

## 合肥上空水汽时空变化特征的研究

王 敏<sup>1,2</sup>, 胡顺星<sup>1</sup>, 方 欣<sup>1,2</sup>, 赵培涛<sup>1,2</sup>, 汪少林<sup>1,2</sup>, 曹开法<sup>1,2</sup>, 范广强<sup>1,2</sup>, 胡欢陵<sup>1</sup>, 王英俭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 详细阐述了 L625 多波长激光雷达的系统结构和主要性能参数。介绍了 L625 激光雷达测量水汽混合比廓线的测量原理和数据处理方法。对 2002 年该雷达测量得到的水汽混合比廓线进行分析, 得出了合肥地区董铺岛 (31.9°N, 117.17°E) 上空水汽的时空月季变化特征。分析结果表明: 8 月份合肥地区上空 0.63 km 处水汽混合比为 11.2 g/kg, 在所有月份中为最高值; 2 月和 12 月相对比较干燥, 同高度处水汽混合比值仅为 2.3 g/kg。同时, 水汽的季节变化非常明显, 表现为夏季比较湿润, 0.63 km 高度处水汽混合比均值为 7.8 g/kg; 冬季较为干燥, 相同高度处水汽混合为 2.6 g/kg, 水汽混合比减少了 5.2 g/kg。

**关键词:** 激光雷达; 水汽混合比; 拉曼散射; 垂直廓线

**中图分类号:** TN 958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)增(激光探测)-0156-06

## Variation characteristics of water vapor mixing ratio profile over Hefei

WANG Min<sup>1,2</sup>, HU Shun-xing<sup>1</sup>, FANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Pei-tao<sup>1,2</sup>, WANG Shao-lin<sup>1,2</sup>,  
CAO Kai-fa<sup>1,2</sup>, FAN Guang-qiang<sup>1,2</sup>, HU Huan-ling<sup>1</sup>, WANG Ying-jian<sup>1</sup>

(1. Centre of Atmospheric Optics, Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The system configuration and main performance parameters of L625 multi wavelength lidar system were presented, at the same time, the measurement principle and data processing method of water vapor mixing ratio profile by L625 lidar were also presented in detail. The variation characters of water vapor mixing ratio profile over Hefei in vertical direction was obtained by analyzing the total data which measured by L625 lidar during 2002. The results indicated that the water vapor mixing ratio can reach 11.2 g/kg at 0.63 km over Hefei in August, and this value was the maximum in 2002 year. February and December were ordinarily drier compared with other months, and the value was only 2.3 g/kg at the same altitude. Simultaneously, variation of water vapor mixing ratio is obvious with season alternated. The summer is the moistest season, and the mean of water vapor mixing ratio can reach 7.8 g/kg. The winter is drier season, and the mean of water vapor mixing ratio can reach 2.6 g/kg, which reduces the value 5.2 g/kg compared with the value of summer.

收稿日期: 2008-05-26

基金项目: 我国东部整层大气重要参数高分垂直分布探查. 项目编号 (2007FY110700)

作者简介: 王敏(1981-), 女, 吉林辽源人, 助理工程师, 硕士生, 目前从事激光雷达大气探测和数据处理研究工作。Email: wm810320@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 胡顺星(1966-), 男, 浙江东阳人, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光雷达研制和激光雷达探测大气参数研究工作。

Email: sxhu@aiofm.ac.cn

Key words: Lidar; Water vapor mixing ratio; Raman scattering; Vertical profile

0 引 言

水汽混合比是描述大气物理状态的重要参数之一。全时段、广领域的水汽垂直分布的测量是建立常规大气模型、研究大气运动规律、预报天气情况的基本要素<sup>[1]</sup>。在特殊的气象和气候条件下,水汽混合比的测量对研究大气对流现象、风暴的形成、冷空气团的运动等剧变气候有非常重要的价值<sup>[2]</sup>。水汽也是重要的温室气体,在太阳光谱中同处于 2.7 m 吸收带的水汽比 CO<sub>2</sub> 对太阳辐射的吸收能力强很多<sup>[3-5]</sup>。同时,对流层底层水汽含量与当地居民的生产生活息息相关,及时准确的测量水汽分布、分析水汽时空变化特征具有十分重要的意义。

水汽混合比的测量方法很多,最常用的手段是通过施放无线电探空仪进行测量。然而,无线电探空仪在连续性和实时性方面存在明显的缺憾。即使相同型号的无线电探空仪之间仍有所差别,这为同条件下数据结果的可比较性方面带来困难<sup>[6-7]</sup>。随着航空技术的发展,星载红外或微波雷达在探测大气参数方面发挥重要作用。但是,星载雷达需要地面数据进行标定且空间分辨率方面仍有待提高<sup>[8]</sup>。目前,应用激光雷达测量水汽含量廓线的方法已经由地基系统和机载系统所广泛证明<sup>[2]</sup>。此方法具有实时性好、时空分辨率高、应用领域广、可重复使用等突出优点<sup>[9]</sup>,这是无线电探空仪和星载雷达无法比拟的。文中正是在此方法的基础上利用 L625 拉曼激光雷达测得的多天数据分析了合肥地区水汽月变化、季变化变化特点,为研究水汽统计变化规律发挥重要作用。

1 L625 振动 Raman 激光雷达系统结构

L625 激光雷达具备分时接收大气分子和气溶胶的 Rayleigh-Raman-Mie 散射回波能力,主要用于大气臭氧、气溶胶、水汽、温度和二氧化碳的垂直分布测量,L625 激光雷达系统结构如图 1 所示。实

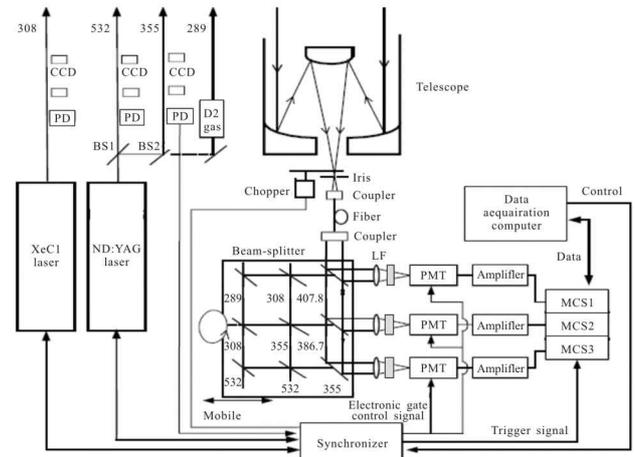


图 1 L625 激光雷达系统结构图

Fig.1 System structure of L625 lidar

验中主要利用 Nd:YAG 激光器发射的三倍频光作为探测光源,并由第一和第二通道分别同时接收的水汽和氮气分子的振动拉曼回波信号测量水汽混合比。系统主要由激光发射系统、回波信号接收系统和数据采集及控制系统 3 部分组成,系统主要指标见表 1。

表1 L625激光雷达系统主要指标

Tab.1 Main performance parameters of L625 lidar system

Table with 3 columns: Transmitter, Receiver, and Data acquisition and control. It lists various technical specifications such as laser types, wavelengths, pulse energies, and system components.

分子激光器和后继光路部分。Nd:YAG 激光器的二倍频、三倍频光输出波长分别为 532 nm、355 nm，单脉冲能量分别为 70 mJ、60 mJ。脉冲重复频率为 20 Hz，光束发散角小于 1 mrad。输出激光经后继光路导入大气，在光路旁设有 CCD 系统用于调节发射系统和接收系统光轴平行。XeCl 准分子激光器输出波长为 308 nm，单脉冲能量为 180 mJ。

信号接收系统采用卡塞格林 (Cassegrain) 型接收望远镜，直径为 625 mm，组合焦距孔径比为 7.37。望远镜焦平面上放置小孔光阑，用于调节接收视场角。回波信号经望远镜反射后进入光纤，再由多波长光学分光单元滤光后分别为 3 个独立通道接收。每个接收通道分别配置光电倍增管及高压电源、制冷器和放大器等，对大气后向散射光进行光电转换和放大。

数据采集和控制系统主要包括多通道累加器、主波控制器、光电倍增管门控制器和主控计算机及其操作程序软件等。主要作用是确保激光发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储协调工作。多通道累加器使用了美国 EG&G 公司生产的 914P 型多通道累加器 (MCS)，具有甄别器、多通道光子计数器和平均器的综合功能。主波控制器是由安装在激光光束出射口处的光电二极管 (PD) 和整形器组成，完成激光发射、接收和数据采集的同步作业。光电倍增管门控制器采用 GBIB 门控，为常闭型。主控计算机在操作程序软件的控制下完成对 MCS 的控制、数据传送和存储。

## 2 测量原理

L625 激光雷达利用拉曼散射原理探测大气中水汽含量。探测波长  $\lambda_0$  为 354.7 nm，水汽分子和  $N_2$  分子的振动拉曼散射波长  $\lambda_H$  和  $\lambda_N$  分别为 407.8 nm 和 386.7 nm。水汽分子和氮气分子的拉曼后向散射回波信号分别表示为<sup>[10]</sup>：

$$P_H(z) = \frac{k_H}{z^2} \cdot k_H(\lambda_H) \cdot n_H(z) \cdot q(\lambda_0, z_0, z) \times q(\lambda_H, z_0, z) \quad (1)$$

$$P_N(z) = \frac{k_N}{z^2} \cdot k_N(\lambda_N) \cdot n_N(z) \cdot q(\lambda_0, z_0, z) \times q(\lambda_N, z_0, z) \quad (2)$$

式中： $P_H$  和  $P_N$  为  $z$  高度处水汽与氮气分子拉曼后向散射回波， $k_H$  和  $k_N$  为雷达系统水汽与氮气拉曼通道的仪器常数， $k_H(\lambda_H)$  和  $k_N(\lambda_N)$  为水汽与氮气分子的拉曼后向散射微分截面， $n_H(z)$  和  $n_N(z)$  为水汽和氮气分子数密度。 $q(\lambda_0, z_0, z)$ 、 $q(\lambda_H, z_0, z)$  和  $q(\lambda_N, z_0, z)$  为波长  $\lambda_0$ 、 $\lambda_H$  和  $\lambda_N$  在传输过程中的大气透过程率，分别表示为：

$$q(\lambda_0, z_0, z) = \exp\left(-\int_{z_0}^z \sigma_0(z) dz\right) \quad (3)$$

$$q(\lambda_H, z_0, z) = \exp\left(-\int_{z_0}^z \sigma_H(z) dz\right) \quad (4)$$

$$q(\lambda_N, z_0, z) = \exp\left(-\int_{z_0}^z \sigma_N(z) dz\right) \quad (5)$$

式中： $\sigma_0(z)$ 、 $\sigma_H(z)$  和  $\sigma_N(z)$  分别为  $\lambda_0$ 、 $\lambda_H$  和  $\lambda_N$  对应波长的大气消光系数。大气中  $N_2$  分子混合比可认为不变的，公式 1 与公式 2 式相比后可得水分子混合比为：

$$w(z) = K_H \frac{Q_N(\lambda_N, z_0, z) P_H(z)}{Q_H(\lambda_H, z_0, z) P_N(z)} \quad (6)$$

式中： $K_H$  为拉曼激光雷达系统标定常数；

$\frac{Q_N(\lambda_N, z_0, z)}{Q_H(\lambda_H, z_0, z)}$  为  $N_2$  和水汽在传输过程中的大气透过程率比值。由水汽和氮气的拉曼后向散射信号即可获得水汽含量的垂直分布。

## 3 实验结果

### 3.1 数据处理方法

采集水汽拉曼回波信号的门控时间设为 100 ns，空间分辨率为 30 m，采样点数为 1 024 点，采样脉冲数 2 000 次。每次测量 3~6 组，累计时间约为 0.5~1 h。为提高信噪比，实验过程中通过增加脉冲累加次数，即以 6 组信号之和作为一大组用于水汽测量。为了详细介绍数据处理过程，以 2002 年 1 月 2 日采集的水汽数据为例进行说明，水汽和氮气分子回波信号如图 2 所示。

数据处理过程如下：首先，为了消除背景噪声对水汽和氮气分子回波信号的影响，选取 21~24 km 高度范围内信号的平均值作为天空背景噪声并进行扣除；其次，对扣除背景后的水汽和氮气拉曼信号

采用三角波平滑方法进行平滑, 0~2.5 km 内平滑点数为 5 点, 2.5 km 以上高度平滑点数为 10 点。为了修正激光大气传输的误差, 对大气分子、气溶胶消光影响进行了修正。大气分子消光系数由美国标准大气中纬度地区模式得到; 气溶胶消光系数由便携式米散射激光雷达测得<sup>[1]</sup>。根据大气分子消光系数和气溶胶消光系数随波长变化关系间接求出 386.7 nm 和 407.8 nm 波长处的气溶胶消光系数。实验中水汽和氮气分子的大气透过率修正曲线如图 3 所示。

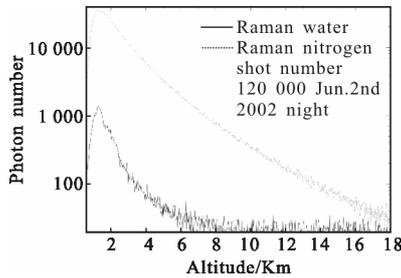


图 2 水汽分子和氮气分子拉曼回波信号

Fig.2 Raman backscattering signals of water vapor and N<sub>2</sub>

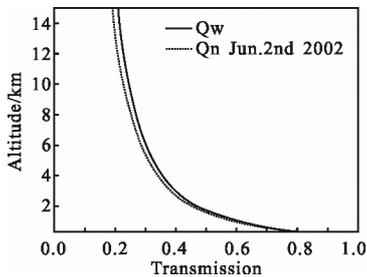


图 3 水汽分子和氮气分子大气透过率

Fig.3 Transmission ratio of water vapor and N<sub>2</sub>

L625 激光雷达发射与接收系统为非同轴结构, 有必要对两通道重迭系数进行修正。实验中将两接收通道均放置氮气滤光片(其具体参数见表 1), 同时接收氮气分子的拉曼后向散射回波信号。根据两通道氮气分子回波信号比值得两通道重迭系数比值如图 4 所示。对于系统标定常数  $K_H$  采用了与气象探空仪对进行标定的方法。在激光雷达探测水汽的过程中施放一探空气球, 通过探空气球获得的水汽廓线与激光雷达测得的水汽和氮气分子的拉曼信号之比拟合系统常数  $K_H$ 。实验中, 参考了文献[10]中前期的工作成果。

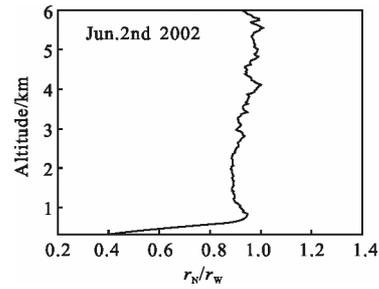


图 4 水汽和氮气通道重迭系数比

Fig.4 Overlap coefficient ratio of water vapor and N<sub>2</sub>

最后, 由公式(6)可得水汽含量分布廓线如图 5

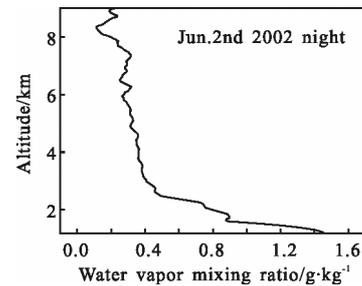


图 5 水汽混合比垂直廓线

Fig.5 Vertical profile of water vapor mixing ratio

所示。可以看出水汽垂直分布的总体特征是随高度的增加逐渐减小, 在 1.5~3.5 km 高度处易有突变层结构, 图中突变高度出现在 1.7 km 处。从数值显示上看, 冬季合肥地区比较干燥, 0.63 km 处水汽混合比仅为 1.56 g/kg, 随着高度的增加水汽含量急剧减小, 在 3 km 高度处水汽混合比仅为 0.4 g/kg。8 km 以上高度水汽混合比波动较大, 这是因为此段高度水汽 Raman 回波信号较弱, 噪声对测量精度有较大影响。

关于 L625 激光雷达水汽测量精度上的讨论, 李陶等人将其实测水汽廓线与气象探空气球进行多天多组的对比。结果表明: 气象探空仪测得的水汽混合比的变化趋势与激光雷达结果较为一致。同时, 对实验结果给出的结论是: L625 拉曼激光雷达性能基本稳定; 测量的水汽和氮气拉曼后向散射回波信号的数据基本可靠, 有一定精度; 大气透过率修正函数和标定常数等数据处理方法也基本正确<sup>[10]</sup>。由于 L625 激光雷达测量精度的研究已有结论性结果, 文中略去了此方面的对比和探讨。

### 3.2 合肥地区水汽时空变化特征

L625 激光雷达位于合肥西郊科学岛, 从 1989

年建成之日起，积累了近 20 年的气象探测数据。我们选取 2002 年数据分析合肥地区水汽时空变化特征，虽然数据量还不够充分，但一定程度上反应了

水汽时空变化的基本趋势和特征。2002 年 L625 激光雷达具体实验日期统计见表 2。

表2 L625激光雷达2002年实验统计

Tab.2 List of L625 lidar experiment date in 2002

Month	Date	Month	Date
January	2、5、7	July	5、8、9、10、11、18、29
February	2、7、23	August	1、2、3、4、5、20、22、23、27、31
March	6、7、9、17、18、29、30	September	2、25
April	6	October	2、8、14、15
May	23	November	2、5、26、28
June	4、6、11	December	9、10、11、13、14、16

为了分析水汽含量夜晚的变化特点，对 2002 年 8 月 1 日晚 21 时至 23 时和 2002 年 8 月 23 日 20 时至 21 时的水汽的数据进行计算得到水汽混合比的变化趋势图，分别如图 6、图 7 所示。从两图可以看出，

看出，L625 激光雷达可较好的反应水汽实时变化情况。

实验中对 2002 年已有水汽数据进行计算，获得多天水汽含量垂直分布，并把相同月份内垂直分布结果求平均值作为当月水汽平均含量。1~12 月水汽混合比垂直分布如图 8 所示。可以直观的看出 2002 年合肥地区水汽月含量的变化特征。此地区 8 月份水汽含量最高，0.63 km 处水汽混合比可达 11.2 g/kg 左右。7 km 高度处水汽含量仍然较大，约为 1.3 g/kg。对于干燥月份来说，同高度处水汽混合比也仅为 0.7 左右。造成 8 月合肥地区水汽含量高的原因是降雨明显，太阳辐射较强，水分蒸发较快导致水汽含量居全年之首。7 月水汽含量也比较高，主要是因为 7 月处正值合肥地区的梅雨季节，空气湿度较大。1 月和 12 月相对其他月份来说，水汽含量较低，水汽混合比随高度的增加下降明显。2 km 处水汽混合比为 0.7 左右。2 km 以上高度处水汽混合比基本固定，随高度变化缓慢。在所有月份中，9 月水汽含量波动较大，1.2 km 和 3 km 处有水汽突变结构。

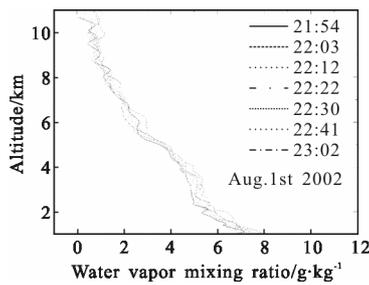


图 6 水汽夜间时段变化趋势图

Fig.6 Change current profiles of water vapor at night

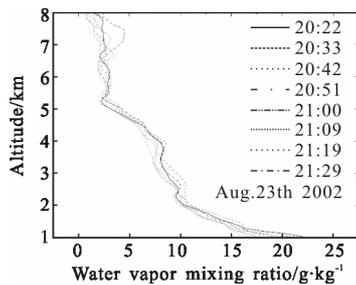


图 7 水汽夜间时段变化趋势图

Fig.7 Change current profiles of water vapor at night

两天夜晚水汽的垂直分布在短时间段内有所波动，但总体变化趋势基本相同。在出现水汽突变时，L625 激光雷达可较好的反应出来，如图 7 中 20：51 水汽廓线图所示。在此测量时间段内，7~8 km 处出现较大的水汽团，在较短的时间内水汽团消失。同时可以

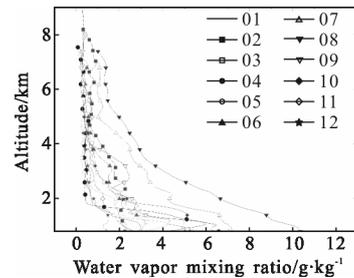


图 8 水汽月变化趋势图

Fig.8 Change current profiles of water vapor in every month

合肥位于江淮之间,属于温带向亚热带过渡气候型,为亚热带湿润气候。图9显示了2002年合肥地区水汽含量的季节变化趋势。从图中可以看出,水汽含量以夏季最高,秋季次之,冬季最低。夏秋两季0.63 km处水汽混合比相差约为1.1 g/kg;夏冬两季水汽含量相差最大,相同高度处差值约达5.2 g/kg。

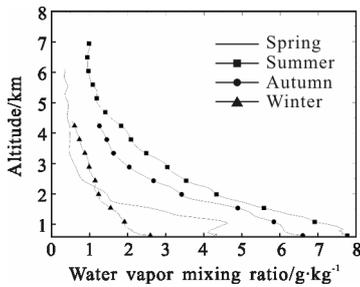


图9 水汽季节变化趋势图

Fig.9 Change current profiles of water vapor in different season

#### 4 结 论

L625 激光雷达积累了多年的水汽探测数据,对研究合肥地区水汽垂直廓线的时空特征提供重要资料。在水汽测量方面,L625 激光雷达系统稳定性较好,测量精度较高,这为不同日期、不同年份之间水汽含量的对比成为可能。文中对2002年水汽数据进行整理计算,获得水汽大致的夜间变化特征、月变化和季变化规律。从中可以看出,一个地区的水汽含量时空变化特征与当地太阳辐射强弱、大气环流特点和所处的地理位置有重要关系。充分了解局部地域具体的气象信息对分析和研究水汽变化有重要作用。下一步的工作目标是通过多年水汽资料的总结获得年

季统计变化规律,为指导当地人们的生产、生活作出积极贡献。

致谢:衷心感谢谢军同志对本文的支持和帮助。

#### 参考文献:

- [1] MATHUR S L, NAM M K, PRASAD C R. A UV Raman Lidar for Monitoring Water Vapor[C]/Optical Society of America, 2001.
- [2] BRUNEAU D, QUAGLIA P, FLAMANT C, et al. Airborne lidar LEANDRE II for water-vapor profiling in the troposphere I. System description[J]. Applied Optics, 2001, 40(21): 3450-3461.
- [3] DAVID N. Whiteman. Examination of the traditional Raman lidar technique II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2593-2608.
- [4] MIKLO 'S SZAKA 'LL, ZOLTA 'N BOZO 'KI, A 'RPA 'D MOHA 'CSI. Diode Laser Based Photoacoustic Water Vapor Detection System for Atmospheric Research[J]. Applied Spectroscopy, 2004, 58(7): 792-798.
- [5] 郭彩丽,周诗健,译. 大气辐射导论(第二版)[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [6] MATTIS I, ANSMANN A, ALTHAUSEN D, et al. Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar[J]. Applied Optics, 2002, 41(30): 6451-6462.
- [7] 吴永华,胡欢陵,胡顺星,等.用瑞利散射激光雷达探测平流层中上部温度[J]. 中国激光,2001,28(2): 137-140.
- [8] 胡顺星,胡欢陵,吴永华,等.光子并合作用对激光雷达测量臭氧的影响分析[J]. 量子电子学报,2002,19(6): 550-554.
- [9] 李陶,戚福第,岳古明,等.大气中水汽混合比的Raman激光雷达探测[J]. 大气科学,2000,24(6): 843-854.
- [10] 钟志庆,周军,戚福第,等.探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达[J]. 强激光与粒子束,2003,15(12): 1145-1147.