

中国西部地区的地质构造演化 与铜矿成矿规律

刘国平 梅友松

(有色总公司北京矿产地质研究所 北京 100012)

摘要 中国西部地区以地槽褶皱系为主体。开合运动是区内一种重要的构造运动形式,形成了时、空分布广泛的海相火山岩及基性—超基性岩。铜矿的时、空分布也非常广泛,类型较多,但主要铜矿类型为火山岩型、喷流沉积型、岩浆硫化铜镍型、斑岩型等四种。不同类型矿床的形成,尤其是大中型矿床的形成严格地受地质构造环境的控制。中国东、西部地区铜矿成矿、控矿因素有一定的差异。

关键词 铜矿 地质构造

1 前言

本文所指的中国西部地区是指大致沿鄂尔多斯台缘褶皱带、四川龙门褶皱带和康滇地轴一线以西地区。中国东、西两地域的构造格局和构造演化有着显著的差异。东、西两区的差异不但反映在沉积作用、岩浆活动和构造运动上,也反映在成矿作用上^[1]。西部地区近年铜矿找矿勘查不断取得进展,继新疆喀拉通克铜镍矿床发现之后,又找到了黄山—香山铜镍矿带、阿舍勒铜多金属矿、以及甘肃桦树沟铁铜矿。这些新发现的铜矿成矿带或成矿区,在发现过程中尽管有一定的偶然因素,但这些矿床在地表或多或少有一定的矿化显示,基于现在的认识水平和技术水平,这些矿床完全可能在周密计划的找矿过程中发现。西部地区与我国其它地区相比找矿工作程度明显偏低。因此,进一步研究中国西部地区大中型铜矿床的成矿规律对西部铜矿勘查和区域成矿规律学的发展有一定的促进作用。

2 西部大地构造演化的一些特征

2.1 西部地区地质背景以地槽褶皱系为主体

除塔里木地台外,西部地区主要由古生代、中生代的地槽褶皱系组成,包括祁连加里东褶皱系、阿尔泰海西褶皱系、准噶尔海西褶皱系、天山褶皱系、西昆仑褶皱系、东昆仑褶皱系、松潘—甘孜印支褶皱系、三江印支褶皱系、喀拉昆仑—唐古拉燕山褶皱系、冈底斯—念青唐古拉燕山褶皱系、喜马拉雅褶皱系等。优地槽分布域海相火山岩发育,分布广泛,在不同的褶皱系分别发育有寒武纪、奥陶纪、泥盆纪、石炭纪和三叠纪的海相火山岩,形成了一系列与海相火山岩有关的矿产。

西部地槽褶皱系内的中央隆起构造带,如中祁连中央隆起、中天山中央隆起、西昆仑中央隆起等也是西部地质构造演化特点之一。

2.2 开合运动是西部地壳演化过程中一种极为重要的构造运动形式

“开”“合”演化的观点以全球构造为背景,以构造发展阶段为基础,运用大陆裂解聚合,此

张彼合的运动来解释地壳的演化。这种认识可以追溯到 60 年代对陆间地槽活动方式的解释^[2],即手风琴式构造运动。黄汲清(1984,1987)^[3,4]研究特提斯带构造演化时,进一步阐明了对手风琴式板块运动的认识。马杏垣(1983)曾按构造应力作用的状态和变形体制不同,将地壳运动概括为升、降、开、合、扭五种形式,其中开和合是最基本的。开合运动的构造运动形式很可能是对板块学说在大陆造山带的一种补充和发展,能比较合理地解释、阐明一些大陆造山带的地质构造演化过程。

祁连褶皱系实质是裂谷地槽系,发育于华北地台边缘,是在前寒武纪陆壳裂陷解体的基础上形成的,其内部由北祁连、拉脊山、南祁连、柴北缘等几个裂谷地槽和中祁连、欧龙布鲁克断隆组成。北祁连是“开”“合”运动最强烈的地区,经过了多次的开合运动。发育有一系列的蛇绿岩套,可以分为三期^[5]。该带内蛇绿岩为无序蛇绿岩,与典型的大洋中脊蛇绿岩套有区别,也与冷侵入的洋壳碎片不同,因为该带地层层序比较清楚,连续性较好,混杂堆积不发育,不具消减带的特征;同时该带蛇绿岩普遍缺少堆晶岩和岩墙群,超基性岩常以侵入关系产于不同层位。表明在“开”的构造运动过程中,只是发生了陆壳的逐渐变薄,向洋壳转化,但没有形成广泛的大洋而是形成了典型的洋壳。这进一步表明了北祁连褶皱带具裂谷带的性质。北祁连褶皱带火山岩和蛇绿岩分布表明在该带内部“开”、“合”构造强度有一定的差异。以景阳岭为界将北祁连分为东、西两段,西段“开”形成的构造表现较强,东段“合”的形式表现较强,其证据是:1)西段火山活动时间长,以中基性岩为主,东段以中酸性岩为主;2)三期蛇绿岩均出露于西段,除东段雾宿山及景泰老虎山一带火山岩地层中有零星的基性岩和超基性岩体出露,可能构成蛇绿岩套外,其他地区均未见该类岩石的产出。南祁连、拉脊山、柴北缘等裂谷地槽,有着与北祁连相似的演化。

天山褶皱系是另一个开合构造运动发育的地区。天山褶皱系可以划分为三个次级构造单元,即中天山隆起带、南天山加里东优地槽带、北天山海西优地槽带。中天山隆起带出露有大面积的前震旦纪变质及浅变质岩系,震旦纪-早奥陶世沉积属稳定的台型盖层,肖序常等(1982)^[6]认为可以同塔里木北缘的台型盖层进行对比。早志留世泛塔里木地台沿汗腾格里峰—哈尔克山—巴仑台—库米什—一线拉张裂解形成早古生代晚期的南天山裂解带,自此,中天山隆起才从塔里木地台解体出来,之后,挤压褶皱带形成了南天山晚加里东优地槽带。可以说,中天山隆起与塔里木地台之间的开合运动构成了南天山晚加里东优地槽带。在晚古生代中期,在天山隆起带西端的伊什基里克—阿吾勒拉一带拉张形成了晚古生代中期裂谷。

三江褶皱系的地壳演化过程中,经历了复杂的开合运动,形成了多期次、不同类型的裂谷系。三江褶皱系发育于川滇西部,大约界于澜沧江与金沙江—红河两断裂之间。向北逐渐尖灭于青南地区,向南可延出国境。该褶皱系由一组大致平行的裂谷地槽和大小不一的中间地块组成。地槽内以活动类型的沉积为主,中间地块以稳定类型为特征,形成活动类型与稳定类型相间排列的沉积构造环境。刘肇昌(1993)^[7]将扬子地台西缘地质演化分出五期地壳伸展裂谷事件。兰坪—思茅地区的裂陷作用主要发育了中三叠世至早白垩世沉积,形成了一个总体呈北北西—南南东向展布的大型槽裂型盆地。

郭铁鹰等(1990)^[8]认为青藏高原的构造格局,是在晚前寒武纪末形成的原古大陆基础上,经过古生代以来多次“开”“合”演化和渐新世以来印度板块向北持续挤压环境下,大陆岩石板块发生俯冲—造山运动、陆壳缩短、加厚、大陆抬升形成的。如松薄—甘孜褶皱系在加里东期到海西期,基本保持稳定至过渡型陆表浅海沉积环境,到晚印支期全区发生急剧沉降,出现巨

大的陆缘海盆及强烈的拉张活动,形成了局部洋壳和炉霍—道孚裂谷带,至印支期末,发生挤压作用,全面褶皱隆起。

西部地区地质发展过程中,不同地质构造单元、不同地质时期开合运动的强度、作用的时间具有多种方式,在拉张作用过程中陆壳变薄局部地区向洋壳转化。有的最终形成了小洋盆或初始洋盆,有的则仅仅形成海槽、裂谷、裂陷槽、坳拉谷等。在挤压闭合作用过程中可能发生俯冲消减,也可能没有俯冲消减,仅仅是陆壳的缩短、加厚而形成造山带。在开合运动过程中火山活动、岩浆侵入的强度、规模有较大差异。开合运动可以是单旋回,也可以是多旋回,前者见于拉脊山裂谷、柴北缘裂谷,后者如北祁连裂谷。

2.3 深大断裂控制了西部地区的构造格局

西部地区深大断裂非常发育,各主要构造单元均以深大断裂为分界线。其中主要深断裂带包括:1)额尔齐斯深断裂带;2)婆罗科努—中天山深断裂带;3)北祁连断裂带;4)阿尔金山—北山断裂带;5)玉龙雪山—龙门断裂带;6)祁漫塔格—阿尼玛卿断裂带;7)金沙江—红河断裂带;8)雅鲁藏布江深断裂带。这些深大断裂带控制了西部地区的地质演化过程和构造格局。

额尔齐斯断裂带、阿尔金山—北山断裂带、川西玉龙雪山—龙山断裂带是西部地区三条重要的巨型剪切断裂带。一般说来剪切断裂切割较深,巨型的剪切断裂有利于构成地壳深部或地幔物质上升的良好通道,是铜、金成矿的有利构造部位。

额尔齐斯断裂带位于阿尔泰褶皱系与准噶尔褶皱系之间。该断裂带具有逆冲推覆和左行平移双重构造特征^[9],形成一系列的鞘褶曲、流劈理及糜棱岩,并见宽达近百米的碎裂岩带。在该断裂带经过的富蕴地区,形成了基性-超基性岩带,伴有岩浆铜镍矿化、矿床形成。该断裂带是中亚蒙古地槽褶皱区发展过程中有重要意义的深断裂带之一。

阿尔金山—北山断裂带构成了青藏高原的西北边界,古生代以来长期活动,西段的若羌—拉竹龙深断裂将昆仑褶皱系拦腰折断,东段的阿尔金山深断裂带从西端切断了祁连褶皱系,星星峡深断裂带将天山褶皱系拦腰切断。该断裂带由一组北东向、北东东向剪切断裂带组成,发育有多条基性-超基性岩带,其中包括黄山-镜儿泉基性-超基性岩带,笔架山、坡北基性-超基性岩带,伴有岩浆铜镍矿床、矿化产出。

川西玉龙雪山—龙门山深断裂系构成了青藏高原的东南边界,其断裂展布和活动继承了杨子地台西缘的古断裂,由一系列斜列断裂组成。剪切作用相对比较弥散,剪切作用的规模稍次前述的两条断裂带。

2.4 基性-超基性岩在西部地区广泛分布,岩体数量多、规模大

由于基性-超基性岩体的分布主要受深大断裂的控制,因而多呈带状断续分布,遍及西部地区各个构造单元,如阿尔泰褶皱系、准噶尔褶皱系、祁连褶皱系、喜马拉雅褶皱系等。根据基性-超基性岩与深大断裂的关系,大体可以将其分为两大类,一类形成于拉张构造环境,其分布受深大断裂控制,而并非沿深大断裂侵入。另一类是沿深大断裂侵入的基性-超基性岩杂岩体,往往形成于挤压构造环境,缓慢的上升构成了基性-超基性岩浆良好的分异环境。前者以蛇绿岩套的超基性岩为典型代表。科尔曼提出蛇绿岩套形成于多种构造环境,包括洋壳扩张带、弧后盆地等。天山蛇绿岩的研究表明(王作勋等 1990)除了科尔曼提出的典型蛇绿岩外,还有新类型的代表陆壳拉张薄化及洋壳上隆,直至形成新洋壳过程中形成的基性-超基性岩与沉积建造组合,西部地区基性-超基性岩大多数属于这一类,蛇绿岩带和广泛分布的开合运动密切相关。与蛇绿岩套有关的基性-超基性岩往往伴生铬铁矿化。一般说来,在褶皱带及邻区,与边界

深大断裂有关的基性-超基性侵入岩组合有利于岩浆硫化铜镍矿床的形成。

3 西部大中型铜矿的成矿规律

3.1 西部地区铜矿床主要有四种类型

西部地区包括多个地质构造单元,地质构造作用复杂,形成了多种类型的铜矿床,主要矿床类型有四种,即:海相火山岩型铜矿床、喷流沉积型铜矿床、斑岩型铜矿床、岩浆硫化铜镍矿床。铜矿床的分布特征与西部地质背景密切相关。

海相火山岩型铜矿床、喷流沉积型铜矿床:西部地区地质构造单元以地槽褶皱系为主体,尤其是优地槽发育,在地壳演化过程中开合运动强烈,形成了多期的海相火山岩浆活动和多期裂谷,因此,海相火山岩型、喷流沉积型铜矿床发育。在矿床形成时间上,具有显著的跨时性,从元古代至中生代均有这两种矿床类型形成。火山岩型矿床有早古生代的白银厂铜矿床、晚古生代的阿舍勒铜矿床、中生代的呷村多金属矿床等,喷流沉积型矿床有元古代的桦树沟铁铜矿床、晚古生代的澜沧老厂含铜多金属矿、中生代三叠纪的铜峪沟、赛什塘铜矿床等。火山岩铜矿床与海相火山作用密切相关,矿化作用的强弱常与火山作用强度、分异作用发育程度、海相火山岩富钠的特点和火山作用持续的时间以及多旋回喷发等有关。矿床的空间分布常与火山机构、火山穹隆构造和火山洼地有关,如阿舍勒铜多金属矿床定位于火山机构中,可能与充填于火山机构中的次火山岩有关;白银厂矿田各矿床定位于火山穹隆斜坡上的火山碎屑岩中。喷流沉积型矿床主要与拉张地质环境中的坳拉谷、断裂拗陷带、弧后盆地、海沟等类型构造中同生断裂发育的次级盆地或洼地有关。这些环境中,火山活动的强弱差异比较大,有的火山作用强,火山岩、火山碎屑岩较发育,有的火山喷发作用不很发育,是一种“近似优地槽”的环境(宋叔和,1991),总体看来,火山活动发育和深大断裂提供热能强的地区,有利于形成与地下热水有关的铜矿床,其标志是有一套热水沉积岩与之伴生。

斑岩铜矿:西部地区斑岩铜矿点有一定的分布,但大中型斑岩铜矿主要集中于三江褶皱带的玉龙—马拉松多斑岩铜矿带。对西半球斑岩铜矿的研究^[10]表明斑岩铜矿形成于强烈的俯冲消减带上部,并且与一定的陆壳环境和深断裂带活动有关。中国西部在开合构造运动的过程中一般没有形成广泛发育的大洋,也就是主要发育威尔逊旋回的前期和末尾阶段,在“合”的作用过程中,俯冲消减的情况难以与东太平洋中、新生代的俯冲消减相比拟。玉龙—马拉松多斑岩成矿带的成矿期为喜山期,该时期该带处于地台活化阶段,斑岩铜矿所赋存的地层下部常有不整合或古隆起带存在^[11]。印度板块向欧亚板块俯冲挤压过程中,在喜马拉雅褶皱系与三江褶皱系一线形成了十分强烈的挤压,斑岩铜矿带的形成与陆内俯冲引起的昌都地块再活动和金沙江—红河巨型走滑剪切断裂体系的次级断裂密切相关。

岩浆硫化铜镍矿床:西部大中型铜镍矿床主要位于阿拉善大陆的边缘深断裂中和准噶尔地块周边。前者成矿期为中元古代,后者成矿期为晚古生代。从全球范围来看,这类矿床的时空分布有显著的特征,与地壳演化关系尤为密切。国外铜镍硫化物矿床主要产于加拿大—美国、西澳大利亚、南非—津巴布韦及芬兰等四片矿化集中区。它们都是古老的地质区。铜镍矿的形成时代主要是太古代—早元古代,即形成于地球演化的早期阶段(太古代绿岩带阶段和克拉通化阶段)。当时的陆壳是以铁镁质为主,硅铝质层不够发育。也可以说,岩浆硫化铜镍矿床的形成与地球分异演化形成陆壳的过程密切相关。西部地区晚古生代地槽褶皱系中形成具有工业意义的该类矿床(如喀拉通克铜镍矿床、香山—黄山铜镍矿带)并非偶然,可能与准噶尔地

块在相应地区有洋壳基底存在密切相关,其定位与切割深度较大的大型剪切断裂有关。

3.2 铜矿主矿带、矿体的产出分布与区域主构造线的展布大体一致,但矿田、矿床产于与主矿带大角度相交或斜交的断裂交汇处,并有等距与不等距产出的特征

这是西部地槽区成矿的一个重要特征,与东部成矿域有一定差别。北祁连火山型铜矿成矿带:白银厂矿田各矿床,其矿体、矿体群均呈北北西、北西向展布,红沟矿床的矿体、矿群也呈北西西向、近东西向展布,与成矿带主体构造线方向基本一致。青海德尔尼—铜峪沟成矿区:矿体、矿群呈北西西向展布,与阿尼玛卿山区域主断裂带方向大致平行。但矿田、矿床的产出与主构造线斜交的北北东、北北西向的断裂构造有关,并有等距与不等距的分布特点,据此结合有关地质条件与找矿信息可预测矿田、矿床产出的地区。

中国东部地区的地质背景是以地台为主体,并且中生代环太平洋构造活动构成了极为重要的成矿期,往往具有“北东成带、北西成群”的分布特征。由于属于环太平洋成矿域,成矿带的方向呈北东向、北北东向展布,但矿体、矿群往往受北西向构造所控制。位于赣东北成矿带的德兴矿田、成矿带呈北东走向,矿田、矿床(铜厂、富家坞、朱砂红)定位富集受北西向构造及构造交汇部位控制。额尔古纳成矿带呈北北东向展布,其中的甲乌拉、查干布拉根、马奴克吐山等矿田矿床、矿体的展布受北西向断裂的控制。这是东部地区构造活化期成矿的重要特征。

3.3 大中型矿床、矿化集中区往往产于不同构造单元的交接部位及附近,并受深大断裂的控制

青海德尔尼—铜峪沟成矿区处于西秦岭与松藩—甘孜褶皱系的交接部位,同时,受阿尼玛卿碰撞带、鄂拉山断裂带的控制。香山—黄山岩浆硫化铜镍成矿带位于天山隆起带与北天山褶皱带过渡交接部位,同时受到星星峡—且末河剪切断裂带和康古尔塔格大断裂的控制。阿尔泰南缘铜多金属成矿带也处于构造单元的交接部位。在不同构造单元交接部位,尤其是地壳性质、地球物理、地球化学差异较大的部位,在进一步的地质构造演化过程中,是地球物理、地球化学场剧变部位,构造应力集中,有利于成矿物质的富集定位。

4 结语

西部地区的地质构造以地槽褶皱系为主体。开合运动在古陆内、古陆边缘带和中央隆起附近尤其强烈,中祁连中央隆起、中天山中央隆起、西昆仑中央隆起对区内开合运动的格局有重要影响。区内矿床类型较多,成矿在空间上分布较广,在时间上延续较长,但铜矿成矿有一定的规律可循,主要矿床类型包括火山岩型、喷流沉积型、岩浆硫化铜镍型、斑岩型等四种类型,其中火山岩型和喷流沉积型是两种最基本的类型。西部地区基性-超基性岩分布广泛,但形成岩浆硫化铜镍矿床需要比较特殊的成矿环境。

西部地区地质的发展演化和铜矿成矿特征、铜矿控矿因素同东部地区相比有一定的差异,进一步研究和对比其异同点将有利于促进铜矿的找矿勘查。

参考文献

- 1 宋叔和. 中国一些主要金属矿床类型及其时空分布规律问题. 矿床地质,1991(1)
- 2 黄汲清 尹赞勋. 中国地壳运动命名的几点意见(草案). 地质论评,1965(增刊)
- 3 黄汲清等. 特提斯—喜马拉雅构造域初步分析. 地质学报,1984(1)
- 4 黄汲清. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京:地质出版社,1987
- 5 肖序常. 祁连山古蛇绿岩的构造意义. 地质学报,1978
- 6 肖序常等. 新疆北部及邻区大地构造. 北京:地质出版社,1992

- 7 刘肇昌. 扬子板块西缘的裂谷(陷)构造金属成矿. 第五届全国矿床会议论文集, 北京:地质出版社, 1993
- 8 郭铁鹰 梁定益. 青藏高原地区古生代—始新世的大陆“开”、“合”演化. 中国及邻区构造古地理与生物古地理, 北京:中国地质大学出版社, 1990
- 9 曲国胜 张进江. 额尔齐斯构造带. 新疆地质科技(3), 1991
- 10 Hollister. 西半球斑岩铜矿床地质(中译本). 谭顺道等译, 1978
- 11 徐正余. 青藏高原主要矿产及其分布规律. 北京:地质出版社, 1991

THE GEOTECTONIC EVOLUTION AND COPPER MINERALIZATION IN THE WESTERN CHINA

Liu Guoping Mei Youcng

(Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, CINC, Beijing, 100012)

Abstract The western China is tectonically dominated by geosynclinal tectonic systems, in which the opening—closing tectonics is an important one. The copper deposits accompanied by volcanic rocks and basic—ultrabasic rocks are widely distributed temporally and spatially. The copper deposits are presented in various types with the dominance of four types: volcanic type, exhalative—sedimentary type, magmatic Cu—Ni type and porphyry type. The formation of various copper deposits, especially that of the medium—large sized ones, is strictly controlled by geologic and tectonic environments. It is concluded that there is obvious difference in metallogeny and metallogenesis between the eastern China and the western China.

Key words geotectonic evolution; copper mineralization

1993年中国有色金属工业总公司评审享受政府特殊津贴的有突出贡献的专家、学者、技术人员的工作已圆满结束。总公司人事部在春节前后将1993年享受政府特殊津贴人员的通知和荣誉证书发到了各单位和个人。有色地质系统1993年申报政府特殊津贴的人员101人,经国务院批准,享受自然科学系列政府特殊津贴人员有59人,占整个有色总公司系统的8.1%,其中100元档次的有47人。他们分属19个地勘局和研究所。从专业看,地质(含水文、工程地质等)53人,物探3人,化探1人,探工2人。到目前为止,我们有色地质系统享受政府特殊津贴人员已有120人。

从1993年度评选享受政府特殊津贴的人员中我们可看到,有色地质系统有突出贡献的专家很多,硕果累累;评审中注重了以下几方面的专家、学者、技术人员:

一是注重年轻、有突出贡献的中青年专家或学科带头人。如江西地勘局四队高工韦星林,33岁,现任金山金矿田地测分队主任工程师并任该矿区勘探报告主编。是评审人员中最年轻的一位专家。是他发现了金山矿田的石榴、西蒋、西矿等金矿点;提出了金山合金层遥感影像标志,建立了矿化影像模式,对德兴金铜矿化集中区的成矿地质特征提出新认识;深化和充实了“德兴推覆构造剪切带控矿”的观点,首次建立了金山金矿田构造格架,改变了金山金矿田为“层控矿、一层矿”的观点,向剪切带控矿、多层矿”的认识转化。他对金山金矿田的勘查、开发有突出的贡献。

二是注重业绩。注重曾为有色地质作出突出贡献的老专家。如西南地勘局三〇八队总工庄永秋,58岁,研究成果达到国际水平;1988年后组织研究和开发了地学数据处理和综合编图等几个大中型应用软件系统。系统设计先进,在找矿生产和科研中发挥了重要作用,成果达到国内领先水平;1992年享受50元档政府特殊津贴后,由她主持并参加完成的“地质、物化探图件综合编绘和管理系统”的研究成果社会和经济效益良好,获1992年总公司科技进步三等奖,所以1993年度由50元档晋升为100元档;目前,她又以新的姿态进入高科技领域——地理信息系统(GIS)的开发应用。

我们坚信,今后在有色地质战线上将会涌现更多成绩显著、贡献突出的专家。广大地质工作者一定会为有色地质的腾飞而更加努力奋斗!

一九九三年有色地质系统享受政府特殊津贴人员的工作结束

1972年在任分队技术负责期间,为卡房矿田新增了锡、铜、铅、锌、钨综合金属储量69万吨,其中有两个地质报告已交付矿山利用;1988年任队总工以来,主持提交了锡、铜、铅等有色金属和贵金属储量报告等4个(获总公司二等奖和省储委银质奖各1个,局二、三等奖各1个),提交金属储量共35.2万吨,其中两个银矿报告获银626吨,并找到了两个中型有色金属勘查基地;1993年被授予“全国有色金属工业劳动模范光荣称号”。又如华东地勘局807队总工倪大平,54岁,1985年至1988年主持地质技术工作,提出了“小秦岭地区金矿是破碎蚀变型金矿”的找矿理论,找到了葫芦沟金矿等数个金矿勘探基地及远景区,一举探获金储量8吨,金矿远景储量30吨;1989年后在福建尤溪地区找矿中取得了突破性进展,找到了尤溪大型铅锌矿。

三是在已享受50元档次政府特殊津贴人员中注重近年来又有新成就的专家。如北京矿产地质研究所高工王书惠,52岁,1985年前从事地球物理探矿理论基础及方法研究,引入有限元和边界元法,解决了磁法勘探解释理论的几个关键性问题,研究开发了实用的计算方法和软件,研究

(陈梦熊供稿)