

大气中水汽柱浓度的直射太阳光红外吸收 光谱遥测研究

程巳阳 高闽光 徐亮* 李胜 金岭 童晶晶 刘建国 刘文清

(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)

摘要 研制了一种地基傅里叶变换红外光谱遥测系统, 自动记录了晴天的太阳近红外吸收光谱, 从该光谱中实时获得了整层大气透射率, 进而采用最优化方法从该透射率中反演出了测量站点地区大气中 2011 年 10 月 17 日到 2013 年 3 月 6 日期间的整层水汽柱浓度含量。由该地基遥感技术获得的高时间分辨率整层水汽柱浓度与太阳辐射计的测量结果相比较, 两者具有较好的一致性, 相关系数达 92%。测量站点地区的水汽柱浓度日变化很大并且没有明显周期性, 日变化的复杂特征与多种因素有关。由于大气环流、季节温度变化等因素影响, 测量站点地区水汽柱浓度呈现出明显季节周期特征, 夏季明显高于冬季。这些结果对于水汽探测和分析方法的研究应用具有重要意义。

关键词 大气光学; 遥感; 水汽; 柱浓度; 红外太阳光谱

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1001001

Study on Remote Sensing of Water Vapor Column Concentration in the Atmosphere by Direct-Sun Infrared Absorption Spectroscopy

Cheng Siyang Gao Minguang Xu Liang Li Sheng Jin Ling Tong Jingjing
Liu Jianguo Liu Wenqing

(Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract A remote sensing system of ground-based Fourier transform infrared spectrometer is developed, automatically recording solar near infrared absorption spectra on sunny day. The real-time whole atmospheric transmittance spectrum is obtained through the recorded single spectrum. Based on the optimization method, total column concentrations of water vapor in the atmosphere are retrieved from the transmittance spectra on the observation site between October 17, 2011 and March 6, 2013. Total column concentrations of water vapor, obtained by the ground-based remote sensing technology with high temporal resolution, are compared with the ones by solar radiometer. They agree very well with each other and the correlation coefficient is 92%. Total column concentrations of water vapor change a lot during a day in the measurement site area, and there is no obvious periodicity. The characteristics of diurnal variation are complex and associated with many factors. Owing to factors such as atmospheric circulation and seasonal variation of temperature, total column concentrations of water vapor show the characteristic of obvious seasonal cycle in the measurement site area, which is significantly higher in summer than in winter. These results are significant to the research and application of water vapor detection and analysis method.

Key words atmospheric optics; remote sensing; water vapor; column concentration; infrared solar spectra

OCIS codes 010.7340; 120.0280; 300.6300

收稿日期: 2013-04-12; **收到修改稿日期:** 2013-05-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAJ24B02)、国家自然科学基金(40905011, 41105022)

作者简介: 程巳阳(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事大气成分探测及光谱分析等方面的研究。

E-mail: sycheng@aiofm.ac.cn

导师简介: 高闽光(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气成分探测及光谱分析等方面的研究。

E-mail: mggao@aiofm.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

水汽的吸收遍及整个红外区,是最重要的温室气体之一,也是大气辐射传输衰减的重要因素,特别在与大气相关的红外系统设计和应用中必须考虑水汽的影响^[1-2]。连续的水汽观测对天气系统演变、全球气候变化、环境变迁具有重要意义,因而受到广泛关注^[3-4]。对流层以上的水汽廓线,传统上使用无线电探空仪测量,但是这种方法时间分辨率有限并且在采用不同传感器时数据一致性难以保证。整层大气柱中水汽总含量即可降水含量(PWV),有许多广泛应用的自动化技术测量方法,比如太阳光度计和全球定位系统(GPS)接收器。太阳光度计探测水汽精度受到滤光片位置和带宽限制;GPS探测水汽需要建立连续运行的GPS参考站,不能直接提供天顶方向水汽的廓线分层信息^[5-7]。以上这些技术对于长期高质量的数据应用还有很多局限^[8-10]。

相比之下,地基遥感技术探测水汽是一个实用而有效的方法。这是因为,在大气成分变化探测网络(NDACC)框架下已使用相同仪器测量了不同站点多年高质量的太阳吸收光谱^[11]。即使光谱分析方法有改进,也可以对傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪记录的原始干涉图数据重新分析,从仪器和分析方法的一致性保证了数据的长期可比较性。德国气象和气候研究所的研究小组第一个报道了地基FTIR实验装置测量水汽垂直廓线^[12]。经过几年的发展和提高,目前可以通过地基FTIR实验装置对对流层水汽廓线以及水汽同位素比例廓线进行监测^[13-14]。在国内,利用自主研发的地基FTIR遥测系统观测水汽柱浓度和廓线的报道甚少。

在前期工作基础之上^[15-16],本文利用自主研发的地基FTIR遥测系统得到近红外波段太阳吸收光谱。进而在利用该光谱定量分析大气中温室气体二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)柱浓度的过程中发现受到了水汽弱吸收线的影响。在修正其影响的过程中,采用最优化反演方法对近红外太阳吸收光谱中的水汽吸收带进行了分析,获得了大气中水汽柱浓度。并将反演出的水汽柱浓度与太阳光度计的测量结果进行了比较,验证了遥测系统和光谱反演方法的有效性。从2011年10月17日到2013年3月6日的观测中,得到了测量站点地区大气中水汽柱浓度的日变化和季节变化规律。

2 实验仪器

文中所用的实验仪器为自主研发的地基低分辨

傅里叶变换红外光谱遥测系统(LRFTS),该系统安装在安徽合肥某单位楼顶站房内,距离地面约20 m,系统示意图如图1所示。它主要由五部分组成:太阳跟踪器、傅里叶红外光谱仪、微机、微型气象站、无线传输天线。太阳跟踪器由四象限光电探测器实时追踪太阳,接收由天窗进入的太阳光,通过45°平面反射镜将其导入傅里叶红外光谱仪进行测量。傅里叶红外光谱仪的光谱分辨率为1 cm⁻¹,覆盖的波数范围为5400~9000 cm⁻¹,分束器材料为CaF₂,探测器为近红外电制冷InGaAs探测器,探测器的探测率为8.8×10¹¹ cm·Hz·W⁻¹,实时记录单次扫描干涉图以便后续光谱处理。无线数据传输天线完成站点数据发送和远程命令接收。微型气象站包括温度、压力、湿度等气象参数,并利用该气象参数进行数据分析以及决定是否启动仪器工作。微机通过与下位机的通信完成数据采集和系统运行控制。

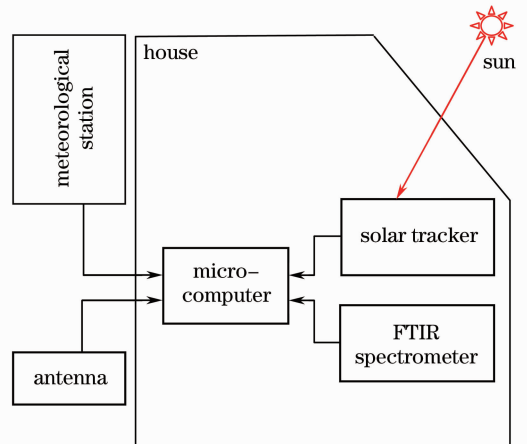


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

3 基本原理

3.1 反演方法

分析红外太阳吸收光谱的基本方程是比尔朗伯定律^[13]:

$$I(\lambda) = I_{\text{sun}}(\lambda) \exp \left\{ - \int_{S_{\text{TOA}}}^{S_{\text{Obs}}} \sigma_x[\lambda, s(T, p)] x(s) ds \right\}, \quad (1)$$

式中 $I(\lambda)$ 是测量的波长 λ 处太阳辐射强度; I_{sun} 是大气顶太阳辐射强度; $\sigma_x(\lambda, s)$ 是与温度和压力相关的吸收截面; $x(s)$ 是吸收成分 x 在位置 s 处的浓度;积分范围是沿着直射太阳光的路径从大气顶位置(S_{TOA})到观察者位置(S_{Obs})。(1)式中忽略了大气辐射,若是在热红外区域进行光谱定量分析则需要

增加大气辐射修正项。

将(1)式转化为透射率形式：

$$T(\lambda) = \exp\left\{-\int_{S_{\text{TOA}}}^{S_{\text{Obs}}} \sigma_x[\lambda, s(T, p)]x(s)ds\right\}. \quad (2)$$

它表示在反演分析波段所有气体分子的吸收。结合光谱数据库参数(线强、线宽等)、大气状态参数 p_{atmos} 、测量系统参数 p_{exp} ，可以通过精确的逐线积分辐射传输模型进行模拟计算。

同时为了数值处理方便，将描述吸收成分垂直分布的大气状态 $x(s)$ 和模拟透射率光谱 $T(\lambda)$ 离散化成状态向量 \mathbf{x} 和测量向量 \mathbf{y} 。同时，定义一个前向关系 F ，模拟大气辐射传输和测量系统特性(光谱分辨率、仪器线型函数等)：

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}, p_{\text{atmos}}, p_{\text{exp}}). \quad (3)$$

偏微分 $\partial y/\partial x$ 决定了因为吸收成分 x 垂直分布变化带来的光谱透射率 y 的变化。这些偏微分合在一起构成雅克比矩阵 \mathbf{K} ：

$$\partial \mathbf{y} = \mathbf{K} \partial \mathbf{x}. \quad (4)$$

反演过程就是调整吸收成分含量以使模拟和测量的光谱一致。(4)式的直接反演是通过迭代计算寻找变量 \mathbf{x} 。但是，矩阵 \mathbf{K} 的列之间不是线性独立的，对于一个测量光谱有许多解，不能获得唯一解。最优估计方法将先验知识和测量信息结合，消除了这种不确定性，获得最可能的解。解在条件概率密度函数最大值时取得。条件概率密度函数包括两方面因素：1)描述模拟和测量光谱之间统计误差的噪声协方差 \mathbf{S}_ϵ ；2)描述大气状态的先验知识(平均值 \mathbf{x}_a 和协方差 \mathbf{S}_a)。假定满足严格的高斯统计规律，最小化以下价值函数提供最可能的解：

$$[\mathbf{y} - F(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} [\mathbf{y} - F(\mathbf{x})] + [\mathbf{x} - \mathbf{x}_a]^T \mathbf{S}_a^{-1} [\mathbf{x} - \mathbf{x}_a]. \quad (5)$$

由于比尔朗伯定律的非线性行为，价值函数通过高斯牛顿方法迭代求解最小值。第 $(i+1)$ 次迭代的解是

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_a + \mathbf{S}_a \mathbf{K}_i^T (\mathbf{K}_i \mathbf{S}_a \mathbf{K}_i^T + \mathbf{S}_\epsilon)^{-1} \times [\mathbf{y} - F(\mathbf{x}_i) + \mathbf{K}_i (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a)]. \quad (6)$$

3.2 透射率遥测

根据 3.1 节中论述的反演方法，除了在前向模型中逐线积分精确模拟计算大气透射率外^[4]，反演时还需要实时遥测的大气透射率光谱。在某一太阳位置，自动太阳跟踪器捕获太阳后将直射太阳辐射导入光谱仪内进行测量。假设大气由若干平行平面层组成，如图 2 所示。在地面上所观测到的波长为

λ 的直接太阳辐射辐照度 $F_{m\lambda}$ 可表示为

$$F_{m\lambda} = F_{0\lambda} \exp[-\epsilon_\lambda m(\theta)], \quad (7)$$

式中 $F_{0\lambda}$ 为大气层顶的单色太阳辐照度， $m(\theta)$ 为光路上的沿天顶角 θ 的相对大气质量， ϵ_λ 为波长为 λ 的指向天顶方向的大气光学厚度。沿天顶角 θ 方向大气透射率可表示为

$$T_{m\lambda} = F_{m\lambda}/F_{0\lambda} = \exp[-\epsilon_\lambda m(\theta)]. \quad (8)$$

仪器输出信号数值 $P_{m\lambda}$ 正比于探测器接收到的太阳辐照度。定义与大气层顶的太阳辐照度 $F_{0\lambda}$ 对应的仪器测量值为 $P_{0\lambda}$ ，定标因子为 C_λ ，则(7)式可改写为

$$P_{m\lambda} = C_\lambda F_{0\lambda} \exp[-\epsilon_\lambda m(\theta)] = P_{0\lambda} \exp[-\epsilon_\lambda m(\theta)], \quad (9)$$

因此，

$$\ln[P_{m\lambda}] = \ln[P_{0\lambda}] - \epsilon_\lambda m(\theta), \quad (10)$$

$$T_{m\lambda} = P_{m\lambda}/P_{0\lambda}. \quad (11)$$

在大气稳定、气溶胶含量较少时，假设 ϵ_λ 近似为常数，以 $m(\theta)$ 为自变量，在不同大气质量下测量 $\ln[P_{m\lambda}]$ 。根据(10)式，考虑到测量噪声，用最小二乘法对 $\ln[P_{m\lambda}]$ 进行拟合，将拟合直线外推获得相对大气质量 $m(\theta)$ 为 0 时 $\ln[P_{m\lambda}]$ 的值，即为这台仪器的 $\ln[P_{0\lambda}]$ ^[17]。 $P_{0\lambda}$ 是由太阳常数和仪器常数共同决定的。从而可由(11)式计算出某一时刻的大气透射率。值得一提的是，实际应用该方法之前需要对测量的光谱进行波长校准。

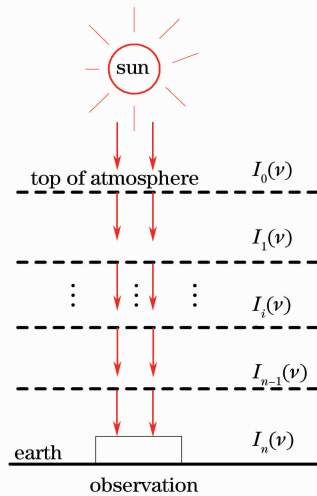


图 2 平行平面大气

Fig. 2 Plane-parallel atmosphere

4 实验结果与讨论

4.1 光谱反演

地基痕量气体遥测系统测量的直射太阳光近红

外吸收光谱如图 3 所示。该单光谱的有效光谱范围为 $5400\sim 9000\text{ cm}^{-1}$ ，在此光谱范围内包含了 H_2O 、 CH_4 、 CO_2 、 O_2 等气体的光谱吸收信息。从单光谱出发，获得的实测整层大气透射率 T_m^{total} 如图 4 黑色实线所示，但是此透射率包含了气体吸收、气溶胶散射等共同作用导致的太阳光衰减。相对于气体吸收，散射等通常是一个低频变化过程，因而可以采用一个低阶多项式 R_m 来近似表示低频贡献，如图 4 中红色短划线所示。图 4 中蓝点线表示气体吸收部分整层大气透射率 T_m^{gas} ，

$$T_m^{\text{gas}} \approx T_m^{\text{total}}/R_m. \quad (12)$$

反演过程就是要从 T_m^{gas} 中得到气体柱浓度。图 5 中给出了实测 T_m^{gas} 和最优化求解后模拟光谱以及两者的差值光谱，即残差谱(图 5 的下部)。在该波段残差的最大值为 0.019，最大百分比残差(残差与实测透射率 T_m^{gas} 的比值)为 2%，实测和模拟光谱吻合得相当好。本文在此波段反演整层大气中水汽柱浓度。

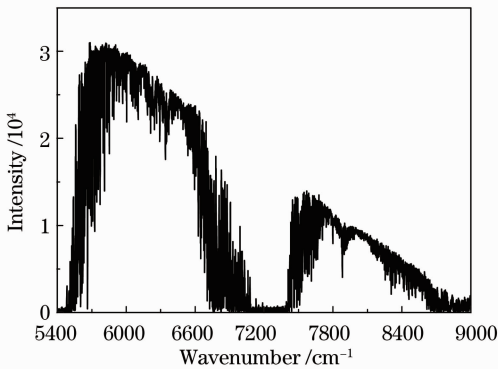


图 3 $5400\sim 9000\text{ cm}^{-1}$ 波段测量的单光谱

Fig. 3 Measured single spectrum at the spectral range of $5400\sim 9000\text{ cm}^{-1}$

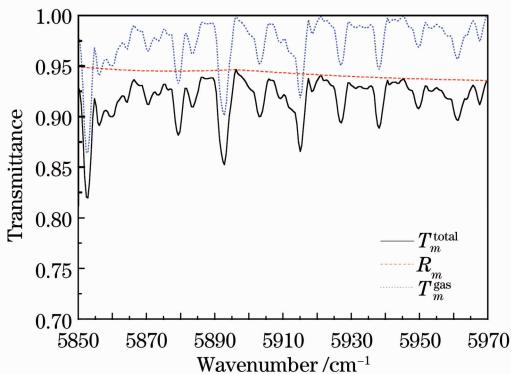


图 4 实测整层大气透射率

Fig. 4 Measured total transmittance spectra of atmosphere

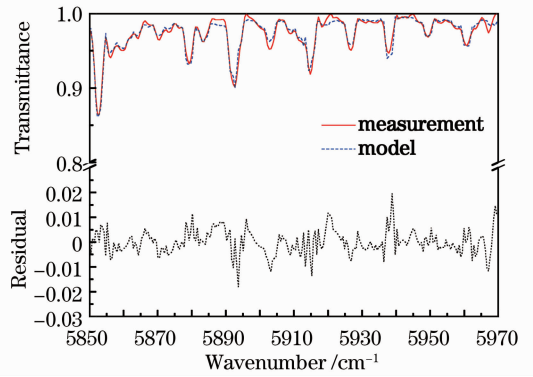


图 5 实测和拟合整层大气透射率光谱

Fig. 5 Measured total transmittance spectrum of atmosphere, fitting spectrum and residual spectrum

4.2 日变化

从 2011 年 10 月 17 日、2011 年 11 月 10 日、2012 年 9 月 15 日实测光谱中反演出的水汽柱浓度 $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 日变化曲线如图 6 所示。这三天中，均未观察到水汽柱浓度基本保持恒定的日变化过程，2011 年 10 月 17 日水汽柱浓度总体平稳，但在 11:30 和 15:00 附近出现波动；2011 年 11 月 10 日水汽柱浓度随时间缓慢增长，12:30 之后平稳振荡；而 2012 年 9 月 15 日水汽柱浓度不断增长，10:30 达到最大值，随后开始逐渐减小，到 13:30 以后出现振荡。水汽柱浓度日变化很大，其特征非常复杂，这与大气输送、局地气象条件、下垫面类型密切相关，在天气变化过程中扮演着非常重要的角色。

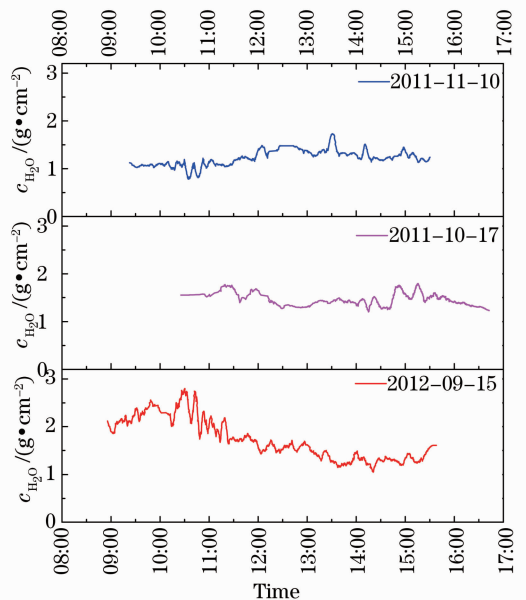


图 6 水汽柱浓度日变化

Fig. 6 Diurnal variation of water vapor column

4.3 与太阳辐射计测量的比较

测量站点同时还有太阳辐射计,在2012年9月14日到2012年11月14日期间,与地基遥测系统同时进行的测量天数共有8天,如表1所示。在这8天中的14:00~15:00内的小时均值,以及小时均值绝对偏差 δ 同样在表1中列出。绝对偏差的绝对值最大值为 $0.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$,相差较大,这主要是由反演误差、测量误差以及大气质量因子误差导致的。但是两套系统测量结果之间具有较好的相关性,相关系数为92%,相关性关系式为: $y=0.87x+0.16$,如图7所示。这说明了地基遥测系统和反演方法的有效性。

表1 水汽柱浓度的地基 FTIR 遥测(RS)与太阳辐射计(SR)测量的比较

Table 1 Comparison of water vapor column obtained by ground-based FTIR remote sensing (RS) and solar radiometer (SR)

Date	SR / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	RS / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	δ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)
2012-09-14	1.91	1.61	-0.30
2012-09-15	1.56	1.29	-0.27
2012-09-16	2.06	1.93	-0.13
2012-09-24	2.57	2.57	0
2012-10-08	1.93	1.93	0
2012-10-17	1.04	1.29	0.25
2012-11-04	0.55	0.64	0.09
2012-11-14	0.92	0.96	0.04

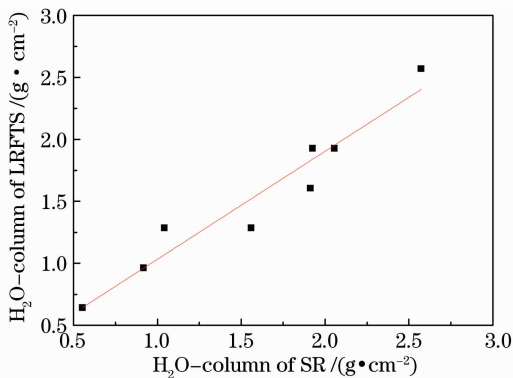


图7 地基 FTIR 遥测水汽柱浓度与太阳辐射计测量结果的相关性

Fig. 7 Correlation of water vapor column obtained by ground-based FTIR and solar radiometer

4.4 季节特征

图8给出了2011年10月17日到2013年3月6日共计17个月的水汽柱浓度小时均值(黑色圆点)和月均值(蓝线),其中2012年1月遥测系统未运行。从图中可以看到明显的季节周期性,这与水汽柱浓度一天之内的变化或者天与天之间的变化明

显不同。水汽柱浓度的最大值出现在夏季的7月中旬附近,最小值出现在冬季的1月中旬附近,从3月开始水汽柱浓度逐渐增大,在7月之后逐渐减小,夏季水汽柱浓度明显高于冬季,接着继续重复这一季节周期。月均值比小时均值更为清晰地显示了这种季节周期。水汽柱浓度的季节特征与合肥地区的气候条件、大气环流、季节温度变化有关。夏季主要是东南风,来自太平洋的暖湿气流含有丰富水汽,从而使得夏季站点处测量的整层水汽柱浓度高;冬季主要是西北风,来自欧亚大陆内地的干冷空气中所含水汽较少,使得冬季站点处测量的整层水汽柱浓度低。此外,冬季温度较低,地面蒸发量较小,空气比较干燥,也是导致整层水汽柱浓度含量较小的一个原因,而夏季正好相反。

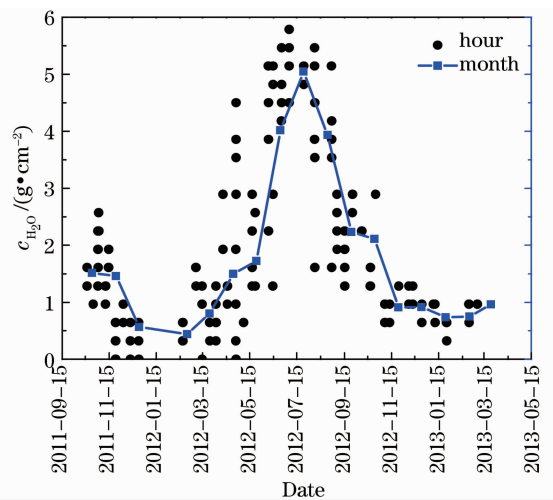


图8 地基 FTIR 遥测水汽柱浓度小时均值和月均值
Fig. 8 Hourly and monthly averaged values of water vapor column by ground-based FTIR

5 结 论

介绍了一种地基低分辨率傅里叶变换红外光谱遥测系统,研究了实时遥测整层大气透射率方法和整层大气柱浓度反演方法,在合肥地区2011年10月17日到2013年3月6日期间进行了观测,反演出了该地区整层大气中水汽柱浓度,得到了水汽柱浓度日变化和季节变化特征。结论如下:1)利用地基遥感技术可以获得高时间分辨率的整层水汽柱浓度,与太阳辐射计的测量结果相比,两者具有较好的一致性,相关系数达92%;2)测量站点地区水汽柱浓度的日变化特征非常复杂,与多种因素有关,并且日变化很大;3)测量站点地区水汽柱浓度的季节特征明显,夏季明显高于冬季,主要由大气环流输送、季节温度变化等因素引起。

参 考 文 献

- 1 Wei Heli. Retrieval of the column abundance of atmospheric trace gas [J]. *J Remote Sensing*, 1999, 3(3): 209–214.
魏合理. 垂直气柱中大气微量成分总含量的反演[J]. *遥感学报*, 1999, 3(3): 209–214.
- 2 Wei Heli, Zhao Fengsheng. Remote sensing of precipitable water from infrared solar spectra [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2001, 18(4): 315–319.
魏合理, 赵凤生. 大气气柱内水汽总含量的红外光谱遥测[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(4): 315–319.
- 3 Sun Youwen, Liu Wenqing, Xie Pinhua, *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.
- 4 Zou Mingmin, Fang Yonghua, Xiong Wei, *et al.*. Line-by-line retrieval calculation of water vapor based on spatial heterodyne spectroscopy observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1701–1705.
邹铭敏, 方勇华, 熊伟, 等. 一种基于空间外差光谱技术观测的逐线积分水汽浓度反演方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1701–1705.
- 5 Li Jianyu, Xu Wenqing, Qie Lili, *et al.*. Development and application of the portable full autocontrol sun-photometer [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 30–35.
李建玉, 徐文清, 伽丽丽, 等. 便携式全自动太阳光度计的研制及其应用[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 30–35.
- 6 Cao Yunchang, Chen Yongqi, Li Binghua, *et al.*. Approaches to atmospheric water vapor profile sounding by GPS [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 241–245.
曹云昌, 陈永奇, 李炳华, 等. 利用地基 GPS 测量大气水汽廓线的方法[J]. *气象科技*, 2006, 34(3): 241–245.
- 7 Bi Yanmeng, Yang Zhongdong, Li Yuan. A comparison of atmospheric precipitable water detections among the GPS, the sun photometer and the radiosonde employed [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 69(3): 528–533.
毕研盟, 杨忠东, 李元. 应用全球定位系统、太阳光度计和探空仪探测大气水汽总量的对比分析[J]. *气象学报*, 2011, 69(3): 528–533.
- 8 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun, *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1511–1515.
熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1511–1515.
- 9 Pei Shixin, Cui Fenping, Zhang Chengyi, *et al.*. Detection of water vapour based on integrated cavity output spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3655–3659.
裴世鑫, 崔芬萍, 张成义, 等. 基于积分腔输出光谱技术的水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3655–3659.
- 10 Deng Lunhua, Gao Xiaoming, Cao Zhensong, *et al.*. Difference-frequency generation in PPLN and water vapor detection in air [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(11): 2186–2189.
邓伦华, 高晓明, 曹振松, 等. 中红外差频光源应用于实际大气水汽浓度测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(11): 2186–2189.
- 11 M Schneider, E Sepulveda, O Garcia, *et al.*. Remote sensing of water vapour profiles in the framework of the total carbon column observing network (TCCON) [J]. *Atmos Meas Tech*, 2010, 3(6): 1785–1795.
- 12 M Schneider, F Hase. Ground-based FTIR water vapour profile analyses [J]. *Atmos Meas Tech*, 2009, 2(2): 609–619.
- 13 M Schneider, F Hase, T Blumenstock. Water vapour profiles by ground-based FTIR spectroscopy: study for an optimised retrieval and its validation [J]. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6(3): 811–830.
- 14 M Schneider, P M Romero, F Hase, *et al.*. Continuous quality assessment of atmospheric water vapour measurement techniques: FTIR, Cimel, MFRSR, GPS, and Vaisala RS92 [J]. *Atmos Meas Tech*, 2010, 3(2): 323–338.
- 15 Jin Ling, Gao Minguang, Liu Zhiming, *et al.*. Application of SOF-FTIR method in measuring SO₂ emission of chemical plant [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1071–1075.
金岭, 高闽光, 刘志明, 等. 利用 SOF-FTIR 技术监测化工厂区 SO₂ 排放[J]. *激光与红外*, 2010, 40(10): 1071–1075.
- 16 Liu Zhiming, Liu Wenqing, Gao Minguang, *et al.*. Study of the retrieval algorithm of emission gas spatio-temporal distribution of pollution source using the infrared solar occultation flux (SOF) method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5397–5405.
刘志明, 刘文清, 高闽光, 等. 基于红外掩日通量法(SOF)污染源排放气体浓度时空分布反演算法研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5397–5405.
- 17 Guo Ruipeng, Zhan Jie, Rao Ruizhong. Measurement of total atmospheric spectral transmittance by solar irradiance [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2006, 23(5): 736–740.
郭瑞鹏, 詹杰, 饶瑞中. 利用太阳测量整层大气光谱透射率[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(5): 736–740.

栏目编辑: 王晓琰