

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大环流背景分析郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O₃体积分数分布特征李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM_{2.5}中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM_{2.5}浓度非线性变化分析吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd²⁺的吸附机制姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO₂交换及其环境调控刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N₂O和CH₄排放的影响胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻吸收转运的影响周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜峰峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

基于大气成分观测网的山西省近地面 O₃ 体积分数分布特征

李莹¹, 王淑敏¹, 裴坤宁¹, 闫世明^{1*}, 孙鸿娉^{2*}, 张逢生¹, 高兴艾¹

(1. 山西省气象科学研究所, 中国气象局温室气体及碳中和监测评估中心山西分中心, 太原 030006; 2. 山西省人工增雨防雷增技术中心, 太原 030006)

摘要: 利用山西省 6 个大气成分观测站 2019 年 3 月至 2020 年 2 月的反应性气体 O₃、NO、NO₂ 和 NO_x 连续观测资料以及同期气象资料, 采用统计分析和后向轨迹分析等方法, 对山西近地面 O₃ 体积分数变化特征及影响因素进行了对比研究. 结果表明, 6 个站的 O₃ 体积分数一般在 4~9 月较高, 10 月至翌年 3 月较低, 研究期内山西南部的晋城和临汾 2 站的 O₃ 日最大 8h 体积分数滑动平均值 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标最严重, 其次是北部的五台山、朔州和大同 3 站, 中部的太原站 O₃ 污染较轻. 对比城市站和高山站发现, 两类站点的 O₃ 体积分数季节变化虽都表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 但前者主要受前体物 NO_x 光化学反应的影响, 后者的 NO_x 并不是产生高体积分数 O₃ 的主要来源; 两类站点的 O₃ 日变化谱型截然相反, 城市站 O₃ 小时平均体积分数的峰谷值分别出现在 15:00 和 06:00, 而高山站分别出现在 20:00 和 10:00, 分别比城市站滞后了约 5 h; 此外城市站的 O₃ 日振幅明显大于高山站. 就城市站而言, 相较日照时数、降水量和总云量, 气温对 O₃ 体积分数的影响更为显著; 白天的 NO₂ 体积分数直接影响 O₃ 的日振幅大小, 尽管太原站 O₃ 的光化学生成潜力也较高, 由于被高体积分数的 NO 滴定消耗, O₃ 体积分数为城市站中最低; 各城市站高体积分数的 O₃ 对应低体积分数的 NO_x, 低 NO_x 以 NO₂ 为主, 高 NO_x 的贡献则主要来自 NO, 在较高 NO_x 体积分数时, O₃ 基本上完全被消耗. 影响全部站点 O₃ 体积分数升高的地面风主要来自东南、南和西南方向, 特定的风速条件将导致站点 O₃ 体积分数增加. 站点地理位置不同会引起大气污染物输送作用的差异, 而来自华北平原和汾渭平原高浓度 O₃ 的水平输送很可能是造成山西各站点 O₃ 体积分数升高的共同原因.

关键词: O₃ 体积分数; 前体物 NO_x; 城市站; 高山站; 气团输送

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0655-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202303009

Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network

LI Ying¹, WANG Shu-min¹, PEI Kun-ning¹, YAN Shi-ming^{1*}, SUN Hong-ping^{2*}, ZHANG Feng-sheng¹, GAO Xing-ai¹

(1. Shanxi Branch of Monitoring and Assessment Center for GHGs & Carbon Neutrality, China Meteorological Administration, Shanxi Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Weather Modification and Lightning Protection Technical Center, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on the continuous data of O₃, NO, NO₂, and NO_x and the meteorological data from March 2019 to February 2020 at six atmospheric composition observation stations in Shanxi Province, the characteristics and influence factors of O₃ volume fractions were studied using statistical analysis and backward trajectory analysis. The results showed that O₃ volume fractions were generally higher from April to September and lower from October to the following March. During the study period, O₃ pollution represented by $\varphi(\text{MDA8O}_3)$, i. e., the maximum daily 8-h average of O₃ volume fractions, was the most serious at the Jincheng and Linfen stations in the south of Shanxi, followed by that in the Wutaishan, Shuozhou, and Datong stations in the north, with the least pollution occurring at the Taiyuan station in the middle. There were differences between the urban and alpine stations, although their seasonal O₃ volume fractions were both summer > spring > autumn > winter. O₃ volume fractions at the urban station were usually lower than those at the alpine station; O₃ at the urban station might have been influenced by photochemical reactions with precursor NO_x; however, this was not the main source of high O₃ at the alpine station. The peak and valley values appeared at 15:00 and 06:00, respectively, at the urban station, whereas they appeared at 20:00 and 10:00, respectively, at the alpine station, representing diametrically opposite diurnal variation patterns. Further, the daily amplitude of O₃ at the urban station was much larger than that at the alpine station. For urban stations specifically, temperature was the most important meteorological factor affecting O₃ volume fraction, compared with sunlight hours, precipitation, and total cloud cover. The NO₂ volume fraction in the daytime affected the daily amplitude of O₃; although the photochemical generation potential of O₃ at the Taiyuan station was good, the O₃ volume fractions were the lowest among urban stations due to strong NO titration. The higher O₃ corresponded to lower NO_x in which NO₂ was dominant, and the higher NO_x was largely composed of NO, under which conditions O₃ would be depleted completely. The surface wind that affected O₃ volume fractions of all stations primarily came from the southeast, south, and southwest, and specific wind speed led to the increase in O₃ volume fraction. The geographical situation of the station would cause the difference in the transport of atmospheric pollutants, whereas the horizontal transmissions of high O₃ from the North China Plain and Fenwei Plain were likely to be the common reason for the increase in O₃ volume fraction in Shanxi.

Key words: O₃ volume fraction; precursor NO_x; urban station; alpine station; air mass transmission

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-05-11

基金项目: 山西省基础研究计划青年科学基金项目(20210302124617, 202203021212112); 山西省气象局项目(SXKMSDW20217114)

作者简介: 李莹(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域大气污染, E-mail: huangongly@163.com

* 通信作者, E-mail: qksysm@126.com; fengdichenshp@126.com

臭氧(O₃)是地球大气的重要微量成分之一,是一种重要的氧化剂,也是对流层中其它重要氧化剂(如·OH和NO₃)的主要前体物^[1].近地层大气中高浓度O₃对人类健康、植被生态系统等构成较大威胁^[2,3].近年来,随着我国社会经济的高速发展、城市化进程的加快以及机动车保有量的激增,以O₃为特征污染物的大气光化学污染已成为我国城市区域越来越突出的大气环境问题,受到政府、科学界和普通民众的广泛关注^[4-7].

对流层O₃污染是局地光化学过程和区域输送共同作用的结果^[8].有研究表明^[9-14],前体物排放处于高位及高反应活性前体物的化学转化是O₃污染形成的主要内在原因,环境因子及气候条件是关键外在因子,三维立体传输(平流层输入、垂直混合及水平传输)是重要影响因素^[15].Wei等^[16]研究表明2015年以来我国夏季O₃浓度及O₃污染出现概率明显加重,尤其在华北平原和主要大气污染传输带(即“2+26”城市).Wang等^[17]对武汉城市圈区域O₃生成机制的研究表明,(NO+HO₂)过程主导着O₃的光化学生成,(NO₂+OH)过程主导O₃光化学损耗,夜间(O₃+烯烃)对于O₃的汇作用不可忽视.Shen等^[18]研究指出,在珠三角地区,副热带高压控制下日照强、云量少和风力弱等气象条件有利于光化学反应生成较高浓度的O₃而不利于其扩散,O₃平均值较高.谢放尖等^[19]研究表明南京市O₃污染主要集中在春夏季,且O₃污染的区域输送贡献明显.Wang等^[20]进一步研究发现来自东南方向的O₃传输是南京夏季夜间O₃上升的主要原因.Zeng等^[21]研究发现生物质燃烧、污染物输送和平流层入侵对北京上空对流层O₃的贡献显著.Liao等^[22]采用聚类算法解析北京地面O₃日变化的主要型态、时变特征及其气象和化学影响机制,指出北京地面O₃整日偏高型的形成有赖于夜间低空急流输送与日间前体物浓度增长两方面条件的共同作用.

作为我国中部地区重要的省份,山西省位于华北平原西面的黄土高原上,地形较为复杂,东倚太行山,西傍吕梁山,高原内部起伏不平,河谷纵横,由于地形不同导致了O₃污染气象条件存在明显差异.近年来,O₃已成为继PM_{2.5}之后山西超标最严重的大气污染物^[23],山西O₃污染显著加剧.然而,与京津冀、长三角和珠三角地区相比而言,缺乏对该区域O₃浓度分布特征及其影响因素等相关研究.山西省大气成分观测网涵盖城市站点和高山站点,分别代表受人为活动影响较大和相对清洁可作为背景的站点,为分析山西典型区域的O₃浓度分布差异以及不同区域间污染输送相互作用提供了支撑.本研究利用2019年3月至2020年2月山西省大气成分观测网的6

个地面观测站点观测的反应性气体O₃、NO、NO₂和NO_x体积分数数据以及同期的气象资料,从O₃的季、日变化特征、前体物NO_x与气象条件以及气团输送的影响等方面进行分析,以期对山西省空气质量预报提供参考并对大气O₃污染防治管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 站点概述

山西省6个大气成分观测站从北到南依次为大同站(DT)、朔州站(SZ)、五台山站(WTS)、太原站(TY)、临汾站(LF)和晋城站(JC),基本实现了山西全域网络覆盖(图1),6站均依托国家气象站建设,站址周围探测环境良好,且均已纳入国家温室气体观测网首批名录.大同站(113.41°E,40.08°N,海拔1052.6m)和朔州站(112.43°E,39.37°N,海拔1114.8m)均位于山西省北部,分别地处大同盆地的中心和西南端,均属温带大陆性季风气候,大同站处在大同市城乡结合地区,周围有农田和林地环绕,东、西两侧分别邻近铁路和高速公路;朔州站位于朔州市主城区北部,四周分布有学校、企事业单位、居民住宅及多条城区交通主干道.太原站(112.54°E,37.75°N,海拔776.2m)位于省会太原市南城区,地处太原盆地北端,也属温带大陆性气候,下垫面主要为水泥、沥青和少量的植被覆盖,站点临近城市快速路和高速口,受交通车辆影响明显.临汾站(111.49°E,36.06°N,海拔449.5m)和晋城站(112.85°E,35.53°N,海拔794.0m)分别位于山西省的西南部和东南部,前者地处临汾盆地,属半干旱、半湿润季风气候,站点建在临汾市主城区西南部,人口较密集,紧邻近郊和外环快速路等交通主干道;后者地处晋城盆地,属暖温带半湿润大陆性季风气候,站点建于晋城市城乡结合区,附近分布有学校、公园、少量住宅及农田,除汽车尾气和居民生活排放外无明显污染源.可见,以上5站观测结果主要代表了山西不同城市地区大气成分浓度水平,属于城市站点.五台山站(113.52°E,38.95°N,海拔2208.3m)位于山西省东北部,属暖温带半干旱型森林草原气候的北端,因地处偏远,海拔较高,周边没有大的人为污染源,四周森林草地覆盖良好,已纳入中国气象局野外科学试验基地,属于高山站点.

1.2 数据资料

6站采用的观测仪器分别为美国热电环境设备有限公司生产的49i紫外光度法O₃分析仪,检测下限1.0×10⁻⁹(体积分数,下同),零漂<1.0×10⁻⁹(24h),跨漂<±1%(月);42i化学发光NO-NO₂-NO_x分析仪,检测下限0.40×10⁻⁹,零漂<0.40×10⁻⁹(24h),跨漂<

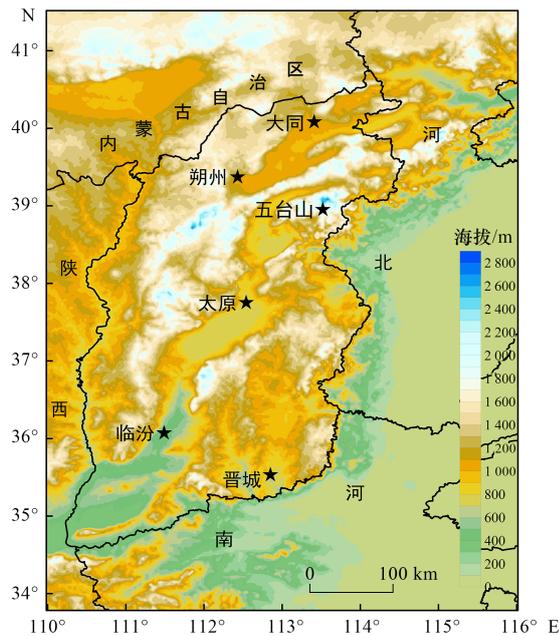


图1 山西省6个大气成分观测站地理位置示意

Fig. 1 Location of six observation stations in Shanxi Province

$\pm 1\%$ (满度值)。所有仪器每日 24 h 连续采样, 数据记录频率为 5 min。选取 6 站 2019 年 3 月至 2020 年 2 月 O₃、NO、NO₂ 和 NO_x 在线观测数据, 利用仪器的日常零跨检查与定期多点校准等结果对原始数据进行质量控制和订正, 各站均保留 85% 以上的有效数据, 在此基础上计算小时均值和日均值等。选取 6 站同期地面气象观测资料, 包括逐小时气温、风速、风向、辐射以及日降水量、日日照时数等, 用于后向轨迹

模式计算的气象场资料(2019年3月至2020年2月)为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)数据, 每日4个时次, 即 00:00、06:00、12:00 和 18:00, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。结合后向轨迹进行 O₃ 污染输送分析的气体资料, 采用将 O₃ 观测数据的小时时间序列减去相应的 30 d 滑动平均后时间序列的方法, 取得与季节变化基本不相关的气体体积分数差值 $[\Delta\varphi(\text{O}_3)]$ 进行研究。此外, 选取 2019 年 3 ~ 9 月中国高分辨率高质量近地表 O₃ 污染物数据集 (ChinaHighO₃)^[16] 进行地面 MDA8O₃ 浓度空间分布图的绘制, 并与研究结果作比对。

2 结果与讨论

2.1 O₃ 体积分数水平与污染状况

图 2 给出了 6 站 O₃ 日最大 8 h 体积分数滑动平均值 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 的逐日变化。可以看出, 研究时段内 6 站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 均表现出明显的日际变化, O₃ 体积分数一般在 4 ~ 9 月较高, 10 月至翌年 3 月较低。晋北的大同和朔州 2 站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 年变化趋势接近, 且朔州 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 整体上略高于大同, 晋东北的五台山站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 还在 3 月出现了高值。晋中部的太原站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 整年保持较低水平, 晋南部的临汾和晋城 2 站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 都表现出夏半年高于冬半年的特点, 但冬半年临汾 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 明显低于晋城, 与晋北部大同和朔州 2 站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 变化相近的特征不同。

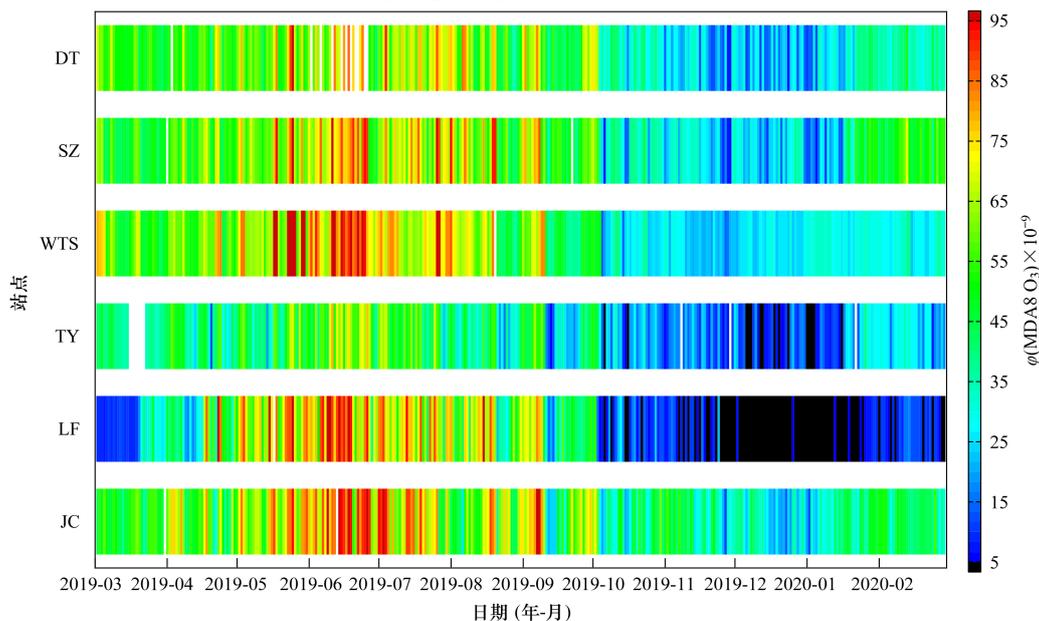


图2 研究期内山西6站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 逐日变化

Fig. 2 Daily variations in $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ at six stations during the study period

图 3 给出了研究时段内山西 6 站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标天数及第 90 百分位数。根据《环境空气质量标准》

(GB 3095-2012) 和《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633-2012), 2019 年除太原站仅在 6 月

出现了 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标,其余站均在5~9月发生 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标,另外大同、临汾和晋城3站在4月也发生超标,而五台山站更是从3月起就出现了超标.山西6站2019年 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标天数从高到低依次为:晋城(60 d)、临汾(55 d)、五台山(54 d)、朔州(40 d)、大同(26 d)和太原(2 d),可以看出,晋南部的晋城和临汾站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标最严重,其次是晋北部的五台山、朔州和大同站,晋中部的太原站全年仅有2 d发生超标, O_3 污染程度最轻.从 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标发生的月份来看, O_3 污染月份主要分布在5~9月,6站5~9月 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标率均占全年超标率的88%以上,其间又以6月污染最严重,如太原站6月 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标率占全年100%,其余5站6月 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标率分别占全年的23%~39%,以上结论与《山西省大气环境气象公报(2019年)》^[24]基本一致.由于朔州、五台山、临汾和晋城这4站的 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 第90百分位数均超出二级标准限值 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (折合等于 75×10^{-9}),因此这4站2019年 O_3 超标.

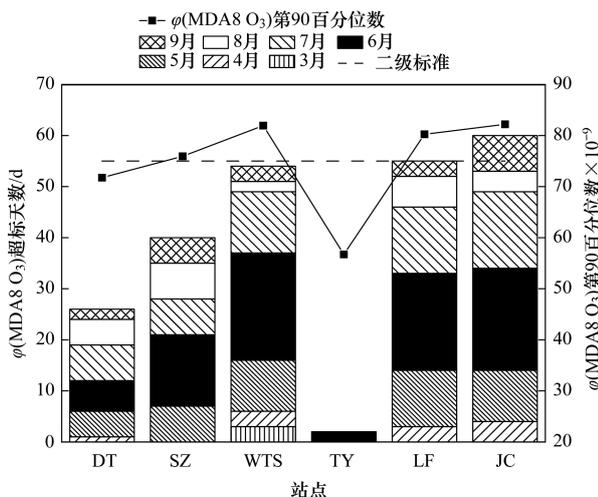


图3 研究期内山西6站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标天数及第90百分位数

Fig. 3 Days exceeding the standard and the 90th percentile of $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ over Shanxi during the study period

2.2 O_3 体积分数的季节和日变化

2.2.1 季节变化特征分析

根据2.1节的结论,为更好地分析和认识山西6站 O_3 体积分数变化特征,在后续的研究中,重新对站点顺序作出调整,首先按照站点类型将6站分为城市站和高山站(5+1),然后按照城市站 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标程度,由高到低依次为晋南部的晋城和临汾、晋北部的朔州和大同以及晋中部的太原.

图4给出了6站气态污染物小时体积分数的月平均值变化及与主要气象要素的关系.从中可知,5个城市站 O_3 月均值均呈单峰型,峰值出现在6月,夏

季6月太阳辐射强烈、气温较高,有利于 O_3 的光化学生成.城市站 O_3 体积分数都表现为:夏季>春季>秋季>冬季,其中临汾站夏季 O_3 均值高达冬季的14.3倍,其他站夏季 O_3 均值大约是冬季的2.0~3.1倍.从图4还可看出,城市站 O_3 及其前体物 NO 、 NO_2 的月均值基本呈反相位变化,夏季光照充分的情况下易发生光化学反应,利于 NO 转化为 NO_2 ,促进 O_3 的生成;冬季大气辐射减弱, O_3 的光化学反应速率降低,此时燃煤采暖排放和交通源叠加造成 NO_x 排放显著增大,且较低的大气混合层厚度不利于污染物扩散,导致 NO 和 NO_2 体积分数相应出现高值. NO_2 是 NO_x 中最为稳定的物种之一,在强太阳辐射条件及VOCs的参与下,多余 NO_2 的生成光解是城市高浓度 O_3 的唯一化学来源^[25].由图4可知,晋城、临汾、朔州和大同4站3~9月 NO_2 明显高于 NO ,这大体上也与 O_3 的高值月份吻合;太原站 NO 体积分数明显高于其它城市站,反映出太原作为省会城市规模较大、交通更为繁忙的特点,6~8月 NO 多向 NO_2 转化,同样导致 O_3 峰值出现.与城市站相比,五台山站 O_3 也表现为:夏季>春季>秋季>冬季,但全年前体物 NO 、 NO_2 体积分数都很低,月均值基本在 5×10^{-9} 以下,说明有 NO_x 参与的光化学反应可能不是五台山站 O_3 的主要来源,这一现象与青海瓦里关^[26,27]和黄山光明顶^[28]等高山站点情况类似.

关于气象要素对 O_3 浓度的影响,一般认为 O_3 污染多发于晴空日,其浓度与气温、太阳辐射和日照时数在统计学上呈正相关,与降水和相对湿度呈负相关^[29-32].如图4所示,城市站 O_3 季节分布与气温季节分布相一致,全省气温南高北低,因而南部的晋城和临汾站更容易出现 O_3 污染.日照时数能够反映太阳辐射强度,而降水量和总云量都对日照时数有影响,晋城和临汾这2站的降水量和总云量都较高,造成日照时数距平多负值,但 O_3 污染相对严重,说明气温对城市站 O_3 体积分数的影响较其它气象因素显著.太原站的气温和日照时数均介于南北之间,但 O_3 体积分数最低、污染最轻,很可能与本站 O_3 被大量的 NO 滴定消耗有关^[33].相比城市站点,五台山站不仅前体物 NO_x 体积分数很低,同时气温和日照时数也较低,不利于 O_3 的局地光化学生成,然而该站 O_3 体积分数全年保持高位,可能与高山地区 O_3 背景浓度水平较高以及 O_3 的输送有关.

2.2.2 逐月日变化特征分析

图5给出了研究时段内6站 O_3 体积分数逐月日变化.由于 O_3 是光化学反应的产物,一般情况下,其体积分数会随着日出而逐渐变大,到中午太阳辐射最强的时候其体积分数也达到最高值,随后在夜间

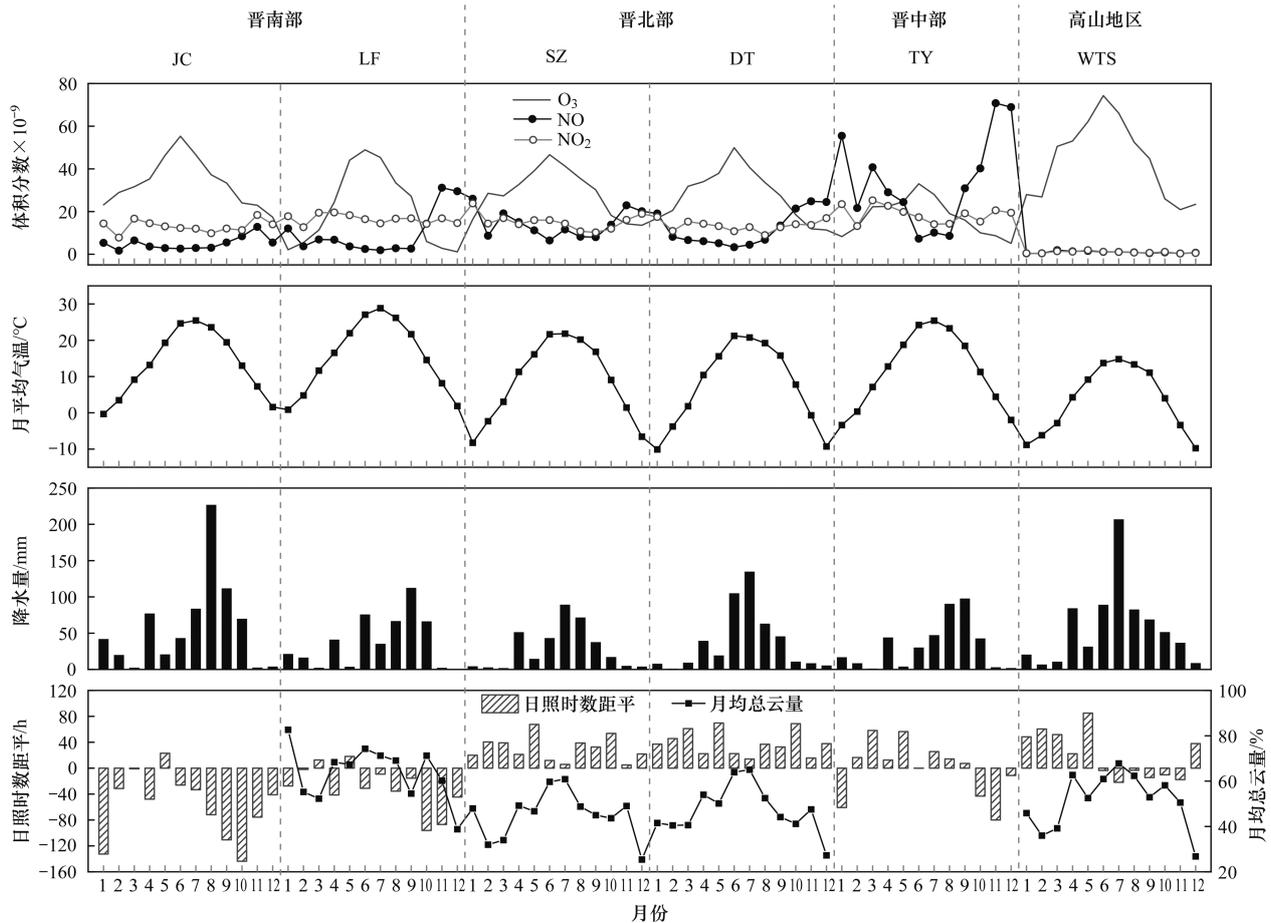


图4 山西6站 O₃、NO 和 NO₂ 的季节分布及与气象要素的关系

Fig. 4 Seasonal distribution of O₃, NO, and NO₂ and their relationship with meteorological factors at six stations

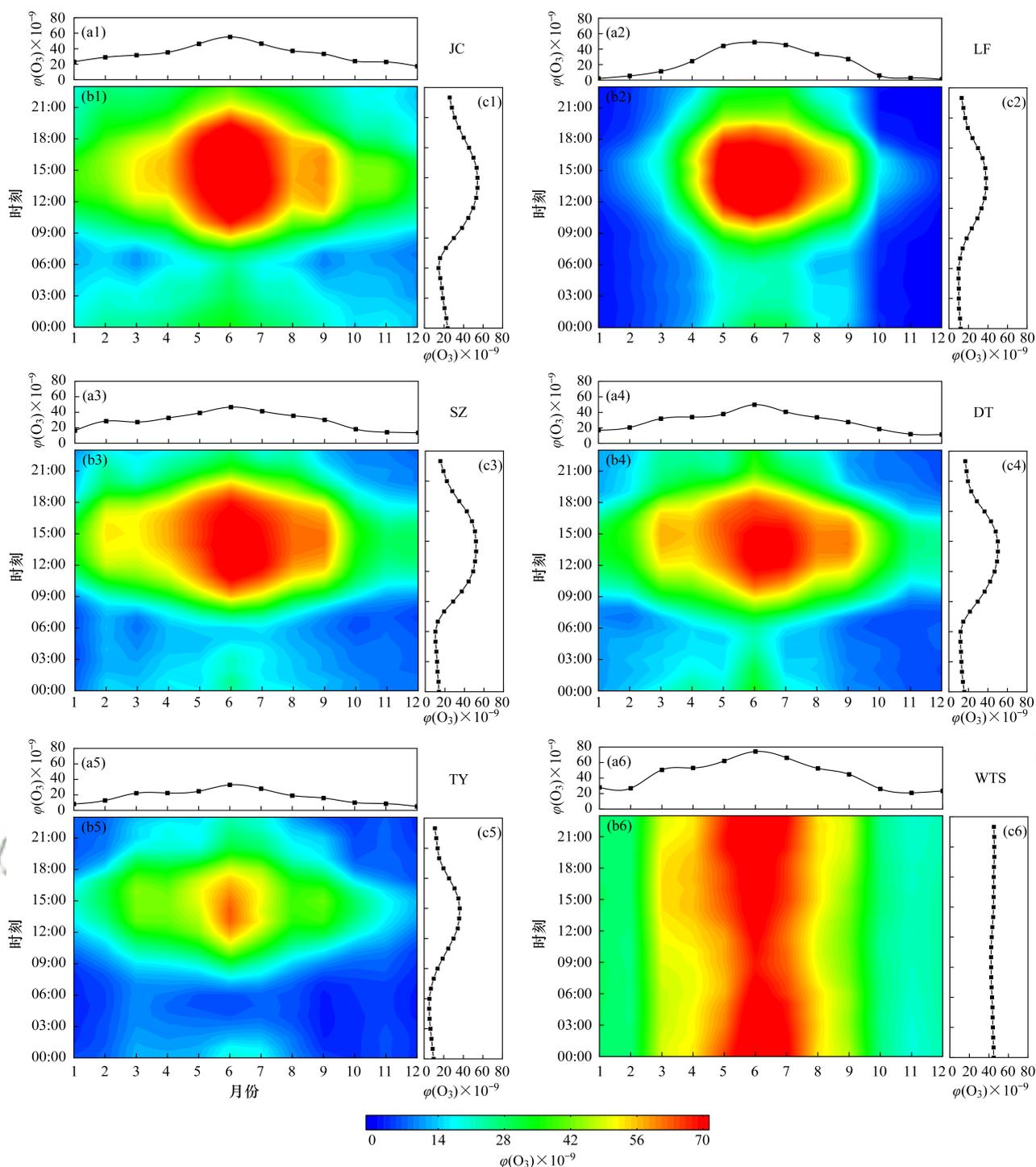
由于与NO发生滴定反应不断被消耗而逐渐降低. 从图5可以看出, 5个城市站 O₃ 小时体积分数日变化均呈单峰型分布, 15:00左右达到峰值, 06:00左右降至谷值, 与我国多数城市的 O₃ 日变化特征一致. 对比可知, 晋城站 O₃ 日变化谱型较对称, 5~8月一天中 O₃ 小时体积分数在 10:00~18:00 均处于较高水平; 临汾站 O₃ 小时体积分数高值同样集中在 5~8月一日中午前后, 不同于晋城的是, 临汾冬半年 O₃ 小时体积分数显著降低. 北部的朔州和大同站 O₃ 日变化谱型十分相似, 太原站仅在 6月 12:00~18:00 出现了较明显的 O₃ 高值. 五台山站 O₃ 日变化谱型与城市站截然相反, O₃ 小时平均体积分数在 20:00 出现最高值, 在 10:00 出现最小值, 4~9月尤为明显, 且日振幅远小于城市站. Yan 等^[34] 利用后向轨迹模型对该地区的研究发现, 这是由于午后谷风的上升气流将华北平原和汾渭平原的高浓度 O₃ 源源不断地输送到站点, 再加上站点 NO 浓度很低, 输送来的 O₃ 不容易被滴定消耗, 因此不断积累直至在晚间出现峰值, 夜间风向逐渐转为山风, 山风带来的下沉气流又将站点的高浓度 O₃ 吹散所致. 五台山站 O₃ 日变化的峰、谷值时间恰好比城市站滞后约 5 h, 反映出城市区域和高山地区

之间 O₃ 污染传输的时效性.

2.3 O₃ 与 NO_x 的相关性

对流层 O₃ 与 NO 和 NO₂ 的相互关系可简要概括为: 地面活动排放的 NO_x 进入对流层大气中, 在 $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ 的太阳光照射下, 发生光致离解生成原子氧和 NO, 原子氧和 O₂ 结合生成 O₃, 同时大气中的 NMHC 和 CO 等还原态物质迅速消耗 NO, O₃ 与 NO 和 NO₂ 处于动态平衡^[35]. 要了解 NO_x 对 O₃ 体积分数变化的影响, 有必要分析研究 O₃ 与其前体物 NO、NO₂ 之间的相关关系.

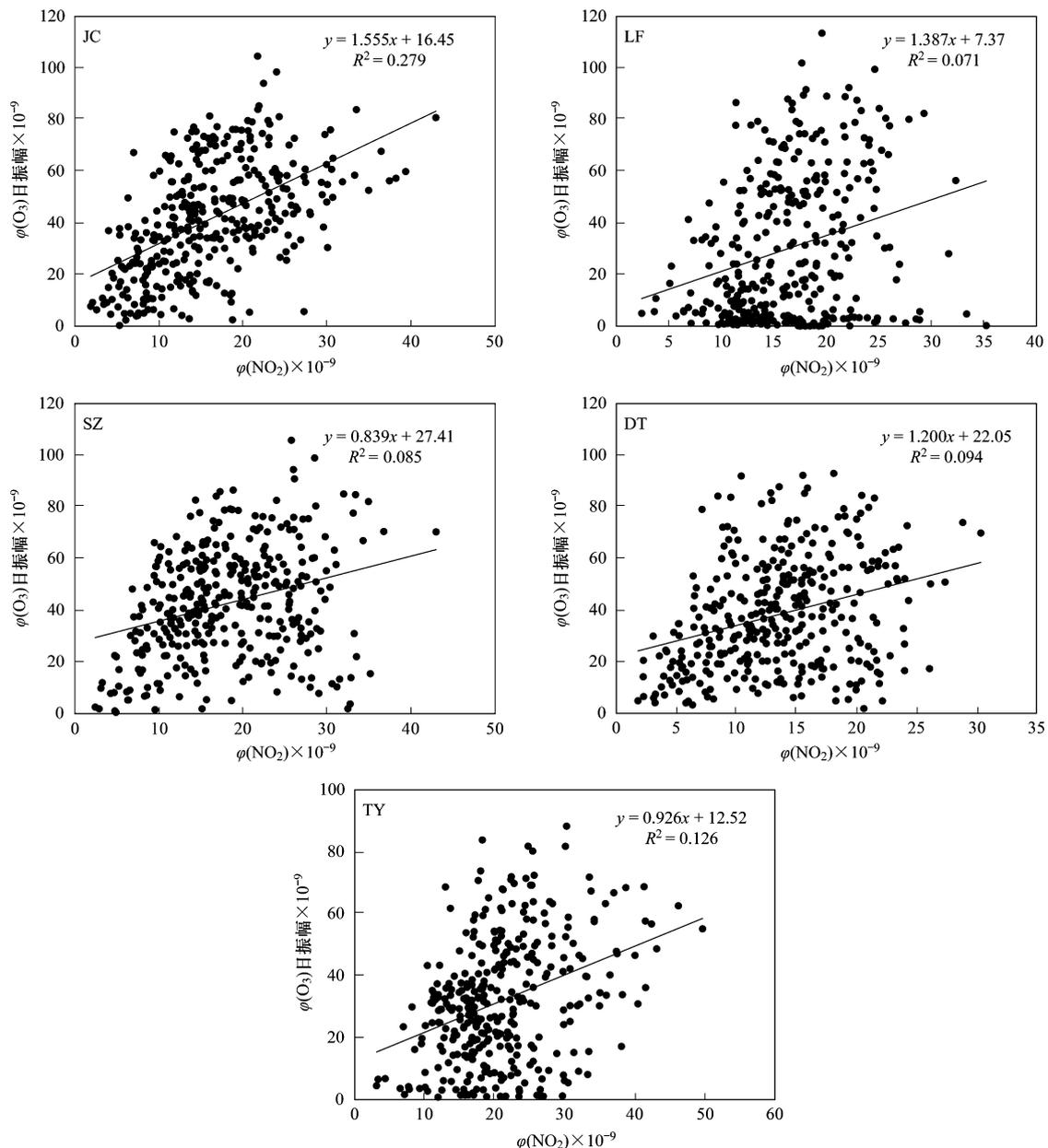
由 2.2 节分析可知, 光化学反应可能不是引起五台山站高体积分数 O₃ 的主要来源, 因此本研究仅对 5 个城市站 O₃ 及其前体物体积分数进行讨论. 图 6 为研究时段内各城市站 O₃ 日振幅与上午 NO₂ 体积分数平均值的散点图及线性拟合, 这里 O₃ 日振幅为 1 d 中 15:00 和 06:00 的 O₃ 小时体积分数差, 上午 NO₂ 体积分数平均值为 06:00~10:00 的 NO₂ 体积分数小时平均值. 各站 O₃ 日振幅与上午 NO₂ 体积分数平均值都表现出良好的正线性相关, 二者的 Pearson 相关系数均通过 $P < 0.001$ 的显著性检验. 就线性拟合的斜率而言, 斜率越大说明 NO₂ 对 O₃ 光化学生成的贡献越

图5 山西6站O₃逐月日变化Fig. 5 Diurnal variation in O₃ at six stations

大,晋城和临汾站的斜率高达1.3以上,其次是大同站(1.2),太原站和朔州站略低分别为0.926和0.839,可见太原站O₃的光化学生成潜力与其他站相近,但观测到的O₃体积分数却很低,从图4可知太原站NO体积分数显著高于其他站,由此进一步印证了太原O₃是被高体积分数NO滴定大量消耗的推断。

图7为晋城站四季白天时段NO、NO₂、O₃与NO_x的关系,根据O₃体积分数日变化特点,白昼定义为每

日的08:00~19:00,合计12h。由图7可知,晋城站夏季高O₃体积分数对应于低NO_x体积分数,NO_x以NO₂为主,NO₂与NO变化趋势相近;春、秋和冬季的NO、NO₂和O₃体积分数随NO_x的变化曲线规律相似,低NO_x区以NO₂为主,随着NO_x体积分数增大,NO₂体积分数几乎不变,NO_x增长的贡献主要来自于NO,而在较高NO_x体积分数时,O₃基本上完全被消耗。临汾、朔州、大同和太原的NO、NO₂、O₃与NO_x关系与晋城

图6 山西5个城市站 O₃ 日振幅与 NO₂ 体积分数的散点图及线性拟合Fig. 6 Scatter plot and linear fitting between O₃ daily amplitude and NO₂ volume fraction at urban stations

站相似(图略),也都与北京^[36]、天津^[37]和河北廊坊^[38]等地的研究结果一致.分析发现山西各城市站的 NO 与 NO₂ 的分界点 $\varphi(\text{NO}_x)$ 约为 $50 \times 10^{-9} \sim 70 \times 10^{-9}$, O₃ 与 NO 的分界点 $\varphi(\text{NO}_x)$ 多在 $30 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$, O₃ 与 NO₂ 的分界点 $\varphi(\text{NO}_x)$ 一般在 $15 \times 10^{-9} \sim 30 \times 10^{-9}$, 分别低于河北廊坊 NO 与 NO₂、O₃ 与 NO 以及 O₃ 与 NO₂ 的分界点 $\varphi(\text{NO}_x)$ (99.6×10^{-9} 、 44.0×10^{-9} 和 33.5×10^{-9}), 体现了华北地区的高原与平原区域 O₃ 及其前体物体积分数分布的差异.以上分界点 NO_x 体积分数也为进一步研究山西城市地区 O₃-NO_x 敏感性以及合理管控 O₃ 前体物排放提供了依据.

2.4 地面风对近地面 O₃ 体积分数的影响

O₃ 体积分数的变化与风场和不同地区的下垫面

特征如地形起伏、地表粗糙度等密切相关,不同地形下的近地面风速和风向的变化对 O₃ 的影响十分复杂.图8为山西各站2019年3~9月 O₃ 小时体积分数风向风速玫瑰图.从中可知,晋城站在偏南风向下的 O₃ 体积分数明显高于偏北风向,受夏季季风影响 SE-S-SW 扇区风频较高为 43.26%,且当小时风速为 $4 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,易出现 O₃ 体积分数高值.临汾站在东、南和西风向下,受上游污染源的影响容易造成本地 O₃ 体积分数的增加,且南风 and 西风出现频率均很高;临汾局地风速小于晋城,当风速约 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 O₃ 体积分数较高.山西北部的朔州和大同2站,都处于大同盆地,地形相似导致 O₃ 污染的气象条件也十分相近,两地主导风向均为西北风,但引起 O₃ 体积分数升高的

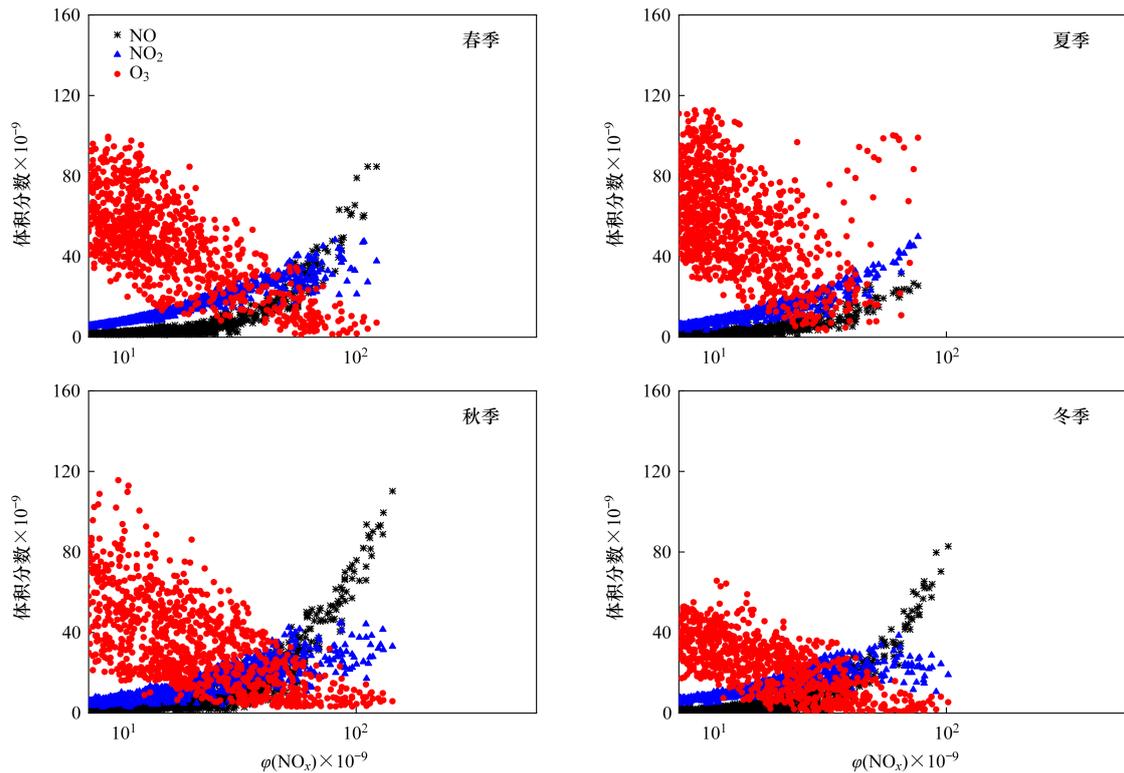


图7 晋城站 NO、NO₂和 O₃体积分数对 NO_x的关系

Fig. 7 Relationship between NO, NO₂, O₃, and NO_x volume fractions at Jincheng station

风向均来自 SSE-SSW-WSW 扇区,且朔州在 $4 \sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速时出现 O₃ 体积分数高值,大同在 $6 \sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下产生高体积分数 O₃. 太原站 O₃ 体积分数仅在 SSW 风向、风速约 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时出现明显抬升,SSW 风向出现频率为 9.87% 仅次于 N 风. 五台山站最多风向依次为 WSW (22.35%)、E (17.21%) 和 W (14.99%),以上风向下的 O₃ 体积分数分布均匀;因站点海拔较高,西北和西南风向小时风速可达 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,对五台山地区 O₃ 污染物起到一定的清除作用,而 ESE 风向频率虽低,但当风速为 $9 \sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时水平输送作用会使得 O₃ 体积分数增加,相应的小时 $\varphi(\text{O}_3)$ 平均值高达 103.2×10^{-9} . 可见,影响各站 O₃ 体积分数升高的地面风主要来自东南、南和西南方向,可能与这些方位城市群 O₃ 的区域输送有关,且在特定风速条件下 O₃ 污染物的输送效率提高,导致站点 O₃ 体积分数增加.

2.5 气团输送对 O₃ 体积分数的影响

为分析气团输送对城市站和高山站 O₃ 影响的区别和联系,本节选取晋城站和五台山站为代表站点进行研究. 图 9 给出两站 2019 年 3 ~ 9 月的 72 h 后向轨迹聚类结果以及每类轨迹对应的 $\Delta\varphi(\text{O}_3)$ 平均值,表 1 列出两站聚类轨迹在各月份出现的频次、占轨迹总数的百分比和轨迹平均移动高度等.

从图 9 和表 1 可知,晋城站的后向轨迹聚类分为

5 簇,轨迹 1 源自华北平原中南部的山东、江苏、安徽和河南等地,移动高度低、速度慢;轨迹 3 来自站点东北方向,沿途主要经过京津冀地区,移动高度较高、速度较快. 这两类轨迹对应的 $\Delta\varphi(\text{O}_3)$ 平均值均为正值 (1.89×10^{-9} 和 1.20×10^{-9}),有研究表明^[39],在排除了污染物浓度季节变化影响后,各轨迹对应的浓度水平主要反映排放源空间分布和轨迹移动特性对污染物浓度的影响,因此推断轨迹 1 和 3 可能将源地更高体积分数的 O₃ 向晋城站输送. 轨迹 2 源自湖北地区,途经河南到达站点,移动高度最低、速度最慢;轨迹 4 和 5 均来自西北方向,途经西北地区,移动高度和速度都很高. 这三类轨迹的 $\Delta\varphi(\text{O}_3)$ 平均值呈负值,说明轨迹途经区域的 O₃ 体积分数相对本站偏低. 从出现比例来看,晋城站轨迹 2 的占比最低且主要出现在 7 月,其他四类轨迹占比相当,轨迹 1 和 3 主要集中在 6 ~ 9 月,轨迹 4 和 5 主要集中在 3 ~ 5 月. 五台山站的后向轨迹聚类也分为 5 簇,轨迹 1 和 2 分别源自京津冀和汾渭平原地区,轨迹高度低且移速慢,气团到达五台山站前都有一个先下沉后上升的移动路径,很容易裹挟近地面高浓度污染物并输送至站点,对应较高的 $\Delta\varphi(\text{O}_3)$ 平均值,分别为 4.41×10^{-9} 和 3.95×10^{-9} ; 轨迹 3、4 和 5 均来自高纬度地区,轨迹高度高、速度快,其中,西北来向的轨迹 5 对应 $\Delta\varphi(\text{O}_3)$ 平均值为 0.09×10^{-9} ,而正北来向的轨迹 3 和 4 对应的 $\Delta\varphi(\text{O}_3)$ 平

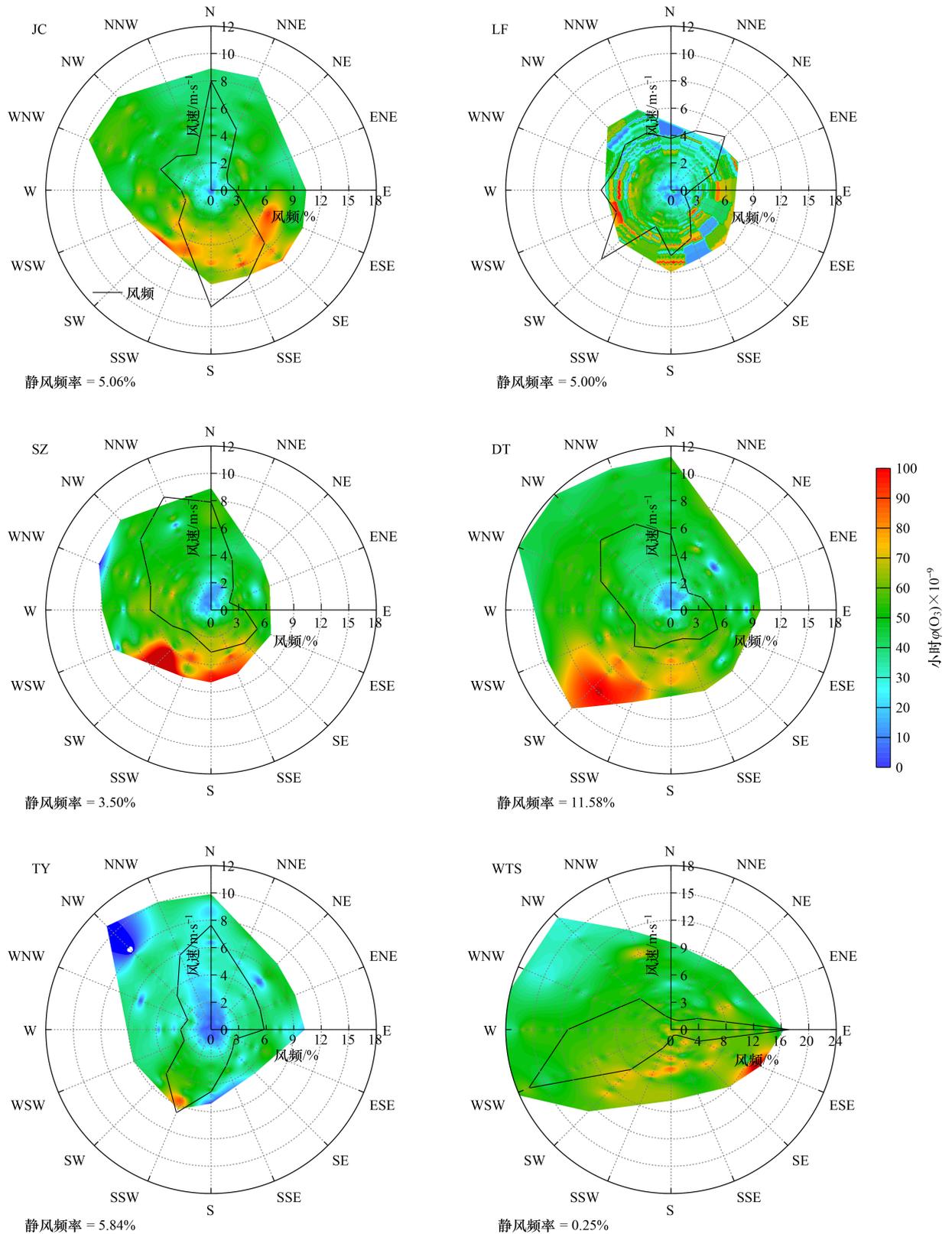
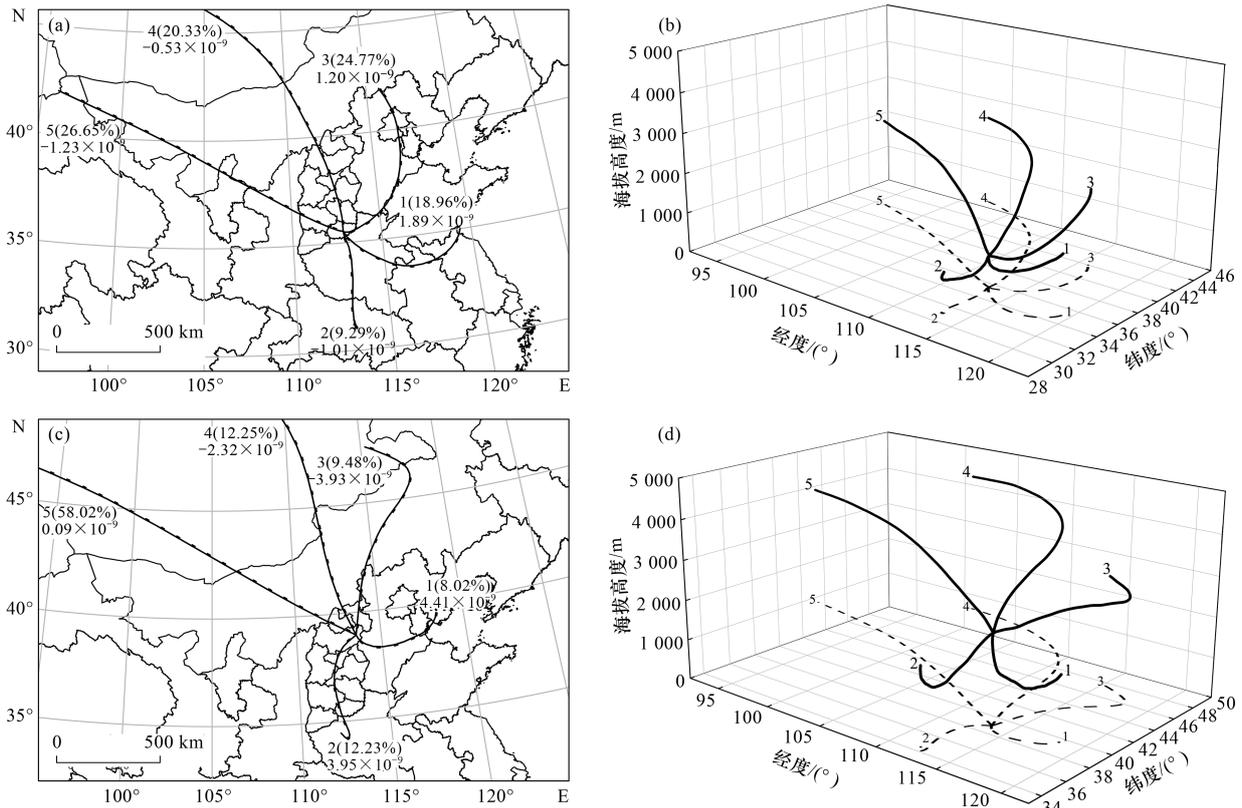


图8 山西6站2019年3~9月O₃小时体积分数风向风速玫瑰图

Fig. 8 Distribution of O₃ volume fraction in different wind conditions at six stations from March to September in 2019

均值为负值,表明北向气流较西北气流更清洁.五台山站的轨迹1、2和3主要出现在6~9月,轨迹4各月出现比例较均匀,轨迹5占比最高达58.02%,主要出现在3~5月.通过对比可知,五台山站与晋城站经度相近,纬度相差约3.4°,两站后向轨迹聚类的风向相

似,但因五台山站纬度更高,其西北气流占比明显大于晋城站,而东南气流占比却不及晋城站.与此同时,西北气流有利于降低晋城站的O₃体积分数,起到污染清除的作用,却能引起五台山站O₃体积分数的轻微抬升;而来自人口相对密集和经济发达地区的东向



(a)和(b)分别为晋城站聚类轨迹的水平与垂直分布,(c)和(d)分别为五台山站聚类轨迹的水平与垂直分布,
(a)和(c)中的百分数表示轨迹占比,体积分数表示与各类轨迹对应的 $\Delta\varphi(O_3)$ 平均值

图9 晋城站和五台山站聚类轨迹分布

Fig. 9 Distribution map of cluster trajectories at Jincheng and Wutaishan stations

表1 晋城站和五台山站各簇轨迹逐月统计结果

Table 1 Monthly statistical results of each cluster trajectory at Jincheng and Wutaishan stations

站点	轨迹	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合计	比例/%	轨迹高度/m
晋城	1	55	78	79	201	171	143	247	974	18.96	986
	2	40	39	65	88	200	39	6	477	9.29	713
	3	70	186	97	198	145	274	302	1 272	24.77	1 236
	4	171	140	212	70	69	244	138	1 044	20.33	1 782
	5	408	277	291	163	159	44	27	1 369	26.65	1 838
五台山	1	0	15	7	77	118	48	147	412	8.02	1 469
	2	35	63	40	151	167	105	67	628	12.23	1 549
	3	29	0	7	64	98	110	179	487	9.48	2 486
	4	84	36	137	123	59	109	81	629	12.25	3 311
	5	596	606	553	305	302	372	246	2 980	58.02	2 881

气流,对两站 O_3 体积分数基本都是正贡献,由此反映出站点地理位置不同引起的大气污染物输送作用的差异.

图10给出2019年3~9月山西及周边区域地面MDA8 O_3 浓度平均分布.从中可知,研究时段内 O_3 浓度高值区主要集中在华北平原中部、汾渭平原东部以及山西省东南部,其次西北地区中北部、山西中北部以及黄淮地区的 O_3 浓度也较高,而山西以南和西南的大部分地区 O_3 浓度普遍较低.结合图9和图10可以看出,以上2个代表性站点的 O_3

后向轨迹聚类及其对应的 $\Delta\varphi(O_3)$ 平均值高低,恰与同期山西及周边区域地面MDA8 O_3 浓度分布相吻合,较好地验证了上述气团输送对站点 O_3 体积分数抬升或降低的推断,进一步表明来自华北平原和汾渭平原高浓度 O_3 的水平传输很可能是造成山西站点 O_3 体积分数升高的原因之一.因此,对山西大气 O_3 污染的防控不仅要考虑 NO_x 等前体物的削减,还应关注水平传输对当地 O_3 污染的影响,尤其要加强山西与河北、河南及山东等周边地区 O_3 污染的联防联控.

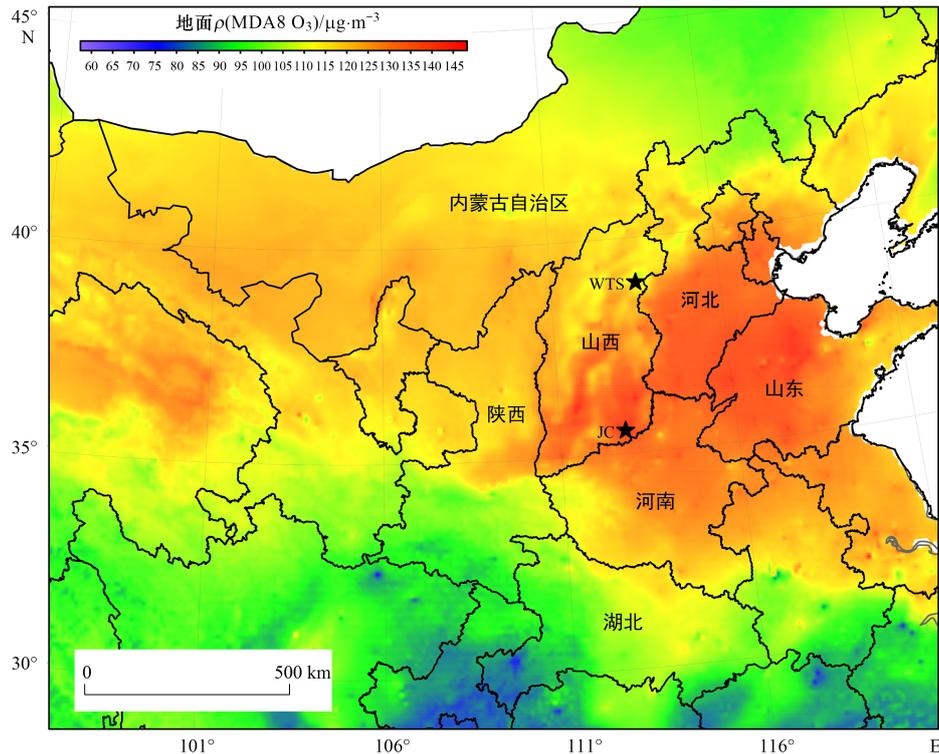


图 10 2019 年 3~9 月山西及周边区域地面 MDA8O₃ 浓度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of surface MDA8O₃ concentration in Shanxi and its surrounding areas from March to September in 2019

3 结论

(1) 山西 6 站由于地理位置、地形和下垫面特征不同, O₃ 体积分数变化有共同特征和地区差别. O₃ 体积分数一般在 4~9 月较高, 10 月至翌年 3 月较低, 研究期内山西南部的晋城和临汾 2 站的 $\varphi(\text{MDA8O}_3)$ 超标最严重, 其次是北部的五台山站、朔州站和大同站, 中部的太原站污染程度较轻.

(2) 城市站和高山站的 O₃ 体积分数都表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 前者 O₃ 的季节变化主要受前体物 NO_x 光化学反应的影响, 而后者 NO_x 并不是高体积分数 O₃ 的主要来源. 气温、日照时数、降水量和总云量也会影响 O₃ 分布, 对于城市站, 气温是最主要的影响因素.

(3) 5 个城市站的 O₃ 小时体积分数平均日变化均呈单峰型, 15:00 左右达到峰值, 06:00 左右降至谷值. 五台山站的 O₃ 日变化谱型与城市站截然相反, 其日变化的峰、谷值时间分别比城市站滞后了约 5 h, 反映了城市区域与高山地区之间 O₃ 污染传输的时效.

(4) 在城市站点, 白天的 NO₂ 体积分数直接影响 O₃ 的日振幅大小, 尽管太原站 O₃ 的光化学生成潜力与其他站相近, 由于被高体积分数的 NO 滴定大量消耗, 该站 O₃ 体积分数为城市站中最低. 各城市站高体

积分数的 O₃ 对应低体积分数的 NO_x, 低 NO_x 以 NO₂ 为主, 高 NO_x 主要来自 NO 的贡献, 在较高 NO_x 体积分数时, O₃ 基本上完全被消耗.

(5) 影响各站 O₃ 体积分数升高的地面风主要来自东南、南和西南方向, 在特定风速条件下 O₃ 污染物的输送效率提高, 导致站点 O₃ 体积分数增加. 站点地理位置不同会引起大气污染物输送作用的差异, 而来自华北平原和汾渭平原高浓度 O₃ 的水平输送很可能是造成山西各站点 O₃ 体积分数升高的共同原因, 山西的大气 O₃ 污染防控应加强区域联合应对.

致谢: 感谢山西省 6 个大气成分站全体工作人员在反应性气体日常观测和设备维护中的辛勤劳动.

参考文献:

- [1] 徐晓斌, 葛宝珠, 林伟立. 臭氧生成效率(OPE)相关研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(8): 845-853.
Xu X B, Ge B Z, Lin W L. Progresses in the research of ozone production efficiency (OPE) [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(8): 845-853.
- [2] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, et al. Ground-level O₃ pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. Environmental Pollution, 2015, 199: 42-48.
- [3] Wang W C, Liang X Z, Dudek M P, et al. Atmospheric ozone as a climate gas [J]. Atmospheric Research, 1995, 37 (1-3): 247-256.
- [4] 马一琳, 张远航. 北京市大气光化学氧化剂污染研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 14-17.
Ma Y L, Zhang Y H. The study on pollution of atmospheric

- photochemical oxidants in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, **13**(1): 14-17.
- [5] Tang X, Wang Z F, Zhu J, *et al.* Sensitivity of ozone to precursor emissions in urban Beijing with a Monte Carlo scheme [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(31): 3833-3842.
- [6] Xu W Y, Lin W L, Xu X B, *et al.* Long-term trends of surface ozone and its influencing factors at the Mt Waliguan GAW station, China-Part 1: overall trends and characteristics [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(10): 6191-6205.
- [7] Zhang Z Y, Zhang X L, Gong D Y, *et al.* Evolution of surface O₃ and PM_{2.5} concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **108**: 67-75.
- [8] 王淑兰, 柴发合. 北京市 O₃ 污染的区域特征分析[J]. *地理科学*, 2002, **22**(3): 360-364.
Wang S L, Chai F H. Provincial characteristics of ozone pollution in Beijing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, **22** (3) : 360-364.
- [9] Bowman F M, Seinfeld J H. Ozone productivity of atmospheric organics [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, **99**(D3): 5309-5324.
- [10] 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演变特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
Wang S, Nie S S, Feng Y P, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of O₃ and NO₂ in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (6) : 2679-2690.
- [11] Wang N, Liu X P, Deng X J, *et al.* Aggravating O₃ pollution due to NO_x emission control in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **677**: 732-744.
- [12] 徐晓斌. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. *应用气象学报*, 2016, **27**(5): 604-619.
Xu X B. Observational study advances of haze and photochemical pollution in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, **27** (5) : 604-619.
- [13] 奇奕轩, 胡君, 张鹤丰, 等. 北京市郊区夏季臭氧重污染特征及生成效率[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(5): 663-671.
Qi Y X, Hu J, Zhang H F, *et al.* Pollution characteristics and production efficiency of ozone in summertime at rural site in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30** (5) : 663-671.
- [14] 贾诗卉, 徐晓斌, 林伟立, 等. 华北平原夜间对流天气对地面 O₃ 混合比抬升效应[J]. *应用气象学报*, 2015, **26**(3): 280-290.
Jia S H, Xu X B, Lin W L, *et al.* Increased mixing ratio of surface ozone by nighttime convection process over the North China plain [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, **26** (3) : 280-290.
- [15] 张涵, 姜华, 高健, 等. 我国大气 O₃ 污染成因及影响因素综述 [J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(12): 2657-2665.
Zhang H, Jiang H, Gao J, *et al.* Review on causes and influencing factors of O₃ pollution in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(12): 2657-2665.
- [16] Wei J, Li Z Q, Li K, *et al.* Full-coverage mapping and spatiotemporal variations of ground-level ozone (O₃) pollution from 2013 to 2020 across China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **270**, doi: 10.1016/j.rse.2021.112775.
- [17] Wang R Y, Wang L L, Xue M, *et al.* New insight into formation mechanism, source and control strategy of severe O₃ pollution: the case from photochemical simulation in the Wuhan Metropolitan Area, Central China [J]. *Atmospheric Research*, 2023, **284**, doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106605.
- [18] Shen J, Zhang Y H, Wang X S, *et al.* An ozone episode over the Pearl River Delta in October 2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 852-863.
- [19] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 88-96.
Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 88-96.
- [20] Wang K, Xie F J, Sulaymon I D, *et al.* Understanding the nocturnal ozone increase in Nanjing, China: insights from observations and numerical simulations [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **859**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160211.
- [21] Zeng Y S, Zhang J Q, Li D, *et al.* Vertical distribution of tropospheric ozone and its sources of precursors over Beijing: results from ~ 20 years of ozonesonde measurements based on clustering analysis [J]. *Atmospheric Research*, 2023, **284**, doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106610.
- [22] Liao Z H, Pan Y B, Ma P K, *et al.* Meteorological and chemical controls on surface ozone diurnal variability in Beijing: a clustering-based perspective [J]. *Atmospheric Environment*, 2023, **295**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119566.
- [23] Chen L, Xiao H, Zhu L Y, *et al.* Characteristics of ozone pollution and the impacts of related meteorological factors in Shanxi Province, China [J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(10), doi: 10.3390/atmos13101729.
- [24] 山西省气象科学研究所. 山西省大气环境气象公报[R]. 太原: 山西省气象局, 2019.
- [25] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [26] 金赛花, 樊曙先, 王自发, 等. 青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(3): 198-202.
Jin S H, Fan S X, Wang Z F, *et al.* The variation characteristics of surface ozone concentration at Waliguan in Qinghai [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(3): 198-202.
- [27] Ding A J, Wang T. Influence of stratosphere-to-troposphere exchange on the seasonal cycle of surface ozone at Mount Waliguan in western China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33** (3), doi: 10.1029/2005GL024760.
- [28] 张天航, 银燕, 高晋徽, 等. 中国华东高海拔地区春夏季臭氧质量浓度变化特征及来源分析[J]. *大气科学学报*, 2013, **36** (6): 683-698.
Zhang T H, Yin Y, Gao J H, *et al.* Characteristics and source analysis of O₃ in spring and summer in high-altitude area of Eastern China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, **36** (6) : 683-698.
- [29] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
Qian Y, Xu B, Xia L J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- [30] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 675-685.
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variations in

- ozone and its causes over Hainan Province from 2015 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 675-685.
- [31] 李婷苑, 陈靖扬, 翁佳烽, 等. 广东省臭氧污染天气型及其变化特征[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(5): 2015-2024.
Li T Y, Chen J Y, Weng J F, *et al.* Ozone pollution synoptic patterns and their variation characteristics in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(5): 2015-2024.
- [32] 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.
- [33] Xu J, Ma J Z, Zhang X L, *et al.* Measurements of ozone and its precursors in Beijing during summertime: impact of urban plumes on ozone pollution in downwind rural areas [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(23): 12241-12252.
- [34] Yan S M, Gao X A, Pei K N, *et al.* Mixing-layer depth-based backwards trajectory analysis of the sources of high O₃ concentrations at the Wutaishan station, North China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2023, **14**(2), doi: 10.1016/j.apr.2023.101652.
- [35] 王明星. 大气化学[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 1999.
- [36] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3001-3008.
Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3001-3008.
- [37] 姚青, 孙玫玲, 蔡子颖, 等. 2009年天津城区地面 O₃ 和 NO₃ 的季节变化与相关性分析[J]. *环境化学*, 2011, **30**(9): 1650-1656.
Yao Q, Sun M L, Cai Z Y, *et al.* Seasonal variation and analysis of the relationship between NO, NO₂ and O₃ concentrations in Tianjin in 2009 [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(9): 1650-1656.
- [38] 宋从波, 李瑞芃, 何建军, 等. 河北廊坊市区大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 2903-2912.
Song C B, Li R P, He J J, *et al.* Analysis of pollution characteristics of NO, NO₂ and O₃ at urban area of Langfang, Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2903-2912.
- [39] 徐晓斌, 刘希文, 林伟立. 输送对区域本底站痕量气体浓度的影响[J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(6): 656-664.
Xu X B, Liu X W, Lin W L. Impacts of air parcel transport on the concentrations of trace gases at regional background stations [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, **20**(6): 656-664.

环境科学

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)