

夏季格尔木中间层大气温度探测初步分析

鱼 艇^{1,2,3}, 潘蔚琳², 朱克云¹, 乔 帅², 杨海龙³

- (1. 成都信息工程大学 大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;
2. 中国科学院大气物理研究所 中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;
3. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 济源 459000)

摘 要: 中间层大气温度及时空演变特征对研究青藏高原中高层大气动力、热力学结构具有重要的科学意义。利用大气物理研究所设计建造的 MARMOT 激光雷达对青藏高原地区中层大气温度进行探测。介绍了 MARMOT 激光雷达的瑞利测温原理、系统构成及主要功能参数; 并利用格尔木夏季大气温度的激光雷达探测资料分析该地区中间层大气温度, 并与 MSIS-00 大气模式和 SABER 卫星数据进行对比分析, 获得了夏季格尔木地区中间层大气温度的初步结果, 并对激光雷达的温度数据进行验证。结果表明: MARMOT 激光雷达探测温度与 MSIS-00 模式和 SABER 卫星结果整体上均具有较好的一致性; 在上中间层和低中间层, 激光雷达均比 MSIS-00 模式值、SABER 卫星数据偏高; 在中中间层, 激光雷达与卫星数据均略低于模式值。

关键词: 大气探测; 瑞利激光雷达; 中间层; 大气温度

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1211005

Preliminary analysis of mesospheric summer temperature measurements in Golmud

Yu Ting^{1,2,3}, Pan Weilin², Zhu Keyun¹, Qiao Shuai², Yang Hailong³

- (1. College of Atmospheric Sciences Plateau, Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Jiyuan 459000, China)

Abstract: The mesospheric thermal structure and temperature variations have an important scientific significance in the research of dynamic and thermal process in the middle atmosphere. The middle atmosphere temperature over the Qinghai-Tibet Plateau was measured by the Middle Atmosphere Remote Mobile Observatory in Tibet (MARMOT) lidar, which was designed and built by the Institute of Atmospheric Physics(IAP). The measurement principle, the system configuration, and the specifications of the MARMOT lidar were introduced. The middle atmospheric temperatures in summer at Golmud were analyzed using the lidar data, and the initial results of middle atmospheric temperatures were obtained. By

收稿日期: 2016-04-15; 修订日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(41127901)

作者简介: 鱼艇(1988-), 男, 硕士生, 主要从事大气物理与大气环境方面的研究。Email: 505862137@qq.com

导师简介: 潘蔚琳(1973-), 女, 研究员, 博士, 主要从事中高层大气主、被动光学遥感探测系统方面的研究。

Email: panweilin@mail.iap.ac.cn

comparing with both the MSIS-00 model data and the TIMED/SABER satellite data, the results showed that the MARMOT lidar results have a good consistency with the MSIS-00 model and the TIMED/SABER satellite results in general. In the upper and lower mesosphere, the temperatures retrieved from lidar are higher than the MSIS-00 model results and the TIMED/SABER satellite results. In the mid-mesosphere, the lidar data and the satellite data are slightly lower than model results.

Key words: atmospheric sounding; Rayleigh lidar; mesosphere; atmospheric temperature

0 引言

大气温度是描述大气热力结构和动力结构、天气分析与预报及气候环境研究中的重要气象参数之一。同时,大气温度对研究大气的稳定性和动力学特征具有重要意义。中间层大气对人类的生存、发展有着重要的作用。因此,对中间层大气温度的有效监测具有十分重要的科学意义^[1]。

格尔木(36.25°N, 94.54°E)地处青藏高原北部,海拔高度约 2 800 m。青藏高原是世界平均海拔最高的高原,素有“世界屋脊”之称,由于其复杂的地形和独特的气候特点被称为“地球第三极”,对中国以及东亚大气环流乃至全球气候变化都有重要的影响,因此备受科学家的关注。近年来,关于青藏高原大气研究已取得一些重要成果^[2-3]。然而,受多种技术条件的限制,前人对青藏高原大气温度的研究大多限于利用地面观测资料、探空资料以及再分析资料等对对流层及下平流层大气温度的研究,而对于青藏高原上空中间层大气温度的研究却鲜有报道。探空气球和飞机等常规手段受其探测高度的限制,火箭探测数据可靠准确,但它只能获取一个时间的垂直廓线,且成本昂贵,不适合连续观测。卫星遥感的时空分辨率比较低,无法获得短期变化数据。激光雷达的出现刚好弥补了上述探测手段的不足。

瑞利激光雷达具有较高的时间分辨率和空间分辨率,并且能够在夜间晴空条件下对中层大气进行连续观测,有助于实现对中层大气热力结构、动力结构及其演变特征等方面的深入研究^[4-5]。近些年,国内外在激光雷达探测方面都有研究。Gardner^[6-7]等利用瑞利和钠荧光激光雷达探测中层大气温度和风场。Gardner^[8]和 Pan^[9]等利用瑞利和铁荧光激光雷达在南、北极上空进行了中层大气温度的探测。胡欢陵、吴永华^[10]等利用 L625 型的 355 nm 和 532 nm 双

通道瑞利散射激光雷达,探测了合肥地区 30~43 km 高度范围内的大气密度和温度分布。田力^[11]等利用瑞利激光雷达对南京地区平流层温度反演。乔帅^[12]等利用 MARMOT 瑞利激光雷达获取了拉萨上空中层大气温度廓线的初步结果,填补了青藏高原中层大气激光雷达探测的空白。

文中主要介绍了 MARMOT 激光雷达测量原理、系统结构及功能参数,并利用其在格尔木的夏季探测资料分析该地区中间层大气温度,并与 MSIS-00 大气模式和 TIMED/SABER 卫星数据进行对比分析,获得了格尔木地区中间层大气温度的初步探测结果。

1 激光雷达测量原理

瑞利激光雷达是利用瑞利散射机制对高度在 30 km 以上的中层大气的密度、温度进行探测。在 30 km 以下的高度,由于气溶胶的存在,使得气溶胶的米散射信号叠加在大气分子的瑞利散射信号之上,因此瑞利散射激光雷达不适用于该高度范围的大气温度测量。而对于 30 km 以上的大气,可以忽略气溶胶粒子的存在,近似认为大气回波信号主要是分子瑞利散射信号。

瑞利激光雷达方程表示为:

$$N(z) = (\eta T_A^2 E(z)^2) \left(\frac{P_L \Delta t}{hc/\lambda} \right) (\sigma_{\text{eff}} \rho(z) \Delta z) \left(\frac{A_R}{4\pi z^2} \right) + N_B \quad (1)$$

式中: $N(z)$ 为激光雷达接收到的光子数; z 为距离; η 为系统效率; T_A 为大气单程透过率; E 为被测成分消光比,对于瑞利激光雷达: $E=1$; P_L 为激光发射功率; Δt 为时间分辨率; h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为激光波长; Δz 为高度分辨率; σ_{eff} 为后向散射截面; $\rho(z)$ 为被测成分的数密度; A_R 为接收望远镜面积; N_B 为噪声。

假设已知某一高度 z_0 的大气密度,利用公式(1)可求得大气密度廓线:

$$\rho(z) = \frac{z^2 \rho(z_0)(N(z) - N_B)}{z_0^2 (N(z) - N_B)} \quad (2)$$

式中： $N(z)$ 和 $N(z_0)$ 分别为对应高度上的回波光子数； $\rho(z)$ 和 $\rho(z_0)$ 为对应高度上的大气分子密度； N_B 为背景噪声。

再结合理想气体状态方程和大气静力学方程可以反演得到大气温度反演公式：

$$T(z) = T(z_0) \frac{\rho(z_0)}{\rho(z)} + \frac{1}{R} \int_z^{z_0} g(r) dr \frac{\rho(r)}{\rho(z)} \quad (3)$$

式中： $T(z)$ 和 $\rho(z)$ 分别为待求高度的大气温度值和大气密度值； $T(z_0)$ 和 $\rho(z_0)$ 分别为参考点 z_0 高度的大气温度值和大气密度值； R 为摩尔气体常数， $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

瑞利激光雷达是获得中层大气温度的有效方法之一。在对大气温度的反演过程中，参考高度 z_0 的选取对反演结果有着重要的影响。文中在进行反演的过程中，根据实际的瑞利雷达回波情况，使用MSIS-00大气模式值作为参考，并且参考点的选取标准则设为在该高度及以下激光雷达所测的大气密度相对误差小于10%。

2 数据说明

2.1 MARMOT 激光雷达系统

MARMOT 激光雷达系统基本构造如图 1 所示，由激光发射单元、光学接收单元、信号采集与控制单元三部分构成^[12]。

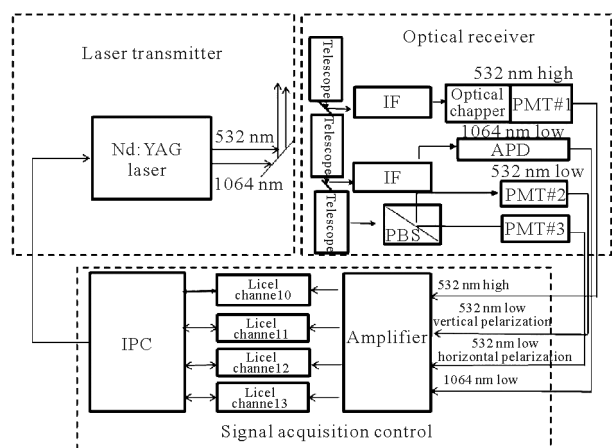


图 1 MARMOT 激光雷达系统基本构造

Fig.1 Configuration of the MARMOT lidar system

激光发射单元的 Nd:YAG 激光器向天顶方向发出波长为 532 nm 的激光。大口径(1 m)主焦点望远

镜接收经光斩波器屏蔽掉低空(50 km 以下)信号的高空(50~90 km)回波信号。光学接收单元的光电倍增管受到低空强光照射后，会产生所谓的“强光感生噪声”现象，该噪声的衰减时间常数一般在百微秒量级^[13]。利用斩波器斩去 50 km 以下的大气回波信号，避免了因低空信号过强而造成的光电倍增管饱和现象，从而提升激光雷达的探测精度。

而对于 60 km 以下回波信号，则利用小口径牛顿式望远镜进行接收。在实验过程中，高空信号所覆盖的高度范围可达 50~90 km，低空信号的高度范围可达 30~60 km。这样，可获得 30~90 km 连续的大气分子瑞利散射信号。表 1 给出了该激光雷达系统参数。

表 1 MARMOT 激光雷达系统参数

Tab.1 Specifications of the MARMOT lidar system

Specifications	Value
Wavelength	532 nm
Pulse energy	550 mJ
Repetition rate	30 Hz
Pulse width	~8 ns
Telescope type	Prime focus
Telescope diameter	1 000 mm
Field of view	0.7 mrad
Vertical resolution	30 m
Temporal resolution	1 min

2.2 NRLMSIS-00 模式

NRLMSIS (Mass Spectrometer and Incoherent Scatter empirical model, 以下简称 MSIS-00)是质谱非相干散射经验高层大气模式，最初基于卫星上质谱计所测得的成分资料和地面非相干散射雷达测得的温度资料而建立。目前 MSIS-00 是该模式的最新版本，是由 Picone^[14]等在 MSISE-90 模型基础上设计开发的全球大气经验模型，描述了从地面到热层高度范围内(0~1 000 km)的中性大气密度、温度等大气物理性质，MSIS 模式是当前国际上较为广泛使用的中层大气经验模式。

2.3 TIMED/SABER 卫星

美国宇航局 2001 年 12 月 7 日发射的 TIMED 卫星，主要用于探测全球中层-低热层区域大气参数(大气温度、气压、风速、化学成分)及其随时间和空间的变化。卫星轨道为太阳同步圆轨道，轨道高度

625±25 km, 轨道倾角 74.1±0.1°, 卫星绕地球一周的时间大约为 1.6 h。SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 是搭载 TIMED 卫星的 10 通道宽带辐射计, 使用临边测量方案获取垂直廓线。该设备自 TIMED 卫星升空以来一直稳定持续地监测中层大气热力学状态。其中温度监测主要利用 CO₂ 在 15 μm 波段的辐射信号反演获得。在夜间条件下还联合利用 4.3 μm 波段 CO₂ 辐射信号共同反演温度^[15]。

文中所采用的卫星资料来自 NASA 数据中心 TIMED/SABER 研究组提供的 Level2A 数据产品, 反演计算方案版本为 V2.0(<http://saber.gats-inc.com>)。V2.0 版本相对于 V1.07 版本, 对中间层的温度反演算法进行了提高, 进一步减小了误差。关于 SABER 的温度探测, 目前已有大量研究^[16-17], 研究结果表明: 在 10~100 km 高度范围, SABER 温度测量有相当高的准确性, 误差平均 2~3 K; 在不同高度范围, 温度测量的精度分别可以达到 1.5 K (15~80 km) 和 4.0 K(80~100 km)。SABER 在垂直方向是非均匀采样的, 分辨率大约为几百米。为了方便数据的使用, 将数据插值为 1 km 垂直分辨率的均匀采样数据。

3 结果分析

3.1 观测数据的选取

3.1.1 地基激光雷达数据选取

文中所采用的激光雷达数据为 2014 年夏季(6~8 月), 为了获得更高的信噪比(SNR)和探测精度, 文中筛选采用夜间天气晴朗、无云的大气探测数据。6 月共 2 天, 累计有效时长 12 h, 7 月共 15 天, 累计有效时长 88 h, 8 月共 13 天, 累计有效时长 92 h(具体每日的观测时长详见表 2)。文中所用激光雷达数据垂直分辨率为 300 m。

表 2 2014 年夏季观测日期及时长

Tab.2 Observations date and duration in the summer of 2014

表 2.1 6 月

Tab.2.1 June

June		
Date	29	30
Duration/h	4	8

表 2.2 7 月

Tab.2.2 July

July								
Date	1	2	3	4	5	6	7	8
Duration/h		8	3	2				
Date	9	10	11	12	13	14	15	16
Duration/h	7			7	7	7	7	2
Date	17	18	19	20	21	22	23	24
Duration/h							8	8
Date	25	26	27	28	29	30	31	
Duration/h	8			8	5	1		

表 2.3 8 月

Tab.2.3 August

August								
Date	1	2	3	4	5	6	7	8
Duration/h			8		1	7		9
Date	9	10	11	12	13	14	15	16
Duration/h				7	9	7	9	2
Date	17	18	19	20	21	22	23	24
Duration/h	9						9	9
Date	25	26	27	28	29	30	31	
Duration/h	6							

3.1.2 卫星数据选取

中间层大气温度具有随高度、纬度、经度和时间变化的特点, 为了减少卫星观测和地基观测在时空上不匹配导致温度偏差, 应使匹配的时间和地点尽量接近。根据以往的研究, 通常中间层大气温度随纬度的变化较其随经度的变化更为显著, 因此在经度方向的匹配条件相对于纬度可适当放宽^[8]。基于以上原则, 参考 Sivakumar 等^[9]的匹配方案, 纬度覆盖范围±2°, 经度覆盖范围±10°。由于目前激光雷达只在夜间进行观测, 所以卫星数据时间匹配区间为 13:00UT-22:00UT(21:00LT-次日 06:00LT, 文中的 LT 均采用北京时)。经统计和筛选, 能够满足该匹配条件的 SABER 温度廓线在 6、7、8 月分别有 20、24、28 条。

3.2 数据分析与讨论

3.2.1 个例分析

图 2 为 2014 年 8 月 15 日夜间接激光雷达在格尔木观测的中间层大气温度, 同时也给出了 MSIS-00 模式与 SABER 卫星数据作为参考和对比。根据卫星数据的选取方法, 选取 2014 年 8 月 15 日夜间的卫

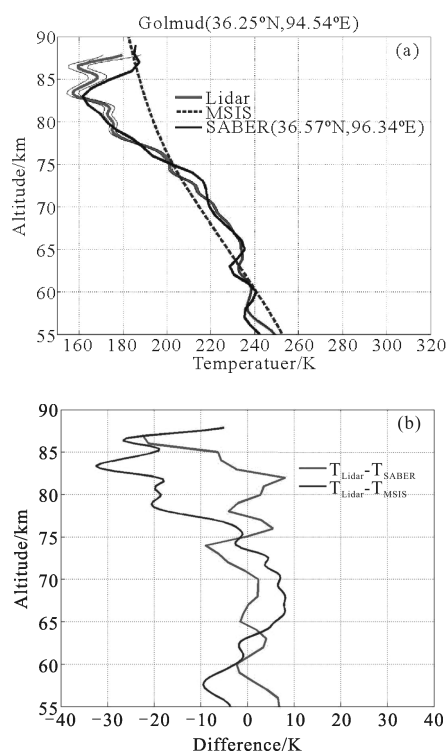


图 2 (a) 2014 年 8 月 15 日夜间激光雷达温度(灰色实线)反演结果与 MSIS-00 模式(灰色虚线)和 SABER 卫星数据(黑色实线)对比;(b) 激光雷达反演温度分别与 MSIS-00 模式(灰色)、SABER 卫星数据(黑色)的差值

Fig.2 (a)Vertical profiles of the lidar derived night-time temperature (gray solid line), the MSIS-00 model result (gray dotted line), and the SABER satellite data(black solid line)on August 15, 2014; (b)Difference of the lidar and the SABER satellite data(gray), and the MSIS-00 model result(black)

星数据,观测地点为(36.57°N,96.34°E),两者纬度相差为 0.32°,经度相差为 1.8°,距离相差约 165 km。时间为 03:20LT,为了提高信噪比,遂选取该卫星观测时间±30 min(即 02:50LT-03:50LT)的激光雷达 1 h 累加数据来反演大气温度。图 2(a)为激光雷达、模式、卫星三者大气温度垂直廓线图,其中灰色实线为激光雷达温度反演结果,灰色虚线为 MSIS-00 模式结果、黑色实线为卫星数据结果;图 2(b)为激光雷达探测温度分别与 MSIS 模式和卫星温度的偏差。(灰线为激光雷达数据与卫星数据的差值,黑线为激光雷达数据与 MSIS 模式的差值)。

从图 2(a)中可以看出,激光雷达、大气模式、卫星三者整体变化趋势基本一致,并且激光雷达反演温度误差值在 55~80 km 小于 2 K,这表明激光雷达观测结果准确可靠,无系统偏差,能够真实地反映格

尔木地区中间层大气实际状况。图 2(b)中,激光雷达与卫星数据比较,激光雷达温度值与卫星数据具有良好的一致性,在 55~85 km 高度范围内,激光雷达温度值与卫星数据两者温度略有偏差,温度偏差小于 10 K;在~87km 高度处温度差值分别达到最值,达到 22K。这种差别可能与观测原理、观测时间、观测地点等因素有关。激光雷达与大气模式比较,在 55~63 km 和 74~88km 高度之间,激光雷达数据整体比模式值偏小,温度偏低。从图中可以看出,在 75 km 以上,激光雷达与卫星值两者具有良好的一致性,但是激光雷达、卫星值与大气模式却存在一定的差异,这可能由于大气模式值是某大气参数长期观测平均值的原因。

3.2.2 月平均分析

笔者对一个月所有观测日的日平均温度在各高度层计算得到月平均温度。图 3 为激光雷达观测的大气温度廓线月平均与模式月平均、卫星数据月平均的对比情况。其中灰色实线为激光雷达温度反演结果,灰色虚线为 MSIS-00 模式结果、黑色实线为卫星数据结果。

从图 3(a)中可以看出,2014 年 6 月的激光雷达数据在中间层中部与卫星数据基本一致并且都低于模式值;在接近中间层顶区域,激光雷达比卫星数据和模式值偏大。具体来说,在 55~77 km 激光雷达数据与卫星数据具有很好的一致性,偏差绝对值小于 4 K;在 57~78 km,激光雷达的温度值低于模式值,最大差值为 9 K。激光雷达数据在中间层顶附近存在的波动可能与 6 月份观测天数较少有关。

图 3(b)为 2014 年 7 月激光雷达、模式、卫星三者大气温度垂直廓线图。从中可以看出,三者整体具有较好的一致性。激光雷达数据在中间层顶附近低于卫星数据和模式值。在中中间层激光雷达和卫星数据都较模式值偏低。激光雷达与卫星数据相比,55~86 km 激光雷达数据与卫星数据具有很好的一致性,偏差绝对值小于 5 K,然而二者在 89 km 的偏差约为 14 K。

图 3(c)为 2014 年 8 月激光雷达、模式、卫星三者大气温度垂直廓线图。从中可以看出,激光雷达数据与卫星数据、模式值整体一致性较好。而在中间层顶区域,激光雷达数据比卫星数据和模式值偏低。激光雷达与卫星数据对比,在 55~63 km 和 72~84 km

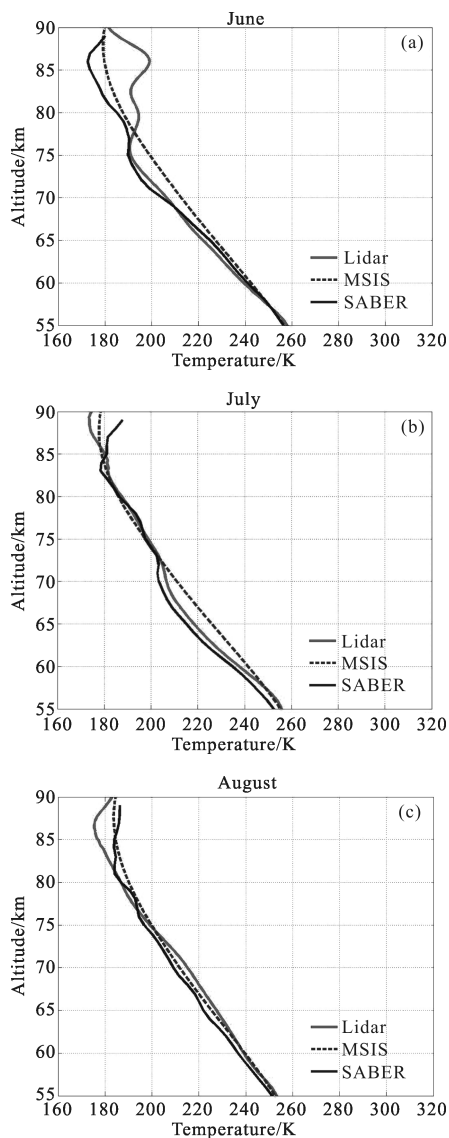


图 3 激光雷达反演的月平均温度(灰色实线)与 MSIS-00 模式温度(灰色虚线)和 SABER 卫星温度(黑色实线)对比,其中(a)为 2014 年 6 月数据,(b)为 2014 年 7 月数据,(c)为 2014 年 8 月数据

Fig.3 Vertical profiles of the lidar monthly averaged temperature(gray solid line), MSIS-00 model temperature(gray dotted line), and the SABER satellite temperature (black solid line) in (a) June, 2014, (b)July 2014, and(c)August 2014

二者偏差绝对值小于 5 K,在~87 km 处偏差最大,差值为 10 K;激光雷达与模式值对比,在 55~82 km,两者偏差绝对值小于 5 K,在 55~68 km 和 71~78 km,两者偏差绝对值小于 3 K。

3.2.3 季平均分析

对 2014 年夏季各月的月平均温度求平均,获得季节平均。图 4 为激光雷达观测的大气温度廓线季

平均与模式季平均、卫星数据季平均的对比情况。激光雷达与卫星数据对比,激光雷达数据整体比 SABER 卫星数据略偏高,在 55~83 km 之间,两者的偏差小于 5 K,在~84 km 处差值最大,约为 5 K;激光雷达与模式值对比,在 58~78 km,激光雷达的温度值低于模式值,偏差小于 4 K;在中间层顶区域,激光雷达温度比模式温度偏高,在 86 km 处差值最大,约为 4 K。

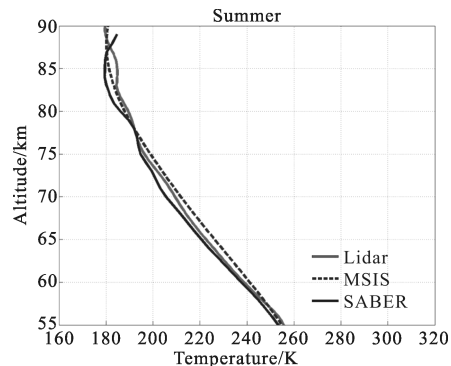


图 4 2014 年夏季平均的激光雷达(灰色实线)与模式值(灰色虚线)、卫星温度数据(黑色实线)对比情况

Fig.4 Vertical profiles of the lidar data(gray solid line), the model value (gray dotted line), and the satellite (black solid line) temperature in the summer of 2014

4 结论

文中主要介绍了 MARMOT 激光雷达测量原理、系统结构及功能参数,并利用其在格尔木地区夏季的探测资料来分析该地区中间层大气温度,并与 MSIS-00 大气模式和 SABER 卫星数据进行对比分析,获得了夏季格尔木地区中间层大气温度的初步结果,并对激光雷达的数据进行验证。激光雷达数据与 SABER 卫星数据、MSIS-00 模式在整体上具有较好的一致性。在中间层顶区域,激光雷达数据比模式值、卫星数据偏高;在中中间层,激光雷达与卫星数据都低于模式值;在低中间层,激光雷达数据比二者都略高。为更全面地研究青藏高原地区中层大气的实际状况,还需要利用 MARMOT 激光雷达对该地区进行长期监测,为高原地区中层大气的机理研究及大气模式、卫星数据的修订提供参考依据。

参考文献:

[1] Wang Yingjian. New advances of middle and upper atmosphere research in China [J]. *Acta Geophysica Sinica*,

- 1997, 40(S): 29–36. (in Chinese)
王英鉴. 我国中层大气观测研究的新进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增): 29–36.
- [2] Wu Guoxiong. Recent progress in the study of the Qinghai-Xizang plateau climate dynamics in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(1): 1–9. (in Chinese)
吴国雄. 我国青藏高原气候动力学研究的近期进展[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 1–9.
- [3] Cai Ying, Li Dongliang, Tang Maocang, et al. Decadal temperature changes over Qinghai-Xizang plateau in recent 50 Years [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22 (5): 464–470. (in Chinese)
蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 464–470.
- [4] Meng Xianfeng, Lu Chunhua, Ni Yaru, et al. Application and protection of laser technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 136–141. (in Chinese)
孟献丰, 陆春华, 倪亚茹, 等. 激光技术的应用与防护[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 136–141.
- [5] Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 21–27. (in Chinese)
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 21–27.
- [6] Gardner C S. Rayleigh and Sodium Lidar Techniques for Measuring Middle Atmosphere Density, Temperature and Wind Perturbations and Their Spectra[M]. US: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1989.
- [7] Gardner C S. Sodium resonance fluorescence lidar applications in atmospheric science and astronomy[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(3): 408–418.
- [8] Gardner C S, Papen G C, Chu X, et al. First lidar observations of middle atmosphere temperatures, Fe densities, and polar mesospheric clouds over the North and South Poles [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1199–1202.
- [9] Weilin Pan, Chester S G. The temperature structure of the winter atmosphere at South Pole[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(16): 4901–4904.
- [10] Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing, et al. Atmospheric density and temperature measurement with lidar in the middle and upper stratosphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2000, 5(17): 426–431. (in Chinese)
吴永华, 胡欢陵, 胡顺星, 等. 激光雷达探测平流层中上部大气密度和温度[J]. 量子电子学报, 2000, 5(17): 426–431.
- [11] Tian Li, Guo Shengli, Bu Lingbing, et al. Stratosphere temperature inversion algorithm of Rayleigh lidar using wavelet-denoising[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 649–654. (in Chinese)
田力, 郭胜利, 卜令兵, 等. 利用小波降噪的瑞利激光雷达平流层温度反演[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 649–654.
- [12] Qiao S, Pan W, Zhu K Y, et al. Initial results of lidar measured middle atmosphere temperatures over Tibetan Plateau[J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2014, 7: 213–217.
- [13] Lee H S, Schwemmer G K, Korb C L, et al. Gated photomultiplier response characterization for DIAL measurements[J]. *Applied optics*, 1990, 29(22): 3303–3315.
- [14] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2002JA009430.
- [15] Chen Zeyu, LV Daren. Seasonal variations of the MLT tides in 120°E meridian[J]. *Chinese J Geophys*, 2007, 50(3): 691–700. (in Chinese)
陈泽宇, 吕达仁. 东经 120°E 中间层和低热层大气潮汐及其季节变化特征[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 691–700.
- [16] Palo S E, Forbes J M, Zhang X, et al. Planetary wave coupling from the stratosphere to the thermosphere during the 2002 Southern Hemisphere pre-stratwarm period [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L23809.
- [17] Remsberg E E, Marshall B T, Garcia-Comas M, et al. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(17): D17101.
- [18] Gong Xiaogan, Hu Xiong, Wu Xiaocheng, et al. Comparison of temperature measurements between COSMIC atmospheric radio occultation and SABER/TIMED[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(7): 2152–2162. (in Chinese)
宫晓艳, 胡雄, 吴小成, 等. COSMIC 大气掩星与 SABER/TIMED 探测温度数据比较 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2152–2162.
- [19] Sivakumar V, Vishnu Prasanth P, Kishore P, et al. Rayleigh LIDAR satellite measurements of stratosphere-mesosphere temperature over a southern sub-tropical site, Reunion(20. 8° S;55. 5° E): climatology and comparison study [J]. *Ann Geophys*, 2011, 54(29): 649–662.