

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

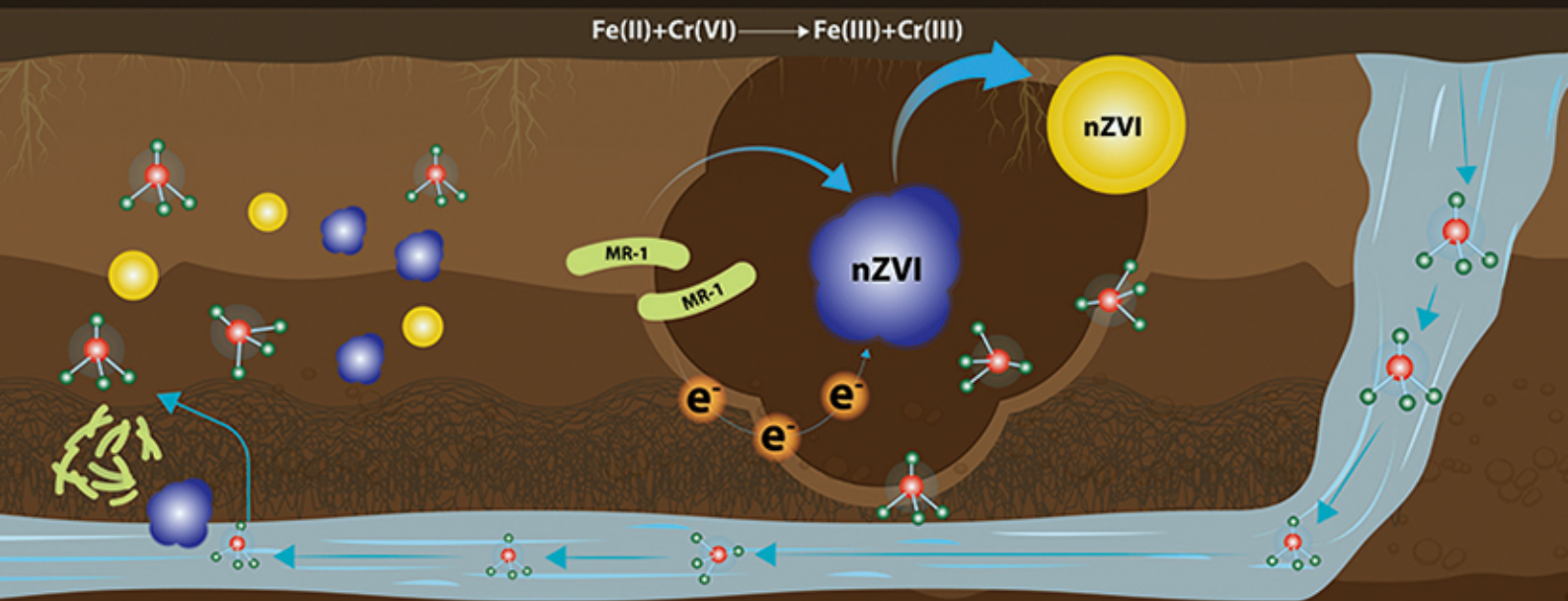
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市2014~2020年PM _{2.5} 和O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市2020年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气VOCs污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短SRT强化短程SNEDPR系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1株草螺属植物内生菌R-13的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米N ₂ O排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载NH ₄ ⁺ -N生物炭对土壤N ₂ O-N排放和NH ₃ -N挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201)	
《环境科学》征稿简则(4340)	
信息(4382, 4537, 4565)	

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究

张瑞欣¹, 陈强^{1*}, 夏佳琦¹, 刘晓¹, 郭文凯¹, 李光耀¹, 陈梅²

(1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘要: 乌海市地形复杂, 周边工业园区分布密集, 近年来夏季 O_3 污染问题突出, 且污染特征与形成机制尚不明确, 分析乌海市 O_3 变化特征, 探究 O_3 污染形成机制对该区域大气污染防治具有重要意义. 本文在分析乌海市 2018 年 6~8 月 3 次持续 O_3 污染过程特征的基础上, 利用 WRF-CMAQ 模式系统进行模拟并根据过程分析输出结果对污染的成因进行了深入分析, 探讨了区域输送和局地光化学反应对乌海市 O_3 的影响. 结果表明, 乌海市夏季 O_3 呈现“单峰”的日变化特征, 近地面 O_3 与向下短波辐射和气温显著呈正相关, 与相对湿度呈负相关; 空间分布上, 乌海市 3 个工业园区白天和夜间均为 O_3 低值区, 乌海西南部宁夏石嘴山地区、乌海城区和西北部乌兰布和沙漠地区白天为 O_3 高值区; 过程分析结果表明, 输送和化学过程及其相对大小对乌海市 O_3 有决定性影响, 6 月和 7 月的污染过程中局地光化学反应和输送共同导致 O_3 显著升高, 且化学过程的影响是输送的两倍左右, 8 月 O_3 的升高主要为输送作用的贡献; 进一步对输送作用进行分解可知偏南和西北方向的输送对 O_3 的升高有较大贡献, 结合前体物的排放, 可能的传输来源为宁夏银川、石嘴山及巴彦淖尔等区域, 因此, 乌海市应在控制本地排放的基础上, 加强区域联防联控, 减少区域传输对 O_3 的影响.

关键词: 臭氧(O_3); 社区多尺度空气质量模型(CMAQ); 污染特征; 过程分析; 乌海

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4180-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101094

Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai

ZHANG Rui-xin¹, CHEN Qiang^{1*}, XIA Jia-qi¹, LIU Xiao¹, GUO Wen-kai¹, LI Guang-yao¹, CHEN Mei²

(1. Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In recent years, summer O_3 pollution has become more severe in Wuhai, where the terrain is complex and industrial parks are densely distributed. However, the characteristics and formation mechanisms of this pollution have not yet been investigated and remain unclear. Analyzing the variation and formation mechanisms of O_3 is crucial to the prevention and control of air pollution in this region. By analyzing characteristics and using a WRF-CMAQ model to simulate three O_3 pollution periods in Wuhai from June to August 2018, this study explored the causes of O_3 pollution based on in-depth process analysis, and the effects of regional transportation and local photochemical reaction on O_3 were also discussed. The diurnal variation of ozone exhibited a single-peak distribution, and near-surface O_3 was positively correlated with short-wave radiation and temperature, and negatively correlated with relative humidity. The areas of Shizuishan in Ningxia and the Ulanbuhe desert exhibited high O_3 values during the day, while the three industrial parks in Wuhai exhibited low values during both the day and night. Process analysis showed that transportation, chemical processes, and their relative magnitudes had a significant impact on O_3 . Local photochemical reactions and transport during the pollution period in June and July led to an obvious increase in O_3 , while the impact of chemical processes was about twice as large as that of transport. The increase of O_3 in August was mainly caused by transport. Further decomposition of the transportation effect showed that transportation in the south and northwest directions had a remarkable effects on the increase of O_3 . Together with the emission of O_3 precursors, the main sources of transportation were the Yinchuan, Shizuishan, and Bayannaoer regions. Therefore, Wuhai and neighboring cities should strengthen regional joint prevention and control by jointly formulating and implementing control measures for air pollution to reduce the impact of regional transmission on O_3 .

Key words: ozone (O_3); community multiscale air quality model(CMAQ); pollution characteristics; processes analysis; Wuhai

近地面臭氧(ozone, O_3)主要由人为排放的挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)等前体物在太阳光照射下经复杂的光化学反应产生。 O_3 污染不仅会导致农作物减产, 树木生长缓慢, 同时对气候变化和人体健康也会产生不利影响^[1~4]。基于 O_3 污染的危害性, 国内外学者已从区域和城市尺度上对 O_3 污染的时空变化规律、主要影响因素和成因分析等开展了大量研究^[5~8]。

从 O_3 的日变化特征来看, 我国香港、杭州、青岛和烟台等地城市区域可观察到 O_3 的双峰变化, 白天和夜间 O_3 峰值相差不大, 分别出现在 14:00 和 04:00 左右^[9~11], 京津冀和珠三角等地区 O_3 多呈现

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61762057)

作者简介: 张瑞欣(1994~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: zhangrx18@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenqhq@lzu.edu.cn

勃湾区.

1.2 数据来源及模式设置

本研究采用的气象数据为乌海市气象局公布的逐小时气象观测资料. 空气污染物数据来自全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>) 公布的乌海市国控站点小时浓度数据. 利用 WRF v3.6.1 模拟气象场, CMAQ v5.0.1 对乌海市 O_3 及其前体物进行模拟. 模拟区域如图 1 所示, CMAQ 采用水平分辨率为 9、3 和 1 km 的三层嵌套. WRF 模式的气象资料来源于 NCEP 发布的 FNL 全球再分析资料, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间间隔为 6 h. 模式源排放清单采用清华大学开发的 2016 年 MEIC 排放清单 (<http://meicmodel.org/>), 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ [29-32], 其中乌海市排放清单采用本课题组自建的 2018 年高分辨率源排放清单 (HEI-WH18), 涵盖化石燃料燃烧源、工艺过程

源、移动源、溶剂使用源、扬尘源和天然源等 11 大类源, 包括 SO_2 、 NO_x 、CO、VOCs、 NH_3 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、BC 和 OC 等 9 种污染物的排放.

2 结果与讨论

2.1 模拟结果评估

采用平均偏差 (MB)、平均误差 (ME)、均方根误差 (RMSE)、皮尔逊相关系数 (R) 和一致性指数 (IOA) 对 WRF 和 CMAQ 的模拟效果进行定量评价 (表 1). 相关系数体现了模拟结果与观测数据的相关程度, 即趋势是否一致, MB 体现模拟对观测的相对偏离; ME 反映模拟对观测的绝对偏差; RMSE 是模拟值误差大小的量度, 均方根误差越小表明预报的准确度越高; IOA 指数代表模拟值和观测值的吻合程度, 越接近于 1 代表模拟效果越好.

表 1 WRF 和 CMAQ 模拟结果与监测数据对比

Table 1 Statistical comparison between the observed and simulated meteorological variables

要素	MB			ME			RMSE			R			IOA		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
辐射/ $W \cdot m^{-2}$	-36.27	80.04	-22.07	148.89	161.59	153.27	225.06	276.60	250.98	0.89	0.69	0.77	0.93	0.81	0.87
风速/ $m \cdot s^{-1}$	0.68	1.44	0.44	1.47	2.13	1.23	1.83	2.75	1.59	0.28	0.16	0.39	0.55	0.44	0.59
温度/ $^\circ C$	0.48	1.68	1.69	1.85	2.50	2.50	2.22	3.10	3.27	0.95	0.90	0.83	0.97	0.93	0.87
相对湿度/%	-1.98	-7.26	-2.39	10.02	11.04	14.96	13.59	13.45	19.32	0.59	0.88	0.60	0.77	0.91	0.78
聚英学校 $O_3/\mu g \cdot m^{-3}$	-9.16	-24.72	-8.68	31.52	44.19	36.65	38.51	53.52	43.06	0.63	0.49	0.62	0.76	0.61	0.74
林业局 $O_3/\mu g \cdot m^{-3}$	-2.55	-25.82	-7.58	44.38	44.75	37.15	56.22	55.00	42.83	0.67	0.54	0.62	0.72	0.64	0.73
中海勃湾学校 $O_3/\mu g \cdot m^{-3}$	-12.86	2.96	-16.32	39.81	50.06	41.85	46.60	62.73	49.96	0.60	0.55	0.62	0.72	0.60	0.69

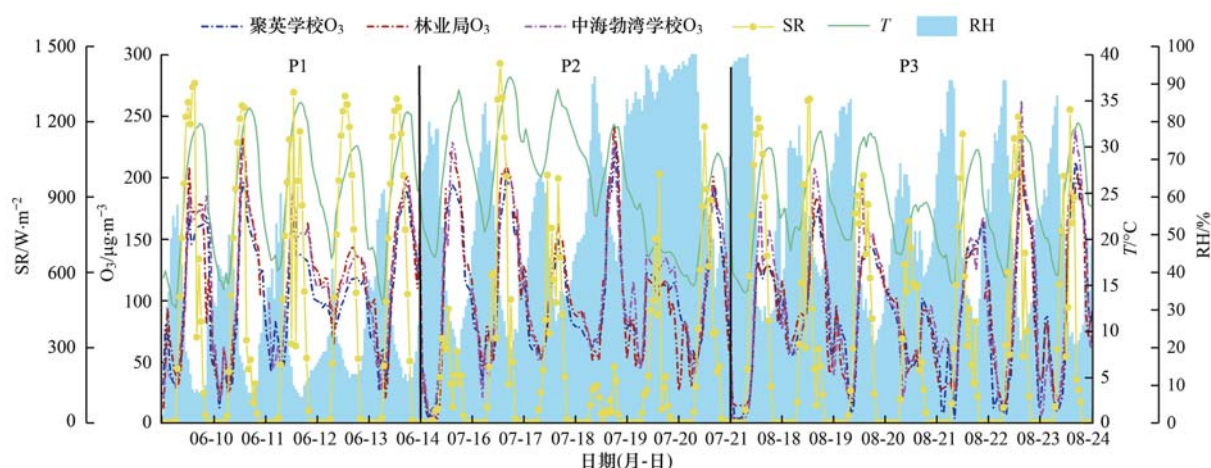
对于向下短波辐射 (SR) 和气温 (T), 3 个时段内模拟值与观测值均有很好地一致性; P3 时段相对湿度 (RH) 的模拟结果与观测的差异最大, ME 和 RMSE 分别为 14.96% 和 19.32%; 对于风速 (WS), P3 时段内模拟值与实测值的 IOA 最大为 0.59, 与其他研究相近 [33-35]. 从 O_3 的模拟上看, P1 时段, 林业局站点模拟值与监测值的差异最大, ME 和 RMSE 分别为 $44.38 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $56.22 \mu g \cdot m^{-3}$, 站点模拟值与监测值的 R 在 0.60~0.67 之间; P2 时段, 中海勃湾学校站点 RMSE 最大为 $62.73 \mu g \cdot m^{-3}$, 站点模拟值与监测值的 IOA 在 0.60~0.64 之间; P3 时段, 中海勃湾学校站点 MB、ME 和 RMSE 最大, 分别为 -16.32、41.85 和 $49.96 \mu g \cdot m^{-3}$, 除 8 月 21 日、22 日外, 其他时段内模式未模拟出日间 O_3 浓度的高值, 站点模拟值与监测值的 R 均为 0.62; O_3 模拟结果与监测结果的相关性与目前光化学传输模式模拟 O_3 的相关性一致 [36-39], 整体来看, CMAQ 的模拟结果在 3 个站点均能再现 O_3 的变化.

2.2 O_3 污染特征及与气象因子的关系

2.2.1 O_3 时间变化特征及与气象因子的关系

由于气象因素在 O_3 的形成、扩散稀释、传输和沉降等过程起着非常重要的作用, 为了更好地了解 3 次污染过程 O_3 变化特征及其形成机制的异同情况, 对 3 次污染过程中 O_3 与 SR、 T 和 RH 的日变化特征进行分析 (图 2).

O_3 浓度与 T 的日变化趋势吻合较好, 均呈单峰型分布, 峰值出现在 12:00~18:00 左右, 3 个时段内 O_3 -1h 和 O_3 -8h 最大超标倍数分别在 1.23~1.64 和 0.08~0.29 之间; 随后 T 逐渐下降, O_3 浓度也出现下降趋势, 至次日 06:00 左右 T 达到 1 d 中的最低值, O_3 浓度也降至最低, 在 3~18 $\mu g \cdot m^{-3}$ 内变化; 之后 T 上升, O_3 浓度开始不断升高, 至中午或午后达到 1 d 中的最大值. 相关性分析显示, 3 个站点 O_3 浓度与 T 在 0.05 置信水平 (双侧检验) 下显著相关, P1 和 P3 时段 Pearson 相关系数均大于 0.88. SR 和 T 的变化趋势基本一致, 随着 SR 达到最大, O_3 浓度也逐渐达到 1 d 中的最大值, 受日照的

图2 3次污染过程中 O_3 与辐射、气温和相对湿度日变化曲线Fig. 2 Daily variation of O_3 and meteorological factors during three pollution processes

影响, SR 在 18:00 左右之后显著下降, O_3 浓度的高值可在 18:00 后维持一段时间,再逐渐下降,夏季 SR 和 T 是影响近地面 O_3 浓度的关键因素. 大气中的水汽通过影响太阳辐射、前体物浓度从而对 O_3 产生影响,剔除降水影响后,3 个时段内 Pearson 相关系数大于 -0.81 (0.05 置信水平,双侧检验), RH 与 O_3 显著负相关. 综合 SR、 T 和 RH 对 O_3 浓度的影响,强光照、高温和低湿的条件,有利于乌海市 O_3 的生成,这与国内外大多数研究结果相一致^[40~42].

2.2.2 O_3 空间分布特征

根据 O_3 的“单峰”日变化特征,得到 3 次污染过程中夜间 (00:00 ~ 06:00) 和白天 (12:00 ~ 18:00) O_3 的分布情况 (图 3).

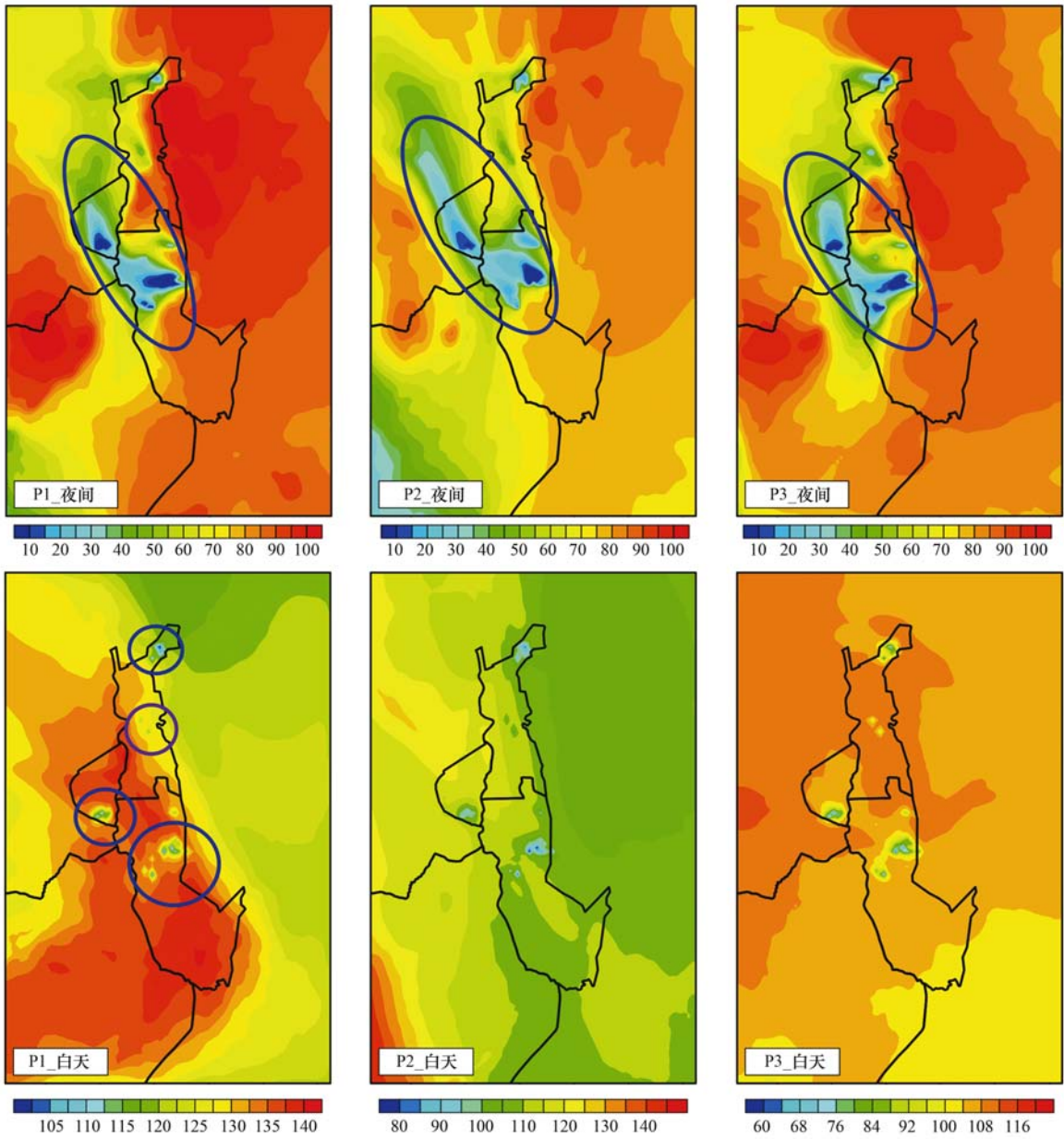
夜间,宁夏北部和乌海东部为 O_3 高值区,乌海市工业园区、海勃湾区 (电厂周边) 和宁夏石嘴山地区由于 NO 等物质对 O_3 的消耗而呈现低值区,低于 $40 \mu g \cdot m^{-3}$; 同时乌海市城区夜间受东南风控制,3 次污染过程均存在显著从海南工业园区向乌达工业园区及其北部的前体物输送,在此路径上的区域均为 O_3 浓度低值区. 白天,乌海市 3 个工业园区 (图 3, 蓝色圈) 及国控站点附近两个电厂位置 (图 3, 紫色圈) 为 O_3 浓度低值区, O_3 浓度较低的原因可能是由于工业园区和电厂排放的 VOCs 及 NO_x 在高温光照的条件下发生光化学反应, O_3 的消耗大于生成导致的; 乌海西南部宁夏石嘴山地区、西北部乌兰布和沙漠地区和乌海城区 O_3 浓度较高,但不同污染过程 O_3 的高值中心和浓度水平存在差异, P1 时段从石嘴山地区-海南区-乌达区整体 O_3 浓度较高,达到 $140 \mu g \cdot m^{-3}$, P2 时段石嘴山地区 O_3 高值仍维持在 $140 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右,但乌海城区 O_3 浓度在 $110 \sim 120 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间, P3 时段区域整体 O_3 浓度相差不

大. 从 NO_x 和 VOCs 的排放分布来看 (图 4), 乌海市西南部宁夏银川、石嘴山地区和北部巴彦淖尔地区均存在前体物的排放,为可能的 O_3 源区,但区域传输和本地光化学反应对 3 次污染过程的影响仍需进一步量化.

2.3 模拟时段内 O_3 污染过程分析

CMAQ 过程分析模块 IPR 输出结果具体包括 7 个过程:垂直扩散 (VDIF)、垂直平流 (ZADV)、水平扩散 (HDIF)、水平平流 (HADV)、化学过程 (CHEM)、干沉降 (DDEP) 和云过程 (CLDS). 从表 2 和图 5 可知, HTRA 代表水平输送,为水平扩散和水平平流的总和; VTRA 代表垂直输送,是垂直扩散和垂直平流的总和; TRAN 代表输送过程,为水平输送和垂直输送过程的总效应. 利用 IPR 量化对不同物理化学过程在 3 次 O_3 污染过程中的贡献情况 (表 2 和图 5).

根据 IPR 输出结果, DDEP 在 3 次污染过程中对 O_3 均为负贡献,起到降低 O_3 的作用, 3 个站点 DDEP 最大负贡献可达 $-11 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右,平均负贡献率在 $18.69\% \sim 45.77\%$ 之间, 08:00 ~ 18:00 DDEP 对 O_3 的消耗较大,尤其在中午 CHEM 和 TRAN 的贡献量级变小,此时 DDEP 将成为 O_3 的主要汇之一. CLDS 在大部分时刻均对 O_3 有正贡献, 3 次污染过程平均正贡献率 $1.41\% \sim 51.82\%$ 之间. TRAN 和 CHEM 对乌海市 O_3 贡献的变化幅度较大,且输送和化学过程的相对大小对 O_3 浓度有决定性影响. P1 和 P2 时段, 00:00 ~ 10:00 左右 TRAN 对 O_3 有较大的正贡献,站点平均正贡献在 $75.89\% \sim 95.06\%$ 之间,同时 00:00 ~ 06:00 左右, CHEM 与 TRAN 的贡献相反,主要起到消耗 O_3 的作用, P1 和 P2 时段站点平均负贡献分别为 -83.95% 和 -88.96% ,整体来看 00:00 ~ 06:00 O_3 浓度的净变



图例表示 O₃ 浓度,单位 μg·m⁻³

图 3 3 次污染过程中 O₃ 空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of O₃ during different pollution processes

表 2 不同污染时段内国控站点物理化学过程平均贡献率/%

Table 2 Average contribution rate of different physical and chemical processes at air quality monitoring stations during different pollution periods/%		DDEP		CLDS		CHEM		TRAN	
时段	站点	源	汇	源	汇	源	汇	源	汇
P1	聚英学校	—	-30.63	29.39	—	47.95	-87.31	77.82	-58.88
	林业局	—	-40.59	5.71	-2.59	72.99	-91.77	86.19	-31.89
	中海勃湾学校	—	-45.77	51.82	-9.36	68.58	-72.78	75.89	-29.91
	平均	—	-39.00	28.97	-5.98	63.17	-83.95	79.97	-40.23
P2	聚英学校	—	-18.69	8.98	—	78.90	-92.23	86.73	-81.16
	林业局	—	-19.01	0.86	-1.37	85.78	-95.81	95.06	-70.42
	中海勃湾学校	—	-42.98	—	-6.25	68.29	-78.83	86.04	-32.28
	平均	—	-26.89	4.92	-3.81	77.66	-88.96	89.28	-61.29
P3	聚英学校	—	-32.81	39.37	—	18.86	-82.16	67.09	-33.43
	林业局	—	-28.67	1.41	-1.19	8.75	-80.78	98.26	—
	中海勃湾学校	—	-32.88	—	-12.67	18.94	-72.00	95.06	-10.72
	平均	—	-31.45	20.39	-6.93	15.52	-78.31	86.80	-22.08

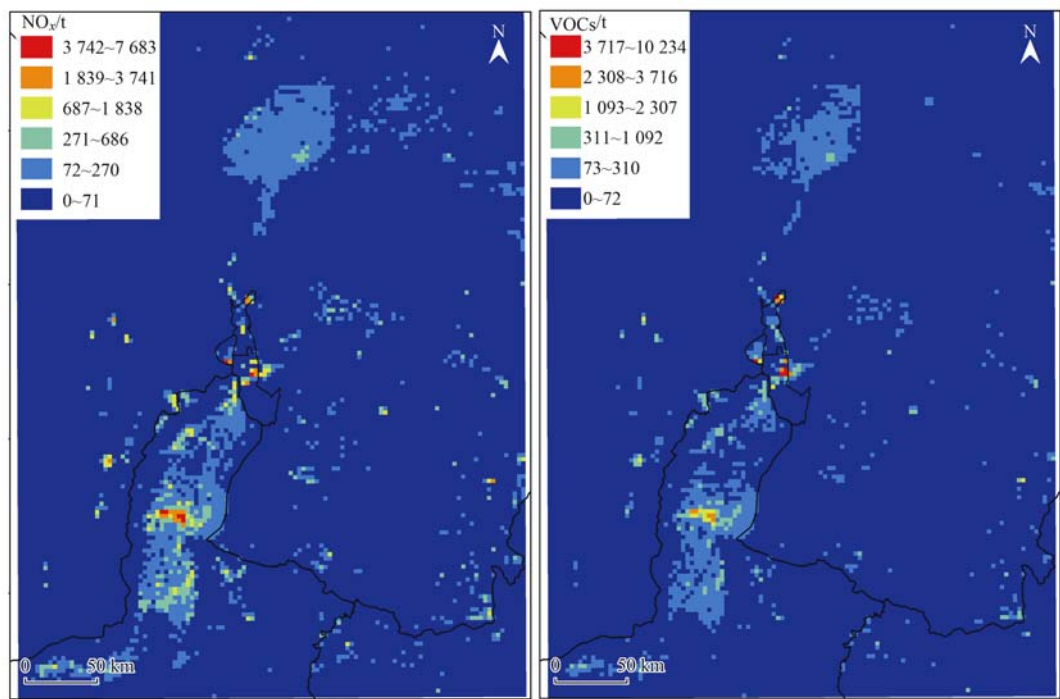
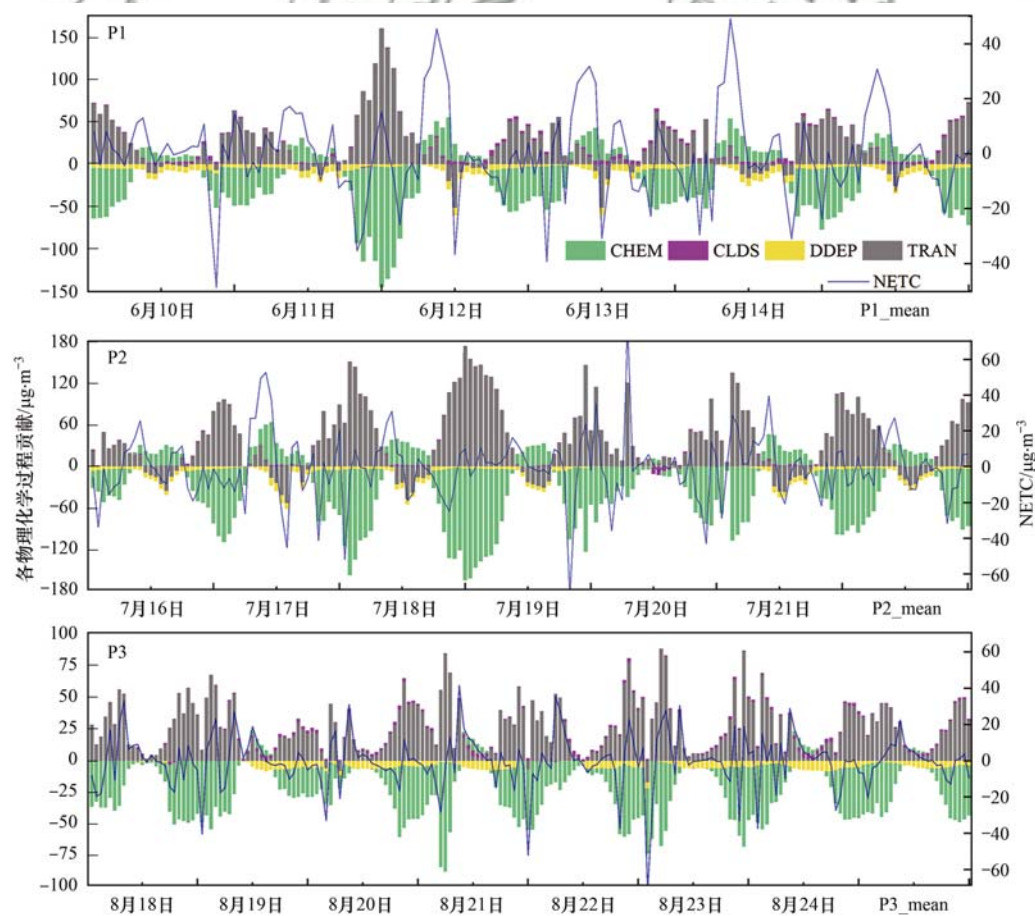


图 4 NO_x 和 VOCs 年排放量
Fig. 4 Annual emissions of NO_x and VOCs



NETC 为各物理化学过程导致的 O_3 浓度净变化, P1_mean、P2_mean 和 P3_mean

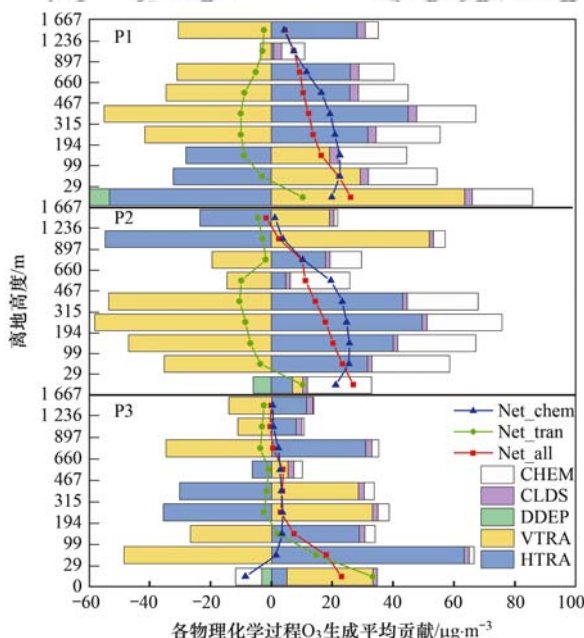
分别为 P1、P2 和 P3 时段不同时刻各物理化学过程的平均贡献

图 5 不同污染时段内各物理化学过程对 O_3 小时浓度的贡献

Fig. 5 Contribution of various physical and chemical processes to the hourly O_3 concentration

化在 $\pm 25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内,不会出现 O_3 显著升高情况; 07:00 ~ 10:00 左右 TRAN 和 CHEM 对 O_3 浓度贡献的量级减小,但由于光照促进了光化学反应的发生, CHEM 对 O_3 的影响由夜间的负贡献转变为正贡献,此时 TRAN 和 CHEM 共同作用导致 O_3 显著上升, O_3 净变化出现大于 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的情况; 11:00 ~ 17:00 左右, CHEM 保持正贡献,但 TRAN 转变为负贡献,消耗 O_3 ; 17:00 ~ 00:00 由于光照逐渐减弱消失, CHEM 成为 O_3 的主要汇, TRAN 是 O_3 的源之一. P3 时段,除个别时刻外, TRAN 对 O_3 均为正贡献; 10:00 ~ 15:00 光照较强时刻的 CHEM 在 8 月 19 ~ 21 日和 8 月 24 日对 O_3 有正贡献, 8 月 18 日和 8 月 23 日有较小负贡献,从平均来看 CHEM 在 10:00 ~ 14:00 是 O_3 的源之一,但贡献不大,平均正贡献率为 15.52%. 说明 P3 时段输送是导致 O_3 浓度升高并维持的主要原因.

由于输送过程与气象条件密切相关,且输送的污染物会对局地光化学过程产生影响,因此, 3 次污染过程中近地层 O_3 主要来源于局地光化学生成,还是周边地区污染输送需要进一步讨论. 对 3 次过程中站点 O_3 净增量最大时刻前后站点垂直方向上各物理化学过程的贡献进一步分析(图 6).



Net_all 为所有物理化学过程影响下 O_3 的净变化, Net_tran 为输送过程导致的 O_3 变化, Net_chem 为化学过程导致的 O_3 变化

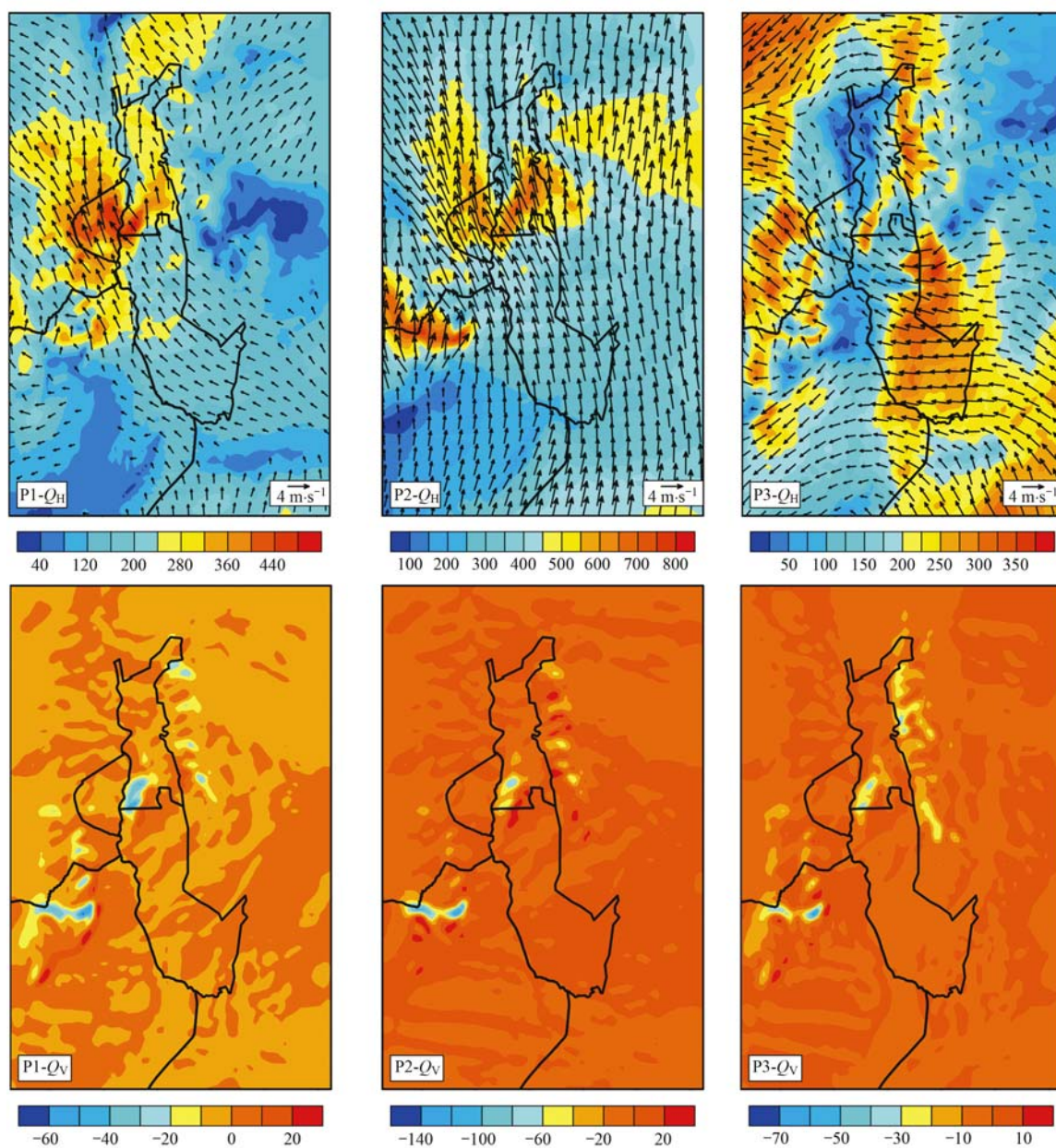
图 6 各物理化学过程对 O_3 生成的平均贡献垂直廓线

Fig. 6 Vertical profile of averaged contribution of various physical and chemical processes to O_3 generation

P1 和 P2 时段最低层(0 ~ 29 m)输送和化学过程对 O_3 的贡献均为正,其余高度输送过程的贡献均为负,说明输送和化学过程共同导致了低层 O_3 的快

速升高;这与 IPR 站点小时贡献的结果一致. 进一步将输送作用分解到水平和垂直方向上, P1 时段低层(0 ~ 194 m), VTAR 的贡献为正, HTAR 为负,在中高层(>194 m)则相反,表示中高层 O_3 水平传输至乌海上空,通过局地下沉运动,造成乌海市 O_3 浓度的积累,并在低层通过水平运动扩散出去,但扩散的量级较小,因此 0 ~ 29 m 由输送过程导致 O_3 浓度的增量为 $10.34 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; P2 时段,最低层(0 ~ 29 m), HTAR 和 VTAR 均为正贡献,在 29 ~ 897 m, VTAR 的贡献为负, HTAR 的贡献为正,说明在 P2 时段 0 ~ 897 m 水平输送造成乌海 O_3 的积累,进一步经垂直输送向低层和高空扩散,最终导致低层 O_3 平均升高 $10.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. P1 和 P2 时段, CHEM 在所有高度对 O_3 的贡献均为正,且随着高度的增加由气相化学反应导致的 O_3 浓度增量略有增大后逐渐减小,最低层由 CHEM 导致的 O_3 变化量分别为 $21.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $25.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最低层 CHEM 对 O_3 的贡献是输送过程的一倍左右,说明局地化学反应在 P1 和 P2 时段主导了 O_3 的升高,并且在整个边界层内均是 O_3 的重要来源之一. P3 时段,最低层 CHEM 和 DDEP 的贡献为负, HTAR、VTAR 的贡献为正,随着高度的增加 CHEM 虽有正贡献,但贡献量均小于 $3.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,且低层输送过程对 O_3 的贡献平均达到 $33.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,持续的输送过程正贡献是 O_3 暴发式升高的主要原因, CHEM 则起到消耗 O_3 的作用. 若白天输送过程正贡献使得 O_3 小时净增量大于 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为暴发机制,具有暴发机制的污染为输送型污染,不具备该暴发机制且日间输送贡献明显为负,化学贡献显著高于平均值的污染型为局地生成型污染^[22,24],考虑地域差异, P3 时段输送的平均正贡献接近 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,满足输送区域输送型污染特征; P1 和 P2 时段,化学贡献是输送的两倍左右,但二者均为正贡献,无显著局地生成型污染特征,因此, P1 和 P2 时段的污染过程是由输送和局地生成共同导致的.

根据 O_3 净增量较大时刻前后平均输送通量分布(图 7),进一步分解 3 次污染过程中的输送作用, P1 和 P2 时段海勃湾区 O_3 水平输送通量分布情况相似,乌海市整体被偏南风控制,海勃湾区甘德尔山附近和乌达区 O_3 向南输送显著, P1 时段海勃湾区国控站点附近输入和输出通量相差不大在 $300 \sim 450 \mu\text{g}\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1}$ 变化, P2 时段,甘德尔山附近向南的输送通量大于 $700 \mu\text{g}\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1}$,显著高于海勃湾市区的向南输送,市区南边界输入通量大于北边界输出通量,导致 O_3 的积累,站点附近垂直输送



Q_H 为 O_3 水平输送通量, Q_V 为 O_3 垂直输送通量; 图例表示输送通量, 单位 $\mu g \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$

图7 不同污染过程近地层(0~29 m) O_3 输送通量小时平均

Fig. 7 Hourly average of O_3 transport flux in the near-surface layer (0-29 m)

通量在 $-20 \sim 20 \mu g \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$ 左右, 因此 P1 和 P2 时段的输送主要以偏南方向的输送导致 O_3 净累积为主. P3 时段, 海勃湾区向西北方向的输送小于 $100 \mu g \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$, 但甘德尔山附近和市区东北部向海勃湾的输送通量在 $350 \mu g \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$ 左右, 水平方向上输入大于输出, 且这两个区域在垂向上向下输送通量在 $-50 \sim -30 \mu g \cdot (s \cdot m^2)^{-1}$, 向下输送扩散将进一步导致海勃湾区 O_3 的积累, 因此 P3 时段偏南和东北方向的水平输送以及垂向输送共同导致乌海 O_3 的积累. 综上, O_3 的输送方向与 O_3 前体物排放的分布具有很好的一致性.

结合监测数据, 分析 3 次 O_3 污染过程中的风玫瑰

图及对应国控站点近地面风向、风速与 O_3 小时净变化量的关系可知(图 8), P1、P2 和 P3 时段内的主导风向分别为东北风、南风 and 东南风, $1 \sim 3 m \cdot s^{-1}$ 风速出现频率分别为 72%、61% 和 82%. 由风向、风速和 O_3 小时净变化量的关系, 污染时段内主导风向上均未出现 O_3 小时浓度的显著升高; P1 时段风向分布在 E ~ W 扇区, P2 时段在 SSE ~ WNW 扇区, P3 时段在 S ~ W 和 NE ~ E 扇区, 风速为 $1 \sim 3 m \cdot s^{-1}$ 时(P2 时段存在风速大于 $6 m \cdot s^{-1}$ 的情况), 国控站点 O_3 小时净变化量较大, 与模式输出结果中各污染过程 O_3 水平输送通量方向基本一致, 进一步证明了当存在偏南或者偏东北风, 风速在 $1 \sim 3$

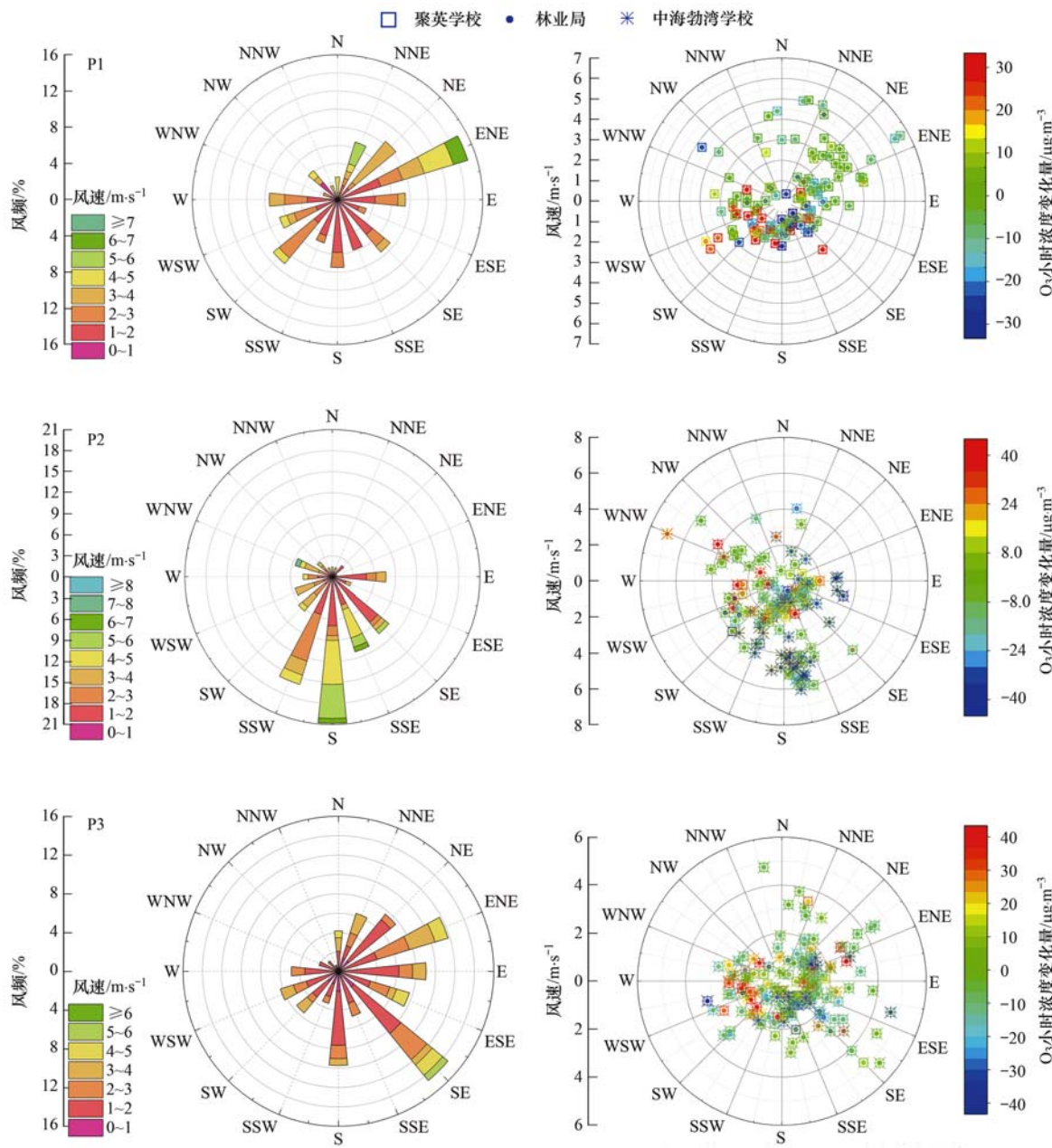


图8 3次污染过程中风玫瑰图及风向风速与O₃小时浓度变化量的关系

Fig. 8 Wind rose diagram and the relationship between wind direction, wind speed, and hourly variation of O₃ concentration

m·s⁻¹时,乌海市易出现O₃快速升高现象.

3 结论

(1)根据IPR输出结果,干沉降对O₃的贡献均为负,为O₃的汇;云过程对O₃的影响较小,在大部分时刻均有正贡献,是O₃的源之一;输送和化学过程及其相对大小对乌海市O₃有决定性影响,其中P1和P2时段,07:00~10:00,输送和化学过程共同导致O₃浓度的显著上升,化学过程的作用是输送的两倍左右;P3时段水平和垂直输送是O₃的浓度升高的主要原因,化学过程的正贡献不大,满足区域输送型污染特征.

(2)区域O₃输送通量的分布进一步证明偏南和东北方向上的水平输送对乌海的O₃的升高有显著贡献,乌海市应在控制乌海市本地排放的基础上,加强区域性O₃的联防联控与协同治理工作.

(3)夏季3次污染过程中,乌海市O₃均呈现“单峰”的日变化特征,峰值出现在12:00~18:00.近地面O₃浓度与向下短波辐射、气温呈正相关,与相对湿度呈负相关.乌海市3个工业园区及电厂位置白天和夜间均为O₃低值区;白天乌海西南部宁夏石嘴山、西北部乌兰布和沙漠地区及乌海城区为O₃浓度高值区;结合NO_x和VOCs排放的分布情况,乌海市O₃可能的传输源区为宁夏银川、石嘴山和巴彦淖尔等区域,夜间乌海市本地存在海南工业

园区向乌达工业园区及其北部的 O₃ 及前体物传输。

参考文献:

- [1] Yi F J, Feng J A, Wang Y J, *et al.* Influence of surface ozone on crop yield of maize in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, **19**(2): 578-589.
- [2] Cailleret M, Ferretti M, Gessler A, *et al.* Ozone effects on European forest growth—Towards an integrative approach [J]. *Journal of Ecology*, 2018, **106**(4): 1377-1389.
- [3] Kim Y, Choi Y H, Kim M K, *et al.* Different adverse effects of air pollutants on dry eye disease: ozone, PM_{2.5}, and PM₁₀ [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115039.
- [4] Hendriks C, Forsell N, Kieseewetter G, *et al.* Ozone concentrations and damage for realistic future European climate and air quality scenarios [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 208-219.
- [5] Kulkarni P S, Bortoli D, Silva A M. Nocturnal surface ozone enhancement and trend over urban and suburban sites in Portugal [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 251-259.
- [6] Jasaitis D, Vasilaiuskienė V, Chadyšienė R, *et al.* Surface ozone concentration and its relationship with UV radiation, meteorological parameters and radon on the Eastern Coast of the Baltic Sea [J]. *Atmosphere*, 2016, **7**(2), doi: 10.3390/atmos7020027.
- [7] 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.
- [8] 郑小华, 李明星, 刘慧, 等. 汾渭平原空气质量的时空特征及其与气象因子的关系 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(11): 4113-4121.
- Zheng X H, Li M X, Liu H, *et al.* Spatiotemporal characteristics of air quality and their relationships with meteorological factors over the Fenwei Plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(11): 4113-4121.
- [9] Tong N Y O, Leung D Y C. Ozone diurnal characteristics in areas with different urbanizations [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2012, **49**(1-2): 100-124.
- [10] 陈超, 严仁熾, 叶辉, 等. 杭州市臭氧污染特征研究 [J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(3): 339-342.
- Chen C, Yan R C, Ye H, *et al.* Research on the characteristics of ozone pollution in Hangzhou [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(3): 339-342.
- [11] Li J, Zhao Z H. Comparative analysis of the variation characteristics of O₃, NO₂ and CO in the boundary layer in coastal cities and inland cities in the middle latitude regions in China [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **208**, doi: 10.1088/1755-1315/208/1/012006.
- [12] Fang X Z, Xiao H Y, Sun H X, *et al.* Characteristics of ground-level ozone from 2015 to 2018 in BTH area, China [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(2), doi: 10.3390/atmos11020130.
- [13] Xu J W, Huang X, Wang N, *et al.* Understanding ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China from the perspective of diurnal cycles [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **752**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141928.
- [14] Wang X Q, Zhang T S, Xiang Y, *et al.* Investigation of atmospheric ozone during summer and autumn in Guangdong Province with a lidar network [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141740.
- [15] Burley J D, Bytnerowicz A, Ray J D, *et al.* Surface ozone in Joshua Tree National Park [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **87**: 95-107.
- [16] Galvão E S, Santos J M, Junior N C R, *et al.* Volatile organic compounds speciation and their influence on ozone formation potential in an industrialized urban area in Brazil [J]. *Environmental Technology*, 2016, **37**(17): 2133-2148.
- [17] Dimitriou K, Kassomenos P. Three year study of tropospheric ozone with back trajectories at a metropolitan and a medium scale urban area in Greece [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 493-501.
- [18] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **192**: 55-71.
- [19] Pay M T, Gangoiti G, Guevara M, *et al.* Ozone source apportionment during peak summer events over southwestern Europe [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(8): 5467-5694.
- [20] Shi C N, Fernando H J S, Hyde P. CMAQ predictions of tropospheric ozone in the U. S. southwest: influence of lateral boundary and synoptic conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **416**: 374-384.
- [21] Jeon W B, Lee S H, Lee H, *et al.* A study on high ozone formation mechanism associated with change of NO_x/VOCs ratio at a rural area in the Korean Peninsula [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 10-21.
- [22] 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.
- [23] 沈劲, 刘瑞菲, 晏平仲, 等. 2018 年国庆前后广东省臭氧污染过程分析 [J]. *安全与环境工程*, 2020, **27**(1): 75-80.
- Shen J, Liu Y F, Yan P Z, *et al.* Analysis of ozone pollution process in Guangdong province around the national day in 2018 [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, **27**(1): 75-80.
- [24] 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, Lu 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.
- [25] Wang X, Zhang Y, Hu Y, *et al.* Process analysis and sensitivity study of regional ozone formation over the Pearl River Delta, China, during the PRIDE-PRD2004 campaign using the Community Multiscale Air Quality modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4423-4437.
- [26] Shu L, Xie M, Wang T J, *et al.* Integrated studies of a regional ozone pollution synthetically affected by subtropical high and typhoon system in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(24): 15801-15819.
- [27] 李莉. 典型城市群大气复合污染特征的数值模拟研究 [D]. 上海: 上海大学, 2012.
- Li L. The numerical simulation of comprehensive air pollution

- characteristics in a typical city-cluster[D]. Shanghai: Shanghai University, 2012.
- [28] 赵文龙. 广州地区海陆风条件下臭氧污染的数值模拟研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- Zhao W L. Numerical simulation of ozone pollution in Guangzhou Area under sea-land breeze condition[D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [29] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [30] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [31] Li M, Zhang Q, Streets D G, *et al.* Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5617-5638.
- [32] Li M, Zhang Q, Zheng B, *et al.* Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(13): 8897-8913.
- [33] 汪鹏. 应用双向耦合的 WRF-CMAQ 模型研究排放控制策略对长三角地区 PM_{2.5} 及 O₃ 浓度的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Wang P. Impacts of emission control strategies on PM_{2.5} and O₃ concentrations over the Yangtze River Delta investigated by the two-way coupled WRF-CMAQ model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [34] 董旭光, 孟祥新, 伯忠凯, 等. 山东高分辨率风能资源分布特征的数值模拟研究[J]. *海洋气象学报*, 2019, **39**(2): 117-125.
- Dong X G, Meng X X, Bo Z K, *et al.* Numerical simulation of distribution characteristics of high resolution wind energy resources in Shandong[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2019, **39**(2): 117-125.
- [35] 张懿, 陈军辉, 唐斌雁, 等. 基于两种再分析资料的一次四川盆地大气污染过程气象要素数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(9): 3093-3102.
- Zhang Y, Chen J H, Tang B Y, *et al.* Numerical simulation of meteorological elements of a pollution episode in Sichuan Basin based on two reanalysis datasets[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(9): 3093-3102.
- [36] Sharma S, Sharma P, Khare M. Photo-chemical transport modelling of tropospheric ozone: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **159**: 34-54.
- [37] Han X, Zhu L Y, Wang S L, *et al.* Modeling study of impacts on surface ozone of regional transport and emissions reductions over North China Plain in summer 2015[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(16): 12207-12221.
- [38] Georgiou G K, Christoudias T, Proestos Y, *et al.* Air quality modelling in the summer over the eastern Mediterranean using WRF-Chem: chemistry and aerosol mechanism intercomparison[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(3): 1555-1571.
- [39] Liu H, Liu S, Xue B R, *et al.* Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 223-230.
- [40] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- Cao T W, Wu K, Kang P, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- [41] 陈漾, 张金谱, 黄祖照. 广州市近地面臭氧时空变化及其与气象因子的关系[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 99-109.
- Chen Y, Zhang J P, Huang Z Z. Spatial-temporal variation of surface ozone in Guangzhou and its relations with meteorological factors[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 99-109.
- [42] Kavassalis S C, Murphy J G. Understanding ozone-meteorology correlations: a role for dry deposition[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(6): 2922-2931.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)