

文章编号:1671-4814(2014)01-061-06

页岩气勘探中的地球物理方法综述及展望*

滕 龙,徐振宇,黄正清,殷启春,谭桂丽

(中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016)

摘要:地球物理方法是页岩气勘探中最有效、最准确的预测方法之一。在调研国内外利用地球物理方法勘探页岩气研究成果的基础上,分析总结了页岩气勘探中最有效的地震和测井法对页岩气的响应特征,讨论了常规油气勘探中已获得成功的电磁法、重磁勘探以及综合地球物理方法在页岩气勘探中的应用;对我国页岩气勘探技术的发展进行了展望,为我国页岩气勘探与开发提供参考。

关键词:页岩气;地震勘探;测井;电磁法;重磁法;综合地球物理勘探;展望

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

随着世界经济的快速发展,人类社会对油气资源的需求量也日益增加,而常规油气资源的供应已日益紧缺,因此寻找新的替代能源已刻不容缓。大量研究资料表明,页岩气等非常规天然气蕴含着巨大的资源潜力,页岩气勘探与开发已成为全球油气资源研究的热点,正在改变世界能源格局^[1]。页岩气指赋存在泥页岩中以吸附及游离状态存在的重要的非常规天然气资源^[2,3]。据统计,全球页岩气储量约为456万亿立方米,我国页岩气储量约为26万亿立方米,占全球页岩气储量的5.7%。我国是天然气等能源消耗大国,到2020年我国天然气将有80亿立方米的缺口。若能将页岩气进行合理开发利用,将能极大地缓解我国天然气资源的供需矛盾。页岩气赋存在地表以下,在勘探过程中需要利用先进的勘探技术和方法才能确定目标储层。美国是世界上最早进行页岩气勘探开发的国家,其页岩气的开发极大地促进了世界页岩气的开发热潮。2010年,美国页岩气年产量1378亿立方米,至2015年将提高到近2700亿立方米。如此巨大的页岩气产量已改变了美国资源紧缺的局面,解决了其天然气供需矛盾。我国页岩气勘探起步较晚,页岩气勘探技术尚处于借鉴与摸索阶段。同常规油气勘探一样,页岩气勘探也需要一系列综合方法:首先评估页岩的规模及其储层潜力,圈定勘探有利靶区;然后运用

地质、地球物理、地球化学及钻探等综合方法,划分出页岩层;最后分析页岩的含气特征,确定产气层。上述综合方法中,地质以地表露头观测为主,钻探虽可直接了解地表以下的物性特征,但具有“一孔之见”的缺点,且钻探成本高、效率低,因此,在页岩气勘探中钻探不可能大面积投入使用。而地球物理技术可以让我们透过地球表面“看”到地表以下的物质,相对钻探来说,在提高勘探效率的前提下,大大降低了勘探成本,是探测页岩气空间分布最有效、最准确的预测方法。

本文在大量调研国内外页岩气勘探成果的基础上,总结了页岩气勘探中有效的地球物理技术和方法,并对我国页岩气勘探技术的发展进行了展望,为我国页岩气勘探与开发提供技术参考。

1 页岩气勘探中的地球物理方法

地球物理勘探是以不同岩矿石之间物理性质的差异为依据,利用物理学原理,通过观测各种地球物理场空间和时间的分布规律来进行勘探,是深部矿产资源勘查的核心^[4]。在常规油气勘探过程中,地球物理方法是不可或缺的技术手段,其中地震勘探是最行之有效的方法。在页岩气勘探与开发过程中,地球物理方法也是必要的技术手段。近年来,随着计算机与GPS技术的发展,地球物理方法勘探的

* 收稿日期:2013-07-22 改回日期:2013-08-16 责任编辑:汪建宁
基金项目:中国地质调查局“重点地区页岩气资源调查评价”项目(项目编号:1211302108025-3)资助。
第一作者简介:滕 龙,1980年生,男,工程师,从事地球物理勘探工作。Email: tldragon@163.com.

效率与精度已有很大提升,这为页岩气勘探提供了有效的技术支撑^[5-9]。由于页岩气主体一般位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,且储层致密^[10],因此地球物理方法是分析页岩气空间分布最有效、最准确的预测技术。在所有地球物理方法中,地震勘探在识别和追踪页岩储层空间分布具有明显优势;测井则能精细评价页岩层及储气能力;电磁法具有探测深度大、工作效率高的特点,可用于寻找深部圈闭构造;而重磁法可解决区域构造格架问题,圈定有利远景区;利用非震方法可达到间接寻找页岩气的目的。

1.1 地震勘探

1.1.1 页岩层识别

地震勘探主要是利用介质的波阻抗差异,通过观测和分析观测介质对地震波的响应,达到推断地下介质分布与形态的目的。一般页岩层中含气量越高,其速度和密度就越低,此时页岩层相对围岩具有较低的波阻抗,在地震剖面上表现为断续一弱振幅反射,以此作为识别页岩层的标志。我国四川盆地龙马溪组页岩便具有这种特征(图1)。从图1可见,龙马溪组与中奥陶统顶界面存在清晰的波阻抗界面,可以较好的识别出龙马溪组页岩层;但组内反射振幅弱,无明显的波阻抗界面,符合断续一弱振幅反射特征。此例表明,利用地震勘探可以有效地识别页岩层。笔者认为,地震勘探可能是页岩气勘探中最有效的地球物理方法之一。

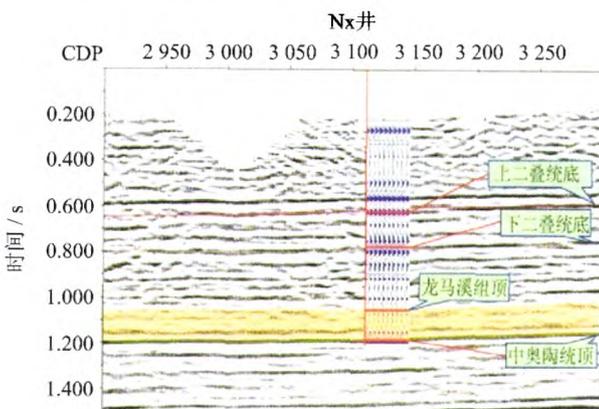


图1 四川盆地龙马溪组页岩地震剖面^[6]

Fig.1 Seismic profile of shale in Longmaxi Formation of Sichuan basin

近二十年以来,计算机技术的迅速发展促进了地震勘探技术的进步。以高分辨率三维地震勘探技术为代表的勘探方法将成为页岩气勘探中的重要方法,用于识别和追踪页岩气储层^[11,12]。高分辨率三维地震勘探是在二维地震基础上发展起来的,具有

信息量丰富、分辨率高的特点,可以获得三维空间的立体结构,用于勘探隐蔽油气藏、研究圈闭构造,已经在油气领域广泛应用^[13,14]。相比于二维地震勘探,高精度三维地震勘探的分辨能力更高,可用于查明页岩气地层特征、构造特征、区域沉积特征、页岩气层段分布特征、页岩气层段储层特征、岩石力学特征,进而圈定页岩的埋深与规模,评价页岩的储气能力。我国已经在酉阳、富顺、永川、长宁、昭通等开展了页岩气二维地震勘探,威远、长宁2个地块实施了页岩气三维地震,形成南方海相页岩气藏地震勘探技术^[9,15]。这些成功的勘探案例在我国页岩气地震勘探中具有重要的指导作用。

1.1.2 储层含气性预测

除了从地震剖面上识别页岩层,还可以利用不同的数据处理方法预测页岩的含气性。目前常用的技术有叠后波阻抗反演、叠前AVO反演、叠前弹性阻抗反演及频谱分解^[8]。

(1)叠后波阻抗反演:页岩含气量越高,其密度和速度越低,波阻抗减小。通过地震数据的反射系数得到波阻抗,进而可推算出页岩的含气性。但受制于反演的多解性,该方法不能全面、准确地提供储层的岩性和物性信息。

(2)叠前AVO反演:页岩层的密度和速度直接影响到含气层的弹性参数。通过使用不同的近似式反演求解得到与岩性、含油气性相关的多种弹性参数,用来预测储层含油气性。该方法已在松辽盆地进行验证,成功确定了岩层含气位置和分布范围^[16]。此方法对地震资料的质量要求较高,且稳定性和分辨率相对较低。

(3)叠前弹性阻抗反演:弹性阻抗是纵波速度、横波速度、密度和入射角的函数,充分利用了振幅随偏移距变化的信息。因此它既有叠后波阻抗反演的优点,又弥补了叠前AVO反演的分辨力和稳定性,增强了储层含气性的预测能力。多项研究和试验证实了此方法预测结果的有效性^[17,18]。

(4)频谱分解技术:基于含油气储层的高频吸收特性进行页岩气检测。这项技术已在常规油气中开展应用,但在页岩气的应用中还较少^[19]。

1.2 页岩气测井

地球物理测井具有分辨率高、精细测量的特点,已成为常规油气勘探中必不可少的手段之一。与钻探相比,地球物理测井更加经济高效,不需要取芯即可准确获取钻孔中的多种物性参数。由于受环境影响,测量岩芯获得的物性参数与真值之间往往存在

一定的误差,而地球物理测井法直接在井中进行测量,不改变其物质的沉积环境,因而可以获得更加准确的结果。除了直接获得井中物性参数外,还可以对井壁周围进行推测,判断目标体的规模和延伸。由此可见,在评价页岩气储量方面,地球物理测井已成为页岩气勘探开发的重要技术手段。

由于含气页岩的孔隙渗透率低,且具有很强的非均质性和各向异性^[20],常规测井解释评价方法不再适用,因而需要建立新的测井方法模式。已经逐渐发展起来用于识别页岩气储层的测井技术方法有气测识别法、常规测井组合识别法、 $\Delta \lg R$ 识别法、介电常数识别法^[21]。

(1)气测识别法:低渗透率页岩一般具有较高的烃含气量,钻井时会发生井涌等现象。通过气测异常,可以识别页岩气储层。该方法已经在四川盆地、济阳拗陷等地识别出了页岩气储层^[22,23]。

(2)常规测井组合识别法:利用不同的测井组合有效识别页岩气储层。吴庆红等利用自然伽玛、电阻率、中子孔隙度、声波时差和感应测井组合识别出龙马溪组页岩气储层^[24]。

(3) $\Delta \lg R$ 识别法:来源于 Exxon 公司和 Esso 公司,见公式(1)。

$$\Delta \lg R = \lg \frac{R}{R_{\text{基线}}} + K(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (1)$$

$\Delta \lg R$ 为经过一定刻度的孔隙度曲线与电阻率曲线的幅度差, R 表示地层电阻率, $R_{\text{基线}}$ 表示非源岩电阻率基线, Δt 为声波测井读数, $\Delta t_{\text{基线}}$ 表示非源岩声波测井基线, K 为刻度系数,取决于孔隙度测井的单位。 $\Delta \lg R$ 反映了富含有机质烃源岩地层、含烃储集层和岩性差异。齐宝全等(2011)^[25]利用 $\Delta \lg R$ 识别法突出了页岩气,识别效果较好。

(4)介电常数识别法:含碳氢化合物页岩层介电常数高,反之则介电常数低,利用该特征可达到识别页岩气储层的目的。此方法的有效性已在美国某些页岩层得到了证实。

综上所述,笔者认为测井技术和解释方法作为高效快速的地球物理探测和分析手段,可以为地质学家和开发工程师提供丰富的评价指标^[26]。

1.3 电磁法

如前所述,地震是油气勘探中最有效的方法。油气赋存多与盆地有关,地形和岩层产状相对较为平缓,为地震勘探提高了良好的地形条件。但对于地形起伏剧烈、构造复杂(如推覆体地区)和火山岩覆盖区的地区,数据采集困难,地震波散射严重,难以进行地震勘探。在我国,页岩气可分为南方、北

方、东北、西北和青海—西藏五大区^[1]。其中南方地表条件复杂,高阻的碳酸盐岩层比较发育,阻挡了地震波向下穿透,难以获得深部信息。因此需要考虑非震方法。电磁法根据岩石或矿石的导电性和导磁性的不同,利用电磁感应原理进行勘探的方法,具有勘探深度大、不受高阻层屏蔽、对低阻层分辨灵敏等优点,在常规油气勘探发挥着重要的作用。唐新功等(2011)^[27]认为,音频大地电磁测深(AMT)和复电阻率法(CR)在页岩气勘探中具有非常良好的前景。

1.3.1 音频大地电磁测深(AMT)

AMT 是以天然电磁场源进行勘探的方法,可用于寻找构造圈闭与层位追踪。AMT 方法具有效率高、成本低、布点灵活、仪器轻便的特点,特别适合在我国南方地区开展普查。电磁波对高阻的碳酸盐地层具有很强的穿透力,易于在高阻覆盖区开展勘探工作,可以用于划分盆地范围、了解主要地层分布、发现与油气构造相关的深部信息。以江苏溧水火山盆地的 AMT 勘探结果为例(图 2),可见茅东断裂出露处(252 号点)往北西的茅山推覆体之下存在一显著层状高阻层。区域物性研究表明,海相地层在该区为高阻、高密度,重力测量成果也显示茅东断裂以西为重力异常高值区。结合区域地质认识,推断茅山推覆体下方高阻层为以灰岩为主的古生界海相地层(该区主要页岩气产层),其顶面埋深在 1000 m 以内。可见 AMT 方法在页岩气勘探中具有较好的应用前景。

1.3.2 复电阻率法(CR)

CR 法是电磁法中唯一能够直接指示油气藏的方法,可用于检测工作区域内的局部圈闭或异常是否含油。已有的研究表明,CR 法在油气勘探中的预测符合率高达 75%^[28]。泥质砂岩的复电阻率在特定的频段存在明显的频散现象,为 CR 法测量页岩气提供了物理基础。除了电阻率外,CR 法所测的视极化率也具有探寻油气藏圈闭的能力(图 3 中新疆准噶尔盆地某区 2 号井和 4 号井下的高极化异常均钻孔证实为油气藏圈闭)。

1.4 重磁法

重力勘探是测量与围岩有密度差异的地质体在其周围引起的重力异常,以确定这些地质体存在的空间位置、大小和形状,从而对工作地区的地质构造作出判断的一种地球物理勘探方法。磁法勘探是以探测对象的磁性差异为基础,进而研究目标体的分布规律的一种方法。重磁法勘探都是基于位场理论,它们的数据处理与解释方法相互通用,故有重磁

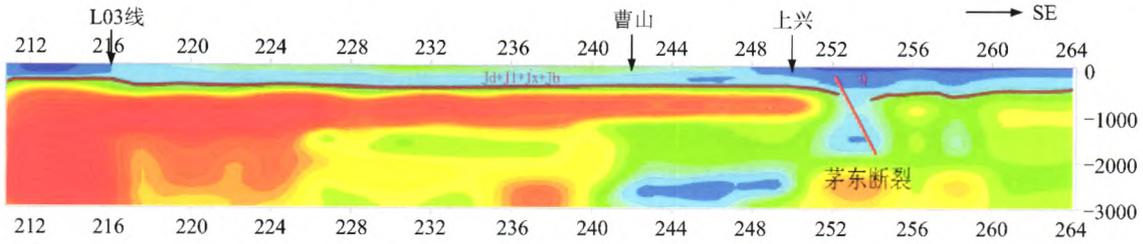
图2 江苏溧水火山岩盆地 AMT 电阻率断面图^①

Fig. 2 AMT resistivity section of Lishui volcanic basin in Jiangsu Province

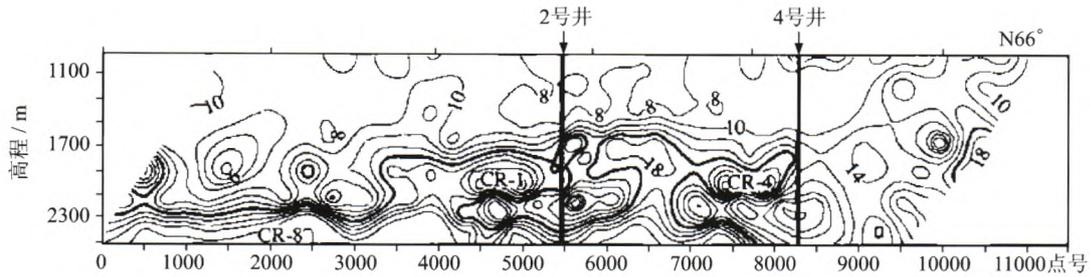
图3 新疆准噶尔盆地某区 CR 法视极化率成果图^[29]

Fig. 3 CR apparent induced polarization section in Zhungaer basin

不分家的说法。

重磁勘探结果具有区域性特点,其局部分辨率较差。所有地球物理方法中,重力勘探是第一个被用于油气勘探的方法^[30]。盆地是油气赋存的重要场所,特别是新生代海相碳酸盐岩残留盆地的勘探将成为页岩气勘探的突破口。一般而言,盆地的密度相对基底低,相对覆盖其上的第四系沉积物要高,利用重力可以划分出盆地的密度界面^[31-33]。相比地震勘探,重磁测量效率高、成本低,在如盆地这种面积性测量中有不可比拟的优势。郝天珧等通过岩石物性分析,利用正反演方法,求取了大港地区重力基底和磁性基底的埋深,讨论了前新生代残留盆地的宏观分布,并预测了前新生代油气资源有利区^[34]。随着仪器精度的提高和数据处理解释技术的完善,重磁法将在页岩气勘查中起到重要的作用。

1.5 综合地球物理勘探

赋存页岩气的页岩地质结构十分复杂,勘探难度较大。单一的地球物理方法存在一定的局限性,需要综合多种地球物理法进行勘探。综合地球物理方法不仅能从不同角度认识问题,还能相互约束提高各种方法的准确度。综合地球物理勘探方法已成为常规油气勘探发展的一个重要方向,也是页岩气勘探的发展方向。只有走综合地球物理之路,才能充分发挥各种地球物理方法的优势和特长^[35]。地震勘探在含气页岩识别中有独特优势。在页岩气勘探中,应坚持地震为主、非震为辅的勘探技术路线。

利用重磁区域测量,圈定潜在含页岩气盆地;然后利用地震、电磁法、测井,结合区域构造及沉积环境,确定有利的页岩层沉积微相发育特征以及展布范围。标定出深部构造和页岩层的顶底界面,分析页岩层段对地震波、电阻率及测井参数的响应特征。在地震剖面上识别和追踪页岩储层,确定含储层的深度、厚度以及延伸。在研究深部构造、基底结构等方面,电磁法是地震勘探的一个重要补充。合理利用各种方法组合,能提高探测结果的可靠性。

综合前人研究成果,我们认为井震联合是页岩气勘探最直接有效的方法组合,应进行重点研究应用。井震联合能准确标定页岩气层的顶底界面以及有效页岩的位置,进而在地震剖面上识别和追踪页岩储层,圈出页岩的区域展布特征。通过建立储层特征曲线与地震响应的关系,选用合适的反演技术进行预测,达到有效勘探页岩气的目的。

2 展望

2.1 我国页岩气发展现状

我国页岩气发展史可以追溯到 20 世纪 60 年代,当时页岩气作为常规油气的副产品在我国多个含油盆地中被发现;90 年代中期对页岩气开展了大量研究工作,探讨我国页岩气的形成和富集;2005 年对我国页岩气的资源潜力进行调查和评价。近几十年的研究证实我国页岩气成藏条件好,页岩气储量巨大。但限于技术原因,仍未开展全国范围页岩

气资源调查与评价,我国页岩气真实的资源总量和分布情况并未完全掌握。值得关注的是,我国第一口页岩气勘探评价井-威201已于2010年4月实现日产气量 $(1\sim 2)\times 10^4\text{m}^3$ 。近几年已在四川、重庆、贵州、湖北等地开展页岩气井钻探,获得工业页岩气井流井10口,实现了中国页岩气的突破^[36]。

2012年12月27日,中国地质调查局油气资源调查中心在北京挂牌成立,为国家油气资源战略、规划、管理及勘探开发提供技术支撑。“十二五”规划也明确提出“推进页岩气等非常规油气资源开发利用”,显示出我国大力推动页岩气勘探开发的决心。2013年,油气资源调查中心开始启动项目,在我国南方优选有利页岩气区带。

2.2 我国页岩气勘探技术展望

我国页岩气资源丰富,具有良好的资源前景。我国的页岩气勘探技术还处于实验研究及总结摸索阶段。受北美页岩气勘探启发,我们应在借鉴国外先进经验的基础上,开展适合我国页岩气成藏特点的勘探技术研究。特别是复杂地形和地质条件下,利用地震采集和处理解释、页岩气测井识别和储层精细描述等地球物理关键技术。探讨非震方法在页岩气中的勘探能力,建立页岩气地球物理勘探方法体系,为确定页岩气“甜点区”提供强有力的技术手段。

我国赋存页岩气的地质环境复杂,特别是南海相页岩发育地区,地形起伏较为剧烈,植被覆盖严重,应用地球物理方法进行勘探面临严峻挑战。因此,需要提高复杂地形条件下地震勘探结果的质量,并加强更适合山区工作的电磁法、重磁法等非震方法对页岩气勘探有效性研究。深化地质认识,优选一批具有勘探前景的靶区,开展综合地球物理方法试验,优化技术方法组合。南京地质调查中心承担的“重点地区页岩气资源调查评价”项目,计划于2013年完成华东地区的页岩气选区,并将从2014年开始投入地球物理方法进行重点地区页岩气勘探。随着国家和社会资金的不断投入,未来5~10年我国的页岩气勘探技术可能会取得一定突破。

3 结论

(1)地震是页岩气勘探最有效的地球物理方法,不仅能圈出页岩的规模与埋深,还可以评价页岩层储气能力。测井能精确标定页岩层的结构并评价页岩气的储量。测井与地震相结合,以测井的精细结构指导地震识别和追踪页岩气层,能充分发挥各自的技术优势。

(2)非震综合地球物理方法(电磁法、重磁法)在

常规油气勘探中发挥了重要作用,是地震勘探的一个重要补充。特别是在地形复杂区、推覆体区和火山岩覆盖区,非震地球物理方法更具应有优势。随着我国页岩气勘探进程的推进,非震地球物理方法的应用将日益广泛。

(3)综合地球物理方法是有效解决地质问题,从而达到勘探目的的有效途径。赋存页岩气的地质条件复杂,勘探难度大,单靠一种方法无法解决问题,需使用多种方法,相辅相成,从不同的角度对同一个目标进行解剖,才能得到可靠的勘探结果。

注释

①江苏省地质调查研究院. 江苏省宁芜深水区火山岩盆地岩浆构造演化与成矿作用关系研究(内部资料),2012.

参考文献

- [1] Xingang Z, Jiaoli K, Bei L. Focus on the development of shale gas in China: Based on SWOT analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 603-613.
- [2] 张大伟. 2010. 拿什么应对气荒? [N]. 中国国土资源报, 2010-01-29.
- [3] 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, (06): 136-140.
- [4] 滕吉文. 强化第二深度空间金属矿产资源探查, 加速发展地球物理勘探新技术与仪器设备的研制及产业化[J]. 地球物理学进展, 2010, (03): 729-748.
- [5] 昌书林, 秦启荣, 周毅. 地球物理技术在页岩气勘探过程中的应用研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(04): 10-12.
- [6] 李志荣, 邓小江, 杨晓, 等. 四川盆地南部页岩气地震勘探新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(04): 40-43.
- [7] 李曙光, 程冰洁, 徐天吉. 页岩气储集层的地球物理特征及识别方法[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(04): 351-352.
- [8] 林建东, 任森林, 薛明喜, 等. 页岩气地震识别与预测技术[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(08): 56-60.
- [9] 谢治国, 王巧丽, 曾祥亮, 等. 重庆西阳板溪页岩二维地震勘探研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, (08): 21-24.
- [10] 贾飞雄, 侯亚妮, 贾东林, 等. 页岩气勘探与开发现状[J]. 辽宁化工, 2013, 42(02): 145-148.
- [11] Milsom J, Eriksen A. Field geophysics[M]. WILEY: 2011: 179-195.
- [12] Chen X, Bao S, Hou D. Methods and key parameters for shale gas resource evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 605-610.
- [13] 陈佳梁, 胡润苗. 高分辨率三维地震勘探隐蔽油气藏的效果[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(04): 451-453.
- [14] 杨飞, 彭大钧, 沈守文, 等. 综合利用三维地震资料研究岩性圈闭[J]. 天然气工业, 1999, 19(06): 25-29.

- [15] 罗蓉,李青.页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨[J].天然气工业,2011,31(4):34-39.
- [16] 李艳玲.AVO叠前反演技术研究[J].大庆石油地质与开发,2006,25(05):103-105.
- [17] 曹孟起,王九拴,邵林海.叠前弹性波阻抗反演技术及应用[J].石油地球物理勘探,2006,41(3):323-326.
- [18] 喻岳钰,杨长春,王彦飞,等.叠前弹性阻抗反演及其在含气储层预测中的应用[J].地球物理学进展,2009,24(2):574-580.
- [19] 袁志云,孔令洪,王成林.频谱分解技术在储层预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2006,(S1):11-15.
- [20] Johnston J E, Christensen N I. Seismic anisotropy of shales[J]. Journal of Geophysical Research, 1995,100(4):5991-6003.
- [21] 肖昆,邹长春,黄兆辉,等.页岩气储层测井响应特征及识别方法研究[J].科技导报,2012,30(18):73-79.
- [22] 张金川,徐波,聂海宽.中国天然气勘探的两个重要领域[J].天然气工业,2007,27(11):1-6.
- [23] 张林晔,李政,朱日房,等.济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性[J].天然气工业,2008,(12):26-29.
- [24] 吴庆红,李晓波,刘洪林,等.页岩气测井解释和岩心测试技术-以四川盆地页岩气勘探开发为例[J].石油学报,2011,32(3):484-488.
- [25] 齐宝权,杨小兵,张树东,等.应用测井资料评价四川盆地南部页岩气储层[J].天然气工业,2011,31(04):44-47.
- [26] 莫修文,李舟波,潘保芝.页岩气测井地层评价的方法与进展[J].地质通报,2011,(Z1):400-405.
- [27] 唐新功,胡文宝,苏朱刘,等.我国南方地区页岩气电磁勘探技术初探[J].长江大学学报(自然科学版),2011,8(11):33-34.
- [28] 徐传建,徐自成,杨志成,等.复视电阻率法(CR)探测油气藏的应用效果[J].石油地球物理勘探,2004,39:31-36.
- [29] 苏朱刘,吴信全,胡文宝.复视电阻率法(CR)油气预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2005,40(10):467-471.
- [30] Nabighian M N. Historical development of the gravity method in exploration[J]. Geophysics, 2005,70(6):63-89.
- [31] Wattananikorn K, Jemal A B, Nochaiwong A. Gravity interpretation of Chiang Mai Basin, northern Thailand; concentrating on Ban ThungSiao area[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1995,9547(95):53-64.
- [32] Mammo T. Analysis of gravity field to reconstruct the structure of Omo basin in SW Ethiopia and implications for hydrocarbon potential[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,29(1):104-114.
- [33] Zhou X. Gravity inversion of 2D bedrock topography for heterogeneous sedimentary basins based on line integral and maximum difference reduction methods[J]. Geophysical Prospecting, 2012:1-15.
- [34] 郝天珧,徐亚,周立宏,等.前新生代残留盆地宏观分布的综合地球物理研究—以大港地区为例[J].地球物理学报,2008,51(2):491-502.
- [35] 杨辉.重力、地震联合反演基岩密度及综合解释[J].石油地球物理勘探,1998,33(4):496-502.
- [36] 董大忠,邹才能,杨桦,等.中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J].石油学报,2012,33(S1):107-114.

Summary and prospect of geophysical methods for the shale gas exploration

TENG Long, XU Zhen-yu, HUANG Zheng-qin, YIN Qi-chun, TAN Gui-li
(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: Geophysical methods are the most effective and accurate methods for the shale gas exploration. Basing on the investigation of the research achievements of the shale gas exploration by using of geophysical methods at home and abroad, the paper analyses and summarizes the response characteristics of the most effective seismic and logging methods for the shale gas exploration, discusses the conventional electromagnetic, gravitational, and magnetic methods successfully used for the oil-gas exploration, investigates the application of comprehensive geophysical methods for the shale gas exploration, and makes a prospect to the development of technique of the shale gas exploration providing some references to the shale gas exploration in China.

Key words: Shale gas; seismic prospecting; well logging; electromagnetic method; gravitation and magnetic method