0254-6124/2022/42(5)-0901-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LUO Ji, XU Jiyao, WU Kun, YUAN Wei, WANG Wei, ZHANG Jiaojiao. Research on Long-distance MSTID Event Observed by Multi-instruments over Mid-latitude Regions of China (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 901–912. DOI:10.11728/cjss2022.05.210722080

基于多仪器观测的中国中纬区域 MSTID 长距离传播事件研究*

罗 吉[1,2] 徐寄遥[1,2] 吴 坤[1]
袁 伟[1] 王 玮[1,2] 张佼佼[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 101407)

摘 要 电离层等离子体不规则结构通常会影响星地卫星的通信、导航及定位等，因此研究不规则体的结构特征和演化过程具有非常重要的科学意义和应用价值。中尺度电离层行进式扰动（MSTID）是一种常发于 F 层的电离层扰动，其演化过程十分复杂。本文利用伊春和兴隆台站全天空气辉成像仪、Swarm 卫星、佳木斯高频雷达以及漠河和十三陵台站数字测高仪观测数据，对 2018 年 10 月 17 日夜间出现在中国东北区域上空的 MSTID 事件进行分析。该 MSTID 事件传播时间较长，在气辉观测中持续时间超过 4 h（12:02－16:23 UT），其波长范围为 176.3～322.5 km，波速范围为 67.0～154.1 $m\cdot s^{-1}$。研究结果显示，该 MSTID 可能产生于较高的纬度，自东北向西南往中纬传播，依次经过伊春和兴隆台站的气辉观测区域。

关键词 中尺度电离层行进式扰动，全天空气辉成像仪，高频雷达，Swarm 卫星，数字测高仪

中图分类号 P352

Research on Long-distance MSTID Event Observed by Multi-instruments over Mid-latitude Regions of China

LUO Ji[1,2] XU Jiyao[1,2] WU Kun[1] YUAN Wei[1]
WANG Wei[1,2] ZHANG Jiaojiao[1]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 101407)

Abstract Ionospheric plasma irregularities have always been one of the research focuses in space physics. These irregularities usually have impacts on satellite communication, navigation as well as posi-

* 国家自然科学基金项目资助（41831073, 42004138）

2021-07-21 收到原稿，2022-03-14 收到修定稿

E-mail：jyxu@spaceweather.ac.cn

tioning system. It is of great importance to study the morphological features and the evolutions of these ionospheric irregularities. Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbance (MSTID) is one kind of irregularities which usually be wave-like perturbations of the ionospheric plasma in the F-region. The evolution of mid-latitude MSTID is complicated, especially over China. In recent years, with the rapid development of the Chinese Meridian Project and the All-sky Imager Observation Network, more and more instruments have been added to the study of the ionosphere over China. This paper reports a long-distance propagating MSTID event over northeastern China on the night of 17 October 2018. The MSTID were simultaneously observed by multi-instruments, including the all-sky imager, Swarm satellites, High-frequency radar as well as Digisonde. The MSTID lasted for more than 4 hours (12:02－16:23 UT) in the field view of the airglow imager, showing typical wavelength, the phase velocity of 176.3～322.5 km, 67.0～154.1 m·s^{-1}. The MSTID event was possibly generated at high latitude and propagated southwestward to the lower latitude, which was observed by the all-sky imagers in Yichun and Xinlong stations.

Key words MSTID, All-sky imager, High-frequency radar, Swarm satellites, Digisonde

0 引言

中尺度电离层行进式扰动(MSTID)通常是指夜间发生在中纬区域的电离层扰动现象。在北半球，MSTID 常表现为西北–东南向延伸的明暗相间条带状结构，由东北向西南传播。而在南半球，MSTID 通常是向西北方向传播。MSTID 的波长范围为几十到几百公里，波速最大可达几百米每秒[1,2]。

在早期研究中，全天空气辉成像仪、GPS-TEC 监测仪、数字测高仪以及部分雷达和卫星被用于观测中低纬区域 MSTID 结构[3–10]。从 20 世纪 70 年代开始，全天空气辉成像仪被用于研究 MSTID 的形态结构以及演化过程。21 世纪初，有关 MSTID 的研究在电离层领域被广泛关注。Mendillo 等[11] 利用阿雷西博的一台 OI 630.0 nm 气辉成像仪观测到电离层上空西北–东南向倾斜的条带状气辉结构，其传播速度约为 60～100 m·s^{-1}。Kubota 等[12] 利用日本 5 台气辉成像仪研究了 1998 年 5 月 19－22 日晚的长距离传播 MSTID 事件，其波长范围为 200～600 km，波速范围为 83～137 m·s^{-1}。Garcia 等[13] 通过统计分析得出 MSTID 的大致特征，MSTID 通常在北半球呈西南向传播，其传播速度为 50～170 m·s^{-1}，波长范围为 50～ 500 km。Kelley 等 [14] 结合气辉观测数据及 GPS 监测数据研究了一次北半球发生的西南向传播的 MSTID 事件，发现在气辉观测中的暗条带对应了背景等离子体耗散，亮条带对应背景等离子体的增强。Shiokawa 等[15] 在日本统计了两台站三年间的气辉观测数据，获得 MSTID 的一般波长、波速、周期和振幅范围分别为 100～300 km，50～100 m·s^{-1}，0.5～1.5 h，5%～15%。Otsuka 等[16] 利用两台气辉成像仪分别在日本和澳大利亚对 MSTID 同时进行观测，揭示 MSTID 在南北半球的镜像共轭结构特征。Ogawa 等[17] 利用全天空气辉成像仪，GPS-TEC 监测仪以及 SuperDARN 高频雷达同时观测的结果进一步阐述了 MSTID 在北半球区域向西南方向往低纬运动的传播特性。

中国也对 MSTID 开展了多项研究，并取得了一系列重要成果。Ding 等[18] 利用中国中部地区密集 GPS 监测仪阵列对太阳活动低年 MSTID 事件进行统计分析，获得其在日夜的不同传播特征。Song 等[19] 利用北美两年 GPS-TEC 观测数据，统计分析 MSTID 的传播特性，认为扰动振幅的峰值在春秋分前后达到最大，在夏冬至日前后最小。Sun 等[20] 利用子午工程全天空气辉成像仪、法布里–珀罗干涉仪、数字测高仪以及 GPS-TEC 监测仪对 2012 年 2 月 17 日晚一次 MSTID 事件进行深入研究，在 MSTID 结构中发现中尺度场向不规则体结构。近期 Xie 等[21] 利用 VHF 雷达、数字测高仪与 GNSS 观测网相结合的手段研究了 2018 年 3 月 3 日晚从中纬传播至低纬的 MSTID 事件，发现当 MSTID 传播至低纬时，极化电场可以调制等离子体不稳定性。Wu 等[22] 利用子午工程富克台站的全天空气辉成像仪及数字测高仪等观测数据，发现了相向运动且发生相互作用的 MSTID 事件。Luo 等[23] 结合子午工程全天空气辉成像仪、

GPS-TEC 监测仪以及 Swarm 卫星进一步研究分析中纬地区 MSTID 在传播过程中的转向和消散现象。近年来, 虽然关于 MSTID 传播特性的研究不断深化, 但有关中国中纬区域 MSTID 的产生来源及传播过程尚不明确。因此, 结合多种仪器观测数据来研究该区域 MSTID 的发生及演化具有重要的科学意义。

本文利用河北兴隆和黑龙江伊春的 OI 630.0 nm 全天空气辉成像仪观测数据, 结合 Swarm 卫星数据、佳木斯 SuperDARN 高频雷达的回波结果以及漠河和十三陵测高仪观测结果对 2018 年 10 月 17 日夜间西南向传播的 MSTID 事件进行分析, 详细研究了此次 MSTID 事件从高纬向中低纬长距离传播的演化过程。

1　观测仪器与数据

1.1　全天空气辉成像仪

主要使用河北兴隆(40.4°N, 117.6°E), 黑龙江伊春(47.9°N, 128.9°E)两个台站的全天空气辉成像仪观测数据, 对出现在 2018 年 10 月 17 日夜间的 MSTID 事件进行分析研究。图 1 给出了各个台站的位置, 其中红色星形和蓝色菱形分别代表两个台站的位置, 黑色圆圈分别代表两个气辉成像仪在 250 km 高度处的视场覆盖范围。两台站使用的是相同的全天空气辉成像仪, 其主要组成包括 1024 pixel ×1024 pixel 的 CCD, 视场角为 180°的鱼眼镜头及波长为 630.0 nm 的滤波片。

1.2　Swarm 卫星

Swarm 卫星组发射于 2013 年 11 月 22 日, 是由三颗卫星组成的。其中较低的两颗卫星 Swarm A 和 Swarm C 并列飞行的高度约为 470 km, 两颗卫星飞行轨道的经度距离大约为 1.4°(距离约为 150 km), 另一颗卫星 Swarm B 的飞行高度约为 520 km。本文所使用的 Swarm 卫星数据来源于 http://earth.esa.int/swarm。

1.3　佳木斯高频雷达

佳木斯雷达位于中国佳木斯长发镇, 其地理位置为 46.8°N, 130.5°E, 其视线中心方向为东北向 44°。佳木斯雷达是国际高频雷达网 SuperDARN 的组成部分之一, 对电离层的等离子体运动进行持续观测。佳木斯雷达由 16 组天线单元组成的主阵和 4 个天线单元组成辅阵构成。雷达扫描过程中每个波束之间的夹角为 3.25°, 24 个波束的总扫描角度为 78°, 图 1 给出了佳木斯台站高频雷达的位置, 绿色直线分别代表该雷达第 0, 13, 23 波束的视线方向。每一波束上相邻两个采样点的距离为 45 km。详细内容可参考文献 [24]。

1.4　电离层数字测高仪

漠河台站位于中国最北端的黑龙江省漠河县北极镇, 地理坐标为 53.5°N, 122.4°E。该数字测高仪属于子午工程无线电观测设备之一, 其型号为 DPS-4。十三陵台站地理坐标为 40.3°N, 116.2°E。当观测区域上空电离层 F 层出现不规则体(例如电离层等离子体泡, 中尺度电离层行进式扰动等)时, 频高图中会出现明显的扩展 F。

2　观测结果

2.1　气辉观测结果

图 2 中给出了 2018 年 10 月 17 日夜间 12:02—16:23 UT 兴隆和伊春两台站全天空气辉成像仪所观

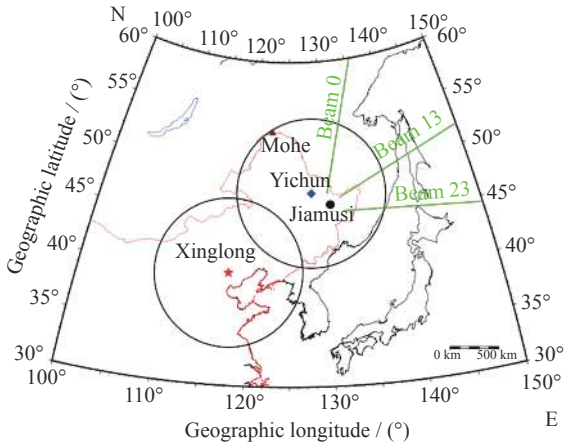


图 1　观测仪器及台站位置。红色星形代表兴隆台站全天空气辉成像仪位置, 蓝色菱形代表伊春台站全天空气辉成像仪位置, 黑色圆点代表佳木斯台站高频雷达位置, 棕色三角形代表漠河台站数字测高仪位置

Fig. 1　Location of observation instruments and stations. The red star denotes the geographic location of the all-sky imager at Xinglong, and the blue diamond denotes the geographic location of the all-sky imager at Yichun. The black spot denotes the geographic location of the High-frequency radar at Jiamusi. The brown triangle denotes the geographic location of the Digisonde at Mohe

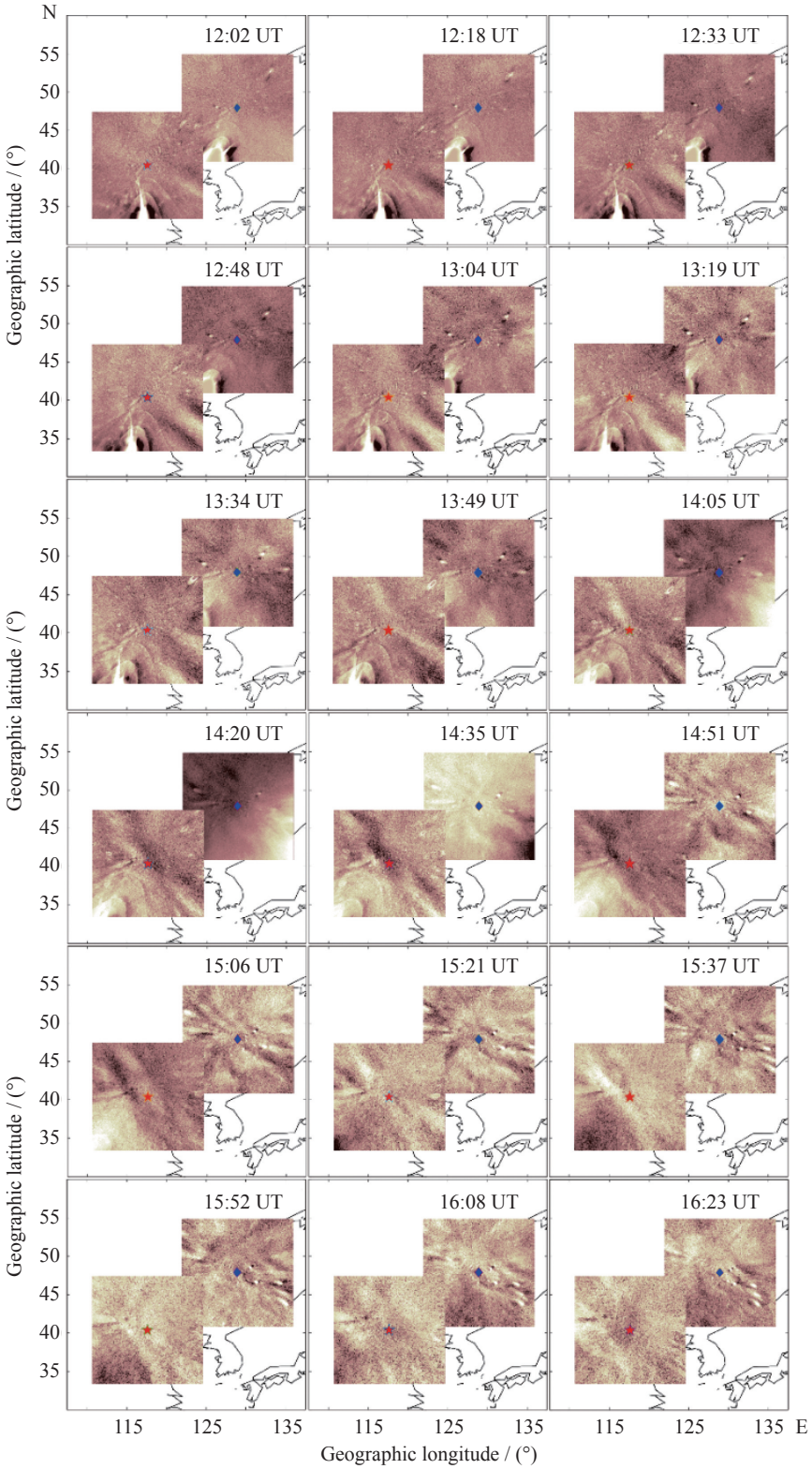


图 2　2018 年 10 月 17 日晚 12:02－16:23 UT 河北兴隆和黑龙江伊春台站观测到的气辉图像（相邻两图之间的时间间隔约为 15 min）

Fig. 2　Images of MSTIDs from the Xinglong and Yichun station from 12:02 to 16:23 UT on 17 October 2018 (time interval between successive images is about 15 min)

测的气辉图像。基于 Garcia 等[25] 的气辉图像处理方法，将兴隆和伊春台站的气辉观测图像投影到 250 km 高度物理空间，其地理区域范围分别是经度 110.6°E－124.6°E，纬度 33.4°N－47.4°N 和经度 121.9°E－135.9°E，纬度 40.9°N－54.9°N。每张图的上端指向地理北向，右端指向地理东向。相邻两张图的时间间隔约为 15 min。

兴隆台站气辉观测显示，该 MSTID 事件在该台站观测结果中持续时间为 12:02－15:37 UT，其结构呈现从西北至东南向延伸的条带状结构，且向西南向传播。在传播过程中，MSTID 的波长范围为 281.3～322.5 km，波速由开始的 154.1 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$（12:09－12:54 UT）逐渐降至 89.5 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$（13:34－15:12 UT）。

在伊春台站的气辉观测结果中，MSTID 持续时间为 13:04－16:23 UT，前期的相平面主要出现在观测视野的西北区域（伊春台站气辉图片左上角）且不是很清晰。在 14:27 UT 左右，气辉观测区域右下角出现明显条带，而子夜后由于云量变多，气辉观测图片被污染不再可用。伊春台站可用气辉观测数据显示，在传播过程中 MSTID 的波长范围为 176.3～187.5 km，波速范围为 67.0～69.2 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$。

通过对兴隆与伊春台站气辉观测结果的对比，两台站观测到的 MSTID 事件持续时间不同，MSTID 出现在兴隆台站的时间更早，兴隆台站所观测到的 MSTID 波长和波速都大于伊春台站。

2.2　卫星观测结果

图 3(a) 上图将 13:00－13:08 UT 期间的 Swarm A，C 卫星轨道映射至伊春气辉观测图中，下图为两颗卫星经过伊春台站气辉观测区域电子密度随时间的变化。在图 3(a) 上图的气辉观测中并没有明显的 MSTID 结构出现，但在图 3(a) 下图卫星观测的电子密度变化中，从 13:03 UT 起，Swarm A，C 卫星的电子密度都先后出现明显的波峰波谷，这说明在 Swarm 卫星的探测高度（约 450 km）等离子体存在波动。通过相邻数据的差值可以得到卫星测量的电子密度随纬度的变化梯度，如图 3(c) 所示，当两颗卫星自南向北穿过气辉观测区域时，从 46°N 以上，电子密度梯度出现波动，且在 51°N 附近扰动幅度最大。

图 3(b) 上图将 14:32－14:38 UT 期间 Swarm C 卫星轨道映射至兴隆气辉观测图中，图中右侧标注了卫星经过不同纬度的时间，下图表示卫星经过兴隆台站气辉观测区域的电子密度随时间的变化。从 14:33 UT 起，随着卫星由南向北经过气辉观测区域，电子密度发生变化。图 3(c) 给出了卫星测量得到电子密度随纬度的变化梯度，从 32°N－41°N Swarm C 卫星所测量的电子密度就有较为明显的波动，但由于气辉观测图中右下角的月光污染，无法确认气辉观测该区域是否存在 MSTID。

2.3　雷达观测结果

图 4 给出了佳木斯雷达在 2018 年 10 月 17 日晚 12:00－18:00 UT 间第 13 波束的观测数据随时间的变化。雷达第 13 波束的视线方向与 MSTID 传播方向较为一致，其视线方向详见图 1。在图 4 中由上至下分别代表回波能量，视线多普勒速度以及谱宽，横坐标为时间 UT，纵坐标为地理纬度。在视线多普勒速度变化图中，负值代表等离子体远离雷达运动，正值代表等离子体向雷达方向移动。此次观测的回波频率保持在 10.4 MHz，这意味着佳木斯雷达处于正常工作模式。该结果中，地波信号已通过经验公式 $\frac{w}{3}+|v|<30\ \mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 筛选[26]，其中 w 代表谱宽，v 代表视线多普勒速度。从 14:15 UT 起，视线多普勒速度图中出现明显片状的正向速度，此时的回波区域在 50°N 附近，该速度随着时间逐渐减小，从开始的约 75 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 降至后期的约 50 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$。在 15:45 UT 附近回波在第 13 波束观测中消失，但回波的消失并不意味着 MSTID 的消失，这可能与波束的方位角有关。通过第 13 波束观测数据分析可以发现，在 14:15－15:45 UT，佳木斯雷达观测到 MSTID 从 50°N 向更低纬度 47°N 传播。

图 5 给出了不同时刻伊春台站观测到的气辉图像及佳木斯雷达在对应时刻所测量的视线多普勒速度及回波强度。在 14:36 UT，伊春台站气辉观测图中，右下角出现 MSTID 相平面，此时佳木斯雷达回波扫频图中在 49°N 出现速度为 50 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 的回波。在 15:04 UT，雷达回波强度变强，范围变大，且向雷达方向移动，这与伊春台站的气辉观测结果一致。

3　讨论

综上所述，伊春和兴隆两台站观测到的 MSTID 事件持续时间不同，MSTID 结构出现在兴隆台站的时间更早。若两台站观测到的 MSTID 来自同一事

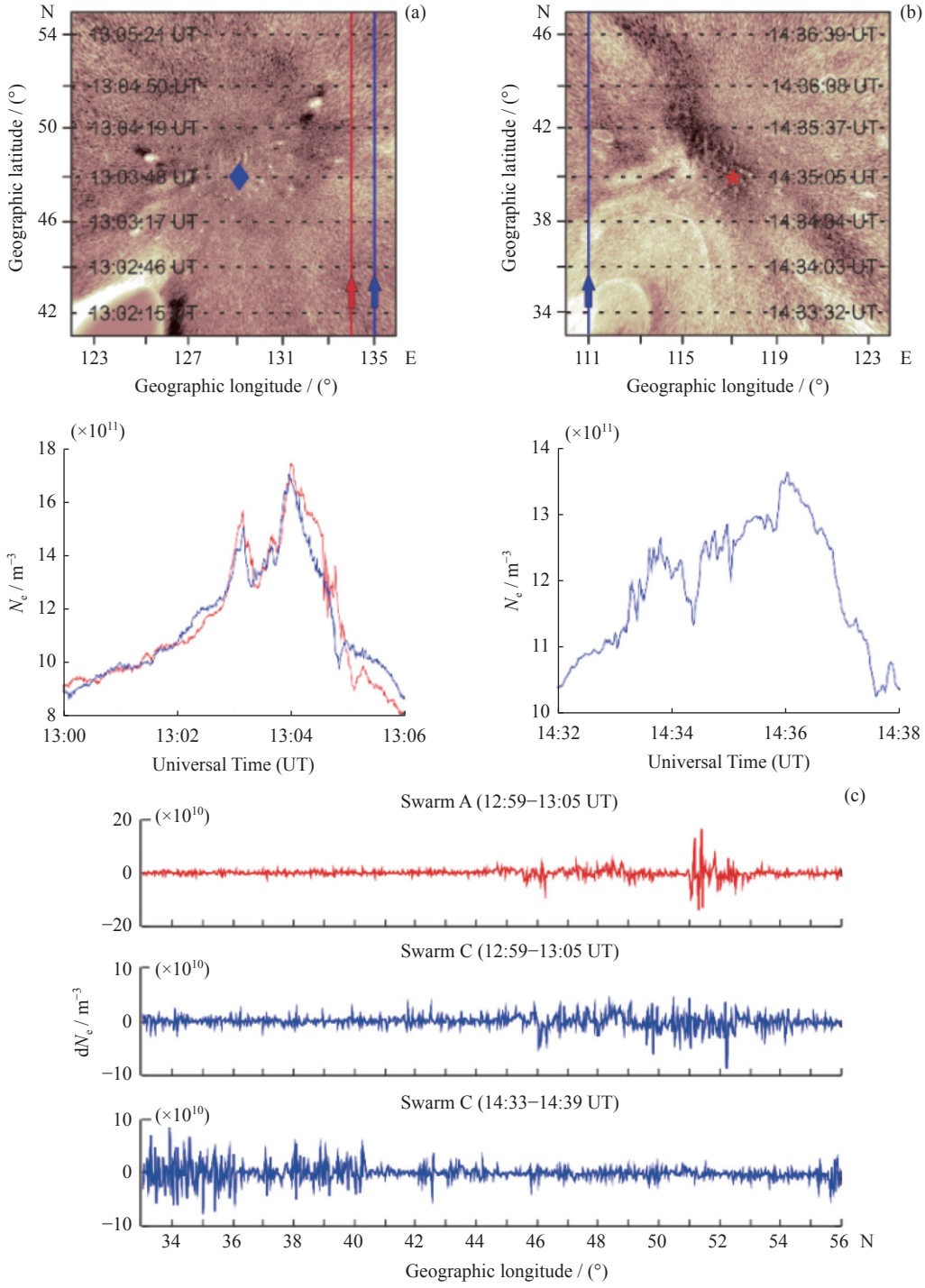


图 3 （a）上图为全天空气辉成像仪和 Swarm A，C 卫星在 2018 年 10 月 17 日 13:00−13:08 UT 同时观测到的 MSTID 事件，红线代表 A 卫星轨道，蓝线代表 C 卫星轨道；下图为 Swarm A，C 卫星观测到的电子密度变化。（b）上图为全天空气辉成像仪和 Swarm C 卫星在 14:32−14:38 UT 观测到的 MSTID 事件，下图为 Swarm C 卫星观测到的电子密度变化。（c）观测期间不同纬度的电子密度梯度

Fig. 3 (a) Top figure denotes the orbits of Swarm A, C added to the airglow image observed from 13:00 to 13:08 UT on 17 October 2018, the red line indicates the orbit arc of Swarm A, the blue line indicates the orbit arc of Swarm C. Bottom figure denotes the time series of in situ electron density data from Swarm satellites. (b) The orbit arc of Swarm C (top figure) and the time series of *in-situ* electron density data from Swarm C (bottom figure). (c) The latitude series of *in-situ* electron density gradient from Swarm satellites

件, 为什么伊春台站气辉成像仪在 12:02－13:04 UT 期间没有观测到 MSTID, 通过伊春台站气辉观测结果分析, 在 13:04 UT 前, 伊春台站上空有云, 气辉成像仪观测数据无法辨别是否存在 MSTID。在该时间段, MSTID 是否已经在伊春台站上空出现, 这是研究中亟待解决的问题。由于漠河台站距离伊春较近(约 770 km), 所以下面引入当天夜间漠河台站和十三陵台站数字测高仪的观测数据开展讨论分析。

2018 年 10 月 17 日处于地磁平静期, 当日总 Kp 指数为 4, 且 3 h 最大 Kp 值为 2^-。图 6 为漠河台站电离层数字测高仪 08:00 UT 至次日 00:00 UT 时段电离层频高图。结果显示扩展 F 在 09:00 UT 左右开始出现, 此时漠河台站上空已经存在电离层不规则体。漠河台站的位置在伊春台站西北方向, 处于伊春台站气辉观测视野的左上角区域, 距离兴隆台站约 1500 km。通过气辉观测结果, 在兴隆台站 12:09 UT MSTID 的传播速度约为 154 $m\cdot s^{-1}$(555 $km\cdot h^{-1}$), 通过大概估算, MSTID 从漠河上空传播至兴隆观测区域需要时间约为 2.7 h。图 7 给出了十三陵台站数字测高仪 10:00－23:30 UT 时间段的频高图。从 12:30 UT 开始, 频高图中出现扩展 F 结构, 十三陵台站地理位置为 40.3°N, 116.2°E, 与兴隆台站(40.4°N, 117.6°E)较近。因此兴隆台站最早气辉观测到 MSTID 的时间约为 12:02 UT。这与估算 MSTID 从漠河传播至兴隆上空的时间吻合。综上所述, 该 MSTID 结构可能产生于更高纬度之上, 经过漠河台站传播至兴隆台站。

早期研究表明, Es 层的活动可能与 F 层产生耦合作用, 从而影响 MSTID 传播。Haldoupis 等[27] 研究表明霍尔极化过程会在中纬度 Es 层产生强电场。Tsunoda 等[28] 发现这种 Es 层强电场可能会通过磁力线映射到 F 层, 正反馈作用于极化电场。Yokoyama 等[29] 模拟 E-F 层耦合后证明 MSTID 的西南向传播可能与 Es 层的中性风剪切有关。在此次 MSTID 事件的传播过程中, 漠河和十三陵两个台站的数字测高仪结果中都出现了较强的 Es 回波。因此, 该事件中 MSTID 的发生和传播可能也受到 Es 层的影响。

在 13:04 UT, MSTID 结构开始出现在伊春台站的气辉观测仪视野, 其相平面主要分布在左上角区域(50°N－54°N, 122°E－125°E)。在图 3(a)中, Swarm A, C 卫星在 13:00－13:08 UT 前后经过伊春台站气辉观测右侧区域(41°N－55°N, 134°E－135°E)。

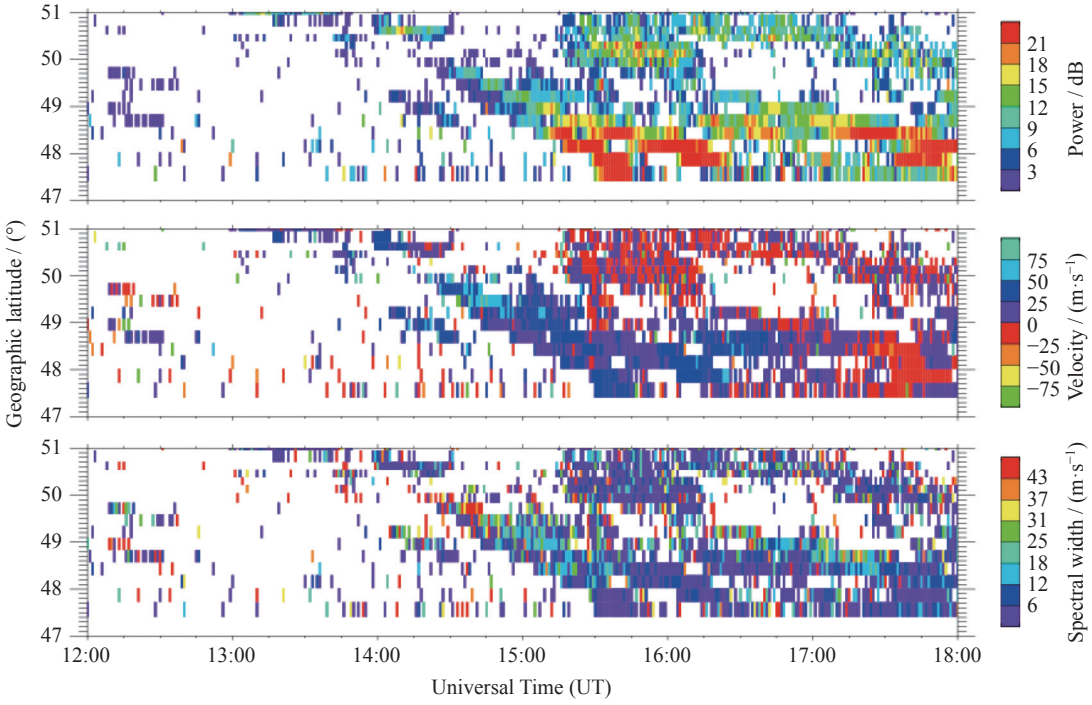


图 4　2018 年 10 月 17 日 12:00－18:00 UT 佳木斯雷达第 13 波束所观测到的雷达数据

Fig. 4　Time series plots of measurements from beam 13 of the Jiamusi radar obtained from 12:00 to 18:00 UT on 17 October 2018

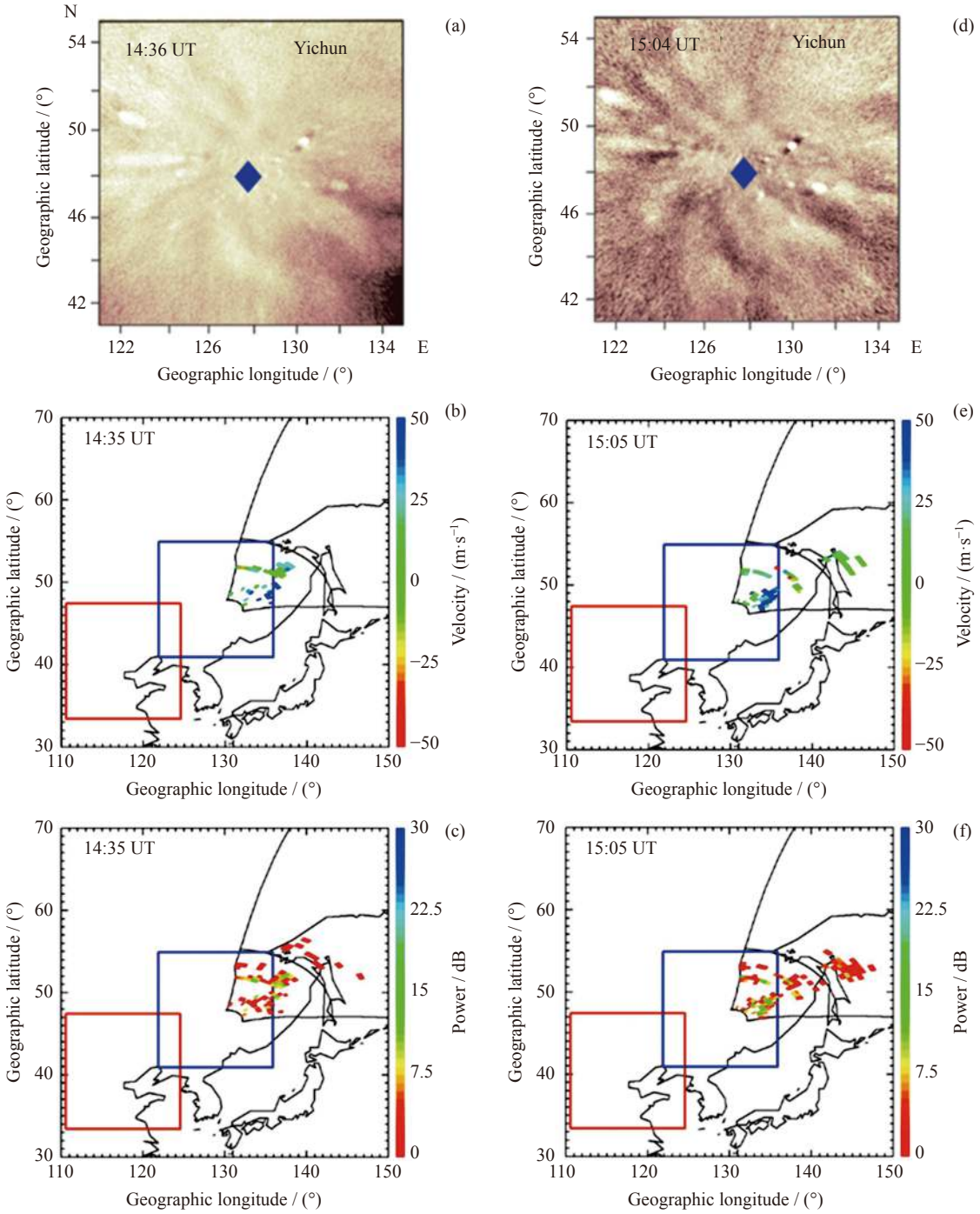


图 5 （a）2018 年 10 月 17 日 14:36 UT 伊春台站气辉观测结果，（b）佳木斯雷达在 14:35 UT 所测量的视线多普勒速度，（c）佳木斯雷达在 14:35 UT 所测量的回波强度，（d）15:04 UT 气辉观测结果，（e）佳木斯雷达在 15:05 UT 所测量的视线多普勒速度，（f）佳木斯雷达在 15:05 UT 所测量的回波强度。红框和蓝框分别代表兴隆和伊春台站全天空气辉成像仪的观测视野

Fig. 5 (a) Airglow observations of Yichun at 14:36 UT on 17 October 2018, (b) the Doppler velocity observed by the Jiamusi radar at 14:35 UT, (c) the echo power observed by the Jiamusi radar at 14:35 UT, (d) airglow observations of Yichun at 15:04 UT, (e) the Doppler velocity at 15:05 UT, (f) the echo power at 15:05 UT. Red and blue squares denote the field of view of the all-sky imagers at 250 km at Xinglong and Yichun

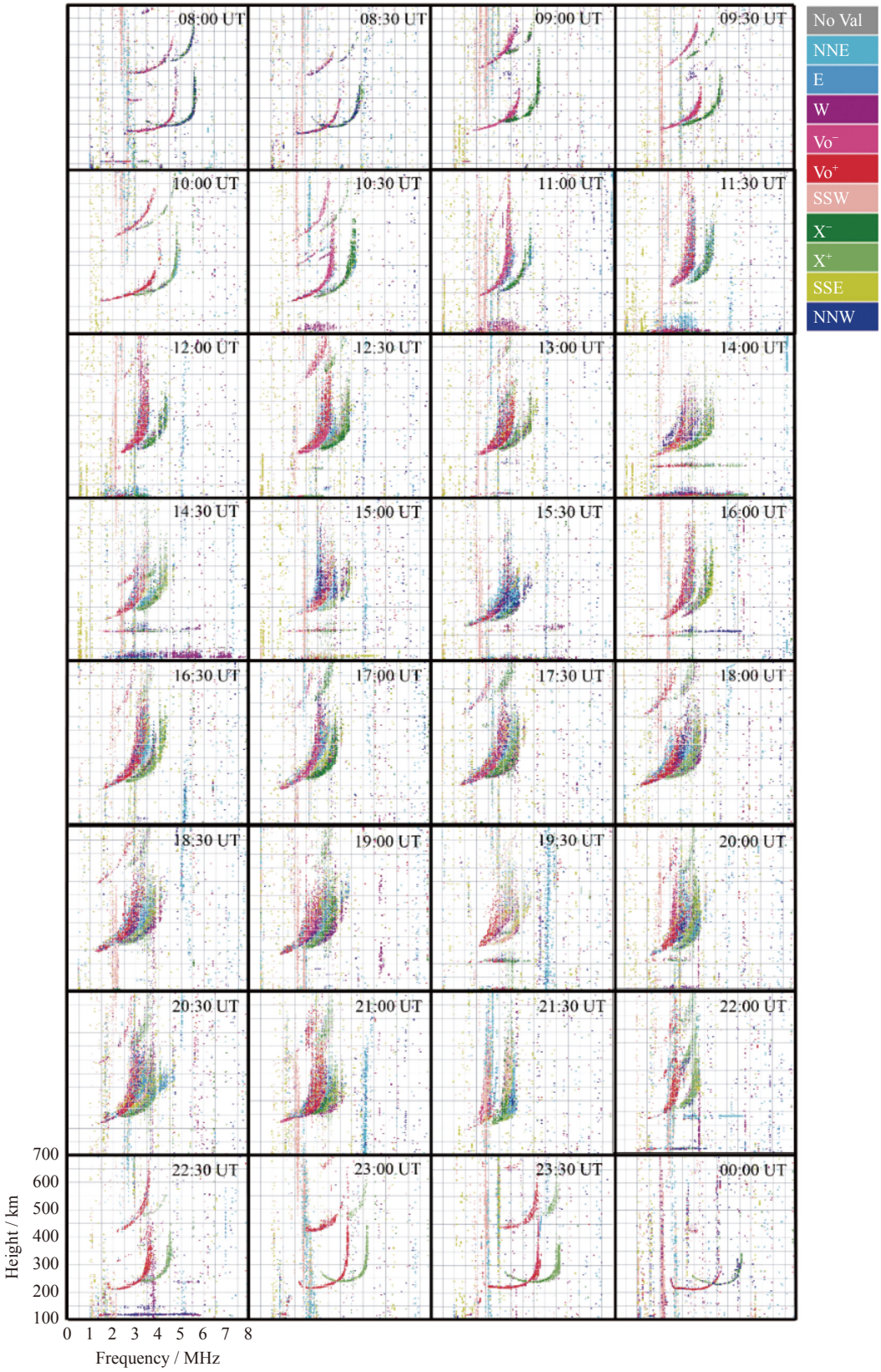


图 6　黑龙江漠河数字测高仪观测的 2018 年 10 月 17 日 08:00 UT 至次日 00:00 UT 每 30 min 的电离层频高图

Fig. 6　Ionograms observed by the Digisonde at Heilongjiang Mohe station every 30 min from 08:00 to 00:00 UT on 17−18 October 2018

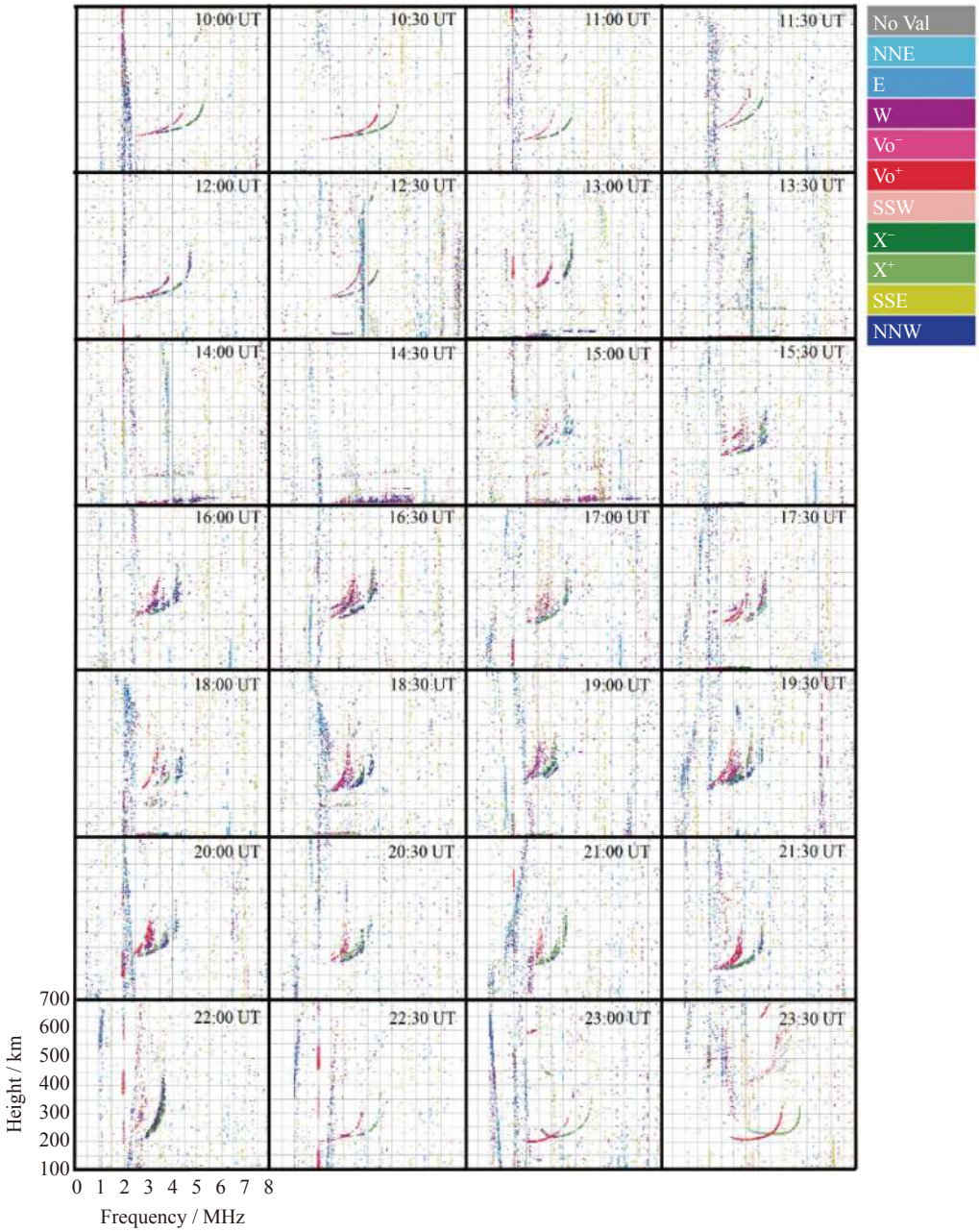


图 7 北京十三陵数字测高仪观测的 2018 年 10 月 17 日 10:00－23:30 UT 每 30 min 的电离层频高图

Fig. 7 Ionograms observed by the Digisonde at Beijing Shisangling station every 30 min from 10:00 to 23:30 UT on 17 October 2018

图 3(b)和(c)中相应位置出现明显的波动，该波动主要出现在 46°N 以北，这说明 Swarm A, C 卫星都先后出现明显的波峰波谷。因此 13:02－13:05 UT，在约 450 km 高度，卫星在 46°N－52°N, 134°E－135°E 区域观测到 MSTID 结构。但此时在伊春台站 250 km 气辉成像仪结果中，该结构并没有得到明显观测。这可能是因为在 12:02－14:20 UT 期间，伊春台站的气辉图像被部分云层污染，无法辨别 MSTID。直到 14:35 UT，伊春台站气辉观测区域右下角区域(41°N－46°N, 131°E－135°E)才出现明显 MSTID 结构。因此，伊春和兴隆台站所观测到的 MSTID 是同一事件，12:02－14:35 UT 期间，背景云量污染是影响伊春台站气辉成像仪观测结果的主要原因。

通过气辉观测结果，在此次 MSTID 事件中，更高

纬度的伊春台站所观测到的 MSTID 波长小于兴隆台站。在 MSTID 向中纬的传播过程中，其波长逐渐变大。因为 MSTID 的传播过程符合德布罗意波（物质波）的传播特性，根据波的动量方程 $P = h/\lambda$（其中 h 为普朗克常数，λ 为波长），由于波在传播过程中会有能量损耗，即 P 会减小，h 为定量，λ 随之增强，直到能量全部消耗。

综上所述，此次 MSTID 事件从更高的纬度产生，自东北向西南往中纬地区传播，被不同台站的不同仪器所观测，例如高频雷达（佳木斯台站）、数字测高仪（漠河和十三陵台站）、气辉成像仪（伊春和兴隆台站）。在其传播过程中，MSTID 的波长逐渐变大，直至消失。

4　结论

利用伊春和兴隆台站全天空气辉成像仪，Swarm 卫星及佳木斯高频雷达等仪器的观测数据对 2018 年 10 月 17 日夜间的 MSTID 事件的演化过程及传播特征进行了详细分析。研究结果显示，该 MSTID 事件在气辉观测中持续时间超过 4 h（12:02－16:23 UT），其波长范围为 176.3～322.5 km，波速范围为 67.0～154.1 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$。研究发现，此次 MSTID 事件应该产生于较高纬区域，自东北向西南往中纬区域传播。在传播过程中，MSTID 结构依次被伊春、兴隆台站的气辉成像仪所观测。该研究结果加深了对中纬区域 MSTID 传播特征的认知，丰富了对中国中纬区域电离层不规则体的研究。

参考文献

[1] HUNSUCKER R D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, **20**(2): 293-315

[2] CANDIDO C M N, PIMENTA A A, BITTENCOURT J A, *et al*. Statistical analysis of the occurrence of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Brazilian low latitudes using oi 630.0 nm emission all-sky images[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(17): L17105

[3] WAN Weixing, XU Jiyao. Recent investigation on the coupling between the ionosphere and upper atmosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **44**(9): 1863-1883 (万卫星, 徐寄遥. 中国高层大气与电离层耦合研究进展[J]. 中国科学:地球科学, 2014, **44**(9): 1863-1883)

[4] XU J Y, LI Q Z, SUN L C, *et al*. The ground-based airglow imager network in China[M]//Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. Hoboken: American Geophysical Union, 2021

[5] KOTAKE N, OTSUKA Y, TSUGAWA T, *et al*. Climatological study of GPS total electron content variations caused by medium-scale traveling ionospheric disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A4): A04306

[6] KUTIEV I, MARINOV P, FIDANOVA S, *et al*. Modeling medium-scale TEC structures, observed by Belgian GPS receivers network[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **43**(11): 1732-1739

[7] XIAO S G, XIAO Z, SHI J K, *et al*. Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A1): A01303

[8] PARK J, LÜHR H, MIN K W, *et al*. Plasma density undulations in the nighttime mid-latitude F-region as observed by CHAMP, KOMPSAT-1, and DMSP F15[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, **72**(2/3): 183-192

[9] KATAMZI Z T, SMITH N D, MITCHELL C N, *et al*. Statistical analysis of travelling ionospheric disturbances using TEC observations from geostationary satellites[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, **74**: 64-80

[10] NARAYANAN V L, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al*. Airglow observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from Yonaguni: statistical characteristics and low-latitude limit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(11): 9268-9282

[11] MENDILLO M, BAUMGARDNER J, NOTTINGHAM D, *et al*. Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300-Å images from the Arecibo observatory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A4): 7331-7343

[12] KUBOTA M, SHIOKAWA K, EJIRI M K, *et al*. Traveling ionospheric disturbances observed in the OI 630-nm nightglow images over Japan by using a multipoint imager network during the FRONT campaign[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(24): 4037-4040

[13] GARCIA F J, KELLEY M C, MAKELA J J, *et al*. Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at midlatitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A8): 18407-18415

[14] KELLEY M C, GARCIA F, MAKELA J, *et al.* Highly structured tropical airglow and TEC signatures during strong geomagnetic activity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(4): 465-468

[15] SHIOKAWA K. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A1): 1052

[16] OTSUKA Y. Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(15): L15803

[17] OGAWA T, NISHITANI N, OTSUKA Y, *et al.* Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the superDARN Hokkaido radar, all-sky imager, and GPS network and their relation to concurrent sporadic *E* irregularities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A3): A03316

[18] DING F, WAN W X, XU G R, *et al.* Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A9): A09327

[19] SONG Qian, DING Feng, WAN Weixing, *et al.* Monitoring nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network over North America[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, **54**(4): 935-941 (宋茜, 丁锋, 万卫星, 等. 北美地区夜间中尺度电离层行进式扰动的GPS台网监测研究[J]. 地球物理学报, 2011, **54**(4): 935-941)

[20] SUN L C, XU J Y, WANG W B, *et al.* Mesoscale field-aligned irregularity structures (FAIs) of airglow associated with medium- scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(11): 9839-9858

[21] XIE H Y, LI G Z, ZHAO X K, *et al.* Coupling between *E* region quasi-periodic echoes and *F* region medium-scale traveling ionospheric disturbances at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(5): e2019JA027720

[22] WU K, XU J Y, WANG W B, *et al.* Interaction of oppositely traveling medium-scale traveling ionospheric disturbances observed in low latitudes during geomagnetically quiet nighttime[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): e2020JA028723

[23] LUO J, XU J Y, WU K, *et al.* The influence of ionospheric neutral wind variations on the morphology and propagation of medium scale traveling ionospheric disturbances on 8th August 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(6): e2020JA029037

[24] ZHANG J J, WANG W, WANG C, *et al.* First observation of ionospheric convection from the Jiamusi HF radar during a strong geomagnetic storm[J]. *Earth and Space Science*, 2020, **7**(1): e2019EA000911

[25] 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

[26] EMMA C B, ANDREW J M, SEBASTIEN D L, *et al.* Determination of ionospheric parameters in real time using SuperDARN HF Radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(7): 5830-5846

[27] HALDOUPIS C, FARLEY D T, SCHLEGEL K. Type-1 echoes from the mid-latitude *E*-Region ionosphere[J]. *Annales Geophysicae*, 1997, **15**(7): 908-917

[28] TSUNODA R T, COSGROVE R B. Coupled electrodynamics in the nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(22): 4171-4174

[29] YOKOYAMA T, HYSELL D L, OTSUKA Y, *et al.* Three-dimensional simulation of the coupled Perkins and E_s-layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A3): A03308