

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

天津市“十三五”期间 O_3 污染特征和驱动因子

李源¹, 肖致美¹, 毕晓辉², 蔡子颖³, 徐虹¹, 高璟赞¹, 郑乃源¹, 杨宁^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 3. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 为了解“十三五”期间天津市 O_3 污染特征和驱动因素, 基于 2016 ~ 2020 年高时空分辨率的在线监测数据, 利用空间自相关、空间热点分析和 STIRPAT 模型分析了 O_3 污染空间分布、聚集特征和驱动因子。结果表明, 2016 ~ 2020 年天津市 O_3 浓度变化特征呈现污染发生时间点提前和污染范围扩大的趋势。6 ~ 10 月 O_3 污染分布具有显著聚集性, 高值-高值聚集区主要为市内六区、北辰区、津南区和静海区, O_3 浓度在西南部地区形成高值热点聚集区, 在东北部地区形成低值冷点聚集区。气温、小风百分率和日照时数等气象因子与 NO_x 排放量、VOCs 排放量和机动车保有量等社会因子对 O_3 浓度有显著性影响, 综合驱动 STIRPAT 模型的回归拟合效果比单一气象因子或社会因子模型更好。为科学高效地开展“十四五”期间 O_3 污染的防治, 在关注气象条件基础上, 在“双碳”目标的约束下, 天津市应进一步提升钢铁、石化、火电和建材等行业全过程排放的绩效水平, 引导企业清洁化提升改造、转型升级和绿色发展, 减少企业 VOCs 和 NO_x 的排放量, 同时进一步控制燃油机动车保有量的增加, 大力推广新能源机动车, 减少机动车尾气的排放。

关键词: “十三五”期间; 天津市; 空间自相关; 空间热点分析; STIRPAT 模型

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4241-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210168

Characteristics and Driving Factors of O_3 Pollution During 13th Five-Year Period in Tianjin

LI Yuan¹, XIAO Zhi-mei¹, BI Xiao-hui², CAI Zi-ying³, XU Hong¹, GAO Jing-zun¹, ZHENG Nai-yuan¹, YANG Ning^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: The spatial distribution, accumulation features, and driving factors of O_3 pollution were analyzed using spatial autocorrelation and hotspot analysis and the STIRPAT model based on the high spatiotemporal resolution online monitoring data from 2016 to 2020 in Tianjin. The results showed that the variation characteristics of O_3 concentration in Tianjin from 2016 to 2020 had the trend of pollution occurring in advance and the scope of the pollution expanding. The distribution of O_3 pollution showed significant aggregation from June to October. High-high value clustering areas included six urban districts, Beichen District, Jinnan District, and Jinghai District. O_3 concentration formed high value hot spots in the southwest and low value cold spots in the northeast. Meteorological factors such as temperature, breeze percentage, and sunshine duration, as well as social factors such as NO_x emission, VOCs emission, and motor vehicle ownership had significant effects on O_3 concentration. The regression fitting effect of the integrated drive STIRPAT model was better than that of the single meteorological factor or social factor models. In order to promote scientific and efficient prevention and control of ozone pollution during the 14th Five-Year Plan period, meteorological conditions require attention; under the goal of “peaking carbon dioxide emissions and achieving carbon neutrality,” it is necessary for Tianjin to further improve the emission performance of steel, petrochemicals, thermal power, building materials, and other industries. Additionally, clean upgrading, transformation, and green development should be guided for enterprises to reduce VOCs and NO_x emissions. At same time, the increase in fuel vehicle numbers should be controlled, and new energy vehicles should be vigorously promoted to reduce vehicle emissions.

Key words: 13th Five-Year Period; Tianjin; spatial autocorrelation; spatial hotspot analysis; STIRPAT model

随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》深入实施,“十三五”期间,我国城市 $PM_{2.5}$ 平均浓度持续下降^[1,2],但城市臭氧(O_3)污染日益凸显,在全国多个区域都没能得到有效控制。 O_3 浓度水平上升,污染范围扩大,已逐渐成为制约空气质量持续改善的主要因素^[3~6]。对于京津冀、长三角、珠三角和成渝地区等特大型城市群及其周边地区而言, O_3 污染现已成为困扰经济快速发展地区的重要环境问题^[7,8]。

近地面 O_3 主要是人类活动排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等前体物在光照下发生复杂光化学反应的产物^[9~16],其浓度水平一方

面受气象条件影响,另一方面与社会因素密切相关^[17,18]。一般认为,影响 O_3 的气象因子主要有气温、紫外辐射、相对湿度、边界层高度和风等^[19~26], O_3 污染多出现在高温、低湿、强辐射的天气^[27~29]。王玫等^[30]分析京津冀 O_3 变化特征和与气象要素的关系表明,当气温大于 30℃、相对湿度为 50%~60%、风速为 2.0 ~ 3.0 $m \cdot s^{-1}$ 时, O_3 超标概

收稿日期: 2022-10-17; 修订日期: 2022-11-08

基金项目: 国家大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG202102); 国家自然科学基金项目(42177465); 天津市科技计划项目(21YFNSN00200)

作者简介: 李源(1988~),女,硕士,工程师,主要研究方向为臭氧污染特征与防控, E-mail: liyuanku@163.com

* 通信作者, E-mail: 13820388835@163.com

O₃-8h; $\bar{x}$ 为所有监测站 O₃-8h 的平均值; W_{ij} 为权重矩阵, 由于本研究的 O₃-8h 是点文件, 故选择欧氏距离权重生成空间权重矩阵。

全局 Moran's I 只能判断整个区域 O₃ 浓度在空间上是否存在自相关性, 需要采用局部 Moran's I 探测聚集或分异的具体位置, 评价某一局部区域与其周边临近区域的浓度高低值聚集情况。将基于全局空间自相关分析的统计方法分解到局部空间上^[39], 得到局部 Moran's I 计算公式如下:

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

式中, 各符号含义与式(1)相同。本研究运用 GeoDa 软件来计算 I_i 值。

1.3.2 空间热点分析

为进一步分析天津市 O₃ 浓度高值或低值在空间上发生聚集的位置和范围, 采用空间热点分析 (Getis-Ord G_i^*) 研究局部空间聚类分布特征, 更详细地表示出是高值聚集 (热点), 还是低值聚集 (冷点)。热点分析不同于全局 Moran's I , 其对于 O₃ 浓度在空间上随机分布的情况也可能探测出某种程度的聚集, 也不同于局部 Moran's I 只针对某一局部区域, 而是可以同时反映某几个区域的高低值 (冷热点) 分布。空间热点分析可在整个研究区域内探测出 O₃ 浓度显著高于或低于其他地方的区域, 将空间分布聚集的程度通过热点与冷点进行区分^[40]。公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \cdot \sqrt{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)^2 / (n-1)}} \quad (3)$$

式中, S 为样本标准差, 其他符号含义与式(1)相同。本研究运用 ArcGIS 软件进行空间热点探测

分析。

1.3.3 STIRPAT 模型

采用 STIRPAT 模型分析 O₃ 驱动因素, 该模型由 IPAT 模型演变而来^[41]。为克服 IPAT 模型中各因素等比例影响的不足, York 等基于 IPAT 模型构建了 STIRPAT 模型^[42], 其表达式为:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (4)$$

为消除模型中可能存在的异方差影响, 本研究将所有变量进行对数化处理, 对数化之后的扩展 STIRPAT 模型如下:

$$\ln I = a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e \quad (5)$$

式中, I 为大气污染情况; P 为人口规模; A 为富裕程度; T 为技术水平; a 为常数; b 、 c 和 d 分别为 P 、 A 和 T 的指数项; e 为误差项。

在使用 STIRPAT 模型时, 由于气象因子或社会因子之间具有相关的共同趋势, 会产生多重共线问题, 导致估计失真或难以估计准确。本研究在构建模型之前采用方差膨胀因子 (VIF) 检验多重共线性, 通常以 10 作为判断边界, 当 $VIF < 10$ 时, 不存在多重共线性, 当 $VIF \geq 10$ 时, 存在较强多重共线性^[43]。

2 结果与讨论

2.1 O₃ 浓度时空变化特征

“十三五”期间, 天津市 $\rho(O_3)$ 由 2016 年的 $157 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 升至 2020 年的 $190 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 累计上升 31.2% (图 2), 2017~2020 年连续 4 a 超过国家二级浓度限值标准 ($160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 其中 2018 年达到峰值 ($201 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。从月浓度分布上看, 天津市 O₃ 浓度在每年的 1~5 月上升, 6 月达到全年峰值, 7 月后呈现下降趋势, 12 月达到全年谷值, 与大多数城市变化特征相同^[44]。5~9 月天津市气温较高, 日最高气温大于 30°C 的天数多^[45], 大气光化学反应强, 该时期各年 O₃ 浓度均较高, 各月均

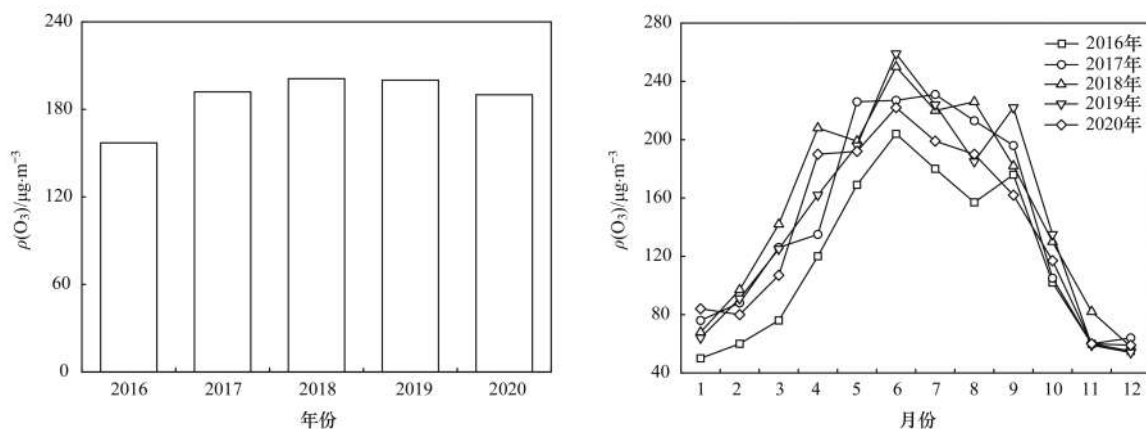


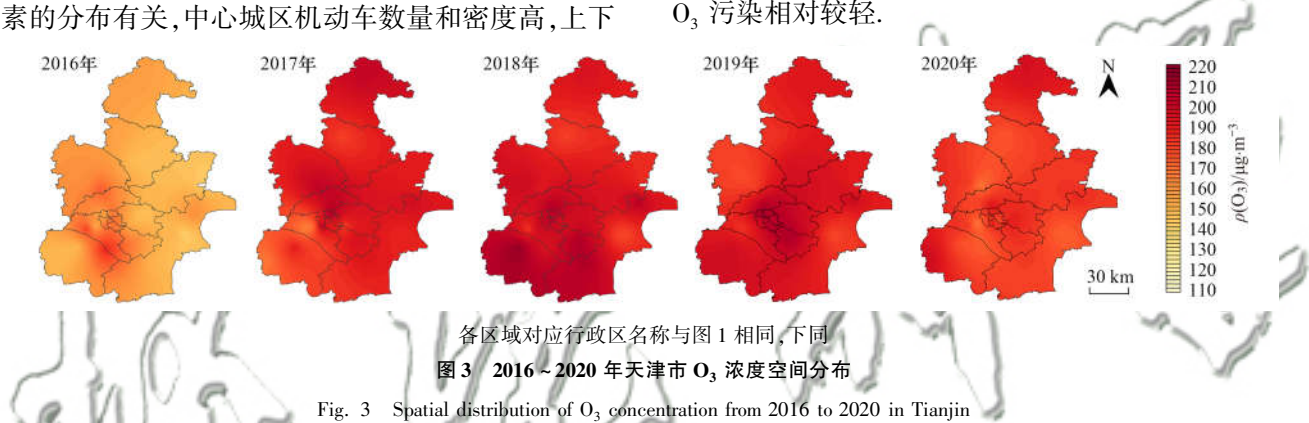
图 2 2016~2020 年天津市 O₃ 浓度

Fig. 2 O₃ concentration from 2016 to 2020 in Tianjin

超过 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.“十三五”后期(2018~2020年),4月 O_3 浓度明显上升,各年 $\rho(\text{O}_3)$ 均超标,分别为208、162和 $190\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与“十三五”后期4月降水相对较少,日最高气温大于 30°C 的天数明显增加有关^[45].“十三五”期间,天津市 O_3 月浓度变化特征反映出 O_3 污染发生时间节点提前, O_3 污染加重的特点.

从空间分布上看(图3),“十三五”初期(2016年),天津市西部和中部地区 O_3 浓度较高,东南部区域 O_3 浓度相对较低;2017年开始,天津市16个区 O_3 浓度均超过国家二级标准限值,高值区域呈现明显扩大趋势,其中中部、西南部、西部和北部区域 O_3 浓度均较高,东南部区域 O_3 浓度相对较低.天津市 O_3 浓度空间分布特征与污染源排放和气象因素的分布有关,中心城区机动车数量和密度高,上下

班高峰期交通堵塞严重,机动车排放量大,同时餐饮油烟、干洗、加油站和市政有机溶剂使用等面源排放影响较高,受城市“热岛效应”影响,温度相对较高, O_3 污染较重;中部的环城区域钢铁、火电和建材等行业 O_3 前体物排放量大,西南部静海的黑色金属冶炼和压延加工业、医药、家具和运输设备制造业以及西部的武清区域的汽车制造、化学品制造、医药和家具行业等行业VOCs排放量大, O_3 污染较重;北部的蓟州区 O_3 污染较重与植物源排放量大有关.东南部的滨海新区石化行业排放量大,但受天津港船舶和柴油车货运影响, NO 排放量大, O_3 可以通过 NO 滴定效应去除^[46],较高的 NO 对 O_3 生成有明显的抑制作用^[47,48],同时东南部区域受海陆风影响,东南风发生频率高^[36],大气扩散条件相对较好, O_3 污染相对较轻.



2.2 空间自相关分析

“十三五”期间天津市 O_3 浓度全局空间自相关分析结果显示(表1),6~10月各月的全局Moran's I 均为正值且均通过显著性检验($P < 0.001$),说明6~10月天津市 O_3 浓度呈现出高低

值聚集的态势,其分布明显受自身和邻近区域之间的影响;其余各月全局Moran's I 接近0且均不显著,说明区域 O_3 浓度之间相互独立.因此,6~10月天津市 O_3 污染的防控需要各区之间密切合作和协同治理.

表 1 2016~2020 年天津市 O_3 浓度全局 Moran's I
Table 1 Global Moran's I of O_3 concentration in Tianjin from 2016 to 2020

月份	Moran's I	Z-score	P-value	空间自相关
1	0.051	0.776	0.438	独立
2	0.049	0.703	0.482	独立
3	0.043	1.318	0.188	独立
4	0.074	1.712	0.087	独立
5	0.073	1.680	0.093	独立
6	0.476	4.564	<0.001	聚集
7	0.487	4.693	<0.001	聚集
8	0.263	2.861	<0.001	聚集
9	0.355	3.224	<0.001	聚集
10	0.298	3.348	<0.001	聚集
11	0.068	1.329	0.184	独立
12	0.070	1.379	0.168	独立
6~10	0.461	4.310	<0.001	聚集

为进一步说明哪些区域出现聚集和其对天津市全局空间自相关的贡献,对“十三五”期间6~

10月的 O_3 浓度进行局部自相关分析,结果如图4,其中Moran's I 散点图的第一、第二、第三和第

四象限分别为高值-高值聚集区(H-H,即该区域与其周边区域 O₃ 浓度均为高值)、低值-高值聚集区(L-H,即该区域 O₃ 浓度较低,但其周边 O₃ 浓度较高)、低值-低值聚集区(L-L,即该区域与其周边区域 O₃ 浓度均为低值)和高值-低值聚集区(H-L,即该区域 O₃ 浓度较高,但其周边 O₃ 浓度较低). H-H 和 L-L 聚集区表明 O₃ 污染呈正空间自相关,

O₃ 浓度呈现高低值聚集性; H-L 和 L-H 聚集区表明 O₃ 污染呈负空间自相关, O₃ 浓度呈现高低值分异性. “十三五”期间 6~10 月天津市 O₃ 浓度空间分布呈正相关聚集, H-H 和 L-L 显著聚集区占 62.5%,其中 H-H 聚集区为市内六区、北辰区、津南区和静海区,是 O₃ 污染急需集中治理的区域.

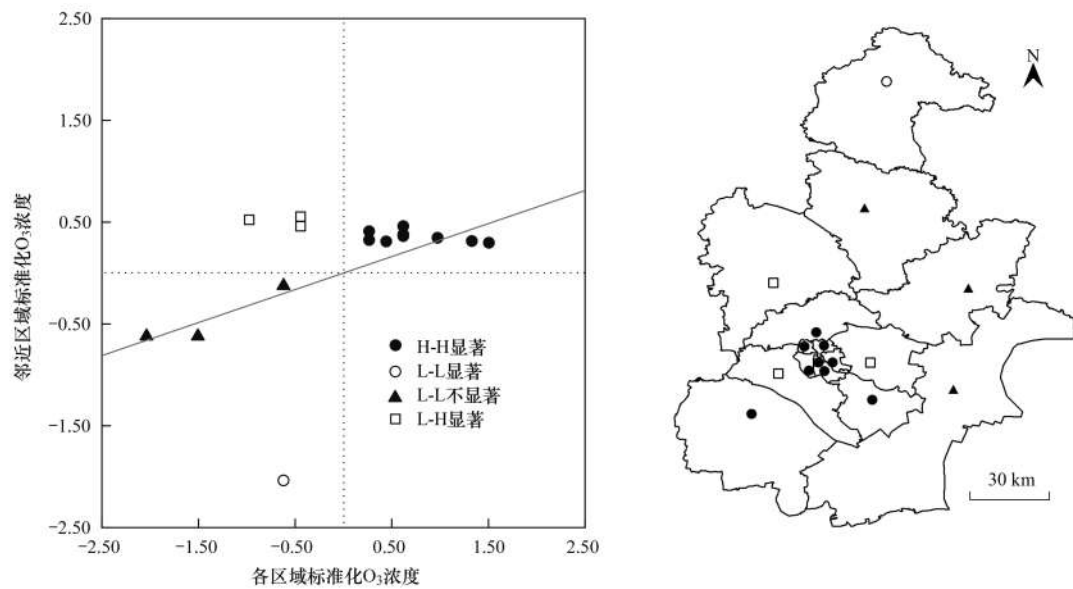


图4 “十三五”期间 6~10 月天津市 O₃ 浓度局部 Moran's I 散点图和空间分布

Fig. 4 Local Moran's I scatter plot and spatial distribution of O₃ concentration in Tianjin from June to October during 13th Five-Year Period

2.3 空间冷热点分析

基于空间自相关分析结果,进行冷热点探测,发现“十三五”期间 6~10 月天津市 O₃ 浓度整体表现出强聚集性,其中市内六区、西青区和津南区呈现 99% 置信度的热点聚集,北辰区和静海区呈现 95% 置信度的热点聚集,这些区域的 O₃ 浓度显著高于其他地方;宝坻区呈现 99% 置信度的冷点聚集,蓟州区和宁河区呈现 95% 置信度的冷点聚集,这些区域的 O₃ 浓度显著低于其他地方(图 5). 由此可见,天津市 O₃ 浓度冷热点空间分布非常明显,即西南部地区形成浓度高值聚集区域, O₃ 污染形势严重,是防治的重点地区,东北部地区形成浓度低值聚集区域, O₃ 污染相对较轻.

2.4 O₃ 驱动因子分析

2.4.1 相关性分析与多重共线性检验

本研究选取的 8 个气象因子均为与 O₃ 浓度相关的气象要素,但在构建 STIRPAT 模型之前,首先对气象因子和社会因子进行相关性分析,以确保因子独立性. 气象因子之间的相关性分析表明(表 2),紫外辐射、混合层厚度和静稳指数与其他气象因子的相关性较高,均存在 4 个相关系数绝对值大于 0.7 的情况,另外 5 个气象因子之间的相关系

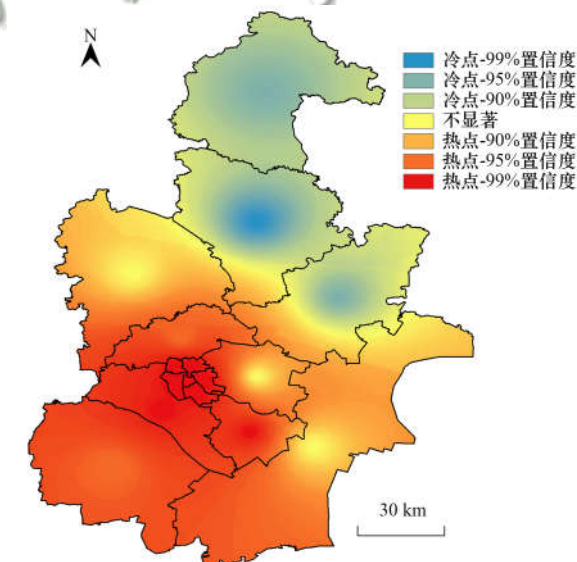


图5 “十三五”期间 6~10 月天津市 O₃ 浓度冷热点区域

Fig. 5 Cold and hot spot area of O₃ concentration in Tianjin from June to October during the 13th Five-Year Period

数较低. 在此基础上,对气温、相对湿度、小风百分率、日照时数和逆温百分率进行多重共线性检验, VIF 分别为 6.63、6.05、2.75、4.79 和 1.85, VIF 均小于 10,说明 5 个气象因子之间不存在多重共线性,不会由于相互作用而影响模型的准确

性和稳定性.

社会因子之间的相关性分析表明(表3),烟粉尘排放量、人口密度和生产总值与其他社会因子的相关性较高,均存在4个相关系数绝对值大于0.7的情况,另外5个社会因子之间的相关系数较低.对

SO₂排放量、NO_x排放量、VOCs排放量、第二产业占比和机动车保有量进行多重共线性检验,VIF分别为5.18、3.61、2.63、1.28和4.02,VIF均小于10,说明5个社会因子之间共同趋势不大,不存在多重共线性.

表2 气象因子之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between meteorological factors

	气温	相对湿度	小风百分率	紫外辐射	日照时数	混合层厚度	静稳指数	逆温百分率
气温	1.000							
相对湿度	0.540	1.000						
小风百分率	-0.309	0.417	1.000					
紫外辐射	0.706	-0.087	-0.716	1.000				
日照时数	0.463	-0.390	-0.607	0.862	1.000			
混合层厚度	0.690	-0.143	-0.778	0.879	0.783	1.000		
静稳指数	0.128	0.752	0.770	-0.374	-0.763	-0.733	1.000	
逆温百分率	-0.602	-0.374	0.356	-0.389	-0.181	-0.440	-0.005	1.000

表3 社会因子之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between social factors

	SO ₂ 排放量	NO _x 排放量	烟粉尘排放量	VOCs排放量	人口密度	生产总值	第二产业占比	机动车保有量
SO ₂ 排放量	1.000							
NO _x 排放量	0.734	1.000						
烟粉尘排放量	0.848	0.490	1.000					
VOCs排放量	-0.178	-0.546	0.185	1.000				
人口密度	0.513	0.139	0.736	0.747	1.000			
生产总值	-0.434	-0.044	-0.713	-0.311	-0.788	1.000		
第二产业占比	-0.583	-0.006	-0.307	-0.191	-0.365	0.962	1.000	
机动车保有量	-0.594	-0.109	-0.831	-0.501	-0.904	0.706	0.493	1.000

2.4.2 气象和社会单因子驱动分析

利用式(5)建立O₃浓度与气温、相对湿度、小风百分率、日照时数和逆温百分率等气象因子STIRPAT模型,模型调整后的R²为0.868、标准误差为0.188,回归拟合效果好.模型结果可知(表4),气温、小风百分率和日照时数通过了显著性检验(P<0.05),说明气温的上升、小风百分率的加大和日照时数的增多均对O₃浓度的升高有明显驱动作用.气象因子中,气温对O₃浓度

的影响最大,较高的气温一方面有助于生物源VOCs等O₃前体物的挥发,另一方面能够提供光化学反应条件,使反应速率大大提高,驱动O₃的生成^[49].日照时数的增多一定程度上意味着光照时间的延长、紫外辐射的增加,在为生成O₃的光化学反应提供良好条件的同时,也延长了反应时间,有利于O₃的生成与累积.小风百分率的加大会减弱大气湍流作用,降低大气输送能力,造成本地累积.

表4 气象因子和社会因子STIRPAT模型结果

Table 4 STIRPAT model results of meteorological factors and social factors

气象因子	回归系数	P-value	社会因子	回归系数	P-value
气温	8.416	<0.001	SO ₂ 排放量	0.031	0.845
相对湿度	0.502	0.090	NO _x 排放量	-0.958	<0.001
小风百分率	-0.344	0.015	VOCs排放量	1.211	<0.001
日照时数	0.526	0.046	第二产业占比	0.133	0.713
逆温百分率	-0.021	0.755	机动车保有量	2.983	0.028

建立O₃浓度与SO₂排放量、NO_x排放量、VOCs排放量、第二产业占比和机动车保有量等社会因子STIRPAT模型,模型调整后的R²为0.740,标准误差为0.264,回归拟合效果较好.根据模型结果(表4),NO_x排放量、VOCs排放量和机动车保有

量通过了显著性检验(P<0.05),这3个社会因子对O₃有明显的驱动作用,其中机动车保有量和VOCs排放量对O₃的影响较大.“十三五”期间,天津市机动车保有量由2016年的281.8万辆增加至2020年的338.5万辆^[50],机动车尾气中的NO_x和

VOCs 是 O₃ 的主要前体物,汽车保有量大的城市通常有更高的 O₃ 浓度^[51~53]. 同时,天津市 O₃ 的生成处于 VOCs 控制区^[45,54],“十三五”期间的 VOCs 排放量仍处于高位^[55],对 O₃ 的驱动作用明显.

2.4.3 多因子综合驱动分析

选取对 O₃ 有显著性影响的 6 个因子进行多重共线性检验,得到气温、小风百分率、日照时数、NO_x 排放量、VOCs 排放量和机动车保有量的 VIF 分别为 5.02、2.40、2.42、3.55、4.54 和 2.17,VIF 均小于 10,说明因子之间不存在多重共线性,可以确保模型的准确性和稳定性. 建立的综合驱动 STIRPAT 模型,调整后的 R² 为 0.891,标准误差为 0.169,回归拟合效果比单一建立气象因子或社会因子模型更好(表 5). 结果表明,气温、日照时数、NO_x 排放量、VOCs 排放量和机动车保有量均通过了显著性检验($P < 0.05$),其中气温与 O₃ 浓度呈极显著的正相关关系,是最重要的 O₃ 驱动因子. 为科学高效地开展“十四五”期间 O₃ 污染的防治,在关注气象条件的基础上,在“双碳”目标的约束下,天津市应进一步提升钢铁、石化、火电和建材等行业全过程排放的绩效水平,引导企业清洁化提升改造、转型升级和绿色发展,减少企业 VOCs 和 NO_x 的排放量;同时,要进一步控制燃油机动车保有量的增加,大力推广新能源机动车,减少机动车尾气的排放.

表 5 综合驱动 STIRPAT 模型结果

Table 5 STIRPAT model results of integrated driving

因子	回归系数	P-value
气温	10.800	<0.001
小风百分率	-0.294	0.132
日照时数	0.137	0.032
NO _x 排放量	-0.181	0.032
VOCs 排放量	-0.204	0.003
机动车保有量	0.699	0.021

3 结论

(1)“十三五”期间天津市 O₃ 浓度整体呈上升趋势,O₃ 污染主要集中在每年的 5~9 月,中部、西南部、西部和北部区域 O₃ 浓度相对较高,变化特征呈现出 O₃ 污染发生时间点提前、污染范围扩大的趋势.

(2)空间自相关分析表明,6~10 月天津市 O₃ 浓度全局 Moran's I 为正值且通过显著性检验($P < 0.001$),O₃ 污染分布具有明显的聚集性,H-H 聚集区主要为市内六区、北辰区、津南区和静海区,是 O₃ 污染急需集中治理的区域.

(3)空间热点分析表明,6~10 月天津市西南部

地区形成 O₃ 浓度高值热点聚集区域,O₃ 污染形势严重,是防治的重点地区,东北部地区形成 O₃ 浓度低值冷点聚集区域,O₃ 污染相对较轻.

(4)气象因子中,气温的上升、小风百分率的加大和日照时数的增多对 O₃ 浓度的升高有显著的促进作用;社会因子中,NO_x 排放量、VOCs 排放量和机动车保有量对 O₃ 有显著的驱动作用. 综合驱动 STIRPAT 模型回归拟合效果比单一气象因子或社会因子模型更好,气温、日照时数、NO_x 排放量、VOCs 排放量和机动车保有量是驱动 O₃ 浓度变化的重要因子.

参考文献:

- [1] 肖致美,徐虹,李立伟,等. 基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4355-4363.
Xiao Z M, Xu H, Li L W, et al. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on the online observation in Tianjin [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4355-4363.
- [2] 李源,陈魁,孔君,等. 天津市 PM_{2.5} 污染特征与来源解析[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 132-137.
Li Y, Chen K, Kong J, et al. Pollution characteristics and sources analysis of PM_{2.5} in Tianjin [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 132-137.
- [3] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, et al. Significant increase of surface ozone at a rural site, North of eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(6): 3969-3977.
- [4] 王雪涵,张文慧,毕晓辉,等. 2001—2020 年天津市大气污染特征的演变与防治历程[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 945-955.
Wang X H, Zhang W H, Bi X H, et al. Characteristics evolution and prevention development of ambient pollution in Tianjin, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(4): 945-955.
- [5] 李源,孔君,徐虹,等. 天津市臭氧污染特征及来源解析研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(6): 647-651.
Li Y, Kong J, Xu H, et al. Analysis of ozone pollution characteristic in Tianjin and its source apportionment [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(6): 647-651.
- [6] 姜华,常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1576-1582.
Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and control recommendations [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1576-1582.
- [7] 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.
- [8] 杜云松,罗彬,陈建文,等. 气温在成都地区臭氧预报的运用研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S1): 329-334.
Du Y S, Luo B, Chen J W, et al. Study on the application of air temperature in ozone forecast in Chengdu area [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S1): 329-334.
- [9] Doherty R M. Atmospheric chemistry: ozone pollution from near and far[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(9): 664-665.

- [10] Fishman J, Crutzen P J. The origin of ozone in the troposphere [J]. *Nature*, 1978, **274**(5674): 855-858.
- [11] Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Ground-level ozone in urban Beijing over a 1-year period; temporal variations and relationship to atmospheric oxidation [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **164-165**: 110-117.
- [12] Von Schneidmesser E, Monks P S, Allan J D, *et al.* Chemistry and the linkages between air quality and climate change [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 3856-3897.
- [13] Zhang Y N, Xiang Y R, Chan L Y, *et al.* Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(28): 4898-4906.
- [14] Liu T, Li T T, Zhang Y H, *et al.* The short-term effect of ambient ozone on mortality is modified by temperature in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 59-67.
- [15] Iqbal M A, Kim K H, Shon Z H, *et al.* Comparison of ozone pollution levels at various sites in Seoul, a megacity in Northeast Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **138**: 330-345.
- [16] Shi C Z, Wang S S, Liu R, *et al.* A study of aerosol optical properties during ozone pollution episodes in 2013 over Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **153**: 235-249.
- [17] Li Y, Wang J G, Li L W, *et al.* Research on the influence of weather patterns on ozone concentration: a case study in Tianjin [J]. *Atmosphere*, 2022, **13** (8), doi: 10.3390/atmos13081312.
- [18] Jaén C, Udina M, Bech J. Analysis of two heat wave driven ozone episodes in Barcelona and surrounding region: Meteorological and photochemical modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118037.
- [19] 白宇, 李源, 郭瑞, 等. 气象因子对天津市臭氧浓度的影响分析 [J]. *环境影响评价*, 2022, **44**(2): 14-19.
Bai Y, Li Y, Guo R, *et al.* Influence analysis of meteorological factors on ozone concentration in Tianjin [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2022, **44**(2): 14-19.
- [20] 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.
- [21] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [22] Xu X, Lin W, Wang T, *et al.* Long-term trend of surface ozone at a regional background station in eastern China 1991-2006: enhanced variability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(10): 2595-2607.
- [23] 周贺玲, 周玉都, 闻静. 河北廊坊近地面层 O₃ 特征及其影响因素 [J]. *干旱气象*, 2017, **35**(3): 405-411.
Zhou H L, Zhou Y D, Wen J. Characteristics of ozone over surface layer of Langfang City and its influencing meteorological factors [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, **35**(3): 405-411.
- [24] 崔梦瑞, 白林燕, 冯建中, 等. 京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(12): 1-13.
Cui M R, Bai L Y, Feng J Z, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(12): 1-13.
- [25] Yang L F, Xie D P, Yuan Z B, *et al.* Quantification of regional ozone pollution characteristics and its temporal evolution: Insights from identification of the impacts of meteorological conditions and emissions [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(2), doi: 10.3390/atmos12020279.
- [26] Ma M L, Yao G B, Guo J P, *et al.* Distinct spatiotemporal variation patterns of surface ozone in China due to diverse influential factors [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112368.
- [27] Solomon P, Cowling E, Hidy G, *et al.* Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 1885-1920.
- [28] Colette A, Andersson C, Baklanov A, *et al.* Is the ozone climate penalty robust in Europe? [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(8), doi: 10.1088/1748-9326/10/8/084015.
- [29] Ejimofor C S, Okoro E C, Sivla W T. Effects of elevated humidity on stratospheric ozone content in the tropics [J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2021, **15**(4): 182-193.
- [30] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [31] 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 Science of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [32] 柯碧钦, 何超, 杨璐, 等. 华北地区地表臭氧时空分布特征及驱动因子 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(4): 1562-1574.
Ke B Q, He C, Yang L, *et al.* The spatiotemporal variation of surface ozone and the main driving factors in North China [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(4): 1562-1574.
- [33] 胡雪萍, 方永丽. 中国大气污染的影响因素及防治措施研究——基于 STIRPAT 模型和固定效应面板模型 [J]. *工业技术经济*, 2018, **37**(2): 107-113.
Hu X P, Fang Y L. Study on influencing factors and preventive measures of atmospheric pollution in China-based on STIRPAT model and fixed effect panel model [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018, **37**(2): 107-113.
- [34] 汪可可, 康平, 周明卫, 等. 四川盆地臭氧浓度空间分异及驱动因子研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(6): 2361-2370.
Wang K K, Kang P, Zhou M W, *et al.* Spatial differentiation and driving factors of ozone concentration in Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(6): 2361-2370.
- [35] 王文美, 高璟赞, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [36] 关玉春, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市臭氧污染特征与影响因素分析 [J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 40-49.
Guan Y C, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Characteristics of ozone pollution and its influencing factors in Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 40-49.

- [37] 高璟贇, 肖致美, 徐虹, 等. 2019 年天津市挥发性有机物污染特征及来源[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 55-64.
Gao J Y, Xiao Z M, Xu H, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 55-64.
- [38] 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 等. 天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3054-3062.
Xiao Z M, Xu H, Cai Z Y, *et al.* Assessment of emission reduction effect of major air pollution control measures on PM_{2.5} concentrations during 13th Five-Year Period in Tianjin [J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3054-3062.
- [39] Anselin L. Local indicators of Spatial association—LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, **27**(2): 93-115.
- [40] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM_{2.5} 时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(4): 483-493.
Zhou L, Wu J J, Jia R J, *et al.* Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(4): 483-493.
- [41] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. Science, 1971, **171**(3977): 1212-1217.
- [42] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, **46**(3): 351-365.
- [43] Marquardt D W. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation[J]. Technometrics, 1970, **12**(3): 591-612.
- [44] 王笑哲, 赵莎, 郭灵辉, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市臭氧的季节性变化规律[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(8): 1786-1797.
Wang X Z, Zhao S, Guo L H, *et al.* Seasonal variation of ozone in ‘2+26’ cities in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(8): 1786-1797.
- [45] 肖致美, 李源, 孔君, 等. 天津市 PM_{2.5}-O₃ 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 PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2928-2936.
- [46] Seguel R J, Morales S R G E, Leiva G M A. Ozone weekend effect in Santiago, Chile [J]. Environmental Pollution, 2012, **162**: 72-79.
- [47] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 706-711.
An J L, Wang Y S, Li X, *et al.* Analysis of the relationship between NO, NO₂ and O₃ concentrations in Beijing [J]. Environmental Science, 2007, **28**(4): 706-711.
- [48] 毛敏娟, 刘厚通, 杜荣光. 不同时间尺度下杭州市 O₃ 污染特征及控制因素[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(11): 1844-1851.
Mao M J, Liu H T, Du R G. Characteristics and control factors of ozone pollution at different time scales in Hangzhou city [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(11): 1844-1851.
- [49] 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.
- [50] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 2017-2021 年天津统计年鉴 [EB/OL]. https://stats.tj.gov.cn/tjsj_52032/tjnj/, 2022-08-30.
- [51] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 478-492.
Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs Emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 478-492.
- [52] Zhang Y L, Yang W Q, Simpson I, *et al.* Decadal changes in emissions of volatile organic compounds (VOCs) from on-road vehicles with intensified automobile pollution control: case study in a busy urban tunnel in South China [J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 806-819.
- [53] 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.
- [54] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the ozone monitoring instrument [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, **120**(14): 7229-7246.
- [55] 肖致美, 徐虹, 高璟贇, 等. 天津市 PM_{2.5}-O₃ 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 PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1140-1150.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter ...	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil ...	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)