

文章编号: 2095-4980(2024)09-1000-09

基于HCOPAR雷达的中国低纬F层V型散射回波研究

陈禹舟, 龚晚林

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于中国子午工程在海南富克台站获取的甚高频相干散射雷达数据, 对低纬度地区电离层F层的场向不均匀体特性进行了细致探究。在此过程中, 识别出一种罕见的V型结构不均匀体, 进一步绘制后向扇形图, 结合测高仪数据分析其时频特性。将分析结果与相应时段的气辉图像进行比对, 结果显示这种V型结构不均匀体是由于重力波对电离层背景电场的调制, 导致其动力学状态的改变所致。

关键词: 电离层F层不均匀体; 重力波; 相干散射雷达; 电离层行进式扰动

中图分类号: P352.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023086

V-shaped scattered echoes in F-layer observed by the HCOPAR radar in low-latitude areas of China

CHEN Yuzhou, GONG Wanlin

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

Abstract: Meridian Project, a detailed investigation of the characteristics of field-aligned irregularities in the F region of the ionosphere in low latitude areas in China was conducted. During this process, a rare V-shaped structure of irregularities was identified. Further mapping of the fan-shaped diagram and analysis of its time-frequency characteristics in conjunction with ionosonde data were performed. The analysis results were compared with the airglow images of the corresponding period, and the results show that this V-shaped structure of irregularities is caused by the modulation of the background electric field of the ionosphere by gravity waves, leading to changes in its dynamic state.

Keywords: ionospheric F-layer irregularities; gravity wave; coherent scattering radar; traveling ionospheric disturbances

电离层F层的场向不均匀体特性研究对于理解电离层过程和空间天气预测具有重要意义。近年来, 我国子午工程的发展和建设为研究低纬地区电离层提供了宝贵的观测数据^[1-3]。本文通过海南省富克镇甚高频(Very High Frequency, VHF)相干散射相控阵雷达HCOPAR(Hainan COherent scatter Phased Array Radar)对中国低纬度电离层场向不均匀体进行观测研究。HCOPAR雷达自2013年开始连续运行至今, 积累了丰富的场向不均匀体回波观测数据, 涵盖了不同季节、太阳活动条件和地磁条件, 极大丰富了中国低纬度地区不均匀体观测样本。

赤道电离层F层的不均匀体起源于一系列复杂的等离子体运动过程, 其中等离子体泡理论被广泛认可。这一理论涉及日落后在F2区域发生的等离子体瑞利-泰勒(Rayleigh-Taylor, R-T)不稳定性及 $E \times B$ 漂移。在F2层底部的轻等离子体因太阳能不足导致的等离子体耗尽而被推入密集等离子体时, 电离层中将出现R-T不稳定性^[4]。R-T不稳定性由日落后向东电场的增加引发, 赤道向东电场的增加使等离子体泡在日落后迅速上升, 形成类似羽毛状的向上延伸, 因此F层不均匀体也被称为羽状不均匀体^[5-6]。

在低纬度电离层中, 大多数观测到的电离层行进式扰动是由上传播的重力波引起的。重力波对不均匀体的重要影响一方面可能触发磁赤道地区的R-T不稳定性^[7-8]; 另一方面, 在中纬度地区可能通过铂金斯不稳定性产生不均匀体^[9]。重力波影响均匀体的具体过程仍需深入研究, 分析2014年的观测数据, 发现了一种罕见的先下降后上升的回波结构。本文通过多种方法详细分析、探讨了其成因以及重力波对其的调制作用。研究结果将有助于丰富我们对电离层F层不均匀体特性及其动力学过程的认识。

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-04-25

1 观测用设备及其主要参数

位于海南省儋州市富克镇(19.5°N, 109.1°E)的甚高频相干散射雷达 HCOPAR 具备对我国低纬度电离层场向不均匀体的观测研究能力。HCOPAR 雷达的工作频率为 47 MHz, 峰值功率达 54 kW, 带宽为 2 MHz, 采用巴克码相位调制脉冲。HCOPAR 的详细雷达系统参数及天线参数见表 1。HCOPAR 自运行以来积累了大量关于场向不均匀体回波的观测数据, 覆盖不同季节、太阳活动和地磁条件。

表1 富克站 HCOPAR 雷达系统主要参数
Table1 Main parameters of Fuke HCOPAR radar system

antenna array	five elements Yagi antenna
antenna area/m ²	2 000
antenna gain/dBi	25.7
half power beamwidth	4.5°×21.7°
antenna array working mode	scan beam or fixed single beam mode
antenna standing wave ratio	≤1.1
	the azimuth and elevation angles of beams 1~7 are
beam direction	(-22.5,59.72°), (-15°,60.70°), (-7.5°,61.24°), (0°,61.36°), (7.5°,61.06°), (15°,60.35°), (22.5°,59.15°)

2 观测结果与分析

2.1 2014 年 2 月 27 日 HCOPAR 观测到的 V 型散射回波

VHF 相干散射雷达可利用电离层不均匀体的后向散射特性进行探测。通过快速波束合成技术对东西平面进行扫描, 有助于进一步了解 F 层不均匀体的纬向分布发展趋势和漂移特征, 以检测电离层中约 3 m 尺度不均匀体的空间和时间演变。将相干散射雷达观测到的场向不均匀体的回波在高信噪比图像上可视化, 分析后向散射扇形图和高度-时间-强度(Altitude-Time-Intensity, ATI)图, 可以确定场向不均匀体的空间和时间变化。

利用 HCOPAR 在东西方位面内的多波束扫描观测, 得到富克地区 F 层不均匀体的纬向分布随时间的变化规律, 如图 1 所示。图 1 为 2014 年 2 月 27 日观测的先下降后上升散射回波, 3 列分别为 3 月 17~18 日在 HCOPAR 北方向观测到不均匀体的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、多普勒速度和频谱的高度-时间变化。为显示不均匀体的空间分布, 波束 1~波束 7 的回波从上到下呈现。灰色虚线连接由 7 个波束观察到的不均匀体前缘。从图 1 可知, 回波首先在西波束上观测到, 在东波束上稍晚, 因此得出不均匀体的整体漂移趋势是自西向东。

图 1 中的散射回波大致可分为 3 部分: 第 1 部分是在 12:10 世界时(Universal Time, UT)左右出现的顶部型羽状不均匀体, 在高海拔(>500 km)回波到达时出现微弱的回波, 随着时间增加, 不断斜向上往更高的高度延伸。同时, 回波强度逐渐增强, 且高度上升至观测高度以外; 第 2 部分是从 13:20(UT)一直持续到 14:30(UT)的散射回波, 回波高度先呈下降趋势, 下降至 200 km 左右后, 大约在 14:00(UT), 不均匀体回波开始回升并短暂离开观测视线。值得注意的是, 在 14:30(UT)之前连续出现的这段回波与常见的等离子泡导致的羽状不均匀体结构存在差异, 这也是本文研究的重点; 第 3 部分是在 15:00(UT)高度-时间-信噪比图像中出现的另一种衰退型的不均匀体, 这种不均匀体出现在 HCOPAR 观测范围内时已经处于衰退阶段。在不均匀体东向漂移过程中, 回波强度不断减弱, 且回波高度分布范围也逐渐降低。这种衰退型的不均匀体回波在其他研究中也被称为不均匀体化石结构^[10]。

图 1 的 3 列观测结果具有不同的物理意义。从回波信噪比看(左列), 高度分布先向下扩展, 后向上收缩, 不均匀体的最大信噪比部分呈东移趋势。多普勒速度(中列)先向下移动后向上移动, 可以计算出其漂移速度值。根据 7 个雷达波束, 可计算出不均匀体整体东向漂移的平均速度为(68.07±1.89) m/s, 垂直向下漂移平均速度为(62.50±5.53) m/s。频谱(右列)可通过对应的数据进一步分析, 计算得到每 3 min 的谱宽图。具体方法如下: 首先, 对功率谱密度进行平滑处理以减少噪声; 其次, 寻找谱线的峰值并由峰值确定谱线的中心频率; 最后, 使用半功率全宽计算谱宽。由此得到在高度 400 km 左右, 时间 13:22(UT)—14:28(UT), 功率谱密度大于 50 dB 先后出现在-100~100 m/s 的速度范围内。这些数据有助于更深入地了解富克地区不均匀体的时空演变过程和特征。

2.2 磁暴参数分析

磁暴是由环电流增大引发的磁场扰动现象, 其主要成因在于太阳风携带的行星际磁场与地球磁场相互作用过程中, 太阳风能量被注入磁尾, 导致环电流增大。随着电流的变化, 电场发生变化, 在全球范围内导致剧烈的地磁扰动。太阳耀斑、日冕物质抛射和高速日冕空流可对地球磁场造成持续数天的干扰。

图 2(a)~(c)分别为 2014 年 2 月 26 日—27 日之间极光电流流(Auroral Electrojet, AE)指数、SYM/H(Symmetric H-component)指数和 K_p(Planetary K)指数的时间变化情况。磁暴在 2 月 27 日 20 时 08 分 V 型结构之后开始, SYM/H 指数在 2 月 27 日 00 时开始回升, 表明磁暴主要在此阶段开始。亚暴的发生用 AE 指数表示, 地磁扰动强度用 K_p 指数表示。从各项指标看, 27 日的特殊结构与磁暴出现的时间不能完全对应, 因此推断, 27 日的 V 形结构现象与地磁活动无关。

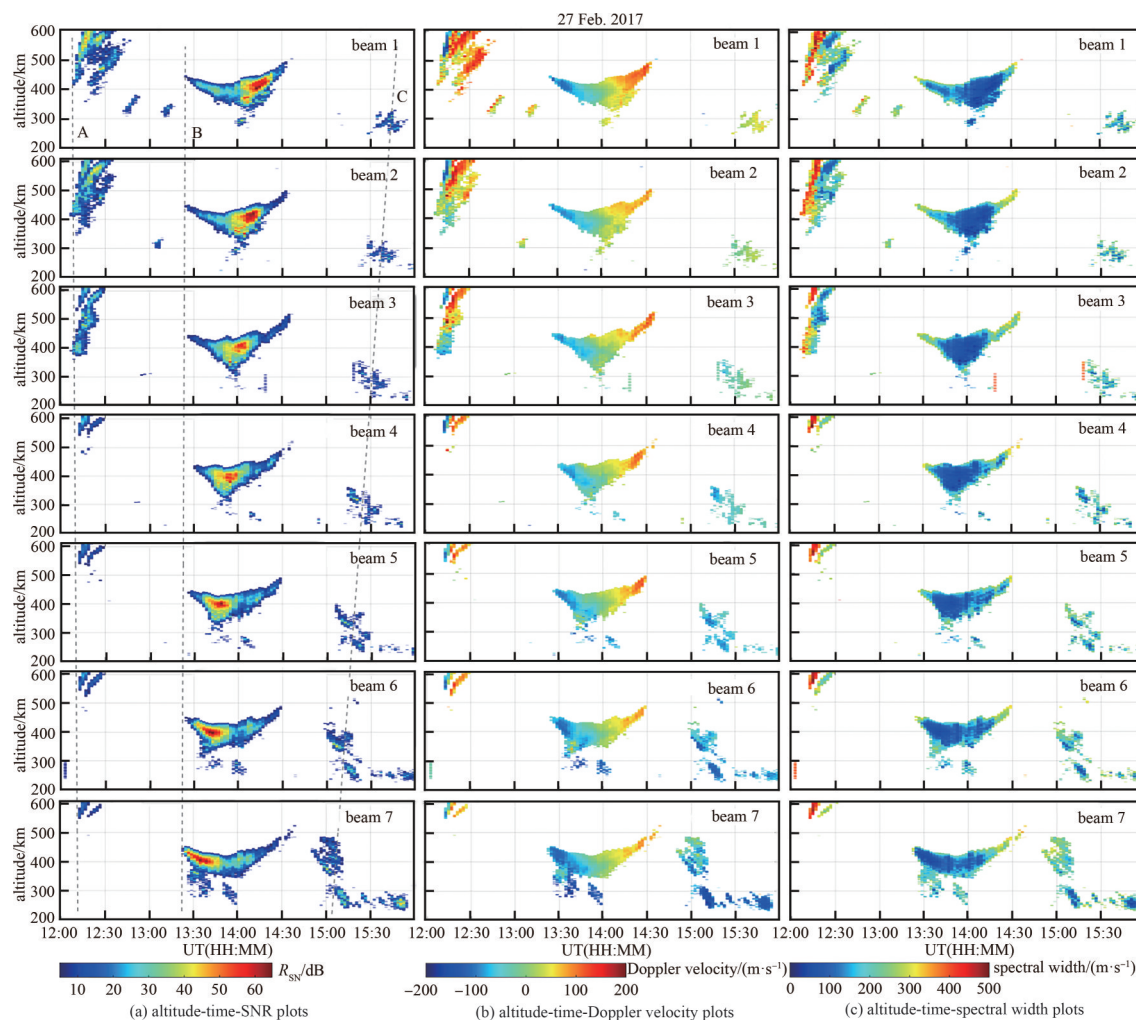


Fig.1 Recorded by the HCOPAR in fan-beam mode on 27 Feb., 2014
图1 2014年2月27日 HCOPAR在扇波束模式下记录的散射回波图

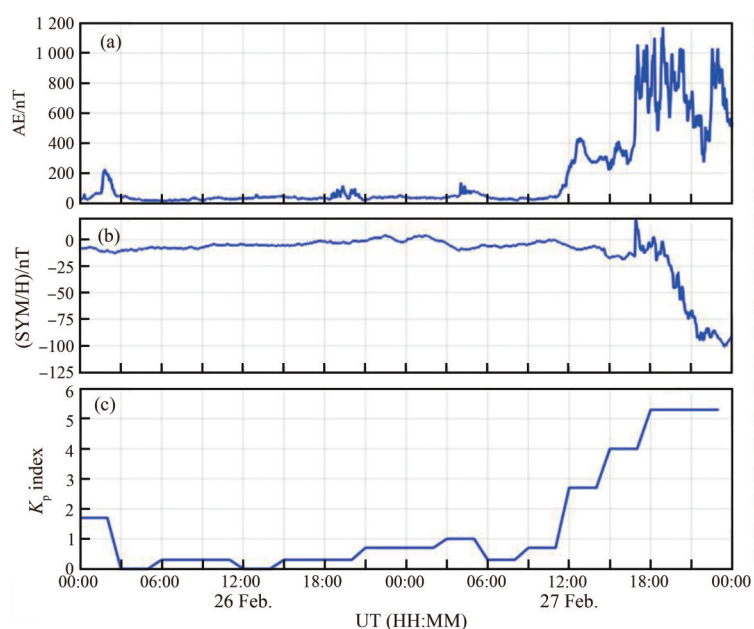


Fig.2 Variations of (a) AE, (b) SYM/H, and (c) K_p index on 26–27 Feb., 2014
图2 2014年2月26–27日(a) AE;(b) SYM/H和(c) K_p 指数的变化

2.3 多波束扇形图分析

东西方向雷达波的扫描观测为研究低纬地区不均匀体回波的纬向漂移特征提供了有利手段^[10]。为进一步了解不均匀体的时空演变过程,对HCOPAR雷达的7束多波束扫描观测得到的扇形后向散射图综合分析,并采用二维插值法将雷达7个波束的观测结合到一个扇面内。图3为2014年2月27日13:22(UT)—14:28(UT)时间内HCOPAR后向散射回波的高度-纬向距离-SNR的扇形图,横坐标为纬向距离,纵坐标为回波高度,颜色深度表示回波的信噪比。

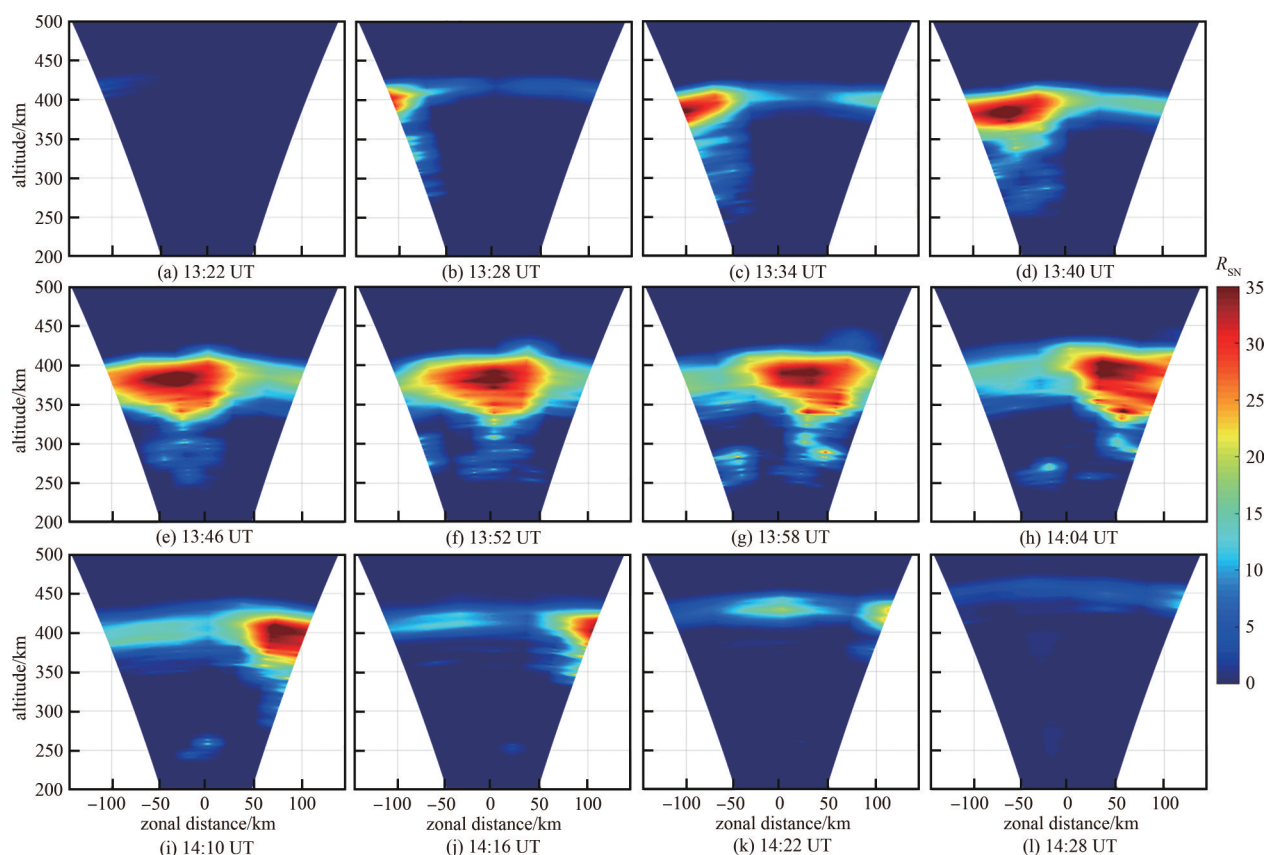


图3 2014年2月27日12:22UT—14:28UT扇区后向散射回波图时间序列显示,不均匀体东移,步长为6 min

通常日落后的羽状回波具有向东漂移的特征,本次观测到的不均匀体同样具有明显的东向漂移特征。在13:22(UT)不均匀体的散射回波(高度约为400 km)出现在雷达观测范围,扇形图中出现较小的回波。随后回波整体保持东向漂移的趋势,直至14:28(UT)离开雷达的观测范围。13:40(UT)之后,不均匀体回波上边沿一直保持在400 km高度,而下边沿逐渐下降至最低300 km高度范围。

值得注意的是,该不均匀结构体在400 km高度几乎同时被7个波束观测到,说明它进入HCOPAR观测范围的方向不是东西方向,而是从垂直方向进入。结合图1中不均匀体下边缘向下和负多普勒速度,以及之后向上的下边缘和正多普勒速度,说明该不均匀体是从上方进入雷达观测范围,接着下降一段距离后,转而上升直至离开雷达的观测范围。同时,结合图1数据,回波信号包络并没有东西向漂移,但深色的强回波部分明显东向漂移,且7个波束展现的多普勒速度非常一致,都是先接近后远离,不像15:00(UT)以后的不均匀体,西波束展现的是接近,东波束展现的是远离。说明HCOPAR观测到的V型结构只是一个大型等离子体结构的一部分,其尺度远大于HCOPAR的带状观测范围,它应该在雷达观测面的上方且平行于雷达观测面漂移。

2.4 基于测高仪的波动分析

如图4所示,2014年2月27日10:30(UT)时,测高仪在电离图模式下获得了一幅电离图(数据来源于海南的电离层垂直测高仪)。在频域上观察到回波具有显著的延展,这是典型的由不均匀体引起的频率延展现象。该结果进一步证实了之前基于HCOPAR雷达的观测回波确实是由电离层不均匀体引起,而非其他类型的杂波。

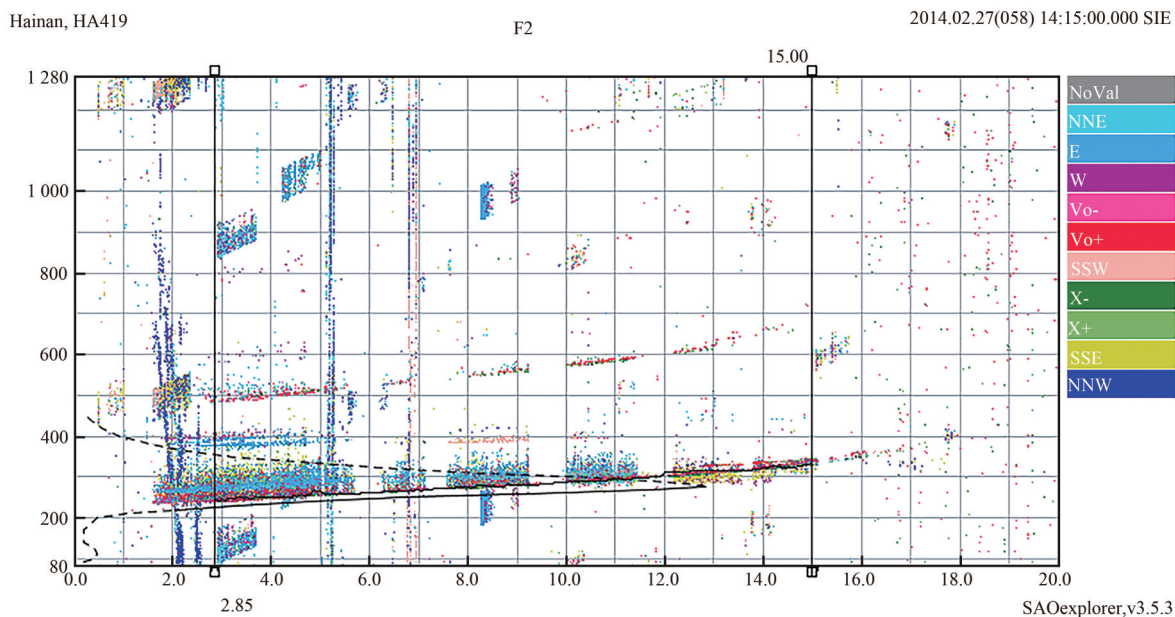


Fig.4 Ionograms detected in Hainan digisonde ionograms mode at 14:15 on 27 Feb.

图4 2月27日 14:15(UT)海南数字测高仪电离图模式下探测得到的电离图

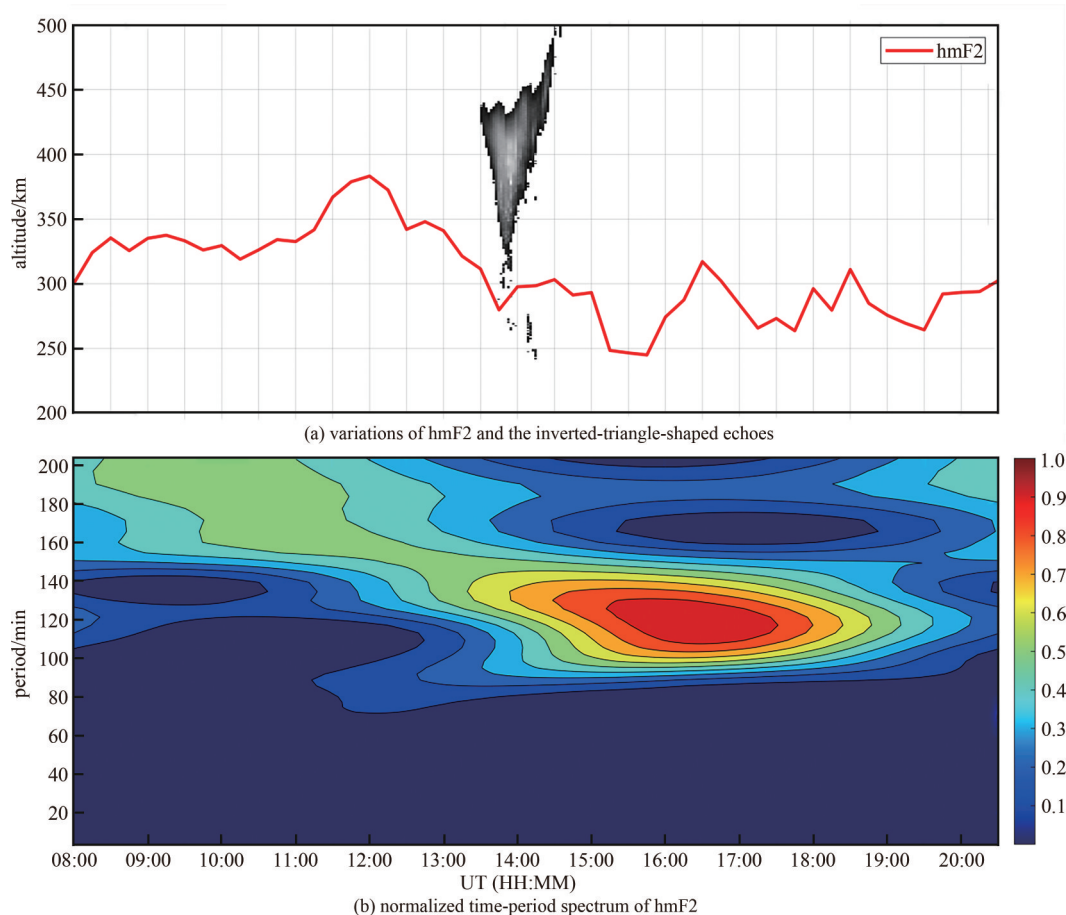


Fig.5 Variations of the hmF2 recorded by the Hainan digisonde and the inverted-triangle-shaped scattered echoes recorded by the HCOPAR on 27 Feb., 2014, and hmF2 normalized time-period spectrum

图5 2014年2月27日海南数字测高仪记录的hmF2和HCOPAR观测到的倒三角形散射回波的变化及hmF2归一化时域谱

为了解不均匀体产生时的背景电离层状态,通过人工描绘提取了电离层测高仪观测数据的电离图中F2层峰高hmF2,并将V型回波与hmF2曲线绘制在同一个图内,如图5(a)所示。图5(a)中可清晰地分辨不均匀体的下降与

背景电离层中 F2 层峰高在时间上相互对应。不均匀体和 F2 层峰高在同时下降至约 14:00(UT)后, 随后同步上升, 说明背景电离层和不均匀体在垂直方向的运动状态是一致的。

为研究波动对电离层产生的影响, 根据文献[11], 对 hmF2 使用 Morlet 小波变换进行时频分析。Morlet 小波变换定义为一个复杂的指数波和高斯包络的结果:

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为 Morlet 小波函数, ψ_0 为在非维度时间 η 的小波变换值; $\pi^{-1/4}$ 为一个归一化因子, 用来确保小波函数的能量为 1; $e^{i\omega_0 t}$ 为复数指数函数, 表示一个频率为 ω_0 的正弦波; $e^{-t^2/2}$ 为高斯函数的一部分, 负责形成包络, 随时间 t 在零点附近对称, 并随着时间的增加迅速减少, 确保小波函数具有局部化特性。

改变整体尺寸并顺着时间滑动整个小波, 由此定义“缩放小波分析”为:

$$\psi\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] = \left(\frac{\delta t}{s}\right)^{1/2} \psi_0\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] \quad (2)$$

式中: s 为改变变换规模的“扩张”参数, $s^{-1/2}$ 因子保持经缩放的小波恒定的总能量归一化; n 为时间滑动的平移参数; n' 为另一个时间点索引, 通常用于表示当前分析的时间点; δt 为时间步长。

对于给定的时间序列 x_n , 每一个值都被恒定的时间间隔 δt 分离, 其小波变换 $W_n(s)$ 变换为和原来时间序列的小波函数卷积:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^*\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] \quad (3)$$

式中 $W_n(s)$ 为小波变换的积分结果, 该积分可以评估规模 s 以及在开始和结束时间的所有 n 值。

计算时间序列的小波变换具体步骤如下:

1) 选择一个母小波并求母小波的傅里叶变换。计算时间序列 x_n 的傅里叶变换:

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N} \quad (4)$$

2) 选择一个最小尺度和所有其他的尺度, 每一个尺度选择适合的母波函数, 在该尺度下计算子波:

$$\hat{\psi}(s\omega_k) = \left(\frac{2\pi s}{\delta t}\right)^{1/2} \hat{\psi}_0(s\omega_k) \quad (5)$$

式中 $\hat{\psi}(s\omega_k)$ 表示在频域中的子波函数, 其依赖于尺度参数 s 和频率 ω_k 。

3) 通过区分总的小波方差的平方根归一化子波, 乘以时间序列的傅里叶变换, 利用式(3)反演变换到真实空间, 绘制等高线图即可得到 hmF2 的归一化时域谱图, 如图 5(b) 所示。其纵坐标为周期, 横坐标为时间, 颜色表示波动成分。从图 5(b) 中可知, 100~140 min 的周期性成分出现在 18:00(UT)到 20:00(UT)之间, 说明这段时间内 hmF2 有明显的周期性波动, 这很可能是重力波在电离层中传播导致的。

根据回波出现的周期性波动, 可以做出关于不均匀体向下漂移的推断: 首先图 3 中观测到的大型等离子体结构整体在向东漂移, 根据 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移特性, 东向的背景电场应当对不均匀体产生抬升而不是下降作用, 因此出现的下降结构不是东向漂移导致的; 其次, 行进式电离层扰动在其中起重要作用, 根据 hmF2 的周期性变化, 不均匀体随背景电离层同步上下移动, 这个周期性波动大概率是由于重力波调制的背景电离层高度出现变化, 进而导致不均匀体跟随背景电离层也出现了垂直方向的漂移。

2.5 结合气辉图像进行验证

为验证重力波调制背景电离层高度的变化而导致不均匀体跟随背景电离层出现了垂直方向的漂移的猜想, 进一步结合气辉图像结果, 对猜想进行验证。

气辉观测是研究电离层和中高层大气的重要手段之一, 它能够提供电离层中的各种不同等离子体结构的形态、尺度、空间分布和演化等方面的信息^[12-13]。但气辉观测通常涉及分析大量的图像数据, 处理观测数据首先需要校正图像畸变和去除可能干扰分析的星光效应; 其次, 光学伪迹(如暗角效应和 van Rhijn 效应)也可能影响观测数据的质量, 在数据处理阶段需要通过建模仪器的光学响应并对原始数据应用适当的校正算法来去除; 最后, 需要将观测结果投影到相应的物理空间中, 将地理坐标和经纬度坐标之间进行转换。

图 6 为使用上述校正技术后, 曲靖地区的全天空空气辉成像仪的观测、处理结果(地理坐标: 25.5°N , 103.8°E ; 磁纬: 15.6°N)。图 6 为该成像仪在 2014 年 2 月 27 日 14:31(UT)至 17:00(UT)曲靖台站观测到的气辉图像, 16 个图像按时间顺序排列, 每个图像被投影到经度 $100^{\circ}\text{E}\sim 108^{\circ}\text{E}$, 纬度 $20^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 的地理区域。假设高度为 250 km, 图像的顶部指向地理北方, 右侧指向地理东方。图 6 展示了在观测区域的不均匀体的运动过程: 第一部分从 14:31(UT)进入观测区域后, 经向向北发展, 纬向持续东向漂移后快速消散; 第二部分于 15:00(UT)左右进入观测区域后, 不均匀体纬向持续东向漂移, 经向先向北发展后向南逐渐衰退。这一观测与本文使用 VHF 观测到于 14:31(UT)出现的 V 型结构不均匀体及 15:00(UT)出现的化石结构的观测结果相对应。

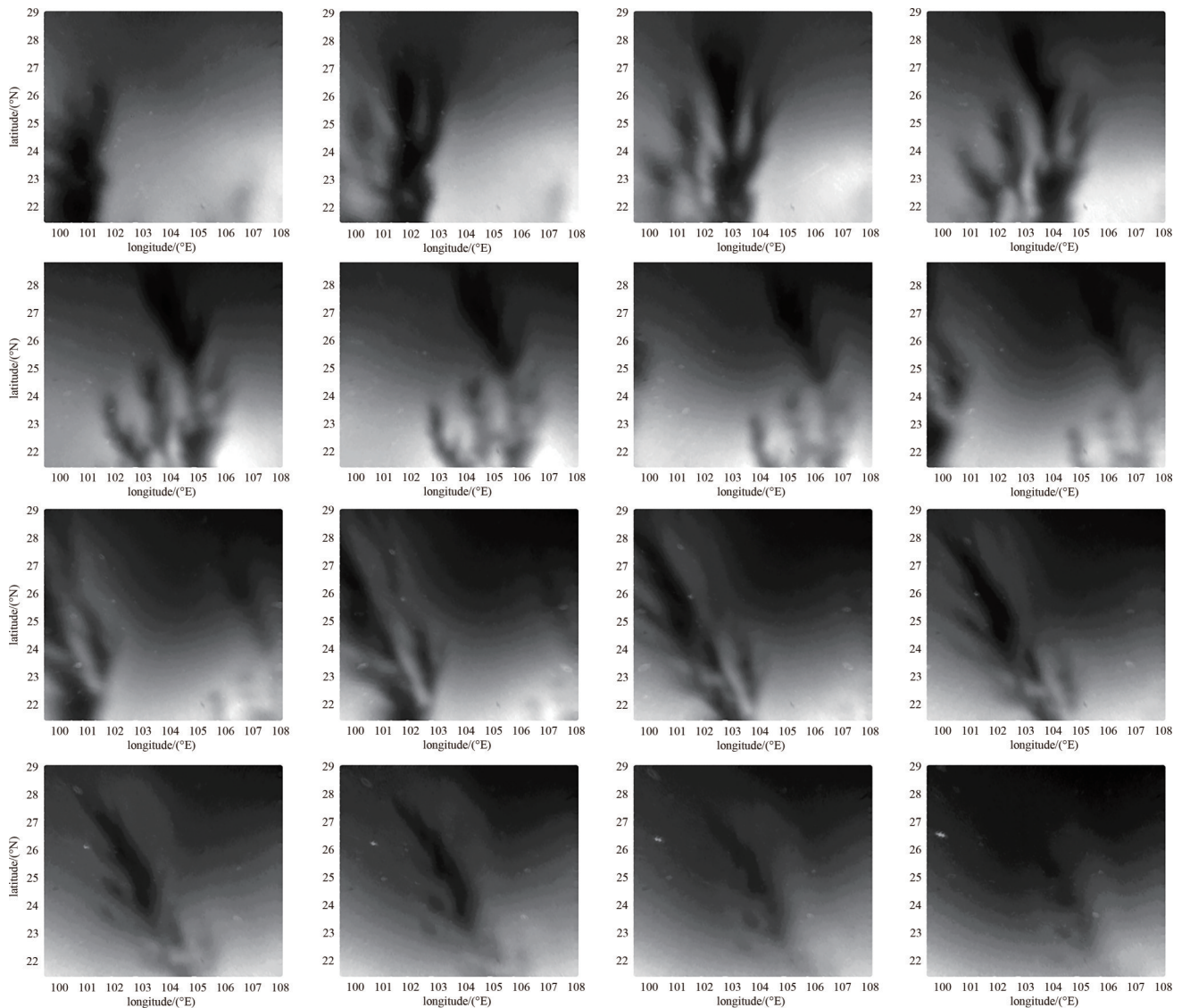


Fig.6 Airglow images observed at Qujing station from 14:31 to 17:00 on 27 Feb.,2014

图 6 2014 年 2 月 27 日 14:31 至 17:00 曲靖台站观测到的气辉图像

利用二维傅里叶快速变换, 从经过预处理的气辉差分图像中提取出重力波场分布^[14]。这些参数包括重力波的水平波长、观测周期、水平相速度和方位角。对预处理后的气辉图像做进一步线性平面拟合后, 从原始的差分图像中减去该平面(该过程称为去势处理)。从相应结果中可知图 6 中不均匀体的重力波背景出现了明显波动。

图 7 为 2014 年 2 月 27 日 23:52:34 当地时间(Local Time, LT)在曲靖台站观测到的气辉图像及其对应的能谱图, 其中右图为左图中对应的矩形区域。选取 2014 年 2 月 27 日 23:52:34(LT)图像中背景出现明显波动的区域, 对其进行去势处理和 2D FFT 技术分析, 得到重力波的一些参数。如图中所示, 可以清晰地看到, 能谱图中出现了中心对称的高亮区域, 这表明在该区域存在一个倾斜的波结构, 文献[14]中认为这种波动可能是由一种重力波引起的大型波动结构, 且该波动结构与前文 VHF 雷达所观测的不均匀体的波动现象在空间和时间存在一致性, 可以认为这次不均匀体的特殊现象可能由重力波导致。进一步分析能谱图中的高亮区域, 发现该重力波的水平波长约

为14 km, 周期约为326 s, 水平相速度约为47.3 m/s, 方位角约为 142° 。这些参数的提取为深入研究重力波的特性和演化提供了重要线索。需要注意的是, 在提取重力波参数的过程中, 周围光线的突变和背景场的变化等因素可能会影响重力波提取的准确性。

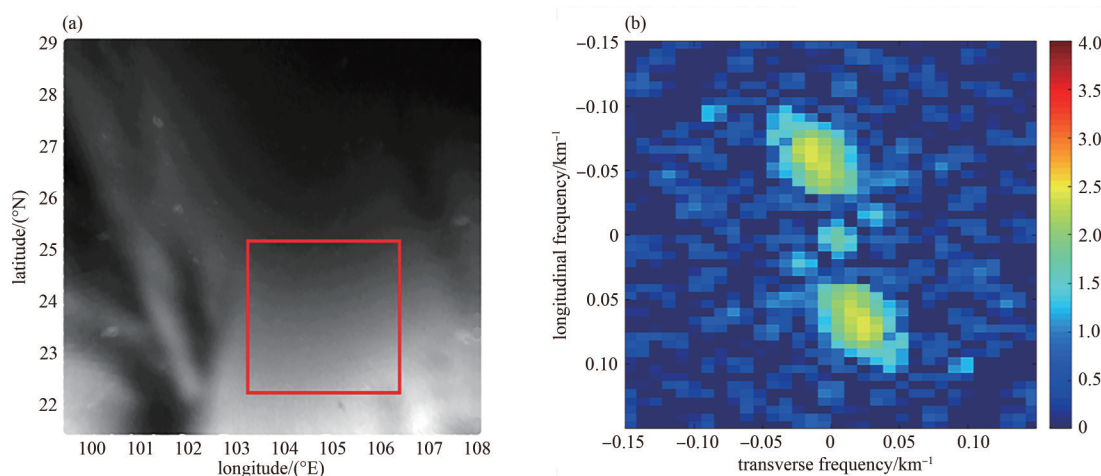


Fig7(a) Airglow image in the projection axis observed at Qijing station at 23:52:34LT on 27 Feb., 2014; (b) the energy spectrum corresponding to the rectangular region in Fig.7(a)

图7 (a) 2014年2月27日 23:52:34 LT 在曲靖台站观测的投影坐标轴内的气辉图像;(b) 与(a)图中矩形区域相对应的能谱图

3 结论

本文的研究主要关注重力波对电离层场向不均匀体的影响。之前的研究认为重力波可能通过不同的机制在低纬度和中纬度触发不均匀体, 本文的工作则进一步发现, 重力波不仅能够激发不均匀体, 还能够显著调制已经存在的不均匀体。这种调制作用不仅改变了不均匀体的形态和运动趋势, 还有可能通过调制极化电场促进其发展或消散。因此, 对于电离层的不均匀体研究, 重力波的作用和意义是非常重要的, 不能忽视。

为探究重力波对电离层场向不均匀体的影响, 本文利用子午工程海南台站的甚高频相干散射雷达HCOPAR、海南数字测高仪和曲靖台站的气辉观测, 对2014年2月27日我国海南地区低纬电离层出现的场向不均匀体进行了观测研究。观测的结论如下:

1) 2014年2月27日观测到的V形结构现象与地磁活动无关, 它是一个大型等离子体结构的一部分, 先出现在雷达观测面上方并平行于雷达观测面向东漂移, 后因为某种原因向下进入了观测面, 又很快地向上出去了, 形成了这样的一种特殊的现象。

2) 根据hmF2的时频分析结果, 认为重力波能显著调制背景电离层, 进而影响到场向不均匀体并改变其空间分布和运动轨迹。

3) 通过对气辉图像的观测结果分析, 验证了V型结构不均匀体的存在, 并验证了重力波确实对它产生了影响, 使其发生向南和垂直向下的漂移。

总之, 重力波除激发不均匀体外, 对已产生的不均匀体的作用和意义是不能忽视的。本文的研究成果为深入理解重力波与电离层相互作用提供了重要的观测证据, 有助于进一步探究电离层的不均匀体演化机制。

参考文献:

- [1] 宁百齐,李国主,胡连欢,等. 基于三亚VHF雷达的场向不规则体观测研究:1. 电离层E区连续性回波[J]. 地球物理学报, 2013,56(3): 719–730. (NING Baiqi, LI Guozhu, HU Lianhuan, et al. Observations on the field-aligned irregularities using Sanya VHF radar: 1. ionospheric E-region continuous echoes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 719–730.) doi: 10.6038/cjg20130301.)
- [2] 王宁. 我国中低纬地区电离层扩展F的统计特征及预测模型研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020. (WANG Ning. Research on the statistical characteristics and prediction model of ionospheric spread-F at the low-and mid-latitudes in China[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2020.)
- [3] 王勇. 极区电离层不均匀体及闪烁研究[D]. 济南:山东大学, 2019. (WANG Yong. Research on ionospheric irregularities and scintillations in polar region[D]. Jinan, China: Shandong University, 2019.)
- [4] FEJIER B G, SCHERLIESS L, DE-PAULA E R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of

- equatorial spread F[J]. *Journal of Geophysical Research A:Space Physics*, 1999,104(A9):19859–19869. doi:10.1029/1999JA900271.
- [5] HUBA D J,JOYCE G. Global modeling of equatorial plasma bubbles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010,37(17):L17104. doi:10.1029/2010GL044281.
- [6] WOODMAN R F,LA H C. Radar observations of F-region field-aligned irregularities at the magnetic equator[J]. *Journal of Geophysical Research A:Space Physics*, 1982,87(A3):1453–1464. doi:10.1029/JA087iA03p01453.
- [7] TSUNODA R T. On equatorial spread F:establishing a seeding hypothesis[J]. *Journal of Geophysical Research A:Space Physics*, 2010,115(A12):A12303. doi:10.1029/2010JA015564.
- [8] AJITH K K,LI Guozhu,TULASI R S,et al. On the seeding of periodic equatorial plasma bubbles by gravity waves associated with tropical cyclone:a case study[J]. *Journal of Geophysical Research A:Space Physics*, 2020,125(10):e2020JA028003. doi: 10.1029/2020JA028003.
- [9] DAS S K,PATRA A K,KHERANI E A,et al. Relationship between presunset wave structures and interbubble spacing:the seeding perspective of equatorial plasma bubble[J]. *Journal of Geophysical Research A:Space Physics*, 2020,125(8):e2020JA028122. doi:10.1029/2020JA028122.
- [10] PATRA K A,CHAITANYA P P,DASHORA N,et al. Highly localized unique electrodynamics and plasma irregularities linked with the 17 March 2015 severe magnetic storm observed using multitechnique common-volume observations from Gadanki, India[J]. *Journal of Geophysical Research A:Space Physics*, 2016,121(11):11518–11527. doi:10.1002/2016JA023384.
- [11] TORRENCE C,COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *American Meteorological Society*, 1998,79(1):61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- [12] HECHT J H. Instability layers and airglow imaging[J]. *Reviews of Geophysics*, 2004,42(1):1–12. doi:10.1029/2003RG000131.
- [13] 吴祺,余涛,林兆祥,等. 海南电离层 F 区不规则体的气辉观测[J]. *地球物理学报*, 2016,59(1):17–27. (WU Qi,YU Tao,LIN Zhaoxiang,et al. Night airglow observations to irregularities in the ionospheric F region over Hainan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016,59(1):17–27.) doi:CNKI:SUN:DQWX.0.2016-01-003.
- [14] GARCIA F J,TAYLOR M J,KELLEY M C. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data[J]. *Applied Optics*, 1997,36(29):7374–7385. doi:10.1364/AO.36.007374.

作者简介:

陈禹舟(1997–),男,在读硕士研究生,主要研究方向为电离层探测技术 .email:2016301200198@whu.edu.cn.

龚晚林(1990–),男,博士,工程师,主要研究方向为电离层探测技术.