



“闻山辨龙” ——页岩气勘探中的地球物理方法

□ 文图 / 殷启春 周道容 滕 龙

第一作者简介 殷启春,高级工程师,长期从事长江下游地区页岩气地球物理勘探及资源评价工作。

据美国能源信息署对全球页岩气储量评估,我国页岩气储量居世界第一,我国南方海相页岩气开采前景广阔。我国是继美国、加拿大之后第三个实现页岩气商业开发的国家。页岩气赋存在深部富有机质泥页岩地层之中,钻探验证之前需要采用地表勘探技术确定深部页岩储层的分布状态。曾经热播的电视剧《怒晴湘西》中男主拥有神奇的“闻山辨龙”之法,站在地面通过听风听雷就可以识别深处地宫位置。地质勘探者面临的问题是类似的:不同性质的岩石相互叠置、深埋于地下,如何预测这些岩石的分布,乃至其中的矿藏?简单的方法是实施密集的钻探,将岩芯从深部取出来。然而就经济和效率而言,这是得不偿失的,仅适用于个别小范围的富集矿区。在地球物理界确实有这么一批人,他们不挖坑、不打钻,在地表利用仪器接收地下传来的物理信号,用这种方法去找油、找矿、找水、甚至找古墓,近年来更是在我国的页岩气地质调查与资源评价工作中大显身手,可谓“闻山辨龙”的科学之法,他们是如何做到的呢?

物理性质差异——地球物理勘探的依据

选择“听风”还是“听雷”,这是首要问题。或者更通俗一点说,如果地质勘探者是主治医生的话,那么地球物理工作者就是医学影像师,不同的地球物理手段就相当于X光、CT、B超、核磁共振等医学影像技术。

地球物理方法是页岩气勘探中最有效、最准确的方法之一。按照地质问题优先,再选用合适的地球物理方法技术的思路,文章以“闻山辨龙之法”为比喻,用通俗易懂的语言从地球物理基础知识出发,介绍了利用地球物理方法开展页岩气勘探方法流程。文中展示了近年来长江下游地区页岩气地球物理勘探成果,为地质调查工作者和地学研究者提供参考。

地球物理勘探的第一步是根据地质目标体的物理性质,结合实际的工作条件,决定采用哪种地球物理手段才能解决地质问题。地质目标的物理性质主要包括密度、磁性、电性、弹塑性等,找到地质目标体和围岩物理性质差异最大的地方,也就明确了什么地球物理方法最合适。

在我国南方海相页岩气勘探中,富有机质泥页岩的围岩往往发育灰岩,二者之间存在较大的物理性质差异。因此地球物理界“四大门派”——重力、磁力、电法、地震(简称为重磁电震),均可在页岩气勘探的不同阶段发挥独特的作用。下面我们将一一揭开“四大门派”的神秘面纱,看他们是如何发现深藏于地下的秘密。

重力勘探——轻松圈定远景区

研究重力值与地质体的关系就诞生了地球物理勘探的第一大“门派”——重力勘探。



＞ 开采现场

习惯上，重力勘探中的重力就是重力加速度值的简称，为了纪念第一个测定重力加速度的物理学家伽利略，把重力加速度的单位称为“伽”。重力勘探是第一种被用于油气勘探的地球物理方法。

如果说观测到了高精度的重力值是“闻山”之术，那么后续的数据处理和地质解释就是更为重要的“辨龙”之术了。尽管由于地质条件差异导致的重力值变化很微弱，而且地表观测到的重力值是不同目标地质体在不同空间中的叠加结果，但地球物理学家采用了极为复杂，目前仍然在不断发展的数学、物理计算方法对重力值分离、反演，从而研究地球内部结构，了解地下不同岩层的性质和空间变化。

野外观测的重力值经过数据处理后，可以清晰明了地显示地表农田、湖泊、河流覆盖下的地下深部结构。神奇的是，通过选用适当的数据处理方法，还可以显示出不同深度的地下结构。当然，一般而言深度越大，对地质体的分辨率就越低。

重力勘探在油气勘探中可以解决以下几个问题：一是划分盆地构造单元，如凹陷、凸起、斜坡、大的火成岩侵入体；二是确定区域性深大断裂；三是研究常规油气聚集的构造圈闭。

重力资料在页岩气勘探中具有独特的优势，主要体现在其可以快速、全景式在水平方向上划定隐伏的富有机质

泥页岩的盆地 / 凹陷边界，还可以划分次一级构造单元，从而确定页岩气远景区分布范围。在中国南方海相地区，因为页岩的密度显著低于其主要围岩灰岩的密度，在理想情况下，甚至可以直接圈定地下页岩分布范围。在与电法、地震和钻井资料结合开展精细的三维地下结构

一个简单而神奇的公式：

$$G=mg$$

牛顿观察苹果落地，发现是因为重力的存在，并总结出了万有引力定律，而重力里面蕴藏了地球内部结构的秘密。

当质量为 m 的物体受到地球引力 G 作用时，物体所获得的加速度为 g 。位于地表的各个位置， g 值是变化的，而这个变化的部分与地球形状的非理想圆形、地壳厚度变化和地质条件差异都有关系。



研究时,重力资料可以提供必要的边界约束。

翁文波院士早在 20 世纪 30 年代攻读博士学位期间就设计、制作了我国第一台重力探矿仪。他回国后于 1945 年成立了我国第一个野外重力、磁力测量队,为我国大西北甘青地区石油勘探开发打下坚实的基础。他运用重力等方法与黄汲清、谢家荣等地质学家一起研究并确定了松辽盆地上的三个基准井位,是发现大庆油田的功勋人物,凭此获得国家自然科学奖一等奖。

磁力勘探——指示磁性地质体的指南针

组成地壳的岩石有着不同的磁性,可以产生各不相同的磁场,它使地球磁场在局部地区发生变化形成磁异常。利用仪器测定这些磁异常,根据其特征做出关于构造、岩体和磁性矿产的预测,这就是磁力勘探的主要任务。磁力勘探在确定磁性矿体、磁性界面起伏和火成岩分布方面有较好的效果。早在 1640 年,瑞典人就开始用罗盘寻找磁铁矿,在 1870 年制造出第一台磁力仪。

在我国南方页岩气勘探实践中,航空磁法异常图中的一个小规模异常区,很好地反映某页岩气井中深达 1 770 米,侵入到沉积岩地层的小型中基性岩脉,而这种小型岩脉在地震解释中容易被误判为背斜式构造变形。因此在页岩气勘探中,要考虑隐

伏岩体对相关地层的影响,最经济易行且效果显著的磁力勘探是一个必不可少的法宝。

重力和磁力勘探都基于位场理论,它们的数据处理和解释方法相互通用,故有重磁不分家的说法。

电法勘探——用电场变化素描地下结构

电磁法勘探,也常被简称为电法勘探,是根据不同岩层电性特点研究地层与构造形态的方法。电法勘探种类繁多,应用极其广泛。可以按场源区分为两类:一是大地电场法,是通过测定地球内部的天然电流大小来研究地下结构;二是人工电场法,即人工向地下通入可控制的电流,再在地面上测定人工电场的变化规律。在中国南方海相地区,富有机质页岩往往和灰岩伴生,二者具有显著的电性差异。中国地质科学院物化探所充分利用此物理差异,在长江下游地区复杂人文干扰环境下,利用自主研发的分布式多参数电磁探测系统,配合该系统开发的抗干扰数据处理与弱信息提取技术,开展了页岩气地球物理电磁法测量工作,成果为页岩气参数井井位确定提供了重要的地球物理依据。

中国南方海相富有机质页岩储层普遍含有黄铁矿,而黄铁矿具有显著的“激发极化”效应。地球物理勘探者当然会抓住这种特点,将这种在金属矿勘探中较为成熟的方法运用到我国南方页岩气勘探中,但

其应用具体情况目前尚处于探索阶段。为了查明富有机质泥页岩的电阻率特征和激发极化特征，从而预测富有机质泥页岩地层分布、埋深、产状和断裂情况，建立适合南方海相地区页岩气探测高效低耗的地球物理方法组合，地质调查者们正在不懈努力。

地震勘探——给地球做“CT”

地震勘探技术是页岩气勘探中一种应用广泛的重要方法，同时也是最接近小说中神奇的“在悬崖边上向着悬崖底下放枪，通过悬崖峭壁间形成的回声，就能辨别悬崖之下的古墓”的“闻山辨龙”之法。它的原理是由人工震源（炸药或机械振动）所引起的地震波，在地面接收和观察地震波在地层中传播的信息，以查明地下介质的分布与形态。相对其他地球物理方法而言，地震方法的优点是垂向分辨率高、层位精度大、探测深度深。由于我国南方海相页岩地层组合是页岩与灰岩共生，在页岩和灰岩的分界面发育有明显的地震波反射界面，因此在识别和追踪海相页岩储层空间分布上具有明显优势，是页岩气钻井优选位置最可靠的地球物理依据之一。

小说、电视剧中的“大师”观泥痕辨草色，听风雷与回声就可以辨别地底下的古墓地宫，地球物理技术被誉为地质勘探家的“透视眼”，可以透过地表障碍物“看”到地表以下物质的分布情况，揭

开地球深藏的秘密，在打钻之前就预测到埋藏地下的页岩气地质条件甚至页岩气藏。

2019年，自然资源部中国地质调查局首次在长江下游地区海相地层中发现异常高压含气层，验证了地球物理调查技术效果。围绕攻关长江下游地区页岩气地质问题，积极推进全区多种物探新方法试点，形成以重力、磁力、电法、二维地震等“多兵种”页岩气勘探联合调查技术，有力支撑了长江下游页岩气调查科技攻坚战。长江下游地区页岩气勘探尚未取得工业产能，具有高难度的人文干扰、复杂地表和复杂地下构造条件，给地球物理工作者带来前所未有的机遇和挑战。这就需要推进已有各种地球物理技术的综合运用，推进物探与地质、钻井、测录井和地球化学等学科交叉发展，加快地球物理技术集成创新，更好地服务于我国页岩气勘探开发。■

本文由中国地质调查局“苏皖地区页岩气地质调查（编号：DD20190083）”“苏皖赣地区页岩油气战略选区调查（编号：DD20190565）”项目联合资助。

第一作者单位 / 中国地质调查局南京地质调查中心、中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心

（本文编辑：王依卓）