

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O_3 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O_3 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 $PM_{2.5}$ 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 $PM_{2.5}$ 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精催化 Fe_3O_4 催化剂的制备及其活化 H_2O_2 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
$Co(II)$ 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 张力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648)	
《环境科学》征稿简则(3659)	
信息(3714, 4150, 4178)	

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析

王伊凡, 全纪龙*, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天

(兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

摘要: 为了更清楚地了解榆林市夏季臭氧污染来源, 提出科学的治理建议, 利用 WRF-CMAQ 模型对 2019 年 7 月榆林市和周边地区(包含太原市、西安市、银川市和呼和浩特市等省会城市)的 O₃ 浓度进行模拟; 利用 ISAM 模块, 对榆林市一次重污染过程的 O₃ 和其前体物 NO_x、VOCs 来源进行量化。结果表明, 重污染日榆林市的 O₃ 主要来自模拟区域外的远距离传输(55.5%), 其次是模拟区域内前体物的光化学反应生成(20.6%, 榆林市、山西省、内蒙古自治区和陕西省依次为 10.0%、5.0%、2.3% 和 2.1%, 甘肃省、宁夏回族自治区和河南省合计为 1.2%) 和初始条件(0.3%), 剩余来源(23.6%) 未能被成功标记; 榆林市处于 VOCs 控制区, 其 VOCs 由烷烃(76.5%)、酮类(9.2%) 和其它种类的 VOCs(14.3%) 构成, VOCs 来源有模拟区域内的污染源排放(45.6%, 榆林市、山西省、内蒙古自治区和陕西省依次为 22.0%、11.4%、6.3% 和 5.1%, 甘肃省、宁夏回族自治区和河南省合计为 0.8%) 和模拟区域外的远距离传输(27.9%), 剩余 26.5% 未被成功标记。研究表明, 治理榆林市 O₃ 污染, 不仅要对本地区 VOCs 排放加以控制, 也应做好外围周边地区 VOCs 排放的统筹规划。

关键词: 臭氧(O₃); 挥发性有机化合物(VOCs); 来源解析; CMAQ-ISAM 模型; 榆林市

中图分类号: X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)07-3676-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202207003

Analysis of O₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model

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

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

Abstract: In order to have a clearer understanding of the sources of ozone pollution in Yulin City in summer and put forward scientific governance suggestions, the WRF-CMAQ model was used to simulate the O₃ concentration in Yulin City and surrounding areas (including Taiyuan City, Xi'an City, Yinchuan City, Hohhot City, and other provincial capital cities) in July 2019. Using the ISAM module, the sources of O₃ and its precursors NO_x and VOCs in a heavy pollution process in Yulin City were quantified. The results showed that on heavy pollution days, the O₃ in Yulin City mainly came from the long-distance transmission outside the simulation area (55.5%), followed by the photochemical reaction of precursors in the simulation area (20.6%, 10.0%, 5.0%, 2.3%, and 2.1%, respectively, in Yulin City, Shanxi Province, Inner Mongolia Autonomous Region, and Shaanxi Province, 1.2% in Gansu Province, Ningxia Hui Autonomous Region, and Henan Province in total), and initial conditions (0.3%); the remaining sources (23.6%) could not be successfully labeled. Yulin City is in the VOCs control area, and its VOCs were composed of paraffin (76.5%), ketones (9.2%), and other types of VOCs (14.3%). The VOCs came from the emission of pollution sources in the simulation area (45.6%, 22.0%, 11.4%, 6.3%, and 5.1%, respectively, in Yulin City, Shanxi Province, Inner Mongolia Autonomous Region, and Shaanxi Province, 0.8% in Gansu Province, Ningxia Hui Autonomous Region, and Henan Province in total) and the long-distance transmission outside the simulation area (27.9%); the remaining 26.5% were not successfully marked. This research showed that to control the O₃ pollution in Yulin, not only should the local VOCs emissions be controlled, but the overall planning of VOCs emissions in the peripheral areas should also be done well.

Key words: ozone (O₃); volatile organic compounds (VOCs); source analysis; CMAQ-ISAM model; Yulin City

臭氧(O₃)是对流层中最重要光化学氧化剂, 通常是由氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)等前体物通过光化学反应形成。早在 19 世纪末, 人们就已经发现高浓度 O₃ 对人体的侵害, 并逐渐制定了和人体健康相关的标准^[1,2]。近年来, 我国的 O₃ 污染问题日益严重, 许多城市和地区监测到的 O₃ 浓度逐年攀升, 这其中, 尤以京津冀、长三角和珠三角等地区最显著^[3~5]。并且, 大气的易流通性, 使得大气污染具有可传输特征, 许多地区的 O₃ 均受到不同程度的跨区域传输影响^[6~8]。

榆林市位于陕西省最北部, 是我国重要的能源化工基地。然而重煤炭和重化工的产业能源结构虽然带来高速的经济增长, 却也使得环境污染问题随

之而来^[9,10]。因为其特殊的生产方式, 众多学者在探讨其污染来源时通常聚焦于本地的工业排放。然而大气污染具有可传输性, 并且榆林周围的城市工业园区众多, O₃ 污染明显^[11~14], 目前还未有学者对榆林市的 O₃ 进行源解析工作。

常用来做污染物来源解析的模型有受体模型^[15~17]和扩散模型^[18~20]。其中, 扩散模型可以用来模拟污染物的传输过程, 解析不同区域污染物的源强贡献^[21]。又因为 O₃ 浓度和前体物的非线性关系,

收稿日期: 2022-07-01; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(42075174)

作者简介: 王伊凡(1999~), 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: wangyf21@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 22399@lzu.edu.cn

扩散模型中的敏感性分析方法不完全适用于 O₃^[22]. 在近些年的研究中,常使用空气质量模型中带有标记示踪功能的模块来进行 O₃ 区域源解析,例如综合空气质量模式 (comprehensive air quality model with extensions, CAMx) 的 O₃ 源解析技术 (ozone source apportionment, OSAT)^[23,24] 和社区多尺度空气质量模型 (community multiscale air quality modeling system, CMAQ) 的集成源分配方法 (integrated source apportionment method, ISAM)^[25,26] 等. 近年来,空气质量模型已广泛应用于 O₃ 污染研究, Li 等^[27] 利用 MM5-CMAQ 模拟分析了上海市城乡地区的 O₃ 敏感性,结果表明, O₃ 在城市地区对 VOCs 更为敏感,而在农村地区对 NO_x 更为敏感. 张树宪等^[28] 利用 CMAQ 对北京市的 O₃ 和其前体物进行了来源解析,结果表明,北京市城区的 NO_x 和 VOCs 均主要来源于北京市本地的排放,而 O₃ 主要来源于其模拟区域外地区和全球背景的背景传输. Collet 等^[29] 利用 CMAQ 对美国 2030 年 7 月的 O₃ 进行了来源分析预测,结果表明,边界条件将是美国西部地区最主要的 O₃ 来源,道路移动源将在巴尔的摩

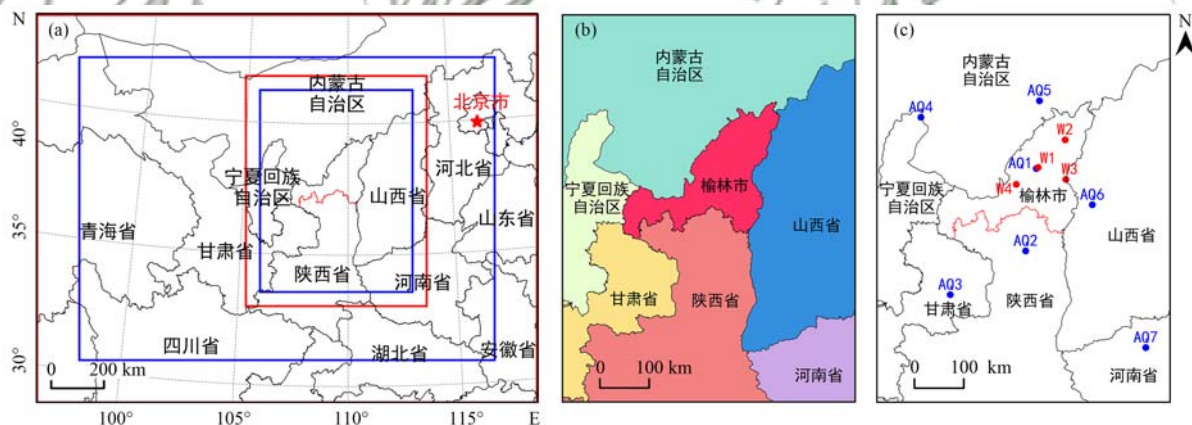
地区的贡献率高约 30%.

基于此,本文使用 CMAQ-ISAM 空气质量模型源解析模块,对榆林市的 O₃ 和其前体物来源进行解析,探究榆林市本地和周边各省的传输贡献率,以期为榆林市的 O₃ 污染治理和陕北地区联防联控提供参考.

1 材料与方法

1.1 模型及方案设置

使用天气预报模式 (weather research and forecasting model, WRF) 和 CMAQ 来进行榆林市和周边地区的 O₃ 模拟,并用 ISAM 模块对 O₃ 进行标记追踪. 投影为兰勃托投影, CMAQ 网格设置为两层嵌套,外层网格数为 60 × 44,分辨率为 27 km,覆盖大部分中国北方区域,内层网格数为 66 × 87,分辨率为 9 km,覆盖榆林市及周围省会城市. WRF 和 CMAQ 模拟区域如图 1(a) 所示. CMAQ 外层为内层提供边界条件,内层为模拟区域,用来进行模式模拟及 O₃ 源解析. 模型高度为 40 层,本文主要选用近地面层进行研究. 因榆林市 O₃ 浓度最高发生在 7 月^[30],所以选择 2019 年 7 月进行模拟.



(a) 红色矩形为两层 WRF 模拟区域,蓝色矩形为两层 CMAQ 模拟区域; (b) 为 ISAM 追踪区域,共 7 部分; (c) AQ1 ~ AQ7 分别为榆林市的环保监测大楼、延安市的延安医附院、庆阳市的市环保局、石嘴山市的惠农南大街、鄂尔多斯市的华泰汽车城、吕梁市的环保局和洛阳市的市委党校空气质量监测站点, W1 ~ W4 分别为榆林、神木、佳县和横山气象站

图 1 模型区域设置及监测数据点位示意

Fig. 1 Model area settings and monitoring data points

WRF 的物理过程参数化方案选用: Lin 等的微物理过程方案^[31]、Kain-Fritsch 积云对流方案^[32]、RRTM 长波辐射方案^[33]、Dudhia 短波辐射方案^[34]、YSU 边界层方案^[35]、Monin-Obukhov 近地面层方案^[36]和 5-layer thermal diffusion 陆面过程方案. CMAQ 选用 CB06 气相化学方案和 AERO7 气溶胶方案^[37]. 利用 ISAM 模块对 O₃、所有硝酸盐和所有 VOCs 组分进行标记. ISAM 追踪区域如图 1(b) 所示,其中陕西省表示模拟范围内,除榆林市以外的陕西省部分,其余省份均为模拟范围内相对应的部分.

利用综合反应速率模块 (integrated reaction rate module, IRR) 输出 H₂O₂ 和 HNO₃ 生成速率 ($P\text{-H}_2\text{O}_2$ 和 $P\text{-HNO}_3$), 并依据 CMAQ 模型中的 O₃ 对 NO_x 和 VOCs 敏感性判断方法 (当 $P\text{-H}_2\text{O}_2/P\text{-HNO}_3 < 0.35$ 时, 为 VOCs 控制区; 反之, 则为 NO_x 控制区)^[38] 判断 O₃ 的敏感性.

WRF 的输入数据使用美国国家环境预报中心 (national energy and climate plans, NECP) 提供的再分析数据集 (final reanalysis data, FNL). 人为源排放清单使用清华大学制作的中国多尺度排放清单模型

(multi-resolution emission inventory for China, MEIC) 清单^[39~41], 并利用人口、GDP、土地利用类型和路网数据对清单进行精细化处理^[42,43], 天然源使用天然气体和气溶胶排放模型(model of emissions of gases and aerosols from nature, MEGAN)估算得到. 以模拟区域内 MEIC 的各类 VOCs 的排放总量作为物种分配依据, 将输入模式的 VOCs 总量分配到各组分, 从而计算出各类 VOCs 的排放量.

1.2 模型验证方法

使用榆林市及下辖区县 4 个气象站点的逐时观测数据验证 WRF 的模拟结果; 使用 7 个国控空气质量监测站点的逐时数据验证 CMAQ 的模拟结果. 各数据站点位置如图 1(c) 所示.

利用观测数据和模拟数据的平均值、相关系数 R 、平均相对偏差 MFB 和平均相对误差 MFE 对模式模拟结果进行评估. WRF 主要验证气压、温度、相对湿度和风速这 4 个要素, CMAQ 主要验证 O_3 的浓度. 具体公式如下:

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

$$MFB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_i - O_i}{O_i + \bar{P}/2}$$

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{O_i + \bar{P}/2}$$

式中, P_i 为模拟数值, O_i 为监测数值, N 为样本数, $\bar{P}$ 为模拟平均值, $\bar{O}$ 为监测平均值.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

WRF 模拟验证结果如表 1 所示. 结果表明, 气压和温度的模拟结果较为准确, MFB 不超过 1%, 相关系数分别达到了 0.9 和 0.87, 均通过 99.9% 的显著性水平检验. 温度的模拟结果略微偏高, MFB 为 2.26%. 风速的模拟结果偏高, MFB 为 19.02%.

CMAQ 模拟验证结果如表 2 所示. 结果表明, 7 个站点的模拟均值偏低, 其中榆林、鄂尔多斯、石嘴山和洛阳的模拟均值要偏低 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 模拟和监测时间序列的相关系数在 0.44 ~ 0.72 之间, 均通过 99.9% 的显著性水平检验. MFB 在 11.77% ~ 53.38% 之间. O_3 的模拟和观测的逐时变化如图 2 所示, 对于 7 个监测点高浓度 O_3 的模拟情况整体偏低, 但模拟结果和监测数据整体呈现出一致的变化规律, 对于观测浓度很高的时刻, 模拟结果也都有比较高的反馈.

依照 Boylan 等^[44] 对各验证参数的讨论, 并结合上述分析, 认为 WRF 对于气象场的模拟结果良

表 1 WRF 模拟结果验证

Table 1 Verification of WRF simulation results

气象要素	模拟值	观测值	$R^{1)}$	MFB/%	MFE/%
气压/hPa	881.77	887.45	0.90 *	-0.43	0.43
温度/℃	56.46	56.10	0.75 *	2.26	14.01
相对湿度/%	24.22	23.99	0.87 *	0.78	4.52
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.95	2.28	0.41 *	19.02	27.45

1) R 无量纲, * 表示通过 99.9% 的显著性水平检验

表 2 O_3 模拟结果验证

Table 2 Verification of O_3 simulation results

监测站点	模拟值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	观测值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$R^{1)}$	MFB/%	MFE/%
榆林	66.43	107.42	0.70 *	-20.79	38.29
延安	71.42	73.99	0.60 *	28.93	55.76
吕梁	80.70	87.67	0.59 *	25.82	53.65
鄂尔多斯	56.50	102.15	0.72 *	-38.83	42.94
庆阳	81.09	97.78	0.44 *	-11.77	18.15
石嘴山	59.82	99.93	0.72 *	-29.45	33.87
洛阳	49.79	106.33	0.65 *	-53.38	55.68

1) R 无单位, * 表示通过 99.9% 的显著性水平检验

好, CMAQ 对于 O_3 浓度的模拟在可接受范围之内. 本文对于榆林市和周边的 O_3 浓度的模拟结果, 可以反映模拟区域内 O_3 的变化及传输情况.

2.2 O_3 和其前体物空间分布

为分析榆林市的 O_3 污染来源, 首先要了解本地

及周边地区污染现状. 模拟区域 O_3 平均浓度最高 8 h 时间段为 11:00 ~ 19:00, 该时间段内榆林市观测值的 O_3 浓度平均值 $[\rho(O_3-8h)]$ 时间序列如图 3 所示. 在 2019 年 7 月, 该市有 13 d 超过 O_3 控制二级标准 ($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 7 月 11 ~ 14 日, 榆林市的

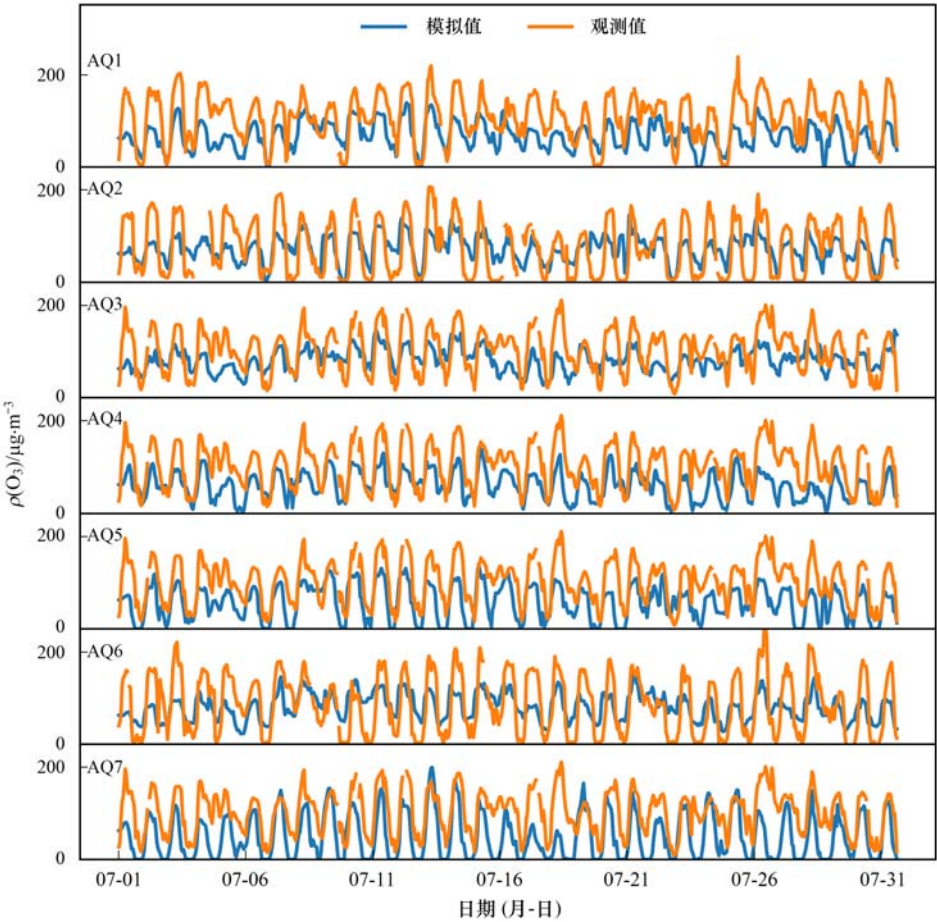
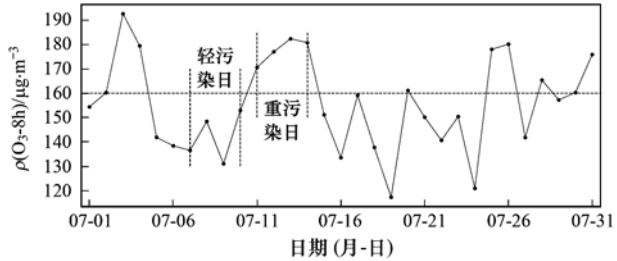


图2 研究区 O₃ 模拟值和观测值
Fig. 2 O₃ simulated and observed values in the study area

$\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 连续4 d 超过 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,因此将这一阶段定义为重污染日,进行重点来源解析.为分析重污染日的 O₃ 来源特征,选择7月中 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 均小于 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的7~10日为轻污染日进行对比.



黑色虚线为 O₃ 控制二级标准 ($160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
8 h 为 11:00 ~ 19:00, 下同

图3 榆林市 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 时间序列

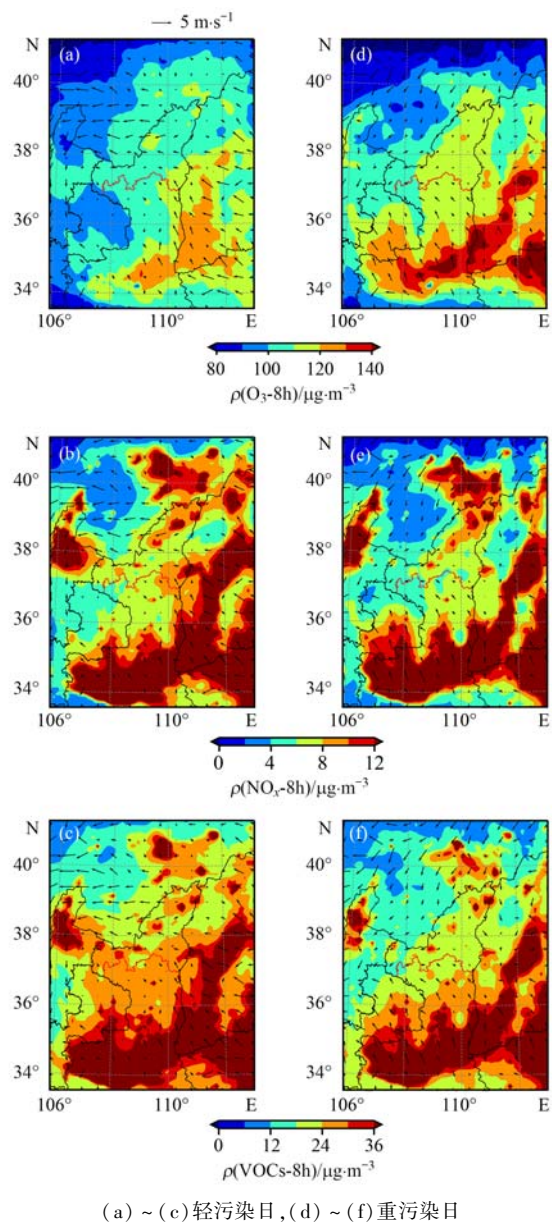
Fig. 3 The $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ time series in Yulin City

不同阶段模拟范围内的 O₃ 和其前体物 NO_x、VOCs 的空间分布,以及对应时刻的风场如图 4 所示. O₃ 呈现出西北高,东南低的特征.重污染日时,榆林市的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 高于除其南侧以外的周边地区. 11:00 ~ 19:00 的 NO_x 浓度 [$\rho(\text{NO}_x\text{-}8\text{h})$] 和 VOCs 浓度 [$\rho(\text{VOCs}\text{-}8\text{h})$] 高值区分布相似,主要在山西省

大部分地区、陕西省中部、宁夏回族自治区北部、包头市附近和榆林市北部.重污染日的地面风场在榆林市北侧以东北风为主,南侧以东南风为主,在榆林市产生辐合,导致内蒙古、陕西省和山西省的 NO_x 和 VOCs 易被输送到榆林市,并且榆林市的风速小,污染物更易堆积,不利于污染物扩散.相比于重污染日,轻污染日的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 在所有地区均偏低, $\rho(\text{NO}_x\text{-}8\text{h})$ 和 $\rho(\text{VOCs}\text{-}8\text{h})$ 在部分地区略有偏高,但高值区均未有明显变化.榆林市和其北侧地区的地面风场为东风,风场辐合作用偏弱.

2.3 O₃ 及前体物来源解析

榆林市的 O₃ 来源解析和对应时间的 O₃ 监测值时间序列如图 5(a) 所示.在 7 月 7 ~ 10 日的轻污染日,侧边界条件 (BCON) 对榆林市 O₃ 的贡献率最大,模拟区域外污染物的远距离输送对当地有显著影响.其次是本地的污染物排放,贡献率峰值约 10.0%.受东风和南风的影响,山西省、河南省和陕西省通过近距离输送和污染物扩散,合计贡献了约 15%.在 7 月 11 ~ 14 日的重污染日,BCON 的贡献率减小.由于风速减小,污染物不易扩散,榆林市本地的贡献率略有提升.另外,持续的东风使得山西省



(a) ~ (c) 轻污染日, (d) ~ (f) 重污染日
图 4 O₃、NO_x 和 VOCs 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of O₃, NO_x, and VOCs

的近距离输送比较稳定,陕西省则因为风场转为偏东风,对榆林市的贡献率减小。

有研究表明,NO_x 和 VOCs 的光化学反应是高浓度 O₃ 的主要成因^[45]。榆林市的 NO_x 和 VOCs 来源解析,以及对应时间的模拟值时间序列如图 5(b) 和图 5(c) 所示。NO_x 和 VOCs 的浓度和各部分贡献

率的日变化几乎一致,重污染日的 NO_x 浓度和 VOCs 浓度明显高于轻污染日。榆林市本地排放对前体物的贡献率最大,峰值约为 45.0% 和 70.0%,其次,BCON,内蒙古、山西省和陕西省由于风场的辐合,也有部分贡献。在前体物浓度峰值较低的 7 月 8、9 和 11 日,榆林市本地的贡献率明显减小,其余各部分的贡献变化不明显。

不同阶段下,榆林市 O₃ 各标记部分贡献率如图 6 所示。轻污染日时,各部分贡献率由大到小依次为: BCON (62.0%),榆林市 (8.4%),山西省 (6.1%),内蒙古自治区 (6.0%),陕西省 (2.2%), ICON (1.2%),宁夏回族自治区 (1.0%),河南省 (0.5%),甘肃省 (0.2%),剩余 OTHR (12.4%) 未被成功标记。重污染日时,各部分贡献率由大到小依次为: BCON (55.5%),榆林市 (10.0%),山西省 (5.0%),内蒙古自治区 (2.3%),陕西省 (2.1%),甘肃省 (0.6%),ICON (0.3%),宁夏回族自治区 (0.3%),河南省 (0.3%),剩余 OTHR (23.6%) 未被成功标记。

为识别榆林市的 O₃ 前体物控制类型,对各网格点的 $P\text{-H}_2\text{O}_2/P\text{-HNO}_3$ 值进行计算。除边缘极少地区外,模拟区域的 $P\text{-H}_2\text{O}_2/P\text{-HNO}_3$ 值均小于 0.35,表明榆林市和外围地区均处在 VOCs 控制区。不同阶段下,榆林市 VOCs 各标记部分贡献率如图 7 所示。轻污染日时,各部分贡献率由大到小依次为: BCON (34.1%),榆林市 (17.5%),山西省 (15.6%),陕西省 (6.1%),内蒙古自治区 (3.1%),河南省 (1.8%),宁夏回族自治区 (1.7%),甘肃省 (0.9%),剩余 OTHR (19.2%) 未被成功标记,无 ICON 来源。重污染日时,各部分贡献率由大到小依次为: BCON (27.9%),榆林市 (22.0%),山西省 (11.4%),内蒙古自治区 (6.3%),陕西省 (5.1%),甘肃省 (0.5%),宁夏回族自治区 (0.2%),河南省 (0.1%),剩余 OTHR (26.5%) 未被成功标记,无 ICON 来源。模拟得到的本次污染过程中,榆林市的主要 VOCs 组分浓度如表 3 所示。榆林市大气中的 VOCs 以烷烃 (PAR) 和酮类 (KET) 为主。

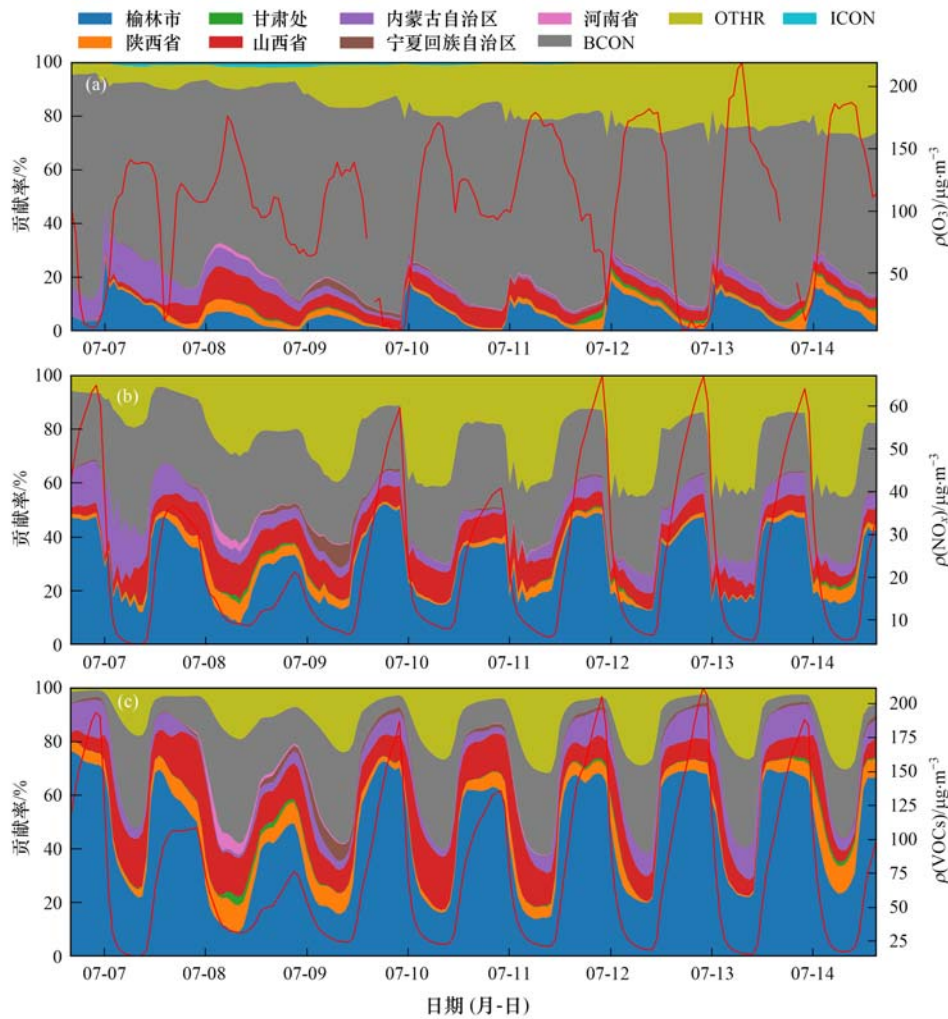
表 3 榆林市主要 VOCs 组分

Table 3 Main VOCs components in Yulin City

项目	PAR(烷烃)	KET(酮类)	OLE(末端烯烃)	TOL(芳烃)	FORM(甲醛)
浓度/μg·m ⁻³	58.3	7.0	1.8	1.6	1.4
占比/%	76.5	9.2	2.3	2.1	1.8

综上,榆林市处在 VOCs 控制区,在重污染日时,风场在榆林市辐合,当地风速较小,污染物积累且不易扩散。榆林市的 VOCs 来源解析中,本地排放

的贡献率最高,并且在重污染日远高于轻污染日,山西省、内蒙古自治区和陕西省等地区因为风场的输送,也对榆林市的污染物积累有一定贡献。所以,以



(a) 红线表示 AQI 站点观测值, 其值不连续处为缺失值; (b) 和 (c) 红线表示模拟值

图 5 榆林市 O₃、NO_x 和 VOCs 来源解析时间序列

Fig. 5 Source analysis time series of O₃, NO_x, and VOCs in Yulin City

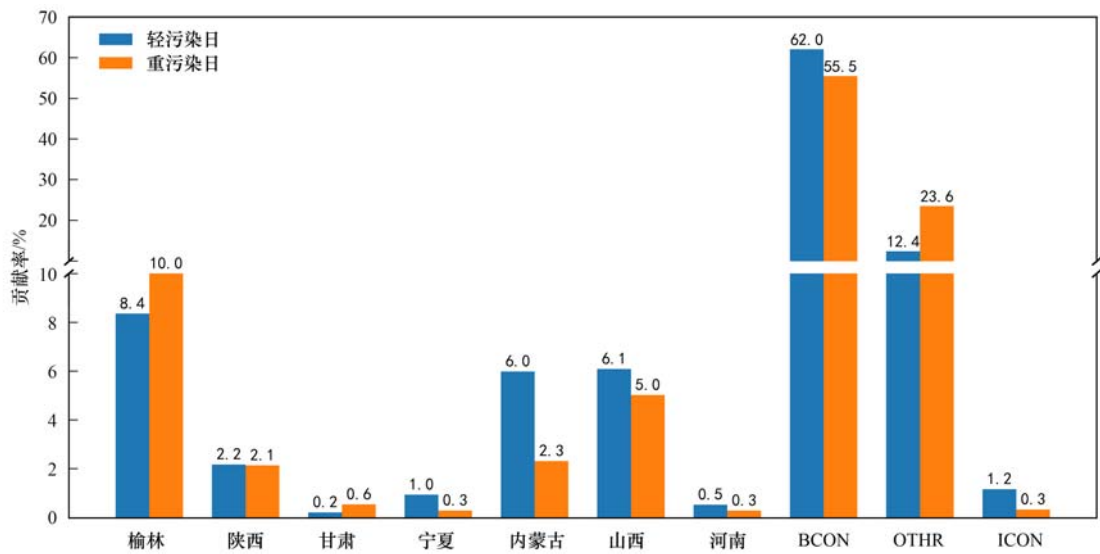


图 6 不同阶段榆林市 O₃ 来源解析

Fig. 6 Analysis of O₃ sources in Yulin City at different stages

控制 PAR 和 KET 的浓度为目的,对本地的 VOCs 排放做出削减规划,并辅以北、山西和内蒙古南部

地区 VOCs 排放的联防联控,将有助于榆林市的 O₃ 污染治理。

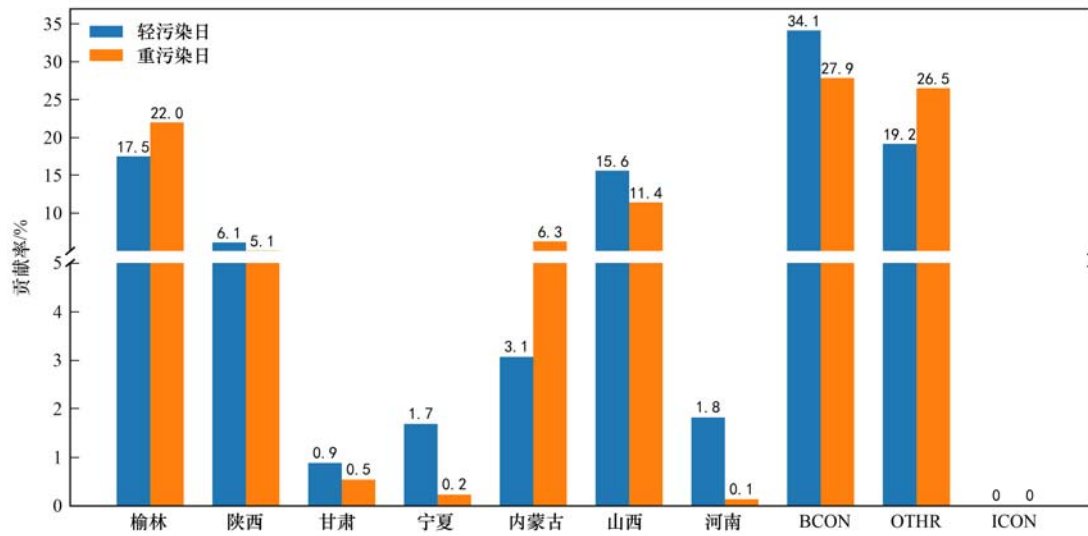


图7 不同阶段榆林市 VOCs 来源解析

Fig. 7 Analysis of VOCs sources in Yulin City at different stages

3 结论

(1) 榆林市在 2019 年 7 月 11 ~ 14 日 O_3 污染严重, 主要是因为风速减弱, 大气污染物不易扩散. 此外, 山西省北部、内蒙古自治区的东北风和山西省南部、陕西省中部的东南风在榆林市辐合, 污染物通过大气输送至榆林市并堆积, 也是本次 O_3 重污染过程的重要原因.

(2) 在本次污染过程中, O_3 的远距离传输特征比较突出. 重污染日时, BCON 对榆林市 O_3 的贡献率为 55.5%, 略低于轻污染日; 本地的贡献在重污染日更加明显, 贡献率为 10.0%; 此外, 由于大气输送和扩散作用, 山西省、内蒙古自治区和陕西省的贡献率分别为 5.0%、2.3% 和 2.1%, 甘肃省、宁夏回族自治区和河南省的贡献率合计为 1.2%; 另有 0.3% 由初始条件提供, 23.6% 未被成功标记.

(3) 榆林市处在 VOCs 控制区, 其 VOCs 有 76.5% 为 PAR, 9.2% 为 KET. VOCs 的远距离传输作用依旧显著. 在重污染日时, BCON 对榆林市 VOCs 的贡献率为 27.9%; 其次是本地的污染物排放, 贡献率为 22.0%; 此外, 受风场辐合影响, 山西省、内蒙古自治区和陕西省贡献了 11.4%、6.3% 和 5.1%, 由于污染物扩散, 甘肃省、宁夏回族自治区和河南省合计贡献了 0.8%; 另有 26.5% 未被成功标记.

参考文献:

- [1] White M C, Etzel R A, Wilcox W D, *et al.* Exacerbations of childhood asthma and ozone pollution in Atlanta [J]. *Environmental Research*, 1994, **65**(1): 56-68.
- [2] Monks P S, Granier C, Fuzzi S, *et al.* Atmospheric composition change—Global and regional air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(33): 5268-5350.
- [3] 林文鹏, 郭欣瞳. 中国城市群臭氧时空分布特征分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2481-2494.
Lin W P, Guo X T. Spatial and temporal distribution characteristics of ozone in Urban agglomerations in China [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2481-2494.
- [4] 陈浪, 赵川, 关茗洋, 等. 我国大气臭氧污染现状及人群健康影响[J]. *环境与职业医学*, 2017, **34**(11): 1025-1030.
Chen L, Zhao C, Guan M Y, *et al.* Ozone pollution in China and its adverse health effects [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2017, **34**(11): 1025-1030.
- [5] 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.
- [6] Lu Y L, Wang Y, Wang L K, *et al.* Provincial analysis and zoning of atmospheric pollution in China from the atmospheric transmission and the trade transfer perspective [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **249**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109377.
- [7] Sofiev M. A model for the evaluation of long-term airborne pollution transport at regional and continental scales [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(15): 2481-2493.
- [8] 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.
- [9] 赵德芳. 基于相关性计量模型的榆林市工业区空气污染空间特征研究[J]. *环境科学与管理*, 2021, **46**(8): 119-122, 150.
Zhao D F. Research on spatial characteristics of air pollution in Yulin industrial district based on correlation measurement model [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, **46**(8): 119-122, 150.
- [10] 郑承煜. 城市煤化工 VOCs 治理管控探索研究[J]. *中国煤炭*, 2019, **45**(9): 68-72.

- Zheng C Y. Exploring research on coal chemical industrial VOCs treatment and control of city[J]. *China Coal*, 2019, **45**(9): 68-72.
- [11] 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.
- [12] 武晓红, 韩爱梅. 2016 年太原市臭氧的时空分布特征[J]. *环境与发展*, 2019, **31**(1): 175-176, 183.
- Wu X H, Han A M. Spatial-temporal characteristics of ozone in Taiyuan, 2016 [J]. *Environment and Development*, 2019, **31**(1): 175-176, 183.
- [13] 贝耐芳, 冯添, 吴佳睿, 等. 西安地区夏季臭氧的模拟研究[J]. *地球环境学报*, 2017, **8**(6): 552-567.
- Bei N F, Feng T, Wu J R, *et al.* Simulations of summertime ozone in Xi'an and surrounding areas [J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, **8**(6): 552-567.
- [14] 马陈焜, 王章玮, 刘建军, 等. 银川都市圈大气挥发性有机物的污染特征及臭氧生成潜势初步分析[J]. *环境化学*, 2022, **41**(3): 801-812.
- Ma C H, Wang Z W, Liu J J, *et al.* Preliminary analysis of pollution characteristics of ambient volatile organic compounds and ozone formation potential in Yinchuan metropolitan area[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(3): 801-812.
- [15] Jaekels J M, Bae M S, Schauer J J. Positive matrix factorization (PMF) analysis of molecular marker measurements to quantify the sources of organic aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(16): 5763-5769.
- [16] Miller S L, Anderson M J, Daly E P, *et al.* Source apportionment of exposures to volatile organic compounds. I. Evaluation of receptor models using simulated exposure data[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(22): 3629-3641.
- [17] Anderson M J, Daly E P, Miller S L, *et al.* Source apportionment of exposures to volatile organic compounds; II. Application of receptor models to TEAM study data [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(22): 3643-3658.
- [18] Wang F, Chen D S, Cheng S Y, *et al.* Identification of regional atmospheric PM₁₀ transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, **25**(8): 927-934.
- [19] 王杨君, 李莉, 冯加良, 等. 基于 OSAT 方法对上海 2010 年夏季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.
- [20] 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.
- [21] 曹广翰, 曹天慧, 朱绍东, 等. 基于 CMAQ-ISAM 模型的长三角典型城市 PM_{2.5} 来源解析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **57**(6): 803-812.
- Cao G H, Cao T H, Zhu S D, *et al.* Sourcing PM_{2.5} in cities in the Yangtze River Delta by CMAQ-ISAM[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, **57**(6): 803-812.
- [22] Kitagawa Y K L, Pedruzzi R, Galvão E S, *et al.* Source apportionment modelling of PM_{2.5} using CMAQ-ISAM over a tropical coastal-urban area[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(12), doi: 10.1016/j.apr.2021.101250.
- [23] Dunker A M, Yarwood G, Ortman J P, *et al.* Comparison of source apportionment and source sensitivity of ozone in a three-dimensional air quality model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(13): 2953-2964.
- [24] Li Y, Lau A K H, Fung J C H, *et al.* Ozone source apportionment (OSAT) to differentiate local regional and super-regional source contributions in the Pearl River Delta region, China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D15), doi: 10.1029/2011JD017340.
- [25] Valverde V, Pay M T, Baldasano J M. Ozone attributed to Madrid and Barcelona on-road transport emissions: characterization of plume dynamics over the Iberian Peninsula [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 670-682.
- [26] Kwok R H F, Baker K R, Napelenok S L, *et al.* Photochemical grid model implementation and application of VOC, NO_x, and O₃ source apportionment[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, **8**: 99-114.
- [27] Li L, Chen C H, Huang C, *et al.* Ozone sensitivity analysis with the MM5-CMAQ modeling system for Shanghai [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(7): 1150-1157.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 王鑫. 陕北典型区域臭氧污染时空变化特征及影响因子分析[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- Wang X. Spatiotemporal variation characteristics of surface ozone and its affecting factors in northern Shaanxi [D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [31] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1983, **22**(6): 1065-1092.
- [32] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2004, **43**(1): 170-181.
- [33] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D14): 16663-16682.
- [34] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the penn state-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, **129**(4): 569-585.
- [35] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, **134**(9): 2318-2341.
- [36] Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere[J]. *Contrib Geophys Inst Acad Sci USSR*, 1954, **24**: 163-187.
- [37] Appel K W, Bash J O, Fahey K M, *et al.* The community multiscale air quality (CMAQ) model versions 5.3 and 5.3.1: system updates and evaluation [J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, **14**(5): 2867-2897.
- [38] Sillman S. The use of NO_y, H₂O₂, and HNO₃ as indicators for

- ozone-NO_x-hydrocarbon sensitivity in urban locations [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, **100** (D7): 14175-14188.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 郭鹏. 基于CMAQ模式的兰州市重污染天气应急减排预案效果评估与优化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- Guo P. Evaluation and optimization research on the effectiveness of the emergency reduction plan for heavy pollution weather in Lanzhou City based on the CMAQ model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [43] 刘永乐. 煤炭深加工产业集群对乌海市臭氧污染的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- Liu Y L. The effects of industrial cluster of coal deep processing on ozone pollution in Wuhai based on numerical simulation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [44] 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.
- [45] Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6203-6218.



CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)