引文格式:许才军,尹汇民.同震电离层扰动:观测、机理研究与应用新进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1562-1583.DOI:10.13203/j.whugis20250325

Citation: XU Caijun, YIN Huimin. Co-seismic Ionospheric Disturbances: Recent Advances in Observations, Mechanisms, and Applications[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(8): 1562-1583. DOI: 10.13203/j.whugis20250325

同震电离层扰动:观测、机理研究与应用新进展

许才军[1,2,3] 尹汇民[1]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 自然资源部地球物理大地测量重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:同震电离层扰动(co-seismic ionospheric disturbances,CIDs)不仅是探索固体地球与近地空间耦合动力学的独特物理窗口,也为地震与海啸等自然灾害的早期预警提供了前沿解决方案。该领域的研究进展已清晰地勾勒出一条从现象观测到应用实践的发展脉络。以全球导航卫星系统总电子含量测量为核心的观测技术演进,揭示了CIDs的关键物理特征,包括N型波、传播各向异性及多模态现象。这些现象的背后,是以声学-重力波为核心的物理机制及其日益精细的数值建模与仿真技术。其两大核心应用潜力在于:一是通过反演扰动特征来快速估算地震震源参数;二是在海啸早期预警中扮演"空中信使"的关键角色。一个显著的趋势是,以混合深度学习架构和物理信息机器学习为代表的数据驱动方法,正为CIDs的自动、近实时探测带来范式转变。然而,从科学演示走向业务化应用的道路仍面临诸多挑战,包括如何在强背景噪声中可靠辨识信号、提升模型的物理保真度,以及构建全球协同的观测与验证体系。未来的突破方向在于构建一个将多技术观测、高保真度物理模型与人工智能深度融合的综合预警体系。CIDs研究的深化必将为地球系统科学的发展和自然灾害应对能力的提升做出重要贡献。

关键词:同震电离层扰动;声学-重力波;GNSS-TEC;海啸早期预警;电离层地震学

中图分类号:P335 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-01-25

DOI:10.13203/j.whugis20250325 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1562-22

Co-seismic Ionospheric Disturbances: Recent Advances in Observations, Mechanisms, and Applications

XU Caijun[1,2,3] *YIN Huimin*[1]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Geophysical Geodesy, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China

Abstract: Co-seismic ionospheric disturbances (CIDs) not only provide a unique physical window into the coupling dynamics between the solid Earth and near-Earth space but also offer a cutting-edge approach for the early warning of natural hazards such as earthquakes and tsunamis. Progress in this field has traced a clear trajectory from phenomenological observation to practical application. The evolution of observational techniques, centered on global navigation satellite system total electron content measurements, has been pivotal in revealing key physical characteristics of CIDs, including N-shaped waves, propagation anisotropy, and multi-modal phenomena. Underpinning these observations are physical mechanisms dominated by acoustic-gravity waves, which are increasingly validated through refined numerical modeling and simulation. The two primary application potentials of CIDs lie in:(1) the rapid estimation of seismic source parameters by inverting disturbance features, and (2) their role as a critical "atmospheric messenger" in tsunami early warning systems. A prominent trend is the paradigm shift driven by data-driven methods—particular-

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42130101)。

第一作者:许才军,博士,教授,主要从事卫星大地测量学、地震大地测量学等方面的教学科研工作。cjxu@whu.edu.cn

通信作者:尹汇民,博士生。iamyhm@whu.edu.cn

ly hybrid deep learning architectures and physics-informed machine learning — in the automated and near-real-time detection of CIDs. However, the path from scientific demonstration to operational application faces several challenges, including the reliable identification of signals amidst strong background noise, enhancement of model physical fidelity, and the establishment of a globally coordinated observation and verification framework. Future breakthroughs are expected to come from an integrated warning system that deeply fuses multi-technique observations, high-fidelity physical models, and artificial intelligence. Continued advances in CIDs research are poised to make significant contributions to both Earth system science and our capacity to respond to natural disasters.

Key words: co-seismic ionospheric disturbances; acoustic-gravity waves; GNSS-TEC; tsunami early warning; ionospheric seismology

地球电离层作为连接地球与空间的等离子体层，为观测地球系统内部的剧烈活动提供了一个独特的天然实验室[1]。它不仅响应太阳和地磁活动等“自上而下”的驱动，也对来自岩石圈、大气圈等低层圈层的物理过程有着灵敏的响应。研究这种“自下而上”的耦合过程，特别是地震活动引发的电离层变化，已形成一门充满活力的交叉学科——电离层地震学[2]。

在电离层地震学中，同震电离层扰动（co-seismic ionospheric disturbances，CIDs）是岩石圈-大气圈-电离层耦合过程中一个关键且可信的观测表现[3]。它是指在地震发生时及震后短时间内，由地震能量释放所激发的声学-重力波（acoustic-gravity waves，AGWs）向高空传播并与电离层等离子体相互作用而引发的一系列扰动[4]。与充满不确定性和科学争议的震前电离层异常相比[5-8]，CIDs的物理机制更为明确，观测证据也更为确凿和丰富，使其成为研究地震物理过程的可靠信使[9]。

对CIDs的科学探索始于20世纪60年代。1964年阿拉斯加特大地震（Mw 9.2）后，DAVIES和BAKER[10]通过高频多普勒频移技术首次记录到CIDs，标志着该领域的开端。然而，该领域真正的革命性发展始于20世纪90年代以来全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）的广泛应用。自CALAIS和MINSTER[11]的开创性工作以来，GNSS以其前所未有的时空分辨率和覆盖能力释放了一个数据驱动的研究新范式，使得系统性地追踪CIDs时空演化、并将其与震源过程进行定量联系成为可能[12-14]。

本文将遵循从观测现象到物理机理、再到前沿应用的逻辑脉络，系统性地梳理该领域的关键进展，识别当前面临的核心挑战，并为未来的研究方向提供前瞻性展望。

1　CIDs的观测现象与物理特征

CIDs作为地震能量在高层大气中的直接映射，其多样的表现形式和复杂的传播特性是理解岩石圈-大气圈-电离层耦合过程的关键。

1.1　观测技术与数据源的演进

对CIDs的观测能力经历了一个从单点突破到全球成像、从二维平面到三维立体的飞跃式发展，这一历程深刻反映了地球物理观测技术的进步。早期的CIDs发现源于地面单点、高灵敏度的探测技术。高频多普勒探测仪通过测量无线电信号反射后的频率变化，极灵敏地捕捉电离层等离子体的垂直运动，DAVIES和BAKER正是利用此技术首次证实了CIDs的存在[15-17]。同时，电离层测高仪通过垂直探测获取电子密度剖面，为理解CIDs在不同高度层的响应提供了最初的证据[18-19]。这些早期技术奠定了CIDs研究的基础，但其空间覆盖极为有限，难以刻画扰动的传播全貌。

GNSS的出现则彻底改变了CIDs的研究范式，引领了一场二维成像的革命。自CALAIS和MINSTER应用GPS技术成功检测到1994年北岭地震后的电离层扰动后，利用GNSS信号延迟反演的总电子含量（total electron content，TEC）成为了观测CIDs的主流手段[20-39]。TEC是衡量电离层中电子总数的关键物理量，其定义为沿单位面积路径上电子密度的积分。对于一条从卫星（S）到接收机（R）的信号路径，其倾斜总电子含量（slant TEC，STEC）可表示为：

$$N_{\mathrm{STEC}}=\int_{R}^{S} N_e \mathrm{d}s \tag{1}$$

式中，N_e是电子密度；s是信号传播路径的长度。为了消除因卫星仰角变化带来的路径长度影响，通常会将STEC通过一个映射函数（或称倾斜因子）$M(\epsilon)$投影到天顶方向，得到垂直总电子含量

(vertical TEC,VTEC),可表示为:

$$N_{\mathrm{VTEC}}=\frac{N_{\mathrm{STEC}}}{M(\epsilon)} \tag{2}$$

式中,映射函数$M(\epsilon)$的具体形式依赖于电离层薄层假设,其中电离层被简化为一个集中在某个固定高度h_m的薄壳。正是VTEC及其随时间的变化(differential TEC,dTEC)构成了当前绝大多数CIDs研究的核心观测量。GNSS的优势在于其高时空分辨率和广域覆盖能力,使得对CIDs波阵面的二维连续追踪成为常规操作[40]。此外,卫星原位探测[41]和重力卫星[42]也为验证和补充地面观测提供了宝贵的"真实值"参考。

尽管观测技术取得了巨大进步,但每种方法都存在其固有的局限性。高频多普勒和测高仪虽灵敏度高,但空间覆盖严重不足。GNSS-TEC虽实现了广域成像,但其本质是沿卫星-接收机路径的积分测量,这导致了两个核心问题:一是垂直结构信息的模糊化,难以精确判定扰动发生的主要高度;二是其对扰动的敏感性强烈依赖于观测几何,当波传播方向与视线方向近乎平行时,扰动可能被"积分抵消"而无法探测到[43]。这些局限性正是驱动CIDs观测向三维成像发展的根本动力。

1.2 CIDs的基本分类与激发源

根据其激发源和传播特性,CIDs可主要分为3种模式。这3种模式在一次强震后可能先后或同时出现,其物理过程如图1所示。

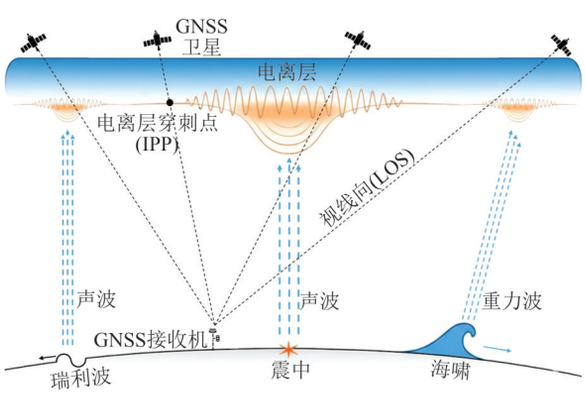


图1 CIDs的3种主要激发机制示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Three Primary Generation Mechanisms of CIDs

第1种是与震源区地壳垂直位移直接相关的近场声波(图1,中间路径)。这种类似活塞的运动会产生强烈的次声波,这些声波近似垂直向上传播,最终在电离层中引起显著扰动。大量研究已确认,断层的垂直位移是引发近场CIDs的关键因素[44-46]。这类CIDs在电离层中的水平传播速度通常在0.3~2.0 km/s范围内[47]。例如,在2013年中国四川芦山M 7.0地震后,观测到的声波传播速度经计算为0.72 ± 0.04 km/s,这与大气在0~450 km高度范围内的平均声速高度吻合[48]。

第2种CIDs的产生则与沿地球表面传播的瑞利面波密切相关(图1,左侧路径)。在距离震中较远的区域,CIDs的产生则与沿地球表面传播的瑞利面波密切相关。瑞利波的垂直运动分量会持续地激发其上方大气中的声波,这些声波不断"泄漏"至电离层,形成扰动。这一机制最早由ROW[15]在分析1964年阿拉斯加大地震的观测数据时提出,后续被大量基于现代GNSS观测的研究证实[49-52]。这类CIDs的传播速度与地表的瑞利波速度基本一致,通常在2.0~4.0 km/s范围内。一个典型的案例是2012年加拿大海达瓜伊Mw 7.8地震,其诱发的CIDs传播速度为2.20 km/s,与地震后不久记录到的瑞利波速度(2.22 km/s)几乎完全相同[53]。同样,2018年阿拉斯加Mw 7.9地震后观测到的速度约为2.6~2.7 km/s的扰动,也被归因于瑞利波的耦合作用[54]。

第3种CIDs与次生灾害——海啸紧密关联(图1,右侧路径)。当海底强震引发海啸时,海啸波本身作为一个移动的大气强迫源,会在其传播路径上激发周期较长、速度较慢的内重力波,这些重力波随后传播至电离层形成CIDs。2011年日本东北Mw 9.0特大地震是研究此类CIDs的经典案例[55-56]。震后约60 min,在距离震中数百公里的洋面上方可以观测到清晰的重力波扰动,其振幅约为0.5~1.5 TECU,与海啸及大气-电离层耦合模型的预测高度一致[57]。这类由海啸产生的CIDs传播速度较慢,通常在0.1~0.3 km/s范围内,与其下方海啸波的传播速度相当。例如,ROLLAND等[58]对2011年日本地震的分析清晰地识别出了由海啸引发的、速度约为225 m/s的慢速重力波。这一机制的可靠性已得到广泛验证,使其成为海啸早期预警的重要物理基础[59-60]。

1.3 关键波形与传播特征的综合解读

对CIDs的深入理解需要从分析单个时间序列的典型波形扩展到剖析整个扰动场的时空传播特征。不同类型的激发源会在TEC数据中留下独特的"指纹",图2通过两个真实案例,将地理源区(图2(a))、理论波形分类(图2(b))与实际观测数据(图2(c)、2(d))紧密联系起来。

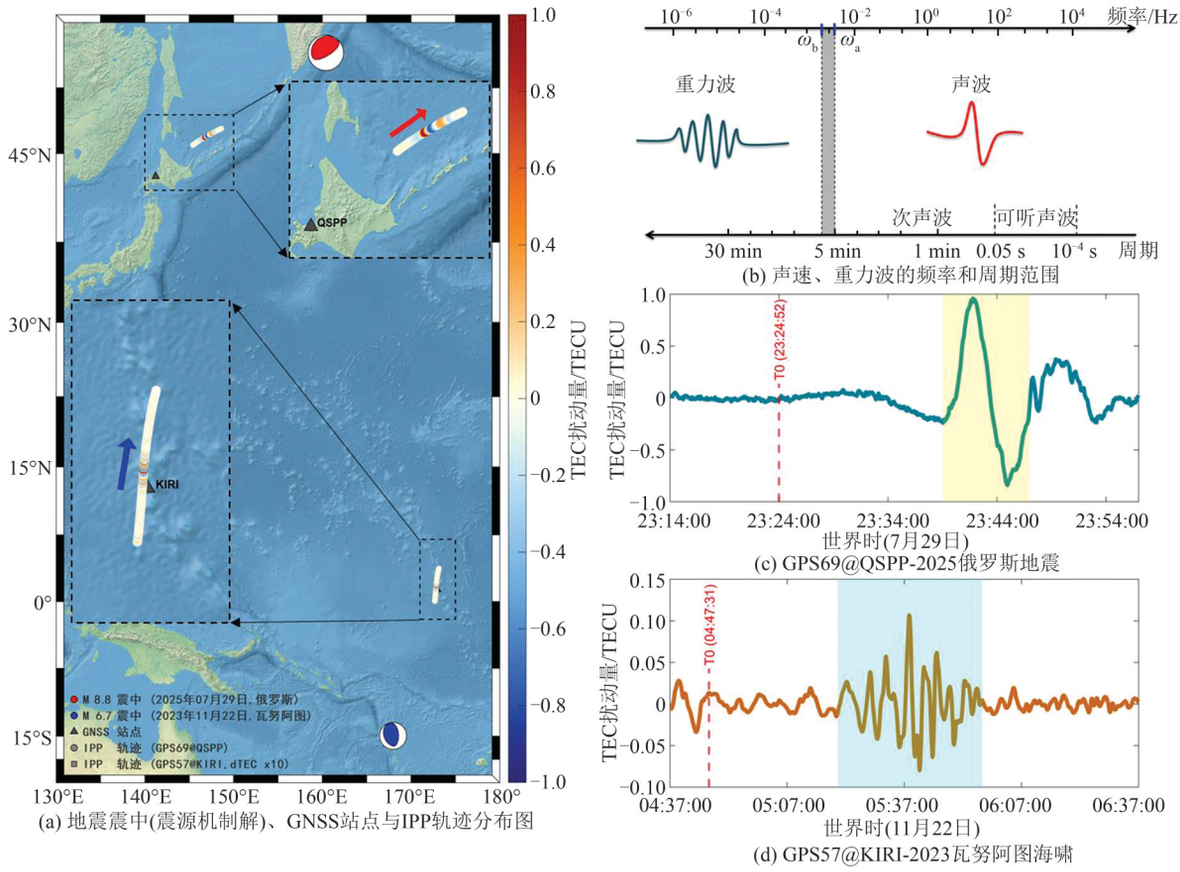


图 2　CIDs 观测特征：从震源、理论到 TEC 波形（图(b)改编自文献[9]）

Fig. 2　Observational Characteristics of CIDs: From Source and Theory to TEC Waveforms (Fig. (b) Is Adapted from Reference [9])

首先，在波形特征上，由地壳快速位移直接产生的扰动主要以高频声波的形式传播。当它们到达电离层后，常在 TEC 时间序列中呈现出一种标志性的 N 型波形。2025-07-29，俄罗斯 M 8.8 地震事件清晰地展示了一个典型的 N 型波（图 2(c)），其形态为一个快速的正脉冲紧跟一个负脉冲，整个过程持续约 10 min。这种短周期的形态与图 2(b) 中所描绘的声学波的高频特性完全相符。N 型波的初始极性被认为与地表的初始运动方向（隆起或沉降）直接相关[61]，为快速判断断层运动方式提供了独立依据[62-63]。

与此形成鲜明对比的是，由海啸等大尺度、慢速过程激发的扰动则主要表现为低频波动。2023-11-22，瓦努阿图 M 6.7 地震引发的海啸事件中的 dTEC 序列就呈现出周期更长（约 20 min）、持续时间更久的特征（图 2(d)）。这种形态则落入了图 2(b) 所示的重力波的低频范畴。这种波形上的显著差异是区分不同类型 CIDs 激发源，特别是识别海啸信号的关键[64]。

其次，在时空传播上，CIDs 并非简单地各向同性扩散，而是表现出复杂的多模态传播和各向异性。图 3 的时距图清晰地揭示了多模态现象。在 1994 年千岛群岛地震中（图 3(a)），初始的单一扰动在传播过程中分裂为速度差异显著的快、慢两个模式，这被解释为瑞利波耦合快波与直接声波慢波的分离[65]。而在 2011 年日本东北特大地震中（图 3(b)），时距图则揭示了由瑞利波、直接声波和海啸重力波共同构成的更为复杂的多模态共存场景[66]。

图 4 直观地展示了 CIDs 传播的各向异性，可以看出，CIDs 的传播具有强烈的方位角依赖性。2024 年日本能登地震激发的 CIDs 并未呈同心圆状扩散，而是几乎完全沿着当地地磁场方向朝南传播。这种现象被认为与地球磁场和高空风场的调制作用密切相关，其详细的物理机制将在§2 深入探讨。准确解耦这些复杂的传播路径效应，是利用 CIDs 反演震源的关键挑战[67]。

1.4　先进观测方法：迈向三维立体成像

为了克服前述 GNSS-TEC 观测的垂直积分局限性，三维电离层层析成像（computerized ionospheric tomography，CIT）应运而生。这一概念最早由 AUSTEN 等[69]开创性地提出，其核心思想

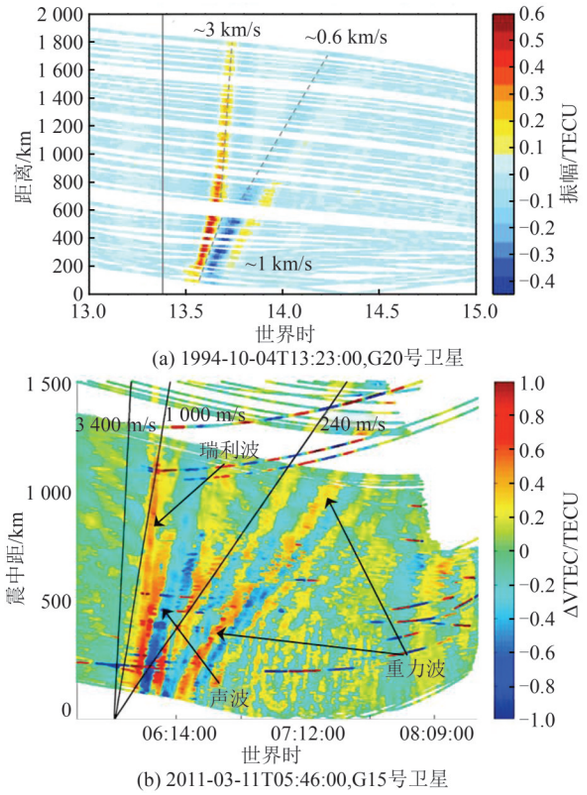


图3 CIDs的多模态传播:时距图观测证据[9]

Fig. 3 Multi-modal Propagation of CIDs: Evidence from Time-Distance Diagrams[9]

是利用来自多个地面站的TEC数据,通过反演算法重建电子密度的三维空间分布,从而能够"解剖"CIDs的垂直结构和时间演化[70-71]。

2011年日本东北特大地震是展示三维层析能力的经典案例。图5的层析结果直观地揭示了CIDs复杂的、随高度变化的垂直结构,这些精细特征是二维观测无法揭示的[72]。该技术的应用也进一步揭示了CIDs在不同地质构造下的特征,例如在2018年印尼帕卢地震中,三维空间中的观测直接证实了CIDs传播的南北不对称性[73]。近期的最新进展是,FU等[74]利用覆盖日本的超密集台网对2024年能登地震进行了迄今最高分辨率的三维重建,其结果甚至揭示了观测与传统理论预测之间的差异,可能指向了非线性传播和多源激发等更复杂的物理过程。

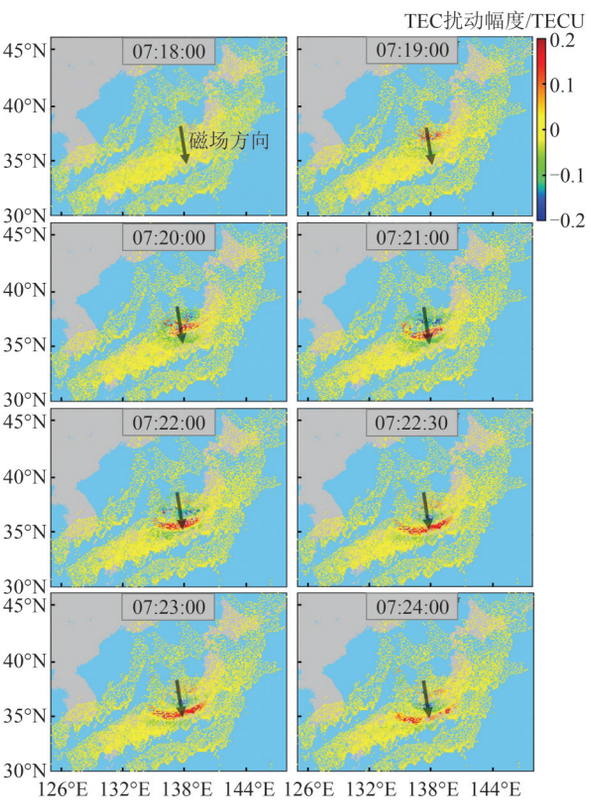


图4 CIDs传播的各向异性:2024年日本能登Mw 7.5地震案例[68]

Fig. 4 Anisotropic Propagation of CIDs: The Case of the 2024 Mw 7.5 Noto, Japan Earthquake[68]

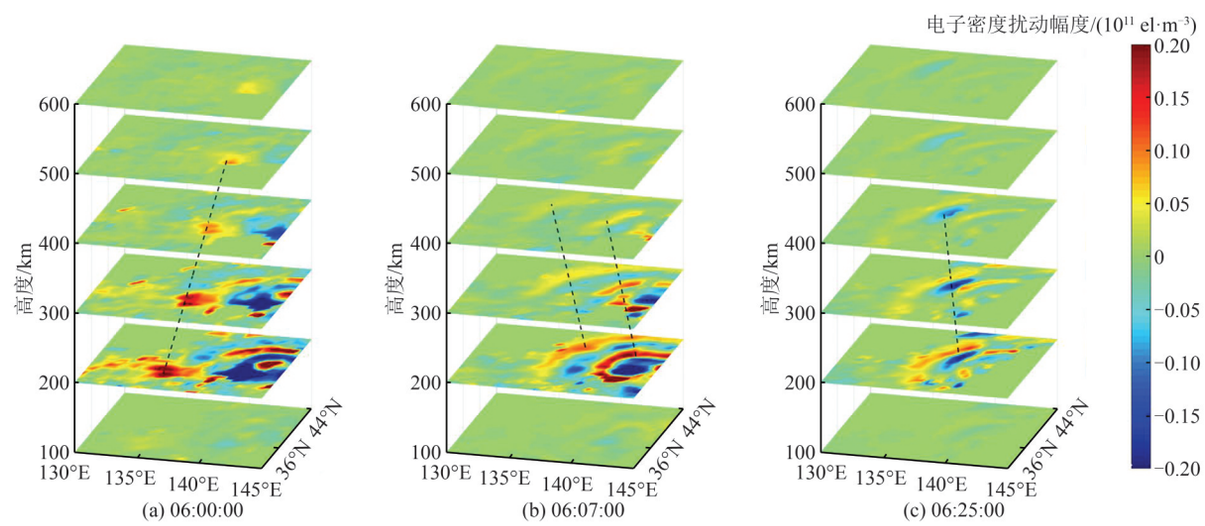


图5 真实CIDs的三维层析成像:2011年日本东北地震案例[72]

Fig. 5 3D Tomographic Imaging of a Real CIDs: The Case of the 2011 Tohoku, Japan Earthquake[72]

尽管三维层析极具潜力,但它也面临着严峻的挑战。其核心是一个数学上的病态反演问题,反演结果的稳定性和分辨率高度依赖于GNSS台站和卫星的几何分布[75]。在台站稀疏地区,其垂直分辨率可能较差。为解决这一根本性挑战,当前的研究前沿正致力于发展更稳健的反演算法,其共同思想是在反演过程中引入关于电离层结构的先验信息。两种主流的先进框架是贝叶斯反演和压缩感知(compressed sensing,CS)。贝叶斯反演将反演问题视为一个统计推断过程,通过构建描述电离层空间相关性等物理特征的先验概率分布来约束和规范化反演结果,从而获得更物理、更稳健的解[76-79]。而CS则引入了另一种强大的先验知识——信号的稀疏性。它假设电离层信号在某个变换域是稀疏的,并通过求解一个稀疏性约束下的优化问题,从有限的观测中精确恢复信号[80]。更有研究将数据驱动方法与CS框架结合,从历史数据中学习最优的稀疏基函数,进一步提升了重建效果[81]。未来,将这些引入了先验信息的先进反演算法与多源数据(如无线电掩星、测高仪等)融合,并最终实现能够实时捕捉CIDs三维波场完整演化过程的四维(3D+时间)监测,将是该领域发展的关键方向[82-84]。

1.5　里程碑事件回顾与展望

综上所述,CIDs的观测研究经历了一个从单点探测到四维成像的跨越式发展。为了系统性地展现这一历史脉络和其中的关键科学突破,表1汇集并总结了自CIDs被发现以来,一系列最具里程碑意义的地震事件及其电离层响应研究,旨在展示观测技术、科学认知和研究方法的演进。

表1　代表性CIDs事件总结

Table 1　Summary of Representative CIDs Events

地震事件	时间	震级(Mw)	震源机制	主要观测技术	主要观测特征	关键参考文献
美国阿拉斯加	1964-03-28	9.2	逆冲	多普勒频移、测高仪	首次科学发现;记录到震后约15 min的电离层扰动	[10,85]
美国北岭	1994-01-17	6.7	逆冲	GNSS-TEC	首次利用GPS探测到CIDs,开启了GNSS电离层地震学时代	[11]
日本十胜近海	2003-09-25	8.0	逆冲	GNSS-TEC	通过射线追踪模拟揭示了CIDs在南北方向上的显著不对称性	[12]
印尼苏门答腊-安达曼	2004-12-26	9.1	逆冲	GNSS-TEC	首次利用CIDs约束超长断层的破裂过程,展示了CIDs对震源时空扩展的敏感性	[22]
日本库页岛	2007-01-13	8.1	正断	GNSS-TEC	观测到正断地震导致的TEC反N型波	[86]
中国汶川	2008-05-12	7.9	逆冲	GNSS-TEC	首次清晰地记录到近场N型波,证实其与地壳垂直位移的直接关系	[44]
日本东北	2011-03-11	9.1	逆冲	GNSS-TEC(高频)、三维层析	首次利用CIDs成像震源滑移分布,清晰观测到海啸诱发的电离层行进式扰动(traveling ionospheric disturbances,TIDs);首次实现CIDs的三维层析重建	[23,58,72]
印尼苏门答腊	2012-04-11	8.6	走滑	GNSS-TEC	揭示了走滑型地震引发的电离层扰动与震级的关系	[87]
尼泊尔廓尔喀	2015-04-25	7.8	逆冲	GNSS-TEC	清晰展示了双模态传播现象(慢速声波与快速瑞利波耦合波)	[66]
新西兰凯库拉	2016-11-13	7.8	逆冲	GNSS-TEC(高频)	通过对比数值模拟与TEC观测数据证实地震期间复杂破裂过程对电离层的影响;CIDs异常复杂结构反映地震本身复杂的多段层结构	[63,88]
印尼帕卢	2018-09-28	7.5	走滑	GNSS-TEC	对走滑地震进行三维层析成像,揭示了地震触发的电离层异常的空间分布	[73,89]
土耳其-叙利亚	2023-02-06	7.8/7.5	走滑	GNSS-TEC、测高仪	提供了走滑型强震引发CIDs的清晰案例;对比了昼/夜间电离层响应的巨大差异。长短期记忆网络(long short-term memory,LSTM)模型对CIDs的近实时探测	[19,90]
日本能登半岛	2024-01-01	7.5	逆冲	GNSS-TEC(超密集台网)、三维层析	利用超密集台网实现了迄今最高分辨率的CIDs三维重建;揭示了多源和非线性传播效应	[67,74]
中国台湾花莲	2024-04-02	7.4	逆冲	多仪器协同(GNSS、多普勒、磁力计)	首次利用四维监测网络揭示了CIDs传播的高度依赖性。	[82]
方法学进展	N/A	N/A	N/A	机器学习(RF)	首次实现了CIDs的近实时机器学习自动分类与拾取,推动了业务化应用	[91]

从表1中可以清晰地看到CIDs研究领域的几大发展趋势:技术的革命性驱动、科学问题的不断深化以及应用需求的明确导向。这一系列坚实的观测证据为人们深入探讨CIDs背后的物理机制、发展高保真度的数值模型奠定了坚实的基础,这也是下一节重点讨论的内容。

2 物理机制、建模与数值仿真

为了从根本上理解§1所呈现的丰富观测现象,必须深入其背后的物理机制,并发展能够定量描述其过程的数值模型。本节旨在系统梳理CIDs的核心物理理论,介绍当前主流的建模方法及其谱系,并探讨制约模型精度的关键不确定性因素,从而将观测现象与物理本质紧密联系起来。

2.1 核心物理理论:AGWs耦合机制

CIDs的产生与传播本质上是一个多圈层能量耦合的过程,其核心物理理论是AGWs在大气中的激发与传播。地震源(地表位移、瑞利波、海啸)作为一种强迫源,在大气中激发AGWs。这些波动携带能量从源区向上传播,其行为由流体动力学方程组所控制,并受到大气环境的深刻调制[92-93]。

AGWs向上传播时,其振幅会发生显著变化。由于大气密度随高度呈指数级递减,为保持能量通量守恒,波的振幅(如速度扰动)会近似指数级增长[94-95]。这一振幅放大效应是低层大气的微弱扰动能够在高空电离层产生显著响应的根本原因。然而,当波动传播至热层(约100 km以上)时,大气黏滞性和热传导等耗散效应变得日益重要,它们会抑制振幅的无限增长,并最终导致波动能量的耗散,转化为对背景大气的加热[96-97]。

当放大了的AGWs到达电离层高度(主要是E层和F层)时,它们通过中性大气粒子与电离层等离子体之间的频繁碰撞,将动量和能量传递给带电粒子,从而扰动背景等离子体的密度、温度和速度,最终表现为可观测到的TEC变化[98]。这一耦合过程受地磁场的强烈约束,由于离子回旋频率远高于离子-中性碰撞频率,离子运动被束缚在磁力线上,AGWs中性风扰动驱动等离子体运动的效率,强烈依赖于风矢量与磁场方向的几何关系[99]。因此,AGWs中性风扰动驱动等离子体运动的效率,强烈依赖于风矢量与磁场方向的几何关系,这种各向异性的耦合正是在图3中观测到的CIDs定向传播现象的根本物理原因[100-101]。

从数学上讲,声波与重力波是同一种大气波动在不同频率范围内的表现形式,它们的传播特性由一个统一的频散关系所描述。在一个简化的无风、无耗散、等温大气模型中,该关系式为:

$$\omega^4-\omega^2C_S^2\left(k_h^2+k_z^2\right)+\left(\gamma-1\right)g^2k_h^2-\omega^2\omega_a^2=0 \tag{3}$$

式中,ω是波的角频率;k_h和k_z分别是水平和垂直波数;C_S是声速;g是重力加速度;γ是比热容比;ω_a是声学截止频率。式(3)(详细解释请参考文献[102-104])揭示了波动的两个关键临界频率:声学截止频率ω_a和布伦特-维赛拉频率ω_b。这一数学关系为在图2(b)中看到的波形分类提供了理论基础:只有当波的频率$\omega>\omega_a$时,它才能以声波的形式垂直传播,而当$\omega<\omega_b$时,它则以内重力波的形式传播,其能量主要沿水平方向输运。正是这个频散关系从根本上决定了由地震激发的不同频率成分的扰动将以何种方式(声波或重力波)传播至电离层,并最终塑造了人们观测到的CIDs形态。

2.2 正演模拟:CIDs数值模型的发展与谱系

为了定量复现和预测CIDs,研究者们发展了多种数值模型,它们在物理完备性和计算效率之间做出了不同的权衡。

解析/半解析模型基于简化的物理假设(如线性、无耗散、等温大气),寻求AGWs控制方程的解析解。它们的优点是计算速度极快,能够在数分钟内完成模拟,因此在近实时应用中展现出巨大潜力[105-106]。

相比之下,全波数值模型通过数值方法直接求解完整的非线性流体动力学方程组,能够最完整地模拟AGWs的传播、耗散及耦合过程,物理保真度最高,但计算量极为庞大,目前主要用于高精度的回溯性科学研究[107-108]。

射线追踪模型是一种在高频近似下模拟波传播路径和相位的几何光学方法[109-112]。它不直接求解波场,而是追踪波包能量的传播路径。其优点是计算效率远高于全波模型,能快速估算波的到达时间、传播路径和由大气折射引起的几何效应[113-115]。射线追踪在解释观测到的CIDs传播时空分布、识别不同传播模式以及确定波与电离层相互作用的主要高度方面非常有用。但其局限性在于无法模拟波的衍射、干涉以及振幅等完整的波动特性。

表2对比了上述3种主流建模方法的特点、权衡及其最适用的研究场景。

表 2　3种主流建模方法的数值模型对比

Table 2　Comparison of Numerical Models of Three Main Modeling Methods

模型类别	核心原理	优点	缺点	主要应用场景	代表性文献
解析/半解析模型	求解简化的线性、等温、无耗散大气波动方程	计算速度极快(分钟级),概念清晰,物理直观	物理过程过度简化,无法模拟非线性、耗散等复杂效应,精度有限	快速概念验证;近实时海啸预警的潜力探索;教学与基础理论研究	[105-106]
全波数值模型	数值求解完整的非线性、粘滞、多组分流体动力学方程组	物理保真度最高,能最完整地模拟波的传播、非线性演化和耗散过程	计算量巨大(小时至天级),对背景大气模型和源的设定极为敏感	高精度回溯性科学研究;理解复杂物理细节;为其他简化模型提供基准	[98,107-108]
射线追踪模型	几何光学近似,在高频假设下追踪波包能量的传播路径	计算效率高,能直观模拟因大气分层和风场引起的折射路径	无法模拟完整的波动效应(如衍射、干涉、振幅),仅在高频时有效	估算波的传播时间与路径;CIDs源的反投影成像;理解观测几何与各向异性效应	[12,114]

从表 2 可以看出,研究者们已经拥有了一套功能互补的建模工具箱。其中,先进的三维射线追踪模型在考虑了真实大气环境(特别是背景风场)后,已成为理解和预测 CIDs 三维传播路径和到达时间特征的强大工具。图 6 展示了一个针对 2016 年新西兰凯库拉地震的附加风场的三维声波射线追踪模型,它完美地连接了理论模型与§1讨论的复杂观测现象。

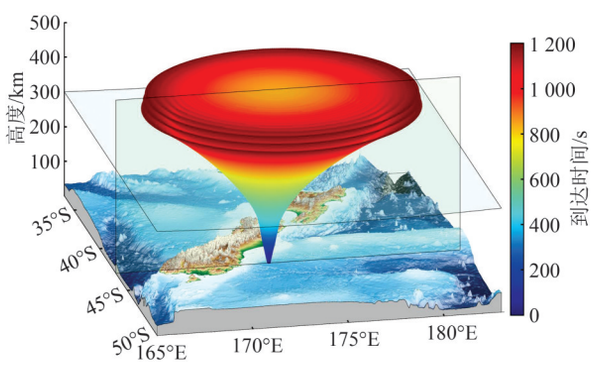


图 6　附加风场的声波射线追踪模型:2016 年新西兰凯库拉地震的三维模拟

Fig. 6　Acoustic Ray-Tracing Model with Wind Fields: 3D Simulation of the 2016 Kaikoura Earthquake

如图 6 所示,模型可以完整地构建出声波从震源向高空传播的三维几何形态。通过提取模型特定剖面,可以获得更详细的物理洞察:其垂直剖面(图 7(a))清晰地展示了声波因大气层结变化而发生的折射路径和到达时间;其在 300 km 高度的水平切面(图 7(b))则直接模拟了 CIDs 在电离层中的水平“足迹”。至关重要的是,该水平切面中的等时线由于包含了背景风场的平流效应,呈现出非对称的形态。这从理论上解释了在图 4 中观测到的 CIDs 传播各向异性,并证明了先进模型在解耦震源效应和传播路径效应方面的关键作用。这种精细化的建模能力是未来实现高精度震源反演和海啸预警预报的基础。

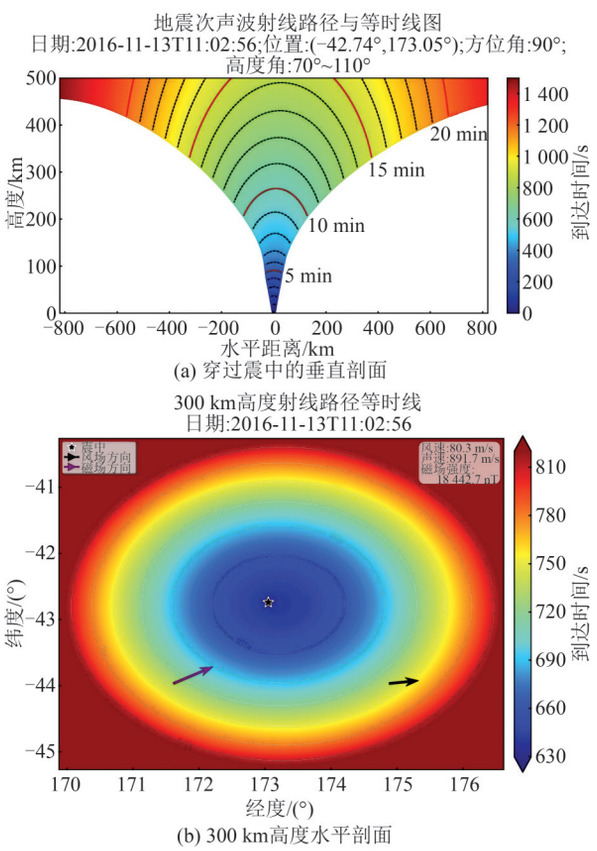


图 7　附加风场的声波射线追踪模型剖面图

Fig. 7　Cross-Sections of the Acoustic Ray-Tracing Model with Wind Fields

2.3　反演成像:从电离层扰动追溯震源

除了正演模拟,研究者们也致力于发展反演技术,即从观测到的 CIDs 特征反向推断震源信息。其中,反投影技术借鉴了地震学中的思想[116-117],将多个 GNSS 测站观测到的 TEC 扰动信号沿着通过射线追踪等方法计算出的 AGWs 传播路径,反向投影回地表。LEE 等[118]首次将该方法应用于 CIDs 研究,成功定位了 2016 年新西兰凯库拉地震的等效电离层扰动源区,并发现其与最大地表抬升区吻合。这为利用 CIDs 数据

直接成像震源破裂范围提供了一种新的途径。另一种更复杂的方法是基于模型拟合的反演,它通过系统性地调整震源参数(如断层几何、滑动分布)进行大量正演模拟,并寻找与观测数据拟合最好的模型参数[21,64,119]。然而,所有反演方法都面临着计算成本高昂以及解的唯一性和稳定性等挑战。

2.4 建模的关键不确定性与挑战

尽管CIDs建模取得了长足进步,但其准确性仍受制于多方面的关键不确定性,这一不确定性链条始于震源的精确描述,即如何将一个复杂的地震破裂过程准确地转化为初始的大气扰动[120]。随后,AGWs的传播路径和速度对背景大气环境(特别是实时高空风场)高度敏感,而相关数据的严重匮乏是限制模型预测精度的主要瓶颈之一[121]。最后,模型中对耦合物理过程(如离子-中性碰撞、化学反应等)的简化也可能影响对电离层响应的模拟精度[98]。攻克这些不确定性,是未来建模研究需要着力突破的方向。

3 前沿分析技术:数据驱动方法的兴起

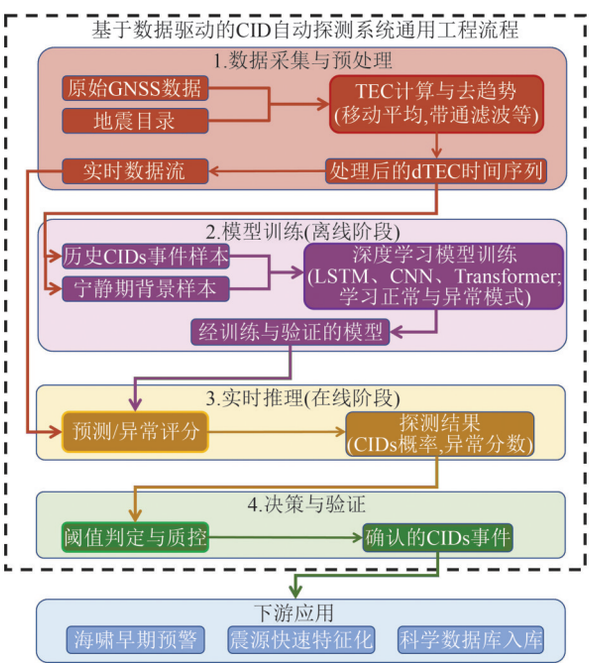
随着GNSS观测网络的全球化和密集化,CIDs研究已进入一个数据丰富的时代。然而,如何从海量的、夹杂着复杂背景噪声的TEC数据中高效、准确地提取微弱的CIDs信号,始终是该领域的核心挑战。传统的信号处理方法,如基于统计阈值[122-123]或模板匹配的技术[124],在处理CIDs多样化的波形和应对复杂的电离层"天气"时,存在自动化程度低、泛化能力弱和误报率较高等先天局限[125-126]。这些挑战催生了对更智能、更自适应的数据分析技术的需求,从而开启了以机器学习,特别是深度学习为代表的数据驱动方法的探索。

3.1 数据驱动方法:从传统机器学习到混合深度学习架构

数据驱动方法的发展呈现出清晰的演进路径:从早期的传统机器学习应用,到深度学习基础模型的引入,再到如今功能日益强大的混合架构,正为CIDs的高效、智能分析提供着不断迭代的工具箱。

早期的探索始于传统机器学习模型。例如,BRISSAUD和ASTAFYEVA[91]构建了一个基于随机森林的框架,该框架不仅能有效地区分CIDs和噪声波形,还能自动拾取CIDs的到达时间。他们的研究在一个包含12次大地震的广泛数据集上进行了训训练和测试,结果显示出优异的分类和拾取性能,为近实时(near real time,NRT)应用铺平了道路。类似地,ASALY等[127]则探索了利用支持向量机技术来识别潜在的地震前兆(尽管是震前,但方法论同样适用于同震)。这些早期工作证明了机器学习在处理TEC时间序列分类问题上的可行性和潜力。

然而,真正带来范式转变的是深度学习(deep learning,DL),它能够处理更原始的数据并自主学习更深层次的时空特征[128]。图8展示了一个典型的、基于深度学习的CIDs自动探测系统通用工作流程,它将复杂的分析过程分解为一系列自动化模块,为近实时应用奠定了基础。



注:CNN(convolutional neural networks)表示卷积神经网络。

图8 基于数据驱动的CIDs自动探测工作流程

Fig. 8 Workflow for Data-Driven Automatic Detection of CIDs

在这一通用框架下,多种深度学习模型被成功应用,它们构成了构建更复杂架构的基础模块。其中,LSTM作为处理时间序列的标杆,擅长学习TEC数据中的长期依赖关系,已被成功用于CIDs的近实时探测[90]。而CNN则在提取TEC扰动图中的空间特征(如波阵面形态)方面表现卓越[129-131]。Transformer模型的核心是自注意力机制,能够有效捕捉序列数据中的长距离依赖关系。这种能力使其非常适合分析复杂的电离层变化。尽管其在CIDs探测中的应用尚处早期,但已有研究将其用于全球VTEC预测,并取

得了优异的性能,显示出其在异常检测领域的巨大潜力[132-133]。

由于电离层TEC数据本质上是时空数据,单一模型各有侧重。因此,结合不同模型优势的混合架构应运而生,并已成为当前研究的主流趋势。最常见的组合之一是CNN-LSTM架构,它通过“先空间(CNN)、后时间(LSTM)”的策略,同时捕捉CIDs的形态和演化过程[134]。在此基础上,引入注意力机制的更复杂模型,则能动态地调整模型对不同时空位置特征的关注度,进一步提升预测精度[135]。另一大趋势是将传统的信号处理方法(如经验模态分解)作为“特征提取器”与深度学习模型结合,在处理非平稳、非线性信号时表现出色[136]。

表3系统性地对比了传统分析方法与(混合)深度学习分析方法的核心差异。可以看出,深度学习虽然在精度和自动化方面优势显著,但其对数据的依赖和“黑箱”特性也带来了新的挑战。

表3　传统与(混合)深度学习CIDs分析方法的对比

Table 3　Comparison of Traditional and Hybrid Deep Learning-Based Analytical Methods for CIDs

特性/指标	传统分析方法(如统计阈值法、匹配滤波)	(混合)深度学习分析方法(如CNN-LSTM)
核心原理	基于预设的物理或统计规则(如固定阈值、波形模板)	从大规模数据中自动学习复杂的、非线性的时空模式
自动化水平	较低,常需人工选择参数和进行结果验证	极高,可实现从数据预处理到事件确认的端到端自动化
适应性/泛化能力	较弱,难以适应多样的CIDs波形和变化的背景环境	较强,能通过学习海量样本,更好地适应不同事件和噪声条件
噪声鲁棒性	较低,易受背景电离层“天气”(如TIDs)干扰,产生虚警	较高,能通过学习深层特征,更有效区分信号与复杂背景噪声
数据需求	较小,依赖于清晰的信号和明确的规则	巨大,需要大量高质量、经专家标记的训练数据集
可解释性	高,其决策过程基于明确的物理或统计规则,易于理解	低(“黑箱”问题),理解其决策过程是当前的主要挑战
主要优势	简单、快速、可解释性强	精度高、自动化、泛化能力强
主要局限性	精度和鲁棒性有限,难以处理复杂场景	数据依赖性强、可解释性差、计算成本高

3.2　弥合差距:物理信息机器学习(physics-informed machine learning,PIML)的未来

尽管数据驱动方法取得了令人鼓舞的进展,但其“黑箱”特性和对大量标记数据的依赖是其应用于科学研究和高可靠性业务系统的主要障碍。PIML为解决这一困境提供了革命性的方向[137]。

PIML的核心思想是在“纯理论驱动”的传统科学计算与“纯数据驱动”的传统机器学习之间找到一个最佳的结合点,如图9所示。这一概念由RAISSI等[138]的开创性工作推广,其核心是将物理规律(通常表现为偏微分方程)的残差作为一项新的惩罚项,直接嵌入到神经网络的损失函数中。正如CUOMO等[139]和HABIB等[140]的研究所述,这种方法强制神经网络的输出在满足数据拟合的同时,必须在物理上遵循已知的控制方程,从而显著提升模型在数据稀疏区域的泛化能力和物理可解释性。

在电离层研究领域,PIML的应用已展现出巨大潜力,尤其是在解决复杂的反演问题上。一个标志性的例子是MA等[142]开发的基于完全物理模型SAMI3的物理信息神经网络(physics informed neural network based on fully physical models SAMI3,PINN-SAMI3)模型。该研究将第一性原理的电离层物理模型(SAMI3)的完整

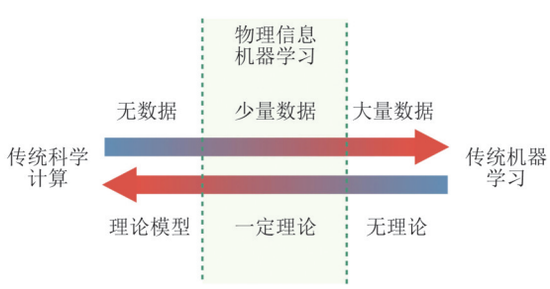


图9　PIML在科学方法谱系中的定位[141]

Fig. 9　Positioning of PIML on the Spectrum of Scientific Methods[141]

控制方程组(包括连续性、动量和温度方程)作为物理约束,成功地仅利用稀疏的离子密度观测数据反演出了完整、高分辨率的四维(3D+时间)电离层等离子体场(包括电子/离子密度、速度和温度)。该研究清晰地表明,与纯数据驱动的人工神经网络相比,PINN-SAMI3模型即便在观测数据极其稀疏的情况下,依然能够提供物理上更一致、更可靠的反演结果,尤其是在没有直接观测的物理量(如速度和温度)上表现卓越。

图9所描绘的PIML正是在“有一些数据、也有一些理论”的广阔中间地带发挥作用,这与地球科学的许多研究场景(包括CIDs研究)高度契合。对于CIDs探测而言,PIML的优势首先在于增强泛化能力与数据效率,通过物理约束(如AGWs的传播方程)引导模型学习到更具普适性

的规律,减少对海量地震事件样本的依赖[143];其次在于提升可解释性与可信度,确保模型输出的扰动场符合物理一致性,避免产生违背物理规律的虚假信号[144];以及在解决反问题中展现巨大潜力,例如利用稀疏的GNSS-TEC观测反演完整的CIDs三维波场或震源参数等不适定问题中展现出巨大潜力[145]。尽管PIML在CIDs领域的直接应用尚处起步阶段,但它无疑代表了该领域数据分析方法未来发展的核心方向——实现数据与物理知识的深度融合。

3.3 数据驱动分析的挑战与机遇

将数据驱动方法成功应用于CIDs研究仍面临诸多挑战,而这些挑战本身也构成了未来的研究机遇。首要的挑战是数据稀缺与不平衡问题,高质量、有清晰标记的CIDs事件样本仍然稀缺,给监督学习模型的训练带来了困难。其次是模型的可解释性问题,理解DL模型为何做出特定判断对于建立科学信任至关重要,这有待可解释性人工智能(explainable artificial intelligence, XAI)技术的发展[146-147]。最后,模型的泛化与适应性仍需严格检验,即在一个区域训练的模型能否有效应用于其他具有不同背景环境的地区[148]。克服这些挑战,是充分释放这些前沿技术潜力的关键所在。

4 应用潜力:从地球科学到灾害预警

CIDs的研究不仅深化了人们对地球多圈层耦合过程的科学认知,更重要的是,它在地震学研究和自然灾害(特别是海啸)的早期预警方面展现出日益增长的应用潜力。本节将系统评述CIDs在这两大领域的应用进展,并深入探讨从科学演示走向业务化应用的现实挑战与未来图景。

4.1 地震学应用:快速反演震源参数

CIDs的特征(如振幅、波形、周期、空间分布等)携带着其激发源——即地震破裂过程的丰富信息[149]。因此,通过对CIDs进行逆向分析,有望反演出地震的震源参数,为快速灾害评估提供独立于传统地震波数据的全新手段。

首先,CIDs的振幅可用于快速估算地震震级。大量研究已证实,CIDs的振幅与地震的矩震级(Mw)之间存在显著的正相关关系[150-151]。这种关系通常可以通过一个经验标度律来定量描述,其常见形式为:

$$\lg(A_{\mathrm{TEC}}) = a \cdot Mw + b \tag{4}$$

式中,A_{TEC}是观测到的最大TEC扰动相对振幅(%);Mw是矩震级;a和b则是通过对大量历史地震事件进行统计回归分析得到的经验常数[119]。尽管这些常数可能因震源机制、地理区域和观测几何的不同而存在差异,但式(4)为从电离层观测快速估算地震能量释放级别提供了直接的物理依据。

图10直观地展示了这一经验关系,并进一步揭示了其与震源机制的内在联系。图10中清晰地显示,随着震级的增大,CIDs振幅整体呈对数线性增长趋势。这一稳健的标度律构成了利用GNSS-TEC观测快速估算地震能量释放级别的物理基础。

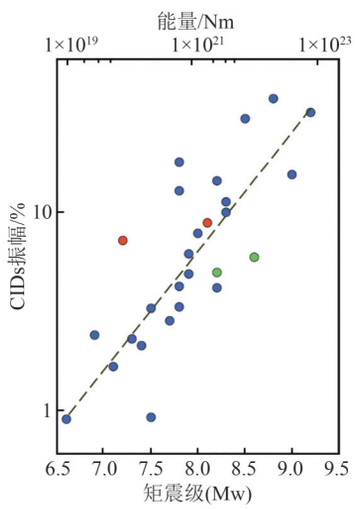


图10 CIDs振幅与地震矩震级(Mw)及震源机制的经验关系[152]

Fig. 10 Empirical Relationship Between CIDs Amplitude, Earthquake Magnitude (Mw), and Focal Mechanism[152]

值得注意的是,式(4)描述的是一个统计平均趋势,而非一个确定性的物理定律。如图10所示,数据点围绕最佳拟合线存在显著的散布,这反映了CIDs振幅不仅受震级控制,还受到一系列复杂物理因素的强烈调制,其中包括震源机制、震源深度、观测几何以及大气和地磁场的传播路径效应[41,153]。例如,图10中走滑型地震(绿色数据点)产生的CIDs振幅在同等震级下普遍小于逆冲型(蓝色数据点)和正断层型(红色数据点)地震。这一现象符合物理预期,因为走滑型地震以水平运动为主,其产生的地壳垂直位移相对较小,从而激发的声波能量也较弱[46,87,154]。因此,虽然该标度律为震后快速估算地震量级提供了宝贵的一阶近似,但任何精确的反演都必须综合考虑上述多种因素的影响。

其次,CIDs的精细特征可用于反演更详细的断层机制与破裂特征。例如,近场CIDs中N型波的初始极性可用于判断地表的隆起或沉降,从

而约束断层的运动方式(逆冲或正断)[61,63]。CIDs振幅的方位角分布模式则可能反映断层破裂的指向性[12]或滑动分布的不均匀性[23]。通过将观测到的CIDs数据与不同震源模型的正演模拟结果进行拟合,理论上可以对地震的详细破裂过程进行反演[21,64]。与传统地震波方法相比,利用CIDs进行震源反演的优势在于GNSS-TEC提供了近场的、密集的、二维覆盖的观测,这对于约束有限断层模型的空间展布特别有利。

4.2　灾害预警:基于CIDs的海啸早期预警

利用CIDs进行海啸早期预警是电离层地震学领域最具实际应用前景、也是最令人兴奋的方向[155-156]。其核心物理基础在于地震能量向不同圈层传播的速度存在巨大差异,如图11所示。

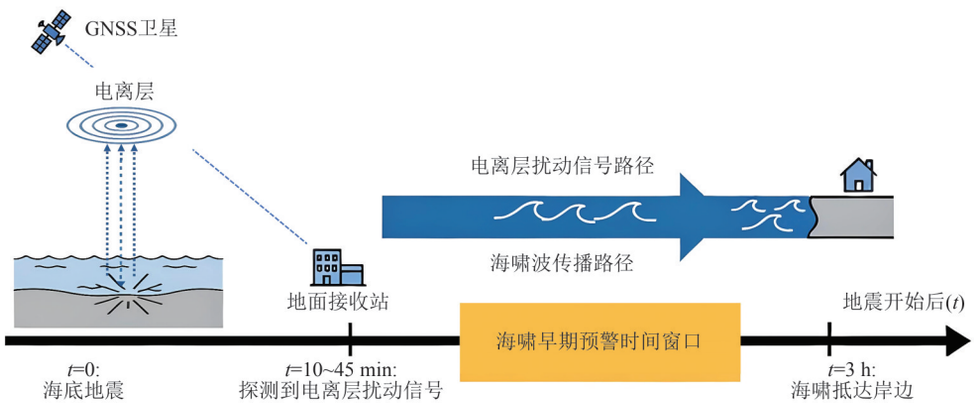


图11　基于CIDs的GNSS海啸早期预警原理示意图

Fig. 11　Schematic of the GNSS-Based Tsunami Early Warning Principle Using CIDs

当一次海底强震发生后(图11,t=0),其能量主要通过两条路径传播:一条是慢速的海洋路径,地震能量转化为海啸波,在广阔的洋面上以相对较慢的速度(约几百公里/h,取决于水深)传播,通常需要数小时才能到达遥远的海岸线;另一条则是快速的大气-电离层路径,地震或海啸波本身会扰动上覆的整个大气柱,从而在大气中激发AGWs[157]。这些AGWs能够以远高于海啸波的速度(声速量级)迅速向上传播至电离层高度,并在约15~30 min内引起可被GNSS等手段探测到的特征性电离层扰动(即海啸诱发的TIDs)[158]。

正是由于CIDs“空中信号”的到达时间远早于海啸波的实际登陆时间,二者之间形成了一个长达数十分钟至数小时的宝贵“预警窗口”。这一原理最早由NAJITA等[159]提出,并在2004年苏门答腊-安达曼和2011年日本东北等特大地震中得到了反复和清晰的观测证实[160-161],从而奠定了利用GNSS进行海啸早期预警的坚实物理基础。

4.3　从理论到实践的鸿沟:业务化应用的挑战

尽管CIDs的应用潜力巨大,但从成功的科学演示到建立一个可靠、稳健的业务化预警系统之间仍然存在巨大的鸿沟。要跨越这一鸿沟,必须正视并解决在延迟、可靠性和覆盖性方面的关键挑战。预警的价值在于速度。一个完整的业务化流程包括GNSS数据采集、实时传输、中心化处理(如NRT-TEC产品生成)、CIDs信号探测与确认以及预警信息发布。整个链条的总耗时必须严格控制在数分钟以内。目前,虽然单个环节(如数据处理)可以很快,但端到端的延迟仍是瓶颈[162]。同时,预警系统必须具有极低的误报率和漏报率,而如何稳健地将海啸信号从复杂的背景电离层“天气”中剥离出来,是降低误报率的核心难题[163]。此外,GNSS台站在广阔海洋区域(尤其是南半球)的稀疏性也直接限制了对远洋海啸的探测能力。

4.4　未来图景:构建多技术融合的预警体系

CIDs研究的未来应用方向并非要取代现有的预警技术,而是要与之深度融合,构建一个更快速、更具韧性的多层次预警体系。一个理想的未来海啸预警系统可能如下运作,它整合了不同技术的优势以覆盖整个灾害时间链[164]:

第一道防线(0~15 min)是GNSS空间遥感。地震发生后,GNSS-TEC系统(如GNSS上层大气实时灾害信息与警报网络(GNSS-based upper atmospheric realtime disaster information and alert network ,GUARDIAN))[165]和实时GPS大地测量[166]可在15 min内提供“海啸是否已生成”的初步、快速判断,这是速度最快的环节。

第二道防线(15~60 min)是深海实地测量。GNSS的初步预警可以指导深海DART(deep-

ocean assessment and reporting of tsunamis)系统等更精确但响应较慢的工具进行针对性确认。DART通过直接测量海啸波经过时的水压变化,为海啸模型的预报提供关键的实测数据,从而提高整个系统的效率和可靠性[167]。

最终确认(数小时)则由沿岸直接观测完成。沿海潮位计提供海啸到达海岸时的最终实测数据,用于验证预警效果和进行灾后评估[168]。在这种融合体系中,基于CIDs的GNSS预警扮演着不可或缺的"侦察兵"角色,其最大价值在于"快",为后续更精确的系统争取宝贵的决策时间,从而将科学研究的突破转化为实实在在的社会效益[169]。

CIDs不仅是探索地球内部过程的科学窗口,更蕴含着巨大的实际应用价值。从快速估算震源参数到提供海啸早期预警,其潜力已得到广泛证实。然而,要将这些潜力转化为可靠的业务化应用,必须正视并克服在延迟、可靠性和覆盖性方面存在的现实鸿沟。未来的发展方向在于构建一个将GNSS-TEC与其他观测手段(如大地测量、深海浮标)深度融合的多技术预警体系,这不仅是技术发展的必然趋势,也是提升人类抵御自然灾害能力的战略选择。

5 挑战与未来发展方向

经过数十年的发展,CIDs研究已从最初的现象发现发展成为一个具备坚实理论基础和丰富观测手段的成熟领域。如前所述,CIDs在揭示地球多圈层耦合动力学和支撑灾害预警方面展现了巨大潜力。然而,要完全释放这一潜力,研究者们必须共同面对并克服一系列深层次的科学与技术挑战。

5.1 跨越"死亡之谷":从回溯性科学到业务化系统

当前CIDs研究面临的最大挑战,是如何跨越从成功的"回溯性科学研究"到可靠的"业务化预警系统"之间的"死亡之谷"。尽管NRT探测系统(如GUARDIAN)已取得原型性突破[90],但其业务化之路仍荆棘丛生。首先,必须建立一个在端到端延迟与系统稳健性上达到业务标准的应用体系,确保从数据采集到预警发布的整个链条能在数分钟内完成并7×24 h不间断运行。其次,任何预警系统在被官方机构采纳前,都必须经过长期、严格的验证与确认,以客观量化其在不同地理和空间天气条件下的误报与漏报率。更重要的是,CIDs预警并非要取代现有的DART浮标等体系,而是要实现与现有体系的深度融合。如何清晰定义其在预警链条中的角色、建立协同决策流程,是亟待解决的实际问题。为此,未来的研究应更多地开展国际合作的"盲测"演练,发展标准化的预警产品与发布协议,并加强与全球灾害管理机构的对话。

5.2 "于无声处听惊雷":在强背景噪声中解耦CIDs信号

CIDs探测的可靠性根本上受制于电离层这个极其"嘈杂"的环境。太阳活动、地磁暴以及来自低层大气的非地震源重力波(如对流、气旋引发的TIDs)都会造成与CIDs形态相似的扰动[170-171]。这种"信号-噪声"的根本性纠缠是制约CIDs探测可靠性的核心科学难题。其中,背景TIDs的挑战尤为突出,因其在传播速度、周期等方面可能与海啸诱发的TIDs存在重叠,如何有效区分二者是降低误报率的关键[163]。此外,在极端空间天气事件(如强地磁暴)期间,背景扰动幅度可能远超CIDs信号,导致其被完全淹没。因此,未来的突破方向在于发展能够实时、高精度预报全球电离层"天气"的背景模型,并利用先进的人工智能技术,从多维特征空间中学习和区分不同来源的扰动。同时,大力推动多仪器协同观测(如GNSS与天基/地基气辉成像仪联合),利用不同物理量的独特响应来共同指认CIDs,将是提升信噪比的有效途径。

5.3 量化耦合链:追求高保真度的物理模型

尽管人们对CIDs的物理机制有了定性理解,但要实现从"复现现象"到"精确预测"的跨越,必须在模型的物理保真度上取得突破。当前建模的瓶颈集中在对整个耦合链条的定量描述上,这包括对地震源的不确定性(如何将复杂破裂过程精确转化为初始大气扰动)[108]、对传播路径的不确定性(特别是全球实时高空风场的严重匮乏),以及对耦合物理过程的精细化(如非线性相互作用和化学过程的简化)等多个方面。未来的研究需要推动地震学、大气科学与空间物理学的深度交叉融合,发展能够双向耦合多个圈层过程的一体化模型。尤为重要的是,将物理模型与数据驱动方法深度结合,发展PIML模型,利用稀疏的观测数据来约束和校正物理模型,将是实现数据同化与高精度预测的革命性方向,正如近期在电离层物理建模中成功应用的研究所展示的那样[137,142]。

5.4 全球协同:构建开放的数据与验证基础设施

CIDs研究的进一步发展迫切需要从当前"各

自为战”的个例研究模式,转向一个全球协同、数据共享、标准统一的新范式。尽管国际GNSS服务等组织为全球提供了高质量的GNSS数据和基础产品[172],但在CIDs这一特定应用领域,数据和模型的共享与验证仍面临三大壁垒。

首先是数据壁垒与标准化问题。获取和处理适用于CIDs研究的、高质量、标准化的NRT-TEC产品仍存在技术和政策上的障碍。不同研究机构使用的数据处理流程和产品格式各不相同,阻碍了成果的直接比较和复现。

然后,领域内严重缺乏一个公认的“黄金标准”基准数据集。机器学习的革命性进步很大程度上得益于像ImageNet这样的大型、公开、经专家标记的基准数据集的存在[173]。然而在CIDs领域,目前尚缺乏一个包含各种类型CIDs事件和复杂背景噪声(非事件)的同类数据集。这不仅严重制约了更先进算法(特别是需要大量数据的深度学习模型)的开发,也使得不同研究提出的算法性能难以在同一个“公平的赛场”上进行公允比较。

最后,缺乏统一的验证协议。不同的研究往往采用自定义的评价指标和验证流程,使得成果之间难以横向比较,这阻碍了领域内形成关于“最佳实践”的共识。

未来的发展方向应致力于构建一个开放的科学基础设施,以克服上述挑战。核心任务是效仿其他成功科学项目的经验,建立一个遵循FAIR(可发现(Findable)、可访问(Accessible)、可互操作(Interoperable)、可重用(Reusable))[174]原则的全球CIDs事件数据库和基准数据集。在此基础上,可以进一步发起国际合作的“CIDs模型与算法比较计划”(CIDs-MIP),类似气候科学领域的国际耦合模式比较计划[175]。通过“盲测”等客观方式,定期对全球不同的探测算法和预测模型进行统一的性能评估。这样的协同努力将极大地加速技术迭代,促进最佳实践的推广,并最终为构建可靠的业务化预警系统奠定坚实的基础。

5.5　总结与展望

CIDs作为地震能量在高层大气中的清晰回响,其研究揭示了它作为基础科学的独特窗口和灾害预警的前沿工具所具有的双重价值。研究表明,以GNSS为核心的多技术观测体系已经能够对CIDs的时空特征进行前所未有的精细刻画;基于AGWs耦合理论的数值模型,也已能够高保真度地复现其复杂的传播动力学。

然而,CIDs研究正站在一个从“可能”走向“可靠”的关键十字路口。未来的突破将高度依赖于多学科的深度交叉融合:它需要地震学的精确震源模型为“因”,需要大气与空间物理学的精细环境场为“途”,需要先进数据科学的智能算法为“器”,三者协同,方能精准预测电离层响应之“果”。

展望未来,一个整合了全球实时观测、高保真度物理模型和人工智能分析能力的“数字孪生”地球系统,将是CIDs研究的终极愿景。在这样的系统中,CIDs将不再仅仅是一个被动的观测对象,而是能够被主动预测、实时同化并用于快速灾害响应的关键信息流。对CIDs的持续探索不仅将持续深化人们对地球内部过程的认知,更将为构建一个更智能、更具韧性的地球灾害监测与预警体系,做出不可或缺的贡献。

参　考　文　献

[1] RISHBETH H, GARRIOTT O K. Introduction to Ionospheric Physics [M]. New York: Academic Press, 1969.

[2] PULINETS S, BOYARCHUK K. Ionospheric Precursors of Earthquakes [M]. Berlin: Springer, 2004.

[3] PULINETS S, OUZOUNOV D. Lithosphere - Atmosphere - Ionosphere Coupling (LAIC) Model — An Unified Concept for Earthquake Precursors Validation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(4/5): 371-382.

[4] HINES C O. Internal Atmospheric Gravity Waves at Ionospheric Heights [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1960, 38(11): 1441-1481.

[5] HEKIK. Ionospheric Electron Enhancement Preceding the 2011 Tohoku-Oki Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L17312.

[6] KAMOGAWA M, KAKINAMI Y. Is an Ionospheric Electron Enhancement Preceding the 2011 Tohoku-Oki Earthquake a Precursor? [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(4): 1751-1754.

[7] HEKI K, ENOMOTO Y. Reply to Comment by K. Heki and Y. Enomoto on “Preseismic Ionospheric Electron Enhancements Revisited” [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(7): 6016-6018.

[8] UTADA H, SHIMIZU H. Comment on “Preseismic Ionospheric Electron Enhancements Revisited”

by K. Heki and Y. Enomoto[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(7): 6011-6015.

[9] ASTAFYEVA E. Ionospheric Detection of Natural Hazards[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(4): 1265-1288.

[10] DAVIES K, BAKER D M. Ionospheric Effects Observed Around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(9): 2251-2253.

[11] CALAIS E, MINSTER J B. GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following the January 17, 1994, Northridge Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1045-1048.

[12] HEKI K, PING J S. Directivity and Apparent Velocity of the Coseismic Ionospheric Disturbances Observed with a Dense GPS Array[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236(3/4): 845-855.

[13] MALETCKII B, ASTAFYEVA E. Determining Spatiotemporal Characteristics of Coseismic Travelling Ionospheric Disturbances (CTID) in Near Real-Time[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20783.

[14] ROLLAND L M, LOGNONNÉ P, MUNEKANE H. Detection and Modeling of Rayleigh Wave Induced Patterns in the Ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116: A05320.

[15] ROW R V. Evidence of Long-Period Acoustic-Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28, 1964[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71(1): 343-345.

[16] YUEN P C, WEAVER P F, SUZUKI R K, et al. Continuous, Traveling Coupling Between Seismic Waves and the Ionosphere Evident in May 1968 Japan Earthquake Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(9): 2256-2264.

[17] NAKATA H, TAKABOSHI K, TAKANO T, et al. Vertical Propagation of Coseismic Ionospheric Disturbances Associated with the Foreshock of the Tohoku Earthquake Observed Using HF Doppler Sounding[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(8): e2020JA028600.

[18] MARUYAMA T, SHINAGAWA H. Infrasonic Sounds Excited by Seismic Waves of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake as Visualized in Ionograms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(5): 4094-4108.

[19] VESNIN A, YASYUKEVICH Y, PEREVALOVA N, et al. Ionospheric Response to the 6 February 2023 Turkey-Syria Earthquake[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2336.

[20] AFRAIMOVICH E L, PEREVALOVA N P, PLOTNIKOV A V, et al. The Shock-Acoustic Waves Generated by Earthquakes[J]. *Annales Geophysicae*, 2001, 19(4): 395-409.

[21] ASTAFYEVA E, SHULTS K. Ionospheric GNSS Imagery of Seismic Source: Possibilities, Difficulties, and Challenges[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(1): 534-543.

[22] HEKI K, OTSUKA Y, CHOOSAKUL N, et al. Detection of Ruptures of Andaman Fault Segments in the 2004 Great Sumatra Earthquake with Coseismic Ionospheric Disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B9): 2005JB004202.

[23] ASTAFYEVA E, LOGNONNÉ P, ROLLAND L. First Ionospheric Images of the Seismic Fault Slip on the Example of the Tohoku-Oki Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L22104.

[24] LIU J Y, CHEN C H, LIN C H, et al. Ionospheric Disturbances Triggered by the 11 March 2011 M 9.0 Tohoku Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116: A06319.

[25] BAGIYA M S, SUNIL P S, SUNIL A S, et al. Coseismic Contortion and Coupled Nocturnal Ionospheric Perturbations During 2016 Kaikoura, Mw 7.8 New Zealand Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(2): 1477-1487.

[26] 罗亦泳, 吴大卫, 张立亭. 阿拉斯加2021年8.2级地震同震电离层扰动特征及对比分析[J]. 地球物理学报, 2024, 67(2): 461-476.
LUO Yiyong, WU Dawei, ZHANG Liting. Analysis of Coseismic Ionospheric Disturbances After Alaska Mw 8.2 Earthquake on July 29, 2021[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(2): 461-476.

[27] 徐涵滢, 张亭, 袁运斌, 等. 能登半岛与花莲地震同震电离层扰动传播特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2026, 46(3): 375-384.
XU Hanying, ZHANG Ting, YUAN Yunbin, et al. Characteristics of Co-seismic Ionospheric Disturbance Propagation Between the Noto Peninsula and Hualien Earthquakes[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(3): 375-384.

[28] 蔡华, 李子申, 王敏, 等. 汶川Mw 7.9与日本Mw 9.0地震同震电离层扰动研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(6): 716-719.

CAI Hua, LI Zishen, WANG Min, et al. Coseismic Ionospheric Disturbances of Mw 7.9 Wenchuan Earthquake and Mw 9.0 Japan Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 716-719.

[29] AFRAIMOVICH E L, ASTAFIEVA E I, KIRUSHKIN V V. Localization of the Source of Ionospheric Disturbance Generated During an Earthquake[J]. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2006, 6(2): GI2002.

[30] Astafyeva E, Heki K. Evolution of Ionosphere Disturbances Associated with the 1994 Shikotan Earthquake[EB/OL].[2026-03-22]. https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/HPHGEp14.pdf.

[31] CHEN C H, SAITO A, LIN C H, et al. Long-Distance Propagation of Ionospheric Disturbance Generated by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(7): 881-884.

[32] ASTAFYEVA E, ROLLAND L, LOGNONNÉ P, et al. Parameters of Seismic Source as Deduced from 1 Hz Ionospheric GPS Data: Case Study of the 2011 Tohoku-Oki Event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(9): 5942-5950.

[33] JIN S G, JIN R, LI J H. Pattern and Evolution of Seismo-Ionospheric Disturbances Following the 2011 Tohoku Earthquakes from GPS Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(9): 7914-7927.

[34] GÓMEZ D, SMALLEY R, LANGSTON C A, et al. Virtual Array Beamforming of GPS TEC Observations of Coseismic Ionospheric Disturbances near the Geomagnetic South Pole Triggered by Teleseismic Megathrusts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(10): 9087-9101.

[35] SUN Y Y, LIU J Y, LIN C Y, et al. Ionospheric F2 Region Perturbed by the 25 April 2015 Nepal Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(6): 5778-5784.

[36] SANTOSO A, MUSLIM B. Effect of Earthquake's Surface Wave on Ionosphere Layer[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1108(1): 012102.

[37] MALETCKII B, ASTAFYEVA E, SANCHEZ S A, et al. The 6 February 2023 Türkiye Earthquake Sequence as Detected in the Ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(9): e2023JA031663.

[38] LESTARI D S, CAHYADI M N, MUSLIM B, et al. Analysis of Ionospheric Disturbances Due to Earthquakes Using 3D Tomography Models to Test the Height Maximum of CID Correlation in Various Regions[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2025, 16(4): 387-402.

[39] ADEBAYO O M, KHERANI E A, PIMENTA A A. First Report on Coseismic Ionospheric Disturbances Following the Deep-Focus Earthquake (Mw 6.6) in Tarauacá, Acre, Brazil: Ground Uplift and TEC Analysis[J]. *Annales Geophysicae Discussions*, 2024, 2024: 1-28.

[40] SHINAGAWA H, TSUGAWA T, MATSUMURA M, et al. Two-Dimensional Simulation of Ionospheric Variations in the Vicinity of the Epicenter of the Tohoku-Oki Earthquake on 11 March 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(19): 5009-5013.

[41] LI M, YANG Z G, SONG J, et al. Statistical Seismo-Ionospheric Influence with the Focal Mechanism Under Consideration[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(3): 455.

[42] YANG Y M, MENG X, KOMJATHY A, et al. Tohoku-Oki Earthquake Caused Major Ionospheric Disturbances at 450 km Altitude over Alaska[J]. *Radio Science*, 2014, 49(12): 1206-1213.

[43] BAGIYA M S, SUNIL A S, SUNIL P S, et al. Efficiency of Coseismic Ionospheric Perturbations in Identifying Crustal Deformation Pattern: Case Study Based on Mw 7.3 May Nepal 2015 Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122(6): 6849-6857.

[44] AFRAIMOVICH E L, FENG D, KIRYUSHKIN V V, et al. Near-Field TEC Response to the Main Shock of the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Earth, Planets and Space*, 2010, 62(11): 899-904.

[45] LIU J Y, TSAI H F, LIN C H, et al. Coseismic Ionospheric Disturbances Triggered by the Chi-Chi Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A8): 2009JA014943.

[46] BAGIYA M S, HEKI K, GAHALAUT V K. Anisotropy of the Near-Field Coseismic Ionospheric Perturbation Amplitudes Reflecting the Source Process: The 2023 February Turkey Earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): e2023GL103931.

[47] 罗亦泳, 吴大卫, 陈强, 等. 2020年7月22日阿拉斯加7.8级地震同震电离层扰动分析[J]. 地球物理学报, 2024, 67(1): 34-49.
LUO Yiyong, WU Dawei, CHEN Qiang, et al.

Analysis of Coseismic Ionospheric Disturbance of Alaska M 7.8 Earthquake on July 22, 2020[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(1): 34-49.

[48] CHEN P, YAO Y B, CHEN J J, et al. Study of the 2013 Lushan M 7.0 Earthquake Coseismic Ionospheric Disturbances[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(11): 2194-2199.

[49] LIU H T, ZHANG K K, IMTIAZ N, et al. Relating Far-Field Coseismic Ionospheric Disturbances to Geological Structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(7): e2021JA029209.

[50] WANG H, EGBERT G, SONG B J, et al. Concentric Ionospheric Currents Driven by Teleseismic Rayleigh Waves from the 2011 Tohoku Earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2025, 671: 119676.

[51] RAO H, CHEN C H, MENG G J, et al. Relationship Between TEC Perturbations and Rayleigh Waves Associated with 2023 Turkey Earthquake Doublet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, 130(1): e2024JA033267.

[52] LIN C C H, SHEN M H, CHOU M Y, et al. Concentric Traveling Ionospheric Disturbances Triggered by the Launch of a SpaceX Falcon 9 Rocket[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(15): 7578-7586.

[53] JIN S G, JIN R, LI D. GPS Detection of Ionospheric Rayleigh Wave and Its Source Following the 2012 Haida Gwaii Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122(1): 1360-1372.

[54] LIU Y H, JIN S G. Ionospheric Rayleigh Wave Disturbances Following the 2018 Alaska Earthquake from GPS Observations[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 901.

[55] TSAI H F, LIU J Y, LIN C H, et al. Tracking the Epicenter and the Tsunami Origin with GPS Ionosphere Observation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(7): 859-862.

[56] KAKINAMI Y, KAMOGAWA M, TANIOKA Y, et al. Tsunamigenic Ionospheric Hole[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(13): 2011GL050159.

[57] GALVAN D A, KOMJATHY A, HICKEY M P, et al. Ionospheric Signatures of Tohoku-Oki Tsunami of March 11, 2011: Model Comparisons near the Epicenter[J]. *Radio Science*, 2012, 47(4): 2012RS005023.

[58] ROLLAND L M, LOGNONNÉ P, ASTAFYEVA E, et al. The Resonant Response of the Ionosphere Imaged After the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(7): 853-857.

[59] KAKINAMI Y, KAMOGAWA M, WATANABE S, et al. Ionospheric Ripples Excited by Superimposed Wave Fronts Associated with Rayleigh Waves in the Thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(2): 905-911.

[60] SHALIMOV S L, NESTEROV I A, VORONTSOV A M. On the GPS-Based Ionospheric Perturbation After the Tohoku Earthquake of March 11, 2011[J]. *Izvestiya*, Physics of the Solid Earth, 2017, 53(2): 262-273.

[61] ASTAFYEVA E, HEKI K. Dependence of Waveform of Near-Field Coseismic Ionospheric Disturbances on Focal Mechanisms[J]. *Earth, Planets and Space*, 2009, 61(7): 939-943.

[62] LI L L, JIN S G, CHAI Y. Co-seismic Ionospheric Disturbances Characteristics in Different Azimuths Following the 2022 Mexico Earthquake from GNSS Observations[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 23.

[63] LI J D, RUDE C M, PANKRATIUS V. Characterizing the Complex Two N-Wave Ionospheric Signature of the 2016 Kaikoura Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(12): 10.

[64] HEKI K, BAGIYA M S, TAKASAKA Y. Slow Fault Slip Signatures in Coseismic Ionospheric Disturbances[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(24): e2022GL101064.

[65] ASTAFYEVA E, HEKI K, KIRYUSHKIN V, et al. Two-Mode Long-Distance Propagation of Coseismic Ionosphere Disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A10): 2008JA013853.

[66] REDDY C D, SEEMALA G K. Two-Mode Ionospheric Response and Rayleigh Wave Group Velocity Distribution Reckoned from GPS Measurement Following Mw 7.8 Nepal Earthquake on 25 April 2015[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(8): 7049-7059.

[67] HEKI K. Decoding Multiple Source Signatures in Coseismic Ionospheric Disturbances of the 2024 January Mw 7.5 Noto-Peninsula Earthquake, Central Japan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024, 640: 118796.

[68] ZHANG B, LIU T, FENG X S, et al. Successively Equatorward Propagating Ionospheric Acoustic Waves and Possible Mechanisms Following the Mw 7.5 Earthquake in Noto, Japan, on 1 January 2024

[J]. *Space Weather*, 2025, 23(4): e2024SW003957.

[69] AUSTEN J R, FRANKE S J, LIU C H. Ionospheric Imaging Using Computerized Tomography [J]. *Radio Science*, 1988, 23(3): 299-307.

[70] RAYMUND T D, AUSTEN J R, FRANKE S J, et al. Application of Computerized Tomography to the Investigation of Ionospheric Structures[J]. *Radio Science*, 1990, 25(5): 771-789.

[71] MA X F, MARUYAMA T, MA G, et al. Three-Dimensional Ionospheric Tomography Using Observation Data of GPS Ground Receivers and Ionosonde by Neural Network[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A5): 2004JA010797.

[72] ZHAI C Z, YAO Y B, KONG J. Three-Dimensional Reconstruction of Seismo-Traveling Ionospheric Disturbances After March 11, 2011, Japan Tohoku Earthquake[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(7): 77.

[73] CAHYADI M N, MUSLIM B, PRATOMO D G, et al. Co-seismic Ionospheric Disturbances Following the 2016 West Sumatra and 2018 Palu Earthquakes from GPS and GLONASS Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 401.

[74] FU W Z, OTSUKA Y, SSESSANGA N, et al. Unveiling the Vertical Ionospheric Responses Following the 2024 Noto Peninsula Earthquake with an Ultra-Dense GNSS Network [J]. *Earth, Planets and Space*, 2025, 77(1): 77.

[75] SEEMALA G K, YAMAMOTO M, SAITO A, et al. Three-Dimensional GPS Ionospheric Tomography over Japan Using Constrained Least Squares [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(4): 3044-3052.

[76] CORNELY P J. Flexible Prior Models: Three-Dimensional Ionospheric Tomography[J]. *Radio Science*, 2003, 38(5): 2002RS002703.

[77] NORBERG J, ROININEN L, VIERINEN J, et al. Ionospheric Tomography in Bayesian Framework with Gaussian Markov Random Field Priors[J]. *Radio Science*, 2015, 50(2): 138-152.

[78] NORBERG J, VIRTANEN I I, ROININEN L, et al. Bayesian Statistical Ionospheric Tomography Improved by Incorporating Ionosonde Measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(4): 1859-1869.

[79] NORBERG J, VIERINEN J, ROININEN L, et al. Gaussian Markov Random Field Priors in Ionospheric 3-D Multi-instrument Tomography [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(12): 7009-7021.

[80] ZHAO J Q, TANG Q, ZHOU C, et al. Three-Dimensional Ionospheric Tomography Based on Compressed Sensing [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(2): 90.

[81] SUI Y, FU H Y, WANG D H, et al. Sparse Reconstruction of 3-D Regional Ionospheric Tomography Using Data from a Network of GNSS Reference Stations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4102615.

[82] MAO Z Q, CHEN C H, YISIMAYILI A, et al. Seismo-Traveling Ionospheric Disturbances from the 2024 Hualien Earthquake: Altitude-Dependent Propagation Insights[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(7): 1241.

[83] 孔建. 联合DORIS和GNSS数据的四维电离层层析新算法及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
KONG Jian. A New Algorithm for Four-Dimensional Ionospheric Tomography Combining DORIS and GNSS Data and Its Application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.

[84] 单路路. GNSS电离层层析及其在空间天气事件研究中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
SHAN Lulu. GNSS Ionospheric Tomography and Its Application in the Study of Space Weather Events [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.

[85] LEONARD R S, BARNES R A. Observation of Ionospheric Disturbances Following the Alaska Earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(5): 1250-1253.

[86] GOKHBERG M B, LAPSHIN V M, STEBLOV G M, et al. Ionospheric Response to Kuril Undersea Earthquakes According to GPS Satellite Data[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, 47(9): 1019-1027.

[87] CAHYADI M N, HEKI K. Coseismic Ionospheric Disturbance of the Large Strike-Slip Earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw Dependence of the Disturbance Amplitudes[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 200(1): 116-129.

[88] INCHIN P A, SNIVELY J B, KANEKO Y, et al. Inferring the Evolution of a Large Earthquake from Its Acoustic Impacts on the Ionosphere[J]. *AGU Advances*, 2021, 2(2): e2020AV000260.

[89] CAHYADI M N, ARISA D, MUAFIRY I N, et al. Three-Dimensional Tomography of Co-seismic Ionospheric Disturbances Following the 2018 Palu Earthquake and Tsunami from GNSS Measurements [J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*,

2022, 9: 890603.

[90] LUHRMANN F, PARK J, WONG W K, et al. Detection of Ionospheric Disturbances with a Sparse GNSS Network in Simulated Near-Real Time Mw 7.8 and Mw 7.5 Kahramanmaraş Earthquake Sequence[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(1): 54.

[91] BRISSAUD Q, ASTAFYEVA E. Near-Real-Time Detection of Co-seismic Ionospheric Disturbances Using Machine Learning[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 230(3): 2117-2130.

[92] YEH K C, LIU C H. Acoustic-Gravity Waves in the Upper Atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 1974, 12(2): 193-216.

[93] BLANC E. Observations in the Upper Atmosphere of Infrasonic Waves from Natural or Artificial Sources — A Summary[J]. *Annales Geophysicae*, 1985, 3: 673-687.

[94] HINES C O. Gravity Waves in the Atmosphere[J]. *Nature*, 1972, 239(5367): 73-78.

[95] KALADZE T D, POKHOTELOV O A, SHAH H A, et al. Acoustic-Gravity Waves in the Earth's Ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar—Terrestrial Physics*, 2008, 70(13): 1607-1616.

[96] VADAS S L, FRITTS D C. Thermospheric Responses to Gravity Waves: Influences of Increasing Viscosity and Thermal Diffusivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D15): 2004JD005574.

[97] CHUM J, CABRERA M A, MOŠNA Z, et al. Nonlinear Acoustic Waves in the Viscous Thermosphere and Ionosphere Above Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(12): 12.

[98] ZETTERGREN M D, SNIVELY J B. Ionospheric Response to Infrasonic-Acoustic Waves Generated by Natural Hazard Events[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(9): 8002-8024.

[99] GOMBOSI T I. Physics of the Space Environment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

[100] HOOKE W H. Ionospheric Irregularities Produced by Internal Atmospheric Gravity Waves[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1968, 30(5): 795-823.

[101] KHERANI E A, LOGNONNÉ P, KAMATH N, et al. Response of the Ionosphere to the Seismic Trigerred Acoustic Waves: Electron Density and Electromagnetic Fluctuations[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 176(1): 1-13.

[102] HOLTON J R, HAKIM G J. An Introduction to Dynamic Meteorology[M]. 5th ed. New York: Academic Press, 2013.

[103] NAPPO C J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves[M]. Waltham, MA: Academic Press, 2013.

[104] GILL A E. Atmosphere-Ocean Dynamics[M]. New York: Academic Press, 1982.

[105] SANCHEZ S A, KHERANI E A, ASTAFYEVA E, et al. The First Near-Real-Time Compatible Numerical Method for Co-seismic Ionospheric Disturbances Simulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(8): e2025GL115208.

[106] KHERANI E A, LOGNONNÉ P, HÉBERT H, et al. Modelling of the Total Electronic Content and Magnetic Field Anomalies Generated by the 2011 Tohoku-Oki Tsunami and Associated Acoustic-Gravity Waves[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(3): 1049-1066.

[107] MIKESELL T D, ROLLAND L M, LEE R F, et al. IonoSeis: A Package to Model Coseismic Ionospheric Disturbances[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(8): 443.

[108] INCHIN P A, KANEKO Y, GABRIEL A A, et al. Three-Dimensional Numerical Modeling of Coseismic Atmospheric Dynamics and Ionospheric Responses in Slant Total Electron Content Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(21): e2023GL108068.

[109] SUTHERLAND L C, BASS H E. Atmospheric Absorption in the Atmosphere up to 160 km[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 115(3): 1012-1032.

[110] DESSA J X, VIRIEUX J, LAMBOTTE S. Infrasound Modeling in a Spherical Heterogeneous Atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(12): 2005GL022867.

[111] JONES R M, BEDARD A J. Atmospheric Gravity Wave Ray Tracing: Ordinary and Extraordinary Waves[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, 179: 342-357.

[112] SCHÄFER P, VORLÄNDER M. Atmospheric Ray Tracing: An Efficient, Open-Source Framework for Finding Eigenrays in a Stratified, Moving Medium[J]. *Acta Acustica*, 2021, 5: 26.

[113] DAUTERMANN T, CALAIS E, MATTIOLI G S. Global Positioning System Detection and Energy Estimation of the Ionospheric Wave Caused by the 13 July 2003 Explosion of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid*

Earth, 2009, 114(B2): 2008JB005722.

[114]THOMAS D, BAGIYA M S, SUNIL P S, et al. Revelation of Early Detection of Co-Seismic Ionospheric Perturbations in GPS-TEC from Realistic Modelling Approach: Case Study[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12105.

[115]BAGIYA M S, THOMAS D, ASTAFYEVA E, et al. The Ionospheric View of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Seismic Source: The First 60 Seconds of the Rupture[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 5232.

[116]KRÜGER F, OHRNBERGER M. Tracking the Rupture of the Mw=9.3 Sumatra Earthquake over 1 150 km at Teleseismic Distance[J]. *Nature*, 2005, 435(7044): 937-939.

[117]ISHII M, SHEARER P M, HOUSTON H, et al. Extent, Duration and Speed of the 2004 Sumatra - Andaman Earthquake Imaged by the Hi-Net Array [J]. *Nature*, 2005, 435(7044): 933-936.

[118]LEE R F, ROLLAND L M, MIKESELL T D. Seismo-Ionospheric Observations, Modeling, and Backprojection of the 2016 Kaikōura Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108(3B): 1794-1806.

[119]ROLLAND L M, VERGNOLLE M, NOCQUET J M, et al. Discriminating the Tectonic and Non-Tectonic Contributions in the Ionospheric Signature of the 2011, Mw 7.1, Dip-Slip van Earthquake, Eastern Turkey[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2518-2522.

[120]NOZUKA Y, INCHIN P A, KANEKO Y, et al. Earthquake Source Impacts on the Generation and Propagation of Seismic Infrasound to the Upper Atmosphere [J]. *Geophysical Journal International*, 2024, 238(1): 537-556.

[121]VADAS S L, CROWLEY G. Sources of the Traveling Ionospheric Disturbances Observed by the Ionospheric TIDDBIT Sounder near Wallops Island on 30 October 2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A7): 2009JA015053.

[122]SHAH M, AHMED A, EHSAN M, et al. Total Electron Content Anomalies Associated with Earthquakes Occurred During 1998—2019[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 175: 268-276.

[123]WEI L Q, LI J Y, LIU L L, et al. Lithosphere Ionosphere Coupling Associated with Seismic Swarm in the Balkan Peninsula from ROB-TEC and GPS[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4759.

[124]GARCIA R, CRESPON F, DUCIC V, et al. Three-Dimensional Ionospheric Tomography of Post-Seismic Perturbations Produced by the Denali Earthquake from GPS Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(3): 1049-1064.

[125]ZHANG Y M, LIU X, GUO J Y, et al. Co-seismic Ionospheric Disturbance with Alaska Strike-Slip Mw 7.9 Earthquake on 23 January 2018 Monitored by GPS[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(1): 83.

[126]LE N, MÄNNEL B, SAKIC P, et al. Optimal TEC Forecast Models Based on Machine Learning and Time Series Analysis Techniques: A Preliminary Study on the Ring of Fire[M]//Geodesy for a Sustainable Earth. Cham: Springer International Publishing, 2022: 387-396.

[127]ASALY S, GOTTLIEB L A, INBAR N, et al. Using Support Vector Machine (SVM) with GPS Ionospheric TEC Estimations to Potentially Predict Earthquake Events[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2822.

[128]MUHAMMAD A, KÜLAHCI F. A Semi-supervised Total Electron Content Anomaly Detection Method Using LSTM-Auto-encoder[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2022, 241: 105979.

[129]RAVANELLI M, CONSTANTINOU V, LIU H, et al. Exploring AI Progress in GNSS Remote Sensing: A Deep Learning Based Framework for Real-Time Detection of Earthquake and Tsunami Induced Ionospheric Perturbations[J]. *Radio Science*, 2024, 59(9): e2024RS008016.

[130]RAVANELLI M, CONSTANTINOU V, LIU H, et al. Harnessing AI in GNSS Remote Sensing: A Deep Learning Framework for Real-Time Detection of Ionospheric Perturbations Triggered by Earthquakes and Tsunamis[C]//EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2025.

[131]CONSTANTINOU V, RAVANELLI M, LIU H, et al. Deep Learning Driven Detection of Tsunami Related Internal Gravity Waves: A Path Towards Open-Ocean Natural Hazards Detection [C]// IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), Paris, France, 2023.

[132]WANG L Y, LI Z T, CHEN Y F, et al. MaxEnt SeismoSense Model: Ionospheric Earthquake Anomaly Detection Based on the Maximum Entropy Principle [J]. *Atmosphere*, 2024, 15(4): 419.

[133]SHIH C Y, LIN C Y, LIN S Y, et al. Forecasting of Global Ionosphere Maps with Multi-day Lead Time Using Transformer-Based Neural Networks [J]. *Space Weather*, 2024, 22(2): e2023SW00

3579.

[134]RUWALI A, SRAVAN KUMAR A J, PRAKASH K B, et al. Implementation of Hybrid Deep Learning Model (LSTM-CNN) for Ionospheric TEC Forecasting Using GPS Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(6): 1004-1008.

[135]TANG J, ZHONG Z Y, HU J C, et al. Forecasting Regional Ionospheric TEC Maps over China Using BiConvGRU Deep Learning[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(13): 3405.

[136]NATH S, CHETIA B, KALITA S. Ionospheric TEC Prediction Using Hybrid Method Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and Long Short-Term Memory (LSTM) Deep Learning Model over India[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(5): 2307-2317.

[137]KARNIADAKIS G E, KEVREKIDIS I G, LU L, et al. Physics-Informed Machine Learning[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(6): 422-440.

[138]RAISSI M, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 2019, 378: 686-707.

[139]CUOMO S, DI COLA V S, GIAMPAOLO F, et al. Scientific Machine Learning Through Physics-Informed Neural Networks: Where We Are and What's Next[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2022, 92(3): 88.

[140]HABIB M, HABIB A, ALIBRAHIM B. Applications of Physics-Informed Neural Networks in Geosciences: From Basic Seismology to Comprehensive Environmental Studies [J]. *Open Geosciences*, 2025, 17: 20250853.

[141]BRAGA-NETO U. Fundamentals of Pattern Recognition and Machine Learning[M]. Cham: Springer International Publishing, 2024.

[142]MA J Y, FU H Y, HUBA J D, et al. A Novel Ionospheric Inversion Model: PINN-SAMI3 (Physics Informed Neural Network Based on SAMI3)[J]. *Space Weather*, 2024, 22(4): e2023SW003823.

[143]DOUMÈCHE N. Physics-Informed Machine Learning: A Mathematical Framework with Applications to Time Series Forecasting[J/OL]. arXiv(2025-07-11)[2025-12-11]. https://arxiv.org/abs/2507.08906.

[144]BLANKE M, LELARGE M. Interpretable Meta-Learning of Physical Systems[C]//The 12th International Conference on Learning Representations, Kigali, Republic of Rwanda, 2023.

[145]ZHANG R Z, LI H R, SHEN Y X, et al. Deep Learning Applications in Ionospheric Modeling: Progress, Challenges, and Opportunities[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(1): 124.

[146]MCGOVERN A, LAGERQUIST R, JOHN GAGNE D, et al. Making the Black Box more Transparent: Understanding the Physical Implications of Machine Learning[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(11): 2175-2199.

[147]GUIDOTTI R, MONREALE A, RUGGIERI S, et al. A Survey of Methods for Explaining Black Box Models[J]. *ACM Computing Surveys*, 2019, 51(5): 1-42.

[148]REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep Learning and Process Understanding for Data-Driven Earth System Science[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 195-204.

[149]JIN S G, OCCHIPINTI G, JIN R. GNSS Ionospheric Seismology: Recent Observation Evidences and Characteristics [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 147: 54-64.

[150]ASTAFYEVA E, SHALIMOV S, OLSHANSKAYA E, et al. Ionospheric Response to Earthquakes of Different Magnitudes: Larger Quakes Perturb the Ionosphere Stronger and Longer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1675-1681.

[151]SANCHEZ S A, KHERANI E A, ASTAFYEVA E, et al. Ionospheric Disturbances Observed Following the Ridgecrest Earthquake of 4 July 2019 in California, USA[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 188.

[152]HEKI K. Ionospheric Disturbances Related to Earthquakes[M]//Huang C S, Lu G, Zhang Y L, eds. Geophysical Monograph Series. New York: Wiley, 2021: 511-526.

[153]CAHYADI M N. Comparison of Coseismic Ionospheric Disturbance Waveforms Revisited: Strike-Slip, Normal, and Reverse Fault Earthquake[J]. *Geoid*, 2015, 10(1): 104.

[154]ASTAFYEVA E, ROLLAND L M, SLADEN A. Strike-Slip Earthquakes Can also Be Detected in the Ionosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 405: 180-193.

[155]NAJITA K. Ionospheric Method of Detecting Tsunami-Generating Earthquakes [J]. *The Physics Teacher*, 1978, 16(9): 606-615.

[156]ANGOVE M, ARCAS D, BAILEY R, et al. Ocean Observations Required to Minimize Uncertainty in

Global Tsunami Forecasts, Warnings, and Emergency Response[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 350.

[157]PELTIER W R, HINES C O. On the Possible Detection of Tsunamis by a Monitoring of the Ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(12): 1995-2000.

[158]OCCHIPINTI G, LOGNONNÉ P, KHERANI E A, et al. Three-Dimensional Waveform Modeling of Ionospheric Signature Induced by the 2004 Sumatra Tsunami[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20): 2006GL026865.

[159]NAJITA K, WEAVER P F, YUEN P C. A Tsunami Warning System Using an Ionospheric Technique[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(5): 563-577.

[160]OCCHIPINTI G, ROLLAND L, LOGNONNÉ P, et al. From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The Systematic GPS Detection of the Ionospheric Signature Induced by Tsunamigenic Earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(6): 3626-3636.

[161]GRAWE M A, MAKELA J J. The Ionospheric Responses to the 2011 Tohoku, 2012 Haida Gwaii, and 2010 Chile Tsunamis: Effects of Tsunami Orientation and Observation Geometry[J]. *Earth and Space Science*, 2015, 2(11): 472-483.

[162]SAITO S, SUZUKI S, YAMAMOTO M, et al. Real-Time Ionosphere Monitoring by Three-Dimensional Tomography over Japan[J]. *NAVIGATION*, 2017, 64(4): 495-504.

[163]CROWLEY G, AZEEM I, REYNOLDS A, et al. Analysis of Traveling Ionospheric Disturbances (TIDs) in GPS TEC Launched by the 2011 Tohoku Earthquake[J]. *Radio Science*, 2016, 51 (5): 507-514.

[164]BERNARD E, TITOV V. Evolution of Tsunami Warning Systems and Products[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373 (2053): 20140371.

[165]MARTIRE L, KRISHNAMOORTHY S, VERGADOS P, et al. The GUARDIAN System—A GNSS Upper Atmospheric Real-Time Disaster Information and Alert Network[J]. *GPS Solutions*, 2022, 27(1): 32.

[166]BLEWITT G, KREEMER C, HAMMOND W C, et al. Rapid Determination of Earthquake Magnitude Using GPS for Tsunami Warning Systems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(11): 2006GL026145.

[167]MEINIG C, STALIN S E, NAKAMURA A I, et al. Real-Time Deep-Ocean Tsunami Measuring, Monitoring, and Reporting System: The NOAA DART II Description and Disclosure[C]//OCEANS 2005 MTS/IEEE, Brest, France, 2005.

[168]WOODWORTH P L, PLAYER R. The Permanent Service for Mean Sea Level: An Update to the 21st Century[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(2): 287-295.

[169]RAVANELLI M, OCCHIPINTI G, SAVASTANO G, et al. GNSS Total Variometric Approach: First Demonstration of a Tool for Real-Time Tsunami Genesis Estimation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 3114.

[170]HUNSUCKER R D. Atmospheric Gravity Waves Generated in the High-Latitude Ionosphere: A Review[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(2): 293-315.

[171]HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J, et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information Since 1998[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 263-275.

[172]DOW J M, NEILAN R E, RIZOS C. The International GNSS Service in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 191-198.

[173]DENG J, DONG W, SOCHER R, et al. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, FL, USA, 2009.

[174]WILKINSON M D, DUMONTIER M, AALBERSBERG I J, et al. The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship[J]. *Scientific Data*, 2016, 3: 160018.

[175]EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.