0254-6124/2022/42(5)-0913-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GUO Shangyong, HU Xiong, YAN Zhaoai, CHENG Yongqiang, TU Cui. Studies for Mesopause Temperature Distribution Characteristics Based on the Sodium Lidar Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 913–918. DOI:10.11728/cjss2022.05.210901096

基于钠激光雷达观测数据的中间层顶大气温度分布特性研究*

郭商勇 胡 雄 闫召爱
程永强 涂 翠

(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 作为中间层和热层的边界层，中间层顶存在多种能量交换方式，是大气能量耦合的重要区域。本文利用部署于中国科学院廊坊临近空间大气探测站的钠荧光多普勒激光雷达 2013 年的观测数据，研究了廊坊上空中间层顶区域大气温度的年度和季节分布特性，并分析了影响温度分布的多种因素。年平均温度廓线图显示，中间层顶位于约 97.5 km 高度处，温度约 191.2 K。受放热化学反应的影响，年平均温度廓线 91 km 高度处出现了一个 198 K 的相对温度高点。中间层顶区域大气温度的季节分布受太阳辐射和大气动力学因素综合影响，夏季在大气动力学影响下，中间层顶高度较低，位于 88 km 高度处，温度也较低，约 177 K；冬季太阳辐射起主导作用，中间层顶位于 99 km 高度处，温度为 181 K。通过拟合月平均温度分析了中间层顶区域大气温度年变化和半年变化的振幅和相位特征。结果显示，中间层顶区域上部温度分布主要受太阳辐射的影响；在中间层顶区域下部，大气波动主导了温度分布。

关键词 激光光学，钠荧光激光雷达，大气温度，中间层顶

中图分类号 P356

Studies for Mesopause Temperature Distribution Characteristics Based on the Sodium Lidar Data

GUO Shangyong HU Xiong YAN Zhaoai
CHENG Yongqiang TU Cui

(*State Key Laboratory of Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

(*Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

Abstract As the boundary of mesosphere and thermosphere, mesopause is an important area for

* 中国科学院战略性先导科技专项（XDA17010303）和国家自然科学基金项目（41905038）共同资助
2021-08-31 收到原稿，2022-06-10 收到修定稿
E-mail：guosy@nssc.ac.cn

studying the middle and upper atmosphere, many energy coupling processes happen here, study for the temperature distribution characters will improve our understanding of the climatology of this region. This paper studies the annual and seasonal temperature distribution characteristics based on the Langfang sodium lidar data in 2013. Results show that, the annual mean mesopause locates at around 97.5 km with the temperature 191.2 K. Under the influence of exothermic chemical reactions, there is a relative maximum temperature 198 K at 91 km on the annual profile. The seasonal temperature at mesopause region is influenced by solar radiation and atmospheric dynamics. In winter, solar radiation is the primary factor, producing a higher mesopause of 181 K at 99 km altitude. In summer, the rising atmosphere from lower altitude makes a colder mesopause at 88 km altitude with the temperature 177 K. Harmonic analysis demonstrates a strong change in annual amplitudes over a rather small altitude range, coupling with the annual phase profile, and it is shown that dynamics in lower mesopause region and solar radiation in upper mesopause region play the key role in determining the thermal structure respectively.

Key words Laser optics, Sodium Lidar, Atmospheric temperature, Mesopause

0 引言

作为中间层与热层的边界层，中间层顶区域存在多种能量交换机制，例如太阳辐射、大气分子的红外辐射、光化学反应、重力波和潮汐波等大气动力学过程，这些因素都影响着该区域的大气温度分布特征[1]。钠原子层正好分布于中间层顶区域，因此开展钠层大气温度分布特性研究有助于更准确地掌握中高层大气规律。

20 世纪初，研究发现了存在于地球上空约 80～110 km 高度范围的钠金属层，便开始把钠金属原子作为示踪物，利用其共振荧光特性获取该层大气参数。对钠原子的早期观测主要是通过分析其对太阳光的共振散射实现的。1969 年 Bowman 等[2] 首次利用激光雷达实现了钠层观测。随后，钠荧光激光雷达的研究不断深入，并逐步改进观测技术。早期的钠荧光激光雷达受激光器技术的限制，只能探测钠原子密度。随着激光器技术的发展，在 20 世纪 80 年代，采用窄线宽激光器，成功研制了可同时探测钠层大气温度和三维风场的钠荧光多普勒激光雷达[3-5]。钠荧光激光雷达具有高探测精度和高时空分辨率的特点，是可实现中间层顶大气常规观测的重要设备，其探测数据已被广泛用于地球大气特性的研究[6, 7]。

本文利用中国科学院国家空间科学中心部署在河北廊坊临近空间大气探测站（39°N, 116°E）的钠荧光多普勒激光雷达的探测数据，研究了 2013 年廊坊上空钠层大气温度的年度和季节分布特性，并分析了影响温度分布的多种因素。

1 激光雷达系统的组成及探测数据

中国科学院国家空间科学中心于 2011 年成功研制了中国首台车载钠荧光多普勒激光雷达，部署于中国科学院廊坊临近空间大气探测站开展中高层大气观测[8]。该激光雷达采用三频探测技术，发射位于钠原子 D_2 谱线上三个频点的窄线宽脉冲激光束，激发高空钠原子产生共振荧光散射信号，通过分析后向散射信号的多普勒展宽和多普勒频移，反演出钠层大气的温度、风场及钠原子密度三个参量。廊坊钠荧光多普勒激光雷达的系统参数列于表 1。

本文利用廊坊钠激光雷达在 2013 年间单次观测时长大于 3 h，共 24 个夜晚、115 h 的有效探测数据，对廊坊上空的大气温度分布特性进行分析研究。

2013 年廊坊钠激光雷达探测数据在每个月份的分布情况如图 1 所示。激光雷达原始数据的积分时间为 1 min，积分高度 76.5 m。为减小反演误差，数据处理时将每个廓线对积分时间累加为 15 min、积分高度累加为 306 m。日平均值由每日所有温度廓线值相加除以廓线数得出，月平均值由一个月中所有日平均值廓线累加除以天数得出，年平均值则由月平均值计算得出。

表 1 廊坊钠荧光多普勒激光雷达系统参数

Table 1 Langfang sodium fluorescence Doppler lidar system parameters

系统参数	参数值
激光波长/nm	589.2
频率调节值/MHz	±630
脉冲能量/mJ	300
脉冲宽度/ns	8
发散角/mrad	1
脉冲频率/Hz	30
望远镜口径/m	1
视场角/mrad	2
滤波器带宽/nm	1
时间分辨率/min	1
高度分辨率/m	76.5

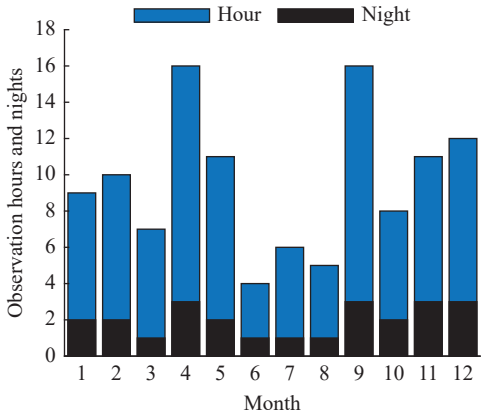


图 1 2013 年廊坊钠激光雷达探测数据时间分布

Fig. 1 Monthly observation hours and nights of sodium lidar for Langfang in 2013

图 2 为 2013 年廊坊钠原子数密度的年平均值分布廓线，廓线呈高斯状分布，半高宽约 12 km，钠原子数密度最大值约为 3.15×10^9 m^{-3}，中心高度约为 91.5 km。数据结果与其他站点钠激光雷达观测结果一致[9]，表明探测数据可靠。

2 中间层顶年均温度分布特性

图 3 给出了廊坊钠激光雷达获取的 83～105 km 钠层大气温度年平均值廓线，误差棒代表对应高度大气温度的标准偏差。钠层大气温度年平均分布特性可在以下三个高度范围内进行研究。

（1）83～87.5 km。大气温度随高度增加而减小，

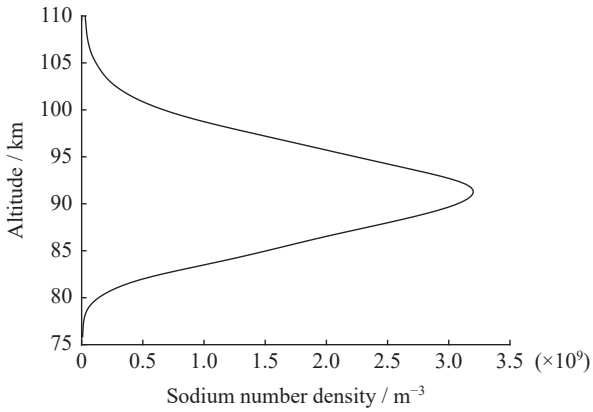


图 2 2013 年廊坊钠原子数密度年平均值分布廓线

Fig. 2 Annual mean number density profile of sodium atoms for Langfang station in 2013

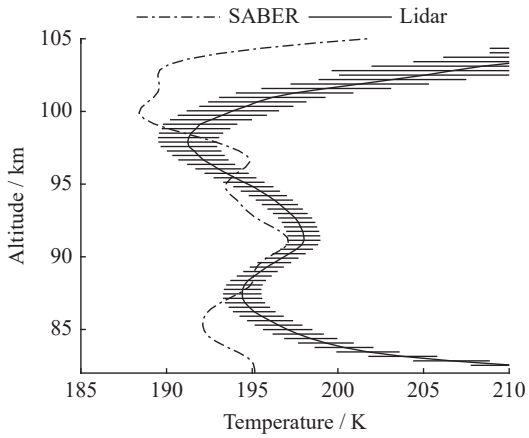


图 3 2013 年钠激光雷达和 SABER 探测的廊坊中间层顶区域大气温度年平均值廓线

Fig. 3 Annual mean temperature profiles of Langfang mesopause region in 2013, detected by Na lidar and SABER respectively

此分布特征由平流层顶一直延续至此。这是由于该高度范围内大气的热量主要来源于 O_3 对太阳紫外辐射的吸收，而 O_3 的密度随着高度升高而减小，则吸收的太阳辐射也随之减少，因此形成了大气温度随高度增加逐渐降低的现象[10]。

（2）87.5～97.5 km。大气温度先随高度增加而升高，在 91 km 处达到最大值 198 K，然后再次随高度增加而降低，直至中间层顶。中间层顶的年平均高度约为 97.5 km，温度值约为 191.2 K。在此高度范围内，存在多种能量收支形式，其中 O_2 和 O_3 对太阳辐射的吸收是最主要的能量来源，与 CO_2 的红外辐射形成大气辐射平衡，在研究中常被用来计算大气背景

温度。此外，放热化学反应是导致年平均温度廓线在91 km高度处出现极大值的直接原因。为研究光化学反应，Mlynczak等[11]建立了中间层顶区域的化学反应模型，模型包含了太阳辐射对O_2和O_3的光解反应、发生在该区域的O_x与H_x等粒子间的多种化学反应。结果表明，中纬度地区上空的化学反应加热率在91 km附近达到最大值，约为10 K·d^{-1}，表明光化学反应会导致该高度大气温度升高，这与廊坊激光雷达观测数据表现一致。

（3）97.5 km以上。大气温度随高度而急剧升高，在钠层顶部，达到224 K。中间层顶以上大气密度极为稀薄，能量主要来源于氧原子对太阳极紫外辐射的吸收，且受太阳活动影响较大。

数据对比表明，廊坊激光雷达的年平均温度结果与位于同纬度的美国Fort Collins（40.6°N, 105°W）的钠激光雷达温度数据结果一致[12]。图3同时给出了TIMED/SABER卫星探测的廊坊上空温度的年平均值廓线，SABER数据选取原则为：地理位置以廊坊钠激光雷达观测点为中心，纬度39°±2°N、经度116°±4°E范围内；数据探测时间与钠激光雷达同日；数据平均值处理方法与钠激光雷达相同。由图3可以看出，两条温度廓线的变化趋势保持一致，尤其在87～98 km高度范围内，温度差维持在±3 K范围内。87 km以下和98 km以上区域，两条温度廓线的差值逐渐增大，这是因为激光雷达的测量精度与钠原子密度有关，而在钠层上下边缘钠原子密度减小，导致激光雷达数据误差增大；在此高度，尤其钠层上边缘区域，稀薄的大气密度也会导致用于SABER反演温度的波段偏离局部热力学平衡，使温度测量偏差增大[13]。

3 钠层大气温度季节分布特性

利用钠层大气温度的月平均值和温度拟合公式分析钠层大气温度的季节分布特性，拟合公式为

$$y(x) = A_0 + A_1 \cos\left[\frac{2\pi}{12}(x-\varphi_1)\right] + A_2 \cos\left[\frac{4\pi}{12}(x-\varphi_2)\right].$$

式中，x为月份，$y(x)$为对应月份的大气温度数值，A_0为温度的年平均值，A_1和A_2分别为温度年变化和半年变化的幅值，φ_1和φ_2分别为温度年变化和半年变化的相位。

上述拟合公式考虑了温度的年变化和半年变化[14]，以月份为变量拟合出每个高度上温度变化的幅值和相位，再由拟合参数计算温度的月平均值，结果如图4所示。由图4可以看出中间层顶的季节变化特点，中间层顶在冬季位于99 km，最低温度181 K。冬季过后，中间层顶迅速降至夏季高度88 km，温度177 K，并在此高度持续整个夏季，然后在秋季又逐渐上升至冬季的高度。中间层顶这一季节性变化是太阳辐射和大气波动共同作用的结果。地球围绕太阳公转影响着地球对太阳辐射的接收，夏季半球接收的太阳辐射多，则地表温度较高，气流以绝热膨胀的方式从大气层底部向上传输，形成重力波，所经过区域大气温度降低。随着大气密度减小，重力波在90 km附近不能继续向上传输，并在此区域耗散。而在100 km以上，由于氧原子吸收了大量的太阳紫外辐射，大气温度较高。在两种因素共同作用下，使得中间层顶基本维持在90 km以下高度。

在冬季，自对流层向上传输的重力波波谱较宽，由此引起的降温效应微弱，中间层顶区域大气温度主要受O_3吸收大气辐射影响。而由于O_3浓度随高度降低，大气温度也逐渐降低[15]。至100 km以上，大气温度由于氧原子大量吸收太阳辐射而升高，因此中间层顶位于约100 km高度以下位置。

由图4可以看出，钠层大气气温在秋季较高。有研究认为，这是由于重力波与周日迁移潮汐发生非线性相互作用，造成周日迁移潮汐在此处破碎释放能

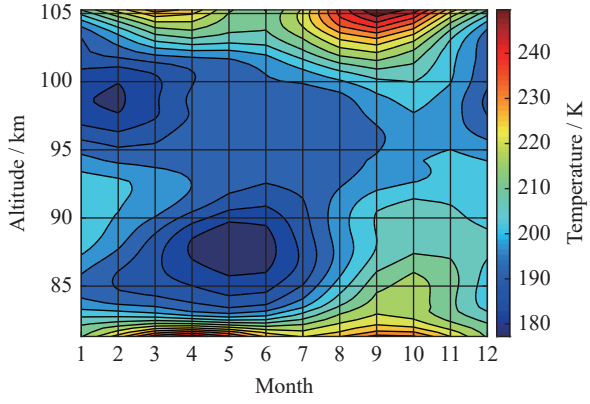


图4 2013年廊坊上空钠层大气温度月平均拟合值分布

Fig. 4 Distribution of monthly average fitted values for atmospheric temperature in the sodium layer over Langfang in 2013

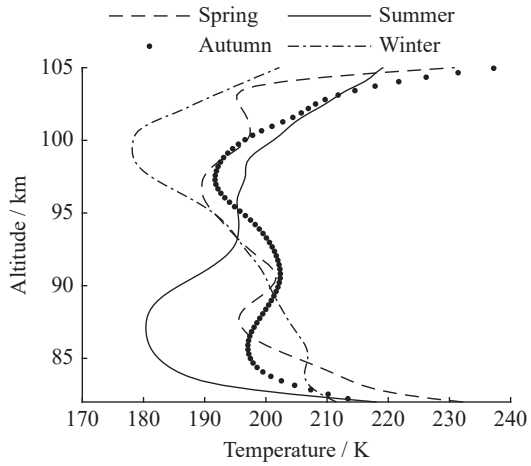


图 5 2013 年廊坊上空钠层大气温度季节平均值廓线

Fig. 5 Seasonal mean temperature profiles in the sodium layer over Langfang in 2013

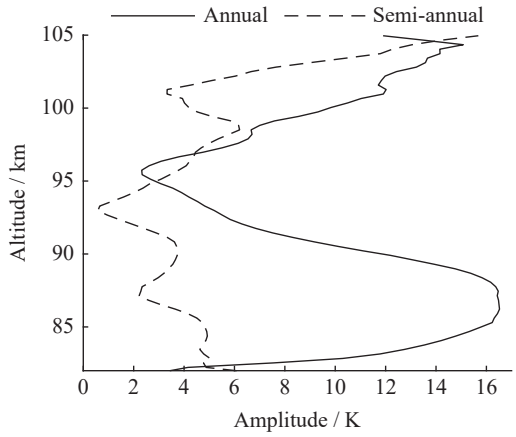


图 6 2013 年廊坊钠层温度年变化和半年变化的幅值廓线

Fig. 6 Amplitude profiles of annual and semi-annual temperature changes in sodium layer 2013

量, 从而引起温度升高的结果[16]。

图 5 给出了 2013 年廊坊 4 个季节的平均温度廓线。由图 5 可明显看出, 冬夏两季的中间层顶分别位于两个不同的高度, 而春秋两个季节均存在两个温度低点, 表现为冬夏两季温度分布的过渡。

4 钠层大气温度的扰动特性

为研究钠层大气温度的年变化特性, 由拟合公式提取出钠层大气月均温度的变化幅值和相位。2013 年廊坊钠层温度的年变化及半年变化幅值随高度分布廓线如图 6 所示。由图 6 可见, 温度年变化的最大幅值位于 87 km 高度处, 约为 16.5 K; 最小值位于 95.5 km 高度处, 约为 2.4 K。其中温度的半年变化幅值较小, 仅在 95～99 km 高度范围内与年变化幅值相当, 这一特性在图 4 中也显现出来, 大气温度在这一高度范围表现出较为明显的半年分布特征。

温度拟合公式中的相位分布可用来分析影响温度变化的因素, 相位对应着温度变化最大的月份。如前所述, 通常将中间层顶区域大气对太阳辐射的吸收和大气分子红外辐射的综合效应作为大气背景温度, 其他因素引起的温度变化作为温度扰动。分析图 7 中相位的年度分布可以看出, 中间层顶区域上半部分的相位位于夏季, 而夏季是太阳辐射最强烈的季节, 表明温度变化与太阳辐射同相, 太阳辐射是中间层顶上部的主要影响因素。在中间层顶区域下部, 温度变化不再与太阳辐射同相, 根据本文上述分析, 大气动

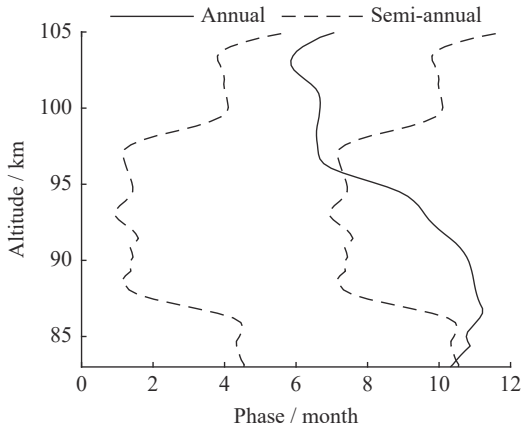


图 7 2013 年钠层温度年变化和半年变化的相位廓线

Fig. 7 Phase profiles of annual and semi-annual temperature changes in sodium layer 2013

力学因素是影响此高度范围内大气温度分布的主导因素。

5 结论

通过分析中国科学院廊坊临近空间大气探测站钠激光雷达 2013 年间的观测数据, 给出了廊坊上空钠层大气温度的年度及季节分布特征。分析了太阳辐射、大气动力学及光化学反应对中间层顶区域温度分布的影响, 并从波动理论的角度分析了钠层区域大气温度的年变化和半年变化特征。由于中间层顶区域大气温度分布受多种因素影响, 且探测手段不多,

因此掌握的数据较少。地基钠荧光多普勒激光雷达仍然是目前、甚至未来一段时间内可连续开展中间层顶区域大气观测的重要设备。积累更多的探测数据有助于开展中间层顶区域大气温度和气候研究，也可为建立更准确的大气模型提供数据支持。

参考文献

[1] CAO Wenxiang. Observations of Atmospheric Mesopause and Wave Turbopause by SABER/TIMED Satellite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012 (操文祥. 中间层顶与湍流层顶的SABER/TIMED观测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012)

[2] BOWMAN M R, GIBSON A J, SANDFORD M C W. Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar[J]. *Nature*, 1969, **221**(5179): 456-457

[3] MEGIE G, BLAMONT J E. Laser sounding of atmospheric sodium interpretation in terms of global atmospheric parameters[J]. *Planetary and Space Science*, 1977, **25**(12): 1093-1109

[4] FRICKE K H, VON ZAHN U. Mesopause temperatures derived from probing the hyperfine structure of the D_2 resonance line of sodium by lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1985, **47**(5): 499-512

[5] PHILBRICK C P, YANG F, VARGAS F A, *et al.* A Na density lidar method and measurements of turbulence to 105 km at the Andes Lidar Observatory[J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2021, **219**: 105642

[6] HU X, GARDNER C S, LIU A Z. Seasonal and nocturnal variations of the mesospheric sodium layer at Starfire Optical Range, New Mexico[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, **46**(3): 432-437

[7] CHU X Z, CHEN Y F, CULLENS C Y, *et al.* Mid-latitude thermosphere-ionosphere Na (TINa) layers observed with high-sensitivity Na Doppler lidar over boulder (40.13°N, 105.24°W)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(11): e2021GL093729

[8] HU Xiong, YAN Zhaoai, GUO Shangyong, *et al.* Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(4): 417-423 (胡雄, 闫召爱, 郭商勇, 等. 钠荧光多普勒激光雷达测量中间层顶区域大气温度[J]. 科学通报, 2011, **56**(4): 247-253)

[9] SHE C Y, CHEN S S, HU Z L, *et al.* Eight-year climatology of nocturnal temperature and sodium density in the mesopause region (80 to 105 km) over Fort Collins, CO (41°N, 105°W)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(20): 3289-3292

[10] ROBERT J S, CHESTER S G. Thermal structure of the mesopause region (80–105 km) at 40°N latitude. Part I: Seasonal variations[J]. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 2000, **57**: 66-77

[11] MLYNCZAK M G, SOLOMON S. Middle atmosphere heating by exothermic chemical reactions involving odd-hydrogen species[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, **18**(1): 37-40

[12] YU J R, SHE C Y. Climatology of a midlatitude mesopause region observed by a lidar at Fort Collins, Colorado (40.6°N, 105°W)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D4): 7441-7452

[13] GARCÍA-COMAS M, LÓPEZ-PUERTAS M, MARSHALL B T, *et al.* Errors in sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) kinetic temperature caused by non-local-thermodynamic-equilibrium model parameters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(D24): D24106

[14] SHE C Y, VON ZAHN U. Concept of a two-level mesopause: support through new lidar observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D5): 5855-5863

[15] XU J Y, LIU H L, YUAN W, *et al.* Mesopause structure from thermosphere, ionosphere, mesosphere, energetics, and dynamics (TIMED)/sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D9): D09102

[16] RAMESH K, SRIDHARAN S, RAGHUNATH K, *et al.* Planetary wave-gravity wave interactions during mesospheric inversion layer events[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(7): 4503-4515