

# 热带下平流层重力波的季节和年际变化特征\*

王雪莲<sup>1,2</sup> 陈泽宇<sup>2\*\*</sup> 吕达仁<sup>2</sup> 杜秉玉<sup>1</sup>

1. 南京信息工程大学电子工程系, 南京 210044;

2. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

**摘要** 利用位于热带太平洋中的 Truk 岛(7.4°N, 151.8°E)长达 7 年的(1998—2004 年)高垂直分辨率探空观测资料分析了热带地区下平流层(18—25 km)重力波活动的气候特征. 分析结果显示, 在该高度范围内, 重力波活动表现出明显的季节变化, 总能量在一月份达到最大, 6 月份最小; 这种变化与北半球西风带向南扩张从而加强当地对流活动的气候特征是一致的. 研究结果还表明, 重力波活动还有显著的与赤道 QBO 周期一致的年际变化. 赤道 QBO 的东风位相向西风位相转变的时段, 重力波能量总是达到异常的最大, 此地区重力波活动的年际变化与 QBO 密切相关. 此外还介绍了重力波的其他参数, 如固有频率, 垂直波长和传播方向.

**关键词** 重力波 季节变化 年际变化 热带 高分辨探空

大气重力波是一种在大气中普遍存在的中小尺度扰动. 在中层大气中, 大气重力波的传播及其动力学效应在决定中层大气环流的基本性质方面起着重要作用. 重力波动量和能量通过波-流以及波-波相互作用在垂直方向传输, 决定了中层大气的温度场和纬向风场. 而且重力波在中层大气中的传播能够在不同高度大气之间产生能量和动量输送, 对中层大气各圈层之间能量耦合有重要贡献<sup>[1]</sup>.

Kitamura 等<sup>[2]</sup>根据 Sawyer<sup>[3]</sup>的观点, 首先提出了利用高分辨率探空资料估计惯性重力波活动的研究方案. 该方案可以利用那些积累下来的长期探空资料, 为下平流层/对流层重力波气候特征的研究提供了一个有效的途径. 因此, 近 20 年来这种方案已经被许多研究人员采用. 例如, Allen 等<sup>[1]</sup>利用 Australia 的 18 个站点的探空资料中的温度参量研究了重力波能量随季节和纬度的变化. Vincent 等<sup>[4]</sup>利用探空资料中的温度和风参量研究分析了 Macquarie 岛(55°S, 159°E)重力波特性. 卞建春等<sup>[5]</sup>利用北京观象台垂直高分辨率探空资料统计分

析了北京上空下平流层重力波的特征. Zhang 等<sup>[6]</sup>研究分析了武汉上空对流层和下平流层重力波参数. 这些研究都发现下平流层重力波活动具有明显的季节变化, 而且这些变量的扰动主要来源于低频重力波<sup>[7]</sup>, 尤其是频率在  $f-3f$  之间的惯性重力波.

作为全球平流层年际变化中的最强信号, 赤道上空平流层纬向风表现出准两年振荡的特点, 称之为 QBO. 通过早期 Lindzen 等<sup>[8]</sup>和 Holton 等<sup>[9]</sup>的研究以及近十多年来的数值模拟和理论分析<sup>[10]</sup>, 已经从本质上认识到赤道区域重力波的强迫作用是驱动赤道 QBO 的主要机制.

近年来, 一些对低纬度地区重力波的研究发现, 近赤道区域下平流层重力波活动除季节变化外, 还有显著的年际变化, 而且这种年际变化与赤道 QBO 密切相关. Vincent 等<sup>[11]</sup>通过分析位于热带印度洋中的 Cocos (12°S, 97°E) 岛观测站近 6 年(1992 年 9 月—1998 年 6 月)的高分辨率探空资料发现 18—25 km 高度范围内重力波能量密度除了表现

2006-03-02 收稿, 2006-04-29 收修改稿

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40333034)和中国科学院方向性项目(KZCX3-SW-217)共同支持

\*\* 通讯作者, E-mail: z.chen@mail.iap.ac.cn

出季节变化外, 还有显著的与 QBO 周期一致的年际变化特征. 在此分析工作基础上, Alexander 等<sup>[12]</sup>通过数值模拟研究, 提出了这样的热带重力波扰动也有可能对赤道 QBO 产生贡献的观点.

Wang 等<sup>[13]</sup>通过利用美国国家海洋大气管理局气候资料中心(NOAA/NCDC)提供的 4 年(1998—2001)的高分辨率探空资料分析了北美地区以及一些热带太平洋岛屿上空下平流层/对流层重力波活动的长期变化特征, 其研究发现北半球低纬度地区下平流层的重力波能量密度除季节变化外还具有明显的年际变化, 并认为这种变化可能与 QBO 的位相转换有关. 但是由于资料的时间长度不够长, 他们得到的重力波与 QBO 之间关系的结论还有相当程度的不确定性.

本文利用 Truk (7.4°N, 151.8°E) 岛站点长达 7 年(1998—2004 年)的探空资料分析了此区域下平流层(18—25 km)重力波的统计特征, 得到了主要的重力波参数: 重力波能量密度, 垂直波长, 固有频率和传播方向. 研究发现, 冬季(12 月—2 月)时重力波活动强, 而夏季(6 月—8 月)较弱, 这与该地区对流活动的季节变化有关. Truk 群岛位于热带太平洋, 冬季受北方冷空气影响, 对流活动频繁. 得益于观测资料的时间长度, 本文还清楚地揭示了重力波能量密度的年际变化与赤道 QBO 之间的一致性, 此区域重力波活动呈现出显著受赤道 QBO 调制的特点.

## 1 资料描述

本文所用的资料是美国国家海洋大气管理局气候资料中心(NOAA/NCDC)提供的 Truk 台站(7.4°N, 151.8°E)的高垂直分辨率无线电探空资料, 时间跨度为 7 年(1998 年 1 月—2004 年 12 月)(Wang 等<sup>[13]</sup>的研究中用过此站点 1998—2001 年的资料). 正常情况是每日探测两次(00:00UTC, 12:00UTC), 有些天会有加密探测(在 06:00UTC 或 18:00UTC 多进行一次或两次探测). 探空资料中每 6 s 记录一次温度、气压和探空气球的位置. 气球的上升速度约为 5 m/s, 因此温度的垂直分辨率约为 30 m. 水平风速由每 6 s 记录的仰角和方位角计算得到, 其垂直分辨率约为 150 m<sup>[14]</sup>. 但是在公开发布的这种资料中, 探

测数据是按气球上升的时间记录的, 时间间隔为 6 s.

Truk 群岛位于北半球热带太平洋, 对流活动频繁, 冬季时由于高纬度地区西风带的向南入侵, 对流活动更为强烈. 此区域上空下平流层盛行东风, 有短暂的周期性的西风出现, 经向风很弱. Truk 群岛上空对流层顶高度一般约为 17.5 km. 本文在研究中对探测高度进行了统计, 结果表明每年中探空高度在 25 km 之上的次数占 60% 以上.

## 2 分析方法

### 2.1 资料处理

在本研究工作中, 参照 Allen 等<sup>[1]</sup>的建议, 并考虑到对流层顶高度和探测高度, 在热带地区选取 18—25 km 高度范围作为下平流层范围, 在此高度范围内, Brunt-Vaisala 频率  $N$  几乎不随高度变化(图 1), 为 0.023—0.027 s<sup>-1</sup>. 对于该高度范围内的探空资料, 首先剔除了那些无效数据过多的廓线和不合理的廓线(如垂直切变量过大). 为了计算方便, 将那些有效的廓线在垂直方向进行等间隔插值. 本文中利用三次样条方法将温度和水平风速插值到垂直间隔为 50 m 的标准高度上, 然后使用二次多项式拟合建立背景廓线(如图 2), 并得到相对于这个背景廓线的扰动廓线: 温度扰动量  $T'$ 、水平风速扰动量  $u'$  和  $v'$ . 温度扰动量除以背景平均温度得到归一化温度扰动  $\hat{T}'$ , 即  $\hat{T}' = T'/\bar{T}$ , 关于重力波能量和谱的分析中使用了该变量.

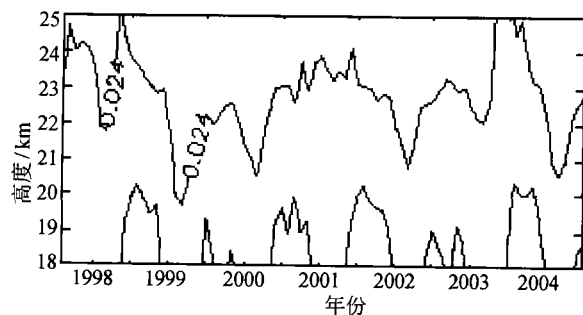


图 1 1998—2004 年月平均的 Brunt-Vaisala 频率(rad/s) 随高度变化等值线(等值线间隔为 0.03 rad/s)

图 2 给出了 2004 年 8 月 3 日 12 时(UTC)的探空资料得到温度和水平风的原始廓线以及二次多项式拟合后的背景廓线, 两者的偏差即为扰动量  $T'$ 、

$u'$  和  $v'$ . 在下平流层, 可假设这些扰动都是由重力波引起的, 很多研究表明下平流层主要是垂直波长较短、周期较长的惯性重力波.

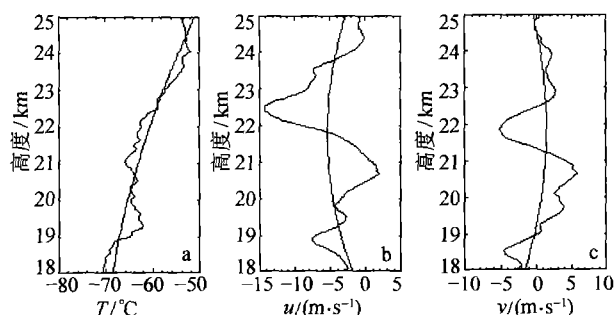


图2 Truk 岛 2004 年 8 月 3 日 12 时(UTC)不同参数的原始垂直廓线及拟合的背景垂直廓线  
(a) 温度; (b) 纬向风; (c) 经向风

## 2.2 分析程序介绍

本文的研究工作是利用澳大利亚 Adelaide 大学 R. Vincent 教授(陈泽宇与 Vincent 个人通信)提供的分析程序完成的. 该分析程序是 Allen 等<sup>[1]</sup>在他们开展利用澳大利亚各站点的探空资料研究对流层和下平流层重力波气候特征的研究工作时建立, 并在随后的同类研究工作中逐渐改进后形成的一个程序包<sup>[4]</sup>. 近年来, Wang 等<sup>[13,15]</sup>利用美国各个站点的探空资料分析了对流层和下平流层重力波能量和其他参数的时空变化特征.

此分析程序是建立在 Fritts 和 VanZandt 重力波参数化方案<sup>[16]</sup>的基础之上的. 使用温度和水平风参量计算出重力波的能量密度, 并利用谱分析方法估计得到重力波的主要参数: 垂直波长, 固有频率和传播方向.

重力波总能量密度(单位质量的能量)为动能和势能密度之和, 18—25 km 高度内平均的动能和势能密度分别用下式计算:

$$E_k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}), \quad (1)$$

$$E_p = \frac{g^2}{2N^2} \overline{T'^2}, \quad (2)$$

$N$  为 Brunt-Vaisala 频率, 本文中  $N$  是用探空资料

直接计算得到的, 公式中的上划线表示 18—25 km 高度内的平均. (1)式中动能的计算没有考虑垂直方向风扰动量的贡献.

重力波的垂直波长可以由归一化温度扰动的垂直波数功率谱估计得到<sup>[16]</sup>. 对  $\hat{T}'$  进行谱分析得到归一化温度扰动的垂直波数功率谱, 通过此垂直波数谱估计出重力波的主要垂直波数, 然后由  $\lambda_z = 2\pi/m$ , 就可以得到垂直波长  $\lambda_z$ .

重力波的水平波长为  $\lambda_h = 2\pi/k_h$ ,  $k_h$  为水平波数, 可由重力波色散关系得到:

$$(\omega^2 - f^2)m^2 = N^2 k_h^2, \quad (3)$$

其中  $f$  为 Coriolis 参数, Truk 站点所在的纬度上,  $f \sim 1.87 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .  $\omega$  为重力波固有频率, 它可近似由下面的关系得到<sup>[15,17]</sup>

$$AXR = \left| \frac{\omega}{f} - \frac{1}{N} \frac{dV_T}{dz} \right|, \quad (4)$$

其中,  $AXR$  为重力波偏振椭圆(这里指的是水平风扰动矢量椭圆)的长短轴之比, 可由 Stokes 参数计算出来<sup>[18,19]</sup>.  $V_T$  是重力波水平传播时水平风速随之产生的变化,

$$V_T = u \cos\phi - v \sin\phi, \quad (5)$$

$\phi$  是重力波水平传播方向(垂直向北为  $0^\circ$ , 自北顺时针旋转).

重力波的水平传播方向即为水平风扰动矢量椭圆长轴的正方向<sup>[4,5]</sup>, 但是这样得到的传播方向存在  $180^\circ$  的不确定性, 利用 Hilbert 变换可以消除这种不确定性<sup>[11]</sup>.

利用水平风扰动矢量场和旋转谱技术可以得到重力波的垂直传播方向. 根据线性重力波理论<sup>[20]</sup>, Coriolis 力影响使得在北半球与向上传播(向下传播)的重力波相对应的风扰动矢量随高度顺时针(逆时针)旋转. 旋转谱技术<sup>[19]</sup>可以将风扰动矢量场分解为逆时针(AW)和顺时针(CW)分量. 北半球重力波能量上传的部分可以简单地认为是 CW 与(CW + AW)的比值.

### 3 分析结果

#### 3.1 重力波能量密度

重力波能量密度(动能密度与势能密度之和)表征重力波活动的强弱. 图3给出了1998—2004年月平均的重力波动能、势能和总能量密度的变化曲线(实线为总能量, 点线为势能, 虚线为动能). 分析结果显示, 与重力波活动相关的动能密度、势能密度和总能量密度都呈现明显的季节变化, 其突出表现是夏季小而冬季大, 与以前的研究结果一致<sup>[5,6,13]</sup>. 这种变化反映了夏季(6月—8月)(JJA)时重力波活动较弱, 而冬季(12月—2月)(DJF)较强, 这与此区域冬季对流活动强相对应.

除了上述季节变化外, 从图3还可以清楚地看到重力波活动还表现出若干年尺度的准周期变化. 例如在1998—1999, 2001—2002和2003—2004年的冬季重力波能量密度均显示出显著的极大值. 这种长期的变化形式在Wang等<sup>[13]</sup>的研究中也曾经被提到过. 他们利用1998—2001年间美国各站点的探空观测资料进行分析后发现西北太平洋上低纬度区域下平流层重力波能量密度在1998—1999和2001—2002年冬季均出现明显增加, 并将这种增加与QBO联系起来, 认为重力波能量密度的年际变化可能与QBO的位相有关. 但是他们所用资料的时间长度不够长(以至于后来在Wang等<sup>[15]</sup>的工作中认为重力波能量密度的年际变化周期约为3年), 也没有深入研究重力波活动与赤道QBO之间的相关性.

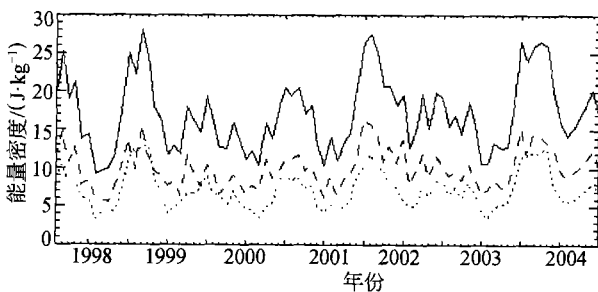


图3 1998—2004年月平均的重力波动能(虚线)、势能(点线)和总能量(实线)密度的变化曲线

在本研究工作中, 借助长达7年的资料, 作者们进一步分析了图3所示的长周期变化与赤道QBO

之间的关系, 结果显示这两者之间存在高度的一致性. 图4为由探空资料得到的18—25 km纬向风场(a)和纬向风距平场(b)的等值线图(距平场由纬向风场减去7年平均的纬向风得到). 图3和图4比较后发现, 25 km左右高度出现西风时重力波总能量密度为最大, 而且这期间刚好是纬向风距平场20 km左右高度东风向西风转变的时间. 并且重力波能量显著增加的周期与纬向风场和纬向风距平场西风带出现的周期一致, 可见重力波的一年变化与纬向风场的转变是紧密相关的.

利用NCEP再分析资料, 图5进一步给出了1998—2004年间不同等压面纬向风随纬度和时间变化的等值线图(图5(c)图中的空白为东风风速大于40 m/s)以及赤道区域纬向风随等压面和时间变化的等值线图(图5(d)). 在Truk岛附近区域, 70, 30, 10 hPa分别对应—18.5, —23.8, —31 km的高度. 从图可以看出18—25 km之间, 冬季时北半球西风带向南深入, 使得此处对流加剧, 从而导致重力波活动增强, 产生了季节变化. 同时在此高度范围内QBO的西风位相也向北扩展, 其影响可以达到10°N以北. 对照图4可看出, Truk岛18—25 km高度范围内出现的准周期性的西风带就是受到了它的影响. 而这些西风带出现时重力波能量明显增加, 可以说明重力波活动增强与QBO之间关系密切. 参照图5(d)的赤道上空平流层内纬向风随时间变化的垂直剖面图(QBO), 不难发现, 当QBO由东风位相向西风位相转变的时候重力波能量增加到最大, 重力波活动显著增强.

上述分析结果与Vincent等<sup>[11]</sup>的结果是一致的. 他们曾利用Cocos岛(12°S, 97°E)近6年(1992年9月—1998年6月)的探空资料分析了下平流层(18—25 km)重力波的活动, 得到类似结论, 即重力波能量密度也在同高度内纬向风西风带出现时达到最大, 呈现类似QBO的年际变化, 在Alexander等<sup>[12]</sup>的工作中通过模拟证实了此重力波活动与赤道QBO之间的相关性. 结合本研究工作的结果, 可以得到结论, 即热带低纬度地区的重力波活动都与赤道QBO之间存在着极其显著的关联.

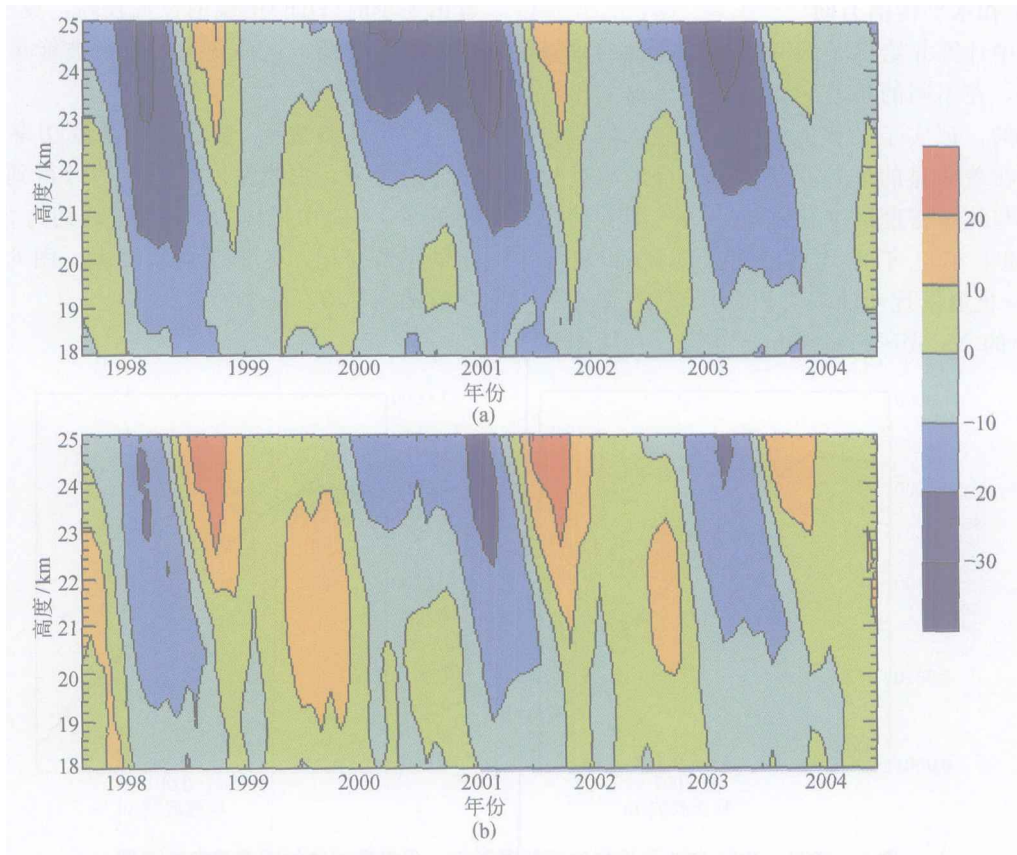


图4 1998—2004年月平均的纬向风场和纬向风距平场的等值线图(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 纬向风场; (b) 纬向风距平场

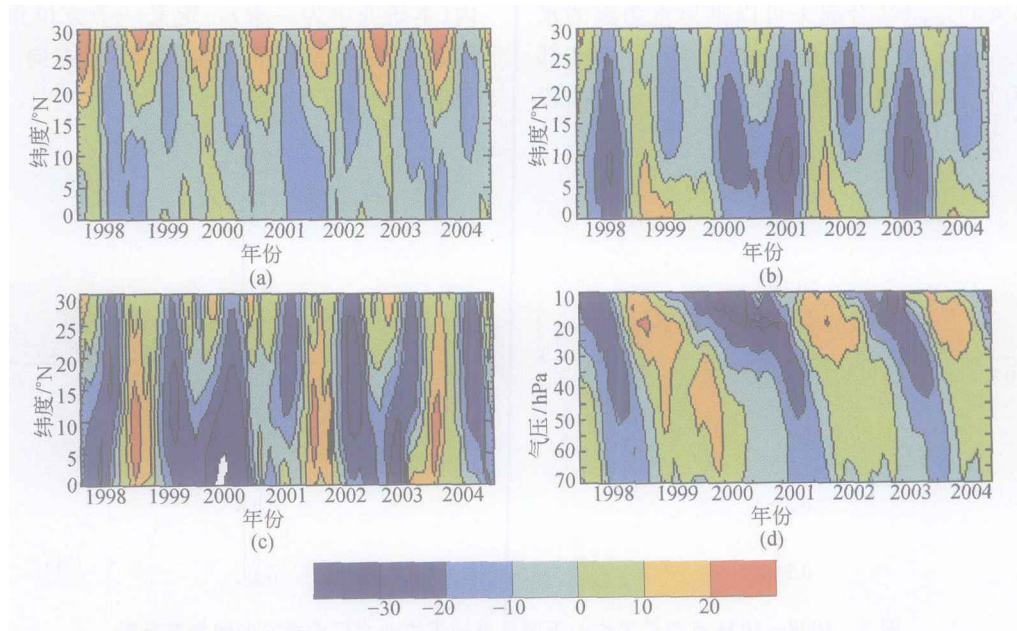


图5 利用NCEP再分析资料画出的1998—2004年 $147.5^{\circ}\text{E}$ — $155^{\circ}\text{E}$ 平均的纬向风等值线图(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 70 hPa的纬向风; (b) 30 hPa的纬向风; (c) 10 hPa的纬向风; (d) 赤道上空不同等压面的纬向风

### 3.2 功率谱和水平传播方向

在本文中计算并给出了归一化温度扰动的垂直波数功率谱,在不同的季节和年份内功率谱的形状是基本相同的,证实了“普适谱”的概念.但是谱的幅度却存在着明显的季节变化,冬季谱的幅度比夏季要大,与能量密度的变化基本一致.图 6 给出了 1998—2004 年 7 年平均的冬季(DJF)和夏季(JJA)的归一化温度扰动的垂直波数功率谱(图中的虚线是拟合的 Modified-Desaubies 谱<sup>[16]</sup>),从图中

看出冬季时(DJF)谱线的位置较高,夏季时(JJA)谱线的位置较低,这种变化与重力波能量密度变化的趋势相同.

重力波参数  $t$ , 表示垂直波数功率谱在高波数部分的斜率,由线性饱和理论估计得到,一般认为接近 3. 本文中得到的  $t$  的值平均约为 2.9, 具有一定的季节变化,冬季比夏季要大.图 6 中的  $t$  在冬季时约为 3.0, 夏季约为 2.8.

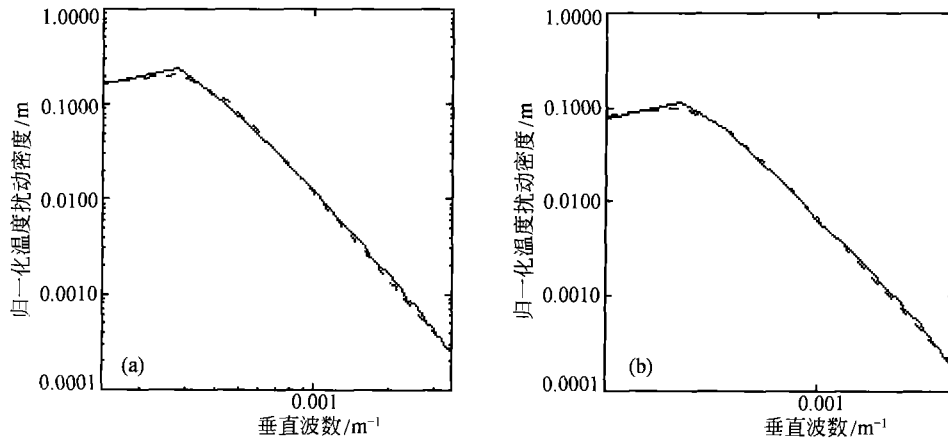


图 6 1998—2004 年 7 年平均的不同季节归一化温度扰动的垂直波数功率谱  
(a) 冬季 (DJF); (b) 夏季 (JJA)

温度和风的信息结合起来可以推出重力波的水平传播方向.把所有方位角度分成  $30^\circ$  间隔的 12 部分(正北方为  $0^\circ$ , 顺时针旋转增加).在一定时间段

内(本研究中为一季),定义一个方位角  $\phi$  的角度谱函数  $\Phi(\phi)$  来表示重力波水平传播方向.对于第  $i$  部分有

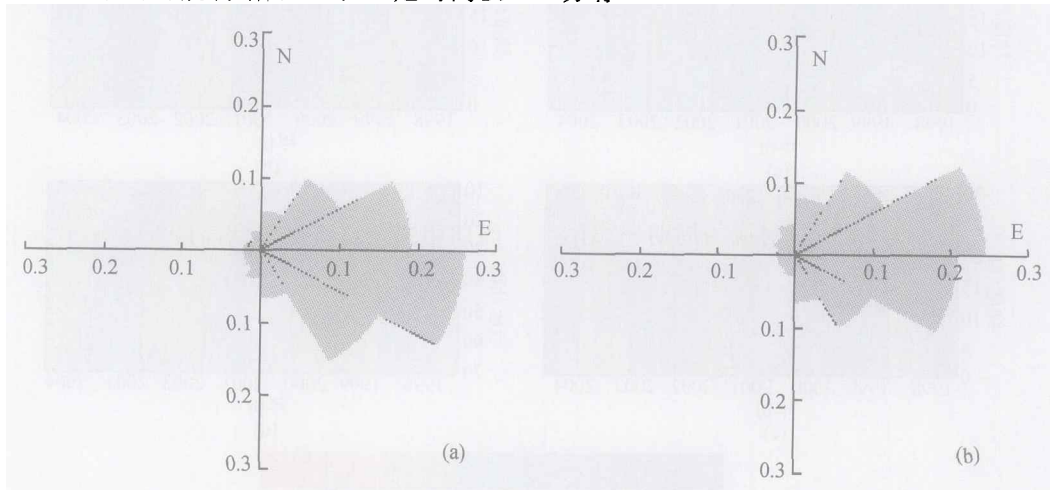


图 7 1998—2004 年 7 年平均的不同季节的重力波水平传播方向的角度谱图  
(a) 冬季 (DJF); (b) 夏季 (JJA)



$$\Phi_i(\phi) = \frac{\sum_j E_{ji}}{E_T}, \quad (6)$$

其中,  $E_j$  表示单条探空廓线得到的重力波能量, 下标  $ji$  表示水平传播方位角落入  $i$  部分的廓线,  $E_T$  为每个季节的总能量. 图 7 给出了 1998—2004 年 7 年平均的冬季(DJF)和夏季(JJA)重力波的水平传播方向角度谱, 从图中可以明显看出重力波的主要水平传播方向不随季节变化, 一致向东, 这表示此区域下平流层重力波具有明显的各向异性, 与 Vincent 等<sup>[11]</sup>的结果一致. 这种水平传播的各向异性与此区域 18—25 km 高度内盛行东风有关(经向风很小, 一般接近于 0).

### 3.3 垂直波长 $\lambda_z$

垂直波长  $\lambda_z$  是由垂直波数的功率谱估计得到的, 是探空所能测到的所有重力波的主要垂直波长. 由于选取的研究高度为 18—25 km, 使得分析得到的垂直波长限制在 7 km 之内. 结果表明,  $\lambda_z$  一般较短, 平均值为 2.78 km, 主要在 2.5—3.5 km 之间变化. 这样的结果与其他用探空资料研究重力波得到的结果相同<sup>[5-6,15]</sup>, 这是探空资料的特点.

整体上看, 垂直波长冬季比夏季长, 与能量密度的变化近似成正比关系(其年际变化不突出), 这与 Wang 等<sup>[15]</sup>的结果相同. 这可说明  $\lambda_z$  长的重力波比较活跃, 其所产生的能量也较大.

### 3.4 固有频率 $\omega$

本研究中得到的重力波固有频率  $\omega$  主要集中在 2—3.5  $f$  之间, 平均为 2.86  $f$ . Truk 岛站点的 Coriolis 参数  $f \sim 1.87 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 当  $\omega$  为  $2f$  时, 对应的周期  $\sim 46 \text{ h}$ , 当  $\omega$  为  $4f$  时, 对应的周期  $\sim 23 \text{ h}$ , 可见探空所能够观测到的重力波周期都是比较长的. Wang 等<sup>[15]</sup>认为探空的时间抽样和观测到的垂直波长  $\lambda_z$  较短是得到的重力波固有频率较低、周期较长的可能原因.

7 年平均来看,  $\omega$  冬季较大, 夏季较小, 与能量密度的变化趋势相似. 此外, 在 1998—1999、2000—2001 和 2003—2004 年冬季  $\omega$  比其他时间要大, 这与 Wang 等<sup>[15]</sup>的研究中 1998—1999 和 2000—2001 年冬季  $\omega$  值较大的结果相同.

### 3.5 垂直传播方向

平均来说, 此区域下平流层约有 74% 的重力波能量向上传播且在 65%—80% 之间波动(与以前研究的结果<sup>[4,15]</sup>相同). Zink 等<sup>[7]</sup>通过分析 Macquarie 岛的探空资料研究得到上传的重力波能量比例 ( $F_{up}$ ) 在冬季时达到最小值, 这与本文结果一致.

整体看来,  $F_{up}$  与固有频率  $\omega$  之间呈现非常好的负相关, 其相关系数达 0.85, 而且  $F_{up}$  与垂直波长  $\lambda_z$  之间除 1998 年外, 也表现出较好的负相关性, 相关系数约为 0.66. Zink 等<sup>[7]</sup>及 Wang 等<sup>[15]</sup>也发现了这种相关性, 他们还讨论了此现象产生的可能原因.

## 4 讨论与结论

本文利用靠近赤道的 Truk 岛 7 年的垂直高分辨率探空资料研究分析了热带地区下平流层重力波的统计特性. 由纬向、经向风和温度扰动量计算得到重力波的能量密度和主要波参数: 垂直波长, 固有频率和传播方向, 分析了它们的季节变化和年际变化. 主要结果如下:

(1) 下平流层的重力波主要是惯性重力波, 动能与势能的比约为 1.37. 重力波活动呈现明显的类似于 QBO 的长期变化. 对于年变化而言, 在北半球冬季重力波活动较强, 而夏季较弱.

(2) 重力波活动的年际变化表现为: 1998—1999, 2001—2002 和 2003—2004 年冬季的重力波能量明显增加, 这种重力波活动的增强对应于纬向风西风出现的时间, 类似于赤道 QBO 的位相变化. 通过与赤道 QBO 的比较分析, 发现此区域下平流层内出现的西风带是赤道 QBO 的西风位相向北扩展的结果, 且重力波活动的年际变化周期与 QBO 周期相同. 说明热带低纬度地区下平流层的重力波活动与赤道 QBO 密切相关.

(3) 重力波总能量的季节变化非常明显, 冬季能量高, 夏季能量低, 两者的比值接近 2. 垂直波长  $\lambda_z$  和固有频率  $\omega$  具有与能量相同的季节变化. 夏季时  $\lambda_z$  较短,  $\omega$  较低; 冬季  $\lambda_z$  较长,  $\omega$  较高.

(4) 重力波的水平传播呈现出明显的各向异性, 不随时间和季节变化, 一致向东传播. 垂直方向上能量主要向上传播, 上传的比例在 60%—80% 之间, 平均为 74%, 没有显示有明显的年际变化. 就

季节变化而言, 总体上看能量上传的比例冬季偏小, 夏季偏大.

**致谢** 作者感谢澳大利亚 Adelaide 大学 R. Vincent 提供了有关的分析程序. 本文使用的 NCEP 再分析资料来自 NOAA—CIRES ESRL/PSD Climate Diagnostics branch, Boulder, Colorado, USA. (<http://www.cdc.noaa.gov>).

### 参 考 文 献

- 1 Allen S, Vincent R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations. *J Geophys Res*, 1995, 100(D1): 1327—1350
- 2 Kitamura Y, Hirota I. Small-scale disturbances in the lower stratosphere revealed by daily rawinsonde observations. *J Meteorol Soc Jpn*, 1989, 67(5): 817—830
- 3 Sawyer J S. Quasi-periodic wind variation with height in the lower stratosphere. *Q J R Meteorol Soc*, 1961, 87: 24—33
- 4 Vincent R A, Allen S J, Eckermann S D. Gravity-wave parameters in the lower stratosphere, In: *Gravity Wave Processes: Their Parameterization in Global Climate Models*, NATO ASI Ser. I, edited by K. Hamilton, New York: Springer Verlag, 1997, 50: 7—25
- 5 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 用垂直高分辨率探空资料研究北京上空下平流层重力波的统计特性, *中国科学 D 辑*, 2004, 34(8): 748—756
- 6 Zhang D, Yi F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30° N, 114° E). *China Annales Geophysicae*, 2005, 23: 665—673
- 7 Zink F, Vincent R A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island. I. Wave parameters. *J Geophys Res*, 2001 106(D10): 10275—10288
- 8 Lindzen R S, Holton J R. A theory of the quasi-biennial oscillation. *J Atmos Sci*, 1968, 25(6): 1095—1107
- 9 Holton J R, Lindzen R S. An update theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. *J Atmos Sci*, 1972, 29(6): 1076—1080
- 10 Canziani P O, Holton J R. Kelvin waves and the quasi-biennial oscillation: An observational study. *J Geophys Res*, 1998, 103(D24): 31509—31512
- 11 Vincent R A, Alexander M J. An observational study of seasonal and interannual variability. *J Geophys Res*, 2000, 105(D14): 17971—17982
- 12 Alexander M J, Vincent R A. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: A model study of seasonal and interannual variability. *J Geophys Res*, 2000, 105(D14): 17983—17993
- 13 Wang L, Geller M A. Morphology of gravity wave energy as observed from four years (1998—2001) of high vertical resolution U. S. radiosonde data. *J Geophys Res*, 2003, 108(D16): 4489
- 14 National Climate Data Center (NCDC). Data documentation for data set rawinsonde 6-second data, Rep D6211, Natl Clim Data Cent, Asheville N C, 1998
- 15 Wang L, Geller M A, Alexander M J. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. Part I: Intrinsic frequency, wavelength and vertical propagation direction. *J Atmos Sci*, 2005, 62(1): 125—142
- 16 Fritts D C, Van Zandt T E. Spectral estimate of gravity wave energy and momentum flux, I: Energy dissipation, acceleration and constraints. *J Atmos Sci*, 1993, 50(22): 3685—3694
- 17 Hines C O. Tropopausal mountain waves over Arecibo: A case study. *J Atmos Sci*, 1989, 46(4): 476—488
- 18 Eckermann S D. Hodographic analysis of gravity waves: Relationships among Stokes parameters, rotary spectra and cross-spectral methods. *J Geophys Res*, 1996, 101(D14): 19169—19174
- 19 Vincent R A. Gravity-wave motions in the mesosphere. *J Atmos Terr Phys*, 1984, 46(2): 119—128
- 20 Holton J R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 3rd edition, San Diego: Academic Press, 1992, 507