0254-6124/2023/43(5)-0821-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HE Hongwei, WANG Xiuying, ZHAO Guocun, YANG Dehe, WANG Qiao, HUANG Jianping. Distribution of Equatorial Electric Field and Its Relation with Ionosphere Distribution Detected by the ZH-1 Satellite (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 821–832. DOI:10.11728/cjss2023.05.2023–0020

张衡一号卫星探测的赤道附近电场分布及其与电离层分布的关系*

何宏玮　王秀英　赵国存
杨德贺　王　桥　黄建平

(应急管理部国家自然灾害防治研究院　北京　100085)

摘　要　利用张衡一号卫星搭载的电场探测仪（Electric Field Detector，EFD）获得的 VLF 频段 2019 年电场功率谱数据，研究赤道附近区域近东西向电场的背景分布、季节变化以及与电离层背景的关系。结果表明：白天电场背景在赤道及其附近随季节呈不同波形结构，以 3 波、4 波为主；夜间电场背景规律性稍差，仍呈随季节变化的经向波形结构分布特征；白天电场背景与电离层背景的季节变化呈高度正相关性，春秋季为峰值；夜间电场背景的季节变化特征是夏冬季峰值，与夜间电离层背景整体上呈负相关性。VLF 电场功率谱观测数据与电离层观测数据在较大和较小空间尺度上的统计特征上都具有一致性。EFD 载荷为电离层相关科学问题的研究及应用提供了一个可以使用的电场观测数据集。

关键词　张衡一号卫星，空间电场探测，电场功率谱，电场时空变化，电子密度分布

中图分类号　P352

Distribution of Equatorial Electric Field and Its Relation with Ionosphere Distribution Detected by the ZH-1 Satellite

HE Hongwei　WANG Xiuying　ZHAO Guocun
YANG Dehe　WANG Qiao　HUANG Jianping

(*National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing* 100085)

Abstract　The nearly east-west power spectral density data of VLF band in 2019, obtained by the Zhangheng-1 satellite, are used to carry out studies on the background distribution of the equatorial elec-

* 国家自然科学基金青年项目资助（42104159）

2023-02-11 收到原稿，2023-04-24 收到修定稿

E-mail：hehongwei19@mails.ucas.ac.cn. 通信作者 王秀英，E-mail：xiuyw@sohu.com

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

tric field, its seasonal variations, as well as its relation with the background ionosphere. The results are as follows: variations of waveform distributions with the season are shown for the daytime equatorial electric field background in the equator and its adjacent regions, with wave number 3 and wave number 4 being the dominant structure; the longitude waveform distribution and its variation with the season can be seen from the spatial distribution of nighttime field background though its regularity is weaker than that of the daytime data; the daytime electric field background has a highly positive correlation with the ionospheric background, with a seasonal variation patter of spring-autumn peaks; Seasonal variation of equatorial nighttime electric field background is characterized by summer and winter peaks, and the correlation between the two is generally negative. Therefore, the spatiotemporal distribution of the electric field background and its correlation with the ionosphere background suggests that the electric field observations are consistent with the ionospheric observations in terms of statistical features obtained both from large as well as relatively small spatial scales. The EFD payload, as one of the payloads that produces the most data, provides a usable dataset for the study of ionosphere-related scientific problems.

Key words Zhangheng-1 satellite, Space electric field detection, Electric field power spectral density data, Electric field spatiotemporal variation, Electron density distribution

0 引言

电离层电场是电离层带电粒子运动的主要影响因素，因此电离层电场成为电离层电动力学过程研究的重要参数。电离层中的带电粒子在电场和磁场共同作用下产生不同方向的运动，进而产生电离层在垂直和水平方向的不同结构分布。例如白天赤道附近低纬区的赤道异常(EIA)现象就是带电离子在电磁场作用下向上运动，然后由于重力、压力等作用沿磁力线向两侧扩散，形成类似喷泉效应的作用效果。除EIA现象外，电离层中很多现象也是借助于带电粒子的动力学过程来分析其形成机制的，例如日落时的PRE(Pre-reversal Enhancement)现象，以及由PRE导致的电离层等离子体气泡现象/闪烁现象等，所以电离层电场是研究电离层动力学过程极其重要的参数。

由于受观测技术的局限，电场观测数据较电离层其他观测参数要少得多。早期电离层电场主要以少量地基观测为主[1–5]，之后开始出现卫星电场观测，例如AE-E/AE-D卫星电场观测[6]，但受限于当时的卫星观测技术，电场观测数据难以展开全球特性的研究[7]。2004年法国发射了DEMETER卫星，其上搭载了电场观测载荷(Instrument Champ Electrique, ICE)，由ICE观测数据获得了一些电场数据的全球性研究成果[8,9]，但该星电场只提供一个方向的数据。2008年发射的C/NOFS卫星，虽然可以产出三分量电场观测数据，但由于该星主要目的是对低纬电离层不规则结构现象进行研究，其电场观测载荷(Vector Electric Field Investigation, VEFI)在白天仅以低采样率采集数据，夜间才会产出高采样率数据[10]，所以仍不能产出比较全面的全球电场数据结果。2013年欧洲航天局发射的Swarm星座，其电场观测仪器(Electric Field Instrument, EFI)产出的数据存在问题，一直未正式发布电场观测数据，仅在2019年9月公布了利用其上搭载的绝对标量磁强计(Absolute Scalar Magnetometer, ASM)观测数据反演的赤道电离层东向电场数据*。所以，迄今比较全面的卫星电场观测数据仍是比较缺少的数据资源。

2018年中国发射了首颗地震电磁监测试验卫星张衡一号(ZH-1)，星上搭载的电场探测仪(Electric Field Detector, EFD)可以观测ULF, ELF, VLF和HF频段范围，根据不同的采样率产出电场时序数据和电场功率谱(Power Spectral Density, PSD)数据，是迄今卫星电离层电场观测中产出数据最为丰富的观测数据集。ZH-1卫星搭载了8种有效载荷[11–13]，

* https://earth.esa.int/

EFD 载荷是其中产出数据最多的三个载荷之一。根据 Gao 等[14] 对 EFD 载荷观测数据的统计, 每天产出的数据量达 30 GByte, 其中仅 VLF 频段每天即产出 2 亿条数据记录。

由于数据量巨大, 虽然 ZH-1 卫星已观测 4 年多, 但目前对 EFD 载荷数据的研究结果比较少, 而且多为基于轨道数据展开的工作。Zhang 等[15] 公布的 ZH-1 卫星与俄罗斯 SURA 电离层加热装置联合展开的一次星地实验结果表明: EFD 载荷轨道观测数据能够记录到地面人工源激发的电离层电场扰动; Zhao 等[16] 和 Liao 等[17] 使用 VLF 频段轨道观测数据研究了地面 VLF 发射机传播到电离层中的信号, 表明 EFD 载荷的观测结果与全波模拟结果具有良好的相关性; Boudjada 等[18] 则利用轨道观测数据分析了 VLF 观测数据记录到的地面发射信号特征。EFD 载荷观测至今已累积近 4 年正式观测数据, 但还未见到对 EFD 载荷全球数据的检验结果。

本文综合了 EFD 载荷 VLF 频段 2019 年全年观测数据, 利用该数据集对赤道及附近区域电场背景分布及其季节变化特点展开分析, 并将地磁赤道沿线更小区域的电场观测数据与 ZH-1 卫星原位电子密度观测数据展开相关性分析。研究结果表明 EFD 载荷 VLF 电场功率谱观测数据在全球较大尺度以及更小空间尺度上的数据结果都与电离层结果具有一致性。所得结果可以为后续其他利用 EFD 载荷观测数据的研究与应用提供参考。

1 数据与计算方法

1.1 卫星、载荷及数据

ZH-1 卫星为太阳同步轨道卫星, 飞行高度 507 km, 轨道倾角 97.4°, 观测范围为地理纬度南北 65°之间, 升轨和降轨地方时(卫星经过地面某点的地方时)分别集中于 02:00 LT 和 14:00 LT 前后, 轨道周期 94 min, 每天飞行约 15 圈, 重访周期 5 d[12,13]。

根据中国地震局卫星地震应用中心官方发布的《电磁监测试验卫星科学数据文件规范》, ZH-1 卫星坐标系的定义: x 方向为卫星飞行方向, z 方向指向地心, y 方向与 x 和 z 方向构成右手系。卫星沿观测轨道飞行过程中, 在赤道附近区域, 卫星飞行方向(x 方向)大致沿南北方向, 即经向。所以这时卫星坐标系的 y 方向大致对应东西方向, 即纬向。卫星坐标系三轴关系如图 1 所示, 该图引自中国地震局卫星地震应用中心《电磁监测试验卫星科学数据文件规范》。

ZH-1 卫星 EFD 载荷采用双探针式空间电场探测, 其探测原理是通过双球形探针耦合获得相对于其周围空间等离子体电势, 两者电势差除以探针间距离便可得到连线方向电场信号。EFD 载荷设有四根卷筒式伸杆, 其位置如图 1 所示, 其中的 A, B, C, D 分别表示四个球形探针的位置, 两两组合取差值, 选取其中的三组(红色虚线标示)作为三分量电场观测数据[19], 红色虚线箭头方向表示电场分量的正值方向。图 1 中三条蓝色线分别表示卫星坐标系的三个坐标轴, 箭头方向表示该轴正值方向。

由图 1 可知, 电场三个分量(通道)的方向与卫星坐标系不同。对于电场时序观测数据, 通过坐标转换可以将 EFD 载荷坐标系数据转换到卫星坐标系。但对于功率谱数据, 即电场时序数据经过快速傅里叶变换(FFT)后得到的频率和幅值数据, 由于 FFT 计算

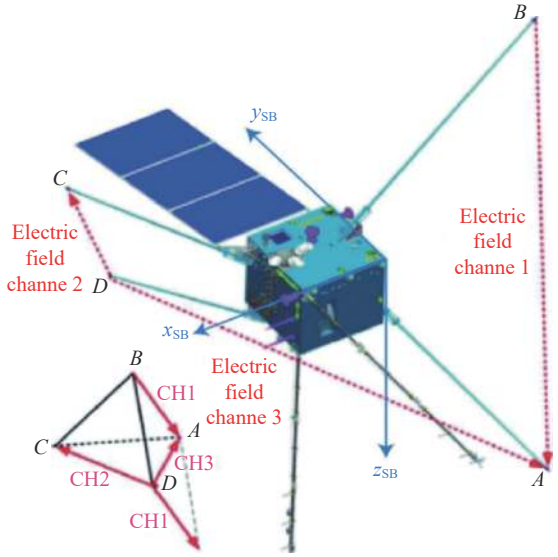


图 1 EFD 载荷电场分量及与卫星坐标系关系 (x_{SB}, y_{SB}, z_{SB} 箭头方向表示卫星坐标系 xyz 轴的正值方向; A, B, C, D 为 EFD 载荷 4 个球形探针的位置; CH1, CH2, CH3 表示实际使用的三个电场分量)

Fig. 1 Components of EFD payload and their relations with the satellite coordinate (The arrow directions of x_{SB}, y_{SB}, z_{SB} indicate the positive direction of the satellite coordinate xyz; A, B, C, and D represent the position of the 4 sphere probes of the EFD payload; CH1, CH2, and CH3 are the three components of the payload)

过程在星上完成，进行 FFT 变换时直接使用的是图 1 所示 3 个通道方向的电场时序数据，而非转换到卫星坐标系的时序数据。

EFD 载荷设计有 ULF, ELF, VLF 和 HF 4 个探测频段，工作模式分为巡查模式和详查模式。巡查模式主要提供电场的功率谱数据，详查模式（只在包含中国全境和全球两个主要地震带地区的特定区域启用）可提供高采样率波形数据和功率谱数据。各频段不同工作模式产出的数据存在差异，在 ULF 频段和 ELF 频段，EFD 以巡查模式沿整个轨道采集波形数据，也产出功率谱数据；在 VLF 频段，EFD 在巡查模式下产出功率谱数据，在详查模式下同时产出波形和功率谱数据；在 HF 频段，EFD 只以巡查模式产出功率谱数据[14,19–21]。

ZH-1 卫星的标准科学数据分为 0～4 级，其中的 2 级数据是科学研究及加工的常用数据。具体到 EFD 载荷 VLF 频段的 2 级数据，主要包含 UTC 绝对时间、地理经纬度、地磁经纬度、卫星飞行高度、工作模式（详查和巡查）、坐标系转换矩阵和卫星状态等属性参量，以及三分量功率谱观测数据、1024 个频点值等，其他频段及类型的电场观测数据介绍可以参考 Gao 等[14] 的研究及《电磁监测试验卫星数据系统设计方案》或其他相关数据*。

本文选用 EFD 载荷 VLF 频段 2 级数据，该频段产出功率谱观测数据的频率范围为 0～25 kHz。观测数据中保留的 1024 个频点依次为（0.000, 24.414, 48.828, …, 24975.590），即频点间等间隔，间距 24.414 Hz。该频段涵盖了很多地面人工发射站的使用频率范围，是电场相关研究经常使用的频段数据[22–24]，例如前文述及的 EFD 载荷数据研究结果，都采用了 VLF 频段的观测数据[15–18]。

VLF 频段，常规产出为功率谱数据，波形数据仅在详查模式下产出。本文为完成全球数据分析检验目标，使用 VLF 的功率谱观测数据。前述功率谱数据由载荷通道方向的时序数据转换得到，为方便后续分析，选取通道方向与卫星坐标轴最接近的方向。根据 Zhang 等[15] 对 EFD 载荷坐标系和卫星坐标系对比，图 1 中 CH3 的方向与卫星坐标系的 y 方向（东西向）接近平行，所以仅使用 CH3 方向的功率谱数据展开后续的计算和分析工作。

1.2 研究区域选择与参数计算

由于地磁场在地磁赤道附近仅有水平分量，没有垂直分量，导致地磁赤道附近的电离层出现多种特殊的分布结构，所以这个区域是电离层研究的重点关注区域。另外，受限于电场功率谱数据的方向性，该数据仅在地理赤道附近才接近地理东西方向，与南北向的磁场方向联合作用导致带电粒子产生垂直运动，便于对数据展开分析。因此，本文也将赤道及附近区域作为研究区域。

检验电场观测数据的主要研究思路：其一，从全球尺度而言，由于电离层等离子体受电磁场作用，在赤道附近会形成特殊的空间天气现象并呈现随季节演化的特性，EFD 电场观测数据背景呈现的特征如与之相符，可以证明电场数据相对变化的正确性；其二，在较小空间尺度上可以反映更为细节的特征，同一卫星电场与电离层观测数据的相关性，可进一步证实电场观测数据与其他数据集的一致性。因此，拟从这两个方面展开计算和分析检验工作。

对于大尺度的比较和分析，为获得 VLF 功率谱数据在地磁赤道附近的背景分布及季节变化，选取地理赤道南北两侧 30°范围的观测数据作为研究数据集[25]，采用以经纬度划分网格，计算每个网格内的逐月背景。网格划分及计算方法参考了 Wang 等[26] 的背景计算方法，具体如下。

（1）经纬度网格参数，采用具有较高空间分辨率的 2°×5°（纬度×经度）。

（2）时间窗长参数，以自然月为时间计算单位。

（3）频率参数，VLF 频段功率谱数据包含 1024 个频点，本文关注电场的背景分布情况，为简化计算，采用 48.828 Hz 频率观测数据。

（4）背景计算采用网格内一个月数据序列中 1/4 到 3/4 分位数之间的数据均值作为该窗口背景值。

相关背景计算方法参考文献 [26]。由于计算背景的方法已消除比较大的数据波动，而 2019 年是太阳活动低年，地磁活动事件很少，所以计算背景时没有专门剔除地磁活动时的数据。研究采用了 2019 年全年数据，利用上述参数和计算方法，分别计算白天和夜间数据在研究区域内每个网格的功率谱背景值，同时给出了对较小尺度下 ZH-1 卫星电场和原位电子密度观测数据相关性分析的计算方法与参数。

* https://leos.ac.cn

2 研究结果

2.1 赤道附近电场空间分布及季节变化规律

EFD 载荷 VLF 频段功率谱观测数据通道 3(CH3)与卫星坐标系 y 轴最为接近,在赤道附近区域,卫星坐标系 y 轴对应观测位置所在地的东西方向。由于地磁场在地磁赤道附近只有水平分量,这时东西向电场对带电粒子的动力学过程起主要作用,因此这里仅使用图 1 中 CH3 的数据,后文如无特别说明,提及的电场功率谱数据即指 CH3 观测数据。

为分析研究区域电场功率谱的空间分布特征及随季节的演化特性,绘制 VLF 功率谱数据的逐月背景分布,结果如图 2 和图 3 所示。其中图 2 为白天观测数据,图 3 为夜间观测数据。

分析图 2 所示白天电场功率谱逐月背景分布的特点如下。

(1)白天近东西向电场背景的空间分布在赤道附近存在一个明显的高值区。高值区沿地磁赤道分布,在地磁赤道两侧的空间延伸范围随季节变化;春秋季在地磁赤道两侧空间分布大致对称;夏冬季空间分布向夏季半球延伸。电场背景的这种空间分布及季节变化特点与电离层 EIA 现象呈现的特点一致。

(2)地磁赤道附近电场背景空间分布随经度呈现明显的波形结构,而且波形的数量随季节有变化,其中春秋季 4 波结构比较明显,夏冬季 3 波结构更显著。这种波形结构分布及其季节演化特征与电离层 EIA 现象也一致。

(3)白天近东西向电场背景的数值变化也呈现出明显的季节特征,春秋季电场背景值较大,夏冬季则背景值较小。整体表现为:春秋季峰值、秋冬季谷值;春季峰值大于秋季峰值,夏季谷值明显小于冬季谷值。此外,电场背景的春秋季峰值还存在明显的季节不对称性,即秋季峰值出现的时间延后。电场背景值的这种季节变化特性与 EIA 现象表现的季节特点也一致。

与白天近东西向电场背景相对比较简单及比较规律的时空分布不同,图 3 所示赤道附近夜间电场的背景分布更为复杂,可以归纳如下特征。

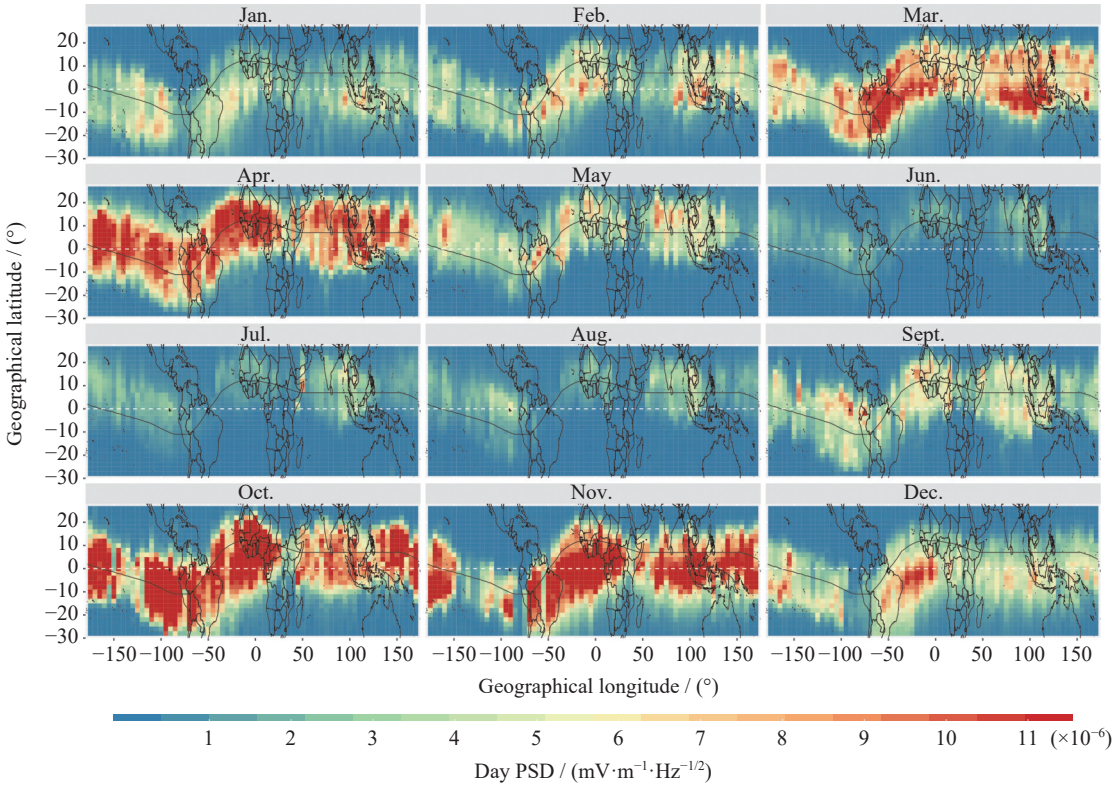


图 2 2019 年白天功率谱(PSD)逐月背景分布(黑色实线表示磁倾角为 0 的磁赤道,白色虚线为地理赤道)

Fig. 2 Monthly background distributions for daytime PSD measurements in 2019 (The black solid line indicates dip equator, and the white dashed line is the geographic equator)

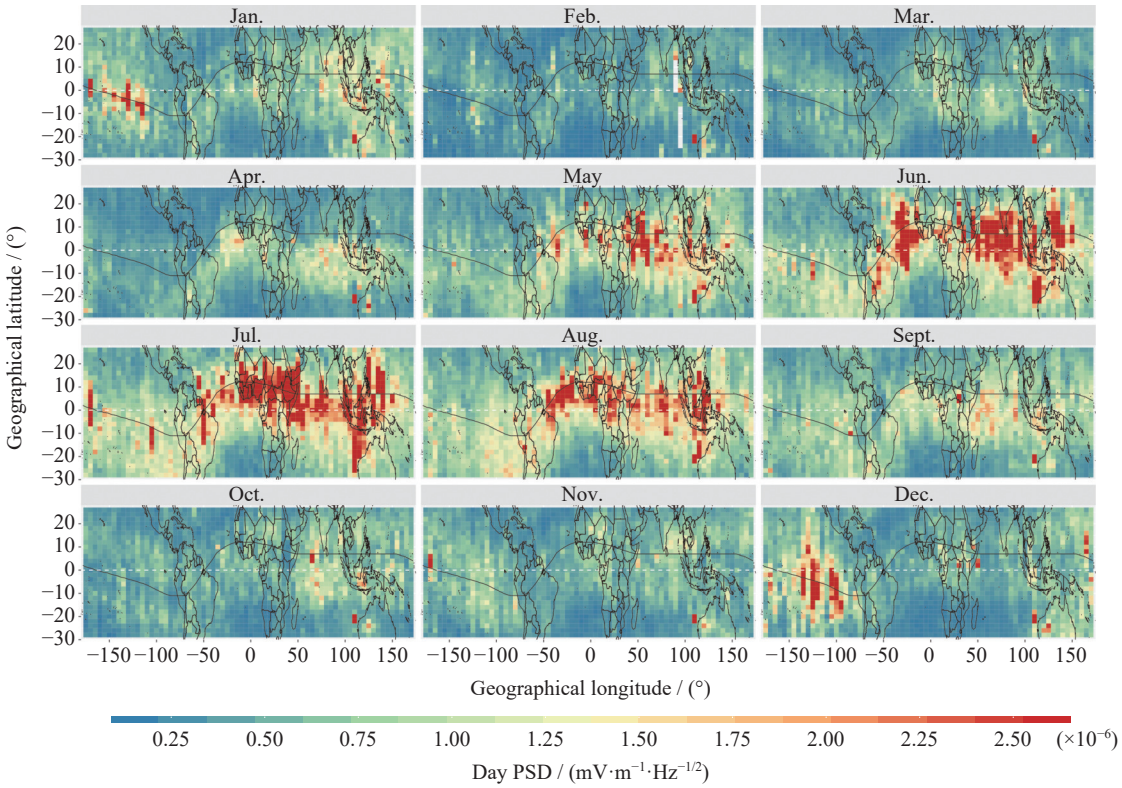


图 3 2019 年夜间功率谱（PSD）逐月背景分布（黑色实线表示磁倾角为 0 的磁赤道，白色虚线为地理赤道）

Fig. 3 Monthly background distributions for nighttime PSD measurements in 2019 (The black solid line indicates dip equator, and the white dashed line is the geographic equator)

(1)夜间近东西向电场背景在赤道附近的空间分布也能看出存在高值区，但高值区边界较白天电场背景的分布不甚明显。夜间电场背景的分布也是沿地磁赤道分布，但夜间电场的分布较白天向地磁赤道两侧延伸的距离更远。夜间近东西向电场在地磁赤道两侧分布对称性的季节变化特征规律不是很明显，主要源于夜间电场背景值间差异较小，变化更显复杂，规律性不强。

(2)夜间赤道附近近东西向电场背景沿经度也呈现了高值、低值相间的分布，虽然不如白天数据明显，仍能大致看出波形结构的分布形态，波数大致为 3 波或 4 波。夜间电场的波形结构分布与之前对夜间电离层的波形结构观测结果一致。

(3)夜间近东西向电场背景值随季节也呈现出较为明显的变化规律，但与白天背景数据的季节规律大相径庭，表现为明显的夏冬季峰值、春秋季谷值的季节规律，而且夏季峰值大于冬季、秋季谷值大于春季。相较于白天电场背景春秋季峰值的季节不对称性，夜间电场背景的夏冬季峰值也存在明显的不对称性，夏季峰值的持续时间明显长于冬季峰值。

对白天和夜间近东西向电场背景分析的结果显示，EFD 载荷的电场观测数据在空间分布和季节演化方面都表现出较好的规律性，与 EIA 现象展现的特点相符。所以，电场观测数据在全球空间尺度上和全年时间尺度上展现的特性可初步证明 EFD 载荷电场观测数据相对变化的正确性。

2.2 电场与电子密度月背景相关性分析

通过综上对近东西向电场背景在赤道附近区域的全球时空分布特征进行的分析，确认了在较大时空尺度上电场观测数据相对变化的正确性。为进一步分析电场观测数据在更小空间尺度上与电离层观测数据的一致性，选择了 ZH-1 卫星朗缪尔探针的原位电子密度观测数据参与对比分析，朗缪尔探针载荷观测数据已经过验证分析，有关朗缪尔探针载荷原位电子密度观测数据的详细介绍请参阅 Wang 等[12,26] 的研究结果。

为给出更小空间尺度的特征，对比两个观测量的相关性，将研究范围缩小到地磁赤道两侧 5°区域内。

另外, 考虑到电场与电离层随经度的变化特性, 以地理经度 30°为间隔将地磁赤道附近区域分为 12 个小经度区, 分别计算每个经度区地磁赤道南北 5°区域内电场和电子密度数据的逐月背景均值。需要说明的是, 计算时采用的地磁坐标为观测数据中提供的偶极场地磁坐标, 与 IGRF 模型中的地磁坐标有所不同。

由于电场功率谱观测数据与电子密度观测数据在数值上相差悬殊, 为便于比较两者, 对两组背景数据进行了最大最小值归一化处理。表 1 为白天和夜间两组数据间的皮尔逊相关系数。由不同经度区相关系数的数值可见, 除个别情况外, 两组数据间的相关性随经度区不同没有大的差异。图 4 和图 5 为两个载荷观测数据的比较结果, 其中的实线为归一化后的近东西向电场月均值时序曲线, 虚线为归一化后的电子密度月均值时序曲线, 图 4 为白天数据, 图 5 为夜间数据, 每个子图上方的数字表示所在地理经度区, 经度范围为(–180°, 180°)。

分析表 1 中白天电场功率谱背景和电子密度背景的相关系数(r_{d})并对比图 4 中两者在各经度区的变化趋势, 两者在白天整体上表现出高度一致性。具体特征概括如下。

(1)与电场逐月背景分布呈现的春秋峰值的季节特点一致, 春秋峰值的季节特性出现在地磁赤道附近的所有经度区。与此对应, 电子密度背景也呈现了较为明显的春秋季峰值的季节特征, 即之前研究所谓的季节异常特征。

(2)两个观测量的春秋峰值在时间上也具有不对称性, 春季峰值大致对应 4 月份, 秋季峰值对应 10 月份甚至延迟到 11 月份, 春季峰值与春分点比较接近, 而秋季峰值比秋分点延后时间更长。两个观测量出现季节峰值的时间基本同步。

(3)虽然两者整体上呈现一致的趋势变化, 但在不同经度区两个观测量的春秋峰值季节规律存在差异。两个观测量春秋季峰值在数值上也具有季节不对称性, 而且这种不对称性随经度有所变化。部分经度区为春季峰值大于秋季, 部分经度区为春秋季峰值相当, 还有部分区域为秋季峰值大于春季。春秋季峰值数值上的不对称性随经度的演化在电场背景值中表现更为明显, 电子密度背景的不对称性更多表现为春季峰值较大。两者之间的差异, 导致两个观测量在某些经度区出现了结果不一致的时段, 例如在 90°—150°跨越的 3 个经度区, 电场背景春秋峰值相当或秋季峰值大于春季, 电子密度背景的春秋峰值都表现为春季峰值大于秋季。

总体而言, 在地磁赤道附近, 白天电场背景与电子密度背景基本同步变化, 两者呈现正相关性, 其之间较高的相关性表明两个观测量之间在较小空间尺度上具有一致性。由于地磁赤道在不同经度区有较大差异, 两个观测量间的相关性也随经度不同而有所差异, 具体在讨论部分对此进行进一步分析。

分析表 1 中夜间电场功率谱背景和电子密度背景的相关系数(r_{n})并对比图 5 中两者在各经度区的变化趋势, 两者在夜间大致呈反向变化, 且两者之间在多数经度区的相关程度要高于白天。具体表现为如下特征。

(1)夜间电子密度背景的季节趋势与白天的情况类似, 多数经度区仍然呈现出双峰的季节特征, 少数经度区双峰季节特征不明显; 而且峰值出现的季节月份更趋复杂, 呈现峰值出现季节随经度变化的特征。与此相对应的电场功率谱背景变化趋势则完全不同, 主要呈现出夏冬峰值的特征, 某些区域冬季峰值不明显。夏季峰值主要出现在 7 月, 也有少数经度区间出

表 1　不同经度区功率谱与电子密度观测数据月背景相关系数

Table 1　Pearson correlation coefficients of monthly background for PSD and electron density measurements in different longitude sectors

Longitude sector	r_{d}	r_{n}	Longitude sector	r_{d}	r_{n}	Longitude sector	r_{d}	r_{n}
–180°至–150°	0.2869	–0.4832	–60°至–30°	0.8837	–0.8297	60°至90°	0.4223	–0.7596
–150°至–120°	0.6598	–0.6592	–30°至0°	0.6473	–0.7942	90°至120°	0.2680	–0.7379
–120°至–90°	0.6038	–0.4963	0°至30°	0.6389	–0.7462	120°至150°	0.3263	–0.7359
–90°至–60°	0.8261	–0.7739	30°至60°	0.5513	–0.6174	150°至180°	0.0383	–0.8137

注　r_{d}表示白天数据的相关系数, r_{n}表示夜间数据的相关系数。

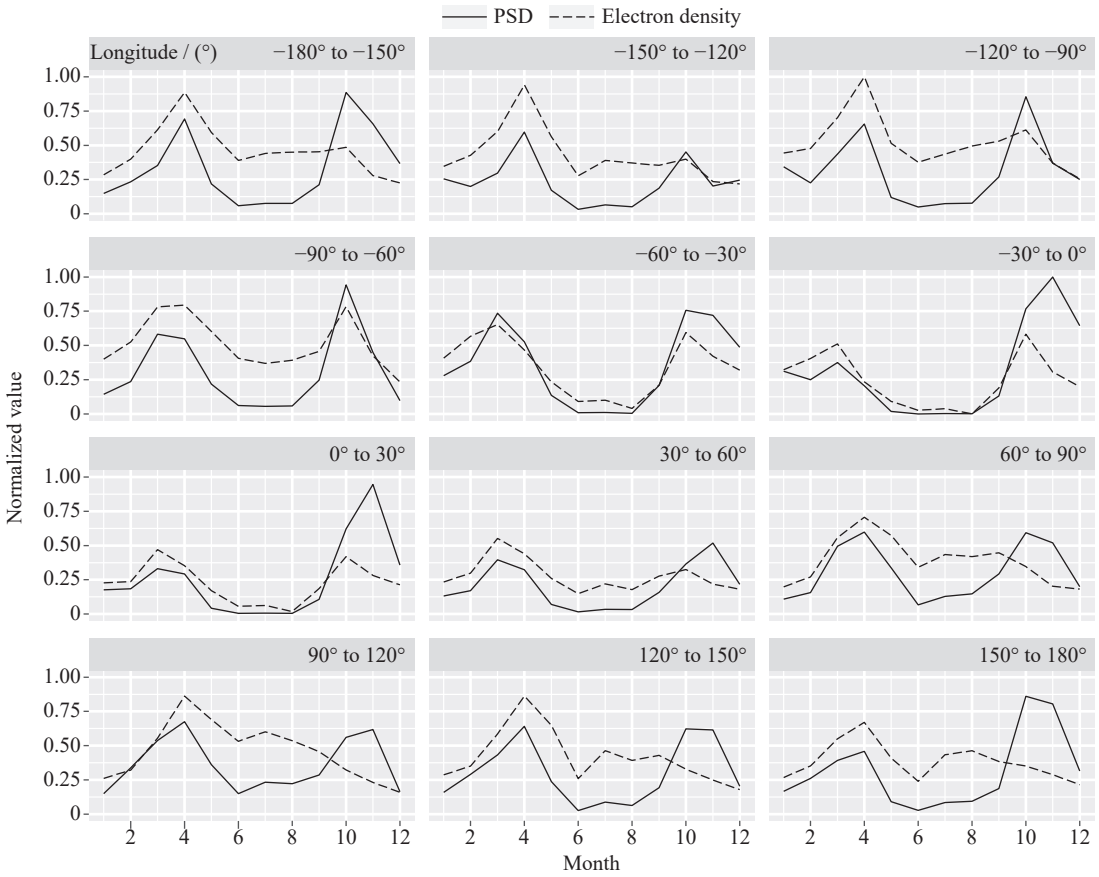


图 4 2019 年白天功率谱（PSD）与电子密度观测数据月背景变化趋势对比

Fig. 4 Comparison of monthly background for daytime PSD and electron density measurements in 2019

现在 6 月或 8 月，冬季峰值主要出现在 1 月和 12 月。

(2)电场的逐月背景变化趋势与电子密度的变化趋势反向变化，即两者负相关。这种负相关性在不同经度区也有所差异，在(–90°, 180°)经度区，两个观测量的负相关性极其明显；而在(–180°, –90°)经度区，电子密度背景规律性较差，对应的电场规律性也不明显，但两者仍然一定程度上表现为负相关特性，尤其在 1 月和 12 月，两个观测量的反向变化更为明显。

总结夜间数据的趋势变化特点，电场背景和电子密度背景大致呈负相关变化，这种负相关表明电场和电子密度观测数据具有一致性。总体上夜间数据的相关程度要高于白天数据，在夏季、冬季等电场幅值较大季节的多数经度区相关程度相对更高。

3 分析与讨论

为检验 ZH-1 卫星 EFD 载荷电场观测数据，综合了 2019 年全年 VLF 频段电场功率谱数据，得到了赤道附近近东西向电场背景的逐月分布及其变化特点。对于白天数据，电场背景无论在空间分布还是季节变化上都表现出极好的规律性，电场沿地磁赤道两侧呈现随经度变化的波形结构分布，而且波形数随季节变化有差异，大致呈 3 波、4 波结构；白天电场数据的季节变化呈现出明显的春秋峰值的特点；与白天电子密度在赤道附近的背景趋势比较，两者呈现一致的变化趋势，即两者之间正相关。对于夜间数据，电场背景分布的规律性不如白天数据明显，但仍能呈现随经度的波形结构分布以及随季节的波形结构数变化；夜间电场背景的季节特点在多数经度区呈现夏冬峰值的特点，与夜间电子密度逐月趋势对比，两者大致呈负相关关系。两个观测量在全球尺度和较小空间尺度的计算分析结果均表明电场和电子密度观测数据具有一致性。

3.1 研究数据的选取

EFD 载荷的电场功率谱数据由所在通道(方向)的时序数据在星上展开 FFT 计算完成，转换后的功

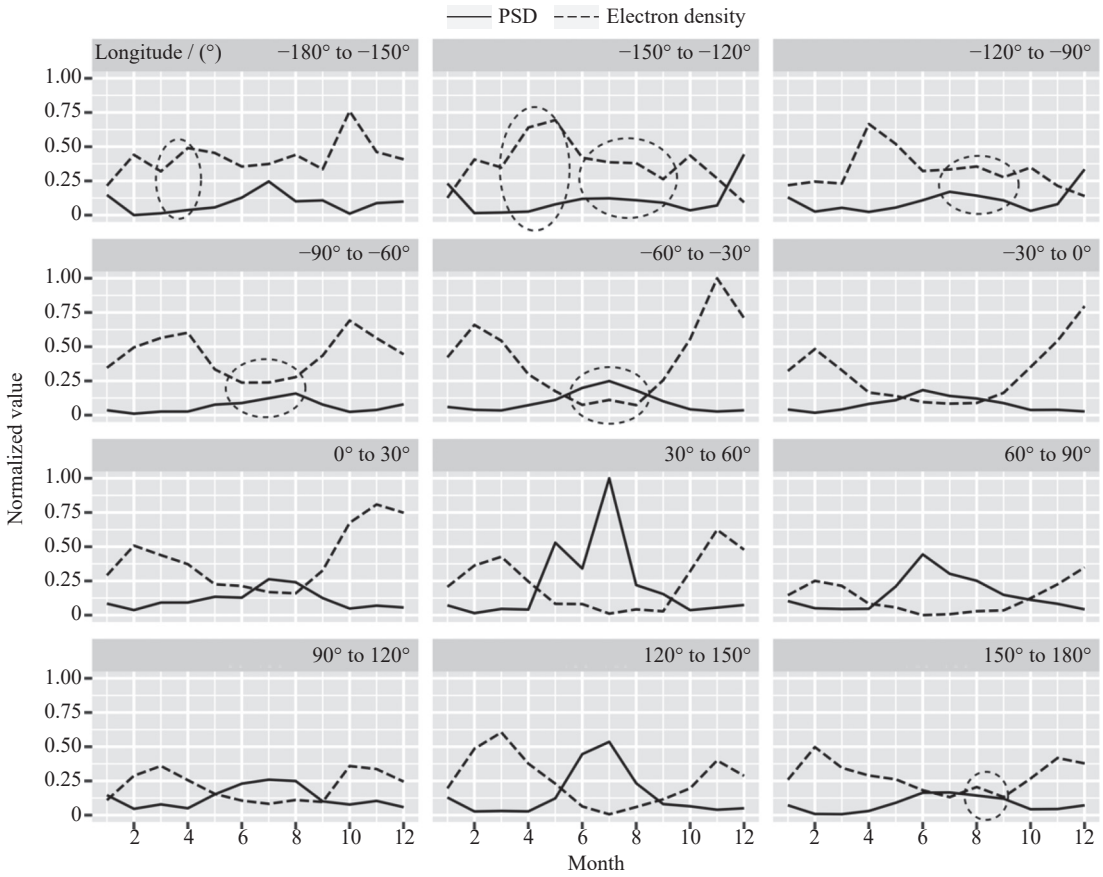


图 5 2019 年夜间功率谱（PSD）与电子密度观测数据月背景变化趋势对比（黑色虚线椭圆表示与夜间整体情况存在差异的情况）

Fig. 5 Comparison of monthly background for nighttime PSD and electron density measurements in 2019 (The black dashed ellipses indicate the situation that differs from the overall nighttime conditions)

率谱数据失去了矢量数据的部分属性，只能反映原始数据采集方向上电场的相对幅度变化关系，具体方向信息比较模糊。由于电磁场对带电粒子的作用与其之间的方向密切相关，因此，为更好地对功率谱数据展开分析，采用了 CH3 的产出数据。因为该通道方向与卫星坐标系的 y 轴方向近似平行[15]，所以 CH3 的功率谱数据可以大致反映电场在卫星坐标系 y 方向的相对幅度变化关系。

根据卫星飞行轨道，在赤道附近观测时，轨道前进（卫星坐标系 x 轴）方向大致沿地理南北方向，此时卫星坐标系的 y 轴方向大致对应地理东西方向，即地理赤道延伸方向。但是图 2 和图 3 所示的地理赤道与地磁赤道关系表明，两者实际上存在较大差异。由图 2 和图 3 可以看出，电场的空间分布明显与地磁赤道密切相关，地磁赤道在不同地理经度，相对于地理赤道的位置有较大差异；沿地磁赤道，虽然地磁场主要为水平分量，但由于磁偏角变化范围较大，在磁偏角较大的经度区，磁力线与地理南北方向偏离较大，其与卫星坐标系的 y 方向就会远离垂直关系，进而会明显影响近东西向电场（即 CH3 数据）对带电粒子的作用，最终会影响电场与电离层观测数据的关系，在后面分析中会有涉及。

3.2 电场与电离层相关性

3.2.1 白天数据

白天的近东西向电场功率谱与电子密度的月变化趋势高度一致，即两个观测量间存在较高的正相关性。由于电离层电场是影响电离层带电粒子运动的重要驱动源。一般认为，在赤道附近区域，电离层 E 区发电机效应产生的电场会映射到卫星飞行高度所处的电离层，白天电场整体上主要呈东向[2,27,28]，使带电粒子整体产生向上运动。白天赤道附近的 EIA 现象就是通过电场向上搬运带电粒子的喷泉效

应而形成。结果表明,赤道附近近东西向电场的时空分布与电离层背景的时空分布高度一致,与之前的研究是一致的。

根据以往的研究[29],白天赤道附近电离层 EIA 现象沿地磁赤道呈现波形结构分布,而且波数随季节会有所变化;这些空间分布特点及其随季节的变化特性在近东西向电场功率谱数据中都有所反映。这表明两个观测量之间虽然是基于不同观测原理的分别测量,但测量结果之间具有高度一致性。

另外,对电离层观测的很多研究结果也显示电离层在赤道附近存在季节异常(SA)现象[30–33];据 Wang 等[26] 对 ZH-1 卫星 2019 年原位电子密度观测数据的背景分析结果也清晰显示季节异常现象仅存在于赤道附近区域。电离层的季节异常现象及其出现的区域,与本文近东西向电场数据显示的春秋季峰值及其在空间上的分布区域是一致的。进一步表明了两个观测量之间在一些细节表现上也是一致的。

尽管白天电场和电子密度观测数据间在整体趋势、表现细节上具有较高一致性,但同时也应注意图 4 中,两者之间在 10, 11 月份存在明显的不一致性。由于本文使用的电子密度观测数据与电场数据来自同一卫星,两个观测量具有相同的观测高度和观测地方时,来自外界对观测环境的影响对两者的影响相同。因此,对两者的不一致性,这里尽量从两个载荷数据间的差异来分析。

统计 2019 年 10 月和 11 月两个观测数据集之间所用数据的轨道数量,电场数据 10 月和 11 月轨道总数分别为 294, 386 个,而根据 Wang 等[34] 对电子密度数据可用轨道的统计,10 月和 11 月分别仅有约 260, 200 个,两个观测量之间所用轨道数据,尤其是 11 月轨道数据,存在较大差异,会影响两个观测量的背景值,从而导致两个结果在这个季节产生较大差异。另外,由于地磁赤道与地理赤道存在较大差异,而且数据计算中使用的偶极场地磁赤道与 IGRF 模型的地磁赤道也存在差异,导致不同经度区东西向电场在垂直磁力线方向的分量不同,对带电粒子的作用力不同,进而导致电场和电子密度之间产生差异。因此,参与计算的轨道数量以及地磁赤道位置差异可能共同造成图 4 所示两者之间的差异。

3.2.2 夜间数据

夜间电场功率谱数据与电离层背景的关系整体上呈现相反变化趋势,即负相关,但变化相较于白天更加复杂;在某些经度区,两个观测量之间的关系不甚明确,甚至在个别经度区的部分季节,如图 5 中以椭圆标识的若干区域,会出现与夜间的整体情况存在较大差异的情况。

两者在很多经度区都存在负相关性,这表明两个观测量整体上密切相关。如图 3 所示,夜间电场功率谱数据在赤道附近的空间分布以及随季节的变化,整体上也是呈波形结构分布,而且波数也随季节有所变化,虽然这种波形结构及季节变化特点没有白天数据明显,但是这种关系是存在的。而且这种波形结构分布特点与夜间电离层数据的空间分布特点相似。之前的电离层研究也显示,夜间电子密度同样存在类似波形结构的分布[29,35,36],夜间电场背景分布与电离层观测的背景分布结构一致性表明夜间电场观测数据的空间相对变化以及时间相对变化基本可靠。

电场与电离层背景季节变化趋势的对比反映的是更为细节的特征,两者总体上表现为反向变化,但在某些经度区的趋势不一致或者不明显,需要进一步分析。本文所使用的近东西向电场为地理东西向,而图 5 显示出电场和电离层关系不明确的经度区主要在西半球,该区地磁赤道与地理赤道有较大差异,存在较大的偏东或偏西的磁偏角,导致(地理)东西向电场与磁场之间并非垂直关系,进而影响电场、磁场对带电粒子的作用力。另外,虽然夜间电场整体表现为西向,但太阳活动低年,夜间电场的观测值很小,极易发生波动而反转[28]。两个因素联合作用,会导致在西半球的一些经度区,东西向电场和电离层的关系不明显。事实上,根据 Wang 等[26] 对夜间电子密度背景波动与白天数据的比较,夜间数据波动更大。所以,夜间电场数据波动较大的现象与夜间电子密度数据表现的波动大的情况是一致的。

赤道附近夜间电场主要为西向,西向电场导致带电粒子夜间主要表现为向下运动[2,28]。更多的研究表明,夜间赤道区存在电离层扩展(Equatorial Spread F, ESF)现象,也称之为等离子气泡(Plasma Bubble)、等离子耗空(Plasma Depletion)或不规则结构(Plasma Irregularity)等。对 ESF 现象的相关研究显示,ESF 现象主要由电离层向上运动才得以形成[37–39]。但根据 Wang 等[34] 对 ZH-1 卫星 2019 年电离层数据的研究结果,夜间电离层在赤道附近存在大

量不规则结构, 只有电离层向上的运动才能产生这些不规则结构, 这表明夜间存在电场反转(reversal)现象, 即电场虽然整体为西向, 但存在局部为东向的情况。实际上夜间电场的局部反转现象在太阳活动低年非常普遍。由前述太阳活动低年时电场值较低, 容易发生反转, 这种情况使得夜间电场的结构和分布更趋复杂, 对应的夜间电离层的结构和分布特性也很复杂。ZH-1 卫星夜间观测时间在赤道附近的地方时在 02:00 LT 左右[12], 属于午夜后, 但仍发现在这个时段电离层观测数据中存在大量不规则结构, 而且不规则结构的季节变化规律为夏冬峰值[34], 与电场观测数据夏冬峰值的季节规律一致。这表明在夏冬季节, 电场经常存在反转现象, 导致大量不规则结构的产生。不规则结构在电子密度观测数据上表现的形式为数据的剧烈上下波动, 由于电场采用的是近东西向功率谱数据, 仅能反映幅度相对变化大小, 并不能反映具体方向, 所以无论电场如何反转, 在幅值上都无法表现出来。在这种情况下, 电离层背景的平均值由于数据波动会被拉低, 而电场功率谱数据, 其平均值总体上不会被拉低, 这会导致两者出现负相关关系在某些情况下可能相关性不明显。

4 结论

利用 ZH-1 卫星 EFD 载荷 VLF 频段 2019 全年的电场功率谱数据, 对赤道及附近区域顶部电离层(卫星飞行高度)近东西向电场月均值背景时空分布及季节演化特征进行分析, 并对更小空间尺度下电场与电子密度的关系进行对比, 可以得到如下结论。

(1)白天电场功率谱背景在赤道附近的分布形态与电离层在这个区域的 EIA 分布形态类似, 随地理经度呈现波形结构的分布形态, 波数随季节有所变化, 主要以 3 波、4 波为主。白天电场背景在赤道附近呈现春秋峰值的季节变化规律, 与赤道附近电离层背景呈现的季节异常现象一致。所以白天近东西向电场的空间分布和季节变化与白天电离层观测数据具有高度一致的变化, 两者之间具有正相关性。

(2)夜间电场功率谱背景在赤道附近的时空分布特性没有白天数据明显, 但仍可呈现波形结构的分布, 以及波形随季节变化的大致规律。赤道附近, 近东西向功率谱背景与电离层背景整体呈现反向变化的特点, 即两者之间存在负相关性。夜间电场背景更多呈现了夏冬峰值的季节特性, 与电离层观测中不规则结构夏冬峰值的季节特性一致, 反映了两者之间的内在关联性。

EFD 载荷是 ZH-1 卫星产出观测数据种类最为丰富、观测数据量最大的载荷之一, 观测至今已累积海量观测数据, 但对该载荷观测数据的研究和应用还非常有限。本文利用该载荷 VLF 频段功率谱数据的分析以及与电离层观测数据的比较结果都表明 VLF 频段观测数据基本可靠, 可以服务于更多的研究和应用领域。后续将继续利用该数据集展开更多电场数据的分析与研究。

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观测数据。本文研究数据从 https://leos.ac.cn 下载获取。

参考文献

[1] WOODMAN R F. Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(31): 6249-6259

[2] BALSLEY B B. Electric fields in the equatorial ionosphere: a review of techniques and measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1973, **35**(6): 1035-1044

[3] WOODMAN R F, RASTOGI R G, CALDERON C. Solar cycle effects on the electric fields in the equatorial ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(32): 5257-5261

[4] FEJER B G, FARLEY D T, WOODMAN R F, *et al*. Dependence of equatorial *F* region vertical drifts on season and solar cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A10): 5792-5796

[5] FEJER B G, DE PAULA E R, GONZÁLEZ S A, *et al*. Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1991, **96**(A8): 13901-13906

[6] YEH H C, HILL T W. Mechanism of parallel electric fields inferred from observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A8): 6706-6712

[7] FEJER B G, DE PAULA E R, HEELIS R A, *et al*. Global equatorial ionospheric vertical plasma drifts measured by the AE-E satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A4): 5769-5776

[8] BERTHELIER J J, GODEFROY M, LEBLANC F, *et al*. ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 456-471

[9] YAO Li, CHEN Huaran, LIU Xiaocan, *et al*. The global characteristics of VLF electric field frequency spectrum in ionosphere[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2011, **32**(4): 27-34

[10] PFAFF R, URIBE P, FOURRE R, *et al*. The vector electric field investigation (VEFI) on the C/NOFS satellite[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(8): 85

[11] SHEN X H, ZHANG X M, YUAN S G, *et al*. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 634-642

[12] WANG X Y, CHENG W L, YANG D H, *et al*. Preliminary validation of in situ electron density measurements onboard CSES using observations from Swarm Satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **64**(4): 982-994

[13] SHEN X H, ZEREN Z M, YUAN S G, *et al*. The CSES mission and its preliminary results[J]. *Aerospace China*, 2020, **21**(1): 5-18

[14] GAO Peng, WANG Xiuying, YANG Dehe, *et al*. Electric field data storage experiment of the ZH-1 satellite[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, **36**(4): 1386-1392

[15] ZHANG X M, FROLOV V, ZHAO S F, *et al*. The first joint experimental results between SURA and CSES[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 527-537

[16] ZHAO S F, ZHOU C, SHEN X H, *et al*. Investigation of VLF transmitter signals in the ionosphere by ZH-1 observations and full-wave simulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(6): 4697-4709

[17] LIAO Li, ZHAO Shufan, SHEN Xuhui, *et al*. Characteristic analysis and full wave simulation of electrical field for China seismo-electromagnetic satellite observations radiated from VLF transmitter[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(4): 1210-1217

[18] BOUDJADA M Y, EICHELBERGER H U, ZHANG X M, *et al*. Analysis of ground-based very low frequency signal recorded onboard CSES satellite[C]//Proceedings of 2021 Kleinheubach Conference. Miltengerg: IEEE, 2021: 1-3

[19] MA Mianjun, LEI Jungang, LI Cheng, *et al*. Design optimization of zhangheng-1 space electric field detector[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, **38**(7): 582-589

[20] 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

[21] DIEGO P, HUANG J P, PIERSANTI M, *et al*. The electric field detector on board the china seismo electromagnetic satellite—in-orbit results and validation[J]. *Instruments*, 2020, **5**(1): 1

[22] CHMYREV V M, SOROKIN V M, SHKLYAR D R. VLF transmitter signals as a possible tool for detection of seismic effects on the ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, **70**(16): 2053-2060

[23] HAYOSH M, NĚMEC F, SANTOLÍK O, *et al*. Propagation properties of quasiperiodic VLF emissions observed by the DEMETER spacecraft[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(3): 1007-1014

[24] MEREDITH N P, HORNE R B, CLILVERD M A, *et al*. An investigation of VLF transmitter wave power in the inner radiation belt and slot region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(7): 5246-5259

[25] ABDU M A. Electrodynamics of ionospheric weather over low latitudes[J]. *Geoscience Letters*, 2016, **3**(1): 11

[26] WANG Xiuying, YANG Dehe, ZHOU Zihan, *et al*. Features of topside ionospheric background over China and its adjacent areas obtained by the ZH-1 satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(2): 391-409

[27] ADENIYI J O. Magnetic storm effects on the morphology of the equatorial *F*2-layer[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1986, **48**(8): 695-702

[28] FEJER B G. Low latitude ionospheric electrodynamics[J]. *Space Science Reviews*, 2011, **158**(1): 145-166

[29] KIL H, OH S J, KELLEY M C, *et al*. Longitudinal structure of the vertical E×B drift and ion density seen from ROCSAT-1[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(14): L14110

[30] FATKULLIN M N. The seasonal anomaly in the electron density of the topside *F*2-region[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1970, **32**(6): 1067-1075

[31] BALAN N, OTSUKA Y, BAILEY G J, *et al*. Equinoctial asymmetries in the ionosphere and thermosphere observed by the MU radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A5): 9481-9495

[32] LIU L B, ZHAO B Q, WAN W X, *et al*. Yearly variations of global plasma densities in the topside ionosphere at middle and low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A7): A07303

[33] BURNS A G, SOLOMON S C, WANG W, *et al*. Daytime climatology of ionospheric N_mF_2 and h_mF_2 from COSMIC data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A9): A09315

[34] WANG Xiuying, YANG Dehe, ZHANG Xueqing, *et al*. Spatiotemporal features of topside ionospheric irregularities during low solar activity period detected by the ZH-1 Satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, **65**(3): 862-881

[35] SAGAWA E, IMMEL T J, FREY H U, *et al*. Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A11): A11302

[36] IMMEL T J, SAGAWA E, ENGLAND S L, *et al*. Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(15): L15108

[37] BURKE W J, DE LA BEAUJARDIÈRE O, GENTILE L C, *et al*. C/NOFS observations of plasma density and electric field irregularities at post-midnight local times[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(18): L00C09

[38] YIZENGAW E, ZESTA E, MOLDWIN M B, *et al*. Longitudinal differences of ionospheric vertical density distribution and equatorial electrodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A7): A07312

[39] HUANG C S, LU G, ZHANG Y L, *et al*. Space Physics and Aeronomy, Ionosphere Dynamics and Applications[M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2021