武汉上空 MLT 中准 16 日波的流星雷达观测*

姜国英[1,2,3] 熊建刚[1] 万卫星[1] 宁百齐[1] 刘立波[1]

[1](中国科学院地质与地球研究所 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)

摘 要 利用武汉流星雷达 2002 年 2 月 20 日至 2003 年 11 月 10 日的观测数据, 研究了武汉上空中间层-低热层 (MLT) 中的准 16 日波, 即周期范围在 12—20 天的行星波[1]. 分析结果表明, 16 日波的纬向成分通常比经向成分要强. (1) 在 2002 年和 2003 年, 波振幅最强都出现在当年的秋季 (约 9 月 10 日 —10 月 10 日). Lomb-Scargle (L-S) 谱分析得到振幅最大值约为 16 m/s. 2002 年夏季出现了同年次最强的波动, 但 2003 年没有发现这一现象. 两年的冬季都没有出现强的 16 日波. (2) 2002 年, 在 86—98 km 处波动较强, 最大振幅 (约 16 m/s) 出现在 90 km、94 km 处, 而 2003 年低高度的波动要比较高高度的波动强. 武汉上空 MLT 中, 秋季的 16 日波是能量上传的波动, 即它的源在较低的大气层. 2002 年夏季的波动的能量是下行的, 波源可能在南半球.

关键词 流星雷达; 中间层-低热层; 16 日波

中图法分类号 P 412

The Quasi 16-day Waves in the Mesosphere and Lower Thermosphere at Wuhan

JIANG Guoying[1,2,3] XIONG Jiangang[1] WAN Weixing[1] NING Baiqi[1] LIU Libo[1]

[1](*Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)
[2](*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*)
[3](*Graduate School, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Data observed by the Wuhan meteor radar (20 February 2002—10 November 2003) have been used to study the quasi 16-day oscillations in the mesosphere and lower thermosphere (MLT), which is a type of planetary wave with period ranges from 12 to 20 days. The results show that the zonal components are generally stronger than the meridional components. (1) In the year of 2002 and 2003, the largest amplitudes appear in early autumn (10 September—10 October) when the zonal background winds are eastward. The largest amplitude value derived from the Lomb-Scargle (L-S) periodograms is about 16 m/s. A second maximum appears in the summer of 2002, but not in the summer of 2003. There are no strong wave activities in the winter months of both years. (2) In 2002, the 16 day waves are strong from 86 to 98 km with the maximum at about 90 km to 94 km, but they are strong at lower altitudes in 2003. The energy of the 16-day wave propagates upward in

* 国家自然科学基金项目 (40174048, 40134020) 和中国科学院知识创新工程重要项目 (KZCX3-SW-144) 共同资助
2004-05-10 收到原稿, 2004-10-18 收到修定稿

autumn, which means the wave originate from lower atmosphere, but the direction of wave energy propagation is downward in summer of 2002, which means the 16-day waves may propagate from the southern hemisphere.

Key words Meteor radar, Mesosphere and lower thermosphere, The 16-day waves

1 引言

在中间层和低热层大气 (The Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT) 的动力学过程中，大气潮汐、重力波和行星波起着重要作用. 在过去的二三十年里，人们利用地面雷达 (MST 雷达，MF 雷达，流星雷达等) 和卫星观测，广泛研究了 MLT 中大尺度、长周期的行星波特征以及行星波与潮汐、重力波的相互作用. 观测和理论研究表明，MLT 中行星波的周期范围主要是 1.9—2.2 天、4—7 天和 12—20 天，它们分别和低层大气中向西传播的 Rossby 波的特征波模 $(3,0)$、$(1,1)$、$(1,3)$ 非常相似 [2],[3]，分别称之为 “准 2 日波” 、 “准 5 日波” 和 “准 16 日波”. 根据这些研究，有人提出 MLT 中的行星波来自较低的对流层和平流层，行星波在某些条件下可以从低平流层向上传到中层顶 [2]-[5].

Charney 和 Drazin[4] 指出在准地转条件下，对流层中的行星波只有满足条件 $0 < v - c_x < v_c$ 时，才可能垂直向上传播. 其中，v 为纬向平均风速，c_x 为波动的相速度，当纬向平均风或波的传播方向是东向时，v 或 c_x 为正. v_c 为 Rossby 临界速度 (依赖于温度和波动的水平尺度). 行星波垂直传播与纬向风有关，波的西向相速小于或等于东风的速度时不能上传. 准 16 日波 (the quasi 16-day oscillations, 下称 16 日波) 的西向相速很小，而夏季平流层盛行的又是东风，夏季 16 日波会被东风捕获而不能向上传播；冬季平流层盛行的是西风，冬季 16 日波可以向上传播到 MLT 区域. 这个结论已经被 Forbes 等 [5]、Jacobi 等 [6]、 Miyoshi 等 [7]、Mitchell等 [8]、Luo 等 [1],[9],[10]、Namboothiri 等 [11] 的研究证明.

然而，夏季 MLT 区域中也观测到了强的 16 日波 [12],[13]. Williams 和 Avery[12] 用位于 Poker Flat (65°N, 147°W)、 Alaska 的 MST 雷达 1984 年的数据研究了 16 天周期的振荡，发现 16 日波在冬季平流层出现最大值，MLT 中的 16 日波最大值却出现在夏季. 他们对夏季出现 16 日波的原因提出了两种可能的解释：①冬季半球的 16 日波向上传播，然后随纬圈的西风越过赤道传到夏季极区，Forbes 等 [5] 和 Miyoshi 等 [7] 的数值模拟支持这种解释，Forbes 等 [5] 指出半球间的传递发生在中层顶附近；②重力波在夏季对流层和低平流层被 16 日波调制之后向上传播，在中间层破碎或粘性耗散后产生周期为 16 天的能量与动量的振荡 [14].

Espy 等 [13] 研究了 Stockholm (59.5°N, 18.2°E) 1992 年至 1995 年夏季的温度波动，发现 1992 年和 1994 年夏季，中层大气都有 16 天的温度波动出现，这时期赤道平流层上部的 QBO (Quasi-Biennial Oscillation) 处于东风相，而 1993 年和 1995 年的夏季 QBO 处于西风相时，中层大气中没有明显的 16 天温度波动出现. 文中同时指出，1984 年的 QBO 也处于东风相，因此 Williams 和 Avery[12] 报道的夏季 16 日波也与 QBO 的相速度方向有关. 然而 Mitchell 等 [8] 用 Sheffield (53.5°N, 3.9°W) 1990 年 1 月 —1994 年 8 月的流星雷达数据研究了 16 日波. 发现最强的波在 1—4 月中旬，最大振幅为 14 m/s. 而在 7 月 —11 月中旬出现了波的次最大值约 10 m/s. 值得注意的是他们并没有发现夏季 16 日波与 QBO 有关. 由此看来，关于 16 日波的出现规律和季节变化目前并没有统一的结论，仍然需要进一步的观测和研究，本文利用武汉 (30.5°N, 114.3°E) 流星雷达 2002 年 2 月 20 日 —2003 年 11 月 10 日共 629 天的数据 (其中 2003 年有 58 天数据空缺)，对武汉上空 16 日波进行了研究.

2 数据分析

武汉流星雷达是最近几年发展起来的全天空宽波束干涉雷达，建于 2002 年 1 月份. 从 2 月份起一直进行连续观测 [15]. 雷达的工作频率为 38.7 MHz，峰值功率为 7.5 kW. 2002 年 9 月 18 日之前，雷达发射的脉冲重复频率为 500 Hz，9 月 18 日以后脉冲重复频率提高到 1980 Hz，提高了探测的流星数目. 该雷达主要用于探测 70—110 km 范围内的大气运动.

利用与文献 [15] 同样的方法，我们得到 78—

98 km 范围内时间步长 2 h、高度间隔为 2 km 的风场序列，然后计算每天平均的数据，以除去潮汐、其他短周期的波动和周期小于一天的湍流 [10]. 为得到日平均的数据序列，要求一天观测数据不少于 3 个，否则视该天为一残缺点. 在日平均数据中，如果连续残缺的点小于等于 5 d, 就用线性拟合插值补上，如果大于 5 d 并且小于谱分析的窗口长度 (本文为 48 d) 的 1/3 即 16 d, 则用平均数和方差与其余数据点的平均数和方差相等的高斯随机序列补上. 如果残缺数据更长就不作插值处理 [1].

将日平均数据进行分组，以 120 d 为单位，对各个高度的数据进行二次多项式拟合，去除趋势项，以减少更长周期变化的影响 [10],[11],[13]. 为在时域里得到 16 日波的活动情况，对去趋势项后的数据进行周期为 12—20 d 的带通滤波. 另外我们还采用了 L-S 谱分析方法 [16],[17] 计算波的振幅. 该方法优点在于不仅可以对均匀数据分析，还可以对不均匀数据分析，能够得到分辨率高于 $1/T$ 的谱 (T 为时间跨度), 更为准确地确定谱峰的位置 (L-S 谱分析法详见熊建刚和易帆 [18]). 我们还将在感兴趣的周期范围内，采用谐波拟合的方法得到 16 日波的月平均振幅和相位随高度变化的剖面图.

3 结果与分析

3.1 日平均纬向风与 16 日波的纬向分量

图 1 上半部分中的实线表示每 4 km 日平均纬向风的全年变化，虚线表示以 120 d 为单位作二次多项式拟合的趋势线，可表征 16 日波纬向分量的背景风情况，下半部分表示周期为 12—20 d 的带通滤波数据，其变化趋势可表征 16 日波的活动情况.

日平均风是对 MLT 区域中行星尺度波的很好展示. 由图 1 可得到 16 日波的纬向分量随高度和时间的变化：在 86—98 km 高度处，2002 年秋季 (约 9 月 10 日 —10 月 10 日)16 日波的纬向分量的活动相对全年最强；夏季的 94 和 98 km 处，波的活动也比较强；78 km 和 82 km 高度上，全年的活动都很弱. 2003 年的情况与上一年相比较，秋季 9 月份的 16 日波的纬向分量活动相对全年仍然较强，但强度比 2002 年同一时期要弱，但较低高度处的 16 日波的纬向分量强于较高处. 由图 2 可以更清楚地看出 16 日波的纬向分量在 2002 年和 2003 年振幅最强月份的变化情况. 图 2 是对波振幅最强月份的各高度滤波数据的平均.

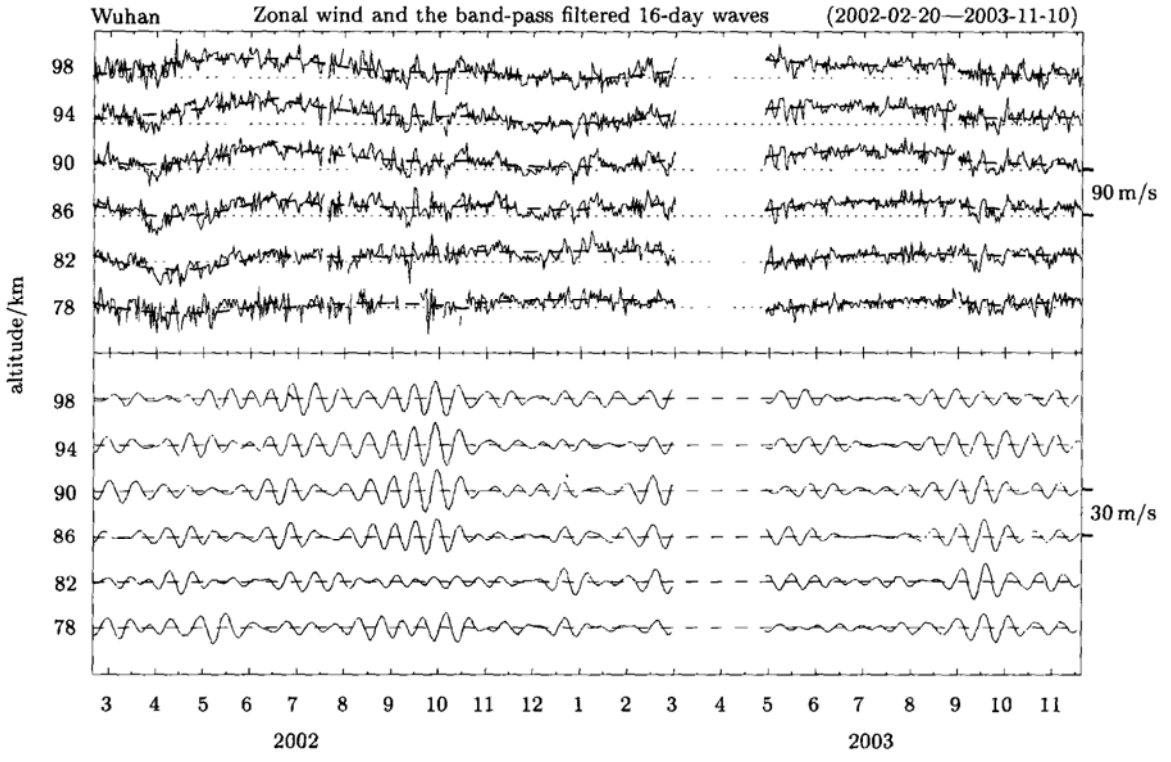


图 1 日平均纬向风与 16 日波的纬向分量

Fig.1 Daily mean zonal winds and the zonal components of the 16-day waves

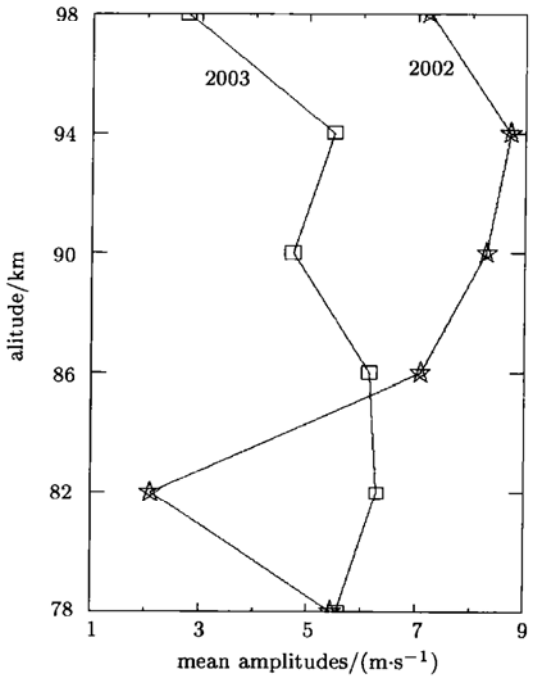


图 2 2002 和 2003 年 9 月份各高度处 16 日波的纬向分量的平均振幅

Fig.2 The zonal mean amplitudes of the 16-day waves in September of 2002 and 2003 at 78—98 km

由图 1 还可得到，2002 年和 2003 年 16 日波的纬向分量的背景风 (上半部分中的虚线) 在 86—98 km 处全年盛行的基本是西风，风值在夏季比同年其他季节要大. 但 16 日波最强的活动出现在背景西风有减弱趋势的秋季. 这与引言中行星波垂直向上传播的条件 (当纬向背景风为西风时，有利于 16 日波垂直向上传播到 MLT 区域) 相符，与 Luo 等 [1],[9],[10] 和 Namboothiri 等 [11] 研究结论基本一致，不同的是 Namboothiri 等 [11] 提出 16 日波的强度随背景西风值的增减而增减，而武汉的数据没有这一特点. 在 78 km 和 82 km 处，除了 2002 年春季 (约 3 月 10 日 —5 月 20 日) 为东风外，其他时间几乎一直是西风，在这两个高度上，2002 年的 16 日波比同年其它高度弱，而 2003 年比其他高度略强.

3.2 L-S 谱分析

为了了解武汉上空 MLT 中 16 日波的整体特征，我们对各高度去趋势后的纬向风和经向风进行了动态 L-S 谱分析，估计波动振幅和周期随高度与季节的变化. 谱分析时取窗口长度为 48 d, 以 5 d 为滑动单位，时间取窗口中心所在的天数. 在既确保谱的精度又确保合适的波动时间响应的条件下，取窗口的长度为 48 天是最佳选择 [8]. 16 日波经向和纬向分量的 L-S 谱分别见图 3 和图 4.

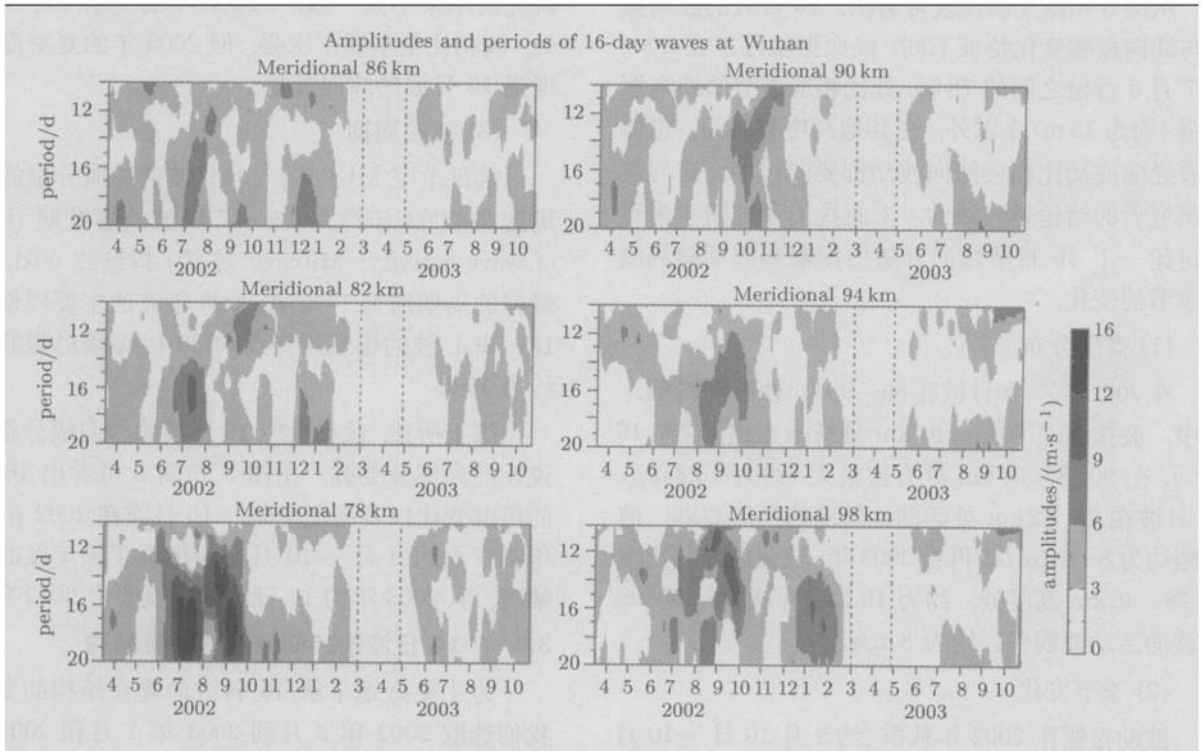


图 3 L-S 谱分析得到的各高度处 16 日波经向分量的振幅和周期

Fig.3 The amplitudes and periods of the meridional components of the 16-day waves at 78—98 km from L-S periodograms

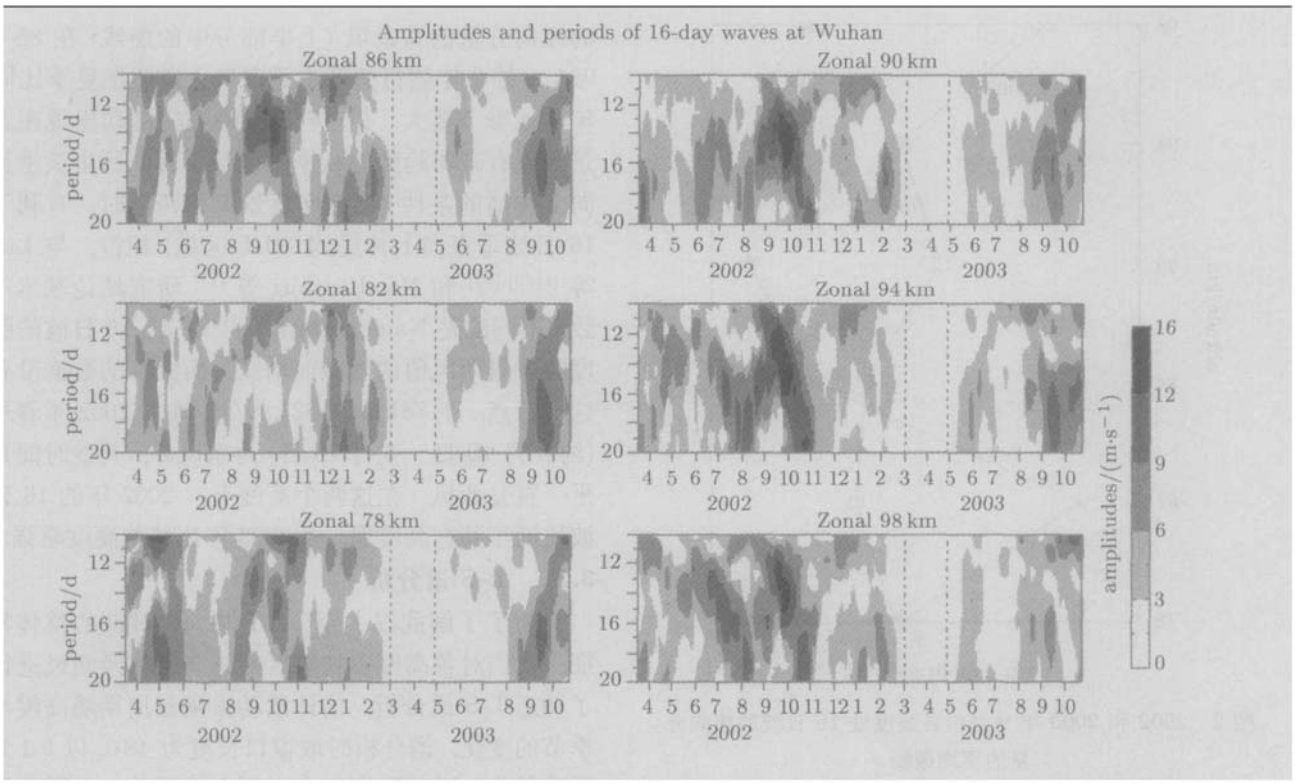


图 4 L-S 谱分析得到的 78—98 km 高度处 16 日波纬向分量的振幅和周期

Fig.4 The amplitudes and periods of the zonal components of the 16-day waves at 78—98 km from L-S periodograms

从图 3 和图 4 的比较可看出，16 日波的经向振幅与纬向振幅变化特征不同. 经向振幅除了在 2002 年 7 月 9 月份之间的 78 km 处比相应季节的纬向振幅强 (约为 15 m/s) 以外，在其他高度和时间，总体来看经向波动比相应纬向波动都要弱得多，这与其他研究者的结论是一致的. 下面我们通过图 4 来重点讨论一下 16 日波纬向分量的振幅和周期随高度与季节的变化.

(1) 高度分布

在2002年， 16日波在86—98 km处活动较强. 其中，波振幅在 90 km, 94 km 处有最大值 (约为 16 m/s); 在 90, 86, 98 km 处有次最大 (约为 13.8 m/); 16 日波在 78, 82 km 处活动比较高的高度要弱，波振幅约为 8—10 m/s. 再看 2003 年, 较强波振幅出现在 78—86 km 高度处，约为 10.5 m/s; 在 90—98 km 处波的活动要弱些，约为 8 m/s.

(2) 季节变化

波动振幅在 2002 年秋季 (约 9 月 10 日 —10 月 10 日) 在全年属于最强. 2003 年， 16 日波活动最强也出现在秋季 (9 月). 两年的冬季都没有出现强的 16 日波，和 Luo 等 [1],[9],[10]、Namboothir 等 [11] 研究的结果不太一致. 2002 年的夏季 94、98 km 处，波相比全年属于次强，但 2003 年的夏季没有发现强 16 日波的纬向分量.

(3) 波的周期

武汉上空 MLT 中， 16 日波的纬向分量的主要周期在 2002 年约为 13—17 d, 波的爆发期 (bursts of wave activity: Mitchell 等 [8]) 持续约 50 d, 振幅最强的周期约为 14 d; 在 2003 年波的主要周期约为 15—19 d, 波的爆发期持续约 30 d. 振幅最强的周期约为 17 d.

综上所述, 武汉上空 16 日波的纬向成分总体来说比经向成分要强. 由图 3 和图 4 可看出 16 日波的年度变化以及高度变化. 16 日波在 2002 和 2003 年都在大约 9 月 —10 月期间出现了该年度的最强幅度，但 2003 年的 16 日波的强度要比 2002 年弱.

3.3 16 日波的纬向分量的垂直结构

为了更好地了解 16 日波的垂直结构的变化，我们选取 2002 年 3 月到 2003 年 1 月和 2003 年 9 月共 12 个月份的数据，用谐波拟合的方法得到 16 日波纬向分量的月平均振幅和相位随高度变化的剖面, 结果见图 5. 以分析月份为中心取 48 d 的窗口做

谐波拟合. 相位用度表示，零度相位与每一组数据序列的第一天对应. 星号表示 16 日波纬向分量的振幅，菱形表示波动的相位，实线表示纬向背景风，虚线表示纬向背景风值为零的线，正值为西风、负值为东风. 图 5(d), (g), (l) 中的粗实线表示对相位进行线性拟合的结果.

由图 5 可看出，波振幅 (星号) 随高度的变化呈现了波动的特征，在 2002 年 4 月， 5 月， 8 月和 9 月尤其明显. 振幅变化与背景风的变化与图 1 的结论一致， 16 日波纬向分量的幅度没有明显的随背景西风增强而增大的规律，例如在 90 km 以上 5 月、 6 月和 7 月的纬向背景西风最强，但波的幅度值并不是最大；反而在东向背景风较小的秋季出现了振幅的最大值. 冬季的纬向背景风偏小，没有很强的 16 日波出现.

由于受到波的反射等的影响 [1], 16 日波的相位变化比较复杂，下面我们仅讨论 16 日波较强的月份， 16 日波相位随高度的变化. 首先分析波动最强

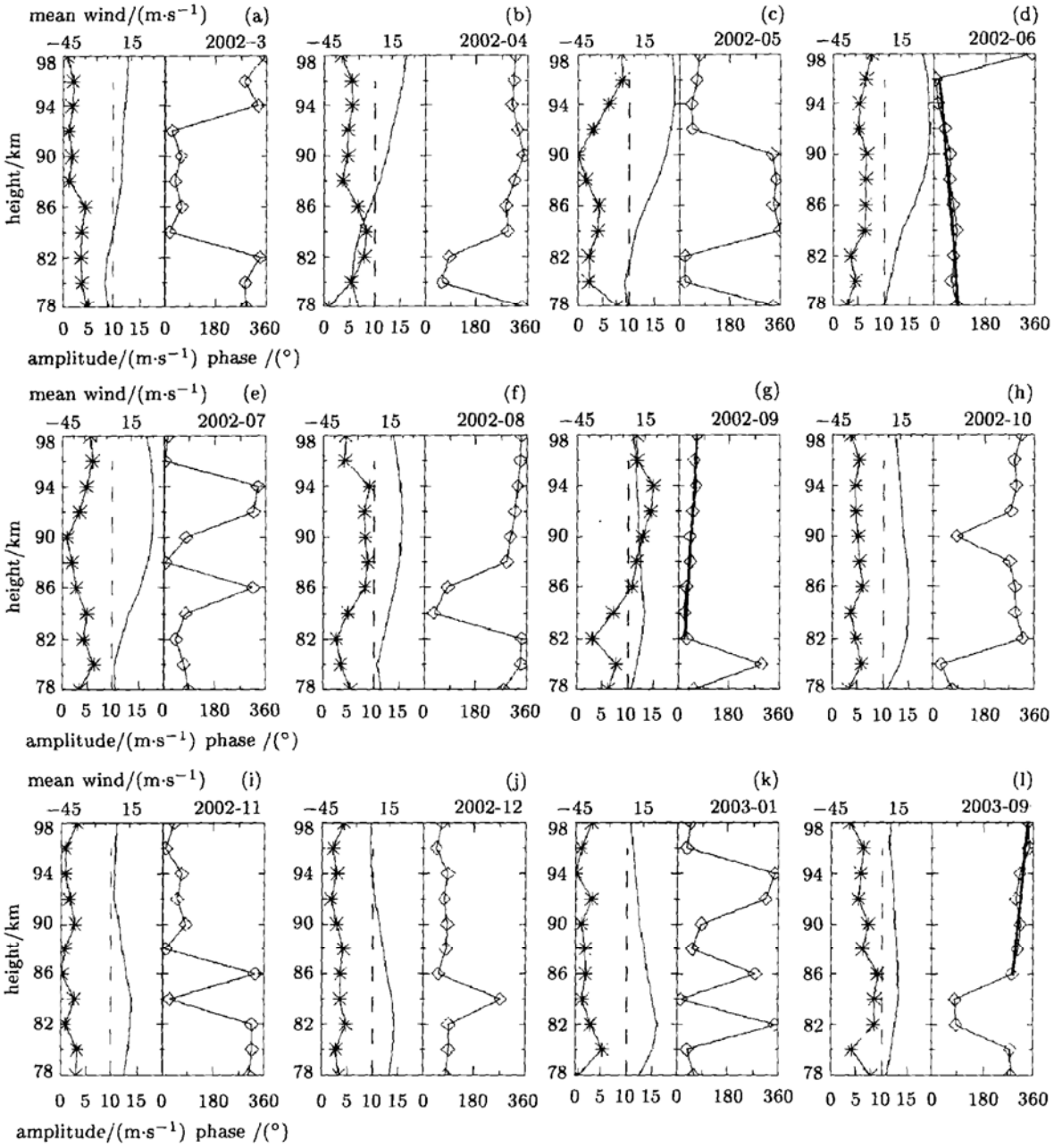


图 5 16 日波的纬向分量的月平均振幅和相位随高度变化的剖面

Fig.5 Height profiles of the monthly amplitudes and phase of the zonal components of the 16-day waves

的 2002 年和 2003 年 9 月份的相位变化，在 82—98 km 高度范围内，相位基本上随高度的增加而增大，即相位有正的斜率，这说明相位向下传播. Luo 等在文献 [1] 中提出，由 Rossby 波理论得到相位传播的方向与能量传播的方向相反. 所以武汉 16 日波的纬向分量在 2002 年 9 月份是能量上行的波动，即它的源在较低的大气层. 再来分析 2002 年波振幅出现次最大的夏季 6 月份，在这两个月份中波的相位基本呈现随高度增加而减小的趋势，即有负的斜率，也就是说波的能量是下行的. Forbes 等 [5] 曾经提出，冬季半球的 16 日波通过赤道传向夏季半球的通道在中层顶，由此可以推测，武汉夏季的 16 日波可能来自南半球.

根据相位随高度的变化，对其进行线性拟合 (见图 5(d)、(g)、(l))，可以近似算出 16 日波纬向分量的垂直波长 $\lambda_\perp$(波相位变化 360° 时在垂直方向上传播的距离). 2002 年 9 月份的 $\lambda_\perp \approx 132.3$ km，2003 年 9 月份的 $\lambda_\perp \approx 77.7$ km. 2002 年 6 月份的 $\lambda_\perp \approx 93.5$ km.

图 6 更明确地表现了 16 日波的纬向分量及其背景风的高度和年度变化，16 日波振幅来自 16 日波在各高度上主要周期的振幅平均. 可以看出，在 2002 年 3 月中旬 —5 月中旬的 78—86 km 处盛行东风，此时的 16 日波的纬向分量活动很弱，可见背景东风阻止了波的上传. 波最强时背景风为西风，西风有利于波的上传. 16 日波纬向分量的年度变化也很明显，两年的波最强都出现在秋季，且 2003 年比 2002 年相对较弱. 这与前面的讨论一致.

4 结论与讨论

本文利用武汉流星雷达 2002 年 02 月 20 日至 2003 年 11 月 10 日的观测数据，研究了武汉上空中层顶附近 (78—98 km) 的准 16 日波动. 结论如下.

(1) 整体来看，16 日波的纬向成分比经向成分要强. 这与大部分研究者的结论是一致的.

(2) 16 日波纬向分量的高度分布. 2002 年，在 86—98 km 处波动较强，最大振幅出现在 90 km、94 km 处，L-S 谱分析得到的振幅最大值约为 16 km/s; 在 78 km 和 82 km 处波动较弱. 2003 年，在 78—86 km 高度上的波较强.

(3) 16 日波纬向分量的季节变化. 在 2002 年和 2003 年，振幅最强都出现在同年的秋季，此时的纬向背景风为西风，这与引言中行星波垂直向上传播的条件 (当纬向背景风为东向时，有利于 16 日波垂直向上传播到 MLT 区域) 相符. 2002 年的夏季出现了当年波的次最强，但 2003 年没有发现这一现象. 两年的冬季都没有出现强的 16 日波.

(4) 武汉上空 MLT 中秋季 (约 9—10 月) 的 16 日波是能量上传的波动，即它的源在较低的大气层. 2002 年夏季的 16 日波是能量下行的波动，波源可能在南半球.

16 日波的纬向分量在振幅最大处是能量上行的

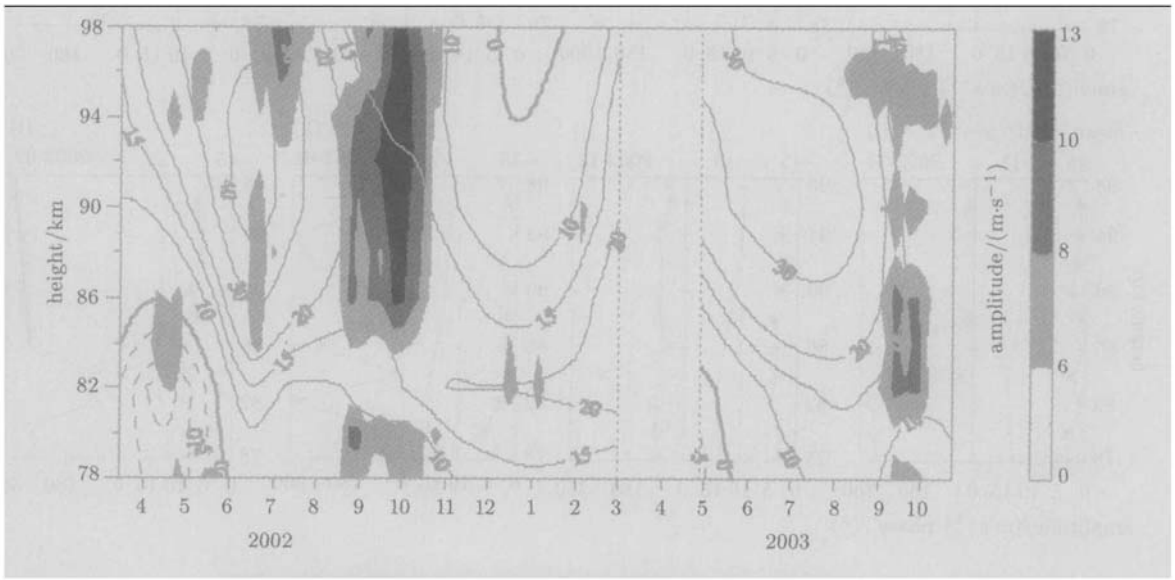


图 6 16 日波纬向分量的平均振幅及其背景风的高度和年度变化

Fig.6 The annual varieties of the zonal averaged amplitudes of the 16-day waves and its background winds at 78—98 km

波动，即它的源在较低的大气层. 86—98 km 处较强的 16 日波是不是与当地的重力波破碎或其他机制有关，这有待于进一步的分析研究. 16 日波的半球间传递还需要有更有力的证据来证明.

参考文献

[1] Luo Y *et al.* The 16-day wave in the mesosphere and lower thermosphere: simultaneous observations at Saskatoon (52°N, 107°W) and London (43°N, 81°W). *Canada. J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**:1287—1307

[2] Salby M L. Rossby normal modes in nonuniform background configurations. Part I: simple fields. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**:1803—1826

[3] Salby M L. Rossby normal modes in nonuniform background configurations. Part II: equinox and solstice conditions. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**:1827—1840

[4] Charney J G, Drazin P G. Propagation of Planetary-Scale Disturbances from the Lower into the Upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**:83—109

[5] Forbes J M *et al.* The 16-day wave in the mesosphere and lower thermosphere. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:9149—9163

[6] Jacobi C, Schminder R, Kuerschner D. Planetary wave activity obtained from long-period (2—18 days) variations of mesopause region winds over Central Europe (52°N, 15°E). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, **60**:81—93

[7] Miyoshi Y. Numerical simulation of the 5-day and 16-day waves in the mesopause region. *Earth Planets Space*, 1999, **51**:763—772

[8] Mitchell N J *et al.* The 16-day planetary wave in the mesosphere and lower thermosphere. *Ann. Geophys.*, 1999, **17**:1447—1456

[9] Luo Y *et al.* The 16-day planetary waves: multi-MF radar observations from the arctic to equator and comparisons with the HRDI measurements and the GSWM modeling results. *Ann. Geophysicae*, 2002, **20**:691—709

[10] Luo Y *et al.* The 16-day wave in the mesosphere and lower thermosphere at Saskatoon (52°N, 107°W). *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:2125—2138

[11] Namboothiri S P, kishore P, Igarashi K. Climatological studies of the quasi 16-day oscillations in the mesosphere and lower thermosphere at Yamagawa (31.2°N, 130.6°E). *Japan. Ann. Geophys.*, 2002, **20**:1239—1246

[12] Williams C R, Avery S K. Analysis of long-period waves using the mesosphere-stratosphere-troposphere radar at poker flat, Alaska. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:20 855—20 861

[13] Espy P J, Stegman J, Witt G. Interannual variations of the quasi-16-day oscillation in the polar summer mesospheric temperature. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:1983—1990

[14] Holton J R. The generation of mesospheric planetary waves by zonally asymmetric gravity wave breaking. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**:3427—3430

[15] Xiong Jiangang *et al.* Meteor radar observation of circulation near mesopause over Wuhan. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, **48**(10):1102—1106. in Chinese (熊建刚等. 武汉上空中层顶附近大气环流的流星雷达观测. 科学通报, 2003, **48**(10):1102—1106)

[16] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Ap. Space Sci.*, 1976, **39**:447—462

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

[18] Xiong Jiangang, Yi Fan. The VHF observation and study of nonlinear interaction near mesopause. *Chin. J. Radio Sci.*, 2000, **15**(1):84—89. in Chinese (熊建刚, 易帆. 中层顶波非线性相互作用的甚高频雷达观测研究. 电波科学学报, 2000, **15**(1):84—89)