

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

大气环流型对珠三角 2015 ~ 2020 年臭氧变化的影响

汪瑶¹, 刘润^{1,2*}, 辛繁¹

(1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 511443)

摘要: 基于 2015 ~ 2020 年的珠三角臭氧(O_3)日最大 8 h 浓度平均值[MDA8 O_3 , $\rho(O_3-8h)$]的观测数据和气象再分析数据, 运用 Lamb-Jenkinson 天气分型法(LWTs)分析不同大气环流型的特征并定量其对 MDA8 O_3 年际变化的贡献。结果表明, 珠三角发生的 18 种天气型中 ASW 型更容易出现 O_3 污染现象, 而 NE 型会导致更严重的 O_3 污染。根据 850 hPa 风场的风向变化及中心系统的不同位置将 18 种天气类型合并为 5 个天气类别来探讨不同天气型的 O_3 生成机制, 发现 $\rho(O_3-8h)$ 高的天气类别为 N-E-S 方向类别[(161 ± 68) $\mu g \cdot m^{-3}$]和 A 类别[(122 ± 39) $\mu g \cdot m^{-3}$], 二者 $\rho(O_3-8h)$ 与日最高气温和太阳净辐射量都呈显著正相关。N-E-S 方向类别为秋季主导大气环流型, 而 A 类别多发生在春季, 其中春季珠三角发生的 90% O_3 污染事件是由 A 类别控制。珠三角受大气环流频率和强度变化影响对 MDA8 O_3 年际变化的贡献率为 69%, 天气型频率变化的贡献率为 4%。MDA8 O_3 的年际波动与天气型强度密切相关, O_3 超标日天气型强度和频率对 MDA8 O_3 年际波动的贡献相当。

关键词: 珠三角(PRD); 臭氧(O_3); Lamb-Jenkinson 天气分型法(LWTs); 天气型; 量化; 天气类别

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3080-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206106

Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020

WANG Yao¹, LIU Run^{1,2*}, XIN Fan¹

(1. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. Guangdong-Hong Kong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 511443, China)

Abstract: Based on the ozone observation data and meteorological reanalysis data of the Pearl River Delta (PRD) from 2015 to 2020, the Lamb-Jenkinson weather typing method (LWTs) was used to analyze the characteristics of different circulation types and quantify their contributions to the interannual ozone variation. The results showed that there was a total of 18 weather types in PRD. Type ASW was more likely to occur with ozone pollution, and Type NE was associated with more serious ozone pollution. To better explore the ozone generation mechanism under different weather types, the 18 weather types were merged into five weather categories based on the wind direction change of the 850 hPa wind field and the different positions of the central system. The weather categories with high ozone concentration were the N-E-S directional category [(161 ± 68) $\mu g \cdot m^{-3}$] and category A [(122 ± 39) $\mu g \cdot m^{-3}$]. The ozone concentrations of these two categories were significantly positively correlated with the daily maximum temperature and the net amount of solar radiation. The N-E-S directional category was the dominant circulation pattern in autumn, whereas category A mostly occurred in spring, and 90% of the ozone pollution events occurring in PRD in spring were related to category A. The contribution of changes in atmospheric circulation frequency and intensity to interannual change in ozone concentration in PRD was 69%, and the contribution of changes in atmospheric circulation frequency alone was 4%. The changes in atmospheric circulation intensity and frequency on ozone-exceeding days contributed comparably to the interannual fluctuations in ozone pollution concentrations.

Key words: Pearl River Delta (PRD); ozone (O_3); Lamb-Jenkinson weather typing (LWTs) method; weather types; quantification; weather categories

自 2013 年 9 月《大气污染防治行动计划》实施以来,我国细颗粒物($PM_{2.5}$)以及二氧化硫(SO_2)浓度明显下降,但臭氧(O_3)浓度不减反增^[1~3]。珠三角作为我国重要城市群之一,其 $\rho(O_3)$ 的区域平均值从 2006 年的 48 $\mu g \cdot m^{-3}$ ^[4] 上升至 2021 年的 99 $\mu g \cdot m^{-3}$, O_3 污染问题凸显。

O_3 的形成既受源排放(人为源和自然源)变化的影响,也受气象因素(大气环流、温度、湿度和辐射等)的影响^[5~12]。在全球暖化背景下气候变化引起的青藏高原^[13]和北极圈^[14,15]的冰川变化会影响东亚大气环流,与其密切相关的极端温度事件^[16]和热带气旋^[17]会对中国南部的大气环流产生重大影响。大气环流可以通过影响大气污染物的垂直分布和远距离传输、污染物的生成、聚集和扩散条件而导致区域污染水平的差异^[18,19]。例如,大陆高压和

低压槽等强暖环流模式会导致华北地区更容易出现 O_3 高值^[20,21]; 华东地区受副高控制或副高西北侧控制时更易发生 O_3 污染^[22]; 珠三角地区高压反气旋、台风外围下沉运动和海陆风会导致高 O_3 污染事件发生^[23], 东海转向热带气旋会导致珠三角 O_3 超标频率和超标浓度明显升高^[24]。珠三角各城市处于静风条件下, O_3 污染以本地贡献为主, 占比 60% 以上, 区域传输贡献较弱^[25]。气象条件对污染物的分布和大气污染水平具有重要影响^[26,27]。在不同的环流天气配置下, 辐射、温度和相对湿度等气象要素会成为驱动当地 O_3 污染的关键因素^[28,29]。

收稿日期: 2022-06-09; 修订日期: 2022-08-15

基金项目: 广州市科技计划项目(202002020065)

作者简介: 汪瑶(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环流型对臭氧污染的影响, E-mail: wangyao@stu2020.jnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: liurun@jnu.edu.cn

天气分型作为一种统计降尺度的方法,可以深入分析区域尺度上气象条件对 O_3 浓度的影响. 天气分型方法主要包括主观天气分型、客观分型以及主客观相结合^[30~34]. 目前关于珠三角污染天气分型的研究表明,珠三角空气污染的天气形势可以分为冷锋前部型、高压底部型和高压脊控制型这 3 类^[35],影响区域中度至重度 O_3 污染过程的主要天气型为副高、台风外围和两者叠加型^[36], Liao 等^[37] 在 Lamb-Jenkinson 天气分型法 (Lamb-Jenkinson weather typing, LWTs) 的基础上结合 CMIP5 模式数据对广州市的研究发现,在高排放背景下,2020~2069 年反气旋型的发生频率会增加 25%,并且会造成更严重的 O_3 污染. 由于大气环流变化 (如气旋和反气旋系统的相位变化) 对局地气象条件有很大影响,而空气质量与气象条件密切相关^[38,39],因此有必要结合天气分型方法来研究气象条件对区域 O_3 浓度的影响.

本研究通过 LWTs 从每日天气型及其气象条件角度分析珠三角 O_3 污染的演变特征,进一步探索珠三角不同天气型与 O_3 浓度的关系、珠三角 O_3 污染的气象机制,量化天气型变化对珠三角 O_3 变化的贡献,以期对珠三角 O_3 防控提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据资料

本研究使用的 O_3 数据来自中国环境监测中心 (<http://www.cnemc.cn/>),选取珠三角 (广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门和肇庆) 2015~2020 年的 O_3 日最大 8 h 浓度平均值 [MDA8 O_3 , $\rho(O_3-8h)$] 数据. 用同 1 d 珠三角 9 个城市的 $\rho(O_3-8h)$ 来表征区域整体 O_3 浓度水平.

气象数据来自欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 ERA5 再分析数据集,包括海平面气压 (SLP)、地表净太阳辐射、850 hPa 位势高度、2 m 最高温度、1000 hPa 相对湿度、边界层高度、总云量、10 m 风速、850 hPa 的纬向风、经向风和 850~975 hPa 的垂直速度与散度. 除边界层高度和 2 m 最高温度采用 08:00~18:00 最大值外,其余数据均计算 24 h 日均值.

1.2 Lamb-Jenkinson 天气分型

本研究将格点 ($112.5^\circ E$, $22.5^\circ N$) 设定为研究区域中心,如图 1 所示, LWTs 通过 16 个格点的 SLP 计算出 6 个环流指数,即地转风的纬向分量 (v)、地转风的纵向分量 (u)、地转风 (V)、纵向剪切涡度

(ξ_u)、纬向剪切涡度 (ξ_v) 和总剪切涡度 (ξ) 来确定每日天气类型. 各个指数的计算方法如下:

$$u = 0.5(P_{12} + P_{13} - P_4 - P_5) \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{\cos\alpha} \times \frac{1}{4}(P_5 + 2P_9 + P_{13} - P_4 + 2P_8 - P_2) \quad (2)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

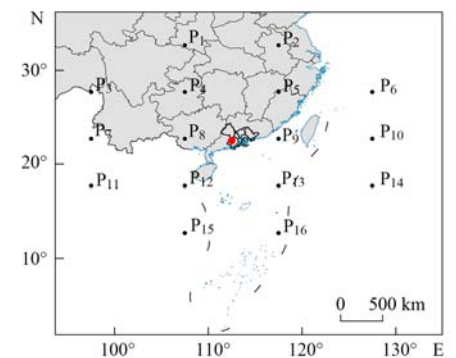
$$\xi_u = \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_1} \times \frac{1}{2}(P_{15} + P_{16} - P_8 - P_9) - \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_2} \times \frac{1}{2}(P_8 + P_9 - P_1 - P_2) \quad (4)$$

$$\xi_v = \frac{1}{2\cos^2\alpha} \times \frac{1}{4}(P_6 + 2P_{10} + P_{14} - P_5 - 2P_9 - P_{13} - P_4 - 2P_8 - P_{12} + P_3 + 2P_7 + P_{11}) \quad (5)$$

$$\xi = \xi_u + \xi_v \quad (6)$$

式中 α 、 α_1 和 α_2 分别为 P_8 、 P_{12} 和 P_4 的纬度, P_n 为格点 n 处的 SLP.

根据涡度与地转风特征将环流类型分为气流型、混合型、旋转型和无定义型. 当 $|\xi| < v$ 时风向平直, 定义为气流型 (N、NE、E、SE、S、SW、W、NW). 当 $|\xi| > 2v$ 时为涡度型, 强调大气旋转包括气旋型 (C) 或反气旋型 (A). 当 $v < |\xi| < 2v$ 时为混合型, 即反气旋混合型 (AN、ANE、AE、ASE、AS、ASW、AW、ANW) 和气旋混合型 (CN、CNE、CE、CSE、CS、CSW、CW、CNW). 当 $v > 6$ 或 $|\xi| > |6|$ 时为无定义型.



红点表示研究中心, 16 个黑点表示 Lamb-Jenkinson

天气分型法选取计算指数的格点

图 1 Lamb-Jenkinson 天气分型法示意

Fig. 1 Schematic diagram of Lamb-Jenkinson weather typing method

1.3 基于天气型重构 O_3 浓度法

Comrie 等^[40] 提出了一种基于天气型发生频率的 O_3 浓度重构方法, 具体算法如下:

$$\overline{\overline{O_{3m}}}(\text{fre}) = \sum_{k=1}^n \overline{O_{3k}} \cdot F_{km} \quad (7)$$

式中, $\overline{\overline{O_{3m}}}(\text{fre})$ 为 m 年受天气型频率变化重构的 O_3 浓度, $\overline{O_{3k}}$ 为 m 年 k 种天气类型 O_3 浓度平均值, F_{km} 为 m 年 k 种天气类型分别发生的频率, 本研究使用

该公式重构 2015 ~ 2020 年珠三角基于天气型频率影响的 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值。

Hegarty 等^[41]在此基础上进一步考虑了天气型的强度变化,用区域平均 SLP 作为环流强度指数(CII),加上年际频率变化来量化天气型对 O_3 浓度的影响,算法如下:

$$\overline{\text{O}_{3m}}(\text{fre} + \text{int}) = \sum_{k=1}^n (\overline{\text{O}_{3k}} + \Delta\text{O}_{3km}) \cdot F_{km} \quad (8)$$

式中, $\overline{\text{O}_{3m}}(\text{fre} + \text{int})$ 为 m 年受天气型频率和强度影响下重建的 O_3 浓度平均值; ΔO_{3km} 为 O_3 浓度的强度拟合值,即 m 年 k 种天气型的 O_3 浓度年异常值 (ΔO_3) 与环流强度指数线性拟合后拟合线上的值,该值可以解释各环流强度对 O_3 浓度年际振荡的影响,但仅用区域内平均 SLP 作为 SLP 有效强度指标是不够的。

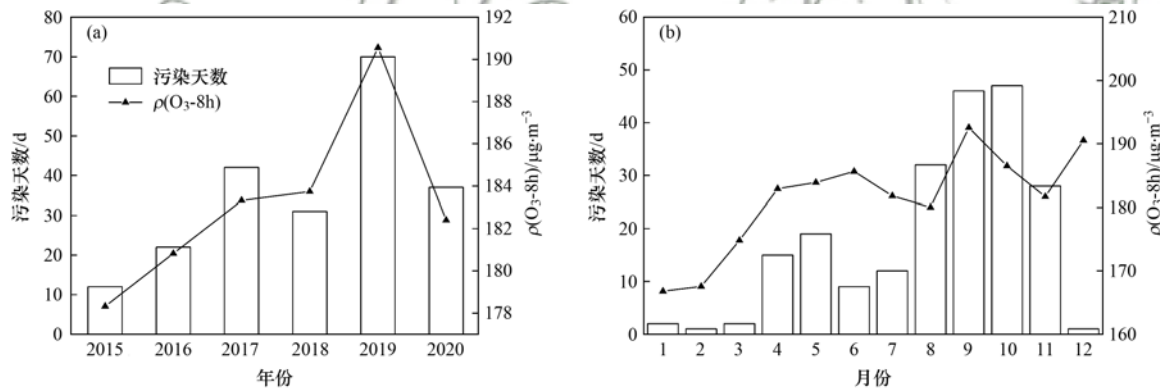
为了更好地了解环流强度变化的特点,本研究采用与 MDA8 O_3 年异常值 ($\Delta\text{O}_3\text{-8h}$) 线性拟合后相关系数最高的环流指数作为该天气型的最强环流指数 (ECII)^[42],包括区域平均 SLP (MSLP)、SLP 梯度

(ΔSLP)、高压系统中心气压 (max SLP)、低压系统中心气压 (min SLP)、高压系统和低压系统与研究区的距离 (dis max 和 dis min),通过式 (8) 重构珠三角 2015 ~ 2020 年基于天气型频率和强度影响的 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值。

2 结果与讨论

2.1 珠三角 MDA8 O_3 变化特征

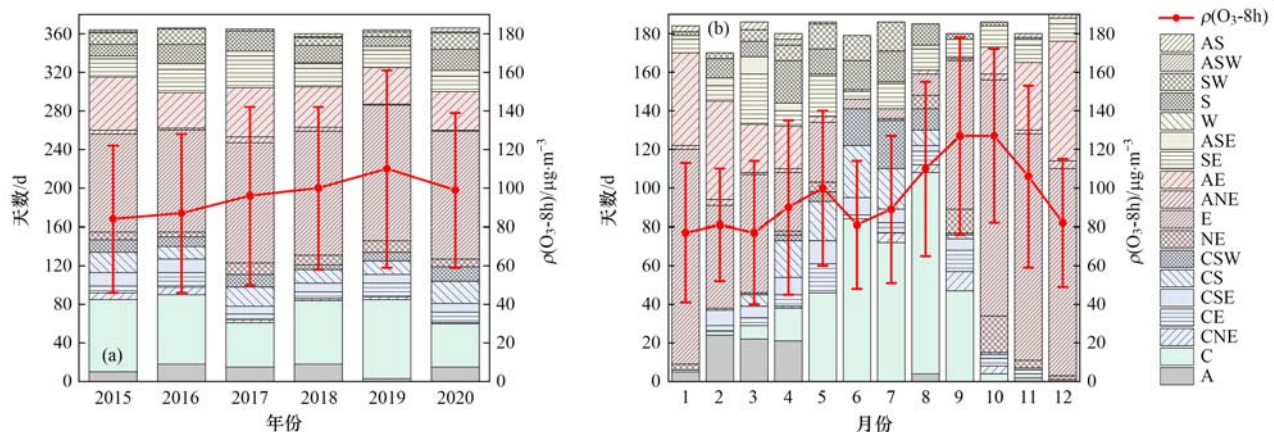
2015 ~ 2020 年珠三角逐年和逐月的 MDA8 O_3 变化情况如图 2 所示, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 年均值为 $96.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,总超标天数达 214 d,与其他污染物浓度呈现下降趋势相反, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 出现增加。尤其是 2019 年 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值高达 $110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标天数高达 70 d,其中 30 d 发生了中度以上的 O_3 污染,是近年 O_3 污染最严重的一年。 O_3 污染最严重的月份出现在 9 ~ 10 月 (图 3),月平均 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 高达 $190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率达 25%。有研究表明,秋季副高和台风外围是导致珠三角秋季 O_3 污染的主要大气环流形势^[43],地面静风或小风 ($< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、稳定的大



污染天数表示同 1 d 珠三角 9 个城市的 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值超过了 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数

图 2 2015 ~ 2020 年 O_3 超标日数及 MDA8 O_3 年和月变化

Fig. 2 Annual and monthly variation in the number of O_3 exceeding days and MAD8 O_3 concentrations from 2015 to 2020



红点表示 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值,垂直红线表示标准偏差,叠加图表示各种天气型发生天数,橙色、粉红色、浅蓝色、绿色和灰色填充分别表示 S-W-N 方向、N-E-S 方向、LP、C 和 A 的天气类别

图 3 2015 ~ 2020 年 18 种天气型发生天数 和年、月 MDA8 O_3 平均值

Fig. 3 Occurrence days of the 18 weather patterns and annual and monthly MDA8 O_3 concentrations from 2015 to 2020

气层结以及高温等气象条件通过影响光化学反应从而加重珠三角 O₃ 污染^[44].

2.2 天气型与 MAD8 O₃ 的关系

2.2.1 全部天气型 MDA8 O₃ 的特征

根据 LWTs 的结果,2015 ~ 2020 年珠三角共出现 18 种天气型,包括 2 种涡度型(A 和 C)、6 种气流型(NE、E、SE、S、SW、W)和 10 种混合型(CNE、CE、CSE、CS、CSW、ANE、AE、ASE、AS 和 ASW).在 2 185 d 中,涡度型、气流型和混合型的发生频率分别为 21.2%、49.3% 和 29.4%.在不同的天气型下,高压和低压中心的位置、850 hPa 风场存在明显差异.

为尽可能合理定量描述不同天气型的大气扩散能力,采用 30 d 滑动平均法去除 MDA8 O₃ 随减排和时间变化趋势,并计算不同天气型下实际的 MDA8 O₃ 与滑动平均值的差值以量化不同天气型的扩散能力^[45](图 4),其中,差值为正值,说明气象

条件不利于 O₃ 扩散,反之则利于 O₃ 扩散.在珠三角地区出现的 18 种天气型中,有 10 种天气型(NE、ANE、AE、ASE、W、ASW、CNE、CE、C、A)容易发生 O₃ 污染,其中 ASW 型最易形成高浓度 O₃,其次是 A 型;其余 8 种天气型(E、SE、S、SW、AS、CSE、CS、CSW)中 CS 型最不易发生 O₃ 污染现象.

2.2.2 污染天气型 MDA8 O₃ 的特征

为了研究不同天气型对 O₃ 污染程度的影响,计算了 13 种出现过 O₃ 超标现象的天气型对应的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 和超标率(指某天气型发生 O₃ 污染的天数与该天气类型的总天数之比).图 5 结果表明,珠三角受 NE 天气型控制下 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 最大,高达 195 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比所有 O₃ 超标天 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 平均值 185 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 高 5.4%.最大超标率出现在 ASW 天气型,达 67%,但超标浓度只有 169 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.因此,相比于其他污染天气型,NE 型的发生会导致珠三角区域出现更严重的 O₃ 污染事件.

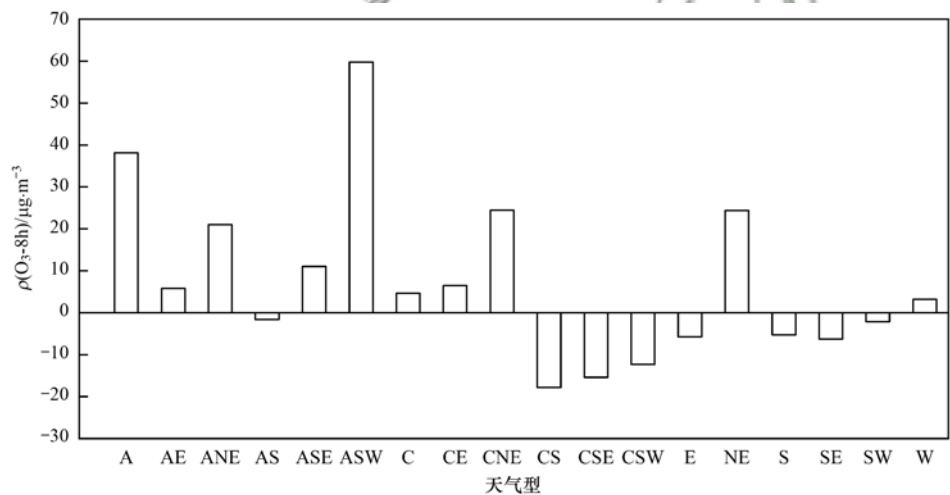


图 4 18 种天气型的原始 MDA8 O₃ 平均值与其 30 d 滑动平均值的差值

Fig. 4 Difference between the mean raw MDA8 O₃ concentrations for the 18 weather patterns and their 30 d running averages

2.2.3 不同天气类别气象条件与 MDA8 O₃ 关系

LWTs 根据每日地转风风向来判断研究区域当日的主导风场,本研究根据 850 hPa 风场的风向变化及中心系统的位置,将 18 种天气型合并为 5 种天气类别^[42]:①N-E-S 方向(地转风向由北向南),包括 NE、E、ANE、AE;②S-W-N 方向(地转风向由南向北),包括 S、SE、SW、ASE、W、AS 和 ASW;③LP(低压相关天气型),包括 CNE、CE、CSE、CS、CSW;④A(反气旋);以及⑤C(气旋).

气象因子在 O₃ 污染中发挥着重要作用,能够影响着 O₃ 光反应和区域传输.表 1 展示了 5 种类别的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 平均值、发生频率和对 O₃ 生成有影响的 12 个气象因子.在 N-E-S 方向类别和 A 类别情况下, $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 平均值较高,分别为 (161 ± 68)

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 (122 ± 39) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. N-E-S 方向类别与 A 类别的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 与日最高气温、太阳净辐射量呈现出显著正相关关系(表 2),但 N-E-S 方向类别在 850 ~ 975 hPa 高度发生辐合上升运动,而 A 类别主要发生下沉运动并伴随低云量、冷湿空气、高辐射量和高边界层的气象条件. C 类别的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 与日最高温度、850 hPa 风场影响显著,具有较低的边界层高度和较大的地面风速. $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 较低的天气类别包括 LP 类别[(84 ± 31) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 和 S-W-N 方向类别[(87 ± 34) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],可能与高空强劲风场、湿热的空气、中等云量和低边界层高度不利 O₃ 的形成和传输的气象条件有关.

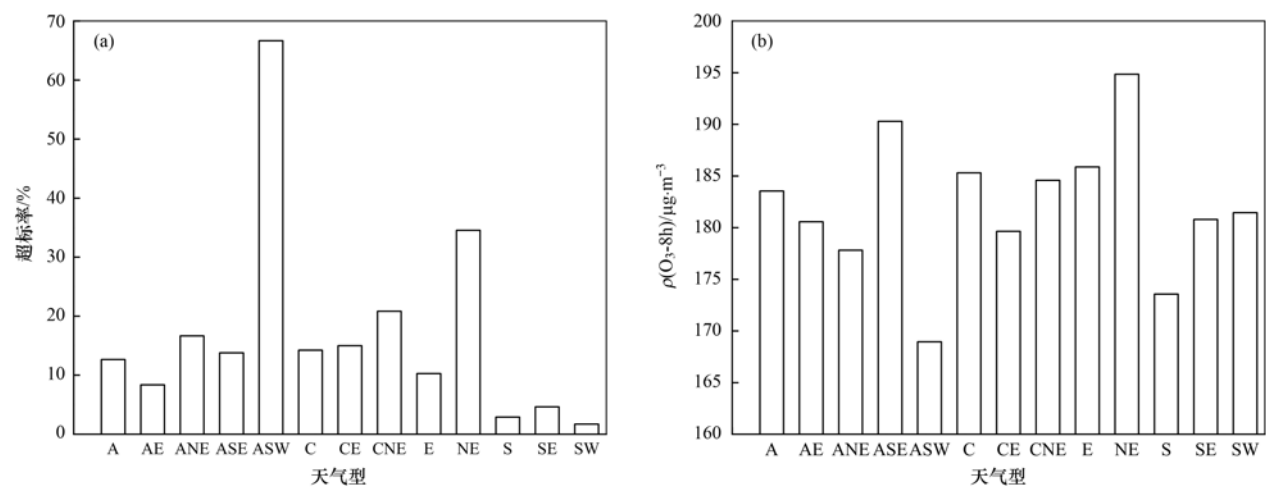
2.2.4 天气类别对 MDA8 O₃ 年、月际变化的影响

5 个天气类别中容易出现高 MDA8 O₃ 的 N-E-S

表 1 5 个天气类别对应天气型的 MDA8 O₃ 及气象条件¹⁾

天气类别	天气型	$\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	频率 /%	温度 / $^{\circ}\text{C}$	湿度 /%	边界层高度 /m	云量 /%	海平面气压 /hPa	位势高度 /m	纬向风 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	经向风 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	垂直速度 $\times 10^{-6}/\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	散度 / s^{-1}	风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	地表净辐射 / $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	特征
N-E-S	NE	141	2.5	25	78	1 061	65	1 013	1 507	-1.5	-1.6	-0.05	-4.0	1.7	0.6	高 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ [(161 ± 68) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 冷湿、中等云量 和中等边界层高度
	E	95	33.4	23	78	1 010	63	1 016	1 519	-1.8	-0.2	-0.04	-3.0	1.5	0.5	
	ANE	114	1.0	21	71	1 179	56	1 018	1 530	-1.8	-3.2	0.03	2.1	1.8	0.5	
	AE	97	12	20	72	1 112	58	1 019	1 533	-2.4	-1.1	0.03	1.9	2.0	0.5	
S-W-N	S	82	4.7	27	79	1 020	65	1 011	1 498	0.9	3.3	-0.03	-2.0	3.0	0.7	低 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ [(87 ± 34) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 中等温度和 高边界层高度
	SE	86	5.9	25	79	1 007	64	1 012	1 503	0.02	2.0	-0.05	-4.2	2.1	0.6	
	ASE	103	1.3	23	75	1 078	57	1 015	1 515	-0.2	2.0	0.001	0.4	1.7	0.6	
	SW	79	2.7	28	78	1 067	61	1 009	1 487	2.3	3.9	-0.01	-0.9	3.9	0.8	
LP	W	113	0.1	29	81	937	75	1 007	1 478	3.4	2.3	0.01	2.0	4.3	0.8	低 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ [(84 ± 31) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 湿热、中等云量 和中等边界层高度
	ASW	154	0.1	26	67	1 299	49	1 013	1 506	1.7	2.8	0.03	3.0	2.8	0.8	
	AS	103	0.6	24	73	1 149	46	1 014	1 511	-0.1	2.5	0.02	2.0	1.9	0.6	
	CNE	130	1.0	28	80	1 018	71	1 008	1 480	-0.1	-0.3	-0.10	-7.6	2.5	0.6	
C	CE	106	2.7	27	80	1 003	68	1 010	1 493	0.5	0.7	-0.08	-5.0	2.5	0.6	高 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ [(122 ± 39) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 干冷、高边界层 高度和受下层气流控制
	CSE	76	2.9	26	80	1 007	65	1 010	1 492	1.1	2.1	-0.06	-5.5	2.8	0.7	
	CS	68	4.8	28	80	1 010	67	1 009	1 486	2.1	3.1	-0.04	-3.6	3.7	0.7	
	CSW	75	3.0	29	81	980	74	1 007	1 479	3.2	3.3	-0.03	-2.7	4.4	0.7	
A	C	102	17.6	28	81	998	76	1 007	1 473	2.6	1.9	-0.07	-6.0	4.1	0.7	与 LP 类别类似

)垂直速度和散度分别表示850~975 hPa的总垂直速度和总散度,垂直速度负值表示上升运动,散度负值表示辐合;纬向风负值表示东风,经向风负值表示北风



超标率表示为某种天气型发生 O₃ 超标的天数和其发生的总天数的比值

图 5 13 种 O₃ 污染天气型的 O₃ 超标率和 MDA8 O₃ 平均值

Fig. 5 O₃ exceeding rates and MDA8 O₃ concentrations for 13 O₃ pollution weather types

表 2 5 个天气类别 MDA8 O₃ 与气象因子相关系数¹⁾

Table 2 Meteorological parameters and their correlation with MDA8 O₃ concentration under the five categories

气象因子		N-E-S	S-W-N	LP	C	A
日最高温度		0.6 **	-0.05	0.2 **	0.4 **	0.4 **
相对湿度		-0.1 **	-0.5 **	-0.05	-0.2 **	-0.2
边界层高度		0.1 **	0.3 **	-0.1 **	0.2 **	0.3 **
总云量		-0.2 **	-0.3 **	0.03	-0.04	-0.1
海平面气压		-0.3 **	0.2 *	-0.1	-0.2 **	-0.3 **
位势高度		-0.1 **	0.2 *	0.01	-0.2 **	-0.3 **
纬向风		-0.1 **	-0.3 **	-0.4 **	-0.1 **	0.1
经向风		-0.3 **	-0.4 **	-0.6 **	-0.4 **	0.03
风速		-0.1 *	-0.3 **	-0.4 **	0.05	-0.05
太阳净辐射量		0.4 **	0.2 *	-0.1	0.1	0.6 **
垂直速度	850 hPa	0.1 *	0.3 **	-0.1	-0.05	-0.05
	875 hPa	0.05	0.2 **	-0.1	-0.07	-0.06
	950 hPa	-0.01	0.2 **	-0.2 **	-0.1 **	-0.13
	975 hPa	-0.03	0.1 *	-0.2 **	-0.08	-0.17
散度	850 hPa	0.1 **	0.3 **	0.05	0.1 **	-0.05
	875 hPa	0.2 **	0.3 **	0.01	0.1	-0.06
	950 hPa	0.1 **	0.2 **	-0.1	-0.1	-0.04
	975 hPa	0.1 *	0.2 **	-0.1	-0.1 **	-0.05

1) * 表示通过 95% 置信度显著性检验, ** 表示通过 99% 置信度显著性检验

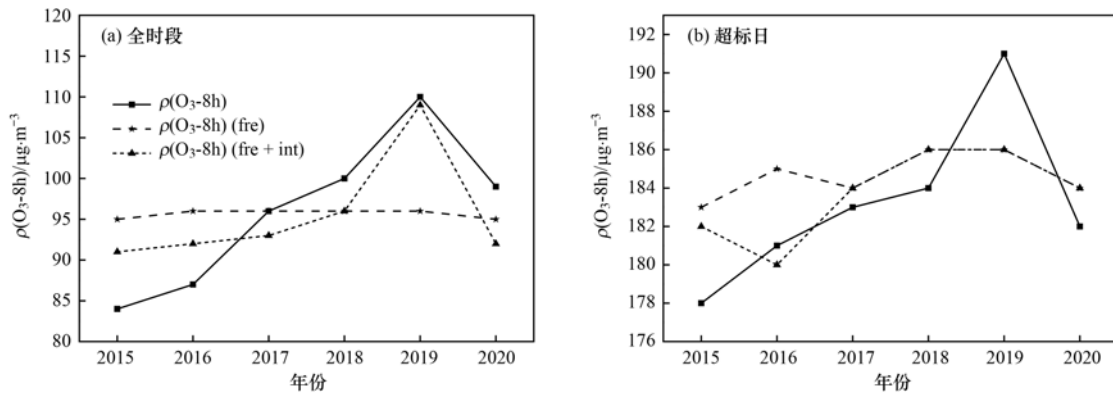
方向类别和 A 类别,在 2015 ~ 2020 年出现的频率在 50% 左右,尤其在 2017 年高达 57%. 相比于 A 类别, N-E-S 方向类别出现频率更高. 在 2019 年 MDA8 O₃ 主要由 N-E-S 方向类别所贡献, A 类别出现频率仅为 4%. 季节尺度上, 夏季由 C 类别和 LP 类别占主导; 秋、冬季节由 N-E-S 方向类别占主导; 春季各类别出现比例相当. 其中春季珠三角发生的 O₃ 污染事件中 90% 是在 A 类别控制下发生的.

2.3 天气型变化对 MDA8 O₃ 年际变率的影响

天气型的强度能够表明中心压力、大气环流系统的位置、压力梯度和区域平均海平面压力差异. 在珠三角不同的天气型中 ECII 和 ΔO₃ 之间的相关性有所不同, AE、E、CSE、CS 型与 min SLP 之间有

很强的负相关关系, 而 CE 型与 min SLP 存在正相关关系. 造成这种差异的原因可能是珠三角由 CE 型控制时 min SLP 值较大, 低压中心与周边环境的压力梯度减小, 导致东风减弱无法将海上相对清洁气团带入珠三角, 从而使 MDA8 O₃ 上升.

根据公式 (7) 和公式 (8) 分别重构了 2015 ~ 2020 年珠三角仅考虑天气型频率变化和同时考虑天气型频率和强度变化的 MDA8 O₃ 时间序列 (图 6). 在此基础上, 本研究参照 Liu 等^[42] 的方法将 2015 ~ 2020 年重构 MDA8 O₃ 的最大值和最小值差值与观测浓度最大值和最小值的差值的百分比作为量化天气型变化对 MDA8 O₃ 年际变化贡献率的指标.



黑线、红线和蓝线分别表示实际观测的 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 变化趋势、根据天气类型变化的频率、频率和强度重构的 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 年平均趋势

图6 基于天气型变化的实际和重构MDA8 O_3 年平均趋势

Fig. 6 Observed and reconstructed annual mean MDA8 O_3 concentrations trends based on weather-type variability

针对2015~2020年的MDA8 O_3 重构结果发现,天气型频率和强度变化对珠三角MDA8 O_3 年际变化的贡献率可达69%,只考虑天气型频率变化,贡献率仅为4%[图6(a)],这表明MDA8 O_3 的年际波动与天气型的强度密切相关.针对2015~2020年所有 O_3 污染日的MDA8 O_3 重构结果发现,天气型频率变化对 O_3 超标日浓度变化的贡献率为23%,天气型频率和强度共同变化的贡献率为46%[图6(b)],这表明对于 O_3 超标日而言天气型的频率和强度的变化同等重要.

3 结论

(1)2015~2020年珠三角地区的 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 逐年增加,在2019年最高达 $110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,秋季 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 最高,平均值为 $167 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(2)根据LWTs结果,珠三角地区在2015~2020年共出现了18种天气型,其中NE型MDA8 O_3 最高,ASW型容易出现 O_3 污染且 O_3 超标比例最高.将18种天气型进一步整合成5种天气类别,其中N-E-W类别和A类别最容易出现 O_3 污染,与日最高气温和太阳辐射有关.

(3)考虑天气型变化对珠三角MDA8 O_3 进行重构发现,2015~2020年天气型的频率和强度变化对MDA8 O_3 年际变化的贡献率可达69%,表明MDA8 O_3 的年际波动与天气型的强度密切相关.但对于2015~2020年的 O_3 超标日的MDA8 O_3 而言,天气型频率变化对 O_3 超标日浓度变化的贡献率为23%,天气型频率和强度共同变化的贡献率为46%,两者贡献相当.

参考文献:

[1] Li M G, Wang L L, Liu J D, *et al.* Exploring the regional pollution characteristics and meteorological formation mechanism of $\text{PM}_{2.5}$ in North China during 2013-2017[J]. *Environment International*, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.

105283.

- [2] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>, 2021-05-26.
- [4] 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, Liu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [5] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [6] Wang N, Lyu X P, Deng X J, *et al.* Assessment of regional air quality resulting from emission control in the Pearl River Delta region, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **573**: 1554-1565.
- [7] 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.
- [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] Yang J B, Liu J L, Han S Q, *et al.* Study of the meteorological influence on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends in all seasons from 2009 to 2015 in Tianjin, China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2019, **131**(6): 1661-1675.
- [10] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Impacts of emissions and meteorological changes on China's ozone pollution in the warm seasons of 2013 and 2017[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, **13**(5), doi: 10.1007/s11783-019-1160-1.
- [11] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.

- [12] 赵恺辉, 包云轩, 黄建平, 等. 华南地区春季平流层入侵对流层低层臭氧影响的模拟研究[J]. 大气科学, 2019, **43**(1): 75-86.
Zhao K H, Bao Y X, Huang J P, *et al.* A modeling study of the impact of stratospheric intrusion on ozone enhancement in the lower troposphere in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, **43**(1): 75-86.
- [13] Zhu L P, Lü X M, Wang J B, *et al.* Climate change on the Tibetan Plateau in response to shifting atmospheric circulation since the LGM[J]. Scientific Reports, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep13318.
- [14] Loo Y Y, Billa L, Singh A. Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia[J]. Geoscience Frontiers, 2015, **6**(6): 817-823.
- [15] Chen H P, Wang H J. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(12): 5895-5909.
- [16] Horton D E, Johnson N C, Singh D, *et al.* Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends[J]. Nature, 2015, **522**(7557): 465-469.
- [17] Henderson-Sellers A, Zhang H, Berz G, *et al.* Tropical cyclones and global climate change: a post-IPCC assessment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, **79**(1): 19-38.
- [18] 何琰, 林惠娟, 舒舒娅, 等. 城市臭氧污染特征与高影响气象因子: 以苏州为例[J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 85-93.
He Y, Lin H J, Cao S Y, *et al.* Characteristics of ozone pollution and high impact meteorological factors in urban cities: a case of Suzhou[J]. Environmental Science, 2023, **44**(1): 85-93.
- [19] 裴成磊, 牟江山, 张英南, 等. 广州市臭氧污染溯源: 基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1615-1625.
Pei C L, Mu J S, Zhang Y N, *et al.* Source apportionment of ozone pollution in Guangzhou: case study with the application of Lagrangian photochemical trajectory model [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1615-1625.
- [20] Knowland K E, Doherty R M, Hodges K I, *et al.* The influence of mid-latitude cyclones on European background surface ozone [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(20): 12421-12447.
- [21] Fleming Z L, Doherty R M, von Schneidemesser E, *et al.* Tropospheric ozone assessment report: present-day ozone distribution and trends relevant to human health[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2018, **6**, doi: 10.1525/elementa.273.
- [22] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 169-179.
Chang L Y, Xu J M, Qu Y H, *et al.* Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 169-179.
- [23] Fan S J, Wang B M, Tesche M, *et al.* Meteorological conditions and structures of atmospheric boundary layer in October 2004 over Pearl River Delta area[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6174-6186.
- [24] 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 等. 热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2957-2965.
Zhao W, Lü M Y, Lu Q, *et al.* Effects of tropical cyclones on ozone pollution in the Pearl River Delta in autumn [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2957-2965.
- [25] 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 等. 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 160-169.
Wu Y K, Chen W H, Yan F H, *et al.* Nonlinear response relationship between ozone and precursor emissions in the Pearl River Delta region under different transmission channels [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 160-169.
- [26] Zheng X Y, Fu Y F, Yang Y J, *et al.* Impact of atmospheric circulations on aerosol distributions in autumn over eastern China: observational evidence[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(21): 12115-12138.
- [27] Ding A J, Wang T, Xue L K, *et al.* Transport of north China air pollution by midlatitude cyclones: case study of aircraft measurements in summer 2007 [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, **114**(D8), doi: 10.1029/2008jd011023.
- [28] Wu P, Ding Y H, Liu Y J. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, **34**(4): 429-440.
- [29] 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.
- [30] Osipova O P, Osipov E Y. Objective classification of weather types for the Eastern Siberia over the 1970-2020 period using the Jenkinson and Collison method [J]. Atmospheric Research, 2022, **277**, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106291.
- [31] Kim H C, Lee D, Ngan F, *et al.* Synoptic weather and surface ozone concentration in South Korea [J]. Atmospheric Environment, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117985.
- [32] Huth R, Beck C, Philipp A, *et al.* Classifications of atmospheric circulation patterns[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008, **1146**(1): 105-152.
- [33] Philipp A, Bartholy J, Beck C, *et al.* Cost733cat-A database of weather and circulation type classifications [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2010, **35**(9-12): 360-373.
- [34] 吴进, 李琛, 马志强, 等. 基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4864-4873.
Wu J, Li C, Ma Z Q, *et al.* Influence of meteorological conditions on ozone pollution at Shangdianzi station based on weather classification [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4864-4873.
- [35] 李颖敏, 范绍佳, 张人文. 2008 年秋季珠江三角洲污染气象分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(10): 1585-1591.
Li Y M, Fan S J, Zhang R W. Study on air pollution meteorology over the Pearl River Delta during the autumn of 2008[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(10): 1585-1591.
- [36] 高晓荣, 邓雪娇, 谭浩波, 等. 广东四大区域污染过程特征与影响天气型分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(5): 1708-1716.
- [37] Gao X R, Deng X J, Tan H B, *et al.* Characteristics and analysis on regional pollution process and circulation weather types over Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(5): 1708-1716.
- [37] Liao W H, Wu L L, Zhou S Z, *et al.* Impact of synoptic weather types on ground-level ozone concentrations in Guangzhou, China [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2021, **57**

- (2): 169-180.
- [38] Demuzere M, Trigo R M, de Arellano J V G, *et al.* The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM₁₀ levels at a rural mid-latitude site[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(8): 2695-2714.
- [39] Chen Z H, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(24): 6078-6087.
- [40] Comrie A C, Yarnal B. Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in Metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania[J]. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 1992, **26**(3): 301-312.
- [41] Hegarty J, Mao H T, Talbot R. Synoptic controls on summertime surface ozone in the northeastern United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D14), doi: 10.1029/2006JD008170.
- [42] Liu J D, Wang L L, Li M G, *et al.* Quantifying the impact of synoptic circulation patterns on ozone variability in northern China from April to October 2013-2017[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(23): 14477-14492.
- [43] 洪莹莹, 翁佳烽, 谭浩波, 等. 珠江三角洲秋季典型 O₃ 污染的气象条件及贡献量化[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 1-10.
- Hong Y Y, Weng J F, Tan H B, *et al.* Meteorological conditions and contribution quantification of typical ozone pollution during autumn in Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 1-10.
- [44] 王媛林, 王哲, 陈学舜, 等. 珠三角秋季典型气象条件对空气污染过程的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3229-3239.
- Wang Y L, Wang Z, Chen X S, *et al.* Impact of typical meteorological conditions on air pollution over Pearl River Delta in autumn[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3229-3239.
- [45] 翁佳烽, 梁晓媛, 谭浩波, 等. 基于 K-means 聚类分析法的肇庆市干季 PM_{2.5} 污染天气分型研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 373-387.
- Weng J F, Liang X Y, Tan H B, *et al.* Objective synoptic classification on PM_{2.5} pollution during dry season based on K-means in Zhaoqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 373-387.



CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)