

# 基于近红外差分吸收光谱技术的大气中水汽柱浓度反演

王汝雯<sup>1,2</sup>, 谢品华<sup>1,2,3\*</sup>, 徐晋<sup>1\*\*</sup>, 李昂<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>中国科学院区域大气环境研究卓越创新中心, 福建 厦门 361021

**摘要** 基于近红外被动差分吸收光谱技术(IR-DOAS)反演了大气中水汽柱浓度。从 Hitran 数据库中获得高分辨率截面,利用 Voigt 线型进行不同温压条件下的线性展宽,获得不同反演吸收截面。以仰角为 90°的光谱作为参考谱,对光谱进行反演,获取垂直柱浓度。通过与太阳光度计(CE-318)进行对比发现,结果具有很好的趋势一致性,线性相关系数为 0.99,且 IR-DOAS 的反演值与 CE-318 结果的差值在 IR-DOAS 反演误差范围内。将其应用于水汽斜柱浓度的空间分布获取发现,垂直方向水汽斜柱浓度随仰角的变化呈梯度变化,水平方向水汽斜柱浓度随观测方位角的变化几乎不变,分布均匀。

**关键词** 大气光学; 近红外差分吸收; 水汽测量; 光学遥感; 环境污染监测; 水汽空间分布

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0201001

## Retrieve of Water Vapor Column Density in Atmosphere Based on Near Infrared Differential Optical Absorption Spectroscopy

Wang Ruwen<sup>1,2</sup>, Xie Pinhua<sup>1,2,3\*</sup>, Xu Jin<sup>1\*\*</sup>, Li Ang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>CAS Center for Excellence in Urban Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** The atmospheric water vapor column density is retrieved based on near infrared passive differential optical absorption spectroscopy technique (IR-DOAS). The high-resolution cross sections are obtained from the Hitran database and Voigt profiles are used for linear broadening under different temperature and pressure conditions to obtain different inversion absorption cross section. The spectra with elevation angle of 90° is selected as reference spectra to retrieve H<sub>2</sub>O column to obtain the vertical column density. Compared with solar photometer (CE-318), it is found that the results are in good trend consistency with IR-DOAS, and the linear correlation coefficient is 0.99. The differences between inversion values of IR-DOAS and CE-318 are within the range of inversion error of IR-DOAS. It is found that the slant column density of water vapor in vertical direction varies gradiently with elevation angle, while the slant column density of water vapor in horizontal direction nearly uniform with observation azimuth, and the distribution is uniform.

**Key words** atmospheric optics; near-infrared differential optical absorption spectroscopy; water vapor measurement; optical remote sensing; environmental pollution monitoring; spatial distribution of water vapor

**OCIS codes** 010.0280; 010.7340; 010.1030; 010.1280

## 1 引 言

水汽是最重要的自然温室气体,是温室效应的

最大贡献者。其大气浓度随着温度的增加而剧烈增长,大气中增加的水分会更进一步加剧气候变化<sup>[1-3]</sup>;同时,水汽也是云形成的重要驱动力,在许多

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-09-03; 录用日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530644)

\* E-mail: phxie@aiofm.ac.cn; \*\* E-mail: jxu@aiofm.ac.cn

化学反应中也发挥了重要作用<sup>[4]</sup>。在全球范围内,对水的时空演变及变化趋势的分析,对于提高人类对地球气候系统的认识至关重要。国际上也一直在提高评估水汽测量值水平,例如世界气象组织(WMO)气候研究计划中的 GEWEX(Global Energy and Water Exchanges)水汽评估项目(<http://gewex-vap.org>)<sup>[4]</sup>。与大多数其他温室气体相反,大气中水汽分布与高度密切相关,其中约 99% 的水汽集中在 10~12 km 以下,75% 的水汽分布在 4 km 以下,大约 50% 的水汽分布在 2 km 以下。因此测量大气中各种空间和时间尺度上的水汽是十分必要的<sup>[5]</sup>。

目前水汽测量主要有探空,全球定位系统(GPS),傅里叶变换红外(FTIR),Cimel 和星载遥感系统。地基主要有 GPS 观测及太阳光度计(CE-318)。遥测最主要的方式是星载及机载。星载水柱浓度数据连续,覆盖范围广,可获得全球范围内水汽影响<sup>[6-7]</sup>及演变趋势<sup>[8-11]</sup>,可为全球气候变化预测提供可靠依据。星载 GOME, SCIAMACHY 及 GOME-2 都在红外波段对水进行测量反演。近期,Beirle 等<sup>[4]</sup>对三颗卫星的水汽反演进行了误差校正,以研究近 20 年的水汽-时间演变规律。机载差分雷达及机载腔衰荡技术具有高时间分辨率,利用这两种技术已获得水垂直廓线及体积混合比<sup>[12]</sup>。各类仪器使用的是不同类型的传感器,这些观测系统并不能直接进行对比<sup>[13-14]</sup>。而大气成分和变化检测网络(NDACC)及总碳柱观测网络(TCCON)进行的地基光谱测量可以提供高度准确的大气透射光谱,因此可将其作为水汽测量的参考标准<sup>[14]</sup>。

近年来,被动差分吸收光谱技术(DOAS)发展迅速,不仅被应用到紫外波段强吸收大气成分 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 等多种气体及气溶胶的实时测量,而且拓展到红外波段 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>O 等的测量。星载 SCIAMACH 实现了红外波段 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NO 和 CH<sub>4</sub> 等整层柱浓度测量<sup>[15]</sup>,不莱梅大学、波茨坦亥姆霍兹中心及德国地质科学研究中心联合开发的甲烷机载成像仪器(MAMAP)实现了 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的源通量计算<sup>[16-17]</sup>。就大气中水汽测量而言,Platt 等<sup>[18]</sup>利用 SCIAMACHY 和 GOME-2 收集的光谱,使用 DOAS 方法反演获得相似精度的陆地及海洋水汽总浓度柱。孙友文等<sup>[19]</sup>利用自主研发的红外 DOAS 仪器对环境水汽进行测量,并与 NDIR-60i 数据对比,一致性大于 0.93。刘进等<sup>[20]</sup>利用地基 MAX-DOAS 系统对水汽总柱浓度进行了测量,且与 CE-318 仪器对比趋势一致。

Christoph 等<sup>[21]</sup>首次利用可见光波段 DOAS 测得了火山烟羽中的水汽。虽然利用 DOAS 方法进行大气水汽测量的研究一直进行,但国内利用该方法测量水汽的研究相对较少,主要是因为水汽在大气环境中分布不稳定,与温度压强变化关系密切,密度大且易饱和。

本文利用近红外 DOAS(IR-DOAS)对环境大气中的水汽柱浓度进行测量,将仰角为 90° 的光谱作为参考谱,通过多截面参与拟合,获得水汽斜柱浓度,再通过几何矫正获得垂直柱浓度。相对单截面而言,多截面拟合不仅起到了温压修正的作用,还提高了反演精度。本文为利用 IR-DOAS 技术测量 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO 等气体的温压修正及反演精度的提高提供了新思路新方法。

## 2 基本原理

### 2.1 水汽吸收截面获取

由于在红外波段不能直接获取实验室高分辨率光谱,本课题组从 Hitran 数据库中获得 1590~1620 nm 波段水汽吸收截面,如图 1(a)所示,对其进行 Voigt 线型展宽以获得吸收截面。Voigt 线型由压力及多普勒展宽共同作用,其表达式为<sup>[22]</sup>

$$\sigma = \frac{F}{\gamma \pi^{3/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{1 + \left(\frac{x - \xi}{y}\right)^2} d\xi, \quad (1)$$

式中:  $F$  为温度  $T$  的函数,  $F = F_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \times \exp\left[\frac{E''hc}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$ ,  $T$  为实际温度,  $T_0$  为参考温度,  $E''$  为分子低能态能量,  $h$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常量,  $c$  为光速;  $y$  为压力展宽半宽  $\gamma$  与多普勒展宽半宽  $\gamma_D$  的函数  $y = \frac{\gamma}{\gamma_D} (\ln 2)^{1/2}$ , 同时  $\gamma$  与  $\gamma_D$  为温度  $T$  与压强  $P$  的函数,  $\gamma = \gamma_0 \frac{P}{P_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n$ ,  $\gamma_D = \frac{\vartheta_0}{c} \times \left(\frac{2kT \ln 2}{M}\right)^{1/2}$ ,  $P$  为实际大气压,  $P_0$  为参考大气压,  $M$  为水汽分子的质量;  $x$  为波数  $\vartheta$  与每条吸收线的中心波数  $\vartheta_0$  的函数  $x = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\gamma_D} (\ln 2)^{1/2}$ 。按照以上要求,根据 Hitran 获得的水汽吸收线,计算获得  $T = 296$  K,  $P = 101.325$  kPa 的高分辨率水汽吸收截面,如图 1(b)所示。再将获得的参考截面与光谱仪的仪器函数曲线[图 1(c)]进行卷积,获得有效吸收截面[图 1(d)]。

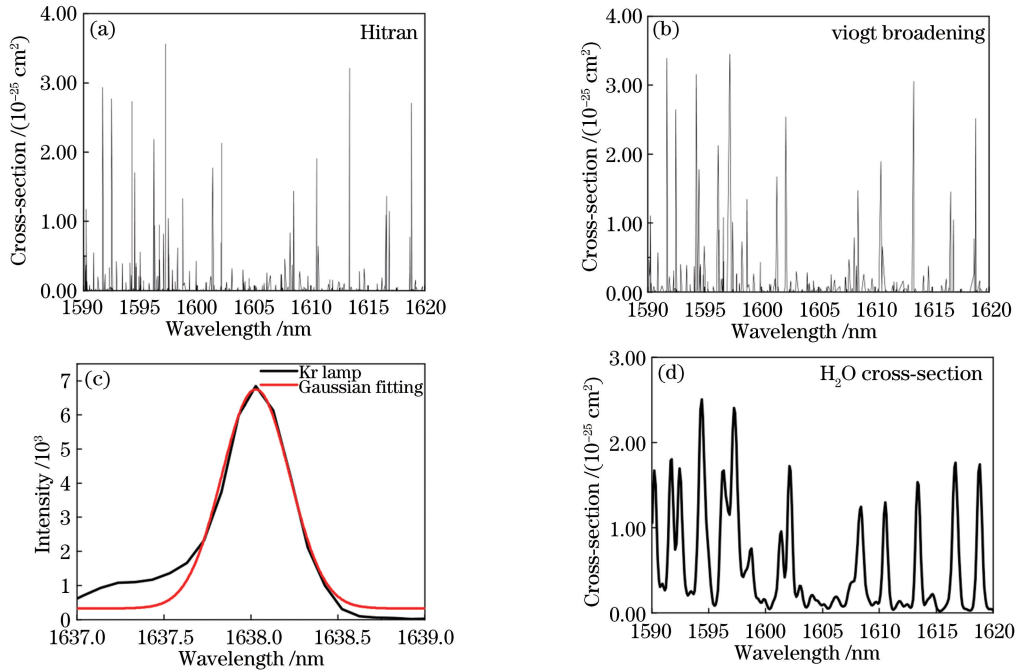


图 1 H<sub>2</sub>O 截面的获取示意图。(a)Hitran 数据库水汽吸收截面;(b)经过 Viogt 线型变化的水汽吸收截面;  
(c)光谱仪仪器函数曲线;(d)水汽有效吸收截面

Fig. 1 Schematic of Acquisition of H<sub>2</sub>O cross section. (a) Water vapor absorption cross-section in Hitran database; (b) water vapor absorption cross-section with Viogt linetype change; (c) instrument function of spectrometer; (d) effective absorption cross-section of H<sub>2</sub>O at wavelength band 1590~1620 nm

## 2.2 近红外 DOAS 原理

被动 DOAS 是以太阳光为光源,通过滤波等方法去除由气体分子造成的瑞利散射、拉曼散射及气溶胶散射等的影响,将大气中分子吸收的高频部分提取出来获得气体吸收的光学厚度 OD,再与分子截面进行最小二乘拟合,即测量值与模拟值对数差值最小,获得柱浓度信息。光学厚度表达式为<sup>[16-17]</sup>

$$A_{OD} = \sum_i^n \sigma_i(\lambda) C_i L, \quad (2)$$

式中, $\sigma_i(\lambda)$ 为第  $i$  种气体的吸收截面, $C_i$ 为第  $i$  种气体的浓度, $L$ 为光程。最小二乘拟合的表达式为

$$|I_n I_{i,M}(\lambda, p_i) - I_n I_{i,R}(\lambda)|^2 = |\delta_i|^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

式中, $I_{i,M}$ 表示第  $i$  种气体的测量光谱, $I_{i,R}$ 表示第  $i$  种气体的参考光谱, $\delta_i$ 表示反演误差的均方根, $\lambda$ 表示反演波段, $p_i$ 表示拟合参数。

## 2.3 水汽探测上限确定

水汽在大气中含量十分丰富,水汽体积混合比  $X(\text{H}_2\text{O})$ 取值范围为 0.1%~4%,对于利用 DOAS 测量水汽,饱和吸收会带来极大反演误差。为确保反演过程在线性范围内,首先需确定水汽饱和吸收上限。DOAS 在实际应用中的线性适用范围为

$\ln(I_0/I) \leq 0.7$ <sup>[23]</sup>,则吸收上限  $N_{\max} = 0.7/\sigma L$ , $\sigma$ 为吸收截面。如图 1(d)所示,水汽吸收截面在  $T = 276 \text{ K}$ 、 $P = 101.325 \text{ kPa}$ 、1590~1620 nm 波段,在 1594.3 nm 处有最大吸收截面  $2.5 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 。假设吸收光程为 1 m,则  $N_{\max} = 2.9 \times 10^{28} \text{ mg/cm}^2$ ,则任意光程吸收上限  $N_{\max} = (4.748 \times 10^7/L) \text{ mg/m}^3$ 。而 99% 的水汽集中在 10 km 以下,取光程为 10 km。理论值  $N_{\max} = 4.748 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ 。大气中  $X(\text{H}_2\text{O})$ 取值范围为 0.1%~4%,取最大值 4%(并非饱和浓度),则计算的最大值  $N = 2.816 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ ,小于理论值  $N_{\max} = 4.748 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ ,即可利用 DOAS 进行水汽柱浓度计算。考虑到水汽受温度压强影响较大。实际上水汽吸收饱和时,计算的最大值  $N$  的取值范围为  $2.816 \times 10^3 \sim 4.748 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ ,即达到饱和时的测量值与理论值接近。因此,水汽反演过程中需考虑饱和吸收带来的影响。

在不同海拔高度对应的温度压强条件下,对水汽吸收进行了饱和吸收模拟,以 1592 nm 处吸收峰(1590~1620 nm 波段最强吸收峰)饱和为标准,选取 0~10 km 海拔高度对应的温度压强数据,如表 1 所示。在温度和压强相同时, $X(\text{H}_2\text{O})$ 与光程的关系如图 2 所示; $X(\text{H}_2\text{O})$ 与光程相同的情况下,同一

海拔高度处的温度压强与水汽吸收的关系如图 3 所示。由图 2 可知,温度为 296 K,压强为 101.325 kPa 时,光程  $L$  与  $X(\text{H}_2\text{O})$  呈负相关。水汽主要集中在近地面 10 km 范围内,因此只要  $X(\text{H}_2\text{O})$  比图 1 中任一光程所对应的  $X(\text{H}_2\text{O})$  小,就不会饱和。如图 3 所示,取大气中水汽含量  $X(\text{H}_2\text{O})$  的最大值 4%,以  $X(\text{H}_2\text{O})$  取最大值时的饱和光程 6 km 作为  $L$  的值,取不同海拔高度的温压值,获得水汽在 1590~1620 nm 波段的吸收。如图 3 中的插图所示,吸收峰位于 1600.8 nm 处,随着海拔的增长,水汽吸收逐渐变小,0 km 处的吸收几乎是 10 km 处的两倍,因此在不同高度使用不同水汽吸收截面会使反演值更接近真实值。综上,本研究使用 0.5,3,6 km 三个海拔高度处的水汽吸收截面进行水汽柱浓度(VCD,文中用  $V$  表示)及斜柱浓度(SCD,文中用  $S$  表示)反演。

表 1 不同海拔高度对应的温度及压强

Table 1 Corresponding temperature and pressure at different altitudes

Number	Altitude /km	Temperature /K	Pressure /kPa
1	0	296	101.325
2	0.5	293	95.4583
3	1	290	89.8651
4	1.5	287	84.5456
5	2	284	79.4793
6	3	278	70.0865
7	4	272	65.7397
8	5	266	61.6056
9	6	260	53.9941
10	7	254	47.1465
11	8	248	41.0316
12	9	242	35.5701
13	10	236	26.4053

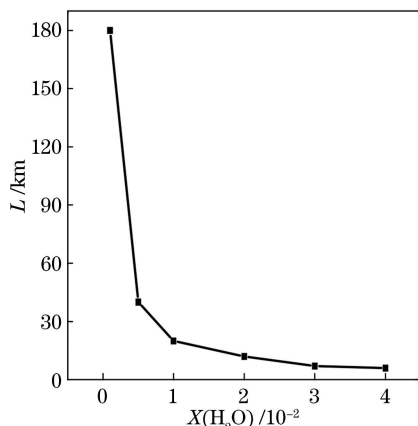


图 2  $T=296\text{ K}, P=101.325\text{ kPa}$ ,水汽达到饱和吸收时,  $X\text{H}_2\text{O}$  与光程  $L$  的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between  $X(\text{H}_2\text{O})$  and  $L$  with water vaporr eaching saturated absorption,  $T = 296\text{ K}$  and  $P = 101.325\text{ kPa}$

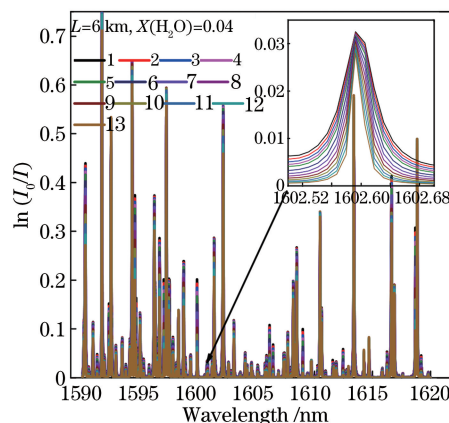


图 3 不同温度对水汽吸收的影响

Fig. 3 Effect of temperature on water vapor absorption

### 3 实验装置

如图 4(a)所示,实验系统包括二维转台、光纤及光谱采集存储系统。通过软件控制二维转台携带望远镜对目标物体和目标方向进行光谱采集,光通过 8 m 长光纤,进入光谱仪,通过 USB 接口将信号数据存储到计算机上。光谱仪采用英国 Andor 公司的 303i 型光谱仪和 InGaSn 探测器。在进行光谱采集时,二维转台控制转速,间隔为  $1^\circ$ ,获取不同水平方向及垂直方向的光谱。实验装置如图 4(b)所示,分室内与室外两部分:室内为光谱仪、CCD、计算机及各种电源,室内温度控制在  $25^\circ\text{C}$  以内;室外为二维转台及望远镜。室内室外通过二维转台电源及光纤连接。

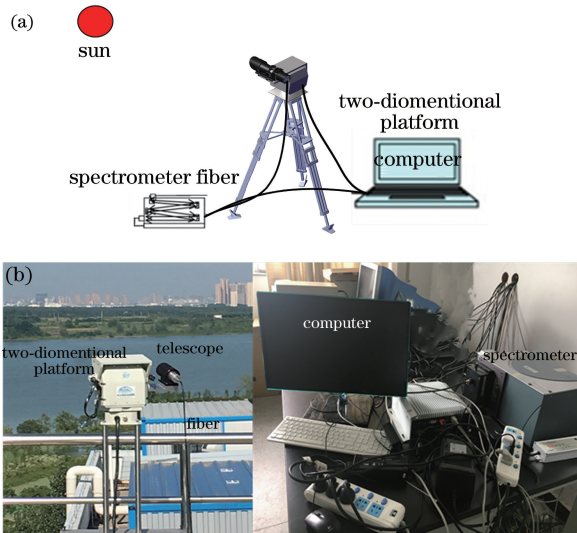


图 4 仪器装置。(a)系统实验装置图;(b)室内室外的装置分布

Fig. 4 Instrument devices. (a) Systematic experimental device diagram; (b) distribution of indoor and outdoor devices



## 4 实验结果及分析

### 4.1 光谱采集

仪器安装在安徽省合肥市科学岛综合楼楼顶,高度约为 15 m,经度为 117.170°,纬度为 31.904°。太阳散射光经大气进入望远镜,再通过 8 m 长光纤,传输到光谱仪进行光栅分光,通过数据传输线进入计算机,将光谱保存起来,再通过自编软件对光谱进行筛选。本课题组采用 2018 年 3 月 14 日—16 日采集的光谱,天气晴朗无云,选取光强大于 20000 的光谱。

### 4.2 光谱反演

#### 4.2.1 不同温压反演截面获取

选取 1590~1620 nm 为水汽反演波段,因该波段还有 CO<sub>2</sub> 吸收,为扣除干扰气体的影响,从 Hitran 数据库中同时获取水汽及 CO<sub>2</sub> 的吸收截面。通过由多普勒展宽及压力展宽共同作用的 Voigt 线型对水汽及 CO<sub>2</sub> 的吸收截面进行线性展宽,并且与仪器函数进行卷积,获取  $P = 95.4583 \text{ kPa}/T = 293 \text{ K}$ ,  $P = 70.0865 \text{ kPa}/T = 278 \text{ K}$ ,  $P = 53.9941 \text{ kPa}/T = 260 \text{ K}$  的水汽及 CO<sub>2</sub> 的吸收截面,如图 5 所示。

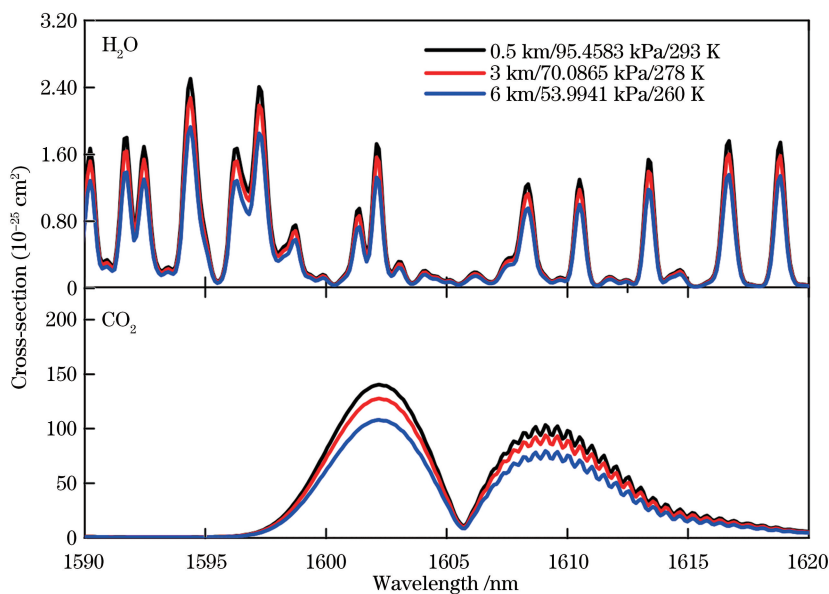


图 5 三种不同条件下水汽及 CO<sub>2</sub> 的吸收截面曲线

Fig. 5 Absorption cross-section curves of water vapor and CO<sub>2</sub> under three different conditions

#### 4.2.2 光谱反演

取 3 月 16 日中午 12:00 的一条仰角 90° 光谱作为参考谱,选取 13:00 仰角为 10° 的光谱作为测量谱进行反演。图 6 所示为 DOAS 反演结果,以 90° 对应的光谱为参考谱反演 10° 光谱的结果,获得  $\Delta S_{10-90}(\text{H}_2\text{O}) = 1.76 \times 10^{23} \text{ molecule}/\text{cm}^2$ ,根据

$$\Delta S = S_a - S_{90} = \left( \frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) V, \quad (4)$$

可得  $V_{10}(\text{H}_2\text{O}) = 3.698 \times 10^{22} \text{ molecule}/\text{cm}^2$ 。水汽柱浓度在气象学上以  $\text{g}/\text{cm}^2$  为单位,  $1 \text{ g}/\text{cm}^2 \approx 3.3 \times 10^{22} \text{ molecule}/\text{cm}^2$ , 所测水汽柱浓度约为  $1.12 \text{ g}/\text{cm}^2$ 。由 CE-318 数据可得,13:00 的水汽柱浓度为  $1.5 \text{ g}/\text{cm}^2$ , 即 IR-DOAS 所测结果比 CE-318 低,二者差值在 IR-DOAS 反演误差范围内,水汽柱浓度误差在  $4 \times 10^{21} \sim 10 \times 10^{21} \text{ molecule}/\text{cm}^2$  量级,即  $0.12 \sim 0.3 \text{ g}/\text{cm}^2$ 。

#### 4.2.3 IR-DOAS 与 CE-318 的数据对比

将 2018 年 3 月 14 日—16 日这三天的 IR-DOAS 的水汽观测数据与 CE-318 的进行对比。CE-318 安装在 IR-DOAS 仪器旁边。由于 CE-318 数据点比较少,所以从 IR-DOAS 测量的数据中,选取 CE-318 数据附近时间段  $\pm 5 \text{ min}$  内测得的数据平均值与 CE-318 数据进行对比。对比结果如图 7 所示,可以看出两者具有很好的趋势一致性,且线性相关系数  $R^2$  为 0.99,如图 8 所示。但 IR-DOAS 的数据值总体比 CE-318 的低,差值在误差范围内。同时,从图 7 黑色方框部分可以看出,IR-DOAS 的数据与 CE-318 的逐渐偏离,主要是因为 IR-DOAS 系统不能跟踪太阳光,在 17:00 之后,仪器接收的太阳光强变弱,噪声相对变强,反演效果较其他时间段变差,差异变大。

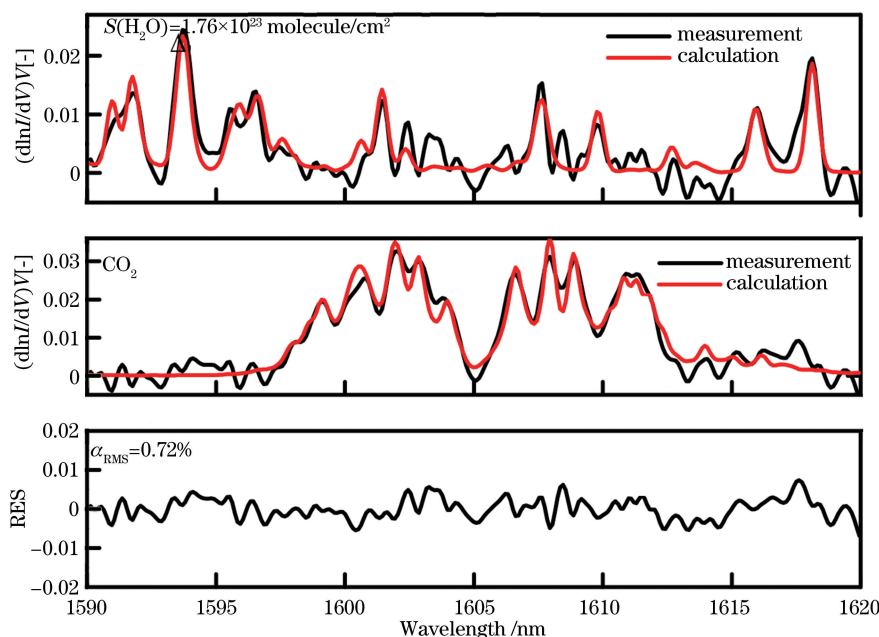


图 6 IR-DOAS 反演水汽光谱示例

Fig. 6 Example of H<sub>2</sub>O retrieval by IR-DOAS

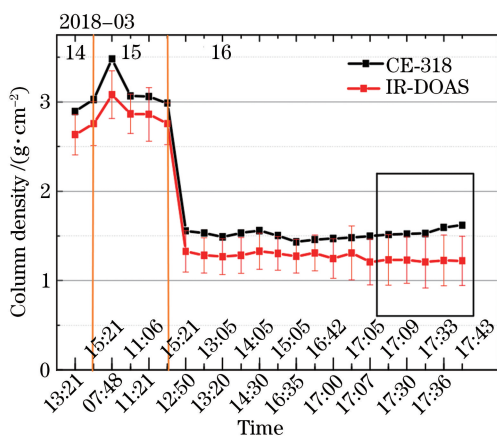


图 7 IR-DOAS 与 CE-318 水汽反演结果对比

Fig. 7 Comparison of retrieval results between IR-DOAS and CE-318

#### 4.2.4 水汽斜柱浓度的空间分布

将 2018 年 3 月 14—16 日测得的光谱按仰角分类,将各仰角对应的水平角的测量值取平均,获得各仰角的  $S(\text{H}_2\text{O})$ ,如图 9 所示。仰角方向  $S(\text{H}_2\text{O})$  呈梯度分布,因  $S(\text{H}_2\text{O})$  与仰角有关,所以将  $1/\sin\alpha$  曲线图与  $S(\text{H}_2\text{O})$  在各个仰角的分布作比对,发现当仰角小于  $3^\circ$  时,两者趋势相差较大,即在仰角较低时,不能按照(7)式获取  $V(\text{H}_2\text{O})$ ,否则会出现较大误差。

以 2018 年 3 月 16 日所得光谱为例,获得水汽斜柱浓度的空间分布。16 日光谱采集时间为 14:00~16:30,方位角取  $1^\circ\sim 100^\circ$ ,仰角取  $0^\circ\sim 20^\circ$ ,获取

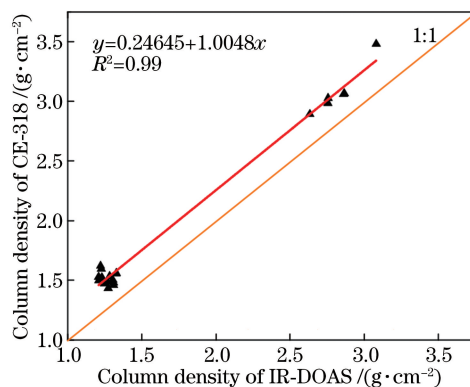


图 8 IR-DOAS 与 CE-318 的观测数据的线性相关性  
Fig. 8 Linear correlation of observation data between IR-DOAS and CE-318

各个方向的  $S(\text{H}_2\text{O})$ ,如图 9 所示,光谱获取环境内没有水汽排放源,故在水平方向,各个方位角水汽分布较均匀,框图内值比周围低,主要是因为距离该角度方向约 20 m 处有建筑遮挡。垂直方向的水汽斜柱浓度随仰角的增加呈梯度变化,仰角每增加  $1^\circ$ ,相应的  $\Delta S(\text{H}_2\text{O})$  值稳定在一个常数附近,约为  $(2\pm 0.20)\times 10^{22}$  molecule/cm<sup>2</sup>。此增量与每天天气状况有关,对于特定的某一天而言,该梯度变量在一常数附近波动;对于不同天气状况和不同日期,该值没有相关性。

## 5 结 论

大气中水汽含量的剧烈变化会影响气候变化,

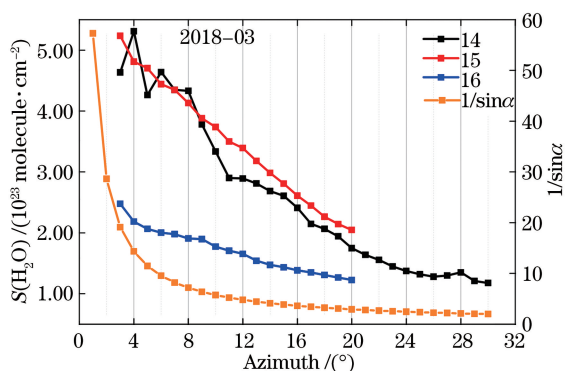


图 9  $S(\text{H}_2\text{O})$  和  $1/\sin\alpha$  曲线

Fig. 9 Curves of  $S(\text{H}_2\text{O})$  and  $1/\sin\alpha$

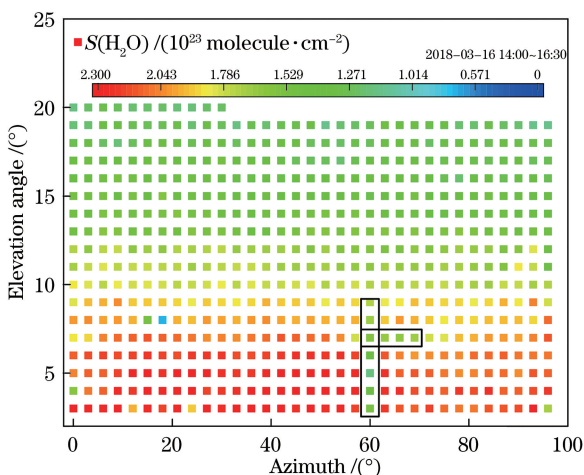


图 10  $S(\text{H}_2\text{O})$  在各个方位角方向上的分布

Fig. 10 Distribution of  $S(\text{H}_2\text{O})$  in various azimuth directions

水汽含量是大气稳定性的重要指标。然而在红外波段水汽受温度气压及地理环境影响较大,难以实现水汽浓度的精确测量。在 DOAS 基础上,使用三个不同温压条件下的  $\text{H}_2\text{O}$  吸收截面对 DOAS 进行温压修正,使得反演结果更接近真实值。通过与 CE-318 的结果进行对比,验证了该方法的可行性,不仅与 CE-318 的结果有较好的趋势一致性,同时具有很高的线性相关度(0.99)。将该方法应用到水汽斜柱浓度的空间分布获取时发现,水平方向水汽斜柱浓度几乎不随观测方位角的变化而变化,同一仰角不同方位角方向上水汽分布均匀,说明周围环境中没有水汽排放源;随仰角增加水汽斜柱浓度呈梯度变化,除低仰角外(小于  $3^\circ$ ),其余仰角处水汽斜柱浓度与光传输路径几何近似  $1/\sin\alpha$  的变化规律较一致。

参 考 文 献

[1] Held I M, Soden B J. Water vapor feedback and

global warming [J]. Annual Review of Energy and the Environment, 2000, 25(1): 441-475.

[2] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Technical summary, in: Climate change 2007: The physical science basis[M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change edited by: Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 40-66.

[3] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, et al. Anthropogenic and natural radiative forcing, in: Climate change 2013: The physical science basis[M]. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker T, Qin D, Plattner G-K, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 659 - 740.

[4] Beirle S, Lampel J, Wang Y, et al. The ESA GOME-Evolution “Climate” water vapor product: a homogenized time series of  $\text{H}_2\text{O}$  columns from GOME, SCIAMACHY, and GOME-2 [J]. Earth System Science Data, 2018, 10(1): 449-468.

[5] Wagner T, Andreae M O, Beirle S, et al. MAX-DOAS observations of the total atmospheric water vapour column and comparison with independent observations [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(1): 131-149.

[6] Wagner T. El Niño-induced anomalies in global data sets of total column precipitable water and cloud cover derived from GOME on ERS-2 [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D15): D15104.

[7] Loyola D, Valks P, Ruppert T, et al. The 1997 El Niño impact on clouds, water vapour, aerosols and reactive trace gases in the troposphere, as measured by the Global Ozone Monitoring Experiment [J]. Advances in Geosciences, 2006, 6: 267-272.

[8] Wagner T, Beirle S, Grzegorski M, et al. Global trends (1996-2003) of total column precipitable water observed by Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) on ERS-2 and their relation to near-surface temperature [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D12102.

[9] Mieruch S, Noël S, Bovensmann H, et al. Analysis of global water vapour trends from satellite measurements in the visible spectral range [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(3): 491-504.

[10] Mieruch S, Noël S, Reuter M, et al. A new method for the comparison of trend data with an application to water vapor [J]. Journal of Climate, 2011, 24

- (12): 3124-3141.
- [11] Mieruch S, Schröder M, Noël S, *et al.* Comparison of decadal global water vapor changes derived from independent satellite time series [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2014, 119(22): 489-499.
- [12] Filges A, Gerbig C, Chen H L, *et al.* The IAGOS-core greenhouse gas package: A measurement system for continuous airborne observations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O and CO [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2015, 67(1): 27989.
- [13] Miloshevich L M, Vömel H, Whiteman D N, *et al.* Accuracy assessment and correction of Vaisala RS<sub>92</sub> radiosonde water vapor measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D11): 305.
- [14] Schneider M, Romero P M, Hase F, *et al.* Continuous quality assessment of atmospheric water vapour measurement techniques: FTIR, Cimel, MFRSR, GPS, and Vaisala RS<sub>92</sub> [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(2): 323-338.
- [15] Buchwitz M, Rozanov V V, Burrows J P. A near-infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub>O total column amounts from SCIAMACHY Envisat-1 nadir radiances [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105 (D12): 15231-15245.
- [16] Krings T, Gerilowski K, Buchwitz M, *et al.* MAMAP-a new spectrometer system for column-averaged methane and carbon dioxide observations from aircraft: retrieval algorithm and first inversions for point source emission rates [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(9): 1735-1758.
- [17] Gerilowski K, Tretner A, Krings T, *et al.* MAMAP-a new spectrometer system for column-averaged methane and carbon dioxide observations from aircraft: instrument description and performance analysis [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(2): 215-243.
- [18] Platt U, Stutz J. Differential absorption spectroscopy [M]//Platt U, Stutz J, eds. *Physics of Earth and Space and Space Environments*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 135-174.
- [19] Sun Y W, Liu W Q, Xie P H, *et al.* Measurement of atmospheric water vapor using infrared differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 140705.  
孙友文, 刘文清, 谢品华, 等. 红外差分光学吸收光谱技术测量环境大气中的水汽 [J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 140705.
- [20] Liu J, Si F Q, Zhou H J, *et al.* Measurement of atmospheric water vapor column density with passive differential optical absorption spectroscopy technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801002.  
刘进, 司福祺, 周海金, 等. 被动差分吸收光谱技术测量大气中水汽垂直柱浓度 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801002.
- [21] Wagner T, Ibrahim O, Shaiganfar R, *et al.* Mobile MAX-DOAS observations of tropospheric trace gases [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3 (1): 129-140.
- [22] Griffith D W T. Synthetic calibration and quantitative analysis of gas-phase FT-IR spectra [J]. *Applied Spectroscopy*, 1996, 50(1): 59-70.
- [23] Zhou B, Liu W Q, Liu F, *et al.* The determination of upper and lower limits of the differential optical absorption spectroscopy [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(5): 25-28.  
周斌, 刘文清, 刘峰, 等. 差分吸收光谱仪测量上下限的确定 [J]. *应用光学*, 2001, 22(5): 25-28.