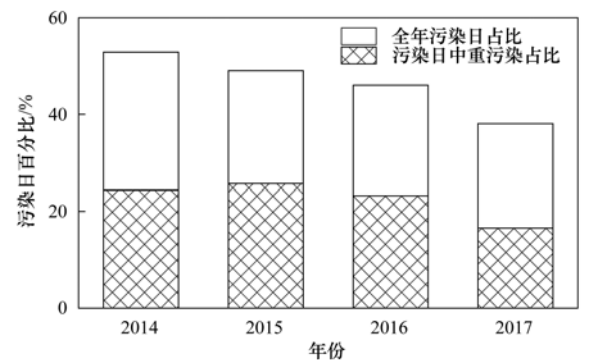


图2 2014~2017年北京地区污染日数及其中重污染日占比
Fig. 2 Percentages of pollution days in Beijing during 2014-2017

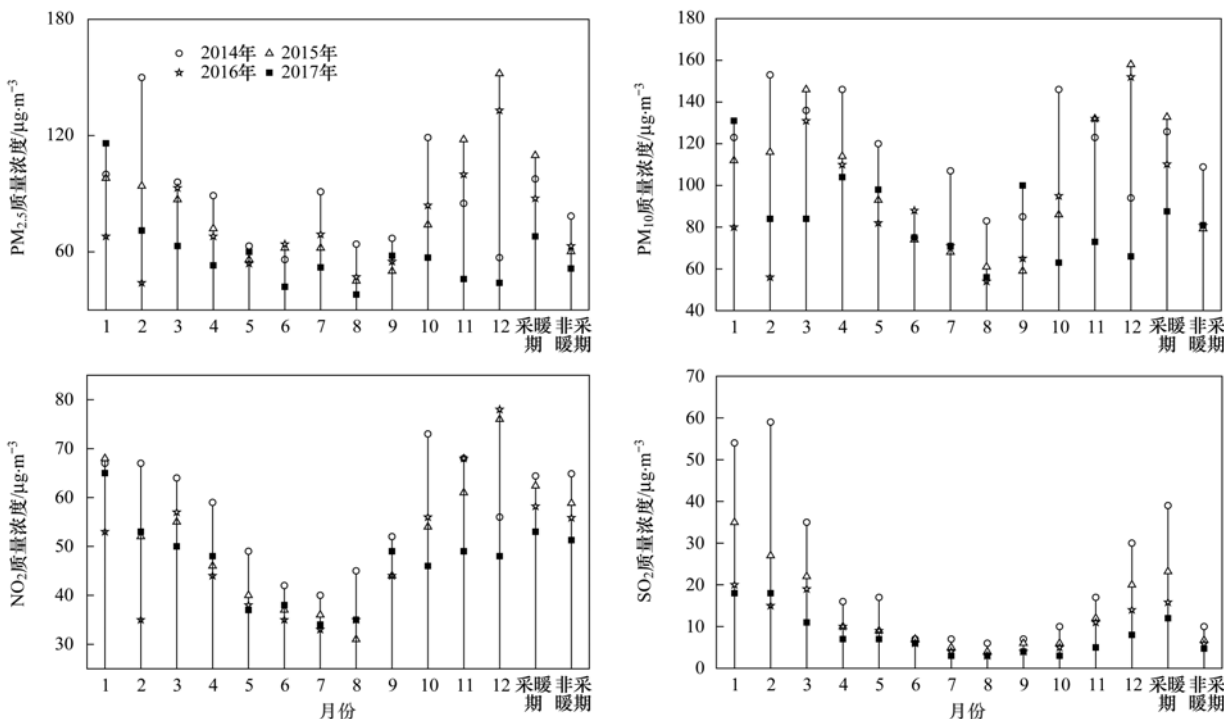


图3 2014~2017年北京PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和SO₂质量浓度逐月统计值
Fig. 3 Monthly concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, and SO₂ in Beijing during 2014-2017

表2 2014~2017年观象台小风日数统计值¹⁾/d
Table 2 Number of low wind days during 2014-2017/d

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	采暖期	非采暖期
2014	20	22	10	14	5	20	20	23	27	26	23	14	89	135
2015	20	13	12	6	7	12	18	22	26	19	24	24	93	110
2016	17	10	12	7	4	14	22	23	24	21	22	23	84	115
2017	20	16	9	8	10	17	23	21	23	27	17	19	81	129

1) 北京采暖期为每年的1~3月和11~12月；日均风速 $\leq 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

少13.5%，比2016年同期偏多15.4%；11~12月出现36 d，较2015~2016年同期分别减少25.0%、20.0%，可见2017年前冬（11~12月）大气水平扩散条件较有利。此外，2017年11~12月小风日数与2014年大体持平，但污染比2014年明显缓解，这可能与2017年减排措施相关，需结合其它要素综合判断。

2.2 气象条件分析

2.2.1 基本气象要素

风主要体现了区域大气水平方向的扩散能力，也是局地性较强的气象因子。表2是观象台2014~2017年逐月小风日数统计值。2017年小风日数210 d，比2014年偏少14 d，较2015和2016年分别偏多7 d和11 d。曾有研究指出，京津冀地区采暖期大气扩散能力下降趋势比全年明显，更易造成近地面污染物堆积^[41]，冬季也是重霾的多发季节^[10]。针对采暖期进行分析发现，小风日数最少年份为2017年；其中，1~3月共45 d，较2014年同期偏

北京20站平均风速分析结果显示，2014~2017年风速整体上呈缓慢增加态势。其中，城区站（海淀、朝阳、石景山、丰台、大兴、观象台）2017年风速均值为 $1.94\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较过去3a分别增加20.2%、1.0%和2.4%。近地面风速达3级及以上（ $\geq 3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）时，PM_{2.5}扩散能力将明显增强，污染物浓度降低^[29]。为此，统计了城区站 $\geq 3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风

速出现的频次比例(表 3), 2017 年的频率最高(10.6%), 2014 ~ 2015 年不足 8%; 采暖期内 $\geq 3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速频次仍在 2017 年最大(14.3%), 比 2015 年同期偏高 3.3%. 其中, 1 ~ 3 月最大频率出现在 2016 年, 其次为 2017 年, 两者较 2014 年同期分别偏

高 8.7% 和 4.3%; 11 ~ 12 月 $\geq 3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速频率在 2017 和 2014 年分别为 15.8% 和 14.1%, 2015 ~ 2016 年不足 7%. 综合来看, 2017 年近地面风速条件有所改善, 尤其是 11 ~ 12 月较大风速的频次明显增加, 对污染物的扩散有利.

表 3 北京城区站 2014 ~ 2017 年小时风速 $\geq 3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 频次统计结果/%

Table 3 Percentage of hourly wind speed $\geq 3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in Beijing during 2014-2017/%					
年份	全年	采暖期	非采暖期	1 ~ 3 月	11 ~ 12 月
2014	7.7	11.1	5.3	9.0	14.1
2015	7.9	9.4	6.9	11.4	6.2
2016	10.4	13.3	8.4	17.7	6.7
2017	10.6	14.3	8.0	13.3	15.8

图 4(a) 给出了北京平均相对湿度空间分布. 2014 ~ 2017 年昌平至门头沟一带相对湿度低值中心清晰, 位置稳定不变; 北部、东南部、南部相对湿度较高. 2014 和 2017 年城区一带的平均相对湿度明显低于 2015 ~ 2016 年. 图 4(b) 为采暖期和非采暖期各站点平均相对湿度逐年变化, 采暖期相对湿度低于非采暖期. 其中, 采暖期各站点相对湿度在 2015 年最高, 2017 年最低. 1 ~ 3 月, 2014 年各站点相对湿度约 40% ~ 55%, 而 2015 ~ 2016 年明显偏低, 尤其在门头沟和昌平地区平均相对湿度低于 35%; 11 ~ 12 月, 各站点相对湿度在 2014 和 2017 年低于 50%, 较 2015 ~ 2016 年同期偏低约 10% ~ 20%. 当湿度增至 70% 以上时, 干气溶胶粒子吸湿增长会使大气消光增强, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度“虚高”^[3]. 对城区站进行统计, 2014 和 2017 年 70% 以上湿度日数分别占全年的 24.7% 和 25.1%, 较 2015 ~ 2016 年偏低 1.6% ~ 4.3%; 尤其在采暖期, 2017 年 70% 以上湿度日频次最低, 仅为 9.8%, 较 2015 年偏低 19.7%.

2.2.2 综合表征指数

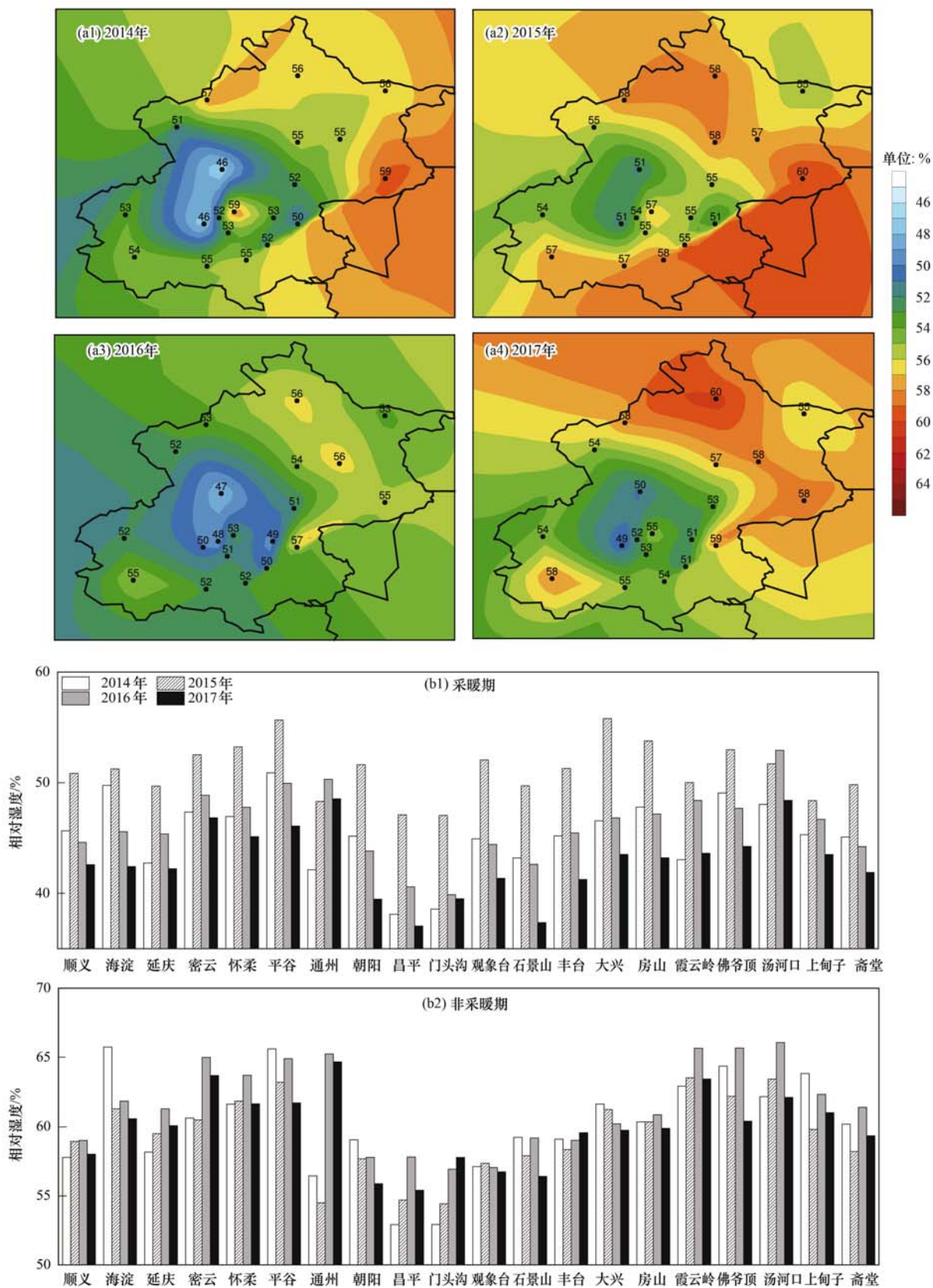
2014 年平均大气环境容量指数和通风系数低于其他 3 a, 2015 ~ 2016 年相对偏高(图 5). 采暖期内环境容量指数和通风系数呈明显的逐年增长趋势, 2017 年两个指数较过去 3 a 平均增加 11% 左右, 表明污染相对较重时段内大气对污染物的容纳能力有所提升; 其中, 1 ~ 3 月 2015 年和 2017 年两个指数持平, 比 2016 年同期约偏低 11% ~ 12%, 比 2014 年同期约偏高 16%, 表明 2014、2015 和 2017 年年初大气承载力和通风能力相对较弱, 与同时期的污染实况对应; 11 ~ 12 月大气环境容量指数和通风系数最大值在 2017 年, 与 2015 年同期相比, 2017 年的两个指数升高 54.1% 和 54.8%. 非采暖期内两个指数呈逐年减小趋势, 故影响了大气对污染物的年平均承载能力. 但非采暖期内 2016

和 2017 年累积降水量分别为 652.7 mm 和 558.3 mm, 显著高于 2014 年和 2015 年(约 400 ~ 450 mm), 较多的降水有利于污染物清除.

边界层高度影响污染物垂直方向的扩散和混合. 图 6 是大气边界层高度变化的时间序列, 由图可见边界层年均值差异较小. 采暖期, 2014 ~ 2017 年大气边界层高度呈增加态势, 增加速率约 $3.2\% \cdot \text{a}^{-1}$. 其中, 1 ~ 3 月 2017 年边界层高度为 1 175.7 m, 较 2014 年同期升高 10.7%, 但比 2015 年和 2016 年同期偏低 2.3% 和 3.3%, 较低的边界层高度将污染物压制在大气低层, 减弱了大气垂直方向的扩散能力; 11 ~ 12 月 2017 年平均边界层高度 1 171.8 m, 比 2014 ~ 2016 年升高 7.4% ~ 47.8%. 非采暖期边界层高度变化有所差异, 2014 ~ 2016 年缓慢升高, 但 2017 年显著低于过去 3 a 同期, 尤其是 7 ~ 8 月和 10 月, 这与大气混合层高度较低、含水量较高有关.

2.2.3 气象条件改善对空气质量的影响模拟

为讨论大气环流改变引起的大气扩散条件的转好对空气质量改善的贡献率, 基于 WRF-CHEM 对 2014 ~ 2017 年空气污染重、霾天气多发的 12 月进行模拟. 图 7 是 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度模拟结果与观测值的对比: 2014 年 12 月和 2017 年 12 月大气扩散条件相对较好, 模式对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度趋势及峰值浓度的模拟与观测值一致, 但模拟结果略高, 相关系数达到 0.90, 通过 0.01 显著性水平检验; 模式对 2015 ~ 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日均值模拟较好, 但在 2016 年趋势模拟上存在偏差, 相关系数分别为 0.9 和 0.7. 相同排放清单、不同气象条件、不考虑减排的背景下, 2017 年与过去 3 a 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差如图 8 所示: 气象条件的差异导致 2017 年 12 月 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度平均值较 2014、2015 和 2016 年同期分别降低 5.0%、38.0% 和 25.0% 左右, 2017 年与 2015 ~ 2016 年相比污染状况显著改善;



(a) 北京近地面相对湿度空间分布; (b) 近地面相对湿度时间变化

图4 2014~2017年北京地区近地面相对湿度的时空变化

Fig. 4 Spatial and temporal variation of relative humidity in Beijing during 2014-2017

2017 年与 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异较小, 说明两者的大气扩散条件较为相似. 因气象条件的改变, 2017 年与过去 3 a 相比, 污染过程峰值浓度显著

降低, 尤其与 2015~2016 年相比, 小时浓度可降低约 $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对污染过程的累积和发展有很大程度的缓解.

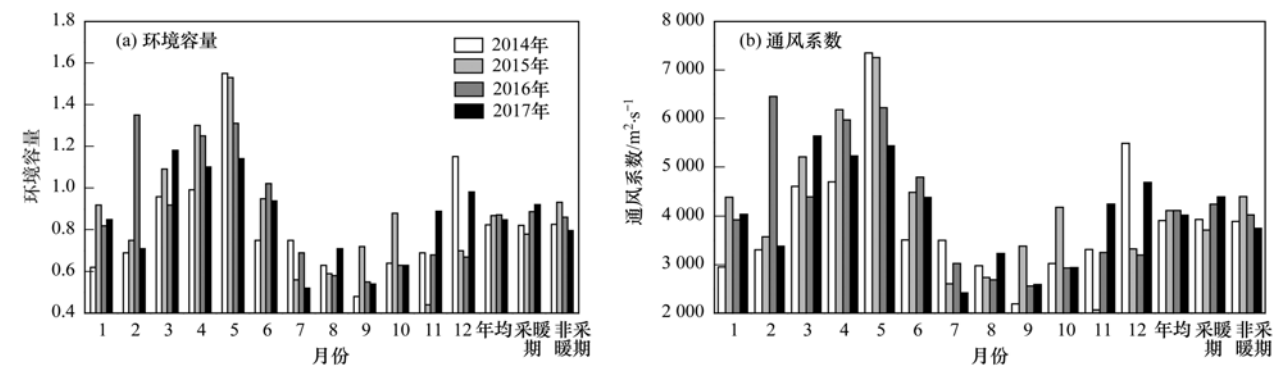


图5 2014 ~ 2017 年观象台大气环境容量和通风系数

Fig. 5 Atmospheric environmental capacity and ventilation coefficient in Beijing during 2014-2017

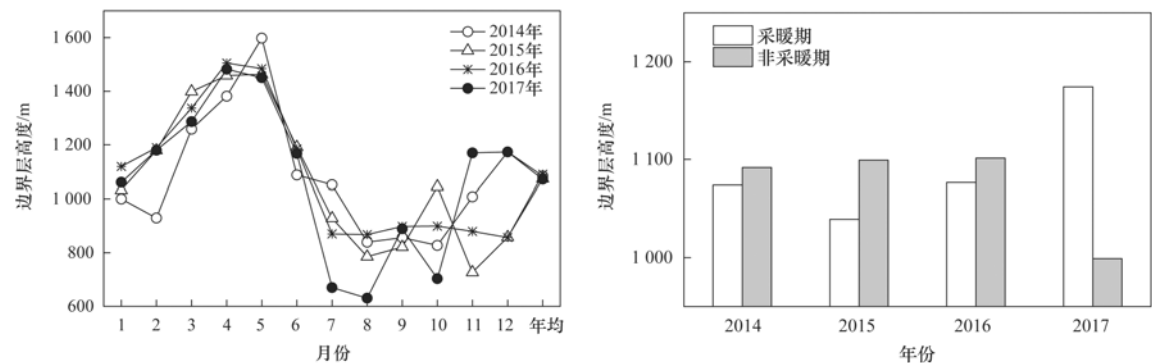


图6 2014 ~ 2017 年观象台不同时段大气边界层高度统计值

Fig. 6 Boundary layer height in Beijing during 2014-2017

2.3 利用大数据挖掘算法评估气象与减排对大气污染的影响

2.3.1 KNN 和 SVM 模型对霾日的评估结果

上述结果只能给出气象条件的改变对污染($\text{PM}_{2.5}$ 浓度)影响的定量化结果,并不能区分气象和排放改变的贡献率.利用 KNN 和 SVM 模型评估的基本思路如下:利用 2013 ~ 2016 年气象条件和霾日数的实况数据,基于 KNN 和 SVM 进行模拟并验证.当模拟结果满足预报要求时,即认为模型已能较好地匹配 2013 ~ 2016 年实际的气象条件和排放背景.之后,基于 2017 年实际气象条件模拟霾日数,得到的结果包含了 2013 ~ 2016 年的排放条件和 2017 年气象条件的综合作用.

3 种评估情景设置见表 4. 情景 1 表示以 2013 ~ 2016 年的排放和气象条件为背景,年平均霾日为 125 d;情景 2 假设排放条件同情景 1,气象条件更替为 2017 年,则 2017 年模拟霾日 101 d;情景 3 表示在 2017 年实际排放和气象条件背景下,2017 年

出现霾日 72 d. KNN 评估中,情景 1 和 2 的差异代表排放量不变的情况下,2017 年的气象条件可导致 2017 年霾日减少 24 d;情景 2 和 3 的差异代表气象条件不变时,排放量的变化可导致 2017 年霾日减少 29 d;情景 1 和 3 的差异代表在排放量减少和气象条件改善的双重作用下,2017 年霾日较过去 4 a 可减少 53 d,即 2017 年减少的 53 个霾日中,约 29 个霾日(54.7%)是减排引起的,约 24 个霾日(45.3%)归因为气象条件的改善.同样 3 种情景设置基于 SVM 构建评价模型进行检验回算,结果显示,2017 年减少的 53 个霾日中,约 36 个(约 67.9%)归因于人为减排的贡献,约 17 个(约 32.1%)是气象条件改善的作用.

2.3.2 KNN 和 SVM 模型对空气重污染日的评估结果

与 2.3.1 节中霾日的预报模拟同理,利用 2013 年的气象数据和重污染日频次作为验证训练模型的基础数据,并采用留一交叉检验方法(即一个样本

表 4 3 种情景下 KNN 和 SVM 模型对霾日的评估结果

Table 4 Assessment results for haze days in three situations by KNN and SVM models

情景	条件描述		观象台霾日数/d	
	排放条件	气象条件	KNN 模型	SVM 模型
1	2013 ~ 2016 年排放条件	2013 ~ 2016 年气象条件	125	125
2	2013 ~ 2016 年排放条件	2017 年气象条件	101	108
3	2017 年排放条件	2017 年气象条件	72	72

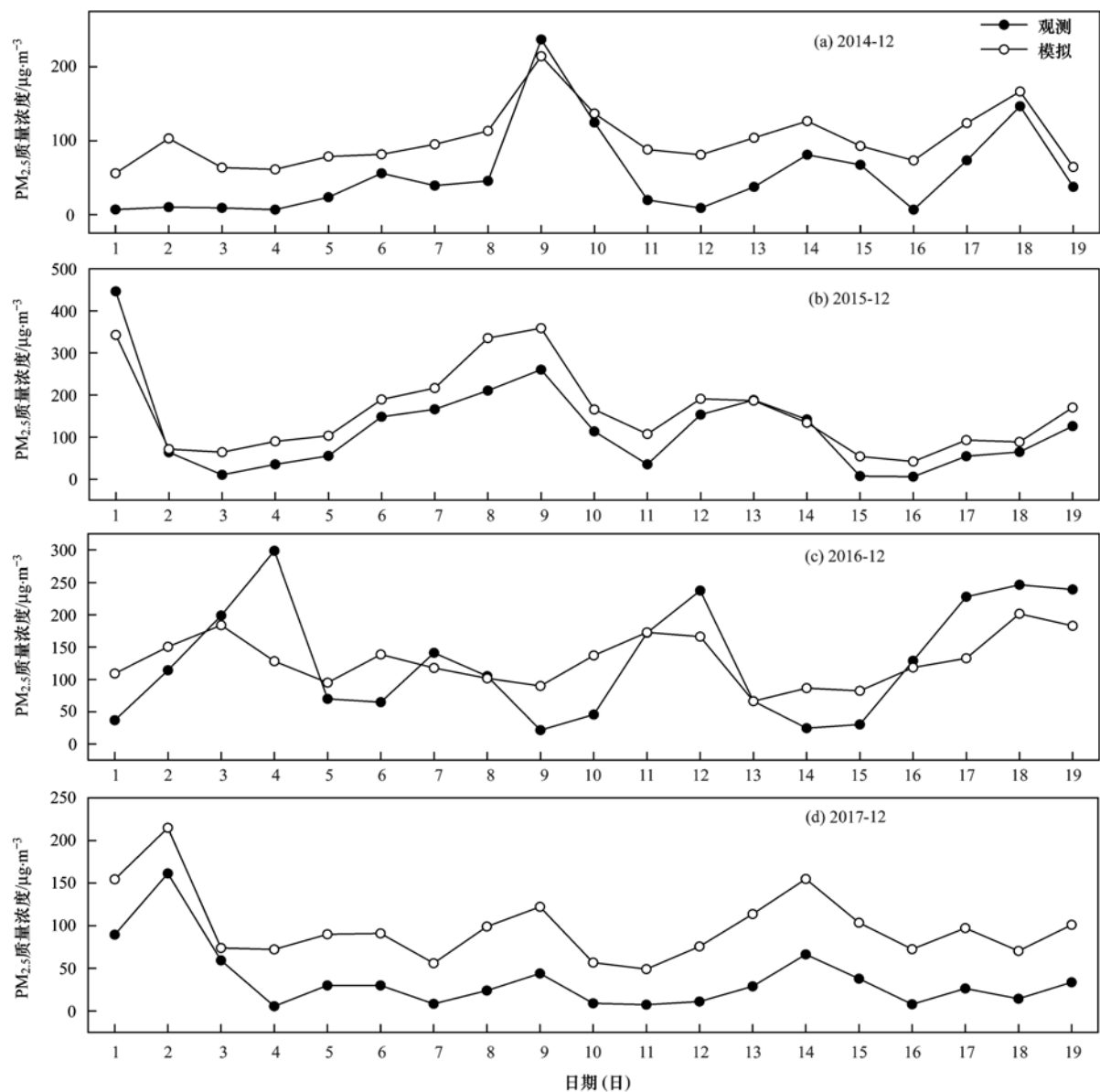


图 7 2014 ~ 2017 年天坛站 PM_{2.5} 日均质量浓度模拟值与观测值对比

Fig. 7 Comparison between simulated and observed daily PM_{2.5} concentrations at Tianan site during 2014-2017

做测试集, 其它样本为训练集, 若有 n 个样本, 则需要训练 n 次, 测试 n 次) 对预报结果进行分类准确性等多项检验. 当模型达到较高准确率时 (KNN 和 SVM 分别达到 85% 和 83%), 即认为集成了 2013 年的气象条件和排放背景, 继而对 2014 ~ 2017 年的模拟结果就包含了 2013 年的排放信息和模拟年份的气象条件. 将模拟结果与实际发生的重污染日数进行对比, 可分离每年的排放和气象对重

污染日发生频次的作用, 结果见表 5. 若将 2017 年与 2013 年相比, 可见气象和排放共同影响下重污染日减少 35 d, KNN 与 SVM 模拟的气象改善导致重污染日分别减少 12 d (34.3%) 和 10 d (28.6%), 则人为减排的作用分别为 23 d (65.7%) 和 25 d (71.4%), 即 2017 年减少的重污染日中, 人为减排和气象条件改善的贡献率分别为 68.6% 和 31.4%.

表 5 2013 ~ 2017 年观测的重污染日数及 KNN 和 SVM 模型的模拟结果

Table 5 Assessment results for heavy pollution days simulated by KNN and SVM models

年份	实际发生日数/d	KNN 模型模拟日数/d	SVM 模型模拟日数/d
2013	58	58	58
2014	47	54	48
2015	46	57	64
2016	39	40	53
2017	23	46	48

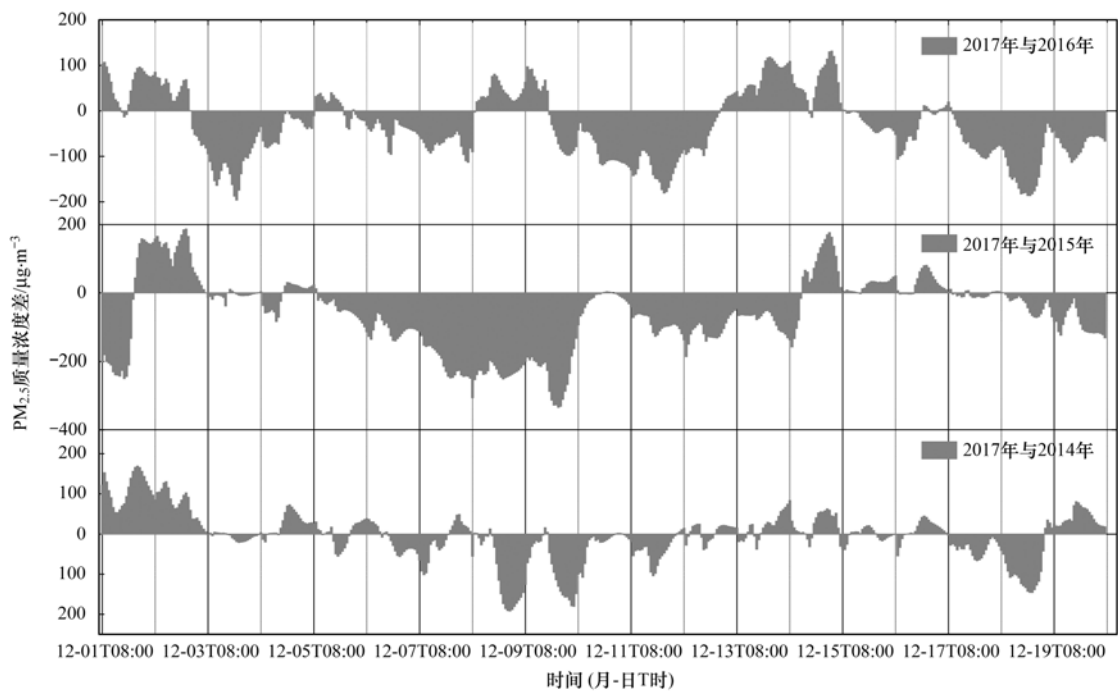


图8 天坛站 2017 年与 2014~2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度的 WRF-CHEM 模拟结果差异

Fig. 8 Hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentration differences between 2017 and three previous years simulated by WRF-CHEM at Tiantan site

最终将两种模型的计算结果进行算数平均, 结果显示 2017 年北京霾日的减少, 61.3% 是人为减排的作用, 38.7% 归因于气象条件的改善; 2017 年减少的空气重污染日, 人为减排和气象条件的贡献比分别为

68.6% 和 31.4% (表 6)。可见, 2017 年北京霾日和空气重污染日的大幅减少是气象条件改善和人为减排共同作用的结果, 其中排放减少的贡献率达 65.0%, 与前人在其它城市开展的研究结论相似^[26,42]。

表 6 2017 年霾日和重污染日大幅减少的归因贡献比/%

Table 6 Assessed contribution for decreased haze and heavy pollution days by KNN and SVM in 2017

算法类型	霾日减少的贡献比例/%		重污染日减少的贡献比例/%	
	排放条件	气象条件	排放条件	气象条件
KNN 算法	54.7	45.3	65.7	34.3
SVM 算法	67.9	32.1	71.4	28.6
平均值	61.3	38.7	68.6	31.4

3 结论

(1)北京 2017 年霾日数较 2014、2015 和 2016 年分别减少 41.2%、39.8% 和 36.4%, 最明显的地区位于石景山和丰台; 污染日数较过去 3 a 分别减少 28.0%、22.4% 和 17.3%, 重污染日数比 2014~2016 年分别减少 24、23 d 和 16 d, 污染程度和污染物浓度显著降低。

(2)2014~2017 年各站点平均风速逐年增加, 尤其是西部和南部, 通州风速却有逐年减小的态势; $\geq 3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速频次的占比在 2017 年最大, 2014 和 2017 年相对湿度低于 2015~2016 年。采暖期是全年污染频发的时期, 小风日数、平均风速、 $\geq 3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速频次、 $\geq 70\%$ 湿度日占比等气象要素均在 2017 年最好, 可见 2017 年气象条件向有利的方向转换; 其次采暖期扩散条件较好的是 2014

年, 尤其 11~12 月各要素与 2017 年相似, 但污染情况严重。

(3)2014 和 2017 年平均大气环境容量指数和通风系数略低于 2015~2016 年, 边界层高度年际差异较小。经分析, 采暖期大气对污染物的承载力在 2017 年显著高于其它年份, 尤其 11~12 月。非采暖期 2017 年大气的承载力下降, 影响了全年平均值; 但值得注意的是, 2017 年非采暖期降水量 558.3 mm, 远远多于 2014~2015 年, 提高了对污染物的清除和湿沉降能力。总体来看, 2017 年大气自身的容纳能力在采暖期尤其是 11~12 月明显增加, 污染物在垂直方向的稀释和扩散能力有所提升, 非采暖期的降水清除作用显著。

(4)对大气污染中气象和排放的定量评估是政府减排工作的数据支撑。基于 WRF-CHEM 模式和相同的排放输入对 2014~2017 年 12 月进行模拟,

气象条件的差异导致 2017 年 12 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较 2014、2015 和 2016 年同期分别降低 5%、38% 和 25% 左右, 但该方法不能量化气象和减排的贡献率。利于 KNN 和 SVN 大数据挖掘算法对 2017 年空气质量改善中气象和排放变化的贡献进行评估, 结果显示, 2017 年减排对霾日和重污染日减少的平均贡献率约为 65.0%, 气象条件改善的贡献约占 35.0%, 可见北京大气污染防治工作中两者缺一不可。

参考文献:

- [1] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(14): 2375-2377.
- [2] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 711-718.
- [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] Qiu Y L, Liao H, Zhang R J, *et al.* Simulated impacts of direct radiative effects of scattering and absorbing aerosols on surface-layer aerosol concentrations in China during a heavily polluted event in February 2014[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, **122**(11): 5955-5975.
- [5] 吴兑, 陈慧忠, 吴蒙, 等. 三种霾日统计方法的比较分析——以环首都圈京津冀晋为例[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 545-554.
- Wu D, Chen H Z, Wu M, *et al.* Comparison of three statistical methods on calculating haze days-taking areas around the capital for example[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 545-554.
- [6] Zhang J K, Sun Y, Liu Z R, *et al.* Characterization of submicron aerosols during a month of serious pollution in Beijing, 2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 2887-2903.
- [7] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in china[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [8] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(1): 27-36.
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 26-35.
- [9] Zheng G J, Duan F K, Su H, *et al.* Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 2969-2983.
- [10] 刘厚凤, 杨欣, 陈义珍, 等. 中国重霾过程污染气象研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(11): 1917-1922.
- Liu H F, Yang X, Chen Y Z, *et al.* A review of meteorological effects on heavy haze pollution in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(11): 1917-1922.
- [11] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [12] Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 14-25.
- [13] 尹晓梅, 孙兆彬, 郭淳薇, 等. 2016 年 12 月京津冀一次重污染天气过程分析[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(12): 2071-2083.
- Yin X M, Sun Z B, Guo C W, *et al.* Analysis of a heavily polluted event in Beijing-Tianjin-Hebei Region in December, 2016 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2071-2083.
- [14] 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.
- [15] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [16] Chen Z Y, Xie X M, Cai J, *et al.* Understanding meteorological influences on $\text{PM}_{2.5}$ concentrations across China: a temporal and spatial perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(8): 5343-5358.
- [17] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系[J]. *气象与环境学报*, 2013, **29**(2): 34-41.
- Song M, Han S Q, Zhang M, *et al.* Relationship between visibility and relative humidity, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, **29**(2): 34-41.
- [18] Sun Y L, Wang Z F, Fu P Q, *et al.* The impact of relative humidity on aerosol composition and evolution processes during wintertime in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 927-934.
- [19] Chen J, Qiu S S, Shang J, *et al.* Impact of relative humidity and water soluble constituents of $\text{PM}_{2.5}$ on visibility impairment in Beijing, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(1): 260-268.
- [20] 曹伟华, 梁旭东, 李青春. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析[J]. *气象学报*, 2013, **71**(5): 940-951.
- Cao W H, Liang X D, Li Q C. A study of the stageful characteristics and influencing factors of a long-lasting fog/haze event in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, **71**(5): 940-951.
- [21] 高怡, 张美根. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 140-152.
- Gao Y, Zhang M G. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(2): 140-152.
- [22] 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.
- [23] 郭淳薇, 孙兆彬, 李梓铭, 等. 北京地区近 35 年大气污染扩散条件变化[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2202-2210.
- Guo C W, Sun Z B, Li Z M, *et al.* Change of atmospheric pollution diffusion conditions in Beijing in recent 35 years [J].

- Environmental Science, 2017, **38**(6): 2202-2210.
- [24] 吴进, 李琛, 孙兆彬, 等. 北京地区两次重污染过程中 PM_{2.5} 浓度爆发性增长及维持的气象条件[J]. 干旱气象, 2017, **35**(5): 830-838.
- Wu J, Li C, Sun Z B, *et al.* Meteorological condition of explosive increase and maintaining of PM_{2.5} concentration during two heavy pollution processes in Beijing[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, **35**(5): 830-838.
- [25] 翟世贤, 安兴琴, 刘俊, 等. 不同时刻污染减排对北京市 PM_{2.5} 浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1369-1379.
- Zhai S X, An X Q, Liu J, *et al.* Effects of emission-sources reduction at different time points on PM_{2.5} concentration over Beijing Municipality[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1369-1379.
- [26] 何建军, 吴琳, 毛洪钧, 等. 气象条件对河北廊坊城市空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(6): 791-799.
- He J J, Wu L, Mao H J, *et al.* Impacts of meteorological conditions on air quality in urban Langfang, Hebei Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(6): 791-799.
- [27] 张周祥. 秋冬季北京北部重污染事件 PM₁ 化学组分特征及气象因素的贡献[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017. 33-40.
- Zhang Z X. Characteristics of PM₁ chemical composition and role of meteorological factors during heavy aerosol pollution episodes in northern Beijing area in autumn and winter [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2017. 33-40.
- [28] 熊亚军, 徐敬, 孙兆彬, 等. 基于数据挖掘算法和数值模拟技术的大气污染减排效果评估[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 116-125.
- Xiong Y J, Xu J, Sun Z B, *et al.* Air pollution reduction effect evaluation based on data mining algorithm and numerical simulation technology[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 116-125.
- [29] 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.
- [30] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013~2014 年北京大气重污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 27-35.
- Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013~2014 [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 27-35.
- [31] 孙兆彬, 李梓铭, 廖晓农, 等. 北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1693-1705.
- Sun Z B, Li Z M, Liao X N, *et al.* Influence of Beijing atmospheric thermal and dynamics structure on pollutants transport and diffusion conditions [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1693-1705.
- [32] Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-Moment 6-class microphysics Scheme (WSM6) [J]. Journal of the Korean Meteorological Society, 2006, **42**(2): 129-151.
- [33] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**(D14): 16663-16682.
- [34] Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, *et al.* Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC) [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113**(D13): D13204.
- [35] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [36] Zhang L, Wang T, Lv M Y, *et al.* On the severe haze in Beijing during January 2013: unraveling the effects of meteorological anomalies with WRF-Chem [J]. Atmospheric Environment, 2015, **104**: 11-21.
- [37] Emmons L K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. Geoscientific Model Development, 2010, **3**(1): 43-67.
- [38] 熊亚军, 廖晓农, 李梓铭, 等. KNN 数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用[J]. 气象, 2015, **41**(1): 98-104.
- Xiong Y J, Liao X N, Li Z M, *et al.* Application of KNN data mining algorithm to haze grade forecasting in Beijing [J]. Meteorological Monthly, 2015, **41**(1): 98-104.
- [39] 刘炳春, 符川川, 李健. 基于 KNN&SVM 的北京空气污染预测模型研究[J]. 产业创新研究, 2017, (1): 32-38, 72.
- Liu B C, Fu C C, Li J. Study on KNN&SVM-Based Beijing's air pollution prediction model [J]. Industrial Innovation, 2017, (1): 32-38, 72.
- [40] Rani R U, Rao T K R K. An enhanced support vector regression model for weather forecasting [J]. IOSR Journal of Computer Engineering, 2013, **12**(2): 21-24.
- [41] 梅梅, 朱蓉. 污染防治重点区域大气扩散条件变化趋势及成因[J]. 环境影响评价, 2017, **39**(5): 1-6, 12.
- Mei M, Zhu R. Variation trend and genesis analysis of atmospheric diffusion conditions in key areas for pollution control [J]. Environmental Impact Assessment, 2017, **39**(5): 1-6, 12.
- [42] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 大阅兵期间北京市大气质量改善效果评估[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2881-2889.
- Zhao H, Zheng Y F, Xu J X, *et al.* Evaluation of the improvement of the air quality during the parade in Beijing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 2881-2889.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)