基于张衡一号卫星观测的夜侧高纬电离层电场时空变化特征分析

李中暘[1] 黄建平[1] 李忠[2] 李文静[1] 泽仁志玛[1] 鲁恒新[1] 谭巧[1]

周娜[1] 韩莹[2]

1(应急管理部国家自然灾害防治研究院 北京 100085)

2(应急管理大学 廊坊 065201)

摘 要 电离层电场是磁层-电离层耦合过程中的关键物理量，其时空分布特征对理解空间电动力学过程及空间天气演化具有重要意义。本文利用张衡一号卫星电场探测仪（EFD）在一年时间尺度内获取的重访轨道观测数据，在地心地固坐标系（ECEF）下系统研究了夜侧高纬电离层电场的时空变化特征。首先对电场三分量波形数据进行预处理，并统计分析其在 65° S~65° N 纬度范围内的全年分布结构；在此基础上选取多个固定纬度位置，对电场 Y 分量（Ey）的时间序列变化进行分析，以揭示其年内变化规律。同时利用电场仪 VLF 频段功率谱密度（PSD）数据，对 11.5~12 kHz 频段电场扰动能量的纬向分布及时间变化特征进行了统计研究。结果表明：在固定重访轨道条件下，电场三分量随纬度变化呈现稳定的大尺度空间结构，其中 Ey 对电场变化最为敏感，并在固定纬度位置上表现出明显的阶段性年内变化特征，且其变化幅度随纬度升高而增强。在 VLF 频段，功率谱密度整体呈现“中纬稳定、高纬增强”的空间分布特征，高纬区域更容易出现显著的电磁扰动增强事件。研究结果表明，夜侧高纬电离层电场及其电磁扰动能量在年内尺度上具有明显的时空变化规律。本研究为理解高纬电离层电动力学过程及磁层-电离层耦合机制提供了新的卫星观测证据。

关键词 高纬电离层，电场观测，张衡一号卫星，功率谱密度，磁层-电离层耦合

中图分类号 P352

Analysis of Spatiotemporal Variations in the Nightside High-Latitude Ionospheric Electric Field Based on CSES Observations

ZhongYang LI[1] JianPing HUANG[1] Zhong LI[2] WenJing LI[1] ZhiMa ZEREN[1] HengXin LU[1] Qiao TAN[1] Na ZHOU[1] Ying HAN[2]

1(*National Institute of Natural Hazards, Beijing* 100085)

2(*University of Emergency Management, Langfang* 065201)

Abstract The ionospheric electric field is a key parameter governing plasma transport and magnetosphere-ionosphere coupling, yet its long-term behavior at high latitudes, particularly on the nightside, remains insufficiently characterized by in situ observations. This study investigates the spatial structure and annual variation of the nightside high-latitude ionospheric electric field using one year of revisit-orbit measurements acquired by the Electric Field Detector (EFD) aboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES) from 4 May 2021 to 4 May 2022.

民用航天技术预先研究项目（D040203）与龙计划6（dragon6-95407）共同资助

最新录用

Observations from a fixed revisit-orbit group, mainly covering 00:00~03:00 local time and 65°S~65°N, were analyzed in the Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) coordinate system to maintain a consistent reference frame for long-term comparisons. The three-component ULF electric-field waveforms were denoised using Savitzky–Golay filtering, after which their full-year latitudinal distributions were compared. The temporal evolution of the Y component (Ey), which showed the strongest sensitivity to inter-orbit variations, was further examined at representative fixed latitudes. In addition, EFD power spectral density (PSD) data in the 11.5~12 kHz VLF band were used to characterize the spatial and temporal distribution of electromagnetic disturbance energy. The three electric-field components exhibited reproducible large-scale latitudinal structures along the selected orbit, although their amplitudes varied with observation date. Compared with the X component, the Y and Z components showed greater dispersion at middle and high latitudes. At fixed locations, Ey displayed distinct stage-like and quasi-periodic annual variations, with broadly consistent temporal phases across latitudes but increasing amplitudes toward higher latitudes. At approximately 62° in both hemispheres, strong and weak Ey stages persisted for about four and six months, respectively, whereas the transition characteristics differed at lower latitudes. The VLF PSD was generally stable at middle and low latitudes but increased markedly near both high-latitude ends of the orbit. The CH2 and CH3 channels showed the clearest high-latitude enhancements, while fixed-latitude time series revealed sustained enhancement in the southern high-latitude region in early 2022 and intermittent events in the north. These results demonstrate that the nightside ionospheric electric field has a statistically stable large-scale spatial background superimposed with pronounced latitude-dependent annual variability. They also indicate that high-latitude regions are more responsive to magnetospheric forcing in both low-frequency electric-field variations and VLF electromagnetic activity. The study provides an observational basis for long-term statistical analyses of high-latitude electrodynamics using CSES measurements and for further investigations of magnetosphere-ionosphere coupling mechanisms.
Key words High-latitude ionosphere, Electric field observation, China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES), Power spectral density, Magnetosphere–ionosphere coupling

0 引言

电离层作为地球上大气与空间等离子体的关键过渡区域，其电场结构在电离层动力学、等离子体输运、磁层-电离层耦合等方面发挥着核心作用[1-5]。电场的时空分布与变化特征深刻影响着空间天气的演化过程[6-8]。而高纬度地区由于地磁场线近乎垂直，日夜电导率差异显著，使得该区域电场的时空结构更为复杂[2,9-10]。因此，深入研究高纬度地区电离层电场的时空分布特征，既是揭示磁层-电离层耦合核心物理机制的基础[5,11]，也对理解全球空间天气效应有着重要的应用价值[7]。

受限于早期空间探测技术水平和电场仪器研制能力，电离层电场的直接原

位测量长期面临较大困难。许多早期卫星任务并未搭载专门的电场探测载荷，导致可用于研究电离层电场的观测数据相对匮乏[12]。在缺乏直接测量数据的情况下，相关研究主要依赖理论推导、电离层电动力学模型构建，或结合磁场观测数据通过电动力学关系反演电场分布特征[4,13-14]。尽管这些方法在揭示电离层电场的大尺度结构方面取得了重要进展，但其结果往往依赖于模型假设或外部参数约束，在高纬地区尤其是夜侧条件下的统计特征刻画仍存在一定不确定性。

近年来，空间探测技术的发展使得电离层电场的卫星原位观测成为可能，为揭示其空间分布特征及其对外部驱动的响应提供了宝贵数据支撑[15-18]。例如，Cluster 卫星利用其电场、磁场和密度数据，对位于 4~7 个地球半径地心距离处的高纬度强电场事件（映射到电离层高度时大于 150 mV/m）进行了统计研究，揭示了这些强电场的出现和分布模式，为其驱动机制的认识提供了重要线索[15]。ICON 任务搭载的离子速度计（IVM）能够提供原位离子密度、离子温度和三维离子漂移速度，对于量化低等离子体密度环境下漂移速度不确定性具有关键意义[16]。这些卫星观测显著提升了我们对高纬电离层电场及其变异性的认识[10,19]。

已有研究表明，高纬电离层电场在空间上呈现出显著的纬度依赖性，并受太阳活动、季节变化以及磁层扰动的共同调制[1,4,6,20-22]。然而，由于观测轨道、地方时覆盖以及分析方法的差异，不同研究之间的结果仍存在一定的不一致性，对高纬电离层电场长期统计特征的认识仍有待深化。

在现有研究中，电离层电场通常被转换至局地坐标系或场向坐标系进行分析[2,4,23]，以突出其物理方向意义。这种处理方式在研究瞬时事件或局地过程时具有明显优势，但同时也依赖于精确的姿态信息和磁场模型，并可能在多轨道、长时间尺度统计分析中引入额外不确定性[24]。相比之下，地心地固坐标系（Earth-Centered Earth-Fixed，ECEF）作为一种统一的地固参考框架，在多轨道、多时段数据对比中具有良好的稳定性和一致性。

此外，高纬电离层电场对地方时具有显著依赖性。夜侧高纬地区由于缺乏太阳辐射，其电离层电导率显著降低，在相同磁层驱动条件下更容易产生较强的电场响应[6]。同时，夜侧区域也是磁层-电离层耦合过程的重要作用区，极光电流体系和磁尾回流过程频繁发生，使得电场在时间尺度上表现出更强的变化特征[2,5,21]。然而，针对固定地方时条件下高纬电离层电场的长期统计研究仍相对较少，尤其是在年尺度上同时兼顾空间结构与时间变化的系统分析尚不充分[9,25]。

而之前基于张衡一号卫星电场的研究，集中在中低纬度地震前的电场异常分析[26-29]，对于中高纬度地区的电离层电场特征研究相对较少[30]，中低纬度的电离层电场应用分析方法是否适用中高纬度还有待于对中高纬度电场的背景特征认识。

基于此，本文利用张衡一号卫星电场仪在一年时间尺度内获取的高纬电离层电场观测数据，在地心地固坐标系下系统研究高纬电离层电场的时空分布特征。通过对全年多轨道电场三分量和功率谱密度的整体分析，揭示其随纬度变化的空间分布特征；进一步在固定纬度位置对其进行时间序列统计，重点探讨夜侧条件下高纬电离层电场在年内尺度上的变化规律及其可能的物理机制。

1 卫星及载荷简介

本研究使用的电场数据来自于张衡一号卫星。电磁监测试验卫星“张衡一号”是我国首颗用于电离层电磁扰动监测的专业卫星，是地震立体监测体系的首个天基电磁平台，也是地球物理场探测卫星计划的首发星，于 2018 年 2 月 2 日发射入轨。它通过获取地球磁场、空间电磁场、电离层等离子体和高能粒子等信息，覆盖全球，重点关注中国及周边地震带区域，填补了我国在天基地震电磁监测领域的空白[31]。该卫星主要用于探索地震前兆、研究电离层与地球系统相互作用，并为地震监测与预报、空间环境监测、导航通信等提供支撑。张衡一号卫星运行于轨道高度约为 507 km 的太阳同步轨道，降交点地方时为下午 14 点，轨道回归周期为 5d，每 5d 星下点轨迹相同，卫星一个 5d 周期的星下点轨迹如图 1 所示。卫星绕地球飞行一圈约 94 min，大部分载荷在 65° S~65° N 的纬度范围开机工作，观测数据按升轨（夜晚）和降轨（白天）分别储存，每半轨观测约 34 min；在同一天内相邻的升轨（或降轨）空间分辨率约 2000 km[32].

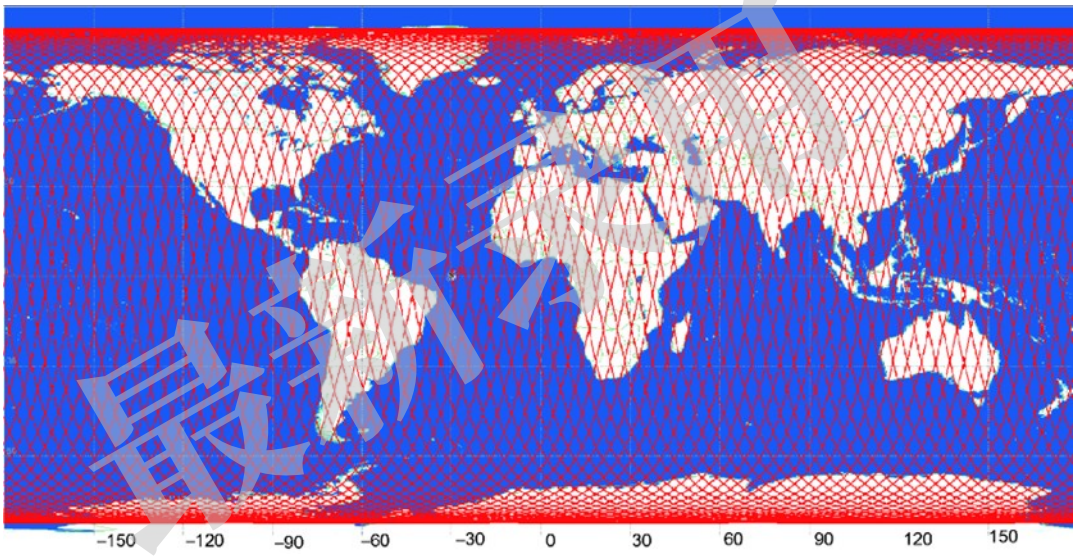


图 1　张衡一号卫星轨道及观测覆盖范围示意图[32]。

Fig.1　Diagram of CSES Orbit and Observation Coverage.

在所有载荷中，电场探测仪（Electric Field Detector，EFD）是监测电离层电场变化的关键设备。其探测频段覆盖从近直流到 3.5 MHz，分为 ULF,ELF,VLF,HF 四个频段，可同时获取低频电场背景变化和高频电磁波扰动信息，用于探测地震前后电离层电场异常、磁暴期间电场结构变化以及电磁波传播特征。电场探测仪采用四根约 4.15 m 的卷筒式伸杆，每根伸杆末端配置球形探头，以形成长基线电场测量结构，从而显著减小卫星本体表面电荷和射频干扰对测量的影响。在性能上，电场探测仪具有约 1 $\mu V/m$的典型分辨率，低频段灵敏度优于 0.1 $\mu V \cdot m^{-1} \cdot Hz^{-0.5}$，可精确捕捉极弱的电场扰动信号。在 VLF 频段, EFD 以三条双探针基线输出电场功率谱数据，其中 CH1,CH2 和 CH3 分别对应 A-B,C-D 和 A-D 探头对，其基线长度分别约为 7.315 m, 9.394 m 和 9.566 m。双探针系统通过测量两个探头之间的电势差，获得电场在相应探头连线方向上的响应。三个探头对的空间方向不同，三个通道反映的是波动电场在不同测

量基线方向上的投影。卫星为确保电场探测的准确性，在系统层面进行了严格的电洁净度控制，要求卫星本体任意两点电位差优于 1 V，整体绝对电位控制在±2 V 以内，以减少由卫星与等离子体相互作用引发的浮动电位干扰。同时通过伸杆使探头远离星体，使测量环境尽可能接近真实电离层背景电场。EFD 的性能评估表明，在飞行测试中它能成功记录自然电磁发射事件，符合预期的科学目标要求[33]。

2 数据的选择与处理

2.1 轨道选择

依托张衡一号卫星的轨道覆盖情况，针对夜侧高纬地区电离层电场开展统计分析，选取起始编号为 18046 轨道及其重访轨道数据。该轨道的星下点主要分布于海洋及人类活动稀少区域，从空间覆盖上有效减少了陆地区域人工电磁干扰对电场观测结果的影响。本研究选取 2021 年 5 月 4 日至 2022 年 5 月 4 日作为研究时段，主要基于以下考虑：首先该时间区间覆盖一个完整周年，能够包含不同季节条件，有利于分析固定重访轨道上电离层电场的年内变化特征，并避免因研究时段不足一年或起止季节不一致而造成的季节采样偏差；其次，该时段位于张衡一号卫星完成初期在轨调试后的正常观测阶段，仪器运行与数据处理方法已完成固化，所选取的数据能够满足全年统计及固定纬度位置时序分析的需要。图 2 展示了该重访轨道在 2021 年 5 月 4 日至 2022 年 5 月 4 日期间的星下点轨迹分布。所选轨道的空间覆盖范围由南半球高纬地区（约 65° S）跨越赤道延伸至北半球高纬地区（约 65° N），经度主要分布在西经 127°~167°之间。

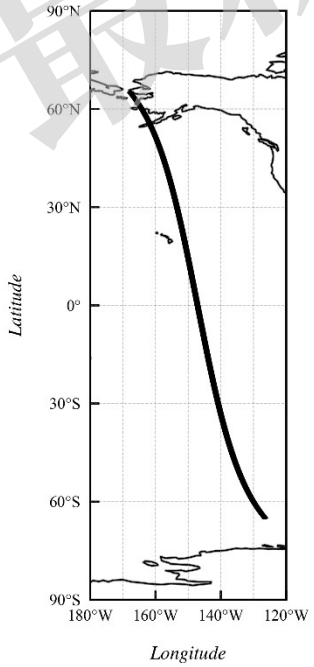


图 2　张衡一号卫星选定重访轨道的星下点轨迹分布。

Fig. 2　Distribution of sub-satellite tracks for the selected CSES revisit orbit.

2.2 单轨数据预处理

滑动时窗法和四分位距法常作为异常提取前的预处理手段，能够在一定程度上削弱电离层背景场的影响并突出异常扰动信号，但此类方法在处理过程中可能破坏原始数据的连续性与完整性。为在抑制噪声的同时尽可能保留信号结构特征，本文引入 Savitzky–Golay（S-G）滤波方法。该方法本质上是一种基于最小二乘多项式拟合的平滑滤波算法，由 Savitzky 和 Golay 于 1964 年提出，近年来已被广泛应用于各类时序数据的平滑与去噪处理[34]。本文采用 S-G 滤波器对 EFD 载荷获取的电离层电场三分量波形数据进行去噪处理。图 3 以 180461 轨道数据为例，结果展示该方法在有效抑制随机噪声的同时，较好地保留了电场信号的整体变化趋势和结构特征，为研究电场的整体结构特征提供可靠结果。

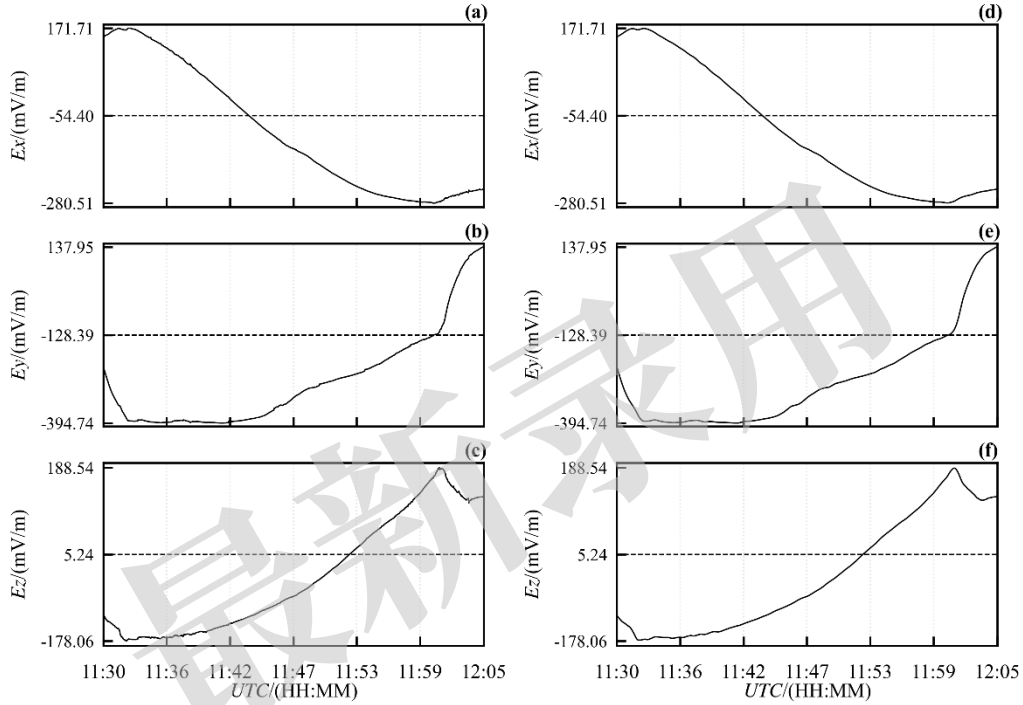


图 3　单轨电场数据 Savitzky－Golay 滤波处理示例。

Fig.3　Example off Savitzky-Golay filtering applied to electric-field data from a single orbit.

3 结果与分析

3.1 电场强度纬向变化特征分析

在前述数据预处理的基础上，首先对比分析了该轨道从 2021 年 5 月 4 日至 2022 年 5 月 4 日期间的所有重访轨道的 ULF 频段电场波形序列，见图 4。

最新录用

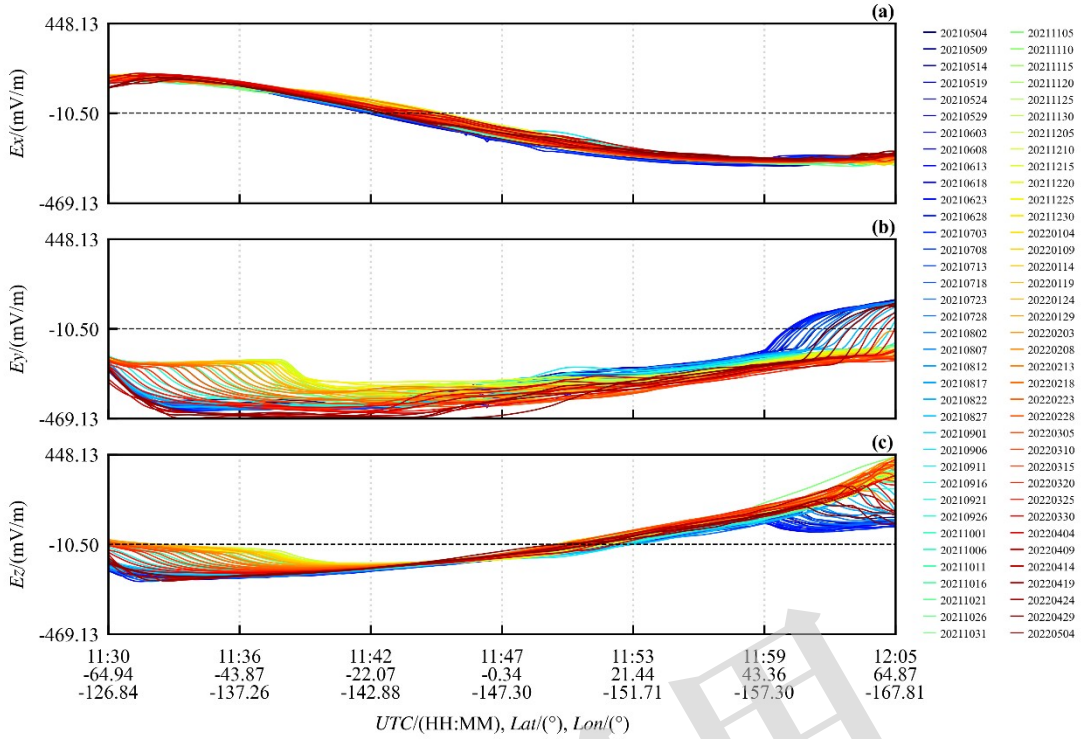


图 4　张衡一号卫星电场仪在选定重访轨道上观测到的 ULF 频段电场三分量全年波形序列。

Fig. 4　The full-year waveform sequence of the three components of the ULF band electric field observed by CSES EFD on the selected revisit orbit.

图 4 展示了张衡一号卫星电场仪在所选重访轨道上连续一年观测得到的 ULF 频段电场波形随纬度的变化情况（65° S~65° N），其中每条曲线对应一次重访轨道观测结果。图中自上而下依次为电场 X,Y,Z 三个分量的全轨波形序列。

从整体分布看，三分量在全年观测中表现出一致的宏观变化趋势，但幅值范围及离散程度存在明显差异。X 分量在所有重访轨道中均呈现出由南向北近似单调变化的特征，其离散程度在不同纬度区间变化较小，表现出相对稳定的纬向分布结构。相比之下，Y 分量与 Z 分量在保持总体变化趋势一致的同时，在不同纬度区域表现出更为显著的幅值离散现象，反映出更强的时间变化敏感性。

分区来看，在南半球中高纬区域（40° S~65° S）（图 5），同一纬度条件下三分量均存在一定幅值波动，其中 X,Y,Z 分量的最大变化幅度分别为 66.257 mV/m, 292.960 mV/m和 198.679 mV/m。赤道附近区域电场分量波动相对减弱，但仍可观测到明显的轨道间差异，其中 X 分量的最大值为-74.681 mV/m、最小值为-155.699 mV/m，对应变化幅度为 81.018 mV/m；Y 分量的最大值为-271.200 mV/m、最小值为-451.162 mV/m，对应变化幅度为 179.962 mV/m；Z 分量的最大值为-44.386 mV/m、最小值为-87.724 mV/m，对应变化幅度为 43.337 mV/m。在北半球中高纬区域（40° N~65° N）（图 6），Y 与 Z 分量的离散程度进一步增强，而 X 分量仍保持相对平稳，其最大变化幅度分别为 84.686 mV/m, 367.521 mV/m和 310.284 mV/m。

最新录用

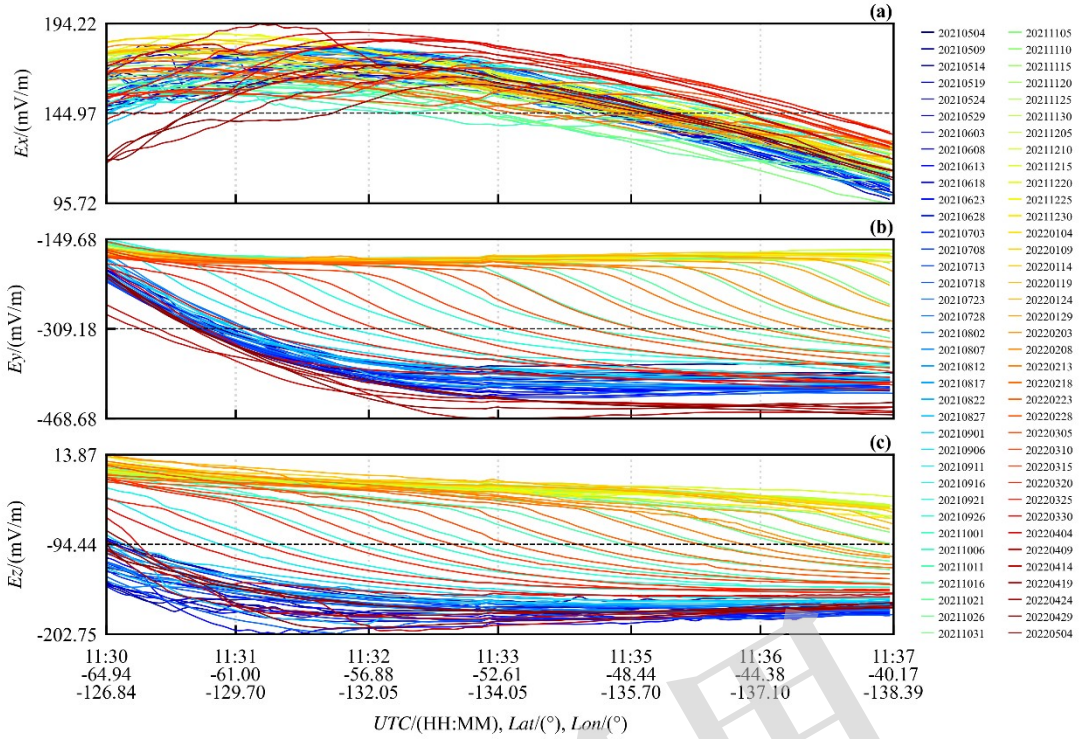


图5　电场三分量在南半球高纬区域的局部放大图。

Fig.5　Local magnified view of the three components of the electric field in the high-latitude region of the Southern Hemisphere.

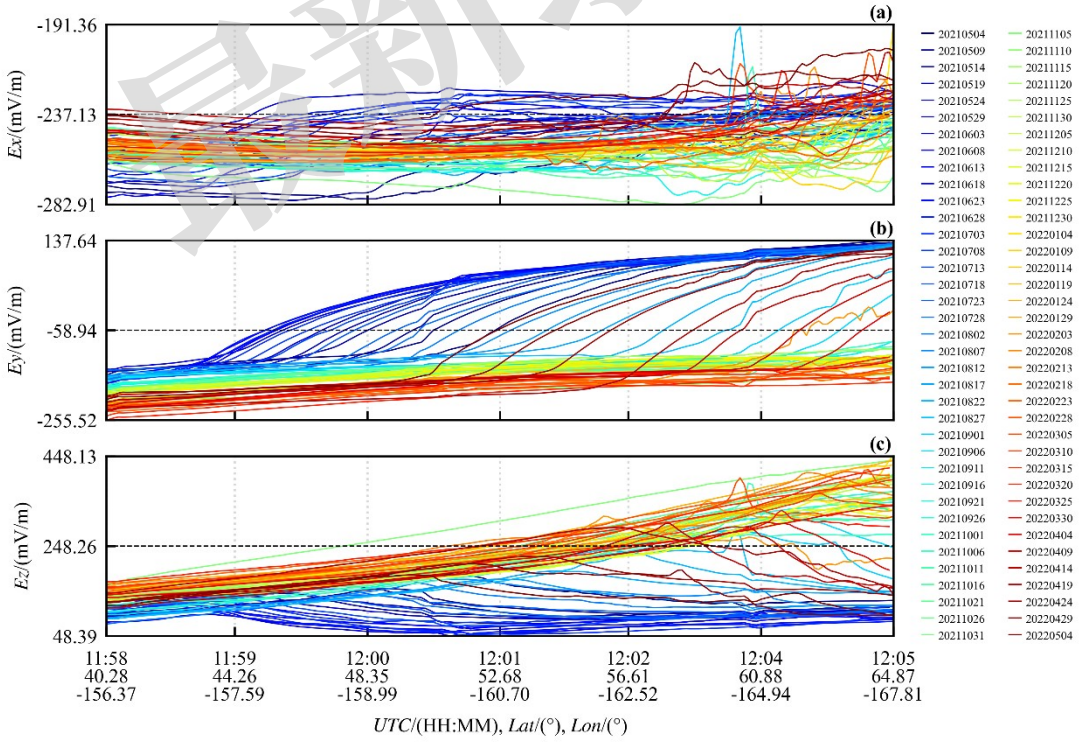


图6　电场三分量在北半球高纬区域的局部放大图。

Fig.6　Local magnified view of the three components of the electric field in the high-latitude region of the Northern Hemisphere.

最新录用

在地心地固坐标系下，高纬电离层电场三分量随纬度变化呈现出较为稳定的大尺度空间分布结构。尽管不同观测日期电场幅值存在一定差异，但其整体变化趋势在全年范围内保持高度一致，说明在统计意义上夜侧高纬电离层电场具有相对稳定的空间结构特征。这种稳定结构与夜侧电离层的背景物理条件密切相关。本文所选取的轨道在全年范围内对应的地方时主要集中在夜侧时段（约 00:00LT~03:00LT），在该时段电离层缺乏太阳辐射加热，电子密度及电导率整体较低。由于电离层电导率降低，在相同磁层驱动条件下电场更容易形成较大响应，从而使夜侧高纬电场在不同轨道观测之间表现出较好的重复性，并在长期统计结果中呈现出稳定的空间结构。此外，从三分量的分布特征来看，X 分量随纬度呈现较为平滑的单调变化，而 Y 与 Z 分量在中高纬区域表现出更明显的离散结构，说明后两者对外部驱动变化更为敏感。这一现象可能与高纬地区磁层对流、电流系统以及极区电场结构的变化有关，使得电场在不同时间条件下产生更明显的幅值差异。

上述特征表明，夜侧高纬电离层电场在整体上具有相对稳定的空间分布形态，但同时叠加了显著的时间变化成分。通过对全年重访轨道数据的对比可见，在相同空间轨道条件下，不同时间区间电场分量幅值的系统性差异客观存在，其中 Y 分量表现较为突出，在各时间区段均呈现清晰的分层结构。这为从固定空间位置视角研究高纬电场的时间演化规律提供了可靠观测基础。

3.2 电场强度固定位置的时序分析

为进一步探讨夜侧高纬电离层电场的时间变化特征，本文在全年重访轨道数据基础上，选取若干固定纬度位置，对电场 Y 分量（Ey）进行时间序列统计分析。相较于 X 和 Z 分量，Y 分量在飞行过程中对纬度变化表现出更为显著的幅值响应，同时在不同时间段之间呈现出较为清晰的系统性差异，因此被选作为研究高纬电场时间变化特征的代表性分量。

图 7 展示了多个固定纬度位置处 Ey 在一年时间尺度内的演化特征。总体来看，中高纬地区 Ey 表现出明显的高值与低值交替阶段，且不同纬度位置的变化节律存在差异。在南半球，南纬 62.23° 处 Ey 强值阶段约持续 4 个月，弱值阶段约 6 个月，单向过渡变化阶段约 1 个月；南纬 45.27° 处强值阶段约 4 个月，弱值阶段约 4 个月，单向过渡阶段约 3 个月。北半球方面，北纬 62.26° 的变化特征与南半球高纬相似，强值与弱值阶段分别约持续 4 个月和 6 个月；而北纬 45.92° 处强值阶段仅约 1 个月，其余时间以弱值为主，单向变化阶段约 1 个月。

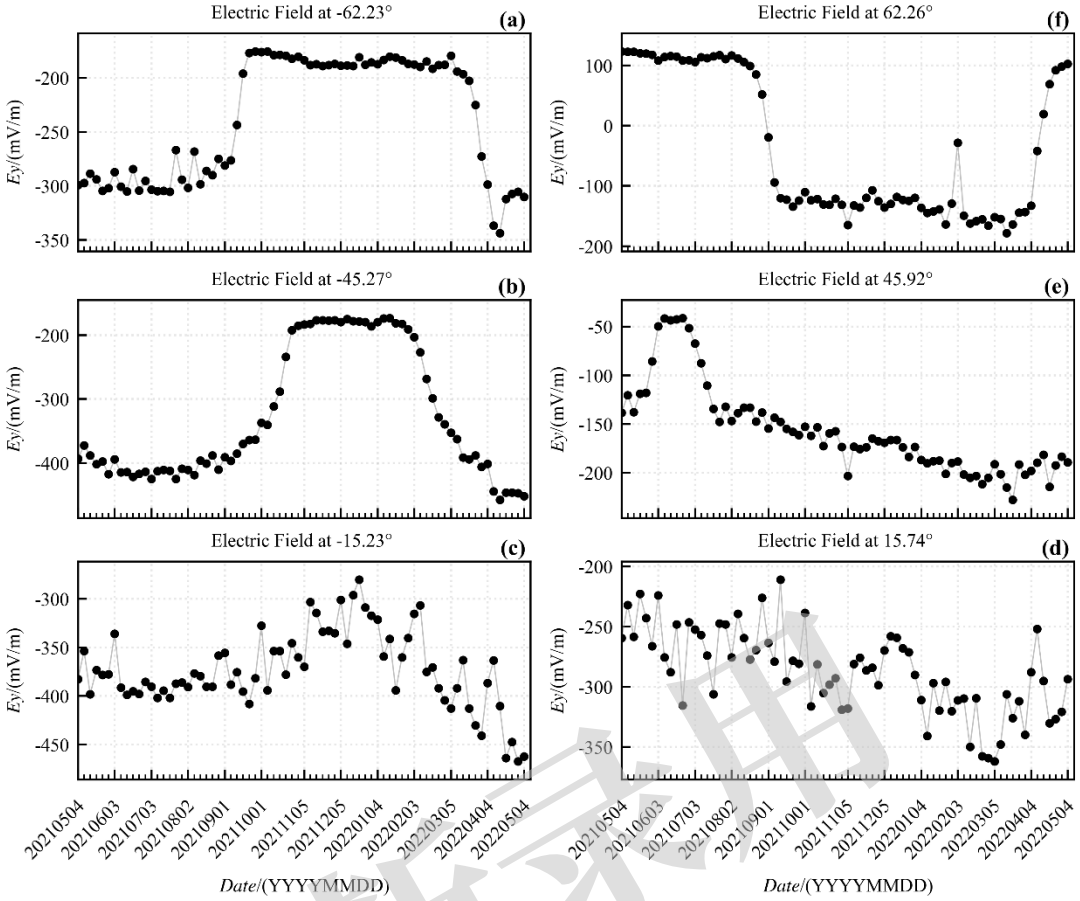


图 7　不同固定纬度位置处 Y 分量在一年时间尺度内的变化情况。

Fig.7　Temporal variations of Ey at representative fixed latitudes over one year.

从纬向对比可见，高纬地区弱电场阶段持续时间相对较长，且阶段转换更为迅速，表现出较强的时间变化敏感性；低纬区域虽然缺乏持续数月的稳定平台区间，但其整体变化趋势与中高纬保持一致，仅变化幅度相对较小。总的来说，在相同空间位置条件下，Ey 随时间呈现出显著的阶段性与准周期性变化特征，不同纬度间变化相位整体一致，但幅值范围和变化幅度存在差异。通过进一步比对可以发现，随着纬度升高，Ey 的年内变化幅度总体增强，反映出高纬电离层对时间尺度扰动的响应更为显著，而低纬地区变化相对平缓。

上述分析揭示了高纬电离层电场在年内尺度上具有显著的时间变化规律，与前文空间分布分析所揭示的整体结构特征相互印证。

3.3 功率谱密度纬向变化分析

对于更高频段，由于缺少与 ULF 频段相同形式的连续三分量波形记录，这里选择了频段为 11.5 kHz 至 12 kHz 的区间，对比其在选定重访轨道上连续一年的南纬 65 度至北纬 65 度区间内的变化。图 8 从上至下依次给出了张衡一号卫星搭载的电场仪观测的 CH1,CH2,CH3 三通道的选定频段的全轨 PSD 波形序列。三个通道由不同空间方向的双探针基线构成，分别反映波动电场在相应测量方向上的响应。图中不同颜色曲线分别代表不同日期的重访轨道观测结果。

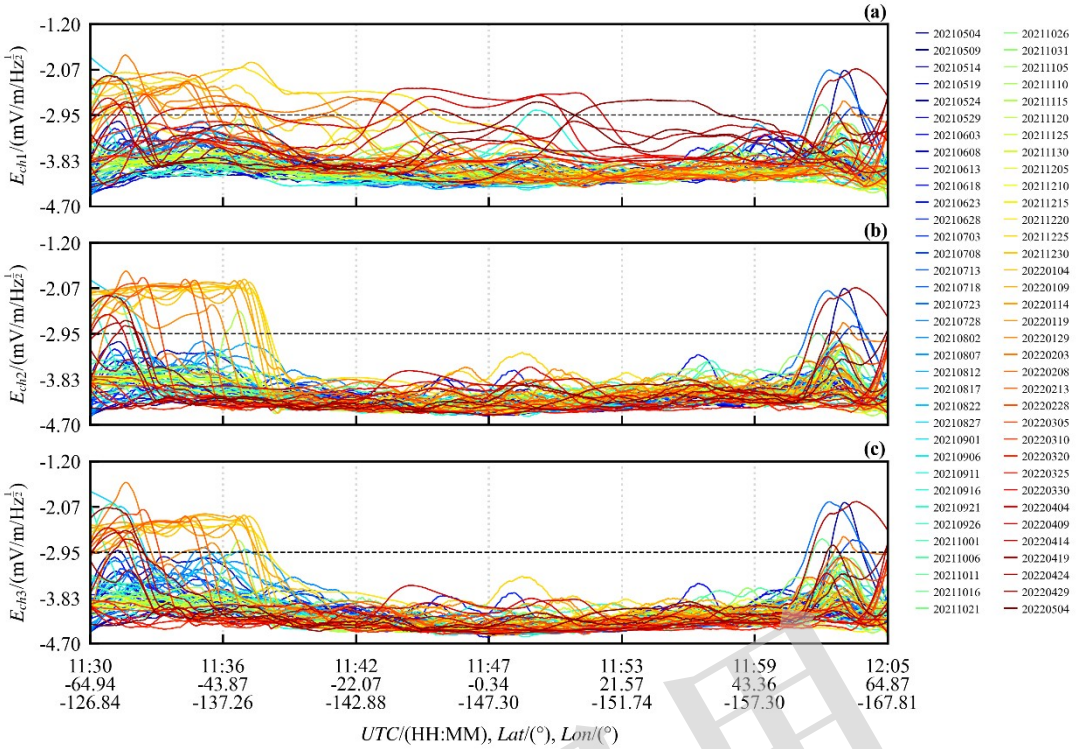


图 8　11.5~12 kHz 频段功率谱密度在全年重访轨道中的纬向分布。

Fig. 8　Annual latitudinal distribution of power spectral density in the 11.5~12 kHz band along the selected revisit orbit.

从整体分布特征来看，三个通道的功率谱密度在多数时间段内集中分布于-3.8 至-4.5 $mV\cdot m^{-1}Hz^{-0.5}$区间，表现出较为稳定的背景水平。CH1 整体波动幅度最大，相较于 CH2 和 CH3 只在中高纬度地区出现较强的离散结构，CH1 在全轨不同纬度区间均存在较高数值。CH2 在轨道初段（即南半球中高纬区域）出现较为显著的离散增强结构，部分轨道功率谱密度快速上升至-2.0 $mV\cdot m^{-1}Hz^{-0.5}$附近，随后在进入中段纬度区域后迅速回落并维持较低水平。在轨道末端同样存在明显增强特征，增强幅度与 CH1 相近。CH3 的整体变化趋势与 CH2 类似，在轨道初段与末段均存在增强结构，而在中段纬度范围内功率谱密度保持较低且相对平稳。与 CH1 相比，CH2,CH3 在高纬区域的增强更为集中且幅度更大。

总体而言，三通道均表现出“中段稳定、两端增强”的空间分布特征，其中 CH2,CH3 的增强更为显著，说明该频段内电场扰动在高纬区域具有明显的通道依赖性和一定的方向性响应特征。

3.4 功率谱密度固定位置时序分析

根据图 8 所示，CH2 和 CH3 在中低纬区域背景相对稳定，而在南北半球高纬区域均呈现较为集中的增强特征，两者总体空间分布趋势较为相似。考虑到 CH2 的高纬增强结构较为清晰，且其高纬与中低纬背景之间的对比明显，因此本文选取 CH2 作为代表通道，选取 3.2 小节同样的固定纬度位置进行时间序列统计分析。

图 9 展示了该频段在所选六个不同纬度位置处通道 CH2 功率谱密度随时间

的变化情况。从整体变化趋势来看，不同纬度位置的 PSD 表现出明显不同的时间变化特征。在南半球中高纬区域，即子图 a 和 b，PSD 在部分时间段内出现显著增强，其中在 2022 年初出现持续时间较长的高值区间，PSD 可上升至-1.879 $mV\cdot m^{-1}Hz^{-0.5}$，明显高于其余时间的背景水平。在北半球高纬处，PSD 在多数时间维持在较低水平，但在个别观测日期出现突发性增强，其中最大值接近-2.005 $mV\cdot m^{-1}Hz^{-0.5}$，未能形成持续的高值区间，这种增强具有明显的间歇性特征。在低纬区域，PSD 整体变化较为平稳，仅在个别日期出现短时增强，整体波动幅度明显小于高纬地区。总体而言，图中结果表明通道 CH2 在不同纬度上的 PSD 具有明显的空间差异，高纬区域更容易出现幅度较大的增强事件，而中低纬区域整体波动较小、变化相对稳定。

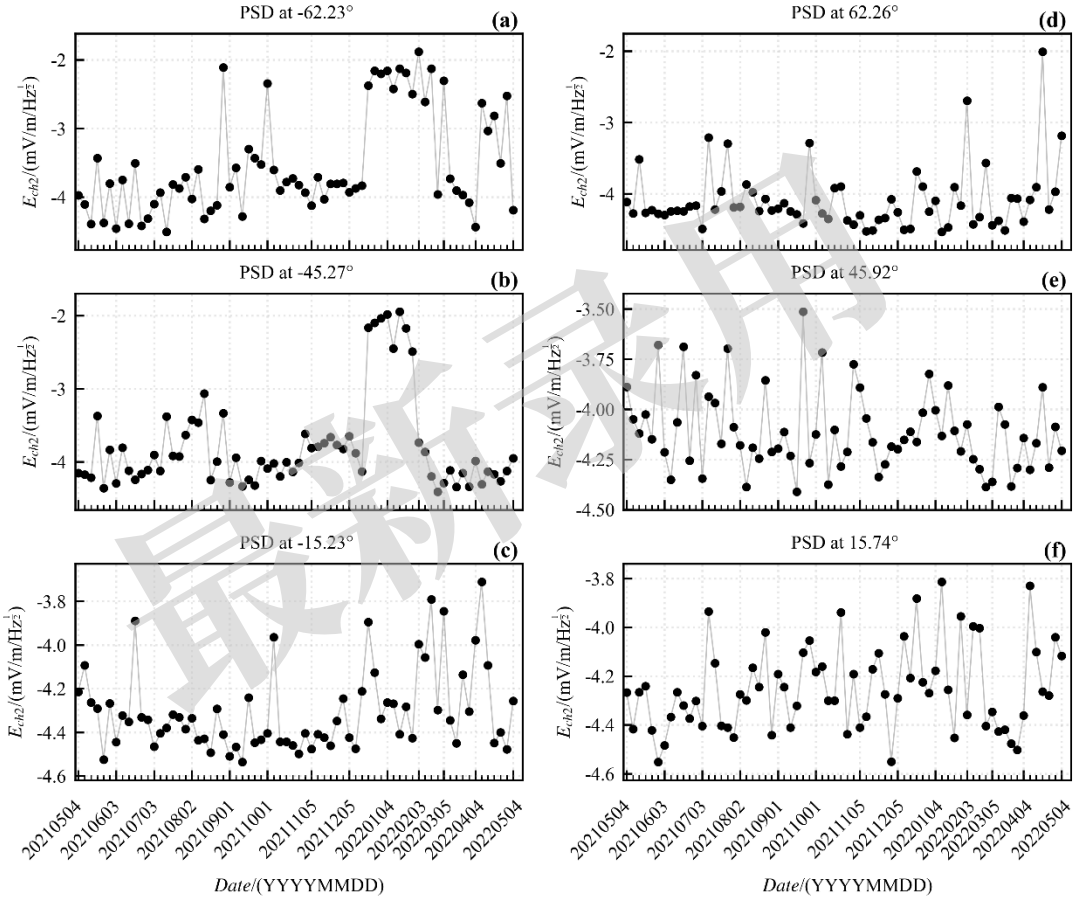


图 9　不同固定纬度位置处 CH2 通道功率谱密度随时间的变化。

Fig.9　The variation of CH2 channel power spectral density over time at different fixed latitude positions.

固定纬度位置的功率谱密度时间序列分析进一步表明，该频段电场扰动在不同纬度区域具有明显不同的时间变化特征。在南半球中高纬地区，PSD 在部分时间段出现持续增强，并在 2022 年初形成持续时间较长的高值区间。这表明在该时间段内，高纬电离层中可能存在较为持续的电磁波活动或能量输入增强过程。相比之下，北半球高纬区域的 PSD 增强主要表现为短时突发事件，持续时间较短且具有明显间歇性，未形成长期稳定的高值区间。而在低纬区域，PSD 整体变化较为平稳，仅在个别日期出现短时增强。这种纬度差异说明，VLF

频段电场扰动在高纬地区更容易出现强烈变化，而中低纬区域整体背景较为稳定。该结果进一步表明，高纬电离层不仅在直流电场结构上对外部驱动更加敏感，在电磁波活动能量分布方面同样具有更显著的响应特征。

3.5 太阳高度角年内变化分析

为定量评估所选夜侧重访轨道在不同纬度和季节条件下的太阳照明状态，本文选取与 3.2 小节同样的固定纬度位置，利用重访轨道观测点的 UTC 时间、地理经度和地理纬度计算太阳高度角。太阳高度角记为 h，表示太阳方向与观测点局地水平面之间的夹角。当 h 为正数时，太阳位于地平线上方；当 h 为负数时，太阳位于地平线以下。

表 1 显示，所选纬度位置的太阳高度角存在明显的纬度和季节差异。南北纬约 15° 位置的太阳高度角全年分别处于-60.55°～-38.61° 和-64.59°～-42.37° 范围内，南北纬约 45° 位置的最大太阳高度角也分别仅为-12.30° 和-17.90°，这些位置在全部观测中太阳均位于地平线以下，表明所选观测时刻的中低纬区域整体处于较深的夜间照明状态。相比之下，南北半球约 62° 高纬位置的太阳高度角变化幅度明显增大。南纬 62.23° 位置的太阳高度角范围为-41.39°~3.35°，其中约 16.2％的观测位置太阳位于地平线上方。北纬 62.26° 位置的地表太阳高度角始终低于 0°，但最高达到-3.58°，也临近满足几何日照条件。

表 1　不同纬度位置的太阳高度角统计结果

Table 1　Statistical results of solar elevation angles at six representative latitudes

选定纬度	太阳高度角范围/(°)	中位数/(°)	地表日照比例/%
62.23°S	-41.39～3.35	-20.03	16.2
45.27°S	-53.05～-12.30	-34.28	0.0
15.23°S	-60.55～-38.61	-54.29	0.0
15.74°N	-64.59～-42.37	-56.15	0.0
45.92°N	-60.45～-17.90	-38.29	0.0
62.26°N	-49.31～-3.58	-25.17	0.0

上述结果表明，所选重访轨道整体属于夜侧轨道，沿轨不同位置的太阳照明状态并不完全一致。中低纬区域全年基本保持较深的夜间条件，而南北半球高纬区域在相应半球夏季仍可能受到太阳照明。夜侧轨道在高纬区域全年多数时间处于稳定的低太阳照明状态。

4 讨论

4.1 Ey 分量年内变化特征及其可能机制

在固定纬度位置条件下，Ey 在一年时间尺度内表现出明显的阶段性变化特征，并在不同纬度位置呈现出相似的变化趋势，但变化幅度随纬度升高而逐渐增强。这表明夜侧高纬区域的电场对年内尺度背景条件及外部驱动变化表现出更强的响应。

最新录用

由于观测轨道为固定重访轨道，全年观测点对应的地方时基本保持在夜侧，因此观测几何条件的变化较小。由此可以推断，Ey 随时间呈现的系统性变化主要来源于电离层背景状态及外部驱动条件的真实变化，而非由轨道几何变化或坐标投影效应所引起。从物理机制上看，夜侧电离层缺乏太阳辐射，其 Pedersen 电导率和 Hall 电导率均显著降低[35-37]。在较低电导率背景下，电离层对磁层对流电场及场向电流系统的响应更为敏感。当磁层输入条件发生变化时，夜侧电离层更容易产生较大的电场响应，从而形成明显的时间变化结构。此外，高纬地区接近极区电流系统活动区域，极光电流、磁尾回流以及场向电流闭合过程均可能对电离层电场产生调制作用，这些过程在年内尺度上受太阳活动及电离层季节变化的共同影响。随着纬度升高，Ey 年内变化幅度明显增强，说明靠近极区区域的电离层更容易受到磁层驱动变化的影响，电场响应被进一步放大，从而在观测数据中表现出更明显的时间变化特征。

根据本文中对太阳高度角的计算可知，高纬区域夜侧数据在相应半球夏季仍可能受到太阳辐射影响，所选轨道并非全部处于低太阳照明环境。太阳高度角的季节变化可能通过调制太阳 EUV 光致电离，进一步影响电离层电子密度及 Pedersen 电导率和 Hall 电导率。在其他外部驱动条件相近的情况下，背景电导的变化可能改变电离层对磁层对流电场和场向电流系统的响应，从而参与 Ey 年内变化过程。但是，太阳高度角仅描述太阳照明的几何条件，不能直接给出实际电导大小，也不能单独确定其对 Ey 变化的贡献。此外，高纬电离层总电导还可能受到极光粒子沉降影响，电场则与磁层对流、极光电流、场向电流闭合及磁尾活动等过程相互耦合。这些外部驱动条件在不同季节和地磁活动状态下也会发生变化。

因此，本文观测到的 Ey 年内阶段性变化可能是太阳照明、电离层背景电导和外部磁层驱动共同调制的结果。现有单一电场观测尚不足以对各因素的相对贡献进行定量分离，具体机制仍需结合磁场波动、粒子沉降、等离子体参数及地磁活动指数开展进一步研究。

4.2 VLF 频段功率谱密度的空间分布特征

在 11.5~12 kHz 频段的功率谱密度分析中，三个观测通道整体表现出“中纬度稳定、高纬增强”的空间分布特征。大多数时间内 PSD 背景值集中分布在-3.8 至-4.5 $mV \cdot m^{-1} Hz^{-0.5}$区间，但在轨道两端的高纬区域常出现明显增强结构。其中 CH2 和 CH3 通道在南北半球高纬区域的增强最为显著，而中低纬区域整体波动较小。这种空间分布特征说明，在该频段范围内电场波动能量在高纬区域更容易出现增强现象。

这种现象可能与高纬地区活跃的电磁波活动有关。高纬电离层是多种等离子体波动的重要传播和激发区域，例如极光区等离子体不稳定性、粒子沉降以及磁层波动均可能在 VLF 频段产生电磁扰动[5,38-39]。由于这些过程主要集中在极区及其邻近区域，因此在统计结果中表现为高纬区域 PSD 增强的特征。

此外，不同通道之间增强幅度的差异还表明该频段电场扰动具有一定的方向性特征，这可能与电磁波传播方向、天线测量方向以及局地磁场结构之间的关系有关。

4.3 夜侧条件下 ECEF 坐标系分析的适用性

本文在夜侧地方时条件下，采用 ECEF 坐标系对电离层电场进行统计分析，

主要目的是在统一的地固参考框架下比较不同时间、重访轨道的观测结果。虽然与自然电场描述的局地地理坐标系（ENU）不同，不直接对应局地物理电场分量，但在夜侧条件相对稳定、轨道几何重复性较好的情况下，该方法能够避免坐标系转换所带来的误差，有效揭示高纬电离层电场随时间变化的统计规律。

因此，本文的结果应被理解为夜侧高纬电离层电场在地心地固参考系中的时空变化特征描述。未来在确定异常区间后，可结合模型构建及局地坐标系进行强化分析，有望进一步深入理解高纬电离层电场变化的物理机制。

5 结论

本文利用张衡一号卫星电场仪在一年时间尺度内的重访轨道观测数据，在地心地固坐标系（ECEF）下系统分析了高纬电离层电场的空间分布特征及其时间变化规律，并结合 VLF 频段功率谱密度数据探讨了电场扰动能量的时空分布特征。主要结论如下：

（1）在固定重访轨道条件下，电场三分量随纬度变化呈现出稳定的大尺度空间分布结构。尽管不同时间段电场幅值存在一定差异，但整体变化趋势在全年范围内保持一致，表明夜侧高纬电离层电场在大尺度空间结构上具有统计意义上的稳定性。

（2）在电场三分量中，Ey 对高纬区域电场变化最为敏感。在固定纬度位置条件下，Ey 在一年时间尺度内表现出明显的阶段性变化特征，并且其变化幅度随纬度升高而增强，反映出高纬电离层电场在时间尺度上受到显著调制。

（3）VLF 频段 11.5~12 kHz 功率谱密度整体呈现出“中纬稳定、高纬增强”的空间分布特征。高纬区域更容易出现明显的 PSD 增强结构，并在不同纬度区域表现出不同的时间变化特征，表明该频段电磁扰动在极区附近更为活跃。

本文的研究结果为利用地固坐标系下的卫星电场观测数据开展高纬电离层电场统计研究提供了参考，并为进一步理解高纬电离层电动力学过程及磁层-电离层耦合机制提供了新的观测依据。

致谢 本工作使用了中国国家航天局和中国地震局支持的张衡一号卫星的观测数据（https://www.leos.ac.cn）。

参考文献

[1] CHISHAM G, BURRELL A G, ZAWDIE K A. The impact of adaptive high-latitude coordinates[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(16): e2025GL115265. DOI: 10.1029/2025GL115265

[2] HATCH S M, VANHAMAKI H, LAUNDAL K M, *et al*. Does high-latitude ionospheric electrodynamics exhibit hemispheric mirror symmetry?[J]. *Annales Geophysicae*, 2024, **42**(1): 229-253. DOI: 10.5194/angeo-42-229-2024

[3] TURNER D L, COHEN I J, CLARK G, *et al*. Hypotheses concerning global magnetospheric convection, magnetosphere-ionosphere coupling, and auroral activity at Uranus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(8): e2024JA032723. DOI: 10.1029/2024JA032723

[4] LAM M M, SHORE R M, CHISHAM G, *et al*. A model of high latitude ionospheric convection derived from SuperDARN EOF model data[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(7): e2023SW003428. DOI: 10.1029/2023SW003428

[5] YU Y, CAO J, PU Z, *et al*. Meso-scale electrodynamic coupling of the Earth magnetosphere-ionosphere system[J]. *Space Science Reviews*, 2022, **218**(8): 74. DOI: 10.1007/s11214-022-00940-0

[6] BORRIES C, IOCHEM P, TASNIM S, *et al*. Persistent high-latitude ionospheric response to solar wind forcing[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2024, **14**: 33. DOI: 10.1051/swsc/2024029

[7] WATERMANN J, WINTOFT P, SANAHUJA B, *et al*. Models of solar wind structures and their interaction with the Earth's space environment[J]. *Space Science Reviews*, 2009, **147**(3/4): 233-270. DOI: 10.1007/s11214-009-9494-9

[8] JAKOWSKI N, WILKEN V, SCHLUETER S, *et al*. Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, **67**(12): 1074-1084. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.02.023

[9] QUATTROCIOCCHI V, DE M P, ALBERTI T, *et al*. Characterization of electric field fluctuations in the high-latitude ionosphere using a dynamical systems approach: CSES-01 observations[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(21): 3919. DOI: 10.3390/rs16213919

[10] MATSUO T, RICHMOND A D, HENSEL K. High-latitude ionospheric electric field variability and electric potential derived from DE-2 plasma drift measurements: Dependence on IMF and dipole tilt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A1): SIA 1-1-SIA 1-15. DOI: 10.1029/2002JA009429

[11] DECOTTE M, LAUNDAL K M, HATCH S M, *et al*. Occurrence probability of magnetic field disturbances measured with Swarm: Mapping the dynamic magnetosphere-ionosphere coupling[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(2): e2023JA032191. DOI: 10.1029/2023JA032191

[12] FRIIS-CHRISTENSEN E. Electric field and current coupling at high latitudes[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1991, **43**(Supplement 1): 311-324. DOI: 10.5636/jgg.43.Supplement1_311

[13] WAN Weixing, LIU Libo, YU Tao. Theory and model of electric fields in the mid-low latitude ionosphere[J]. *Science in China Series A-Mathematics*, 2002, **32**(8): 688-695. DOI: 10.1360/za2002-32-8-688 (万卫星, 刘立波, 余涛. 中低纬电离层电场理论模式[J]. *中国科学*, 2002, **32**(8): 688-695)

[14] UVAROV V M, LUKIANOVA R Yu. Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(11): 2563-2574. DOI: 10.1016/j.asr.2015.10.004

[15] JOHANSSON T, KARLSSON T, MARKLUND G, *et al*. A statistical study of intense electric fields at 4-7 R_e geocentric distance using Cluster[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**(7): 2579-2588. DOI: 10.5194/angeo-23-2579-2005

[16] WU Y-J J, MENDE S, HARDING B J, *et al*. Cross-validation of the ionospheric vertical drift measurements based on ICON/IVM, Swarm, and the ground-based radar at the Jicamarca Radio Observatory[J]. *Space Science Reviews*, 2023, **219**(6): 47. DOI: 10.1007/s11214-023-00993-9

[17] KULLEN A, BUCHERT S, KARLSSON T, *et al*. Plasma transport along discrete auroral arcs and its contribution to the ionospheric plasma convection[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(11): 3279-3293. DOI: 10.5194/angeo-26-3279-2008

[18] GIANNATTASIO F, PIGNALBERI A, TOZZI R, *et al*. Perpendicular electrical conductivity in the topside ionosphere derived from Swarm measurements[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(17): 3129. DOI: 10.3390/rs16173129

[19] MATSUO T, RICHMOND A D, LU G. Optimal interpolation analysis of high-latitude ionospheric electrodynamics using empirical orthogonal functions: Estimation of dominant modes of variability and temporal scales of large-scale electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A6): A06301. DOI: 10.1029/2004JA010531

[20] THEMENS D R, ELVIDGE S, MCCAFFREY A, *et al*. The high latitude ionospheric response to the major May 2024 geomagnetic storm: A synoptic view[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(19): e2024GL111677. DOI:

10.1029/2024GL111677

[21] ZHOU S, LUAN X, DOU X. Solar activity dependence of nightside aurora in winter conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(2): 1619-1626. DOI: 10.1002/2015JA021865

[22] LIN Yusha, LI Chen, SHI Mengxi, *et al*. Observation and analysis of plasma bubbles in Hainan during the magnetic storm in March 2015[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 49-60. DOI: 10.11728/cjss2026.01.2025-0004 (林郁莎, 李琛, 史梦夕, 等. 2015 年 3 月磁暴期间海南地区等离子体泡观测分析[J]. *空间科学学报*, 2026, **46**(1): 49-60)

[23] GIANNATTASIO F, CONSOLINI G, COCO I, *et al*. Dissipation of field-aligned currents in the topside ionosphere[J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1): 17202. DOI: 10.1038/s41598-022-21503-x

[24] KUO C L, LEE L C, HUBA J D. An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(4): 3189-3205. DOI: 10.1002/2013JA019392

[25] YU Tao, WAN Weixing, LIU Libo, *et al*. Numerical study for the semi-annual variation of electric fields at the mid- and low-latitudes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(3): 182-193. DOI: 10.11728/cjss2004.03.20040303 (余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 电离层电场半年变化的模拟研究[J]. *空间科学学报*, 2004, **24**(3): 182-193)

[26] ZHANG X, DE SANTIS A, XIONG P, *et al*. The lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (LAIC) processes around the 2024 Wushi (China) M_v 7.1 earthquake[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2026, **297**: 106916. DOI: 10.1016/j.jseaes.2025.106916

[27] SONG Junjie, HUANG Jianping, LI Zhong, *et al*. The spatiotemporal evolution characteristics of spatial electric field before and after the Gansu Jishishan earthquake observed by the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, **68**(6): 2039-2054. DOI: 10.6038/cjg2024S0169 (宋俊杰, 黄建平, 李忠, 等. 张衡一号卫星观测的甘肃积石山地震前后空间电场时空演化特征[J]. *地球物理学报*, 2025, **68**(6): 2039-2054)

[28] ZHANG F Z, HUANG J P, LI Z, *et al*. Statistical analysis of electric field perturbations in ELF based on the CSES observation data before the earthquake[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, **11**: 1101542. DOI: 10.3389/feart.2023.1101542

[29] YANG B Y, LI Z, HUANG J P, *et al*. EMD based statistical analysis of nighttime pre-earthquake ULF electric field disturbances observed by CSES[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **9**: 1077592. DOI: 10.3389/fspas.2022.1077592

[30] ZHENG J, HUANG J, LI Z, *et al*. Multiple-band electric field response to the geomagnetic storm on 4 November 2021[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(18): 3497. DOI: 10.3390/rs16183497

[31] SHEN X, ZHANG X, YUAN S, *et al*. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 634-642. DOI: 10.1007/s11431-018-9242-0

[32] YUAN Shigeng, ZHU Xinghong, HUANG Jianping. System design and key technology of China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(S1): 32-38. DOI: 10.11834/jrs.20188177 (袁仕耿, 朱兴鸿, 黄建平. 电磁监测试验卫星（张衡一号）系统设计与关键技术[J]. *遥感学报*, 2018, **22**(S1): 32-38)

[33] HUANG J P, LEI J G, LI S X, *et al*. The Electric Field Detector (EFD) onboard the ZH-1 satellite and first observational results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 469-478. DOI: 10.26464/epp2018045

[34] CANDAN C. Polynomial order selection for Savitzky-Golay smoothers via N-fold cross-validation[J]. *Signal Processing*, 2026, **242**: 110443. DOI: 10.1016/j.sigpro.2025.110443

[35] ZOSSI B S, FAGRE M, DE H, *et al*. Ionospheric conductance using different IRI F2 layer models[J]. *Journal of*

最新录用

Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2021, **225**: 105759. DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105759

[36] SHEBANITS O, HADID L Z, CAO H, *et al*. Saturn's near-equatorial ionospheric conductivities from in situ measurements[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 7932. DOI: 10.1038/s41598-020-64787-7

[37] SHEN Changshou, ZI Minyun. The hemispheric power input and height-integrated conductance[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1998, **18**(3): 200-205. DOI: 10.11728/cjss1998.03.200 (沈长寿, 资民筠. 半球功率输入和高纬电离层电导[J]. *空间科学学报*, 1998, **18**(3): 200-205)

[38] PANOV E V, BAUMJOHANN W, WOLF R A, *et al*. Magnetotail energy dissipation during an auroral substorm[J]. *Nature Physics*, 2016, **12**(12): 1158-1163. DOI: 10.1038/nphys3879

[39] TANAKA T, EBIHARA Y, WATANABE M, *et al*. Reproduction of ground magnetic variations during the SC and the substorm from the global simulation and Biot-Savart's law[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(2): e2019JA027172. DOI: 10.1029/2019JA027172



李中暘 男，1999年7月出生于辽宁省本溪市，应急管理部国家自然灾害防治研究院地球物理专业硕士研究生，研究方向为空间物理与电磁学.

E-mail: lizhongyang241@mails.ucas.ac.cn



黄建平（通信作者） 男，1979年2月出生于河南省南阳市，现为应急管理部国家自然灾害防治研究院研究员，硕士生导师，主要研究方向为地震电离层特征的基础理论与应用研究.

E-mail:jianpinghuang@ninhm.ac.cn

最新录用