

# 多波长水汽探测激光雷达回波仿真及误差分析

李 婷<sup>1</sup> 陈思颖<sup>1</sup> 张寅超<sup>1</sup> 郭 磐<sup>1</sup> 陈 和<sup>1</sup> 高 龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081

<sup>2</sup>北京空间机电研究所, 北京 100094

**摘要** 大气水汽含量随海拔升高急剧减小, 为准确获得水汽浓度随高度的分布, 设计多波长发射水汽探测星载距离分辨差分吸收激光雷达(DIAL)。选取波长相差较小, 水汽吸收截面不同的4个发射波长; 其中3个吸收截面较大的波长作为信号光束, 第4个吸收截面较小的波长作为参考光束, 分3组对不同海拔高度处的水汽浓度进行分段探测。对4个发射波长的回波信号进行了仿真模拟, 为验证其水汽探测能力, 在白天和夜晚对3组波长水汽浓度探测的相对误差进行分析讨论。结果表明, 在相对误差小于20%的情况下, 该多发射波长星载距离分辨差分吸收激光雷达系统可以实现白天对流层(小于12 km)、夜晚平流层底以下(小于15 km)水汽浓度的探测。理论上初步证实了该多波长星载距离分辨差分吸收激光雷达能全天时精确地探测对流层水汽浓度分布。

**关键词** 大气光学; 距离分辨差分吸收激光雷达; 星载系统; 水汽遥感; 多波长探测

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0213001

## Simulation of Water Vapor Multiple Wavelengths Lidar Echo Signals and Error Analysis

Li Ting<sup>1</sup> Chen Siying<sup>1</sup> Zhang Yinchao<sup>1</sup> Guo Pan<sup>1</sup> Chen He<sup>1</sup> Gao Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

<sup>2</sup>Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

**Abstract** The concentration of atmospheric water vapor decreases sharply as the attitude increases. In order to obtain an accurate distribution of water vapor in atmosphere, a spaceborne range-resolved differential absorption lidar (DIAL) of multiple wavelengths emission is designed. Four wavelengths are identified with small differences in wavenumbers, and with different water vapor absorption cross sections, where three wavelengths with larger cross sections are considered to be signal beams, and the last one with smaller cross section is called the reference beam. Divided into three groups, the concentrations of water vapor at different elevations can be segmentally detected. The echo signals of the four wavelengths are simulated. To verify the performance of water vapor profiles detection, the random systematic relative errors of three groups detections of DIAL from spaceborne platforms in daytime and nighttime are evaluated. The analysis shows that, under relative error less than 20%, water vapor profile measurement is possible under troposphere (less than altitude of 12 km) in daytime, and under the bottom of the stratosphere (less than altitude of 15 km) at night. It is theoretically and preliminary proved that the multiple wavelengths spaceborne range-resolved DIAL has the ability of accurate detection of water vapor concentration distributions in troposphere.

**Key word** atmospheric optics; range-resolved differential absorption lidar; spaceborne system; water vapor remote sensing; multiple wavelengths detection

**OCIS codes** 280.1910; 010.1290; 010.3640; 010.1280

收稿日期: 2014-08-07; 收到修改稿日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61178072)

作者简介: 李 婷(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: tingli\_1990@163.com

导师简介: 陈思颖(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光遥感大气探测方面的研究。E-mail: csy@bit.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

大气中水汽主要集中在对流层下半部,虽然占大气气体成分的比例很小,但它是影响天气变化的主要因素之一。因此,对水汽浓度的精确测量,可以有效监测大气天气和气候的变化。近几年,随着科技的发展,水汽在大气研究中的重要性越来越受到科学家们的重视,在全球变化研究委员会(CGCR)的综述报告指出,气候变化的评估主要是基于对水循环更好的观测<sup>[1]</sup>。差分吸收激光雷达(DIAL)尤其是距离分辨差分吸收激光雷达采用探测气体微分吸收原理,选取发射波长相近的信号光束(即 on 光束)和参考光束(即 off 光束),同时对待测气体浓度进行探测,可消去大气衰减的影响,获得待测气体分子浓度的三维空间分布,对环境监测和研究气体变化规律具有很大的实用价值<sup>[2]</sup>。

差分吸收激光雷达探测大气水汽技术国外发展得较早。1996年,美国宇航局(NASA)飞行研究中心研制了激光雷达大气遥感实验(LASE),采用差分吸收激光雷达探测大气水汽的方法,探测范围为地面至 20 km 左右的平流层<sup>[3]</sup>。2001年,欧空局(ESA)开始研制星载遥测大气水汽的系统(WALES)<sup>[4]</sup>,现还处于仿真计算阶段。系统采用距离分辨差分吸收的原理,采用 935 nm 左右的 4 个近红外波长作为发射波长,彼此之间依次作为信号光束和参考光束波长,系统的垂直分辨距离为 50 m。现阶段,国内关于大气水汽探测差分吸收激光雷达,尤其是大气水汽探测星载<sup>[5]</sup>距离分辨差分吸收激光雷达的研究还处于起步阶段,尚未发现有关星载差分吸收激光雷达水汽探测方面的文献。

结合国外相关研究,本文选取 936 nm 附近的水汽吸收带,在初步给定星载差分吸收激光雷达系统仿真参数的前提下,以美国标准大气模式<sup>[6]</sup>为背景,由高分辨率分子吸收光谱(Hitran)数据库计算 4 个发射波长水汽单分子吸收截面,并对星载水汽探测差分吸收激光雷达回波信号进行模拟仿真。为了研究其可行性,对系统水汽探测浓度的相对误差进行对比分析。结果表明,当相对误差小于 20% 时,该多波长星载距离分辨差分吸收激光雷达白天可探测对流层以下(小于 12 km)、夜晚平流层底以下(小于 15 km)水汽的浓度。

## 2 水汽探测星载距离分辨差分吸收激光雷达原理

星载水汽探测距离分辨差分吸收激光雷达发射两束波长相近的激光,一束激光的波长位于水汽分子的吸收光谱的顶峰,称为 on 光束;另一束处于水汽分子的吸收光谱的波谷,称为 off 光束。由于两束光波长接近,通过对两束光回波信号的处理,可以消去仪器常数和背景大气的衰减,减小探测误差,能更加精确地获得水汽分子的浓度。

假设卫星轨道高度为  $R$ ,星载激光雷达在空中垂直向地面发射激光,则探测到海拔高度为  $z$  时,激光传输的距离为  $R-z$ 。假设 on 和 off 两束激光发射能量为  $E_0$ ,根据光电雷达方程,则激光雷达接收到两个波长下海拔高度为  $z$  的大气介质后向散射回波光子数  $N_s(z, \lambda_{on})$  和  $N_s(z, \lambda_{off})$  分别可以表示为<sup>[7]</sup>

$$N_s(z, \lambda_{on}) = \frac{C_A(\lambda_{on})\beta(z, \lambda_{on})}{(R-z)^2} \exp\left\{-2 \int_z^R [\sigma_{H_2O}^0(\lambda_{on})N_{H_2O}(z) + \sigma_g(z, \lambda_{on})] dz\right\}, \quad (1)$$

$$N_s(z, \lambda_{off}) = \frac{C_A(\lambda_{off})\beta(z, \lambda_{off})}{(R-z)^2} \exp\left\{-2 \int_z^R [\sigma_{H_2O}^0(\lambda_{off})N_{H_2O}(z) + \sigma_g(z, \lambda_{off})] dz\right\}, \quad (2)$$

式中  $C_A = \frac{AQ_0c\tau\eta(z)\chi k_q}{2}$  为激光雷达系统的仪器常数,  $A$  是接收望远镜有效接收面积,  $Q_0 = \frac{E_0}{h\nu}$  为脉冲激光器发射的总光子数,  $\nu$  是激光发射频率;  $c$  是光速;  $\tau$  是激光器脉宽,  $\frac{c\tau}{2}$  是垂直距离分辨,  $\eta(z)$  为填充系数(仿真时一般恒等于 1),  $\chi$  是接收光学元件透射率,  $k_q$  是光电探测器的量子效率;  $\beta(z, \lambda_{on})$  和  $\beta(z, \lambda_{off})$  为两个波长下大气体后向散射微分截面,  $\sigma_{H_2O}^0(\lambda_{on})$  为波长位于水汽分子中心吸收谱线时的单分子吸收截面,  $\sigma_{H_2O}^0(\lambda_{off})$  为波长偏离水汽中心吸收谱线时的吸收截面。  $N_{H_2O}(z)$  是水汽分子数密度,  $\sigma_g(z, \lambda_{on})$  和  $\sigma_g(z, \lambda_{off})$  分别为信号光波长  $\lambda_{on}$  和参考光波长  $\lambda_{off}$  时的背景大气消光系数。

假设  $\lambda_{on} \approx \lambda_{off}$ , 故有  $\beta(z, \lambda_{on}) \approx \beta(z, \lambda_{off})$ ,  $\sigma_g(z, \lambda_{on}) \approx \sigma_g(z, \lambda_{off})$ , 由(1)式和(2)式可以近似推出水汽浓度的表达式<sup>[8]</sup>:

$$N_{\text{H}_2\text{O}}(z, z + \Delta z) = \frac{\ln \left[ \frac{N_s(z + \Delta z, \lambda_{\text{off}})}{N_s(z + \Delta z, \lambda_{\text{on}})} \right] - \ln \left[ \frac{N_s(z, \lambda_{\text{off}})}{N_s(z, \lambda_{\text{on}})} \right]}{2\Delta\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^0 \Delta z}, \quad (3)$$

式中  $\Delta\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \sigma_{\text{H}_2\text{O}}^0(\lambda_{\text{on}}) - \sigma_{\text{H}_2\text{O}}^0(\lambda_{\text{off}})$  为激光雷达 on 和 off 发射波长水汽吸收截面差,  $\Delta z$  为垂直距离分辨。

### 3 水汽探测星载距离分辨差分吸收激光雷达回波信号仿真

图 1 为美国标准大气模式下水汽模型<sup>[6]</sup>。从图中可以看出,大气中水汽主要集中在对流层中下部,其浓度大小随海拔高度的增加急剧减小。由近地面到海拔 20 km 的高度,水汽浓度可减小约 4 个量级。因此针对不同高度的水汽浓度,根据距离分辨差分吸收激光雷达微分吸收原理,选取 4 个水汽吸收截面不同的激光发射波长,对水汽浓度进行分层探测。

参考 935 nm 附近的水汽吸收带,选取 4 个发射波长为  $\lambda_1 = 935.685 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 935.561 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 935.906 \text{ nm}$ <sup>[4]</sup> 和  $\lambda_4 = 936.242 \text{ nm}$ 。其中前 3 个波长在水汽吸收谱的顶峰,为 on 光束;第 4 个波长偏离水汽吸收峰,为 off 光束。水汽单分子吸收截面可以由洛伦兹线型<sup>[9]</sup>表示,考虑到温度压强对吸收截面的影响,由 HITRAN2012 数据库<sup>[10]</sup>,就可以计算出特定频率下分子的吸收截面。图 2 为 4 个发射波长对应的水汽单分子吸收截面。

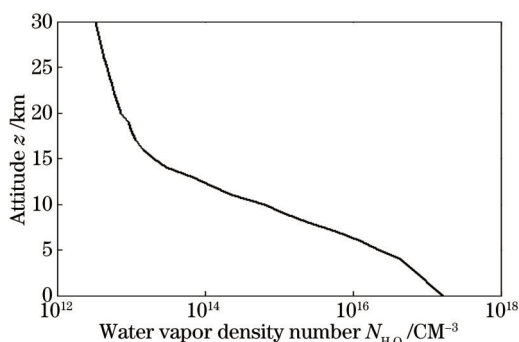


图 1 美国标准大气模式下水汽分子数密度随高度的分布

Fig.1 Water vapor number density distribution from US standard atmosphere

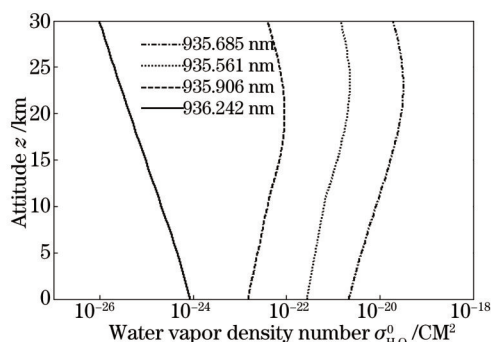


图 2 不同发射波长下水汽分子吸收截面

Fig.2 Water vapor molecule absorption cross sections with different emission wavelengths

结合国外相关研究和卫星平台工作环境特征,按照表 1 所示的星载差分吸收激光雷达系统仿真参数,根据星载距离分辨差分吸收激光雷达基本原理,仿真多波长发射星载距离分辨差分吸收激光雷达水汽探测回波信号,如图 3 所示。横坐标表示激光雷达发射一个脉冲激光能量所获得的回波光子数,纵坐标为海拔高度。

表 1 水汽探测星载差分吸收激光雷达仪器参数

Table 1 Instrument parameters of water vapor detection DIAL system

	Parameter	Value
Satellite	Orbital altitude /km	400
	Velocity /( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	7
Laser	Wavelength /nm	935.685 ( $\lambda_1$ )
		935.561 ( $\lambda_2$ )
		935.906 ( $\lambda_3$ )
		936.242 ( $\lambda_4$ )
	Vertical range resolution /m	300
Telescope	Horizontal resolution /km	15
	Repetition rate /Hz	25
	Pulse energy /mJ	100
	Divergence angle /mrad	0.1
	Telescope diameter /m	1
Detector	Field of view /mrad	0.2
	Optical efficiency	0.6
Atmospheric	Detector quantum efficiency	0.14
	Filter bandwidth /nm	0.5
	Daytime background /( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}$ )	0.2
	Nighttime background	0
	Atmospheric optical thickness	0.5

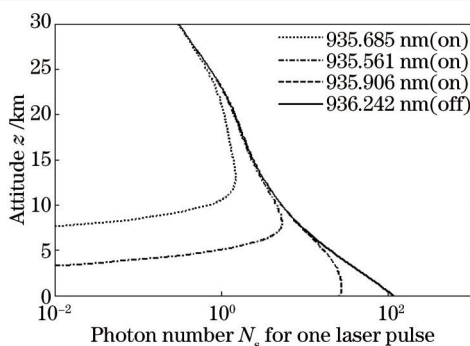


图3 星载距离分辨差分吸收激光雷达水汽探测回波信号

Fig.3 Echo signals of water vapor spaceborne range-resolved DIAL

由图3初步可知,波长为  $\lambda_1$  时水汽吸收截面较大,在对流层顶到平流层低(10~20 km)水汽浓度较小的区域,与参考光束  $\lambda_4$  的回波信号相差明显,而在对流层内(小于 10 km)由于水汽浓度较大,该波长对水汽消光作用太强,接收系统无法接受到光子数,故适合探测水汽浓度较小的对流层顶到平流层底区域(10~20 km)。同理,  $\lambda_2$  波长适合探测对流层中上部(5~10 km)水汽浓度,  $\lambda_3$  波长适合探测对流层中下部(小于 5 km)水汽浓度。

#### 4 星载距离分辨差分吸收激光雷达水汽探测相对误差分析

为验证多波长发射星载距离分辨差分吸收激光雷达水汽探测性能,对系统由回波随机性和背景噪声引起的相对误差进行分析研究。

激光雷达在接收来自大气的后向散射回波信号的同时,主要会受到天空背景辐射噪声  $N_b$ 、探测器产生的暗计数噪声  $N_d$  的影响。

按照信噪比(SNR)定义,得出累积  $M$  次脉冲星载差分吸收激光雷达水汽探测回波信号信噪比计算公式<sup>[9]</sup>:

$$R_{SN}(z) = \frac{N_s(z)}{\sqrt{N_s(z) + 2(N_b + N_d)}} \times \sqrt{M}, \quad (4)$$

式中  $M$  为累积激光脉冲数;  $N_b$  是进入到接收探测器内部的背景辐射噪声,对于夜晚测量可以认为  $N_b = 0$ ,  $N_d$  为光电倍增管的暗计数。

星载距离分辨差分吸收激光雷达背景噪声不仅需要来自于天空背景辐射噪声,而且需考虑来自地表表面反射到探测器的辐射噪声,因此背景噪声公式<sup>[11]</sup>应为

$$N_b = \frac{L_v \rho}{hv \pi} \cos \theta_0 \exp[-2\tau_{atm}(v)] \Delta v_f A \pi F_\theta^2 \Gamma_{rec} \Delta t, \quad (5)$$

式中  $L_v$  是太阳辐射照度的谱密度,  $\rho$  是地表反射率,  $\theta_0$  是太阳天顶角,  $\tau_{atm}$  是大气光学厚度,  $h$  是普朗克常数,  $v$  是激光频率,  $\Delta v_f$  是探测器系统滤光片的带宽,  $A$  是接收望远镜有效接收面积,  $F_\theta$  是接收望远镜视场角半角。  $\Gamma_{rec}$  是接收系统的透射率,一般包括接收系统的光学效率和探测器量子效率,  $\Delta t$  为信号累积时间。

由水汽浓度(3)式和信噪比(4)式,可以得到由于背景噪声和信号噪声引起的系统探测水汽浓度随机相对误差表达式<sup>[12]</sup>:

$$\delta_N = \frac{\Delta N_{H_2O}}{N_{H_2O}} = \frac{1}{2N_{H_2O} \Delta \sigma_{H_2O} \Delta z \sqrt{M}} \left[ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left( \frac{N_{ij} + N_b + N_d}{N_{ij}^2} \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中  $i=1,2$  表示垂直距离  $z$  和  $z + \Delta z$ ,  $j=1,2$  表示表示 on 和 off 回波信号。

假设水汽探测星载距离分辨差分吸收激光雷达的水平分辨率为  $\Delta x$ , 则  $\delta_N \propto \sqrt{1/\Delta x}$ , 夜晚探测时,由于信号能量远大于背景噪声,因此增大垂直距离分辨  $\Delta z$  可以增大接收信号能量,则  $\delta_N \propto 1/\Delta z^{1.5}$ 。综合考虑水平分辨率和垂直距离分辨的影响,则探测误差可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\delta_N \propto (\Delta x)^{-0.5} (\Delta z)^{-1.5}. \quad (7)$$

当水平分辨率  $\Delta x = 15$  km, 垂直距离分辨率  $\Delta z = 300$  m 时,3组 on/off 发射波长下,星载距离分辨差分吸



收激光雷达白天和夜晚探测水汽浓度相对误差如图4所示。通过对比可知,白天探测时,波长为 $\lambda_1$ 的信号光束在探测海拔高度9~12 km范围内水汽浓度的相对误差较小, $\lambda_2$ 光束在5~9 km内水汽浓度的相对误差较小, $\lambda_3$ 光束在5 km以下的相对误差较小;夜间探测时, $\lambda_1$ 光束在8~20 km水汽浓度的相对误差较小, $\lambda_2$ 光束在4~8 km水汽浓度的相对误差较小, $\lambda_3$ 光束在4 km以下范围内相对误差较小。

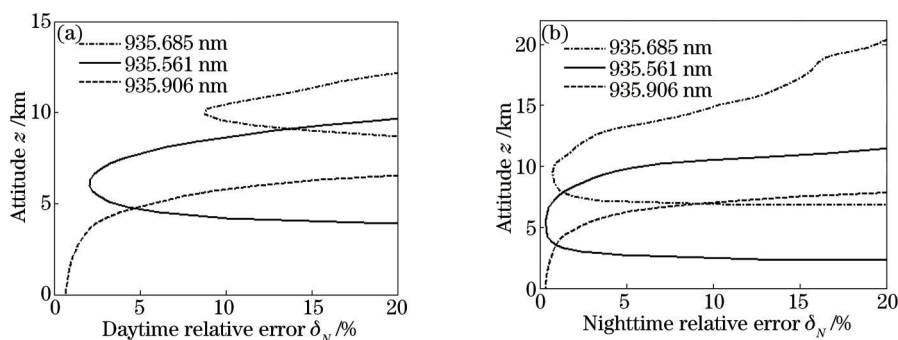


图4 星载距离分辨差分吸收激光雷达白天/夜晚探测水汽浓度相对误差

Fig.4 Relative errors of water vapor concentration of spaceborne range-resolved DIAL in daytime and nighttime detections

国内外对于水汽探测差分吸收激光雷达相对误差的标准没有确切的规定,对于不同探测高度、不同距离分辨,其探测精度也不同。有文献[14]写到,水汽浓度相对误差应在10%以内,但也有文献[4]将相对误差限定为20%。因此,通过3组 on/off 发射波长对的配合使用,该星载距离分辨差分吸收激光雷达白天海拔高度8 km 以下和10 km 附近水汽浓度相对误差小于10%,在7 km 以下相对误差可达到5%以内,9 km 附近相对误差保持在15%以内,10~12 km 高度相对误差也小于20%;夜间海拔高度15 km 以内水汽浓度相对误差小于10%,且大部分高度相对误差在5%以内,在20 km 以内水汽浓度相对误差也小于20%。

## 5 结 论

为准确探测大气水汽浓度随海拔高度的分布,设计多波长发射水汽探测星载距离分辨差分吸收激光雷达。根据微分吸收原理,选取水汽吸收截面较大,波长为935.685、935.561、935.906 nm的发射光束作为 on 光束;选取水汽吸收截面较小,波长936.242 nm 的光束为 off 光束, on 和 off 光束对分成3组,对不同海拔高度不同浓度的水汽进行分层探测。

对这4个波长激光雷达水汽探测的回波信号进行了仿真模拟。为验证其对水汽浓度探测的能力,对该激光雷达探测水汽浓度的相对误差进行分析计算。结果表明,通过3组 on/off 发射波长的相互配合,该星载距离分辨差分吸收激光雷达白天海拔高度9 km,夜晚15 km 以下探测水汽浓度的相对误差保持在10%以内;假设相对误差小于20%即可满足探测要求,该多发射波长星载距离分辨差分吸收激光雷达系统可以实现白天对流层以下(小于12 km),夜晚平流层底以下(小于15 km)水汽浓度的探测。初步证实了多波长水汽探测星载距离分辨差分吸收激光雷达能全天探测对流层水汽浓度分布,且具有较高的精度。

## 参 考 文 献

- 1 Committee on Global Change Research and Board on Sustainable Development, National Research Council. Global Environmental Change: Research Pathways for the Next Decade[M]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1998.
- 2 Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.*. Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0401001.
- 季承荔,陶宗明,胡顺星,等.三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J].光学学报,2014,34(4):0401001.
- 3 W Staehr, W Lahmann, C Weitkamp. Range-resolved differential absorption lidar: Optimization of range and sensitivity[J]. Appl Opt, 1985, 24(13): 1950-1955.
- 4 G Ehret, A Fix, M Wirth, *et al.*. WALES: Water vapour lidar experiment in space[C]. 54th International Conference on Space Optics, 2004, 554: 25-32.
- 5 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2013, 50(2): 020006.  
 于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020006.
- 6 Noaa U S, Force U S A. US Standard Atmosphere[R]. NOAA-S/T, 1976.
- 7 Fan Guangqiang. Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s114006.  
 范广强. 双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s114006.
- 8 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Chen Zhenyi, *et al.*. A differential absorption lidar system for tropospheric ozone monitoring[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1113001.  
 范广强, 刘建国, 陈臻懿, 等. 一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达系统[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1113001.
- 9 Sun Jingqun. Laser Atmospheric Sounding [M]. Beijing: Science Press, 1986. 242-243.  
 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 242-243.
- 10 Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, *et al.*. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 130: 4-50.
- 11 Wulfmeyer V, Walther C. Future performance of ground-based and airborne water-vapor differential absorption lidar. II. Simulations of the precision of a near-infrared, high-power system[J]. Appl Opt, 2001, 40(30): 5321-5336.
- 12 Gao Po, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, *et al.*. Accuracy analysis of all-fiber differential absorption lidar for atmospheric component[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301003.  
 高坡, 胡以华, 赵楠翔, 等. 全光纤差分吸收激光雷达大气成分探测精度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301003.
- 13 Ismail S, Browell E V. Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: A sensitivity analysis[J]. Appl Opt, 1989, 28(17): 3603-3615.
- 14 Bösenberg J. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor and temperature profiling: Methodology[J]. Appl Opt, 1998, 37(18): 3845-3860.

栏目编辑: 王晓琰