



# 中国地震电磁研究现状和发展趋势

赵国泽<sup>1\*</sup>, 张学民<sup>2†</sup>, 蔡军涛<sup>3†</sup>, 詹艳<sup>1†</sup>, 马钦忠<sup>4</sup>, 汤吉<sup>1</sup>, 杜学彬<sup>5</sup>, 韩冰<sup>1</sup>, 王立凤<sup>1</sup>, 陈小斌<sup>3</sup>, 肖骑彬<sup>1</sup>, 孙翔宇<sup>1</sup>, 董泽义<sup>1</sup>, 王继军<sup>1</sup>, 张继红<sup>6</sup>, 范晔<sup>1,7</sup>, 叶涛<sup>3</sup>

1. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

3. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

4. 上海市地震局, 上海 200062;

5. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000;

6. 山东省地震局, 济南 250014;

7. 中国地震台网中心, 北京 100045

\* 通讯作者, E-mail: zhaogz@ies.ac.cn

† 同等贡献

收稿日期: 2021-08-26; 收修改稿日期: 2022-02-22; 接受日期: 2022-04-02; 网络版发表日期: 2022-05-20

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC1500103、2018YFC1503506)、中央公益性科研院所基本科研业务专项项目(编号: IGCEA1919)、国家自然科学基金项目(批准号: 41374077、42074086、41674156)和国家重大科学技术基础设施项目(编号: 15212Z0000001)资助

**摘要** 地震电磁法作为重要的地球物理方法, 在地震前兆异常观测中发挥了重要作用, 是可能首先取得地震预测突破性进展的主要方法之一. 我国“九五”、“十五”计划实施的数字化改造和网络化建设升级优化了原有观测系统, 提升了观测数据质量, 丰富了地震电磁观测信息, 增强了地震电磁异常的分析能力和时效性, 为地震电磁研究事业的腾飞和新技术的发展起到了重要的支撑作用. 21世纪以来我国发射的专门用于地震监测的电磁卫星 CSES和建成的大功率人工源极低频电磁CSELF台网进一步推动了地震电磁异常信息的全时空立体监测和对异常信息的识别和捕捉的应用研究. 文章基于几十年来我国观测的大量地震前兆异常实例、物理和数值模拟以及异常机理研究成果, 分类梳理了地震电磁异常现象的特点和各种电磁观测方法的优势和弱点. 最后针对地震电磁预测研究面临的有关问题, 借鉴国内外的最新发展, 提出了地震电磁研究的发展趋势和未来需要攻关的方向.

**关键词** 地震电磁, 地震异常, 电磁观测, 试验和模拟, 地震预测, 展望

## 1 引言

20世纪早中期, 中国、苏联、日本等分别启动了国家地震预报研究计划(别洛烏索夫等, 1955; 陈运泰等, 2001), 各国编制了本国地震分布和区划图(别洛烏

索夫等, 1955; 李善邦, 1957; 梅世蓉, 1960), 既用于中、长期地震预报研究, 也促进了新的学科分支“地震地质”等的发展(傅承义, 1963).

地震中短期和临震预报是减轻地震灾害最有效的方法, 但也是最困难的研究领域(马宗晋等, 1982; 张国

中文引用格式: 赵国泽, 张学民, 蔡军涛, 詹艳, 马钦忠, 汤吉, 杜学彬, 韩冰, 王立凤, 陈小斌, 肖骑彬, 孙翔宇, 董泽义, 王继军, 张继红, 范晔, 叶涛. 2022. 中国地震电磁研究现状和发展趋势. 中国科学: 地球科学, 52(8): 1499–1515, doi: 10.1360/SSTe-2021-0271

英文引用格式: Zhao G, Zhang X, Cai J, Zhan Y, Ma Q, Tang J, Du X, Han B, Wang L, Chen X, Xiao Q, Sun X, Dong Z, Wang J, Zhang J, Fan Y, Ye T. 2022. A review of seismo-electromagnetic research in China. Science China Earth Sciences, 65(7): 1229–1246, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9930-5>

民, 1987; 陈颢, 1988). 自1966年河北邢台地震以来, 我国启动了多种地震前兆异常监测方法(刘国栋等, 1984; 刘国栋, 1994; 陈有发和余存顺, 1997; 陈运泰, 2015), 20世纪70~80年代建设了包括“土地电”在内的一些地震电磁监测技术, 在地震监测研究中发挥了重要作用。

过去几十年, 电磁法观测到大量的地震前兆异常现象, 被认为是最有可能首先取得地震短临预测突破性进展的地球物理方法之一(Johnston和Uyeda, 1999; Bleier和Freund, 2005). 我国在“七五”(1986~1990)计划期间对原有人工观测、模拟记录较低水平的台站优化、完善的基础上, 于“九五”和“十五”计划期间(1996~2005年)又进行了数字化改造和网络化建设, 为地震电磁研究事业的腾飞和新技术的发展起到了重要的支撑作用(王琛和王延艳, 2011). 这期间, 首次在我国提出并实施卫星技术CSSES(China Seismo-Electromagnetic Satellite)(赵国泽, 2003; 卓贤军等, 2005)和大功率人工源极低频电磁技术CSELF(Control Source Extremely Low Frequency)(赵国泽和陆建勋, 2003; 赵国泽等, 2003)开展空间电磁和人工源电磁信号监测研究计划, 建设地震前兆立体电磁监测平台, 受到国内外专家和有关部门的高度重视。

自20世纪50~60年代以来, 我国与国际上基本同步开展研究, 而且积累了更丰富的地震电磁异常观测研究实例和数据, 为地震前兆监测研究科学作出了积极贡献, 所发表的与地震电磁研究相关的论文达数千篇以上, 仅最近十年的论文数就达约2000篇。

本文将重点介绍20世纪50~60年代以来我国地震电磁研究取得的成果和新进展。由于地震的发生过程和地震前兆现象的复杂性, 通过观测和实验获得日益丰富的前兆异常信息和机理研究进展的同时, 也出现了一些不一致或矛盾的结果和认识。本文无意推崇某种观测方法或观点, 而是为了借鉴历史经验, 少走弯路, 争取尽早使“可操作的地震预测预报”取得突破性进展(陈运泰, 2015)。

## 2 地震电磁异常观测

### 2.1 地电阻率观测

地电阻率观测方法是引入矿床勘探中的四极对称电极系的直流电阻率法, 较早用于地震电磁异常监测

中(赵玉林和钱复业, 1978; 傅良魁, 1983). 一般供电电极距AB长约为1200m, 测量电极距MN为AB/3, 现全国已建有80多个台站(杜学彬, 2010; 杜学彬等, 2017). 1966年邢台地震以来, 积累了大量的震前地电阻率异常资料, 尤其是在7.0级以上地震前, 邻近震中的台站记录地电阻率均呈现了典型的异常下降特点(钱复业和赵玉林, 1980; 杜学彬, 2010). 例如图1展示了2008年5月12日汶川 $M_s$ 8.0地震前3个台站出现的电阻率同步下降变化. 统计分析表明, 异常下降幅度和持续时间与震中距、震级大小表现出较好的线性统计关系, 是地震前兆观测中7级及以上地震前异常特性可重复的少有的观测量, 中短期预测优势更明显, 在强震趋势分析中占有重要位置. 但震前十几天内异常变化的明显加速或者转折只在个别震例中有所显示, 难以判断异常结束时间并做出临震预测。

地电阻率观测的不足之处在于占地较广(AB极距为1200m), 在电极埋设较浅时易受到如降雨、灌溉、金属管道铺设等因素的影响, 容易与地震前兆异常混淆. 为克服浅表层可能的非地震因素干扰影响, 近年来加大了对深井观测和交流电阻率测量技术的研究应用(金安忠, 1981; 汪晓东和关华平, 1992; Ma, 2002; 王兰炜等, 2015; 张磊等, 2015; 毛先进等, 2017; 解滔等, 2018; 刘吉平等, 2019; 樊晓春等, 2019), 期望捕捉到更可靠的反映地下深处介质的电性变化。

### 2.2 大地电磁观测

大地电磁法测量的是频带较宽(一般超出1000~0.001Hz频率范围)的交变电磁场, 在地面同时观测相互垂直的水平电、磁场和垂直磁场分量, 探测深度可达地壳深部和上地幔, 可同时观测空间电磁场和地下电阻率及其变化(国家地震局地质研究所大地电磁测深组和国家地震局兰州地震研究所大地电磁测深组, 1981; 刘国栋等, 1984; 刘国栋和陈乐寿, 1984; 赵国泽等, 1998, 2004, 2007a, 2009, 2012; 陈小斌等, 2008; 陈小斌和郭春玲, 2017). 国际上首先在北美洲圣安德烈斯断裂带3个不同电阻率背景的测点观测到1971年San Fernando 6.4级地震前的异常及其幅度差别(Reddy等, 1976)。

我国早期以流动重复测量的方式先后观测到1976年河北唐山 $M_s$ 7.8地震、四川松潘 $M_s$ 7.2地震和1998年河北张北 $M_s$ 6.2地震之前不同周期范围的电阻

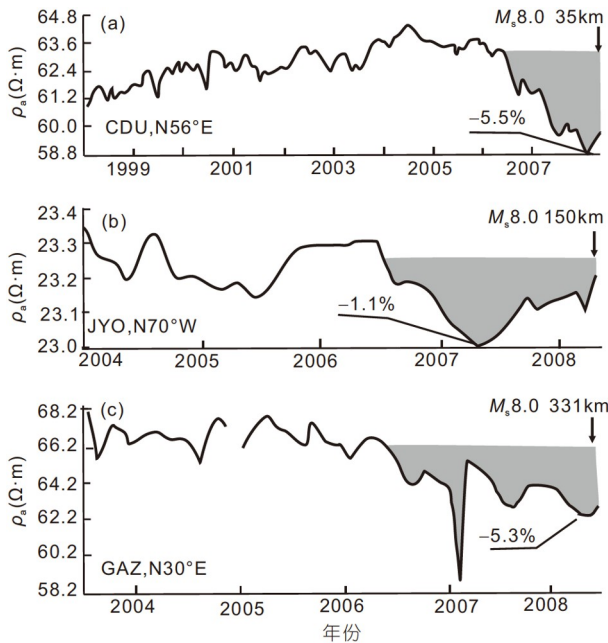


图 1 汶川 $M_{8.0}$ 地震前邻近台站视电阻率同步下降特征

(a) CDU-成都台, 震中距35km, 下降幅度5.5%; (b) JYO-江邛台, 震中距150km, 下降幅度1.1%; (c) GAZ-甘孜台, 震中距331km, 下降幅度5.3%. 据杜学彬(2010)

率减小, 及震后恢复的现象(国家地震局地质研究所大地电磁测深组, 1981; 国家地震局兰州地震研究所大地电磁测深组, 1981; 张云琳等, 1994; 汤吉等, 1998). 为了获得长期连续的观测数据, 2000年之后, 我国先后建成了分布范围较广的由12个台站组成的试验台网和在重点地震监视区由30个台站组成的人工源和天然源极低频电磁(CSELF)观测台网(赵国泽和陆建勋, 2003; 赵国泽等, 2003, 2010a, 2012). 在2009~2010年广西龙滩水库加/卸载期间, 在大地电磁测点观测到电阻率异常变化(王立凤等, 2010). 在2005年云南巧家 $M_{5.6}$ 地震、2013年芦山 $M_{7.0}$ 地震、2013年甘肃岷县-漳县 $M_{6.6}$ 地震和2017年云南大理漾濞 $M_{5.1}$ 地震前后, 由CSELF台站监测到与地震活动相关的电阻率异常波动等现象(Zhao等, 2009; 王立凤等, 2010, 2017; Jiang等, 2020; Han等, 2021). 图2展示了漾濞 $M_{5.1}$ 地震前3个月至震前3天电阻率的异常扰动过程. 作为新技术, CSELF仅有几年的建设时间(孙维怀等, 2012; 牛露等, 2018), 且台站分布稀疏、区域有限, 尚需积累更多观测数据显现其优势.

大地电磁法还以其对震源区电性结构、特别是对地震孕育发生过程中具有诱发或触发作用的含流体的

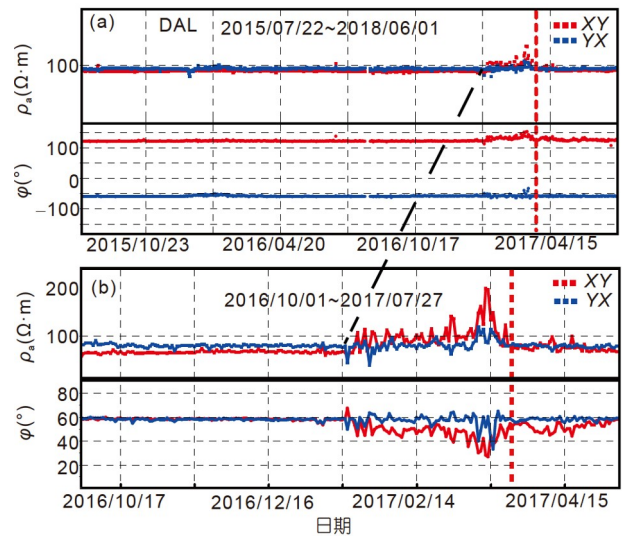


图 2 2017年3月27日云南漾濞 $M_{5.1}$ 地震前大理台(震中距32km)的视电阻率变化

(a) 地震前后两年74Hz两种极化方式的视电阻率和相位曲线(数据误差小于10%); (b) 截取(a)中部分时段, 放大纵向坐标比例. XY、YX分别表示电场沿南北方向和东西方向的视电阻率和相位. 震前约3个月开始脉动式逐步增大, 震前15天达最大, 然后逐步减小, 震前3天恢复到背景值, 相位( $\phi$ )发生对应变化. 参考Han等(2021)

低阻体异常敏感的优势, 在地震区或构造活动区开展了大量的深部结构探测, 取得了丰富的研究成果(Chen, 2007; 金胜等, 2007, 2012; 张乐天等, 2012; 李冉等, 2014; 程远志等, 2015, 2017; 赵凌强等, 2015, 2018, 2019; 韩松等, 2016; Cai等, 2017; 李军等, 2017; 闵刚等, 2017; 王志等, 2017; 于常青等, 2017; 许林斌等, 2017; 叶涛等, 2018, 2021; 夏时斌等, 2019; 杨福平等, 2019; 崔腾发等, 2020; 詹艳等, 2021). 地壳和上地幔低阻层的发育, 严重影响到地壳的变形以及相关区域的地震活动性(赵国泽和赵永贵, 1986; 赵国泽等, 2008, 2012; 詹艳等, 2021). 多数强震发震区显示了高、低阻体交互分布的结构特征, 主震和余震集中分布于岩石孔隙度较大、力学性质较弱区和周围高阻区的边界或转换带附近(刘国栋等, 1983; Zhao等, 1997, 2010, 2012; 邓前辉等, 1998; 詹艳等, 1999, 2004, 2005, 2021; Cai等, 2017; 叶涛等, 2021). 强震前慢滑事件过程中的地下电性和孔隙度变化正在成为重要的研究领域(Honkura等, 2013; Zhu等, 2020). 大地电磁观测是目前最先进的地面地震电磁监测方法之一, 但由于其具有宽频带、观测分量多和较高灵敏性, 对台站周围的电磁环境要求较高.

## 2.3 地磁观测

地磁观测方法是研究地震电磁异常最早的地球物理方法之一, 近一个世纪的研究发现(Stacey, 1964; Yukutake和Tachinaka, 1967; Nagata, 1972; 祁贵仲, 1978), 地磁异常现象与地震活动关系大体可分成两类: 一类是基本磁场观测数据中岩石在应力作用下出现的磁化率和剩余磁性变化为基础的“压磁效应”(祁贵仲, 1978), 另一类是邻近交变场频率范围的观测资料中(包括磁通门磁力仪观测和基本磁场发生变化的部分等)基于感应效应和地下电性变化出现的有关地磁异常现象, 也可称为“感应磁效应”. 两类异常没有严格的频率分布界限, 又可统称为“震磁效应”(中国科学院地球物理研究所第十研究室一组, 1977; 王亶文, 2001; 李琪等, 2006).

地磁场幅度变化较大、频带较宽, 为了识别和提取可能与地震发生有关的异常, 研究发展了一些分析方法, 如地磁脉动、低点位移、地磁日变、舒曼共振等现象研究, 以及地磁场转换函数、小波变换、滑动相关、垂直极化比、谐波振幅比、主成分分析等技术研究, 获取地震前地磁场不同分量、不同周期成份的异常变化(丁鉴海等, 1988, 2005; 陈伯舫, 1998; 龚绍京等, 2001; 韩鹏等, 2009; Huang, 2011; Han等, 2011, 2016; 冯志生等, 2013; Xu等, 2013; 倪晓寅和陈莹, 2016; 李琪等, 2016; Jiang等, 2016, 2020; Mao等, 2020; Chen等, 2021). 现在中国大陆地磁台站有上百个, 震情紧急时还部署磁通门磁力仪(0.005~10Hz)等流动测站或测点进行应急观测(李琪等, 2008). 地磁台站建设对电磁环境要求较高, 数据频带较宽(包括基本场和变化场), 与空间变化因素关联密切, 非震干扰因素较多, 识别异常难度较大, 需要有地面和空间电磁场知识. 研究成果中多显示出震前几个月甚至更短时间内的短临异常, 但实际应用中不少方法预测时限已经逐渐从6个月拓展到了1年甚至1年半的时间(冯志生等, 2013; 李琪等, 2016), 需要加强临震预测研究, 发展低成本广布网的观测模式.

## 2.4 地电场观测

地电场是通过测量某一方向两个接地铅电极之间的电位差, 除以极距后得到电场分布. 1968年后地电场观测在全国曾有很大发展, 20世纪80年代, 我国的“土

地电”随同“三土”(土地电、土地磁、土应力)一并被废除或升级改造. 主要是因为使用的铅电极既是地电流的接收装置, 又因电极电位的极差大而成为地电流的发射装置等, 导致有用信号与干扰成份相混(陈有发和余存顺, 1997). 1981年希腊专家提出的VAN方法采用同一方位布设多道长短极距, 并采用不极化电极作为传感器以及数字化和模拟并举记录方式, 为地电场观测带来了革命性变化, 其突出的预测应用研究引起了全球关于地震预报的关注和争议(Varotsos和Alexopoulos, 1984; 黄清华, 2005; 席继楼等, 2013). VAN方法在我国也得到推广应用, 20世纪90年代专门研制了大地电场仪(毛桐恩等, 1999), 至今已经建设120多个台站, 频率范围为0~0.005Hz, 采取多方位、长短极距结合的布极方式, 以便通过比测实现排除噪声的目的(马钦忠, 2008, 2018; 马钦忠等, 2014, 2017).

地电场包括外空间较大区域的“大地电场”和局部区域的地下“自然电场”两部分(马钦忠, 2008). 地震监测重点关注自然电场变化的测量(谭大诚等, 2019). 由于受到大地电场及其他干扰因素的影响, 地电场虽然在一些强震前也观测到异常现象(张云琳, 1980; 赵玉林和钱复业, 1981), 但在监测预测领域进步相对缓慢. 目前观测到的地电场异常信号包括地震电信号‘SES’(毛桐恩等, 1999; 马钦忠等, 2004, 2009, 2013; 马钦忠, 2008, 2018)、地电场日变(或周期变化)曲线畸变(高曙德等, 2010; 安张辉等, 2013; 谭大诚等, 2019)、优势方位角异常(王伟铭和谭大诚, 2020)和潮汐波异常(张学民等, 2007a)等, 异常大多出现在震前几个月内, 有明显的短临时间特性, 但异常站点具有与构造部位密切相关的“选择性”(黄清华和刘涛, 2006; Huang和Lin, 2010), 较难在不同台站同时记录到来自同一个源的信息.

地电场观测设备安装相对简单, 但随着社会经济的快速发展, 各种干扰显著增强, 原始观测数据质量严重下降. 为提高识别干扰和地震异常的能力, 建议采用增加观测磁场分量实施全信息量观测方法(钱家栋, 1998; 席继楼等, 2013), 以提高地电场方法识别异常的能力和应用效能.

## 2.5 电磁辐射

电磁辐射也称为电磁扰动或电磁波观测. 相对于传统的地磁场和地电场观测, 震源区更关注因摩擦起

电、压电、压磁和动电效应等辐射出的电磁信号(熊皓, 1991; 万战生等, 2007).

电磁辐射观测远远滞后于传统的地磁、地电观测技术, 但因其成本低, 发展比较迅速, 至今我国已经建设200多个电磁辐射台站(陈化然等, 2008). 不像前几种方法那样各自有专门的观测设备, 电磁辐射观测仪器种类达近十种, 观测参数不够统一, 有的仍采用模拟记录(张德齐等, 1981), 多数台站仅观测电场或仅观测磁场(李美和卢军, 2008). 观测探头设置在地面, 或埋设于地下2~3m深, 或者设置在几十、上百米深的井中. 磁场传感器有环状、鞭状或感应磁棒等, 电场电极一般用金属板. 地震电磁辐射场本身频带很宽, 与上述几种方法的观测频带有重叠, 但多数观测限于几到十几kHz以上, 也有观测几MHz或者0.01~10Hz的. 地震电磁辐射波形有脉冲、脉冲丛集或方波形态等. 电磁辐射观测到与地震有关的异常现象达到数百个震例(李美和卢军, 2008; 中国地震局, 2009).

电磁辐射异常出现的时间一般在地震前几小时、几天或几十天, 也有上百天的, 有的异常在震后仍在持续. 一般较强的地震, 异常开始出现的时间较早, 可观测异常的范围也较大, 例如3级以上地震可达100多千米, 5级以上地震可达500km(关华平和刘桂萍, 1995; 李美和卢军, 2008). 异常分布区域相对于震中区有一定的方位性, 并可能与地下构造或断裂分布有关(黄清华和林玉峰, 2010). 电磁辐射场可在大气中(郝建国, 1988)和卫星上观测(赵国泽等, 2007b; 汤吉等, 2007; 肖骑彬等, 2007; 万战生等, 2007). 电磁辐射由于设备种类多、观测标准不一, 其地震监测应用效能仍未能通过有效评估, 在地震短临预测中发挥的作用不明显.

为有效提高电磁辐射观测效能, 很多学者也在开展提高识别干扰和捕捉异常能力的研究, 例如研发同时观测电场和磁场的装置(关华平和肖武军, 2004), 以及增加自至低频(TLF, <3Hz)到特低频(ULF, 300~3000Hz)等交变电磁场范围的测量(郝锦绮等, 2003).

## 2.6 地基电离层及卫星电磁观测

20世纪70年代以来由卫星观测到大量震前电磁异常现象(Gokhberg等, 1983; Gyceb等, 1997; 卓贤军等, 2005; Parrot等, 2006; 赵国泽等, 2007b; 张学民等, 2007b). 特别是2004年6月29日第一个地震电磁卫星

DEMETER(Detection of ElectroMagnetic Emission-Transmitted from Earthquake Region)发射以来, 利用卫星观测数据研究地震电磁异常成为新的热点.

我国学者利用DEMETER卫星等观测数据, 开展了大量研究(张学民等, 2009a), 并由此促进了我国第一颗地震电磁卫星CSES于2018年2月2日成功发射(Shen等, 2018). 卫星观测数据重点是电离层电磁场、原位等离子体参量、等离子体剖面、高能粒子通量等(图3).

卫星数据地震应用研究主要集中在震例和统计分析两个方面(张学民等, 2020), 目前在电磁场、电子密度、离子密度和高能粒子沉降等十余种参量上均观测到丰富的前兆现象, 异常集中出现在震前1周或者几小时内, 显示了典型的短临时间特性. 卫星与地基电磁观测的主要差异在于, 地基观测多以单站时序为主, 而卫星随其飞行位置移动可观测含“时空强”信息的多维度变化, 其分析方法也在单轨道分析的基础上, 发展了重访轨道、纬度归算、空间差值、电磁波极化比、波分布函数等一系列算法. 卫星观测的优势在于, 可绕全球运转, 可获取更多的震例和有关信息, 增加了异常特征分析和检验探测技术的机会, 提高了建立真实客观背景场和识别弱异常的能力. 不足之处在于卫星直接处于电离层中, 更易记录到空间各类扰动信号, 可能会导致异常频次较多, 而且单颗卫星过境时间有限、轨道间隔较大, 仍存在较大的时空空白区. 目前地震电磁卫星2号星已经开始研制, 预计2022年发射, 预期会有较大补益. 同时, 急需发展空间扰动信号的溯源技术, 加强圈层耦合机理模型和电离层异常与地震关系的理论研究.

卫星红外探测也是地震研究的重要领域, 其主要利用地物波谱特征的差异, 使用红外波段的电磁波开展地表及大气温度监测. 中国自20世纪开始卫星红外地震监测研究(强祖基等, 1990), 地壳应力应变、临震地球放气、电荷积累及电磁辐射效应等可能是造成临震热红外异常的主要因素(徐秀登等, 1993, 1995; 强祖基等, 1997). 红外探测在1997年玛尼 $M_s7.9$ 、1976年龙陵 $M_s7.4$ 、唐山 $M_s7.8$ 、松潘 $M_s7.2$ 、1985年乌恰 $M_s7.4$ 、1990年共和 $M_s7.0$ 、2001年昆仑山口西 $M_s8.1$ 、2008年汶川 $M_s8.0$ 、2013年芦山 $M_s7.0$ 地震前一个月内, 长波辐射异常明显增强(刘德富等, 1997, 1999; 刘德富, 2000; 刘德富和康春丽, 2003; 康春丽等, 2003; 吴立

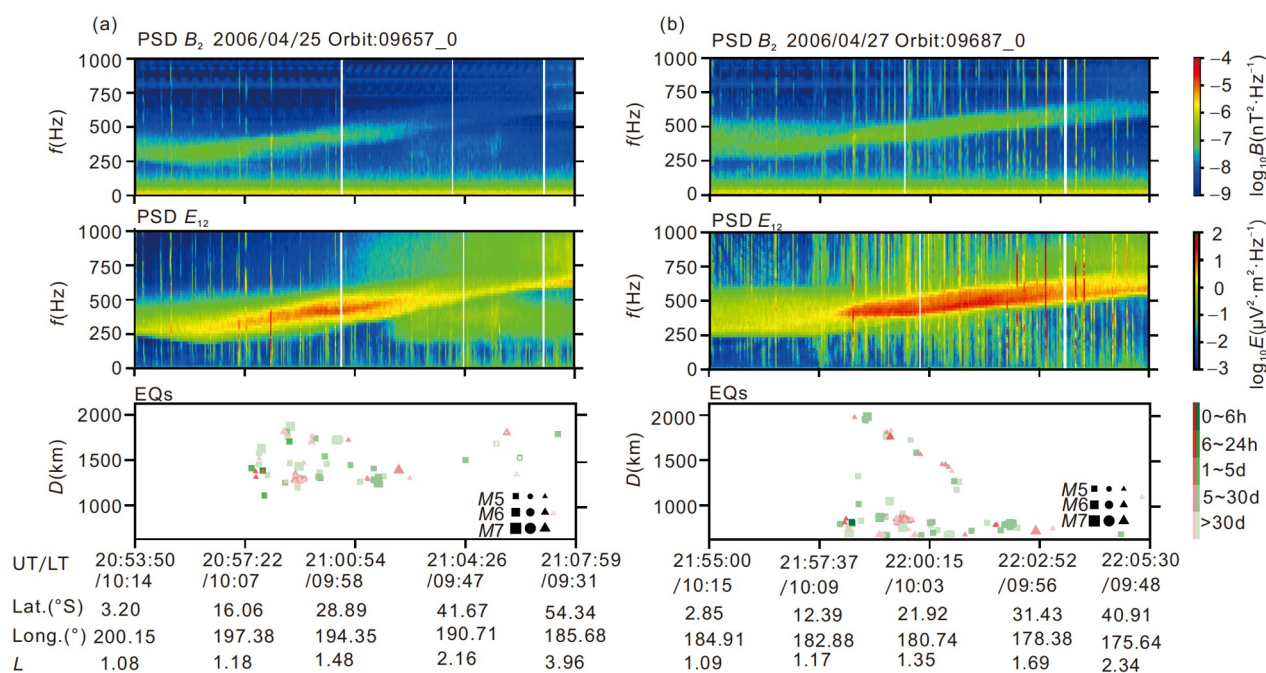


图3 2006年汤加 $M_w 8.0$ 地震前DEMETER卫星观测的电场和磁场截止频率功率谱增强现象

(a) 2006年4月25日观测; (b) 2006年4月27日观测. 上、中图分别为磁场、电场的功率谱密度(PSD),  $B_2$ 示2号磁场传感器记录,  $E_{12}$ 示1、2号电场传感器记录. 下图为距离轨道2000km以内 $\pm 30$ 天内的5级以上地震分布, 其中绿色方框代表发生在轨道记录之前的地震, 红色三角为轨道观测之后发生的地震, 圆圈代表轨道过境时正在发生的地震(未记录到), 颜色越深代表距离轨道观测时间越近. 图下方坐标为轨道的时空位置, 其中UT为世界时, LT为地方时, 最下方的 $L=r/R_E \cos^2(\phi)$ , 其中 $r$ 为卫星高度到地心的距离,  $R_E$ 为地球半径,  $\phi$ 为当地磁纬. 参考张学民等(2011)

新等, 2008). 随着我国遥感卫星和气象卫星的发展, 依托中国自身卫星的研究在走向实用化.

大量地基电离层探测技术也被应用于地震监测预测, 相关的技术手段有电离层垂测、斜测、甚低频电波、舒曼谐振、GNSSTEC等, 这些探测技术利用了不同频段的电磁波在电离层的反射、折射和穿透效应, 探测获得电离层底部至峰值高度不同层位的特征参量, 可以与卫星探测形成较好的互补和链路串联作用(张学民等, 2016). 在地震应用研究中, 既有不同手段的独立研究成果(Le等, 2011; 徐彤等, 2012; 刘静和万卫星, 2014; 欧阳新艳等, 2015), 也有多参量联合的分析结果(张学民等, 2009b, 2014; 安张辉等, 2011; 解滔等, 2013; 赵庶凡等, 2016), 并呈现出震前几天内的典型短临异常特征.

卫星观测数据也可用于地壳上地幔结构研究, 还可通过测量地面人工源信号探索空间电磁场及其异常的传播耦合现象(詹艳等, 2007; 何宇飞等, 2009; Zhao等, 2019). 地面和卫星电磁、红外异常等联合研究, 是岩石圈-大气层-电离层耦合关系研究的有效组合方式

(蔡军涛等, 2007; 肖骑彬等, 2007). 其中卫星电磁观测可能成为地震电磁异常监测重要的研究方向之一.

### 3 物理实验、数值模型和地震电磁异常机理研究

由于天然地震震例数量有限, 物理模拟和数值模型成为地震电磁异常及其产生机理研究的重要组成部分. 这些试验一般与地震波速、应力、应变和流体等参数的试验相结合或同时进行(Beamish, 1982). 我国学者开展了多方面有特色的实验和物理数学模拟研究(郝锦琦等, 2000; 钱书清等, 2003; 陈峰等, 2013; Ren等, 2015, 2016; Gao等, 2016, 2020).

#### 3.1 岩石试验和物理模拟

几乎所有常温环境和高温高压岩石电阻率实验都表明(顾芷娟等, 1992; 王继军等, 2005), 岩石受力破坏引起的电阻率变化比应变的变化对地震变形破坏的敏感度高得多(赵玉林等, 1983). 不论是干岩石或者水饱

和岩石实验, 岩石受力破裂之前, 电阻率普遍经过了缓慢升高-平稳或微小变化-快速下降三个阶段的变化(陆阳泉和温新民, 1980; 吕广廷等, 1984; 张天中等, 1985; 陈大元等, 1987, 1994; 陆阳泉等, 1988; 陈峰等, 1993, 2000a, 2000b, 2002, 2003a, 2003b, 2013; 陈有发, 1993; 安金珍等, 1996; 郝锦琦等, 2000). 试验过程中电阻率增大及减小的变化趋势与地震前后现场观测电阻率异常变化趋势可对比. 在失稳过程中电阻率变化与失稳前的差异, 可能成为岩石破裂最重要的短临前兆特征, 与我国专家提出的亚失稳现象可能有一定关联(马瑾等, 2012; 马瑾, 2016).

岩石磁性实验包括压磁和剩磁效应实验(郝锦琦等, 1993; 徐小荷等, 1998; 钱书清等, 2003), 应力加载致岩石破裂过程中, 在较低频段(0~20Hz)的磁场、自电位和应变的缓慢变化首先在近破裂源处出现, 随裂纹的发展而改变位置. 早、中、晚期三个阶段电磁信号形态有明显差异, 晚期磁场变化由一系列频率约为 10~20Hz 的信号组成(郝锦琦等, 1993, 2003).

电磁辐射的实验较多, 包括室内岩石实验以及爆破实验等. 大量的试验表明(李均之等, 1982; 徐为民等, 1985; 钱书清等, 1986, 1996, 1998; 孙正江等, 1986; 郑联达, 1990; 曹惠馨等, 1994; 郭自强和刘斌, 1995; 金安忠等, 1997; 刘煜洲等, 1997), 岩石破坏过程中都有电磁辐射. 辐射的电磁波波形多数为单个脉冲或连续的脉冲串, 也有阵发性脉冲, 与地震现场台站观测的现象具有相似性. 针对地震发生前电磁异常信号不同步现象, 开展双轴压力试验发现, 位于裂缝处的信号最大; 电信号出现早于磁信号, 且频次多, 幅度大(钱书清等, 1998). 大药量爆破(钱书清等, 1986)、小尺度爆破(金安忠等, 1997)和石灰岩矿(郭自强等, 1999)分别进行的现场试验发现, 不同频率的波出现有先后次序, 也存在地震波激发的二次辐射. 未来采用覆盖频率范围更大的设备, 采用相同或相似的岩石样本和同样的实验环境, 对于认识辐射现象特征和产生机理的研究有益(郝锦琦等, 2003).

岩石实验结果可解释部分前兆电磁现象产生机理, 但因岩石实验受实验条件、岩石尺寸、观测参量和观测频带覆盖宽度等各种因素的影响, 与实际观测地震电磁扰动信号之间仍然存在矛盾或不合之处, 且近10年来实验成果不多. 有针对性地开展可重复性验证的实验将是需要加强的研究方向(王继军等, 2005).

兼顾断层位错理论和压电效应的物理模型, 从理论上证明微小的优势排列可产生与野外观测相当的电磁信号, 支持压电效应可产生地震电磁信号模型(Huang, 2002). Huang和Ikeya(1998)基于物理的相似性和波导模型, 构建了同时考虑电性结构和地壳-大气波导作用的物理模型, 开发了研究地震电磁信号空间分布特征的室内模拟实验方法, 用于解释地震电信号选择性现象. 物理模拟控制实验(Huang和Ikeya, 1999; 黄清华, 2005)发现, 不同模型参数对电磁信号传播有显著影响, 展示了信号远距离传播的可行性与可信性, 为地震电磁信号传播问题的研究提供了合理的传播机制模型和可行的实验途径.

### 3.2 数值模型研究

近20年来, 中国地震局系统内外很多学者针对实际观测到的地震电磁异常现象和岩石模拟实验异常, 开展了更深入的数学模拟和异常产生的机理研究, 在国内外发表了不少有影响力的论文(Gao和Hu, 2010; Ren等, 2010, 2012, 2015, 2016; Hu和Gao, 2011; Gao等, 2016, 2020). 孔隙介质模型产生地震电磁辐射信号的动电效应受到广泛关注, 已在理论和数值模拟研究方面取得显著进展(任恒鑫等, 2007; 任恒鑫, 2009; 高永新和胡恒山, 2009; 高永新, 2010; Gao和Hu, 2010; Ren等, 2010, 2012, 2015, 2016; Hu和Gao, 2011; Gao等, 2016, 2020). 水平分层孔隙介质双偶源激发的震电波场模拟计算表明, 伴随地震纵波的电场强度不仅与纵波幅度和动电耦合系数有关, 还与介质孔隙结构有关(高永新和胡恒山, 2009). 对不同破裂模型震电波场数值模拟研究结果表明, 理论震电信号除了与破裂源的特征相关之外, 对介质结构以及与介质电性相关的参数也非常敏感, 明显不同于地震信号的响应特征, 可用于定量解释地震电磁信号的振幅(Huang等, 2015). 李美等(2015)基于岩石压电效应模型和岩石受压产生的电子-空穴理论, 计算了汶川 $M_s$ 8.0地震前主断层在强压力作用下主破裂前, 断层表面积累的电荷带电量、垂直地-气界面的附加电场, 以及主破裂发生时断层表面的电量、电场强度和断层输出电流, 可为解释实际观测异常提供依据. 龚强等(2006)通过断裂力学理论中的张开位移法计算了岩石破裂过程中裂纹宽度与电磁辐射频率的关系, 研究了辐射频率(在数百kHz到数MHz范围)与弹性参数之间的关系.

国际上比较认可主要有三条地震电离层耦合途径, 即附加直流电场耦合、声重波传播和电磁波传播耦合途径(Hayakawa和Molchanov, 2002; Pulinets和Boyarchuk, 2004). 中国台湾地区学者对直流电场的耦合模型及其与电离层电子密度之间的耦合关系研究作出了突出贡献(Le等, 2011), 通过直流电场耦合的数值模拟计算, 较好地解释了电离层电子密度的扰动分布及其磁共轭效应(Kuo等, 2011, 2014). Zhou等(2017)重点计算了直流电场在不同纬度的电离层传播效应, 显示中高纬地区更利于直流电场的传播耦合. 声重波传播的过程更多是利用同震或震后观测实例进行验证(赵庶凡等, 2015), 目前不多的模拟结果显示, 在考虑能量守恒的情况下, 由于中性粒子的密度随着大气层高度的增加快速减小, 声重波在大气层传播至电离层底界面高度过程中, 其幅度呈指数增大(Shen等, 2013). 赵庶凡等(2011, 2015, 2017)发展了电磁波全波传播模型, 以地表甚低频范围内人工源发射信号为例, 获得了其在电离层中的传播衰减过程, 结果显示频率越低在电离层中的传播损耗越小, 并讨论了各种电离层粒子、地磁场等对电磁波能量在波导和D/E区中衰减的影响规律.

## 4 地震电磁监测研究的发展趋势

### 4.1 多参数综合观测

地震台站和测点观测以及物理、数学模拟研究都表明, 地震前存在可观测的前兆电磁异常现象(马瑾, 2016), 但因为地震孕育过程难以直接测量, 以及不同电磁参量显示前兆异常出现的时间、震中距、频带和异常形态等因不同的地震可能有较大差别, 并且任何参量均不能保证在每次地震前异常会重复出现, 因此仅依据单一或少数手段观测的异常进行地震预测具有较大的局限性.

地震一般发生在先存或新生的断裂处, 断裂带内部和周围介质的力学特性以及电磁特性往往不同, 而且断裂的性质和延伸深度以及长度等也因构造区的差别而不同, 即使同一个断裂也可能具有分段性(詹艳等, 2013), 于是导致某些地震电信号具有选择性或者复杂性(黄清华和刘涛, 2006; Huang和Lin, 2010).

因此要获得反映地震发生的更全面的异常信息, 必须开展综合立体观测研究, 发挥各观测方法对不同

参量、信号频带、震前异常出现时间、信号源深度以及空间分布尺度范围等所具有的灵敏度优势, 捕捉“确定性”前兆异常, 为“时空强”三要素地震预测服务. 同时, 综合分析所观测的异常现象特征, 有利于研究异常的发生源、产生机制和传播过程等(Huang, 2011; Wang等, 2019). 图4给出不同电磁方法在地面、地下(井中)、空中乃至卫星进行立体观测的示意图.

实践中, 由同步观测的电、磁场(如大地电磁法)计算得到的地面阻抗和视电阻率参数等的平稳性和合理数据的可判断性, 非常有助于识别电场或磁场异常是来自于震源区还是来自于非地震因素的干扰(Uyeda, 2015; 赵国泽等, 2015; 陈运泰, 2015)(图4).

### 4.2 交变电磁场频率范围观测

现在的地震电磁观测台站, 大多数观测近直流的电场或磁场, 少数观测数kHz及以上的较高频的电磁场, 缺少自至低频(TLF)到超低频(SLF)频段交变电磁场观测. 地面以及卫星观测都表明, 可能由于交变场的感应作用特点, 对电场或磁场的变化更敏感, 使得大量的地震电磁异常出现在(与震源深度相当的)交变电磁场频段(Ogawa等, 1985; 钱书清等, 1998; Bleier和Freund, 2005; Parrot等, 2006; 赵国泽等, 2007b, 2015).

交变电磁场观测和数据处理分析的理论和技術已经成熟, 在解译具有潜在地震危险性的地震活动区的地壳深部探测结果时, 具有独特的优势. 国内观测设备的国产化近年也取得了很大进展, 降低了成本. 因此, 在建设装备精良的“天然实验室”过程中, 具备了增加和补充交变电磁场频段多参量观测的条件和可行性(郝锦琦等, 2003; 陈运泰, 2015).

此外, 过去一些文献对频带的称呼比较混乱, 不利于不同异常信息间的研究和共享. 我国根据《中华人民共和国无线电管理条例》、国际电信联盟《无线电规则》(2016年版)和我国无线电业务发展的实际情况, 制定了和国际接轨且适合我国实际的无线电频率划分表, 并于2018年7月1日施行(中华人民共和国工业和信息化部, 2018). 为了提高对地震电磁异常现象的观测和分析的精准度, 有利于开展更广泛的交流, 建议规范使用电磁场频带的称呼, 使用我国正式发布的频带称谓: 甚低频(VLF, 3~30kHz)、特低频(ULF, 300~3000Hz)、超低频(SLF, 30~300Hz)、极低频(ELF, 3~30Hz)和至低频(TLF, <3Hz)(赵国泽等, 2015), 扭转

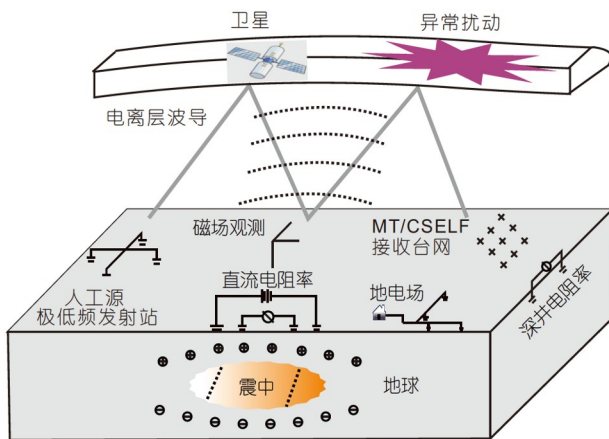


图 4 地震电磁异常立体观测示意图

某些混乱表述。

### 4.3 真实的背景场数据识别

以前在分析地震电磁数据中, 有两种需要纠正的偏向, 一种是在没有充分分析异常现象的来源和特点的情况下, 简单地认为数据中出现的异常与地震有关; 另一种是笼统地认为很多异常现象都是干扰。我们根据观测实例总结出识别和提取异常的方法, 取得较好的效果, 有推广价值。此方法包括(Han等, 2021): (1) 首先需要有足够丰富或足够长时间的连续观测数据, 构成“大数据”框架(张娅, 2015; 王学军等, 2019; Han等, 2021)。 (2) 基于对观测数据成功的分析经验, 通过机器学习等方法, 从“大数据”获得反映真实电磁背景场的时间域或频率域的数据(袁爱璟等, 2021; 杨旭等, 2021), 摒弃干扰或暂不明原因的所谓“异常”数据, 得到代表正常背景场的“优良观测资料”(陈运泰, 2015)。 (3) 从正常背景数据中, 采用成熟的或先进的计算技术挖掘真正的异常现象, 通过全面对比分析记录的时间序列、频谱和阻抗等, 窥测与地下地震活动相关的异常现象。 (4) 研究这些异常现象与相应区域地震事件的关系, 以获得“确定性”震前异常现象(图5)。在这一过程中, 获得真实的背景场是基础, 识别由地震引起的真实异常是关键。

为了提高观测数据的可利用率和地震预测的成功率, 需要在干扰背景小的地点, 补充或重新建设新的台站, 特别是在高危险性地震地区, 部署适当密度的观测台站, 不论是对于获取真实背景场、中强地震前的异常, 还是对地震前兆异常现象的概率统计和产生机制

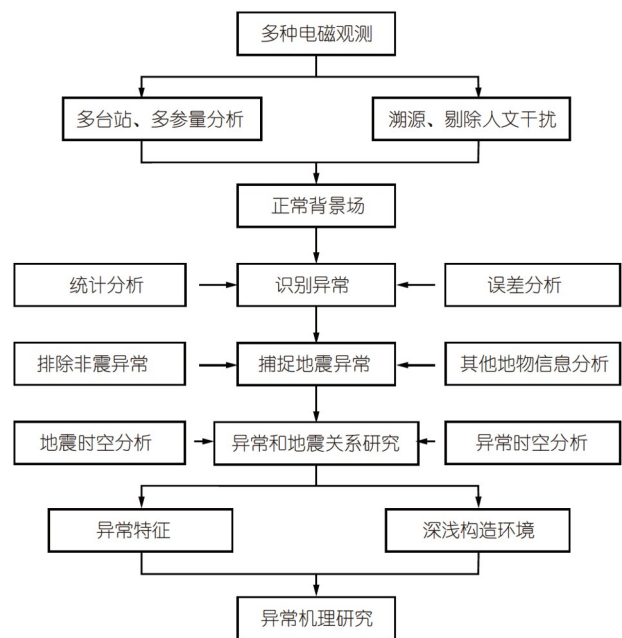


图 5 地震电磁异常综合分析过程框图

研究, 都将具有事半功倍的作用。

### 4.4 加强地震电磁异常机理研究

除获得确定性地震前兆电磁异常之外, 了解异常与地壳变化过程的关系是实现地震成功预测的另一个必要条件(Johnston和Uyeda, 1999)。通过物理模拟或数学模型计算等在异常产生机制研究方面已经取得很多进展, 但是至今没有一种被广泛认可、并被证明可满意解释产生异常现象的机制。之所以出现这种状况, 除了由于异常信号源的多样性, 也因物理模拟或数值模型计算的目标体或样本, 没有完全符合震源区构造和环境的实际, 需要加强研究。

地壳中流体对地震的发生、诱发或触发作用被越来越多的研究所证实(Lei等, 2017)。在已经开展深部探测研究的大陆地震区, 都存在地壳异常低阻层, 除部分地区可能由于岩石部分熔融使地壳电阻率降低外, 很多是因流体(或水)的存在(Unsworth等, 2000; Türkoğlu等, 2008; 赵国泽等, 2009, 2010b; Zhao等, 2012)。电磁方法在探测流体或者部分熔融岩石和结构方面具有独特的优势, 并且因地震电磁场异常能快速(往往先于声波或地震波异常变化)被观测到, 成为地震预测研究中不可替代的方法。最近的研究表明, 在地震孕育过程中, 即岩石尚未发生破裂的岩层变形(慢滑动)过程中,

岩层中流体是最活跃的成分, 已成为研究异常产生机理和发震可能性的重要方向(Honkura等, 2013; Barnes等, 2020; Zhu等, 2020; Cruz-Atienza等, 2021). 一些大气热红外及电离层地震耦合通道和机制, 可通过数值模拟技术解释相关现象, 但其与地下异常电导率结构、电流形成、电磁辐射等异常之间的关系, 目前仍无较好的实测结果和理论模型串联起所有相关参量, 给定的边界条件和模拟结果也与实测仍有较大差距, 因此急需加强物理原理和数学模型研究, 避免又落入早期各自为政、个人经验为主的研究模式。

此外, 在大陆地区具有典型意义的地震活动区或者曾经发生强地震的地区, 开展覆盖一定区域范围的对整个地壳直至上地幔的精细电磁探测研究, 开展多种电磁方法观测, 并与地震地质学研究等相结合, 建成真正的“天然实验室”是十分必要的。比如对“地震空区”的成因和危险性, 必须要进行全息研究, 要了解地下构造和结构(赵国泽等, 2009)。

## 5 结论与展望

自1966年邢台地震以来, 我国在地震观测预测方面是投入最多、研究量最大的国家之一, 取得了丰富的数据和经验, 为地震预测研究做出了贡献。地球电磁法以其场源具有全域(全空间)的可覆盖性, 电磁测量对与地震活动密切相关的地下流体的异常灵敏性, 以及观测快速传播的电磁波的时效性等, 被认为是可能首先取得突破性进展的研究领域。

本文涉及的地电阻率、大地电磁、地磁场、地电场、电磁辐射和卫星等观测研究, 基于电磁地球物理学中多种成熟的或改进升级的测量方法(赵国泽和詹艳, 2012), 从不同角度或不同层次观测到大量可能与地震孕育和发生有关的异常现象。虽然目前的观测研究水平距离实现地震三要素的“诊断性预报”还很远(陈运泰, 2015), 但确实观测到了“有助于地震预报的地震先兆”(马瑾, 2016), 并以其所具有的完备的电磁场理论, 正在发展成为具有研究价值的“地震电磁法”。

需要指出, 由于目前我国的地震台站和台网分布尚不均匀, 不同方法研究的历史有早有晚, 不排除随着观测技术的发展和对方理论法的深入研究, 未来仍会观测到与地震活动有关的更多的异常现象。庆幸的是, 经过我国和国际上众多学者几十年的不懈努力,

对地震电磁异常的观测研究, 可以说已经越过了“摸着石头过河”的阶段, 开始展现出一些有可能取得突破性进展的方向。

在未来的观测和实验研究中, 通过多参数、立体化监测和“大数据”分析技术的应用, 识别和排除干扰影响, 获得可靠的正常背景场, 捕捉与地震活动有关的真实异常是广大科技人员继续努力的方向。其中, 不可忽视的是, 应加强地震台站观测与有关大学、研究机构的紧密结合, 推进从前端观测到预测研究成果产出的“一体化”体系的建设, 使之成为科学研究和人才培养的有机体, 特别要避免前后脱节现象的发生。

可以预计, 在当前和未来, 只要抓住影响地震预测的关键问题, 例如地震前、后地下结构的变化以及由此产生的电磁异常现象和规律, 开展高质量的电磁观测, 深入研究异常与地壳内部过程的关系即异常产生机理, 持之以恒, 就能取得地震预测科学的进步(陈运泰, 2015; 马瑾, 2016)。

现在国际大地测量与地球物理学联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)设有专门的“地震火山电磁研究会”和“国际地球电磁委员会”, 分别举行两年一届的国际研讨会, 地震电磁监测研究是其中的重要内容。我国相应地有“地球电磁专业委员会”和“地震电磁专业委员会”, 应充分利用这些良好的交流合作机制, 为地震预测尽早取得突破性进展作出应有的贡献。

**致谢** 北京大学黄清华和陈峰对本文的修改提出了重要的宝贵意见。南方科技大学任恒鑫对文稿的修改提供了帮助。责任编辑和审稿专家的评审意见和建议对文章的进一步优化和水平的提升起到了重要的作用。中国地震局地质研究所刘国栋研究员和电磁组成员邓前辉、徐常芳、姜峰、刘钟尹、邓琰、杨静、赵凌强、程远志、崔腾发、李建凯、李冉等积累了大量数据和丰富经验, 为本文起到重要支撑作用。在此一并致谢。

## 参考文献

- 安金珍, 修济刚, 陈峰, 陈大元. 1996. 单轴压力下有补给水岩石电阻率变化各向异性研究. 中国地震, 12: 300-306
- 安张辉, 杜学彬, 范莹莹, 刘君, 谭大诚, 陈军营, 解滔. 2011. 汶川 $M_s8.0$ 级大震前天基与陆基电场资料联合应用研究. 地球物理学报, 54: 2876-2884
- 安张辉, 杜学彬, 谭大诚, 范莹莹, 刘君, 崔腾发. 2013. 四川芦山 $M_s7.0$

- 和汶川 $M_s$ 8.0地震前地电场变化研究. 地球物理学报, 56: 3868–3876
- 别洛烏索夫, 王耀文, 梅世蓉, 宫维樞, 李自強. 1955. 地震区域划分的任务与方法. 地球物理学报, 4: 17–24
- 蔡军涛, 赵国泽, 詹艳, 汤吉, 陈小斌. 2007. 地震期间电离层扰动现象研究. 地球物理学进展, 22: 695–701
- 曹惠馨, 钱书清, 吕智. 1994. 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. 地震学报, 16: 235–241
- 陈伯舫. 1998. 关岛8.1级大地震和地磁转换函数时间变化的关系. 地震学报, 20: 217–219
- 陈大元, 陈峰, 贺国玉. 1987. 岩石受压过程中“应力反复”对电阻率的影响. 地震学报, 9: 303–311
- 陈大元, 修济刚, 安金珍, 陈峰. 1994. 单轴压力下有补给岩石电阻率变化各向异性研究. 中国地球物理学会第十届学术年会论文集, 吉林长春. 1
- 陈峰, 陈大元, 曹其平, 于淑筠, 许东俊, 陈从新, 余毓良, 盛建豪. 1993. 原位岩体在剪切和摩擦试验中的视电阻率变化特征研究. 地震学报, 15: 217–223
- 陈峰, 修济刚, 安金珍, 廖椿庭, 陈大元. 2000a. 用动态岩石电阻率变化各向异性探测岩石破裂前兆和确定主破裂扩展方向. 地震学报, 22: 210–213
- 陈峰, 修济刚, 安金珍, 廖椿庭, 陈大元. 2000b. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究. 地震学报, 22: 310–318
- 陈峰, 安金珍, 廖椿庭. 2002. 弹性约束承载岩石电阻率变化形态研究. 北京大学学报(自然科学版), 38: 427–430
- 陈峰, 廖春庭, 安金珍. 2003a. 剪切和摩擦滑动大模型的视电阻率变化幅度和各向异性. 地球物理学报, 46: 667–675
- 陈峰, 安金珍, 廖椿庭. 2003b. 原始电阻率各向异性岩石电阻率变化的方向性. 地球物理学报, 46: 271–280
- 陈峰, 马麦宁, 安金珍. 2013. 承压介质电阻率变化的方向性与主应力的关系. 地震学报, 35: 84–93
- 陈化然, 杨冬梅, 李琪, 朱荣, 蒋淳, 王建国. 2008. 1980年以来我国电磁辐射地震前兆信息的观测与研究. 中国地震, 24: 180–186
- 陈小斌, 赵国泽, 马霄. 2008. 关于MT二维反演中数据旋转方向的选择问题初探. 石油地球物理勘探, 43: 113–118
- 陈小斌, 郭春玲. 2017. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(五)——利用阻抗张量成像识别大地线性构造. 地球物理学报, 60: 766–777
- 陈顺. 1988. 地震预报中几个科学问题的讨论. 中国地震, 4: 3–10
- 陈有发. 1993. 受压岩石电阻率的方向性及其在地震预报中的应用. 华南地震, 13: 1–8
- 陈有发, 余存顺, 马连桂. 1997. 我国地震地电学的研究现状和发展趋势. 地震科技情报, (6): 1–6
- 陈运泰, 滕吉文, 张中杰. 2001. 地球物理学的回顾与展望. 地球科学进展, 16: 634–642
- 陈运泰. 2015. 可操作的地震预测预报. 北京: 中国科学技术出版社
- 程远志, 汤吉, 陈小斌, 董泽义, 肖骑彬, 汪利波. 2015. 南北地震带南段川滇黔接壤区电性结构特征和孕震环境. 地球物理学报, 58: 3965–3981
- 程远志, 汤吉, 蔡军涛, 陈小斌, 董泽义, 汪利波. 2017. 青藏高原东缘川滇构造区深部电性结构特征. 地球物理学报, 60: 2425–2441
- 崔腾发, 陈小斌, 詹艳, 赵凌强, 刘钟尹. 2020. 安徽霍山地震区深部电性结构和发震构造特征. 地球物理学报, 63: 256–269
- 邓前辉, 张木生, 詹艳, 刘国栋, 赵国泽. 1998. 邢台7.2级地震震源区的电磁阵列剖面法测量与电性特征研究. 地球物理学报, 41: 218–225
- 丁鉴海, 黄雪香, 邢如英, 张淑兰. 1988. 地磁“低点位移”现象及其与地震的关系. 地震学报, 10: 406–414
- 丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 2005. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系. 空间科学学报, 25: 44–50
- 杜学彬. 2010. 在地震预报中的两类视电阻率变化. 中国科学: 地球科学, 40: 1321–1330
- 杜学彬, 孙君嵩, 陈军营. 2017. 地震预测中的地电阻率数据处理方法. 地震学报, 39: 531–548
- 樊晓春, 解滔, 吴帆, 袁慎杰. 2019. 井下地电阻率观测影响系数分析——以江宁地震台为例. 中国地震, 35: 347–358
- 冯志生, 李鸿宇, 张秀霞, 梅卫萍, 叶碧文. 2013. 地磁谐波振幅比异常与强地震. 华南地震, 33: 9–15
- 傅承义. 1963. 有关地震预告的几个问题. 科学通报, 14: 30–36
- 傅良魁. 1983. 电法勘探教程. 北京: 地质出版社
- 高曙德, 汤吉, 杜学彬, 刘小凤, 苏永刚, 陈彦平, 狄国荣, 梅东林, 詹艳, 王立凤. 2010. 汶川8.0级地震前后电磁场的变化特征. 地球物理学报, 53: 512–525
- 高永新, 胡恒山. 2009. 水平分层孔隙介质中点源激发的震电波场数值模拟及分析. 地球物理学报, 52: 2093–2104
- 高永新. 2010. 地震电磁场——基于动电效应的波场模拟. 博士论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学
- 龚强, 胡祥云, 张胜业, 张荣, 郝小柱. 2006. 岩石破裂电磁辐射频率与弹性参数的关系. 地球物理学报: 1523–1528
- 龚绍京, 田真丽, 戚成柱, 何淑敏, 阎晓梅, 陈化然, 栗连第. 2001. 地磁水平场转换函数的短期前兆. 地震学报, 23: 280–288
- 顾芷娟, 郭才华, 应育浦, 于莉. 1992. 高温高压下角闪岩的变化与其电导率. 全国构造物理全国高温高压学术讨论会. 湖南长沙. 1
- 关华平, 刘桂萍. 1995. 震前电磁辐射异常与地震关系研究. 地震学报, 17: 237–246
- 关华平, 肖武军. 2004. 电磁辐射“EMOLS”仪观测结果原理及震例. 地震, 24: 96–103
- 郭自强, 刘斌. 1995. 岩石破裂电磁辐射的频率特性. 地球物理学报, 38: 221–226
- 郭自强, 罗祥麟, 钱书清, 赵国芳, 郭子琪, 陈国华, 全力民, 阎恒庄. 1999. 矿山爆破中的电磁辐射. 地球物理学报, 42: 834–840
- 国家地震局地质研究所大地电磁测深组. 1981. 北京凤河营地区的

- 地壳地壳电性结构及其在唐山大地震前后的变化. 北京: 地震出版社, 89–95
- 国家地震局地质研究所大地电磁测深组, 国家地震局兰州地震研究所大地电磁测深组. 1981. 大地电磁测深. 北京: 地震出版社
- 国家地震局兰州地震研究所大地电磁测深组. 1981. 与大地震有关的地壳深部的电性变化. 北京: 地震出版社, 80–88
- 韩鹏, 黄清华, 修济刚. 2009. 地磁日变与地震活动关系的主成分分析——以日本岩手县北部6.1级地震为例. 地球物理学报, 52: 1556–1563
- 韩松, 韩江涛, 刘国兴, 王海燕, 梁宏达. 2016. 青藏高原东北缘至鄂尔多斯地块壳幔电性结构及构造变形研究. 地球物理学报, 59: 4126–4138
- 郝建国. 1988. 近地表大气电场异常与地震. 地震学报, 10: 206–212
- 郝锦绮, 黄平章, 周建国. 1993. 微破裂对岩石剩磁的影响——对地震预报的意义. 地球物理学报, 36: 203–211
- 郝锦绮, 冯锐, 李晓芹, 周建国, 钱书清, 高金田. 2000. 对样品含水结构的电阻率CT研究. 地震学报, 22: 305–309
- 郝锦绮, 钱书清, 高金田, 周建国, 朱涛. 2003. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常. 地震学报, 25: 102–111
- 何宇飞, 杨冬梅, 陈化然, 钱家栋, 朱荣, Parrot M. 2009. DEMETER卫星探测到可能与汶川地震有关的地面VLF发射站信号的信噪比变化. 中国科学(D辑): 地球科学, 39: 403–412
- 黄清华. 2005. 地震电磁信号传播的控制模拟实验. 科学通报, 50: 1774–1778
- 黄清华, 刘涛. 2006. 新岛台地电场的潮汐响应与地震. 地球物理学报, 49: 1745–1754
- 黄清华, 林玉峰. 2010. 地震电信号选择性数值模拟及可能影响因素. 地球物理学报, 53: 535–543
- 金安忠. 1981. 地电阻率正常变化的初步研究. 地球物理学报, 24: 92–106
- 金安忠, 赵强, 姜枚, 刘煜洲, 王寅生, 刘希强, 张继红. 1997. 小尺度岩石爆破引起电磁辐射的野外实验观测结果. 地震学报, 19: 45–50
- 金胜, 叶高峰, 魏文博, 邓明, 景建恩. 2007. 青藏高原西缘壳幔电性结构与断裂构造: 札达-泉水湖剖面大地电磁探测提供的依据. 地球科学, 32: 474–480
- 金胜, 张乐天, 金永吉, 魏文博, 叶高峰. 2012. 青藏高原东北缘合作——大井剖面地壳电性结构研究. 地球物理学报, 55: 3979–3990
- 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 田勤俭, 刘德富. 2003. 昆仑山口西8.1级地震的卫星热红外前兆特征分析. 西北地震学报, 25: 15–18
- 李军, 王绪本, 李大虎, 秦炎庆, 张刚, 周军, 李亚星, 刘宇. 2017. 青藏高原东缘岩石圈物性结构特征及深部构造涵义. 地球物理学报, 60: 2500–2511
- 李均之, 曹明, 夏雅琴, 毛浦森. 1982. 岩石压缩试验与震前电磁波辐射的研究. 北京工业大学学报, (4): 47–53
- 李美, 卢军. 2008. 地震电磁辐射前兆异常特征和异常指标关系研究. 地震, 28: 112–120
- 李美, 谭捍东, 王中平, 张小涛, 曹萌. 2015. 用电子-空穴理论推算汶川 $M_s$ 8.0地震电磁异常的“能量源”大小. 地震学报: 842–852
- 李琪, 林云芳, 曾小苹. 2006. 应用小波变换提取张北地震的震磁效应. 地球物理学报, 49: 855–863
- 李琪, 李军辉, 杨冬梅, 陈化然. 2008. 地磁ULF前兆信息研究简述. 地震地磁观测与研究, 29: 170–176
- 李琪, 袁伊人, 杨星, 蔡绍平, 孙维怀. 2016. 2013年3月3日洱源 $M_s$ 5.5地震前地磁谐波振幅比异常研究. 地震学报, 38: 122–129
- 李冉, 汤吉, 董泽义, 肖骑彬, 詹艳. 2014. 云南南部地区深部电性结构特征研究. 地球物理学报, 57: 1111–1122
- 李善邦. 1957. 中国地震区域划分图及其说明 I. 总的说明. 地球物理学报, 6: 127–158
- 刘德富, 罗灼礼, 彭克银. 1997. 强烈地震前的长波辐射异常现象. 地震, 17: 126–132
- 刘德富, 彭克银, 刘维贺, 黎令仪, 侯建盛. 1999. 地震有“热征兆”. 地震学报, 21: 652–656
- 刘德富. 2000. 台湾集集地震前的卫星遥感长波辐射场变异分析. 地球信息科学, 1: 33–36
- 刘德富, 康春丽. 2003. 地球长波辐射(OLR)遥感与重大自然灾害预测. 地学前缘, 10: 427–435
- 刘国栋, 顾群, 史书林, 孙洁, 石障松, 刘金汉. 1983. 京津唐渤和周围地区地壳上地幔电性结构及其与地震活动性的关系. 地球物理学报, 26: 149–157
- 刘国栋, 陈乐寿. 1984. 大地电磁测深研究. 北京: 地震出版社
- 刘国栋, 史书林, 王宝钧. 1984. 华北地区壳内高导层及其与地壳构造活动性的关系. 中国科学(B辑: 化学 生物学 农学 医学 地学), 14: 839–848
- 刘国栋. 1994. 我国大地电磁测深的发展. 地球物理学报, 37: 301–310
- 刘吉平, 刘锦, 严兴, 钟天任. 2019. 和平台深井地电阻率在中强地震前异常特征. 华南地震, 39: 90–96
- 刘静, 万卫星. 2014. 中国6.0级以上地震临震电离层扰动时空分布特征研究. 地球物理学报, 57: 2181–2189
- 刘煜洲, 刘因, 王寅生, 金安忠, 傅建民, 曹静平. 1997. 岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理. 地震学报, 19: 83–90
- 陆阳泉, 温新民. 1980. 三向压缩下大型混凝土标本的电性特征. 西北地震学报, 2: 55–60
- 陆阳泉, 钱家栋, 刘建毅. 1988. 砂岩在摩擦滑动中的电阻率变化及其在地震预报中的应用. 西北地震学报, 10: 51–56
- 吕广廷, 赵广莖, 谢原定, 金铭, 蒋续媛. 1984. 应力作用下层状砂岩电阻率的变化特征. 西北地震学报, 6: 11–16
- 马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别——以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例. 中国科学: 地球科学, 42: 633–645
- 马瑾. 2016. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起. 科学通报, 61: 409–414

- 马钦忠, 冯志生, 宋治平, 赵卫国. 2004. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析. 地震学报, 26: 304–312
- 马钦忠. 2008. 地电场多极距观测装置系统与文安Ms5.1地震前首都圈地电场异常研究. 地震学报, 30: 615–625
- 马钦忠, 赵卫国, 张文平. 2009. 文县地电场震前异常变化及其在2001年昆仑山口西 $M_s$ 8.1地震预测研究中的应用. 地震学报, 31: 660–670
- 马钦忠, 方国庆, 李伟, 周江南. 2013. 芦山 $M_s$ 7.0地震前的电磁异常信号. 地震学报, 35: 717–730
- 马钦忠, 李伟, 张继红, 郭玉贵, 方国庆. 2014. 与大电流信号有关的华北东部地区地电场空间变化特征的研究. 地球物理学报, 57: 518–530
- 马钦忠, 李伟, 赵文舟, 周江南, 龚耀. 2017. 人工源地电场空间变化区域性特征. 地震学报, 39: 455–468
- 马钦忠. 2018. 与2008年汶川 $M_s$ 8.0地震有关的成都台地电场异常信号. 地震学报, 40: 351–363
- 马宗晋, 傅征祥, 张郅珍, 汪成民, 张国民, 刘德富. 1982. 1966–1976年中国九大地震. 北京: 地震出版社
- 毛桐恩, 席继楼, 王燕琼, 尹淑芝. 1999. 地震过程中的大地电场变化特征. 地球物理学报, 42: 520–528
- 毛先进, 杨玲英, 赵晋民, 段炜, 庄儒新. 2017. 井下地电阻率观测的探测深度初步研究. 地震学报, 39: 230–238
- 梅世蓉. 1960. 中国的地震活动性. 地球物理学报, 9: 1–19
- 闵刚, 王绪本, 夏时斌, 周军, 张兵, 蔡学林, 梁斯琪. 2017. 岷山隆起带与西秦岭构造带中段中上地壳电性结构特征. 地球物理学报, 60: 2397–2413
- 倪晓寅, 陈莹. 2016. 福建地磁谐波振幅比异常与台湾强震的关系研究. 华南地震, 36: 56–60
- 牛露, 王莉森, 马旭东, 韩冰, 张晓刚, 王秀敏. 2018. 红山基准地震台ELF电磁观测资料异常特征分析. 地震地磁观测与研究, 39: 78–84
- 欧阳新艳, 娄文字, 申旭辉, 张学民. 2015. 中国大陆区域6级以上地震舒曼谐波异常特征分析. 地震, 35: 123–130
- 祁贵仲. 1978. “膨胀”磁效应. 地球物理学报, 21: 18–33
- 钱复业, 赵玉林. 1980. 地震前地电阻率变化十例. 地震学报, 2: 186–197
- 钱家栋. 1998. 电磁预报地震与多参数地震活动研究. 国际地震动态: 26–28
- 钱书清, 张以勤, 曹惠馨, 吕智. 1986. 岩石破裂时产生电磁脉冲的观测与研究. 地震学报, 8: 301–308
- 钱书清, 任克新, 吕智. 1996. 伴随岩石破裂的VLF, MF, HF和VHF电磁辐射特性的实验研究. 地震学报, (3): 346–351
- 钱书清, 吕智, 任克新. 1998. 地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验研究. 地震学报, (5): 535–540
- 钱书清, 郝锦琦, 周建国, 高金田. 2003. 岩石受压破裂的ULF和LF电磁前兆信号. 中国地震: 109–116
- 强祖基, 徐秀登, 赁常恭. 1990. 卫星热红外异常——临震前兆. 科学通报, 35: 1324–1327
- 强祖基, 孔令昌, 郭满红, 王弋平, 郑兰哲, 赁常恭, 赵勇. 1997. 卫星热红外增温机制的实验研究. 地震学报, 19: 87–91
- 任恒鑫, 黄清华, 陈晓非. 2007. 层状介质中点源激发的震电波场的一种新的数值计算方法. 第8届中国国际地球电磁学讨论会. 湖北荆州. 325–329
- 任恒鑫. 2009. 流体饱和孔隙介质中震电效应的理论研究. 博士论文. 北京: 北京大学
- 孙维怀, 汤吉, 张平, 杨学慧. 2012. 云南ELF电磁观测资料的异常特征分析. 地震地质, 34: 488–499
- 孙正江, 王丽华, 高宏. 1986. 岩石标本破裂时的电磁辐射和光发射. 地球物理学报, 29: 491–495
- 谭大诚, 辛建村, 王建军, 范莹莹, 王玮铭. 2019. 大地电场岩体裂隙模型的应用基础与震例解析. 地球物理学报, 62: 558–571
- 汤吉, 赵国泽, 王继军, 李文军, 詹艳. 1998. 张北-尚义地震前后电阻率的变化及分析. 地震地质, 20: 164–171
- 汤吉, 赵国泽, 陈小斌, 詹艳, 王继军, 肖骑彬. 2007. 地震电磁卫星载荷及现状. 地球物理学进展, 22: 679–686
- 万战生, 赵国泽, 陈小斌, 郭秀芬, 施兴. 2007. 岩石圈地震前兆异常机制. 地球物理学进展, 22: 708–714
- 汪晓东, 关华平. 1992. 地电阻率前兆与地电台台址-装置条件的关系研究. 地震学报, 14: 337–342
- 王琛, 王延艳. 2011. 地震台网数字化改造的思考. 魅力中国, 13: 265–266
- 王宣文. 2001. 地震预报探讨中的地磁学手段. 国际地震动态, (5): 17–21
- 王继军, 赵国泽, 詹艳, 卓贤军, 汤吉, 关华平, 万战生. 2005. 中国地震电磁现象的岩石实验研究. 大地测量与地球动力学, 25: 22–28
- 王兰炜, 张宇, 张世中, 颜蕊, 王子影, 张兴国, 胡哲. 2015. 我国井下地电阻率观测技术现状分析. 地震地磁观测与研究, 36: 95–102
- 王立凤, 詹艳, 赵国泽, 王继军, 肖骑彬, 莫青云, 高鹏飞, 张远韩, 韦永福. 2010. 广西龙滩库区库水加卸载过程中地下电阻率的变化. 地震地质, 32: 586–594
- 王立凤, 赵国泽, 陈小斌, 汤吉, 蔡军涛, 詹艳, 韩冰, 程远志, 赵凌强, 肖骑彬. 2017. 芦山 $M_s$ 7.0地震余震期间大地电磁视电阻率变化. 地震学报, 39: 64–77
- 王玮铭, 谭大诚. 2020. 2019年长宁 $M_s$ 6.0地震邻区分钟采样地电场分析. 地震, 40: 41–51
- 王学军, 杨勇, 马良乾, 王霖, 姜敏. 2019. 大数据时代的地震数据智能化管理策略. 中国石油学会2019年物探技术研讨会. 四川成都. 1469–1471
- 王志, 王绪本, 黄润秋, 刘冠男. 2017. 龙门山断裂带多参数深部结构成像与地震成因研究. 地球物理学报, 60: 2068–2079
- 吴立新, 刘善军, 陈云浩, 马保东, 李玲玲. 2008. 汶川地震前卫星热红外异常与云异常现象. 科技导报, 26: 32–36

- 席继楼, 宋艳茹, 胡明朝, 刘超, 徐学恭, 尚先旗. 2013. 全方位自然电场观测方法和观测技术研究. 地震学报, 35: 94–107
- 夏时斌, 王绪本, 闵刚, 胡元邦, 李德伟, 孔凡涛, 蔡学林. 2019. 青藏高原东北缘祁连山造山带至阿拉善地块壳幔电性结构研究. 地球物理学报, 62: 950–966
- 肖骑彬, 赵国泽, 詹艳, 陈小斌, 汤吉, 王继军, 王立凤, 晓汪. 2007. 地震电磁卫星交变电磁场的数据处理. 地球物理学进展, 22: 674–678
- 解滔, 杜学彬, 刘君, 范莹莹, 安张辉, 陈军营, 谭大诚. 2013. 汶川  $M_s8.0$ 、海地  $M_w7.0$  地震电磁信号小波能谱分析. 地震学报, 35: 61–71
- 解滔, 刘杰, 卢军, 李美, 姚丽, 王亚丽, 于晨. 2018. 2008年汶川  $M_s8.0$  地震前定点观测电磁异常回溯性分析. 地球物理学报, 61: 1922–1937
- 熊皓. 1991. 地震电磁辐射研究的新进展. 地震学报, 13: 254–258
- 徐彤, 胡艳莉, 吴健, 李春斌, 吴振森, 索玉成, 冯健. 2012. 中国大陆14次强震前电离层异常统计分析. 电波科学学报, 27: 507–512
- 徐为民, 童莞生, 吴培稚. 1985. 岩石破裂过程中电磁辐射的实验研究. 地球物理学报, 28: 181–190
- 徐小荷, 邢国军, 王标. 1998. 岩石中应变波激发的电磁效应. 地震学报, 20: 96–100
- 徐秀登, 徐向民, 马升灯. 1993. 卫星热红外临震异常成因机理的初步试验和认识. 浙江师大学报(自然科学版), 16: 86–90
- 徐秀登, 徐向民, 马升灯, 骆高远. 1995. 临震大气增温异常成因的初步认识. 地震学报, 17: 123–127
- 许林斌, 魏文博, 金胜, 叶高峰, 梁宏达, 贾常秀, 龚旭, 于洋. 2017. 鄂尔多斯地块北部至阴山造山带深部电性结构特征研究. 地球物理学报, 60: 575–584
- 杨福平, 余刚群, 侯林峰, 周昕. 2019. 大地电磁测深在珊溪水库诱发地震研究中的应用. 工程地球物理学报, 16: 203–210
- 杨旭, 李永华, 盖增喜. 2021. 机器学习在地震学中的应用进展. 地球与行星物理论评, 52: 76–88
- 叶涛, 黄清华, 陈小斌. 2018. 滇西南地区南汀河断裂带三维深部电性结构及其孕震环境. 地球物理学报, 61: 4504–4517
- 叶涛, 陈小斌, 黄清华, 崔腾发. 2021. 2021年5月21日云南漾濞地震 ( $M_s6.4$ )震源区三维电性结构及发震机制讨论. 地球物理学报, 64: 2267–2277
- 于常青, 张刚, 王绪本, 罗威, 李德伟, 蔡学林, 郭紫明. 2017. 滇西三江地区深部电性结构特征及其意义. 地球物理学报, 60: 2385–2396
- 袁爱璟, 王伟君, 彭菲, 闫坤, 寇华东. 2021. 机器学习在地震预测中的应用进展. 地震, 41: 51–66
- 詹艳, 赵国泽, 汤吉, 赵俊猛, 晋光文, 邓前辉, 王继军. 1999. 新疆玛纳斯大震区地壳深部的电性结构. 地震地质, 21: 159–167
- 詹艳, 赵国泽, 陈小斌, 汤吉, 王继军, 邓前辉. 2004. 宁夏海原大震区西安州—韦州剖面大地电磁探测与研究. 地球物理学报, 47: 274–281
- 詹艳, 陈小斌, 赵国泽, 邓前辉, 王继军, 宣飞, 汤吉, 赵俊猛. 2005. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究. 地震学报, 27: 431–440
- 詹艳, 王继军, 汤吉, 陈小斌, 赵国泽. 2007. 利用卫星探测研究地下结构. 地球物理学进展, 22: 702–707
- 詹艳, 赵国泽, Martyn Unsworth, 王立凤, 陈小斌, 李涛, 肖骑彬, 王继军, 汤吉, 蔡军涛, 王阎昭. 2013. 龙门山断裂带西南段4.20 芦山7.0 级地震区的深部结构和孕震环境. 科学通报, 58: 1917–1924
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇, 黄飞鹏, 赵凌强, 宫悦, 韩静, 李陈侠, 张培震, 张会平. 2021. 2021年5月22日青海玛多  $M_s7.4$  地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, 64: 2232–2252
- 张德齐, 殷春阳, 王盛飞, 郭一新, 吴少武. 1981. 临震电磁波信息研究. 西北地震学报, 3: 9–14
- 张国民. 1987. 我国大陆强震活动的韵律性特征. 地震地质, 9: 27–37
- 张乐天, 金胜, 魏文博, 叶高峰, 段书新, 董浩, 张帆, 谢成良. 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究. 地球物理学报, 55: 4126–4137
- 张磊, 乔子云, 罗娜, 张国苓, 贾立峰, 白云刚, 张波. 2015. 河北大柏舍台深井与浅层地电阻率观测对比分析. 华北地震科学, 33: 49–53
- 张天中, 华正兴, 徐明发. 1985. 1.2千巴围压下岩样破裂和摩擦滑动过程中电阻率变化. 地震学报, 7: 428–433
- 张学民, 翟彦忠, 郭学增, 郭建芳. 2007a. 远震前的地电场潮汐波异常. 地震学报, 29: 48–58
- 张学民, 赵国泽, 陈小斌, 马为. 2007b. 国外地震电磁现象观测. 地球物理学进展, 22: 687–694
- 张学民, 申旭辉, 欧阳新艳, 蔡晋安, 黄建平, 刘静, 赵庶凡. 2009a. 汶川8级地震前空间电离层VLF电场异常现象. 电波科学学报, 24: 1024–1032
- 张学民, 丁鉴海, 申旭辉, 王敏, 刘静, 余素荣, 王亚丽, 欧阳新艳. 2009b. 汶川8 级地震前电磁扰动与电磁立体监测体系. 电波科学学报, 24: 1–8
- 张学民, 泽仁志玛, 申旭辉, 蔡军涛, 赵庶凡, 熊攀, 陈化然, 欧阳新艳. 2011. 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  $M_w8.0$  地震为例. 地震学报, 33: 451–460
- 张学民, 刘静, 赵必强, 徐彤, 申旭辉, 姚璐. 2014. 玉树地震前的电离层异常现象分析. 空间科学学报, 34: 822–829
- 张学民, 申旭辉, 赵庶凡, 刘静, 欧阳新艳, 娄文宇, 泽仁志玛, 何建辉, 钱庚. 2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展. 地震学报, 38: 356–375
- 张学民, 钱家栋, 申旭辉, 刘静, 王亚璐, 黄建平, 赵庶凡, 欧阳新艳. 2020. 电磁卫星地震应用进展及未来发展思考. 地震, 40: 18–37
- 张娅. 2015. 地震大数据网络化分析系统的实现及在地震预测上的应用. 硕士论文. 沈阳: 东北大学. 79
- 张云琳. 1980. 大地电场临震突变异常形态的初步研究. 西北地震学报, 2: 50–54
- 张云琳, 刘晓晓, 安海静, 司玉兰, 蒋梅, 张五四. 1994. MT重复测量

- 在地震中短期预报中的应用——祁连山中段MT剖面监测研究. 地球物理学报, 37: 200–210
- 赵国泽, 赵永贵. 1986. 华北平原盆地演化中深部热、重力作用初探. 地质学报, 2: 102–113
- 赵国泽, 刘国栋, 詹艳, 江钊, 刘铁胜, 汤吉, 王继军, 李文军, 梁竞阁. 1998. 张北-尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构. 地震地质, 20: 155–163
- 赵国泽. 2003. 地震电磁监测卫星. 香山会议, 2003–02–20
- 赵国泽, 陆建勋. 2003. 利用人工源超低频电磁波监测地震的试验与分析. 中国工程科学, 5: 27–33
- 赵国泽, 汤吉, 邓前辉, 赵俊猛, 王继军, 陈小斌, 詹艳, 宣飞, Saraev A K, Pertel M I, Kotcherov A B, Kharlmov M M, 鲁跃, 刘允秀, 张建新, 翟彦忠. 2003. 人工源超低频电磁波技术及在首都圈地区的测量研究. 地学前缘, 10: 248–257
- 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 陈小斌, 卓贤军, 王继军, 宣飞, 邓前辉, 赵俊猛. 2004. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究. 中国科学: 地球科学, 34: 908–918
- 赵国泽, 陈小斌, 汤吉. 2007a. 中国地球电磁法新进展和发展趋势. 地球物理学进展, 22: 1171–1180
- 赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛. 2007b. 电磁卫星和地震预测. 地球物理学进展, 22: 667–673
- 赵国泽, 陈小斌, 王立凤, 王继军, 汤吉, 万战生, 张继红, 詹艳, 肖骑彬. 2008. 青藏高原东边缘地壳“管流”层的电磁探测证据. 科学通报, 53: 345–350
- 赵国泽, 陈小斌, 肖骑彬, 王立凤, 汤吉, 詹艳, 王继军, 张继红, Utada H, Uyeshima M. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 级地震成因三“层次”分析——基于深部电性结构. 地球物理学报, 52: 553–563
- 赵国泽, 王立凤, 汤吉, 陈小斌, 詹艳, 肖骑彬, 王继军, 蔡军涛, 徐光晶, 万战生, 汪晓, 杨静, 董泽义, 范晔, 张继红, 高妍. 2010a. 地震监测人工源极低频电磁技术(CSELF)新试验. 地球物理学报, 53: 479–486
- 赵国泽, 詹艳, 王立凤, 王继军, 汤吉, 陈小斌, 肖骑彬. 2010b. 鄂尔多斯断块地壳电性结构. 地震地质, 32: 345–359
- 赵国泽, 王立凤, 詹艳, 汤吉, 肖骑彬, 陈小斌, 王继军, 蔡军涛, 汪晓, 杨静. 2012. 地震预测人工源极低频电磁新技术(CSELF)和第一个观测台网. 地震地质, 34: 576–585
- 赵国泽, 詹艳. 2012. 电磁地球物理法的发展和应用研究现状. 徐文骏, 主编. 王子昌先生诞辰百年纪念文集. 北京: 北京大学出版社. 29–39
- 赵国泽, Bi Y X, 王立凤, 韩冰, 汪晓, 肖骑彬, 蔡军涛, 詹艳, 陈小斌, 汤吉, 王继军. 2015. 中国地震交变电磁场观测数据处理技术新进展. 中国科学: 地球科学, 45: 22–33
- 赵凌强, 詹艳, 赵国泽, 陈小斌, 杨皓, 姜峰. 2015. 基于深部电性结构特征的2013年甘肃岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震孕震环境探讨. 地震地质, 37: 541–554
- 赵凌强, 詹艳, 周本刚, 孙翔宇, 陈小斌, 杨皓. 2018. 1631年常德历史地震区深部结构的大地电磁探测研究. 地震地质, 40: 155–170
- 赵凌强, 詹艳, 孙翔宇, 郝明, 祝意青, 陈小斌, 杨皓. 2019. 利用大地电磁技术揭示2016年1月21日青海门源 $M_s 6.4$ 地震隐伏地震构造和孕震环境. 地球物理学报, 62: 2088–2100
- 赵庶凡, 申旭辉, 潘威炎, 张学民. 2011. VLF波从大气层到低电离层的传输特性分析. 空间科学学报, 194–200
- 赵庶凡, 申旭辉, 张学民, 潘威炎. 2015. VLF电波渗透到卫星高度电离层传播的全波计算. 空间科学学报, 35: 178–184
- 赵庶凡, 张学民, 廖力, 钱庚. 2016. 2010年玉树7.3级地震前阿尔法导航信号场强异常分析. 地震, 36: 153–162
- 赵庶凡, 廖力, 张学民. 2017. 地面VLF波穿透电离层的能量衰减变化. 地球物理学报, 60: 3004–3014
- 赵玉林, 钱复业. 1978. 唐山7.8级强震前震中周围形变电阻率的下降异常. 地球物理学报, 21: 181–190
- 赵玉林, 钱复业. 1981. 大地电场的临震周期变化. 地震, 13: 13–16
- 赵玉林, 钱复业, 杨体成, 刘建毅. 1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报, 5: 217–225
- 郑联达. 1990. 地震电磁波发射的一种机制. 地震学报, 12: 78–86
- 中国地震局. 2009. 地震地电观测方法: 电磁扰动观测. 北京: 地震出版社
- 中国科学院地球物理研究所第十研究室一组. 1977. 地磁场的空间相关性及其在地震预报中的应用. 地球物理学报, 20: 169–184
- 中华人民共和国工业和信息化部. 2018. 中华人民共和国无线电频率划分规定. 北京: 人民邮电出版社
- 卓贤军, 赵国泽, 王继军, 汤吉, 詹艳. 2005. 地震预测中的电磁卫星. 大地测量与地球动力学, 25: 1–5
- Barnes P M, Wallace L M, Saffer D M, Bell R E, Underwood M B, Fagereng A, Meneghini F, Savage H M, Rabinowitz H S, Morgan J K, Kitajima H, Kutterolf S, Hashimoto Y, Engelmann de Oliveira C H, Noda A, Crundwell M P, Shepherd C L, Woodhouse A D, Harris R N, Wang M, Henrys S, Barker D H N, Petronotis K E, Bourlange S M, Clennell M B, Cook A E, Dugan B E, Elger J, Fulton P M, Gamboa D, Greve A, Han S, Hüpers A, Ikari M J, Ito Y, Kim G Y, Koge H, Lee H, Li X, Luo M, Malie P R, Moore G F, Mountjoy J J, McNamara D D, Paganoni M, Scream E J, Shankar U, Shreedharan S, Solomon E A, Wang X, Wu H Y, Pecher I A, LeVay L J. 2020. Slow slip source characterized by lithological and geometric heterogeneity. *Sci Adv*, 6: y3314
- Beamish D. 1982. The time-dependence of electromagnetic response functions. *Geophys Surveys*, 4: 405–434
- Bleier T, Freund F. 2005. Impending earthquakes have been sending us warning signals and people are starting to listen. *IEEE Spectrum INT*, 3: 3–7
- Cai J, Chen X, Xu X, Tang J, Wang L, Guo C, Han B, Dong Z. 2017. Rupture mechanism and seismotectonics of the  $M_s 6.5$  Ludian earthquake inferred from three-dimensional magnetotelluric ima-

- ging. *Geophys Res Lett*, 44: 1275–1285
- Chen C H, Lin J Y, Gao Y X, Lin C H, Han P, Chen C R, Lin L C, Huang R, Liu J Y. 2021. Magnetic Pulsations Triggered by Microseismic Ground Motion. *J Geophys Res*, 126: e2020J-e21416J
- Chen X B. 2007. Present-day horizontal deformation status of continental China and its driving mechanism. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 50: 1663–1673
- Cruz-Atienza V M, Tago J, Villafuerte C, Wei M, Garza-Girón R, Dominguez L A, Kostoglodov V, Nishimura T, Franco S I, Real J, Santoyo M A, Ito Y, Kazachkina E. 2021. Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico. *Nat Commun*, 12: 2171
- Gao Y, Hu H. 2010. Seismoelectromagnetic waves radiated by a double couple source in a saturated porous medium. *Geophys J Int*, 181: 873–896
- Gao Y, Harris J M, Wen J, Huang Y, Twardzik C, Chen X, Hu H. 2016. Modeling of the coseismic electromagnetic fields observed during the 2004  $M_w$  6.0 Parkfield earthquake. *Geophys Res Lett*, 43: 620–627
- Gao Y, Zhao G, Chong J, Klemperer S L, Han B, Jiang F, Wen J, Chen X, Zhan Y, Tang J, Xiao Q, Wang L. 2020. Coseismic electric and magnetic signals observed during 2017 Jiuzhaigou  $M_w$  6.5 earthquake and explained by electrokinetics and magnetometer rotation. *Geophys J Int*, 223: 1130–1143
- Gokhberg M B, Pilipenko V A, Pokhotelov O A. 1983. Seismic precursors in the ionosphere. *Izvestiya Earth Physics*, 19: 762–765
- Han B, Zhao G Z, Wang L F, Tang J, Bi Y X, Zhan Y, Chen X B, Xiao Q B, Zhang J H. 2021. Earthquake Electromagnetic Precursor Anomalies Detected by a New Ground-based Observation Network. *J Geodesy Geoinfor Sci*, 4: 116–123
- Han P, Hattori K, Huang Q, Hirano T, Ishiguro Y, Yoshino C, Febriani F. 2011. Evaluation of ULF electromagnetic phenomena associated with the 2000 Izu Islands earthquake swarm by wavelet transform analysis. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 11: 965–970
- Han P, Hattori K, Huang Q, Hirooka S, Yoshino C. 2016. Spatiotemporal characteristics of the geomagnetic diurnal variation anomalies prior to the 2011 Tohoku earthquake ( $M_w$  9.0) and the possible coupling of multiple pre-earthquake phenomena. *J Asian Earth Sci*, 129: 13–21
- Hayakawa M, Molchanov O A. 2002. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: TERRAPUB
- Honkura Y, Oshiman N, Matsushima M, Barış S, Kemal Tunçer M, Bülent Tank S, Celik C, Ciftçi E T. 2013. Rapid changes in the electrical state of the 1999 Izmit earthquake rupture zone. *Nat Commun*, 4: 2116
- Hu H, Gao Y. 2011. Electromagnetic field generated by a finite fault due to electrokinetic effect. *J Geophys Res*, 116: B8302
- Huang Q, Ikeya M. 1998. Seismic electromagnetic signals (SEMS) explained by a simulation experiment using electromagnetic waves. *Phys Earth Planet Inter*, 109: 107–114
- Huang Q, Ikeya M. 1999. Experimental study on the propagation of seismic electromagnetic signals (SEMS) using a mini-geographic model of the Taiwan Strait. *Episodes*, 22: 289–294
- Huang Q H. 2002. One possible generation mechanism of co-seismic electric signals. *Proc Japan Academy Ser B*, 78: 173–178
- Huang Q H, Lin Y F. 2010. Selectivity of seismic electric signal (SES) of the 2000 Izu earthquake swarm: a 3D FEM numerical simulation model. *Proc Japan Academy Ser B*, 86: 257–264
- Huang Q. 2011. Retrospective investigation of geophysical data possibly associated with the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *J Asian Earth Sci*, 41: 421–427
- Huang Q H, Ren H X, Zhang D, Chen Y J. 2015. Medium effect on the characteristics of the coupled seismic and electromagnetic signals. *Proc Japan Academy Ser B*, 91: 17–24
- Jiang F, Chen X B, Zhan Y, Zhao G Z, Yang H, Zhao L Q, Qiao L, Wang L F. 2016. Shifting Correlation Between Earthquakes and Electromagnetic Signals: A Case Study of the 2013 Minxian-Zhangxian  $M_L$  6.5 ( $M_w$  6.1) Earthquake in Gansu, China. *Pure Appl Geophys*, 173: 1–16
- Jiang F, Chen X, Chen C C, Chen H. 2020. Relationship between seismic electric signals and tectonics derived from dense geoelectric observations in Taiwan. *Pure Appl Geophys*, 177: 441–454
- Johnston M, Uyeda S. 1999. Electromagnetic methods for monitoring earthquake and volcanic eruptions. *IUGG 99*. A72–A83
- Kuo C L, Huba J D, Joyce G, Lee L C. 2011. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges. *J Geophys Res*, 116: A10317
- Kuo C L, Lee L C, Huba J D. 2014. An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system. *J Geophys Res Space Phys*, 119: 3189–3205
- Le H, Liu J Y, Liu L. 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736  $M$  6.0+ earthquakes during 2002–2010. *J Geophys Res*, 116: A02303
- Lei X, Huang D, Su J, Jiang G, Wang X, Wang H, Guo X, Fu H. 2017. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to  $M_w$  4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. *Sci Rep*, 7: 7971
- Ma Q. 2002. The boundary element method for 3-D dc resistivity modeling in layered earth. *Geophysics*, 67: 610–617
- Mao Z, Chen C H, Zhang S, Yisimayili A, Yu H, Yu C, Liu J Y. 2020. Locating seismo-conductivity anomaly before the 2017  $M_w$  6.5 Jiuzhaigou earthquake in China using far magnetic stations. *Remote*

- Sens*, 12: 1777
- Nagata T. 1972. Application of tectonomagnetism to earthquake phenomena. *Tectonophysics*, 14: 263–271
- Ogawa T, Oike K, Miura T. 1985. Electromagnetic radiations from rocks. *J Geophys Res*, 90: 6245–6249
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, Sauvaud J A, Santolik O, Blecki J. 2006. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions. *Phys Chem Earth Parts A B C*, 31: 486–495
- Pulinets S, Boyarchuk K. 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer
- Reddy I K, Phillips R J, Whitcomb J H, Cole D M, Taylor R A. 1976. Monitoring of time dependent electrical resistivity by magnetotellurics. *J Geomagn Geoelec*, 28: 165–178
- Ren H, Huang Q, Chen X. 2010. A new numerical technique for simulating the coupled seismic and electromagnetic waves in layered porous media. *Earthq Sci*, 23: 167–176
- Ren H, Chen X, Huang Q. 2012. Numerical simulation of coseismic electromagnetic fields associated with seismic waves due to finite faulting in porous media. *Geophys J Int*, 188: 925–944
- Ren H, Wen J, Huang Q, Chen X. 2015. Electrokinetic effect combined with surface-charge assumption: a possible generation mechanism of coseismic EM signals. *Geophys J Int*, 200: 837–850
- Ren H, Huang Q, Chen X. 2016. Existence of evanescent electromagnetic waves resulting from seismoelectric conversion at a solid-porous interface. *Geophys J Int*, 204: 147–166
- Shen X H, Zong Q G, Zhang X M. 2018. Introduction to special section on the China Seismo-Electromagnetic Satellite and initial results. *Earth Planet Phys*, 2: 439–443
- Shen X, Zhang X, Hong S, Jing F, Zhao S. 2013. Progress and development on multi-parameters remote sensing application in earthquake monitoring in China. *Earthq Sci*, 26: 427–437
- Stacey F D. 1964. The seismomagnetic effect. *Pure Appl Geophys*, 58: 5–22
- Türkoğlu E, Unsworth M, Çağlar İ, Tuncer V, Avşar Ü. 2008. Lithospheric structure of the Arabia-Eurasia collision zone in eastern Anatolia: Magnetotelluric evidence for widespread weakening by fluids. *Geology*, 36: 619–622
- Unsworth M, Bedrosian P, Eisel M, Egbert G, Siripunvaraporn W. 2000. Along strike variations in the electrical structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geophys Res Lett*, 27: 3021–3024
- Uyeda S. 2015. Current affairs in earthquake prediction in Japan. *J Asian Earth Sci*, 114: 431–434
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I. *Tectonophysics*, 110: 73–98
- Wang Y L, Xie T, An Y R, Yue C, Wang J Y, Yu C, Yao L, Lu J. 2019. Characteristics of the coseismic geomagnetic disturbances recorded during the 2008  $M_w$  7.9 Wenchuan Earthquake and two unexplained problems. *Earth Planet Phys*, 3: 436–444
- Xu G, Han P, Huang Q, Hattori K, Febriani F, Yamaguchi H. 2013. Anomalous behaviors of geomagnetic diurnal variations prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ( $M_w$ 9.0). *J Asian Earth Sci*, 77: 59–65
- Yukutake T, Tachinaka H. 1967. Geomagnetic variation associated with stress change within semi-infinite elastic earth caused by 1 cylindrical force. *Bull Earthqu Res Instit*, 45: 785–798
- Zhao G Z, Zhao J, Liu G D, Tang J, Liu T S, Zhan Y. 1997. Two-Dimensional Inversion and Interpretation of Magnetotelluric Data in a Seismic Active Area of Northern Part of North China. In: *Geophysics*. London: CRC Press. 69–82. doi: 10.1201/9780429070853-7
- Zhao G, Zhan Y, Wang L, Wang J, Tang J, Xiao Q, Chen X. 2009. Electromagnetic anomaly before earthquakes measured by electromagnetic experiments. *Earthq Sci*, 22: 395–402
- Zhao G Z, Wang L F, Chen X B, Tang J, Wan Z S, Zhan Y, Xiao Q B, Cai J T, Zhang J H, Wang J J. 2010. The active fault belts in eastern Tibet margin inferred using magnetotellurics. *Geol Acta*, 8: 99–110
- Zhao G, Unsworth M J, Zhan Y, Wang L, Chen X, Jones A G, Tang J, Xiao Q, Wang J, Cai J, Li T, Wang Y, Zhang J. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan  $M_w$  7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40: 1139–1142
- Zhao S, Zhou C, Shen X, Zhima Z. 2019. Investigation of VLF transmitter signals in the ionosphere by ZH-1 observations and full-wave simulation. *J Geophys Res Space Phys*, 124: 4697–4709
- Zhou C, Liu Y, Zhao S, Liu J, Zhang X, Huang J, Shen X, Ni B, Zhao Z. 2017. An electric field penetration model for seismo-ionospheric research. *Adv Space Res*, 60: 2217–2232
- Zhu W, Allison K L, Dunham E M, Yang Y. 2020. Fault valving and pore pressure evolution in simulations of earthquake sequences and aseismic slip. *Nat Commun*, 11: 4833
- Гусев, Гуфепь, Литеровский. 1997. СДВ РАДИОВОЛНОВОЙ МОНИТОРИНГ КРАТКОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ. Москва

(责任编辑: 潘永信)