0254-6124/2007/27(6)-491-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Jiang Kui, Ding Feng, Wan Weixing, Reid I M, Woithe J M. Observations of atmospheric gravity waves in airglow over Adelaide. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(6): 491∼497

Adelaide 地区大气重力波的气辉观测*

江 葵[1,2,3] 丁 锋[1] 万卫星[1] Reid I M[4] Woithe J M[4]

[1](中国科学院地质与地球物理所 北京 100029)

[2](中国科学院武汉物理与数学研究所)

[3](中国科学院研究生院)

[4](澳大利亚 Adelaide 大学物理系)

摘 要 利用澳大利亚 Adelaide (34.5°S, 138.5°E) 地区 7 年 (1995—2001 年) 的 OH 和 OI 气辉观测数据, 以及同地区中频雷达所测背景风场数据, 通过最大熵谱分析方法, 统计分析了该地区大尺度重力波的传播特性. 结果表明, (1) 在中层顶气辉观测区, 利用 OH 气辉探测到 48 个重力波事件, 利用 OI 气辉探测到 29 个重力波事件, 这些重力波的周期和水平相速度分别集中在 68 min 和 36 m/s 左右, 具有东南向的优势传播方向, 平均仰角为 8° ∼ 10°, 接近水平方向传播; (2) 通过 OH 气辉和 OI 气辉观测到了同一个重力波事件, 并根据两个高度上观测到的扰动相位差判断该重力波为上行波.

关键词 气辉; 最大熵谱分析; 滑动窗; 风剪切

中图法分类号 P 353

Observations of Atmospheric Gravity Waves in Airglow Over Adelaide

JIANG Kui[1,2,3] DING Feng[1] WAN Weixing[1] Reid I M[4] Woithe J M[4]

[1](*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

[2](*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences*)

[3](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

[4](*Department of Physics and Mathematical Physics, University of Adelaide, Australia*)

Abstract This paper presents the statistical results of the propagation characteristics of large-scale gravity waves observed by OH and OI airglow during the years from 1995 to 2001 in Adelaide, Australia (34.5°S, 138.5°E). The propagation parameters were obtained through the three-channel maximum entropy method. Totally 48 gravity wave events were identified by the OH airglow observation and 29 events were identified by OI. The periods and horizontal phase speeds of these gravity waves peak at about 68 min and 36 m/s, and the gravity waves shows an obvious dominating direction of propagating south-eastward. The mean elevation is 8° ∼ 10°, which shows the nearly horizontal propagation trends. It was also found that an up-going gravity wave event was observed nearly simultaneously by OH and OI. However, in most cases, the gravity waves cannot be observed

* 国家自然科学基金项目 (40774090, 40636032) 和国家重点基础研究规划项目 (2006CB806306) 共同资助

2007-03-29 收到原稿, 2007-08-28 收到修定稿

simultaneously by OH and OI observations, because of the errors of the instruments or the effects of strong wind shears on gravity waves in the mesopause region.

Key words Airglow, Maximum entropy method, Sliding window, Wind shear

1 引言

大气重力波一直是中高层大气包括电离层领域的研究热点. 气辉观测是研究获得重力波传播特性的一种常规观测手段. 早在 1977 年, Moreels 和 Herse[1] 通过全天空 OH 气辉观测到了 85 km 高度的二维波动带状结构. 他们的研究结果表明, 这种规则的波动现象是由几组探测到的产生于对流层并向中层和热层传播到中层顶区域的重力波引起的. 1995 年 Swenson 等 [2] 利用气辉仪和 NCAR Electra 航天器对美国毛伊岛上空进行观测, 证实了在中层大气中, 周期小于 1 h 的重力波扰动是一种重要而又经常发生的现象. Walterscheid[3] 采用澳大利亚 Adelaide (34.5°S, 138.5°E) 9 个月 OH 和 O_2 气辉观测数据, 统计分析了水平波长为几十 km 的小尺度重力波在 80~100 km 高度范围的传播特性, 认为在中层顶区域的这种准单色波传播方向具有显著的各向异性的特征, 特别是在冬夏两季. 同时重力波出现率最大在夏季, 主要是南向传播, 而冬季出现率较小, 主要为北向传播. Nikolai[4] 采用日本 Shigaraki (35°N, 136°E) 37 个月的 OH 和 O_2 气辉观测数据进行统计分析, 发现在中层顶区域观测到的重力波周期范围为 0.5~2 h, 水平波长为 100~500 km. 同时, 通过 OH 和 OI 气辉观测到的重力波方位角的优势传播方向在冬季分别是西北向及南向和西北向及东南向, 在夏季则转到北向. Ding[5] 采用澳大利亚 Adelaide (34.5°S, 138.5°E) 7 年的 OH 和 OI 气辉观测数据, 对周期为 10~30 min, 水平相速度为 20~250 m/s 的中小尺度重力波进行统计分析, 结果表明, 在一地区的中小尺度重力波的周期和相速分布集中在 17 min, 70 m/s (OH) 以及 20 min, 40 m/s (OI). 同时, 重力波具有东南向的优势传播方向, 并且传播方位角在夏季为 160°, 在冬季转向 130°. 分析表明, 传播方向的季节变化与背景风场的季节变化密切相关.

Walterscheid[3] 和 Ding[5] 等的研究主要针对中层顶高度观测到的较小尺度的重力波, 实际上在中层顶区域还存在周期较长的重力波, 从目前利用气辉观测数据对重力波在中层顶 (主要范围 80~100 km) 传播的研究状况来看, 对于较大周期 (> 40 min) 的研究较少. 本文利用澳大利亚 Adelaide (34.5°S, 138.5°E) 7 年的 OH 和 OI 气辉数据, 结合同一地区中频雷达所测背景风场数据, 通过最大熵谱分析方法, 统计分析了周期在 40~80 min 范围的重力波传播特性.

2 气辉数据处理方法

2.1 数据的预处理

本文使用的观测数据来自澳大利亚 Adelaide 大学的三通道气辉仪对两种气辉 (OH 和 OI) 的强度进行的观测记录. 其中 OH 和 OI 气辉的中心观测高度分别为 85 km 和 97 km. 每种气辉在观测高度上有三个观测点, 观测点间距分别为 12 km (OH) 和 13 km (OI). 三通道气辉仪每隔 30 s 记录一次观测点的平均气辉强度 [6]. 收集了 1995 年到 2001 年共约 1460 天的 OH 和 OI 气辉观测数据.

为便于之后的数据处理, 需要对这些每 30 s 轮流记录 OH 强度和 OI 强度的数据进行预处理. 由于存在各种干扰, 原始观测数据会经常出现跳跃点和乱码, 我们将这些有缺陷的原始数据进行梳理, 更正错误记录, 去除不必要的数据和进行线性插值补足数据间断点等, 使得这些原始数据变成三通道随时间均匀递增的数值序列.

图 1 显示的是 1999 年 1 月 12 日从 2100 LT 到次日 0400 LT 气辉强度时间序列. 从三条时间序列可以看出明显的扰动情况.

2.2 频谱分析

假设气辉仪在 OH(或 OI) 高度的三个观测点观测到的三个气辉发光强度的时序为 I_1, I_2 和 I_3, 通过预处理后的每种气辉的气辉强度时序表示为

$$I_i = (I_1, I_2, I_3).$$

为了分析重力波扰动, 必须对气辉强度时序进行滤波, 分离出这些序列中的扰动信息. 可将这些过程分为三个步骤: 首先, 对 I_i 采用滑动窗口方法截取固定时间长度的时序, 本文选择时间窗口长度为 2 h,

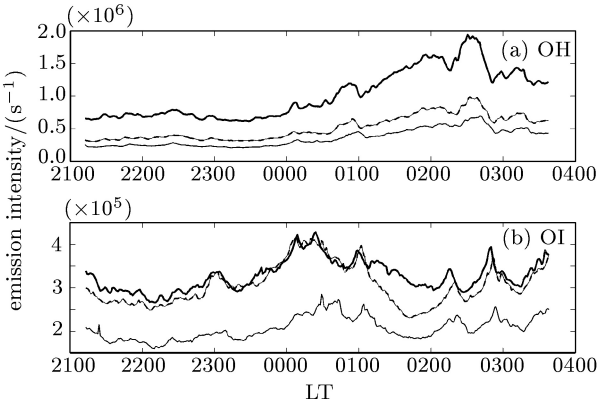


图 1 1999 年 1 月 12 日晚观测到的 OH 和 OI 气辉强度的时间序列
(三条曲线分别表示气辉仪三个镜头的观测结果)
Fig.1 OH and OI emission intensity time series observed on January 12, 1999
(Three curves in each plot show the time series observed by three fields of the photometer)

滑动步长为 1 min; 然后, 通过线性拟合求残差的方法, 在固定时间长度时序中分离背景变化时序和扰动时序; 最后, 对分离出的扰动时序进行最大熵谱分析, 并计算重力波扰动的传播参量.

2.2.1 最大熵谱分析方法

最大熵谱分析方法是由 Burg[7] 和 Von[8] 等提出并逐步发展起来的现代谱分析方法, 与传统的傅里叶变换和小波变换等方法相比, 最大熵谱分析方法能更精确地估计各种信号的真实功率谱, 特别是在较短的序列长度下, 最大熵谱分析方法分辨率大大高于传统的谱分析. 本文采用的是 Strand[9] 给出的最大熵动态互谱分析方法.

在气辉观测高度上的三个观测点中 (记为点 1, 2 和 3), 以其中一点为坐标原点 (0, 0), 选取东向和北向分别为 x 轴和 y 轴正向. 将在这三个观测点上得到的扰动时序记为 I_1, I_2 和 I_3, 通过设定滤波阈值以及相关系数, 可以将时域信号 (I_1, I_2, I_3) 输入三通道的最大熵动态谱函数, 得到三通道信号的频率和相位差, 有

$$(f, \varphi_{21}, \varphi_{31}) = F_{\mathrm{mem}}(I_1, I_2, I_3). \tag{1}$$

其中, F_{mem} 表示最大熵谱函数, f 表示波频率, φ_{i1} $(i = 2, 3)$ 为三个扰动时序信号之间的互谱相位差.

在最大熵谱分析中, 输出量包含对应的三个自谱、互谱相位, 互谱幅度和互相关系数. 在式 (1) 中, 本文选取了所需的波频率和互谱相位差三个参数. 而对于每一次输入时序, 其固定窗口长度为 2 h, 通过程序后得到一组对应于该时序中心时间的输出量 f, φ_{21} 和 φ_{31}, 通过滑动时间窗得到这些输出量的时序.

2.2.2 重力波传播参量的获取

通过 2.2.1 节中得到的重力波扰动频率 f, 可以得到角频率 ω. 该频率是地面固定坐标系中观测到的扰动视在频率. 考虑到背景风场对重力波的多普勒频移, 需要结合风场数据计算扰动在随风运动坐标系中的本征频率 ω_0. 本文使用 Adelaide 当地的中频雷达在 OH 和 OI 两个观测高度观测到的风场日平均值, 通过伽利略变换得到重力波的本征频率, 有

$$\omega_0 = \omega - k_x v_x - k_y v_y, \tag{2}$$

其中, v_x, v_y 分别是东向和南向的风速.

采用之前选定的坐标系, 设 x_{21} 和 y_{21} 以及 x_{31} 和 y_{31} 为观测点 2 和 3 分别与观测点 1 在 x 和 y 方向的距离分量. 则扰动的传播参量满足

$$\begin{aligned} k_x x_{21} + k_y y_{21} &= \varphi_{21}, \\ k_x x_{31} + k_y y_{31} &= \varphi_{31}, \end{aligned} \tag{3}$$

其中, k_x 和 k_y 是重力波的水平波数. 相位差 φ_{21} 和 φ_{31} 已经通过最大熵函数 (1) 式得到. 对 (3) 式求解可得

$$\begin{aligned} k_x &= \frac{y_{21}\varphi_{31} - y_{31}\varphi_{21}}{x_{31}y_{21} - x_{21}y_{31}}, \\ k_y &= \frac{x_{21}\varphi_{31} - x_{31}\varphi_{21}}{x_{21}y_{31} - x_{31}y_{21}}. \end{aligned} \tag{4}$$

进一步计算得到重力波的水平波速、方位角和周期, 有

$$v_{\mathrm{ph}} = \omega_0 / \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \tag{5}$$

$$\sigma = \arctan(k_x / k_y), \tag{6}$$

$$T = 2\pi / \omega_0. \tag{7}$$

为了得到重力波扰动参量的传播仰角, 还需计算波参量垂直波数 k_z. 根据内重力波色散关系 [10], k_z 可由下式计算得到

$$k_z^2 = \frac{\omega_0^2 - \omega_a^2}{c^2} - (k_x^2 + k_y^2)\left(1 - \frac{N^2}{\omega_0^2}\right). \tag{8}$$

其中， N 为浮力频率， $N^2=(\gamma-1)g^2/c^2$, c 为观测高度上的声速. 重力波的传播仰角有

$$\theta=\arctan\left(\sqrt{k_x^2+k_y^2}/k_z\right). \tag{9}$$

将上节中得到的重力波频率和各观测点之间相位差的时序代入式 (4)~(7), 可以得到周期、水平相速度和传播方位角随时间的变化. 如果有稳定的重力波波场通过观测点, 则通过最大熵分析得到的频率 f 的分布会出现一个峰值. 同时, 三个观测点所记录的扰动时序出现近似稳定的相位差. 这使得通过式 (4)~(7) 得到的周期、水平相速度和传播方位角会在一段时间内平稳变化. 在有湍流的情况下, 不会观测到稳定的相位差, 据此可以排除掉湍流事件. 我们设定, 如果周期、水平相速度和传播方位角等参量在至少一个扰动周期内平稳变化, 就确认观测到一次重力波事件.

3 个例分析

图 1 给出了从 1999 年 1 月 12 日晚至第二天凌晨的气辉强度观测时序. 图 2 给出了该时间段的重力波各传播参量随时间变化的频谱分析结果. 如图 2 显示, 从 0000 LT 到 0300 LT, 重力波的周期、相速度以及传播方向等参量随时间基本平稳变化, 反映有稳定的重力波波场通过观测点, 并被 OH 气辉 (观测高度约 85 km) 和 OI 气辉 (观测高度约 97 km) 同时观测到. 重力波在 OH 观测高度的传播周期、水平相速度和方位角的平均值分别是 14 min, 53 m/s 和 $-29°$ (方位角定义为重力波波矢方向与正北向之间的顺时针夹角); 在较高的 OI 观测高度, 观测到的平均传播周期、水平相速度和方位角为 14 min, 35 m/s 和 $-35°$. 在两个高度观测到重力波的平均周期大小相同, 水平相速度稍有差异, 且传播方向一致.

在相差 12 km 的两个高度上, 同时观测到传播参数相近的重力波, 这表明极有可能是通过 OH 气辉和 OI 气辉观测到了同一个重力波事件. 两个高度上的重力波传播参量之间的差异可以用背景风场在不同高度的变化来解释, 即在重力波的本征频率不变的情况下, 不同观测高度的背景风场差异导致重力波视在频率发生不同程度的多普勒频移, 通过式 (4) 和式 (5) 影响到观测周期和相速度, 从而导致重力波周期和水平相速度在不同两个观测高度上的少许差异.

从图 1 所示的气辉强度观测时序可以看出, 不仅在同一观测高度的三个观测点观测到的时序之间存在相关性, 而且在 OH 和 OI 气辉的两个不同观测高度上所观测到的扰动时序之间也存在明显相关性. 这样, 通过分析两个不同高度观测时序之间的相位差, 可以计算该重力波的垂直传播参量. 我们将两个高度对应点的观测时序经过滤波后通过二通道最大熵处理, 得到重力波在垂直方向上的传播相

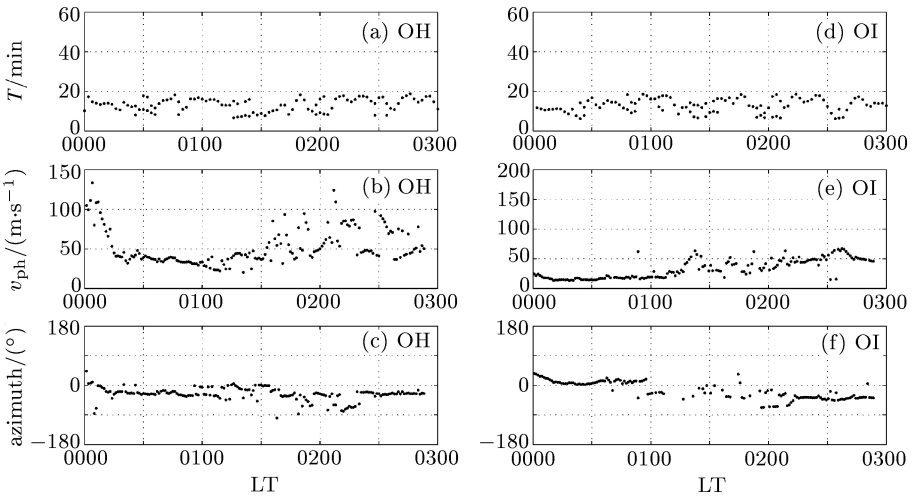


图 2 在 1999 年 1 月 12 日晚的重力波扰动事件中, 根据 OH 和 OI 气辉观测计算出的重力波传播参量随时间的变化

Fig.2 Gravity wave event observed on Jan. 13, 1999. The time sequence of gravity wave periods (a), (d), phase speeds (b), (e), and azimuths (c), (f) are displayed, based on the observation of OH and OI observations

位差 $\delta\varphi$, 再通过 $\boldsymbol{k}_z = \delta\varphi/d$ 直接求出垂直波矢 $\boldsymbol{k}_z$, 并进而计算垂直波长 $\lambda_z = 2\pi/\boldsymbol{k}_z$. 其中 $\delta\varphi$ 为两个高度上的相位差, d 为垂直方向两观测点之间的高度差.

图 3(a) 显示了垂直波矢的计算结果. 图 3(a) 中负数表示波矢向下. 从图 3(a) 可以看出, 重力波的垂直波长在 24~43 km 之间, 平均值为 30 km, 相应的垂直传播相速度为 36 m/s, 相位向下传播. 根据重力波理论, 该重力波是一个上行波 [11], 传播仰角为 39°. Steven[12] 曾经使用阿根廷 El Leoncito 天文台的气辉仪, 通过类似的方法, 观测到清晰的周期约 5 min 的小尺度上行重力波.

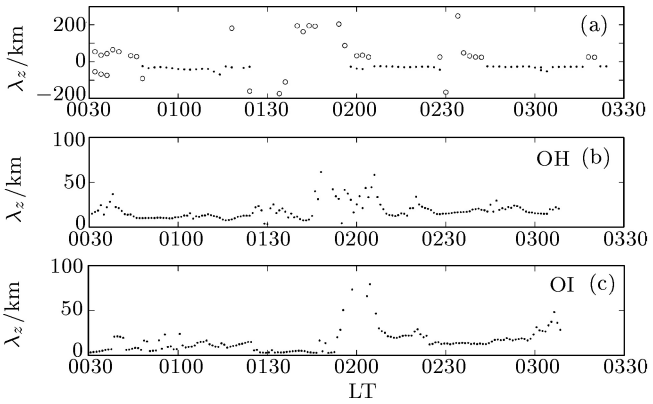


图 3 1999 年 1 月 13 日观测到的重力波垂直波长随时间的变化. (a) 为根据 OH 和 OI 气辉不同观测高度的观测时序之间的相位差计算得到的垂直波长. 其中, 点时序为垂直波长随时间平稳变化的情况; (b) 和 (c) 分别为根据色散关系从 OH 和 OI 观测的重力波水平分量推算得到的垂直波长

Fig.3 Time sequence of vertical wavelength of the gravity wave, which was calculated by estimating the vertical phase discrepancy between the airglow series observed by OH and OI airglow (a), and by solving the dispersion relation of gravity waves based on OH and OI observation heights (b), (c)

为与利用垂直相差方法计算图 1 所示的重力波垂直波长的方法作一比较, 我们通过色散关系式 (8), 根据 OH 气辉和 OI 气辉对重力波水平传播参量的观测结果, 分别估算了 OH 气辉和 OI 气辉高度的垂直波长, 如图 3(b) 和 3(c) 所示. 图中所示重力波的垂直波长平均值分别为 18 km (OH 观测) 和 14 km (OI 观测). 与图 3(a) 比较, 两种方法得到的垂直波长有一定差异. 分析表明, 这种差异是由于两种方法本身固有的误差引起的. 在通过色散关系计算垂直波矢时, 是在背景大气是无耗、绝热的理想气体的假设前提下, 对重力波的传播进行了一系列的简化; 而在利用不同高度的垂直相差计算垂直波长时, 由于没有可靠的即时风场数据, 没有考虑背景风剪切的影响, 使得计算得到的垂直波长产生一定误差.

4 统计结果

通过对 1995—2001 年这 7 年的观测数据进行筛选, 除去下雨、有云以及有月亮等夜晚的观测数据, 一共得到 1464 天的有效气辉观测数据. 通过最大熵方法统计了周期在 40~80 min 范围内的重力波事件. 采用了由中频雷达测量所得的日平均风场数据, 得到了重力波的本征周期、水平相速度等参量. 统计结果如图 4 所示.

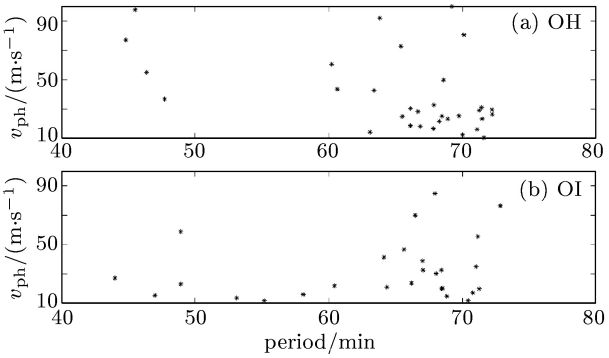


图 4 Adelaide 地区气辉仪观测到的 1995—2001 年周期位于 40~80 min 的重力波事件统计结果

Fig.4 Statistical results of gravity waves with the period between 40~80 min during the year 1995—2001 over Adelaide

通过对 OH 和 OI 气辉观测, 分别得到 49 次和 28 次重力波扰动事件. 这些扰动集中在周期为 60~75 min 的区域. 水平相速度分布在 10~100 m/s 范围, 水平波长为 36~420 km, 扰动持续时间为 70~130 min. 其中, OH 和 OI 观测到的重力波均在 60~73 min 周期、10~50 m/s 相速度的区域有一个分布峰值.

Ding[5] 曾经使用与本文同样的观测数据统计分析了周期为 10~30 min 的中尺度重力波扰动, 得到了 1300 次重力波事件, 这些重力波分布峰值周期为

13 min, 水平相速为 40 m/s. Reid 和 Woithe[6] 也使用大致一样的数据, 通过小波变换, 得到周期在约 5 min 到 120 min 范围的重力波事件 391 次, 其中周期在 40~80 min 的重力波事件约有 70 次, 水平相速度在 10~250 m/s 之间. 文献 [6] 的统计结果与本文结果近似. 但是, 文献 [6] 是将整晚的气辉观测时序作为样本一次输入, 利用小波变换直接求频谱, 我们则是利用滑动窗口选取小段的样本时序进行最大熵频谱分析, 并要求满足求得的传播参量在一段时间内平稳变化的条件下, 才认为该扰动为一个重力波事件. 显然, 本文的方法能够更严格地计算重力波的传播参量.

从我们统计的所有周期为 40~80 min 的重力波事件来看, 很少能在同一夜晚, 在两个气辉层高度同时观测到某一重力波事件. 这与文献 [6] 对重力波进行统计的结果一致. Woithe[6] 认为, 通过气辉仪探测到的重力波信号由于仪器采样的空间局限或波向上传播结构的改变, 而使得两个气辉探测高度缺乏显著的相关. Steven[12] 曾经通过中层重力波事例的分析表明, 在 85~97 km 范围, 存在强烈的风剪切效应, 且对重力波传播具有很大影响. Waldock[13] 和 Ding[14] 分析表明, 在 OH 和 OI 的观测高度上存在的较强的背景风剪切可能导致重力波的反射、穿透和捕获. 强烈的风剪切还可能导致重力波发生波破碎. Medeiros[15] 同样通过滤波分析, 认为由于两个气辉高度间的风剪切影响过大, 导致两个高度上观测到的重力波不相关.

图 5 为根据气辉观测数据分析所得到的重力波事例方位角的统计情况. 图 5 所示重力波的方位角在各个方向都有分布, 在东偏南方向出现一个峰值传播方向, 其中 OH 和 OI 观测到的重力波的峰值

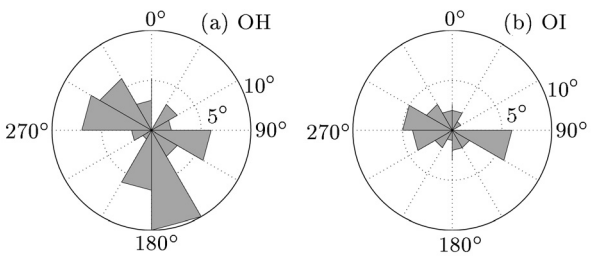


图 5 重力波事件方位角分布的极坐标

Fig.5 Polar plots of occurrence rate of the propagation azimuth for gravity waves

方位角分别为 165° 和 105°, 这与 Woithe[6] 和 Ding[5] 等的统计结果一致.

根据重力波色散关系计算得到的重力波传播仰角统计情况如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 仰角分布主要集中在 3° ~ 13° 之间, 且通过 OH 气辉观测到的重力波方位角分布范围比 OI 的要广泛. 同时, 重力波仰角较低, 重力波近似于水平传播. 这表明重力波来源于距离观测点较远的地方. 同时也说明重力波的垂直相速度较小, 容易受到时变风剪切的影响. 这可能是很难在同一夜晚找到两个高度相关的同一重力波事例的原因之一.

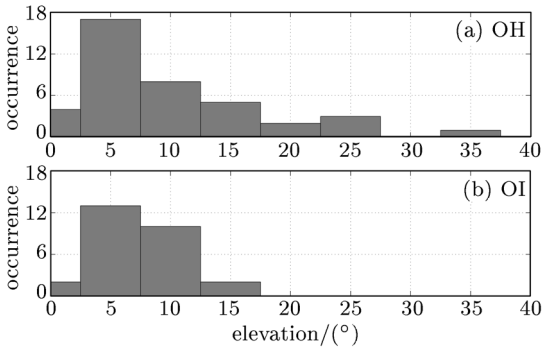


图 6 根据色散关系计算得到的重力波传播仰角统计分布

Fig.6 Statistical results of the wave elevation for gravity waves observed by the OH and OI

5 结论

利用澳大利亚 Adelaide 地区三镜头气辉仪 7 年的 OH 和 OI 气辉观测数据, 结合同一地区中频雷达所测日平均风场数据, 采用最大熵谱分析方法, 分析研究了该地区上空中层顶区域重力波的统计传播特性, 并研究了重力波在中层顶区域的垂直传播特征, 结果如下.

(1) 在中层顶区域, 通过 OH 和 OI 气辉分别探测到 48 个和 29 个周期大于 40 min 的重力波事件. 统计结果表明, 重力波分布峰值为 68 min 周期, 36 m/s 水平相速度. 同时这些重力波具有东南向的优势传播方向, 接近水平方向传播. 重力波的平均仰角在 8° ~ 10° 之间, 表明这些重力波可能源于相距观测点较远的地方.

(2) 在 1999 年 1 月 12 日晚的气辉观测中, 通过 OH 气辉和 OI 气辉观测到了同一个重力波事件. 重力波的周期、水平相速度、方位角和垂直波长分别

为 14 min, 44 m/s, -32° 和 30 km. 根据两个高度上观测到的扰动相位差, 判断该重力波为上行波. 然而, 我们所得到的大部分事例中, 在两个高度上观测到的重力波事例之间具有明显相关性的极少. 分析表明, 由于该气辉仪及其观测方法本身存在固有的误差, 同时也因为重力波在中层顶高度受到强烈的风剪切作用而导致传播相位的改变, 使得我们很少能在两个气辉探测高度观测到同一个重力波事件.

参考文献

[1] Moreels G, Herse M. Photographic evidence of waves around the 85km level. *Planet. Space Sci.*, 1977, **25**(3): 265~273

[2] Swenson G R *et al.* ALOHA-93 measurements of intrinsic AGW characteristics using airborne airglow imager and groundbased Na wind/temperature lidar. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(20):2841~2844

[3] Walterscheid R L, Hecht J H *et al.* Analysis and interpretation of airglow and radar observations of quasi-monochromatic gravity waves in the upper mesosphere and lower thermosphere over Adelaide, Australia (35°S, 138°E). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**:461~478

[4] Nikolai M. Gavrilov, KazuoShiokawa, Tadahiko Ogawa. Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from spectral airglow temperature imager observations at Shigaraki, Japan. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(D24):4755, doi:10.1029/2001JD001469

[5] Ding F, Yuan H *et al.* Occurrence characteristics of medium-scale gravity waves observed in OH and OI nightglow over Adelaide (34.5°S, 138.5°E). *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D14104, doi:10.1029/2003JD004096

[6] Reid I M, Woithe J M. Three-field photometer observations of short-period gravity wave intrinsic parameters in the 80 to 100 km height region. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D21108, doi:10.1029/2004JD005427

[7] Burg J P. Maximum entropy spectral analysis. In: Paper Presented at 37th AIM, Oklahoma, 1967

[8] Von D B. Alternative interpretation of maximum entropy spectral analysis. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1971, **17**:493~494

[9] Strand O N. Multichannel complex maximum entropy (autoregressive) spectral analysis. *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1977, **22**(4):634~640

[10] Xiong Nianlu, Tang Cunchen, Li Xingjian. An introduction on Ionosphere Physics. Wuhan: Wuhan University Press, 1999. in Chinese (熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论. 武汉: 武汉大学出版社, 1999)

[11] Ye Gongjie, Liu Zhaohan. Theory of Ionospheric Waves. Beijing: Academic Press, 1972. in Chinese (叶公节, 刘兆汉. 电离层玻璃论. 北京: 科学出版社, 1983)

[12] Steven M S, Jurgen S *et al* . Characterization of exceptionally strong mesospheric wave events using all-sky and zenith airglow observations. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, A09309, doi:10.1029/2005JA011197

[13] Waldock J A, Jones T B. The effects of neutral winds on the propagation of medium scale atmospheric gravity waves at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**:217~231

[14] Ding Feng, Wan Weixing. The influence of background winds and temperature gradients on the propagation of atmospheric gravity waves. *Chin. J. Radio Sci.*, 1998, **13**(2):109~112. in Chinese (丁锋, 万卫星. 背景风场和温度梯度对重力波传播的影响. 电波科学学报. 1998, **13**(2):109~112)

[15] Medeiros A F, Taylor M J, Takahashi H, Batista P P, Gobbi D. An investigation of gravity wave activity in the low-latitude upper mesosphere: Propagation direction and wind filtering. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D14):4411, doi:10.1029/2002JD002593