

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

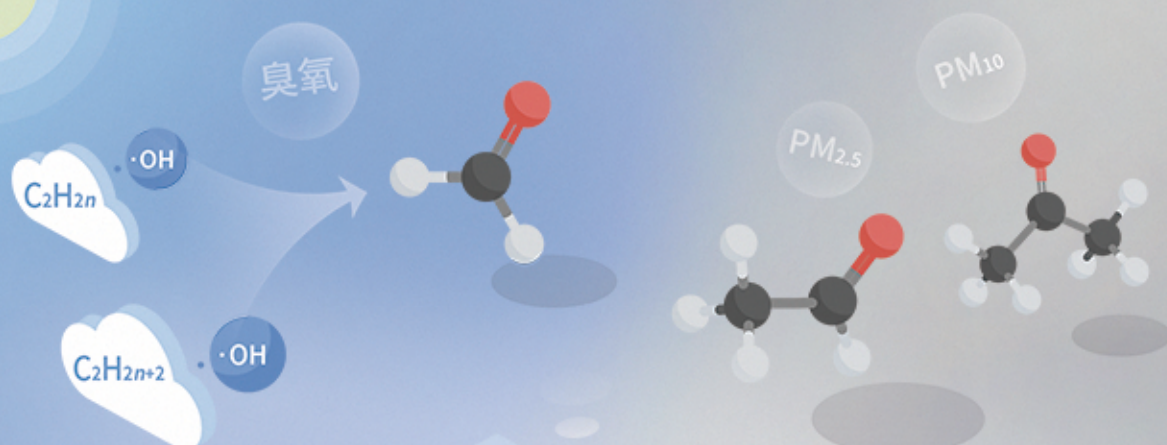
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国 (127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼 (184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦 (195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳 (251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩 (343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒 (378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区

谢放尖¹, 陆晓波², 杨峰¹, 李文青³, 李洁¹, 谢轶嵩¹, 王艳¹, 刘益和¹, 王庆九¹, 胡建林^{4,5*}

(1. 南京市生态环境保护科学研究院, 南京 210093; 2. 江苏省南京环境监测中心, 南京 210093; 3. 南京市生态环境局, 南京 210017; 4. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 5. 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 基于南京市空气质量数据与 NCEP 全球再分析资料, 利用后向轨迹模式计算了 2017 年春夏(4~10 月)到达南京城区逐时的 24 h 近地面气团后向轨迹, 并将后向轨迹数据与臭氧质量浓度数据结合, 进行轨迹聚类与潜在源区分析。结果表明, 2017 年南京市臭氧日最大 8 h 滑动平均浓度在 $12 \sim 261 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标共 58 d, 主要集中在春夏季。臭氧月变化呈现单峰状, 其中 6 月臭氧浓度与超标天数最高, 臭氧日变化总体呈单峰状, 峰值浓度出现在 14:00 左右; 模拟获得 5 136 条轨迹, 其中超标轨迹约占 10%, 超标轨迹月度分布差异较为明显, 5、6 两月合计占比约 60%, 经聚类分析得到气团输送路径共有 6 条, 分别来自东北偏北、西北、西南、东南偏南、东南及东北方向, 其中东南与东南偏南方向两类气团出现频率最高, 分别为 23.33% 和 20.76%, 且对应的臭氧浓度较高, 对南京臭氧污染贡献较大; 潜在源区分析 WPSCF 与 WCWT 的高值区一致性较好, 均揭示臭氧污染潜在源区主要分布在常州、无锡、苏州与湖州等环太湖城市, 同时周边城市泰州、马鞍山、芜湖、滁州、南通与连云港等地是次要的潜在源区。臭氧污染区域输送贡献明显, 需要强化长三角区域联防联控。

关键词: 后向轨迹; 聚类分析; 污染输送路径; 潜在源区; 南京

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0088-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005077

Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017

XIE Fang-jian¹, LU Xiao-bo², YANG Feng¹, LI Wen-qing³, LI Jie¹, XIE Yi-song¹, WANG Yan¹, LIU Yi-he¹, WANG Qing-jiu¹, HU Jian-lin^{4,5*}

(1. Nanjing Municipal Academy of Ecological and Environment Protection Science, Nanjing 210093, China; 2. Nanjing Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210093, China; 3. Nanjing Bureau of Ecology and Environment, Nanjing 210017, China; 4. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 5. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring & Pollution Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this study, the 24-hour backward trajectories of air mass at ground level(10 m) in Nanjing were calculated by using the HYSPLIT model with the NCEP global reanalysis data from April 1st to October 31st, 2017. The backward trajectories were then combined with the hourly concentration data of O_3 in Nanjing for trajectories clustering analysis and potential pollution sources analysis. The results show that in 2017, the maximum daily 8 h running average O_3 level in Nanjing was around $12 \sim 261 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ with 58 days of O_3 pollution in Nanjing, mainly in the spring and summer. The monthly variation of O_3 showed a single peak, with the highest O_3 concentration, as well as the most days exceeding the standard, occurring in June; the diurnal variation of O_3 was unimodal and reached its peak around 14:00. A total number of 5 136 trajectories were obtained by simulation, among which the exceeded trajectories accounted for approximately 10%. The exceedance trajectories in May and June were significantly higher, accounting for 60% of the total exceedance trajectories. Six ground-level air mass transporting pathways were identified through clustering analysis, from the NNE, NW, SW, SSE, SE, and NE directions. The SE and SSE directions with higher O_3 levels were the dominant transport routes of O_3 pollution, contributing to 23.33% and 20.76% of backward trajectories, respectively. As for the potential pollution source analysis, the area with high WCWT value distribution matched the WPSCF result, indicating that the potential sources of O_3 pollution were mainly distributed in Changzhou, Wuxi, Suzhou, Huzhou, and other cities around Taihu Lake. Additionally, cities located around Nanjing, such as Taizhou, Ma'anshan, Wuhu, Chuzhou, Nantong, and Lianyungang, were considered the secondary potential sources. The results indicate that O_3 pollution in Nanjing is a regional issue and its control requires joint prevention and control strategies in the Yangtze River Delta.

Key words: backward trajectories; cluster analysis; pollution transporting pathway; potential pollution source; Nanjing

收稿日期: 2020-05-09; 修订日期: 2020-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213800); 江苏省环保科研项目(2017003); 江苏省 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制重大专项

作者简介: 谢放尖(1982~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为城市大气污染防治, E-mail: strong886@126.com

* 通信作者, E-mail: jianlinhu@nuist.edu.cn

对流层臭氧(O_3)是大气中的重要痕量组分. 高浓度 O_3 会影响人体健康, 破坏生态环境, 并影响气候变化^[1]. 《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 把 O_3 列为空气质量评价的 6 项指标之一. 南京市是长三角重要的区域中心城市, 社会经济十分活跃, 同时也是复合型污染较为严重的区域之一^[2~4]. 大气污染防治行动计划实施以来, 南京市 $PM_{2.5}$ 浓度从 2013 年的 $77 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降到 2017 年的 $40 \mu g \cdot m^{-3}$, 降幅达 48%, 但 O_3 污染问题日益凸显, 2017 年取代 $PM_{2.5}$ 成为影响空气质量优良率的第一因素^[5]. 李菁等^[6]利用卫星观测资料分析了 2008 ~ 2017 年南京市 O_3 污染时空分布及变化特征, 发现受大气环流、气候变化及人类活动等综合因素影响, O_3 时空变化特征明显; An 等^[7]观测发现南京城区与郊区的高浓度 O_3 污染经常同时出现, 可能与污染区域混合有关; Wang 等^[8]在 O_3 及前体物污染特征基础上, 基于 OBM 模型进行了 O_3 生成敏感性分析, 发现南京城区 O_3 主要受挥发性有机物(VOCs)控制. 以上研究深化了本地 O_3 污染特征与成因的认识. 对流层 O_3 寿命较长, 夏季 O_3 有时在大气中能存在数天^[9], 因此 O_3 污染可存在明显的区域输送^[10], 但关于区域输送对南京 O_3 污染的影响, 目前的认识还较为欠缺. 为指导 O_3 污染的区域联防联控, 识别南京地区 O_3 污染区域输送特征及潜在源区成为目前亟待解决的问题.

后向轨迹法是研究污染空间输送特征的基本工具之一, 相比 CMAx 与 CMAQ 等复杂空气质量模型, 后向轨迹分析具有不依赖污染物排放信息且容易掌握等优点, 被广泛应用于污染输送与来源分析^[11~13]. 利用后向轨迹分析 O_3 及前体物污染输送特征, 已有较多的应用研究. 如 Nzotungicimpaye 等^[14]利用后向轨迹分析发现工业高原的污染排放是开普敦 O_3 的主要来源, 主要的传输路径有 4 条, 导致空气质量变差的是东北方向路线与南部海岸线路线; Dimitriou 等^[15]利用后向轨迹分析发现雅典 O_3 来源主要是巴尔干半岛、希腊与爱琴海, 而约阿尼纳则主要受希腊北部与巴尔干半岛影响, 尤其是保加利亚的索菲亚地区贡献较为明显, 两个城市污染传输的差异可能主要是受地形影响; Vellingiri 等^[16]在轨迹分析基础上, 利用潜在源区贡献函数(potential source contribution function analysis, PSCF)发现韩国首尔 NO_2 浓度上升主要受中国华北及本地源排放的影响, 而 O_3 则主要来自于中国和日本的海洋与山区; Sharma 等^[17]利用 PSCF 方法与浓度权重轨迹方法(concentration weighted trajectory

method, CWT)发现印度恒河平原是印度德里地区 O_3 污染的主要潜在源区; 杨健等^[18]利用 PSCF 方法分析了安阳近地面 O_3 潜在来源, 认为不同季节 O_3 的潜在源区差异较大, 夏季潜在源区主要分布在河北南部、湖北北部和沈阳北部; 张磊等^[19]利用 PSCF 方法发现华北及长三角发达的工业地区对黄山 O_3 存在输送影响.

南京处于长三角腹地, 易受周边城市影响, 目前针对南京地区 O_3 污染区域输送影响还缺少系统性研究. 本文在 2017 年 O_3 污染特征分析的基础上, 重点针对春夏季 4 ~ 10 月 O_3 污染高发时段, 利用后向轨迹模式聚类与潜在源区等分析方法, 揭示影响南京 O_3 及前体物的主要输送路径与潜在源区, 旨在为空气质量预报和 O_3 污染防控提供依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

空气质量数据源于江苏省南京环境监测中心, 为 2017 年南京市 9 个大气国控点逐小时观测数据; 气象数据源于江苏省气象台, 为 2017 年南京国家基准站大气压、气温、风速、相对湿度与降水等逐日观测数据; 气象数据取自美国国家环境预报中心(NCEP)的全球资料同化系统(GDAS)数据, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨为 3 h (00:00、06:00、12:00 与 18:00 为同化资料, 03:00、09:00、15:00 与 21:00 为模式预报, 均为世界时), 主要包括地表气压、10 m 风速、2 m 相对湿度、位势高度、温度、水平风速、压力垂直速率和相对湿度等. GDAS 数据从公开网站(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>)下载得到.

1.2 研究方法

1.2.1 轨迹计算及聚类分析

采用美国海洋与大气管理局开发的 HYSPLIT4 (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory Model 4) 模式^[20]计算后向轨迹数据, 计算时段为 2017 年 4 月 1 日 00:00 到 10 月 31 日 23:00, 轨迹的受体点为南京城区 ($118.79^\circ E$, $32.05^\circ N$), 高度 10 m, 每条轨迹计算时长为 24 h, 时间分辨率为 1 h. 受体高度取 10 m 主要考虑到目前大气国控点高度一般在 3 ~ 15 m 的近地面; 计算 24 h 后向轨迹主要考虑将研究范围界定在长三角联防联控区域; 时间分辨率取 1 h 是方便轨迹数据与 O_3 小时浓度数据的联合分析. 计算结果共获得轨迹 5 136 条, 通过聚类分析将相似速率与方向的轨迹进行合并, 代表一个特定的输送路径. 采用 Ward's 最小方差法^[21]进行聚类, 其基本思路是先将 n 条轨迹归为 n 类, 然后每

次减少一类时,需满足两两轨迹的欧式距离之和与原来的差距最小,直到减少到合适的类别为止.该方法被植入于 TrajStat 软件^[22]中,本文利用 TrajStat1.4.7 版本进行聚类得到不同类型的输送轨迹,并统计每类轨迹的出现频率及对应的 O_3 平均浓度.

1.2.2 潜在源区贡献函数(PSCF)方法

PSCF 方法^[23]是一种条件概率函数,利用污染轨迹与所有轨迹在途经区域停留时间的比(以轨迹节点数量来近似表征停留时间,逐时计算的 24 h 后向轨迹共 25 个节点)来表征每个区域对受体点的污染贡献.将研究区分为 $i \times j$ 个网格,每个网格 PSCF 计算见公式(1).

$$PSCF = m_{ij}/n_{ij} \quad (1)$$

式中, n_{ij} 代表落在某一网格内的所有轨迹节点数, m_{ij} 为其中污染轨迹节点数.污染轨迹指受体点浓度超过某一浓度阈值时对应的轨迹,浓度阈值一般为所有轨迹对应浓度的平均值或空气质量标准值,本文将所有轨迹对应的 O_3 平均浓度作为阈值.本文设定的 PSCF 网格区域包含主要轨迹所覆盖的地理区域($110^\circ \sim 126^\circ E$, $24^\circ \sim 39^\circ N$),覆盖南京周边东西约 800 km,南北约 700 km 的范围,网格分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,共计约 24 000 个网格,总轨迹条数为 5 136 条,约 12.8 万个节点.

PSCF 值越大表明该区域对于受体点污染贡献越大,由于 PSCF 是一种条件概率,当 n_{ij} 较小时, PSCF 计算结果的不确定性较大.为降低计算的不确定性,一些学者引入了权重函数 W_{ij} 计算 WPSCF 值^[24,25],见公式(2).

$$WPSCF = W_{ij} \times PSCF \quad (2)$$

参考文献[15,16],同时考虑本研究网格分辨率较高平均节点数较少的情况,为减少 PSCF 方法

不确定性,将权重函数 W_{ij} 具体设定见公式(3).

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & n_{ij} > 60, \\ 0.70 & 30 < n_{ij} \leq 60, \\ 0.42 & 20 < n_{ij} \leq 30, \\ 0.05 & n_{ij} \leq 20. \end{cases} \quad (3)$$

1.2.3 浓度权重轨迹(CWT)方法

PSCF 反映的是某网格中污染轨迹所占的比例,无法区分相同 PSCF 值的网格对受体点污染贡献的差异^[17],CWT 方法^[26]则可以定量表征各网格对受体点的污染贡献.首先创建 CWT 网格,范围及分辨率均与 PSCF 网格相同.在浓度权重轨迹分析法中,每个网格都有一个权重浓度,通过计算经过该网格的轨迹对应的污染物浓度的平均值来实现,见公式(4).

$$CWT_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M (C_l \times \tau_{ijl})}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (4)$$

式中, CWT_{ij} 为网格 (i, j) 的平均污染权重浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$); l 代表气团轨迹; M 是轨迹的总数; C_l 是轨迹 l 经过网格 (i, j) 时对应的污染物质量浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$); τ_{ijl} 是轨迹 l 在网格 (i, j) 停留的时间,计算时使用落在网格内的轨迹节点数来代替停留时间,同样当节点数较少时,也会增大不确定性,采用与 PSCF 方法相同的权重函数 W_{ij} ,见公式(5).WCWT 值越大,表明该区域对受体点的污染贡献越大.

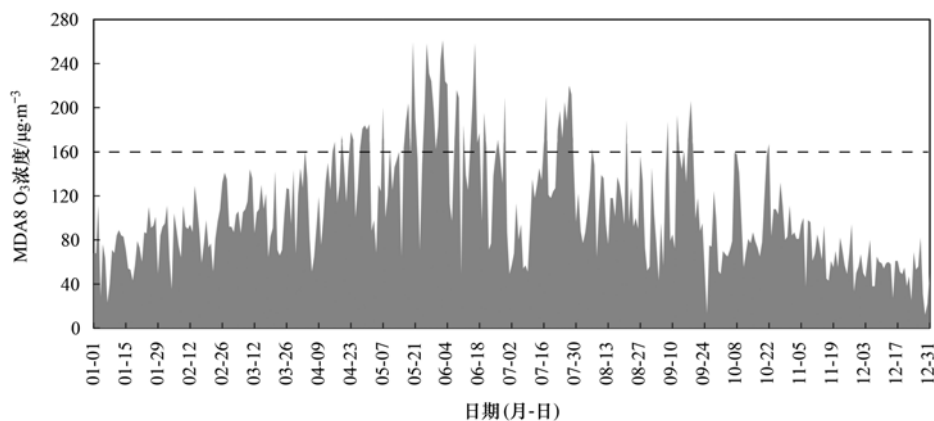
$$WCWT_{ij} = W_{ij} \times CWT_{ij} \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 臭氧污染特征

2.1.1 总体情况

图 1 给出了 2017 年南京市 O_3 日最大 8 h 浓度 (maximum daily 8h average O_3 , MDA8 O_3) 的时间序



红色虚线为 MDA8 O_3 国家二级标准限值

图 1 2017 年南京市 MDA8 O_3 浓度分布时间序列

Fig. 1 Time series of MDA8 O_3 concentration distribution in Nanjing in 2017

列,MDA8 O₃ 浓度范围在 12 ~ 261 μg·m⁻³,浓度均值为(107 ± 49) μg·m⁻³. 根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)评价,O₃ 超标天数共计 58 d,其中中度污染 11 d,轻度污染 47 d, O₃ 超标天数占总超标天数的 57.4%,高于 2017 年长三角各市平均水平(50.4%)^[27].

O₃ 是由光化学反应生成的二次污染物,受太阳辐射影响较大,一般来说太阳辐射越强,越有利于 O₃ 生成^[28]. 气温与太阳辐射变化较为一致,水汽可削减太阳辐射,风速主要影响扩散,而降水有利于污染物的清除. 因此,O₃ 污染一般发生在太阳

辐射强、气温高、湿度低、风速小与降水少的气象条件下^[29]. 表 1 给出了南京市 2017 年 O₃ 超标日与非超标日部分气象参数的日平均值对比情况,可见,超标日的气温明显高于非超标日,而超标日气压、相对湿度和降水则明显低于非超标日,低气压时风场辐合,不利污染扩散,超标日与非超标日风速差别不大,可能主要还跟风向有关. 计算皮尔逊相关系数,可知 MDA8 O₃ 与气温、气压及相对湿度的相关性较强,相关系数分别为 0.55、-0.46 和 -0.29,说明高温、低压和低湿条件下容易发生 O₃ 污染现象.

表 1 超标日与非超标日气象参数对比

Table 1 Comparison of meteorological parameters between days exceeding and days not exceeding the standard						
时段	大气压/hPa	气温/℃	相对湿度/%	风速/m·s ⁻¹	降水量/mm	MDA8 O ₃ /μg·m ⁻³
超标日	1 006	25.5	64	2.4	0.4	193
非超标日	1 014	15.5	73	2.5	4.3	91

2.1.2 时间特征

图 2 给出了南京市逐月 MDA8 O₃ 平均浓度及超标天数分布,可见 MDA8 O₃ 浓度的月变化呈单峰状,6 月浓度最高,为 162 μg·m⁻³,超标日在 4 ~ 10 月均有分布,6 月超标日最多,为 17d. 计算季节浓度,可知 MDA8 O₃ 浓度为夏季(6 ~ 8 月) > 春季(3 ~ 5 月) > 秋季(9 ~ 11 月) > 冬季(1 ~ 2 月和 12 月).

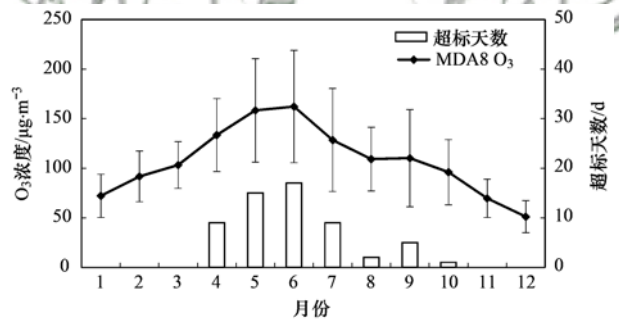


图 2 2017 年南京市 MDA8 O₃ 浓度与超标天数月度分布

Fig. 2 Monthly distribution of MDA8 O₃ concentration and days exceeding the standard in Nanjing in 2017

图 3 给出了对应的逐月温度与降水的情况,1 ~ 6 月随着气温的逐步升高,光化学反应增强,MDA8 O₃ 浓度也逐步升高,4 月 3 日首次出现超标,5 ~ 6 月超标天数逐渐增多;6 月尽管降水量较大,但降水日仅有 8d,MDA8 O₃ 浓度与超标天数均达到峰值;7 月平均气温高达 30.7℃,为全年最高,降水量比 6 月明显下降,但 MDA8 O₃ 浓度却未随气温升高和降水减少而升高,相反却比 6 月下降了 34 μg·m⁻³,这可能与高温天气条件下,污染排放减少、扩散速度加快导致空气中前体物氮氧化物(NO_x)和

VOCs 浓度有所减少有关^[30];8 月和 9 月降水日分别达到 16 d 和 17 d,污染缓解,10 月气温下降,降水日为 12 d,仅 10 月 22 日超标;11 月和 12 月随着气温继续下降,MDA8 O₃ 浓度进一步下降.

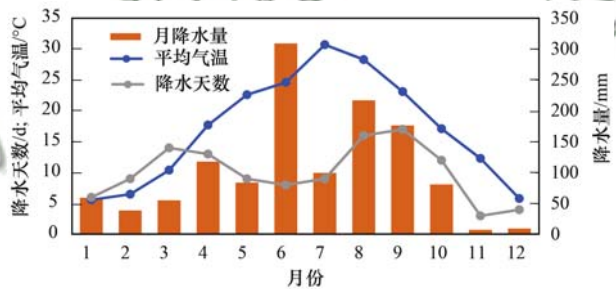


图 3 2017 年南京市气温、降水天数及降水量月度分布

Fig. 3 Monthly distribution of temperature, precipitation days, and precipitation in Nanjing in 2017

图 4 给出了 2017 年 O₃ 浓度日变化情况,可见,全年 O₃ 日变化呈现单峰状,日出前后 06:00 左右是一天的最低值,日出后光化学反应逐步增强,O₃ 浓度开始迅速升高,上升速率约为 10 μg·(m³·h)⁻¹,到 14:00 左右达到峰值,随后开始下降,但仍维持高位,一般 MDA8 O₃ 浓度为 12:00 ~ 19:00 时段均值,20:00 后随着夜间光化学反应减弱及一氧化氮(NO)滴定作用,O₃ 浓度持续下降,到日出前后达到一天的最低值,开始新的循环. 杭州和合肥等长三角城市呈现类似的日变化规律结果^[29,30],主要是与太阳辐射等气象条件的日变化规律有关. 由图 4 可知,超标日与非超标日 O₃ 日变化同样呈现单峰变化,浓度最高值均出现 14:00 左右,最低值均出现在 06:00 左右,06:00 ~ 14:00 期间,超标日 O₃ 浓度上升速率约为 20 μg·(m³·h)⁻¹,约为全年水平的 2 倍;

14:00时超标日与非超标日 O_3 浓度差值约为 $108 \mu g \cdot m^{-3}$, 06:00 时差距仅 $11 \mu g \cdot m^{-3}$, 说明超标日光化学反应强烈, 昼间生成速率快, 夜间消耗也非常迅速.

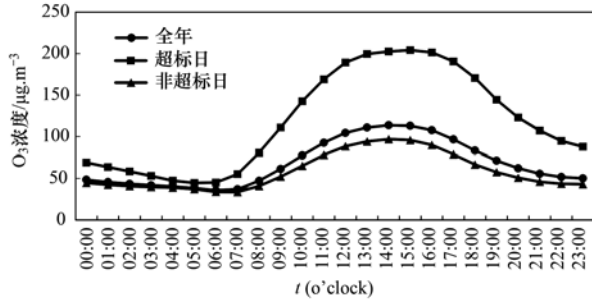


图4 2017年南京市全年、超标日及非超标日的 O_3 浓度日变化

Fig. 4 Daily variation of O_3 concentration throughout the year, days exceeding the standard, and days not exceeding the standard in Nanjing in 2017

2.2 超标轨迹分析

本研究模拟了2017年春夏(4~10月)以南京城区为受体点的逐小时后向轨迹, 考虑到轨迹数较多, 筛选其中污染影响较大的轨迹分析, 将浓度超过MDA8 O_3 国家二级标准(标准限值 $160 \mu g \cdot m^{-3}$)的轨迹定义为超标轨迹. 图5给出了4~10月逐月的超标轨迹, 可见, 超标轨迹数量的月间差异较明显, 这主要与气象条件和排放变化有关. 从超标轨迹数来看, 超标轨迹共521条, 约占总轨迹数的10%, 主要集中在6月和5月, 分别为152条和140条, 占超标轨迹的29%和27%, 对应超标天数分别为17 d和15 d, 占总超标天数的29%和26%; 其余月超标轨迹占比16%(7月)和12%(4月), 8、9和10月均不足10%, 相应污染天数也较少; 从轨迹来向与范围看, 气团来自东南方向时, 南京市的 O_3 易超标, 超标轨迹区域以南京周边200~300 km为主, 集中在长三角区域范围内; 从超标轨迹月度分布来看, 4月轨迹来向较分散, 主要来自苏南地区、浙江北部及安徽中南部区域, 5月主要来自东南方向, 以苏南和浙北为主, 6月以东~东南方向为主, 范围包括苏南、浙北、上海及南通等区域, 6月下旬到7月上旬为梅雨季节, 污染清除条件较好, 7月超标轨迹主要来自东南、西南与西北方向, 以苏南与安徽东部为主, 轨迹略短于前3月; 受副热带高压控制, 8月午后强对流天气较多, 扩散条件较好, 超标轨迹数较少, 9月气团主要来自省内, 受台风外围等影响, 超标轨迹数较少, 10月气团同样主要来自省内, 气温进一步下降, 超标轨迹数进一步减少.

2.3 轨迹聚类分析

为明确主要的气团输送特征, 对所得到的5136

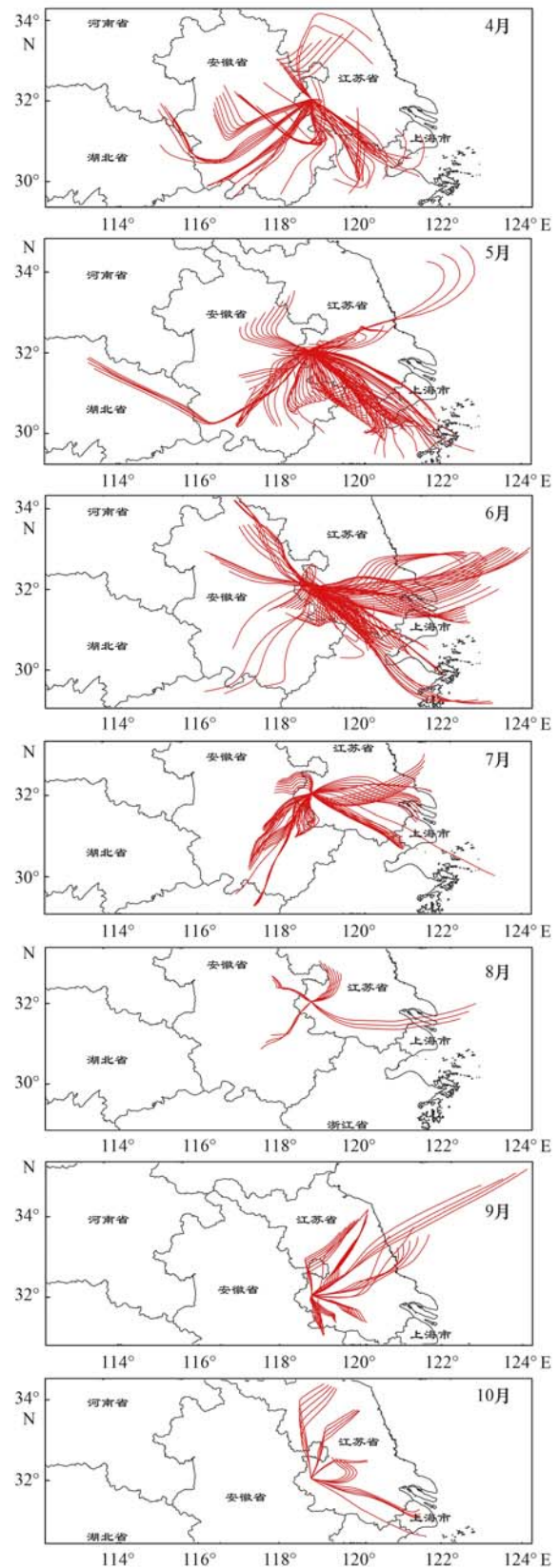


图5 2017年4~10月南京市逐月超标轨迹

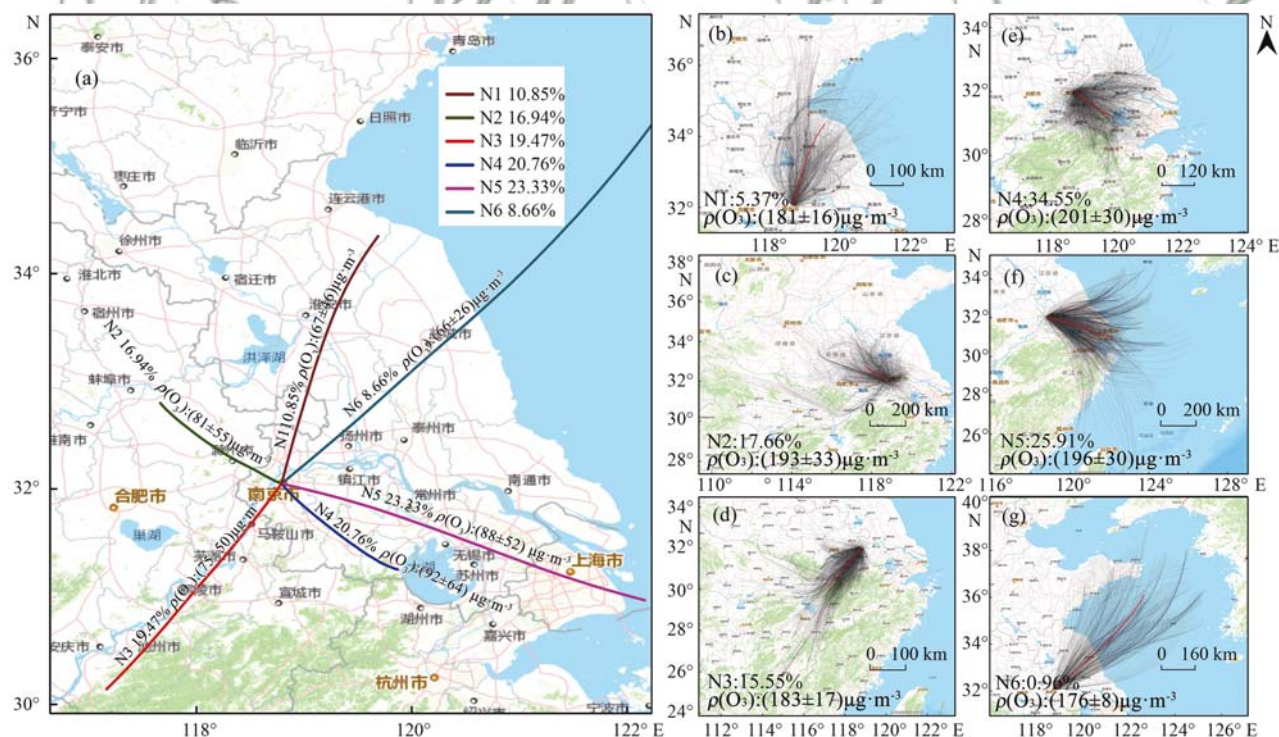
Fig. 5 Monthly exceeding trajectories in Nanjing from April to October in 2017

条轨迹中具有相似速率与来向的气团轨迹进行聚类, 代表气团输送路径. 图6(a)给出了2017年春夏期间到达南京城区气团后向轨迹聚类的结果, 可见,

主要输送路径有 6 条,包括:①聚类 N1 为来自东北偏北方向经连云港、淮安、滁州传输的气团轨迹,占 10.8%;②聚类 N2 为来自西北方向经滁州的气团轨迹,占 16.9%;③聚类 N3 为来自西南方向经安徽池州、铜陵、芜湖、马鞍山传输的气团轨迹,占 19.5%;④聚类 N4 为来自东南偏南方向经无锡、常州、镇江传输的气团轨迹,占 20.8%;⑤聚类 N5 为来自东南方向经上海、苏州、无锡、常州及镇江传输的气团轨迹,占 23.3%,比重最大;⑥聚类 N6 为来自东北方向,自黄海、盐城、泰州与扬州传输的气团轨迹,占 8.7%。从聚类轨迹的空间分布看,南京地区 24h 气团后向轨迹多集中在江苏、安徽和上海以及东海和黄海海域,传输的距离相对较短,说明影响南京市每日空气质量变化的污染源主要集中于长三角区域。

为进一步明确不同类型气团对 O_3 污染的贡献,图 6(a) 给出了不同聚类轨迹到达受体点时对应的 O_3 平均浓度,图 6(b)~6(g) 给出了聚类 N1~N6 的轨迹簇,并列出了其中超标轨迹概率(为超标轨迹与总超标轨迹比值)及对应的 O_3 平均浓度。由图 6(a) 可知,聚类 N4 与 N5 轨迹数合计约占总轨迹数的 44%,对应的 O_3 平均浓度分别为 $92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 88

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,居第一与第二位,由图 6(e) 和 6(f) 可知其中的超标轨迹概率合计约为 60%,对应的 O_3 平均浓度分别为 $201 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 $196 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,同样列第一与第二位,这两类气团出现的概率高,且对应的 O_3 浓度高,表明东南方向气团途经上海、无锡、苏州和常州等经济发达地区时,裹挟了大量的 NO_x 与 VOCs 等 O_3 前体物和光化学产物,叠加本地排放影响后,导致南京地区 O_3 浓度较高。聚类 N4 长度比 N5 短,对应的 O_3 浓度更高,说明风速较小扩散不利时,输入影响叠加本地生成的 O_3 ,更易发生 O_3 污染;其次对南京 O_3 浓度较高时所对应的聚类为 N2 与 N3,其超标轨迹出现概率为 17.66% 与 15.55%,聚类 N2 较短,气团移动速率慢,西北风较小时也更容易发生 O_3 污染,西南方向的聚类 N3 轨迹途经马鞍山和芜湖等地,这些区域钢铁等重污染行业排放较大,对南京 O_3 影响也不容忽视,说明联防联控区域需扩大到安徽;聚类 N1 超标轨迹出现概率 5.37%,主要途经苏北区域,经济社会活动相对苏南较弱,污染输送贡献相对较小;聚类 N6 占比仅 8.66%,超标轨迹出现概率为 0.96%,这部分气团来自海洋,轨迹路径较长,气团移动速率较快,利于污染扩散,污染输送影响较小。



(a) 所有轨迹对应的 O_3 平均浓度, (b)~(g) 为超标轨迹出现概率及对应的 O_3 平均浓度

图 6 2017 年 4~10 月南京地区气团输送路径及对应 O_3 浓度

Fig. 6 Air mass transport path and corresponding O_3 concentration for Nanjing from April to October in 2017

2.4 潜在源区分析

PSCF 值是指超过阈值浓度的轨迹与所有轨迹

数的比值,其分布区域被解释为受体点的污染潜在源区^[31]。图 7 为后向轨迹的 WPSCF 结果,总体来

看, 24 h 内 O_3 潜在源区主要集中在南京周边 200 km 范围内, WPSCF 高值区 (>0.6) 主要集中在苏南地区的常州、无锡及苏州, 以及浙江北部的湖州, 沿南京东南方向分布, 分布方向与南京常年的主导风向较为一致. WPSCF 高值区的分布, 与黄成等^[32] 估算的长三角高排放区域主要集中在沿江经济社会发达城市的结论较为一致. 经过这些高排放区域的气团挟带大量的前体物, 经光化学反应转化生成 O_3 , 对下风向区域影响较大. 值得注意的是, 常州、无锡、苏州和湖州等地都是环太湖城市, 2017 年上半年这 4 个城市的 MDA8 O_3 第 90 百分位数分别为 197、197、192 和 193 $\mu g \cdot m^{-3}$ ^[33], O_3 污染较重. WPSCF 的次高值区 (介于 0.48 ~ 0.6) 则分布较为分散, 包括东南方向的常州、无锡、苏州和湖州, 东北方向的泰州, 西南方向的马鞍山和芜湖及西北方向的滁州市等市.

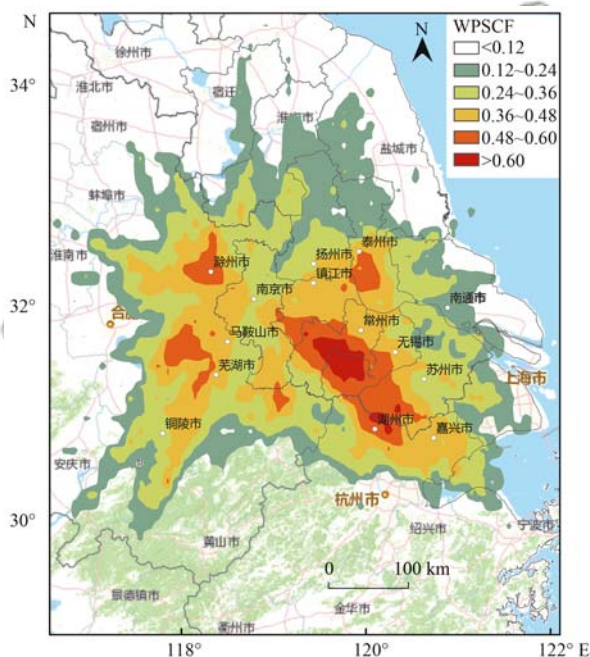


图 7 2017 年 4 ~ 10 月 O_3 的 WPSCF 分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of O_3 WPSCF from April to October in 2017

PSCF 方法表明污染轨迹通过某一区域的概率, 而 CWT 方法能给出该区域对受体点的浓度贡献大小^[34], 两者重合区域则表明该区域是主要潜在源区. 图 8 给出了后向轨迹 WCWT 结果, WCWT 高值区 ($>103 \mu g \cdot m^{-3}$) 同样包括了无锡、常州、苏州与湖州, 且高值区连成了片, 范围比 WPSCF 高值区略大, 同样揭示环太湖城市是主要的潜在源区; WCWT 次高值区 ($>81.7 \mu g \cdot m^{-3}$) 分布较分散, 包括东南方向的无锡、常州、湖州与苏州等城市, 东北方向的泰州、镇江与扬州等地, 西南方向的芜湖和马鞍山, 西北方向滁州以及南面宣城市等地, 次高值区

分布与 WPSCF 较为一致, 但范围有所扩大. 总体来说, WCWT 与 WPSCF 分析得到结果具有较好地一致性, 均表明南京的 O_3 污染受区域输送影响较大. 另外值得注意的是, WPSCF 与 WCWT 的高值区不在南京本地, 而是集中在上风向区域, 这可能与 O_3 为二次污染物, 没有直接的排放源, 前体物排放到发生光化学反应生成 O_3 需要一定的时间, 因而 O_3 高值更容易发生在下风向区域. 风速大时受输送影响更大, 风速小时主要受本地排放影响, 定量的本地与外地污染贡献评估还需进一步研究. 王燕丽等^[35] 利用 CAMx 模型发现 2015 年 7 月京津冀 13 个城市 O_3 污染受传输贡献超过 80%, 而本地贡献较小. 李莉等^[36] 的研究发现 2013 年 7 月上海淀山湖点日最大 O_3 浓度贡献为浙江 (48.5%)、江苏 (11.7%)、安徽 (11.6%) 与上海 (7.4%) 以及长距离输送 (20.9%), 可见, 在强化本地污染防控的基础上, 加强与上风向区域联防联控是有效控制 O_3 污染的关键.

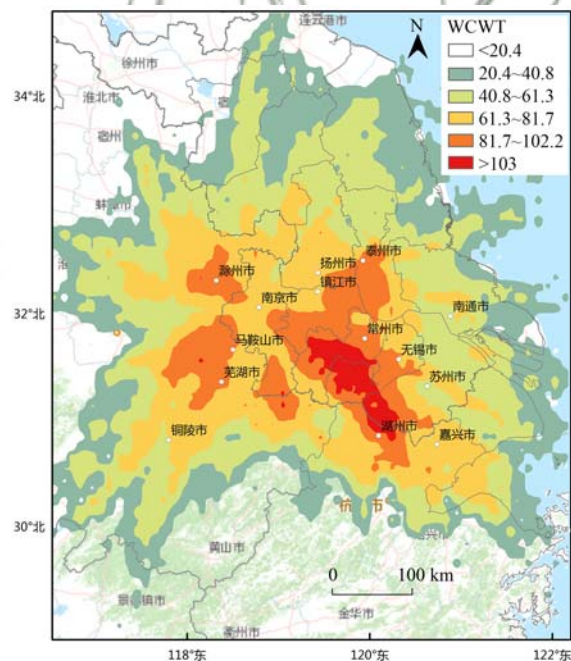


图 8 2017 年 4 ~ 10 月 O_3 的 WCWT 分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of O_3 WCWT from April to October in 2017

3 结论

(1) 2017 年南京市 O_3 超标 58 d, 占总超标天数的 57.4%, 略高于长三角城市平均水平; 受光化学反应与气象条件影响, MDA8 O_3 浓度月变化呈单峰状, 峰值出现在 6 月, O_3 浓度日变化呈单峰状, 峰值出现 14:00 点左右, 谷值出现在 06:00 左右.

(2) 模拟获得 2017 年春夏到达南京城区的近地面 24 h 后向轨迹 5 136 条, 其中 O_3 超标轨迹 521

条; 超标轨迹月度分布差异较为明显, 主要分布在 6 月(152 条)与 5 月(140 条), 合计约占 56%; 超标轨迹以东南方向为主, 集中在长三角区域。

(3) 经过聚类分析获得 2017 年春夏到达南京城区的气团输送路径共 6 条, 包括东北偏北(10.85%)、西北(16.94%)、西南(19.47%)、东南偏南(20.76%)、东南(23.33%)和东北方向(8.66%); 其中, 东南偏南与东南方向两类气团轨迹出现概率合计 44%, 其中超标轨迹合计占比约为 60%, 轨迹对应的 O_3 浓度较高, 是主要的 O_3 污染输送路径。

(4) 潜在源区分析 PSCF 与 CWT 高值区域一致性较好, 均揭示南京东南方向的常州、无锡、苏州与湖州等环太湖城市是主要的 O_3 污染潜在源区; 周边城市泰州、马鞍山、芜湖、滁州、南通与连云港等均对南京 O_3 污染有输送贡献, 区域输送影响甚至可能超过本地贡献, 因此, 针对 O_3 污染必须加强长三角区域联防联控, 尤其强化上风向城市前体物控制。

致谢: 衷心感谢上海市环境科学研究院原总工程师、大气环境研究所所长陈长虹教授对论文的悉心指导。

参考文献:

- [1] 马明亮. 对流层臭氧时空分析影响因素研究及近地面臭氧估算[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Ma M L. Temporal and spatial analysis of tropospheric ozone, simulation of influencing factors and surface ozone estimation [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [2] 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 等. 基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2967-2976.
Xie F J, Shi Z H, Li J Y, *et al.* Scenario simulation study constrained by the ambient air quality standards in Nanjing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2967-2976.
- [3] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O_3 生成潜势的相关性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district[J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 443-451.
- [4] 王博妮, 濮梅娟, 陈鹏, 等. 南京城区冬季大气污染特征[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(9): 1335-1345.
Wang B N, Pu M J, Chen P, *et al.* Characteristic analysis of atmospheric pollutants in Nanjing urban area in winter[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(9): 1335-1345.
- [5] 南京市环境保护局. 2017 年南京市环境状况公报[EB/OL]. http://njrb.njdaily.cn/njrb/html/2018-06/05/content_501843.htm?div=-1, 2020-04-30.
- [6] 李菁, 戴竹君, 李正金, 等. 基于卫星观测的南京臭氧时空分布及变化特征[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(10): 2012-2019.
Li J, Dai Z J, Li Z J, *et al.* Ozone spatial-temporal distribution and trend over Nanjing: insight from satellite[J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, **28**(10): 2012-2019.
- [7] An J L, Zou J N, Wang J X, *et al.* Differences in ozone photochemical characteristics between the megacity Nanjing and its suburban surroundings, Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(24): 19607-19617.
- [8] 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.
- [9] Saavedra S, Rodríguez A, Taboada J J, *et al.* Synoptic patterns and air mass transport during ozone episodes in northwestern Iberia[J]. Science of the Total Environment, 2012, **441**: 97-110.
- [10] 刘宁微. 中国区域近地面臭氧时空分布变化及远距离输送影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
Liu N W. Seasonal-spatial variations of surface ozone over China and the influence of long range transport[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019.
- [11] Stohl A. Trajectory statistics-a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(4): 579-587.
- [12] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at Xian, China during spring[J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(2-3): 875-883.
- [13] Brereton C A, Johnson M R. Identifying sources of fugitive emissions in industrial facilities using trajectory statistical methods[J]. Atmospheric Environment, 2012, **51**: 46-55.
- [14] Nzotungicimpaye C M, Abiodun B J, Steyn D G. Tropospheric ozone and its regional transport over Cape Town[J]. Atmospheric Environment, 2014, **87**: 228-238.
- [15] Dimitriou K, Kassomenos P. Three year study of tropospheric ozone with back trajectories at a metropolitan and a medium scale urban area in Greece[J]. Science of the Total Environment, 2015, **502**: 493-501.
- [16] Vellingiri K, Kim K H, Lim J M, *et al.* Identification of nitrogen dioxide and ozone source regions for an urban area in Korea using back trajectory analysis[J]. Atmospheric Research, 2016, **176-177**: 212-221.
- [17] Sharma A, Mandal T K, Sharma S K, *et al.* Relationships of surface ozone with its precursors, particulate matter and meteorology over Delhi[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2017, **74**(4): 451-474.
- [18] 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.
- [19] 张磊, 金莲姬, 朱彬, 等. 2011 年 6~8 月平流输送对黄山顶污染物浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 969-978.
- [20] Zhang L, Jin L J, Zhu B, *et al.* The influence of advective transport on the concentrations of pollutants at the top of mountain Huangshan from June to August, 2011[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(6): 969-978.
- [21] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**(4): 295-308.
- [22] 王世强, 黎伟标, 邓雪娇, 等. 广州地区大气污染物输送通道的特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 2883-2890.

- Wang S Q, Li W B, Deng X J, *et al.* Characteristics of air pollutant transport channels in Guangzhou region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2883-2890.
- [22] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [23] Ara Begum B, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [24] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(7): 1499-1509.
- [25] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(21): 4214-4226.
- [26] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 545-562.
- [27] 生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201912/t20191231_754132.html, 2020-06-05.
- [28] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- Cao T W, Wu K, Kang P, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu - Chongqing urban agglomeration [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- [29] 严仁嫦, 叶辉, 林旭, 等. 杭州市臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- Yan R C, Ye H, Lin X, *et al.* Characteristics and influence factors of ozone pollution in Hangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- [30] 赵旭辉, 董昊, 季冕, 等. 合肥市 O₃ 污染时空变化特征及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 649-660.
- Zhao X H, Dong H, Ji M, *et al.* Analysis on the spatial-temporal distribution characteristics of O₃ and its influencing factors in Hefei City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 649-660.
- [31] Hopke P K. Recent developments in receptor modeling [J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, **17**(5): 255-265.
- [32] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 1858-1871.
- Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 1858-1871.
- [33] 中国环境监测总站. 2017 年上半年 74 城市空气质量状况报告 [EB/OL]. http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlzkg/201710/t20171030_646978.shtml, 2020-06-05.
- [34] Cheng I, Zhang L, Blanchard P, *et al.* Concentration-weighted trajectory approach to identifying potential sources of speciated atmospheric mercury at an urban coastal site in Nova Scotia, Canada [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(12): 6031-6048.
- [35] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀地区典型月 O₃ 污染输送特征 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Model-derived source apportionment and regional transport matrix study of ozone in Jingjinji [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- [36] Li L, An J Y, Shi Y Y, *et al.* Source apportionment of surface ozone in the Yangtze River Delta, China in the summer of 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 194-207.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i>	(1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i>	(30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i>	(38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i>	(55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i>	(65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i>	(88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i>	(97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i>	(106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i>	(114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo	(127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i>	(136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i>	(147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i>	(159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i>	(166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i>	(175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i>	(184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue	(195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i>	(204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao	(211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i>	(242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i>	(263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i>	(274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i>	(283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i>	(315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i>	(323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i>	(333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i>	(343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i>	(353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i>	(386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i>	(394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i>	(403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i>	(411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i>	(433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i>	(443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i>	(450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i>	(459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i>	(467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i>	(477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i>	(485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i>	(492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i>	(501)