

当前地球物理学发展中的若干问题

Some Considerations on the Development in Geophysics

刘光鼎

(中国科学院地球物理研究所所长, 学部委员)

杨小毛 魏 蕾

(中国科学院地球物理研究所)

地球物理学是地球科学中重要的基础分支科学。它利用物理学的理论方法(如电学、光学、声学、核物理学、磁学、热学等)及其技术来研究地球。地球物理学的研究范围十分广阔,它涉及地壳、地幔和地核或者岩石层和软流层,也包括地表及其以上的大气层、电离层乃至宇宙外层空间所发生的各种物理现象、变化及过程。

应该指出,地球作为一个整体,在时间上和空间上都是不断变化的,因而有必要把地球作为一个复杂的动力学系统进行综合考察。为了全面地认识地球,或者解决某些地质问题,地球物理学必须在求得本学科发展的同时,力求与地质学、地球化学等学科紧密结合起来。

近十几年来,岩石层板块大地构造理论的不不断发展、基础科学和高技术成就的引入,特别是电子计算机的广泛应用,不仅使得地球物理学解决问题的能力得以长足提高,而且还促进地球物理学与其它学科的相互渗透和交叉,从而能在国民经济建设中发挥重要作用。中科院地球物理研究所的傅承义教授明确指出:当前地球物理学发展的重要方面是:资源勘查、环境保护、灾害预防和认识地球。后者是地球物理学的基本任务,而前三者则是重大的应用。

一、资源勘查

资源的勘探与开发的水平是一个国家综合国力的重要指标。我国经济建设资源需求向地球物理学科提出了紧迫的任务:利用地球物理的理论、方法与手段,加速资源的勘探和开发。

1. 能源勘探

能源利用的主要形式是矿物燃料。今天全世界的燃料,约有40%是石油,30%为天然气。因此油气资源是战略物资,应属国民经济的命脉。但是,长期以来,我国煤炭在能源结构中仍占相当高的比例,石油比例偏低,而天然气的勘探与开发则长期受到忽视。我国约有350多个沉积盆地,有希望的面积达238.3万平方公里,并且勘探的密度和深度,与发达国家相比还有很大的差距。因而,石油与天然气勘探在我国应有相当大的潜力。

在油气勘探领域中,地球物理学面临要解决的两大课题是盆地动态模拟及油储地球物理。

石油和天然气存在于盆地之中,油气存在的空间位置与数量是勘探必须解决的基本问题。沉积盆地分处在不同的大地构造位置上,在其形成、演化的历史过程中,受到各种地球动力学条件的作用与制约,从而使其中沉积的物质产生各种响应。因此对油气资源的研究,首先要以沉积盆地作为基本单元,应用地质、地球物理、地球化学方法进行综合研究,取得构造演化和沉积演化的基本认识,再用电子计算机进行其构造史、热史、生烃史及运聚史的数学模拟,以进行油气资源评价或指导勘探部署,即所谓盆地的动态模拟。

在动态模拟中,首先要进行综合地球物理研究(如重力、磁力、地震、大地电磁的联合反演等),对沉积盆地的深部构造以及其它地球物理特征进行全面的分析,结合地质资料、钻孔资料等,了解沉积盆地的大地构造特征,构造演化,水动力状态及热状态;运用地球化学的理论和方法探讨其中烃生成和运移的方式,进而建立盆地中构造沉积和油气运移的动态模型,再借助计算机的高速处理和运算能力,求得圈闭的位置及油气资源量,进

行油气远景区的预测和评价。

在80年代,我国油气地球物理勘探技术有了长足的进展。三维地震勘探、地震地层学、精细资料处理以及其它一些新的方法、技术和装备得到了广泛的推广和应用。但是由于我国的油气田多属陆相的薄互层的特点,储层结构复杂,需要开展更加深入的研究工作。

远景区内油气勘探大多是将油源岩作为勘探目标,进行地球化学研究,以确定其时代及初次和二次运移的时间,并评价聚集于圈闭中的油气资源。圈闭是有利于油气聚集的场所,它在不同的地球动力学条件下形成,并可分为构造圈闭和地层圈闭两大主要类型。在陆相碎屑岩沉积盆地中,应考虑油气生成的有利与不利条件以及水动力条件的影响作用,而其储集层则要考虑孔隙度、渗透率、沙泥比例和陆相薄互层等各种物理参数的影响。对海相碳酸盐岩地区而言,裂隙、溶洞、生物礁和泥底辟都可以成为较好的油气储集圈闭。为了提高油气回采率,在油气田开发过程中,还必须建立完整的油储地球物理研究。如果能把我国油田的平均回采率提高10%,其效果将相当于使现有油田增加25%的储量。

油储地球物理学的理论和方法体系中,包括有储集层的岩石物性规律、测井正反演理论、四维地震勘探、矢量地震波和地震层析成像理论等。其主体方法技术包括地震一测井综合方法、矢量地震、跨孔地震层析及解释工作站系统。

通过油储地球物理理论和方法的研究,可以进而建立地球物理参数和储层参数之间的定量关系和规律;在有钻孔和测井资料的条件下,可以利用反射地震资料精细地描述井间储集层段的构造;可以利用多分量地震资料描述储集层参数;可以利用跨孔地震层析成像等手段大幅度地提高储层描述的分辨力。

油气勘探中的盆地与油储两大课题,是实际生产中迫切需要解决的问题,也是将影响地球物理勘探理论相当长时间的具战略性意义的课题。

2. 金属矿勘探

国民经济建设需要广泛的金属原料,其中属于紧缺矿产资源的有多种,而以黄金最为重要。

中国有许多地方,在历史上就出产黄金,包括脉金和砂金,但它们大多裸露于地表附近,经过长时间的采掘,已所剩无几。因此,国民经济建设向黄金勘探提出了新的任务,必须寻找隐伏的大型或超大型金矿床。金矿大多与蚀变带有关,一些与硫化矿物共生,其品位往往与硫化物矿物含量之间存在着正相关关系。而金矿石与围岩一般存在着电性和磁性差异,这就为用地球物理方法发现和圈定金矿载体提供了可能性。为此,必须因地制宜,

采用综合地质地球物理方法,在有利于金矿赋存的大地构造背景中,选择适于成矿的地带,确定地球物理异常的含矿性。这样,在地球物理异常区内应进行定量的正反演研究,并结合地质,特别是钻孔资料,进行正确的解释。

黄金地质工作取得的认识与经验,无疑是指导金属矿地球物理勘探的重要依据。而多种物探方法在不同含矿地区的适应性则是应用综合地球物理的基础。

在矿产资源勘探和开发中,传统的地质学理论和方法发挥了巨大的作用,形成了各种成矿理论和成矿模式,有效地指导了找矿实践。但是,对矿体的认识,尤其是对隐伏矿体以及深部成矿构造的识别,必须依赖于地球物理的方法,如高精度的重力和磁力以及高分辨地震勘探系统的应用。此外,建立找矿的地质—地球物理模型是必要的,但是不能简单地将模型理解为分类或类比,而应以观测为基础,根据成矿理论及模式建立地球物理模型,再用定律、定理、公式来表达和推理,进而认识地质体,解决找矿中存在的问题。

二、环境保护

由于工业化和城市化的迅猛发展,环境污染和生态恶化日益严重,以致环境保护成为举世瞩目的课题。

在环境范围内,地球物理学有着广阔的工作领域和众多的任务,而且大多集中在地表以下或10米到100米的浅层。

1. 地下水勘探

满足水资源的需求不仅应充分利用地表水,而且还必须大力开发地下水。我国一些山区、高原和岛屿水资源缺乏,即使一些城市也往往供水不足,以致地下水的勘探更显得紧迫。这些地区地下水位深,构造不明显,因此地球物理方法在这些地区应能获得应用。例如,微重力测量结果可以圈定地下水构造,电法会给出有关含水层位的信息等。在目前,已经开始应用综合物探方法为寻找地下水提供井位,并取得良好的效果。但还需要积累经验,探索最佳工作方法。

2. 工程地球物理

长江和黄河上及核电站等重大工程基础(坝基)构造稳定性和岩石强度的研究,以及铁路和公路的选线与铺设,都需要了解浅部的精细结构和构造,从而向地球物理学提出了高精度和高分辨的要求。地形起伏和浅层的地表有强烈吸收作用与噪声干扰,增加了资料采集与处理的难度。但更严重的是,工程地质所要解决的浅层问题动摇着地球物理应用的前提条件(如水平层状介质的假

定)。因此,在浅层的各向异性及不均质介质中,需要重新考虑地球物理的理论和方法(如浅层勘探理论),并建立与之相适应的观测和处理技术,以解决各式各样的工程地球物理问题,适应国民经济建设的需要。

3. 海底工程地质调查

海洋开发,特别是近海大陆架油气资源的开发,海底及航道疏通,河口整治,港湾建设,码头修建等一系列海底工程所需的地质条件,都涉及对海底地形、松散沉积物和基底及其展布性质的了解。为此,在海洋地球物理方法中,已经出现并得到广泛应用的地震声学设备包括:回声测深、地层剖面、旁侧声纳、以及高分辨率反射地震等。

根据海底工程研究对象的不同以及它们的介质对地震声波不同频率的反映,研制和采用不同的震源接收装置及记录装置,实现现场数据采集,是海洋地球物理工作的基本内容之一。

其次是对洋底沉积物和基底岩石物性的测量,研究它们在水动力学条件下,对地震声波的吸收与反射,是地震声学资料解释的基础。

三、灾 害

为抵御自然灾害,首先应进行灾害预测。灾害预测必须建立在现代化观测技术基础上,先认识其规律,而后进行判定。如利用气象卫星进行天气预报,遥感卫星进行灾害监测等。

地震灾害具有全球性。在我国,地震活动范围分布广泛,地震活动频繁,强度也较大,有些地震灾害的严重程度在世界上是罕见的。据最新统计,本世纪以来,全球发生54起重大自然灾害,我国占8起,其中4起为地震灾害。我国因地震死亡的人数占全球自然灾害死亡人数的27%。因此,地震灾害的预测与评估是很有必要的,而它更多的是地球物理问题。

我国是全球板内地震活动最强烈的地区之一,而且其强度及时空分布具有强烈的不均匀性。研究这种不均匀性原因及其发展规律,进而预测未来地震活动,地震灾害和灾害损失,是地震预测研究的根本任务。

地震参数、地震灾害及其损失预测,是地震预测研究的三个层次。这就要建立以观测地震事件发生时间、地点和强度三个参数为目的的台站,进行宽频带、大动态范围的数字化观测。进而对震前的地震活动、地形变、磁场、电场、地下水位及其化学成分等进行长、中、短、临各阶段前兆变化特征的研究,结合地震地质及深部地球物理特征,对未来的地震参数进行预测。

地震释放的能量往往对地球的自然环境及人

工建筑造成巨大的破坏,因此提高建筑物的抗震性能,采取结构性抗震措施是必要的。这样,首先必须了解地面运动特征,即研究地震危险性背景及地震小区划影响。对场地特征(如介质的不均匀性)及地震破坏过程的定量分析是解决问题的关键。工程地震学,是工程师和地震学家越来越感兴趣的课题之一。

气候异常经常影响人类的社会活动和生产活动,危及动植物的正常生长,造成影响国计民生的巨大损失。气象灾害涉及日地关系,大气/海洋/地面之间的相互关系。要通过地球流体系统研究,了解大气、海洋和冰圈,以及水循环这一系统在全球连续地传输能量和物质的情况,考虑它们相互之间以及与陆地之间的通量,特别是水循环及热量和动量的交换,从而揭示气候变化的性质和原因。研究天气动力学的规律并进行气候数值模拟,研究全球气候变化规律,研究旱涝规律和成因,并进行预测,是高空地球物理学领域的前沿,也是关系到国计民生的重大课题。

太阳大气中存在的各种瞬变事件,可以引起日球局部扰动,进而使地球物理场扰动。例如,可能激发磁暴、磁层亚暴、地磁微脉动、电离层暴、电离层突然扰动等等。这些灾害的发生,直接影响到通讯联系,航天航空技术,因此,需要对发生扰动的时间及其持续时间和强度作出正确预测。这就要求对这些扰动进行连续的、全球范围内的观测,认识其规律,如建立全球范围内的地磁台网(链)对地磁场变化和磁暴在全球各纬度连续记录和观察,再进行资料分析。对存在于太阳事件、地磁场变化和电离层扰动之间的联系及作用过程的研究是极为复杂,而又是最根本的。解决这一问题,正是当前地球物理学家努力的方向之一。

各种灾害的发生,不仅在成因上有着或多或少的联系,而且还有一个明显的特征,即灾害群发现象。为此,在研究与地球物理学有关的灾害问题时,建立统一的灾害数据库很有必要。将各类灾害的地球物理成因、地球物理异常现象及特征作为建立数据库的参数,以此作为纽带将灾害研究纳入一个系统化的研究体系中,并根据新积累的资料,上升得出规律性的认识,为灾害预测及抗灾对策提供必要的基础依据。

四、认识地球

认识地球,是地球物理学的基本问题,也是应用的基础。地球物理学家的主要任务是基于观测的数据,运用科学的推理方法及现代的技术手段,求得对地球及其性质的正确认识。

1. 地球层圈性质

人们很早就已经注意到地球的分层现象。古特伯格(B. Gutenberg)根据地震波的速度分布规律对地球层圈进行了最早的划分。随着地震学理论和方法的发展及仪器设备性能的提高,对地球各层圈之间的关系及其内部精细结构的认识已经有了长足的发展。特别是板块大地构造理论问世以来,广泛应用岩石层(Lithosphere)和软流层(Asthenosphere)等概念,丰富了对地球层圈构造的认识。近来,由于地震层析成像技术(Tomography)的应用,全球地学计划(如ODP, ODP和GGT等)的实施,对地球层圈构造及其横向不均匀性的认识越来越深刻。如关于Conrad面的存在性、Moho面的不连续性、软流层的不均匀性,都冲击了传统地球物理学的认识,甚至动摇了地球物理学的基本假定。因此,90年代里,地球物理学家除了继续深入认识地球层圈结构及其不均匀性之外,还须探讨造成这些现象的原因,不仅要深入研究地球物理学的基本理论及其应用,甚至对其基本的假定(如层状介质的假定)也应重新加以考察,进而要研究随机介质条件下的地球物理学理论。再次,地球物理学家还必须结合现代地质学的最新发展,对大地构造框架作出新认识。如对拼贴而成的中国大陆的岩石层及其深部构造的认识,大陆内部各构造单元的地球物理特征,以及对基底拆离、滑脱和与之有关的薄壳构造在地球物理场中的表现等,都是当今地球科学发展的前沿。

2. 实验地球物理学

地球物理理论的基础是岩石物性。应用地球物理方法,进行地球物理解释的依据是上下岩层的物性参数差。因此,岩石物性研究程度的高低直接关系到地球物理解释成果的正确程度。尤其是对难于直接证实的地球深部构造问题,只有在充分了解深部岩石物性的基础上得出的地球物理资料的解释成果才是可信的。因此,开展实验地球物理学研究是完全必要的。

实验地球物理学的一项重要任务是研究在高温高压条件下,岩石物性参数(如密度、速度、导热系数、磁化率、孔隙度、导电率、渗透系数等)的变化规律。由于科学技术的进步,当今高温高压实验技术已可模拟接近或达到地核的温压条件。目前国际上静态高压高温实验、高温高压岩石工程力学、冲击波动态超高压高温实验都已完善。在我国,高温高压实验研究也有长足的进展,如中国科学院地球物理研究所地球动力学高温高压开放实验室的成套实验装置,其温度和压力可达1500℃和3吉帕,已经步入当今世界领先的

行列。这些进展,为实验地球物理学的研究奠定了坚实的基础。

然而,目前高温高压研究主要集中于静态实验方面,如高压矿物学、矿物物理学及极端条件下变质作用的研究,而实验地球物理学的研究仍相对较少。因此,立足国内条件,加强国际合作交流,大力推动实验地球物理学研究,使之呈现出崭新的面貌,是我们的一项重要任务。

3. 层析成像技术的应用

随着地球科学的发展,需要确定和了解地球内部的精细结构,必须采用高分辨率的层析成像技术。

层析成像是利用各种地球物理场所携带地球内部的信息对其内部结构逐层剖析成象,重建地球内部切片的图象。这样,位场和电磁波、地震波都可用于地球层析成象,现在广泛应用的只是地震层析成象。我们还必须考虑下列因素:

(1) 岩石地震波的速度与岩石性质有比较稳定的相关性,适合于地球内部成象,而岩石的电阻率和介电系数变化范围很大,不利于直接用于岩性和构造成象。然而,找水或确定孔隙流体饱和度等问题却可能从电磁层析成象的应用中获得更好的效果。

(2) 目前用于探测的电磁波频段,具有很高的衰减比,难以穿透超过几百米的岩层,但不妨作浅层的层析研究。

(3) 电磁波传播速度太快,难以在小尺度内测量其到时参数。地震波速度为每秒几公里,振幅和到时都易于测量,而且不同的震相又可以在记录上区分开,进而提供出极其丰富的信息。但是如何在某些制约条件下发挥重磁场的层析成象作用,则是另一个值得考虑的问题。

总之,地震层析成象是目前了解地球内部精细结构的重要手段。它对于了解地幔结构,研究板块驱动机制等问题都很有意义。此外,地震层析成象应在能源勘探开发中用以寻找有利的油气岩性圈闭,在工程地质和灾害地质中用以探测裂缝结构,在金属矿勘探开发中用以寻找盲矿体等等。

认识地球,开发地球,保护地球,改造地球是当前人类面临的重大问题,也是地球物理学家肩负的重任,地球物理学的发展必须与之保持一致。只有把握住正确的努力方向,投入全部精力,地球物理学才能步入当代先进学科的行列,并为人类社会和社会发展做出应有的贡献。

(责任编辑 宋义荣)