北纬 30°N 中间层和低热层大气平均风中频雷达观测 *

张冬娅[1] 胡 雄[2] 张训械[1,2] 吴小成[1,2,3] K. Igarashi[4]

[1](中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)
[2](中国科学院空间科学与应用研究中心)
[3](中国科学院研究生院)
[4](日本国家信息和通信技术研究所)

摘 要 利用武汉 (30.5°N, 114.4°W) 中频雷达在 2001 年 1 月 1 日至 3 月 18 日、2002 年 2 月 5 日至 3 月 18 日、2002 年 10 月 18 日至 12 月 31 日期间，日本 Yamagawa(31.2°N, 130.6°W) 中频雷达在 1997 年 1 月 1 日至 10 月 17 日期间的数据，分析北纬 30°N 地区上空 60—98 km 高度的中间层、低热层大气平均风的变化规律，结果表明平均纬向风和经向风都具有明显的季节变化. 平均纬向风在冬季基本为西风，随高度增加，西风减弱，甚至在上部会出现微弱的东风；夏季中间层表现为强烈的东风，低热层则为西风，风向转换高度在 80 km 附近；春季和秋季为转换季节，在春季出现舌状东风结构. 80 km 附近的平均经向风场在冬季以南风为主，在夏季则以北风为主. 不同年份的平均风场存在年际变化性，但其气候变化特点非常相似. 中频雷达观测结果与 HWM93 模式结果的气候变化特点符合很好，与其他纬度的平均纬向风气候变化特点基本类似.

关键词 中频雷达；大气平均风场；中层顶；季节变化
中图法分类号 P401

Observations of the Mesospheric and Lower Thermospheric Mean Winds at 30°N With MF radars

ZHANG Dongya[1] HU Xiong[2] ZHANG Xunxie[1,2] WU Xiaocheng[1,2,3] K. Igarashi[4]

[1](*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430071)
[2](*Center of Space Science and Application Research, The Chinese Academy of Sciences*)
[3](*Graduate School, The Chinese Academy of Sciences*)
[4](*National Institute of Information and Communication, Japan*)

Abstract Winds data of Wuhan (30.5°N, 114.4°W) MF radar available during 2001-01-01—03-18, 2002-02-05—03-18, and 2002-10-18—12-31, Yamagawa (31.2°N, 130.6°W) MF radar of Japan available during 1997-01-01—10-17 were used to analyze features of the mesospheric and lower thermospheric mean winds within 60—98 km altitude ranges at near 30°N. It is shown that there are obviously seasonal variations in mean zonal winds and mean meridional winds. Westerly winds prevail in winter mean zonal winds, and decrease versus increasing heights, and even reverse near the

* 国家自然科学基金项目资助 (40204011)
2004-11-20 收到原稿，2005-04-20 收到修定稿

top sometimes. During summer, Easterly winds prevail in the mesosphere but westerly winds prevail in the lower thermosphere. The summer zonal wind reversed height is about 80 km. The spring and autumn are the transition time between summer structures and winter structures. An easterly winds tongue shows in spring. In the mesopause regions near 80 km the mean meridional winds blow northwards during winter time, but southwards during summer time. Mean winds also show inter-annual variability. The above climate features of mean winds agree very well with the HWM93 model.

Key words MF radar, Mesopause regions, Mean winds, Seasonal variations

1 引言

60—100 km 高度范围的中间层和低热层，其光化学和动力学非常复杂，是人们对大气层了解最少的区域. 该层大气在日地能量传输中，起着承上启下的作用，而且对于航天飞行器的发射和再入等具有重要的影响，所以其探测和研究具有重要的科学意义和应用前景.

中频雷达是探测该层大气水平风场的主要技术之一. 目前国际上共有 20 多台中频雷达在进行常规观测，其他的还有包括火箭、雷达和卫星等的观测. 尽管如此，也还没有足够的覆盖全球的探测数据来展示中层顶区域的详细变化规律.

我国对该层大气水平风场的探测最早开始于 2000 年底武汉的中频雷达观测 [1]. 武汉的中频雷达和日本 Yamagawa 的中频雷达是在 30°N 附近仅有的两个中频雷达，有利于了解中纬度中层顶区域大气动力学等特征. 武汉的中频雷达的数据已被用于大气角谱、中层顶区域潮汐风、电子密度等的分析和研究 [1]–[3]. 本文将利用武汉和 Yamagawa 的中频雷达数据分析北纬 30°N 的中间层和低热层大气平均水平风的气候变化特点，并与 HWM93 水平风模式进行比较.

2 中频雷达和数据来源

武汉的中频雷达建于 2000 年底，工作频率约为 2 MHz. 发射部分由固态发射机和 1 个矩形发射天线阵组成，发射机的峰值功率为 25 kW. 接收部分由 3 个正交偶极子天线阵组成，并将这 3 个天线阵排列成边长为 185 m 的等边三角形. 该中频雷达采用全相关分析 (Full Correlation Analysis, FCA) 方法得到大气风场剖面. 该方法采用空间分布天线 (Spaced Antenna, SA) 接收从探测高度反射回波复数信号，并利用这些信号之间的相关性来分析计算风场. 这种分析方法广泛应用于各种频段的大气雷达数据处理，如低层大气的 VHF 雷达以及中间层和低热层的 MF/HF 雷达的 SA 数据分析. 雷达数据的时间分辨率为 2 min，高度分辨率为 2 km，其测量范围在白天为 60—98 km，晚上为 70—98 km.

Yamagawa 的中频雷达建于 1994 年 8 月，其配置和性能与武汉的雷达类似 [4]，不再详细介绍.

本文采用的数据为武汉 2001 年 1 月 1 日至 3 月 18 日、2002 年 2 月 5 日至 3 月 18 日、2002 年 10 月 18 日至 12 月 31 日以及日本 Yamagawa 1997 年 1 月 1 日至 10 月 17 日等期间的原始风场数据. 在数据分析时，先对每个小时的风场数据进行平均，得到小时平均风场，对每天 24 h 的平均风场再进行平均以得到风场的日平均值；当某一高度一天的小时平均风场值小于 20 时，不给出该高度的日平均值. 这样的日平均值考虑了每个小时的相同权重，避免数据分布极度不均匀时对日平均值估计的影响.

下面利用上述日平均风场数据，分析中间层、低热层大气平均水平风场的变化特性，并将其结果与 HWM93 参考大气模式进行比较，以得到北纬 30°N 中层顶区域平均风的基本变化规律.

3 结果与讨论

3.1 冬季-早春期间平均风变化

取武汉 2001 年 1 月 1 日至 3 月 18 日、2002 年 2 月 5 日至 3 月 18 日两组平均风数据，分析平均风在冬天和早春期间的变化规律，并取 Yamagawa 1997 年 1 月 1 日至 3 月 18 日的数据作比较.

利用上述 3 组数据作 3 日平滑处理后，得到图 1 和图 2 所示结果，图 1 为平均纬向风随时间和高度变化的等值线，图 2 为平均经向风随时间和高度

变化的等值线. 在图 1 和图 2 中，风速单位为 m/s，西风为正，东风为负，南风为正，北风为负，白色实线表示风速为 0 时的等值线.

图 1(a) 中，在 1 月初，80 km 高度的西风接近最大值 67 m/s，随着高度的增加，风速逐渐减小，其减小率约 $4\,\mathrm{m\cdot s^{-1}\cdot km^{-1}}$，在 98 km 附近出现东风. 随着时间的推移，西风的强度逐渐减弱. 1 月底 2 月初，在 82 km 以上，甚至出现较为明显的东风，在 95 km 高度左右达到最大值 15 m/s，但持续几天后再转为西风，这可能与大气行星波或某些天气过程有关. 之后，西风逐日减小，而且等值线向下移动. 在 3 月份，80 km 以上西风开始向东风转换.

图 1(b) 缺少 2 月 5 日之前的数据. 从图 1(b) 可以看出，2 月 5 日后是较为明显的西风，与图 1(a) 类似，其最大值可达 60 m/s，高度在 80 km 附近. 其风速随时间和高度的变化与图 1(a) 相似，较为明显的东风出现在 3 月初，最大值为 16 m/s，与图 1(a) 一致.

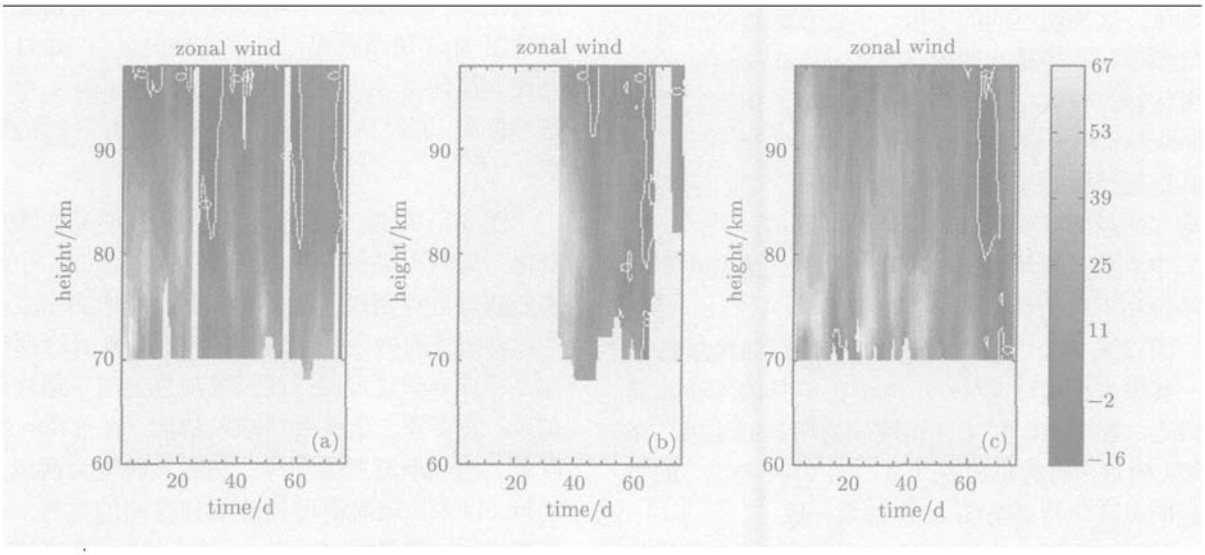


图 1 冬季-早春期间平均纬向风. (a) 武汉 2001 年 1 月 1 日至 3 月 18 日，(b) 武汉 2002 年 2 月 5 日至 3 月 18 日，(c) Yamagawa 1997 年 1 月 1 日至 3 月 18 日

Fig.1 Mean zonal wind during winter and early spring

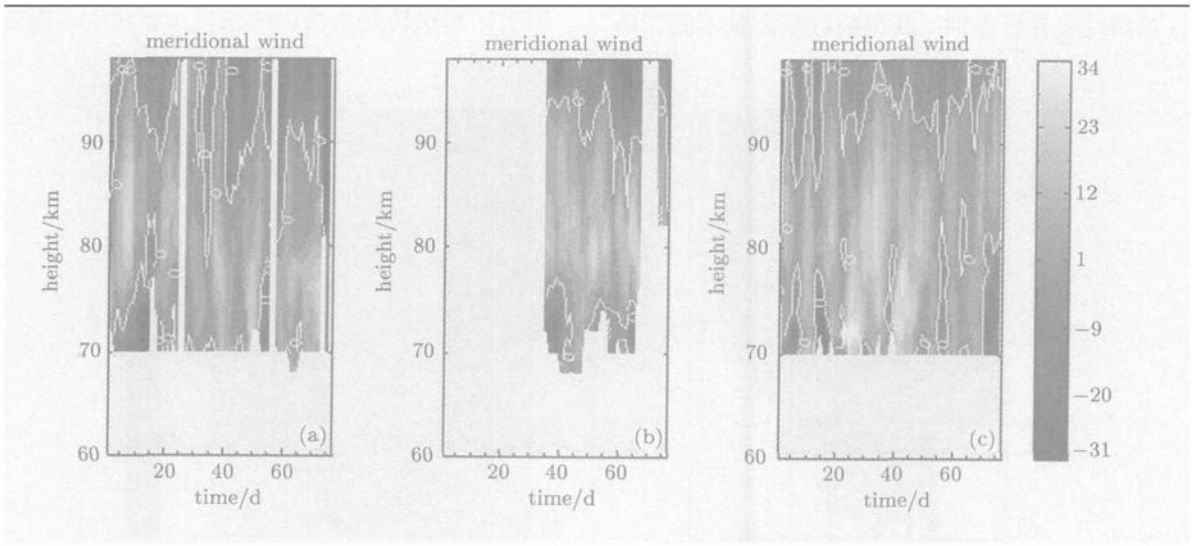


图 2 冬季-早春期间平均经向风. (a) 武汉 2001 年 1 月 1 日至 3 月 18 日，(b) 武汉 2002 年 2 月 5 日至 3 月 18 日，(c) Yamagawa 1997 年 1 月 1 日至 3 月 18 日

Fig.2 Mean meridional wind during winter and early spring

在图 1(c) 中，最大的纬向西风也出现在 1 月初的 80 km 附近，其最大值可达 63 m/s，西风随时间的推移逐渐减小，而且向下移动；在 3 月初，80 km 以上开始出现东风，其最大值为 15 m/s，对应高度在 95 km 左右.

比较图 1(a) 和图 1(b) 可发现，武汉两个不同的冬季-早春期间的平均纬向风的气候变化特点是相同的，即冬季中层顶附近盛行西风，随着时间的发展，西风逐渐减弱且向下移动，至早春，开始转换为东风. 这说明不同的年份，中层顶附近的纬向风的气候变化趋势是相同的. 图 1(c) Yamagawa 的气候变化特点与武汉基本类似，这表明，由于武汉和 Yamagawa 两个台站的地理纬度都在 30°N 附近，虽然其地理经度的差别约 15°，而且年份不同，它们的平均纬向风的气候变化趋势还是相同的. 当然，从图 1 中看到，其风值的大小和某些变化细节在不同的年份和不同的台站有差别.

图 2(a) 中，80 km 附近，平均经向风盛行南风，其最大值可达 29 m/s，出现在 1 月的 85 km 高度附近. 在 90 km 以上，出现较为明显的北风. 在 70 km 附近，有时也出现北风. 图 2(b) 与 (c) 的平均经向风变化特点与图 2(a) 基本一致.

从图 1 和图 2 中可发现，平均纬向风和平均经向风变化的波动较多，这可能与中层顶区域大气行星波、重力波活动等动力学过程有关.

由上述分析可见，这两个纬度相近的观测站点，虽然经度有所差别，获得的数据亦是不同年份的，但是，所得到的风场变化趋势却是基本一致的.

3.2 风场年变化

由于武汉与日本 Yamagawa 的纬度几乎相同，气候特点类似，为了分析该纬度中间层、低热层大气风场全年的季节性变化，将 Yamagawa 1997 年 1 月 1 日 —10 月 17 日和武汉 2002 年 10 月 18 日 —12 月 31 日期间的两组数据拼合，以组成较完整的一年数据，不会影响分析北纬 30°N 平均风的气候变化特性. 对以上平均纬向风做 5 日平滑处理，得到图 3(a) 所示结果；对平均经向风做 15 日平滑处理，得到图 4(a) 所示结果. 图 3 和图 4 中，风速单位为 m/s，白色的实线表示风速为 0 时的等值线.

图 3(a) 可见，平均纬向风呈现较明显的季节性变化. 与图 1 类似，在冬季 (12、1 、2 月)，中间层和低热层盛行西风，西风风速随高度增加而减弱，在顶部附近有时出现微弱的东风，如图 1(a) 所示. 在冬季向春季过度时，西风逐渐自上而下地转化为东风；在春季，出现舌状东风结构，在 80 km 高度以上，西风渐渐变为东风，然后又转变为西风，而 80 km 以下，随着高度的降低和时间的推移，东风逐渐增强. 到夏季 (6、7 、8 月)，80 km 高度以上区域以西风为主，而 80 km 以下区域为较为强劲的东风；在此期间，东风最大可达 56 m/s，出现在 70 km 高度附近. 随着秋季 (9、10 、11 月) 的来临，90 km 以上区域又转变为微弱的东风，而 90 km 以下区域

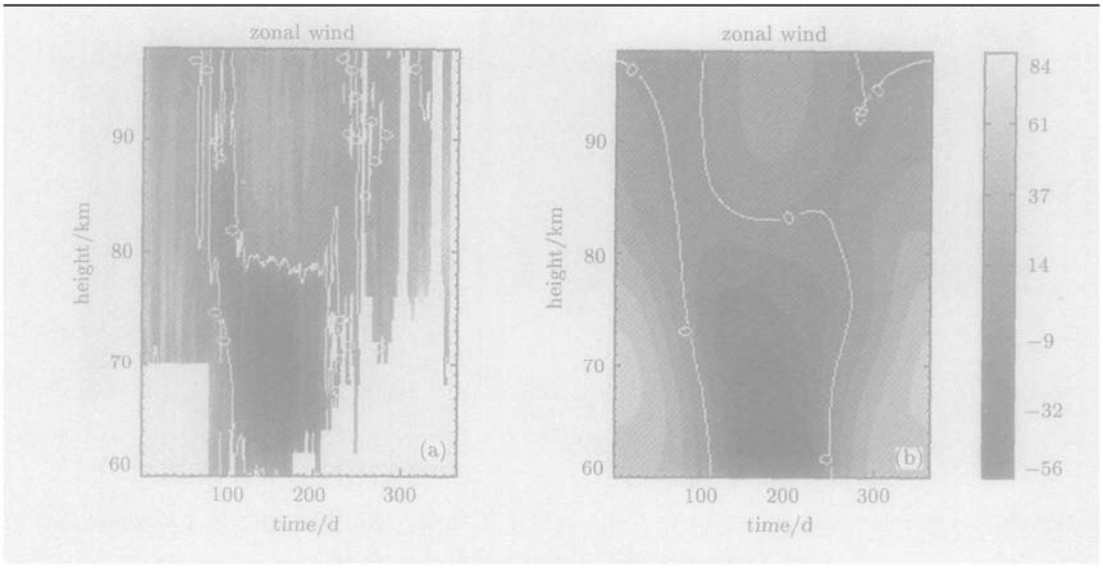


图 3 平均纬向风的季节变化. (a) 中频雷达观测, (b) HWM93 模式

Fig.3 Seasonal variations of mean zonal winds. (a) MF radar observations, (b) HWM93 model

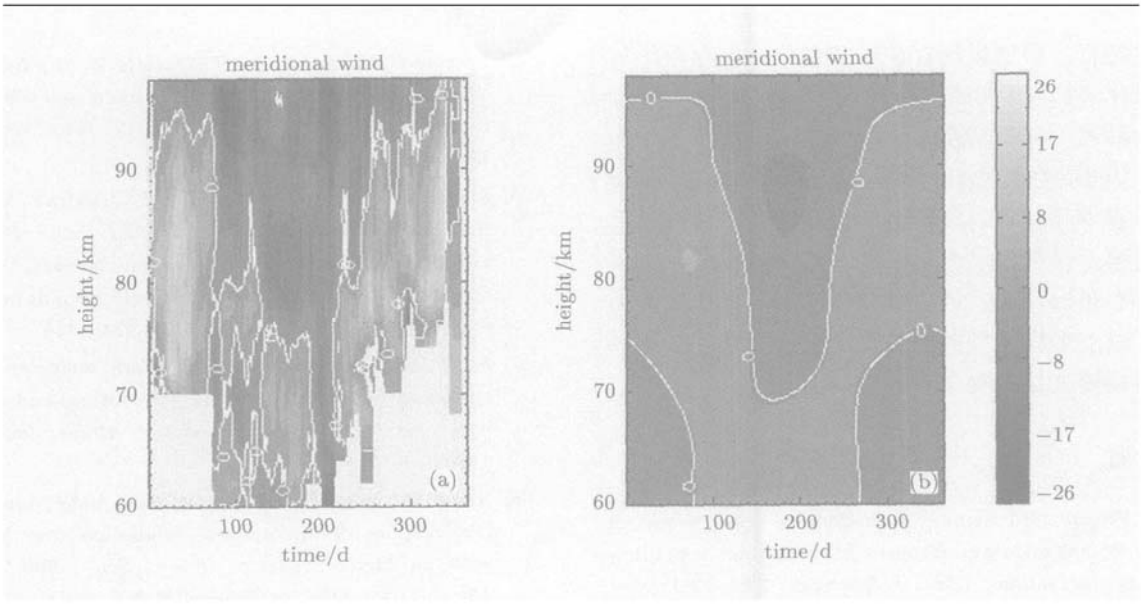


图 4 平均经向风的季节变化. (a) 中频雷达观测, (b) HWM93 模式

Fig.4 Seasonal variations of mean meridional winds. (a) MF radar observations, (b) HWM93 model

则由东风向西风转换. 秋季是从夏季向冬季的转换季节, 但与春季不同的是, 没有出现舌状东风结构.

图 3(b) 是 HWM93 模式给出的武汉上空的平均纬向风. 该模式是在 1969—1992 年全球雷达和卫星观测数据的基础上建立起来的大气水平风经验模式. 在模式计算中, 取太阳辐射参数 $F_{107}=150$, 地磁参数 $Ap=4$. 比较图 3(a) 和图 3(b) 可以发现, 虽然 HWM93 模式的建立没有采用本文的数据, 中频雷达观测的季节变化特点与 HWM93 模式非常一致, 雷达的观测值更显示出风场天气变化的细节. 这是可以理解的, 因为前者表示的是一种气候变化, 而后者变化比较多的是天气变化现象.

图 3(a) 与其他纬度地区的观测值 [5] 相比, 纬向风的变化特点基本一致, 但又各有特点. 在高纬地区, 夏季纬向风风向转换高度一般在 92 km, 在中纬地区, 夏季风向转换高度也在 90 km 附近 [5],[6]. 图 3(a) 中的夏季转换高度则较低, 在 80 km 附近, 比模式值小一点.

如图 4(a) 所示, 经向风场也呈现了明显的季节性变化. 冬季在 80 km 附近区域以南风为主, 风速最大可达 26 m/s, 随着春季的到来, 南风逐渐转换为北风. 在夏季, 80 km 附近的经向风以北风为主, 在 75 km 以下则以南风为主. 在秋季, 经向风结构又开始由夏季形态向冬季形态转换, 北风逐渐转换为南风. 与图 4(b) HWM93 模式相比, 其季节变化形态结构非常相似, 所不同的是, 风速的观测值比模式值大一些, 而且含有许多的波动. 准静态行星波、瞬态行星波的活动对观测值偏大有贡献, 大的经向风也可能是这里大气重力波活动强烈的指示 [7].

图 3 和图 4 的观测结果, 与武汉流星雷达的观测结果 [8] 相比, 风场的气候特点符合很好.

从图 3(a) 中看到, 中层顶区域平均纬向风的季节变化主要表现在, 冬季中间层为西风结构, 往上到中层顶和低热层高度西风减弱甚至可出现微弱的东风; 夏季中间层盛行东风, 至中层顶和低热层东风减弱并反转为西风, 转换高度在 80 km 附近; 春、秋季则为冬季和夏季风场结构的转换季节. 以上纬向风场结构与大气的辐射平衡风场结构 [9] 有所不同, 其原因是由于大气动力学的影响. 一般认为大气重力波对中层顶区域的环流起很重要作用 [10]. 用简单的模型和重力波的参数化方案对大气重力波的作用进行研究和计算得到 [11],[12] 重力波破碎在中层顶附近可产生 $100\,\mathrm{m\cdot s^{-1}\cdot d^{-1}}$ 的作用力和 $100\,\mathrm{m^2/s}$ 的扩散系数, 使纬向风大大偏离辐射平衡风场, 在中层顶附近逐渐减小至 0, 甚至反转, 与中频雷达的实际观测结果相符合.

4 结论

本文采用武汉中频雷达台站和 Yamagawa 中频雷达站的观测数据, 分析中间层、低热层的大气风

场变化特征，得到风场存在季节变化，也存在年与年的变化. 平均纬向风的结果表明，在冬季，中层顶区域为西风，风速随高度增加而减小，甚至反转；在夏季，中间层为东风，低热层为西风，转换高度约为80 km；春季和秋季的风场结构表现为冬季和夏季之间的转换，春季出现舌状东风结构. 平均经向风的结果：在80 km附近，冬季大致为南风，夏季大致为北风. 以上平均风场的季节变化特征，与HWM93大气风场模式基本吻合.

参考文献

[1] Li Fengqin, Hu Xiong, Zhang Dongya, Zhang xunjei *et al.* Wuhan middle atmospheric MF radar and its preliminary observations. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(1):65—71. in Chinese (李凤琴，胡雄，张冬娅，张训械等. 武汉中层大气中频雷达及其初步探测结果. 空间科学学报， 2002, **22**(1):65—71)

[2] Hu Xiong, Zeng Zhen, Zhang Dongya *et al.* Observations of the mesosphere and lower thermosphere angular spectrum with an MF radar at Wuhan. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(3):256—261, in Chinese (胡雄，曾桢，张冬娅等. 武昌中层大气角谱中频雷达观测. 空间科学学报，2003, **23**(3):256—261)

[3] Zhang S D, Yi F, Hu X. MF radar observation of mean wind and tides of winter mesopause (80—98 km) region over Wuhan (30°N, 114°E). *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2004, **66**(1):15—25

[4] Igarashi K, Nishimuda I, Murayama Y *et al.* Comparison of wind measurements between Yamagawa MF radar and the MU radar. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 3341—3344

[5] Kishore P, Namboothiri S P, Igarashi K, Murayama Y, Watkins B J. MF radar observations of mean winds and tides over Poker Flat, Alaska (65.1°N, 147.5°W). *Ann. Geophys.*, 2002, **20**:679—690

[6] Manson A H, Meek C E, Fleming E, Chandra S, Vincent R A, Phillips A, Avery S K, Fraser G J, Smith M J, Fellous J L, Massebeuf M. Comparisons between satellite derived gradient winds and radar-derived winds from the CIRA-86. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**:411—428

[7] Fritts D C, Vincent R A. Mesospheric momentum flux studies at Adelaide, Australia: observations and a gravity wave-tidal interactions model. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**:605—619

[8] Xiong Jiangang, Wan Weixing, Ning Baiqi, Liu Libo. Observations of mesospause circulations over Wuhan with an Meteor radar. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, **48**(10):1102—1106. in Chinese (熊建刚，万卫星，宁百奇，刘立波. 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)

[9] Fels S B. Radiative-dynamical interactions in the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **41**:1755—1764

[10] Andrews D A, Holton J R, Leovy C B. Middle atmosphere dynamics. Academic Press, INC., 1987. 305—308

[11] Lindzen R S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:9707—9714

[12] Hu Xiong, Zhang Dongya, Zhang Xunxie. Effects of gravity waves on the mesospheric and lower thermospheric circulations. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(2):111—117. in Chinese (胡雄，张冬娅，张训械. 重力波对中间层和低热层大气环流的影响. 空间科学学报， 2005, **25**(2):111—117)