

王翠梅, 李钦增, 徐寄遥等. 2014. 基于 OH 全天空空气辉成像仪观测的中国低纬地区的重力波传播统计特征. 地球物理学报, 57(11):3659-3667, doi:10.6038/cjg20141120.

Wang C M, Li Q Z, Xu J Y, et al. 2014. Statistical characteristics analysis of atmospheric gravity waves with OH all-sky airglow imagers at low-latitude region of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3659-3667, doi:10.6038/cjg20141120.

基于 OH 全天空空气辉成像仪观测的中国低纬地区的重力波传播统计特征

王翠梅^{1,2}, 李钦增¹, 徐寄遥¹, 袁韡¹, 刘伟军^{1,2},
孙龙昌^{1,2}, 陈金松^{1,2,3}, 燕春晓¹

1 中国科学院空间科学与应用研究中心天气学国家重点实验室, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国电波传播研究所电波环境及模化技术重点实验室, 青岛 266107

摘要 利用位于海南富克(19.5°N, 109.1°E)和广西桂平(23.4°N, 110.1°E)两个台站两年多的 OH 全天空空气辉成像仪观测数据, 对中国低纬地区的重力波传播统计特征进行了研究. 从富克和桂平的气辉成像观测中, 分别提取了 65 和 86 个重力波事件. 研究表明, 观测水平波长, 观测周期和水平相速度分别集中分布在 10~35 km, 4~14 min 和 20~90 m·s⁻¹ 范围. 重力波传播方向, 在夏季表现出很强的东北方向传播. 然而, 在冬季主要沿东南和西南方向传播. 同时, 结合流星雷达风场观测和 TIMED/SABER 卫星的温度数据, 也发现在中层-低热层中传播的大多数重力波表现为耗散传播. 且低层-中层大气中背景风场的滤波作用和多普勒频移可能对纬向方向传播的重力波产生的各向异性起到重要的调制作用. 然而, 经向方向传播的重力波产生的各向异性可能同时被低层大气中波源的非均匀分布以及潮汐变化所影响.

关键词 大气重力波; 统计特征; 传播

doi:10.6038/cjg20141120

中图分类号 351, P412

收稿日期 2014-09-25, 2014-10-27 收修定稿

Statistical characteristics analysis of atmospheric gravity waves with OH all-sky airglow imagers at low-latitude region of China

WANG Cui-Mei^{1,2}, LI Qin-Zeng¹, XU Ji-Yao¹, YUAN Wei¹, LIU Wei-Jun^{1,2},
SUN Long-Chang^{1,2}, CHEN Jin-Song^{1,2,3}, YAN Chun-Xiao¹

1 State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China Research Institute of Radio Wave Propagation, National Key Laboratory of Electron Magnetic Environment, Qingdao 266107, China

Abstract To study the statistical characteristic of low-latitude atmospheric gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere in southern China, we carried out long-term (the observation at Fuke during March of 2010 to July of 2012 and at Guiping during September of 2012 to November of 2013) observation with OH all-sky airglow imager at Fuke (19.5°N, 109.1°E), Hainan, and Guiping (23.4°N, 110.1°E), Guangxi. We extracted 65 and 86 gravity wave events

from OH imagers observation at Fuke and Guiping, respectively. Observed horizontal wavelength, observed period, and horizontal phase velocity of gravity waves at Fuke and Guiping are mainly distributed in the range of 10~35 km, 4~14 min, and 20~90 m · s⁻¹, respectively. The propagation directions of the gravity waves are dominantly northeast during summer. However, southwestward and southeastward propagation are dominant during winter. Combining with wind measurements from the Doppler meteor radar and temperature data from SABER on board TIMED satellite, we also found that most of gravity waves propagated evanescently. The statistical results show that the background wind filtering and Doppler shifting may play an important role in controlling the anisotropy of AGWs in the zonal direction. However, the anisotropy of AGWs propagation in the meridional direction may be affected simultaneously by the non-uniform distribution of wave sources and tides in the lower atmosphere.

Keywords Atmospheric gravity waves; Statistical characteristic; Propagation

1 引言

中层-低热层大气重力波,主要产生于低层大气,在向上传播过程中输送其能量和动量,对大气风场和热平衡起到重要调节作用(Nakamura et al., 2003).且部分大气重力波将其携带的能量和动量输运到高层大气,控制了中层-低热层全球尺度环流(Holton et al., 1982).因此,中层-低热层重力波传播特征的研究对于全球尺度环流研究十分重要.

目前,对中层-低热层大气重力波的观测,有很多技术手段.例如,雷达、激光雷达、火箭和卫星.全天空气辉成像技术为大气重力波提供了一种具有180°大视场,高分辨率优势的观测手段;且随着CCD成像技术的迅速发展,全天空气辉成像仪已经被广泛用于中层-低热层短周期(<1 h)重力波的观测.

近几十年里,很多研究者(Narayanan and Gurubaran, 2013; Li Z H et al., 2011; Medeiros et al., 2003; Nakamura et al., 2003; Li Q et al., 2011; Ejiri et al., 2003)利用气辉成像仪对不同纬度的中层-低热层重力波实施了观测与统计特征研究.绝大多数研究表明,重力波传播方向在夏季倾向于东向和极向传播.然而,在冬季主要表现为沿赤道方向传播.在赤道附近,Narayanan and Gurubaran (2013)报道了Tirunelveli (8.7°N, 77.8°E)地区的重力波传播方向的季节变化特性.夏季,几乎所有的重力波向南和西南方向传播.Nakamura等(2003)利用Tanjungsari (6.9°S, 107.9°E)台站的观测数据发现,除11月份和2月份的观测外,绝大多数重力波趋向于东南方向传播.在低纬地区, Li Z H等(2011)对Maui (20.7°N, 156.3°W)台站的重力波

的观测结果表明,重力波在夏季主要向东和东北方向传播.同时,他们也给出了重力波在冬季主要向西和西南方向传播的报道. Medeiros等(2003)在Brazil(23°S, 45°W)台站的研究结果表明,该台站观测的重力波在夏季主要向东南方向传播.然而,在冬季倾向于西北方向传播.在中国的中纬地区, Li Q等(2011)利用Xinglong(40.2°N, 117.4°E)台站的OH气辉成像观测,首次对中国北方地区重力波传播特性进行了统计特征研究,研究表明,几乎所有的重力波在夏季沿东北方向传播.然而,重力波传播方向在冬季表现出明显的沿西南方向传播的特性.

本文将利用海南富克(19.5°N, 109.1°E)和广西桂平(23.4°N, 110.1°E)两个台站的OH气辉成像观测数据,研究中国低纬地区重力波传播特征,同时结合流星雷达风场数据和TIMED/SABER卫星的温度参数分析中层-低热层大气中重力波的传播形态.

2 观测和数据处理

用于研究中国低纬地区重力波传播统计特征的OH全天空气辉成像仪分别位于海南富克(19.5°N, 109.1°E)和广西桂平(23.4°N, 110.1°E),两个台站间的直线距离约为400 km.前者,是子午工程(Wang, 2010)地基光学仪器的一部分,其与Li Q等(2011b)用于分析中国北方重力波统计特征的气辉成像仪相似.它使用Mamiya 24 mm/f4.0鱼镜头,视场角为180°,且包括温度稳定的滤波轮子和CCD探测元件.背照式CCD感光元件的像元数为1024×1024像素,数据存储格式为16位,其物理维度为13×13 mm.相机系统被电热制冷到-70左右

(暗电流 < 0.5 electrons/pixel/sec). 后者气辉成像仪与前者区别为后者的鱼眼透镜为 AF Fisheye-Nikkor 16mm f/2.8D. 气辉成像仪的整个观测过程均由软件自动控制. 在目前的工作中, 仅利用 OH 气辉辐射波段 (715~930 nm) 进行气辉成像观测. 每幅图像的曝光时间约为 1 min.

同时, 结合风场速度和温度参数对重力波的传播形态进行了分析. 伴随 OH 全天空空气辉成像仪进行观测的风场数据来自流星雷达, 温度参数来自 TIMED/SABER 探测卫星. 由于广西桂平 (23.4°N, 110.1°E) 台站没有流星雷达观测, 且海南富克 (19.5°N, 109.1°E) 地区在 2012—2013 年由于天气条件的限制致使与桂平地区提取的重力波事件相应的流星雷达观测较少. 因此, 与富克 (19.5°N, 109.1°E) 和桂平 (23.4°N, 110.1°E) 地区观测重力波事件相对应的风场数据分别来自海南富克 (19.5°N, 109.1°E) 和昆明曲靖 (25.6°N, 103.7°E) 台站的流星雷达观测. 流星雷达在中层-低热层区域测风的高度范围在 70~110 km 之间, 时间分辨率为 1 h, 垂直高度分辨率为 2 km. 本文中风场的垂直高度分辨率被插值为 1 km. Mertens 等 (2001) 给出了 TIMED/SABER 卫星由 CO₂ 辐射反演得到动力学温度的具体方法. 图 1 呈现出了 OH 气辉成像仪和流星雷达所在台站位置.

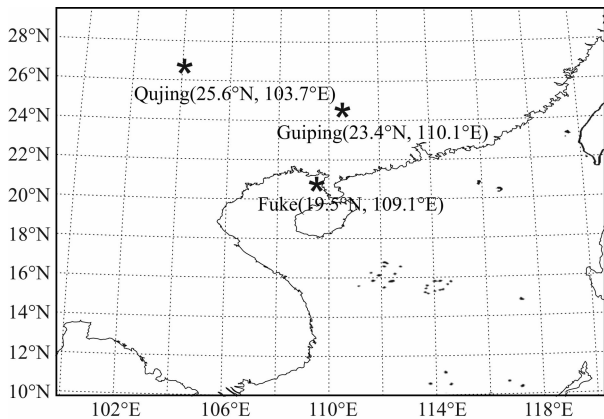


图 1 OH 气辉成像仪(富克和桂平)和流星雷达(富克和曲靖)所在位置图

Fig. 1 Map showing the locations of OH airglow imagers and meteor radars

提取重力波参数前, 首先从 OH 气辉成像仪观测中挑选出晴空且无月光的夜晚, 同时根据如下步骤对其图像进行预处理. 第一步, 利用中值滤波法去除星光污染 (Coble et al., 1998; Suzuki et al., 2007). 第二步, 根据 Kubota 等 (2001) 描述的方法,

图像数据除以一个校正系数来消除 Van Rhijin 效应和大气消光效应. 第三步, 为了矫正由于鱼镜头头导致的图像扭曲, 假设 OH 气辉层的高度为 87 km (Baker and Stair, 1988), 且将第二步中获得的图像投影到 512 km × 512 km 范围内的地理坐标范围内. 第四步, 差分操作可以去除背景, 使高频率的波动结构明显的显现. 所以, 利用连续的两幅图像相减获取差分 (TD) 图像 (Swenson and Mende, 1994; Tang et al., 2005; Suzuki et al., 2007). 图 2(a, b) 分别给出了 2013 年 10 月 7 日晚在广西桂平台站观测到的 OH 气辉原始图像及去除星光后的图像, 图 2c 给出了相应的差分平铺图像, 平铺区域为 512 km × 512 km.

最后, 对差分平铺后的图像实施去趋势处理, 同时利用 2-D FFT 谱分析方法 (Garcia et al., 1997; Coble et al., 1998) 提取重力波相关参数, 包括观测水平波长, 观测周期, 水平相速度和传播方向. 图 2d 给出了与图 2c 中的矩形区域相对应的能量谱. 基于此图与相位-时间关系分析, 获得该重力波事件的水平波长为 19.8 km, 观测周期为 8.2 min, 水平相速度为 40.2 m · s⁻¹, 方位角为 161.6°.

3 结果与分析

为了对中国低纬地区中层-低热层的重力波传播统计特征和传播形态进行分析研究, 将 OH 气辉成像仪安置于海南富克 (19.5°N, 109.1°E) 和广西桂平 (23.4°N, 110.1°E) 实施了长期的观测. 其中, OH 气辉成像仪在富克进行观测的时间为 2010 年 3 月至 2012 年 7 月, 在桂平实施观测的时间为 2012 年 9 月至 2013 年 11 月.

3.1 重力波统计特征分析

为了分析重力波观测参数的季节变化特征, 将全年划分为四个季节, 春季 (3—4 月份), 夏季 (5—8 月份), 秋季 (9—10 月份) 和冬季 (11—次年 2 月份), 与这四个季节相对应的重力波观测事件个数分别是 39, 47, 40, 25.

本文从 784 个 OH 气辉成像观测夜晚中挑选出 178 个有效的观测夜晚, 且共提取出 151 个重力波事件 (其中, 富克台站有 65 个事件, 桂平台站有 86 个事件). 为了准确提取重力波参数, 这里, 有效观测夜晚定义为包含至少 30 min 以上的图像是晴空无月光. 图 3a 是观测 (晴空) 夜晚月分布图. 根据图 3b, 发现有效观测小时数在 3 月份和 10 月份较长.

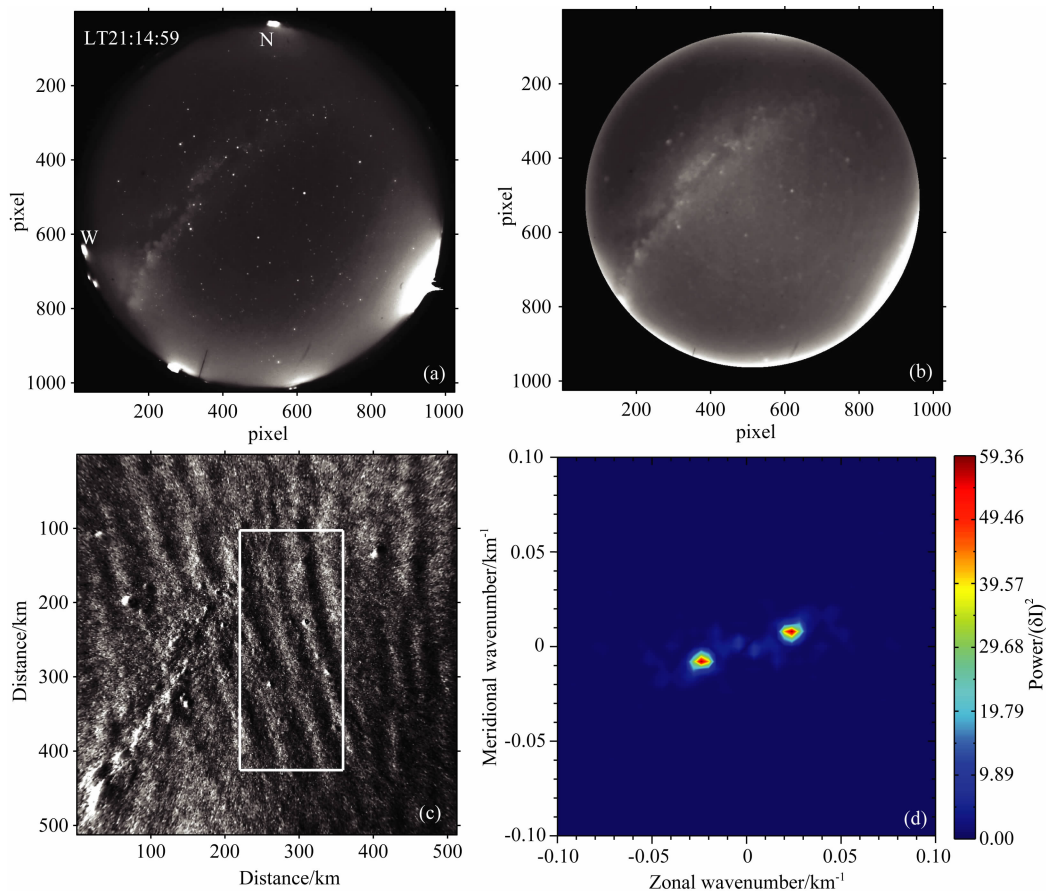


图2 (a) 2013年10月7日LT 21:14:59在桂平台站观测的OH气辉原始图像(1024×1024像素); (b)去除星光污染, van Rhijin效应和大气消光效应后的图像(1024×1024像素); (c)平铺于512×512 km范围内的差分图像; (d)与(c)图中矩形区域相对应的能谱图

Fig. 2 (a) A 1024×1024 pixel OH airglow raw image on the night of 7 October 2012 at 21:14:59 LT at Guiping; (b) Image after removing stars, Van Rhijin and atmospheric extinction effect; (c) TD image flatted onto 512×512 km; (d) Power spectrum of rectangular area (160×320 km) in figure (c)

图4是重力波事件数及其发生频率的月分布图。这里,事件发生频率定义为事件数与相应的晴空小时数的比率。发现重力波发生频率峰值出现在冬季(1月)和春季(4月)。然而,由于冬季的事件数较少,因此冬季的事件发生频率可能不能精确的反映该季节的波动状态。这个结果与之前的报道结果(Medeiros et al., 2004; Li Q et al., 2011)不同。Medeiros et al. (2004)发现了Brazil (23°S, 45°W)地区的重力波发生频率在二至点高于二分点。Li Q等(2011)利用北京兴隆(40.2°N, 117.4°E)地区2009年12月至2010年11月的OH气辉成像观测数据报道了夏季和冬季的重力波发生频率要高于春季和秋季。这可能是由于观测的天气条件和地理位置的不同所导致。

图5是重力波观测参量分布图(共151个事件)。从图中看出,水平波长(图5a)分布在5~50 km范围内,86%的事件分布于10~35 km,其平均值为

19.2 ± 5.5 km(这里,19.2是平均值, ± 5.5 是标准偏差)。观测周期(图5b)集中分布在4~14 min,其平均值为 7.4 ± 2.2 min。观测水平相速度(图5c)的分布范围较广,在 $10 \sim 170 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,84%的事件数集中分布在 $20 \sim 90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其平均值 $36.9 \pm 16.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在这些观测参量中,没有发现明显的季节变化(这里没有给出与这些参数相应的季节变化图)。与其他低纬地区的重力波参量分布进行比较,Medeiros等(2003)报告了Brazil (23°S, 45°W)地区的重力波参量分布范围,水平波长分布于10~60 km,其平均值为22.9 km,观测周期分布于5~35 min,水平相速度分布在 $10 \sim 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Li等(2011a)在Maui (20.7°N, 156.3°W)给出了与我们的统计结果相似的重力波参数分布,观测水平波长集中分布于10~35 km,观测周期主要分布在5~15 min,观测水平相速度集中在 $20 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在赤道附近,Narayanan和Gurubaran(2013)报道了

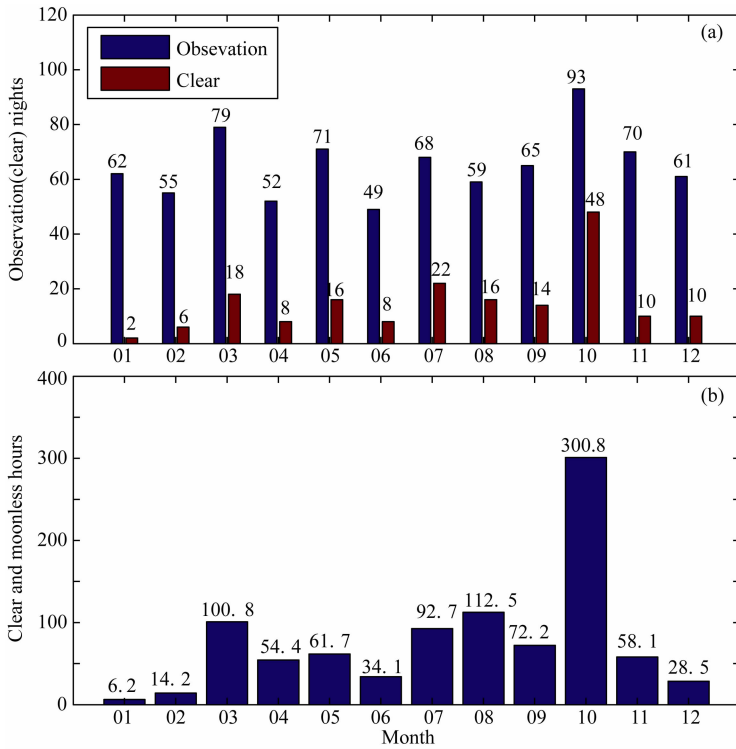


图 3 (a) 观测(晴空)夜晚月分布图; (b) 晴空无月光时间月分布图

Fig. 3 (a) The monthly distribution of observation (clear) nights; (b) monthly distribution of clear moonless hours

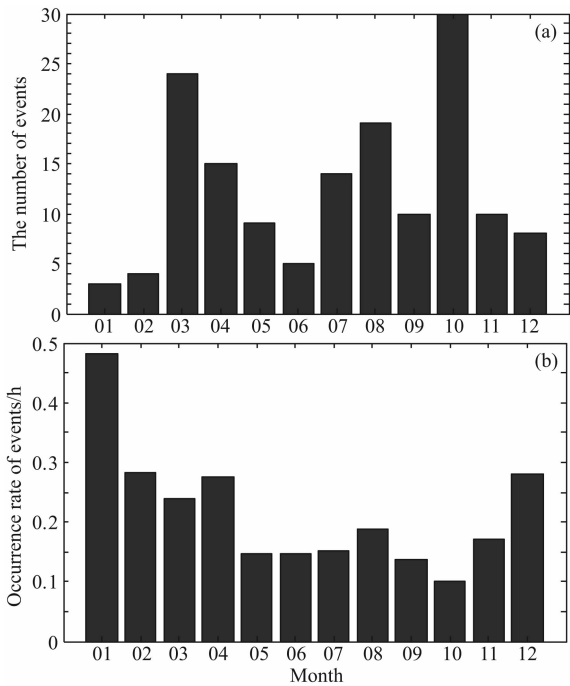


图 4 (a) 重力波事件数月分布图; (b) 重力波事件的发生频率月分布图

Fig. 4 (a) The monthly distribution of number of gravity wave events; (b) monthly distribution of occurrence rate of gravity wave events

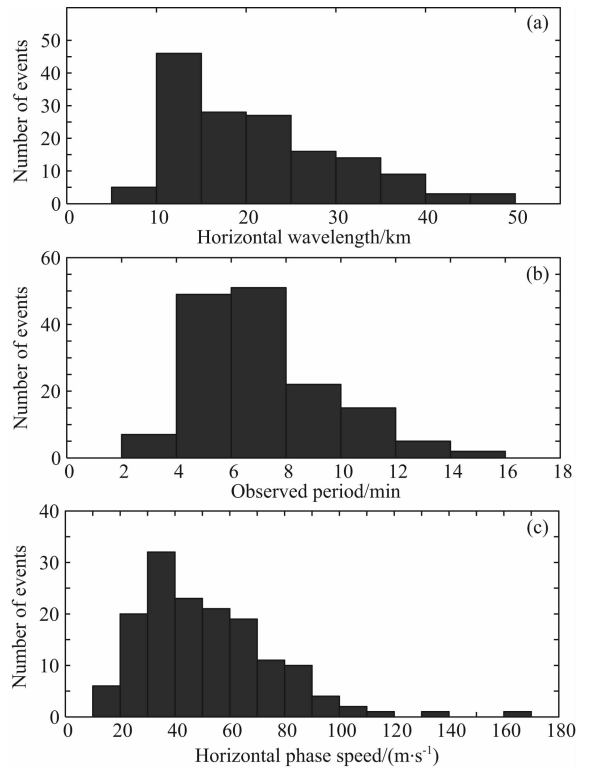


图 5 观测参数直方图

(a) 水平波长; (b) 观测周期; (c) 水平相速度.

Fig. 5 Histograms of observed parameters

(a) Horizontal wavelength; (b) observed period;

(c) horizontal phase speed.

Tirunelveli(8.7°N, 77.8°E)地区的水平波长, 观测周期和水平相速度的分布范围分别是5~45 km, 2~13 min和10~140 m·s⁻¹. 与中纬地区重力波参数分布比较, Smith等(2000)利用 Millstone (42.6°N, 71.5°W)地区的 OH 气辉观测数据也报告了与本文结果类似的重力波参量分布, 其水平波长平均值为21±7 km, 平均观测周期为8.5±4.6 min, 平均观测相速度为47±20 m·s⁻¹. Li Q等(2011)通过 Xinglong (40.2°N, 117.4°E)台站的 OH 气辉观测给出中国北方重力波参数分布, 水平波长集中在10~35 km 范围, 其平均值为22±7 km. 观测周期集中分布在4~14 min, 其平均值为8.1±3.0 min. 观测相速度集中分布在30~60 m·s⁻¹, 其平均值为48±16 m·s⁻¹.

图6表明了重力波平均参量的季节变化. 图中发现平均水平波长没有明显的季节变化(图6a). 该结果与中纬地区(Li Q, et al., 2011; Ejiri et al., 2003)给出的报道结果一致. 图6(b, c)分别表明, 平均观测周期在冬季高于夏季, 而平均相速度在夏季大于冬季. 本文的结果与 Ejiri等(2003)通过 OH 和 OI 气辉成像观测在 Rikubetsu(43.5°N, 143.8°E)和

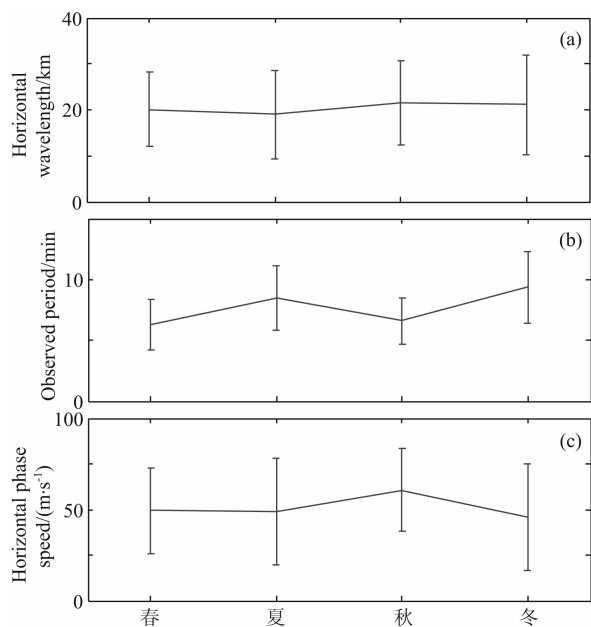


图6 重力波观测参数的平均值季节变化图

(a) 平均水平波长; (b) 平均观测周期;

(c) 平均水平相速度. 误差棒代表平均误差.

Fig. 6 The seasonal variations of averaged parameters of AGWs.

(a) Averaged horizontal wavelength; (b) Averaged observed period, (c) Averaged horizontal phase speed. Error bars represent mean error for each season.

Shigaraki(34.9°N, 136.1°E)地区报道的平均观测周期和平均相速度的季节分布相似. 然而, Li Q等(2011)在 Xinglong (40.2°N, 117.4°E)给出了与本文的结果相反的季节变化, 即平均观测周期在冬季低于夏季, 平均水平波长在冬季大于夏季. 由于在冬季的观测事件数较少, 为了得到该地区更加清晰的平均水平参数的季节变化情况, 足够多的观测是必要的.

图7是重力波本征参数分布. 与图5相比较, 发现重力波的本征周期和本征相速度的分布范围大于其观测值分布范围. 这可能是由于背景风场滤波作用和多普勒频移效应引起的. 这里, 用于计算本征值的风场速度来自流星雷达观测.

图8是所有重力波事件(151)的传播方向分布图. 海南富克(8a)和广西桂平(8b)对应的重力波事件个数分别是65和86. 此图表明观测的中国低纬地区的重力波整体趋向于向东传播. 由于冬季的重力波观测事件数较少, 为了得到该地区更加准确的重力波传播方向分布, 足够多的在冬季的成像观测是有必要的.

图9反应了在海南富克(蓝色)和广西桂平(红色)地区的重力波传播方向的季节变化. 发现绝大部分重力波在春季沿东北和东南方向传播. 在夏季, 重力波主要沿东北方向传播. 图10为由 HWM-07 模型计算得到的2011年全年在富克地区的纬向风场月平均分布图, 由于该地区的低层-中层大气风场在

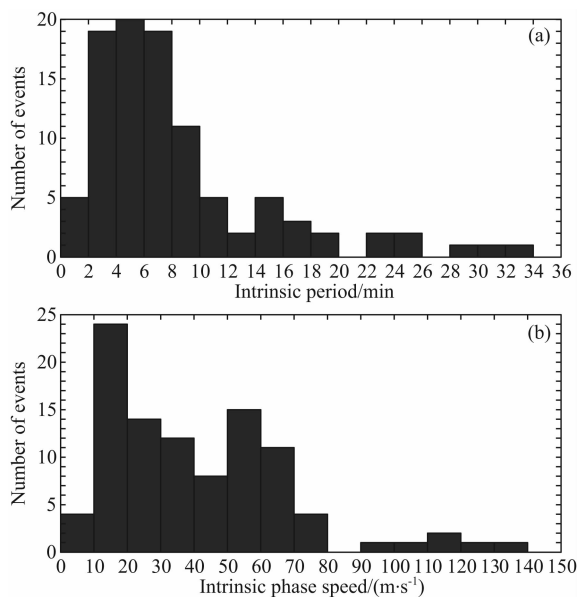


图7 本征参数分布

(a) 本征周期; (b) 本征相速度.

Fig. 7 Distribution of intrinsic parameters

(a) intrinsic period; (b) intrinsic phase speed.

10 月份发生反转,在秋季没有观测到明显的重力波传播方向. 在冬季,重力波主要向东南和西南方向传播. 图 9 和图 10 比较,发现低层-中层大气背景风场的滤波作用和多普勒频移在夏季和冬季对重力波传播方向影响比较明显. 然而,在冬季观测到的东南方向传播的重力波可能与导管传播和波源分布有关.

本文的结果与 Li Z H 等(2011) 在 Maui(20.7°N, 156.3°W)台站报道的重力波传播方向的季节变化特征相似. 同时,我们也发现富克和桂平两个台站的重力波在传播方向上表现出相似的季节变化特征. 基于上述分析发现,该地区的重力波在夏季表现为极向传播,在冬季表现为向赤道方向传播.

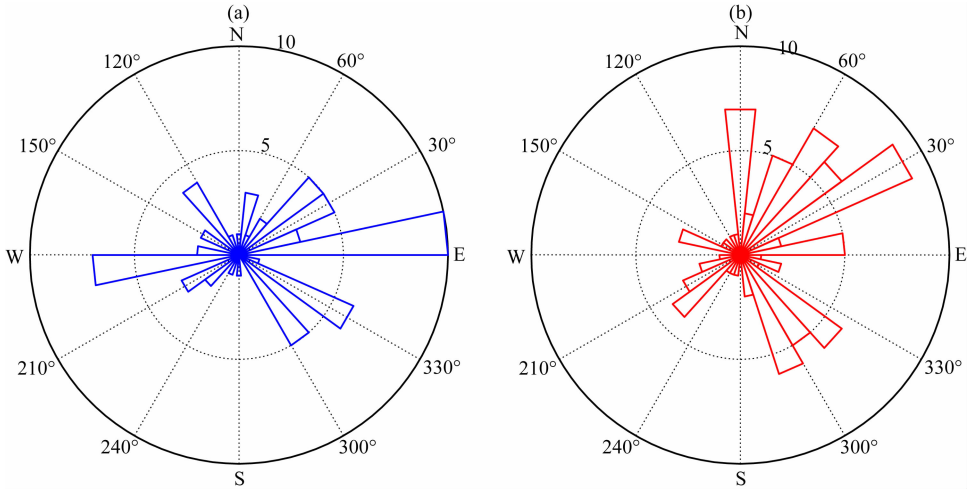


图 8 所有重力波传播方向极坐标分布图((a)富克, (b)桂平)

Fig. 8 Distribution of propagation direction in all seasons (Blue and red represent gravity wave events at Fuke and Guiping, respectively)

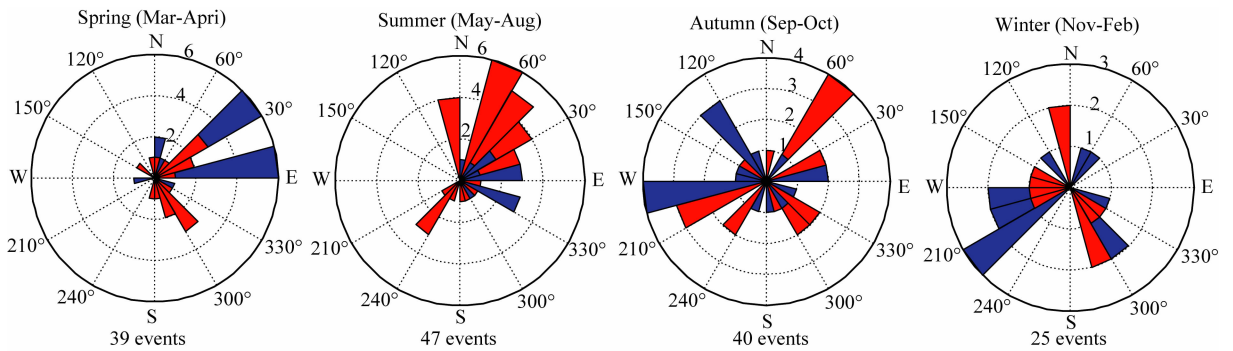


图 9 重力波传播方向极坐标季节变化图

Fig. 9 Seasonal variations of the propagation direction of AGWs

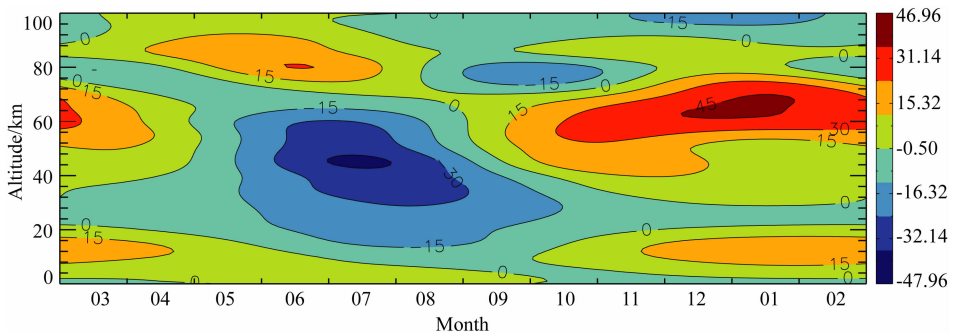


图 10 水平风模式(HWM-07)得到的富克地区上空 2011 全年的纬向风廓线 (每月数值由 20:00 LT 至 04:00LT 平均值得到)

Fig. 10 Monthly variations of zonal wind hourly averaged from 20:00 to 04:00 LT at Fuke by the HWM-07model (from January 2011 to December 2011)

3.2 重力波传播形态分析

高频重力波的色散关系可表示为如下方程(Nappo, 2002),

$$m^2 = \frac{N^2}{(u-c)^2} - \frac{u_{zz}}{u-c} + \frac{u_z}{H(u-c)} - \frac{1}{4H^2} - k^2, \quad (1)$$

这里, m 和 k 分别代表重力波的垂直波数和水平波数, u 是沿波动方向的风场速度, c 是重力波的观测相速度, u_z 和 u_{zz} 分别是 u 在竖直高度上的一阶导数和二阶导数, H 为 OH 气辉层大气标高, 这里假设为 6 km. N^2 是 Brunt-Väisälä 频率的平方, 可表示为

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} \right), \quad (2)$$

这里, $g=9.54 \text{ ms}^{-2}$, T 是由 TIMED/SABER 卫星探测的大气温度, dT/dz 是 TIMED/SABER 卫星经过 OH 气辉台站附近时与观测重力波观测事件相对应的平均温度廓线得到的垂直温度梯度, $c_p=1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

如果 $m^2 > 0$, 重力波将会自由传播. 如果 $m^2 > 0$ 的区域被上下 $m^2 < 0$ 的区域所包围, 重力波将会被导管的上下边界反射, 形成导管传播. 如果 $m^2 < 0$, 重力波传播将会是瞬态的, 称为耗散传播 (Isler et al, 1997). 由于其他重力波事件缺少温度观测或风场数据, 图 11 仅给出了 93 个重力波事件的传播形态分布图. 图中表明, 中层-低热层中的大部分重力波表现为耗散传播.

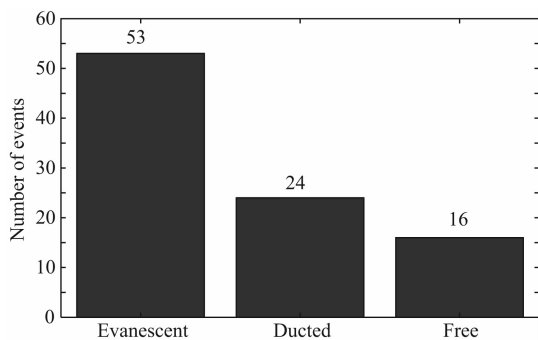


图 11 重力波传播形态分布图

Fig. 11 Distribution of propagation morphology of AGWs

4 结论

本文利用海南富克(19.5°N, 109.1°E)和广西桂平(23.4°N, 110.1°E)的 OH 全天空气辉成像观测数据研究了中国低纬地区重力波传播统计特征, 同时结合了流星雷达风场数据和 TIMED/

SABER 温度参数分析了重力波的传播形态. 结果表明:

(1) 重力波的观测水平波长, 观测周期和水平相速度分别集中分布在 10~35 km, 4~14 min 和 20~90 m·s⁻¹ 范围.

(2) 由于背景风场的滤波作用和多普勒频移效应, 我们发现重力波的本征周期和本征相速度的分布范围广于相应的观测值分布范围.

(3) 研究表明, 中国低纬地区重力波, 在夏季主要沿东北方向传播, 在冬季主要沿东南和西南方向传播.

(4) 在中层-低热层中传播的大多数重力波表现为耗散型传播.

为了更加深入地研究中层-低热层重力波传播特性及其对全球大尺度环流的影响, 我们需要更多的观测来估计重力波的动量通量以及探究其季节变化 (Swenson and Liu, 1998) 特征, 同时对重力波的产生源做出更详细的探究.

致谢 非常感谢中国科学院 (KZZD-EW-01-2), 国家自然科学基金 (41229001, 41331069), 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2011CB811405) 和重点实验室专项经费对这项工作的支持. 同时, 也非常感谢 TIMED/SABER 团队和中国子午工程提供的数据.

References

- Baker D J, Stair A T Jr. 1988. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow. *Physica Scripta*, 37(4): 611-622.
- Coble M R, Papen G C, Gardner C S. 1998. Computing two-dimensional unambiguous horizontal wavenumber spectra from OH airglow images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2): 368-382.
- Ejiri M K, Shiokawa K, Ogawa T, et al. 2003. Statistical study of short-period gravity waves in OH and OI nightglow images at two separated sites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 108(D21): 4679, doi: 10.1029/2002JD002795.
- Garcia F J, Taylor M J, Kelley M C. 1997. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. *Applied Optics*, 36(29): 7374-7385.
- Holton J R. 1982. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere. *J. Atmos. Sci.*, 39: 791-799.
- Isler J R, Taylor M J, Fritts D C. 1997. Observational evidence of wave ducting and evanescence in the mesosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 102(D22): 26301-26313, doi: 10.1029/97JD01783.

- Kutoba M, Fukunishi H, Okano S. 2001. Characteristics of medium- and large-scale TIDs over Japan derived from OI 630 nm nightglow observation. *Earth, Planets and Space*, 53(7): 741-751.
- Li Z H, Liu A Z, Lu X, et al. 2011. Gravity wave characteristics from OH airglow imager over Maui. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 116(D22), doi: 10.1029/2011JD015870.
- Li Q, Xu J, Yue J, et al. 2011. Statistical characteristics of gravity wave activities observed by an OH airglow imager at Xinglong, in northern China. *Am. Geophys.*, 29: 1401-1410.
- Medeiros A F, Taylor M J, Takahashi H, et al. 2003. An investigation of gravity wave activity in the low-latitude upper mesosphere: Propagation direction and wind filtering. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 108(D14): 4411, doi: 10.1029/2002JD002593.
- Medeiros A F, Takahashi H, Batista P P, et al. 2004. Observations of atmospheric gravity waves using airglow all-sky CCD imager at Cachoeira Paulista, Brazil (23°S, 45°W). *Geofisica International*, 43(1): 29-39.
- Mertens C J, Mlynczak M G, López-Puertas M. 2001. Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO₂ 15 μm earth limb emission under non-LTE conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 28(7): 1391-1394.
- Nakamura T, Aono T, Tsuda T. 2003. Mesospheric gravity waves over a tropical convective region observed by OH airglow imaging in Indonesia. *Geophys. Res. Lett.*, 30(17): ASC 4-1, doi: 10.1029/2003GL017619.
- Nappo C J. 2002. An introduction to Atmospheric Gravity Waves. Amsterdam: Academic Press.
- Narayanan V L, Gurubaran S. 2013. Statistical characteristics of high frequency gravity waves observed by OH airglow imaging from Tirunelveli (8.7°N). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92: 43-50.
- Smith S M, Mendillo M, Baumgardner J, et al. 2000. Mesospheric gravity wave imaging at a subauroral site: First results from Millstone Hill. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978—2012), 105(A12): 27119-27130, doi: 10.1029/1999JA000343.
- Suzuki S, Shiokawa K, Otsuka Y, et al. 2007. Gravity wave momentum flux in the upper mesosphere derived from OH airglow imaging measurements. *Earth Planets and Space*, 59: 421-428.
- Swenson G R, Liu A Z. 1998. A model for calculating acoustic gravity wave energy and momentum flux in the mesosphere from OH airglow. *Geophys. Res. Lett.*, 25(4): 477-480, doi: 10.1029/98GL00132.
- Swenson G R, Mende S B. 1994. OH emission and gravity waves (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake, UT. *Geophys. Res. Lett.*, 21(20): 2239-2242.
- Tang J, Kamalabadi F, Franke S J, et al. 2005. Estimation of gravity wave momentum flux with spectroscopic imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1): 103-109.
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China. *Space Weather*, 8(8), doi: 10.1029/2010SW000603.

(本文编辑 汪海英)