

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)
山东省典型灌溉区土壤-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)	

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析

符传博^{1,2,3}, 丹利², 佟金鹤^{1,3}, 徐文帅⁴

(1. 海南省气象科学研究所, 海口 570203; 2. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029; 3. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 4. 海南省环境科学研究院, 海口 571126)

摘要: 基于2015~2020年西北太平洋生成的181个热带气旋资料, 海南岛18个市县臭氧(O_3)小时浓度数据和气象观测资料, 分析了热带气旋对海南岛 O_3 污染的影响。结果表明, 近6年共有40个(22.1%)热带气旋的生命期间海南岛出现了 O_3 污染天气, 热带气旋生成个数偏多的年份, O_3 污染天数也偏多, 其中2019年污染天数最多最严重, 高污染(≥ 3 个市县超标)天数高达39 d(54.9%)。高污染(HP)类热带气旋有逐年增多趋势, 趋势系数和气候倾向率分别为0.725(通过95%信度检验)和0.667个 $\cdot a^{-1}$ 。热带气旋强度与海南岛 O_3 最大8 h滑动浓度平均值(O_3 -8h)成正相关关系, 其中在台风(TY)等级, HP类热带气旋占有所有样本数的比例高达35.4%。热带气旋路径聚类分析表明, 南海生成影响型(A类)热带气旋生成个数最多, 共有67个(37%), 同时最容易造成海南岛出现大范围和高浓度的 O_3 污染, A类热带气旋中HP的个数和海南岛 $\rho(O_3$ -8h)分别为7个和121.90 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。此外, HP期间热带气旋中心出现频率相对密集的区域分别是南海中部海面 and 巴士海峡以东的西太平洋海面。HP类热带气旋影响下, 海南岛气象条件的变化有利于 O_3 浓度的升高。

关键词: 臭氧(O_3); 热带气旋; 聚类分析; 相关分析; 海南

中图分类号: X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)06-3089-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202206221

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island

FU Chuan-bo^{1,2,3}, DAN Li², TONG Jin-he^{1,3}, XU Wen-shuai⁴

(1. Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 4. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 571126, China)

Abstract: Based on the 181 tropical cyclones data in the western North Pacific Ocean from 2015 to 2020, hourly ozone (O_3) concentration data, and meteorological observation data of 18 cities and counties in Hainan Island, this study analyzed the impacts of tropical cyclones on ozone pollution in Hainan Island. We found that 40 (22.1%) tropical cyclones experienced O_3 pollution in Hainan Island during the lifetime of tropical cyclones in the past six years. During the years with more tropical cyclones, more O_3 polluted days occurred in Hainan Island. Highly polluted days, which were defined as more than or equal to three cities and counties exceeding the standard, were the most serious in 2019 with 39 (54.9%) polluted days. The tropical cyclones related to high pollution (HP) showed an increasing trend, with the trend coefficient and climatic trend rate of 0.725 (exceeding the 95% significance level) and 0.667 a^{-1} , respectively. Tropical cyclone intensity was positively correlated with the maximum 8 h moving average (O_3 -8h) concentration in Hainan Island. Among them, HP-type tropical cyclones accounted for 35.4% of all samples in the typhoon (TY) intensity level. Cluster analysis of tropical cyclone paths showed that tropical cyclones from the South China Sea (type A) were the most common of the 67 (37%) and were the most likely to cause large-scale and high-concentration O_3 pollution events in Hainan Island. The average number of HP tropical cyclones and $\rho(O_3$ -8h) of Hainan Island in type A were 7 and 121.90 $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively. In addition, the tropical cyclone centers were located generally in the middle part of the South China Sea and the western Pacific Ocean near the Bashi Strait during the HP period. The change in meteorological conditions in Hainan Island under the influence of HP tropical cyclones was conducive to the increase in O_3 concentration.

Key words: ozone (O_3); tropical cyclone; cluster analysis; correlation analysis; Hainan

近地面臭氧(O_3)不仅是大气中重要的氧化剂, 参与了多种化学反应, 同时也是主要的温室气体和大气污染物之一, 其浓度的上升对城市空气质量、人体健康、生态系统和气候变暖等问题都有显著的影响^[1~4]。随着我国经济的迅猛发展和工业化的快速推进, 大气污染问题已由传统的单一污染物污染和点源污染, 转变成多污染物共同作用的复合型污染和区域性污染^[5~7]。自2013年开始, 我国政府相继颁布和实施了多项大气污染防治政策, 以 $PM_{2.5}$ 为代表的大气颗粒物浓度呈逐渐下降的变化趋势, 大气污染防治工作效果显著^[8,9]。然而 O_3 浓度却呈现出波动上升趋势, 并逐渐取代了 $PM_{2.5}$ 成为多个城市中的首要污染物^[10,11]。根据生态环境部门的监测数据显

示^[12], 2021年全国339个地级及以上城市中, 以 O_3 为首要污染物的超标天数占总超标天数的34.7%, 而京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原(三大重点区域)以 O_3 为首要污染物的超标天数占总超标天数分别为41.8%、55.4%和39.3%, 明显高于全国339个城市的平均结果。近地面 O_3 污染已经成为影响空气质量持续改善的重要因素^[13,14]。

收稿日期: 2022-06-20; 修订日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42065010, 42141017); 海南省重大科技计划项目(ZDKJ202007); 海南省自然科学基金项目(422RC802, 421QN0967); 海南省院士创新平台科研项目(YSPTZX202143)

作者简介: 符传博(1985~), 男, 硕士, 正研级高级工程师, 主要研究方向为大气环境与大气污染, E-mail: hnfuchuanbo@163.com

O_3 是一种二次污染物,主要由挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)和一氧化碳(CO)等前体物,在紫外辐射作用下经过一系列复杂的链式光化学反应生成^[15]. O_3 浓度变化强烈依赖于气象要素,气温在一定程度上反映了太阳紫外辐射强度的大小,温度越高,光化学反应越剧烈,对 O_3 浓度升高越有利^[16];相对湿度和云量的变化一方面会影响太阳辐射强度,另一方面会影响大气污染物的干湿沉降效果,因此相对湿度和云量主要与 O_3 浓度呈负相关关系^[17];风向风速的变化对 O_3 的传输和消散也会产生影响,在高污染区域风速与 O_3 浓度呈负相关关系,而在下游污染区域呈正相关关系^[18,19]. 此外,边界层高度、海陆风、气候变化等也会对 O_3 浓度产生影响^[3,20]. 热带气旋是一种发生在热带洋面上的强烈的暖性气旋性涡旋^[21],当热带气旋靠近陆地时,外围的下沉气流会在陆地形成具有稳定结构的高压均压场,这种形势场具有高温、低湿和弱风的气象条件^[22,23],非常有利于光化学过程和污染物的积累. 从垂直方向上看,热带气旋外围下沉气流还会使得边界层内气流混合加强^[24],造成混合层顶低和逆温层出现^[25],近地层污染物不易扩散,导致 O_3 浓度超标. 在我国东南沿海省份,热带气旋外围下沉气流引起的 O_3 污染天气已经引起了广泛关注^[26-28].

海南岛是我国第二大岛屿,地处热带,气候温暖湿润,常以环境优美,空气质量好著称^[29]. 近年来国家和省政府高度重视生态环境保护工作,连续出台了多项针对生态环境的保护政策. 在此背景下海南岛颗粒物浓度有明显下降^[30],2019~2021年海南岛 $\rho(PM_{2.5})$ 分别为 16、13 和 13 $\mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(O_3)$ (第 90 百分位数)分别为 118、105 和 111 $\mu g \cdot m^{-3}$, O_3 浓度下降并不明显,浓度一直维持较高水平^[31]. 海南岛素有“台风走廊”之称,年平均影响的热带气旋高达 7 个之多^[32]. 目前针对台风影响下的海南岛 O_3 污染特征及成因还未见报道,而此项工作对于海南岛城市 O_3 污染预报工作有很强的现实意义,因此本研究收集整理了 2015~2020 年西北太平洋热带气旋资料,海南岛 18 个市县 O_3 监测数据和气象数据,以及 ERA5 再分析资料,深入探讨了不同路径对海南岛 O_3 浓度的影响,以期台风影响下气象和环境部门的大气污染防治政策制定提供支撑.

1 材料与方法

1.1 数据资料

本研究采用的资料包括:①2015~2020 年共 6

a 海南岛 32 个环境监测站点的 O_3 小时浓度数据,数据来自海南省生态环境厅(<http://hnsthb.hainan.gov.cn:8009/EQGIS/>), O_3 浓度监测值在分析之前均处理为参比状态值. ②2015~2020 年期间所有西北太平洋(含南海,赤道以北,180°E 以西)海域生成的 181 个热带气旋数据,资料来自中国台风网(https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_sm.html)“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”. ③2015~2020 年海南岛 18 个市县地面逐日气象数据,包括降水量、平均气温、相对湿度、日照时数、气压、平均气温和太阳总辐射,其中太阳总辐射只有海口市和三亚市两个站点资料,数据源自海南省气象局.

1.2 污染定义

为兼顾热带气旋对海南岛 O_3 污染影响的强度(浓度)和广度(地域范围),本文首先对海南岛各个市县的环境监测资料进行平均,处理出 2015~2020 年 18 个市县的 O_3 -8h(日最大 8 h 滑动平均)浓度值,同时参照标准《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ633-2012),以 O_3 -8h 浓度二级标准,即 160 $\mu g \cdot m^{-3}$ 作为判定热带气旋发生期间是否造成海南岛 O_3 污染的临界标准,以热带气旋期间出现 $\rho(O_3$ -8h) 超过 160 $\mu g \cdot m^{-3}$ 的市县是否超过 3 个作为重度和轻度污染的判据,由此将热带气旋分为 3 类:①无污染热带气旋(none-pollution tropical cyclones, NP):热带气旋期间无任一市县 $\rho(O_3$ -8h) $\geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$. ②轻污染热带气旋(slight-pollution tropical cyclones, SP):热带气旋期间有市县 $\rho(O_3$ -8h) $\geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$,且出现市县数 < 3 个. ③高污染热带气旋(heavy-pollution tropical cyclones, HP):热带气旋期间有市县 $\rho(O_3$ -8h) $\geq 160 \mu g \cdot m^{-3}$,且出现市县数 ≥ 3 个.

1.3 聚类分析方法

热带气旋不同于其它天气尺度系统,具有明显清晰的移动轨迹特征,因而本文采用了聚类分析方法对西北太平洋海域生成的 181 个热带气旋移动路径进行聚类分析. 聚类分析是一种对不同事物间的相似性进行分类,使得同类对象间相似性最大,不同类对象相似性最小的方法^[33]. K-means 聚类方法(也称快速聚类)是一种应用广泛的经典聚类算法,其基本原理是将数据 A 聚成 K 类,使得每个样本点都属于且仅属于一种一类,同时希望不同类的样本之间的欧式距离尽可能小,因而欧式距离即可作为测度样本“亲疏程度”的指标. K-means 聚类方法具有运算简单、高效,易于实施等优异特性,已被应用于多种领域^[34].

2 结果与讨论

2.1 热带气旋期间海南岛 O₃-8h 浓度特征

图 1 给出了 2015 ~ 2020 年热带气旋期间海南岛 O₃-8h 浓度平均值和超标市县个数叠加. 从中可知,海南岛 O₃-8h 浓度与超标市县个数存在很好的正相关关系,即在 O₃-8h 浓度偏高时段,超标市县个数偏多;反之,O₃-8h 浓度偏低时段,超标市县个数偏少或没有市县超标. 从不同年份上看(表 1),热带气旋生成个数偏多的年份,海南岛发生 O₃ 污染天数也偏多,表明海南岛 O₃ 污染与热带气旋个数存在密切联系. 2017、2018 和 2019 年热带气旋生成个数在 30 个及其以上,为偏多年份,其中 2018 年热带气旋生成个数最多,达到 34 个;热带气旋生成偏多年份发生污染天数(d)分别为 41(2017 年)、43(2018 年)和 71(2019 年),其中 2019 年污染天数最多最严重,HP 天数达到了 39 d(54.9%). 2015、2016 和 2020 年热带气旋生成个数在 29 个及以下,生成个数最少年份为 2020 年,仅为 26 个;热带气旋生成偏少年份发生污染天数(d)分别为 44(2015 年)、22(2016 年)和 40(2020 年),其中 2016 年污染天数最少,且没有出现 HP 天数. 此外近 3 年 HP 天数比例均在 54.9% 以上,表明海南岛 O₃ 污染有逐年加重趋势^[35],应引起广泛关注. 从不同污染类别上看

(表 2),2015 ~ 2020 年 181 个热带气旋样本中,生命期间海南岛出现 O₃ 污染天气的热带气旋共有 40 个,占总样本数的 22.1%,其中 HP 类和 SP 类热带气旋各有 20 个,对应的海南岛 $\rho(O_3-8h)$ 分别为 $111.05 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $87.48 \mu g \cdot m^{-3}$;而 NP 类的热带气旋个数为 141 个,占总样本数的 77.9%,海南岛 $\rho(O_3-8h)$ 为 $61.98 \mu g \cdot m^{-3}$. 结果表明有 77.9% 的热带气旋未能致使海南岛出现 O₃ 污染天气,这可能是本文所选的热带气旋中包含了所有季节的样本个数所致. 结合前人的分析可知,海南岛 O₃ 污染主要出现在秋季和春季,夏季基本没有 O₃ 污染天气^[36].

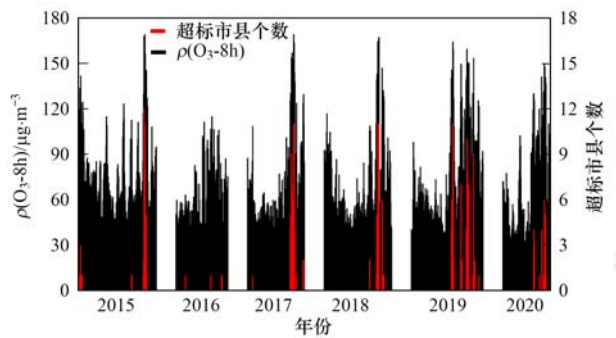


图 1 2015 ~ 2020 年热带气旋发生期间海南岛 O₃-8h 浓度和超标市县个数

Fig. 1 O₃-8h concentration and the number of cities and counties exceeding the standard in Hainan Island during the occurrence of tropical cyclones from 2015 to 2020

表 1 2015 ~ 2020 年热带气旋个数和海南岛 O₃ 污染统计

Table 1 Statistics on the number of tropical cyclones and O ₃ pollution in Hainan Island from 2015 to 2020						
项目	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
热带气旋个数/个	29	29	30	34	33	26
发生污染天数/d	44	22	41	43	71	40
HP 天数/d(占有污染天数比例/%)	23(52.3)	0(0)	21(51.2)	32(74.4)	39(54.9)	24(60)

表 2 2015 ~ 2020 年海南岛不同污染类别热带气旋个数统计

Table 2 Statistics on the number of tropical cyclones of different pollution types in Hainan Island						
污染类别	热带气旋个数	占样本热带气旋总数比例/%	年平均热带气旋个数	$\rho(O_3-8h)$ / $\mu g \cdot m^{-3}$	趋势系数	气候倾向率 /个 $\cdot a^{-1}$
HP	20	11.05	3.33	111.05	0.725 ¹⁾	0.667
SP	20	11.05	3.33	87.48	-0.207	-0.095
NP	141	77.90	23.5	61.98	-0.351	-0.548

1)通过 95% 的信度检验

2.2 年际和季节变化

图 2 和图 3 分别为各污染类别热带气旋个数的年际变化和逐月变化. 从图 2 中可以看出,不同类别的热带气旋年际变化特征明显不同. HP 类热带气旋在 2015 ~ 2020 年期间出现显著的增多趋势,趋势系数和气候倾向率分别为 0.725 和 0.667 个 $\cdot a^{-1}$,其中趋势系数通过了 95% 的信度检验(表 2),表明近

年来热带气旋对海南岛 O₃ 污染的影响有加重的趋势. SP 和 NP 类热带气旋则表现为减少的变化趋势,其趋势系数分别为 -0.207 和 -0.351,均没有通过信度检验;气候倾向率分别为 -0.095 个 $\cdot a^{-1}$ 和 -0.548 个 $\cdot a^{-1}$. 这与中国香港地区的统计结果较为一致^[37]. 从图 3 中可知,夏季和秋季是热带气旋最为活跃的季节,其中 7 ~ 10 月平均热带气旋个数均

在 4 个以上,占比均超过 14%,最大值出现在 8 月,为 6.67 个(22.1%)。HP 类和 SP 类热带气旋主要出现在秋季,其中 HP 类热带气旋 9、10 和 11 月平均热带气旋个数(占比)分别为 0.67(20%)、1.33(40%)和 1.17 个(35%);SP 类热带气旋分别为 0.67(20%)、1.17(35%)和 0.83 个(25%)。NP 类热带气旋主要发生在夏季和秋季,与所有样本数基本一致[图 3(a)],其中 7~9 月平均热带气旋个数(占比)分别为 4.83(20.57%)、6.67(28.37%)和 3.67 个(15.60%)。

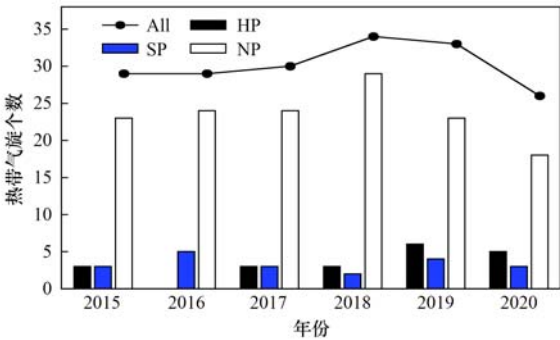


图 2 各污染类别热带气旋个数年际变化
Fig. 2 Annual variation in different types of tropical cyclones

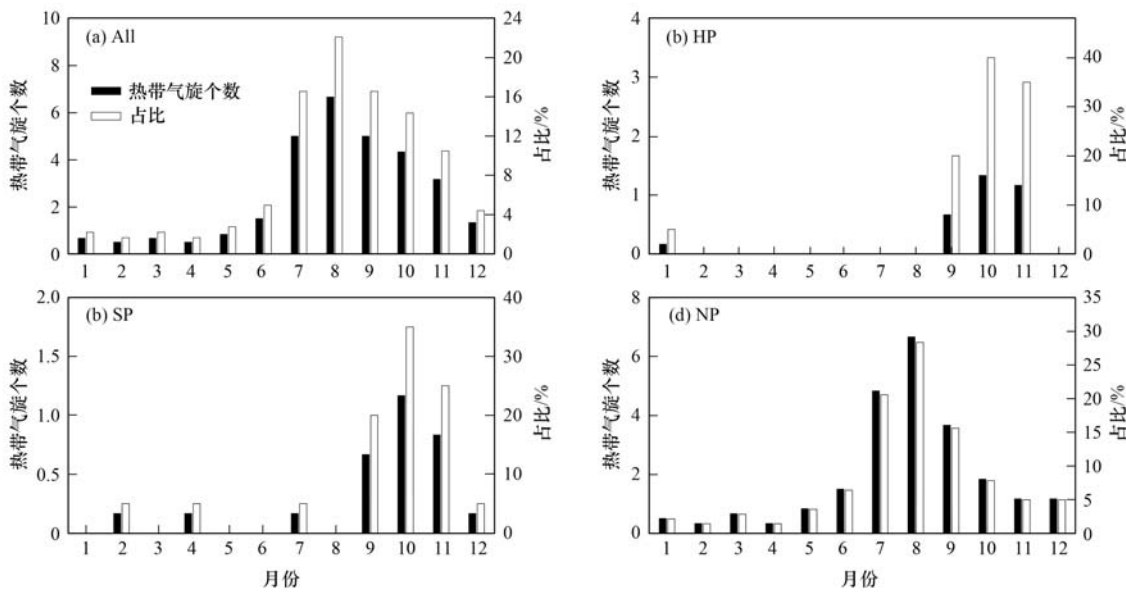


图 3 各污染类别热带气旋个数逐月变化
Fig. 3 Monthly variation in different types of tropical cyclones

2.3 热带气旋强度与 O₃ 污染相关性

热带气旋主要是通过外围下沉气流改变陆地天气形势场结构,进而影响近地面 O₃ 浓度变化^[22~25]。一般而言,热带气旋强度越强,外围下沉气流越剧烈,影响效果越大。本文将每个热带气旋 1 d 内的所有台风中心附近极大风速($v_{\max}$)和最小气压($p_{\min}$)进行平均,并与海南岛 ρ (O₃-8h)求相关,如图 4 和图 5 所示,其中污染时段定义为单日海南岛有一个及其以上市县 O₃-8h 浓度超标,清洁时段定义为单日海南岛没有市县 O₃-8h 浓度超标。从中可知,O₃-8h 浓度主要与平均极大风速($v_{\max}$)呈正相关关系,与最小气压($p_{\min}$)呈负相关关系,表明热带气旋强度越强,越有利于海南岛 O₃-8h 浓度上升。所有时段的 O₃-8h 浓度与平均极大风速($v_{\max}$)和平均最小气压($p_{\min}$)相关系数分别为 0.124 和 -0.092(表 3)。对比污染时段和清洁时段的相关系数可知,污染时段 O₃-8h 浓度与平均极大风速($v_{\max}$)和平均最小气压($p_{\min}$)相关系数分别为 0.257 和 -0.232,明显高于清洁时段的相关系数(0.116 和 -0.085)。进一

步统计不同强度等级热带气旋对海南岛 O₃-8h 浓度的影响程度对比,分别以 TD、TS、STS、TY、STY 和 SUPERTY 代表热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风,结果如图 6 所示。从中可知,热带气旋强度与海南岛 O₃ 污染存在一定的正相关关系,即热带气旋强度越强,海南岛发生 O₃ 污染的概率越大。从 TD 等级到 TY 等级,HP 类热带气旋占有样本数的比例逐级递增,并在 TY 等级达到了最大值,为 35.4%,STY 和 SUPERTY HP 类热带气旋的比例分别为 14.8% 和 10.8%,偏低 TY 等级,其内在影响机制还有待于进一步分析。

表 3 不同时段海南岛 O₃-8h 浓度与热带气旋中心附近最大风速和最小气压相关系数

Table 3 Correlation coefficients between O ₃ -8h and maximum wind speed and minimum pressure near the tropical cyclone center at different time periods			
时段	样本数/d	$v_{\max}$	$p_{\min}$
所有	1 470	0.124	-0.092
污染	134	0.257	-0.232
清洁	1 336	0.116	-0.085

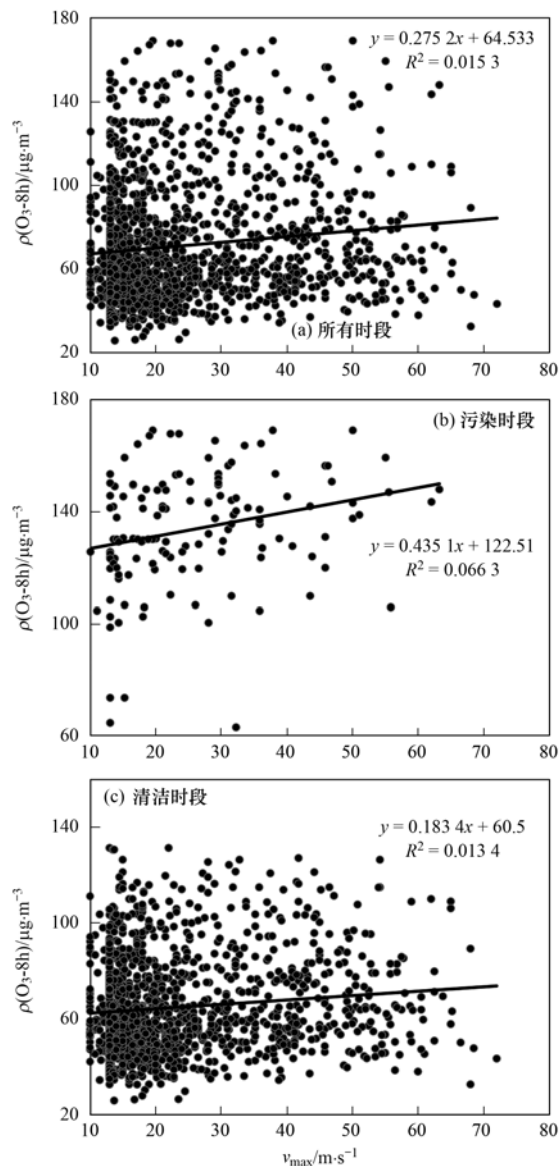


图4 不同时段热带气旋中心附近最大风速 $v_{\max}$ 和海南岛 O_3 -8h 浓度相关性

Fig. 4 Correlation between the maximum wind speed near the tropical cyclone center and the O_3 -8h in Hainan Island at different periods

2.4 热带气旋轨迹聚类分析

利用 K-means 聚类方法对 2015 ~ 2020 年发生在西北太平洋的 181 个热带气旋移动路径进行聚类分析,其结果如图 7 所示. 从中可以看出,聚成的 4 种路径类型热带气旋的地理位置有非常清楚的区分,具体可分为南海生成影响型(A 型),西太平洋近大陆转向型(B 型),西太平洋远大陆转向型(C 型)和远海长距离西行转向型(D 型). 图 8 显示了 4 类热带气旋所有包含台风起始位置和全体路径. A 类热带气旋共有 67 个(37%),是 4 类热带气旋中个数最多的一类. 该类热带气旋多数生成于南海,少部分在菲律宾吕宋岛以东洋面生成,西移进入南海. A 类热带气旋多数穿过南海登陆越南,少数从我国

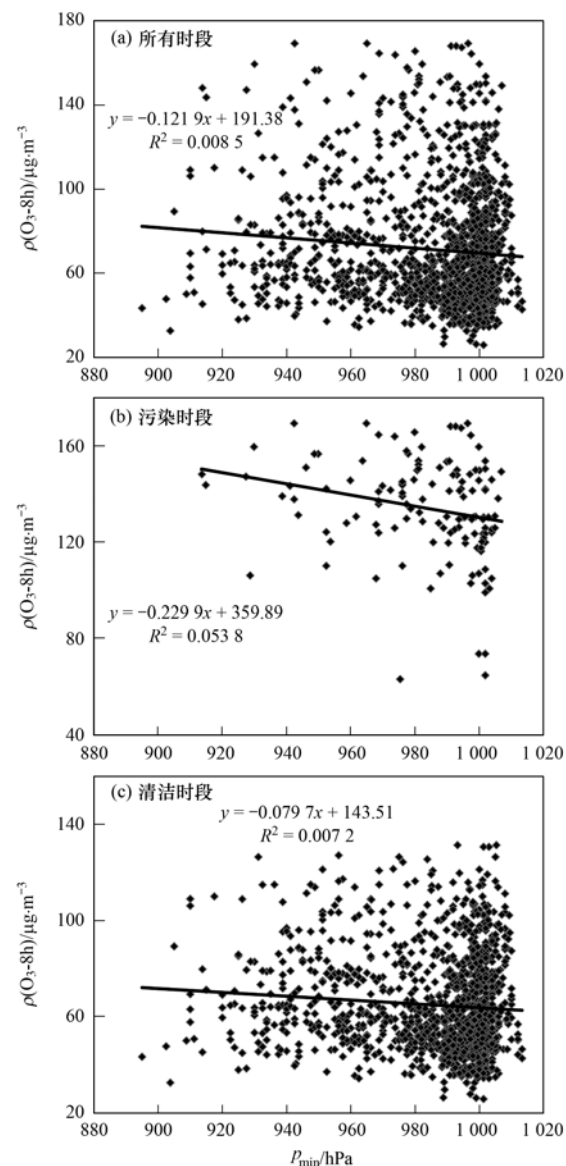


图5 不同时段热带气旋中心附近最小气压 $p_{\min}$ 和海南岛 O_3 -8h 浓度相关性

Fig. 5 Correlation between the minimum air pressure near the tropical cyclone center and the O_3 -8h in Hainan Island at different periods

华南沿海登陆,影响区域为 $100^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$. B 类热带气旋共有 34 个(18.9%),主要生成于 140°E 以东洋面,生成后稳定向西北偏西方向移动,部分热带气旋靠近大陆后转向东北,其余减弱消失在南海,影响区域为 $110^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$. C 类热带气旋共有 31 个(17.1%),是 4 类热带气旋中个数最少的一类. 该类热带气旋起始位置多数在菲律宾以东洋面生成,先东北移动后转向西北移动,影响日本较多. 影响区域为 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$. D 类热带气旋共有 49 个(27.1%),是 4 类热带气旋中移动距离最长,分布最为分散的一类. 该类热带气旋在 130°E 以东洋面上生成,多数先向西北方向移动,后转向东北方向移动. 影响区域为 $130^{\circ} \sim$

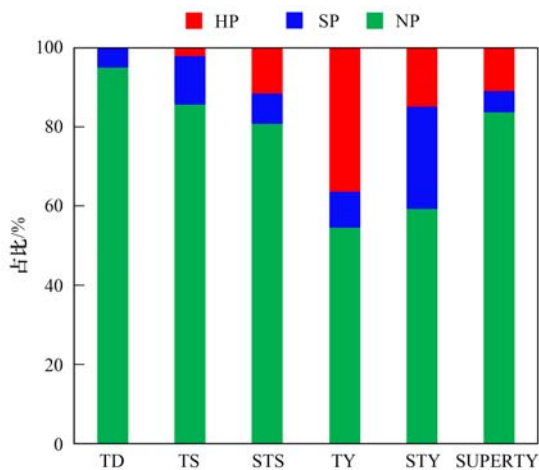


图6 不同强度等级热带气旋对海南岛 O₃-8h 浓度影响程度对比

Fig. 6 Comparison between different degree tropical cyclones and different levels of O₃-8h in Hainan Island

180°E, 5°~60°N.
2.5 不同路径类型热带气旋对 O₃ 浓度的影响
4 种路径类型的热带气旋各自包含 HP、SP 和

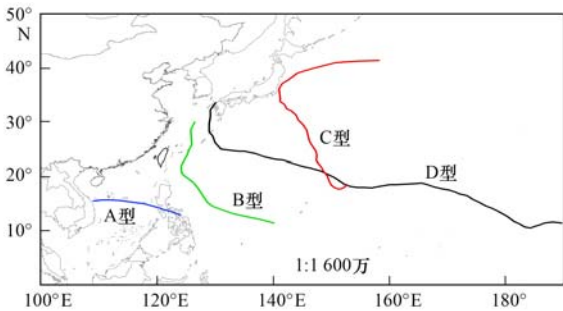


图7 2015~2020 年热带气旋聚类后的平均路径

Fig. 7 Mean track of tropical cyclones after clustering from 2015 to 2020

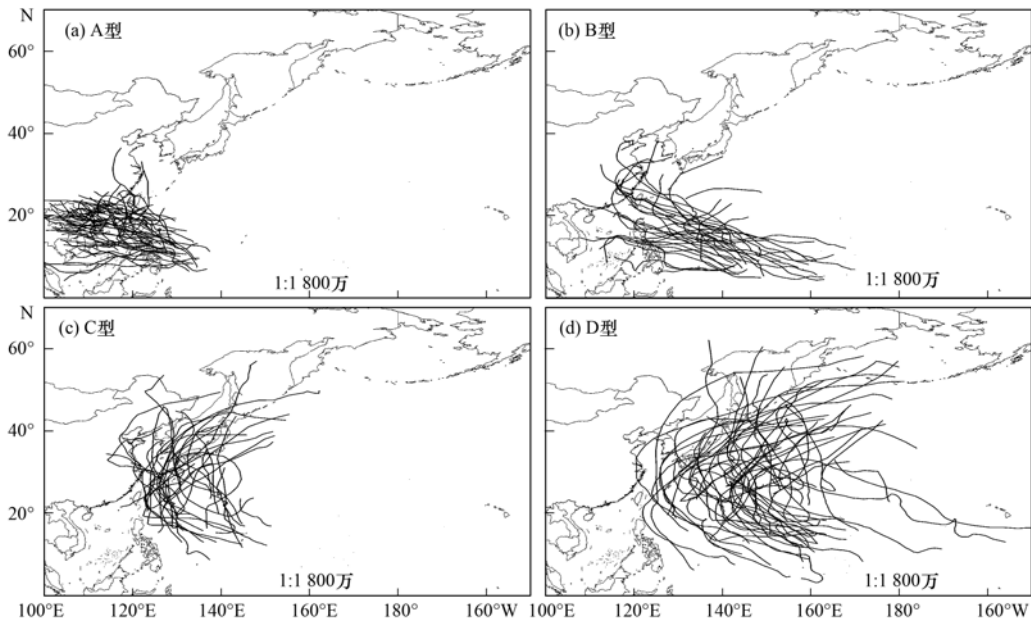


图8 4 类聚类分析结果对应的热带气旋轨迹

Fig. 8 Tropical cyclone trajectories corresponding to the four types of cluster analysis results

NP 热带气旋个数及对应的海南岛平均 O₃-8h 浓度如表 4 所示. 总体而言,A 类热带气旋最容易造成海南岛出现大范围和高浓度的 O₃ 污染,其次是 B 类和 D 类热带气旋,而 C 类热带气旋海南岛发生 O₃ 污染可能性最低. 从不同类型污染来看,在 A 类热带气旋中 HP 的个数最多,为 7 个,ρ(O₃-8h)最高,达到了 121.90 μg·m⁻³. 其次是 B 类和 D 类,HP 个

数均为 5 个,ρ(O₃-8h)分别为 117.95 μg·m⁻³和 113.08 μg·m⁻³. C 类最少,仅为 3 个,ρ(O₃-8h)为 102.64 μg·m⁻³. 对于 SP 污染的热带气旋,A 类热带气旋个数也是 4 类中个数最多的,为 7 个,B 类和 D 类次之,均为 6 个,而 C 类 SP 个数只为 1 个. 从 SP 对应的ρ(O₃-8h)上看,C 类热带气旋最高,达到了 111.79 μg·m⁻³,这可能与样本数偏少有关. B 类和

表4 4 种路径类型热带气旋个数及对应海南岛 O₃-8h 浓度

Table 4 Number of four types of tropical cyclones and its O ₃ -8h concentration in Hainan Island										
污染类型	A 类		B 类		C 类		D 类		所有样本	
	个数	ρ(O ₃ -8h)/μg·m ⁻³	个数	ρ(O ₃ -8h)/μg·m ⁻³	个数	ρ(O ₃ -8h)/μg·m ⁻³	个数	ρ(O ₃ -8h)/μg·m ⁻³	个数	ρ(O ₃ -8h)/μg·m ⁻³
HP	7	121.90	5	117.95	3	102.64	5	113.08	20	115.25
SP	7	85.39	6	91.29	1	111.79	6	87.23	20	89.34
NP	53	60.01	23	69.06	27	59.29	38	59.85	141	61.44
All	67	70.75	34	80.56	31	75.31	49	68.83	181	71.18

D 类次之,A 类最低.

2.6 成因分析

当热带气旋发生时,其环流结构影响了周边大范围的气象场变化,通过改变降水、水汽条件、风场、日照和太阳辐射等气象要素,进而影响着区域 O₃ 的生成、传输、扩散和清除等^[28]. 图 9 给出了 HP 期间海南岛 O₃-8h 污染时段热带气旋位置频数. 从中可以看出,HP 期间热带气旋中心出现频率相对密集区域有两个,一个位于南海中部海面,中心值为 4 次;一个位于巴士海峡以东的西太平洋海面,中心值为 3 次. 说明热带气旋中心位于这两个区域时,海南岛最容易出现 O₃ 污染. 本文进一步计算了 4 种路径类型热带气旋生命期间,污染时段和清洁时段海南岛气象要素平均值如表 5 所示,其中污染时段指海南岛 1 个及以上市县 O₃-8h 浓度超标的时段;清洁时段指没有 1 个市县 O₃-8h 浓度超标的时段. 总体上看,污染时段海南岛降水量偏少,相对湿度偏低,日照时数偏长,太阳总辐射偏强;反之,清洁时段降水量偏多,相对湿度偏高,日照时数偏短,太阳

总辐射偏弱. 平均气温没有较大差异,但均在 22℃ 以上. 污染时段和清洁时段平均风速差异也较小,一般而言,风速偏大时有利于污染物向外扩散,因而风速与污染物浓度呈负相关关系,海南岛污染时段和清洁时段平均风速差异较小可能与外源输送有关^[36]. 此外,污染时段和清洁时段气压差异也较小.

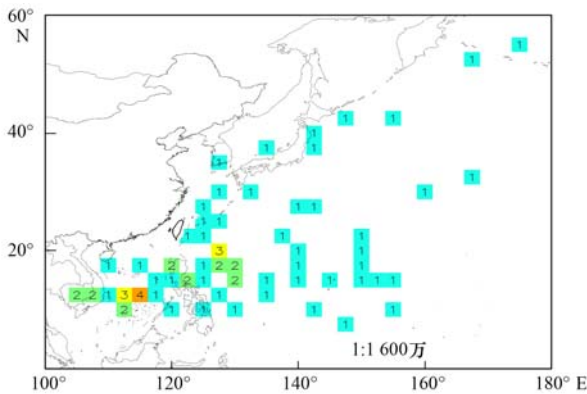


图 9 HP 期间 O₃-8h 污染时段热带气旋位置频数
Fig. 9 Location frequency of tropical cyclone during O₃-8h pollution during HP period

表 5 HP 型热带气旋不同阶段海南岛气象要素平均值

Table 5 Mean of meteorological elements in Hainan Island at different stages of HP-type tropical cyclone							
项目	降水量 /mm	平均气温 /℃	相对湿度 /%	日照时数 /h·d ⁻¹	气压 /hPa	平均风速 /m·s ⁻¹	太阳总辐射 /MJ·m ⁻²
A 型污染时段	1.64	23.20	74.79	4.13	1 000.14	2.75	12.35
A 型清洁时段	7.68	23.99	82.37	3.33	1 000.11	2.61	10.63
B 型污染时段	0.76	22.47	75.73	7.23	1 002.24	1.87	17.55
B 型清洁时段	2.01	22.62	82.02	6.49	1 002.90	1.91	15.53
C 型污染时段	0.13	25.71	73.94	7.78	1 000.47	1.70	19.88
C 型清洁时段	5.11	25.66	81.56	5.98	996.86	1.75	16.09
D 型污染时段	1.70	24.55	77.82	6.24	999.02	1.98	16.56
D 型清洁时段	9.54	26.11	84.15	5.21	997.21	2.19	15.11

3 结论

(1)2015~2020 年西北太平洋一共发生了 181 次热带气旋过程,其中有 40 个热带气旋的生命期间海南岛出现了 O₃ 污染天气,占总样本数的 22.1%. 热带气旋生成个数偏多的年份,海南岛发生 O₃ 污染天数也偏多,其中 2019 年污染天数最多最严重,HP 天数达到了 39 d (54.9%),2016 年污染天数最少,且没有出现 HP 天数. HP 类热带气旋有逐年增多趋势,且主要出现在秋季,趋势系数和气候倾向率分别为 0.725 和 0.667 个·a⁻¹,其中趋势系数通过了 95% 的信度检验.

(2)热带气旋强度与海南岛 O₃-8h 浓度成正相关关系,污染时段 O₃-8h 浓度与平均极大风速 ($V_{\max}$) 和平均最小气压 ($P_{\min}$) 相关系数分别为 0.257 和 -0.232,明显偏高于清洁时段的相关系数

(0.116 和 -0.085). 随着热带气旋强度等级的上升,HP 类热带气旋占有样本数的比例升高,最大值出现在 TY 等级,为 35.4%,STY 和 SUPERTY HP 类热带气旋的比例分别达到了 14.8% 和 10.8%.

(3)热带气旋路径聚类分析表明,A 类热带气旋是 4 类中个数最多的一类,共有 67 个,占有样本数的 37%;B 类和 D 类热带气旋分别有 34 个 (18.9%) 和 49 个 (27.1%),C 类热带气旋生成个数最少,仅为 31 个 (17.1%). 此外,A 类热带气旋最容易造成海南岛出现大范围和高浓度的 O₃ 污染,A 类热带气旋中 HP 的个数最多,为 7 个, $\rho(O_3-8h)$ 最高,达到了 121.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其次是 B 类和 D 类,HP 个数均为 5 个, $\rho(O_3-8h)$ 分别为 117.95 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 113.08 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. C 类最少,仅为 3 个, $\rho(O_3-8h)$ 为 102.64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(4)HP 期间热带气旋中心出现频率相对密集

的区域分别是南海中部海面 and 巴士海峡以东的西太平洋海面,中心值分别为 4 次和 3 次. 对比分析 HP 类热带气旋期间污染时段和清洁时段海南岛气象要素平均值表明,HP 类热带气旋使得污染时段海南岛降水量偏少,相对湿度偏低,日照时数偏长,太阳总辐射偏强等,气象条件的变化有利于 O_3 浓度升高.

参考文献:

- [1] Wang M, Chen W T, Zhang L, *et al.* Ozone pollution characteristics and sensitivity analysis using an observation-based model in Nanjing, Yangtze River Delta Region of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **93**: 13-22.
- [2] Fan H, Zhao C F, Yang Y K. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014-2018 [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.
- [3] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(2): 33-43.
- Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 33-43.
- [4] 赵楠, 卢毅敏. 中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1235-1245.
- Zhao N, Lu Y M. Estimation of surface ozone concentration and health impact assessment in China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1235-1245.
- [5] Chen K, Zhou L, Chen X D, *et al.* Acute effect of ozone exposure on daily mortality in seven cities of Jiangsu Province, China: no clear evidence for threshold [J]. *Environmental Research*, 2017, **155**: 235-241.
- [6] Liu X F, Guo H, Zeng L W, *et al.* Photochemical ozone pollution in five Chinese megacities in summer 2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **801**(3), doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149603.
- [7] Mazzuca G M, Ren X R, Loughner C P, *et al.* Ozone production and its sensitivity to NO_x and VOCs: results from the DISCOVER-AQ field experiment, Houston 2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(22): 14463-14474.
- [8] Liu J Y, Woodward R T, Zhang Y J. Has carbon emissions trading reduced $PM_{2.5}$ in China? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(10): 6631-6643.
- [9] He W H, Meng H, Han J, *et al.* Spatiotemporal $PM_{2.5}$ estimations in China from 2015 to 2020 using an improved gradient boosting decision tree [J]. *Chemosphere*, 2022, **296**(11), doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134003.
- [10] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O_3 -VOC- NO_x sensitivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [11] Zeng P, Lyu X P, Guo H, *et al.* Causes of ozone pollution in summer in Wuhan, Central China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 852-861.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2021 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220527581962738409.pdf>, 2022-05-28.
- [13] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 [J]. *环境科学*, 2020 **41**(1): 106-114.
- Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, during 2013-2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [14] 解淑艳, 霍晓芹, 曾凡刚, 等. 2015—2019 年汾渭平原臭氧污染状况分析 [J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(1): 49-57.
- Xie S Y, Huo X Q, Zeng F G, *et al.* Analysis of ozone pollution in Fenwei Plain from 2015 to 2019 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(1): 49-57.
- [15] 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.
- [16] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [17] 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.
- [18] 耿福海, 刘琼, 陈勇航. 近地面臭氧研究进展 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, **6**(6): 8-14.
- Geng F H, Liu Q, Chen Y H. Discussion on the research of surface ozone [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2012, **6**(6): 8-14.
- [19] 刘楚薇, 连鑫博, 黄建平. 我国臭氧污染时空分布及其成因研究进展 [J]. *干旱气象*, 2020, **38**(3): 355-361.
- Liu C W, Lian X B, Huang J P. Research review on the spatio-temporal distribution of ozone pollution and its causes in China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, **38**(3): 355-361.
- [20] 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 气候变化对环空气质量影响的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 2011, **16**(6): 805-814.
- Sun J R, Xu Z C, Liu Y, *et al.* Advances in the effect of climate change on air quality [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, **16**(6): 805-814.
- [21] 高拴柱, 董林, 许映龙, 等. 2016 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析 [J]. *气象*, 2018, **44**(2): 284-293.
- Gao S Z, Dong L, Xu Y L, *et al.* Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoons in Western North Pacific in 2016 [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, **44**(2): 284-293.
- [22] 岳海燕, 顾桃峰, 王春林, 等. 台风“妮妲”过程对广州臭氧浓度的影响分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(12): 4565-4572.
- Yue H Y, Gu T F, Wang C L, *et al.* Influence of typhoon Nida process on ozone concentration in Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(12): 4565-4572.
- [23] 张智, 马翠平, 赵娜. 台风“安比”对河北东南部地区一次 O_3 污染影响的特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(12): 4162-4173.
- Zhang Z, Ma C P, Zhao N. The character analysis on typhoon ampil effecting on ozone air pollution in the southeast of Hebei Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(12): 4162-4173.
- [24] Jiang F, Wang T J, Wang T T, *et al.* Numerical modeling of a continuous photochemical pollution episode in Hong Kong using WRF-chem [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(38): 8717-8727.
- [25] Shu L, Xie M, Wang T J, *et al.* Integrated studies of a regional ozone pollution synthetically affected by subtropical high and typhoon system in the Yangtze River Delta region, China [J].

- Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(24): 15801-15819.
- [26] Hu X M, Xue M, Kong F Y, *et al.* Meteorological conditions during an ozone episode in Dallas-Fort Worth, Texas, and impact of their modeling uncertainties on air quality prediction [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(4): 1941-1961.
- [27] 赵文龙, 张春林, 李云鹏, 等. 台风持续影响下中山市大气 O₃ 污染过程分析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(12): 5531-5538.
- Zhao W L, Zhang C L, Li Y P, *et al.* Analysis of the ozone pollution process in Zhongshan under the continuous influence of typhoons[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(12): 5531-5538.
- [28] 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.
- [29] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [30] 海南省生态环境厅. 2020 年海南省生态环境状况公报[EB/OL]. http://hnsthb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202106/t20210607_2990105.html, 2021-06-07.
- [31] 海南省生态环境厅. 2021 年海南省生态环境状况公报[EB/OL]. http://hnsthb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202206/t20220602_3205707.html, 2022-06-02.
- [32] 《海南省天气预报技术手册》编委会. 海南省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [33] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市 PM_{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient PM_{2.5} in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [34] Jain A K. Data clustering: 50 years beyond K-means [J]. *Pattern recognition Letters*, 2010, **31**(8): 651-666.
- [35] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015—2018 年海南省城市臭氧时空分布特征[J]. *环境化学*, 2020, **39**(10): 2823-2832.
- Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Spatiotemporal distribution of ozone in cities of Hainan from 2015 to 2018[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(10): 2823-2832.
- [36] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 海南省城市臭氧污染特征及气象学成因[M]. 北京: 气象出版社, 2021.
- [37] 杨柳, 王体健, 吴蔚, 等. 热带气旋对香港地区臭氧污染影响的初步研究[J]. *热带气象学报*, 2011, **27**(1): 109-117.
- Yang L, Wang T J, Wu W, *et al.* The preliminary study on the effect of tropical cyclones on ozone pollution in Hong Kong[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, **27**(1): 109-117.

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)