

文章编号: 2095-4980(2022)08-0824-06

## 基于武汉 MST 雷达的对流层异常强反射回波观测

曾荒原, 龚晚林\*, 周晓明, 陈 罡

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 为研究中层-平流层-对流层(MST)雷达在对流层高度上的回波机制, 利用特殊天气条件(切断低压)下的雷达回波功率、风场, 采用 Lomb-Scargle 谱分析、谐波拟合、Richardson 数等方法分析对流层上部出现回波功率异常的现象。结果表明, 在切断低压的天气条件下, 急流和深对流造成持续存在的重力波源, 重力波由下至上传播至对流层顶下方并发生饱和和破碎, 能量耗散在大气中, 破坏了大气的静力稳定, 形成 K-H 不稳定层, 进而发展为湍流, 使对流层区域出现雷达回波功率增强。

**关键词:** MST 雷达; 重力波; K-H 不稳定性; 湍流

**中图分类号:** P356

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021268

## Observation of abnormal strong tropospheric echoes based on Wuhan MST radar

ZENG Huangyuan, GONG Wanlin\*, ZHOU Xiaoming, CHEN Gang

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

**Abstract:** In order to study the echo mechanism of Mesosphere-Stratosphere-Troposphere(MST) radar at tropospheric height, the phenomenon of abnormal echo power in the upper troposphere is studied by using the radar echo power and wind field under special weather conditions(cut off low pressure), Lomb-Scargle spectrum analysis, harmonic fitting, Richardson number and other methods. Experimental and simulation results show that under the cutting off of low-pressure weather conditions, persistent gravitational waves are generated by the jet stream and deep convection, and the gravity waves are disseminated from the bottom up beneath tropopause and saturated broken, which dissipates energy in the atmosphere, destroys atmospheric static stability, and forms the Kelvin-Helmholtz(K-H) instability layer, and then develops into turbulence, thus making the region of radar echo power increased.

**Keywords:** MST radar; gravity wave; Kelvin-Helmholtz instability; turbulence

从 20 世纪 70 年代首次 Jicamarca 成功观测大气风场和湍流以来, 甚高频(Very High Frequency, VHF)雷达在世界各地相继建立, 推动了全球大气研究并提供了便利<sup>[1-2]</sup>。这种 VHF 雷达已发展成最重要的大气遥感设施, 能够在所有天气条件下连续工作, 具有良好的空间和时间分辨力。目前, 有大量用于大气研究的 VHF 雷达正在工作中, 遍布极地地区至赤道地区。

在大气 VHF 雷达中, 平均功率孔径积大于  $108 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  的中间层-平流层-对流层(MST)雷达由于覆盖面积大、投资成本高, 属于非常规设备, 在全世界范围内仅有少数<sup>[3-4]</sup>。目前, 世界上主要的 MST 雷达有 Jicamarca 雷达、德国的 SOUSY 和 ALWIN 雷达、印度的 Gadanki 雷达、日本的 MU 雷达、中国武汉的 MST 雷达和北京的 MST 雷达等。MST 雷达具有良好的时间和高度分辨力, 为广泛和深入研究各种大气现象提供了很大的便利。Rapp<sup>[5]</sup>等利用 ALWIN 雷达在 2004~2008 年观测的数据, 首次在高纬度电离层 e 层发现回波, 并且将部分反射理论用于观测到的电子密度, 定量解释了观测到的回波很可能基于这种散射机制。对于 MST 雷达, 对流层高度的雷达回波主要来源于两种机制: 第一种是各向异性湍流散射; 第二种是由一个或一组水平薄层造成的部分反射, 其折射率的垂直变化非常剧烈, 这种回波机制一般称为菲涅尔散射。对于实际的雷达回波, 要区分来自各向异性湍流散射的回波和来自镜面反射的回波是非常困难的<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41474132)

\*通信作者: 龚晚林 email:gongwl@whu.edu.cn

本文利用武汉 MST 多波束扫描数据和 ERA-Interim 数据集，在 2015 年 5 月 12 日切断低压经过武汉 MST 雷达的时间前后，研究对流层高度上 MST 雷达回波发生异常的原因，试图对 MST 雷达在对流层高度上的回波机制进行合理的解释。

## 1 实验设备和数据

### 1.1 武汉 MST 雷达

武汉 MST 雷达工作在甚高频波段(53.8 MHz)，观测 3.5~90 km(不包括 25~60 km)高度范围内湍流和风场矢量的实时特征。这台全固态、全相干脉冲多普勒雷达是中国首次自主研发的以大气观测为重点的 MST 雷达。武汉 MST 雷达的子系统包括天线系统、馈线系统、全固态雷达发射机、数字接收器、波束控制系统、信号处理系统、数据处理系统、产品生成系统和用户终端。采用了先进的雷达技术，包括高可靠的全固态发射机、低噪声大动态范围数字接收器、有源相控阵、高速数字信号处理和实时图形终端<sup>[4]</sup>。武汉 MST 雷达有 3 种工作模式：低、中、高模式，设定的探测高度范围分别为 2.25~10.05 km、10.2~25.2 km 以及 60~90 km。本文所使用的数据包括低模式和中模式下的风场数据以及功率谱数据，其中典型的风场数据如表 1 所示。

表 1 武汉 MST 雷达风场数据  
Table1 Wind field data of MST radar in Wuhan

altitude/km	horizontal wind direction/(°)	horizontal wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )	vertical wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )	atmospheric refraction index
0.15	246.75	4.83	-0.45	-183.33
0.30	53.22	2.98	-0.78	-175.13
0.45	96.34	1.68	-0.14	-171.77
0.59	294.52	1.98	-0.36	-170.17

### 1.2 ERA-Interim 数据集

本文使用欧洲天气预报中心提供的 ERA-Interim 全球气候再分析数据集<sup>[8]</sup>。ERA-Interim 数据集包含从 1979 年 1 月 1 日至 2019 年 8 月 31 日的 6 h 时间分辨率(每隔 6 h 测 1 次，1 天测 4 次)的再分析数据集。单元网格为经度 0.75°×纬度 0.75°，气压分布为 1 000~1 hPa。本实验采用位势涡度和风速数据，并使用以中纬度矩形区域为中心的数据子集，该区域由(latitude:[90° E,150° E],longitude:[0° S,55° S])组成的坐标区间划分。数据的时域跨度为 2015 年 5 月 9 日至 2015 年 5 月 12 日，时间分辨率为 24 h。模式的输入为 1 000~1 hPa 的 37 个非均匀大气压，输出或预测场为风场和位势涡度场，其中典型的位势涡度数据如表 2 所示。

表 2 ERA-Interim 数据集位势涡度  
Table2 Potential vorticity of ERA-Interim dataset

latitude	longitude			
	114°E	114.75°E	115.5°E	116.25°E
29°N	7.081 6	7.081 6	7.635 9	7.635 9
29.75°N	8.190 2	8.190 2	7.635 9	7.635 9
30.5°N	6.527 3	6.527 3	5.972 9	5.972 9

## 2 观测结果和分析

### 2.1 武汉 MST 雷达回波功率异常

由于 MST 雷达回波取决于折射率波动，而折射率波动又取决于对流层中的温度和水汽梯度，因此可有效地利用它们来识别和研究对流层顶及其周围区域。在过去的研究中，研究人员用不同的算法试图从雷达的后向散射信号中识别对流层顶的高度。Alexander<sup>[4]</sup>等对这些方法进行了综述，在对流层上层各向同性散射回波相对较弱，回波来自小尺度湍流产生的折射率随机波动<sup>[9]</sup>。因此，VHF 雷达垂直波束接收到的回波在对流层顶附近垂直增加，这是由于对流层顶静稳定性增加所致。在过去的研究中发现，对流层顶高度可以通过发现垂直波束中的回波功率开始增加的高度来确定<sup>[10-12]</sup>。图 1 为武汉 MST 雷达在 2015 年 5 月份观测的雷达垂直波束功率图，可以看到，武汉上空对流层顶的高度约为 16~18 km 的区间，而在 2015 年 5 月 10 日至 5 月 12 日时间段，在对流层顶下方出现一处雷达回波功率的增强。

实验中，需要对武汉 MST 雷达的原始数据进行处理，实验采用计算机 CPU 为 Intel® Core™ i7-6700 CPU@3.40 GHz,16 G 内存，仿真过程中 CPU 利用率超过 80%，内存利用率超过 70%。

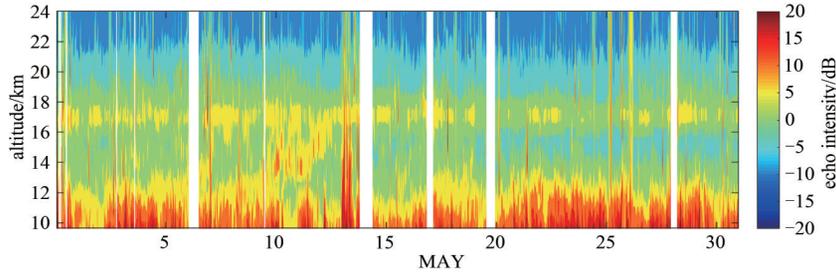


Fig.1 Mid mode echo power image obtained by Wuhan MST radar from 0:00 LT on May 1, 2015 to 24:00 LT on May 31, 2015  
图1 武汉MST雷达在2015年5月1日0:00 LT至2015年5月31日24:00 LT获取的中模式回波功率图

2.2 切断低压

2015年5月10日12:00LT, 在贝加尔湖附近形成高纬度高空低压槽, 并不断向中纬度地区行进, 向赤道方向移动, 2015年5月11日12:00LT在武汉MST雷达上空形成孤立的气旋系统, 即切断低压。由于发源于高纬度西伯利亚地区, 其类型为极性切断低压, 如图2所示。可以发现, 在涡旋系统运动的整个过程中, 其周围伴随着明显的高空急流, 由于急流容易造成较大的纬向风剪切, 破坏大气的静态稳定性甚至形成湍流, 这对低层大气重力波的产生有着重要的影响<sup>[13]</sup>。

2.3 准单色惯性重力波

惯性重力波(Inertia-Gravity Wave, IGW)活动从对流层向中层大气输送能量和动量, 对大气动力和热力结构有深刻的影响<sup>[14-15]</sup>。一般来说, IGW主要产生于低层大气, 向上传播至中高层大气。IGW伴随着向上传播, 通过动力或对流不稳定背景大气中沉积动量和能量, 进而影响局地大气动力结构<sup>[15-16]</sup>。另外, 由于大气密度的减小, 向上传播的IGW的振幅会随高度增加。一旦振幅达到动力学不稳定的阈值, IGW就会破裂并产生强烈的湍流, 导致能量和动量的耗散, 以及大气成分的扩散和混合<sup>[15-17]</sup>。对流和射流/锋系统是IGW的主要来源<sup>[16-17]</sup>, 可能的机制包括地转调整、剪切不稳定和对流, 由切断低压系统引起的高空急流和对流很可能会成为重力波的源头。

为了提取准单色惯性重力波, 首先要去除背景风的影响。对纬向风、经向风和垂直风进行二阶多项式拟合, 得到背景场, 用观测场减去背景场得到扰动场。由于大气中存在着各种扰动, 可能会使观测到的不同方向上的风场主导波长存在偏差, 因此进行数据分析时, 允许一定的误差, 根据ZHANG和YI<sup>[18]</sup>的研究, 当3个方向上的风场垂直波长的相对标准差小于20%, 即可认定为惯性重力波。

$$(u', v', w') = (\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_z} z + \varphi\right) \quad (1)$$

式中:  $(u', v', w')$  表示重力波的扰动部分;  $(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$  以及  $\varphi = (\varphi_u, \varphi_v, \varphi_w)$  分别表示拟合振幅以及相位;  $\lambda_z$  表示垂直波长;  $z$  表示垂直传播方向。

图3为武汉MST雷达在5月11日00:15:32LT观测到的风速的Lomb-Scargle谱, 纬向风、经向风、垂直风的垂直波长分别为3.15 km, 3.60 km和4.05 km, 平均垂直波长为3.60 km, 相对标准差分别为12.5%, 0%和12.5%, 比早期研究中的20%更小, 因此可以判定这是一个惯性重力波。确定了垂直波长之后, 重新进行拟合, 以确定每个波分量的振幅和相位。

重新拟合之后, 结果如图4所示, 从图中可以看到, 经向风、垂直风、纬向风的扰动场振幅分别为2.49 m/s,

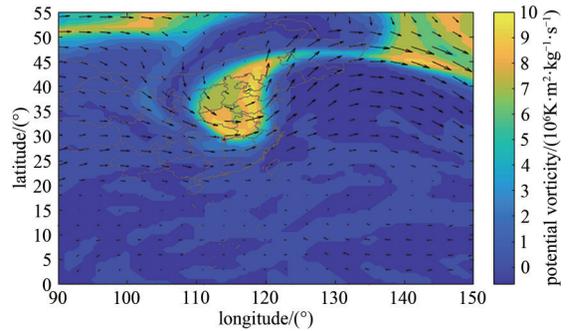


Fig.2 Wind field vector map of 500 hPa isobaric surface potential vorticity distribution obtained by ECWFMF at 12:00 LT on May 11, 2015(black arrow represents the wind speed, and red five-pointed star represents the position of Wuhan MST radar)  
图2 欧洲天气预报中心获得的2015年5月11日12:00LT 500 hPa等压面位势涡度分布图风场矢量图(黑色箭头代表风速, 红色五角星代表武汉MST雷达的位置)

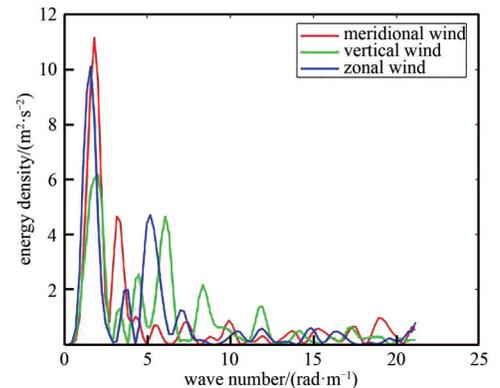


Fig.3 The Lomb-Scargle spectrum of three-dimensional wind field disturbance observed by Wuhan MST on May 11, 2015

图3 2015年5月11日武汉MST观测的三维风场扰动的Lomb-Scargle谱

0.29 m/s, 2.87 m/s。从图 4(d)可以看出，随着高度的增加，矢端曲线沿顺时针方向旋转。武汉处于北半球，可以判断重力波向上传播，这说明了该重力波的发源地是对流层下层区域。并且，根据武汉 MST 雷达在 2015 年 5 月 9 日至 5 月 13 日观测的数据，重力波出现的频率分别为 12.50%, 8.33%, 47.92%, 4.17%, 10.42%，在 5 月 11 日切断低压经过武汉 MST 雷达时，重力波出现的频率显著增加，以上两个证据说明，切断低压经过 MST 雷达时形成了强对流和急流，进而发展为持续的重力波源。

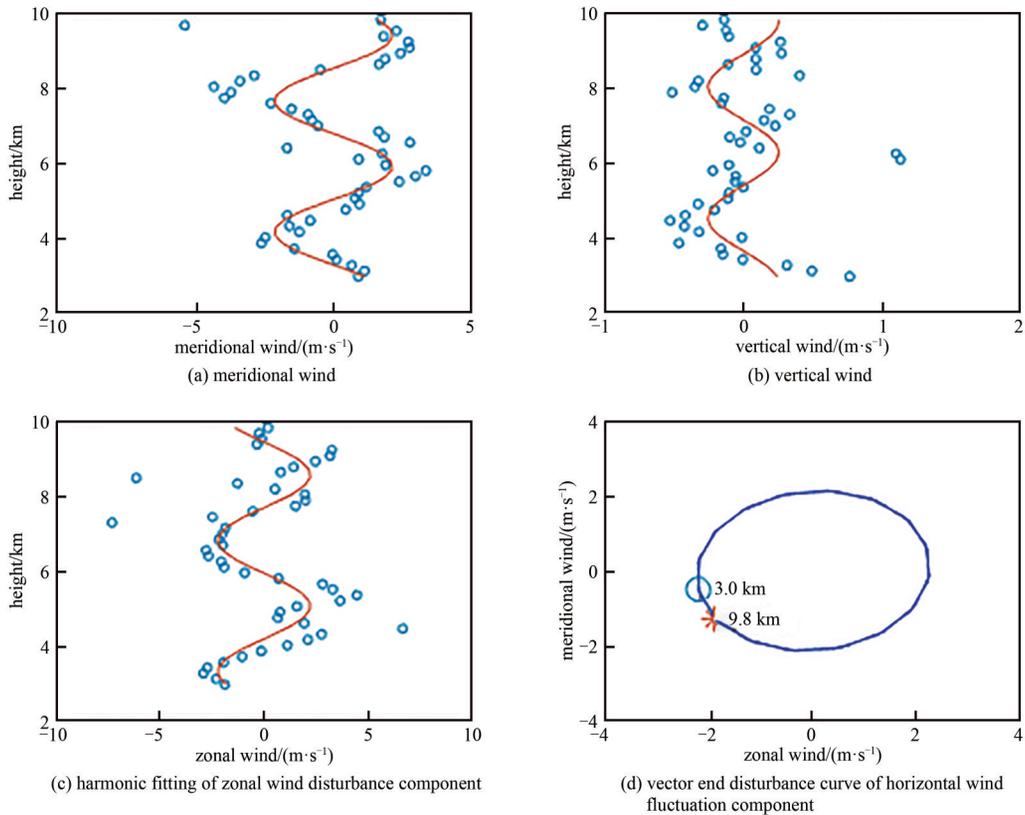


Fig.4 Quasi-monochromatic inertial gravity waves extracted at 00:15:32 LT on May 11, 2015

图 4 2015 年 5 月 11 日 00:15:32LT 时提取的准单色惯性重力波

图 5 为 5 月 9 日~13 日武汉 MST 雷达观测的水平风场图。从图 5(a)可以看到，从 5 月 10 开始，纬向风场逐渐形成 v 字形，并在 5 月 11 日的 12~14 km 的高空上形成最大的风速，这一现象说明切断低压到来后纬向风的垂直剪切增强。从图 5(b)可以看到，在 5 月 11 日时经向风场的风向由东向逐渐转变为西向，这与 ERA-Interim 所预测的数据集表现一致。由于此时水平风场由纬向风占主导地位，本文着重分析纬向风的垂直剪切。

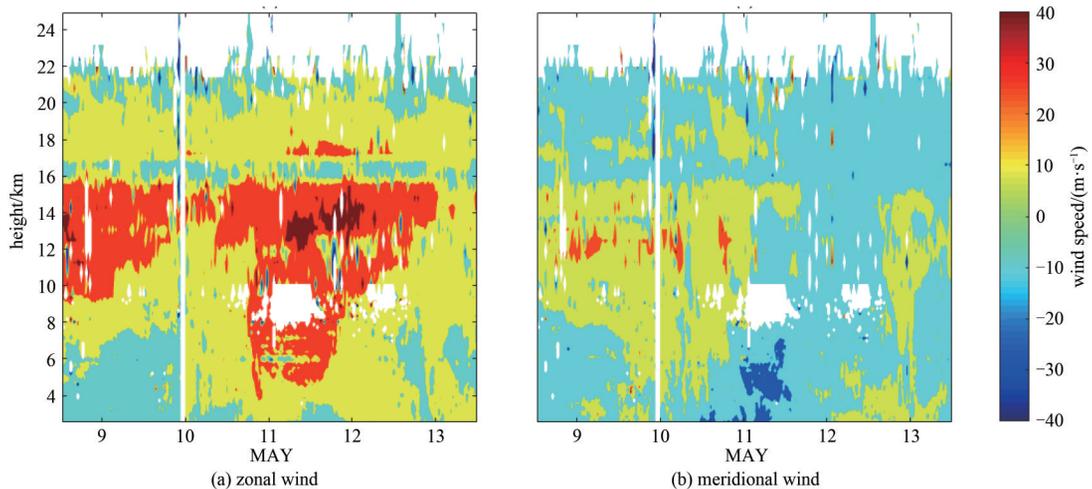


Fig.5 The wind profile observed by the Wuhan MST radar during the duration of cut-off low

图 5 武汉 MST 雷达在切断低压持续期间观测的风廓线图

根据 LIU<sup>[19]</sup>的研究, 较小尺度的扰动如重力波容易造成较大的风切变, 并在造成最大的风切变的案例中具有最重要的作用。从图 5 的结论中已知, 水平风在切断低压经过的情况下有一定的转向和增强, 但仍不知道风速切变的定量值。

图 6 为 5 月 10 日~12 日武汉 MST 雷达观测的纬向风的垂直方向剪切, 可以观察到 12~14 km 高度上有较强的剪切结构。特别是 5 月 12 日, 在 13 km 的高度上, 纬向风的垂直切变最为强烈, 可以达到  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。由于水平风的垂直切变, 静稳定层可能变得动态不稳定, 产生 K-H 不稳定, 并产生水平分层之间的弯曲扰动, 从而形成湍流。

为定量分析大气的不稳定程度, 可采用 Richardson 指数表征大气的不稳定性:

$$Ri = \frac{N^2}{S^2} \quad (2)$$

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \times \frac{\Delta\theta}{\Delta z} \quad (3)$$

式中:  $N$  表示浮力频率;  $S$  表示水平风的垂直剪切;  $\theta$  表示位温;  $z$  表示海拔高度;  $g$  表示重力加速度。图 7~图 8 为计算结果。

图 7 为位温随高度变化图, 图 8 为 Richardson 指数随高度变化图, 在 14~16 km 的高度上, Richardson 指数的值小于 0.25, 这意味着在 14 km 处的高度上出现了动力学不稳定性, 并且进一步诱发湍流的生成。而湍流的各向异性散射是 MST 雷达的主要回波机制之一, 这就解释了在相应的高度上为何出现雷达回波功率的增强。

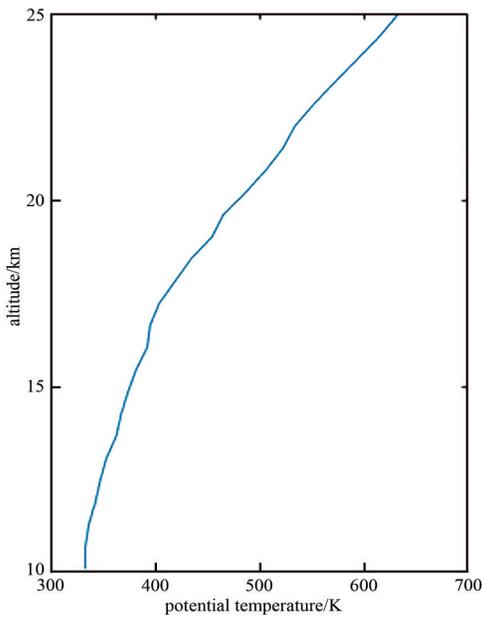


Fig.7 Diagram of potential temperature as a function of height  
图 7 位温随高度变化图

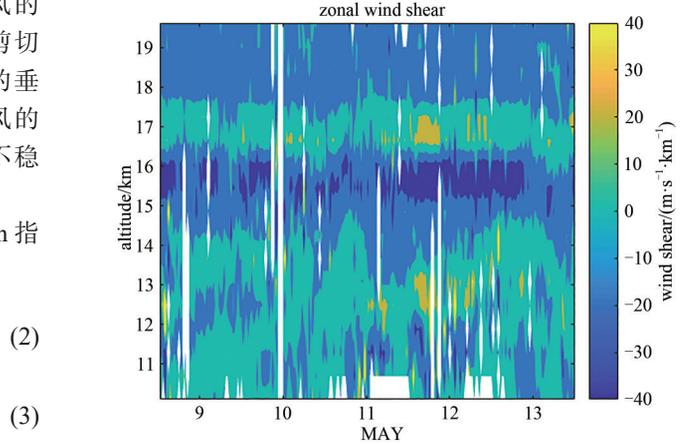


Fig.6 The vertical shear of zonal wind observed by Wuhan MST radar from May 9, 2015 to May 13, 2015

图 6 武汉 MST 雷达在 2015 年 5 月 9 日至 2015 年 5 月 13 日所观测的纬向风的垂直剪切

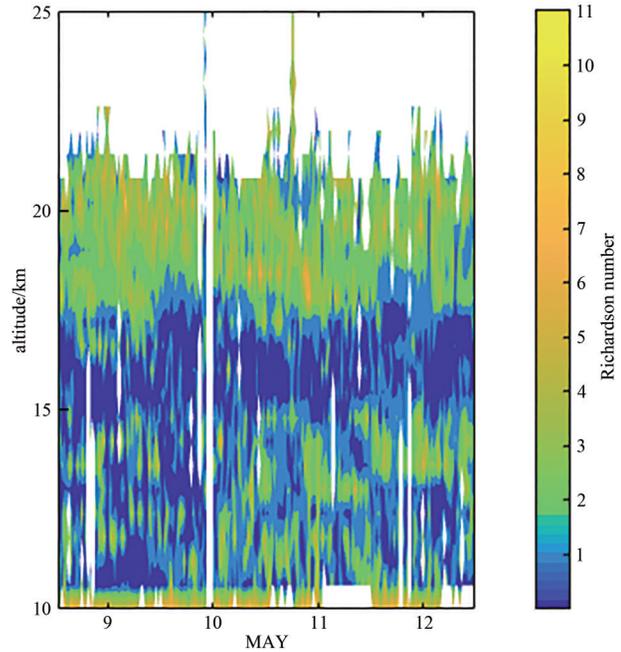


Fig.8 Diagram of Richardson number as a function of time and height  
图 8 Richardson 指数随时间及高度变化图

### 3 结论

通过武汉 MST 雷达观测的武汉上空回波功率图, 在 2015 年 5 月 10 日~12 日, 在对流层顶下方发现了一处回波功率的增强, 通过 ECWMF 提供的 ERA-Interim 全球再分析数据集发现, 在回波异常期间发生了一起切断低压事件。通过重力波分析, 结论表明, 在切断低压经过武汉上空的同时形成了持续的重力波源, 重力波向上传播并在对流层顶下方发生破碎和耗散, 破坏了大气的静力稳定性, 形成了 K-H 不稳定层, 进而发展成为湍流。由于湍流各向异性散射是 MST 雷达主要的回波机制, 因而在相应的时间和高度上, 回波功率出现了增强现象。

## 参考文献：

- [ 1 ] WOODMAN R F,GUILLEN A. Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences Atmos*, 1974,31(2):493–505.
- [ 2 ] ALEXANDER S P,MURPHY D J,KLEKOCIUK A R. High resolution VHF radar measurements of tropopause structure and variability at Davis,Antarctica(69° S, 78° E)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013,13(6):3121–3132.
- [ 3 ] ZHAO Z,CHEN Z,QING H Y,et al. Wuhan Atmosphere Radio Exploration(WARE) radar: system design and online winds measurements[J]. *Radio Science*, 2013,48(3):326–333.
- [ 4 ] 崔啸. 基于天线阵列的雷达系统设计与应用研究[D]. 武汉:武汉大学, 2017. (CUI Xiao. Design and application research of radar system based on antenna array[D]. Wuhan,China:Wuhan University, 2017.)
- [ 5 ] RAPP M,LEITERT L,LATTECK R,et al. Localized mesosphere–stratosphere–troposphere radar echoes from the E region at 69° N: properties and physical mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2011(116):A02320.
- [ 6 ] CAMPISTRON B,POINTIN Y B,LOHOU F,et al. Aspect sensitivity of VHF radar echoes observed in the middle and upper troposphere during the passage of a cut–off low[J]. *Radio Science*, 1999,34(3):667–679.
- [ 7 ] QING H,ZHAO Z,XU Y,et al. Observation and study of the aspect sensitivity and echo mechanism based on the Wuhan MST radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018,16(2):211–215.
- [ 8 ] LARRAONDO P R,RENZULLO L J,VAN-DIJK A I J M,et al. Optimization of deep learning precipitation models using categorical binary metrics[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020,12(5):1–10.
- [ 9 ] RITTGER J. Reflection and scattering of VHF radar signals from atmospheric refractivity structures[J]. *Radio Science*, 1980,15(2):259–276.
- [ 10 ] HOCKING W K,RÜSTER R,CZECHOWSKY P. Absolute reflectivities and aspect sensitivities of VHF radio wave scatterers measured with the SOUSY radar[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1986,48(2):131–144.
- [ 11 ] GAGE K S,GREEN J L. An objective method for the determination of tropopause height from VHF radar observations[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010,21(21):1150–1154.
- [ 12 ] 郑秀明,夏一凡,王志锐,等. 风廓线雷达中自适应抗干扰技术研究[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020,18(3):391–396. (ZHENG Xiuming,XIA Yifan,WANG Zhirui,et al. Adaptive anti–interference technique in Wind Profiler Radar[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020,18(3):391–396.)
- [ 13 ] PRICE J D,VAUGHAN G. The potential for stratosphere–troposphere exchange in cut–off–low systems[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010,119(510):343–365.
- [ 14 ] ALEXANDER M J. Interpretations of observed climatological patterns in stratospheric gravity wave variance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998,103(D8):8627–8640.
- [ 15 ] FRITTS D C,VINCENT R A. Mesospheric momentum flux studies at adelaide,australia–observations and a gravity wave–tidal interaction model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987,44(3):605–619.
- [ 16 ] ZHANG Y H,SHAO D Z,FAN Y. Intensive radiosonde observations of lower tropospheric inversion layers over Yichang,China[J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2009,71(1):180–190.
- [ 17 ] FRITTS D C,ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(1):1–64.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] LIU H L. Large wind shears and their implications for diffusion in regions with enhanced static stability:the mesopause and the tropopause[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017,122(18):9579–9590.

## 作者简介：

曾荒原(1995–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为中高层大气,email:zenghy@whu.edu.cn.

龚晚林(1990–), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为空间探测技术.

周晓明(1966–), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为空间探测技术.

陈 罡(1980–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为中高层大气.