0254-6124/2016/36(2)-175–13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

TANG Lei, HUANG Chunming. Mid-latitude planetary waves observation from MST radar measurements in the troposphere and lower stratosphere (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(2): 175-187. DOI:10.11728/cjss2016.02.175

基于 MST 雷达数据的中纬对流层和低平流层大气行星波研究 *

汤 蕾 [1,2] 黄春明 [1,2]

1(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

2(地球空间环境与大地测量教育部重点实验室 武汉 430072)

摘 要 通过分析中国河北香河站 MST (Mesosphere-Stratosphere-Troposphere) 雷达 2012—2014 年的水平风场数据, 研究了北半球中纬地区对流层和低平流层 (Troposphere and Lower Stratosphere, TLS) 区域大气行星波的特性. 谱分析发现, 在这一区域准 16 天波和准 10 天波占据主导地位, 准 16 天波更为显著. 在对流层区域, 行星波具有丰富的频谱成分, 活动具有间断性, 持续时间一般不超过三个月, 并没有明显的季节性变化特征, 其中纬向分量的振幅大于经向分量. 在平流层区域 (高度 17 km 以上), 行星波一般出现在冬季, 并且主要在纬向分量中. 通常平流层区域的振幅要小于对流层区域. 结合 MERRA 再分析资料分析了强行星波传播特性, 结果表明: 2014 年 2—3 月纬向分量中的准 16 天波垂直向上传播, 垂直波长约为 64 km, 纬圈波数约为 2, 纬向传播方向自西向东, 水平波长约为 15 324.7 km, 对应的相速度为 11.1 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ (向东为正); 2014 年 5 月纬向分量中的准 10 天波在 10∼18 km 高度范围内向下传播, 垂直波长约为 50 km, 纬圈波数约为 1, 传播方向自西向东, 水平波长约为 30 649.4 km, 对应相速为 35.5 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

关键词 行星波, 对流层和平流层, MST 雷达

中图分类号 P353

Mid-latitude Planetary Waves Observation from MST Radar Measurements in the Troposphere and Lower Stratosphere

TANG Lei[1,2] HUANG Chunming[1,2]

1(*School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan* 430072)

2(*Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan* 430072)

Abstract Characteristics of the Planetary Waves (PW) in the Troposphere and Lower Stratosphere (TLS) were investigated with Mesosphere-Stratosphere-Troposphere (MST) radar wind measurements in Xianghe (116.9°E, 39.8°N) from January 2012 to December 2014. Spectral analyses

* 国家自然科学基金项目 (41174126, 41374152) 和极地环境综合研究评估专项基金项目 (CHINARE 2015-02-03) 共同资助

2015-06-30 收到原稿, 2015-12-28 收到修定稿

E-mail: huangcm@whu.edu.cn

show that the TLS region is dominated by quasi-16-day and quasi-10-day PW, while the former ones are more significant. In the troposphere regions (above 17 km height), the PW with dynamic periods are primarily observed, which last less than three months and don't indicate significant seasonal variation. Meanwhile, the amplitudes of the PW in the zonal direction exceed those in the meridional direction. In the lower stratosphere regions, intense PW mainly occur in the zonal component in winter. The amplitudes in the stratosphere are generally smaller than those in the troposphere. This paper also discusses the propagation characteristics of PW based on MST radar data and MERRA reanalysis data. The result shows that zonal component of the quasi-16-day PW observed in February and March 2014 propagated eastward with a zonal wave number of 2 (the horizontal wave length was about 15 324.7 km). The corresponding phase velocity was 11.1 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ (positive eastward). The quasi-16-day PW propagated upward vertically with a 64 km vertical wave length. In addition, the observation in May 2014 showed that the quasi-10-day PW in the zonal component propagated eastward with a zonal wave number of 1. Its horizontal wave length, phase velocity and vertical wave length were 30 649.4 km, 35.5 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ and 50 km respectively.

Key words Planetary Waves (PW), Troposphere and Lower Stratosphere (TLS), MST radar

0 引言

行星波是大气波动的重要组成部分, 通常产生于对流层, 周期在几天到几十天之间, 水平波长可达几千到上万千米, 其形成和演变影响着大气环流的结构和物质分布, 对大气研究具有十分重要的意义. 广义的行星波按照其波长的不同可分为两类 [1−2]: 波长在几千千米的天气尺度波和波长与地球半径相当或更长的行星尺度波. 通常认为行星尺度波是由地形不均匀性和太阳热辐射而产生的, 纬圈波数约为 1~3, 由于其空间尺度大、演变周期长, 具有准定常性, 又被称为准定常行星波. Charney[3] 和 Elienssen[4] 的理论研究表明, 准定常行星波在一定条件下可以向上传播. 多年来的观测结果 [5−8] 也证实, 除产生行星波的对流层外, 平流层区域及中间层和低热层 (Mesophere and Lower Thermosphere, MLT) 区域同样能观察到行星波的显著活动. 行星波振荡周期 [5−13] 多集中在 2, 5, 10 和 16 d 附近, 相应周期分别为 1.7~3.4 d, 4.5~6.2 d, 7.5~12 d, 和 12~20 d[5].

在低层大气波动中, 行星波通常占据主导地位, 拥有比潮汐波和重力波更大的振幅. Huang 等 [5] 和 Lawrence 等 [6] 曾指出, 在对流层以及低平流层 (Troposphere and Lower Stratosphere, TLS) 区域存在明显的行星波活动情况, 振幅超过 10 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$; Merzlyakov 等 [7] 和 Smith 等 [8] 也提出在中间层和电离层观察到的行星波活动是 TLS 区域行星波上传的结果. 理论和观测结果表明, 行星波随纬度变化呈现不同的分布特性, 中纬地区位于西风环流带, 大气环流的形成与行星波活动关系密切, 因此, 研究这一区域行星波的活动特性对于解释各种天气现象具有十分重要的意义. 近年来行星波研究得到广泛关注 [9−13], 但对于产生行星波的对流层区域, 相关研究还不够深入.

河北香河站 MST 雷达是中国第一台独立研制的大气探测多参数甚高频 (Very High Frequency, VHF) 雷达 [14], 也是子午工程项目 [15] 的主要观测设备之一. 作为晴空测风雷达, MST 雷达主要利用布拉格散射对一定尺度 (入射电磁波波长的一半) 的湍流运动情况进行探测, 从而获得三维大气风场 [16]. 香河站 MST 雷达于 2011 年 7 月投入使用以来, 在探测精度、垂直分辨率和探测时间间隔等方面具有突出的优势. 同时选用了 MERRA (The Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications) 再分析资料 [17], 与 MST 观测结果进行分析和对比. MERRA 再分析资料是美国 NASA 提供的全球同化模式数据, 其综合运用卫星、地基雷达、无线电探空、舰船等观测资料进行同化处理, 数据范围覆盖全球, 与以往的再分析资料相比具有更高的时间和空间分辨率.

本文利用河北香河站 MST 雷达的水平风场数据, 统计分析了中国中纬地区 TLS 区域 2012—2014 年不同周期 (准 16 天和准 10 天) 行星波在 3.5~25 km 处随时间和高度的变化情况, 并结合 MERRA 再分析资料对强行星波的传播特性进行研究.

1 数据来源及分析方法

所使用的数据为子午工程数据中心网站 * 提供的 MST 风廓线雷达资料以及 NASA 戈达德地球科学数据和信息服务中心下属的模式和同化资料信息服务中心网站 ** 提供的 MERRA 三维等压再分析资料. 其中, MST 雷达提供了水平风速、水平风向、垂直风速等数据 [18], 并按照测量高度范围分为低中高三种模式, 分别对应 3.5~10 km, 10~25 km 和 60~90 km 高度范围. 由于高模式数据的平均时间覆盖率不足 1/3, 因此这里仅选取低中两种模式的数据进行研究. 低模式和中模式的高度分辨率分别为 0.15 km 和 0.6 km, 时间分辨率为 0.5 h, 水平速度分辨率为 0.5 m·s^{-1}, 径向速度分辨率为 0.2 m·s^{-1}. MERRA 再分析资料包含温度、纬向风速和经向风速等物理参量, 选取了 875~10 hPa (对应高度约 1~30 km) 范围内共 26 个等压面上的风场和温度资料. 每天有 4 个数据, 对应时间分别为 00:00 GMT, 06:00 GMT, 12:00 GMT 和 18:00 GMT.

选用 2012 年 1 月至 2014 年 12 月河北香河站 (116.9°E, 39.8°N) 的 MST 雷达水平风场数据以及 (86.7°E, 40.0°N), (116.7°E, 40.0°N) 和 (146.7°E, 40.0°N) 三个地点 (为方便表示, 依次称为 A, B, C 站点) 的 MERRA 再分析资料研究中纬地区行星波活动. 其中, MST 雷达观测除 2013 年 9 月及 2014 年 9 月没有数据外, 其他大部分月份的数据覆盖率都达到 50% 以上, 数据时间覆盖率列于表 1.

使用滑动窗来分段处理 MST 数据, 以便观察行星波随时间的变化规律. 若滑动窗内的数据覆盖率小于 50%, 则视为无效数据段. 考虑到大气中可能存在周期较大的背景波动, 首先利用最小二乘法对滑动窗内的数据进行一次线性拟合 (拟合公式为 $y = at+b$), 得到这段时间内的背景值 y, 然后用原始数据减去背景值得到所需的扰动量. 采用 Lomb-Scargle (LS) 谱分析方法对各个高度的风场扰动量进行频谱分析, LS 谱分析方法能对非均匀采样数据进行分析从而避免数据不均匀性引起的误差 [19], 由此得到各个高度的功率值, 进一步转化为波的幅度值并从中提取行星波的振幅. 最后, 结合 MERRA 数据对行星波活动比较剧烈的时段数据进行正弦拟合, 拟合公式为 $U = A\cos(t \times 2\pi/T + \psi)$. 其中, U 为风场扰动量, T 为行星波周期, A 和 ψ 为拟合所得的相位和振幅, 通过分析振幅和相位变化可以得到行星波的垂直和水平结构.

2 数据分析结果

2.1 背景大气结构

行星波扰动与背景大气结构具有紧密关系, 特别是纬向背景风场对行星波的垂直传播有很大影响 [3]. 由于 MERRA 的 B 站点与香河站地理位置仅相距 36 km, 这里将这一地点的 MERRA 温度数据看

表 1 香河站 MST 雷达风场数据 2012—2014 年每月的时间覆盖率

Table 1 Monthly time coverage rate of MST radar wind data in 2012—2014

month	2012	2013	2014
Jan.	0.529	0.640	0.985
Feb.	0.748	0.605	0.958
Mar.	0.737	0.803	0.708
Apr.	0.600	0.788	0.800
May	0.700	0.702	0.802
Jun.	0.594	0.261	0.902
Jul.	0.882	0.884	0.878
Aug.	0.700	0.570	0.534
Sept.	0.550	—	—
Oct.	0.539	0.491	0.983
Nov.	0.673	0.923	0.935
Dec.	0.664	0.607	0.588

注 一字线表示该月份无观测数据.

*http://data.meridianproject.ac.cn

**http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/FTPSubs et.pl?LOOKUPID_LIst=MAI3CP ASM

作香河站的温度数据. 假设大气标高 H_0 为 7 km, p_0 为标准大气压, 利用 $H = H_0\ln(p_0/p)$ 将等压面转化为近似高度, 后面使用的 MERRA 风场资料也进行同样的处理. 对于 2012 年 1 月至 2014 年 12 月期间 MST 雷达香河站的经向、纬向风场数据及温度数据, 使用窗长为 30 天、步长为 15 天的滑动窗计算各个高度上的月平均值. 利用滑动间隔为 15 天的月平均值, 可以更加细致观察到背景大气随时间、高度的变化及其季节特征 (见图 1).

从图 1 可以看出, 经向风场和纬向风场具有明显的年际变化特征. 纬向风在 19 km 高度以下基本为东向风 (西风), 且冬季月份最强, 在 2013 年 1 月风速出现最大值, 可达 54.9 m·s^{-1}. 风场先随高度增加而增加, 在高度 12 km 左右达到最大值, 之后又随高度增加而减小. 在 19~25 km 的高度范围内, 风场依然随高度减小, 甚至在夏季月份风速减小到零然后方向发生改变, 从东向风变为西向风, 西向风最大可达 12.7 m·s^{-1}, 其他月份仍以弱东向风为主. 经向风的平均值比纬向风小很多, 大致在 12 m·s^{-1} 以内, 在大部分月份表现为南向风, 在 2012 年和 2013 年的夏季月份 (7—9 月) 则出现了北向风, 同年的冬季月份 20 km 以上某些高度也同样可以观察到北向风. 南向风和北向风的最大值分别为 12.1 m·s^{-1} 和 5.6 m·s^{-1}.

背景温度同样表现出明显的年变化特征, 在 12 km 高度以下温度随时间有明显的起伏变化, 夏季温度普遍高于冬季温度. 在 12 km 高度以上, 温度随时间变化不大, 只在 15~19 km 高度范围内夏季温度低于冬季温度. 总体而言, 温度先随高度的增加而快速减小, 在 17 km 高度左右达到最小值, 可以判断对流层顶高度在 17 km 左右. 温度最小值为 205.8 K, 出现在 2013 年 7 月. 在 17 km 以上, 温度随高度增加而缓慢增加. 这与之前观察到的中纬地区大气结构 [20] 结果一致.

2.2 行星波谱分析结果

为观察行星波周期和振幅随时间的变化规律, 使用 60 天的滑动窗对风场数据进行分段处理, 滑动步长为 15 天. 先对窗内的风场数据进行线性拟合得到背景波动, 再对减去背景波动后的风场扰动量进行 LS 频谱分析, 然后将功率值转化为波的振幅. 考虑到行星波通常产生于对流层并在一定条件下向平流层传播, 这里选取香河站 2012—2014 年 12 km (对

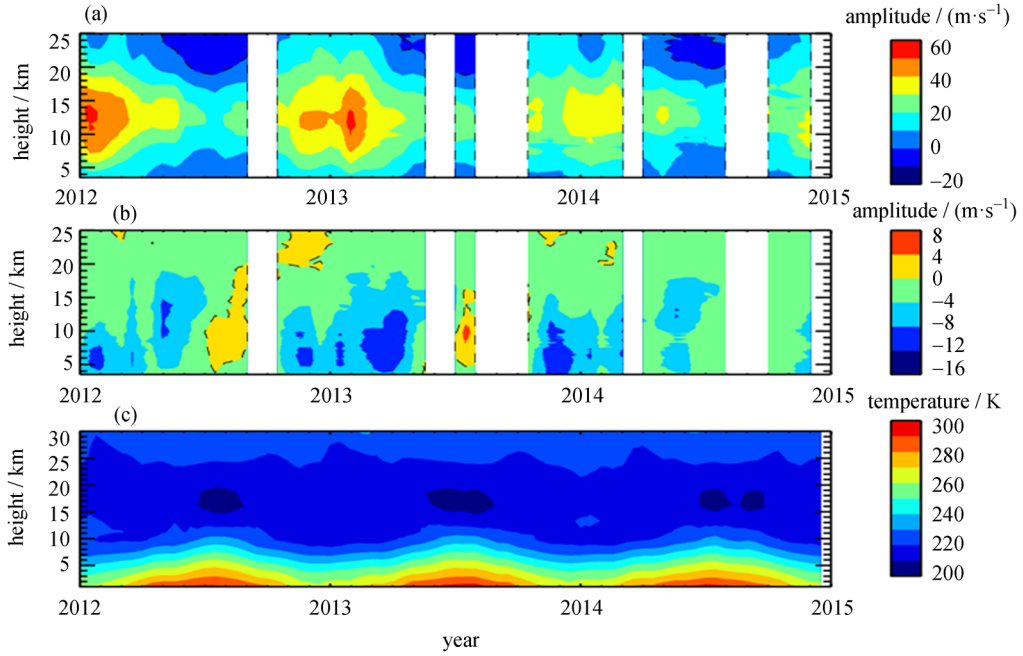

图 1 香河站 2012—2014 年纬向风 (a)、经向风 (b) 和温度 (c) 的月平均值. 空白部分为数据覆盖率不足 50% 的时间段, 虚线为零风线

Fig. 1 Monthly averaged zonal wind (a), meridional wind (b) and temperature (c) in Xianghe in the period of 2012—2014. The data coverage of blank part is less than 50%, the dotted line is the zero wind line

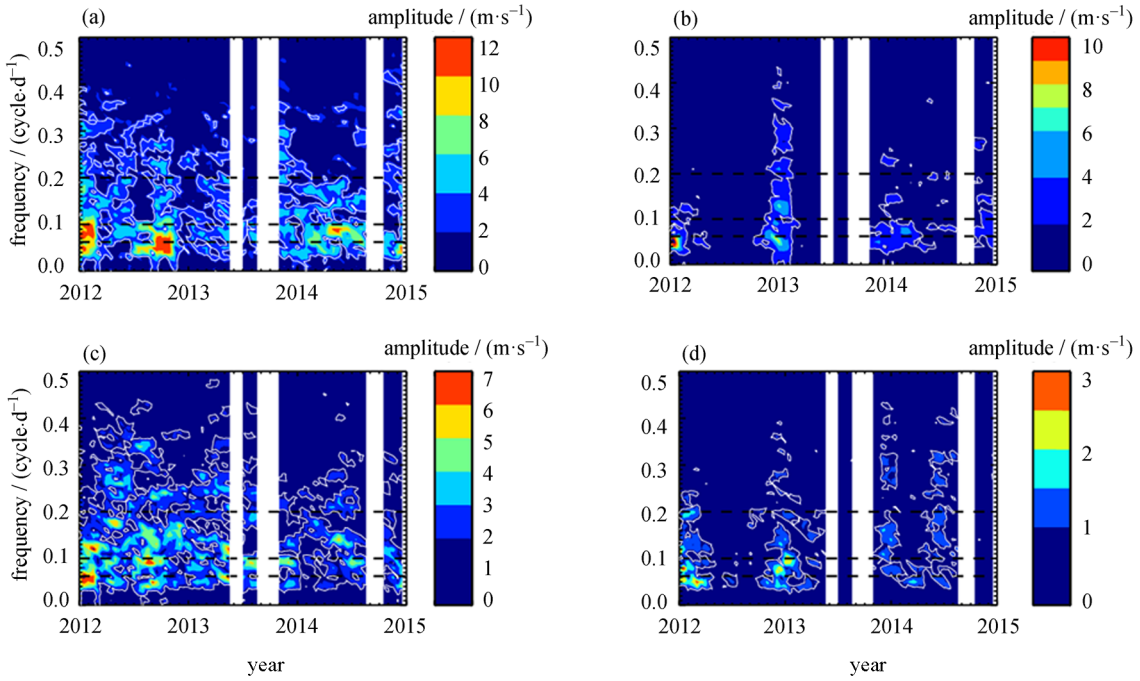

图 2　香河站 2012—2014 年在 12 km (a) (c) 和 22 km (b) (d) 处纬向风 (a) (b) 和经向风 (c) (d) 扰动量 LS 谱分析的振幅. 白色曲线对应 95% 的置信水平, 黑色虚线从上到下分别表示周期为 5 天、10 天和 16 天行星波对应的频率

Fig. 2　LS spectrum of wind disturbances in zonal component (a) (b) and meridional component (c) (d) at heights of 12 km (a) (c) and 22 km (b) (d) in Xianghe. The white contour lines denote the confidence level of 95%. The black dashed line from top to bottom is for frequency of quasi-5-day, quasi-10-day, quasi-16-day PW

流层区域) 和 22 km (平流层区域) 两个高度剖面分析行星波幅值随时间的变化 (见图 2). 图中黑色虚线从上到下分别表示周期为 5 天、10 天和 16 天行星波对应的频率, 白线对应 95% 的置信水平, 当某个时间窗内的数据覆盖率不足 50% 时, 不做频谱分析, 即为图中的空白部分.

在 12 km 高度 (对流层区域) 上, 行星波的出现较为频繁但持续时间不长, 没有明显季节变化, 这是由于对流层作为行星波的源区存在丰富的激发源. 纬向风扰动中准 10 天波和准 16 天波占据主导地位, 其中在 2012 年 10 至 11 月, 准 16 天波活动剧烈, 波幅最大值达到 12 m·s^{-1}. 经向扰动的振幅比纬向扰动小, 但频谱成分更为复杂, 除了准 5 天、10 天和 16 天波外, 还可以观察到一些周期更小的波动, 例如 3~4 d 左右的波动.

在 22 km 高度 (平流层区域) 上, 行星波活动具有较为明显的年际变化特征, 其基本出现在冬季, 并且弱于 12 km 处 (对流层区域) 的振幅值, 其他月份则几乎观察不到行星波的存在. 纬向扰动中准 16 天波最为显著, 最大振幅可达到 10 m·s^{-1}, 除此之外还存在幅值很小的准 10 天波. 经向扰动的幅度很小, 一般小于 3 m·s^{-1}, 主要谱成分有准 10 天波和准 16 天波, 其中准 10 天波的振幅更强.

对于平流层区域冬季出现的行星波, 主要可能来源于两个方面, 即对流层产生的行星波垂直上传及高纬地区平流层行星波的经向传播. 根据经典行星波传播理论 [3], 当满足条件 $0 < \bar{u} - c_x < U_c$ 时, 行星波将从对流层垂直向上传播到平流层和中间层. 其中, $\bar{u}$ 为纬向平均风 (向东为正), c_x 为波动相速, U_c 为 Rossby 临界速度 (与背景温度和行星波水平尺度有关). 从图 1 可以得知, 19 km 以上平均纬向风在夏季表现为东风, 冬季则表现为西风. 夏季东风区 $\bar{u}$ 为负值, 行星波的西向相速小于或等于东风时不能向上传播, 而行星波的西向相速一般较小, 行星波很难向上传播; 冬季西风区 $\bar{u}$ 为正值, 有部分满足传播条件的行星波上传. 同时, 有研究指出 [21−24],

准定常行星波在北半球冬季的三维传播主要有两条路径, 其中一条是在高纬度地区从对流层垂直传播到平流层 (极地夜间急流区存在西风急流轴, 波动能量沿急流轴从对流层向平流层传播, 类似波导管中波的传播 [25]), 再沿经向向中低纬度平流层传播. 这条传播路径被称为极地波导, 在北半球夏季整个平流层为东风环流, 极地波导不存在 [24]. 行星波在平流层沿经向传播时同样会导致在中纬地区冬季观察到行星波的存在.

2.3 行星波时空变化

选取在这一区域活动较为显著的准 16 天波和准 10 天波进行分析. 为更好地区分准 16 天波与准 10 天波, 仍然采用 60 天滑动窗对各个高度的风场扰动进行 LS 谱分析, 滑动步长为 15 天. 由于行星波周期大致在 16 天和 10 天附近变化, 将 LS 谱中周期在 7.5~12 d 和 12~20 d 之间的波振幅的最大值分别提取出来, 作为准 10 天波和准 16 天波的振幅, 最后得到两个不同周期行星波振幅随时间和高度的变化情况 (见图 3), 数据覆盖率不足 50% 的时间段用空白来表示.

从图 3 中可以看出, 行星波的振幅变化与高度有关. 在 5~17 km 的高度范围内可以观察到较为剧烈的行星波, 活动时间间断, 持续时间一般不超过三个月, 没有明显的时间变化规律, 幅度最大值一般出现在 10~12 km 高度附近. 纬向分量的幅度值要大于经向分量, 准 16 天波和准 10 天波的最大幅度值分别可达到 13.2 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 和 14.1 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 经向分量的幅度值均在 10 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 以内. 纬向分量中大部分时间内准 16 天波占据主导地位, 只在 2014 年的 5 至 7 月出现显著的准 10 天波活动. 经向分量中主要谱成分为准 10 天波, 准 16 天波在 2012 年 9 月活动较为明显, 幅度可达 9.4 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 在 17~25 km 的高度范围内行星波活动有明显季节变化特征, 只在冬季月份观察到行星波的出现, 且幅值较小. 对于纬向扰动, 准 16 天波的幅值明显比准 10 天波大, 有些月份可达到 8 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 而准 10 天波的幅值不超过 7 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 对于经向扰动, 只在很少月份观察到行星波存在, 幅值不超过 4 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 这与之前的观察结果 (见图 2) 一致. 同时发现, 有时平流层行星波出现的时间与对流层一致, 例如 2014 年冬季纬向风中的准 16 天波. 有时则只在平流层观察到较强波的活动, 例如 2013 年冬季纬向风中的准 16 天波. 原因可能是两种行星波来源同时存在, 在平流层观察到的行星波既有来自对流层波的上传, 又有来自高纬地区平流层波的经向传播.

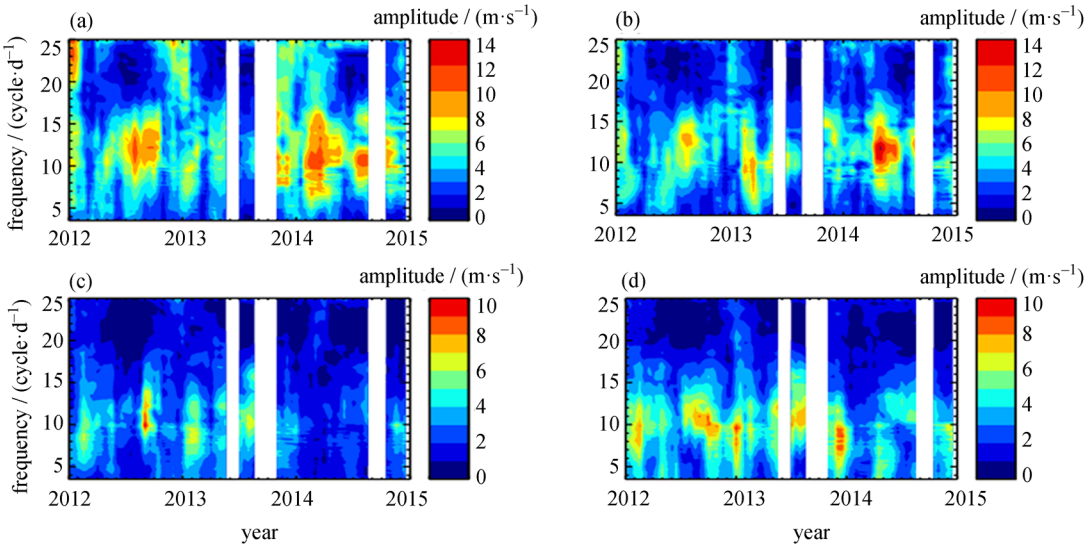

图 3 香河站纬向风 (a) (b) 和经向风 (c) (d) 扰动量中提取的准 16 天波 (a) (c) 和准 10 天波 (b) (d) 振幅随时间高度的变化. 空白区域表示数据覆盖率不足 50% 的时间段

Fig. 3 Time-height cross sections of the quasi-16-day (a) (c) and quasi-10-day (b) (d) PW amplitude in zonal component (a) (b) and in meridional component (c) (d). The data coverage of blank part is less than 50%

2.4　行星波传播特性

根据行星波振幅随时间和高度的变化情况 (见图 3), 选取准 16 天波活动剧烈的 2014 年 1 至 4 月时间段的纬向风数据及 2012 年 8 至 11 月的经向风数据进行分析. 首先对 6~24 km 高度范围内共 7 个高度剖面 (间隔为 3 km) 的数据进行线性插值, 然后利用巴特波斯带通滤波器提取准 16 天波, 截止周期为 12~20 d. 滤波结果如图 4 所示. 2014 年 2 至 3 月份可以在纬向分量中观察到剧烈的准 16 天波活动, 在 6~24 km 的高度范围内持续存在, 并且等相位面的斜率为正, 表明波垂直向上传播. 经向分量中的准16 天波比纬向分量弱, 主要出现在 2012 年 9 至 10 月的 18 km 以下区域.

为分析行星波的垂直结构, 选取香河站 2014 年 2 月 1 日至 3 月 4 日期间纬向风及 2012 年 9 月 10 日至 10 月 12 日期间经向风数据, 在各个高度上进行线性插值并滤除背景风场, 进行正弦拟合 (拟合周期为 16 天). 对与香河站位置接近的 B 站点 MERRA 再分析数据进行同样计算, 行星波幅度和相位随高度的变化如图 5 所示, 其中实线为香河站数据的拟合结果, 虚线为 B 站点数据拟合结果. 从图 5 中可以看出, 香河站的 MST 雷达数据与 B 点 MERRA 数据拟合的行星波变化趋势大致相同, MERRA 数据更平滑, 而 MST 数据在某些高度上出现抖动. 这一方面是由于在对流层区域, 大气受各种因素影响, 具有很强的不稳定性, 在某些高度上存在风切变现象, 而行星波和大气急流相互作用可能造成行星波振幅和相位的变化. 另一方面还与 MST 的探测机理有关, 其对大气中尺度大致为入射电磁波波长一半的湍流运动反应特别敏感, 探测的是绝对湍流速度, 这与前后高度数据无相关性, 而 MERRA 是同化处理后的再分析数据, 上下高度间具有一定相关性.

纬向分量中两站点无论振幅和相位都具有很高的吻合度. 其中振幅先随高度增加而增加, 在 10 km 左右出现最大值, 香河站的最大振幅可达 12.8 m·s^{-1}, B 站点的最大值为 10.8 m·s^{-1}, 其后振幅随高度增加而减小. 相位在 10 km 以下随高度无明显变化, 在 10 km 以上随高度增加而减小, 行星波垂直向上传播, 香河站的相位变化率略小于 B 站点. 根据相位在 10~25 km 高度的变化计算出香河站垂直波长约为 64 km. 经向分量中两者振幅的变化趋势大致相同, B 站点在 7.5 km 高度左右出现了极小值, 之后随高度增加先增大后减小, 在 13 km 高度左右出现最大值. 香河站振幅大致上先增加后减小, 最大值不超过 7 m·s^{-1}. 相位的变化情况也基本一致, 先随高度增加而减小, 之后香河站在 10 km 以上、B 站点在 8~25 km 之间, 相位几乎保持不变.

由于 MST 雷达与 MERRA 数据纬向分量中的

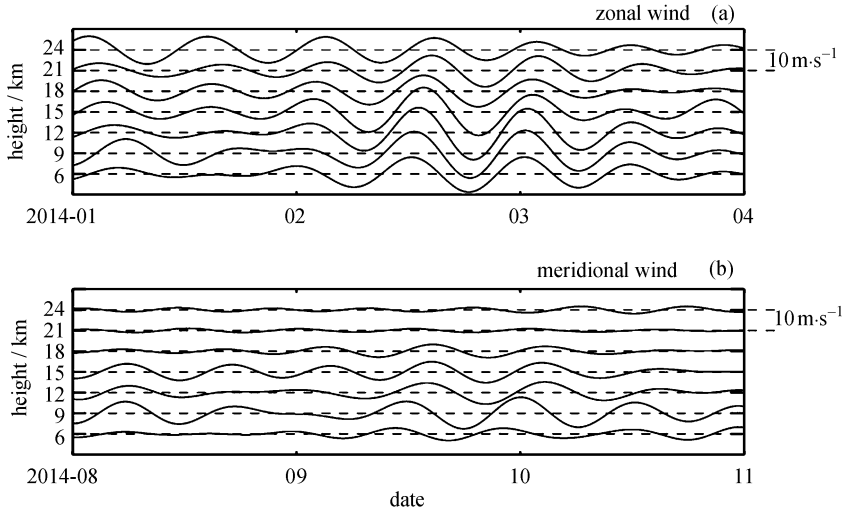

图 4　香河站 2014 年 1 至 4 月纬向风 (a) 和 2012 年 8 至 11 月经向风 (b) 的带通滤波结果. 截止周期为 12~20 d, 间隔为 10 m·s^{-1}

Fig. 4　Band pass filtering for zonal wind (a) from January to April in 2014 and for meridional wind (b) from August to November in 2012. The cut-off period is 12~20 d and the interval is 10 m·s^{-1}

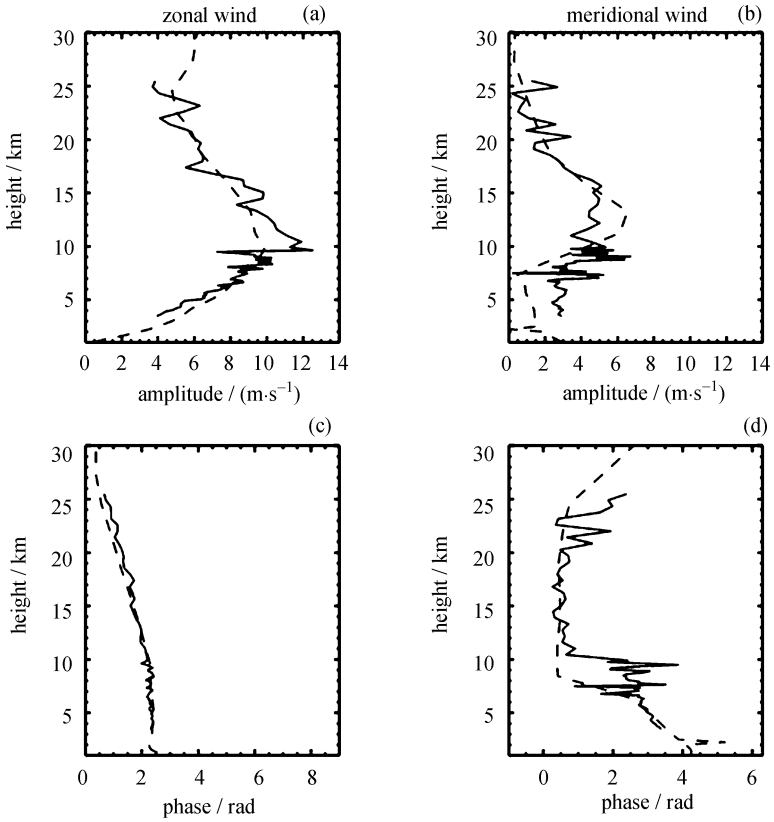

图 5 准 16 天波的纬向风 (a) (c) 和经向风 (b) (d) 拟合的振幅 (a) (b) 和相位 (c) (d). 实线为 MST 拟合结果, 虚线为 MERRA 拟合结果

Fig. 5 Amplitude (a) (b) and phase (c) (d) for the quasi-16-day PW in zonal component (a) (b) and in meridional (c) (d) component. Solid line is the result of MST data and dashed line is MERRA result

准 16 天波振幅和相位几乎完全一致, 使用 MERRA 数据进一步分析这个时间段观察到的准 16 天波水平传播特性. 图 6 给出了 MERRA 三个站点 2014 年 2 月 1 日至 3 月 4 日期间纬向风扰动对准 16 天波的拟合结果, 图 6 中虚线为 LS 谱分析时 90% 置信度所对应的振幅. 除 A 站点在 16 km 以上振幅较小外, 各个站点振幅基本均超过 90% 的置信度, C 站点的相位变化较小, 而 A, B 站点在 10 km 以下相位几乎不变, 在 10 km 以上随高度增加而减小, 由于行星波振幅最大值在 7 ~ 10 km 之间, 并且在这个高度范围内相位变化不大, 因此计算 7~10 km 高度范围内的平均相位, 并结合纬圈长度来估算行星波的水平传播速度. 求得 A, B, C 站点相位分别为 3.4, 2.3 和 1.4 rad, 纬圈波的个数约为 2, 传播方向自西向东, 水平波长约为 15 324.7 km, 对应相速为 11.1 m·s^{-1} (东向为正).

根据 MERRA 提供的温度和压强等数据, 利用公式 $U_{\rm c}=\beta/[(k^2+l^2)+f_0^2/4H^2N^2]$ 求出准 16 天波对应的 Rossby 临界速度. 式中 β 和 f_0 分别表示 Rossby 参数和 Coriolis 参数, k 和 l 表示纬向和经向波数, N 为 Brunt-Vaisala 频率, H 为大气密度标高. 由于无法确定经向波数, 根据准 16 天波的波模式假设经圈波数为 3, 计算得到 $U_{\rm c}=35\,{\rm m\cdot s^{-1}}$. 已知相速度 $c_x=11.0\,{\rm m\cdot s^{-1}}$, 因此准 16 天波垂直上传时平均纬向风 $\bar{u}$ 应满足 $11.1\,{\rm m\cdot s^{-1}}<\bar{u}<46.1\,{\rm m\cdot s^{-1}}$, 这与图 1 得到的 2014 年冬季纬向平均风数值相符, 理论和观测数据均证实了在中纬地区满足条件的行星波可以垂直向上传播.

使用类似方法研究准 10 天波, 分别选取 2014 年 4 至 7 月的纬向风数据及 2012 年 12 月至 2013 年 3 月的经向风数据进行滤波, 结果如图 7 所示. 纬向分量中较强的准 10 天波出现 2014 年 5 月期间, 在 6~18 km 高度范围内幅值较大, 超过 18 km 则幅度较小. 经向分量振幅小于纬向分量, 在 15 km 高度以下, 准 10 天波在这三个月几乎一直存在, 在 15 km

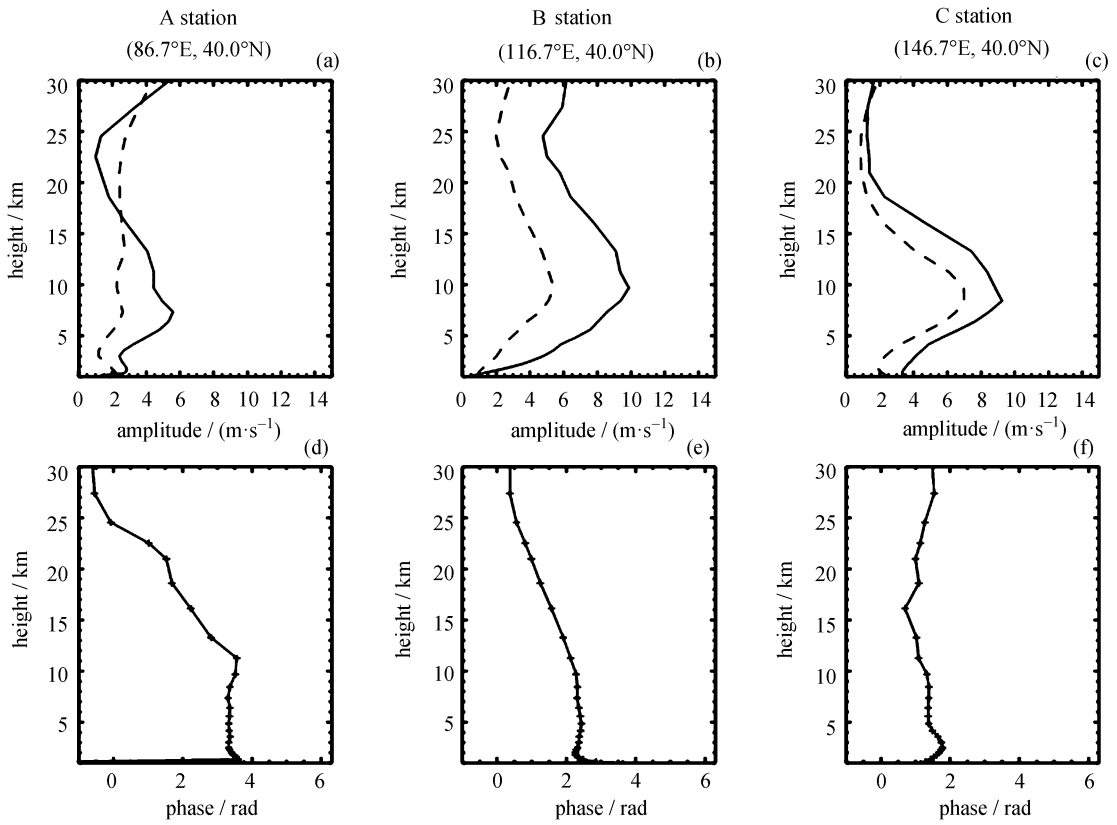

图 6　2014 年 2 月纬向分量准 16 天波振幅 (a)∼(c) 和相位 (d)∼(f) 随高度的变化. 虚线表示 LS 谱分析中置信度为 90% 所对应的振幅. “+” 号对应 MERRA 数据所在的高度剖面

Fig. 6　Height variations of amplitudes (a) (b) (c) and phase (d) (e) (f) for the quasi-16-day PW in zonal component in February 2014. Dashed line denotes the confidence level of 90%. “+” corresponds to the height profile of the MERRA data

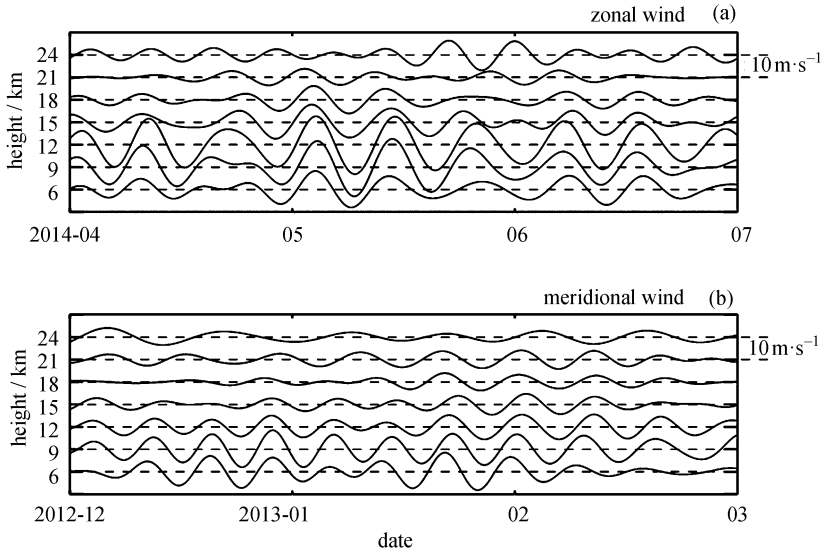

图 7　香河站 2014 年 4 至 7 月纬向风 (a) 和 2012 年 12 月至 2013 年 3 月经向风 (b) 带通滤波结果. 截止周期为 7.5∼12 d, 间隔为 10 m·s^{-1}

Fig. 7　Band pass filtering for zonal wind (a) from April to July in 2014 and for meridional wind (b) from December 2012 to March 2013. The cut-off period is 7.5∼12 d and the interval is 10 m·s^{-1}

以上则只在 2013 年 1 至 2 月期间观察到较为微弱的准 10 天波.

选取香河站及 B 站点 2014 年 5 月 1 日至 30 日期间纬向风及 2013 年 1 月 16 日至 2013 年 2 月 15 日期间经向风数据进行正弦拟合 (拟合周期为 10 天), 拟合结果如图 8 所示. 香河站与 B 站点数据变化趋势大致相同, 但是香河站的振幅值小于 B 站点. 其中纬向分量在 17 km 以下约相差 1∼2 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 经向分量中两者相差更大, 最大可达 4 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 纬向分量中准 10 天波振幅先增大后减小, 在 9∼11 km 高度处达到最大值, 香河站约为 11 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, B 站点约为 12 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 相位在 10 km 以下变化不大, 之后随高度的增加而逐渐增加, 行星波垂直向下传播, 由于 18 km 以上振幅值很小, 选取 10∼18 km 高度范围内的相位斜率来计算垂直波长, 约为 50 km. 经向分量中准 10 天波振幅的变化与纬向分量大致相同, 其中 B 站点的最大值约为 9 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 香河站则不超过 8 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 两站点的相位在 25 km 以下随高度变化不大, 呈现出静态波的特性.

选取 2014 年 5 月 1 日至 30 日期间 MERRA 数据的纬向分量研究准 10 天波的传播特性. 图 9 给出了三个站点的拟合结果. 其中 A 站点的振幅置信度较低, 而 B, C 站点在 18 km 高度以上振幅很小, 不超过 2 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 因此仅考虑 B, C 站点在 1∼18 km 高度范围内的行星波. 这一范围内的振幅先增大后减小, 在 10 km 左右达到最大值, 最大振幅分别为 12 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 和 15 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 同样选取 9∼11 km 的平均相位计算纬向波个数, 平均相位为 4.7 和 4.0 rad, 求得纬向波数约为 1, 水平波长约 30649.4 km, 对应相速为 35.5 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

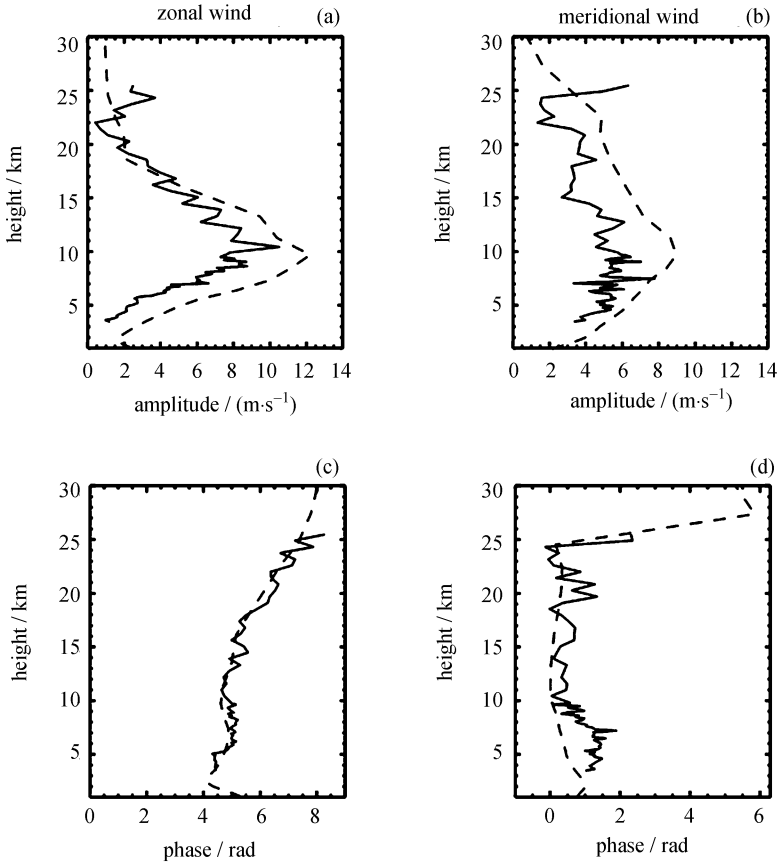

图 8 准 10 天波的纬向风 (a) (c) 和经向风 (b) (d) 的拟合的振幅 (a) (b) 和相位 (c) (d). 实线为香河站 MST 数据拟合结果, 虚线为 B 站点 MERRA 拟合数据结果

Fig. 8 Amplitude (a) (b) and phase (c)(d) for the quasi-10-day PW in zonal component(a) (c) and in meridional component (b) (d). Solid line is the result of MST data and the dashed line is MERRA result

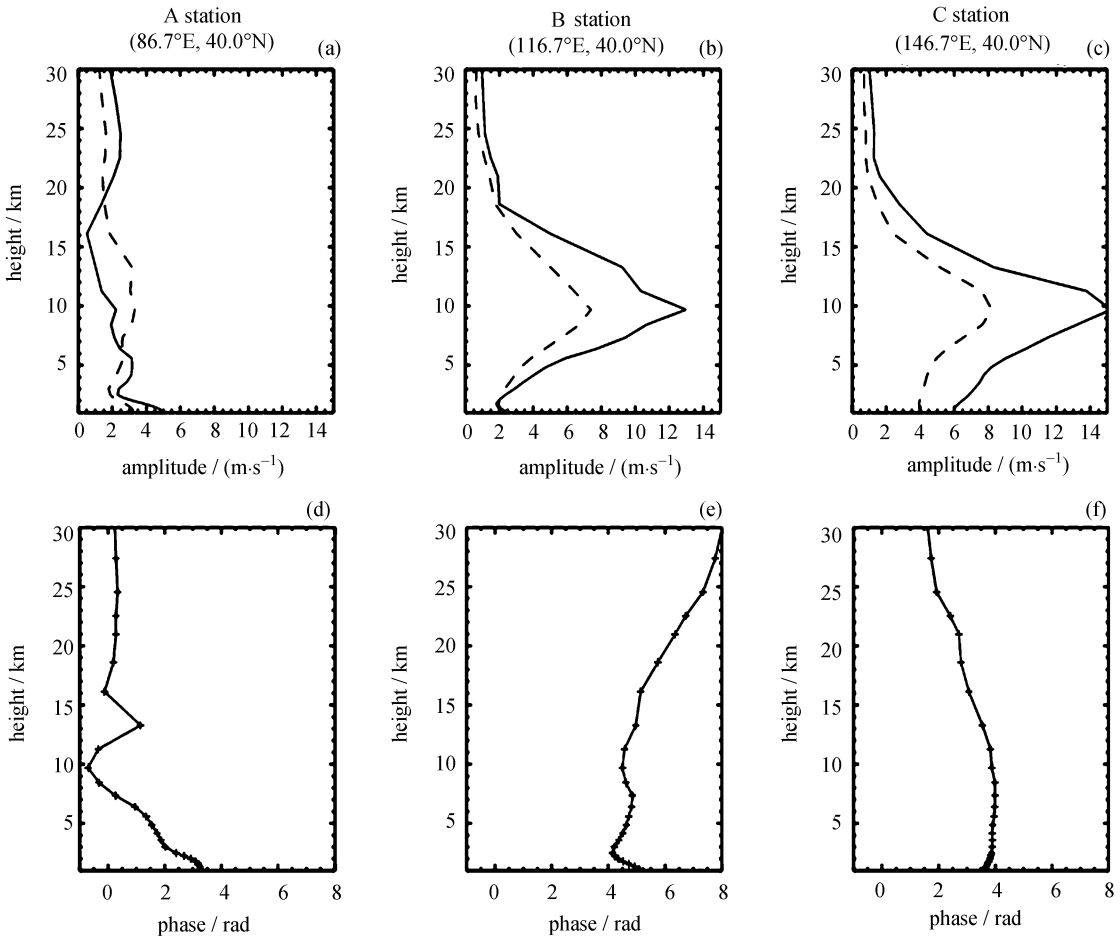

图 9　2014 年 5 月纬向分量准 10 天波振幅 (a)∼(c)、相位 (d)∼ (f) 随高度的变化. 虚线表示 LS 谱分析中置信度为 90% 所对应的振幅. “+” 号对应 MERRA 数据所在的高度剖面

Fig. 9　Height variations of amplitudes (a)∼(c) and phase (d)∼(f) for the quasi-10-day PW in zonal component in May 2014. The dashed line denotes the confidence level of 90%. “+” corresponds to the height profile of the MERRA data

根据垂直传播条件 $0 < \bar{u} - c_x < U_c$, 平均纬向风速 $\bar{u}$ 大于相速 c_x 时行星波才能垂直上传, 而实际纬向平均风并不满足这一条件, 这与观察结果一致, 在高度 18 km 以上的行星波振幅很小, 并无行星波垂直上传.

3　结论

根据河北香河站 MST 雷达 2012—2014 年的水平风场数据, 研究了中国中纬度地区对流层和低平流层地区的行星波活动. 通过对风场扰动量进行 LS 频谱分析, 发现在这一地区准 16 天波及准 10 天波占据主导地位.

在对流层 (5∼17 km 高度) 区域, 行星波具有丰富的频谱成分, 活动具有间断性, 一般不超过三个月, 没有明显的季节变化, 其中纬向分量的振幅大于经向分量, 准 16 天波大于准 10 天波; 在平流层区域 (17 km 高度以上), 行星波只在冬季出现, 并且主要出现在纬向分量中, 准 16 天波大于准 10 天波. 通常平流层区域的振幅要小于对流层区域. 行星波产生的理论研究表明, 行星波主要由地形不均匀性及太阳热辐射等多种因素作用而在对流层中产生, 因此在对流层的各个时期均观察到行星波. 而平流层行星波多出现在冬季: 这一方面是由于冬季背景纬向风场为东向风, 根据 Charney[3] 的行星波垂直传播理论, 部分符合条件的行星波将垂直上传; 另一方面则

是高纬地区的行星波垂直上传到平流层, 然后在平流层向中低纬地区传播 [21−24].

使用和香河站地理位置最接近的 B 站点 MERRA 数据与香河站数据进行对比, 对行星波活动剧烈的时间段进行正弦拟合, 得到准 16 天波和准 10 天波的振幅和相位随高度的变化情况. 二者准 16 天波和准 10 天波的变化情况在纬向分量中几乎完全一致, 经向分量中存在一定差异, 但变化趋势大致相同. 香河站纬向分量中 2014 年 2 至 3 月出现的准 16 天行星波在 3.5∼25 km 高度范围内振幅均超过了 4 m·s^{-1}, 相位随高度增加而减小, 沿垂直方向向上传播, 垂直波长约为 64 km. 2014 年 5 至 6 月出现的行星波在 3.5∼18 km 高度范围内幅度较大, 相位随高度增加而增加, 在 10∼18 km 高度范围内向下传播, 垂直波长约为 50 km. 经向分量中相位随高度的变化不大, 呈现出静态波的特性.

由于香河站 MST 雷达数据与 B 站点 MERRA 数据纬向分量吻合度很高, 利用 MERRA 再分析资料进一步研究行星波的水平传播特性. 对 MERRA 三个站点 2014 年 2 月和 3 月纬向分量进行正弦拟合, 准 16 天波纬圈波的个数约为 2, 传播方向自西向东, 水平波长约为 15 324.7 km, 对应相速为 11.1 m·s^{-1}. 对 2014 年 5 月纬向风中存在的准 10 天波进行相同的分析, 得到准 10 天波纬圈波数约为 1, 水平波长约为 30 649.4 km, 同样自西向东传播, 对应相速为 35.5 m·s^{-1}.

对单个行星波的研究有助于对行星波结构和传播机制进行更加深入的分析. 特别是 2014 年冬季在 3.5∼25 km 高度范围内始终能观察到较为显著的准 16 天波, 并且行星波相位随高度增加而均匀减小, 这进一步证实了中纬地区满足传播条件的行星波能够垂直上传.

致谢 MST 雷达探测数据由子午工程数据中心提供, MERRA 再分析数据由 NASA 戈达德地球科学数据和信息服务中心提供.

参考文献

[1] TAN Benkui. Advances of atmospheric of Rossby waves dynamics [J]. *Acta Meteor. Sin.*, 2008, **66**(6): 870-879 (谭本馗. 大气 Rossby 波动力学的研究进展 [J]. 气象学报, 2008, **66**(6): 870-879)

[2] LI Aibing, ZHANG Lifeng, ZHANG Liang, *et al.* The effects of zonal non-uniform basic flow on adjustment of atmospheric long-wave [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(4): 1104-1113 (黎爱兵, 张立凤, 张亮, 等. 纬向非均匀基流对大气长波调整的作用 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(4): 1104-1113)

[3] CHARNEY J G, DRAZIN P G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**(1): 83-109

[4] ELIASSEN A, PALM E. On the transfer of energy in stationary mountain waves [J]. *Geof. Publ. Norske Vid.-Akad. Oslo*, 1961, **22**(3): 1-23

[5] HUANG C M, ZHANG S D, YI F. Intensive radiosonde observations of the diurnal tide and planetary waves in the lower atmosphere over Yichang (111.18° E, 30.42° N), China [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**(3): 1079-1095

[6] LAWRENCE A R, JARVIS M J. Simultaneous observations of planetary waves from 30 to 220 km [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, **65**(6): 765-777

[7] MERZLYAKOV E G, SOLOVJOVA T V, YUDAKOV A A. The interannual variability of a 5∼7 day wave in the middle atmosphere in autumn from ERA product data, Aura MLS data, and meteor wind data [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2013, **102**(9): 281-289

[8] SMITH A K. The origin of stationary planetary waves in the upper mesosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**(24): 3033-3041

[9] HUANG K M, LIU A Z, ZHANG S D , *et al.* A nonlinear interaction event between a 16-day wave and a diurnal tide from meteor radar observations [J]. *Ann. Geophys.*, 2013, **31**(11): 2039-2048

[10] LI Yanjie, LI Jianping. Propagation of planetary waves in the horizontal non-uniform basic flow [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(2): 361-371 (李艳杰, 李建平. 水平非均匀基流中行星波的传播 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(2): 361-371)

[11] MTHEMBU S H, SIVAKUMAR V, MITCHELL N J, *et al.* Studies on planetary waves and tide interaction in the mesosphere/lower thermosphere region using meteor RADAR data from Rothera (68°S, 68°W), Antarctica [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2013, **102**(1): 59-70

[12] LU Xian, ZHANG Shaodong. Radiosonde observation of planetary waves in the lower atmosphere over the center China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(6): 529-535 (鲁娴, 张绍东. 中国中部低层大气行星波无线电探空仪的观测研究 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(6): 529-535)

[13] WANG Rui, ZHANG Shaodong, YI Fan. Radiosonde observations of high-latitude planetary waves in the lower atmosphere [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2010, **40**(5): 603-617 (王睿, 张绍东, 易帆. 高纬地区低层大气行星波的无线电探空仪观测研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, **40**(5): 603-617)

[14] ZHANG Xiaofang, YAN Wei. Advances in Studies on the exploration of the middle and upper atmosphere [J]. *Sci. Meteor. Sin.*, 2007, **27**(4): 457-463 (张晓芳, 严卫. 中高层大气探测技术的研究进展 [J]. 气象科学, 2007, **27**(4): 457-463)

[15] LIU Libo, WAN Weixing. A brief overview on the issue on space physics and space weather [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(11): 3493-3501 (刘立波, 万卫星. 我国空间物理研究进展 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3493-3501)

[16] MA Guanglin, HU Xiong, XU Qingchen, *et al.* Investigation and application of FCA method for Langfang MF radar wind retrievals [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 618-626 (马广林, 胡雄, 徐轻尘, 等. 廊坊中频雷达风场 FCA 算法的研究及应用 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(5): 618-626)

[17] ZHAO Jiaying, XU Haiming. Comparison of wind velocity among reanalysis and radiosone datasets over China [J]. *Climat. Environ. Res.*, 2014, **19**(5): 587-600 (赵佳莹, 徐海明. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(5): 587-600)

[18] HUANG C, ZHANG S, ZHOU Q, *et al.* WHU VHF radar observations of the diurnal tide and its variability in the lower atmosphere over Chongyang (114.14°E, 29.53°N), China [J]. *Ann. Geophys.*, 2015, **33**(7): 865-874

[19] GLYNN E F, CHEN J, MUSHEGIAN A R. Detecting periodic patterns in unevenly spaced gene expression time series using Lomb-Scargle periodograms [J]. *Bioinformatics*, 2006, **22**(3): 310-316

[20] 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

[21] HUANG Ronghui, LIU Yong, HUANGFU Jingliang, *et al.* Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the late 1990s [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2014, **38**(4): 627-644 (黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 大气科学, 2014, **38**(4): 627-644)

[22] HUANG R H, GAMBO K. On other wave guide in stationary planetary wave propagations in winter northern hemisphere [J]. *Sci. China*, 1984, **27**(6): 610-624

[23] CHEN Wen. The interannual variations of propagation of quasi-stationary planetary waves in the northern hemisphere winter [J]. *Progr. Nat. Sci.*, 2006, **16**(4): 485-489 (陈文. 北半球冬季准定常行星波传播的年代际变化 [J]. 自然科学进展, 2006, **16**(4): 485-489)

[24] YANG Lei, CHEN Wen, HUANG Ronghui. The data analysis and numerical simulation of the climatology of quasi-stationary planetary waves in the northern hemisphere [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2006, **30**(3): 361-376 (杨蕾, 陈文, 黄荣辉. 北半球准定常行星波气候平均态的资料分析和数值模拟 [J]. 大气科学, 2006, **30**(3): 361-376)

[25] MATSUNO T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter northern hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1970, **27**(1): 871-883