

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间歇期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙晨翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

2000 ~ 2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析

蔡子颖^{1,2}, 郝国³, 韩素芹^{1,2}, 唐颖潇^{1,2}, 杨旭^{1,2}, 樊文雁^{1,2}, 姚青^{1,2}, 邱晓滨³

(1. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 2. 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074; 3. 天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘要: 基于中国大气成分实时追踪数据集、天津气象局和生态环境局长序列 PM_{2.5} 质量浓度和气象观测, 结合 MEIC 排放清单和环境模式构建的细颗粒气象条件扩散指数, 研究 2000 ~ 2020 年天津地区 PM_{2.5} 质量浓度演变规律及驱动因子, 以期更科学地分析气象对大气环境影响, 为“十四五”期间深度环境治理提供支撑. 结果表明, 2000 ~ 2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度呈现 3 个阶段变化, 第一阶段 2000 ~ 2007 年, 呈现持续地上升, 其变化速率为 $4.58 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, 该阶段排放量的快速增加是主导因素, 其作用是气象条件年际波动影响的 4 倍, 排放量增加使得 PM_{2.5} 质量浓度增加 45.3%; 第二阶段为 2007 ~ 2013 年, 该阶段 PM_{2.5} 质量浓度呈现波动变化, 出现了两个浓度峰值年(2007 年和 2013 年), 该阶段排放稳定, 气象条件年际波动对 PM_{2.5} 质量浓度年际波动产生重要影响, 两者相关系数 0.81; 第三阶段为 2013 ~ 2020 年, PM_{2.5} 质量浓度呈现快速地下降, 其变化速率为 $-6.9 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, 排放量的下降作用是决定性的, 使得 PM_{2.5} 下降了 43.9%, 气象扩散条件转好也提供正贡献, 约使得 PM_{2.5} 下降 8.7%. 从近 20 年数据分析, 气象条件年际变化导致的大气扩散条件年际变化 2003 ~ 2004 年和 2013 ~ 2015 年为谷值, 2008 ~ 2010 年和 2018 ~ 2020 年为峰值, 峰峰相距和谷谷相距是 11 a 左右; 气象条件年际变化导致的大气扩散条件年际波动平均强度是 4%, 可解释近 20 年 PM_{2.5} 质量浓度年际变化的 25% ~ 50%, 峰谷相差 16%, 气象扩散条件年际波动对未来 PM_{2.5} 目标制定和应对措施设计有重要影响.

关键词: 细颗粒物; 大气扩散条件; 环境模式; 驱动因子; 天津

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1129-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108182

Analysis of Change and Driving Factors of PM_{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020

CAI Zi-ying^{1,2}, HAO Jian³, HAN Su-qin^{1,2}, TANG Ying-xiao^{1,2}, YANG Xu^{1,2}, FAN Wen-yan^{1,2}, YAO Qing^{1,2}, QIU Xiao-bin³

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

Abstract: Based on real-time tracking data, PM_{2.5} mass concentration, and meteorological observations of the Tianjin Meteorological Bureau and the Ecological Environment Bureau, combined with the fine particle meteorological condition diffusion index constructed using the environmental model, the change and driving factors of the PM_{2.5} mass concentration in Tianjin from 2000 to 2020 were studied to analyze the impact of meteorology on the atmospheric environment. The study showed that change in PM_{2.5} mass concentration in Tianjin took place in three stages from 2000 to 2020; the first stage showed a continuous increase from 2000 to 2007. The rapid increase in emissions in this stage was the dominant factor, and its effect was four times that of the annual fluctuation in meteorological conditions. The second stage was from 2007 to 2013, in which the PM_{2.5} mass concentration fluctuated, with two peak years (2007 and 2013). The emissions were stable in this stage. The annual fluctuation of meteorological conditions had an important influence on the annual fluctuation in PM_{2.5} mass concentration. The third stage was from 2013 to 2020; the PM_{2.5} mass concentration decreased rapidly, and the decline in emissions was decisive, which reduced the PM_{2.5} mass concentration by 40% to 50%. The improvement in the meteorological diffusion conditions also provided a positive contribution, which reduced the PM_{2.5} mass concentration by approximately 10%. Based on the analysis of the data over the past 20 years, the annual variation in atmospheric diffusion conditions caused by the annual variation in meteorological conditions was periodic, with trough values from 2003 to 2004 and 2013 to 2015 and peaks from 2008 to 2010 and 2018 to 2020; the distance between peaks and valleys was approximately 11 years. It was estimated that the next atmospheric diffusion condition valley stage will occur circa 2025. The average intensity of the annual fluctuation in atmospheric diffusion conditions caused by the annual variation in meteorological conditions was 4%, which can explain 25%-50% of the annual variation in PM_{2.5} mass concentration over the past 20 years, with a difference between peaks and valleys of 16%. The periodic fluctuations in meteorological diffusion conditions have an important impact on the future PM_{2.5} target setting and corresponding measures design.

Key words: fine particles; atmospheric diffusion condition; environmental model; driving factor; Tianjin

细颗粒物是指悬浮在大气中空气动力学等效直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 其具有较长的大气滞留时间特征, 所以对环境质量、大气能见度^[1,2]、人体健康^[3,4] 和气候变化均有重要的影响. 欧美发达地区 PM_{2.5} 治理已近半个世纪, 中国对 PM_{2.5} 的研究始于 20 世纪 90 年代^[5], 2012 年 2 月修订并发布了《环境空气质量标准》(GB 3095-2012), 新增了 PM_{2.5} 浓度的环境空气质量标准. 2013 年 9 月国

院发布《大气污染防治行动计划》, 提出了到 2017 年, 全国地级及以上城市可吸入颗粒物浓度比 2012

收稿日期: 2021-08-17; 修订日期: 2021-08-27

基金项目: 天津市自然科学基金项目(19JCQNJC08000); 国家自然科学基金项目(41771242); 天津市重大专项(18ZXJQSF00130, 18ZXSZSF00160); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z034); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-007)

作者简介: 蔡子颖(1984~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境气象预报和评估, E-mail: 120078030@163.com

年下降 10% 以上的目标^[6,7]. 在 2013 ~ 2017 年治理的基础上, 2018 ~ 2020 年开展《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度降至 $33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 大气环境持续改善, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度持续下降, 与深入科学研究密不可分. 2017 年由环境保护部牵头, 多部委和高校协同组织开展了大气重污染成因与治理攻关项目, 有力支撑了“大气污染防治行动计划”和“打赢蓝天保卫战三年行动计划”^[8]. 由于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的形成、累积与天气条件密切相关, 其问题解决离不开气象影响的分析. 不同天气条件可通过影响通风率、降水沉降、干沉积、化学转化损失率、自然排放量和背景浓度等影响大气气溶胶浓度, 张小曳^[9]的研究在评估分析全国 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降时指出, 相比 2013 年, 2016 年和 2017 年仅因气象条件有利会导致 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在京津冀地区下降 9% 和 5%, 在长三角地区下降 2% 和 7%; Mu 等^[10]的研究显示 2013 年雾、霾天气逐日演变的方差有超过 2/3 可由气象因子解释; 众多 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程, 均可很好地从气象上进行解析. 如混合层高度降低^[11]、风场辐合^[12]、相对湿度增加^[13]和静稳天气^[14]影响等. $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题排放量大是内因, 气象条件是外因, 其规律决定了大气污染防治工作需要厘清气象条件影响.

为厘清气象条件对大气环境影响, 气象部门开展了大气污染气象条件评估工作. 从内容上包括科学解析气象条件对空气质量影响和减排效果评估, 基于气象的重污染成因分析、大气环境容量评估和污染来源分析. 其中月季年气象条件对空气质量影响和减排效果评估, 技术上大致可分 4 类: 一是基于环流和天气形势的分析方法, 比如经纬向环流指数的分析^[15-20], 各种气候指数与大气污染扩散的关系, 如东太平洋副高脊线, 东太平洋副高北界, 北半球极涡中心强度, 亚洲经向环流指数和北半球极涡强度指数等指标与天津冬季大气扩散能力密切相关^[20], 一些大气遥相关的指数也被用于评估和指示秋冬季大气污染气象扩散条件, 如北大西洋副热带区和西北太平洋地区的海温, 斯堪的纳维亚-中西伯利亚-西太平洋 (SCSWP) 指数; 二是基于单气象要素统计, 如月年水平风速^[21]、小风频率、相对湿度、逆温^[22]、混合层厚度和降水量的变化; 三是通过综合多种气象要素实现大气污染气象条件评估, 比较成功的例子有中国气象科学研究所的 PLAM 指数^[23]和国家气象中心静稳指数^[24], 国家气候中心的大气自净能力^[25], 大气环境容量^[26]的统计也可以归到这一类. 其核心思路就是通过多气象要素的加权, 或者公式计算, 综合表征大气污染气象条件;

四是数值模式模拟解析大气污染气象条件, 典型的方式为固定排放源, 使用不同气象条件进行大气化学模拟, 然后开展同比环比的研究, 以确定大气污染气象条件的变化, 中国气象科学研究所的 EMI 指数是其中典型代表^[27].

目前大气污染气象条件评估工作技术发展的趋势是由定性向定量、精细化和系统化发展. 数值模式在其中发挥了越来越重要的作用^[28-31]. 天津以大气化学模式 WRF/Chem 为核心, 通过在模式和排放源中增加相应的控制符, 引入标记法源追踪技术^[32]和过程分析技术^[33], 增加中间输出和诊断产品, 建立天津地区大气环境气象条件评估模型, 实现气象条件对空气质量影响、区域输送^[34]、成因解析^[35,36]和大气环境容量的定量评估. 技术上由定性向定量发展同时, 气象条件对空气质量影响分析, 从短期研究^[37-39]向长期延伸. 长序列研究可更好掌握气象周期和气候变化对空气质量影响, 为科学制定大气污染防治目标、开展工作和效果评估提供有力支撑. 本文基于中国大气成分实时追踪数据集、天津气象局和生态环境局长序列 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和气象观测, 将研究序列由 2013 ~ 2020 年延伸至 2000 ~ 2020 年, 并在天河超算中心海量计算资源支撑下, 基于环境模式构建量化的 2000 ~ 2020 年细颗粒气象条件扩散指数, 并结合气象观测数据, 通过更长序列研究分析 2000 ~ 2020 年天津地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量演变规律及驱动因子, 从气象周期和天津排放量变化合理解析 2000 ~ 2020 年天津地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量演变, 并掌握其中规律, 以期为更科学分析气象对大气环境影响, 并为“十四五”期间天津大气环境深度治理提供支撑.

1 材料与方法

1.1 空气质量数据

本文空气质量监测分为三部分, 一是生态环境部门 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据, 数据时序为 2013 ~ 2020 年, 来自天津市生态环境监测中心发布的天津逐小时监测数据, 观测方法振荡天平 (有加热补偿); 二是气象部门 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据, 数据时序为 2009 ~ 2014 年, 来自城市边界层观测站 $\text{PM}_{2.5}$ 质量监测, 观测方法振荡天平 (无加热补偿), 并通过 2013 ~ 2014 年数据与生态环境部门比对 (两者相关系数为 0.91, 有加热补偿 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度观测是无加热补偿 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度观测的 128%), 对序列数据进行整体订正, 保持与生态环境部门 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测 (2013 ~ 2020 年) 数据序列一致; 三是 2000 ~ 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度反演数据, 来自中国大气成

分实时追踪数据集 (tracking air pollution in China, TAP)^[40-42], 由清华大学联合北京大学、南京大学、复旦大学和中国气象科学研究院等多家单位开发并维护, 该数据集由 TAP 团队基于机器学习算法和多源数据资料, 构建了综合地面观测数据、卫星遥感信息、高分辨率排放清单、空气质量模型模拟等多源信息的多源数据融合体系, 提高了大气气溶胶成分反演结果的时空精度. 在这一技术体系支撑下, TAP 团队开发了大气成分近实时追踪数据集 (TAP), 提供每日完整覆盖的大气成分浓度产品, 并进一步集成云计算和大数据技术, 实现了数据产品的实时动态计算和在线定制化下载. 目前 TAP 数据集已上线 2000 年至今的中国大气细颗粒物浓度数据和 2013~2020 年的中国近地面臭氧浓度数据.

1.2 气象数据

为辨识 2000~2020 年气象条件对天津 PM_{2.5} 质量浓度演变趋势影响, 使用气象数据分为两部分. 一是常规气象观测数据, 来自天津市气象局, 包括风、温、湿度、气压和降水等; 二是基于天津环境气象模式构建的基准排放源 (MEIC2015) 细颗粒物气象扩散指数. 具体为采用大气化学模式, 假定年际排放源固定 (有月变化和日间变化), 模拟天津地区 PM_{2.5} 质量浓度, 由于年际排放源固定, 可认为其模拟的 PM_{2.5} 质量浓度年际波动主要由气象条件引起, 表征天津地区细颗粒物气象扩散能力变化趋势, 方法验证参考文献^[20]. 在具体模式设置方面, 采用 WRF/chem3.5.1 版本^[43], 该模式是 NCAR 和 NOAA 联合一些大学和研发机构开发的中尺度在线大气化学模式, 模式考虑大气污染的化学过程, 平流输送, 湍流扩散、干湿沉降过程, 在全球空气质量预报和模拟中有广泛地运用. 气相化学过程采用 CBMZ 机制, 气溶胶过程采用 MOSAIC 模型, 主要物理过程设置如下: 积云对流方案采用 GRELL-3D, 微物理过程采用 WSM5, 长波辐射方案和短波辐射方案均采用 RRTMG, 考虑气溶胶直接辐射反馈, 边界层方案使用 YSU 方案, 模式水平分辨率 15 km, 水平网格 121×121, 中心经纬度为 39°N, 117°E, 垂直方向分为 41 层. 模式的人为排放源使用清华大学 MEIC 排放源清单 (MEIC2015), 分辨率 0.25°×0.25°, 在天津地区使用 28 个空气质量监测站实况数据和相关排放源统计信息进行时空的细化, 气象初始场和背景场均使用 NECP 的 FNL 全球 1°×1° 数据, 模拟时间为 2000 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日, 模拟采用 24 h 滚动计算, 每 24 h 重新使用一次 NECP 的 FNL 气象初始场, 污染初始场则为上一轮的模拟值.

1.3 排放清单数据

排放源清单数据为 MEIC1.3 版本 (<http://meicmodel.org>)^[44], 包括 2008、2010、2011、2012、2013、2014、2015、2016 和 2017 版本, 2019 年和 2020 年排放源清单为 MEIC 团队最新发布成果, 2018 年排放清单为天津源普查数据, 来自天津市生态环境局. 排放源清单为逐月工业、农业、交通、生活和电力行业 BC、OC、SO₂、NO_x、CO、PM_{2.5}、PM₁₀、NH₃ 和 VOC 排放量, 分辨率 0.25°×0.25°.

2 结果与讨论

2.1 天津 2000~2020 年 PM_{2.5} 质量浓度变化特征

图 1 显示 TAP 数据集天津地区 PM_{2.5} 质量浓度与观测有较好的一致性, 2009~2020 年两者相关系数为 0.99, 2017~2020 年年值基本相等, 2009~2016 年 TAP 略偏高 7.5%, 对其进行一致性处理 (2000~2016 年 TAP 数据集 PM_{2.5} 质量浓度乘以 0.93), 命名为 TAP 调整数据. 图 2 显示天津 2000~2020 年 PM_{2.5} 变化趋势整体表现为三阶段特征. 第一阶段为 2000~2007 年, PM_{2.5} 质量浓度呈现持续上升, 其变化速率为 4.58 μg·(m³·a)⁻¹; 第二阶段为 2007~2013 年, PM_{2.5} 质量浓度呈现波动变化, 出现两个峰值年, 分别为 2007 年和 2013 年, ρ(PM_{2.5}) 为 103 μg·m⁻³ 和 96 μg·m⁻³; 2011 年为谷值年份, ρ(PM_{2.5}) 为 85 μg·m⁻³; 第三阶段为 2013~2020 年, PM_{2.5} 质量浓度呈现快速地下降, 其变化速率可以达到 -6.9 μg·(m³·a)⁻¹, 且从 2015 年以后, 天津 ρ(PM_{2.5}) 开始小于近 20 年均值 (81 μg·m⁻³). 从年际变化趋势分析, 天津和河北 PM_{2.5} 质量浓度演变具有一致性, 呈现同样的三阶段变化特征, 北京第二阶段波动性变化特征不明显, 2008 年相比 2007 有明

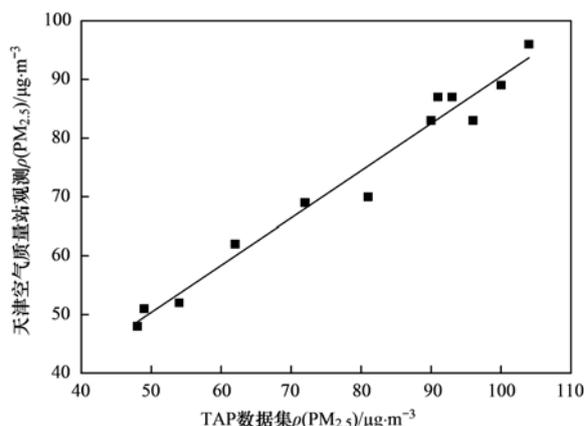


图 1 TAP 数据天津 PM_{2.5} 质量浓度与天津空气质量站 PM_{2.5} 质量浓度对比

Fig. 1 Comparison of observation and TAP data in Tianjin regarding PM_{2.5} mass concentration

显下降,其后 2008 ~ 2013 年维持在 $74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 2013 ~ 2020 年呈现快速下降,其变化速率为 $-5.9 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,该阶段河北地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降速率为 $-5.2 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$. 分冬半年(1 ~ 3 月, 10 ~ 12 月)和夏半年(4 ~ 9 月)分析,两者天津 $\text{PM}_{2.5}$ 年际变化趋势基本一致,相关系数为 0.87,在第一阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度冬半年上升速率略快于夏半年,变化速率分别为 $5.72 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $3.81 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,第三阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度冬半年下降速率是夏半年 1 倍,变化速率分别为 $-9.12 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $-4.65 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,按百分率计算冬半年下降 50.23%,夏半年下降 49.71%,两者基本相当.

不同季节天津 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变趋势分析,天津 $\text{PM}_{2.5}$ 质量呈现秋冬季高,春夏低的分布,20 a 的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在冬季为 $119.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,秋季为 $79.28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春季为 $64.61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,夏季为 $59.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 四季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变趋势与年均值演变趋势基本相似,20a 春夏秋冬各季与年均值相关系数分别为 0.86、0.93、0.94 和 0.87(图 3),冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变在 3 个阶段特征明显,且每一阶段变化率与年变化率基本相等(图 4); 秋冬第一个波峰(2006 年)相比年际距平更明显(秋季峰值为 143%,全年峰值为 129%),其他阶段变化相似;夏季第一阶段和第三阶段与年值变化相似,第二阶段波动相比年值波动平缓;春季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变规律与其它季节以及年际变化存在差异,呈现两阶段演变特征,2000 ~ 2008 年持续上升,2008 ~ 2020 年持续下降,但个别年份会出现波动性增加.

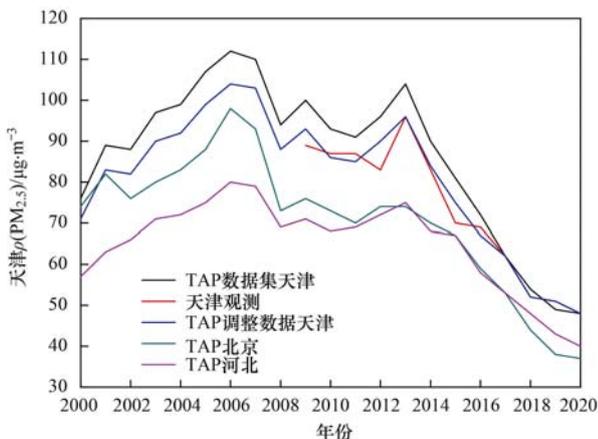


图 2 天津、北京和河北 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变趋势

Fig. 2 Variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Tianjin, Beijing, and Hebei

2.2 气象条件对 2000 ~ 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化影响

驱动 2000 ~ 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的两个

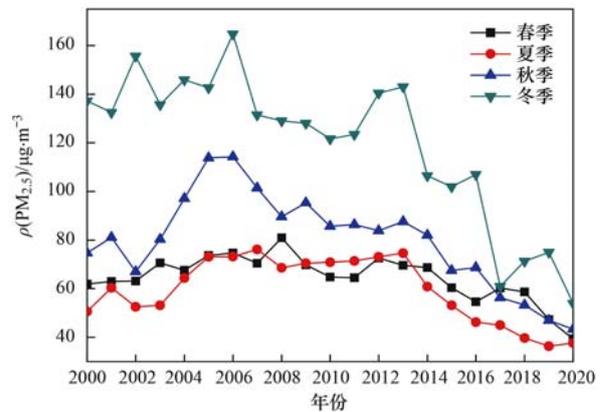


图 3 天津不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变趋势

Fig. 3 Trend of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in different seasons in Tianjin

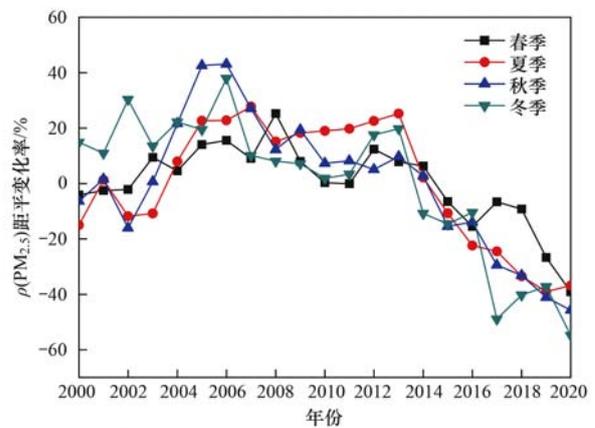


图 4 天津不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度演变 (距 20 a 平均变化率) 趋势

Fig. 4 Trend of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration (average percentage of change over 20 years) in different seasons in Tianjin

重要因素,一是排放源,二是气象条件,此外污染对气象反馈作用也有一定影响. 基于天津环境气象模式构建基准排放源 (MEIC2015) 细颗粒物气象扩散指数,该指数假定年排放源固定,模拟天津地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,由于排放源固定,可认为其模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度年际波动主要由气象条件引起,定义为天津地区细颗粒物气象扩散指数. 计算实况 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和细颗粒物气象扩散指数距平变化百分率,图 5 显示气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度年际波动影响远小于实况 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度年际波动,其平均幅度分别为 4.00% 和 16.59%,峰谷值相距为 16.07% 和 69.72%,相较上一年的平均变动为 3.67% 和 7.65%,最大变动为 10.57% 和 17.65%,气象条件的年际波动影响约占实况 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度年际变化 25% ~ 50%. 气象条件变化有一定的规律性,2003 ~ 2004 年和 2013 ~ 2015 年是细颗粒物气象扩散指数峰值(表征扩散条件较差),2008 ~ 2010 年和 2018 ~ 2020 年是细颗粒物气象扩散指数谷值(表征扩散

条件较好),峰峰相距和谷谷相距都是 11 a 左右. 实况 PM_{2.5} 质量浓度演变分为 3 个阶段,有两个峰值, 2006 ~ 2007 年的峰值与气象条件关系不大, 2013 年左右 PM_{2.5} 质量浓度峰值,与气象条件周期中不利扩散年份有关. 3 个阶段,第一阶段 2000 ~ 2007 年实况 PM_{2.5} 质量浓度快速上升, 2003 年前 PM_{2.5} 质量浓度变化与气象条件年际变化一致,随后 2003 ~ 2007 年,气象扩散条件逐渐转好,但实况 PM_{2.5} 质量浓度不降反升,出现近 20 年的峰值;第二阶段 2007 ~ 2013 年, PM_{2.5} 质量浓度呈现先降后升的过程,该演变趋势与气象扩散条件变化是一致的,两者相关系数高达 0.81, 2011 年前气象条件转好幅度略大于 PM_{2.5} 质量浓度下降幅度, 2011 年后反之(可推定 2011 年之前排放源可能持续增加, 2011 ~ 2012 年出现拐点); 2013 ~ 2020 年实况 PM_{2.5} 质量浓度快速下降,在 2015 年之后与气象扩散条件转好对应,从幅度分析气象作用更多是锦上添花, 2015 年以后气象条件使得 PM_{2.5} 质量浓度下降了 10.37% 左右,实况 PM_{2.5} 质量浓度下降了 40.44%.

单气象要素分析,平均风速、气温、相对湿度、雾日数、边界层高度和降水量这 6 个指标, 2000 ~ 2020 年年际变化与细颗粒物气象扩散指数相关系数分别为 0.13、0.03、0.60、0.53、-0.61 和 -0.14,其中相对湿度、雾日数和边界层高度的年际变化与细颗粒物气象扩散指数相关性通过 0.99 置信区间检验. 图 6 给出相对湿度年际演变趋势,其与细颗粒物气象扩散指数年际演变趋势基本一致, 2003 ~ 2004 年和 2013 年的细颗粒物气象扩散指数峰值(表征扩散条件较差),均为相对湿度的峰值,其超过 20 a 平均相对湿度的幅度均大于 5%,雾日数也多 10% 以上; 2008 ~ 2010 年和 2018 ~ 2020 年两个细颗粒物气象扩散指数谷值(表征扩散条件较

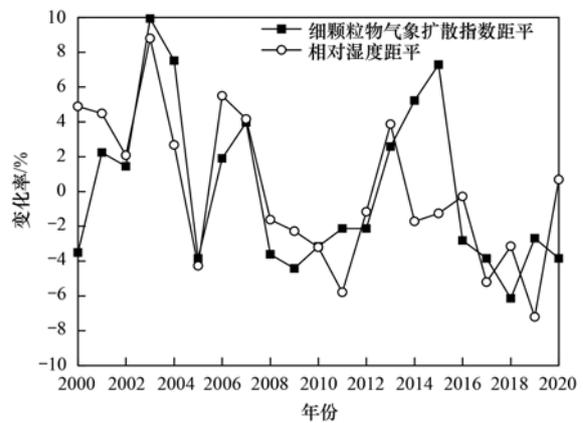


图 6 2000 ~ 2020 年天津细颗粒物气象扩散指数距平和相对湿度距平变化率演变趋势

Fig. 6 Variation in relative humidity and meteorological diffusion index in Tianjin from 2000 to 2020

好),均为相对湿度谷值,低于 20 a 平均相对湿度 5% 左右,雾日数也偏少 10%. 全年和秋冬季相对湿度较低,雾和气溶胶吸湿效应对应减弱,有利 PM_{2.5} 扩散,干燥的秋冬季意味着冷空气频繁,潮湿的秋冬季意味着西南、南风 and 东南风带来的暖湿气团偏多,对应静稳天气偏多,不利于大气扩散. 混合层厚度 20 a 呈现波动性上升(图 7),扩散条件较差的 2003 ~ 2004 年和 2013 年混合层厚度低于 20 a 均值 5% 以上,扩散条件较好的 2008 ~ 2010 年和 2018 ~ 2020 年混合层厚度高于 20 a 平均水平,其中 2015 ~ 2020 年大气扩散条件持续转好与混合层厚度的持续增加密切相关,近 3 年(2018 ~ 2020 年)混合层厚度均高于 20 a 平均的 5%. 风速在 20 a 呈现两阶段变化(图 8),第一阶段 2000 ~ 2011 年,风速快速下降,其变化与细颗粒物气象扩散指数不一致, 2011 ~ 2020 年波动变化,两者相关性明显增强,相关系数达到 -0.76. 降水量与细颗粒物气象扩散指

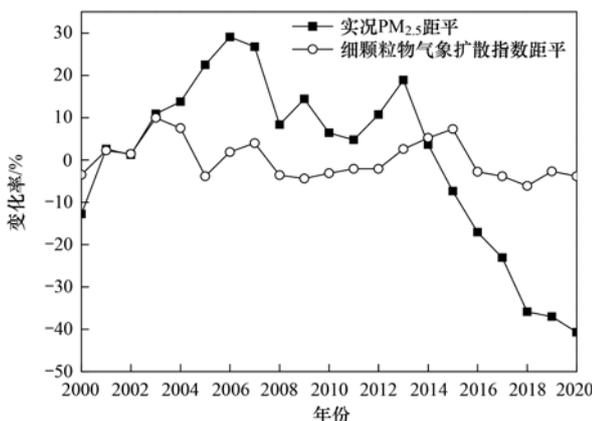


图 5 2000 ~ 2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度和细颗粒物气象扩散指数距平变化率演变趋势

Fig. 5 Variation in PM_{2.5} mass concentration and meteorological diffusion index in Tianjin from 2000 to 2020

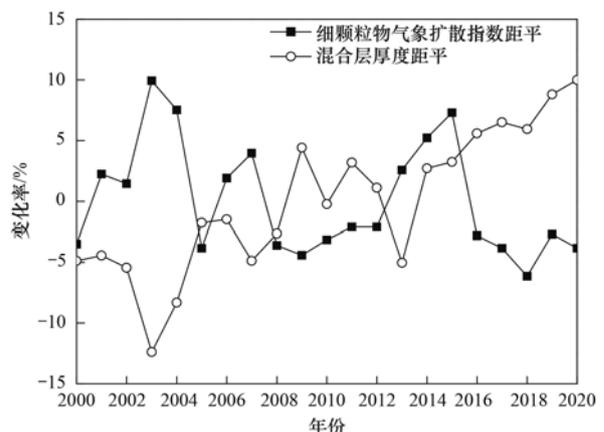


图 7 2000 ~ 2020 年天津细颗粒物气象扩散指数距平和混合层厚度距平变化率演变趋势

Fig. 7 Variation in mixed layer thickness and meteorological diffusion index in Tianjin from 2000 to 2020

数呈现弱的反相关,降水越多,大气扩散条件越好,但其相关性并不显著,主要因为天津位于华北平原,降水集中在7~8月之间,对全年大气扩散条件影响较小,这与南方地区是有差异的.气温20 a呈现持续上升趋势,年升幅达到0.05℃,但与细颗粒物气象扩散指数年际变化关系不明显.

综合分析:2000~2020年气象条件(大气扩散条件)变化呈现两峰两谷特征,扩散条件谷值为2003~2004年和2013~2015年,扩散条件峰值为2008~2010年和2018~2020年,其中扩散条件谷值年份2013~2015年与实况PM_{2.5}质量浓度峰值年份吻合.20 a大气扩散条件平均年值波动在4%,最大波动在10%左右,驱动该期间PM_{2.5}质量浓度年际变化的25%~50%,即气象解释25%~50%的2000~2020年PM_{2.5}质量浓度演变.第一阶段:2000~2007年PM_{2.5}质量浓度持续上升,前期与气象扩散条件变化周期吻合,后期气象条件变化并不能很好解释PM_{2.5}质量浓度上升;第二阶段2007~2013年PM_{2.5}质量浓度波动变化,该阶段气象条件年际变化对PM_{2.5}质量浓度年际变化影响明显,驱动2008~2010年实况PM_{2.5}质量浓度阶段性谷值和2013年PM_{2.5}峰值出现,该阶段相对湿度和混合层厚度年际波动对PM_{2.5}质量浓度变化有重要影响;第三阶段2013~2020年PM_{2.5}质量浓度持续下降,气象条

件年正贡献使得PM_{2.5}质量浓度下降8.7%,为实际PM_{2.5}质量浓度下降的六分之一左右,其中平均风速上升、相对湿度下降和混合层厚度上升共同驱动该阶段大气扩散条件转好.

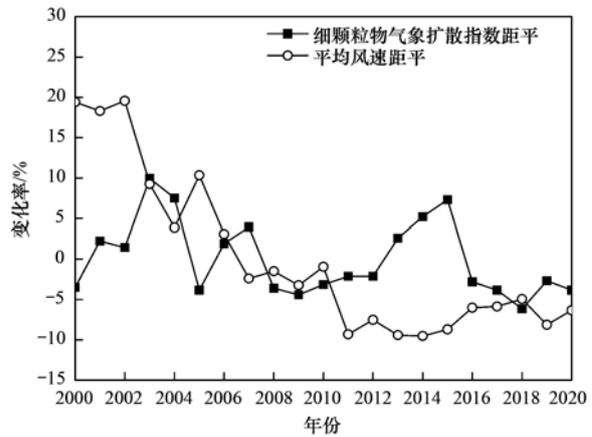


图8 2000~2020年天津细颗粒物气象扩散指数距平和平均风速距平变化率演变趋势

Fig. 8 Variation in wind speed and meteorological diffusion index in Tianjin from 2000 to 2020

图9显示细颗粒物扩散指数在四季变化趋势存在差异,其波动比年波动增加,年际气象条件对PM_{2.5}影响的波动在4%左右,春夏秋冬波动分别为6.77%、7.54%、5.11%和7.21%,其两峰两谷的特征相比年值规律性减弱.第一阶段2000~2007年

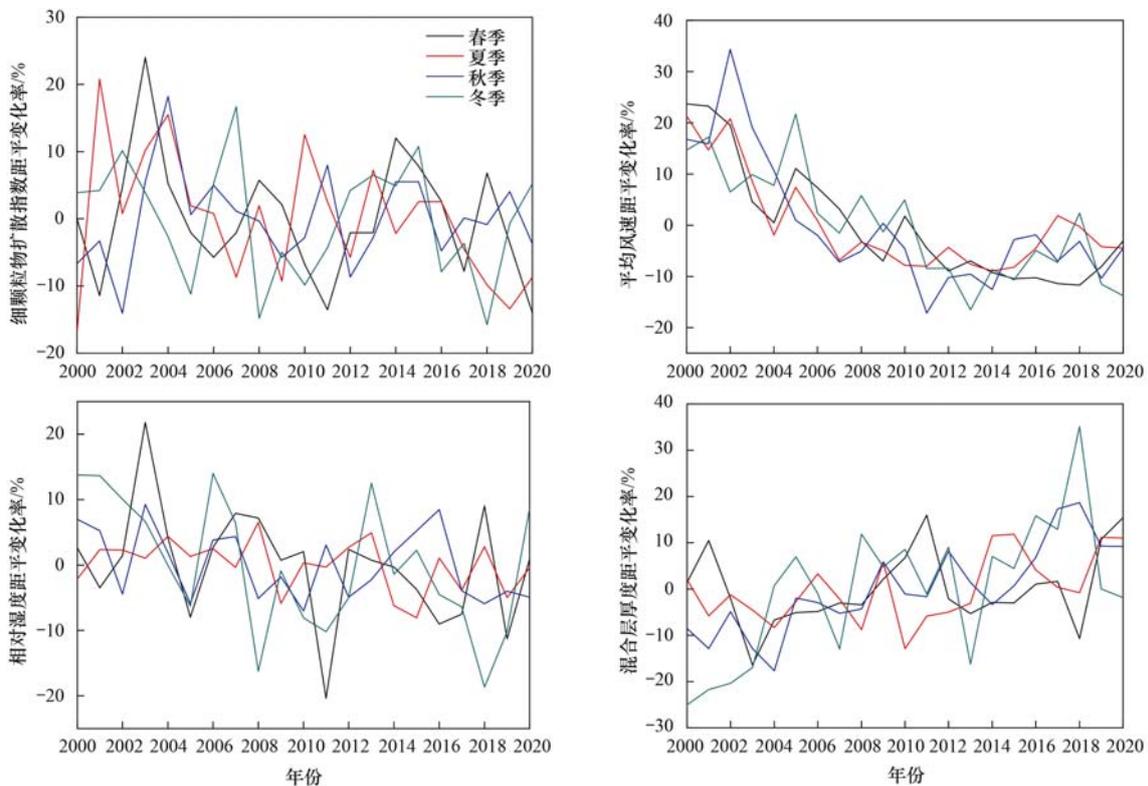


图9 天津不同季节细颗粒物扩散指数、相对湿度、混合层厚度和平均风速距平变化率演变趋势

Fig. 9 Trend of fine particle diffusion index, relative humidity, mixed layer thickness, and average wind speed anomaly percentage in different seasons in Tianjin

PM_{2.5} 质量浓度持续上升过程中, 大气扩散条件转差 7.72%, 其贡献主要来自夏、秋和冬季, 3 个季节气象条件转差使得 PM_{2.5} 增加 9.93%、8.37% 和 12.30%, 春季基本持平. 第二阶段 2007 ~ 2013 年大气扩散条件波动性变化, 扩散条件最不利是 2007 年, 次之为 2013 年, 最有利年份为 2008 年, 对比 2013 年和 2008 年, 大气扩散条件转差 6.4%, 其贡献主要来自夏季和冬季, 气象条件转差使得 PM_{2.5} 增加 5.20% 和 25.0%, 而春季和秋季大气扩散条件则略转好. 第三阶段 2013 ~ 2020 年大气扩散条件转好 8.7%, 转好在春夏冬季三季均有表现. 单气象要素分析, 第一阶段风速下降对大气扩散条件转差起重要贡献, 该下降在四季均有表现, 春夏秋冬平均风速平均下降了 16.59%、23.22%、20.54% 和 14.17%; 第三阶段大气扩散条件转好, 为平均风速上升、相对湿度下降和混合层厚度上升共同驱动, 其中平均风速四季均有上升, 冬季更为明显, 其幅度为 5.60%, 其它季节在 3% ~ 4% 之间, 相对湿度下降主要表现在冬季、夏

季和秋季, 幅度在 3% ~ 5%, 春季保持基本稳定, 混合层厚度上升在四季具有一致性, 其中冬春季更明显, 分别为 17.19% 和 21.91%.

分析 2000 ~ 2020 年逐月天津细颗粒物气象扩散指数与周边城市相关性(图 10), 天津地区演变规律特征与周边城市相关系数最高的前 8 城市为沧州、廊坊、德州、衡水、滨州、唐山、济南和淄博, 北京为保定、廊坊、石家庄、唐山、衡水、邢台、唐山和天津, 其与文献[32]基于标记法源追踪数值模式定量估算天津和北京 PM_{2.5} 来源有一致性. 从气象条件长期演变规律分析, 天津与河北中部平原和山东南部气象扩散条件变化规律同步性更高, 北京与太行山沿山城市气象扩散条件演变规律更为一致. 分析天津各区与天津整体的细颗粒物气象扩散指数相关性, 除宝坻和蓟州以外, 均超过 0.99, 显示出平原地区扩散条件演变规律的一致性, 宝坻相关系数 0.96, 蓟州为 0.77, 其中蓟州地区受燕山山脉影响, 其气象扩散条件变化与天津整体表现出不一致特征.

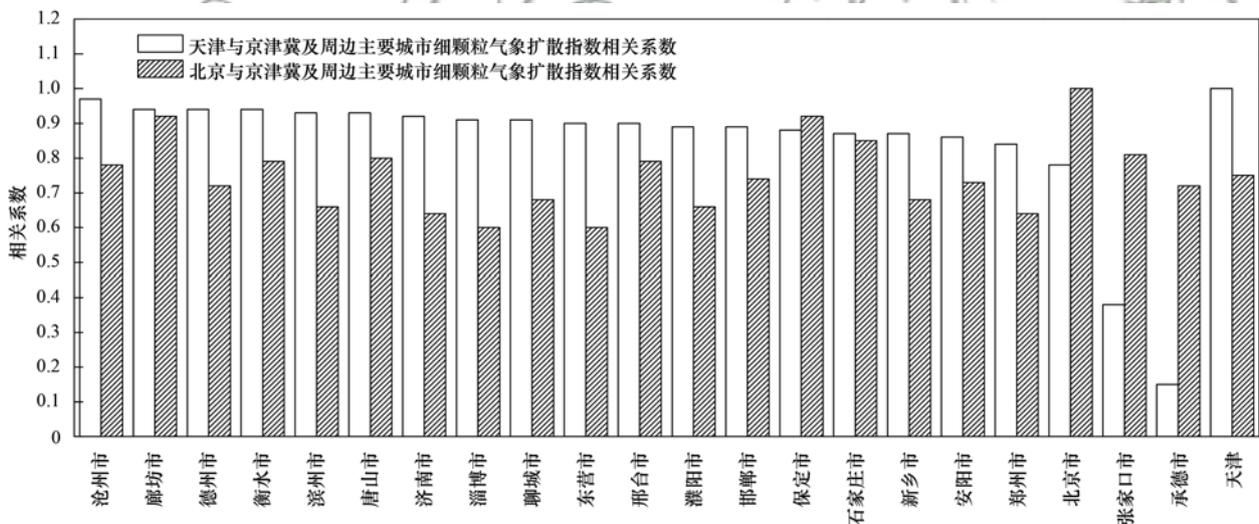


图 10 2000 ~ 2020 年逐月天津和北京细颗粒物气象扩散指数与周边地区相关系数

Fig. 10 Monthly meteorological diffusion index in Tianjin and Beijing from 2000 to 2020 and its correlation coefficient with surrounding areas

2.3 排放源对 2000 ~ 2020 年 PM_{2.5} 质量浓度变化影响

排放源对 2000 ~ 2020 年 PM_{2.5} 质量浓度变化影响基于 MEIC1.3 清单进行分析. 天津 PM_{2.5} 排放的峰值出现在 2011 年, 达到 117 000 t, 此后呈现持续地下降趋势, 到 2020 年为 51 000 t, 不到峰值的 50%. 基于实况 PM_{2.5} 质量浓度变化扣除气象条件影响后计算的排放影响为 method1, 直接基于排放源变化估算的为 method2, 图 11 显示 method1 和 method2 排放源对天津 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势影响, 两种方法具有较好的一致性, 数据相关系数为 0.56. 统计表明第三阶段 2013 ~ 2020 年天津地区

PM_{2.5} 质量浓度变化主要驱动因素为排放源下降, method1 估算作用为排放源下降使得天津 PM_{2.5} 下降 43.87%, 基于天津地区一次 PM_{2.5} 排放量估算, 其下降为 52.7%, 考虑其它大气污染排放的二次影响、周边排放的影响和非人为排放影响, 其使得 PM_{2.5} 质量浓度变化应略小于 52.7%. 基于 method1 估算第一阶段排放对 PM_{2.5} 质量浓度变化影响, 排放量增加导致天津 PM_{2.5} 增加 37.59%, 其作用是气象条件波动影响的 4 倍. 第二阶段波动过程, 2008 年和 2013 年 MEIC 排放清单天津地区年 PM_{2.5} 排放量均为 108 000 t, 实况 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 $88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 $96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增加了 9.1%, 基于 method1 估算, 气象条

件转差幅度为 6.5%, 数据具有较好的一致性. 该阶段从 MEIC 清单也可以看出, 除了 2008 年由于奥运保障排放量较低外, 该时期排放量基本稳定在 110 000 ~ 120 000 t, 年平均变动在 2.39%, 所以该时期在 2.2 节分析中显示细颗粒物气象扩散指数与 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关系数为 0.81, 气象条件年际变化对第二阶段 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化起主导影响.

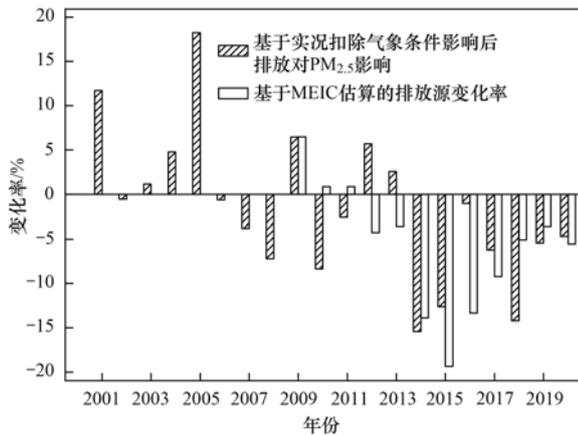


图 11 天津地区排放源对 $PM_{2.5}$ 变化趋势影响

Fig. 11 Influence of emission sources on the variation in $PM_{2.5}$ mass concentration in Tianjin

2.4 污染对气象反馈作用导致的基准源模拟不确定性分析

污染对气象反馈作用, 是采用基准源确定气象条件对 $PM_{2.5}$ 影响的不确定性因素. 2000 ~ 2020 年实况 $PM_{2.5}$ 质量浓度峰谷值相差 1 倍, 其导致的气溶胶直接辐射效应存在差异. 从原理分析, 高浓度排放, 导致大气中高 $PM_{2.5}$ 质量浓度, 减少到达地面的太阳辐射, 大气稳定层结增多, 混合层下降, 气象条件转向不利于扩散方向; 低浓度排放, 大气清洁, 地面太阳辐射正常到达地面, 大气中性和不稳定层结增加, 气象条件转向有利扩散方向 (图 12); 以 2015 年排放清单为基准源模拟, 明显高于 2020 年排放清单, 会低估 2020 年大气扩散条件; 反之, 2015 年排放源低于 2013 年排放源, 采用基准源模拟, 会高估 2020 年大气扩散条件, 使得构建的大气扩散条件长时间序列图与真实的存在偏差, 带来不确定性. 从现有排放数据分析, 考虑污染对气象反馈作用, 2016 ~ 2020 年细颗粒气象扩散指数存在高估 (即真实的大气扩散条件可能更好), 2000 ~ 2014 年年细颗粒气象扩散指数存在低估 (即真实的大气扩散条件可能更差), 给分析带来了不确定性.

设计考虑气溶胶直接辐射效应和不考虑气溶胶直接辐射效应的情景, 初步估计这种不确定性的影响. 以 2015 年作为基准源进行 2015 年的全年模拟, 假设两种情景, 情景 1 考虑气溶胶直接辐射效应, 情

景 2 不考虑气溶胶直接辐射效应, 两者模拟的差值为气溶胶污染对气象反馈作用在 $PM_{2.5}$ 质量浓度上的表现. 将 $PM_{2.5}$ 质量浓度分段用于计算反馈作用的强度, 制作表 1, 比照 2015 年基准源模拟扣减反馈强度, 得到细颗粒气象扩散指数在 2000 ~ 2020 年不同年份的不确定性. 由表 1 分析, 随着 $PM_{2.5}$ 质量浓度增加, 气溶胶直接辐射效应导致气象扩散条件转差增加的 $PM_{2.5}$ 质量浓度增幅加速 (即气溶胶-气象- $PM_{2.5}$ 的反馈增幅并非线性地增加 $PM_{2.5}$ 质量浓度), 尤其是 $\rho(PM_{2.5})$ 超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以后, 其增加率可以达到 5.59%, $\rho(PM_{2.5})$ 超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 气溶胶直接辐射效应导致的 $PM_{2.5}$ 质量浓度增加在 6.17%, 基准排放源 (MEIC2015) 气溶胶直接辐射效应导致 $PM_{2.5}$ 增加在 4.30% 左右. 上述非线性的调整, 也是基准排放源估算细颗粒物扩散条件不确定性原因所在, 由表 1 进行调整, 除 2020 年外, 大部分年份由此引起的不确定性在 $-0.8\% \sim 0.11\%$, 远小于细颗粒物气象扩散指数年际波动, 2020 年由于 $\rho(PM_{2.5})$ 为 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 相比基准源计算的 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 明显偏低, 方法估算细颗粒物气象扩散指数略低估 1.74% (清洁大气, 反馈作用减弱), 不确定性略高, 可进行适当修正.

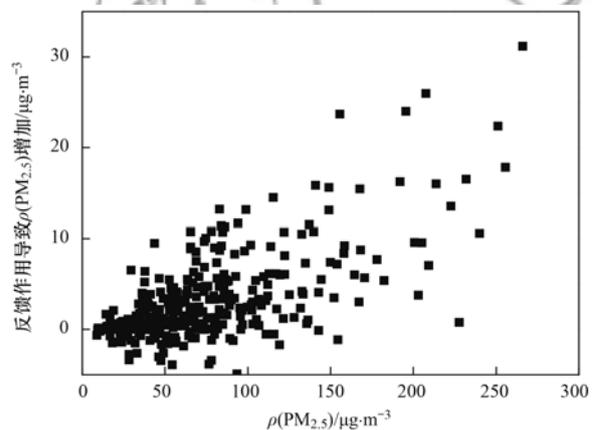


图 12 气溶胶直接辐射效应 (污染-气象-污染反馈作用) 导致的 $PM_{2.5}$ 质量浓度增加

Fig. 12 Increase in $PM_{2.5}$ mass concentration caused by the aerosol direct radiation effect (pollution-meteorology-pollution feedback)

2.5 2018 ~ 2020 年天津 $PM_{2.5}$ 变化主要原因

在圆满完成 2013 ~ 2017 年大气污染防治第一步目标后, 天津制定了打赢蓝天保卫战三年作战计划, 要求“到 2020 年全市 $\rho(PM_{2.5})$ 达到 $52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 重污染天数比 2015 年减少 25%”. 实际 2020 年天津 $\rho(PM_{2.5})$ 为 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 重污染天数 11 d, 比 2015 年减少 57.7%, 圆满完成任务.

2020 年天津 $\rho(PM_{2.5})$ 为 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 比打赢蓝天保卫战三年作战计划开始前的 2017 年下降

了 22.89%, 一次 PM_{2.5} 排放量下降了 13.6%, NO_x 排放量下降 27.59%, SO₂ 排放量下降 9.26%。气象条件分析: 2020 年风速平均值为 2.16 m·s⁻¹, 混合层厚度为 534.08 m, 相对湿度为 59.05%, 降水量为 598.7 mm, 相比 2017 年分别变化了 -0.52%、3.27%、6.20% 和 15.11%, 调整后细颗粒物气象扩

散指数(考虑基准源高于 2020 年排放源模拟带来的气溶胶直接辐射效应误差)偏低 1.62%, 大气扩散条件略转有利, 幅度 1.62%, 仅为实际 PM_{2.5} 质量浓度下降的十五分之一, 气象条件对该期间天津 PM_{2.5} 质量浓度影响是微小的, 打赢蓝天保卫战三年作战计划目标完成主要依赖于大气排放量的降低。

表 1 不同 PM_{2.5} 质量气溶胶直接辐射效应(污染-气象-污染反馈作用)导致 PM_{2.5} 增加率

Table 1 Direct radiation effect(pollution-meteorology-pollution feedback) of aerosols cause by different PM_{2.5} mass concentrations

项目	$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$									
	0~35	35~50	50~60	60~75	75~100	100~115	115~150	150~200	>200	
反馈导致 PM _{2.5} 增加率/%	0.59	2.95	3.50	4.18	4.30	4.41	4.49	5.59	6.17	
对应年份	2020	2018~2019	2016~2017	2008~2015 2001~2005	2005~2007					
相比 2015 年修正	-3.71	-1.74	-0.8	-0.12	0	0.11	0.19	1.29	1.87	

从 20 a 时间序列分析, 2018~2020 年这 3 a 为 21 世纪以来大气扩散条件较好的峰值年份, 其中 2020 年的距平是 -3.84%, 即大气扩散条件优于 20 a 平均(3.84%)。与 2013~2015 年大气扩散条件谷值相比, 该阶段大气扩散条件提升了 8.45%, 即未来排放不变的条件下, 遇到大气扩散条件谷值年份, PM_{2.5} 质量浓度可能还会出现不降反升现象, 升幅可达到 8%~13% (以 2003 年极端不利扩散年计算)。

此外 2020 年 1~3 月排放受到疫情显著的影响^[45], 排放量低于正常水平。MEIC 研究团队研究表明: 受新冠疫情期间封城等管控措施影响, 2020 年 1~3 月中国大气污染物排放显著低于 2019 年同期水平。2 月排放量下降最为显著, SO₂、NO_x、CO、NMVOCs 和一次 PM_{2.5} 排放量与 2019 年 2 月相比分别同比下降了 27%、36%、28%、31% 和 24%。工业部门主导了 SO₂ 与 PM_{2.5} 排放的下降, 工业与交通部门共同驱动了 NO_x、CO 和 NMVOCs 排放下降。随着疫情得到控制, 2020 年 4 月后我国大气污染物排放量迅速回升, 2020 年底基本恢复到 2019 年同期水平。2020 年, SO₂、NO_x、CO、NMVOCs 和一次 PM_{2.5} 全年排放量与 2019 年相比分别同比下降了 7.1%、5.6%、4.8%、5.3% 和 5.5%。MEIC 清单给出天津 2020 年相比 2019 年 PM_{2.5} 排放量下降了 5.56%, 2019 年相比 2018 年下降了 3.57%, 2018 年相比 2017 年下降了 5.08%, 2017 年相比 2016 年下降了 9.23%, 2016 年相比 2015 年下降了 13.3%, 2015 年相比 2014 年下降了 19.3%, 由于治理难度的加大, 排放量的下降是逐年递减的, 且逐年递减的线性关系 R 达到了 0.98, 规律性清晰。按此推算没有疫情影响, 2020 年相比 2019 年 PM_{2.5} 排放量下降率可能为 1.82%, 或可以按照 2019 年相比 2018 年 PM_{2.5} 排放量下降 3.57% 计算, 即疫情导致天津 PM_{2.5} 排放量非正常下降 1.99%~3.74%。基于此推断在延续前期政策

的情况下, 目前天津 PM_{2.5} 年正常排放量下降速率应该在 2%~3% 之间, 如果不考虑气象扩散条件的年际波动, 可以完成“十四五”设定的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 目标, 但考虑气象扩散条件的峰谷值转换, 距离完成目标仍有差距, 假定 2025 年为大气扩散条件较差的谷值年份, 每年的排放量减少应在 4%~5% 左右, 只有这样才能抵消气象条件年际波动的影响, 圆满完成“十四五”设定目标。

3 结论

(1) 2000~2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度呈现 3 个阶段变化, 第一阶段 2000~2007 年, 呈现持续上升, 其变化速率为 4.58 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$; 第二阶段为 2007~2013 年, 该阶段 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈现波动变化, 出现两个浓度峰值年为 2007 年和 2013 年, 分别为 103 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 第三阶段为 2013~2020 年, PM_{2.5} 呈现快速下降, 其变化速率为 -6.9 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 基于下降率估算, 冬半年和夏半年保持基本一致。

(2) 2000~2020 年气象条件(大气扩散条件)变化具有规律性, 呈现两峰两谷特征, 2003~2004 年和 2013~2015 年为谷值, 2008~2010 年和 2018~2020 年为峰值。大气扩散条件年际波动在 4% 左右, 可解释 25%~50% 的 2000~2020 年 PM_{2.5} 质量浓度年际变化。从空间上分析, 天津大气扩散条件年际变化与河北中部平原和山东南部接近, 北京地区则与太行山沿山城市密切相关。

(3) 2000~2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度呈现 3 个阶段变化, 第一阶段 2000~2007 年 PM_{2.5} 质量浓度持续上升大气污染排放量的快速增加是主导因素, 其作用是气象条件年际波动影响的 4 倍, 气象条件转差使得 PM_{2.5} 增加 7.72%, 其贡献主要来自夏、

秋和冬季;第二阶段2008~2013年 $PM_{2.5}$ 排放量相对稳定, $PM_{2.5}$ 质量浓度年际变化受气象因素影响显著,其相关性可达0.81;第三阶段2013~2020年, $PM_{2.5}$ 质量浓度持续下降,排放量下降影响占绝对主导,大气扩散条件转好使得 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降了8.7%,扩散条件转好在春、夏和冬季均有明显表现,排放量下降使得 $PM_{2.5}$ 下降了43.9%,风速上升、混合层厚度上升、湿度下降共同驱动该阶段大气扩散条件转好。

参考文献:

- [1] 王继康,张恒德,桂海林,等.能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度关系及其分布特征[J].环境科学,2019,40(7):2985-2993.
Wang J K, Zhang H D, Gui H L, et al. Relationship between atmospheric visibility and $PM_{2.5}$ concentrations and distributions [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 2985-2993.
- [2] 丁净,唐颖潇,郝天依,等.天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响[J].环境科学,2021,42(11):5143-5151.
Ding J, Tang Y X, Hao T Y, et al. Impact of air humidity on $PM_{2.5}$ mass concentration and visibility in winter of Tianjin [J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5143-5151.
- [3] 胡彬,陈瑞,徐建勋,等.雾霾超细颗粒物的健康效应[J].科学通报,2015,60(30):2808-2823.
Hu B, Chen R, Xu J X, et al. Health effects of ambient ultrafine (Nano) particles in haze [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(30): 2808-2823.
- [4] 李勇,廖琴,赵秀阁,等. $PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响[J].环境科学,2021,42(4):1688-1695.
Li Y, Liao Q, Zhao X G, et al. Influence of $PM_{2.5}$ pollution on health burden and economic loss in China [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1688-1695.
- [5] 曹军骥. $PM_{2.5}$ 与环境[M].北京:科学出版社,2014.
- [6] 王跃思,李文杰,高文康,等.2013~2017年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J].中国科学:地球科学,2020,50(4):453-468.
Wang Y S, Li W J, Gao W K, et al. Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1857-1871.
- [7] 张强,耿冠楠.中国清洁空气行动对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J].中国科学:地球科学,2020,50(4):439-440.
Zhang Q, Geng G N. Impact of clean air action on $PM_{2.5}$ pollution in China [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1845-1846.
- [8] 国家大气污染防治攻关联合中心.大气重污染成因与治理攻关项目研究报告[M].北京:科学出版社,2021.
- [9] 张小曳,徐祥德,丁一汇,等.2013~2017年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响[J].中国科学:地球科学,2020,50(4):483-500.
- [10] Mu M, Zhang R H. Addressing the issue of fog and haze: a promising perspective from meteorological science and technology [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 1-2.
- [11] Gao Y, Zhang M, Liu Z, et al. Modeling the feedback between aerosol and meteorological variables in the atmospheric boundary layer during a severe fog-haze event over the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(8): 4279-4295.
- [12] 王丛梅,杨永胜,李永占,等.2013年1月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J].环境科学研究,2013,26(7):695-702.
Wang C M, Yang Y S, Li Y Z, et al. Analysis on the meteorological condition and formation mechanism of serious pollution in south Hebei province in January 2013 [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7): 695-702.
- [13] 张雅斌,林琳,吴其重,等.“13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J].应用气象学报,2016,27(1):35-46.
Zhang Y B, Lin L, Wu Q Z, et al. Meteorological conditions and impact factors of a heavy air pollution process at Xi'an in December 2013 [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(1): 35-46.
- [14] 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, Yao X W, et al. Analysis of the continuous heavy pollution process in the winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3405-3414.
- [15] Zhang Z, Zhang X, Gong D, et al. Possible influence of atmospheric circulations on winter haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(2): 561-571.
- [16] Niu F, Li Z Q, Li C, Lee K H, et al. Increase of wintertime fog in China: potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D7), doi: 10.1029/2009JD013484.
- [17] Li Q, Zhang R H, Wang Y, et al. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon [J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(1): 346-354.
- [18] Yin Z C, Wang H J, Chen H P. Understanding severe winter haze events in the North China Plain in 2014: roles of climate anomalies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(3): 1641-1651.
- [19] Yin Z C, Wang H J. The relationship between the subtropical western Pacific SST and haze over North-Central North China Plain [J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(10): 3479-3491.
- [20] 蔡子颖,姚青,韩素芹,等.21世纪以来天津细颗粒物气象扩散能力趋势分析[J].中国环境科学,2017,37(6):2040-2046.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al. The trends of fine particulate meteorological diffusivity in Tianjin from 21th [J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2040-2046.
- [21] Wang H J, Chen H P. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: roles of climate change [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(6): 4205-4211.
- [22] Chen H P, Wang H J. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(12): 5895-5909.
- [23] Yang Y Q, Wang J Z, Gong S L, et al. PLAM-a meteorological pollution index for air quality and its applications in fog-haze forecasts in North China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(3): 1353-1364.
- [24] 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等.北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J].气象,2017,43(8):998-1004.
Zhang H D, Zhang B H, Lv M Y, et al. Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(8): 998-1004.
- [25] 朱蓉,张存杰,梅梅.大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J].中国环境科学,2018,38(10):3601-3610.

- Zhu R, Zhang C J, Mei M. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3601-3610.
- [26] 安兴琴, 陈玉春, 吕世华. 兰州市冬季SO₂大气环境容量研究[J]. *高原气象*, 2004, **23**(1): 110-115.
An X Q, Chen Y C, Lv S H. Study on SO₂ atmospheric environment capacity in Lanzhou winter [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, **23**(1): 110-115.
- [27] 焦亚音, 孟凯, 杜惠云, 等. 气象条件对颗粒物污染定量贡献的时空特征分析: 以京津冀中南部重点城市为例[J/OL]. *中国环境科学*, 2021. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210706.009>, 2021-07-07.
Jiao Y Y, Meng K, Du H Y, *et al.* Analysis on spatial-temporal characteristics of the quantitative contributions of meteorological conditions to the particle pollution: a case study of key cities of central and southern Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region [J/OL]. *China Environmental Science*, 2021. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210706.009>, 2021-07-07.
- [28] 吴其重, 王自发, 李丽娜, 等. 北京奥运会空气质量保障方案京津冀地区措施评估[J]. *气候与环境研究*, 2010, **15**(5): 662-671.
Wu Q Z, Wang Z F, Li L N, *et al.* Assessment on the effectiveness of the air quality assurance program in Beijing-Tianjin-Hebei area during the Beijing Olympic Games Period[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, **15**(5): 662-671.
- [29] 王凌慧, 曾凡刚, 向伟玲, 等. 空气重污染应急措施对北京市PM_{2.5}的削减效果评估[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2546-2553.
Wang L H, Zeng F G, Xiang W L, *et al.* A model evaluation of the effect of implementing heavy air pollution emergency plan to PM_{2.5} reduction in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2546-2553.
- [30] 李荔, 刘倩, 李冰, 等. 南京青奥会期间管控措施空气质量改善效果评估[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(2): 175-182.
Li L, Liu Q, Li B, *et al.* Assessment of air quality benefits from control measures during Nanjing Youth Olympic Games [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 175-182.
- [31] 毛敏娟, 胡德云. 杭州G20峰会空气污染控制状况评估[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(12): 1822-1831.
Mao M J, Hu D Y. Evaluation of the air pollution control over Zhejiang Province during the G20 Summit in Hangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(12): 1822-1831.
- [32] 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 等. 基于天气背景天津大气污染输送特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4855-4863.
Cai Z Y, Yang X, Han S Q, *et al.* Transport characteristics of air pollution in Tianjin based on weather background [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4855-4863.
- [33] 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 9-18.
Yang X, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Heavy pollution episode in Tianjin Based on UAV meteorological sounding and numerical model[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 9-18.
- [34] 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 等. 京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM_{2.5}污染影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4095-4103.
Shao X Y, Wang X Q, Zhong Y S, *et al.* Impacts of anthropogenic emission reduction and meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in Typical cities of Beijing-Tianjin-Hebei in winter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4095-4103.
- [35] 蔡子颖, 韩素芹, 邱晓滨, 等. 基于WRF/Chem模式天津地区重污染天气成因分析[J]. *高原气象*, 2019, **38**(5): 1108-1119.
Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, *et al.* Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on WRF/Chem [J]. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(5): 1108-1119.
- [36] 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 等. 乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4180-4190.
Zhang R X, Chen Q, Xia J Q, *et al.* Exploring characteristics and cause of summer ozone pollution based on process analysis in Wuhai. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4180-4190.
- [37] 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 等. 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对PM_{2.5}的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3099-3106.
Lu S Z, Shi X R, Xue W B, *et al.* Impacts of meteorology and emission variations on PM_{2.5} concentration throughout the country during the 2020 epidemic period [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3099-3106.
- [38] 武文琪, 张凯山. 区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 523-533.
Wu W Q, Zhang K S. Contributions of emissions reduction and regional meteorological conditions to air quality improvement [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 523-533.
- [39] 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, Hebei, and its surrounding area (“2+26” Cities) from October to December 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- [40] Xue T, Zheng Y X, Geng G N, *et al.* Estimating spatiotemporal variation in ambient ozone exposure during 2013-2017 using a data-fusion model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(23): 14877-14888.
- [41] Xiao Q Y, Zheng Y X, Geng G N, *et al.* Separating emission and meteorological contributions to long-term PM_{2.5} trends over eastern China during 2000-2018 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(12): 9475-9496.
- [42] Xue T, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Spatiotemporal continuous estimates of PM_{2.5} concentrations in China, 2000-2016: a machine learning method with inputs from satellites, chemical transport model, and ground observations [J]. *Environment International*, 2019, **123**: 345-357.
- [43] 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 634-642.
Guo W K, Li G Y, Chen B, *et al.* Establishment of a High-resolution anthropogenic emission inventory and its evaluation using the WRF-Chem model for Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 634-642.
- [44] Tong D, Cheng J, Liu Y, *et al.* Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(9): 5729-5757.
- [45] Zheng B, Zhang Q, Geng G N, *et al.* Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(6): 2895-2907.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i>	(1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i>	(1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i>	(1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i>	(1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i>	(1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i>	(1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i>	(1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i>	(1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min	(1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i>	(1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i>	(1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i>	(1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i>	(1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i>	(1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an	(1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i>	(1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i>	(1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i>	(1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo	(1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i>	(1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i>	(1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i>	(1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i>	(1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i>	(1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i>	(1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i>	(1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i>	(1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i>	(1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i>	(1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i>	(1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua	(1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i>	(1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i>	(1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i>	(1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i>	(1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i>	(1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i>	(1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i>	(1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i>	(1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i>	(1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i>	(1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i>	(1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i>	(1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i>	(1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i>	(1688)