

中层顶准单色重力波特性的钠荧光多普勒激光雷达观测分析

王 博^{1,2}, 胡 雄¹, 闫召爱^{1,2}, 肖存英¹, 郭商勇¹, 程永强¹, 郭文杰^{1,2}

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用 2011~2013 年期间 60 h 的钠荧光多普勒激光雷达温度和风场数据, 采用矢端曲线法提取廊坊上空 85~95 km 中层顶区域准单色惯性重力波的所有参量, 并统计准单色大气重力波的活动特性。获得的 85 次准单色重力波事件中, 上传(下传)重力波 64 次(21 次), 占总数的 75.29%(24.71%)。垂直波长(水平波长)和观测周期平均值分别为 6.6 km(727.8 km)和 7.4 h, 分别集中在 6~9 km(200~800 km)和 2~7 h, 固有周期平均值为 7.76 h, 主要集中在 3~9 h, 水平传播方向分布比较均匀, 没有占主导的传播方向。对于上传重力波, 水平背景风在大气重力波水平传播方向上的分量取正值和取负值的概率大致相等, 但对于下传重力波, 该风场分量取正值的概率大约是取负值的 2 倍, 说明观测到的下传大气重力波在中层顶区域多为顺风传播。

关键词: 钠荧光多普勒激光雷达; 中层顶; 准单色惯性重力波; 固有周期; 传播方向

中图分类号: P356 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0506002

Observational study of quasi-monochromatic gravity waves characteristics in mesopause region with sodium fluorescence Doppler lidar

Wang Bo^{1,2}, Hu Xiong¹, Yan Zhaoai^{1,2}, Xiao Cunying¹, Guo Shangyong¹, Cheng Yongqiang¹, Guo Wenjie^{1,2}

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

Abstract: The quasi-monochromatic gravity waves (QM GWs) parameters in the mesopause region over Langfang (39.4° N, 116.6° E) were studied based on the 60 h sodium fluorescence Doppler lidar data during 2011–2013 year. A total of 85 QM GWs were extracted from the simultaneously measured temperature and wind profiles between 85 km and 95 km using hodograph method. The result shows that vertical wavelengths (horizontal wavelengths) and observed periods are mainly distributed from 6 km to 9 km (200 km to 800 km) and 2 h to 7 h, with the mean values 6.6 km (727.8 km) and 7.4 h respectively. GWs propagating upward in the vertical direction are with an occurrence of 75.29%. The intrinsic periods are mainly distributed from 3 h to 9 h with a mean value 7.76 h. There is no dominant horizontal

收稿日期: 2016-04-23; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(41104099, 41104100, 41204137)

作者简介: 王博(1987-), 男, 博士生, 主要从事临近空间大气物理方面的研究。Email: wangbocas@163.com

通讯作者: 胡雄(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事临近空间环境建模、预报、探测方面的研究。Email: xhu@nssc.ac.cn

propagation direction. The probability of the horizontal background wind component along the horizontal propagate direction $U_p > 0$ is about 50% for upward GWs, but for downward GWs the probability of $U_p > 0$ is about 66.66%, which is about 2 times of the probability of $U_p < 0$ (33.33%), which suggests that the observed downward GWs are mainly propagating horizontally along the wind.

Key words: sodium fluorescence Doppler lidar; mesopause; quasi-monochromatic inertia gravity waves; intrinsic period; propagate direction

0 引言

大气重力波对中高层大气环流、温度、化学成分分布等有重要影响^[1]。由于重力波活动极为复杂,波源分布不均匀且随时间变化,波的激发具有间歇性,当前对重力波的产生机制和波源的时空分布了解非常有限,大气环流模式普遍采用过度简化的重力波参数化方案计算重力波对大气环流的影响^[2],因此重力波参数的观测和分析是十分活跃的研究领域^[3-5]。

钠荧光激光雷达利用中层顶区域(约 75~105 km)钠层钠原子作为示踪物探测中层顶大气。按照探测原理,钠荧光激光雷达可分为宽线宽和窄线宽两类,前者发射的激光束线宽大于钠原子多普勒(Doppler)增宽共振荧光谱线,主要用于探测中层顶钠原子数密度廓线,无法探测该区域温度和风场^[6-9],后者可通过测量钠荧光共振谱线的多普勒展宽和频移分别测量中层顶区域温度和风场^[3,10]。目前,国际上采用宽线宽钠荧光激光雷达开展了一些重力波活动的观测研究^[11-15],这些观测主要集中在美国、南极、巴西等地区。中国境内的观测研究集中在武汉^[16-17]、北京^[18-19]、海南^[20]等地。受观测手段限制,这些研究大多利用钠原子数密度廓线提取重力波参量,不能直接获得大气重力波的本征参量。国内有 2 台窄线宽的钠荧光多普勒激光雷达,分别为中国科学院国家空间科学中心^[21-22]和中国科学技术大学所研制^[23-24]。同时采用钠荧光多普勒激光雷达温度和风场数据可提取准单色大气重力波的所有参量^[25-26]。

中国科学院国家空间科学中心研制的钠荧光共振多普勒激光雷达采用窄线宽激光、三频多普勒技术,以车载方式部署在廊坊临近空间大气探测示范站(39.4°N, 116.6°E),可同时探测中层顶大气温

度、风场和钠原子密度。文中利用该钠荧光共振多普勒激光雷达温度和风场数据分析廊坊上空中层顶区域大气重力波特性和(垂直波长、水平波长、观测周期、固有周期、传播方向等),以增加对中纬度中层顶区域重力波活动的认知。

1 数据来源和分析方法

数据源为 2011 年 1 月至 2013 年 10 月积累的 60 h 的温度和风场数据,中国科学院国家空间科学中心钠荧光多普勒激光雷达系统构成及参数可参考文献[21-22],温度和风场参数反演算法可参考文献[27-28]。笔者选取有效数据集中的 85~95 km 的探测廓线提取重力波,光子数廓线积分时间为 0.5 h,采用三次样条插值将温度和风场插值为高度间隔 100 m 的数据。

这里采用矢端曲线法^[29]提取大气重力波参量。首先从原始廓线提取扰动信息。对整晚平均风场和温度分别作一阶拟合和四阶拟合,将拟合结果作为背景从原始廓线中扣除,得到扰动廓线。为了减小潮汐和垂直波长较大的扰动对重力波频谱的影响,将扰动廓线随高度变化的线性趋势扣除^[26]。记 u, v, T 分别为纬向风、经向风和温度的观测值, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{T}$ 为相应的背景值,扰动值记为 u', v', T' ,单位质量大气扰动动能 $E_k = 0.5(u'^2 + v'^2)$,扰动势能 $E_p = 0.5\hat{T}^2$,其中 $\hat{T} = \frac{g}{N} \frac{T'}{T}$, g 为重力加速度, N 为浮力频率。参照 Allen 和 Vicent 的方案^[30],笔者对 \hat{T} 作谱分析以确定重力波主导垂直波数 m 。单色重力波可以拟合为如下形式:

$$u' = A_u e^{\beta(z-z_0)} \cos[m(z-z_0) + \theta_u] \quad (1)$$

$$v' = A_v e^{\beta(z-z_0)} \cos[m(z-z_0) + \theta_v] \quad (2)$$

$$\hat{T} = A_T e^{\beta(z-z_0)} \cos[m(z-z_0) + \theta_T] \quad (3)$$

式中： β 为增长因子； z_0 为参考高度，取 $z_0=90 \text{ km}$ 。

根据重力波极化关系，不考虑增长因子时， (u', v') 矢端曲线构成极化椭圆，椭圆长轴与短轴之比与重力波固有频率之间满足如下关系：

$$\left| \frac{f}{\hat{\omega}} \right| = \left| \frac{\hat{v}}{\hat{u}} - \frac{1}{N} \left(\frac{d\bar{v}}{dz} \sin\phi - \frac{d\bar{u}}{dz} \cos\phi \right) \right| \quad (4)$$

这考虑了风切变的影响，其中 f 为惯性频率，固有频率 $\hat{\omega} = \omega - k\bar{u} - l\bar{v}$ ， \hat{u} 、 \hat{v} 分别为扰动风场振幅在极化椭圆长轴和短轴方向的分量， ϕ 为重力波水平传播方向，正北方向为 0° ，角度顺时针增加。 $\frac{dv_T}{dz} = \frac{d\bar{v}}{dz} \cdot \sin\phi - \frac{d\bar{u}}{dz} \cos\phi$ 代表垂直于传播方向的风切变， N 为浮力频率。重力波水平传播方向 ϕ 与椭圆长轴所在方向 φ 平行，它们之间有 180° 的不确定性，可以通过 (u', v') 、 (u_i, \hat{T}) 两个极化椭圆的转动方向来消除这种不确定性。其中， $u_i = u' \sin\varphi + v' \cos\varphi$ 。重力波水平波长可通过色散关系 $(\hat{\omega}^2 - f^2)m^2 = N^2 k_h^2$ 计算。

2 结果与讨论

2.1 个例分析

笔者选取 2012 年 12 月 5 日夜间 20 点 45 分一次重力波事件作为个例展示计算过程。图 1 给出了 u, v, \hat{T} 夜间平均廓线、背景廓线和扰动廓线。采用传

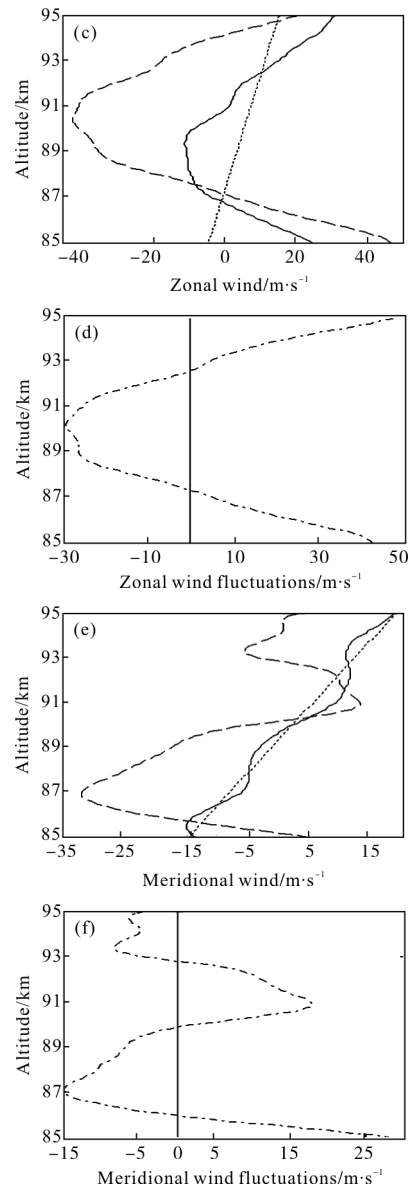
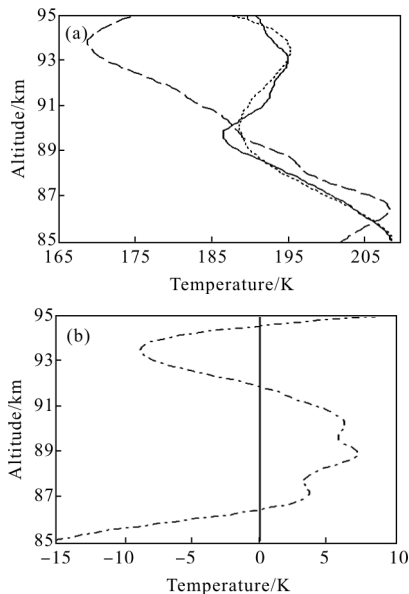


图 1 温度、纬向风和经向风的夜间平均廓线(实线)、拟合背景廓线(点线)、原始廓线(虚线)、扰动廓线(点画线) of temperature, zonal wind and meridional wind in night

统谱分析方法对采样点补零，补充为 512 个采样点。图 2 展示了 \hat{T} 垂直波数振幅谱，振幅峰值相应的垂直波长为 8.53 km 。对 u, v, \hat{T} 拟合之后，结合极化关系和色散关系算得 $\hat{\omega}/f=1.7$ ，相应的固有周期为 10.9 h ，水平波长为 1284 km 。图 3 展示了 (u', v') 、 (u_i, \hat{T}) 的矢端曲线，前者随高度增加顺时针转动，说明重力波能量

向上传播,后者逆时针转动,说明重力波水平传播方向需要增加或减小 180° ,最终得到水平传播方向为 278.1° 。利用 $\hat{\omega}=\omega-k\bar{u}-l\bar{v}$,取背景风平均值(由于背景风采用线性拟合,这里的平均值即为 90km 的背景风),计算得到观测周期为 13h ,此次重力波事件为逆风传播,观测周期与固有周期的相对偏差达到 19.3% 。

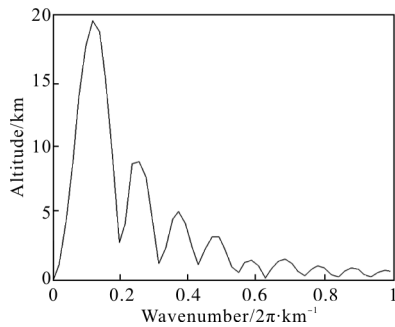


图 2 \hat{T} 垂直波数据幅谱

Fig.2 Amplitude-wavenumber spectrum of \hat{T}

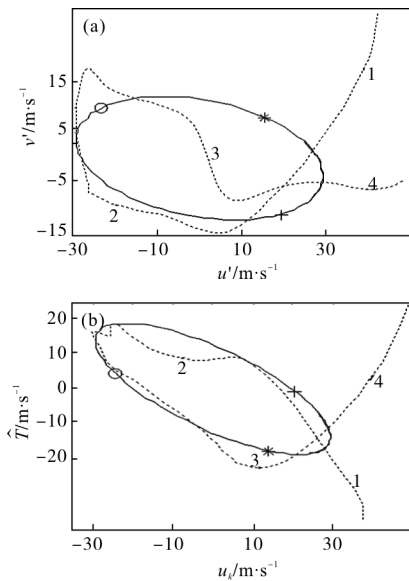


图 3 矢端曲线, (a) u' 与 v' , (b) u_k 与 \hat{T} 。实线和点线代表拟合和扰动曲线。‘+’、‘o’、‘*’ (数字 1,2,3,4) 对应的高度依次增加,用来显示拟合(扰动)曲线转动方向

Fig.3 Hodographs of u' (a) versus v' (b) u_k versus \hat{T} . The solid line and dash dot line denote fitted curve and perturbation curve respectively. The symbols ‘+’ ‘o’ and ‘*’ (number 1,2,3,4) show the rotational direction of the fitted curve (perturbation curve) since they denote the values at successively increased height

2.2 统计分析

一共提取出 85 次重力波事件,其中能量上传(下

传)重力波 64 次(21 次),占总数的 $75.29\%(24.71\%)$ 。笔者对波长、固有频率、传播方向进行统计,垂直波长统计间隔为 500m ,水平波长统计间隔为 250km 。

图 4(a)显示重力波最大垂直波长 10km ,这与所选取的 $85\sim 95\text{km}$ 高度区间提取重力波有关。垂直波长最小的两个值分别为 1.969km 和 2.048km ,可以认为最小垂直波长约为 2km ,这与其他的观测结果类似^[11,15,19],Gardner and Taylor 指出激光器输出能量的涨落和背景噪声限制了重力波垂直波长的观测范围,能实际分辨的重力波最小垂直波长大约为 2km ^[31]。垂直波长平均值约为 6.6km ,主要集中在 $6\sim 9\text{km}$ 之间。Hu 等^[26]利用钠测风测温激光雷达温度和风场数据给出的 Starfire Optical Range ($35^\circ\text{N}, 106.5^\circ\text{W}$) 地区垂直波长为双峰分布,首次提取(2 次提取)重力波垂直波长峰值 $15\sim 17\text{km}$ ($7\sim 9\text{km}$),笔者的结果与 Hu 等 10km 以下垂直波长分布类似。采用钠密度廓线提取重力波的结果显示:美国 Illinois ($40.2^\circ\text{N}, 88.2^\circ\text{W}$) 为 $3\sim 7\text{km}$ ^[11],北京为 $2\sim 4\text{km}$ ^[19],武汉为 $3\sim 7\text{km}$ ^[17],位于巴西的南半球低纬站点 Sao Jose' dos Campos ($23^\circ\text{S}, 46^\circ\text{W}$) 为 $2\sim 4\text{km}$ ^[15],比较可见,所提取的多是垂直波长较长的重力波。

水平波长(图 4 (b))包含几十千米、几百千米和上千千米,平均值约为 727.8km 。观测周期(图 5(a))

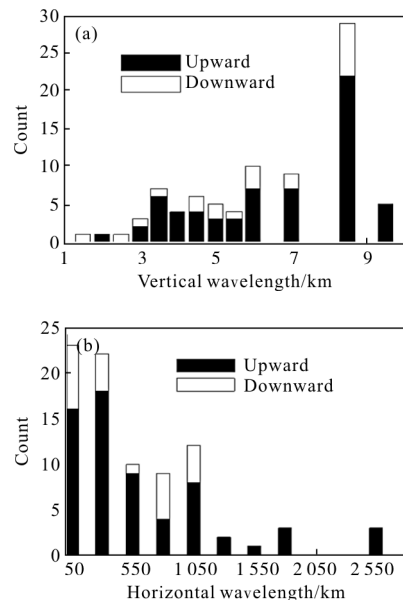


图 4 频数分布图, (a) 垂直波长, (b) 水平波长

Fig.4 Histogram of the (a) vertical wavelength and (b) horizontal wavelength

最小值约为 1 h, 超过 20 h 的两个取值约为 23 h, 取值 15~18 h 的很少, 观测周期平均值约为 7.4 h, 以 2~7 h 居多。固有周期(图 5(b))最小值约为 1.5 h, 最大值约为 15.7 h, 在廊坊观测站相应的惯性周期 18.9 h 之内, 平均值为 7.76 h, 主要集中在 3~9 h。

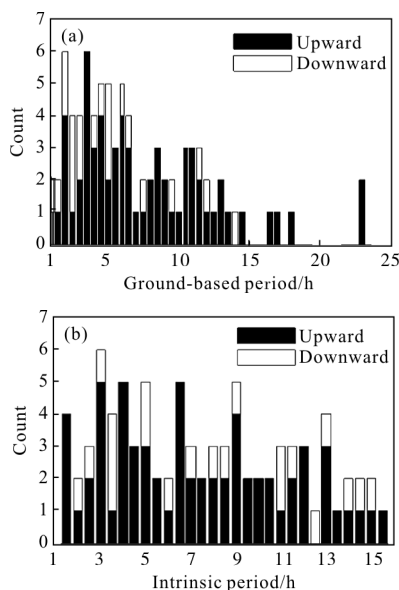


图 5 频数分布图, (a) 观测周期, (b) 固有周期
Fig.5 Histogram of the (a) ground-based period and (b) intrinsic period

85 次统计中, 水平波长小于 100 km 的只有 2 次, 取值分别为 72.7 km 和 91.5 km, 水平波长大于 1000 km 的有 23 次, 约占 27%, 水平波长几百千米的约占 70.6%, 以 200~800 km 居多。钠密度激光雷达的结果显示: 美国 Illinois(40.2°N, 88.2°W) 的水平波长为几十千米的约占 20%, 相应的观测周期以 200 min 以下居多^[11]。北京观测周期集中在 1~4 h^[19], Sao Jose' dos Campos(23°S, 46°W) 观测周期集中在 100~300 min^[15], 总体而言这些观测周期比钠测风测温激光雷达的结果要小。

垂直观测相速度分布范围约为 0.1~1.8 m/s, 主要集中在 0.1~0.3 m/s (图 6(a)), 与武汉地区的结果相近(以 0.1~0.5 m/s 居多)^[17], 而 Gardner 等报道的垂直相速度频数最高的大约在 0.5~1.0 m/s^[11], 这可能与 Gardner 的结果观测周期以 200 min 以内居多有

关。垂直群速度按照 $c_{gc} = \frac{-m(\hat{\omega}^2 - f^2)}{\hat{\omega}(k^2 + l^2 + m^2)} \approx \frac{(\hat{\omega}^2 - f^2)}{-\hat{\omega}m}$ 计算,

分布范围约为 0.1~11.3 m/s, 主要集中在 0.5~1.5 m/s (即 1.8~5.4 km/h)(图 6(b))。

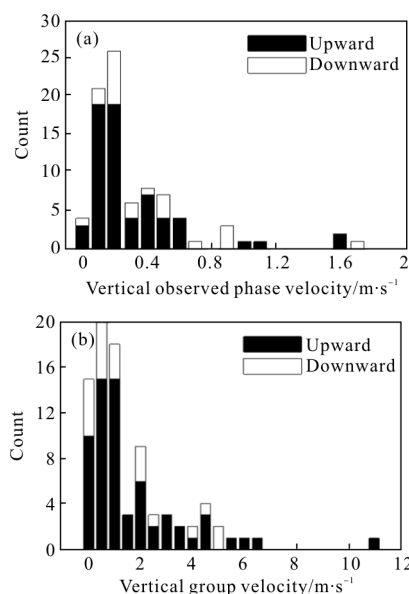


图 6 频数分布图, (a) 垂直观测相速度, (b) 群速度
Fig.6 Histogram of the (a) vertical observed phase velocity and (b) vertical group velocity

通过上述比较可见, 总体而言, 利用钠荧光多普勒激光雷达温度和风场数据采用矢端曲线法提取的重力波相对于利用钠密度激光雷达钠密度廓线提取的重力波具有较大的尺度, 这与观测手段和重力波提取方法有关。

与 Gardner 等^[11]的结果类似, 廊坊中层顶惯性重力波水平波长与固有周期有显著的相关性, 相关系数为 0.88, 近似满足 $\lambda_h = cT_{in}^p$, $c=60.5$, $p=1.16$ 。对水平波长和固有周期作拟合 $\log_{10}\lambda_h = p\log_{10}T_{in} + \log_{10}c$, 结果采用对数坐标显示在图 7 中。垂直波长与固有周期没有显示出相关性, 这可能与浮力频率变化范围较大有关。

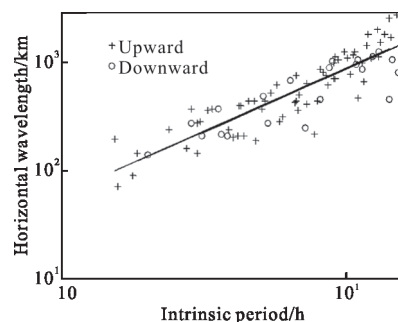


图 7 水平波长与固有周期(实线为拟合结果)
Fig.7 Horizontal wavelength versus intrinsic period (solid line is the fitting line)

表 1 列出了廊坊中层顶重力波参数平均值。按水平波长范围将重力波参数分组。水平波长几十千米、几百千米、上千千米分别对应第 1、第 2、第 3 组, Up n 代表能量上传第 n 组, Down n 代表能量下传

第 n 组。 $\hat{c}_z(\hat{c}_h)$ 为固有垂直相速度(水平相速度)大小, $c_z(c_h)$ 为观测垂直相速度(水平相速度)大小, c_{gz} 为垂直群速度大小, 单位为 m/s。

图 8(a)、(b) 显示重力波水平传播方向大致均匀,

表 1 廊坊中层顶重力波参数平均值

Tab.1 Mean values of gravity wave parameters of in the mesopause over Langfang

	$\hat{\omega}/f$	T_m/h	T_{ob}/h	λ_z/km	λ_h/km	\hat{c}_z	\hat{c}_h	c_z	c_h	c_{gz}	Count
Up 1	11.22	1.69	3.05	3.8	82.1	0.63	13.48	0.38	7.99	3.9	2
Up 2	4.02	5.90	6.70	6.4	446.4	0.41	21.80	0.30	20.96	2.4	44
Up 3	1.56	12.38	11.75	8.0	1598.6	0.18	35.20	0.20	40.86	0.7	18
Down 2	3.76	7.05	4.67	5.9	479.8	0.36	20.02	0.34	30.48	2.1	16
Down 3	1.60	12.15	8.20	7.3	1120.6	0.17	26.20	0.28	42.63	0.7	5
Up	3.55	7.59	6.87	6.8	759.1	0.35	25.31	0.28	26.15	1.95	64
Down	3.25	8.27	5.41	6.2	632.3	0.32	21.49	0.32	3.37	1.76	21
Total	3.48	7.76	7.39	6.6	727.8	0.34	24.36	0.29	27.93	1.9	85

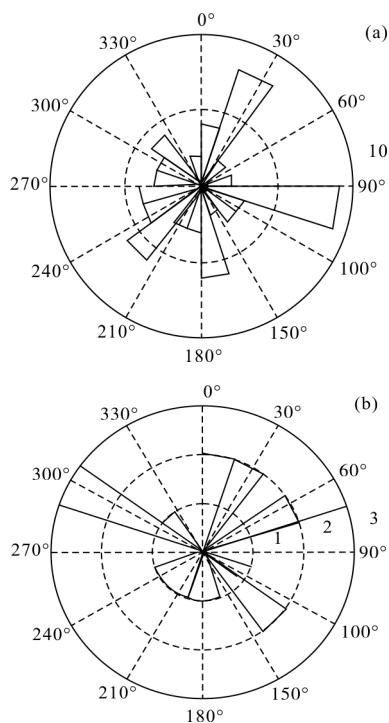


图 8 水平传播方向分布,(a)、(b)分别对应上传和下传重力波传播方向由自正北方向顺时针转过的角度表示

Fig.8 Distribution of horizontal propagation direction. (a),(b) denotes upward and downward GWs respectively. The direction is defined to be 0°at north and increases clockwise

没有占主导地位的传播方向, 其中能量上传的重力波向东北和正东方向有微弱的优势, 但不明显。Hu

等报道的 Starfire Optical Range(35°N, 106.5°W) 地区同样没有主导水平传播方向^[26]。

$$\text{利用 } R = \frac{\omega - \hat{\omega}}{\hat{\omega}} = \frac{|k_h| U \cos \theta}{\hat{\omega}} = \frac{|k_h| U_p}{\hat{\omega}}$$

计算观测频率与固有频率的相对偏差, 其中 k_h 为水平波数, U 为水平背景风大小, θ 为水平背景风与重力波水平传播方向的夹角, $U_p = |U| \cos \theta$ 为水平背景风在重力波水平传播方向的分量。结果发现, 85 次事件中, 有 42 次 $R < 0$ (占 49.41%)。对上传和下传重力波分开统计, 上传 65 次有 35 次 $R < 0$ (占 53.85%), 下传 21 次有 7 次 $R < 0$ (占 33.33%), 总体而言, U_p 正值和取负值的概率大致相等, 但对于下传重力波来说, U_p 取正值的概率是取负值的 2 倍, 这说明笔者观测到的下传重力波顺风传播居多。

3 结论

利用中国科学院国家空间科学中心研制的窄线宽钠荧光多普勒激光雷达数据研究了廊坊中层顶区域准单色惯性重力波特性。采用矢端曲线法从 60 h 同时探测的温度和风场有效数据 (85~95 km) 中提取了 85 组重力波参数, 结果显示: 85 次准单色重力波事件中, 上传(下传)重力波 64 次(21 次), 占总数的 75.29%(24.71%)。垂直波长(水平波长)平均值为 6.6 km (727.8 km), 频数峰值分布在 6~9 km (200~

800 km)。观测周期(固有周期)平均值为 7.4 h(7.76 h),主要集中在 2~7 h (3~9 h)。垂直相速度集中在 0.1~0.3 m/s,群速度集中在 0.5~1.5 m/s。廊坊中层顶区域惯性重力波水平传播方向比较均匀,没有占主导的传播方向。水平背景风在重力波水平传播方向上的投影取正值和取负值的概率大致相等,但下传重力波取正值的概率大约是取负值的 2 倍,这说明笔者观测到的下传重力波以顺风传播的居多。

参考文献:

- [1] Kaifler B, Lübken F J, Höffner J, et al. Lidar observations of gravity wave activity in the middle atmosphere over Davis (69° S, 78° E), Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(10): 4506–4521.
- [2] Schirber S, Manzini E, Krismer T, et al. The quasi-biennial oscillation in a warmer climate: sensitivity to different gravity wave parameterizations [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(3–4): 825–836.
- [3] Li T, She C Y, Liu H L, et al. Sodium lidar - observed strong inertia - gravity wave activities in the mesopause region over Fort Collins, Colorado (41° N, 105° W) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D22): 104–1.
- [4] Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al. Latitudinal and altitudinal variability of lower atmospheric inertial gravity waves revealed by US radiosonde data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(14): 7750–7764.
- [5] Kramer R, Wüst S, Schmidt C, et al. Gravity wave characteristics in the middle atmosphere during the CESAR campaign at Palma de Mallorca in 2011/2012: Impact of extratropical cyclones and cold fronts [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2015, 128(5): 8–23.
- [6] Gong S, Zeng X, Xue X, et al. First time observation of sodium layer over Wuhan, China by sodium fluorescence lidar [J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 1997, 40(11): 1228–1232.
- [7] Yi F, Zhang S, Zeng H, et al. Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5° N, 114.4° E) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 59–1.
- [8] Dou X K, Xue X H, Chen T D, et al. A statistical study of sporadic sodium layer observed by sodium lidar at Hefei (31.8 N, 117.3 E)[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(6): 2247–2257.
- [9] Xue X H, Dou X K, Lei J, et al. Lower thermospheric - enhanced sodium layers observed at low latitude and possible formation: Case studies [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(5): 2409–2418.
- [10] She C Y, Sherman J, Yuan T, et al. The first 80 -hour continuous lidar campaign for simultaneous observation of mesopause region temperature and wind [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 52.
- [11] Gardner C S, Voelz D G. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois: 2. Gravity waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1987, 92(A5): 4673–4694.
- [12] Beatty T J, Hostetler C A, Gardner C S. Lidar observations of gravity waves and their spectra near the mesopause and stratopause at Arecibo [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1992, 49(6): 477–496.
- [13] Collins R L, Hallinan T J, Smith R W, et al. Lidar observations of a large high - altitude sporadic Na layer during active aurora[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(24): 3655–3658.
- [14] Yang G, Clemesha B, Batista P, et al. Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at 23 S [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D21): 107–1.
- [15] Yang G, Clemesha B, Batista P, et al. Lidar study of the characteristics of gravity waves in the mesopause region at a southern low-latitude location [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2008, 70(7): 991–1011.
- [16] Ai Yong, Lu Shu, Zhang Xunjie, et al. Lidar observations of gravity wave activity and spectra in the mesopause region at Wuhan, China [J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 1998, 28(9): 818–822.
- [17] Song Juan, Cheng Xuewu, Yang Guotao, et al. The investigation of gravity wave activities on mesopause over Wuhan by sodium lidar[J]. *Chin J Space Sci*, 2005, 25(6): 522–528. (in Chinese)
宋娟, 程学武, 杨国韬, 等. 武汉上空中层顶大气重力波活动的钠层荧光激光雷达观测研究 [J]. *空间科学学报*, 2005, 25(6): 522–528.
- [18] Gong S, Yang G, Xu J, et al. Statistical characteristics of atmospheric gravity wave in the mesopause region observed with a sodium lidar at Beijing, China [J]. *Journal of*

- Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 97(5): 143-151.
- [19] Gong Shaohua, Liu Zhengkuan, Guan Sai, et al. Lidar study on the parameter relations of gravity waves in the mesopause region at Beijing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1134-1140. (in Chinese)
龚少华, 刘正宽, 关塞, 等. 北京上空中层顶区域重力波参数关系的激光雷达研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1134-1140.
- [20] Zou Xu, Yang Guotao, Wang Jihong, et al. Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at Hainan, China [J]. *Chinese J Geophys*, 2015, 58(7): 2274-2282. (in Chinese)
邹旭, 杨国韬, 王继红, 等. 基于激光雷达手段的海南地区重力波与其波谱的季节分布特性研究[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7): 2274-2282.
- [21] Hu X, Yan Z A, Guo S Y, et al. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(4-5): 417-423.
- [22] Yan Zhaoai. Research on sodium fluorescence Doppler lidar system [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
闫召爱. 钠荧光多普勒激光雷达系统的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [23] Fang Xin. Sodium temperature and wind lidar development and gravity wave momentum flux observation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
方欣. 钠测温测风激光雷达的研制及重力波动量通量的探测[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [24] Li T, Fang X, Liu W, et al. Narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5401-5411.
- [25] Yang W M. Gravity wave studies of the mesopause region using a Na wind/temperature lidar[D]. Illinois: University of Illinois, 1998.
- [26] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24): 22-1-22-4.
- [27] Xu Li, Hu Xiong, Yan Zhaoai, et al. Retrieval method of atmospheric parameters for a Sodium Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 140-143. (in Chinese)
徐丽, 胡雄, 闫召爱, 等. 钠多普勒激光雷达大气参数反演方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 140-143.
- [28] Xu Li, Hu Xiong, Cheng Yongqiang, et al. Simulation of echo-photon counts of a Sodium Doppler lidar and retrievals of atmospheric parameters[J]. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(7): 1520-1528. (in Chinese)
徐丽, 胡雄, 程永强, 等. 钠多普勒激光雷达回波光子数仿真及大气参数反演[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1520-1528.
- [29] Zhang S D, Yi F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30 N, 114 E) China[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(3): 665-673.
- [30] Allen S J, Vincent R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D1): 1327-1350.
- [31] Gardner C S, Taylor M J. Observational limits for lidar, radar and airglow imager measurements of gravity wave parameters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D6): 6427-6437.