

2024 年 5 月特大地磁暴期间子午工程中国地区数字测高仪探测回波消失现象分析

袁天娇^{1,2} 陈艳红¹ 龚建村^{2,3} 罗冰显^{1,2} 刘四清¹

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 200120)

摘要 地球电离层在无线电波的传输、反射和散射中起着关键作用，直接影响通信、导航和定位系统。本文利用中国子午工程（CMP）数字测高仪和相控阵非相干散射雷达观测数据，分析了 2024 年 5 月 10-12 日特大地磁暴期间测高仪短波信号回波消失现象及其物理机制。分析结果表明，2024 年 5 月 10-11 日 X3.9 和 X5.8 级耀斑引起中国地区短波吸收，持续时间较短，造成 MOHE、YUZH 等部分台站测高仪信号短波中断，频高图回波消失；磁暴主相和恢复相期间，强电离层负暴使电子密度下降，电离层 F 层临界频率下降、峰值高度抬升，导致较长时间内频高图回波残缺或回波消失，自动标定结果失真、缺失。子午工程三亚非相干散射雷达观测显示 5 月 10-11 日发生多次反转的穿透电场和扰动发电机电场共同引发的低纬地区电离层垂直漂移与 11-12 日的强负暴，与测高仪频高图的暴时表现一致。这些结果说明数字测高仪频高图在暴时长时间回波消失的原因是强电离层负暴和电离层垂直抬升共同引起的短波中断，促进了电离层暴对数字测高仪观测影响的理解，为改进空间天气扰动情况下测高仪观测数据质量控制、短波中断预警和参数自动标定方法提供了先验知识支持。

关键词 数字测高仪，子午工程，短波通信中断，空间天气

中图分类号 电离层物理 P352

Investigation of the Backscatter Echo Failures of CMP Digisondes during the Geomagnetic Superstorm in May 2024

YUAN Tianjiao^{1,2} CHEN Yanhong¹ GONG Jiancun^{2,3} LUO Bingxian^{1,2} LIU Siqing¹

* 基金项目：国家重点研发计划课题（2024YFC2206902）和子午工程数据治理能力提升与数智驱动的电波环境应用项目联合资助

投稿日期：2026-03-11

E-mail: yuantianjiao@nssc.ac.cn

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

2 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100149)

3 (Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 100149)

Abstract The ionosphere plays a critical role in radio wave transmission, reflection, and scattering affecting communication, navigation and positioning systems directly. This study analyzes the disappearance of short-wave echoes during the extreme geomagnetic storm on 10-12 May 2024 using observations of digisondes and incoherent scatter radar(ISR) of the Chinese Meridian Project (CMP). The results show that the short-wave absorption over Chinese regions caused by X3.9 and X5.8 solar flares on 10-11 May 2024 lasted for a short time, with interruptions of digisonde short-wave signals at some stations such as MOHE and YUZH stations were interrupted. During the main and recovery phases of the geomagnetic storm, the strong ionospheric negative storm reduced electron density, decreased the critical frequency of the ionospheric F-layer, and raised its peak height, resulting in incomplete or vanished ionogram echoes over a long period, as well as distorted or missing automatic calibration results. Observations from the Sanya ISR of CMP reveal vertical ionospheric drifts at low latitudes on 10-11 May and a strong negative storm on 11-12 May driven by prompt penetration electric fields(PPEF) and disturbance dynamo electric fields (DDEFs), which are consistent with the storm-time ionograms. In conclusion, the long-duration disappearance of backscatter echoes in ionograms during geomagnetic superstorm is caused by short-wave interruption induced by the strong ionospheric negative storm and vertical uplift of the ionosphere. This study improves the understanding of ionospheric storm effects on digital ionosonde observations and provide a critical priori knowledge for improving the quality control of ionosonde observational data and automatic feature extraction during space weather disturbances.

Key words Digisonde, Chinese Meridian Project, Short-Wave Outage, Space Weather

0 引言

电离层作为地球大气层中距地表约 60~2000 km 高度的部分电离区域，是无线电传播的重要媒介，尤其在短波通信、卫星导航、超视距雷达等领域具有不可替代的作用。电离层受太阳辐射调节，并与地球磁层和中性大气层互相耦合，因此电离层参数不仅呈现明显的周日、季节性周期变化，同时受太阳爆发活动、地磁场扰动等空间天气的短期影响，太阳耀斑是造成电离层短波衰减（Short-Wave Fade, SWF）、短波通信中断（Short-Wave Outage, SWO）的主要原因，而特大地磁暴作为空间天气极端事件，可导致电离层结构剧烈畸变，引发导航误差骤增、卫星信号闪烁等严重技术灾害^[1, 2]。近年来，随着人类对空间技术依赖的加深，磁暴期间电离层扰动机制及其对无线电系统的影响已成为空间物理与应用研究的重要议题

之一。

东半球空间环境地基综合监测子午链，简称子午工程（Meridian Monitoring Project, CMP），是我国分两期建设的国家重大科技基础设施^[3, 4]。子午工程已部署包括相控阵非相干散射雷达、高频相干散射雷达、激光雷达及新一代数字测高仪（如 CAS-DIS 型、DPS-4D 型）在内的多平台探测阵列^[5-8]。数字测高仪作为现代电离层探测的核心装备，通过垂直发射频率可调的无线电脉冲，接收电离层反射的回波信号，生成频高图（Ionogram），实现对电离层电子浓度剖面、临界频率（foF2）、峰值高度（hmF2）等关键参数的高精度反演^[9, 10]。然而，在强磁暴期间，频高图常出现回波模糊、异常扩散或大面积回波消失现象。这一现象不仅反映了电离层暴的极端扰动状态，更是理解磁层-电离层耦合和能量注入过程的关键窗口。地磁暴发生时，扰动的太阳风能量通过磁重联、焦耳加热等过程进入地球极区，形成或增强向赤道的热层扰动环流，并将极区受热膨胀的大气中性成分向低纬地区输送^[11, 12]，同时行星际太阳风电场快速穿透到低纬地区，改变电离层带电粒子垂直漂移及沿着磁力线的扩散运动^[13-15]。极区中性大气向低纬方向的扩散与赤道等离子体垂直漂移和电离层沿/跨磁力线的抬升或降低运动，都会改变局地电离层复合过程和扩散平衡，使得电离层电子密度、foF2、hmF2 等参量显著地正向/负向偏离平静期背景值，即发生电离层正暴/负暴^[16-21]。尤其在中纬度地区，这些电离层电离/损耗/扩散的物理化学和电动力学机制相互耦合，使得中纬度电离层的暴时响应复杂，可预测性较低。

电离层数字测高仪观测台站全球分布广泛、积累的历史观测数据丰富，其频高图回波分类、参数标定结果是电离层天地基联合探测和研究、数据融合和同化等研究领域的重要基础之一^[22]。国内外技术团队利用全球测高仪网络对各大磁暴期间测高仪频高图和电离层参量的精细化时空演化、区域特性及多尺度耦合机制开展了大量分析研究，并且持续优化测高仪探测技术，发展新的频高图度量方法^[10, 23-27]。子午工程数字测高仪在中国大陆的布局自漠河至三亚覆盖中低纬，具有高时间分辨率（2 - 15 min）、宽频段覆盖（1 - 30 MHz）及高灵敏度接收能力^[28]，可以监测电离层参数（临界频率、电离层虚高、峰值电子密度和每层峰值高度等），反演峰值高度以下的电子密度高度分布，能够捕获磁暴期间电离层结构变化、适用于研究磁暴期间中国区域电离层的经度链响应，为揭示东亚电离层暴响应特征提供了独特视角。

为提升对电离层暴期间的物理演化机制的理解，满足测高仪频高图分类、数据标定、电离层多源数据融合等研究应用的需求，本文基于子午工程数字测高仪设备网络，分析在 2024 年母亲节事件（5 月 10-11 日）大太阳耀斑事件和特大地磁暴事件的影响下数字测高仪探测数据的变化，并结合 ACE 卫星行星际太阳风磁场观测数据、子午工程三亚相控阵非相干散射雷达在事件期间的探测数据，讨论事件期间测高仪探测结果的演化原因和过程。下文将分别详细介绍所用的数据、特大地磁暴事件、分析测高仪回波和自动标定参数长时间缺失的原因，最后是总结与展望。

1 数据简介

子午工程一期于 2008 年开工建设，沿东经 120°、北纬 30° 布局 15 个综合性监测台站，主要覆盖我国东部地区，2012 年 10 月通过国家验收。子午工程二期于 2019 年开工建设，

在一期基础上新增 16 个台站，形成由 31 个台站、近 300 台（套）监测设备组成的沿东经 100° /120°、北纬 40° /30° 覆盖我国区域和南北极区的“井”字形地基监测网络,对太阳表面、行星际、磁层、电离层、中高层大气等多个圈层开展综合性的空间环境连续监测，2025 年 3 月通过国家验收。子午工程建设了数字测高仪、甚高频雷达、非相干散射雷达、电离层 TEC 及闪烁监测仪、电离层高频多普勒频移监测仪等电离层探测设备，其中中国区域共部署了 13 台数字测高仪（图 1），分布自漠河至海南，覆盖中低纬，经度横跨东经 76.8° 至东经 122.5°。SAYA 站相控阵非相干散射雷达（SYISR）是子午工程二期的关键设施之一，提供了事件期间的高分辨率电子密度和离子漂移速度数据^[29-32]。我们使用的数字测高仪自动标定 SAO 数据、频高图和 SYISR 数据来源于子午工程数据网站（<https://www.meridianproject.ac.cn/>），数据台站位置如表 1。

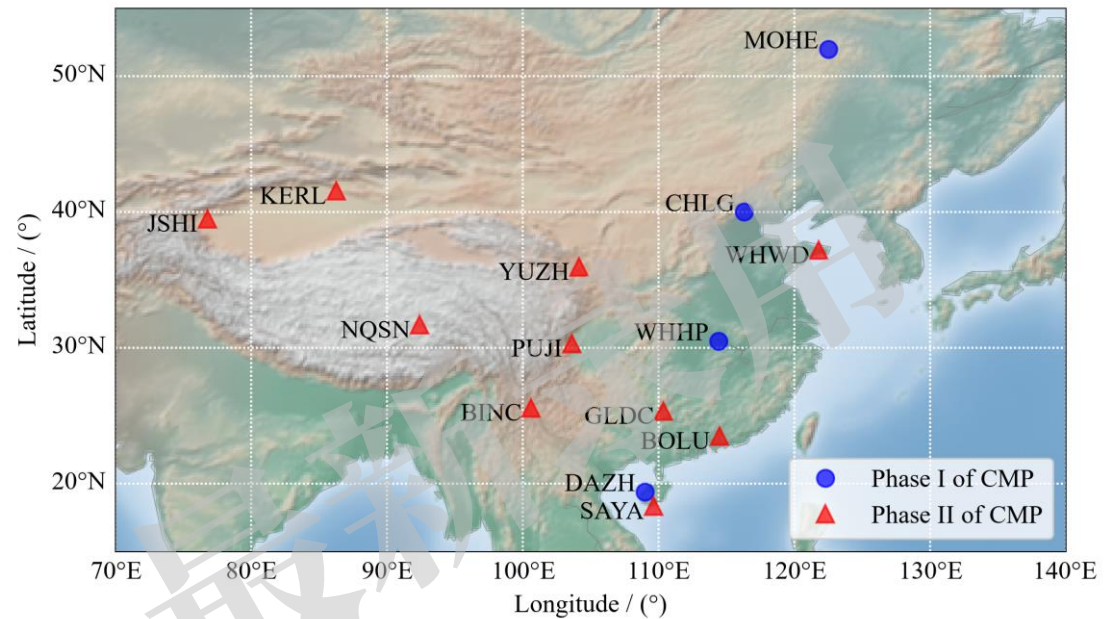


图 1 子午工程 I 期和 2 期电离层数字测高仪和 SAYA 相控阵非相干散射雷达台站分布

Fig.1 Digisondes and ISR(SAYA) of phase I and phase II of CMP

GOES 系列卫星观测的 1 分钟分辨率 0.1-0.8 nm 的 X 射线流量数据由美国国家海洋和大气管理局国家地球物理数据中心提供(<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes-r.html>)，ACE 卫星太阳风速度、行星际磁场和 Dst 指数从 OMNI 平台获取 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>)。

表 1 数字测高仪和三亚非相干散射雷达经纬度位置

Table 1 Position of digisondes and SYISR

设备类型	子午工程 台站编号	URSI 台站 ID	地理经度 (°E)	地理纬度 (°N)
数字测高仪 I	MOHE	MH453	122.5	52.0
数字测高仪 II	CHLG	BP440	116.3	40
数字测高仪 II	JSHI	JS439	76.8	39.5
数字测高仪 II	WHWD	WH437	121.8	37.2
数字测高仪 II	YUZH	YZ435	104.1	36.0

数字测高仪 II	NQSN	NQ431	92.4	31.7
数字测高仪 I	WHHP	WU430	114.4	30.5
数字测高仪 II	PUJI	PJ430	103.6	30.3
数字测高仪 II	BINC	BC425	110.6	25.6
数字测高仪 II	GLDC	GL425	110.4	25.4
数字测高仪 II	BOLU	BL423	114.5	23.5
数字测高仪 I	DAZH	HA419	109.0	19.4
非相干散射雷达 II	SAYA	-	109.6	18.4

2 特大地磁暴事件背景和子午测高仪观测结果

2024 年 5 月上旬，太阳频繁爆发 X 级 X 射线大耀斑（表 2），并伴随有多次日冕物质抛射（Coronal Mass Ejection, CME），太阳 F10.7 指数从 5 月 1 日的 135 sfu（太阳流量单位， $1\text{ sfu} = 10^{-22}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ）上升至 5 月 9 日的 233 sfu，并在 5 月 10-12 日期间保持在 214 sfu 以上，太阳活动达到了高水平（F10.7>200sfu）。太阳活动区 AR3664 在 5 月 8-9 日的可见日面位置为 S20° W15° /S19° W31°（太阳活动区参数来自 SWPC/SRS 产品），靠近可见日面中心区域，其喷发的高速 CMEs 在行星际中沿着径向传播，几乎正对地球，有显著的对地有效性。5 月 10-11 日，多个 CMEs 抵达地球，引起地磁强烈扰动。图 2a 为 ACE 卫星探测 L1 点行星际太阳风磁场南向分量强度 Bz 和总磁场强度 Bt，2024 年 5 月 10 日 16:36UTC，ACE 卫星观测到第一波激波到达（蓝色竖虚线），Bz 在 5 月 10 日 22:00 UT 达到最小值-50 nT。这些不同 CME 驱动的行星际激波共同引起强烈的地磁扰动，图 2b 中地磁 Dst 指数剧烈下降。5 月 11 日 03:00UTC，地磁 Dst 指数降至-412nT，是 2003 年万圣节事件以来，太阳风暴引起的最强地磁活动。图 2b 左 y 轴为 X 射线流量，2024 年 5 月 10 日 06:54UTC 和 11 日 01:23UTC 分别发生 X3.9 级和 X5.8 级 X 射线大耀斑（红色竖虚线）。

表 2 2024 年 5 月 3-11 日大太阳 X 射线耀斑列表（世界时）

Table 2 Strong X-ray flares over 3-11 May, 2024 (UTC)					
日期	开始时间	峰值时间	结束时间	级别	太阳活动区
05 月 03 日	02:14	02:22	02:26	X1.6	AR3663
05 月 05 日	05:29	06:01	06:06	X1.3	AR3663
05 月 05 日	11:41	11:54	12:15	X1.2	AR3663
05 月 06 日	05:13	06:35	06:46	X4.5	AR3663
05 月 08 日	01:35	01:41	01:46	X1.0	AR3663
05 月 08 日	04:24	05:09	05:36	X1.0	AR3664
05 月 08 日	21:01	21:40	22:05	X1.0	AR3664
05 月 09 日	08:33	09:13	09:36	X2.2	AR3664
05 月 09 日	17:27	17:44	17:59	X1.1	AR3664
05 月 10 日	06:17	06:54	07:05	X3.9	AR3664
05 月 11 日	01:10	01:23	01:38	X5.8	AR3664
05 月 11 日	11:25	11:44	12:03	X1.5	AR3664

图 2c-图 2l 分别是 MOHE、JSHI、WHWD、YUZH、NQRN、WHHP、PUJI、BINC、GLDC、BOLU 台站数字测高仪自动标定的 f_oF_2 (左 y 轴) 和 h_mF_2 (右 y 轴) 参量。5 月 10 日 X3.9 级大耀斑期间 (图 2 左起第一条红色竖虚线), 图 2c-图 2l 中, WHWD 和 WHHP 台站 f_oF_2/h_mF_2 自动标定值偏低, MOHE、JSHI、YUZH、NQRN、PUJI、BINC、GLDC 台站 f_oF_2/h_mF_2 自动标定值缺失 (BOLU 站缺少该时段探测结果, 暂不讨论)。5 月 10 日 17:00UTC 磁暴急始至 5 月 11 日 3:00UTC 磁暴主相期间, 图 2a 行星际磁场 B_z 分量 (粉色实线) 在南北向之间多次反转, Dst 指数持续下降, MOHE 站 f_oF_2 骤降, h_mF_2 上下震荡, 随后其余各台站 f_oF_2 开始下降, WHHP 和 BOLU 台站的 f_oF_2 自动标定值下降过程较完整, 其余台站的数据部分缺失, WHHP 台站的 h_mF_2 自动标定值有明显的上升, MOHE、JSHI、WHWD、NQRN 等台站的部分 f_mF_2 也在主相期间分别抬升和下降。5 月 11 日 X5.8 级 X 射线大耀斑期间 (图 2 左起第二条红色竖虚线), WHWD、NQRN、WHHP、PUJI、BINC、GLDC、BOLU 台站的 f_oF_2/h_mF_2 自动标定值均出现中断, 与此同时, 磁暴进入恢复相, WHWD、PUJI、BINC、GLDC、BOLU 台站的标定值多次中断, MOHE、JSHI、YUZH、NQRN 台站有较长时间缺失标定值。

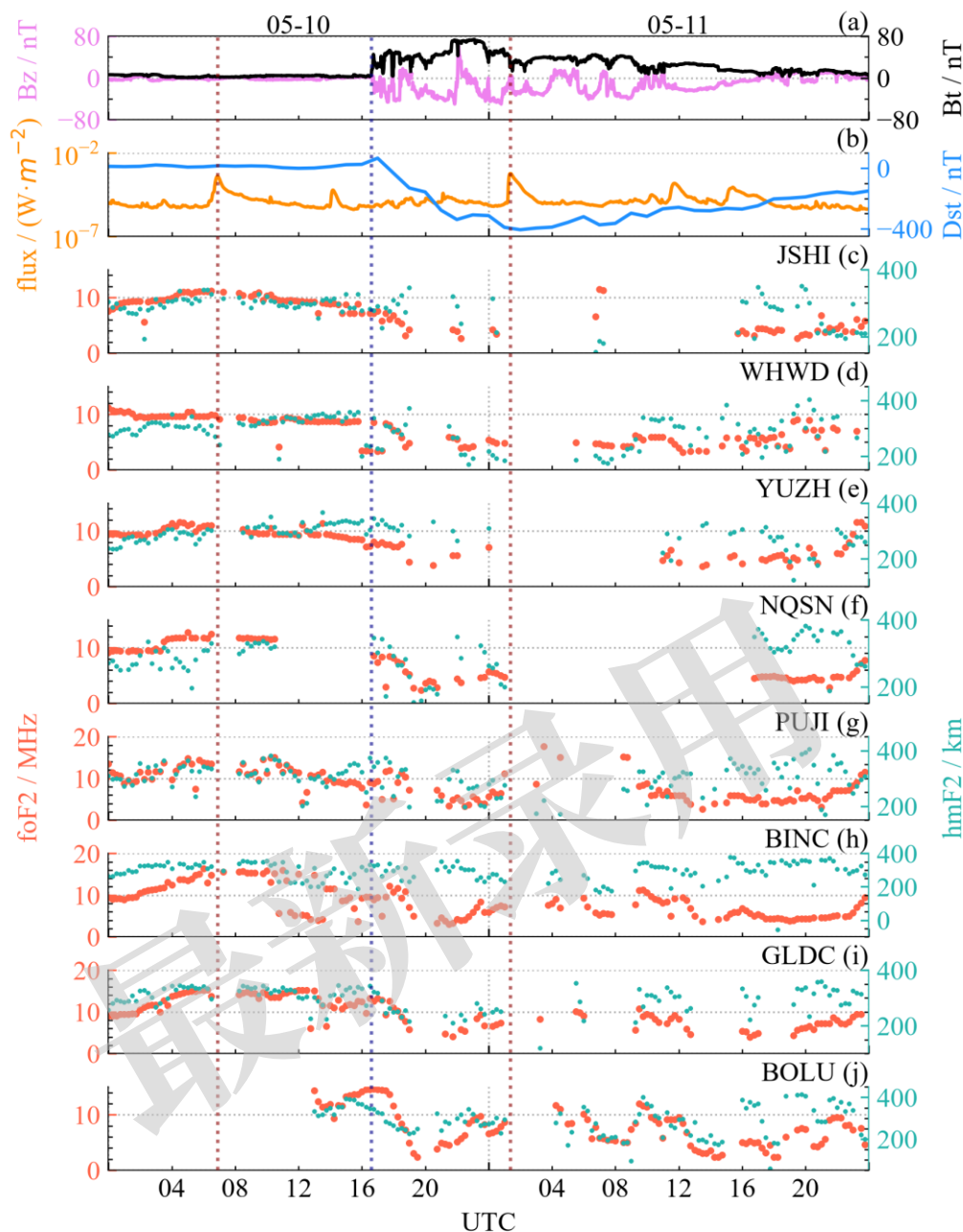


图2 (a) ACE 卫星行星际磁场南向分量 B_z (左) 和总磁场 B_t (右) ; (b) GOES 卫星 x 射线流量 (左) 和地磁 Dst 指数 (右) ; (c) - (j) 子午工程数字测高仪 (高纬-低纬) F2 层临界频率 (左) 和 F2 层峰值高度

Fig.2 (a) ACE IMF B_z (left) and B_t (right), (b) GOES x-ray flux(left) and Dst index(right), (c)-(j) Digisonde foF_2 (left) and hmF_2 (right) of CMP stations from high latitude to low latitude

3 测高仪回波消失现象分析与讨论

发生耀斑和地磁暴时, 电离层电子密度垂直结构的变化会影响电离层对电波的反射、吸收过程, 我们结合耀斑、地磁暴事件和三亚相控阵非相干散射雷达的观测结果, 分析讨论了本次事件子午工程测高仪频高图中部分或全部回波信号消失 (下文简称“回波消失”) 的过

程。

发生 M 级及以上级别 X 射线耀斑时,增强的太阳辐射能够显著提高地球向阳面低电离层的电离率, D 区电子密度上升, 对短波信号的吸收增强, 造成向阳面测高仪低频段短波信号被部分吸收, 导致频高图低频段的回波消失, 此时发生短波衰减, 测高仪可以接收到较高频段的回波, 短波通信也可以通过调高通信频率来保障通信质量。局地接收到的辐射通量受太阳天顶角 χ 影响, 与测高仪垂直发射的可被反射并接收到的最低信号频率 f_{min} (MHz) 之间存在经验关系^[33]:

$$f_{min} = 10 \cdot flux^{\frac{1}{4}} \cdot \cos \chi^{\frac{1}{2}}$$

其中, 太阳天顶角与地理纬度、太阳赤纬和地方时有关, $flux$ 是太阳耀斑的辐射通量 ($mWatts/m^2$)。天顶角越小, 接收到的辐射通量越大, f_{min} 越高, D 区吸收越强, 当 f_{min} 上升到超过 foF2, 短波信号将被完全吸收, 电离层垂测仪将无法接受到回波信号, 频高图中全频段的回波消失, 即发生短波中断, 调节电波频率也无法恢复通信, 而短波信号受影响的持续时间与耀斑的持续时间相当^[34]。

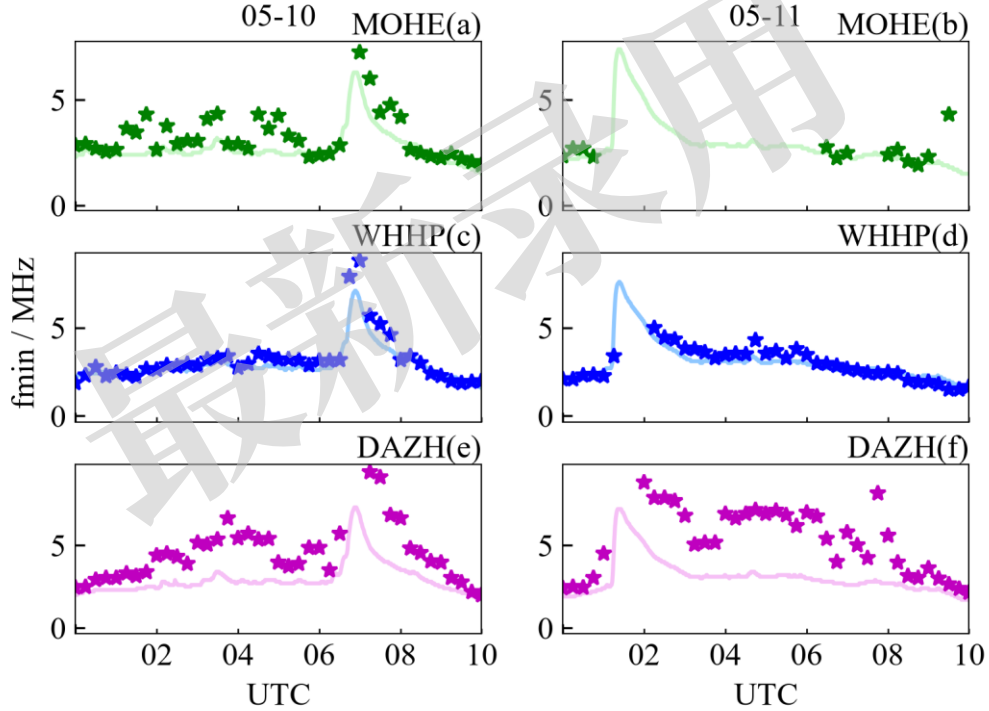


图 3 2024 年 5 月 10-11 日白天 (00:00-10:00UTC), 测高仪垂直探测最低频率 (*号) 和 X 射线流量经验计算最低可用频率 (线), (a-b) MOHE 站; (c-d) WHHP 站; (e-f) DAZH

Fig.3 Minimum frequency detected by digisondes(*) and calculated with X-ray flus(solid lines) during daytime(00:00-10:00 UTC) on May 10-11, 2024 of MOHE(a, b), WHHP(c, d) and DAZH stations(e, f)

将 GOES 卫星 X 射线流量代入上式, 计算 MOHE、WHHP、DAZH 三站位置在 2024 年 5 月 10-11 日白天 (0-10UTC/8-18BJT) 的 f_{min} , 与人工标定的测高仪频高图最低回波频率对比 (图 3)。图 3 中线条为 X 射线流量计算得到的 f_{min} , 与图 2b 中 X 射线流量的变化趋势基本一致, 无耀斑事件时白天 f_{min} 约为 2~3MHz。图 3 中星号为测高仪垂直探测最低频率, 无耀斑事件时, 中高纬的 MOHE 和 WHHP 站白天约在 2~5MHz 之间, 低纬 DAZH 站约在 2~7MHz 之间。发生 X3.9

和 X5.8 级 X 射线耀斑时，三站测高仪均发生了短时的回波中断，测高仪最低回波频率显著上升。中纬度的 WHHP 站测高仪最低频率的日变化与计算 f_{min} 更加一致（图 3c, d），对 11 日地磁扰动响应不明显，高纬 MOHE 站测高仪受地磁扰动影响最大，在 5 月 11 日白天强地磁暴恢复相期间没有回波信号，发生了长时段的短波中断（图 3b），低纬 DAZH 站 5 月 10 日白天测高仪最低频率相比 X 射线流量计算 f_{min} 更高，这是由于低纬地区太阳直射强烈，D 层吸收更强。5 月 11 日，地磁扰动增强了背景噪声，白天 DAZH 站的最低回波频率进一步上升。由图 3 可知，测高仪最低信号频率和 X 射线流量的经验关系最符合中纬度地区的 f_{min} 计算。

2024 年 5 月 10 日 X3.9 级大耀斑从 06:17UTC 开始，持续到 07:05UTC，期间中国区域处于白天（北京时 14:17-15:05），MOHE、JSHI、WHWD、YUZH、NQSN、WHHP、PUJI、BINC、GLDC、DAZH 台站频高图均出现短波吸收现象，其中 MOHE、YUZH、GLDC、DAZH 站出现频高图回波信号完全消失，发生了短波中断。图 4a 为 5 月 10 日 YUZH 站频高图，06:30UTC 低高度寻常波回波被部分吸收，F 层回波结构基本完整，测高仪自动标定结果准确，06:45UTC 回波完全消失，07:00UTC 仅有无效的零星回波信号；07:15UTC，各站频高图均从 F 层开始恢复，其中 YUZH 站低电离层恢复最慢，10:00UTC 恢复 E 层回波；JSHI 站在 09:45UTC 才恢复 E 层回波，其余台站分别在 07:30UTC、07:30UTC、08:00UTC、08:15UTC、09:30UTC 恢复 E 层回波。

2024 年 5 月 10 日，磁暴发生后，MOHE 台站频高图从 18:00UTC 开始回波信号频率快速下降，同时信号反射高度抬升，19:45-20:45UTC 回波信号基本消失，仅 3MHz 以下出现零星寻常波回波信号（图 4b），且信号反射高度逐渐回落，从 22:00UTC 开始回波信号再次消失。5 月 11 日 8:45、11:15、12:00-14:15UTC 低层在 2-3MHz 附近出现部分回波，17:15、18:45UTC 高层开始间断恢复部分 2-3MHz 左右的回波信号，且反射高度逐渐下降，出现 E 层和偶发 E 层（Sporadic E layer，简称 Es 层）回波。5 月 12 日 00:45-09:30UTC 回波信号再次完全消失，随后频高图中高层开始有 F 层回波信号恢复，最大频率在 4-6MHz 之间震荡。由于短时恢复的回波信号维持在较低频率，且回波消失期间仅在 11 日 01:10-01:38、12 日 00:41-00:52UTC 和 05:37-06:06UTC 爆发了 X5.8 级、M3.2 级和 M2.4 级 X 射线耀斑，说明 MOHE 站数次长时段的回波消失原因不是太阳耀斑，而是电离层负暴引起的电子密度下降至临界频率低于电离层数字测高仪 f_{min} ，导致短波信号无法被电离层反射，发生短波中断，此时回波信号完全消失。

5 月 10 日 18:00-19:15UTC，JSHI 站最大回波频率从 6.75MHz 迅速下降至 4MHz 左右，18:45UTC 开始 F 层回波反射高度抬升并反复震荡。5 月 11 日 01:00UTC，foF2 下降至 3.5MHz，foE 约为 3MHz，随后 F 层回波消失。01:30-02:00UTC 期间，E 层回波也消失了，原因应为 X5.8 级大耀斑引起的 D 区增强对短波信号的吸收。02:15UTC 开始恢复 E/Es 层回波，02:45-04:15UTC，在 Es 层回波信号上方存在部分 F 层回波，然后消失，此时 foEs 约 4-4.6MHz，说明此时 F 层电子密度已下降，F 层完全被 Es 层遮蔽。5 月 11 日 08:15-15:15UTC，回波信号完全消失，15:30UTC 频高图中开始出现 E 层回波和从高层、低频区域恢复的 F 层回波（图 4c），进一步证明了此前回波信号的消失是强烈的负暴效应引起的。

其余台站频高图探测回波频率均从 5 月 10 日 18:00UTC 开始下降，19:00UTC，WHWD、YUZH、NQSN、WHHP 台站的回波信号反射高度开始抬升，19:15UTC，PUJI、BINC、BOLU、DAZH 台站的回波信号高度开始抬升，GLDC 站回波信号消失。

5 月 10 日 21:30UTC 开始，WHWD 站 F2 层回波高度回落，但是最大回波信号频率再次下

降,几乎被 Es 层遮蔽,foEs 为 4-5MHz。受 X5.8 级大耀斑影响,5 月 11 日 01:15-02:15UTC,频高图回波信号完全消失。02:30UTC 开始,低频段出现零散回波点迹,4:15-10:00UTC,有较清晰的回波信号从频高图上边缘落下,几经震荡后恢复了 E 层、F1 层和 F2 层回波结构(图 4d),无自动标定结果,期间临界频率约 6-7MHz,说明是此段回波消失是电离层强烈的抬升过程叠加负暴效应导致。同时,暴时频高图回波形态偏离平静期的电离层结构,使得频高图自动标定失效,导致图 2c 中 5 月 10 日 19:00-21:15UTC 时段 foF2 数据缺失。

5 月 10 日 22:15UTC 开始,YUZH 站频高图仅有零散的回波信号,各层回波形态不完整,无法判断自动标定。5 月 11 日 01:15UTC 频高图回波信号完全消失,持续至 08:45-13:15UTC,有部分回波信号从频高图上边缘落下,临界频率从 7MHz 下降至 4MHz 左右,且回波形态不完整,多次发生强 Es 层遮蔽信号,无自动标定参数结果。因此,太阳耀斑、电离层负暴和强烈的抬升过程共同导致了 5 月 10-11 日 WHWD 站频高图回波信号完全消失。

5 月 11 日 01:15UTC,NQSN 站频高图回波信号完全消失,X5.8 级耀斑结束后,02:00UTC 仅恢复部分 Es 层回波,无自动标定结果。03:15UTC,Es 层上方出现部分 F 层回波,05:45-08:00UTC 回波完全消失,08:15UTC 底层 3-4.5MHz 出现 E 层和 Es 层回波,高空约 5.5-6MHz 出现 F 层回波。直至 16:45,5MHz 左侧才恢复形态完整的、仍在震荡的 F 层回波信号。说明磁暴发生后 NQSN 站长时段的参数缺失也是电离层电子密度负相降低、F2 层峰高抬升、回波形态偏离平静日引起的。

WHHP、PUJI、BINC、GLDC 台站与 YUZH 站相似,5 月 11 日因 X5.8 级耀斑造成的短波消失后,频高图回波没有立刻恢复。03:00UTC,WHHP 和 BINC 站频高图中从高层开始出现部分 F2 层回波信号且反射高度逐渐降低、震荡,PUJI 站出现强 Es 层;GLDC、BOLU、DAZH 站回波信号恢复后,回波信号仍反复震荡、回波形态不完整,5 月 11 日 09:30UTC,DAZH 站回波信号的高度和回波频率开始震荡,12:15UTC 频率快速下降、回波短暂消失,随后 fof2 维持在 5MHz 以下。20:30-22:00UTC,DAZH 站发生扩展 F 现象,随后至 5 月 12 日,F2 层回波再次左移,接近 foEs,02:30-04:15UTC 回波完全消失(图 4e)。因此,除了回波完全消失以外,频高图 Es 层遮蔽、扩展 F 和暴时回波形态变形、分层不清晰等原因,造成各台站时常无法自动标定频高图参数。

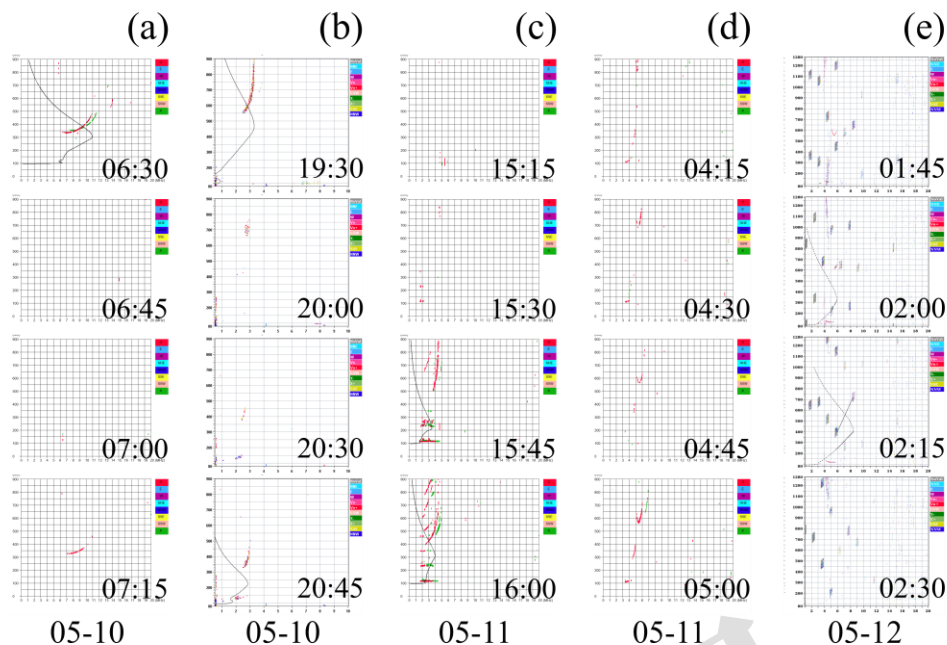


图 4 2024 年 5 月 10-12 日，子午工程部分台站的数字测高仪频高图，（a）2024-05-10，YUZH 站频高图回波部分吸收和全部吸收；（b）2024-05-10，MOHE 站低频段回波；（c）2024-05-11，JSHI 站频高图回波信号从低频、高空开始恢复；（d）2024-05-11，WHWD 站低频段回波；（e）2024-05-12，DAZH 站回波被 Es 层遮蔽至消失

Fig.4 Ionograms of CMP digisondes on May 10-12, 2024 while echoes disappeared due to X3.9 flare(a), observed in low-frequency areas(b, e) and recovered from low-frequency or high-altitude areas(c, d)

图 5 统计了在 2024 年 5 月 10-12 日 X 级耀斑和地磁暴期间（图 5a），子午工程测高仪频高图回波发生短波衰减和短波中断的时段（图 5b）。图 5b 中各测高仪回波中断结果从上至下按纬度降低排列，在 5 月 10 日 X3.9 级大耀斑期间，除 BOLU 站缺少频高图数据，所有台站都因部分吸收发生了短波衰减（粉色），纬度偏低的 GLDC 站、DAZH 站和位置偏西、天顶角更高的 YUZH 站由于完全吸收发生了短波中断（红色）。在 Dst 下降的地磁暴主相期间，纬度更高的 MOHE 站、CHLG 站响应最快，最高频率随着电离层负暴下降导致短波衰减甚至中断，高纬度台站测高仪短波中断的持续时间比低纬度台站更长。

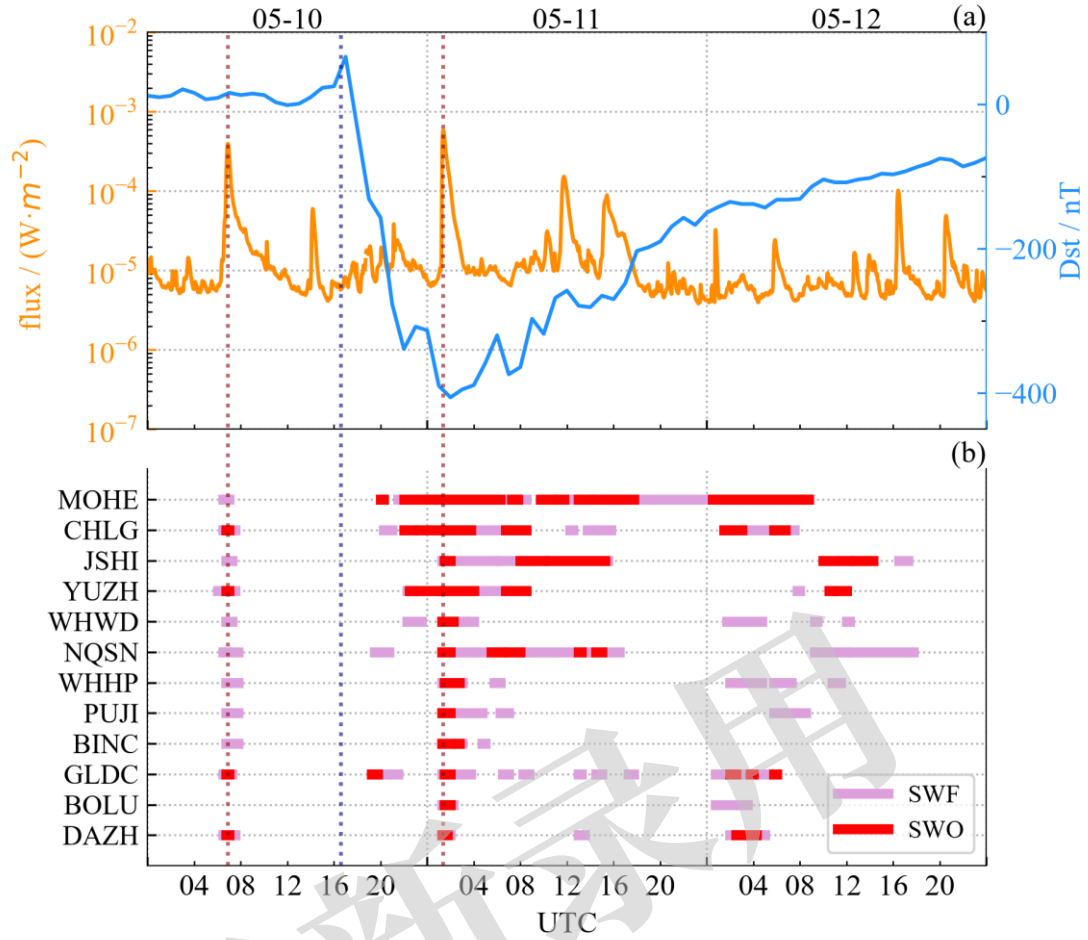


图 5 2024 年 5 月 10-12 日，子午工程数字测高仪回波发生短波衰减（SWF）和短波中断（SWO），（a）GOES 卫星 x 射线流量（左）和地磁 Dst 指数（右）；（b）子午工程数字测高仪台站发生短波衰减（粉）和短波中断（红）的时间（从上向下：MOHE、CHLG、JSHI、YUZH、WHWD、NQSN、WHHP、PUJI、BINC、GLDC、BOLU 和 DAZH 站）

Fig.5 Short wave fade and short wave outage of CMP digisondes on May 10-12, 2024, (a) GOES x-ray flux (left) and Dst index (right), (b) Short wave fade (pink) and short wave outage (red) periods of CMP digisondes (from top to bottom: MOHE, CHLG, JSHI, YUZH, WHWD, NQSN, WHHP, PUJI, BINC, GLDC, BOLU and DAZH)

图 6 展示了 2024 年 5 月 10-12 日 SAYA 站 SYISR 探测的电子密度和等离子体速度分布。图 6a-g 是电子密度随不同雷达探测波束仰角由北至南的探测结果，图 6h 是天顶方向等离子体运动速度。可以看出磁暴发生后，SAYA 站所在经度的电离层层峰高均明显降低，11-12 日发生了显著的电离层负暴，负暴电子密度在 5 月 11 日夜间下降了三个数量级，下降幅度达 99%。SAYA 站上方等离子体漂移速度向下，5 月 11 日垂直漂移方向多次反转，证明存在行星际磁场南北翻转引起的东向穿透电场和热层环流引起的西向扰动发电机电场。5 月 11-12 日南北向波束探测的电子密度整体低于 5 月 10 日，发生了电离层负暴，且 5 月 10 日白天电子密度和峰高与漂移速度同步震荡，漂移速度向下时，峰值高度下降，峰值密度上升，漂移速度翻转时，峰值高度上升，峰值密度下降，5 月 12 日的电子密度整体呈下降趋势，没有明显波动模式，离子漂移速度相较 11 日也有所下降，05:00-10:00UTC 期间出现垂直向下漂移，表明西向发展扰动电场可能是 5 月 12 日 SAYA 站电离层负暴的主要原因。

图6中5月10日18-19UTC电离层快速的向下漂移和19-20UTC向上漂移,与WHWD、YUZH、NQSN、WHHP、PUJI、BINC、BOLU、DAZH 等台站回波信号反射高度显著抬升的时间相符,5月11日漂移速度有所下降,但漂移方向也发生了多次翻转,与DAZH站的频高图回波变化相符,说明穿透电场引起了中低纬区域电离层的整层下降和抬升。

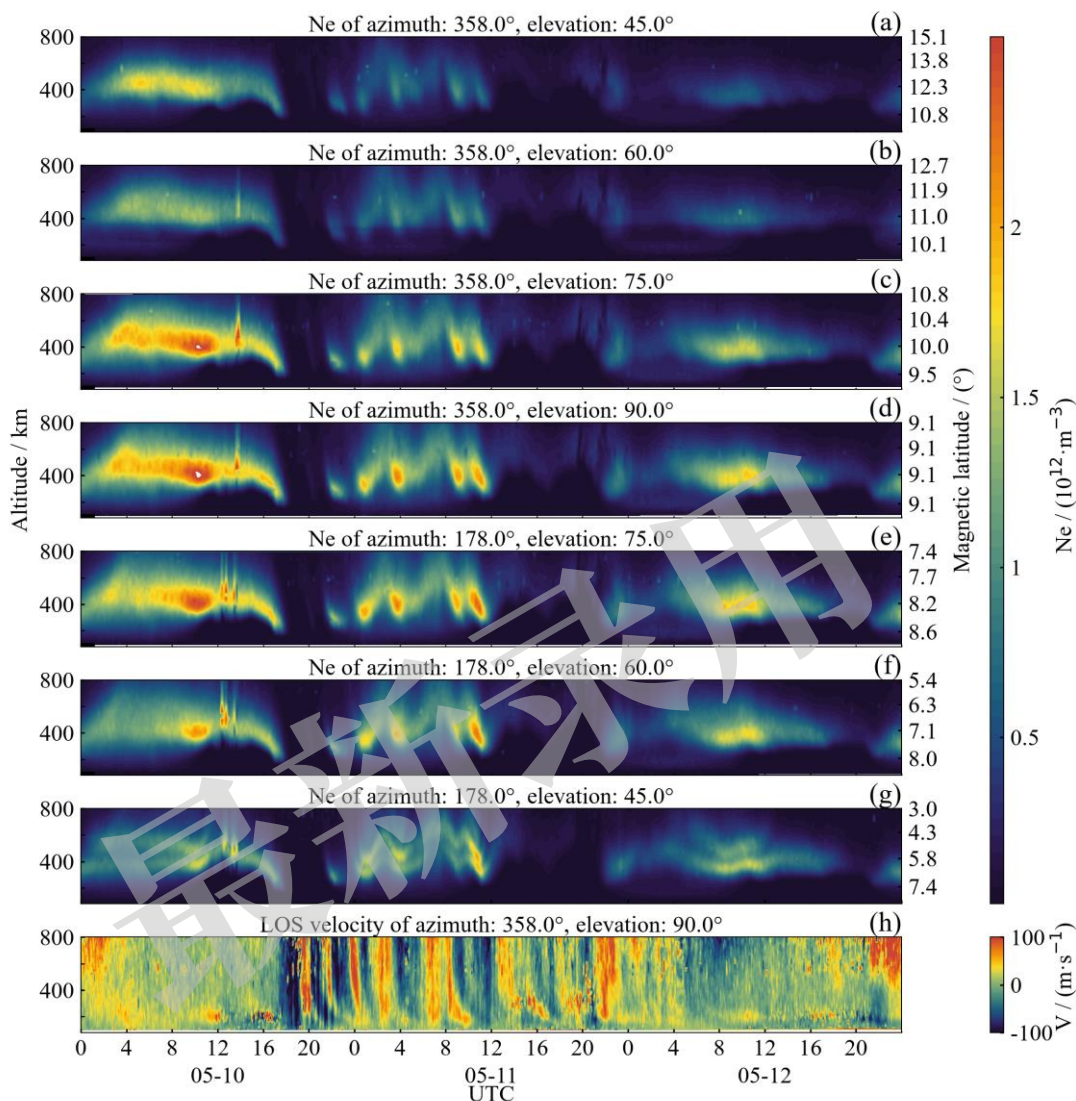


图6 2024年5月10-11日, 三亚非相干散射雷达探测电子密度随高度分布 (a-g, 探测射线方向由北至南) 和天顶方向视向速度 (h)

Fig.6 Observations of SYISR on May 10-11, 2024. (a-g) Electron densities with detection rays from north to south, (h) LOS velocity of zenith direction

4 总结与展望

本文基于子午工程电离层数字测高仪和非相干散射雷达的测量数据, 分析了2024年5月8-11日太阳爆发活动引起的超级地磁暴对中国区域测高仪短波信号和观测产品的影响。5月10-12日, 数字测高仪和SYISR探测到了显著的电离层负相扰动, 而数字测高仪自动标定foF2和hmF2参数产品出现了多次、较长时段的缺失。5月10日6:30UTC左右, X3.9级X

射线耀斑引起了子午工程测高仪短波衰减,其中 MOHE、YUZH、GLDC、DAZH 站频高图发生短波信号中断,无自动标定参数。CMEs 激波到达后,引起特大地磁暴和中国区域的强电离层负暴,5月10日18:00UTC开始,电离层电子密度的大幅降低显著干扰了高频无线电波传播。由于强太阳耀斑引发的短波吸收/消失现象,与耀斑的发生时间和持续时间高度相关,我们分析了子午工程中11个电离层数字电离探空仪连续的时序频高图变化,统计了频高图最低回波频率和回波衰减和中断的时间,发现不同纬度的测高仪均因白天的X射线耀斑引起了短波吸收,测高仪最低回波频率升高时段和幅度与用X射线流量的计算电离层最小频率基本一致,天顶角较高的低纬、西部的台站因完全吸收引起短波中断。排除了耀斑引起的电波吸收影响,发现地磁暴发生后,测高仪回波信号完全消失是电离层负暴效应造成的,纬度更高的MOHE站、CHLG站台站测高仪短波中断的响应更快、持续时间更长。根据连续的频高图,频高图F层回波恢复的一种模式是回波信号首先出现在低频区域,说明当前电离层正从负暴中恢复;另一种模式是回波信号从高空、低频段开始恢复,即从左上角出现,并逐渐向低高度和高频段偏移,与SYISR探测到的穿透电场造成低纬电离层垂直向上漂移和回落运动一致,表明这次短波中断与电离层高度抬升和电离层负暴有关。同时,除了平静期也存在的偶发Es层和扩展F层,电离层负暴、抬升导致测高仪回波信号消失、分层结构变形等,也会使得数字测高仪自动标定失败,是造成此次事件期间测高仪foF2和hmF2参数不准确和长时间缺失的主要原因。

下一步工作,可以结合地磁活动指数或行星际太阳风参数研究频高图异常的自动分类和短波通信中断预警,并。相比偶发Es层和扩展F层等现象造成的频高图标定困难,暴时变形的频高图可以通过人工标定获取更准确的电离层参数,但是随着电离层测高仪台站部署的增加,人工标定工作量大、可行性低,因此可以通过对部分暴时频高图样本进行人工标定,采用人工智能弱监督学习等方法建模[35],提升电离层暴时测高仪频高图参数自动标定的准确性和稳定性。

致 谢

作者感谢国家重大科技基础设施子午工程、国际空间环境服务组织中国区域警报中心、太阳活动与空间天气全国重点实验室对本研究的支持。

参考文献

- [1] JAKOWSKI N, BENIGUEL Y, DE FRANCESCHI G, *et al.* Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2012, **2**: A22. DOI: 10.1051/swsc/2012022
- [2] MARUYAMA N. Chapter 9-Storms and substorms-the new whole system approach and future challenges[M]//MATERASSI M, FORTE B, COSTER A J, *et al.* The Dynamical Ionosphere: A Systems Approach to Ionospheric Irregularity. Amsterdam: Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-814782-5.00009-1
- [3] WANG C. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 2010, **8**(8): S08001. DOI: 10.1029/2010SW000603
- [4] WANG C, CHEN Z Q, XU J Y. Introduction to Chinese meridian project-phase II[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 718-722. DOI: 10.11728/cjss2020.05.718
- [5] BIBL K. Evolution of the ionosonde[J]. *Annals of Geophysics*, 1998, **41**(5/6): 667-680

- [6] REINISCH B W, GALKIN I A, KHMYROV G M, *et al.* Advancing digisonde technology: the DPS-4D[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, **974**(1): 127-143
- [7] REINISCH B W, GALKIN I A, KHMYROV G M, *et al.* New Digisonde for research and monitoring applications[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A24. DOI: 10.1029/2008RS004115
- [8] WANG Shun, CHEN Ziwei, ZHANG Feng, *et al.* A new design for digital ionosonde[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(6): 849-857 (王顺, 陈紫微, 张锋, 等. CAS-DIS 数字电离层测高仪系统研制[J]. 空间科学学报, 2014, **34**(6): 849-857)
- [9] CHEN Z W, GONG Z Q, ZHANG F, *et al.* A new ionogram automatic scaling method[J]. *Radio Science*, 2018, **53**(9): 1149-1164. DOI: 10.1029/2018RS006574
- [10] CHEN Zhiqing, WANG Guojun, ZHANG Feng, *et al.* Digisonde prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(1): 37-52. DOI: 10.19975/j.dqyxx.2023-004 (陈志青, 王国军, 张锋, 等. 子午工程二期电离层数字测高仪样机测试与数据质量对比分析[J]. 地球与行星物理理论评(中英文), 2024, **55**(1): 37-52)
- [11] KIL H, KWAK Y S, PAXTON L J, *et al.* O and N₂ disturbances in the F region during the 20 November 2003 storm seen from TIMED/GUVI[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A2): A02314
- [12] YU T T, WANG W B, REN Z P, *et al.* Middle-low latitude neutral composition and temperature responses to the 20 and 21 November 2003 superstorm from GUVI dayside limb measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): e2020JA028427
- [13] HUANG C S. Identification of penetration and disturbance dynamo electric fields and their effects on the generation of equatorial plasma bubbles[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(11): e2023JA031766
- [14] AA E, ZHANG S R, ERICKSON P J, *et al.* Significant mid-and low-latitude ionospheric disturbances characterized by dynamic EIA, EPBs, and SED variations during the 13-14 March 2022 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(8): e2023JA031375
- [15] OYAMA S, VANHAMÄKI H, CAI L, *et al.* Thermospheric wind response to March 2023 storm: Largest wind ever observed with a Fabry-Perot interferometer in Tromsø, Norway since 2009[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(3): e2023SW003728
- [16] VARGHESE B, THOMAS V, ABRAHAM A, *et al.* Response of equatorial ionosphere to the September 2017 geomagnetic storm: a case study using digisonde observations at Fortaleza[J]. *Indian Journal of Physics*, 2024, **98**(14): 4643-4650. DOI: 10.1007/s12648-024-03217-0
- [17] OIKONOMOU C, HARALAMBOUS H, PAUL A, *et al.* Investigation of the negative ionospheric response of the 8 September 2017 geomagnetic storm over the European sector[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(4): 1104-1120. DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.035
- [18] PAUL K S, HARALAMBOUS H, OIKONOMOU C. Ionospheric response of the March 2023 geomagnetic storm over European latitudes[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(12): 6029-6040. DOI: 10.1016/j.asr.2024.03.026
- [19] TSAGOURI I, ANNA B, KONSTANTINOS K, *et al.* Identification of large-scale travelling ionospheric disturbances (LSTIDs) based on digisonde observations[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(2): 331. DOI: 10.3390/atmos14020331
- [20] CHEN Y H, AA E, YUAN T J, *et al.* The extreme depletion of ionospheric electron density and its hemispheric asymmetry during the May 2024 storm[J]. *National Science Review*, 2025, **12**(10): nwaf307. DOI: 10.1093/nsr/nwaf307
- [21] PAUL K S, HARALAMBOUS H, MOSES M, *et al.* Effects of the October 2024 storm over the global ionosphere[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(13): 2329. DOI: 10.3390/rs17132329
- [22] CHARTIER A T, SMITH N D, MITCHELL C N, *et al.* The use of ionosondes in GPS ionospheric tomography at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A10): A10326. DOI: 10.1029/2012JA018054
- [23] REINISCH B W, GALKIN I A. Global ionospheric radio observatory (GIRO)[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, **63**(4): 377-381. DOI: 10.5047/eps.2011.03.001

- [24] LAN T, HU H, JIANG C H, *et al.* A comparative study of decision tree, random forest, and convolutional neural network for spread-F identification[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **65**(8): 2052-2061. DOI: 10.1016/j.asr.2020.01.036
- [25] XIAO Z W, WANG J, LI J, *et al.* Deep-learning for ionogram automatic scaling[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(4): 942-950. DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.009
- [26] WANG Z, ZHAN M Y, GAO P D, *et al.* Automatic detection and classification of Spread-F from ionosonde at Hainan with image-based deep learning method[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(11): e2023SW003498. DOI: 10.1029/2023SW003498
- [27] LIU W, HUANG X X, WEI N, *et al.* Automatic scaling of vertical ionograms based on generative adversarial network[J]. *Radio Science*, 2025, **60**(3): 1-11. DOI: 10.1029/2024RS008123
- [28] WANG C, XU J Y, CHEN Z Q, *et al.* China's ground-based space environment monitoring network-Chinese meridian project (CMP)[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(7): e2024SW003972. DOI: 10.1029/2024SW003972
- [29] HAO H L, ZHAO B Q, WAN W X, *et al.* Initial ionospheric ion line results and evaluation by Sanya Incoherent Scatter Radar (SYISR)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(9): e2022JA030563
- [30] YUE X A, WAN W X, XIAO H, *et al.* Preliminary experimental results by the prototype of Sanya Incoherent Scatter Radar[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(6): 579-587
- [31] YUE X A, WAN W X, NING B Q, *et al.* Development of the Sanya incoherent scatter radar and preliminary results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(8): e2022JA030451
- [32] YUE X A, WAN W X, NING B Q, *et al.* An active phased array radar in China[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(5): 619
- [33] SATO T. Sudden $f_{\min}$ enhancements and sudden cosmic noise absorptions associated with solar X-ray flares[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1975, **27**(2): 95-112
- [34] TAO C, NISHIOKA M, SAITO S, *et al.* Statistical analysis of short-wave fadeout for extreme space weather event estimation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, **72**(1): 173. DOI: 10.1186/s40623-020-01278-z
- [35] MA H L, ZHANG L Y. Attention-based framework for weakly supervised video anomaly detection[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2022, **78**(6): 8409-8429. DOI: 10.1007/s11227-021-04190-9

第一作者和通信作者简介

袁天娇 女, 1990 年 4 月出生于江苏省扬州市, 现为中国科学院国家空间科学中心助理研究员, 主要研究方向为电离层物理与应用、空间天气等。

