

临近空间大气扰动风场的探测与分析

李娜, 陈金松, 丁宗华, 许正文, 林乐科

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 山东 青岛 266107)

摘要: **目的** 深入了解掌握临近空间大气风场的扰动状态, 给临近空间飞行器的精确入轨、有效运行提供可靠的环境信息。**方法** 用昆明站(25.6°N, 103.8°E)临近空间观测平台中的 MF 雷达开展临近空间大气风场扰动观测。基于谐波拟合方法得到昆明地区 2008 年 8 月至 2010 年 8 月期间的周日和半日潮汐分量及背景风场, 分析昆明地区临近空间 80~100 km 之间潮汐波动的变化特征。**结果** 周日潮汐振幅具有明显的年变化和半年变化, 最大值均出现在 10 月份和 3 月份的 86~92 km 高度范围内, 同时第一年度的潮汐幅度明显强于第二年度, 类似准两年变化。纬向半日潮汐的变化特征不是非常明显, 而经向半日潮汐在 88~94 km 之间具有年变化, 在其他高度处则出现多个峰值。**结论** 潮汐相位的变化结果表明潮汐的下行传播, 潮汐振幅的高度变化符合先增大后减小的特征, 呈现胞状结构。

关键词: 临近空间; 潮汐; MF 雷达

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.007

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)07-0035-06

Wind-oscillation Measurement and Study in Near Space

LI Na, CHEN Jin-song, DING Zong-hua, XU Zheng-wen, LIN Le-ke

(China Research Institute of Radio-wave Propagation, National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao, 266107, China)

ABSTRACT: Objective To understand variations of oscillation wind and provide exact environmental status for precision entering and running of aircraft in near space. **Methods** The experiments on wind field turbulence were performed at Kunming station (25.6°N, 103.8°E) with Medium frequency radar (MF radar) in the near space observation platform. Based on data on diurnal and semidiurnal tide component and background wind field from Kunming from August 2008 to August 2010 with harmonic fitting method, characteristics of tide fluctuation in 80~100 km of near space in Kunming were analyzed. **Results** The variations periods of diurnal tide behaved annually and semiannually, although the amplitude of tidal in the first year was larger than that in the second year, which may be thought as quasi-biennial oscillation. The maximum values always occurred in October and March at 86~92 km. But the zonal semidiurnal tidal component has no this feature, at least not obviously. The case became complicated in meridional semidiurnal tidal that annual variation only dominated at 88~94 km region; and several peak values occurred at other height. **Conclusion** Changes of tide phase show the downward transmission of tide. The height change of tide meets the feature of increasing with height and then decreasing. It shows a cystiform structure.

KEY WORDS: near space, tidal, MF radar

收稿日期: 2017-03-13; 修订日期: 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41604129)

作者简介: 李娜(1981—), 女, 河南新乡人, 工程师, 主要研究方向为临近空间大气环境探测。

临近空间是各种高空气球、高空飞行器、亚轨道飞行器和低轨航天器的驻留区，临近空间大气参数的扰动和变化过程对临近空间大飞行器的安全运行具有重要影响。在各种临近空间环境参数中，风场是非常重要的一个参数，它直接影响临近空间飞行器的精确入轨和可靠运行。同时风场中存在丰富的波动现象，比如重力波、潮汐波、行星波等，具有重要的科学意义。最新研究显示，由太阳和地磁的周期性变化以及地磁暴引起的高层大气的周期性扰动（包括风场周期性震荡）会对卫星轨道高度参数产生重要影响^[1-5]。

临近空间风场具有显著的地域性和多时间尺度（包括日变化、半年和年变化等）的变化特征。昆明站位于低纬地区，靠近青藏高原，其临近空间大气的变化特征非常独特。关于昆明地区临近空间的参数特性研究可见于文献[6-8]。

中频（Medium Frequency, 简称 MF）雷达可以实现白天 60~100 km 和晚上 80~100 km 高度大气风场及电子密度的持续测量。20 世纪 80 年代以来，探测技术和分析方法的发展，使 MF 雷达具有了设备简单、运行方便和无人值守的优点，因此 MF 雷达站点迅速增加^[9]。目前，在欧洲、北美、南极、澳大利亚、南非、印度、日本和印度尼西亚等国家和地区都建有 MF 雷达站，这些雷达为临近空间风场及电子密度研究提供了的重要观测数据。我国于 2000 年在武汉建立了第一台 MF 雷达^[10]，胡雄、张冬娅、张秀川和易帆等人利用该雷达对武汉中层低热层的大气角谱^[11]、平均风^[12]、潮汐变化及相互作用进行了研究^[13-14]。由于国内在这方面的起步较晚，制约着我国大气与空间环境观测和研究工作的开展。

文中利用昆明站 MF 雷达 2 年的风场观测数据，分析了昆明地区临近空间大气风场中波动扰动的年和半年尺度的变化特征。

1 MF 雷达工作原理及数据处理

1.1 工作原理

60~100 km 高度范围内存在几米到几百米尺度的电离层不均匀团块，其界面上存在折射指数梯度，导致入射电磁波发生部分反射。该高度范围内还存在其他回波反射和散射机制，如湍流散射和 Thompson 散射等。MF 雷达主要利用部分反射过程，由于其反射信号强度除与电子密度的梯度成正比外，还与电磁波频率的平方成反比，因此雷达工作频率越低，回波信号越强。当频率太低时，电磁波将在较低高度上发生全反射，不能够得到较高高度上的回波，故观测上通常选择 1.8~2.5 MHz 之间的频率^[10]，昆明站 MF 雷达选择的频率为 2.138 MHz。关于雷达的主要技术指标参数：位置为 25.6°N, 103.8°E，峰值功率 64 kW，工作频率为 2.138

MHz，采样间隔为 2 km，观测模式为 FCA, IDI, DAE, DPE，为开始运行时间 2007 年 12 月。

该雷达采用分布式天线系统（Space Antenna, 简称 SA），由 4 副相互独立馈电的交叉偶极子天线按等边三角形布局形成收发共用天线阵，其中三副天线与另外一副呈 120°辐射状排列，每副交叉偶极子天线的偶极子交叉成 90°，布局如图 1 所示。天线单元为传统的半波偶极子，也就是天线阵一共包含 8 个半波偶极子，可以方便地形成右圆极化和左圆极化模式。雷达的结构如图 2 所示，可以看出，雷达工作时主要有 4 部分组成：信号发射、信号接收、数据采集和数据分析显示。

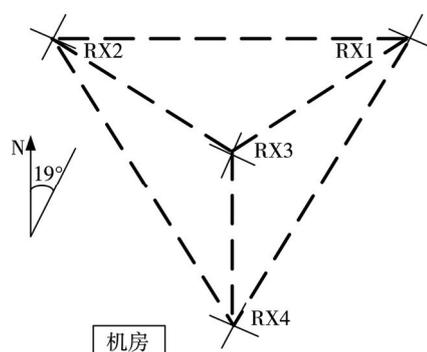


图 1 昆明 MF 雷达天线阵布局

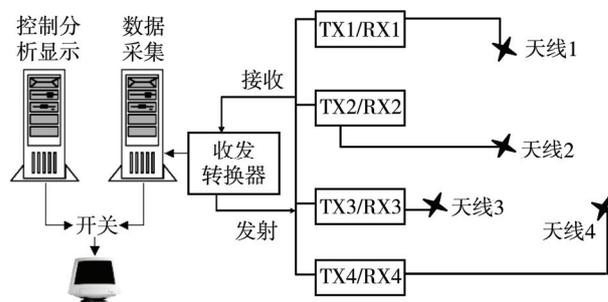


图 2 昆明 MF 雷达硬件结构

雷达系统通过两种不同的方式分别测量大气风场与电子密度。探测风场时，雷达发射一种偏振波寻常波（O 波）或非寻常波（X 波），通过分析天线接收到的回波数据反演风场。昆明 MF 雷达反演风场时可以采用全相关分析方法^[15-17]或多普勒干涉成像法（Imaging Doppler Interferometry, 简称 IDI），其理论基础是衍射样本的空间时间相关函数为一组椭球，在不同位置对衍射样本取样，计算所得样本信号的自相关和互相关函数，可以得到椭球参数，最后通过互相关函数的时间置换可以得到视线速度（Apparent Velocity）。由于衍射样本的运动及不对称性，需要对自相关函数进一步计算才能得到真实速度（True Velocity）^[16]。探测电子密度时，雷达交替发射 O 波和 X 波，由于 MF 雷达天线能够分辨下行波的 O 波与 X 波，通过测量两个特征波的振幅与相位可以得到电子密度等信息^[18]。反演电子密度时可

以采用微分吸收试验法或微分相位试验法 (Differential Phase Experiment, 简称 DPE)。昆明 MF 雷达目前选择 FCA 与 DAE 交替进行的模式来探测大气风速及电子密度。有关 FCA 观测模式的参数见表 1。

表 1 昆明 MF 雷达 FCA 观测主要参数

参数	白天	夜间
高度分辨率/km	2	2
起始高度/km	50	50
极化	O波模式	X波模式
PRF/Hz	80	40
相关叠加	32	16
采样点数	285	285
记录长度/s	114	114

1.2 数据预处理

选择 2008 年 8 月至 2010 年 8 月期间 80~100 km 高度范围内的风场观测数据作为研究对象,其中 2009 年 8 月缺失。在数据的分析过程中,首先通过线性插值得到每个高度上的小时平均值。其原则是如果每小时内的缺失数据个数少于 4,那么该小时内的数据是有效的;如果大于 4 个,将设该小时的平均值为 NAN,且不参加后续运算。然后将每个月的数据作为一个数据序列,如果该数据序列中 NAN 的个数小于一半,

则利用最小二乘法对插值后的数据进行谐波拟合,得到背景风场、周日潮汐分量和半日潮汐分量。如果数据序列中 NAN 的个数大于等于一半,则视为潮汐分量分别为 NAN。采用的谐波拟合公式为:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \sin\left(\frac{2\pi i}{24}t + \varphi_i\right) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为观测到经向风或纬向风; y_0 为背景风场; A_1 与 φ_1 为周日潮汐的振幅和相位; A_2 与 φ_2 为半日潮汐的振幅和相位。

2 雷达初步探测结果

2.1 纬向潮汐分量

图 3 给出了昆明地区 2008 年 8 月至 2010 年 8 月期间纬向周日潮汐和半日潮汐的振幅和相位随时间高度的等高变化。其中横坐标表示每年的 2 月 (February)、5 月 (May)、8 月 (August)、11 月 (November), LT 表示地方时,即潮汐振幅最大时对应的当地时。

由图 3 可知,周日潮汐分量振幅在 5~35 m/s 之间变化,半日潮汐分量振幅在 1~14 m/s 之间变化。相比来说,周日潮汐的年变化和半年变化较为显著,每年的 10 月份和 3 月份潮汐振幅达到最大值,且 2008—2009 年的潮汐振幅明显大于 2009—2010 年,而半日潮汐振幅则无明显的年或半年变化特征。半日

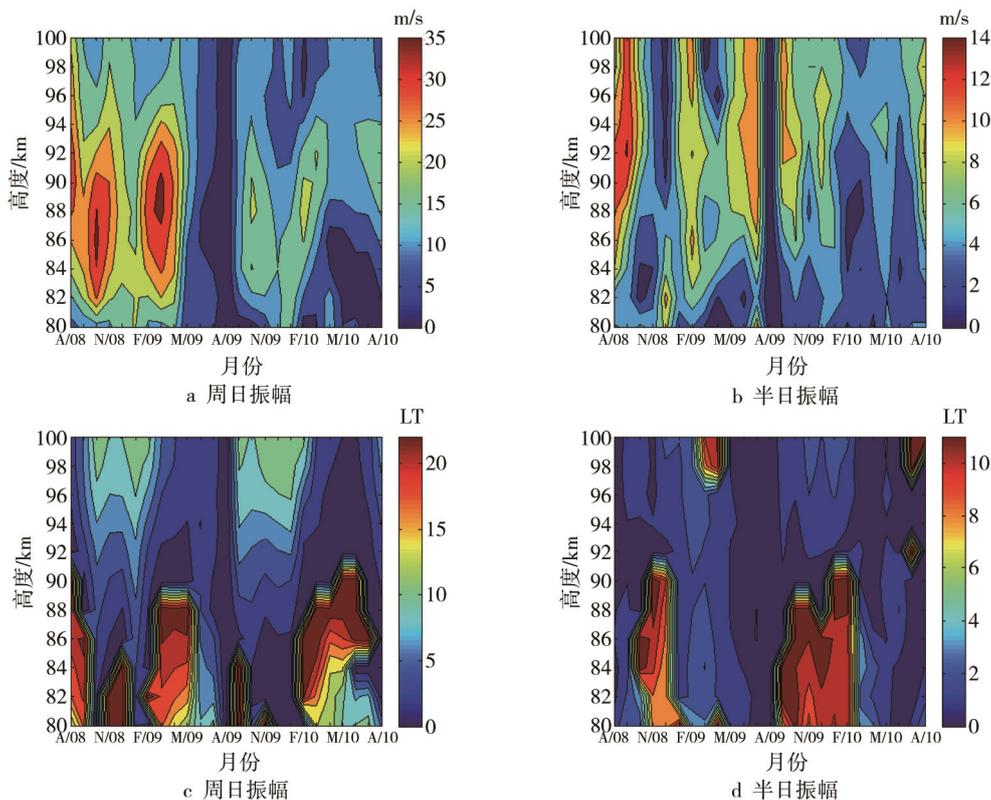


图 3 2008—2010 期间昆明纬向周日、半日潮汐振幅和相位等高线

振幅也具有2008—2009幅度大于2009—2010年幅度的特征，这可能与低纬地区的准两年变化有关^[19]。在潮汐的垂直结构方面，周日振幅的最大值出现在86~90 km之间，而半日振幅则是在90 km以上。周日潮汐振幅最大值出现的高度可能与风剪切有关，因为对昆明地区纬向平均风变化特征的分析研究中发现，90 km处纬向风由东向风急变为西向风，通常认为风剪切现象是重力波造成的^[20]。分析结果与日本的Yamagawa (31.2°N, 130.6°E)站的结果^[21]具有明显的不同。两个潮汐振幅的共同特点是振幅的高度变化均呈胞状结构，即先随高度的增加而增加，之后减小。从数值上看，周日潮汐大于半日潮汐。昆明站地处我国低纬地区，海拔2000 m，是周日潮汐较为活跃的区域，这可能是造成周日潮汐成为该地区最主要波动形态的原因。

通常潮汐振幅随高度的增加而增加是因为大气密度随高度降低，所以在中层顶区域潮汐振幅会变得很大导致其他非线性相互作用的发生。比如波破碎、潮汐与重力波之间的非线性作用、潮汐与行星波之间的非线性作用等^[22—28]，之后振幅则随高度增加而减小。这是风剪切的形成理论。

潮汐相位即潮汐振幅达到最大值时的时刻。由图

3所示，相位的变化特征进一步验证了潮汐的年变化和半年变化特征。

2.2 经向潮汐分量

昆明地区2008年8月至2010年8月期间经向周日潮汐和半日潮汐的振幅和相位随时间高度的等高变化如图4所示。首先经向周日潮汐振幅和半日潮汐振幅的变化范围分别是1~40 m/s和1~20 m/s，稍大于纬向分量振幅幅度。经向周日潮汐与纬向表现出一致的变化特点，即同时具有年变化和半年变化，最大值出现在10月份和3月份的86~90 km之间。半日潮汐与纬向不同，经向半日潮汐具有非常明显的年变化，即最大值出现在每年12—4月份的88~94 km之间。由图4可知，2008—2009年经向潮汐分量幅度大于2009—2010年经向潮汐分量幅度，这与潮汐波动的准两年变化有关，更多的特征验证需要更多的数据支持。从高度区域上来看，经向半日潮汐在94 km以上活动更频繁，比如经向半日潮汐振幅分别在9, 11, 2, 5月出现峰值，同时在84 km以下也出现类似特征。这可能与中层顶区域波动相互之间的非线性作用有关。经向潮汐振幅的高度分布同样经历了随高度先增大后减小的变化特征。

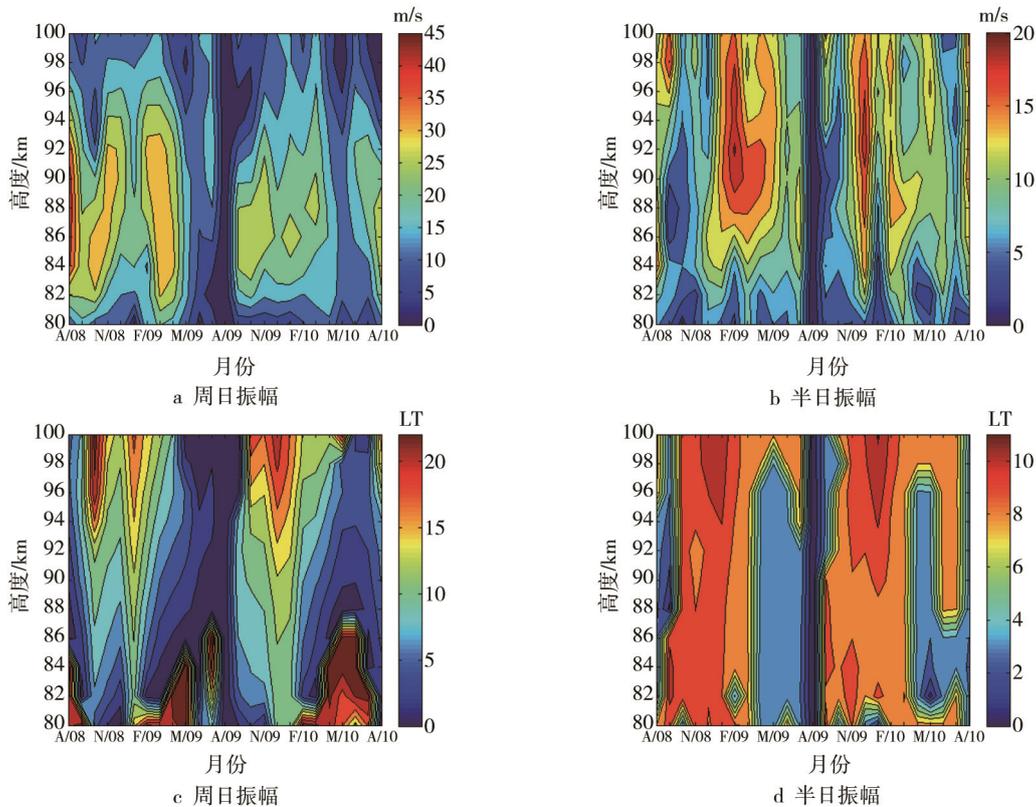


图4 2008—2010年期间昆明经向周日、半日潮汐振幅和相位等高线

3 结论

大气潮汐是全球大气中常见的一种波动现象，周

期为一天或其整数分之一，一般可向上传播至热层底部（电离层E区）甚至更高，在中间层-低热层大气水平和垂直风场中都具有很强的幅度，是影响中性大

气-电离层耦合过程的重要因素,也是影响临近空间飞行器和航天器精确飞行的重要因素。潮汐波的变化在时间和空间上均具有多尺度的特征。从时间尺度来看,潮汐既具有长周期的变化,诸如季节变化、年变化、半年变化、准两年变化甚至更长周期的规则与异常变化,又存在短周期变化,诸如日变化。从空间尺度来看,潮汐既具有局域地区变化,又具有随纬度或经度的全球尺度变化。文中研究工作主要是基于昆明站 MF 雷达 2008—2010 年期间风场观测数据分析昆明地区临近空间大气风场中潮汐波动的变化特征。

1) 纬向(东西向)周日潮汐和经向(南北向)周日潮汐均具有年变化和半年变化,最大值均出现在10月份和3月份的86~92 km高度范围内。2008—2009年潮汐幅度大于2009—2010年潮汐幅度,这与潮汐的准两年变化有关。以往的研究证明,准两年波动在低纬地区起主导作用^[20—22]。潮汐的垂直结构都经历了先随高度增加而增加,达到最大值后随高度减小。

2) 纬向半日潮汐没有表现出明显的特征,但经向半日潮汐的一个重要特征是88~94 km之间为年变化,即12月—4月期间的潮汐幅度要大于其他月份。94 km以上高度半日潮汐振幅出现多个峰值,比如在9, 11, 2, 5月份经向半日潮汐振幅明显大于其他月份,而在84 km以下也出现类似特征。

文中仅给出了昆明地区两年的风场潮汐变化,严格上得出昆明地区潮汐具有年变化特征和半年变化特征有待于更多数据的支持。潮汐的准两年变化是最近研究的热点,文中指出昆明地区大气潮汐具有类准两年变化,下一步是对更多的数据进行处理分析。

文中主要目的是描绘昆明地区临近空间环境扰动风场的变化特征,为融合多手段的探测数据、结合动力学理论等建立临近空间环境扰动风场模型,进一步为临近空间武器装备的高效运行等提供理论保障。

参考文献:

- [1] XU J, SMITH A K, LIU H, et al. Seasonal and Quasi-biennial Variations in the Migrating Diurnal Tide Observed by Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED)[J]. *J Geophys Res*, 2010, 114 (D13): 267—275.
- [2] LIU X, XU J, ZHANG S, et al. Thermospheric Planetary Wave-type Oscillations Observed by FPIs over Xinglong and Millstone Hill[J]. *J Geophys Res Space Physics*, 2015, 119(8):6891—6901.
- [3] YI Fan. Short-term Variability and Temporary Structures of Tides and Mean Wind in the Polar Summer Mesosphere[J]. *J Atmos Solar Terr Phys*, 2001,63: 749—757.
- [4] ZHAO L, CHEN J, DING Z, et al. First Observations of Tidal Oscillations by an MF Radar over Kunming (25.6° N,103.8° E)[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, s78—79: 44—52.
- [5] XU J, WANG W, LEI J, et al. The Effect of Periodic Variations of Thermospheric Density on CHAMP and GRACE Orbits[J]. *J Geophys Res*, 2011, 116(A2): 1—11.
- [6] 李娜, 陈金松, 赵蕾. 基于 MF 雷达观测的 D 区日食效应的研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 942—949.
- [7] LI Na, CHEN Jin-song, DING Zong-hua, et al. The Mean Winds Observed by an MF Radar over Kunming (25.6° N, 103.8° E)[J]. *Journal of Atmosphere Solar-terrestrial Physics*, 2015(122): 58—65.
- [8] YI Wen, CHEN Jin-song, Ma Chun-bo, et al. Observation of Upper Atmospheric Temperature by Kunming All-sky Meteor Radar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 750—760.
- [9] HOLDSWORTH D A, REID I M. A Simple Model of Atmospheric Radar Backscatter Description and Application to the Full Correlation Analysis of Spaced Antenna Data[J]. *Radio Sci*, 1995, 30(4): 1263—1280
- [10] 李凤琴, 胡雄, 张训械, 等. 武汉中层大气中频雷达及其初步探测结果[J]. *空间科学学报*, 2002, 22(1): 65—71.
- [11] 胡雄, 曾楨, 张冬娅, 等. 武汉中层、低热层大气角谱中频雷达观测[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(4): 256—261.
- [12] 张冬娅, 胡雄, 张训械, 等. 北纬 30° N 中间层和低热层大气平均风中频雷达观测[J]. *空间科学学报*, 2005, 25(4): 267—272.
- [13] 张绍东, 易帆, 胡雄. 武汉上空(30° N,114° E)潮汐及其相互作用的 MF 雷达观测[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(6): 430—435.
- [14] 张秀川, 易帆. 武汉上空中层顶区域潮汐的 MF 雷达观测[J]. *空间科学学报*, 2007, 27(1): 29—34.
- [15] BRIGGS B H. The Analysis of Spaced Sensor Records by Correlation Techniques[J]. *MAP Handbook*, 1984, 13: 166—186.
- [16] ANDREW D M. VHF Boundary Layer Radar and Rass [D]. Adelaide: The University of Adelaide, 2001.
- [17] BRIGGS B H, PHILLIPS G J, SHINN D H. The Analysis of Observations on Spaced Receivers of the Fading of Radio Signals[J]. *Proc Phys Soc*, 1950, 63B: 106—121.
- [18] GARDNER F F, PAWSEY J L. Study of the Ionospheric D-region Using Partial Reflection[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1953, 53(3): 321—344.
- [19] VERYARD R G, EBDON R A. Fluctuations in Tropical Stratospheric Winds[J]. *Meteorol*, 1961, 125: 90.
- [20] SHARMA A K, ROKADE M V, KONDALA R, et al. Comparative Study of MLT Mean Winds Using MF Radars Located at 16.8N and 8.7N[J]. *J Earth Syst Sci*, 2010, 119(4): 461—470.
- [21] NAMBOOTHIRI S P, KISHORE P, IGARASHI K, et al. MF Radar Observations of Mean Winds over Yamagata

- (31.2° N, 130.6° E) and Wakkanai(45.4° N, 141.7° E)
[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2000,62: 1177—1187.
- [22] FRITTS D C, ISLER J R. Mean Motions and Tidal and Two-day Wave Structure and Variability in the Mesosphere and Lower Thermosphere over Hawaii[J]. *J Atmos Sci*, 1994, 51: 2145—2164.
- [23] LIEBERMAN R S, HAYS P B. An Estimate of the Momentum Deposition in the Lower Thermosphere by the Observed Diurnal Tide[J]. *J Atmos Sci*, 1994, 51: 3094—3105.
- [24] NAKAMURA T, FRITTS D C, ISLER J R, et al. Short-period Fluctuations of the Diurnal tide Observed with Low-latitude MF and Meteor Radars during CADRE: Evidence for Gravity Wave/Tidal Interactions[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(26): 26225—26238.
- [25] TEITELBAUM H, VIAL F. Momentum Transfer to the Thermosphere by Atmospheric Tides[J]. *J Geophys Res*, 1981, 86: 9693—9697.
- [26] WU Q, ORTLAND D A, KILLEEN T L, et al. Global Distribution and Inter-annual Variations of Mesospheric and Lower Thermospheric Neutral Wind Diurnal Tide: 1. Migrating Tide[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(6): 211—215.
- [27] WU Q, ORTLAND D A, KILLEEN T L, et al. Global Distribution and Inter-annual Variations of Mesospheric and Lower Thermospheric Neutral Wind Diurnal Tide: 2. Nonmigrating Tide[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(5): 237—245.
- [28] Xu J, Smith A K, Liu H L, et al. Season and Quasi-biennial Variations in the Migrating Diurnal Tide Observed by Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED)[J]. *J Geophys Res*, 2009, 114 (D13): 267—275.