

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

基于卫星和地面监测的河西走廊 O_3 浓度时空分布及潜在源区分析

李锦超¹, 曹春^{1*}, 方锋², 唐千惠¹, 梁朕月¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070; 2. 兰州区域气候中心, 兰州 730030)

摘要: 基于 2005 ~ 2020 年 OMI 遥感卫星 O_3 柱浓度数据, 结合河西走廊地区 10 个国控点环境自动监测站大气污染物数据和全球资料同化系统 (GDAS) 气象资料, 利用克里金插值法、相关性分析和后向轨迹 (HYSPLIT) 模型, 探讨河西走廊近地面 O_3 时空分布特征、气象因素、传输路径和潜在来源。结果表明: ① 从时间变化来看, O_3 柱浓度在 2005 ~ 2010 年和 2014 ~ 2020 年呈上升趋势, 2010 ~ 2014 年呈下降趋势, 2010 年和 2014 年分别达到最大值和最小值, 分别为 332.31 DU 和 301.00 DU, 季节变化表现为春季和冬季明显大于夏季和秋季。② 在空间分布上, O_3 柱浓度大体呈现由西南向东北递增的纬向带状分布特征, 高值区主要分布在地势低平的城市区域, 中值区呈纬向带状与祁连山山麓走向基本一致。③ 气象条件分析发现, 温度、风速和日照时数与 O_3 呈现正相关, 相对湿度与 O_3 呈现负相关。④ 通过对武威市模拟受点气流输送轨迹发现, O_3 输送路径方向较为单一, 各季节的主导气流均以西部和西北部为主, 所占比例分别为 71.62%、66.85%、61.22% 和 77.78%; O_3 潜在贡献源区存在一定的季节差异: 春季、夏季和秋季的 O_3 潜在源高值区域均分布于白银市和兰州市等地, 为东南风源, 冬季高值区分布于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间, 为北风源。

关键词: O_3 ; 河西走廊; 时空分布; 后向轨迹; 潜在源区

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4785-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209059

Temporal and Spatial Distributions of O_3 Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring

LI Jin-chao¹, CAO Chun^{1*}, FANG Feng², TANG Qian-hui¹, LIANG Bin-yue¹

(1. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730030, China)

Abstract: Based on 2005–2020 O_3 column concentration data of OMI remote sensing satellite, combined with air pollutant data from 10 nationally controlled environmental automatic monitoring stations in the Hexi Corridor and global data assimilation system meteorological data, we used Kriging interpolation, correlation analysis, and backward trajectory (HYSPLIT) models to explore the temporal and spatial distribution characteristics, meteorological factors, transmission paths, and potential sources of O_3 in the Hexi Corridor. The results showed the following: ① in terms of temporal distribution, O_3 column concentration showed an upward trend in 2005–2010 and 2014–2020 and downward trend in 2010–2014; the maximum and minimum values were reached in 2010 and 2014 (332.31 DU and 301.00 DU), respectively, and seasonal changes showed that those in spring and winter were significantly higher than those in summer and autumn. ② In terms of spatial distribution, O_3 column concentration showed a latitudinal band distribution characteristic of increasing from southwest to northeast; the high-value areas were primarily distributed in urban areas with low terrain, and the median zone was latitudinally striped with the basic alignment of the Qilian foothills. ③ The analysis of meteorological conditions revealed that temperature, wind speed, and sunshine hours were positively correlated with O_3 , and relative humidity was negatively correlated with O_3 . ④ By simulating the airflow transportation trajectory of the receiving point in Wuwei City, it was found that the direction of the O_3 conveying path was relatively singular; the dominant airflow in each season was primarily in the west and northwest; and the proportions were 71.62%, 66.85%, 61.22%, and 77.78%, respectively. There were certain seasonal differences in the source areas of O_3 potential contribution; the high-value areas of O_3 potential sources in spring, summer, and autumn were distributed in Baiyin City and Lanzhou City, which were southeast wind sources, and the high-value areas in winter were distributed between the Badain Jaran Desert and the Tengger Desert, which was the north wind source.

Key words: O_3 ; Hexi Corridor; spatiotemporal distribution; backward trajectory; potential source area

大气臭氧 (O_3) 是当今大气科学和环境科学界重要的研究对象之一。近年来, 国内许多城市 O_3 污染加剧, O_3 已成为影响城市空气质量最主要的大气污染物之一^[1]。自 2013 年 9 月国务院颁布《大气污染防治行动计划》以来, 我国大气污染防治取得显著成就。虽然 $PM_{2.5}$ 持续下降, 但是 O_3 浓度却稳步上升, 特别是我国中低纬度地区, O_3 已经代替 $PM_{2.5}$ 成为最主要的大气污染物^[2,3]。 O_3 浓度过高对空气质量、人体健康和陆地生态系统均会造成一定的影响

和危害^[4,5]。

目前, 近地面 O_3 的检测主要是通过卫星遥感监测和地面常规监测。卫星遥感监测可以获得大尺度、长时间的动态数据和时空分布, 以弥补地面监测数

收稿日期: 2022-09-06; 修订日期: 2022-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41861034); 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室项目; 甘肃省自然科学基金项目 (20JR10RA454)

作者简介: 李锦超 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染, E-mail: jinchao11226@163.com

* 通信作者, E-mail: caochun@nwnu.edu.cn

据的不足^[6],将卫星遥感资料和地面监测结合,取长补短,对于小范围大气污染监测和防治具有重要的现实意义.现阶段,能够正常进行高空 O₃ 监测的卫星传感器有 4 个(TOME、GOME、GOME-2 和 OMI),分别于 1978、1995、1995 和 2004 年启用^[7,8],由于 OMI 传感器反馈 O₃ 数据监测精度较高,所以受到广大研究人员的青睐.随着对 O₃ 污染的深入研究,国内外学者通过对这些卫星数据的解译开展了城市尺度、大区域和全球尺度的 O₃ 研究. Park 等^[9]利用 O₃ 监测仪(OMI)SO₂ 产品、地面原位 SO₂ 数据和混合单粒子拉格朗日积分轨迹(HYSPLIT)模型在亚洲大陆到东北亚和西北太平洋区域尺度上计算源区到受体区 SO₂ 流量的方法,还计算了亚洲大陆与受体地区之间每 1 000 km 二氧化硫流量的平均下降速率,对流量估计中的不确定性也进行了评估和讨论.刘旻霞等^[10]利用 OMI 卫星反演数据,对 2005~2018 年新疆地区大气 O₃ 柱浓度数据进行分析,研究其时空分布格局及影响因素. Shen 等^[11]利用 2013~2017 年中国地面 O₃ 数据,连同 O₃ 探空仪和飞机的垂直剖面,以量化从 O₃ 监测仪(OMI)反演对流层 O₃ 的能力,并检测中国的边界层 O₃ 污染.

河西走廊位于甘肃省境内,含酒泉、武威、张掖、金昌和嘉峪关这 5 个地级市.作为陆地丝绸之路经济带的重要组成部分,其经济发展受人瞩目,近些年不合理的开发和利用,使得河西走廊地区生态环境问题异常突出,生态形势严峻.虽然已有许多学者对西北干旱区重点城市过去几年的空气污染

物影响因素、时空变化以及潜在来源解析做了大量研究,但将河西走廊作为整体,利用 O₃ 监测仪(OMI)卫星反演数据研究 O₃ 柱浓度的时空变化和潜在源解析很少.鉴于此,本文以河西走廊为研究区域,利用 OMI 卫星遥感数据集来分析 2005~2020 年河西地区 O₃ 柱浓度的时空分布特征,结合地面环境监测站点的 O₃ 数据和气象数据,分析 O₃ 与气象因子的关系,并运用 HYSPLIT 轨迹计算模式,结合聚类分析、潜在源贡献因子分析(PSCF)和浓度权重轨迹(CWT)分析方法探讨季节性输送路径和潜在源区影响,以期为河西走廊地区乃至整个西北干旱区的 O₃ 污染治理与防控措施及生态环境保护提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河西走廊(37°15'~41°30'N, 92°21'~104°45'E)位于甘肃省西北部,东临乌鞘岭,西与新疆边界接壤,南侧为祁连山脉,北侧为合黎山,为西北—东南走向的狭长平原^[12];南北距离为 40~100 km,东西距离约为 1 120 km^[13].如今一般指甘肃省 14 个地州市中的河西五市,即武威、金昌、张掖、酒泉和嘉峪关^[14](图 1).该地受大陆性气候和青藏高原气候影响,夏季干燥冬季寒冷,年平均气温约为 5~10℃,年降水量为 30~320 mm,年蒸发量为 1 500~3 200 mm,全年日照时数 2 800~3 300 h^[15].因该区处于南北两山夹缝之间,容易产生狭管效应,风力较大,对空气污染物的扩散有一定的帮助.

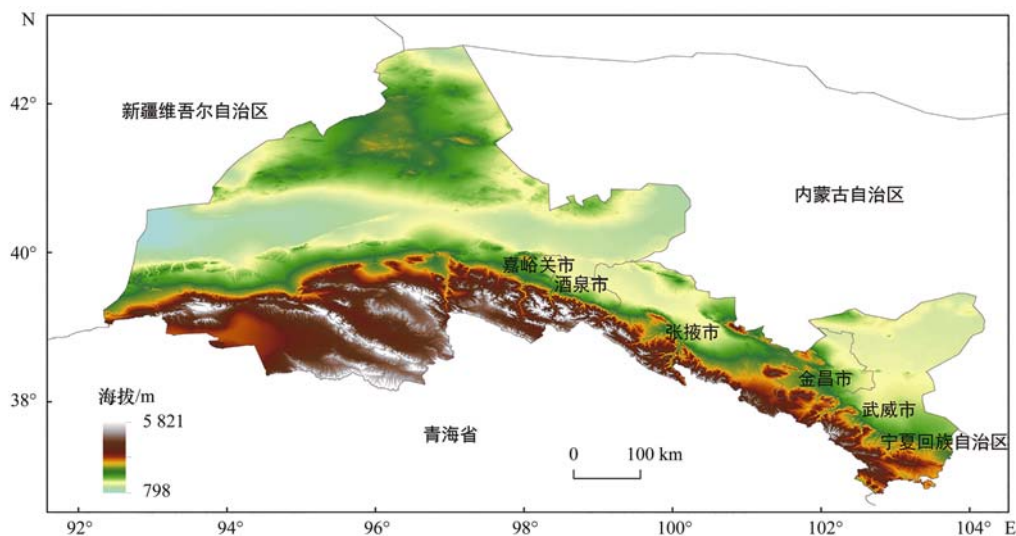


图 1 河西走廊区位示意

Fig. 1 Location of Hexi Corridor

1.2 数据来源

O₃ 层监测仪(ozone monitoring instrument, OMI)由荷兰和芬兰共同研制,于 2004 年 7 月 15 日发射

的 Aura 地球观测系统卫星上携带的 4 个传感器之一. OMI 传感器是通过观测地球大气和表面的后向散射辐射来获取数据,可通过的波长范围为 270~

500 nm, 平均波谱分辨率为 0.5 nm, 轨道扫描宽度为 2 600 km, 空间分辨率为 13 km × 24 km, 覆盖全球频率为一天一次; 数据包括 Level-0、Level-1、Level-2 和 Level-3 共 4 个处理等级, 可以监测 O₃ 柱浓度、HCHO、NO₂ 和 SO₂ 柱浓度廓线以及气溶胶、云和紫外辐射等多种数据. 本文所采用的 O₃ 柱浓度反演数据来自 NASA 官网中 GES DISC 的 Level-2 V003 产品, 为了进一步提高数据精度, 对云量大于 20% 及误差大于 15% 的数据进行剔除以减少数据反演误差, 且当格点数据缺测率小于 15% 时, 视为该格点数据有效; 同时, 在计算月均值时, 剔除有 7 d 以上缺测的当月数据^[16].

HYSPLIT 模型使用的数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 2020 年 3 月至 2021 年 2 月时间段的全球资料同化数据. 空气质量数据来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035>), 包括 2015 ~ 2020 年河西走廊地区 5 个城市(10 个监测站)的 O₃、PM_{2.5}、CO 和 NO₂ 等空气污染物逐日监测数据. 气象数据源于国家气象中心(<http://data.cma.cn/>), 包括 2020 年研究区内 5 个城市(13 个气象站点)的气温、风速、日照时长和相对湿度等数据.

1.3 研究方法

1.3.1 OMI 遥感数据处理

O₃ 柱浓度数据来自 2005 ~ 2020 年每日 OMI 数据, 用 HDF-EOS 条带格式进行存储, 将研究区的经纬度与 O₃ 柱浓度对应; 为保证区域边界的插值精度, 将经纬度分别扩大 2°, 然后利用 Matlab 编程语言工具运行提取, 并以 Excel 表进行存储. 对转化后的数据利用 ArcGIS 10.2 进行空间插值、掩膜处理和栅格计算, 从而得到研究区大气 O₃ 柱浓度时空分布.

1.3.2 稳定性分析

标准偏差(standard deviation, SD)是计算数据离散程度的统计指标之一, 主要用来评估污染物在时间序列上的稳定程度. 本文通过计算 2005 ~ 2020 年 O₃ 的标准偏差, 以评估时间序列上的稳定性, 计算公式见式(1):

$$SD = \sqrt{(n-1)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中, SD 为标准偏差, n 为总时长, X_i 为第 i 年的 O₃ 柱浓度, $\bar{X}$ 为 i 年的 O₃ 柱浓度平均值, SD 值越小表明数据在这一时间范围内, 数据离散程度越弱, 波动越小, 稳定性越好, 反之稳定性越差.

1.3.3 相关性分析

相关性计算方法是一种基于像元的分析方

法^[17], 用来分析 O₃ 浓度与各种影响因子的相关关系. 计算公式见式(2):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中, r_{xy} 为 O₃ 浓度与影响因子的相关性系数; x_i 为第 i 月 O₃ 浓度均值; y_i 为第 i 月影响因子; $\bar{x}$ 为 O₃ 浓度的多月均值; $\bar{y}$ 为影响因子的多月平均^[18]; n 为样本数量. r_{xy} 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 $r_{xy} > 0$ 时, 二者呈正相关关系; 当 $r_{xy} < 0$ 时, 二者呈负相关关系.

1.3.4 HYSPLIT 模型

HYSPLIT (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) 模式是一种欧拉和拉格朗日混合的计算模式, 广泛应用于分析污染物来源及确定传输路径等方面^[19], 是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象局联合研发的轨迹计算模式, 目前, 诸多学者利用 HYSPLIT 模型研究空气污染物的输送和扩散以及潜在源分析^[20,21]. 本文利用 HYSPLIT 模式和 GIS 技术结合的 Meteoinfo 软件中的 TrajStat 插件对河西走廊中心城市武威市进行气流轨迹分析和研究, 分析河西走廊地区近地面大气 O₃ 来源. 选取时间为 2020 年 3 月 1 日到 2021 年 2 月 28 日逐日 24 个时间段(00:00 ~ 23:00)到达到受点的 48 h 后向轨迹, 利用聚类分析方法以季节进行聚类; 为准确地反映边界层平均气场特征, 设定模拟气流高度为 500 m^[18].

1.3.5 污染物潜在贡献源分析法(PSCF)

潜在源贡献因子方法(PSCF)也被称为滞留时间分析法, 以条件概率函数为基本原理^[22,23], 利用气流轨迹来计算分析潜在源区的地理位置和空间分布. 基于后向轨迹模拟的结果, 通过创建一定分辨率的矩形网格(i, j)覆盖研究区域, 对污染物浓度设定阈值, 当后向轨迹上的点所对应的要素值大于阈值时, 则认为该轨迹点为污染轨迹^[24]. 将 HYSPLIT 模型中后向轨迹网格分辨率设置为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 当气团通过位于特定单元的源区时, 污染物通过空气团收集, 沿气流轨迹输送至受体位置^[25]. PSCF 的值是研究区内经过 ij 网格的污染轨迹数 M_{ij} 与经过该网格的所有轨迹数 N_{ij} 的比值, 即式(3):

$$PSCF_{ij} = M_{ij}/N_{ij} \quad (3)$$

由于 PSCF 是一种条件概率, 当 N_{ij} 较小时, PSCF 计算结果具有较大的不确定性, 这将使得值的置信度将变的非常低, 为降低计算的不确定性, 一些学者引入了权重函数 W_{ij} ^[26], 即式(4):

$$WPSCF = W_{ij} \times PSCF \quad (4)$$

式(4)中引入的权重函数 W_{ij} 具体取值如式(5), N_{avg} 则表示研究区网格单元中气流轨迹端点数均值.

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.0, & N_{ij} > 2N_{avg} \\ 0.75, & N_{avg} < N_{ij} \leq 2N_{avg} \\ 0.5, & 0.5N_{avg} < N_{ij} \leq N_{avg} \\ 0.15, & 0 < N_{ij} \leq 0.5N_{avg} \end{cases} \quad (5)$$

1.3.6 浓度权重轨迹分析法(CWT)

由于PSCF具有一定局限性,无法反映污染物权重浓度高低^[27].因此,为进一步确定轨迹污染程度,利用该方法计算潜在源区气流轨迹浓度权重,分析不同轨迹和潜在源区的污染程度,反映不同源区贡献因子大小^[24].计算公式见式(6):

$$C_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m C_1 \times T_{ij1}}{\sum_{i=1}^m T_{ij1}} \times W(n_{ij}) \quad (6)$$

式中, C_{ij} 为网格(i, j)的平均污染权重浓度;1为气流轨迹; C_1 为轨迹1经过网格(i, j)时对应的 O_3 质量浓度; T_{ij1} 为轨迹1在网格(i, j)停留的时间,计算过程中,使用落在网格内的轨迹端点数来代替停留时间,采用与PSCF分析法相同的权重函数 $W(n_{ij})$.

2 结果与讨论

2.1 河西走廊地区 O_3 柱浓度时空变化

本研究分析了河西走廊地区16年 O_3 柱浓度的年、季和月时空分布特征,参照ArcGis 10.2中的自然间断点分级法(Jenks)的分级标准,将 O_3 柱浓度分为6个等级:一级(285~300 DU)、二级(300~315 DU)、三级(315~330 DU)、四级(330~345 DU)、五级(345~360 DU)和六级(360~375 DU),ArcGIS图中不同颜色表示不同的等级,单位为DU.

2.1.1 河西走廊地区 O_3 柱浓度年际变化

由河西走廊地区 O_3 柱浓度16 a 平均值变化趋势可知(图2),2005~2020年的 O_3 柱浓度极差较大,具有一定的波动性.2005~2010年的 O_3 柱浓度由缓慢下降到极速上升,并在2010年到达近16年峰值332.31 DU,最大增幅为9.73%;2010~2014年 O_3 柱浓度曲折下降,并在2014年达到最低值301.00 DU,下降幅度为10.4%;2014~2020年 O_3 柱浓度逐渐增加并趋于平稳.其中,造成 O_3 柱浓度在2010年异常增高的原因,其他学者在研究时发现由于高大气层的向下传输作用的增强,在2005~2010年间,中国上空的低对流层中 O_3 柱浓度有所升高^[28];同时,2010年我国极端天气气候事件频

发^[27],长波辐射(OLR)异常增高、对流层变暖以及反气旋循环活动等大气环流异常现象,是导致该年中国中高纬度地区 O_3 柱浓度异常增加的主要原因之一^[29].

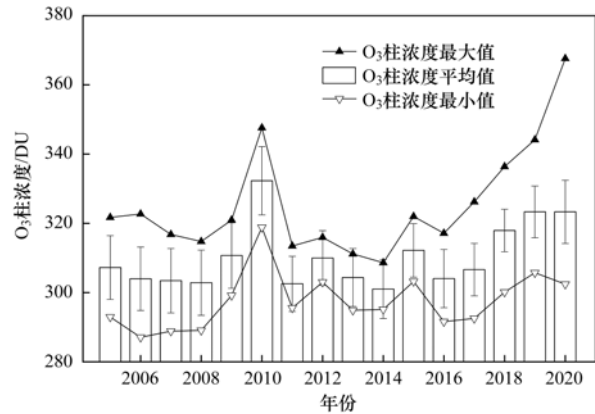


图2 2005~2020年河西走廊 O_3 柱浓度年均值变化趋势

Fig. 2 Variation trend of annual mean concentration of O_3 column in Hexi Corridor from 2005 to 2020

从空间分布变化来看(图3),河西走廊地区2005~2020年 O_3 柱浓度整体空间分布变化有明显的差异性,大体呈现由西南向东北不断递增的纬向带状分布.主要高值区分布于酒泉、张掖市东北部、武威市北部、嘉峪关和金昌大部分地区,原因可能是该区域地形平坦,人口相对集中,工业部门集聚,汽车尾气和工业生产等产生的 O_3 前体物(NO_x 和 CO 等)排放量相对较多,大量前体物质参与光化学反应,二次生成大气 O_3 . 中值区呈纬向带状分布,与祁连山山麓走向基本一致,并将高值区与低值区沿祁连山山麓划分出明显界限.由年际变化可以看出,2005~2008年 O_3 柱浓度基本由山麓走向将其划分为明显的高低值区;2009~2011年 O_3 柱浓度高值区由酒泉北部转移至金昌、武威地区,低值区逐步扩大,且集中于酒泉、嘉峪关与张掖地区;2012~2014年 O_3 高低值区分布零散,但高值区面积有所较少,这主要得益于“十二五”规划提出将环境保护放在首要位置,并将氮氧化物(NO_x)的总量控制作为目标.2015~2020年 O_3 柱浓度高值区面积大幅度减小,低值区面积逐步扩大,这主要是因为自“十三五”以来我国加大环境综合治理力度,实现环境质量总体改善.

2.1.2 河西走廊地区 O_3 柱浓度季节变化

图4给出了河西走廊地区2005~2020年16年间四季 O_3 柱浓度变化趋势,可以看出春季(3~5月)和冬季(12月至次年2月)的 O_3 柱浓度平均值明显高于夏季(6~8月)和秋季(9~11月).春季最高,且明显高于冬季, O_3 柱浓度平均值为330 DU,冬季次之,夏季和秋季在2015年以前浓度交替变

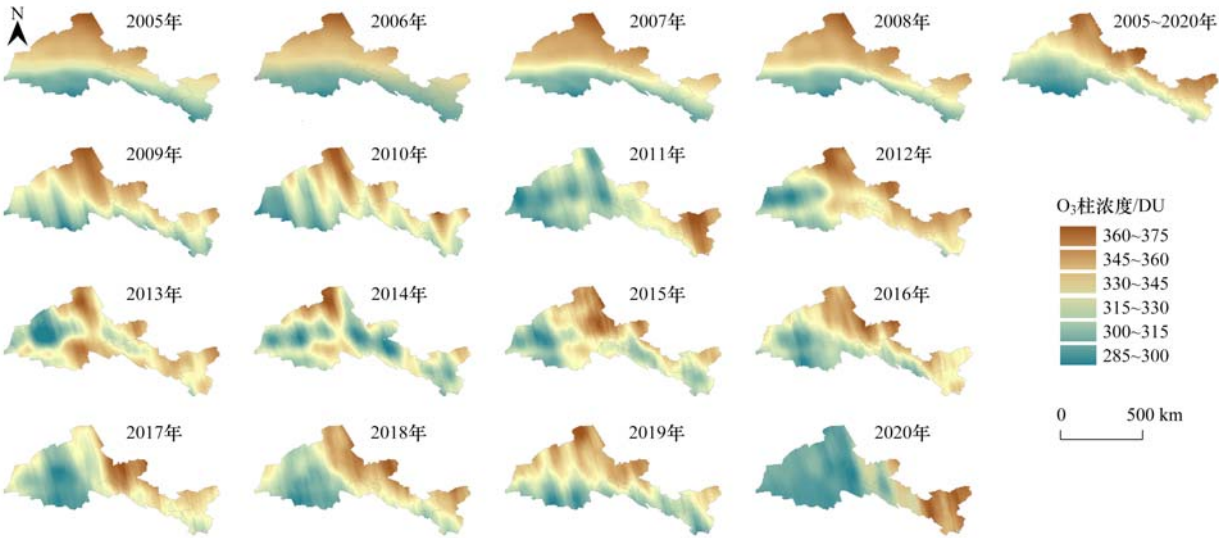


图3 2005 ~ 2020 年河西走廊 O₃ 柱浓度逐年分布

Fig. 3 Year-by-year distribution of O₃ column concentration in Hexi Corridor from 2005 to 2020

化,而后秋季 O₃ 柱浓度值均高于夏季. 这与河套平原 O₃ 柱浓度季节性变化^[27] 以及中国大陆 O₃ 柱总量季节变化趋势的研究结果相似^[30]. 其中,春季和冬季的 O₃ 柱浓度最大值分别出现在 2010 年和 2019 年,为 374.59 DU 和 348.83 DU,且明显高于夏秋季节,这是因为春季和冬季该地区气温降低,因燃煤供暖而产生的大量 O₃ 前体物和其他污染物,加剧了河西走廊地区空气污染状况,使得 O₃ 柱浓度升高. 夏季和秋季的 O₃ 柱浓度最大值出现的时间与春季和冬季一致,分别在 2010 年和 2019 年,为 319.30 DU 和 328.67 DU,这是由于该地区夏秋两季降水相对增多,有利于空气污染物的沉降.

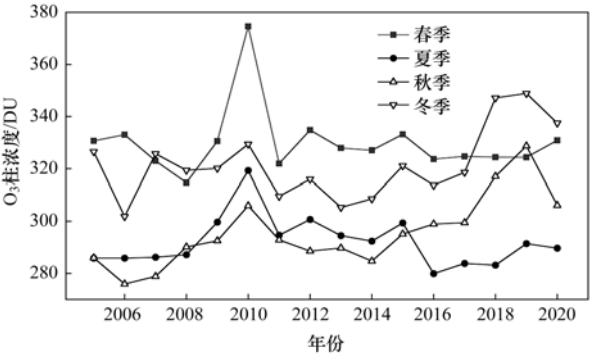


图4 2005 ~ 2020 年河西走廊 O₃ 柱浓度季节平均值变化趋势

Fig. 4 Variation trend of seasonal average concentration of O₃ column in Hexi Corridor from 2005 to 2020

进一步分析 2005 ~ 2020 年河西走廊地区 O₃ 柱浓度空间分布 (图 5),发现该地区不同季节的 O₃ 柱浓度空间分布存在显著差异,存在较大的空间异质性. 春季、夏季、秋季和冬季的 O₃ 柱浓度均值分别为 329.95、292.10、295.65 和 321.81 DU. 16 年间,春季、夏季和冬季的 O₃ 柱浓度高值

区域分布在酒泉市北部,秋季 O₃ 柱浓度高值区分布在金昌与武威市北部. O₃ 柱浓度的季节性变化与 2005 ~ 2020 年整体空间分布变化高度一致,均表现为由西南向东北不断递增的纬向带状分布,且变化梯度较为均匀.

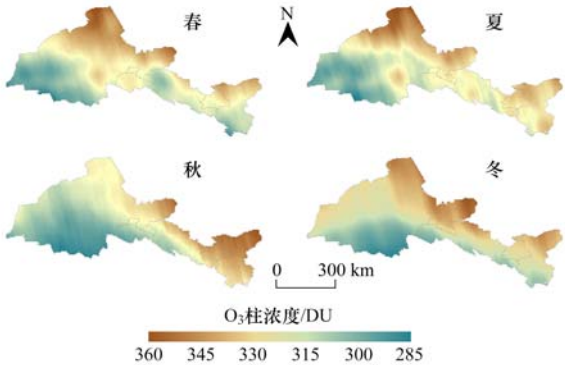


图5 2005 ~ 2020 年河西走廊 O₃ 柱浓度季节分布

Fig. 5 Seasonal distribution of O₃ column concentration in Hexi Corridor from 2005 to 2020

2.1.3 河西走廊地区 O₃ 柱浓度月变化

为研究河西走廊地区 O₃ 柱浓度的月变化特征,利用 2005 年 1 月至 2020 年 12 月,共计 192 个月的 O₃ 柱浓度数据绘制出河西走廊地区的月均值变化趋势 (图 6); 并根据 16 年间 O₃ 柱浓度月均值绘制 2005 ~ 2020 年 O₃ 柱浓度月均值分布情况 (图 7). 16 年间 O₃ 柱浓度年内变化幅度大,呈现周期性变化特征,每年月均值呈现先增大后减小再升高的曲折变化趋势,具体表现为每年 1 月开始不断上升,至 2 ~ 4 月出现最大值,而后 O₃ 柱浓度不断降低,在 6 ~ 10 月出现最低值,随后 O₃ 柱浓度继续上升. 整个 16 年间 O₃ 柱浓度最高月出现在 2010 年 3 月,浓度为 388.06 DU,最低月出现在 2018 年 8 月,浓度为

271.88 DU. 而从空间分布上看(图7), O_3 柱浓度月均值主要呈东北向西南递减的纬向带状分布, 主要高值区集中在地势相对平坦的城市区域, 最高达到了6级, 而低值区主要集中于祁连山脉地区, 最低达到了1级. 从4月和5月开始 O_3 柱浓度开始降低, 大部分地区处于中值范围, 且由东北向西南逐渐降

低. 7月和8月高值和低值覆盖范围降低至最小, 中值区域面积达到最大值, 这主要是因为该地区夏季气温变换幅度小. 9月和10月高值区域逐渐扩大, 且浓度等级随之增大, 直至冬季来临, 该地区的 O_3 柱浓度等级主要集中在5级和6级, 导致此类变化趋势主要与气温降低燃煤供暖有关.

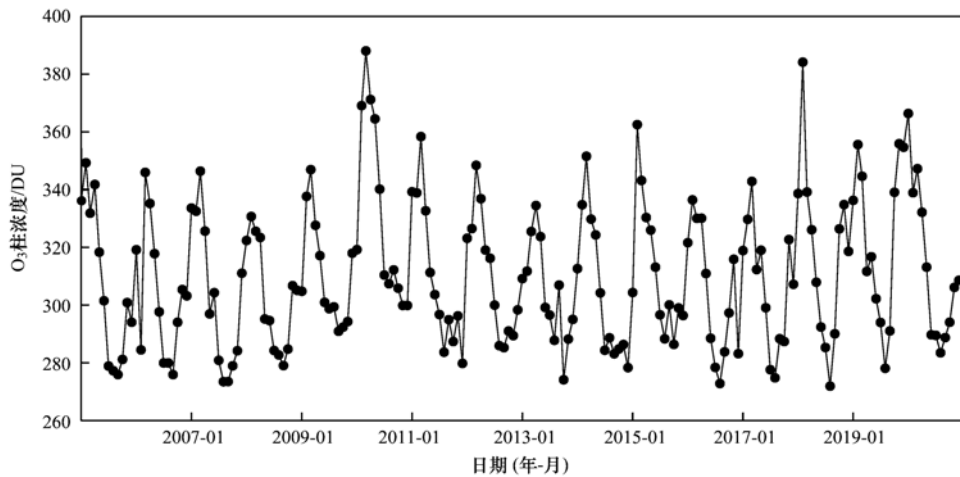


图6 2005~2020年河西走廊 O_3 柱浓度月均值变化趋势

Fig. 6 Variation trend of monthly mean concentration of O_3 column in Hexi Corridor from 2005 to 2020

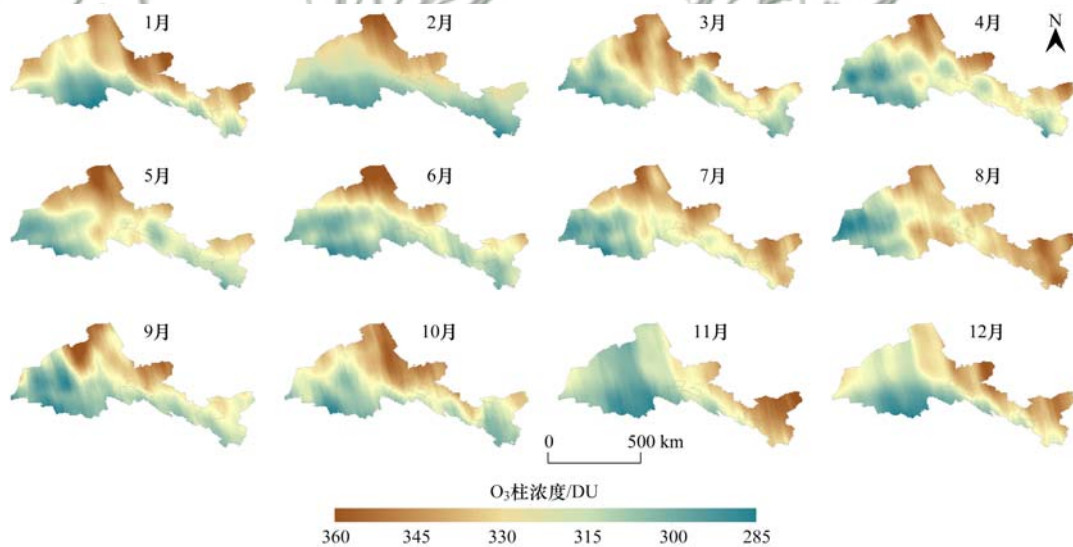


图7 2005~2020年河西走廊 O_3 柱浓度月均值分布

Fig. 7 Distribution of monthly mean values of O_3 column concentration in Hexi Corridor from 2005 to 2020

2.2 O_3 时间序列变化趋势

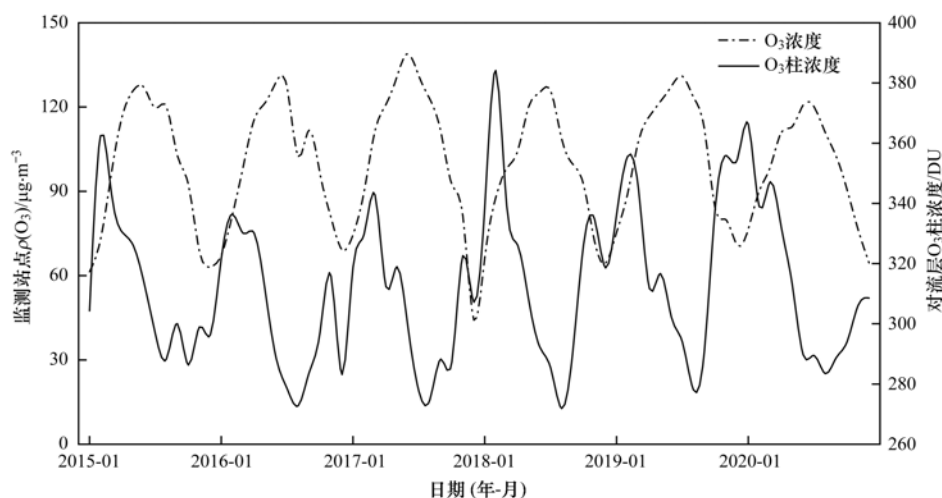
2.2.1 O_3 柱浓度与监测站点 O_3 浓度的关系

为研究对流层 O_3 柱浓度与地面环境监测站点 O_3 浓度之间的时间序列变化趋势, 选取2015~2020年为长时序构建拟合曲线, 并进行两者的相关性分析. 由图8可知, 监测站点 O_3 浓度和对流层 O_3 柱浓度之间变化规律性明显, 两者每年最高浓度和最低浓度出现时间相差大约4个月. 将两者进行 Pearson 相关性检验得出, 在0.01水平上显著相关, 相关系数为-0.384, 相关性较低. 从而验证了我国

北方高纬度地区由于对流层顶高度(即平流层中下层的温度)、太阳辐射强度和大气环流而导致近地面监测站点 O_3 浓度出现较大的年际及年内变化^[31,32]. 除此之外, 空气颗粒物和 O_3 前体物的排放、地形地势和气象因素等对近地面 O_3 浓度都有着至关重要的影响.

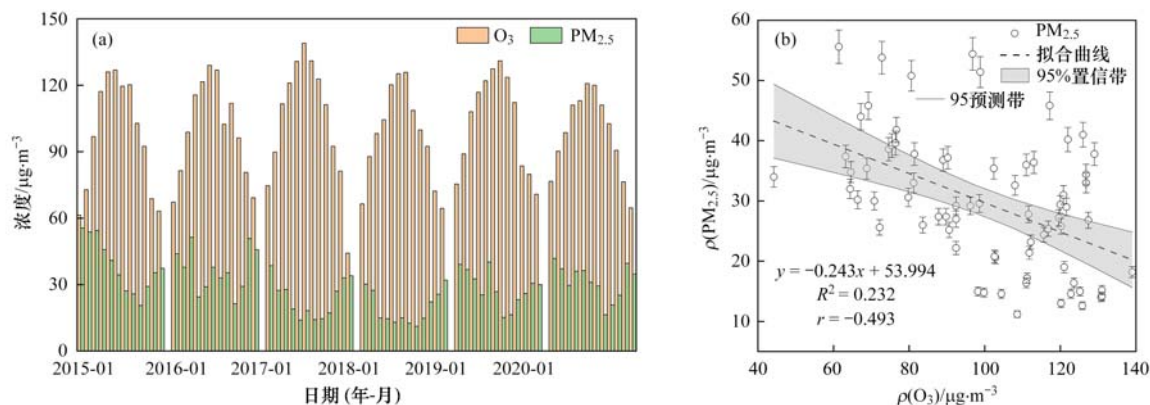
2.2.2 O_3 浓度与颗粒物 $PM_{2.5}$ 之间的关系

2015~2020年河西走廊地区近地面 O_3 浓度和颗粒物 $PM_{2.5}$ 浓度之间的时间变化趋势及相关性显示(图9), 两者之间变化具有较强的规律性, 整体表

图8 对流层 O_3 柱浓度与监测站点 O_3 浓度的关系Fig. 8 Relationship between O_3 column concentration and O_3 concentration at monitoring sites

现为此消彼长的态势图 9(a), O_3 浓度于夏季出现最高值, 而此时的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度却为最低值, 这主要是因为不同大气污染物在不同季节呈现不同的特征^[33]. 而且就相关性分析可以看出[图 9(b)], O_3 浓度与颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 之间呈负相关, 相关系数为 -0.493 , 用方程可表示为 $y = 0.243x +$

53.994 . 究其原因, 主要是因为空气中的颗粒物对太阳光的吸收和散射较强, 减少太阳光辐射通量, 增加气溶胶光学厚度, 从而导致光化学反应速率降低, 使得 O_3 浓度下降^[34,35]. 同时, 发生在大气颗粒物表面的非均相化学过程, 也会影响 O_3 浓度的产生^[36].

图9 O_3 浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时间变化趋势和相关性Fig. 9 Time trend and correlation of O_3 concentration and $\text{PM}_{2.5}$ concentration

2.2.3 O_3 浓度与前体物(CO 和 NO_2) 的关系

近地面 O_3 主要是由光化学反应生成的, 其浓度和生成速度主要受到 CO 和 NO_2 等前体物浓度和气象条件的影响^[37]. 基于此, 选取 2015 ~ 2020 年河西地区近地面监测点 O_3 浓度与前体物 CO、 NO_2 浓度的时间序列变化趋势图 10(a), 趋势分析显示前体物 CO 和 NO_2 均表现为冬季高, 夏季低, 年间呈周期性变化特征, 年际总体浓度降低, $\rho(\text{CO})$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 分别于 2015 年冬季达到峰值 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $35.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 于 2020 年夏季降低至 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $15.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 且在时间上与 O_3 浓度呈现出相反的趋势, 即 CO 和 NO_2 浓度与近地面 O_3 浓度呈负相关[图 10(b) 和 10(c)]. 这是由于该地区冬季气温低、

太阳辐射较弱, 不利于光化学反应生成 O_3 , 而导致前体物积累; 夏季气温升高、光照增强、利于光化学反应, 使得前体物充分转换为 O_3 ^[38], 前体物浓度降低, O_3 浓度升高, 这也进一步证实了前体物对 O_3 的影响主要是通过光化学反应. 反观近地面 O_3 浓度变化周期明显, 季节上 O_3 夏季浓度明显大于冬季, 这种变化与 O_3 柱浓度趋势相反, 与山东半岛、河套平原和长三角等地区的 O_3 季节性变化趋势一致^[18,27,39].

2.3 O_3 和气象条件之间的关系

为了探究气象因子对河西走廊地区 O_3 浓度的影响, 选择研究区内 5 个地级市 2020 年每天 O_3 浓度平均值, 以及同时间段的相对湿度(RH)、日照时

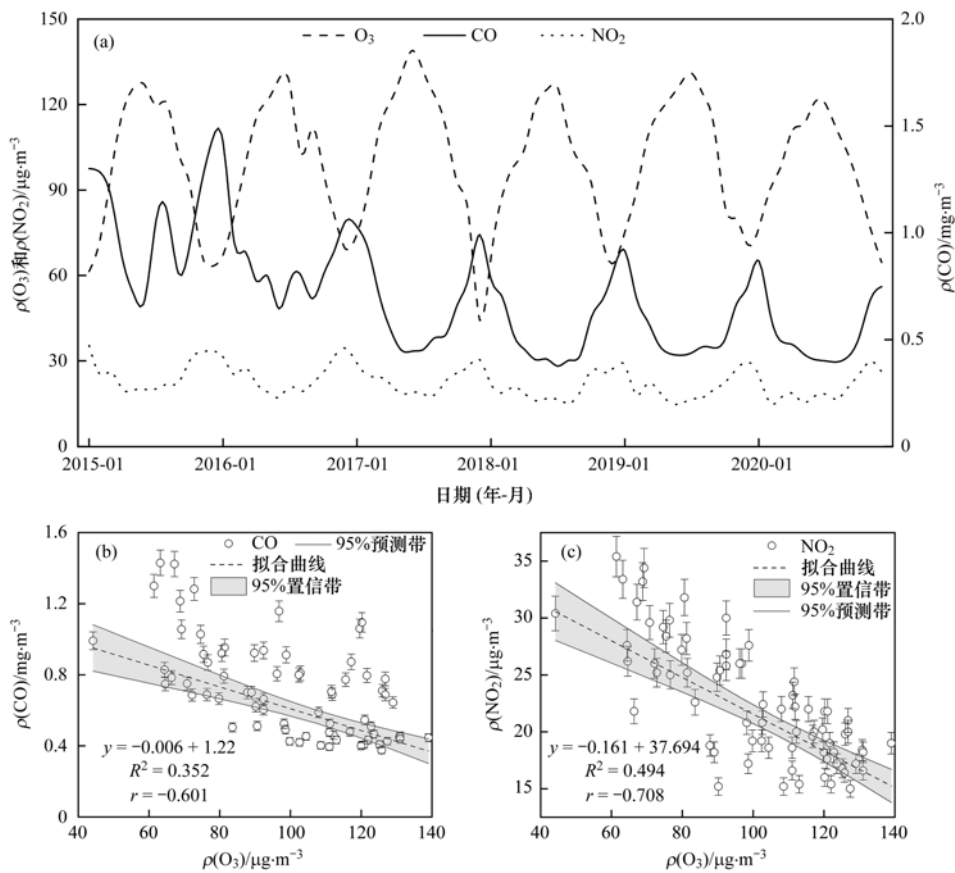


图 10 O_3 与前体物 (CO 和 NO_2) 的时间变化趋势和相关性

Fig. 10 Time trend and correlation of O_3 and precursors CO and NO_2

长(S)、平均气温(T)和平均风速(WS)作为气象影响因子. 表 1 为河西走廊地区 5 个地级市 O_3 浓度与气象因子之间的相关性分析结果. Pearson 相关系数表明,除相对湿度外,其他气象要素与 O_3 浓度均呈正相关关系,即气温的升高、相对湿度的降低、日照时数的延长以及风速的增大均会导致 O_3 浓度的增加. 4 种气象因子与 O_3 浓度均在 0.01 水平上显著相关,且相关性强弱程度依次为:平均气温($r = 0.850$),相对湿度($r = -0.545$),日照时长($r = 0.425$),平均风速($r = 0.320$).

表 1 河西五市 O_3 浓度与气象因子之间的相关性¹⁾

Table 1 Correlation between O_3 concentration and meteorological factors in five cities in Hexi

城市	相对湿度	日照时长	平均气温	平均风速
酒泉	-0.685 **	0.437 **	0.845 **	0.407 **
嘉峪关	-0.583 **	0.426 **	0.862 **	0.251 **
张掖	-0.521 **	0.416 **	0.852 **	0.298 **
金昌	-0.419 **	0.304 **	0.841 **	0.205 **
武威	-0.401 **	0.323 **	0.839 **	0.198 **
河西五市	-0.545 **	0.425 **	0.850 **	0.320 **

1) ** 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著

气温的高低决定着太阳辐射强弱,太阳辐射的强弱也决定着 O_3 发生光化学反应的速率,太阳辐射

越强,光化学反应越明显, O_3 越容易积累,浓度升高越明显. 河西地区深处西北内陆,远离海洋气候干旱,晴天多云层少,不仅有利于 NO_x 等前体物的生成,而且该地区较强的太阳辐射也有利于氧分子的分解和 O_3 的合成^[40]. 图 11(a)为 2020 年河西走廊地区 O_3 浓度与气温日变化进行线性拟合,拟合直线的 R^2 为 0.722,拟合方程为 $y = 0.465x - 38.044$,其中 2020 年河西地区 $\rho(\text{O}_3)$ 最高值为 $154.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最高日均温为 25.8°C . 同时,日照时长可以间接反映太阳辐射对 O_3 浓度影响,日照时数越长,太阳辐射越多,越有利于增加光化学反应速率,从而促进 O_3 生成,由图 11(c)可知,日照时长与 O_3 浓度的拟合直线的 R^2 为 0.178,拟合方程为 $y = 0.534x + 2.946$. 较大的相对湿度会阻碍 O_3 污染形成,对前体物产生一定的清洗作用^[41];同时,水汽的消光机制会衰减紫外辐射,不利于光化学反应的进行^[42]. 由图 11(b)可知,相对湿度与 O_3 浓度的拟合直线的 R^2 为 0.295,拟合方程为 $y = -0.385x + 80.710$, $\rho(\text{O}_3)$ 最低值 $44.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 出现在 $\text{RH} > 75\%$. 由图 11(d)可知,风速与 O_3 浓度相关性较弱($r = 0.320$),即平均风速的增加,并没有对 O_3 浓度有强有力的扩散作用,而高浓度 O_3 仍集中出现在稳定小

风的情况下,2020 年该地区 $\rho(\text{O}_3)$ 大于 $140 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,风速均小于该地区平均风速 ($2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),这是由于该地区的风主要来自于大气环流西风带,特殊地形导致的狭管效应使近地面风速加大,较大的风

速对 O_3 有一定的水平扩散作用,但该地区受西风的主导作用使得在 O_3 浓度在下风向出现聚集. 总体来看,平均气温和相对湿度为影响河西走廊地区近地面 O_3 的主导气象因子(图 12).

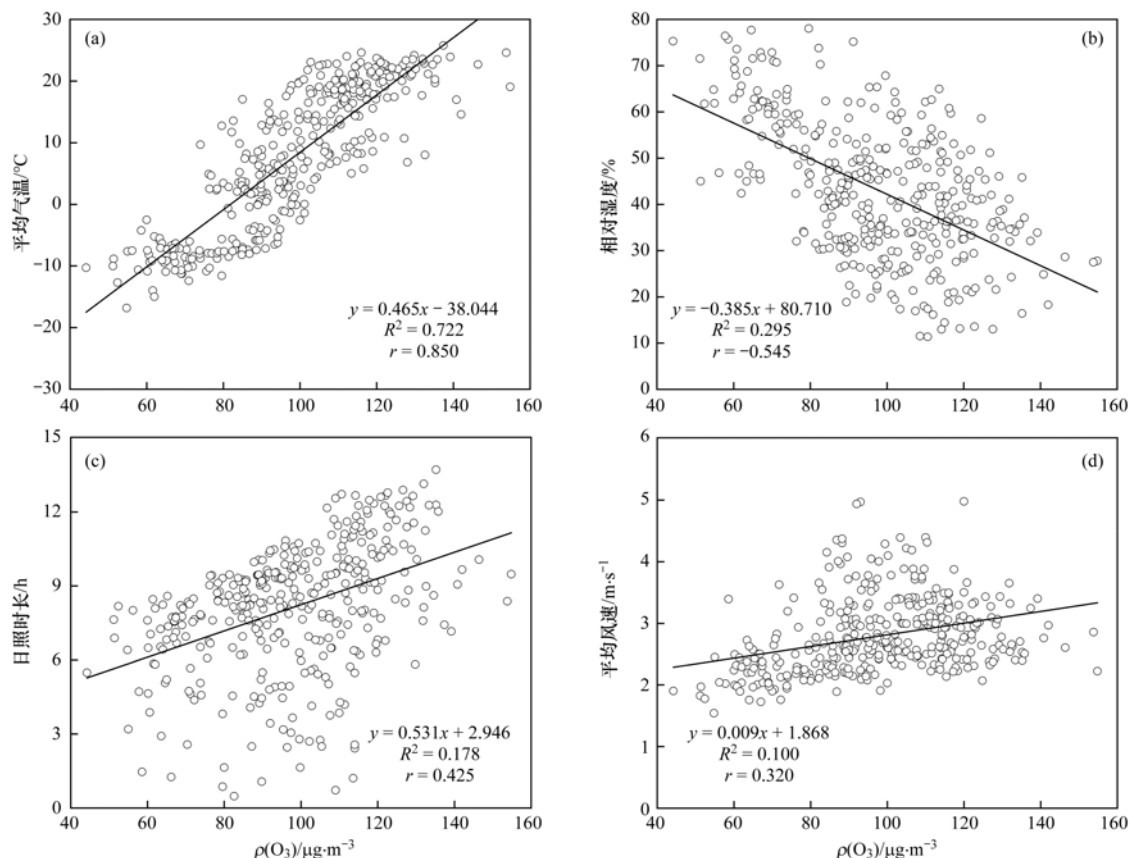


图 11 2020 年河西走廊 O_3 与气象条件之间的关系

Fig. 11 Relationship between O_3 and meteorological conditions in Hexi Corridor in 2020

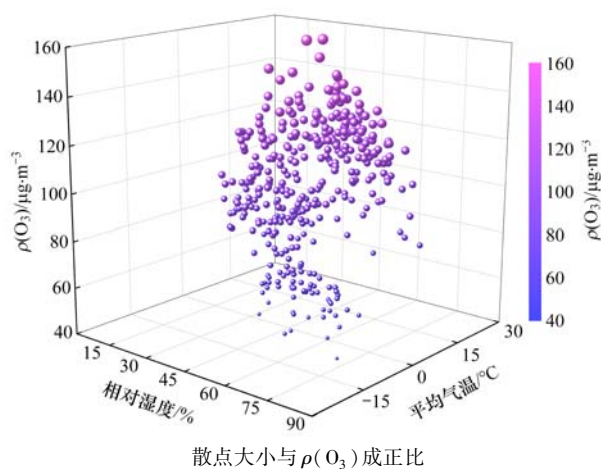


图 12 主导气象因子与 O_3 的关系

Fig. 12 Relationship between dominant meteorological factors and O_3

2.4 后向轨迹与潜在源分析

为进一步探究河西走廊地区 O_3 的传输路径和潜在源区,使用 HYSPLIT 模型,选择河西走廊中心城市武威市 (37.928°N , 102.642°E) 为起始点,研究时间段为 2020 年 3 月 1 日至 2021 年 2 月 28 日,以

季节进行聚类,选取每日 24 个整点时刻计算 48 h 后向轨迹(共计 8760 条),模拟气流高度为 500 m. 按照欧氏距离方法分别将不同季节的气流轨迹聚类为 6 类(图 13).

由图 13 可知,武威市 O_3 输送路径方向较为单一,春季、夏季、秋季和冬季的主导气流均以西部和西北部为主,所占比例分别为 71.62%、66.85%、61.22% 和 77.78%. 春季轨迹 1(23.49%)、轨迹 2(32.60%)、轨迹 3(1.10%) 和轨迹 4(14.42%) 均来自西北方向,主要是因为狭长的河西走廊使得污染物易进难出;其中轨迹 2 占比最大,途经酒泉、嘉峪关和张掖这 3 个城市,使得污染物随风向聚集至下风向区域. 除此之外,轨迹 5(7.55%) 和轨迹 6(20.83%) 来自东北方向气流,轨迹 6 途经河套平原和宁夏回族自治区,气流携带较大的 CO 和 NO_2 导致了轨迹 6 对 O_3 浓度贡献率高达 20.83%.

夏季除河西走廊城市群所导致的污染物外,有 20.83% 的轨迹来源于新疆地区,分别为轨迹 1

(10.01%) 和轨迹 4 (10.82%), 且轨迹 1 输送距离最长, 主要是因为从新疆中部地区经河西走廊地势起伏不大, 气流移动速度较快. 轨迹 3 (18.48%) 和轨迹 5 (14.67%) 均来自东南方向, 但输送距离短, 途经白银及黄土高原西侧. 秋季有 3 条轨迹来自新疆地区, 分别为轨迹 3 (9.43%)、轨迹 5 (9.94%) 和轨迹 6 (5.68%), 其中轨迹 6 移动速度最快, 输送距离最长, 但占比最小, 主要是因为气流来源于塔克拉

玛干沙漠, 人口稀少; 其中轨迹 2 (38.78%) 受东南季风影响占比最大. 冬季受到冬季风的影响, 轨迹主要来自于西北方向, 综合占比高达 77.78%, 其中轨迹 4 (11.76%) 来源新疆阿拉山口, 途经新疆中部和河西走廊地区, 气团传输距离长, 传输速度快, 利于污染物的扩散^[43], 导致轨迹占比小 O_3 浓度低; 轨迹 1 (22.22%) 气团路径最短, 出现概率较大, 主要来自武威市区.

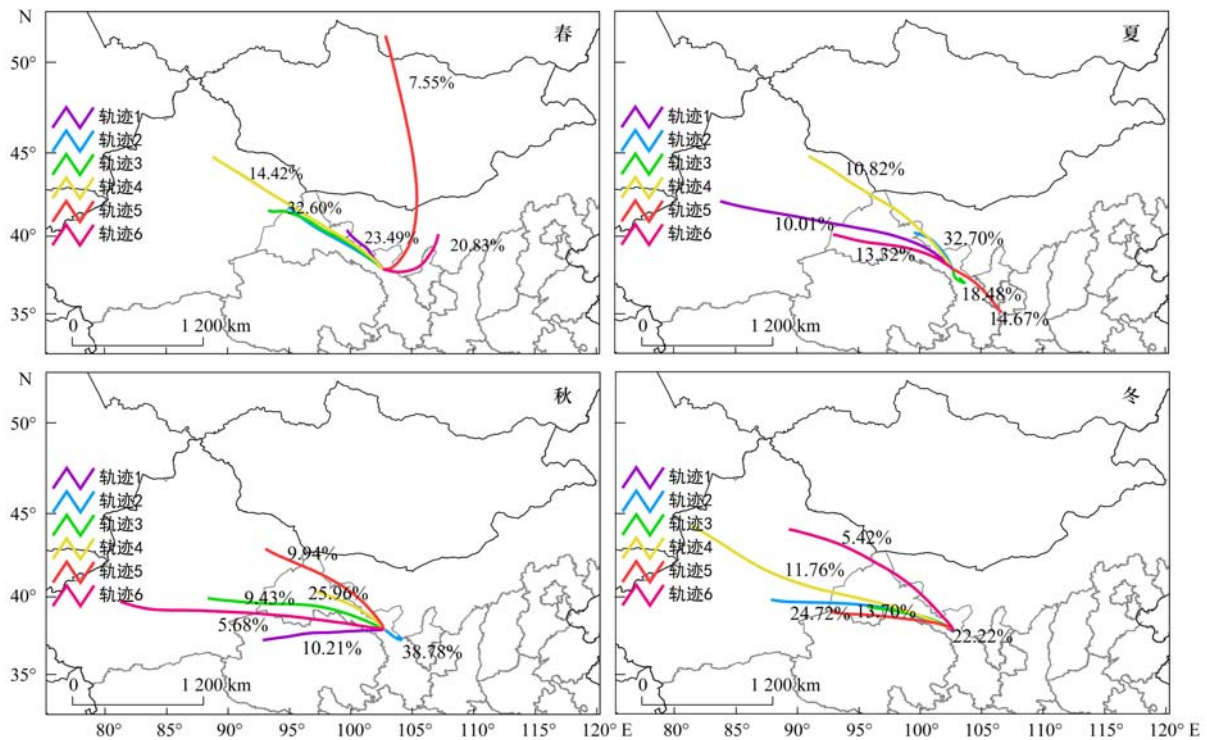


图 13 2020 年武威市 O_3 在不同季节的后向轨迹分析

Fig. 13 Analysis of the backward trajectory of O_3 in Wuwei City in different seasons in 2020

2.5 潜在源贡献因子分析

由后向轨迹聚类分析可知, 导致河西走廊地区 O_3 污染的气团来源有明显的季节性差异, 因此, 有必要进一步分析河西地区 O_3 污染的潜在源区情况. 利用 TrajStat 软件对武威市四季 O_3 浓度的潜在源贡献因子分析 (PSCF), 时间跨度为 2020 年 3 月至 2021 年 2 月, 网格设置为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率, 各季节阈值均按照 O_3 浓度的第 90 百分位数计算, 取值分别为 115、126、102 和 $81 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对比分析武威市 WPSCF 分布具有明显的季节性特征.

根据图 14 武威市 2020 年各季节 PSCF 值空间分布可知, 2020 年各季节 O_3 潜在源区分布范围广泛, 除明显高值区外, 各季节的低值区均受 6 类轨迹所影响, 并广泛分布于目标城市的西北部区域, 这是由于该地区主导风向所导致. 春季、夏季和秋季的 O_3 潜在源区分布范围广泛, 高值区域均分布于武威市东南侧的白银市和兰州市等地, 其 WPSCF 均值

< 0.5 , 范围分别为 $0.03 \sim 0.33$ 、 $0.05 \sim 0.55$ 和 $0.04 \sim 0.44$. 冬季 O_3 潜在源区的 PSCF 高值区域分布于武威市北侧巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠之间, WPSCF 范围为 $0.04 \sim 0.44$. 这进一步说明该地区存在两个潜在源区, 分别为: ①东南风源, 包括兰州和白银等地区; ②北风源, 包括金昌和民勤等地区. 其中东南风源和北风源人口密度大, 经济较为发达, 为 O_3 及前体物的主要输送源地; 而盛行风向的西风源和西北风源所在区域, WPSCF 均属于低值区, 这是由于西风源和西北风源的输送距离较远, 对 O_3 有一定的扩散作用.

2.6 浓度权重轨迹分析

由于 PSCF 只能反映 O_3 浓度潜在源贡献因子的局限性, 因此, 为进一步了解污染轨迹的污染程度, 利用 TrajStat 插件计算 2020 年武威市四季 O_3 浓度权重轨迹 (CWT), 如图 15 所示. 区域内 CWT 值越高, 表示对武威市污染物浓度贡献越大, 将 CWT

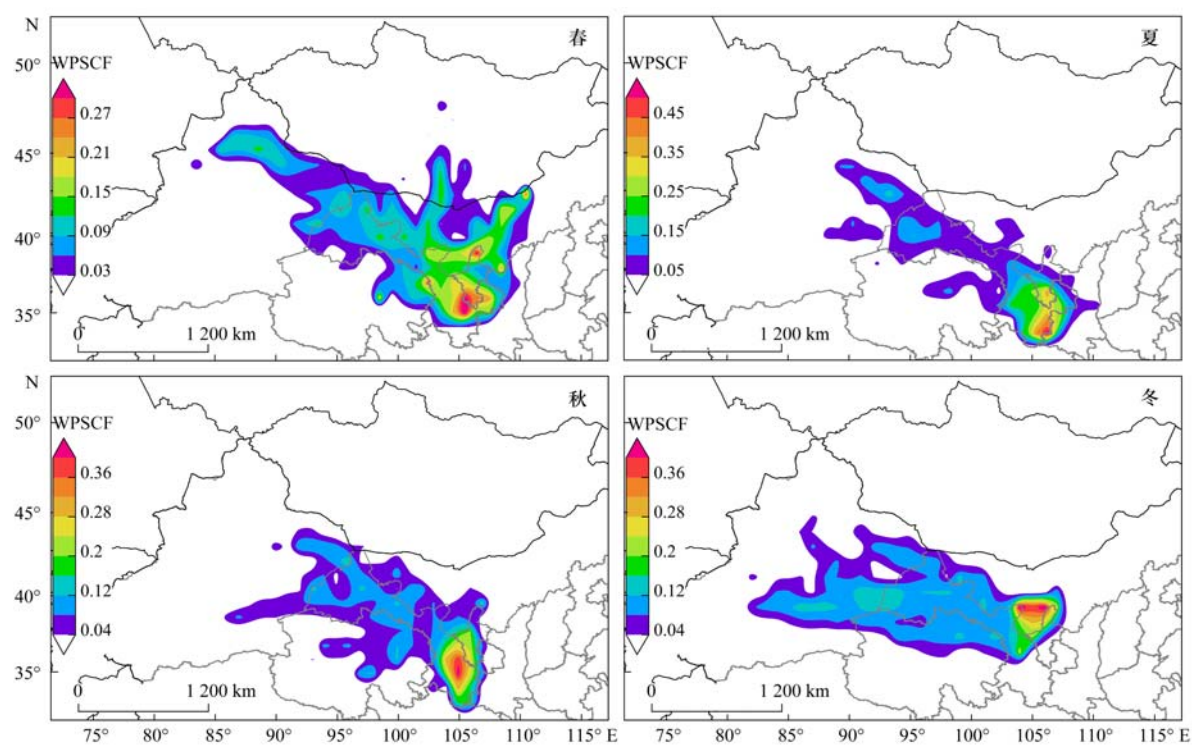


图 14 不同季节潜在源分析
Fig. 14 Analysis of potential sources in different seasons

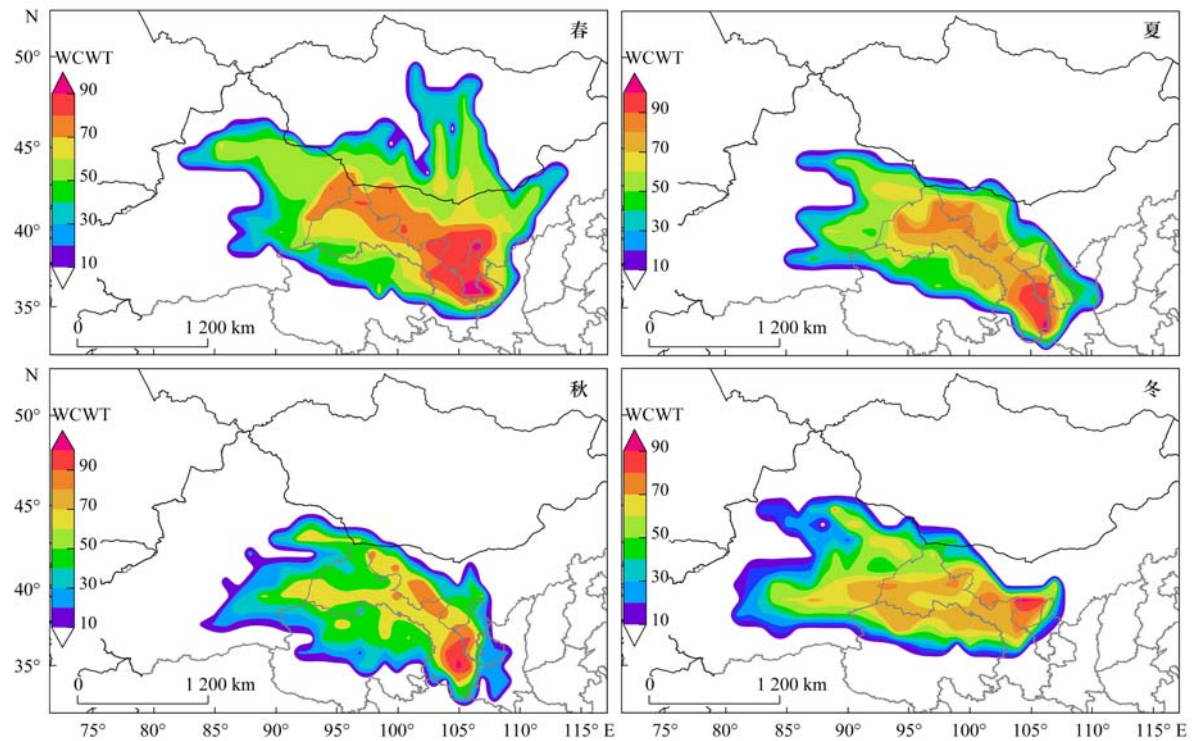


图 15 不同季节 O₃ 的浓度权重轨迹分析
Fig. 15 Concentration weight trajectory analysis of O₃ in different seasons

值高于各季节阈值的区域设置为主要贡献区. 春季主要贡献区范围最广, 主要贡献区位于兰州北部、白银市、宁夏回族自治区和庆阳市等地区, 对武威市 O₃ 小时浓度的贡献为 115 ~ 188 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 夏季与秋季的主要贡献区范围大小仅次于春季, 但其贡献

区位置与春季贡献区位置重合, 夏秋两季对武威市 O₃ 小时浓度的贡献为 126 ~ 179 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 102 ~ 139 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 且 2020 年武威市前 3 个季节的 O₃ 浓度的权重轨迹值 CWT 分析结果与 PSCF 具有较好的一致性. 而冬季主贡献区范围明显缩小, 集中于武

武威市北侧巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间,对武威市 O_3 小时浓度的贡献为 $81 \sim 128 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3 结论

(1)时间变化上,河西走廊地区 O_3 柱浓度在 2005 ~ 2020 年这 16 年间的年际变化呈单峰变化,2005 ~ 2010 年由缓慢下降到极速上升,并在 2010 年出现最大值(332.31 DU),2010 ~ 2014 年呈缓慢下降趋势,于 2014 年达到最低值(301.00 DU),2014 ~ 2020 年 O_3 柱浓度逐渐增加并趋于平稳。 O_3 柱浓度的季节变化中,春季和冬季的浓度平均值均明显高于夏季和秋季;春季最高且基本保持着春季高于冬季的规律, O_3 柱浓度平均值为 330 DU,夏季和秋季在 2015 年之前浓度交替变化,2015 年之后秋季 O_3 柱浓度值均高于夏季。 O_3 柱浓度月均值呈现先增大后减小再升高的曲折变化趋势,最高值出现在每年的 2 ~ 4 月,最低值出现在每年的 6 ~ 10 月。

(2)空间分布上, O_3 柱浓度的高值区主要分布在地势低平的城市区域,中值区呈条带状分布,与祁连山山麓走向基本一致,并将高值区与低值区沿山麓划分出明显界限,大体呈现由西南向东北不断递增的纬向带状分布特征。从各年的空间变化来看,2009 ~ 2011 年 O_3 柱浓度高值区由酒泉北部转移至金昌、武威地区,低值区逐步扩大,2012 年以后高值区面积大幅度减小,低值区面积逐步扩大。四季分布有明显变化,季平均浓度排序为:春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季,各季节低值区均分布在酒泉市南部。月值空间分布上,从 4 月和 5 月开始 O_3 柱浓度值开始降低,大部分地区处于中值范围,7 月和 8 月高值和低值覆盖范围降低至最小,9 月和 10 月高值区域逐渐扩大,且浓度等级随之增大,等级主要集中在 5 级和 6 级。

(3) O_3 与气象条件分析表明,气温、风速和日照时数与 O_3 呈现正相关,相对湿度与 O_3 呈现负相关,即气温的升高、相对湿度的降低、日照时数的延长以及风速的增大均会导致 O_3 浓度的增加,主导气象因子是平均气温和相对湿度。但 O_3 浓度与颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 以及前体物 CO 和 NO_2 均呈现相反趋势,这也证实了对 O_3 的影响主要是通过光化学反应。

(4)后向轨迹聚类分析表明,武威市 O_3 远距离传输路径绝大部分来自西北方向(天山、塔克拉玛干沙漠、马鬃山、酒泉市和嘉峪关市),小部分来自东北方向(内蒙古高原和河套平原);近距离传输路径主要来自武威市区和东南方向的兰州市及白银市,该路径气团所携带高浓度污染物主要为影响 O_3

浓度的前体物。通过气团传输路径聚类和 PSCF 分析和 CWT 分析的结果,本文发现东南风源和北风源为武威市 O_3 浓度潜在源区。

参考文献:

- [1] 赵伟,高博,卢清,等. 2006 ~ 2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, et al. Ozone pollution trend in the Pearl River Delta Region during 2006-2019 [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 97-105.
- [2] 邓爱萍,陆维青,杨雪. 2013 年-2017 年江苏省环境空气中首要污染物变化分析研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(12): 19-22.
Deng A P, Lu W Q, Yang X. Analysis on change of primary pollutant in ambient air of Jiangsu Province during 2013 and 2017 [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(12): 19-22.
- [3] 沈劲,黄晓波,汪宇,等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4449-4457.
Shen J, Huang X B, Wang Y, et al. Study on ozone pollution characteristics and source apportionment in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(12): 4449-4457.
- [4] Ren W, Tian H Q, Tao B, et al. Impacts of tropospheric ozone and climate change on net primary productivity and net carbon exchange of China's forest ecosystems [J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(3): 391-406.
- [5] 李红,彭良,毕方,等. 我国 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1763-1778.
Li H, Peng L, Bi F, et al. Strategy of coordinated control of $\text{PM}_{2.5}$ and ozone in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1763-1778.
- [6] 卢秀娟. 基于 OMI 卫星数据的甘肃省臭氧时空分布及影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
Lu X J. Analysis of spatial and temporal distribution and influencing factors based on OMI satellite data of ozone in Gansu Province [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2018.
- [7] Chang C Y, Faust E, Hou X T, et al. Investigating ambient ozone formation regimes in neighboring cities of shale plays in the Northeast United States using photochemical modeling and satellite retrievals [J]. Atmospheric Environment, 2016, 142: 152-170.
- [8] Levelt P F, Hilsenrath E, Leppelmeier G W, et al. Science objectives of the ozone monitoring instrument [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1199-1208.
- [9] Park J, Ryu J, Kim D, et al. Long-range transport of SO_2 from continental Asia to Northeast Asia and the Northwest Pacific ocean: flow rate estimation using OMI data, surface *in situ* data, and the HYSPLIT model [J]. Atmosphere, 2016, 7(4), doi: 10.3390/atmos7040053.
- [10] 刘旻霞,孙瑞弟,宋佳颖,等. 基于 OMI 数据的新疆地区臭氧柱浓度研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1498-1510.
Liu M X, Sun R D, Song J Y, et al. Research on ozone column concentration in Xinjiang based on OMI data [J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1498-1510.
- [11] Shen L, Jacob D J, Liu X, et al. An evaluation of the ability of the ozone monitoring instrument (OMI) to observe boundary layer ozone pollution across China: application to 2005-2017 ozone trends [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(9): 5491-5504.

- 6551-6560.
- [12] 罗晓玲, 李岩瑛, 严志明, 等. 近 60 年河西走廊地区沙尘暴发生演变特征及其气象影响因子[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(5): 254-260, 267.
- Luo X L, Li Y Y, Yan Z M, *et al.* Evolution characteristics of sandstorm and meteorological influence factors in Hexi corridor in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(5): 254-260, 267.
- [13] Yang L S, Feng Q, Adamowski J F, *et al.* Causality of climate, food production and conflict over the last two millennia in the Hexi Corridor, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136587.
- [14] 焦云腾. 河西走廊土地整治模式研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- Jiao Y T. Study on land consolidation model of Hexi corridor [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [15] Nan L L, Guo Q E, Cao S Y. Archaeal community diversity in different types of saline-alkali soil in arid regions of Northwest China[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2020, **130**(4): 382-389.
- [16] 于瑞新, 刘旻霞, 李亮, 等. 长三角地区近 15 年大气臭氧柱浓度时空变化及影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 770-784.
- Yu R X, Liu M X, Li L, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric ozone column concentration and influencing factors in the Yangtze River Delta region in recent 15 years[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 770-784.
- [17] 陈志青, 邵天杰, 赵景波, 等. 内蒙古地区近地面臭氧浓度时空分异及主导气象因子探讨[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(6): 1504-1512.
- Chen Z Q, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Spatial-temporal differentiation of near-surface ozone concentration and dominant meteorological factors in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(6): 1504-1512.
- [18] 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 等. 山东半岛近地面 O₃ 浓度时空变化及潜在源区解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1256-1267.
- Li L, Liu M X, Xiao S R, *et al.* Temporal and spatial variation in O₃ concentration near the surface of Shandong peninsula and analysis of potential source areas[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1256-1267.
- [19] 徐言. 北京市气溶胶物理光学特征及潜在来源分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Xu Y. Analysis of the characteristics and potential sources of aerosol physical optics in Beijing [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [20] Tyagi B, Singh J, Beig G. Seasonal progression of surface ozone and NO_x concentrations over three tropical stations in North-East India[J]. Environmental Pollution, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113662.
- [21] Zhao S P, Ye Y, Qin D H, *et al.* Analyses of regional pollution and transportation of PM_{2.5} and ozone in the city clusters of Sichuan Basin, China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, **10**(2): 374-385.
- [22] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada[J]. Atmospheric Environment, 1989, **23**(7): 1499-1509.
- [23] Hopke P K, Gao N, Cheng M D. Combining chemical and meteorological data to infer source areas of airborne pollutants[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993, **19**(2): 187-199.
- [24] 李莉, 蔡黎琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- Li L, Cai J L, Zhou M. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in Eastern and Middle China in December, 2013 [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [25] Salmabadi H, Khalidy R, Saeedi M. Transport routes and potential source regions of the Middle Eastern dust over Ahvaz during 2005-2017[J]. Atmospheric Research, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104947.
- [26] Xu X, Akhtar U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(15): 7073-7083.
- [27] 肖仕锐, 刘旻霞, 李乐, 等. 河套平原 O₃ 浓度时空分布、传输路径及潜在源贡献分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(6): 237-249.
- Xiao S R, Liu M X, Li L, *et al.* Temporal and spatial distribution, transmission path and potential source contribution of O₃ concentration in Hetao Plain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(6): 237-249.
- [28] Doherty R M. Ozone pollution from near and far[J]. Nature Geoscience, 2015, **8**(9): 664-665.
- [29] Ziemke J R, Olsen M A, Witte J C *et al.* Assessment and applications of NASA ozone data products derived from Aura OMI/MLS satellite measurements in context of the GMI chemical transport model[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, **119**(9): 5671-5699.
- [30] 张莹, 高场, 祝善友, 等. 近 30a 中国上空臭氧总量时空变化遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, **16**(6): 971-978.
- Zhang Y, Gao Y, Zhu S Y, *et al.* Variation of total ozone over China for 30 years analyzed by multi-source satellite remote sensing data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, **16**(6): 971-978.
- [31] 陈洪滨, 许丽生, 王普才. 利用 SAGE II 遥感分析我国上空平流层臭氧的分布和变化特征[J]. 应用气象学报, 1995, **6**(2): 240-245.
- Chen H B, Xu L S, Wang P C. A study of the distribution and evolution characteristics of stratospheric ozone over China using SAGE II data[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, **6**(2): 240-245.
- [32] 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 等. 利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4412-4422.
- Wang R F, Ma X D, Zhao T L, *et al.* Evaluation of MACC reanalysis ozone data over China using ground-based and AIRS satellite observations [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4412-4422.
- [33] 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 等. 河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 587-599.
- Qi Y J, Yu S J, Yang J, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological influence factors of ozone pollution in Henan Province[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 587-599.
- [34] Zheng J Y, Zhong L J, Wang T, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta region: analysis of data from a recently established regional air quality monitoring network [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(6): 814-823.
- [35] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog

- [J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 827-830.
- [36] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- Yi R, Wang Y L, Zhang Y J, *et al.* Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- [37] 单文坡, 殷永泉, 杜世勇, 等. 夏季城市大气 O₃ 浓度影响因素及其相关关系[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1276-1281.
- Shan W P, Yin Y Q, Du S Y, *et al.* Ozone pollution, influence factors and their correlation at urban area in summer [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(7): 1276-1281.
- [38] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **575**: 1582-1596.
- [39] 黄小刚, 赵景波. 2016 年长三角城市群 O₃ 浓度的时空变化规律[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3611-3620.
- Huang X G, Zhao J B. Spatial-temporal variation of ozone in Yangtze River Delta urban agglomeration in 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3611-3620.
- [40] 周牡丹. 气候变化情景下新疆地区干旱指数及作物需水量预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- Zhou M D. Drought index and crop water requirement prediction under climate change scenarios in Xinjiang region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [41] 刘彪. 东北某城市臭氧污染特征及控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Liu B. Study on the characteristics and control strategies of ozone pollution in a city in northeast China [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [42] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 75-87.
- Luo R X, Liu B S, Liang D N, *et al.* Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 75-87.
- [43] 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 等. 郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 604-615.
- Wang X D, Yin S S, Yang J, *et al.* Characteristics, meteorological influences, and transport source of ozone pollution in Zhengzhou city [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 604-615.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-jiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)