

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

基于无人机的大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展

曲雅微^{1,2}, 王体健³, 袁成^{2*}, 吴昊⁴

(1. 金陵科技学院智能科学与控制工程学院, 南京 211169; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 3. 南京大学大气科学学院, 南京 210023; 4. 南京气象科技创新研究院中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041)

摘要: 近年来, 中国大气细颗粒物($PM_{2.5}$)污染的治理已取得阶段性成效, 但臭氧(O_3)污染快速上升, 实现 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制的基础与关键是针对大气污染物的精细化探测和污染溯源。随着无人机技术和传感器技术的迅速发展, 基于无人机平台的大气污染探测可以有效获得近地层的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 结构特征, 并结合计算机算法对大气污染事件进行精准溯源, 具有高时效性、高灵活性和高时空分辨率的特征, 有助于研究人员了解区域污染物的分布、变化以及来源, 为大气复合污染的协同控制提供科学依据。通过回顾传统的大气污染探测方法, 总结了污染探测领域常用的无人机飞行平台类型和探测仪器, 归纳了基于无人机的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染探测应用与相关溯源算法, 并展望了无人机大气探测的未来研究方向。

关键词: 无人机(UAV); $PM_{2.5}$; 臭氧(O_3); 大气污染探测; 大气污染溯源

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6598-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211243

Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization

QU Ya-wei^{1,2}, WANG Ti-jian³, YUAN Cheng^{2*}, WU Hao⁴

(1. College of Intelligent Science and Control Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster (KLME), Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041, China)

Abstract: In recent years, the management of atmospheric fine particulate matter($PM_{2.5}$) pollution in China has achieved staged success, but ozone(O_3) pollution has increased rapidly. Detection and source localization of atmospheric pollutants is the basis and key to controlling the combined pollution of $PM_{2.5}$ and O_3 . With the rapid development of UAV technology and sensor technology, air pollution detection based on UAV platforms can effectively obtain the structural characteristics of $PM_{2.5}$ and O_3 near the surface and accurately trace the source of air pollution events by applying the computer algorithms, with the characteristics of high timeliness, flexibility, and spatial and temporal resolution. This will help researchers understand the distribution, changes, and sources of regional pollutants and provide a scientific basis for the synergistic control of combined air pollution. This study reviewed the traditional air pollution detection methods, summarized the types of UAV platforms and detection instruments commonly used in pollution detection, concluded the applications of UAV-based $PM_{2.5}$ and O_3 pollution detection and the algorithms of pollution source localization, and discussed the future trends of UAV-based air pollution detection.

Key words: unmanned aerial vehicle(UAV); $PM_{2.5}$; ozone(O_3); air pollution detection; air pollution source localization

以细颗粒物($PM_{2.5}$, 空气动力学直径小于 $2.5\mu m$ 的颗粒物)和臭氧(O_3)为主要污染物的大气复合污染是当今社会的热点问题之一。细颗粒物是大气边界层内的重要污染物, 颗粒物污染会导致心脑血管疾病、呼吸系统疾病、肺癌甚至过早死亡^[1]。对流层臭氧同样是重要的大气污染物, 它能够危害人体健康, 影响植被生长, 并对区域气候产生重要的影响^[2]。近年来, 随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等计划的实施, 我国空气质量持续改善, 大气颗粒物污染逐渐减轻。然而, 大气臭氧浓度逐渐升高, 重点城市地区的臭氧污染抬头, 并呈现出细颗粒物与臭氧共同作用的大气复合污染。目前, 复合污染问题已成为制约我国空气

质量持续改善的关键问题。为解决这一问题, 首先要深入理解城市大气 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的污染结构特征, 其次要发展相关探测手段与智能算法, 实现对污染的精准溯源, 最终才能针对不同地区不同污染源设计合理的污染防治手段, 实现对大气细颗粒物与臭氧污染的协同控制, 推进大气环境治理。

收稿日期: 2022-11-22; 修订日期: 2023-02-17

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目(22KJB170012); 国家自然科学基金项目(42005085); 金陵科技学院高层次人才科研启动基金项目(JIT-B-202108); 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室 & 气象灾害预报预警与评估协同创新中心联合开放课题项目(KLME202109); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2022Y023)

作者简介: 曲雅微(1993~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气污染智能监测、大气环境数值模式和空气污染监测与预报, E-mail: yawei.qu@jit.edu.cn

* 通信作者, E-mail: cyuan@nuist.edu.cn

随着空气动力技术、复合材料、信息化技术和传感器技术等的发展,无人机技术发展迅速,为大气污染探测与溯源提供了新的实验平台. 无人机技术的应用,可以弥补传统探测方法的不足,大大提高大气污染探测的空间广度和时空分辨率精度,有助于建立完整的城市尺度大气污染的三维结构模型,强化大气污染靶向定位,为溯源治理提供科学依据. 本文回顾了传统的大气污染探测方法,从无人机飞行平台类型、无人机电载大气污染探测仪器、无人机 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染探测、无人机大气污染溯源等角度,总结了无人机技术在大气污染探测与溯源领域的应用,并探讨了无人机技术在大气污染监测领域的发展前景.

1 传统大气污染探测方法

1.1 地面站点监测

传统的大气污染探测主要基于离散的地面监测点位,使用自动或手动的监测仪器对环境空气质量进行样品采集、处理和分析. 2012 年,中国环境保护部发布了《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》^[3],规定了环境空气功能区分类、各项环境空气污染物浓度限值、监测方法、数据统计的有效性等行业标准. 2013 年以来,随着国控站点数量的增加,逐渐建立了大气污染国控质量监测站点网络,实时监测 6 种大气污染物,即 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} (空气动力学直径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物)、二氧化硫(SO_2)、二氧化氮(NO_2)、 O_3 和一氧化碳(CO). 近年来,有大量基于监测站点数据的空气质量研究,董佳丹等^[4]研究发现,2015~2019 年, $\text{PM}_{2.5}$ 是 6 种大气污染物中唯一年均值超标的污染物,但 $\text{PM}_{2.5}$ 的年均浓度整体呈现下降趋势,2019 年与 2015 年相比降低了 4.5%,而 O_3 的年均浓度上升了 0.79%,目前中国大气污染以 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 为主. Zhang 等^[5]分析了近 20 年来的大气污染变化趋势,同样发现了颗粒物浓度的明显下降趋势. 地面站点监测的时间连续性高,有利于大气污染的趋势分析和预报,然而站点检测方法还具有一定的局限性:首先,空间代表性有限,例如长三角地区国控点对 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分布代表范围仅占总面积的 63.23%^[6];其次,探测高度有限,国控点等传统地面监测站点仅探测地表污染物浓度,铁塔观测虽然可以进行垂直探测,但一般局限于 500 m 以内^[7].

1.2 卫星遥感探测

基于卫星的大气成分遥感探测能够获取更大空间范围上的大气成分信息,并反演出不同高度上的细颗粒物和臭氧浓度. 已经成功发射的美国 Aqua、

Aura 和 CALIPSO (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation) 卫星,日本葵花八号卫星(Himawari-8),中国风云四号卫星(FY-4)等均搭载了相关的大气成分探测器,能够对大气细颗粒物或臭氧进行浓度的探测和反演. Prijith 等^[8]使用 CALIPSO 卫星数据分析了颗粒物在全球 6 km 以下各高度层的分布,发现陆地地区颗粒物分布季节变化较大,颗粒物垂直分布的最大高度出现在北半球夏季的非洲东北部和西北部地区. CALIPSO 的星下点分辨率高达 330 m,但是受空间覆盖率的影响,在实际研究中可使用的卫星数据水平分辨率仅为 $2^\circ \times 5^\circ$ ^[8]. Shen 等^[9]将 OMI 探测仪(ozone mapping instruments,搭载于 Aura 卫星)获得的卫星数据与中国地面环境监测站的臭氧浓度监测数据进行了对比分析,发现 OMI 能较好地再现中国东部地区多年平均的夏季午后臭氧浓度的空间分布,但卫星观测在大气边界层内的灵敏度有限.

1.3 系留气球探空

系留气球探空可以有效解决卫星探测在对流层内分辨率较低的问题,尤其是在人类活动旺盛的边界层内. Zhang 等^[10]使用系留气球探测边界层内不同粒径颗粒物数浓度的垂直分布,发现粒径在 200 nm 以内的颗粒物主要分布于近地面层,粒径为 200~661.2 nm 的粗颗粒物主要分布于 400 m 以上的高度. Zhang 等^[11]针对 O_3 和 NO_x 在春季的垂直分布,在上海市开展了为期 12 d 的系留气球探空,结果发现在 0~1 000 m 高度内, O_3 的垂直廓线呈现明显的昼夜特征. 然而气球探空受天气影响较大,释放频率有限, Zhang 等^[11]在探空实验中每日释放探空气球 2~12 次,探测高度和时间存在一定的不稳定性.

1.4 地基激光雷达

地基激光雷达系统较为稳定,与探空相比,不受气球释放频率和风速大小的影响. 激光雷达发射系统中的激光器激发激光脉冲,向大气发射激光光束,激光光束在大气中产生后向散射,由接收系统接受回波信号,并通过信号解析系统进行分析. 通常使用 532 nm 波长的激光对颗粒物进行探测,并根据接收到的后向散射信号进行 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度反演. Tao 等^[12]利用激光雷达探测发现,在边界层内 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直分布具有多层结构,并且在重污染天气下,颗粒物被抬升到较高高度,便于进一步传输到其他区域. O_3 等污染气体的探测通常基于差分吸收激光雷达技术(DIAL),利用气体对不同波长激光的吸收差异反演待测气体的浓度. Xing 等^[13]在上海使用地基臭氧激光雷达进行垂直探测,观测结果表明, O_3 不仅在地表生成,在 1.1 km 左右高度处也有较强生成, O_3 在

对流层内的浓度分布主要和挥发性有机物 (VOCs) 浓度相关. 但是, 由于发射系统和望远镜接收系统的视场几何重叠问题, 激光雷达在近地面几百米内的探测仍存在不确定性^[14,15].

1.5 有人飞机探测

基于有人飞机的大气污染物观测出现于 20 世纪 80 年代初^[16], 一般使用改装的民航客机或多用途运输机, 搭载相关的大气气溶胶和污染气体探测设备进行探测. 陈鹏飞等^[17]使用轻型双发多用途运输机 Y-12 (运-12) 搭载大气探测设备, 在北京地区上空进行了氮氧化物 (NO_x)、SO₂、CO 和 O₃ 等污染物的飞行探测, 发现在 1 500 m 左右存在污染气体浓度分界线. 运-12 飞机的最大升限为 7 000 m, 最大载重 1 700 kg, 续航时间 4.4 h, 然而运-12 的飞行高度性能较差, 在实际飞行中往往达不到理想的高度^[18]. 改装后的夏延 III A 飞机飞行高度较高, 最大升限为 10 925 m, 董晓波等^[19]在华北地区重度霾过程期间使用夏延 III A 搭载机载 PMS 粒子测量系统, 分析了气溶胶粒子的微物理垂直特征. 郑博华等^[20]使用空中国王 350i 飞机, 搭载 DMT 粒子测量系统, 在吐鲁番和若羌地区开展冬季气溶胶垂直分布探测, 该飞机的最大升限为 8 400 m, 最大载重

7 200 kg. 我国的有人飞机探测通常基于改装的人工增雨飞机, 建造和使用成本较高, 且飞行航线一般结合人工降雨作业设计, 灵活度较低. 此外, 有人飞机需要一定数量的机组成员, 存在人员安全风险, 无法在高风险地区或有害区域执行观测任务.

1.6 传统探测方法的局限性

传统的大气污染探测方法还包括差分吸收光谱技术 (DOAS)、舰载或车载激光雷达等. 但传统的探测方法存在着不同的问题 (表 1), 例如存在时间和空间上的局限性, 无法兼顾时间分辨率、空间分辨率和空间探测广度; 并且, 观测灵活度有限, 无法深入高风险地区或有害区域; 另外, 传统的大气污染探测代价高昂, 布点探测需要大量的传感器和设备, 探测卫星的发射和维护成本高昂, 激光雷达也需要不菲的研发和维护费用. 而无人机成本相对较低, 其飞行高度可达几百至几十千米, 可以搭载大气污染传感器进行边界层内垂直或水平大气污染探测, 能够弥补激光雷达在近地面几百米内的探测盲区, 可以进行高时间、空间分辨率的重污染事件加密观测和跟踪溯源, 并且可以在危险环境下进行探测作业. 因此, 无人机在大气环境监测和污染探测领域具有巨大优势.

表 1 传统大气污染物探测方法及其特征

Table 1 Traditional air pollutant detection methods and their characteristics

探测方法	空间代表性/ 空间分辨率	观测频率	可探测物种	经济成本	存在问题
地面站点监测	低/低	高	多	高	空间代表性有限, 探测高度有限, 多数站点无法开展垂直方向探测
卫星遥感探测	高/低	低 (极轨卫星) 高 (静止卫星)	多	高	在对流层内, 尤其是边界层内灵敏度有限, 不易获得精细的近地面污染物垂直廓线
系留气球探测	低/高	低	少	高	受天气影响较大, 释放频率有限, 探测高度和时间存在一定的不确定性
地基激光雷达	低/高	高	少	高	由于几何重叠, 激光雷达在近地面几百米内的探测仍存在探测盲区
有人飞机探测	高/低	低	多	高	建造、使用成本较高, 飞行航线灵活度较低, 存在人员安全风险, 无法在高风险地区或有害区域开展观测

2 无人机飞行平台

常见的无人机飞行平台有固定翼无人机、旋翼无人机和扑翼无人机等. 在大气环境监测和污染溯源领域, 通常使用固定翼型和旋翼型无人机, 其中旋翼型又可分为无人直升机和多旋翼无人机 (表 2).

2.1 固定翼无人机

固定翼无人机的外观和传统民航飞机相似, 在机身两侧有固定的机翼, 由动力系统和机翼实现飞行. 固定翼无人机的飞行稳定性高、续航时间长、载重能力强, 能够进行长时间高强度的作业. 在传感器搭载方面, 由于其高载重能力和高稳定性, 固定翼

无人机可以搭载更多的传感器, 并且安装灵活^[21]. 固定翼无人机的航速高, 飞行覆盖范围更大, 探测区域更广. Harrison 等^[22]首次使用零排放的 AMR Payload Master 100 固定翼无人机搭载气溶胶光谱仪, 在不同的高度进行了 4 次飞行, 定量测量了颗粒物的尺寸分布及其垂直、水平和时间变化. Corrigan 等^[23]使用 Manta 固定翼无人机在印度洋上空进行颗粒物浓度探测, Manta 最大起飞重量为 27 kg, 有效载荷为 5 kg, 巡航速度最大为 31 m·s⁻¹, 可以飞行 5 h, 航程高达 550 km. 然而, 固定翼无人机的高空间覆盖度是以降低空间分辨率为代价的, 并且需要起飞和降落跑道, 例如德国不伦瑞克技术大学研发的

Carolo P360 ALADINA 固定翼无人机,需要尺寸约 60 m×25 m 的表面平坦的机场跑道^[24].此外,固定翼无人机有最低的工作高度限制,不能在某一指定地点实现空中悬浮^[25].

2.2 旋翼型无人机

旋翼型无人机,如无人直升机(单旋翼)和多旋翼飞机(四旋翼、六旋翼、八旋翼等),运行速度相对较低,但可以实现垂直起降、空中悬停,起飞着陆场地小,飞行方向灵活,空间分辨率较高,可用于污染的近距离监测^[26].

无人直升机只有一个主动力桨,其飞行动力主要由系统顶部的大型螺旋桨提供,此外,在飞机尾部有一个小型螺旋桨用于抵消主动力桨所产生的反扭力.与有人直升机相比,无人直升机造价更低、体积更小,在危险环境下(如军事侦查、火山喷发、森林大火)的生存能力更强,且不存在人员伤亡.2013~2019 年期间,樱岛火山频繁喷发,日本的研究团队使用无人直升机 Yamaha RMAX G1 搭载 Multi-GAS 多成分气体分析系统,对火山烟羽进行测量,估算火山气体成分^[27].2018 年草津白根火山喷发后,Koyama 等^[28]使用 Yamaha FAZER R G2 无人直升机对火山附近地区进行了磁场强度探测和分析.针对大气边界层内的污染气体,Lin 等^[29]利用无人直升机平台 Gauji-X7 对中国台湾高雄高污染地区的气溶胶和臭氧开展探测.Düsing 等^[30]使用无人直升机搭载 ACTOS 探测器,针对气溶胶粒径分布、气溶胶数浓度、云凝结核数浓度以及气象参数进行了测

量,并结合地面激光雷达验证了无人直升机探空的有效性.

多旋翼无人机有多个动力桨,例如四旋翼无人机(DJI M300 和 Hi-Drone M600),六旋翼无人机(DJI M600 和 CEEWA X8),八旋翼无人机(DJI S1000 和 Prodrone PD8-AW-HR).与无人直升机相似,多旋翼无人机可以通过螺旋桨的高速旋转产生向上的升力,实现垂直起降.不同的是,无人直升机依靠主动力桨的桨距变化,改变旋翼的拉力方向,从而实现前后飞行,并通过改变尾桨的桨距实现转向;而多旋翼无人机的螺旋桨都是不可变距的,主要依靠多个螺旋桨的不同转速实现平飞和转向.多旋翼无人机的机械结构可靠性高,固定翼无人机和无人直升机的机身都有活动关节,在飞行过程中容易产生磨损,而多旋翼无人机的机架多为固定结构,机械磨损小,结构可靠且容易维护.但需要注意的是,多旋翼无人机搭载传感器进行探测时,旋翼形成的扰流场可能会对探测结果产生影响,导致探测误差.沈奥等^[26]发现探测设备在多旋翼无人机上的安装位置会对探测精度产生影响,例如颗粒物与气体的惯性差异会导致传感器采集的空气样本中颗粒物的含量与真实值不一致,结合流场分析发现,气象和污染物探测传感器应当安装在靠近无人机中心轴的位置,并且在高度上应当靠近旋翼旋转平面的相对静风区,重量较轻、精度要求较高的探测设备可安装在无人机上方,重量较大、精度要求较低的设备可安装在无人机下方.

表 2 固定翼无人机和旋翼型无人机的特征
Table 2 Characteristics of fixed wing UAV and rotary wing UAV

项目	固定翼无人机	旋翼型无人机	
		无人直升机	多旋翼无人机
机翼	1 对固定机翼	1 个主螺旋桨,1 个尾桨	4、6、8 甚至多个旋翼
载重	<1 000 kg	<200 kg	<10 kg
续航时间	1~10 h	1~6 h	30 min~2 h
飞行高度	高,但存在最低工作高度	中	低
灵活性	低	中	高
维护难度	高	中	低
起降条件	起飞和降落需要滑行,需要开阔的空间和跑道	起飞和降落需要固定平台,不需要跑道	可在多种环境中起飞降落,不需要跑道
是否可以悬停	不可以	可以	可以
经济成本	高	高	低
代表性产品	AMR Payload Master 100、Manta、Carolo P360 ALADINA、Cruiser 和 Skywalker X8	Yamaha RMAX G1、Yamaha FAZER R G2 和 Gauji-X7	DJI M300、Hi-Drone M600、DJI M600、DJI S1000、CEEWA X8 和 Prodrone PD8-AW-HR
文献	[22~25]	[27~29]	[31~33]

3 无人机载探测仪器

无人机平台可以搭载多种 PM_{2.5}和 O₃ 探测仪器(表 3)开展浓度监测或样本收集,本节介绍当今主

流的无人机载 PM_{2.5}和 O₃ 探测仪器.

3.1 PM_{2.5}探测仪器

在传统的站点监测中,颗粒物的探测方法主要为微量振荡天平法和 β 射线法.无人机探测中,常用

的大气颗粒物实时探测仪大多是基于光的散射原理,此类仪器体积小、重量轻和响应速度快,适用于多种无人机平台. 牛记等^[34]设计的基于六旋翼无人机的 $\text{PM}_{2.5}$ 测量系统搭载了美国 GE 公司生产的 SM-PWM-01A 粉尘传感器,该传感器是基于红外光设计的,当颗粒物通过 LED 发射的红外光时会产生散射光,接收传感器检测到该光线,根据光强的大小计算空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度,测量范围为 $0.01 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 与红外型传感器相比,激光型传感器的启动速度更快,测量分辨率更高. 美国 TSI 公司生产的基于光散射激光光度计的 SIDEPAK AM520 型个体暴露粉尘仪,可搭载于多旋翼无人机飞行平台,使用波长为 650 nm 的激光,能够提供粉尘、烟、雾的实时气溶胶质量浓度读数,并可以通过更换切割头,进行 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_1 等的测量,测量范围为 $1 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,分辨率 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[35]. 北京攀藤科技生产的激光型 $\text{PM}_{2.5}$ 传感器 PMS3003,可搭载于多旋翼无人机平台,其测量范围为 $0 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,分辨率为 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[36]. 欧盟塞浦路斯研究所 (Cyprus) 无人系统研究实验室 (USRL) 研发的 Cruiser 固定翼无人机,搭载了基于激光散射原理的 MetOne 212-2 颗粒物传感器,用于检测直径范围为 $0.5 \sim 10.0 \text{ } \mu\text{m}$ 的大气颗粒物^[37]. 有些研究使用的传感器采用多波段的激光,如 Skywalker 固定翼无人机所搭载的 COBALD 气溶胶检测器结合了红外光 (波长 940 nm) 和蓝光 (波长 455 nm),可检测来自空气分子、颗粒物或云滴的后向散射光^[38,39]. 还有研究使用集成式多参数大气环境探测器,如深圳市腾威测控技术有限公司生产的多参数大气环境探测器,可以同时测量温度、相对湿度、高度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度^[31],其中颗粒物浓度的测量基于激光型传感器,测量误差为 $\pm 10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

除了光散射原理外,另一种主流的无人机载颗粒物探测仪器是基于多通道空气颗粒物采样的方法,此类探测仪器体积和重量较大,一般搭载于载重能力较强的固定翼无人机平台^[40]. 例如,美国 Brechtel 生产的 Filter Sampler Model 9401 包含 8 个过滤器通道,可以获得多个样本并进行颗粒物分析. 欧盟项目 BACCHUS 在地中海地区的野外探测实验中使用了 FRIDGE PEAC 单/多通道静电气溶胶采集器,由 Skywalker X8 固定翼无人机搭载单通道 PEAC (仪器重量 0.6 kg),由 Cruiser 固定翼无人机搭载多通道 PEAC (仪器重量 2.5 kg),其中多通道 PEAC 可一次最多收集 7 个样本^[40]. 此类仪器分多粒径通道将气流中的颗粒物静电吸附在石英膜或特氟龙膜上,并通过透射电镜 (TEM) 或扫描电镜

(SEM),对采集的样本进行自动相分析、颗粒物分析以及形态学分析.

3.2 O_3 探测仪器

一般情况下,国控点或环境监测站使用紫外光度法和差分吸收光谱分析法进行 O_3 探测. 在无人机平台上,常见的气体传感器有电化学传感器、半导体传感器、紫外吸收法传感器、催化燃烧式传感器、非分散红外 (NDIR) 传感器和光离子化检测 (PID) 传感器等.

电化学臭氧传感器是目前臭氧垂直探空和无人探测中的主流探测仪器类型之一. 在电化学臭氧传感器中, O_3 在工作电极上发生电化学氧化还原反应,产生一定强度的电流,通过测定电流强度的大小即可判定 O_3 的浓度. 英国 EN-SCI 公司生产的 ECC 臭氧探空仪^[41],以及英国 Alphasense 公司生产的 OX-B431 传感器^[42] 均为电化学气体传感器. OX-B431 传感器的测量范围 (体积分数) 为 $0 \sim 20 \times 10^{-6}$,灵敏度为 $-225 \times 10^6 \sim -550 \times 10^6 \text{ nA}$. 基于 O_3 与碘化钾 (KI) 溶液发生的电化学反应,中国科学院大气物理研究所研制的电化学臭氧探测仪 IAP O_3 已在探空领域得到充分验证和应用^[43].

半导体传感器一般使用在清洁空气中具有高导电性的半导体金属氧化物,当待测气体 O_3 存在时,半导体的电导率会随着 O_3 浓度的增加而降低,通过电导率的变化即可反演 O_3 的浓度. Alvear 等^[44] 设计的六旋翼无人机探测平台上,搭载了郑州炜盛电子科技有限公司生产的 MQ-131 气体传感器,该传感器所使用的气敏材料为二氧化锡,对 O_3 的灵敏度高,测量范围 (体积分数) 为 $10 \times 10^{-9} \sim 1000 \times 10^{-9}$.

紫外吸收法臭氧传感器的设计基于比尔朗伯定律, O_3 对波长为 253.7 nm 的紫外光有特征吸收,当该波长下的紫外光通过 O_3 时会发生衰减,通过测量吸收后的光强变化就可以反演出 O_3 的浓度. 王东升等^[35] 设计的六旋翼无人机大气污染观测平台使用美国 2B POM 袖珍式臭氧监测器,2B POM 为一种紫外臭氧传感器,测量范围为 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,分辨率 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

除臭氧检测传感器外,无人机还可以搭载其他小型气体传感器,进行大气污染气体的测量,例如基于催化燃烧热效应原理的催化燃烧式传感器可用于测量甲烷 (CH_4) 浓度,基于非分散红外技术的 NDIR 传感器可用于测量 CO_2 气体浓度,光离子化传感器可用于检测空气中的挥发性有机物 (VOCs). 上述气体的无人机测量对于大气环境监测和治理也有着重要意义.

表 3 无人机平台可搭载的大气颗粒物与臭氧探测仪器类型

Table 3 Types of UAV-based detection instruments for monitoring fine particulate matter and ozone

探测要素	仪器类型	代表性产品	量程(分辨率)	特点	文献
颗粒物	红外型传感器	SM-PWM-01A	0.01 ~ 2.0 mg·m ⁻³	功耗低,体积小,重量轻,可搭载于固定翼或旋翼无人机平台	[34,45]
	激光型传感器	SIDEPAK AM520、PMS3003、MetOne 212-2 和 COBALD	0 ~ 100 mg·m ⁻³ (1 μg·m ⁻³)	启动速度快,测量分辨率高,体积较小,可搭载于固定翼或旋翼无人机平台	[35 ~ 39]
	多通道空气颗粒物采样	Filter Sampler Model 9401 和 FRIDGE PEAC	—	仪器体积和重量较大,一般搭载于载重能力较强的固定翼无人机平台	[40]
O ₃	电化学传感器	EN-SCI ECC、OX-B431 和 IAP O ₃	0 ~ 20 × 10 ⁻⁶	体积小,响应快,选择性好,测量稳定,应用范围较广	[41 ~ 43]
	半导体传感器	MQ-131	10 ~ 1 000 × 10 ⁻⁹	灵敏度高,响应快,电路简单,成本低廉,选择性、稳定性差	[44]
	紫外吸收法传感器	2B POM	0 ~ 10 mg·m ⁻³ (0.1 mg·m ⁻³)	可自动校正、自动运行,灵敏度高,重复性好,准确度高	[35]

4 基于无人机的 PM_{2.5} 和 O₃ 污染探测

无人机以其高灵活性、时效性、可操作性等优点,已被逐渐应用于环境探测领域.目前,国内外已有大量研究将固定翼、旋翼无人机与大气污染物探测设备相结合,开展大气 PM_{2.5} 和 O₃ 污染探测.

4.1 PM_{2.5} 探测

Wang 等^[45] 研制了基于六旋翼无人机的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 三维立体监测系统,系统主要由数据采集与处理、无线数据传输、全球定位系统(GPS)、地面测控子系统等模块组成,通过与国家空气质量监测站进行对比校准发现,无人机系统测量的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的平均相对误差分别为 6.2% 和 6.6%,结果可靠.王东生等^[35] 研制的多旋翼无人机 PM_{2.5} 监测系统与大载荷系留气艇平台探测结果进行对比,发现不同探测平台得到的 PM_{2.5} 浓度呈现较高的一致性,相关系数达 0.94 以上,证明无人机系统可有效用于大气环境中 PM_{2.5} 浓度的监测.

在长三角地区,Li 等^[46] 使用固定翼无人机搭载微型传感器开展颗粒物垂直探测,发现对流层下部的 PM_{2.5} 颗粒可能来自化石燃料燃烧,夏季和秋季主要来自长三角地区的本地排放,冬季来自中国北部和西北部的远距离传输.Peng 等^[47] 使用固定翼无人机搭载移动监测设备,在杭州进行 1 000 m 高度内的三维 PM_{2.5} 质量浓度数据采集,结果发现,一般情况下 PM_{2.5} 浓度随着高度的增加而降低,但出现逆温层时例外,并且上午 PM_{2.5} 浓度的垂直递减率大于下午.苏春艳^[48] 使用四旋翼无人机平台在杭州市开展了颗粒物探测,发现该地区的 PM_{2.5} 浓度随高度上升呈波动增加的趋势,与 Peng 等^[47] 的观测结果相反,这可能是白天人为排放和气象条件变化共同作用的结果.Zhou 等^[49] 在南京市开展了基于六旋翼无人机的观测实验,研究发现气象要素与 PM_{2.5} 质量浓度

之间存在相关性,高相对湿度、低风速和低温度的地面气象条件有利于 PM_{2.5} 的累积,同时在污染过程中观测到地表至 4 000 m 之间的沙尘气溶胶层,结合轨迹分析判断颗粒物污染事件受到了西北风的长距离传输的影响.曹云擎等^[31] 在相似地区开展的基于六旋翼无人机的颗粒物观测实验同样发现了气象条件对污染物的影响,研究发现逆温层的出现能有效地抑制 PM_{2.5} 和水汽的垂直向上输送,在夜间,边界层高度降低和逆温层生成导致近地面 PM_{2.5} 累积,结合外部输送,将进一步加重近地面的颗粒物污染.

在中国北部地区,Xin 等^[50] 通过六旋翼无人机的探测发现,相对湿度对 PM_{2.5} 垂直廓线的影响最大,PM_{2.5} 在水面和绿地表面的垂直廓线呈先缓慢上升后下降的趋势,距离水面和绿地表面 10 ~ 30 m 高度处的 PM_{2.5} 浓度较高.

除常规垂直探测外,无人机探测平台也被用于重度 PM_{2.5} 污染过程的探测分析.Liu 等^[32] 使用 Hi-Drone M600 型四旋翼无人机探测 2017 年冬季南京市重污染过程中的 PM_{2.5} 垂直分布,发现 PM_{2.5} 垂直分布具有明显的三层结构特征,混合层内接近恒定,过渡层内局部梯度较大,自由大气层内浓度低、梯度小,PM_{2.5} 浓度在边界层顶部附近出现累积.无人机探测数据还可以应用于大气数值模式结果的对比验证,Liu 等^[51] 发现,在重污染过程中,WRF-Chem 数值模式对夜间边界层 PM_{2.5} 浓度的模拟存在明显高估,结合四旋翼无人机平台的观测数据,增加参数化方案中涡流扩散率的最小值可以改善重污染过程中夜间 PM_{2.5} 的模拟效果.

4.2 O₃ 探测

与 PM_{2.5} 探测相比,针对 O₃ 的无人机探测研究相对较少.在国际上,Illingworth 等^[52] 使用 Skywalker 固定翼无人机在英国曼切斯特地区探测了局地 O₃ 浓度和大气热力学参数,发现城市环境中存在局部

的空间和时间变化,而传统的地面仪器因分辨率较低则无法捕捉到这些变化梯度.在雨季期间,Guimarães 等^[53]在亚马逊中部城市地区使用无人直升机,针对夜间边界层及大气 O_3 浓度开展了垂直探测.研究采集了从地面到 500 m 高度的 57 个 O_3 浓度、位温和绝对湿度的垂直廓线,发现从地表到边界层顶部, O_3 浓度随高度的增加而增加,可以根据 O_3 浓度的突然变化来判断夜间边界层高度,亚马逊雨林中部的城市地区夜间边界层高度大约在 255 ~ 350 m 之间.

在国内研究中, Li 等^[54]研究发现,基于固定翼无人机的大气污染探测平台能够准确地捕捉中国东部地区 O_3 和气象因素的时空变化, O_3 的垂直变化主要与气温的垂直分布以及其他地区的水平输送有关.在没有主要排放源的情况下, O_3 的水平分布变化与对流层下部气团的垂直对流强度有关.当 O_3 的水平分布差异较小时通常伴随着较高的气温,且底层地表多样性的影响较弱.通过对无人机采集的样本进行插值,可以获得三维 O_3 分布图,能够清楚地表现对流层低层 1 000 m 以内 O_3 的昼夜变化. Chen 等^[33,55]在上海地区使用六旋翼无人机进行了臭氧探测实验,结果表明,地表臭氧浓度平均相对较低,但是在高空,臭氧浓度较高、变化较强,最大臭氧体积分数可达 220×10^{-9} . 根据无人机探测结果,冬季中国东部地区的臭氧垂直廓线可以分为四类,即均匀混合型、随高度增加型、分层型和峰值型.

4.3 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同探测

近年来,随着 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的复合污染问题的出现,单一的 $PM_{2.5}$ 或 O_3 观测已无法满足复合污染研究和治理的需求.为了深入理解大气 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的污染结构特征,我国科学家利用最新的大气探测手段开展了一系列大气 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同立体观测. Wu 等^[56]使用六旋翼无人机平台探测深圳城市地区的黑碳颗粒物(BC)和 O_3 浓度的垂直分布,发现 BC 浓度随探测高度的增加而降低,而 O_3 浓度随高度的增加而增加,并且 BC 和 O_3 浓度垂直廓线会受到边界层高度和气团来源的影响.在 G20 峰会期间, Li 等^[57]应用六旋翼无人机研究了输送过程对边界层 $PM_{2.5}$ 和 O_3 垂直分布的影响,结果表明,区域输送主要发生在中上边界层,导致边界层 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的垂直变化与高度正相关,而再循环输送主要发生在下边界层,导致边界层 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的垂直变化与高度呈负相关. Qu 等^[14]结合六旋翼无人机探测平台和地基激光雷达系统,对南京市边界层 $PM_{2.5}$ 和 O_3 进行垂直探测,结果发现, O_3 浓度随高度增加而增加并在上边界层达到最大值,而 $PM_{2.5}$ 浓度随高度下

降, $PM_{2.5}$ 和 O_3 在 650 m 以下是负相关的,相关系数随高度增加,在 1 875 m 处达到最大值 0.379.在边界层内, $PM_{2.5}$ 和 O_3 在有颗粒物污染[日平均 $\rho(PM_{2.5}) > 35 \mu g \cdot m^{-3}$]时呈现负相关,而在无颗粒物污染时呈正相关.此类基于无人机平台的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同探测,具有高时效性、高灵活性、高时空分辨率的特征,有助于了解 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染的分布特征、变化趋势以及相互关联,为大气复合污染的协同控制提供了科学依据.

5 基于无人机的大气污染溯源

为了进一步治理 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染,在实现污染物实时探测的基础上,开展大气污染的精准溯源是精准治污的重要先决条件.在传统的大气污染研究中,污染物排放源定位和分析常使用同位素、气相色谱-质谱、源解析数值模式等方法,但传统的污染物来源解析方法存在时间滞后性,无法进行污染源实时定位和分析,导致溯源结果时效性较差,且产生一定的不确定性.无人机作为移动监测平台,通过搭载多种污染物传感器,结合算法按照给定的搜寻策略进行路径规划,可以实现对 $PM_{2.5}$ 、 O_3 和其他大气污染的实时溯源定位和排放源跟踪.

5.1 经典算法

广泛使用的经典溯源方法有 Z 字形算法和螺旋搜索算法.在 Z 字形算法(又称“之”字形算法)中^[58],无人机以一定的角度向上风方向飞行,穿过烟羽.当无人机传感器检测到污染物浓度低于某个阈值时,判定无人机已经飞抵烟羽的边缘.此时,无人机重新测量风向并再次以一定到角度向上风方向飞行,重复此过程,形成 Z 字形的飞行轨迹,直至到达源头时停止. Hayes 等^[59]提出了螺旋算法,在该算法中探测仪器沿着逆风方向前进,并根据污染物浓度变化和风向来判断下一步运行方向,其运动轨迹呈螺旋形.但这类算法容易陷入局部最优,并且依赖于稳定的流场信息.谢丽华等^[60]基于 Z 字形溯源法和浓度梯度算法,提出了变步长 Z 字形-浓度梯度大气污染物溯源算法,改进后的算法在污染烟羽发现过程中的全局搜索能力更高,并且在跟踪溯源过程中,局部搜索能力更强,误差更小.

5.2 仿生算法

生物对气味的搜寻行为简单且高效,仿生算法通过研究和模仿生物的行为来改进溯源算法.常见的污染源仿生搜寻策略有化学趋向性(chemotaxis)和风趋向性(anemotaxis).在化学趋向性算法中,生物通过嗅觉等感官,依据信息素的浓度梯度变化来搜寻气味源头,此类算法模仿该过程进行污染物溯

源. 路光达等^[61]基于扁形虫动态刺激反应和趋激性行为,提出了一种仿生味源定位算法,即通过对比多个传感器同时测得的浓度梯度,对浓度变化差做出方向估计,从而调整转向率,在仿真实验中,经过19步迭代可搜寻到污染源. 这类刺激趋应性机制不依赖于绝对浓度,并且不依赖于风向. 风趋向性算法模仿生物在感知气味时逆风而上搜寻源头的行为,来进行污染物溯源,其缺陷是容易在气旋处陷入局部最优解. 孟庆浩等^[62]结合蚁群算法和逆风搜索,提出了一种基于主动嗅觉协同搜索算法. 路光达等^[63]研究漂泊信天翁的捕猎行为,发现漂泊信天翁能够在海域上空结合视觉和嗅觉联合搜索并捕食,提出了基于漂泊信天翁的仿生主动搜索策略,包含随机搜索、嗅觉跟踪、趋近、逆风搜索、味源判定和避障等行为模块. 与单一化学趋向性或风趋向性算法相比,这种视觉与嗅觉结合的仿生算法的目标信息资源更加丰富,信息空间的分辨率更高,提升了算法的鲁棒性和可信度.

5.3 智能算法

近年来,基于信息理论的智能算法逐渐应用于无人机污染物溯源中. 魏顺成^[36]提出了一种基于爬山算法的污染物溯源方法. 爬山算法是一种局部择优的算法,模拟整个爬山的过程,以任意位置作为登山(检测)起始点,将该点与感知范围内的临近点进行对比,取更优解作为下一步的起始点,确保每一步都在朝向山顶(最优解,即源头)移动,重复上述步骤直至在临近空间中沒有比该点更优的点,则搜寻到污染源头. 爬山算法结构简单,通过仿真实验发现,在复杂紊流浓度场内爬山算法的定位误差平均不超过1 m,结果可靠,且可以避免风向信息的影响. 但是爬山算法的步长会影响计算效率与溯源精度,需要经过试验反复调整. 崔学林等^[64]提出了一种基于模糊控制的溯源算法,在烟羽内的溯源效率与成功率较高,稳态条件和复杂紊流条件下均表现出优越的性能,具有良好的适用性和鲁棒性,但是如果在初始状态时无人机未处于污染物的烟羽中,可能会导致溯源任务的效率降低甚至失败. 在污染溯源问题中,由于浓度测量的稀疏性较高, Vergassola 等^[65]提出了基于贝叶斯估计和信息测度的 Infotaxis 搜寻算法. 不同于传统基于梯度法的低鲁棒性, Infotaxis 策略能够提升测量稀疏的情况下的污染溯源效果,但计算复杂度较高. Hutchinson 等^[66]在 Infotaxis 的基础上,应用基于 KL 散度的信息路径规划,提出了 Entrotaxis 信息驱动算法,实现了无人机探测平台的源参数估计和污染溯源. 信息驱动算法的鲁棒性较强,不依赖于污染物浓度梯度的信息,但

是计算负荷较大,多数实验需要远程计算平台的协助,限制了无人机溯源平台的灵活度和实用性. 此外,无人机探测结果还可以应用于大气数值模式中^[67,68],对数值模式结果进行验证和修正,提升城市大气环境污染物扩散数值模式的计算准确性和有效性,提升数值模式的溯源效果.

6 展望

6.1 无人机平台性能提升

无人机融合了多学科技术手段,在大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染探测领域有着广阔的发展前景. 同时,无人机平台还面临着动力源改进、高精度微型传感器研发、数据传输能力提升等方面的挑战.

动力源改进. 固定翼无人机的动力源大多为燃气或燃油,续航时间长且载重能力强. 然而,燃料燃烧产生的碳排放不仅会对公众健康、环境和地球的生态系统产生不利影响,还会导致传感器进气管中采集到部分排放尾气,进而使得污染物测量结果产生误差. 轻型多旋翼无人机的动力源主要为锂聚合物电池,续航时间较短. 为减轻自身的起飞重量,多旋翼无人机无法携带更重的大容量电池,且无法携带较重的污染物探测设备,导致探测时长较短、搭载传感器数量有限. 较短的探测时长,不仅限制了飞行距离和空间覆盖性,还会带来飞行稳定性减弱、探测连续性降低等问题. 因此,改进无人机动力源、提高多旋翼无人机电池续航时间是当前亟待解决的问题.

高精度微型传感器研发. 无人机的负载能力影响着飞行探测实验中探测仪器和设备的选取,限制探测物种的数量. 在提升动力源与负载能力的同时,使用新型材料,开发轻量化探测仪器,发展微型传感器,降低传感器的尺寸和重量,有助于在无人机探测平台上搭载更多仪器设备,并提升飞行的稳定性与续航. 此外,无人机飞行速度较高,目前市售的气体传感器的响应时间仍较长,探测实验中需要调整无人机飞行平台的移动速度,以获得具有足够分辨率的数据. 同时,一些传感器存在着基线漂移、传感器中毒等问题. 因此,在传感器轻量化、小型化发展的同时,提高传感器测量精度和反应灵敏度是十分重要的.

数据传输能力提升. 在进行大气污染遥感探测与实时溯源时,需要无人机平台将大量远程数据快速传输至地面控制站,在溯源过程中,还需要进行数据的快速运算与分析处理,并对无人机的飞行方向进行实时调整,这对无人机的地空通讯能力提出了更高的要求. 提升高速宽带数据的传输能力、加强

信息传输的抗干扰性、保证控制链路的稳定可靠性,是基于无人机的大气污染监测技术的重要发展方向之一。

6.2 无人机大气污染探测

无人机已成为大气污染探测的重要新兴技术手段。然而,在当前的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染探测中,通常使用单一的无人机平台搭载少量传感器开展个例研究。在未来研究中,无人机平台可以进一步发挥高移动性、高效率、低风险、低成本、可编队的优势,进一步增强污染探测的灵活性、构建精细化的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 同步三维立体探测、开展无人机探测与数值模式的联合研究,促进 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制。

增强污染探测的灵活性。当前基于无人机平台的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染探测多为有计划性、有针对性的探测实验,机动性较低,尚未充分发挥无人机平台的高移动性和高灵活性优势。面对突发性污染事件,如重污染传输、工厂泄漏、秸秆焚烧、突发火情等现象,可组建无人机应急监测平台,结合污染物探测传感器和污染溯源算法,远程控制无人机在第一时间进行现场监测,迅速回传污染物数据,精准定位污染源头,提升对突发事件的响应速度和应急处置能力。

构建精细化的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 同步三维立体探测。无人机不仅可以作为单一探测平台开展观测实验,还可以开展联合观测,进一步提升 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 探测的数据精细度和完整性。一方面,可以与地面监测站点、激光雷达等多种探测平台开展联合观测。无人机能够弥补地面监测站点空间代表性差、激光雷达存在探测盲区的缺点。包含无人机在内的多平台联合观测数据可以互相验证、互为补充,有助于深入了解典型地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的污染结构。另一方面,可以由多架无人机搭载相同的探测设备,组建无人机编队在多点开展同步飞行,形成立体化的三维污染探测网格,构建污染物空间分布的精细三维结构。

开展无人机探测与数值模式的联合研究。无人机探测平台的发展可以为大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染研究提供更为丰富的真实大气数据。在深入认识大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染特征的基础上,可以将无人机探测结果应用于模式验证和模式改进中,无人机探测结合大气数值模式模拟,针对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合污染现象开展机制分析,剖析污染形成的内在机制,探究复合污染协同控制的有效措施,并借助无人机平台,对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染事件或协同控制减排方案进行监测和实时数据反馈,促进 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制。

7 结论

(1)与传统大气污染探测方法相比,无人机具有灵活性高、可操作性高、探测时空分辨率高等优势,在大气环境监测和污染探测领域具有巨大的发展潜力。在大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究中,通常使用固定翼无人机、无人直升机和多旋翼无人机作为探测平台。各类无人机平台可以搭载多种 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 探测仪器开展污染物浓度监测或样本收集,如光散射型颗粒物传感器、多通道空气颗粒物采样仪、电化学臭氧传感器、半导体传感器、紫外吸收法臭氧传感器等仪器设备。结合大气污染探测设备,基于无人机的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的单物种探测或多物种协同探测在大气复合污染问题的研究中起到了重要作用。同时,无人机移动监测平台能够按照搜寻策略进行路径规划,实现对大气污染的溯源定位和排放源跟踪,提升污染物溯源的时效性。

(2)基于无人机的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染探测与溯源研究为大气复合污染的协同控制提供了科学依据,然而,在无人机平台性能及其应用方案等方面还有较大的发展空间。未来研究中,值得进一步探索的方向包括:改进无人机动力量、研发高精度微型传感器、提升数据传输能力、增强污染探测的灵活性、构建精细化的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 同步三维立体探测和开展无人机探测与数值模式的联合研究。

参考文献:

- [1] Gao J H, Woodward A, Vardoulakis S, *et al.* Haze, public health and mitigation measures in China: A review of the current evidence for further policy response[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 148-157.
- [2] Sahu S K, Liu S C, Liu S, *et al.* Ozone pollution in China: Background and transboundary contributions to ozone concentration & related health effects across the country[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144131.
- [3] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [4] 董佳丹,陈晓玲,蔡晓斌,等. 基于中国大气环境监测站点的2015—2019年大气质量状况时空变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2020, **22**(10): 1983-1995.
Dong J D, Chen X L, Cai X B, *et al.* Analysis of the temporal and spatial variation of atmospheric quality from 2015 to 2019 based on China atmospheric environment monitoring station[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, **22**(10): 1983-1995.
- [5] Zhang F Y, Shi Y, Fang D K, *et al.* Monitoring history and change trends of ambient air quality in China during the past four decades[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110031.
- [6] 苏玲,高婵娟,曹闪闪,等. 长三角地区空气质量国控环境监测点空间代表性评价——以 $\text{PM}_{2.5}$ 为例[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(11): 4377-4387.
Su L, Gao C C, Cao S S, *et al.* Spatial representative evaluation of ambient air quality monitoring stations in the Yangtze River

- delta; Taking $PM_{2.5}$ as an example [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(11): 4377-4387.
- [7] 姚青, 马志强, 林伟立, 等. 天津夏季边界层低层大气中 PAN 和 O_3 的输送特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 67-75.
- Yao Q, Ma Z Q, Lin W L, *et al.* Transport characteristics of PAN and O_3 in the lower atmosphere of the boundary layer in Tianjin in summer[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 67-75.
- [8] Priyith S S, Aloysius M, Mohan M, *et al.* Elevated aerosols and role of circulation parameters in aerosol vertical distribution[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, **137**: 36-43.
- [9] Shen L, Jacob D J, Liu X, *et al.* An evaluation of the ability of the ozone monitoring instrument (OMI) to observe boundary layer ozone pollution across China: application to 2005-2017 ozone trends[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 6551-6560.
- [10] Zhang K, Wang D F, Bian Q G, *et al.* Tethered balloon-based particle number concentration, and size distribution vertical profiles within the lower troposphere of Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **154**: 141-150.
- [11] Zhang K, Zhou L, Fu Q Y, *et al.* Vertical distribution of ozone over Shanghai during late spring: A balloon-borne observation [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **208**: 48-60.
- [12] Tao Z M, Wang Z Z, Yang S J, *et al.* Profiling the $PM_{2.5}$ mass concentration vertical distribution in the boundary layer [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(3): 1369-1376.
- [13] Xing C Z, Liu C, Wang S S, *et al.* Observations of the vertical distributions of summertime atmospheric pollutants and the corresponding ozone production in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(23): 14275-14289.
- [14] Qu Y W, Zhao M, Wang T J, *et al.* Lidar- and UAV-based vertical observation of spring ozone and particulate matter in Nanjing, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(13), doi: 10.3390/rs14133051.
- [15] Qu Y W, Wang T J, Wu H, *et al.* Vertical structure and interaction of ozone and fine particulate matter in spring at Nanjing, China: The role of aerosol's radiation feedback [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117162.
- [16] Lo K K, Passarelli R E. The growth of snow in winter storms: An airborne observational study [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, **39**(4): 697-706.
- [17] 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 等. 北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4141-4150.
- Chen P F, Zhang Q, Quan J N, *et al.* Temporal and spatial distribution of ozone concentration by aircraft sounding over Beijing [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4141-4150.
- [18] 王广河, 李淑日, 刘卫国. 新一代人工增雨综合监测、催化作业飞机(夏延 III A)改装及其在人工增雨中的应用[A]. 见: 第十四届全国云降水物理和人工影响天气科学会议(上册)[C]. 贵阳: 中国气象学会, 2005.
- [19] 董晓波, 杨军, 杨洋, 等. 华北重度霾过程期间大气气溶胶粒子的微物理垂直特征[J]. *科学技术与工程*, 2018, **18**(2): 204-211.
- Dong X B, Yang J, Yang Y, *et al.* Microphysical characteristics in the vertical direction of atmospheric aerosol particles of North China during the heavy haze process background [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(2): 204-211.
- [20] 郑博华, 陈胜, 李圆圆, 等. 吐鲁番和若羌冬季气溶胶垂直分布的飞机观测分析[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(5): 1426-1439.
- Zheng B H, Chen S, Li Y Y, *et al.* Aircraft observation and analysis of vertical distribution of aerosols in winter in Turpan and Ruqiang [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(5): 1426-1439.
- [21] Lambey V, Prasad A D. A review on air quality measurement using an unmanned aerial vehicle [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, **232**(3), doi: 10.1007/s11270-020-04973-5.
- [22] Harrison W A, Lary D J, Nathan B J, *et al.* Using remote control aerial vehicles to study variability of airborne particulates [J]. *Air, Soil and Water Research*, 2015, **8**(1): 43-51.
- [23] Corrigan C E, Roberts G C, Ramana M V, *et al.* Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian Ocean using autonomous unmanned aerial vehicles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(3): 737-747.
- [24] Altstädter B, Platis A, Wehner B, *et al.* ALADINA-an unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(4): 1627-1639.
- [25] Villa T F, Gonzalez F, Miljevic B, *et al.* An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives[J]. *Sensors*, 2016, **16**(7), doi: 10.3390/s16071072.
- [26] 沈奥, 周树道, 王敏, 等. 旋翼无人机大气探测设备布局仿真优化设计[J]. *计算机测量与控制*, 2018, **26**(2): 165-169, 174.
- Shen A, Zhou S D, Wang M, *et al.* Simulation and optimization design of atmospheric detection equipment layout based on UAV [J]. *Computer Measurement & Control*, 2018, **26**(2): 165-169, 174.
- [27] Shinohara H, Kazahaya R, Ohminato T, *et al.* Variation of volcanic gas composition at a poorly accessible volcano: Sakurajima, Japan [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, **407**, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2020.107098.
- [28] Koyama T, Kanda W, Utsugi M, *et al.* Aeromagnetic survey in Kusatsu-Shirane volcano, central Japan, by using an unmanned helicopter [J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**(1), doi: 10.1186/s40623-021-01466-5.
- [29] Lin P H, Chen W N. The study of aerosol and ozone measurements in lower boundary layer with UAV helicopter platform[A]. In: EGU General Assembly 2013 [C]. Vienna: EGU, 2013.
- [30] Düsing S, Wehner B, Seifert P, *et al.* Helicopter-borne observations of the continental background aerosol in combination with remote sensing and ground-based measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(2): 1263-1290.
- [31] 曹云擎, 王体健, 高丽波, 等. 基于无人机垂直观测的南京 $PM_{2.5}$ 污染个案研究[J]. *气候与环境研究*, 2020, **25**(3): 292-304.
- Cao Y Q, Wang T J, Gao L B, *et al.* A case study of $PM_{2.5}$ pollution in Nanjing based on unmanned aerial vehicle vertical observations [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, **25**(3): 292-304.
- [32] Liu C, Huang J P, Wang Y W, *et al.* Vertical distribution of $PM_{2.5}$ and interactions with the atmospheric boundary layer

- during the development stage of a heavy haze pollution event[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135329.
- [33] Chen Q, Wang D S, Li X B, *et al.* Vertical characteristics of winter ozone distribution within the boundary layer in Shanghai based on hexacopter unmanned aerial vehicle platform [J]. *Sustainability*, 2019, **11**(24), doi: 10.3390/su11247026.
- [34] 牛记, 王仁波. 基于六旋翼无人机的 PM_{2.5} 低空测量系统[J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**(36): 72-76.
Niu J, Wang R B. PM_{2.5} Low altitude measurement system based on six-rotor UAV [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(36): 72-76.
- [35] 王东生, 彭仲仁, 李白, 等. 基于多旋翼无人机平台的大气 PM_{2.5}垂直结构观测技术[J]. *装备环境工程*, 2019, **16**(6): 35-40.
Wang D S, Peng Z R, Li B, *et al.* Vertical atmospheric structure observation technology based on multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) Platform [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, **16**(6): 35-40.
- [36] 魏顺成. 基于无人机的大气污染应急监测与溯源[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
Wei S C. Emergency monitoring and tracing of atmospheric pollution based on UAV[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [37] Mamali D, Marinou E, Sciare J, *et al.* Vertical profiles of aerosol mass concentration derived by unmanned airborne in situ and remote sensing instruments during dust events [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(5): 2897-2910.
- [38] Brabec M, Wienhold F G, Luo B P, *et al.* Particle backscatter and relative humidity measured across cirrus clouds and comparison with microphysical cirrus modelling[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(19): 9135-9148.
- [39] Cirisan A, Luo B P, Engel I, *et al.* Balloon-borne match measurements of midlatitude cirrus clouds [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(14): 7341-7365.
- [40] Schrod J, Weber D, Drücke J, *et al.* Ice nucleating particles over the Eastern Mediterranean measured by unmanned aircraft systems[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(7): 4817-4835.
- [41] Deshler T, Stübi R, Schmidlin F J, *et al.* Methods to homogenize electrochemical concentration cell(ECC) ozonesonde measurements across changes in sensing solution concentration or ozonesonde manufacturer [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, **10**(6): 2021-2043.
- [42] 戴上, 周呈祥, 庞小兵, 等. 基于无人机观测研究杭州湾化工园区近地面层臭氧垂直廓线[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2514-2522.
Dai S, Zhou C X, Pang X B, *et al.* Vertical profiles characteristics of near surface layer ozone in Shangyu Economic Development Zone of Hangzhou Bay based on unmanned aerial vehicle[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2514-2522.
- [43] 郑向东, 宣越键, 林伟立, 等. 国产 ECC 型 O₃ 探空仪性能测试及室外比对观测[J]. *应用气象学报*, 2018, **29**(4): 460-473.
Zheng X D, Xuan Y J, Lin W L, *et al.* Performance tests and outdoor comparison observations of domestic remade ECC ozonesondes [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, **29**(4): 460-473.
- [44] Alvear O, Zema N R, Natalizio E, *et al.* Using UAV-based systems to monitor air pollution in areas with poor accessibility [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, **2017**, doi: 10.1155/2017/8204353.
- [45] Wang T H, Han W T, Zhang M F, *et al.* Unmanned aerial vehicle-borne sensor system for atmosphere-particulate-matter measurements; Design and Experiments[J]. *Sensors*, 2019, **20**(1), doi: 10.3390/s20010057.
- [46] Li X B, Wang D S, Lu Q C, *et al.* Investigating vertical distribution patterns of lower tropospheric PM_{2.5} using unmanned aerial vehicle measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 62-71.
- [47] Peng Z R, Wang D S, Wang Z Y, *et al.* A study of vertical distribution patterns of PM_{2.5} concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles: A case in Hangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 357-369.
- [48] 苏春艳. 基于四旋翼无人机的 PM_{2.5} 浓度实时监测系统开发[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
Su C Y. Development of real-time monitoring system for the PM_{2.5} concentration based on quad-rotor unmanned aerial vehicles[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2018.
- [49] Zhou S D, Peng S L, Wang M, *et al.* The characteristics and contributing factors of air pollution in Nanjing: A case study based on an unmanned aerial vehicle experiment and multiple datasets [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(9), doi: 10.3390/atmos9090343.
- [50] Xin K, Zhao J Y, Ma X, *et al.* Effect of urban underlying surface on PM_{2.5} vertical distribution based on UAV in Xi'an, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, **193**(5), doi: 10.1007/s10661-021-09044-8.
- [51] Liu C, Huang J P, Hu X M, *et al.* Evaluation of WRF-Chem simulations on vertical profiles of PM_{2.5} with UAV observations during a haze pollution event[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **252**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118332.
- [52] Illingworth S, Allen G, Percival C, *et al.* Measurement of boundary layer ozone concentrations on-board a Skywalker unmanned aerial vehicle [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2014, **15**(4): 252-258.
- [53] Guimarães P, Ye J H, Batista C, *et al.* Vertical profiles of ozone concentration collected by an unmanned aerial vehicle and the mixing of the nighttime boundary layer over an Amazonian urban area [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(10), doi: 10.3390/atmos10100599.
- [54] Li X B, Wang D S, Lu Q C, *et al.* Three-dimensional investigation of ozone pollution in the lower troposphere using an unmanned aerial vehicle platform[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **224**: 107-116.
- [55] Chen Q, Li X B, Song R F, *et al.* Development and utilization of hexacopter unmanned aerial vehicle platform to characterize vertical distribution of boundary layer ozone in wintertime [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(7): 1073-1083.
- [56] Wu C, Liu B, Wu D, *et al.* Vertical profiling of black carbon and ozone using a multicopter unmanned aerial vehicle(UAV) in urban Shenzhen of South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149689.
- [57] Li X B, Peng Z R, Wang D S, *et al.* Vertical distributions of boundary-layer ozone and fine aerosol particles during the emission control period of the G20 summit in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(1): 352-364.
- [58] Ishida H, Suetsugu K, Nakamoto T, *et al.* Study of autonomous mobile sensing system for localization of odor source using gas

- sensors and anemometric sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, **45**(2): 153-157.
- [59] Hayes A T, Martinoli A, Goodman R M. Distributed odor source localization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, **2**(3): 260-271.
- [60] 谢丽华, 丁涛. 基于无人机的大气污染物变步长溯源算法研究[J]. *中国计量大学学报*, 2020, **31**(1): 79-84.
- Xie L H, Ding T. Research on air pollutant variable step tracing algorithm based on UAV [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2020, **31**(1): 79-84.
- [61] 路光达, 张明路. 一种机器人仿生气味源定位策略[J]. *河北工业大学学报*, 2010, **39**(5): 48-52.
- Lu G D, Zhang M L. A biological—inspired gas/odor source localization strategy for mobile robot [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2010, **39**(5): 48-52.
- [62] 孟庆浩, 李飞, 张明路, 等. 湍流烟羽环境下多机器人主动嗅觉实现方法研究[J]. *自动化学报*, 2008, **34**(10): 1281-1290.
- Meng Q H, Li F, Zhang M L, *et al.* Study on realization method of multi-robot active olfaction in turbulent plume environments [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(10): 1281-1290.
- [63] 路光达, 张小俊, 李建华. 基于漂泊信天翁行为的机器人仿生主动嗅觉策略[J]. *机械设计*, 2010, **27**(11): 43-47.
- Lu G D, Zhang X J, Li J X. Robot bionic active olfaction strategy based on wandering albatross behavior [J]. *Journal of Machine Design*, 2010, **27**(11): 43-47.
- [64] 崔学林, 丁涛, 魏顺成. 基于无人机的大气污染物模糊控制溯源算法的仿真实现[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(35): 370-374.
- Cui X L, Ding T, Wei S C. Simulation implementation of fuzzy control traceability algorithm for air pollutants based on unmanned aerial vehicle [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(35): 370-374.
- [65] Vergassola M, Villermaux E, Shraiman B I. ‘Infotaxis’ as a strategy for searching without gradients [J]. *Nature*, 2007, **445**(7126): 406-409.
- [66] Hutchinson M, Liu C J, Chen W H. Information-based search for an atmospheric release using a mobile robot: Algorithm and experiments [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, **27**(6): 2388-2402.
- [67] 张晓旭, 王丹. 无人机监测在城市环境大气污染物扩散数值模拟中的应用[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(2): 44-46.
- Zhang X X, Wang D. Application of UAV monitoring in numerical simulation of urban ambient atmospheric pollutants diffusion [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(2): 44-46.
- [68] 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 9-18.
- Yang X, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Heavy pollution episode in Tianjin based on UAV meteorological sounding and numerical model [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 9-18.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)