文章编号:1001-5078(2025)01-0120-10

·光学技术 ·

ERA5 对拉曼激光雷达水汽反演的标定与分析

王雯慧^{1,2},曹念文¹

(1. 南京信息工程大学大气物理学院,江苏南京 210044;2. 淄博市气象局,山东 淄博 255000)

摘 要:在探测大气水汽方面,拉曼激光雷达是精度较高的探测方法。探空资料经常用来对拉 曼激光雷达反演水汽进行标定和对比分析,但是探空资料在时间和空间上具有局限性,在无探 空数据时,拉曼激光雷达的标定和反演受限。ERA5 再分析资料与探空资料的相似度较高,时 空分辨率比探空数据高。对安徽地区 ERA5 水汽混合比数据的适用性进行了分析,结果表明 在安徽两个探空站 ERA5 资料与探空资料的水汽混合比相关性较好,整体偏差较小。因此在 无探空数据的合肥地区,选择 ERA5 再分析资料作为参考数据,对拉曼激光雷达反演水汽混合 比进行标定。将标定常数代入水汽混合比的反演公式,得到水汽混合比在高度上的垂直廓线, 将反演结果与探空站插值得到的合肥水汽混合比廓线进行对比分析,在 0.5~1.5 km 高度内, 相对误差大概在 -15 % ~7 % 范围内。结果表明拉曼激光雷达反演的水汽混合比与探空站 插值得到的合肥水汽混合比具有较好的一致性,验证了 ERA5 资料对拉曼激光雷达反演水汽 混合比标定的可行性。

关键词:拉曼激光雷达;水汽混合比;ERA5 再分析资料;探空资料

中图分类号:P407.5;TN958.98 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.018

ERA5 calibration and analysis of water vapor inversion of Raman LiDAR

WANG Wen-hui^{1,2}, CAO Nian-wen¹

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
 2. Zibo Meteorological Bureau, Zibo 255000, China)

Abstract: Raman LiDAR is a highly accurate method for detecting atmospheric water vapor. Sounding data are often used for calibration and comparative analysis of Raman lidar inversions of water vapour, but sounding data have limitations in time and space, and the calibration and inversion of Raman lidar are restricted when sounding data are not available. The ERA5 reanalysis data have a higher similarity to sounding data, and the temporal and spatial resolution is higher than that of sounding data. The applicability of ERA5 water vapor mixing ratio data in Anhui is analyzed and the results show that the water-vapour mixing ratios of the ERA5 data and the sounding data at two sounding stations in Anhui correlate well with each other, and the overall deviation is small. Therefore, in Hefei where there is no radio-sonde data, the ERA5 reanalysis data is selected as the reference data to calibrate the water vapor mixing ratio retrieved by Raman LiDAR. The calibration constant is substituted into the inversion formula of the water-vapor mixing ratio, and the vertical profile of Hefei obtained by the data interpolation of the radiosonde station, and the relative error is about -15 % ~7 % at the altitude of 0.5 km ~1.5 km. The results show that the water vapor mixing ratio of the radiosonde station, which verifies the feasibility of ERA5 data for calibration of water vapor mixing ratio re-

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2023 YFC3705301;No. 2018 YFC0213100;No. 2017 YFC0209603)资助。 作者简介:王雯慧(1999 -),女,硕士研究生,主要从事激光雷达探测大气方面的研究。E-mail:1534506907@qq. com 通讯作者:曹念文(1967 -),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光雷达探测大气方面的研究。E-mail:nwcao@nuist.edu.cn 收稿日期:2024-05-19 trieved by Raman LiDAR.

Keywords: Raman LiDAR; water vapor mixing ratio; ERA5 reanalysis data; radiosonde data

1 引 言

大气中的水汽在时间和空间上的变化是非常活 跃的,是参与全球水循环过程的重要环节,对地气系 统的辐射收支平衡等有着重要的影响。水汽的探测 及其分布特征对于天气和气候变化等大气过程的研 究具有重要的意义^[1]。水汽的探测方法主要有无 线电探空仪、微波水汽辐射计、太阳辐射计、GPS 水 汽探测、差分吸收激光雷达、拉曼激光雷达^[2]。在 水汽探测的方法中,拉曼激光雷达的性能比较突出。 拉曼激光雷达系统结构简单,探测的时空分辨率高, 可以用于车载、机载多种方式等^[3-4]。国内外对拉 曼激光雷达探测水汽进行了广泛的研究^[5-12],对拉 曼激光雷达探测水汽的可靠性进行了验证。

在拉曼激光雷达探测水汽的实验研究中,通常 采用探空数据来对反演过程进行标定,得到标定常 数并代入计算,将反演结果与探空资料进行对比分 析,验证反演结果的可靠性。探空气球的成本较高, 全球无线电探空网提供的探空数据时间间隔为12 h,且探空站分布不均匀,对于无探空数据的区域, 拉曼激光雷达的水汽探测反演受限。

ERA5 是欧洲中尺度天气预报中心最新一代全 球气候和天气再分析数据产品^[13]。时间分辨率较 高,为1h,水平分辨率为0.25°×0.25°,可在全球 范围内检索数据,没有探空资料的空间局限性。许 多学者对 ERA5 资料进行了研究^[14-17],验证了其数 据与探空资料的相关性较好。

使用的拉曼激光雷达探测地点位于安徽合肥, 而安徽的探空站位于阜阳和安庆,在合肥地区,拉曼 激光雷达的水汽探测研究缺少对应的探空资料对其 进行标定。选择与探空资料相关性较好的 ERA5 再 分析资料作为参考值,对拉曼激光雷达反演水汽混 合比进行标定,并将标定常数代入计算,对水汽混合 比进行反演。通过合肥附近的探空站数据进行二维 散点插值,得到合肥地区的水汽混合比,并将插值得 到的合肥水汽混合比廓线数据作为参考,对拉曼激 光雷达反演的水汽混合比结果进行分析。

2 ERA5 水汽混合比数据适用性分析

 2.1 数据来源与处理 使用的拉曼激光雷达数据探测点位于安徽合肥 (31.49°N,117.13°E),但安徽的探空站只有阜阳 站(32.87°N,115.73°E)和安庆站(30.62°N, 116.97°E),在合肥地区缺少对应的探空资料对拉曼 激光雷达反演水汽混合比进行标定。选择与探空资 料相似度较高的 ERA5 再分析资料作为参考值,对拉 曼激光雷达反演水汽混合比进行标定。下面对安徽 地区 ERA5 再分析资料的水汽混合比数据适用性进 行分析,将阜阳站和安庆站两个探空站的 ERA5 资料 与探空资料的水汽混合比数据进行对比。

将 ERA5 资料与探空站资料进行时空匹配,选 择误差较小的邻近格点匹配法^[18-19]。将 ERA5 资 料匹配到与阜阳站和安庆站最近的经纬度格点,时 间选择为 2020 年 5 月和 6 月每天的 8:00 和 20:00, 垂直方向上选择 16 个气压点(500 hPa、550 hPa、600 hPa、650 hPa、700 hPa、750 hPa、775 hPa、800 hPa、 825 hPa、850 hPa、875 hPa、900 hPa、925 hPa、950 hPa、975 hPa、1000 hPa)对应的水汽混合比,大概对 应着近地面至 5.5 km 的高度范围。在每个气压点 对应的位置,分别将 5 月和 6 月的 ERA5 资料与探 空资料的水汽混合比进行对比。

用 Python 脚本可以从怀俄明大学天气数据网(http://weather.uwyo.edu/wyoming/)下载阜阳站和安庆站2020年5、6月每日8:00和20:00的探空数据,输入探空站的站点号和下载时间进行获取,其中阜阳站的区站号为58203,安庆站的区站号为58424。用 Python 脚本可以从网站(https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp #! /home)获取ERA5再分析资料,输入检索产品类型、时间、经纬度等信息申请数据产品。读取探空资料、ERA5再分析资料的气压及水汽混合比数据,即可得到大气水汽混合比的垂直廓线。

在 ERA5 再分析资料里获取到的是比湿数据, 需要将比湿数据转换算成水汽混合比 W。比湿 q 的 定义为单位体积内水汽的质量与湿空气质量的比 值,其与水汽混合比 W 的关系为:

$$W = \frac{q}{1 - q} \tag{1}$$

除去探空站缺失的数据, 阜阳站探空资料的 水汽混合比 5 月共 62 条廓线, 6 月共 60 条廓线, 安庆站 5 月共 53 条廓线,6 月共 60 条廓线。将 阜阳站和安庆站 2020 年 5、6 月的 ERA5 再分析 资料与探空资料的水汽混合比进行比较,分析 ERA5 再分析资料水汽混合比数据在安徽地区的 适用性。

2.2 评价指标

在垂直方向上每个气压点对应的位置,分别计 算出 ERA5 资料与探空资料水汽混合比在 2020 年 5 月和 6 月的相关系数、平均绝对偏差、相对偏差以及 均方根误差,作为对 ERA5 资料的适用性分析的评 价指标。

ERA5 再分析资料的水汽混合比与探空资料的水汽混合比在不同气压位置的相关系数,可以反映二者的相关程度,平均绝对偏差可以反映 ERA5 水汽数据相比于探空数据偏差的数值大小,相对偏差可以反映 ERA5 水汽数据在数值上偏离探空数据的程度(用%表示),均方根误差可以反映 ERA5 资料偏离探空资料水汽混合比的离散程度(均方根误差越小,表明二者数据的一致性越好)。相关系数 R、平均绝对偏差 M_{ae}、相对偏差 B_{ias}、均方根误差 R_{MSE}的计算公式如下^[14,17]:

$$R = \frac{\sum_{1}^{N} (W_{\text{ERA}} - \overline{W}_{\text{ERA}}) (W_{\text{RS}} - \overline{W}_{\text{RS}})}{\sqrt{(W_{\text{ERA}} - W_{\text{ERA}})^{2}} \sqrt{(W_{\text{RS}} - W_{\text{RS}})^{2}}}$$
(2)

$$M_{\rm ae} = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} |W_{\rm ERA} - W_{\rm RS}|$$
 (3)

$$B_{\rm ias} = \left[\frac{\sum_{1}^{N} (W)_{\rm ERA} - W_{\rm RS}}{N} / \frac{\sum_{1}^{N} W_{\rm RS}}{N}\right] \times 100 \ (4)$$

$$R_{\rm MSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (W)_{\rm ERA} - W_{\rm RS}\right]^{2} \right]^{1/2}$$
(5)

式中, W_{ERA} 表示 ERA5 再分析资料的水汽混合比; $\overline{W}_{\text{ERA}}$ 表示 ERA5 再分析资料的水汽混合比的平均 值; W_{RS} 表示探空资料的水汽混合比; \overline{W}_{RS} 表示探空 资料的水汽混合比的平均值, N 表示样本数。

2.3 对比分析

图 1 为阜阳站在 5 月、6 月北京时间 8:00 和 20:00,ERA5 资料与探空资料水汽混合比在垂直探 测方向上不同气压位置的对比结果。图 1(a)中,在 5 月份和 6 月份,阜阳站在 1000 hPa 到500 hPa的气 压范围内,ERA5 资料与探空资料水汽混合比的相 关系数整体大于 0.9,5 月份相关系数整体在 0.93 ~0.97之间,6月份的相关系数在0.9~0.98之间。 图1(b)中,在1000 hPa到500 hPa的气压范围内, 阜阳站5、6月份 ERA5资料与探空资料水汽混合比 的平均绝对偏差在0.25~0.95g/kg,且低空的平均 绝对偏差比高空大,可能是由于低空水汽较多,水汽 混合比数值比高空较大。图1(c)中,阜阳站5、6月 份 ERA5资料与探空资料水汽混合比的相对偏差在 -4%~5%范围内。图1(d)中,阜阳站5、6月份 ERA5资料与探空资料水汽混合比的均方根误差小 于1.23,且整体上有随高度逐渐减小的趋势。





图 2 为安庆站在 5 月、6 月北京时间 8:00 和 20:00, ERA5 资料与探空资料水汽混合比在垂直探 测方向上不同气压位置的对比结果。图2(a)中,在 5月份和6月份,安庆站在1000 hPa 到500 hPa 的 气压范围内, ERA5 资料与探空资料水汽混合比的 相关系数整体大于 0.86,5 月份相关系数大概在 0.89~0.98之间,6月份的相关系数在0.86~0.98 之间。图 2(b)中,在 1000 hPa 到 500 hPa 的气压 范围内,安庆站5、6月份 ERA5 资料与探空资料 水汽混合比的平均绝对偏差在 0.3~1 g/kg,在 850 hPa 以上平均绝对偏差整体上呈逐渐减小的 趋势。图2(c)中,安庆站5、6月份 ERA5 资料与探 空资料水汽混合比取样点的相对偏差在-6.5% ~3%范围内。图2(d)中,安庆站5、6月份ERA5 资料与探空资料水汽混合比的均方根误差小 于1.55。







图 1、图 2 的结果反映了,5、6 月份在安徽的阜阳站和安庆站,在 1000 hPa 到 500 hPa 的气压范围内,ERA5 再分析资料的水汽混合比与探空资料的水汽混合比在垂直方向上不同气压位置的相关性较好,偏差较小,ERA5 资料的水汽混合比偏离探空数据的程度较小,二者廓线的变化趋势大致相同,具有

较好的一致性。因此,在无探空数据的合肥地区,可 以选择 ERA5 再分析资料的水汽混合比进行代替作 为参考数据。

3 拉曼激光雷达探测水汽的原理

3.1 拉曼激光雷达探测原理

拉曼激光雷达发射激光,与大气发生相互作 用,会产生弹性散射和非弹性散射回波。非弹性 散射如大气中的水汽分子和氮气分子的拉曼散 射,会产生与入射光不同频率的拉曼散射信号,拉 曼散射的频移与散射粒子种类有关,不受入射光 的影响,不同分子产生的拉曼频移不同^[20],由此可 利用拉曼散射激光雷达探测大气中水汽和其他气 体的浓度。

拉曼激光雷达系统由三大部分组成,包括激光 发射系统、信号接收系统、数据采集和控制系统。实 验使用的拉曼激光雷达系统结构如下图 3 所示。雷 达发射系统使用 ND:YAG 固体激光器,发射波长 为 355 nm 的激光,对大气目标物进行探测,探测的 垂直距离分辨率为 7.5 m。发射激光遇到大气分子 和气溶胶,产生弹性散射(瑞利散射和米散射)回波 信号,回波信号波长为 355 nm;发射激光遇到大气 中的水汽分子和氮气分子,发生拉曼频移,产生非弹 性散射回波信号,水汽对应的回波信号波长为 407 nm,氮气对应的回波信号波长为 387 nm。激光 照射大气目标物时,发生后向散射的信号进入雷达接 收系统的光学望远镜,部分光被分束镜 BS1 反射,



图 3 拉曼激光雷达系统结构 Fig. 3 Schematic diagram of Raman lidar system

并经过干涉滤光片 IF1 滤光,使 355 nm 的弹性散射 光到达光电倍增管 PMT1;部分光透过分束镜 BS1, 被分束镜 BS2 分为反射光和透射光,反射光经滤光 片 IF2 滤光后,使 387 nm 的氮气拉曼散射光到达光 电倍增管 PMT2,透射光经滤光片 IF3 滤光后,使 407 nm的水汽拉曼散射光到达光电倍增管 PMT3。 光电倍增管的数据经数据采集和处理系统,将光信 号转换为电信号,得到可进行分析和反演计算的回 波信号数据。

氮气和水汽的拉曼散射回波信号的激光雷达方 程基本一致,可表示为

$$P_{N}(z, \lambda_{N}) = P_{0} \frac{K_{N}}{z^{2}} N_{N}(z) \frac{d\sigma_{N}}{d\Omega} (\lambda_{0}, \pi) \times T(\lambda_{0}, z_{0}, z) \times T(\lambda_{N}, z_{0}, z)$$
(6)

$$P_{W}(z,\lambda_{W}) = P_{0} \frac{K_{W}}{z^{2}} N_{W}(z) \frac{d\sigma_{W}}{d\Omega}(\lambda_{0},\pi) \times$$

$$T(\lambda_0, z_0, z) \times T(\lambda_W, z_0, z)$$
(7)

$$T(\lambda_0, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^{z} \alpha_{\lambda_0}(z') dz'\right]$$
 (8)

$$T(\lambda_g, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_g}(z') dz'\right]$$
(9)

$$\alpha_{\lambda_0}(z) = \alpha_{a,\lambda_0}(z) + \alpha_{m,\lambda_0}(z) \tag{10}$$

$$\alpha_{\lambda_g}(z) = \alpha_{a,\lambda_g}(z) + \alpha_{m,\lambda_g}(z)$$
(11)

式中,z是探测高度; $P_N(z,\lambda_N)$ 是高度z处氮气的拉 曼散射回波信号; $P_{W}(z, \lambda_{W})$ 是高度 z 处水汽的拉曼 散射回波信号; P_0 表示发射激光功率; K_N 和 K_W 分 别为氮气和水汽的拉曼散射回波通道的仪器常数; λ_0 = 355 nm 为发射激光波长, λ_N = 387 nm 为氮气 的拉曼散射波长, λ_{W} = 407 nm 为水汽的拉曼散射 波长; $N_N(z)$ 和 $N_W(z)$ 分别为氮气和水汽在高度 z 处的分子数密度; $\frac{d\sigma_N}{d\Omega}(\lambda_0,\pi)$ 和 $\frac{d\sigma_W}{d\Omega}(\lambda_0,\pi)$ 分别 是氮气和水汽在发射波长 λ_0 的后向拉曼散射截面; $T(\lambda_0, z_0, z)$ 是散射体和激光雷达之间的大气在入 射波通道 λ_0 上的大气透过率, $T(\lambda_x, z_0, z)$ 是散射 体和激光雷达之间的大气在气体 g(即氮气或水汽) 的拉曼散射通道 λ_g 上大气的透过率; $\alpha_{\lambda_0}(z)$ 是在 高度 z 处波长 λ_0 的大气的消光系数, $\alpha_{\lambda_a}(z)$ 是在高 度z处拉曼散射波长 λ_g 的大气的消光系数, $\alpha_{m,\lambda_0}(z)$ 和 $\alpha_{m,\lambda_g}(z)$ 分别为大气分子在波长 λ_0 和 λ_g 的消光系数, $\alpha_{a,\lambda_0}(z)$ 和 $\alpha_{a,\lambda_g}(z)$ 分别是大气气溶胶 在波长 λ_0 和 λ_g 的消光系数。

大气分子的消光系数可以利用 1976 年美国标 准大气模型来计算。

弹性散射通道 355 nm 气溶胶的消光系数通过 氮气的拉曼回波方程(6)可以得到:

$$\frac{\frac{d}{dz}\left[\ln\frac{N_{N}(z)}{P_{N}(z,\lambda_{N})z^{2}}\right] - \alpha_{m,\lambda_{0}}(z) - \alpha_{m,\lambda_{N}}(z)}{1 + \left(\frac{\lambda_{0}}{\lambda_{N}}\right)^{A}}$$
(12)

其中,氮气分子的数浓度 N_N(z)通过美国标准大气 模式得到。A 为气溶胶的波长指数,波长指数的选 取取决于大气气溶胶的成分及粒径大小,计算中假 定气溶胶的波长指数为1^[21]。

气溶胶在激光发射波长 355 nm 与拉曼散射波 长 387 nm、407 nm 的消光系数的比值可以用气溶胶 波长指数表示为:

$$\frac{\alpha_{a,\lambda_0}(z)}{\alpha_{a,\lambda_g}(z)} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^A \tag{13}$$

因此,根据公式(12)先计算出拉曼激光雷达弹 性散射波长通道的气溶胶消光系数,根据式(13)的 比值关系,可以计算得到氮气和水汽通道的气溶胶 消光系数,各通道的气溶胶消光系数与对应的大气 分子的消光系数相加,即可得到大气的消光系数。 将大气消光系数在高度上进行积分得到光学厚度, 进而得到大气透过率。

3.2 水汽混合比

水汽混合比 W(z)的定义为单位体积内水汽的 质量与干空气质量之比。水汽混合比的定义式可表 示如下:

$$W(z) = \frac{N_W(z)M_W}{N_{dry}(z)M_{dry}}$$
(14)

式中, $N_W(z)$ 、 $N_{dry}(z)$ 是高度z处的水汽和干空气的分子数浓度; M_W 、 M_{dry} 是水汽和干空气的分子质量。

将氮气的拉曼散射回波信号的激光雷达方程 (6)和水汽的拉曼散射回波信号的激光雷达方程 (7)相比,得到:

$$\frac{N_{W}(z)}{N_{N}(z)} = \frac{K_{N}}{K_{W}} \frac{\frac{d\sigma_{N}}{d\Omega}(\lambda_{0}, \pi)}{\frac{d\sigma_{W}}{d\Omega}(\lambda_{0}, \pi)} \frac{P_{W}(z, \lambda_{W})}{P_{N}(z, \lambda_{N})} T_{r}(z)$$
(15)

$$T_{r}(z) = \frac{T(\lambda_{N}, z_{0}, z)}{T(\lambda_{W}, z_{0}, z)}$$
(16)

 $T_r(z)$ 定义为大气透过率修正函数,是氮气拉 曼通道和水汽拉曼通道的大气透过率的比值。由 于氮气的体积约占干空气的 78 %,在大气中的含 量比较稳定,所以干空气的分子数浓度可以用氮 气分子数浓度的百分含量来表示,并将式(15)代 入水汽混合比的定义式(14),得到水汽混合 比W(z):

$$W(z) = 0.78 \times \frac{N_W(z)}{N_N(z)} \frac{M_W}{M_N}$$
$$= C_A \frac{P_W(z, \lambda_W)}{P_N(z, \lambda_N)} T_r(z)$$
(17)

其中, C_A 为水汽混合比的标定常数,是由激光雷达氮 气和水汽拉曼通道的系统常数 K_N 和 K_W 决定的^[20]。 在式(17)中,若求得标定常数 C_A 以及大气透过率修 正函数 $T_r(z)$,通过将拉曼激光雷达水汽通道回波信 号和氮气通道回波信号的比值 $\frac{P_W(z,\lambda_W)}{P_N(z,\lambda_N)}$ 代入,就可 以得到水汽混合比 W(z) 的值。

大气透过率修正函数 $T_r(z)$ 可以通过式(8)、 (9)、(16)计算得到,水汽混合比的标定常数 C_A , 通过 ERA5 再分析资料的水汽混合比数据进行 确定。

3.3 标定常数的确定

对于拉曼激光雷达反演水汽混合比的标定常数 *C_A*的确定,通常采用较多的方法是,用探空数据对 其进行标定。由于探空数据具有时空局限性,探测 地点有限,两次探测时间不连续,因此在无探空数据 的合肥地区,选择与探空资料水汽混合比相似度较 高,时间较为连续,可在全球范围内检索的 ERA5 再 分析资料的水汽混合比,代替探空数据进行 *C_A*的标 定。在用 ERA5 水汽混合比对 *C_A* 进行标定时,需要 将 ERA5 水汽混合比在拉曼激光雷达垂直分辨率 (7.5m)高度上进行插值。

在大气稳定的天气条件下,选取与拉曼激光雷 达探测时间对应的 ERA5 的水汽混合比数据对其进 行标定。在相对湿度没有较大突变的高度范围内对 应的 *n* 个数据点^[12],代入拉曼激光雷达水汽和氮气 通道的回波信号强度、插值的 ERA5 水汽混合比数 据以及水汽和氮气拉曼通道计算得到的大气透过率 的比值,对水汽混合比公式中的 *C_A* 进行标定,计算 得到标定常数为^[2,22]:

$$C_{A} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} \left(\frac{W(z)}{T_{r}(z)} \frac{P_{N}(z)}{P_{W}(z)} \right)$$
(18)

使用 ERA5 再分析资料数据中 2020 年 5 月 26 日、5 月 27 日和6 月 1 日 20:00 的水汽混合比数据作 为参考,对计算水汽混合比的标定常数 C_A 进行确定,并将标定常数 C_A 代入拉曼激光雷达反演水汽混合比 的公式,为避免雷达几何重叠因子的影响,标定和反 演选择在探测高度 0.5~1.5 km 的范围进行。

在没有天气过程的情况下,对 C_A 进行标定。如 表1所示,为合肥地区 2020 年 5 月 26、5 月 27 日、 6 月1 日 20:00 拉曼激光雷达的标定常数。标定常 数在不同夜晚的计算结果有变化,分析是由于 ERA5 资料与探空资料存在一定的偏差,ERA5 资料 的垂直分辨率没有拉曼激光雷达高,插值后会存在 一定的误差,且拉曼激光雷达系统存在一定的不稳 定性,这些因素会导致标定常数随时间的变化,但整 体上变化的幅度不大。

- 表1 5月26日、5月27日、6月1日 20:00的标定常数结果
- Tab. 1 The calibration constant results at

20:00 on May 26, May 27 and June 1

Date	5.26	5.27	6. 1
C_{A}	397	380. 5	461

4 拉曼激光雷达水汽混合比反演结果及分析

用 Matlab 中的 griddata 函数,在不同探测高度, 对阜阳站(32.87 °N,115.73 °E)、安庆站(30.62 °N, 116.97 °E)、南京站(31.93 °N,118.9 °E)三个探空站 的水汽混合数据比进行二维散点插值,横、纵坐标分别 对应着经、纬度,插值得到合肥(31.49 °N,117.13 °E) 的水汽混合比廓线数据,将其作为参考数据对拉曼激 光雷达反演的水汽混合比进行对比分析。

将标定常数及各参量代入式(17),得到拉曼 激光雷达反演合肥的水汽混合比结果,与探空数 据插值得到的合肥水汽混合比对比如图 5 所示。 拉曼激光雷达反演合肥地区 2020 年 5 月 26、5 月 27 日、6 月 1 日 20:00 的水汽混合比,在 0.5~1.5 km 的范围内,反演的水汽廓线整体趋势与探空数 据插值后的水汽混合比廓线较为相似。5 月 26 和 6 月 1 日,在 0.5~1.5 km 的范围内,拉曼激光雷 达反演结果与探空插值的水汽混合比的相对误差 在±7%以内。5月27,在0.5~1.5 km的范围 内,拉曼激光雷达反演结果与探空插值的水汽混 合比的相对误差在-12%~5%。从相对误差的 结果来看,用ERA5水汽数据对拉曼激光雷达反演 水汽混合比进行标定,将标定常数代入计算,在 0.5~1.5 km的范围内,得到的水汽反演结果与探 空站插值得到的水汽混合比廓线较为一致,相对 误差较小。因此,用ERA5再分析资料的水汽混合 比代替探空数据对拉曼激光雷达反演水汽混合比 进行标定是可行的。



station with scatter interpolation





vapor mixing ratio obtained by Raman lidar retrieval and the data interpolation of radiosonde station

5 结 论

对安徽地区 ERA5 再分析资料水汽混合比数据 的适用性进行了分析。将阜阳站和安庆站地区 ERA5 再分析资料的比湿数据转换成水汽混合比, 与探空资料的水汽混合比进行对比,分析了 ERA5 资料与探空资料水汽混合比在 2020 年 5 月和 6 月 的相关系数、平均绝对偏差、相对偏差以及均方根误 差。结果表明在 1000~500 hPa 的气压范围内,5、6 月份阜阳站和安庆站的 ERA5 再分析资料与探空资 料的水汽混合比,二者的相关性较好,垂直廓线变化 趋势较为一致,存在的偏差较小,因此,在无探空数 据的合肥地区,选择了 ERA5 再分析资料的水汽混 合比代替探空数据,对拉曼激光雷达反演水汽混合 比进行标定。

通过将阜阳站、安庆站、南京站三个探空站的水 汽混合比数据进行散点插值,得到合肥的水汽混合 比廓线,并将其作为参考数据与拉曼激光雷达反演 结果进行对比分析。用合肥地区 2020 年 5 月 26 日、5 月 27 日和 6 月 1 日 20:00 的拉曼激光雷达数 据反演水汽混合比,并与经探空插值得到的合肥的 水汽混合比对比,相对误差在 - 12 % ~ 7 % 的范围 内,二者的廓线具有大致相同的趋势,垂直方向上一 致性较好。表明在合肥地区用 ERA5 再分析资料对 拉曼激光雷达反演水汽混合比进行标定和对比是可 行的。

拉曼激光雷达探测水汽的时间分辨率可以达 到分钟级、秒级,垂直探测分辨率高,ERA5 再分析 资料可以解决无探空数据时对拉曼激光雷达反演 水汽混合比的标定,进而可以通过拉曼激光雷达 高时空分辨率数据反演得到时空更精细化的水汽 廓线。

参考文献:

- [1] Wang Jianyü, Hong Guanglie. Advice about our country developing spaceborne meteorologic lidar[J]. Laser & infrared, 2009, 39(4):347-353. (in Chinese)
 王建宇,洪光烈.关于发展我国空间激光气象雷达的 建议[J].激光与红外,2009,39(4):347-353.
- [2] Deng Q. Research on self-calibration method for water vapor detection of Raman Lidar and development of all-solid-state system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019:2 - 15. (in Chinese)

邓迁.拉曼激光雷达水汽探测自标定方法研究与全固态系统研制[D].合肥:中国科学技术大学,2019:2-15.

 [3] Wang Yüfeng, Gao Fei, Zhu Chenxuan, 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.

[4] Cao Xiaoming. Detection and analysis of all-sky atmospheric water vapor content based on raman LiDAR[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology of China,2017:1-9.(in Chinese)
曹小明.基于拉曼激光雷达的全天时大气水汽含量探

测与分析[D]. 西安:西安理工大学,2017:1-9.

- [5] Melfi S H, Lawrence J D, McCormick M P. Observation of Raman scattering by water vapor in the atmosphere [J].
 Applied Physics Letters, 1969, 15(9):295 - 297.
- [6] 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]. Applied Optics, 1992, 31 (16):3068-3082.
- [7] Whiteman D N, Melfi S H. Cloud liquid water, mean droplet radius, and number density measurements using a Raman lidar[J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 1999, 104(D24): 31411 - 31419.
- [8] Whiteman D N. Examination of the traditional Raman lidar technique. II. evaluating the ratios for water vapor and aerosols [J]. Applied Optics, 2003, 42 (15): 2593-2608.
- [9] Whiteman D N, Rush K, Rabenhorst S, et al. Airborne and ground-based measurement using a high-performance Raman lidar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(11):1781-1801.
- [10] Yufeng W, Fei G, Chengxuan Z, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Opt. Sin, 2015, 35:0328004.
- [11] Shang Zhen, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. Raman lidar for measuring water vapor in the troposphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12):184 - 189. (in Chinese)

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): 184-189. [12] Li Tao, Qi Fudi, Yue Guming, et al. Raman lidar detection of atmospheric water vapor mixing ratio[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, (6):843 - 854. (in Chinese)

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, (6): 843-854.

[13] Mo Zhixiang, Huang Ling, Guo Xi, et al. The accuracy of GNSS water vapor inversion in Guilin area was analyzed by using ERA5 data[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Science, 2021, 13 (2):131-137. (in Chinese) 莫智翔,黄玲,郭希,等. 利用 ERA5 资料进行桂林地区 GNSS 水汽反演精度分析[J]. 南京信息工程大学学

GNS5 水汽及澳有度分析[J]. 南泉信息工程入学学 报:自然科学版,2021,13(2):131 – 137.

- [14] Zhu Song, Deng Xueliang, Shen Weiwei, et al. Evaluation of wind profile radar data in Hefei[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2023, 18(6):516 531. (in Chinese)
 祝颂,邓学良,沈薇薇,等. 合肥地区风廓线雷达资料 评估初探[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18(6):516-531.
- [15] Yang Sikun, Yang Ling, Zhang Xuefen, et al. Comparative analysis of atmospheric boundary layer height retrieved by ground-based remote sensing combined with ERA5 reanalysis data[J]. Meteorological Journal, 2019, 49(2):178 – 187. (in Chinese) 杨世昆,杨玲,张雪芬,等. 地基遥感联合反演大气边

(初回起, (初运, 示当分, 寺. 地塞運恐联合反便入气边 界层高度与 ERA5 再分析资料比对分析[J]. 气象, 2023,49(2):178-187.

[16] Zhu Jun, Zhao Meiyan, Wang Xin, et al. Applicability analysis of relative humidity products from HRCLDAS and ERA5 reanalysis data in Chongqing[J]. Journal of Southwest Normal University: Natural Science, 2023, 48(5): 70-76. (in Chinese)
朱君,赵美艳,王新,等. HRCLDAS 和 ERA5 再分析资

本有, 应美把, 主制, 等. InfelioAs 和 ERAS 再分析员 料的相对湿度产品在重庆地区的适用性分析[J]. 西 南师范大学学报:自然科学版, 2023, 48(5): 70 – 76.

[17] Meng Xuangui, Guo Junjian, Han Yongqing. ERA5 reanalysis data applicability preliminary assessment[J]. Journal of Marine meteorological, 2018, 38(1):91 - 99. (in Chinese)

孟宪贵,郭俊建,韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报,2018,38(1):91-99.

[18] Liu Cuan, Yü Yua, Xie Jin, et al. Applicability of soil temperature and moisture in several datasets over qinghai-xizang plateau [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34 (3): 653-665. (in Chinese)

刘川,余晔,解晋,等.多套土壤温湿度资料在青藏高 原的适用性[J].高原气象,2015,34(3):653-665.

[19] Zhu Jing, Yuan Huizhen. Applicability of ERA reanalysis data of land surface temperature in Zhejiang province[J].
 Meteorological Science and Technology, 2019, 47(2):289

 - 298. (in Chinese)
 - 100

朱景,袁慧珍. ERA 再分析陆面温度资料在浙江省的 适用性[J]. 气象科技,2019,47(2):289-298.

[20] Tian Xiaomin, Liu Dong, Xü Jiwei, et al. Review of atmospheric detection lidar technology [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2018, 13 (5): 321 – 341. (in Chinese) 田晓敏,刘东,徐继伟,等.大气探测激光雷达技术综述[J].大气与环境光学学报,2018,13(5):321-341.

- [21] Shen Ji, Cao Nianwen. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (6): 0610003. (in Chinese)
 沈吉,曹念文.米 拉曼散射激光雷达反演对流层气 溶胶 消 光 系 数 廓 线 [J]. 中 国 激 光, 2017, 44 (6):0610003.
- [22] Shi Yue. Analysis of water vapor error in Raman lidar measurement[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2017. (in Chinese) 史悦. 拉曼激光雷达测量水汽误差分析研究[D]. 合 肥:中国科学技术大学,2017.