

## 地表气压对温室气体柱总量反演的敏感性分析及敦煌地区温室气体的柱总量观测

刘丹丹, 黄印博, 孙宇松, 卢兴吉, 曹振松

引用本文:

刘丹丹, 黄印博, 孙宇松, 等. 地表气压对温室气体柱总量反演的敏感性分析及敦煌地区温室气体的柱总量观测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 573–583.

LIU Dan-dan, HUANG Yin-bo, SUN Yu-song, et al. Analysis of earth surface pressure sensitivity on inversion of greenhouse gases columns and observation of greenhouse gases columns in Dunhuang in China[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 573–583.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0573>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[\(Sm<sub>0.875</sub>La<sub>0.125</sub>\)<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>的制备及反射性能研究](#)

Research on preparation and reflection properties of

(Sm<sub>0.875</sub>La<sub>0.125</sub>)<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 129–134 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0129>

[基于遥感监测的高光谱分辨率与高信噪比光谱探测技术](#)

Spectral detection with high spectral resolution and high signal-to-noise ratio based on remote sensing monitoring

*光学精密工程*. 2015, 23(10z): 229–238 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0229>

[基于PANI/SnO<sub>2</sub>复合材料的QCM水果气体传感器](#)

QCM fruit gas sensor based on PANI/SnO<sub>2</sub> composite materials

*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 511–519 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0511>

[蓝光辐照对PET和SiO<sub>2</sub>基石墨烯导电性能的影响](#)

Electrical conductivity of graphene film electrodes on PET and SiO<sub>2</sub> substrate under blue light irradiation

*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 162–168 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0162>

[基于人脸视频的心率参数提取](#)

Extraction of heart rate parameters from video of human face

*光学精密工程*. 2020, 28(3): 548–557 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0548>

文章编号 1004-924X(2020)03-0573-11

# 地表气压对温室气体柱总量反演的敏感性分析及 敦煌地区温室气体的柱总量观测

刘丹丹<sup>1,2,3</sup>, 黄印博<sup>1</sup>, 孙宇松<sup>1,2</sup>, 卢兴吉<sup>1</sup>, 曹振松<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 研究生院 科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

3. 皖西学院 电气与光电工程学院, 安徽 六安 237012)

**摘要:**地表气压对温室气体浓度反演具有非常重要的影响。利用地基便携式傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 观测了敦煌地区  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  气体分子的浓度, 获得了 2018 年 6 月 27 日到 7 月 21 日敦煌地区大气中  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的时间序列, 结合敦煌观测数据, 定量分析了地表气压对气体柱-平均摩尔分数  $X_{\text{gas}}$  (column-averaged dry air mole fractions, DMFs) 反演的影响。结果表明:  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  与地表气压密切相关, 相关系数均高于 0.99, 柱总量随地表气压的变化快慢决定柱-平均摩尔分数随地表气压的变化趋势。相比较  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  分子,  $\text{XH}_2\text{O}$  对地表气压的敏感性较弱, 地表气压改变 1 hPa,  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  分别变化 0.027 8%, 0.065 9%, 0.068 6% 和 0.062%; 观测期间,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  的浓度变化幅度波动较大,  $\text{XCH}_4$ ,  $\text{XCO}$  变化较小,  $\text{XH}_2\text{O}$  平均值在  $2\ 000 \times 10^{-6} \sim 6\ 000 \times 10^{-6}$  变化, 而  $\text{XCO}_2$  平均值在  $407.27 \times 10^{-6} \sim 417.60 \times 10^{-6}$  变化, 敦煌站点  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的测量精度分别为 2.3%, 0.14%, 0.12% 及 1.7%,  $\text{XCO}_2$  及  $\text{XCH}_4$  的测量精度均优于 TCCON 网的测量精度; 与 GOSAT 卫星数据对比结果显示, 地基反演的  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  值均偏大,  $\text{XCO}_2$  的绝对偏差为  $7.07 \times 10^{-6}$ ,  $\text{XCH}_4$  的绝对偏差为  $0.025 \times 10^{-6}$ ; 与 WACCM 数据对比显示, 地基反演  $\text{XCO}_2$  结果多数大于 WACCM 值, 最大绝对偏差可以达到  $8.0 \times 10^{-6}$ , 地基反演  $\text{XCH}_4$  值小于 WACCM 值, 最大绝对偏差为  $0.032 \times 10^{-6}$ 。实时观测数据更能反映当地的具体情况, 研究结果可为我国温暖带干旱性气候温室气体源与汇的研究提供数据支撑和理论基础。

**关键词:**傅里叶变换光谱技术; 温室气体; 分子摩尔分数; GOSAT; 地表气压

**中图分类号:** X131.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202803.0573

## Analysis of earth surface pressure sensitivity on inversion of greenhouse gases columns and observation of greenhouse gases columns in Dunhuang in China

LIU Dan-dan<sup>1,2,3</sup>, HUANG Yin-bo<sup>1</sup>, SUN Yu-song<sup>1,2</sup>, LU Xing-ji<sup>1</sup>, CAO Zhen-song<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics,  
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Science Island Branch of Graduate School,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

收稿日期: 2019-09-27; 修订日期: 2019-10-25.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(No. XDA17010104)

3. College of Electrical and Optoelectronic Engineering,  
West Anhui University, Luan 237012, China)  
\* Corresponding author, E-mail: zscas@aoifm.ac.cn

**Abstract:** Surface pressure has a significant impact on the inversion of greenhouse gas concentrations. Observations of the column-averaged dry air mole fractions of water vapor, carbon dioxide, carbon monoxide, and methane in Dunhuang are presented based on ground-based Fourier transform infrared spectrometer (EM27/SUN). The time series of  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$ , and  $\text{XCO}$  from June 27 to July 21 (2018) in Dunhuang were obtained, and the sensitivity of surface pressure to the column-averaged dry air mole fractions retrieval was analyzed. The main results are as follows: The surface pressure has a significant influence on the inversion results, and the underestimated surface pressure results in low inversion results.  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$ , and  $\text{XCO}$  are sensitive to changes in surface pressure, and their correlation coefficients with surface pressure are higher than 0.99. The change in the total column volume with surface pressure determines the trend of column-average mole fraction with surface pressure. Compared with  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{CO}$  molecules,  $\text{XH}_2\text{O}$  is less sensitive to surface pressure. When the local pressure is changed by 1 hPa,  $\Delta\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\Delta\text{XCO}_2$ ,  $\Delta\text{XCH}_4$  and  $\Delta\text{XCO}$  are 0.027 8%, 0.065 9%, 0.068 6%, and 0.062%, respectively. The daily averages variation range of  $\text{XH}_2\text{O}$  and  $\text{XCO}_2$  are  $2\ 000 \times 10^{-6}$ — $6\ 000 \times 10^{-6}$  and  $407.27 \times 10^{-6}$ — $417.60 \times 10^{-6}$ , respectively. The measurement accuracies of  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$ , and  $\text{XCO}$  at Dunhuang site are 2.3%, 0.14%, 0.12%, and 1.7%, respectively. The measurement accuracies of  $\text{XCO}_2$  and  $\text{XCH}_4$  are within the requirement of TCCON. Comparing daily averaged  $\text{XCO}_2$  and  $\text{XCH}_4$  based on EM27/SUN with GOSAT, the results show that the value of  $\text{XCO}_2$  and  $\text{XCH}_4$  based on GOSAT satellite data are lower than our observations, and deviations of 7.07 ( $\text{XCO}_2$ ) and  $0.025 \times 10^{-6}$  ( $\text{XCH}_4$ ). The value of  $\text{XCO}_2$  based on WACCM data are lower than our observations with a deviation of  $8 \times 10^{-6}$  while the value of  $\text{XCH}_4$  based on WACCM data are higher than our observations with a deviation of  $0.032 \times 10^{-6}$ , indicating that WACCM data does not reflect the invasion of foreign sources. These results provide a theoretical basis and first-hand observation data to understand the space-time distribution and changes of greenhouse gases in Dunhuang, China.

**Key words:** Fourier transform infrared spectroscopy; greenhouse gases; Dry air Mole Fractions (DMFs); satellite data; surface pressure

## 1 引 言

大气中  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  等温室气体的浓度仅占大气总浓度的 0.1%, 但其吸收长波辐射导致的温室效应会引起一系列环境问题<sup>[1]</sup>。研究表明, 从工业革命以来大气中的温室气体浓度发生了显著的变化, 全球  $\text{CO}_2$  浓度近两百年已由  $278 \times 10^{-6}$  快速增长到  $396 \times 10^{-6}$ ,  $\text{CO}_2$  浓度加倍致使当地的气温升高  $2.6 \sim 2.8\ ^\circ\text{C}$ <sup>[2-3]</sup>。目前, 探测温室气体的手段主要有三种: 一是具有高精度

的原位测量, 但空间覆盖范围有限, 容易受大气垂直混合效应及附近排放源的影响; 二是可探测全球范围内的卫星遥感, 但对温室气体浓度变化不敏感, 例如 GOSAT 卫星 (The Greenhouse gases Observing Satellite) 和 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) 卫星等; 三是地基遥感, 是目前最直观、有效的探测手段, 不仅探测精度高, 而且对温室气体浓度的变化敏感<sup>[4-7]</sup>。

傅里叶变换光谱仪具有高分辨率、高灵敏度及宽探测范围等特点, 一般认为是地基遥感的主要观测仪器。例如德国布鲁克公司研发的

Bruker IFS125 系列仪器,是总碳柱观测网(Total Carbon Column Observing Network, TCCON)和大气成分变化观测网(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC)的主要观测仪器。然而, Bruker IFS125 系列仪器体积庞大、价格昂贵,需要大量的基础设备支持和定期维护,不能随意移动<sup>[8-9]</sup>。因此, Bruker 后续研发了轻便、紧凑、稳定的便携式傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 作为 Bruker IFS125 仪器的代替产品。该光谱仪可满足更大范围环境测量的需求,且温室气体浓度的反演精度已与 TCCON 相当<sup>[10-13]</sup>,例如: EM27/SUN 观测 XCO<sub>2</sub> 的平均偏差为  $0.2 \times 10^{-6}$ , XCH<sub>4</sub> 的平均偏差为  $0.8 \times 10^{-12}$  (与 TCCON 网的数据比较)<sup>[14]</sup>。我国幅员辽阔,气候变化范围大,便携式傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 更适合我国典型地区温室气体浓度的实时观测。目前,我们利用该仪器已经在合肥、敦煌、西藏、茂名等地开展了一系列观测,初步获得了我国部分地区温室气体浓度的分布特征。

敦煌市地处甘肃省西北部,位于甘肃、青海、新疆三省的交汇点,是典型的暖温带干旱性气候,降雨量少,昼夜温差大,日照时间长,具有典型西部城市的特征。本文利用傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 观测了敦煌地区气体分子的柱-平均摩尔分数(Dry air Mole Fractions, DMFs),针对地表气压对温室气体浓度的反演影响展开了定量分析,获得了敦煌这一典型地区 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 及 CO 4 种温室气体的浓度信息,其结果可以为温暖带干旱性气候温室气体源与汇的研究提供数据支撑和理论基础。

## 2 基本原理

傅里叶变换光谱仪(EM27/SUN)观测点位于敦煌市气象局(经度 94.68°E, 纬度 40.14°N), 站点海拔高度 1.075 km(见图 1(a))。光谱仪 EM27/SUN 包含干涉仪和太阳跟踪器两个部分(见图 1(b)), 光谱波段为 0.83~2.5 μm, 最大光程差为 1.8 cm(光谱分辨率为 0.5 cm<sup>-1</sup>), 光谱采集时间为 58 s(10 次扫描平均), 可实现多种气体分子的同时监测, 如 CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 等。



(a) 观测站点位于敦煌市气象局  
(a) Dunhuang meteorological bureau  
(b) EM27/SUN 傅里叶变换光谱仪  
(b) FTIR based EM27/SUN spectrometer

图 1 观测点位置

Fig. 1 Location of observing site

温室气体浓度反演包括垂直柱总量(Vertical Column Density, VCD)和柱-平均摩尔分子数(Dry air Mole Fractions, DMFs),反演方法是基于德国卡尔斯鲁厄理工学院(Karlsruhe Institute of Technology, KIT)气象和气候研究所开发的 PROFFIT(PROFILE FIT)反演算法<sup>[15]</sup>,该算法是最优估算法和非线性逐次迭代的结合,利用 Tikhonov-Phillips 约束条件,在对数尺度上对温室气体柱浓度进行反演。反演算法主要包含前向模型和后向反演两个部分。前向模型可以表述为:

$$y = F(x, u), \quad (1)$$

其中:  $x$  是  $n$  维参数,包括未知的独立参量,如垂直柱浓度;  $u$  代表固定参数,例如气压、温度等;  $y$  是  $m$  维测量值,  $F$  是非线性模型,可线性化为下列形式:

$$y - y_0 = \mathbf{K}(x - x_0), \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{K}$  是  $m \times n$  维的雅可比矩阵,  $\mathbf{K} = \Delta F / \Delta x$ ,  $x_0$  是线性化参考点,且  $y_0 = F(x_0)$ 。利用最小二乘法,使得测量信号( $y_{\text{meas}}$ )与模拟信号  $y$  的差值  $dy$  最小,即有:

$$|\Delta y|^2 \mathbf{S}_y^{-1} = |y_{\text{meas}} - y|^2 \mathbf{S}_y^{-1} = (y_{\text{meas}} - y)^T \mathbf{S}_y^{-1} (y_{\text{meas}} - y), \quad (3)$$

其中  $\mathbf{S}$  是反演状态参量的协方差矩阵。采用高斯-牛顿算法解决非线性并执行多次迭代,第  $i+1$  次迭代为:

$$x_{i+1} = x_i + (\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K}_i)^{-1} \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} (y_{\text{meas}} - y(x_i)), \quad (4)$$

在大气遥感时,由于未知量多于实测量,此时需要约束条件求解方程。在反演过程中,采取固定的廓线或者缩放的先验廓线,并采用

Tikhonov-Phillips 约束条件, 规则化方程为:

$$|y_{\text{meas}} - y|^2 \mathbf{S}_y^{-1} + \gamma |\mathbf{B}(x - x_a)|^2 = \text{minimal}, \quad (5)$$

其中:  $x_a$  是变化参量的先验值集合,  $\mathbf{B}$  是规则化矩阵,  $\gamma$  是规则化参数。在约束条件下的第  $i+1$  次迭代为:

$$x_{i+1} = x_i + (\mathbf{K}_i + \gamma \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_y^{-1} (y_{\text{meas}} - y(x_i) + \gamma \mathbf{B}^T \mathbf{B}(x_a - x_i)). \quad (6)$$

由于傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 是低分辨率光谱仪(分辨率为  $0.5 \text{ cm}^{-1}$ ), 因此, 在反演过程中采用缩放先验廓线的方法进行反演。VCD 及气体柱平均 DMFs 可以表示如下:

$$\begin{aligned} \text{Column}_{\text{gas}} &= \int_0^{P_s} \frac{c_k \omega_{o,k}(p) dp}{m_{\text{dry}} g(\varphi, p)}, \\ X_{\text{gas}} &= \frac{\text{Column}_{\text{gas}}}{\text{Column}_{\text{dryair}}}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中:  $P_s$  为地表气压,  $p$  为气压,  $g$  为重力加速度,  $m_{\text{dryair}}$  为干空气的分子质量, 缩放因子为  $c_k$ ,  $\omega_{o,k}(p)$  为先验廓线,  $\text{Column}_{\text{gas}}$  是气体的柱总量,  $\text{Column}_{\text{dryair}}$  是干空气柱总量, 其公式为:

$$\text{Column}_{\text{dryair}} = \frac{P_{\text{gr}}}{g m_{\text{dryair}}} - \text{Column}_{\text{H}_2\text{O}} \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{dryair}}}, \quad (8)$$

其中: 参数  $P_{\text{gr}}$  表示地表气压,  $g$  是重力加速度,  $m_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $m_{\text{dryair}}$  分别为水汽和干空气的分子质量,  $\text{Column}_{\text{H}_2\text{O}}$  为水汽柱总量。在反演过程中, 地表气压的变化不仅改变压强廓线, 且影响干空气柱总量。因此, 在反演过程中, 需要准确的地表气压值。在反演过程中为了减少仪器误差, 常采用氧气作为内部标准反演气体柱平均 DMFs:

$$X_{\text{gas}} = 0.2095 \times \frac{\text{Column}_{\text{gas}}}{\text{Column}_{\text{O}_2}}, \quad (9)$$

其中:  $\text{Column}_{\text{gas}}$  是气体的柱总量,  $\text{Column}_{\text{O}_2}$  是氧气的柱总量。反演过程中的压强和温度廓线均来自美国国家环境预报中心 (National Centers Environmental Prediction, NCEP) 的分析数据。

### 3 结果分析与讨论

洛伦兹展宽、多普勒展宽均是压强及温度的函数, 决定着分子光谱的吸收线型。地表气压不仅是气体柱平均摩尔分数的重要参量, 而且在反演过程中对气压廓线初值进行修正, 其准确度影响反演结果的精度, 例如总碳柱观测网 TCCON 要求地表气压的准确度优于  $0.3 \text{ hPa}$ , 研究表明低估的地表气压会导致反演结果偏低, 反之亦然<sup>[16]</sup>。因此, 在反演过程中, 需要足够精确的地

表气压, 以避免对反演造成偏差。

#### 3.1 地表气压参数敏感性分析及柱-平均摩尔分数的变化趋势

在反演过程中, 重点分析了地表实测气压值对反演结果的影响。首先利用最优估算法分别反演有、无地表实测气压两种条件下的  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  (见图 2, 彩图见期刊电子版), 然后给地表实测气压一个扰动, 分析柱总量及柱-平均摩尔分数对地表气压偏离真实值的敏感性。获得了敦煌地区 2018 年 6 月 27 日到 7 月 21 日大气中  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的时间序列。选取天气条件相对较好的 7 月 6 日的数据进行分析。

7 月 6 日, 水汽浓度变化较大 (见图 2(a)), 变化幅度为  $5219.12 \times 10^{-6} \sim 6149.90 \times 10^{-6}$ 。由于太阳辐射增强水汽蒸发, 在 10:00 左右最大, 18:00 达到最小, 从图 2(a) 可以看出, 地表气压对  $\text{XH}_2\text{O}$  的影响, 两者最大偏差为  $7.8 \times 10^{-6}$ , 相对偏差在 0.15% 左右。  $\text{XCO}_2$  的变化较平稳 (见图 2(b)), 考虑地表实测气压的影响, 反演结果 (红色圆点) 明显低于不考虑地表实测气压的反演值 (黑色正方形), 考虑地表实测气压条件下  $\text{XCO}_2$  在  $410.56 \times 10^{-6} \sim 413.60 \times 10^{-6}$  变化, 变化幅度为  $3.04 \times 10^{-6}$ , 日平均值为  $412.42 \times 10^{-6}$ ; 后者  $\text{XCO}_2$  在  $411.69 \times 10^{-6} \sim 414.96 \times 10^{-6}$  变化, 变化幅度为  $3.27 \times 10^{-6}$ , 日平均值为  $413.73 \times 10^{-6}$ , 两者平均值的相对偏差为 0.32%。

$\text{XCH}_4$  的变化趋势 (见图 2(c)) 与  $\text{XCO}_2$  的变化相似, 主要来自两方面: 一是具有相同的排放源, 例如人为排放等; 二是对流层高度变化和大气稳定度变化等气象条件导致两种气体的稀释与扩散具有相同的规律。考虑地表实测气压的影响, 反演结果 (红色圆点) 明显低于不考虑地表气压的反演值 (黑色正方形), 两者平均值的相对偏差为 0.1%。由于  $\text{CO}$  与  $\text{OH}$  的光化学作用,  $\text{XCO}$  呈现先增大后减小的变化趋势, 在中午 12:00 达到最大 (见图 2(d)); 考虑地表实测气压的影响, 反演结果 (红色圆点) 略小于不考虑地表气压的值 (黑色正方形)。进一步分析地表实测气压对  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的影响, 给地表气压一个扰动, 扰动量设置如下:  $\Delta p = 1, 2, 3, -1, -2, -3 \text{ hPa}$ , 计算  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的值, 并与扰动之前相比较, 分析其相对偏差随地表气压的变化, 如图 3 所示。

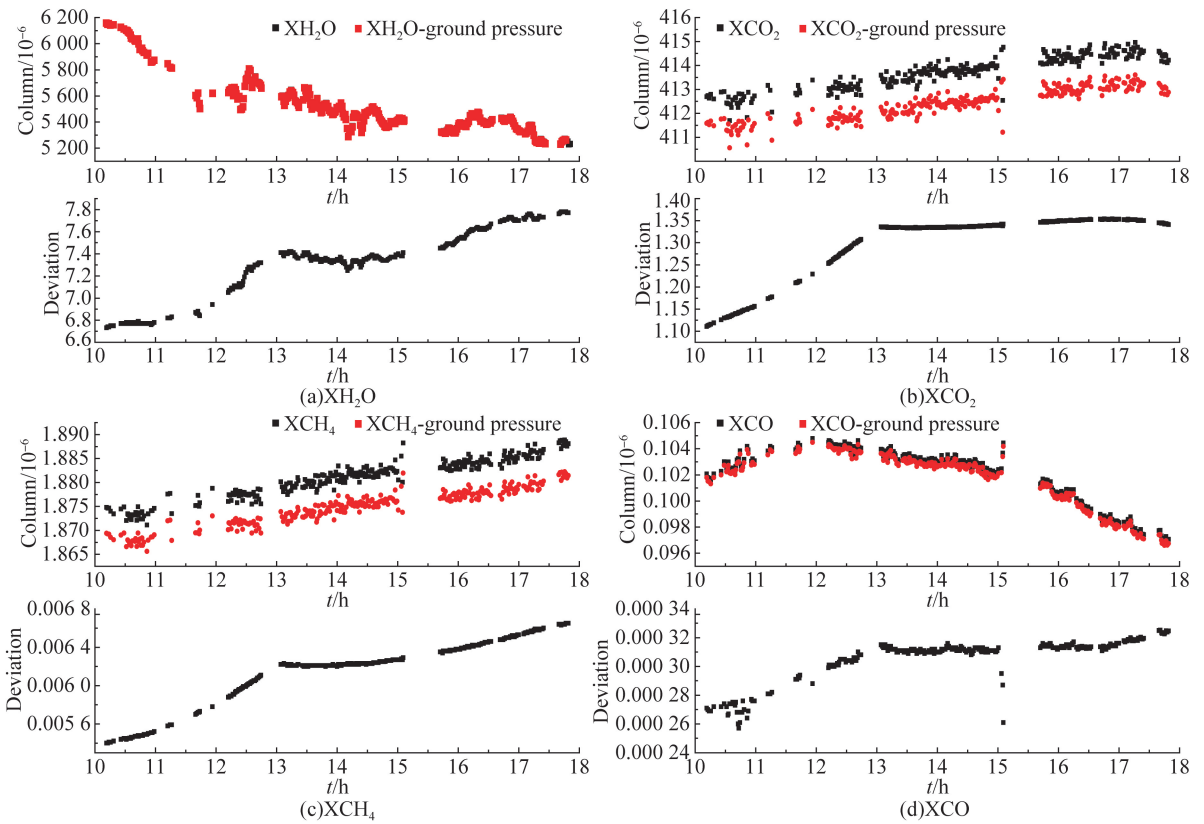


图 2 XH<sub>2</sub>O, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> 及 XCO 的时间序列及柱总量绝对偏差

Fig. 2 Time series of XH<sub>2</sub>O, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> and XCO on 06/07/2018 at Dunhuang and deviation between columns calculated with and without ground pressure

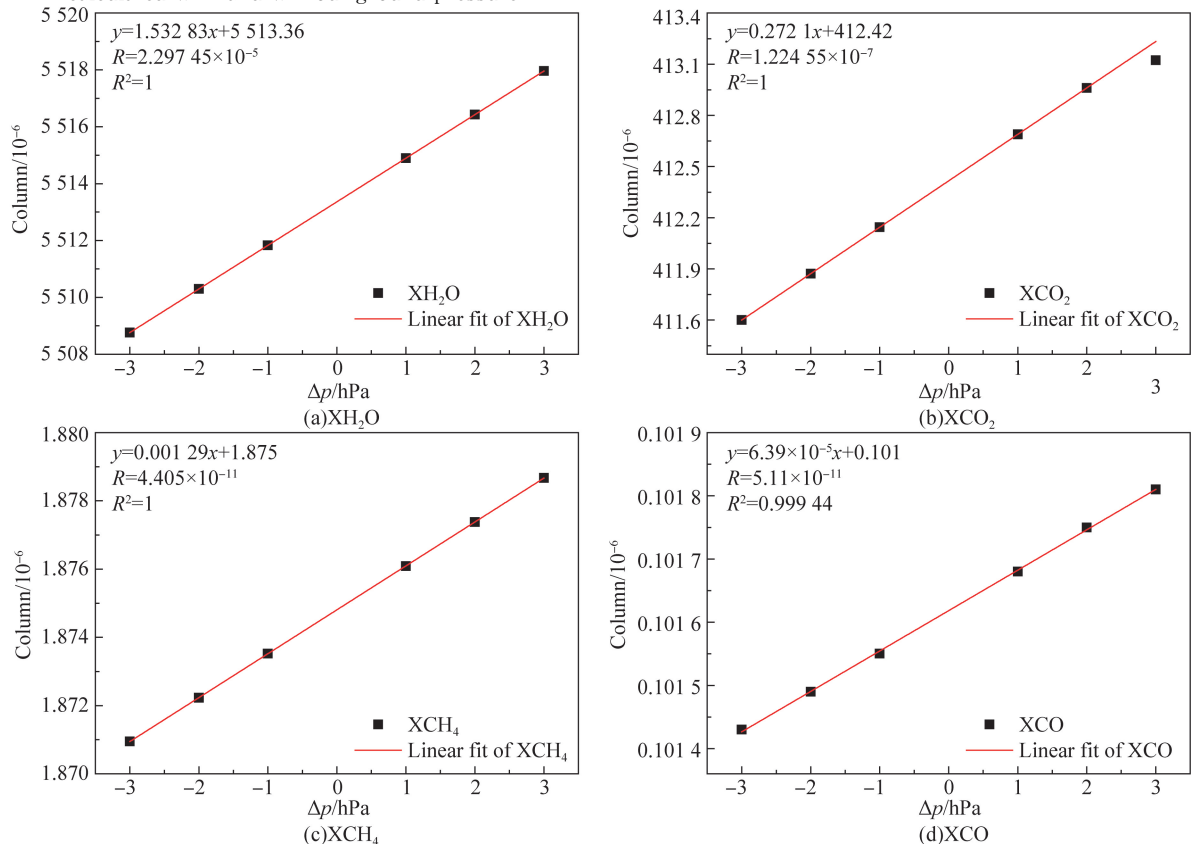


图 3 2018 年 7 月 6 号 XH<sub>2</sub>O, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> 及 XCO 柱总量日平均值随地表气压扰动的变化

Fig. 3 Daily averages of XH<sub>2</sub>O, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> and XCO changes with surface pressure disturbance

由图 3 可知,  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的柱总量平均值与地表气压扰动均呈正相关, 相关系数高于 0.99, 即柱总量平均值随着地表气压的增大而增大。  $\text{XH}_2\text{O}$ ,  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的日平均值随地表气压扰动的变化率分别为: 1.532 8, 0.272 1, 0.001 29 及  $6.392\ 86 \times 10^{-5}$ , 地表气压影响气体柱-平均摩尔分数的反演, 即地表气压偏大, 反演的柱-平均摩尔分数大于真实值; 反之, 反演的柱-平均摩尔分数小于真实值。不同气体柱-平均摩尔分数的反演对地表气压敏感性不同, 原因可能是地表气压对分子柱总量的反演影响程度不同, 依据式(9), 气体分子柱-平均摩尔分数与气体分子柱总量及  $\text{O}_2$  分子柱总量有关, 气体分子柱总量对地表气压误差的敏感性决定了地表气压对气体柱-平均摩尔分数的影响程度。当某一种气体柱总量随地表气压的变化率与  $\text{O}_2$  柱总量随地表气压变化率相差较小时, 则该柱-平均摩尔分数随地表气压变化较慢; 反之, 当两者变化率相差

较大时, 柱-平均摩尔分数随地表气压变化较快, 即柱-平均摩尔分数对地表气压比较敏感。

为了验证上述分析, 研究  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  气体的相对柱总量随地表气压的变化关系, 如图 4 所示。相对柱总量与地表气压呈负相关(见图 4(a)),  $\text{O}_2$  分子的斜率绝对值最大, 其次是  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  气体分子, 说明  $\text{O}_2$  分子柱总量对地表气压最敏感, 其次是  $\text{H}_2\text{O}$  分子。不同气体分子柱总量对地表气压的敏感性不同的原因可能与气体分子在大气层中的分布有关, 低层大气分子对地表气压更敏感, 由于低层大气的分子线型主要是碰撞引起的洛伦兹线型, 该线型与气压密切相关。  $\text{H}_2\text{O}$  分子主要分布在边界层,  $\text{O}_2$  均匀分布在大气中, 而  $\text{CO}_2$  及  $\text{CH}_4$  等气体分子主要分布在对流层, 因而  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  柱总量对地表气压比较敏感, 其他气体分子的柱总量对地表气压的敏感性稍弱。

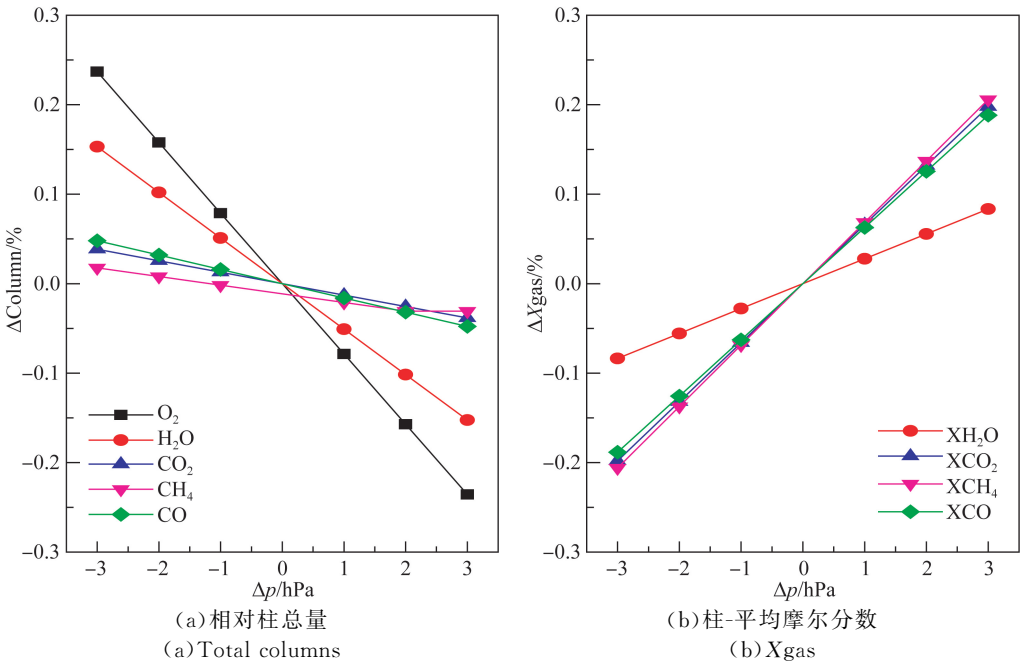


图 4  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的相对柱总量随地表气压的变化

Fig. 4 Difference of total columns of  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}$  retrievals with variable pressures

由图 4(a)可知, 当地表气压增加 1 hPa, 导致  $\text{O}_2$  柱总量减少 0.078%,  $\text{H}_2\text{O}$  柱总量减少 0.051%,  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  柱总量分别减少 0.013% 和 0.021%,  $\text{CO}$  柱总量减少 0.016%。由于气体分子的柱总量随地表气压的变化率小于  $\text{O}_2$  分子柱总量随地表气压的变化率, 柱-平均摩尔分数

( $\text{X}_{\text{gas}}$ )与地表气压呈正相关(见图 4(b)), 当地表气压改变 1 hPa,  $\Delta\text{XH}_2\text{O}$  改变最小, 其相对变化量为 0.027 8%,  $\Delta\text{XCO}_2$ ,  $\Delta\text{XCH}_4$  和  $\Delta\text{XCO}$  分别为 0.065 9%, 0.068 6% 及 0.062%, 与前文分析结论一致。

### 3.2 气体柱-平均摩尔分数的变化趋势

基于以上分析,地表气压及其精度会直接影响反演结果,在反演过程中准确的地表气压参量是必不可少的。因此,本文利用敦煌市气象局地

表气压参数,基于 PROFFIT 反演算法,获得了敦煌地区 2018 年 6 月 27 日到 7 月 21 日大气中  $X_{H_2O}$ ,  $X_{CO_2}$ ,  $X_{CH_4}$  及  $X_{CO}$  的时间序列,如图 5 所示。

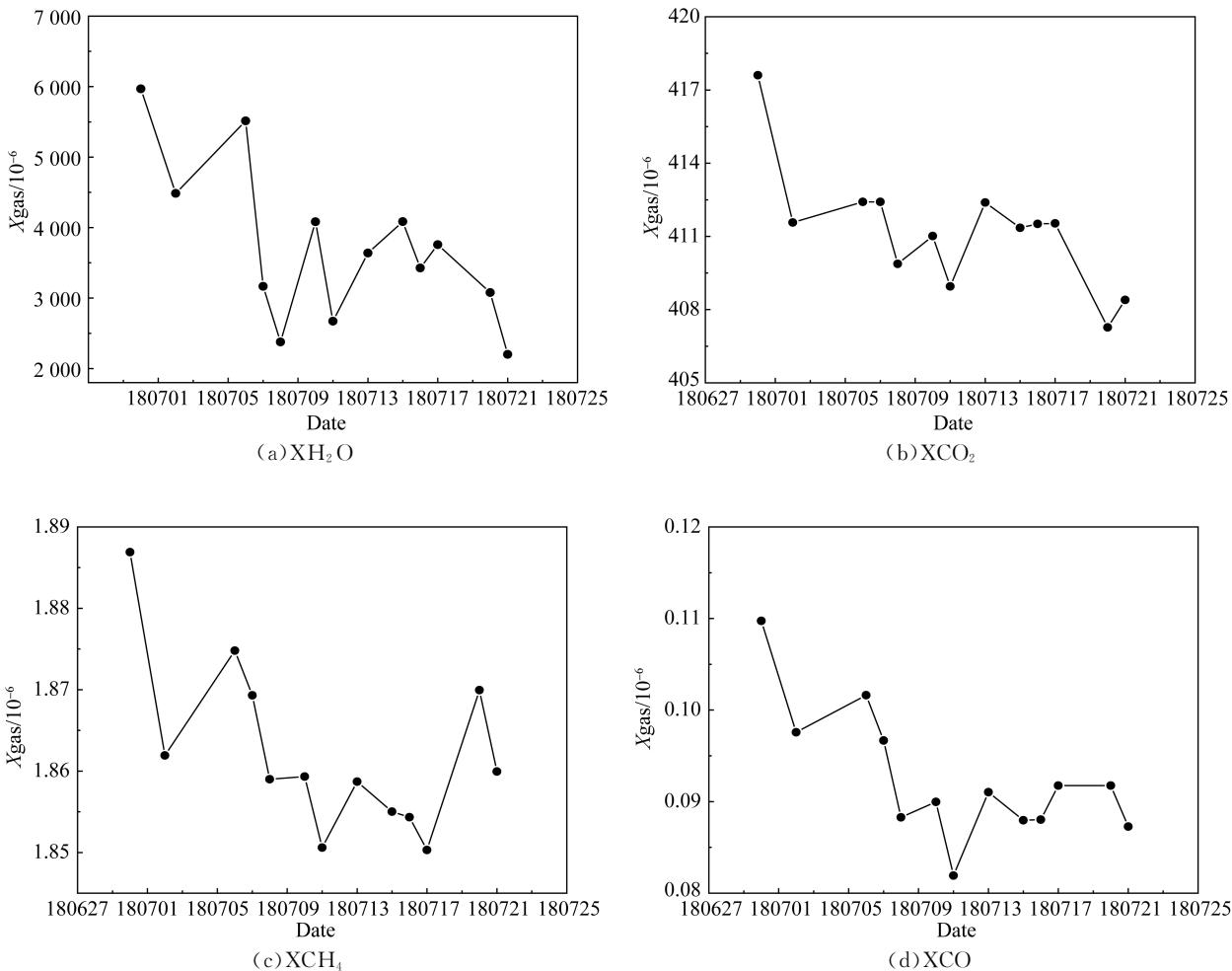


图 5 2018 年 6 月至 7 月敦煌大气中  $X_{H_2O}$ ,  $X_{CO_2}$ ,  $X_{CH_4}$  和  $X_{CO}$  的时间序列

Fig. 5 Time series of  $X_{H_2O}$ ,  $X_{CO_2}$ ,  $X_{CH_4}$  and  $X_{CO}$  from June to July 2018 at Dunhuang

在观测期间,  $H_2O$ ,  $CO_2$  的波动最大。  $X_{H_2O}$  平均值在  $2\ 000 \times 10^{-6} \sim 6\ 000 \times 10^{-6}$  变化;  $X_{CO_2}$  平均值在  $407.27 \times 10^{-6} \sim 417.60 \times 10^{-6}$  变化, 最大偏差为  $10.33 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $411.25 \times 10^{-6}$ ;  $X_{CH_4}$  平均值在  $1.850 \times 10^{-6} \sim 1.887 \times 10^{-6}$  变化, 平均值为  $1.862 \times 10^{-6}$ ;  $X_{CO}$  平均值在  $0.082 \times 10^{-6} \sim 0.110 \times 10^{-6}$  变化, 平均值为  $0.093 \times 10^{-6}$ 。上述 4 种气体分子均在 2018 年 6 月 30 号出现最大值, 其原因可能与天气状况、局地气象条件及大气输送等有关, 如人为排放等因素。利用

后向轨迹模型 HYSPLIT 分析 6 月 30 日的 72 h 气体分子输送轨迹(见图 6), 从气体分子轨迹来看, 大气气流的输送轨迹主要来自西北方向, 3 类轨迹的起源来自新疆维吾尔自治区, 中高层气流移动速度较快, 两类轨迹分别从伊犁哈萨克自治州与塔城地区出发, 在阿勒泰地区相遇, 途经哈密市, 向东南方向运输到敦煌市; 低层气流移动较慢, 起源于哈密市伊州区, 向西北方向到达哈密市巴里坤哈萨克自治州, 气流受到塔斯托别山的阻挡折回向东南方向运输到达敦煌市。

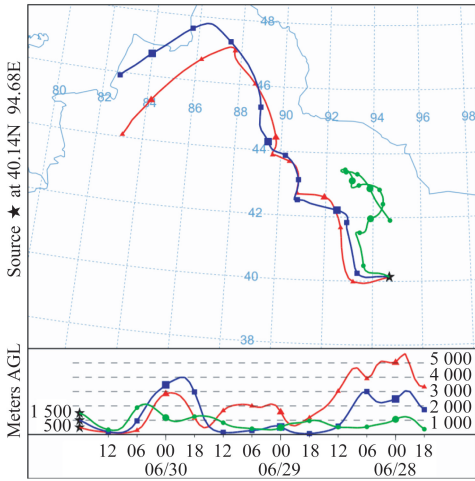


图 6 2018 年 6 月 30 号 72 h 后向轨迹

Fig. 6 Cluster analysis of 72 hour back trajectories from 30 June 2018 in Dunhuang

观测期间,同时利用探空气球获得风速风向数据,具体测量数据见表 1 及图 7。观测期间的

最大风速为 2.6 m/s(7/9),风频率高的方位是 NNW(北西北),这与 HYSPLIT 模型模拟的后向轨迹图结果一致。敦煌市气象局北西北方向主要是一片居民区,从后向轨迹图判断空气气流是从新疆地区到达该区域将人为污染源输送到观测站点。

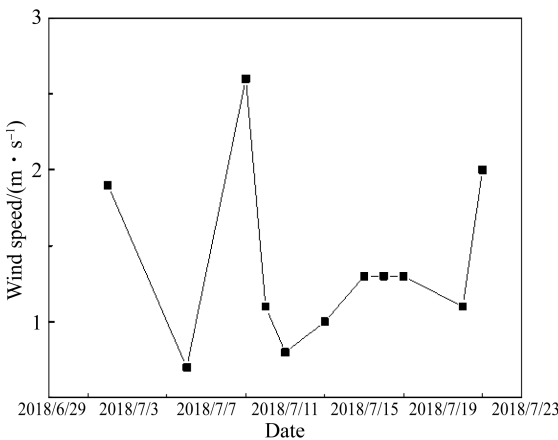
### 3.3 地基测量与其他数据源的对比分析

用 Xgas 日标准差与日平均值的比值来表示该站点的测量精度<sup>[16]</sup>。选取 7 月 20 号、21 号连续两天的测量结果计算 4 种气体浓度的测量精度,并将反演结果与其他数据源进行对比。计算出敦煌站点 XH<sub>2</sub>O, XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> 及 XCO 的测量精度分别为 2.3%, 0.14%, 0.12% 及 1.7%, 便携式 EM27/SUN 观测 CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 的精度均优于 IFS125HR, 这一结果与文献<sup>[16]</sup>中的研究结果一致, TCCON 规定的 CO<sub>2</sub> 精度及 CH<sub>4</sub> 精度分别要求在 0.25% 及 0.5% 以内<sup>[17-18]</sup>。将地基观测的 XH<sub>2</sub>O 与探空气球数据进行对比, 结果见表 2。

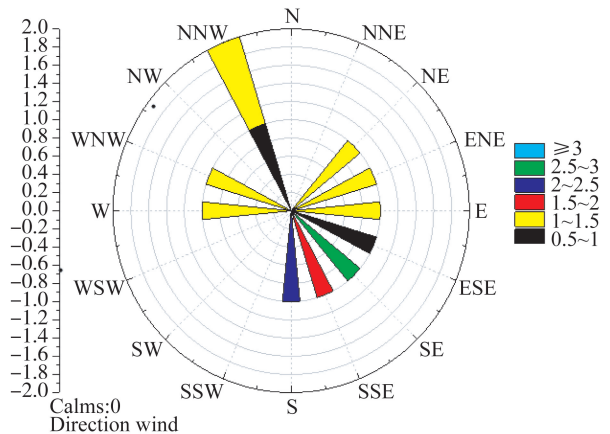
表 1 观测期间地表风速及风向

Tab. 1 Ground-level wind speed and direction in measurement days

Date	7/2	7/6	7/9	7/10	7/11	7/13	7/15	7/16	7/17	7/20	7/21
Speed/(m · s <sup>-1</sup> )	1.9	0.7	2.6	1.1	0.8	1.0	1.3	1.3	1.3	1.1	2
Direction	327	164	326	97	289	163	105	279	218	247	8



(a) 地表风速  
(a) Ground-level wind speed



(b) 风玫瑰图  
(b) Wind rose diagram

图 7 风速及风向

Fig. 7 Wind speeds and directions

表 2 地基测量 XH<sub>2</sub>O 与探空气球数据对比

Tab. 2 Comparison of XH<sub>2</sub>O based on EM27/SUN with air balloon data

日期\仪器	EM27/SUN/×10 <sup>-6</sup>	探空气球/×10 <sup>-6</sup>
180720	3 078	2 723
180721	2 201	1 739

探空气球获得的是湿度随高度的分布,其高度在 30 km 左右,利用相对湿度、水汽分压以及体积混合比的转化关系,将湿度量转换为 H<sub>2</sub>O 的混合比<sup>[19]</sup>。相对于探空气球,便携式光谱仪 EM27/SUN 测量的 XH<sub>2</sub>O 的结果偏大 13%,与 2017 年罗马尼亚电子研究所 (IONE; the

Romanian National Institute for Research and Development in Optoelectronics) 发现的结果类似,该研究所将 EM27/SUN 的结果与微波辐射计的结果进行对比,发现  $\text{H}_2\text{O}$  的柱总量高 20%<sup>[2]</sup>。出现偏差的可能原因主要有以下几点:一是数据的时间差,探空气球数据是中午 13:10—13:30,EM27/SUN 光谱仪是 12:44 时刻的数据,两者数据存在 30 min 左右的时间差,由于观测季节是最炎热的夏季(7 月份),气候干旱、蒸发快,较小的时间差也可能产生较大的变化;二是反演误差,便携式光谱仪 EM27/SUN 获得  $\text{H}_2\text{O}$  含量是通过反演算法获得,且依赖于反演先验廓线,包括温度、压强、气体分子的廓线等,因此存在反演误差;三是探空测量误差以及探空气球进行的路径与太阳光线经过的路线不完全一致也会导致偏差。探空气球是原位测量,可以作为 EM27/SUN 光谱仪反演  $\text{H}_2\text{O}$  的对比数据源。

进一步验证地基傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 的观测结果,将该结果分别与 WACCM (The Whole Atmosphere Community Climate Model) 及 GOSAT (The Greenhouse gases Observing Satellite)

卫星数据进行对比。GOSAT 卫星数据是以测量站点敦煌市为中心,经纬度在  $\pm 1.5^\circ$  范围内的数据,比较相同时间(7 月 8 号)的日平均值,地基  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  的观测值分别为  $409.87 \times 10^{-6}$  和  $1.860 \times 10^{-6}$ ,GOSAT 卫星观测  $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$  的值分别为  $402.80 \times 10^{-6}$  及  $1.835 \times 10^{-6}$ ,地基观测明显偏高,两者  $\text{XCO}_2$  的绝对偏差为  $7.07 \times 10^{-6}$ , $\text{XCH}_4$  的绝对偏差为  $0.025 \times 10^{-6}$ ,存在偏差的原因是地基观测对温室气体浓度更敏感。地基测量结果与 WACCM 数据的对比如图 8 所示。相比较 WACCM 数据,地基  $\text{XCO}_2$  数值偏大,大部分测量值大于 WACCM 数据(见图 8(a)),最大绝对偏差达到  $8.0 \times 10^{-6}$ ;而地基  $\text{XCH}_4$  结果偏低(见图 8(b)),最大绝对偏差为  $0.032 \times 10^{-6}$ ,WACCM 低估了  $\text{XCO}_2$  的浓度值,而高估了  $\text{XCH}_4$  的浓度值。产生这种误差可能主要来自两方面的原因:一是 WACCM 数据是每天 4 个数值,每间隔 6 小时获得一个数据,数据量比较少,平均作为当天平均值会产生偏差;二是 WACCM 数据主要是通过 GEOS-5 模型获得,与实地观测数据存在一定的偏差。

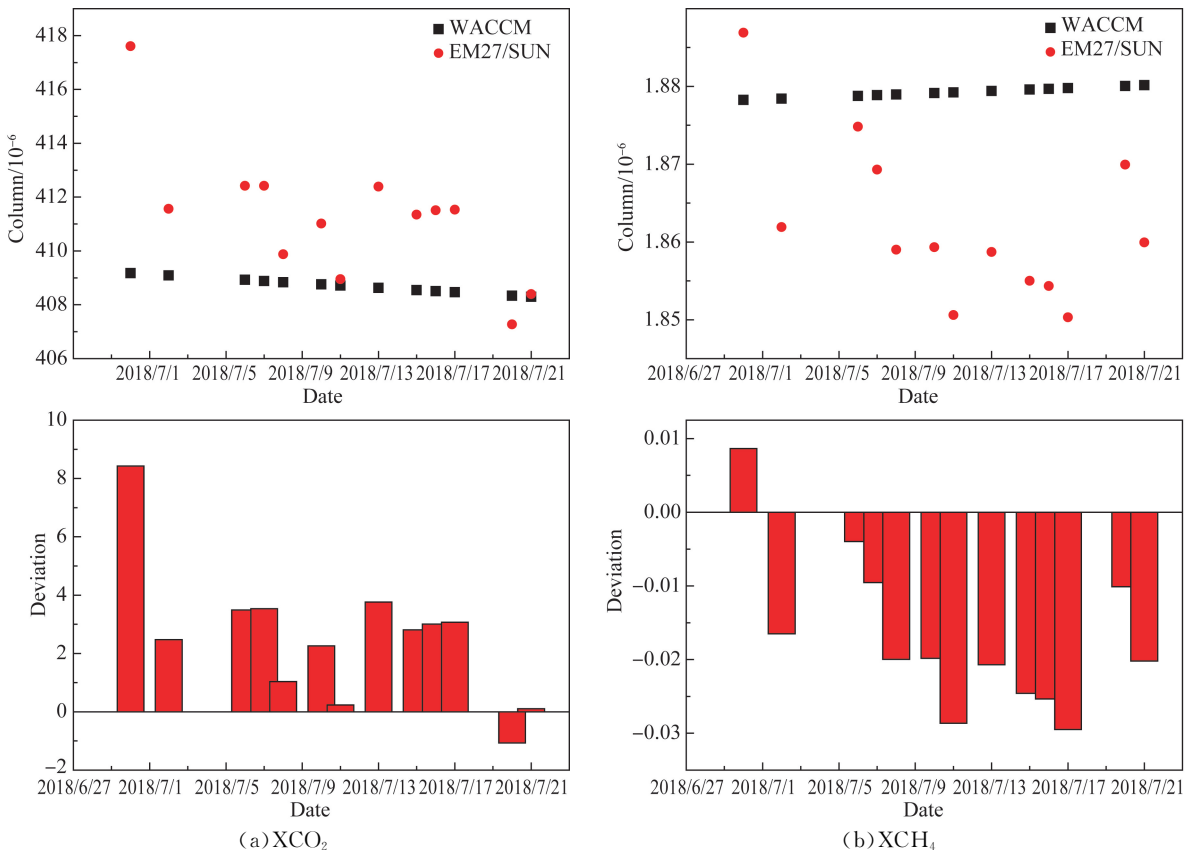


图 8 地基测量  $\text{XCO}_2$  和  $\text{XCH}_4$  与 WACCM 测量的对比

Fig. 8  $\text{XCO}_2$  and  $\text{XCH}_4$  based on EM27/SUN respectively compared with those based on WACCM

## 4 结 论

本文利用地基便携式傅里叶变换光谱仪 EM27/SUN 观测了敦煌地区  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  气体的分子浓度,获得了 2018 年 6 月 27 日到 7 月 21 日敦煌地区大气中  $\text{XH}_2\text{O}$ 、 $\text{XCO}_2$ 、 $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的时间序列,重点分析了柱-平均 DMFs 对地表气压的敏感性,计算了敦煌站点 4 种气体分子 DMFs 的测量精度,对比了地基反演数据与 GOSAT 卫星数据及 WACCM 模式模拟数据之间的差异。对比结果表明:地表气压对浓度反演结果的影响较大,低估的地表气压导致反演结果偏低, $\text{XH}_2\text{O}$ 、 $\text{XCO}_2$ 、 $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  浓度反演与地表气压密切相关,4 种气体分子的 DMFs 与地表气压的相关系数高于 0.99。气体分子柱总量对地表气压的敏感程度决定柱-平均摩尔分数对地表气压的敏感性,当地表气压改变 1 hPa 时, $\Delta\text{XH}_2\text{O}$ 、 $\Delta\text{XCO}_2$ 、 $\Delta\text{XCH}_4$  和  $\Delta\text{XCO}$  分别为 0.027 8%、0.065 9%、0.068 6% 及 0.062 0%。

## 参考文献:

- [1] 李晶,王跃思,刘强,等.北京市两种主要温室气体浓度的日变化[J].气候与环境研究,2006,11(1):49-56.  
LI J, WANG Y S, LIU Q, et al.. Diurnal variation of two greenhouse gases in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(1):49-56. (in Chinese)
- [2] FREY M. *Technische Aspekte der Überwachung der akustischen Qualität der Fahrwege im Straßenverkehr Abschlussbericht* [D]. Karlsruhe Institute of Technology, 2018.
- [3] 高学杰,李栋梁,赵宗慈,等.温室效应对青藏高原及青藏铁路沿线气候影响的数值模拟[J].高原气象,2003,22(5):458-463.  
GAO X J, LI D L, ZHAO Z C, et al.. Numerical simulation for influence of greenhouse effects on climatic change of Qinghai-Xizang plateau along Qinghai-Xizang railway [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5):458-463. (in Chinese)
- [4] 单昌功,刘诚,王薇,等.高分辨率太阳吸收光谱二氧化碳反演中参数的敏感性分析[J].光谱学与光谱分析,2017,37(7):1997-2003.  
SHAN CH G, LIU CH, WANG W, et al.. Analysis of sensitivity of the parameters on carbon dioxide retrieval using high-resolution solar absorption spec-

在测量期间,敦煌站点  $\text{XH}_2\text{O}$ 、 $\text{XCO}_2$ 、 $\text{XCH}_4$  及  $\text{XCO}$  的测量精度分别为 2.3%、0.14%、0.12% 及 1.7%, $\text{XCO}_2$  和  $\text{XCH}_4$  的测量精度均在总碳柱观测网 TCCON 要求的范围之内。 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  的浓度日变化幅度波动较大, $\text{XH}_2\text{O}$  日平均值在  $2\ 000 \times 10^{-6} \sim 6\ 000 \times 10^{-6}$  变化, $\text{XCO}_2$  日平均值在  $407.27 \times 10^{-6} \sim 417.60 \times 10^{-6}$  变化,最大偏差为  $10.33 \times 10^{-6}$ , $\text{XCH}_4$  日平均值在  $1.850 \times 10^{-6} \sim 1.887 \times 10^{-6}$  变化,平均值为  $1.862 \times 10^{-6}$ , $\text{XCO}$  日平均值在  $0.082 \times 10^{-6} \sim 0.110 \times 10^{-6}$  变化,平均值为  $0.093 \times 10^{-6}$ 。相对于 GOSAT 卫星数据,地基  $\text{XCO}_2$ 、 $\text{XCH}_4$  的观测值偏大, $\text{XCO}_2$  的绝对偏差为  $7.07 \times 10^{-6}$ , $\text{XCH}_4$  的绝对偏差为  $0.025 \times 10^{-6}$ ;地基  $\text{XCO}_2$  多数反演结果均大于 WACCM 数据,最大绝对偏差达到  $8.0 \times 10^{-6}$ ,地基  $\text{XCH}_4$  反演结果小于 WACCM 数据,最大绝对偏差为  $0.032 \times 10^{-6}$ 。

实时观测数据更能反映当地的具体情况,上述研究结果可为我国温暖干旱性气候温室气体源与汇的研究提供数据支撑和理论基础。

- tra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7):1997-2003. (in Chinese)
- [5] 田园,孙友文,谢品华,等.高分辨率傅里叶变换红外光谱反演环境大气中  $\text{CO}_2$  浓度的质量优化方法[J].光谱学与光谱分析,2017,37(1):48-53.  
TIAN Y, SUN Y W, XIE P H, et al.. Quality optimization method for ambient  $\text{CO}_2$  inversion of high resolution Fourier transform infrared spectrum [J]. *Pectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(1):48-53. (in Chinese)
- [6] 赵敏杰,司福祺,江宇,等.星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标[J].光学精密工程,2013,21(3):567-574.  
ZHAO M J, SI F Q, JIANG Y, et al.. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):567-574. (in Chinese)
- [7] 李春光,董磊,王一丁,等.基于 TDLAS 和 ICL 的紧凑中红外痕量气体探测系统[J].光学精密工程,2018,26(8):1855-1861.  
LI CH G, DONG L, WANG Y D, et al.. Compact mid-infrared trace gas detection system based on TDLAS and ICL [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8):1855-1861. (in Chinese)
- [8] 徐兴伟,王薇,刘诚,等.基于太阳吸收光谱观测大气一氧化碳柱总量[J].光谱学与光谱分析,2018,

- 38(5):1329-1334.
- XU X W, WANG W, LIU C, *et al.*. Observations of total columns of CO based on solar absorption spectra [J]. *Spectrosc Spect Anal.* 2018, 38(5): 1329-1334. (in Chinese)
- [9] 程巴阳,高闯光,徐亮,等. 基于直射太阳光红外吸收光谱技术的大气中CH<sub>4</sub>柱浓度遥测研究[J]. 量子电子学报,2014,31(1):18-24.  
CHENG S Y, GAO M G, XU L, *et al.*. Remote sensing of CH<sub>4</sub> column concentration in atmosphere based on direct-sun infrared absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(1):18-24. (in Chinese)
- [10] KIEL M, HASE F, BLUMENSTOCK T, *et al.*. Comparison of XCO abundances from the total carbon column observing network and the network for the detection of atmospheric composition change measured in karlsruhe [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, 9(5): 2223-2239.
- [11] KIEL M, WUNCH D, WENNERBERG P O, *et al.*. Improved retrieval of gas abundances from near-infrared solar FTIR spectra measured at the Karlsruhe TC-CON station [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, 9(2): 669-682.
- [12] HASE F, FREY M, KIEL M, *et al.*. Addition of a channel for XCO observations to a portable FTIR spectrometer for greenhouse gas measurements [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, 9(5): 2303-2313.
- [13] FREY M, HASE F, BLUMENSTOCK T, *et al.*. Calibration and instrumental line shape characterization of a set of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, 8(7): 3047-3057.
- [14] GISI M, HASE F, DOHE S, *et al.*. XCO<sub>2</sub>-measurements with a tabletop FTS using solar absorption spectroscopy [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2012, 5(11): 2969-2980.
- [15] HASE F, HANNIGAN J W, COFFEY M T, *et al.*. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 87(1): 25-52.
- [16] 田园. 基于地基高分辨率傅里叶变换红外光谱的大气甲烷反演及应用研究[D]. 安徽:中国科学院合肥物质科学研究院,2018.  
TIAN Y. *Research on Inversion and Application of CH<sub>4</sub> Based on Ground-based Hyper-resolution Fourier Transform Infrared Spectra* [D]. Anhui: Heifei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [17] WUN CH D, TOON G C, WENNERBERG P O, *et al.*. Calibration of the total carbon column observing network using aircraft profile data [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2010, 3:1351-1362.
- [18] WUNCH D, WENNERBERG P O, TOON G C, *et al.*. A method for evaluating bias in global measurements of CO<sub>2</sub> total columns from space [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11(23):12317-12337.
- [19] 燕振宇,马学谦. 青海高原不同地区大气水汽含量的对比分析[C]. 第35届中国气象学会年会论文集. 合肥,2018:240-248.  
YAN ZH N, MA X Q. Comparison and analysis of precipitation water vapor in different regions of Qinghai Plateau [C]. *The 35th China Academic Journal Electronic Publishing House*. Hefei, 2018:240-248. (in Chinese)

## 作者简介:



刘丹丹(1986—),女,安徽安庆人,博士,2013年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事温室气体浓度反演方面的研究。E-mail: baobaoldd@126.com; dandan86@mail.ustc.edu.cn

## 导师简介:



黄印博(1976—),男,博士,研究员,博士生导师,2005年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事激光大气传输物理特性及工程应用方面的研究。E-mail: ybhuang@aiofm.ac.cn

## 通讯作者:



曹振松(1979—),男,博士,副研究员,2003年于合肥工业大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要研究方向为红外高分辨率高灵敏度激光吸收光谱技术及其在大气、环境等方面的应用。E-mail: zscao@aiofm.ac.cn