

蔡润, 武震, 谭大诚, 等. 地震前的电磁异常综述[J]. 华南地震, 2018, 38(1):1-16. [CAI Run, WU Zhen, TAN Dacheng, et al. A Summary of Electromagnetic Anomalies Before Earthquakes[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1):1-16]

地震前的电磁异常综述

蔡润¹, 武震¹, 谭大诚¹, 云欢², 郭鹏¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000; 2. 大华会计师事务所重庆分所, 成都 610000)

摘要: 从地震电磁异常成因、地震电磁监测两个方面来概括近年来在地震电磁学科的研究进展, 通过对现有研究结果的分析总结, 认为确立震前电磁异常与地震区域与震级的关系是做好预报地震工作的关键所在, 因此加快完善地震电磁立体监测体系, 发展与重力、红外、遥感等卫星多手段分区域协同研究是未来地震电磁学科的发展方向, 多学科的融合和相互验证是实现地震准确预报的必经之路。

关键词: 岩石破裂; 电磁法; 地震预报; 电磁监测

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)01-0001-16

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.001

A Summary of Electromagnetic Anomalies Before Earthquakes

CAI Run¹, WU Zhen¹, TAN Dacheng¹, YUN Huan², GUO Peng¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

2. Da Hua Certified Public Accountants Chongqing Branch, Chengdu 610000, China)

Abstract: This paper summarizes the research progress of earthquake electromagnetic discipline in recent years from both of the abnormal seismic electromagnetic's reasons and electromagnetic monitoring system. Based on the analysis of the existing research results, the author believes that establishing the relationship between the magnitude of the electromagnetic anomaly before earthquake and the magnitude of the earthquake area is the key to do well the earthquake prediction work. Therefore, it can be seen that speeding up the improvement of seismic electromagnetic three-dimensional monitoring system, and the development of the gravity, the infrared, the remote sensing and other satellite multi-means sub-regional collaborative research is the future development direction of seismic electromagnetic research, integration of multi-disciplinary and achieve mutual authentication is the only way to accurately predict earthquakes.

Keywords: Rock fracture; Electromagnetic method; Earthquake prediction; Electromagnetic monitoring

收稿日期: 2016-10-26

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所及预测所局所专项(2015IESLZ01)和中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室(SKLCS-OP-2014-01)联合资助。

作者简介: 蔡润(1991-), 男, 在读研究生, 主要研究方向为地震电磁学。E-mail: cairun15@mailsucas.ac.cn.

通信作者: 武震(1979-), 男, 副研究员, 主要研究方向为地震电磁学、电磁模型等。E-mail: wuzhen@lzb.ac.cn.

0 引言

在众多的自然灾害中,地震灾害造成的死亡人数占全球各类自然灾害造成的死亡人数总数的54%,全球平均每年发生破坏性极大的7级以上的地震有20次之多,堪称群灾之首^[1]。在20世纪,全球有高达180多万人被地震夺去了生命,平均一年约1.8万余人死于地震灾害^[2-4]。1975年2月4日,我国辽宁海城发生7.3级地震,由于我国地震科技工作者对此成功做出短临预报,据估此次成功预报至少减少了十万人的伤亡,也大大减轻了财产损失^[5]。因此,合理地利用各种方法和理论来准确的预报地震就显得非常必要和迫切。

目前对地震的成因,以及发震的过程尽管已经有了进一步的认识,但就地震预报整个学科的进展而言仍是摸索阶段,寻找可行与合理的地震预报方法并将其应用于实际是目前科学家们共同努力的方向^[6-7]。

近年来,人们利用各种接收仪器纪录到在许多的大震发生之前的一些异常,这些异常为我们进行一个大致的地震预报提供了可能。大量观测资料表明:地质学、地球物理学和地球化学等许多现象中,电磁异常是对短临地震反映最敏感的前兆现象^[8]。地震电磁信号就是一种常用的地震异常观测手段。它基于岩石碰撞产生电磁信号的机理^[9-13],地震发生时,地面监测到的地下电磁信号会发生明显的变化^[14-15],而且这些异常一般都出现在震前的几天甚至更短的时间之内^[16-18],第一次记录到地震时电磁场发生变化的是Alaskan地震^[19-20];Weaver发现在1969年Kurile岛发生地震期间,其周围的电离层出现了明显的变化^[21],1996年11月17日至29日在新疆喀什地区共发生8次地震,在震前均观测到地磁异常变化^[22-23];发生汶川地震之前,也监测到有明显的电磁异常现象^[24-27];2010年玉树发生7.1级地震,许多研究者对地震前后的电离层扰动进行了研究^[28-29],这种方法在地震预报中表现出的及时性、高效性,使其成为地震短临预报的一个重要的手段^[30-33]。

通过对大量的强震发生前后的电磁的变化情况的分析后,我们已经初步证实了地震在孕震过程中,电磁波的产生是客观存在的,这期间会产生一系列的变化,例如电离层粒子浓度变化^[34-43],舒曼谐振幅度和频率异常^[44-49],在较宽频带范围内的连续背景电磁噪声会增强^[43,50,51]等。为了解释电磁异常的成因,大量学者对地震导致的电磁异常

原因做出了解释^[13,52-56],通过大量的岩石断裂试验发现岩石在主破裂时会产生电磁信号,国内外的做了大量的山岩人工爆破和实验室岩石样品破碎的电磁辐射检测试验,得出的结论是地震岩石破裂时应力急速下降,电流强度和流率急剧变化,从而激发产生电磁辐射^[54]。电磁辐射的频段包括ULF、ELF、VF、VLF等。但是在实际发生地震时,由于地球内部结构的非均匀性和地震孕育过程的复杂性等原因,我们对地震电磁现象的认识和理解依然非常有限^[57]。地震震前的电磁异常出现时间一般集中在震前的几天甚至几小时,这对地震的预报预警系统的建立起着非常重要的作用^[6]。

目前,全世界有二十多个国家和地区在从事地震电磁前兆的研究工作,发射电磁卫星也成为各国研究地震学的一个重要的手段^[5,27,58-62],自电磁卫星发射以来,国内外大量的学者对传回的数据进行了分析研究,得到了大量与地震电磁研究相关的成果^[63-72],这些成果也推动了空间电磁信号的发展。

利用电磁信号变化来研究地震有许多其它方法不能比拟的优势,电磁法是利用非力学的方法来研究地震,通过直接观测电磁的异常来判断地震能够更加的高效,且电磁异常在震前几天甚至几个小时的异常变化特别的明显^[6,73]。地震电磁波的变化特点每一次地震前的脉冲数大都先从低到高,再从高到低,地震电磁场辐射强度的对数与地震震级呈线性关系,一般震级越大,异常的频次也越高^[73-75]。电磁辐射的信号频率可以从超低频到可见光^[76-77]。根据地震前的电磁强度大小、电磁异常持续的时间以及电磁的脉冲频率来做地震的短临预报变得更加可行。

本文通过从目前地面的地震电磁观测台站系统、地震电磁卫星的对地震电磁异常的观测研究结果两个方面来说明近年来电磁法在地震预报中取得的新进展,文中详细综述了地面监测系统、电磁卫星的发展状况,结合许多震例的研究成果来阐述发展电磁法的必要性。由于电磁法在对地震短临预报中有着明显的优势,进而对电磁法在地震预报中的应用前景进行了展望。

1 地震电磁异常的成因

目前,对于震前出现电磁异常成因还没有统一的认识,地震电磁辐射源来自何处,是直接来自震源区还是地壳,还是大气层的电离层,对于

探讨地震的物理机制有着极其重要的意义。但是对于岩石的破裂导致电磁异常这一说法的认同度是最高的,国内外的大量学者均做了大量的实验来验证这一理论。郭自强等^[52]利用粒子探测方法在花岗岩破裂实验中记录到有电子发射,岩石在被压缩时一些原子的外壳层电子有可能获得高的动能逃逸出来,岩石在破裂时贮存在岩石中的能量以猝发方式释放出来,原先已逃逸出的自由电子将从岩石中挣脱出来,这些电子的大多数具有较低能量,它和周围介质分子碰撞从而产生光和电磁辐射;郭自强等^[78]利用 16 通道高速数据采集系统及三分量声发射换能器对多种岩石样品在单轴压缩及双剪破裂过程中产生的电磁辐射实验研究,结果表明岩石形变至破裂过程中产生的电磁信号具有复杂性,除有与微破裂同步出现的电磁辐射外,还有微破裂不同步的电磁辐射;刘煜洲等^[53]对不同的岩石进行实验研究后发现岩石破裂时必须导致矿物晶体破裂并发生电荷或偶电层运动才有可能产生电磁辐射,而方解石等矿物由于它们解理发育或具有层状结构,受力时易发生粒内滑移而破裂,这种滑移不破坏晶体原有电荷平衡,因而不产生电磁辐射,此外,若岩石中存在较多的裂隙或细脉时,破裂往往沿着这些构造薄弱面发生,不能导致矿物晶体中的电荷或偶电层运动,同样不利于产生电磁辐射,这一实验说明岩石的矿物成分和微观结构都对电磁信号的产生具有重要影响;前苏联地震学家萨多夫斯基等^[79]认为电磁脉冲与电介质脆性破裂的裂缝壁起电特征有关;徐为民等^[80]研究自然条件下的岩石破裂过程,结果表明花岗岩在破裂的过程中会产生电磁辐射,这些信号具有脉冲振幅的特点,频谱较宽,但是野外爆破实验,岩石的受力实验不易控制,因此不能明确电磁辐射与岩石成分、结构以及加载方式等关系。徐为民等^[81]再次进行室内实验,结果表明含有石英晶体的岩石,在破裂过程中会产生电磁信息,其振幅具有脉冲形态,随着应力水平的提高,电磁脉冲的频度增加,不同结构的介质,在主破裂前又会呈现平静和高潮两种不同类型,这一结论这对于识别震前短临异常有积极的意义;王恩元等^[82]通过研究砂岩等发现在压、拉状态下能够产生电磁辐射且电磁辐射与载荷呈现正相关性,此外岩石电磁辐射具有记忆效应,在加载过程中最大电磁辐射强度与岩石强度间呈现正相关性;钱书清等^[83]通过加压岩样,结果表明在同一类岩样中未出现电磁辐射信号的,都是破裂抗压强度最

低的,这一结论将有助于解释一些小地震未出现电磁异常的原因,此外,主破裂时刻的电磁辐射强度最大且不同方位的信号强度也不一样,这一认识能够解释同一地震不同台站记录到的异常不一样;V. Frid 等^[84]利用花岗岩进行室内电磁辐射实验,研究结果表明当泊松比增加,岩石新的裂缝的数量会随之减少,电磁异常幅度减小;钱书清^[85]利用多年的观测资料发现,大地震的孕育过程到临近发震的各个阶段,在孕震区的地下、地面大气层乃至电离层会出现异常的电磁辐射信号,而且异常信号的幅度与震级的大小成正比;樊勇等^[86]利用花岗岩进行岩石破碎实验,实验结果表明:试件在加载过程中电磁辐射脉冲数与时间具有明显的分形特征,并随加载速率增大电磁辐射信号强度增大,分形维数 D 也增大,具有很好的相关性;宋晓艳等^[87]利用预制裂纹岩石试样实验测试了裂纹扩展途径的电位信号变化规律及裂纹两侧电位分布特征,结果表明扩展裂纹的尖端和新形成的裂纹壁面是产生自由电荷的主要位置,在裂纹扩展路径上距离裂纹尖端近处产生的电位信号强度较高,距离较远处产生的电位强度较低,裂纹壁面电荷的正负交替及裂纹扩展中两侧壁张翕运动引起的电场变化是煤岩产生电磁辐射的原因;朱元清等^[88]也提出了岩石破裂时的电磁辐射是裂纹尖端电荷随着裂纹加速扩展运动所产生的假设,并根据破裂岩石的电子发射理论解释了裂纹尖端电荷的现象。理论分析表明岩石破裂时电磁辐射量的大小主要取决于裂纹尖端的电荷总量和岩石破裂时裂纹扩展的加速度,而裂纹尖端的电荷总量和岩石破裂时裂纹扩展的加速度又取决于岩石的致密程度和岩体的大小及成分,由于岩石破坏实在瞬间完成,因此电磁辐射具有脉冲形式;萧佐^[89]认为地面出现的异常电磁场在向高空传播过程中,由于声重力波等作用,而被逐渐放大,因此引起电离层电磁场和粒子的明显扰动。

2 研究现状

目前对于地震电磁异常的研究可总结为 4 个方面:地面观测,主要是包括利用已建立的地面台站收集震前电磁的异常情况;空间观测,目前部分国家通过发射电磁卫星来进行震前电磁的变化监测;将地面台站与空间异常相结合的研究,利用台站和卫星各自的优势,建立天地一体化监测系统,更好的总结出震前的异常情况;将电磁

学科同其它学科的结合，这也是地震预报未来发展的必经之路。

2.1 地面电磁监测及进展

地面台站监测作为传统的监测方式，也是目前最广泛的监测方式，世界各国均布置了地震监测台网，台网的建设对地震的监测预报起到了非常重要的作用。近几十年来，地面监测台站为地震预报的发展提供了丰富宝贵的资料。前苏联于1978年在伊晒湖地区建立了频率为15 kHz水平磁性天线的观测台，这是最早的地面电磁辐射观测台站。我国地震监测预报研究是从1966年邢台地震开始，而研究电磁信号与地震活动相关性以及地震电磁现象的辐射及传播机制等问题主要是在唐山地震之后^[75]。近年来，中国政府对地震方面的研究投入了大量的科研经费，以中国地震局为核心，在全国大陆范围内布置了各类的电磁台网来搜集电磁的相关信息。我国在震前电磁辐射方面的探索所取得的成果已经得到了国内外的科研机构的重视^[74]，我国台湾地区也在各个地区布置了

一定数量的以地震监测和预报研究为目的的电磁台站，日本在东海地区建起数字化遥测电磁观测台网，可同步记录地电场、地磁场，有的还可记录不同频段的电磁波的变化^[57]，美国地质调查局在美国西部布置了由28个永久台、61个临时台与131个测点组成的地磁观测网，以测定和监视与地下应力变化有关的构造磁效应与震磁效应^[90]。

目前我国大陆有测震观测站1303个、电磁观测站294个、前兆合计观测站1271个，我国地震监测台网规模还在继续扩大，我国地震电磁监测台网的不断完善以及多年来积累的丰富的地震资料不仅为地震科学研究提供了方便，而且对地球科学的发展提供了大量宝贵的基础资料，从而推动我国地震预报的研究工作。我国目前布设在全国各地电磁的观测仪器也各不相同，例如云南省地震局利用Dz0-1型深井鞭式天线电磁信息仪器，江苏省连云港市地震局应用MDCB电磁波仪，成都台地磁观测采用GM4型磁通门磁力仪和FHDZ-15型地磁组合观测仪。

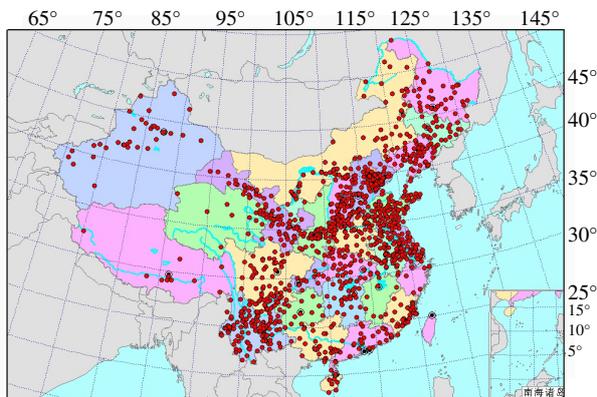


图1 中国大陆地震台站分布图

Fig.1 Distribution of seismic stations in China

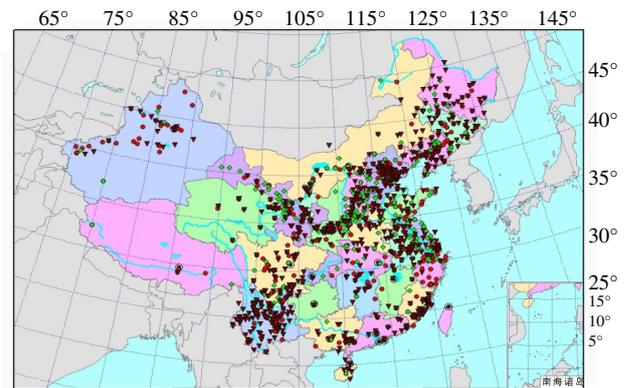


图2 中国大陆前兆台站分布图

Fig.2 Distribution of the precursor stations in the mainland of China

由我国地震台站的分布特点可知：东部台网建设比较密集和完善，电磁台站的密度大约可以达到300 km，而在西部地区相对零散，还存在许多的空白地区，但是我国的地震分布特点是西部地区的地震也比较活跃，地处西部地区的“青藏高原地震区”是我国最大的一个地震区，也是地震活动最强烈、大地震最频繁的地区。据统计，这里8级以上地震发生过9次，7~7.9级地震发生过78次，位居全国之首。此外，发生在西部地区的地震检测到了大量的电磁异常，例如汶川地震与玉树地震均有电磁异常的出现^[28]。因此加强西部

地区的电磁台站建设是以后需要重点考虑的。目前，利用各个地方布置的电磁观测台站的记录获取地震前后的电磁变化情况，大量的事实表明，成效是显著的。1976年唐山地震前，昌黎等电磁台站监测到 $\Delta Z/\Delta H$ 存在明显的差异，以及Wiese分量辩护较大，这有可能是反映出唐山地震前地电的异常变化^[91]，此外对昌黎台地电阻率分数维进行计算发现唐山地震前的分数维明显的下降，震后出现明显的回升^[92]；丁鉴海等^[93]利用中国地磁台网资料，总结出大地震前出现的地磁低点位移和地磁日变异常现象，对比1997年11月8日玛尼

7.5 级与 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震前磁场异常分布及特征, 结果显示两次巨大地震前磁场异常时空分布特征有较好的一致性, 震中周围出现日变异常, 震前约 1 个月出现地磁低点位移, 其突变分界线通过震中地区; 2004 年印尼发生 8.7 级地震, 4 670 km 外的昌黎台记录到地震前一周, 地电阻率急剧的下降, 出现多次的阶变^[94]。据统计, 昌黎电磁台站对许多地震震前的地电阻率、电位等的测值极为敏感, 这样的测点我们称之为敏感测点。但是有些台站对来自不同方向的地震电磁异常的敏感程度也不一样, 这就涉及到选择性的问题。2006 年 1 月 29 日河南范县发生 3.6 级地震, 在 1 月 18 日, 鄄城台四个测项出现异常信号, 南北向电场异常量达 75 mV/m, 超过正常值 10 倍以上。2006 年 4 月 9 日河南范县再次发生 4.6 级地震, 在震前的 3 月 27、28 日胶州台出现电磁异常变化, 电场变化的时间长达近 6 h^[73], 但从 4 月 20 日起, 接连几天烟台台站的电磁信号远大于正常值, 相关专家认为附近可能会发生有感地震, 但是在 20 d 的预报期内无地震发生, 这说明目前单从地震前的电磁异常信号来判断地震发

生与否是不完全正确的; 2008 年汶川地震时, 距离震中较近的成都地电台站记录到电场发生了明显的变化, 而距离较远的青藏高原东北缘的电磁台也记录到了显著的自然电场变化^[16](如图 3), 说明地震会引起电磁场的变化这一事实是确定的^[25-26], 从图 3 a 中可以看出震前十九天磁场 X 分量的强度开始减小, 后逐步增大变化, 最大的幅度减少超过; 图 3b 是 2008 年 1 月至 6 月初的 SHN 台地电场 N1S1 测到的小时均值变化曲线, 从 3 月 21 日新疆于田地震前夕至汶川地震前的大约 50 多天时间, 自然电场 V_{sp} 发生大幅度变化, 最大变化幅度约 130 mV/km, 从图中可以大致看出, 于田地震前几天开始地电场低频扰动成分增强, 汶川大地震前夕自然电场变化恢复, 低频扰动现象消失; 图 3c 为谱密度随时间变化图, 结果显示在 2008 年 2 月 15 值 3 月 15 日, 周期小于 3 h 的低频成分谱值比 2 月 15 日前减小约 1 个数量级, 在 3 月 16 日至 5 月 9 日约 50 d 内, 各频段的谱值都增大, 特别是 $T>3$ h 低频成分谱值比 3 月 16 日前增大了 1~3 个数量级, 汶川地震前 2 d 开始谱值恢复到 3 月 16 日前的水平。

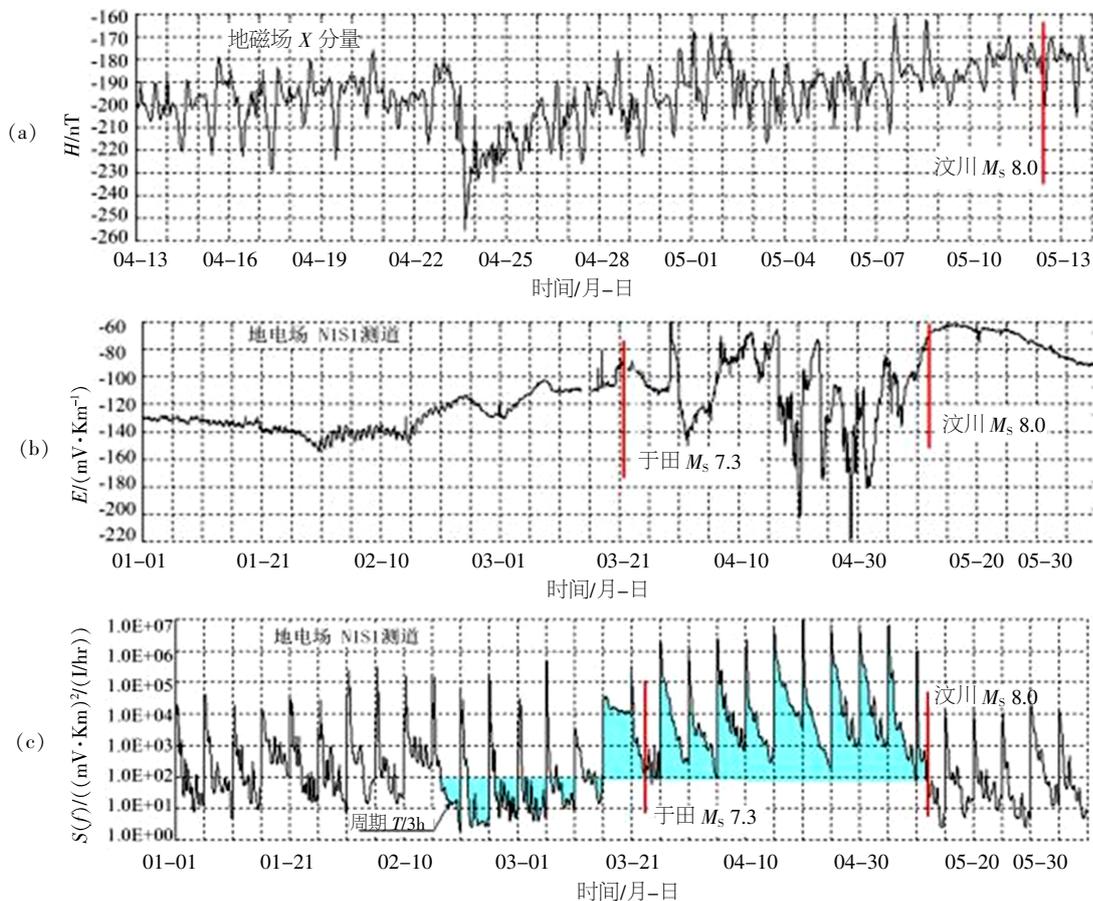


图 3 汶川地震 SHN 地磁场(a)、地电场(b)变化和地电场 MEM 时一频图(c)^[16]

Fig.3 Changes of geomagnetic field (a) and geoelectric field (b) and the MEM time-frequency curve of geoelectric field (c)

黄清华^[57]对大量的震例进行统计研究后发现当地震震级确定时,观测点的位置与震中距的距离越大,监测到电磁强度发生变化的概率越小。图4

中空圆圈代表电磁强度无异常,实心圆圈代表电磁强度有变化,虚线代表出现电磁强度变化的阈值。

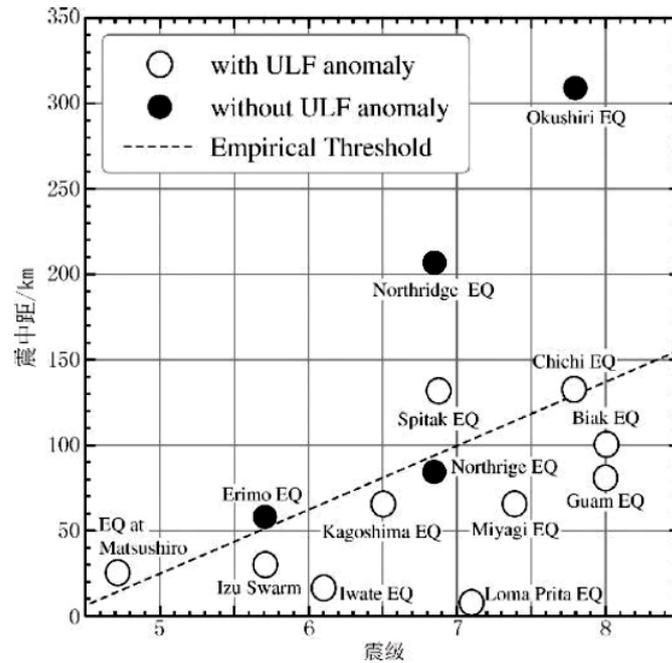


图4 电磁异常与震中距和震级的关系图^[57]

Fig.4 Relationship between the electromagnetic anomaly and the epicenter distance and magnitude^[57]

地面电磁观测网能够为地震短临预报提供不少的方便,例如,在全国范围内布设台站时实施起来相对容易;大多数情况下地面观测对观测站附近发生的地震有较清楚的反应^[95];更新台站监测仪过程相对简单等等。但是地面电磁观测也存在很多的问题,第一:由于人为选择布设台站的位置,观测站分布很不均匀,存在一些不合理性;由于受地域和环境如地形、国界、气候等的影响,这些使得台站监测范围受到一定的限制,再者,利用地面电磁台站对空间电磁的变化的观测有一定的困难^[96]。第二:许多的震例表明,即使在与震源很近的地方,也未能监测到电磁的变化,此外,距离震源相等的地方对同一地震的电磁变化的异常的反应也不一样,有的甚至是出现相反的现象,对于产生这方面的原因,这有可能和震源机制有一定的关系,但是目前尚未得到统一的认识^[7]。第三:随着现代工业的发展,人们的日常生活对台站的监测也有一定的影响,高压电流对台站监测数据的影响,此外,在地铁运行时,由于铁轨和地面不完全绝缘,所以存在一定程度的电流泄漏,这就会影响台站收集到的电场数据的真实性^[18, 97-98],闪电会对电磁现象产生较大的影响^[99]。表1为近年来地面监

测系统监测到的部分地震前的电磁异常的统计情况,从表中可以看出地面监测的电磁异常出现的时间大多数在一个月之内,这也说明利用电磁异常做地震短临预报是可行的。

2.2 电磁卫星的监测及进展

随着卫星在多方面的应用,利用卫星观测到地震区及其附近区域的热红外辐射异常在本质上就是电磁异常的表象,电磁卫星可对地球全覆盖、时间可连续的观测。再者,地震前后的电磁场强度的变化为发展地震电磁卫星提供了震例和理论基础,利用卫星来监测电磁的变化也逐渐得到推广,俄罗斯,美国,法国相继发射了地震电磁探测卫星,而中国,意大利,日本也在酝酿着发射各自的电磁探测卫星;2005年美国宣布将用十年的时间建成空间电磁探测和地面电磁测量相结合的地震预警信号监测系统,因此目前较为完善的是美国的立体监测系统,能够测量电磁异常变化和红外光等。

世界第一个卫星电磁观测震例是 Davis 等利用 Alouette-1 卫星对 1964 年 Alaska 大地震的监测,分析发现在震前电离层临界频率显著增高,震后

逐渐恢复^[9]。自此以后各国的研究学者投入大量的精力在电磁卫星的观测上,例如 Molchanov^[107]利用法国的地震电磁探测卫星搜集到的 2004 年 12 月苏门答腊 9.0 级大地震的磁信号,并进行分析后,得到的结论是在发生地震前,震区的上空信号信噪比较弱,而在震后,震区的信噪比又会出现上升的现象。1970 年 3 月 30 日前苏联 OGO206 卫星偶然经过某地震震前附近上空时,记录到 100 Hz、216 Hz 和 467 Hz 等频率清晰的磁场脉动异常,这次发现是较早发现空间电磁场异常与地震事件存在某种联系;俄罗斯于 2001 发射了 Predvestnik-E 卫星,但由于多方面的原因未能成功发射;俄罗斯于 2006 年 5 月再次发射了 Compass-II 卫星,俄罗斯地震学家等就地震引起的电磁异常和电离层扰动与地震活动的关系开展了相关研究,发现在地震前数小时到数天出现电磁场频谱、带电粒子浓度或温度等明显的异常变化;美国于 2003 年 6 月发射了 Quakesat-1 卫星,但是 Quakesat-1 卫星只有一个磁探测仪,它主要是监测美国西部地震带的磁场异常变化,它的运行情况至今美国也没

有对外公布;乌克兰于 2004 发射了 Sich-1M 卫星,但未进入预定轨道;Demeter 卫星是由法国国家研究中心研制的一颗微型卫星,也是世界上第一颗专门用于监测地震电磁扰动的卫星,卫星飞行高度小于 800 km,它主要测量电子密度和浓度、离子密度和浓度 3 分量电场、3 分量磁场以及高能粒子谱,该卫星于 2004 年发射,2010 年停运,在运行的六年时间里,为全世界的地震电磁科研工作提供了大量的宝贵的数据^[108],相关数据可以在 <http://smc.cnes.fr/DEMETER> 下载;中国首颗自主研发的电磁监测试验卫星已进入整星测试阶段,预计 2017 年下半年择机发射并投入使用,中国地震电磁探测试验卫星将用于获取全球电磁场、等离子体和高能粒子的观测数据,识别大地震发生前相关的电磁、电离层和高能粒子异常,探索大地震短期预报的方法。卫星携带了电场仪、磁力仪、等离子体分析仪和高能粒子探测仪,在轨高度 500 km,轨道倾角 79°,重访周期为 5 d,目前我国主要是使用风云二号卫星进行空间的电磁异常监测。

表 1 地面监测系统电磁异常统计

Table 1 Electromagnetic anomaly statistics of ground monitoring system

| 地震 | 时间/(年-月-日) | 出现异常时间 | 异常特征 | 监测点 |
|-------------------------|------------|------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 张家港地震 ^[100] | 2001-11-03 | 震前 42 d、20 d、2 d | 短极距观测曲线中出现较大的异常信号。 | 崇明地电场台站 |
| 苏门答腊岛地震 ^[94] | 2004-12-26 | 震前一个月开始出现异常。 | 变化幅度相应减小,震后快速恢复。 | 昌黎台 |
| 汶川地震 ^[101] | 2008-05-12 | 震前 1 d | 电磁扰动异常,电磁波突跳明显。 | 金河、剑阁地震台 |
| 玉树地震 ^[102] | 2010-04-14 | 震前 7 d | 电场方位角出现突跳。 | 汉王台 |
| 日本大地震 ^[48] | 2011-03-11 | 震前 3~4 d | 低阶谐振开始出现比较明显的幅度增强。 | 云南的舒曼谐振(SR)观测站 |
| 高邮地震 ^[103] | 2012-07-20 | 震前 10 d | 电磁扰动超低频段数据脉冲出现明显的增强。 | 滁州地震台 |
| 芦山地震 ^[104] | 2013-04-20 | 震前 21 d、16 d、5 d、4 d、1 d | 地电场异常信号幅度大,电磁扰动仪观测到该时段的超低频信号。 | 仙女山台 |
| 岷县漳县地震 ^[105] | 2013-07-22 | 震前几天至 2 个多月 | 震前脉冲信号频繁突跳、增大,以及波形畸变、多次出现阶跃等现象。 | 万州天星台 |
| 尼泊尔地震 ^[106] | 2015-04-25 | 2014 年 6 月开始,异常持续时间为 10 个多月。 | 地电场数据长时间段、大幅度异常扰动变化。 | 拉萨台 |

电磁卫星主要是对电场和磁场观测、电离层的电子、离子和高能粒子以及电离层结构扰动等观测,并实时地向地面传回数据^[109-110]。对于不同纬度地区,地震前兆空间分布特征有着各自的特点,电离层异常会显著影响电磁信号的频谱和衰

减率^[49],相关研究表明电离层的扰动会经历一个由低到高再降低的这么一个过程,即在主震发生的前几天,会出现电离层扰动,但是扰动区域并不在未来地震震中的正上方,而是漂移了 200 km,在空间上会略有差异^[6]。此外,随着地震主震的临

近, 电离层扰动覆盖的区域越来越大, 并且扰动幅值也会增加, 地震发生后几小时, 其扰动逐渐恢复。此外, 国内外还记录到在大震发生前高能粒子出现明显异常^[107]。

世界上每天都会发生很多震级不一的地震, 但并不是每一次地震都足以产生电离层扰动异常, 震级太小, 对我们生活不会有太大影响, 对研究工作也不能提供太多的信息, 所以选择震例是取震级在 5 级以上的地震, 据统计震级越大, 出现电磁异常现象的可能性就越大, 异常也越明显, 电磁扰动与震级的关系如表 2 所示。由于在高纬度地区, 干扰电离层的因素很多, 即使有震前扰动也不容易识别出来, 所以选择中低纬度地区, 如果震源太深又不能产生电离层扰动, 因此选择震源深度低于 40 km 的震例^[111]。有相关的研究表明震源深度对电子浓度扰动的影响并不明显^[112]

电离层的扰动幅度与地震的震级呈现正相关^[113] (如图 5)。

DEMETER 卫星在多次强震前观测到 VLF 频段的电磁异常信息, 2006 年 5 月 3 日汤加发生 8.0 级地震, 张学民等^[114]利用 DEMETER 卫星收集到的数据, 对汤加地震震前后的电磁辐射信号的变化形态进行研究并统计分析, 做出电磁场频谱图, 如图 6 所示, 其中每幅图中顶端的图为 1 000 Hz

表 2 卫星监测的电磁扰动与震级的关系^[6]

Table 2 The relationship between electromagnetic disturbance and magnitude in satellite monitoring^[6]

| 震级 | 有无扰动 | 所占比例 |
|---------|------|------|
| 4.7 级以上 | 有 | 54 |
| 5 级以上 | 有 | 73 |
| 6 级以上 | 有 | 100 |

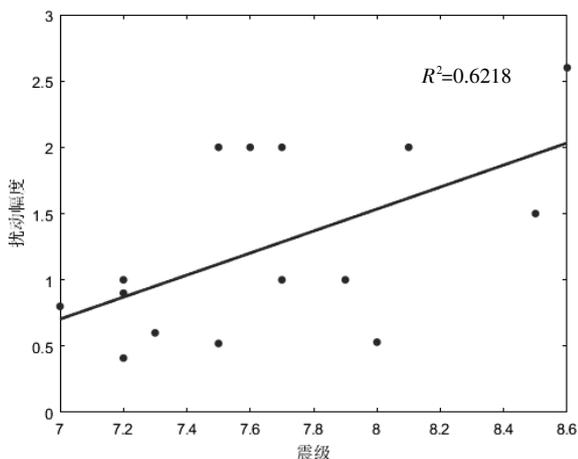


图 5 电离层的扰动幅度与地震震级的关系^[104]

Fig5 Correlation between magnitude of earthquakes and disturbance amplitude of electron density ^[104]

以下的磁场频谱, 中间图为 1 000 Hz 以下的电场频谱图, 底图为轨道附近前后 1 个月内 2 000 km 范围内的地震分布图, 其中红色三角形表示未来发生的地震, 三角形的大小代表震级的大小。从图 6 中可以看出, 在 250~500 Hz 范围内, 电磁场均有显著增强的现象, 随着纬度的增加, 截止频率随磁场强度增强在逐渐升高, 通过对比震前半个月的数据, 可以发现在 4 月 25 至 28 日震中的电磁信号明显增强, 4 月 27 日电场频谱值达到最大值为 $10^2(\mu V^2 m^{-2}/Hz)$, 其他时间的电场截止频率的频带宽度及波及范围都明显大于其它时间段。

2010 年 4 月 13 日, 青海省玉树县发生 M_s 7.1 级地震, 张学民、姚璐等^[115]研究表明玉树地震前孕震区及其磁共轭区上空电离层均存在异常扰动现象(如图 7), 从图中可以看出在 4 月 1 日和 4 月 13 日这两天玉树地震的南部出现明显的异常, 而且是全球最强值, 同时其磁共轭区显示同步异常, 需要注意的是在驼峰值最强附近, 2010 年 4 月 6 日发生了 7.8 级的苏门答腊地震, 因此 4 月 1 日的扰动异常可能与此次地震相关, 由于此次地震的震级较大, 因此电离层的扰动也明显大于 13 日的电离层扰动范围。

Parrot^[111]利用 DEMETER 卫星对 2004 年 8 月至 2009 年 10 月全球 17 366 次 4.8 级以上的地震的离子密度数据进行了统计分析, 发现地震引起的电离层扰动要大于随机事件引起的电离层扰动, 并且这种扰动会随着震级的增加而增强。表 3 为近年利用电磁卫星对部分地震事件震前电磁异常观测的统计情况, 由表 3 可知, 即使针对同一个地震, 不同作者选择的研究方法和时间窗口范围不同, 导致分析出的电离层异常特征也是不一样的, 但是判断物理量是否存在异常, 主要还是根据作者选择的时间范围内是否有明确的变化, 因此将多个物理量的异常特征结合起来判断地震震前异常显得十分必要。

地震电磁卫星监测系统有许多优势^[62], 第一: 能够监测地震电磁空间的变化, 能够获取电离层强弱的变化。第二: 电磁卫星监测的范围较广, 能够避免国家疆域的限制, 获取的数据较为全面和真实, 还能够结合地面监测系统绘制三维的电磁异常图, 为提前获取震源位置提供方便。第二: 相比传统的地面观测手段, 电磁卫星技术能够减少使用人力和资金。但是电磁卫星监测也存在一些困难, 例如获得的数据由于较全面, 因此处理数据时比地面监测系统获取的数据更加的复杂, 此外太阳活动对电磁卫星的监测影响更大, 研究表明在太阳耀斑期间, 有明显的电子产生率增加^[112,119]。

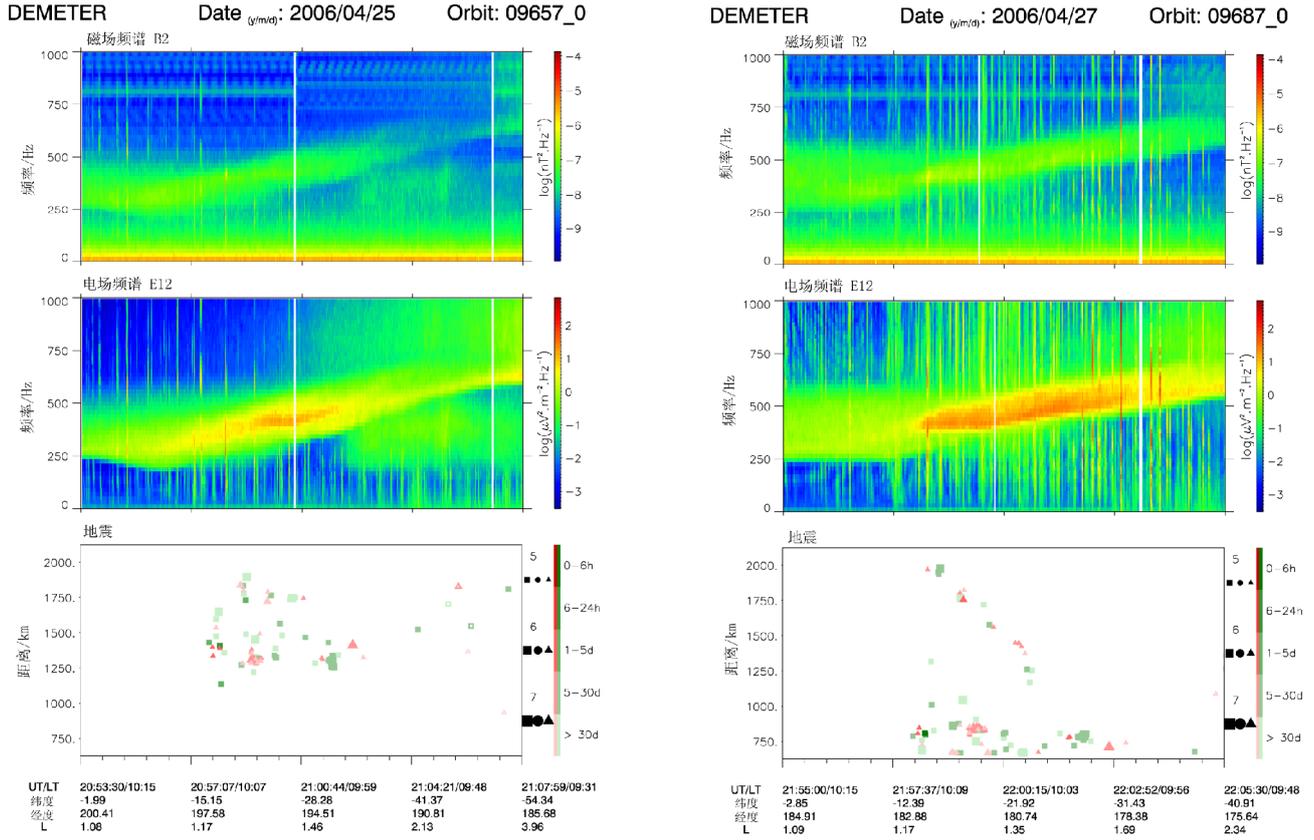
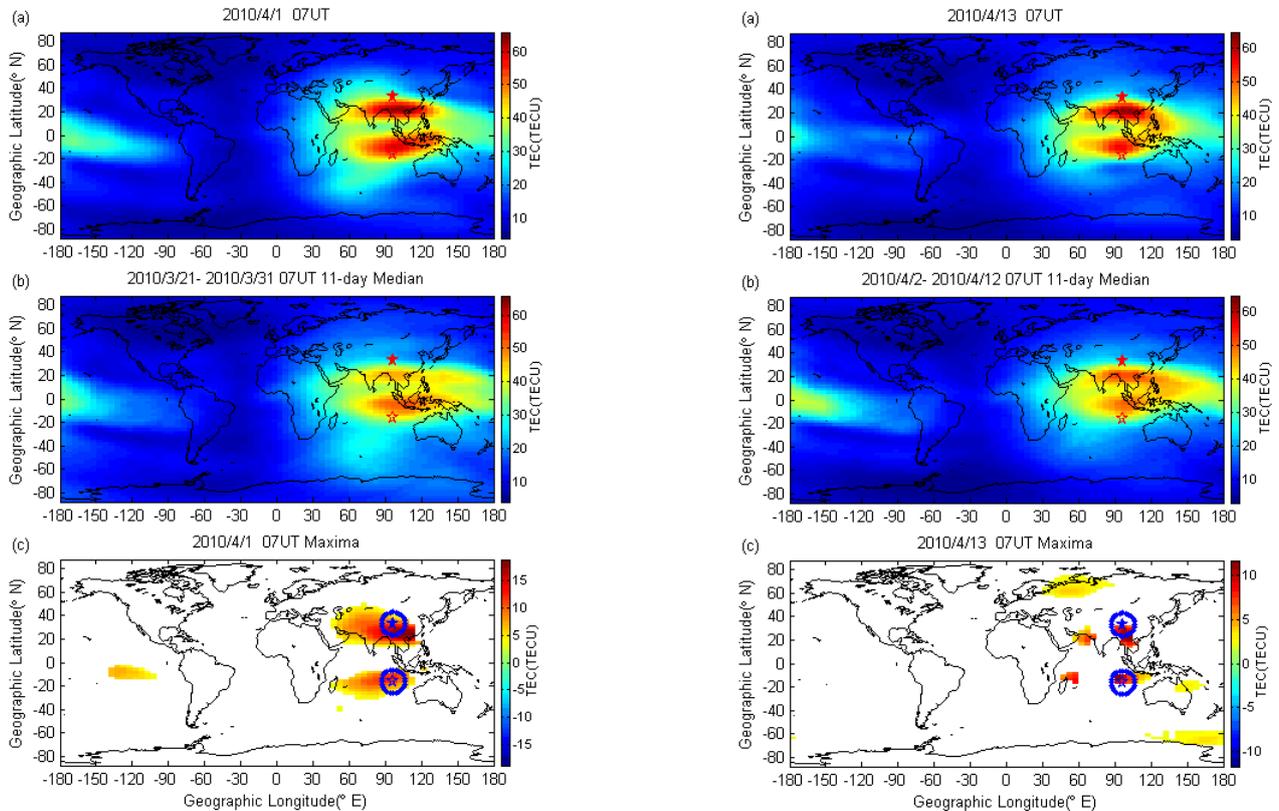


图 6 地震前电离层电磁场截止频率功率谱值增强^[105]

Fig.6 Spectral enhancement of electromagnetic field at cut-off frequency before Tonga earthquake^[105]



(a) GPS 电子含量原始观测; (b) 滑动中值背景; (c) 异常最大值累计

图 7 电磁异常图

Fig.7 Electromagnetic anomaly map

表 3 卫星监测系统电磁异常统计

Table 3 Electromagnetic anomaly statistics of satellite monitoring system

| 地震 | 时间 | 出现异常时间 | 异常参量 | 异常特征 |
|-------------------------|------------|------------|----------------|---------------------------------|
| 苏门答腊地震 ^[116] | 2005-03-28 | 震前 15 d | 电子密度、离子温度 | 震前温度上升, 震后电子温度下降 |
| 西藏改则地震 ^[20] | 2007-05-05 | 震前 3 d | 电子数密度 | 显著升高, 震后下降 |
| 西藏改则地震 ^[20] | 2008-01-09 | 震前 5 d | 电子温度 | 电子温度下降 |
| 于田地震 ^[29] | 2008-03-21 | 震前 9 h | PSD | 显著的增加 |
| 汶川地震 ^[42] | 2008-05-12 | 震前 3 d | 离子温度 | 温度明显升 |
| | | 震前 4 d | VLF 电磁场单频点频谱数据 | 震中有明显突升 |
| 萨摩亚群岛地震 ^[20] | 2009-09-29 | 震前 10 h | 电子密度 | 电子数密度增加 |
| | | | 电子温度 | 电子温度在最北部也呈现下降趋势 |
| 海地地震 ^[117] | 2010-01-12 | 震前 3 d、1 d | 电子含量(TEC) | 震前 3 d 异常增大, 震前 1 d 达到最大值, 震后下降 |
| 智利地震 ^[42] | 2010-02-27 | 震前 9 d | 离子温度 | 剧烈扰动 |
| 苏门达腊地震 ^[20] | 2010-04-06 | 震前 4 d | VLF 电磁场单频点频谱数据 | 出现突升 |
| | | 震前 6 d | 电子温度、离子温度 | 出现明显的波动 |
| 玉树地震 ^[115] | 2010-04-14 | 震前 1 d | 电子含量 (TEC) | 震中附近出现显著增强 |
| | | | 氧离子密度 | 大幅度增强 |
| 尼泊尔地震 ^[118] | 2015-04-25 | 04-23 | 电子含量(TEC) | 出现显著的正异常 |
| | | 04-28 | | 出现显著负异常 |

2.3 地面台站同电磁卫星的结合

采用地面观测和空间观测相结合的综合观测研究, 建立天地一体化观测体系是突破地震预测难题的必经之路。目前多数国家建立了地震监测台站, 但由于多种原因, 台网的分布很不均匀, 但是卫星观测具有覆盖范围广、时间上连续监测的特点, 能够弥补了地面台站的短处。天地电磁观测系统主要包括地面电磁观测、地基电离层观测、卫星电磁与电离层和红外遥感观测等, 服务于短临监测, 这已成为多震国家的努力目标, 目前较为完善的是美国建立的地震预警信号监测系统, 监测主要包括宽频带的电磁异常变化、电离层扰动、红外光、空气电导率变化和传统的力学现象以及使用 GPS 技术观测电离层结构异常和地壳运动等。我国若要早日完成天地监测系统, 则需要首先完善地面台站的建设, 更新陈旧的设备, 增加台站的监测异常的种类, 在多震少台站的地区建立一定的观测台站, 其次, 我国即将发射专门用于监测电磁异常的电磁卫星, 则需要配合地面监测台网, 不断完善天地一体地震电磁辐射观测网。建立天地一体观测系统主要是为了探索震前地面和卫星监测到的电磁异常信号的相关性, 这就需要对监测物理量进行统一化, 目前卫星监测的物理量主要是空间电磁场、等离子体参数和高能粒子能谱等 3 类共计 11 个分量, 目前地面可开展的对比观测手段包括地电场、地磁场、地磁扰动、等离子体参数等地基电磁观测, 以汶川地

震为例, 统计地面台站监测和卫星监测的异常值, 如表 4 所示。在进行初步探索的阶段, 可选取特定的多发地震某一区域, 对该区域实施连续观测, 通过对比地面和卫星的观测结果来寻找到天地监测的异常之间相关性。

表 4 汶川地震的电磁异常

Table 4 Electromagnetic anomaly of Wenchuan earthquake

| 监测方式 | 异常量 |
|------|--|
| 卫星监测 | 电子密度 N_e 减小 ^[120] |
| | 离子密度 N_i 减小 ^[42] |
| | 电离层 TEC 增强 ^[121] |
| | 离子温度升高 ^[24] |
| 地面监测 | 电磁扰动异常 ^[101] |
| | 电磁波频谱值 ^[122] |
| | 地电场功率谱值增大 ^[123] 地磁场日变化波形畸变 ^[16] |

2.4 多学科融合的预警系统

笔者通过研究多次地震前兆现象发现, 几乎每次地震前兆异常都存在非震异常现象, 即有前兆异常, 并无地震发生。由于地震预报的复杂性, 它涉及到多门学科的融合, 仅靠一学科来做好地震预报科学是不现实的, 因此, 需要加强多个部门的协调作用。而地震的孕育发生更是一个非常复杂的变化过程, 伴随地震的孕育, 会产生许多的前兆异常现象, 包括地面电磁场、空间电离层、重力场、地下流体活动、地壳形变、地震活动等

变化, 这些前兆现象又涉及到地震电磁学、空间物理学、地球化学、地球物理学、气象学、地震学等学科的前沿知识, 只有结合各个学科观测到

的前兆信息, 相互验证和总结(如图 8), 相关的科研工作者更要多沟通交流, 对于一些未解的问题可以进行联合攻关, 取长补短。

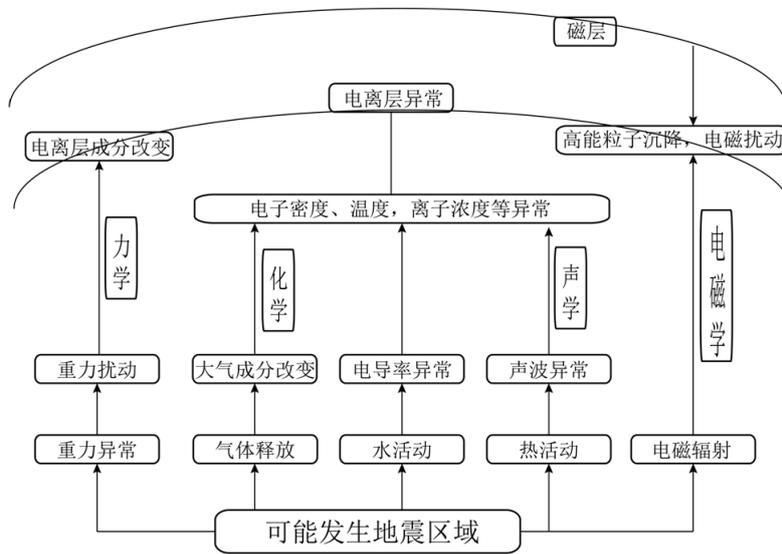


图 8 各学科交叉结合流程图^[6]

Fig.8 The flow chart of the cross-disciplinary^[6]

牛志仁等^[124]探索建立孕震动力学方程组对地震前兆的相互关系进行理论分析, 将电阻率、地震空区、条带、频度、*b* 值、波速异常、地下水位、水氡等多种前兆在孕震过程中生成的理论机制、相互之间的内在联系等从理论上进行解释, 为地震综合预报向以物理为基础的预报方向迈出了重要的一步; 罗兰格^[125]曾指出在同一地点不同时间发生的两次震级相当的地震, 前兆异常项目、异常地点可能有较大差别, 但前兆异常的总体规模相似, 此外, 当地震孕育进入短临阶段后地震短临异常在短时间内集中出现, 呈现准同步性, 这就说明结合多种前兆进行地震预测是未来的必经之路; 李均之^[126]通过列举 13 次成功的临震预测及 16 次较好的年度地震预测, 说明结合多学科的观测方法是有效的; 而目前的现状则是学科之间的交流几乎为零, 但值得庆幸的是各个学科均积累了大量的观测资料, 这就为学科的交叉融合奠定了基础, 笔者以玉树地震为例, 列举部分前兆异常, 如表 5 所示。只要当做好了这些基础学科的深入研究, 对发震的机理和过程有了全面的认识, 对地震前兆变化有了规律性的总结后, 才有可能促进地震电磁法在地震预报中的准确有效应用, 进而才有做好准确预报地震的震级、时间、地点的可能。

表 5 玉树地震的短临异常统计

Table 5 Short impending anomaly statistics of Yushu earthquake

| 学科 | 异常情况 |
|-------|--|
| 地电场 | 电场矢量振幅出现突变异常, 异常幅度范围在 15~400 mV/km ^[102, 123] |
| 地磁场 | 地磁场总强度增加, 地磁场全局小波能谱值增大 ^[28, 29, 127] |
| 空间电离层 | 震前震中附近区域的电离层会有异常扰动, TEC 和电子密度增强 ^[128-130] |
| 地球化学 | 震后一个月的时间内 CO ₂ 和土壤气、水氡浓度都保持在比较高的水平, 此后浓度有一个先下降后上升的变化过程, 在浓度下降变化的过程中, 余震比较少; 而在浓度上升过程中, 余震活动比较活跃, 数量多, 震级大 ^[131, 132] 。 |
| 重力场 | 重力变化剧烈 ^[133] |
| 地壳形变 | 方位向形变场断层两盘相对错动最大达 1.7 m, 距离向形变场断层两盘相对错动最大 2 m ^[134, 135] 。 |
| 热红外 | 地震前相对功率谱比值出现明显增强 ^[136, 137] |
| 温度变化 | 在临震前 2~5 d, 震中处的温度比周围低 ^[138, 139] 。 |

3 地震电磁学的研究展望

准确的地震预报是学者们奋斗的目标, 做好准确的地震预报需要在前人的基础之上积累和总结大量的经验, 不管是失败亦或成功的经验, 而

地震电磁学以其独特的优势再次兴起,为地震准确预报又开辟了一个新的方向。近年来,各国正在研制新型的电-磁分量同时观测、多频段扫描的数字记录电磁波观测仪器,这些观测仪器的研发为收集更准确的异常信息奠定了基础。此外,各国正在规划建立更加合理的电磁辐射观测台网,扩大地面电磁监测台站的监测范围。由于政府对地震这一块研究的投入的增加,也逐渐在由地面走向空间,一些国家相继发射了用于观测电磁异常的电磁卫星,并取得了一些很重要的成果,卫星观测较地面台站观测有许多明显的优势,这是一个很好的导向,而且对地震预报的发展有很强的实用价值,电磁卫星的发射推动了天地一体观测系统的建立,这为将来的全方位、实时观测创造了有利条件。

3.1 对电磁辐射机理的探讨

对地震电磁辐射的机理及其变化过程进行探索是解决产生地磁异常信息的必经之路,目前大家相对较认可电磁异常是由岩石破裂引起的,但是目前的实验环境较为单一,而地震的孕育是十分复杂、由各种因素共同影响而促发的,因此未来模拟地震破裂过程中,做岩石破裂试验时,需要改变实验条件,例如采用随机荷载、多向加载、调节实验的环境温度等。但是若要对地震电磁辐射的机理进行准确的认识,还需要从地震的孕震过程出发,结合多次震例的电磁辐射变化来研究电磁辐射的前兆特征形态,统计异常信息存在的规律特征,然后通过人工可控震源观测系统,大范围、连续观测地下 8~25 km 深处地壳介质的各种物理化学性质和现象,从而获取到丰富的包括电磁辐射现象的地壳深部的观测资料,将地震电磁辐射前兆与其他前兆之间在特征上存在的关系进行研究。

3.2 天地一体化观测系统的建立

虽然目前有几个国家的电磁卫星作为观测手段,但并未形成一个系统的观测,观测到的数据还是存在着不连续,将地面观测与空间观测结合起来,充分利用地面台站和电磁卫星观测的各自的优势,对岩石圈-大气层-电离层三圈耦合、不同圈层对信号的扰动作用进行研究必然是未来地震震前预测的发展趋势。单颗卫星的观测受到卫星高度和卫星寿命等多方面的影响,单颗卫星每天只能监测特定地区几分钟,若多国之间能够相互合作,同时运行几颗卫星,就可以更频繁地监测一个特定地区,如果在一些地区连续观测到一

个扰动,将它作为震前异常是有一定的可靠度的。因此,建立一个较为完善和全面的卫星网络来对电离层的扰动进行连续的观测是十分有必要的。此外,发展与重力、红外遥感等卫星结合起来进行观测是未来地震电磁卫星的发展方向。

3.3 提出解决异常信息识别的方法

目前如何区分地电场与地磁场正常与异常是一个亟待解决的问题,笔者认为将同纬度、同经度地电台和地磁台记录的数据进行相比,若出现局部或区域性变化,则可将其作为与强震相关的异常现象;对空间电离层的正常与异常的区分,除利用密度检验、滑动时窗进行异常识别等传统方法外,笔者认为可以以电磁波形数据为基础,提取其均值、均方差、峰度和偏度等作为特征信息,利用模糊评价进行异常识别是未来可以发展的一个方向。

3.4 建立危险度计算公式和长期观测

电磁学科的发展,需要同其它学科建立联系,因此分别建立电磁学科、地下流体、重力场、地表形变、地球化学、地表温度等异常的累积危险度计算公式,对当前存在的各项异常,划定其存在的危险区域并按相应公式计算出各自的危险度,将同一区间各种异常的危险度累加得到该区域最终的危险度,伴随前兆的不断变化,将变化的危险度作出动态变化图像,根据设定的危险度进行评判后,得到该区发生地震的概率大小。目前对出现电磁异常的判断缺乏长期的总结,缺少对异常的准确把握,缺少对异常判断的坚持,如 2007 年初曾对四川地区提出中期预报意见,但是直到 2007 年年底也没有发生强震,于是就放弃了原来的判断。帕克菲尔试验场的失败也说明了坚持有理有据的判断的重要性。

4 结语

目前,世界公认的成功进行短临预报的地震就只有海城地震,几十年来,地震预报取得了一些进展,全世界的相关研究者均提出不同的方法来预报地震,甚至有的学者认为地震是不能预报的,地震地磁异常作为短临预报的一个特征,笔者认为它能够为做好短临预报提供重要的线索。但就整个地震预报这门科学的发展而言,目前对地震电磁辐射的相关研究仍处在探索阶段,尽管我们已经搜集到了大量的数据,在实际的观测中往往是观测到电磁异常后就会在短时间内发生地

震,但是也有很多时候观测到电磁异常后并没有发生地震,这就使得对电磁异常的研究不能与地震的发生一一对应,对于一些电磁异常的出现,需要深入研究产生的原因,将地震导致的异常与其他原因引起的异常区分开来,同时对地震产生的电磁异常的特点进行总结。目前在时间、地点、震级的预报方面还尚未弄清楚,对全世界的科学家而言,还需要进行长期深入的研究,做好地震预报的道路还很遥远。

致谢:感谢中国地震局地震预测研究所张学民研究员在本文形成的过程中提供部分原图;感谢中国地震局兰州地震研究所助理研究员范莹莹提供的部分原图;感谢匿名审稿专家给予的宝贵意见

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] 陈颢,李娟. 2001年地球物理学的一些进展[J]. 球物理学进展,2003,18(1):1-4.
- [3] 陈运泰,滕吉文,张中杰. 地球物理学的回顾与展望[J]. 地球科学进展,2001,16(5):634-642.
- [4] 吴中海,赵根模. 地震预报现状及相关问题综述[J]. 地质通报,2013,32(10):1493-1512.
- [5] 张国民. 我国地震监测预报研究的主要科学进展[J]. 地震,2002,22(1):2-8.
- [6] 尼鲁帕尔·买买吐孙,张永仙. 地震电磁卫星电离层扰动研究进展综述[J]. 地震,2012,32(1):103-117.
- [7] 赵国泽,陈小斌,蔡军涛. 电磁卫星和地震预测[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):667-673.
- [8] Bleier T, Freund F. Earthquake [earthquake warning systems][J]. IEEE Spectrum, 2005, 42(12):22-27.
- [9] 郝锦琦,冯锐. 岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J]. 地球物理学报,2002,45(3):426-434.
- [10] 王继军,赵国泽,詹艳,等. 中国地震电磁现象的岩石实验研究[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):22-28.
- [11] 龚强,胡祥云,张胜业,等. 岩石破裂电磁辐射频率与弹性参数的关系[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1523-1528.
- [12] 魏荣强,臧绍先. 岩石破裂强度的温度和应变率效应及其对岩石圈流变结构的影响[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1730-1737.
- [13] 王立凤,王继军,陈小斌,等. 岩石破裂电磁辐射(EMR)现象实验研究[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):715-719.
- [14] Gokhberg MB, Steblou GM, Shalimov SL, et al. Ionospheric response to submarine earthquake of March 11, 2011, in Japan according to GPS observations [J]. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011, 47(8):929-940.
- [15] Sobisevich AL, Kanonidi KK, Sobisevich LE, et al. On a class of electromagnetic disturbances preceding strong earthquakes [J]. Seismic Instruments. 2010, 46(3):228-233.
- [16] 范莹莹,杜学彬, Jacques, 等. 汶川 M_s 8.0 大震前的电磁现象[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12):2887-2898.
- [17] 关华平,韩凤银,肖武军,等. 超低频(ULF)电磁辐射观测与资料处理方法[J]. 地震, 2003, 23(2):85-93.
- [18] 钟李彬,吕茜,董立杰. 成都地铁运行对成都台电磁观测的影响[J]. 四川地震, 2015(1):29-32.
- [19] Leonard RS, Jr RAB. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70(5):1250-1253.
- [20] 刘静,黄建平,张学民,等. 基于 DEMETER 卫星原位等离子体参量的震前异常提取方法研究及震例分析[J]. 地震学报, 2013, 35(1):72-83.
- [21] Weaver PF, Yuen PC, Prolls GW, et al. Acoustic coupling into the ionosphere from seismic waves of the earthquake at Kurile Islands on August 11, 1969 [J]. Nature, 1970, 226(5252):1239-1241.
- [22] Kan O, Takeuchi N, Utsugi M, et al. Direct magnetic signals from earthquake rupturing: Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan [J]. Earth & Planetary Science Letters. 2009, 305(1):65-72.
- [23] 杨少峰,陈宝生,杜爱民,等. 新疆喀什地区地震前地磁脉动异常分析[J]. 地球物理学报, 1998, 41(3):332-341.
- [24] 赵必强,万卫星,王敏,等. 震前电离层扰动研究进展及汶川地震前电离层变化[J]. 科技导报, 2008, 26(11):30-34.
- [25] 高曙德,汤吉,杜学彬,等. 汶川 8.0 级地震前后电磁场的变化特征[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3):512-525.
- [26] 汤吉,詹艳,王立凤,等. 5月12日汶川 8.0 级地震强余震观测的电磁同震效应[J]. 地震地质, 2008, 30(3):739-745.
- [27] Sarkar S, Gwal AK. Satellite monitoring of anomalous effects in the ionosphere related to the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008 [J]. Natural Hazards, 2010, 55(2):321-332.
- [28] 范莹莹,解滔,安张辉,等. 2008年汶川 M_s 8.0 与 2010年玉树 M_s 7.1 地震前电磁现象研究[J]. 地震学报, 2014, 36(2):275-291.
- [29] 刘君,杜学彬, Zlotnicki J, 等. 几次大震前的地面和空间电磁场变化[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11):2885-2897.
- [30] 张学民,丁鉴海,申旭辉,等. 汶川 8 级地震前电磁扰动与电磁立体监测体系[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1):1-8.
- [31] 何宇飞. 地震电磁前兆的观测[J]. 国际地震动态, 2009(3):28-36.
- [32] Bliokh P. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2000, 62(3):225-227.

- [33] 郭宝昌,邹环宇,纪东梅,等.电磁辐射异常与岫岩地震[J]. 防灾减灾学报,2001,17(2):23-27.
- [34] 李永生,李开春.大震前后电离层的扰动[J].地震学报,1987(1):103-109.
- [35] Pulinets S,Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes[J]. 2004,4(5/6):697-702.
- [36] 方涵先,翁利斌,王威,等.电离层在地震短临预报中的应用[J].科学技术与工程.2010,10(27):6 698-6 706.
- [37] 张学民,刘静,申旭辉,等.2005年3月28日苏门答腊8.6级地震前的电离层扰动[J].地球物理学报,2010,53(3):567-575.
- [38] 刘静,万卫星,黄建平,等.智利8.8级地震的震前电子浓度扰动[J].地球物理学报,2011,54(11):2 717-2 725.
- [39] 李新乔,马宇蓓,王焕玉,等.空间电磁卫星的粒子探测与汶川地震[J].地球物理学报,2010,53(10):2 337-2 344.
- [40] 安张辉,范莹莹,刘君,等.汶川 M_s 8.0地震前DEMETER卫星探测的离子温度变化分析[J].地震学报,2010,32(6):754-759.
- [41] 刘静,张学民,申旭辉,等.九江地震前DEMETER卫星观测到的电离层异常[C].北京:中国地震学会空间对地观测专业委员会成立大会暨学术研讨会论文集,2008.
- [42] 颜蕊,王兰炜,胡哲,等.利用DEMETER卫星数据分析强震前后的电离层异常[J].地震学报,2013,35(4):498-511.
- [43] 王毅,曹群生,袁肖.地震期间的超低频电磁波传播异常研究[J].南京航空航天大学学报,2013,45(4):479-484.
- [44] 王毅,曹群生,苏冰柏.地震期间的舒曼谐振异常研究[C].北京:全国电波传播学术讨论年会,2011.
- [45] Hayakawa M,Ohta K,Nickolaenko AP,et al. Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-chi earthquake in Taiwan [J]. Annales Geophysicae,2005,23(4):1 335-1 346.
- [46] 欧阳新艳,娄文宇,申旭辉,等.中国大陆区域6级以上地震舒曼谐振异常特征分析[J].地震,2015,35(1):123-130.
- [47] 苗园青,张学民,申旭辉,等.云南地区震前舒曼谐振异常初步分析[J].Earthquake Research in China,2011,27(3):290-299.
- [48] 周洪娟,于海雁,曹丙霞,等.日本 M_w 9.0地震前的舒曼谐振异常分析[J].地震学报,2013,35(3):400-409.
- [49] 欧阳新艳,张学民,申旭辉,等.云南地区观测的舒曼谐振背景变化特征[J].地球物理学报,2013,56(6):1 937-1 944.
- [50] Frasersmith AC,Helliwell RA. The Stanford University ELF/VLF radiometer project Measurement of the global distribution of ELF/VLF electromagnetic noise [J]. Proc. IEEE Internat symp electromagn compat,1985:305-311.
- [51] 于海雁,周洪娟,乔晓林.汶川 M_s 8.0地震前ELF异常电磁辐射传播分析[J].地震学报,2010,32(6):641-648.
- [52] 郭自强,周大庄,马福胜,等.岩石破裂中的电子发射[J].科学通报,1987,32(11):879.
- [53] 刘煜洲,刘因,王寅生,等.岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理[J].地震学报,1997(4):418-425.
- [54] 钱书清,张以勤,曹惠馨,等.岩石破裂时产生电磁脉冲的观测与研究[J].地震学报,1986(3):75-82.
- [55] 黄清华.地震电磁信号传播的控制模拟实验[J].科学通报,2005,50(16):1 774-1 778.
- [56] 苏维嘉,齐洪涛,苏畅.岩石受力过程表面电荷变化的实验[J].辽宁工程技术大学学报,2013,32(12):1 651-1 654.
- [57] 黄清华.地震电磁观测研究简述[J].国际地震动态,2005(11):2-5.
- [58] Parrot M. The micro-satellite DEMETER [J]. Journal of Geodynamics,2002,33(4):535-541.
- [59] 汤吉,赵国泽,陈小斌,等.地震电磁卫星载荷及现状[J].地球物理学进展,2007,22(3):679-686.
- [60] 卓贤军,赵国泽,王继军,等.地震预测中的电磁卫星[J].大地测量与地球动力学,2005,25(2):1-5.
- [61] 杨芳,申旭辉,吴云,等.电磁环境卫星系统及在地震短临预测中的应用[J].航天器工程,2008,17(1):68-73.
- [62] 张振霞,李新乔,吴书贵,等.智利地震前DEMETER卫星对空间高能粒子的观测[J].地球物理学报,2012,55(5):1 581-1 590.
- [63] Zhang X,Shen X,Zhao S,et al. The characteristics of quasistatic electric field perturbations observed by DEMETER satellite before large earthquakes[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2014,79(2):42-52.
- [64] Sarkar S,Gwal AK,Parrot M. Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2007,69(13):1 524-1 540.
- [65] Rozhnoi A,Solovieva M,Molchanov O,et al. Variations of VLF/LF signals observed on the ground and satellite during a seismic activity in Japan region in May-June 2008[J]. 2010,10(3):529-534.
- [66] Parrot M,Berthelier JJ,Lebreton JP,et al. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c. 2006,31(4):486-495.
- [67] Bhattacharya S,Sarkar S,Gwal AK,et al. Electric and magnetic field perturbations recorded by DEMETER satellite before seismic events of the 17th July 2006 M 7.7 earthquake in Indonesia[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2009,34(5):634-644.
- [68] Shen X,Zhang X,Wang L,et al. The earthquake-related disturbances in ionosphere and project of the first China seismo-electromagnetic satellite[J]. Earthquake Science,2011,24(6):639-650.
- [69] 陈恩平,陆洪,张学民. DEMETER卫星监测的极低频和超低频电磁场数据分析[J].地震学报,2013,35(4):512-519.

- [70] 泽仁志玛,申旭辉,曹晋滨,等. 强震前 ELF/VLF 磁场的扰动特征统计研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3699-3708.
- [71] 曾中超,张蓓,方广有,等. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 11-19.
- [72] 何宇飞,杨冬梅,钱家栋,等. DEMETER 卫星观测到与地震相关的电离层电子密度变化[C]. 北京:中国地震学会地震电磁学专业委员会换届暨学术研讨会摘要集, 2011.
- [73] 邓柏昌,魏焕,屈晔,等. 中强地震发生前电磁扰动机制的研究[J]. 地震工程学报, 2009, 31(3): 231-236.
- [74] 陈化然,杨冬梅,李琪,等. 1980 年以来我国电磁辐射地震前兆信息的观测与研究 [J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(2): 180-186.
- [75] 范小平,杨从杰,李清河,等. 远场地震电磁辐射强度与孕震震级关系[J]. 地震工程学报, 2008, 30(3): 208-213.
- [76] 曹惠馨,钱书清,吕智. 岩石破裂过程中超长波段的电、磁信号和声发射的实验研究 [J]. 地震学报, 1994(2): 235-241.
- [77] 郝锦琦,钱书清,高金田,等. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常[J]. 地震学报, 2003, 25(1): 102-111.
- [78] 郭自强,钱书清. 岩石破裂中的电声效应[J]. 地球物理学报, 1999, 42(1): 74-83.
- [79] 萨多夫斯基. 地震的电磁前兆 [M]. 北京:地震出版社, 1986.
- [80] 徐为民,吴培稚. 人工地震的电磁效应[J]. 地震, 1983(1): 31-33.
- [81] 徐为民,童莞生,吴培稚. 岩石破裂过程中电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 1985(2): 67-76.
- [82] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1472-1477.
- [83] 钱书清,任克新,吕智. 伴随岩石破裂的 VLF, MF, HF 和 VHF 电磁辐射特性的实验研究[J]. 地震学报, 1996(3): 346-351.
- [84] Frid V. Electromagnetic radiation associated with induced triaxial fracture in granite [J]. Philosophical Magazine Letters, 1999, 79(2): 79-86.
- [85] 钱书清. 地震电磁辐射与地震预报的观测实验研究[J]. 国际地震动态, 2009(7): 57-62.
- [86] 樊勇,赵伏军,张孟举,等. 静力破碎花岗岩电磁辐射信号的分形特征[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017(1): 7-11.
- [87] 宋晓艳,李忠辉,王恩元. 岩石受载破坏裂纹扩展带电特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1941-1945.
- [88] 朱元清,罗祥麟,郭自强,等. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(5): 594-601.
- [89] 萧佐. 50 年来的中国电离层物理研究[J]. 物理, 1999, 28(11): 661-667.
- [90] 袁浩浩,顾左文,陈斌,等. 美国的震磁观测与研究[J]. 地震研究, 2014, 37(1): 163-169.
- [91] 詹志佳,白彤霞,高金田,等. 唐山地震前后地磁短周期变化的分析[J]. 地震研究, 1987(3): 68-79.
- [92] 梁子彬,石玉成,蔡红卫. 唐山地震前兆场的分布特征 [J]. 高原地震, 1995(3): 40-44.
- [93] 丁鉴海,索玉成,余素荣. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系[J]. 空间科学学报, 2005, 25(6): 536-542.
- [94] 张学民,翟彦忠,郭建芳,等. 2004 年印尼 8.7 级强震前昌黎台的远场电性异常特征探讨[J]. 地震, 2006, 26(4): 82-93.
- [95] Bernardi A, Fraser-Smith AC, McGill PR, et al. ULF magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 1991, 17(9): 45-63.
- [96] 杨兆旺,沈海宝. 电磁辐射异常信息的分析与思考[J]. 防灾减灾工程学报, 1997(4): 16-21.
- [97] 谢凡,滕云田,徐学恭,等. 天津轨道交通对地磁观测干扰的影响研究[J]. 地震学报, 2011, 33(2): 252-261.
- [98] 安张辉,杜学彬,元丽华,等. HHT 方法在受城市轨道交通干扰地电场观测数据中的应用[J]. 地震学报, 2011, 33(2): 243-251.
- [99] Yang H, Pasko VP, Sütöri G. Seasonal variations of global lightning activity extracted from Schumann resonances using a genetic algorithm method[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(D1): 328-334.
- [100] 马钦忠,冯志生,宋治平,等. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析[J]. 地震学报, 2004, 26(3): 304-312.
- [101] 张建国,刘晓灿,姚丽,等. 汶川 8.0 级大地震前电磁扰动异常变化特征初步研究 [J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(5): 56-60.
- [102] 张小涛,陈化然,马新欣,等. 玉树 M_s 7.1 地震前地电场异常变化特征分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(s1): 38-42.
- [103] 李军辉,何康,李玲利,等. 高邮 4.9 级地震前滁州地震台电磁扰动异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2014, 35(5): 108-112.
- [104] 马钦忠,方国庆,李伟,等. 芦山 M_s 7.0 地震前的电磁异常信号[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 717-730.
- [105] 刘君,安张辉,范莹莹,等. 芦山 M_s 7.0 与岷县漳县 M_s 6.6 地震前电磁扰动异常变化 [J]. 地震, 2015, 35(4): 43-52.
- [106] 席继楼,关华平,刘超,等. 2015 年尼泊尔 8.1 级地震前后拉萨地电场观测数据变化分析[J]. 地震, 2016, 36(2): 1-13.
- [107] Pulnits S, Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [108] Cussac T, Clair MA, Ultré-Guerard P, et al. The Demeter microsatellite and ground segment [J]. Planetary and Space Science, 2006, 54(5): 413-427.
- [109] Serebryakova ON, Bilichenko SV, Chmyrev VM, et al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites [J]. Geophysical Research Letters, 1992, 19(2): 91-94.

- [110] Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, et al. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(19): 3 113–3 116.
- [111] Parrot M. Statistical analysis of automatically detected ion density variations recorded by DEMETER and their relation to seismic activity [J]. *Annals of geophysics = Annali di geofisica*, 2012, 55(1): 149–155.
- [112] 张东和, 李强, 覃健生, 等. 日照边缘区域电离层对耀斑的响应特点研究 [J]. *空间科学学报*, 2006, 26(5): 321–325.
- [113] 闫相相, 单新建, 曹晋滨, 等. 利用 DEMETER 卫星数据统计分析全球 $M_w \geq 7.0$ 地震的电离层电子浓度异常 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 364–376.
- [114] 张学民, 泽仁志玛, 申旭辉, 等. 地震前后电离层截止频率处电场频谱强度变化分析——以 2006 年汤加 M_w 8.0 地震为例 [J]. *地震学报*, 2011, 33(4): 451–460.
- [115] Zhang Xuemin, Liu Jing, Zhao Biqiang, et al. Analysis on ionospheric perturbations before Yushu earthquake (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(6): 822–829.
- [116] 张学民, 刘静, 申旭辉, 等. 2005 年 3 月 28 日苏门答腊 8.6 级地震前的电离层扰动 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(3): 567–575.
- [117] 张学民, 杨杰, 郭广猛, 等. 海地地震前电离层电子含量数据异常分析 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2012, 58(5): 406–410.
- [118] 王泽民, 孙伟, 安家春. 2015–04–25 尼泊尔 M_s 8.1 地震前后电离层 VTEC 异常变化分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(2): 133–137.
- [119] 王劲松. 空间天气灾害 [M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [120] 马新欣, 林湛, 陈化然, 等. 基于 COSMIC 掩星数据探测汶川 M_s 8.0 地震震前电离层异常 [J]. *地震学报*, 2013, 35(6): 848–855.
- [121] 熊晶, 吴云, 周义炎, 等. 2008 年汶川地震前电离层异常研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(2): 28–31.
- [122] 张建国, 焦立果, 刘晓灿, 等. 汶川 M_s 8.0 级地震前后 ULF 电磁辐射频谱特征研究 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1 253–1 261.
- [123] 田山, 张磊, 王建国, 等. 汶川、玉树大地震前的地电场异常 [J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 878–887.
- [124] 牛志仁, 张逸, 麻水歧. 唐山 7.8 级地震前兆异常的物理解释 [J]. *地震工程学报*, 1979(2): 11–18.
- [125] 罗兰格. 我国地震综合预报方法研究的回顾与展望 [J]. *华北地震科学*, 2002, 20(4): 1–18.
- [126] 李均之, 陈维升, 夏雅琴. 综合多学科观测方法预测强地震 [J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(7): 778–784.
- [127] 杨冬梅, 何宇飞, 张素琴. 玉树地震及其余震前的地磁场总强度变化 [C]. 北京: 中国地震学会地震电磁学专业委员会换届暨学术研讨会摘要集. 2011.
- [128] 熊晶, 周义炎, 吴云. 玉树 M_s 7.1 地震前电离层 VTEC 异常 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(5): 24–27.
- [129] 李旺, 郭金运, 于学敏, 等. 玉树 M_w 7.1 地震前电离层异常扰动初步分析 [J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(4): 11–16.
- [130] 姚璐, 申旭辉, 张学民, 等. 玉树 M_s 7.1 地震前电离层异常扰动分析 [J]. *地震*, 2014, 34(3): 74–85.
- [131] 高玲, 邢成起. 北京五里营井流体前兆观测到的两次异常及讨论 [J]. *地震地质*, 2011, 33(3): 644–652.
- [132] 刘雷, 杜建国, 周晓成, 等. 青海玉树 M_s 7.1 地震震后断层流体地球化学连续观测 [J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 888–893.
- [133] 祝意青, 刘芳, 郭树松. 2010 年玉树 M_s 7.1 地震前的重力变化 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(1): 1–4.
- [134] 刘云华, 单新建, 屈春燕, 等. 青海玉树 7.1 级地震地表形变场特征研究 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2010, 40(10): 1 310–1 320.
- [135] 孟国杰, 苏小宁, 徐婉楨, 等. 基于 GPS 观测研究 2010 年青海玉树 M_s 7.1 地震震后地壳形变特征及其机制 [J]. *地球物理学报*, 2016(12): 4 570–4 583.
- [136] 魏从信, 张元生, 郭晓, 等. 玉树 7.1 级地震热红外与长波辐射异常 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2 444–2 452.
- [137] 袁伏全, 谢庆和, 周海生. 2010 年玉树 M_s 7.1 级地震前热红外异常特征研究 [J]. *高原地震*, 2015, 27(a12): 41–46.
- [138] 解杨春, 龚平, 熊宗龙. 基于 MODIS 数据探讨玉树 M_s 7.1 地震前后温度变化 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(s1): 25–27.
- [139] 卢显, 孟庆岩, 顾行发, 等. 基于 HJ-1B 卫星的玉树 M_s 7.1 地震地表温度异常识别 [J]. *中国地震*, 2015, 31(4): 679–687.