

# 平流层风场的火箭观测及其与模式风场的比较

刘梦珠, 马 民, 刘 晓

(河南师范大学 数学与信息科学学院, 河南 新乡 453007)

**摘 要:**美国西北研究机构(NWRA: NorthWest Research Associates)发布了1963—1992年期间在Kwajalein岛礁(8°N, 167°E)上共计1862次火箭探测的平流层风场和温度剖面. 本文选取测量较为连续的1969—1972年期间共计345个风场剖面来研究平流层月平均风场及其两年变化、年变化和半年变化的特征. 同时与目前应用较为广泛的风场模式HWM07(Horizontal Wind Model; 2007)和CIRA86(COSPAR International Reference Atmosphere; 1986)进行了比较. 火箭测量的4年逐月平均纬向风在夏季为西向风,并在8月41 km处达到最大值45 ms<sup>-1</sup>;在冬季变为东向风,并在3月57 km处达到最大值47 ms<sup>-1</sup>. 全年的经向风在60 km以下基本上是北向风且风速低于10 ms<sup>-1</sup>. 纬向风在20~35 km之间以两年变化为主,振幅在10~17 ms<sup>-1</sup>之间;在45~55 km之间以半年变化为主,振幅是16~25 ms<sup>-1</sup>之间;在5 km以上以年变化为主,振幅在16~25 ms<sup>-1</sup>之间. 测量风场与HWM07相比, HWM07的西向风在7月46 km处达到最大值38 ms<sup>-1</sup>,东向风在2月60 km处达到最大值37 ms<sup>-1</sup>,均小于测量风场的峰值. 测量风场与CIRA86相比, CIRA86的西向风在7月49 km处达到最大值36 ms<sup>-1</sup>,东向风在3月60 km处达到最大值43 ms<sup>-1</sup>,仍小于测量风场的峰值. 测量风速稍大于模式风速的可能原因之一是测量风场包含了背景风场和各种波动成分,而模式风场是气候学平均的结果;此外, HWM07和CIRA86虽然包含了不少探空火箭数据,但并没有包含在Kwajalein岛礁的测量资料.

**关键词:**平流层;月平均风;两年变化;年变化;半年变化

**中图分类号:**O241.6

**文献标志码:**A

对中层大气风场的观测研究是人们了解和认识中层大气风场及其变化特征的重要手段之一. 在30 km高度以下的对流层和低平流层,主要采用探空气球的就地探测来测量风场;在70 km高度以上,由于一些散射体的存在使得无线电雷达(中频雷达和流星雷达)和激光雷达能够测量70~100 km高度范围内的风场<sup>[1-3]</sup>. 而在30~70 km高度范围内,理论上可用MST(Mesosphere Stratosphere and Troposphere)雷达测量三维风场和温度场,然而MST雷达在全球的分布有限<sup>[4]</sup>. 另外,雷达的地理位置和基本设备也会影响长期平均的垂直风<sup>[5]</sup>. 美国高层大气研究卫星UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)搭载的HRDI(High Resolution Doppler Imager)探测器能够对平流层,中间层和低热层水平风场遥感测量,但其只在白天对平流层和中间层进行探测<sup>[6]</sup>. 因此30~60 km高度范围的大气风场仍然依靠火箭的就地探测<sup>[7-10]</sup>.

对中层大气风场的观测能够为建立更为准确的经验风场模式提供必要的数据. 目前国际上广泛应用的经验风场模式包括HWM07(Horizontal Wind Model; 2007)和CIRA86(COSPAR International Reference Atmosphere; 1986). HWM07利用近几十年来的地基、卫星和火箭测量结果以及模拟数据,结合球谐函数拟合的方式给出了0~500 km高度范围内的风场及其随着地方时、日期、地理位置和高度的变化特征<sup>[11-15]</sup>. CIRA86是由国际空间研究委员会(COSPAR)组织,利用大量的地基、卫星和火箭测量的风场和温度,通过纬向平均的纬向动量方程和线性插值的方法给出80°S~80°N,0~120 km高度范围内的风场和温度<sup>[16]</sup>.

收稿日期:2015-12-30;修回日期:2016-07-26.

基金项目:国家自然科学基金(41374158;41574143);河南省教育厅项目(2014GGJS-047;17HASTIT010);河南师范大学优秀青年基金(14YQ006).

第1作者简介:刘梦珠(1992-),女,河南开封人,河南师范大学硕士研究生,研究方向为计算数学、中高层大气动力学, E-mail:lmz0378@163.com.

通信作者:刘 晓, E-mail:liuxiao@htu.cn.

由于经验风场模式是对测量数据通过拟合或者插值得到全球风场分布,因此经验风场模式能否准确描述某一地区某高度范围内风场的气候学特征,在很大程度上取决于该地区观测资料的丰富程度.为此,有必要充分挖掘历史上的观测资料,并与模式结果进行比较,从而提高经验风场模式的可靠性.

在国际合作计划“平流层过程及其在气候学中的作用(SPARC: Stratospheric Processes and their Role in Climate)”的支持下,美国西北研究机构(NWRA: NorthWest Research Associates)在 SPARC 官网发布了主要包含 1969—1991 年期间火箭探空网的历史观测数据. Dunkerton 等曾经使用这个数据集,研究 20 世纪 60—80 年代中层大气温度的变化趋势,应用结果表明其中的数据具有较好的一致性<sup>[17]</sup>. 中国科学院大气物理研究所的陈泽宇研究员等人通过分析其他站点的火箭探测数据的结果表明中层大气静力稳定性减弱趋势<sup>[10]</sup>. 本文利用 1963—1992 年期间在 Kwajalein 岛礁(8°N, 167°E)上共计 1862 次火箭探测的数据研究平流层风场. 该站点位于赤道附近,测量的风场能够代表赤道平流层风场的主要特征,比如:两年变化、年变化和半年变化等.

Reed 等人<sup>[18]</sup>和 Ebdon 等人<sup>[19]</sup>发现的准两年变化是纬向风在近赤道区域的平流层基本大气风场环流的重要组成部分. 准两年变化发生的高度范围是 16~50 km,纬度范围是 12°S~12°N<sup>[20]</sup>. 在过去 50 年的研究中,平流层纬向风的观测资料表明准两年震荡的最大振幅是 20 ms<sup>-1</sup><sup>[21-22]</sup>. 此外,北半球近赤道平流层风场的年变化是冬季以东向风为主,夏季以西向风为主,并且东向风和西向风发生转向的时间一般是在春季和秋季,从而表现出年变化特征<sup>[23]</sup>. 半年变化是近赤道区域平流层风场变化的另一个重要特征,Reed<sup>[24]</sup>通过分析 Ascension 岛上的火箭探测资料,发现了平流层平均纬向风中半年变化. 随后,许多学者也观测到热带区平流层域盛行的纬向风有强烈的半年变化,平流层东向风半年变化的峰值一般出现在春分和秋分之后,西向风的峰值出现在冬至和夏至之后<sup>[25]</sup>.

本文将利用在 Kwajalein 岛礁(8°N, 167°E)上在 1969—1972 年期间观测得到的较为连续的平流层风场数据研究该地区风场的特征,并分别与 HWM07 和 CIRA86 模式的风场进行比较. 这是因为,从现有文献中我们知道 HWM07 没有用到这些火箭测量数据,CIRA86 也没有用到这些测量数据<sup>[26]</sup>. 通过本文的研究一方面可以了解该地区实测风场的长期变化特征,另一方面可以对模式风场在该地区的有效性进行定量评估.

## 1 观测数据与分析方法

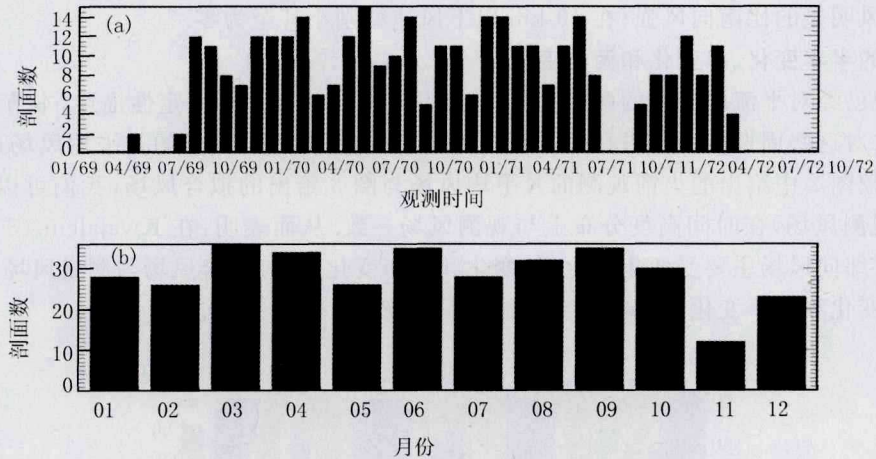
### 1.1 数据介绍

美国西北研究机构(NWRA: NorthWest Research Associates)在 SPARC 官网发布了 1963—1992 年期间在 Kwajalein 岛礁(8°N, 167°E)上共计 1862 次火箭探测的平流层风场和温度剖面. Kevin<sup>[25]</sup>利用这些数据研究了平流层和中间层风场半年变化的振幅和相位,结果表明,北向风半年变化的振幅从 40 km 开始随着高度增加而增加,并在 48 km 处达到最大值 24 ms<sup>-1</sup>,东向风半年变化最大值出现在 4 月中旬和 10 月中旬,并随着高度增加而减少,在 60 km 处达到最小值.

本文将利用这些数据分析平流层月平均风场的气候学特征并与模式风场进行比较. 同时也将分析该地区平均风场的半年变化、年变化和两年变化特征. 首先,需要对这些数据进行筛选. 具体来说,这些数据中缺少 1967 和 1968 年的数据;在 1963—1965 年和 1973—1992 年这些数据中,每月进行观测的次数较少甚至没有观测,不利于进一步分析,所以本文舍弃了这些数据. 因此,本文选用 1969—1972 年 4 年期间 20~60 km 共计 345 个平流层风场剖面. 风场剖面的个数随着月份以及 4 年逐月剖面个数分布的情况如图 1 所示,其中 4 年逐月剖面个数是把这 4 年中月份相同的测量剖面都算在一个月份中. 从图 1(a)中可以看到虽然某些月份数据较少,甚至没有观测,但整体上还算完整,特别是 1970 和 1971 年数据较多. 从图 1(b)给出的 4 年逐月剖面个数可以看到每月的观测次数相差不大,分布较为均匀,除了 11 月有 12 个观测剖面之外,其余月份的观测剖面都在 20 个以上. 通过对火箭发射的地方时进行统计之后,发现这些观测基本上在凌晨 1 点左右,在相对固定的地方时进行测量,能够有效减少由于潮汐风在一天内的变化而对月平均风场的影响.

为了更准确地与模式风场进行比较,选取了与观测数据的地方时一样的 HWM07 的数据. 此外, CIRA86 只有月平均风场,不需要特别处理地方时的问题. 本次比较时用到的是 CIRA 风场在 10°N 的数据,

该纬度最接近于本文所用数据的观测点 8°N 的数据.



图(a)横坐标表示月份/年,如:01/69表示1969年01月;图(b)纵坐标均表示剖面个数,也就是观测次数.  
图1 (a) 1969-1972年共计48个月的风场剖面个数的逐月分布, (b) 4年逐月剖面个数随月份的分布

### 1.2 分析方法

为了研究平流层风场半年变化、年变化和两年变化,本文用最小二乘拟合的方法提取这些周期性变化<sup>[27]</sup>. 在每个高度上的拟合公式为

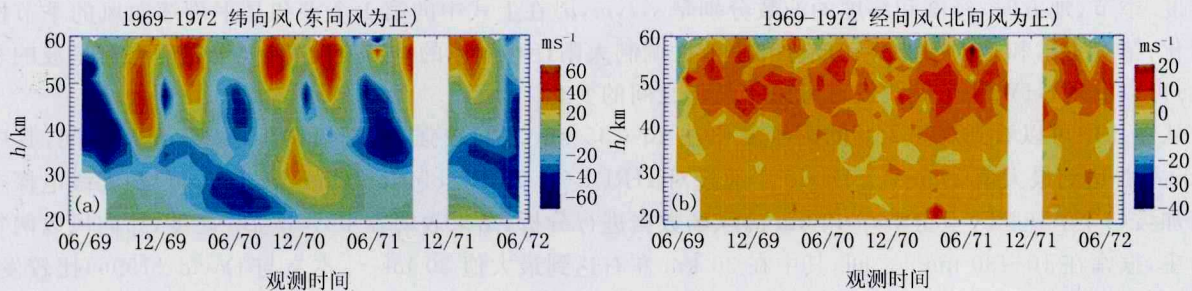
$$y_i = a_{B_0} \cos\left(\frac{2\pi t_i}{24m} - \varphi_{B_0}\right) + a_{A_0} \cos\left(\frac{2\pi t_i}{12m} - \varphi_{A_0}\right) + a_{S_{A_0}} \cos\left(\frac{2\pi t_i}{6m} - \varphi_{S_{A_0}}\right),$$

其中,  $a_{B_0}(\varphi_{B_0})$ ,  $a_{A_0}(\varphi_{A_0})$ ,  $a_{S_{A_0}}(\varphi_{S_{A_0}})$  分别表示两年变化, 年变化和半年变化的振幅(相位),  $m$  表示月数,  $y_i$  和  $t_i$  分别表示月平均风场及其对应的月份, 下标取值从 1 到 48, 表示 1969-1972 共 4 年的 48 个月.

## 2 结果与分析

### 2.1 月平均观测风场

图 2 给出了 1969 到 1972 年这 4 年期间火箭观测的(a)纬向和(b)经向月平均风场. 从图 2(a)中可以看到夏季的西向风最大值在  $30\sim 50 \text{ ms}^{-1}$  之间, 出现的月份是 6 月到 8 月, 出现的高度在  $35\sim 45 \text{ km}$  之间. 冬季的东向风的最大值在  $30\sim 50 \text{ ms}^{-1}$  之间变化, 每年最大值出现的高度和时间也不同, 高度在  $40\sim 60 \text{ km}$  之间变化, 分别出现在 2 月到 4 月或者 10 月到 11 月中旬. 从这 4 年的观测结果中发现, 由东向风转为西向风发生在 5 月, 转向的高度在  $40\sim 50 \text{ km}$  之间; 由西向风转成东向风发生在 9 月到 10 月, 转向的高度也在  $40\sim 50 \text{ km}$  之间.



图中的空白部分表示无测量数据. 其中横坐标表示月份/年, 如: 06/69表示1969年6月, 纵坐标表示高度.

图2 (a) 1969到1972年间火箭观测的纬向风月平均风场; (b) 1969到1972年间火箭观测的经向风月平均风场

从图 2(a)中还可以看到纬向风场的周期性变化与高度有关. 具体而言, 在  $20\sim 35 \text{ km}$  之间, 测量风场以

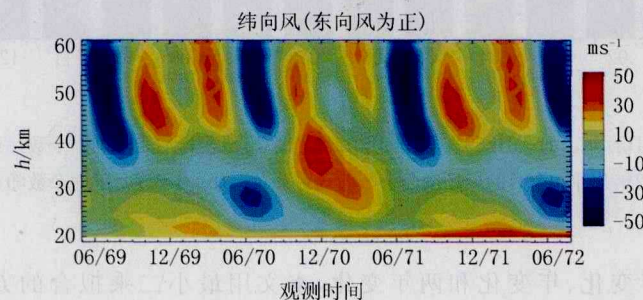


两年变化为主,在 45~55 km 之间测量风场以半年变化为主,在 55~60 km 之间测量风场变化以年变化为主。

图 2(b)是 1969—1972 年月平均的经向风风场的变化,可以看到在 40~60 km 之间,北向风在每年都占主导地位,北向风明显的比南向风强;在 40 km 以下风速特别小甚至为零。

## 2.2 测量风场的半年变化、年变化和两年变化

在 2.1 节中已经对平流层风场的两年变化、年变化和半年变化进行了定性描述,本节利用 1.2 节中给出的谐波拟合方法对这些周期性变化进行定量分析。图 3 给出了对火箭测量的月平均风场进行最小二乘拟合得到的结果。比较图 2 中给出的火箭观测的月平均风场与图 3 给出的拟合风场,我们可以看到,拟合风场在数值上稍小于观测风场,在时间高度分布上与观测风场一致。从而表明:在 Kwajalein (8°N, 167°E) 观测的月平均的平流层纬向风场主要受两年变化、年变化和半年变化控制。拟合风场与测量风场的一致也为后面研究两年变化、年变化和半年变化随高度的变化提供了保障。



横坐标和纵坐标表示的意义与图2表示的意义相同。

图3 用半年变化、年变化和两年变化对火箭探测的月平均纬向风拟合的结果

图 4 给出了火箭探测的月平均风场和 HWM07 模式风场的半年变化振幅、年变化振幅和两年变化振幅随高度的变化。从图 4 可以发现火箭探测的月平均风场和 HWM07 模式风场的年变化和半年变化展现出来很好的一致性,特别是半年变化,两者半年变化振幅变化趋势几乎一样,观测风场的振幅稍微比 HWM07 模式的振幅大。观测风场和 HWM07 模式风场的年变化振幅变化趋势也很相似,还可以发现,火箭探测的振幅稍微比 HWM07 模式的振幅大。然而,HWM07 模式风场的两年变化振幅远小于观测风场的两年变化振幅。这是因为 HWM07 模式仅考虑了风场随着一年内天数的变化,而没有考虑年与年之间风场的差别<sup>[14]</sup>。

HWM07 模式用到的公式:

$$u(\tau, \lambda, \delta, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^S C_r^{n,s} \phi_1^{n,s} - C_i^{n,s} \phi_2^{n,s} + B_r^{n,s} \phi_3^{n,s} + B_i^{n,s} \phi_4^{n,s} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=l}^N \sum_{s=0}^S C_r^{l,n,s} \phi_1^{l,n,s} - C_i^{l,n,s} \phi_2^{l,n,s} + B_r^{l,n,s} \phi_3 + B_i^{l,n,s} \phi_4^{l,n,s} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=m}^N \sum_{s=0}^S C_r^{m,n,s} \phi_1^{m,n,s} - C_i^{m,n,s} \phi_2^{m,n,s} + B_r^{m,n,s} \phi_3 + B_i^{m,n,s} \phi_4^{m,n,s},$$

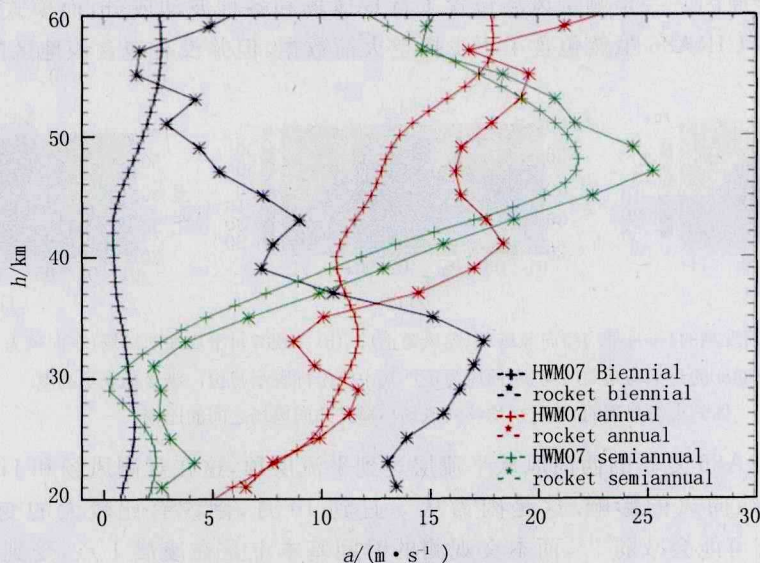
其中,  $u(\tau, \lambda, \delta, \theta)$  代表纬向风在某一水平的函数,  $\tau$  代表一年中的每一天,  $\lambda$  代表经度,  $\delta$  代表地方时,  $\theta$  代表纬度维度。季节、地方时、经度和纬度的波数分别是  $s, l, m, n$ 。在上式中的第 1 个求和是平均纬向风的季节性调制变化;第 2 个求和是太阳波移动成分和季节性调制太阳迁移潮汐的季节变化;第 3 个是静态行星波的季节变化。可以发现,HWM07 模式没有考虑年与年之间的变化。

从图 4 中可以看到观测风场的两年变化在 20~35 km 之间较强,其振幅在 10~17 ms<sup>-1</sup> 之间,其中在 32 km 左右达到最大值 17 ms<sup>-1</sup>。David<sup>[28]</sup>通过对 HRDI (High Resolution Doppler Imager) 和无线电探空仪在新加坡 (1°N, 104°E) 上空 15~40 km 的风场数据进行分析,结果表明在 15~35 km 高度,纬向风以两年变化为主,振幅在 10~30 ms<sup>-1</sup> 之间,其中在 30 km 左右达到最大值 30 ms<sup>-1</sup>。本文与 David (1996) 比较发现,半年变化发生的高度几乎一样,振幅最大值发生的高度也几乎一样,只是 David<sup>[28]</sup> 振幅的最大值比本文的结果略大。

观测风场的年变化在 55~60 km 之间较强,振幅在 16~25 ms<sup>-1</sup> 之间,其中在 60 km 左右达到最大值 25 ms<sup>-1</sup>,最大值出现在 1 月中旬和 7 月中旬。年变化以夏季为西向风,冬季为东向风为主,夏季的西向风从



4月持续到10月;东向风从10月持续到次年4月.由西向风转变成东向风发生在10月;由东向风转变成西向风发生在4月.



其中黑色表示两年变化;红的表示年变化;绿色表示半年变化.‘+’表示HWM07的结果;‘\*’表示火箭的观测结果.横坐标表示振幅,纵坐标表示高度.

图4 火箭探测的月平均风场和HWM07模式风场的半年变化振幅、年变化振幅和两年变化振幅随高度的变化

近赤道平流层区域纬向风的另一主要动态特征是半年变化.半年变化在45~55 km之间较强,振幅在16~25  $\text{ms}^{-1}$ 之间,在47 km左右达到最大值25  $\text{ms}^{-1}$ ,在最大振幅出现的地方,强大的东向风伴随着半年变化出现在4月中旬和10月中旬.这与之前在这个地方的研究的半年变化一致<sup>[29]</sup>.比如,Kevin<sup>[25]</sup>的研究结果表明,在48 km振幅达到最大值24  $\text{ms}^{-1}$ .总的来看,半年变化振幅随高度增加而增加,在47 km达到最大值25  $\text{ms}^{-1}$ ,之后随高度增加而减小,在60 km处达到13  $\text{ms}^{-1}$ .这一随高度变化的结果与Kevin<sup>[25]</sup>的结果变化趋势一样,Kevin<sup>[25]</sup>的研究结果表明,半年变化振幅随高度增加而增加,在48 km达到最大值24  $\text{ms}^{-1}$ ,之后随高度增加而减小,在60 km处达到4  $\text{ms}^{-1}$ .

### 2.3 4年月平均风场与模式风场的比较

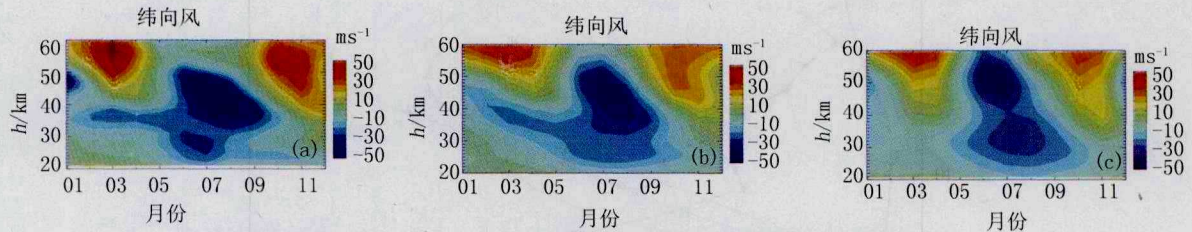
HWM07和CIRA86均能给出一年内风场随高度的变化规律.为了与模式风场进行比较,按月份对4年的观测风场进行平均.图5(a)给出火箭观测的1969—1972年4年逐月月平均的纬向风场.从图5(a)中可以看到西向风在5月到9月占主导地位,在8月的41 km处达到最大值45  $\text{ms}^{-1}$ ;而东向风从9月到次年5月占主导地位,在3月57 km处达到最大值47  $\text{ms}^{-1}$ .和西向风相比,东向风随高度的变化性比较大,强大的东向风发生在50~60 km的区域,时间是10月到11月中旬和第2月到4月.这种复杂的结果或许是因为在火箭探测的4年月平均风场中难以去掉平流层增温或者行星波的影响<sup>[30]</sup>.

图5(b)和图5(c)分别给出HWM07和CIRA86的月平均纬向风场.从图5中可以看出三者的变化基本一致,但稍有不同.具体而言,从冬季的东向风转向为夏季的西向风的时间稍有不同:观测风场的转向时间是4月;HWM07和CIRA86的风场转向时间分别是5月和4月.三者从夏季的西向风转向为冬季的东向风的时间都是在9月.平均纬向风反转的高度,也就是高空或者低空中夏天的西向风突然变成东向风的高度,对于比较这一区域的平均风是一个很好的标志.在火箭探测的结果中,反转发生的高度大约是52 km,在HWM07的结果中,反转发生的高度大约是56 km,在CIRA86的结果中,反转发生的高度大约是60 km,这一结果有很好的吻合性.

在火箭探测结果与HWM07和CIRA86模式的比较中还可以发现,观测的西向风在8月份的41 km处达到最大值45  $\text{ms}^{-1}$ ;而HWM07(CIRA86)的西向风分别在7月份的46 km(49 km)处达到最大值38  $\text{ms}^{-1}$ (36  $\text{ms}^{-1}$ ).观测的东向风在3月的57 km处达到最大值47  $\text{ms}^{-1}$ ;HWM07(CIRA86)的东向风在



2月(3月)的60 km (60km)处的达到最大值  $37 \text{ ms}^{-1}$  ( $43 \text{ ms}^{-1}$ ). 模式风场的东风和西向风的峰值出现的高度均大于测量风场的峰值出现的高度,模式风场的东风和西向风的峰值均小于测量风场的峰值. 观测风速稍大于模式风速的可能原因之一是测量风场包含了背景风场和各种波动成分,而模式风场是气候学平均的结果;此外,HWM07和CIRA86虽然包含了不少探空火箭数据,但并没有包含该地区的测量资料.



(a) 火箭观测的4年月平均纬向风场(东风为正), (b) HWM07月平均纬向风场(东风为正),  
(c) CIRA86的月平均纬向风场(东风为正);其中横坐标表示月份,纵坐标表示高度.

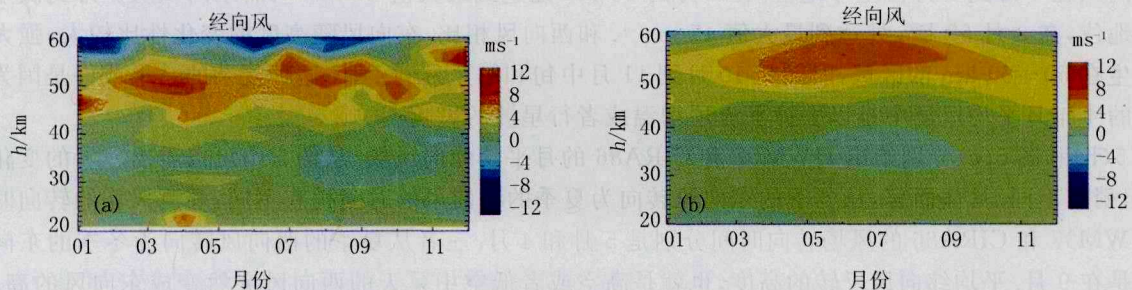
图5 火箭观测的4年月平均纬向风场与模式纬向风场之间的比较

另外还可以发现,CIRA86夏季的西向风从平流层达到平流层顶,这在观测风场和HWM07风场中都没有出现.有可能是潮汐对纬向风的影响.这是因为从5月到10月,潮汐有比较大的变化幅度,基本上是  $10 \text{ ms}^{-1}$ ,纬向风在晚上有可能会减弱<sup>[31]</sup>,而本文观测的时间基本上是在凌晨1点,受到潮汐的影响本文观测风的持续时间有可能比HWM07和CIRA86模式风的持续时间短.

通过对观测和模式之间的纬向风的比较,可以得到观测的纬向风场与HWM07的纬向风场吻合程度要好于与CIRA86的纬向风场的吻合程度.这可能是由于CIRA86在近赤道区域所用数据有限,只有很少的位于近赤道附近的观测资料可以供CIRA86使用.

CIRA86是一个没有包含经向风的模式,所以在下面经向风的比较中,本文的观测结果只与HWM07做了比较.图6(a)展示的是火箭观测的1969—1972年4年的逐月月平均的经向风风场的变化.经向风的风速比较小,变化比较复杂.除了55 km以上是南向风,其他区域几乎全年都是北向风占主导地位,且变化比较复杂;在40~55 km之间,北向风风速比较大;40 km以下,风速比较小,南向风和北向风交替.在60 km以上,南向风占主导地位,这和Nakamura<sup>[30]</sup>利用MU Radar 1985—1989年的结果是相似的,Nakamura<sup>[30]</sup>指出,在60 km从10月到次年3月有  $10 \sim 20 \text{ ms}^{-1}$  的南向风出现.值得注意的是,有时候北向风会达到  $10 \text{ ms}^{-1}$ ,这发生在3月、4月大约50 km处和12月大约55 km处.

火箭探测的结果和HWM07模式的比较,模式风场在在45~60 km之间,北向风占主导地位,且风速在  $4 \sim 8 \text{ ms}^{-1}$ 之间;在45 km以下,风速比较小,在  $0 \sim 4 \text{ ms}^{-1}$ 之间,南向风和北向风交替,且随着高度的增加模式风场的风在变大.但观测风场更为复杂一些,而且南向风出现的高度比HWM07低一些.



(a) 火箭观测的4年月平均经向风场(北向风为正), (b) HWM07的月平均经向风场(北向风为正),  
其中横坐标和纵坐标表示的意义与图5表示的意义相同.

图6 火箭观测的4年月平均经向风场与模式经向风场之间的比较

### 3 结论

本文研究了在Kwajalein ( $8^{\circ}\text{N}$ ,  $167^{\circ}\text{E}$ )火箭观测的1969—1972年20~60 km月平均风场及其两年变

化、年变化和半年变化的特征,并与 HWM07 和 CIRA86 的风场进行了比较.虽然已有不少设备可以观测部分平流层的风场,然而火箭的就地探测仍然是对平流层风场进行全高度观测的重要手段.

在纬向风的变化中,可以看到夏季的西向风最大值在  $30\sim 50\text{ ms}^{-1}$ ,出现的月份是6月到8月,出现的高度在  $35\sim 45\text{ km}$  之间.冬季的东向风的最大值在  $30\sim 50\text{ ms}^{-1}$  之间变化,每年最大值出现的高度和时间也不同,高度在  $40\sim 60\text{ km}$  之间变化,时间分别出现在2月到4月或者10月到11月中旬.从经向风的变化中,在  $40\sim 60\text{ km}$  之间,北向风在每年都占主导地位,北向风明显的比南向风强;在  $40\text{ km}$  以下风速特别小甚至为零.

纬向风在  $20\sim 35\text{ km}$  之间以两年变化为主,振幅在  $10\sim 17\text{ ms}^{-1}$  之间,其中在  $32\text{ km}$  左右达到最大值  $17\text{ ms}^{-1}$ .与 David<sup>[28]</sup>比较,两年变化发生的高度几乎一样,振幅最大值发生的高度也几乎一样,只是文献<sup>[28]</sup>中振幅的最大值比本文的结果略大.在  $55\sim 60\text{ km}$  之间以年变化为主,振幅在  $16\sim 25\text{ ms}^{-1}$  之间,其中在  $60\text{ km}$  左右达到最大值  $25\text{ ms}^{-1}$ ,最大值出现在1月中旬和7月中旬.在  $45\sim 55\text{ km}$  之间以半年变化为主,振幅在  $16\sim 25\text{ ms}^{-1}$  之间,其中在  $47\text{ km}$  左右达到最大值  $25\text{ ms}^{-1}$ ,在最大振幅出现的地方,强大的东向风伴随着半年变化出现在4月中旬和10月中旬.这与之前在这个地方的研究的半年变化一致<sup>[25]</sup>.

本文结果与 HWM07 和 CIRA86 在相同地点做了比较.模式风场的东向风和西向风的峰值出现的高度均大于测量风场的峰值出现的高度,模式风场的东向风和西向风的峰值均小于测量风场的峰值.观测风速稍大于模式风速的可能原因之一是测量风场包含了背景风场和各种波动成分,而模式风场是气候学平均的结果;此外,HWM07 和 CIRA86 虽然包含了不少探空火箭数据,但并没有包含该地区的测量资料.因为本文研究所用数据的观测地点 Kwajalein 岛礁在 HWM07 和 CIRA86 模式中并未涉及,在平流层建立一种依靠大量数据的模式是非常有价值的,这就需要以后更深入、更广泛的研究和分析,而本文的研究可以为以后的研究提供可靠信息.

### 参 考 文 献

- [1] Manson A H, Meek C E, Fellous J L, et al. Mean winds of the upper middle atmosphere ( $60\text{--}110\text{ km}$ ): A global distribution from radar systems (MF, Meteor, VHF)[J]. *Adv Space Res*,1985,5:134-144.
- [2] Manson A, Meek C, Hagan M, et al. Seasonal variations of the semidiurnal and diurnal tides in the MLT: multi-year MF radar observations from  $2$  to  $70^\circ\text{N}$ , and the GSWM tidal model[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*,1999,61:809-828.
- [3] Vincent R A, Lesicar D. Dynamics of the equatorial mesosphere: first results with a new generation partial reflection radar[J]. *Geoph Res Lett*,1991,18:825-828.
- [4] Qing H Y, Zhang Y N, Zhou Ch, et al. Atmospheric temperature profiles estimated by the vertical wind speed observed by MST radar [J]. *Acta Phys Sin*,2014,63(9):094301-094307.
- [5] Hocking W K. A review of Mesosphere-Stratosphere-Troposphere (MST) radar developments and studies circa 1997—2008[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*,2011,73(9):848-882.
- [6] Reber C A, Trevathan C E, McNeal R J, et al. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission[J]. *J Geophys Res*,1993,98(D6):10643-10647. DOI:10.1029/92JD02828.
- [7] MA R P. Wind and wind shear observed by ZN-1 Rocket at Hainan[J]. *Chin J Space Sci*,1997,17:70-74.
- [8] Reed R J. Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere[J]. *J Geophys Res*,1966,71:4223-4233.
- [9] JIANG G Y, XU J Y, SHI D B, et al. Observations of the first meteorological rocket of the Meridian Space Weather Monitoring Project [J]. *Chinese Sci Bull*,2011,56:2131-2137.
- [10] WANG L J, CHEN Z Y, LING C, et al. Decreasing trend of the middle atmospheric static stability in historical data from rocketsonde network[J]. *Acta Phys Sin*,2015,64:169201.
- [11] Hedin A E, Spencer N W, Killeen T L. Empirical global model of upper thermosphere winds based on Atmosphere and Dynamics Explorer satellite data[J]. *J Geophys Res*,1988,93:9959-9978.
- [12] Hedin A E, Biondret M A, Burnside R G, et al. Revised global model of thermospheric winds using satellite and ground-based observations[J]. *J Geophys Res*,1991,96:7657-7688.
- [13] Hedin A E, Fleming E L, Mansonet A H, et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere[J]. *J Atmos Terr Phys*,1996,58(13):1421-1447.
- [14] Drob D P, Emmert J T, Crowley G, et al. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07[J]. *J Geophys Res*,2008,113:A12304. DOI:10.1029/2008JA013668.



- [15] Alken P, Maus S, Emmert J T, et al. Improved horizontal wind model HWM07 enables estimation of equatorial ionospheric electric fields from satellite magnetic measurement[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35:L11105. doi:10.1029/2008GL033580.
- [16] Eric L F, Sushil C, Mark R S, et al. Monthly Mean Global Climatology of Temperature, Wind, Geopotential Height, and Pressure for 0-120 km[J]. *Adv Space Res*, 1990, 10:3-12.
- [17] Dunkerton T J, Delisi D P, Baldwin M P. Middle atmosphere cooling trend in historical rocketsonde data[J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25:3371-3380.
- [18] Reed R J, Campbell W J, Rasmussen L A, et al. Evidence of the downward-propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere[J]. *J Geophys Res*, 1961, 66:813-818.
- [19] Ebdon R A, Veryard R G. Fluctuations in tropical stratospheric winds[J]. *Meteor Mag*, 1961, 90:125-143.
- [20] Gabis I P. The validity of long-term prediction of quasi-biennial oscillation (QBO) as a proof of the exact seasonal synchronization of the equatorial stratospheric QBO cycle[J]. *J Sol-Terr Phys*, 2015, 124:44-58.
- [21] Venkat M R, Kumar G K, Patra A K, et al. Long-term variability of the low latitude mesospheric SAO and QBO and their relation with stratospheric QBO[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35:L21809. doi:10.1029/2008GL03590.
- [22] Baldwin M P, Gray T J, Dunkerton K, et al. The Quasi-biennial Oscillation[J]. *Rev Geophys*, 2001, 39:179-229.
- [23] Vladimir V G, Christoph J, Alexey V E, et al. Annual and semiannual harmonics of wind in the Northern stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere[J]. *Adv Space Res*, 2015, 56:1863-1876.
- [24] Reed R J. The quasi-biennial oscillation of the atmosphere between 30 and 50 km over Ascension Island[J]. *J Atmos Sci*, 1965, 22:331-333.
- [25] Kevin H. Rocketsonde Observations of the Mesospheric Semiannual Oscillation at Kwajalein[J]. *Atmos Ocean*, 1982, 20:281-286.
- [26] Schmidlin F J, Carlson M, Rees D D, et al. Wind structure and variability in the middle atmosphere during the November 1980 Energy Budget Campaign, *J Atmos Terr Phys*, 1986, 47:183193. doi:10.1016/0021-9169(85)90133-3
- [27] Lomb R N. Least-square frequency analysis of unequally spaced data[J]. *Astrophys Space Sci*, 1976, 39:447-462.
- [28] David A O, Wilbert R S, Paul B Y, et al. Measurements of stratospheric winds by the High Resolution Doppler Imager[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101:351-363.
- [29] Hopkins R H. Evidence of polar-tropical coupling in upper stratospheric zonal wind anomalies[J]. *J Atmos Sci*, 1975, 32:712-719.
- [30] Nakamura T, Tsuda T, Fukao S, et al. Mean winds at 60-90 km observed with the MU radar (35°N)[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1996, 58(6):655-660.
- [31] Choi G H, Monson K, Wickwar V B. Seasonal and diurnal variations of wind and temperature near the mesopause from Fabry-perot interferometer observations[J]. *Adv Space Res*, 1998, 21(6):847-850.

## Rocket Sounding Observations of Stratospheric Winds in Kwajalein Island (8°N, 167°E) and Their Comparisons with HWM07 and CIRA86

LIU Mengzhu, MA Min, LIU Xiao

(School of Mathematics and Information Science, Henan Normal University, Xixiang 453007, China)

**Abstract:** Mean winds in the altitude range of 20–60 km, which were derived from rocket sounding in Kwajalein Island (8°N, 167°E) are analyzed. The wind data covered the period of 1969–1972, which was selected from 1963–1992. The quasi-biennial variation, annual variation and semi-annual variation have been studied and compared with Horizontal Wind Model 2007 (HWM07) and COSPAR International Reference Atmosphere 1986 (CIRA86). The summer westward winds reached a peak value of 45 ms<sup>-1</sup> in August at 41 km. The winter eastward winds reached a peak value of 47 ms<sup>-1</sup> in March at 57 km. Below 60 km, the meridional wind was the northward in general, with the wind speed was less than 10 ms<sup>-1</sup>. In the altitude range of 20–35 km, the zonal winds showed a clear quasi-biennial variation, with the amplitude in the range of 10–17 ms<sup>-1</sup>. In the altitude range of 45–55 km, the zonal winds showed a clear semi-annual variation, with the amplitude in the range of 16–25 ms<sup>-1</sup>. Above 55 km, the zonal winds showed a clear annual variation, with the amplitude in the range of 16–25 ms<sup>-1</sup>. These observed features were compared with HWM07 and CIRA86. HWM07 westward winds reached a peak of 38 ms<sup>-1</sup> in July at 47 km. HWM07 eastward winds reached a peak value of 47 ms<sup>-1</sup> in February at 66 km. The maximum of HWM07 eastward winds was less than the peak value of the observed winds. This might be the fact that the observed winds include the background winds and the various waves, while empirical winds are average results of climatology. In addition, although HWM07 and CIRA86 contain a lot of rocket sounding data, they do not include the observed wind dates in the Kwajalein Island.

**Keywords:** stratosphere; month mean wind; quasi-biennial variation; annual variation; semi-annual variation