

# 基于连续激光器的侧向拉曼散射激光雷达无盲区探测大气水汽技术研究

杨帆<sup>1</sup>, 高飞<sup>1,2\*</sup>, 李晓莉<sup>1</sup>, 高雄<sup>1</sup>, 张城安<sup>1</sup>, 汪丽<sup>1,2</sup>, 闫庆<sup>1,2</sup>, 石冬晨<sup>1,2</sup>, 辛文辉<sup>1,2</sup>, 华灯鑫<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>陕西省现代装备绿色制造协同创新中心, 陕西 西安 710048

**摘要** 大气中50%以上的水汽主要存在于海拔2 km以内的低层大气内,而传统振动拉曼散射激光雷达探测大气水汽主要采用基于后向散射的同轴和非同轴平行收发系统结构,系统探测盲区和过渡区限制了其在近地表大气水汽探测方面的有效性。因此,提出一种新型的基于双基地收发系统结构的侧向振动拉曼散射激光雷达探测技术,通过俯仰转动云台带动侧向望远镜接收系统,对不同高度层下氮气和水汽分子的侧向振动拉曼散射回波光谱进行扫描探测,从而实现地表到感兴趣高度范围内无盲区的近地表大气水汽精细探测。在实验观测研究中,采用整段等距分辨率和分段等距分辨率两种探测模式,探测结果展示了两种转动方案均可实现从近地表到特定高度的大气水汽探测,特别是分段等距分辨率云台转动方案凭借可变频分辨率的探测优势,在近地表区域实现了对大气水汽分布的精细探测。

**关键词** 激光雷达; 近地表大气水汽; 侧向振动拉曼散射; 无盲区探测; 俯仰扫描

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231462

## 1 引言

水汽是大气物理状态的重要参数,其时空变化非常活跃,是重要的温室气体之一。水汽是大气中唯一以三相态存在的成分,与气象学、大气动力学、大气化学、全球水文循环等大气过程密切相关<sup>[1-3]</sup>。水汽的质量分数通常在0.1%~4.0%之间,大气中的水汽主要积聚在较低的大气层,约50%的水汽分布在海拔2 km以下,超过75%的水汽聚集在海拔4 km以下。水汽直接影响大气辐射场,在低层大气中,它吸收太阳热辐射,使大气获得较多的热能,同时减少地表向空间的散热。近地表面的水汽波动变化最为剧烈,对人类活动影响最为显著。研究近地表大气水汽分布规律,特别是在近地表无盲区的情况下精准观测大气水汽,对深入了解近地表水汽的时空分布特性来说十分重要,可以为提高天气预报准确性、应对极端气候事件、优化农业生产等提供有力支持<sup>[4-6]</sup>。

在大气水汽探测中,振动拉曼散射激光雷达扮演着重要的角色。通过对氮气和水汽振动拉曼散射回波信号的同步探测可实现大气水汽混合比的反演<sup>[7-8]</sup>。然而,传统的后向散射激光雷达通常使用单基地收发系统结构设计,其自身结构的局限会导致激光雷达在

近距离探测区域内的几何重叠因子小于1,制约其对近地表大气水汽的探测能力<sup>[9]</sup>。诚然双视场激光雷达系统设计、几何重叠因子自调整技术等相继被科研工作者提出,旨在提升激光雷达对近场大气信号的探测性能,但是仍然无法解决从地表到边界层内大气水汽的探测应用瓶颈<sup>[10-11]</sup>。

为实现大气边界层内大气水汽的无盲区探测,基于振动拉曼散射原理创新性地引入了侧向扫描激光雷达探测近地表大气水汽的技术。该技术借助转动云台和望远镜构成的侧向接收系统的俯仰扫描功能,在距离激光发射系统一定的距离处,对不同仰角位置的氮气和水汽侧向振动拉曼散射回波信号进行采集,形成数据剖面。相比于脉冲激光雷达,侧向振动拉曼散射激光雷达不仅在成本方面实现了降低,同时其结构也更加紧凑、轻巧。该研究在详细阐述侧向振动拉曼散射激光雷达无盲区探测大气水汽原理的基础上,着重于斜程大气透过率的数据校正和实验探测研究,充分验证了在无盲区大气水汽探测方面侧向振动拉曼散射激光雷达的优势和可行性。

## 2 侧向振动拉曼散射激光雷达系统设计

在侧向振动拉曼散射激光雷达系统设计中,借鉴

收稿日期: 2023-08-22; 修回日期: 2023-10-08; 录用日期: 2023-10-17; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(42175149,42275151,42275148)、陕西省自然科学基金(2023-JC-QN-0308)、陕西省教育厅科研项目(23JY055)、西安理工大学博士创新基金(310-252072205)

通信作者: \*gaofei@xaut.edu.cn; \*\*dengxinhua@xaut.edu.cn

了用于无盲区探测大气温度的侧向纯转动拉曼散射激光雷达的系统搭建和实验方案<sup>[12]</sup>,且二者的接收系统可以进行组合处理,以达到近地表大气温度和水汽的同步观测。侧向振动拉曼散射激光雷达探测近地表大气水汽的原理如图 1 所示,其中,  $\varphi$  为光学望远镜指向激光束的俯仰角,  $\Delta w$  为虚拟激光脉冲长度。侧向接收系统将双开普勒光学望远镜组(直径为 90 mm、焦距为 900 mm)配置在俯仰云台顶端的水平支架上,这些望远镜的尾端连接超窄带干涉滤光

片,以便从中分离并提取氮气和水汽的侧向振动拉曼散射光谱。为了和用于温度探测的双望远镜组 telescope 1 和 telescope 2 进行区分,将水汽探测的双望远镜组标注为 telescope 3 和 telescope 4。望远镜组 telescope 3 和 telescope 4 与安装在俯仰转动云台顶端水平支架上用于水汽探测的双望远镜在间距和倾斜角配置方面略有差异,其安装间距  $2L$  为 200 mm,倾斜角  $\varepsilon$  为  $89.90^\circ$ ,双望远镜指向同一高度的激光束区域<sup>[12]</sup>。

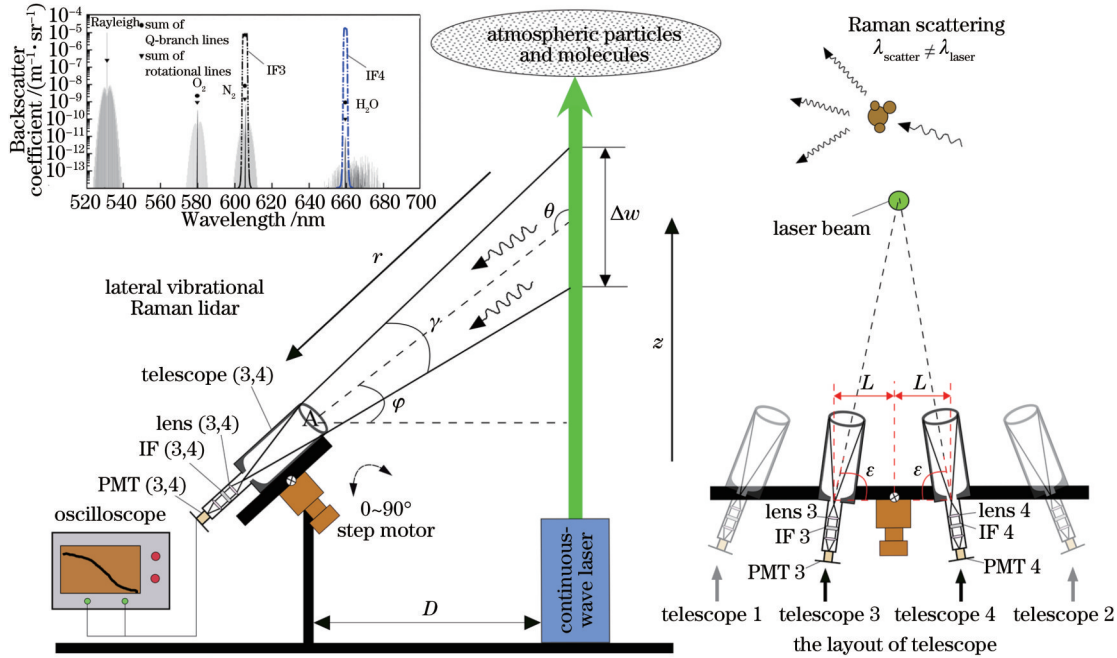


图 1 侧向振动拉曼散射激光雷达原理图

Fig. 1 Schematic diagram of lateral vibrational Raman scattering lidar

侧向振动拉曼散射激光雷达选择具有  $2331\text{ cm}^{-1}$  频移的氮气振动拉曼散射光谱信号作为参考信号,选择具有  $3652\text{ cm}^{-1}$  频移的水汽振动拉曼散射光谱信号作为测量信号来实现大气水汽的探测。各高度层的氮气侧向振动拉曼散射信号由俯仰转动云台带动光学望远镜 telescope 3 在不同的仰角处采集,然后由透镜 lens 3 准直,并通过中心波长为  $607.44\text{ nm}$ 、带宽为  $1.80\text{ nm}$  的滤光片 IF 3 进行分离和提取;同样,各高度层的水汽侧向振动拉曼散射信号由俯仰转动云台带动光学望远镜 telescope 4 在不同仰角处采集,然后由透镜 lens 4 准直,并通过中心波长为  $660.43\text{ nm}$ 、带宽为  $1.80\text{ nm}$  的滤光片 IF 4 进行分离和提取。最终,光电倍增管将微弱的振动拉曼散射信号转换成电信号,通过数据采集系统进行进一步处理。在两个望远镜分光

系统设计中采用相同规格的机械结构连接件,以消除光路差异给测量结果带来的影响。整体而言,用于近地表大气水汽探测的侧向振动拉曼散射激光雷达的其他参数配置与侧向纯转动拉曼散射激光雷达基本一致,详见参考文献<sup>[12]</sup>。

### 3 大气水汽的数据反演和数据校正技术

#### 3.1 侧向振动拉曼散射激光雷达探测大气水汽的数据反演算法

侧向振动拉曼散射激光雷达通过探测氮气和水汽的侧向振动拉曼散射光谱信号实现大气水汽的精细探测。氮气探测通道和水汽探测通道的侧向振动拉曼散射激光雷达方程分别表示为

$$E_{N_2}(z, \lambda_0, \lambda_{N_2}, \theta) = E_0 AK \frac{\gamma}{D} N_{N_2}(z) \frac{d\sigma_{N_2}(\pi, \lambda_{N_2})}{d\Omega} f_{N_2}(\theta) \times \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_0) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_0)] dz\right\} \times \exp\left\{\frac{1}{\cos\theta} \int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{N_2}) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{N_2})] dz\right\}, \quad (1)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}}(z, \lambda_0, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta) = E_0 AK \frac{\gamma}{D} N_{\text{H}_2\text{O}}(z) \frac{d\sigma_{\text{H}_2\text{O}}(\pi, \lambda_{\text{H}_2\text{O}})}{d\Omega} f_{\text{H}_2\text{O}}(\theta) \times \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_0) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_0)] dz\right\} \times \exp\left\{\frac{1}{\cos\theta} \int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{\text{H}_2\text{O}})] dz\right\}, \quad (2)$$

式中:  $E(z, \lambda_0, \lambda_x, \theta)$  为侧向振动拉曼散射回波信号功率, 其中,  $z$  为探测高度,  $\theta$  为散射角,  $X$  为氮气或水汽的振动拉曼散射光谱;  $E_0$  为激光发射功率;  $A$  为望远镜的有效接收面积;  $K$  为激光雷达的系统常数;  $D$  为收发系统间距;  $\gamma$  为望远镜视场角;  $N_X(z)$  为大气分子密度;  $d\sigma_X(\pi, \lambda_X)/d\Omega$  为振动拉曼散射各分子的拉曼后向散射截面;  $f_X(\theta)$  为归一化的大气分子散射相函数;  $\alpha_i(z, \lambda_0)$ 、 $\alpha_i(z, \lambda_x)$  ( $i$  is aer, mol) 分别为气溶胶粒子(aer)和大气分子(mol)在激光激励波长  $\lambda_0$  和振动拉曼光谱  $\lambda_x$  处的消光系数。

根据大气水汽混合比的定义, 通过式(1)、(2)可得大气水汽混合比的表达式为

$$w(z, \lambda_0, \lambda_{\text{N}_2}, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta) = 0.25 \frac{E_{\text{H}_2\text{O}}(z, \lambda_0, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta)}{E_{\text{N}_2}(z, \lambda_0, \lambda_{\text{N}_2}, \theta)} \Delta f_{\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}}(\theta) \Delta T_r(z, \lambda_{\text{N}_2}, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta), \quad (3)$$

式中:  $\Delta f_{\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}}(\theta)$  为大气中氮气和水汽分子散射相函数的校正系数;  $\Delta T_r(z, \lambda_{\text{N}_2}, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta)$  为氮气和水汽振动拉曼散射信号在斜程路径上由于两者之间的光谱波长差异所导致的斜程大气透过率修正函数。考虑到两个通道的波长差相差较大 ( $>50$  nm) 且斜程大气透过率由于散射角度的变化其传输路径也存在较大差异, 因此, 在对近地表大气水汽反演算法进行研究时, 必须充分考虑斜程大气透过率对探测精度的影响。进一步地, 斜程大气透过率校正函数可表示为

$$\Delta T_r(z, \lambda_{\text{N}_2}, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta) = \frac{T_r(z, \lambda_{\text{N}_2}, \theta)}{T_r(z, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta)} = \exp\left\{\frac{1}{\cos\theta} \int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{\text{N}_2}) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{\text{N}_2}) - \alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}) - \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{\text{H}_2\text{O}})] dz\right\}. \quad (4)$$

### 3.2 侧向振动拉曼散射激光雷达探测大气水汽的数据校正技术

对于侧向散射激光雷达, 侧向散射光强度会随着散射角的变化而变化, 散射相函数也会随之变化。归一化的大气分子散射相函数表示为

$$f(\theta) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2\theta). \quad (5)$$

图 2 为归一化的大气分子散射相函数  $f(\theta)$  和散射角  $\theta$  之间的关系, 可以看出, 大气分子散射相函数随着散射角的变化而变化。当散射角为  $90^\circ$  时, 散射相函数的值最小; 随着散射角逐渐增大到  $180^\circ$  即后向散射时, 散射相函数达到最大值。

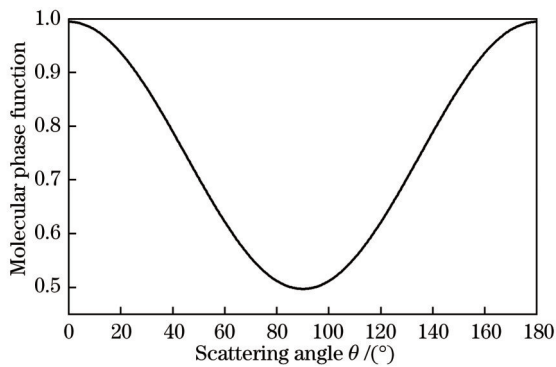


图 2 归一化的大气分子散射相函数

Fig. 2 Normalized phase function of molecular scattering

侧向振动拉曼散射激光雷达探测大气水汽主要利用氮气和水汽的振动拉曼散射光谱信号来实现。氮气和水汽均可假设为以球形状态存在的大气分子, 所以

散射角是大气分子散射相函数关键的参量。侧向接收系统的双望远镜位于同一水平框架上, 由俯仰转动云台带动其一同转动, 确保接收侧向拉曼散射光时双望远镜的散射角一致。因此可认为大气水汽混合比反演公式[式(3)]中的大气分子散射相函数的校正系数  $\Delta f_{\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}}(\theta) = 1$ 。

在利用侧向振动拉曼散射激光雷达探测大气水汽时, 将氮气的侧向振动拉曼散射信号作为基准信号, 将与水汽分子数密度相关的水汽侧向振动拉曼散射信号作为实际测量信号。由于氮气振动拉曼散射信号相对于水汽振动拉曼散射信号具有较大的波长偏移 ( $>50$  nm), 所以不能简单地忽略大气透过率所带来的影响[式(4)]。图 3 为标准大气模型下的可见光波长 (532.10 nm) 及与其对应的氮气和水汽分子振动拉曼散射波长下的大气分子消光系数廓线分布。考虑到消光系数和波长的反比关系, 在同一高度下氮气通道的大气分子和气溶胶的消光系数均大于水汽通道, 且两个波长下气溶胶的消光系数远大于大气分子。因此, 氮气和水汽的振动拉曼散射波长下斜程路径上所产生的气溶胶消光系数对大气透过率的影响占主导地位。

侧向振动拉曼散射激光雷达系统结构导致去程和斜程路径不重叠, 斜程距离随收发间距  $D$  和散射角  $\theta$  的变化而变化。图 4 为依据标准大气模型(图 3)数据所计算的斜程大气透过率及其修正函数。从图 4 可以看出, 斜程大气透过率中氮气通道小于水汽通道, 即  $T_r(z, \lambda_{\text{N}_2}, \theta) < T_r(z, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, \theta)$ , 由波长差引起的斜程大气



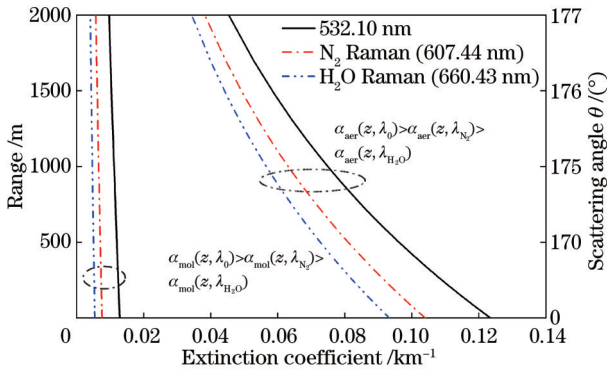


图 3 激励波长为 532.10 nm 时标准大气模型的消光系数  
Fig. 3 Extinction coefficient profiles in standard atmospheric model when excitation wavelength is 532.10 nm

透过率修正函数是随高度变化的函数。而实际大气气溶胶的含量是随高度变化的函数,因此根据实测数据对大气透过率函数进行修正是提升大气水汽反演精度的重要手段。

利用 Raman 法对实时测量的氮气振动拉曼散射回波信号进行反演,可得到氮气和水汽拉曼散射波长

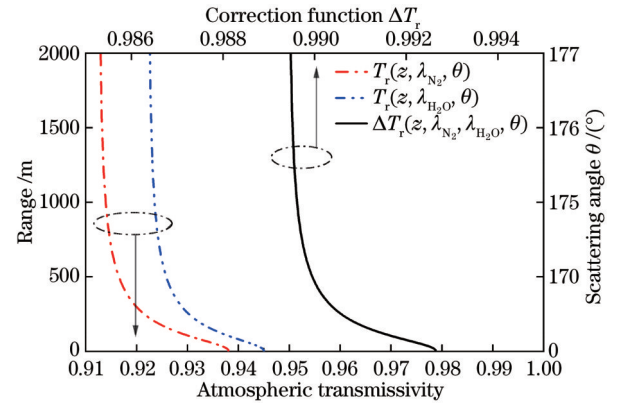


图 4 激励波长为 532.10 nm 时标准大气模型的斜程大气透过率和大气透过率修正函数

Fig. 4 Slant range atmospheric transmissivity and atmospheric transmissivity correction function profiles in standard atmospheric model when excitation wavelength is 532.10 nm

下的气溶胶消光系数,并将其用于修正斜程大气透过率。基于侧向拉曼散射激光雷达反演氮气和水汽拉曼波长下的消光系数可分别表示为

$$\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{N_2}) = \frac{\frac{d}{dz} \ln \left[ \frac{f_{N_2}(z, \theta) N_{N_2}(z)}{E_{N_2}(z, \lambda_0, \lambda_{N_2}, \theta)} \right] - \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_0) + \frac{1}{\cos \theta} \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{N_2})}{1 - \frac{1}{\cos \theta} \times \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{N_2}} \right)^A} \times \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{N_2}} \right)^A, \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{H_2O}) = \alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{N_2}) \left( \frac{\lambda_{N_2}}{\lambda_{H_2O}} \right)^A, \quad (7)$$

式中:  $A$  为 Ångström 指数,通常取 1.0。

## 4 实验观测

为了验证侧向振动拉曼散射激光雷达对近地表大气水汽探测的能力,将放置于俯仰转动云台顶端的双望远镜作为接收系统,搭建出一台侧向扫描振动拉曼散射激光雷达实验装置,并利用其进行近地表大气水汽实验探测。该系统的布置与无盲区探测大气温度的侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统基本一致<sup>[12]</sup>:双望远镜安装在俯仰转动云台顶端的水平支架上,两个望远镜 telescope 3 和 telescope 4 之间的距离  $2L$  为 200 mm,水平倾斜角  $\epsilon$  为  $89.90^\circ$ ,指向同一高度的激光束。利用东莞市晶研仪器科技有限公司生产的双轴数显水平仪 (DXL360S) 对初步安装时的望远镜水平倾斜角和扫描探测时望远镜的俯仰转动角进行标定,以保证实验探测的可靠性。

为了凸显出侧向扫描振动拉曼散射激光雷达在近地表探测时采样分辨率可调节的优势,采用两种不同采样方案:第一种实验方案为整段等距分辨率云台转动方案,收发间距为 60 m,利用俯仰转动云台的扫描

功能对 37 个角度进行扫描采样(最大可探测距离为 1296 m);第二种实验方案为分段等距分辨率云台转动方案,设置同样的收发间距,利用放置在云台顶端的双望远镜对 41 个角度进行扫描采样(最大可探测距离为 1332 m)。鉴于随后的实验需要同时探测近地表的大气温度和水汽,整个实验方案设置与近地表大气温度探测的实验方案一致<sup>[12]</sup>。在各角度采样时间均为 20 s 的情况下,采用整段等距分辨率云台转动方案完成一次大气廓线采集的时间为 14.3 min,采用分段等距分辨率云台转动方案完成一次大气廓线采集的时间为 16.0 min。在实验探测结果中,侧向氮气振动拉曼散射信号和水汽振动拉曼散射信号虚拟脉冲长度范围内的标准差用红色水平的误差棒表示;虚拟脉冲长度用蓝色垂直的误差棒表示,代表了该仰角处接收到的信号的区域范围。

### 4.1 基于整段等距分辨率云台转动方案的实验探测结果

为确保廓线的整体采样分辨率一致,选择第一种实验方案进行探测。为探测出近地表水汽层的变化情况,选取雨后或多云天进行观测,2023 年 4 月 17 日的探测结果如图 5 所示。

图 5(a)展示了氮气通道的回波信号廓线,可以观

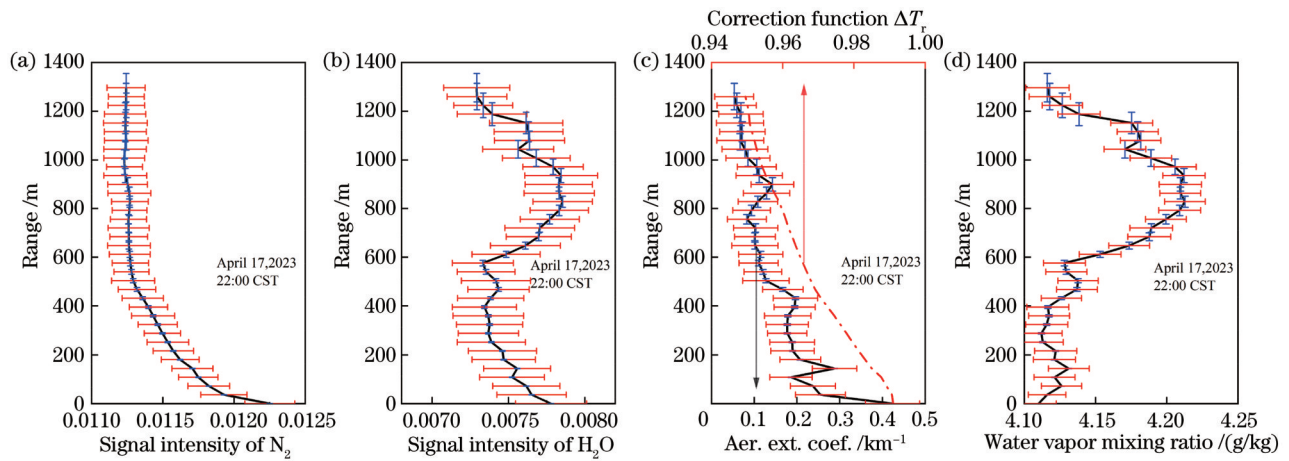


图 5 近地表大气水汽探测结果(2023年4月17日22时)。(a)氮气通道的信号强度;(b)水汽通道的信号强度;(c)气溶胶消光系数和斜程大气透过率修正函数的反演结果;(d)大气水汽混合比廓线

Fig. 5 Detection results of near surface water vapor (22:00, April 17, 2023). (a) Signal intensity of the N<sub>2</sub> channel; (b) signal intensity of the H<sub>2</sub>O channel; (c) inversion results of aerosol extinction coefficient and slant range atmospheric transmissivity correction function; (d) atmospheric water vapor mixing ratio profile

察到,在576 m高度以下的区域氮气的侧向振动拉曼散射信号强度减小较快,在576~1296 m高度区域信号强度变化趋势较为稳定。图5(b)展示了水汽通道的回波信号廓线,实验观测期间天空中云层较厚,水汽的侧向振动拉曼散射信号强度随着高度的上升呈现出明显的波动情况。可以明显地看出,576 m高度以下的水汽信号强度衰减比较平缓,而576 m高度以上的水汽信号强度明显增大,说明此处有较强的水汽聚集层。图5(c)展示了通过Raman法反演的该时刻氮气通道的气溶胶消光系数和斜程路径的大气透过率修正函数廓线。氮气信号强度的变化趋势能够反映出气溶胶层的高度,斜程路径大气透过率修正函数的廓线随

着探测高度的增加而逐渐减小。通过同时刻探测到的气溶胶消光系数可修正斜程大气透过率,从而提高大气水汽混合比的探测精度。图5(d)展示了通过反演得到的近地表水汽混合比垂直分布廓线,可以看出,大气水汽在随高度变化的空间内呈现出明显的变化过程:596 m以下的高度范围内水汽混合比在4.10~4.13 g/kg之间,较为稳定,这是由于该区域内氮气的振动拉曼散射信号和水汽的振动拉曼散射信号都存在相似的衰减趋势;但在600~1200 m的高度范围内存在一个明显的水汽聚集层,水汽混合比达到4.22 g/kg。

2023年3月20日21时10分多云天气情况下的近地表大气水汽探测结果如图6所示。

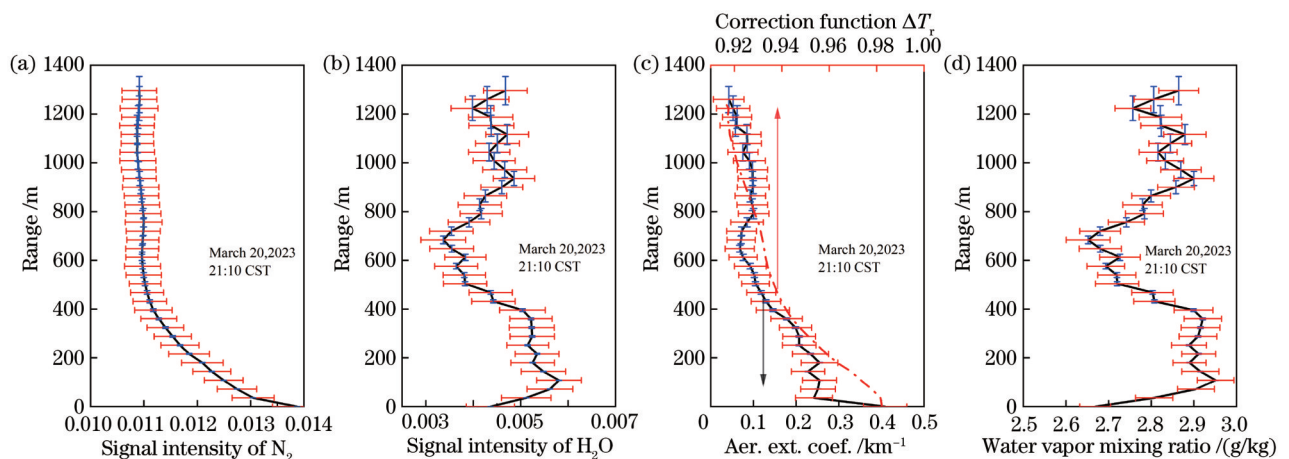


图 6 近地表大气水汽探测结果(2023年3月20日21时10分)。(a)氮气通道的信号强度;(b)水汽通道的信号强度;(c)气溶胶消光系数和斜程大气透过率修正函数的反演结果;(d)大气水汽混合比廓线

Fig. 6 Detection results of near surface water vapor (21:10, March 20, 2023). (a) Signal intensity of the N<sub>2</sub> channel; (b) signal intensity of the H<sub>2</sub>O channel; (c) inversion results of aerosol extinction coefficient and slant range atmospheric transmissivity correction function; (d) atmospheric water vapor mixing ratio profile



图 6(a)展示了氮气通道的回波信号廓线,可以看出,大气中氮气含量变化较为稳定,随探测高度的增加缓慢减小,与大气分子模型基本保持一致。图 6(b)展示了水汽通道的回波信号廓线,实验观测前刚下完小雨,大气中水汽含量较为丰富,可以看出,水汽信号强度在 0~400 m 和 700~1200 m 高度存在两个明显的突变区域,而在 400~700 m 中间高度区域呈明显的减小趋势。图 6(c)展示了通过 Raman 法反演的该时刻氮气通道的气溶胶消光系数和斜程路径的大气透过率修正函数廓线。由图 6(c)可知,采用修正的斜程大气透过率可提高近地表大气水汽混合比的反演精度。图 6(d)展示了通过反演得到的近地表水汽混合比垂直分布廓线。从反演结果来看,在地表区域 400 m 高度以

下和 700 m 高度以上出现了两个明显的水汽聚集层,水汽混合比在 2.80~2.96 g/kg 范围内波动,而中间高度区域 400~700 m 范围的水汽混合比呈现出急速减小的趋势,从 2.89 g/kg 减小到 2.65 g/kg。

#### 4.2 基于分段等距分辨率云台转动方案的实验探测结果

为了使近地表层具有更高的探测分辨率,采用第二种实验方案,即可实现各高度层不同分辨率的采样方式。在整个采样阶段,不同的距离分辨率用不同的色条表示。图 7 为选用第二种实验方案于获得图 6 观测结果当日的 21 时 30 分进行实验探测得到的结果。由于方案二的分段等距分辨率采用自适应的采样分辨率模式,可更详细地观测到靠近地表层的水汽变化情况。

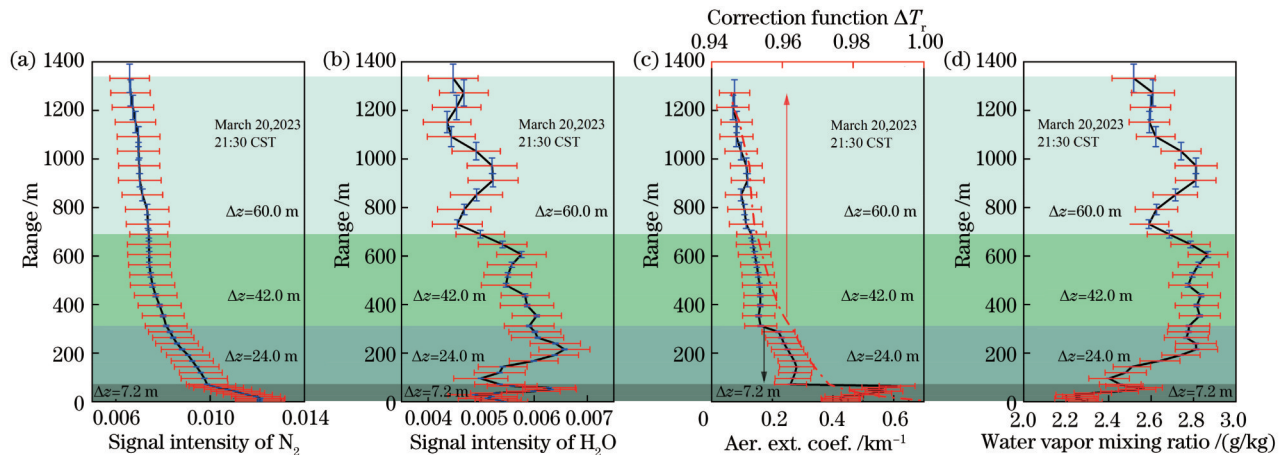


图 7 近地表大气水汽探测结果(2023年3月20日21时30分)。(a)氮气通道的信号强度;(b)水汽通道的信号强度;(c)气溶胶消光系数和斜程大气透过率修正函数的反演结果;(d)大气水汽混合比廓线

Fig. 7 Detection results of near surface water vapor (21:30, March 20, 2023). (a) Signal intensity of the  $N_2$  channel; (b) signal intensity of the  $H_2O$  channel; (c) inversion results of aerosol extinction coefficient and slant range atmospheric transmissivity correction function; (d) atmospheric water vapor mixing ratio profile

图 7(a)展示了氮气通道的回波信号廓线,可以看出,信号强度随着高度的增加缓慢减小,在 0~72 m 高度区域下降最快,750 m 高度以上趋于稳定。图 7(b)展示了水汽通道的回波信号廓线,在 0~72 m 和 72~312 m 高度的近地表区域可以明显地看出水汽回波信号强度的变化,这是由于分段等距分辨率采样方案可在 312 m 高度以下区域实现更小分辨率的采样。例如:在 30~64 m 高度区域,水汽含量逐渐升高。在 70 m 高度附近,水汽通道的回波信号强度降低到与地表相同。96~216 m 高度区域,水汽含量突增,迅速达到探测高度范围内的最大值,此时出现了第一个水汽突变区域;随后,水汽信号强度逐渐降低,到 700 m 高度附近又突然增强,出现了第二个水汽突变区域。图 7(c)展示了通过 Raman 法反演的该时刻氮气通道的气溶胶消光系数和斜程路径的大气透过率修正函数廓线,低层区域可反映出更多的气溶胶波动状况。可以看出,斜程路径的透过率廓线与图 7(a)所示的氮气信号变化趋势相似,特别是在 0~72 m 和 72~312 m 高度

区间内。这是由于采样分辨率较小,因此可以反映出更多的大气细节。大气透过率修正函数的减小趋势与该区间的氮气信号变化趋势类似。图 7(d)展示了通过反演得到的近地表水汽混合比垂直分布廓线,其整体变化趋势与图 6 相似,即存在两个明显的水汽聚集层,水汽混合比在 2.72~2.89 g/kg 范围内波动。但由于时间的推移,水汽聚集层的高度存在一定变化。

采用第二种实验方案,即分段等距分辨率云台转动方案,于 2023 年 4 月 24 日进行实验探测,结果如图 8 所示。

图 8(a)是氮气通道的回波信号廓线,氮气通道回波信号强度的变化趋势为:随探测高度的增加而逐渐减小。图 8(b)为水汽通道的回波信号廓线,可以看出:在 0~690 m 高度区间,水汽信号强度呈现出连续波动且逐渐增大的变化趋势;在 690 m 高度以上,信号强度变化较为平缓。图 8(c)为通过 Raman 法反演的该时刻氮气通道的气溶胶消光系数和斜程路径的大气透过率修正函数廓线,同样在低层区域可反映出更多

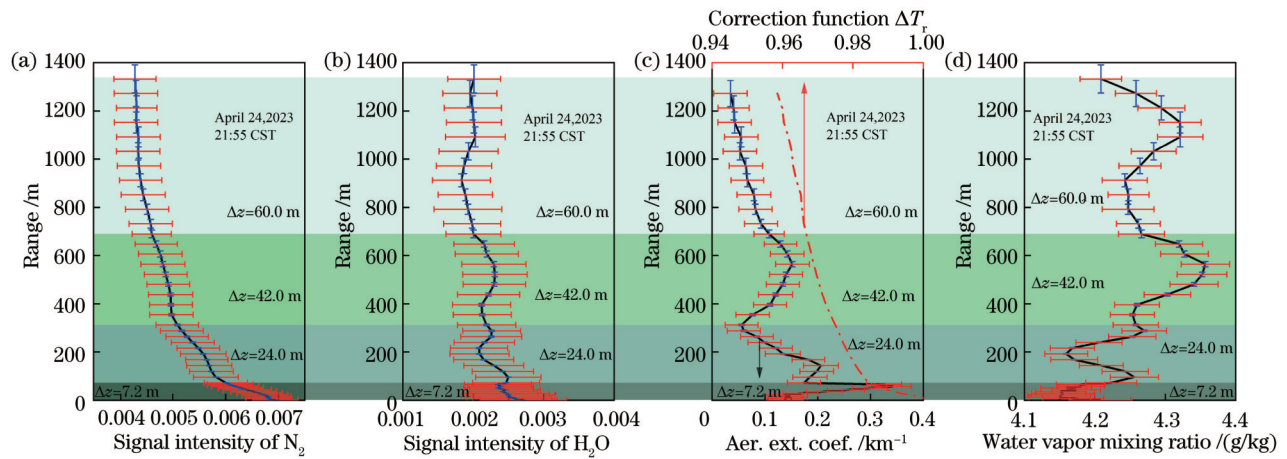


图 8 近地表大气水汽探测结果(2023年4月24日21时55分)。(a)氮气通道的信号强度;(b)水汽通道的信号强度;(c)气溶胶消光系数和斜程大气透过率修正函数的反演结果;(d)大气水汽混合比廓线

Fig. 8 Detection results of near surface water vapor (21:55, April 24, 2023). (a) Signal intensity of the  $N_2$  channel; (b) signal intensity of the  $H_2O$  channel; (c) inversion results of aerosol extinction coefficient and slant range atmospheric transmissivity correction function; (d) atmospheric water vapor mixing ratio profile

的气溶胶波动状况,通过该时刻的气溶胶消光系数修正斜程大气透过率可以提高大气水汽混合比的反演精度。图 8(d)展示了通过反演得到的近地表水汽混合比垂直分布廓线,可以看出:在 690 m 高度以下的范围内连续出现三个水汽聚集层,水汽混合比变化较为剧烈,在 4.15~4.36 g/kg 之间波动且呈现出逐步增大的趋势;在 690 m 高度以上出现了一个水汽聚集层,水汽混合比从 4.24 g/kg 迅速增大到 4.32 g/kg,可以明显地观测到低空存在云层。

由于大气中氮气的含量比较稳定,且其分子数密度随高度减小,因此从实验测量结果上看,氮气的侧向振动拉曼散射回波信号随探测高度的增加呈现出缓慢下降的趋势,其曲线变化相对平缓;相比之下,大气中水汽的含量波动较大,导致其侧向振动拉曼散射回波信号在不同高度表现出无规律的波动变化,此外,在近地表层还会出现多个水汽聚集层。

## 5 结 论

针对近地表无盲区大气水汽的探测需求,以振动拉曼散射为理论基础创新性地提出了侧向扫描激光雷达探测近地表大气水汽的技术。该技术结合侧向接收系统的俯仰扫描功能,实现了对低层大气水汽的无盲区扫描探测。由于氮气和水汽的振动拉曼散射光谱波长存在较大的差异,利用侧向氮气振动拉曼散射信号反演得到的气溶胶消光系数进行斜程大气透过率的实时修正可以提高大气水汽混合比的探测精度。若利用高功率脉冲激光器与后向振动拉曼散射激光雷达进行同步观测,构建联合探测系统,可以实现从近地表无盲区探测至感兴趣高度范围内大气水汽的实验观测研究。实验结果表明:在激光发射系统与侧向望远镜接收系统相距 60 m 的情况下,侧向振动拉曼散射激光雷

达能够探测到 1400 m 以内的大气水汽混合比。此外,分段等距分辨率云台转动方案具有不同高度层分辨率变化的优势,可提供适应性的采样分辨率,使近地表区域展现出更多水汽分布细节。

## 参 考 文 献

- [1] Worden J, Saatchi S, Keller M, et al. Satellite observations of the tropical terrestrial carbon balance and interactions with the water cycle during the 21st century[J]. Reviews of Geophysics, 2021, 59(1): G000711.
- [2] Kelsey V, Riley S, Minschwaner K. Atmospheric precipitable water vapor and its correlation with clear-sky infrared temperature observations[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(5): 1563-1576.
- [3] Plakhotnik T, Reichardt J. Accurate absolute measurements of the Raman backscattering differential cross-section of water and ice and its dependence on the temperature and excitation wavelength[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 194: 58-64.
- [4] 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010101.  
Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, et al. Characteristics of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010101.
- [5] 尚震, 谢晨波, 钟志庆, 等. 用于测量对流层水汽的拉曼激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1211003.  
Shang Z, Xie C B, Zhong Z Q, et al. Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1211003.
- [6] Hua D X, Kobayashi T. UV Rayleigh-Mie Raman lidar for simultaneous measurement of atmospheric temperature and relative humidity profiles in the troposphere[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(3R): 1287-1291.
- [7] 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.  
Wang Y F, Gao F, Zhu C X, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328004.
- [8] 王玉峰, 张晶, 汤柳, 等. 基于拉曼激光雷达的大气三相态水

- 同步精细探测分光系统的设计与仿真分析[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 224205.
- Wang Y F, Zhang J, Tang L, et al. Design and simulation analysis of spectroscopic system for synchronous atmospheric three-phase water detection based on Raman lidar[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 224205.
- [9] Sassen K, Dodd G C. Lidar crossover function and misalignment effects[J]. Applied Optics, 1982, 21(17): 3162-3165.
- [10] 王界, 刘文清, 张天舒, 等. 基于双视场激光雷达的气溶胶水平分布观测[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2664-2669.
- Wang J, Liu W Q, Zhang T S, et al. Mapping for horizontal aerosol density field by a portable dual-FOV lidar[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2664-2669.
- [11] 王欣红, 狄慧鸽, 王娅娅, 等. 基于气溶胶光学参数的拉曼激光雷达重叠因子校正方法[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0601005.
- Wang X H, Di H G, Wang Y Y, et al. Correction method of Raman lidar overlap factor based on aerosol optical parameters [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0601005.
- [12] 杨帆, 高飞, 高雄, 等. 基于连续激光器的侧向拉曼散射激光雷达无盲区探测大气温度技术研究[J]. 光学学报, 2024, 44(6): 0601015.
- Yang F, Gao F, Gao X, et al. Accurate measurements of atmospheric temperature using lateral scanning rotational raman scattering lidar with continuous-wave laser[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(6): 0601015.

## Accurate Measurements of Atmospheric Water Vapor Using Lateral Scanning Vibrational Raman Scattering Lidar with Continuous-Wave Laser

Yang Fan<sup>1</sup>, Gao Fei<sup>1,2\*</sup>, Li Xiaoli<sup>1</sup>, Gao Xiong<sup>1</sup>, Zhang Cheng'an<sup>1</sup>, Wang Li<sup>1,2</sup>, Yan Qing<sup>1,2</sup>, Shi Dongchen<sup>1,2</sup>, Xin Wenhui<sup>1,2</sup>, Hua Dengxin<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Collaborative Innovation Center for Modern Equipment Green Manufacturing, Xi'an 710048, Shaanxi, China

### Abstract

**Objective** More than 50% of atmospheric water vapor exists mainly in the lower atmosphere within 2 km. Vibrational Raman scattering lidar is an important remote sensing tool for atmospheric water vapor measurement. However, the traditional vibrational Raman scattering lidar mainly adopts a coaxial and non-coaxial parallel transceiver system structure, and the system detection blind zone and transition zone limit their effectiveness in ground atmospheric water vapor detection. We propose a novel detection technique of lateral vibrational Raman scattering lidars based on the structure of a bistatic system, where the lateral vibrational Raman scattering signals of N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O at different heights are detected by the elevation angle scanning of the lateral receiver system. Finally, it realizes fine detection of near-surface atmospheric water vapor without a blind zone from the ground to the height of interest.

**Methods** We study the lateral vibrational Raman scattering lidar technique in the application of accurate measurements of atmospheric water vapor from the ground to the height of interest. First, a novel lateral scanning vibrational Raman scattering lidar technique is proposed and designed. Two telescopes combined with specified narrow-band interference filters are utilized to detect the lateral scattering signals of the vibrational Raman scattering spectra of N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O respectively. Then, the inversion algorithm of atmospheric water vapor using the lateral vibrational Raman scattering lidar is established. Vibrational Raman scattering spectra of N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O have large wavelength differences, which lead to large differences between atmospheric transmissivity of the slant path in these two detection channels, and the aerosol extinction coefficients inverted by Raman method are adopted to correct atmospheric transmissivity of the slant path and improve the detection accuracy of the atmospheric water vapor mixing ratio. Finally, the construction of the experimental system is completed, and the preliminary experiments are conducted via the lateral scanning vibrational Raman scattering lidar. Two different rotation schemes including the continuous equidistant resolution and segmented equidistant resolution are employed during the experimental observations.

**Results and Discussions** The detection principle of the lateral vibrational Raman scattering lidar is innovatively proposed. It breaks through the traditional backward vibrational Raman scattering lidar by a monostatic transceiver system structure, which produces the blind zone and transition zone without effective detection of near-surface atmospheric water vapor. Meanwhile, this technology can utilize a continuous-wave laser featuring light weight, portability, mobility, and



low cost (Fig. 1). Data correction of atmospheric water vapor is realized by analyzing the atmospheric molecular scattering phase function and the difference in slant path atmospheric transmissivity caused by the wavelength difference between the vibrational Raman scattering spectra of  $N_2$  and  $H_2O$ . The aerosol extinction coefficient obtained from the inversion of the lateral  $N_2$  vibrational Raman scattering signal is employed for real-time correction of the slant path atmospheric transmissivity, which improves the accuracy of atmospheric water vapor mixing ratio detection (Figs. 2–4). Preliminary experimental observational studies of a lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar are performed by two different rotation schemes including the continuous equidistant resolution and segmented equidistant resolution, which are employed during the experimental observations. The experimental results show that both rotation schemes can realize atmospheric water vapor detection from the ground to the height of interest. In particular, the segmented equidistant resolution scheme can realize more fine detection of atmospheric water vapor distribution in the ground zone (Figs. 5–8).

**Conclusions** We focus on the detection demand for atmospheric water vapor from the ground to the height of interest using the lidar technique. Based on the theoretical basis of vibrational Raman scattering, the innovative technology of lateral scanning Raman scattering lidar for detecting atmospheric water vapor at the ground surface is proposed. This technology combines the elevation angle scanning function of the lateral receiver system to achieve non-blind scanning detection of water vapor in the lower atmosphere. Due to large differences between the wavelengths of the vibrational Raman scattering spectra of  $N_2$  and  $H_2O$ , the aerosol extinction coefficients obtained by inverting the lateral  $N_2$  vibrational Raman scattering signals are adopted to make real-time corrections to the slant path atmospheric transmissivity, which improve the accuracy of atmospheric water vapor mixing ratio. If a high-power pulsed laser is applied, it can be simultaneously observed with a backward vibrational Raman scattering lidar to construct a joint detection system to realize the measurement of atmospheric water vapor from the ground to the height of interest. The experimental results show that the lateral vibrational Raman scattering lidar can detect atmospheric water vapor mixing ratios up to 1400 m with a horizontal distance of 60 m between the laser transmitter system and the lateral telescope receiver system. Additionally, the segmented equidistant resolution scheme has variable resolutions at different heights to show more details of water vapor distribution in the ground zone.

**Key words** lidar; near-surface atmospheric water vapor; lateral vibrational Raman scattering; detection with non-blind zone; elevation angle scanning