利用自制SEP电磁观测系统研究祁曼塔格山和西柴达木盆地岩石圈结构

底青云^{1,2,4,5*}, 薛国强^{3,4,5†}, 王中兴^{1,2,4,5}, 何兰芳^{3,4,5}, 裴仁忠^{1,2,4,5}, 张天信^{1,2,4,5}, 方广有⁶

1. 中国科学院深地资源装备技术工程实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院页岩气和地质工程重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

3. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;

5. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

6. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

* 通讯作者, E-mail: qydi@mail.iggcas.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: xueguoqiang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2020-08-03; 收修改稿日期: 2021-04-12; 接受日期: 2021-05-07; 网络版发表日期: 2021-08-06

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC0603200)、中国科学院科研仪器设备研制项目(编号: ZDZBGCH2018006)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 42030106)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0804)资助

摘要 地球物理是开展“深地”探测最重要的技术手段之一, 利用高精度装备进行数据观测和实验分析, 通过数据处理和信息认识地球内部复杂结构. 高端地球物理勘探装备, 尤其是电磁勘探装备, 长期以来被美国、加拿大、德国等欧美国家垄断, 制约了中国“深地”探测技术的发展. 中国科学院地质与地球物理研究所联合国内相关科研单位成功研制地面电磁探测(Surface Electromagnetic Prospecting System, SEP)系统. 首先, 在具有强电磁干扰复杂环境的建三江进行测试对比, 确认仪器的稳定性和性能的可靠性; 然后, 采用SEP系统在柴达木盆地西缘进行深部地质构造的科学观测, 数据质量与国际高端装备系统探测结果相当, 并探测出更精细的深部地质结构. 结果显示, 祁曼塔格山之下的上地幔层存在高导异常, 表明可能存在一个向北方向的流体通道, 通过剖面南端的底部高导层异常推测流体到达了柴达木西部地壳底部. 柴达木盆地巨厚的新生代沉积物以一系列的褶皱为特征, 其基底是前寒武纪刚性地块. 地质-地球物理综合分析发现, 青藏高原北部上地壳发生纵弯褶皱是柴达木盆地形成的主要原因, 下地壳变形以流变为主. 这一认识为青藏高原隆起机制研究提供了较好的地球物理证据.

关键词 地面电磁探测系统, 自主研发, 探测能力, 柴达木盆地西缘, 岩石圈结构

中文引用格式: 底青云, 薛国强, 王中兴, 何兰芳, 裴仁忠, 张天信, 方广有. 2021. 利用自制SEP电磁观测系统研究祁曼塔格山和西柴达木盆地岩石圈结构. 中国科学: 地球科学, 51(12): 2197–2204, doi: [10.1360/SSTe-2020-0203](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0203)

英文引用格式: Di Q, Xue G, Wang Z, He L, Pei R, Zhang T, Fang G. 2021. Lithospheric structures across the Qiman Tagh and western Qaidam Basin revealed by magnetotelluric data collected using a self-developed SEP system. Science China Earth Sciences, 64(10): 1813–1820, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9785-4>

1 前言

地球科学与人类生存和社会发展密切相关, 深部探测是地球科学研究的重要分支, 也是揭示地球深部结构和物质组成的必要手段. 多个国家相继启动了深部探测计划, 包括: 美国的COCORP计划和Earth-Scope计划(Oliver等, 1983)、英国的BIRPS计划(Matthews和Group, 1990)、澳大利亚的GLASS EARTH计划(Moss和Mathur, 1986)和LITHOPROBE计划(Clowses, 1992)等, 对地球深部的认识取得了一系列成果. 中国也启动了深部探测技术与实验研究专项(Sino-Probe), 旨在建立固体地球深部圈层立体探测的技术体系.

借助地球物理手段, 通过分析地球内部地球物理参数(地震波、电磁场、重力场、磁场和地温场)的变化, 可以获得深部地质体的分布形态和物理属性, 从而为研究深部地球动力学过程提供依据(董树文等, 2012; 武振波等, 2016; 邹长桥等, 2017; 底青云等, 2019; 韩江涛等, 2019). 大地电磁(Magnetotelluric, MT)方法是获取深部电性结构最重要的技术手段(Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953), 基于电磁波传播的大地电磁测深方法能够提供地下电阻率分布以及由此推测的岩石孔隙度、流体含量、温度等属性, 在深部结构、矿产资源、地热探测中具有重要作用(Bai等, 2010; 许林斌等, 2017; 詹艳等, 2017; Johansen等, 2019).

由于大地电磁场属于弱场, 弱场测量要求极高的精度和分辨能力, 以便能够抵抗环境噪声的影响. 在20世纪中叶, 受限于大地电磁观测仪器、计算机和电磁测量水平, 大地电磁测深没有得到广泛的应用. 随着电子技术和计算机的发展, 大地电磁测量仪经历了电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路四个阶段, 实现了小型化飞跃(林君等, 2010; 黄大年等, 2012). 大地电磁方法在俄罗斯、美国、加拿大、澳大利亚、东欧、日本、冰岛等地的地球物理高分辨勘探工作中发展迅速(Oliver等, 1983; Moss和Mathur, 1986; Matthews和Group, 1990; Clowses, 1992; Unsworth等, 2000; Caldwell等, 2004; Johansen等, 2019), 主要得益于研发的一系列高精度电磁探测装备. 目前国际上主要的大地电磁探测系统包括: 加拿大Phoenix的V系列、美国Zonge公司的GDP系列、美国Geometrics和EMI公司联合研制的EH4系统、德国Metronix公司的GMS系列、

EMI公司的MT系列, 以及加拿大Geonics公司和瑞典ABEM公司联合研制的WADI甚低频测量仪等. 国内大地电磁法勘探装备基本上被加拿大Phoenix、美国Zonge、德国Metronix三大仪器公司产品垄断(Zhang等, 2015), 占据了中国90%以上的市场. 由于受资助力度不够、研究力量分散、研究工作持续性差等因素的影响, 中国一直未开发出适合本国实际情况的可用于深部勘查的实用化、商用化、高分辨的大地电磁法仪器设备. 所以, 研制具有中国自主知识产权的大地电磁探测系统迫在眉睫.

中国科学院地质与地球物理研究所联合国内多家科研单位攻克了低噪声感应式磁传感器的技术瓶颈, 研制出高分辨率采集站和大功率密度发射机, 自主研发了地面电磁探测(Surface Electromagnetic Prospecting System, SEP)系统(底青云等, 2013). 该系统探测范围覆盖地球浅部(0~1.5km)、中部(1.5~5km)和深部(5~10km), 可用于金属矿、地热和地质构造等目标体的探测. 目前, SEP系统的浅部探测能力已在辽宁兴城杨家杖子铅锌矿、甘肃金川镍矿和内蒙古曹四夭钼矿等实际探测中获得成功测试(底青云等, 2015), 测试结果与已知地质、地球物理、钻孔等数据吻合度较高. 为明确SEP系统对深部结构的探测能力, 需要选择典型地区开展深部岩石圈尺度的探测试验. 为此, 我们首先在室内环境下对宽频带(10kHz~10000s)大地电磁标准信号和含噪声信号进行测试; 之后, 针对特定噪声和自然环境, 在黑龙江建三江开展了实地数据采集试验, 并与国际先进仪器进行了比对; 最后, 在柴达木盆地西缘完成深部150km结构探测. 根据所获得的大地电磁视电阻率断面图, 推测在祁曼塔格山上地幔层流体到达了柴达木西部地壳底部, 新的解释成果显示柴达木盆地基底是前寒武纪刚性地块.

2 观测系统与软件系统

电磁探测装备系统包括大功率发射机、宽频带接收机和高灵敏磁传感器. 磁传感器是系统核心部件, 除了应用于地球物理探测外, 还在国防领域有重要的应用, 长期被西方国家技术封锁, 存在磁芯材料、线圈绕制工艺、低噪声电路等技术难点, 中国之前一直未能取得突破.

2013年,通过技术攻关,我们突破了磁传感器核心技术,成功研制出感应式磁传感器(图1a).在磁芯材料制备工艺方面,采用高磁导率的坡莫合金和高温绝缘氧化物材料,经过高温氧化炉退火,使得初始磁导率大大提高;带材厚度减小为数十个微米,有效地降低了导磁材料的涡流磁场能量的损耗,实现了磁场信号无损放大.在线圈设计与加工工艺方面,通过理论设计,优化线圈线径、直径和匝数等参数,优化重量/体积比;漆包线圈采用特殊绕制方式,有效降低了分布电容,在16000匝时线圈分布电容小于90pF.

通过攻关带通正反馈高频幅度补偿、调理电路白噪声抑制、高精度信号采集与同步、基于可编程逻辑门阵列(FPGA)的信号处理、原子钟对时等技术,研制了分布式采集站(图1b).研制的采集站通道多(12道)、动态范围大($\geq 120\text{dB}$)、频带范围宽(DC~10kHz)、噪声低($2\mu\text{V}_{\text{RMS}}$)、功耗低、体积小、重量轻.

研制的极低频微弱信号检测电路技术,有效地消除了放大器等半导体器件在低频段的直流漂移和 $1/f$ 噪声影响,提高了磁传感器低频微弱信号的识别能力(朱万华等, 2013).自主研制的磁传感噪声曲线如图1c所示,其平均噪声为 $0.05\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$,传感器性能达到了国际先进水平(国际水准平均噪声为 $0.1\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$).

为检验自主研制的SEP系统各组成部分在实际勘查中的性能与可靠性,以及整体系统的野外实际工作能力,我们在内蒙古乌兰察布市兴和县曹四夭钼矿开展了SEP不同类型磁传感器之间以及SEP整套系统与国外商业仪器系统的全面对比试验(底青云等, 2015).试验采用多种方案,分别进行了高温超导磁传感器和感应式磁传感器之间的性能对比试验,磁通门磁传感器和感应式磁传感器之间的性能对比试验,SEP系统与加拿大Pheonix公司V8、美国ZONGE公司GDP-32II等国际先进仪器的CSAMT法综合对比试验,以及SEP系统和V8系统的MT法对比试验.试验结果对比显示,自主研制的SEP系统整体上已经与国外同类产品相当,部分性能指标优于国际高端产品,能够胜任野外实际勘查工作.

建立了3D电磁数据的成像处理和解释技术:针对中国大多矿区电性结构复杂的情况,建立了电磁数据成像处理、解释和可视化软件平台.包括MT预处理程序、2D和3D电磁正反演软件系统.

数据预处理实现了从时间序列到频率域信号之间的转换,并实现了干扰数据记录自动剔除、通道标定、频率选择、互功率谱相干分析及视电阻率计算.实现了阻抗矩阵四分量曲线成图、视电阻率及阻抗相位曲线成图、视电阻率及相位的手动编辑功能.静态效应使视电阻率曲线在对数坐标中发生平移,对此采用三种方法来进行校正.(1)手动平移法:采用人机联作的方法,比较相邻测点曲线形态和幅度,将明显偏离众值的测点曲线进行平移,使各点曲线的幅度连续变化.(2)低通滤波法:在空间域,静态效应是高频成分,所以采用汉宁低通滤波方法在剖面上进行低通滤波,平移测点曲线,使各点曲线的幅度连续变化.(3)瞬变电磁(Transient electromagnetic method, TEM)静态校正法:由于TEM资料没有静态,所以可用TEM数据获得高频的视电阻率,然后平移大地电磁视电阻率曲线,使高频段和TEM曲线重合,实现静态校正的目的.

图形可视化软件分成数据管理和数据可视化两大部分.第一部分数据管理平台:数据导入模块、数据编目管理、数据存档、数据备份与恢复、数据查询浏览、目录检索、数据下载.第二部分可视化演示平台主要是实现图形显示功能.包括全图显示模块、图形缩放模块、漫游模块、视图切换模块、查询模块、图层控制模块、数据调度和渲染、断面显示、三维体数据可视化等.

为了检验地面大地电磁探测系统各组成部分在海拔、低温环境的性能及可靠性,以及由SEP系统各组成部分集成的整体系统的野外实际工作能力,在黑龙江建三江(低温极端环境)开展了与国外仪器的比对试验.通过不同发射机原始曲线、不同接收机原始曲线、反演剖面的详细对比,表明SEP系统和国际高端商业仪器系统的数据一致性好,SEP系统的抗干扰能力已经和国际先进仪器相当,能够胜任强电磁干扰环境的勘探任务.

2015年10月下旬至11月上旬,使用SEP系统在黑龙江省佳木斯市建三江地区进行MT方法测试.测试温度 -3°C ,试验时长12h.XY方向的视电阻率幅值与相位的试验结果显示三台仪器测试结果曲线基本吻合(图2).视电阻率幅值一致性误差为2.74%,相位误差为3.46%,证明SEP系统能够克服严寒气候,取得良好的试验结果.

图1 自主研制大地电磁SEP系统及感应式磁传感器等效输入噪声

(a) 感应式磁传感器; (b) SEP系统接收机; (c) 感应式磁传感器等效输入噪声

图2 建三江视电阻率和相位曲线对比图

(a) 视电阻率曲线; (b) 相位曲线

3 SEP电磁观测与资料处理解释

3.1 SEP电磁数据观测

研究区域位于青藏高原北缘与柴达木、塔里木盆地三者交汇地区(图3), 是理解陆内岩石圈变形机制, 探索高原侧向增生、研究盆山相互作用的理想窗口。2018年8~9月, 我们在该区开展了大规模的大地电磁测深阵列观测, 共完成了222个宽频带(Broadband) MT测点的野外采集工作(具体测线及测点分布如图3所示)。虽然研究区域内的MT测点主要以剖面形式布

设, 但各剖面之间的水平间距较小(小于100km), 辅以剖面间的零散测点, 基本实现了对研究区域的面积性覆盖, 具备开展较大尺度三维电性结构成像研究的条件。

试验采用了两种型号的仪器, 分别是自主研发的地面大地电磁探测系统SEP和加拿大Phoenix生产的MTU-5A系统。每个测点包含两个正交的电道(E_x 、 E_y)和三个磁道(H_x 、 H_y 、 H_z), 电场测量采用两对不极化电极, 磁场测量采用自主研发的宽频带磁棒。各测点的平均观测时间均超过20h, 有效频段范围为

图3 研究区域内对比点的剖面线

P点为7340对比点, 黄色线为测量剖面线, 白色圆点所示测点采用SEP系统, P点表示MTU-5A系统与SEP系统同时观测点

320Hz~3000s, 最大有效探测深度达到数十至上百千米, 可提供地壳-岩石圈尺度的电性结构信息。

图4为SEP和MTU-5A在同一测点(图3中所示的P点位置)独立采集低频数据的对比图, 有效采集时间超过50h, 选用对比频段为0.00034~10Hz. 结果显示, SEP和MTU-5A采集曲线形态基本一致, 证明自主研制的

仪器系统与Phoenix公司MTU测量水平相当。

3.2 资料处理解释

研究区域内人烟稀少, 远离人文噪声干扰, 因此数据质量整体上较好. 相位张量是阻抗张量实部矩阵的逆矩阵与虚部矩阵的乘积, 具有不受电流型畸变影响和无需对地下介质维性作假设的优点, 是近年来被广泛应用的一种MT数据分析方法. 相位张量可以椭圆的形式进行展示, 椭圆的形状、长轴方向、填充颜色包含了地下介质的构造走向、维性、电性分布等电性结构信息. 当区域电性结构为1D时, 相位张量椭圆的长、短半轴长度相同, 椭圆为圆形, 而当区域电性结构为2D时, 相位张量的长、短半轴分别对应两种极化模式(transverse electric & transverse magnetic)的相位, 椭圆的长轴平行或垂直于构造走向. 此外, 椭圆的长、短半轴值(即填充色)能够反映电阻率随深度的变化情况, 当它们大于45°时表明电阻率随着深度增加而减小, 反之当它们小于45°时则表明电阻率随着深度增加而增大。

图5所示为各测点的相位张量椭圆在不同周期(1~1000s)的分布, 椭圆填充色为椭圆短轴值(即最小相位差值). 结果表明, 研究区域内盆(柴达木+塔里木)山(阿尔金山+祁曼塔格)地区具有截然不同的电性结构. 在地壳浅层(周期小于10s), 柴达木和塔里木盆地的相

图4 SEP和MTU-5视电阻率(a)、相位曲线(b)对比

位张量椭圆接近圆形, 相位值高于 45° (偏红色), 反映了盆地浅层的近1D低阻沉积盖层; 而阿尔金山和祁曼塔格山脉的相位值均小于或接近 45° (偏蓝色), 反映了这些地区上地壳整体上是高阻的. 在中下地壳或上地幔顶部(周期大于100s), 盆山地区的电性结构模式发生了反转. 柴达木和塔里木盆地的相位值急剧减小, 反映了盆地的高阻结晶基底, 而阿尔金山西段和祁曼塔格山脉的相位值升高至超过 45° , 反映了在这些地区的深部存在显著的低阻异常.

4 祁曼塔格山和西柴达木盆地岩石圈深部结构特征

图6是深部探测地球物理与地质剖面对比图. 图6a是由Xiao等(2018)完成的电阻率剖面图, 采用产于德国Metronix公司的ADU07仪器系统进行数据采集, 采用基于非线性共轭梯度(NLCG)算法的ModEM程序(Kelbert等, 2014)进行视电阻率反演计算. 电阻率值在南北和东西方向都发生变化, 说明地下电性结构不均匀, 在测线南段表现为高电阻率值, 在测线中段表示为低电阻率值, 这种电性结构变化与祁曼塔格山与柴达木盆地接替出现的空间关系一致. 在测线的北段, 出现高电阻异常, 说明该段处于柴达木盆地北缘与阿尔金断裂交汇部位. 图6b是由Xiao等(2018)推测的跨越东昆仑山的地质结构模型图. 他们认为祁曼塔格山下方上地幔高导异常表明了可能存在一个向北方向的

流体通道; 剖面南端的底部高电异常可能反映深部物质流到达了柴达木盆地西部下地壳底部.

图6c是依据本文作者自主研发的SEP仪器采集数据的处理结果(数据处理与Xiao等(2018)的反演计算方法相同, 即水平方向网格尺寸为5km, 垂直方向上首层厚度为50m, 并以系数1.2随着深度增大而逐渐增大各层厚度). 从图6c可以看出, 本文的3D处理结果明显优于Xiao等(2018)的2D反演结果, 更清晰地显示了柴达木盆地浅部与深部的细致结构: (1) 整个测线深部电性均具有明显的差异性, 反映深部岩石圈具有电性结构不均匀性. 祁曼塔格上地壳表现为高电阻率值, 而柴达木盆地上地壳表现为低电阻率, 下地壳表现为中高电阻率, 反映出祁曼塔格-柴达木盆地地壳的内部, 不存在连续高导层, 故不存在连贯中-下地壳通道流. (2) 在祁曼塔格深部100~150km范围内出现高导异常体, 并且向北逐渐减弱, 推测该异常体代表向北流动的地幔通道流, 向北可抵达柴达木中部.

图6d是根据本次电阻率断面处理成果建立的地质模型, 反映东昆仑山-柴达木盆地西部-阿尔金山的深部结构.

(1) 祁曼塔格和柴达木地体之间构成A-型俯冲关系. 这一俯冲关系表现为祁曼塔格俯冲到柴达木地体之下, 且俯冲作用主要发生于地壳层次, 即俯冲的祁曼塔格地体到达下地壳后未进入地幔, 反映该地区为一陆内造山带. 该陆内造山带的动力来源推测为印度-欧亚碰撞及其持续挤压应力.

图5 不同周期测点相位张量椭圆分布

上图, 实际观测相位张量; 下图, 反演模型计算得到的相位张量

图 6 深部探测电阻率剖面成果对比图

(a) 德国ADU07仪器测量剖面(Xiao等, 2018); (b) ADU07仪器深部地质成果图(Xiao等, 2018)(粉红色箭头表示地壳流, 紫红色箭头表示岩石圈流, 蓝色箭头表示来自青藏高原推向阿尔金的走滑力); (c) SEP数据反演电阻率断面图; (d) SEP系统探测结果的地质解释, h 表示深度. 红色表示低电阻的柴达木盆地地壳; 蓝色表示祁曼塔格山下方的高阻流体通道; 浅绿色表示盆地中下地壳与上地幔; 深绿色表示上地幔; 黄色还表示可能的拆沉的榴辉岩化祁曼塔格下地壳物质; 桔黄色表示阿尔金地块地壳

(2) 柴达木盆地下部可能存在一个大范围的下地壳-最上部地幔流或流变弱化层. 当祁曼塔格俯冲到柴达木盆地之下后, 由于祁曼塔格为一刚性体(相对低电导), 在其俯冲推挤作用下, 使得这祁曼塔格上地幔和柴达木盆地上地幔与中下地壳发生强烈变形, 并使得流变弱化层(或部分熔融体)局部上升到中上地壳层次.

(3) 在祁曼塔格山西北段岩石圈上地幔深度(100km深度以下)物质分布具有不均匀性, 表现为存在北东倾高导异常体. 该高导异常体向北东方向不断减弱, 大体至柴达木盆地西部南缘附近消失, 推测该高导异常体可能是向来自南部的地幔流.

(4) 柴达木盆地西部具有巨厚(>10km)高导沉积盖层, 下地壳电阻率较低, 且东西方向分布不均匀.

5 结论

电磁法探测是认识深部地质结构的主要手段, 需要借助于仪器平台进行数据采集才能完成. 鉴于中国

电磁探测装备长期受到西方勘探地球物理大国技术封锁的实际情况, 我们自主研发了包含大地电磁功能模块的电磁探测系统(SEP). 在弱电磁干扰环境、低温极端环境、强电磁干扰区的试验结果表明SEP系统性能已经和国际领先仪器相当. 特别是在青藏高原北缘柴达木盆地的深部探测(150km)试验结果表明: SEP在1000~3300s的低频段采集曲线形态和MTU-5A一致, 表明中国自主研发的SEP系统已成功取得突破, 可为中国深地探测和规模化电磁勘探提供装备支撑.

在祁曼塔格山以下的上地幔层, 发现存在高导异常, 推测祁曼塔格山以下可能存在一个向北方向的流体通道, 并且推测流体由祁曼塔格山向北到达了柴达木西部地壳底部. 柴达木盆地巨厚的新生代沉积物以一系列的褶皱为特征, 其基底是前寒武纪刚性地块. 根据电性剖面推测青藏高原北部上地壳发生纵弯褶皱是柴达木盆地形成的主要原因, 柴达木西部下地壳变形以流变为主. 这一认识为青藏高原隆起机制以及柴达木盆地新生代形变机制研究提供了更清晰的地球物理证据.

致谢 感谢西安西北有色物探总队郭文波教授级高工及技术人员付出, 感谢中国科学院地质与地球物理研究所常中华和图雅在野外采集协调方面提供的帮助, 感谢中国科学院地质与地球物理研究所白登海和孟庆仁研究员提出的有益建议, 感谢李鑫博士对资料的处理。

参考文献

- 底青云, 方广有, 张一鸣. 2013. 地面电磁探测系统(SEP)研究. 地球物理学报, 56: 3629–3639
- 底青云, 许诚, 付长民, 王中兴, 张文秀, 安志国, 王若. 2015. 地面电磁探测(SEP)系统对比试验——内蒙曹四夭钼矿. 地球物理学报, 58: 2654–2663
- 底青云, 朱日祥, 薛国强, 殷长春, 李貅. 2019. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展. 地球物理学报, 62: 2128–2138
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 魏文博, 高锐, 吕庆田, 杨经绥, 王学求, 陈群策, 石耀霖, 黄大年, 周琦. 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述. 地球物理学报, 55: 3884–3901
- 韩江涛, 袁天梦, 刘文玉, 刘立家, 刘国兴, 侯贺晟, 王天琪, 郭振宇, 康建强, 张金会. 2019. 西伯利亚板块与华北克拉通碰撞带地电结构及对深部缝合边界的讨论. 地球物理学报, 62: 1159–1171
- 黄大年, 于平, 底青云, 郭子祺, 林君, 孙友宏, 徐学纯. 2012. 地球深部探测关键技术装备研发现状及趋势. 吉林大学学报(地球科学版), 42: 1485–1496
- 林君, 王言章, 刘长胜. 2010. 高端地球物理仪器研究及我国产业化现状. 仪器仪表学报, 31: 173–180
- 武振波, 徐涛, 武澄沅, 张明辉, 田小波, 滕吉文. 2016. 利用接收函数反演青藏高原西部地壳S波速度结构. 地球物理学报, 59: 516–527
- 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
- 詹艳, 杨皓, 赵国泽, 赵凌强, 孙翔宇. 2017. 青藏高原东北缘海原构造带马东山阶区深部电性结构特征及其构造意义. 地球物理学报, 60: 2371–2384
- 朱万华, 底青云, 刘雷松, 闫彬, 刘凯, 方广有. 2013. 基于磁通负反馈结构的高灵敏度感应式磁场传感器研制. 地球物理学报, 56: 3683–3689
- 邹长桥, 贺日政, 段永红, 魏运浩, 刘巧霞, 刘洋. 2017. 远震P波层析成像研究阿尔金断裂带东端及其邻区深部结构. 地球物理学报,

- 60: 2279–2290
- Bai D, Unsworth M J, Meju M A, Ma X, Teng J, Kong X, Sun Y, Sun J, Wang L, Jiang C, Zhao C, Xiao P, Liu M. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nat Geosci*, 3: 358–362
- Caldwell T G, Bibby H M, Brown C. 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophys J Int*, 158: 457–469
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18: 605–635
- Clowes R. 1992. Lithoprobe—an integrated approach to studies of crustal evolution. *Geotimes*, 37: 12–14
- Johansen S E, Panzner M, Mittet R, Amundsen H E F, Lim A, Vik E, Landrø M, Arntsen B. 2019. Deep electrical imaging of the ultraslow-spreading Mohns Ridge. *Nature*, 567: 379–383
- Kelbert A, Meqbel N, Egbert G D, Tandon K. 2014. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Comput Geosciences*, 66: 40–53
- Matthews D H, Group T B. 1990. Progress in BIRPS deep seismic reflection profiling around the British Isles. *Tectonophysics*, 173: 387–396
- Moss F J, Mathur S P. 1986. A review of continental reflection profiling in Australia. *Reflection Seismol A Glob Perspect*, 13: 67–76
- Oliver J, Cook F, Brown L. 1983. COCORP and the continental crust. *J Geophys Res*, 88: 3329–3347
- Tikhonov A N. 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 73: 295–297
- 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
- Xiao Q, Yu G, Shao G, Li M, Wang J. 2018. Lateral rheology differences in the lithosphere and dynamics as revealed by magnetotelluric imaging at the northern Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Solid Earth*, 123: 7266–7284
- Zhang L, Unsworth M, Jin S, Wei W, Ye G, Jones A G, Jing J, Dong H, Xie C, Le Pape F, Vozar J. 2015. Structure of the Central Altyn Tagh Fault revealed by magnetotelluric data: New insights into the structure of the northern margin of the India-Asia collision. *Earth Planet Sci Lett*, 415: 67–79

(责任编辑: 殷长春)