

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸢 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估

武文琪, 张凯山*

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 区域气象条件和减排与空气质量的变化关系密切。区域污染天气的发生不只受人为排放的影响, 其与气象条件也密切相关。我国地处全球的主要季风气候区, 大气环流具有明显的季风气候变化特征, 区域气象条件受年际气候变化影响显著。研究通过分析不同气候条件下京津冀地区、成渝地区、长三角和珠三角城市群 2001~2018 年主要气象要素及其污染天气的变化趋势, 利用 KNN 大数据挖掘算法量化分析区域气象条件和减排对大气污染的贡献率。结果表明, 2001~2018 年间全球气候变化异常频繁, 厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候占比近一半。减排与气候变化均对空气质量的改善起促进作用。在非正常气候条件下, 气象对空气质量改善的贡献更为明显。例如, 非正常气候时京津冀地区气象条件对空气质量改善的贡献约为 51%, 而正常气候时约为 30%。对于长三角和珠三角城市群, 其气象条件在非正常气候时的贡献达到了 50% 左右, 几乎与减排贡献相当。此外, 各区域 2015~2018 年的减排贡献均高于 2001~2012 年的平均水平, 表明随着我国实施大气污染物排放控制措施力度的增大, 减排对空气质量改善的贡献显著。但气象条件对空气质量改善的贡献仍不容忽视, 区域减排控制仍然任重道远。

关键词: 厄尔尼诺; 拉尼娜; 空气质量; K 近邻算法(KNN); 空气质量指数(AQI); 空气污染指数(API)

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)02-0523-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202005291

Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement

WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan*

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Regional meteorological conditions and emissions reduction are closely related to air quality. China has a monsoonal climate and regional meteorological conditions are significantly impacted by interannual climate variability. The objective of this study was to evaluate the contributions of meteorological conditions and emissions reduction to regional improvements in air quality. Trend analyses of key meteorological factors and air pollution for the Beijing-Tianjin-Hebei region, Chengdu-Chongqing region, Yangtze River Delta, and Pearl River Delta urban agglomeration areas were performed for the period from 2001 to 2018, and K-Nearest Neighbor (KNN) models were constructed for each calendar year. The analysis showed that approximately half of the years between 2001 and 2018 experienced abnormal global-scale climate conditions, i. e., El Niño and La Niña. Both emissions reduction and climate changes contributed to the improvement of air quality during the study period. The contribution of meteorological conditions to air quality improvement under abnormal climate conditions was 51% compared to 30% under normal climate conditions in the Beijing-Tianjin-Hebei region; for the Yangtze River Delta and Pearl River Delta regions, meteorological conditions contributed approximately 50% to the improvement of air quality under both abnormal and normal climate conditions. In addition, the contribution of emissions reduction to air quality improvement was higher in the study areas during 2015-2018 compared to 2001-2012. This indicates that emissions reduction has played an increasingly important role in air quality improvements largely due to the implementation of a variety of emission control measures. However, the contribution of meteorological conditions to air quality improvement cannot be ignored.

Key words: El Niño; La Niña; air quality; K-nearest neighbor (KNN); air quality index (AQI); air pollution index (API)

近年来随着我国大气污染控制减排措施力度的加大, 我国环境空气质量开始呈现改善趋势, 区域空气重污染天数也有所减少, 尤其是以细颗粒物($PM_{2.5}$)为首要污染物的污染超标天数明显降低。以京津冀、长三角和珠三角地区为例, 到 2019 年, 这 3 个区域的细颗粒物平均浓度分别比 2013 年下降了 55%、39% 和 40%^[1], 区域空气质量状况有所改善。

虽然排放源减少、排放速率降低等大气污染减排措施能够使大气污染物的浓度有所下降^[2], 但是也常发生污染物排放量下降而空气污染加重的情況。例如 2020 年初我国暴发新型冠状病毒疫情, 出

于疫情控制需要, 各类产生污染物排放的工业活动大幅下降, 各地空气中的二氧化氮含量明显减少。但京津冀及周边地区仍多次出现重污染天气过程^[3]。可见, 污染发生与否并非只受人为排放影响, 而是同时与区域气象条件密切相关。区域气象条件变化由大气内部动力学驱动并受年际气候变化影响^[4,5]。

已有研究表明, 我国降水、气温和风的异常均与

收稿日期: 2020-05-28; 修订日期: 2020-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877395)

作者简介: 武文琪(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: venkywu@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: zhangkaishan@scu.edu.cn

东亚季风有关^[6,7]。中国所在的东亚是全球的主要季风气候区之一,其大气环流具有明显的季风气候变化特征。与此相关的赤道太平洋厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-southern oscillation, ENSO)现象的海表温度不规则振荡会导致东亚季风的异常^[8~10]。ENSO 是代表年际气候变化的最强信号,它以 2~7 a 的周期不断循环,并在暖位相和冷位相分别表现为 El Niño(厄尔尼诺)和 La Niña(拉尼娜)事件^[11]。ENSO 对东亚季风的影响可以通过改变近地面风和降水等大气条件来影响我国空气污染物的浓度分布。因此,全球气候变化与区域气象及空气质量的关系如何?区域减排或气象条件变化对空气质量改善的贡献有多大?以上问题的解决将有助于区域大气污染特征分析和相关政策的制定,最终达到改善空气质量的目的。Zhang 等^[12]采用 GRAPES-CUACE 模型量化区域气象条件和减排对 PM_{2.5}浓度下降的贡献,结果显示北京地区 2016~2017 年冬季气象条件变化较其他中东部城市更为有利,气象条件对北京地区颗粒物浓度下降的贡献达到 50.9%。Zhang 等^[13]通过引入气溶胶污染气象条件指数分析北京国际田径联合会世界田径锦标赛期间“北京蓝”形成过程,发现大约 70%~74%的“北京蓝”来自有利天气条件,专项综合减排措施对其贡献为 26%~30%。Xu 等^[14]利用 WRF/CMAQ 模型量化 2000~2017 年气象条件对我国 PM_{2.5}时空分布的贡献,指出气象条件变化是 PM_{2.5}浓度变化的重要驱动力,且其对各省份 PM_{2.5}浓度变化的贡献为 9.3%~55.1%。

本研究以成渝地区、京津冀地区、长三角和珠三角城市群为例,收集各区域历史气象和环境监测数据,利用统计分析方法讨论历年厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候变化特征及其与区域气象条件和空气质量的关系,并结合大数据挖掘技术量化分析区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献,以期对区域空气质量预测预防提供科学依据。

1 材料与方法

为评估不同气候背景下区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献,本研究收集历年气象条件、环境监测数据及太平洋海表温度等用于后续数据分析。本部分的主要内容如下:①2001 年以来全球厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候变化特征统计;②2001~2018 年区域空气质量变化趋势及其与厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候的关系分析;③区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估。详细的数据来源、相关统计分析方法和数据挖掘算法具体分述

如下。

1.1 数据来源和研究区域

研究所用的气象数据为中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)下载的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”。该数据集包含我国 699 个基本气象站自 1951 年以来气压、气温、降水量和风向风速等各类气象要素的日值数据。研究选取该数据集集中京津冀、成渝、长三角和珠三角地区共 101 个站点的历史气压、气温、风速、降水量、日照时数和相对湿度等气象要素的日值数据。研究所用的环境监测数据为中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>)下载的各地区城市 2001~2012 年 API 逐日监测数据和 2014~2018 年 AQI 逐日监测数据。研究有关海表温度资料来源于美国国家环境预测中心(national centers for environmental prediction, NCEP)和中国国家气候中心(<https://cmdp.ncc-cma.net/>)。资料经过异常值检验和缺测剔除,数据完整性和质量情况较好。

本文的研究区域包括成渝地区、京津冀地区、长三角城市群和珠三角城市群。其中成渝地区包括重庆市及下属的万州、涪陵和渝中区等 31 个区县以及四川省的成都、德阳和绵阳等 15 个市^[15];京津冀地区包括北京、天津以及河北省所有城市;长三角城市群包括上海市及江苏、浙江和安徽这 3 个省份中的南京、杭州和合肥等 26 市^[16,17];珠三角城市群包括广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州和肇庆^[18]。

以上 4 个地区或城市群既是我国经济较发达区域,也是大气污染防治的重点区域,其经济发达且人口密集,地区内各城市动态关联构成了一个个以城市为节点的复杂网络结构。以上城市或区域的气象条件和空气质量研究成果,将对我国大气污染区域联防联控工作提供重要的数据支撑。

1.2 厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候与区域气象条件及空气质量的关系分析

本研究利用统计分析方法和数据挖掘算法分析评价全球气候变化与区域气象条件及空气质量的关系,并量化区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献。研究所用的统计分析方法和贡献分析模型介绍如下。

1.2.1 ENSO 非正常气候的判定

ENSO 非正常气候的判定主要是确认厄尔尼诺和拉尼娜发生的年份。厄尔尼诺/拉尼娜发生的评判标准通常以赤道太平洋海温监测值的距平变化作为依据。当海温距平值高于正常值超过 2 个季度时,全球发生厄尔尼诺现象,则该年确定为厄尔尼诺

年,反之,全球则发生拉尼娜现象,该年确定为拉尼娜年^[19,20]. 赤道太平洋海温监测区中 NINO3.4 区海表温度与多年气候平均值的差即为 NINO3.4 区指数^[21~23].

厄尔尼诺和拉尼娜年的具体辨别如下:
① NINO3.4区指数 3 个月滑动平均的绝对值达到或超过 0.5℃; ②持续至少 5 个月. 满足这两个条件即判定为一次厄尔尼诺/拉尼娜事件(NINO3.4 指数≥0.5℃为厄尔尼诺事件; NINO3.4 指数≤-0.5℃为拉尼娜事件)^[24].

NINO3.4 指数满足厄尔尼诺/拉尼娜事件判别的最早月份和最晚月份分别认定为事件的开始/结束时间. 事件起始直至结束的总月数为持续时间.

厄尔尼诺/拉尼娜事件过程中,NINO3.4 指数 3 个月滑动平均的绝对值达到最大的时间和数值分别定义为事件的峰值时间和峰值强度(出现数值相同的多个峰值时,以首次出现的峰值为准)^[25]. 事件强度的判别依据为事件峰值强度的绝对值(用 f 表示),具体标准如表 1 所示.

表 1 厄尔尼诺和拉尼娜事件强度判别标准¹⁾

Table 1 Intensity classifications of El Niño and La Niña		
事件峰值强度绝对值/℃	事件强度	量化强度值
$0.5 \leq f < 1.3$	弱事件	1
$1.3 \leq f < 2.0$	中等事件	2
$2.0 \leq f < 2.5$	强事件	3
$f \geq 2.5$	超强事件	3

1) 1.3、2.0 和 2.5℃ 分别接近于 1.5、2.5 和 3 倍 NINO3.4 指数的标准差

本文依据上述定义,确定 2001~2018 年全球厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候的发生时间和强度用以后续的分析.

1.2.2 空气污染程度分类

对于各研究区域,依据其每日的空气质量指数 (air quality index, AQI) 或者空气污染指数 (air pollution index, API) 判定其当日的空气质量状况或空气污染程度. AQI 指数是根据大气污染物的不同采用 24h 均值或者小时均值加权计算的无量纲指数. 依据 AQI 大小将空气质量分为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染等六级^[26]. 当空气质量达到轻度及以上污染时,易感人群甚至是健康人群都可能会出现某些刺激症状,尤其是对于儿童、老年人及心脏病、呼吸系统疾病的患者,此时应避免较长时间和高强度的户外锻炼.

由于 2012 年之前,我国一直使用 API 确定空气质量等级,因此,本研究依据国家《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[26] 及国家标准中 API 对应的空

气质量状况,确定空气质量等级并与以 AQI 为基准的空气质量等级对应,用于后续的数据分析. 具体来说,2001~2012 年区域污染天气的判定以当日 API 大于 100 为依据;对于 2014~2018 年,则采用如下两种方法判定:①以当日 AQI 大于 100 为依据;②依据区域每日环境监测数据,先计算其 API^[27],再按其相应标准判定. 具体如表 2 所示. 本研究将污染天气分为 A、B 和 C 这 3 种类型用于区域气象条件和减排贡献模型的计算.

表 2 API 和 AQI 的范围及相应空气质量状况

Table 2 Ranges of API and AQI and corresponding air quality			
API	AQI	空气质量状况	污染天气类型
0~50	0~50	优	A
51~100	51~100	良	A
101~200	101~150	轻度污染	B
201~300	151~200	中度污染	B
301~500	201~300	重度污染	C
无	大于 300	严重污染	C

1.2.3 区域各种气候条件下极端天气的判定

全球厄尔尼诺和拉尼娜非正常气候对区域气象条件的影响常表现在区域极端天气出现的频率. 例如,在全球气候变暖背景下,以旱涝为主的灾害事件发生频率日益增加. 分析不同气候背景下区域极端天气的发生情况,不仅有利于解读区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献,还可以结合历年气温和降水等气象要素的分析综合判定非正常气候与区域气象的关系.

一般而言,当气象要素(如气温和降水量等)达到定义的极值时,便可认为极端事件发生^[28]. 而对于这一极值的选取,目前国际上主要有两种处理方法,即绝对极值和相对极值. 其中绝对极值根据绝对物理界限值来定义极端天气气候事件,如寒潮和霜冻日数、大雨和暴雨日数等,这种阈值能较好地表征极端事件的特征和变化规律^[29]. 但同时,“极端天气和气象”常具有时空相对性,例如,日均风速 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 在北京地区为正常水平,而在成渝地区已达到极端水平. 因此,本研究根据气候变化监测和指标专家小组 (expert team on climate change detection and indice, ETCCDI) 推荐的指数体系,综合考虑研究区域自身的特点,选取包括中雨天数、大雨天数和大风天数作为判定极端天气的指标. 其中,中雨天数指日降水量大于等于 10 mm 的天数,大雨天数指日降水量大于等于 20 mm 的天数^[30];大风天数的定义则按区域而定:对于成渝地区,其指的是平均风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的天数,对于京津冀、长三角和珠三角地区,其则指平均风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的天数. 大风天气通常利于大气污染物的扩散,从而改善区域的

空气质量.

1.3 区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估

为了量化区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献,本研究利用 K 近邻 (K-nearest neighbor, KNN) 模型对区域历年的污染天气类型进行预测. KNN 模型是采用分类与回归分析相结合的监督式算法^[31],构建目标变量和模型变量之间的映射关系,并利用该映射关系根据模型变量的观测值预测目标变量的一种方法. 采用 KNN 模型,利用气象数据预测当天相应空气污染等级或类别的准确率高达 91.8%^[32]. 当两个相邻年份的气象条件类似而空气污染的天数不同,特别是预测年份的空气污染天数较基准年份少时,通过计算实际污染天数与预测天数的差别就可以估算气象和减排对空气质量改善的贡献. 本部分的主要内容包括: KNN 模型构建原理以及气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估.

1.3.1 KNN 模型的构建原理

假定 S 为 $A_i (i=1,2,\cdots,n)$ 个天气样本组成的环境空气质量监测数据集,每个天气样本由 m 个属性变量 $(x_{i,m})$ 及 1 个标志量 (L_i) 构成,即:

$$S = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1m} & L_1 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2m} & L_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \cdots & x_{nm} & L_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,属性变量指的是影响空气质量的各种要素,这里主要指气象条件,而标志量指的是表征空气质量的要素,一般为非连续的离散指标,这里主要指以空气污染指数 (API) 或者空气质量指数 (AQI) 为基准划分的空气质量等级. 本研究选取日均海平面气压、日均温度、日均风速、日均降水、日均变温及日均变压等要素为属性变量,以表 2 中所述的污染天气类型为标志量.

模型的构建是依据污染天气类型对所有的属性变量进行分类并建立一定的映射关系. 预测时,根据属性变量样本,在 S 中找到与该样本最相似 (样本之间的相似性通过欧几里德距离表示) 的 K 个近邻及对应的标志量,按其相似性从大到小排列,即距离从小到大排列,选取距离最近的 K 个近邻中出现次数最多的标志量作为预测结果. 计算其相似性时,需对属性变量进行加权. 例如,定义一个权重向量 $W_q = (w_{q1}, w_{q2}, \cdots, w_{qm})$, $q=1,2,\cdots,10$, q 表示 10 种不同的加权方法,则加权之后的样本观测值用 Hadamard 积表示为

$$W_q \circ X_{i,m} = (w_{q1} \cdot x_{i1}, w_{q2} \cdot x_{i2}, \cdots, w_{qm} \cdot x_{im}) \quad (2)$$

加权后预测样本 $X_{j,m} (j=1,2,\cdots,n)$ 与已知样本 $X_{i,m}$ 的欧几里德距离为:

$$d_{ij}(W_q) = \sqrt{\sum_{s=1}^m w_{qs}^2 \cdot (x_{is} - x_{js})^2} \quad (3)$$

构建 KNN 时,近邻 K 值的选取对于模型准确率有较大的影响. 若 K 值太小,则 KNN 预测结果容易受到噪声的影响;反之,若 K 的取值过大,则提取的最邻近子集中容易因为包含过多的错误点而对预测准确率产生影响^[32]. 因此,对于 K 的选择,通常采用留一法 (leave-one-out, LOO) 进行试验,先设定初始值,然后根据结果调整 K 值直至满足模型精度^[33]. 此外,属性变量的加权方法包括 rectangular、triangular、epanechnikov、biweight、triweight、cos、inv、gaussian、rank 和 optimal^[34],在实际应用中,也常根据模型的精度确定.

本研究中近邻 K 值及加权方法的确定均采用留一交叉验证进行^[35]. 即对于输入模型的 n 个天气个例样本,每次只取 1 个样本作为测试集,其余 $n-1$ 个样本作为训练集,循环 n 次进行测试^[36]. 将 K 的范围设定为 1~10. 对于每一个 K 值,都分别采用 10 种加权方法与之对应并用留一交叉验证计算模型的精度,并最终确定满足模型精度大于 0.8 的 K 值及其对应的加权方法.

1.3.2 气象条件和减排的贡献评估

本研究评估气象条件和减排对空气质量改善的贡献采用公式 (4) 和 (5):

$$Q = \frac{T_o - T_m}{T_o - T_r} \times 100\% \quad (4)$$

$$J = 1 - Q \quad (5)$$

式中, T_o 表示基准年份实际污染天数; T_m 表示基于基准年份构建的 KNN 模型预测的未来年份的污染天数; T_r 表示未来年份实际的污染天数; Q 和 J 表示气象条件与减排对空气质量改善的贡献率, %.

本研究的所有统计分析均使用 R 软件完成,其中 KNN 模型的建立及检验使用 KNN 工具包^[37].

2 结果与讨论

本部分主要介绍 2001 年以来全球厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候的变化特征,京津冀地区、成渝地区、长三角和珠三角城市群历年污染天气变化趋势以及不同气候背景下区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估.

2.1 厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候变化特征统计

本研究依据前述 1.2.1 节中的气候背景判定方法及我国气象行业标准《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别

方法》(QX/T 370-2017)确定自 2001 年以来厄尔尼诺/拉尼娜事件发生年份及其强度,结果如表 3 所示。这里需要指出的是,因定义和判定指标的不同,ENSO 事件的起止年月和持续时间略有差别,但在总体趋势上,表 3 的结果与其他结果基本一致^[11,38]。

表 3 2001 年以来全球厄尔尼诺和拉尼娜事件发生年份及其强度

Table 3 Chronology of El Niño and La Niña phases and their intensity category since 2001		
年份	事件类型	事件强度 ¹⁾
2001	正常	—
2002	厄尔尼诺	2
2003	正常	—
2004	厄尔尼诺	1
2005 ~ 2008	正常	—
2009	厄尔尼诺	2
2010 ~ 2011	拉尼娜	2
2012 ~ 2014	正常	—
2015	厄尔尼诺	3
2016	拉尼娜	1
2017 ~ 2018	正常	—

1) 1 ~ 3 分别代表事件强度, 1 为弱事件, 2 为中等事件, 3 为强/超强事件; “—”表示正常年份的事件强度

2001 ~ 2018 年间,全球气候变化异常频繁,超过三分之一的年份气候异常。其中有 4 个年份发生厄尔尼诺现象, 3 个年份发生拉尼娜现象。自 2009 年以来,厄尔尼诺和拉尼娜几乎交替发生。非正常气候的强度大多数在中等以上,以厄尔尼诺稍强。

2.2 区域历年污染天气变化

图 1 为各区域历年污染天数的变化趋势。污染天气的判定以表 2 中当日空气质量状况为轻度污染及以上为依据。由于 2001 ~ 2012 年之间我国对空气质量状况的判定以 API 为主,而自 2013 年起,改

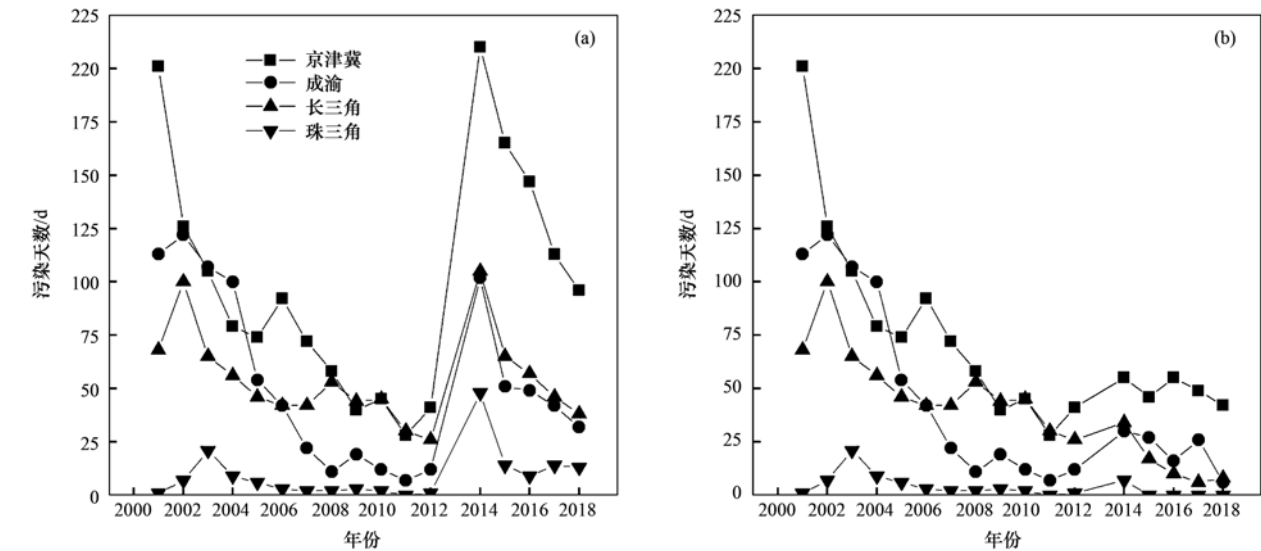
用 AQI,因此,污染天数的累计在 2013 年后与之前有所区别。

整体看来,2001 ~ 2012 年间,各区域每年的污染天数大致呈下降趋势。京津冀地区历年污染天气的数量相对较多,成渝地区和长三角城市群次之,而珠三角城市群相对较少。但个别年份也有所变化。例如,成渝地区 2004 年的污染天数在所有区域中最大,但之后下降速度较快,2007 年后则小于京津冀和长三角地区。此外,各区域均出现个别年份污染天数较前一年有所增加的情况。

如图 1(a)所示,由于自 2014 年起我国环境空气质量标准中用 AQI 代替之前的 API,将 PM_{2.5}、O₃ 和 CO 等污染物纳入新的空气质量评价标准,因此,各区域污染天数的估算较以前有明显区别。2014 年的污染天数较之前有较大跳跃,但这其实并非是空气质量的加剧下降,而更多是评价标准的不同所致。因此自 2014 起,各区域的污染天数再次呈现下降趋势,这应该与区域大气污染联防联控、减排措施的实施以及区域气象条件的变化密切相关。又如图 1(b),当 2001 ~ 2018 年区域污染天气的判定均以 API 为标准时,2014 年后区域污染天数较图 1(a)下降明显。具体来看,2014 年由于环境空气质量标准中各污染物的监测时间和监测站点有所改变,各区域污染天数较 2012 年均有所上升,但自 2014 年起,区域污染天数仍大致呈下降趋势。

2.3 区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估

区域 KNN 模型近邻参数 K 和加权方法的频数分布如图 2 所示。同时,表 4 列出本研究针对京津



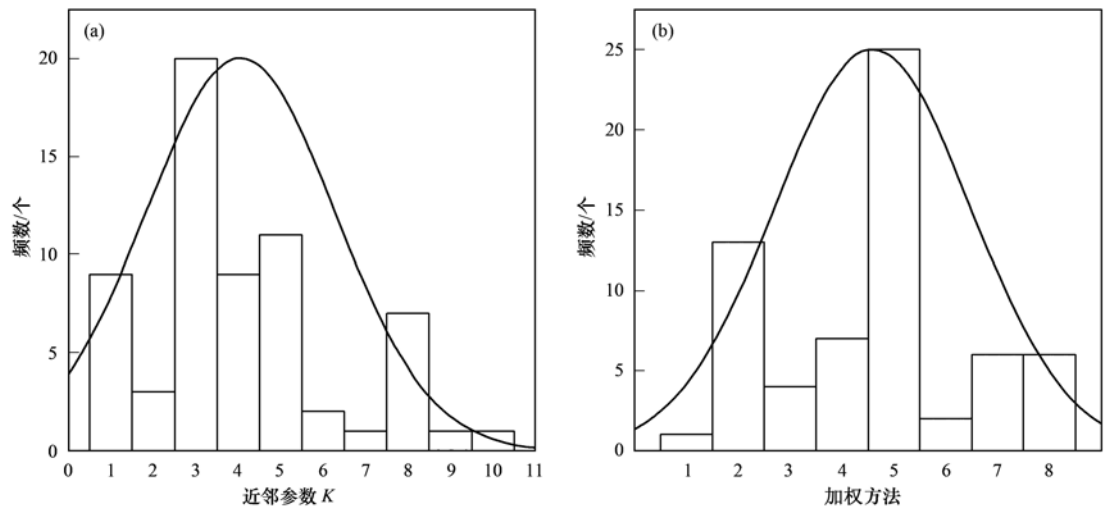
污染天数各数据不包括 2013 年; 对于 2014 ~ 2018 年, (a) 污染天气的判定以当日 AQI 大于 100 为依据, (b) 以 API 大于 100 为准

图 1 各区域历年污染天数变化

Fig. 1 Variation in pollution days in the study regions since 2001

冀、成渝、长三角以及珠三角自 2001 年始逐年构建的 KNN 模型总结,即以 2001 年为基准,预测 2002 年;以 2002 年为基准,预测 2003 年,以此类推至

2017 年. 对于每一个预测年份的气象和减排贡献等要素均按照对应年份的气候条件划分至正常气候年或非正常气候年的类别.



加权方法:1. rank; 2. rectangular; 3. optimal; 4. biweight; 5. triangular; 6. cos; 7. triweight; 8. epanechnikov

图 2 区域 KNN 模型近邻参数 K 和加权方法的频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of parameter K and weighting methods of the developed regional KNN models

表 4 不同气候条件下区域 KNN 模型构建及气象和减排的贡献评估¹⁾

Table 4 Contributions of meteorological conditions change and emissions reduction to air quality improvement by different climate and regions based on the KNN model

地区	气候条件	模型构建		贡献评估			
		留一交叉验证 准确率	模型预测 准确率	实际污染 天数/d	预测污染 天数/d	气象 贡献/%	减排 贡献/%
京津冀	正常	0.86 ± 0.01	0.94 ± 0.03	72.7 ± 31.8	31.5 ± 5.0	30.1 ± 1.6	69.9 ± 1.6
	非正常	0.90 ± 0.01	0.93 ± 0.04	53.7 ± 25.1	52.3 ± 4.2	51.1 ± 3.4	48.9 ± 3.4
成渝	正常	0.96 ± 0.01	0.98 ± 0.01	53.7 ± 23.2	72.0 ± 4.2	38.4 ± 2.6	61.6 ± 2.6
	非正常	0.95 ± 0.01	0.98 ± 0.01	51.4 ± 30.6	43.7 ± 7.0	55.5 ± 4.2	44.5 ± 4.2
长三角	正常	0.92 ± 0.01	0.94 ± 0.03	53.1 ± 13.0	66.4 ± 6.0	40.1 ± 4.2	59.9 ± 4.2
	非正常	0.89 ± 0.01	0.97 ± 0.03	56.7 ± 15.2	65.5 ± 5.9	49.1 ± 3.8	50.9 ± 3.8
珠三角	正常	0.98 ± 0.01	0.97 ± 0.01	11.1 ± 8.6	5.7 ± 2.2	39.2 ± 3.8	60.8 ± 3.8
	非正常	0.96 ± 0.01	0.98 ± 0.01	6.3 ± 3.4	24.3 ± 1.8	51.9 ± 2.8	48.1 ± 2.8

1) 各数据的置信区间是依据不同参数的 KNN 模型结果估算; 由于 2001 ~ 2012 年判定空气质量等级的标准为 API, 而 2013 ~ 2018 年则以 AQI 为准, 2013 年的 AQI 数据不全, 因此表中数据不包括 2013 年; 气候条件依据表 3 进行判别

如图 2 所示,构建 KNN 模型时,参数 K 的选择范围多数居于 3 ~ 5 之间,占比为 62.5%,且 K 为 3 的情况最多;而加权方法以 triangular 和 rectangular 最为常见,占比近 60%。如表 4 所示,当以 2001 ~ 2018 年中任意一年为基准建立 KNN 模型时,留一交叉验证的准确率在 0.86 ~ 0.98 之间,模型预测的准确率在 0.93 ~ 0.98。构建的 KNN 模型满足精度要求,可用于进一步估算区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献。

区域历年气象条件和减排对空气质量改善的贡献在不同气候条件下有所区别。整体看来,厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候条件下,区域气象条件对空气质量改善的贡献要高于正常气候。就京津冀地区而

言,非正常气候时气象条件的贡献约为 51%,而正常气候时约为 30%。对于成渝地区,其气象条件对空气质量改善的贡献高于京津冀地区,且其非正常气候时气象贡献高于正常气候。对于长三角和珠三角城市群,其气象条件在非正常气候时对空气质量改善的贡献达到了 50% 左右,几乎与减排的贡献相当,而正常气候时气象贡献约为 40% 附近,均低于减排贡献。同时,对于不同气候条件下区域历年的实际污染天数,由于 2001 年以来我国实施大气污染物排放控制措施力度不断增大,2001 ~ 2018 年区域实际污染天数的变化范围较大。除长三角外,京津冀、成渝和珠三角地区在非正常气候时的污染天数均较正常气候小。但长三角则没有呈现出显著性

差异.

由于研究可用的数据量相对有限,特别是能对应厄尔尼诺和拉尼娜非正常气候的环境监测数据较少,本研究只根据现有的监测数据,重点研究不同气候条件下区域气象和减排对空气质量改善贡献的内在关联. 未来随着可用数据的增加,将有必要探讨具体的异常气候对空气质量的影响,以更有效地指导并改善空气质量的污染物排放控制工作.

不同气候条件下各区域历年气象条件对空气质量改善贡献的累积概率分布如图 3 所示. 整体看来,非正常气候条件下区域气象条件对空气质量改善的贡献较正常气候条件下高,其 95% 的置信区间为 20%~70%. 这说明厄尔尼诺/拉尼娜非正常气候会导致区域气象条件的变化,而这些气象条件的变化有利于区域大气污染物的扩散和沉降,从而改善当地的空气质量.

空气质量的改善除受气象条件影响之外,理论上讲更多的还是取决于大气污染物排放的减少,减排在长期改善空气质量方面发挥主导作用. 例如图 4 所示,2001~2018 年间,全国各主要城市和区域的二氧化硫和氮氧化物排放基本呈下降趋势,特别是氮氧化物的排放逐年减少,而二氧化硫排放量呈现先增加后降低的趋势,其在 2005 年达到最大. 由于电厂的脱硫,SO₂ 排放量在 2006 年之后有所下降^[39]. 其后除河北在 2011 年有突然跳跃之外,其他地区均逐年下降,这与更为严格的控制措施有关. 特别是 2015 年后,各地区的污染物排放量下降速率急剧增大. 就各省份的排放而言,河北省历年污染

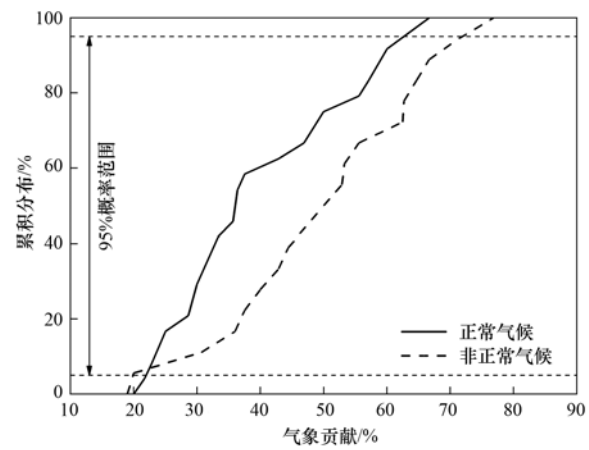
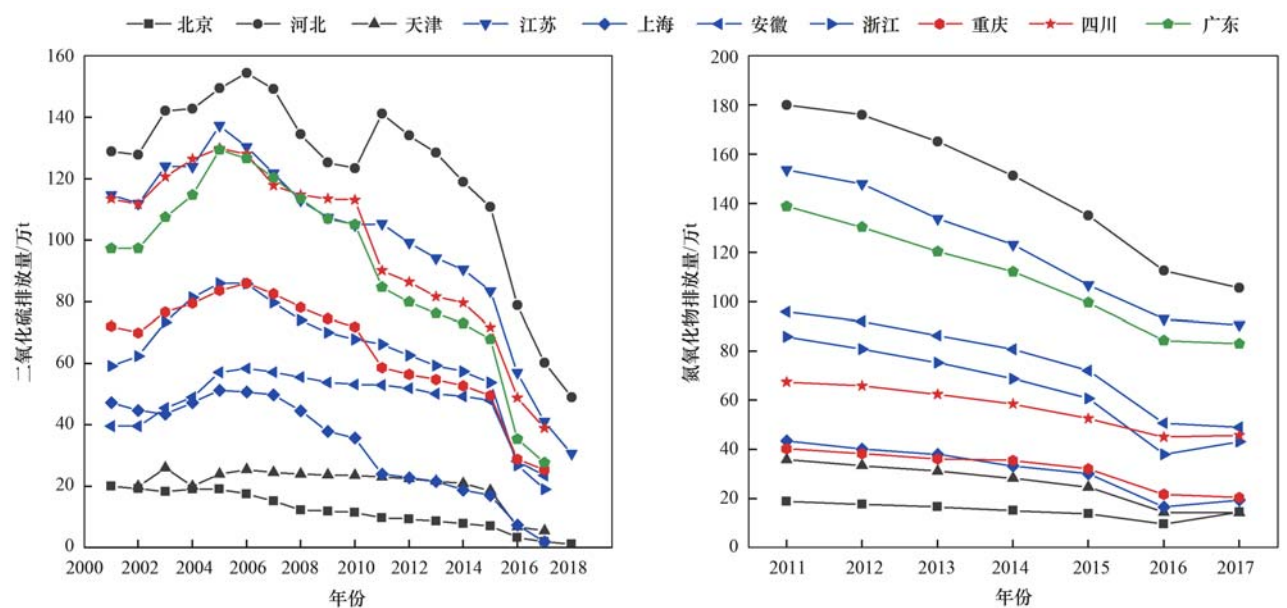


图 3 不同气候条件下区域历年气象贡献的累积频率分布
Fig. 3 Cumulative distribution functions for the contributions of meteorological condition changes by different climate from 2001 to 2018

物排放量最大,江苏省次之. 2011 年起四川省的二氧化硫排放量下降且低于江苏省,安徽省历年二氧化硫排放水平最低,而广东的氮氧化物排放量则高于浙江和四川. 就直辖市而言,重庆市历年二氧化硫排放水平较高,上海次之,其次是天津和北京;上海和重庆的氮氧化物排放量也要高于天津和北京. 一般而言,空气质量变差的年份其当年污染物排放量通常也较高. 例如,结合前文图 1 所示,2006 年京津冀地区的污染天数较 2005 年明显增多,而 2006 年京津冀地区的二氧化硫排放量也达到历史最高. 当然,区域空气污染发生与否并非只受人为排放影响,同时也与区域气象条件密切相关. 这也是气象条件对空气质量改善的贡献不容忽视,亟待



二氧化硫和氮氧化物的排放数据均来自文献[40]
图 4 各地区历年二氧化硫和氮氧化物排放趋势

Fig. 4 Annual sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions of different regions in China from 2001 to 2018

分析以用于指导空气质量改善政策制定的重要原因。

就区域气象条件的变化情况而言,降水量和风速是影响区域空气质量的主要气象因素,降水有助

于污染物的冲洗和沉降,而近地面风速则直接影响大气污染物的扩散. 在 2001 ~ 2018 年间,不同气候条件下区域历年极端降水和大风天数对比情况见表 5.

表 5 不同气候条件下区域历年极端天气对比

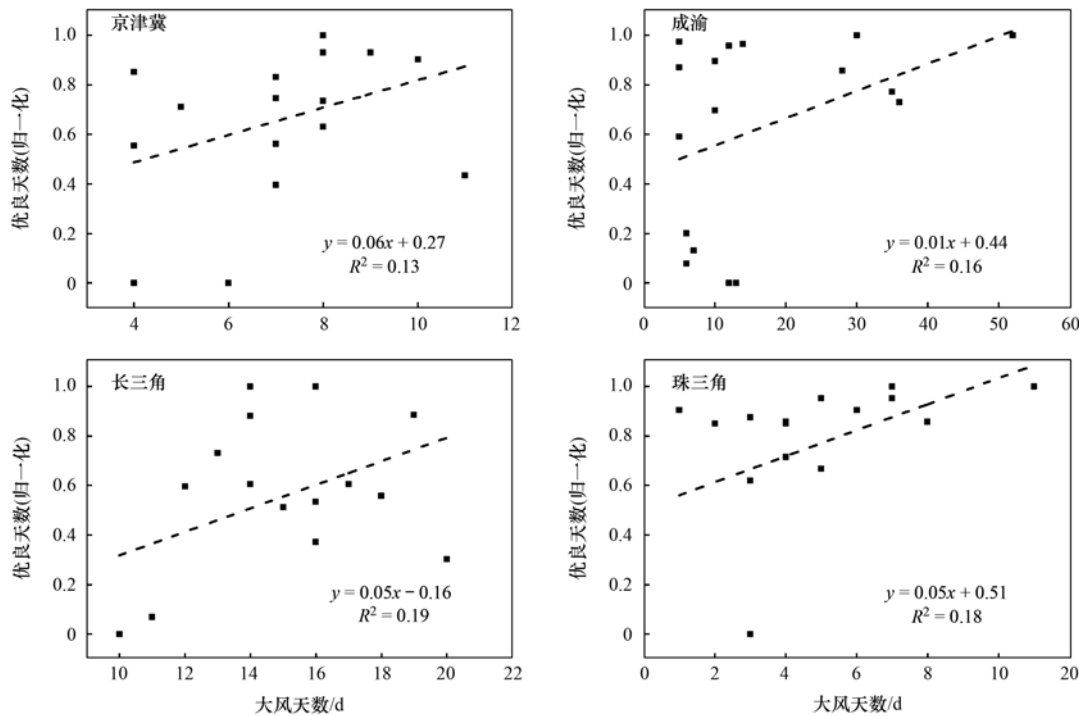
Table 5 Comparison of regional extreme weather conditions by different climates

气候条件	区域	中雨天数 /d	大雨天数 /d	大风天数 /d	年最高降水量 /mm	日均最大风速 /m·s ⁻¹
正常气候	京津冀	14.5 ± 1.4	3.8 ± 0.6	6.5 ± 1.1	621.6	5.3
	成渝	29.0 ± 3.3	7.5 ± 2.0	14.4 ± 8.8	1 239.6	3.1
	长三角	38.8 ± 3.5	10.8 ± 1.3	13.7 ± 1.5	1 462.4	6.1
	珠三角	57.1 ± 4.6	29.3 ± 2.7	4.1 ± 1.1	2 502.5	8.4
非正常气候	京津冀	14.7 ± 1.8	3.9 ± 0.8	8.0 ± 1.4	648.4	5.9
	成渝	33.4 ± 1.9	8.9 ± 1.5	20.3 ± 8.8	1 262.6	3.3
	长三角	46.6 ± 5.7	13.0 ± 1.6	17.0 ± 2.4	1 497.0	6.9
	珠三角	59.7 ± 5.8	28.3 ± 4.1	6.0 ± 2.1	2 553.3	8.7

如表 5 所示,整体看来,在 4 个区域中珠三角城市群历年的极端降水天数最多,但其大风天数则较少;长三角城市群的极端降水天数次之,但其大风天数较多;成渝地区较长三角地区极端降水天数有所减少,但其大风天数也较多;对于京津冀地区,其历年极端降水天数最少,大风天数略高于珠三角城市群.

同时,不同气候条件下各区域的极端天气天数

分布也有所区别. 由于区域极端天气的发生受气候变化等多种条件的影响,存在一定的不确定性,但是其在不同气候条件下的分布仍然存在一定的变化趋势. 例如,对于京津冀、成渝和长三角地区,非正常气候时区域极端降水和大风天数有所上升;珠三角地区非正常气候时的中雨天数和大风天数其均值也较正常气候多. 此外,除了考虑不同气候背景下极端天气天数的年均值差异外,也须考虑降水量和风



由于 2001 ~ 2012 年判定空气质量优良的标准为 API,而 2013 ~ 2018 年则为 AQI, 2013 年的 AQI 数据不全,故空气质量优良天数各数据利用最值归一化方法进行处理[归一化公式为 $D' = (D - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min})$,式中, D 为空气质量优良天数, $D_{\min}$ 为历年空气质量优良天数最小值, $D_{\max}$ 为历年空气质量优良天数最大值, D' 的范围为 0 ~ 1],数据不包括 2013 年

图 5 区域年际空气质量优良天数与大风天数的关系

Fig. 5 Correlations between regional inter-annual days of good air quality days and windy days

速变化范围的不同. 研究时段内区域在非正常气候条件下的年最高降水量和日均最大风速均高于正常气候, 即非正常气候时的降水量和风速变化范围较大.

总的来说, 非正常气候会导致区域极端降水和大风天数增多, 且气象要素的变化范围较大, 有利于加强空气扰动和对污染物的扩散. 例如, 如图 5 所示, 极端天气的变化与区域空气质量状况密切相关. 整体看来, 区域空气质量优良天数随大风天数的增多而上升. 不同区域的空气质量优良天数均与大风天数存在不同显著水平的相关性.

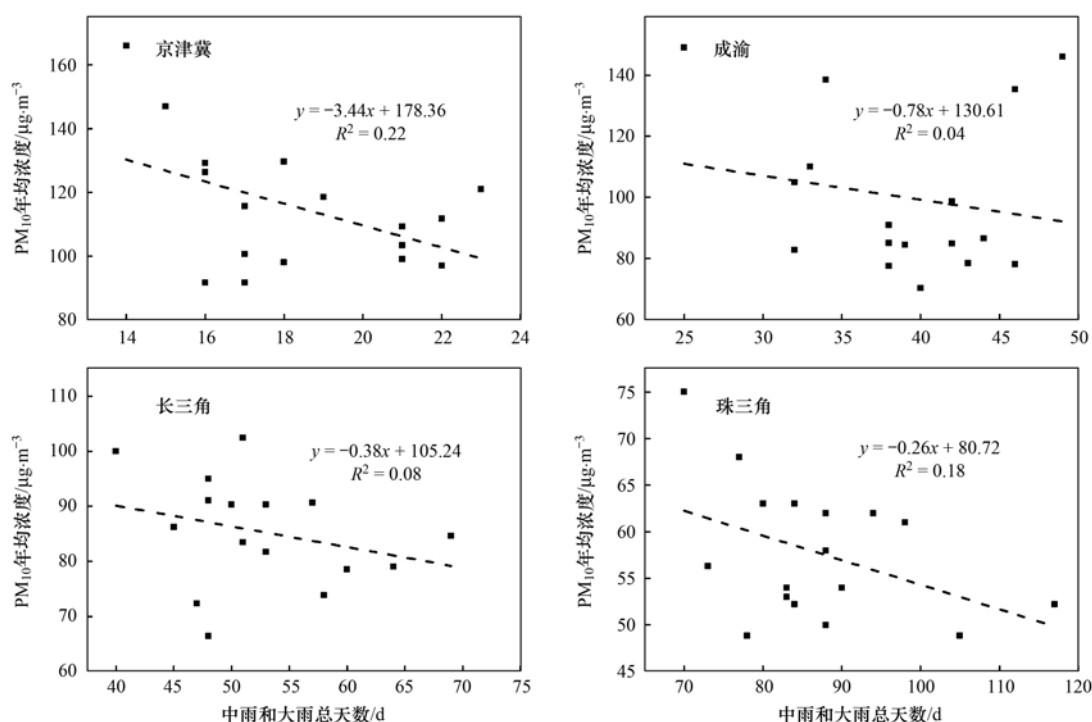


图 6 区域年际 PM_{10} 平均浓度与极端降水天数的关系

Fig. 6 Correlations between average annual concentration of PM_{10} and extreme precipitation days

3 结论

(1) 建立的 KNN 模型在空气污染类型分类预报中的准确率均在 80% 以上, 能够较好地匹配基准年份的气象和排放背景, 可用于评估区域历年气象条件和减排对空气质量改善的贡献.

(2) 在 2001 ~ 2012 年间, 京津冀、成渝和长三角地区虽然有个别年份污染天数较前一年有所增加, 但整体均呈现下降趋势; 2014 ~ 2018 年间各地区的污染天数下降趋势明显, 这与区域大气污染联防联控、减排措施的实施以及区域气象条件的变化密切相关.

(3) 不同气候条件下区域历年气象条件和减排对空气质量改善的贡献有所差异. 其中, 气象贡献的变化范围为 30% ~ 55%, 减排贡献则为 45% ~

图 6 则展示了区域年际 PM_{10} 平均浓度与极端降水天数的关系. 整体看来, 区域年际 PM_{10} 平均浓度与极端降水天数呈负相关关系, 即区域 PM_{10} 的年均浓度随极端降水天数的增多而降低, 极端降水可以促进大气颗粒物的去除. 同时, 不同区域的 PM_{10} 年均浓度与极端降水天数存在不同显著水平的相关性. 虽然个别年份的数据影响了空气质量与天气状态之间的线性关系, 但总的来说, 区域极端降水和降水天数的增多均有利于空气质量的改善. 这也是为何非正常气候时区域气象条件对空气质量改善的贡献较正常气候时高的主要原因.

70%. 区域历年气象条件的贡献在非正常气候时通常较正常气候时高. 这主要是因为非正常气候会造成区域极端降水和降水天数增多, 且气象要素的变化范围增大, 有利于大气污染物的去除与扩散.

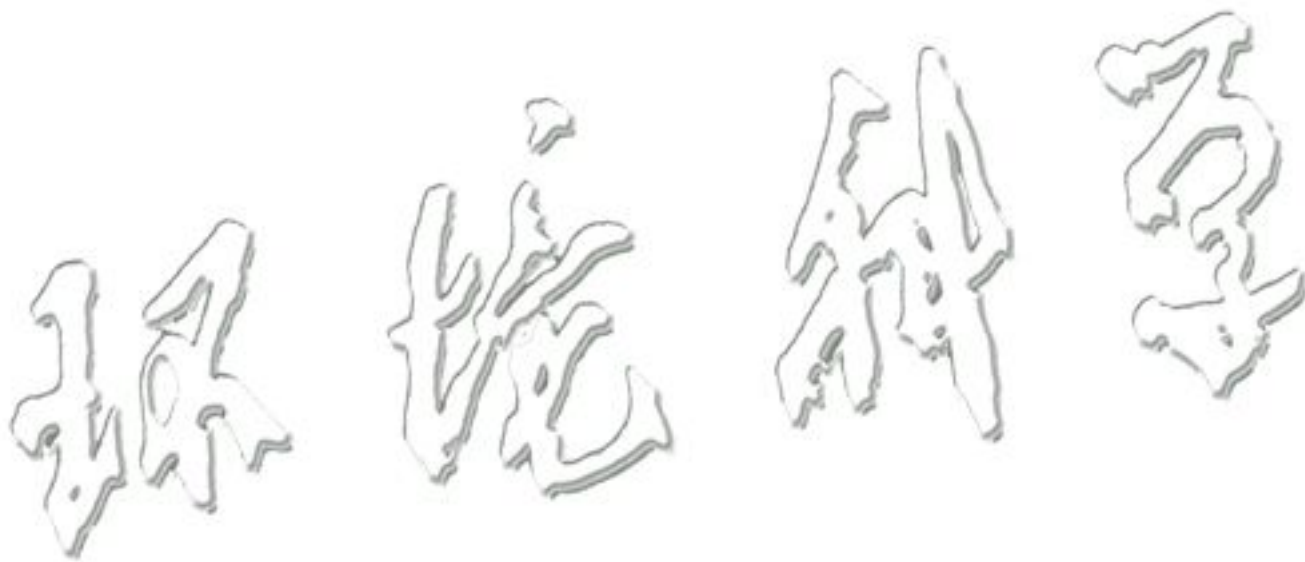
(4) 不同气候条件下区域历年气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估结果表明, 随着我国实施大气污染物排放控制措施力度的增大, 减排对空气质量改善的贡献显著. 但气象条件对空气质量改善的贡献仍不容忽视, 区域减排控制仍然任重道远.

参考文献:

- [1] 生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2020.
- [2] Wang X H, Zhong S Y, Bian X D, et al. Impact of 2015-2016 El Niño and 2017-2018 La Niña on $PM_{2.5}$ concentrations across China[J]. Atmospheric Environment, 2019, 208: 61-73.

- [3] 生态环境部. 京津冀及周边地区再现重污染 五位专家集中解答污染成因 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202002/t20200211_762584.html, 2020-02-11.
- [4] Cheng X G, Zhao T L, Gong S L, *et al.* Implications of East Asian summer and winter monsoons for interannual aerosol variations over central-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **129**: 218-228.
- [5] Gu Y, Shi X M, Sun J L. Possible influence of Arctic Oscillation on winter visibility over Eastern China[J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2017, **5**(8): 56-62.
- [6] 寇雄伟, 李昀英, 方乐铎, 等. 东亚夏季风活动与不同类型云的相关性研究[J]. *大气科学*, 2016, **40**(3): 463-475.
- Kou X W, Li Y Y, Fang L X, *et al.* Relationships between east Asian summer monsoon activities and cloud types[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, **40**(3): 463-475.
- [7] 方建刚, 肖科丽, 王娜, 等. 初夏东亚季风强度指数与陕西降水异常关系[J]. *干旱区地理*, 2014, **37**(1): 1-8.
- Fang J G, Xiao K L, Wang N, *et al.* East-Asian summer monsoon intensity indexes in early summer and their anomalous relationship with precipitation in Shaanxi province [J]. *Arid Land Geography*, 2014, **37**(1): 1-8.
- [8] Kim J W, An S I, Jun S Y, *et al.* ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone[J]. *Climate Dynamics*, 2017, **49**(4): 1157-1179.
- [9] Zhao S Y, Zhang H, Xie B. The effects of El Niño-Southern Oscillation on the winter haze pollution of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(3): 1863-1877.
- [10] Sun J R, Li H Y, Zhang W J, *et al.* Modulation of the ENSO on winter aerosol pollution in the eastern region of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(21): 11952-11969.
- [11] 陈虹颖, 徐峰, 李晓惠, 等. 近 65 年 ENSO 事件强度变化及时频特征研究[J]. *热带气象学报*, 2017, **33**(5): 683-694.
- Chen H Y, Xu F, Li X H, *et al.* Intensities and time-frequency variability of ENSO in the last 65 years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, **33**(5): 683-694.
- [12] Zhang W J, Wang H, Zhang X Y, *et al.* Evaluating the contributions of changed meteorological conditions and emission to substantial reductions of PM_{2.5} concentration from winter 2016 to 2017 in Central and Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136892.
- [13] Zhang Y M, Wang J Z, Yang Y Q, *et al.* Contribution distinguish between emission reduction and meteorological conditions to "Blue Sky" [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **190**: 209-217.
- [14] Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Spatiotemporal variation in the impact of meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in China from 2000 to 2017[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117215.
- [15] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发成渝经济区区域规划的通知 [EB/OL]. 发改地区 [2011] 1124 号. http://www.gov.cn/zwgk/2011-06/02/content_1875769.htm, 2011-06-02.
- [16] 国务院. 国务院关于长江三角洲城市群发展规划的批复 [EB/OL]. 国函 [2016] 87 号. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/25/content_5076639.htm, 2016-05-25.
- [17] 王长源. 长三角城市群环境效率测度及影响因素分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [18] 国务院新闻办公室. 珠江三角洲地区改革发展规划纲要 (2008-2020 年) [EB/OL]. http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/2014/20140610/xgzc31037/Document/1372733/1372733_1.htm, 2011-06-07.
- [19] 魏君平, 赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对陕北地区近 57a 气候的影响[J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(5): 210-214.
- Wei J P, Zhao J B. Climate impacts of El Niño/La Niña events on northern Shaanxi province in the last 57 years[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(5): 210-214.
- [20] 冯利华. 中国登陆热带气旋与太平洋海面温度的关系[J]. *地理学报*, 2003, **58**(2): 209-214.
- Feng L H. Relationship between tropical cyclones landing in China and sea surface temperature in the Pacific [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(2): 209-214.
- [21] GB/T 33666-2017 厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法[S].
- [22] Hanley D E, Bourassa M A, O'Brien J J, *et al.* A quantitative evaluation of ENSO indices [J]. *Journal of Climate*, 2003, **16**(8): 1249-1258.
- [23] Adhani G, Buono A, Faqih A. Support vector regression modelling for rainfall prediction in dry season based on Southern Oscillation Index and NINO3.4 [A]. In: *Proceedings of 2013 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems* [C]. Bali: IEEE, 2013. 315-320.
- [24] 李晓燕, 翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J]. *气象学报*, 2000, **58**(1): 102-109.
- Li X Y, Zhai P M. On indices and indicators of ENSO episodes [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, **58**(1): 102-109.
- [25] 曹璐, 孙丞虎, 任福民, 等. 一种综合监测两类不同分布类型 ENSO 事件指标的研究[J]. *热带气象学报*, 2013, **29**(1): 66-74.
- Cao L, Sun C H, Ren F M, *et al.* Study of a comprehensive monitoring index for two types of ENSO events [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013, **29**(1): 66-74.
- [26] GB 3095-2012 环境空气质量标准[S].
- [27] 张轶男, 向运荣, 张毅强, 等. 我国与国际空气污染指数系统的比较[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(8): 1604-1610.
- Zhang Y N, Xiang Y R, Zhang Y Q, *et al.* A comparison of the mainland Chinese and international Air Pollution Index system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(8): 1604-1610.
- [28] 赵国永, 韩艳, 刘明华, 等. 1961-2013 年河南省极端降水事件时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2018, **25**(6): 115-120.
- Zhao G Y, Han Y, Liu M H, *et al.* Spatial-temporal variation of extreme precipitation events in Henan province from 1961 to 2013 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(6): 115-120.
- [29] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. *气候与环境研究*, 2010, **15**(4): 337-353.
- Ren G Y, Feng G L, Yan Z W. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in Mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, **15**(4): 337-353.
- [30] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. *中国工程科学*, 2012, **14**(9): 55-63, 84.
- Zhai P M, Liu J. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background [J]. *Engineering Science*, 2012, **14**(9): 55-63, 84.
- [31] 朱亚迪. 大数据驱动的城市轨道交通需求时空分布分析及预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [32] 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.
- [33] Góra G, Wojna A. RIONA: a classifier combining rule induction and k-NN method with automated selection of optimal neighbourhood [A]. In: *Proceedings of the 13th European Conference on Machine Learning* [C]. Helsinki, Finland: Springer, 2002. 111-123.
- [34] 何玉林. 基于核密度估计的光谱数据分类与回归方法研究 [D]. 保定: 河北大学, 2014.
- [35] 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, *et al.* Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- [36] 杨稳, 刘晓宁, 朱菲. 基于支持向量机的颅骨性别识别 [J]. *计算机技术与发展*, 2019, **29**(2): 43-47.
- Yang W, Liu X N, Zhu F. Sex determination of skull based on support vector machine [J]. *Computer Technology and Development*, 2019, **29**(2): 43-47.
- [37] Samworth R J. Optimal weighted nearest neighbour classifiers [J]. *Annals of Statistics*, 2012, **40**(5): 2733-2763.
- [38] 王文秀, 林燕丹, 许桂旋, 等. 1951~2016 年厄尔尼诺/拉尼娜事件对登陆华南地区台风的影响 [J]. *亚热带水土保持*, 2018, **30**(2): 13-19.
- Wang W X, Lin Y D, Xu G X, *et al.* Impact of El Niño or La Niña on the typhoon landed in South China from 1951 to 2016 [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2018, **30**(2): 13-19.
- [39] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [40] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴 2001-2018 [M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2001-2018.



CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)