

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019 ~ 2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015 ~ 2020 年中国城市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染时空演变特征 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000 ~ 2020 年中国典型经济区 PM_{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM_{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高空间分辨率的郑州市城镇居民 PM_{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O₃ 生成特征 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减排协同控制情景模拟和效应评估 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO₂ 排放模拟 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 卓海华, 姜保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘辉, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 张静, 胡愈忻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 共附生细菌群落结构和功能的影响 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔鳧箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏卢璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
磷渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹国帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

2015 ~ 2020 年中国城市 PM_{2.5} -O₃ 复合污染时空演变特征

牛笑笑¹, 钟艳梅¹, 杨璐¹, 易嘉慧¹, 慕航¹, 吴倩¹, 洪松^{1*}, 何超^{2*}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079; 2. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100)

摘要: 基于 2015 ~ 2020 年中国 333 个城市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度监测数据, 利用空间聚类、趋势分析和地理重力模型等方法, 定量分析我国主要城市的 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征和时空演变格局. 结果表明: ① PM_{2.5} 和 O₃ 浓度存在协同变化规律, 当 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) \leq 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 存在同步增长的现象; 当 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 处于国家 II 级限值 (35 ± 10) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 平均值的峰值增速最快; 当 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) > 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 平均值出现显著下降趋势. ② 我国城市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度空间聚类格局类似, $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的 6 a 平均值热点区域集中分布在京津冀、山西、河南和安徽等地区. ③ PM_{2.5}-O₃ 复合污染城市数量的年际变化趋势为先增 (2015 ~ 2018 年) 后降 (2018 ~ 2020 年), 季节变化趋势为从春到冬持续减少, 复合污染现象主要发生在暖季 (4 ~ 10 月). ④ PM_{2.5}-O₃ 复合污染城市数量的空间分布呈现扩散 (2015 ~ 2017 年) - 聚集 (2017 ~ 2020 年) 的规律. ⑤ PM_{2.5} 和 O₃ 浓度重心的迁移方向相似, 存在明显的西移和北移趋势, 高浓度复合污染问题在中国中北部城市更明显.

关键词: PM_{2.5}; 臭氧 (O₃); 复合污染; 时空演变; 中国

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1830-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205018

Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM_{2.5}-O₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020

NIU Xiao-xiao¹, ZHONG Yan-mei¹, YANG Lu¹, YI Jia-hui¹, MU Hang¹, WU Qian¹, HONG Song^{1*}, HE Chao^{2*}

(1. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Based on the monitoring data of PM_{2.5} and O₃ concentrations in 333 cities in China from 2015 to 2020, using spatial clustering, trend analysis, and the geographical gravity model, this study quantitatively analyzed the characteristics of PM_{2.5}-O₃ compound pollution concentrations and its spatiotemporal dynamic evolution pattern in major cities in China. The results showed that: ① there was a synergistic change in PM_{2.5} and O₃ concentrations. When $\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) \leq 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, for every $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ increase in $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$, the peak of the mean value of $\rho(\text{O}_3_perc90)$ increased by $9.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. When $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ exceeded the national Grade II standards of $(35 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, the peak of the mean value of $\rho(\text{O}_3_perc90)$ increased the fastest, with an average growth rate of 11.81%. In the past six years, on average, 74.97% of Chinese cities with compound pollution had a $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ in the range of 45 to 85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. When $\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) > 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, the mean value of $\rho(\text{O}_3_perc90)$ showed a significant decreased trend. ② The spatial clustering pattern of PM_{2.5} and O₃ concentrations in Chinese cities was similar, and hot spots of the six-year mean values of $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ and $\rho(\text{O}_3_perc90)$ were distributed in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and other cities in the Shanxi, Henan, and Anhui provinces. ③ The number of cities with PM_{2.5}-O₃ compound pollution showed an interannual variation trend of increasing first (2015-2018) and then decreasing (2018-2020) and a seasonal trend of gradually decreasing from spring to winter. Further, the compound pollution phenomenon mainly occurred in the warm season (April to October). ④ The spatial distribution of PM_{2.5}-O₃ compound polluted cities was changing from dispersion to aggregation. From 2015 to 2017, the compound polluted areas spread from the eastern coastal areas to the central and western regions of China, and by 2017, a large-scale polluted area centered on the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, the Central Plains urban agglomeration, and surrounding areas was formed. ⑤ The migration directions of PM_{2.5} and O₃ concentration centers were similar, and there were obvious trends of moving westward and northward. The problem of high-concentration compound pollution was concentrated and highlighted in cities in central and northern China. In addition, since 2017, the distance between the centers of gravity of PM_{2.5} and O₃ concentrations in the compound polluted areas had been significantly reduced, with a reduction of nearly 50%.

Key words: PM_{2.5}; ozone (O₃); compound pollution; spatiotemporal evolution; China

中国政府采取的强有力的防控政策 [如《大气污染防治行动计划》(2013 ~ 2017 年) 和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(2018 ~ 2020 年) 等] [1,2], 使得中国城市空气质量显著改善, 2020 年我国 PM_{2.5} 未达标的地级及以上城市浓度平均值比 2015 年下降了 28.8%, 远超目标 18% [3]. 但是, 高浓度 PM_{2.5} 和高浓度 O₃ 并存且发生复杂的相互作用而构成复合污染的

现象 [4-6] 在中国很多城市 (如北京 [7,8]、天津 [1,9,10]、邯郸 [4] 和广州 [11] 等) 日益频发, 严重影响我国经济社会的可持续发展和人民身体健康 [12-18]. 因此, 从全国尺度研究我国主要城市 PM_{2.5} 和 O₃ 的复合污染, 对全

收稿日期: 2022-05-03; 修订日期: 2022-07-11

作者简介: 牛笑笑 (1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染与防控, E-mail: 1437230945@qq.com

* 通信作者, E-mail: songhongpku@126.com; hechao@yangtzeu.edu.cn

面了解我国大气复合污染时空变化规律,揭示 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同效应的成因机制具有重要意义^[19].

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 属于同源污染物,两者之间存在复杂的非线性化学耦合关系^[20],氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)是二者生成的共同前体物.具体来讲,高强度排放的硫化物、 NO_x 和 VOCs 等通过复杂的光化学反应^[21,22] 会生成颗粒物的二次组分(如 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等),这些气溶胶与 O_3 的生成密切相关,相互依存^[23].此外, $\text{PM}_{2.5}$ 二次无机组分的生成会受到 O_3 强氧化性的影响.大气颗粒物也可以通过对太阳辐射的削弱及表面的非均相反应等化学过程反作用于 O_3 ,影响 O_3 的生成和累积,引起复杂的非线性响应,进一步导致复合污染的产生^[20,24-26].随着对 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染对社会环境影响的逐渐认识,众多学者从不同时空尺度对我国复合污染情况做了深入的研究.如花丛等^[27] 对我国中东部地区 2015~2020 年夏半年 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征的研究表明,中东部大部分地区 O_3 超标日数增加和 $\text{PM}_{2.5}$ 超标日数减少的“跷跷板”效应十分明显.陈楠等^[28] 对湖北省 17 个市(州)2015~2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染的相关关系和成因的研究发现,湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的关联愈发密切,在夏季两者呈现显著正相关,协同效应显著.此外,毛卓成等^[29] 和赵辉等^[30] 也从 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染的气象影响因素方面做了相关的研究.

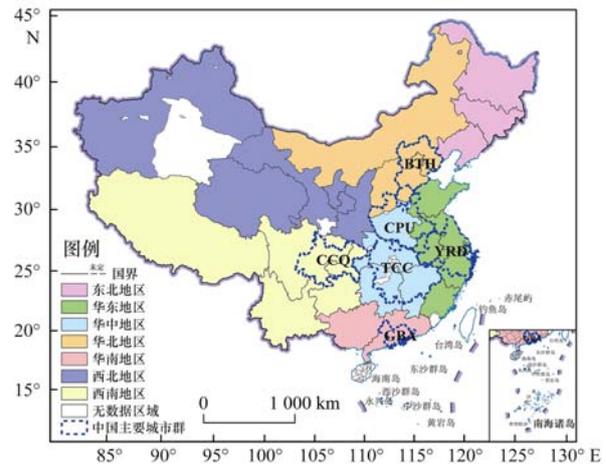
上述研究为认识我国 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染的形成过程和机制提供了重要基础,然而也存在以下不足:①对复合污染特征的分析主要集中在时序变化分析(如日变化、月变化和季节变化),缺少对 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染时空动态变化规律的探讨.②从单一污染物主导污染到复合污染类型的变化特征,以及复合污染发生时的污染物浓度特征的研究较少.针对以上不足,本文利用中国环境监测总站的 2015~2020 年逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 -8h 浓度监测数据,通过全局和局部空间自相关分析和趋势分析等方法,在定量分析 2015~2020 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度平均值的空间聚类格局及其演变规律基础上,基于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)确定 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染判定标准,研究中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及其时空动态变化格局,以期为我国当前空气污染协同治理和科学防控提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文选取中国大陆 333 个历年空气质量监测数

据较为完整的地级及以上城市作为研究对象.同时,结合中国不同区域的区位特征和社会经济发展状况,据中国地理区域划分方法^[31] 将全国划分为 7 个大区,分别为:东北地区、华东地区、华中地区、华北地区、华南地区、西北地区和西南地区^[32,33],如图 1 所示.



CCQ 表示成渝城市群, TCC 表示长江中游城市群, CPU 表示中原城市群, BTH 表示京津冀城市群, YRD 表示长江三角洲城市群, GBA 表示粤港澳城市群, 台湾省资料暂缺; 基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作, 下同

图 1 中国 333 个主要城市和城市群的地理分布

Fig. 1 Geographical distribution of 333 major Chinese cities and urban agglomerations

1.2 数据来源与预处理

2015 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度监测数据源自中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台(<http://www.cnemc.cn/>). 为了确保研究数据的连续与可靠,对获取的原始数据进行了以下处理:首先对获取的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度监测数据进行正态分布检验,再利用拉依达准则法(pauta criterion)即 3σ 准则辨别和剔除异常值.其次,严格按照《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中的要求进行数据质量控制,剔除不符合实际物理意义的样本数据,仅保留污染物浓度逐时数值 > 0 且当日有效数据量 ≥ 20 、当月无效日数据量 ≤ 4 和当年有效日数据量 ≥ 324 的数据^[34].

1.3 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染判定

根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)的规定, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度超标限值分别有小时、日和年尺度的评价指标,本文参考前人的研究成果^[10,28,29,35],制定了判定 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染的标准.将时间尺度统一到年尺度,选取 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值 [$\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$] 国家 II 级标准 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 O_3 日最大 8 h 浓度平均值第 90 百分位数 [$\rho(\text{O}_3 -$

perc90)] 国家 II 级标准 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 作为判定 $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染、 O_3 主导污染、 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染

和未发生 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 污染(即清洁)的标准, 具体见表 1.

表 1 $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染、 O_3 主导污染、 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染和清洁类型的判定标准

Table 1 Determination criteria of $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ compound pollution, O_3 dominated pollution, $\text{PM}_{2.5}$ dominated pollution, and clean types

污染类型	判定标准
$\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染	$\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) > 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3_perc90) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
O_3 主导污染	$\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) \leq 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3_perc90) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
$\text{PM}_{2.5}$ 主导污染	$\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) > 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3_perc90) \leq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
未发生 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 污染(清洁)	$\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) \leq 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3_perc90) \leq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

1.4 研究方法

1.4.1 空间自相关分析

利用全局莫兰指数(global Moran's I)和局部莫兰指数(angelina local Moran's I)分别从整体和局部角度探究 2015 ~ 2020 年中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的空间分布特征, 如公式(1)和公式(3)所示:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (2)$$

$$I_L = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, I_G 为全局莫兰指数, I_L 为局部莫兰指数, x_i 和 x_j 分别为研究单元 i 和 j 的 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 或 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的 6 a 平均值, \bar{x} 为所有研究单元 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 或 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的平均值, n 为研究单元(本文为 333 个地级及以上城市)的数量, W_{ij} 为研究单元 i 和 j 的空间权重矩阵. 若研究单元 i 和 j 邻近, 则 $W_{ij} = 1$, 否则 $W_{ij} = 0$. S 为所有研究单元空间权重的聚合.

Moran's I 的标准化统计量 $Z(I)$ 得分可以检验研究单元之间是否存在空间聚集关系, 如公式(4)所示:

$$Z(I) = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}}, \quad E[I] = -\frac{1}{n-1}, \quad V[I] = E[I^2] - E[I]^2 \quad (4)$$

Moran's I 的取值在 $[-1, 1]$ 之间, 如果 Moran's I 指数值为正则指示聚集趋势, 如果 Moran's I 指数值为负则指示离散趋势. $Z(I)$ 得分的绝对值大于 1.96, 即在 0.05 的显著性水平下. 通过分析 Moran's I 和 $Z(I)$ 的取值范围可以得到 4 种不同空间自相关分布类型: 当 Moran's $I > 0$ 时, 若 $Z(I) > 1.96$, 为“高高聚集”类型, 表示该单元和邻近单元 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 或 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 高于浓度平均值, 即“热点”

区域; 反之则为“低低聚集”类型, 即“冷点”区域. 当 Moran's $I < 0$ 时, 若 $Z(I) > 1.96$, 为“高低聚集”类型, 表示 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 或 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的高值区域被低值区域环绕; 反之, 则为“低高聚集”类型^[32, 36].

1.4.2 趋势分析

利用趋势分析法(trend analysis)对 2015 ~ 2020 年中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度年际变化的空间分布格局进行分析, 如公式(5)所示:

$$\text{Trend} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times P_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n P_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中, n 为时间跨度(本文中 $n = 6$), i 为时间年份; P_i 为第 i 年的 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 或 $\rho(\text{O}_3_perc90)$. 斜率的显著正值表明污染物浓度有增长趋势, 而斜率的显著负值则反映污染物浓度的显著下降趋势.

1.4.3 地理重心计算

利用地理重力模型定量分析复合污染地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 在空间上的迁移过程, 表征空气污染物的局部空间集聚变化特征, 并利用迁移距离反映污染物浓度时空变化的具体幅度, 如公式(6)和公式(7)所示:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times x_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

$$\bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times y_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (7)$$

式中, n 为复合污染城市总数, x_i 和 y_i 为第 i 个复合污染城市的坐标, W_i 为第 i 个复合污染城市的权重[本文分别为 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 或 $\rho(\text{O}_3_perc90)$], \bar{X}_w 和 \bar{Y}_w 则为复合污染区域污染物的重心坐标.

2 结果与讨论

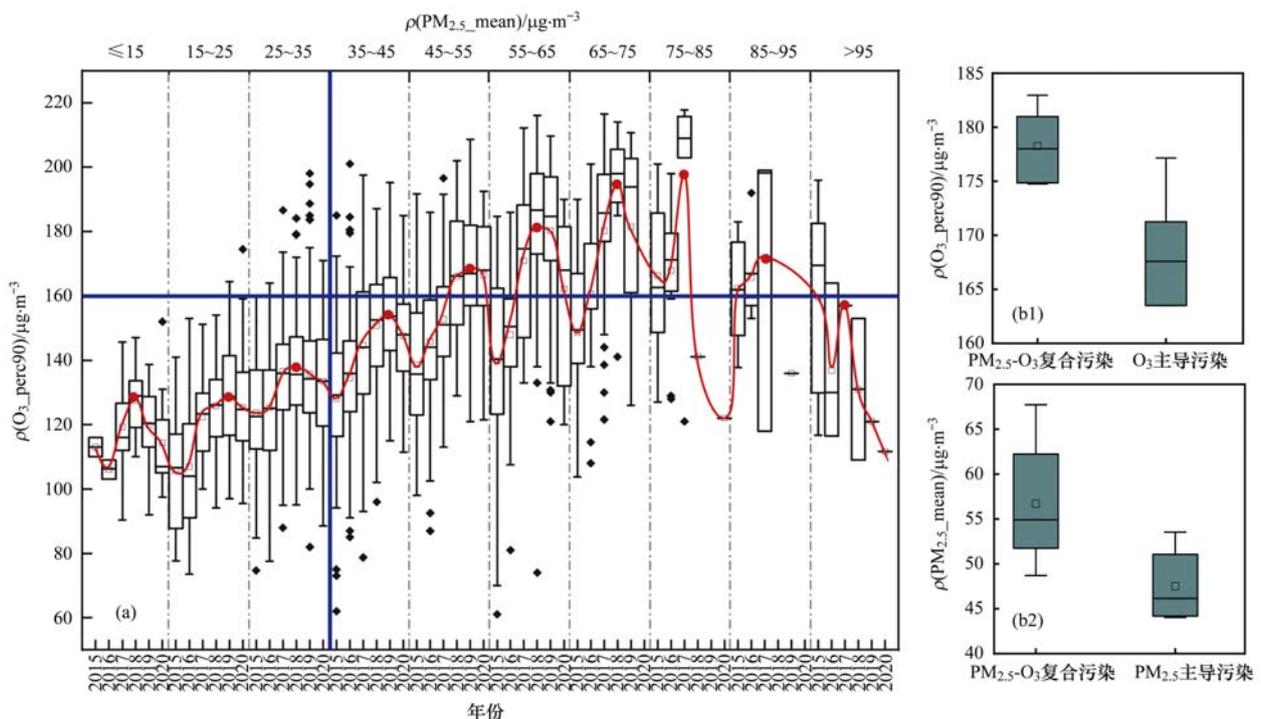
2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度的协同变化特征

图 2(b1) 和图 2(b2) 表示 $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染与 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染时 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的分布情

况,结果表明,2015 ~ 2020 年中国 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染区域的 $\rho(O_3_perc90)$ 平均值 ($178.26 \mu g \cdot m^{-3}$) 较 O_3 主导污染区域的浓度平均值 ($141.18 \mu g \cdot m^{-3}$) 偏高,与毛卓成等^[29]的研究结果相似.同时, $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染区域的 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 平均值 ($56.71 \mu g \cdot m^{-3}$) 同样也较 $PM_{2.5}$ 主导污染区域的浓度平均值 ($47.52 \mu g \cdot m^{-3}$) 偏高.利用 $PM_{2.5_mean}$ 的不同浓度区间对应的 O_3_perc90 浓度绘制如图 2 (a) 所示的箱线图,结果表明,2015 ~ 2020 年间,同一 $PM_{2.5_mean}$ 浓度区间下 $\rho(O_3_perc90)$ 变化规律较为一致,呈先增后降的变化趋势,峰值集中在 2018 和 2019 年.当 $\rho(PM_{2.5_mean}) \leq 85 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,随着 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 每增加 $10 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(O_3_perc90)$ 平

均值也逐渐升高,其峰值平均增加 $9.98 \mu g \cdot m^{-3}$,可见,两者存在同步增长的情况.其中当 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 在 $25 \sim 45 \mu g \cdot m^{-3}$ 区间时, $\rho(O_3_perc90)$ 平均值的峰值增速最快,增长率为 11.81% .当 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 处于 $45 \sim 85 \mu g \cdot m^{-3}$ 时, $\rho(O_3_perc90)$ 集中分布在超过 $160 \mu g \cdot m^{-3}$ 的区间.经统计,6 年间平均有 74.97% 的复合污染城市处于此浓度区间.当 $\rho(PM_{2.5_mean}) > 85 \mu g \cdot m^{-3}$ 时, $\rho(O_3_perc90)$ 平均值的峰值出现显著下降趋势,下降率达 19.17% .可能的原因是气溶胶辐射增强导致臭氧生成减弱,这表明 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 较高时气象因素对臭氧生成会产生重要的影响^[25].

不同 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 区间下 $\rho(O_3_perc90)$ 的季



(a) 变化规律, (b) 浓度特征; 两条蓝色实线表示 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度超标 II 级限值, 红色点表示 $\rho(O_3_perc90)$ 平均值的峰值, 红色实线表示 (O_3_perc90) 的平均值连接线

图 2 2015 ~ 2020 年中国不同 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 区间下 $\rho(O_3_perc90)$ 的年度变化规律和复合污染类型相较于单一污染物主导污染类型的浓度特征

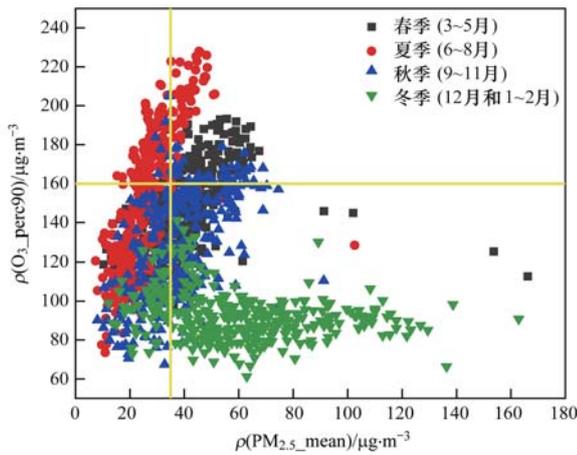
Fig. 2 Interannual variation in $\rho(O_3_perc90)$ in different $\rho(PM_{2.5_mean})$ ranges in China from 2015 to 2020 and the concentration characteristics of compound pollution type compared with single pollutant dominant pollution type

节变化特征如图 3 所示. 当 $\rho(PM_{2.5_mean}) \leq 35 \mu g \cdot m^{-3}$ 时, $\rho(PM_{2.5_mean})$ 和 $\rho(O_3_perc90)$ 变化较为一致, 存在显著的正相关性, 季节性差异较小; 当 $35 \mu g \cdot m^{-3} < \rho(PM_{2.5_mean}) \leq 70 \mu g \cdot m^{-3}$ 时, $\rho(PM_{2.5_mean})$ 和 $\rho(O_3_perc90)$ 在春夏秋三季呈正相关性, 在冬季, 两者的相关性由正变负; 当 $\rho(PM_{2.5_mean}) > 70 \mu g \cdot m^{-3}$ 时, 在春夏秋三季, 随 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 的升高 $\rho(O_3_perc90)$ 开始降低, 而在冬季两者的相关性不明显. $\rho(O_3_perc90)$ 的季

变化与图 2 中的年度变化相比, $\rho(O_3_perc90)$ 开始下降时的 $\rho(PM_{2.5_mean})$ 阈值更小. 因此, 控制 $PM_{2.5}$ 浓度在一定程度上有助于控制 O_3 浓度增速并减轻 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染. 同时需要深入挖掘 $PM_{2.5}$ 和 O_3 之间存在的复杂耦合关系及相互作用机制, 分阶段分区域针对性地制定复合污染防控目标.

2.2 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的空间聚类格局及其演变规律

为探究 2015 ~ 2020 年中国 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度的时空分布格局, 利用全局和局部 Moran's I 指数对研



两条黄色实线表示 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度超标 II 级限值

图 3 2015 ~ 2020 年中国不同 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 区间下 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的季节变化规律

Fig. 3 Seasonal variation in $\rho(\text{O}_3_perc90)$ in different $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ ranges in China from 2015 to 2020

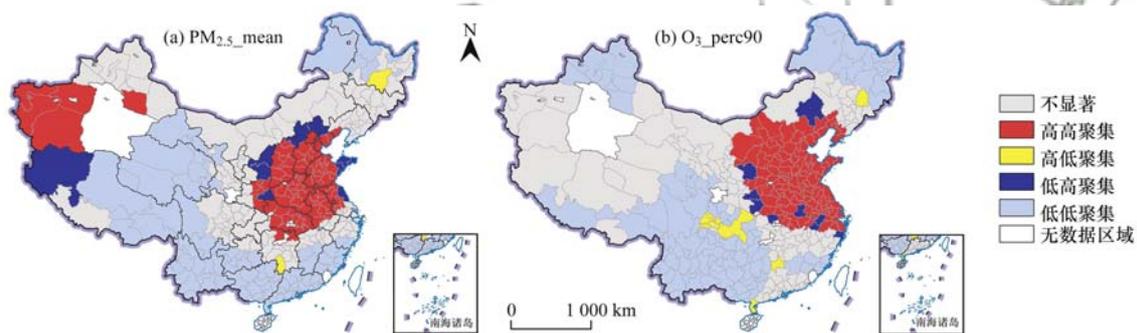


图 4 2015 ~ 2020 年中国城市 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 6 a 平均值的空间聚类

Fig. 4 Spatial clustering of six-year mean values of $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ and $\rho(\text{O}_3_perc90)$ in Chinese cities from 2015 to 2020

如图 5 所示,在 2015 ~ 2020 年期间,中国整体的 PM_{2.5} 浓度的变化趋势以下降为主导. 在研究的中国 333 个地级市中有 324 个城市 (97%) 的 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 呈下降趋势,变化速率范围为 $-11.34 \sim -0.02 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$,其中保定、喀什地区和德州 的 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 下降速率超过 $10 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$. 仅位于新疆的和田地区、石河子、伊犁哈萨克自治州、昌吉回族自治州,云南的西双版纳傣族自治州

究期间 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的 6a 平均值进行空间自相关分析 (图 4). PM_{2.5} 和 O₃ 的全局 Moran's *I* 均为正值 (Moran's *I* > 0.6),且通过 95% 的显著性检验 ($P < 0.05$),表明两者在空间上的分布均呈现明显的空间聚集特征. 进一步基于局部 Moran's *I* 计算发现 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的高高聚集区 (热点区域) 和低低聚集区 (冷点区域) 分布类似^[22,37,38] (图 3). 除新疆外,高高聚集区主要分布在京津冀城市群和山西、山东、江苏、安徽和湖北等省. 低低聚集区主要分布在西南、东北和华南地区. 此外,在 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 高高聚集区上外围和下外围分别环绕着零星的低高聚集区 [$\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 低值区被高值区域环绕],而在低低聚集区中穿插分布着少量的高低聚集区 [$\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 高值区被低值区域环绕].

和怒江傈僳族自治州,黑龙江绥化,贵州铜仁和四川广元共 9 个城市的 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 呈显著增长趋势,增长速率范围为 $0.09 \sim 6.01 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$. 其中新疆的和田地区却存在浓度和增长率“双高”的情况,这与和田地区降水量少,沙尘暴频发且持续时间长密不可分^[39],需要加强针对气象不可控因素展开的大气污染防治. 相比之下,O₃ 浓度呈增长趋势,在研究的 333 个城市中有 198 个城市 (59%) 的

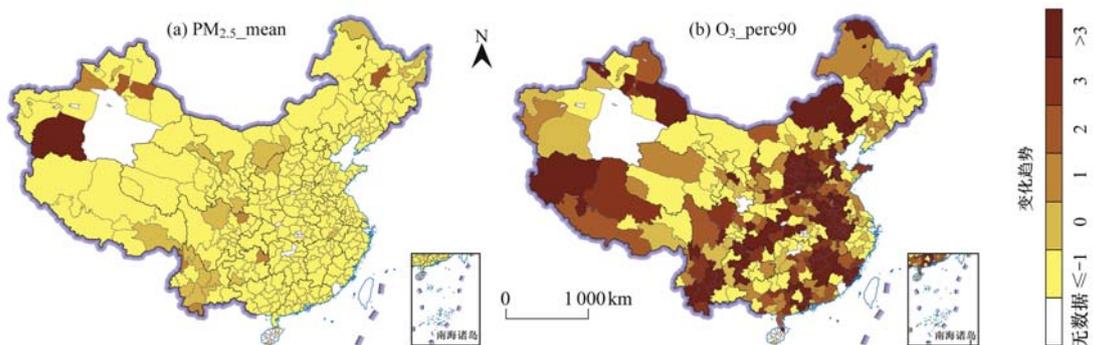


图 5 2015 ~ 2020 年中国城市 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 变化趋势的空间差异

Fig. 5 Spatial differences in the trends of $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ and $\rho(\text{O}_3_perc90)$ in Chinese cities from 2015 to 2020

$\rho(O_3_perc90)$ 增长速率为正值, 其中有 97 个城市的 $\rho(O_3_perc90)$ 显著增长, 主要分布在天津, 河北邢台和秦皇岛, 山东济南和滨州, 辽宁朝阳, 重庆以及山西、江西、安徽和云南这 4 个省份的大部分城市, 增长范围为 $3.15 \sim 17.65 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$. 其中, 浓度和增长率“双高”的城市主要分布在山西、河北和安徽的大部分城市, 是 O_3 的重度污染区, 与黄小刚等^[18]的研究结果一致. 但是, 处于西南地区的云南和贵州的部分城市出现 O_3 浓度不高, 但是有较为显著的增长趋势的现象. 有研究表明这与西部大开发进程加速有很大的关系^[40], 需要注重经济发展与污染防治之间的平衡.

2.3 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染时空演变格局

图 6 为 2015 ~ 2020 年中国 333 个城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染类型的年际变化. 本研究期间, $PM_{2.5}$ 主导污染的城市数量呈逐年下降的趋势, 其中 2015 年

$PM_{2.5}$ 主导污染的城市数量最多, 超过研究城市总量的 60% (201 个); 到 2018 年, $PM_{2.5}$ 主导污染的城市数量下降到了 88 个, 主要分布在新疆的和田地区、喀什地区、乌鲁木齐 [西南地区 $\rho(PM_{2.5} - mean)$ 超过 $90 \mu g \cdot m^{-3}$], 湖北襄阳和武汉, 陕西宝鸡和延安等城市. 到 2020 年, $PM_{2.5}$ 主导污染的城市数量进一步下降到了 80 个, 相比 2015 年下降 60%. 相比之下, 2015 ~ 2020 年 O_3 主导污染的城市数量呈先增后降的变化趋势. 2017 年以前中国城市空气污染的首要污染物主要是 $PM_{2.5}$, O_3 污染问题相对于如今并不突出. 但是到 2017 年以后, O_3 主导污染的城市数量逐渐增多. 2017 年 O_3 主导污染的城市数量为 7 个, 到 2018 年和 2019 年 O_3 主导污染的城市数量已超过 10 个. 以上城市主要分布在河北承德和张家口, 广东江门、广州和中山等城市.

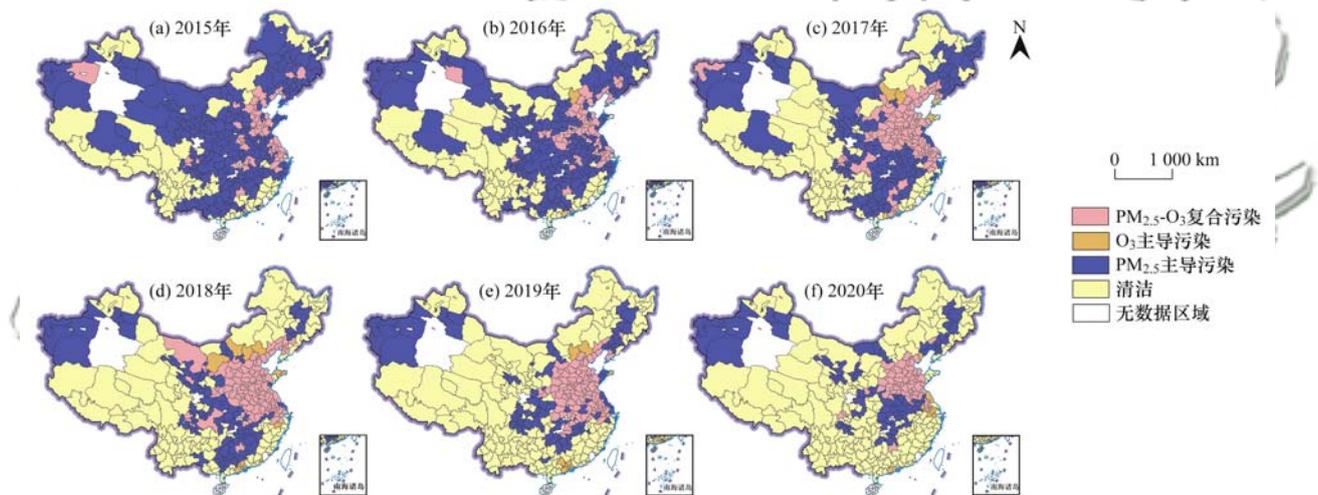


图 6 2015 ~ 2020 年中国 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染区域的年际变化

Fig. 6 Interannual variation in $PM_{2.5}$ - O_3 compound pollution areas in China from 2015 to 2020

从时间变化序列来看, $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染城市数量的变化可以分为两个阶段. 第一阶段是 2015 ~ 2018 年逐年增长阶段, $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染的城市数量由 2015 年的 57 个, 增长到 2016 年的 60 个, 进一步增长到 2018 年的 108 个. 第二阶段是 2018 ~ 2020 年持续下降阶段, 发生 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染的城市数量由 2018 年的 108 个, 减少到 2019 年的 94 个并进一步减少到 2020 年的 56 个. 这也证明了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施的有效性. 值得注意的是, 2020 年复合污染城市的下降数量接近 2019 年的 3 倍, 这可能与 2019 年底暴发的新冠肺炎疫情有关. 严格的防疫封控措施使得人类活动强度降低、交通和工业的污染物排放强度也降低, 对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度造成影响, 在一定程度上为城市复合污染情况的改善起到了积极的作用^[27].

从空间分布来看, 2015 ~ 2016 年 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染的城市主要零星分布在北京、上海、河南郑州、湖北黄冈、河北与山东和江苏与浙江交界处的部分城市; 2016 年以后, 我国 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染的城市开始出现集聚效应, 连片出现在京津冀城市群、中原城市群、山东全省 (威海、烟台、青岛除外)、陕西咸阳和江苏南京等经济发达城市. 除去工业、交通和能源消耗等带来的 NO_x 和 VOCs 等前体物排放外^[30,41], 还有一个重要原因是持续性偏南风 and 较高相对湿度的气象条件更利于这些区域 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染的发生^[4,8,29]. 此外, 中国东部地区和京津冀地区分别受到青藏高原冬季大地形“背风坡”效应和平直西风型和高压脊型环流的影响产生下沉气流, 进而阻碍城市污染物的扩散, 同时当大气污染物累积到一定程度还会改变边界层的气象条件, 两者

相互影响,进一步加剧复合污染的形成^[42].

基于 2015 ~ 2020 年 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 和 $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 的 6 a 平均值统计分析中国 333 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染类型的季节变化发现(图 7), $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染城市数量在夏季最少,仅分布在青海海东和新疆的阿苏克地区、和田地区和喀什地区,在冬季最多,有 273 个城市,占研究城市总数的 81.98%^[28,43]. 而 O_3 主导污染的城市数量恰好相反,在冬季最少,在夏季最多,有 98 个城市,主要分布在内蒙古、辽宁、吉林和江苏等省的大部分城市,整体上 O_3 主导污染的城市环绕 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染城市分布. $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染的城市数量则随季节呈逐步减少的变化趋势,由春季的 90 个城市到夏季的 45 个城市再到秋季的 37 个城市,直到冬季,

$\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染的城市数量下降为 0. 由此可见, $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染现象主要发生在暖季(4 ~ 10 月),主要原因是暖季太阳辐射较强,光化学反应较为强烈,臭氧生成增多,进一步增强大气氧化性,二次气溶胶贡献增多,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同增长^[25,44,45]. 从空间分布来看, $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染的城市在春季主要连片分布在京津冀城市群、山西、河南、山东和江浙沪等东部沿海城市; 在夏季, $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染区域明显缩小,集中分布在京津冀城市群、山西、河南和山东的部分城市; 在秋季,除河北和山东之外, $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染区域主要分布在河南信阳和驻马店、湖北武汉和孝感、湖南长沙和湘潭等城市,与夏季相比, $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染区域有南移的趋势.

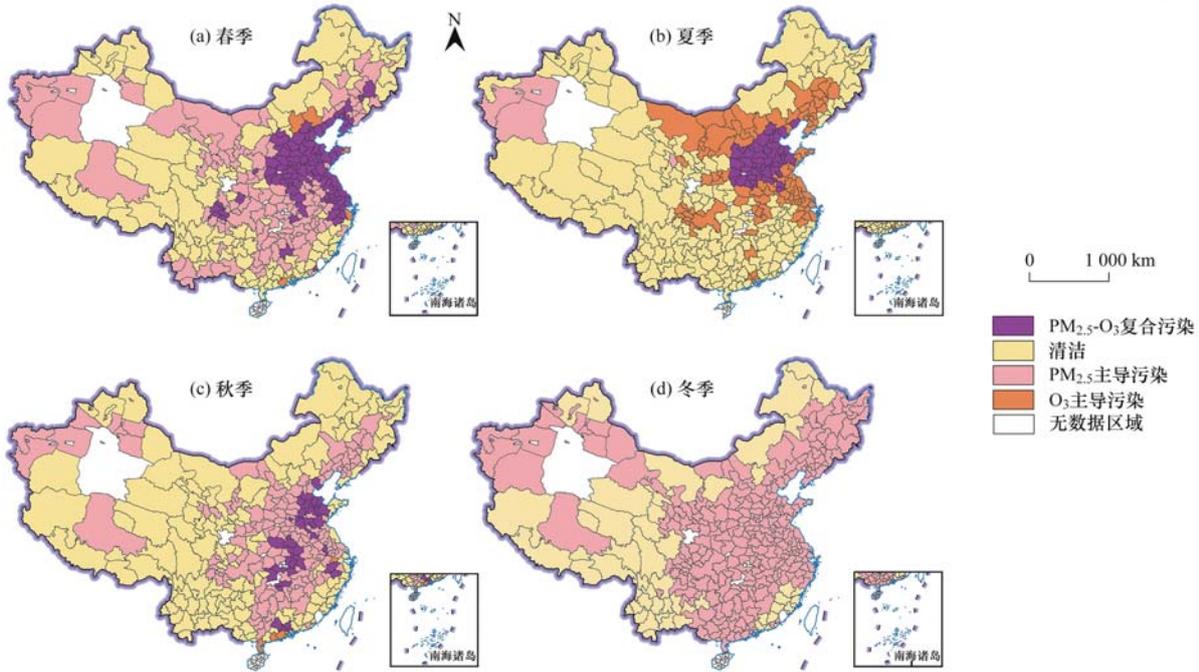


图 7 2015 ~ 2020 年中国 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染区域的季节性变化

Fig. 7 Seasonal variation in $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ compound pollution areas in China from 2015 to 2020

2.4 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染区域的阶段性变化特征

从图 6 分析可知, $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染、 O_3 主导污染、 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染和未发生这两种污染(即清洁)的空间转变规律分为两个阶段. 第 I 阶段是 2015 ~ 2017 年,有 56 个城市由 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染类型转为 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染类型,是主导的污染类型转变类型,主要分布在天津、重庆、晋陕豫、晋冀和豫苏皖交界处的部分城市. 由此可见,复合污染区域由原来的东部沿海地区进一步向中西部地区扩散. 第 II 阶段是 2017 ~ 2020 年,有 27 个城市由 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染类型转为 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染类型,主要分布在辽宁南部环渤海城市、河南南部城市、安徽合肥和陕西西安; 有 16 个城市由 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染向清

洁类型转变,主要分布在广东广州和东莞、重庆、上海及浙江杭州和金华等经济发达的大城市. 此外,主导污染转变类型为由 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染类型转为清洁类型(75 个城市),主要分布在华中地区南部、华南地区和东北地区的部分城市. 前一阶段与之正好相反,主要分布在西北地区和华北地区东北部的部分城市,共 28 个城市转为清洁类型(图 8 和表 2).

2.5 $\text{PM}_{2.5}-\text{O}_3$ 复合污染浓度重心的年际迁移

本文计算了 2015 ~ 2020 年复合污染区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的浓度重心,并可视化重心迁移轨迹(图 9),分析了其移动的距离和方向. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度重心在 2015 年和 2016 年位于山东菏泽境内,2017 年大幅向西南方向迁移 110.25 km 至河南新乡,2018 年和 2019

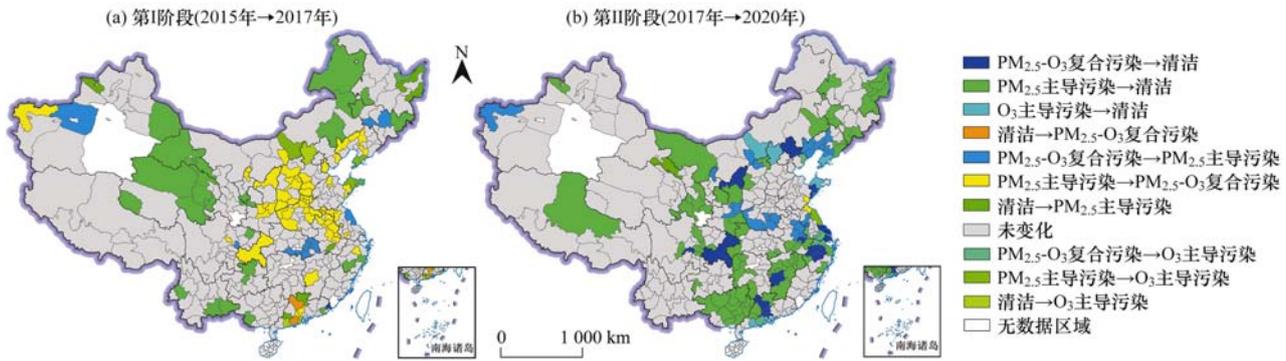


图 8 2015 ~ 2020 年中国 PM_{2.5}-O₃ 复合污染区域的阶段性空间转变

Fig. 8 Staged spatial transformation of PM_{2.5}-O₃ compound pollution areas in China from 2015 to 2020

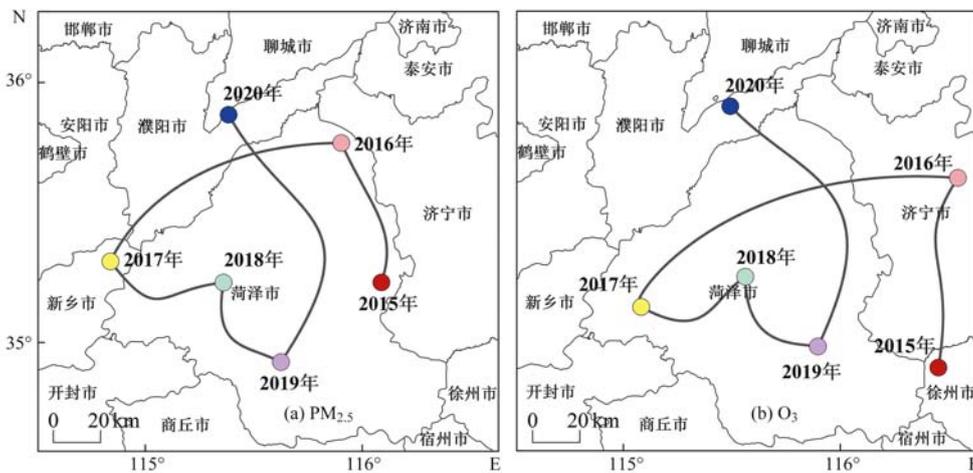


图 9 2015 ~ 2020 年中国 PM_{2.5}-O₃ 复合污染浓度重心的分布与迁移

Fig. 9 Distribution and migration of PM_{2.5}-O₃ compound pollution concentration centers in China from 2015 to 2020

表 2 第 I 与第 II 阶段中国污染类型转变的城市数量统计
Table 2 Statistics on the number of cities with pollution type transition in China in stage I and II

污染类型转变	城市数量	
	第 I 阶段	第 II 阶段
PM _{2.5} -O ₃ 复合污染→清洁	1	16
PM _{2.5} -O ₃ 复合污染→PM _{2.5} 主导污染	10	27
PM _{2.5} -O ₃ 复合污染→O ₃ 主导污染	0	7
PM _{2.5} 主导污染→清洁	28	75
PM _{2.5} 主导污染→O ₃ 主导污染	3	1
PM _{2.5} 主导污染→PM _{2.5} -O ₃ 复合污染	56	2
O ₃ 主导污染→清洁	0	7
清洁→PM _{2.5} 主导超标	6	1
清洁→O ₃ 主导污染	4	0
清洁→PM _{2.5} -O ₃ 复合污染	2	0
未变化	223	197

年连续两次向东南方向迁移回到山东菏泽境内, 2020 年再一次向西北方向远距离迁移 108.01 km 至河南濮阳境内与山东聊城交界处附近. O₃ 浓度重心则在 2015 ~ 2016 年由江苏徐州向东北方向迁移 81.45 km 至山东济宁, 随后向西南方向迁移 145.19 km 到山东菏泽境内, 2018 ~ 2019 年均位于山东菏泽, 年均移动距离为 44.41 km. 直到 2020 年, O₃ 浓

度重心向西北方向大幅迁移 109.15 km 至河南濮阳境内, 位于 PM_{2.5} 浓度重心东侧.

重心迁移轨迹表明, 6 年间, PM_{2.5} 和 O₃ 浓度重心的迁移方向表现出相似性, 存在明显的西移和北移趋势, 说明东南部地区的 PM_{2.5}-O₃ 复合污染问题有所改善, 尤其是 2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 的浓度重心有显著的北移趋势, 表明高浓度复合污染问题在中国中北部城市集中凸显. 但 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度重心之间存在偏差, O₃ 浓度重心的迁移轨迹与 PM_{2.5} 相比在地理位置上更偏东, 这说明相较于 PM_{2.5}, 复合污染区域的 O₃ 在东部经济较发达城市有更高浓度分布. 此外, 与前两年相比, 从 2017 年开始复合污染区域 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度重心间距显著缩小, 减少接近 50%, 到 2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度重心间距仅为 10.6 km.

3 结论

(1) 2015 ~ 2020 年间, PM_{2.5} 和 O₃ 浓度存在协同变化规律. 当 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean}) \leq 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$ 每增加 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3_perc90)$ 平均值的峰值升高 $9.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 当 $\rho(\text{PM}_{2.5_mean})$

处于超标限值(35 ± 10) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\rho(\text{O}_3\text{-perc90})$ 平均值的峰值增速达 11.81%。当 $\rho(\text{PM}_{2.5}\text{-mean})$ 在 $45 \sim 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间时, $\rho(\text{O}_3\text{-perc90})$ 集中分布在超过 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区间, 6 年间平均有 74.97% 的复合污染城市处于此浓度区间。当 $\rho(\text{PM}_{2.5}\text{-mean}) > 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\rho(\text{O}_3\text{-perc90})$ 平均值的峰值显著下降, 降幅为 19.17%。

(2) 2015~2020 年中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的空间聚类格局相似, 热点区域集中分布在人口密集、城市化或工业化水平高的地区(如京津冀城市群、山西、河南和安徽等省), 冷点区域主要分布在西南、华南和东北地区。

(3) $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染城市数量由 2015 年→2018 年→2020 年呈先增后降的年际变化趋势, 空间分布呈现由分散到集聚的变动规律。2015~2017 年, 西北和华北地区东北部的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 主导污染减轻, 转为清洁类型, 但复合污染区域由原来的东部沿海地区向中西部地区扩散, 到 2017 年, 形成京津冀城市群及周边城市、中原城市群、山东和江苏的大部分城市为核心的成片复合污染区域。

(4) $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染现象主要发生在暖季(4~10 月)。从空间分布来看, $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染的城市在春季主要连片分布在京津冀城市群、山西、河南、山东和江浙沪等东部沿海城市; 到夏季, $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染区域明显缩小, 江浙沪地区的部分城市转为 O_3 主导污染区域; 在秋季, 复合污染区域进一步南移至湖南和湖北的部分城市。

(5) 复合污染区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度重心的迁移方向表现出相似性, 存在明显的西移和北移趋势, 高浓度复合污染问题在中国中北部城市集中凸显。此外, 从 2017 年开始复合污染区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度重心间距显著缩小, 减少接近 50%。

参考文献:

- [1] 肖致美, 徐虹, 高璟贇, 等. 天津市 $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1140-1150.
Xiao Z M, Xu H, Gao J Y, et al. Characteristics and sources of $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ compound pollution in Tianjin [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1140-1150.
- [2] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1190-1200.
Wang L L, Liu X J, Li D, et al. Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of $\text{PM}_{2.5}$ in the Yangtze River economic belt [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1190-1200.
- [3] 生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2021. 1-5.
- [4] 赵淑婷, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸市 $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染特征及相互影响研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2250-2261.

- Zhao S T, Wang L T, Qi M Y, et al. Study on the characteristics and mutual influence of $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ complex pollution in Handan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(6): 2250-2261.
- [5] 赖安琪, 陈晓阳, 刘一鸣, 等. 珠江三角洲 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合污染过程的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4022-4031.
Lai A Q, Chen X Y, Liu Y M, et al. Numerical simulation of a complex pollution episode with high concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 over the Pearl River Delta region, China [J]. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4022-4031.
- [6] 贾梦唯, 赵天良, 张祥志, 等. 南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2567-2577.
Jia M W, Zhao T L, Zhang X Z, et al. Seasonal variations in major air pollutants in Nanjing and their meteorological correlation analyses [J]. China Environmental Science, 2016, 36(9): 2567-2577.
- [7] 李婷婷, 尉鹏, 程水源, 等. 北京一次近地面 O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$ 复合污染过程分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1979-1985.
Li T T, Wei P, Cheng S Y, et al. Analysis of a near earth surface O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ pollution in combination with its contaminating process in Beijing [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1979-1985.
- [8] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 北京市夏季不同 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 807-815.
Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, et al. Different air pollution situations of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ during summer in Beijing [J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 807-815.
- [9] 刘可欣, 卢苗苗, 张裕芬, 等. 天津市夏秋季 $\text{O}_3\text{-PM}_{2.5}$ 复合污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3650-3662.
Liu K X, Lu M M, Zhang Y F, et al. Analysis of characteristics and meteorological causes of $\text{O}_3\text{-PM}_{2.5}$ compound pollution in summer and autumn over Tianjin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(9): 3650-3662.
- [10] 肖致美, 李源, 孔君, 等. 天津市 $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ 复合污染特征及气象影响分析[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 2928-2936.
Xiao Z M, Li Y, Kong J, et al. Characteristics and meteorological factors of $\text{PM}_{2.5}\text{-O}_3$ compound pollution in Tianjin [J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 2928-2936.
- [11] 何国文, 邓涛, 欧阳珊珊, 等. 广州地区秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合污染的观测研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(6): 250-259.
He G W, Deng T, Ouyang S S, et al. Observation studies on the $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 complex episodes during autumn in Guangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(6): 250-259.
- [12] Jung C R, Lin Y T, Hwang B F. Ozone, particulate matter, and newly diagnosed alzheimer's disease: a population-based cohort study in Taiwan [J]. Journal of Alzheimer's Disease, 2015, 44(2): 573-584.
- [13] GBD 2015 Risk Factors Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015 [J]. The Lancet, 2016, 388(10053): 1659-1724.
- [14] 齐冰, 牛彧文, 杜荣光, 等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 443-451.
Qi B, Niu Y W, Du R G, et al. Characteristics of surface ozone

- concentration in urban site of Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 443-451.
- [15] Gao X, Li W D. A graph-based LSTM model for PM_{2.5} forecasting[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(9), doi:10.1016/j.apr.2021.101150.
- [16] Figueres C, Landrigan P J, Fuller R. Tackling air pollution, climate change, and NCDs: time to pull together [J]. *The Lancet*, 2018, **392**(10157): 1502-1503.
- [17] 王鑫龙, 赵文吉, 李令军, 等. 中国臭氧时空分布特征及与社会经济因素影响分析[J]. *地球与环境*, 2020, **48**(1): 66-75.
- Wang X L, Zhao W J, Li L J, *et al.* Characteristics of spatiotemporal distribution of O₃ in China and impact analysis of socio-economic factors [J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(1): 66-75.
- [18] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 中国城市 O₃ 浓度时空变化特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1120-1131.
- Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1120-1131.
- [19] 李霄阳, 李思杰, 刘鹏飞, 等. 2016年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1263-1274.
- Li X Y, Li S J, Liu P F, *et al.* Spatial and temporal variations of ozone concentrations in China in 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1263-1274.
- [20] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter [J]. *Science*, 1997, **277**(5322): 116-119.
- [21] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [22] Li K, Jacob D J, Shen L, *et al.* Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(19): 11423-11433.
- [23] 邵平, 辛金元, 安俊琳, 等. 长三角工业区夏季近地层臭氧和颗粒物污染相互关系研究[J]. *大气科学*, 2017, **41**(3): 618-628.
- Shao P, Xin J Y, An J L, *et al.* An analysis on the relationship between ground-level ozone and particulate matter in an industrial area in the Yangtze River delta during summertime [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(3): 618-628.
- [24] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog [J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 827-830.
- [25] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 PM_{2.5} 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
- Li H, Peng L, Bi F, *et al.* Strategy of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
- [26] Zhao D D, Liu G J, Xin J Y, *et al.* Haze pollution under a high atmospheric oxidization capacity in summer in Beijing: insights into formation mechanism of atmospheric physicochemical processes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(8): 4575-4592.
- [27] 花丛, 江琪, 迟晔元, 等. 我国中东部地区 2015—2020 年夏半年 PM_{2.5} 和臭氧复合污染气象特征分析[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 650-658.
- Hua C, Jiang Q, Chi X Y, *et al.* Meteorological characteristics of PM_{2.5}-O₃ air combined pollution in central and eastern China in the Summer Half Years of 2015-2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 650-658.
- [28] 陈楠, 陈立, 王莉莉, 等. 2015—2020 年湖北省 PM_{2.5} 和臭氧复合污染特征演变分析[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 659-672.
- Chen N, Chen L, Wang L L, *et al.* Characteristic and trend analysis of PM_{2.5} and ozone in air compound pollution in Hubei province during 2015-2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 659-672.
- [29] 毛卓成, 许建明, 杨丹丹, 等. 上海地区 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象成因分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2730-2738.
- Mao Z C, Xu J M, Yang D D, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological causes of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2730-2738.
- [30] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 江苏省大气复合污染特征与相关气象驱动[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2830-2839.
- Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, *et al.* Atmospheric compound pollution characteristics and the effects of meteorological factors in Jiangsu province [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2830-2839.
- [31] Gong X, Hong S, Jaffe D A. Ozone in China: spatial distribution and leading meteorological factors controlling O₃ in 16 Chinese cities [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(9): 2287-2300.
- [32] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [33] Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2015 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, **29**(2): 253-270.
- [34] 肖嘉玉, 何超, 慕航, 等. 中国城市空气污染时空分布格局和人口暴露风险[J]. *地理科学进展*, 2021, **40**(10): 1650-1663.
- Xiao J Y, He C, Mu H, *et al.* Spatiotemporal pattern and population exposure risks of air pollution in Chinese urban areas [J]. *Progress in Geography*, 2021, **40**(10): 1650-1663.
- [35] 朱彤, 万薇, 刘俊, 等. 世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读[J]. *科学通报*, 2022, **67**(8): 697-706.
- Zhu T, Wan W, Liu J, *et al.* Insights into the new WHO Global Air Quality Guidelines [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(8): 697-706.
- [36] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- [37] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近 20 年来中国 PM_{2.5} 污染演变的时空过程[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 1-13.
- Shi Y, Liu R M, Luo Y, *et al.* Spatiotemporal variations of PM_{2.5} pollution evolution in China in recent 20 years [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 1-13.
- [38] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 PM_{2.5} 污染时空分

- 布规律[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 641-650.
- Li M S, Ren X X, Yu Y, *et al.* Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in China's mainland[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 641-650.
- [39] 苏吾比努尔·热克甫, 玉散·吐拉甫, 迪丽努尔·塔力甫, 等. 和田市城区 PM_{2.5} 化学组成特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(5): 823-833.
- Suwubinuer R, Yusan T, Dilnuer T, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Hotan City, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(5): 823-833.
- [40] 舒卓智, 赵天良, 郑小波, 等. 清洁大气背景下贵阳空气质量变化及气象作用[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4460-4468.
- Shu Z Z, Zhao T L, Zheng X B, *et al.* Air quality variations and meteorological drivers of Guiyang city in clean atmospheric environment[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4460-4468.
- [41] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 等. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析[J]. 地理学报, 2021, **76**(11): 2814-2829.
- Zhao Y Y, Zhang X P, Chen M X, *et al.* Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(11): 2814-2829.
- [42] 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.
- Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [43] 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.
- [44] 姜华, 高健, 李红, 等. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(3): 601-610.
- Jiang H, Gao J, Li H, *et al.* Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 601-610.
- [45] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, *et al.* Inverse relations of PM_{2.5} and O₃ in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China[J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(3), doi:10.3390/atmos8030059.



CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ling, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)