

## 大气多参数激光雷达在化工园区的安全环保和碳监测中的应用

夏秋炜 章振 余赛芬 夏海云 潘凡峰

### Application of atmospheric multi-parameter lidar in safety, environmental protection and carbon dioxide monitoring in chemical industrial parks

Xia Qiuwei, Zhang Zhen, Yu Saifen, Xia Haiyun, Pan Fanfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20240068>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 大气气溶胶污染监测中应用的新型全天时户外型拉曼-米散射激光雷达系统

New all-weather outdoor Raman-Mie scattering lidar system used in atmospheric aerosol pollution monitoring

红外与激光工程. 2019, 48(7): 706001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0706001>

#### 亚稳态氦激光雷达的研制进展

Progress on developing metastable helium Lidar

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200323 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200323>

#### 天基大气环境观测激光雷达技术和应用发展研究

Technical and application development study of space-borne atmospheric environment observation lidar

红外与激光工程. 2018, 47(3): 302002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0302002>

#### 基于激光雷达的区域大气颗粒物探测

Detection of regional atmospheric particulate matter based on lidar

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200324 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200324>

#### 合肥上空中层大气密度和温度的激光雷达探测

Lidar measurement for atmospheric density and temperature in middle atmosphere over Hefei

红外与激光工程. 2017, 46(7): 730003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0730003>

#### 底层大气探测激光雷达国内研究现状与进展（特邀）

Research status and progress of Lidar for atmosphere in China (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20210032 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210032>

# 大气多参数激光雷达在化工园区的安全环保 和碳监测中的应用

夏秋炜<sup>1,2,3</sup>, 章 振<sup>1,2,3</sup>, 余赛芬<sup>1,2,3\*</sup>, 夏海云<sup>1,2,3</sup>, 潘凡峰<sup>1</sup>

1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏南京 210044;
2. 国家碳计量中心(福建), 福建南平 353011;
3. 福建瑞碳光电精密仪器有限公司, 福建南平 353011)

**摘要:** 化工产业是国家经济发展的基础,但其在促进经济发展的同时也面临着高碳排放、环境污染和安全风险等挑战。为了保障化工园区的平稳运行,团队研制了一套全光纤体制的 1.5  $\mu\text{m}$  大气多参数激光雷达系统,并应用于化工园区的污染强度、气体浓度、风场和降雨信息的监测和预警。该激光雷达系统集成了直接探测模块和相干探测模块,在直接探测模块中,基于扫描光源和超导纳米线单光子探测器进行气体浓度的监测。在相干探测模块中,基于对距离修正回波信号、载噪比和多普勒频移的分析获得颗粒物污染强度和风场分布;基于湍流动能耗散率和风廓线的速度梯度获得湍流和风切变信息;基于深度功率谱分析获得谱宽和偏度,用于区分风速和雨速,获得精准的降雨信息。大气多参数激光雷达分别在江苏省南京市江北新区和内蒙古自治区鄂尔多斯自治旗棋盘井镇进行外场实验,通过多次实验验证了该大气多参数激光雷达在化工园区进行环保、安全和精细化气象保障的能力。文中还进一步设计展望了该系统在化工园区探测多种危化气体浓度的潜力。

**关键词:** 激光雷达; 化工园区; 环境监测; 大气遥感

中图分类号: X851 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20240068

## 0 引言

化工产业在国民经济中占有重要地位。多年来,化工产业产值在全国 GDP 占比稳定在 20% 左右,是国家的支柱产业和基础产业,对国家经济增长、就业和工业发展起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。然而,化工产业的快速发展是把双刃剑,在促进经济发展的同时也面临着环境污染、资源消耗和安全风险等挑战<sup>[1]</sup>。

在日常运行中,化工企业往往面临着如何预防和治理环境污染的问题<sup>[2-4]</sup>。据不完全统计,2022 年国内发生化工企业泄漏和爆炸事故达 800 余起。事故的起因大多是因为仪器或管线老化和仓库内原料或者废料的不规范存放。化工企业泄漏和爆炸事故通常会导致严重的化工污染事件发生。化工园区的污

染具有高度复杂性和危险性,如果得不到快速有效处理,会引发严重的环境和安全隐患<sup>[2-3]</sup>。由于化工生产包含蒸馏、合成、萃取等诸多环节,并且各个流程都会有各种污染物产生,因而化工污染往往具有污染物种类多和浓度高的特点<sup>[2]</sup>,可能造成的危害也是多种多样<sup>[3]</sup>。例如,黄磷生产过程中产生的尾气包含 CO、H<sub>2</sub>S;炼焦生产过程中产生的废气包含 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和颗粒物。如果这些有毒有害和易燃易爆气体发生泄漏或者大量排放,必然会导致爆炸事故和环境污染,威胁居民生命健康安全<sup>[2]</sup>。以往的气体泄漏检测手段主要有负压波检测法<sup>[5-6]</sup>、超声检测法<sup>[7-8]</sup>、红外成像检测<sup>[9-10]</sup>、浓度检测法<sup>[11-13]</sup>、可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)<sup>[14-15]</sup>、傅里叶变换红外吸收光谱仪(FTIR)<sup>[16-18]</sup>和差分吸收光谱技术(DOAS)<sup>[19-21]</sup>等,但

收稿日期:2024-02-07; 修订日期:2024-03-15

基金项目:科技部重点研发计划项目(2022YFF0606400);国家自然科学基金项目(42305147);江苏省基础研究计划自然科学基金项目(BK20230428)

作者简介:夏秋炜,男,硕士生,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。

导师简介:夏海云,男,教授,博士,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。

通讯作者:余赛芬,女,讲师,博士,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。

这些方法都存在着抗干扰能力弱、灵敏度不足、探测范围受限和难以实现连续实时监测等问题<sup>[22-23]</sup>。同时,常规手段难以即时判定与伴热蒸汽混合的废气,并且难以评估有害气体飘入非监测区的危险性<sup>[2]</sup>。

除了对这些危险气体和污染物的监测十分必要外,近年来在环保领域,碳排放监测也显得越发重要。2020年,我国提出将“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的双碳目标承诺,这就需要不断削减社会的碳源排放量,而企业的低碳生产是减少碳排放的重要一环。目前,随着多颗携带碳监测载荷的卫星在轨运行,全球全天时的高精度二氧化碳浓度探测已经实现<sup>[24-25]</sup>;而多种点式碳监测设备的广泛应用<sup>[26-27]</sup>,也使得企业的有组织排放监测及其周边的无组织排放愈发准确。然而,这两种监测方式都无法同时实现对于中尺度区域的碳排放进行昼夜不间断的高时空分辨率高精度二氧化碳浓度实时监测<sup>[28]</sup>。

近年来,由于各种极端天气事件的频繁发生,化工企业如何平衡安全运转和快速发展也是亟待解决的问题<sup>[2-4]</sup>。例如,极端高温和暴雨事件造成设备老化,导致气体和液体存储装置泄漏或者爆燃;化工园区内大型施工受制于短临大风、雷阵雨等突发天气条件,产生大量的误工费。经济学领域的德尔菲气象定律指出,如果企业在气象信息上投资1元,便可获得98元的经济回报<sup>[29]</sup>。精细化气象保障不仅对于化工园区的安全运转尤为重要,也使得化工企业能够实现可持续发展。

因而,发展能对化工园区的污染强度、气体浓

度、风场和降雨信息进行高灵敏度、高稳定、大范围且昼夜连续监测的遥感技术尤为重要。

激光雷达具有高时空分辨率和可昼夜连续观测的特点,且能进行气溶胶<sup>[30-31]</sup>、气体浓度<sup>[28,32]</sup>和风场<sup>[33]</sup>探测,在大气环境和大气参数探测中具有独特的优势。1.5 μm 激光雷达凭借其人眼安全、全光纤体制、小型化、低功耗、高稳定的优势<sup>[30]</sup>,逐渐成为化工园区在安全环保领域开展监测的重要手段之一。目前,差分吸收激光雷达(DIAL)主要应用于多种温室气体<sup>[28]</sup>和危险气体浓度分布以及通量排放的探测<sup>[34]</sup>,而相干多普勒测风激光雷达(CDWL)则广泛应用于风场、气溶胶和降水等大气多参数探测<sup>[35-36]</sup>。

笔者团队搭建了一套集成了直接探测模块和相干探测模块的1.5 μm 大气多参数全光纤激光雷达系统,其中直接探测模块基于扫描光源和超导纳米线单光子探测器进行气体浓度的监测;相干探测模块用于获得颗粒物污染强度、风场和降雨信息。该大气多参数激光雷达在江苏省南京市江北新区和内蒙古自治区鄂尔多斯自治旗棋盘井镇进行了应用,实现了对化工园区的污染物排放监测溯源、气体遥感监测预警以及精细化气象保障。此外,该系统具备宽光谱探测的特点,文中展望了该系统进行多种危化气体浓度探测的潜力,有助于进一步保障化工园区安全。

## 1 系统和原理

### 1.1 系 统

图 1 为集成了直接探测和相干探测的大气多参

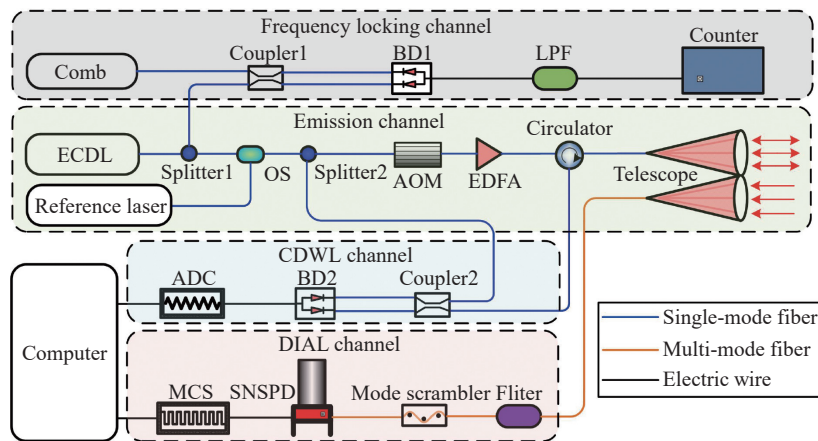


图 1 大气多参数激光雷达系统光路图

Fig.1 Schematic diagram of the atmospheric multi-parameter lidar system

数激光雷达系统,用于气溶胶、气体和风场同步探测,其系统参数如表 1 所示。

表 1 大气多参数激光雷达系统参数

Tab.1 System parameters of the atmospheric multi-parameter lidar

Parameter	Value
Wavelength range of ECDL/nm	1 530-1 620
Wavelength for CO <sub>2</sub> detection/nm	On: 1 572.335 Off: 1 572.454
Pulse energy/ $\mu$ J	80
Repetition frequency/kHz	10
Diameter of collimator/mm	80
Diameter of telescope/mm	70
Spatial resolution/m	120
Temporal resolution/min	1
Maximum detection range/km	6
Azimuth scanning range/(°)	0-360
Zenith scanning range/(°)	0-90
Detection efficiency of SNSPD	31.5% @ 1 572 nm
Active area diameter/ $\mu$ m	50
Pixel number	9
Dark count rate/cps	100
Responsibility of BD/A $\cdot$ W <sup>-1</sup>	1.0

出射光源使用一台可调外腔半导体激光器 (ECDL) 作为差分吸收的探测光源,根据不同的探测目标调谐至相应的 On 波长,另一台光纤激光器作为参考光源 (Off 波长)。将 ECDL 1% 的出射光接入锁定通道,与光学频率梳拍频,进而通过反馈回路锁定 ECDL 的出射频率,保证 On 波长的稳定性<sup>[37]</sup>。同时, ECDL 99% 的出射光和参考光接入光开关,采用时分复用技术交替地出射连续光。在经过分束器以后,其中的一小部分连续光用作相干探测的本振光,另一部分通过声光调制器 (AOM) 斩成脉冲光并频移 80 MHz,再利用掺铒光纤放大器进行放大,随后经过环形器,并通过望远镜发射到大气中。

接收系统包含直接探测模块和相干探测模块两部分。在直接探测模块,采用波分复用技术,后向散射信号通过双轴望远镜接收并耦合进一根多模光纤,经过光学滤波器滤波和光纤模式扰频器调制<sup>[38]</sup>,最后被大面元超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 探测,为

气体浓度探测提供高信噪比<sup>[37]</sup>。SNSPD 输出的模拟信号,放大后用自制电气模块偏置并读取。多通道定标器记录数字信号,并用计算机处理。在相干探测模块,后向散射信号使用望远镜耦合进环形器,然后和本振光混合,通过平衡探测器测量。模拟信号用模数转换器转变为数字信号,并用同一台计算机处理。

该套系统的气体浓度,污染浓度,风场和降雨等监测结果的准确性已经在之前的工作中进行了验证。在各项验证性实验中,由直接探测模块观测结果反演的气体浓度和原位仪器之间的误差统计为 2.1%<sup>[37]</sup>;由相干探测模块观测结果反演的颗粒物污染强度和当地国家监测站的 PM<sub>10</sub> 值变化趋势一致<sup>[31]</sup>,反演的风速风向信息和无线电探空仪观测结果的平均误差分别为 0.3 m/s 和 1.1°<sup>[36]</sup>,反演的降雨信息和微雨雷达观测的降雨现象一致性高<sup>[39]</sup>。

## 1.2 原理

相干探测模块通过对大气回波信号进行快速傅里叶变换,可以获得回波信号的功率谱信息。回波信号功率和噪声功率的比值表示为载噪比 (CNR),可以反映回波信号的强度,用于表征大气气溶胶浓度<sup>[38]</sup>。并且,通过计算回波信号功率谱的平均多普勒频移可以测量大气风场径向速度<sup>[33]</sup>,可表示为:

$$V_{\text{LOS}} = \frac{\lambda_{\text{Off}}}{2} \cdot f_i \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{LOS}}$  为径向速度;  $\lambda_{\text{Off}}$  为激光器发射的 Off 波长 (Off 波长激光不受气体吸收的影响,回波信号功率更高);  $f_i$  为回波信号功率谱的平均多普勒频移。当采用平面位置显示 (PPI) 扫描时,基于变分法可以获得二维风场信息<sup>[33]</sup>;当采用速度范围显示 (VAD) 扫描时,基于滤波正弦拟合法,可以获得风廓线信息<sup>[40]</sup>。

在激光雷达获得风廓线信息后,通过进一步计算还能获得湍流和风切变信息。湍流往往使用湍流动能耗散率 (TKEDR) 表示,文中利用方位结构函数来估计 TKEDR<sup>[35,41-42]</sup>;风切变通常用风廓线的速度梯度 (切变强度) 来衡量,可表示为:

$$\vec{S}h = (\partial u_i / \partial z_i, \partial v_i / \partial z_i) \quad (2)$$

式中:  $u_i$  和  $v_i$  为距离  $z_i$  处的速度分量<sup>[35]</sup>。

此外,基于对回波信号功率谱的深度分析,大气多参数激光雷达还可以实现降水探测<sup>[35-36]</sup>。在降雨发生时,接收到的回波信号包含气溶胶信号和降水信

号两个部分,如果风和降水的速度不同,可以观测到功率谱为双峰结构<sup>[36]</sup>。气溶胶信号和雨滴信号功率谱的谱宽与偏度的差异是区分风和雨信号的基础之一<sup>[36]</sup>,通常用双高斯模型拟合双峰频谱,可表示为:

$$S(f) = I_a \exp\left(-\frac{(f-f_a)^2}{2\sigma_a^2}\right) + I_r \exp\left(-\frac{(f-f_r)^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (3)$$

式中: $f$ 表示多普勒功率谱频率; $f_a$ 和 $f_r$ 表示来自双峰多普勒功率谱的气溶胶部分和双峰多普勒功率谱的降水粒子的平均多普勒频移; $I_a$ 和 $I_r$ 为对应的峰值强度; $\sigma_a$ 和 $\sigma_r$ 为谱宽。通过计算功率谱的谱宽和偏度即可辨认降水活动。

直接探测模块根据 On 波长和 Off 波长的回波信号可以获得待测气体吸收的光学深度与吸收截面的关系,可表示为<sup>[37-38]</sup>:

$$DOD = r \cdot N[\sigma_{\text{On}}(v_{\text{On}}, r) - \sigma_{\text{Off}}(v_{\text{Off}}, r)] \quad (4)$$

则一个距离门内 ( $r_j \sim r_{j+1}$ ) 的 DOD 表示为:

$$\Delta DOD = DOD(r_{j+1}) - DOD(r_j) \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 为待测气体的吸收截面,单位为  $\text{m}^2$ ;  $N$ 为气体数密度,单位为  $\text{m}^{-3}$ ;  $r$ 为探测距离,单位为  $\text{m}$ 。

气体浓度  $\chi$  表示某气体在混合气体中的比例,单位为 ppm。根据理想气体方程,气体数密度可转换为气体浓度,可表示为:

$$\chi = \frac{\Delta DOD \cdot R \cdot T \cdot 10^6}{\Delta r \cdot (\sigma_{\text{On}} - \sigma_{\text{Off}}) \cdot N_A \cdot P} \quad (6)$$

式中: $\chi$ 为气体浓度,单位为 ppm( $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ ); 气体常数  $R$ 为  $8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{mol} \cdot \text{K})$ ; 阿伏伽德罗常数  $N_A$ 为  $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $T$ 为测量温度;  $P$ 为总的气体压力;  $\Delta r = r_{j+1} - r_j$ 为距离分辨率,单位为  $\text{m}$ 。在实际探测中,温度和大气压力数据由放置在仪器附近的便携式原位传感器和当地气象站的观测资料提供。

## 2 应用与结果

### 2.1 化工园区污染物排放监测和溯源

为验证大气多参数激光雷达进行污染物排放监测的准确性和稳定性,该套激光雷达在江苏省南京市江北新区进行了一次外场实验,观测时间为 2022-05-02。实验中,基于大气多参数激光雷达相干探测模块接收的回波信号分析了观测区域内污染物传输的情况,并进行了污染源头追溯。

污染源定位的精度取决于对监测区域 PPI 扫描的次数、仰角和范围。能在短时间内对监测区域做足够多次数的扫描,可以更及时地追踪烟羽的传输路径。尽可能多的扫描仰角和尽可能大的扫描范围可以更准确地判断污染源头的位置<sup>[31]</sup>。值得注意的是,当激光雷达布置在周围遮挡物少的高处时,能够获得更大的监测范围,此时在扫描模式中加入向下探测的负仰角,能够更有效地确定污染源位置<sup>[31]</sup>。使用低仰角的 PPI 扫描可以进行化工园区内污染源排放的溯源和污染扩散情况的监控<sup>[31]</sup>。在此次实验中,大气多参数激光雷达放置在南京信息工程大学气象楼 9 楼(高度约 30 m),该地点位于南京钢铁集团有限公司附近。大气多参数激光雷达水平扫描的仰角设置为  $4^\circ$ ,方位角以  $0^\circ$ 为正北方向,  $90^\circ$ 为正东方向,扫描范围为  $35^\circ \sim 95^\circ$ ,扫描间隔为  $1^\circ$ 。本次扫描中,每个径向的累计时间为 15 s,因此扫描周期为 15 min。

图 2(a)~(i) 展示了大气多参数激光雷达于 2022-05-02-13:56-23:39 水平扫描的距离修正回波信号  $PR^2$  和风矢量的结果。 $PR^2$  是后向散射回波信号功率和距离平方的乘积,可以表征气溶胶浓度。结果显示,监测区域风速主要为 4 m/s,部分区域风速可达 6 m/s,盛行西南风且近场风力强于远场。图 2(a)~(c) 展示了 2022-05-02 下午部分时段观测的结果,可以看出受限于太阳背景辐射, $PR^2$  分布均匀,但仍能发现多个明显的  $PR^2$  高值点,这表明此处有工厂排放了较多的污染物。图 2(d)~(e) 中发现了 2022-05-02 晚间有两条明显的污染传输带,且传输方向和风向一致。结合  $PR^2$  和水平风场,可以推断出两个污染源位于烟羽的上游,由于此段时间的风力较强,污染随水平风向东北方向扩散到下游地区,并且在远处混合增强。考虑到扫描区域覆盖了南京钢铁集团园区,很明显,更远处烟羽由在激光雷达东北方向 ( $80^\circ$ ) 距离 3.1 km 处的污染源(园区内工厂)引起,而更近处烟羽则是由扫描未覆盖区域的园区内的污染源引起。图 2(f)~(i) 显示了两股污染传输带在西南风作用下逐渐汇聚成一条污染传输带的过程。大气多参数激光雷达由于其出射激光位于红外波段,在白天依然能准确判断污染源位置。并且,由于大气多参数激光雷达能同时观测污染物分布情况和局地水平风场,因而可以区分多个污染源并准确判断传输情况。

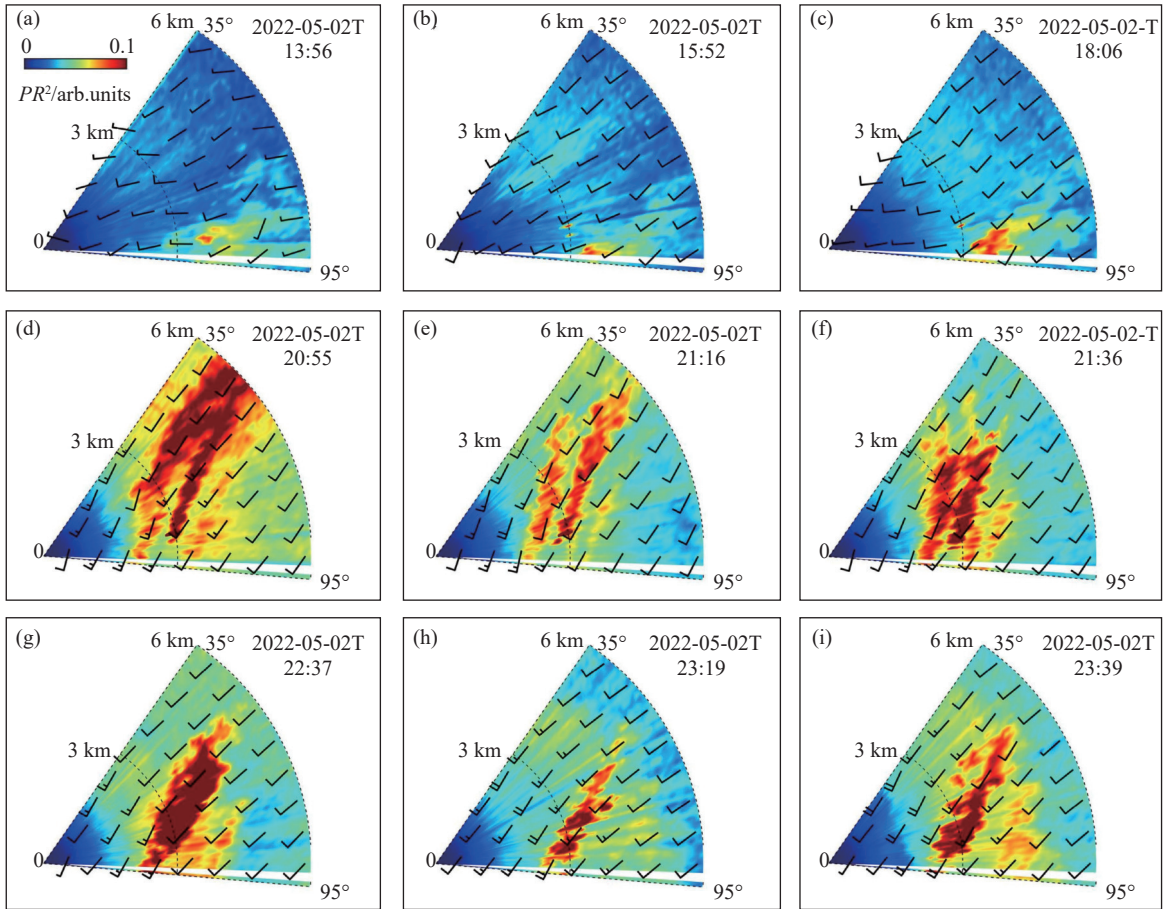


图 2 2022-05-02 距离修正回波信号  $PR^2$  和 风矢量的水平扫描结果 (风矢量表示风速和风向, 长风羽表示风速 4 m/s, 短风羽表示风速 2 m/s)  
 Fig.2 Results of the range-corrected echo signal  $PR^2$  and wind vector for horizontal scanning on 2022-05-02 (Wind vectors represents the wind speed and direction, with the long barb representing the wind speed of 4 m/s and the short barb representing the wind speed of 2 m/s)

图 3 展示了 2022-05-02T20:55 对污染源溯源的具体结果, 图中蓝色五角星为放置激光雷达处。通过结合风矢量和卫星地图, 较远处烟羽的可以确定为图 3 中红框区域内的污染源导致, 其污染扩散方向和速度也可以进一步确定。经过实地考察, 红框区域位于化工园区内, 区域内有两座烟囱持续排出混合废气的蒸汽。大气多参数激光雷达的距离分辨率为 120 m, 因而实际污染源和大气多参数激光雷达定位污染点距离误差最多为 120 m。根据卫星地图测算, 红框内两座烟囱和激光雷达放置点的平均距离约 3.2 km, 激光雷达探测到的污染源和烟囱的方位一致, 且距离激光雷达约 3.1 km。烟囱和定位的污染源之间的距离差约 100 m, 该污染源定位较为准确。较近处的烟羽受限于监测范围无法准确判断源头, 但根据风矢量和  $PR^2$  可以大致判断烟羽扩散源头位于图 3 中所示污染源西南方向不远处。

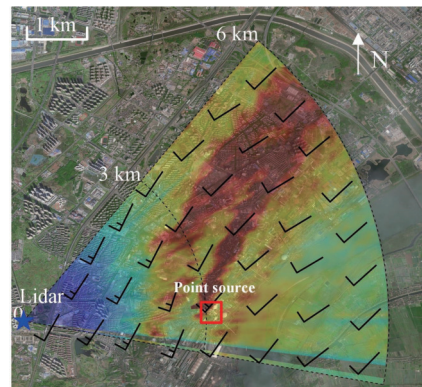


图 3 污染源溯源的具体结果图

Fig.3 Map of specific results of pollution source tracing

在化工园区场景下, 现有的接触式测量设备难以实现污染排放源的精确定位。激光雷达是一种具有高时空分辨率的遥感设备, 通过遥感得到气体浓度、颗粒物污染强度、风速风向信息, 可以在空间中准确识别污染物来向和高值位置。其定位精度可以达到

120 m×120 m, 提高激光雷达距离分辨率可以进一步提高定位精度<sup>[31]</sup>。

## 2.2 气体遥感监测和预警

在 2.1 节中验证了大气多参数激光雷达高稳定、大范围、昼夜连续监测和污染溯源的能力, 然而化工园区的污染具有复杂性和危险性, 需要进一步对不同种类的污染物进行定性和定量监测。目前, 根据“双碳”战略的要求, 中国的碳排放要在 2030 年前达到峰值, 所以化工企业的低碳生产是重要一环。因此, 大气多参数激光雷达率先用于化工园区 CO<sub>2</sub> 监测。

外场实验在内蒙古自治区鄂尔多斯棋盘井镇进行, 观测时间为 2023-03-29—2023-03-31。大气多参数激光雷达设置在一座即将建成的酒店的楼顶, 该酒店是镇上最高建筑(高度约 30 m), 位于棋盘井工业园附近。由于气体探测对激光雷达的激光出射频率的稳定性具有更高要求, 因而本套大气多参数激光雷达采用基于飞秒光频梳的频率锁定技术对出射激光的 On 波长进行频率锁定, 以实现高精度 CO<sub>2</sub> 浓度探测<sup>[43]</sup>。实验中, 出射激光的 On 波长为 1572.335 nm,

Off 波长为 1572.454 nm; 水平 PPI 扫描方位角范围分别为 193°~323°和 180°~310°, 扫描间隔为 3°; 每个径向的累积时间为 60 s, 因而扫描周期约为 43 min。

图 4(a)~(f) 展示了 2023-03-29 和 2023-03-30 大气多参数激光雷达于鄂尔多斯探测的两组 CO<sub>2</sub> 浓度和风矢量结果。图 4(a) 和 (d) 展示了当局地风速较小时的 CO<sub>2</sub> 浓度扩散情况。污染点呈现点状, 有明显的局地堆积特征。当局地风速增大以后, 如图 4(b) 和 (e) 所示, CO<sub>2</sub> 随着盛行风向快速扩散, 有明显的带状传输带出现。而当风速再进一步增大到 12 m/s 以上时, CO<sub>2</sub> 依然会随风扩散, 但很快就会出现消散的情况, 难以形成持续的带状传输, 对于局地盛行风向下流的地区影响较弱。当然, 风对于 CO<sub>2</sub> 扩散的影响也取决于工厂排放情况, 很明显, 图 4(a)~(c) 中, 由于局地排放更多, 所以带状传输带更加清晰。为了进一步展示大气多参数雷达对 CO<sub>2</sub> 扩散情况和点排放情况的监测能力, 下文选取了 2023-03-31 的观测结果做具体分析。

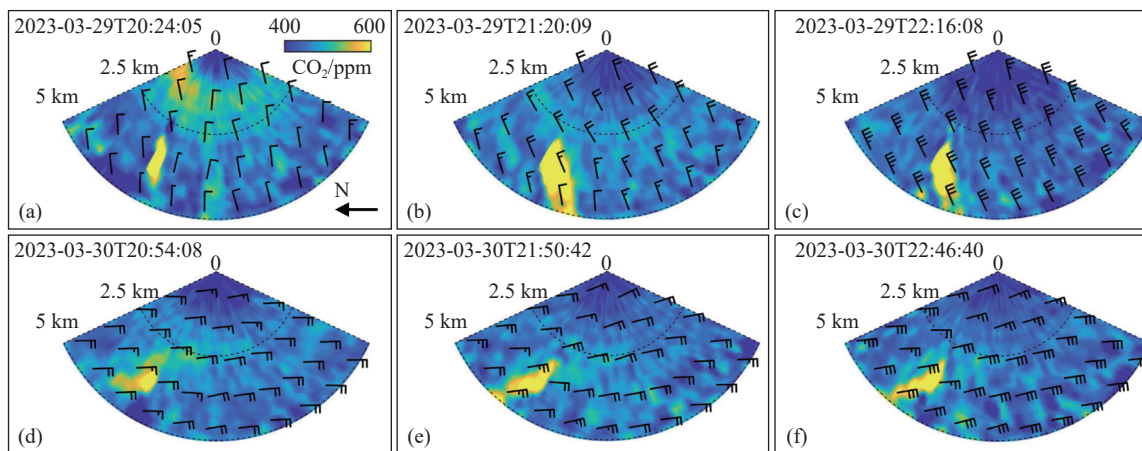


图 4 2023-03-29 和 2023-03-30 两组 CO<sub>2</sub> 浓度和风矢量水平扫描结果

Fig.4 Two sets of horizontal scanning results of CO<sub>2</sub> concentration and wind vector on 2023-03-29 and 2023-03-30

图 5(b)~(c) 展示了 2023-03-31T06:40 大气多参数激光雷达水平扫描的 CO<sub>2</sub> 浓度、水平风速和风矢量的结果。根据风矢量结果可以发现, 监测区域内盛行西南风, 从图 5(c) 可以看出, 近场的风速在 4 m/s 左右, 远场风速在 4~8 m/s, 监测区域总体风速较大, 利于 CO<sub>2</sub> 扩散。如图 5(b) 所示, 监测范围内大部分区域 CO<sub>2</sub> 浓度总体上分布相对均匀, 但仍能发现两处明

显的 CO<sub>2</sub> 高值点, 且位于北侧排放点的 CO<sub>2</sub> 有明显随风扩散的趋势。CO<sub>2</sub> 浓度分布和径向风速可以确定, 结合图 5(a) 的卫星地图, 位于激光雷达西侧 3 km 处的两处 CO<sub>2</sub> 的排放源分别为图 5(a) 中绿框表示的电力公司和黄框所表示的电石厂, 并且 CO<sub>2</sub> 有向偏东方向传输趋势。

大气多参数激光雷达还可以对监测范围内指定

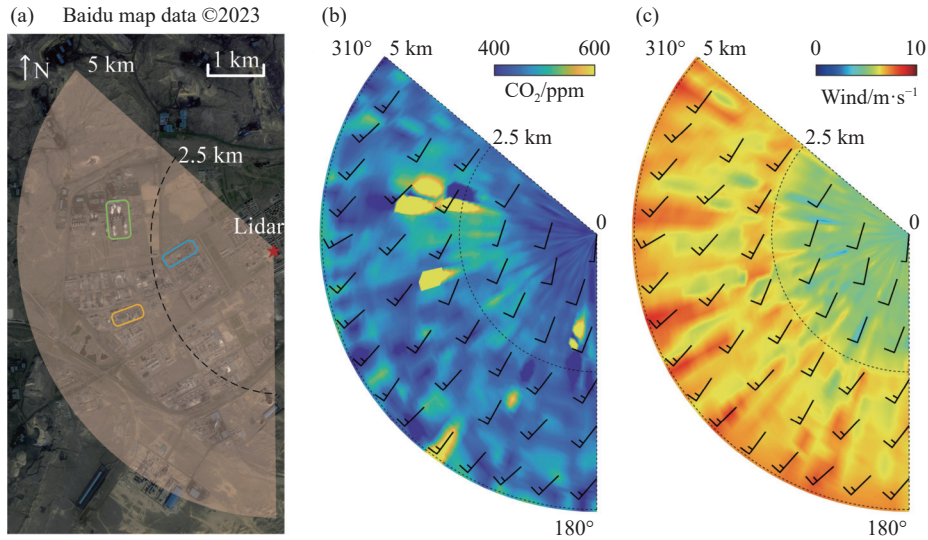


图 5 2023-03-31 一组水平扫描结果。(a) 测量区域示意图；(b) CO<sub>2</sub> 浓度水平扫描结果；(c) 水平风速测量结果

Fig.5 A set of horizontal scans on 2023-03-31. (a) Schematic diagram of the measurement area; (b) CO<sub>2</sub> concentration horizontal scanning results; (c) Horizontal wind speed measurement results

地点的气体浓度的时间变化情况进行监测。在上述的外场实验中,大气多参数激光雷达对图 5(a) 中的电力公司、锰合金厂和电石厂的 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化情况进行了监测,结果如图 6 所示。对比三处测量点昼夜连续观测结果可以发现,当地的 CO<sub>2</sub> 浓度大多数时间处在 450 ppm 左右,浓度值较大气本底值偏高,且昼夜变化情况较弱<sup>[30]</sup>。这一方面是由于当地的绿化水平较低,碳汇较少导致的;另一方面当地工业园区内企业多为火电厂和冶炼工厂,煤炭使用量大,导致 CO<sub>2</sub> 排放量较大。在图 5 所展示的时间段内,由于电力公司和电石厂于半夜时分加大生产,导致了 CO<sub>2</sub> 大量排放,两处的 CO<sub>2</sub> 浓度明显上升,而大气多参数雷达准确定位了此次超量排放的开始和结束时间,并记录了此次偷排行为持续时间。总的来说,大气多参数激光雷达能稳定准确监测化工园区内 CO<sub>2</sub> 的浓度分

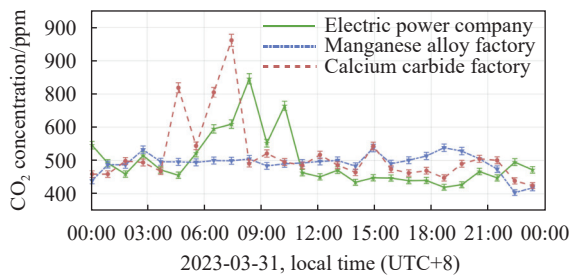


图 6 图 5(a) 中三处地点的 CO<sub>2</sub> 浓度时间变化图

Fig.6 Time change of CO<sub>2</sub> concentration for the three sites in Fig.5(a)

布和变化情况。

### 2.3 化工园区的精细化气象保障

精细化气象保障对于化工园区的安全平稳运行尤为重要。对于化工园区而言,精细化气象保障主要关注降水、大风、风切变和湍流等天气事件。降水是大气中的水汽凝结物降落到地面的现象,无论是突发性强降水还是长时间持续性降水,都会使气体和液体存储装置泄露及爆炸的风险性和园区内涝的可能性增加。大风天气是一种近地面风力较大的现象,而短临大风天气由于其发生的突然性,危害最大。短临大风通常也被认为是一种风切变现象。风切变往往是指风矢量在大气中水平和(或)垂直距离上的变化,这种变化会对高层建筑物造成一定的损害。通过实时监测风切变,工人能够有效判断风切变发生时间,合理规划高空作业时段,使高空作业更加具有效率。大气湍流是大气的一种不规则运动,大气的随机运动会对化工园区污染物或者气体扩散趋势和累积效应产生影响,并使化工园区高空作业的危险性有一定程度的增加。先前的研究已经证明,相干多普勒测风激光雷达具有良好的风雨同时探测能力<sup>[35-36,44]</sup>。由于大气多参数激光雷达集成了相干探测模块,因而理论上能应用于化工园区的精细化气象保障,进行化工园区的降水,风切变和湍流监测。

大气多参数激光雷达于 2023-06-18—2023-06-



19 在北京市海淀区进行了一次外场实验验证。激光雷达以 60°固定仰角进行 VAD 扫描,方位角每次步进 2°,变化范围为 0°~355°,扫描周期为 3 min 左右。在 0~2.67、2.67~5.67、5.67~14.67 km 的径向距离分辨率分别设置为 30、60、150 m,以增强大气多参数激光雷达在较高高度探测的能力。

在此次实验中观测到了湍流、风切变和降水等易引发安全事故的天气现象。在此次观测中,2023-06-19 午后出现了一次明显的降水过程,如图 7(a) 所示,

在降水开始前 12 个小时,大气多参数激光雷达在 2 km 和 4 km 高度处观测到明显的 CNR 高值区,这表明大气中有云层在聚集,这是降水发生的前兆。如图 7(f) 所示,垂直气流以下沉气流为主,且速度较快,这是降水粒子下落的特征之一。此外,图 7(b)~(c) 显示大气多参数激光雷达的谱宽和偏度都明显增大(谱宽>4.5 MHz,偏度>0.2),进一步证明了降水正在发生<sup>[35]</sup>。

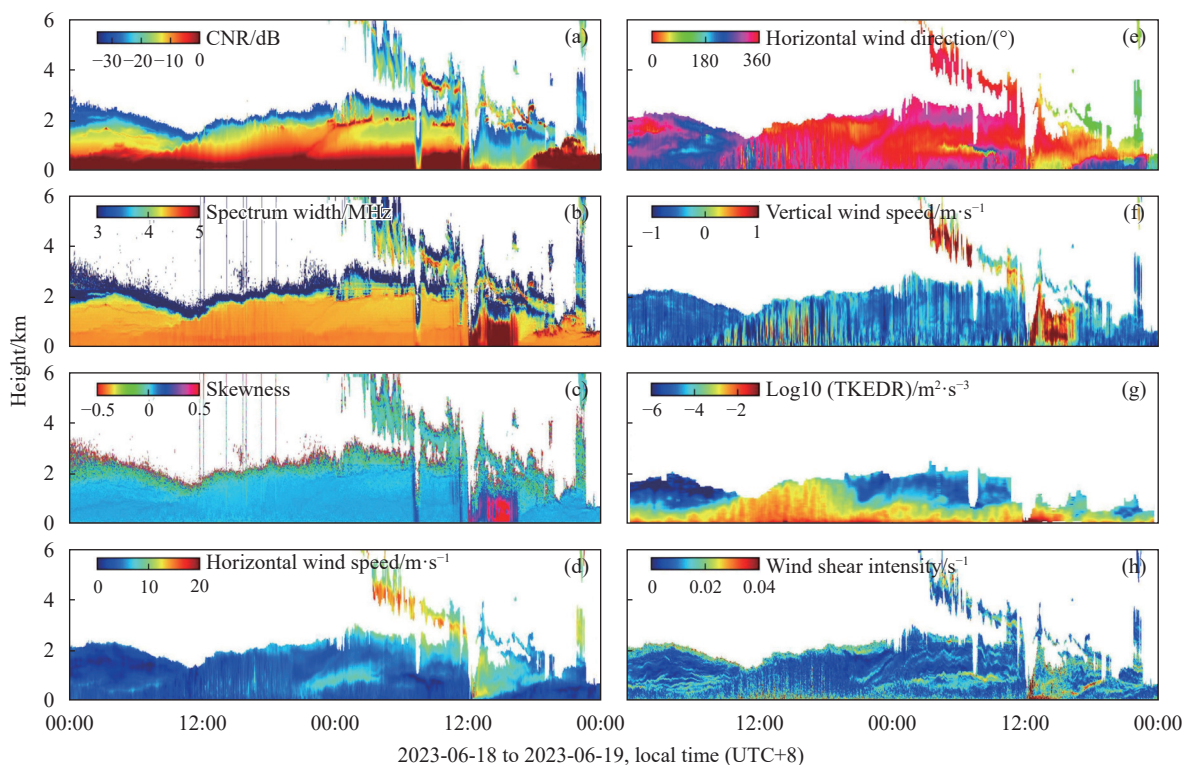


图 7 2023-06-18—2023-06-19 气象信息连续观测结果

Fig.7 Continuous observations of meteorological information from 2023-06-18 to 2023-06-19

进行风切变观测时,当风切变强度 $>0.02\text{ s}^{-1}$ ,可以判定观测区域出现风切变现象<sup>[35]</sup>。大气多参数激光雷达在 2023-06-18—2023-06-19 观测到了多次风切变现象。如图 7(d) 和 (h) 所示,2023-06-19T18:00 左右水平风速出现了垂直切变,0.5~1 km 高度处水平风速明显较高,同时风切变强度也较大;如图 7(e) 和 (h) 所示,2023-06-19T10:00 左右出现了水平风向的垂直切变,1 km 高度处风向明显变化了 90°~180°,此时风切变强度达到了  $0.03\text{ s}^{-1}$ ,表明风切变较强。

如图 7(g) 所示,2023-06-18T10:00—18:00 大气多

参数激光雷达观测到了 TKEDR 的明显增加,大部分时间段 TKEDR 值 $>10^{-2}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ ,说明湍流较强<sup>[32]</sup>。

化工园区的精细化气象保障需要观测手段能实时准确地发现并预警天气事件的发生,总的来看,大气多参数激光雷达在气象观测方面的实时高效性,保证了其能够成为化工园区日常气象保障的有效补充。同时,1.5 μm 激光雷达系统具有小型化、人眼安全和低功耗等优势,使其更适用于化工园区的小范围气象保障工作。

### 3 总结和展望

文中将一套集成了直接探测模块和相干探测模块的 1.5 μm 大气多参数全光纤激光雷达系统应用于化工园区的安全和环保领域。通过于南京市的外场实验验证了大气多参数激光雷达可以基于距离修正回波信号  $PR^2$  和风矢量实现污染物排放的溯源和扩散监测预警。此外,通过对棋盘井镇化工园区内  $CO_2$  分布的长时间大范围监测实验,验证了大气多参数激光雷达进行气体遥感的准确性和稳定性。进一步地,将大气多参数激光雷达应用于化工园区的精细化气象保障,并通过观测实验验证了大气多参数激光雷达进行气象观测的实时高效性。

总的来看,大气多参数激光雷达在化工园区的安

全和环保领域有着很好的应用前景,能够准确稳定地进行污染物排放监测和溯源、气体遥感监测预警和精细化气象保障。将大气多参数激光雷达应用在化工园区可以有效提升其环保治理水平和优化安全管理能力,实现化工园区的可持续发展。目前,大气多参数激光雷达的污染源定位和污染物分类能力仍有待补足。

为了能够对排放气体进行分类,该套激光雷达系统采用了扫描光源,出射激光波长范围为 1530~1620 nm 波段,该波段可覆盖化工园区多种危险气体吸收线。根据目标气体调谐激光出射波长,可实现多种气体的探测。表 2 列出了化工园区多种危险气体的在该波段的吸收线和最优浓度探测下限<sup>[45]</sup>。

表 2 化工园区可被探测的危险气体的光谱参数及最优浓度下限

Tab.2 Spectral parameters and the lower limit of optimal concentration of detectable dangerous gases in the chemical industry park

Molecular formula	Wavenumber/ cm <sup>-1</sup>	Wavelength/ nm	Line strength/ cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup>	Ground state energy/ cm <sup>-1</sup>	Environmental concentration/ ppm	Lower limit of optimal concentration/ ppm
CO <sub>2</sub>	6359.967	1572.352	1.76×10 <sup>-23</sup>	106.130	415.0	74.00
CO	6377.407	1568.035	2.22×10 <sup>-23</sup>	107.642	1.1	38.00
H <sub>2</sub> S	6369.810	1569.906	6.17×10 <sup>-23</sup>	114.178	2.0×10 <sup>-4</sup>	11.00
NH <sub>3</sub>	6528.900	1531.652	1.35×10 <sup>-21</sup>	298.300	3.6×10 <sup>-4</sup>	1.18
CH <sub>4</sub>	6176.993	1618.911	1.53×10 <sup>-23</sup>	376.730	1.5	36.00
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	6529.172	1531.588	1.17×10 <sup>-20</sup>	155.289	1.0×10 <sup>-4</sup>	0.16
CS <sub>2</sub>	6466.295	1546.481	3.33×10 <sup>-28</sup>	101.477	3.0×10 <sup>-6</sup>	8.07

由此可以看出,除  $CO_2$  以外,  $H_2S$ 、 $CH_4$  和  $CS_2$  等都是危险气体,其环境浓度都远小于最优下限浓度,但当大气多参数激光雷达用于该类气体的化工园区监测时,通常是为了监测其是否发生泄露,理论上大气多参数激光雷达可用于此类气体的监测和预警。

未来,笔者将引入拉格朗日后向轨迹追踪模型,进一步提高定位精度,并将溯源方法应用到更多领域。并且将使用大气多参数激光雷达在化工园区进行  $H_2S$ 、 $CH_4$ 、 $CS_2$  等多种危险气体的探测实验,并计划在大气多参数激光雷达上集成偏振探测能力,以增强污染物和气体分类能力。

### 参考文献:

- [1] Zhou M. Research on the development status and countermeasures of coal chemical industry [J]. *Modern Chemical Research*, 2023, 21: 187-189. (in Chinese)
- [2] Xu Z, Su L. Importance and optimization countermeasure of environmental monitoring in chemical enterprise management [J]. *Chemical Engineering Management*, 2023, 26: 64-66. (in Chinese)
- [3] Wang N, Zhang Y, Wang L. Environment-al monitoring measures for chemical and other polluting enterprises [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2023, 49(1): 192-194, 214. (in Chinese)
- [4] Kong Y. Analysis on current situation of safety risks in chemical industry parks and research on countermeasures in Anhui

- Province [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2023, 49(6): 70-72. (in Chinese)
- [5] Zhao L, Wang J, Li Z. Optical fiber negative pressure wave pipeline leakage monitoring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0722002. (in Chinese)
- [6] Qin C, Ren L, Wang J, et al. Pipeline leak monitoring and location system based on LabVIEW [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(13): 23-30. (in Chinese)
- [7] Quy T B, Kim J M. Leak detection in a gas pipeline using spectral portrait of acoustic emission signals [J]. *Measurement*, 2020, 152(3): 17-23.
- [8] Xiao R, Hu Q, Li J. Leak detection of gas pipelines using acoustic signals based on wavelet transform and support vector machine [J]. *Measurement*, 2019, 146: 479-489.
- [9] Li J, Jin W, Zhang X, et al. Gas leak infrared image dynamic compression and enhancement method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0111003. (in Chinese)
- [10] Zhao L, Wang T, Peng G, et al. Leak point localization system for closed vessel based on infrared image processing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 51(8): 26-29. (in Chinese)
- [11] Moridi M A, Kawamura Y, Sharifzadeh M, et al. Development of underground mine monitoring and communication system integrated ZigBee and GIS [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 811-818.
- [12] Fabien Chraim, Yusuf Bugra Erol, Kris Pister. Wireless gas leak detection and localization [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 12(2): 768-779.
- [13] Ye W, Zhou B, Tu Z, et al. Leakage source location based on Gaussian plume diffusion model using a near-infrared sensor [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 109: 27-33.
- [14] Li M, Wang F, Zhang Y. Measurement of nitric oxide with low concentration based on mid-infrared laser absorption spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 053002. (in Chinese)
- [15] Xin F, Guo J, Li J, et al. Measurement of CO<sub>2</sub> concentration by tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(8): 137-142 (in Chinese)
- [16] Zhu Q, Wang W, Shan C, et al. Effects of biomass burning on CO, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>CO during long-term FTIR measurements in Hefei, China [J]. *Optics Express*, 2024, 32(5): 8343-8363.
- [17] Sun Y, Palm M, Liu C, et al. The influence of instrumental line shape degradation on NDACC gas retrievals: total column and profile [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(5): 2879-2896.
- [18] Sussmann R, Forster F, Rettinger M, et al. Strategy for high accuracy and precision retrieval of atmospheric methane from the mid-infrared FTIR network [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(9): 1943-1964.
- [19] Zhang Q, Mou F, Li S, et al. Quantifying emission fluxes of atmospheric pollutants from mobile differential optical absorption spectroscopic (DOAS) observations [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 286: 121959.
- [20] Lu C, Li Q, Xing C, et al. Identification of O<sub>3</sub> sensitivity to secondary HCHO and NO<sub>2</sub> measured by MAX-DOAS in four cities in China [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(4): 662.
- [21] Bösch T, Rozanov V, Richter A, et al. BOREAS—a new MAX-DOAS profile retrieval algorithm for aerosols and trace gases [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(12): 6833-6859.
- [22] Wang T, Wang D, Fan W. The research progress of new gas leak detection method [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2015(10): 1-11. (in Chinese)
- [23] Du W, Shao J, Wang Q, et al. Review of research methods of heavy gas diffusion [J]. *Environmental Science Survey*, 2017(S2): 148-151. (in Chinese)
- [24] Liu Y, Wang J, Che K, et al. Satellite remote sensing of greenhouse gases: Progress and trends [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1): 53-64
- [25] Hong X, Zhang C, Tian Y, et al. First TanSat CO<sub>2</sub> retrieval over land and ocean using both nadir and glint spectroscopy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 304: 114053.
- [26] Lees K J, Quaife T, Artz R R E, et al. Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 857-874.
- [27] Yu G, Zhang L, Sun X. The main progress and development prospects of the China Land Ecosystem Flux Observation and Research Network (China FLUX) [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 903-917 (in Chinese)
- [28] Yue B, Yu S, Dong J, et al. Measurement methods and progress of greenhouse gas flux [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 1899906. (in Chinese)
- [29] Wu Z, Liu H. Function of climatic information in enterprise management and production [J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 1999, S1: 260-262, 256. (in Chinese)
- [30] Shang X, Xia H, Dou X, et al. Adaptive inversion algorithm for

- 1.5  $\mu\text{m}$  visibility lidar incorporating in situ angstrom wavelength exponent [J]. *Optics Communications*, 2018, 418: 129-134.
- [31] Yuan J, Wu Y, Shu Z, et al. Real-Time synchronous 3D detection of air pollution and wind using a solo coherent Doppler wind lidar [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2809.
- [32] Lin J, Cao K, Hu S, et al. Experiment study of  $\text{SO}_2$  measurement by differential absorption lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 872-878. (in Chinese)
- [33] Yuan J, Su L, Xia H, et al. Microburst, windshear, gust front, and vortex detection in mega airport using a single coherent Doppler wind lidar [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1626.
- [34] Liang X, Yang Z, Wang S, et al. Progress in toxic and harmful gas telemetry based on differential absorption lidar [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(1): 53-60. (in Chinese)
- [35] Yuan J, Xia H, Wei T, et al. Identifying cloud, precipitation, windshear, and turbulence by deep analysis of the power spectrum of coherent Doppler wind lidar [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37406-37418.
- [36] Wei T, Xia H, Hu J, et al. Simultaneous wind and rainfall detection by power spectrum analysis using a VAD scanning coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31235-31245.
- [37] Yu S, Zhang Z, Xia H, et al. Photon counting distributed free space spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 212.
- [38] Yue B, Yu S, Li M, et al. Local-scale horizontal  $\text{CO}_2$  flux estimation incorporating differential absorption lidar and coherent Doppler wind lidar [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5150.
- [39] Yuan J, Wu K, Wei T, et al. Cloud seeding evidenced by coherent Doppler wind lidar [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3815.
- [40] Banakh V A, Brewer A, Pichugina E L, et al. Measurements of wind velocity and direction with coherent Doppler lidar in conditions of a weak echo signal [J]. *Atmos Oceanic Opt*, 2010, 23: 381-388.
- [41] Banakh V A, Smalikho I N, Falits A V. Estimation of the turbulence energy dissipation rate in the atmospheric boundary layer from measurements of the radial wind velocity by micropulse coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22679-22692.
- [42] Banakh V A, Smalikho I N. Lidar studies of wind turbulence in the stable atmospheric boundary layer [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1219.
- [43] Yu S, Zhang Z, Li M, et al. Multi-frequency differential absorption lidar incorporating a comb-referenced scanning laser for gas spectrum analysis [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12984-12995.
- [44] Wu K, Wei T, Yuan J, et al. Thundercloud structures detected and analyzed based on coherent Doppler wind lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2023, 2023: 1-22.
- [45] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 203: 3-69.

# Application of atmospheric multi-parameter lidar in safety, environmental protection and carbon dioxide monitoring in chemical industrial parks

Xia Qiuwei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Zhen<sup>1,2,3</sup>, Yu Saifen<sup>1,2,3\*</sup>, Xia Haiyun<sup>1,2,3</sup>, Pan Fanfeng<sup>1</sup>

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. National Center of Carbon Metrology (Fujian), Nanping 353011, China;

3. Fujian Ruitan Optoelectronic Precision Instrument Co., Ltd., Nanping 353011, China)

## Abstract:

**Objective** The chemical industry occupies an important position in the national economy. However, it is also facing challenges such as environmental pollution, carbon dioxide emission, resource consumption and safety risks. Therefore, it is particularly important to develop remote sensing technology that can monitor pollutant discharge, dangerous gas leakage, wind and rain and other meteorological elements in chemical parks with high sensitivity, high stability, wide range and continuous day and night monitoring. In recent years, 1.5  $\mu\text{m}$  lidar has been regarded as an important detection means for the detection of atmospheric environment and atmospheric parameters due to its advantages of human eye safety, continuous day and night observation, high spatial and temporal resolution, all-fiber integration, low power consumption and high stability. At present, differential absorption lidar (DIAL) has been used to detect the concentration distribution and flux emission of various greenhouse gases and dangerous gases, while coherent wind lidar (CDWL) is also widely used to detect atmospheric multiple parameters such as wind field, aerosol and precipitation. Lidar has gradually become one of the important means of safety and environmental protection monitoring in chemical parks. For this purpose, atmospheric multi-parameter detection lidar is applied in the field of safety and environmental protection in chemical industry park.

**Methods** For simultaneous detection of aerosols, gases, and wind fields, we built an atmospheric multi-parameter lidar system integrating direct detection module and coherent detection module (Fig.1 and Tab.1). The outgoing light source uses a tunable external cavity semiconductor laser (ECDL) as the detection light source (On wavelength laser) and a fiber laser as the reference light source (Off wavelength laser). The ECDL's outgoing frequency is locked by the optical frequency comb. The receiving system consists of two parts: direct detection module and coherent detection module. In direct detection module, the signal is detected by a large area superconducting nanowire single photon detector (SNSPD). Gas detection requires high sensitivity, and SNSPD provides a higher signal-to-noise ratio than coherent detection techniques. In coherent detection module, the backscattered signal is coupled with the local oscillator light and detected by a balanced detector. In this system, direct detection module uses differential absorption technology of molecular spectrum for gas detection, and coherent detection module uses range correction echo signal, doppler frequency shift, turbulent kinetic energy dissipation rate (TKEDR), the velocity gradient of wind profiles and power spectrum deep analysis technology for pollutant, wind, rain, turbulence and wind shear.

**Results and Discussions** Firstly, by combining the detection results of range correction echo signal  $\text{PR}^2$  and wind vector, the atmospheric multi-parameter lidar can be used for the early warning and monitoring of pollutant

emission tracing and diffusion. The stability of monitoring and the accuracy of tracing are verified by experiments (Fig.2-3). Then, the accuracy and stability of carbon dioxide monitoring by the atmospheric multi-parameter lidar were verified through long-term and large-scale monitoring experiments on CO<sub>2</sub> distribution in chemical industry park (Fig.4-6). Finally, in view of the simultaneous detection of wind and rain by CDWL, the atmospheric multi-parameter lidar is applied to the fine meteorological support of the chemical industry park, and the meteorological observation capability of the atmospheric multi-parameter lidar is verified by observation experiments. (Fig.7).

**Conclusion and Prospect** A set of atmospheric multi-parameter lidar integrated with direct detection and coherent detection is applied to the safety and environmental protection of chemical parks. In general, the atmospheric multi-parameter lidar has a good application prospect in the field of safety and environmental protection in the chemical industry park, which can accurately and stably achieve tracing of pollutant emissions, monitoring gases, and refined meteorological support. The application of atmospheric multi-parameter lidar in chemical industry park can effectively improve the level of environmental protection and optimize the ability of safety management, and realize the sustainable development of chemical industry park. Due to the use of scanning light sources, it is theoretically possible to achieve the detection of a variety of gases. (Tab.2) In the future, we will use atmospheric multi-parameter lidar to detect a variety of dangerous gases in the chemical park, and plan to integrate polarization detection capabilities on atmospheric multi-parameter lidar to enhance pollutant and gas classification capabilities.

**Key words:** lidar; chemical industry park; environmental monitoring; atmospheric remote sensing

**Funding projects:** National Key Research and Development Program of China (2022YFF0606400); National Natural Science Foundation of China (42305147); Natural Science Foundation of Jiangsu Basic Research Program (BK20230428)