0254-6124/2019/39(1)-084–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

QIAO Shuai, PAN Weilin, BAN Chao, CHEN Lei, YU Ting. Characterization of mesospheric inversion layer with Rayleigh lidar data over Golmud (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 84-92. DOI:10.11728/cjss2019.01.084

基于瑞利激光雷达对格尔木地区中间层逆温层特征分析*

乔 帅[1,2] 潘蔚琳[1,2] 班 超[1] 陈 磊[1,2] 鱼 艇[3]

1(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国洛阳电子装备试验中心 济源 459000)

摘 要 利用 MARMOT (Middle Atmosphere Remote Mobile Observatory in Tibet) 激光雷达对 2014 年 7 月至 12 月格尔木 (36.25°N, 94.54°E) 上空的中间层逆温层 MIL(Mesosphere Inversion Layer) 事件进行研究分析. 格尔木 MIL 现象的发生频率为 53.8%, 其中冬季 (12 月) 发生频率最高, 达 76%; 秋季 (9—10 月) 较高, 为 60%; 夏季 (7—8 月) 发生频率较低, 为 29%. 2014 年 7 月至 12 月观测到的 MIL 逆温幅度主要分布在 5∼20 K, 平均逆温幅度为 15.9 K. 秋季逆温层底部高度较高, 主要分布在 77∼84 km, 冬季和夏季逆温层底部高度较低, 主要分布在 64∼74 km. 逆温层底部高度平均为 75.1 km. 逆温层的平均宽度为 8.7 km, 由夏季到冬季呈递增趋势.

关键词 激光雷达, 中间层, 逆温层

中图分类号 P 356

Characterization of Mesospheric Inversion Layer with Rayleigh Lidar Data over Golmud

QIAO Shuai[1,2] PAN Weilin[1,2] BAN Chao[1] CHEN Lei[1,2] YU Ting[3]

1(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Jiyuan* 459000)

Abstract Based on the measurements of MARMOT (Middle Atmosphere Remote Mobile Observatory in Tibet) lidar located in Golmud, Qinghai (36.25°N, 94.54°E) from July to December 2014, Mesospheric Inversion Layer (MIL) over Golmud area has been analyzed. The average occurrence frequency of MIL over Golmud is 53.8% during this period. The occurrence frequency is highest and can be up to 76% in winter (December), is around 60% in autumn equinox, and is as low as 29% in summer (July, August). The amplitude of temperature inversion is within 5∼20 K, and the average

* 国家自然科学基金项目资助 (41127901)

2018-01-16 收到原稿, 2018-08-06 收到修定稿

E-mail: panweilin@mail.iap.ac.cn

value is 15.9 K. The mean bottom altitude of MIL is 75.1 km. The bottom altitude is higher and mainly from 77 to 84 km in autumn. It is lower in winter and summer, and mainly from 64 to 74 km. The mean width of MIL is 8.7 km, and it increases from summer to winter.

Key words Lidar, Mesosphere, Mesospheric Inversion Layer (MIL)

0 引言

中间层逆温层 (Mesospheric Inversion Layer, MIL) 是指在中间层–低热层 (Mesosphere-Low-Thermosphere, MLT) 区域温度垂直梯度由负变正, 并持续一定高度的现象. 对 MIL 的研究有利于理解 MLT 区域的大气稳定性. 逆温层内的层结相对稳定, 会减少大气垂直混合. 但在逆温层之上, 负的温度梯度会减小大气稳定度, 进而可能产生对流不稳定, 促进湍流的发展. 重力波是 MLT 区域能量传输的重要媒介, 而逆温层的发生可能与重力波破碎相关, 所以研究 MIL 有助于理解大气上下层能量交换. MIL 还影响气辉强度的垂直分布, 因为其关联的化学反应速率依赖于大气温度. 此外, MIL 研究还有助于理解潮汐波的变化, 以及重力波与行星波之间的相互作用 [1].

1976 年 Schmidlin[2] 利用火箭探空数据首次发现了高度为 75 km 左右的 MIL 现象. 此后, 一系列遥感或原位探测手段捕捉到大量 MIL 现象, 这些探测手段包括落球探测 [2,3]、瑞利激光雷达探测 [4−6]、钠荧光激光雷达探测 [7−10] 和卫星探测 [5,11,12] 等. 利用上述探测结果对 MIL 的基本特征参数如逆温层高度、宽度、逆温幅度、发生概率等开展了若干研究分析. 2000 年 Meriwether 和 Gardner[13] 对已有研究结果进行了总结并指出, 中低纬度 MIL 现象的逆温幅度为 15∼50 K, 逆温层宽度约为 10 km, 出现的高度分别在上中间层 (60∼70 km) 和中间层顶区域 (90∼100 km). 随着观测手段和数据的增加, 在中间层的其他高度也发现了 MIL 现象 [5]. 2001 年 Duck 等 [14] 利用具有白天观测功能的瑞利激光雷达对 Millstone Hill (42.6°N, 71.5°E) 上空中层大气温度进行了探测, 捕捉到一个位于 60 km 左右高度且持续 31.5 h 的 MIL 事件, 发现其逆温幅度随时间变化与重力波随时间变化有关.

关于 MIL 成因的模式模拟工作研究也相继开展. 1990 年 Alain 和 Alexre[15] 利用加入重力波扩散和拖拽效应的平流层中间层 2D 动力模型, 模拟出的冬季 MIL 与激光雷达观测结果较为吻合. 他们指出, 该逆温现象与中间层大气下沉绝热加热有关. 2002 年 Sassi 等 [16] 利用 WACCM (Whole Atmospheric Community Climate Model) 和 CCM3 (Community Climate Model) 对冬季 MIL 进行模拟, 发现 MIL 的出现与行星波垂直上传至逆温层高度的衰减破碎有关, 重力波只是间接影响. 2007 年 Sica 等 [17] 利用加拿大中层大气模式模拟 MIL, 研究发现当背景大气温度垂直递减率小于大气绝热垂直递减率的一半时, 重力波饱和会导致逆温层形成, 并且逆温幅度与背景大气垂直递减率有关. Fadnavis 等 [5,18] 指出, 臭氧的化学加热作用与逆温层的出现及逆温幅度相关.

本文利用 MARMOT 激光雷达在青海格尔木 (36.25°N, 94.54°E) 2014 年 7 月至 12 月期间的夜间观测数据反演 30∼90 km 高度的中层大气温度廓线, 从中筛选出 MIL 事件, 对格尔木地区上空的 MIL 特征进行统计分析, 并分析其形成原因. 这是首次开展中国青藏高原地区中间层逆温层现象观测研究, 研究结果可为模式研究提供对比资料.

1 数据来源

1.1 MARMOT 激光雷达

MARMOT 激光雷达主要由激光发射单元、光学接收单元、信号采集与控制单元组成 [19,20], 其基本构造如图 1 所示.

图 1 中 Nd:YAG 激光器向天顶方向发射波长为 532 nm, 1 m 口径的主焦点式望远镜接收大气分子的瑞利散射回波信号, 经光斩波器后, 保留下来的 50∼90 km 高度的 532 nm 高空信号用于反演该高度范围的大气温度. 这里光斩波器的作用是防止低空强信号造成光电倍增管的饱和效应. 200 mm 口径的卡塞格林式望远镜接收 532 nm 低空信号. 利用 532 nm 低空信号和 532 nm 高空信号, 可反演得到 30∼90 km 的大气温度廓线. 由于格尔木海拔高

度 (2808 m) 较高, 激光在大气传输中的衰减比平原地区少, 整晚信号叠加后的探测高度可达 95 km 左右. 表 1 列出 MARMOT 激光雷达主要技术参数, 目前 MARMOT 尚不具备白天观测能力.

1.2 数据反演

沿天顶方向发射到大气中的 532 nm 激光被大气中的分子散射后, 由望远镜接收, 其接收到的给定高度回波光子数与发射激光脉冲的光子数和给定高度大气分子密度成正比. 一般认为在 30 km 高度以上的气溶胶极少, 这里忽略不计, 即假设激光与大气作用过程中不存在米散射, 则瑞利激光雷达方程可以表示为

$$N(z)=(\eta T_{\mathrm{A}}^2)\Big(\frac{P_{\mathrm{L}}\Delta t}{hc/\lambda}\Big)[\sigma_{\mathrm{eff}}(\lambda)\rho(z)\Delta z]\cdot\Big(\frac{A_{\mathrm{R}}}{4\pi z^2}\Big)+N_{\mathrm{B}}. \tag{1}$$

其中, $N(z)$ 为激光雷达接收到的 z 高度处的光子数, z 为高度距离, η 为激光雷达系统效率, T_{A} 为大气单程透过率, 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 为发射的激光波长, σ_{eff} 为瑞利后向散射截面, $\rho(z)$ 为大气密度, Δz 为垂直分辨率, A_{R} 为接收望远镜面积, N_{B} 为背景噪声和系统噪声.

将回波光子数进行背景去噪和距离平方订正之后, 可以得到大气的相对密度为

$$\frac{\rho(z)}{\rho(z_0)}=\frac{z^2(N(z)-N_{\mathrm{B}})}{z_0^2(N(z_0)-N_{\mathrm{B}})}. \tag{2}$$

其中, $\rho(z)$ 为高度 z 处的大气密度, z_0 为大气密度的参考高度. 一般选取信噪比较高的高度, 这里高空通道的 z_0 选取为 50 km, 低空信号的 z_0 选取为 30 km.

根据理想气体状态方程和大气静力学方程, 得到大气温度和大气相对密度的关系为

$$T(z)=T(z_{\mathrm{seed}})\frac{\rho(z_{\mathrm{seed}})}{\rho(z)}+\frac{1}{R}\int_z^{z_{\mathrm{seed}}}g(r)\mathrm{d}r\frac{\rho(r)}{\rho(z)}. \tag{3}$$

表 1 MARMOT 激光雷达主要技术参数

Table 1 Specifications of the MARMOT lidar system

激光发射单元		
波长/nm	532	
单脉冲能量/mJ	550	
重复频率/Hz	30	
脉宽/ns	8	
光学接收单元		
望远镜类型	主焦点式	卡塞格林式
接收范围/km	50~90	30~50
望远镜直径/mm	1000	200
焦距/mm	1500	2000
接收波长/nm	532	532
滤光片带宽/nm	1	1
信号采集与控制单元		
垂直分辨率/m	30	15
时间分辨率/min	1	1

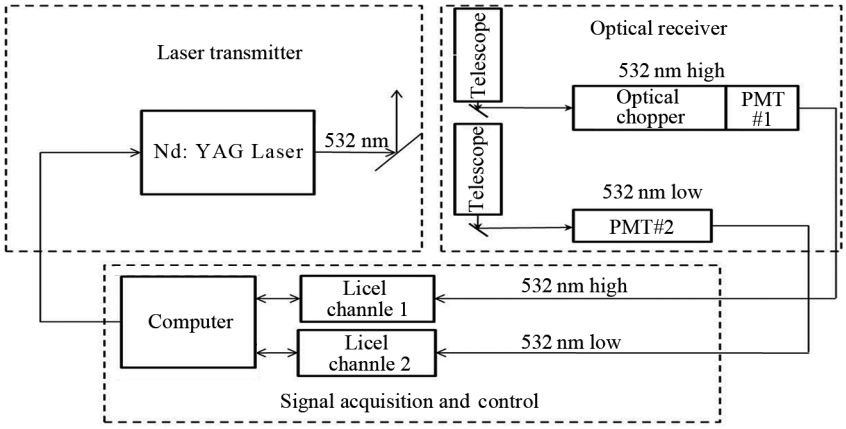


图 1 MARMOT 激光雷达结构

Fig. 1 Configuration of the MARMOT lidar system

其中: $T(z)$ 为高度 z 处的大气温度; z_{seed} 为温度反演的起始高度, 这里选取大气密度相对误差为 10% 的高度; $g(r)$ 为重力加速度; R 为普适气体常数.

对激光雷达整夜观测的回波信号进行累加, 进而反演大气温度. 反演起始高度 z_{seed} 为 90 km 左右, 温度误差为 2~10 K 左右, 80 km 处的反演误差为 1~3 K 左右, 反演结果的垂直分辨率为 300 m, 平滑窗口半宽为 2 km. 将反演得到的大气温度廓线与 TIMED/SABER 卫星数据 [21] 和 MSIS-00 模式 [22] 进行比较发现, MARMOT 激光雷达数据具有较好的可靠性 [19,20,23].

2　数据分析

选取观测时长大于 2 h 的 MARMOT 激光雷达夜间观测数据, 2014 年 7 月至 12 月在格尔木的有效观测天数列于表 2. TIMED/SABER 卫星数据给出的是某一地点在某一时刻的单条廓线, 其并不能代表整晚的大气状况, 而 MSIS00 模式结果反映的是大气平均状态, 并不能模拟出类似 MIL 这样的事件, 所以这里依据激光雷达在夜间探测到的整晚平均大气温度结果来选取 MIL 事件.

以 2014 年 12 月 1 日的观测结果为例 (见图 2) 说明逆温层参数的提取方法. 逆温层底部高度为中间层大气温度梯度由负变正的高度, 对应图 2 中 72 km 左右. 逆温层峰值高度为该逆温层大气温度梯度由正变负的高度, 对应图 2 中 86 km 左右. 逆温宽度为逆温峰值高度与逆温层底部高度之差, 对应图 2 中 14 km 左右. 逆温幅度为逆温层峰值高度与逆温层底部高度之间的温度差, 对应图 2 中 21 K 左右. 考虑 MARMOT 激光雷达数据的反演误差, 参考文献 [5, 6, 24] 对 MIL 事件的选取标准, 统计激光雷达有效观测期间同时满足中间层逆温幅度大于 5 K 和逆温宽度大于 5 km 的 MIL 事件. 由于双逆温层属于 MIL 中的一类特殊事件 [6], 这里只在 MIL 发生频率中作统计, 在 MIL 其他参数中对双逆温层现象不作统计. 表 2 列出了 MARMOT 激光雷达 2014 年 7 月至 12 月的逐月有效观测天数和 MIL 参数.

2.1　MIL 发生频率

2014 年 7 月至 12 月, MARMOT 激光雷达在格尔木的有效观测天数共 104 天, 其中 56 天出现 MIL 现象, 总体发生频率为 53.8%. 图 3 为逐月 MIL 出现频率柱状图. 由图 3 可见, 12 月的逆温层发生频率最高, 达到 76%, 这与 Leblanc 和 Hauchecorne[4] 在

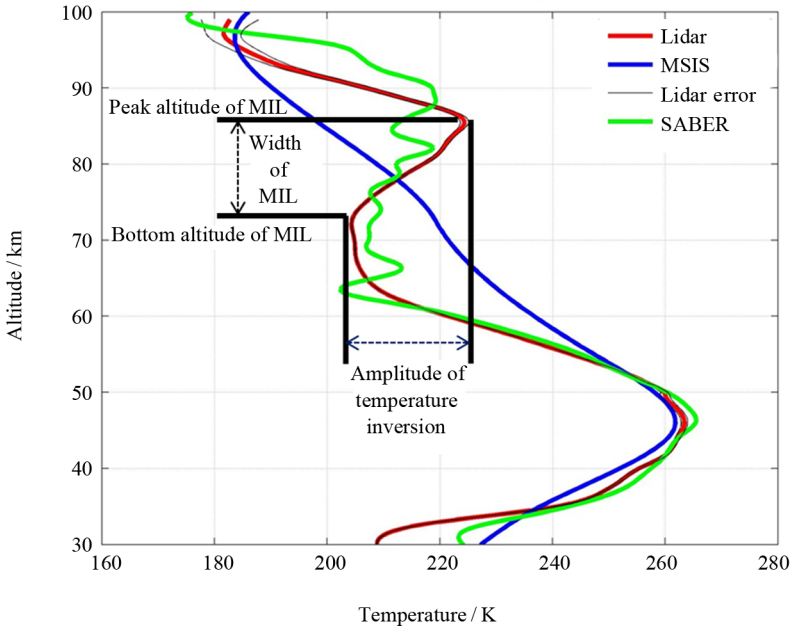


图 2　2014 年 12 月 1 日格尔木中层大气温度廓线

Fig. 2　Middle atmospheric temperature profiles over Golmud on 1 December 2014

表 2 2014 年 7—12 月 MARMOT 有效观测天数和 MIL 参数

Table 2 Lidar observation days and MIL parameters from July to December 2014

月份	有效观测天数/d	出现逆温层天数/d	逆温层发生频率/(%)	逆温幅度/K	逆温层底部高度/km	逆温层峰值高度/km	逆温层宽度/km
7	11	5	45.5	12.0	72.0	78.5	6.5
8	13	2	15.4	12.5	78.0	84.5	6.5
9	16	10	62.5	18.0	80.2	89.0	8.8
10	19	11	57.9	21.6	80.4	89.6	9.3
11	20	9	45.0	14.0	72.1	81.7	9.6
12	25	19	76.0	17.2	68.0	79.1	11.6

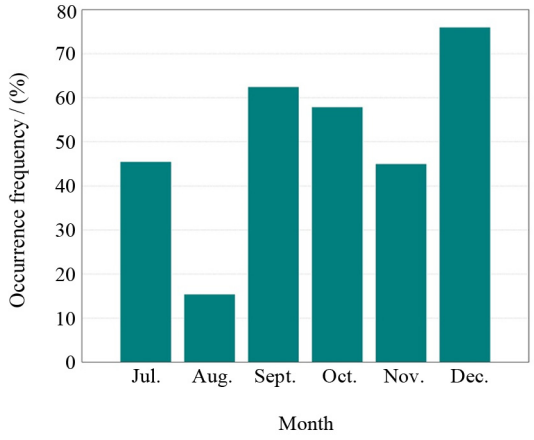


图 3 2014 年 7—12 月期间逐月的 MIL 发生频率

Fig. 3 Monthly mean occurrence frequency of MIL from July to December 2014

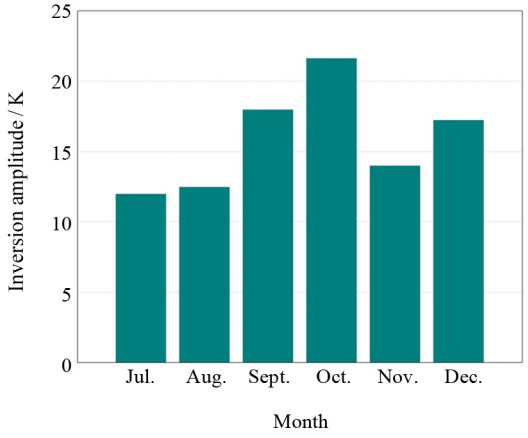


图 4 2014 年 7—12 月逐月的 MIL 平均逆温幅度

Fig. 4 Monthly mean amplitude of temperature inversion from July to December 2014

法国南部 (44°N, 5°E) 利用瑞利激光雷达观测的 12 月 MIL 事件发生频率较为一致 (78%); 秋季 (9—10 月) 的逆温层发生概率较高, 分别为 62.5% 和 57.9%, 平均为 60%; 而逆温层在夏季 (7 月和 8 月) 的发生频率较低, 分别为 45.5% 和 15.4%, 平均为 29%. 这与其他站点的研究结果 [13] 一致, 即冬季发生频率高, 夏季发生频率低.

2.2 逆温幅度

对 MARMOT 激光雷达观测到的 MIL 事件进行统计分析, 得出该观测期内的平均逆温幅度为 15.9 K. 图 4 为 2014 年 7—12 月逐月的 MIL 事件平均逆温幅度柱状图. 从图 4 可见, 9, 10 和 12 月逆温层的平均幅度最大, 均达到 15 K 以上, 而 7, 8 和

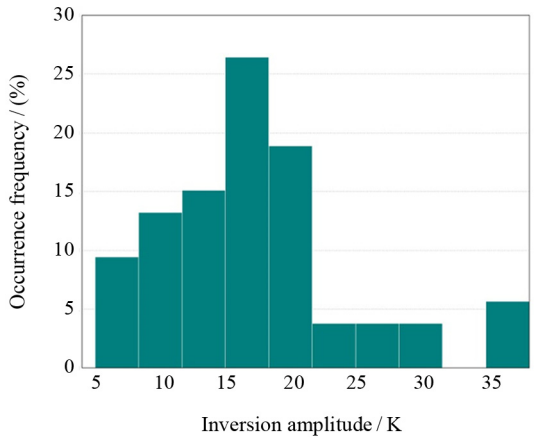


图 5 MIL 逆温幅度分布

Fig. 5 Amplitude distribution of temperature inversion

11 月的逆温层幅度在 12 K 左右. 图 5 为逆温幅度的分布. 由图 5 可知, 逆温幅度主要集中在 5~20 K, 比 Fadnavis 和 Beig[5] 观测到逆温幅度谱 (10~14 K) 更宽.

2.3　逆温层底部高度

对观测到的 MIL 事件进行统计分析, 得出逆温层底部的平均高度为 75.1 km. 图 6 给出了 2014 年 7—12 月 MIL 事件统计结果. 对图 6 和表 2 分析可知, 秋季逆温层出现高度较高, 底部高度均为 75 km 以上, 9 月和 10 月达到 80 km; 夏季和冬季逆温层出现高度较低, 底部高度通常在 70 km 以下. 这种冬夏逆温高度低而秋季逆温高度高的现象与 Fadnavis 和 Beig[5] 对印度热带地区 (0—30°N, 60—100°E) MIL 现象的研究结果基本一致, 但冬夏高度比印度地区低. 但是 Whiteway 等 [25] 对加拿大多伦多附近 (44°N, 80°W) 的 MIL 研究结果与上述结论有所不同, Whiteway 等的结果表明, 夏季逆温层高度高, 冬季逆温层高度低. 图 7 为逆温层底部高度分布. 由图 7 可以看出, 逆温层主要出现在两个高度区间, 其中 64~74 km 主要对应于夏季和冬季出现的 MIL 事件, 77~84 km 主要对应于秋季出现的 MIL 事件.

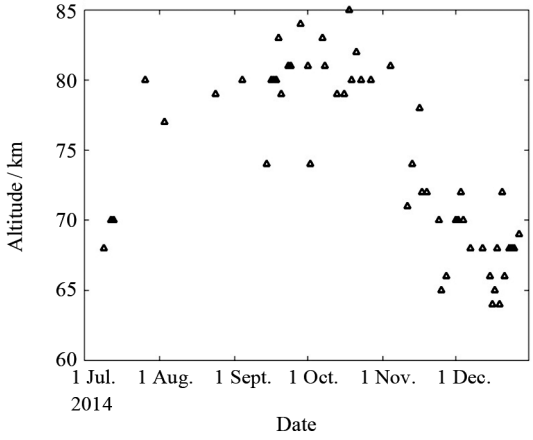


图 6　2014 年 7—12 月的 MIL 逆温层底部高度

Fig. 6　Bottom altitude of MIL from July to December 2014

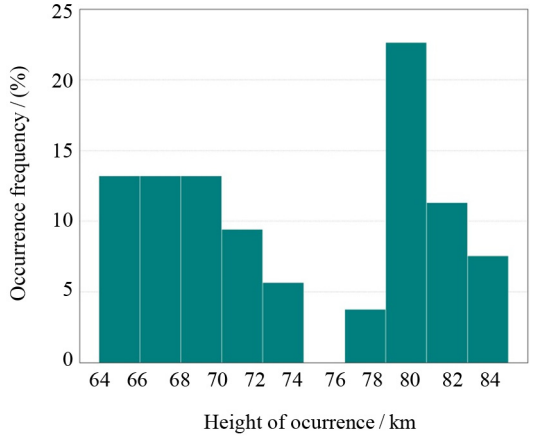


图 7　逆温层底部高度的分布

Fig. 7　Distribution of MIL bottom altitude

2.4　逆温宽度

对观测到的 MIL 事件逆温宽度进行统计分析, 得出平均逆温宽度为 8.7 km, 且从 7 至 12 月呈递增趋势, 如图 8 所示. 该结果与 Sica 等 [17] 在加拿大 University of Western Ontario's Delaware Observatory (43°N, 81°W) 的研究结果基本一致, 但格尔木的逆温宽度比其宽 3~6 km.

2.5　MIL 事件发生频率

为研究逆温层的出现是否与潮汐波有关, 对所有观测天 (夜间) 每小时 (地方时) 激光雷达探测的大气温度廓线进行统计分析, 将各小时出现逆温层的天数除以该小时的有效观测天数, 得到每小时的逆温层发生频率, 如表 3 和图 9 所示. 由表 3 和图 9 可以看出, 在 19:00 LT—21:00 LT 时段 MIL 的发生频率较高, 21:00 LT—22:00 LT 时段略低, 随后从 22:00 LT 到次日凌晨 07:00 LT, MIL 发生频率较一致, 在 40%~50% 之间. 由表 3 可知, 由于 MARMOT 激光雷达只在夜间开机观测 (目前尚不具备白天探测能力), 因此 19:00 LT—21:00 LT 主要是冬季观测的数据. 根据 2.1 节的分析结果, 冬季 MIL 出现频率高, 从而导

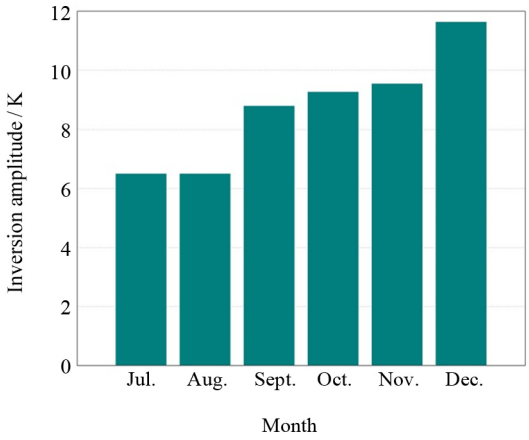


图 8　2014 年 7—12 月的逐月 MIL 平均逆温宽度

Fig. 8　Monthly mean MIL width from July to December 2014

表 3 MIL 事件发生天数及频率

Table 3 Total observational days and occurrence frequency of MIL

地方时段	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
出现 MIL 天数/d	14	24	27	36	33	31	33	32	34	33	33	23
所有观测天数/d	23	44	71	82	78	78	73	73	73	68	67	52
MIL 发生频率/(%)	61	55	38	44	42	40	45	44	47	49	49	44

注 地方时段① ～⑫ 按顺序对应时间如下:

19:00—20:00, 20:00—21:00, 21:00—22:00, 22:00—23:00,

23:00—00:00, 00:00—01:00, 01:00—02:00, 02:00—03:00,

03:00—04:00, 04:00—05:00, 05:00—06:00, 06:00—07:00.

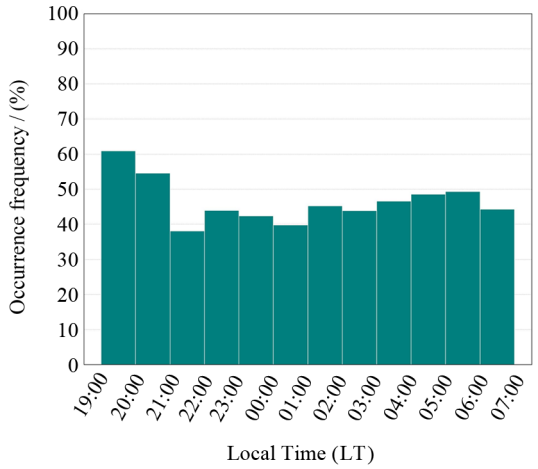


图 9 MIL 事件发生频率

Fig. 9 Occurrence frequency of MIL

致 19:00 LT—21:00 LT MIL 出现的频率相对较高. 若忽略 19:00 LT—21:00 LT 的数据, 可以看到 MIL 的出现没有明显的日变化特征.

Gille[26] 和 States[27] 利用具有白天观测能力的激光雷达对中层大气温度进行了昼夜连续观测, 发现中层大气存在明显的半日潮和全日潮现象. 由于 MARMOT 激光雷达目前仅有夜间数据, 所以只能对 19:00 LT—07:00 LT (次日) 的数据进行分析. 但由图 9 可见, MIL 事件在各小时 (地方时) 的发生频率未见明显差异.

3 MIL 形成机制讨论

关于 MIL 形成的原因目前尚无定论. 最早用来解释 MIL 成因的是重力波破碎理论. 重力波随高度向上传播, 随着大气密度的减小, 其波动幅度呈指数递增, 到达中间层的某一高度后发生破碎, 使得该区域出现对流不稳定. 重力波破碎导致净动量传输到背景大气环流中, 进而造成向下的热通量, 最终重力波破碎区冷却, 破碎区下层形成逆温层 [28,29]. Hauchecorne 等 [24] 利用模式模拟的结果表明, 在逆温层高度或之上出现的连续重力波破碎能够导致逆温层的出现. Gardner 和 Yang[30] 指出, 80 km 高度以下的重力波耗散造成的热量下传可能是 70 km 高度出现 MIL 的原因. Sica 等 [17] 利用加拿大中层大气模式模拟 MIL 时发现, 背景大气温度垂直递减率小于大气绝热垂直递减率的一半时, 重力波饱和导致逆温层的形成.

Liu 和 Hagan 等 [31,32] 利用二维非线性重力波传播模式研究重力波与潮汐风场的相互作用. 研究发现, 通过改变影响重力波稳定性的平均流场, 本地的动力冷却和湍流加热作用将加强. 这种作用加强的结果表明热力结构的相位下降 (逆温结构出现) 依赖于潮汐波的相位下降. 由 2.5 节可知, MIL 发生频率随时间没有明显变化, 所以本文中 MIL 出现与潮汐波没有明显关系. Sassi 等 [16] 利用 WACCM 模式模拟解释了冬季 MIL 形成是由于行星波在 70～80 km 之间破碎造成的, 而重力波的作用只是间接引导了行星波在该区域的破碎. Brown 等 [33] 指出在春秋分和冬至期间, 行星波可到达中间层中部的零风层, 导致波动耗散并形成位于 65～80 km 高度的逆温层.

化学加热尤其是臭氧的加热作用也是形成 MIL 的一种可能原因. Fadnavis[5] 发现中间层臭氧含量与印度地区 MIL 逆温幅度的相关系数达 0.65. Mly-

nczak 等 [34] 在一次火箭探空资料中发现一个 MIL 的同时, 在同一高度段臭氧浓度也出现峰值. 但也有研究指出两者之间没有明显关系, 两个峰值同时出现只是巧合 [1].

考虑到青藏高原的大地形作用, 气流受山脉的机械阻挡会激发产生重力波. Xu 等 [35] 和 Li 等 [36] 的研究表明, 青藏高原上空大气重力波活动冬春季最活跃, 夏秋季较平静. 这与 MIL 冬季出现频率高, 夏季出现频率低相对应. Li 等 [36] 的研究表明青藏高原中间层大气的重力波大多数向东传播, 而对流层和中间层夏季盛行西向气流, 对重力波形成滤波作用, 导致重力波上传受阻, 大部分波动无法到达中间层, 故无法形成因重力波破碎而导致的逆温层.

4　结论

利用 MARMOT 激光雷达探测数据, 对青海格尔木上空的中间层逆温层事件进行统计分析研究, 主要结论如下. 在 2014 年 7 月至 12 月, 格尔木 MIL 现象发生频率为 53.8%. 其中冬季 (12 月) 的发生频率最高, 达 76%; 秋季 (9—10 月) 较高, 为 60%; 夏季 (7—8 月) 的发生频率较低, 为 29%. 该时期平均逆温幅度为 15.9 K, 主要分布在 5∼20 K. 逆温层底部的平均高度为 75.1 km. 秋季的平均高度较高, 在 77∼84 km 之间; 冬季和夏季较低, 在 64∼74 km 之间. 逆温层的平均宽度为 8.7 km, 由夏季到冬季呈递增趋势. 研究结果可为研究青藏高原中层大气提供可靠的地基观测结果, 结合更多观测要素 (大气风场等) 有助于对 MLT 区域的大气稳定性及能量传输过程进行更深入了解, 完善现有大气模式.

致谢　格尔木市气象局提供了观测支持, 中国科学院大气物理研究所 MARMOT 观测团队提供了激光雷达数据.

参考文献

[1] MERIWETHER J W, GERRARD A J. Mesosphere inversion layers and stratosphere temperature enhancements [J]. *Rev. Geophys.*, 2004, **42**(3): 1-31

[2] SCHMIDLIN F J. Temperature inversions near 75 km [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1976, **3**(3): 173-176

[3] LÜBKEN F J, HILLERT W, LEHMACHER G, *et al.* Intercomparison of density and temperature profiles obtained by lidar, ionization gauges, falling spheres, datasondes and radiosondes during the DYANA campaign [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**(13-14): 1969-1984

[4] LEBLANC T, HAUCHECORNE A. Recent observations of mesospheric temperature inversions [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 1997, **102**(D16): 19471-19482

[5] FADNAVIS S, BEIG G. Mesospheric temperature inversions over the Indian tropical region [J]. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**(10): 3375-3382

[6] CHEN Linxiang, YANG Guotao, WANG Jihong, *et al.* Measurements of lower mesosphere inversion layers with rayleigh lidar over Beijing [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(1): 75-81 (陈林祥, 杨国韬, 王继红, 等. 瑞利激光雷达探测北京上空中间层低逆温层 [J]. 空间科学学报, 2017, **37**(1): 75-81)

[7] SHE C Y, YU J R, CHEN H. Observed thermal structure of a midlatitude mesopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**(7): 567-570

[8] STATES R J, GARDNER C S. Influence of the diurnal tide and thermospheric heat sources on the formation of mesospheric temperature inversion layers [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(9): 1483-1486

[9] HUANG T Y, HICKEY M P, TUAN T F, *et al.* Further investigations of a mesospheric inversion layer observed in the ALOHA-93 Campaign [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2002, **107**(D19): ACL 17-1-ACL 17-8

[10] YUAN T, PAUTET P D, ZHAO Y, *et al.* Coordinated investigation of midlatitude upper mesospheric temperature inversion layers and the associated gravity wave forcing by Na lidar and advanced mesospheric temperature mapper in Logan, Utah [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2014, **119**(7): 3756-3769

[11] CLANCY R T, RUSCH D W, CALLAN M T, *et al.* Temperature minima in the average thermal structure of the middle mesosphere (70∼80 km) from analysis of 40- to 92-km SME global temperature profiles [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 1994, **99**(D9): 19001-19020

[12] GAN Q, ZHANG S D, YI F. TIMED/SABER observations of lower mesospheric inversion layers at low and middle latitudes [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2012, **117**(D7): 1-14

[13] MERIWETHER J W, GARDNER C S. A review of the mesosphere inversion layer phenomenon [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2000, **105**(D10): 12405-12416

[14] DUCK T J, SIPLER D P, SALAH J E, *et al.* Rayleigh lidar observations of a mesospheric inversion layer during night and day [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(18): 3597-3600

[15] HAUCHECORNE A, MAILLARD A. A 2-d dynamical model of mesospheric temperature inversions in winter [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**(12): 2197-2200

[16] SASSI F, GARCIA R R, BOVILLE E, *et al.* On temperature inversions and the mesospheric surf zone [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2002, **107**(D19): ACL 8-1-ACL 8-11

[17] SICA R J, ARGALL P S, SHEPHERD T G, *et al.* Model-measurement comparison of mesospheric temperature inversions, and a simple theory for their occurrence [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(23): 231-247

[18] FADNAVIS S, SIINGH D, BEIG G, *et al.* Seasonal variation of the mesospheric inversion layer, thunderstorms, and mesospheric ozone over India [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2007, **112**(D15): 1-12

[19] 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**(3): 213-217

[20] YU Ting, PAN Weilin, ZHU Keyun, *et al.* Preliminary analysis of mesospheric summer temperature measurements in Golmud [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2016, **45**(12): 1211005-1-1211005-7 (鱼艇, 潘蔚琳, 朱克云, 等. 夏季格尔木中间层大气温度探测初步分析 [J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(12): 1211005-1-1211005-7)

[21] MERTENS C J, MLYNCZAK M J, LÓPEZ-PUERTAS M, *et al.* Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO_2 15 μm earth limb emission under non-LTE conditions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(7): 1391-1394

[22] 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.*: *Space Phys.*, 2002, **107**(A12): SIA 15-1-SIA 15-16

[23] QIAO S, PAN W L, LÜ D. Winter mesospheric thermal structure over tibetan plateau [C]//The 27th International Laser Radar Conference 2016. New York, USA, 2016

[24] HAUCHECORNE A, CHANIN M L, WILSON R. Mesospheric temperature inversion and gravity wave breaking [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1987, **14**(9): 933-936

[25] WHITEWAY J A, CARSWELL A I, WARD W E. Mesospheric temperature inversions with overlying nearly adiabatic lapse rate: An Indication of a well-mixed turbulent layer [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(10): 1201-1204

[26] GILLE S T, HAUCHECORNE A, CHANIN M L. Semidiurnal and diurnal tidal effects in the middle atmosphere as seen by Rayleigh lidar [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 1991, **96**(D4): 7579-7587

[27] STATES R J, GARDNER C S. Thermal structure of the mesopause region (80∼105 km) at 40°N latitude. Part II: Diurnal Variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**(1): 66-77

[28] RAMESH K, SRIDHARAN S. Large mesospheric inversion layer due to breaking of small-scale gravity waves: evidence from rayleigh lidar observations over Gadanki (13.5°N, 79.2°E) [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2012, **89**(89): 90-97

[29] RAMESH K, SRIDHARAN S, RAGHUNATH K, *et al.* Planetary wave-gravity wave interactions during mesospheric inversion layer events [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2013, **118**(7): 4503-4515

[30] GARDNER C S, YANG W M. Measurements of the dynamical cooling rate associated with the vertical transport of heat by dissipating gravity waves in the mesopause region at the Starfire Optical Range, New Mexico [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1998, **103**(D14): 16909-16926

[31] LIU H L, HAGAN M E. Local heating/cooling of the mesosphere due to gravity wave and tidal coupling [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15): 2941-2944

[32] LIU H L, HAGAN M E, ROBLE R G. Local mean state changes due to gravity wave breaking modulated by the diurnal tide [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2000, **105**(D10): 12381-12396

[33] BROWN L B, GERRARD A J, MERIWETHER J W, *et al.* All-sky imaging observations of mesospheric fronts in OI 557.7 nm and broadband OH airglow emissions: Analysis of frontal structure, atmospheric background conditions, and potential sourcing mechanisms [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2004, **109**(D19): 1-19

[34] MLYNCZAK M G, MORGAN F, YEE J H, *et al.* Simultaneous measurements of the O2($^1\Delta$) and O2($^1\Sigma$) Airglows and ozone in the daytime mesosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(6): 999-1002

[35] XU Xiaohua, GUO Jincheng, LUO Jia. Analysis of the active characteristics of stratosphere gravity waves over the Qinghai-Tibetan Plateau using COSMIC radio occultation data [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2016, **59**(4): 1199-1210 (徐晓华, 郭金城, 罗佳. 利用 COSMIC RO 数据分析青藏高原平流层重力波活动特征 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(4): 1199-1210)

[36] LI Q Z, XU J Y, YUAN W, *et al.* Characteristics of mesospheric gravity waves over the southeastern Tibetan Plateau region [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2016, **121**(9): 9204-9221