极区夏季中间层半日潮汐的 VHF 雷达观测*

刘仁强 易 帆
(武汉大学无线电科学技术系 430072)

摘 要

采用德国 SOUSY VHF 雷达观测数据，研究了极区夏季中间层半日潮汐的结构和变化特征. 纬向和经向风的动态 Lomb-Scargle 谱表明，半日潮是中间层高度上占支配地位的波动，其谱峰对应的频率一般与 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 有偏离，说明它们经常处在被扰动状态. 稳定的半日潮振幅随高度增加而迅速增长，在 87.9 km 高度附近达到饱和；经向分量的相位一般比纬向分量的相位超前 $\pi/4$—$\pi/2$, 从而水平扰动速度矢量端点随时间变化的轨迹显示出顺时针方向旋转的特征. 半日潮汐特征参量在纬向和经向风中随时间的变化在基本趋势一致的基础上显示出一定程度的各向异性.

关键词 半日潮汐—中间层— VHF 雷达

1 引 言

主要由太阳辐射加热引起的周期为一天或一天的整数分之一的大尺度的大气振荡现象称为大气潮汐. 由于具有持续的强迫源以及它们所处的时空尺度，潮汐在中层大气动力学中起着重要作用. 在高纬中间层和低热层高度，半日潮是主要的传播型潮汐波，其振幅经常超过 $20\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 因而被认为在中间层和低热层加热以及平均流动加速中起重要作用.

雷达观测表明，在中间层和低热层，大气潮汐的强度和相位显示出实质性的长期和短期变化，其中短期变化更难解释. 人们推测，有三类原因可能导致这种变化 [4]: (1) 由当地激发源产生的具有潮汐周期的波动； (2) 潮汐与重力波和行星波之间的相互作用； (3) 臭氧和水汽全球分布以及传播条件的变化.

本文将在对德国 SOUSY VHF 雷达在夏季极区 6 天的观测数据作动态谱分析的基础上，首次跟踪两个水平分量都比较稳定的并随高度连续的半日潮汐谱峰对应的频率，取其作为半日潮汐波谐波拟合函数中的频率参量值，由此通过严格的计算 (而不是估计) 来获得半日潮汐波结构参量值及其随高度和时间变化的特征.

2 观测与分析

在 1987 年夏天 MAC/SINE 国际联合观测期间，移动式 SOUSY VHF 雷达在挪威 Andϕya (69°N, 16°E) 对极区中间层大气进行了连续的观测. 我们的研究采用其中 6 月

* 国家杰出青年科学基金 (49625407) 和国家自然科学基金委员会“九五”重大项目 (49990450) 资助课题
1999-06-16 收到原稿， 2000-05-20 收到修定稿

23—29 日的观测数据. 该雷达的工作频率为 53.5 MHz, 单脉冲峰值功率为 100 kW, 占空比为 4%, 探测高度范围为 60.0—100.2 km, 时间分辨率为 60 s, 高度分辨率为 0.3 km. 它的天线交替地指向 6 个方向, 通过组合这 6 个波束方向上的径向速度, 可计算出风场的 3 个分量. 由于这里关心的主要是大气扰动的低频部分的垂直传播特性, 因此首先对水平分量的数据进行了 10 min 步长的滑动平均.

2.1 谱分析

为了揭示半日潮汐的变化性, 我们取 36 h 为时间窗, 2 h 为滑动的时间步, 计算出各高度上纬向风和经向风的 Lomb-Scargle 动态功率谱 [5,6]. Lomb-Scargle 周期图方法根据非等间距采样数据的最小二乘频率分析, 可以得到分辨率比 $1/T$ (T 为数据的时间跨度) 更精细的功率谱, 从而更准确地定出谱峰的位置和强度; 同时它不需要对存在间断的时间序列进行插值, 自然避免了插值带来的人工误差. 图 1 给出了 88.2 km 高度上纬向风和经向风的动态功率谱, 纵坐标是 36 h 数据窗的中点对应的时间 (用一年中的天数表示). 可以看到, 从 175(24 日) 至 177.5 天, 在 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 频率附近, 存在几乎连续的缓慢向低频方向移动的强谱峰结构, 与其它频率位置的谱峰强度相比, 它是最强, 表明半日潮在夏季中层顶区域的大气起伏中占支配地位. 在某些时间, 谱峰准确地落在 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 位置上; 然而在大多数时间, 谱峰与 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 有一定的偏离, 这代表半日潮被扰动的情况. 非共振波之间的相互作用可能是潮汐频率偏移的一个原因 [7]. 从 178 天起, 原来频率略小于 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 的半日潮谱峰迅速向高频方向移动, 在 $1/9.3\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 附近产生一个强的宽谱峰结构. 在经历了约一天的缺失后, $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 附近的谱峰在 179 天再次出现. 可以断定, 在 178—179 天, 出现了强烈影响半日潮的因素, 导致它的谱峰严重偏离 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 的位置. 在 $1/24\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 和 $1/8\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 附近也有持续一段时间的强谱峰, 但它们的持续时间比半日潮要短, 强度通常也比半日潮弱, 这是周日潮和 $1/8\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 潮汐的变化特性.

注意纬向风与经向风动态谱在 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 附近显示出非常好的相似性, 但它们的谱峰对应的频率位置一般不相同. 另外, 在 88.2 km 高度附近, 纬向风场的谱强度一般强于经向风场的谱强度, 这一点后面还会看到.

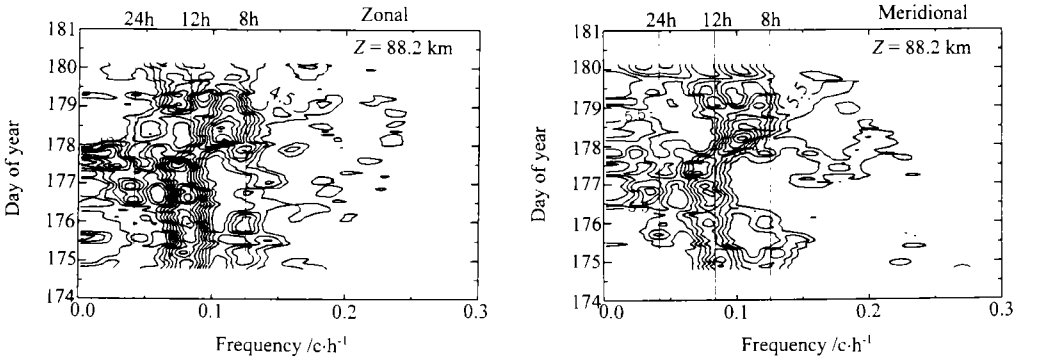


图 1 88.2 km 高度上纬向和经向风的动态功率谱

Fig.1 Dynamic normalized power spectra of zonal and meridional wind components at the height of 88.2 km. On the abscissa is the frequency of the wind fluctuation and on the ordinate the time signified by the middle of a 36 h data window

在以前的工作中，人们通常用固定频率 ($1/24\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$,$1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 和 $1/8\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$) 上的谱值或振幅大小代表潮汐的强度. 可以看到，潮汐谱峰对应的频率通常与其定义值有一定的偏离而且随时间变化，这意味着中间层大气潮汐经常处于被扰动的状态. 为了有效地研究半日潮汐波结构参量值随高度和时间变化的特征，我们定义一个频率区间 $(1/12-\Delta f, 1/12+\Delta f)\mathrm{c\cdot h^{-1}}$(这里频率偏移限 $\Delta f = 0.5/24\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 恰好是半日潮与周日潮或 $1/8\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 潮汐频率差值的一半)[1], 在这个频率区间内谱的最大值代表半日潮的强度，所对应的频率代表半日潮的频率. 由于 Lomb-Scargle 谱强度 $p(\omega)$ 与波振幅 $X(\omega)$ 之间存在如下关系 [5]

$$X(\omega) = 2\sigma\sqrt{p(\omega)/N}. \tag{1}$$

其中， N 为所取时间窗中实际数据点数， σ^2 为数据的方差，所以我们可以用谱强度来表示相应的波振幅.

图 2 给出了 86.1—88.8 km 高度上风场纬向分量和经向分量的归一化功率谱，时间范围是 176 天 0500—177 天 1700. 从图 1 可知，这是周日潮增强的时段，因此图 2 中纬向风和经向风的功率谱均呈现明显的双峰结构，显然它们分别代表周日潮和半日潮. 注意到周日潮的谱峰对应的频率位置随高度的增加向低频方向移动，而半日潮的谱峰对应的频率位置几乎不变，这是半日潮相当稳定且在数个连续的高度上出现的情形，因而其结构参量值具有典型意义. 有趣的是，经向风中周日潮的谱峰对应的强度随高度的增加而逐渐减小，而半日潮的变化倾向正好相反，但它在 87.9 km 的高度上达到饱和，随后有所减小. 无论在经向风还是纬向风中，粗略地看，似乎两种潮汐成份在一定范围内的传播过程中发生

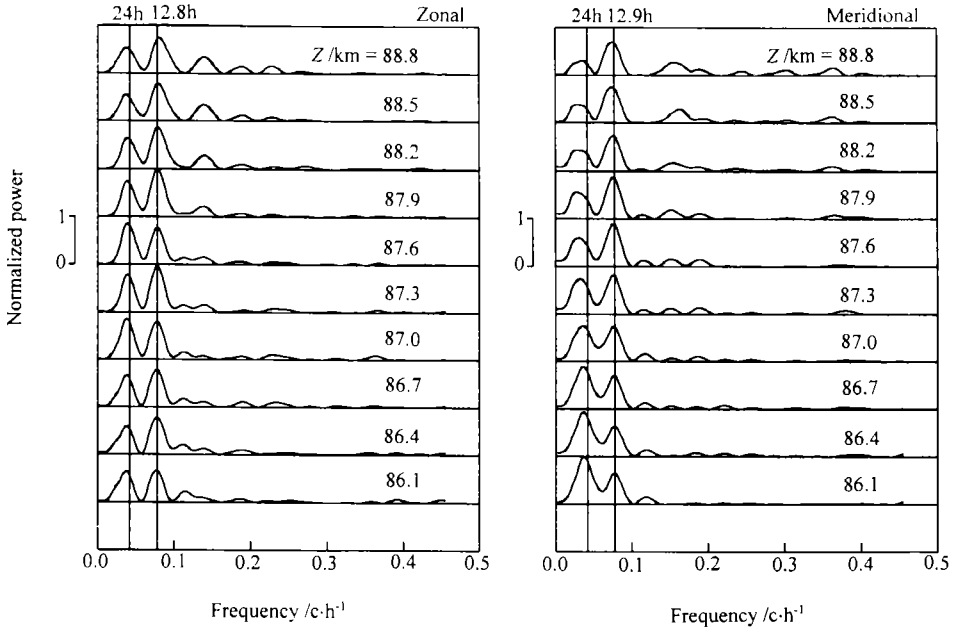


图 2　当地时间 176 天 0500 至 177 天 1700 风场纬向分量和经向分量的归一化功率谱

Fig.2　Normalized power spectra of zonal and meridional wind components between 0500LT on day 176 and 1700LT on day 177

了能量交换，但其总能量保持不变.

实际计算中，对应的频率偏移在 $\pm 0.015/\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 的范围内，且谱峰在纬向和经向风的功率谱中均以大于 90% 的置信水平至少在 9 个连续的高度上出现的半日潮被认为是稳定的. 我们按出现的高度数对这些非常接近的频率进行了平均，结果得出图 2 中纬向和经向半日潮的谱峰对应的频率分别为 $1/12.8\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 和 $1/12.9\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$，因此我们看到在图 2 中，半日潮的谱峰对应的频率几乎总是落在标记直线上，而周日潮则不然. 通过这种算法，我们能够动态地跟踪稳定的半日潮汐谱峰对应的频率.

2.2 谐波拟合

为了考察半日潮的结构特征，对于去掉线性倾向量 (背景风) 的每一个水平风分量 [8]，采用正弦函数拟合功率谱显示半日潮:

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi). \tag{2}$$

这里 A,ω,φ 分别表示半日潮的振幅、角频率和相位. 角频率 ω 采用功率谱中半日潮谱峰所对应的实际频率值， A,φ 通过最小二乘法获得.

图 3 给出了 8 个高度上半日潮各水平分量随时间和高度变化的曲线. 可以看到，各分量的振幅随高度增加而逐渐增长；波等相面随时间增加向下移动；各高度上经向分量的相位比纬向分量的相位超前. 为了更清楚地显示这些特征，图 4 绘出了半日潮各分量振幅和相位 (用扰动首次到达最大值的地方时 $T_{\max}$ 表示) 的高度剖面. 计算结果表明，经向分量的振幅从 84.6 km 上的 $5.3\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 迅速增长到 87.9 km 上的 $31.2\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，以后有所减小；纬向分量的振幅从 84.6 km 上的 $7.5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 增长到 87.9 km 上的 $35.2\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，以后基本不变. 在 87.9 km 以下，经向分量的振幅略大于纬向分量的振幅；在 87.9 km 以上，经向分量的

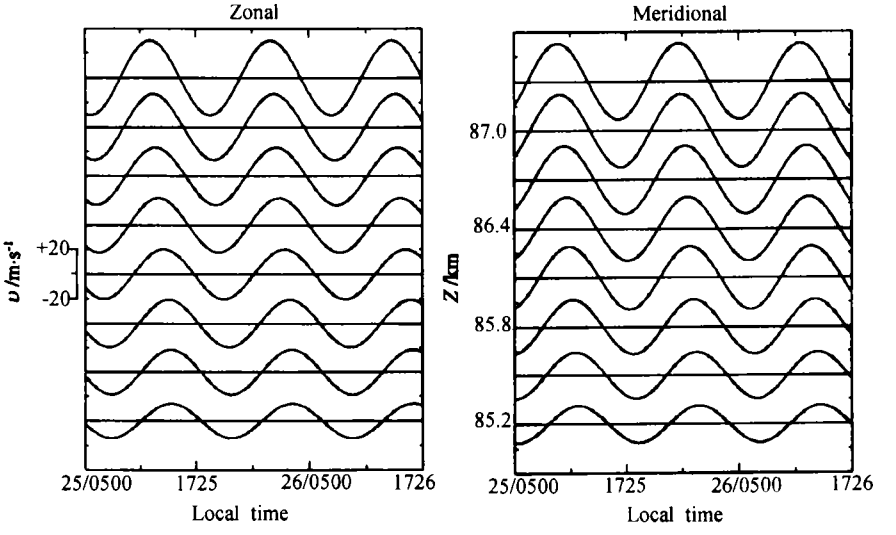


图 3 当地时间 176 天 0500 至 177 天 1700, 85.2—87.3 km 高度上
用正弦函数拟合后的水平扰动速度随时间变化的轨迹

Fig.3 Time variation of horizontal perturbation velocities fitted by sinus function from 0500LT on day 176 to 1700LT on day 177 between 85.2 km and 87.3 km

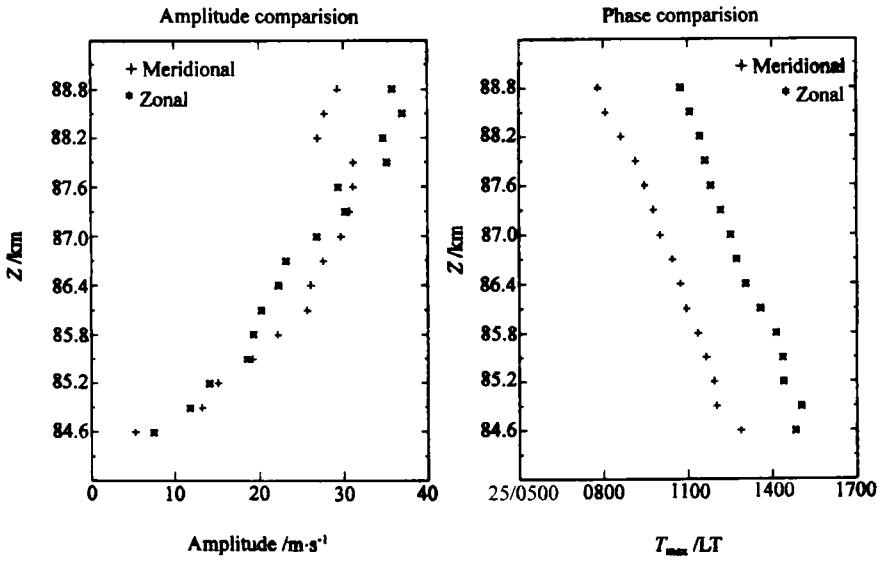


图 4　当地时间 25 日 0500 至 26 日 1700 从 84.6—88.8 km 高度上半日潮振幅和相位 ($T_{\max}$ 首次达到最大值的当地时间) 的高度剖面

Fig.4　Height profiles of the amplitude and phase ($T_{\max}$, the first local time of maximum) of the semidiurnal tide from 0500LT on day 176 to 1700LT on day 177 between 84.6 km and 88.8 km

振幅明显小于纬向分量的振幅. 无论经向还是纬向分量, 其振幅都在 87.9 km 附近达到最大, 这可能是波传播过程中饱和或发生破碎的高度. 注意以上用谐波拟合方法得到的波振幅随高度的变化特征与在功率谱中看到的谱峰强度的变化特征几乎完全一致, 比较 (1) 式和 (2) 式, 说明我们对稳定的半日潮汐谱峰所对应的频率的跟踪是相当准确的. 然而, 由 (2) 式出发, 我们可以得到更多的波结构参量值.

图 4 右边显示出各高度上经向分量的相位比纬向分量的相位超前 2.5 h(相当于 $2\pi/5$) 左右, 但相位随高度变化的轨迹几乎呈平行的直线, 说明它们的相速稳定且近似相等; 波等相面随着时间的增加均明显向下移动, 从而表明这是两个能量向上传播的半日潮汐波. 根据关系式

$$\boldsymbol{k} = -\nabla\varphi, \tag{3}$$

通过计算相邻高度上的相位差, 可获得垂直波矢 $\boldsymbol{k}$, 进一步容易得到垂直波长和垂直相速. 计算结果表明, 这里所考察的半日潮的经向分量的按高度数平均的垂直波长为 14.4 km, 垂直相速为 $-0.27\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$; 纬向分量的垂直波长为 13.0 km, 垂直相速为 $-0.22\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

图 5 摘自文献 [2], 其中所选的是 23—24 日两天的数据, 所采取的方法可能是 $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$ 的固定频率拟合. 可以看出, 无论是波振幅还是相位随高度变化的特征 (其振幅的变化范围是 10—30 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 视垂直波长约 55 km) 与我们的结果均有一定的差异. 这一方面因为两者所采用的是不同时间段的数据, 另一方面也因为两者所用的数据分析方法不同. 总的说来, 我们的方法可能更合理, 所得的结果也更有规律. 另外, 我们没有在 23—24 日两天发现稳定的半日潮汐.

图 6 给出了 8 个高度上半日潮水平扰动速度矢量端点随时间变化的轨迹, 同时也给

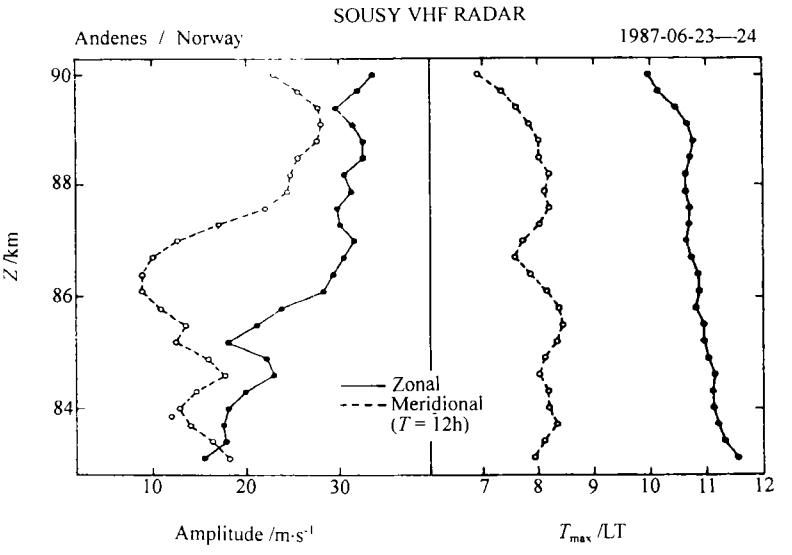


图 5 当地时间 174—175 天半日潮振幅和相位 (T_{max} 是达到最大值的当地时间) 的高度剖面
(振幅的变化范围是 10—30 $m \cdot s^{-1}$, 视垂直波长约 55 km)

Fig.5 Height profiles of the amplitude and plase of the semidiurnal fide

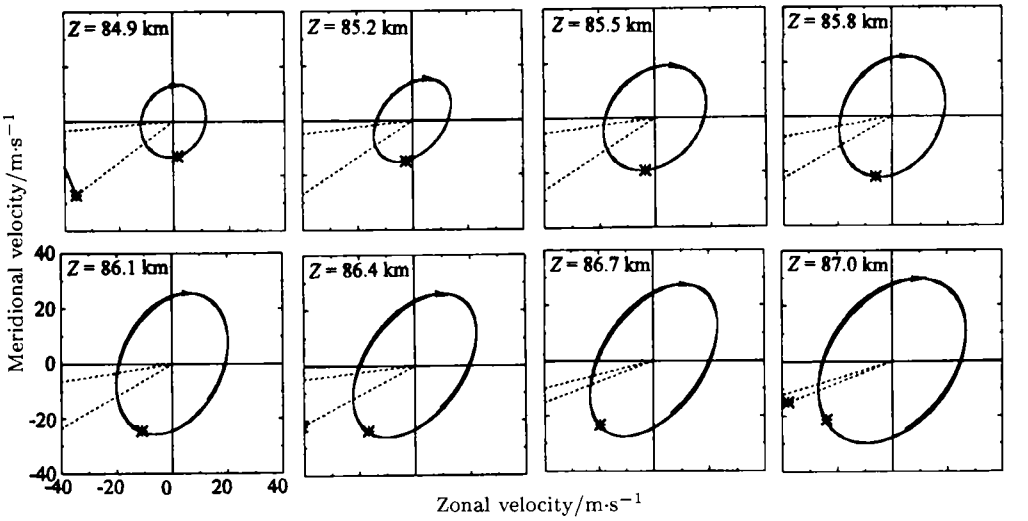


图 6 当地时间 176 天 0500—177 天 1700 从 84.9—87.0 km 高度上半日潮
水平扰动速度和背景风矢量端点随时间变化的轨迹

Fig.6 Hodographs of the semidiurnal tide wind vector and the background wind from 0500LT on day 176 to 1700LT on day 177 between 84.9 km and 87.0 km. Asterisk stands for the starting point of time

出了这段时间内的背景风矢端轨迹, 其中 "*" 代表时间起点 (25 日 0500). 可以看到, 由于两个分量对应的频率略有不同, 半日潮随时间变化的轨迹近似呈椭圆形, 伴随半日潮振幅在垂直方向上的迅速增长, 近似椭圆的长轴也越来越长, 但其方向 (呈东北-西南向) 随高度变化较小, 这主要是因为两个分量的垂直相速比较接近的缘故. 背景风的方向 (呈

西南向) 和大小随高度的变化都较小，说明中层顶区域的背景风是比较稳定的. 注意到各高度上的近似偏振椭圆随时间的旋向都是顺时针的，这是因为经向分量的相位比纬向分量的相位超前的缘故. 动态拟合的结果表明，经向分量的相位总是比纬向分量的相位超前 $\pi/4$—$\pi/2$(约相当于 1.5—3 h) 左右，这是北半球的特征 [3]，可能是由于稳定的背景风的作用使纬向分量产生了相位延迟.

图 7 显示了由动态拟合得到的半日潮的各种按高度数平均的结构参量 (从上到下依次为周期 T, 振幅 A, 垂直波长 λ_z 和垂直相速 v_{pz}) 值随时间的变化情况. 和图 1 一样，这里每个点代表的时间是相应的 36 h 窗的中点对应的地方时刻，所以实际时间跨度应向前和向后各推移 18 h, 这样一来出现稳定的半日潮的总的时间跨度是 24 日 (175 天)2100—29 日 (180 天)0100. 正如前面所提到的，在 23—24 日 (174—175 天) 两天没有跟踪到稳定的半日潮汐，初看起来这与图 1 有些不符，实际上是因为我们跟踪的是谱峰随高度连续的半日潮，而谱状况常随高度有大的变化的缘故. 图 7 中还在 27—28 日 (178—179 天) 出现了不到一天的间断，这与图 1 是一致的，对应于出现了强烈的扰动因子的时段.

由图 7 可见，即使是我们所说的稳定的半日潮，其波结构参量值也一直在随时间起伏，再次表明半日潮汐实际上经常处于被扰动的状态，其中较弱的扰动可能是潮汐与重力波之间的局地相互作用引起的，其持续时间较短；而较强的扰动可能是源及传播条件的变化或行星波与潮汐之间的非线性相互作用引起的，其持续时间较长. 比较经向分量和纬向分量随时间的变化情况，可以看到，它们在基本变化趋势一致的基础上显示出一定程度的各向异性. 表 1 给出了波结构参量值的变化范围和按时间窗数的平均，显然它们是合理的，由于这些结果是通过比较严格的计算得到的，在潮汐的短期变化研究中，可能具有一定的参考意义.

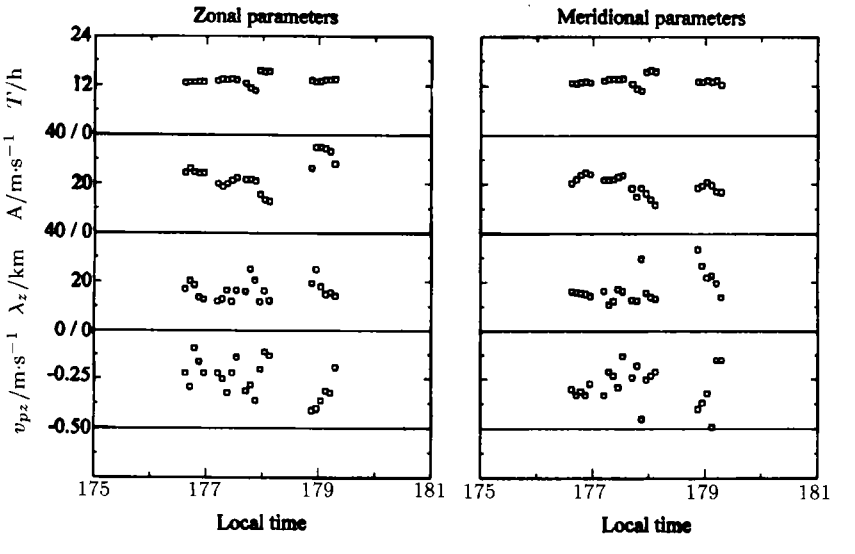


图 7　半日潮的各种按高度数平均的结构参量值随时间的变化

Fig.7　Time variations of various semidiurnal tide parameters averaged by height number, from up to down are showed the period T, amplitude A, vertical wave length λ_z and vertical phase speed v_{pz} by turns

表 1 波结构参量值的变化范围和按时间窗数的平均

分量 / 参数	纬向分量		经向分量	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
周期 (h)	10.8—15.6	13	10.9—15.8	13
振幅 ($m\cdot s^{-1}$)	12.9—34.9	24	11.7—24.8	20
垂直波长 (km)	12.9—25.2	16	10.9—33.5	18
垂直相速 ($m\cdot s^{-1}$)	−0.09—−0.41	−0.3	−0.13—−0.45	−0.3

3 结 论

采用德国 SOUSY VHF 雷达在挪威 Andφya 6 天的观测数据研究了极区夏季中间层大气半日潮汐的结构和变化特征. 纬向和经向风的动态 Lomb-Scargle 谱表明, 半日潮是中间层高度上占支配地位的波动, 其谱峰对应的频率一般与 $1/12\,c\cdot h^{-1}$ 有偏离, 说明它们经常处在被扰动的状态.

对于同一时间窗内纬向和经向分量都比较稳定并且随高度连续的半日潮, 其振幅随高度增加而迅速增长, 在 87.9 km 高度附近达到饱和; 半日潮汐波等相面向下运动, 说明它们是能量向上传播的行波; 经向分量的相位一般比纬向分量的相位超前 $\pi/4$—$\pi/2$(约相当于 1.5—3 h) 左右, 从而水平扰动速度矢量端点随时间变化的轨迹显示出顺时针方向旋转的特征. 用谐波拟合方法得到的波振幅随高度的变化特征与在功率谱中看到的谱峰强度的变化特征几乎完全一致, 从而说明我们对稳定的半日潮汐谱峰对应频率的跟踪是相当准确的.

动态的谐波拟合分析得到了半日潮汐波结构参量随时间的变化, 结果表明, 它们在纬向和经向风中的基本变化趋势一致, 但是还存在一定程度的差异. 由于在研究潮汐的短期变化特征时, 不能像在研究长期变化时那样对观测数据进行纵向宽步长的时间平均或横向的月平均, 但我们也不满足于简单的固定频率拟合, 比较而言这里所讨论的在谱分析基础上进行的谐波拟合方法显得可靠而有效.

致谢 作者感谢德国 Max-Planck-Institut für Aeronomie 的 J. Klostermeyer 博士和 R. Rüster 博士提供 SOUSY VHF 雷达观测数据.

参 考 文 献

[1] 易帆, 刘仁强. 极区夏季中间层潮汐和平均风的短期变化特征. 电波科学学报, 2000, **15**(1)

[2] Rüster R, Reid I M. VHF radar observations of the dynamics of the summer polar mesopause region. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(D7):10 005—10 016

[3] Malinga S B, Poole L M G. Atmospheric tides observed at Graham-stown (33.3°S, 26.5°E). *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1997, **59**:2 037—2 050

[4] Beard A G, Mitchell N J, Williams P J S, Kunitake M. Nonlinear interactions between tides and planetary waves resulting in periodic tidal variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**: 363—376

[5] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis II, statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Ap. J.*, 1982, **263**:835—853

[6] Press W H *et al.* Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data. Numerical recipes in FORTRAN, 2nd ed. 1992. 569—577

[7] Yi Fan, Xiao Zuo. Evolution of gravity waves through resonant and nonresonant interactions in a dissipative atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**:305—317

[8] 张绍东，易帆. 极区中层惯性重力波的 VHF 雷达观测. 空间科学学报， 1995, **15**(2):156—162

VHF RADAR OBSERVATION OF THE SEMIDIURNAL TIDE IN THE SUMMER POLAR MESOSPHERE

LIU Renqiang　YI Fan

(*Department of Radio Science and Technology, Wuhan University* 430072)

Abstract

Data obtained from the mobile SOUSY VHF radar at Andϕya/Norway (69°N, 16°E) during the MAC/SINE campaign in summer 1987 have been used to study the structure characteristics and variability of the semidiurnal tide in the polar mesosphere. It is shown that the spectral peak corresponding to the semidiurnal tide dominates and persists almost uninterruptedly in time. The corresponding frequency often deviates from $1/12\,\mathrm{c\cdot h^{-1}}$. This likely represents a temporary or disturbed state. The amplitude of the stable semidiurnal tide increases rapidly with height and shows a saturation behavior at the height of about 87.9 km. The phase front of the tide moves downward, indicating the associated energy flux transports upward. The phase of the meridional component often leads that of the zonal component about $\pi/4$—$\pi/2$ (equivalent to 1.5—3 h), resulting in a clockwise hodograph of the wind vector with respect to time. The values of wave-associated parameters are obtained by a harmonic analysis in which the variable frequency corresponding to spectral peak is traced. By and large, the time variation trends of the tide in the zonal and meridional components are similar, but display an anisotropy to some extent.

Key words　The semidiurnal tide, Mesosphere, VHF radar