

# 一种全天空气辉成像仪数据预处理方法和初步结果<sup>\*</sup>

段博强<sup>1</sup> 潘蔚琳<sup>2</sup>

1(成都信息工程大学电子工程学院 成都 610225)

2(中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测重点实验室 北京 100029)

**摘要** 大气重力波是大气中的基本波动形式之一,在中高层大气动力和热力学过程中起着十分重要的作用.全天空气辉成像仪是一种以大气气辉辐射为示踪物,能够有效对大气重力波成像的仪器.本文针对中国科学院国家空间科学中心空间天气学国家重点实验室中高层大气组自主研制的全天空气辉成像仪所观测的数据,提出了一种气辉图像预处理方法,进行平场校正、方位校正、星光去除和坐标映射等数据订正.利用该方法处理 2015 年 5 月 17 日 21:00 BLT 至次日 05:00 BLT 西宁台站 (36.6°N, 101.7°E) 的 OH 气辉数据,发现一次重力波事件,分析并获得了该重力波的水平波长、观测水平相速度和传播方向 (分别为 17.72 km, 47 m·s<sup>-1</sup>, 339°). 研究结果表明该方法是可行的.

**关键词** 大气重力波, 气辉, 成像仪, 图像处理

**中图分类号** P 353

## A Data Preprocessing Method and Preliminary Results of All-sky Airglow Image

DUAN Boqiang<sup>1</sup> PAN Weilin<sup>2</sup>

1(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

2(Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract** Atmospheric Gravity Wave (AGW) is one of the fundamental waves in the atmosphere, which plays a significant role in the dynamics and thermal balance of the Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT) region. By tracing the atmospheric airglow radiation, all-sky airglow imager can effectively image atmospheric gravity waves. In this paper, an image processing method for the data of OH airglow imager at Xining Station (36.6°N, 101.7°E) is presented. The imager was independently designed by State Key Laboratory of Space Weather of the CAS National Space Science Center. A typical gravity wave-event was observed using this imager on 17 May 2015. Finally, the OH airglow data obtained by observation experiments in Xining (on 17 May 2015 at 21:00 BLT to 05:00 BLT on the next day) is analyzed by this method. The horizontal wavelength, phase velocity

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目资助 (KZCX2-YW-JS202)

2016-02-06 收到原稿, 2016-05-21 收到修定稿

E-mail: designbook@sina.cn

and propagation direction of the gravity wave are successfully extracted, which proved the method is feasible and robust.

**Key words** Atmospheric gravity wave, Airglow, Imager, Image processing

0 引言

大气重力波是大气流体在地球重力作用下产生的一种水平尺度变化比较大的波动。重力波在低层大气被激发后,随着波的传播将所携带的能量和动量向高层大气传输,这个过程在中高层大气的动量能量收支平衡中具有重要作用<sup>[1]</sup>。当重力波上传到临界高度(critical level)时,波动会因饱和而破碎,并产生湍流,重力波的动量、能量便通过湍流的混合作用传递给背景大气。重力波的饱和与破碎效应,可以改变中层大气的背景风场及背景大气的垂直稳定分层结构,甚至主导中层大气的全球大尺度环流的形成。由于源的多样性(如气流通过地形起伏的山地、对流层的水平风剪切、强对流天气等)以及传播过程中背景环境时空变化的复杂性,重力波的时间尺度和空间尺度变化范围相当大。大气重力波在中高层大气环境中具有非常重要的作用,所以对大气重力波进行观测和研究是非常必要的。

电离层行进式扰动(Travelling Ionosphere Disturbance)的发现标志着中高层大气重力波观测的开端<sup>[2,3]</sup>。此后,各种无线电雷达(Radar)<sup>[4-7]</sup>、激光雷达(Lidar)<sup>[6,8-12]</sup>等地基观测设备在世界各地相继建立,火箭探空<sup>[13-19]</sup>、热气球探空<sup>[10,20-22]</sup>与无线电探空<sup>[23-26]</sup>在全球广泛使用和数据积累,以及近些年来发展迅猛的卫星观测<sup>[27-34]</sup>等,越来越多的探测技术被用于研究中高层大气重力波。无线电雷达(如MST雷达)可以利用大气折射率不规则体对雷达电磁波的散射回波获取对流层、平流层及中间层的大气重力波扰动信息;激光雷达利用激光与大气分子、原子之间散射产生的回波信号可反演获得垂直分辨率很高的大气重力波扰动廓线;火箭能够探测中高层大气温度场和风场,利用风分量可以提取比较高分辨率的大气重力波平均强度信息,但是火箭探测成本高昂,而且时间连续性很差,无法进行长时间探测;无线电探空仪可提供离地面25 km高度以下的大气温度与风场数据,具有相当高的垂直分辨率,以及长期稳定的时间覆盖和较广的地理覆盖,也被广泛

应用于大气重力波研究。

气辉是中高层大气中的一种微弱发光现象,其形成源于一些原子和分子之间的光化学反应,表1列出了80~250 km高度范围内的主要气辉辐射谱线及其对应峰值高度。当大气重力波在大气气辉层传播时,会引起气辉层原子与分子的数密度发生扰动,这种扰动体现在时间和空间上<sup>[35,36]</sup>,因此气辉可以作为大气重力波很好的示踪物。

全天空辉成像仪以大气气辉辐射为示踪物,能有效探测二维大气重力波的结构。它能用180°视场角观测气辉层,可覆盖方圆800 km范围,能够弥补很多垂直探测技术在水平观测上的缺陷;此外还具有较高的时间和水平空间分辨率,其天顶处的水平空间分辨率优于1 km·pixel<sup>-1</sup>,能够有效获得重力波的水平传播信息,有利于研究重力波波动及其时空演变过程,因此被广泛应用。

1 全天空辉成像仪

近几十年,随着成像技术的发展及电耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)生产工艺的提高,成像技术已经被国外很多科学家用于中高层大气重力波观测和研究<sup>[37-40]</sup>。中国的大气重力波成像观测起步较晚,Tu等<sup>[41]</sup>于2009年1月5日在河北廊坊开展了中国气辉大气重力波成像观测实验。子午工程陆续在国内开展了多个全天空辉成像仪台站。

表1 大气气辉辐射谱线波长及其对应峰值高度  
Table 1 Airglow radiation wavelength and its height

| 名称             | 波长/nm   | 峰值高度/km |
|----------------|---------|---------|
| OH             | 715~930 | 87      |
| Na             | 589     | 92      |
| O <sub>2</sub> | 865.5   | 94      |
| OI             | 557.7   | 96      |
| OI             | 630     | 250     |

Li 等<sup>[42]</sup>利用兴隆站 (40.2°N, 117.4°E) 2009 年 12 月到 2010 年 10 月的 OH 气辉图像数据, 分析了中国北方地区上空的重力波季节变化特征, 研究结果表明: (1) 中国北方区域波动活动夏季和冬季频率高于分点; (2) 典型水平波长为 10~35 km; (3) 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) 风滤波效应、波导管及重力波波源分布不一致可能对重力波在不同季节传播各项异性起重要作用. 此后, Li 等<sup>[43]</sup>用云南曲靖 (25.6°N, 103.7°E) 2011 年 11 月到 2012 年 10 月的 OH 气辉图像数据, 研究了云贵高原的重力波季节变化特征, 该区域重力波的水平波长分布为 10~35 km, 认为重力波传播的耗散性可能是多普勒频移效应导致的. Wang 等<sup>[44]</sup>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 气辉图像数据研究了中国低纬度重力波传播统计特征和传播形态, 结果表明: 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; 中间层顶和低热层中出现的重力波大多数以耗散形态传播.

本文使用的数据来自中国科学院国家空间中心空间天气学国家重点实验室中高层大气组自主研发的全天空气辉成像系统 (见图 1). 该系统使用的鱼镜头型号为 Nikon 16 mm/2.8D, 其视场角可以达到 180°. 该成像仪系统还搭载了 OH (715~930 nm) 与 OI (630±1 nm) 两个波段的滤光片, 用于研究不同气辉层的大气重力波活动. 系统使用 PI CCD 作为感光器件采集图像, CCD 的像元数为 1024×1024 pixel, 数据存储格式为 16 bit, 其物理维度为 13 μm×13 μm<sup>[45]</sup>. 在目前的工作中, 仅利用 OH 气辉辐射波段 (715~930 nm) 进行分析处理, 每幅图像的曝光时间为 1 min.

## 2 图像数据预处理

CCD 获取的原始数据是在曝光时间内气辉层的积分图像. 原始图像中充斥着明亮的星光污染、van Rhijn 效应<sup>[46]</sup>、方位不确定性和光学畸变等的影响 (见图 2). 因此, 提取大气重力波参数之前, 需要

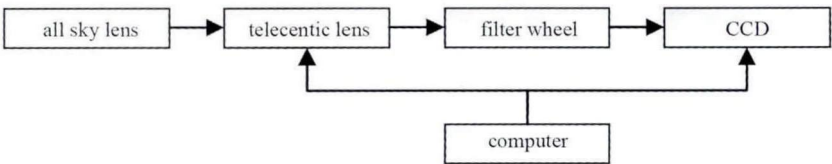


图 1 全天空气辉成像仪硬件组成  
Fig. 1 Block diagrams of the all-sky airglow imager

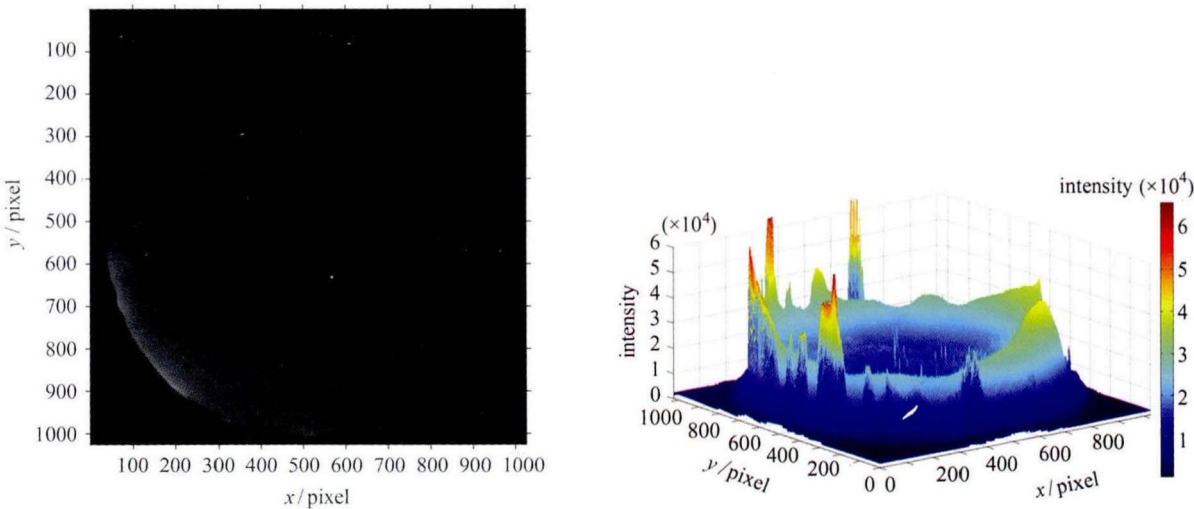


图 2 原始图像数据及其亮度分布  
Fig. 2 Raw image data and its brightness distribution

对图像进行一系列预处理工作, 主要包括平场校正、方位校正、星光去除和坐标映射等.

2.1 平场校正预处理

图 3 给出了 2015 年 5 月 17 日重力波事件 3 h 前, 由热层-电离层-散逸层-能量学与动力学卫星 (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics, TIMED) 搭载的大气探测宽带辐射计 (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry, SABER) 探测器所观测到的 18:41–18:42 BLT (Beijing Local Time) 的  $1.6\ \mu\text{m}$  OH 气辉辐射廓线<sup>[47]</sup>. 由图 3 可以看出, OH 气辉层的厚度约为 10 km, 此厚度相对地球半径而言可认为是基本不变的, 因此从地心处到气辉层各处的积分路径相同. 但是气辉成像仪是以地球表明为中心进行的观测 (见图 4), 成像仪视线方向上的气辉层积分路径随天顶角的变化而变化<sup>[38]</sup>, 导致成像仪所接收到的气辉辐射信号强度随天顶角而变化, 中心较暗四周较亮, 该效果呈径向对称. 这种现象就是所谓的 Van Rhijn 效应, 其订正称为平场订正.

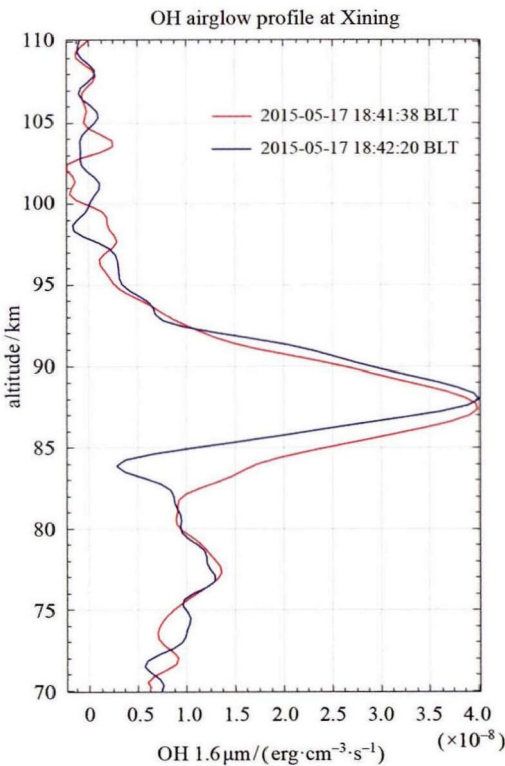


图 3 18:41 BLT OH 气辉体辐射率高度廓线 (数据来源 TIMED/SABER)

Fig. 3 OH  $1.6\ \mu\text{m}$  emission intensity obtained by the TIMED/SABER at 18:41 BLT

图像亮度随天顶角变化的函数关系记为  $f(\zeta)$ . 为方便求出  $f(\zeta)$  随  $\zeta$  的分布规律, 假定同一晚上的大气消光系数不变, 从而通过求出整晚图像数据的平均值近似得到  $f(\zeta)$  的变化规律. 通过以下步骤可以消除 Van Rhijn 效应<sup>[39]</sup>:

步骤 1 整晚图像做平均, 获取背景图像数据.

步骤 2 将步骤 1 中获取的背景图像数据转换为极坐标 (方位角  $\theta$ , 天顶角  $\zeta$ ) 表示, 求出图像亮度随天顶角变化的散点图. 进而通过曲线拟合, 获取  $f(\zeta)$  的关系表达式.

步骤 3 将图像数据除以  $f(\zeta)$  并归一化到天顶方向的亮度值, 得到亮度经平场校正的图像, 即

$$I_{\text{flat-field}} = \frac{I(\theta, \zeta)}{f(\zeta)} f(0). \tag{1}$$

2.2 方位校正

一般情况下, 图像中心并不是视场的中心, 这是因为仪器的视窗中心与 CCD 中心之间存在误差, 因此需要找到视场的中心坐标 (即天顶位置). 通过设定阈值分割图像边缘与视场, 进而逐行逐列地检测行方向与列方向的最大直径  $D_x$  和  $D_y$ , 其交点就是视场中心坐标 ( $X_0 = 520, Y_0 = 534$ ).

全天空辉成像仪是在地表对天空成像, 在观测时并不做精准的方位标定, 而是对后期图像数据进行方位校正获取精准的方位. 为便于分析研究大气重力波传播特性, 需要把图像方位校正为“上北下南, 左西右东”的地图方位分布. 成像仪随地球做自西向东的自转运动, 而记录在成像仪上的星星相对于地球自东向西运动, 因此星星运动轨迹的切线方向正好是从东向指向西向. 所以, 只需再确定一个方位, 在天顶位置 ( $X_0 = 520, Y_0 = 534$ ) 已知的情况下, 即可确定所有方位.

这里说明利用星体运动轨迹和北极星确定北方的方法. 图 5 给出了地球、成像仪与天球北极和北

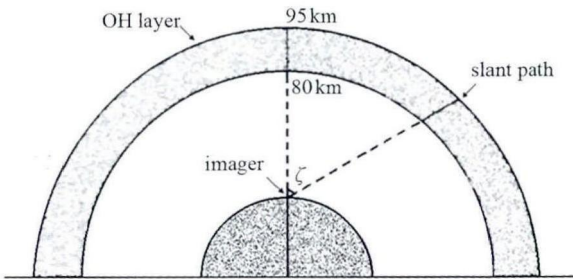


图 4 气辉成像仪积分路径关系

Fig. 4 Imaging geometry for OH all-sky images

向之间的空间几何关系. 成像仪随着地球以地轴为中心自西向东自转, 因此成像仪观测到天球上的星体自东向西方向围绕天轴 (与地轴重合) 作旋转运动. 这种天体的周日视运动轨迹均平行于天赤道的圆圈. 类似于地球纬圈, 天赤道是最大的周日平行圈, 越向天极靠近, 周日平行圈越小, 最终周日平行圈缩小为天极点. 如果成像设备能记录下行星运动的轨迹, 这些星体的轨迹图将展示出若干圆圈, 这些圆圈的共同圆心即为天极的位置<sup>[48]</sup>.

图 6 是在晴朗的天气条件下, 21:23 BLT 到次日 05:00 BLT 时间段内数据叠加平均后得到的. 从图 6 可以清楚地看到位于小熊星座北极星的位置 ( $X_p = 457, Y_p = 206$ ) 及其他恒星的轨迹.

由上述计算得出天顶坐标位于 ( $X_0 = 520, Y_0 = 534$ ) 处, 则需要图像绕其中心点旋转的角度为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_0 - X_p}{Y_0 - Y_p}\right) = 10.87^\circ. \quad (2)$$

这时图像的方位为上北下南, 左东右西, 最后再将图

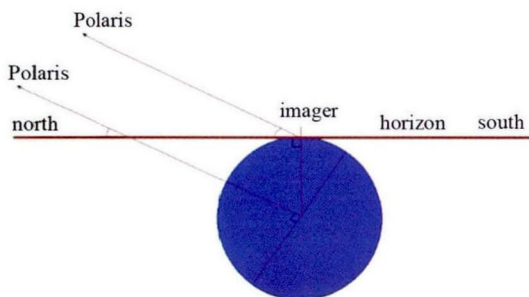


图 5 成像仪与天球北极之间的关系

Fig. 5 Relationship between imager and the Polaris

像东西镜像翻转, 即得到符合方位要求的图像数据. 图 7 展示了数据图像在方位校正前后的效果.

### 2.3 星光去除

原始图像中可以看到星光的影响 (见图 8a), 星光的亮度远大于气辉辐射的亮度, 其对气辉信号造成了强烈的干扰. 为防止星光噪声引起泄露, 在坐标映射之前, 必须去除星光.

通常使用中值滤波器滤除图像中的星光<sup>[37,38]</sup>. 此算法的使用条件是: 图像中星光突变剧烈且局部亮度变化大. 大气气辉辐射的特点是亮度变化比较缓慢 (见图 9a). 根据星光和气辉不同的特征, 去除星光的过程中要保证在滤除星光的同时不削弱气辉的亮度. 因此, 本文使用  $21 \times 21$  个像素点的模板对像素

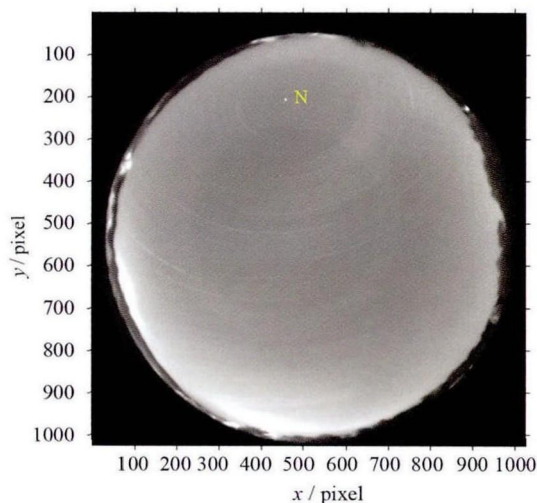


图 6 全天空气辉仪观测到的北极星位置及恒星轨迹

Fig. 6 Position of Polaris and star track observed by all-sky imager

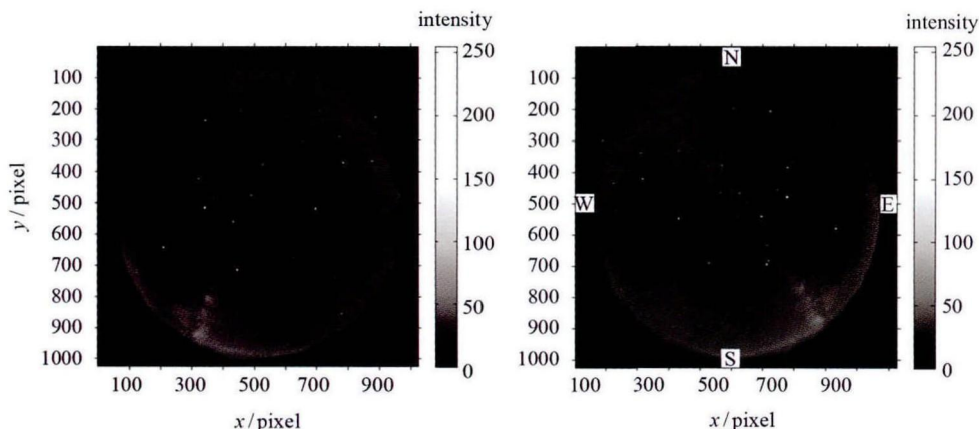


图 7 方位校正处理前后对比效果

Fig. 7 Images before and after spatial calibration



点进行逐行索引判断. 如果检测到某行存在灰度值大于阈值  $k$  的像素, 就用模板中的中间值来替换该像素点的灰度值作为星点处气辉辐射的估计. 这种方法的优点是处理速度快, 实验结果表明该算法对图像中“尖峰”结构包括星光都有很强的削弱作用 (其中模板大小取决于星点的尺度, 行列宽均为 21 pixel,  $k$  为经验值, 其选取与整幅图像亮度的均值有关, 每天都有可能不同).

图 8 是利用上述算法去除星光前后的对比效果, 从图 8(b) 和图 9(b) 可以看出, 星光被有效去除的同时并没有破坏变换较为缓和的大气气辉辐射, 这说明该算法是有效的.

## 2.4 畸变校正与地理坐标投影

气辉成像仪的鱼镜头虽然增加了视场范围, 但是使重力波图像发生了非线性扭曲. 这些扭曲是可预测的畸变, 这部分畸变可用多项式拟合得出入射角与径向距离的近似关系 [37].

另外, 成像仪的成像对象是大气气辉层, 其是与地球表面同心的球面, 而成像仪位于地球表面而不是地球中心, 相当于球面投影到 CCD 相机平面上, 需考虑物面畸变. 校正这种畸变, 必须利用天顶角将像素间距与天顶距联系起来.

图 10 给出了成像仪天顶角与天顶距之间的关系. 从图 10 可以看出, 成像仪位于地球表面, 地球半径为  $r_e$ , 天顶角  $\zeta$  所对应的天顶距为  $r$ , 观测点与气辉层之间的距离为  $r_z$ , 从图 3 可以看出 OH 气辉层的高度  $Z_{OH}$  约为 87.5 km.

天顶角  $\zeta$  与天顶距  $r$  可由下面关系式确定 [38]. 根据弧长公式, 有

$$r = (r_e + Z_{OH})\gamma. \quad (3)$$

根据正弦定理, 有

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \zeta} = \frac{r_z}{r_e - Z_{OH}}. \quad (4)$$

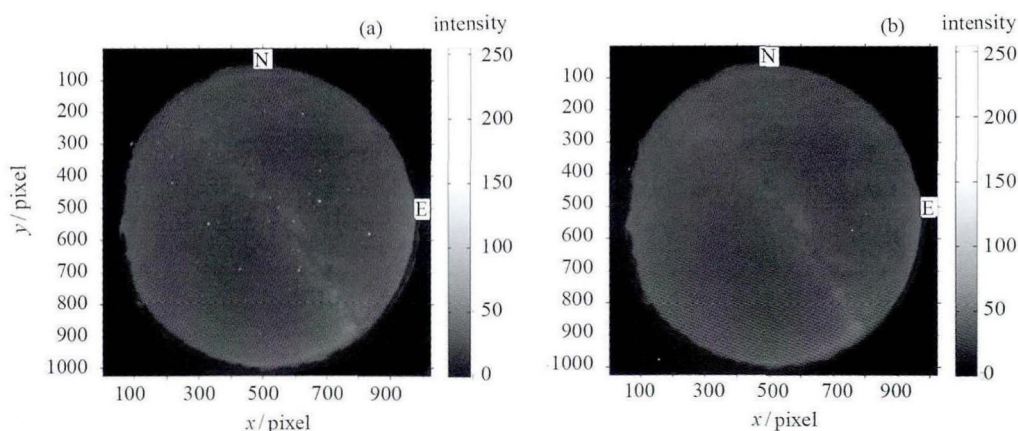


图 8 星光去除前后的效果

Fig.8 Comparison image before and after star removal

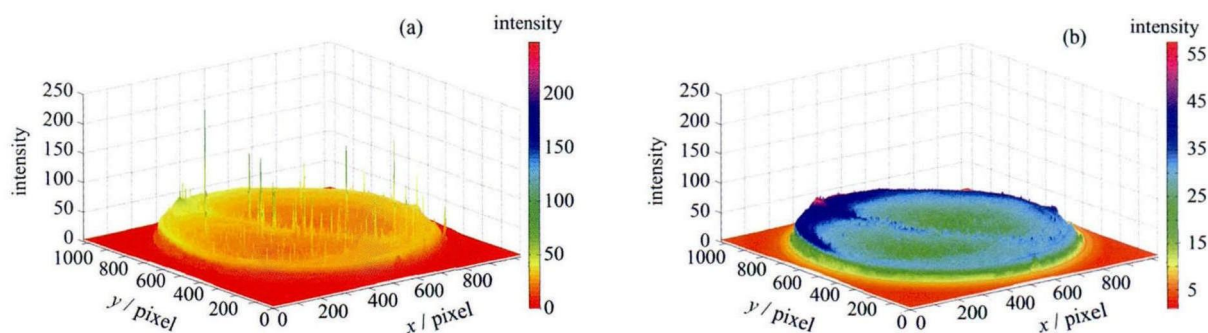


图 9 星光去除前后的 3D 效果

Fig.9 3D comparison image before and after star removal

根据余弦定理, 有

$$r_z^2 = r_e^2 + (r_e + Z_{OH})^2 - 2r_e(r_e + Z_{OH}) \cos \gamma. \quad (5)$$

联立式 (3)~(5), 可解得天顶角与天顶距之间的关系 (见图 11), 即可确定气辉成像仪的像素点间距与大气气辉层单位距离之间的关系得以确定。

利用上述关系, 可以把图像投影在地理坐标系中. 原始图像描述了被 CCD 相机所记录的数据阵列, 其中  $(j, j)$  坐标系代表数据阵列的索引方式<sup>[37]</sup>, 最后用于分析的图像应该符合常规的地理坐标方位, 即上北下南左西右东. Hapgood 和 Taylor 等<sup>[49]</sup>的基本思路是引入一个方位经校正的、标准的极坐标系, 首先把原始图像转换为极坐标系, 然后根据天顶角与天顶距的关系把极坐标表示的图像转换为地理坐标系所表示的图像. 本文所采用的方法并没有把原始

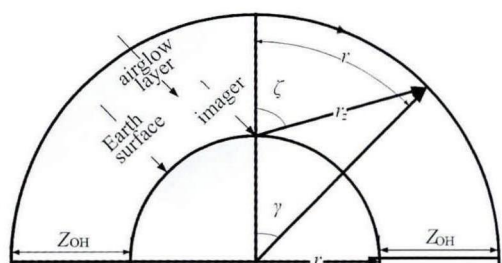


图 10 成像仪天顶角与天顶距的关系

Fig. 10 Geometrical relationship between zenith angle and zenith distance

图像转化为极坐标系, 而是根据天顶角与天顶距的关系直接把图像像素点投影在地理坐标系中, 再对像素点进行等比例插值。

图 12 给出了方位校正后的图像以及投影后的图像. 投影后截取视场  $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ , 分辨率为  $1 \text{ km} \cdot \text{pixel}^{-1}$ . 从图 12 可以看出, 沿直线划过的流星由于畸变效应在气辉图像中变弯, 经过校正投影后又完整地恢复成直线, 说明该方法是可行的。

### 3 大气重力波参数提取和分析

根据中高层大气重力波在 OH 气辉层高度的相

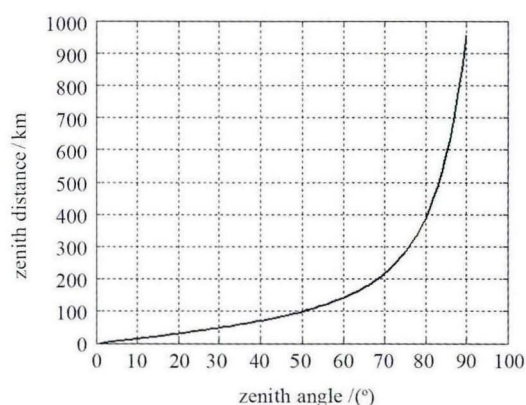


图 11 OH 气辉层天顶角与天顶距的关系

Fig. 11 Relationship of OH airglow between zenith angle and zenith distance

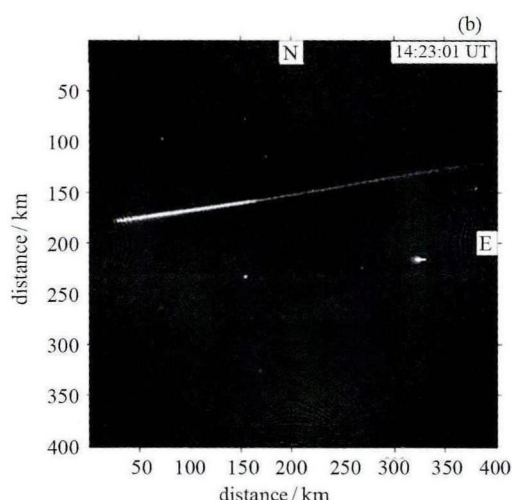
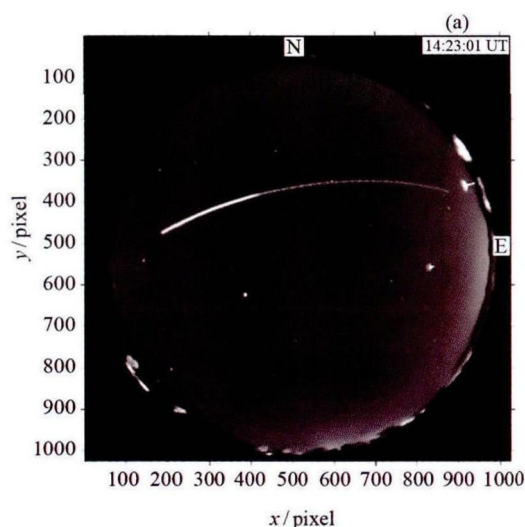


图 12 方位校正后的西宁站台 2015 年 5 月 17 日 14:23 UT 的原始图像 (a) 和图 (a) 投影到地理坐标后得到的图像 (b)

Fig. 12 (a) Example of spatial calibrated all-sky OH airglow images at 14:23 UT (22:23 Beijing Time) obtained at Xining on May 17, 2015. (b) The same to (a), except that it was unwarped

关特性, 这里假定重力波为准单色重力波 (波长为单一值), 这是提取重力波参数的一个重要前提.

利用上述方法分析处理西宁台站 2015 年 5 月 17 日 21:00 BLT 到次日 05:00 BLT 时段的气辉观测数据, 并进行时间差分处理. 在 21:30 BLT—22:00 BLT 发现一个准单色重力波活动现象, 图 13 给出了 21:34 BLT 的图像. 在图 13(a) 中的紫色矩形内, 可以看出明显平行且明暗相间的波动条纹, 此即为大气重力波, 其沿垂直于波前的方向传播. 图 13(a) 中与波前垂直的方向约为  $339^\circ$  (如图中紫色箭头所示) 或  $159^\circ$ . 从图 13(b) 中选取相隔 3 个波长的较为清晰的 4 条等相位面 (绿色直线), 量出它们之间的水平距离, 再除以波数 3, 得到该重力波的水平波长的平均值  $\bar{\lambda}_h$  为 17.72 km. 利用相隔 4 min 的连续观测图像序列, 估算出图 13(b) 中第 3 个波前在 4 min 内传播的距离, 除以传播时间, 得出观测水平相速度的平均值  $\bar{c}$  为  $47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 并确认水平传播方向约为  $339^\circ$ . 最后将波长除以水平相速度得到其观测周期的平均值  $\bar{T}$  为 6.29 min.

为了分析该大气重力波传播的时间演化过程, 在图 13 中选取一个矩形区域 ( $141 \text{ km}\times 141 \text{ km}$ ), 如图 14(a) 所示, 该区域包含了该大气重力波的完整活动区域. 对该区域的数据沿波前方向平均, 可以得到 1 条沿波前传播方向的曲线. 图 14(b) 给出

了 13:34 UT—13:41 UT 时间连续的 7 条曲线, 每条曲线的时间间隔为 1 min, 纵坐标表示重力波扰动的强度, 强度的极值处即为波峰位置. 该图清晰地显示出上述单色大气重力波, 图中利用两条斜线标出了重力波的波前, 从图上可估算出两个相邻峰值之间的距离即波长  $\lambda$  为 17.0 km. 由图可见, 该大气重力波在传播到第 7 条曲线时刻恰好经过一个波长即可计算出其观测周期  $T$  为 6.4 min, 进而可推算出其观测相速度为  $v = \lambda/T \approx 44.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 图中可明显看出波峰随时间向左传播, 从而解决了该波动水平传播  $180^\circ$  不确定性的问题, 确定该大气重力波传播方向为  $339^\circ$ . 图 14(b) 清晰地显示了该单色大气重力波随时间在空间上的演变过程, 这些参数与前面估计的参数的区别在于, 前者计算的结果为 3 个重力波等位相面的均值, 而后者仅为单个等位相面所得到的参数.

4 结论

本文系统研究了全天空空气辉成像数据预处理过程, 去除了原始图像中各种成分对重力波数据分析的影响. 对星光去除算法以及地理映射算法进行了优化, 改进了预处理过程的处理速度及算法复杂度. 为验证上述图像预处理方法的可行性, 对 2015 年 5 月 17 日 21:23 BLT 晚上到次日 05:00 BLT 的气辉

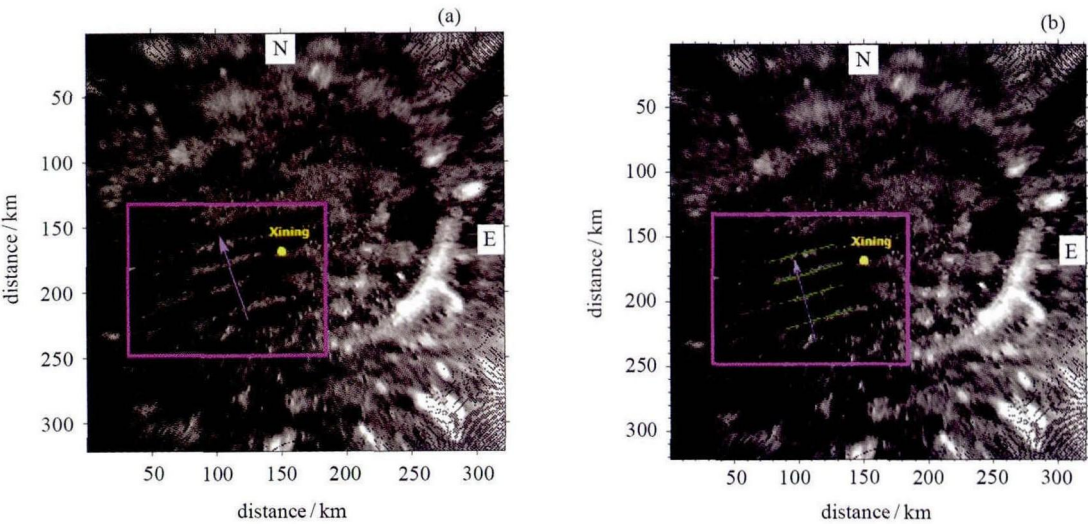


图 13 2015 年 5 月 17 日 13:34:26 UT 西宁台站气辉辐射大气重力波差分扰动观测 (a) 和选取 (a) 中 4 个重力波等位相面 (b)

Fig. 13 An unwrapped TD gravity image observed on the night of 17 May 2015 at 13:34:26 UT Xining Station (a). Same as (a), except the 4 wavefronts (b)



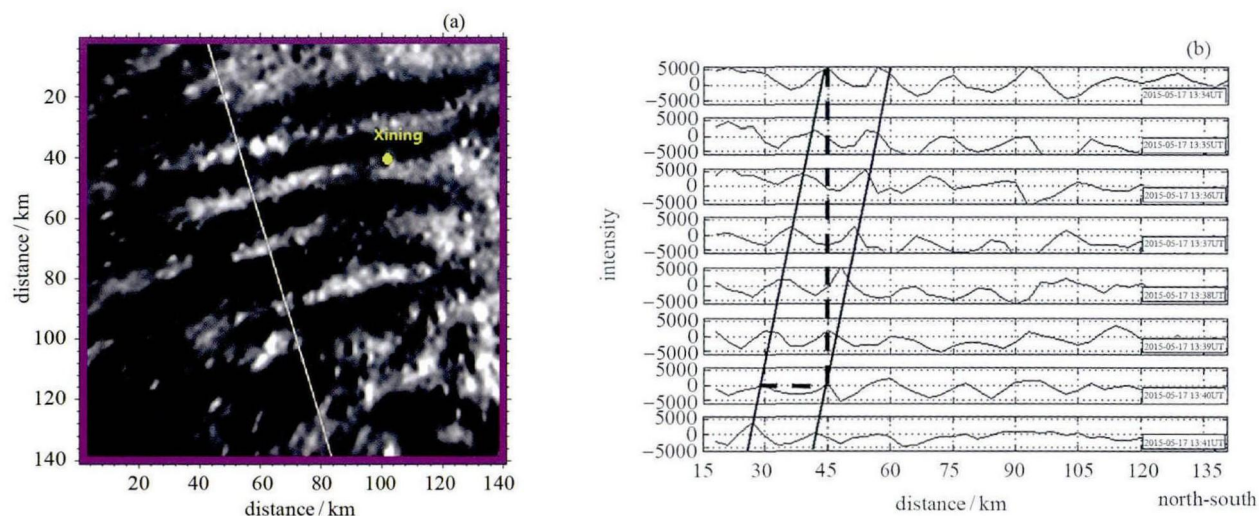


图 14 (a) 13:34:26 UT 西宁台站气辉辐射大气重力波活动区域 ( $141\text{ km} \times 141\text{ km}$ ), 直线为重力波波前法线方向.

(b) 大气重力波波动随时间和空间变化, 从上到下分别为 13:34 UT—13:41 UT 每隔 1 min 的波动随空间的距离变化, 斜线表示波前, 水平虚线表示波长, 垂直虚线表示观测周期

Fig. 14 (a) An unwrapped TD gravity image corresponding in an area of  $141\text{ km} \times 141\text{ km}$ . and (b) atmospheric gravity waves fluctuate over time and space diagram, from top to bottom, it is 13:34 UT to 13:41 UT 1 min intervals fluctuate changes with distance space, respectively. Slash represents wavefront, horizontal dashed line represents the wavelength, and the vertical dashed line represents the period of observation

图像数据进行了预处理, 处理结果清晰显示, 当日 21:30 BLT—22:00 BLT, 观测到一次明显的准单色大气重力波水平二维活动. 在此基础上, 初步分析并提取了该重力波的水平波长、水平传播方向、观测相速度和观测周期 ( $17.7\text{ km}$ ,  $339^\circ$ ,  $47\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $6.29\text{ min}$ ).

高频准单色大气重力波是中高层区域常见的一种大气波动现象, 早期的雷达研究表明, 在 MLT 区域周期小于 1 h 的高频大气重力波提供了约 2/3 的总动量通量<sup>[50]</sup>, 而全天空气辉成像仪具有相当高的时间分辨率, 一般可达几分钟以内, 能够有效探测 MLT 区域周期小于 1 h 的高频重力波, 有利于大气重力波动量通量的研究. 上述观测到的大气重力波周期为 6.29 min, 属于短周期高频重力波.

本文仅利用单层通道 OH 气辉成像仪的观测数据, 因此仅得到大气重力波的水平波长、水平传播方向、观测相速度和观测周期等信息. 如果能与流星雷达、MST 雷达或激光雷达展开联合观测, 则可以捕获大气风场信息以及重力波垂直方向的波动信息, 进而得到大气重力波的垂直波长、固有相速度 (去除大气风场影响后的相速度) 及固有周期等参量的信息<sup>[51]</sup>.

全天空气辉成像仪适合于对大气重力波活动进行长期观测. 从长时间累计的成像仪数据中可以统计重力波的季节变化特征、计算重力波的动量通量, 还可以研究重力波的产生、传播、破碎、耗散的具体过程对大气环境的影响. 大气重力波不仅对中高层大气动力和热力学平衡具有非常重要的贡献, 还会引发电离层扰动和扩展 F 层等. 所以, 开展全天空气辉成像探测具有重要的科学意义.

**致谢** 本文所使用的数据由子午工程及 TIMED/SABER 团队提供, 徐寄遥和涂翠老师提供了有益建议.

## 参考文献

- [1] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Rev. Geophys.*, 2003, **41**(1): 1-2
- [2] MARTYND F. Cellular atmospheric waves in the ionosphere and troposphere[J]. *Proc. Roy. Soc. London A: Math., Phys. Eng. Sci.*, 1950, **201**(1065): 216-234
- [3] HINES C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights [J]. *Can. J. Phys.*, 1960, **38**(11): 1441-1481
- [4] REID I M, RÜSTER R, CZECHOWSKY P, SCHMIDT G. VHF radar measurements of momentum flux in the summer polar mesosphere over Andenes ( $69^\circ\text{N}$ ,  $16^\circ\text{E}$ ),

- Norway [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**(11):1263-1266
- [5] FRITTS D C, WANG D Y. Doppler-shifting effects on frequency spectra of gravity waves observed near the summer mesopause at high latitude [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**(13):1535-1544
- [6] SATO K. Short-period disturbances in the equatorial lower stratosphere [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 1994, **72**(6):859-872
- [7] HOPPE U P, FRITTS D C. High-resolution measurements of vertical velocity with the European incoherent scatter VHF radar: 1. Motion field characteristics and measurement biases [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 1995, **100**(D8):16 813-16 825
- [8] WILSON R, CHANIN M L, HAUCHECORNE A. Gravity waves in the middle atmosphere observed by Rayleigh lidar: 2. Climatology [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 1991, **96**(D3):5153-5167
- [9] MITCHELL N J, THOMAS L, PRICHARD I T. Gravity waves in the stratosphere and troposphere observed by lidar and MST radar [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**(8):939-947
- [10] SATO K, O'SULLIVAN D J, DUNKERTON T J. Low-frequency inertia-gravity waves in the stratosphere revealed by three-week continuous observation with the MU radar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(14):1739-1742
- [11] RIGGIN D M, FRITTS D C, FAWCETT C D, et al. Radar observations of gravity waves over Jicamarca, Peru during the CADRE campaign [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1997, **102**(D22):26 263-26 282
- [12] YAMASHITA C, CHU X, LIU H L, et al. Stratospheric gravity wave characteristics and seasonal variations observed by lidar at the South Pole and Rothera, Antarctica [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2009, **114**(D12):1192-1192
- [13] HIROTA I, NIKI T. A statistical study of inertia-gravity waves in the middle atmosphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1985, **63**(6):1055-1066
- [14] HAMILTON K. Climatological statistics of stratospheric inertia-gravity waves deduced from historical rocketsonde wind and temperature data [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1991, **96**(D11):20 831-20 839
- [15] MURAYAMA Y, OYAMA K I, TSUDA T, et al. Rocketsonde observations of the middle atmosphere dynamics at Uchinoura (31°N, 131°E) during the DYANA Campaign. I: outline of experiments and background conditions [J]. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1992, **44**(11):995-1007
- [16] ECKERMANN S D, HIROTA I, HOCKING W K. Gravity wave and equatorial wave morphology of the stratosphere derived from long-term rocket soundings [J]. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 1994, **121**(521):149-186
- [17] FRITTS D C, GARTEN J F, RIGGIN D M, et al. Equatorial dynamics observed by rocket, radar, and satellite during the CADRE/MALTED campaign: 2. Mean and wave structures, coherence, and variability [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D22):26
- [18] MA Ruiping. Wind and wind shear observed by ZN-1 Rocket at Hainan station [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1997, **17**(1):70-74 (马瑞平. 用织女一号火箭在海南站探测的高空风和风切变 [J]. *空间科学学报*, 1997, **17**(1):70-74)
- [19] JIANG Guoying, XU Jiyao, SHI Dongbo, et al. Observations of the first meteorological rocket of the Meridian Space Weather Monitoring Project [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2011, **56**(19):1568-1574 (姜国英, 徐寄遥, 史东波, 等. 子午工程首枚气象火箭大气探测结果分析 [J]. *科学通报*, 2011, **56**(19):1568-1574)
- [20] KITAMURA Y, HIROTA I. Small-scale disturbances in the lower stratosphere revealed by daily raw in sonde observations [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 1989, **67**:817-831
- [21] HAMILTON K, VINCENT R A. High-resolution radiosonde data offer new prospects for research [J]. *Eos. Trans. Am. Geophys. Union*, 1995, **76**(49):497-506
- [22] VINCENT R A, ALEXANDER M J. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: an observational study of seasonal and interannual variability [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2000, **105**(D14):17 971-17 982
- [23] TSUDA T, MURAYAMA Y, WIRYOSUMARTO H, et al. A preliminary report on radiosonde observations of the equatorial atmosphere dynamics over Indonesia [J]. *J. Geomag. Geoelec.*, 1992, **44**(11):1041-1055
- [24] ALLEN S J, VINCENT R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: seasonal and latitudinal variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(D1):1327-1350
- [25] SHIMIZU A, TSUDA T. Characteristics of Kelvin waves and gravity waves observed with radiosondes over Indonesia [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1997, **102**(D22):26 159-26 171
- [26] YOSHIKI M, SATO K. A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D14):17 995-18 011
- [27] FETZER E J. Gravity wave variance in LIMS temperatures: I. variability and comparison with background winds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**(17):2461-2483
- [28] WU D, WATERS J. Satellite observations of atmospheric variances: a possible indication of gravity waves [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(24):3631-3634
- [29] ALEXANDER M. Interpretations of observed climatological patterns in stratospheric gravity wave variance [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 1998, **103**(D8):8627-8640
- [30] PICARD R, GALLERY W. MSX satellite observations of thunderstorm-generated gravity waves in mid-wave infrared images of the upper stratosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(7):939-942
- [31] MITRA S K, KUO Y. Digital Signal Processing: A Computer-based Approach [M]. New York: McGraw-Hill, 2006
- [32] MCLANDRESS C, ALEXANDER M J, WU D L. Mi-

- crowave Limb Sounder observations of gravity waves in the stratosphere: a climatology and interpretation [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2000, **105**(D9): 11947-11967
- [33] ERN M, PREUSSE P, ALEXANDER M J, *et al.* Absolute values of gravity wave momentum flux derived from satellite data [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2004, **109**(D20): 2083-2089
- [34] FRANCE J A, HARVEY V L, ALEXANDER M J, *et al.* High resolution dynamics limb sounder observations of the gravity wave-driven elevated stratopause in 2006 [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2012, **117**: D20108
- [35] KRASSOCSKY V, SHAGAEV M. On the nature of internal gravitational waves observed from hydroxyl emission [J]. *Planet. Space Sci.*, 1977, **25**(2): 200-201
- [36] TAYLOR M J, GARCIA F. A two-dimensional spectral analysis of short period gravity waves imaged in the OI (557.7 nm) and near infra red OH night glow emissions over Arecibo, Puerto Rico [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(18): 2473-2476
- [37] GARCIA F, TAYLOR M J, KELLEY M. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(29): 7374-7385
- [38] COBLE M R, PAPEN G C, GARDNER C S. Computing two-dimensional unambiguous horizontal wave number spectra from OH airglow images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1998, **36**(2): 368-382
- [39] KUBOTA M, FUKUNISHI H, OKANO S. Characteristics of medium-and large-scale TIDs over Japan derived from OI 630 nm nightglow observation [J]. *Earth Planets Space*, 2001, **53**(7): 741-751
- [40] SUZUKI S, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al.* Gravity wave momentum flux in the upper mesosphere derived from OH airglow imaging measurements [J]. *Earth Planets Space*, 2007, **59**(5): 421-428
- [41] TU C, HU X, YAN Z A, *et al.* First imaging observation of the gravity waves in the mesopause region in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**: 3784-3789 (涂翠, 胡雄, 闫召爱, 等. 中国首次中层顶大气重力波成像观测实验 [J]. 科学通报, 2009, **54**: 3784-3789)
- [42] LI Q, XU J, YUE J, YUAN W, LIU X. Statistical characteristics of gravity wave activities observed by an OH airglow imager at Xinglong, in northern China [C]//Symposium on Solar-Terrestrial Physics of China. Chongqing: Chinese Society of Space Research, 2011: 1401-1410
- [43] LI Q, XU J, YUE J, *et al.* Investigation of a mesospheric bore event over northern China [J]. *Ann. Geophys.*, 2013, **31**(3): 409-418
- [44] WANG C M, LI Q Z, XU J Y, *et al.* Statistical characteristics analysis of atmospheric gravity waves with OH all-sky airglow imagers at low-latitude region of China [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(11): 3659-3667. DOI:10.6038/cjg20141120 (王翠梅, 李钦增, 徐奇遥, 等. 基于 OH 全天空气辉成像仪观测的中国低纬地区重力波传播统计特征 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3659-3667)
- [45] XU J, LI Q, YUE J, *et al.* Concentric gravity waves over northern China observed by an airglow imager network and satellites [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015, **120**. DOI:10.1002/2015JD023786
- [46] ROACH F, MEINEL A. The height of the nightglow by the Van Rhijn method [J]. *Ap. J.*, 1955, **122**: 530
- [47] YEE J H, TALAAT E R, CHRISTENSEN A B, *et al.* TIMED instruments [J]. *Johns Hopkins APL Tech. Digest*, 2003, **24**(2): 156-164
- [48] FANG J C, NING X L. The Principle and Application of Celestial Navigation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006 (房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006)
- [49] HAPGOOD M A, TAYLOR M J. Analysis of airglow image data [J]. *Ann. Geophys.*, 1982, **38**: 805-813
- [50] FRITTS D C, VINCENT R A. Mesospheric momentum flux studies at Adelaide, Australia: observations and a gravity wave-tidal interaction model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**(3): 605-619
- [51] TANG J, KAMALABADI F, FRANKE S J, LIU A Z. Estimation of gravity wave momentum flux with spectroscopic imaging [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2005, **43**(1): 103-109