

用于测量流层水汽的拉曼激光雷达

尚震^{1,2}, 谢晨波¹, 钟志庆¹, 王邦新¹, 王珍珠¹, 赵明¹, 谭敏^{1,2}, 刘东¹, 王英俭^{1,2}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械所 大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

摘要: 水汽在大气中含量很少, 但变化很大, 变化范围在 0.1%~4% 之间, 水汽绝大部分集中在对流层。随着光电探测技术的不断发展, 大气衰减对光电探测造成的影响也越来越显著, 其中水汽是主要影响因子之一, 也是最为不确定参数。光电探测中常用红外波段, 但是水汽分子浓度较大, 对辐射吸收造成很大的影响。拉曼激光雷达是测量大气水汽的主要技术手段之一。介绍了自行研制的激光水汽测量拉曼激光雷达的总体结构和主要技术参量。测量结果显示: 该激光雷达可以对夜晚 8 km 高度范围内以及白天边界层内的水汽进行测量。实验数据与当地探空数据进行比对, 取得了较好的一致性, 充分验证了该拉曼激光雷达测量水汽的有效性和可靠性。

关键词: 水汽混合比; 对流层光电探测; 拉曼激光雷达; 垂直对流层

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1211003

Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor

Shang Zhen^{1,2}, Xie Chenbo¹, Zhong Zhiqing¹, Wang Bangxin¹, Wang Zhenzhu¹, Zhao Ming¹,
Tan Min^{1,2}, Liu Dong¹, Wang Yingjian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The content of water vapor in atmosphere is very little, but it is the most active molecule in atmosphere. The volume ratio of moisture to air was about 0.1%–4% and most part water vapor concentration in the troposphere. The influences of atmospheric attenuation become more serious along with the development of the optics-electron detecting technology. The water vapor in the atmosphere was the main factor and uncertain parameter to affect atmospheric attenuation. Infrared wavelengths was commonly used in photoelectric detection, but water vapor makes great effect on the radiation absorption due to its high concentration. Raman lidar has become the useful advantaged tools to measure water vapor. The system structure and specifications of Raman lidar developed by introduced. The measurement results show that this lidar can take measurements of water vapor over 8 km height at night and water vapor in boundary layer in day time as well as the tropospheric aerosol in day and night continuously.

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(41005014, 41405032); 中国科学院重点部署(KJZD-EW-TZ-G06-01);

安徽省自主创新专项(12Z0104074)

作者简介: 尚震(1988-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。Email: Shangzhengd@163.com

导师简介: 谢晨波(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光雷达大气遥感和环境监测方面的研究。Email: cbxie@aiofm.ac.cn

The obtained results are better consistent with radiosonde data in terms of the water vapor, which assures the reliability and availability of the Raman lidar for water vapor observation.

Key words: water vapor mixing ratio; photoelectric detection; Raman lidar; troposphere

0 引言

光电探测是根据被测对象辐射或反射光波的特征来探测和识别对象的一种技术,所利用的电磁辐射波谱范围主要涉及紫外光(0.2~0.4 μm)、可见光(0.4~0.7 μm)和红外光(1~3 μm, 3~5 μm, 8~12 μm)。大气(主要包括大气气溶胶粒子和云粒子,以及水汽等空气分子)对传输于其中的辐射具有散射和吸收等作用,造成辐射能的衰减,尤其是在光电探测中常用的红外波段,大气的传输特性将直接影响到光电探测的作用效果,而这其中水汽分子浓度较大,对辐射衰减造成的影响尤为突出。大气的传输特性将直接影响到光电探测的作用效果。大气湍流运动会对光波在大气中的传输产生一定的影响作用,引起光束抖动、强度起伏、光像位置抖动等大气湍流效应^[1]。定义 Cn₂ 为大气折射率结构常数,它是激光大气传输和天文观测中一个很重要的参数,由 Cn₂ 可以计算出大气湍流对光电探测系统的影响。

大气温、湿度和风速是影响 Cn₂ 的主要因素,一般认为,在可见光和近红外波段,Cn₂ 的起伏主要是由温度引起的,湿度影响非常小。通过分析他人野外测量的实验数据,Arnold 等^[2]人总结出与之相反的结论,在可见光波段,湿度对大气折射率结构常数的影响有时超过温度起伏引起的影响,在潮湿地带这种现象更为突出。因此,能够准确测量大气湿度对研究近地面湍流对光电探测的影响是很有必要的,也是很有现实意义的研究工作。

水汽在红外波段(0.7、0.8、0.94、1.1、1.38、1.87、2.7、3.2 μm)有许多吸收带^[3-4],水汽的含量及其垂直分布特征对激光在大气中的传输有着不可忽视的作用。随着激光技术和弱信号检测技术的发展^[3-4],拉曼激光雷达探测大气参数的能力得到提升,现已成为精确探测大气水汽和气溶胶的主要技术手段之一^[5-7]。

国内众多高校与科研机构展开了许多大气水汽探测的研究工作,并且取得了一定的研究成果^[6-8]。

该单位早在 20 世纪至今一直开展测量大气水汽的 Raman 激光雷达研制工作^[9-12]。文中介绍了该单位最新研制的水汽 Raman 激光雷达系统的结构和技术参数,重点对 Raman 激光雷达在北京地区探测水汽混合比的结果进行了分析和讨论。该最新水汽 Raman 雷达能够测量近地面至 10 km 高度范围内的大气水汽混合比廓线,水汽测量精度为 ±1 g/kg,系统整体设计为车载型,结构紧凑,便于移动,在保护天窗测量状态下具备全天候无人值守测量能力,便于开展外场实验。

1 Raman 激光雷达系统结构

设计的 Raman 激光雷达结构图如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。Raman 激光雷达系统主要

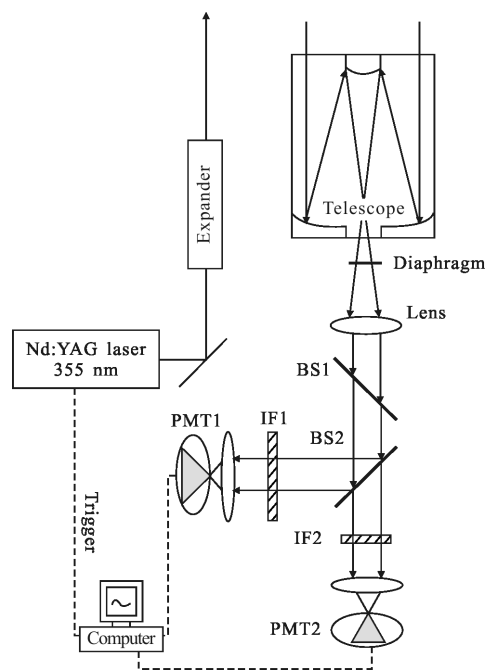


图 1 Raman 激光雷达的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of Raman lidar system

由三部分组成,激光发射单元主要包括激光器、发射镜片组和扩束镜。该激光雷达系统采用灯泵 Nd:YAG

激光器的 3 倍频 355 nm 脉冲激光作为探测光源, 发射光频率为 20 Hz, 单脉冲能量为 200 mJ。激光发散角为 0.45 mrad, 为降低激光雷达自身几何因子对近距离测量数据的影响, 该激光雷达系统发射光路中采用 3 倍率的扩束镜, 将发散角减小为 0.15 mrad。发射器采用两个高稳定的二维调节光学镜架和 50 mm 口径光学反射镜, 实现出射激光光轴和光学望远镜接收光轴间高度平行。

表 1 Raman 激光雷达的主要性能指标

Tab.1 Main specification of Raman lidar system

Transmitter optics		Receiver optics		Data acquisition and control	
Nd:YAG laser		Telescope		Detector: PMT	
Wavelength /nm	355	Diameter /m	0.45	Diameter /mm	8
Pulse energy/mJ	200	Focal length/m	4	Quantum efficiency	>25%
PRF/Hz	20	Field of view/mrad	0.5-2	Sample rate/MHz	20
Divergence /mrad	<0.15	Filter-Band-width/nm	0.3@386.7 & 407.8	AD: resolution/bit	12
Expander	x3	Transmission /%	60@386.7 & 407.8	PC: Resolution/MHz	250

光学接收单元由光学接收望远镜、光阑、目镜、分色镜、干涉滤光片和会聚透镜组成, 主要用于收集大气分子和气溶胶粒子与出射激光相互作用产生的后向散射光信号并依据测量波长进行分色、滤光和聚焦。光学接收望远镜为卡塞格林型, 口径 450 mm, 焦距 4 000 mm。在接收望远镜焦点处安置小孔光阑, 实现望远镜接收视场角在 0.5~2 mrad 可调, 经过光阑的会聚光经过目镜被准直为近似平行光。分色片 BS1 将望远镜接收的光信号在 360~370 nm 波长一分为二, 分色片 BS1 的透射光被分色片 BS2 在 390~400 nm 波长进一步分为两束, 其中透射光经过干涉滤光片 IF2 滤光后仅透过 407 nm 光信号, 为大气水汽振动拉曼散射光信号, 反射光经过干涉滤光 IF1 滤光后仅透过 386 nm 光信号, 为大气氮气分子振动拉曼散射光信号, 二者用于反演大气水汽混合比垂直廓线。分色片 BS1 的反射光首先经过干涉滤光片

IF0, 滤除太阳背景光, 透过光经过干涉滤光片 IF1 分色, 透射光信号为 355 nm, 为大气气溶胶米散射光信号, 干涉滤光片 IF1 反射光信号经过两个干涉滤光片 IF2a 和 IF2b 分色, 透射光信号为 354 nm, 为大气分子的低阶纯转动拉曼散射光信号, 干涉滤光片 IF2a 的反射光经过干涉滤光片 IF3 分色, 透射光信号为 353 nm, 为大气分子的高阶纯转动拉曼散射光信号。

控制单元由工控机等组成, 确保 Raman 激光雷达发射信号和数据采集同步进行。

信号探测和采集单元由光电探测器和数据采集器组成。其中光电探测器选用适合紫外和可见光波段测量的光电倍增管类型光谱范围为 300~650 nm, 峰值波长在 420 nm。采用模数转换 AD 和光子计数 PC 相结合的数据采集器。采样频率为 20 MHz(对应空间分辨率为 7.5 m), 对于 AD 采样精度为 12 bits, 对于光子计数的最高计数率为 250 MHz。控制单元由工控机以及相应运行控制软件和数据处理软件组成, 确保 Raman 激光雷达系统发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储步调一致地工作。

2 Raman 激光雷达探测水汽混合比原理

水汽混合比定义为^[11-13]: 一定高度 z 处包含在同一体积内的水汽质量 $m_H(z)$ 与干空气质量 $m_{dy}(z)$ 之比, 即 $w(z)=m_H(z)/m_{dy}(z)$ 。其数值随高度 z 的分布可表示如下:

$$w(z)=\frac{n_H(z)}{n_{dy}(z)} \frac{M_H}{M_{dy}} \quad (1)$$

式中: $n_H(z)$ 与 $n_{dy}(z)$ 为高度 z 处的水汽和干空气数密度; M_H 与 M_{dy} 分别表示水汽和干空气的分子量。由于大气中氮气含量在 100 km 以下非常稳定并且混合均匀, 氮气混合比 (氮气与干空气的质量比) 为 0.78, 因此可以用氮气分子数密度代替干空气分子数密度。根据测量水汽和氮气的拉曼回波信号, 利用拉曼激光雷达方程可得出水汽混合比 $w(z)$ 为:

$$w(z)=C_w \Delta_q^w(z_0, z) \frac{S_H(z)}{S_N(z)} \quad (2)$$

式中: C_w 为激光雷达探测水汽混合比的系统标定常数; $\Delta_q^w(z_0, z)$ 为大气透过率修正函数; $S_H(z)/S_N(z)$ 为激光雷达测量的水汽和氮气分子拉曼后向散射光信号的比值。由公式(2)可以看出, 如果已知标定常数和大气透过率修正函数^[11], 通过 Raman 激光雷达测量

的水汽和氮气拉曼后向散射光信号的比值就可以计算出水汽混合比 $w(z)$ 。

3 Raman 激光雷达测量水汽结果

3.1 个例分析

Raman 激光雷达系统置于中国科学院大学北京雁栖湖校区,对该局部地区大气进行初步实验观测,探测时间为每 15 min 一组,激光能量为 150 mJ, 5 000 发脉冲。利用氮气和水汽拉曼散射信号反演的大气水汽混合比廓线如图 2 所示,为验证 Raman 激光雷达系统测量结果的正确性,图中还分别给出了气象探空仪(点划线)探测的水汽混合比垂直廓线。

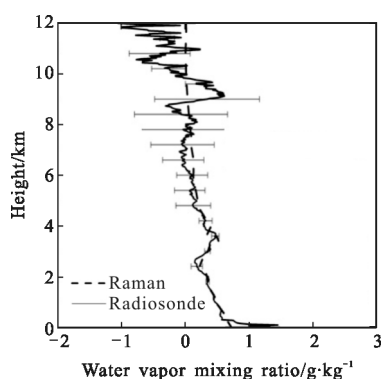


图 2 2015 年 3 月 4 日 Raman 激光雷达探测水汽混合比垂直廓线结果和由信号噪声产生的不确定度

Fig.2 Profiles of water vapor Raman lidar detection results obtained by Raman lidar on Mar 4 2015. Error bars shows the 1- statistical uncertainty that is due to signal noise

实验期间,北京地区天气干燥,大气中水汽混合比的比值较小,不超过 1.5 g/kg。从图中可以看出大气中的水汽含量随着探测高度变化明显,呈现出水汽的高时空变化特性。夜晚,Raman 激光雷达能够探测 6 km 以上高度的水汽混合比垂直廓线。在共同探测的高度范围内,二者测量的水汽混合比垂直廓线总体趋势大致相同,甚至一些精细结构都能较好的吻合。在 5 km 以上,Raman 激光雷达探测的水汽混合比垂直廓线出现较大振荡,与气象探空仪的探测结果比有较大偏差。5 km 以下测得水汽不确定度最大值约为 0.07,5 km 以上不确定度逐渐增大,8 km 附近约为 0.7,不确定度增大主要是因为相对湿度较低的情况下测湿元件灵敏度较差以及在高空激光

雷达接收的水汽 Raman 后向散射回波信号变弱、信噪比降低,导致探测误差变大。

上述测量结果表明,该 Raman 激光雷达测量对流层水汽混合比垂直分布的数据正确可靠,夜间测量范围可以从近地面至对流层中部的 7~8 km 左右高度,可以较为精细的反映水汽含量在大气中的垂直分布特征。

3.2 白天水汽混合比探测

由于强烈背景光辐射的影响,白天探测水汽非常困难。此 Raman 激光雷达在设计中采取一定的措施,尝试进行白天水汽探测,并得出初步探测结果。如图 3 所示,给出了 Raman 激光雷达与 2015 年 3 月 4 日上午 8:00 测量的水汽混合比垂直廓线(实线)和当地气象探空仪测量的水汽混合比垂直廓线(虚线)。从中可以看出该天边界层高度大约在 2 km 附近,边界层内水汽混合比垂直廓线的白天测量结果和气象

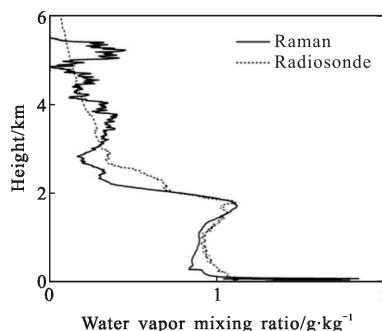


图 3 Raman 激光雷达探测白天水汽混合比垂直廓线
Fig.3 Vertical profile of water vapor mixing ratio measured by Raman lidar in day time

探空仪较为一致,在边界层以上,由于强烈的天空背景辐射的影响,使得反演的水汽混合比垂直廓线出现振荡。白天探测水汽的有效高度一般在 3 km 附近,总体白天测量数据与气象探空仪的测量数据趋势一致,表明此 Raman 激光雷达已经具备了一定的白天探测能力。

3.3 大气中水汽含量的时空变化

图 4 给出了 2015 年 2 月 23 日晚 19:00~20:30,即一个半小时内 Raman 激光雷达探测的 6 条水汽混合比的垂直廓线。从图中可以看出,这段时间内水汽混合比均有一突变层,大致在 2~3.5 km 的高度范围内。突变层以下水汽混合比相对较大,突变层内水汽混合比逐渐减小,它反映了大气中水汽含量空间结

构的复杂性。水汽混合比的突变层从 19:00~19:45 的约 23.5 km 处上升下降到 2019:030 的约 3.5km 处,降低了约 500 m,之后又下降到 20:0015 的约 2.8 km 5 km 处,又降低了约 500 m,最后 20:30 又上升到约 3 km 处,一个半小时内突变层变化较大,另外,低层水汽混合比也逐渐变大,这与地面观测结果较为一致。这说明大气中水汽含量的时空变化有时是较为显著的。此外,计算了地面到 8km 处的大气中水汽的柱含量^[4],6 个时刻的水汽柱含量分别为 2.342、2.213、2.351、2.978、2.578、2.723 cm。水汽含量的变化较为明显,可能与天气状况、局地气象条件和大气输送有关。

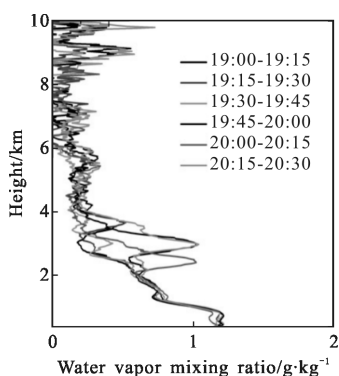


图 4 2015 年 2 月 23 日晚 19:00~20:30 水汽混合比垂直分布的变化
Fig.4 Profiles of water vapor mixing ratio between 19:00 and 20:30 on Feb.23, 2015

3.4 水汽混合比的连续观测

图 5 中给出了 2014 年 12 月 21 日至 2014 年 12 月 23 日 Raman 激光雷达测量的水汽混合比的连续时空分布,垂直分辨率为 7.5 m,时间分辨率为 15 min。在测量期间可以看出水汽大约集中在 5 km 以下,平

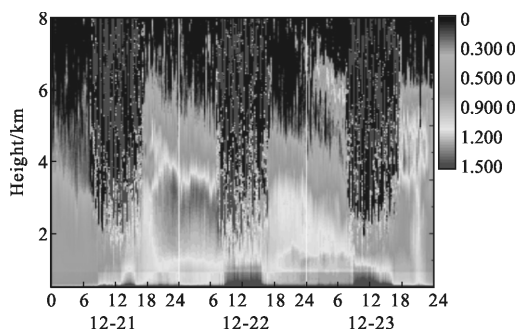


图 5 2014 年 12 月 21 日至 2014 年 12 月 23 日 Raman 激光雷达连续测量的水汽混合比时空分布
Fig.5 Continuous observation of water vapor mixing measured by Raman lidar between 21 Dec 2014 and 23 Dec 2014

均水汽混合比大约为 1.2 g/kg。夜晚测量的高度约为 7 km,白天由于背景光信号太强,只能测量边界层内的水汽,测量高度约为 2 km。由图中可以看出,该 Raman 激光雷达能够实现连续观测,实时监测大气水汽混合比变化,大气中水汽随高度变化剧烈,随着高度的增加,大气中水汽含量越来越低,水汽主要分布在大气边界层以内,但是 23 号凌晨 3:00~23:00 在高度范围 4~6 km 内水汽含量又明显增加,表明该高度层内有水汽层的存在。由此表明,Raman 激光雷达可以实时、连续、精确的测量大气中的水汽含量。

3.5 误差分析

图 6 给出了 2015 年 4 月 25 日夜晚 20:30,0~9 km 高度范围内 Raman 激光雷达(实线)测量结果和无线电探空仪(虚线)测量结果及绝对误差廓线图。由图中看出二者测量结果大体一致,水汽结构也能较好吻合。对比显示二者间的绝对误差大部分在 ± 1 g/kg 以内,由此说明该 Raman 激光雷达水汽测量已经达到较高的测量精度。

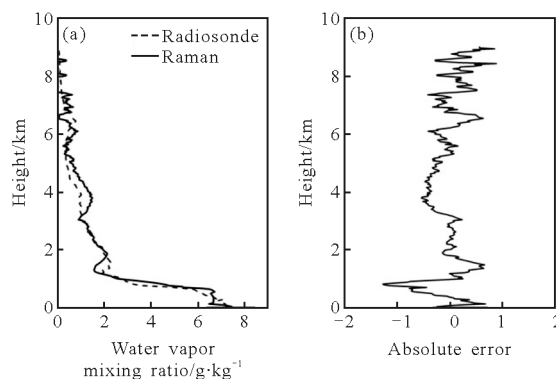


图 6 2015 年 4 月 25 日 20:30 水汽混合比垂直分布的变化和绝对误差廓线图

Fig.6 Profile of water vapor mixing ratio on Apr 25, 2015 and absolute error

4 结论

文中详细介绍了自行研制的单波长四 Raman 激光雷达系统中测量水汽的系统部分,及水汽的典型测量结果。测量结果表明了大气水汽在时间和空间上变化较大,并且分布都不均匀,它们对大气衰减造成的影响程度也各不相同。因此实时测量获取大气的水汽混合比垂直廓线,对分析和去除大气衰减对光电探测的影响具有重要的意义。

中国科学院大学雁栖湖校区夜晚该 Raman 激光雷达探测的水汽混合比廓线与气象探空仪测量的水汽混合比廓线在整个探测高度范围内(1~7 km)具有较好的一致性,并且能够进行夜晚和白天的连续观测,表明了该 Raman 激光雷达性能稳定,测量的水汽数据可靠。另外值得注意的是,影响光电探测的大气参数不仅包括水汽、气溶胶还包括大气温度、风场以及大气中的痕量气体(O₃、SO₂、CO₂、NOX 和 CH₄等)都会不同程度的影响大气衰减特性,从而最终影响光电探测的测量结果和性能参数。并且这些参数之间是相互关联的,因此要想精确获得大气衰减特性,必须采用多参数多功能雷达系统,这也是应用于光电探测中激光雷达未来发展的重要方向。

参考文献:

[1] Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. (in Chinese)

[2] Arnold T, Herry R. Estimating effects of temperature and moisture on in the dame unstable boundary layer for visible, infrared, ratio, and millimeter wavelengths [C]//SPIE, 1992,1668: 465-476.

[3] Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. Advanced Atmospheric Physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. (in Chinese)
周秀冀,陶善昌,姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.

[4] Keith P. Shine, Ashok Sinha. Sensitivity of the Earth's climate to height-dependent changes in the water vapor mixing ratio [J]. *Nature*, 1991, 354(6352): 382-384.

[5] G J Nott, T J Duck, J G Doly, et al. A remotely operated lidar for aerosol, temperature, and water vapor profiling in the high Arctic [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(2): 221-234.

[6] Wang Hongwei, Hua Dengxin, Wang Yufeng, et al. Design and analysis of new spectroscopic system of Raman lidar for detection of atmospheric water vapor [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(12): 120701. (in Chinese)
王红伟,华灯鑫,王玉峰,等. 水汽探测拉曼激光雷达的新型拉曼光谱分光系统设计与分析 [J]. 物理学报, 2013, 62(12): 120701.

[7] Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere Height [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328004. (in Chinese)
王玉峰,高飞,朱承炫,等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328004.

[8] Li Ting, Chen Siying, Zhang Yinchao, et al. Simulation of water vapor multiple wavelengths lidar echo signals and error analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0213001. (in Chinese)
李婷,陈思颖,张寅超,等. 多波长水汽探测激光雷达回波仿真及误差分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0213001.

[9] Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, et al. New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1281-1286. (in Chinese)
谢晨波,周军,岳谷明,等. 新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1281-1286.

[10] Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, et al. Mobile lidar system for measuring tropospheric aerosol and water vapor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 365-368. (in Chinese)
谢晨波,周军,岳谷明,等. 测量大气气溶胶和水汽的车载式激光雷达系统 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 365-368.

[11] Li Tao, Qi Fudi, Jin Chuanjia, et al. Raman lidar system for the measurement of water vapor mixing ratio in the atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24: 843-854. (in Chinese)

[12] Liu Bo, Wu Decheng, Fan Aiyuan, et al. Development of a mobile Raman-Mie lidar system for all time water vapor and aerosol detection [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(2): 230-235.

[13] Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(16): 3068-3082.

[14] Wei Heli, Zhao Fengsheng. Remote sensing of precipitable water from infrared solar spectra [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(4): 315-319. (in Chinese)
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.