

Yingtaogou Formation

Acknowledgements: This work was financially supported by the National Basic Research Program of China (NBRPC, 973 program) (2011CB403001). We would also like to thank the reviewers for their valuable comments and suggestions that greatly helped to improve the paper.

First author: WANG Zhentao, male, born in 1986, postdoctor, Sedimentary Geology and Salt Deposits. Email: gibson_wong@foxmail.com

Manuscript received on: 2015-05-27; Accepted on: 2015-05-08; Edited by: LIU Zhiqiang.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.04.019

深层油气藏地球物理探测理论与技术

——香山科学会议第563次学术讨论会简报

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.04.022

中国陆上39%的剩余石油资源和57%的剩余天然气资源分布在深层。深层石油地质资源量约153.81亿吨,天然气约16.52万亿立方米。但深层油气资源的探明率较低,分别为12%和6.3%,远低于石油总体探明率35.5%和天然气探明率17.9%的水平。以上数据表明我国深层油气资源相当丰富,勘探潜力巨大。利用三维地震勘探技术,在美国西内盆地奥陶系7663~8083 m深度发现天然气藏,在墨西哥湾密西西比三角洲的列克—华盛顿湖油田6540 m深度发现了世界上最深的油藏。地球物理勘探技术的进步也有力地促进了我国的深层油气勘探。20世纪90年代中期, Kirchhoff 叠前深度偏移技术在工业界刚刚应用,大港油田就利用该技术在千米桥潜山取得勘探突破,板深7井、板深8井相继获得高产油气流。进入21世纪,随着高分辨率处理技术的不断发展和波动方程叠前深度偏移的工业化应用,华北油田在牛坨镇潜山部署的牛东1井、大兴砾岩兴9井,大港油田在埕海潜山的海古101井获得高产油气流;在塔里木盆地,塔深1井在8000m深度发现液态石油,大大拓展了石油勘探深度,深层已经成为我国油气资源接替的重要领域。

但对深层油气藏进行地球物理探测的理论与技术仍是21世纪深层油气资源勘探开发亟需解决的关键技术难题之一,也是地球物理方法理论发展的重大课题。该难题的解决需要地球物理学家、地质勘探家和油气勘探开发企业的大力协作和共同努力。为此,香山科学会议于2016年6月7~8日在北京香山饭店召开了以“深层油气藏地球物理探测理论与技术”为主题的学术讨论会,会议邀请了地球物理学界和石油工业界的学者专家共计41人与会,并由贾承造院士、杨文采院士、朱日祥院士、金之钧院士、陈晓非院士和王尚旭教授共同担任执行主席。会议围绕三个中心议题进行了深入讨论:①中国西部深层油气藏地球物理勘探问题及对策;②中国东部深层油气藏地球物理勘探问题及对策;③深层天然气藏地球物理勘探问题及对策。会议总结了与我国深层油气藏地球物理探测相关的地质问题,以及数据采集、资料处理和多信息融合等方面的研究现状及存在的主要问题,凝炼了我国深层油气藏地球物理探测的关键科学问题,讨论了相应的解决对策方案,并对油气地球物理专业人才的培养及企业与科研机构的合作方式给出了建议。

1 主题评述报告

围绕“深层油气藏地球物理探测理论与技术”这一会议主题,中国地质科学院研究员杨文采和中国石油大学(北京)教授王尚旭分别作了题为“中国深埋沉积盆地和潜在储层的分布预测”和“深层油气藏地球物理勘探新理论与新技术”的主题评述报告。

杨文采院士在报告中介绍说,在北美、欧洲与亚洲古生代、元古宙的含烃沉积盆地分布十分广泛,油气资源丰富。我国古生代及元古宙中的深埋海相沉积盆地分布也很广泛,在四川、鄂尔多斯和塔里木,都发现了古生界、元古宇海相油气田。与西方相比,由于我国大地构造演化的特殊性,导致我国的沉积盆地具有演化时间长和结构叠置的特点,多为叠合盆地;深埋裂谷盆地底部或侧部结晶岩中也可能发育裂隙型油气潜在储层;对该类储层,利用目前的地震勘探技术很难获得有效的成像。由于结晶基底密度大、磁性较强,沉积岩密度低磁性较弱,可用密度成像及磁性体顶面深度反演揭示深埋的沉积盆地和潜在储层分布范围。在会上,杨文采院士也详细介绍了区域重力场小波变换多尺度反演方法和刻痕分析系统,并通过实例展示了这些方法在我国5大区深埋盆地和潜在储层分布预测中的显著应用效果。

王尚旭教授在报告中,详细介绍了我国深层油气资源的概况及生产对地球物理技术的需求。王尚旭教授介绍说,我国陆上39%的剩余石油资源和57%的剩余天然气资源分布在深层;但深层石油和天然气资源的探明率较低,远低于石油和天然气的总体探明率。对深部白云岩储层,由于埋深较大,反射信号很弱,如何拾取深部地层对应的微弱信号,并对该信号进行处理、识别缝洞中的流体性质是目前工业界面临的重大需求。王尚旭教授在报告中通过物理实验详细阐述了复杂介质中波传播以及缝洞的散射特征,解释了深层地震信号“弱信号、高畸变”特点的成因。通过数值实验给出了球面波反射系数与平面波反射系数的差异,指出利用平面波理论进行地震资料的解释和反演可能会导致一些误差;并且,目前逆时偏移获得的成像结果反映的应是密度比剖面,同时报告给出了一种球面波反射系数的简洁表达式。

与会专家针对两个主题评述报告展开了热烈的讨论。印兴耀教授指出地球物理勘探中应用的是地震波传播的统计效应,虽然波动方程在真实介质中不能严格成立,但在目

前情况下,应用近似理论进行油气勘探也是适用的,在很多勘探区块可以取得很好的效果。陈晓非院士提出在勘探中利用低频震源,可能跨过一些散射区把深层的构造勘探出来。针对低频勘探,张永刚教授认为,对低频来讲,菲涅耳带很大,对勘探也会造成一些困难;同时,张教授也提出目前深层油气藏的勘探难题主要集中在弱信号如何获取和处理上,在东部的胜利油田,很多地方埋深 3500m 以下的区域反射信号很差,而西部塔河油田很多埋深在 7000 m 以下的构造反射信号仍较强,如何从诸多信号中把深部构造对应的弱信号拾取出来并处理是勘探的主要难题。杨文采院士,傅立叶算子展开后第一项就是我们常用的波动方程的解,其去掉了所有的高阶项,有学者也做过高阶,但都是对简单模型;低频不会影响地震勘探的分辨率,分辨率取决于频带宽度,在频率域进行反演的时候要选好频率的数量,并确定选取频率点的方式;在采集的时候,要改变采集系统的设计方案,以多尺度的观测系统来弥补偏移距不足的问题。撒利明教授指出,深层油气藏的勘探主要从理论和技术(工程)两个层次进行顶层设计,明确理论上主要解决什么问题,在技术和工程层面上,清楚信号如何采集和处理;并分采集、处理和解释三个阶段进行攻关。欧阳永林教授指出,目前利用串珠现象也能找到气藏,但串珠的机理和结构还需要进一步的研究。金之钧院士指出,目前对深层油气的钻井成本很高,在目前低油价的形势下,如何通过地球物理方法确定油气藏的位置和信息,是降低勘探风险和成本的重要途径,希望地球物理学界能给出一个地球物理的分辨率极限。

2 中国西部深层油气藏地球物理勘探问题及对策

围绕“中国西部深层油气藏地球物理勘探问题及对策”这一中心议题,与会专家在报告中详细分析了塔里木盆地海相碳酸盐岩超深层油气藏地球物理勘探问题,并针对西部深层油气藏地球物理勘探中的地震数据采集、海量数据的计算以及储层预测等问题提出了相应的对策。

报告指出,西部深层油气藏主要是碳酸盐岩储层,有岩溶缝洞型和多成因裂缝洞穴型两大类油气藏。前一类主要为以典型喀斯特地表淡水溶蚀作用下形成的洞穴、溶蚀孔洞、裂缝为主的储集空间,对该类储层应用原来的方式在构造高点布井失败率较高;后一类主要为受高能相带控制,经溶蚀改造形成的微生物岩孔隙型储层,但对其成因机制,以及层序界面发育状况和控藏机理仍待深入研究。在西部深层地球物理勘探中,面临的主要问题是:① 地震勘探纵横向分辨率问题;② 地震成像上“串珠状”反射存在多解性;③ 缝洞储集体成像技术问题;④ 断裂带边界、断裂带内幕储层的发育情况;⑤ 天然气的检测问题。报告中提出,在目前低油价形势下,对地震信号的采集,在油气前景好但具体目标不明确的地带,优选有利区带采用二维宽线方式进行地震采集,搜寻和落实深层有利目标;在此基础上,开展高密度三维地震勘探,准确落实和精细评价深层复杂目标的构造细节和储层特征,满足目标精细勘探和开发的需要。针对地震数据处理中的海量计算问题,多尺度方法和并行计算方法是研究方向。报告认为,多尺度方法包括快速多极算法和计算局部不均匀多体散射的本征模式方法;目前 GPU 的并行程序已经在工业界发挥了重要作用。对深部裂缝评价模型必须突

破单一尺度的哈德逊—汤姆森均匀等效介质理论的局限性,建立多尺度裂缝的定量识别方法;裂缝型储层成藏过程复杂,需进一步明确裂缝的发育与油气水之间的关系。

与会专家针对西部勘探问题的中心议题报告和专题报告展开了热烈的讨论。与会专家认为一个很小的洞,在成像的时候也会产生很大的一个串珠,但如果两个小洞在一起,那么现有的勘探方法无法将其分开。杨文采院士指出白云岩跟灰岩之间是过渡的,对于 6~12 km 白云岩利用现在的反射地震不可能将其与灰岩分开,要分开可以采用两种途径,一是用多尺度地震采集技术,用层析成像专门求这个深度范围的泊松比或纵横波速度比;二是做高密度的大地电磁三维反演。金之钧院士指出塔河、磨溪等大气藏主要是在白云岩的基础上形成的,白云岩裂缝发育,纯白云岩是结晶白云岩,结晶过程中孔隙度增大,电阻率变小;以当前地球物理技术,弄清楚古地貌对白云岩的预测有很大的作用,国外的地震地貌学主要就是做白云岩。与会专家对与气藏相关的低频阴影问题也进行了热烈的讨论。

3 中国东部深层油气藏地球物理勘探问题及对策

围绕“中国东部深层油气藏地球物理勘探问题及对策”这一中心议题,与会专家在报告中指出,东部渤海湾盆地构造复杂、沉积体系发育、储层薄、相变快;深部储层具有更加复杂的波场特征。现有的速度建模策略和地震成像方法不能很好地满足构造成像和地层刻画的实际需求,亟需新的地球物理勘探方法为深部油气勘探提供技术支撑。

报告指出,相对于中浅层地质目标,深部地震反射经历了更多的吸收和衰减,地震分辨率与储层厚度的矛盾更加突出,中浅层多次反射等对深层信号的干涉效应也加剧了深部地震记录的非稳态特征。现有的基于线性理论框架的提高分辨率方法不能很好地满足深部勘探的是实际需求;基于贝叶斯理论框架的非线性反褶积方法在实际应用中也遇到了诸多问题。尽管属性分析和地震反演技术在中浅层储层预测中发挥了重要作用,但在面向深部储层时遇到了一些新的问题。我国东部潜山型油气藏一般发育大倾角断层和不整合面,岩性和速度变化剧烈;古潜山内部发育裂缝和溶洞,地层各向异性很强。目前东部潜山型油气藏偏移速度建模不准,潜山内幕存在成像盲区。针对成像问题,可采用测井—构造—地震相互结合的建模方法,以及旅行时—振幅剥离的 FWI 反演方法,获得较为准确的速度模型。然后采用各向异性 Q 补偿逆时偏移和最小二乘逆时偏移成像方法,提高古潜山边界及高倾角断层的成像分辨率。目前反射系数及波阻抗反演中存在反射系数序列具有“白性”、地震子波为最小相位的限制,采用数据驱动的非平稳地震道信号模型和散射与吸收效应分离算子理论,可以有效地突破该限制。为了更好地反演储层参数,要深入研究微裂缝和地层品质因子参数对地震波传播的影响,阐明地层吸收衰减参数与基岩模量、储层物性、孔隙流体参数等之间定量关系;明确含油气性优质储层在不同入射角条件下的地震反射特征差异,为利用叠前地震资料开展优质储层预测提供可靠的地震地质模型;建立起叠前地震道集间的差异性属性与储层性质之间的定性变化关系,提取出能反映优质储层特征的叠前地震属性参数。

与会专家针对东部勘探问题的 4 个报告展开了热烈的

讨论。印兴耀教授指出在实际工作中佐普利兹方程比波动方程应用效果要好。杨文采院士指出,时间序列的方式忽略了多次波、侧面波等,跟实际资料有很大的区别;回转波对深层勘探有很大的作用,盐丘的内部成像还需要好好利用回转波;另外对油气藏进行识别的关键仍是信号的提取问题。沈金松教授提到流体识别问题,要考虑有油和无油情况下的相对差异对流体识别作用可能更大,而不是单纯去定量的评价。王延光教授提出对东部深层油气藏进行地球物理勘探最关键的问题还是成像的问题,其对构造圈闭的落实具有重要的作用,特别是在目前低油价的形势下,选择合适的成像方法尤为重要。朱日祥院士在交流中指出,问题是创新的源头,有了问题就知道往哪里努力,对问题的解决只依靠自己专业的人是不够的,要引入信号处理、数学以及地质等专业的人才一起进行研究;另外,对深层进行勘探,如何从数据里面获得深部地层的关键信息十分重要,可以借鉴GPS的伪随机编码的技术,如何把它们简单介质中的传播用到复杂介质中,可能会实现重大的突破。

4 深层天然气藏地球物理勘探问题及对策

围绕“深层天然气藏地球物理勘探问题及对策”这一中心议题,与会专家在报告中指出深层气藏埋藏深度大,储层致密,利用现有地震理论直接进行检测存在困难;地震也不能区分含气饱和度的高低。

报告中提到砂岩和碳酸盐岩气藏的地震响应均有三大特性:“拟非均质”现象、“气晕”规律和“钉软木”效应。在叠前地震资料上,气层的反射振幅随炮检距的变化没有佐普利兹方程计算的极性反转现象,存在较大差异,利用佐普利兹方程存在较大误差。地震勘探首先要优化针对深层、超深层的采集,改善资料品质,然后进行油气检测。报告中指出,中国东部,特别是渤海湾裂谷盆地,具有大致相似的发育演化历史,发育众多的变质岩潜山和凸起。辽河油田已经建立了变质岩潜山“内幕”油气藏和基岩“负向构造”油气藏的成藏模式和成藏理论,认识到变质岩内部并非是均一的地质体,具有储层与非储层交互发育的层状或似层结构特征和网状裂缝发育的构造应力条件,源储有机配合,有利于内幕油气藏形成。辽河油田发现变质岩中可能发育多套裂缝系统,每一套裂缝系统,可能成为一套油藏系列,提出供油窗的底界有多深,油藏埋藏就有多深的构想。通过地震资料采集、处理、解释一体化技术攻关,提高变质岩潜山内幕信噪比,特别是变质岩内部,储层与非储层交互发育的特点,可形成阻抗界面。

与会专家围绕中心议题报告和专题报告进行了热烈讨论,王大兴教授针对地震资料处理中Q的问题,提出随着射线入射角的变化,计算的Q值是发生变化的,在处理中没有考虑;随着入射角变化的Q值补偿应该在处理中加以考虑。金之钧院士指出,四川盆地下一步的勘探重点将会是二叠系的致密灰岩,白云岩化不彻底,对其进行地球物理勘探是一个重要发

展方向;在考虑创新的同时,要做好经济评价,例如高密度是一个很热的词,但怎样评价投入和产出之间的关系需要进行考虑;技术的经济的评价如何去考虑,高密度也是很热的一个词,这个经济账如何算?怎样去培养创新型地球物理人才是百年大计;探索有效的国内产学研合作的方式,更好地发挥学校和企业和技术合作开发中的作用。

5 会议总结与专家建议

经广泛交流和深入讨论,形成以下主要观点和建议:

(1) 对我国西部的塔里木盆地、四川盆地,白云岩为深部潜在油气资源的主要储层,区分白云岩与灰岩对深层油气藏勘探十分重要;但利用传统的地震勘探技术,很难将其与灰岩分开;应加强白云岩岩石物理研究,开发针对白云岩油气藏的地球物理勘探技术。

(2) 对我国东部拉张型盆地,裂缝是深部变质岩等基岩油气藏的主要储集空间,应加强针对深层的裂缝预测方法与流体识别技术的研究。

(3) 对深层油气藏进行地震勘探,应重视从强干扰记录中拾取深部地层对应的弱信号,以及利用这些弱信号对构造进行准确成像的技术研究。

(4) 对深层油气藏进行勘探,应重视重、磁、电等综合地球物理勘探方法,利用密度成像获得深部含油气盆地的分布范围,然后引入时频电磁等技术进行反演成像。

(5) 要汇聚信号处理、数学和地质等学科人才共同攻关,借鉴其他行业的先进理论和技术,例如GPS中的伪随机编码等,探索地球物理勘探技术新的突破口。

(6) 应在科研活动与技术探索过程中引入经济评价机制,使经济投入与产出比能控制在合理的范围。

(7) 要重视创新型地球物理人才的培养,根据需要培养理论创新型人才和技术创新型人才,对理论创新型人才要着重数学和物理基础的培养,而对技术创新型人才要重视解决工程问题能力的培养。

(8) 探索新的科研院所和企业的合作模式,使双方在技术研发和进步中更高效地发挥作用。

(杨文采 供稿 章雨旭 编辑)

