

文章编号: 0253-2697(2010)06-0959-07

# 高含水油田油藏地球物理技术 ——中国石油物探的新领域

刘文岭

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要:** 从高含水油田深度开发需求的角度和油藏地球物理发展的历程,指出高含水油田油藏地球物理技术是中国石油物探研究的新领域,并提出在高含水油田发展油藏地球物理技术具有 10 项地质任务。对高含水油田油藏地球物理技术研究涉及的地震属性分析技术的适应性、储层物理特征曲线重构的必要性与可行性、井震联合地震反演井数据的应用、开发地震的成图单元等重要认识问题进行了探讨。通过对低级序断层识别、微幅度构造解释、薄互层储层预测等关键技术的研究,以中国东部某油田的应用为例,说明了在高含水油田发展油藏地球物理技术的必要性和可行性。

**关键词:** 高含水油田; 剩余油预测; 提高采收率; 油藏地球物理; 开发地震; 地震反演; 储层预测

中图分类号: P631.9

文献标识码: A

## Reservoir geophysics techniques in development of mature oilfields with high water cut: A new research area of geophysical prospecting for petroleum in China

LIU Wenling

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the need of developing mature oilfields with high water cut, the present paper reviewed the development history of reservoir geophysics techniques and proposed the reservoir geophysics techniques in developing mature oilfields with high water cut as a new research area of geophysical prospecting for petroleum in China. The paper enumerated ten geological issues for the application of reservoir geophysics techniques to mature oilfields with high water cut and discussed some important cognition problems including the suitability of seismic attribute analysis technology, the necessity and feasibility of log curve reconstruction of reservoir physical properties, the application of well data to seismic inversion and the plotting units of production seismology. Based on studies of the recognition of low-order faults, the interpretation of microstructures and the prediction of laminated interbed reservoirs, the paper, by taking an oilfield in eastern China as an example, showed the necessity and feasibility to apply reservoir geophysics techniques in developing mature oilfields with high water cut.

**Key words:** oilfield with high water cut; prediction of remaining oil; enhancement of oil recovery; reservoir geophysics; production seismology; seismic inversion; reservoir prediction

经过三四十年的开采,中国已开发油田主体上进入了高含水后期,2006 年底中国石油天然气股份公司各油田平均采出程度为 73.9%,综合含水率为 84.94%<sup>[1]</sup>。尽管中国高含水油田的稳产难度越来越大,特别是陆上东部地区的老油田,产量递减快,但高含水油田的原油产量仍然在原油总产量中占有相当大的比例,其中 70% 以上是由已开发 20 年以上的老油田生产的。高含水期和特高含水期是可采储量的主要开采期<sup>[2]</sup>,做好高含水油田提高采收率工作,对地球物理技术提出了新的挑战。

### 1 高含水油田提高采收率对地球物理学的新需求

地球物理技术服务于石油勘探已有几十年的历史,发展了全三维自动解释、相干体、属性分析、地震反演、烃类检测等一系列成熟技术,用来解决油田开发早期评价阶段的问题,也很有成效。然而用地球物理技术,特别是地震技术,来解决油田开发后期精细油藏描述与剩余油分布问题,却是近年来高含水油田提高采收率赋予的新使命,在高含水油田发展油藏地球物理

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX0510-002)资助。

作者简介: 刘文岭,男,1966 年 7 月生,2002 年获中国地质大学(北京)博士学位,2004 年中国石油勘探开发研究院博士后出站,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事油藏地球物理与储层地质建模研究。E-mail: liuwenling@petrochina.com.cn

技术是中国石油物探研究的新领域。

### 1.1 油藏地球物理技术发展历程

油藏地球物理是指在已知油藏中服务于油田开发的地球物理研究,通常也被称为开发地震。

国外深入的油藏地球物理技术研究始于20世纪70年代,1977年美国能源部资助斯坦福大学开展了油藏地球物理基础研究,20世纪80年代,SEG专门成立了开发与开采委员会,每年召开专题研讨会,推动油藏地球物理技术的发展。90年代以来,油藏地球物理技术得到了长足的进步<sup>[3-5]</sup>。进入21世纪,随着国际石油价格的攀升,国外石油公司更加重视高含水油田采收率的提高,积极发展、大力推广高密度三维地震、多波多分量地震、井间地震、三维VSP和四维地震等油藏地球物理技术。在油藏开发阶段,三维地震多次覆盖,多学科协作,时间推移解释,动态管理油藏,有效指导开发调整,使许多老油田降低了开发成本,焕发出新的生机。

在中国油藏地球物理学作为一个全新的领域开展研究,主要是在20世纪90年代,1995年谢剑鸣先生发表了“论开发地震”的论文,阐述了开发地震的作用;1995年东部地区第七次物探技术研讨会上,孟尔盛先生提出了开发地震较系统的概念;钱绍新先生在该次会议上宣读了题为“油藏地球物理学——地球物理学的一个新领域”的学术论文,从理论上较系统地阐述了油藏地球物理学的几个重要概念及研究方法;1996年刘雯林先生出版了《油气田开发地震技术》一书;1996年牟永光先生出版了《储层地球物理学》一书。然而,20世纪90年代中国的油藏地球物理技术还主要是地球物理学家在推动,这一阶段的工作受到了油田开发领域广泛的质疑,许多人认为开发阶段井很多、很密,采用当时国内分辨率相对较低地震没什么用。受这种认识和阻力的影响,这一时期,油藏地球物理技术在中国高含水油田基本没有得到很好的应用,甚至很难进入这一领域。进入21世纪,国外油藏地球物理技术得到了迅速发展<sup>[6-8]</sup>,为这项技术能够真正帮助开发专家解决油田开发中遇到的地质问题带来了新的希望。2000年以后中国石油韩大匡院士、中国石化牟书令和李阳等一批油田开发领域的专家积极倡导,并和张国珍、赵邦六、阎世信、王喜双、刘雯林、王延光等地球物理专家共同大力推动油藏地球物理技术在老油田的应用,中国油藏地球物理技术从此掀开了高含水油田应用的新篇章。2002年刘文岭采用大庆油田杏树岗地区勘探扶余油层的地震资料,以上部高含水主力油层葡萄油层研究为例,对开展高含水油田开发地震工作的可行性和有效性进行了论证,率先在大庆长垣老区

开展了开发地震工作。2002—2006年,中国石化以胜利油田垦71高含水区块为示范区,完成油藏综合地球物理技术研究,实现了井间地震、3DVSP与高精度三维地震的结合,有效提高了老油田的采收率。自2007年开始中国石油在大庆长垣油田开展了全面的高精度三维地震资料采集,标志着中国油藏地球物理技术进入了高含水油田深入研究应用的新阶段。

### 1.2 高含水油田油藏地球物理技术的地质任务

在高含水油田开展油藏地球物理技术研究,最主要的目的就是要重构地下认识体系,并体现到储层地质模型之中,服务于油藏数值模拟预测剩余油的需要。从高含水油田深度开发需求的角度,具体有以下10项主要地质任务:

(1) 地下断层体系重构:断层对剩余油的富集起着重要的遮挡作用,油藏地球物理技术在老油田的应用,应当注重发挥其在井间存在资料的优势,有效识别和组合断距 $\geq 3$  m,长度 $\geq 100$  m的断层。

(2) 微幅度构造解释:研究微幅度构造能进一步揭示储层的非均质性,预测剩余油富集部位,寻找高效井。但是在常规标准层构造图的大等高距下微幅度构造难以发现,这需要结合密井网资料和地震资料,在提高深度域构造成图精度的基础上,采用1~5 m小间距等高线法进行研究。

(3) 砂体横向边界预测:不规则大型砂体的边角部位、主砂体边部变差部位,以及现有井网控制不住、动用程度低或未射孔的小砂体、薄砂层形成的剩余油预测,都需要结合地震资料预测砂体横向边界和砂体的分布范围。

(4) 条带型砂体走向确定:通过测井解释,容易识别井点上砂体,然而,在高含水后期井数多,对于条带型砂体在井点上的组合和井间砂体的走向的确定,需要辅助地震储层预测成果对其加以精细刻画,这对于预测条带型砂体因注采完善程度低导致的剩余油富集部位有帮助。

(5) 河流相储层主体部位刻画:刻画大型复合型砂体中河道主体部位对开展有针对性的堵水调剖、调驱,以及结合精细地质对隔夹层的研究成果,挖潜厚油层顶部等储集空间的剩余油,具有非常积极的意义。对于油藏地球物理技术而言,刻画河流相储层主体部位(包括主河道和点坝等)着重是要解决薄互层储层条件下单砂层厚度预测的精度问题,单砂层厚度预测准确了,相对厚度较大的河流相储层主体部位也就得以预测了。

(6) 砂体接触关系与连通性识别:通过开展高精度地震反演与属性分析,确定砂体接触关系与连通性,

对于分析注采井对应关系,调整注采井网,完善注采系统,具有指导意义。

(7) 岩性隔挡预测:砂体被纵向或横向的各种泥质遮挡形成滞油区,是剩余油挖潜的有利部位。预测对剩余油富集有利的各种岩性隔挡的位置,如末期河道、废弃河道等,是地球物理技术在油田开发领域应用的一项新任务。

(8) 储层物性参数预测:建立高精度确定性储层物性参数模型是开展剩余油预测油藏数值模拟的基础,仅靠井数据地质统计学插值和模拟,无法解决井间的不确定性问题,这需要油藏地球物理技术对此进行高精度的研究,而对于裂缝性储层则要做好裂缝分布和方向等参数的预测。

(9) 约束储层地质建模:集成地震资料断层、构造解释和储层预测成果,建立以地震资料为约束的井上忠实于井数据、井间符合地震的体现多学科研究成果的确定性数字化三维地质模型,是开展高含水油田剩余油预测精细油藏数值模拟的切实需要。

(10) 直接剩余油预测与油田开发动态监测:在老油田发展地球物理技术最终的目标应是直接的剩余油预测与油田开发动态监测。

## 2 高含水油田油藏地球物理技术研究的重要认识

### 2.1 地震属性分析技术的适应性

地震属性分析技术在油田勘探阶段发挥了重要作用,但是随着地震技术进入高含水油田开发领域,研究目标由过去的研究砂岩组等相对较厚的储层,到细分小层甚至单砂层,地震属性分析技术应用出现了适应性问题。中国陆上老油田沉积呈多旋回性,油田纵向上油层多,有的多达数十层甚至百余层,是典型的薄互层储层。多年来,油田开发实践表明地质小层是开发地质和油藏工程研究的最基本单元。与之相对应,地震储层预测需要到小层级才能对油田开发具有实质意义,对此地震属性分析的适

应性存在两个方面的情况:一方面,对于“砂包泥”类型的储层,如大庆油田主力油层葡萄花油层组,地震反射波组是若干个地质小层反射相互干涉的结果,沿层和按时窗提取的地震属性均不对应具体的地质小层,使得地震属性分析仅能认识砂岩组的整体特征,达不到高含水油田精细刻画具体地质小层砂体分布的目的;另一方面,对于“泥包砂”类型的储层,在上覆下伏泥岩相对较厚的情况下,地震属性分析技术则能够实现良好的薄层预测。

由此可见,在高含水油田开展地震储层预测,地震属性分析方法的应用要因地制宜,需要对储层的适用条件加以认真分析,不可强行要求,盲目应用。

### 2.2 储层物理特征曲线重构的必要性与可行性

以往的研究实践表明,声波测井曲线不能刻画岩性是东部砂泥岩薄互层油田普遍存在的现象。而不同岩性存在声波差异是地震波阻抗反演的先决条件,声波时差不能很好地反映储层和围岩的差异,使得反演结果无法进行岩性解释,为储层预测带来很大困难。为此,有必要利用现有其他可刻画岩性的测井资料,弥补声波时差曲线的不足,构造一条能够反映储层物理特征信息的曲线,使其能够替代采集的声波测井曲线参与反演计算,有效地预测不同岩性的空间展布。然而,许多地球物理学家反对这种“重构”的做法,认为缺乏理论依据。笔者这里将以先正演、后反演的方式来说明储层物理特征曲线重构的可行性。

图1正演模型设计的砂岩速度为3570 m/s、泥岩速度2850 m/s,重构的砂岩速度3333 m/s、泥岩速度为3225 m/s。采用Strata软件进行反演,反演结果对比说明,对于采用初始模型,通过合成记录与实际地震道对比修正反射系数序列的反演方法,即便重构的速度和原始模型设计的速度(对应于地下真实的速度)有较大的不同,也能够达到较高的砂体横向预测精度(预测的速度值存在一定误差),可以用于预测井间的砂体分布。

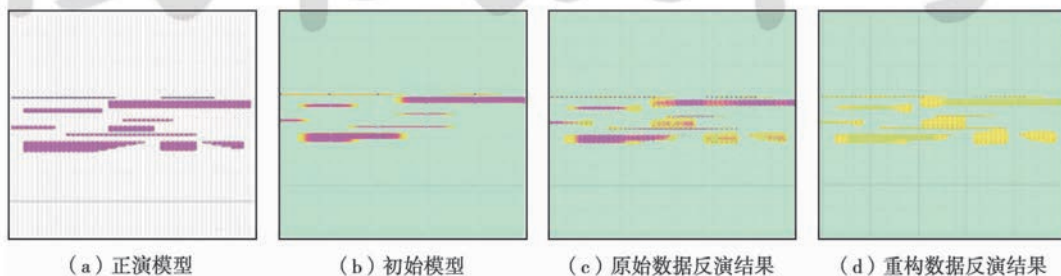


图1 重构曲线应用的有效性说明

Fig. 1 The effectiveness of the application of log rebuilding

### 2.3 井数对地震反演精度的影响

高含水油田井网密度大、井数众多,通常  $1 \text{ km}^2$  有几十口井,甚至上百口井,对于一个开发区块一般有数百口井。中国高含水油田开发地震工作起步晚,目前从业人员绝大部分过去从事的是勘探阶段或是油藏评价阶段的地震工作。勘探阶段和油藏评价阶段已知井少,面对油田开发后期如此大量的井数,工作量数倍、十几倍、数十倍的增加,许多刚从勘探领域转入开发地震的工作人员难以适应,提出抽稀已知井,以提高工作

效率。

地震反演技术从纯地震的递推反演发展到井约束的地震反演,井数据的参与使地震反演精度出现了突飞猛进的飞跃,为此必须格外重视油田开发现场宝贵的井数据的应用。研究表明(图2),在反演的过程中井数据的应用多多益善,油田开发后期大量的已知井在反演中的应用能够更加精细地表征储层空间分布的非均质性。至于由于大量井数据应用带来的工作效率问题,则需要在改进工作方式、方法中加以解决。

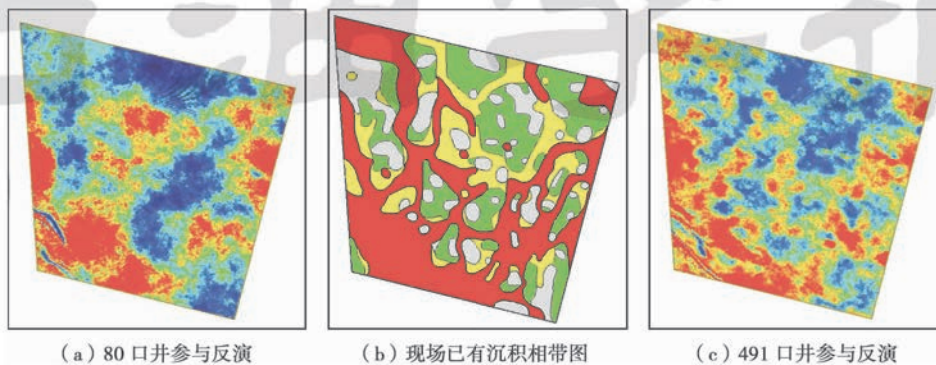


图2 井数对地震反演精度的影响

Fig. 2 The influence of the number of wells on seismic inversion accuracy

### 2.4 开发地震的成图单元问题

老油田开发地震的成图单元是人们关心的重点问题之一。中国高含水油田开发,通常以地质小层为单元,油田开发调整方案的部署、二次开发层系井网的优化等等,都需要依托对各个地质小层断层、构造和储层分布情况的翔实认识。针对地质小层在地震剖面上一般不具有连续的可分辨的地震反射特征可以解释,地震资料解释工作仅能够解释少数几个反映大套层系或砂岩组的地震标志层,以及地震反演成果难以解释到小层等问题,提出以地震标志层位解释数据约束的地质分层数据地质统计学插值方法,来实现井震联合的地质小层构造成图、地质小层约束反演和地震反演后的小层砂体解释与辅助沉积相带图绘制。

## 3 高含水油田油藏地球物理关键技术

油田进入高含水、特高含水阶段以后,剩余油高度分散,以“小规模”和“微规模”为主,对剩余油分布起控制作用的低级序断层、微幅度构造和井间主力砂体展布状况进行精细描述和表征,是高含水油田油藏地球物理技术现阶段的主要任务。

### 3.1 井中断点引导的小断层解释方法

岩性变化等因素和小断层的存在一样可以带来地震反射同相轴的连续性、光滑程度和振幅强弱的变化,地震技术识别小断层带有一定的多解性。为了有效降

低地震识别小断层的多解性,鉴于高含水油田井数多、井距小、分布相对均匀,多数小断层被井所打到,提出在高含水油田开展地震资料断层解释必须与井中断点数据相结合,并进一步建立了利用井中断点引导地震小断层识别的方法。其要点是将井上具体小层的断点平面投影到蚂蚁体沿层切片上,拾取井上断点落到的异常带,作为重点研究的小断层,拾取井间连续长度较大的异常带,作为疑似小断层,以波形变面积显示的时间剖面为主,结合彩色剖面,对重点研究和疑似的小断层进行人工确认,去伪存真,规避由于岩性变化带来的多解性。

### 3.2 地震约束地质小层构造成图方法

在勘探阶段通常采用时深转换的方法,利用速度数据,将地震解释的时间域层位  $T_0$  图,转换为深度域的构造图。这种做法对于勘探地震寻找区域构造能够完全满足精度要求,但是对于油田开发识别微幅度构造的需求,由于地震速度难以求得非常准确,构造成图受速度影响,或者出现假的构造,或者抹煞真的微幅度构造,不利于高含水后期对  $5 \text{ m}$  左右甚至更小的微幅度构造进行研究。

为了发挥高含水油田已知井多的优势、规避地震速度难以求准所带来的误差,提出老区微幅度构造研究不应再沿用勘探地震时深转换方法进行构造成图,并进一步建立了具有外部漂移克里金构造成图方法<sup>[9]</sup>。其实

质是在地震层位解释数据的约束下,采用井上分层数据进行插值,实现井震结合的高精度构造成图。该方法的提出实现了在地震剖面上无法解释的地质小层可以借助相邻地震层位的约束,进行精细构造成图,进而达到以地质小层为单元进行构造成图的目的。

### 3.3 地质小层约束精细储层反演方法

以地质小层约束地震反演有两方面的必要性:一是防止砂体窜层;二是便于反演后小层砂体解释。开展地质小层约束反演实现地质小层在地震剖面的合理解释是关键,鉴于具体区块的开发加密、调整或其他挖潜措施对应的目的层厚度一般不大,通常在几十米、最多上百米的范围,为此提出采用以下方法来开展地质小层约束地震反演:①根据小层深度以及过井道地震解释的上下层位时间值,按比例计算地质分层深度值对应的地震双程旅行时,实现地质分层数据深时转换;②将时间域的各井分层数据,以相邻地震解释层位约束,采取地质统计学方法插值,做到井上忠实于井,井间和外部符合地震趋势;③将利用开发区大量已知井插值获得的时间域小层层面数据加入地震解释系统,根据地震同相轴趋势和局部反射特征,对不合理处进行重新解释后用于地震反演;④地震反演后,在小层内对地震反演数据体进行体现厚度的砂体雕刻解释,实现地震反演成果以地质小层为单元的工业化制图。

## 4 实例

运用笔者提出的高含水油田油藏地球物理关键技术,在中国东部油田多个重点开发区块开展了井震联合精细油藏描述,研究表明采用高精度三维地震资料在老油田开展小断层识别、微幅度构造解释、井间砂体

边界刻画是可行的,有利于重构老区地下认识体系。

(1) 基于井中断点的小断层解释。目前被广泛应用的相干体技术识别大断层非常有效,但难于用于5 m以下的小断层解释,而地震蚂蚁体技术识别断层尽管具有很高的灵敏度,但同时也具有较强的多解性。为此,提出了井中断点引导的蚂蚁追踪断层解释方法。利用该方法对研究区地质解释的孤立断点所打到的小断层和井间小断层进行了有效的解释。图3(a)给出了一个断距为2.5 m孤立断点所属小断层的解释实例。从图3(b)中蚂蚁体切片可见,圆圈内X6-41-636井断点位于蚂蚁痕迹之上,表明断点指示的该蚂蚁异常痕迹有断层经过(没有断点覆盖的痕迹可能是岩性变化引起的),蚂蚁异常痕迹清晰表明了小断层的延伸长度和走向。采用断点和蚂蚁体技术综合分析后,在地震剖面上对X6-41-636井所过小断层的倾向和空间产状进行了解释。从图3(c)可见,圆圈位置处2.5 m的断点在地震剖面上存在微弱的地震同相轴抖动,上下地层地震层位也有明显的错断或抖动现象,表明这一小断层确实存在。对于地震解释技术而言,由于岩性等变化也可以产生和小断层类似的地震反射特征,过去仅凭地震同相轴微弱的变化,地震解释人员往往难以解释断层,采用笔者提出的这种井震结合的方法,有了井中断点的引导,则给出了地震解释小断层的确切依据。过去仅靠井资料分析,那些孤立断点所代表的小断层由于只被一口井钻遇,以及没有被井打到的井间小断层,地质家和油田开发专家对其长短、走向和产状是无法认识的。该方法的提出解决了老油田长期以来难以解决的孤立断点、局部断点组合和井间小断层解释的难题。

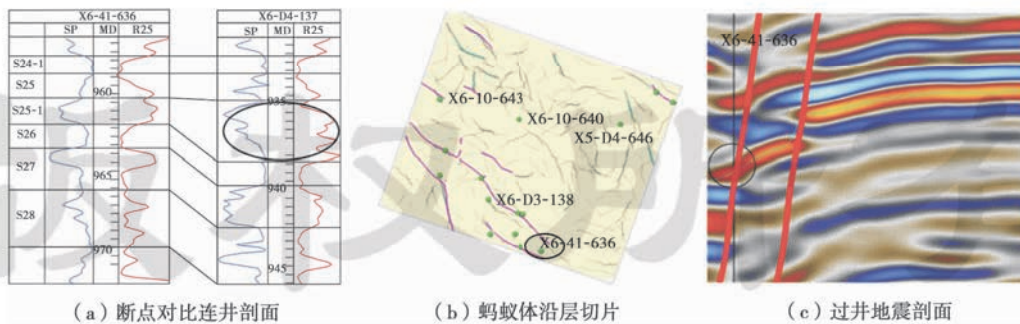
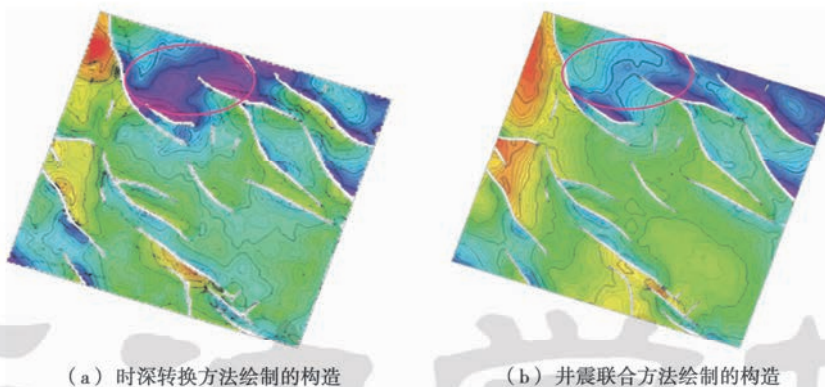


图3 井震联合小断层解释

Fig. 3 The small faults interpretation by combination of well and seismic data unit

(2) 井震联合精细构造成图。图4所示的研究区域面积为37 km<sup>2</sup>,井数为2082口,井网密度为56口/km<sup>2</sup>。该区井网分布相对均匀,井距小于150 m,研究区域四周边界均有密集井网控制,如此密的井网条件下,用井数据采取插值方法形成的构造图可以认为具

有良好的精度,这为对比构造成图方法提供了有利条件。图4(a)为采用常规地震时深转换方法获得的深度域构造图,与图4(b)采取笔者提出的以地震约束地质分层数据地质统计学插值取得的成果相比,尽管两者在同一色标体系下成图,圆圈处两图颜色有着非常



(a) 时深转换方法绘制的构造

(b) 井震联合方法绘制的构造

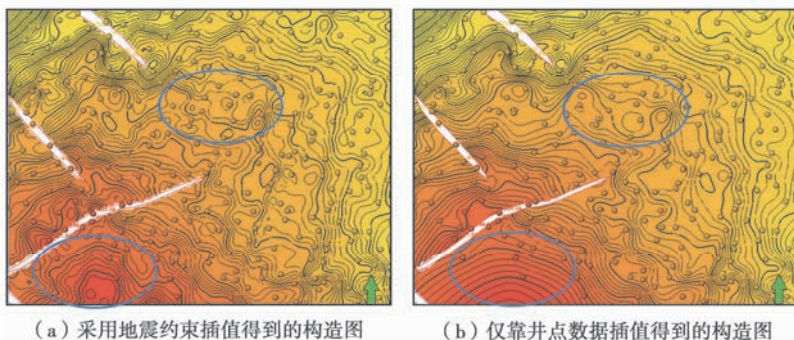
图 4 井震联合构造图方法与地震方法的对比

Fig. 4 The comparison of structure map by the primary seismic method and the new method

明显的差异。由于该区已知井多而密,有理由相信插值方法获得的构造图更真实可靠,那么两图的差异则表明地震常规方法存在较大误差,其来源在于地震的速度很难求得准确。为此,在老油田开展开发地震构造图,必须抛弃地震传统的构造图方法,发挥老区井多的优势,井震联合绘制高品质的小层构造图(图 5),以避免由于地震速度的不准带来的假构造或抹煞

真实的对剩余油富集认识有利的微幅度构造。

图 5 表明了即便在密井网区域,采用地震约束地质分层数据地质统计学插值方法要好于老区目前普遍采用的仅用井数据插值的方法。前者突现了地震数据在井间的约束作用,使得所绘制的构造图在井上忠实于井,在井间和边界井数据相对较少区域继承了地震趋势,而更加合理和符合地质实际。



(a) 采用地震约束插值得到的构造图

(b) 仅靠井点数据插值得到的构造图

图 5 井震联合构造图方法与仅用井数据方法的对比

Fig. 5 The comparison of structure map by the method with only well data and the new method

(3) 地质小层约束随机反演。勘探阶段的地震反演由于对地质小层无法进行解释,仅采取地震解释的少数几个大的标志层作为约束,来建立反演初始模型或者背景模型,这使得反演成果可能出现砂体窜层情况,而对于反演数据体的砂体解释又很难落实到具体的地质小层之中。地震反演不能解释到地质小层,就无法进一步指导油田开发工作,不能为油田生产所用的开发地震是没有意义的。为此,前文提出了地质小层约束的地震反演方法。采用该方法以测井曲线预处理和地质分层数据复查为基础,开展地震随机反演,井震联合重绘小层沉积相带图,相对较厚砂体以地震储层预测结果为主,薄砂体采用井数据刻画,对小层砂体展布有新认识。图 6 黑线为相带边界,由于在小层内采用反映厚度信息的方法进行砂体雕刻,不同色彩代

表了一定的砂体厚度信息,红色厚度相对较大。在图 6 中红色的河道主体部位清晰可见,这对油田进一步

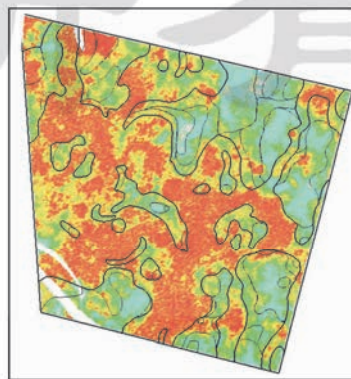


图 6 地质小层砂体雕刻图

Fig. 6 The fine description of geological layering sand body

的调整挖潜具有积极的参考意义。

## 5 结 论

(1) 中国高含水油田油藏地球物理技术研究真正的工业化应用和深入的科研攻关,是近年来才开展的工作。大庆长垣油田、新疆克拉玛依油田开发地震工作和胜利油田垦71等区块开发地震工作,标志着中国石油物探技术真正从勘探地球物理进入了高含水油田油藏地球物理的新领域,也标志着油藏地球物理技术从油藏开发评价阶段应用真正进入了高含水油田规模化应用的新阶段。

(2) 从勘探地球物理到油藏地球物理、从勘探地震到开发地震,研究的目标、尺度和精度要求发生了很大的变化,这需要在工作方式、方法上谋求创新,建立适应高含水油田井数多、储层薄、综合含水高、剩余油分布零散条件下的开发地震采集、处理、解释一体化技术。

(3) 当前高含水油田油藏地球物理技术的研究主要任务是识别小断层、解释微幅度构造和开展井间储层横向边界预测,并在此基础上重构地下构造与储层认识体系。为了达到这一目标,关键是要充分利用老油田已有的大量的井资料,开展井震联合的技术方法攻关,在多学科数据与方法集成中,实现“小”断层、“微”构造、“薄”储层识别及预测技术瓶颈的突破。

(4) 在阐述发展高含水油田油藏地球物理技术相关理念的基础上,提出了从井中断点出发开展小断层解释、采取地震解释层位约束进行地质小层地质统计学插值绘制构造图和以地质小层约束开展地震反演等方法,井震联合精细储层描述应用取得良好效果。研究表明,在高含水油田开展油藏地球物理技术研究与应用对于重构老区地下认识体系十分必要,也是非常可行和有效的。

**致谢** 感谢中国石油勘探开发研究院胡水清、侯伯刚、陈留勤、王玉学等博士在论文实例研究中所做的工作和帮助。

### 参 考 文 献

[1] 胡文瑞. 论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J]. 石油

勘探与开发, 2008, 35(1): 1-5.

Hu Wenrui. Necessity and feasibility of PetroChina mature field redevelopment [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 1-5.

[2] 李阳, 陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 396-399.

Li Yang. Study on enhancing oil recovery of continental reservoir by water drive technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 396-399.

[3] 王喜双, 甘利灯, 易维启, 等. 油藏地球物理技术进展[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 606-613.

Wang Xishuang, Gan Lideng, Yi Weiqi, et al. Technical progress of reservoir geophysics [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(5): 606-613.

[4] 冯魁, 张晓帆, 陈川, 等. 开发地震技术及进展[J]. 地质与资源, 2009, 18(1): 64-69.

Feng Kui, Zhang Xiaofan, Chen Chuan, et al. Advances in development seismic technology [J]. Geology and Resources, 2009, 18(1): 64-69.

[5] 杨建礼. 油藏地球物理及其进展[J]. 石油物探译丛, 1998(6): 1-8. Yang Jianli. Reservoir geophysics and its advances[J]. Translated Collection of Geophysical Prospecting for Petroleum, 1998(6): 1-8.

[6] 刘振武, 撒利明, 董世泰, 等. 中国石油高密度地震技术的实践与未来[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 129-135.

Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai, et al. Practices and expectation of high-density seismic exploration technology in CNPC[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 129-135.

[7] 赵邦六. 多分量地震勘探在岩性气藏勘探开发中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 397-409.

Zhao Bangliu. Application of multi-component seismic exploration in the exploration and production of lithologic gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 397-409.

[8] 李庆忠, 王建华. 多波地震勘探的难点与展望[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2007: 2-16.

Li Qingzhong, Wang Jianhua. Problems of multi-component seismic exploration and its solutions [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2007: 2-16.

[9] 刘文岭, 朱庆荣, 戴晓峰. 具有外部漂移的克里金方法在绘制构造图中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(4): 404-406.

Liu Wenling, Zhu Qingrong, Dai Xiaofeng. Application of Krging with an external drift in structure mapping[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(4): 404-406.

(收稿日期 2010-04-25 改回日期 2010-07-10 编辑 张 怡)