0254-6124/2017/37(5)-547–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Bo, HU Xiong, XIAO Cunying, SHI Dongbo, WEI Feng, WANG Xinying, WANG Lianzhong. Characteristics of quasi-monochromatic inertia gravity waves revealed by first meteorological rocket data of the Meridian Space Weather Monitoring Project (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(5): 547-553. DOI:10.11728/cjss2017.05.547

子午工程首次火箭探空数据准单色惯性重力波特性分析*

王 博[1,2] 胡 雄[1] 肖存英[1] 史东波[1]
韦 峰[1] 王欣颖[1] 王连忠[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 利用 2010 年 6 月 3 日子午工程首次气象火箭探测的温度和风场数据, 采用矢端曲线法分别从平流层 (20∼50 km) 和对流层 (0∼15 km) 廓线提取了海南火箭发射场上空准单色惯性重力波参数. 火箭探测的平流层和对流层两个准单色惯性重力波分别向上和向下逆风传播, 固有周期为 20.1 h 和 22.4 h, 垂直波长为 9.5 km 和 4.0 km, 水平波长为 2900 km 和 753 km, 垂直群速度 c_{gz} 为 0.0887 m·s^{-1} 和 0.0298 m·s^{-1}, 水平群速度 c_{gh} 为 12.7 m·s^{-1} 和 3.65 m·s^{-1}, λ_h/λ_z 为 305:1 和 188:1, c_{gh}/c_{gz} 为 143:1 和 122:1.

关键词 准单色惯性重力波, 固有周期, 传播方向, 气象火箭

中图分类号 P 352

Characteristics of Quasi-monochromatic Inertia Gravity Waves Revealed by First Meteorological Rocket Data of the Meridian Space Weather Monitoring Project

WANG Bo[1,2] HU Xiong[1] XIAO Cunying[1] SHI Dongbo[1]
WEI Feng[1] WANG Xinying[1] WANG Lianzhong[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

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

Abstract Wind and temperature data detected by the first meteorological rocket of the Meridian Space Weather Monitoring Project were used to study quasi-monochromatic inertia Gravity Waves (GW) over Hainan rocket launch site (19.5°N, 109°E). The GW extracted from the stratosphere (troposphere) revealed by rocket sonde data is upward (downward) GW, and propagates against the

* 国家重点研发计划项目 (2016YFB0501503) 和国家自然科学基金项目 (41104099, 41104100, 41204137) 共同资助
2016-05-12 收到原稿, 2017-07-27 收到修定稿
E-mail: wangbocas@163.com. 通信作者 胡雄, E-mail: xhu@nssc.ac.cn

background wind. The intrinsic period, vertical wavelength λ_z, horizontal wavelength λ_h, vertical group velocity $c_{\mathrm{g}z}$, and horizontal group velocity c_gh of Stratospheric (Tropospheric) GW are 20.1 h (22.4 h), 9.5 km (4 km), 2900 km (753 km), 0.0887 (0.0298) m·s^{-1}, and 12.7 (3.65) m·s^{-1}, respectively. There is a significant difference between $c_\mathrm{gh}/c_{\mathrm{g}z}$ and $\lambda_\mathrm{h}/\lambda_z$ because of the background wind. The value of $\lambda_\mathrm{h}/\lambda_z$ and $c_\mathrm{gh}/c_{\mathrm{g}z}$ is 305:1 (188:1) and 143:1 (122:1) for the stratospheric (tropospheric) GW.

Key words Quasi-monochromatic inertia gravity waves, Intrinsic period, Propagation direction, Meteorological rocket

0 引言

20~60 km 高度的平流层大气探测手段相对较少. 探空火箭是少有的能够同时探测该区域温度和风场的手段 [1−3]. 20 世纪 70 至 80 年代开展了大量火箭探空活动, 探测站点主要分布在北美等北半球站点和热带站点, 这为研究平流层和中间层大气提供了探测数据 [4−6].

2010 年 6 月 3 日中国科学院国家空间科学中心在海南探空火箭发射场 (19.5°N, 109°E) 成功开展了子午工程首次火箭探空活动. 运载工具为 TY-4A 型气象火箭, 搭载的海燕 A 型气象火箭探空仪在中国首次采用了 GPS 体制. Shi 等 [7] 介绍了该探空仪的结构设计和探测过程, Jiang 等 [8] 将火箭探测所得温度和风场与气球观测、SABER 卫星观测以及 NRLMSISE-00, MISSS HWM 模式的数据等进行对比, 分析了风切变及大气动力学稳定性, 并给出重力波垂直波数振幅谱.

从此次火箭探测的温度和风场剖面中可以看到明显的准单色惯性重力波活动, 为进一步分析这些准单色大气重力波的活动特性, 本文利用子午工程首次火箭探空数据提取准单色惯性重力波参量 (波长、固有频率、传播方向等), 进一步研究海南发射场上空大气重力波活动特性.

1 数据来源和分析方法

这里使用了子午工程首次火箭探测的温度和风场数据, 温度和风场廓线覆盖地面至 52 km 高度, 高度间隔 500 m[7,8], 通过对原始采样数据进行三次样条插值得到.

探空火箭温度廓线显示发射场上空对流层顶高度约为 17 km. 为避开对流层顶对扰动可能的影响 [9,10], 选择 0~15 km 和 20~50 km 两段廓线提取重力波. 参考 Eckermann 的方案 [11], 将纬向风、经向风和温度的四阶多项式拟合结果作为背景, 火箭探测廓线作为大气真实状态, 扣除背景得到扰动, 采用矢端曲线法 [12−14] 提取重力波.

设 u, v, T 分别为纬向风、经向风和温度的观测值, $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{T}$ 为相应的背景值, 扰动值记为 u', v', T', 单位质量大气扰动动能 $E_\mathrm{k} = 0.5(u'^2 + v'^2)$, 扰动势能 $E_\mathrm{p} = 0.5\hat{T}^2$, 其中 $\hat{T} = \dfrac{g}{N}\dfrac{T'}{\bar{T}}$, g 为重力加速度, N 为浮力频率. 参照 Allen 等 [15] 的方案, 对 $\hat{T}$ 进行谱分析以确定重力波主导垂直波数 m. 单色重力波拟合如下:

$$u' = A_u \mathrm{e}^{\beta(z-z_0)} \cos[m(z-z_0)+\theta_u], \tag{1}$$

$$v' = A_v \mathrm{e}^{\beta(z-z_0)} \cos[m(z-z_0)+\theta_v], \tag{2}$$

$$\hat{T} = A_T \mathrm{e}^{\beta(z-z_0)} \cos[m(z-z_0)+\theta_T]. \tag{3}$$

其中: β 为增长因子; z_0 为参考高度, 取扰动廓线下边界.

根据重力波极化关系, 在不考虑增长因子的情况下, (u', v') 矢端曲线构成极化椭圆, 椭圆长轴与短轴之比与重力波固有频率近似满足

$$\hat{\omega}/f = |\hat{u}/\hat{v}|. \tag{4}$$

式中, 固有频率 $\hat{\omega} = \omega - k\bar{u} - \bar{v}l$, f 为惯性频率, $\hat{u}$, $\hat{v}$ 分别为扰动风场振幅在极化椭圆长轴和短轴方向的分量. 重力波水平传播方向 ϕ 与椭圆长轴所在方向平行, 二者间有 180° 的不确定性, 可通过 (u', v') 和 $(u_\mathrm{k}, \hat{T})$ 两个极化椭圆的转动方向来消除这种不确定性, 这里 $u_\mathrm{k} = u'\sin\varphi + v'\cos\varphi$. 重力波水平波长可通过色散关系 $(\hat{\omega}^2 - f^2)m^2 = N^2 k_\mathrm{h}^2$ 计算, 其中 k_h 为水平波数.

2 结果分析

图 1 和图 2 分别给出了 20~50 km 和 0~15 km 高度的原始廓线、拟合背景和扰动廓线. 探测时间 (6 月 3 日) 为夏季, 对流层约 2 km 以上为西风, 纬向风在大约 12 km 以下随高度增加而增加, 之后逐渐减小, 20~50 km 的平流层纬向风为东风, 温度和风场扰动幅度比 0~15 km 的对流层扰动大得多.

图 3 和图 4 分别给出 20~50 km 和 0~15 km 高度 $\hat{T}$ 的垂直波数振幅谱, 20~50 km (0~15 km) 谱峰值对应的垂直波长约为 9.5 km (4.0 km), 谱分析时采用经典的补零办法.

图 5 给出了 20~50 km 高度拟合结果矢端曲线构成的极化椭圆, 图 5(a) 显示 (u', v') 随高度增加顺时针旋转, 说明重力波向上传播, 结合 $(u_{\rm k}, \hat{T})$ 顺时针转动 (见图 5b), 消除重力波传播方向的 180° 不确定性, 得到该重力波水平传播方向为 119.5°.

由主导垂直波数拟合出能量最强的重力波, 由极

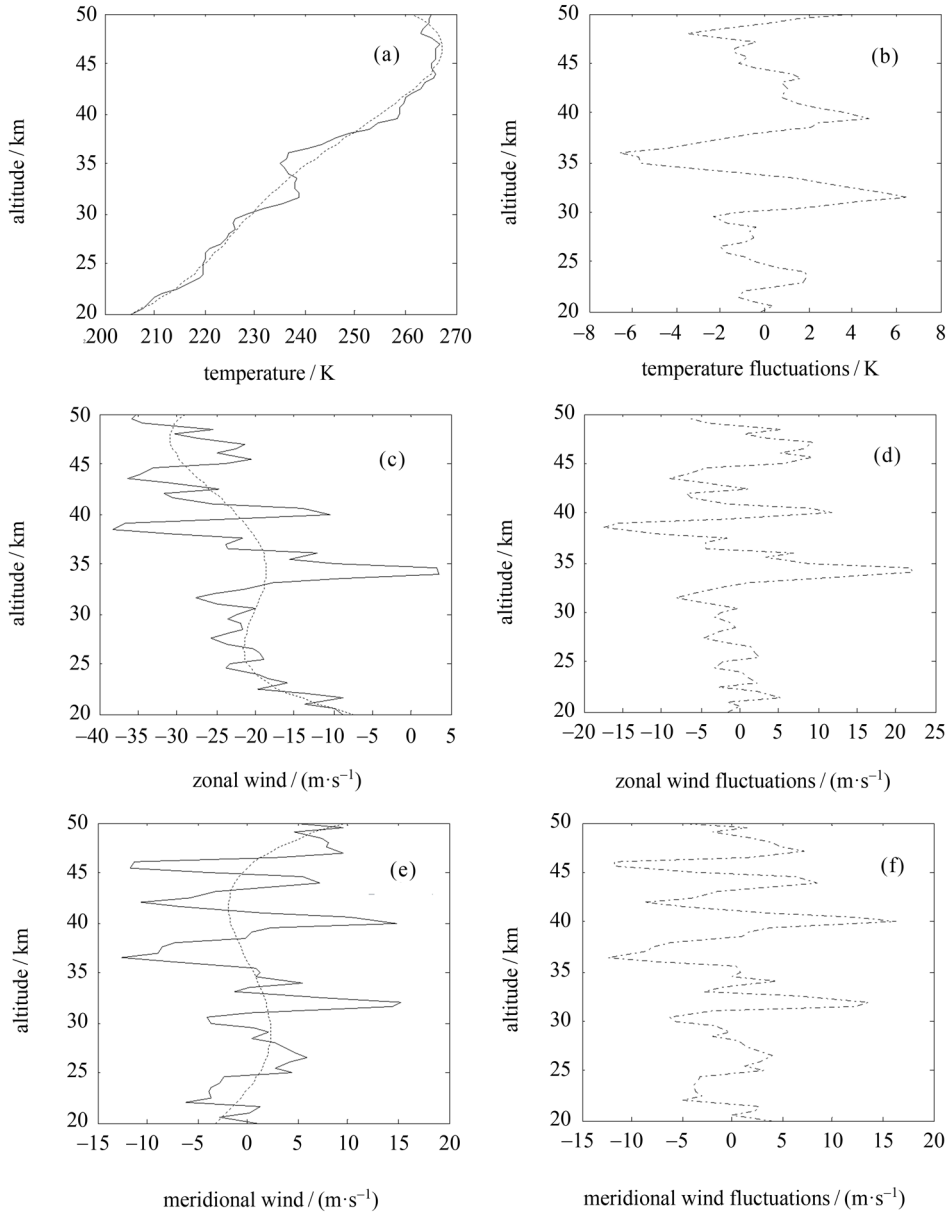


图 1 高度 20~50 km 温度、纬向风和经向风的原始廓线 (实线)、拟合背景廓线 (点线) 和扰动廓线 (点画线)

Fig. 1 Raw data (solid line), fitted background structure (dotted line) and perturbation profile (dash-dotted line) of temperature, zonal wind and meridional wind (height: 20~50 km)

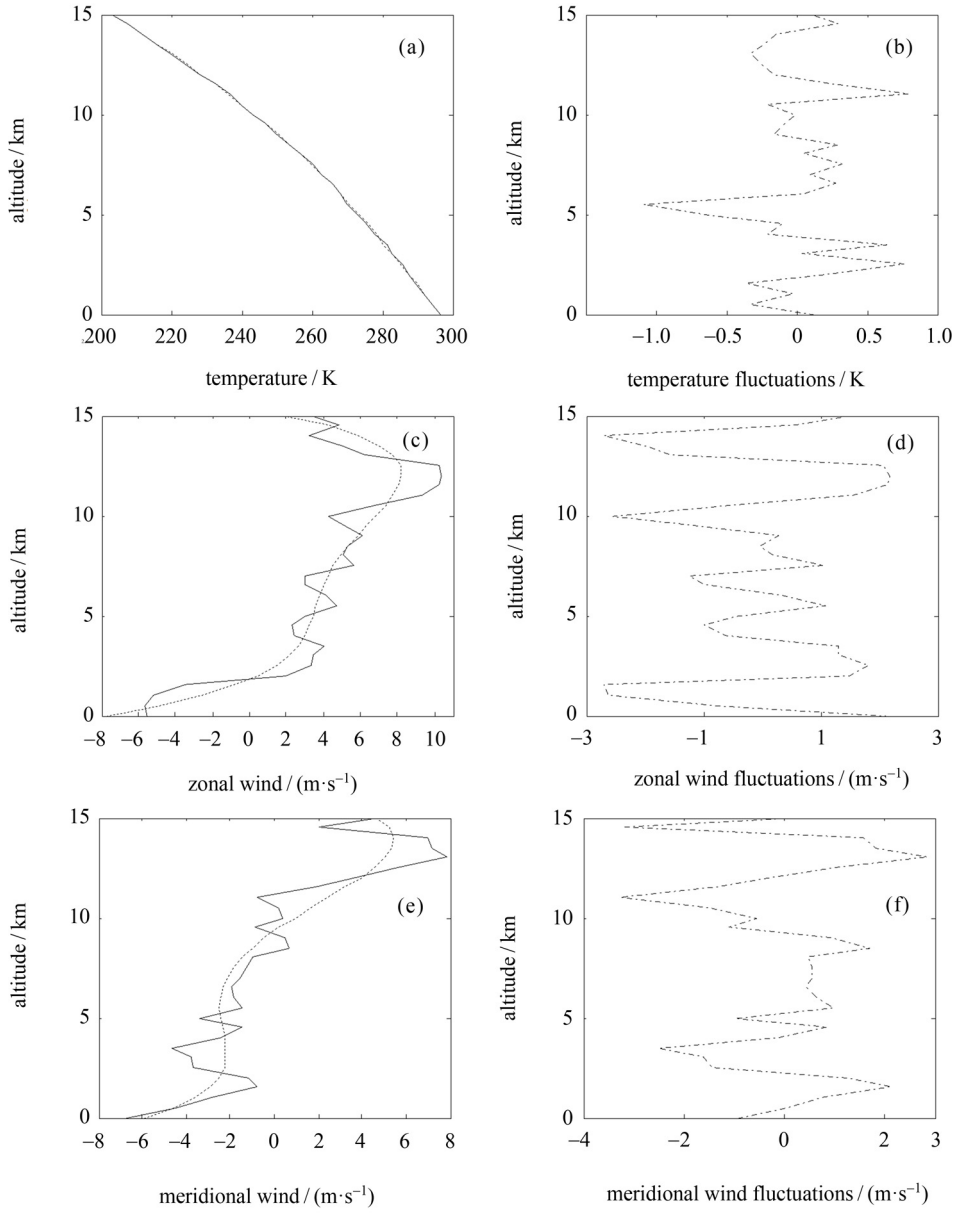


图 2 高度 0∼15 km 温度、纬向风和经向风的原始廓线 (实线)、拟合背景廓线 (点线)、扰动廓线 (点画线)

Fig. 2 Raw data (solid line), fitted background structure (dotted line) and pertabation profile (dash-dotted line) of temperature, zonal wind and meridional wind (height: 0∼15 km)

化椭圆的长短轴之比和长轴指向结合极化椭圆转动方向与色散关系等求出准单色重力波相关参量, 结果列于表 1. 其中: λ_z, $\lambda_{\rm h}$ 分别为垂直波长和水平波长; θ 为自正北方向顺时针转过的角度, 代表重力波水平传播方向;

θ_2 为重力波水平传播方向与背景风的夹角; $\hat{\omega}$ 为固有频率; f 为惯性频率; $T_{\rm in}$, $T_{\rm ob}$ 分别为固有周期和观测周期; $c_{{\rm g}x}$, $c_{{\rm g}y}$, $c_{{\rm g}z}$ 分别为 x, y, z 方向的群速度, $(c_{{\rm g}x}, c_{{\rm g}y}) = (\hat{c}_{{\rm g}x} + \bar{U}, \hat{c}_{{\rm g}y} + \bar{V})$; $\bar{U}(\bar{V})$ 分别为纬向背景风 (经向背景风) 的平均值. $\hat{c}_{\rm pz}$, $\hat{c}_{\rm ph}$ 分别为垂直和水平方向固有的相速度, 单位 m·s^{-1}.

0∼15 km 高度火箭探测提取出的重力波事件为下传重力波, 20∼50 km 高度火箭探测提取出的重力波为上传重力波, 两者均为逆风传播.

这两个观测到的准单色惯性重力波固有周期大, 垂直传播速度远小于水平传播速度, 所以其激发源应

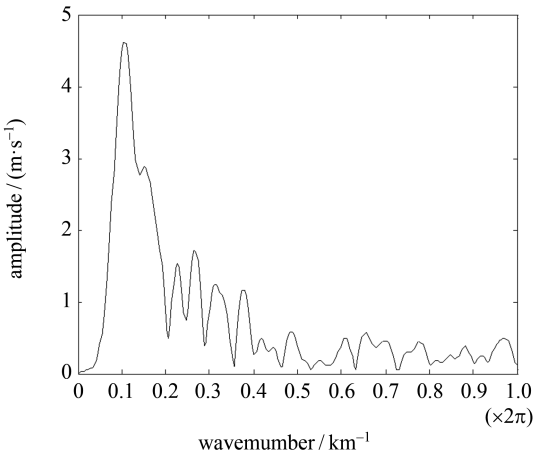


图 3 $\hat{T}$ 垂直波数振幅谱 (高度 20∼50 km)

Fig. 3 Amplitude-wavenumber spectrum of $\hat{T}$ (height 20∼50 km)

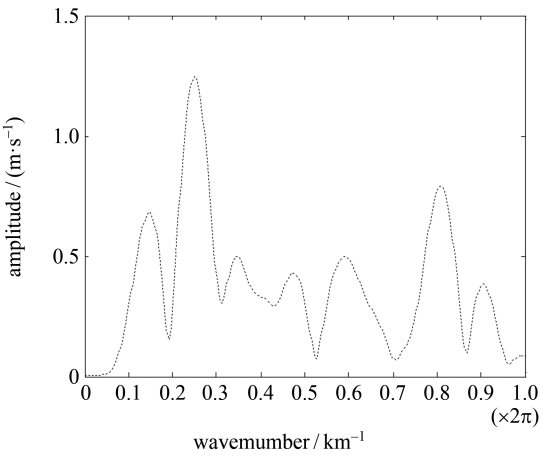


图 4 $\hat{T}$ 垂直波数振幅谱 (高度 0∼15 km)

Fig. 4 Amplitude-wavenumber spectrum of $\hat{T}$ (height 0∼15 km)

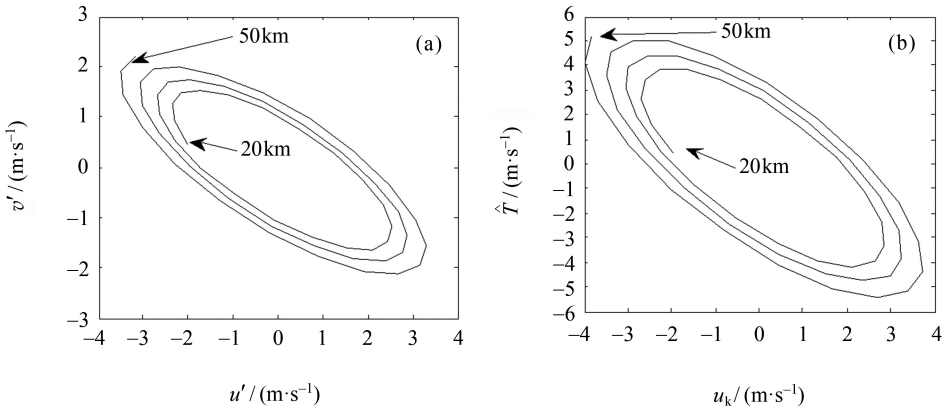


图 5 20∼50 km 高度的矢端曲线. (a) u' 与 v', (b) u_k 与 $\hat{T}$

Fig. 5 Hodographs of u' versus v' (a) and u_k versus $\hat{T}$ (b) at the height of 20∼50 km

表 1 海南发射场重力波探测结果

Table 1 Several detection results of gravity waves over Hainan rocket launch site

parameters	λ_z/km	λ_h/km	θ/(°)	θ_2/(°)	$\hat{\omega}/f$	T_{in}/h	T_{ob}/h
rocketsonde (0∼15 km)	4.0	753	312.5	314.9	1.58	22.4	32.4
rocketsonde (20∼50 km)	9.5	2900	119.5	−58.6	1.76	20.1	39.3

parameters	c_{gz}	c_{gh}	c_{gx}	c_{gy}	$\hat{c}_{gx}$	$\hat{c}_{gy}$	$\hat{c}_{pz}$	$\hat{c}_{ph}$
rocketsonde (0∼15 km)	−0.0298	3.65	−0.37	3.63	−4.13	3.79	0.0496	9.34
rocketsonde (20∼50 km)	0.0887	12.7	1.59	−12.6	23.61	−13.36	−0.1309	40.04

远离海南. 风切变引起的切变不稳定、强对流引起的对流不稳定、急非平衡流附近的地转适应过程等都可能是重力波的激发源, 有研究采用重力波反向追踪技术追踪大气惯性重力波波源的位置, 这里不对此进行介绍.

利用火箭探测数据研究重力波活动已有不少报

道, 不少研究关注温度和风场垂直波数谱与饱和谱的比较 [16,17]、重力波引起风场扰动的各向异性 [18]、风场扰动振幅和饱和谱特征波垂直波长的高度变化 [9] 以及扰动能量的季节和纬度变化 [11].

利用火箭温度和风场数据提取准单色重力波参量的报道较少. Hirota 等 [19] 首先注意到风场扰动矢量端点连线大致为椭圆偏振, 北半球顺时针旋转居多, 在 30~60 km 之间约旋转 3 圈, 显示平流层风场扰动典型垂直尺度为 10 km, 并给出惯性重力波 $f/\hat{\omega}$ 典型值在 0.2~0.4 之间, 但是没有利用温度数据解决水平传播方向的计算问题. Eckermann 等 [20] 利用 1962−1976 年间澳大利亚 Woomera 站点 (36°S, 136°E) 的火箭探测数据, 采用斯托克斯参数法研究傅里叶波数域上斯托克斯参数的季节平均值随波数的变化, 通过计算斯托克斯参数在 3~10 km 波长范围内的平均值, 给出 30~60 km 平流层重力波参量平均值如下: $f/\hat{\omega}$ 在夏季为 0.47, 冬季为 0.41; 相应的固有周期在夏季为 11.0 h, 冬季为 9.5 h; 水平波长与垂直波长之比在 120~140 之间. 对水平传播方向的统计显示, 其在夏季偏东南向传播, 进而利用水平波长与垂直波长之比, 估计对流层波源可能在赤道地区到澳大利亚北部之间.

这里提取的平流层重力波事件垂直波长为 9.5 km, $f/\hat{\omega}$ 为 0.57. 垂直波长 (9.5 km) 与 Hirota 等 [19] 给出的典型垂直尺度 (10 km) 非常接近, 文献 [20] 中给出了 2~10 km 波长范围内多年平均的垂直波数功率谱, 结果同样显示 10 km 波长有最大的功率谱密度. $f/\hat{\omega}$ (0.57) 比文献 [20] 中 Woomera 站点 (36°S, 136°E) 夏季的 $f/\hat{\omega}$ (0.47) 高, Niki[19] 给出了四个站点 $f/\hat{\omega}$ 的频数分布, 纬度最靠近海南发射场的两个站点 White Sands (32°N, 106°W) 和 Kwajalein (9°N, 168°E) 的 $f/\hat{\omega}$ 多在 0.2~0.4 之间, 取 0.57 的频次约在频次峰值的 1/2~1/3 之间. 由于是单次观测, 这里的取值也属合理. 水平传播方向与 Woomera 站点 (36°S, 136°E)[20] 类似, 均为夏季东南向, 逆风传播, 平流层重力波逆风传播居多的统计特征可能与临界层风场滤波作用有关 [21,22].

火箭探测提取到的对流层重力波事件垂直波长为 4 km, Zhang 等 [23] 利用美国 92 个站点 11 年 (1998−2008 年) 的无线电探空数据研究了惯性重力波参数随高度和纬度变化的多年平均状况, 结果显示 (19.5°N, 10 km) 垂直波长约为 3~4 km, $\hat{\omega}/f$ 约为 2.7, 这里利用火箭数据提取的对流层重力波事件垂直波长 (4 km) 稍大, $\hat{\omega}/f$ (1.58) 偏小.

本文利用火箭探空数据提取的平流层重力波事件垂直波长与已有研究结果一致, 水平传播方向也与夏季平流层重力波逆风传播大部分结果类似. 与同纬度其他站点测量的对流层重力波的垂直波长相比, 海南站点测量的对流层重力波垂直波长稍大. 对流层重力波事件垂直波长稍大, $\hat{\omega}/f$ 偏小说明重力波活动具有区域特征, 这还需要有更多观测数据来获得统计结果.

3 结论

利用 2010 年 6 月 3 日子午工程首次气象火箭探测的温度和风场数据, 采用矢端曲线法分别从平流层 (高度 20~50 km) 和对流层 (高度 0~15 km) 廓线提取准单色惯性重力波参数. 结果表明火箭探测的平流层重力波向上传播, 对流层重力波向下传播, 两次重力波事件在水平方向上均为逆风传播. 火箭探测的平流层 (对流层) 准单色惯性重力波垂直波长为 9.5 km (4.0 km), 两者固有周期较接近, 约为 20 h; 水平波长与垂直波长之比 $\lambda_{\mathrm{h}}/\lambda_z$ 差别很大, 前者约为 305∶1, 后者约为 188∶1. 比较显示, 本文提取的单次平流层重力波事件垂直波长和传播方向与已有研究结果符合很好, 对流层重力波事件垂直波长稍大, 两次事件 $\hat{\omega}/f$ 均偏小.

致谢 本研究使用了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的科学数据.

参考文献

[1] ZHUANG Hongchun, XIAO Guangquan, TIAN Jianhua, *et al.* Comparison of middle atmospheric data obtained by Chinese rockets with the draft of CIRA 1986 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1987, **7**(3): 190-197 (庄洪春, 肖光全, 田剑华, 等. 我国火箭探测资料与 CIRA 1986 稿的比较 [J]. 空间科学学报, 1987, **7**(3): 190-197)

[2] MA Ruiping. Wind and wind shear observed by ZN-1 rocket at Hainan station [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1997, **17**(1): 70-74 (马瑞平. 用织女一号火箭在海南站探测的高空风和风切变 [J]. 空间科学学报, 1997, **17**(1): 70-74)

[3] JIANG Xiujie, LIU Bo, YU Shiqiang, *et al.* Development status and trend of sounding rocket [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2009, **27**(23): 101-110 (姜秀杰, 刘波, 于世强, 等. 探空火箭的发展现状及趋势 [J]. 科技导报, 2009, **27**(23): 101-110)

[4] WU Yongfu, XU Jiyao. Anisotropy of the horizontal velocity fluctuation field in the large wavenumber region [J]. *Sci. China*: *Earth Sci.*, 2003, **46**(3): 210-216

[5] WANG Liji, CHEN Zeyu, LING Chao, *et al*. Decreasing trend of the middle atmospheric static stability in historical data from rocketsonde network [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015, **64**(16): 169201 (王丽吉, 陈泽宇, 凌超, 等. 中层大气静力稳定性减弱趋势 — 历史火箭探空数据分析 [J]. 物理学报, 2015, **64**(16): 169201)

[6] DAS S S, UMA K N, BINEESHA V N, *et al*. Four-decadal climatological intercomparison of rocketsonde and radiosonde with different reanalysis data: results from Thumba Equatorial Station [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2016, **142**(694): 91-101

[7] SHI Dongbo, WEI Feng, ZHANG Yu, *et al*. Meteorological rocket sonde of meridian project and its detection results [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4): 492-497 (史东波, 韦峰, 张宇, 等. 子午工程气象火箭探空仪及其探测结果 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4): 492-497)

[8] JIANG Guoying, XU Jiyao, SHI Dongbo, *et al*. Observations of the first meteorological rocket of the meridian space weather monitoring project [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2011, **56**(20): 2131-2137

[9] TSUDA T, MURAYAMA Y, OYAMA K I, *et al*. Rocketsonde observations of the middle atmosphere dynamics at uchinoura (31°N, 131°E) during the DYANA campaign Part II: characteristics of gravity waves [J]. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1992, **44**(11): 1009-1023

[10] RATNAM M V, TSUDA T, JACOBI C, *et al*. Enhancement of gravity wave activity observed during a major Southern Hemisphere stratospheric warming by CHAMP /GPS measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31** (16): 171-184

[11] ECKERMANN S D, HIROTA I, HOCKING W K. Gravity wave and equatorial wave morphology of the stratosphere derived from long-term rocket soundings [J]. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1995, **121**(521): 149-186

[12] HU X, LIU A Z, GARDNER C S, *et al*. Characteristics of quasi-monochromatic gravity waves observed with Na lidar in the mesopause region at Starfire Optical Range, NM [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(24): 22-1-22-4

[13] ZHANG S D, YI F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114°E) China [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**(3): 665-673

[14] ZHANG Shaodong, YI Fan. Latitudinal and seasonal variations of inertial gravity wave activity in the lower atmosphere over central China [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2007, **112**(D5): D05109

[15] ALLEN S J, VINCENT R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1995, **100**(D1): 1327-1350

[16] WU Yongfu, WIDDEL H U. Further study of a saturated gravity wave spectrum in the mesosphere [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 1991, **96**(D5): 9263-9272

[17] WU Y F, XU Jiyao. Comparison of horizontal velocity spectra derived from chaff rockets with saturation models [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2006, **111**(D13): D13109

[18] HAMILTON K. Climatological statistics of stratospheric inertia-gravity waves deduced from historical rocketsonde wind and temperature data [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.* (1984—2012), 1991, **96**(D11): 20831-20839

[19] HIROTA I, NIKI T. A statistical study of inertia-gravity waves in the middle atmosphere [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 1985, **63**(6): 1055-1066

[20] ECKERMANN S D, VINCENT R A. Falling sphere observations of anisotropic gravity wave motions in the upper stratosphere over Australia [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1989, **130**(2/3): 509-532

[21] CHEN Zeyu, LU Daren. Numerical simulation on stratospheric gravity waves above mid-latitude deep convection [J]. *Adv. Space Res.*, 2001, **27**(10): 1659-1666

[22] CHEN Dan, CHEN Zeyu, LV Daren. Simulation of the stratospheric gravity waves generated by the Typhoon Matsa in 2005 [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2012, **55**(4): 602-610

[23] ZHANG Shaodong, YI Fan, HUANG Chunming, *et al*. Latitudinal and altitudinal variability of lower atmospheric inertial gravity waves revealed by U.S. radiosonde data [J]. *J. Geophys. Res.*: *Atmos.*, 2013, **118**(14): 7750-7764