



## 利用差分吸收激光雷达探测二氧化碳浓度廓线

马昕, 史天奇

引用本文:

马昕, 史天奇. 利用差分吸收激光雷达探测二氧化碳浓度廓线[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(3): 412–418.

MA Xin, SHI Tianqi. Detection of CO<sub>2</sub> Concentration Profile Using Differential Absorption LiDAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(3): 412–418.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 武汉市出租车轨迹二氧化碳排放的时空模式分析

Computing the CO<sub>2</sub> Emissions of Taxi Trajectories and Exploring Their Spatiotemporal Patterns in Wuhan City

武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1115–1123 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170334>

### 利用无人机激光雷达提取玉米叶面积密度

Extraction of the Leaf Area Density of Maize Using UAV–LiDAR Data

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1737–1745 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200674>

### 利用形状模型进行火卫一高阶重力场建模

High Degree Phobos Gravity Field Modeling Based on Shape Model

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 604–611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190104>

### GNSS水汽层析的自适应代数重构算法

Adaptive Algebraic Reconstruction Algorithms for GNSS Water Vapor Tomography

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1318–1327 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190387>

### 联合星象仪四元数的卫星重力梯度测量角速度重建方法

Reconstruction Method of Satellite Gravity Gradient Measurement Angular Velocity by Combining Star Tracker Quaternion

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1336–1344 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200595>



# 利用差分吸收激光雷达探测二氧化碳浓度廓线

马 昕<sup>1</sup> 史天奇<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘 要:**针对大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度在对流层分布变化明显的特点,采用激光雷达主动观测方式获取低空CO<sub>2</sub>廓线浓度。利用自主研制的基于染料差分激光技术的CO<sub>2</sub>探测差分吸收激光雷达,在中国安徽省淮南市进行了长期观测,受制于白天的低信噪比,只进行了夜间观测,并通过开发先进的信号处理算法获取了高空间、高时间分辨率的CO<sub>2</sub>廓线浓度以及低空平均浓度,测量结果能够在一定程度上反映江淮平原地区CO<sub>2</sub>浓度垂直分布的变化规律。得到了冬夏夜间典型的低对流层CO<sub>2</sub>垂直分布特点:夜间CO<sub>2</sub>浓度持续增加,且夏季夜间CO<sub>2</sub>浓度增幅大于冬季,一年中夏季的CO<sub>2</sub>浓度最低( $403.2 \times 10^{-6}$ ),冬季最高( $412.7 \times 10^{-6}$ )。目前该设备已运至西藏羊八井地区(海拔4 300 m)进行持续观测,成功获得了关键的CO<sub>2</sub>廓线信息,可用于平原和高原CO<sub>2</sub>垂直分布特征的对比分析,并为研究青藏高原对温室气体的传输效应提供重要的观测资料。

**关键词:**CO<sub>2</sub>廓线浓度;染料差频;差分吸收;激光雷达;垂直分布特征

**中图分类号:**P237

**文献标志码:**A

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)持续增加是造成全球温室效应增强的重要原因,但是CO<sub>2</sub>的分布不确定性较高<sup>[1]</sup>。目前的观测手段主要分为被动和主动两种方式。被动观测主要是利用傅里叶红外变换光谱仪测量太阳光谱,对整层大气柱浓度进行探测。被动观测卫星如日本的温室气体观测卫星(greenhouse gases observing satellite, GOSAT)、美国的轨道碳观测卫星(orbiting carbon observatory-2, OCO-2)可以获取全球大尺度的CO<sub>2</sub>柱浓度<sup>[2-3]</sup>,其中OCO-2的空间分辨率高达 $1.3 \text{ km} \times 2.3 \text{ km}$ ,重返周期为16 d<sup>[4]</sup>,是比较先进的被动探测手段。总碳柱观测网(Total Carbon Column Observing Network, TCCON)作为全球最主要的温室气体观测组织,利用傅里叶变换光谱仪对整层大气CO<sub>2</sub>柱浓度进行探测,在全球有34个站点<sup>[5]</sup>。然而被动观测只能在白天进行观测,且对空气质量的要求比较严格,只能在气溶胶光学厚度较小和无厚云的条件下进行反演<sup>[6-7]</sup>。这些观测得到的大气CO<sub>2</sub>柱浓度为研究碳循环提供了重要的数据,但是无法精确提供特定高度的CO<sub>2</sub>的浓度。原位(In-situ)测量仪测量精度较高,可达

到 $0.1 \times 10^{-6}$ <sup>[8]</sup>,但仅能获取空间中某一个位置的点浓度,而且极易受环境的影响。

激光雷达作为一种CO<sub>2</sub>主动观测方式,其应用越来越广泛,它具有精度高、不受观测时间限制的优点。根据观测方式的不同,激光雷达主要分为柱浓度观测和廓线式观测<sup>[9-10]</sup>。柱浓度激光雷达(integrated path differential absorption LiDAR, IPDA LiDAR)得益于激光反射信号的高信噪比,其探测精度较高,如美国宇航局戈达德中心的CO<sub>2</sub>柱浓度精度高于 $1.4 \times 10^{-6}$ <sup>[11]</sup>,中国科学院上海技术物理研究所在1 s积分时间内,柱浓度的精度可达99%以上<sup>[12]</sup>。但IPDA LiDAR只能获得柱浓度,无法获得分层的CO<sub>2</sub>廓线。廓线式观测激光雷达(differential absorption LiDAR, DIAL)可以精确地获取廓线浓度,反映CO<sub>2</sub>的空间分布特性(尤其是CO<sub>2</sub>浓度主要在低空躁动的特点),还可作为大气模式的原始输入数据,对于CO<sub>2</sub>通量传输和碳循环研究具有重要意义。文献[13]成功地制造了1.6  $\mu\text{m}$ 波段的CO<sub>2</sub>探测DIAL,经过0.5 h积分,其CO<sub>2</sub>廓线探测精度最高可达99%。文献[14]于2012年研制成功了中国第

收稿日期:2019-09-27

项目资助:国家自然科学基金(42171464, 41801261, 41827801);国家对地观测科学数据中心开放基金项目(NODAOP2021005);湖北省重点研发计划(2021BCA216)。

第一作者:马昕,博士,副研究员,主要从事温室气体排放监测研究。maxinwhu@whu.edu.cn

通讯作者:史天奇,博士生。shitian@whu.edu.cn

一台 CO<sub>2</sub> 差分吸收激光雷达, 10 min 的积分时间内, 其精度最高为 98.9%<sup>[14]</sup>。

目前, 国内针对 3 km 以下高度的 CO<sub>2</sub> 廓线分布情况的系统性研究较少。为了研究平原地区 CO<sub>2</sub> 浓度垂直分布情况, 揭示 CO<sub>2</sub> 的季节变化规律, 将观测地点选择在中国安徽省淮南市。淮南市处于淮河流域的江淮平原, 周围地势平坦, 测量结果具有代表性。通过自主开发的高稳定的基于染料差分激光技术的差分吸收激光雷达, 将切比雪夫拟合和自建的吸收截面查找表相结合, 实现对 CO<sub>2</sub> 廓线的高精度测量, 2016 年开始在淮南地区对低空 CO<sub>2</sub> 进行了为期 1 a 的有效观测, 受制于白天的低信噪比, 因此只进行了夜间观测, 并获取了当地 CO<sub>2</sub> 持续的夜间和季节性特征, 揭示了 CO<sub>2</sub> 的变化特征。2017 年下半年设备运抵西藏拉萨羊八井地区, 获得了青藏高原 CO<sub>2</sub> 廓线信息, 从而与平原地区的观测结果进行了有效的对比。

## 1 观测原理与数据处理方法

### 1.1 DIAL 构造与探测原理

#### 1.1.1 DIAL 构造

CO<sub>2</sub> 探测差分吸收激光雷达 (CO<sub>2</sub>-DIAL) 有 3 个主要部分: 激光发射单元、波长校准单元和信号检测单元。泵浦激光源由钇铝石榴石晶体发射, 激光重复频率为 20 Hz, 原始波长为 1 064 nm, 它同时发射 1 064 nm 和 532 nm 的激光, 后者是通过激光倍频器实现的。波长约为 1 572 nm 的激光, 是通过钇铝石榴石晶体发射的 1 064 nm 激光和 634 nm 激光通过差频产生的。634 nm 激光是由 532 nm 的脉冲激光进入染料激光器经过光栅调节所产生的。差频产生的 1 572 nm 激光的 1% 部分进入波长校准单元, 而其余激光通过发射路径进入大气。波长校准单元将激光波长的检测信息反馈到染料激光器, 以确保激光波长维持在正确位置。为了尽可能提高最终接收信号的信噪比, 光学接收检测系统由一个孔径为 1 000 mm 的接收望远镜、一个窄带滤波器组和一个近红外光电倍增管组成, 用于接收回波信号、滤除杂散光和光电转换。Licel 瞬态记录仪用于激光雷达探测数据采集, 采样频率为 20 MHz。硬件参数如表 1 所示。

#### 1.1.2 DIAL 探测原理

标准 DIAL 系统发射两个不同波长的激光束, 其波长非常接近。位于目标气体的强吸收光

谱处的波长称为 on-line 波长, 位于弱吸收光谱处的另一波长称为 off-line 波长<sup>[9]</sup>。大气中气溶胶会对发射的激光进行后向散射。根据探测器接收到后向散射信号, 通过激光雷达方程进行反演。

表 1 CO<sub>2</sub>-DIAL 激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters for CO<sub>2</sub>-DIAL

参数	数值
on-line 波长/cm <sup>-1</sup>	6 359.962
off-line 波长/cm <sup>-1</sup>	6 359.350
线宽/MHz	50
波长稳定性/MHz	10
脉冲能量/mJ	75
脉冲重复频率/Hz	20
脉宽/ns	15
激光发散角/mrad	0.1
望远镜口径/m	1
探测器量子效率/%	3
采集频率/MHz	20

目标气体的数密度反演公式为:

$$N_{\text{CO}_2}(r) = \ln \frac{P_{\lambda_{\text{off}}}(r_{\text{top}}) \cdot P_{\lambda_{\text{on}}}(r_{\text{bottom}})}{P_{\lambda_{\text{on}}}(r_{\text{top}}) \cdot P_{\lambda_{\text{off}}}(r_{\text{bottom}})} \times \frac{1}{2(r_{\text{top}} - r_{\text{bottom}}) [\sigma_{\text{CO}_2, \lambda_{\text{on}}}(\bar{r}) - \sigma_{\text{CO}_2, \lambda_{\text{off}}}(\bar{r})]} \quad (1)$$

式中,  $r$  代表距离;  $N(r)$  代表距离  $r$  处的气体分子的数密度;  $P(r)$  是在距离  $r$  处的回波能量;  $\lambda$  是波长; off 和 on 分别代表 off-line 波长和 on-line 波长激光;  $r_{\text{top}}$  代表积分计算开始的位置;  $r_{\text{bottom}}$  代表积分结束的位置;  $\bar{r}$  代表 top 和 bottom 间的平均高度;  $\sigma$  代表吸收截面, 与温度、压强、高度相关, 即 CO<sub>2</sub> 的探测结果与环境参数尤其是温度和压强有很大关系<sup>[13]</sup>。

### 1.2 激光雷达数据处理方法

1) 信号处理。由于探测器所接收的信号是气溶胶的后向散射信号, 极易受环境噪声的影响。因此, 在处理信号时, 利用统计方法提高信噪比。给定一系列原始信号  $P_i(r_k)$ , 将其转换为  $\ln(P_{\text{off}}(r_k)/P_{\text{on}}(r_k))$ , 然后利用一段时间的统计结果计算准确的信噪比。

2) 光学厚度切比雪夫拟合。光学深度 (optical depth, OD) 是 CO<sub>2</sub> 反演的重要参数, 表示路径中 CO<sub>2</sub> 分子对 on-line 波长或 off-line 波长的吸收效果。实际观测中, 由于 DIAL 探测器的接收信号信噪比较低, 因此, 直接根据公式计算得到的光学厚度误差较大。基于上述考虑, 本文提出了

切比雪夫拟合方法,即用切比雪夫多项式进行拟合,同传统的多项式拟合相比,其优点在于拟合结果更加稳定,同时抑制了信号首尾的误差。

3)吸收截面查找表法。 $\text{CO}_2$ 对不同波长激光的吸收截面与温度、压强有关,在实际反演中,由于温度、压强的变化,吸收截面的计算需要消耗大量的时间。为了更快捷地反演出所需结果,提前计算出不同温度、压强、波长下的 $\text{CO}_2$ 吸收截面得到查找表。该步骤可大幅度地提高反演速度,以尽可能地接近 $\text{CO}_2$ 实时监测。

4)平均浓度。为了探测夜间 $\text{CO}_2$ 浓度的变化趋势,将每个实际探测距离区间内的浓度进行平均,平均浓度 $C$ 的计算公式为:

$$C = \frac{1}{180} \int_{300}^{3000} c(r) dr \quad (2)$$

式中, $c(r)$ 表示距离 $r$ 处的 $\text{CO}_2$ 浓度。

5)水汽的影响。水汽是探测 $\text{CO}_2$ 时最大的干扰气体,因此需要分析水汽对探测结果的影响。用于探测的激光波长不同,其对应的吸收截面大小也不同。选择不同波长,并评估水汽对 $\text{CO}_2$ 探测结果的影响<sup>[15]</sup>。其计算公式为:

$$\chi = \frac{\sigma_{\text{CO}_2}(\lambda_{\text{on}}) - \sigma_{\text{CO}_2}(\lambda_{\text{off}})}{\sigma_{\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}}(\lambda_{\text{on}}) - \sigma_{\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}}(\lambda_{\text{off}})} \quad (3)$$

当 on-line 波长的波数为  $6\,359.962\text{ cm}^{-1}$ 、off-line 波长的波数为  $6\,359.350\text{ cm}^{-1}$  时,水蒸气对探测结果的影响为  $0.11\%$ 。因此,水蒸气对其 $\text{CO}_2$ 探测结果的影响可以忽略。

### 1.3 辅助数据

由于大气温度和压强直接影响到吸收截面的计算精度,因此激光雷达系统配备了辅助的微波辐射计以获取实时的温度和压强数据。2016-12-11 设备在淮南地区获得的温度数据如图 1 所示,大气温度一开始随着高度增加逐渐增加,大约 300 m 以后,大气温度随着高度的增加而减小。最高温度达 277.6 K,最低温度为 274.5 K。

## 2 激光雷达实验结果与分析

### 2.1 信噪比

激光雷达获得的原始信号是气溶胶对发射脉冲激光的后向散射信号,对于一个发射对(on-line 和 off-line),奇异值会被去除,将时间积分信号作为原始数据进行反演。由于该设备的空间分辨率较高(7.5 m),相邻高度的 $\text{CO}_2$ 浓度差异较小,所以需要足够高的信噪比以满足高精度

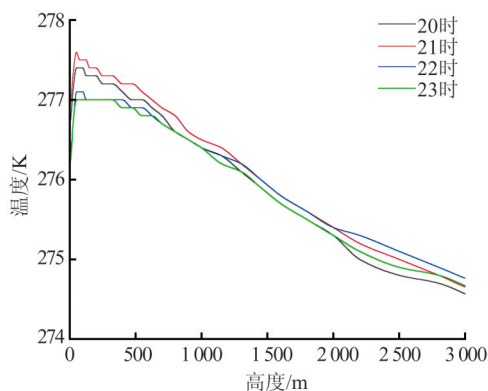


图1 2016-12-11微波辐射计获取的温度数据

Fig.1 Temperature Data Obtained by the Microwave Radiometer on December 11, 2016

的 $\text{CO}_2$ 廓线浓度反演。图 2 为反演单根廓线时不同高度的信噪比。激光雷达接收信号时,由于望远镜视场和激光发散角以及光学元器件的遮挡,存在重叠效应(即 overlap),使得激光能量利用率小于  $100\%$ ,因此去除了 overlap 高度 300 m 以下的信号。信噪比随着高度的增加逐渐减小,造成这样现象的原因主要有两点:(1)发射激光会被大气中的 $\text{CO}_2$ 分子吸收;(2)在探测路径上气溶胶散射会使脉冲激光能量衰减,激光传输距离越长,其衰减效应越强。当测量高度大于 1 500 m 后,信噪比大约维持在 25 dB。

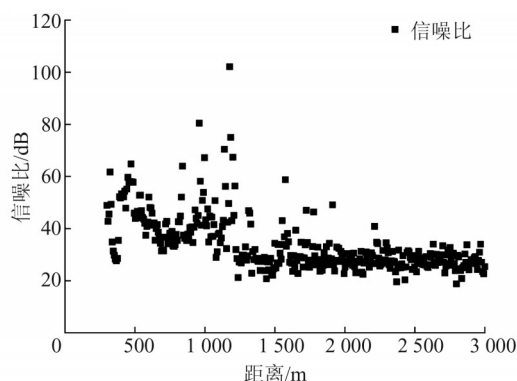


图2 垂直观测激光雷达的信噪比

Fig.2 Signal to Noise Ratio Results of the Vertical LiDAR

### 2.2 $\text{CO}_2$ 廓线浓度观测

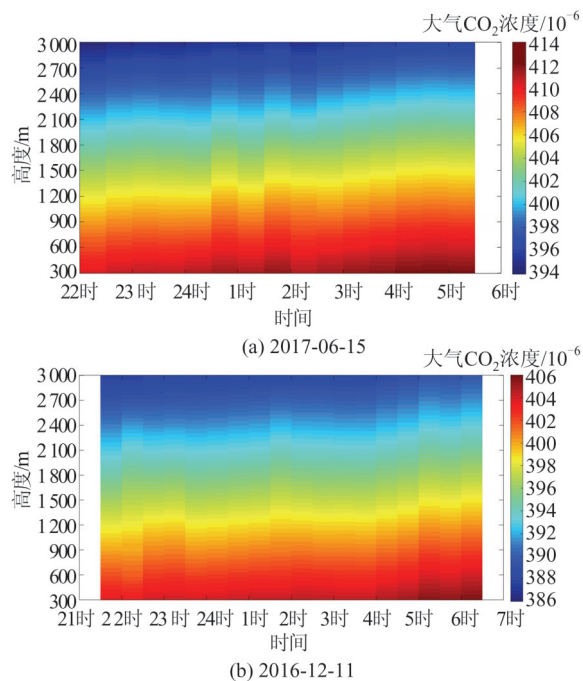
DIAL 系统放置在中国科学院淮南大气物理研究所内,观测场地的航拍图如图 3 所示。淮南市是安徽省北部的平原和内陆城市,位于淮河沿岸,城市周围有着较多的农作物和草原,地理位置和气候条件有利于植物的生长。它也是中国重要的矿产资源产区,其煤炭产品占中国产量的近  $20\%$ 。淮南市夜间 $\text{CO}_2$ 浓度廓线观测结果如图 4 所示,图 4(a)为 2017-06-15(夏季)观测的

CO<sub>2</sub>廓线浓度,图4(b)为2016-12-11(冬季)观测的CO<sub>2</sub>廓线浓度。由图4可以看出,随着夜晚时间增加,CO<sub>2</sub>的廓线浓度呈增加趋势。设备位于淮南市郊区,当地存在大量的植物和农作物,且附近存在多处人员密集区,因此植物夜间的呼吸作用以及人类活动有关产生的CO<sub>2</sub>均会促使大气CO<sub>2</sub>浓度持续增加<sup>[1, 16-17]</sup>。整个观测反演区间中,最底层廓线浓度是其探测路径中最大的,CO<sub>2</sub>浓度随着高度的增加而减少,其变化幅度夏季约为 $16 \times 10^{-6}$ ,冬季约为 $19 \times 10^{-6}$ ,该变化区间冬季比夏季大。这是由于冬季气温低,地表辐射弱,近地表的CO<sub>2</sub>向上运动的动力较低,因此容易在不同的高度形成较高的浓度差。



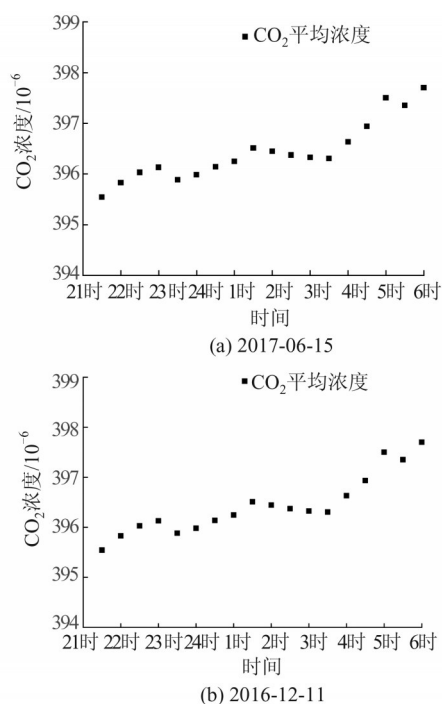
图3 淮南市的观测地点

Fig.3 Observation Site in Huainan City

图4 淮南市夜间CO<sub>2</sub>廓线浓度观测结果Fig. 4 CO<sub>2</sub> Concentration Profile During Night Observed in Huainan City

为了形象地表征夜间CO<sub>2</sub>浓度随着时间的变化情况,对图4数据进行了高度上的积分,得到

CO<sub>2</sub>平均浓度变化情况(图5)。夏季夜间CO<sub>2</sub>浓度持续增加,变化区间为 $(395.5 \sim 397.8) \times 10^{-6}$ ,相邻观测区间的变化为 $(0.2 \sim 0.7) \times 10^{-6}$ ;冬季夜间CO<sub>2</sub>浓度同样地持续增加,相邻观测区间的变化为 $(0.1 \sim 0.3) \times 10^{-6}$ ,其增幅较夏季相对稳定。夏季夜间CO<sub>2</sub>最底层浓度的最大值为 $3.2 \times 10^{-6}$ ;冬季夜间CO<sub>2</sub>最底层浓度的最大值为 $1.9 \times 10^{-6}$ ,小于夏季的变化区间。这是因为冬季观测场地周围的植物都枯萎或者为幼苗期,植物的呼吸作用较夏天弱很多。

图5 淮南市夜间CO<sub>2</sub>平均浓度Fig. 5 Average CO<sub>2</sub> Concentration During Night Observed in Huainan City

经过DIAL系统在淮南市为期1 a的观测,获得了2016年的月平均浓度,如图6所示,淮南地区的CO<sub>2</sub>浓度具有明显的季节特征,即夏季和秋季CO<sub>2</sub>浓度低,冬季和春季CO<sub>2</sub>浓度高。3月份的CO<sub>2</sub>浓度达到最高值 $404.8 \times 10^{-6}$ ,在8月份的时候,其浓度达到最低值 $396.4 \times 10^{-6}$ 。这是因为春季观测站点周围的植物为生长初期,其光合作用强度较小,夜间呼吸作用产生的CO<sub>2</sub>浓度大于白天光合作用所吸收的CO<sub>2</sub>量,因此3月份的CO<sub>2</sub>浓度最高。而8月份时,植物生长旺盛,白天光合作用强烈吸收了大量空气中的CO<sub>2</sub>,所以造成大气中CO<sub>2</sub>的含量较低。

### 2.3 对比分析

为了实现同平原地区的观测结果对比,本文同时获得了高原地区的观测资料,CO<sub>2</sub>-DIAL于

2017-09 运抵西藏拉萨羊八井宇宙射线观测站(海拔 4 300 m),并成功运行至今,观测场地的航拍图如图 7 所示,可以看到观测场地周围为高山,基本无植被覆盖。青藏高原空气较为纯净,受人类活动影响较小。

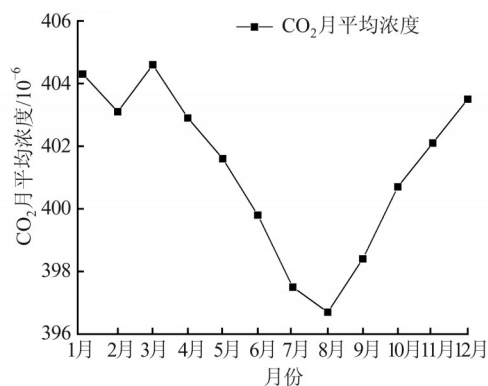


图6 2016年在淮南市观测得到的CO<sub>2</sub>月平均浓度

Fig. 6 Monthly Average CO<sub>2</sub> Concentration Observed in Huainan City in 2016



图7 羊八井地区的观测地点

Fig. 7 Observation Site in Yangbajing Area

国内外学者认为青藏高原对大气环流具有重要作用,即在特定的时刻,低空的污染气体以及温室气体会经过青藏高原传输到大气层高处。因此,获取该处的CO<sub>2</sub>变化特征是十分有意义的。但目前只能以有限的观测手段获得该地区的CO<sub>2</sub>浓度:由于青藏高原厚云较多<sup>[18]</sup>,温室气体卫星仅能获取少量的数据;瓦里关站点仅可以提供近地表的浓度<sup>[19]</sup>。而CO<sub>2</sub>-DIAL弥补了青藏高原CO<sub>2</sub>廓线浓度探测手段的空缺。

由于羊八井气溶胶浓度较低,随着高度的增加,其后向散射信号强度降低,本文获得了2 200 m高度以下高信噪比信号。而淮南地区的气溶胶浓度较高原地区高,因此其信号的信噪比在3 000 m处仍可用。淮南和羊八井地区的CO<sub>2</sub>廓线浓度分别如图8(a)、8(b)所示。

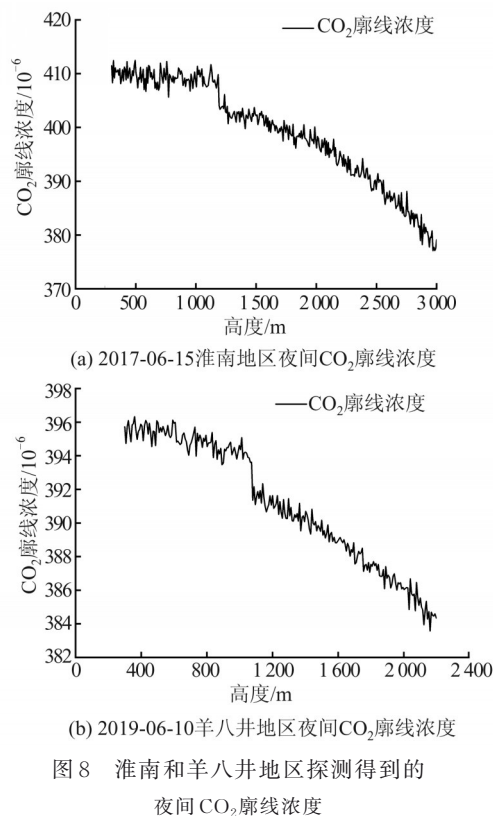


图8 淮南和羊八井地区探测得到的夜间CO<sub>2</sub>廓线浓度

Fig. 8 CO<sub>2</sub> Concentration Profile Observed in Nighttime in Huainan and Yangbajing, Respectively

总体上看,淮南和羊八井地区的CO<sub>2</sub>浓度分布情况存在着相似之处:CO<sub>2</sub>浓度均随着高度上升而下降,并且降低的速度随着高度而增加;且在边界层处会出现明显的浓度差,这是由于CO<sub>2</sub>在边界层处的整流效应导致的。不同之处在于:淮南地区冬季的CO<sub>2</sub>浓度远高于羊八井地区,约为 $15 \times 10^{-6}$ (考虑到全球CO<sub>2</sub>浓度持续升高,转换为相同年份,二者间的浓度差应为约 $10 \times 10^{-6}$ 左右),受海拔高度和下垫面的影响,即使在相同的月份中,二者的边界层高度也不相同。在同一探测高度上,羊八井的CO<sub>2</sub>浓度较淮南低大约 $10 \times 10^{-6}$ 。这主要有两方面原因:(1)由于羊八井地区人烟稀少,即使是夏季,周围的山脉依然白雪皑皑,而雪是重要碳汇,起到了一定的吸收作用;(2)羊八井的海拔较淮南高4 000 m,因此其CO<sub>2</sub>背景浓度本身较淮南低。

### 3 结 语

本文通过开发先进的信号处理算法,并使用自主研发的基于染料差频激光技术的CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达获取了高空间、高时间分辨率的CO<sub>2</sub>廓线浓度以及低空平均浓度。一方面通过算法实现高时间、高空间分辨的快速反演;另一方面

自主研发的激光雷达系统更为稳定,探测效率更高。经过在淮南市的长期观测获得了低空  $\text{CO}_2$  浓度的垂直分布特点: $\text{CO}_2$  浓度随高度的升高而降低,夜间  $\text{CO}_2$  的浓度持续增加,夏季的增幅较大,为  $2.2 \times 10^{-6}$ ,而冬季的增幅较小,为  $1.1 \times 10^{-6}$ ;大气  $\text{CO}_2$  具有明显的季节性,一年中大气  $\text{CO}_2$  在夏秋季浓度最低,春冬季浓度最高。结合观测地点具有较高植被覆盖和较少人为活动的实际情况,以实测结果论证了植物夜间的生命活动与大气  $\text{CO}_2$  的浓度分布之间具有较强的相关性。同时,通过平原地区和高原地区的廓线结果对比,并结合地表不同的覆盖类型,表明高原处于  $\text{CO}_2$  背景场的地位,未来该设备将为研究青藏高原对温室气体的传输效应提供重要的观测资料。

必须承认的是,现在研制成功的  $\text{CO}_2$  差分吸收激光雷达系统在运行时也存在一些问题,比如染料激光器波长锁定过程较难,光路较为复杂,系统体积庞大等。若要对实现对中国不同地貌、生态的关键地区  $\text{CO}_2$  垂直分布情况的覆盖性研究,这就对移动测量提出了要求。未来,全固态激光雷达移动测量将是研究的重要技术手段

### 参 考 文 献

- [1] Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B, et al. Increase in Observed Net Carbon Dioxide Uptake by Land and Oceans During the Past 50 Years[J]. *Nature*, 2012, 488(7409): 70-72
- [2] Wunch D, Wennberg P O, Toon G C, et al. A Method for Evaluating Bias in Global Measurements of  $\text{CO}_2$  Total Columns from Space[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(23): 12317-12337
- [3] Boesch H, Baker D, Connor B, et al. Global Characterization of  $\text{CO}_2$  Column Retrievals from Shortwave-Infrared Satellite Observations of the Orbiting Carbon Observatory-2 Mission [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(2): 270-304
- [4] Wunch D, Wennberg P O, Osterman G, et al. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) X- $\text{CO}_2$  Measurements with TCCON [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10: 2209-2238
- [5] Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al. The Total Carbon Column Observing Network[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1943): 2087-2112
- [6] Zhao Wenhao, Yan Li, Wang Chengyi, et al. Detection of Atmospheric Particulate Matter Pollution Based on Three-Dimensional Atmospheric Detection LiDAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1436-1441 (赵文豪, 闫利, 王成义, 等. 基于三维大气探测激光雷达的大气颗粒物污染探测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(10): 1436-1441)
- [7] Dong Y N, Du B, Zhang L P, et al. Hyperspectral Target Detection via Adaptive Information: Theoretic Metric Learning with Local Constraints[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1415
- [8] Ramanathan A K, Mao J P, Abshire J B, et al. Remote Sensing Measurements of the  $\text{CO}_2$  Mixing Ratio in the Planetary Boundary Layer Using Cloud Slicing with Airborne LiDAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 2055-2062
- [9] Han G, Cui X H, Liang A L, et al. A  $\text{CO}_2$  Profile Retrieving Method Based on Chebyshev Fitting for Ground-Based DIAL [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6099-6110
- [10] Du J, Zhu Y D, Li S G, et al. Double-Pulse 157 mm Integrated Path Differential Absorption LiDAR Ground Validation for Atmospheric Carbon Dioxide Measurement[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7053
- [11] Abshire J, Ramanathan A, Riris H, et al. Airborne Measurements of  $\text{CO}_2$  Column Concentration and Range Using a Pulsed Direct-Detection IPDA LiDAR [J]. *Remote Sensing*, 2013, 6(1): 443-469
- [12] Liu Hao, Shu Rong, Hong Guanglie, et al. Continuous-Wave Modulation Differential Absorption LiDAR System for  $\text{CO}_2$  Measurement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 209-214 (刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 等. 连续波差分吸收激光雷达测量大气  $\text{CO}_2$  [J]. 物理学报, 2014, 63(10): 209-214)
- [13] Shibata Y, Nagasawa C, Abo M. Development of 16 mm DIAL Using an OPG/OPA Transmitter for Measuring Atmospheric  $\text{CO}_2$  Concentration Profiles [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1194
- [14] Xiang C Z, Han G, Zheng Y X, et al. Improvement of  $\text{CO}_2$ -DIAL Signal-to-Noise Ratio Using Lifting Wavelet Transform [J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2362
- [15] Ma X, Shi T Q, Xu H, et al. On-Line Wavenumber Optimization for a Ground-Based  $\text{CH}_4$ -DIAL [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 229: 106-119
- [16] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests [J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993
- [17] Brooks A, Farquhar G D. Effect of Temperature on the  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  Specificity of Ribulose-1, 5-Bisphos-

- phate Carboxylase/Oxygenase and the Rate of Respiration in the Light [J]. *Planta*, 1985, 165 (3): 397-406
- [18] Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al. Summer Dust Aerosols Detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (18): L18805
- [19] Zhou L X, Tang J, Wen Y P, et al. The Impact of Local Winds and Long-Range Transport on the Continuous Carbon Dioxide Record at Mount Waliguan, China[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 145-158

## Detection of CO<sub>2</sub> Concentration Profile Using Differential Absorption LiDAR

MA Xin<sup>1</sup> SHI Tianqi<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** Carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) is the main component of greenhouse gases. Facing the urgent need of carbon peak and carbon neutralization, differential absorption light detection and ranging(LiDAR) is an ideal remote sensing method for measuring CO<sub>2</sub>. In view of the characteristics that the obvious distribution change of atmospheric CO<sub>2</sub> in the troposphere, the low-altitude CO<sub>2</sub> concentration profile is obtained by differential absorption LiDAR.**Methods:** Using the self-developed CO<sub>2</sub>detection differential absorption LiDAR based on dye differential frequency laser technology, long-term observations were carried out in Huainan City, Anhui Province. Subject to low signal-to-noise ratio in the daytime, only nighttime observations were conducted. And through the development of advanced signal processing methods, high-space, high-time resolution CO<sub>2</sub> concentration profile and low-level average concentration were obtained.**Results:** The measurement results can representatively reflect the variation of the vertical distribution of CO<sub>2</sub> concentration in the plains of the middle and lower reaches of the Yangtze River. The typical CO<sub>2</sub> vertical distribution in winter and summer nights in low tropospheric is concluded: The CO<sub>2</sub> concentration continues to increase during nighttime. And the increase of CO<sub>2</sub> concentration in summer night is greater than that in winter. The lowest CO<sub>2</sub> concentration occurred in summer and the highest one occurred in winter.**Conclusions:** Ground based differential absorption LiDAR can obtain the spatial distribution of CO<sub>2</sub>, which can provide key data in the quantitative study of carbon source and carbon sink. At present, the equipment has been transported to the Yangbajing area of Tibet (4 300 m above sea level) for continuous observation, and the key CO<sub>2</sub> profile information has been successfully obtained. It can be used for comparative analysis of the vertical distribution characteristics of CO<sub>2</sub> in plains and plateaus, and provides important observational data for studying the transmission effect of the Qinghai-Tibet Plateau on greenhouse gases.

**Key words:** CO<sub>2</sub> concentration profile; dye differential frequency laser; differential absorption; LiDAR; vertical distribution

**First author:** MA Xin, PhD, associate researcher, specializes in remote sensing of greenhouse gases. E-mail: maxinwhu@whu.edu.cn

**Corresponding author:** SHI Tianqi, PhD candidate. E-mail: shitian@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (42171464, 41801261, 41827801); the Open Research Fund of National Earth Observation Data Center (NODAOP2021005); the Key Research and Development Program of Hubei Province (2021BCA216).

**引文格式:** MA Xin, SHI Tianqi. Detection of CO<sub>2</sub> Concentration Profile Using Differential Absorption LiDAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 412-418. DOI:10.13203/j.whugis20190362 (马昕, 史天奇. 利用差分吸收激光雷达探测二氧化碳浓度廓线[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(3): 412-418. DOI:10.13203/j.whugis20190362)