

中国首次中层顶大气重力波成像观测实验

涂翠^{①②}, 胡雄^{①*}, 闫召爱^{①②}, 徐轻尘^①, 赵明亮^①, 刘佳^①

① 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: xhu@cssar.ac.cn

2009-04-23收稿, 2009-06-17接受

国家自然科学基金(批准号: 40774087)和国家航天领域高技术课题资助项目

摘要 2009年1月5日02:00到06:00之间, 在河北省廊坊市韩村镇(39.4°N, 116.6°E)利用 CCD 气辉成像技术开展了我国首次中层顶大气重力波观测实验. 结果显示, 当日03:00到05:00点之间, 观测到了丰富的、明显的准单色大气重力波水平二维活动. 初步分析了3个大气重力波个例, 得到它们的水平波长、观测水平相速度、水平传播方位角和观测周期分别约为(12.3 km, 41 m/s, 327°, 5 min), (25 km, 35 m/s, 68°, 12 min)和(10 km, 48 m/s, 341°, 3.5 min).

关键词

中层顶
气辉
大气重力波
成像仪

大气重力波是中高层大气中经常出现的自然现象. 产生于低层大气的重力波, 在向上传播时携带能量和动量, 在中层顶附近发生饱和、破碎等过程, 将其能量和动量沉淀下来, 导致中间层和低热层的大气环流和温度分布严重偏离辐射平衡状态, 对该高度范围的大气环流和冬半球温度高、夏半球温度低的大气结构起决定性的作用, 因此大气重力波的观测和研究吸引了众多科学家的关注, 是中高层大气动力学研究的重要内容^[1].

在 80~110 km 的中层顶区域, 大气光化学过程非常复杂, 一些原子(如 O, Na 等)和分子(如 OH, O₂ 等), 在白天吸收了太阳辐射能量, 在夜间通过光化反应以辉光的形式辐射出来, 这种夜间大气原子和分子的发光现象, 称为夜气辉^[2]. 大气重力波传播到气辉层时, 会通过大气背景温度、风场、密度的扰动, 导致这些原子和分子的数密度产生扰动, 从而对气辉的体辐射率产生扰动^[3,4]. 人们通过监测气辉辐射扰动, 可以监测和研究大气重力波活动的特征; 气辉成为一种极好的大气重力波探测的示踪物, 并被广泛用于中高层大气风场、温度和成分密度等遥

感探测中^[5,6].

随着 CCD 技术的发展, 气辉的水平二维成像技术, 即气辉重力波成像仪技术, 得到迅速发展, 国际上科学家广泛使用这类设备开展大气重力波的观测和研究. 重力波成像仪可获得水平二维的大气重力波信息, 包括获得准单色重力波的特征参量(如水平波长、观测周期、传播方向等)、估计中间层顶的重力波的动量通量和能量通量^[7,8]. 如果利用两层或多层的气辉观测数据, 以及测站上空的大气风场数据, 可以进一步获得重力波本征周期、垂直波长等参量^[9,10]. 重力波成像仪的数据对于我们了解大气重力波活动的变化规律具有重要的作用.

我国于 1986~1989 年通过中美合作, 利用气辉光度计获得了第一批夜气辉观测数据^[11]. 柯熙政^[12]于 1994 年报道了陕西的气辉光度计观测结果, 发现有明显的重力波扰动现象. 王咏梅和王英鉴^[13]于 1997 年报道了利用气辉测量中层顶大气温度的尝试. 徐寄遥等人^[14]深入开展了大气重力波影响光化学应用的理论研究. 但是, 我国还鲜有大气重力波成像仪

引用格式: 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. 科学通报, 2009, 54: 3784~3789

Tu C, Hu X, Yan Z A, et al. First imaging observation of the gravity waves in the mesopause region in China. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0489-4

观测和研究的报道。

中国科学院空间科学与应用研究中心正在河北廊坊韩村,建立以测风、测温激光雷达、中频雷达、流星雷达、重力波成像仪等先进设备为主的临近空间/中高层大气探测研究基地。在该基地支持下,我们开展了气辉大气重力波成像仪的自主研制。2009年1月5日,我们利用该设备,在韩村基地成功开展了我国首次中层顶区域大气重力波成像观测实验。本文介绍该次实验的重力波成像仪及其观测个例分析结果。

1 重力波成像仪

气辉重力波成像仪一般由鱼眼(大视场)镜头、远心滤光系统、CCD相机等部分组成,如图1。鱼眼镜头用于收集大视场的气辉,一般采用180°视场的鱼眼镜头。远心滤光系统一般由远心镜、干涉滤光片等组成,远心镜的作用是对光进行准直,使得通过干涉滤光片的光的发散角满足所观测谱线的窄带滤光要求;许多仪器采用多通道滤光片,以实现多个气辉谱线的观测。CCD相机部分由成像镜头和科学级CCD组成,最后生成二维成像图片。数据后处理将利用这些图片获得大气重力波信息。重力波成像仪的操作和控制,完全由电脑控制实现。对于观测宽带的气辉,如OH梅涅尔带气辉,可以采用简单的滤光片取代图1的远心滤光系统。

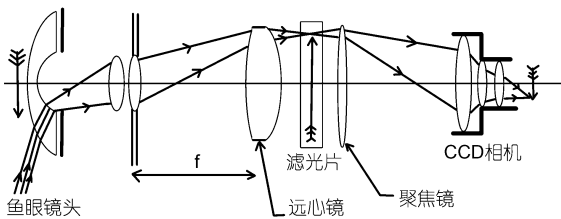


图1 气辉重力波成像仪组成示意图^[15]

我们的重力波成像仪具备观测窄带气辉和宽带气辉的能力。在本次实验中,我们拟观测OH宽带气辉。观测设备主要由鱼眼镜头、滤光片和CCD等组成,技术参数见表1。系统波长响应范围为710~1000 nm,包含了OH和O₂(865 nm)的气辉波段。由于这里O₂(865 nm)气辉波段与OH的带宽相比非常窄,相对于OH而言,其对710~1000 nm宽波段总的

气辉辐射的贡献很小、甚至可以忽略,所以可以近似认为该成像仪观测的气辉为OH气辉。

OH气辉辐射的峰值高度为87 km,厚度约为8 km。710~1000 nm波段的气辉辐射强度约为18 KR,经估算,该重力波成像仪单个像素的信噪比为10时,曝光时间需要2 s。单个像素对应的天顶方向的水平分辨率小于1 km。

表1 气辉重力波成像仪参数表

| 鱼眼镜头 | 透射波段 | CCD |
|-----------------|-------------|------------------|
| f10.5 mm, #F2.8 | 710~1000 nm | 1024×1024, 24 μm |

我们在实验室对CCD进行了成像测试,厂家所提供的CCD噪声、暗电流、阱深等参数都能达到。我们采用MaxImDL软件对该CCD进行成像控制,该软件提供多种模式,如Dark, Bias, Flat Field以及曝光等模式,对成像图片进行校正。

另外,该重力波成像仪直接探测的是气辉辐射。我们关心的是该辐射随时间和空间的变化,利用该变化来提取大气重力波的信息,不需要辐射绝对值的信息,所以,我们不对气辉重力波成像仪的成像数据进行定标。没有定标的成像图片不影响我们分析大气重力波。

2 实验和数据分析

韩村基地远离城市,具有良好的光学观测条件。我们选取韩村基地,作为上述OH气辉重力波成像仪设备的首次观测实验的场地。2009年1月4日到达韩村,做好实验前准备,夜间开始观测,2009年1月5日上午6:36结束观测实验。

通过一个夜间的观测实验,获得了很好的2009年1月5日02:09~06:00时间段的气辉观测数据。其竖直线KEO图如图2。竖直线KEO图是指将每张图片的中间的竖直线依次抽出来,组成一张新的图片。一般利用该图片了解夜间观测数据的基本情况,如是否有云、是否是晴空等,为是否进一步分析作参考。

图2中,弥散的亮点,是星星通过竖直线留下的图像。从图2可知,在日出之前的所有观测时间里,有清晰的星星图像,说明天空晴朗无云,是一次很好的观测实验。当晚有关的实验条件如下。

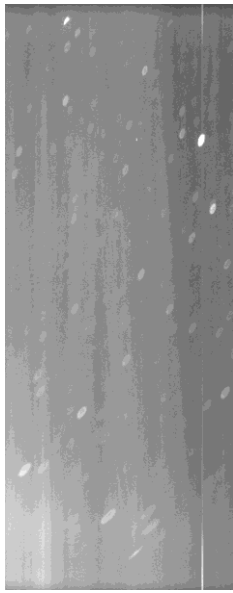


图2 竖直线 KEO 图

横轴为时间(02:09~06:00), 纵轴为竖直线像素点

气象条件: 2009年1月4日晚上, 最低温度达到-10℃左右, 晴, 少云, 有风; 2009年1月5日02:00以后, 晴空, 无云. 月光等杂光: 弦月; 西北方向存在杂光. 镜头指向东南天空. 曝光时间58s, 时间分辨率为1min.

对于观测的原始气辉图片(1024×1024), 我们首先利用星图分析得到气辉图像的北方方位和测站天顶在图像上的位置, 然后利用87km上空OH气辉在CCD上的几何投影关系, 将气辉图像的像素坐标转换为OH气辉层的二维水平坐标, 最后得到在气辉层水平直角坐标系下的图像, 相关坐标系转换可以参看文献[7].

为了消除一些低频和大气背景辐射, 将时间上相邻的两张图像相减, 得到时间微分的图像, 这些图像数据用于下面准单色重力波的分析.

3 重力波观测结果

通过对逐张处理后的重力波图像的分析, 发现了许多准单色重力波活动的现象. 作为例子, 下面给出几个准单色重力波的个例观测结果.

在03:40~04:00一直存在一个单色重力波活动. 图3给出了03:46:53时刻的图片. 在图3红色圆圈内可看到明显的、平行的、明暗相间的波动条纹, 这就是大气重力波, 平行的亮(暗)条纹是该重力波

的波前(等相位面). 根据重力波理论, 大气重力波沿垂直于波前的方向传播; 图3中的垂直于波前方向的方位角(自北顺时针)约为: 327°(如图中绿色箭头所示)或147°. 作为初步简单估算, 从图3中选取相隔3个波长的两个较为清晰的等相位面, 量出它们之间的水平距离, 再除以该波长数, 得到该重力波的水平波长为~12.3km; 然后利用相隔1min的连续观测图像序列, 估计出该重力波某个波前在7min内传播的距离, 再除以传播时间, 得到观测水平相速度为~41m/s, 并确认水平传播方向的方位角约为327°. 最后, 波长除以水平相速度得到其观测周期约为~5min.

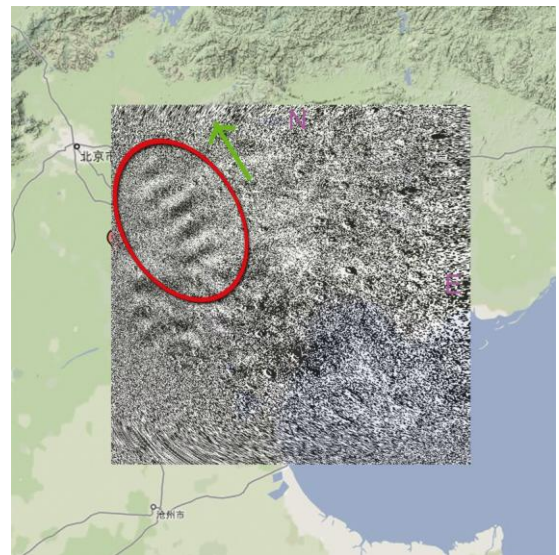


图3 03:46:53 LT 时韩村气辉辐射大气重力波扰动观测图

为了更清晰地显示该大气重力波及其分析过程, 在上述的每个图片中, 沿该波动传播方向选取一个矩形区域(19km×93km), 该区域完全包含了该大气重力波的活动区域. 对该区域的数据沿波前方向平均, 得到一条沿波传播方向的曲线. 图4给出了时间上连续的7条曲线, 自上而下每条曲线的时间为03:43~03:49, 时间间隔为1min. 图4的曲线清晰地显示了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, 从图上可简单估计出其峰-峰间的距离即波长为12.3km. 图中显示, 波峰随时间向左传播, 不是向右传播, 从而解决了该波动水平传播方向的180°模糊问题. 图中斜线(等相面)的斜率(即

重力波的观测水平相速度)约为 41 m/s. 波动的观测周期也可从图中垂直线段的时间长度获知, 或利用波长除以水平相速度得到, 约为 5 min. 这些参数数据与前面估计的参数数据一致.

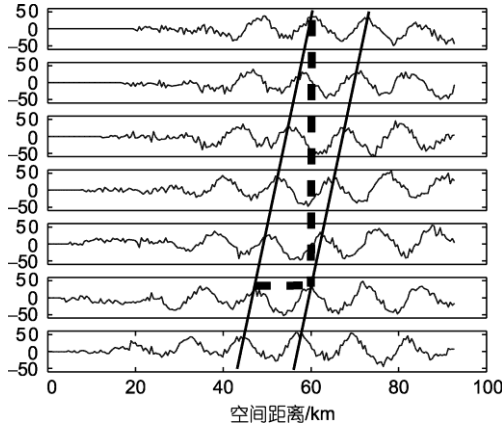


图 4 个例一中波动随空间和时间的变化图

从上至下分别表示的是 03:43~03:49 之间每隔 1 min 的波动随空间距离的变化. 斜线表示波前, 水平虚线表示波长, 垂直虚线表示观测周期

图 5~7 为观测到的重力波活动个例二和个例三. 在图 5 中存在两个比较明显的波动, 一个为较大尺度东偏北向的波动(如图中红色线标识了该波动的等相面, 个例二), 另一个为波前与之近似垂直的小尺度波动(如图中青色圆圈内区域, 个例三). 由于两个波夹杂在一起, 为了研究他们的性质, 我们仿照个例一中的方法, 分别提取了这两个波动的信息并进行分析.

为了更清晰地说明个例二中大尺度波动, 我们在图中用红色直线画出了该波动的等相面位置, 见图 5. 该大气重力波明显的存在时间为 04:30~05:10. 采用与个例一中相同的方法估算, 该大气重力波的水平波长约为 25 km, 观测相速度约为 35 m/s, 观测周期约为 12 min, 水平传播方向的方位角约为 68°. 类似于图 4 的分析方法, 沿该波动传播方向选取 (53 km × 120 km) 的矩形区域, 并沿波前方向平均, 得到沿波传播方向的曲线, 见图 6. 由于波前与之近似垂直的小尺度波动的波长较小, 大致在 10 km 左右, 这样得到的平均值曲线可以剔除小尺度波动对该大尺度波动的影响. 图 6 给出了 04:41~04:46 的大气波动的时间空间变化曲线, 可较清晰地看到该大气重力波.

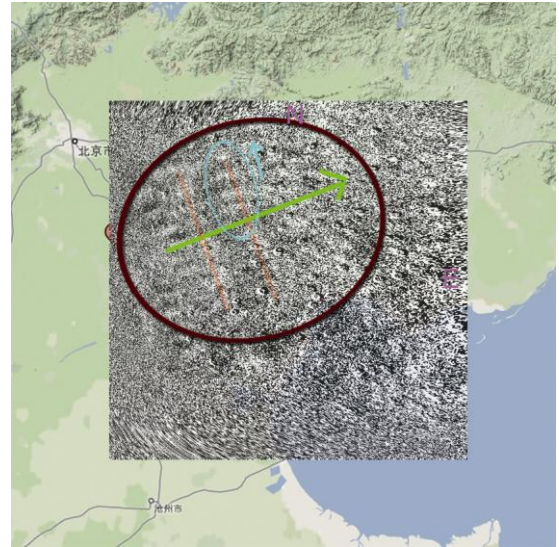


图 5 04:46:22 LT 时韩村气辉辐射重力波扰动观测图像

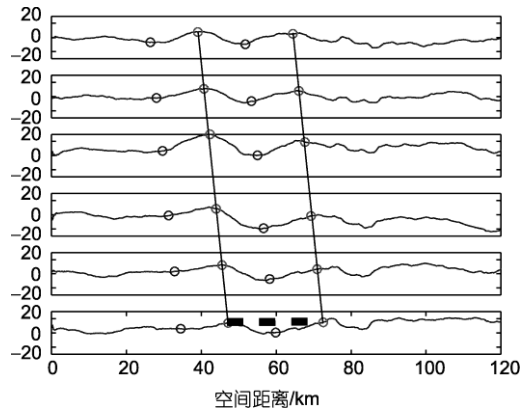


图 6 个例二中大尺度波动随空间和时间的变化图

从上至下分别表示的是 04:41~04:46 之间每隔 1 min 的波动随空间距离的变化. 图中用圆圈表示出了峰和谷的位置, 斜线表示波前, 水平虚线表示波长

为了分析图 5 个例三中青色圆圈内的小尺度波动的相关参量, 采用上述基本相同的分析方法, 沿该波动传播方向选取一个 (18 km × 80 km) 的矩形区域, 并沿其波前方向平均, 最后得到该小尺度波动的水平波长约为 10 km, 观测水平相速度约为 48 m/s, 观测周期约为 3.5 min, 水平传播方向的方位角约为 341°; 如图 7.

4 讨论和结论

准单色重力波是中层顶区域中经常出现的自然现象. 上述发现的重力波有个特点, 就是周期短, 属于高频重力波, 这点与激光雷达和无线电

雷达廓线中经常观测到的准单色重力波多为惯性重力波不同^[16]。上述结果中大气重力波的波前基本都是平行的直线,说明该大气重力的激发源应该在远方。

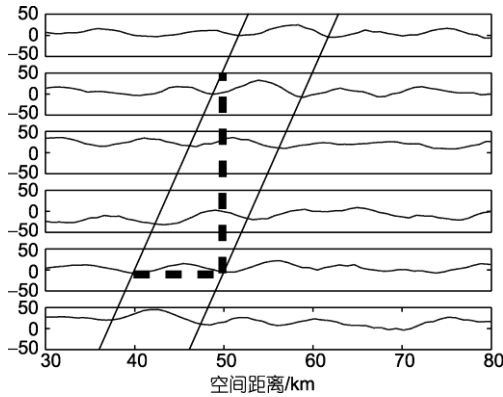


图7 个例三中小尺度波动随空间和时间的变化图

从上至下分别表示的是04:41~04:46之间每隔1 min的波动随空间距离的变化。图中斜线表示波前,水平虚线表示波长,垂直虚线表示观测周期

仅利用单通道的大气重力波成像仪的观测数据,不能获得大气重力波的垂直波长、本征周期等参量的信息。利用多通道仪器,或者对风场进行同时观测,

则可以获得大气重力波的包括垂直波长、本征频率以及垂直传播方向等所有参量。国内以往的气辉观测实验^[11,12],是利用光度计的一维测量,结果中都有明显的大气重力波活动;但是限于光度计技术,只能给出大气重力波活动周期的信息,不能像成像仪一样给出大气重力波水平波长、传播方向等参数。

通过本次观测实验,首次获得了我国上空中层顶附近的大气重力波成像数据,初步分析得到3个准单色大气重力波的参数分别约为(水平波长:12.3 km;观测水平相速度为:41 m/s;水平传播方向的方位角:327°;观测周期:5 min), (水平波长:25 km;观测水平相速度:35 m/s;水平传播方向的方位角:68°;观测周期:12 min)和(水平波长:10 km;观测水平相速度:48 m/s;水平传播方向的方位角:341°;观测周期:3.5 min)。

大气重力波成像仪非常适合对大气重力波活动进行监测。有研究报道,气辉辐射异常与地震发生可能有内在联系^[17],而中层顶大气波动一直是空间天气监测中非常重要的要素,会诱发电离层行进扰动和扩展F层等,所以,利用大气重力波成像仪开展中层顶大气波动监测具有重要的科学意义和应用前景。

致谢 UIUC的Gary R.Swenson教授、Alan Z.Liu博士和武汉大学的艾勇教授、何平安教授在重力波成像仪设计阶段提供了很好的建议,特此致谢。

参考文献

- 1 Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev Geophys*, 2003, 41: 1003 [\[doi\]](#)
- 2 Chamberlain J W. *Physics of the Aurora and Airglow*, International Geophysics Series, 2. New York: Academic Press, 1961
- 3 McDade I C, Llewellyn E J, Murtach D P, et al. Simultaneous rocket measurements of the OH Meinel Au=2 sequence and sequence and (8, 3) band emission profiles in the nightglow. *Planet Space Sci*, 1987, 35: 1137—1147 [\[doi\]](#)
- 4 Makhlof U B, Picard R H, Winick J R. Photochemical-dynamical modeling of the measured response of airglow to gravity waves. *J Geophys Res*, 1995, 100: 11289—11311 [\[doi\]](#)
- 5 Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A, et al. WINDII—the wind imaging interferometer on the UARS spacecraft. In: *AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 31st, Reno, NV, Jan. 11—14, 1993. 6
- 6 Ortland D A, Hays P B, Skinner W R, et al. Remote sensing of mesospheric temperature and O₂(1S) band volume emission rates with the high resolution Doppler imager. *J Geophys Res*, 1998, 103: 1821—1835 [\[doi\]](#)
- 7 Coble M R, Papen G C, Gardner C S. Computing two-dimensional unambiguous horizontal wave number spectra from OH airglow images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 368—382 [\[doi\]](#)
- 8 Tang J, Liu A Z, Swenson G R. High frequency gravity waves observed in OH airglow at Starfire Optical Range, NM: Seasonal variations in momentum flux. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1966 [\[doi\]](#)
- 9 Liu A Z, Swenson G R. A modeling study of O₂ and OH airglow perturbations induced by atmospheric gravity waves. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4151 [\[doi\]](#)

- 10 Reisin E R, Scheer J. Characteristics of atmospheric waves in the tidal period range derived from zenith observations of O₂ (0-1) Atmospheric and OH(6-2) airglow at lower midlatitudes. *J Geophys Res*, 1996, 101: 21223—21232 [\[doi\]](#)
- 11 朱岗崑. 北京近郊夜空气辉的观测和分析——中国第一批气辉观测数据(1986—1989). *地球物理学进展*, 2008, 23: 319—325
- 12 柯熙政. 高层大气中的气辉扰动. *陕西气象*, 1994, 2: 29—31
- 13 王咏梅, 王英鉴. 利用光谱拟合法反演中间层顶大气温度. *空间科学学报*, 1997, 17: 358—352
- 14 徐寄遥, 马瑞平. 重力波对中层顶区 O₃ 及 OH 分布的影响. *科学通报*, 2001, 46: 514—517
- 15 Mende S B, Eather R H, Lamodt E K. Instrument for the monochromatic observation of all sky auroral images. *Appl Opt*, 1977, 16: 1691—1700 [\[doi\]](#)
- 16 Hu X, Liu A Z, Gardner C S, et al. Characteristics of quasi-monochromatic gravity waves observed with Na lidar in the mesopause region at Starfire Optical Range, NM. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 2169 [\[doi\]](#)
- 17 菲什科瓦, 戈赫博格, 詹志佳. 夜间气辉与地震活动之间的关系. *国际地震动态*, 1987, 3: 33—36