

基于新型往返式探空观测的下平流层重力波特征分析*

杨晨义¹ 郭启云² 曹晓钟² 张 武¹

YANG Chenyi¹ GUO Qiyun² CAO Xiaozhong² ZHANG Wu¹

1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州, 730000

2. 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081

1. *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2020-05-16 收稿, 2020-10-18 改回.

杨晨义, 郭启云, 曹晓钟, 张武, 2021. 基于新型往返式探空观测的下平流层重力波特征分析. 气象学报, 79(1): 150-167

Yang Chenyi, Guo Qiyun, Cao Xiaozhong, Zhang Wu. 2021. Analysis of gravity wave characteristics in the lower stratosphere based on new round-trip radiosonde. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(1):150-167

Abstract The observational data of the round-trip sounder collected at Anqing, Changsha, Ganzhou, Nanchang, Wuhan and Yichang stations during an observation experiment from 9 June to 10 July 2018 are used to extract the parameters of gravity wave, including the energy density, natural frequency, wavelength and propagation direction. By studying and analyzing the parameters of gravity wave at these stations, the gravity wave from June to July in the experimental area is counted. Characteristics and horizontal differences as well as the differences between the up and down sections are compared between various sites. The main results are as follows: (1) The gravitational wave energy in this region is generally distributed in the range of 0.2 to 1.2 J/m³, with an average value of about 0.8 J/m³, and the potential energy is generally distributed in the range of 0.03 to 0.5 J/m³, with an average value of about 0.2 J/m³. (2) For the vertical wavelength, 90% of the samples are within the range of 1 to 2.5 km, and more than 50% of the samples are within the range of 2 to 2.5 km. The average wavelength is about 1.8 km. The horizontal wavelength is mainly distributed in the range of 200 to 800 km, with an average of about 600 km. The ratio of vertical wavelength to horizontal wavelength of gravity wave is very small, and the gravity wave propagates horizontally in the stratosphere. (3) There are obvious main propagation directions in the ascending and descending sections of most stations, but the characteristics of the main propagation directions are not the same. The northwest ward propagation prevails, followed by the northward propagation. This new type of data are suitable for the observation and analysis of gravity wave in the lower stratosphere. The data in the descending section can play an important role in the intense observations of gravity wave events. There are some differences between the results obtained in the ascending section and the descending section, but the differences in other parameters are small except for the horizontal propagation direction, and the results in the descending section are generally large except for the energy.

Key words Lower stratosphere, Gravity wave, Round-trip sounding data, Drop sounding

摘 要 利用2018年6月9日—7月10日安庆、长沙、赣州、南昌、宜昌、武汉6个探空站的往返式探空观测试验数据, 研究分析了重力波参数(能量密度、固有频率、波长及传播方向), 统计了试验地区6—7月的重力波特征, 比较了各站之间以及上升与下降段之间重力波的差异。主要结果如下: (1) 该区域重力波动能分布在0.2—1.2 J/m³, 平均约为0.8 J/m³, 势能分布在0.03—0.5 J/m³,

* 资助课题: 科技部重大自然灾害监测预警与防范重点专项(2018YFC1506201、2018YFC1506204)、国家重点研发计划项目(2016YFC0401003)、国家自然科学基金重点项目(41430425)。

作者简介: 杨晨义, 研究方向为云降水物理。E-mail: yangchy14@lzu.edu.cn

通信作者: 郭启云, 研究方向为探空关键技术研究及应用。E-mail: feng_cloudy@163.com

平均约为 0.2 J/m^3 。(2)垂直波长中 90% 样本分布在 1—2.5 km, 超过 50% 的样本分布在 2—2.5 km, 平均波长为 1.8 km 左右; 水平波长分布范围 40—1500 km, 主要集中在 200—800 km, 平均 600 km, 重力波垂直波长与水平波长的比值很小, 在平流层重力波以水平传播为主。(3)大部分站点的上升和下降段结果均存在比较明显的主要传播方向, 但主要传播方向特征并不一致, 以西北方向传播最多, 其次是北向传播。这种往返式探空数据适用于下平流层重力波的观测与分析, 下降段资料起到对重力波事件的加密观测作用。上升与下降段所获得的结果存在一定差异, 但除水平传播方向外, 其余参数差别较小, 除能量外, 其余参数在下降段结果偏大。

关键词 下平流层, 重力波, 往返式探空资料, 下投探空

中图法分类号 P401

1 引言

重力波普遍存在于地球大气中, 且具有全球效应。其时、空尺度范围较大, 水平波长从十几到几千千米, 周期从几分钟到几天。一些研究指出, 重力波不仅是稳定大气受到激发的产物, 同时也是影响一些中尺度过程发生、发展的因子。在中层大气中, 重力波的传播及其动力学效应在决定大气环流的基本性质方面起重要作用。然而, 目前对于重力波的发生、发展机制及其对天气过程的反馈机制了解还十分有限, 在具体业务中使用重力波进行预报也比较困难。为了了解重力波的形成及各种作用机制并模拟重力波, 则需要重力波的活动、分布、变化等气候学特征信息, 这些特征可以通过对观测资料进行分析得到。目前, 在研究重力波时采用的观测手段主要有: 遥感观测 (Preusse, et al, 2002; McLandress, et al, 2000; Tsuda, et al, 2000; Taylor, et al, 1998)、无线电探空观测 (卞建春等, 2004; 吴泓锟等, 2019; Bai, et al, 2016; Pramitha, et al, 2016)、火箭观测 (Eckermann, et al, 1995; 王博等, 2017)、飞机观测 (Alexander, et al, 2000), 由于重力波波源的多样性及其在传播过程中背景场垂直结构的复杂性, 大气中的重力波在时间和空间上的变化尺度非常大, 每一种观测手段只能获取重力波的部分频段特征, 而无法获取全貌 (Alexander, et al, 2010)。

常规高空气象探测作为综合气象观测的重要组成部分 (郭启云等, 2018a), 不仅满足天气、气候分析的需求 (郭启云等, 2018b), 还是地基遥感的相对参考。在下平流层区域内的高空气球探测主要有两类: 气象背景要素高空气球和大气成分气球探空。目前, 绝大多数气象背景要素高空气球探测在下平流层区域仅仅提供比较可靠的风和温度资料。将高分辨率的垂直探空资料用于分析重力波

特征, 最初由 Kitamura 等 (1989) 提出并使用, 他们利用探空资料计算风速与温度的扰动, 并根据所得到的扰动计算出了一系列的重力波参数。卞建春等 (2004) 和 邓少格等 (2012) 曾详细推导并描述了这一方法的物理意义。这种方法被广泛使用并在以后的各种研究中不断改进, 如 Zhang 等 (2005) 曾对武汉附近站点的数据进行过分析, 并比较了中、低纬度地区的结果; 马兰梦等 (2012) 曾使用提取出的重力波参数进行了动量通量相速度谱的分析; 王丽吉等 (2018) 使用扩展经验正交函数 (EEOF) 取代了原有的多项式拟合法, 对热带下平流层行星波和重力波扰动进行了分离。此外, 吴泓锟等 (2019)、白志宣等 (2016) 也使用上述方法开展了一些研究。

文中所使用的高垂直分辨率往返式探空系统在传统上升探空观测的同时可以利用下降段进行类似“逆上升”的探测进行空间加密, 一定程度上解决了传统无线电探空观测的密度问题, 并且由于其具有的高垂直分辨率, 能够更敏锐地捕捉波动的特征。

2 资料与方法

2.1 往返式探空观测资料

选用的探空观测资料来自新研发的往返探空系统, 该系统可以实现“上升段 (约 1 h)—平漂段 (约 4 h)—下降段 (约 1 h)”3 个阶段共计 6 h 左右的长时效观测。其下降段可以起到加密观测的作用, 且经过验证下降段数据的质量与上升段相近 (郭启云等, 2018a), 平漂段可以弥补平流层—对流层较长时效连续直接观测的空白。且由于夏季平漂距离 (放球结束点距放球站距离) 约为 300 km, 文中认为可以视上升段和下降段所测得的结果来自同一个重力波事件, 并且由于主要分析的是区域统计特征, 即使上升段和下降段所测得的不是同一个重力波事件, 但其得出的夏季区域统计结果也具有相近特征。

文中仅选取往返式探空系统的上升段和下降段的数据,由中国东南部的6个探空站观测试验提供,这6个站为安庆、长沙、赣州、南昌、宜昌、武汉(图1)。时间跨度为2018年6月9日到2018年7月10日。该数据每日采集两次,分别为07和19时(北京时,下同)。数据中所有参数的时间分辨率为2 s。由于气球的上升和下降速度不是均匀不变的,且在下降段气球爆炸后最初的几秒仪器降落速度较快,2 s内的垂直高度变化过大,所以将所有变量都插值成50 m间隔。

文中下平流层的下边界由对流层顶确定,上边界由气球的探测高度确定。考虑到6个站点位于较低纬度地区,对流层顶接近18 km高度,以及Allen等(1995)建议的常用分析高度,文中选取18—25 km的高度进行该地区下平流层的重力波特征分析。数据经过质量控制,剔除了一部分不可信数据,范围内剩余数据为有效数据,各站点上升段和下降段

可以使用的数据总量如表1所示。从表1可以看到,在廓线总数相近的前提下各站点下降段的数据总量相较于同站点的上升段要少很多,这是因为选取的下平流层高度较高,在该高度范围内下投探空仪多具有很高的速度,垂直分辨率与测量精度都会受到很大影响,这与Gardner等(1993)的结论较为一致。

2.2 研究方法

以往对重力波的研究多采用小波分析法(覃卫坚等, 2010; 郝立生等, 2006; 万明波等, 2006),或根据物理量的空间分布特征直观判断波动特征参数和传播方向(许小峰等, 2003; 龚佃利等, 2005; 张勇等, 2008),进而分析其产生机制及其和天气现象演变的关系。但这些传统分析方法均不能够准确反映大气重力波的实际特征(邓少格等, 2012)。文中利用温度廓线和风廓线提取重力波参数进而分析大气重力波实际特征,该方法能够较为准确地描述重力波特征。卞建春等(2004)和邓少格等(2012)

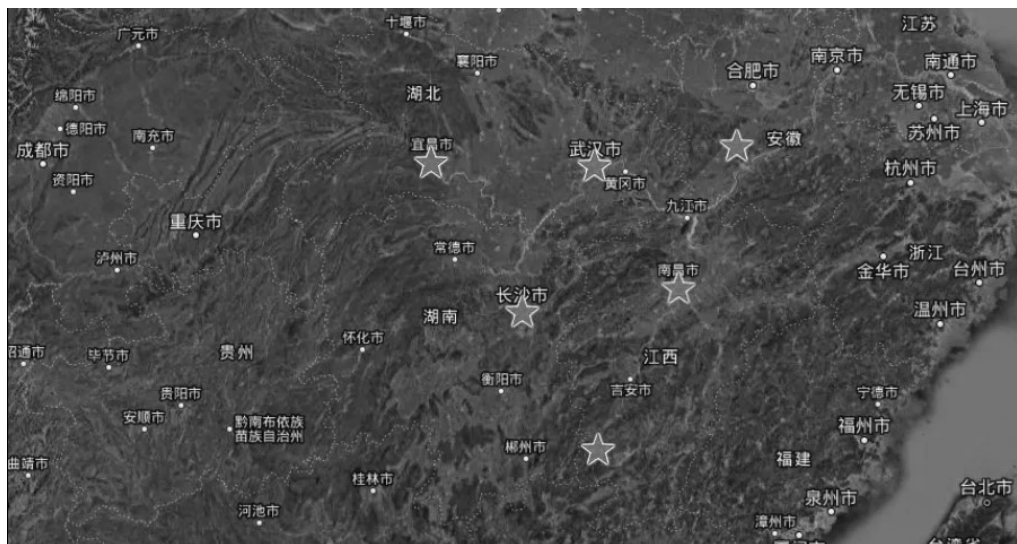


图1 探空资料的站点分布(五角星表示)

Fig. 1 Distribution of stations (pentagram) where sounding data are used in this study

表1 探空站点信息及测量阶段的数据总量和廓线数

Table 1 Information of 6 sounding stations and effective samples in two measurement stages

站点	纬度(°N)	经度(°E)	上升数据总量/廓线数	下降数据总量/廓线数
安庆	30.6	117.1	28168/59	10889/57
长沙	28.3	112.9	25272/63	8426/55
赣州	25.9	114.9	24994/59	8961/53
南昌	28.7	115.9	28518/63	10333/63
宜昌	30.7	111.3	26769/63	10248/56
武汉	30.6	114.3	27122/63	8740/61

曾详细推导并描述了这一方法的物理意义,这里只简要介绍。

该方法利用探空数据中的经向风速(u)、纬向风速(v)、温度(T)3个变量,首先将原始资料进行3次样条插值得到分辨率为50 m的垂直廓线,并采用二阶多项式拟合的方法提取各自的背景廓线($\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{T}$),背景场中包含了局地大尺度动力学气候特征和大尺度波动;并且认为原廓线相较于背景场的偏差(u' 、 v' 、 T')是由各个频段的重力波叠加造成的。这其中,温度扰动(T')需要与背景温度($\bar{T}$)共同得出归一化温度扰动($\hat{T}'$),即 $\hat{T}'(z) = T'/\bar{T}$ 。

(1) 重力波能量

重力波能量由重力波动能和重力波势能组成,由于6个站在选定的下平流层内空气密度不同,因此需要引入空气密度(ρ)来计算单位体积内的重力波能量,计算公式为

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

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

式中, E_k 为重力波动能, E_p 为重力波势能。 $\overline{u'^2}$ 和 $\overline{v'^2}$ 表示在选定高度范围内水平风速扰动量的平均值。由于风速垂直分量与水平分量相比要小很多,同时风速垂直分量难以测量,所以式中未考虑垂直方向风速扰动对重力波能量的贡献。 N 为 Brunt-Vaisala 频率。 N 和 ρ 都可由探空资料计算得到, g 为重力加速度。

(2) 垂直波长

$$\lambda_z = 2\pi/m \quad (3)$$

式中, m 为重力波的主要垂直波数,通过 Yule-Walker 最大熵谱分析方法得到归一化温度扰动($\hat{T}'$)的垂直波数功率谱分布,并选取功率密度最大值的垂直波数作为重力波的主要垂直波数。

(3) 固有频率

$$\frac{\hat{\omega}}{|f|} = R = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

计算重力波固有频率($\hat{\omega}$)的常用方法为椭圆拟合法。式中, λ_1 、 λ_2 分别为拟合椭圆长轴和短轴半径的平方,可对水平风速扰动量(u' 、 v')进行主分量分析得到。

(4) 水平波长

$$\lambda_h = 2\pi/k_h \quad (5)$$

$$k_h^2 = \frac{(\hat{\omega}^2 - f^2)m^2}{N^2} \quad (6)$$

式(5)中, k_h 为重力波水平波数,可由频散关系(式(6))得到。

(5) 传播方向

重力波垂直传播方向可通过水平风速廓线的旋转方向来确定,水平传播方向一般使用拟合椭圆法确定。在北半球,如果水平风速扰动廓线的旋转方向为顺时针方向则重力波能量向上传播,反之则向下传播。

$$\tan\alpha = \left[\overline{v'^2} - \overline{u'^2} + \sqrt{(\overline{u'^2} - \overline{v'^2})^2 + 4\overline{u'v'}} \right] / 2\overline{u'v'} \quad (7)$$

式中, α 为从 x 轴开始逆时针旋转至椭圆长轴方向的夹角。但其存在 180° 不确定性,由于纬向风扰动与温度扰动之间存在 $\pi/2$ 的相位差,因此需要利用归一化温度扰动量的垂直梯度与纬向风扰动(u')乘积的符号来消除此不确定性(Vincent, et al, 2000)。

3 结果分析

重力波根据波源的不同可以分为地形重力波与非地形重力波(以深对流触发为主)。文中所选取的6个站中赣州、宜昌海拔高度比周边地区高,其余4个站都处在较为平坦的地带,并且其周围都存在海拔最高不超过1000 m的山脉。意味着这6个站所在地区都存在一定的海拔高度差,为触发地形重力波提供了一定条件,但地形高度普遍较低,激发能够传播至平流层的重力波比较困难。由于对流活动也能激发重力波(Hoffmann, et al, 2013),这里同样也对产生对流重力波的条件进行了分析。对流是一个比较复杂的物理过程,在发生时往往会伴随着大气层结和风切变的相互作用以及潜热释放等一系列现象,温度层结对对流的限制作用以及风垂直切变对对流的促进作用的相对大小决定了对流是否能够发展起来,这就使得对流激发重力波的机制相较于地形重力波更为复杂。目前,常见的对流源激发重力波机制主要为障碍作用(Lane, et al, 2001)、机械振荡(Fovell, et al, 1992)和纯热源(Alexander, et al, 1995),并且这3种激发机制相互作用会促进对流重力波的激发,各个机制的相对重要性主要受局地风切变、潜热等因素的影响(Lane, et al, 2008)。由于对流源激发重力波的机

制相对复杂,且以往的研究表明重力波活动与对流强度的相关性较好,文中选择分析对流产生的条件进而判断对流重力波存在的可能,并且确保波动在因不稳定性破碎或者因多普勒频移作用吸收前被探空观测所捕捉到。因大气热力层结在很大程度上决定了对流活动是否能够形成发展,这里选择浮力频率(N^2)表征大气层结稳定度,通过分析浮力频率来判断是否存在通过深对流活动激发重力波的条件。经过计算发现,几乎所有的样本都具有不稳定层结,各站点均有约一半的样本具有能够延伸至下平流层的不稳定层结。相较于比较平坦的地形,研究区域内的对流条件较好,所以认为本研究中所提取的重力波主要为对流性重力波。

为了确保所提取的扰动为重力波,在提取重力波参数前还进行了功率谱分析(图略),发现各次试验得到的波谱都随着频率增大分别存在能量衰减率约为 -3 和 $-5/3$ 次幂的阶段,对应了重力波能量衰减率和惯性副区能量衰减率,并且在这两阶段中

间存在间歇区,与典型的重力波谱特征一致,表明提取的是重力波特征参数,并且该参数是可靠的(斯塔尔, 1991; Sun, et al, 2015)。

3.1 能量密度

重力波的能量密度大小表征了重力波活动的强弱,对选取的6个站在试验期间的势能、动能、总能量和动能势能比变化特征进行统计(图2)可以看出,各个站因具体试验情况的不同,总成功试验次数不同,但都有50次左右。

图2中的三条浅蓝线分别代表动能、势能和总能量,橙红线代表能量的比值。各站上升段所测得的3种能量变化相对较为平稳,动能分布在 $0.4\text{--}1.2\text{ J/m}^3$,平均值约为 1.0 J/m^3 ;势能分布在 $0.03\text{--}0.5\text{ J/m}^3$,平均值约为 0.2 J/m^3 。因动能比势能大得多,使得总能量曲线与动能曲线趋势相近,只是量值略大,动势能比为 $2\text{--}6$,但也有个别试验比值在2以下或8以上,说明该地区重力波以惯性重力波而非纯重力波为主。下降段测出的重力波能量波

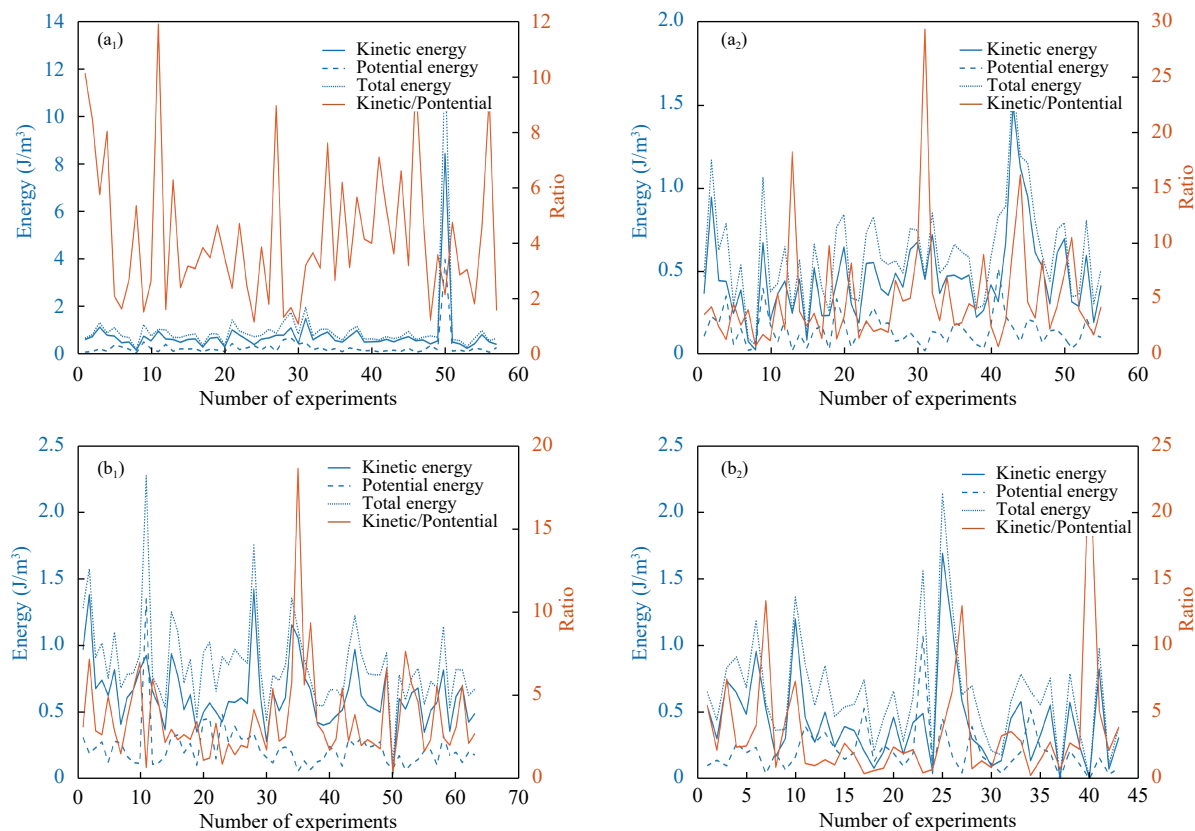
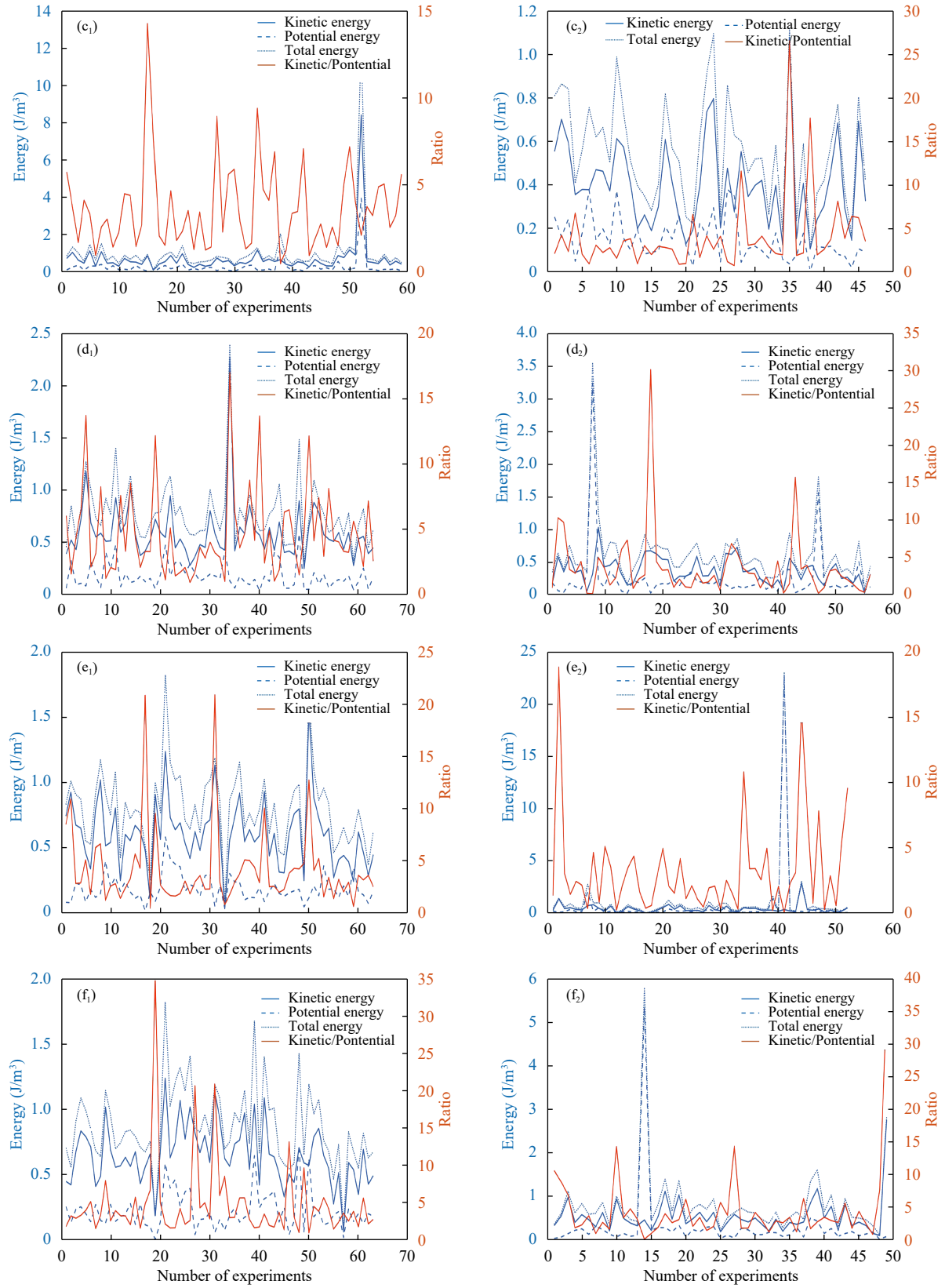


图2 6个站上升段($a_1\text{--}f_1$)和下降段($a_2\text{--}f_2$)下平流层重力波能量密度(a. 安庆, b. 长沙, c. 赣州, d. 南昌, e. 武汉, f. 宜昌)

Fig. 2 Energy density of gravity wave in the lower stratosphere in the ascending ($a_1\text{--}f_1$) and downcast ($a_2\text{--}f_2$) sections of 6 stations (a. Anqing, b. Changsha, c. Ganzhou, d. Nanchang, e. Wuhan, f. Yichang)



续图 2

Fig. 2 Continued

动情况与上升段相近,但更为平稳,量值略小于上升段。动能分布在 $0.2\text{--}1\text{ J/m}^3$, 平均值约为 0.5 J/m^3 , 势能分布在 $0.02\text{--}0.4\text{ J/m}^3$, 平均值约为 0.2 J/m^3 , 动势能比在 5 附近变化。该区域不同站的能量密度特征及变化的差异较小,可能是所选取的站较为接近造成的(经纬度差异均不足 5°)。比较两阶段结果发现,下降段所提取的能量整体小于上升段,这可能是下降段垂直分辨率相对上升段较低,因而漏掉了一些小尺度的重力波。后文分析垂直和水平波长时同样会考虑该因素的影响。文中 6 个站结果都与以往研究(白志宣等, 2016)中宜昌站结果接近,说明本研究提取的重力波能量密度参数是合理的。

3.2 垂直波长

利用 Yule-Walker 最大熵谱分析方法得到归一化温度扰动($\hat{T}$)的垂直波数功率谱分布,并选取功率密度最大值的垂直波数作为重力波的主要垂直

波数(m),从而得出下平流层重力波垂直波长。从 6 个站重力波垂直波长频数分布以及最大(小)值和平均值(图 3)可以看出,所有站的垂直波长最小值为 0.20 km 、最大值为 2.73 km , 90% 的样本分布在 $1.0\text{--}2.5\text{ km}$, 50% 的样本分布在 $2.0\text{--}2.5\text{ km}$, 平均波长为 1.8 km 左右。从整体来看,各站垂直波长的分布范围以及平均值没有明显差异,下降段所测得的垂直波长各值均略大于上升段。这一结果与 3.1 节提出的推测相符,即下降段垂直分辨率相对较低,致使漏掉一些小尺度的重力波。结果还显示,重力波垂直波长的频数分布以 1.5 km 为界有两个峰值,分别位于 1 和 2 km 处。

3.3 固有频率

计算重力波固有频率(ω)的常用方法为椭圆拟合法,扰动矢量拟合椭圆的长短轴之比即为重力波固有频率。由以往的研究(卞建春等, 2004)可知,资料中存在的许多随机扰动会干扰固有频率的计

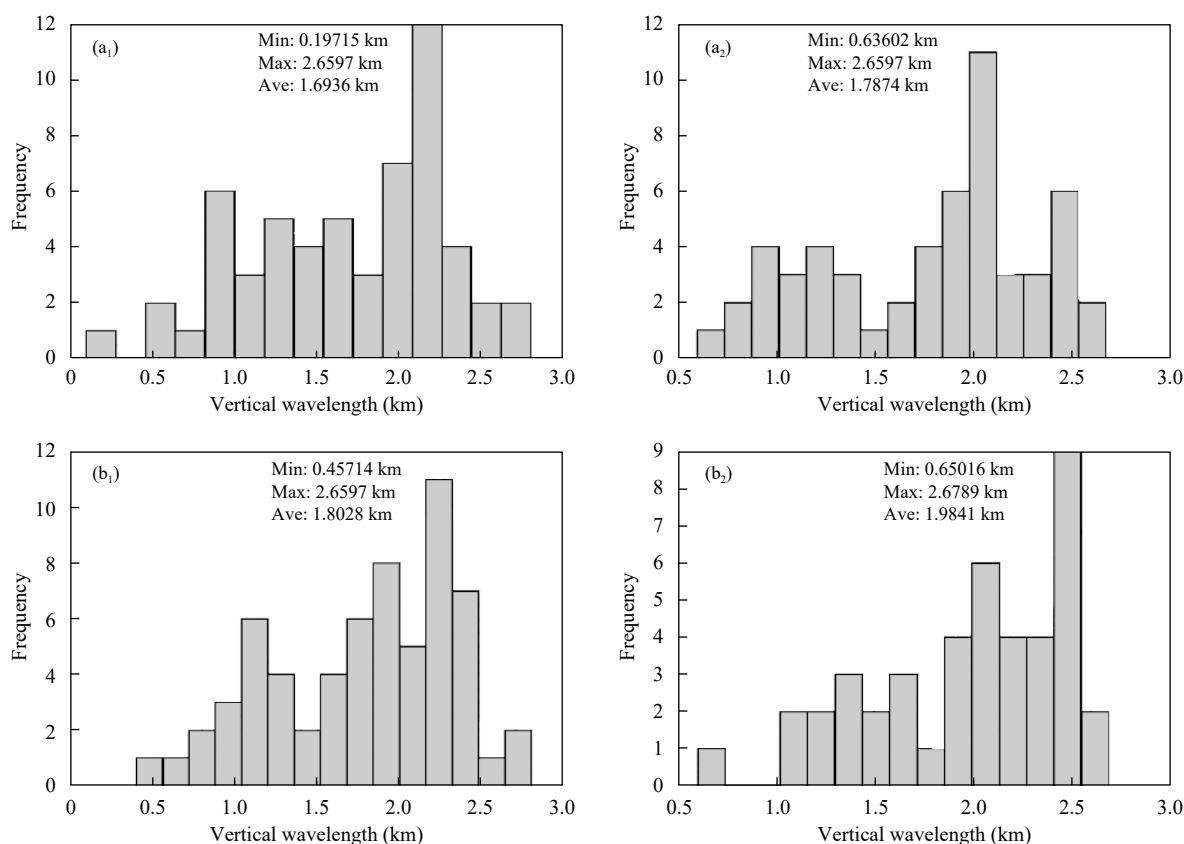
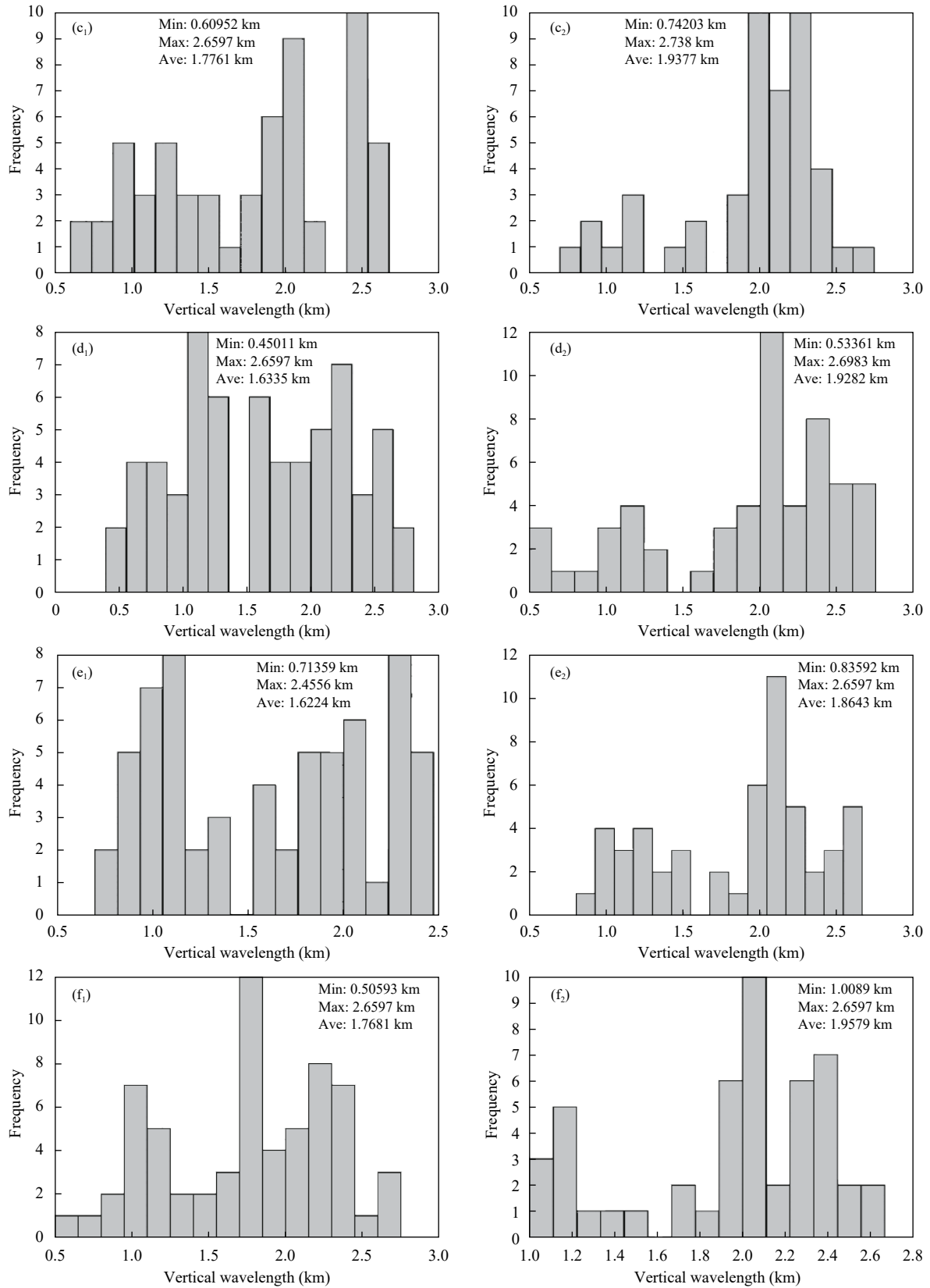


图 3 6 个站上升段($a_1\text{--}f_1$)和下降段($a_2\text{--}f_2$)下平流层重力波垂直波长频数分布
(a. 安庆, b. 长沙, c. 赣州, d. 南昌, e. 武汉, f. 宜昌)

Fig. 3 Vertical wavelength frequency distribution of gravity wave in the lower stratosphere in the ascending ($a_1\text{--}f_1$) and downcast ($a_2\text{--}f_2$) sections of 6 stations (a. Anqing, b. Changsha, c. Ganzhou, d. Nanchang, e. Wuhan, f. Yichang)



续图 3

Fig. 3 Continued

算,文中在主成分分析前对水平风速扰动量进行滤波处理以得到更加精确的计算结果。利用上述垂直波长的分析结论,采用巴特沃斯带通滤波方法保留波长为1—2.5 km的波,计算滤波前后的固有频率。图4为滤波前6个站的频数分布,图5为滤波后的频数分布。可以发现,滤波后结果有向大值方向移动的特征。滤波前固有频率主要分布在 $1.2\sim 2f$,平均值为 $1.7f$;滤波后固有频率的最小值仍为 $1.2f$ 左右,但最大值明显增大,较大值分布频数也明显增多,大部分分布在 $1.2\sim 4f$,平均值增大至 $2.0f$ 左右,表明试验区域重力波以惯性重力波为主。比较上升和下降段结果可以发现,部分站点下降段所测得的固有频率分布同样有向大值方向移动的特征,平均值也有所增长。此结果比北京站(卞建春等,2004)略大,与王雪莲(2006)和白志宣等(2016)的研究中固有频率与地转参数的比值随纬度增加有缓慢减小的趋势相符。

上述结果表明,滤波前、后固有频率的分布变化比较明显,因此计算前应进行必要的滤波处理才能够获得更为准确的固有频率;上升与下降段结果同样存在一定差异但较小。

3.4 水平波长

从6个站上升和下降段测得的下平流层重力波水平波长频数分布(图6)可以看到,下平流层水平波长在40—1500 km内均有分布,集中分布在200—800 km,平均值约为550 km。水平波长与垂直波长比约为250:1,表明平流层重力波在垂直方向的夹角极小,主要在水平方向传播,这也是惯性重力波能够传播到距离波源极远地方的原因,与北京(卞建春等,2004)、四川(吴泓锟等,2019)、华北地区(Chen, et al, 2019)的结果相似,但平均值略有不同,且各站之间差异较小。说明尽管在夏季一般存在约为300 km的平漂距离,下降段数据也能起到对重力波事件的加密观测作用。

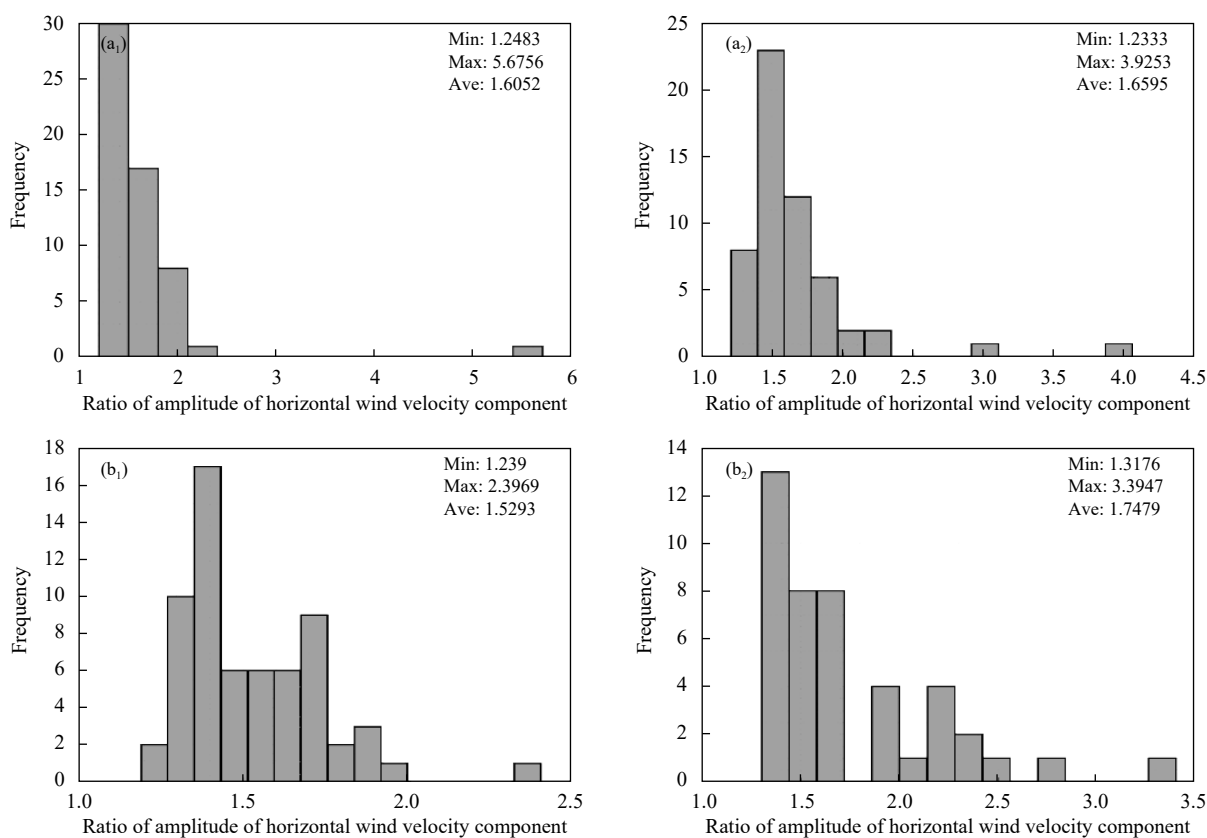
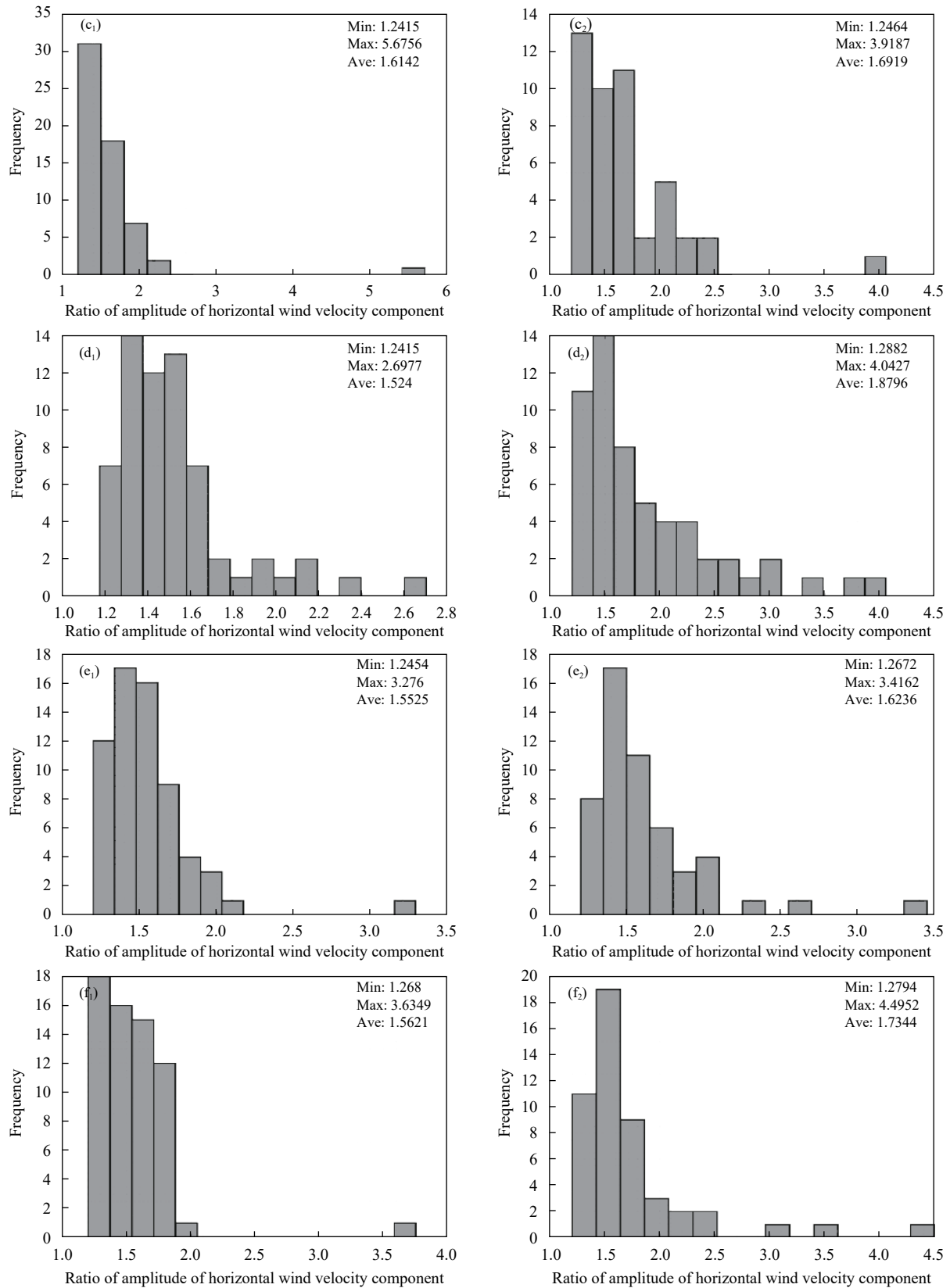


图4 滤波前6个站上升段(a_1-f_1)和下降段(a_2-f_2)下平流层重力波固有频率频数分布

(a. 安庆, b. 长沙, c. 赣州, d. 南昌, e. 武汉, f. 宜昌)

Fig. 4 Natural frequency distribution of gravity wave in the lower stratosphere (before filtering) in the ascending (a_1-f_1) and downcast (a_2-f_2) sections of 6 stations (a. Anqing, b. Changsha, c. Ganzhou, d. Nanchang, e. Wuhan, f. Yichang)



续图 4

Fig. 4 Continued

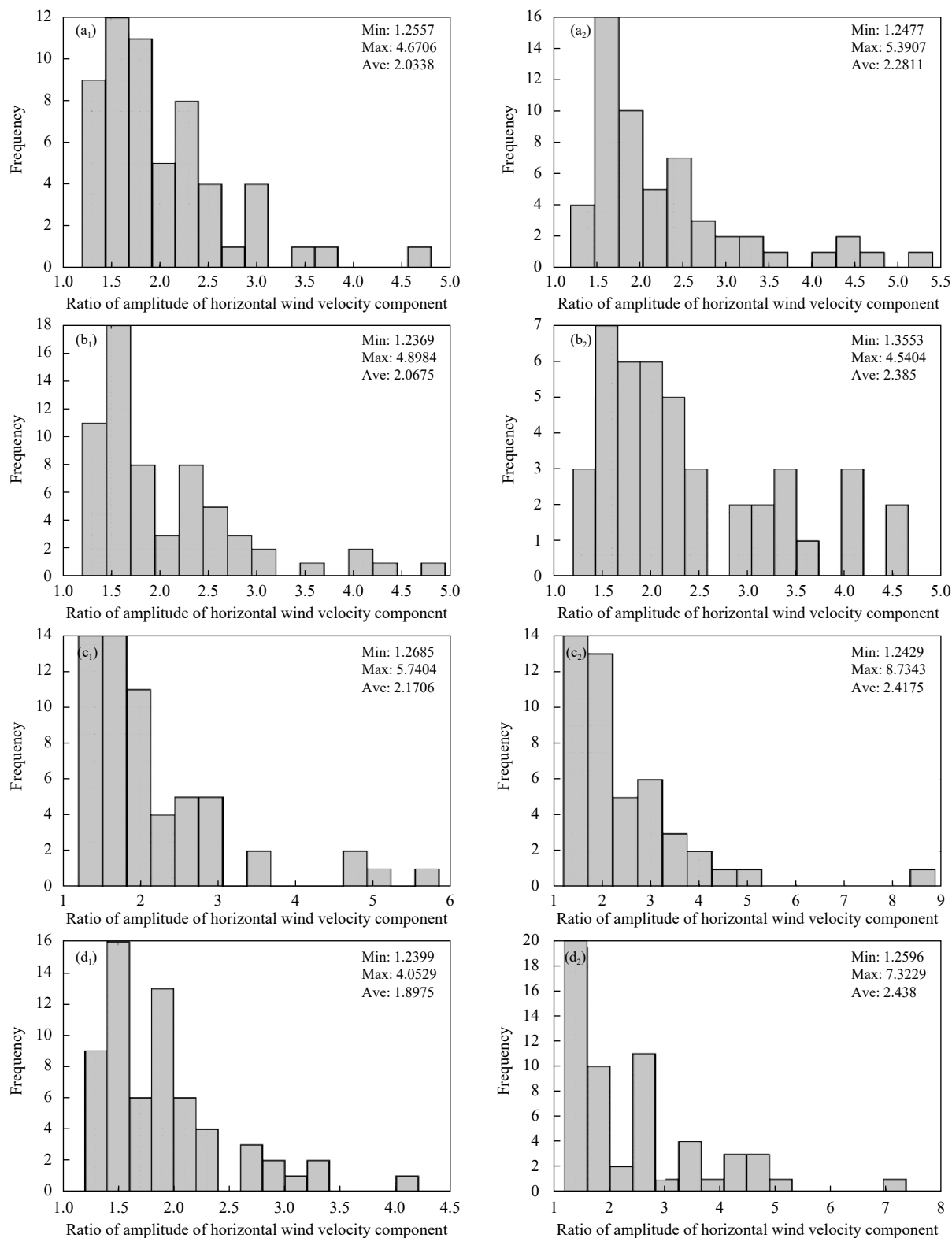
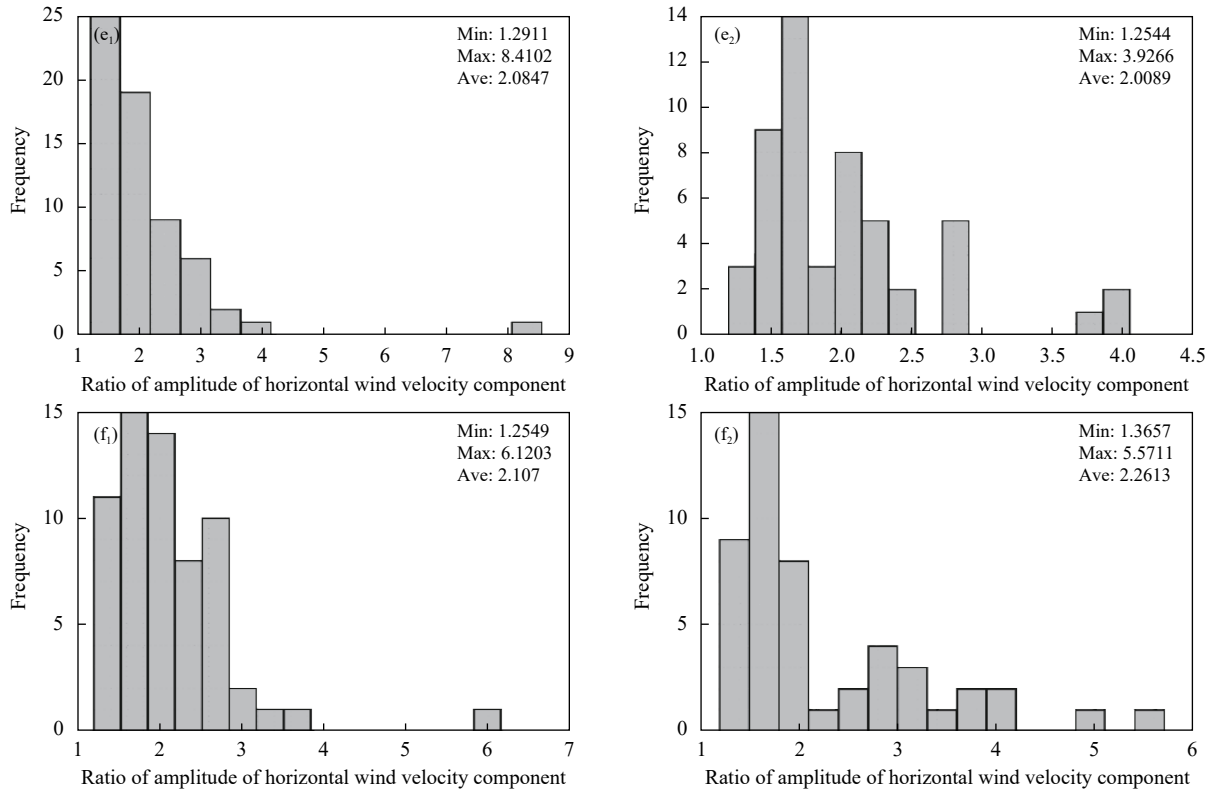


图 5 滤波后 6 个站上升段 (a₁—f₁) 和下降段 (a₂—f₂) 下平流层重力波固有频率频数分布

(a. 安庆, b. 长沙, c. 赣州, d. 南昌, e. 武汉, f. 宜昌)

Fig. 5 Natural frequency distribution of gravity wave in the lower stratosphere (after filtering) in the ascending (a₁—f₁) and downcast (a₂—f₂) sections of 6 stations (a. Anqing, b. Changsha, c. Ganzhou, d. Nanchang, e. Wuhan, f. Yichang)



续图 5

Fig. 5 Continued

3.5 传播方向

重力波垂直传播方向一般可通过水平风速廓线的旋转方向来确定,分别分析各站的水平风速廓线旋转方向发现,2018年6月9日到2018年7月10日,6个站下平流层重力波能量垂直上传播的概率均大于90%,且各站结果之间无显著差异。说

明下平流层重力波在垂直方向上主要是向上传播,与之前的一些研究(卞建春等,2004; Zhang et al, 2007, 2010)结果一致。

图7为6个站下平流层重力波水平传播方向频数分布,扇形的方向表示水平传播方向,扇形的大小表示出现在这个方向范围内的频数,扇形越大表

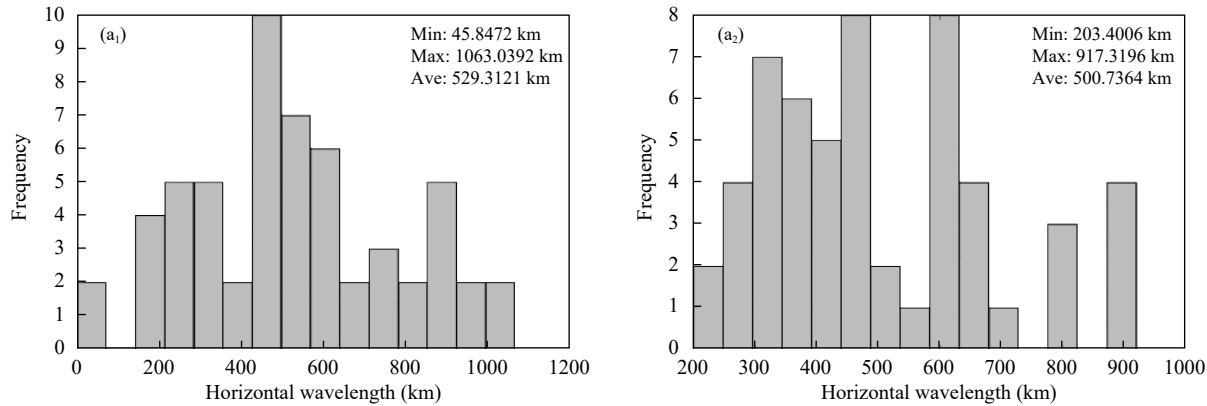
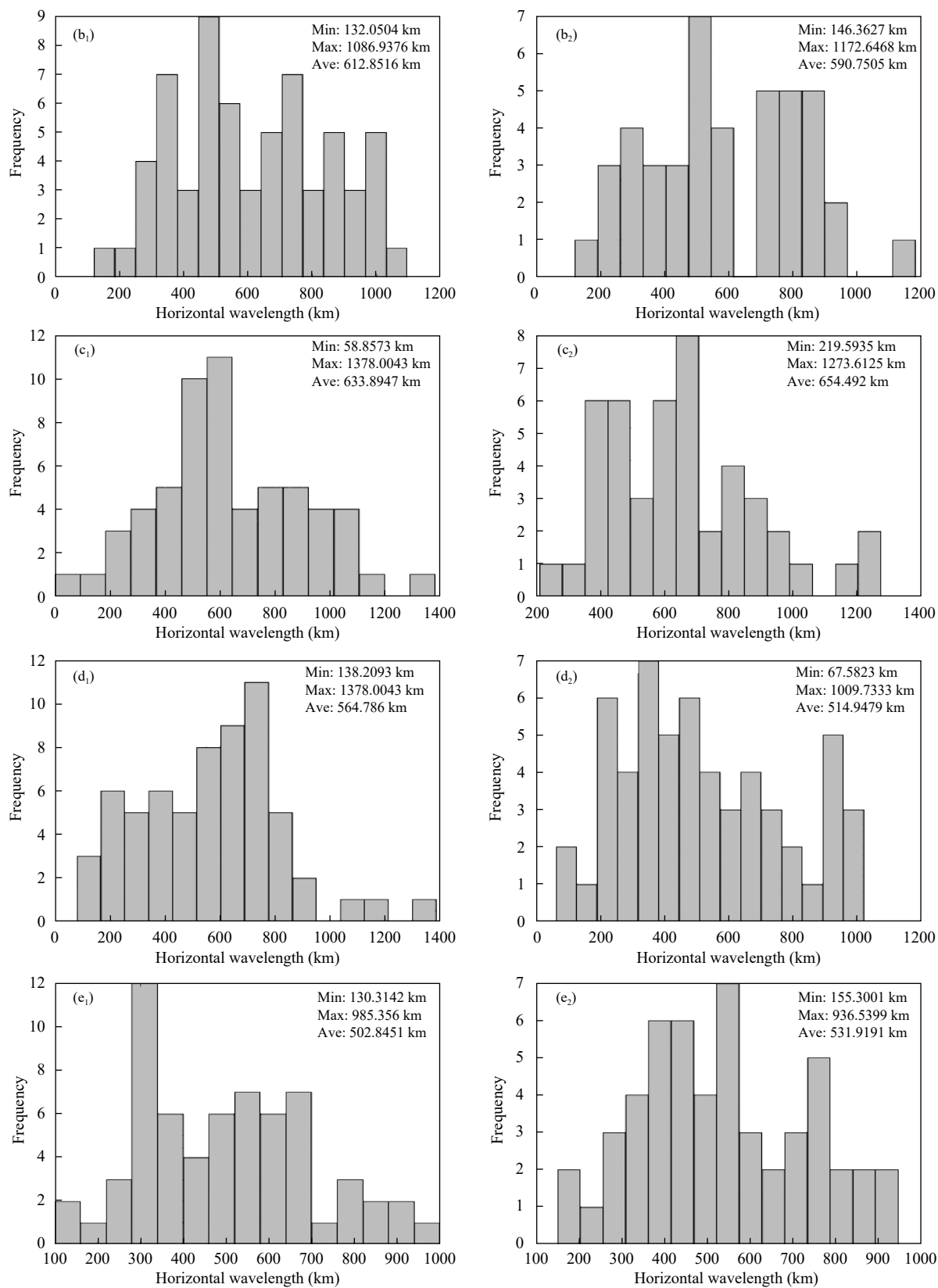


图 6 6个站上升段(a₁—f₁)和下降段(a₂—f₂)下平流层重力波水平波长频数分布

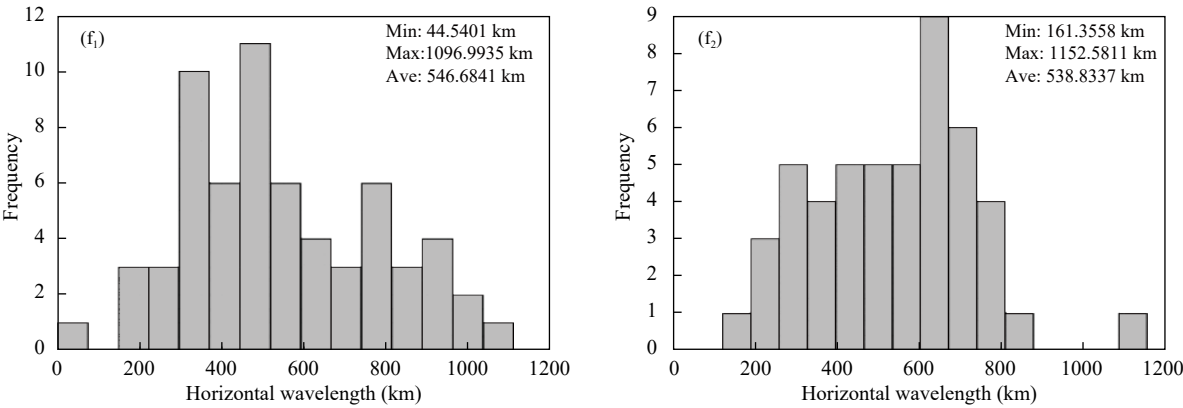
(a. 安庆, b. 长沙, c. 赣州, d. 南昌, e. 武汉, f. 宜昌)

Fig. 6 Horizontal wavelength frequency distribution of gravity wave in the lower stratosphere in the ascending (a₁—f₁) and downcast (a₂—f₂) sections of 6 stations (a. Anqing, b. Changsha, c. Ganzhou, d. Nanchang, e. Wuhan, f. Yichang)



续图 6

Fig. 6 Continued



续图 6

Fig. 6 Continued

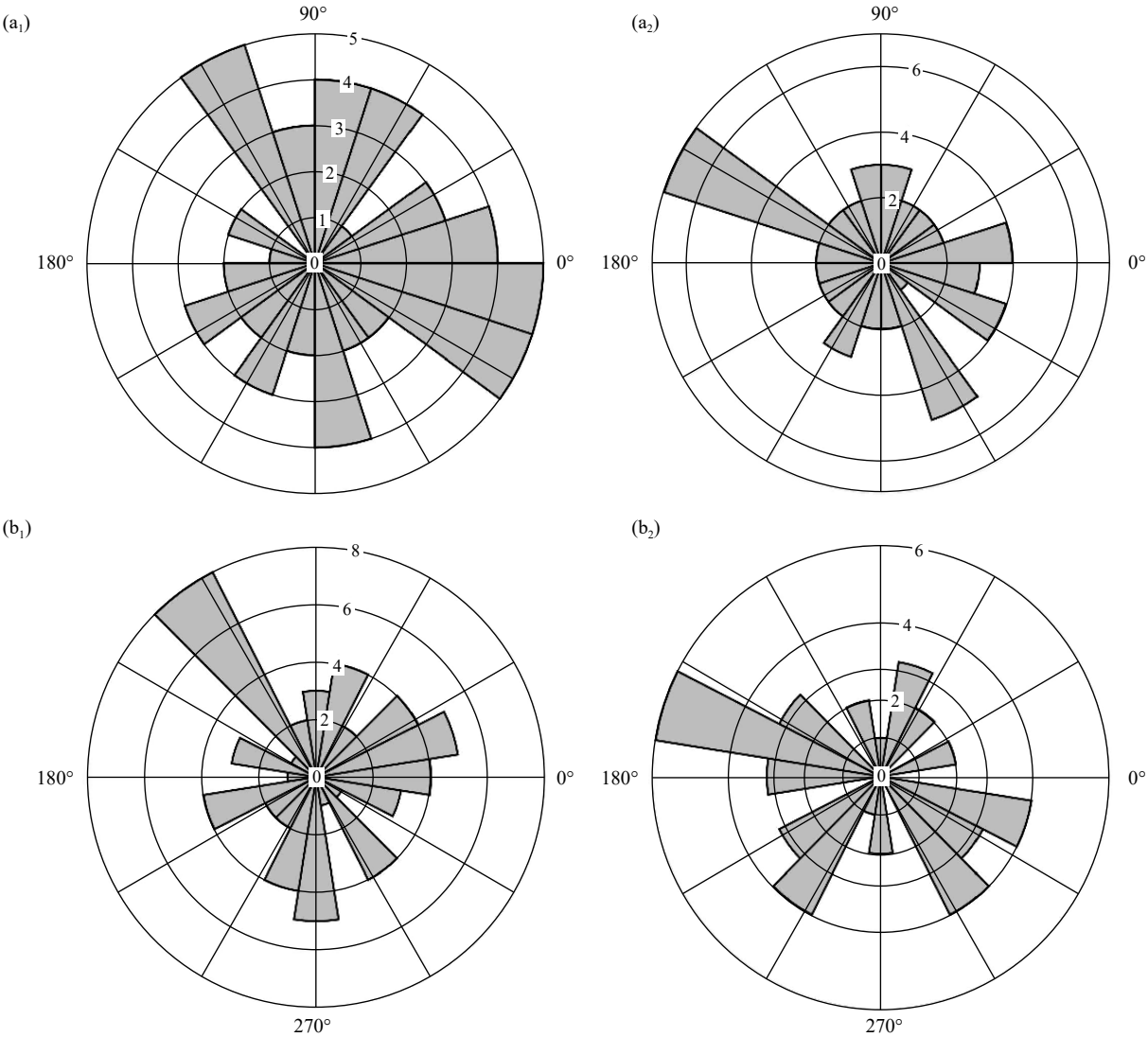
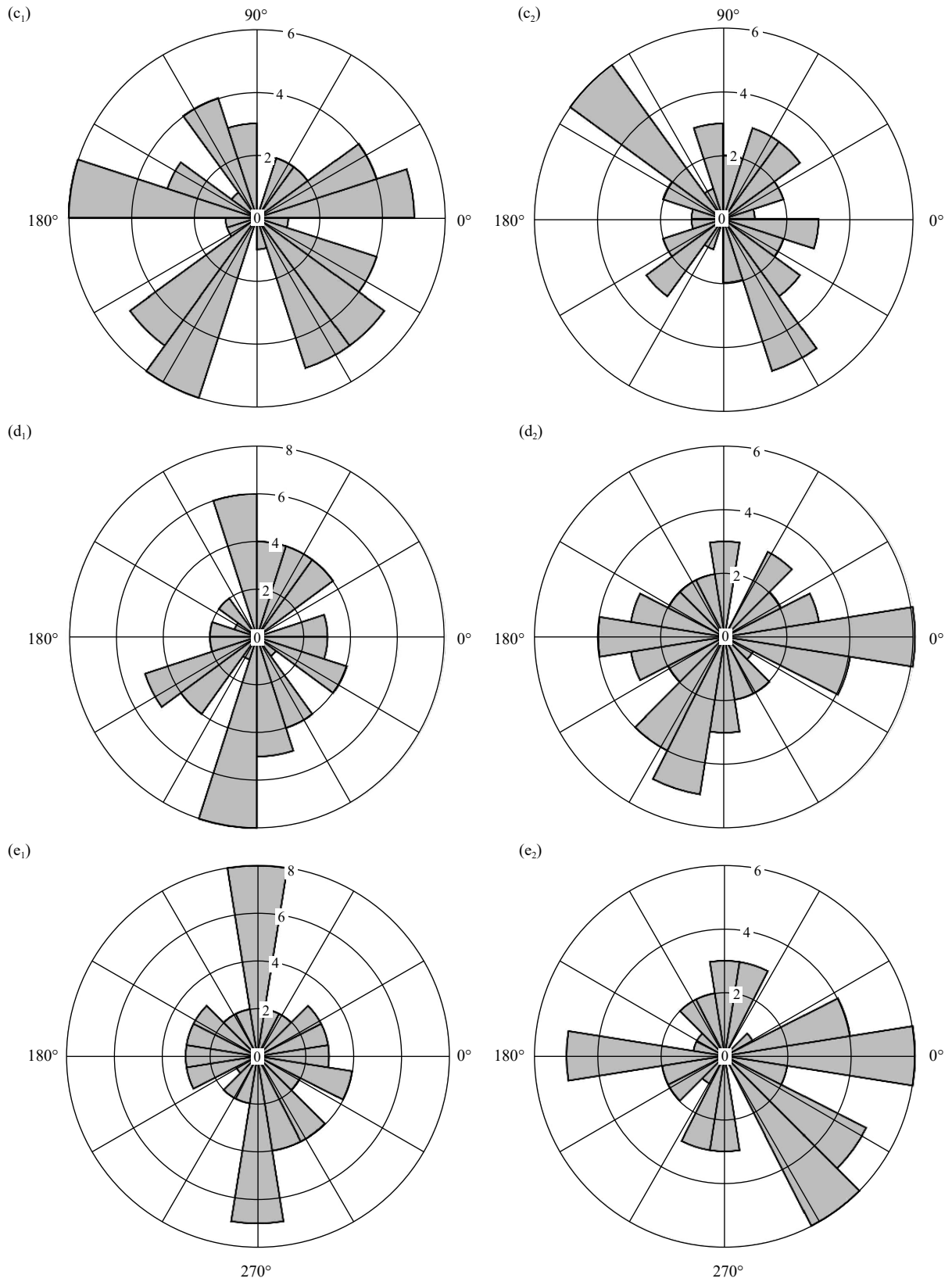


图 7 6 个站上升段 (a₁—f₁) 和下降段 (a₂—f₂) 下平流层重力波传播方向频数分布

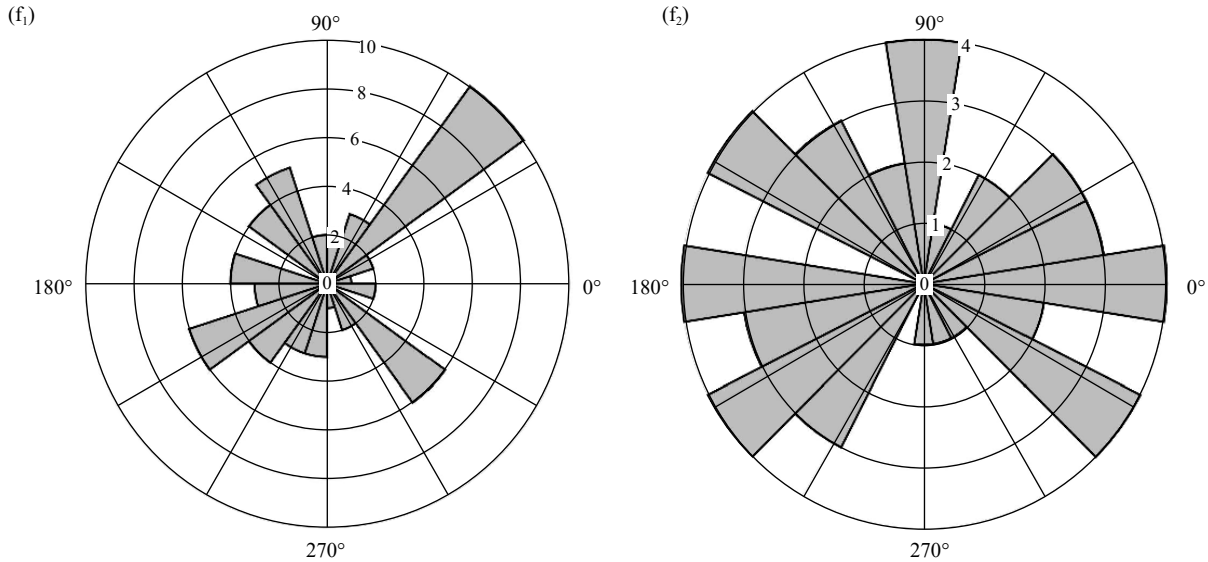
(a. 安庆, b. 长沙, c. 赣州, d. 南昌, e. 武汉, f. 宜昌)

Fig. 7 Frequency distribution of gravity wave propagation directions in the lower stratosphere in the ascending (a₁—f₁) and downcast (a₂—f₂) sections of 6 stations (a. Anqing, b. Changsha, c. Ganzhou, d. Nanchang, e. Wuhan, f. Yichang)



续图 7

Fig. 7 Continued



续图 7

Fig. 7 Continued

示在这个方向范围内重力波传播的频率越高。从图中可以看出,与其他参数不同,两阶段所测得的水平传播方向特征差异较大,考虑到经过平漂过程后测量位置改变,气球与重力波的相对位置也有改变,这一结果是比较合理的。大部分站的上升段和下降段结果均存在比较明显的主要传播方向,但主要传播方向特征并不一致,以西北向传播最多,其次是北向传播。

4 结论与讨论

利用 2018 年 6 月 9 日到 2018 年 7 月 10 日安庆、长沙、赣州、南昌、宜昌、武汉 6 个站的往返式探空系统试验数据,提取重力波能量密度、固有频率、波长以及传播方向等参数,统计了试验地区 6—7 月的重力波特征,比较了各站之间以及重力波上升与下降段的差异。主要结论如下:

(1)该区域内下平流层重力波在日尺度上变化明显,并且重力波动能的量值远大于势能,动势能比为 2—6,总能量的曲线受重力波动能影响较大。不同站的能量密度特征及变化差异较小,上升段与下降段的差异也较小。

(2)该区域内下平流层重力波垂直波长与水平波长的比值很小,说明平流层重力波以水平传播为主,在垂直方向上的夹角极小,使得平流层重力波能够传播到相对较远的地方。同时说明尽管存在夏季一般约为 300 km 的平漂距离,但下降段数据

也能起到对重力波事件的加密观测作用,且无论是垂直波长还是水平波长,下降段结果均略大于上升段。

(3)滤波前后固有频率的分布变化比较明显,滤波后结果有向大值方向移动的特征,滤波前固有频率主要分布在 1.2—2 f,平均值为 1.7 f;滤波后固有频率的最小值仍为 1.2 f 左右,但最大值明显增大,较大值分布频数也明显增多,大部分分布在 1.2—4 f,平均值也增大至 2.1 f 左右。

(4)与其他参数不同,两阶段所测得的水平传播方向特征差异较大。大部分站上升段和下降段结果均存在比较明显的主要传播方向,但主要传播方向特征并不一致,以西北向传播最多,其次是北向传播。

因主要着眼于重力波的区域统计特征,所以文中将上升段和下降段的结果视为等效并进行了比较分析,但实际上这两阶段的结果存在一些差异,这在后续的工作中需要重点关注:(1)因平漂段的存在,上升段和下降段所处位置发生了改变,因夏季平漂距离(放球结束点距放球站距离)约为 300 km,认为可以考虑将上升段和下降段所测得的结果视为同一个重力波事件,并且认为两阶段结果应具有相近特征,除水平传播方向以外的其余参数的结果都比较支持这一假定。但冬季平漂距离相对较远,这时上升段和下降段的结果是否能近似认为源自于同一重力波事件仍有待讨论。(2)分析中发现能量和垂直波长的下降段结果存在相对于上

升段结果的整体偏移(偏大或偏小),在分析两阶段数据的差异时认为这可能是因为下降段速度明显偏大,其垂直分辨率偏低,因此相对于上升段会漏掉一些小尺度的重力波,从而影响到能量和垂直波长的统计特征,这一差异较小,但今后在进行其他方向的研究时可能不能忽略,如何在保证上升段高分时间分辨率的同时消除这种差异需要进一步讨论。

参考文献

- 白志宣, 卞建春, 陈洪滨等. 2017. 中国地区下平流层惯性重力波参数分布特征的资料分析. 中国科学: 地球科学, 60(2): 328-340. Bai Z X, Bian J C, Chen H B, et al. 2017. Inertial gravity wave parameters for the lower stratosphere from radiosonde data over China. Sci China Earth Sci, 60(2): 328-340 (in Chinese)
- 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 2004. 用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性. 中国科学 D 辑 地球科学, 34(8): 748-756. Bian J C, Chen H B, Lü D R. 2005. Statistics of gravity waves in the lower stratosphere over Beijing based on high vertical resolution radiosonde. Sci China Ser D Earth Sci, 48(9): 1548-1558
- 邓少格, 杨闻, 钟中等. 2012. 一种利用温度廓线与风廓线提取大气重力波参数的方法简介. 干旱气象, 30(4): 630-634. Deng S G, Yang W, Zhong Z, et al. 2012. Brief introduction of a method to extract atmospheric gravity wave parameters using temperature and wind profile. J Arid Meteor, 30(4): 630-634 (in Chinese)
- 龚佃利, 吴增茂, 傅刚. 2005. 一次华北强对流风暴的中尺度特征分析. 大气科学, 29(3): 453-464. Gong D L, Wu Z M, Fu G. 2005. Analysis of the mesoscale characteristics about a severe thunderstorm in North China. Chinese J Atmos Sci, 29(3): 453-464 (in Chinese)
- 郭启云, 杨加春, 杨荣康等. 2018a. 球载式下投国产北斗探空仪测风性能评估. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 10(5): 629-640. Guo Q Y, Yang J C, Yang R K, et al. 2018a. Evaluation of wind performance of domestic Beidou dropsonde of ball-loading. J Nanjing Univ Inf Sci Technol (Nat Sci Ed), 10(5): 629-640 (in Chinese)
- 郭启云, 杨荣康, 钱媛等. 2018b. 气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析. 气象, 44(8): 1094-1103. Guo Q Y, Yang R K, Qian Y, et al. 2018b. Full-range sounding comparison analysis of balloon borne rdiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending. Meteor Mon, 44(8): 1094-1103 (in Chinese)
- 郝立生, 李新, 李月英. 2006. 太阳活动变化的小波分析. 干旱气象, 24(4): 15-19. Hao L S, Li X, Li Y Y. 2006. The wavelet analysis of solar activity variation. Arid Meteor, 24(4): 15-19 (in Chinese)
- 马兰梦, 张绍东, 易帆. 2012. 中纬低层大气重力波动量通量谱的探空观测. 地球物理学报, 55(10): 3194-3202. Ma L M, Zhang S D, Yi F. 2012. Radiosonde observations of lower atmospheric gravity wave momentum flux spectra at a single mid- latitude station. Chinese J Geophys, 55(10): 3194-3202 (in Chinese)
- 覃卫坚, 寿绍文, 高守亭等. 2010. 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟. 地球物理学报, 53(5): 1039-1049. Qin W J, Shou S W, Gao S T, et al. 2010. Numerical study of the dynamical mechanism of inertial gravity waves in hail storm process. Chinese J Geophys, 53(5): 1039-1049 (in Chinese)
- 斯塔尔. 1991. 边界层气象学导论. 杨长新, 译. 北京: 气象出版社, 457pp. Stull R B. 1991. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Yang C X, trans. Beijing: China Meteorology Press, 457pp (in Chinese)
- 万明波, 程智, 王文. 2006. 青藏铁路沿线气温和降水的小波分析. 干旱气象, 24(4): 35-39. Wan M B, Cheng Z, Wang W. 2006. Wavelet analysis of temperature and rainfall along Qinghai-Xizang Railway. Arid Meteor, 24(4): 35-39 (in Chinese)
- 王博, 胡雄, 肖存英等. 2017. 子午工程首次火箭探空数据准单色惯性重力波特性分析. 空间科学学报, 37(5): 547-553. Wang B, Hu X, Xiao C Y, et al. 2017. Characteristics of quasi-monochromatic inertia gravity waves revealed by first meteorological rocket data of the Meridian Space Weather Monitoring Project. Chinese J Space Sci, 37(5): 547-553 (in Chinese)
- 王丽吉, 杨程. 2018. 热带平流层多尺度波动分离方案的研究: 多站点高分辨率无线电探空联合分析. 气象学报, 76(1): 62-77. Wang L J, Yang C. 2018. Separation of planetary and gravity waves in the tropical stratosphere with multi-station radiosonde data. Acta Meteor Sinica, 76(1): 62-77 (in Chinese)
- 王雪莲. 利用高分辨探空资料分析热带下平流层重力波活动 [D]. 2006. 南京: 南京信息工程大学. Wang X L. 2006. Gravity wave activity in the tropical lower stratosphere with high vertical resolution radiosonde data [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 王泓锐, 陈起英, 华维等. 2019. 基于秒级探空资料分析四川重力波统计特征. 应用气象学报, 30(4): 491-501. Wu H K, Chen Q Y, Hua W, et al. 2019. A statistical study of gravity wave with second-level radiosonde data in Sichuan. J Appl Meteor Sci, 30(4): 491-501 (in Chinese)
- 许小峰, 孙照渤. 2003. 非地转平衡流激发的重力惯性波对梅雨锋暴雨影响的动力学研究. 气象学报, 61(6): 655-660. Xu X F, Sun Z B. 2003. Dynamic study on influence of gravity wave induced by unbalanced flow on Meiyu front heavy rain. Acta Meteor Sinica, 61(6): 655-660 (in Chinese)
- 张勇, 寿绍文, 王咏青等. 2008. 山东半岛一次强降雪过程的中尺度特征. 南京气象学院学报, 31(1): 51-60. Zhang Y, Shou S W, Wang Y Q, et al. 2008. Mesoscale characteristics analysis on a snow storm in Shandong Peninsula. J Nanjing Inst Meteor, 31(1): 51-60 (in Chinese)
- Alexander M J, Pfister L. 1995. Gravity wave momentum flux in the lower stratosphere over convection. Geophys Res Lett, 22(15): 2029-2032
- Alexander M J, Beres J H, Pfister L. 2000. Tropical stratospheric gravity wave activity and relationships to clouds. J Geophys Res, 105(D17): 22299-22309
- Alexander M J, Geller M, McLandress C, et al. 2010. Recent developments in

- gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(650): 1103-1124
- Allen S J, Vincent R A. 1995. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations. *J Geophys Res*, 100(D1): 1327-1350
- Chen L, Bian J C, Liu Y, et al. 2019. Statistical analysis of inertial gravity wave parameters in the lower stratosphere over Northern China. *Climate Dyn*, 52(1): 563-575
- Eckermann S D, Hirota I, Hocking W K. 1995. Gravity wave and equatorial wave morphology of the stratosphere derived from long-term rocket soundings. *Quart J Roy Meteor Soc*, 121(521): 149-186
- Fovell R, Durran D, Holton J R. 1992. Numerical simulations of convectively generated stratospheric gravity waves. *J Atmos Sci*, 49(16): 1427-1442
- Gardner C S, Gardner N F. 1993. Measurement distortion in aircraft, space shuttle, and balloon observations of atmospheric density and temperature perturbation spectra. *J Geophys Res*, 98(D1): 1023-1033
- Hoffmann L, Xue X, Alexander M J. 2013. A global view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations. *J Geophys Res*, 118(2): 416-434
- Kitamura Y, Hirota I. 1989. Small-scale disturbances in the lower stratosphere revealed by daily rawinsonde observations. *J Meteor Soc Japan*, 67(5): 817-831
- Lane T P, Reeder M J, Clark T L. 2001. Numerical modeling of gravity wave generation by deep tropical convection. *J Atmos Sci*, 58(10): 1249-1274
- Lane T P, Moncrieff M W. 2008. Stratospheric gravity waves generated by multiscale tropical convection. *J Atmos Sci*, 65(8): 2598-2614
- McLandress C, Alexander M J, Wu D L. 2000. Microwave limb sounder observations of gravity waves in the stratosphere: A climatology and interpretation. *J Geophys Res*, 105(D9): 11947-11967
- Pramitha M, Venkat Ratnam M, Leena P P, et al. 2016. Identification of inertia gravity wave sources observed in the troposphere and the lower stratosphere over a tropical station Gadanki. *Atmos Res*, 176-177: 202-211
- Preusse P, Dörnbrack A, Eckermann S D, et al. 2002. Space-based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA 1: Sensitivity, analysis method, and a case study. *J Geophys Res*, 107(D23): 8178
- Sun J L, Nappo C J, Mahrt L, et al. 2015. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer. *Rev Geophys*, 53(3): 956-993
- Taylor M J, Seo S H, Nakamura T, et al. 1998. Long base-line measurements of short-period mesospheric gravity waves during the SEEK campaign. *Geophys Res Lett*, 25(11): 1797-1800
- Tsuda T, Nishida M, Rocken C, et al. 2000. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *J Geophys Res*, 105(D6): 7257-7273
- Vincent R A, Joan Alexander M. 2000. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: An observational study of seasonal and interannual variability. *J Geophys Res*, 105(D14): 17971-17982
- Zhang S D, Yi F. 2005. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30° N, 114° E) China. *Ann Geophys*, 23(3): 665-673
- Zhang S D, Yi F. 2007. Latitudinal and seasonal variations of inertial gravity wave activity in the lower atmosphere over central China. *J Geophys Res*, 112(D5): D05109
- Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al. 2010. Latitudinal and seasonal variations of lower atmospheric inertial gravity wave energy revealed by US radiosonde data. *Ann Geophys*, 28(5): 1065-1074