生态环境知识网
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟，徐杉，赵峥，周小华，冯庆，杨江华，李飞龙，王志浩，张效伟

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年2月
第42卷 第2期
Vol.42 No.2

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷　第 2 期
2021 年 2 月 15 日

目　次

2013～2017 年中国 $PM_{2.5}$ 污染防治的健康效益评估 …… 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 …… 武文琪, 张凯山(523)
2016 年 1 月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 …… 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)
广州市 2020 年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响 …… 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 …… 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 …… 张扬, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 …… 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐淼, 冯银厂(574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 …… 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)
洛阳市秋冬季 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 …… 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 …… 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 …… 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 …… 叶露, 邰菁菁, 俞华明(624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在 WRF-Chem 中应用评估 … 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)
2010～2017 年四川省机动车污染物排放趋势分析 …… 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)
珠江三角洲海陆交互相沉积物中镉生物有效性与生态风险评价 …… 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 …… 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素 a 的响应关系 …… 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移-滞留的影响 …… 王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 …… 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 …… 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策 …… 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 …… 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 …… 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)
典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 …… 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 …… 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 …… 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 …… 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 …… 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 …… 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 娄帅, 刘鹏(786)
环境 DNA 宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 …… 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 …… 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)
松花江干流 2014～2019 年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 …… 于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 …… 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)
两种典型 PPCPs 在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 …… 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建(842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和 ARGs 的去除 …… 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)
紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 …… 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 …… 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 …… 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)
电凝聚臭氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 …… 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 …… 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 … 孟晓飞, 郭俊姆, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 …… 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)
复合改良剂 FZB 对砷镉污染土壤的修复效果 …… 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)
石灰配施有机物料修复酸性 Cd 污染稻田 …… 李光辉, 成晴, 陈宏(925)
叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻富集镉的影响机制 …… 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 …… 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)
辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 …… 邵晓庆, 贺章咪, 徐卫红(952)
4 种草本植物对镉的富集特征 …… 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 …… 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鋆燕, 王子芳, 高明(967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤 C: N: P 生态化学计量特征的影响 …… 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 …… 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 …… 葛艺, 徐民民, 徐绍辉, 徐艳(996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响 …… 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 …… 李源邃, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李莺(1013)
《环境科学》征订启事(522)　《环境科学》征稿简则(722)　信息(748, 899, 924)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第2期 2021年2月
Vol.42, No.2 Feb., 2021

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析

王旭东[1], 尹沙沙[2*], 杨健[1], 袁明浩[3], 张瑞芹[2], 李亚松[1], 卢轩[1]

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001; 3. 河南省郑州生态环境监测中心, 郑州 450007)

摘要: 基于环境空气质量和气象在线监测数据,研究了郑州市近地面臭氧(O_3)污染的年际变化、空间差异及气象影响,并分析了 O_3 传输路径和潜在源区. 结果表明, 2014~2018 年郑州市近地面 O_3 污染超标时间跨度增加,城区站点 O_3 日最大 8 h 滑动平均值(MDA8) 第 90% 分位呈显著上升趋势($P<0.05$),增长速率为 15.50 μg·(m^3·a)$^{-1}$; O_3 月变化呈"M"型,峰值出现在夏季; 日变化呈单峰型,峰值出现在 15:00~16:00,农村站点 O_3 日峰值浓度(130.94 μg·m^{-3})最高; 气温(T)>23℃、相对湿度(RH)<65% 和风速(WS)为 2.0~4.0 m·s^{-1}及风向在东南和东北方向时城市站点易发生高浓度 O_3 污染. 各影响因子和 O_3 浓度的多元线性回归分析表明, T 和 RH 是城市和工业站点的主控因子,T 和 WS 是城市交通和郊区站点的主控因子; 不同季节后向轨迹聚类分析和 O_3 潜在来源差异明显,春夏季大气传输路径以正南及东北方向近距离慢移速的轨迹为主,秋冬季以西北方向远距离快移速的轨迹为主; 夏季高 O_3 浓度主要受本地生成和河北、山东及安徽等地传输影响.

关键词: 臭氧(O_3); 郑州; 氮氧化物(NO_x); 时空变化; 气象影响; 潜在源区

中图分类号: X515 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)02-0604-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202006197

Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City

WANG Xu-dong[1], YIN Sha-sha[2*], YANG Jian[1], YUAN Ming-hao[3], ZHANG Rui-qin[2], LI Ya-song[1], LU Xuan[1]

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Based on online monitoring data of air quality and meteorological parameters, the long-term variations, spatial differences, and meteorological influencing factors of ground-level ozone (O_3) pollution in Zhengzhou were studied. In addition, the transport pathways and potential source regions of O_3 were investigated. The results show that surface O_3 concentrations at the city station in Zhengzhou City increased significantly during the period 2014-2018 ($P<0.05$) with a growth rate of 15.50 μg·(m^3·a)$^{-1}$, and the timespan of exceeding pollutant standards was extended. The monthly O_3 variations showed an "M" pattern with the seasonal maximum in summer. The diurnal O_3 variations showed a "single-peak" pattern with a diurnal concentrations peak at 15:00-16:00, while the diurnal peak at the rural station was relatively high (130.94 μg·m^{-3}). At the urban station, the exceedance probability of O_3 concentrations was relative high when hourly temperature (T) exceeded 23℃, relative humidity (RH) was less than 65%, wind speed (WS) ranged 2.0-4.0 m·s^{-1}, and wind direction was southeast or northeast. Based on the multivariate linear fitting of impact factors on O_3, the main controlling factors at the city and industrial sites were also identified as T and RH compared to T and WS at the traffic and suburb sites. Back trajectory analysis and potential sources of O_3 during different seasons were significantly different, with the dominant transport trajectories during spring and summer being short-distance and slow-moving airflows from the south and northeast; autumn and winter were characterized by long-distance and quick-moving airflows from the northwest. The high O_3 concentrations observed in summer were mainly affected by local photochemical formation and regional transport from Hebei, Shandong, and Anhui Provinces.

Key words: ozone (O_3); Zhengzhou; nitrogen oxides (NO_x); temporal-spatial characteristics; meteorological influences; source identification

近地面臭氧(O_3)主要来源于氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)在光照作用下发生的大气光化学反应及平流层输入[1],受前体物浓度水平、大气化学反应、气象条件和区域传输等因素影响[2,3]. 高浓度 O_3 严重威胁人类健康,能够引发肺部和呼吸道疾病等,还可能对植物、农作物和森林等造成危害[4~6].

自 2013 年"国十条"等一系列大气污染防控政策实施以来,我国细颗粒物($PM_{2.5}$)污染取得逐步好转,但 O_3 污染问题却日趋凸显. 如 Xu 等[7]、Yin 等[8]和 Ma 等[9]分别对上海、广州和上甸子背景站的研究均发现 O_3 浓度呈上升趋势. 随着 O_3 超标城市数量占比的上升,越来越多研究开始关注 O_3 污染

收稿日期: 2020-06-19; **修订日期**: 2020-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212403); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41907187)

作者简介: 王旭东(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治,E-mail: 1501420043@qq.com

* 通信作者,E-mail: shashayin@zzu.edu.cn

的时空分布特征、气象和 NO_x 等环境因素影响，在长三角[10~12]、珠三角[13,14]和京津冀地区[15]等地区相继报道. 如 Gu 等[12]的研究发现上海市夏季当气温 30℃以上时，O_3 体积分数随气温的增长速率在市区和郊区分别为 6.65×10^{-9}℃$^{-1}$ 和 13.68×10^{-9}℃$^{-1}$. 王占山等[15]的研究发现气温对北京市 O_3 浓度影响最大，其次为气压和湿度. 赵伟等[16]的研究发现晴天少雨、气温升高、辐射增强、相对湿度降低和风速变小等是香港 O_3 超标日的典型气象特征. 同一城市不同类型站点气象条件和 O_3 前体物排放等因素的不同会导致 O_3 污染特征的差异，如 Tong 等[11]的研究发现宁波市城市交通站点 O_3 浓度要低于郊区和农村站点，归因于受 NO 滴定效应影响. 杨健等[17]的研究发现安阳市 O_3 污染表现城郊差异现象. 此外，O_3 作为中等大气寿命物质，可以跨区域远距离传输[18]. 国内外学者利用后向轨迹和潜在源分析(potential source analysis function，PSCF)及浓度权重轨迹分析(concentration weight trajectory，CWT)等方法对 O_3 的跨区域输送问题展开了大量研究[7,19~21]. Zhang 等[10]使用后向轨迹和 PSCF 手段发现杭州市 O_3 污染受浙江、江苏和安徽省等地污染物的传输影响. Zhao 等[21]使用 PSCF 和 CWT 分析发现青藏高原是四川盆地城市群，特别是盆地西部地区高 O_3 的重要来源. 通过分析不同类型站点环境因素和区域传输影响有助于理解本地 O_3 污染成因.

观测数据显示，河南省 2015 ~ 2017 年夏季 O_3 平均浓度达到 140.41 μg·m^{-3}[22]，郑州市作为河南省省会，是中部地区重要的中心城市，2018 年总人口1 012万人，机动车保有量达 400 万辆[23]，前体物的大量排放导致 O_3 污染超标严重. 目前针对郑州市 O_3 污染特征的相关研究[24,25]其时间跨度小，空间范围仅针对市区少数点位，对 O_3 的长时间尺度研究和不同站点类型 O_3 污染特征和影响因素、及输送路径与潜在源区分析等仍为缺乏. 因此，本文基于空气质量和气象在线监测数据分析郑州市 O_3 污染时空分布特征及典型站点气象和 NO_x 影响与其主控因子，并讨论季节性区域传输影响，以期为制定 O_3 污染防治政策提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　站点与数据来源

1.1.1　站点选择

本文首先运用 O_3 浓度的层次聚类分析对郑州市空气质量监测站点进行分类(表 1)，该方法参考文献[26]. 并在聚类基础上参考各监测站点周边环境，共选择 5 个典型站点代表不同功能分区(图 1). 分别为：①烟厂站(34°45′N，113°40′E)，位于市区，周边以居民住宅区、行政机关单位和学校为主，选择作为城市站点；②河医大站(34°45′N，113°38′E)，位于市区，周边以居民住宅区为主，东北方向约 300 m 处为立交道路，受日间车流量较大的机动车尾气排放影响，选择作为城市交通站点；③岗李水库站(34°54′N，113°36′E)，位于黄河滩区，距城市中心 20 km 以上，选择作为郊区站点；④经开区管委会站(34°43′N，113°43′E)，距离工业聚集区约 1 km，包括涂料、印刷和机械制造等行业，且位于东南盛行风向，选择作为工业站点；⑤新天地大酒店站(34°27′N，113°02′E)，临近登封市嵩山国家风景名胜区，其森林树木覆盖率 80% 以上，选择作为农村站点.

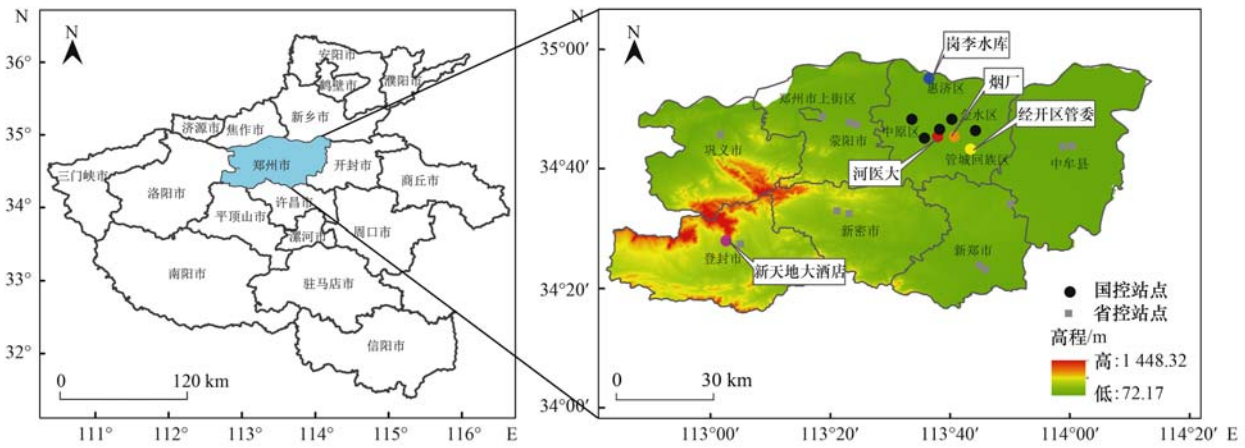


图 1　郑州市监测站点分布示意

Fig. 1　Distribution of air quality monitoring stations in Zhengzhou City

1.1.2　数据来源

本文所选取的站点数据包括 9 个国控监测站点和省控监测站点登封市新天地大酒店站点逐时 O_3、NO_2 和 NO 质量浓度，研究时段为 2014 年 1 月 1 日

表 1 空气质量监测站点聚类分析结果和地区类型

Table 1 Area type and cluster analysis results of air quality monitoring sites

聚类序号	站点	地区类型
1	四十七中、银行学校、烟厂、郑纺机、市监测站和供水公司	城区
2	经开区管委、新郑轩辕和航空港北部区指挥部	城区
3	中牟县农校和新密市房管所	城区
4	岗李水库和荥阳市环保局	郊区
5	上街区政府	城区
6	新郑新区	郊区
7	登封市中岳区委	城区
8	登封市新天地大酒店	农村
9	河医大	城区

~2018 年 12 月 31 日. 为了分析 O_3 时空分布特征,地面气象数据来自各典型站点常规气象观测数据,包括逐时气温(T)、气压(p)、相对湿度(RH)、降水(Pr)、风向(WD)和风速(WS). 使用 Model 49i 型 O_3 分析仪、Model 42i 型 NO_x 分析仪(Thermo Fisher,美国)监测 O_3 和 NO_x($NO + NO_2$);使用 Model QXZ 1.0(易谷科技,中国)监测地面气象数据. 设备运行期间根据《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-2005)定期校准和质控[27].

1.2 数据处理

依据文献[28, 29]对 O_3 污染状况进行评价,评价指标包括 O_3 MDA8 和 O_3 1h 平均浓度(O_3-1h). 将郊区之外的 8 个国控站点平均值定义为城区平均值. 层次聚类分析、线性回归分析和多元线性回归分析均使用 SPSS 26.0 完成,使用 t 检验及 F 检验评估 O_3 的年际变化的趋势显著性. 气象因素相关性分析只针对日间 07:00 ~ 18:00 时段,并剔除降水的影响. 污染物风玫瑰图使用 R 语言 openair 程序包[30]绘制.

1.3 后向轨迹和潜在来源分析

HYSPLIT 模式(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory model)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,广泛用于空气污染物传输和来源分析研究[19,21]. 本文将城市站点设为起始点,使用 1° × 1°分辨率的全球资料同化系统(GDAS)气象数据,以 6 h 间隔(当地时间 08:00、14:00、20:00 和 02:00)计算 72 h 后向轨迹,模拟高度设置为 100 m,以反映污染物的传输特征[10]. 并利用聚类分析工具对全年(2017 年 12 月 ~2018 年 11 月)每个季节气流轨迹作聚类分析.

PSCF 分析使用基于 GIS 技术的 TrajStat 软件,研究区域定义为(25 ~55°N, 90 ~130°E),网格分辨率为 0.5° ×0.5°. 将研究期间每个季节的 O_3 平均浓度设置为超标污染物阈值,$PSCF_{ij}$ 值定义为经过第 ij 网格的污染轨迹数 m_{ij} 和总轨迹数 n_{ij} 的比值,$PSCF_{ij}$ 值高的网格被解释为潜在源区,见公式(1):

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \tag{1}$$

为减少当某一网格中 n_{ij} 小于研究区域内每个网格内平均端点数 n_{ave} 在 3 倍时所导致 $PSCF_{ij}$ 值较高的不确定性,将 $PSCF_{ij}$ 值乘以权重函数 $W(n_{ij})$,即 $WPSCF = W(n_{ij}) \times PSCF_{ij}$,权重函数 W_{ij} 值[31]定义为:

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.0 & (3n_{ave} < n_{ij}), \\ 0.72 & (1.5n_{ave} < n_{ij} < 3n_{ave}), \\ 0.4 & (n_{ave} < n_{ij} < 1.5n_{ave}), \\ 0.2 & (n_{ij} < n_{ave}). \end{cases} \tag{2}$$

2 结果与讨论

2.1 O_3 浓度变化特征

2.1.1 城郊年际变化

图 2 为郑州市 2014 ~2018 年城郊站点的 O_3 MDA8 污染浓度级别时间序列分布. O_3 污染超标天主要在 5 ~9 月,以轻度污染和中度污染为主,6 月中度污染和重度污染居多. 2017 年重污染天数出现最多,位于下风向的郊区对照点 O_3 浓度超标频率高于城区站点,存在城郊差异. 此外,污染超标时间跨度增加,4 月和 10 月也开始出现超标现象.

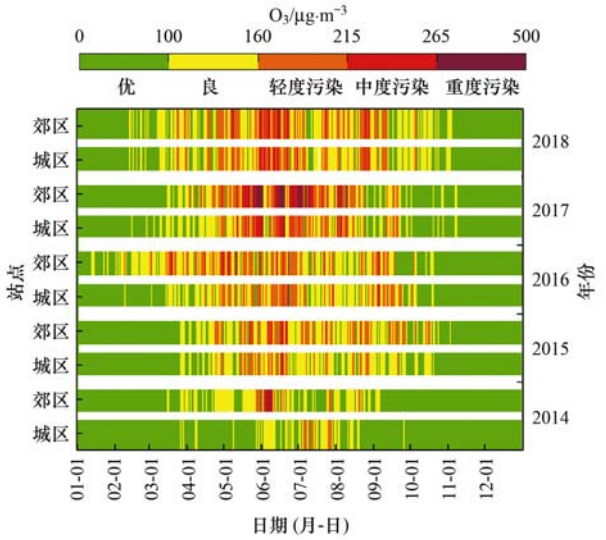


图 2 城郊站点 O_3 MDA8 污染级别时间序列

Fig. 2 Time-series of O_3 MDA8 pollution levels at the city and suburb station

通常,低百分位数(5%)代表背景条件,中等百分位数(25%、50% 和 75%)代表典型条件,高百分位数(95%、99%)表示特征污染事件[13]. 其中相关系数(R^2)表示线性回归方程的拟合度,P 代表趋势

显著性. 本研究期间,城区站点 O_3 MDA8 各百分位浓度增速范围为 1.69 ~ 16.23 μg·(m^3·a)$^{-1}$,除第 5% 位外各百分位均表现显著趋势[图 3(a)],其第 90% 分位增速为 15.50 μg·(m^3·a)$^{-1}$(R^2 = 0.837,P < 0.05). 郊区站点增速范围为 3.03 ~ 14.34 μg·(m^3·a)$^{-1}$,除第 5% 位外各百分位趋势不显著[图 3(b)],其第 90% 分位增速为 13.91 μg·(m^3·a)$^{-1}$(R^2 = 0.615,P = 0.12). 郊区站点第 5% 分位上升趋势显著,增速为 3.03 μg·(m^3·a)$^{-1}$(R^2 = 0.87,P < 0.05),表明郊区站点 O_3 背景浓度增长显著. 此外,城郊 O_3 污染浓度水平差异正在缩小,这与其城市化水平加快有关. O_3 MDA8 第 90% 和 95% 分位 O_3 浓度增长幅度均高于第 50% 和 75%,第 5% 分位最小. 高百分位 O_3 浓度快速增加可能是郑州市 O_3 污染问题逐年加重的关键因素.

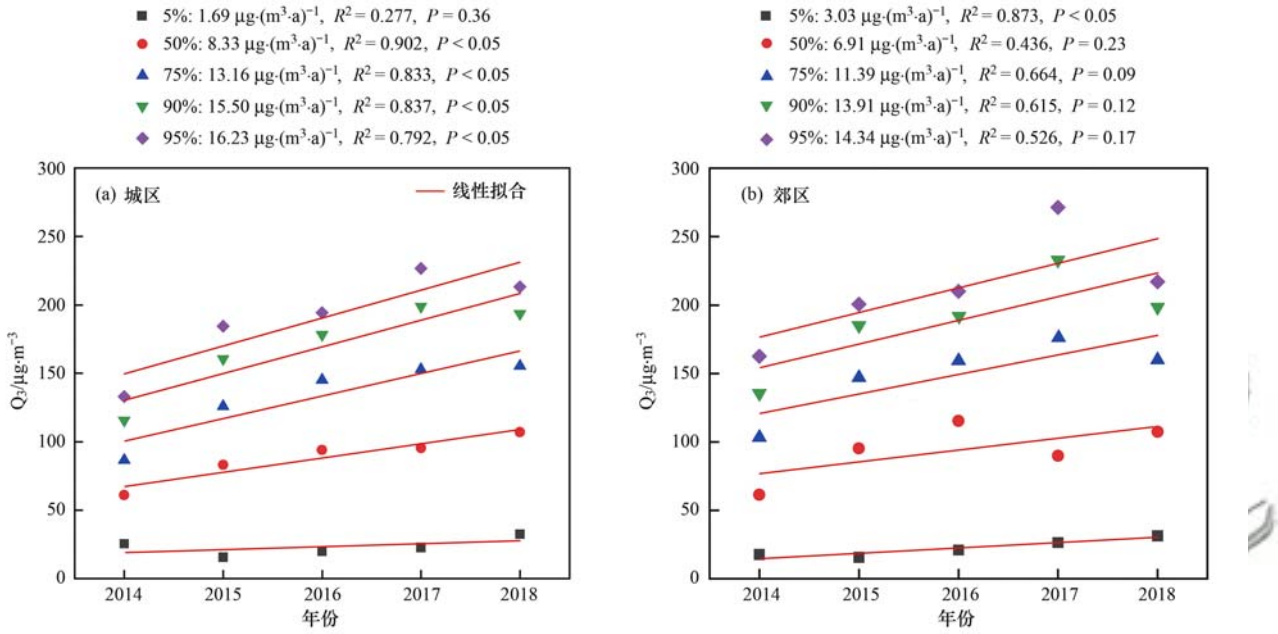


图 3　城郊站点不同分位数 O_3 MDA8 年际变化

Fig. 3　Annual variation in different percentiles for O_3 MDA8 concentrations at the city and suburb station

2.1.2　季节和月变化

以 2018 年为基准年,研究典型站点 O_3 及前体物 NO_x 变化特征. 由图 4(a)可知,O_3 MDA8 月变化呈“M”型,峰值在 6 月和 8 月. O_3 浓度季节变化呈夏季(84.76 ~ 151.17 μg·m^{-3}) > 春季(60.72 ~ 127.48 μg·m^{-3}) > 秋季(26.96 ~ 104.65 μg·m^{-3}) > 冬季(18.96 ~ 75.91 μg·m^{-3})的特征,与其他北半球中纬度地区研究相似[17]. 7 月 O_3 浓度明显下降,夏季多雨,低太阳辐射及湿沉降作用不利于 O_3 生成[32]. 与 O_3 相反,NO_2、NO 和 NO_x 的月变化呈冬季高夏季低特征[图 4(b) ~ 4(d)],归因于冬季供暖消耗的化石燃料排放及气象条件不利于其去除[11]. 从空间分布来看,农村站点 O_3 浓度高于其他站点,其 NO 浓度水平最低,且变化幅度最小,而城市交通站点 NO_2 浓度明显高于其他站点.

2.1.3　日变化

O_3 日变化呈单峰型[图 5(a)],在 15:00 ~ 16:00左右达到峰值,白天浓度明显高于夜间. 峰值浓度水平:农村站点(130.94 μg·m^{-3}) > 郊区站点(127.70 μg·m^{-3}) > 城市站点(122.36 μg·m^{-3}) > 工业站点(116.90 μg·m^{-3}) > 城市交通站点(112.50 μg·m^{-3}). 振幅,即 O_3 浓度在白天和夜间差异,郊区站点振幅最大,和受日间城市人类活动的影响有关. 而农村站点振幅最小,可能是附近交通车辆排放等人为因素较少导致. 此外,郊区站点 O_3 浓度峰值出现滞后其他站点 1 h 的现象,与上风向 O_3 及前体物输送相关[33].

NO_2 浓度日变化呈“M”型[图 5(b)],在 08:00 和 21:00 出现峰值,与 O_3 呈相反变化趋势,NO 浓度日变化呈单峰型[图 5(c)],早上 08:00 出现峰值. 城市交通和工业站点 NO_2 和 NO 浓度较高,因为 NO_x 主要来自机动车尾气排放[34]. 早晚高峰时段 NO_2 可以通过 NO 和 O_3 氧化反应生成导致浓度升高[35],而白天时段 NO_x 通过光解反应向 O_3 转换而降低. 与其他站点相比农村站点 NO 浓度较低且日变化更为平稳. O_3 可以通过 NO 滴定效应($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$)而去除,农村和郊区站点较高 O_3 浓度可能是由于日间天然源 VOCs 排放较高,且受 NO 的滴定效应影响较少,更有利于 O_3 的产生和积累.

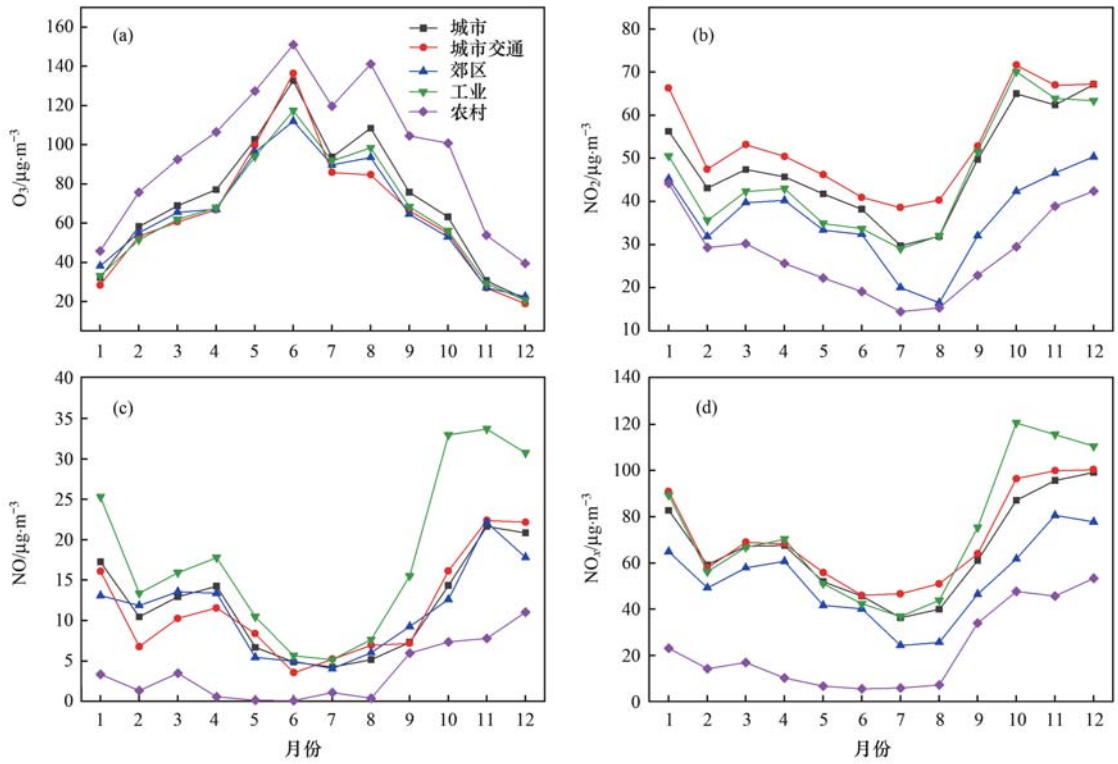


图 4 2018 年郑州市典型站点 O_3、NO_2、NO 和 NO_x 月变化

Fig. 4 Monthly variations in O_3, NO_2, NO, and NO_x at the typical stations in Zhengzhou City, 2018

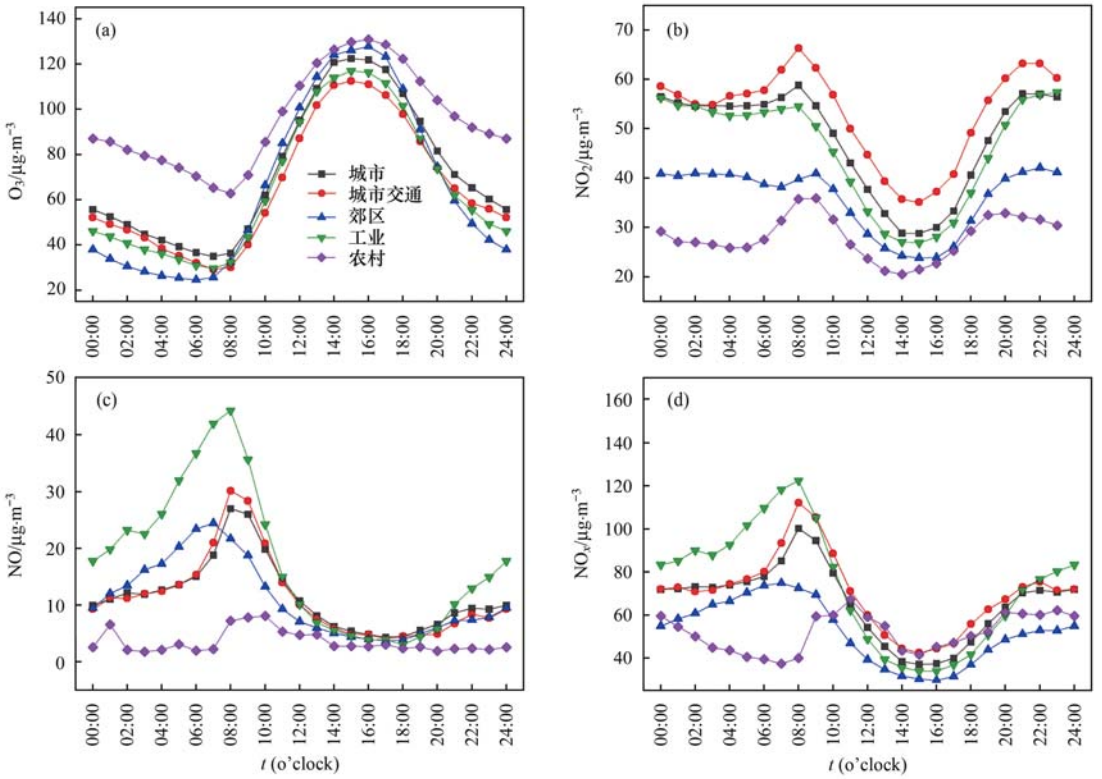


图 5 2018 年郑州市典型站点 O_3、NO_2、NO 和 NO_x 日变化

Fig. 5 Diurnal variations in O_3, NO_2, NO, and NO_x at the typical stations in Zhengzhou City, 2018

2.2 气象和环境因子影响

2.2.1 气温和湿度

典型站点 O_3 和气象参数、NO_x 的 Pearson 相关系数见表 2. 结果显示 O_3 均与气温和风速呈正相关,与相对湿度、压力、NO 和 NO_2 呈负相关. 气温可反映太阳辐射对光化学反应的影响[36],高温会促进 O_3 生成. 高相对湿度会减缓光化学反应过程,导致太阳辐射和气温降低,从而减缓 O_3 生成[37]. 风

表 2　O_3 与常规气象参数和 NO_x 的 Pearson 相关系数[1)]

Table 2　Pearson's correlation coefficients between O_3, meteorological parameters, and NO_x

站点	气温	相对湿度	风速	压力	NO 浓度	NO_2 浓度
城市	0.52*	−0.47*	0.37*	−0.23*	−0.08*	−0.04*
城市交通	0.53*	−0.54*	0.40*	−0.25*	−0.36*	−0.56*
工业	0.56*	−0.50*	0.38*	−0.23*	−0.39*	−0.64*
郊区	0.68*	−0.68*	0.46*	−0.21*	−0.36*	−0.46*

1）* 表示 $P<0.05$

速和风向影响 O_3 输送和扩散，会导致 O_3 和前体物从高污染地区向下风向地区输送[33]．

图 6 为典型站点气温（T）、相对湿度（RH）、风速（WS）与 O_3 和 NO_x 浓度日变化趋势，在 00:00 ~ 07:00 和 15:00 ~ 23:00 期间，O_3 浓度随气温降低而减小；O_3 浓度随早上气温增长而快速增加，最大值出现在 15:00 ~ 16:00，此时气温为全天最高值．与气温不同，O_3 与相对湿度呈明显相反的日变化趋势．由表 2 知，郊区站点 O_3 浓度和气温的相关性最强，其次为工业站点、城市交通站点和城市站点．郊区站点 O_3 浓度和相对湿度的相关性最强，其次为城市交通站点、工业站点和城市站点．

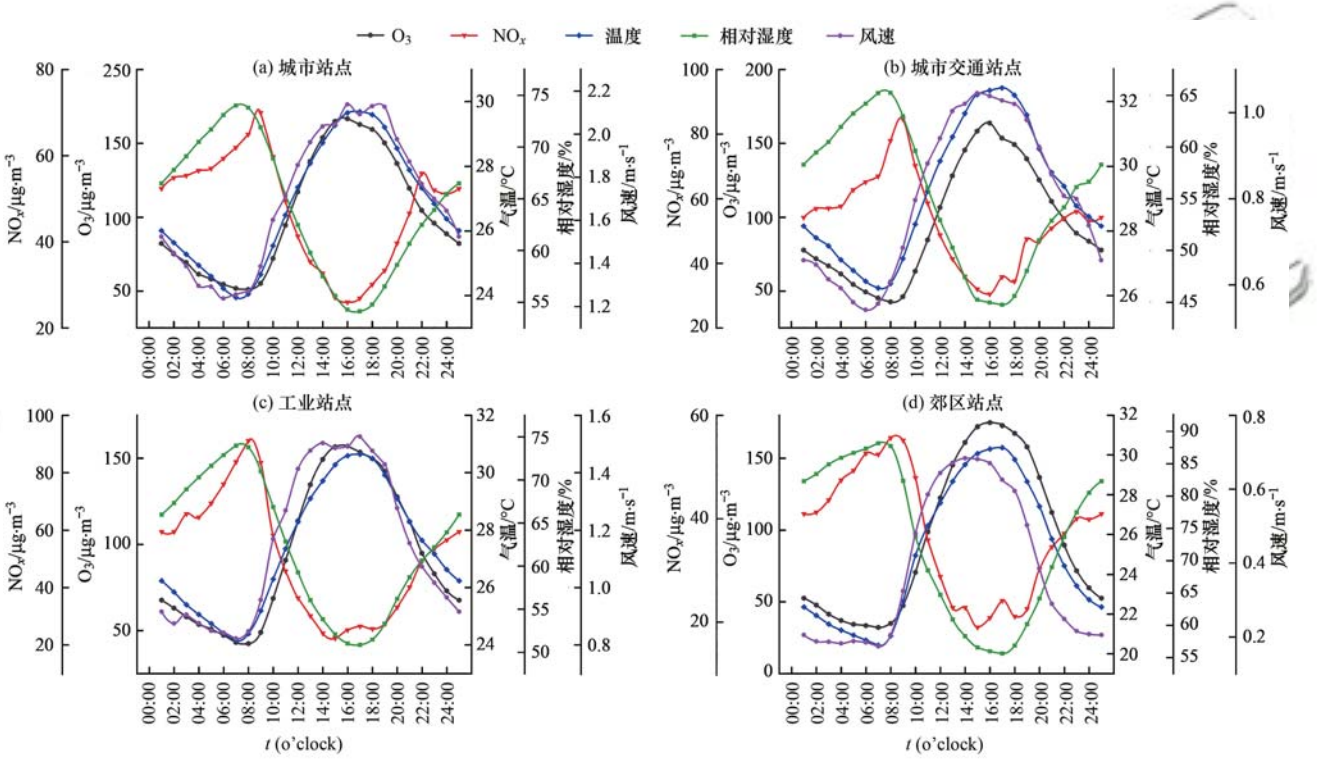


图 6　典型站点气温、相对湿度、风速与 O_3 和 NO_x 浓度的日变化

Fig. 6　Diurnal variations in temperature, relative humidity, wind speed, and concentrations of O_3 and NO_x at typical stations

图 7 为 O_3 小时浓度与气温、相对湿度关系的散点，不同颜色代表不同的相对湿度．不同站点 O_3 浓度超过国家二级标准 200 μg·m^{-3} 时气温和相对湿度范围存在差异．当气温超过 23℃，且相对湿度小于 65% 时，城市站点超标概率较高[图 7(a)]；当气温超过 27℃，且相对湿度小于 59% 时，城市交通站点超标概率较高[图 7(b)]；当气温超过 25℃，且相对湿度小于 64% 时，工业站点超标概率较高[图 7(c)]；当气温超过 28℃，且相对湿度小于 68% 时，郊区站点超标概率较高[图 7(d)]，表明不同类型站点气温和湿度对 O_3 影响存在差异．

2.2.2　风速和风向

图 8 是各站点不同风向风速变化及 O_3-1h 浓度的风玫瑰图．可以看出，不同站点 O_3 浓度高值发生时风向和风速存在差异，城市站主要偏东南及东北风，且风速大多集中在 2.0 ~ 4.0 m·s^{-1}[图 8(a)]；城市交通站主要偏东及东南风，风速集中在 1.0 ~ 2.0 m·s^{-1}[图 8(b)]；工业站点主要偏北及南风，风速集中在 1.0 ~ 3.0 m·s^{-1}[图 8(c)]；郊区站点主要偏南及西南风，风速集中在 2.0 ~ 3.0 m·s^{-1}[图 8(d)]，不同站点的 O_3 浓度随风向风速的差异与其周边环境排放相关．郊区站点 O_3 浓度和风速

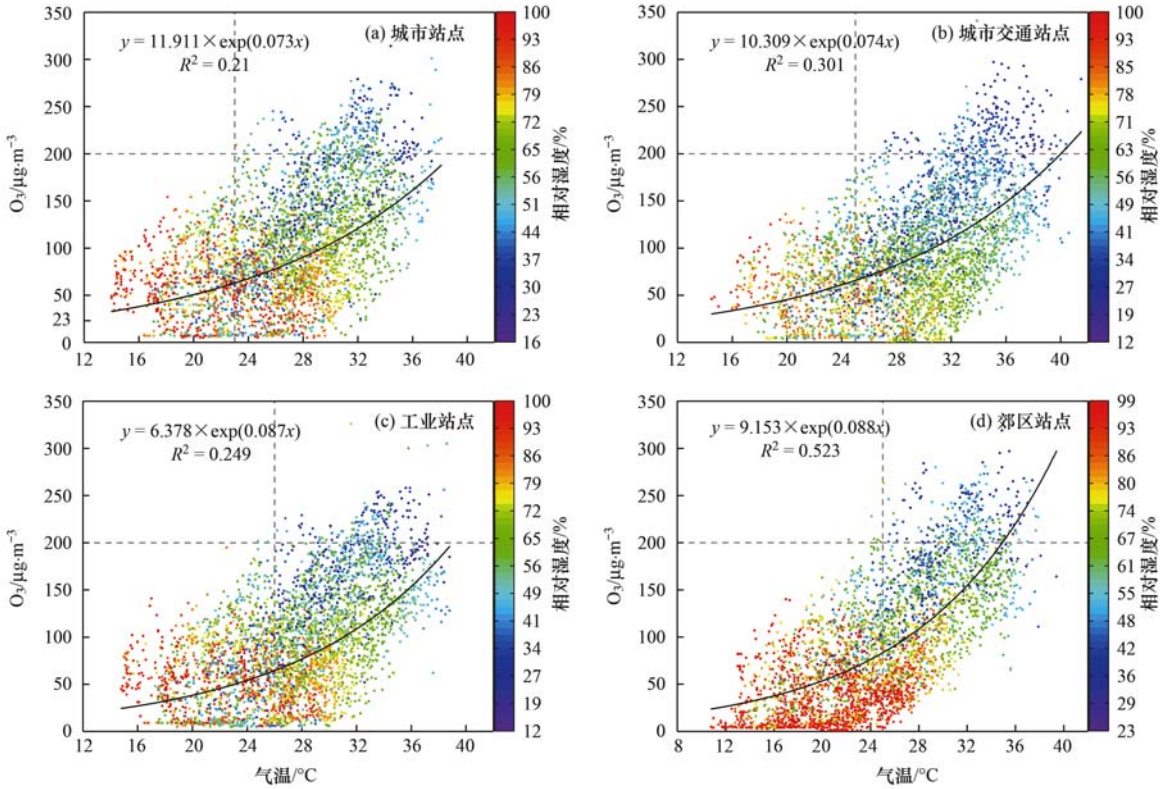


图 7 典型站点 O_3 与气温、相对湿度的散点图

Fig. 7 O_3 concentrations against temperature and humidity at the typical stations

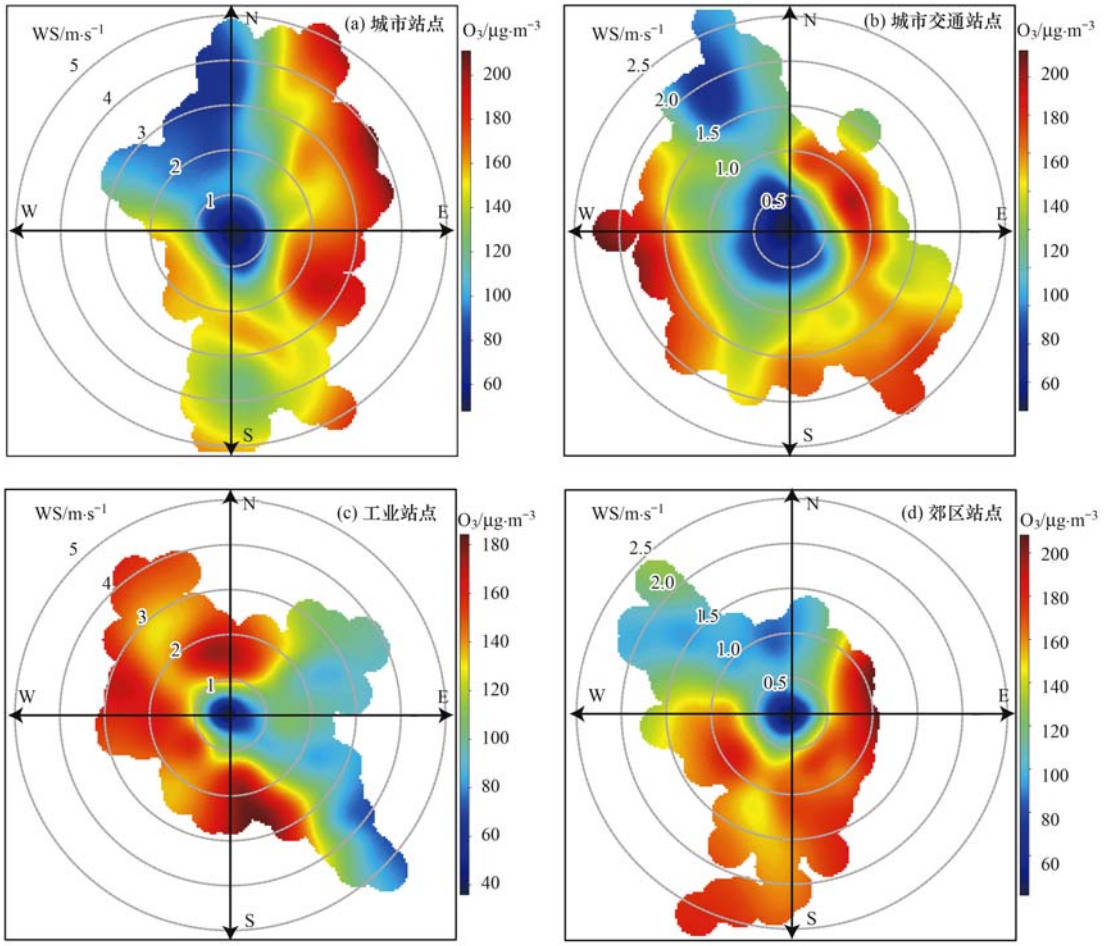


图 8 典型站点 O_3 浓度与不同风向风速变化的关系

Fig. 8 O_3 concentrations corresponding with wind speed and wind direction at the typical stations

的相关系数 R 最高(表2),说明风速对郊区 O_3 浓度影响最大.

由表3 可知,O_3 浓度从静风状态(1.0 $m\cdot s^{-1}$)开始随风速增加而增加,而城市交通和工业站点在风速大于 2.1 $m\cdot s^{-1}$时出现 O_3 随风速增加而降低现象,这种非线性关系表现出风速对 O_3 浓度双向影响. 当风向为东南盛行风时,上风向工业站点 O_3 浓度低于城市、城市交通和郊区站点,下风向郊区站点达到 131.09 $\mu g\cdot m^{-3}$,可能是污染物至上风向输送到下风向地区,使其 O_3 浓度升高.

表3　不同风速和风向范围内 O_3 浓度水平(平均值±偏差)

Table 3　O_3 concentrations (avg ± std) under the different ranges of wind speeds and wind direction

项目	单位	$O_3/\mu g\cdot m^{-3}$			
		城市	城市交通	工业	郊区
风速范围/$m\cdot s^{-1}$	≤1.00	76.67 ± 52.04	87.03 ± 60.60	69.72 ± 51.65	122.68 ± 67.52
	1.10 ~ 2.00	127.31 ± 62.45	120.26 ± 53.34	121.81 ± 52.72	136.95 ± 48.64
	2.10 ~ 3.00	142.49 ± 55.75	111.09 ± 38.26	116.86 ± 45.44	158.45 ± 30.39
	3.10 ~ 4.00	143.38 ± 52.38	—	104.56 ± 42.46	—
	4.10 ~ 5.00	152.5 ± 41.22	—	90.06 ± 26.02	—
	≥5.10	—	—	—	—
风向	北	104.98 ± 55.10	63.24 ± 51.74	139.90 ± 60.12	86.44 ± 52.22
	东北	132.32 ± 58.37	84.90 ± 60.94	107.99 ± 51.03	116.88 ± 61.76
	东	117.13 ± 60.14	121.04 ± 75.18	96.76 ± 49.08	118.98 ± 61.83
	东南	138.67 ± 68.03	111.36 ± 59.86	98.71 ± 50.31	131.09 ± 70.93
	南	129.09 ± 64.43	104.80 ± 52.99	128.14 ± 56.15	135.37 ± 70.84
	西南	133.41 ± 57.68	101.60 ± 53.26	126.89 ± 61.29	144.94 ± 69.85
	西	121.65 ± 52.38	98.77 ± 54.12	128.44 ± 61.29	134.61 ± 54.22
	西北	94.75 ± 46.78	77.16 ± 51.29	113.07 ± 61.36	102.13 ± 48.35

2.2.3　不同站点臭氧主控因子

使用多元线性回归分析讨论典型站点 O_3 与 NO_x 及各气象等环境因素的拟合关系(表4),其中相关系数(R^2)表示线性回归方程的拟合度,系数代表不同影响因子对 O_3 浓度的相对重要性. 可以看出,影响各站点 O_3 浓度的主控因子是气象因素,城市站点和工业站点 O_3 浓度的主控因子均是气温 T 和湿度 RH; 城市交通站点和郊区站点的主控因子均是气温 T 和风速 WS. 根据 Wang 等[3]的研究发现城市站点大多处于 VOCs 控制区,而郊区站点处于协同控制区或 NO_x 控制区. 对比各站点 NO_x 系数发现郊区站点的系数最大,其 NO_x 浓度较低而 O_3 浓度较高,说明其 O_3 浓度对 NO_x 浓度更敏感,倾向于 NO_x 控制区. 城市站点系数最小,其 NO_x 浓度偏高而 O_3 浓度相对较低,高 NO_x 浓度会抑制 O_3 浓度,属于 VOCs 控制区. 综上,相关部门应考虑不同站点主控气象因子和前体物排放影响采取相应措施预防 O_3 污染发生.

表4　典型站点 O_3 与 NO_x 及各气象要素的拟合关系

Table 4　Fitting relationships between O_3 and NO_x and various meteorological elements at the typical stations

站点	O_3 与 NO_x 及气象要素的拟合关系	R^2
城市	$[O_3] = -0.838[NO_x] + 3.314T - 1.360RH + 1.179WS + 147.877$	0.784
城市交通	$[O_3] = -0.497[NO_x] + 3.195T - 1.569RH + 9.271WS + 115.827$	0.741
工业	$[O_3] = -0.466[NO_x] + 3.930T - 1.313RH - 0.881WS + 100.696$	0.799
郊区	$[O_3] = -0.362[NO_x] + 4.500T - 1.842RH - 9.582WS + 140.176$	0.804

2.3　来源分析

2.3.1　后向轨迹分析

O_3 浓度不仅受气象和前体物等因素影响,同时污染物的区域传输以及传输过程中前体物的光化学反应也起到重要作用[38]. 使用后向轨迹模型分析发现郑州市不同季节气团传输路径和聚类结果(图9),以及轨迹的占比和相应的 O_3 与 NO_x 浓度差异显著(表5).

春季的气团以正南、东北和西北方向为主. 轨迹1(28.26%)来自东北方向,途经辽宁、渤海和山东等地; 轨迹2(8.97%)来自西北方向,途经陕西和山西部分地区,其对应的 O_3 浓度最高,可能与途经山西地区的气团中携带较高 NO_x 浓度有关(表5); 轨迹3(50.82%)来自正南方向,主要来自河南省南部地区,表明春季受更多近距离传输影响. 轨迹4(11.96%)来自西北方向,途经内蒙古和山西,气团传输距离长,传输速度快,有利于污染物的扩散,导致对应的 O_3 浓度最低. 夏季以正南和东北方向为主,其次为东和东南. 轨迹1(34.78%)来自正南方向,自河南省南部边界到达郑州,气团传输距离

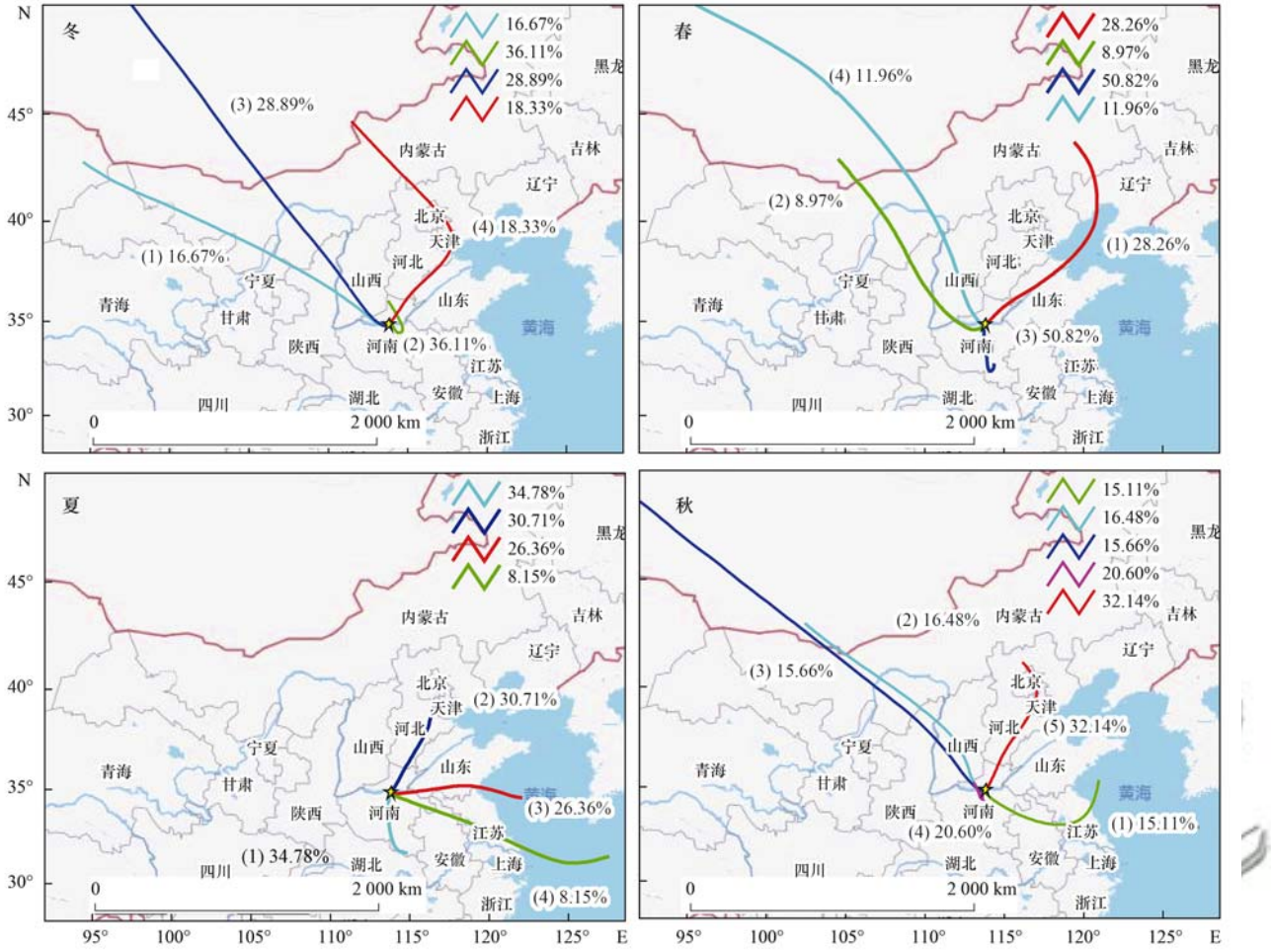


图 9 郑州市 100 m 高度 72 h 气团后向轨迹的季节性变化

Fig. 9 Seasonal cluster analysis of the 72 h air mass back trajectories starting at 100 m in Zhengzhou City

表 5 郑州市后向轨迹分析结果[1)]

Table 5 Statistical results of backward trajectory analysis in different seasons in Zhengzhou City

季节	轨迹编号	占比 /%	O_3 平均浓度 /μg·m^{-3}	O_3 超标频率 /%	O_3 超标平均浓度 /μg·m^{-3}	NO_x 平均浓度 /μg·m^{-3}
春季	1	28.26	65.43	—	—	56.30
	2	8.97	47.50	—	—	68.83
	3	50.82	71.71	—	—	80.94
	4	11.96	89.83	—	—	120.00
夏季	1	34.78	137.49	22.95	236.14	44.54
	2	30.71	109.68	9.09	217.00	47.70
	3	26.36	141.00	25.92	228.43	62.50
	4	8.15	133.60	10.00	231.58	34.10
秋季	1	15.11	44.80	6.67	253.00	49.25
	2	16.48	25.32	—	—	80.13
	3	15.66	58.18	—	—	62.65
	4	20.60	26.74	—	—	85.75
	5	32.14	27.24	—	—	55.77
冬季	1	16.67	41.00	—	—	60.29
	2	36.11	42.29	—	—	60.89
	3	28.89	21.49	—	—	110.30
	4	18.33	26.29	—	—	51.88

1)超标频率为该聚类轨迹中污染物超标轨迹所占比例

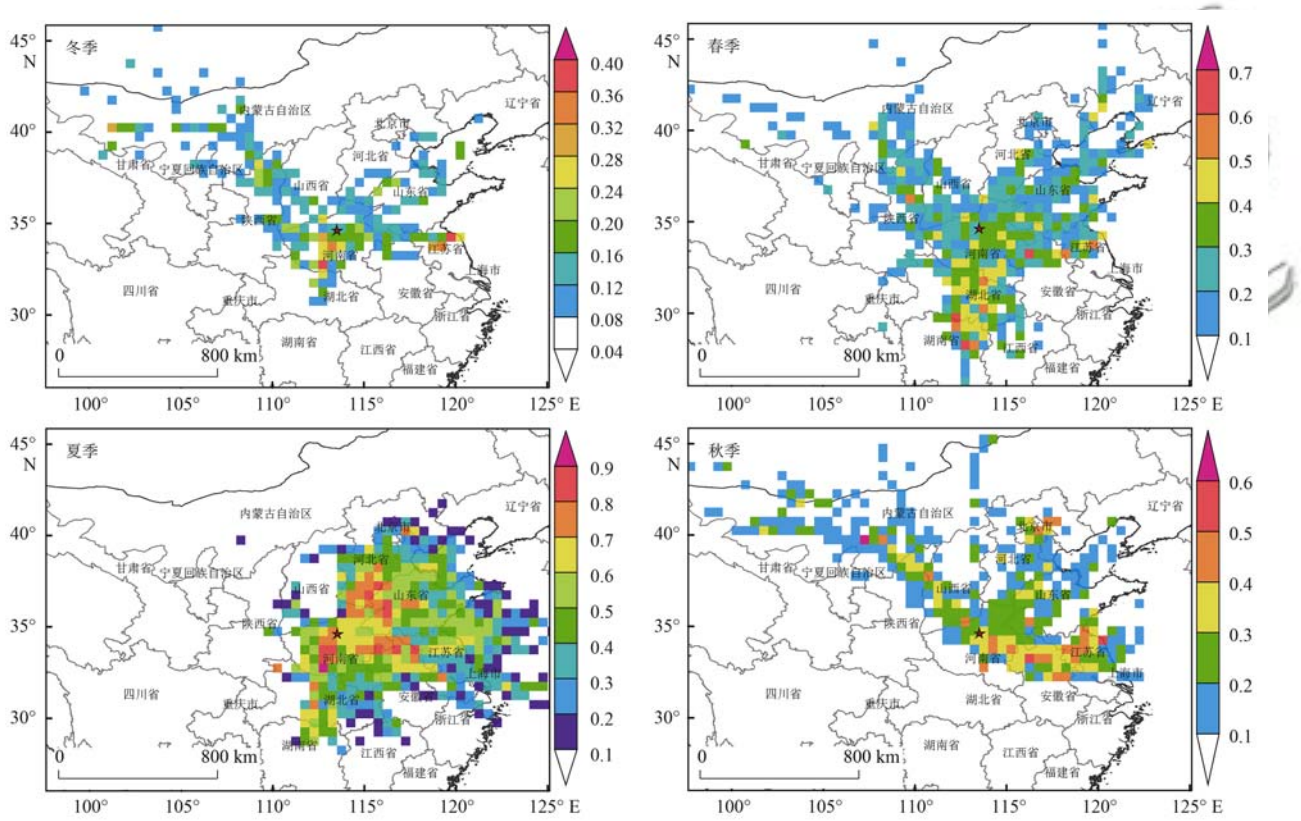
短,传输速度慢,表明该区域气象条件较稳定而导致沿途污染物难以扩散,累积造成 O_3 浓度偏高. 轨迹 2(30.71%)来自东北方向,途经京津翼传输通道. 轨迹 3(26.36%)来自正东方向,途经黄海和山东等

地，来自沿海的清洁气团会稀释 O_3 浓度. 轨迹 4(8.15%)来自东南方向，途经江苏和安徽等地.

秋季以东北和西北方向为主，其次为东南. 轨迹 1(15.11%)来自正东方向，途经江苏和安徽等地；轨迹 2(16.48%)和轨迹 3(15.66%)来自西北方向，主要途经山西地区，轨迹 2 移动速度较快. 较短的轨迹 4(20.60%)表明气团相对静止，主要受郑州市及周边影响. 轨迹 5(32.14%)来自东北方向，途经北京、天津和河北等地；冬季以西北和东南方向为主. 轨迹 1(16.67%)来自西北方向，途经内蒙古、宁夏和山西等地. 轨迹 2(36.11%)气团长度较短，主要来自河南省本地. 轨迹 3(28.89%)来自西北方向，途经内蒙古、宁夏和山西等地，其气团对应的 NO_x 浓度较高. 轨迹 4(18.33%)来自东北方向，途经内蒙古、北京、天津和河北等地区.

2.3.2　潜在来源分析

由图 10 可知，春季 O_3 潜在源区分布广泛，WPSCF 高值区域主要分布在河南省东南部、湖北省中部和湖南省东北部等地区，其 WPSCF 值在 0.4～0.6. 江苏省、安徽省等地部分网格也存在较高的 WPSCF 值，可能是 O_3 潜在源区. 夏季潜在源区主要集中在郑州市及周边等地区，其 WPSCF 值在 0.6～0.9，表明夏季 O_3 受到强烈的本地光化学生成影响. 此外，河南省、河北省南部、山东省、江苏省和安徽省等地为明显排放源；秋季 O_3 受到远距离传输影响，潜在源区主要分布在河南省中部及东部、安徽省北部和江苏省中东部，WPSCF 值为 0.3～0.5；冬季 O_3 浓度较低，潜在源区主要分布在河南省本地和



图例表示该网格区域污染轨迹的 WPSCF 值

图 10　郑州市 O_3 潜在源分析季节变化

Fig. 10　Seasonal variations in potential sources of O_3 in Zhengzhou

江苏省北部，WPSCF 值较低. 结合后向轨迹和潜在来源分析发现郑州市夏季较高 O_3 浓度主要受本地生成和河北、山东和安徽等地传输影响.

3　结论

(1)2014～2018 年郑州市 O_3 污染超标时间跨度增加，城区和郊区 O_3 MDA8 第 90 百分位分别以 15.50 μg·(m^3·a)$^{-1}$(R^2=0.837，P<0.05)和 13.91 μg·(m^3·a)$^{-1}$(R^2=0.615，P=0.12)上升幅度增加，但城郊差异正在减少. 高百分位 O_3 浓度表现出更高增速.

(2)O_3 和 NO_x 月变化分布分别呈“M”型和倒“V”型分布. 农村站点 O_3 日峰值浓度水平最高，郊区站点日变化振幅最大，农村站点和郊区站点表现出受更少 NO 滴定效应影响.

(3)O_3 浓度与气温、风速呈正相关，与相对湿度、压力和 NO_x 呈负相关；O_3 浓度在不同风速范围和风向之间存在显著差异，与风速呈非线性关系；

气温高于23℃、相对湿度低于65%,风速范围在3.0~5.0 m·s^{-1},风向偏东南及东北时,城市站点O_3浓度易出现高值;气温T为O_3的主控因子,应根据不同站点的主控因子采取O_3防控措施.

(4)后向轨迹聚类分析表明,郑州市O_3污染在秋冬季表现为更多远距离传输影响,春夏季表现为更多近距离传输影响,夏季O_3污染主要受本地生成和河北、山东和安徽等地传输影响.

参考文献:

[1] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(12): 1821-1845.

[2] Pudasainee D, Sapkota B, Shrestha M L, *et al*. Ground level ozone concentrations and its association with NO_x and meteorological parameters in Kathmandu valley, Nepal [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(40): 8081-8087.

[3] 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.

[4] Moura B B, Alves E S, Marabesi M A, *et al*. Ozone affects leaf physiology and causes injury to foliage of native tree species from the tropical atlantic forest of southern Brazil[J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**: 912-925.

[5] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al*. Ground-level O_3 pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. Environmental Pollution, 2015, **199**: 42-48.

[6] Li P, De Marco A, Feng Z Z, *et al*. Nationwide ground-level ozone measurements in China suggest serious risks to forests[J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 803-813.

[7] Xu J M, Tie X X, Gao W, *et al*. Measurement and model analyses of the ozone variation during 2006 to 2015 and its response to emission change in megacity Shanghai, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(14): 9017-9035.

[8] Yin C Q, Deng X J, Zou Y, *et al*. Trend analysis of surface ozone at suburban Guangzhou, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133880.

[9] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, *et al*. Significant increase of surface ozone at a rural site, north of eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(6): 3969-3977.

[10] Zhang G, Xu H H, Qi B, *et al*. Characterization of atmospheric trace gases and particulate matter in Hangzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(3): 1705-1728.

[11] Tong L, Zhang H L, Yu J, *et al*. Characteristics of surface ozone and nitrogen oxides at urban, suburban and rural sites in Ningbo, China[J]. Atmospheric Research, 2017, **187**: 57-68.

[12] Gu Y X, Li K, Xu J M, *et al*. Observed dependence of surface ozone on increasing temperature in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2020, **221**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117108.

[13] Li J F, Lu K D, Lv W, *et al*. Fast increasing of surface ozone concentrations in Pearl River Delta characterized by a regional air quality monitoring network during 2006-2011 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(1): 23-36.

[14] Xie M, Zhu K G, Wang T J, *et al*. Temporal characterization and regional contribution to O_3 and NO_x at an urban and a suburban site in Nanjing, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **551-552**: 533-545.

[15] 王占山, 李云婷, 安欣欣, 等. 2006~2015 年北京市不同地区 O_3 浓度变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 1-8.
Wang Z S, Li Y T, Aa X X, *et al*. Variation of O_3 concentration in different regions of Beijing from 2006-2015 [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 1-8.

[16] 赵伟, 高博, 刘明, 等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 55-66.
Zhao W, Gao B, Liu M, *et al*. Impact of meteorological factors on the ozone pollution in Hong Kong [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 55-66.

[17] 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 等. 安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 115-124.
Yang J, Yin S S, Yu S J, *et al*. Characteristic of surface ozone and meteorological parameters analysis in Anyang City [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 115-124.

[18] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ and Ozone in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1763-1778.

[19] 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.

[20] 任浦慧, 解静芳, 姜洪进, 等. 太原市大气 $PM_{2.5}$ 季节传输路径和潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3144-3151.
Ren P H, Xie J F, Jiang H J, *et al*. Transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ in different seasons in Taiyuan City [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3144-3151.

[21] Zhao S P, Yu 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, 2019, **10**(2): 374-385.

[22] Shen F Z, Ge X L, Hu J L, *et al*. Air pollution characteristics and health risks in Henan Province, China[J]. Environmental Research, 2017, **156**: 625-634.

[23] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

[24] 黄丽, 段书音, 朱佳城, 等. 郑州市 2015~2016 年臭氧污染特征分析[J]. 郑州大学学报(医学版), 2018, **53**(1): 64-67.
Huang L, Duan S Y, Zhu J C, *et al*. Characteristics analysis of ozone pollution in Zhengzhou City in 2015-2016[J]. Journal of Zhengzhou University (Medical Sciences), 2018, **53**(1): 64-67.

[25] 于世杰, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市近地面臭氧污染特征及气象因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 140-149.
Yu S J, Yin S S, Zhang R Q, *et al*. Analysis on the characteristics of surface ozone pollution and meteorological factors in Zhengzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 140-149.

[26] Gramsch E, Cereceda-Balic F, Oyola P, *et al*. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM_{10} and ozone data[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(28): 5464-5475.

[27] HJ/T 193-2005, 环境空气质量自动监测技术规范[S].

[28] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].

[29] HJ 633-2012，环境空气质量指数（AQI）技术规定（试行）[S].

[30] Carslaw D C，Ropkins K. *openair*-an R package for air quality data analysis[J]. Environmental Modelling & Software，2012，**27-28**：52-61.

[31] Dimitriou K，Kassomenos P. Combining AOT，angstrom exponent and PM concentration data，with PSCF model，to distinguish fine and coarse aerosol intrusions in Southern France [J]. Atmospheric Research，2016，**172-173**：74-82.

[32] Awang N R，Ramli N A，Yahaya A S，*et al*. Multivariate methods to predict ground level ozone during daytime，nighttime，and critical conversion time in urban areas[J]. Atmospheric Pollution Research，2015，**6**(5)：726-734.

[33] 王占山，李云婷，陈添，等. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. 环境科学，2014，**35**(12)：4446-4453.
Wang Z S，Li Y T，Chen T，*et al*. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Beijing[J]. Environmental Science，2014，**35**(12)：4446-4453.

[34] Sicard P，Coddeville P，Galloo J C. Near-surface ozone levels and trends at rural stations in France over the 1995-2003 period [J]. Environmental Monitoring and Assessment，2009，**156**(1-4)：141-157.

[35] Zou Y，Deng X J，Zhu D，*et al*. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs，NO_x and O_3 at a suburban site in Guangzhou，China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics，2015，**15**(12)：6625-6636.

[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] Londhe A L，Jadhav D B，Buchunde P S，*et al*. Surface ozone variability in the urban and nearby rural locations of tropical India [J]. Current Science，2008，**95**(12)：1724-1729.

[38] 程念亮，李云婷，张大伟，等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. 环境科学，2016，**37**(6)：2041-2051.
Cheng N L，Li Y T，Zhang D W，*et al*. Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014[J]. Environmental Science，2016，**37**(6)：2041-2051.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 2

Feb. 15, 2021

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of $PM_{2.5}$ Pollution in China During 2013-2017 ····· ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, *et al.* (513)

Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement ····· WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)

Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016 ····· YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, *et al.* (534)

Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020 ····· PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, *et al.* (546)

Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta ····· XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, *et al.* (556)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing ····· ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, *et al.* (564)

Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin ····· DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, *et al.* (574)

Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling ····· ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, *et al.* (584)

Characterization, Sources, and Health Risks of $PM_{2.5}$-bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City ····· QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, *et al.* (595)

Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City ····· WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, *et al.* (604)

Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods ····· LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, *et al.* (616)

Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai ····· YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)

Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou ····· GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, *et al.* (634)

Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017 ····· LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, *et al.* (643)

Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta ····· WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, *et al.* (653)

Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed ····· SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, *et al.* (663)

Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai ····· WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, *et al.* (673)

Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City ····· WANG Wei, LI Xu-yong (681)

Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir ····· YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, *et al.* (688)

Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation ····· WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, *et al.* (699)

Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake ····· YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, *et al.* (712)

Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide ····· XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, *et al.* (723)

Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir ····· CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, *et al.* (732)

Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River ····· LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, *et al.* (740)

Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province ····· WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, *et al.* (749)

Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds ····· HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)

Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin ····· ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, *et al.* (766)

Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin ····· HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, *et al.* (776)

Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution ····· ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, *et al.* (786)

Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes ····· ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, *et al.* (796)

Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties ····· HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, *et al.* (808)

Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019 ····· YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, *et al.* (819)

Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season ····· HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, *et al.* (831)

Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, *et al.* (842)

Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems ····· ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, *et al.* (850)

Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection ····· HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, *et al.* (860)

Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron ····· SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, *et al.* (867)

Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution ····· WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, *et al.* (874)

Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters ····· XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, *et al.* (883)

Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste ····· CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, *et al.* (891)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province ····· MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, *et al.* (900)

Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City ····· CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, *et al.* (909)

Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil ····· DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, *et al.* (917)

Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter ····· LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)

Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO_2 on Cadmium Enrichment of Rice ····· ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, *et al.* (932)

Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area ····· WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, *et al.* (941)

Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells ····· SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)

Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs ····· CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, *et al.* (960)

Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments ····· XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, *et al.* (967)

Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C: N: P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China ····· GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, *et al.* (977)

Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils ····· LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, *et al.* (988)

Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems ····· GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, *et al.* (996)

Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar ····· LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)

Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter ····· LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, *et al.* (1013)