0254-6124/2023/43(4)-0609-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Wei, ZHANG Jiaojiao, WANG Chi, DENG Xiang, LAN Ailan, YAN Jingye. Comparison of Characteristics of F-region Irregularities Scattering Occurrence Rate Based on the Observation of the Jiamusi Radar and Hokkaido East Radar (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 609–617. DOI:10.11728/cjss2023.04.2022–0028

基于佳木斯雷达与北海道东雷达观测的F层不规则体回波发生率*

王 玮[1,2] 张佼佼[1,2] 王 赤[1,2]
邓 翔[1] 蓝爱兰[1] 阎敬业[1]

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

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 利用佳木斯和北海道东高频相干散射雷达的观测数据，对2018年3月至2019年11月期间两部雷达观测到的F层高度的不规则体回波信号发生率的分布特征进行了对比分析。比较了在地磁平静期（$Kp < 3$）和地磁扰动期（$Kp > 3$）的不规则体回波发生率变化特征，分析了回波发生率在昏侧与晨侧增强的现象和纬度变化特征。昏侧回波发生率增强现象在45°－64° MLAT范围内普遍存在，其中55°－64° MLAT的回波发生率在地磁扰动期明显增强。而晨侧回波发生率增强现象主要分布在45°－54° MLAT的地区，除了春秋分季外，地磁扰动的增强对其影响较弱。中纬日侧回波发生率受地磁活动影响较小。

关键词 中纬度电离层F层，电离层不规则体，地磁活动，回波发生率

中图分类号 P352

Comparison of Characteristics of F-region Irregularities Scattering Occurrence Rate Based on the Observation of the Jiamusi Radar and Hokkaido East Radar

WANG Wei[1,2] ZHANG Jiaojiao[1,2] WANG Chi[1,2]
DENG Xiang[1] LAN Ailan[1] YAN Jingye[1]

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)

* 国家自然科学基金项目（41731070，42174210），中国科学院前沿科学重点研究计划项目（QYZDJ-SSW-JSC028）和中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目（XDA15052500）共同资助

2022-06-17收到原稿，2022-08-15收到修定稿

E-mail：wwang@spaceweather.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract Distribution of the ionospheric irregularities scattering occurrence rate was investigated using data from March 2018 to November 2019, which were observed by the SuperDARN Jiamusi and Hokkaido East radars. The irregularities scattering occurrence rate have been statistically compared in the geomagnetic quiet period ($Kp < 3$) and geomagnetic disturbance period ($Kp > 3$), obtained the variation characteristics of the irregularities scattering occurrence rate depending on magnetic latitude and MLT, and analyzed the characteristics of the occurrence rate enhancement phenomenon in the dusk side and dawn side. The enhancement of the dusk side occurrence rate was widespread in the range of 45°−64° MLAT, and the occurrence rate in the subauroral region was significantly enhanced during the magnetic disturbed period. The enhancement of the dawn side occurrence rate is mainly distributed in areas below 55° MLAT, and the enhancement of the geomagnetic disturbance has a weak effect on it except in equinox. The dayside occurrence rate in middle magnetic latitude is less affected by geomagnetic disturbance.

Key words Mid-latitude ionospheric F region, Ionospheric irregularities, Geomagnetic activity, Scattering occurrence rate

0 引言

电离层不规则体指的是电离层中不均匀的块状电离结构,在电离层中普遍存在,对无线电波的传播存在显著影响。电离层通过磁力线与磁层、热层连接,在不同高度的大气层间传输物质与能量,研究电离层不规则体有利于推进热层-电离层-磁层耦合系统中的物理过程的研究。而电离层不规则体的产生机制非常复杂,与电子密度、电场、风场、背景地磁场、重力波、太阳活动等多种因素有关。当这些宏观物理参数偏离平衡状态后,产生的等离子体不稳定性是产生电离层不规则体的主要机制。

当高频相干散射雷达发射的电磁波信号与分米尺度的场向不规则体(Field-Aligned Irregularity, FAI)相遇时,如果信号传播方向与不规则体结构垂直,则雷达接收机可以接收到不规则体的散射信号。从高频相干散射雷达的回波信号中可以得到扫描方向上观测目标的多普勒速度、多普勒谱宽和信噪比。高频相干散射雷达的回波信号既与电离层不规则体有关,又与高频信号传播条件有关。因此,回波发生率,也就是电离层不规则体回波信号数占雷达总回波信号数中的百分比,低于真实的电离层不规则体发生率,反映了其数值范围的最小值边界。这一参数可以提供研究电离层不规则体的分布特征与产生机制的重要信息[4,5]。

国际超级双极光雷达网(Super Dual Auroral Radar Network, SuperDARN)是一个由位于南北半球中高纬地区的 30 余台高频相干散射雷达组成的国际合作研究组织[1–3]。Ruohoniemi 等[6] 利用 SuperDARN Goose Bay 雷达平静期的数据进行统计研究,发现在冬季附近,昏侧亚极光区存在特殊的回波现象(Dusk Event, DUSE)。该现象通常发生在天顶角 95°附近,纬度低于极光椭圆卵的赤道向。Ruohoniemi 和 Greenwald[7] 利用 5.5 年 Goose Bay 雷达的观测数据对回波发生率进行了统计分析,发现其存在季节变化特征,并受到太阳活动周期的影响。Milan 等[8] 利用 Iceland-East 雷达和 Finland 雷达组的数据进行研究,发现电离层不规则体在冬季多发生在日侧极尖区,在夏季多发生在夜侧极光椭圆卵范围内。

Parkinson 等[9] 利用 Tasmania 雷达的观测数据对南半球亚极光区电离层不规则体回波的分布特征进行统计研究,发现该区域的雷达回波发生率存在季节变化和地磁依赖。回波信号的季节变化相对较弱,主要体现在夜间出现较强回波发生率的时间不同,夏季较强回波发生率的持续时间最短,且不存在昏侧较高纬度的发生率增强区域。观测中,发生率峰值总是出现在磁地方时的午夜附近,且随着地磁扰动的增强而增强。

Hosokawa 等[10] 利用 6 台北半球 SuperDARN 雷达数据的统计研究发现昏侧回波事件的分布区域

位于中纬槽附近。另外,该项研究同时也发现在晨侧同样存在回波增强事件。文章提出了数种理论来解释这一现象,并认为电场和等离子体密度梯度的共同作用是最有可能的机制。

利用 SuperDARN Rankin Inlet 和 Inuvik 雷达以及加拿大雷索雷特湾(Resolute Bay, RB)先进数字电离层探空仪的联合观测, Koustov 等[11] 评估了电离层 F 层的电子密度峰值和电场强度对加拿大雷索雷特湾先进数字电离层探测仪回波探测的影响,认为雷达信号到反射体路径上的传播条件对观测存在影响。这些雷达数据也显示出电离层的回波发生具有日变化和季节变化特征。

早期的研究主要利用高纬雷达数据对电离层不规则体的分布特征与产生机制进行研究,随着近年来中纬 SuperDARN 雷达的建立,对于中纬区域电离层不规则体的研究也进一步开展。Hosokawa 等[12] 利用 Hokkaido East(HOK)雷达 2007 年 4 月的观测数据对雷达回波发生率的分布进行了统计分析。该雷达相对此前建立的其他北半球中纬 SuperDARN 雷达的磁纬度更低。结果表明, DUSE 发生区域与中纬槽的向阳边界处的电子密度梯度密切相关。

目前,对于回波增强现象的研究受限于雷达纬度位置,研究尚不完善,同时对于中纬区域的回波发生率分布情况的认识尚不充分。本文使用中国首部自主研发的高频相干散射雷达佳木斯雷达(Jiamusi, JME)和日本北海道东雷达(Hokkaido East, HOK) 2018 年 3 月至 2019 年 11 月的观测数据,对中纬度地区电离层 F 层回波发生率的变化情况进行分析和对比研究。

1 雷达与数据

1.1 JME 雷达与 HOK 雷达

建立 SuperDARN 雷达网最初的目的是观测两极地区的等离子体对流,因此所有早期的 SuperDARN 雷达都位于高纬地区[1]。其中在“十五”能力建设和子午工程空间天气监测项目的支持下,中国在南极地区架设的唯一的一部高频雷达——中山站(Zhongshan, ZHO)雷达于 2010 年 4 月建成并投入使用,主要观测极区电离层对流。该雷达的建立为高纬电离层不规则体的研究提供了新的数据[4,5,13]。

然而,在磁暴和亚暴期间,由于极光卵向赤道方向的扩张通常可以达到中纬度地区,高纬度的雷达无法观测到完整的对流过程。此后中纬 SuperDARN 雷达逐步建立,使得 SuperDARN 雷达网可以观测到磁暴和亚暴活动期间的中纬等离子体对流过程。SuperDARN 北半球雷达的视野分布如图 1 所示,其中用较粗的黑色线条标明的区域为 JME 雷达和 HOK 雷达视野。本文研究主要使用的是 JME 和 HOK 两部雷达的数据。

JME 雷达是在国家高技术研究发展计划支持下,由中国科学院国家空间科学中心自主研发的首部高频相干散射雷达。JME 雷达于 2020 年 6 月加入 SuperDARN 雷达网组织,截至目前为该网络最新的一台雷达。该雷达主要用于观测中国中纬度至极区的电离层不规则体。JME 雷达视野覆盖了此前 SuperDARN 雷达网络缺失的部分中纬度区域,改善了电离层对流模式的观测[14]。其遵循 SuperDARN 雷达的基本设计原则,与此前建立的中山站雷达相比, JME 雷达在硬件设计中采用了基于现场可编程门阵列的数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术,使得波束方向控制比以前的时间延迟控制更加灵活[15]。

JME 雷达位于地理坐标 46.8°N, 130.5°E, 对应于地磁坐标 41.8°N, 155.1°W。雷达的法向方向为地理坐标系下的北偏东 44°。雷达共有 24 个扫描波束,每个波束之间间隔 3.25°。传统的 SuperDARN 雷达有三种操作模式,分别为普通模式,特殊模式和自由操作模式,其中普通模式下雷达网络中的所有雷达以统一的扫描周期,按照 0 波束至 23 波束的方向逐步进行扫描;特殊模式下所有雷达同样保持统一扫描模式,但是不同波束的扫描周期存在差异;自由操作模式下各雷达可以单独设置扫描方式。本次研究中使用的数据为普通模式下的观测数据。该模式下雷达在每个波束方向上收到回波信号需要 7 s,一个完整的扫描过程需要 2 min。每个波束在雷达普通模式下的距离分辨率为 45 km(1 距离门),共有 75 个距离门。雷达主要的观测参数为扫描波束视线方向上的不规则体漂移速度、信噪比以及多普勒谱宽。

HOK 雷达位于地理坐标 43.53°N, 143.61°E, 对应于地磁坐标 37.3°N, 144.9°W, 于 2006 年 12 月建成并投入使用。在普通模式下, HOK 雷达沿 16 个方向发射高频信号,每个波束之间的方位角夹角为

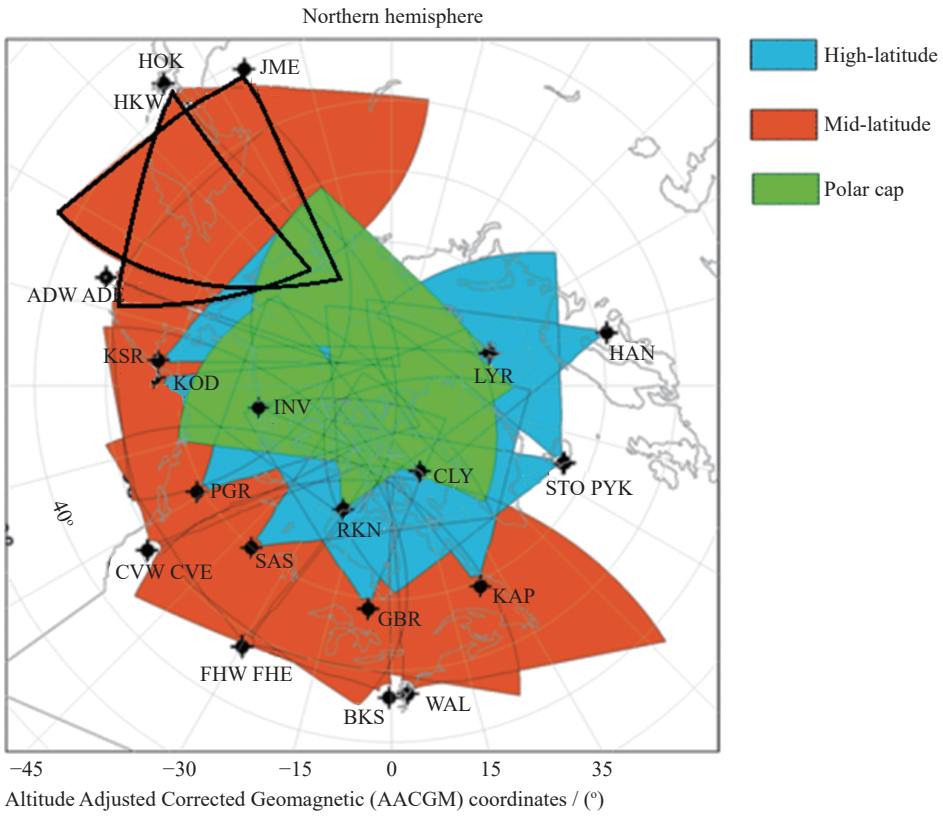


图 1 北半球 SuperDARN 雷达视野（粗黑线标出部分为 JME 雷达和 HOK 雷达视场）

Fig. 1 Field of view of SuperDARN radars in the northern hemisphere (The areas marked by black solid lines are field of view of Radar JME and HOK)

3.25°, 法向方向为地理坐标系下的北偏东 30°, 距离分辨率与 JME 雷达相同, 均为 45 km。HOK 雷达与 JME 雷达相距约 1000 km。

1.2 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[*], 其数据的时间分辨率为 1 min, 距离分辨率为 45 km。3 h 的 Kp 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[**]。

由于雷达的回波信号中组成成分复杂, 在研究过程中进行进一步的数据筛选是有必要的。在雷达收到的回波信号中存在两种常见的类型, 即地面/海面回波和电离层回波, 其中电离层回波信号中又分为 E 层回波与 F 层回波。对雷达数据进行处理时, 首先需要剔除地面回波与海面回波信号。这些回波信号的特点是视线速度较慢, 多普勒谱宽较低, 信噪比较小。依此特征, 满足条件

$$|v| - [v_{\max} - (v_{\max}/W_{\max})|W|] > 0, \tag{1}$$

$$p \leqslant 3\text{dB}. \tag{2}$$

可以认为此信号为地面或者海面回波[10,16], 式中 v 为观测中的多普勒速度, W 为多普勒谱宽, p 为信噪比, 在 SuperDARN 软件的当前版本中, 多普勒速度最大值 $v_{\max}$ 被设置为 30 m·s^{-1}, 多普勒谱宽最大值 $W_{\max}$ 被设置为 90 m·s^{-1}。

研究主要关注电离层 F 层的不规则体信号, 因此需要将雷达回波中来自 E 层的数据筛除。一般认为, 当回波信号距离雷达 600 km 以上时, 可以被认为是来自电离层 F 层的回波信号。本文在进行数据处理时选择距离雷达 15 距离门以上的回波, 也就是回波距离大于 675 km 的信号。在统计过程中采用 AACGM(Altitude Adjusted Corrected Geomagne-

[*] https://superdarn.nssdc.ac.cn/

[**] http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html

tic)坐标系,将雷达所有波束的数据划分到各个单元格内进行计算,每个单元格为 12 min × 1° MLAT。然后计算每个单元格内的电离层 F 层回波总数 N_F 以及雷达总回波数 N_O,用以下公式计算可得到如下雷达回波发生率:

$$R = \frac{N_F}{N_O} \times 100\%.$$

2　统计结果与分析

2.1　雷达回波发生率的分布特征

对 JME 雷达和 HOK 雷达 2018 年 3 月至 2019 年 11 月在夏季、春秋分季和冬季(夏季为 5, 6, 7, 8 月;春秋分季为 3, 4, 9, 10 月;冬季为 1, 2, 11, 12 月)的雷达回波发生率在地磁扰动期($Kp > 3$)与地磁平静期($Kp < 3$)的分布进行统计分析,结果如图 2 和图 3 所示。图中坐标系为 AACGM 坐标,其磁地方时按逆时针方向分布,并在图中给出了 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 MLT(Magnetic Local Time, MLT)的方位。统计中显示的雷达回波分布在地磁纬度为北半球磁纬(Magnetic Latitude, MLAT) 45°－65°,回波发生率范围为 0～6%。

回波发生率分布图中存在明显的季节和纬度变化特征,并受到地磁扰动影响。如图 2 所示,JME 雷达回波发生率的峰值出现在昏侧或夜侧。从地磁平静期中可以看出,在春秋分季和夏季,JME 雷达的回波发生率峰值出现在昏侧,在冬季则出现在午夜及午夜后,回波发生率显著增强的持续时间为约 01:30－03:00 MLT。在地磁平静期,JME 雷达回波发生率在大多数时间下小于 4.5%,其数值大小的季节变化较弱,但峰值出现的位置有所差别,夏季出现在 19:00－22:00 MLT,春秋分季出现在 16:00－19:00 MLT,冬季出现在 00:30－01:20 MLT。回波发生率的分布也存在纬度差异,昏侧回波发生率(>2%)分布的纬度区

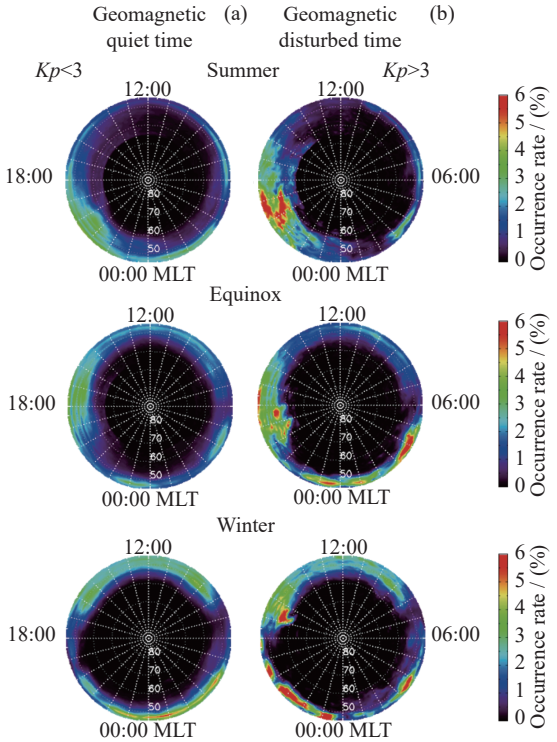


图 2　2018 年 3 月至 2019 年 11 月不同季节 JME 雷达在地磁平静期和扰动期的回波发生率分布

Fig. 2　Distribution of scattering occurrence rate of the JME radar in three seasons during geomagnetic quiet time and disturbed time from March 2018 to November 2019

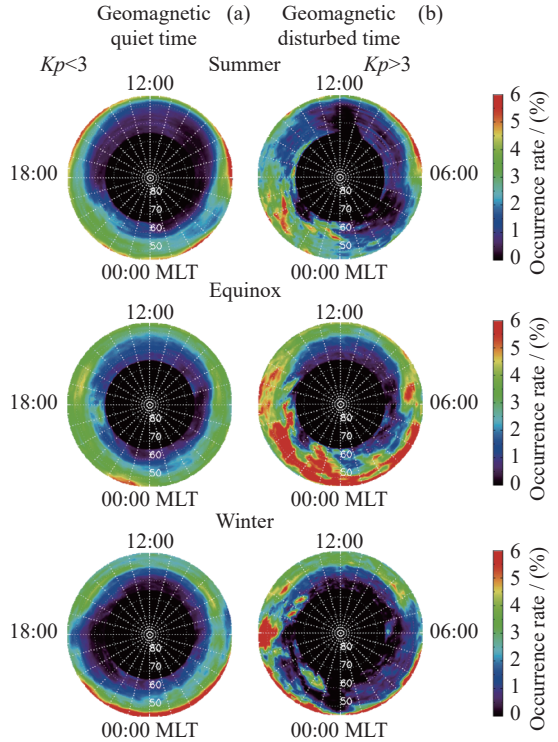


图 3　2018 年 3 月至 2019 年 11 月不同季节 HOK 雷达在地磁平静期和扰动期的回波发生率分布

Fig. 3　Distribution of scattering occurrence rate of the HOK radar in three seasons during geomagnetic quiet time and disturbed time from March 2018 to November 2019

域为 45°－59° MLAT, 而在夜侧其纬度分布稍低, 在 45°－50° MLAT。

在地磁扰动期, 三个季节的回波发生率均随地磁活动的增强而增强。地磁活动对昏侧回波发生率的影响效果表现为: 在地磁扰动期昏侧回波发生率增强, 其中在 55°－64° MLAT 增幅较大。但是在冬季, 雷达在午夜前的回波发生率明显增强, 而午夜后区域的回波发生率在地磁扰动期反而减弱了, 这一减弱现象同样也出现在夏季。

如图 3 所示, HOK 雷达的回波发生率分布也存在季节变化特征和受到地磁扰动影响。从图 3(a) 所示的地磁平静期中可以看出, HOK 雷达的回波发生率在大多数情况下也小于 4.5%, 但是其回波发生率大于 2% 的分布区域大于 JME 雷达, 这与佳木斯雷达和北海道东雷达的视野法向方向差异和视野范围有关, 扫描方向的不同会影响雷达信号的传播情况。从图 3(b) 所示的地磁扰动期可以看出, 三个季节的回波发生率均显示出了明显的回波发生率增强, 与 JME 雷达一致的是, 冬季和夏季的午夜后区域, 同样出现了发生率在地磁扰动期反而减小的现象。图 4 和图 5 则提供了两部雷达观测中不同纬度范围的回波发生率的时间分布,在统计过程中, 对雷达各信号的纬度位置进行向下取整, 以便进行绘制工作。

如图 4 所示, JME 雷达观测中显示了回波发生率存在纬度变化特征与地磁扰动影响。从地磁平静期中可以看出, 除了在冬季的 45°－49° MLAT 区域, 回波发生率峰值出现在昏侧, 且在较低的纬度区域更强。日侧回波发生率在夏季较低, 春秋分季和冬季较高。而晨侧回波发生率增强弱于昏侧, 纬度位置也更低, 主要出现在 55° MLAT 以下的区域。在地磁扰动期, 昏侧回波发生率增强, 尤其是在 55°－64° MLAT 范围内增幅较大(最大增幅约 3.8%), 其峰值出现在春季(5.5%)。地磁扰动的增强对晨侧回波发生率的影响较小, 除了在春季的 45°－49° MLAT 区域, 增幅达到了 3%。

如图 5 所示, HOK 雷达的统计结果显示, 与 JME 雷达观测结果相一致, 当地磁扰动增强时, 昏侧回波发生率在 55°－64° MLAT 范围内增幅最为明显。同时, 晨侧回波发生率增强主要出现在纬度较低的区域(40°－54° MLAT), 除了在春秋分季地磁扰动期间 55°－59° MLAT 范围内也出现了晨侧回波的增强。HOK 雷达在冬季 45°－49° MLAT 范围内的回波发生率在夜侧远大于同雷达其他纬度的观测数据, 且远大于 JME 雷达的观测数据。

2.2 分析

统计结果表明, 中纬度地区 JME 雷达与 HOK 雷达的回波发生率分布存在明显的季节、纬度变化与地磁扰动影响。两雷达均在昏侧 45°－64° MLAT 观测到了回波发生率的增强现象, 且在地磁扰动增强时, 55°－64° MLAT 范围内昏侧回波发生率的增强较为显著, 这可能与磁扰期间高纬对流电场的赤道向扩张有关。Scherliess 等[17] 对中纬电离层不规则体漂移运动的研究发现, 在纬向方向上漂移以西向占主导, 对应着极向的电场分量。在昏侧亚极光区域, 中纬槽的向阳边界处的向阳等离子体密度梯度与极向电场共同促进了该区域电离层不规则体的产生。当地磁扰动增强时, 高纬度对流电场向赤道向扩张, 使得中纬度昏侧的极向电场增强, 且极向电场的增幅随着纬度的降低而减小, 这与统计结果保持一致。

同时, 与此前的统计结果中昏侧回波发生率增强出现在亚极光区有所不同[10], 在 45°－49° MLAT 范围内仍存在明显的昏侧回波发生率增强现象。这与 JME 雷达与 HOK 雷达相对较低的纬度位置相关, 两雷达得到了更低纬度的长期中纬电离层不规则体观测数据。

45°－49° MLAT 范围内的昏侧回波发生率增强, 可能与日落时刻的太阳 EUV 辐射导致的向阳方向的等离子体密度梯度和中纬电离层在该区域的背景极向电场有关。在该区域, 电离层受高纬对流电场的影响相对更小, 回波发生率的增幅也更小。而雷达回波发生率在较低的纬度数值更大可能与雷达回波信号原理有关。满足传播方向与场向不规则体结构垂直的信号返回雷达, 不满足该条件的信号在电离层与地面之间多次散射, 逐渐向更远的方向传播, 当信号再次遇到不规则体时, 满足回波条件的电磁波也会产生回波信号。这意味着回波距离越远, 雷达回波发生率可能更低。

两雷达同时在晨侧也观测到了增幅稍小的发生率增强现象。晨侧中纬槽的向阳边界同样存在向阳方向的等离子体密度梯度, 但极向的电场分量对应的等离子体西向漂移与等离子体密度梯度方向相反, 这使得其对不规则体产生的促进作用小于昏侧。而中

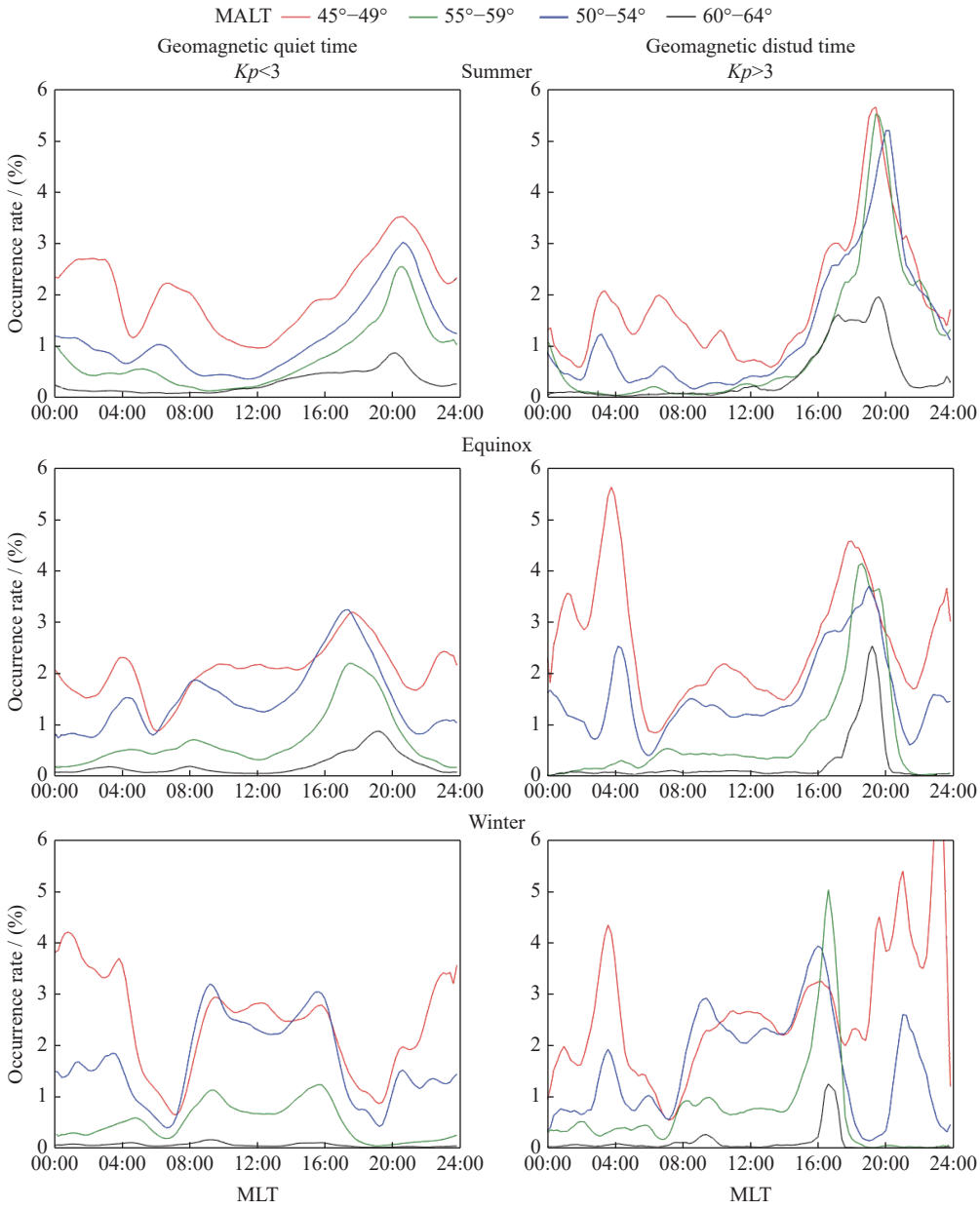


图 4　不同季节与不同地磁条件下 JME 雷达观测到的不同纬度范围回波发生率随时间的变化

Fig. 4　Distribution of scattering occurrence rate over time at different latitude ranges observed by the Jiamusi radar, and its variation in the geomagnetic quiet time, the geomagnetic disturb time and different seasons

纬槽纬度位置随地方时的变化显示晨侧中纬槽的纬度小于昏侧中纬槽的纬度，这可能是观测中晨侧增强出现的纬度低于昏侧增强的原因。晨侧回波发生率的增强受地磁扰动的影响较弱，这可能与午夜后至晨侧中纬电离层受中性风影响比高纬对流电场更显著有关[18]。

在 HOK 雷达的统计结果中，存在冬季夜侧 45°−49° MLAT 范围内的回波发生率超过 10% 的情况，远大于其他时间段和纬度区域的回波发生率。这一统计结果的出现可能需要进一步的研究分析。

3　结论

利用佳木斯雷达与北海道东雷达 2018 年 3 月至 2019 年 11 月的观测数据，统计研究了中纬度电离层 F 层回波发生率的季节与纬度变化，以及其随地磁扰动的变化情况。可以得到如下结论。

(1)在 45°−64° MLAT 范围内都存在昏侧的回

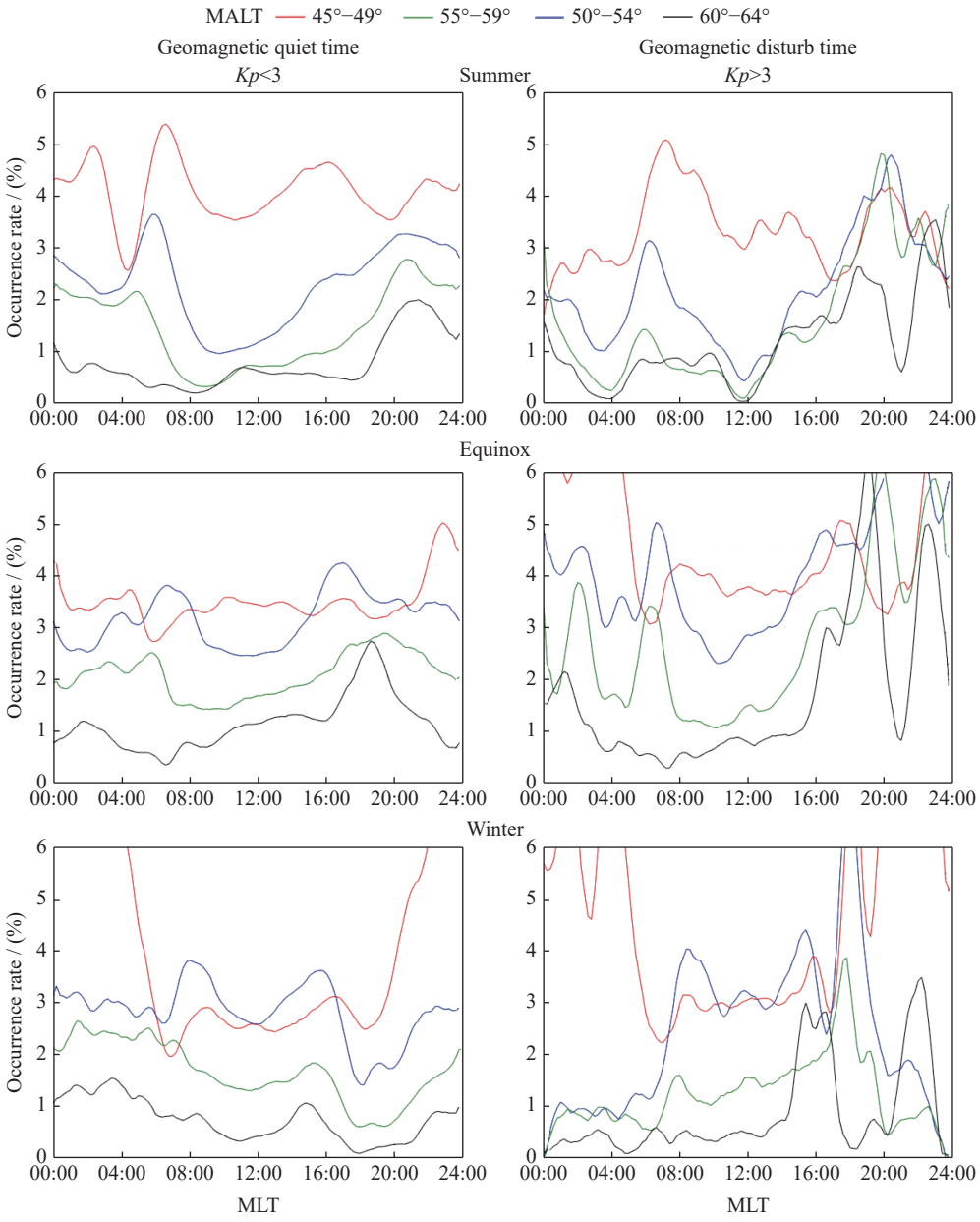


图 5 不同季节与不同地磁条件下 HOK 雷达观测到的不同纬度范围回波发生率随时间的变化

Fig. 5 Distribution of scattering occurrence rate over time at different latitude ranges observed by the Hokkaido East radar, and its variation in the geomagnetic quiet time, the geomagnetic disturb time and different seasons

波发生率增强现象，可能与昏侧向阳的等离子体密度梯度和背景极向电场相关。

（2）地磁扰动期与平静期的对比显示，昏侧 55°－64° MLAT 范围内的回波发生率增幅大于 45°－54° MLT。这可能是受到磁扰期间高纬对流电场的赤道向扩张影响。

（3）晨侧回波发生率增强现象弱于昏侧回波发生率增强现象，且发生的纬度相对较低，一般出现在 45°－54° MLAT 范围内，受地磁扰动的影响较弱。可能受晨侧向阳的等离子体密度梯度和背景极向电场的共同作用。

在昏侧，向阳的等离子体密度梯度和中纬度电离层背景极向电场的共同作用，可能是中纬度电离层昏侧回波发生率增强现象的产生机制。这一方向的等离子体密度梯度由太阳 EUV 辐射引起的等离子体密度梯度与中纬槽的日向边界处等离子体密度梯度共同组成。这一机制可能同样作用于晨侧昏侧回波发生率增强现象，中纬槽的日出边界较日落边界纬度更

低, 这与统计观测中的晨侧回波发生率增强现象出现的纬度较昏侧更低保持一致。

致谢 本文使用的佳木斯雷达与北海道东雷达数据从国家空间科学数据中心获取(https://superdarn.nssdc.ac.cn/)。*Kp* 指数的使用由京都地磁数据中心 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html)授权。

参考文献

[1] GREENWALD R A, BAKER K B, DUDENEY J R, *et al*. DARN/SuperDARN: a global view of the dynamics of high-latitude convection[J]. *Space Science Reviews*, 1995, **71**(1): 763-796

[2] 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

[3] 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

[4] LIU Erxiao, HU Hongqiao, LIU Ruiyuan, *et al*. Diurnal variation of the HF radar echoes at Zhongshan Station and the influence of geomagnetic activity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, **55**(9): 3066-3076 (刘二小, 胡红桥, 刘瑞源, 等. 中山站高频雷达回波的日变化特征及地磁活动的影响[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(9): 3066-3076)

[5] HU H Q, LIU E X, LIU R Y, *et al*. Statistical characteristics of ionospheric backscatter observed by SuperDARN Zhongshan radar in Antarctica[J]. *Advances in Polar Science*, 2013, **24**(1): 19-31

[6] RUOHONIEMI J M, GREENWALD R A, VILLAIN J P, *et al*. Coherent HF radar backscatter from small-scale irregularities in the dusk sector of the subauroral ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 1988, **93**(A11): 12871-12882

[7] RUOHONIEMI J M, GREENWALD R A. Rates of scattering occurrence in routine HF radar observations during solar cycle maximum[J]. *Radio Science*, 1997, **32**(3): 1051-1070

[8] MILAN S E, YEOMAN T K, LESTER M, *et al*. Initial backscatter occurrence statistics from the Cutlass HF radars[J]. *Annales Geophysicae*, 1997, **15**(6): 703-718

[9] PARKINSON M L, DEVLIN J C, YE H, *et al*. On the occurrence and motion of decametre-scale irregularities in the sub-auroral, auroral, and polar cap ionosphere[J]. *Annales Geophysicae*, 2003, **21**(8): 1847-1868

[10] HOSOKAWA K, IYEMORI T, YUKIMATU A S, *et al*. Source of field-aligned irregularities in the subauroral *F* region as observed by the SuperDARN radars[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2001, **106**(A11): 24713-24731

[11] KOUSTOV A V, PONOMARENKO P V, GHEZELBASH M, *et al*. Electron density and electric field over resolute bay and *F* region ionospheric echo detection with the Rankin Inlet and Inuvik SuperDARN radars[J]. *Radio Science*, 2014, **49**(12): 1194-1205

[12] HOSOKAWA K, NISHITANI N. Plasma irregularities in the duskside subauroral ionosphere as observed with mid-latitude SuperDARN radar in Hokkaido, Japan[J]. *Radio Science*, 2010, **45**(4): RS4003

[13] LIU Jianjun, HU Hongqiao, CHEN Xiangcai. A dataset from the Zhongshan HF coherent scatter radar in Antarctica (2012)[J]. *China Scientific Data*, 2021, **6**(2): 64-72 (刘建军, 胡红桥, 陈相材. 2012年南极中山站高频相干散射雷达数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2021, **6**(2): 64-72)

[14] 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

[15] DENG Xiang, YAN Jingye, WU Ji, *et al*. A method and implementation of internal calibration in AgileDARN HF radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(6): 1221-1226 (邓翔, 阎敬业, 吴季, 等. AgileDARN 雷达内定标的方法与实现[J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(6): 1221-1226)

[16] BLANCHARD G T, SUNDEEN S, BAKER K B. Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(5): RS5012

[17] SCHERLIESS L, FEJER B G, HOLT J, *et al*. Radar studies of midlatitude ionospheric plasma drifts[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2001, **106**(A2): 1771-1783

[18] MAIMAITI M, RUOHONIEMI J M, BAKER J B H, *et al*. Statistical study of nightside quiet time midlatitude ionospheric convection[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2018, **123**(3): 2228-2240