

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析

林鑫, 全纪龙*, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天

(兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

摘要:日照市作为典型沿海城市,近年来 O_3 污染日益严重,为探究 O_3 污染成因和来源,基于 CMAQ 模型的 IPR 过程分析和 ISAM 源追踪工具分别量化不同物理化学过程,不同源追踪区域对日照市 O_3 的贡献,并对比在 O_3 超标日和非超标日的差异,结合 HYSPLIT 模式探究日照市 O_3 的区域输送路径.结果表明,以日照市及周边为 CMAQ 模拟区域, O_3 超标日与非超标日相比,日照市和连云港市沿海附近 O_3 、 NO_x 和 VOCs 浓度明显增加,这主要是由于超标日日照市为西风、西南风和东风的辐合区,易于污染物的输送并累积;过程分析显示,输送过程 (TRAN) 对日照市和连云港市沿海附近的近地面 O_3 贡献在超标日明显增加,而对临沂以西大部分区域贡献减小.光化学反应 (CHEM) 在各个高度对日照市白天 O_3 浓度均为正贡献,TRAN 在离地 0~60 m 为正贡献,在 60 m 以上主要为负贡献,超标日 CHEM 和 TRAN 在离地 0~60 m 的贡献会显著增加,是非超标日时贡献的 2 倍左右;源解析显示,日照市本地源是 NO_x 和 VOCs 的主要贡献源,贡献率分别为 47.5% 和 58.0%, O_3 主要来自模拟区域外贡献 (67.5%),超标日日照市西面城市 (潍坊市和临沂市等) 和南面城市 (连云港市等) 的 O_3 及前体物贡献会显著增大;输送路径分析显示,来自日照市西面的路径中超标轨迹数占比最大 (11.8%),为日照市 O_3 及前体物的主要输送通道,这与过程分析和源追踪结果相互验证,该类轨迹占总轨迹数的 13.0%,其主要途经陕西、山西、河北和山东地区.

关键词:日照市;臭氧(O_3);CMAQ 模型;ISAM 工具;HYSPLIT 模型;来源分析;过程分析

中图分类号:X515 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2023)06-3098-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207223

Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models

LIN Xin, TONG Ji-long*, WANG Yi-fan, CHEN Yu-xiang, LIU Yong-le, ZHANG Xin, AO Cong-jie, LIU Hao-tian

(College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As a typical coastal city, O_3 pollution in Rizhao has become increasingly serious in recent years. In order to explore the causes and sources of O_3 pollution, IPR process analysis and ISAM source tracking tools based on the CMAQ model were used, respectively, to quantify the contributions of different physicochemical processes and different source tracking areas to O_3 in Rizhao. Additionally, by comparing the differences between O_3 -exceeding days and non-exceeding days, combined with the HYSPLIT model, the regional transportation path of O_3 in Rizhao was explored. The results showed that the concentrations of O_3 , NO_x , and VOCs near the coastal areas of Rizhao and Lianyungang were significantly increased on O_3 exceedance days compared with those on non-exceedance days. This was mainly because Rizhao was the convergence zone of western, southwestern, and eastern winds on exceedance days, which facilitated the transport and accumulation of pollutants. Process analysis showed that the transport process (TRAN) contribution to the near-surface O_3 near the coastal areas of Rizhao and Lianyungang increased significantly on the exceedance days, whereas the contribution to most areas to the west of Linyi decreased. Photochemical reaction (CHEM) had a positive contribution to the O_3 concentration in Rizhao during the daytime at all heights, and TRAN had a positive contribution at 0-60 m above the ground, and mainly had a negative contribution above 60 m. The contributions of CHEM and TRAN at 0-60 m above the ground would increase significantly on exceedance days, which was approximately twice that on the non-exceedance days. Source analysis showed that the local sources in Rizhao were the main contribution sources of NO_x and VOCs, with the contribution rates of 47.5% and 58.0%, respectively. O_3 mainly came from the contribution outside the simulation area (67.5%). The O_3 and precursor contributions of the western cities of Rizhao (Weifang, Linyi, etc.) and the southern cities (Lianyungang, etc.) would increase significantly on the days of exceeding the standard. The transportation path analysis showed that the number of exceedances accounted for the largest proportion (11.8%) in the path from the west of Rizhao, which was the main transportation channel of O_3 and precursors in Rizhao. This was verified through process analysis and source tracking results, and such trajectories accounted for 13.0% of the total number of trajectories, and their main routes were in the Shaanxi, Shanxi, Hebei, and Shandong regions.

Key words: Rizhao; ozone(O_3); CMAQ model; ISAM tool; HYSPLIT model; source analysis; process analysis

随着我国经济社会的快速发展,我国空气污染的特征已从局地煤烟型污染逐渐转变为以臭氧(O_3)和 $PM_{2.5}$ 为主的区域性复合污染^[1,2]. 近年来,随着一系列大气污染防治政策和法规的实施,我国环境空气中的 $PM_{2.5}$ 浓度呈现下降趋势,但 O_3 浓度不降反升,高浓度 O_3 污染不仅在高度城市化的京津冀、长三角、珠三角和川渝地区频发,在一些城市化水平不高的地区也时有发生^[3~7]. 高浓度 O_3 对人

体健康和植物生长均有危害^[8,9]. 由于 O_3 与前体物和 $PM_{2.5}$ 存在复杂的非线性关系,且 O_3 污染具有区域性和易受气象条件影响的特点,使 O_3 污染成因分析、 O_3 及前体物来源解析和气象因素对 O_3 污染的

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42075174)

作者简介: 林鑫(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为空气质量模型和大气污染控制, E-mail: linx20@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 22399@lzu.edu.cn

影响等成为当前的研究热点^[10~12]。

目前有关 O₃ 污染成因分析和来源解析的研究集中在京津冀、长三角、珠三角和四川盆地地区^[13]。例如唐颖潇^[14]基于 WRF-CHEM 模式过程分析探究京津冀典型城市 O₃ 污染成因,发现夏季午后化学过程是北京、天津和石家庄 O₃ 浓度增加的主要原因,垂直混合使天津和石家庄 O₃ 浓度增加,北京 O₃ 浓度减小。大量的过程分析研究表明^[15~19],传输过程和光化学反应是造成高浓度 O₃ 的主要因素,NO_x 排放量大的区域是地面 O₃ 主要的汇,高空 O₃ 的垂直向下传输也是地面 O₃ 的重要来源;Liu 等^[20]利用 ISAM 源追踪工具解析北京 O₃ 来源,发现清洁日 O₃ 主要来自模拟区域外边界传输(77.45%),而在 O₃ 污染日边界贡献减小为 31.62%,来自天津(9.63%)、河北(19.02%)和山东(13.01%)的贡献显著增加。国内外学者在长三角和珠三角的研究也均显示边界传输对城市 O₃ 有重要贡献但不同地区略有差异^[21~25];Yang 等^[26]对广州 O₃ 分行业的解析结果显示,交通源、工业源、天然源和民用源对 O₃ 的贡献率分别为 39%、22%、10% 和 10.5%。Wang 等^[27]在重庆的解析结果显示工业源对 O₃ 的贡献大于交通源。因此,不同区域 O₃ 来源存在一定的差异性。

目前常用来 O₃ 成因分析和来源解析的方法有后向轨迹法、源模型和受体模型法^[28~30]。后向轨迹法通过对到达目标区域的气团轨迹进行聚类,结合污染物监测数据来分析污染物的主要输送路径,但由于该方法只考虑了物理迁移和沉降过程,没有考虑化学反应,因此更适用于一次污染物的传输研究,也被广泛应用于 O₃ 和前体物的直接输送路径探究^[31~33];源模型法在具有准确的排放清单条件下可以模拟 O₃ 及前体物的传输和光化学反应,其缺点是结果会由于排放清单和气象场模拟的不确定性而造成误差^[34,35];受体模型通过测量 O₃、NO₂、CO、HONO、VOCs、光解速率和气象条件等数据来模拟大气光化学反应过程,它可以避免由于排放清单不确定性带来的误差,但该方法仅限于对固定地点和时间的分析,不能进行大区域的空间分布特征研究^[36~40]。

日照市位于山东省东南部,处在京津冀与长江三角洲地区之间,东临黄海,是典型的沿海城市^[41]。近 5 年来,日照市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度呈现明显下降趋势,2020 年 PM_{2.5} 年均浓度达 35 μg·m⁻³,同比其改善幅度居山东省第一,但 O₃ 污染却日渐严重,成为制约日照市环境空气质量进一步提升的关键因

素。2020 年夏季 O₃ 超标天数达 24 d,其中 6 月 O₃ 污染最为严重^[42]。目前日照市 O₃ 污染成因和来源尚不明确,相关研究也较少。因此,本文选取日照市夏季 2020 年 6 月为典型月,基于 CMAQ 模拟 O₃ 污染过程,利用 IPR 过程分析和 ISAM 源追踪工具进行 O₃ 污染成因和来源分析,同时应用 HYSPLIT 模式探究 O₃ 及前体物的区域输送路径,深入分析 O₃ 污染的原因,旨在为日照市和处在沿海地区城市的 O₃ 防治对策制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 模型介绍

WRF 模型是新一代中尺度天气预报模式,可为 CMAQ 模型提供气象驱动场^[43];CMAQ 模式是美国环保署基于“一个大气层”的理念而设计的三维欧拉大气化学和传输综合模型^[44]。IPR 过程分析可以量化不同物理化学过程对 O₃ 的贡献^[45]。ISAM 是 CMAQ 模型中一种基于敏感性的源追踪分析工具,可以计算不同类别,不同区域源排放对目标区域污染物的贡献,相比于传统的强置零法,ISAM 不但可以减少计算量,而且对于 O₃、PM_{2.5} 等高度非线性的污染物可以减小系统误差^[46];HYSPLIT4 模式是欧拉和拉格朗日混合扩散模式,用来计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹^[47]。

1.2 模型设置和数据来源

本研究采用 WRF4.0 为 CMAQ5.3 提供气象场,因此两者参数设置尽量保持一致,详细设置见表 1。WRF 使用的气象背景场为美国国家环境预测中心(NCEP)发布的 FNL 全球再分析资料。人为源排放清单采用清华大学 2017 年 MEIC 清单(<http://www.meicmodel.org/>)和日照市精细化排放清单。天然源排放清单由 MEGAN 模型估算。HYSPLIT4 模式所用气象数据为 NCEP 提供的 GDAS 数据。地面气象数据采用日照市气象局公布的逐时地面气象观测资料。国控点污染物监测数据来自国家环境观测中心空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035>)。

1.3 ISAM 源追踪区域划分

为探究日照市本地和周边区域源排放对日照市的 O₃ 及前体物贡献,考虑相对日照市的距离和方位,共设置 8 个源追踪区域(图 1),分别为日照、青岛、潍坊、临沂、连云港、北面区域、西面区域和南面区域。除人为设定的来源区域,ISAM 会自动追踪来自初始条件,边界传输和其他贡献,其中边界传输贡献指模拟区域外的 O₃ 直接输送和前体物输送到日照市并通过光化学反应生成的 O₃,以及平流层 O₃

的传输,其他贡献主要为大气中甲烷对 O₃ 的贡献^[24].

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter settings		
模型	参数类型	参数设置
WRF	模拟时间	2020 年 6 月 1 ~ 30 日
	中心经纬度	35.500°N, 119.125°E
	嵌套层数	2 层
	水平分辨率	25 km, 5 km
	垂直层数	41 层
	微物理过程	WSM3 类简单冰方案
	边界层方案	YSU 方案
	近地面方案	Revised MM5 Monin-Obukhov 方案
	积云方案	浅对流 Kain-Fritsch (new Eta)
CMAQ	陆面过程	Noah 方案
	气相化学机制	cb6r3_ae6_aq
HYSPLIT	气溶胶化学机制	aero6
	受体点	监测站(35.42°N, 119.52°E)
HYSPLIT	计算时间	2020 年 6 月逐时后向 48 h
	模拟起始高度	500 m



图 1 源追踪区域划分示意

Fig. 1 Diagram of source tracing area division

1.4 模型验证方法

为评估模式模拟的准确性,选取标准化平均误差(NME)、标准化平均偏差(NMB)、平均相对误差(MFE)、平均相对偏差(MFB)和相关系数(*R*)对模拟结果进行验证.计算公式见式(1)~(5).NME 反映模拟值的偏差程度,用于将平均误差进行标准化;NMB 反映模拟值平均偏离程度,正值表示总体模拟

值高于实测值,反之表示模拟值低于实测值;MFE 反映平均绝对误差量;MFB 反映平均值的分数偏差;相关系数反映模拟值与实测值之间的吻合性和相关性.有研究建议^[48],当 |MFB| < 60% 且 MFE < 75% 时认为模拟结果合理.

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{(O_i + P_i/2)} \times 100\% \quad (3)$$

$$MFB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)}{(O_i + P_i/2)} \times 100\% \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

式中,*P_i* 为 *i* 时刻的模拟值,*O_i* 为 *i* 时刻的实测值,*n* 为样本个数, $\bar{P}$ 为模拟值的均值, $\bar{O}$ 为实测值的均值.

2 结果与讨论

2.1 模型检验

分别利用地面气象观测资料和日照市国控点污染物监测数据与模拟值对比来评估 WRF 和 CMAQ 的模拟效果(表 2).评估结果显示,总体上 WRF 对温度和相对湿度的模拟效果较好,*R* 大于 0.63, MFE 小于 10%,MFB 在 0 ~ -3.6% 之间,说明模拟值与监测值表现为极强相关.对风速的模拟略有高估,平均值高估 1.5 m·s⁻¹,MFE 小于 75% 且 |MFB| 小于 60%,故认为模拟结果合理;CMAQ 模拟 O₃ 浓度在各国控点的 *R* 均大于 0.6, MFE 在 44.1% 以内,且 |MFB| 在 34.5% 以内,说明模拟值

表 2 WRF 和 CMAQ 模拟结果评估统计量¹⁾

Table 2 WRF and CMAQ simulation results were used to evaluate statistics						
项目	MB	NME/%	NMB/%	MFE/%	MFB/%	<i>R</i>
温度	-1.5℃	9.5	-6.2	6.8	-3.6	0.74
相对湿度	-2.4%	12.3	-2.8	9.9	-1.8	0.63
风速	1.5 m·s ⁻¹	87.0	76.6	48.7	41.7	0.34
监测站 O ₃	-30 μg·m ⁻³	49.1	-34.0	44.1	-13.5	0.61
市政府广场 O ₃	-38 μg·m ⁻³	45.6	-40.7	36.5	-30.1	0.69
港务局 O ₃	-43 μg·m ⁻³	49.4	-45.3	41.2	-34.5	0.69
职业技术学院 O ₃	-41 μg·m ⁻³	51.2	-46.7	41.9	-34.2	0.68
岚山环保局 O ₃	-32 μg·m ⁻³	40.9	-36.8	31.9	-26.3	0.66

1) MB 为模式模拟值与实测值的差值,NME、NMB、MFE、MFB 和 *R* 的含义见 1.4 节

与监测值存在较好的相关性. 各国控点模拟值均低于实测值,可能是由化学机制的不确定性、气象场对风速的高估和源清单的不确定性造成的. 总体上, CMAQ 能较好模拟日照市 O_3 浓度变化.

2.2 O_3 及其前体物浓度空间分布特征

2020 年 6 月日照市国控点 O_3 日最大 8 h 浓度平均值变化如图 2 所示,从中可知,各国控点的 O_3 日最大 8 h 浓度平均值变化趋势较为一致,均在 6 月 4 日出现最大值,最高达 $256\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 对照国家环境空气质量二级标准(GB 3095-2012)限值 $160\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,各国控点均有超标出现,且出现时间一致. 若将国控点 O_3 日最大 8 h 浓度平均值超过 $160\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定为超标日,低于 $160\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定为非超标日,则 2020 年 6 月共有 O_3 超标日 8 d,分别为 6 月的 2、3、4、7、14、15、19 和 20 日,其余为 O_3 非超标日,共 22 d. 为探究日照市 O_3 超标日和非超标日的污染特征及来源差异,进一步明确 O_3 污染的成因,以下将对非超标日和超标日 O_3 污染成因和来源进行对比分析.

由于 O_3 高浓度主要出现在白天,因此,本研究重点关注日照市白天 O_3 浓度,将 10:00~17:00 的

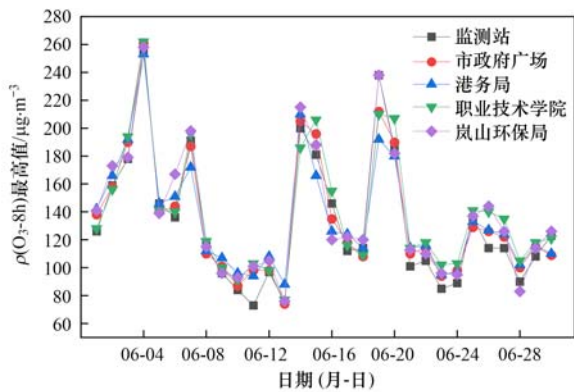
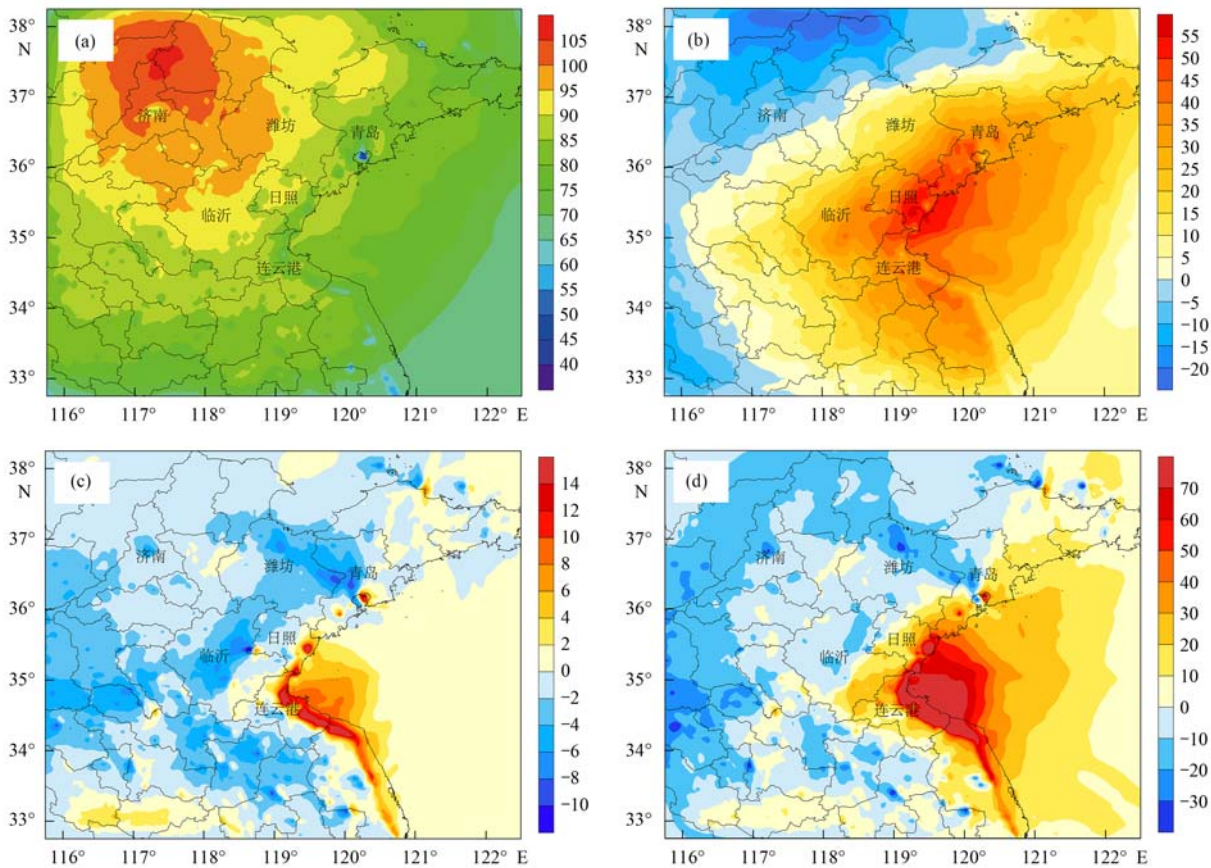


图 2 日照市国控点 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 最高值变化曲线
Fig. 2 Change curve of maximum value of state control point $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ in Rizhao

O_3 平均浓度作为白天代表时段进行分析[以下简称白天 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$]. 图 3(a)为日照市及周边区域白天 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 月均值空间分布,从中可知,浓度高值区中心位于济南市北部,与德州市和滨州市三市交界处,由高值中心向外 O_3 浓度逐渐减小,日照市远离高值中心,市内由西北向东南 O_3 浓度逐渐降低. 济南市与其西面的淄博市为重要的前体物排放区,这可能是造成高值中心位于济南市北部的主要原因.



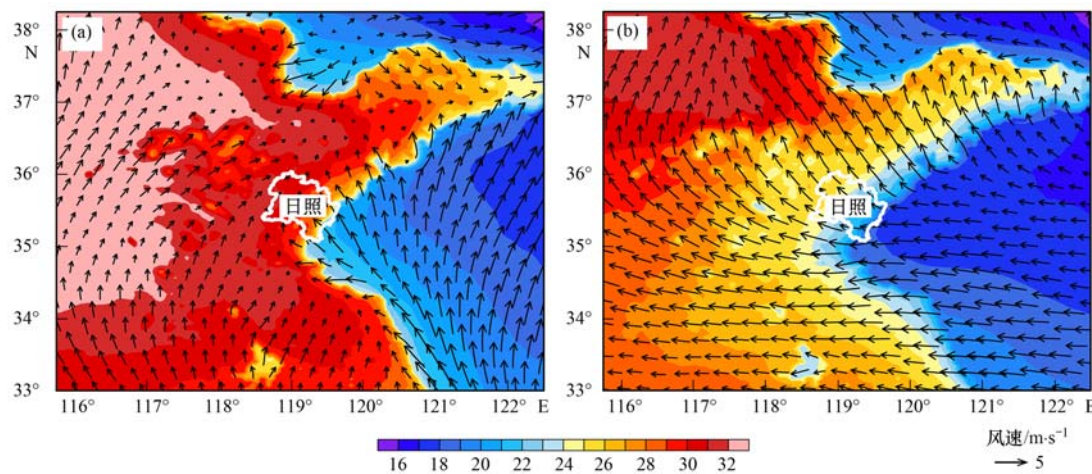
(a) 白天 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 月均值, (b) O_3 , (c) NO_x , (d) VOCs ; 色柱表示浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 3 O_3 月均浓度和超标日与非超标日 O_3 及前体物浓度差值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of O_3 and precursors on monthly average O_3 concentration and on exceedance and non-exceedance days

为了解 O_3 及前体物浓度空间分布在超标日和非超标日的差异,将超标日时近地面 O_3 及前体物浓度与非超标日时对应网格的浓度作差,差值空间分布如图 3(b)~3(d)所示,从中可知,相比于非超标日,在超标日 O_3 及前体物浓度呈现西面减小,东面增加的特征,日照市附近的 O_3 及前体物浓度均增大. O_3 浓度增加的区域范围较大,主要是以日照市为中心的周边大部分区域. NO_x 和 VOCs 在日照市和连云港市沿海附近浓度显著增大,日照市以西的绝大部分区域浓度减小. VOCs 浓度在日照沿海地

区增加量较大,最大可达 $83 \mu g \cdot m^{-3}$. 对比超标日与非超标日近地面风场与温度场可知(图 4),非超标日风向为东风,风速较大,易于污染物的扩散稀释,且均为源自海上的清洁空气;超标日,区域风场较为复杂,携带 O_3 和前体物的西南风,南风以及来自海上的东南风在日照市附近汇集,易于污染物的输送并在日照市附近累积,同时超标日近地面温度较高,利于光化学反应的增强生成 O_3 ,由此可见,日照市 O_3 超标主要是由于气象条件的改变造成 O_3 和前体物的累积以及光化学反应的加强.



(a) 超标日, (b) 非超标日; 色柱表示温度, 单位为 $^{\circ}C$

图 4 超标日与非超标日平均风场与温度场对比

Fig. 4 Comparison of average wind field and temperature field between exceedance and non-exceedance days

2.3 日照市 O_3 污染过程分析

利用 CMAQ 模型过程分析模块 (IPR) 输出不同物理化学过程对日照市白天 $\rho(O_3-8h)$ 的贡献, 主要过程包括: 光化学反应 (CHEM)、输送过程 (TRAN)、干沉降 (DDEP) 和云过程 (CLDS). 表 3 给出了各物理化学过程在不同离地高度上对日照市国控点 O_3 的平均贡献值, 由于云过程在各高度的贡献较其他过程量级较小, 故没有列出, NETC 表示所有过程造成的 O_3 累积量.

由表 3 可知, CHEM 在各个高度对 O_3 生成均为正贡献, 贡献值范围为 $0.11 \sim 13.34 \mu g \cdot m^{-3}$, 平均贡献值为 $7.14 \mu g \cdot m^{-3}$, 贡献值随高度增加呈先增大后减小的趋势, 最大值出现在离地 $151 \sim 450 m$ 之间. O_3 超标日与非超标日相比, CHEM 在各个高度的贡献值均有所增大, 平均增加量为 $5.87 \mu g \cdot m^{-3}$, 在离地 $0 \sim 60 m$ 增加最显著 ($7.43 \mu g \cdot m^{-3}$), 可见当日照市发生 O_3 污染时近地面和对流层中下层的光化学反应会明显增强. 气象要素对比可知, 超标日的温度和辐射分别高出非超标日 $1.7^{\circ}C$ 和 $36.5 W \cdot m^{-2}$, 相对湿度低于非超标日 9.2% , 高温、强辐射和低相对湿度, 均有利于光化学反应的加强^[49].

TRAN 在离地 $0 \sim 60 m$ 为正贡献, 平均贡献值为 $11.72 \mu g \cdot m^{-3}$, 其大于 CHEM 在该高度范围内的贡献值, 在离地 $60 \sim 2050 m$ 主要为负贡献或较小正贡献, 贡献值范围为 $-8.31 \sim 0.16 \mu g \cdot m^{-3}$, 负贡献的大小随高度增加呈先增大后减小的趋势, 最大负贡献出现在离地 $61 \sim 250 m$. O_3 超标日与非超标日相比, TRAN 在离地 $0 \sim 60 m$ 的正贡献明显增加, 平均增加量为 $5.42 \mu g \cdot m^{-3}$, 在离地 $751 \sim 1550 m$ 负贡献明显增加, 平均增加量为 $2.56 \mu g \cdot m^{-3}$, 垂直速度的对比显示(表 3), 超标日离地 $751 \sim 1550 m$ 有较大的向下垂直速度, 导致 O_3 的垂直向下输送, 故该高度层负贡献增加, 低层的正贡献增加. 对比张瑞欣等^[50]对乌海市 O_3 污染的过程分析结果, 在 $0 \sim 29 m$, CHEM 和 TRAN 对乌海市 O_3 贡献均为正, 其余高度 TRAN 的贡献均为负, 其与本研究结果具有一定的相似性. DDEP 的贡献主要在离地 $0 \sim 60 m$, 为 O_3 主要的汇, 平均贡献值为 $-16.68 \mu g \cdot m^{-3}$, 超标日的负贡献明显大于非超标日的负贡献. 总之, 从 O_3 非超标日到超标日, 由于光化学反应的增强、水平输送和垂直输送的作用, 使得 CHEM 和 TRAN 在离地 $0 \sim 60 m$ 贡献显著增加.

超标日时 CHEM 和 TRAN 对近地面 O₃ 的贡献与非超标日时对应网格的贡献差空间分布如图 5 所示,从中可知,超标日与非超标日相比,CHEM 对日照市和周边大部分区域的 O₃ 贡献明显增大,在日照市和连云港市沿海附近增加最显著,TRAN 的贡献在

日照和连云港沿海附近也明显增加,而在临沂以西的大部分区域贡献明显减小.由 2.2 节风场分析可知,西南风和西风携带 O₃ 及前体物到达日照市,并与来自海上的东风在此汇集,造成 TRAN 贡献在日照市和连云港市附近明显增加,而在西面区域明显减小.

表 3 不同离地高度处各物理化学过程的 O₃ 贡献值对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Comparison of O ₃ contribution values of physical and chemical processes at different heights above ground/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$									
项目	时期	0 ~ 60 m	61 ~ 150 m	151 ~ 250 m	251 ~ 450 m	451 ~ 750 m	751 ~ 1 150 m	1 151 ~ 1 550 m	1 551 ~ 2 050 m
CHEM	O ₃ 超标日	10.52	13.05	13.34	13.12	12.18	9.15	5.75	3.53
	O ₃ 非超标日	3.09	6.77	8.00	8.25	5.24	1.80	0.38	0.11
TRAN	O ₃ 超标日	14.43	-7.81	-7.62	-6.88	-6.06	-4.00	-2.38	-1.09
	O ₃ 非超标日	9.01	-7.43	-8.31	-8.26	-4.71	-1.26	0.0	0.16
DDEP	O ₃ 超标日	-20.47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	O ₃ 非超标日	-12.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NETC	O ₃ 超标日	4.47	5.24	5.73	6.24	6.12	5.15	3.37	2.44
	O ₃ 非超标日	-0.96	-0.80	-0.50	-0.08	0.51	0.54	0.37	0.27
W ¹⁾	O ₃ 超标日	-0.000 2	-0.001 3	-0.002 5	-0.004 3	-0.007 1	-0.009 8	-0.012 9	-0.014 6
	O ₃ 非超标日	0.001 0	0.002 1	0.001 9	0.000 8	0.000 3	0.003 9	0.008 4	0.008 3

1) W 为垂直速度,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

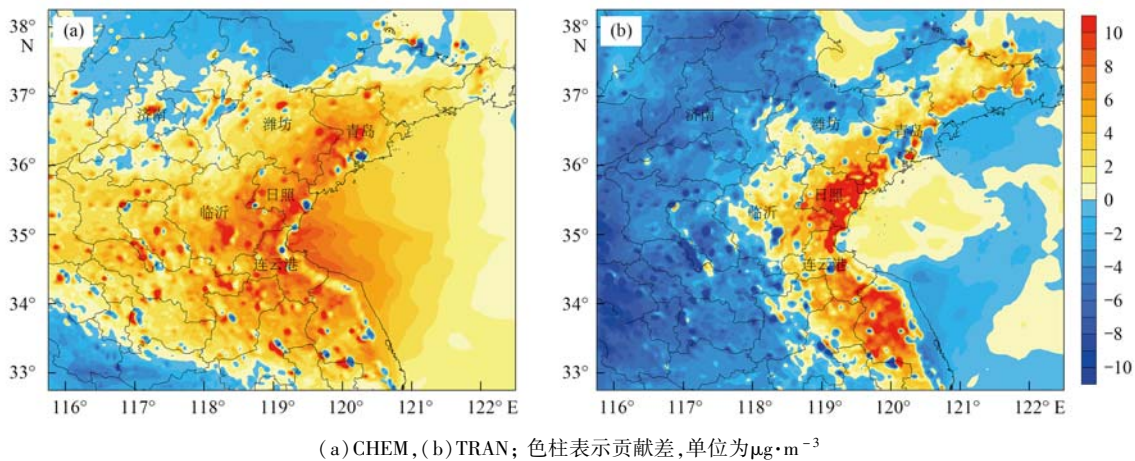


图 5 近地面 CHEM 和 TRAN 在超标日和非超标日的贡献差

Fig. 5 Contribution difference between near-surface CHEM and TRAN on superscalar and non-superscalar days

2.4 O₃ 及前体物来源分析

为了解日照市本地和周边不同源区排放对 O₃ 及其前体物的贡献,以及在超标日和非超标日的贡献差异,基于 ISAM 工具得到不同源追踪区域的贡献情况如图 6 所示,从中可知,日照市本地源是 NO_x 和 VOCs 的主要贡献源,贡献率分别为 47.5% 和 58.0%.本地源占主导的结果与张树宪等^[24] 在北京的研究结果一致.模拟区域外传输和其他源分别是 NO_x 和 VOCs 的第二大贡献源,贡献率分别为 32.5% 和 13.5%. O₃ 主要来自模拟区域外传输,贡献率达 67.5%.国内外学者在京津冀、长三角和珠三角等地区的研究也发现模拟区域外传输对城市 O₃ 污染有主要贡献^[20,24,34].日照市本地源对 O₃ 的贡献率为 12.0%,日照市周边区域中潍坊市、临沂市、连云港市和南面区域对 NO_x、VOCs 和 O₃ 的贡

献较显著,而来自青岛市,北面区域和西面区域的贡献相对较小.

对比各源追踪区域在 O₃ 超标日和非超标日的贡献差异可知,在超标日,日照市本地源对 NO_x 和 VOCs 的贡献率有所减小,分别减小 5.0% 和 20.0%,对 O₃ 的贡献率略有增加(2.0%).潍坊市、临沂市、连云港市和南面区域对 O₃ 及前体物的贡献率均显著增加,其中连云港市和南面区域的贡献率增加最显著,连云港市对 NO_x、VOCs 和 O₃ 的贡献率分别增加 2.7%、8.0% 和 2.8%,南面区域的贡献率分别增加 3.6%、7.0% 和 2.2%.模拟区域外传输对 NO_x、VOCs 和 O₃ 的贡献率在超标日有所减小,减小量分别为 5.0%、3.0% 和 9.0%.综合认为,当日照市发生 O₃ 污染时,其周边西面城市(潍坊市和临沂市等)和南面城市(连云港市等)的 O₃ 及其

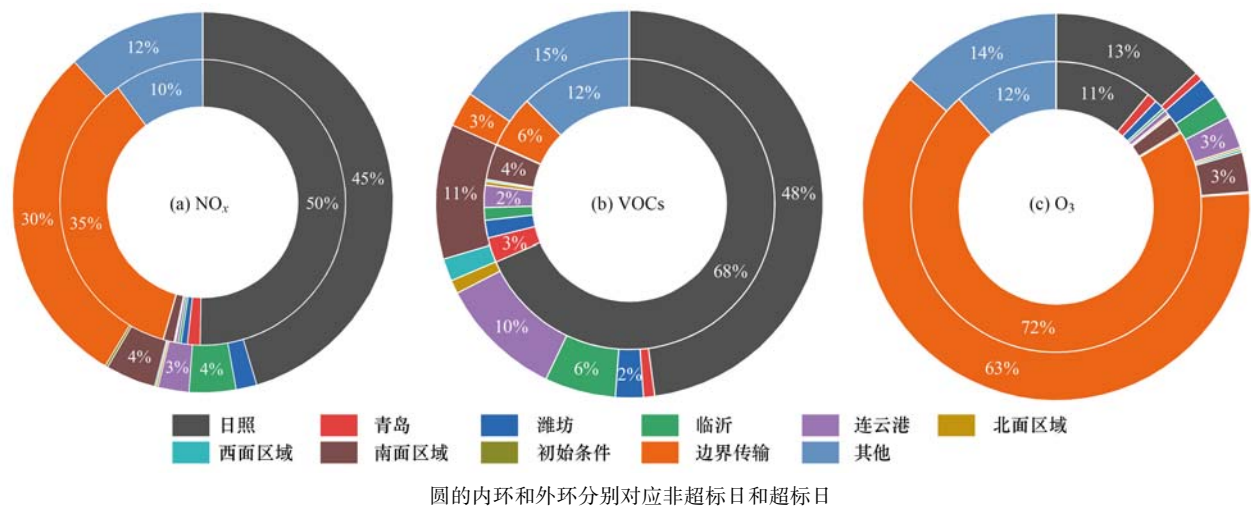


图 6 超标日和非超标日各源追踪区域对 O_3 、 NO_x 和 VOCs 的贡献对比

Fig. 6 Comparison of O_3 , NO_x , and VOCs contribution rates of all contributing sources on O_3 exceedance and non-exceedance days

前体物会大量输送到日照市,伴随较强的光化学反应,造成日照市 O_3 浓度明显增大,这与 2.3 节过程分析的结论一致。

2.5 区域输送路径分析

由 ISAM 源解析结果可知,日照市有超过 60% 的 O_3 来自于模拟区域外的边界传输,为探究 O_3 主要输送路径,基于 HYSPLIT 模式计算 2020 年 6 月日照市逐时气团后向轨迹,轨迹聚类结果见图 7。为表征各类轨迹对 O_3 及其前体物浓度的影响,结合日照市 O_3 和 NO_2 小时浓度监测数据,计算各类轨迹对应的 O_3 和 NO_2 平均浓度,并按照国家环境空气质量二级标准 (GB 3095-2012),将 O_3 小时平均浓度超过 $200 \mu g \cdot m^{-3}$ 对应的轨迹视为超标轨迹进行统计分析 (表 4)。

由图 7 和表 4 可知,聚类所有轨迹后得到 5 类平均轨迹。第 1 类轨迹源自日照市西面,起源于陕西省北部,依次经过山西省,河北省南部后进入山东省,经临沂市到达日照市,输送距离远,数量占总轨迹数的 12.95%,其对应的 $\rho(O_3)$ 和 $\rho(NO_2)$ 均值最高,分别为 $120.62 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $34.47 \mu g \cdot m^{-3}$,且超标轨迹在该类轨迹的占比最大 (11.8%),超标轨迹的 $\rho(O_3)$ 均值也最大 ($245.2 \mu g \cdot m^{-3}$); 第 3 类轨迹的超标轨迹占比次之 (5.1%),其源自日照市南面,起源于江苏省中部,输送距离短,该类轨迹占总轨迹数的 24.51%; 第 4 类轨迹源自日照市北面的威海市附近,沿海岸线到达日照市,输送距离较短,轨迹数占比最大 (33.84%),对应的 $\rho(O_3)$ 较低,为 $97.07 \mu g \cdot m^{-3}$,超标轨迹占到该类轨迹的 4.2%; 第 2 类

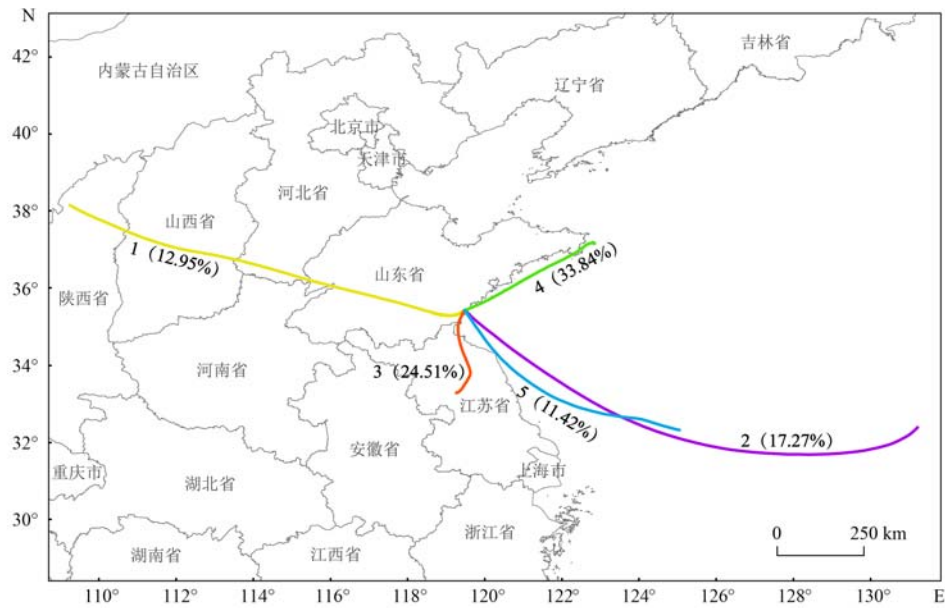


图 7 2020 年 6 月日照市 48 h 后向轨迹聚类

Fig. 7 The 48 h backward trajectory clustering in Rizhao in June 2020

和第 5 类轨迹均源自日照市东面的黄海,第 2 类轨迹的移速明显大于第 5 类轨迹,两类轨迹的数量共占 28.69%,对应的 $\rho(\text{O}_3)$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 均值最低,超标轨迹数占比也最小,不足 2.5%。

表 4 各类轨迹对应 O_3 浓度及超标轨迹占比

Table 4 All types of tracks correspond to O_3 concentration and the proportion of tracks exceeding the standard							
编号	轨迹数目/条	轨迹路径	$\rho(\text{O}_3)$ 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_x)$ 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	超标轨迹数目/条	超标轨迹在该类轨迹的占比/%	超标轨迹 $\rho(\text{O}_3)$ 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
1	93	陕西→山西→河北→山东→临沂→日照	120.62	34.47	11	11.8	245.2
2	124	黄海→日照	92.18	14.36	2	1.6	227.7
3	176	江苏→连云港→日照	108.23	25.14	9	5.1	206.0
4	237	威海→黄海→日照	97.07	28.28	10	4.2	215.0
5	82	黄海→日照	88.20	19.06	2	2.4	225.0

综上,来自日照市西面的路径中超标轨迹占比最大(11.8%),为日照市 O_3 及其前体物的主要输送通道,该类轨迹占总轨迹的 12.95%,来自日照市南面和北面输送距离较短的路径中超标轨迹分别占 5.1% 和 4.2%,对 O_3 和前体物也有一定的输送作用,这两类轨迹占到总轨迹的 58.35%,来自黄海的轨迹中超标轨迹数很少,该类轨迹占到总轨迹数的 28.69%。

3 结论

(1) 近地面 O_3 及前体物浓度空间分布显示, O_3 月均浓度高值中心位于济南市北部,由高值中心向外 O_3 浓度逐渐减小; O_3 超标日与非超标日相比,区域 NO_x 、VOCs 和 O_3 浓度总体呈西面减小,东面增加的特征,日照附近浓度增加显著,这主要是由于超标日风场复杂,携带 O_3 和前体物的西南风,南风以及来自海上的东南风在日照市附近汇集,易于污染物的输送并在日照市附近累积。

(2) 过程分析显示,CHEM 在各个离地高度对日照市白天 O_3 -8h 均为正贡献,平均贡献值为 $7.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,贡献值随高度增加呈先增大后减小的趋势,最大值出现在离地 151~450 m。TRAN 在离地 0~60 m 为正贡献($11.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),在 60 m 以上主要为负贡献。DDEP 贡献主要在离地 0~60 m,为 O_3 主要的汇,平均贡献值为 $-16.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;从 O_3 非超标日到超标日,CHEM 和 TRAN 在离地 0~60 m 的贡献明显增加,增加量分别为 $7.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $5.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(3) 源解析显示,日照市本地源是 NO_x 和 VOCs 的主要贡献源,贡献率分别为 47.5% 和 58.0%, O_3 主要来自模拟区域外传输,贡献率达 67.5%;超标日与非超标日相比,日照市本地源对 NO_x 和 VOCs 的贡献率有所减小,分别减小 5.0% 和 20.0%,潍坊市、临沂市、连云港市和南面区域对 O_3 及其前体物的贡献率均显著增加,其中连云港市和南面区域的贡献率增加最显著,连云港市对 NO_x 、VOCs 和 O_3

的贡献率分别增加 2.7%、8.0% 和 2.8%,南面区域的贡献率分别增加 3.6%、7.0% 和 2.2%。

(4) 轨迹聚类分析显示,来自日照市西面的路径中超标轨迹占比最大(11.8%),为日照市 O_3 及其前体物的主要输送通道,该类轨迹占总轨迹的 12.95%,来自日照市南面和北面输送距离较短的路径中超标轨迹分别占 5.1% 和 4.2%,对 O_3 和前体物也有一定的输送作用,这两类轨迹占到总轨迹的 58.35%,来自黄海的轨迹中超标轨迹数很少,该类轨迹占到总轨迹数的 28.69%。

参考文献:

[1] Turner M C, Jerrett M, Pope III C A, et al. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2016, **193** (10): 1134-1142.

[2] Fleming Z L, Doherty R M, von Schneidmesser E, et al. Tropospheric ozone assessment report: present-day ozone distribution and trends relevant to human health[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2018, **6**, doi: 10.1525/elementa.273.

[3] Liu N W, Lin W L, Ma J Z, et al. Seasonal variation in surface ozone and its regional characteristics at global atmosphere watch stations in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **77**: 291-302.

[4] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 106-114.

Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, et al. Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 106-114.

[5] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>, 2020-06-02.

[6] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>, 2021-05-26.

[7] 中华人民共和国生态环境部. 2021 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220608338202870777.pdf>, 2022-05-27.

[8] 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.

[9] Gao Q, Zang E, Bi J, et al. Long-term ozone exposure and

- cognitive impairment among Chinese older adults: a cohort study [J]. *Environment International*, 2022, **160**, doi: 10.1016/j.envint.2021.107072.
- [10] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in china: a global perspective [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [11] 奇奕轩, 胡君, 张鹤丰, 等. 北京市郊区夏季臭氧重污染特征及生成效率[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(5): 663-671.
Qi Y X, Hu J, Zhang H F, *et al.* Pollution characteristics and production efficiency of ozone in summertime at rural site in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(5): 663-671.
- [12] 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 等. 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 160-169.
Wu Y K, Chen W H, Yan F H, *et al.* Nonlinear response relationship between ozone and precursor emissions in the Pearl River Delta region under different transmission channels [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 160-169.
- [13] Liu H L, Zhang M G, Han X. A review of surface ozone source apportionment in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, **13**(5): 470-484.
- [14] 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 等. 基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2917-2927.
Tang Y X, Yao Q, Cai Z Y, *et al.* Exploring formation of ozone in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region using process analysis [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2917-2927.
- [15] 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.
- [16] 杨显玉, 易家俊, 吕雅琼, 等. 成都市及周边地区严重臭氧污染过程成因分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2000-2009.
Yang X Y, Yi J J, Lü Y Q, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a severe O₃ episode in Chengdu and surrounding areas [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2000-2009.
- [17] Gao J, Zhu B, Xiao H, *et al.* Diurnal variations and source apportionment of ozone at the summit of Mount Huang, a rural site in Eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 513-522.
- [18] 沈劲, 何灵, 程鹏, 等. 珠三角北部背景站臭氧浓度变化特征[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(10): 2006-2011.
Shen J, He L, Cheng P, *et al.* Characteristics of ozone concentration variation in the northern background site of the Pearl River Delta [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(10): 2006-2011.
- [19] 郝建奇, 葛宝珠, 王自发, 等. 2014年6月南京大气复合污染观测[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3585-3593.
Hao J Q, Ge B Z, Wang Z F, *et al.* Observational study of air pollution complex in Nanjing in June 2014 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3585-3593.
- [20] Liu H L, Zhang M G, Han X, *et al.* Episode analysis of regional contributions to tropospheric ozone in Beijing using a regional air quality model [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **199**: 299-312.
- [21] Han M, Lu X Q, Zhao C S, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds in urban and suburban Tianjin, China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, **32**(3): 439-444.
- [22] 李浩, 李莉, 黄成, 等. 2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市 O₃ 来源识别[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 1-10.
Li H, Li L, Huang C, *et al.* Ozone source apportionment at urban area during a typical photochemical pollution episode in the summer of 2013 in the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 1-10.
- [23] Dunker A M, Koo B, Yarwood G. Contributions of foreign, domestic and natural emissions to US ozone estimated using the path-integral method in CAMx nested within GEOS-Chem [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(20): 12553-12571.
- [24] 张树宪, 李洋, 张众志, 等. 基于 CMAQ/ISAM 空气质量模型的北京市夏季臭氧来源解析研究[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(5): 1183-1192.
Zhang S X, Li Y, Zhang Z Z, *et al.* Source apportionment of ozone in summer in Beijing based on CMAQ/ISAM air quality model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(5): 1183-1192.
- [25] 刘婵芳, 宋鑫, 李小兵, 等. 深圳市一次典型春季臭氧污染事件成因研究[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(10): 62-70.
Liu C F, Song X, Li X B, *et al.* Research on the causes of typical spring ozone pollution events in Shenzhen [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(10): 62-70.
- [26] Yang W Y, Chen H S, Wang W D, *et al.* Modeling study of ozone source apportionment over the Pearl River Delta in 2015 [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **253**: 393-402.
- [27] Wang P, Chen Y, Hu J L, *et al.* Source apportionment of summertime ozone in China using a source-oriented chemical transport model [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **211**: 79-90.
- [28] Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al.* Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delta during summer time [J]. *Science China Chemistry*, 2010, **53**(3): 651-663.
- [29] Qiao X, Tang Y, Hu J L, *et al.* Modeling dry and wet deposition of sulfate, nitrate, and ammonium ions in Jiuzhaigou National Nature Reserve, China using a source-oriented CMAQ model: Part I. Base case model results [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **532**: 831-839.
- [30] 王雪松, 李金龙, 张远航, 等. 北京地区臭氧污染的来源分析[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2009, **39**(6): 548-559.
Wang X S, Li J L, Zhang Y H, *et al.* Ozone source attribution during a severe photochemical smog episode in Beijing, China [J]. *Scientia Sinica: Chimica*, 2009, **39**(6): 548-559.
- [31] 夏佳琦, 陈强, 刘晓, 等. 乌海市臭氧传输特征与潜在源区[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 3012-3020.
Xia J Q, Chen Q, Liu X, *et al.* Transport characteristics and potential source of ozone in Wuhai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3012-3020.
- [32] 张芊, 庞可, 马彩云, 等. 甘肃地区秋冬季颗粒物输送路径及潜在源分析—基于 HYSPLIT4 模式及 TraPSA 分析平台[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(2): 509-518.
Zhang Q, Pang K, Ma C Y, *et al.* Analysis of transportation path and potential sources of atmospheric particulate matter over Gansu Province in spring and winter—Based on HYSPLIT4 model and TraPSA analysis platform [J]. *China Environmental Science*,

- 2022, **42**(2): 509-518.
- [33] Orellano P, Reynoso J, Quaranta N, *et al.* Short-term exposure to particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$), nitrogen dioxide (NO_2), and ozone (O_3) and all-cause and cause-specific mortality: systematic review and meta-analysis[J]. *Environment International*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105876.
- [34] 王杨君, 李莉, 冯加良, 等. 基于 OSAT 方法对上海 2010 年夏季 O_3 臭氧源解析的数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 567-573.
Wang Y J, Li L, Feng J L, *et al.* Source apportionment of ozone in the summer of 2010 in Shanghai using OSAT method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 567-573.
- [35] Collet S, Kidokoro T, Karamchandani P, *et al.* Future year ozone source attribution modeling study using CMAQ-ISAM[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, **68**(11): 1239-1247.
- [36] 李如梅, 闫雨龙, 王成, 等. 太原市城区夏季 VOCs 来源及其对 O_3 生成的贡献[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2515-2525.
Li R M, Yan Y L, Wang C, *et al.* Source apportionment of VOCs and its contribution to O_3 production during summertime in urban area of Taiyuan[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2515-2525.
- [37] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [38] Chang H L, Hwu C S, Chen S Y, *et al.* Emission factors and characteristics of criteria pollutants and volatile organic compounds (VOCs) in a freeway tunnel study[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **381**(1-3): 200-211.
- [39] Huang Y S, Hsieh C C. VOC characteristics and sources at nine photochemical assessment monitoring stations in western Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117741.
- [40] Li J, Zhai C Z, Yu J Y, *et al.* Spatiotemporal variations of ambient volatile organic compounds and their sources in Chongqing, a mountainous megacity in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1442-1452.
- [41] 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 等. 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对 O_3 臭氧生成的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 714-722.
Yao W J, Wang D W, Xie F Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of VOCs and its impact on ozone formation potential in Rizhao City in summer[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 714-722.
- [42] 山东省生态环境厅. 2020 年山东省生态环境状况公报[EB/OL]. <http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjzkgb/202106/P020210603392845498635.pdf>, 2021-06-03.
- [43] 张礼俊. 基于 Model-3/CMAQ 的珠江三角洲区域空气质量模拟与校验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Zhang L J. A performance evaluation study of Models-3/CMAQ model for simulating PRD regional air quality[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [44] Xing J, Wang S X, Jang C, *et al.* Nonlinear response of ozone to precursor emission changes in China: a modeling study using response surface methodology[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(10): 5027-5044.
- [45] 王佳颖, 曾乐薇, 张维昊, 等. 北京市夏季臭氧特征及臭氧污染日成因分析[J]. *地球化学*, 2019, **48**(3): 293-302.
Wang J Y, Zeng L W, Zhang W H, *et al.* Characteristics and causes of summer ozone pollution in Beijing City[J]. *Geochimica*, 2019, **48**(3): 293-302.
- [46] Kwok R H F, Napelenok S L, Baker K R. Implementation and evaluation of $PM_{2.5}$ source contribution analysis in a photochemical model[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 398-407.
- [47] Sahu S K, Liu S C, Liu S, *et al.* Ozone pollution in China: background and transboundary contributions to ozone concentration & related health effects across the country[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144131.
- [48] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [49] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
Qian Y, Xu B, Xia L J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi Province[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- [50] 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 等. 乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4180-4190.
Zhang R X, Chen Q, Xia J Q, *et al.* Exploring characteristics and causes of summer ozone pollution based on process analysis in Wuhai[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4180-4190.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)