刘正阳,贺 美,任艳芹,等.基于旋翼无人机观测的大亚湾区大气污染物垂直分布特征及其来源研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):4796-4806.
Liu Z Y, He M, Ren Y Q, et al. Study on vertical distribution characteristics and sources of atmospheric pollutants in the Daya Bay area based on rotor UAV observations [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):4796-4806.

基于旋翼无人机观测的大亚湾区大气污染物垂直分布特征及其来源研究

刘正阳[1,2],李 洋[1],贺 美[2],任艳芹[1],唐 伟[1],高 锐[1],毋振海[1],张丹丹[1],龙芳云[1],张 林[3],郑雄枫[4],黄雨林[5],毕 方[1*] (1.中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,北京 100012；2.长江大学资源与环境学院,油气地球化学与环境湖北省重点实验室,湖北 武汉 430100；3.惠州市生态环境局大亚湾经济技术开发区分局,惠州市大亚湾生态环境事务中心,广东 惠州 516008；4.惠州市生态环境局大亚湾经济技术开发区分局,惠州市大亚湾环境科学中心,广东 惠州 516083；5.广州鋆达科技有限公司,广东 广州 511400)

摘要：本研究利用搭载多污染物传感器的旋翼无人机,于 2023 年 10 月 12~18 日每日上午(9:00)、下午(15:00)、晚上(21:00)在广东省惠州市大亚湾区开展多项参数垂直观测.观测结果显示,随着高度的上升,温度总体呈现逐渐下降趋势,部分时段在 350m 高度出现逆温现象;相对湿度总体呈现上升趋势;NO_2 浓度总体呈现逐渐上升趋势,部分时段在 350m 左右高度有较为显著的浓度抬升现象;SO_2 浓度总体呈现逐渐下降趋势,但是部分时段在 350m 左右高度也有显著浓度抬升现象.这表明 350m 高度可能发生了 NO_2 和 SO_2 污染传输过程. CO 浓度在地面相对较高,并随高度上升而迅速降低, 200m 高度以上浓度差异很小,这表明高空 CO 浓度主要受近地面排放扩散影响,没有明显的污染传输过程. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度较低,在各高度的差异较小,且总体呈现“上午高、下午晚上低”的现象,这可能是夜间残留层累积或排放的颗粒物对第 2d 上午产生了影响.利用后向轨迹模拟分析气团来源,发现 0m、300m 和 500m 高度的气团均经过大亚湾石化园区,而且 300m 和 500m 高度气团在 12~14 日来源于广东省东北部县市,在 16~18 日则来源于广东及福建沿海区域,因此大亚湾区石化园区排放和上风向县市均对大亚湾区高空污染物存在一定贡献.利用 WRF~CAMx 模型模拟分析区域高空 NO_2 和 SO_2 分布,发现大亚湾区上风向高空存在污染物浓度高值区,表明该区域可能存在高空污染物传输带.通过无人机观测得到的垂直廓线特征,有助于理解大气污染物在高空的传输规律,为区域空气质量影响研究提供了支撑.

关键词：无人机观测；垂直分布特征；大气污染物；来源分析
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-4796-11

Study on vertical distribution characteristics and sources of atmospheric pollutants in the Daya Bay area based on rotor UAV observations. LIU Zheng-yang[1,2], LI Yang[1], HE Mei[2], REN Yan-qin[1], TANG Wei[1], GAO Rui[1], WU Zhen-hai[1], ZHANG Dan-dan[1], LONG Fang-yun[1], ZHANG Lin[3], ZHENG Xiong-feng[4], HUANG Yu-lin[5], BI Fang[1*] (1.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China；2.Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China；3.Daya Bay Ecological Environment Affairs Center, Daya Bay Economic and Technological Development Zone Branch, Huizhou Ecological Environment Bureau, Huizhou 516008, China；4.Daya Bay Environmental Science Center, Daya Bay Economic and Technological Development Zone Branch, Huizhou Ecological Environment Bureau, Huizhou 516083, China；5.Guangzhou Yunda Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：4796~4806

Abstract：This study utilized a rotor UAV equipped with multi-pollutant sensors to conduct vertical observations of multiple parameters in the Daya Bay District of Huizhou City, Guangdong Province, from October 12 to 18, 2023, during the morning (9:00), afternoon (15:00), and evening (21:00) each day. The results showed that temperature generally decreased with increasing altitude, with temperature inversion observed at 350 meters during certain periods. Relative humidity exhibited an overall increasing trend with height. NO_2 concentrations typically increased with altitude, with significant peaks around 350 meters at specific times. SO_2 concentrations exhibited a general decreasing trend, but significant elevations were also observed around 350meters at certain times, suggesting potential NO_2 and SO_2 pollution transport processes at this altitude. CO concentrations were relatively high at ground level and decreased rapidly with altitude, showing minimal variation above 200meters, indicating that high-altitude CO concentrations were primarily influenced by near-surface emissions and diffusion, with no significant pollution transport processes.

收稿日期：2025-02-11
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3706105);大亚湾区空气质量精细化管理项目(GDHR-2022-013)

* 责任作者, 工程师, bifang@craes.org.cn

PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations were generally low, with slight variations across altitudes. They tended to be higher in the morning and lower in the afternoon and evening, likely due to residual layer accumulation or overnight particle emissions. Backward trajectory analysis revealed that air masses at 0, 300, and 500meters all passed over the Daya Bay Petrochemical Industrial Park. Air masses at 300meters and 500meters originated from northeastern counties and cities of Guangdong Province from October 12 to 14, and from coastal areas of Guangdong and Fujian Provinces from October 16 to 18, indicating that emissions from the Daya Bay Petrochemical Industrial Park and upwind regions contributed to high-altitude pollutant levels in the Daya Bay area. WRF-CAMx model simulations further identified high-concentration zones of NO_2 and SO_2 upwind of Daya Bay, confirming the existence of high-altitude pollutant transport pathways. The vertical profile characteristics obtained from UAV observations provide valuable insights into the transport patterns of atmospheric pollutants at high altitudes, offering support for regional air quality impact studies.
Key words：UAV observation；vertical distribution characteristics；atmospheric pollutants；source analysis

大气中的二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)以及可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($PM_{2.5}$)是影响我国环境空气质量持续改善的污染物,这些污染物在适合的气象条件下会发生高空远距离传输,从而造成区域性的空气污染.为了明确污染物在高空的分布特征,研究其传输规律,研究人员通过激光雷达[1-2]、卫星遥感[3-4]、飞机航测[5-6]、系留气球监测[7-8]、高塔观测[9-10]、无人机观测[11-13]等多种监测方法开展污染物垂直分布观测研究.与其他方法手段相比,无人机观测具有体积小、成本低、灵活方便、时间空间分辨率较高等优势[14-15],是大气污染物垂直分布特征研究的可靠技术方法之一.

近年来,无人机已经成为大气污染物垂直分布特征和传输规律研究的重要技术手段.基于无人机观测结果,研究发现温度与 SO_2、NO_2 浓度呈负相关,却与颗粒物浓度呈正相关,这表明温度变化对污染物浓度的调节作用不容忽视[16],进一步研究发现对流层内逆温与近地面 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布密切相关[17],且 0~100m 高度范围内的颗粒物主要来源为近地面的局地排放,100~500m 高度范围内则以区域传输为主[18].利用无人机观测可以发现,$PM_{2.5}$ 和黑炭(BC)浓度均随海拔升高而显著下降,且主要受区域传输和行星边界层的影响[19],然而臭氧(O_3)浓度则随高度的升高而不断上升,并在夜间形成明显垂直梯度,这一现象反映了以 O_3 为代表的二次污染物垂直分布特征受排放源分布、大气边界层高度变化及光化学反应等因素的共同控制,其垂直分布特征更为复杂[20].在高湿度天气下的无人机观测研究结果显示,挥发性有机物(VOCs)垂直分布规律并不显著,受雾滴沉降过程对逆温层污染物的清除效应等因素影响[21];在高温干旱沙漠地区的无人机观测研究结果显示,高空污染物具有显著的区域传输特征,表明人为排放能够在高空传输并造成大范围区域影响[22].综上,无人机垂直观测已经成为研究污染物空间分布特征以及揭示污染物区域传输规律的重要技术手段,为污染精准溯源、空气质量模型提升以及空气质量持续改善对策提供科技支撑.

然而,当前无人机垂直观测工作多数关注于 O_3 和颗粒物,鲜有在我国南方沿海城市专门针对 SO_2 和 NO_2 等一次污染物垂直分布及传输特征开展无人机观测研究工作,难以明确污染源排放和高空传输对一次污染物的影响.为此,本研究于 2023 年 10 月 12~18 日期间,在广东省惠州市大亚湾区利用搭载多污染物传感器的旋翼无人机开展多参数垂直观测工作,结合地面观测结果研究了不同参数的地面和高空变化特征;利用 CAMx 数值模型和 HYSPLIT 后向轨迹模拟结果,进一步研究了典型污染物的高空分布特征及传输路径,指明了影响污染物垂直分布特征的主要来源,为南方城市地区污染物的区域传输和空气质量持续改善提供了观测研究基础.

1　数据与方法

1.1　观测地点和时间

观测地点为广东省惠州市大亚湾区西区小学(北纬 22°45′35″,东经 114°28′54″,以下简称“西区小学站点”).西区小学站点为大亚湾区空气质量监测站点,同时也为本次无人机垂直观测的所在地.观测点周边 3km 内均为交通干道以及商住混合区,没有大型工业园区或大型工地;东南方向 5km 左右为大亚湾石化工业园区, 该园区内企业以石油炼制和石油化工行业企业为主.

观测时间为 2023 年 10 月 12~18 日.无人机观测

为每日的上午(9:00)、下午(15:00)和晚上(21:00),其中 13 日下午、15 日夜间、16 日上午、18 日下午因降雨大风等原因无法开展观测工作,观测开展情况见表 1.地面观测为在线实时观测.

表 1 无人机观测开展情况

Table 1 Implementation of UAV observation

时刻	12 日	13 日	14 日	15 日	16 日	17 日	18 日
上午(9:00)	√	√	√	√	降雨	√	√
下午(15:00)	√	高空大风	√	√	√	√	降雨
晚上(21:00)	√	√	√	高空大风	√	√	√

注:开展无人机观测工作的时段用“√”代表;未开展的则写明原因.

1.2 无人机观测

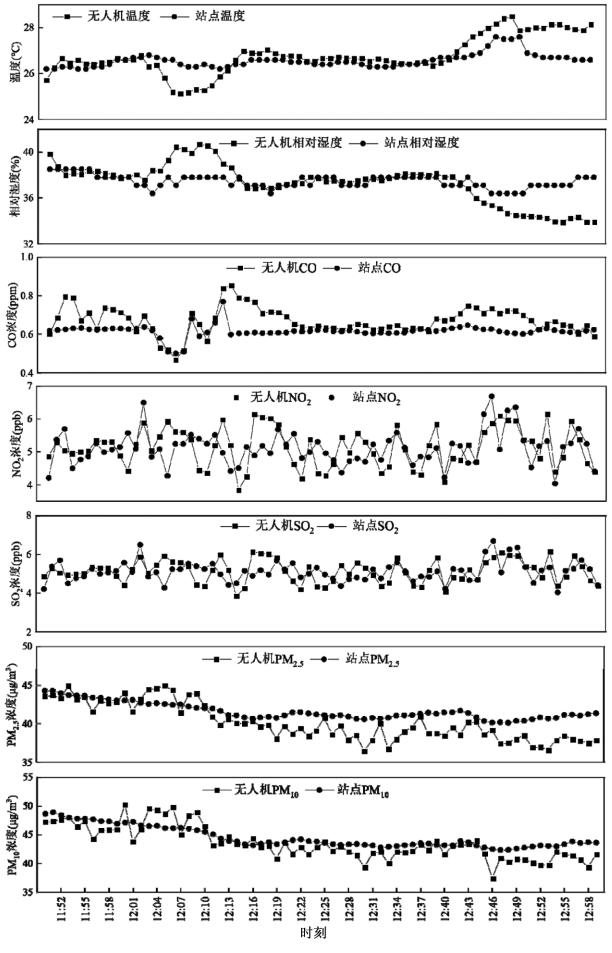


图 1 2023 年 10 月 10 日 11:52~12:58 期间无人机监测数据与西区小学站点监测数据对比

Fig.1 Comparison of drone monitoring data and West Zone Primary School station monitoring data from 11:52 to 12:58 on October 10, 2023

本次观测所使用的无人机为大疆经纬 M30T;观测所利用的多污染物传感器 Sniffer 4D.为了减少无人机旋翼产生的气流扰动,多污染物传感器安装于无人机中上部,靠近中心轴线上、相对静风的区域[23-24].多污染物传感器能够监测 PM_{10}、$PM_{2.5}$、NO_2、SO_2、CO 等污染物浓度以及温度、相对湿度等气象参数;仪器时间分辨率为 1s; PM_{10}、$PM_{2.5}$ 监测方法为激光散射,检测低限为 1μg/m^3,检测精度为 1μg/m^3; NO_2、SO_2、CO 监测方法为电化学,检出低限均为 510×10^{-9},检测精度均为 1×10^{-9};温度检测范围为−40~50℃,检测精度为 1℃;相对湿度检测范围为 0~100%,检测精度为 1%.

为进一步减少因无人机上升和下降过程中旋翼加大功率造成的气流扰动,确保观测数据相对稳定,结合大亚湾区限飞高度和无人机续航时间等情况,本次观测采用多高度停留的监测方法,即从地面(0m)开始, 每上升 50m 停留 3min 持续观测,采集了 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500m 共 11 个高度的数据.

为保证数据质量,在 2023 年 10 月 10 日 11:52~12:58 期间开展了无人机传感器监测和地面监测结果比对工作,比对结果如图 1 所示.根据比对结果,无人机传感器观测数据与地面监测结果差异较小,温度、相对湿度以及 CO、NO_2、SO_2、$PM_{2.5}$、PM_{10} 的平均相对误差分别为 2.07%、0.13%、8.36%、9.17%、6.15%、6.98%.

1.3 地面观测

西区小学站点位于广东省惠州市惠阳区西区小学教学楼 7 楼楼顶,配备仪器型号及基本信息如表 2 所示. NO−NO_2−NO_x 观测仪器为美国 Thermo Fisher 公司生产的 42i 型 NO−NO_2−NO_x 在线分析仪,该仪器利用 NO 与 O_3 反应时产生荧光的性质,按照产生荧光的发生量得到 NO、NO_2 和 NO_x 浓度. SO_2 观测仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 43i 型脉冲荧光 SO_2 分析仪,其运用紫外光激发 SO_2 分子,使其在返回低能量状态时发射特定波长的光.该分析仪通过测量这种发射光的强度来精确计算 SO_2 的浓度.CO 观测仪器为美国 Thermo Fisher 公司生产的 48i 型 CO 在线分析仪,该仪器利用 CO 对波长为 4.6μm 的红外光的吸收特性,按照红外光吸收量得到 CO 浓度. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 观测仪器为美国 Thermo Fisher 公司生产的 5030i 型颗粒物在线分析仪,该仪

器利用光散射法和β射线吸收法测量 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度,仪器采样口配备不同切割头以实现不同粒径范围的采样.气象参数监测仪器为锦州阳光气象科技有限公司生产的 TRM-ZS2 型高精度自动气象站,该设备通过温度传感器测量空气温度,利用湿度传感器的电容或电阻变化来监测相对湿度,紫外辐射通过特定传感器检测紫外线光强度并转换为电信号,而太阳辐射则通过总辐射表感应太阳光谱中的能量.这些传感器收集的数据经过采集系统处理,进而提供精确的气象信息.

表 2　地面观测各仪器规格参数

Table 2　Specifications of ground observation instruments

观测因素	仪器型号	测量范围	分辨率	准确度
NO_2	ThermoFisher 42i	0~150mg/m^3	1×10^{-9}	±5%
SO_2	ThermoFisher 43i	0~250mg/m^3	0.1×10^{-9}	±5%
CO	ThermoFisher 48i	$0\sim100\times10^{-6}$	0.04×10^{-6}	±1%
$PM_{2.5}$	ThermoFisher 5030i-$PM_{2.5}$ 切割头	0~1,000 μg/m^3	0.1 μg/m^3	±5%
PM_{10}	ThermoFisher 5030i-PM_{10} 切割头	0~1,000 μg/m^3	0.1 μg/m^3	±5%
紫外辐射	TRM-ZS2	0~200 μmol/(m^2 · s)	1 μmol/(m^2 · s)	±5%
太阳辐射		0~1500W/m^2	1W/m^2	±5%
温度		-40~60℃	0.3℃	±0.5℃
相对湿度		0%~100%	1%	±2%

1.4　HYSPLIT 模型

混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(HYSPLIT)是目前在大气污染物潜在来源研究领域应用较多的模型[25-26].该模型利用 GDAS 气象数据,能够有效模拟污染物的传输过程.本研究选择大亚湾西区第一小学作为受点,根据无人机飞行高度模拟了垂直观测时段的 0m、300m 以及 500m 高度上 48h 的后向轨迹,共产生了 21 条后向轨迹线,用于分析近地面污染源和远距离输送对污染物浓度的影响,明确污染物的主要来源[27-28].

1.5　WRF-CAMx 模型

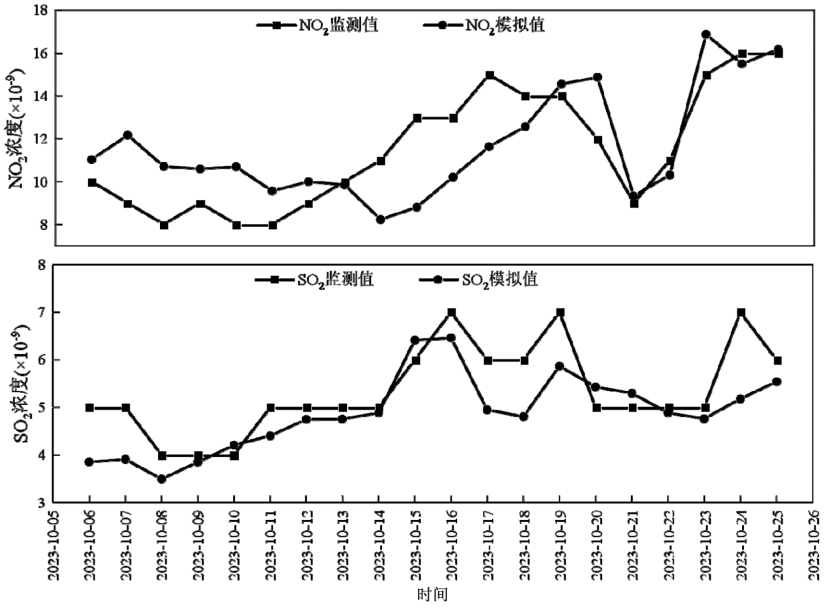


图 2　惠州市大亚湾霞涌子站 NO_2 与 SO_2 浓度模拟值与监测值对比

Fig.2　Comparison of simulated and monitored NO_2 and SO_2 concentrations at the Xiachong substation in Daya Bay, Huizhou

本研究利用 WRF-CAMx 模型开展多高度污染物浓度分布模拟研究.CAMx 模型通过三层嵌套网格系统实现(Lambert 投影,中心经纬度 110°E/35°N),其中第一层覆盖中国全境(57°~161°E, 1°~59°N),水平分辨率 36km×36km,网格数 200×160;第二层聚焦广东、福建、江西及周边区域(107°~121°E, 17°~30°N),分辨率

12km×12km,网格数 104×116;第三层针对大亚湾及广东省核心城市群(110°~118°E, 20°~25°N),分辨率4km×14km,网格数 200×137.垂直方向划分 20 层,模式顶高约 15km.气象驱动采用 NCEP/NCAR 的 FNL 再分析资料(1°×1°),通过 WRF 模型降尺度处理并利用 MCIP 模块转换为 CAMx 兼容格式.污染源排放清单基于清华大学 MEIC2020 清单(0.25°×0.25°),经 SMOKE 模型处理人为源排放参数[29],其中惠州市 SO_2 与 NO_2 等排放量根据本地化清单进行网格化修正.模型系统通过 WRF 提供气象背景场,经 CAMx 计算得到污染物初始/边界场数据,最终通过分析不同高度污染物浓度差值实现珠江三角地区大气污染模拟.利用 2023 年 10 月 6~25 日西区小学站点的监测数据对模拟结果进行验证,验证结果如图 2 所示.模拟结果显示,模拟计算的 SO_2 与 NO_2 浓度值与监测值的变化趋势一致,NO_2 模拟值与监测值的差值范围为 -3.17×10^{-9}~4.20×10^{-9},SO_2 模拟值与监测值的差值范围为 -0.43×10^{-9}~1.82×10^{-9},能够用于 SO_2 与 NO_2 浓度模拟.

2 结果与讨论

2.1 地面观测情况

观测期间,大亚湾区天气总体为高温、高湿、弱辐射.如图 3 所示,温度的平均值为 25.38℃,日均温范围为 21.3~31.0℃,温度在每日 00:00~07:00 期间持续下降,在 07:00 达到每日最低温度,在 07:00~14:00 迅速升高,并在 14:00 达到每日最高温度,在 14:00~次日 00:00 温度持续下降.相对湿度的平均值为 73.13%,日均相对湿度范围为 48.6%~91.3%,相对湿度在每日 00:00~8:00 较为稳定,基本保持不变,而后在 08:00~14:00 迅速下降,在每日 14:00 左右降至当日最低湿度,之后在 14:00~次日 00:00 迅速升高并逐渐稳定.太阳辐射的平均值为 382.96W/m^2,太阳辐射在每日 07:00~13:00 迅速升高,在每日 13:00 左右达到最高值,而后在 13:00~18:00 迅速降低,在 18:00 左右达到最低值.紫外辐射的平均值为 23.05μmol/(m^2·s),变化规律与太阳辐射较为一致.

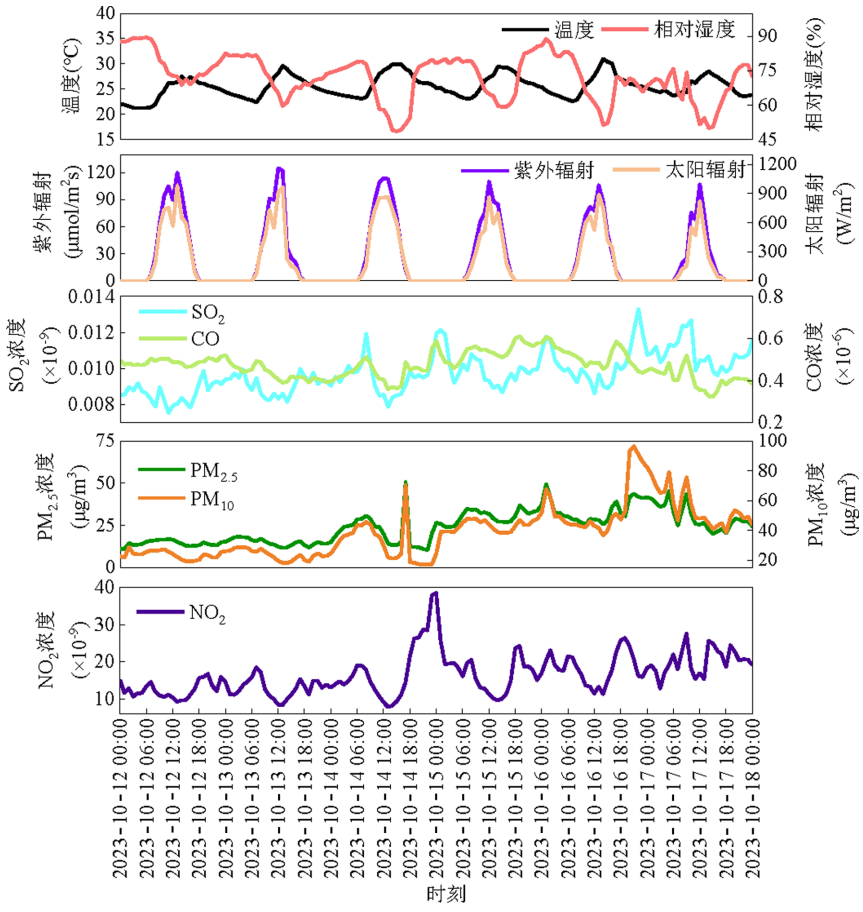


图 3 气象条件与污染物浓度的时序变化

Fig.3 Temporal variations of meteorological conditions and pollutant concentrations

观测期间,大亚湾区空气质量较好,没有发生污染天气. NO_2 的平均浓度为 16.19×10^{-9}, NO_2 浓度在每日 03:00~07:00, 14:00~18:00, 22:00~次日 00:00 出现上升趋势,在每日 00:00~3:00, 07:00~14:00, 18:00~22:00 出现下降趋势. SO_2 的平均浓度为 0.01×10^{-9}, 并具有一定的日变化特征,在每日 00:00~05:00 出现下降的趋势, 05:00~09:00 小幅上升, 09:00~15:00 下降到当日最小值, 15:00~23:00 逐渐上升. CO 的平均浓度为 0.46ppm, CO 浓度在每日 00:00~05:00 下降, 05:00~07:00 上升并达到当日第一个极大值, 07:00~13:00 下降 13:00~次日 00:00 上升并达到当日第二个极大值. $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的平均浓度分别为 24.69 与 39.36μg/m^3, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的浓度变化趋势较为一致, 00:00~07:00 整体保持不变, 07:00~09:00 迅速升高至当日最大值, 09:00~14:00 迅速降低至当日最小值, 14:00~17:00 迅速升高,17:00~18:00 迅速降低, 18:00~23:00 逐渐升高.

值得留意的是,近地面 SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 NO_2 浓度从 14 日下午开始逐渐上升,14 日夜间~15 日凌晨陆续达到峰值,发生这种变化可能与近地面存在逆温或垂直扩散不利的气象条件、近地面氮氧化物排放强度增加、光化学反应逐渐结束等因素有关.

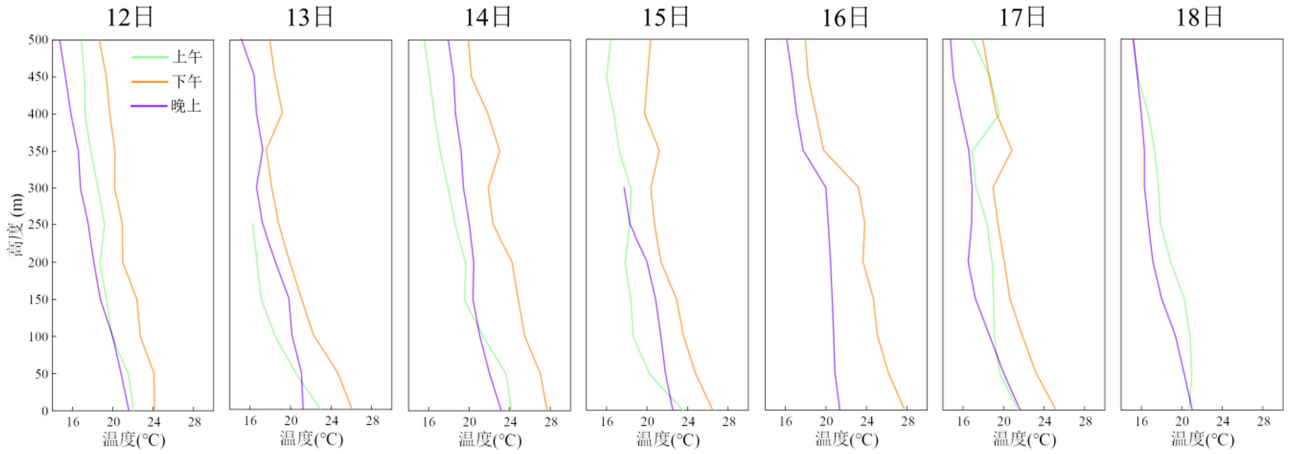
2.2　无人机观测情况

由图 4a 可见,观测期间地面气温为 16.85~23.32℃,且总体呈现随高度上升而降低的变化趋势, 500m 高空温度为 14.70~20.27℃;同时,各高度层下午气温均高于早上和晚上.需要特别留意的是,在 13 日下午的 350~400m、14 日下午的 300~350m、15 日下午的 300~350m、17 日上午的 350~400m 和下午的 300~350m 分别出现了逆温现象,上层高度温度比下层高度温度分别高 1.14℃、0.58℃、2.68℃和 1.87℃.此外,在 12 日下午的 0 和 50m 的温度变化很小,二者差值仅为 0.04℃,这可能导致地面各项污染物浓度难以发生垂直扩散,从而呈现逐渐上升的主要原因.由图 4b 可见,观测期间地面相对湿度为 47.00%~59.22%,且总体呈现随着高度的升高而波动上升的变化趋势,500m 高空相对湿度为 45.43%~79.86%;多数高度层下午相对湿度低于早上和晚上.需要特别留意的是,在部分时段的部分高度层,如 13 日下午的 350~400m、14 日晚上的 300~400m、15 日上午的 400~450m 和下午的 400~500m、17 日上午 350~400m 等,相对湿度出现随高度上升而降低的趋势,这可能与观测地点局地天气条件有关.

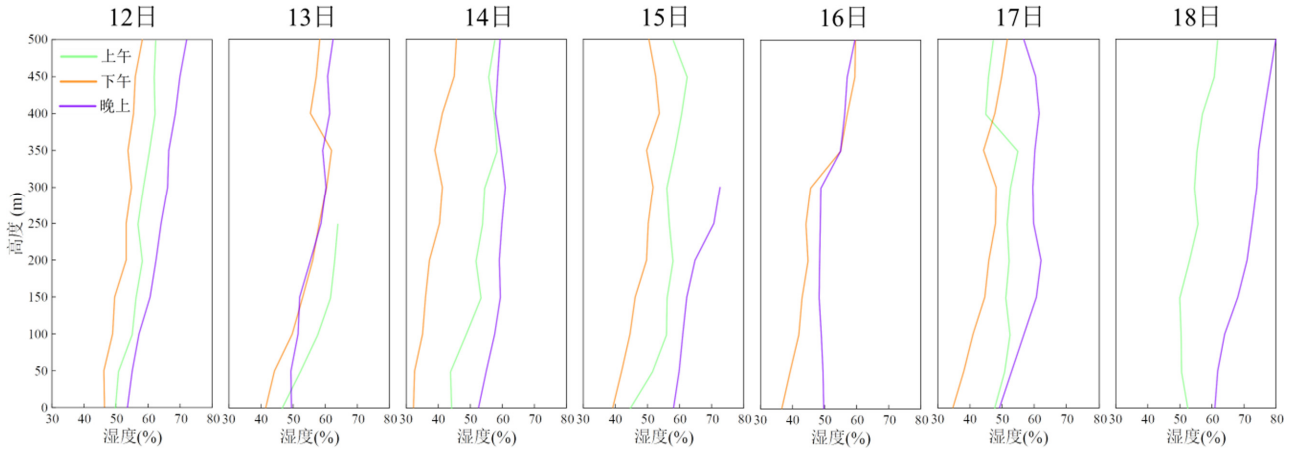
由图 4c 可见,观测期间地面 CO 浓度为 0.5~0.8×10^{-6},且在 0~100m 高度内 CO 浓度随高度上升而大幅度降低, 100m 高度 CO 浓度为 0.37~0.62×10^{-6}, 而在 100m 以上高度 CO 浓度则总体保持波动稳定的趋势, 500m 高度 CO 浓度为 0.26~0.54×10^{-6};各日上午、下午、晚上变化趋势较为一致,且上午、下午、晚上 CO 浓度差异较小.需要特别留意的是,在 14 日晚上的 300~450m、15 日上午的 350~500m 和下午的 350~450m、16 日下午的 350~500m, CO 浓度随高度上升而上升,升幅分别为 0.10×10^{-6}、0.10×10^{-6}、0.07×10^{-6}、0.12×10^{-6}, 这可能与污染物的高空水平传输有关.由图 4d 可见,观测期间地面 NO_2 浓度为 8.13~20.94×10^{-9},且总体呈现随着高度上升而升高的变化趋势,500m 高度 NO_2 浓度为 17.04~23.49×10^{-9};各日上午、下午、晚上变化趋势较为一致,且上午、下午、晚上 NO_2 浓度差异不大. NO_2 浓度随高度上升而上升的变化趋势,与北京[30]、山西[15]、新疆[19]等北方地区观测结果存在差异,但与深圳[31]观测结果较为相似,这可能是与沿海地区独特的气象条件以及沿海排放特征有关.需要特别留意的是, NO_2 浓度在 12 日晚上、13 日晚上、14 日上午、15 日上午、16 日晚上、17 日晚上、18 日晚上的 350m 高度出现极大值,比相邻高度高 1.53~9.12×10^{-9},这可能与大亚湾区石化园区高架点源排放以及 350m 的污染物传输带有关.此外, 14 日晚上 300m 以上高度, 17 日晚上 350m 以上高度, 18 日上午 0~150m 高度, NO_2 浓度呈现随高度上升而降低的趋势,可能与高空局部天气以及近地面机动车排放等因素有关.由图 4e 可见,观测期间地面 SO_2 浓度为 5.40~37.52×10^{-9},且总体呈现随着高度上升而降低的变化趋势, 500m 高度 SO_2 浓度为 0.01~ 13.12×10^{-9};各日上午、下午、晚上变化趋势较为一致,且上午、下午、晚上 SO_2 浓度差异不大.需要特别留意的是, SO_2 浓度在 12 日下午和晚上的 350m、13 日晚上、14 日上午和下午、17 日下午的 350m 以及 15 日的 400m 出现极大值,比相邻高度高 4.20~14.06×10^{-9},这可能与大亚湾区石化园区高架点源排放以及 350~400m 的污染

物传输带有关.

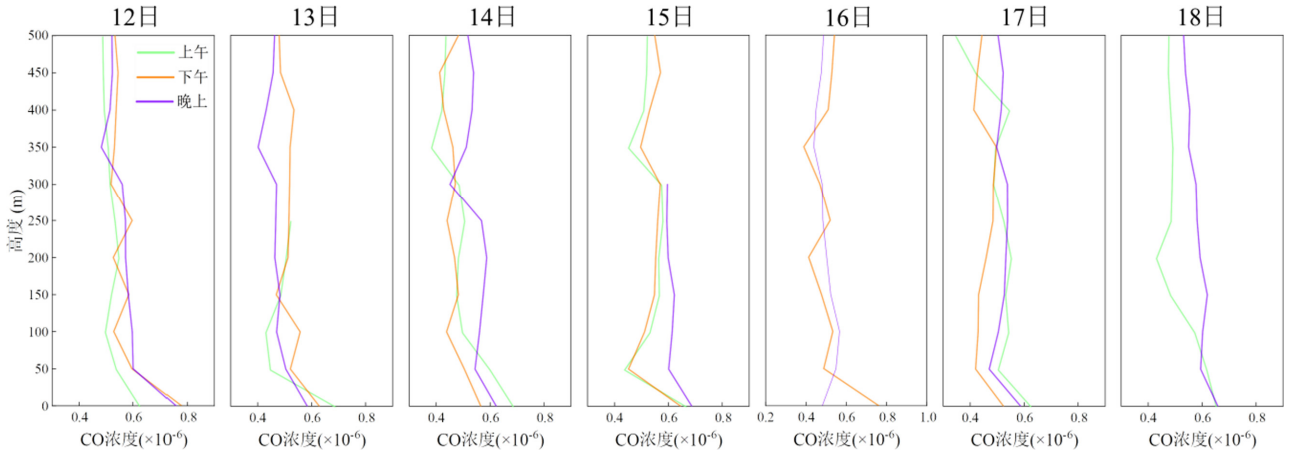
由图 4f 和图 4g 可见, 观测期间地面 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别为 10.58~37.31 和 15.06~52.12 μg/m^3, 且二者总体呈现随着高度上升而基本稳定不变的趋势.$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在 14 日上午的 400m、14 日晚上的 350m、16 日下午的 350m、17 日下午的 350m、18 日上午 500m 和晚上 350m 均出现极大值, 比相邻高度分别高 3.66~12.78 和 5.15~16.91μg/m^3, 这可能与大亚湾区石化园区高架点源排放和污染气团高空传输等因素有关.



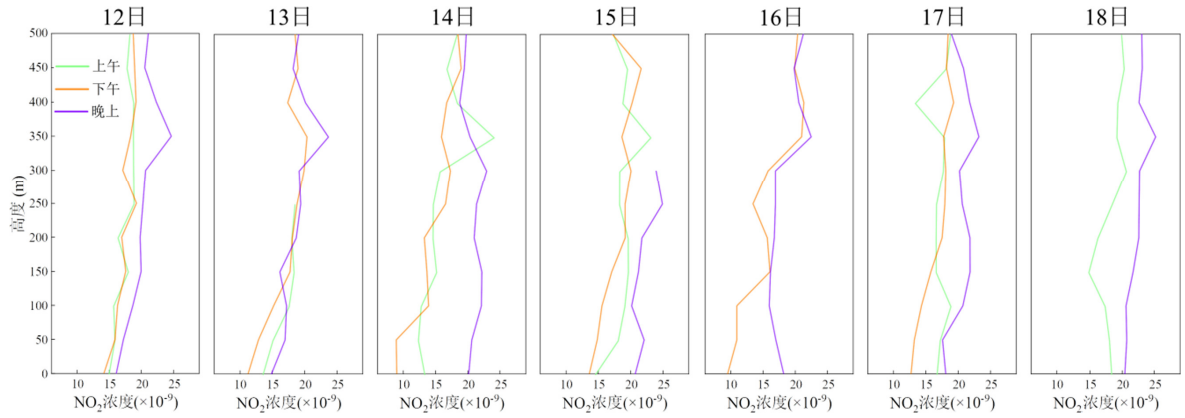
(a) 温度



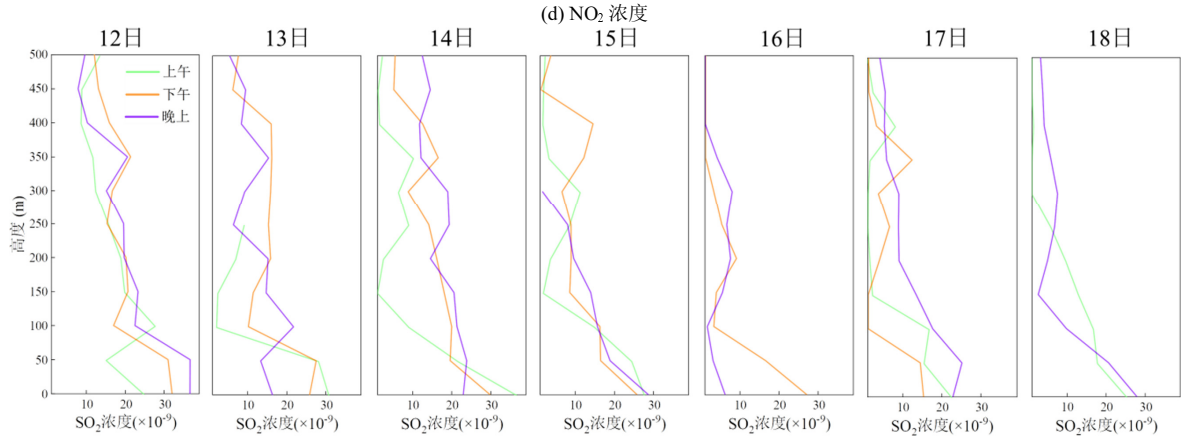
(b) 湿度



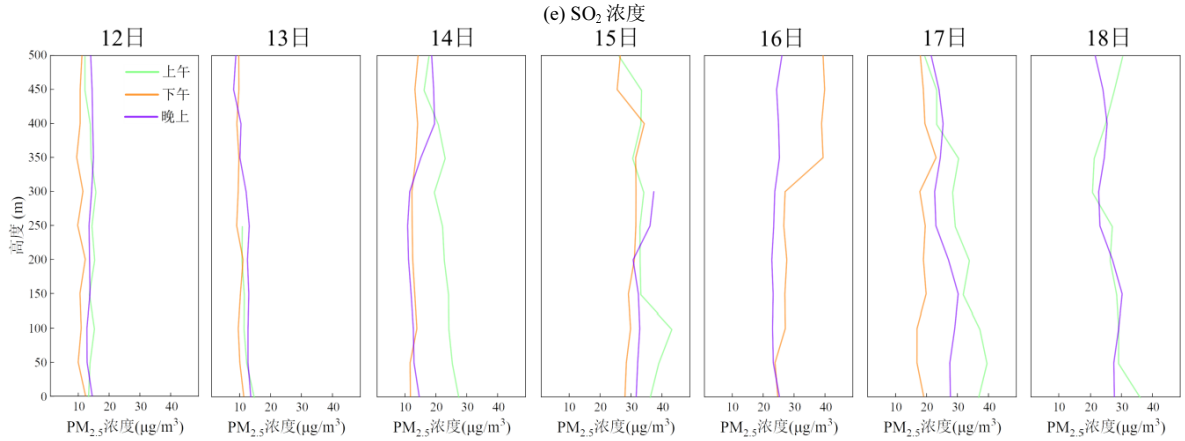
(c) CO 浓度



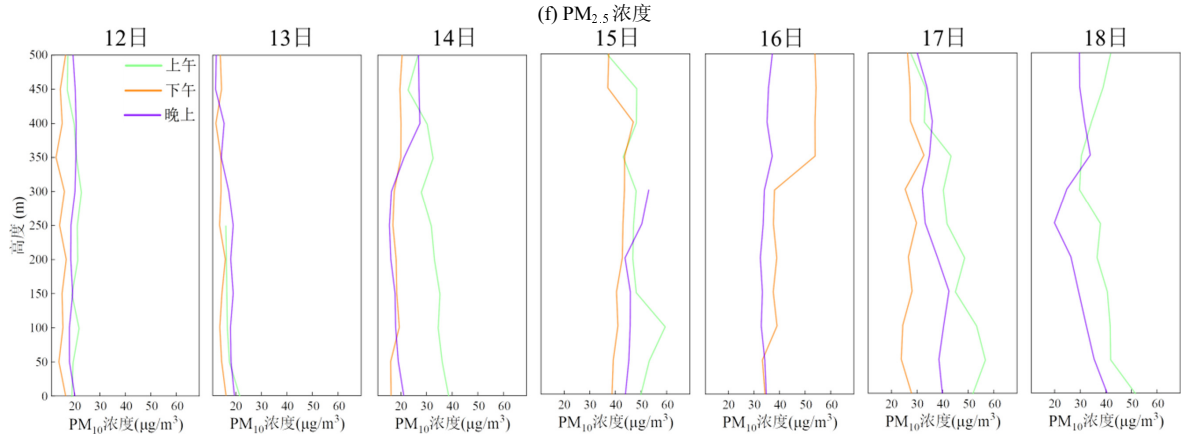
(d) NO_2 浓度



(e) SO_2 浓度



(f) $PM_{2.5}$ 浓度



(g) PM_{10} 浓度

图 4　各影响因素随高度变化的 500m 垂直廓线

Fig.4　Vertical profile of influence factors with height at 500m

2.3 污染物高空传输分析

从 12~18 日 0m(蓝色)、300m(红色)、500m(绿色)的后向轨迹模拟结果(见图 5)可以发现, 12~14 日各时段各高度的气团从北边向南传输到近海地区后,转向西边传输到大亚湾区;15 日开始,气团传输路径向东偏移,各高度气团逐渐靠近海岸线;16~18 日各时段各高度的气团均沿海岸线,从东北方向传输至大亚湾区.由此可以看出, 12~14 日期间近地面主要受大亚湾石化园区排放影响,300m 和 500m 则主要受北部城市和东部沿海城市的排放影响; 15~18 日期间近地面主要受大亚湾石化园区以及相邻县区和城市影响, 300m 和 500m 则主要受东部沿海城市排放以及近海传输的影响.

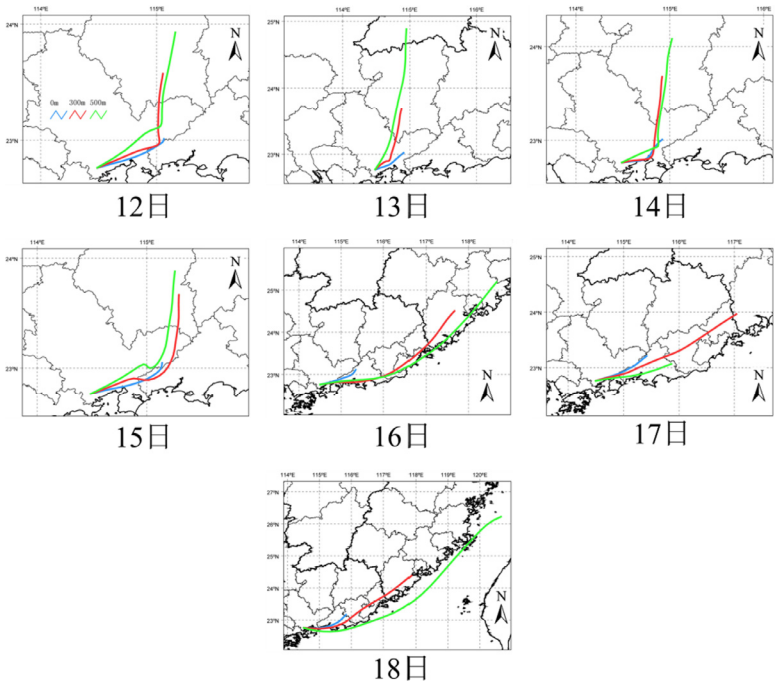


图 5 观测点位处 48h 后向轨迹

Fig.5 48-hour backward trajectory at the observation site

审图号为 GS(2022)1873 号

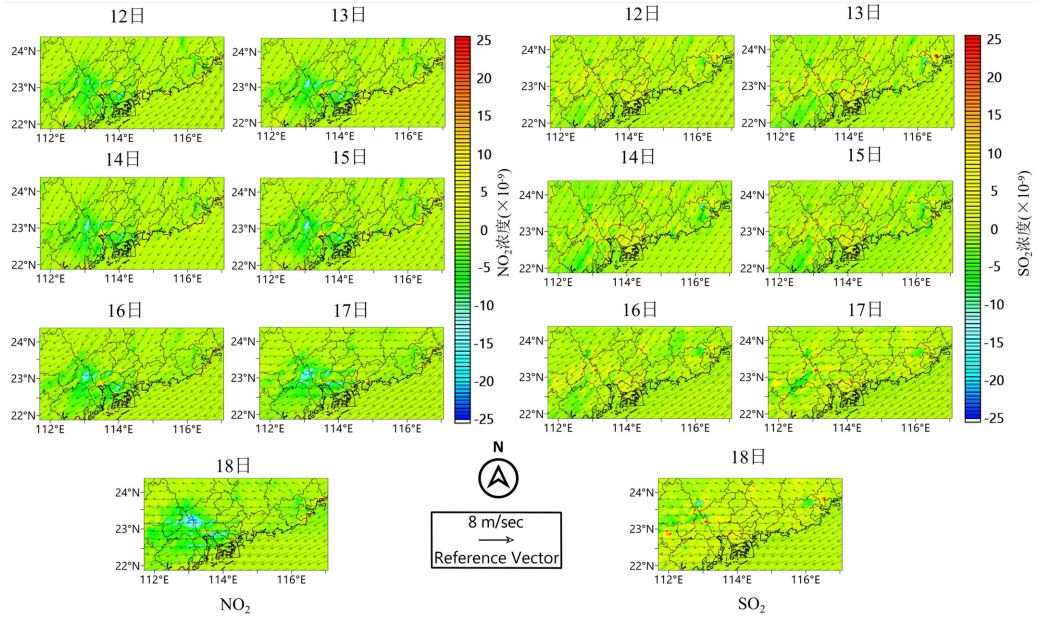


图 6 观测地点模拟浓度差值空间分布

Fig.6 Spatial distribution of simulated concentration differences at the observation site

审图号为 GS(2022)1873 号

根据观测期间大亚湾区及周边地区在 350m 与 250m 的污染物浓度差值图可以发现(如图 6 所示),观测地点 NO_2 浓度差值为+2~+7×10^{-9}, SO_2 浓度差值为+5~+10×10^{-9},即 350m 高度的 NO_2 和 SO_2 浓度比 250m 分别高 2~7×10^{-9} 和 5~10×10^{-9},同时上风向区域 NO_2 和 SO_2 浓度差均呈现正值,表明上风向区域 350m 高度污染物浓度比 250m 高度的高,即 350m 高度存在较为显著的排放源和污染传输带.

3　结论

3.1　在 2023 年 10 月 12~18 日的大亚湾区观测期间,气象条件整体表现为高温、高湿、辐射较弱,未出现污染天气,地面 SO_2、CO、NO_2、$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化呈现一定日变化规律.

3.2　无人机观测发现,气温随着高度增加而逐渐下降,且部分时段在 300~450m 高度出现逆温以及 0~50m 出现温度不变的现象,可能是地面污染物浓度上升的原因之一;多个时段 NO_2、SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度在 350m 附近高度出现极大值,可能与大亚湾区石化园区高架点源排放、高空污染物传输带等因素有关.本次观测周期较短,偶发天气可能会对观测结果造成一定不确定性.

3.3　后向轨迹以及数值模型模拟结果显示,观测期间观测点位在 350m 高度的上风向存在 NO_2 和 SO_2 污染高值区,且对观测点位 350m 高度的 NO_2 和 SO_2 浓度产生影响,在一定气象条件下有可能对近地面空气质量造成影响.

参考文献：

[1] Jin X, Cheng S, Zheng X, et al. Characteristics of cloud and aerosol derived from lidar observations during Winter in Lhasa, Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2024,16(12):2074.

[2] Sun K, Dai G, Wu S, et al. Effect of wind speed on marine aerosol optical properties over remote oceans with use of spaceborne lidar observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(7): 4389−4409.

[3] Hauser D, Abdalla S, Ardhuin F, et al. Satellite remote sensing of surface winds, waves, and currents where are we now [J]. Surveys in Geophysics, 2023,44(5):1357−1446.

[4] Zhao S, Liu M, Tao M, et al. The role of satellite remote sensing in mitigating and adapting to global climate change [J]. Science of the Total Environment, 2023,904:166820.

[5] Johnson M R, Conrad B M, Tyner D R. Creating measurement−based oil and gas sector methane inventories using source−resolved aerial surveys [J]. Communications Earth & Environment, 2023,4(1):139.

[6] Yang X, Ji D, Li J, et al. Impacts of springtime biomass burning in Southeast Asia on atmospheric carbonaceous components over the Beibu Gulf in China: Insights from aircraft observations [J]. The Science of the total environment, 2023,857:159232.

[7] Fonseca J, Carreiro F, Silva V, et al. μVOC−A lightweight environmental data and air samples acquisition system to install in captive balloons [J]. International Symposium on Industrial Electronics, 2003,1:584−588.

[8] Yokoyama O. Measurements of wind fluctuations by a vane mounted on the captive balloon cable [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 1968,47(3):159−166.

[9] Yin C, Xu J, Gao W, et al. Characteristics of fine particle matter at the top of Shanghai Tower [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023,23(2):1329−1343.

[10] Andreae M O, Acevedo O C, Araùjo A, et al. The amazon tall tower observatory (ATTO) overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(18):10723−10776.

[11] Chen L, Pang X, Li J, et al. Vertical profiles of O_3, NO_2 and PM in a major fine chemical industry park in the Yangtze River Delta of China detected by a sensor package on an unmanned aerial vehicle [J]. Science of The Total Environment, 2022,845:157113.

[12] Song R, Wang D, Li X, et al. Characterizing vertical distribution patterns of $PM_{2.5}$ in low troposphere of Shanghai city, China: Implications from the perspective of unmanned aerial vehicle observations [J]. Atmospheric Environment, 2021,265:118724.

[13] Villa T F, Jayaratne E R, Gonzalez L F, et al. Determination of the vertical profile of particle number concentration adjacent to a motorway using an unmanned aerial vehicle [J]. Environmental Pollution, 2017,230:134−142.

[14] Nca J J, Pawnuk M, Bezyk Y, et al. Drone−assisted monitoring of atmospheric pollution—A comprehensive review [J]. Sustainability, 2022,14(18):11516.

[15] 郭　伟,朱凌云,李雁宇,等.基于无人机观测的不同污染天气 O_3 垂直分布特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):6578−6589.
Guo W, Zhu L Y, Li Y Y, et al. Vertical distribution characteristics of O_3 under diverse polluted weather based on unmanned aerial vehicle observations [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):6578−6589.

[16] Li C, Liu M, Hu Y, et al. Investigating the vertical distribution patterns of urban air pollution based on unmanned aerial vehicle gradient monitoring [J]. Sustainable Cities and Society, 2022,86:104144.

[17] Olivares I, Langner J, Soto C, et al. Vertical distribution of $PM_{2.5}$ in Santiago de Chile studied with an unmanned aerial vehicle and dispersion modelling [J]. Atmospheric Environment, 2023,310: 119947.

[18] Zhao Q, He Q, Zhang X, et al. Unmanned aerial vehicle observations of the vertical distribution of particulate matter and sulfur dioxide at a regional background site in northwest China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023,14(12):101919.

[19] Wang Z, Cao R, Li B, et al. Characterizing nighttime vertical profiles of atmospheric particulate matter and ozone in a megacity of South China using unmanned aerial vehicle measurements [J].

Environmental Research, 2023,236:116854.

[20] 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: 149689.

[21] 刘若岚,刘端阳,袁淑杰,等.基于旋翼无人机观测的雾天和霾天 VOCs 垂直分布特征研究 [J]. 大气科学学报, 2023,46(5):655-666.
Liu R L, Liu D L, Yuan S J, et al. Vertical characteristics of VOCs during fog and haze events in the lower troposphere over eastern China: insights from multi-rotor UAV observations [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023,46(5):655-666.

[22] 赵竹君,何 清,陆忠奇,等.基于无人机观测的塔克拉玛干沙漠反应性气体特征及来源分析 [J]. 环境科学研究, 2023,36(9):1665-1675.
Zhao Z J, He Q, Lu Z Q, et al. Characterization of reactive gas and source analysis in Taklimakan Desert based on unmanned aerial vehicle observation [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(9):1665-1675.

[23] Peng Z, Wang D, Wang Z, 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.

[24] 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.
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.

[25] 陆忠奇,赵竹君,何 清.库尔勒市大气颗粒物浓度特征及来源 [J]. 中国沙漠, 2022,42(6):74-84.
Lu Z Q, Zhao Z J, He Q.Concentrations characteristics and sources of particulate matter in Korla, Xinjiang,China [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(6):74-84.

[26] Wang Q, Tong Z, Wang R, et al. Backward trajectory and multifractal analysis of air pollution in Zhengzhou region of China [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022,2022(1):2226565.

[27] Lee S, Ashbaugh L. The impact of trajectory starting heights on the MURA trajectory source apportionment (TSA) method [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(33):7022-7036.

[28] Karaca F, Anil I, Alagha O. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM10profile of a megacity [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(36):5713-5722.

[29] Thongsame W, Henze D K, Kumar R, et al. Evaluation of WRF-Chem $PM_{2.5}$ simulations in Thailand with different anthropogenic and biomass-burning emissions [J]. Atmospheric Environment: X, 2024,23: 100282.

[30] 孟昭阳,丁国安,于海青,等.北京北部城区 SO_2 和 NO_2 浓度垂直分布特点初探 [J]. 应用气象学报, 2002,13(U01):109-112.
Meng Z Y, Ding G A, Yu H Q, et al. The preliminary research on the concentration vertical distribution of SO_2 and NO_2 in the northern part of Beijing [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2002,13 (U01):109-112.

[31] 王碧璇,程 勇,于广河,等.基于无人机的深圳近地层大气 VOCs 垂直分布监测 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3021-3029.
Wang B X, Cheng Y, Yu G H, et al. Vertical distribution monitoring of near-surface atmospheric VOCs in Shenzhen based on UAV-borne [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3021-3029.

作者简介：刘正阳(1999-),男,河南郑州人,中国环境科学研究院环境工程硕士研究生,主要从事大气污染控制研究.发表论文 2 篇. 17630065991@163.com.