

子午工程首枚气象火箭大气探测结果分析

姜国英^①, 徐寄遥^①, 史东波^②, 韦峰^②, 王连忠^②

① 中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院空间科学与应用研究中心火箭与气球探空技术研究室, 北京 100190

E-mail: gyjiang@spaceweather.ac.cn

2011-01-27 收稿, 2011-04-06 接受

国家自然科学基金(40804037, 40890165, 40921063)、国家重大科学基础设施项目——东半球空间环境地基综合监测子午链“子午工程”和国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 2010年6月3日凌晨, 子午工程首枚气象火箭在海南火箭发射场成功发射. 本文利用此次气象火箭探测的大气温度、风场和辅助火箭发射的气球探测的大气温度数据, 分析了大气温度、风场随高度的变化, 研究了大气风剪切、重力波和大气动力学稳定性. 此外, 将大气温度和风场随高度的剖面与 SABER/TIMED 卫星的温度探测、MSIS00 模式和 HWM07 模式结果作了对比分析.

关键词

子午工程
气象火箭
大气温度
风切变
大气稳定性

由于现有空间探测技术水平的局限, 对 30~80 km 高度范围大气的认知仍相对有限, 而该区域是一些飞行器发射和运行的必经之路, 所以该区域的探测对研究中层大气以及宇航运载器发射等方面有着重要意义. 气象火箭是对从对流层到中间层大气环境参数进行直接探测的有效手段之一^[1~4].

2010年6月3日凌晨4时子午工程(国家重大科学基础设施项目——东半球空间环境地基综合监测子午链)首枚气象火箭在海南探空火箭发射场成功发射. 火箭携带的探空仪首次使用 GPS 定位技术给出高精度位置定位, 探空仪在开伞降落的过程中对临近空间大气温度、压力、风速和风向几个参量进行实地探测, 最终有效地给出了约从地面至 52 km 的大气探测数据. 火箭发射前的几个小时先放了 2 个探空气球, 火箭发射后放了第 3 个探空气球, 其目的是了解发射场上空大气风速、风向、温度和湿度等参数的状态, 为火箭发射射角、射向、弹道等方面的调整提供各种数据依据.

气象火箭探测具有较高的时间和高度分辨率, 但探测时间维持较短. 根据这一特点, 单枚气象火箭数据常常被用来研究小尺度大气结构和短周期大气

波动, 如风切变、湍流、重力波等^[1]. 多枚火箭的数据可研究这些结构和波动随时间和空间的变化^[3~7].

本文分析了子午工程首枚气象火箭探测结果, 主要给出 3 方面内容: (1) 展示火箭和气球探测的 0~52 km 高度范围内的大气温度和风场, 并将结果与卫星探测数据和大气模式作对比; (2) 基于火箭的风场探测结果, 研究风切变和垂直重力波谱; (3) 基于火箭的风场和温度探测结果, 分析发射场上空的大气动力学稳定性.

1 数据和模式

子午工程首枚气象火箭其搭载的临近空间大气气象探空仪是中国科学院空间科学与应用研究中心研制的海燕 A 型气象探空仪. 这种探空仪采用了多项先进技术使探测数据的精度有了显著提高. 火箭在 6 月 3 日凌晨 4 时发射, 113 s 达到 70 km 轨道顶点, 此时探空仪与火箭分离, 在下降过程中不断传回大气探测数据, 大约 2.5 h 后落到地面. 在降落至约 52 km 高度时, 降落伞完全展开, GPS 接收机正常锁定卫星, 此后所探测到的数据用来计算得到大气风场、温度、密度等参量. 本文采用的火箭数据高度范围为 0~52 km.

2001年12月7日,美国宇航局成功发射了TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics)卫星,用于探测全球中层-低热层区域大气参数(温度、压强、风、化学组成)及其随时间和空间的变化. SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)是搭载于TIMED 卫星上的宽带辐射计,主要探测对象为中层和低热层区的压强和温度、大气红外辐射致冷、中层和低热层区的太阳和化学加热效应. SABER/TIMED 卫星探测的温度数据已大量应用于中间层-低热层大气研究,结果显示 SABER 多通道辐射计探测的温度可信度很高^[8-13]. 6月3日在海南火箭发射场(19.5°N, 109°E)经纬度 $\pm 5^\circ$ 范围内的 SABER 温度数据被用来检验火箭和气球温度探测结果,所取数据高度范围为20~55 km.

MSIS(Mass Spectrometer and Incoherent Scatter empirical model)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. 之后经过多次更新模式版本,目前 MSIS 系列模式的最新版是 MSIS00^[14]. MSIS00 模式的适用高度范围为地面至高层大气,模式可给出高层大气温度及成分结构.

HWM(Horizontal neutral Wind Model)是高层大气水平中性风场经验模式,最初基于 AE-E 和 DE2 卫星探测的风场数据建立. 目前最新版本为 HWM07^[15],与之前的 HWM 系列模式一脉相承. 在 HWM07 模式的研发中新同化了一些近期的地基和天基观测数据. HWM07 模式的适用高度范围为地面至高层大气.

本文中 HWM07 模式风场和 MSIS00 模式温度被利用于与火箭的风场和温度探测结果作对比研究. 需要注意的是大气模式输出结果是平均意义上的结果. 另外,基于火箭的风场探测数据,还分析了风剪切、垂直重力波谱和大气动力学稳定性,计算方法见本文第二部分结果分析.

这里对本文所采用的风向定义给出特别说明:东西向风,向东吹的风速度为正,向西吹的风为负;南北向风,向北吹的风速度为正,向南吹的风速度为负.

2 结果分析

2.1 火箭和气球探测的温度、风场

图1给出了2010年6月3日火箭、气球温度探

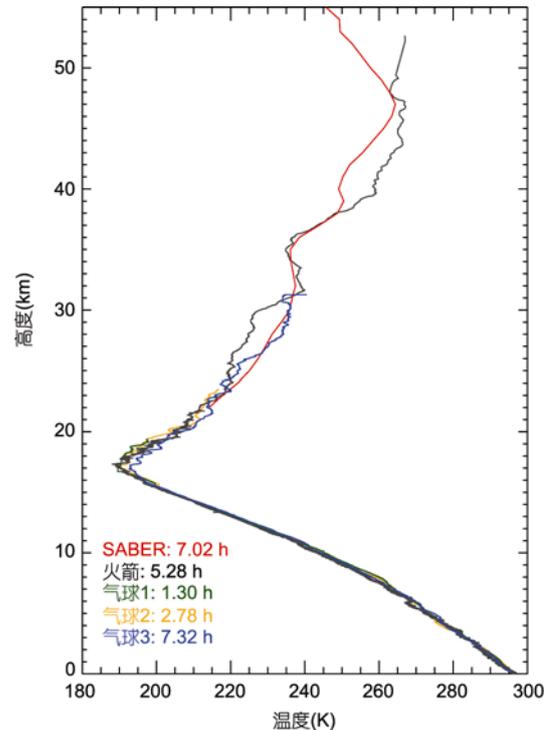


图1 火箭、气球温度探测结果与 SABER 探测相比较

测结果与 SABER/TIMED 探测的比较结果. 为方便分析图1,先给出几种探测方式的探测时间段. 火箭探测有效记录数据的时间段为凌晨4时4分2秒~6时30分57秒;第1只气球采集有效数据的时间段为凌晨0时42分7秒~1时53分37秒;第2只气球采集有效数据的时间段为凌晨2时12分17秒~3时22分28秒;第3只气球采集有效数据的时间段为早上6时29分34秒~8时08分45秒;在海南火箭发射场经纬度 $\pm 5^\circ$ 的22~55 km空间范围内, SABER 探测的时间段为早上6时58分39秒~7时3分34秒. 图1中各探测方式后标注的时间为该探测方式的时间中值,比如火箭的时间中值为凌晨5时16分48秒, SABER 的时间中值基本为早上7时1分12秒.

从图1可以看出,火箭和气球不同探测时间观测到的海南发射场上空对流层顶的位置是一致的,大约在17 km高度处. 火箭探测温度与 SABER 探测温度的探测时间差2.5~3 h,两者随高度变化的趋势基本相同,只在24~30 km和39~52 km两个高度段上温度数值差别明显. 再来看气球探测温度和 SABER 探测温度的对比,第3只气球与 SABER 的探测时间最相近只差半小时,两者的温度探测值也最为接近,符合得非常好.

图2给出了火箭探测温度与 MSIS00 模式输出温

度的比较结果. 由图 2(a)可以看出, 除了对流层顶的位置火箭探测比模式高约 2 km 外, 两者的温度变化的基本趋势基本一致, 温度数值也比较接近. 火箭的温度数值是特定地域的实际探测值, 而模式输出的温度只是一个平均状态的大气结构参数随高度的分布状况, 所以, 两者给出的对流层顶位置有 2 km 的

差别也是合理的, 火箭的温度探测值是可靠的. 图 2(b)为火箭探测温度与 MSIS00 模式温度的差, 最大差值 13.7 K 出现在 17.3 km 高度处.

图 3 给出火箭和气球的风场探测结果(时间标注同图 1). 图 3(a)是风速随高度变化的剖面, 图 3(b)是风向随高度变化的剖面. 在火箭和气球共有的探测

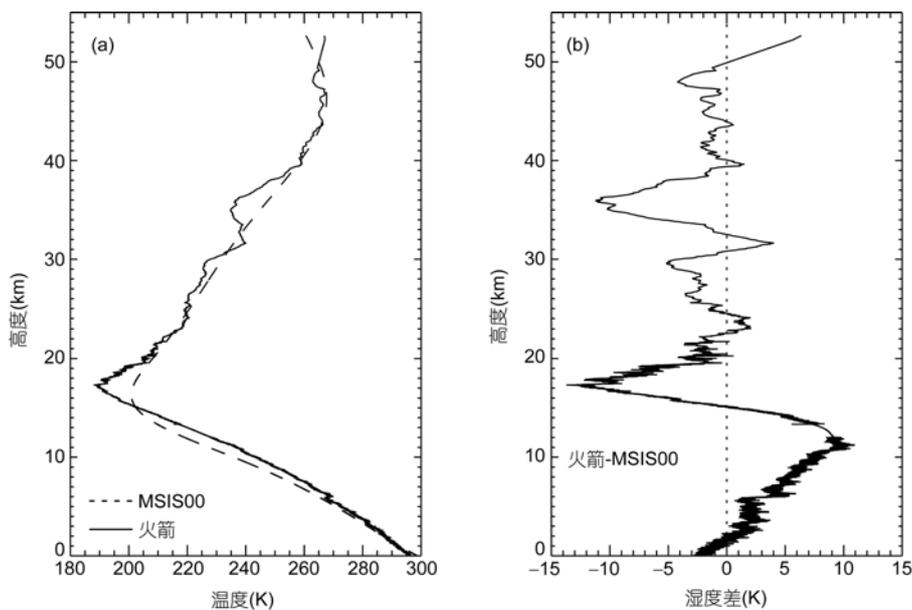


图 2 火箭温度探测结果与 MSIS00 模式比较

(a) 火箭探测温度(实线)和 MSIS00 模式温度(虚线); (b) 火箭探测温度与 MSIS00 模式温度的差值

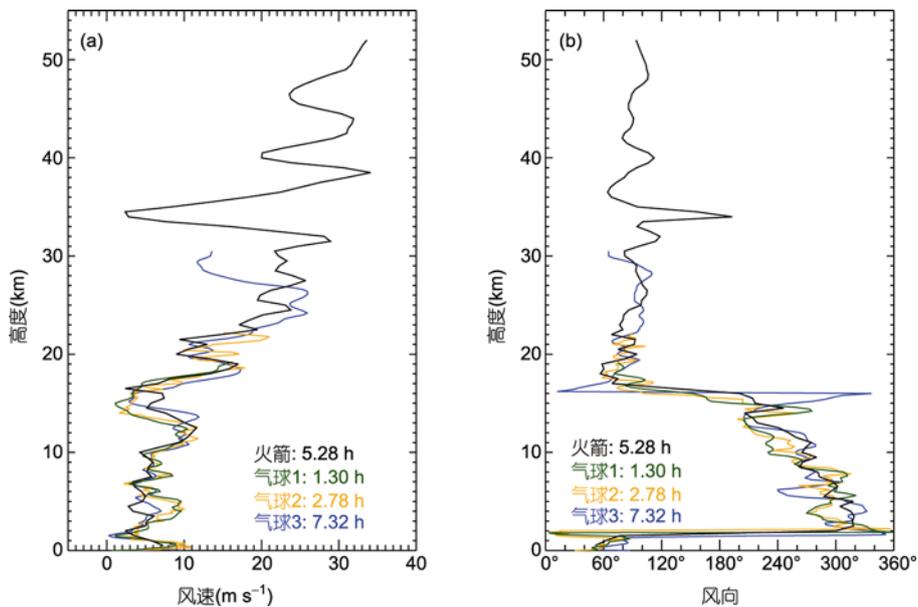


图 3 火箭和气球的风场探测结果

(a) 风速随高度变化剖面; (b) 风向随高度变化剖面, 定义风向 0°为南向风, 风向值变化为顺时针

高度处, 两者观测的风速和风向变化趋势一致, 数值上有些差别, 这个结果是合理的. 因为火箭和 3 个气球数据点的探测不在同一时刻(图 3), 所以两者探测的风场变化有一定差别; 但因在探测时间差内 0~52 km 高度范围内风场变化趋势基本相同, 所以两者观测的风速和风向变化趋势一致. 图 4 给出火箭的风场探测结 HWM07 模式的比较结果. 由图 4(a)和(c)可以得到, 在东西向风中, 火箭探测与模式在约 2~22

km 高度范围内符合得非常好, 在 22 km 以上两者相差较多, 但整体趋势是一致的. 在南北向风中, 火箭探测与模式的变化趋势一致, 模式的数值基本落在火箭探测值的中间位置, 这说明两者符合得很好. 图 4(b)和(d)为火箭探测风场与 HWM07 模式风场的差. 东向风中两者最大差值 26.1 m/s 出现在 38.6 km 高度处; 北向风中两者最大差值 17.9 m/s 出现在 31.6 km 高度处.

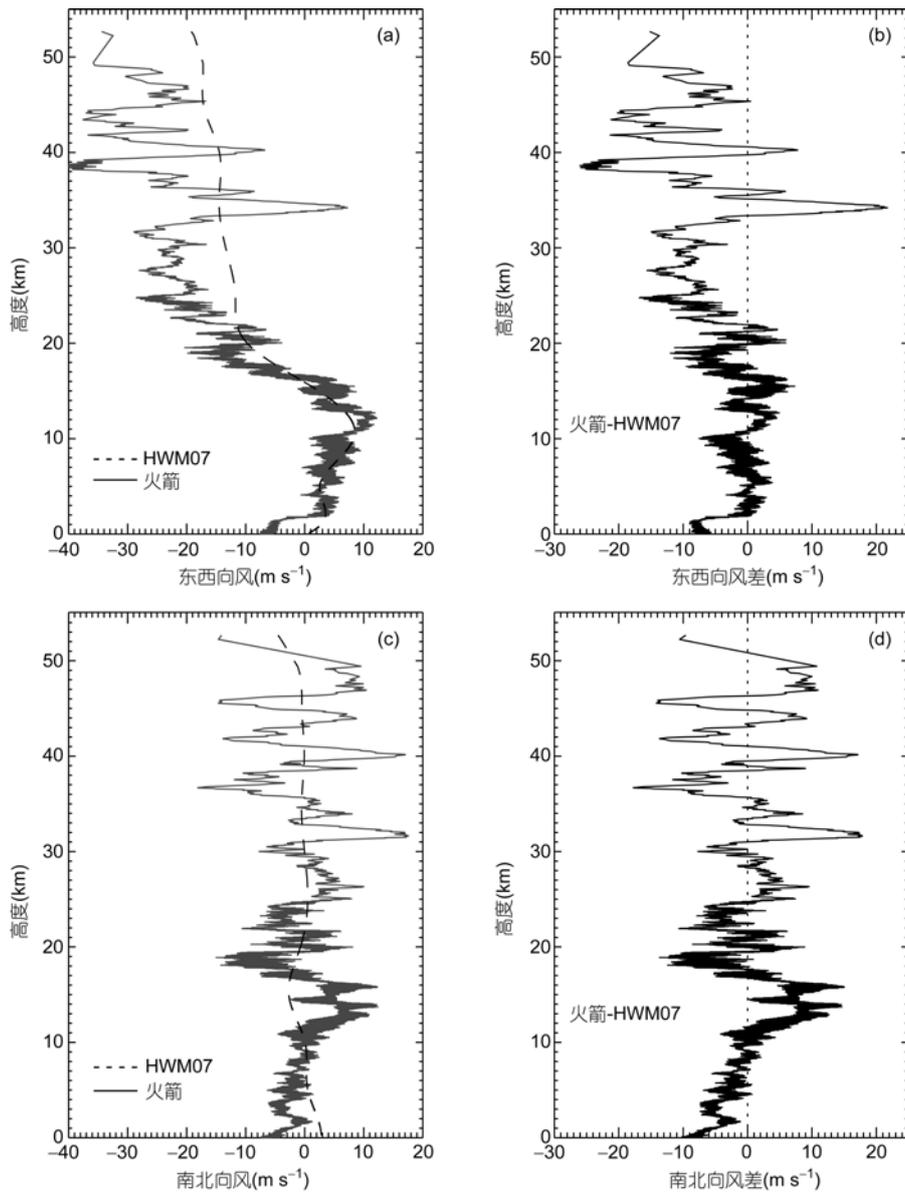


图 4 火箭风场探测结果与 HWM07 模式比较

(a) 火箭探测(实线)和 HWM07 模式(虚线)的东西向风场; (b) 火箭探测与 HWM07 模式东西向风的差值; (c) 火箭探测(实线)和 HWM07 模式(虚线)的南北向风场; (d) 火箭探测与 HWM07 模式南北向风的差值

由以上对比可见,子午工程首枚气象火箭和为火箭发射提供服务的3只气球携带的探测仪观测到的温度和风场数据很可靠.海南火箭发射场是世界上少数几个低纬度火箭探空发射实验基地之一,又与我国文昌航天城地理位置相近,所以这里的火箭和气球探测可为科学研究、技术试验以及空间环境保证提供更多的数据保障.

2.2 风切变和重力波

风切变是空间任意两点之间风向和风速的突然变化.从风场变化情况看,风切变主要分为3种情况:水平风的垂直切变,指水平风在垂直方向上两个不同高度点之间的风向和风速的变化;水平风的水平切变,指水平风在水平方向上2个不同距离点之间的风向和风速的变化;垂直风的切变,垂直风在水平方向上的变化.在实际大气中,这3种风切变既可单独存在,也可同时存在.

本文研究火箭探测的水平风的垂直切变(以下简称风切变).计算风场切变强度的公式如下:

$$\frac{dU}{dz} = \sqrt{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2}, \quad (1)$$

其中, u, v 分别为东西向风和南北向风的风速, z 为高度.分析结果见图5.

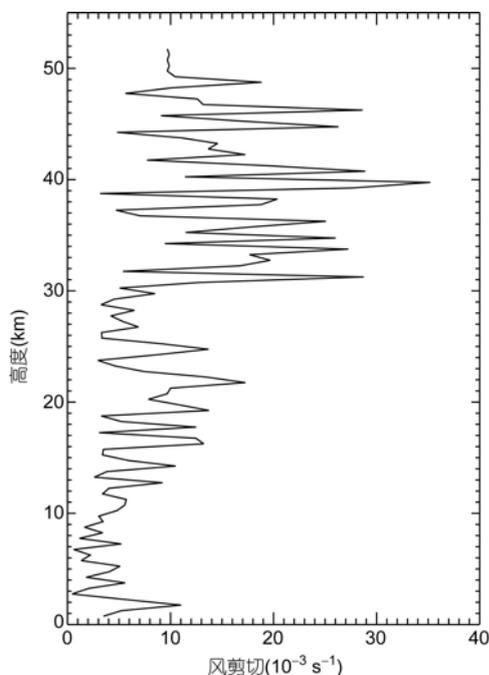


图5 火箭探测风场的风剪切

由图5可以看到,在对流层顶急流处(见图3),风切变的强度约达到 $13 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;较强的风切变出现在30~50 km高度处,最大风切变值出现在40 km处.其实在图3中就可以看到,在30~50 km高度处风场变化很强烈.

引起风场强烈变化和风切变的原因主要是该层大气中存在急流和各种尺度的波动,尤其是重力波^[1].利用火箭的风场探测数据,本文进一步计算了重力波的垂直波谱.计算步骤:首先通过滤波,将数据中垂直波数小于 0.03 km^{-1} 部分滤掉;然后利用 Lomb-Scargle 周期图方法对滤波后的数据进行频谱分析^[1,16,17].分析结果如图6所示,幅度最强(4.09 m/s)的重力波的垂直波长为3.2 km,幅度次强(4.04 m/s)的重力波的垂直波长为14.7 km.

2.3 大气动力学稳定性分析

在研究近地面大气的湍流运动中,一般用 Richardson 数^[18]判别大气层结的动力学稳定性. Richardson 数的物理意义是,层结大气流体微团势能和动能的比值,其定义公式如下:

$$Ri = \frac{N^2}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2}, \quad (2)$$

其中, N 为浮力频率, du/dz 和 dv/dz 分别表示速度 u 和 v 对垂直方向的坐标 z 的导数.浮力频率的平方为

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} \right), \quad (3)$$

其中, g 是重力加速度, T 是大气温度, c_p 是大气的定压比热, $\frac{g}{c_p}$ 是大气温度的绝热递减率(这里取干燥大气的温度绝热递减率 9.8 K km^{-1}).

理论上认为 $Ri < 0.25$ 的时候,层流(laminar flow)

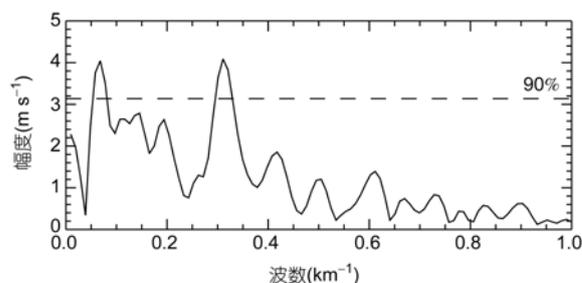


图6 火箭探测风场的重力波谱

变为湍流(turbulent flow), 出现剪切不稳定性^[6,19,20]. 另外浮力频率的平方 N^2 的数值也能表征大气的稳定性, $N^2 < 0$ 大气不稳定, $N^2 > 0$ 大气稳定^[21,22].

本文利用火箭的风场探测数据分析了大气的动力学稳定性. 图 7 给出 Richardson 数的计算结果, 图 7(a)展示了所研究高度范围内全部 Richardson 数值, 包含最大值; 图 7(b)给出 Richardson 数值在 0~1 范围内的高度分布情况, 虚线表示 Richardson 数值为 0.25. 图 8 给出浮力频率平方 N^2 的计算结果. 从图 7 可以看出, 在 0~52 km 高度范围内, Richardson 数大于 0.25, 这说明大气是基本稳定的. 另外, 图 8 的浮力频率的平方数值全为正值, 同样证明了在 0~52 km 高度范围内大气是基本稳定的这一结论.

3 总结

本文利用子午工程首枚气象火箭和相关气球探测的温度和风场数据, 分析了 2010 年 6 月 3 日海南火箭发射场上空温度和风场的分布情况, 并将结果与 SABER/TIMED 卫星探测及模式作对比; 基于火箭的风场探测, 研究了大气风切变、重力波和大气动力学稳定性. 主要结论如下:

(1) 火箭和气球探测的温度在共同覆盖的高度处的变化基本一致, 同样观测到发射场上空的对流

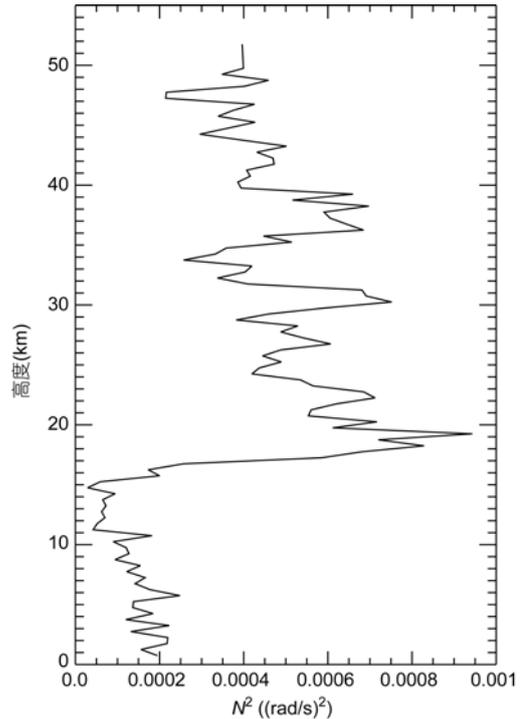


图 8 浮力频率平方随高度的变化

层顶在约 17 km 处. 火箭和气球的温度探测与 SABER 相比随高度变化趋势一致, 但因探测时间的不同, 在数值上有所差别, 与 SABER 探测时间最接近的第 3 只气球的温度与 SABER 温度符合最好.

(2) 火箭的探测结果与模式相比, 温度随高度的变化趋势与 MSIS00 模式一致, 两者的对流层顶的位置差 2 km, 火箭探测对流层顶为 17 km 高度处, 模式约为 15 km 高度处; 风场的变化与 HWM07 模式相比, 随高度的变化一致.

(3) 风切变在约 30~50 km 高度范围内强度最大, 在对流层顶急流处出现次大强度值. 波谱分析显示, 幅度最强(4.09 m/s)的重力波的垂直波长为 3.2 km, 幅度次强(4.04 m/s)的重力波的垂直波长为 14.7 km.

(4) 利用 Richardson 数和浮力频率平方值 N^2 分析了大气动力学不稳定性, 结果显示, 0~52 km 高度范围内的大气基本是稳定的.

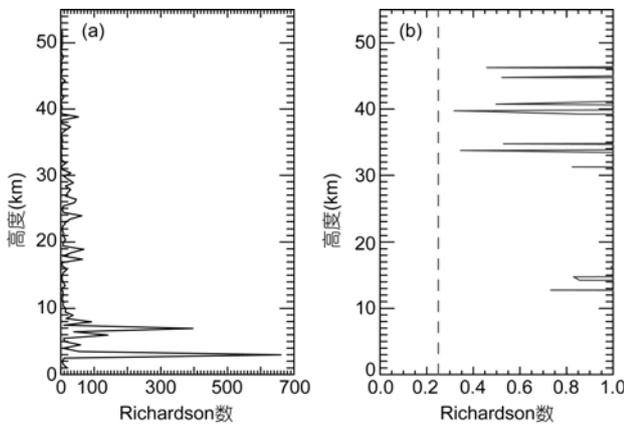


图 7 Richardson 数随高度的变化

(a) 数值在 0~700 之间的 Richardson 数; (b) 数值在 0~1 之间的 Richardson 数

致谢

感谢中国科学院空间科学与应用研究中心的马瑞平研究员对本文工作提供的帮助. 本项成果使用国家重大科学基础设施项目——东半球空间环境地基综合监测子午链科学数据.

参考文献

- 1 马瑞平. 用织女一号火箭在海南站探测的高空风和风切变. *空间科学学报*, 1997, 17: 70–74
- 2 Reed R J. Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere. *J Geophys Res*, 1966, 71: 4223–4233
- 3 Sasi M N, Krishna M B V, Geetha R, et al. A study of equatorial wave characteristics using rockets, balloons, lidar and radar. *Adv Space Res*, 2003, 32: 813–818
- 4 Antonita T M, Geetha R, Karanam K K, et al. A quantitative study on the role of gravity waves in driving the tropical Stratospheric Semiannual Oscillation. *J Geophys Res*, 2007, 112, doi: 10.1029/2006JD008250
- 5 Wüst S, Bittner M. Gravity wave reflection: Case study based on rocket data. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2008, 70: 742–755
- 6 Wu Y F, Widdel H U. Saturated gravity wave spectrum in the polar lower thermosphere observed by foil chaff during campaign “Sosium 88”. *J Atmos Sci*, 1992, 49: 1781–1789
- 7 Schöch A, Baumgarten G, Fritts D C, et al. Gravity waves in the troposphere and stratosphere during the MaCWAVE/MIDAS summer rocket program. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, doi: 10.1029/2004GL019837
- 8 Xu J, She C Y, Yuan W, et al. Comparison between the temperature measurements by TIMED/SABER and lidar in the midlatitude. *J Geophys Res*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JA011439
- 9 Xu J, Smith A K, Liu H-L, et al. Seasonal and quasi-biennial variations in the migrating diurnal tide observed by Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED). *J Geophys Res*, 2009, 114, doi: 10.1029/2008JD011298
- 10 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 Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2008JD010105
- 11 Huang F T, Mayr H G, Reber C A, et al. Stratospheric and mesospheric temperature variations for the quasi-biennial and semiannual (QBO and SAO) oscillations based on measurements from SABER (TIMED) and MLS (UARS). *Ann Geophys*, 2006, 24: 2131–2149
- 12 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 Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2008JD010013
- 13 Zhu X, Yee J-H, Talaat E R, et al. Diagnostic analysis of tidal winds and the Eliassen-Palm flux divergence in the mesosphere and lower thermosphere from TIMED/SABER temperatures. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 3840–3859
- 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 Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2002JA009430
- 15 Drob D P, Emmert J T, Crowley G, et al. An empirical model of the Earth’s horizontal wind fields: HWM07. *J Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2008JA013668
- 16 Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys Space Sci*, 1976, 39: 447–462
- 17 Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. II, Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys J*, 1982, 263: 835–853
- 18 Richardson L F. The supply of energy from and to atmospheric eddies. *Proc R Soc London A*, 1920, 67: 354–373
- 19 Kundu P, Beardsley R. Evidence of a critical Richardson number in moored measurements during the upwelling season off northern California. *J Geophys Res*, 1991, 96: 4855–4868
- 20 Lyons R, Panofsky H A, Wollaston S. The critical Richardson number and its implications for forecast problems. *J Appl Meteor*, 1964, 3: 136–142
- 21 Tsuda T, VanZandt T E, Mizumoto M, et al. Spectral analysis of temperature and Brunt-Väisälä frequency fluctuations observed by Radiosondes. *J Geophys Res*, 1991, 96: 17265–17278
- 22 Wu Y, Xu J, Yuan W, et al. Spectral analysis of 10-m resolution temperature profiles from balloon soundings over Beijing. *Ann Geophys*, 2006, 24: 1801–1808