

凌超, 陈泽宇, 陈洪滨. 2014. 中间层顶区域大气平均风场年和半年振荡的全球结构 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 383–392, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13072. Ling Chao, Chen Zeyu, Chen Hongbin. 2014. Annual and semi-annual oscillations of zonal mean winds in the mesopause region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 383–392.

## 中间层顶区域大气平均风场年和半年 振荡的全球结构

凌超<sup>1,2</sup> 陈泽宇<sup>1</sup> 陈洪滨<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用 2003~2011 年 TIDI(TIMED Doppler Interferometer) 风场观测数据研究了中间层顶区域 80~105 km 纬向平均风场年振荡和半年振荡振幅和相位的全球分布结构, 并给出了它们的年际变化。在热带地区, 纬向风半年振荡最显著。振幅峰值中心位于南半球 10°S~20°S 范围, 出现与平流层半年振荡类似的相对于赤道不对称的分布, 并且振幅峰值与以前在该区域的研究结果存在较大差别。在中高纬度地区, 纬向风和经向风被年振荡所控制。纬向风在高度 100 km 以下中高纬度都存在振幅大值中心; 经向风年振荡只出现在两半球中纬度高度 95 km 以下, 并且南北半球振幅峰值中心分布不一致。分析结果还显示年振荡和半年振荡振幅存在显著地年际变化, 相位的年际变化则较小, 但北半球热带地区经向风年振荡振幅和相位表现出 2 年周期的变化。

**关键词** 中间层顶区域 年振荡 半年振荡 年际变化

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0383-10

中图分类号 P465

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13072

## Annual and Semi-Annual Oscillations of Zonal Mean Winds in the Mesopause Region

LING Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Zeyu<sup>1</sup>, and CHEN Hongbin<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** In this study the authors analyzed the global structures and inter-annual variations of the annual and semi-annual oscillations of the zonal mean winds in the mesopause region from 80 to 105 km, using nine years (2003–2011) of TIDI (TIMED Doppler Interferometer) observations. In the tropical regions, mean zonal winds dominate the semi-annual oscillation; peak amplitudes occur between 10°S and 20°S, with similar results for the semi-annual oscillation in the stratospheric zonal winds; the amplitudes of the TIDI observations are much smaller than previous results for the mesosphere using other measurement techniques. In the middle and high latitudes, zonal winds and meridional winds are dominated by annual oscillation. The annual oscillation of the zonal winds has two maximum centers in the middle and high latitudes below 100 km. The annual oscillation of the meridional winds is only found at the middle latitudes below 95 km, and the amplitude centers are distributed differently in the Northern and Southern Hemispheres. Results also show that the amplitudes of the annual and semi-annual oscillations in the zonal and

收稿日期 2013-04-28 收到, 2013-05-22 收到修定稿

资助项目 中国科学院重点部署项目 KZZD-EW-01-1, 国家自然科学基金面上项目 41075028, 中国科学院先导项目课题“2016–2030 空间地球科学/全球变化规划研究”

作者简介 凌超, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事中层大气风场研究。E-mail: lingchao2003@163.com

meridional winds have significant inter-annual variations with nearly no change in phases. However a two-year period change, both in the amplitude and phase of the annual oscillation of the meridional winds, was found in the northern tropics.

**Keywords** Mesopause region, Annual oscillation, Semi-annual oscillation, Inter-annual variation

## 1 引言

中间层顶区域大气平均风场中存在显著的半年振荡和年振荡 (Andrews et al., 1987)。热带地区半年振荡是最显著的周期变化, 中高纬地区则以年振荡为主。热带中层大气半年振荡首先在平流层月平均温度中发现 (Reed, 1962)。随后, 火箭探空的结果发现上平流层和下中间层范围纬向风同样存在半年振荡 (Reed, 1966), 其中赤道上空 50 km 高度振幅取得最大值 (30 m/s)。后来的研究结果都证实了 Reed (1962, 1966) 的观测结果, 这些研究表明纬向风半年振荡振幅在平流层顶最大, 西风最大值出现在两分点季节之后, 东风出现在两至点季节之后。火箭探空和流星雷达资料的结果显示半年振荡存在于整个中间层 (Groves, 1972)。Hirota (1978) 利用阿森松岛 (Ascension) ( $8^{\circ}\text{S}$ ,  $14^{\circ}\text{W}$ ) 火箭探空纬向风资料发现热带地区半年振荡包括两个明显的中心, 振幅最大值 (约 30 m/s) 出现在平流层顶 (47 km) 和中间层顶 (81 km), 最小值出现在 64 km 高度 (约 5 m/s), 并指出平流层顶与中间层顶半年振荡的相位相差约  $180^{\circ}$ 。Hamilton (1982) 利用 7 年瓜加林站 (Kwajalein) ( $8.7^{\circ}\text{N}$ ,  $167.7^{\circ}\text{E}$ ) 月平均纬向风数据证实了 Hirota (1978) 关于热带地区中层大气中两个不同半年振荡的结果。Dunkerton (1982) 认为平流层顶半年振荡对重力波和开尔文波的选择性吸收过滤是形成中间层顶半年振荡的原因, 而且利用这个原理可以很好地解释中间层顶半年振荡和平流层顶半年振荡之间的反相位关系。Palo and Avery (1993) 利用圣诞岛 (Christmas) ( $1.95^{\circ}\text{N}$ ,  $157.3^{\circ}\text{W}$ ) 流星雷达观测给出了 80~100 km 平均风场的变化, 其中纬向风主要以半年振荡为主, 振幅最大值 (15~20 m/s) 出现在 84 km, 振幅峰值出现的高度比阿森松岛 (Ascension) 和瓜加林岛 (Kwajalein) 的略高。Venkateswara Rao et al. (2012) 集合了亚洲—大洋洲地区 4 部中频雷达和 3 部流星雷达的观测组成了南北纬  $22^{\circ}$  范围内 5 个纬度的长时间序列资料, 分析了这些地区 MLT (Mesosphere and Lower

Thermosphere) 区域月平均风长期变化, 其中纬向风表现出显著的半年振荡, 振幅峰值可达 25 m/s。Li et al. (2012) 利用夏威夷毛伊岛 (Hawaii Maui) 站 ( $20.7^{\circ}\text{N}$ ,  $156.3^{\circ}\text{W}$ ) 的流星雷达观测同样发现该区域中间层顶纬向风存在明显的半年振荡。

基于火箭探空和地基雷达观测资料的分析结果只能覆盖较少区域, 针对中间层顶平均风场半年和年振荡的全球分布研究显得不足。卫星观测的出现, 使得这种局面有了很大改善 (Lieberman et al., 1993; Burridge et al., 1996; Garcia et al., 1997)。Lieberman et al. (1993) 利用 UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 卫星上搭载 HRDI (High Resolution Doppler Imager) 风场观测对中间层和低热层月平均纬向风进行了研究, 指出赤道中间层顶区域纬向风表现出显著的半年振荡, 纬向东风出现在两分点季节, 西风出现在两至点季节, 并且东风最大值出现在南半球; 中高纬度地区纬向风则表现出明显的年变化。热带中间层顶半年振荡与平流层顶半年振荡反相, 中高纬度年振荡两半球之间相位相差  $180^{\circ}$ 。Burridge et al. (1996) 采用 HRDI 资料分析了中间层顶半年振荡, 结果显示半年振荡振幅相对于赤道对称, 最大值出现在 82 km 达 35 m/s。Garcia et al. (1997) 采用多种地基和卫星观测资料对平流层和中间层半年振荡进行了更详细的研究, 指出在 90 km 高度以下纬向风表现出强的半年振荡, 并且存在明显的年际变化。

UARS 卫星搭载的 HRDI 仪器可以覆盖中间层顶区域, 但除 95 km 高度以外只在白天时段获取风场观测资料 (Hays et al., 1993), 利用 HRDI 资料分析平均风场时会受到明显的周日潮汐影响。地基雷达以及火箭探空观测等覆盖范围太小, 不能对中间层顶区域平均风场半年振荡和年振荡全球结构进行分析。2001 年发射的热层—电离层—中间层能量学和动力学卫星 TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) 上搭载的多普勒干涉仪 TIDI (TIMED Doppler Interferometer) 是用于中间层和低热层大气风场观测的设备, 目前在轨观测超过 10 年, 积累了大量的风场观测数据。利用这些数据, 本工作研究了中间层顶区域平均风场

年振荡和半年振荡的全球结构及其年际变化。

## 2 卫星资料和分析方法

TIMED 卫星是美国宇航局 (NASA) 2001 年 12 月 7 日发射的用于地球热层、电离层和中间层能量学和动力学观测的卫星 (Yee et al., 1999; Yee, 2003)。该卫星运行在倾角为  $74.1^\circ$ , 高度为 625 km 的圆形轨道上。它每日完成 15 个轨道观测, 相邻两条轨道之间的经度间隔为  $24^\circ$ 。卫星上搭载的 TIDI 仪器 (Killeen et al., 1999) 用于主要用于中间层和低热层大气风场的观测, 垂直分辨率为 2.5 km, 测量精度在中间层为 3 m/s (Killeen et al., 2006)。TIDI 通过临边扫描方式监测由中性风引起的气辉辐射多普勒频移来测量风速, 白天观测 70~120 km 高度, 晚上则覆盖 80~105 km 的高度范围 (Killeen et al., 2006; Wu et al., 2006)。

在本文中, 我们采用美国国家大气研究中心 (NCAR) 高空观测台 (HAO) 提供的 TIDI 矢量风场资料, 版本为 0307a, 该版本资料已经用于中间层顶区域纬向平均风特征和大气潮汐研究 (Wu et al., 2008a, 2008b)。目前, 风场资料时间可覆盖 2002 年 3 月至 2012 年 3 月。通过归并 60 d 观测资料获取 24 h 局地时间覆盖的风场数据, 求取白天和夜间平均风速, 最后得到纬向平均风场日平均值, 该处理方法与凌超等 (2012) 相同。利用 Lomb-Scargle 谱分析方法 (Press et al., 1992) 可以考察中间层顶区域平均风场中的典型振荡周期, 然后对平均风场中的主要组成部分进行拟合分解。

平均风场可以表示为气候态平均值、年振荡和半年振荡以及长期趋势的总和:

$$W(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_0 t - \phi_1) + \\ A_2 \cos(2\omega_0 t - \phi_2) + T_{\text{rend}} t + \delta_t, \quad (1)$$

其中, 对于给定高度和纬度,  $W(t)$  表示时间  $t$  (单位: d) 对应的纬向平均风速,  $A_0$  为气候态平均值,  $A_1$  和  $A_2$  分别为年和半年振荡振幅,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  为年和半年振荡的相位。 $\omega_0 = 2\pi/365$  是年振荡谐波成份对应的圆频率, 半年振荡的圆频率为  $2\omega_0$ ,  $T_{\text{rend}}$  为长期变化趋势,  $\delta_t$  为观测与拟合结果之间的残差。通过最小二乘拟合方法, 可以得到平均风场年变化和半年变化振幅以及相位的全球分布。采用该方法对多年数据进行拟合可以得到多年平均的结果, 也可以分别对每年资料进行计算得到不同年

份的结果。

## 3 结果分析

### 3.1 Lomb-Scargle 谱分析结果

纬向平均风场的 Lomb-Scargle 谱分析结果显示, 在 80~105 km 高度范围, 85 km 高度的结果描述了纬向风典型的变化结构, 而 87.5 km 高度的结果可以给出经向风的典型变化结构。图 1 给出了全球 85 km 高度纬向平均纬向风的 Lomb-Scargle 谱分析结果, 图中显示的结果都通过了 99% 的置信度检验。在置信度为 99% 的情况下 (即显著性水平为 0.01), 可计算得到此时对应的功率  $P_{\text{confidence}}$ , 即  $P_{\text{confidence}=99\%} = 14.5$ 。图中谱分析功率单位为 dB, 具体计算表达式为:  $P_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P/P_{\text{confidence}})$ , 其中,  $P$  为 Lomb-Scargle 谱分析给出的功率值。在图 1 中可以看到, 在 85 km 高度热带地区纬向风具有显著的半年振荡, 中高纬度则表现为年振荡。热带地区纬向风也存在更长周期 (如 2~3 年) 的变化, 但不如年振荡和半年振荡显著。图中还显示, 热带地区半年振荡功率峰值出现在南半球。

图 2 给出的是 87.5 km 高度纬向平均经向风的谱分析结果, 经向风中最显著的周期变化为年振荡, 峰值主要出现在两半球中纬度地区; 谱分析结果还显示高纬度地区经向风存在半年振荡, 但较年振荡明显偏弱。

### 3.2 年振荡的全球结构

图 3 给出了纬向风多年平均 (2003~2011 年) 年振荡振幅和相位在 80~105 km 高度范围的全球分布, 纬向风相位是指西风取得最大值的时间。全球年振荡振幅在热带地区不超过 6 m/s, 振幅峰值主要出现在中高纬度。以北半球为例, 振幅主要存在两个大值中心, 一个位于 80~95 km 高度的高纬度地区 ( $>60^\circ\text{N}$ ), 另一个出现在 95~105 km 高度的中纬度地区 ( $30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$ )。同样, 在南半球也存在对应的两个大值中心。在 100 km 高度, 振幅大值出现在较宽的纬度范围。北半球峰值中心位于中纬度  $52.5^\circ\text{N}$ , 振幅达到 25 m/s。在相同高度, 南半球振幅峰值约 18 m/s。年振荡振幅的另一个极大值出现在高纬度, 北半球峰值出现在 95 km 高度  $80^\circ\text{N}$  附近, 振幅达 28 m/s; 南半球在相同纬度 87.5 km 高度取得最大值, 约 29 m/s。此外, 在北半球  $40^\circ\text{N}$  附近存在一个次大值中心, 位于 82.5 km 高度,

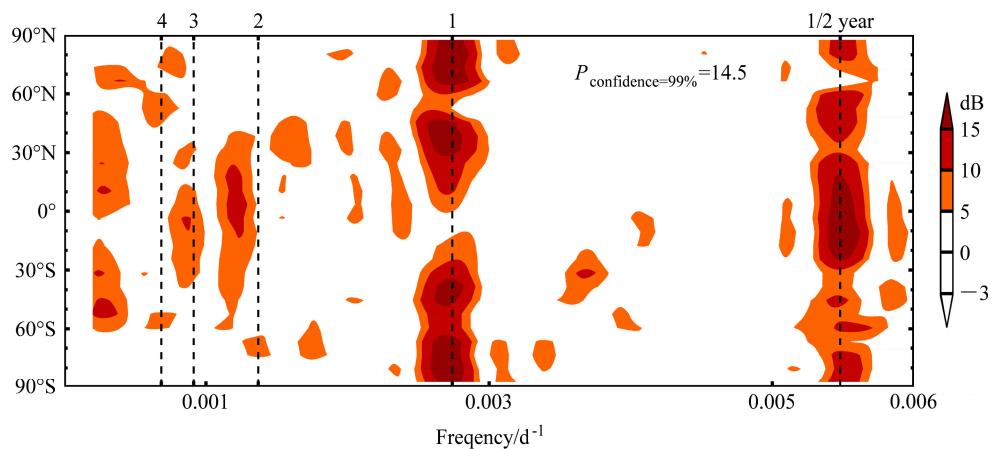


图 1 全球 85 km 高度纬向平均纬向风的 Lomb-Scargle 谱分析结果

Fig. 1 Spectral analysis of zonal mean zonal winds at 85 km using Lomb-Scargle

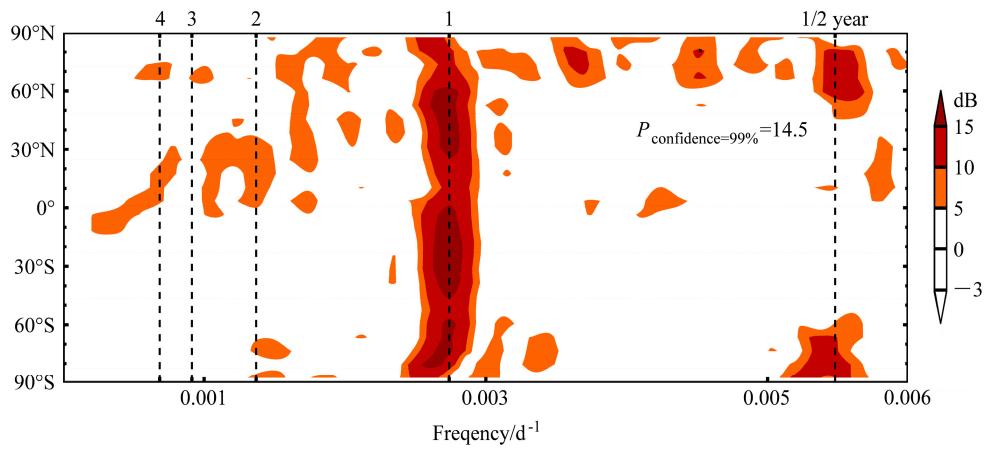


图 2 同图 1, 但为 87.5 km 高度纬向平均经向风的结果

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for zonal mean meridional wind at 87.5 km

振幅约 13 m/s。从年振荡振幅最大值出现的位置来看, 年振荡总体上相对于赤道对称分布。Belmont et al. (1974) 分析平流层 20~65 km 高度纬向风的年振荡结果显示, 在相同高度和纬度, 南半球振幅要大于北半球振幅, 振幅峰值主要出现在中高纬度。两半球年振荡相位总体上都是向下向赤道传播。TIDI 结果显示 MLT 区域纬向风年振荡振幅峰值主要出现在中高纬度, 振幅相对于赤道对称分布。

从图 3b 给出的年振荡相位分布来看, 北半球中纬度 100 km 高度附近年振荡在 6~8 月取得峰值, 即那时年振荡西风出现最大值, 这与 100 km 高度平均纬向风的典型分布结构是一致的; 在北半球中高纬度 100 km 高度以下的地方, 出现峰值的时间要略晚, 从 9 月持续至 12 月。特别是在 90 km 以下高度, 西风峰值出现在 12 月附近, 这与中间层顶纬向风发生反转有关, 即在 90 km 高度以下纬向西风在冬至时达到最大。这也从侧面反应了北半

球纬向风的反转发生在 90~95 km 之间。在南半球中纬度 100 km 高度附近, 相位对应为 12 月, 与北半球相同高度相差半年。这与 MLT 区域纬向风在半球夏季出现西风, 半球冬季出现东风的结构一致。在南半球高纬度 95 km 高度以下的相位为 3~6 月, 该区域西风最大值出现在南半球冬至之前, 与北半球略有区别。Huang and Reber (2003) 利用 HRDI 资料分析的结果显示, 在 95 km 高度, 北半球热带和中纬度地区年振荡相位出现在 12 月, 南半球出现在 6 月。我们的分析结果与其一致。总体上, 相位的全球分布是从 100 km 中纬度开始向下传播的。

为了考察年振荡振幅和相位的年际变化, 同样采用第 2 节介绍的拟合方法对每年纬向风数据进行拟合, 得到 2003~2011 年振幅和相位的结果。选取年振荡振幅极大值出现的对称格点, 即南、北半球 52.5°N (S) 高度 100 km 和 73.5°N (S) 高度 95

km 共 4 个格点进行考察。图 4 给出了年振荡振幅和相位在 2003~2011 年的变化。在 52.5°N (S) 高度 100 km 的两个格点, 北半球振幅比南半球大, 并

且两者都出现周期约为 3 年的年际变化。在 73.5°N (S) 高度 95 km 的两个格点, 振幅表现出更显著的年际变化, 但周期性不显著, 除了北半球 95 km

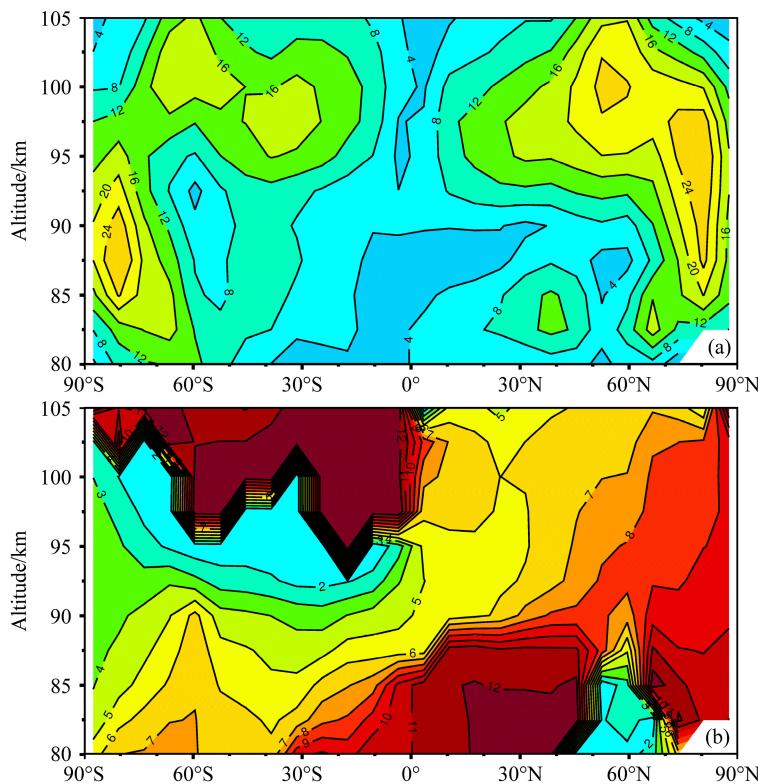


图 3 全球中间层顶区域纬向平均纬向风年振荡 (a) 振幅 (单位: m/s) 和 (b) 相位 (单位: months) 的多年平均分布  
Fig. 3 Annual oscillation (a) amplitudes (m/s) and (b) phases (months) of mean zonal winds in the mesopause region

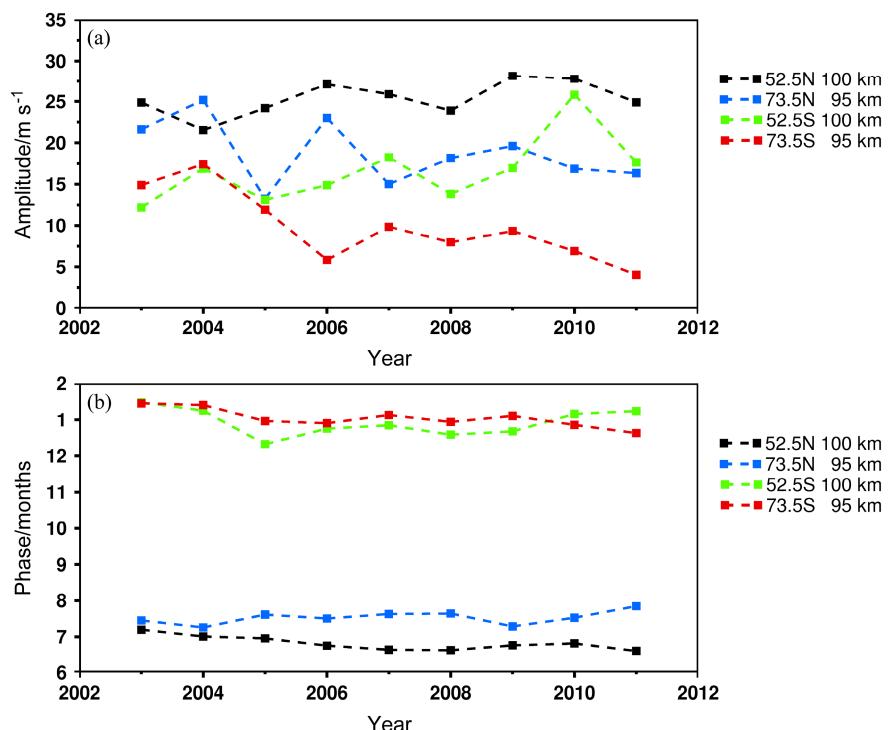


图 4 中间层顶区域 52.5°N (S) 高度 100 km 和 73.5°N (S) 高度 95 km 4 个格点纬向风年振荡 (a) 振幅和 (b) 相位随时间变化

Fig. 4 Variations of (a) amplitude and (b) phase of annual oscillation in mean zonal winds of 52.5°N (S) at 100 km and 73.5°N (S) at 95 km in the mesopause region

振幅在 2003~2006 期间表现出 2 年周期的振荡(蓝色虚线)。从图 4b 中相位分布来看, 年振荡相位的年际变化较小。

采用与纬向风相同的方法对经向风进行考察, 图 5 给出了 MLT 区域全球纬向平均经向风年振荡平均振幅和相位的分布图, 经向风相位表示南风取得最大值的时间。从图中可知, 年振荡振幅峰值出现在 85~90 km 高度的中纬度地区。南半球振幅峰值中心在 20°S~40°S, 最大达 18 m/s; 北半球峰值出现在 40°N~60°N, 可达 16 m/s。在其他高度和纬度, 年振荡振幅都较小。Huang and Reber (2003) 利用 HRDI 经向风数据给出的 95 km 年振荡振幅在 6~12 m/s。在相同高度, TIDI 观测与他们的结果相当。图 5b 中相位的分布显示, 经向风年振荡最大值出现的时间均在 12 月, 这说明全球 95 km 及以下高度南风最大值出现在 12 月。这种经向风的分布与中间层从夏季半球至冬季半球的经圈环流结构是一致的。在 12 月, 北半球处于冬季, 南半球处于夏季, 经向风表现为从南半球到北半球的南风。

图 6 给出了经向风年振荡振幅和相位在中纬度和热带地区的年际变化。同样选取 4 个格点, 黑虚线和蓝虚线分别给出的是 31.5°S 和 59.5°N 两个纬度 87.5 km 高度的结果, 绿虚线和红虚线分别给出的是 10.5°S 和 10.5°N 高度 87.5 km 的结果。在 31.5°S 和 59.5°N 的中纬度地区, 振幅年际变化显著, 但周期性不明显; 对应的相位年际变化较小; 在热带地区, 虽然振幅比中纬度明显减小, 但是年际变化非常显著, 并表现出明显的周期性特征。南半球和北半球 10.5°N (S) 纬度振幅表现出两年周期变化(南半球除 2008 年除外); 分析对应相位的年际变化发现北半球相位同样存在两年周期的变化, 但南半球相位变化则较小。在 2004、2006、2008 和 2010 年北半球热带地区, 年振幅减小, 对应相位提前(出现在 9~11 月); 而 2003、2005、2007、2009 和 2011 年北半球年振幅增大, 对应相位延后(出现在 1 月附近)。

### 3.3 半年振荡的全球结构

图 7 给出了纬向风半年振荡平均振幅和相位的全球分布, 其中相位给出的是第一次振荡西风取得峰值的时间。热带地区半年振荡在高度 85 km 取得峰值, 振幅峰值超过 12 m/s, 而 92.5 km 高度以上迅速减小, 半年振荡可延伸至南北半球 20°N (S)~

30°N (S) 范围。半年振荡振幅大值中心还出现在中高纬度, 北半球分别出现在 66.5°N 高度 95 km 和 80.5°N 高度 87.5 km, 振幅达 12 m/s; 南半球分别出现在 45.5°S 高度 95 km 和 80.5°S 高度 87.5 km, 振幅分别为 11 m/s 和 14 m/s。关于中间层顶半年振荡, 以前的研究结果显示振幅约在 25~35 m/s 之间。Hirota (1978) 利用火箭探空数据给出阿森松岛(Ascension)的振幅最大值出现在 81 km 约 30 m/s。Burridge et al. (1996) 利用 HRDI 资料给出的纬向风半年振荡相对于赤道对称, 最大值出现在 82 km 高度达 35 m/s。Venkateswara Rao et al. (2012) 给出的中间层顶半年振荡最大振幅约 25 m/s, 并且不同观测站点峰值高度不同, 在 80~86 km 之间变化。Palo and Avery (1993) 利用圣诞(Christmas)岛(1.95°N, 157.3°W)流星雷达观测给出中间层顶半年振荡最大振幅出现在 84 km 高度, 约 15~20 m/s。TIDI 给出的结果无论是峰值振幅还是峰值出现的高度都与 Palo and Avery (1993) 的结果非常接近。另外, TIDI 多年平均结果显示热带地区半年振荡振幅并非关于赤道对称, 大值中心主要出现在南半球 10°S~20°S 范围。这种半球不对称性也出现在 Lieberman et al. (1993) 的结果中, 但利用相同的资料也得到不同的结果(Burridge et al., 1996)。

图 7b 中半年振荡相位的全球分布结构显示热带和中纬度地区相位表现一致, 出现在 6 月, 这说明这些地区半年振荡西风同时出现在一年中的两至点季节(6 月和 12 月)。这种相位的分布, 与以前的研究是一致的(Hirota, 1978; Burridge et al., 1996)。选取南北半球典型的 4 个格点对半年振荡振幅和相位的年际变化进行考察, 图 8 给出了它们随时间的变化。结果显示振幅存在明显的年际变化, 甚至出现两年周期的变化(蓝虚线), 但相位的年际变化较小。由于经向风半年振荡很弱, 并且出现在较高纬度, 因此不在此处给出相关分析结果。

## 4 总结和讨论

我们利用 2003~2011 年期间 TIDI 在中间层顶区域 80~105 km 高度的风场观测计算了平均风场, 并利用 Lomb-Scargle 谱分析方法对多年日平均风场典型振荡周期进行分析。采用最小二乘拟合方法分解平均风场中年振荡和半年振荡成分, 给出振幅

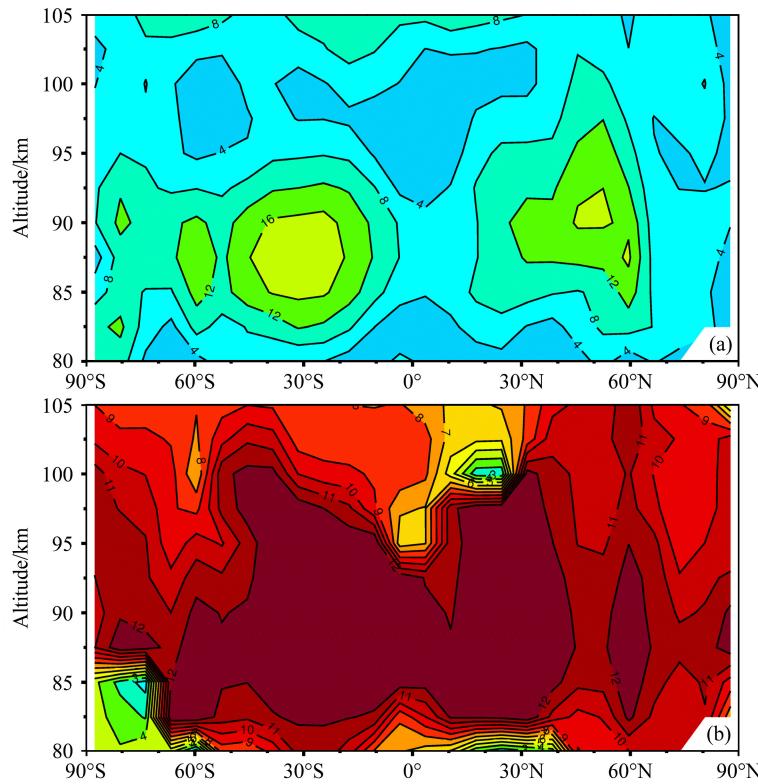


图 5 同图 3, 但给出的是经向风的结果

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the zonal mean meridional wind

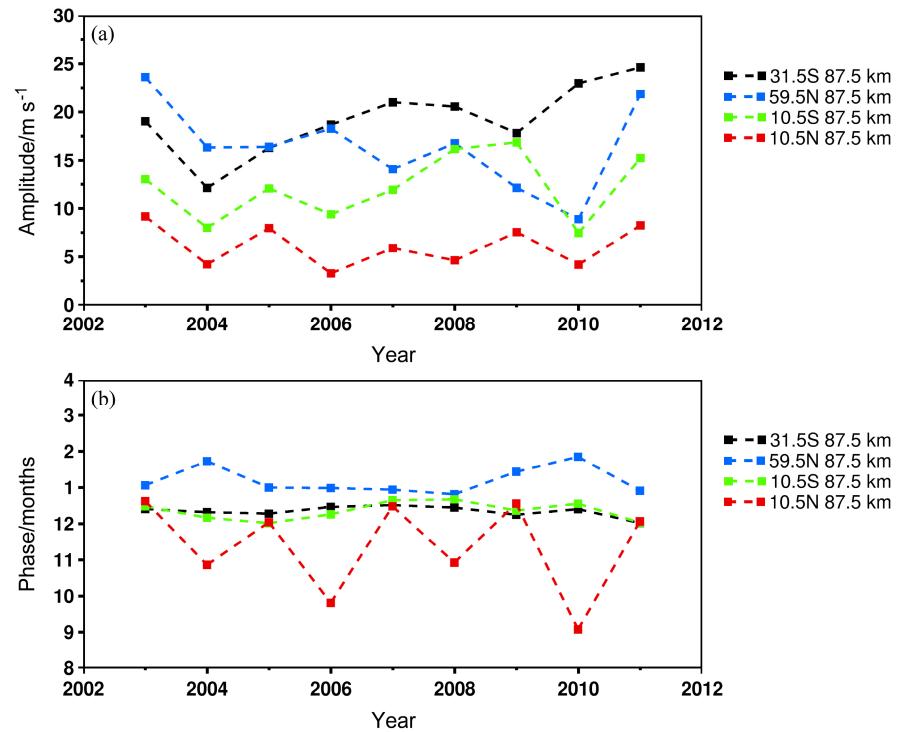


图 6 中间层顶区域 10.5°N (S)、31.5°S、59.5°N 高度 87.5 km 4 个格点向风年振荡 (a) 振幅和 (b) 相位随时间变化

Fig. 6 Variations of (a) amplitude and (b) phase of annual oscillation in mean zonal winds of 10.5°N (S), 31.5°S, and 59.5°N at 87.5 km in the mesopause region

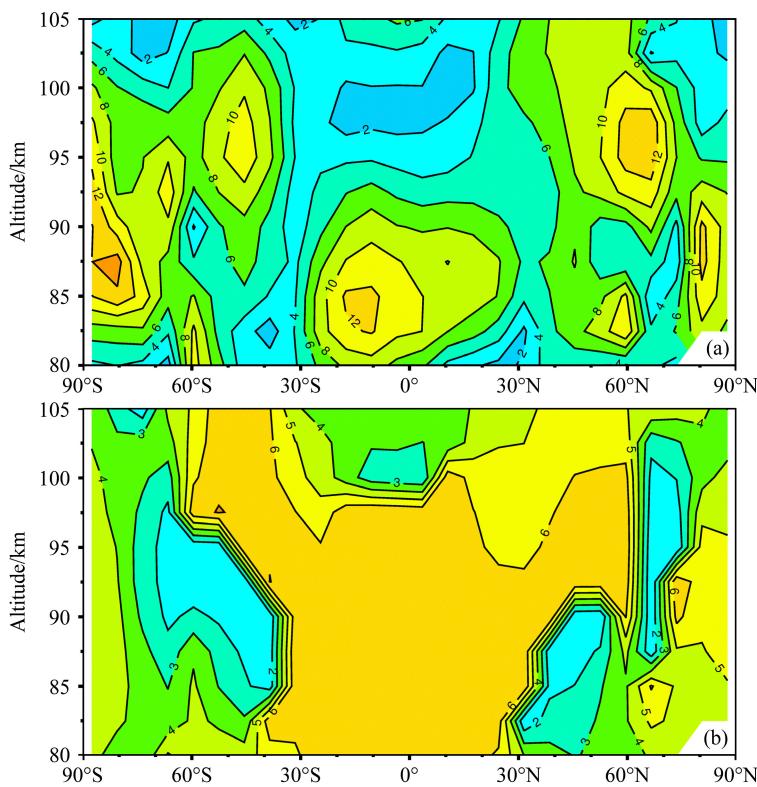


图 7 同图 3, 但给出的是纬向风半年振荡的结果

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for semi-annual oscillation of mean zonal wind

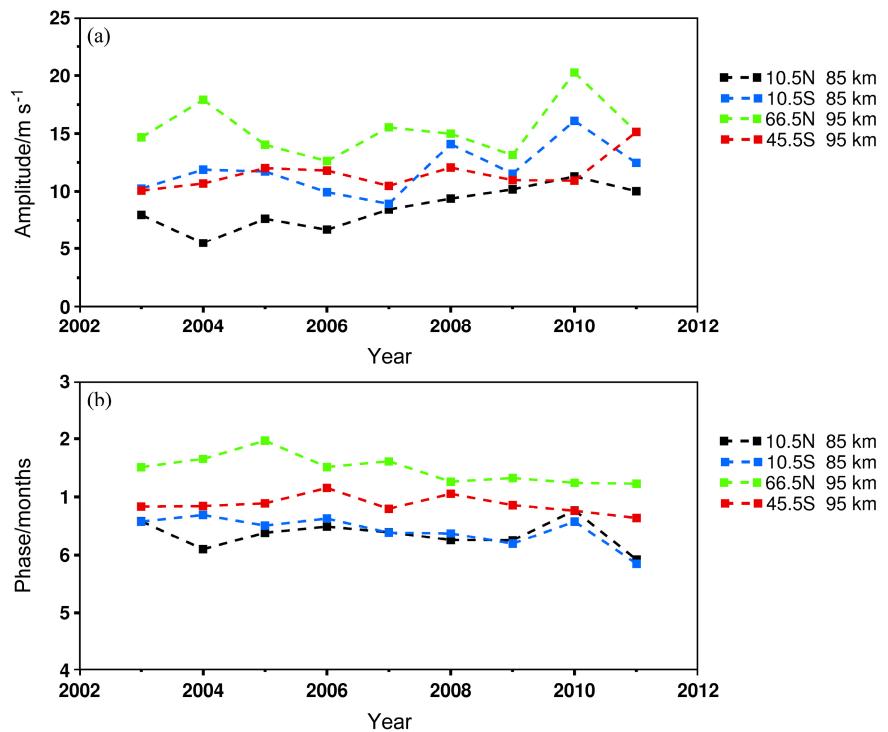


图 8 中间层顶区域  $10.5^{\circ}\text{N}$  ( $\text{S}$ ) 高度 85 km、 $45.5^{\circ}\text{S}$  高度 95 km 和  $66.5^{\circ}\text{N}$  高度 95 km 4 个格点纬向风半年振荡 (a) 振幅和 (b) 相位随时间变化

Fig. 8 Variations of (a) amplitude and (b) phase of semi-annual oscillation in mean zonal winds of  $10.5^{\circ}\text{N}$ ( $\text{S}$ ) at 85 km,  $45.5^{\circ}\text{S}$  at 95 km, and  $66.5^{\circ}\text{N}$  at 95 km in the mesopause region

和相位的全球分布, 并考察了它们的年际变化。得到的主要结果如下:

(1) 全球纬向风年振荡在热带地区很弱, 振幅不超过 6 m/s。年振幅主要出现在中高纬度, 出现两个振幅大值中心, 分别位于中纬度( $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )和高纬度地区( $>60^{\circ}$ )。北半球中纬度振幅峰值可达 25 m/s, 南半球约 18 m/s; 高纬度地区两半球振幅约 28~29 m/s。结果显示北半球  $40^{\circ}\text{N}$  高度 82.5 km 还存在一个次大值中心, 振幅约 13 m/s。相位结果显示, 90 km 高度以上北半球中高纬度西风在夏季(6~8 月)达到最大, 南半球则出现在冬季(12 月), 两半球相位差  $180^{\circ}$ 。90 km 高度以下则刚好相反, 这与纬向风在中间层顶区域发生反转有关。总体上, 两半球年振荡相位从 100 km 高度向下传播。95 km 高度的结果与 Huang and Reber (2003) 的结果一致。振幅的年际变化显著, 在南、北半球  $52.5^{\circ}\text{N}$  (S) 高度 100 km, 振幅出现约 3 年周期的变化, 其它地方周期性不显著。相位的年际变化较小。

(2) 全球经向风年振荡主要出现在 85~90 km 高度的中纬度地区。南半球出现在  $20^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}$ , 振幅峰值达 18 m/s; 北半球出现在  $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ , 峰值达 16 m/s。在其他高度和纬度, 年振荡的振幅量值较小。Huang and Reber (2003) 利用 HRDI 经向风数据给出的 95 km 年振荡振幅在 6~12 m/s。在相同高度, TIDI 观测与他们的结果相当。相位分析显示, 全球 90 km 及以下高度南风最大值出现在 12 月。这种经向风的分布与中间层从夏季半球至冬季半球的经圈环流是一致的。振幅和相位随时间变化的结果显示, 在中纬度地区振幅年际变化显著, 对应的相位年际变化则较小; 在热带地区, 振幅和相位的年际变化都非常显著, 特别是北半球。南、北半球  $10.5^{\circ}$  纬度振幅表现出明显的两年变化(南半球除 2008 年以外), 北半球相位也存在相同的变化, 但南半球相位不存在。在 2004、2006、2008 和 2010 年北半球热带地区, 经向风年振幅减小, 相位提前(出现在 9~11 月); 而 2003、2005、2007、2009 和 2011 北半球年振幅增大, 相位延后(出现在 1 月附近)。

(3) 关于半年振荡, 纬向风半年振荡在热带地区 85 km 高度取得峰值, 92.5 km 高度以上迅速减小, 振幅峰值大于 12 m/s, 可延伸至南北半球  $20\sim 30^{\circ}\text{N}$  (S) 范围。半年振荡振幅大值中心还出现在

中高纬度, 北半球分别出现在  $66.5^{\circ}\text{N}$  高度 95 km 和  $80.5^{\circ}\text{N}$  高度 87.5 km, 振幅达 12 m/s; 南半球分别出现在  $45.5^{\circ}\text{S}$  高度 95 km 和  $80.5^{\circ}\text{S}$  高度 87.5 km, 振幅分别为 11 m/s 和 14 m/s。相位的分布结构显示热带和中纬度地区表现一致, 出现在 6 月, 说明这些地区半年振荡西风同时出现在一年中的两至点季节(6 月和 12 月), 与以前的结果是一致的(Hirota, 1978; Burrage et al., 1996)。振幅和相位随时间的变化显示振幅具有明显的年际变化, 甚至出现两年周期的变化, 但相位的年际变化较小。

TIDI 观测结果显示热带地区纬向风半年振荡峰值出现在 85 km 高度, 且中心出现在南半球  $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$  范围。Lieberman et al. (1993) 根据 HRDI 资料发现东风最大值出现在南半球, 认为半年振荡是不对称的, 而 Burrage et al. (1996) 利用相同资料分析显示半年振荡相对于赤道对称。虽然关于中间层顶的研究结果很少, 但平流层顶的研究结果显示纬向风半年振荡相对于赤道是非对称分布的(例如: Belmont and Dartt, 1973; Belmont et al., 1974; Hopkins, 1975), 纬向风半年振荡中心出现在南半球  $5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{S}$ 。Hopkins (1975) 认为平流层顶纬向风半年振荡的不对称性是由赤道地区不对称地形引起行星波活动的不对称性造成的。因此, 根据中间层顶半年振荡的形成原因(Dunkerton, 1982), 可以推断出中间层顶半年振荡振幅大值中心会出现与平流层顶半年振荡类似的分布。但关于热带中间层顶纬向风半年振荡振幅的不对称分布还需要进一步的研究。另外, TIDI 观测结果显示在中间层顶区域中高纬度地区也存在半年振荡振幅的大值中心, 以前研究的结果也在中间层(约 60 km)高纬度地区发现了显著地半年振荡(Groves, 1972; Belmont et al., 1974)。

致谢 感谢 HAO / NCAR 吴谦博士提供 TIDI Level 3 数据。感谢两位匿名审稿专家对本研究工作的意见和建议。

## 参考文献 (References)

- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics [M]. Orlando, Florida: Academic Press, 331~338.  
Belmont A D, Dartt D G. 1973. Semiannual variation in zonal wind from 20 to 65 kilometers at  $80^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$  [J]. *J. Geophys. Res.*, 78 (27): 6373~6376.  
Belmont A D, Dartt D G, Nastrom G D. 1974. Periodic variations in

- stratospheric zonal wind from 20 to 65 km, at 80°N to 70°S [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 100 (424): 203–211.
- Burridge M D, Vincent R A, Mayr H G, et al. 1996. Long-term variability in the equatorial middle atmosphere zonal wind [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D8): 12847–12854.
- Dunkerton T J. 1982. Theory of the mesopause semiannual oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39 (12): 2681–2690.
- Garcia R R, Dunkerton T J, Lieberman R S, et al. 1997. Climatology of the semiannual oscillation of the tropical middle atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D22): 26019–26032.
- Groves G V. 1972. Annual and semi-annual zonal wind components and corresponding temperature and density variations, 60–130 km [J]. *Planetary and Space Science*, 20 (12): 2099–2112.
- Hamilton K. 1982. Rocketsonde observations of the mesospheric semiannual oscillation at Kwajalein [J]. *Atmos.-Ocean*, 20 (4): 281–286.
- Hays P B, Abrue V J, Dobbs M E, et al. 1993. The high-resolution doppler imager on the Upper Atmosphere Research Satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 98 (D6): 10713–10723.
- Hirota I. 1978. Equatorial waves in the upper stratosphere and mesosphere in relation to the semiannual oscillation of the zonal wind [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35 (4): 714–722.
- Hopkins R H. 1975. Evidence of polar-tropical coupling in upper stratosphere zonal wind anomalies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 32 (4): 712–719.
- Huang F T, Reber C A. 2003. Seasonal behavior of the semidiurnal and diurnal tides, and mean flows at 95 km, based on measurements from the High Resolution Doppler Imager (HRDI) on the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D12): 4360, doi:10.1029/2002JD003189.
- Killeen T L, Skinner W R, Johnson R M, et al. 1999. TIMED Doppler Interferometer (TIDI) [J]. *Proceedings SPIE*, 3756: 289–301.
- Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, et al. 2006. TIMED doppler interferometer: Overview and recent results [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, A10S01, doi: 10.1029/2005JA011484.
- Li T, Liu A Z, Lu X, et al. 2012. Meteor-radar observed mesospheric semi-annual oscillation (SAO) and quasi-biennial oscillation (QBO) over Maui, Hawaii [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D05130, doi:10.1029/2011JD016123.
- Lieberman R S, Burridge M D, Gell D A, et al. 1993. Zonal mean winds in the equatorial mesosphere and lower thermosphere observed by the High Resolution Doppler Imager [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 20 (24): 2489–2852.
- 凌超, 陈泽宇, 陈洪滨. 2012. 东经 120°E 中间层和低热层纬向风结构及变化特征 [J]. *物理学报*, 61 (24): 558–564. Ling Chao, Chen Zeyu, Chen Hongbin. 2012. Global structure and variation of mesospheric and lower thermospheric zonal wind in 120°E meridian [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 61 (24): 558–564.
- Palo S E, Avery S K. 1993. Mean winds and the semiannual oscillation in the mesosphere and lower thermosphere at Christmas Island [J]. *J. Geophys. Res.*, 98 (D11): 20385–20400.
- Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. 1992. Numerical Recipes in FORTRAN, 2nd ed. [M]. New York: Cambridge University Press, 569–577.
- Reed R J. 1962. Some features of the annual temperature regime in the tropical stratosphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 90: 211–215.
- Reed R J. 1966. Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 71 (18): 4223–4233.
- Venkateswara Rao N, Tsuda T, Riggan D M, et al. 2012. Long-term variability of mean winds in the mesosphere and lower thermosphere at low latitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, A10312, doi: 10.1029/2012JA017850.
- Wu Q, Killeen T L, Ortlund D A, et al. 2006. TIMED Doppler Interferometer (TIDI) observations of migrating diurnal and semidiurnal tides [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68: 408–417.
- Wu Q, Ortlund D A, Killeen T L, et al. 2008a. Global distribution and interannual variations of mesospheric and lower thermospheric neutral wind diurnal tide: 1. Migrating tide [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, A05308, doi:10.1029/2007JA012542.
- Wu Q, Ortlund D A, Killeen T L, et al. 2008b. Global distribution and interannual variations of mesospheric and lower thermospheric neutral wind diurnal tide: 2. Nonmigrating tide [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, A05309, doi:10.1029/2007JA012543.
- Yee J H, Cameron G E, Kusnierzewicz D Y. 1999. An overview of TIMED [J]. *Proceedings SPIE*, 3756: 244–254.
- Yee J H. 2003. TIMED mission science overview [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 24 (2): 136–141.