

LI Hang, ZHANG Jiaojiao, WANG Wei, DENG Xiang, LAN Ailan, ZHANG Runzhi, YAN Jingye, WANG Chi. Preliminary Analysis of Observation Data by High Frequency Radars of the CN-DARN (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 266–276. CSTR:32142.14.cjss.2024-0057. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0057

CN-DARN 高频雷达观测数据初步分析*

李 航^{1,2,3} 张佼佼^{1,2,3} 王 玮^{1,3} 邓 翔^{1,3}
蓝爱兰^{1,2,3} 张润芝⁴ 阎敬业^{1,2} 王 赤^{1,2}

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

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(四子王旗空间科学野外观测站 乌兰察布 011800)

4(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘 要 中国双极光雷达网 (CN-DARN) 分别在内蒙古自治区四子王旗、吉林省龙井市和新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州和静县布设了 3 站 6 部高频相干散射雷达. 四子王旗东雷达 (SZE)、四子王旗西雷达 (SZW)、龙井东雷达 (LJE)、龙井西雷达 (LJW)、和静东雷达 (HJE) 以及和静西雷达 (HJW). 按照雷达站建设的时间线, 依次给出了各雷达在地磁平静期和磁暴期的观测结果, 并将雷达观测结果与国际上其他 SuperDARN 雷达, 例如佳木斯雷达 (JME)、北海道雷达 (HOK) 等数据进行对比分析. 进一步, 利用磁暴期间全部北半球 SuperDARN 雷达观测数据获取北半球电离层对流图, 分析结果表明 CN-DARN 观测的等离子体对流符合磁暴期间电离层对流典型特征. 分析证实了 CN-DARN 高频雷达数据的有效性, 为后续中纬高频雷达数据的科学产出奠定了基础.

关键词 中纬度电离层, 高频相干散射雷达, 地磁活动

中图分类号 P352

Preliminary Analysis of Observation Data by High Frequency Radars of the CN-DARN

LI Hang^{1,2,3} ZHANG Jiaojiao^{1,2,3} WANG Wei^{1,3} DENG Xiang^{1,3}
LAN Ailan^{1,2,3} ZHANG Runzhi⁴ YAN Jingye^{1,2} WANG Chi^{1,2}

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Siziwang Space Weather Observatory, Ulanqab 011800)

4(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract China Dual Auroral Radar Network (CN-DARN) has established three stations and six

* 国家自然科学基金项目 (42188101, 42174210) 和国家重点研发计划项目 (2022YFF0504400) 共同资助

2024-04-12 收到原稿, 2024-06-17 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

high-frequency coherent scatter radars in Siziwang, Inner Mongolia Longjing Jilin, and Hejing Xinjiang. This paper utilizes the wide-area high-precision ionospheric irregularities autonomous detection data produced by the six mid-latitude high-frequency coherent scatter radars: Siziwang East Radar (SZE), Siziwang West Radar (SZW), Longjing East Radar (LJE), Longjing West Radar (LJW), Hejing East Radar (HJE), and Hejing West Radar (HJW). According to the time line of the construction of the radar station, the observation results of each radar in the geomagnetic quiet period and geomagnetic storm period are presented in this paper. Then we compared the data of the six high-frequency radars with other international SuperDARN radars (such as Jiamusi Radar, JME; Hokkaido Radars, HOK, *etc.*). Further, the ionospheric convection map of the northern hemisphere was obtained by using all the SuperDARN radar data observed during the magnetic storm. The analysis results show that the plasma convection observed by six high frequency radars in the northern mid-latitude of the CN-DARN is consistent with the typical characteristics of ionospheric convection during the magnetic storm. The analysis in this paper confirms the validity of the mid-latitude HF radar data of the CN-DARN, and lays a foundation for the scientific output of the subsequent mid-latitude high frequency radar data.

Key words Mid-latitude ionosphere, High frequency coherent scatter radars, Geomagnetic activity

0 引言

电离层探测可分为地基探测和卫星探测两种方法. 卫星探测具有全球覆盖性、原位测量和受气象因素影响小的优势, 但时间和空间覆盖难以同时兼顾. 地基探测观测范围有限, 但具有连续、方便、可控、可信和便宜的优越性, 通过组网观测可满足对空间环境进行全天时和整体性监测的需求.

在国际上, 中纬电离层的探测有效手段之一是高频相干散射雷达. 自 20 世纪 80 年代以来, 高频相干散射雷达就被广泛地用来探测电离层对流动力学过程, 并逐渐形成了由全球 10 多个国家 20 余家科研单位 30 余部高频雷达组成的国际合作组织——国际超级双极光雷达网 (Super Dual Auroral Radar Network, SuperDARN)^[1-3], 截至 2024 年 1 月 1 日 SuperDARN 共有 41 部雷达, 其中北半球 25 部, 南半球 16 部.

SuperDARN 雷达可以观测到多种源的散射信号, 例如电离层等离子体不规则体、地面回波、流星电离轨迹、极地中间层夏季回波等不同的后向散射回波. SuperDARN 雷达属于高频相干散射雷达, 其从电离层接收到的信号类似于晶体中 X 射线的布拉格衍射, 尽管雷达的发射信号可能在其他方向上发生散射, 但雷达依旧可以接收到沿着与发射信号方向基本相同的反射信号. 由于布拉格衍射的原理, 散射信号的不规则体的尺度与发射信号的半波长直接相关, 电

离层的 D 层、E 层和 F 层都可以引起后向散射^[2].

在 CN-DARN 建设以前, SuperDARN 欧美地区的中纬度雷达包括来自美国的 10 余部雷达, 经度覆盖范围约为 225°. 相比欧美扇区, 亚洲扇区中纬度区域仅有日本的北海道东西雷达和中国的佳木斯雷达, 存在大量的探测空白区, 这一区域的电离层环境变化特征及机制尚未得到深入研究. 在中国北部布设高频雷达阵正好可以对这一区域进行有效探测.

依托子午工程二期北方中纬分系统^[4]建设的 CN-DARN 为了填补国际上观测区域的空白, 对雷达数据的有效性进行了大量的验证, 本文将对 3 站 6 部高频雷达的验证进行分析.

1 雷达设备与数据

1.1 CN-DARN 高频雷达

CN-DARN 所用的高频相干散射雷达是根据电离层中沿磁力线分布的不规则体对电磁波的布拉格散射原理而发展的监测电离层不规则体运动的重要设备, 工作频率为 8~20 MHz, 具有监测范围广、连续监测能力强等特点. 高频相干雷达的主要探测目标是电离层 E 层和 F 层中沿磁场分布的等离子体不规则体. 雷达发射的高频电磁波在电离层中的传输路径发生弯曲, 当电磁波在磁力线与波束近乎垂直处与电离层不规则体相遇时就会发生布拉格散射. 这种情况下, 入射波长和散射波长相同, 发生电磁波的干涉, 所

以这种雷达被称为高频相干散射雷达. 通过利用回波的自相关函数进而计算等离子体的主要散射特征参数, 即功率、速度和谱宽^[4].

为了获得目标的实际运动速度和方向, 需要采用两个雷达在不同的方向对同一区域进行观测, 然后通过矢量和的方法获取目标的真实运动方向和速度, 这就需要雷达的观测区域两两形成重叠覆盖. 一个雷达站的扫描范围在经度上约为 60°. 两个站的探测区域虽然可以达到 120°的经度覆盖, 但是不能实现雷达观测区域的两两覆盖, 无法得到电离层不规则体的真实运动速度和方向, 只能得到其视线速度. 布设 3 个雷达站, 即可达到雷达观测区域尽可能的两两重叠覆盖, 又能在经度上实现尽可能大的观测范围覆盖. 因此, CN-DARN 在中国北方地区部署 3 个高频相干散射雷达站, 实现对中国电离层扰动上游区域电离层有效的大范围探测. 该分系统的探测范围往北纵深可达 4000 km, 东西跨度超过 10000 km, 几乎覆盖欧亚扇区北部地磁北纬 40°—80°的广大区域.

3 个雷达台站分别位于中国吉林省龙井市、内蒙古自治区四子王旗和新疆维吾尔自治区和静县, 6 部雷达采用全数字相控阵技术, 探测范围两两重叠构成 CN-DARN. 6 部雷达的台站地理位置如表 1 所示. 分系统 6 部雷达自 2019 年底开工建设, 于近日全部建设完成. CN-DARN 的建设使该区域具备了开展空前大范围电离层环境探测的条件, 为深入研究和认识中高纬度电离层动力学过程提供了新机遇, 其可监测来自北极的中高纬地区电离层扰动和传播, 构成衔接极区与国内监测网的桥梁, 对电离层区域特性研究及电离层扰动的高中低纬传播及耦合研究起到重要作用.

在国际上, 中国高频相干散射雷达网填补了中高

纬度的探测空白, 极大地扩展了北半球电离层探测范围, 图 1 给出了 SuperDARN 北半球雷达分布在加入 CN-DARN 前后的对比图 (中国高频雷达网 6 部雷达代码自东向西依次为 LJE, LJW, SZE, SZW, HJE, HJW). 利用 CN-DARN 的探测, 强磁暴期间电离层对流特征、亚极光区极化流、磁层低频波的全球演化等问题将有望取得突破性进展.

1.2 雷达数据与处理方法

使用的雷达数据来源于 SuperDARN 雷达网中国国家空间科学数据中心镜像站, 数据的时间分辨率为 1 min, 距离分辨率为 45 km. Kp 指数、 Dst 指数和 AE 指数可以用来表示地磁活动水平, 数据来源于京都世界地磁数据中心. 利用 6 部雷达生成的 .fitacf 数据进行绘图, .fitacf 是 SuperDARN 雷达的标准数据格式, 包含功率 (信噪比)、多普勒速度、谱宽、仰角和误差等数据信息.

范围时间强度 (Range Time Intensity, RTI) 图是沿雷达特定波束在所有距离门处测量参数的时间序列图, 绘制 RTI 图是查看单个雷达数据最常用的方法. 高频雷达的 RTI 图可以在前几个距离门 95~125 km 高度观测到电离层 E 层的相干回波, 而在较远距离门中可见地面回波和 F 层回波^[5].

2 电离层回波观测结果

CN-DARN 3 站高频相干散射雷达四子王旗站最先完成建设, 并在 2023 年 6 月完成内部测试, 7 月 13 日完成工艺测试; 龙井站紧随其后, 于 2023 年 6 月底建设完成并开机测试, 于 8 月 30 日完成内部测试; 和静站于 9 月 17 日开机测试, 于 9 月 24 日完成内部测试. 下面对 3 站雷达开机工作以来, 在不同地

表 1 CN-DARN 六部雷达台站地理位置
Table 1 Six radars parameters of CN-DARN

雷达名称	雷达代码	地理纬度/(°)	地理经度/(°)	海拔高度/m	地磁纬度/(°)	地磁经度/(°)	磁地方时(MLT)	雷达法向
龙井东	LJE	42.8	129.4	323.1	37.0	-156.4	8.3	44.0
龙井西	LJW	42.8	129.4	333.7	37.0	-156.4	8.3	-34.0
四子王旗东	SZE	41.8	111.9	1445.9	37.2	-173.9	7.2	42.0
四子王旗西	SZW	41.8	111.9	1444.7	37.2	-173.9	7.2	-36.0
和静东	HJE	42.6	83.7	2820.5	38.8	157.1	5.2	39.0
和静西	HJW	42.6	83.7	2820.5	38.8	157.1	5.2	-39.0

注 地磁坐标为2022年1月1日00:00 UT时各台站AACGM坐标.

磁活动水平条件下 (平静期与磁暴期) 的探测结果进行分析.

2.1 四子王旗雷达 (SZE,SZW)

四子王旗雷达位于内蒙古自治区乌兰察布市 (41.831°N, 111.928°E). 图 2 给出了 2023 年 2 月和 3 月 Dst 指数变化情况, 并在此基础上给出了典型的一个地磁平静期和一个磁暴期的观测事例. 数据主要以范围时间图和多波束扫描图的形式展示, 分别用于分析雷达观测数据的时间演化特征与空间分布特征. 通过将四子王旗东 (SZE)、西高频相干散射雷达 (SZW) 数据与已有雷达, 例如佳木斯高频雷达 (JME)、日本北海道雷达 (HOK) 等的对比分析判断其数据有效性.

2.1.1 平静期观测

图 3 给出了 2023 年 2 月 5 日 (地磁平静期) SZE, SZW, JME 和 HOK 雷达的观测结果. 对于多普勒速度, 速度为正表示散射体朝雷达运动, 速度为负则表示其远离雷达运动. 高频雷达所接收到的地波信号可以通过经验公式 $w/3+|v|<30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 筛选, 其中 w 代表谱宽, v 代表视线多普勒速度^[6]. 由于平静期的雷达信号主要由地面回波组成, 故未对地面回波进行筛选与标出. 此日内的雷达回波以低速的回波为主, 回波的速度大多数集中在 $|v|<20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 同时, 雷达回波信号的反射距离在黄昏后与黎明前后存在显著的抬升与下降. 4 台雷达的回波结构类似. 从图 3 中可以看

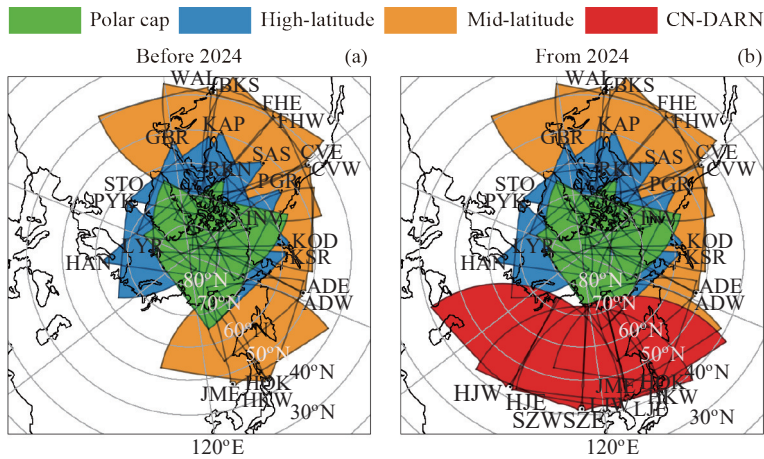


图 1 SuperDARN 北半球雷达分布 (a) 及加入 CN-DARN 后的 SuperDARN 北半球高频雷达分布 (b)
Fig. 1 SuperDARN radar distribution in the northern hemisphere (a) and high frequency radar distribution in the northern monitoring subsystem of CN-DARN (b)

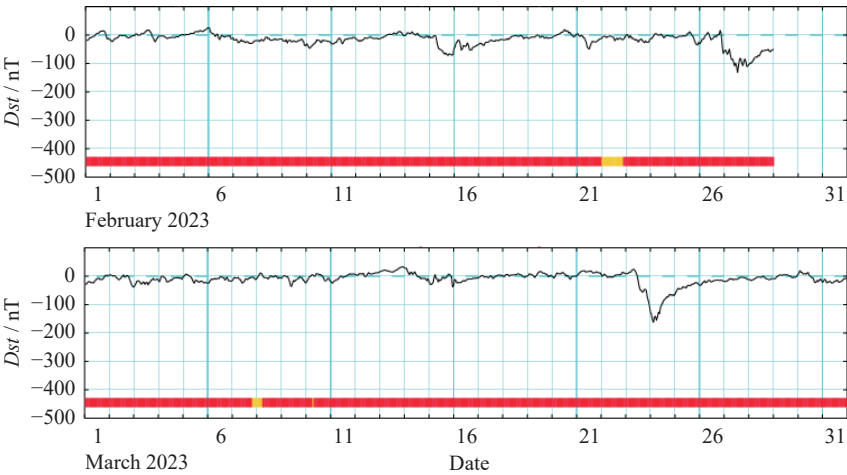


图 2 2023 年 2 月和 3 月磁暴环电流指数变化情况
Fig. 2 Changes of the Dst index in February and March 2023

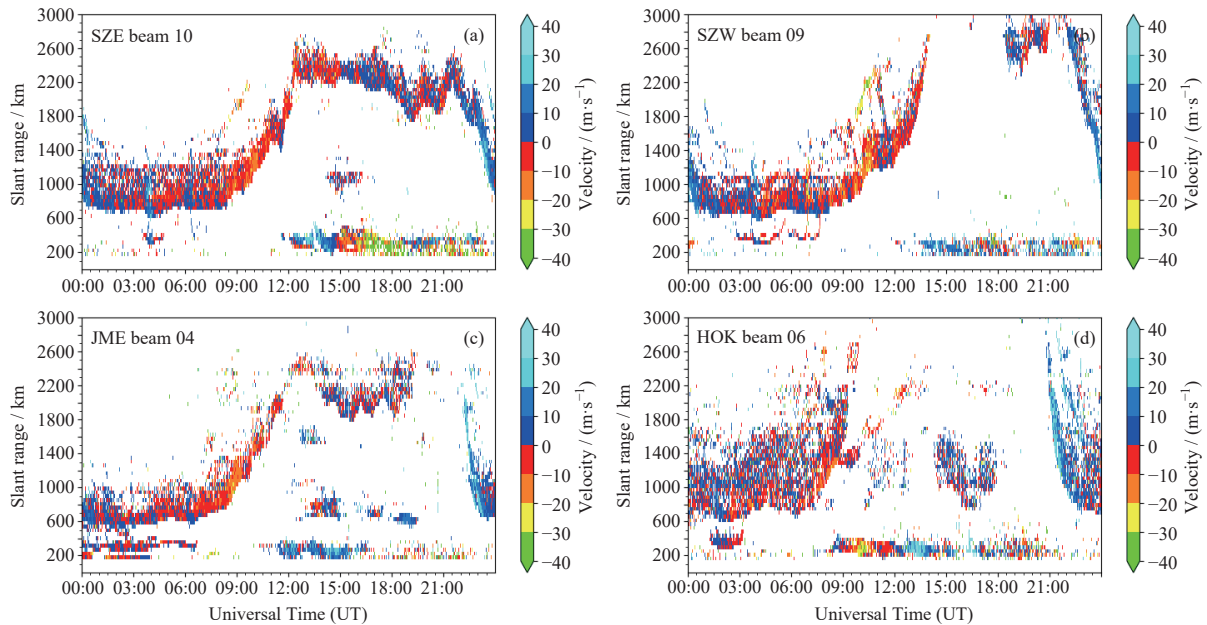


图3 2023年2月5日4台雷达不同波位观测参数的范围时间强度

Fig. 3 Range-time-intensity plots of four radars in different beams on 5 February 2023

出,在平静期时,4台雷达观测数据以低速回波为主.

2.1.2 磁暴期观测

图4给出了2023年3月24日(磁暴期)SZE, SZW, JME, HOK的观测结果.不同于图3,此处地面回波用灰色标注,4台雷达都在夜间观测到了视线速度高的由高纬向低纬传播的不规则体漂移运动.

SuperDARN 主要用于连续、瞬时、全球尺度的电离层对流观测.为了获得完整的二维速度矢量,SuperDARN 雷达从不同朝向方向测量电离层对流视线方向速度.本文通过将所有可用的北半球 SuperDARN 雷达多普勒数据结合制作.map 对流速度文件.第一步,从所有可用的雷达测量的视线方向速度被过滤并分类到一个统一的空间网格中.第二步,加入太阳风速度、磁场三方向分量等太阳风条件.第三步,使用对流模型的数据来填充数据覆盖不完全的区域.最后一步,计算电离层静电势的数学拟合程序^[7,8].根据对流速度文件绘制出电离层瞬时对流图.在这项工作中,运行 SuperDARN 的雷达软件工具包(RST 4.3)来输出地图.在此过程中,使用文献[9]的统计电离层对流模式来估计数据覆盖较差地区的电离层速度.生成对流图的时间间隔是2 min.

4台雷达的观测结果中分布都出现了持续数小时的回波高度降低、回波数量显著减少的现象.4台雷达在磁暴期间的观测结果具有较高的一致性.进一步

分析原因发现,此次磁暴期间发生了强烈的电离层负暴,雷达观测到的回波大幅度衰减甚至消失与电离层负暴有关^[10].

图5给出了2023年3月24日的雷达观测速度对流情况.图5(a)选取了08:28 UT,此时4部雷达处于磁地方时的昏侧,观测到西向小于 $125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的电离层对流;图5(b)选取了18:58 UT,此时4部雷达处于磁地方时的晨侧,观测到东向 $750 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的电离层对流.这可能是受到暴时高纬对流涡旋赤道向扩张的影响.晨侧与昏侧的观测都符合电离层对流的双涡结构^[11],四子王旗双雷达的加入,使晨侧和昏侧的电离层高速对流结构更加清晰地被观测到.

2.2 龙井雷达 (LJE,LJW)

龙井市位于吉林省东南部,隶属于吉林省延边朝鲜族自治州.与四子王旗雷达一样,对龙井雷达(42.820°N , 129.419°E)的数据通过龙井东(LJE)、西(LJW)高频相干散射雷达数据与已有雷达,例如佳木斯高频雷达(JME)、四子王旗东(SZE)、西雷达(SZW)等的对比,进行数据有效性分析.2023年8-9月的Dst指数变化情况如图6所示,并在此基础上给出了典型的一个地磁平静期和一个磁暴期的观测事例.

2.2.1 平静期观测

图7给出了2023年8月12日(地磁平静期)

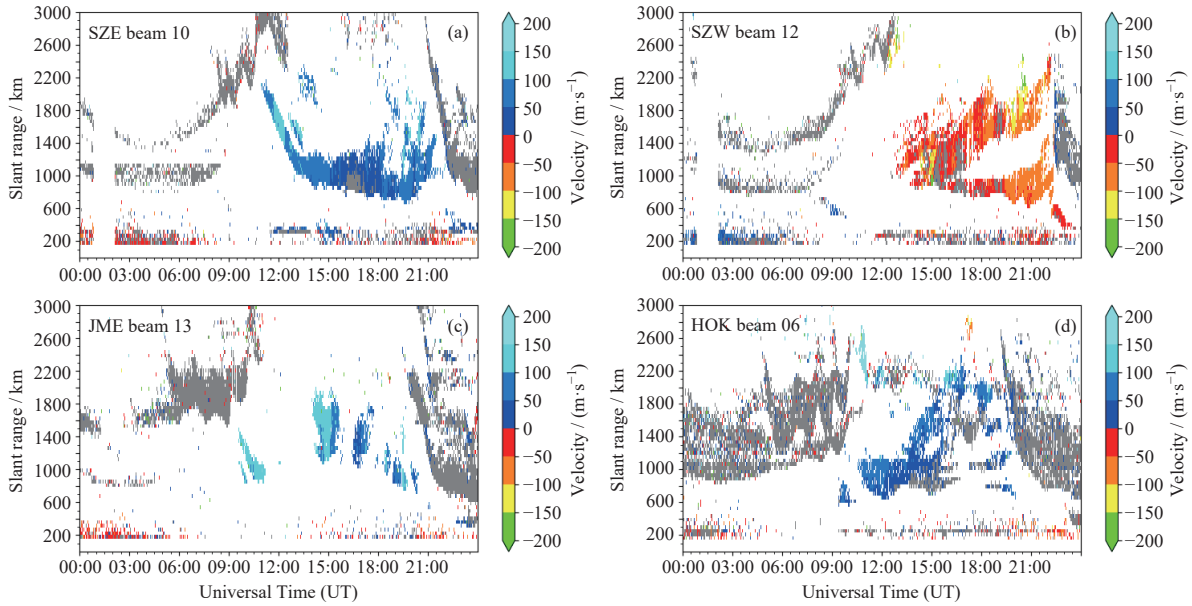


图 4 2023 年 3 月 24 日 4 台雷达不同波位观测参数的范围时间强度 (灰色部分为地面回波)

Fig. 4 Range-time-intensity plots of four radars in different beams, the gray part is the ground scatter on 24 March 2023

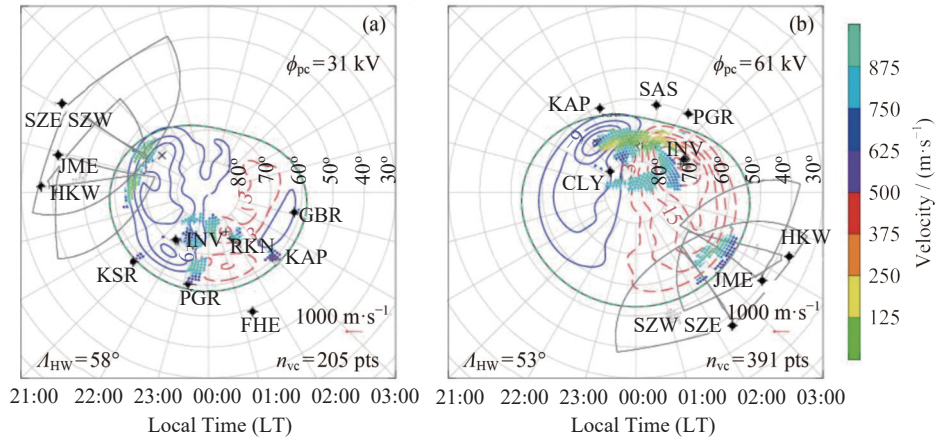


图 5 2023 年 3 月 24 日雷达对流图. (a) 08:28 UT 昏侧, (b) 18:58 UT 晨侧

Fig. 5 Convection maps of radars on 24 March 2023. (a) Evening side at 08:28 UT, (b) Morning side at 18:58 UT

LJE, LJW, JME 和 SZE 雷达的观测结果. 从雷达回波的多普勒速度可以判断, 这一天内的雷达回波以地面回波为主 (利用多普勒速度 $v < 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行估算), 由于电离层电子密度日夜变化, 雷达回波距离在晨侧存在显著的抬升与下降, 且 4 台雷达的回波结构类似.

2.2.2 磁暴期观测

图 8 为 2023 年 9 月 19 日的磁暴期 LJE, LJW, SZE, SZW, JME, HOK 的 RTI 图. 其中龙井东 (LJE) 雷达在 15:00 UT–17:00 UT, 龙井西 (LJW) 雷达在 17:00 UT–19:00 UT, 四子王旗东雷达在 17:00

UT–19:00 UT 均能看到较为明显的不均匀体相对于雷达的视线方向速度发生方向相反的变化. 综合来看, 雷达探测方向偏东向的雷达都探测到朝向雷达电离层不规则体, 而偏西向的雷达则探测到远离雷达电离层不规则体, 该不规则体的运动方向是西向, 速度大小在 $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右. 不规则体的出现时间也进一步佐证了这一点, 13:00 UT 左右首次出现在 HOK 雷达视野范围中, 14:00 UT 左右出现在 LJE 和 LJW 雷达视野范围中, 17:00 UT 左右到达 SZE 雷达视野范围中. 但是 SZW 与 JME 的雷达图中并未观

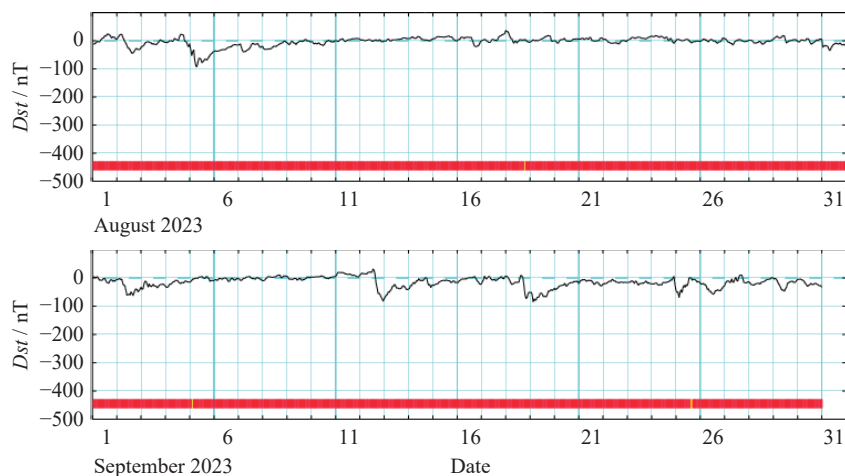


图6 2023年8月和9月磁暴环电流指数变化情况

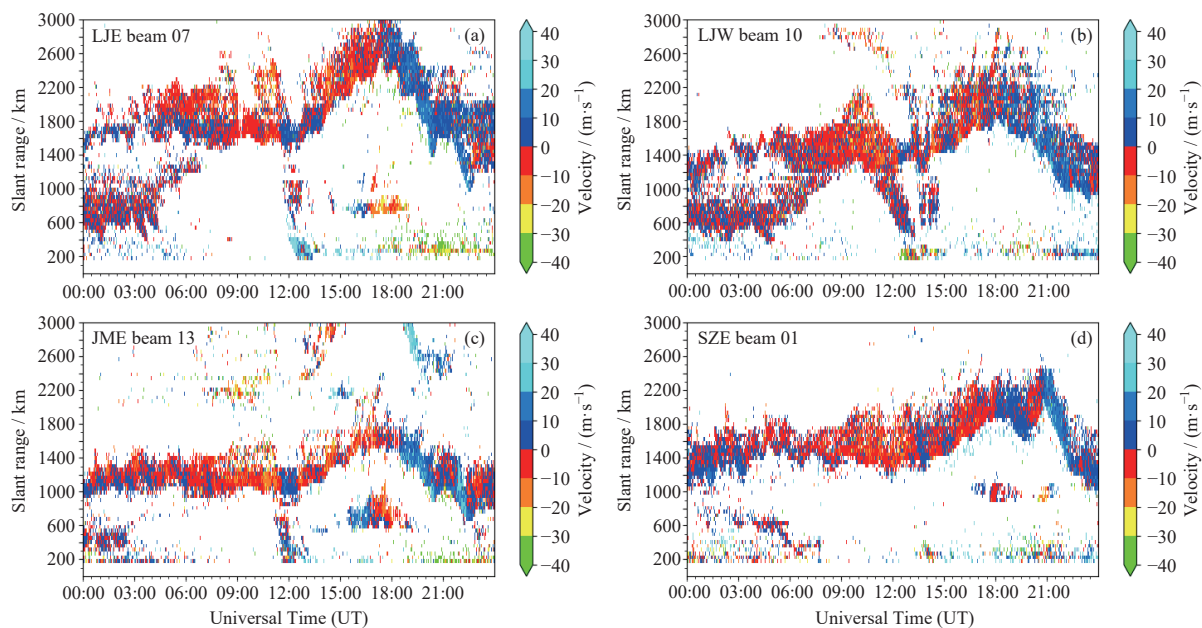
Fig. 6 Changes of the *Dst* index in August and September 2023

图7 2023年8月12日4台雷达不同波位观测参数的范围时间强度(灰色部分为地面回波)

Fig. 7 Range-time-intensity plots of four radars in different beams, the gray part is the ground scatter on 12 August 2023

测到此不规则体现象。

图9为2023年9月19日15:04 UT和18:42 UT雷达观测速度对流图。同图8的观测吻合,即在电离层昏侧存在速度 $625 \sim 750 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西向对流,晨侧存在速度 $625 \sim 750 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东向对流。图9中的观测结果很好地符合了电离层的双涡对流结构。LJE雷达与LJW雷达在磁暴期观测到的高速流速度大小、方向、纬度位置、传播趋势均与SZE, SZW, JME和HOK雷达一致,且龙井双雷达的加入,使晨侧和昏侧

的电离层高速对流结构更加清晰地被观测到。

2.3 和静雷达(HJE, HJW)

和静县隶属于新疆巴音郭楞蒙古自治州,位于新疆中部,巴音郭楞蒙古自治州西北部。根据和静雷达(42.885°N , 83.709°E)在2023年11月5日的地磁暴数据,利用本文介绍的6部雷达对地磁暴期间电离层的形态进行观测分析。

2023年11月5—6日,受同年11月2日爆发的日冕物质抛射(CME)的影响,*Dst*指数最低降至

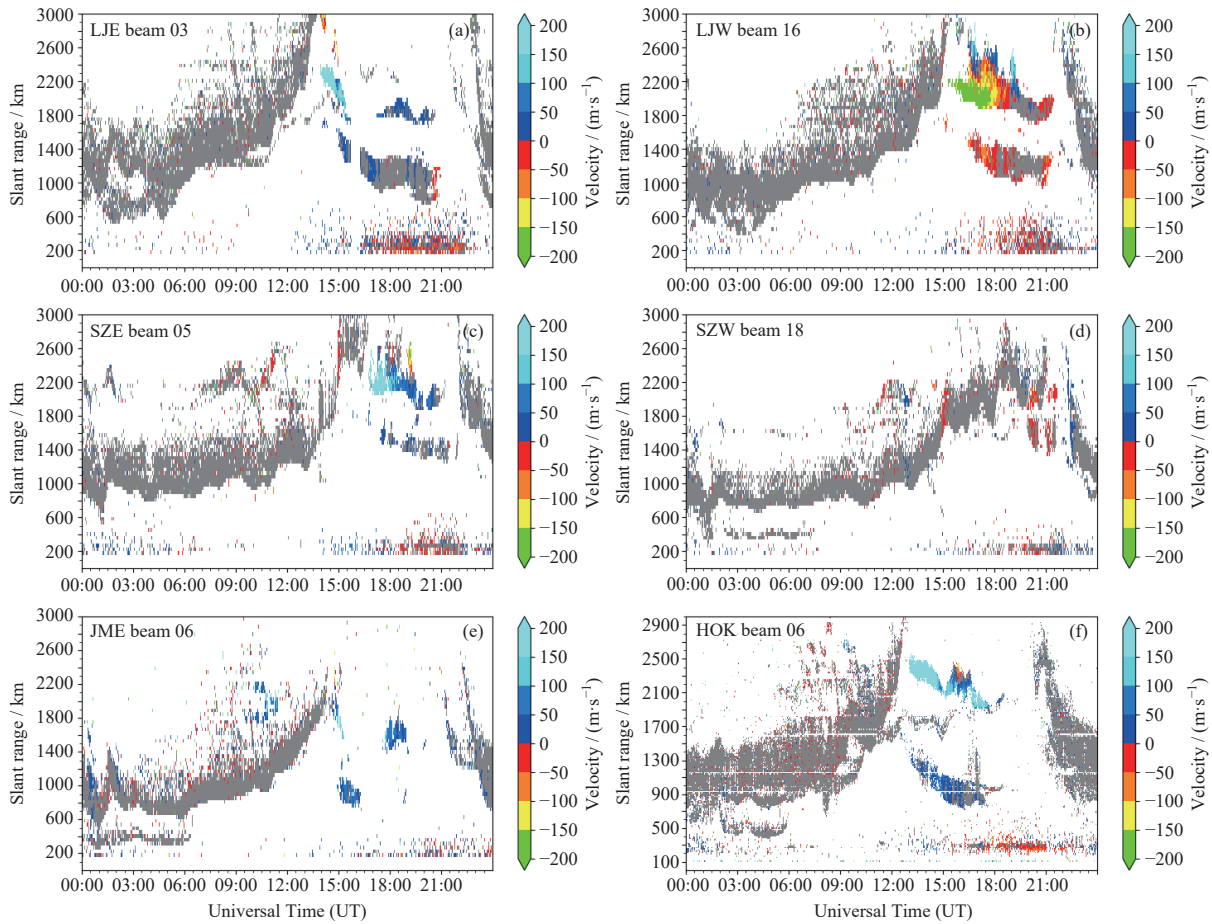


图 8 2023 年 9 月 19 日 6 台雷达不同波位观测参数的范围时间强度 (灰色部分为地面回波)
Fig. 8 Range-time-intensity plots of six radars in different beams, the gray part is the ground scatter on 19 September 2023

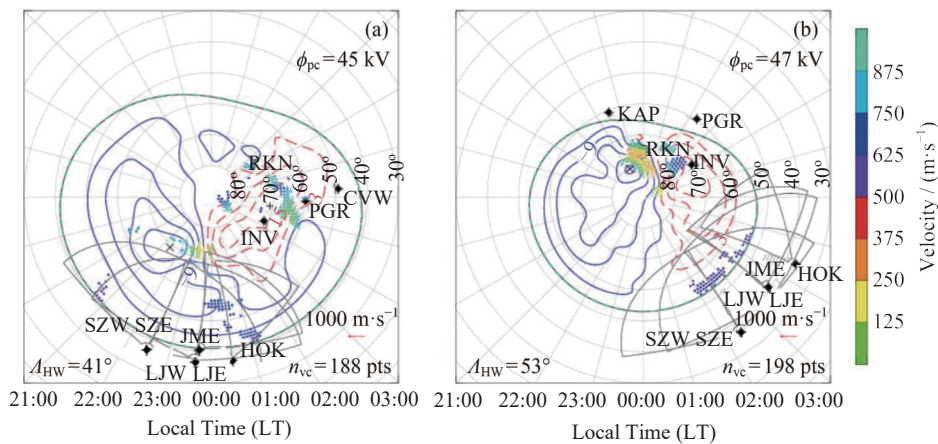


图 9 2023 年 9 月 19 日雷达对流图. (a) 15:04 UT 昏侧, (b) 18:42 UT 晨侧
Fig. 9 Convection maps of radars on 19 September 2023. (a) Evening side at 15:04 UT, (b) morning side at 18:42 UT

-172 nT, 地磁暴持续期间, 有 3 h 的 Dst 指数小于 -100 nT, 12 h 的 Dst 指数为 -100~-50 nT, 6 h 的

Dst 指数为 -50~-30 nT. 图 10 所示为 2023 年 11 月 Dst 指数变化情况.

2023 年 11 月 5 日的观测是首次利用 CN-DARN 的 6 部高频雷达对大地磁暴期间的电离层进行观测, 图 11 给出了 6 部雷达于 11 月 5 日当天的 RTI 图. 在 12:00 UT 时都可以清楚地观测到电离层高度的抬升和速度的陡变. 对应这 Dst 指数在 12:00 UT 时的突然降低 (从 -19 nT 下降至 -83 nT), 在 $1600 \sim 3000$ km 的斜距上出现了南向高速 (>100 m·s $^{-1}$) 的等离子不规则体, 这与可能存在的北

极极区源头的方向一致.

图 12 是 2023 年 11 月 5 日的雷达观测速度对流图, 图 12(a) 选取 10:44 UT, 此时 4 部雷达处于磁地方时的昏侧, 观测到西向小于 500 m·s $^{-1}$ 的电离层对流; 图 12(b) 选取 17:30 UT, 此时 4 部雷达处于磁地方时晨侧, 观测到东向 $250 \sim 500$ m·s $^{-1}$ 的电离层对流. 晨侧与昏侧的对流方向都符合电离层对流的双涡结构, 在此次磁暴事件中, 6 部中纬高频雷达的加入

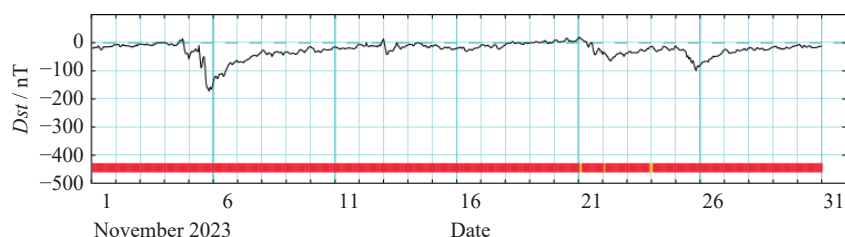


图 10 2023 年 11 月磁暴环电流指数变化情况

Fig. 10 Changes of the Dst index in November 2023

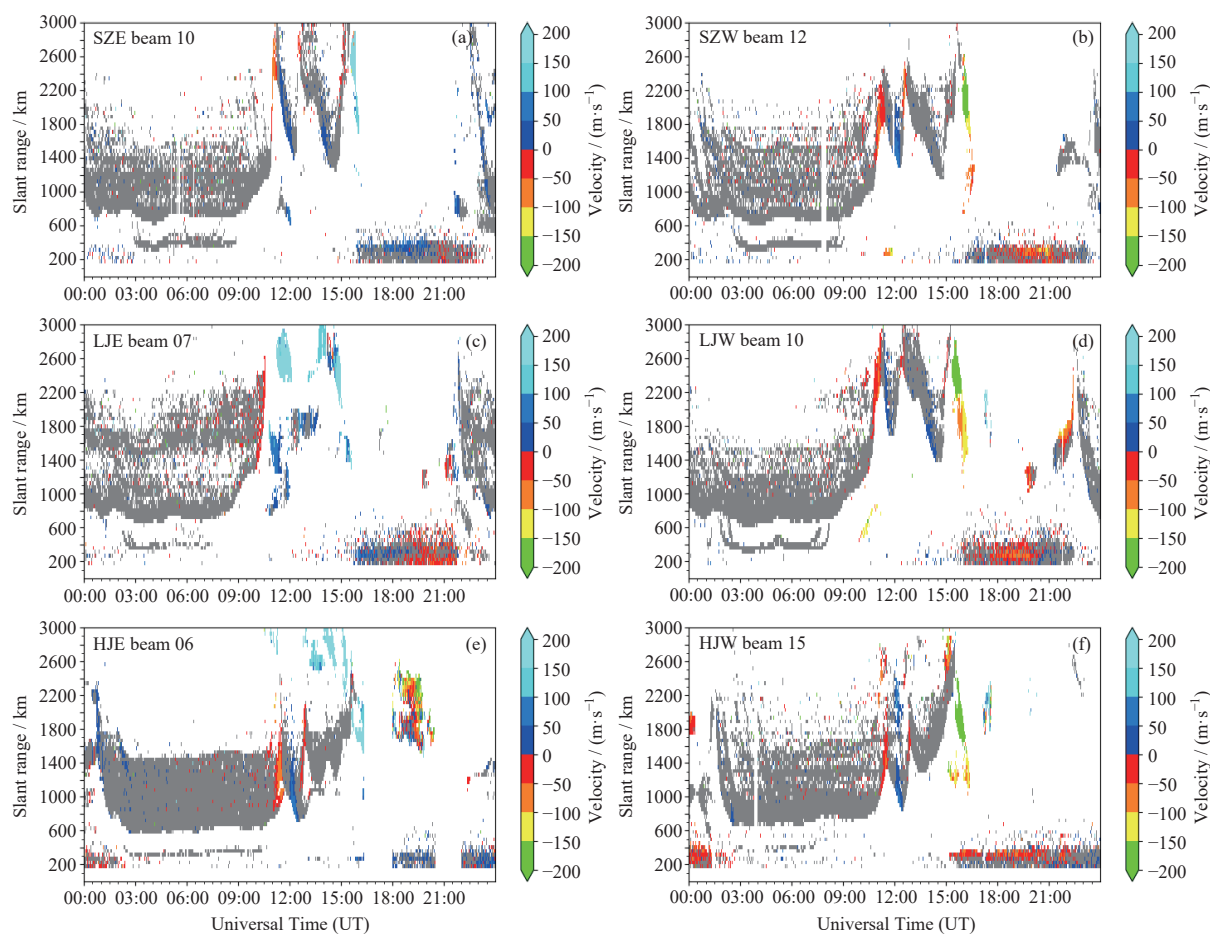


图 11 2023 年 11 月 5 日 6 台雷达不同波位观测参数的范围时间强度 (灰色部分为地面回波)

Fig. 11 Range-time-intensity plots of six radars in different beams, the gray part is the ground scatter on 5 November 2023

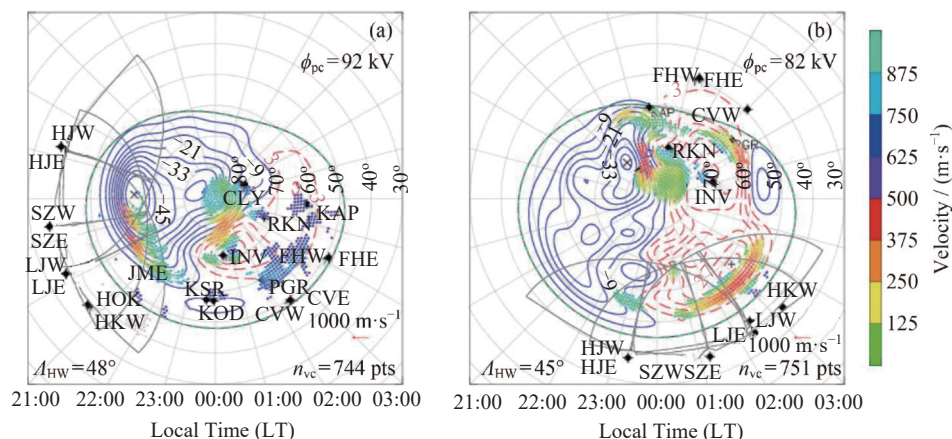


图 12 2023 年 11 月 5 日雷达对流图. (a) 10:44 UT 昏侧, (b) 17:30 UT 晨侧

Fig. 12 Convection maps of radars in 5 November 2023. (a) Evening side at 10:44 UT, (b) morning side at 17:30 UT

可以更好地观察到北半球电离层对流的整体形态.

3 结论

首次对四子王旗东雷达 (SZE)、四子王旗西雷达 (SZW)、龙井东雷达 (LJE)、龙井西雷达 (LJW)、和静东雷达 (HJE)、和静西雷达 (HJW) 产出的亚洲扇区广域高精度电离层不规则体自主探测数据进行验证, 分别选择了 2 个平静期与 3 个磁暴期的数据与已有雷达数据进行对比.

平静期内新建雷达与已有雷达地面回波速度的大小与方向及回波形态都有较好的吻合性; 磁暴期的 RTI 图和速度对流图显示, 昏侧电离层对流主要为西向, 而晨侧对流主要为东向, 速度分布范围为 $0 \sim 750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 通过与已建成的国际 SuperDARN 雷达数据对比, 得到了雷达观测符合电离层双涡对流整体特征的结果, 因此四子王旗雷达、龙井雷达、和静雷达的数据有效性都分别得到了充分验证.

CN-DARN 高频雷达的数据验证工作的顺利进行, 为后续中纬高频雷达数据的科学产出奠定了坚实的基础, 同时 3 站 6 部高频雷达的建设完成与数据产出, 也极大地提高了北半球中纬地区的电离层探测数据质量, 后续 CN-DARN 高频雷达也将为 SuperDARN 高频相干散射雷达探测做出更多的贡献.

致谢 子午工程二期对北方中纬高频雷达网建设给予了大力支持. 本文所使用的 SuperDARN 数据从国家空间科学数据中心 (<https://superdarn.nssdc.ac.cn/>) 获取. Su-

perDARN 是由澳大利亚、加拿大、中国、法国、挪威、南非、英国、美国、意大利和日本的国家科学资助机构资助的雷达网络. *Dst* 指数来自京都世界地磁数据中心 (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

参考文献

- [1] CHISHAM G, LESTER M, MILAN S E, *et al*. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions[J]. *Surveys in Geophysics*, 2007, **28**(1): 33-109
- [2] NISHITANI N, RUOHONIEMI J M, LESTER M, *et al*. Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, **6**(1): 27
- [3] ZHANG Jiaojiao, LAN Ailan. Research of the dynamics of the middle latitude ionosphere based on high-frequency coherent scattering radar network[J]. *China Basic Science*, 2023, **25**(3): 36-43 (张佼佼, 蓝爱兰. 基于高频相干散射雷达网的中纬度电离层动力学过程研究[J]. 中国基础科学: 前沿研究, 2023, **25**(3): 36-43)
- [4] WANG Chi, XU Jiyao, LIU Libo, *et al*. Contribution of the Chinese Meridian Project to space environment research: Highlights and perspectives[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, **66**(7): 1423-1438. (王赤, 徐寄遥, 刘立波, 等. 国家重大科技基础设施子午工程在空间环境领域的亮点研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, **53**(7): 1433-1449. DOI: [10.1360/N072022-0137](https://doi.org/10.1360/N072022-0137))
- [5] HIYADUTUJE A, KOSCH M J, STEPHENSON J A E. First observations of E-region Near Range Echoes partially modulated by F-region Traveling Ionospheric Disturbances observed by the same SuperDARN HF radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(5): e2021JA030157.

- [6] 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
- [7] RUOHONIEMI J M, BAKER K B. Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A9): 20797-20811
- [8] SHEPHERD S G, RUOHONIEMI J M. Electrostatic potential patterns in the high-latitude ionosphere constrained by SuperDARN measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A10): 23005-23014
- [9] THOMAS E G, SHEPHERD S G. Statistical patterns of ionospheric convection derived from mid-latitude, high-latitude, and polar SuperDARN HF radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 3196-3216
- [10] WANG Jingsong, XIAO Zuo. The relation between the onset times of the negative phase of ionospheric storms and the main phase of magnetic storms at middle latitudes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1994, **14**(3): 191-197 ((王劲松, 肖佐. 中纬电离层暴负相开始时间与磁暴主相开始时间的对应关系 [J]. *空间科学学报*, 1994, **14**(3): 191-197)
- [11] PETTIGREW E D, SHEPHERD S G, RUOHONIEMI J M. Climatological patterns of high-latitude convection in the northern and southern hemispheres: Dipole tilt dependencies and interhemispheric comparisons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A7): A07305

作者简介



李航 男, 1999年3月出生于内蒙古包头市, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 主要研究方向为电离层扰动、电离层不规则体等。
E-mail: lihang@spaceweather.ac.cn



张佼佼 (通信作者) 女, 1986年8月出生于河北省邯郸市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电离层扰动, 太阳风-磁层-电离层耦合, 灾害性空间天气对地效应等。
E-mail: jjzhang@swl.ac.cn