

典型大气污染源FTIR监测技术及应用

中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所

大气污染和温室气体监测技术与装备国家工程研究中心
国家环境保护环境光学监测技术重点实验室
国家环境光学监测仪器工程研究中心
中国科学院环境光学与技术重点实验室



李相贤

研究员、硕士生导师

手机: 15056921559

邮箱: lixx@aiofm.ac.cn

地址: 合肥科学岛



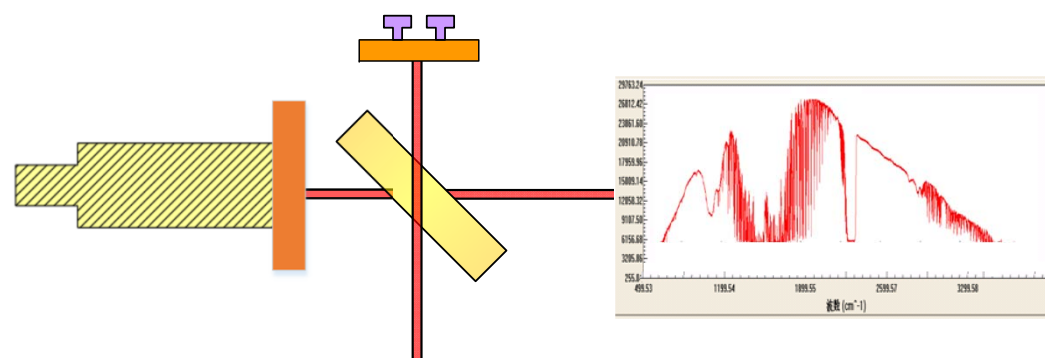


报告提纲



- 1 傅里叶变换红外光谱技术研究
- 2 固定污染源在线监测技术应用
- 3 移动污染源在线监测技术应用

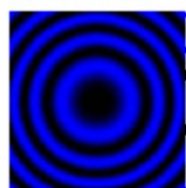
认识下FTIR技术



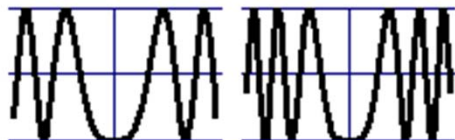
$2d = -1.2656 \mu\text{m}$

$2d = -2. \lambda$

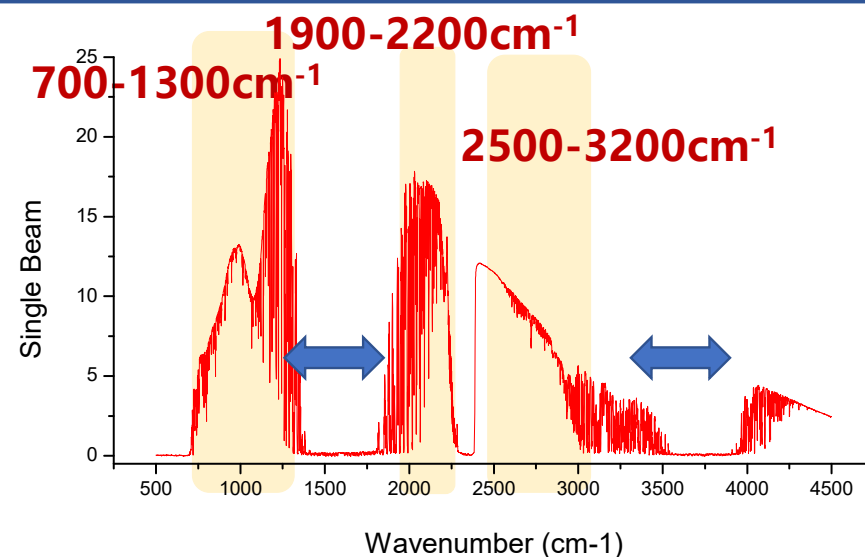
$2d = -3.008 \lambda$



$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\bar{\nu}) \cos 2\pi x d\bar{\nu}$$



$$B(\bar{\nu}) = \int_0^{\infty} I(x) \cos(2\pi \bar{\nu} x) dx$$



* **波段宽**-多组分同时测量

* **高灵敏度**-测量精度高

* **机械简单**-长期免维护运行

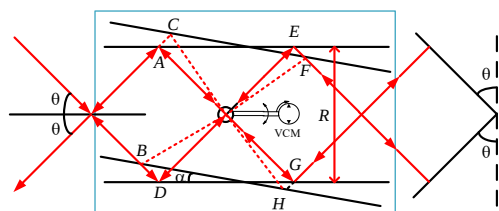
* **光路结构灵活**-大范围遥感

傅里叶变换红外光谱技术被称为“分析领域的小巨人”

关键核心是技术突破

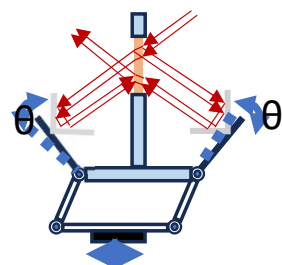
攻克干涉仪设计关键“卡脖子”难题，建立红外光谱数据库，打破国外垄断

研发多类型干涉仪核心部件

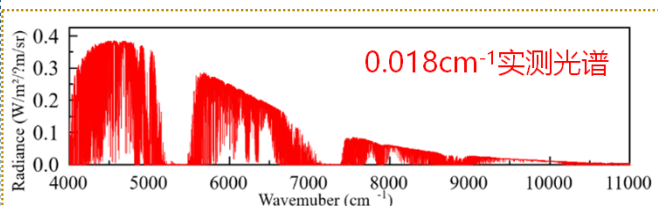


$$OPD = 2(AC + CH + HG + EF + BD - BF)$$
$$= 2R \left[\frac{1 + \sin 2\alpha}{\sin(\theta + \alpha)} - \frac{1 - \sin 2\alpha}{\sin(\theta - \alpha)} \right]$$

双平面镜摆动干涉仪



双角镜摆动干涉仪

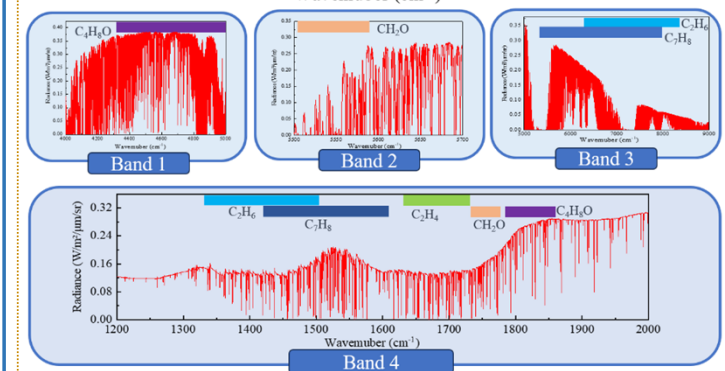
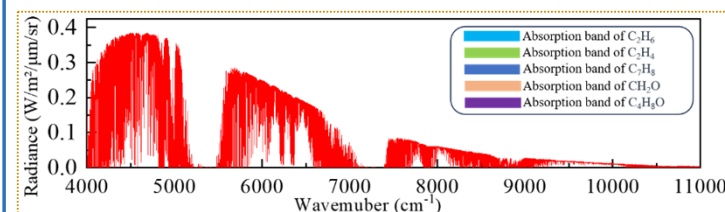


0.02cm⁻¹高分辨率红外干涉仪



参编国家标准

建立600种组分的标准光谱数据库



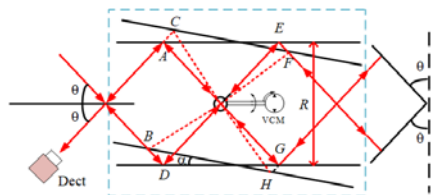
◆国际上公开的光谱数据库只有哈佛大学的HITRAN数据库，但公开组分只有45种。

光谱信噪比增强方法

针对非线性控制难题，创新提出反馈信息精准获取方法，**光谱信噪比**显著提升

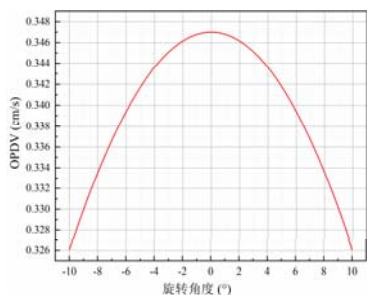
难题

难题：转动式干涉仪的非线性摆动限制了信噪比的提升



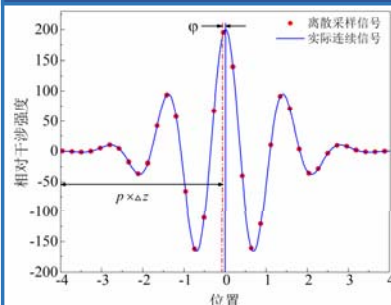
$$OPD = 2(AC + CH + HG + EF + BD - BF)$$

$$= 2R \left[\frac{1 + \sin 2\alpha}{\sin(\theta + \alpha)} - \frac{1 - \sin 2\alpha}{\sin(\theta - \alpha)} \right]$$



$$OPDV \approx 4R\omega / \sin(\pi/4 + \omega t)$$

反馈信息精准获取方法



$$\psi(z) = \exp\left(-\frac{z^2}{L_w}\right) \cdot \exp(j2\pi w_0 z)$$

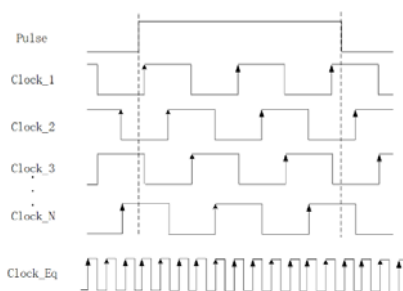
$$\psi(n) = \exp\left[-\left(n\Delta z/L_w\right)^2\right] \exp(j(2\pi v_0 n\Delta z))$$

$$|WT(a,b)| = \sqrt{WT_r^2(a,b) + WT_i^2(a,b)}$$

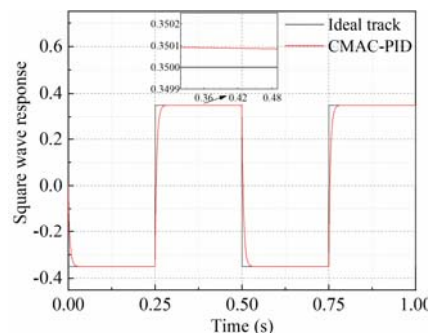
$$\varphi(a,b) = \arctan(WT_i(a,b)/WT_r(a,b))$$

$$h = \Delta z \times p - \Delta z \times N \times \varphi/2\pi$$

基于小波变换的扫描起点定位：提高扫描起点检测精度



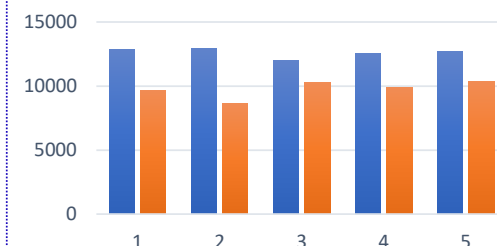
$$fc = N \times f$$



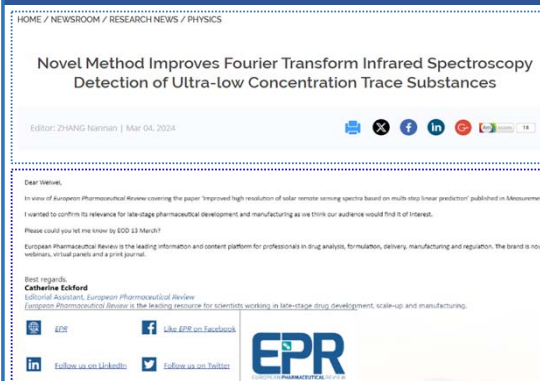
带时变扰动的CMAC-PID控制

基于等效时钟法的速度获取，CMAC-PID动态控制电路

光谱信噪比显著提升



信噪比12617:1，优于国际先进



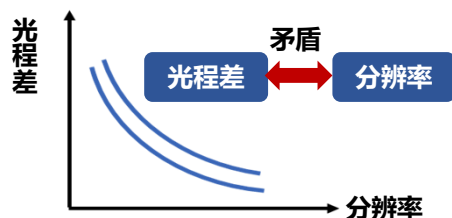
国际知名机构交流使用该算法

光谱分辨率增强方法

创新提出基于线性预测的光谱分辨率增强方法，**光谱分辨率**显著提升

难题

难题： 仅从硬件结构上提高光谱分辨率会给干涉仪的**体积**和**稳定性**带来巨大挑战



$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I_D(x) T(x) \cos 2\pi \nu x dx$$

$$T(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) = \begin{cases} 1, & |x| \leq L \\ 0, & |x| > L \end{cases}$$

$$t(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) \cos 2\pi \nu \frac{x}{2L} d\nu \\ = 2L \cdot \frac{\sin(2\pi \nu L)}{2\pi \nu} = 2L \cdot \text{sinc}(2\pi \nu L)$$

$$B(\nu) = \delta(\nu - \nu_0) * t(\nu)$$

$$= 2L \cdot \frac{\sin[2\pi(\nu - \nu_0)L]}{[2\pi(\nu - \nu_0)L]}$$

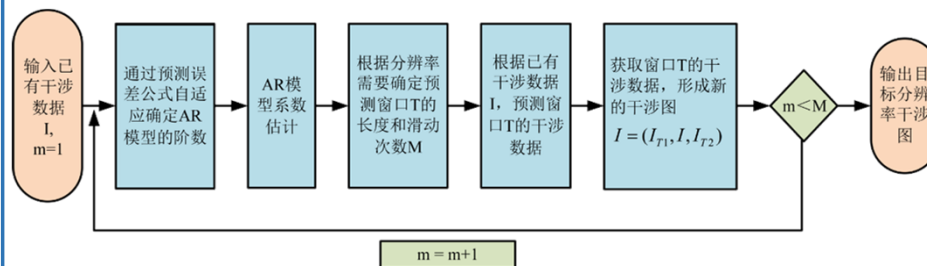
基于线性预测的光谱分辨率增强方法

$$I(n) = \sum_{k=1}^p a_k e^{j2\pi f_k n} + w(n)$$

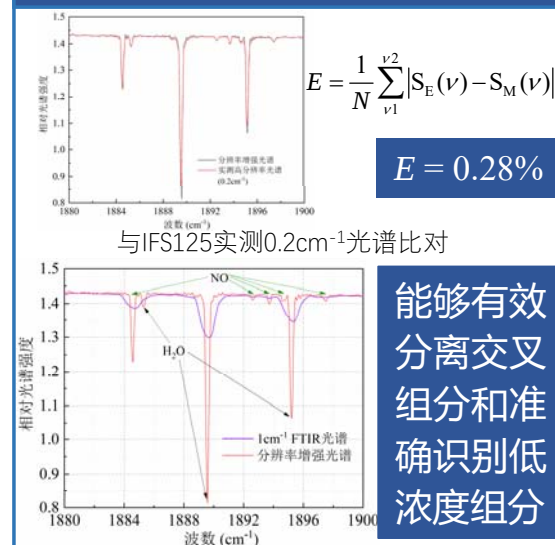
$$i(p+n) = \sum_{k=1}^p I(p+n-k) c_k$$

通过对低分辨率干涉信号进行无误差外推，有效提升光谱分辨率。

$$\begin{pmatrix} I(p) \\ I(p+1) \\ \vdots \\ I(N-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(0) & I(1) & \cdots & I(p-1) \\ I(1) & I(2) & \cdots & I(p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I(N-p-1) & I(N-p) & \cdots & I(N-2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_p \\ c_{p-1} \\ \vdots \\ c_1 \end{pmatrix}$$



光谱分辨率显著增强



与IFS125实测0.2cm⁻¹光谱比对

能够有效分离交叉组分和准确识别低浓度组分

I think that Your publication could be really valuable in this regard because it relies on more recent findings (not like the Mertz and Forman method which have served well for more than half a century now).

Could you please provide me access to the publication?

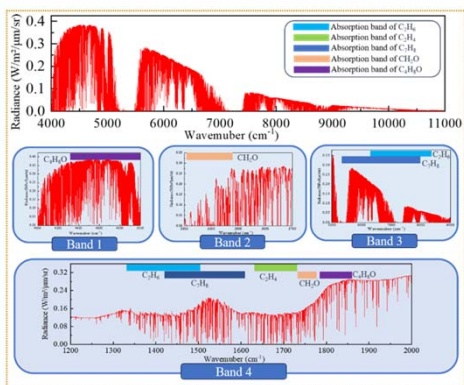
Thank You very much for Your time!

Kind regards
Niklas Zell

德国科学家高度评价该方法

傅里叶变换红外光谱监测技术体系

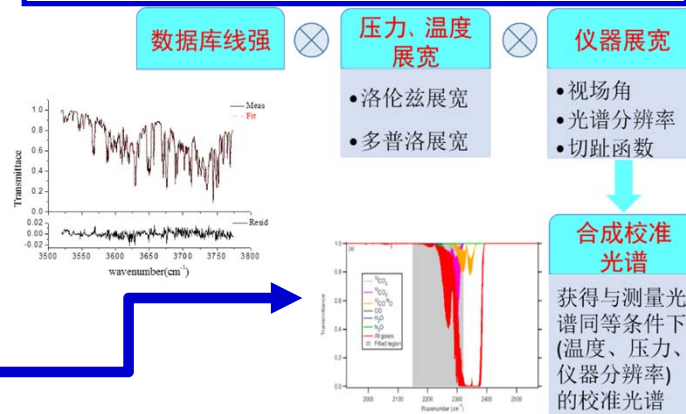
建立600种组分的标准光谱数据库



创建有毒有害气体高温光谱测量数据库

- ◆ 数据库覆盖了600多种气体成分及VOC组分的红外光谱定量数据；
- ◆ 适合FTIR在不同测量条件和参数（光谱分辨率、视场角、切趾函数）下进行定量分析，并实现对测量组份的温度和气压修正；

多组分定量分析方法



- ◆ 有效克服仪器状态变化导致的测量误差；
- ◆ 抗干扰性好，对多组分混叠条件下的多组分定量分析具有显著的效果。在阴雨天气可以正常使用

傅里叶变换红外光谱监测技术体系

- ◆ 工业园区有毒有害气体全方位监测技术系统
- ◆ 碳中和目标下的温室气体与碳同位素比值高精度检测系统
- ◆ 工业燃烧过程高温气体在线监测技术系统
- ◆ 国防和公共安全气体检测技术
- ◆ 半导体行业电子特气检测系统
- ◆ 实验室傅里叶变换红外光谱仪



基于FTIR技术的硬件系统



报告提纲



1

傅里叶变换红外光谱技术研究

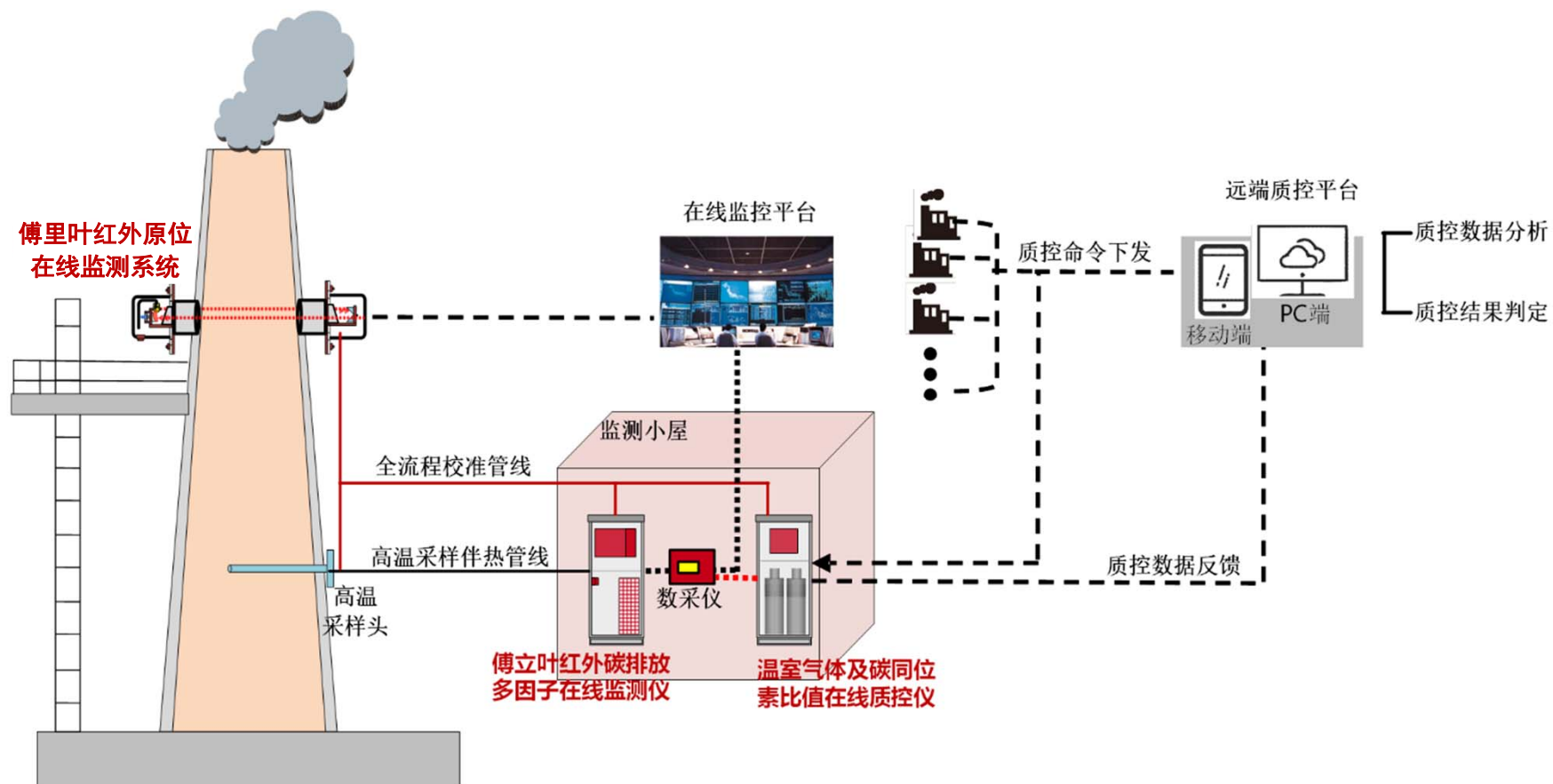
2

固定污染源在线监测技术应用

3

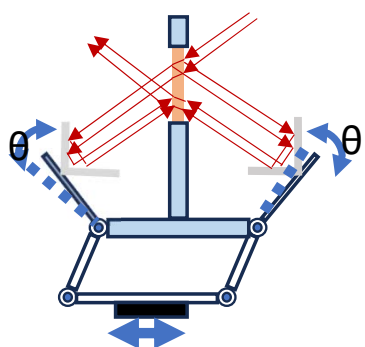
移动污染源在线监测技术应用

固定源污染气体排放在线监测技术体系



固定源污染源抽取式FTIR在线监测

研制固定源多因子碳排放监测设备



研制双角镜干涉仪，提高恶劣环境下的适用性

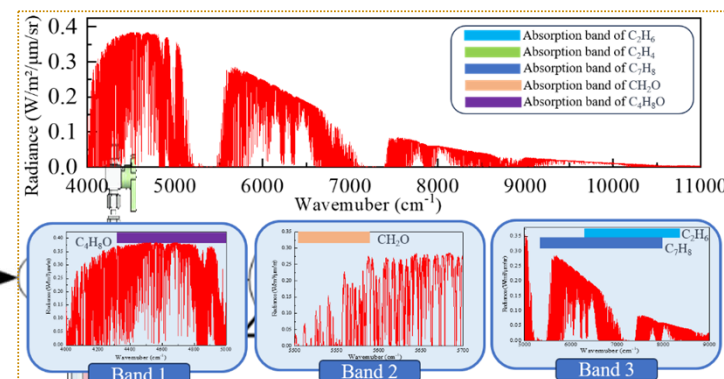


- ◆采用壳体与反射镜一体化设计，解决膨胀系数不一致导致**高温下光路偏移**的问题
- ◆特殊保护金膜和内腔式气路，**减少镜面污染**

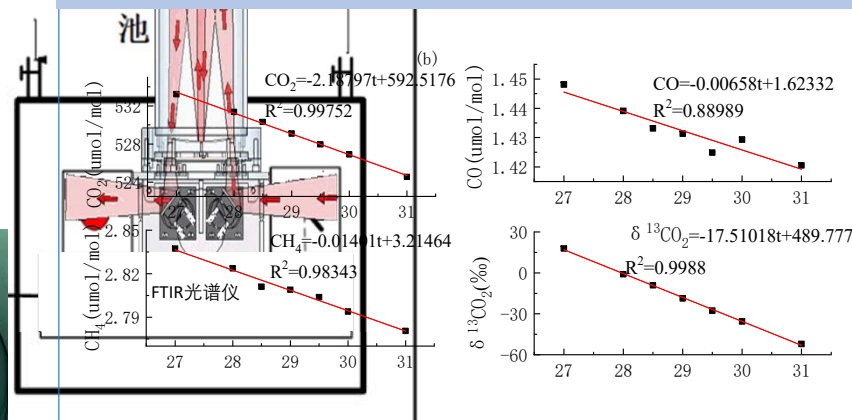
设计抗腐蚀性高温气体池，提高长期稳定性

技术指标	美国MKS	加拿大ABB	自研仪器
气体池光程	5.11m	3.2m	10.4m
气体池温度	180-220℃	150-200℃	180-250℃
测量因子	CO ₂ 、CO、CH ₄ 、SO ₂ 、HCl、HF、NO _x 、HCN、SO ₂ 、HCl、HF、NO ₂ 、NO、NO ₂ 、HCN、SO ₃ 、NH ₃ 、SO ₃ 、CH ₂ O	CO ₂ 、CO、CH ₄ 、SO ₂ 、HCl、HF、NO ₂ 、NO、NO ₂ 、HCN、SO ₃ 、NH ₃ 、NO、NH ₃ 、N ₂ O	CO ₂ 、CO、CH ₄ 、SO ₂ 、HCl、HF、NO ₂ 、NO、NO ₂ 、HCN、SO ₃ 、NH ₃ 、N ₂ O、δ ¹³ CO ₂
低量程	CO ₂ : 0~25%; CO: 0~75ppm; CH ₄ : 0~15ppm;	CO ₂ : 0~5%; CO: 0~75ppm; CH ₄ : 0~7.5ppm;	CO ₂ : 0~25%; CO: 0~100ppm; CH ₄ : 0~15ppm; δ ¹³ CO ₂ 值: 15~-45‰
测量精度	CO ₂ : 250ppm; CO: 0.5ppm; CH ₄ : 0.3ppm;	< 2%FS	CO ₂ : 1ppm; CH ₄ : 0.1ppm; CO: 0.5ppm; δ ¹³ CO ₂ 值: ±2‰

构建多因子高精度定量反演算法

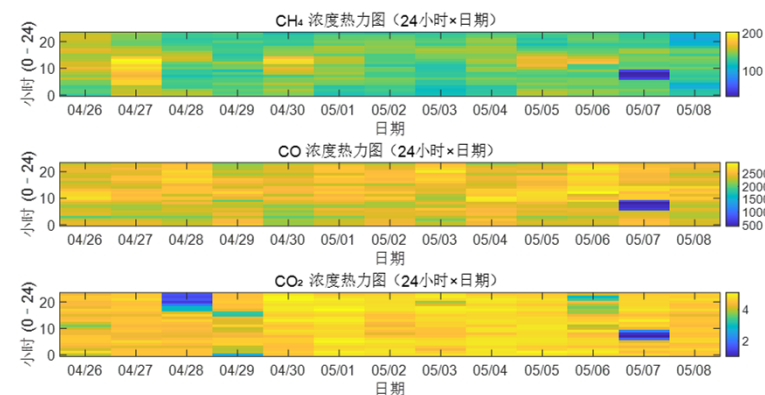
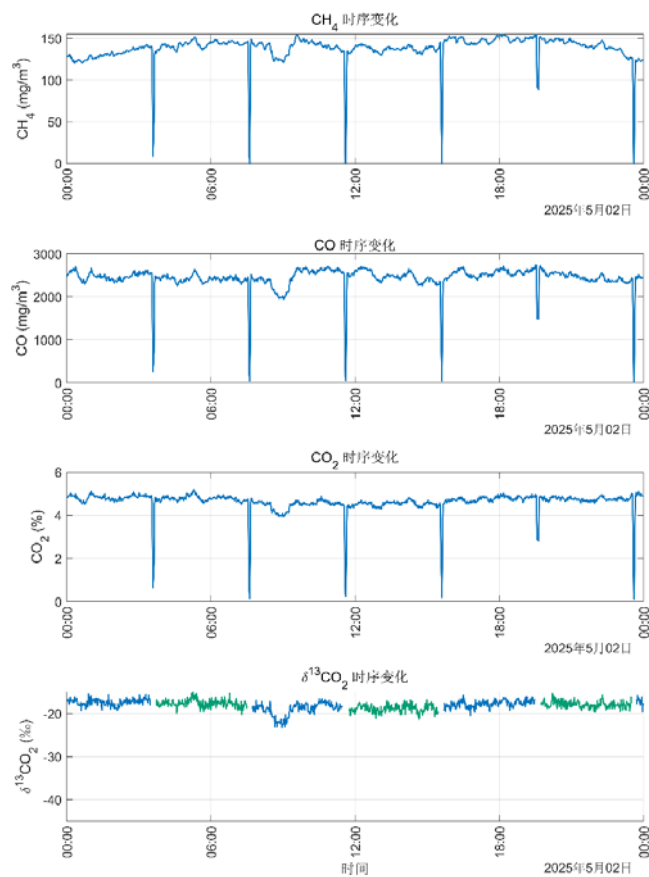
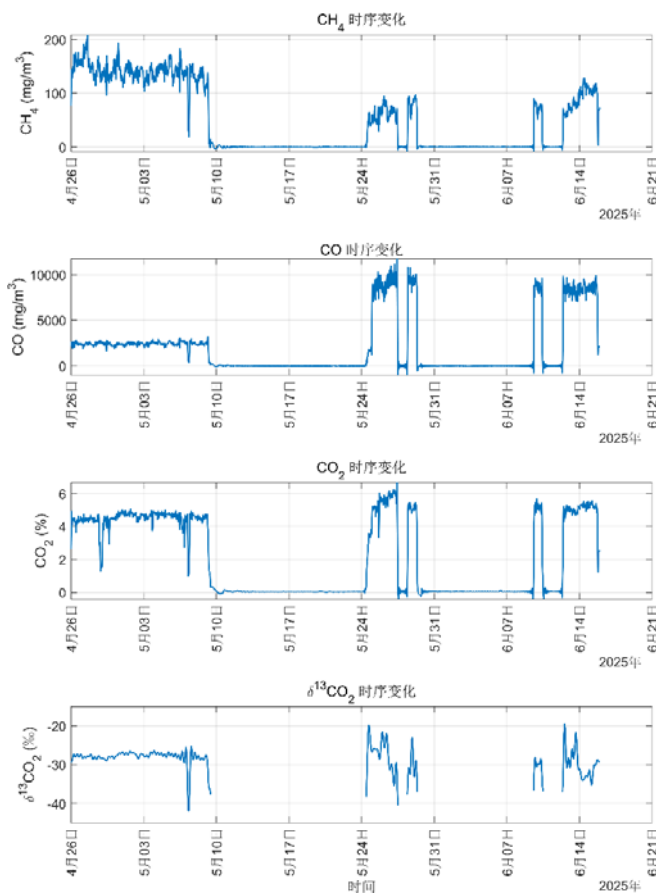


开发基于数字合成校准光谱技术的反演算法

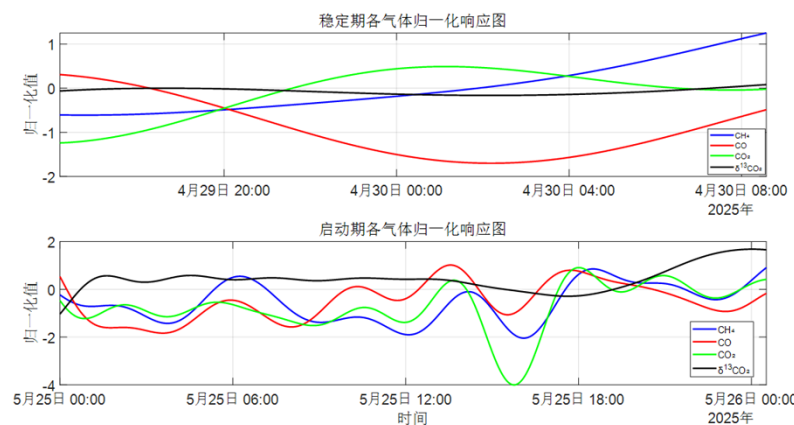


构建环境参数与误差修正算法模型

固定源污染源抽取式FTIR在线监测



日变化热力图

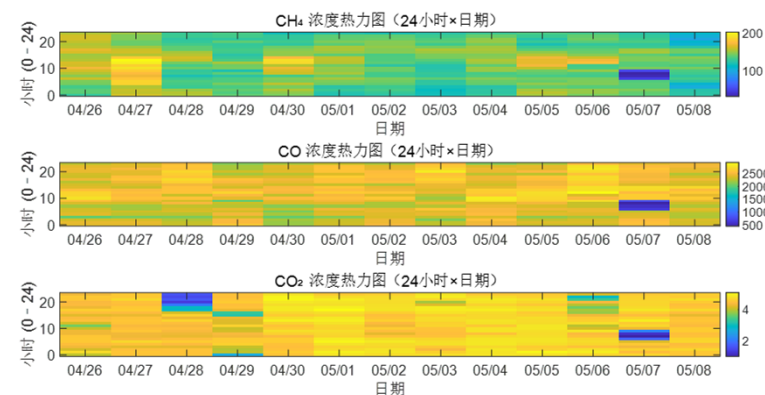
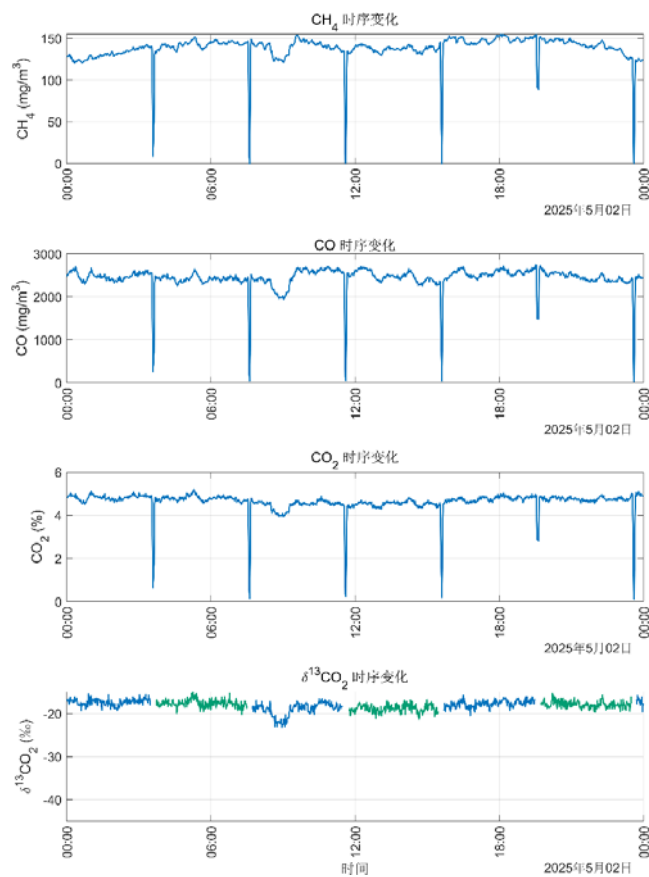
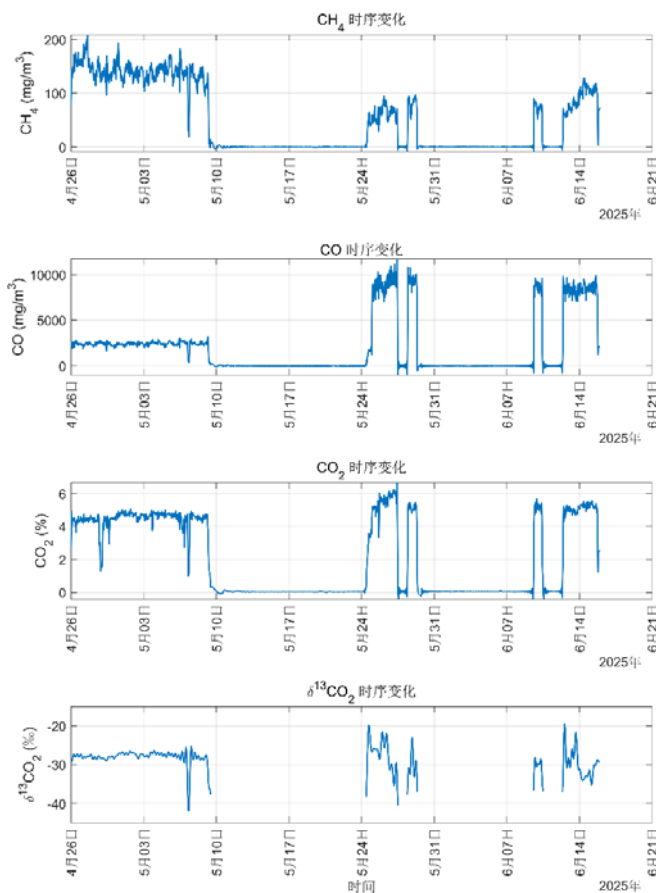


1号设备（烧结塔站点）连续观测数据

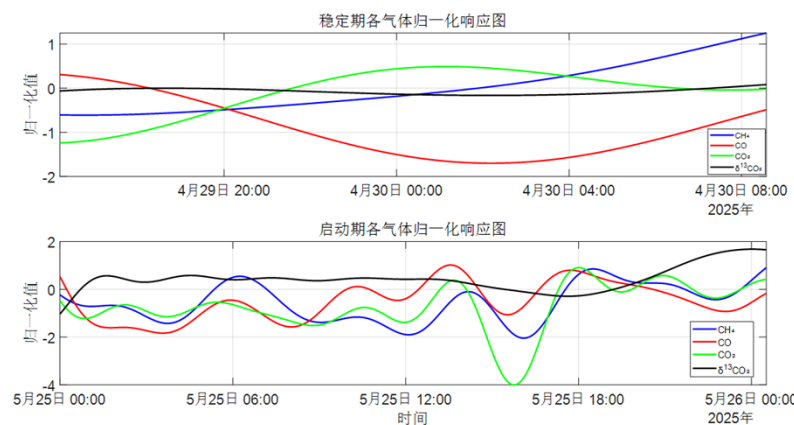
1号设备（烧结塔站点）受自动校准影响

不同阶段的各组分归一化响应图

固定源污染源抽取式FTIR在线监测



日变化热力图

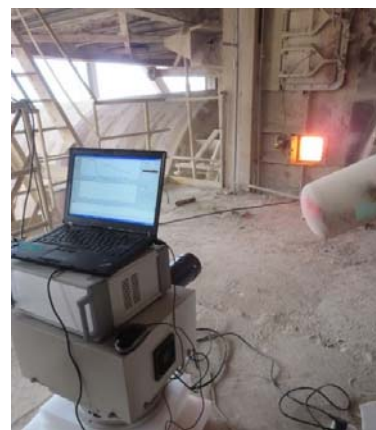
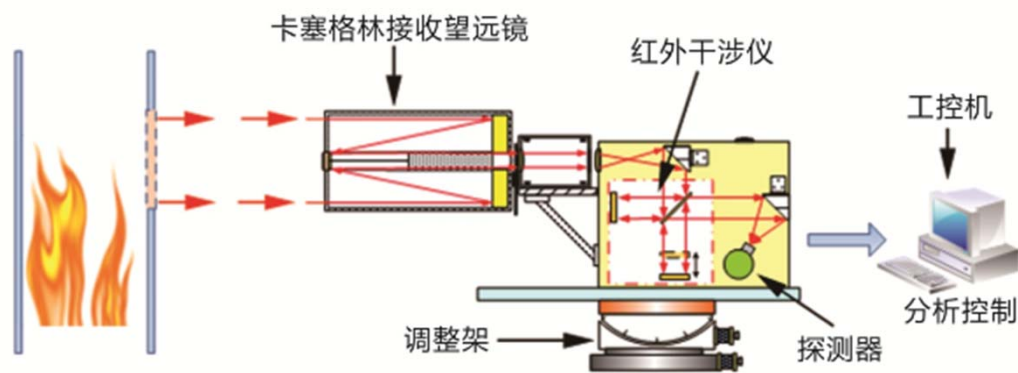


1号设备（烧结塔站点）连续观测数据

1号设备（烧结塔站点）受自动校准影响

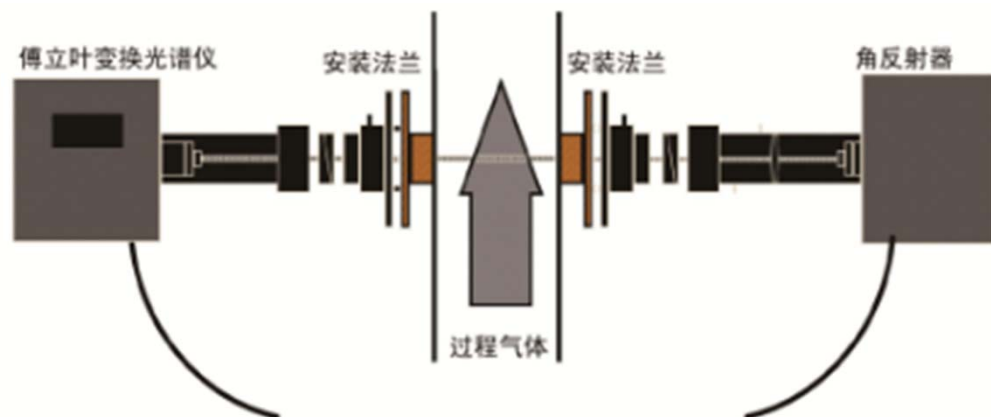
不同阶段的各组分归一化响应图

傅里叶红外原位在线监测系统



◆ 通过对窑尾温室气体的在线测量，掌握温室气体排放情况，同时还为“风煤比”调控提供数据支撑。

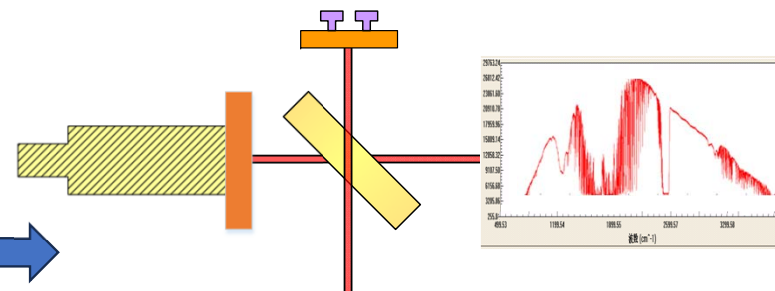
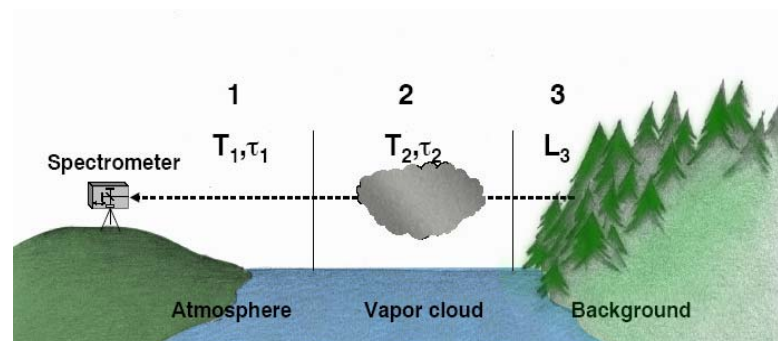
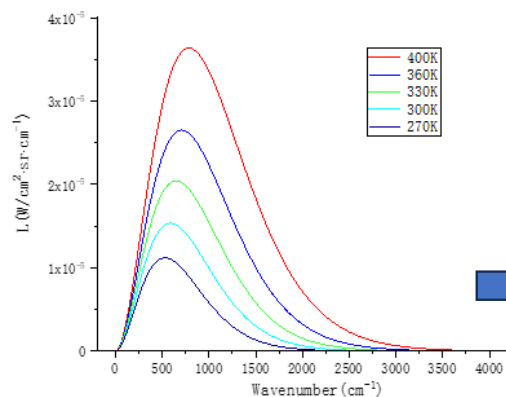
水泥转炉窑尾温室气体在线监测原理及现场监测图



◆ 通过对冶炼炉内温室气体的在线监测，掌握温室气体排放情况，同时还为冶炼终止判断提供数据支撑。

含砷精金矿温室气体在线监测原理及现场监测图

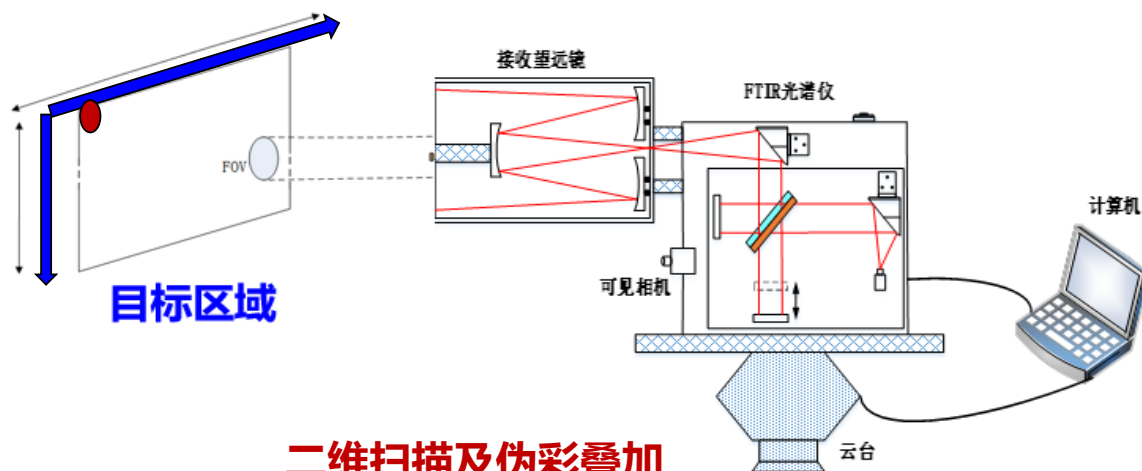
傅里叶红外被动遥测系统



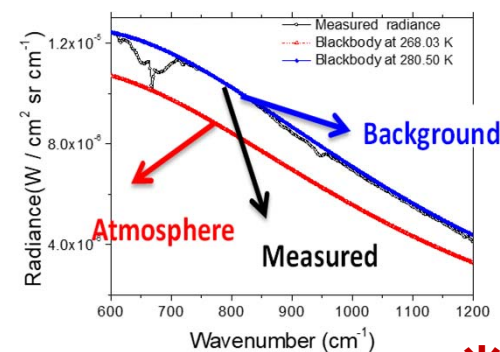
黑体辐射: $B(\nu, T) = \frac{C_1 \nu^3}{\exp(\frac{C_2 \nu}{T}) - 1}$

三层辐射传输模型: $\tau_{gas} = \frac{L - B_{gas}}{L_{bg} - B_{gas}}$

光谱复原: $B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta) D(\delta) \cos(2\pi \nu \delta) d\delta$



二维扫描及伪彩叠加



光谱解析

傅里叶红外被动遥测系统



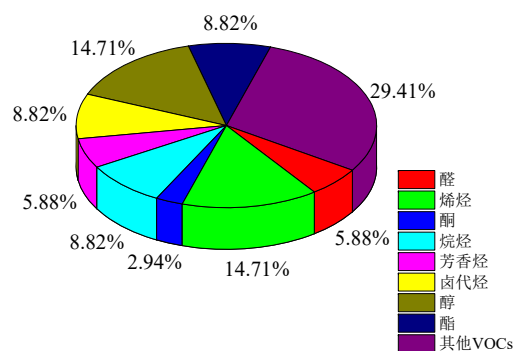
北京石油化工学院监测点



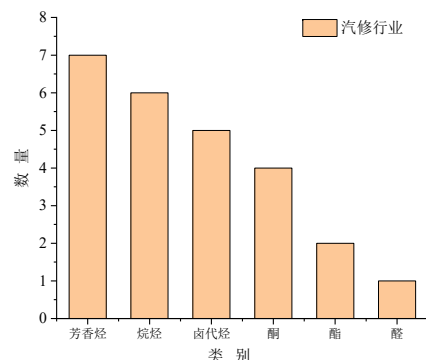
生物制药基地监测点



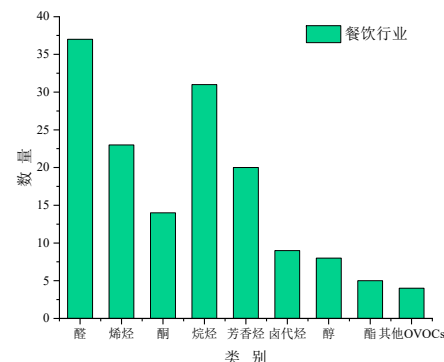
被动FTIR遥测系统平台



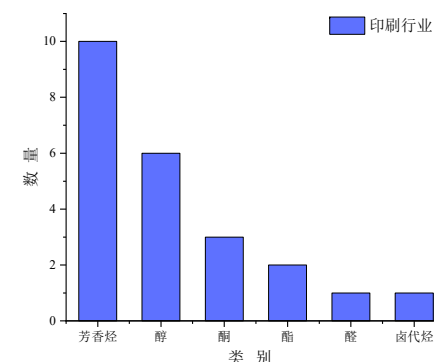
生物医药基地VOCs种类占比



石化学院汽修行业VOCs种类数量

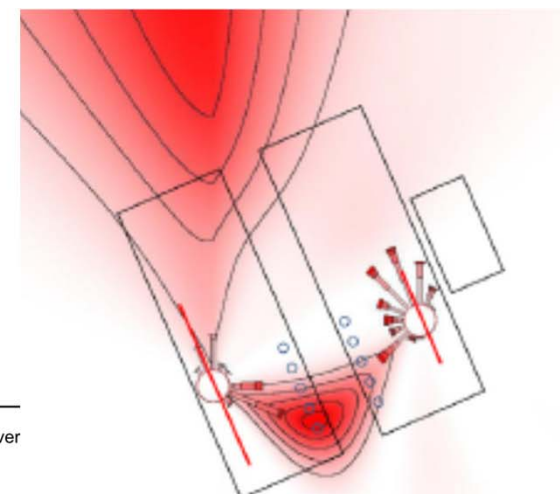
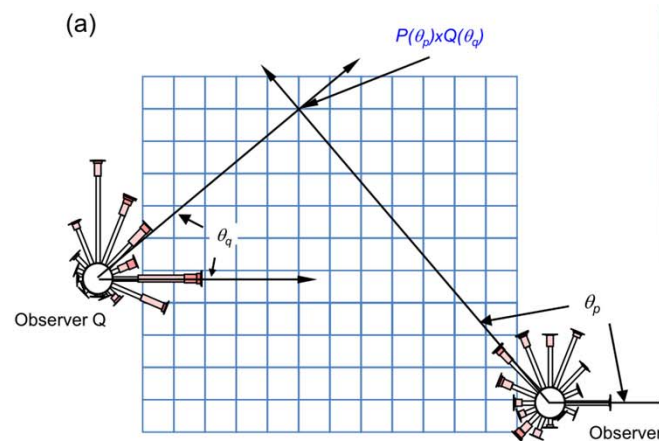
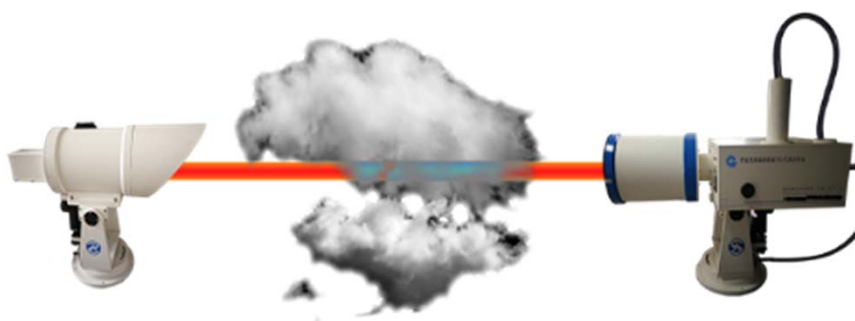
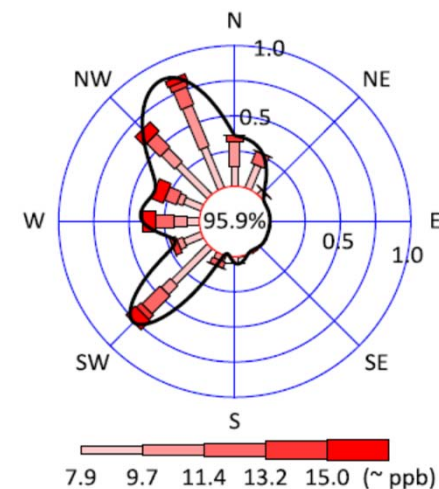
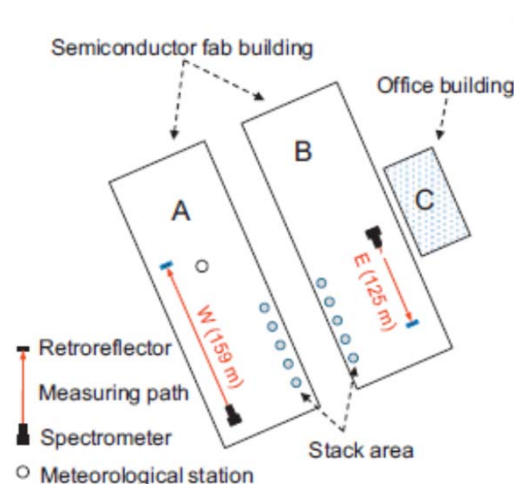
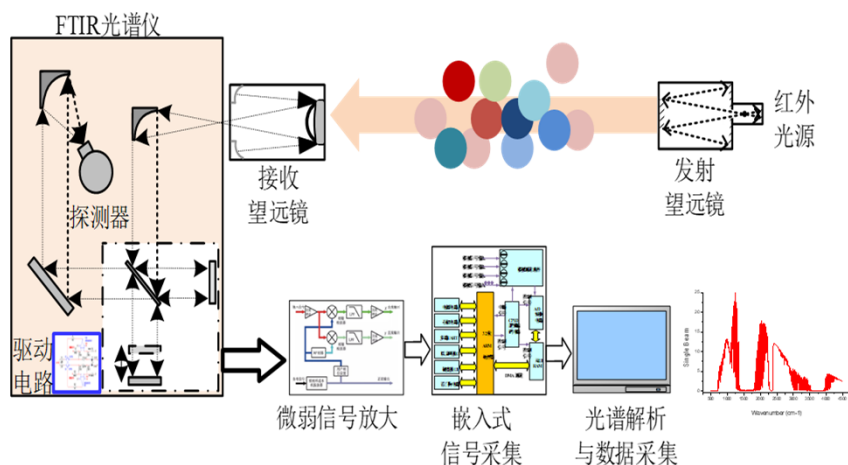


餐饮行业VOCs种类数量

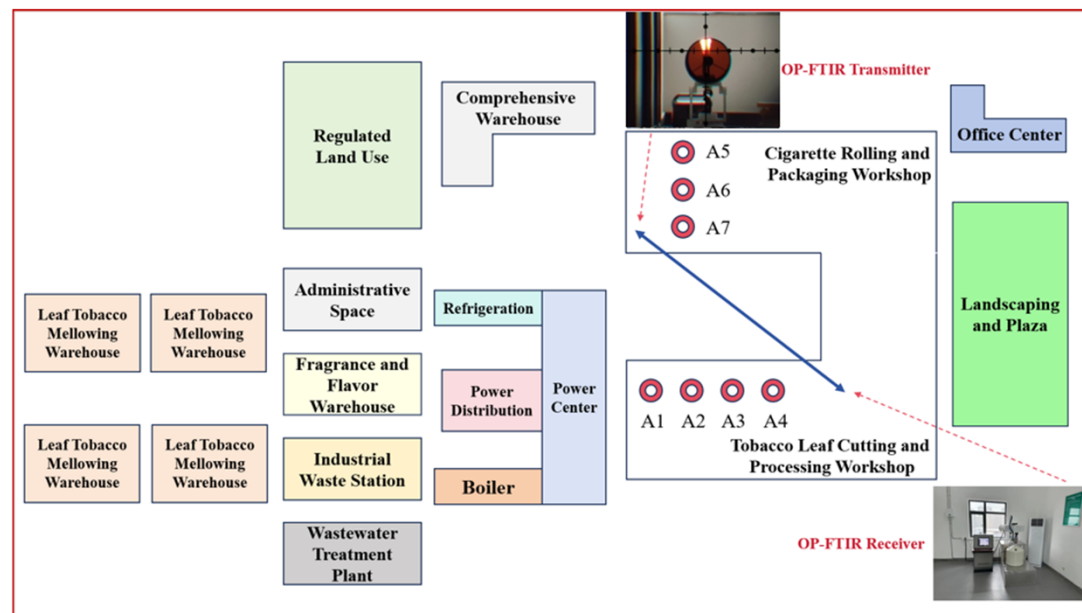
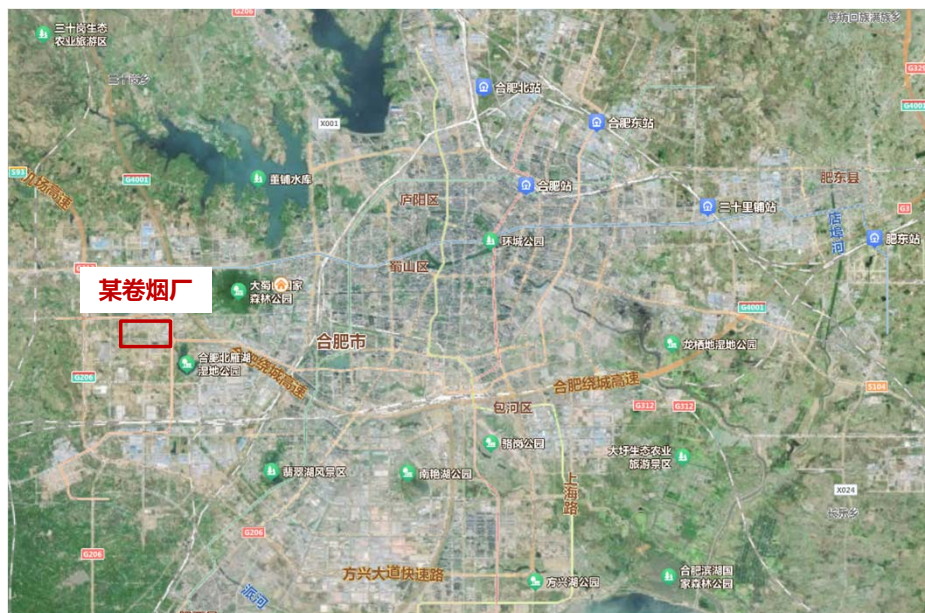


印刷行业VOCs种类数量

开放光路面源排放VOCs气体分析仪

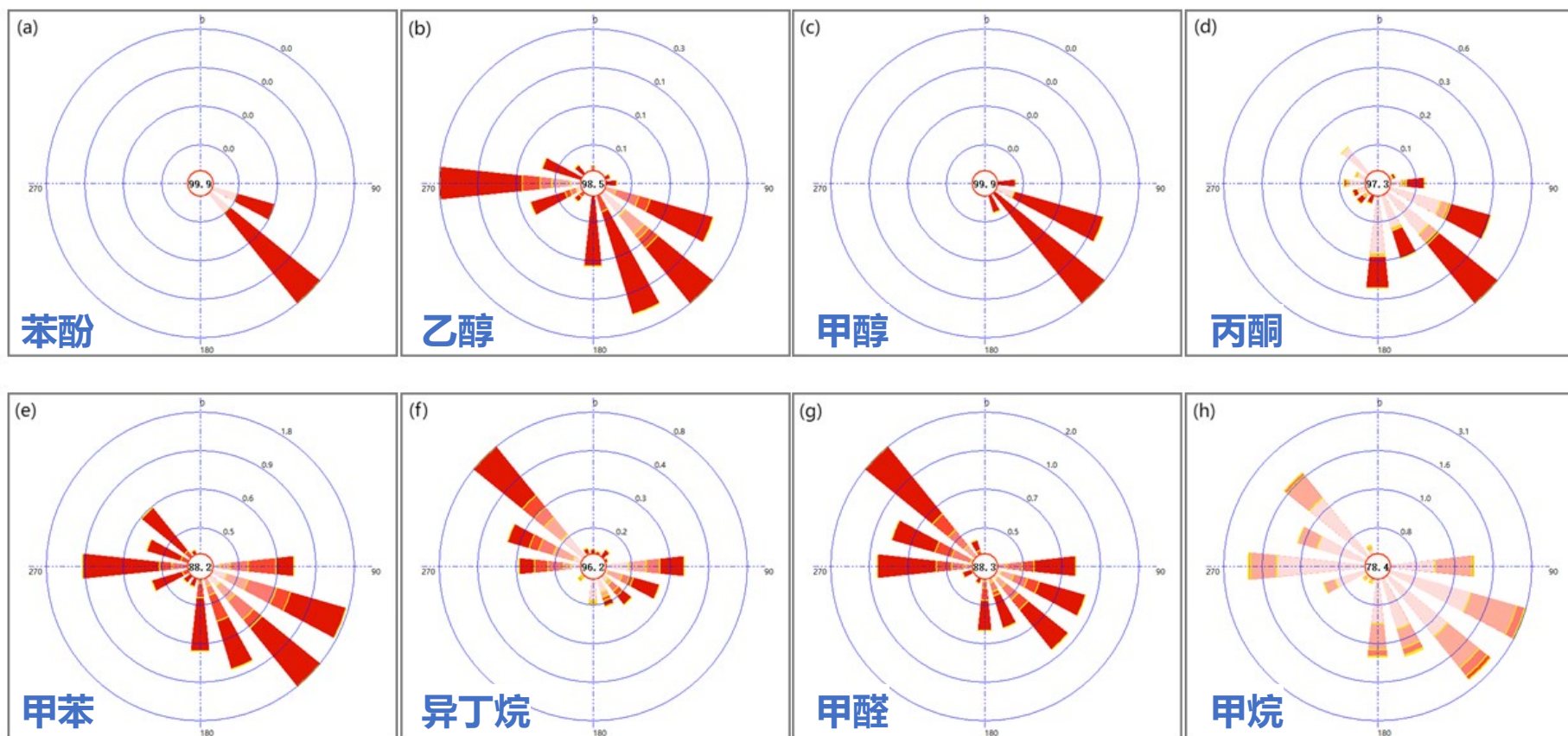


开放光路面源排放VOCs气体分析仪



- 该卷烟厂位于合肥市区西部，周边以工业工业建筑和道路为主，绿地和水体较少；
- 厂区内主要包括制叶丝和卷接包两个车间。两个生产车间楼顶有七个集中排放口（A1~A7），开放光路距离地面高度为20m，有效光程为95m。

开放光路面源排放VOCs气体分析仪



- 苯酚、乙醇、甲醇、丙酮、甲苯和甲烷这六种污染物的来源方向比较一致，均主要来自生产车间，乙醇主要来自于醇化库的跑冒滴漏现象，异丁烷主要来自西北方向的储罐或使用环节，甲醛主要与西北方向卷烟原料的存放和前处理等工序有关。



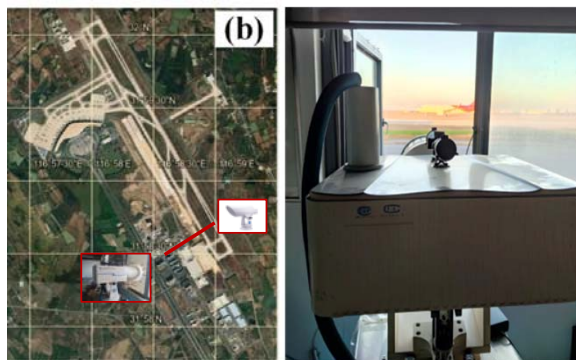
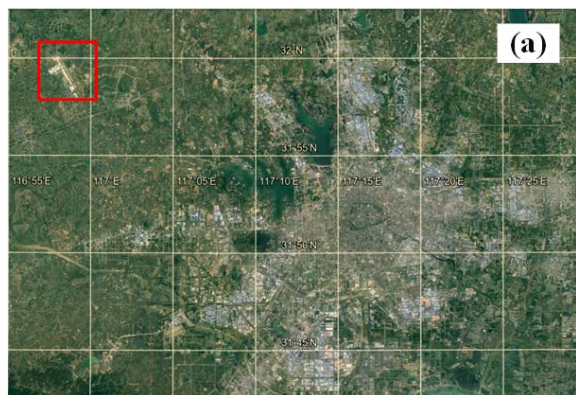
报告提纲



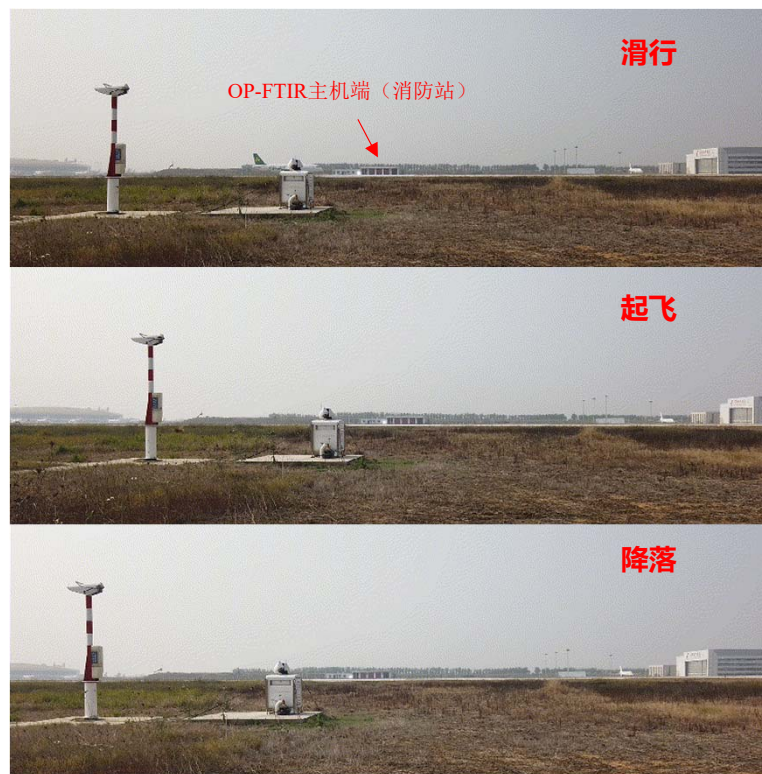
- 1 傅里叶变换红外光谱技术研究
- 2 固定污染源在线监测技术应用
- 3 移动污染源在线监测技术应用

飞机尾气在线监测分析

- 设计研发大口径高光通量光机结构，解决**长距离 (0-1200m)** 微弱红外信号探测难题，开发了基于等效时钟计数法的**扫描速度自适应调节**模块，实现典型工况下飞机排放高灵敏、快速测量。



OP-FTIR安装位置

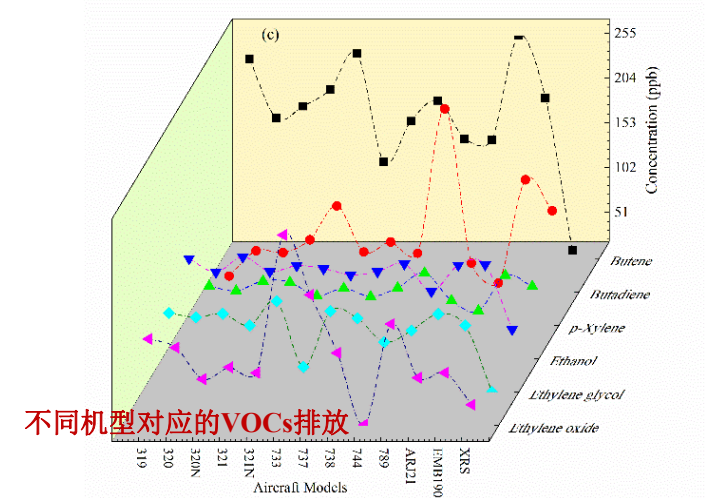
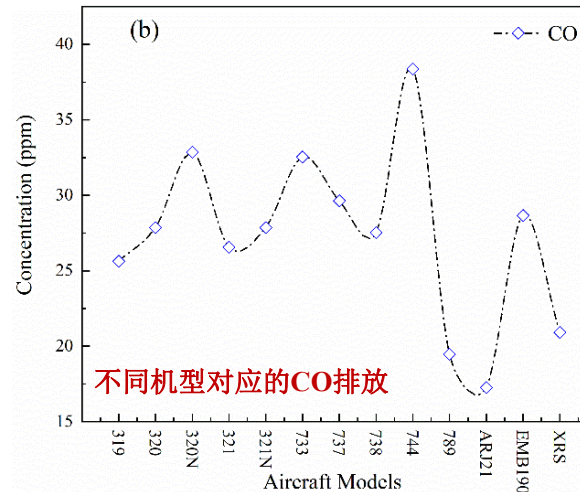
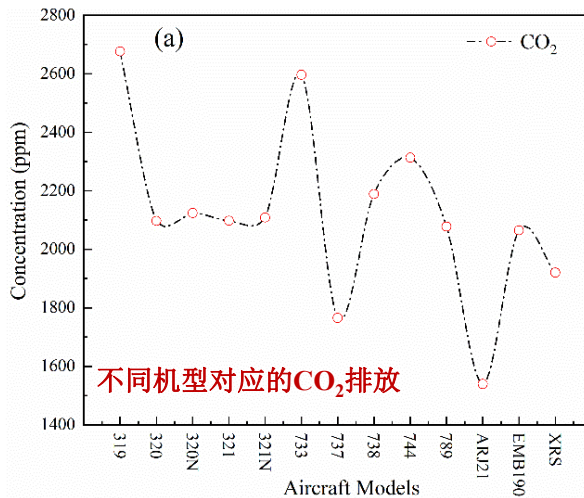


合肥新桥机场试验现场

主要组分	检出限 @1000m	准确度
二氧化碳	53.25ppb	0.24%
一氧化碳	21.64ppb	0.87%
丙烯	11.53ppb	1.51%
乙烯	7.76ppb	0.42%
苯	35.25ppb	1.04%
1,3丁二烯	8.41ppb	1.13%
二甲苯	12.8ppb	1.36%
乙醇	13.12ppb	1.42%
乙二醇	15.34ppb	1.72%
环氧乙烷	7.62ppb	0.91%

飞机尾气在线监测分析

不同型号飞机与CO₂、CO和VOCs排放相关性分析



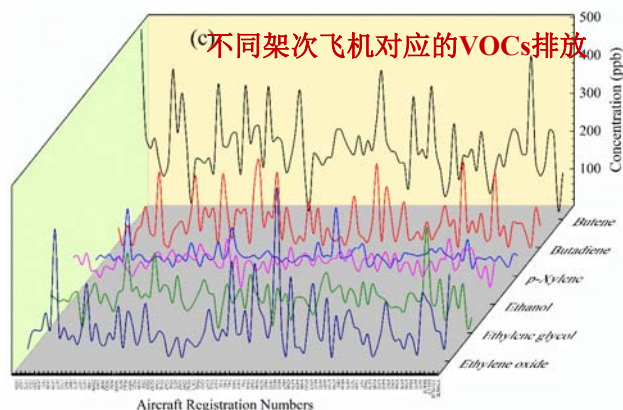
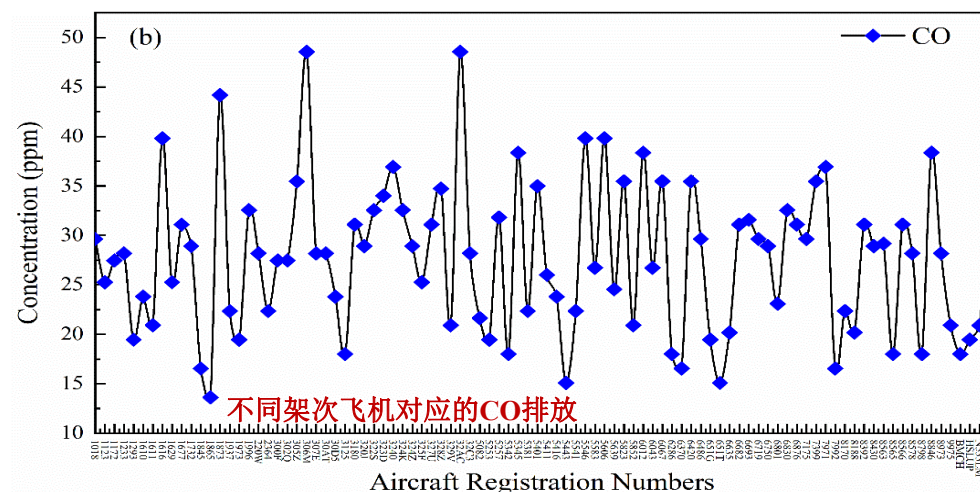
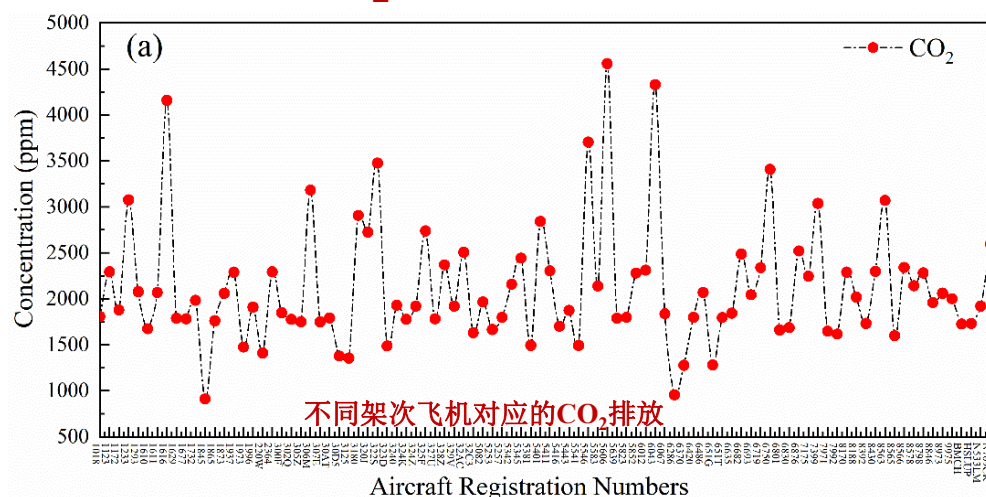
排放预测模型与不同机型排放确定系数

Component	CO ₂	CO	C ₄ H ₈	C ₄ H ₆	C ₈ H ₁₀	C ₂ H ₆ O	C ₂ H ₆ O ₂
R ²	0.042	0.080	0.104	0.179	0.061	0.087	0.073

- 分析了不同型号飞机的排放情况，每个型号的排放值取该型号所有飞机监测数据的平均值
- 排放预测模型与不同机型排放确定系数较低，说明仅依赖机型不能充分解释排放浓度的变化情况

飞机尾气在线监测分析

不同架次飞机与CO₂、CO和VOCs排放相关性分析



排放预测模型与不同飞机架次排放确定系数

Component	CO ₂	CO	C ₄ H ₈	C ₄ H ₆	C ₈ H ₁₀	C ₂ H ₆ O	C ₂ H ₆ O ₂
R ²	0.67	0.62	0.75	0.80	0.76	0.61	0.77

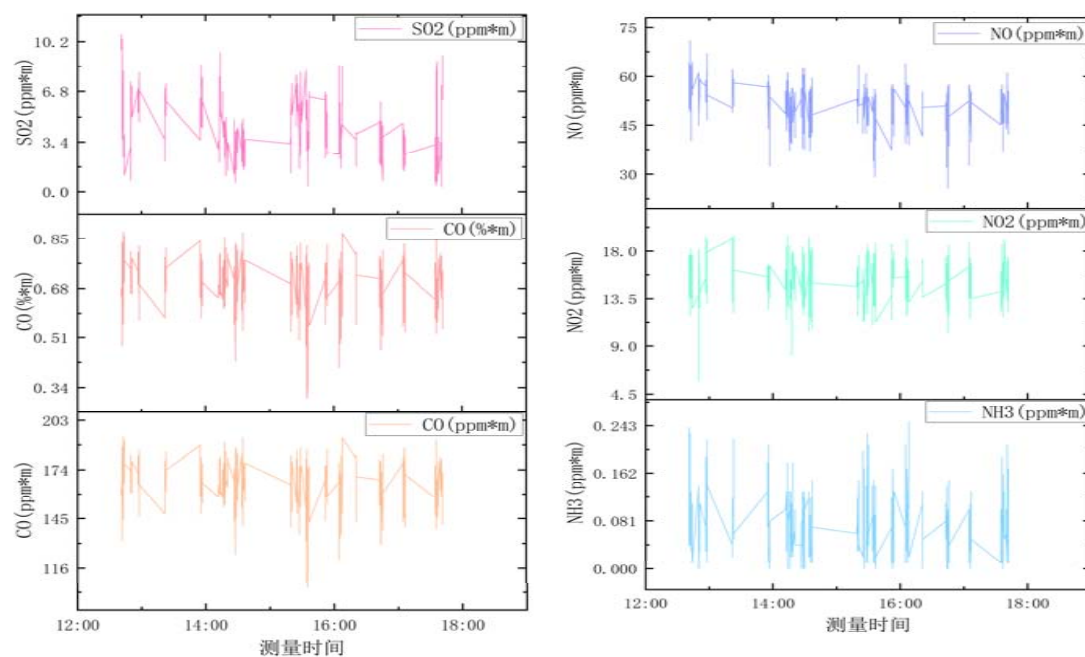
- 基于飞机注册号的污染物浓度变化确定系数明显高于基于飞机型号确定系数，说明飞机污染物排放的个体差异较大，研究飞机污染物排放情况，不能仅考虑机型，要综合考虑多种因素。

船舶尾气被动遥测

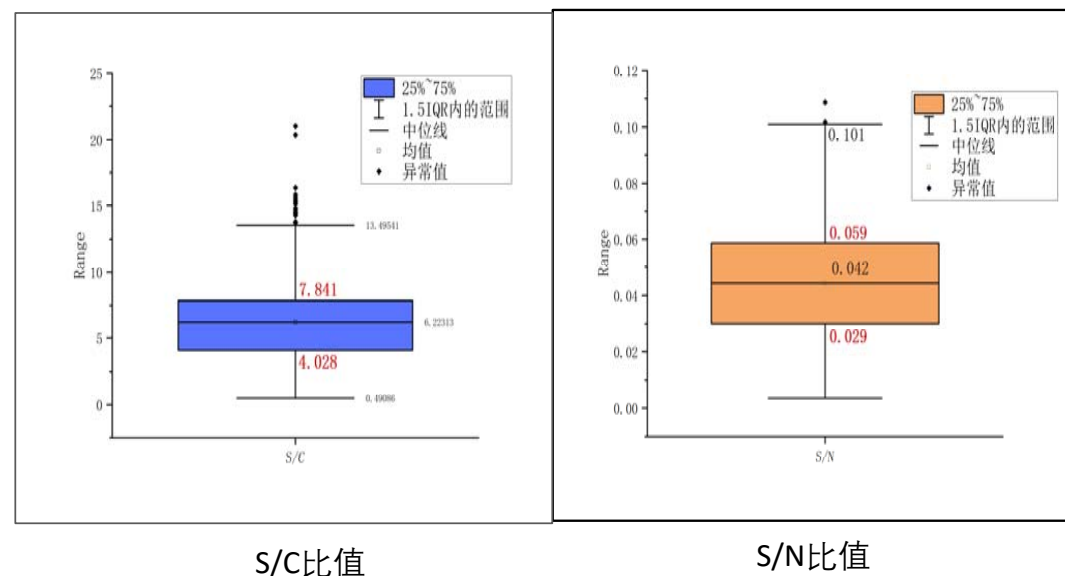


船舶尾气被动遥测

◆2025.8.1船舶有效测量数据时序图及S/C,S/N比值



船舶排放污染气体变化时序图



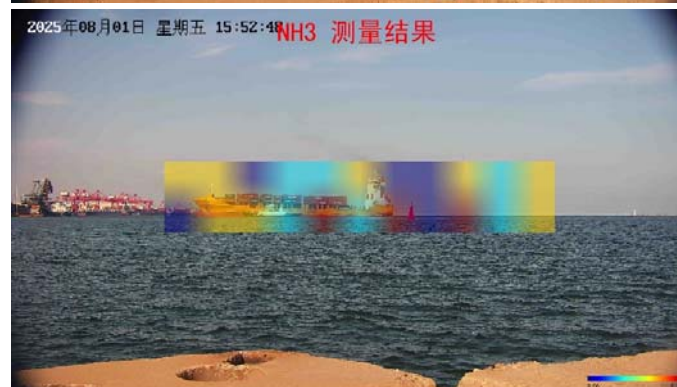
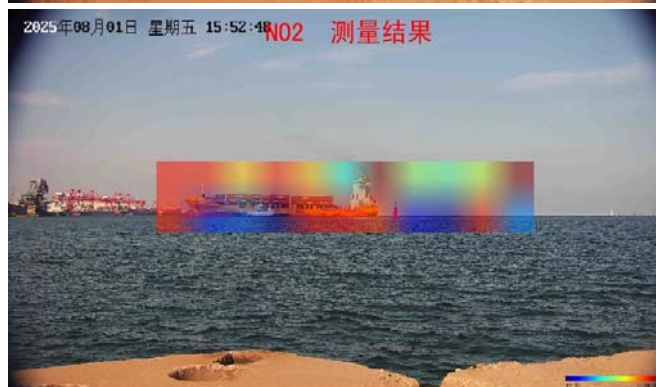
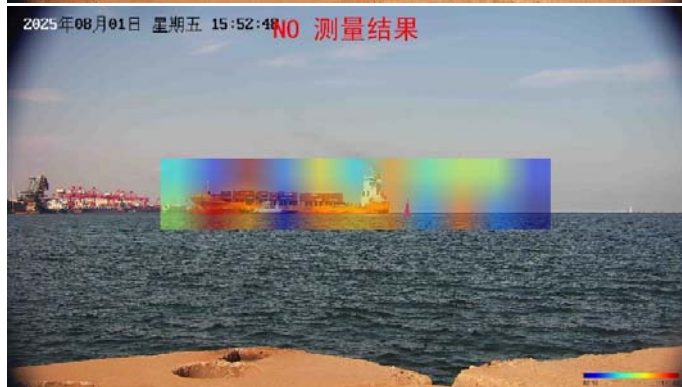
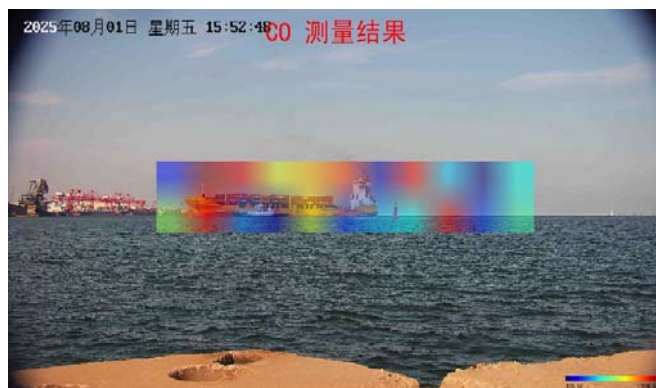
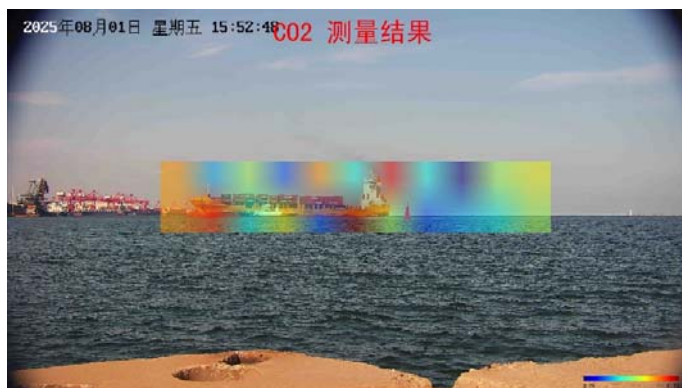
船舶排放S/C,S/N比值箱式图

◆ 船舶尾气中 SO₂、NO_x 等污染物浓度波动明显，S/C 与 S/N 比值分布稳定在典型区间

船舶尾气被动遥测

◆2025.8.1典型船舶测量分布

船舶名称：唐山港集2，MMSI:477057600,2.5节



船舶尾气被动遥测

◆唐山港集2不同状态和测量环境对比

测量组分	8.1日低速锚泊	8.2日中速引航
风场信息	南风2-4级	东南风1-2级
CO ₂	0.65	0.92
CO	170.79	153.42
SO ₂	12.24	17.88
NO	97.6	181.9
NO ₂	18.76	21.86
S/C	18.83	19.43

$$EF_{SO_2} (g/kgfuel) \approx K_{SC} \times \frac{\Delta SO_2}{\Delta CO_2} = 1000 \omega_c \frac{M_{CO_2}}{M_C} \frac{M_{SO_2}}{M_{CO_2}} = 1000 \omega_c \frac{M_{SO_2}}{M_C}$$

$$EF_{SO_2} (g/kg) \approx 1.392 \times (S/N) \times EF_{NO_x}$$

$$\omega_s(\%) \approx \left(\frac{\Delta SO_2}{\Delta CO_2} \right) \frac{M_S}{M_C} \omega_c = 100 \times \frac{S}{C} \times 2.669 \times \omega_c$$

ω_c 为船用油典型含碳质量分数,
[0.84,0.88],典型值为**0.865**;

根据实测结果计算SO₂,NO_x排放因子和燃油含量

- ◆ 前后两天不同风速对同一艘船不同状态的测量结果对比看出, 高风速下整体浓度水平低于低风速情况, 主要是因为**高风速造成烟羽扩散严重**; 但是锚泊时CO高于中速引航状态, 主要是由于**低速情况时发动机燃烧效率低造成**;
- ◆ 同一艘船S/C比变化不大, 说明前后两天该船的燃油一样。

船舶尾气被动遥测

◆各测量船舶状态信息及S/C,S/N比值

	测量时间	船舶名称	船舶MMSI号	信息 (长、宽、Cm)	船舶状态		S/C	S/N
8月1日	13:00	金诚19	413377040	180, 26	6节, 引航, 靠泊		10.277208	0.100143
	13:20	远达16	413224180	126, 21	8.3节, 引航, 靠泊		8.2054819	0.06441
	14:00	TANGSHANGGANG JI1	477045600	127.95, 20.6	10节, 引航, 靠泊		3.7743764	0.040326
	14:25	GLORY STAR	563093800	109.47, 16.6	7节, 引航, 靠泊		7.4497356	0.084374
	15:30	延展92	413348930	182, 30	4节, 靠近码头, 泊位操作		7.6990109	0.069874
	15:50	TANGSHANGGANG JI2	477057600	129.6, 20.6	2.5节, 锚泊		5.9166191	0.069795
	16:05	轩祥3	413368680	159, 24	3.5节, 靠近码头, 泊位操作		6.9993104	0.060956
	16:20	CHANGAN RUN	414885000	200, 33	5节, 靠近码头, 泊位操作		4.7685718	0.05458
	16:40	HUA LU	413296170	60.5, 16	10节, 引航, 靠泊		5.1910588	0.047151
	17:00	纵横102	413315780	110, 27	7节, 引航, 靠泊		8.5981159	0.082533
	17:40	纵横101	413315510	110, 27	6节, 引航, 靠泊		13.96	0.0524
	9:58	长亮海 CHANG LIANG HAI	413383490	187.5, 31	4.3节, 靠近码头, 泊位操作		13.74	0.0526
	10:18	万铭文明 WAN MING WEN MING	413268160	183.18, 29.8	4.1节, 靠近码头, 泊位操作		10.12989	0.040494
	10:47	恒誉01 HENG YU 01	414791000	189.99, 32.26	3.6节, 靠近码头, 泊位操作		19.7276	0.096804
	10:55	锦丰盛 JinFengSheng	412359010	99.8, 16.2	5.8节, 靠近码头, 泊位操作		15.99468	0.061933
	11:18	唐山港集2 TANG SHAN GANG JI2	477057600	129, 20	10.1节, 引航, 靠泊		19.43	0.0877
	11:42	德滋 DEZI	413021290	42.15, 11.4	9.7节, 引航, 靠泊	拖轮	3.41342	0.012728
	11:46	YASA FORTUNE	538002565	229, 32	5.5节, 靠近码头, 泊位操作	系泊	15.73857	0.071617
	12:05	永兴699 YONG XING 699	413702640	46.5, 8.6	8.0节, 引航, 靠泊	防污船	18.6545	0.080345
	12:07	豪通7 HAO TONG 7	413498510	55, 9	7.1节, 引航, 靠泊	油轮	15.99468	0.061933
	12:11	远航供1 YUAN HANG GONG 1	413257980	47.5, 7.4	7.3节, 引航, 靠泊		13.14588	0.049655
	12:48	华元505 HUA YUAN 505	414991000	199.95, 32.26	6.1节, 引航, 靠泊		11.12449	0.04098
	12:57	SANIA	477131500	190, 32	7.1节, 引航, 靠泊		20.1805	0.095197
	13:15	AN HAI VINCENT	574004590	179, 28	6.3节, 引航, 靠泊		14.14025	0.068475
8月2日	13:31	正和7 ZHENG HE 7	413359650	147.02, 21	5.7节, 靠近码头, 泊位操作		12.948	0.053535
	13:44	天祥61 TIAN XIANG 61	413558000	140, 19.8	6.2节, 引航, 靠泊		6.36559	0.026931
	13:56	鑫合泰8 XIN HE TAI 8	413574130	166.8, 25.3	6.6节, 引航, 靠泊		13.14169	0.051739
	14:10	IONA ISLAND	477732100	180, 30	5.2节, 靠近码头, 泊位操作	其他	20.09691	0.102183
	14:51	长安润 CHANG AN RUN	414885000	199.98, 32.5	3.6节, 靠近码头, 泊位操作		15.66616	0.061395
	15:04	JIN HUA SHUN	352005434	122, 18	4.1节, 靠近码头, 泊位操作		22.64378	0.098277
	15:14	EASTERN GLAMOUR	477759600	250, 43	1.4节, 锚泊		15.24717	0.061802
	15:55	兴平 XING PING	477110900	117, 20	10.2节, 引航, 靠泊		19.94739	0.095477
	16:07	中潭海 ZHONGTANHAI	414470000	224, 32	6.5节, 引航, 靠泊		11.69146	0.047297
	16:30	GENCO ENDEAVOUR	538008118	292, 45	2.4节, 锚泊		16.6692	0.054058
	16:40	中燃11 ZHONG RAN 11	413272730	64.72, 11.2	4.0节, 靠近码头, 泊位操作	油轮	19.8452	0.092319
	16:43	豪通7 HAO TONG 7	413498510	55, 9	7.3节, 引航, 靠泊	油轮	13.63275	0.058226
	16:45	协海五洲 XIE HAI WU ZHOU	413292820	129.98, 20.6	4.3节, 靠近码头, 泊位操作		8.1745	0.029059
	16:53	永兴699 YONG XING 699	413702640	46.5, 8.6	5.5节, 靠近码头, 泊位操作	防污船	14.70453	0.061247
	17:34	银源89 YIN YUAN 89	413325210	147.59, 21	5.3节, 靠近码头, 泊位操作		15.82991	0.05414
	17:48	华东26 HUA DONG 26	413323590	133.75, 18.3	4.7节, 靠近码头, 泊位操作		10.37293	0.041806
	17:54	鸿瑞富 HONG RUI FU	413364470	67.58, 15	4.9节, 靠近码头, 泊位操作	其他, 锚泊	10.3272	0.037448

测量船舶、状态信息和测量计算的S/C,S/N比值

◆ JINHUASHUN(MMSI:352005434)船存在燃油含硫量 (0.53%) 疑似超标的情况;

◆ 为船舶燃料含硫量是否达标提供了有效的远程监测有段!



**面向红外光谱检测技术发展国际最前沿，
面向国家高端装备现代化重大战略需求，
面向红外光谱设备国产化全替代主战场！**

李相贤

研究员、硕士生导师

手机：15056921559

邮箱：lix@aiiofm.ac.cn

地址：合肥科学岛