

2025年长三角空气质量管理技术研讨会，上海，8月28-29日



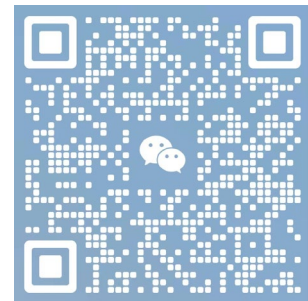
浙江工业大学
ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

无人机大气环境检测系统的研制与应用研究

庞小兵

浙江工业大学环境学院

邮箱：pangxb@zjut.edu.cn
电话与微信：15715806408





目 录

1

引言

2

无人机大气环境检测仪的研制

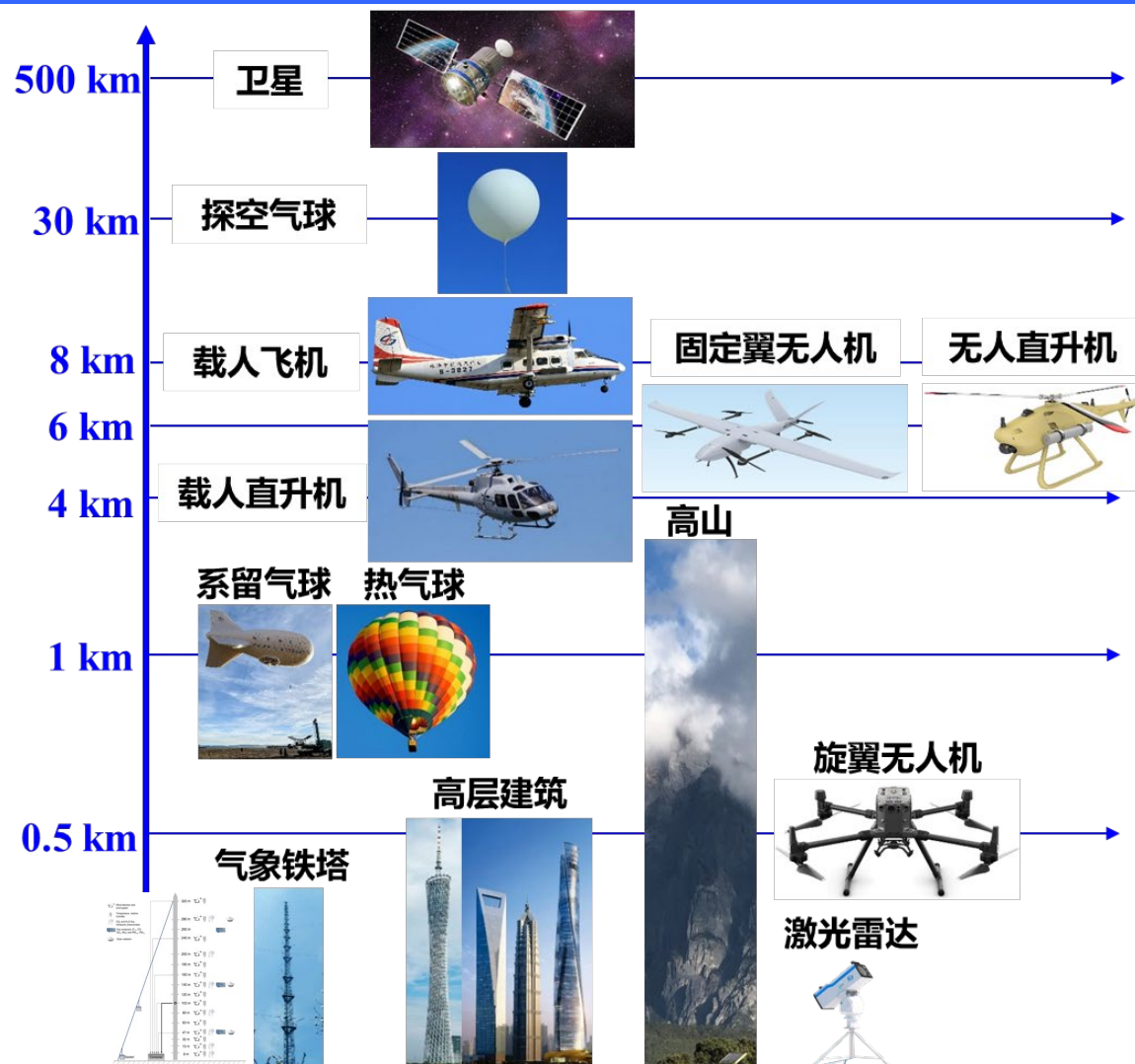
3

无人机大气环境检测仪的应用

4

结论与展望

1.引言



无人
直升机

固定翼
无人机

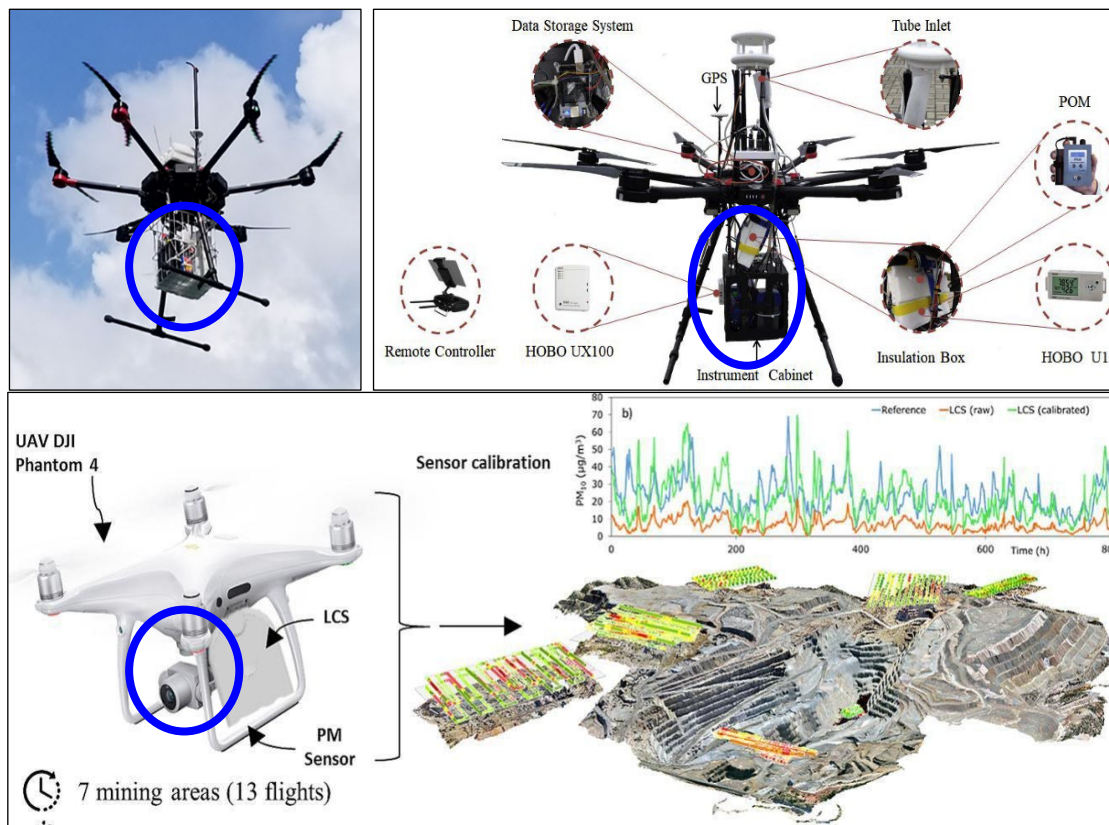
弥补 0-1000米之间观测空白

旋翼
无人机

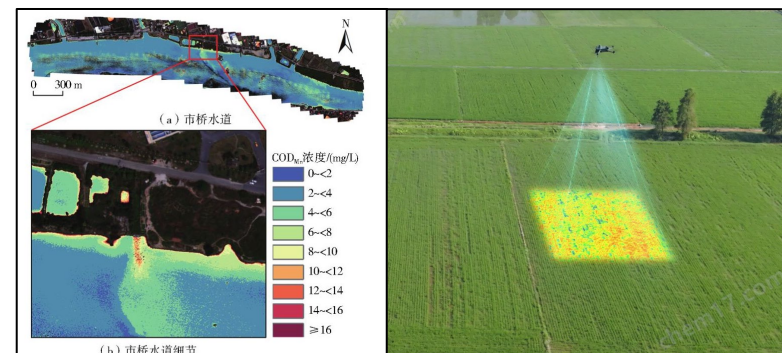
Sun et al., *Adv. Atmos. Sci.*, 2025
Zhou et al. *J. Environ. Sci.*, 2023

无人机观测可以弥补 0-1000米之间观测空白

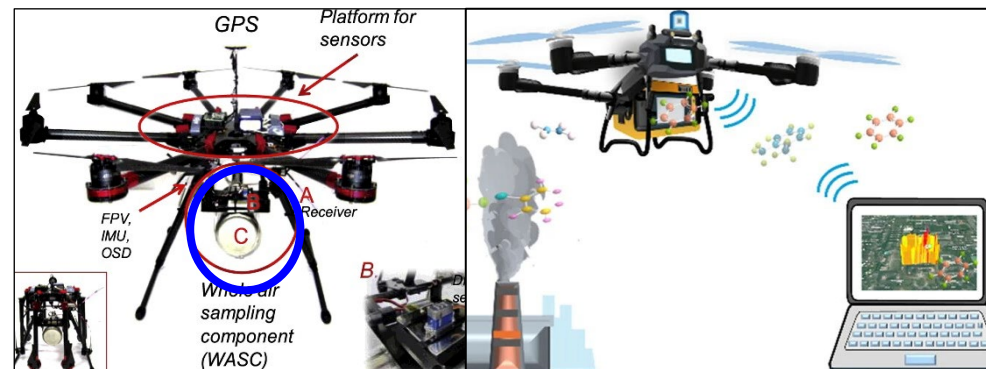
1.引言



无人机大气成分检测仪器



无人机水质遥感探测仪



无人机质谱检测与采样仪

Zhang, J., Hu, B, Environ. Sci. Tech. 2025

无人机实现大气环境与气象立体检测、遥感探测、高空采样



目 录

1

引言

2

无人机大气环境检测仪的研制

3

无人机大气环境检测仪的应用

4

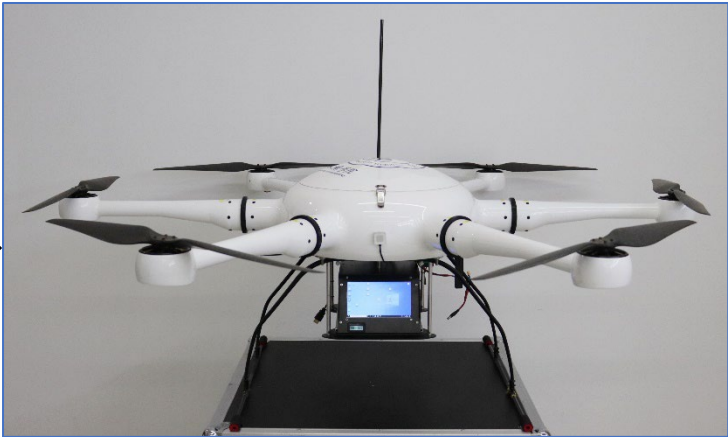
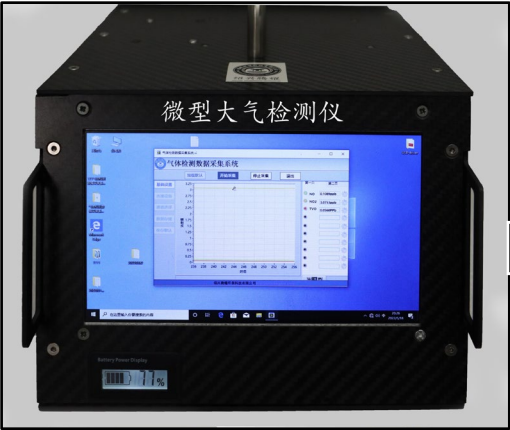
结论与展望

2.无人机大气环境检测仪的研制

2.1无人机大气环境检测仪

质量 (Kg)	< 2
体积 (长×宽×高)	22×15×10cm
能耗 (W)	< 20
自动化程度高	程序自动控制

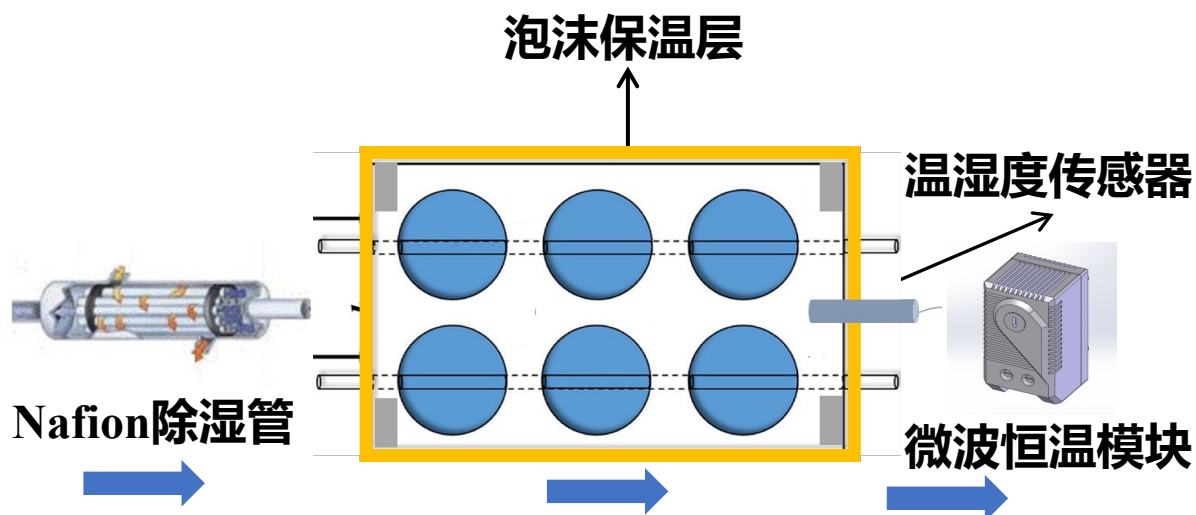
NO₂、NO、N₂O、SO₂、CO、O₃、H₂S、NH₃、CO₂、CH₄、TVOC
PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀、GPS、温、湿度、大气压强、太阳辐射强度、
风速、风向等25种大气成分和气象参数。



无人机大气环境检测仪可测参数多、能耗低、自动化、轻巧2KG

2. 无人机大气环境检测仪的研制

- 关键技术：先进的**恒温除湿技术**和**共存干扰物信号去除技术**

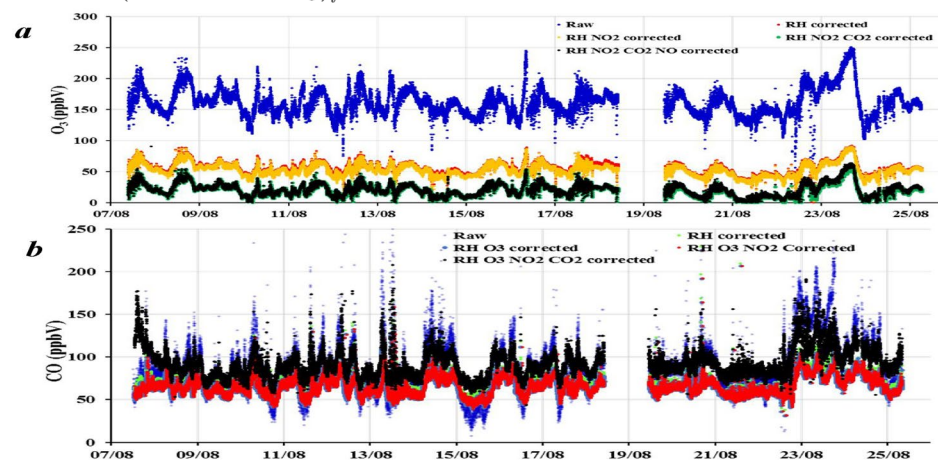


恒温恒湿检测气室

$$(\text{Gas Concentration}) = \frac{\text{sensor signal}}{\text{Sensitivity}} = \frac{(WE - AE)}{\text{Sensitivity}} \quad (1)$$

$$(\text{Gas Concentration})_{\text{corrected}} = \frac{(\text{Signal})_{\text{corrected}}}{\text{Sensitivity}} \quad (2)$$
$$= \frac{(\text{Sensor Signal} - \text{Interfering signal})}{\text{Sensitivity}}$$

$$\text{Interfering signal} = \sum_{i=0}^n \text{MixingRatio}_{\text{copollutanti}} \quad (3)$$
$$* (\text{CrossSensitivity})_i$$



干扰信号去除技术

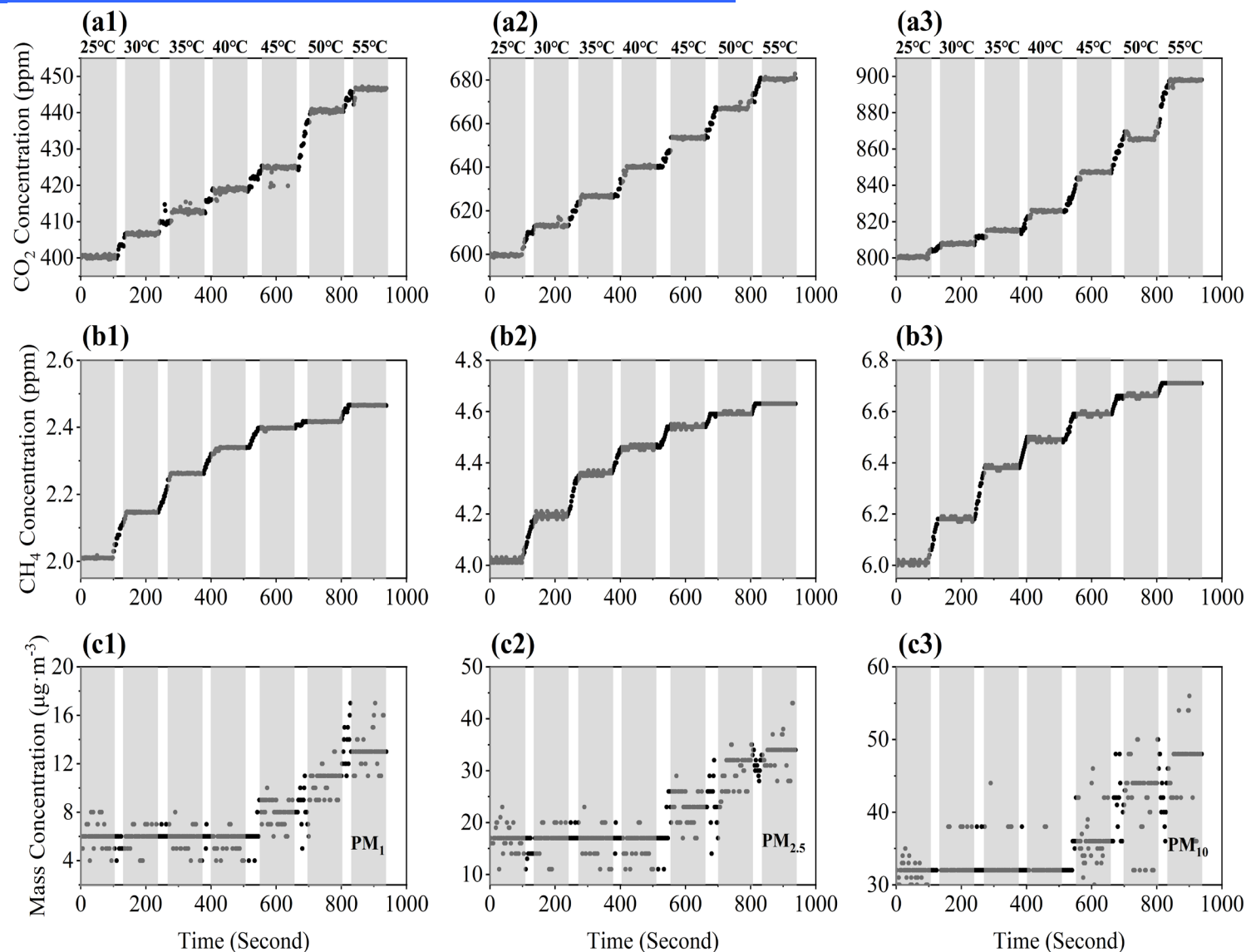
实现检测室内**恒温恒湿**，去除**环境温湿度**和**共存污染物的干扰**

2. 无人机大气环境检测仪的研制



温度影响

25-55 °C



CO₂和CH₄随温度升高而增加，温度影响吸收截面；PM浓度随温度偏差增加，布朗运动影响散射光强度。

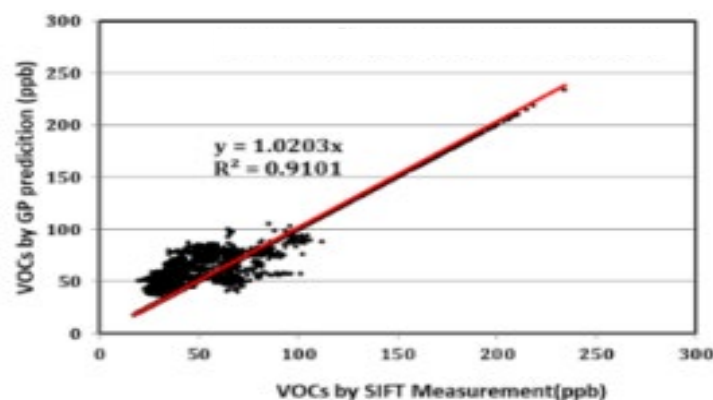
2. 无人机大气环境检测仪的研制

关键技术：机器学习、集群优化、高斯优化

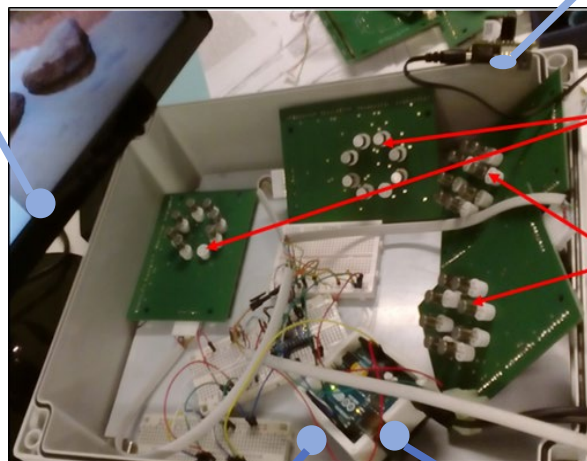
利用多元**高斯分布**形式对信号进行归一化处理

$$\mathcal{N}(y | \mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D}{2}}} \frac{1}{|\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(y - \mu)^T \Sigma^{-1}(y - \mu)\right\}$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}(y - \mu)^T \Sigma^{-1}(y - \mu) = & \\ -\frac{1}{2}(y_a - \mu_a)^T \Lambda_{aa}(y_a - \mu_a) - \frac{1}{2}(y_a - \mu_a)^T \Lambda_{ab}(y_b - \mu_b) & \\ -\frac{1}{2}(y_b - \mu_b)^T \Lambda_{ba}(y_a - \mu_a) - \frac{1}{2}(y_b - \mu_b)^T \Lambda_{bb}(y_b - \mu_b) & \end{aligned}$$



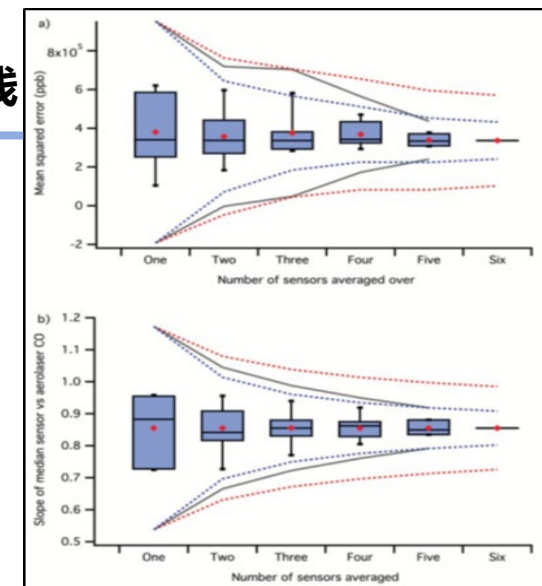
测量结果与GC-MS对比相关性在**0.9**以上



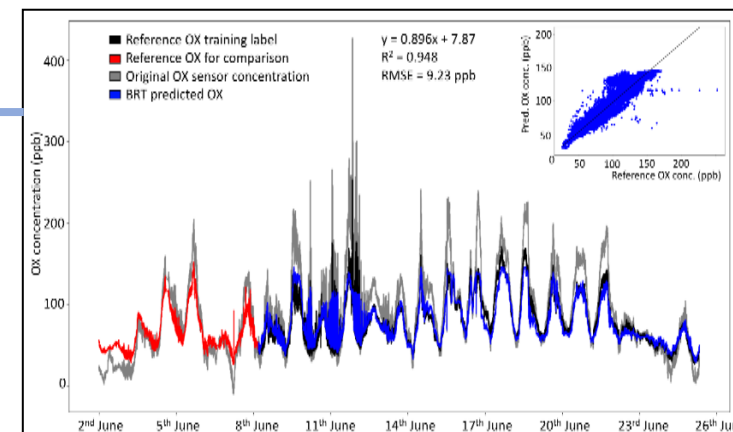
优化传感器信号响应曲线

电化学传感器
PID传感器

MOS传感器



与进口仪器对比拥有非常好的一致性

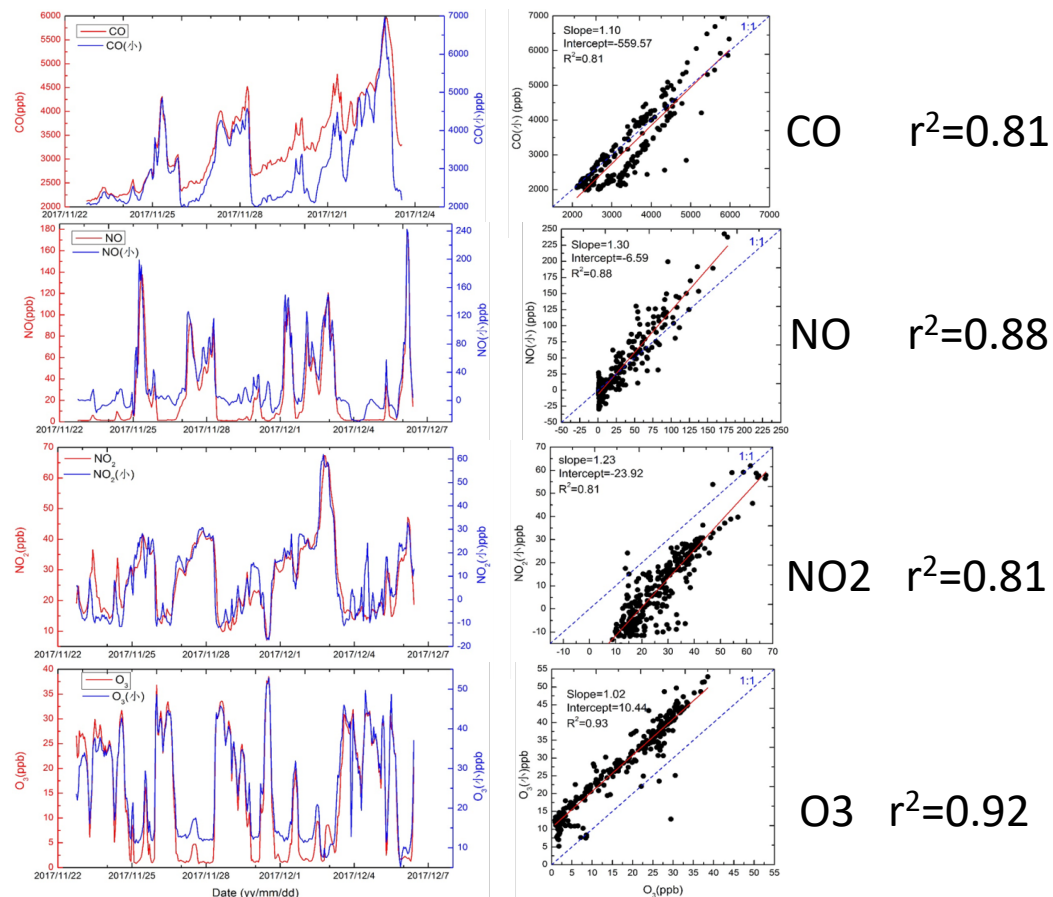


智能算法优化核心技术，提升仪器灵敏度和准确性

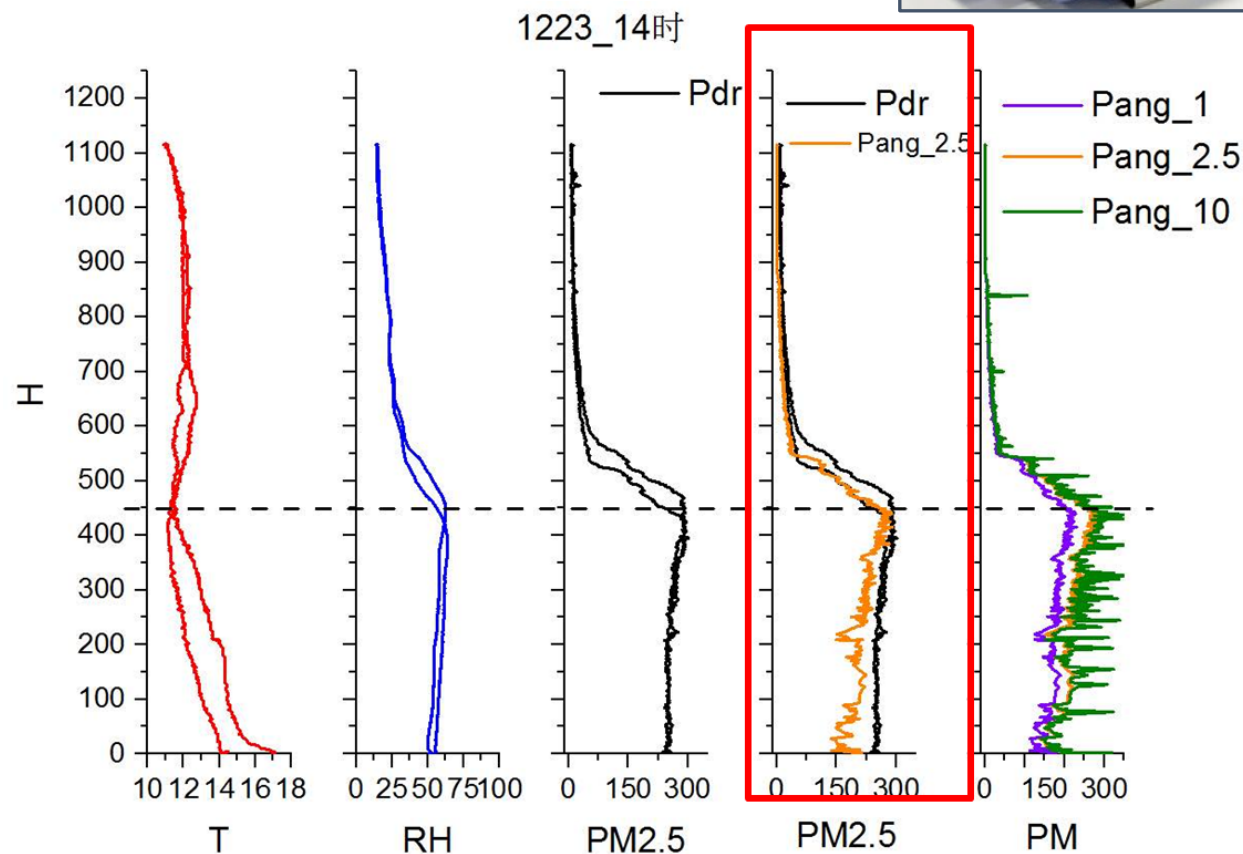
2. 无人机大气环境检测仪的研制



2.1 无人机大气检测仪与常规仪器检测比对



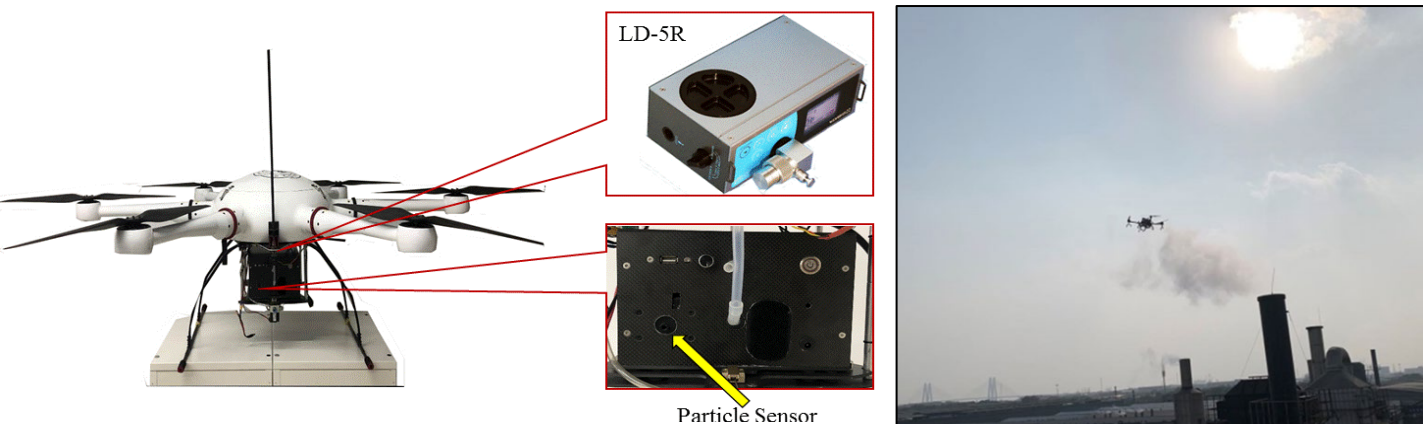
蓝线：微型仪器； 红线：常规仪器(Thermo Fisher)



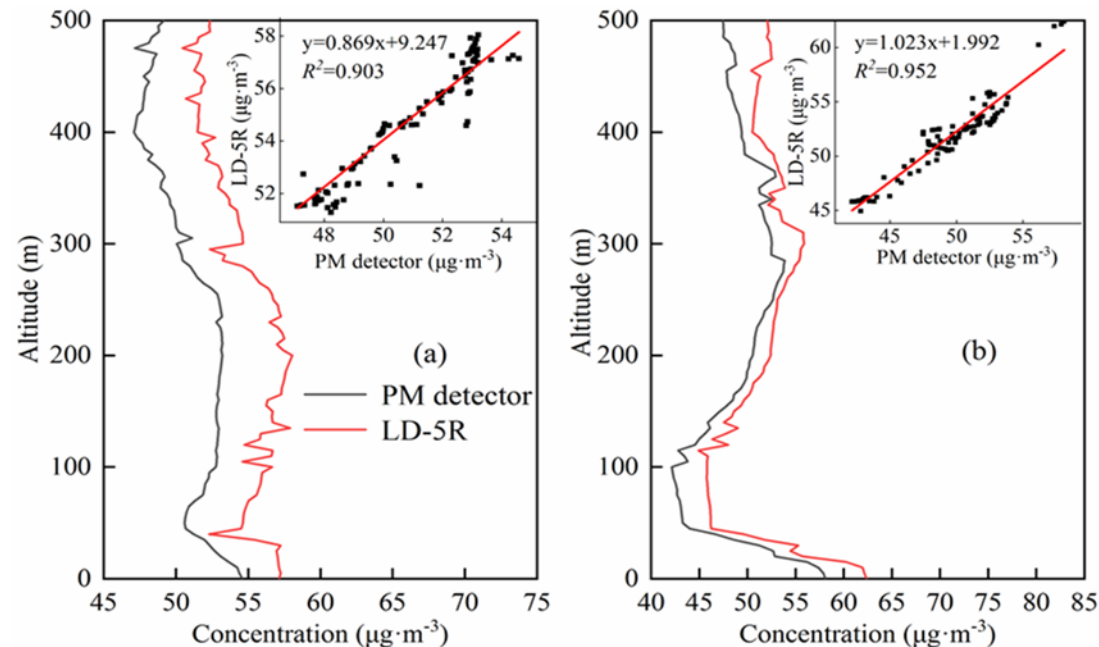
PM_{2.5} 与热电便携式PM_{2.5}检测仪结果一致 ($R^2=0.81$)

2. 无人机大气环境检测仪的研制

2.1 无人机微型大气颗粒物检测仪的垂直检测及比对



微型大气PM检测仪与商业便携式颗粒物检测仪垂直廓线检测实验装置图

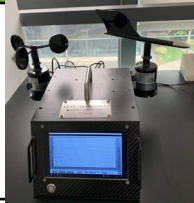


研制的便携式PM检测仪与LD-5R对500米以下PM2.5的检测比对和相关性分析

《Sensors》，2022, 22: 4330

- 微型大气多组分检测仪与商业便携式颗粒物检测仪（日本SIBATA LD-5R）垂直比对结果：两者变化趋势一致，**相关性 ($R^2 > 0.9$)**

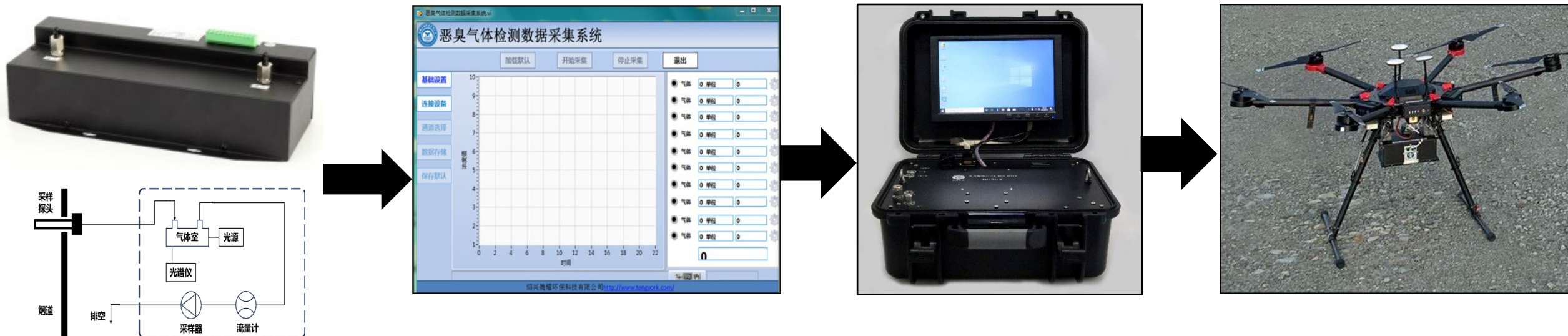
2.无人机大气环境检测仪的研制

	仪器图片	体积/质量	检测指标	日常维护	功率	是否与移动电源	是否随身携带	是否与无人机联用
浙江工业大学		15×20×10cm 质量<3kg	25种大气成分和气象参数	用户	20W	是	是	是
北京雪迪龙AQMS-1100		40×20×50cm 质量=10kg	10种大气污染物和5项气象参数	专业人员	25W	否	否	否
河北先河环保XHAQSN-822		质量=10kg	9种大气污染物和5项气象参数	专业人员	40W	否	否	否
上海麦越环境M2062		质量=28kg	7种大气污染物和5项气象参数	专业人员	30W	否	否	否

与同类产品比，我无人机检测仪可测参数更多、能耗更低、更轻巧

2.无人机大气环境检测仪的研制

2.2 无人机恶臭检测仪：多类型传感器集群优化，矩形阵列排布，先进恶臭值算法



185nm-360nm光谱吸收模块

自研仪器软件和先进恶臭值算法

无人机恶臭成分检测仪

无人机恶臭成分检测仪

无人机恶臭检测仪 2KG，实现高空检测三甲胺、硫化氢、甲硫醇 9 种成分

2.无人机大气环境检测仪的研制

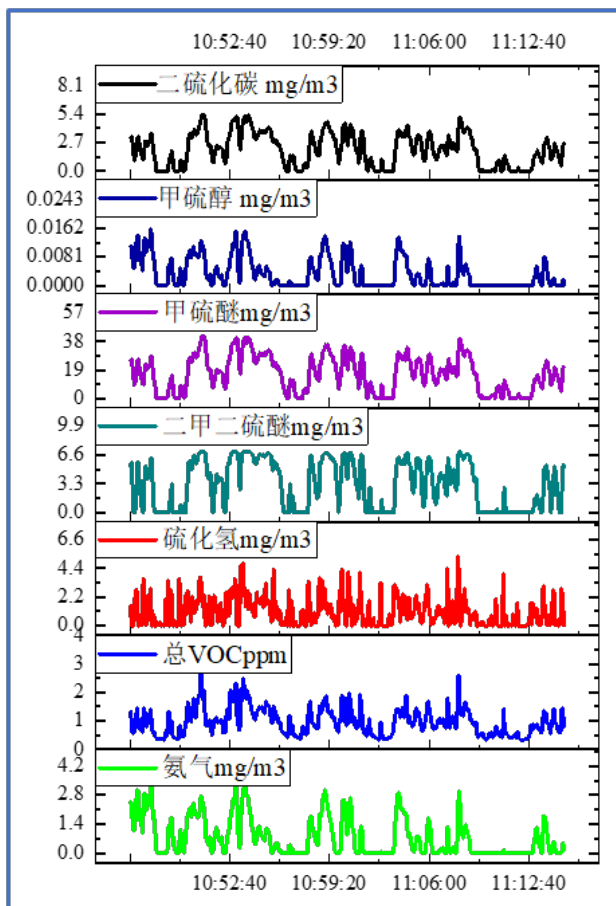
2.2 建立自主的恶臭来源成分谱，通过成分检测实现恶臭溯源

品牌	浙江工业大学	科尔康(英国)	润泽环保 (天津)
产品	 TYK-OU	 AMG-PRO	 OLFOSENSE
检测参数	氨气、三甲胺、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、TVOC (9种)	氨气、三甲胺、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、二硫化碳、苯乙烯 (8种)	氨气、三甲胺、硫化氢、甲硫醇、二硫化碳、苯乙烯 (6种)
灵敏度	1ppb	5-20ppb	10ppb
尺寸 (mm)	250 (L)x 200 (W)x 220(H)	380 (L)x 290 (W)x 420(H)	500 (L)x 200 (W)x 600(H)
续航	24小时	4 小时	需外接电源
质量 (Kg)	2	20	20

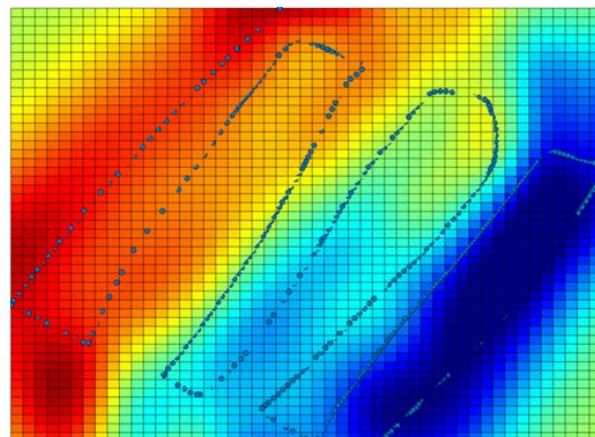
与国内外产品比较，我产品检测更灵敏、可识别恶臭来源、价格更低

2. 无人机大气环境检测仪的研制

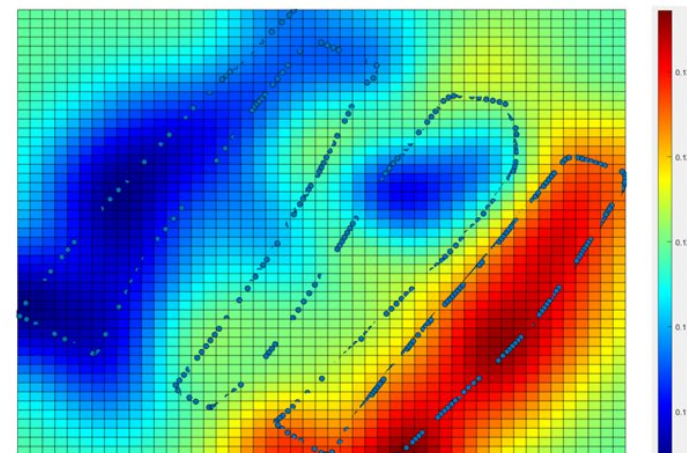
杭州垃圾中转站恶臭检测与垃圾填埋场平面浓度分布



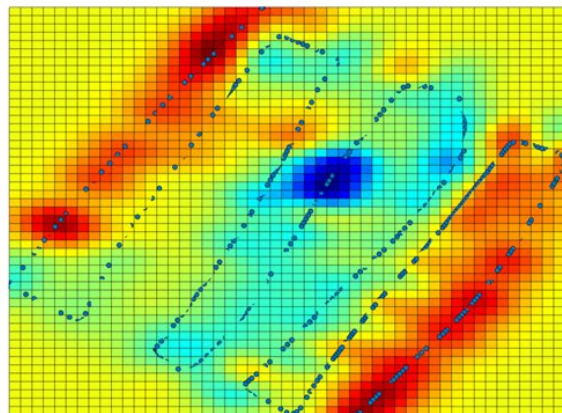
氨气浓度 (mg/m³) 分布图



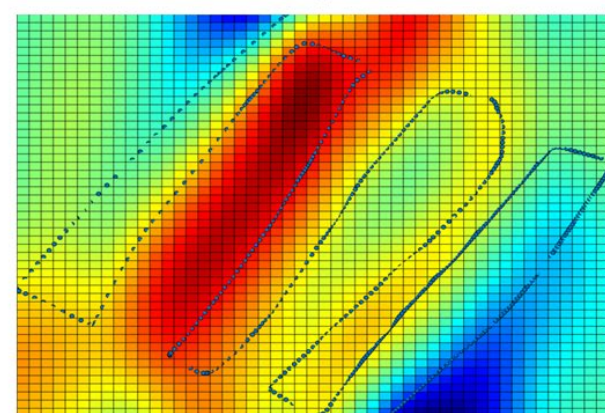
硫化氢浓度 (mg/m³) 分布图



CO 浓度 (mg/m³) 分布图



C_xH_y 浓度 (%) 分布图



垃圾中转站恶臭间歇式释放

填埋场氨气与硫化氢呈负相关

2.无人机大气环境检测仪的研制

2.3-无人机温室气体检测仪

非分散红外技术(NDIR)

研制二氧化碳(CO_2)传感器

TDLAS

可调谐二极管激光吸收光谱技术

研制甲烷(CH_4)传感器

TDLAS

可调谐二极管激光吸收光谱技术

研制氧化亚氮(N_2O)传感器



无人机多目标(CO_2 , CH_4 , N_2O)
温室气体检测仪

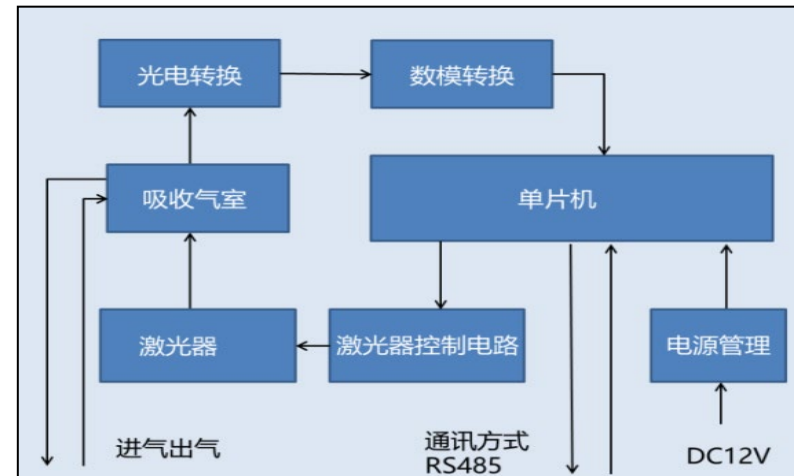
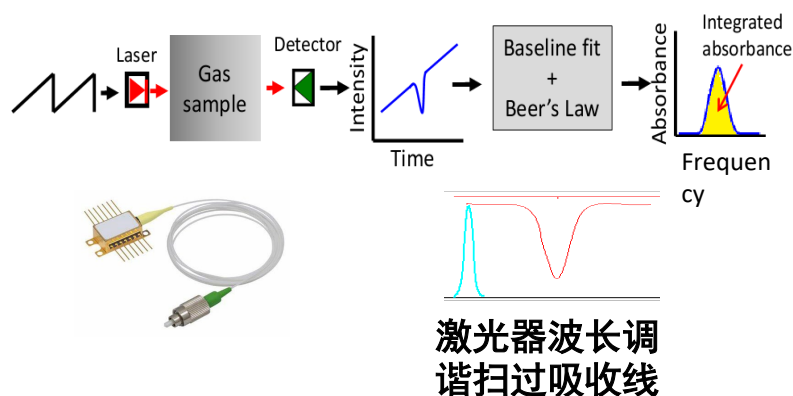
检出限: CH_4 0.01ppm, CO_2 5 ppm, N_2O 0.1ppm

数据采集频率: 1秒

采用先进光谱技术研制出无人机多目标温室气体检测仪

2. 无人机大气环境检测仪的研制

2.3 微型甲烷和氧化亚氮检测仪工作原理：激光吸收光谱技术(TDLAS)



激光吸收光谱技术(TDLAS)

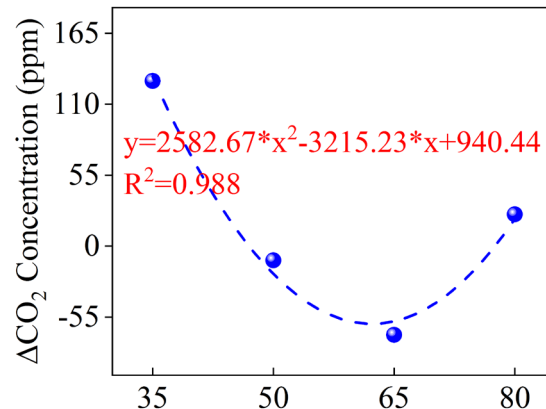
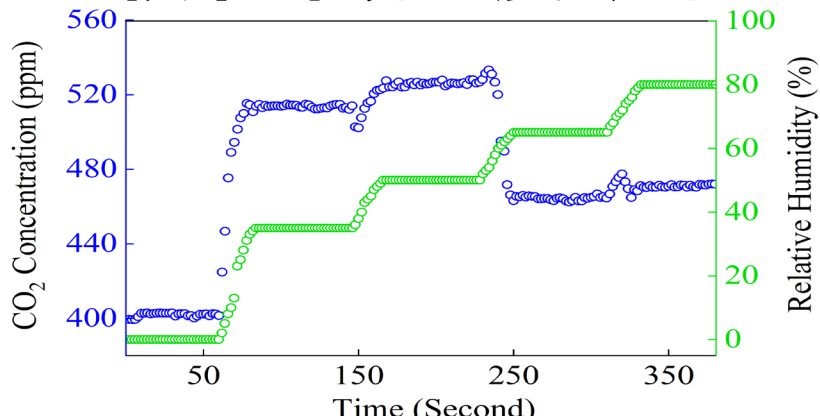
检测范围：0- 100 ppm；

分辨率：0.01 ppm(CH₄)、0.1 ppm (N₂O)

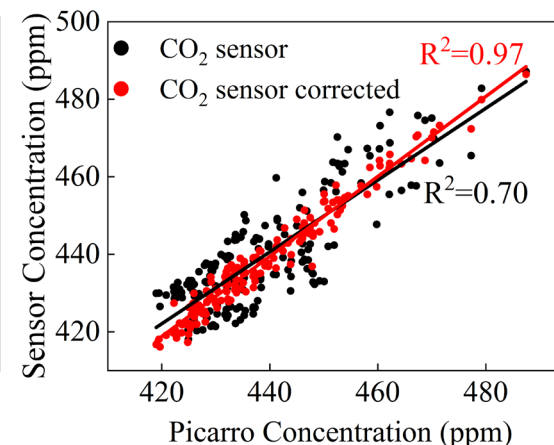
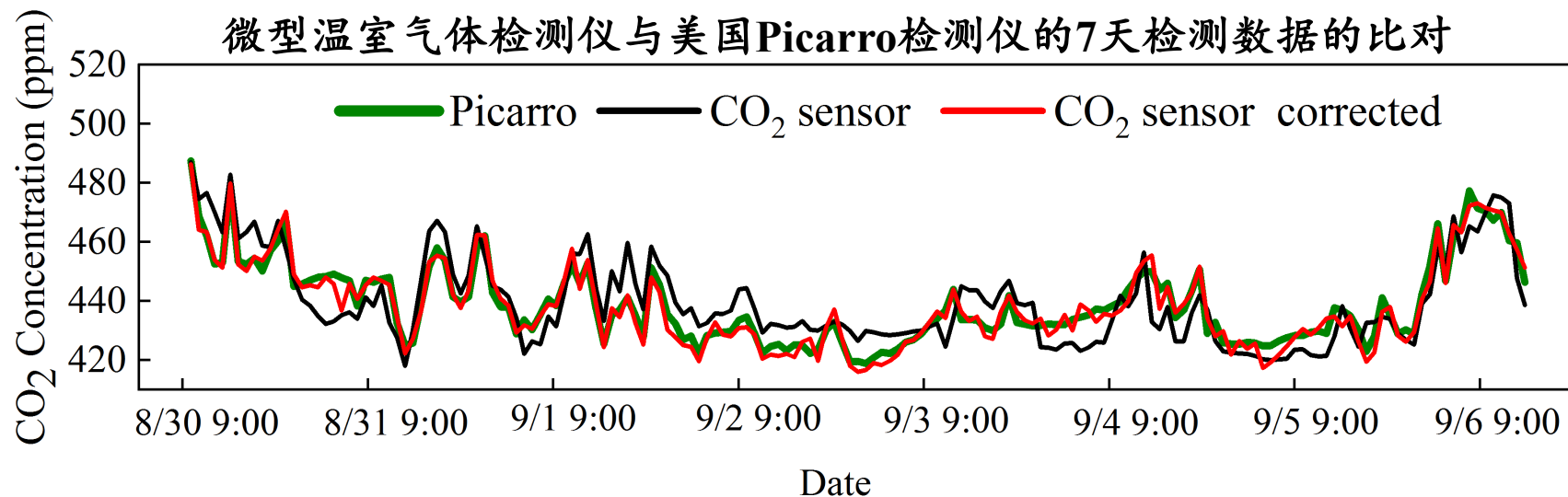
激光器扫描覆盖甲烷吸收波长(1653nm)和N₂O(4500nm)，吸收光谱的强度与浓度线性。

2. 无人机大气环境检测仪的研制

校准环境湿度影响:



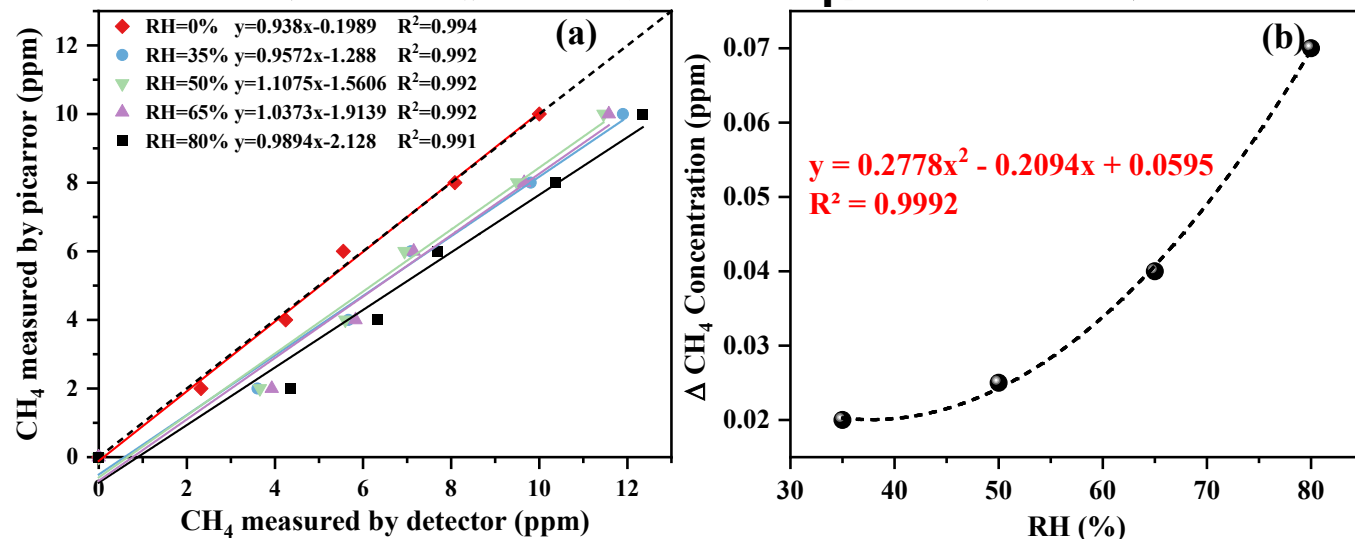
微型温室气体检测仪与美国Picarro检测仪的7天检测数据的比对



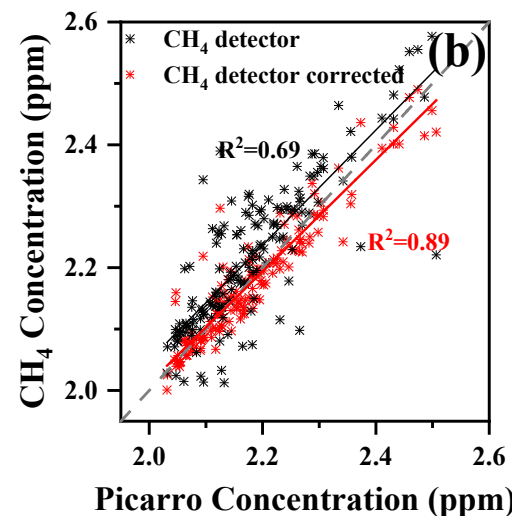
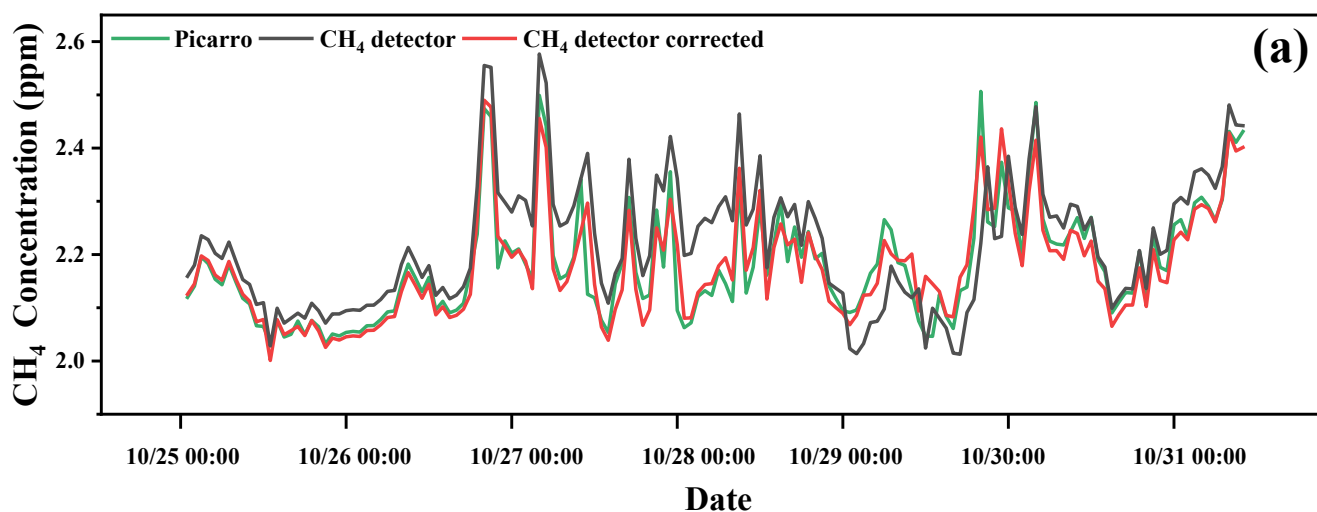
- 湿度对传感器有明显干扰，CO₂浓度随湿度呈指数变化，并得到**CO₂和湿度的校正公式**；
- 湿度干扰校准前，两者偏差10-15ppm，相关性系数R²=0.7；**校准后偏差≤2ppm，系数R²=0.97。**

2. 无人机大气环境检测仪的研制

校准湿度对微型CH₄检测仪的影响



甲烷的浓度差值与湿度呈一元二次方程关系。



偏差ppm R^2

校正前: 0.6 0.69

校正后: 0.3 0.89

校准湿度影响后，TDLAS检测结果和美国Picarro的浓度更接近。

2.无人机大气环境检测仪的研制

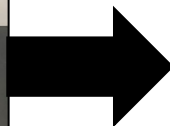
公司名称	美国Picarro G2301	美国LI-COR 分析仪	美国Spectra SS2000	美国LGR GGA-24EP	浙江工业大学
仪器图片					
检测原理	光腔衰荡光谱技术 (CRDS)	非分散红外 (NDIR)	可调谐激光技术 (TDLAS)	离轴连续积分腔输出光谱技术	非分散红外 (NDIR) 和可调谐激光技术 (TDLAS)
测试范围	0-1000ppm	0-20000ppm	0-20000ppm	0-5000ppm	0-5000ppm 0-100ppm
精度	± 25 ppb	± 20 ppm	± 2 ppm	± 65 ppb	± 1 ppm 0.1ppm, 0.01ppm
响应时间	3s	5s	10s	5s	1s
预热时间	10min	5min	5min	5min	1min
重量	27.4kg	8kg	11.5kg	27kg	3kg

与国外产品比较，我仪器精度更高、时间分辨更高、成本更低

2.无人机大气环境检测仪的研制

2.4 无人机气象检测仪

多气象参数：大气压强、温度、湿度、风速风向、降水量、总辐射强度。

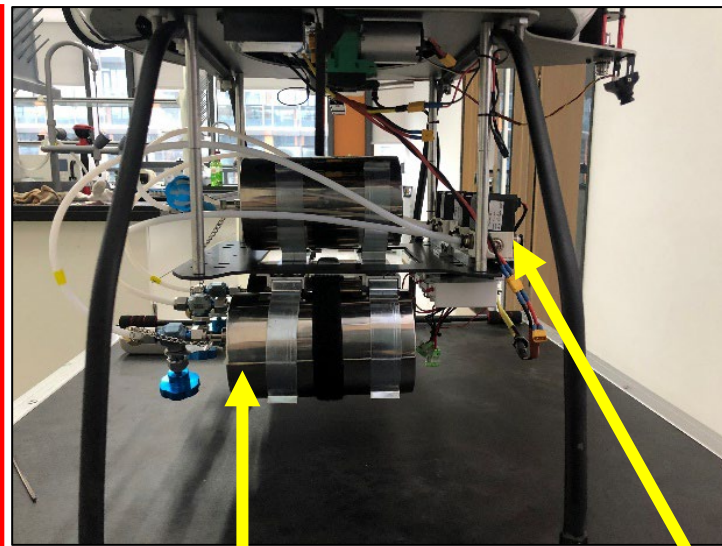
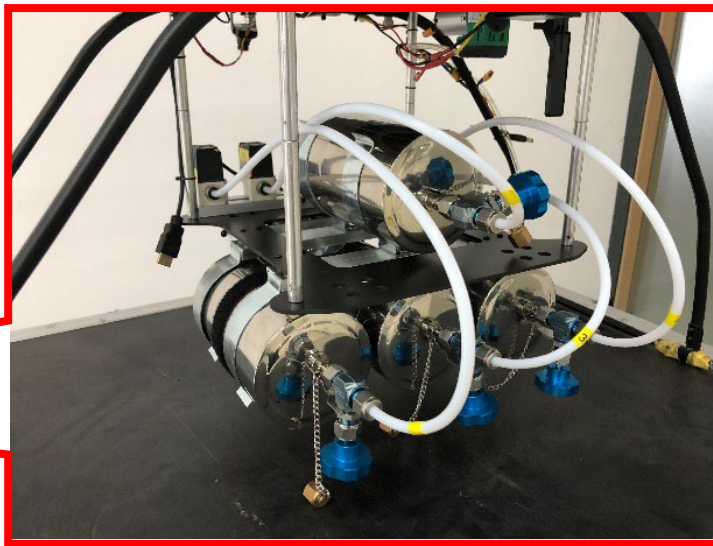


测量范围：水平风向 ($0 \sim 360.0^\circ$)、垂直风向 ($-60^\circ \sim 60^\circ$)、风速 ($0 \sim 60\text{m/S}$)
精确度：水平风向 ($\pm 2^\circ$)、垂直风向 ($\pm 5^\circ$)、风速 ($\pm 0.4 \text{ m/S}$)

采用先进雷达技术研制出无人机多气象参数检测仪

2. 无人机大气环境检测仪的研制

2.6 无人机全空气苏玛罐采样装置



苏玛罐

电磁阀

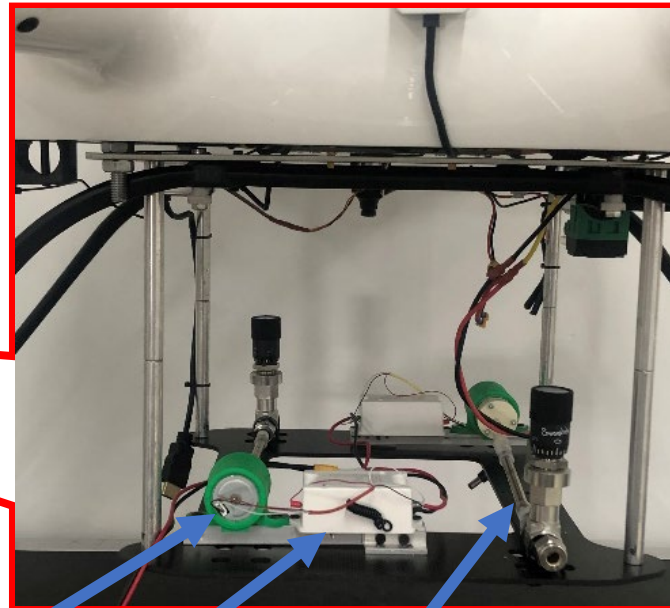
无人机搭载5个苏玛罐，单次飞行在多个高度采样，远程控制、惰性保存大气样品

实现遥控无人机在不同高度全空气样品采集与惰性储存

2. 无人机大气环境检测仪的研制

2.8 创新产品-无人机环境采样系统

无人机无线电遥控大气VOCs吸附管不同高空VOCs采样



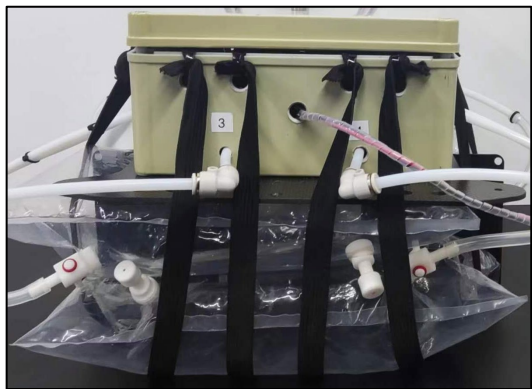
气泵 电磁阀 VOC吸附管



无人机搭载10根吸附管实现高空大气VOCs精准时间和体积吸附采样

2.无人机大气环境检测仪的研制

2.9 创新产品-无人机环境采样系统 无人机高空气袋采样装置



无人机高空气袋采样装置单次飞行可采集多个气袋精准控制采样体积

2. 无人机大气环境检测仪的研制

无线遥控环境采样仪在高空汽艇和无人机进行颗粒物采样



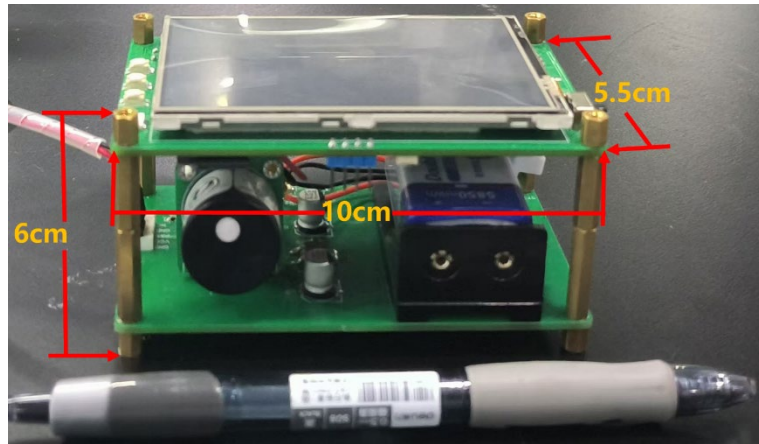
无人机无线遥控颗粒物采样仪

2. 无人机大气环境检测仪的研制

微型TVOC检测仪：

可在线显示TVOC浓度、时间分辨率1Hz、分辨率达1ppb、检测范围0 ~ 40ppm

仪器尺寸：10*6*5.5 cm



显示界面：1、调零、临界值设置；2、TVOC浓度 温度 湿度
3、标定公式输入； 4、时间、报警阈值设置

程序逻辑图：蓝色方框为输入端，橙色方框为输出端，黄色虚线框内为嗅觉感受显示的判断逻辑

2. 无人机大气环境检测仪的研制

检测数据可视化



初始设置

传感器校正 采样设置

设置各传感器的校正公式参数 ($C_{校正} = C_{原始} \times K + B$)

温湿度气压校正参数

温度(°C): K = 1.000 B = 0.00

湿度(%RH): K = 1.000 B = 0.00

气压(Pa): K = 1.000 B = 0.0

甲烷浓度校正参数

甲烷(%LEL): K = 1.000 B = 0.00

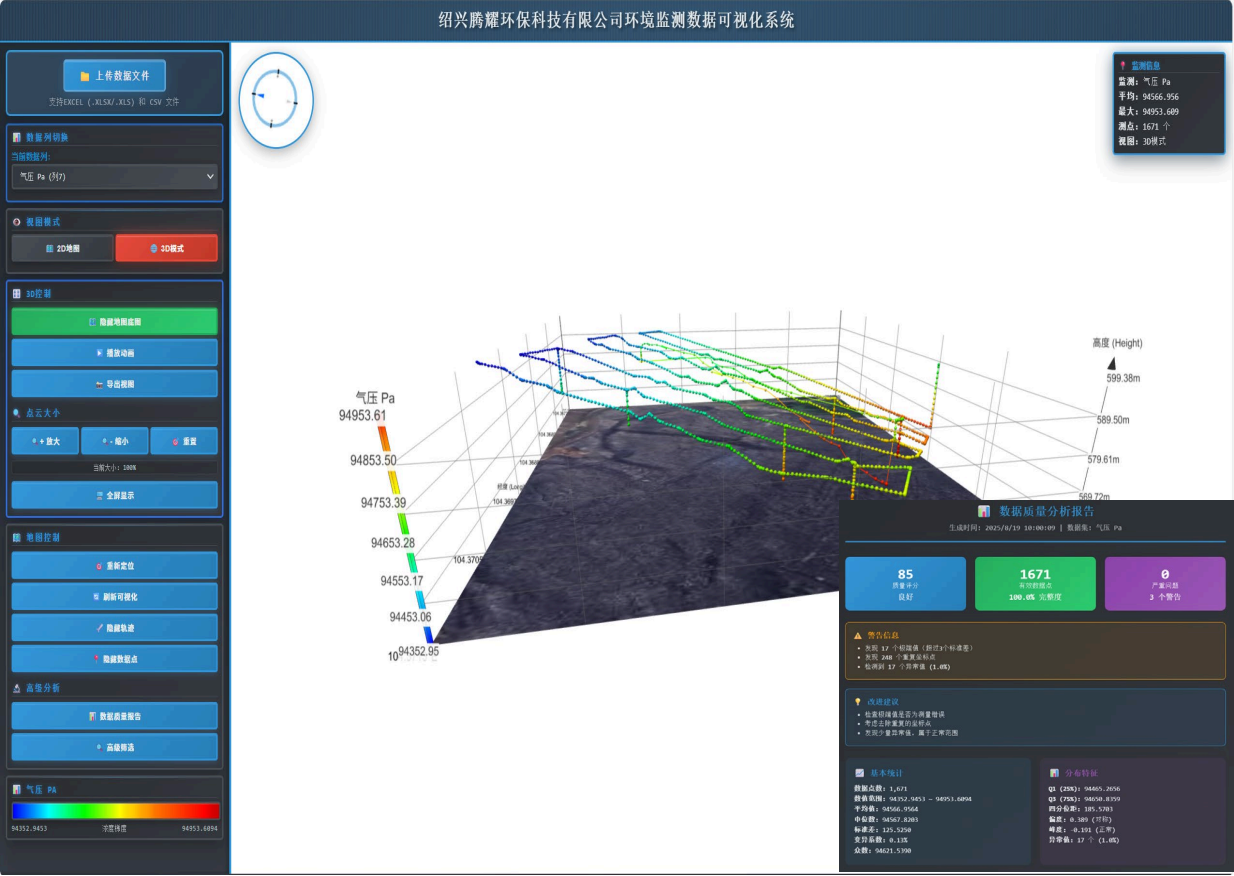
重置默认 取消 确定

- 实时显示检测参数浓度和空间分布; 校准信号数据公式, 提升检测准确性。

2.无人机大气环境检测仪的研制

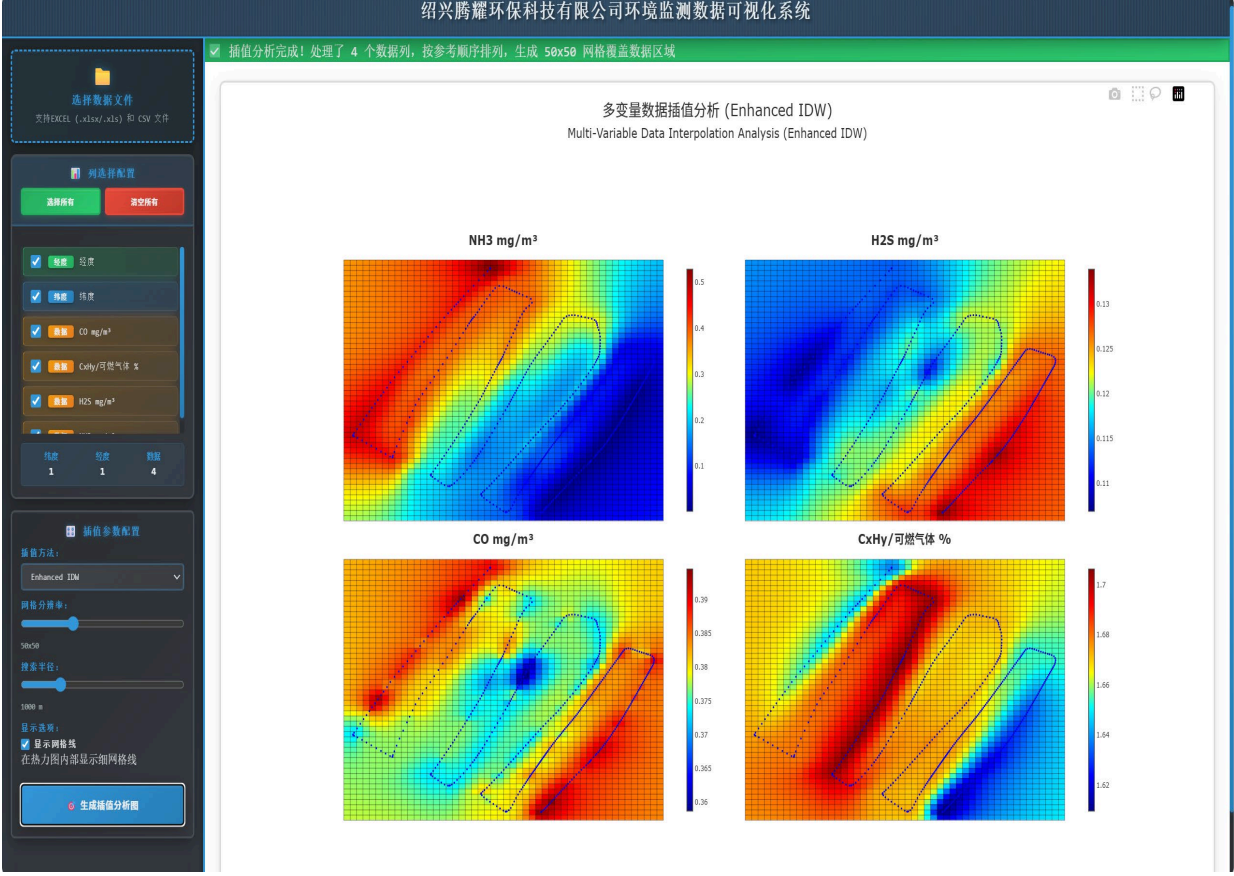
参数设置

无人机飞行轨迹数据可视化



参数设置

浓度数据平面分布可视化



● 气体浓度随无人机飞行三维轨迹展示，可获得50*50m网格浓度空间分布图，并生成数据质量报告。

2.无人机大气环境检测仪的研制

云平台将解析后的数据存储在数据库中，并提供数据可视化和分析功能。



自定义组态界面



- 可以同时添加2000台设备，数据延迟小于2ms。
- 传感器数据采集频率1秒。

- 定制化界面，为数据可视化提供更多选择。

2. 无人机大气环境检测仪的研制

1. 无人机颗粒物采样系统
2. 无人机恶臭检测系统
3. 无人机空气质量检测系统
4. 无人机氧化亚氮检测系统
5. 无人机臭氧检测系统
6. 无人机气象检测系统
7. 无人机TVOC检测系统
8. 无人机GC-PID检测系统
9. 无人机二氧化碳检测系统
10. 无人机气袋采样系统
11. 无人机苏玛罐采样系统
12. 无人机吸附管采集系统
13. 无人机温室气体检测系统



无人机大气检测系统



微型温室气体检测仪



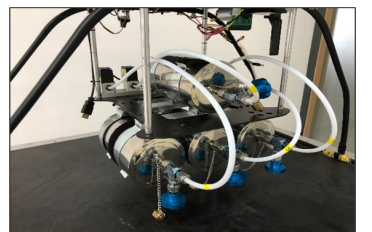
无人机VOC检测仪



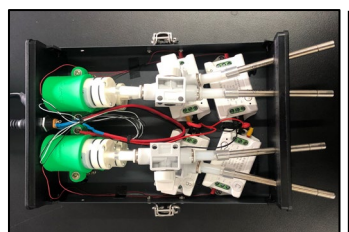
无人机大气检测仪



无人机恶臭检测仪



无人机苏玛罐采样仪



无人机吸附管采样仪



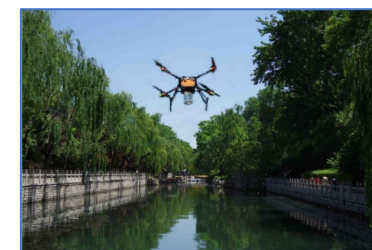
恶臭嗅辩仪



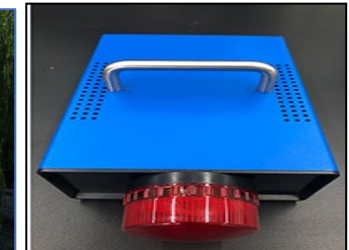
微型二维气相色谱仪



无人机冷冻富集VOC



无人机水质监测仪



天然气报警装置



无人机气象仪



无人机多通道气体采样仪



无人机甲烷检测仪



目 录

1

引言

2

无人机大气环境检测仪的研制

3

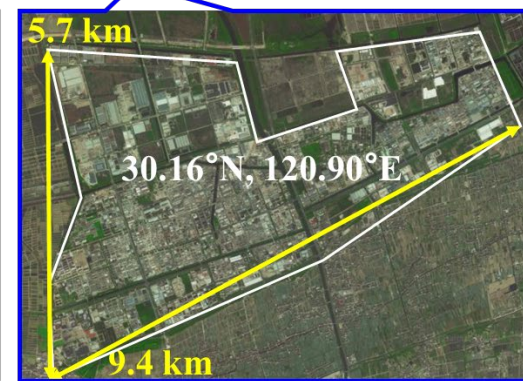
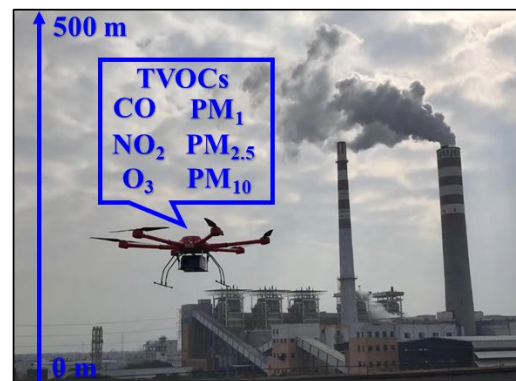
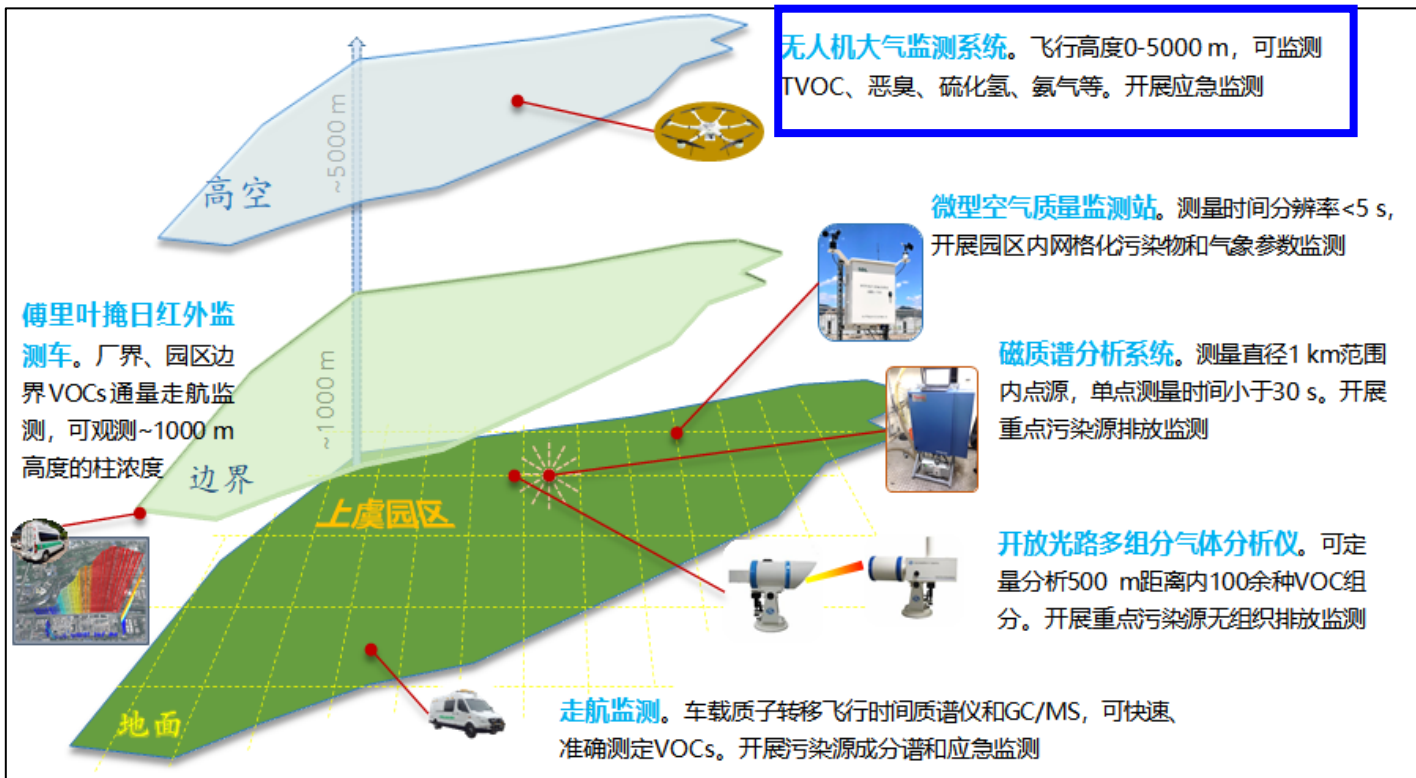
无人机大气环境检测仪的应用

4

结论与展望

3. 无人机大气环境检测仪的应用

3.1 无人机环境检测仪用于杭州湾上虞经济开发区大气污染物溯源

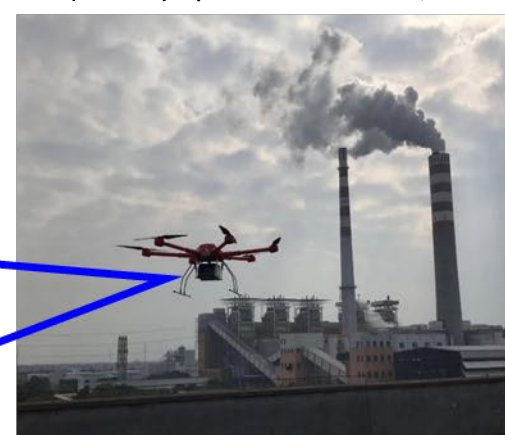
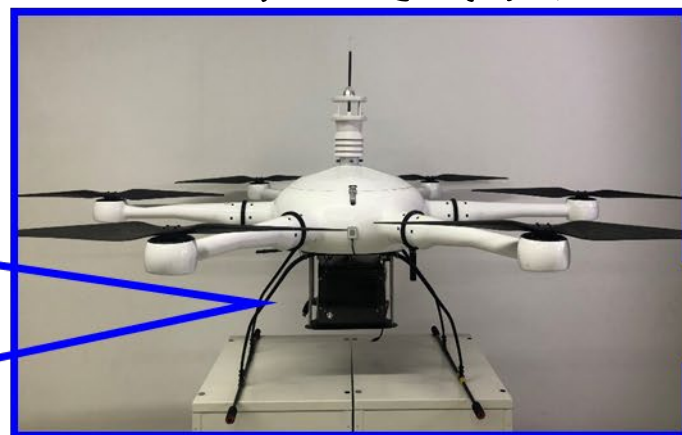
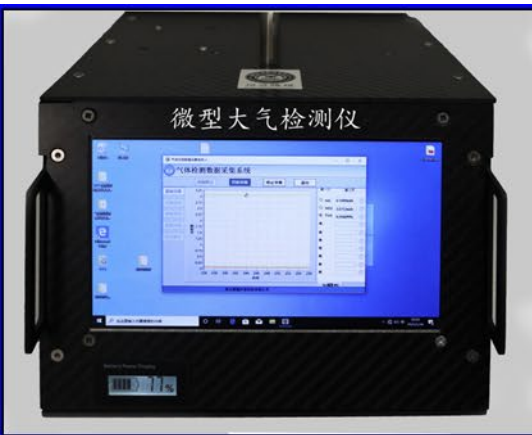


国家重点项目 “精细化工园区大气污染全过程控制与技术集成示范” 实施

3.无人机大气环境检测仪的应用

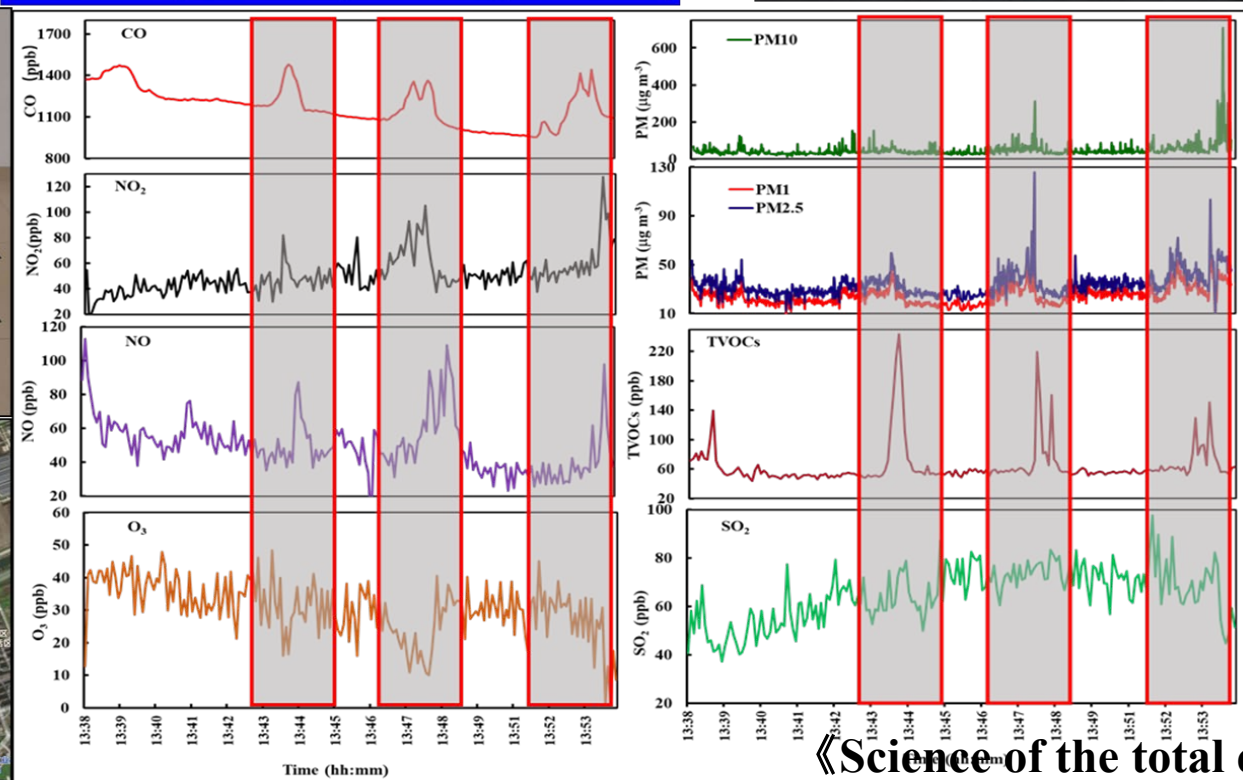


3.1 无人机与大气成分检测仪的联用在工业园区的应用



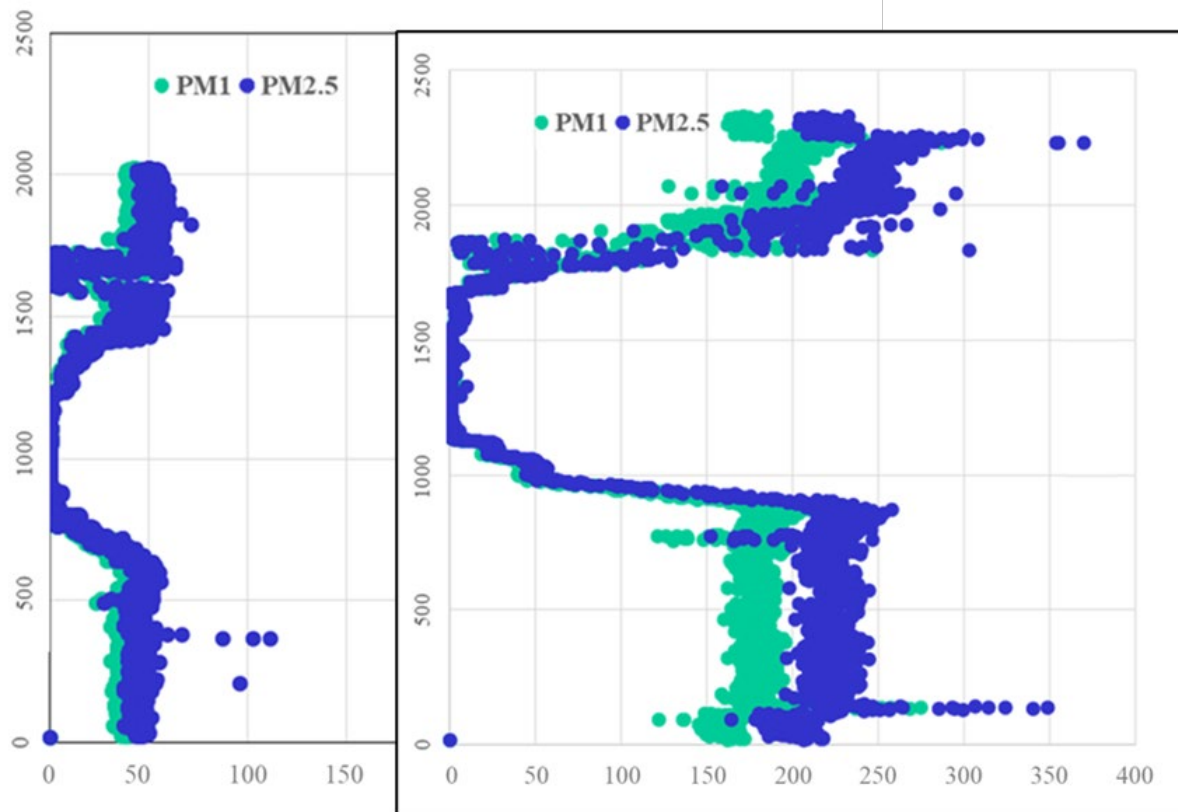
1、在化工园区均能检测到一次污染物排放源；

2、SO₂和O₃未检测到源排放。



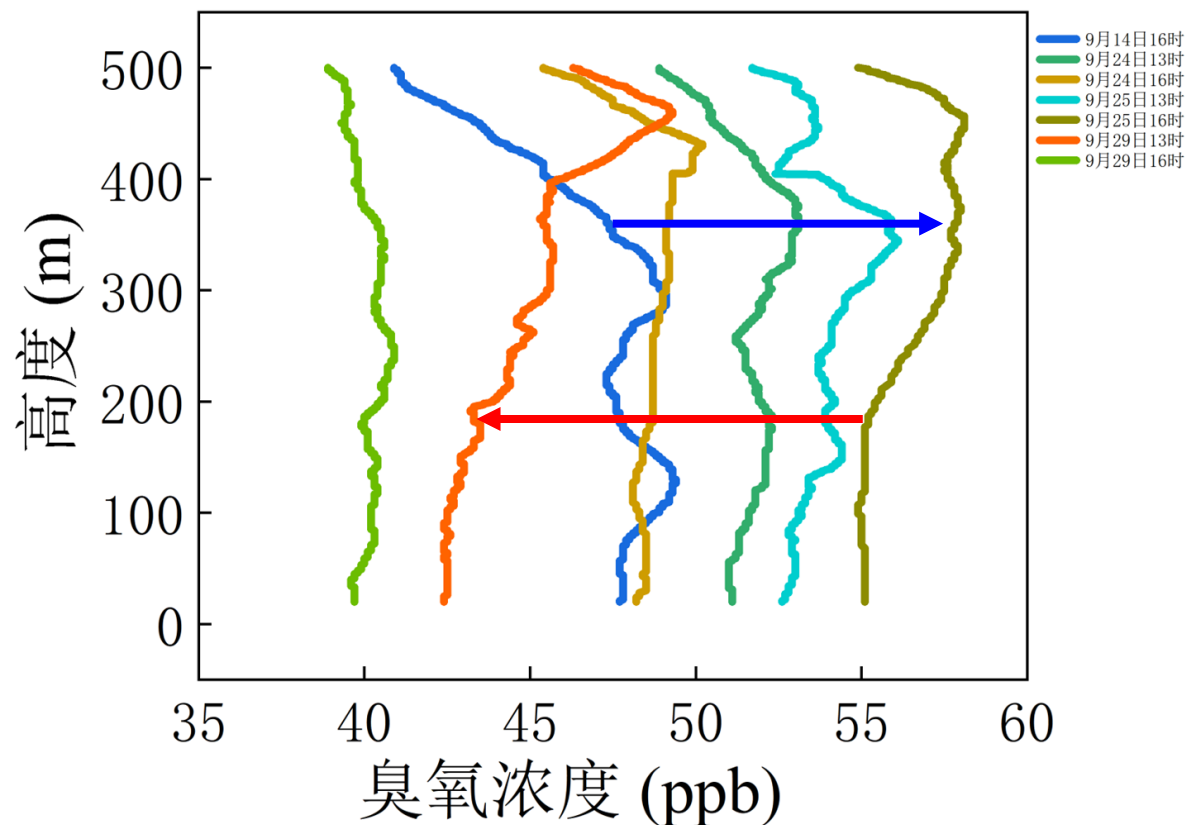
3.无人机大气环境检测仪的应用

无人机观测到大气污染事件



颗粒物在灰霾天气前后垂直分布：

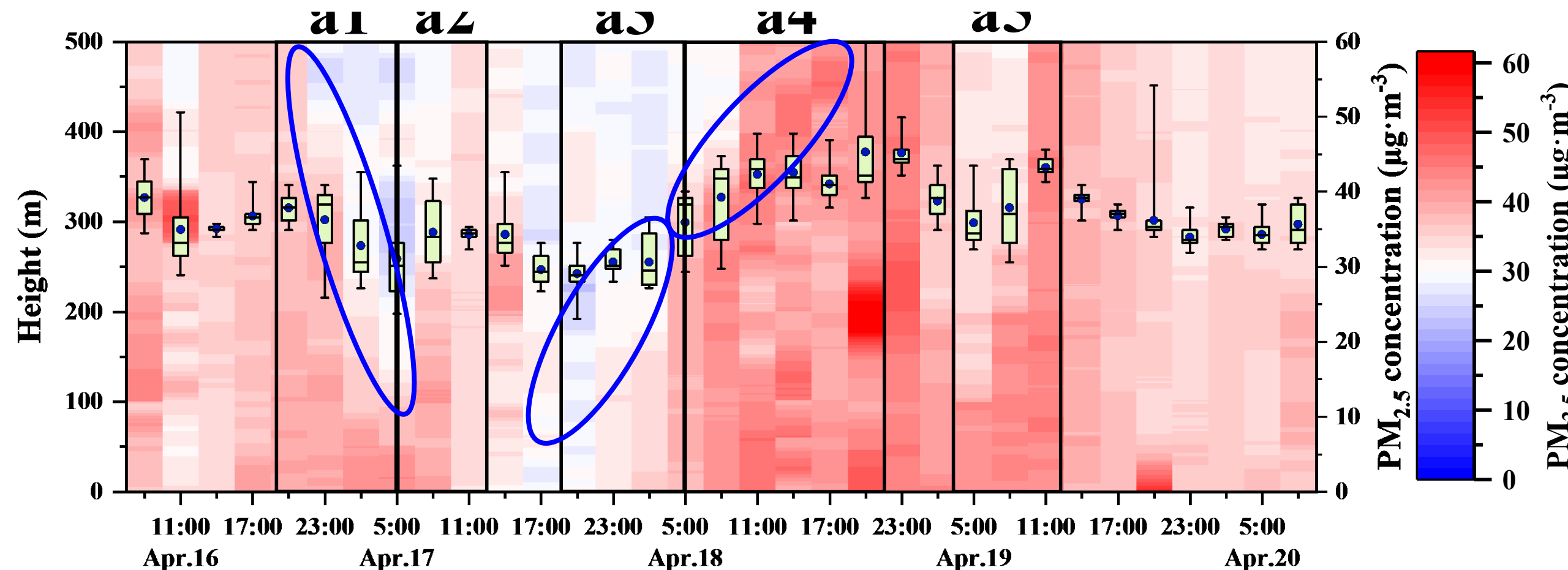
灰霾前 2017年12月22日13时； 2017年12月23日, 13时。



臭氧污染前后垂直分布：

2024年9月24-25日臭氧高值，29日臭氧降低。

3.无人机大气环境检测仪的应用

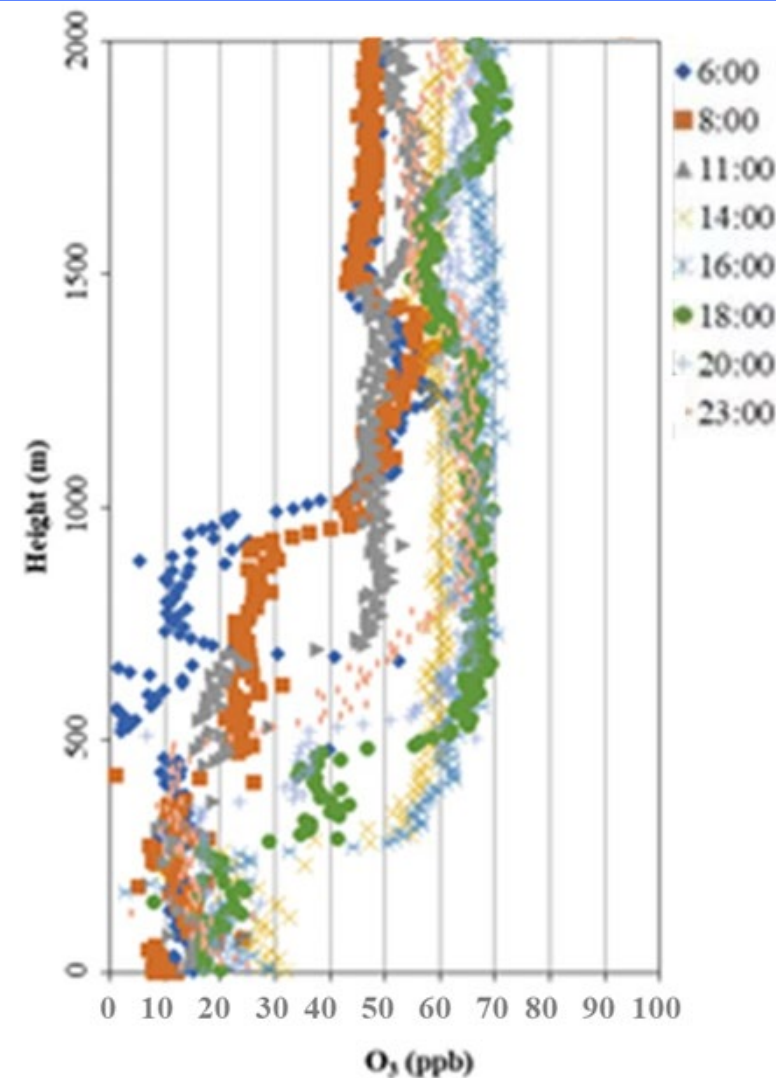
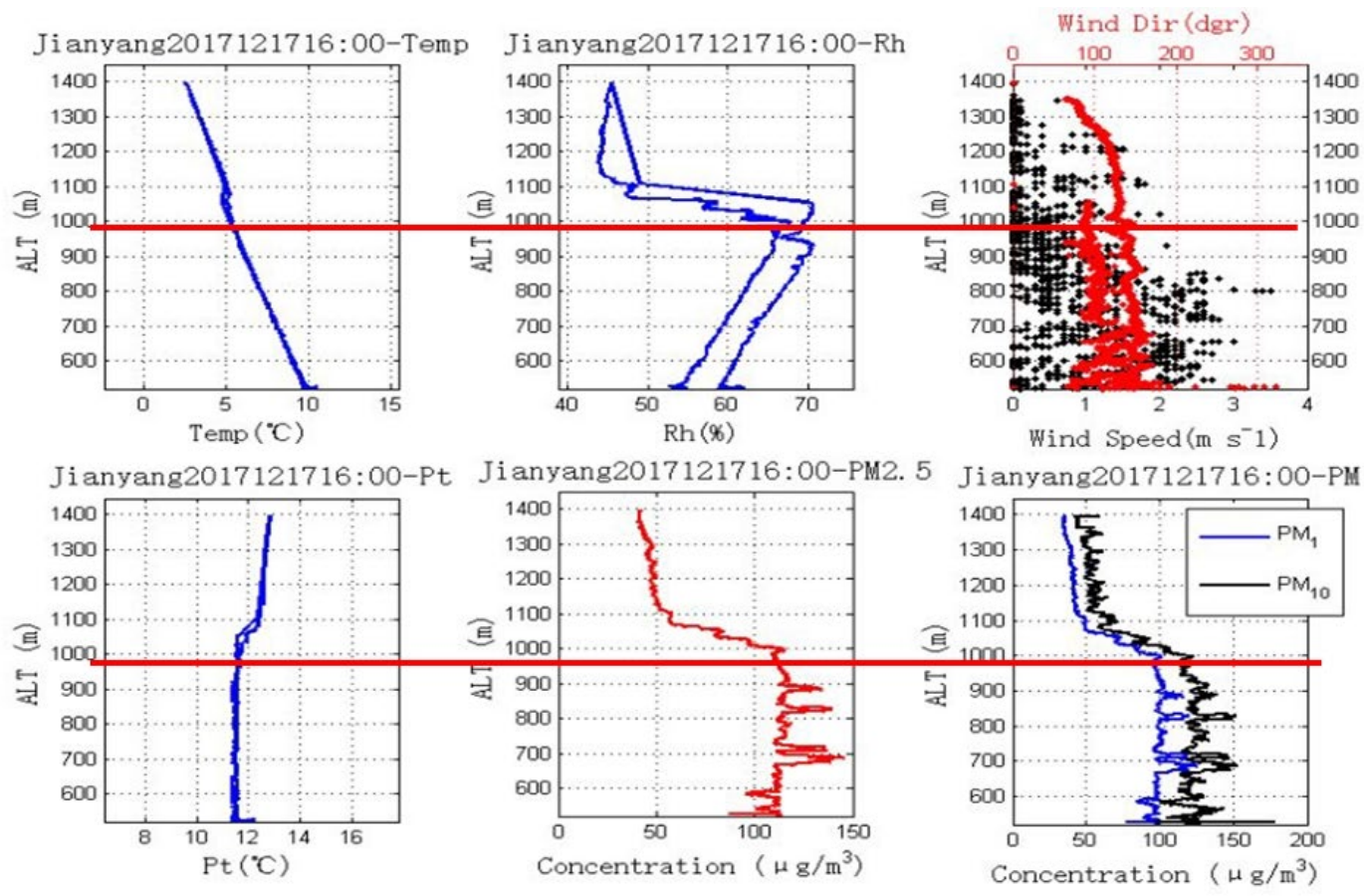


- **a1** $\text{PM}_{2.5}$ 垂直廓线随夜间边界层的沉降而呈现阶梯式下降，并在边界层顶部出现分层
- **a3** 期间夜间边界层沉降过程中，存在活跃的湍流运动，地面的 $\text{PM}_{2.5}$ 反而向上输送
- **a4** 期间高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 气团的移动轨迹与逆温层的上升轨迹重合

3.无人机大气环境检测仪的应用



无人机检测结果与大气边界层高度关系

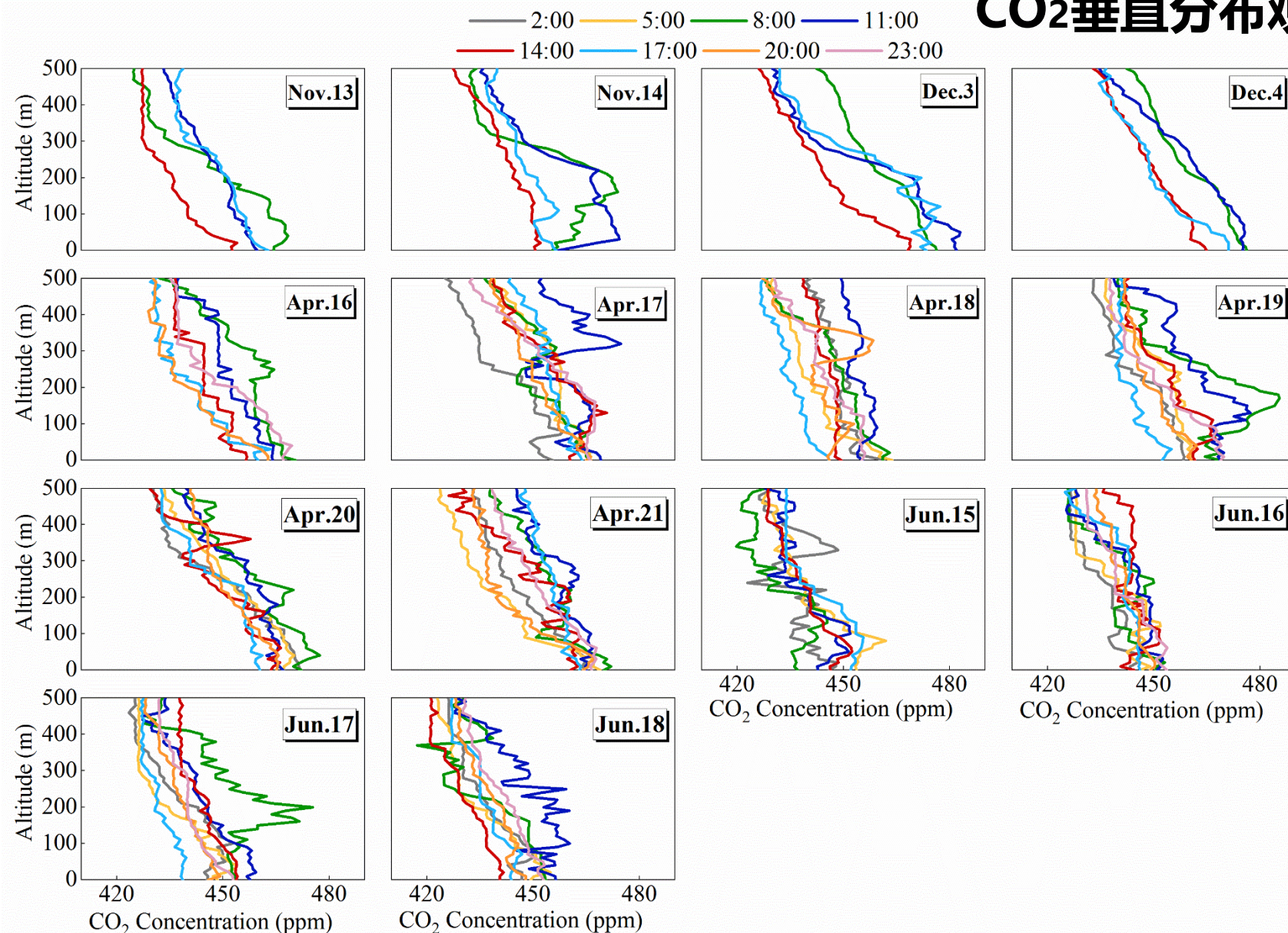


颗粒物浓度突变处与边界层高度一致，大气边界层高度在夜间最低（300米）在白天最高1000米。

O₃浓度随高度增加增加，O₃浓度拐点白天低，夜间高。

3.无人机大气环境检测仪的应用

CO₂垂直分布观测 0-500米



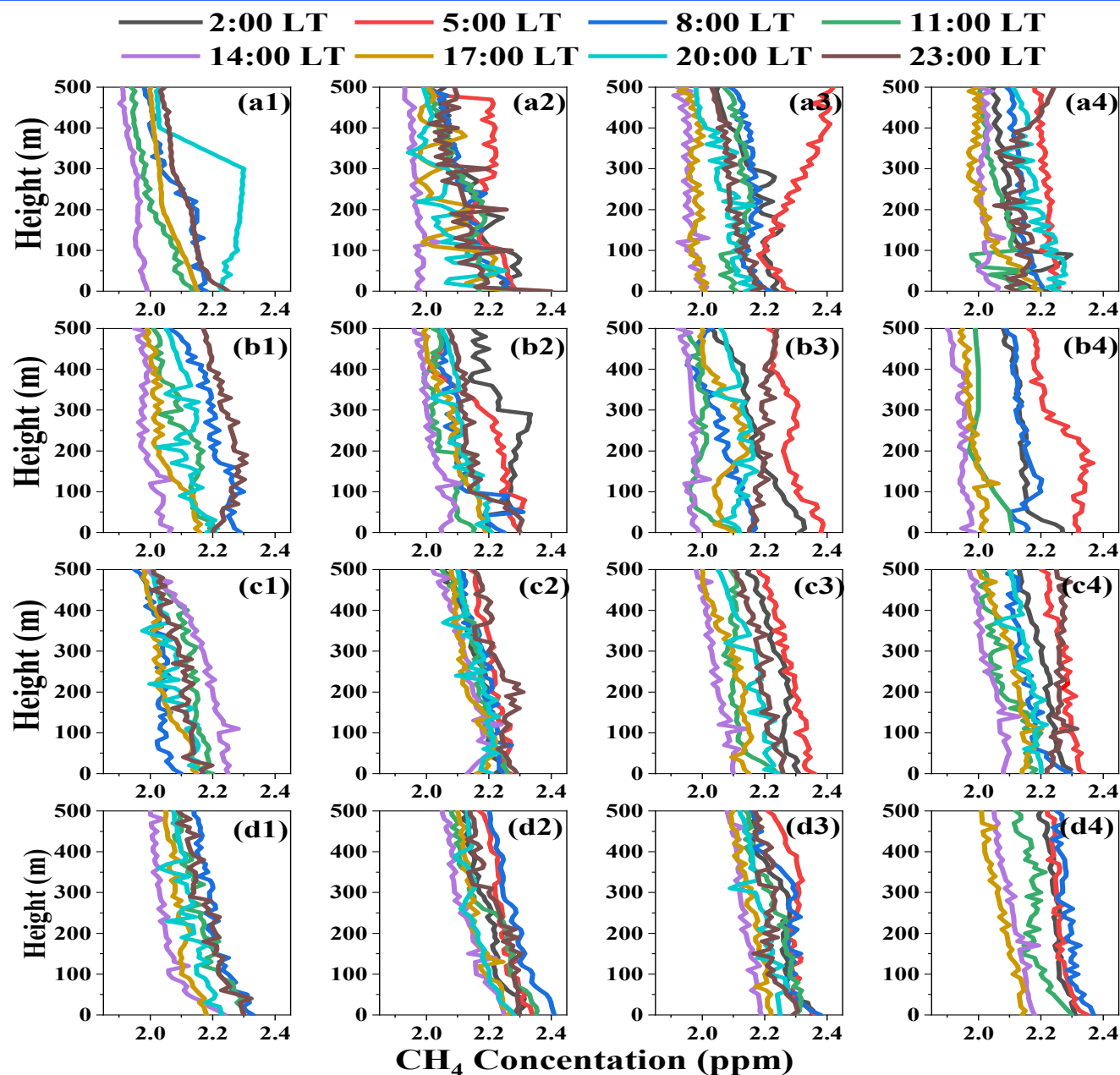
□ 冬季和春季CO₂浓度较高，夏季浓度较低。

□ 总体CO₂浓度随高度增加而减少早上8点随高度增加浓度增加。

□ 计算中小城市尺度CO₂排放通量。

3.无人机大气环境检测仪的应用

长三角0-500m高度内CH₄垂直分布



- 夏季和冬季浓度较高、春季和秋季较低;
- CH₄浓度随高度升高逐渐降低, 午后大气CH₄浓度在垂直方向的差异小。
- 逆温层抑制大气湍流活动, 使得CH₄浓度在某些高度出现随高度增加现象。

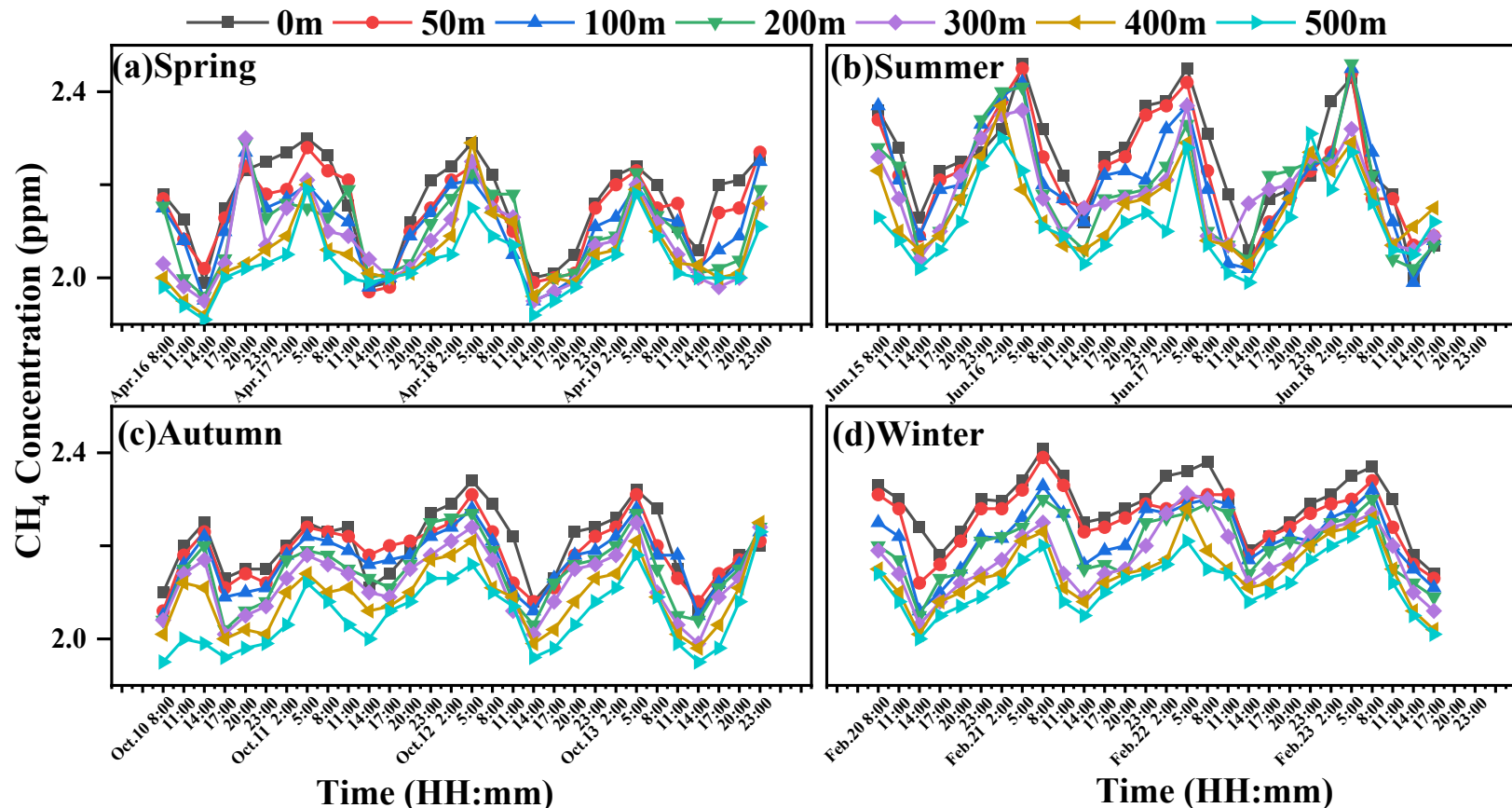
--J. Environ. Sci., 2025,151, 140-149.

--Atmosphere, 2023, 14, 1709 .

3. 无人机大气环境检测仪的应用



长三角不同高度大气CH₄浓度的四季日变化



- 大气CH₄夜间2-5点或8点(冬季)浓度最高，白天14点浓度最低。
- 随着高度增加CH₄的浓度逐渐减少，差异也会增加。
- 夏季和冬季甲烷浓度较高，夏季微生物活跃导致土壤甲烷排放增强，冬季大气边界层高度降低。

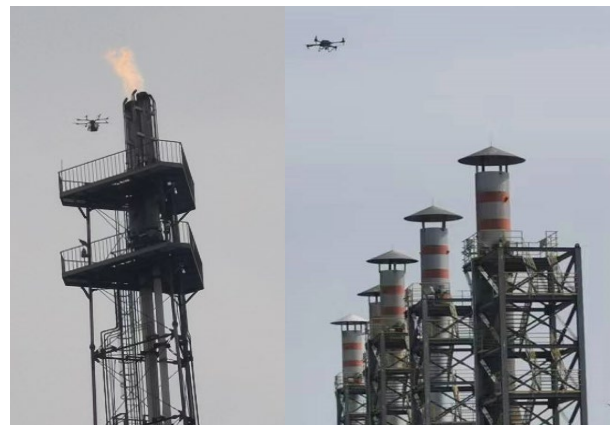
J. Environ. Sci., 2025,151, 140-149.

3.无人机大气环境检测仪的应用

检测内容：无人机高空甲烷逸散检测、地面甲烷逸散检测及风速风向检测等



高空甲烷平面检测+甲烷垂直廓线检测



火炬和烟囱甲烷排放检测

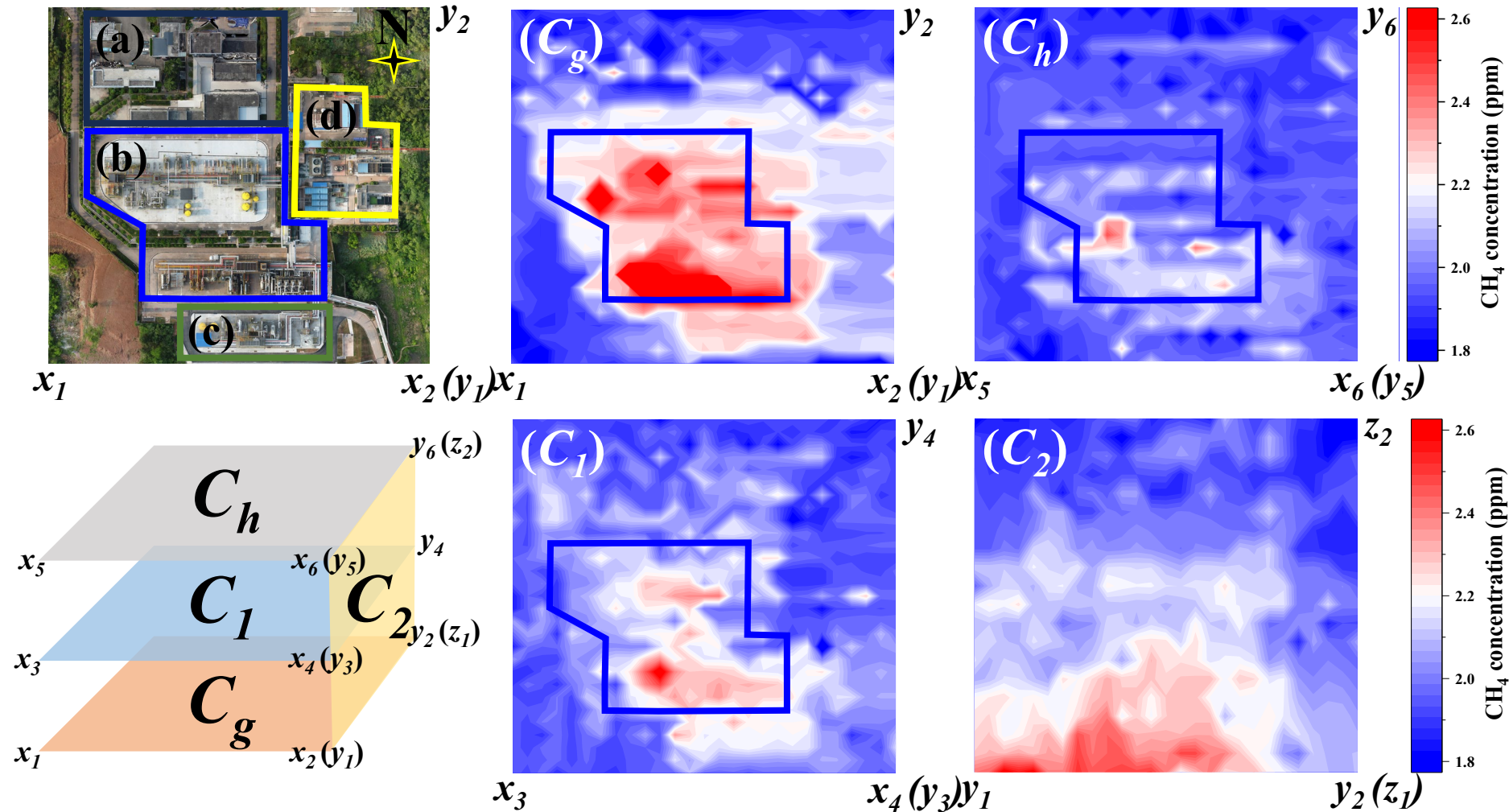


场站组件逸散点检测



场站上空不同高度甲烷采样C13同位素样品

3. 无人机大气环境检测仪的应用



成功应用中国石油西南天然气生产场站不同高度平面的甲烷逸散特征

3.无人机大气环境检测仪的应用

无人机大气VOC采样与检测仪被广东工业大学环境学院采购使用



无人机高空苏玛罐VOCs采样



无人机环境检测仪与苏玛罐高空VOCs采样



- 无人机搭载微型大气检测仪和苏玛罐VOCs采样装置进行高空有毒有害气体检测
- 地面端也同样进行有毒有害气体实时检测和VOCs采样分析实验

成功应用于广东省电子垃圾厂高空VOCs采样与分析

3.无人机大气环境检测仪的应用

无人机大气治理技术与环境检测仪被浙江省生态环境部门使用



无人机环境检测仪



微型大气
检测仪



无人机喷洒大气污染物治理药剂

- 无人机大气污染物治理技术，现场降解大气污染物；
- 无人机环境检测仪检测**高空**大气污染物在治理前后浓度变化。

成功应用于浙江省非道路移动机械大气污染物的治理

3. 无人机大气环境检测仪的应用

无人机大气颗粒物检测与治理技术被浙江省生态环境部门使用



绍兴印染企业烟囱排放大量颗粒物，无人机环境检测仪实时检测并治理大气污染物

成功应用印染企业污染排放检测，帮助绍兴生态环境局制定科学治理方案



目 录

1

引言

2

无人机大气环境检测仪的研制

3

无人机大气环境检测仪的应用

4

结论与展望

4.展望与结语



1

无人机环境气象检测仪可实现高空20种气体和气象参数检测；

2

无人机环境采样仪可实现全空气采样、大气VOCs吸附采集、颗粒物采样；

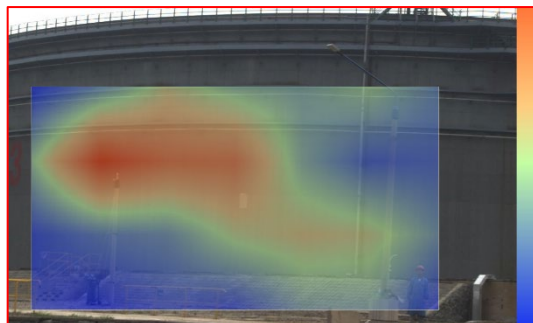
3

无人机是高空检测的载体，需要研制更多微型化检测仪与之配合，探索大气变化科学机理。

4.展望与结语



- 环境传感器更小准确，无人机环境检测更轻便参数更多；
- 结合高光谱和激光遥测技术实现大尺度立体检测；
- 结合微型质谱仪实现在线定性定量分析；
- 结合人工智能与机器学习提高无人机检测精度。



致 谢



浙江工业大学
ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

感谢国家基金委、科技部、浙江省科技厅支持！

感谢各位专家同仁，敬请批评指正！

联系电话：15715806408 (微信同号)
电子邮箱：pangxb@zjut.edu.cn

