

霍禹萌, 李忠, 黄建平, 等. 面向地震事件的空间电场数据可视化分析研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(7): 104–110.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24100201

面向地震事件的空间电场数据可视化分析研究

霍禹萌^{1,2}, 李忠^{1,3}, 黄建平^{1,4}, 李兴溯^{1,2}, 郝博^{1,3}, 张元敬^{1,2}

(1 防灾科技学院 智能应急信息处理研究所, 河北 廊坊 065201; 2 防灾科技学院 信息工程学院, 河北 廊坊 065201;
3 防灾科技学院 应急管理学院, 河北 廊坊 065201; 4 国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要: 随着张衡一号卫星电场监测数据的增多, 高效地展示和分析这些数据成为研究的重点。处理大规模空间数据时, 三维可视化技术能够提供直观的展示效果和深入的分析能力。本文结合 Cesium 三维地球引擎, 应用张衡一号卫星电场数据, 探索了三维可视化在电场数据分析中的应用, 并提出了一套结合地球引擎可视化的处理流程。首先, 对张衡一号卫星的二级产品数据进行矢量场可视化, 统计并展示了全球电场的时空分布情况; 其次, 利用 C 值法和 θ 值法对数据进行处理, 结合三维可视化技术, 分析了震前、震中和震后的电场扰动特征。研究结果表明, 论文方案能够清晰展示电场的时空分布和动态变化, 有效识别地震前兆的电磁扰动信号, 为地震监测与预报提供了新的研究手段和技术支持。

关键词: 张衡一号; 电场数据; Cesium; 三维可视化; C 值; θ 值

中图分类号: TP391.9; P352.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2025)07-0104-07

Research on the visualization and analysis of spatial electric field data for earthquake events

HUO Yumeng^{1,2}, LI Zhong^{1,3}, HUANG Jianping^{1,4}, LI Xingsu^{1,2}, HAO Bo^{1,3}, ZHANG Yuanjing^{1,2}

(1 Institute of Intelligent Emergency Information Processing, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China;
2 School of Information Engineering, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China;
3 College of Emergency Management, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China;
4 National Institute of Natural Disaster Prevention and Control, Beijing 100085, China)

Abstract: With the increasing availability of electric field monitoring data from the CSES, efficiently displaying and analyzing this data has become a key focus of research. Three-dimensional visualization technology offers intuitive display capabilities and deep analytical power when dealing with large-scale spatial data. In this paper, the application of 3D visualization in electric field data analysis is explored by integrating the electric field data from the CSES with the Cesium 3D Earth engine. A visualization process based on the Earth engine is proposed. First, vector field visualization of the Level-2 product data from the CSES is conducted, presenting and statistically analyzing the global spatiotemporal distribution of electric fields. Second, the data is processed using the C -value and θ -value methods, and the characteristics of electric field disturbances before, during, and after earthquakes are analyzed through 3D visualization techniques. The results demonstrate that the proposed approach effectively displays the spatiotemporal distribution and dynamic changes of the electric field, and successfully identifies electromagnetic disturbance signals indicative of earthquake precursors. This provides a new research methodology and technical support for earthquake monitoring and forecasting.

Key words: CSES; electric field data; Cesium; 3D visualization; C value; θ value

0 引言

地震乃百害之首, 每年全球发生数百万次地震,

给人类造成无法估量的损失。地震活动具有高频度、强度大、震源浅、分布广等特点, 严重影响着人们的生活和社会经济发展^[1]。

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2023YFE17300); 中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金项目(ZY20240340); 河北省研究生专业学位精品教学案例(库)建设项目(KCJPZ2023060)。

作者简介: 霍禹萌(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能信息处理。

通信作者: 李忠(1966—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 人工智能。Email: lizhong@cidp.edu.cn; 黄建平(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 地球物理。Email: jianpinghuang@ninhm.ac.cn。

收稿日期: 2024-10-02

张衡一号卫星是中国首颗用于地震监测的地球物理场探测卫星^[2],自2018年发射以来,在监测地震前兆特征方面发挥了重要作用。该卫星搭载了多种先进的探测仪器,电场探测仪是张衡一号卫星的重要载荷之一,能够高精度地探测0~3.5 MHz频段的空间电场数据,并在不同的工作模式下输出详查和巡查数据^[3]。电场数据以HDF5格式文件存储,包含丰富的波形和功率谱信息,数据量巨大,种类繁多。为了解决传统的HDF5文件格式存储和FTP传输方式存在的问题,有人提出了基于Hadoop大数据架构的存储方案,结合了HBase和Elasticsearch两个分布式处理软件,以实现海量数据的安全存储、精准查询和快速访问^[4]。

随着张衡一号卫星监测数据量的不断增加,数据展示和分析的复杂性也随之提高。面对包罗万象的信息,传统方法局限于枯燥无味的数据处理和表现,缺乏直观性和决策可视化,而可视化能够帮助人们将无法看到的数据之间的关系模式和发展趋势以图形的形式清晰直观地表现出来^[5];同时能够根据实际需要准确真实、图文并茂地满足用户对空间信息的查询、检索、统计和计算要求,从而满足决策多维性的需求^[6]。为了应对这一挑战,三维可视化技术逐渐成为数据展示和分析的重要工具^[7]。三维可视化不仅可以直观地展示复杂数据,还能增强分析能力和改进决策支持^[8]。3D视图提供的多角度、多层次观察视角^[9],有助于用户更好地理解空间关系和潜在影响,从而做出更明智的决策^[10]。通过3D可视化,用户能够与数据进行更丰富的交互体验^[11],并应用于仿真和模拟^[12]。Cesium是一个开源的JavaScript库,专门用于创建三维地理空间数据的可视化。其支持高效的三维地形和城市数据的流式传输,以及时间动态数据的展示^[13]。近年来,Cesium被广泛应用于各种领域,其强大的三维地理空间展示能力,使其在水利工程^[14]、城市规划^[15]、大气污染监测^[16]、城市内涝^[17]等多个领域得到了成功应用。通过Cesium平台,可以将复杂的空间数据直观地展示给用户,提供交互式的数据分析和展示工具。

鉴于此,本研究将探索Cesium的三维可视化方法在张衡一号卫星电场数据分析中的应用。利用Cesium的三维地球引擎,围绕汤加群岛地震,展示并分析张衡一号卫星获取的空间电场数据,以及经过C值法、 θ 值法处理后的数据,能够直观地揭示电场数据中的模式、趋势和异常,深入理解电场扰动的

时空分布。通过对电场数据的处理与可视化,能够有效识别地震前的电磁扰动信号,探讨其与地震活动的关系。这为地震前兆研究提供了新的分析方法,也为地震监测与预报提供了重要的参考依据。

1 Cesium 三维地球引擎

Cesium的地图渲染体系基于WebGL技术,提供了高效的三维地理信息可视化能力。整个系统的工作流程从初始化Cesium Viewer开始,用户可以通过JavaScript代码创建一个Cesium视图窗口,设定默认的地形、影像图层和相机视角。Cesium支持多种地形数据源,能够提供高精度的全球地形数据,并且支持加载自定义的DEM(数字高程模型)数据,以增强三维地形的真实感。同时,影像图层的设置也十分灵活,用户可以加载如Bing Maps、ESRI、Mapbox等主流在线地图服务,或使用自定义的瓦片地图、WMTS服务等,以实现个性化的地理信息展示。

如图1所示,在Cesium的架构体系中,CesiumJS作为核心库,封装了三维GIS渲染的所有主要功能。其核心模块负责处理几何对象、数学运算、时间管理和数据格式解析。例如,几何模块允许构建点、线、面等基本几何对象,并进行几何变换;数学模块提供矩阵运算、坐标转换等功能;时间模块支持动画效果的时间控制;输入/输出模块则实现了多种GIS数据格式(如GeoJSON、KML、CZML、3D Tiles)的解析和加载;场景模块负责三维场景的渲染和交互,其中包含渲染引擎、摄像机控制、地形渲染、影像图层、动画和粒子效果等功能。渲染引擎利用WebGL高效绘制三维场景,并通过着色器技术优化渲染性能。摄像机模块支持不同的视角模式(如自由视角、第一人称视角、轨道视角等),允许用户在三维空间中流畅浏览地理信息数据。此外,Cesium还提供丰富的交互功能,如鼠标拾取、点击查询、动态标注等,使得用户能够在地图上进行更加直观和高效的操作。

WebGL作为底层渲染技术,确保了Cesium的高效性能。其通过GPU加速实现大规模3D数据的快速渲染,支持海量点云、矢量数据和3D模型的实时显示,使得Cesium能够轻松处理复杂的地理数据集,广泛应用于城市规划、地理分析、遥感监测、无人机测绘、国防军事等领域。

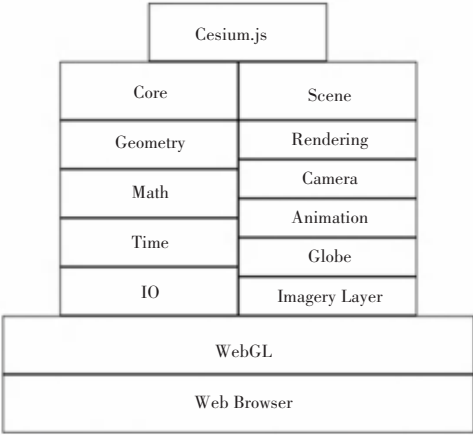


图 1 Cesium 架构

Fig. 1 Cesium architecture diagram

2 数据选取

根据张衡一号卫星的监测数据,电场探测数据覆盖了 DC 至 3.5 MHz 的频率范围,分为 4 个频段:ULF (DC ~ 16 Hz)、ELF (6 ~ 2 200 Hz)、VLF (1.8 kHz ~ 20 kHz)、HF (18 kHz ~ 3 500 kHz)^[18]。本研究中,选择 ULF 频段的原始数据作为矢量场可视化的基础数据。选择 ULF 频段的主要原因是其数据量较小,适合进行高效的三维可视化处理。在大规模三维可视化中,数据集的大小对处理和渲染的效率影响较大,而 ULF 频段的数据能够在保证可视化效果的前提下,显著提升系统的处理效率,能够更好地观察电场数据的分布模式和整体趋势。

有研究表明,通过 C 值法计算 ELF 频段中的 19.5~250 Hz 功率谱数据,并对其进行归一化处理,能够得到反映电场扰动幅度和时空演化特征的 θ 值^[19]。C 值法基于电磁信号的分形特征,能够有效识别低频电场中的异常扰动,尤其是在地震前后提取与地震相关的电磁扰动信号。经过归一化处理, θ 值不仅能够更加准确地反映震前电离层电场能量的变化,还能够显著提高对扰动现象的识别精度。震前的电场扰动通常在震前几周甚至更长时间内逐渐增强,随后在震后恢复至正常水平。因此本文选取震前 70 天至震后 10 天的 ELF 频段中的 19.5~250 Hz 功率谱数据,经过 C 值与 θ 值法处理后的数据,通过可视化分析地震前后的电场扰动。

3 可视化流程与结果分析

3.1 矢量场可视化

基于张衡一号卫星的电场数据 ULF 频段波形数据的 E_x 、 E_y 和 E_z 分量,结合 Cesium 三维地球引

擎,以时间序列的形式分别展示了 3 个分量的空间流场图。首先,在区分白天和黑夜的前提下,以 5 天为一个周期划分数据;随后,通过 Cesium. Cartesian3. fromDegrees 方法,将地理坐标转换为 Cesium 的三维笛卡尔坐标系 (Cartesian3),使用这些坐标来定位箭头实体的起点,并根据电场强度的大小决定箭头的长度,通过电场分量的正负确定箭头的方向,同时用不同颜色区分方向。通过 polyline 绘制箭头实体,并结合柱形图进一步统计了正、负电场的比例情况。柱形图通过统计各个时间段内不同方向电场箭头的数量,分别表示出正向 (红色) 和负向 (青色) 电场的比例。具体流程如下:

1) 数据读取与预处理。根据数据来源选择从大数据平台或本地上传方式读取张衡一号卫星电场数据中的 ULF 频段数据。

2) 通过 Cesium. Cartesian3. fromDegrees 方法,将数据中的原始经纬度转换为 Cesium 所需的三维笛卡尔坐标,定位到具体场景中。

3) 在确认坐标后,利用 E_x 、 E_y 、 E_z 的正负与数值大小,确定箭头的方向和长度。可适度缩放矢量长度,以便在可视化中更直观地呈现不同强度的电场分量,同时通过颜色区分正向和负向 (例如:红色表示正向,青色表示负向)。

4) 使用 polyline 或其它方式在 Cesium 中绘制矢量箭头实体,将起点放置在转换后的坐标位置,并通过矢量方向和长度准确表现电场在空间中的分布情况。

5) 使用 viewer. entities. add () 函数对矢量场进行实例化。

6) 对可视化结果及统计数据进行导出,保存生成的图表。

经过上述过程, E_x 分量的矢量场方向为东西方向,正值表示为自西向东,负值表示为自东向西,如图 2 所示。图 2(a) 与图 2(d) 展示了 E_x 分量在全球的电场分布,红色箭头表示正值电场,青色箭头表示负值电场,图中分别涵盖了白天和夜间的不同时段。图 2(a) 中日间的观测数据显示,正电场主要分布在太平洋东侧、南美洲、大西洋、非洲、欧洲和西亚地区,负电场主要位于印度洋、大洋洲、太平洋和东亚地区。在这个时段内,正电场通常占据优势,尤其在观测周期的初期,正电场的比例可达到 56%,而在第三个周期中,负电场的比例则稍高于正电场。对比之下,图 2(d) 展示的夜间数据中,正电场多见于印度洋、非洲、西欧、大西洋及北美地区,而负电场

则主要集中在亚洲及太平洋地区。在夜间, 正负电场的比例更趋于平衡, 通常在 50% 左右。这些昼夜间的电场变化规律可能是由太阳辐射、电离层的扰动以及大气潮汐效应的综合影响所导致, 从而在全球范围内对电场分布产生影响。

E_y 分量构建的矢量场走向为南北方向, 正值表示为自南向北, 负值表示为自北向南。对图 2(b) 白天电场空间分布的观察可见, 以大西洋为界, 电场分布呈现明显的地域差异: 大西洋以东(非洲、欧洲、亚洲区域)正电场占据主导地位, 大西洋以西(美洲、太平洋区域), 负电场占主导。总体来看, 正电场通常占据主导地位, 特别是在第二和第三周期, 正电场比例超过 52%, 但在第四周期白天, 负电场比例略高于正电场, 显示出白天电场变化的多样性。图 2(e) 的夜间场景下, 正负电场比例更为悬殊, 多

数情况正电场占据主导地位, 但在第二周期夜间负电场稍有优势。

E_z 分量构建的矢量场方向垂直于地球表面的切面, 正值表示由天空指向地面, 负值则相反。在 Z 分量的多个周期中, 图 2(f) 夜间场景下, 正电场始终占据主导地位, 正电场比例大多维持在 77% ~ 78% 之间, 特别是在北半球的中高纬度地区, 正电场箭头密集。相比之下, 图 2(c) 白天场景中, 正电场比例显著下降, 尤其在第二和第三时间段, 正电场降至 47% ~ 49% 附近, 而负电场占据主导, 特别是在南半球更为明显。与之前两个分量的分析相比, Z 分量的夜间正电场更加突出, 而白天正负电场则呈现出较为平衡的状态, 显示出夜间和白天电场分布存在显著差异。

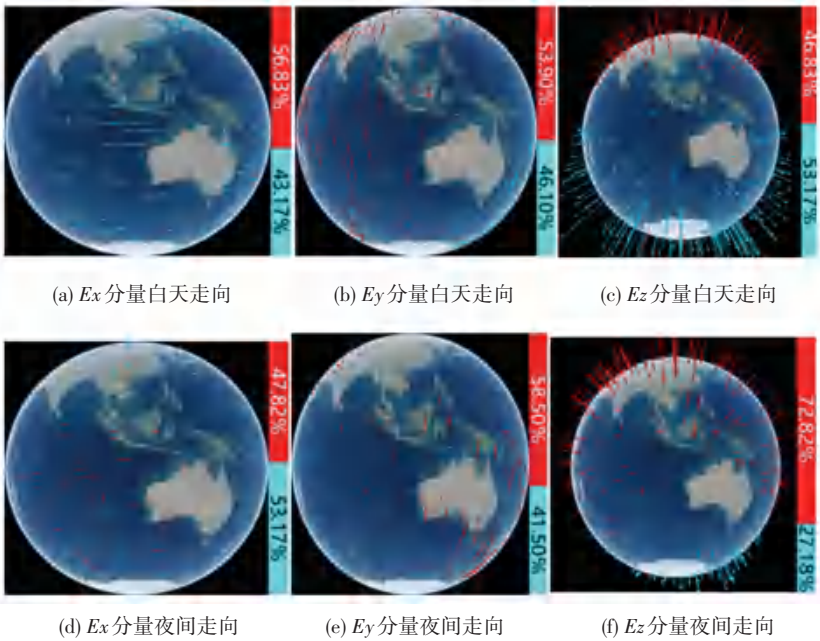


图 2 矢量场可视化

Fig. 2 Vector field visualization

3.2 C 值可视化

C 值是通过分析电磁信号的功率谱密度值与频率的关系, 来评估电场的扰动情况^[20]。根据计算的 C 值, 结合 CesiumHeatmapJS 热力图组件, 展示了数据的能量值和变化趋势, 能够快速识别数据中的热点区域。在转换数据格式时, 首先将每个点的格式转换为 $\{x: \text{Longitude}, y: \text{Latitude}, \text{value}: \text{Value}\}$, 其中 Longitude、Latitude 和 Value 分别表示该点的经度值、纬度值和 C 值; 随后, 在内存中创建一个 Canvas 元素, 用于绘制热力图。使用 Canvas API 在 Canvas 上绘制每个数据点, 根据数据点的 C 值确定其颜色

和透明度, 以表示数据的强度。为了生成更平滑的热力图效果, 对 Canvas 上的绘制结果进行模糊处理, 使用 Canvas 的 filter 属性来实现模糊效果。将处理后的 Canvas 内容转换为纹理, 并应用到地球表面对应的区域。

利用上述方法, 对 2023 年 5 月 11 日汤加群岛 Mw7.5 地震前、后的张衡一号卫星电场功率谱数据进行 C 值法处理, 然后进行分析。如图 3 所示, 将震中 $\pm 20^\circ$ 范围划为孕震区, 图中红色圈内代表孕震区, 中心的红点代表震中位置。选取地震前第 45 天(2023 年 3 月 27 日)的数据作为对照组, 选取地震前五天至震

后两天(2023 年 5 月 6 日~13 日)的数据为研究对象,画出 C 值法处理的结果图。其中,图 3(a)为对照组的 C 值结果,图 3(b)~(i)依次为 5 月 6 日~13 日的 C 值结果。从图 3 中可以看出,对照组显示,没有地震发生时孕震区内的 C 值色标总体偏向蓝色,仅在少数局部区域出现轻微的暖色调。随着距离震期越近,5 月 6 日起,孕震区内局部区域的暖色有所上升;

在 5 月 10 日,更多的区域偏向暖色且个别区域的颜色明显偏红,表明电场活动在当天有较为显著的扰动。地震发生后第一天,震中附近的暖色调范围略有缩小;至 5 月中旬,大多数区域的色标逐渐回归到对照组所呈现的蓝色或接近中性的水平,整体趋于稳定。整体来看, C 值的动态变化与电场活动在震前的增强和震后的恢复过程紧密相关。

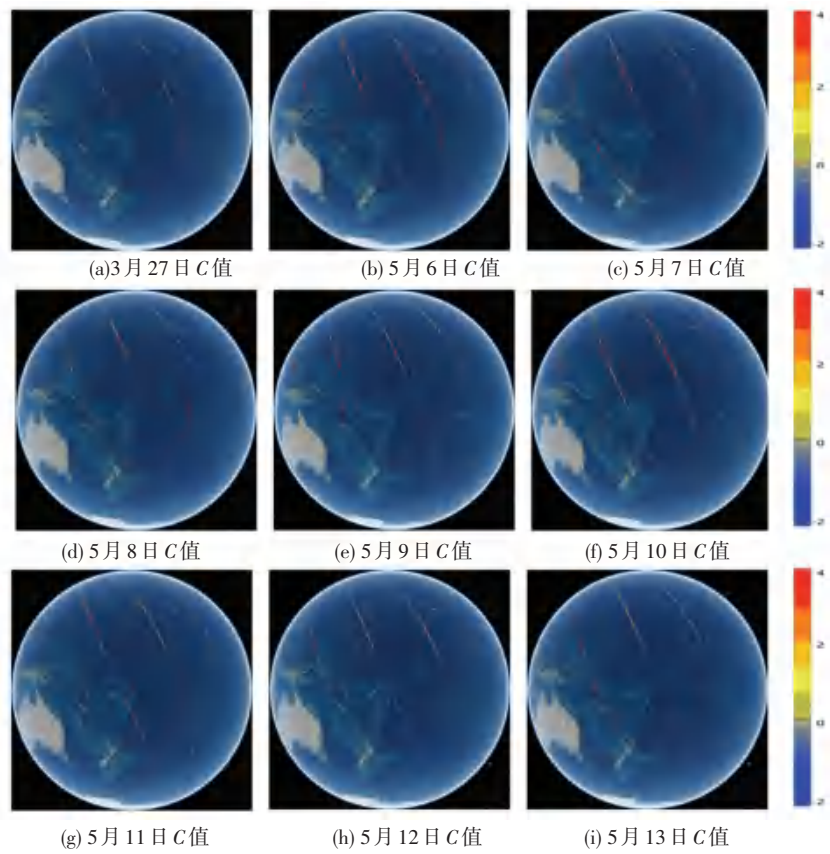


图 3 C 值变化的可视化图
Fig. 3 Visualization of C value changes

3.3 θ 值背景场三维可视化

θ 值是用于量化地震前后电场扰动幅度的重要参数,其计算过程如下:

- 1)选取震前 70 天至震前 40 天的电场 ELF 频段(19.5~250 Hz)功率谱密度值,计算其 C 值,并对这些 C 值进行统计分析,得到每个网格的平均值(背景均值矩阵 β)和标准方差(背景标准方差矩阵 σ)。
- 2)选取震前 39 天至震后 10 天的 C 值,将其分成每隔 5 天一个周期的数据段,计算每个周期的 C 值平均值(α)。
- 3)通过公式 $\theta = (\alpha - \beta) / \sigma$ 计算出每个周期的 θ 值,反映电场扰动的强度和空间分布。

与 3.2 节类似,在 θ 值背景场的三维可视化实验中,同样结合了 CesiumHeatmapJS 热力图组件。为了将离散的热力点形成连续的热力图,采用 cubic 空间插值法。cubic 插值法在数据处理和可视化中具有独特优势,能够通过平滑和高精度的插值结果,有效提高热力图的质量和细节表现。主要流程如下:

- 1)对 θ 值数据进行预处理,确保数据的完整性和一致性。其中包括去除异常值和填补缺失值,以保证后续插值过程的准确性。
- 2)在离散数据点之间应用 cubic 插值方法。cubic 插值通过考虑每个数据点的邻域信息,使用 3 次多项式函数生成插值点。具体而言,cubic 插值法

根据前后相邻数据点的值及其变化趋势,构建出平滑的插值曲线,从而生成新的数据点。这些插值点将覆盖原始数据点之间的所有区域,使得热力图生成地更加连续和平滑。

3) 实际应用中,离散的热力点数据按经度划分为西半球和东半球,并对各自的数据进行 cubic 插值。这样的分类处理方式,更精确地控制了插值过程,避免了因地理范围过大而引起的插值精度降低。

4) 使用 Canvas 绘制插值后的数据点并进行模糊处理,以增强热力图的视觉效果。通过 Canvas API,将每个插值点绘制为一个带有适当颜色和透明度的圆点,再通过模糊滤镜处理生成连续的热力图纹理。最终的纹理将包含所有插值点的综合信

息,形成平滑且连续的热力图表示。

5) 将生成的热力图纹理应用到 Cesium Viewer 中,实现 θ 值背景场随着时间序列动态演化。

根据上述方法和流程,以 2023 年 5 月 11 日 0 时 2 分左右发生在汤加群岛的地震为例,使用 θ 值背景场动态可视化进行了震例分析。该地震震中位置位于南纬 15.5°、西经 174.5°,震源深度为 200 km,震级为 Mw7.5,属于强震。通过对这一震例的分析,展示了 θ 值背景场动态可视化功能在地震研究中的应用和优势。选取震前 70 天至震后 10 天的 VLF 频段功率谱密度值,按照上述流程处理,得到震前 7 个周期、震中 1 个周期以及震后 1 个周期,共 9 个周期的 θ 值背景场变化情况,如图 4 所示。

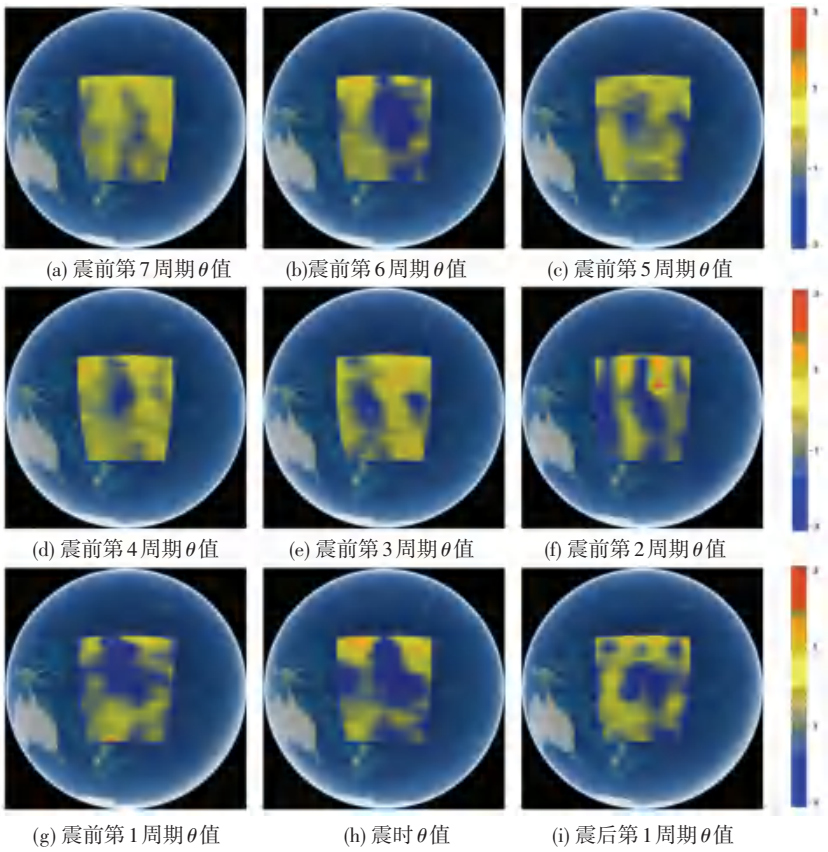


图 4 2023 年汤加群岛地震前后 θ 值的时空演化特征

Fig. 4 Spatiotemporal evolution characteristics of θ value before and after the 2023 Tonga islands earthquake

图 4 中的 9 个子图分别代表从震前到震后的时间序列,共 9 个周期,其中红色五角星代表震中。从 θ 值背景场图 4(a)~(e) 可以看出, θ 值的扰动没有明显的现象,整体较为稳定。在震前第 2 周期,即图 4(f) 中,可以明显看出扰动幅度较大,出现红色区域,并且扰动幅度开始逐渐增加;在震后,扰动幅度逐渐恢复到正常水平。

4 结束语

基于 Cesium 三维地球引擎的可视化技术,本文展示了张衡一号卫星电场数据的时空分布及震前、震中、震后的电场扰动特征。从展示结果中可以得到以下结论:

1) 利用矢量场可视化技术展示了 ULF 频段的

波形数据,从中可以看出全球 E_x 、 E_y 、 E_z 电场的昼夜分布存在明显差异,且可能受多因素影响。

2)震前几天, C 值逐渐上升,电场扰动增强;震中, C 值达到峰值;震后, C 值逐渐回落至正常水平。

3)对 C 值进行归一化处理后得到的 θ 值,能够更清晰地展示电场扰动的强度和空间分布特征。

研究表明,三维可视化不仅提高了对大规模空间数据的分析和展示效率,而且在电场扰动的识别与分析中,展现出极大的潜力。此外,探索并提出了一套结合 Cesium 地球引擎的完整处理流程。针对不同类型的数据,能够根据其特点在可视化过程中有效突出其相应的数据特征,为研究电场分布特征及观察电离层扰动提供了有力的技术支持。

未来,可进一步优化流程,结合更多卫星观测数据和其他电磁信号,提升地震前兆信号的识别能力,推动该技术在地震预报领域的应用。

参考文献

- [1] 张培震. 中国地震灾害与防震减灾 [J]. 地震地质, 2008, 30 (3): 577-583.
- [2] 申旭辉, 袁仕耿, 张学民, 等. 张衡一号卫星计划总体进展 [C]//中国地震学会地震电磁学专业委员会 2018 年学术研讨会论文集. 中国丹东: 中国地震学会地震电磁学专业委员会, 2018:62.
- [3] 马勉军, 雷军刚, 李诚, 等. 张衡一号空间电场探测仪设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(7): 582-589.
- [4] 杨旭明, 李忠, 李锦文, 等. 基于张衡一号卫星 HBase 数据库的入库方法研究 [J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(2): 54-57.
- [5] V SHAKEEL H M, IRAM S, AL - AQRABI H, et al. A comprehensive state-of-the-art survey on data visualization tools: Research developments, challenges and future domain specific visualization framework [J]. IEEE Access, 2022, 10: 96581 - 96601.
- [6] FANG Y, XU H, JIANG J. A survey of time series data visualization research [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 782(2): 022013.
- [7] SHEPPARD S R J. Landscape visualisation and climate change: the potential for influencing perceptions and behaviour [J]. Environmental Science & Policy, 2005, 8(6): 637-654.
- [8] MACEACHREN A M, KRAAK M J. Research challenges in geovisualization [J]. Cartography and Geographic Information Science, 2001, 28(1): 3-12.
- [9] BUYUKDEMIRCIOGLU M, KOCAMAN S. Reconstruction and efficient visualization of heterogeneous 3D city models [J]. Remote Sensing, 2020, 12(13): 2128.
- [10] METZE T. Visualization in environmental policy and planning: A systematic review and research agenda [J]. Journal of Environmental Policy & Planning, 2020, 22(5): 745-760.
- [11] KIEFER P, GIANNIOPOULOS I, KREMER D, et al. Starting to get bored: An outdoor eye tracking study of tourists exploring a city panorama [C]//Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New York: ACM, 2014: 315-318.
- [12] YANG Z, XIANG D, CHENG Y. VR panoramic technology in urban rail transit vehicle engineering simulation system [J]. IEEE Access, 2020, 8: 140673-140681.
- [13] 谈琼, 张涛, 丁乐乐, 等. 基于 Cesium 的多源三维数据可视化与分析平台设计与开发 [J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(6): 120-123.
- [14] 乐世华, 张煦, 张尚弘, 等. 基于 Cesium 的 WebGIS 流域虚拟场景搭建 [J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 90-96.
- [15] 李莹, 赵宁曦. 三种基于 Cesium 的重庆市漫游飞行算法及其对比分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 709-720.
- [16] 高齐琦, 郑凌兵, 孙涛. 基于 Cesium 的气体扩散可视化系统 [J]. 软件, 2020, 41(7): 220-223.
- [17] ZHANG X, ZHOU W, SHEN J, et al. 3D interactive visualization method of urban waterlogging based on cesium [C]//Proceedings of 29th International Cartographic Conference. 2019: DOI:10.5194/ICA-ABS-1-433-2019.
- [18] HUANG J, LEI J, LI S, 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.
- [19] 黄建平, 张富志, 李忠, 等. 张衡一号卫星观测的震前电场数据扰动识别研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(8): 1834-1843.
- [20] ZHANG X M, BATTISTON R, SHEN X H, et al. Automatic collecting technique of low frequency electromagnetic signals and its application in earthquake study [C]//Proceedings of International Conference on Knowledge Science. 2010: 366-377.