



对流层大气温度廓线的激光探测技术研究进展

狄慧鸽

Remote sensing technology for troposphere atmospheric temperature profile: A review

DI Huige

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-161>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨

Error analysis and correction method of temperature and humidity profiles in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system

暴雨灾害. 2024, 43(5): 587–597 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-199>

上海移动式风廓线雷达的探测性能评估与分析

Performance evaluation of mobile wind profiler radar in Shanghai

暴雨灾害. 2021, 40(6): 637–645 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.008>

晴空时微波辐射计温度廓线反演误差分析

Bias analysis of retrieval profile of temperature with microwave radiometer in clear sky

暴雨灾害. 2022, 41(6): 720–726 <https://doi.org/10.12406/byzh.2020-194>

地基云遥感反演进展及挑战

Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing

暴雨灾害. 2021, 40(3): 243–258 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.003>

中尺度天气系统适应性观测研究进展及其在大城市短临预报中的应用构想

Progress in targeted observation for meso-scale convective system and some thoughts on its applications to convection nowcasting in large cities

暴雨灾害. 2023, 42(6): 613–627 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-035>

地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展

Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars

暴雨灾害. 2023, 42(4): 361–371 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-075>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

狄慧鸽.2026.对流层大气温度廓线的激光探测技术研究进展[J].暴雨灾害,45(3):318–329. DI Huige. 2026. Remote sensing technology for troposphere atmospheric temperature profile: A review [J]. Torrential Rain and Disasters,45(3):318–329 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–161

对流层大气温度廓线的激光探测技术研究进展

狄慧鸽

(西安理工大学光电科学与智能仪器学院, 西安 710048)

摘 要: 大气温度廓线的获取对于天气预报预警以及提升天气预报精度具有重要意义, 专业上可使用多种主被动遥感技术对其进行探测。大气温度廓线的变化影响着天气现象的发生发展, 特别是在对流层, 对其高精度遥感探测对于天气预报、灾害天气预警等具有至关重要的作用。本文概述了当前大气温度廓线探测的主要方法与技术, 分析了不同探测技术的优缺点和应用范围, 重点介绍了对流层大气温度廓线的激光探测技术发展现状, 分析了瑞利高光谱分辨率激光雷达技术和转动拉曼激光雷达技术的优势和技术瓶颈问题, 探讨了云层温度的探测技术, 并指出了主被动遥感相结合的无球探空技术是实现对流层大气温度廓线高精度、高时空分辨率连续观测的优势方案。最后, 展望了该探测技术的发展方向。

关键词: 大气温度廓线; 对流层; 激光探测技术; 云层温度探测

中图法分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2024–161

Remote sensing technology for troposphere atmospheric temperature profile: A review

DI Huige

(School of Optoelectronic Science and Intelligent Instrumentation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The acquisition of atmospheric temperature profiles is of great significance for weather forecasting and warning, as well as improving the accuracy of weather forecasts. There are various active and passive remote sensing technologies available in the field to detect it. Changes in temperature profiles significantly influence weather phenomena, especially within the troposphere. High precision remote sensing detection plays a crucial role in weather forecasting, disaster weather warning, and other related fields. This paper outlines the main methods and technologies for detecting atmospheric temperature profiles, analyzes the advantages, disadvantages, and applicability of different remote sensing technologies. It then focuses on the development status of laser-based remote sensing technology for detecting atmospheric temperature profiles in the troposphere, with an examination of the advantages and technical challenges of Rayleigh high-spectral-resolution lidar and rotational Raman lidar. The detection technology of cloud temperature is explored, and the advantages of the technology combining active and passive remote sensing are highlighted for achieving high-precision, high spatiotemporal resolution, and continuous observation of tropospheric temperature profiles. Finally, the prospects of this detection technology are discussed.

Key words: atmospheric temperature profile; troposphere; laser remote sensing; cloud temperature detection

引 言

大气温度是描述地球大气状态的重要参数, 直接影响太阳短波辐射与地-气系统长波辐射的相互作用, 进而影响全球的辐射能量收支平衡。在垂直高度上, 大气温度廓线变化剧烈, 其垂直结构特征影响着大气的稳定性, 对流层内大气温度垂直结构的变

化影响着天气现象, 如雾霾、暴雨、冰雹等的发生, 均与大气温度廓线变化均有重要关系。高精度大气温度廓线的获取对于天气预报预警以及提升天气预报精度具有重要意义 (傅云飞, 2018, 2021)。对流层大气温度廓线的常规测量对于数值天气预报、气候监测至关重要, 目前全球范围内主要是通过探空气球

收稿日期: 2024–08–26; 定稿日期: 2025–03–11

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130612); 陕西省重点研发计划项目 (2021ZDLSF06-07)

第一作者: 狄慧鸽, 主要从事云探测技术与大气激光雷达技术研究。E-mail: dihuige@xaut.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

进行探测,虽然探空气球可以提供精确的温、湿、风等参量数据,但每日释放气球费用高昂,且目前大多数探空气球需要人工释放。因此,世界上大多数气象站点每日只释放两次探空气球,这导致观测数据在时间上采样不足。

遥感技术具有可连续观测和高时空分辨率的特点,学者们采用掩星探测技术(张志华等, 2022)、红外光谱技术(张建伟等, 2011)、微波探测技术(王振会等, 2014)和激光探测技术(Hua et al., 2004)等多种主被动遥感技术来探测大气温度。经典卫星遥感往往采用被动式的红外光谱或微波遥感,不需要主动源,探测结构相对简单,但垂直分辨率较低,对对流层的探测能力较弱;地基遥感是实现对流层大气温度廓线连续探测的主要手段,目前主要采用激光主动探测和微波被动探测两种方式,激光雷达属于主动式遥感,具有可连续测量、实时性好、垂直分辨率高和探测灵敏度高等优点。近年来这些大气温度探测技术已引起广泛关注,并得到长足发展。

本文对大气温度廓线的探测技术进行了梳理和分析,介绍了各种探测技术的优缺点和适用范围,重点介绍了对流层大气温度廓线的激光探测技术发展现状,分析了瑞利高光谱分辨率激光雷达技术和转动拉曼激光雷达技术的优势和技术瓶颈问题,归纳了云层温度的探测技术,探讨了主被动遥感相结合的无球探空技术在对流层大气温度廓线高精度、高时空分辨率连续观测的优势,并对未来该探测技术的发展和应用情况进行了展望。

1 大气温度廓线的主要探测方法与技术

目前,大气温度廓线的获取主要采用探空仪器方法、掩星探测技术、红外/微波被动遥感技术和激光雷达探测技术。

1.1 探空仪器方法

该方法是将温度传感器放置在探空仪器上,通过探空仪器的移动来获得所在路径上的温度信息。常用的探空仪器有探空气球和探空火箭。探空气球是目前获取高精度大气温度廓线最基本的手段,为天气预报和大气科学研究提供了不可或缺的观测数据。我国共有 120 多个观测站点,每日早晚 7:15 (北京时,下同)同时放球,得到大气温度、压力、湿度及风的廓线,探测高度为 0—30 km,数据精度高,温度探测误差 $\leq \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,垂直分辨率可达到米级,探测结果受云层影响较小。叶笃正(1977)早就研究过探空资料的应用,Zhang 等(2020)还利用长时间的探空温度廓线资料分析了云顶逆温。探空资料为深入研究

纷繁复杂的天气现象提供了宝贵的数据,并作为观测资料同化的一部分广泛应用于数值天气预报业务中(张朝林等, 2005)。

但是探空气球费用昂贵、释放频次有限,常规数据每日只能得到 2 次大气温度廓线,受到使用时间和空间的限制,且气球在高空受气流影响会发生漂移,位置会离开探测站垂直上空,一般为几十公里,最大超过 100 km (Yuan et al., 2022a)。

1.2 掩星探测技术

掩星探测技术的发展经历了无线电掩星、微波掩星以及国内外近 10 a 逐步开始研究的低轨激光掩星三个阶段(李虎等, 2021)。1990 年代初,全球导航定位系统(Global Navigation and Positioning System, GNSS)无线电掩星探测就可实现大气折射率、温度和水汽等大气参数的高垂直分辨率、高精度探测。无线电掩星探测资料被各大数值天气预报中心同化到数值天气预报模式。图 1 是无线电掩星观测示意图,可见当地球、GNSS 和 LEO (Low Earth Orbit) 卫星三者的几何关系满足地球处于两颗卫星之间的情况时,GNSS 卫星发射出无线电波信号,该信号在传输过程中会穿过大气层,从而导致电波信号传播路径发生折射。通过无线电波传播路径因折射发生弯曲的情况与 LEO 卫星上接收机测得的无线电波信号的振幅衰减和相位延迟,可以反演出大气温度、压强等参数。掩星探测技术的测温精度较高,误差仅为 0.5~2.0 K,垂直分辨率在 100~500 m 之间。

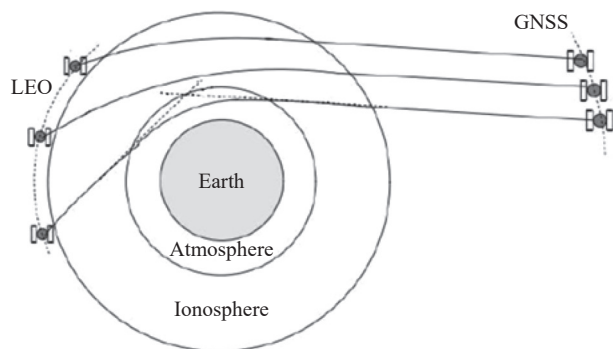


图 1 GNSS-LEO 无线电掩星观测示意图(引自李虎等, 2021)

Fig. 1 Schematic of GNSS-LEO radio occultation observation (Adapted from Li et al., 2021)

然而,在对流层低层较暖区域,水汽比较丰富,仅使用 GNSS 信号进行掩星探测,无法准确区分温度和水汽对折射率的贡献,存在“温度-水汽模糊”问题(张志华等, 2022)。掩星探测是获取大气温度廓线的一种重要方法,但是技术成熟度较高的是无线电掩星探测技术,其数据主要应用在 5 km 以上的空间区域,无法获取边界层内的大气温度廓线数据。

1.3 微波辐射计遥感技术

多通道微波辐射计是一种用于测量亚毫米级到厘米级波长电磁波(微波)的辐射计(游然等, 2013), 属于被动式遥感设备, 通过获取的亮温数据, 结合历史探空资料和人工神经网络等反演算法, 可以实现对流层大气温度、湿度廓线分布的反演。辐射计输出的一级数据为非常规观测资料(即亮温), 代表辐射计在制定频率处接收到的电磁波强度, 需要经过反演计算才能获得大气温度廓线及云信息等二级产品。因其具有较强的全天候工作能力, 已被广泛应用到大气探测研究中, 极大地弥补了探空资料的不足(柳靖等, 2024; 徐桂荣等, 2024)。但是, 由于多通道微波辐射计所有通道的反演权重函数从地面到高空均呈单调递减的形式(张明等, 2024), 信息量有限, 导致其反演精度及分辨率较低, 温度的比对偏差最大可达 5 K 以上, 距离分辨率随高度发生变化, 低层大多数为 50 m, 但在 2 km 以上垂直分辨率为 250 m (Yuan et al., 2022a, 2022b)。垂直方向上短距离的逆温信息通常不能被探测到, 且现有微波辐射计的数据反演依赖当地历史探空资料作为训练样本, 限制了其在无探空观测地区的进一步应用。

目前商用微波辐射计基本上均是采用神经网络的方法进行反演, 它实际上是用统计方法在长年平均的探空资料基础上进行的优化。这种方法反演速度很快, 可以全天候运行, 但反演精度尤其是提供低层大气复杂温度分布的能力不足。因此, 尽管微波辐射计有全天候探测的优势, 但它需要有设备能为它提供好的初值廓线才能反演出高精度的结果, 需要有新的技术补充。

1.4 红外光谱遥感技术

在被动遥感技术中, 除微波辐射计外, 人们还常用红外光谱技术来探测大气温度廓线。红外光谱遥感大气温度是根据大气发射的光谱分布来获取大气温度的垂直分布信息。因为不同的大气层辐射出来的光谱波段各不相同, 通过探测不同波段的光谱信息, 可反演不同高度的大气温度。红外分光计装载于各种气象卫星上, 对大气温度进行全球三维空间探测。Aqua 卫星上装载的 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 是最早的高光谱大气红外探测器, 在 307~15.4 μm 有 2 378 个光谱通道, 可以实现对大气温度、湿度廓线的反演(李亚娟, 2016)。红外光谱遥感得到的是大气辐射量, 需要通过一定的反演方法才能得到大气温度信息, 国内外不少学者在此方面进行了开拓性的研究, 国内基于 AIRS 资料反演大气温度廓线大多是采用特征向量统计反演法, 也有

采用人工神经网络算法(官莉等, 2010)。利用红外光谱遥感测温的精度通常在 1~3 K 之间, 具体取决于光谱通道、仪器性能和反演算法, 基于该方法获得的大气温度廓线信息垂直分辨率较低, 通常为 1~2 km。

1.5 激光雷达探测技术

激光雷达是近几十年来快速发展的主动遥感技术, 凭借其高时空分辨率、高探测灵敏度和强抗干扰能力等优点, 已成为一种有效的大气环境探测手段, 在气象与环境探测中得到了越来越广泛的应用。激光在大气介质中传播, 与大气中的原子、分子或大气气溶胶粒子发生相互作用。激光与大气物质相互作用的机制有瑞利散射、米散射、拉曼散射、荧光、吸收和多普勒效应等。根据这些机制, 学者研制出了多种类型的探测大气温度廓线的激光雷达, 主要有共振荧光激光雷达、瑞利散射激光雷达、振动拉曼散射激光雷达、转动拉曼散射激光雷达、瑞利高光谱分辨率激光雷达和差分吸收激光雷达等。

各种激光雷达各有其探测特点和优势, 共振荧光激光雷达(Fong et al., 2014)探测金属层原子或离子的共振荧光谱线在不同位置的荧光信号, 主要探测 80~105 km 高度区域的大气温度廓线; 瑞利散射激光雷达(常启海, 2005)是利用分子的瑞利散射回波信号测量纯净大气的相对密度, 从而反演大气温度, 故需要在洁净大气中才能实现, 探测高度在 30 km 以上; 振动拉曼激光雷达(吴永华等, 2002)是基于振动拉曼信号的非弹性散射机制, 回波信号不受气溶胶干扰, 通过扣除大气透过率之后得到大气密度, 进而利用理想气体方程和静力学假设反演出大气温度廓线, 其受大气透过率的影响较大, 探测高度相比瑞利散射激光雷达可以从 20 km 延伸到 30 km, 但无法准确获得对流层内的大气温度廓线; 差分吸收技术的基本原理(Bösenberg, 1998)是向大气中交替发射两束激光, 一束激光的波长位于待测气体吸收峰, 一束激光的波长偏离待测气体吸收峰, 通过探测大气对两束激光的差分吸收效应, 实现待测气体浓度的测量, 大气温度廓线是探测氧气的差分吸收信号, 由于氧气的浓度已知, 从而可以获得氧气吸收截面并从中反演大气温度廓线。差分吸收技术测温对激光器要求较高, 需要窄线宽的脉冲激光器, 同时需要超窄的滤光片, 这些因素使得利用差分技术实现温度廓线探测的系统不多。对于对流层大气、气溶胶含量较高的区域, 应用较好的技术是转动拉曼激光雷达和瑞利高光谱分辨率激光雷达。与前几种测温技术相比, 激光雷达的垂直分辨率和测温精度均较高,

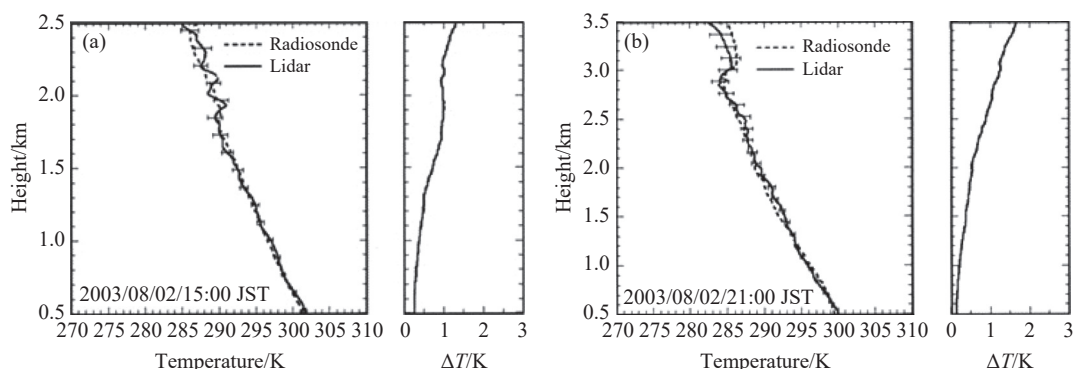


图 3 高光谱分辨率激光雷达探测的白天 (a) 和夜晚 (b) 大气温度廓线 (引自 Hua et al., 2004, 2005)

Fig. 3 The (a) daytime and (b) nighttime atmospheric temperature profiles detected by high spectral resolution lidar (Adapted from Hua et al., 2004, 2005)

除了利用 Fabry-Perot 干涉仪作为分光器进行瑞利光谱探测, 学者也提出尝试利用 Fizeau 干涉仪配合阵列探测器来实现大气温度廓线的探测。Fizeau 干涉仪相对于 Fabry-Perot 干涉仪的优点是其产生的干涉条纹为线形, 可以直接利用阵列探测器得到回波光谱信息, 省去了鉴频的步骤。这些技术最初是由德国航空航天中心提出并实现的, Benjamin 团队对此项技术开展了较为全面的研究, 我国华中科技大学、中国科学技术大学和南京信息工程大学等也均对此技术进行了仿真研究 (刘延文等, 2019; Xu, 2021)。该项技术需要精确解耦瑞利-布里渊包络谱, 分离瑞利散射谱和布里渊散射谱。然而该项技术因为光谱分辨率不足、系统灵敏度较低, 并未实现推广。

高光谱分辨率激光雷达对系统稳定性要求严格, 需要激光器的线宽小于 100 MHz, 稳定度优于 10 MHz, 对于分光器件, 需要高精度的温控措施, 这将会导致系统复杂庞大。因此尽管高光谱分辨率激

光雷达在大气温度探测上具有信噪比高的优势, 但是在实际应用中并不多见。

2.2 转动拉曼激光雷达探测技术

转动拉曼激光雷达探测是一种最适合对流层大气温度廓线探测的技术。该技术由 Cooney (1972) 首次提出, 目前国际上已有不少团队利用转动拉曼散射谱线成功实现了大气温度廓线的探测。转动拉曼激光雷达是基于大气中 N_2 、 O_2 分子的转动拉曼散射谱线强度与大气温度的依赖关系来探测大气温度的, 主要用于低空对流层大气温度的探测。转动拉曼散射谱线有 Stokes 和 Anti-Stokes 谱线, 由于 Stokes 谱线会受到大气中荧光信号的干扰, 因此学者通常选择 Anti-Stokes 谱线来探测大气温度。图 4 是发射激光为 354.7 nm 时的 Anti-Stokes 转动拉曼散射光谱及温度灵敏度, 可见低转动量子数的转动拉曼散射谱线强度随温度升高而降低, 而高转动量子数的转动拉曼散射谱线强度随温度升高而增强。基于转动拉曼散射谱线强度与温度之间的正负相关性, 选择

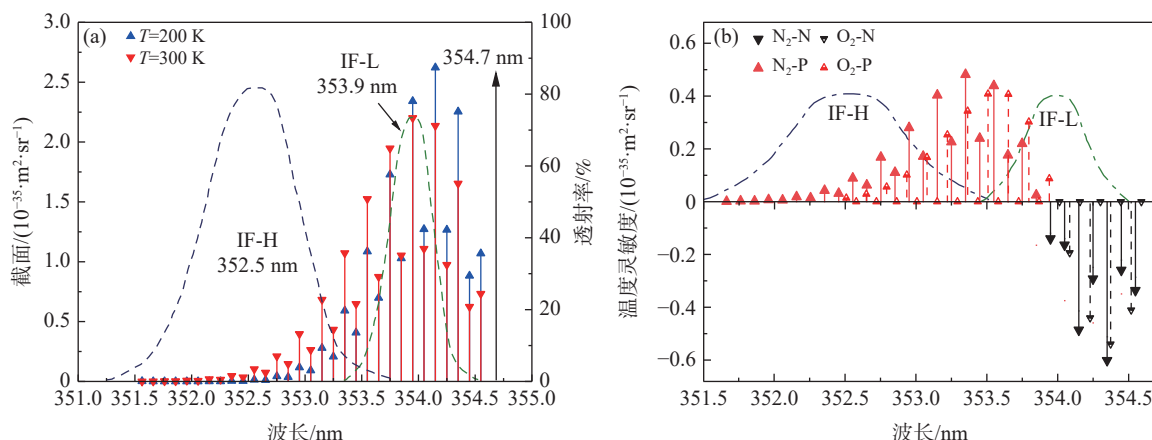


图 4 发射激光为 354.7 nm 时的 Anti-Stokes 转动拉曼散射光谱 (a) 和温度灵敏度 (b) (IF-H 和 IF-L 分别表示温高量子数和温低量子数光谱通道; P 和 N 分别表示正向和负向, 例如 N_2-N 表示 N_2 拉曼谱对应的负温度相关曲线)

Fig. 4 The (a) Anti-Stokes rotation Raman scattering spectrum and (b) temperature sensitivity for an emitted laser of 354.7 nm (IF-H and IF-L represent the spectral channels of high temperature quantum number and low temperature quantum number, respectively. P and N represent positive and negative, respectively. For example, N_2-N represents the negative temperature correlation curve corresponding to the N_2 Raman spectrum)

两个不同的温度敏感区域,如图4a中的蓝色和绿色实线包围区域,分别称为高量子数通道和低量子数通道,利用光谱分光元件对这两个区域信号进行分光,并利用高灵敏度光电探测器对转动拉曼光谱进行探测,根据高低量子数通道信号的比值可以反演得到大气温度廓线。

高、低量子数转动拉曼散射谱线的信号强度之比与温度具有相关性,且遵循玻尔兹曼分布,这是激光雷达测温的理论基础。其中,高量子数转动拉曼散射谱线的信号强度随着温度的升高而增大,低量子数转动拉曼散射谱线则相反。转动拉曼通道的信

号强度(X_i)可以用公式(2)(Li et al., 2022)来表示

$$X_i(T, z, J) = \frac{C_i}{z^2} \beta_i(T, z, J) \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(z', \lambda_e) + \alpha(z', \lambda_i)] dz' \right\} \quad (2)$$

式中, C_i 为通道的系统常数(包含激光脉冲能量、望远镜口径、光学系统效率等参数), β_i 为转动拉曼通道的后向散射系数, z 为探测高度, T 为大气温度, J 为拉曼散射谱线的转动量子数, $\alpha(z)$ 为高度 z 处的大气消光系数, λ_e 是发射激光波长, λ_i 是转动拉曼散射激光波长。

温高和温低量子数通道的回波信号比值 $R(z)$ 是与温度相关的函数,其表达式为

$$R(z) = \frac{X_h(T, z, \lambda_h)}{X_l(T, z, \lambda_l)} = \frac{C_h}{C_l} \frac{\sum_{J_{high}} [t_h \cdot \sigma_h(T, z, J)]}{\sum_{J_{low}} [t_l \cdot \sigma_l(T, z, J)]} \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(z', \lambda_h) - \alpha(z', \lambda_l)] dz' \right\} \quad (3)$$

式中, X_h 和 X_l 分别表示温高通道和温低通道的信号强度, λ_h 和 λ_l 分别表示温高通道和温低通道的中心波长, C_h 和 C_l 分别表示温高通道和温低通道的系统常数, J_{high} 、 J_{low} 分别表示温高通道和温低通道的拉曼散射谱线的转动量子数, t_h 和 t_l 分别表示温高通道和温低通道的透过率, σ_h 和 σ_l 分别表示高量子数和低量子数的转动拉曼散射截面。

转动拉曼激光雷达探测大气温度时,直接探测得到的是回波信号强度的比值,不能直接得到大气温度的真实结果,需要利用已知的大气温度廓线对测量结果进行校准和系统常数标定。通常是采用和激光雷达同址的探空气球获取的大气温度廓线数据来对激光雷达测量的大气温度廓线数据的校准常数进行标定。信号比值的校准,有多种拟合函数选择。Behrendt 和 Reichardt (2000) 用公式(4)的函数来描述大气温度随高度的依赖特性,取得了较稳定的反演结果。

$$R(z) = O(z) \exp[a + b/T'(z)] \quad (4)$$

式中, O 为重叠函数, a 和 b 为标定系数, $T' = T/300$ K。

由于转动拉曼谱线的光谱宽度相较于瑞利谱线的光谱宽度要宽很多,所以转动拉曼谱线的分光采用干涉滤光片或光栅就可以实现,系统的可实现性强,转动拉曼激光雷达技术发展迅速,国内外很多单位均有研发,大多数转动拉曼激光雷达可以实现边界层内的大气温度廓线探测,因系统参数不同,探测高度也有差异。图5为德国亥姆霍兹大学研发的转动拉曼激光雷达系统(Hammann et al., 2015),该系统采用倾斜放置的窄带滤光片实现温高通道和温低通

道光谱的分离,进而实现大气温度的探测,图5a给出光学系统结构原理图,图5b给出该雷达系统的连续观测数据。国内武汉大学(Pan et al., 2020)、西安理工大学(王玉峰等, 2015)、安徽合肥物质研究院(尚震等, 2017)等单位均对转动拉曼激光雷达探测大气温度进行了长期的研究,并且研发了性能良好的温湿度激光雷达系统,在这些转动拉曼激光雷达系统中大多采用窄带滤波器实现光谱分离,也有部分系统采用光栅来实现光谱分光。

转动拉曼激光雷达是实现长时间序列大气温度廓线探测的有效手段,探测结果的稳定性和可靠性取决于激光雷达系统的稳定性(Totems et al., 2021)。西北太平洋国家实验室曾经对拉曼激光雷达系统探测大气温度的长时间稳定性进行了研究和分析,图6是该激光雷达系统在2009年到2010年探测到的4不同月份的位温观测数据(Newsom et al., 2013),图6a、b分别为2009年1月、6月数据,图6c、d分别为2010年4月、10月数据,可见在0—10 km范围内,若全程出现空白区域,表明激光雷达未工作;在某些高度上出现空白,是因为激光遇到云层后无法穿透。在晴朗无云的情况下,该雷达系统能够实现对0—10 km范围内连续且稳定的探测。根据激光雷达与探空的位温数据比对结果,在低空处的标准偏差为1 K,标准偏差随高度增加而变大,在8 km以上的标准偏差达3 K,最大可达6 K。同时发现激光雷达的标定常数呈现一定的日变化特征,这是由于激光雷达在白天探测时受到背景噪声的影响,标定常数与背景噪声之间存在较为明显的相关特征。上述研究说明转动拉曼激光雷达具有长期连续开展大气

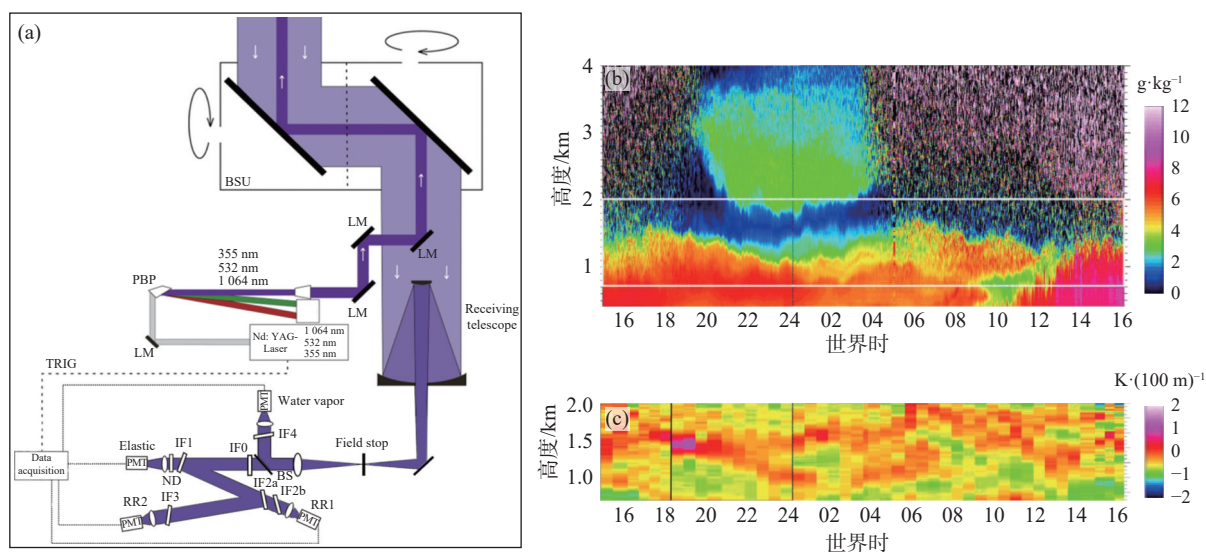


图 5 德国亥姆霍兹大学研发的转动拉曼激光雷达系统结构原理图 (a) 及其连续观测的水汽混合比 (b) 和温度梯度 (c) (引自 Hammann et al., 2015)

Fig. 5 The (a) structural schematic diagram of Rotating Raman lidar system, (b) its continuous observation of water vapor mixing ratio, and (c) temperature gradient developed at Helmholtz University, Germany (Adapted from Hammann et al., 2015)

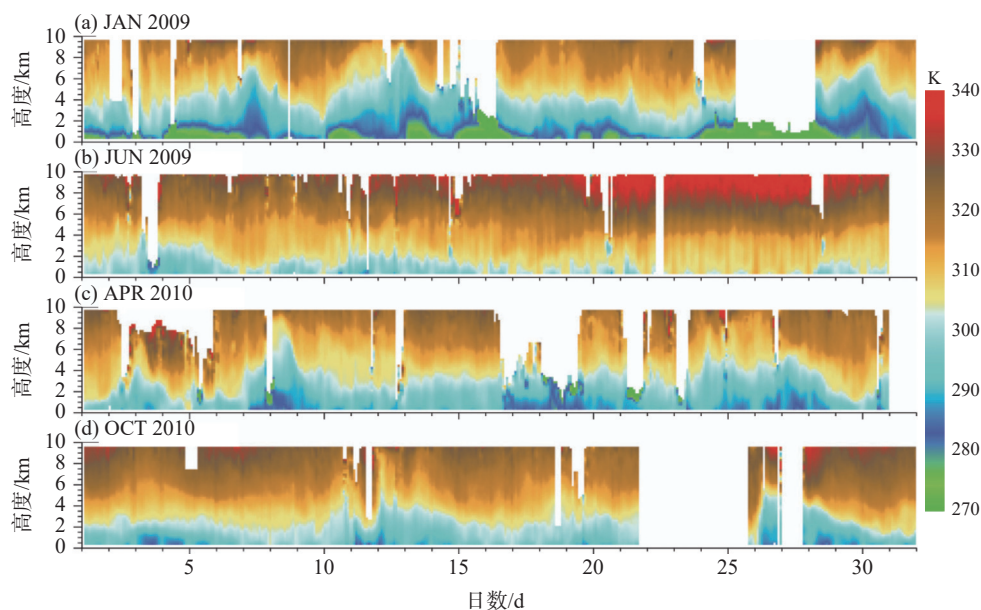


图 6 美国西北太平洋国家实验室转动拉曼激光雷达 2009 年、2010 年观测的 4 个月位温观测数据 (引自 Newsom et al., 2013)

Fig. 6 The 4-month potential temperature observation data measured by rotational Raman lidar at the Pacific Northwest National Laboratory, USA at 2009 and 2010 (Adapted from Newsom et al., 2013)

温度廓线探测的潜力,但遇到云层时,转动拉曼激光雷达的探测能力受限。

2.3 有云条件下的探测与反演技术

无论是瑞利高光谱分辨率激光雷达还是转动拉曼激光雷达,当激光遇到云层或气溶胶时会产生强烈的米散射,这些米散射信号如果混叠进探测信号中,会给大气温度的探测带来很大误差。因此,在大气温度探测激光雷达的设计中,为减小系统误差需要有效抑制米散射信号。通常要实现在厚云层中强烈米散射信号的剔除,需要温度通道的抑

制率能够达到 10^{-8} ,这对于瑞利高光谱分辨率激光雷达来说很困难,因此瑞利高光谱分辨率激光雷达更适用于晴朗天空情况下的大气温度廓线探测。转动拉曼激光雷达更容易实现云层和雾霾层大气温度的探测。

为了探测在有云或有雾霾情况下大气温度廓线,学者从硬件和算法的角度进行了研究。如, Behrendt 和 Reichardt (2000) 基于 532 nm 波段的激光器研发了一台纯转动拉曼温度测量系统,发现大于 70 dB 的弹性散射抑制比适合在薄云的条件下进行

大气温度测量。再如, Behrendt 和 Reichardt (2000) 设计了一套理论弹性散射抑制比高达 10^{-12} 的转动拉曼分光系统, 可实现后向散射比小于 60 的云层温度探测。当弹性散射抑制比足够高并且信噪比足够时, 转动拉曼激光雷达可以准确测量云层内温度。但很多转动拉曼激光雷达分光系统的抑制比不足, 以最常用的 354.7 nm 发射激光为例, 在反斯托克斯光谱中, 因分子转动而产生的高、低量子的拉曼光谱, 其中心波长和弹性散射光相比, 波长上的差异较小, 高量子数通道的光谱间隔仅为 0.6~0.9 nm, 利用窄带滤波器实现 10^{-8} 的米散射信号抑制具有很强挑

战性。Su 等 (2013) 提出了一种基于弹性散射回波信号的矫正方法, 可一定程度上矫正云内温度, 但该矫正过程复杂, 且校正系数太过灵敏, 容易出现过矫正的情况, 且需假定条件, 西安理工大学李启蒙和狄慧鸽 (Li et al., 2022, 2023) 等提出利用振动和转动拉曼相结合的方案探测薄云层中温度, 同时还提出采用实测的气溶胶回波信号与转动拉曼信号之间建立拟合函数来实现云层内温度的高精度矫正。图 7 和图 8 分别为西安理工大学研发的振动+转动拉曼激光雷达系统原理图和该雷达系统探测的云层温度及校正前后结果。

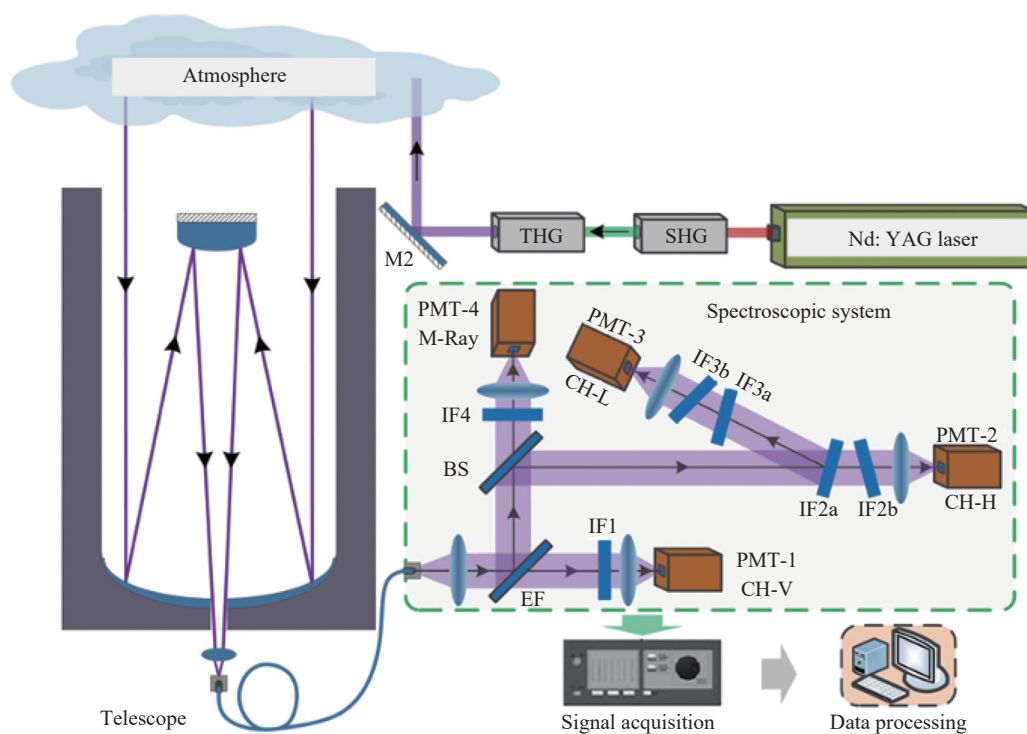


图 7 西安理工大学研发的振动+转动拉曼激光雷达系统原理图 (引自 Li et al., 2022)

Fig. 7 Schematic diagram of the vibrating + rotating Raman lidar system developed by Xi'an University of Science and Technology

(Adapted from Li et al., 2022)

3 激光雷达结合微波辐射计的大气温度廓线无球探测技术

无球大气探测技术一直是气象及遥感人追求的梦想。从微波、毫米波到激光雷达, 探测机理均不相同, 不同探测机理的仪器在实际使用中也存在一定的局限性。利用综合观测平台通过协同观测和数据融合是实现无球大气探测技术有效可行的方法。

激光雷达作为一种主动遥感仪器, 具有高精度、高时空分辨率、能反演逆温细节的优势, 但是由于工作波长短, 数据质量易受大气状态的影响。微波辐射计具有较强的全天候工作能力, 但由于多通道微

波辐射计所有通道的反演权重函数从地面到高空均呈单调递减的形式, 信息量有限, 导致其反演精度和空间分辨率较低。近些年学者提出建立微波辐射计和激光雷达的联合平台, 研究微波辐射计与激光雷达的融合技术, 实现其优势互补。西安理工大学激光遥感技术团队在该方面开展了研究 (刘晶晶等, 2021)。该技术的主要思路是利用激光雷达获取晴空条件下的高时空分辨率温湿度时空剖面代替无线电探空仪作为微波辐射计反演的初值, 通过数据融合和相互校正, 得到两种仪器数据融合后的大气温度廓线数据。图 9 为激光雷达、微波辐射计和两者数

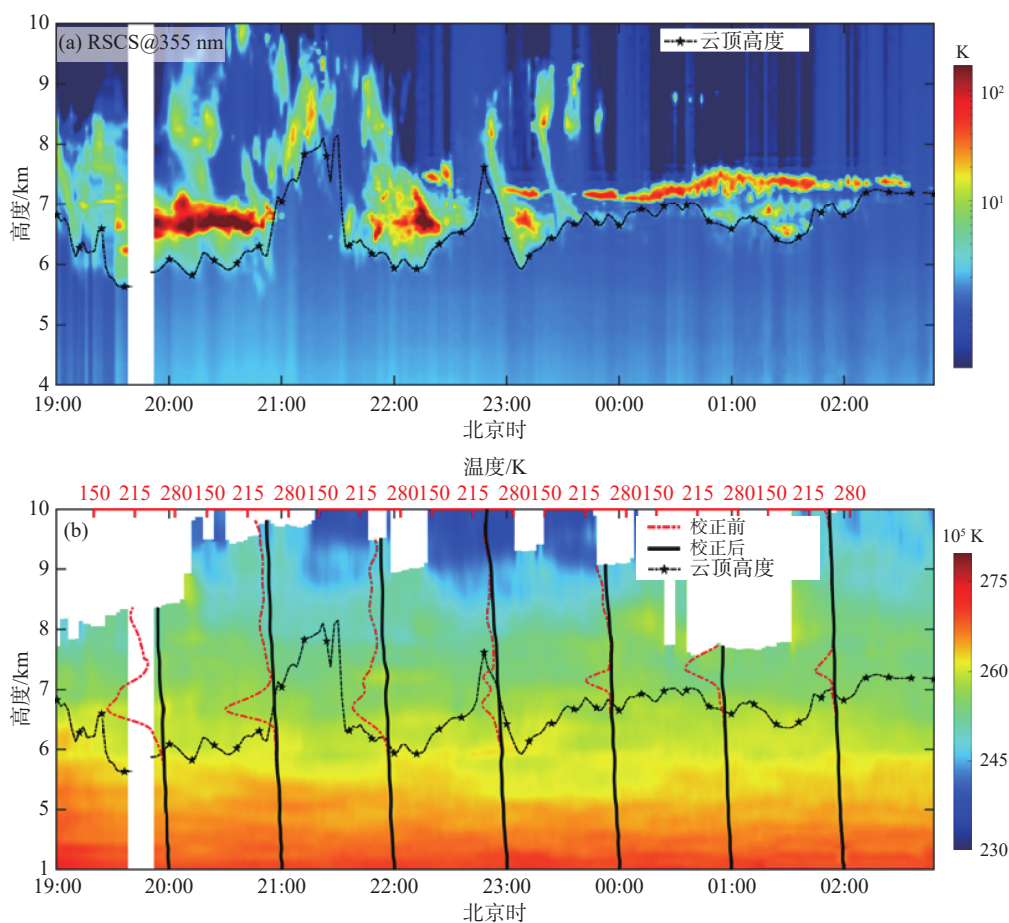


图 8 振动+转动拉曼激光雷达在西安探测的 2022 年 9 月 29 日云底高度和云层温度 (a) 及校正前后结果 (b) (引自 Li et al., 2023)

Fig. 8 The (a) cloud base height and cloud temperature detected using vibrating + rotating Raman lidar and (b) results before and after correction in Xi'an on September 29, 2022 (Adapted from Li et al., 2023)

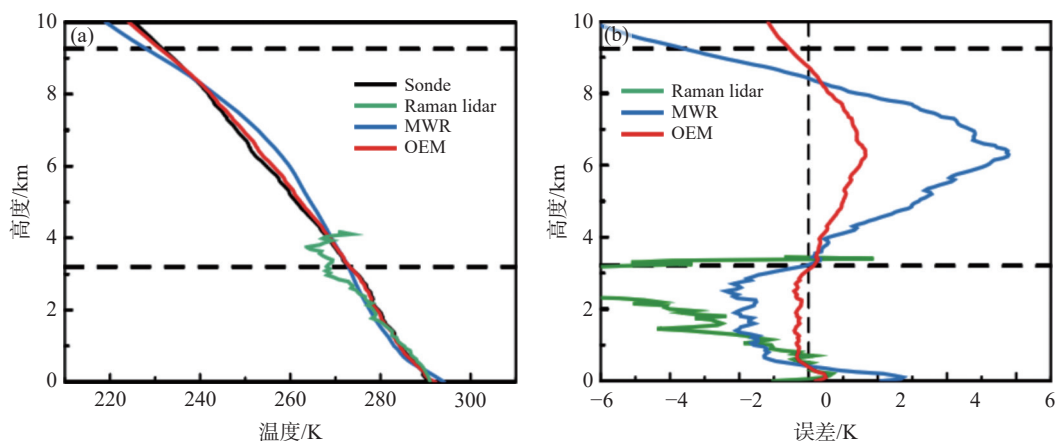


图 9 探空数据 (Sonde)、激光雷达 (Raman lidar)、微波辐射计 (MWR) 和两者数据融合后 (OEM) 的大气温度廓线 (a) 及其与探空数据 (Sonde) 的比对结果 (b) (引自徐梓翔, 2021)

Fig. 9 The (a) sounding data (Sonde), atmospheric temperature profiles from laser radar (Raman lidar), microwave radiometer (MWR), and their data fusion (OEM), and (b) their comparison results with sounding data (Sonde) (Adapted from Xu, 2021)

据融合后的大气温度廓线及其与探空数据的比对情况, 可见激光雷达探测高度较低 (图 9a 中绿色线), 但是垂直分辨率较高; 微波辐射计可以探测到 0—10 km 高度的大气温度廓线, 但是偏差大, 垂直分辨率低;

两者融合后的大气温度廓线与探空数据相比, 精度提升明显。图 10 为采用三种方法获得的连续大气温度廓线探测结果, 转动拉曼激光雷达由于穿透性较差, 故有效数据主要在云底以下区域 (图 10a); 微波辐

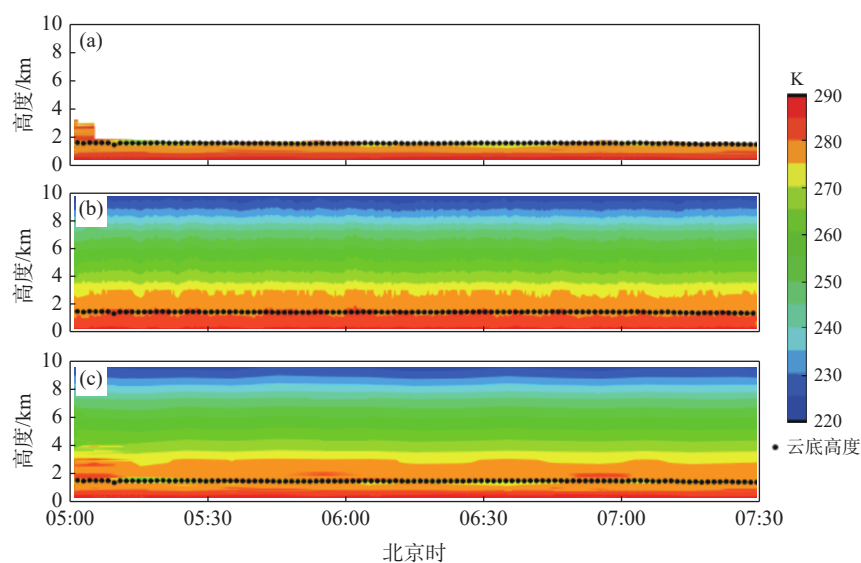


图 10 转动拉曼激光雷达 (a)、微波辐射计 (b) 和二者数据融合 (c) 获得的连续大气温度廓线 (引自徐梓翔, 2021)

Fig. 10 Continuous atmospheric temperature profiles obtained by (a) rotating Raman lidar, (b) microwave radiometer, and (c) data fusion of the two datasets (Adapted from Xu, 2021)

射计的探测结果未反映出大气中逆温现象 (图 10b); 两者的融合数据优化了单种仪器的探测结果, 且在融合结果中可看出大气中的逆温层。

激光雷达和微波辐射计融合后的大气温度廓线数据, 相比单种仪器的探测结果, 精度和数据分辨率均有明显提升。学者可充分利用不同探测仪器的优势, 实现大气温度的高精度探测。该方法不仅适用于大气温度廓线的获得, 还同样地适用于水汽廓线的反演。

4 展 望

大气温度廓线的探测技术日新月异, 将大气温度的遥感探测数据应用到数值天气预报中, 提升天气预报的准确度是当前学者亟需实现的应用目标, 发展可靠且稳定的对流层大气温度廓线遥感探测技术刻不容缓。目前我国正在大力推进新型地基遥感探测仪器建设和业务应用体系, 大气温度廓线的体系建设尚不理想。转动拉曼激光雷达技术日趋成熟, 是最有希望应用到业务应用体系的探测技术, 理论上大气温度探测精度可以达到很高, 但受信号能量衰减及系统不稳定等因素影响, 转动拉曼激光雷达在长时间连续观测时存在大气温度漂移现象, 需要发展实时自动校准技术。

激光雷达和微波辐射计主被动遥感技术的结合可使两类仪器的数据互补和互校, 是实现对流层高空分辨率大气温度探测的有效技术手段。这两类仪器的融合产品将会更多地应用到各种气象场景中, 特别是在边界层内大气温度廓线垂直结构遥感

和云层内温度场的高精度遥感, 这些数据的获得对于环境预警及气象预报的提升具有重要意义, 且对研究分析云/降雨发展变化及云与气溶胶相互作用具有重要价值。两类仪器有机融合不仅可获得全天候、连续、高分辨率大气温度廓线, 更能探测路径气柱上的水汽和液态水总量信息, 该技术将极大地提高激光雷达和微波辐射计反演大气温湿度结果的实时性和可靠性, 大大丰富大气参数数据, 获得精细的大气结构观测资料, 为天气预报、数值模拟、大气环流分析、人工影响天气等科研业务提供重要的观测数据, 而这也正是目前其他方法难以提供的。

在大气温度廓线的全天候探测上, 差分吸收激光雷达也是未来发展的重要方向, 差分吸收激光雷达可直接探测大气米散射和瑞利散射信号, 其信噪比远优于拉曼激光雷达, 更容易实现白天测量; 同时, 反演大气温度廓线主要依赖于氧气分子的吸收截面信息, 一般无需借助其他标定手段, 就可减轻实际应用时的负担。如能突破激光光源波长、光谱特性对温度差分吸收雷达的制约, 克服分子散射多普勒展宽的干扰, 差分吸收激光雷达测温将有望成为大气温度探测的理想手段。

当前激光雷达探测大气温度廓线的时间分辨率是分钟量级, 空间分辨率基本上是米级, 相比其它遥感方式, 激光雷达探测数据的时空分辨率和精度是最高的, 但对研究微观和快速变化的大气变化过程, 这个时空分辨率依然不足, 学者需要更精细的时间尺度 (秒级) 和空间尺度 (厘米或毫米量级) 的探测技术, 以便能更细致地表征大气物理化学变化过程。

致谢: 西安理工大学机械与精密仪器工程学院研究生孙佳对本文内容和参考文献格式进行了修订, 谨致谢忱!

参考文献 (References):

- 常启海. 2005. 武汉上空中层大气的瑞利激光雷达观测与研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉物理与数学研究所). Chang Q H. 2005. Rayleigh lidar observations and studies of the middle atmosphere over Wuhan [D]. Wuhan: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences. Wuhan Institute of Physics and Mathematics (in Chinese)
- 傅云飞. 2018. 云-降水遥感研究现状及夏季东亚云-降水研究思考[J]. *暴雨灾害*, 37(6): 493–501. Fu Y F. 2018. Research actuality of remote sensing on cloud precipitation and reflections on summer East Asian cloud precipitation [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 37(6): 493–501 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2018-146
- 傅云飞. 2021. 洋面云液态水的星载被动微波仪器遥感反演研究进展[J]. *暴雨灾害*, 40(3): 217–230. Fu Y F. 2021. Research progress on retrieval algorithms of cloud liquid water over ocean based on remote sensing by satellite-borne passive microwave instruments [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 40(3): 217–230 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.001
- 官莉, 刘畅, 张雪慧. 2010. 人工神经网络算法在红外高光谱资料反演大气温度廓线中的应用[J]. *大气科学学报*, 33(3): 341–346. Guan L, Liu Y, Zhang X H. 2010. Application of artificial neural network algorithm in retrieving atmospheric temperature profiles from hyperspectral infrared data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 33(3): 341–346 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2010.03.011
- 李虎, 王建宇, 洪光烈, 等. 2021. 激光掩星探测大气温压反演方法的仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 58(3): 99–107. Li H, Wang J Y, Hong G L, et al. 2021. Simulation analysis of inversion method of atmospheric temperature and pressure for laser occultation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 58(3): 99–107 (in Chinese). doi:10.3788/LOP202158.0301002
- 李亚娟. 2016. 纯转动拉曼-瑞利激光雷达中低空大气温度探测研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所. Li Y J. 2016. Temperature measurements in Mid-Lower atmosphere based on pure rotational Raman-Rayleigh lidar [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics Chinese Academy of Sciences (in Chinese)
- 刘晶晶, 李开良, 徐梓翔, 等. 2021. 偏振高光谱激光雷达和微波辐射计的大气温度探测和融合算法研究[J]. *光子学报*, 50(7): 203–211. Liu J J, Li K L, Xu Z X, et al. 2021. Atmosphere temperature profiling and a fusion algorithm based on polarization HSRL and MWR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 50(7): 203–211 (in Chinese). doi:10.3788/J.ISSN.1004-4213.210052
- 柳靖, 唐晓凡, 夏君集, 等. 2024. 青藏高原东坡大气边界层高度变化观测研究[J]. *高原山地气象研究*, 44(2): 32–39. Liu J, Tang X F, Xia J J, et al. 2024. Variation of the atmospheric boundary layer height at the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 44(2): 32–39 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.02.004
- 刘延文, 孙学金, 张传亮, 等. 2019. 基于 Fizeau 干涉仪的激光雷达测温方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 39(10): 3302–3307. Liu Y W, Sun X J, Zhang C L, et al. 2019. Research on lidar temperature measurement method based on Fizeau interferometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(10): 3302–3307 (in Chinese). doi:10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-3302-06
- 尚震, 谢晨波, 王邦新, 等. 2017. 纯转动拉曼激光雷达探测北京地区近地面大气温度[J]. *红外与激光工程*, 46(10): 126–133. Shang Z, Xie C B, Wang B X, et al. 2017. Pure rotational Raman lidar measurements of atmospheric temperature near ground in Beijing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 46(10): 126–133 (in Chinese). doi:10.3788/IRLA201746.1030001
- 汪丽, 崔新月, 索建平, 等. 2022. 空气温度绝对探测激光雷达系统标定技术[J]. *光学学报*, 42(18): 128–135. Wang L, Cui X Y, Suo J P, et al. 2022. Calibration technology of lidar system for air temperature absolute detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 42(18): 128–135 (in Chinese). doi:10.3788/AOS202242.1828001
- 王振会, 李青, 楚艳丽, 等. 2014. 地基微波辐射计工作环境对 K 波段亮温观测影响[J]. *应用气象学报*, 25(6): 711–721. Wang Z H, Li Q, Chu Y L, et al. 2014. Environmental thermal radiation interference on atmospheric brightness temperature measurement with ground-based K-band microwave radiometer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 25(6): 711–721 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20140607
- 王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 2015. 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*, 35(3): 378–387. Wang Y F, Gao F, Zhu C X, et al. 2015. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height [J]. *Acta Optica Sinica*, 35(3): 378–387 (in Chinese). doi:10.3788/AOS201535.0328004
- 吴永华, 李陶, 周军. 2002. Raman 激光雷达探测对流层中上部大气温度分布[J]. *大气科学*, 26(5): 702–708. Wu Y H, Li T, Zhou J. 2002. Raman lidar measured temperature profiles in the mid- and upper troposphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 26(5): 702–708 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.11
- 徐桂荣, 王晓芳, 万蓉, 等. 2024. 青藏高原东侧九龙夏季非降水云的观测特征[J]. *暴雨灾害*, 43(2): 135–145. Xu G R, Wang X F, Wan R, et al. 2024. Observational characteristics of summer non-precipitating clouds in Jiulong on the east side of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(2): 135–145 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-148
- 徐梓翔. 2021. 云天高精度大气温湿度廓线的反演及应用[M]. 西安: 西安理工大学. Xu Z X. 2021. Inversion and application of high-precision temperature and humidity profile under cloudy conditions [M]. Xi'an: Xi'an University of Technology (in Chinese)
- 叶笃正. 1977. 探空资料的应用 (一)[J]. *气象*, 11: 5–7. Ye D Z. 1977. Applications of sounding data (I) [J]. *Meteorological Monthly*, 11: 5–7 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1977.11.004
- 游然, 谷松岩, 郭阳, 等. 2013. 风云三号卫星微波温度计的在轨性能长期稳定性分析[J]. *气象科技进展*, 3(4): 13–17. You R, Gu S Y, Guo Y, et al. 2013. Long-term calibration and accuracy assessment of the FY-3 microwave temperature sounder radiance measurements [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3(4): 13–17 (in Chinese)
- 张朝林, 范水勇, 仲跻芹. 2005. “00.7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估[J]. *气象学报*, 63(6): 922–932. Zhang C L, Fan S Y, Zhong J Q. 2005. Numerical assessing experiments on the individual

- components impact of the meteorological observation network on the “00.7” torrential rain in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 63(6):922–932 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2005.088
- 张建伟, 王根, 张华, 等. 2011. 基于主成分累加影响系数法的高光谱大气红外探测器的通道选择试验[J]. *大气科学学报*, 34(1):36–42. Zhang J W, Wang G, Zhang H, et al. 2011. Experiment on hyper-spectral atmospheric infrared sounder channel selection based on the cumulative effect coefficient of principal component [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 34(1):36–42 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2011.01.005
- 张明, 徐桂荣, 杜裕, 等. 2024. 三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨[J]. *暴雨灾害*, 43(5):587–597. Zhang M, Xu G R, Du Y, et al. 2024. Error analysis and correction method of temperature and humidity profiles in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(5):587–597 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–199
- 张志华, 王鑫, 吕达仁. 2022. LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线研究进展[J]. *遥测遥控*, 43(1):1–12. Zhang Z H, Wang X, Lv D R. 2022. Progress of temperature and water vapor profiles detected by LEO-LEO microwave occultation [J]. *Journal of Telemetry Tracking and Command*, 43(1):1–12 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002–6931.2022.01.001
- Behrendt A, Reichardt J. 2000. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator [J]. *Applied Optics*, 39(9):1372–1378. doi:10.1364/AO.39.001372
- Bösenberg J. 1998. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor and temperature profiling: methodology [J]. *Applied Optics*, 37:3845–3860. doi:10.1364/AO.37.003825
- Cooney J. 1972. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 11(1):108–112. doi:10.1175/1520–0450(1972)011<0108:MOA TPB>2.0.CO;2
- Fong W, Lu X, Chu X, et al. 2014. Winter temperature tides from 30 to 110 km at McMurdo (77.8°S, 166.7°E), Antarctica: Lidar observations and comparisons with WAM [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6):2846–2863. doi:10.1002/2013JD020784
- Hammann E, Behrendt A, Le Mounier F, et al. 2015. Temperature profiling of the atmospheric boundary layer with rotational Raman lidar during the HD (CP)² Observational Prototype Experiment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(5):2867–2881. doi:10.5194/acp–15–2867–2015
- Hua D X, Uchida M, Kobayashi T. 2004. Ultraviolet high-spectral-resolution Rayleigh–Mie lidar with a dual-pass Fabry–Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere [J]. *Optics Letters*, 29(10):1063–1065. doi:10.1364/OL.29.001063
- Hua D X, Uchida M, Kobayashi T. 2005. Ultraviolet Rayleigh–Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry–Perot etalons for temperature profiling of the troposphere [J]. *Applied Optics*, 44(7):1305–1314. doi:10.1364/AO.44.001305
- Li Q M, Di H G, Hua D X, et al. 2022. Temperature measurement of cloud or haze layers based on Raman rotational and vibrational spectra [J]. *Optics Express*, 30(13):23124–23137. doi:10.1364/OE.457665
- Li Q M, Di H G, Chen N et al. 2023. Correction method for temperature measurements inside clouds using rotational Raman lidar [J]. *Optics Express*, 31(26):44088–44101. doi:10.1364/OE.487369
- Newsom R K, Turner D D, Goldsmith J E M. 2013. Long-term evaluation of temperature profiles measured by an operational Raman lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(8):1616–1634. doi:10.1175/JTECH-D-12–00138.1
- Pan X L, Yi F, Liu F C, et al. 2020. Diurnal temperature variations in the lower troposphere as measured by an all-day-operational pure rotational Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 59(28):8688–8696. doi:10.1364/AO.399563
- Su J, McCormick M P, Wu Y, et al. 2013. Cloud temperature measurement using rotational Raman lidar [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 125:45–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.04.007
- Totems J, Chazette P, Baron A. 2021. Mitigation of bias sources for atmospheric temperature and humidity in the mobile Raman Weather and Aerosol Lidar (WALI) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(12):7525–7544. doi:10.5194/amt–14–7525–2021
- Witschas B, Lemmerz C, Reitebuch O. 2014. Daytime measurements of atmospheric temperature profiles (2–15 km) by lidar utilizing Rayleigh–Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 39(7):1972–1975. doi:10.1364/OL.39.001972
- Xia H Y, Dou X K, Shangguan M, et al. 2014. Stratospheric temperature measurement with scanning Fabry–Perot interferometer for wind retrieval from mobile Rayleigh Doppler lidar [J]. *Optics express*, 22(18):21775–21789. doi:10.1364/oe.22.021775
- Xu J, Witschas B, Kableka P, et al. 2021. High-spectral-resolution lidar for measuring tropospheric temperature profiles by means of Rayleigh–Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 46(13):3320–3323. doi:10.1364/OL.424526
- Yuan Y, Di H G, Liu Y Y et al. 2022a. Confidence and error analyses of the radiosonde and ka-wavelength cloud radar for detecting the cloud vertical structure [J]. *Remote Sensing*, 14:4462. doi:10.3390/rs14184462
- Yuan Y, Di H G, Liu Y Y, et al. 2022b. Detection and analysis of cloud boundary in Xi'an, China, employing 35 GHz cloud radar aided by 1064 nm lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15:4989–5006. doi:10.5194/amt–15–4989–2022
- Zhang J Q, Zheng Y T, Li Z Q, et al. 2020. A 17-year climatology of temperature inversions above clouds over the ARM SGP site: The roles of cloud radiative effects [J]. *Atmospheric Research*, 237:104810. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104810