

doi: 10.11720/wtyht.2020.0192

何继善.广域电磁法理论及应用研究的新进展[J].物探与化探,2020,44(5):985-990.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0192

He J S.New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(5):985-990.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0192

广域电磁法理论及应用研究的新进展

何 继 善^{1,2,3}

(1.有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学),湖南长沙 410083;2.有色金属资源与地质灾害探测湖南省重点实验室,湖南长沙 410083;3.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙 410083)

摘 要:矿产资源是国民经济发展的命脉,电磁法是寻找矿产资源的最有效方法之一,随着浅部资源的日渐枯竭,大深度高精度的电磁勘探是世界各国共同面临的技术难题,也是勘探地球物理学的研究热点。针对原有的人工源频率域电磁法深度浅、精度低等问题,从理论、方法、技术到应用,开展了系统研究,发明了广域电磁法。为频率域电磁法由粗放到精细的发展,跨越了一大步。由此形成了“大深度高精度广域电磁勘探技术与装备”成果,2018 年荣获国家技术发明一等奖。广域电磁法为油气勘探、深部找矿、煤矿水害探测、地质灾害防治、压裂监测、城市物探等提供了全新的技术手段,有力地支撑了面向国家重大需求的“深地探测”战略。本专栏收集的论文,主要分布在固体矿产、页岩气和地热探测,压裂监测与航空物探应用等技术研究领域。本文重点围绕这些论文,对广域电磁法理论及应用研究进展加以讨论。

关键词:大深度;高精度;广域电磁法;伪随机信号

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)05-0985-06

0 引言

电磁感应法(电磁法)是地球物理电法勘探的重要分支,该方法主要利用地下介质的导电性、导磁性和介电性的差异,应用电磁感应原理观测和研究人工或天然形成的电磁场分布规律(频率特性和时间特性),进而解决有关地质问题^[1-2]。电磁法发明至今已有百年,由于地球是复杂的非均匀、强耗散介质,电磁波的传播方程求解困难,长期以来对电磁数据只能做定性分析或采用近似公式做定量分析。

针对传统电磁法的不足,提出了广域电磁法。该方法继承了可控源音频大地电磁法(controlled source audio-frequency magnetotellurics,CSAMT)场源可控的优点,克服了大地电磁法(magnetotelluric,MT)场源随机性和信号微弱的缺点,特别是摒弃了 CSAMT 将本来是曲面波的电磁波简化成平面波,沿用“卡尼亚(cagniard)视电阻率”计算公式的做法,

用电磁场的全域精确公式提取视电阻率,从而可以在“非远区”进行测量,拓展了人工源电磁法的观测范围,成倍地增加了探测深度;针对 CSAMT 变频发送的缺点,采用一次发送包含多个频率成分且振幅接近的伪随机信号电流^[3],大幅度提高了观测速度、精度和野外勘探效率^[4-5]。

近年来,在国家自然科学基金、科技部国家重点研发计划以及行业科研专项等项目的持续资助下,广域电磁法实现了地质结构的大面积、大深度、高精度、高效率和多参数探测^[6]。为了有效地提供最新研究成果,在《物探与化探》编辑部组织的“广域电磁法”专栏中将当前最新资料的研究成果与大家共享。本专栏收录的学术论文,主要分布在固体矿产、页岩气和地热勘探,压裂监测和航空物探方面等研究领域。

以专栏形式刊载广域电磁法的研究进展,展现了学术期刊服务读者面向社会的重要举措,有利于广域电磁法技术的应用与推广,供学者们参考、质疑

收稿日期:2020-07-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0807802);国家自然科学基金面上项目(41874081)

作者简介:何继善(1934-),教授,博士生导师,中国工程院院士。长期致力于地球物理理论、方法技术及观测系统的研究。Email:hejishan@csu.edu.cn

或争论,以推动广域电磁法乃至地球电磁学的进步。

1 技术研究进展

王宏宇等从广域电磁法理论出发,推导了地面发射—坑道接收的电磁场表达式,导出了地—坑模式广域视电阻率计算公式,并提出了相应的观测方式;该技术在某超大型金属矿山进行了方法试验研究,获得了可靠的数据,经初步处理与解释取得了良好的地质成果;表明地—坑广域电磁法值得进一步的推广和研究,有望在金属矿山深边部盲矿体探测、煤田巷道深部不良地质体空间定位等领域发挥作用。

低阻覆盖区导致发射端的电磁波能量主要消耗在浅部发热,发射效率低,导致即使是大电流发射,接收端的信号强度也很小,传统意义上认为是电(磁)法工作的“禁区”;田红军等将广域电磁法用于南华盆地低阻覆盖区页岩气探测,基于深挖坑—长导线发射,大 MN 距—长时间迭代的测量技术,获得工作区地下 5 km 内地层电阻率分布规律和特征,查明了工作区的构造展布,同时揭示了以二叠系太原组、山西组和上石盒子组、下石盒子组为主要目的层的含气页岩发育特征,表明广域电磁法可在低阻覆盖区有效工作。

电子设备一般应用在温度从 0℃~40℃ 的环境下,东北地区冬季温度可达零下几十度,属于极寒环境,一直是电法勘探仪器设备的工作禁区。江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队的詹少全等为了扩展广域电磁仪器的应用范围和应用领域,做到全气候条件下的勘探,开展了春季与极寒条件下未揭穿冻土层、极寒条件下揭穿与未揭穿冻土层的对比试验,在实践中应用了各类保暖方法及克服冻土层高阻的措施,总结出一套极寒条件下勘探技术手段。试验证明广域电磁法能在极寒环境下开展工作,在极寒条件下对仪器要采取保暖措施,在野外给仪器设备放入保暖箱或空调环境,配备应急电源设备防止极寒条件设备电池损耗快,只要采取有效的对仪器设备的保暖措施,能保证仪器能正常工作,广域电磁法能在极寒条件下开展工作,并且取得良好的勘探效果。

2 固体矿产勘探

矿产资源是人类文明进步、国民经济发展和科学技术革命的基础;在世界经济中,95% 以上的能

源,80% 以上的工业原料和 70% 以上的农业生产资料来源于矿产资源;长期来看,矿产资源作为我国国民经济的重要基础地位不会改变,矿产资源的供应安全,仍是我国国家安全的重要方面^[7]。

田红军等在胶西北某金矿已知地质剖面对比分析了广域电磁法、MT、CSAMT 与 SIP 的勘探效果,相对于 MT 而言,广域电磁法具有分辨率高、数据精度高、抗干扰能力强和施工效率高等优势;相对于 CSAMT 和 SIP 而言,广域电磁法具有勘探深度大、抗干扰能力强、数据精度高等技术优点;广域电磁法成果与已知地质勘探剖面上断裂蚀变带的地球物理场特征相吻合,表明了广域电磁法是胶西北地区金矿勘探的有效方法。

胶西北地区发育的三山岛、焦家、招平 3 条区域性主干断裂构造分别控制着一系列超大型—大中型金矿,形成了胶西北金矿富集区。近年来通过多种地球物理技术结合钻探验证,又在这些断裂带 1 500 m 以深发现了纱岭、三山岛北部、西岭等多个超大型矿床,新发现金矿资源储量达 1 200 t,区内深部找矿前景光明。但受传统地球物理技术方法的限制,在这些主干断裂构造之间的广大覆盖区却少有金矿勘查突破。它们之间是否有隐伏主干赋矿构造存在?覆盖区深部地质结构特征?三山岛和焦家断裂深部构造样式?一系列问题亟待解决。王洪军通过广域电磁法勘探推断了三山岛和焦家断裂带及其之间隐伏的 5 条断裂带地质特征,获得了覆盖区地层和岩浆岩深部地质结构特征,推测了三山岛和焦家断裂带深部构造样式,最新钻探验证结果证明广域电磁法在胶西北金矿集中区强干扰环境下具有优异的应用效果,其解译成果为胶西北金矿集中区三山岛和焦家主干断裂之间的隐伏区深部探测提供了坚实的基础。

上宫金矿集区位于豫西熊耳山地区,大地构造位置位于华北地台南缘,区内构造活动频繁,岩浆活动强烈。自 20 世纪 80 年代,河南省地矿局地调一队发现了国内典型的构造蚀变岩型上宫金矿以来,矿集区内陆续发现了干树、吉家洼、虎沟、七里坪等多处金矿床,是河南省重要的黄金生产基地。随着浅部资源的开采,寻找复杂的、深部的矿体难度越来越大,成本也越来越高。刘耀文等将广域电磁法用于上宫金矿集区深部勘探,目的是探测区内 3 000~5 000 m 范围内的深部矿体异常信息,开展新方法试验,提交可供工程验证的找矿靶位,试验识别了中低电阻率电性特征的新太古界太华群石板沟岩组片麻岩类(Arth),中高电阻率电性特征的中元古界熊耳

群许山组安山岩类(Pt_2x)和高电阻率电性特征的元古宙闪长岩侵入岩体,在区内共推断划分了 8 条断裂构造带,2 条构造蚀变带。其中 F1、F5 两条构造破碎带,延伸长度大,具有较好的深部找矿空间和潜力,在其深部圈定了 2 处成矿有利区。

东昆仑祁漫塔格地区是青海省重要的铁多金属成矿带之一,区内目前已发现有尕林格、四角羊—牛苦头、虎头崖、野马泉、肯德可克、沙丘、它温查汉、它温查汉西等一批大中型铁多金属矿床。前人对野马泉矿床成矿条件和成矿规律进行了大量研究,认为其为典型的矽卡岩型铁多金属矿床,目前认为低缓磁异常及剩余重力梯级带对野马泉矿区铁多金属找矿具有重要作用和实际意义,但在这些区域内仅从平面上对铁多金属矿体的分布范围有了大致的定性了解,而对纵向上岩体及地层的埋深及分布情况没有一个定量的认识。青海省第三地质勘查院完成了 7 条广域电磁法剖面,获得了调查区内电性结构分布特征,并综合重力资料,基本查明了 M1 至 M3 之间地层与岩体分布范围、延伸、埋深情况及深部接触关系,为探寻深部多金属赋矿有利部位提供了有力依据,经钻孔验证取得了很好的地质找矿效果。勘探成果表明广域电磁法在野马泉矿区寻找铁多金属矿效果显著,并扩大了野马泉矿区的找矿规模及远景。

梁维天等将广域电磁法应用到河洼地区、辽东裂谷和新房多金属矿的深部勘查,实践证明浅部的广域电磁法推断成果与已知地质资料高度吻合,广域电磁法的反演成果对于存在物性差异的各个界面划分十分明显,与钻孔岩性变化吻合度也较高,广域电磁法勘探深度大,对存在明显物性差异地层的辨识程度较高,对辽东地区金矿以及多金属矿成矿模型建立等矿产资源研究意义重大。

郑向光等^[8]在小秦岭潼关地区开展的广域电磁测深工作,对相同场源、不同场源的同一条剖面两次测量,反演的电阻率断面图基本一致,据此认为广域电磁法在小秦岭复杂构造区能够有效进行深部探测,而且具有抗干扰能力强、探测深度大、分辨率好的特点,对同一地质体可实现结果相同的重复测量。经与地震剖面、钻孔资料对比,结合 1:5 万重力资料,以广域电磁剖面电阻率断面图约束反演,其结果清楚地反映了巡马道断裂、太要断裂和太华群的深部形态及结构特征。

3 地热勘探

地热能是一种绿色低碳、可循环利用的可再生

能源,具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点,是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源。我国地热资源丰富,市场潜力巨大,发展前景广阔。当前我国的地热勘探大部分在电磁干扰严重的城市周边开展,要求探测技术达到相当的探测深度和精度,并且要查明工区内盖、储、通地热资源特征,对电磁法勘探技术提出了极高的要求。

才智杰等在共和盆地开展干热岩勘探,该区域太阳能电板密布,电缆错综复杂,电磁干扰严重,2018 年青海省第三地质勘查院在已知 GR2 钻孔布设 1 条广域电磁法和音频大地电磁测深综合剖面,对比两种电磁法的抗干扰能力、施工效率,勘探深度和探测效果。认为广域电磁法抗干扰能力强、探测深大,细节刻画精细,探测效果优于音频大地电磁测深法,优势明显,适于在电磁干扰严重,要求大深度、高精度的干热岩勘查。

曾何胜等将广域电磁法用于城市地热勘探,通过先进行干扰场 12 h 或者 24 h 监测,了解电磁干扰场强度,摸清电磁干扰规律,避开强干扰时间段进行观测,查明了三叠—二叠系灰岩、志留系砂岩、奥陶—寒武系白云岩地层以及构造的产状及空间展布特征,符合地质模型规律,为地热资源钻孔提供了依据,取得良好的勘探效果,为今后广域电磁法在开展类似工作提供了较好的示范。

田红军等将广域电磁法应用到扬子准地台黔北台隆地热勘探,获得了地下 5 km 地层电阻率分布特征,其中奥陶系下统湄潭组、寒武系下统金顶山组、明心寺组、牛蹄塘组低电阻层为试验区盖层,奥陶系下统花园组、桐梓组、寒武系娄山观组、石冷水组、高台组、清虚洞组、震旦系灯影组高阻层为储热层,同时也揭示了深部断裂构造对储热层的影响,广域电磁法成果揭示的电性层与钻井 SZK1 揭示的地层信息相吻合,表明在扬子准地台黔北台隆地热强干扰区,广域电磁法是一种有效的探测手段。

李麒麟等将广域电磁法应用于甘肃临泽县城区深部地热资源调查评价,以区域水文地质为基础,以物探勘查成果为依据,解释推断了研究区地质构造及岩体的分布特征,分析评价了研究区地热勘查前景。同时,初步构建了研究区地热勘查“地质—地球物理—地热”模型,为研究区及邻区的地热勘查提供借鉴和指导。工程实践证明广域电磁勘查深度大、抗干扰能力强,测量数据重现性高,质量可靠,在城郊等干扰大的地区也能取得较好的勘查效果;广域电磁法对层状地质体具有较高的分辨能力,在盆地勘查地热资源具有明显的优势,是高效的地热资

源调查评价方法,值得大力推广。

江西宜春的温汤温泉历史悠久,为我国著名温泉之一,有记载以来距今已有 900 余年历史,现代温汤地热利用相对较早,开发程度较高。温汤温泉历来以温度高、涌水量大而闻名,为高矿化天然热矿泉水。温汤镇温泉地处主要城市和交通干线附近,毗邻明月山 5A 级景区。随着近几年交通事业的飞速发展,周边旅游、休闲、养生业蓬勃兴起,使该区成为以地热水资源为优势产业的黄金地段。危志峰等将广域电磁法用于温汤—万龙山地热带北东段寻找“温汤式”对流型地热水资源,共推测断裂构造 11 条,富水区 2 处。初步了解了控热、导水构造的大致空间分布情况,综合研究分析了富水区、北东向主推覆构造和北西向次级构造的空间关系,提取了与深部隐伏地热水资源相关地质体地球物理信息,并进行了钻孔验证,该孔在深部钻遇推覆构造 F1 与 F9 复合部位,这与前述“温汤式”对流型地热水资源形成模式吻合,验证了本次地热勘查成果;认为广域电磁法是高效的针对复杂地区中深部地热勘查的物探方法。

4 页岩气勘探

非地震勘探技术,尤其是大深度电磁法勘探技术,在盆地基底构造研究、油气资源勘探等方面都发挥了重要的作用;广域电磁法因其诸多优点,被广泛应用于油气勘查领域,并取得了一系列成果。

喻忠鸿等将广域电磁法应用于东昆仑八宝山盆地页岩气勘探,获得了盆地内地下电性体电阻率空间分布特征,基本查明了该区基底特征、盆地格架、暗色泥页岩的走向延伸、垂向变化、埋藏深度等,揭示了八宝山泥页岩层位的电性分布规律,经钻探验证取得了很好的地质效果。古志文等将广域电磁法应用于准噶尔盆地南缘山前地带的勘探中,认为广域电磁法探深大,精度高,适合在复杂山区地形等难于取得较好地震资料的区域开展工作,能较好地弥补地震等其他物探方法的缺陷,有广阔的应用前景。

桂中凹陷是中国南方重要的含油气盆地之一,环江凹陷位于桂中凹陷的东北隅,具有良好的油气地质条件及资源潜力,由于地形和地质条件复杂、勘探程度低、深部岩溶广泛发育等原因,致使页岩气勘探尚无重大突破。韩凯等利用广域电磁法对环江凹陷南部进行探测,获得了其深部电性结构,推断了页岩气勘探有利区段。

5 盐湖深层卤水勘探

青海境内盐湖资源丰富,100 余个盐湖湖区探明的锂资源储量为 1 724 万 t,约占全国保有储量的 83%、世界卤水锂资源储量的三分之一,锂资源作为 21 世纪的战略性能源资源,随着科学技术的发展,国内外锂及其产品的需求与日俱增,它对国家的经济和安全具有重要的意义;盐湖资源的开发和利用对青海经济的发展具有重要的意义。由于卤水矿富集层位与围岩的物性差异极为特殊,传统电磁法无法兼顾探测深度和探测精度,长久以来没有突破。近年来,为寻找一种适合于卤水矿勘探的电法,曾投入过多种方法和仪器进行对比试验,包括常规电法、TEM、MT、AMT、CSAMT 等方法,WDJS-2、GDP-32、V8 等国内外先进仪器,但从试验的结果来看,各种方法无论就勘探深度还是分辨率来说均未能达到预期的要求。林佳富等在柴达木盆地深层卤水勘探中尝试使用了广域电磁法,认为广域电磁法的大功率 $E-E_x$ 装置具有大功率发射、信号衰减速度较慢的特点,采用挖机掘去地表薄层盐壳以及用铝箔作为接收电极等措施,能在柴达木卤水矿区有效地克服“高阻屏蔽”效应,当采用较小的收发距时可采集到品质可靠的野外数据,可以在较浅的层位上对卤水矿富集区进行精确定位。

6 结语

广域电磁法建立了以曲面波为核心的电磁勘探理论,构建了全息电磁勘探技术体系,实现了频率域电磁法由平面波到曲面波的理论跨越,在常规油气、页岩气、生物气、固体矿产、地热及煤矿水害探测等领域中成功应用,为我国矿产资源保障、经济发展和社会安全提供了有效支撑,具有广阔的应用前景和市场前景。

广域电磁法诞生还不久,在广大地质和物探工作者的大力支持下,取得如此丰硕的实际与理论成果,十分可喜,它也反映了广域电磁法的生命力。任何新生事物的发展都有一个过程,广域电磁法需要大家的呵护。笔者深信,在中华辽阔的热土上,经过我们的共同努力,广域电磁法这一中国人自己发明的方法,一定能够为祖国的繁荣昌盛发挥应有的作用。

必须强调,任何地球物理方法都有其应用条件,广域电磁法也不例外。一定要根据地区实际,紧密

结合地区的地质与地球物理条件,有效地应用广域电磁法。

本专栏是在我国万众一心共抗新冠病毒疫情的特殊时期完成的,借此机会,向全国一线工作者们致敬!向为本专栏做出贡献和支持的作者、评审人、编辑表示衷心感谢!

参考文献 (References) :

[1] Tikhonov A N. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust [J]. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1950, 73:295-297.

[2] Cagniard, L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting [J]. Geophysics, 1953, 18:605-635.

[3] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法 [M]. 北京:高等教育出版社,2010.

He J S. Wide-field electromagnetic method and pseudo-random signal electricity method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[4] 何继善. 广域电磁测深法研究 [J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1065-1072.

He J S. Research on wide field electromagnetic sounding method [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2010, 41(3):1065-1072.

[5] 汤井田,任政勇,周聪,等. 浅部频率域电磁勘探方法综述 [J]. 地球物理学报,2015,58(8):2681-2705.

Tang J T, Ren Z Y, Zhou C, et al. Summary of electromagnetic exploration methods in shallow frequency domain [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8):2681-2705.

[6] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术 [J]. 中国有色金属学报,2019,29(9):1809-1816.

He J S. Theory and technology of wide field electromagnetic method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9):1809-1816.

[7] 韩登峰. 我国的航空电法 [J]. 物探与化探, 1994, 18(3):179-185.

Han D F. Airborne electrical method of China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1994, 18(3):179-185.

[8] 郑向光,卢琳,刘会毅,等. 小秦岭地区矿田构造深部探测初步认识 [J]. 物探与化探, 2020, 44(4):894-904.

Zheng X G, Lu L, Liu H Y, et al. The preliminary understanding of deep structure exploration in the orefield of Xiaolinling area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4):894-904.

[9] 朱裕振,许聪悦. 广域电磁法深部找矿实验效果 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6):743-746.

Zhu Y Z, Xu C Y. Experimental results of deep prospecting by wide-area electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6):743-746.

[10] 邓锋华,杨洋,李帝铨. 广域电磁法在隐伏金矿中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(3):357-362.

Deng F H, Yang Y, Li D Q. The application of wide-field electromagnetic method to hidden gold deposit [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(3):357-362.

[11] 曹彦荣, 宋涛, 韩红庆, 等. 用广域电磁法勘查深层地热资源 [J]. 物探与化探, 2017, 41(4):678-683.

Cao Y R, Song T, Han H Q, et al. Exploration of deep geothermal energy resources with wide field electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4):678-683.

[12] 何建华,魏泽权. 遵义市汇川区董公寺地热资源浅析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(3):93-96.

He J H, Wei Z Q. Analysis of geothermal resources in Donggongsi, Huichuan district, Zunyi city [J]. Geological Disaster and Environmental Protection, 2010, 21(3):93-96.

[13] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6):136-140.

Zhang J C, Xu B, Nie H K, et al. Exploration potential of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6):136-140.

[14] 张乔勋, 李帝铨, 田茂军, 等. 广域电磁法在赣南某盆地油气勘探中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5):1085-1092.

Zhang Q X, Li D Q, Tian M J, et al. Application of wide field electromagnetic method to the hydrocarbon exploration in a basin of South Jiangxi [J]. OGP, 2017, 52(5):1085-1092.

[15] 何继善, 李帝铨, 戴世坤. 广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5):1006-1012.

He J S, Li D Q, Dai S K. Shale gas detection with wide field electromagnetic method in north western Hunan [J]. OGP, 2014, 49(5):1006-1012.

[16] 李帝铨, 胡艳芳. 强干扰区中广域电磁法与 CSAMT 探测效果对比 [J]. 物探与化探, 2015, 39(5):967-972.

Li D Q, Hu Y F. Comparison of wide-area electromagnetic method and CSAMT detection effect in highly disturbed mining areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5):967-972.

[17] 熊盛青. 航空物探“九五”进展综述 [J]. 物探与化探, 2002, 26(1):1-5.

Xiong S Q. The advances in airborne geophysical survey in the period of the ninth five year plan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(1):1-5.

[18] 王顺国, 熊彬. 广域视电阻率的数值计算方法 [J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(4):380-383.

Wang S G, Xiong B. Numerical calculation methods of wide field apparent resistivity [J]. Computing Techniques for Geochemical Exploration, 2012, 34(4):380-383.

[19] 李帝铨, 谢维, 程党性. $E-E_x$ 广域电磁法三维数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9):2459-2470.

Li D Q, Xie W, Chen D X. Three-dimensional modeling for $E-E_x$ wide field electromagnetic methods [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9):2459-2470.

New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method

HE Ji-Shan^{1,2,3}

(1.Ministry of Education Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Changsha 410083, China; 2. Hunan Key Laboratory of Nonferrous and Geological Disaster Detection, Changsha 410083, China; 3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Mineral resources are the lifeblood of national economic development. Electromagnetic method is one of the most effective methods to search for mineral resources. With the depletion of shallow resources, developing a both large-depth and high-precision electromagnetic method has become big challenge for all countries in the world, which is also the research hotspots. Aiming at the problems of shallow depth and low precision of the original artificial source frequency domain electromagnetic methods, from theory, method, technology to application, the author carried out systematic research and invented WIDE FIELD ELECTROMAGNETIC METHOD. It is a great leap forward for the development of frequency domain electromagnetic method from coarse to fine. As a result, the achievements of "large depth and high precision wide field electromagnetic exploration technology and equipment" have been formed, it won the First Prize of National Technological Invention in 2018. Wide field electromagnetic method provides a new technical means for oil and gas exploration, deep prospecting, coal mine water disaster detection, geological disaster prevention, fracturing monitoring and urban geophysical exploration. It has strongly supported the "deep ground" strategy oriented to the major needs of the country. The papers collected in this column are mainly distributed in the technical research fields of solid mineral, shale gas and geothermal exploration, fracturing monitoring and airborne geophysical application. This paper focuses on these papers and discusses the development of the theory and application of wide field electromagnetic method.

Key words: large deep; high precision; wide field electromagnetic method; pseudo-random signal

(本文编辑:沈效群)