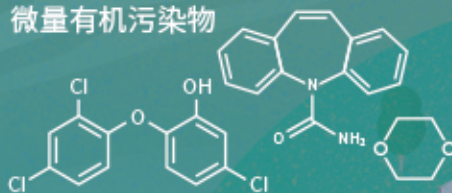


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析

王帅¹, 聂赛赛¹, 冯亚平¹, 崔建升^{1*}, 陈静², 刘大喜^{1*}, 石文雅²

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 石家庄市气象局, 石家庄 050081)

摘要: 为研究石家庄市域臭氧(O_3)和 NO_2 的时空演替格局及污染来源, 取2014~2017年市域18个区县(市)的 O_3 、 NO_2 和气象要素资料(温度、湿度、风速、降水、日照), 及2017年夏季挥发性有机物(VOCs)数据, 采用网络分析(network analysis)、空间插值(IDW)、Moran模型及后向轨迹方法, 对市域内区县 O_3 和 NO_2 的空间联系、演替格局、空间影响因素及污染来源进行了分析。结果表明: ①2014~2017年市域 O_3 浓度呈上升趋势, 市区 O_3 月度变动呈单峰型态势, 5~9月是 O_3 污染($O_3 \geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$)的典型时期(TPOP), TPOP的气象特征为高温低湿弱风强光照, NO_2 在TPOP内的负相关性显著; ②主城区 O_3 浓度在2015年后呈逐年显著上升, 主城区的污染物类型从 NO_2 (2014~2016年)转为VOCs(2016~2017年), 而县域2014~2017年均属VOCs控制区; ③市域 O_3 空间影响因子主要集中于工业、农业、经济和人口这4个维度($P \leq 0.05$)。第二产业对 O_3 污染的高值中心出现在主城区和栾城区, 与区域内工业生产活动有关; ④VOCs夏季监测期间的轨迹聚类出3个来源方向, 即A(东-东北, 26.67%)、B(西北-西, 43.33%)及C(东南-南, 30%), 轨迹A和C是VOCs传输的主要方向(东-东南)。

关键词: 臭氧(O_3); 二氧化氮(NO_2); 挥发性有机物(VOCs); 后向轨迹模型(HYSPLIT); 石家庄

中图分类号: X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)06-2679-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202011090

Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O_3 and NO_2 in Shijiazhuang

WANG Shuai¹, NIE Sai-sai¹, FENG Ya-ping¹, CUI Jian-sheng^{1*}, CHEN Jing², LIU Da-xi^{1*}, SHI Wen-ya²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Ground-level O_3 , NO_2 , and meteorological (temperature, humidity, wind speed, precipitation, and sunshine duration) data from 18 counties in Shijiazhuang City from 2014 to 2017, and volatile organic compounds (VOCs) data for Summer 2017, were analyzed to explore the spatial patterns, evolution, influencing factors, and source apportionment of O_3 and NO_2 in Shijiazhuang City. Network analysis and inverse distance weighted (IDW) spatial autocorrelation and backward trajectories analyses were performed. The results indicate that O_3 concentrations increased between 2014 and 2017, and monthly variations showed a unimodal trend. The typical period of peak O_3 pollution ($O_3 \geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$) was from May to September, characterized by high temperatures, low humidity, weak winds, and strong solar radiation. The O_3 concentrations were negatively correlated with the NO_2 . Furthermore, O_3 concentrations increased year-on-year since 2015 in main urban area, and the dominant pollutant type had changed from NO_2 (2014 to 2016) to VOCs (2016 and 2017). However, the O_3 concentration of county-areas limited by the VOCs. The main factors affecting O_3 concentrations were industry, agriculture, economy, and population, and centers of O_3 pollution associated with secondary industry appeared in the main urban areas of Shijiazhuang and Luancheng. Moreover, VOCs trajectories during the summer monitoring period were clustered in three source directions: (A) East-northeast, 26.67%; (B) Northwest-west, 43.33%; and (C) Southeast-south, 30%). Trajectories (A) and (C) were the dominant directions of VOC transmission (east-southeast).

Key words: ozone (O_3); NO_2 ; volatile organic compounds (VOCs); backward-trajectory (HYSPLIT); Shijiazhuang

城市中臭氧(O_3)的形成受到氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)或二者的共同限制^[1~3]。 NO_2 是 NO_x 中最为稳定的物种之一^[4],在强太阳辐射及VOCs的参与下^[5],多余 NO_2 的生成光解是城市高浓度 O_3 的唯一化学来源^[6]。此外,暴露于高浓度的 O_3 或 NO_x 环境会引发呼吸道疾病^[7,8],长期可能对生命造成威胁^[9,10]。因此,在快速城市化进程中,重新审视 O_3 - NO_2 的时空关联及 O_3 的污染来源,对城市制定有效的 O_3 - NO_2 控制策略至关重要。

当前,关于城市 O_3 的研究主要分为重污染过程^[11~13]、长时序规律^[14,15]、区域格局演变^[16,17]及

来源解析^[18,19]。 O_3 重污染过程分析一般选取连续的多个污染天,采用空气质量模型^[20,21]、前体物(NO_x 和VOCs)加密监测^[22]、垂直探空^[12,13]等方式,探究 O_3 重污染的成因; O_3 长时序规律的探究上,学者们一般取多年 O_3 及气象要素^[23],采用天气分型^[14]、相关性分析、数值分析(小波分析和K-Z滤波法等)及机器学习^[15]等手段,深入探讨 O_3 与相关污染物

收稿日期: 2020-11-10; 修订日期: 2020-12-02

基金项目: 河北省重点研发计划项目(18273705D)

作者简介: 王帅(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境监测与评价,E-mail: wshuai0812@outlook.com

* 通信作者,E-mail: cui1603@163.com; daxidaxi2@126.com

和气象的数值规律性,进而预测 O_3 浓度. O_3 的区域演替研究中,多基于大尺度和热点地区^[24],采用地统计^[25]及区域经济学^[26]等方法分析,探讨 O_3 的空间异质性及影响因素; O_3 的源解析方面,主要是对其前体物的解析,主要分为源清单、源模型及受体模型方法,普遍使用的为基于位置的后向轨迹模型(HYSPLIT)及基于化学组分的 PMF 模型^[18].

因此,针对小尺度的空间关联及影响因素研究中 O_3 - NO_2 的联合探讨较少,研究首先选取石家庄市域 2014~2017 年 17 个区县的 O_3 、 NO_2 、气象要素资料(温度、湿度、风速、降水、日照)及 2015 年经济统计数据,采用网络分析、空间插值及空间自相关方法,探讨 O_3 - NO_2 的空间关联及空间影响因素;进而结合 2017 年夏季 VOCs 数据及同期全球资料同化系统资料,利用后向轨迹模式研究不同方向的 VOCs 的潜在源区,以期对石家庄市全域制定 O_3 - NO_2 的精准防控对策提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区点位分布

石家庄市($37^{\circ}30' \sim 38^{\circ}50'N$, $113^{\circ}30' \sim 115^{\circ}30'E$)是河北省会,位于京津冀大气污染传输通道“2+26”城市的中部,市域面积约 14 464 km²,地形呈西高东低(图 1). 依据空间尺度和污染物排放特征不同,分为主城区(MUA)、市区(UD)、县域(CA)和市域(CR)这 4 个区域;其中,主城区包含长安、新华、桥西和裕华区,其是具有高密度交通和工业的城市化区域;市区则包含主城区、鹿泉、藁城和栾城区,是行政区划上的建制区(含郊区);县域是除市区外的市域部分,其除城镇外,绝大部分区域为耕地. 本研究中县域和市域均不含辛集市. 由于 O_3 监测站点均布设在城市(镇)的人口密集区^[27],因此, O_3 和 NO_2 及气象要素的插值点均设置在各区县(市)的城区(图 1).

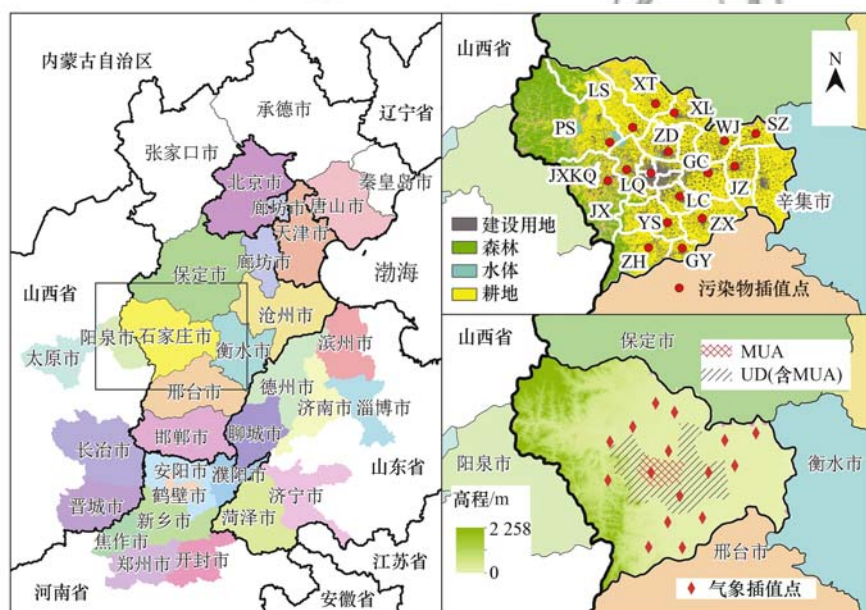


图 1 石家庄市域污染物和气象插值点位分布示意

Fig. 1 Distribution of pollutants and meteorological interpolation points in city-regions of Shijiazhuang

1.2 数据来源及处理

石家庄市域 18 个区县(市)2014~2017 年逐日大气环境数据(O_3 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 CO)来自于中国环境监测总站公布的数据(<http://www.cnemc.cn/>),有效数据量为 149 642 d,有效率为 94.85%;16 个区县(市)气象资料来源于国家或省级气象观测站的气象要素逐日数据,有效数据为 124 333 d (98.83%). 2015 年经济统计数据来源于河北经济年鉴(<http://tjj.hebei.gov.cn/hetj/tjsj/jjn/>),数据 216 项;石家庄市 2017 年夏季 VOCs 数据为文献^[28]中气相色谱-质谱测定的物种浓度,有效数据量

1 555 h (84.97%). HYSPLIT 模式数据采用同期美国国家环境预报中心提供的全球资料同化系统(GDAS)气象数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1/>).

数据的逐月、年及分月处理主要用到 Excel VBA,相关性分析用 SPSS 24 和 R-GUI. 多点位空间插值用 ArcGIS 10.3 ArcMap 实现,GeoDa 进行多元空间自相关分析. 后向轨迹的处理采用 MeteInfo Map 和 Origin 2018 pro 等软件实现. 环境监测数据处理过程符合《环境空气质量指数技术规定(试行)》(HJ 633-2012)、《环境空气质量标准》(GB

3095-2012) 及其修改单。

1.3 空间插值及空间作用分析

空间插值方法是将环境和气象观测点的点要素数据^[29],内插或外推为市域的空间分布状态^[30],根据数据分布和插值方法的适用性,选取与污染物扩散特征较符合的反距离权重插值(IDW)方法^[27]。

区域网络分析(network analysis)的一般过程是基于不同区域间的相关性分析结果,计算区域网络节点的空间关联度(relational degree of space,RDS),即区域间的空间影响程度,RDS(无量纲)越高,网格稳健(关联)性越强,其适用于具有空间关联特征的污染物分析。石家庄市域网络分析中,取18个区县(市)的O₃和NO₂月均值数据进行相关性及RDS分析^[31],区域间的RDS计量O₃满足 $R^2 > 0.95 (P \leq 0.05)$,NO₂满足 $R^2 > 0.92 (P \leq 0.05)$,网络分析主要使用到ggcor-Package。

双变量Moran模型(bivariate Moran's I,BMI)是Moran模型^[32]在多变量(multivariate)空间自相关上的扩展,BMI的统计量与单变量Moran模型一致。BMI依据变量及空间滞后变量的相互关系^[25],分为向心趋势和离心趋势。向心趋势是,区县2015年O₃浓度数据作为原始变量,经济指标依据空间权重^[26]计算为空间滞后变量,周围的空间滞后经济变量指向中心区域O₃浓度空间影响的态势,反之,为离心趋势。本研究主要探讨经济指标对O₃浓度的影响,故仅考虑BMI向心趋势。

1.4 后向轨迹模式

气流后向轨迹模式采用在美国NOAA和澳大利亚BOM研发的HYSPLIT模型基础上改进扩展的TrajStat模块^[33],结合2017年石家庄夏季(6~8月)VOCs数据,选取石家庄市人民会堂监测点(38°03'N,114°31'E)为模拟目标点^[27],初始高度200 m^[18],模拟时长36 h^[34],时间分辨率为1 h,聚类类型为Angle Distance算法,浓度权重轨迹(CWT)分析空间分辨率为0.25°,轨迹数量通过TSV图进行判断。

2 结果与讨论

2.1 O₃和NO₂的环境特征与区域间的作用

2.1.1 O₃和NO₂的环境特征

石家庄市2014~2017年O₃浓度均值变化中鹿泉区O₃污染较严重 $[(92 \pm 68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$,其次为藁城区 $[(84 \pm 58) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、栾城区 $[(80 \pm 57) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、井陉矿区 $[(74 \pm 60) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和主城区 $[(77 \pm 52) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$,O₃整体稳定程度低于2019年^[27],即年内O₃波动幅度较大(表1)。市区NO₂浓度4 a均值变化中,主城区 $[(49 \pm 25) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和井陉矿区 $[(50 \pm 24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 的NO₂浓度较高,而鹿泉区 $[(46 \pm 26) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、栾城区 $[(46 \pm 26) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和藁城区 $[(47 \pm 25) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 浓度较低(表1),主城区的NO₂浓度较高与机动车尾气排放有关^[28],而井陉矿区的NO₂浓度较高与其工业生产过程的脱硫脱硝工艺有重要联系。

表1 石家庄市区和县域2014~2017年O₃和NO₂统计/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 1 Statistics of O₃ and NO₂ in urban districts of Shijiazhuang and the county area from 2014 to 2017/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

项目		O ₃					NO ₂				
		2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	4 a 均值	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	4 a 均值
市区	主城区 MUA	148	135	150	184	77 ± 52	50	46	53	49	49 ± 25
	井陉矿区 JXKQ	147	170	128	190	74 ± 60	62	54	49	45	50 ± 24
	鹿泉区 LQQ	191	197	179	206	92 ± 68	57	47	48	42	46 ± 26
	栾城区 LCQ	162	137	135	195	80 ± 57	49	52	50	44	46 ± 26
	藁城区 GCQ	158	163	165	188	84 ± 58	52	47	52	48	47 ± 25
	市区均值	161	160	151	193	—	54	49	50	46	—
县域	正定县 ZDX	171	185	166	197	87 ± 63	57	51	56	50	51 ± 26
	行唐县 TX	177	183	169	191	92 ± 62	47	42	44	42	42 ± 23
	灵寿县 LSX	178	187	171	191	89 ± 65	47	42	43	45	42 ± 22
	平山县 PSX	184	200	180	200	90 ± 67	49	42	42	42	42 ± 22
	井陉县 JXX	174	200	163	214	88 ± 68	55	49	47	48	47 ± 24
	高邑县 GYX	186	194	161	172	86 ± 63	53	43	43	45	44 ± 23
	元氏县 YSX	178	188	159	185	86 ± 63	50	53	48	42	46 ± 26
	赞皇县 ZHX	187	196	183	202	93 ± 67	47	40	42	39	40 ± 23
	赵县 ZX	174	180	165	165	87 ± 59	52	47	51	45	47 ± 26
	晋州市 JZS	171	185	136	166	80 ± 61	48	48	38	49	43 ± 25
	深泽县 SZX	164	179	149	177	85 ± 57	48	43	47	41	43 ± 25
	无极县 WJX	180	183	149	185	90 ± 60	48	48	52	45	46 ± 27
	新乐市 XLS	179	179	168	190	91 ± 62	43	33	42	41	38 ± 20
	县域均值	177	188	163	187	—	50	45	46	44	—

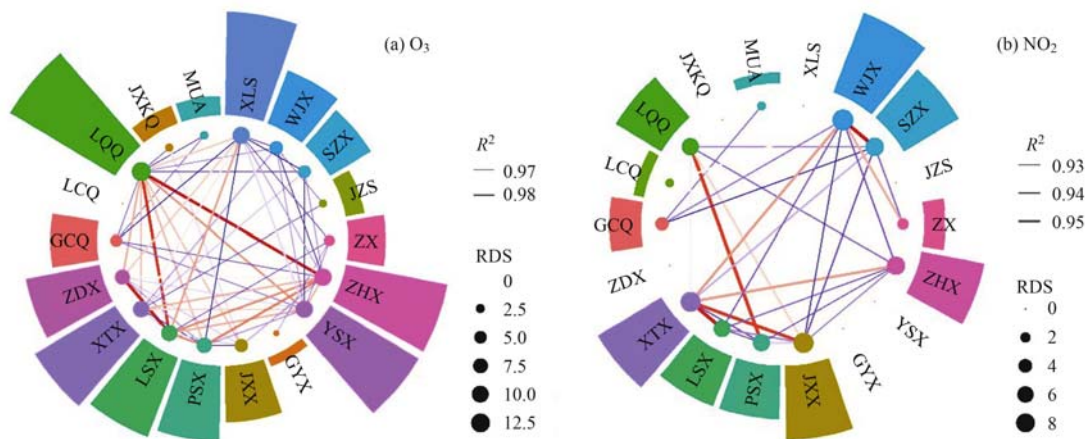
石家庄市域 2014~2017 年 13 个县域 O_3 浓度均值变化中(表 1), 赞皇县 O_3 浓度最高 [$(93 \pm 67) \mu g \cdot m^{-3}$], O_3 浓度高于 $90 \mu g \cdot m^{-3}$ 的县域有, 行唐县、新乐市、平山县和无极县. O_3 污染较重的县主要集中于石家庄市域北部、西部和西南部的边界区域, 这除与县域内部污染物排放特征有关外^[35], 与处于边界的县域会更多受到市域外和市域内气象传输的影响有联系^[36]. 县域 NO_2 浓度中, 正定县的 NO_2 浓度最高 [$(51 \pm 26) \mu g \cdot m^{-3}$], 与其主导产业为旅游业, 车流量大, 产生较多 NO_x 有关; NO_2 浓度仅新乐市 [$(38 \pm 20) \mu g \cdot m^{-3}$] 低于 $40 \mu g \cdot m^{-3}$, 其余县域均超过 $40 \mu g \cdot m^{-3}$, 说明县域 NO_2 排放量较大, NO_x 减排空间较大(表 1).

2.1.2 O_3 和 NO_2 的空间作用

为深入探讨石家庄市域内 O_3 和 NO_2 的空间作用强度, 取 2014~2017 年逐月均值数据进行区域网络分析, 得到表示污染源相似性和区域联系强度^[37]的网络玫瑰图(图 2). 市域 O_3 的 RDS 较强[图 2(a)], 主城区与鹿泉区(LQQ)和藁城区(GCQ)存在空间联系, 空间布局上二者分别在主城区的西部和东部; 鹿泉区与周围区域联系较强, 尤其与灵寿县($R^2=0.98$)和赞皇县($R^2=0.98$)联系性较强($P \leq$

0.05), 表明三地间存在相互传输^[27]影响外, 还可能具有相似的污染来源^[35]; 而栾城区与周围区域联系较弱[图 2(a)], 与周围区域相比, 7~8 月 O_3 浓度出现显著下降趋势(图 3), 与栾城区在空间上降水量大, 降温明显有关. RDS 的计算表明, 鹿泉区(RDS=15)、新乐市(RDS=15)、正定县(RDS=14)和元氏县(RDS=14)与周围区域 O_3 月度浓度间具有较强的一致性.

石家庄市域 NO_2 的 RDS ($0.93 \leq R^2 \leq 0.95$) 略低于 O_3 , 主城区的 NO_2 浓度仅与藁城区有显著联系, 这与二者之间存在较多的交通联系, 排放较多 NO_2 有关[图 2(b)]; 此外, 鹿泉区与平山县地理位置相近, 且交通联系密切, 故 NO_2 的空间联系也较强($R^2=0.95$), 说明二者的高浓度 NO_2 较多地来源于机动车排放. 市域 NO_2 浓度的 RDS ($0 \sim 8$) 弱于 O_3 , 无极县的 RDS(8) 较高, 表明无极县的 NO_2 浓度会更多地与周边区域进行空间相互作用; 行唐县(RDS=7)、井陉县(RDS=7)、赞皇县(RDS=6)和深泽县(RDS=6)的空间关联程度也较高, 且分别位于市域北部、西南、南部和东部的边界上, 与市域污染传输的方向一致, 即空间联系强度产生的重要原因是气象条件的驱动^[13].



图中区域间连线的粗细代表区域相关性的值, 线越粗相关性越强 ($P \leq 0.05$); 圆和柱的颜色代表不同的区县(市), 无颜色表示其未通过 RDS 的显著性检验 ($P \leq 0.05$); 圆半径的大小和柱的高低均代表 RDS 的大小, 圆半径和柱高的值越大代表其与其他区域的关联越强

图 2 石家庄市域 2014~2017 年 O_3 和 NO_2 浓度的空间关联度

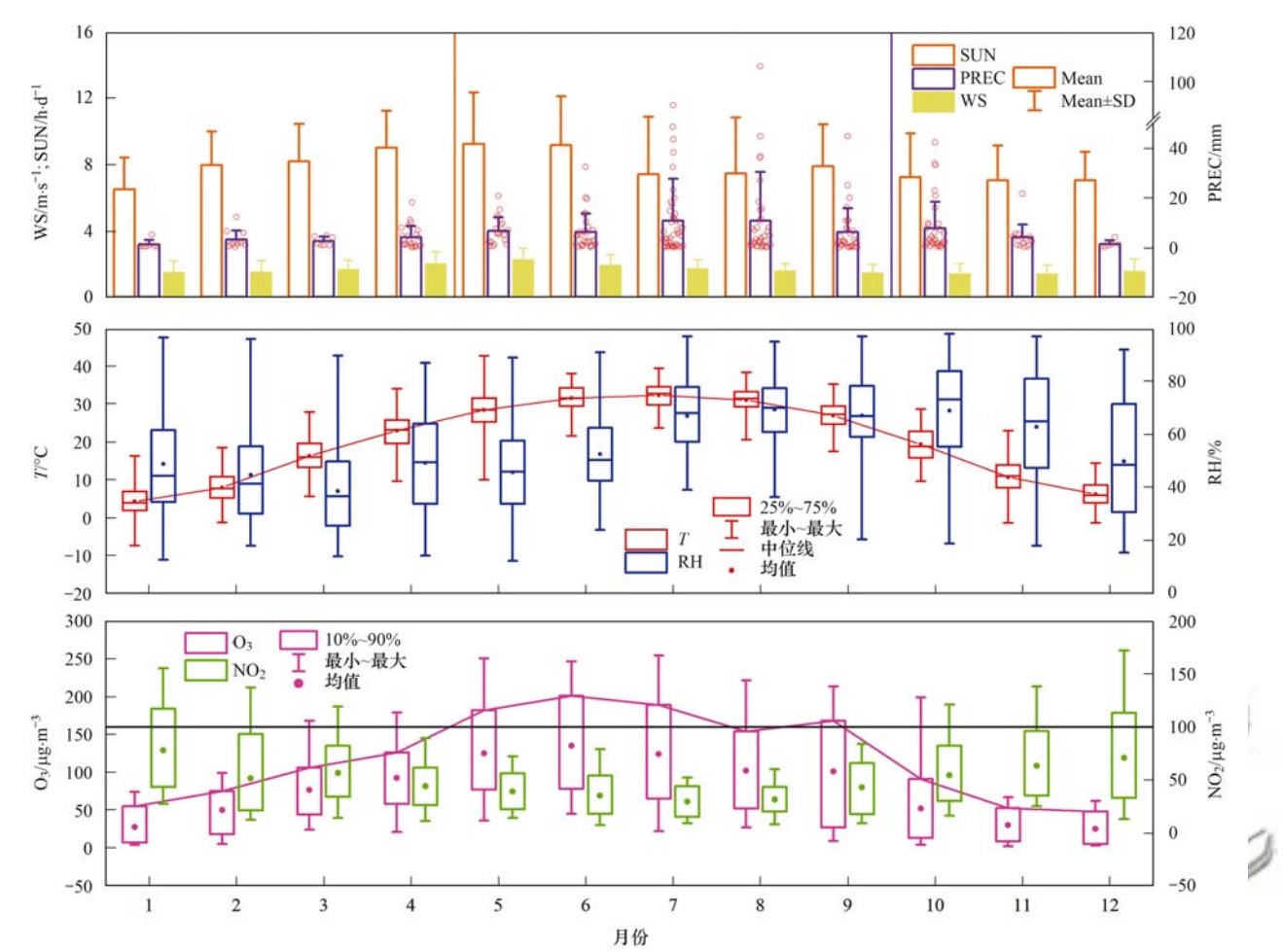
Fig. 2 Spatial relationships between O_3 and NO_2 concentrations in city-regions of Shijiazhuang from 2014 to 2017

2.2 O_3 和 NO_2 的时序演变特征及其与气象要素的关系

为探讨石家庄市域 O_3 和 NO_2 污染的月际变化, 取 2014~2017 年 1~12 月 O_3 和 NO_2 的月度均值表示其变动(图 3); 为进一步说明石家庄市域 O_3 周末效应, 取 2014~2017 年 O_3 日质量浓度, 规定星期一至星期五为工作日, 其余为周末(休息日), 制作 O_3 和 NO_2 工作日和周末变化(图 4); 为研究石

家庄市区 O_3 和 NO_2 月度关联及二者与气象因素的关系, 对年际及月度 O_3 、 NO_2 与气象要素关系进行分析[图 5(a)和图 5(b)].

石家庄市域 O_3 逐月变动整体呈倒“U”型趋势, 而 NO_2 呈显著负相关的“U”型态势(图 3). 1~6 月和 8~9 月的 O_3 浓度呈逐月上升趋势, 而 O_3 浓度在 6~8 月和 9~12 月为逐月下降趋势, O_3 变化趋势与温度整体变动一致(图 3), 但当降水增大, 湿度增



SUN 表示日照时数；PREC 表示降水量；WS 表示风速； T 表示温度；RH 表示湿度
图3 2014~2017年石家庄市 O_3 和 NO_2 月际变动

Fig. 3 Time series of O_3 and NO_2 in Shijiazhuang City from 2014 to 2017

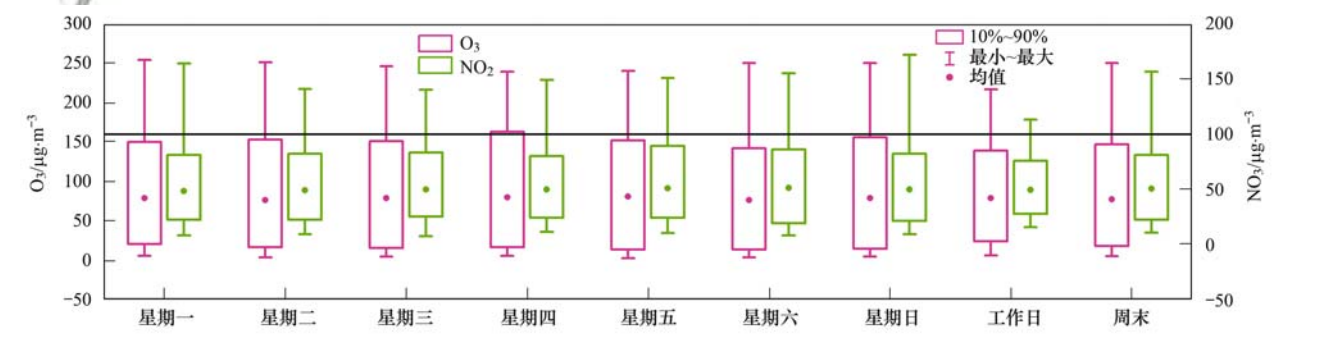


图4 2014~2017年石家庄市 O_3 和 NO_2 在工作日和周末的变动

Fig. 4 Variations in working days and weekends of O_3 and NO_2 in Shijiazhuang City from 2014 to 2017

加,风速减少时 O_3 浓度则会下降,这是8月 O_3 浓度较低的主要原因^[27].按照《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中 O_3 -8 h 二级标准($\geq 160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)以上为污染浓度,可认为石家庄市区的 O_3 污染典型时期(TPOP)为5~9月,其气象特征为高温低湿弱风强光照,利于 O_3 的光化学反应生成^[30].

市区星期一至星期日的 O_3 和 NO_2 质量浓度变化程度较小,但周末的 O_3 和 NO_2 浓度较工作日高,呈现一定的“周末效应”现象^[38](图4).工作日期间

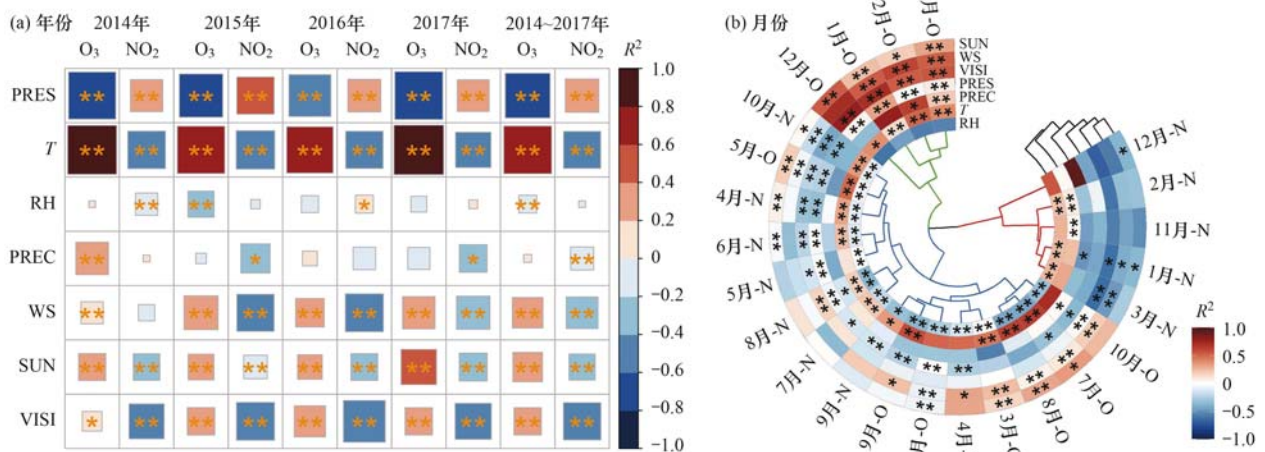
的 NO_2 和NO具有早高峰和晚高峰特点^[27],生成较多的NO在滴定作用^[27]下会抑制 O_3 生成,使 O_3 质量浓度降低,而周末不具有早晚高峰的特点, O_3 抑制弱,生成的浓度高于工作日.

为探讨石家庄市2014~2017年度 O_3 和 NO_2 浓度与气象要素的关系,采用Pearson相关进行分析[图5(a)].石家庄市2014~2017年间 O_3 与温度($R^2=0.77$)、风速($R^2=0.32$)、日照($R^2=0.29$)和能见度($R^2=0.25$)均呈正相关,与压强($R^2=$

-0.68) 和湿度 ($R^2 = -0.11$) 是负相关, 而 O_3 仅在 2014 年度与降水 ($R^2 = 0.36$) 有较强的正相关性, 与 2014 年较多出现夏季阵雨有关, 这表明 O_3 的生成与气象条件有联系. 晴天相较于阴天, 太阳辐射强度大, 日照时间长, 环境空气温度高并伴随较好的能见度时是 O_3 生成的有利条件, 降水和湿度可能通过影响温度而间接影响 O_3 浓度. 此外, 风速较强下导致的区域间 O_3 传输也是重要原因. 市区 2014~2017 年 NO_2 与压强 ($R^2 = 0.38$) 为正相关, 与能见度 ($R^2 = -0.47$)、温度 ($R^2 = -0.46$)、风速 ($R^2 = -0.34$)、日照 ($R^2 = -0.23$) 和降水 ($R^2 = -0.18$) 呈负相关, 而 NO_2 与湿度无相关性. NO_2 在辐射条件下可以转化为 O_3 , 因此, 与 O_3 的生成气象条件相反; 而 NO_2 在高湿

条件下会转化为硝酸盐类, 进而转变为 $PM_{2.5}$, 这一作用在 2014 年较明显 ($R^2 = -0.17$). 交通源是石家庄市的重要污染源, 移动源会产生较多 NO_x 排放, 使 NO_2 浓度较高, 而较大的风速利于 NO_2 扩散, 因此风速与 NO_2 呈显著负相关.

市区 O_3 和 NO_2 的聚类分析中, 1~12 月的 O_3 和 NO_2 分为 3 个类别, 分别为 4~10 月的 O_3 和 NO_2 、1~2 月和 11~12 月的 O_3 浓度、1~3 月和 11~12 月的 NO_2 [图 5(b)]. 其中第一类包含 TPOP 时段, 即在 TPOP 内 O_3 与 NO_2 的相关性较强, 而在其他时段, O_3 和 NO_2 关联性弱. 在 O_3 和 NO_2 的相关性分析中, 湿度对 O_3 高污染时段负相关显著 ($P \leq 0.05$), 而温度对正相关显著 ($P \leq 0.05$).



(a) 蓝色代表负相关, 红色代表正相关, 颜色深度和色块大小代表相关性高低; SUN 表示日照时数; WS 表示风速; VISI 表示能见度; PRES 表示压强; PREC 表示降水量; T 表示温度; RH 表示湿度; O 表示 O_3 ; N 表示 NO_2 ; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

图 5 2014~2017 年石家庄市 O_3 、 NO_2 浓度与气象因子的相关性

Fig. 5 Correlation of O_3 , NO_2 , and meteorological elements in Shijiazhuang City from 2014 to 2017

2.3 O_3 和 NO_2 的空间演替格局

2.3.1 O_3 和 NO_2 的年度时空特征

为研究石家庄市域各尺度的时空演变特征, 取 2014~2017 年 O_3 和 NO_2 浓度数据, 进行空间拟合表明 (图 6), 市域 2014~2017 年 O_3 浓度整体呈上升趋势, 但不同空间尺度下的时序特征有较大差异, 2015 年主城区的 O_3 浓度降至低值后逐年显著上升, 而市区、县域和市域的 O_3 浓度在 2016 年均有所下降 [图 6(a)]. NO_2 浓度在 2014~2017 年变化总体呈逐渐下降态势, 其不同空间尺度下时序变化特征差异较小. NO_2 浓度的下降与 2016~2017 年间燃煤锅炉的改造、冬季单双号限行及全年的常态化限行有关, 这些政策有效降低了 NO_x 的产排量, 使 NO_2 浓度下降明显. NO_2 的差异主要表现在其浓度值分布上, 2014~2017 年县域的 NO_2 浓度值的分布状态, 较主城区的 O_3 浓度分布集中, 且均值较低

[图 6(b)].

在 O_3 和 NO_2 质量浓度的空间变化特征上 (图 6), 可以分析出区域的首要控制污染物类型^[21], 为污染物溯源解析及管理对策的制定提供基本依据^[30]. 主城区的 O_3 浓度呈 2014~2015 年下降, 2015~2017 年递增的趋势, NO_2 在 2014~2015 年和 2016~2017 年趋势为下降, 2015~2016 年为上升趋势. 主城区的 O_3 和 NO_2 变化趋势在 204~2016 年为耦合变化, 即 NO_2 浓度的减少或增长会影响到 O_3 的浓度变化, 属 NO_x 控制类型区; 而 2016~2017 年 O_3 和 NO_2 浓度的变化呈相反趋势, 即 NO_2 的显著下降反而促使 O_3 浓度的明显增长, 这是由于主城区的污染物控制类型从 NO_2 转为 VOCs. 县域的 O_3 和 NO_2 浓度变化趋势呈相反状态, 即 NO_2 浓度的变动对 O_3 浓度影响较小, 属 VOCs 控制区, 这是由于县域的环境质量监测站的布局主要设置在县城周

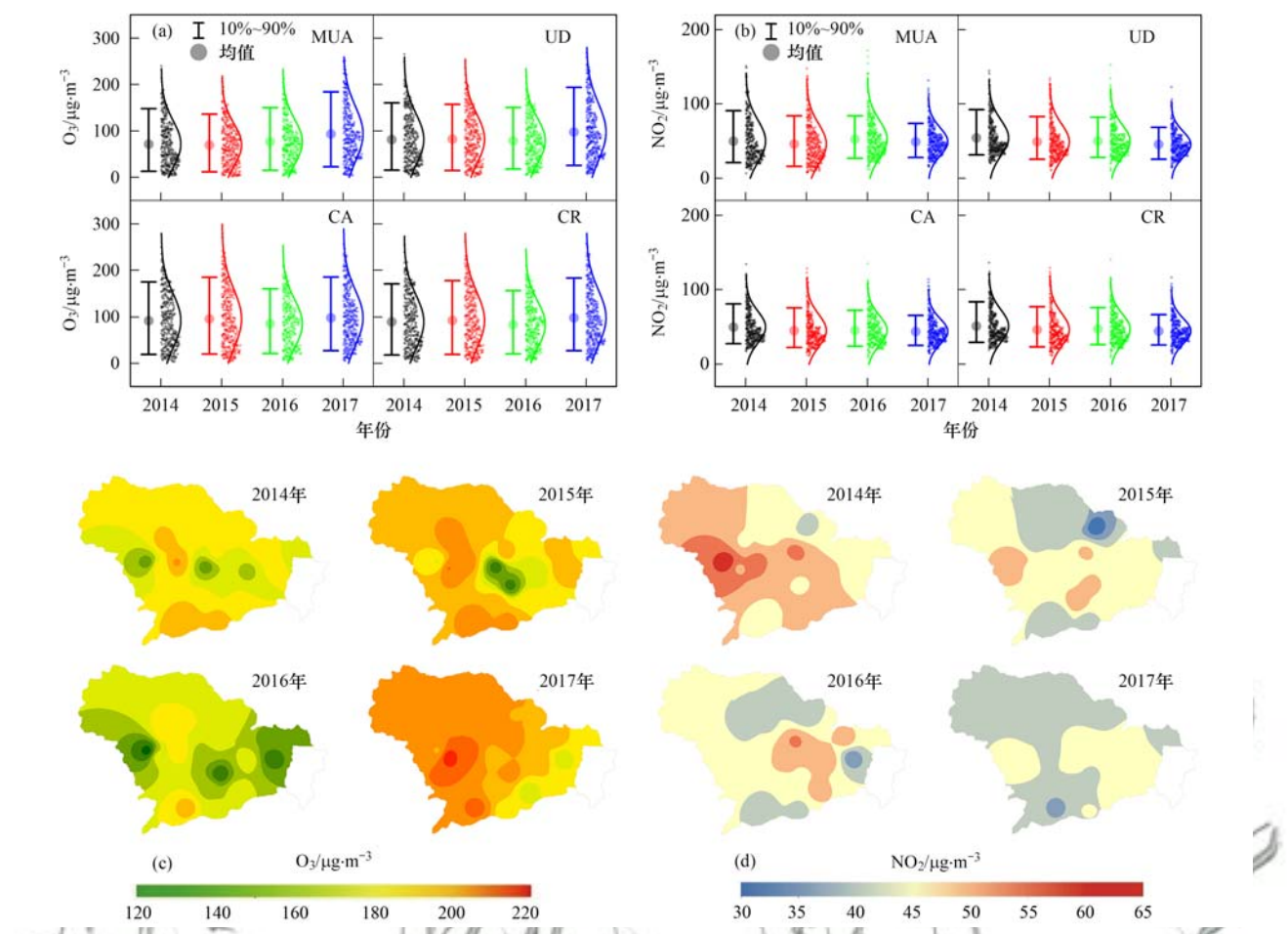


图 6 石家庄市域 2014~2017 年 O_3 和 NO_2 浓度的时空格局
Fig. 6 Spatio-temporal patterns of O_3 and NO_2 concentrations in city-regions of Shijiazhuang from 2014 to 2017

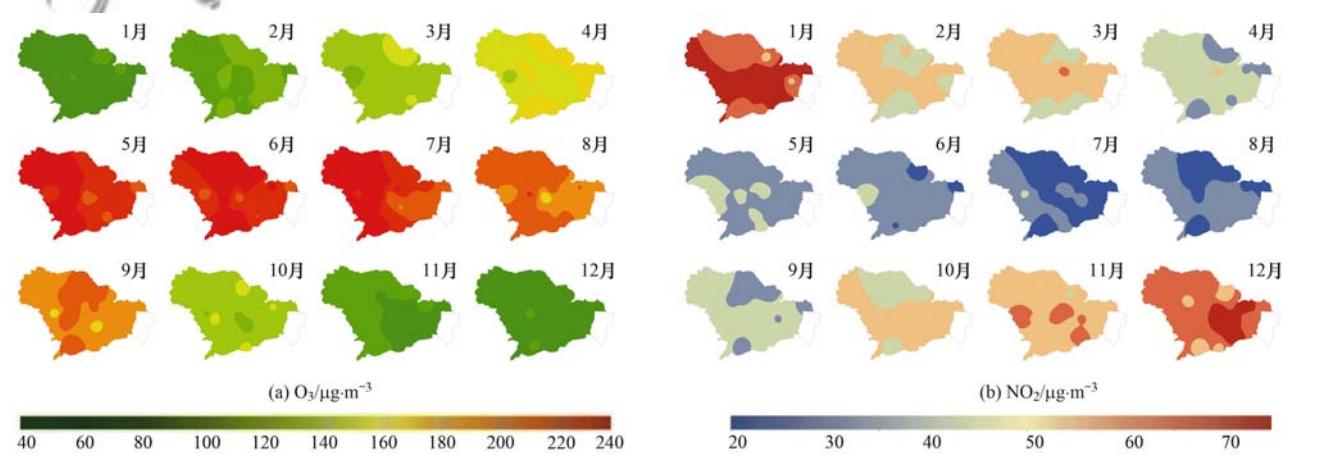


图 7 石家庄市域 2014~2017 年月际 O_3 和 NO_2 浓度的时空格局
Fig. 7 Spatio-temporal patterns of O_3 and NO_2 monthly concentrations in city-regions of Shijiazhuang from 2014 to 2017

围,而县城是县域内工业较集中的区域,工业生产会产生较多的 VOCs.

2.3.2 O_3 和 NO_2 的逐月时空变动

为进一步探讨石家庄市域 O_3 和 NO_2 逐月空间变动的典型污染特征和污染时段,取 2014~2017 年 18 个区县的 O_3 和 NO_2 浓度数据进行插值,得到 1

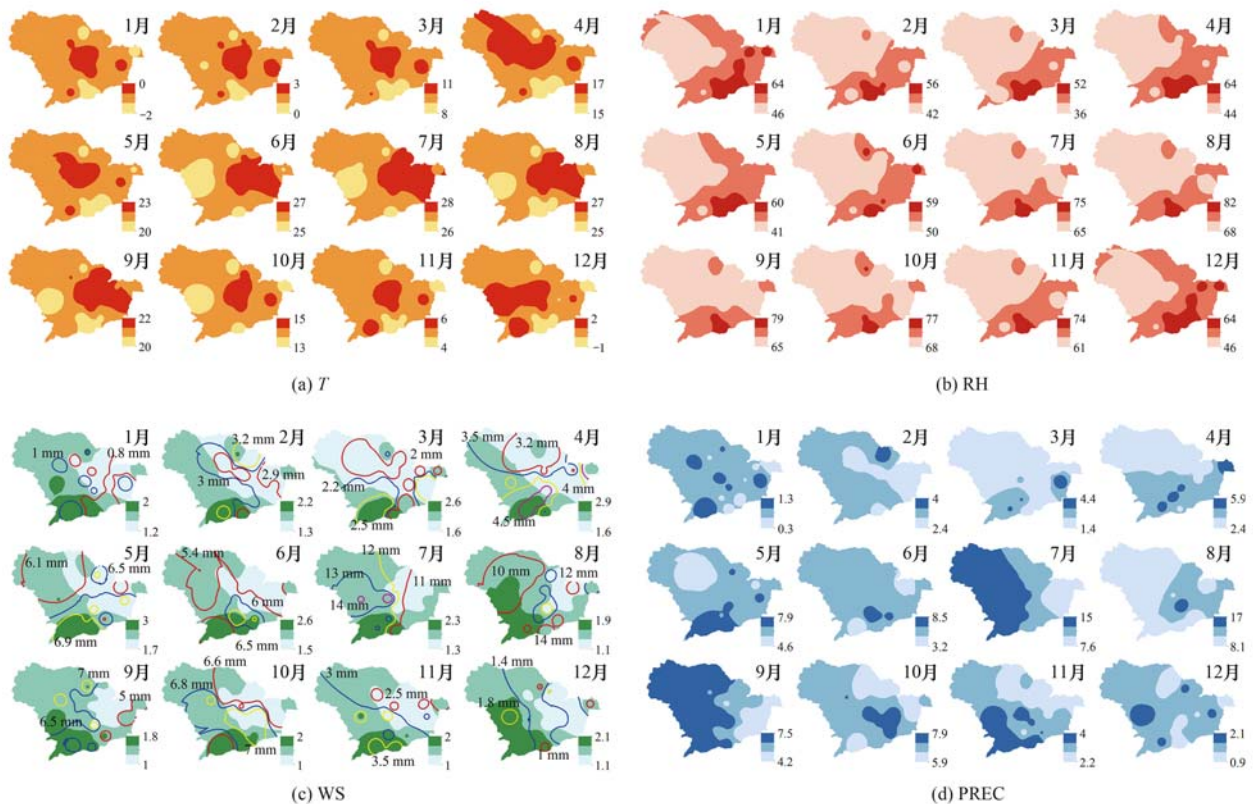
~12 月的市域格局[图 7(a)和图 7(b)]. 市域 O_3 空间格局月度变化特征明显,TPOP 内市域 O_3 超过 $160 \mu g \cdot m^{-3}$,达到污染程度[图 7(a)]. O_3 污染主要集中于春季末(5 月)、夏季(6~8 月)和秋季初(9 月),且月度内空间差异不明显,说明市域地形因素和工业布局在长时期中不是决定因素,而长时期变

化主要与 TPOP 内存在有利于 O_3 转化生成或区域传输的有利气象条件有关. 市域 NO_2 浓度整体与 O_3 浓度呈反相关关系, NO_2 浓度较高的月份为 1~3 月和 10~12 月, 均超过 $40 \mu g \cdot m^{-3}$ [图 7(b)]. 市域 NO_2 浓度在 TPOP 内显著较低, 低于 $50 \mu g \cdot m^{-3}$, 与 TPOP 内的高 O_3 浓度呈反相关, 这与 TPOP 内太阳辐射强, 光化学反应剧烈, 即 NO_2 的光解有关.

2.3.3 逐月气象要素变动

为研究空间上 O_3 和 NO_2 的分布与市域温度、湿度、风速和降水的关系, 采用 IDW 及等值线方法绘制气象空间格局(图 8). 石家庄市域逐月温度范

围为($-2 \sim 28^\circ C$), 格局整体呈市区高、县域较低, 即城市中心热岛效应明显; 但存在西北偏高(4 月)、东部偏高(6~9 月)及西部偏高(12 月)的态势[图 8(a)]. 市域逐月湿度总体为西南-西北逐级递减的分布趋势, 湿度范围为 $36\% \sim 82\%$ [图 8(b)]; 市域风速的空间分布为西南-东北逐渐减少的态势, 风速空间变化幅度($1 \sim 3 m \cdot s^{-1}$)较小[图 8(c)]. 市域降水量的空间规律性较弱, 空间变异大($0.3 \sim 17 mm$); 降水量最大的月份出现在雨季(7 月和 8 月), 变化幅度为 $7.6 \sim 17 mm$, 冬季降水量($0.3 \sim 4 mm$)最少[图 8(d)].



(a) 图例表示温度($^\circ C$); (b) 图例表示湿度(%); (c) 图例表示风速($m \cdot s^{-1}$)分布, 颜色越深, 风速越大; 线条表示降水量相等的连线, 即等降水线; (d) 图例表示降水量(mm)

图 8 石家庄市域 2014~2017 年逐月温度、湿度、风速和降水的时空演替

Fig. 8 Spatio-temporal patterns of temperature, humidity, wind speed and precipitation in city-regions of Shijiazhuang from 2014 to 2017

石家庄市域 TPOP 内的气象要素空间变化范围分别为温度($20 \sim 28^\circ C$)、湿度($41\% \sim 82\%$)、风速($1 \sim 3 m \cdot s^{-1}$)以及降水($3.2 \sim 17 mm$). TPOP 的 O_3 和温度的空间分布无明显的线性正相关作用, 而是存在某一温度范围($26 \sim 27^\circ C$)对应着高浓度 O_3 的生成, 而高于或低于这一范围 O_3 浓度均会下降[图 8(a)]. 温度作用下形成 O_3 的基本格局后, 在降水、湿度及风速的单一或共同作用下将形成最终的分布状态, 6 月的 O_3 浓度呈现中部区域高、东部和西部区域低的分布态势, 温度趋势则为东部($27^\circ C$)-中部($26^\circ C$)-西部($25^\circ C$)的递减趋势; 湿度中部西部为

50%, 东部 59%; 风速东部($1.5 m \cdot s^{-1}$), 降水量整体较低($3.2 \sim 8.5 mm$), 即 O_3 在 $26^\circ C$ (温度)、50% (湿度)、 $1.5 m \cdot s^{-1}$ (风速)及 $5 mm$ (降水)下会提高生成效率.

2.4 O_3 的空间影响因素分析

为从空间因素角度探讨石家庄市域 O_3 与经济因子的关系, 取 2015 年各区县 12 个主要经济统计指标, 进行全局双变量 Moran(global bivariate Moran's I , GBMI)分析^[25](表 2). 为进一步探讨各区县工业、农业、经济和人口与 O_3 污染的空间联系, 对第一产业、第二产业、化肥施用量及年末总人口进行 Moran 散

点图(Moran scatter)分析[图9(a)和图9(b)],并对第一、二产业进行局域双变量 Moran (local bivariate Moran's I ,LBMI)分析[图9(c)和图9(d)].

石家庄市域 2015 年度 O_3 与经济因子的空间分析中(表 2),除土地面积及人口密度外,其余经济指标均通过显著性检验($P\leq 0.05$),指标主要集中于工业、农业、经济和人口这 4 个维度. O_3 与经济指标双变量 Moran's I 指数中,在置信区间内均为趋于离散状态(Moran's $I\leq 0$),这说明市域污染状态主要是呈高-低浓度值分布的,即区域周边的经济发展程度低于污染高值区,周边区域污染较轻. 由图 9(a)和图 9(b)的 Moran 散点图可知,各区县散点分布出现离群值,即存在污染的低值中心或高值中心,

结合 LBMI[图9(c)和图9(d)]分析,第一产业(农业)的低值中心出现在石家庄市(Moran's $I = -2.31$),与石家庄市主要产业是第二产业(工业)和第三产业(服务业)相对应,故农业对石家庄市的空气质量影响较小,周围农业对空气质量影响显著的区域出现在深泽县[图9(c)]. 第二产业对 O_3 污染的离散中心出现在石家庄主城区和栾城区,说明这两个区域的 O_3 污染与周围区域工业联系较弱,而与区域内工业生产活动有关[图9(d)],而无极和深泽县呈现较显著的集聚状态(Moran's $I \geq 0, P\leq 0.25$),说明周围工业源对无极和深泽县的 O_3 污染有较显著影响,以及二者之间也存在不同程度的污染物传输影响.

表 2 石家庄市域 2015 年度 O_3 与各经济因子的双变量 Moran 分析
Table 2 BMI of O_3 and economic factors in city-regions of Shijiazhuang in 2015

指标类型	经济指标名称	单位	Moran's I	P	Z
工业	第二产业		-0.327 0	0.010 5	-2.888 9
	规模以上工业总产值	万元	-0.292 0	0.012 5	-2.580 7
	工业产值		-0.293 0	0.013 2	-2.592 2
经济	国内生产总值	万元	-0.237 0	0.013 8	-2.546 9
农业	农林牧渔业总产值	万元	-0.261 0	0.016 1	-2.330 4
	第一产业		-0.259 0	0.016 9	-2.310 9
人口	年末总人口	万人	-0.180 0	0.02 39	-2.103 6
	人均生产总值	元·人 ⁻¹	-0.192	0.024 23	-2.148 8
农业	化肥使用量	t	-0.22	0.034 32	-1.888
工业	人均工业生产总值	元·人 ⁻¹	-0.199	0.043 23	-1.825 6
土地	土地面积	km ²	0.154	0.065 58	1.471 6
人口-土地	人口密度	人·km ⁻²	-0.116 0	0.066 25	-1.528 1

2.5 O_3 的溯源解析

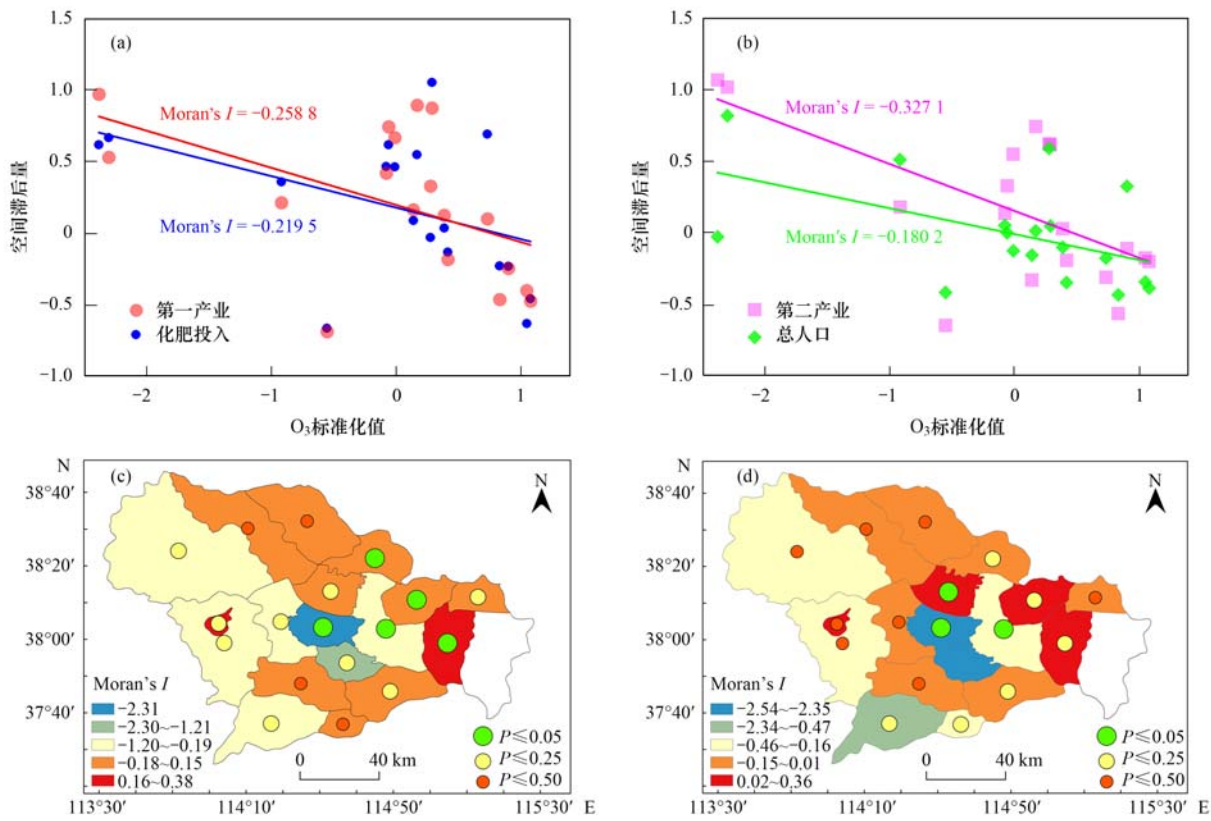
为研究石家庄市夏季 VOCs 的传输特征及潜在源区^[39],取 2017 年夏季大气污染物及 VOCs 上午(10:00)和下午(16:00)的数据^[28],进行后向轨迹聚类、浓度权重轨迹分析(CWT)及空气质量综合指数(air quality composite index, AQCI)分析. 夏季 VOCs 的轨迹聚类出了 3 个主要来源方向(图 10),即 A(东-东北, 26.67%)、B(西北-西, 43.33%)及 C(东南-南, 30%),结合 CWT 分布可知,轨迹 A 和 C 是 VOCs 传输的主要方向,即东-东南是 VOCs 的来源方向,这是由于主要的污染企业集中在市区东部高新区内,当出现东-东南来向的风驱动时,便极易产生 VOCs 的传输,从而造成污染(图 10).

从不同轨迹的 VOCs 组分占比及大气污染物贡献率分析(图 10),轨迹 A 的 TVOCs 浓度为 108.55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其组分占比中,卤代烷烃占绝对优势(40.28%),其次为 OVOCs (24.55%)和芳香烃(23.11%),卤代烷烃的主要来源是工业源,这与高新区的制药和化工企业的生产活动有关^[28];轨迹 A 的各大气污染物贡献中,PM_{2.5}对污染物的贡献较高

(28.57%),其次为 O_3 (26.23%)和 PM₁₀ (21.93%),VOCs 是 PM_{2.5}和 O_3 的前体物,当 VOCs 的浓度高时,会生成较多的 PM_{2.5}和 O_3 ,使二者浓度升高.

轨迹 B 的 TVOCs 浓度较低(74.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),VOCs 组分结构与轨迹 A 类似,整体 VOCs 浓度低于轨迹 A 和 C,与西北部作为石家庄市的生态涵养区,污染源较少相对应;轨迹 B 的 O_3 贡献最高(28.91%),且 NO₂ 的贡献(14.6%)显著高于轨迹 A 和 C,因此其 O_3 浓度较高可能与远距离输送的 NO_x 有关,NO_x 在夏季较强辐射条件下光解会生成较多的 O_3 . 轨迹 C 的 TVOCs 浓度为 107.06 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其 OVOCs 的占比较大(32.55%),显著高于轨迹 A、B,其他占比较大的组分为卤代烷烃(28.64%)和芳香烃(19.79%),结合 WCWT > 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的范围分布,OVOCs 中甲基叔丁醚是造成 OVOC 偏高的重要原因,WCWT > 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 分布与石家庄市 UA 范围相近,而甲基叔丁醚也是汽车尾气的重要示踪物.

轨迹 C 的 AQCI 为 3.53,其显著高于轨迹 A



(a) 第一产业和化肥投入的 GBMI; (b) 第二产业和总人口的 GBMI; (c) 第一产业的 LBMI; (d) 第二产业的 LBMI

图 9 2015 年度 O_3 与第一产业、化肥使用量、第二产业及总人口的双变量 Moran's I 分析

Fig. 9 BMI of O_3 and primary industry, fertilizer usage, secondary industry and total population in city-regions of Shijiazhuang in 2015

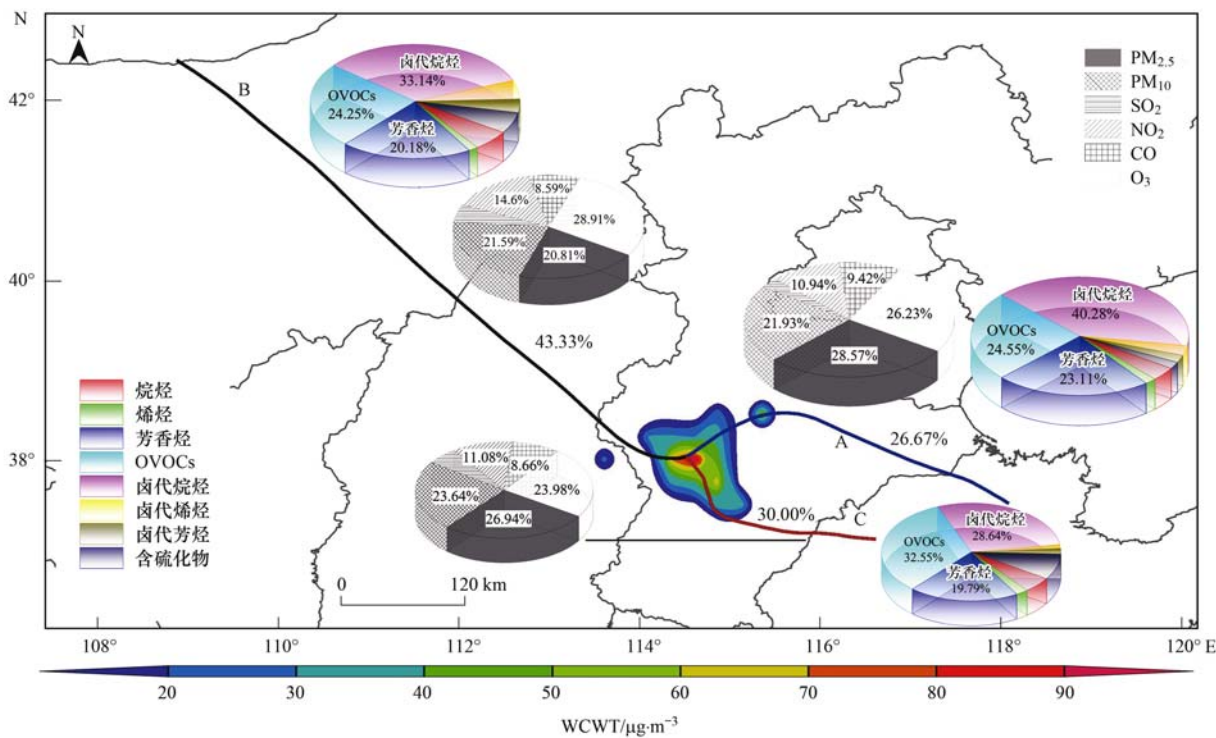


图 10 石家庄市 VOCs 的后向轨迹、WCWT 及其组分和污染物占比

Fig. 10 VOCs backward trajectories, WCWT, and contributions to pollutants in Shijiazhuang City

(2.65) 和轨迹 B(3.05), 对大气污染的贡献依次为: $PM_{2.5}$ (26.94%) > O_3 (23.98%) > PM_{10} (23.64%) > NO_2 (11.08%) > CO (8.66%) > SO_2 (5.7%), $PM_{2.5}$ 浓度较高 ($71.26 \mu g \cdot m^{-3}$), 接近污

染程度($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),这与颗粒物(PM)的长时间寿命远距离跨界输送有关,而 O_3 则集中于市域周边短距离传输为主,因此,轨迹 C 方向上存在较多的 OVOCs 是致使 O_3 浓度抬升的重要原因。

3 结论

(1)2014~2017 年石家庄市域年度 O_3 呈上升趋势,主城区的 O_3 浓度 2015 年降至低值后呈逐年显著上升, NO_2 浓度总体呈逐渐下降态势,且空间差异较小。主城区的污染物类型从 NO_2 (2014~2016 年)转为 VOCs(2016~2017 年),而县域城镇中心 2014~2017 年均属 VOCs 控制区。市区 O_3 月度变动趋势呈倒“U”型,5~9 月是石家庄 O_3 污染的典型时期(TPOP),TPOP 的气象特征为高温低湿弱风强光照,且 O_3 和 NO_2 相关性显著。

(2)石家庄市域 O_3 空间影响因素主要集中于工业、农业、经济和人口这 4 个维度($P\leq 0.05$)。市域污染状态主要是呈高-低浓度值分布的(Moran's $I\leq 0$),即区域周边的经济发展程度低于污染高值区,周边区域污染较轻,存在 O_3 高值中心。LBMI 分析表明,第一产业的低值中心出现在石家庄市(Moran's $I = -2.31$),第二产业对 O_3 污染的高值中心出现在主城区和栾城区,与区域内工业生产活动有关。

(3)2017 年 VOCs 夏季监测期间的轨迹聚类出 3 个来源方向,即 A(东-东北, 26.67%)、B(西北-西, 43.33%)及 C(东南-南, 30%),结合 WCWT 表明,轨迹 A 和 C 是 VOCs 传输的主要方向(东-东南)。轨迹 A 的 TVOCs 浓度较高($108.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),其卤代烷烃占绝对优势(40.28%),大气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ (28.57%)和 O_3 (26.23%)贡献较高。轨迹 C 的 AQCI 最高(3.53),轨迹污染较重,AQCI 的贡献依次为: $\text{PM}_{2.5}$ (26.94%)> O_3 (23.98%)> PM_{10} (23.64%)> NO_2 (11.08%)> CO (8.66%)> SO_2 (5.7%)。

参考文献:

- [1] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, Southwestern China: a case study from radical chemistry to O_3 -VOC- NO_x sensitivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [2] Jin X M, Fiore A, Boersma K F, *et al.* Inferring changes in summertime surface ozone- NO_x -VOC chemistry over U. S. urban areas from two decades of satellite and ground-based observations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(11): 6518-6529.
- [3] Chen T S, Xue L K, Zheng P G, *et al.* Volatile organic compounds and ozone air pollution in an oil production region in Northern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(11): 7069-7086.
- [4] 唐孝炎, 李金龙, 栗欣, 等. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
Tang X Y, Li J L, Su X, *et al.* Chemistry of atmosphere environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [5] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [6] 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.
- [7] Li J, Yin P, Wang L J, *et al.* Ambient ozone pollution and years of life lost: association, effect modification, and additional life gain from a nationwide analysis in China[J]. *Environment International*, 2020, **141**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105771.
- [8] Zong Z, Tian C G, Li J, *et al.* Isotopic interpretation of particulate nitrate in the Metropolitan city of Karachi, Pakistan: insight into the oceanic contribution to NO_x [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(13): 7787-7797.
- [9] Maji K J, Ye W F, Arora M, *et al.* Ozone pollution in Chinese cities: assessment of seasonal variation, health effects and economic burden[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 792-801.
- [10] Li X, Chen Q, Zheng X Y, *et al.* Effects of ambient ozone concentrations with different averaging times on asthma exacerbations: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 549-561.
- [11] Mao J, Wang L L, Lu C H, *et al.* Meteorological mechanism for a large-scale persistent severe ozone pollution event over eastern China in 2017[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **92**: 187-199.
- [12] 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于无人机探空和数值模式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.
- [13] Zhao W, Tang G Q, Yu H, *et al.* Evolution of boundary layer ozone in Shijiazhuang, a suburban site on the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **83**: 152-160.
- [14] Shu L, Wang T J, Han H, *et al.* Summertime ozone pollution in the Yangtze River Delta of Eastern China during 2013-2017: synoptic impacts and source apportionment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113631.
- [15] Dunker A M, Wilson G, Bates J T, *et al.* Chemical sensitivity analysis and uncertainty analysis of ozone production in the comprehensive air quality model with extensions applied to Eastern Texas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(9): 5391-5399.
- [16] Yin C Q, Solmon F, Deng X J, *et al.* Geographical distribution of ozone seasonality over China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **689**: 625-633.
- [17] Wang Z B, Li J X, Liang L W. Spatio-temporal evolution of ozone pollution and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113419.
- [18] Ying X, Du K. Source-resolved attribution of ground-level ozone formation potential from VOC emissions in Metropolitan Vancouver, BC[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137698.
- [19] Simayi M, Shi Y Q, Xi Z Y, *et al.* Understanding the sources

- and spatiotemporal characteristics of VOCs in the Chengdu Plain, China, through measurement and emission inventory[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136692.
- [20] 杨帆, 王体健, 束蕾, 等. 青岛沿海地区一次臭氧重污染过程的特征及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(11): 3565-3580.
Yang F, Wang T J, Shu L, *et al.* Characteristics and mechanisms for a heavy O₃ pollution episode in Qingdao coastal area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(11): 3565-3580.
- [21] Tie X, Geng F, Guenther A, *et al.* Megacity impacts on regional ozone formation: observations and WRF-CHEM modeling for the mirage-shanghai field campaign[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5655-5669.
- [22] 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 等. 典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3076-3084.
Jing S A, Ye X H, Gao Y Q, *et al.* Characteristics and reactivity of VOCs in Hangzhou during a typical photochemical pollution episode[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3076-3084.
- [23] Yang Y C, Liu X G, Zheng J, *et al.* Characteristics of one-year observation of VOCs, NO_x, and O₃ at an urban site in Wuhan, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **79**: 297-310.
- [24] Yang G F, Liu Y H, Li X N. Spatiotemporal distribution of ground-level ozone in China at a city level[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-64111-3.
- [25] Yao Y R, He C, Li S Y, *et al.* Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China: daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 384-394.
- [26] Majumdar D D, Biswas A. Quantifying land surface temperature change from LISA clusters: an alternative approach to identifying urban land use transformation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, **153**: 51-65.
- [27] 王帅, 冯亚平, 崔建升, 等. 石家庄市臭氧污染的时空演变格局和潜在源区[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(9): 3081-3092.
Wang S, Feng Y P, Cui J S, *et al.* Spatio-temporal evolution patterns and potential source areas of ozone pollution in Shijiazhuang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(9): 3081-3092.
- [28] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O₃ in Shijiazhuang[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [29] Bajjali W. ArcGIS for environmental and water issues (Springer textbooks in earth sciences: geography and environment)[M]. Cham: Springer, 2018.
- [30] Yu S J, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Spatiotemporal characterization and regional contributions of O₃ and NO₂: an investigation of two years of monitoring data in Henan, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **90**: 29-40.
- [31] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1666-1675.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Evolution characteristics and driving factors of denitrification community based on network analysis in the process of spring thermal layer formation in Zhouchun Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1666-1675.
- [32] Jiang L, He S X, Zhou H F. Spatio-temporal characteristics and convergence trends of PM_{2.5} pollution: a case study of cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120631.
- [33] Wang Y Q. MeteoInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis[J]. *Meteorological Applications*, 2014, **21**(2): 360-368.
- [34] Song M D, Tan Q W, Feng M, *et al.* Source apportionment and secondary transformation of atmospheric nonmethane hydrocarbons in Chengdu, Southwest China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(17): 9741-9763.
- [35] Guan Y N, Wang L, Wang S J, *et al.* Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **97**: 25-34.
- [36] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀地区典型月 O₃ 污染输送特征[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3684-3691.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Model-derived source apportionment and regional transport matrix study of ozone in Jingjinji[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- [37] 冯颖, 侯孟阳, 姚顺波. 中国粮食生产空间关联网的结构特征及其形成机制[J]. *地理学报*, 2020, **75**(11): 2380-2395.
Feng Y, Hou M Y, Yao S B. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of grain production in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(11): 2380-2395.
- [38] 王俊秀, 安俊琳, 邵平, 等. 南京北郊大气臭氧周末效应特征分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2256-2263.
Wang J X, An J L, Shao P, *et al.* Characteristic study on the "Weekend Effect" of atmospheric O₃ in Northern Suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2256-2263.
- [39] Xie Y Z, Liu Z R, Wen T X, *et al.* Characteristics of chemical composition and seasonal variations of PM_{2.5} in Shijiazhuang, China: impact of primary emissions and secondary formation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **677**: 215-229.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)