

米脂气田太原期古地貌对砂体的控制作用

郭松灵¹, 孟培龙², 宋立军¹, 王世成³, 石磊⁴, 杨国平⁴, 付晓燕²

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;
3. 中国石油集团东方地球物理公司研究院长庆分院, 陕西 西安 710021; 4. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂, 陕西 西安 710018)

摘要:鄂尔多斯盆地米脂气田太原组砂岩是致密气藏的主力产层,但砂体横向变化快。研究表明:古地貌是控制砂体沉积的重要因素,决定着砂体发育位置及分布规模。基于三维地震资料,结合完钻井数据,运用印模法与沉积学综合分析相结合的方法,采用三维地震地层水平切片、多属性融合技术,通过沉积厚度求取,恢复米脂气田二叠系太原组沉积期的古地貌,分析古地貌对三角洲前缘砂体及油气的控制作用,进而通过地震属性和神经网络技术预测太原组有利砂带的分布规律。研究成果优化井位部署,新井钻遇太原组砂岩的符合率达到90%,进一步证实了基于古地貌的储层预测技术的可靠性,对米脂气田的效益开发具有重要的指导意义。

关键词:三维地震地层水平切片;多属性融合;神经网络;米脂气田

中图分类号:TE122 文献标志码:A

Control effect of Taiyuan-based paleogeomorphology on the sand body in Mizhi Gasfield

GUO Songling¹, MENG Peilong², SONG Lijun¹, WANG Shicheng³, SHI Lei⁴,
YANG Guoping⁴, FU Xiaoyan²

(1. School of Geosciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, CNPC, Xi'an 710018, China;
3. Changqing Branch, Research Institute of Eastern Geophysical Company, CNPC, Xi'an 710021, China;
4. The Second Gas Production Plant of Changqing Oilfield Company, CNPC, Xi'an 710018, China)

Abstract: The sandstone of the Taiyuan Formation in the Mizhi Gasfield of Ordos Basin is the main producing layer of tight gas reservoir, but the transverse change of sand body is fast. The results show that paleogeomorphology is a critical factor controlling the deposition of sand bodies, which determines the development location and distribution scale of sand bodies. Based on 3D seismic data, combined with drilling data, using the method of combining the impression method with sedimentology comprehensive analysis, 3D seismic stratum horizontal slice and multi-attribute fusion technology are used to obtain the sedimentary thickness to restore the paleogeomorphology of Permian Taiyuan Formation in Mizhi Gasfield during the sedimentary period, and analyze the control effect of paleogeomorphology on the sand body and hydrocarbon of the front edge of the delta. Then the distribution of favorable sand zones in the Taiyuan Formation is predicted using seismic attributes and neural network technology. The coincidence rate of the new well drilling into the sandstone of the Taiyuan Formation is 90%, the research results further confirm the reliability of the reservoir prediction technology based on paleogeomorphology, which has important guiding significance for the beneficial development of Mizhi Gasfield.

Key words: 3D seismic stratigraphy; multi-attribute fusion; neural network; Mizhi Gasfield

引用格式: 郭松灵, 孟培龙, 宋立军, 等. 米脂气田太原期古地貌对砂体的控制作用[J]. 复杂油气藏, 2024, 17(1): 78-85.

GUO Songling, MENG Peilong, SONG Lijun, et al. Control effect of Taiyuan-based paleogeomorphology on the sand body in Mizhi Gasfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 78-85.

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,是国家实现油气规模增储上产的重要盆地,盆地内天然气资源量超过 $15 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上^[1],展现出巨大潜力。

在陆相碎屑砂岩沉积中,古地貌往往对砂体具

收稿日期: 2023-11-04; 改回日期: 2024-01-09。

第一作者简介: 郭松灵(1998—), 硕士, 主要研究方向: 盆地构造分析。E-mail: 595212456@qq.com。

有明显的控制作用,在坳陷型湖盆沉积中,古地貌对沉积的控制主要是在沉积类型和沉积展布特征等方面,古地貌背景控制沉积体系类型,而古地貌单元控制着沉积砂体的展布特征。目前常用的古地貌恢复方法主要有沉积学分析法^[2]、层序地层学分析法^[3]、残余厚度法^[4]、印模法、回剥和填平补齐法。但在海陆过渡相的沉积环境下,沉积物质比较复杂,有碳酸盐岩化学沉积,也有陆相沉积,这种背景下,古地貌与不同沉积物质存在联系的研究还不够深入,古地貌形态控制了地层的充填过程,古地貌低的地方可容纳空间较大,率先接受沉积而且充填的地层较厚;古地貌高的地方可容纳空间小,沉积较晚,沉积地层也较薄。因此通过分析等时界面内现今的地层厚度可以恢复沉积时期的古地貌形态^[5-16]。

以米脂气田晚古生代太原组砂体展布为例,利用三维地震地层水平切片、多属性融合技术,通过沉积厚度求取,恢复米脂气田二叠系太原组沉积期的古地貌,分析研究古地貌对砂体及其他沉积物质的对应关系,进而指明其在油气勘探开发中的作用,对理论深化及油气实际工作具有重要的参考价值。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是一个整体沉降、坳陷迁移、构造简单的大型多旋回克拉通盆地。太原组连续沉积于本溪组之上,底界为8#煤层顶板,顶部为东大窑灰岩顶、5#下煤层底。盆地北部发育三角洲沉积体系,南部主要为陆表海潮坪沉积环境,由北向南依次发育三角洲平原、三角洲前缘、混合沉积潮下带、浅海陆棚相。受沉积相控制,北部主要发育分流河道砂体,呈南北向条带状展布,延伸较远,规模大;南部局部发育砂坝,连片性及延伸性较差,规模相对较小。

上古生界太原组沉积期,海水主要由东南方向侵入,整体为海侵过程,古地理演化表现为早期海侵,晚期海退的特点,海退时发育储集砂体,海侵时期发育灰岩。太原组是致密气的主力产层之一,沉积体系以碳酸盐岩潮坪沉积为主,伴有浅水三角洲、障壁砂坝—泻湖沉积,形成了一套陆源碎屑岩、煤层与浅海相灰岩交互出现的岩性组合,其中,三角洲平原分流河道砂体、三角洲前缘水下分流河道砂体以及潮道砂体是骨架砂体,并且是太原组主要的储集层。太原组砂岩是致密气的主力产层,年产

达50×10⁸ m³。上古生界太原组下伏于中二叠系的山西组,上覆于晚石炭系的本溪组,均为整合接触。总体上盆地北部砂岩发育,南部灰岩发育;下部碎屑沉积发育,上部灰岩发育。太原组地层自下而上依次划分为庙沟段、毛儿沟段、斜道段、东大窑段(见图1)^[17],其中庙沟(桥头砂岩)段地层变化较大,毛儿沟(马兰砂岩)段、斜道(七里沟砂岩)段地层相对稳定,对应3套砂岩为桥头砂岩、马兰砂岩和七里沟砂岩。

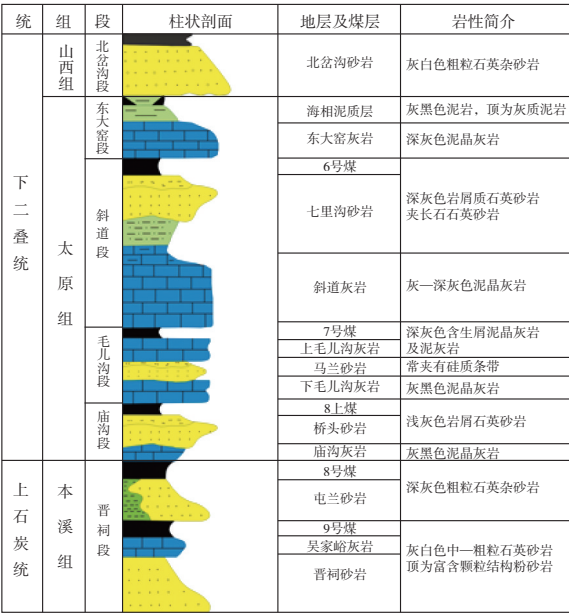


图1 鄂尔多斯盆地太原组地层综合柱状图

研究区钻井资料揭示米脂气田西侧太原组以砂泥岩为主,岩性主要为岩屑石英砂岩、灰黑—黑色泥岩、砂质泥岩、灰白色石英砂岩及煤层,灰岩厚度薄,其中桥头砂岩三角洲平原分流河道或三角洲前缘水下分流河道占优势相,砂体规模较大。米脂气田东侧灰岩更为发育,主要为泥晶生物灰岩。

沉积微相对比研究表明,米脂气田太原—山西组先后经历了三角洲—潮坪、河控三角洲相沉积环境。其中太原组由北向南发育三角洲前缘、陆表海潮坪沉积,南部灰坪为主,局部可见潮汐砂坝(见图2)。

太原组砂体发育,地震反射特征表现为三相位,砂体不发育表现为两相位(见图3)。地震道波形是振幅、相位、频率等地震响应参数的综合反映,其横向变化反映了沉积环境的变化。利用波形聚类分析技术通过不同的数学变换突出地震信号的某些特征,其目的是突出地震信息中的有利信息,削弱干扰信息。大量应用实例表明,地震反射同相轴的细微变化,都反映出了地质体是变化的。

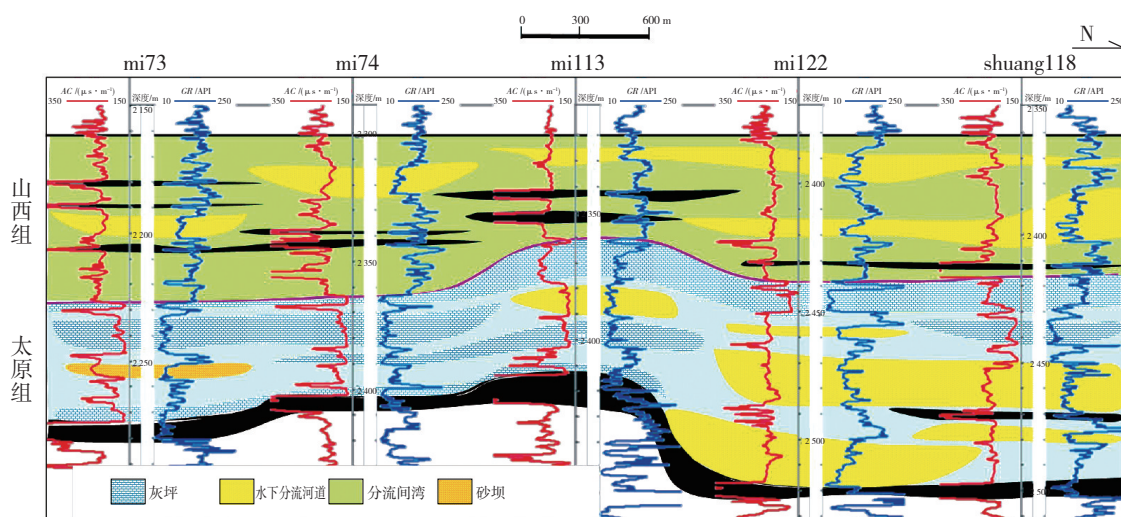


图2 米脂气田 mi73 井—shuang118 井太原组、山西组沉积相剖面

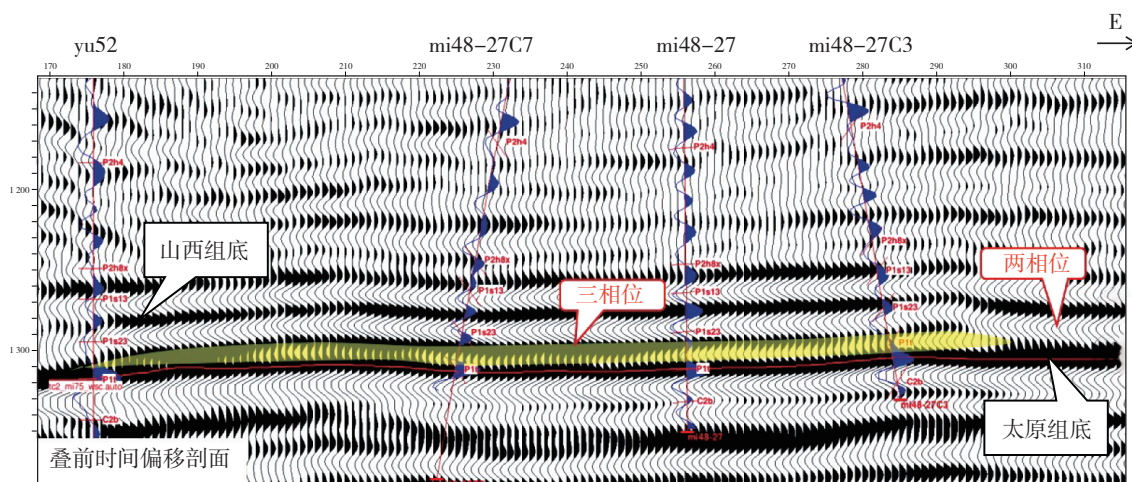


图3 太原组地震反射特征

通过优选时窗及地震属性体,利用神经网络技术对目的层段内的地震道反射波形进行分类,建立岩性发育特征与地震波形之间的联系,明确不同的地震波形对储层分布的影响(见图4)。从波形本身特征可以把地震波形的6种波形共分为4类,根据钻井井旁道波形特征与地震波形分类模型道的特征对比,发现砂泥岩组合方式的4种井旁道波形与地震波形分类的4类波形具有良好的对应关系,1、5类波形对应中等厚度砂泥岩互层,3、4类波形对应厚层砂岩,2类波形对应薄层砂岩与泥岩互层,6类波形对应大套的泥岩发育(见图4)。在此基础上,分析统计不同沉积环境下优选出来的敏感地震属性与砂岩厚度的相互关系,暖色(黄色及橙色)代表厚的砂岩储层发育区,冷色(蓝色及天蓝色)代表泥岩及灰岩发育区。

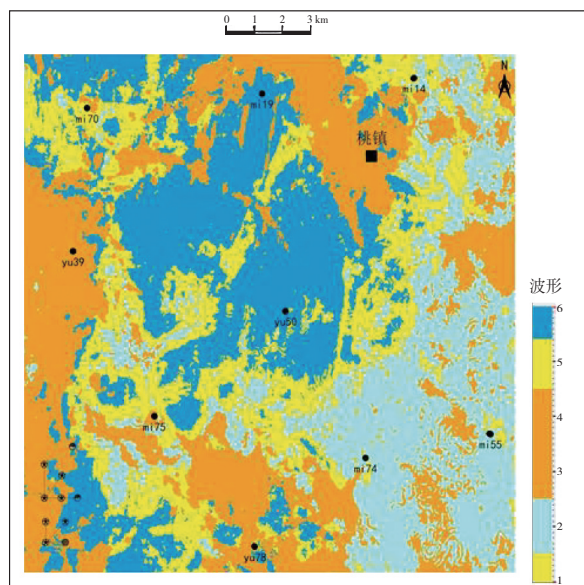


图4 太原组波形聚类分析平面图

2 主要技术与应用效果

2.1 古地貌恢复

古地貌的控制因素很多,包括古地形、沉积作用、古气候、湖盆水体变化及构造活动等。这些因素无时不在发生变化,因此古地貌定量的恢复较为困难,大多是根据研究对象的地质特征和实际资料采取合适的方法进行定性或半定量的恢复。沉积古地貌恢复是利用各种地质和地球物理资料,通过古构造、古水系、古流向和沉积相等内容的综合性研究,从而达到揭示沉积期古地貌形态的目的。

2.1.1 三维地震地层水平切片

利用三维地震地层水平切片、三维可视化工具和多属性融合等方法,结合地质、测井资料及地震反演等进行综合分析,明确研究区地层发育、分布特点及沉积体系在时空的配置演化规律,进而对地震数据体进行古地貌刻画。

三维地震古地貌研究流程包含三个步骤:①三维地震偏移数据体浏览,用各类显示技术(三维切片、三维可视化等)进行浏览、透视,目的是检测出

隐含有沉积或层序填充的地震响应特征。通过地震数据体快速扫描,观察地震数据体或目的层段地震波形及其组合变化特征,有效逼近导致沉积体系发生变化等反映古地貌特征差异。②地震反射特征精细解释及地质体空间追踪,在层位精细解释的基础上,拾取特殊地质体的振幅属性,并结合切片和平面属性,通过上下移动时间切片连续开展同一类型地质体的空间追踪解释,建立地质体或研究目标分布的骨架网格,进而提取相关属性进行地震反射及其组合所代表的地质体或目标的地质解释,进一步表征反映特殊地质体的地震响应特征。③通过地震地质综合研究,地震剖面解释和平面属性相结合,对各种沉积地貌特征做出合乎沉积规律的地质解释。

三维地震地层水平切片是沿地震地质解释层位或漂移一定时窗后提取的切片(见图5),可刻画地层的沉积特征,也可对古地貌、古海岸线变迁等进行有效恢复,有利于开展沉积体系分析与储层描述研究。由此可见三维地震地层水平切片是古地貌研究的重要技术手段。在时窗选择合适的情况

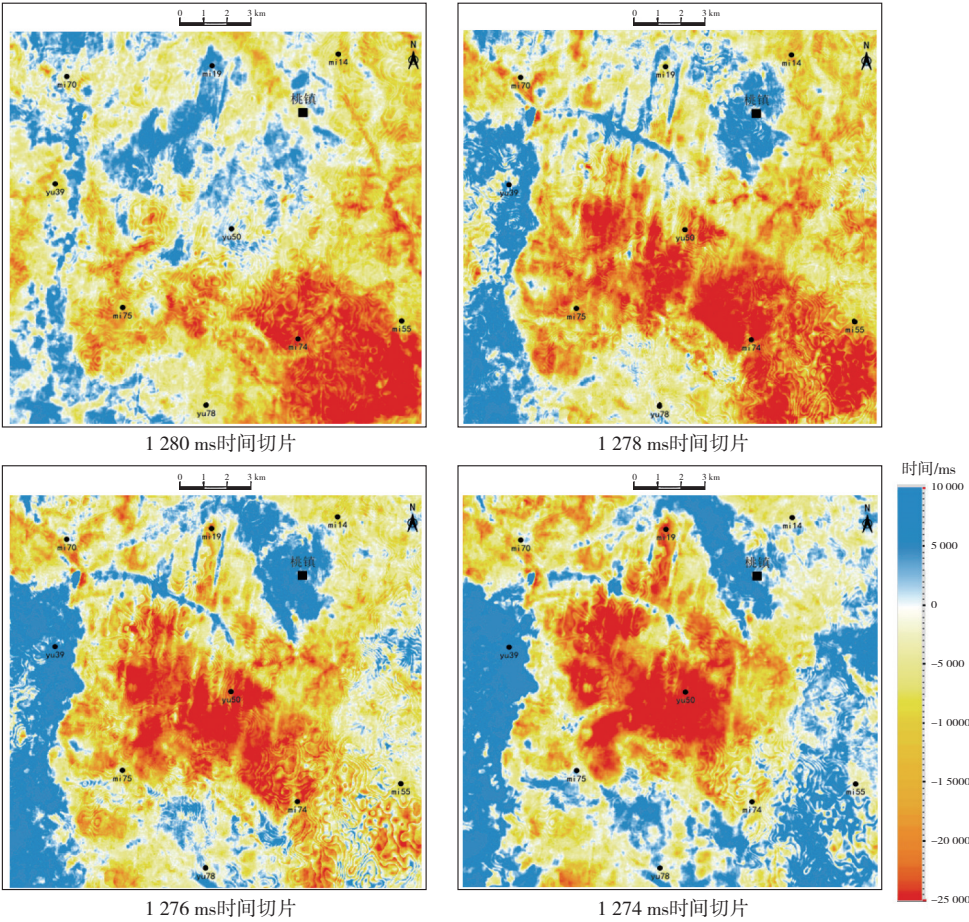


图5 太原组沿层地层水平切片

下,不仅能够反映古地貌特征,还能揭示各类地层沉积现象和岩相变化。三维地震地层水平切片能在顶底面等时格架内按厚度均分等时界面,精细揭示出地层的沉积充填和演化变迁。

2.1.2 多属性融合

地震属性分析^[18]是以地质、钻井、测井资料为基础,利用多种数学变换从地震数据中提取各种地震属性,来综合分析描述储层的特征。利用单一地震属性解释复杂地质问题具有多解性,而且用来描述同一地质问题的不同属性,对该问题的敏感性也有差异。地震属性优选就是运用岩石物理分析和数学分析方法,从众多地震属性中优选出对储层较敏感的属性,利用特定的数学组合通过降维处理形成能反映地下异常地质现象的地震属性综合信息。

多属性融合,即将表征不同储层特征的多个属性,经过一定的数学算法和显示方法融合在一起,能够同时反映多个属性对古地貌的影响。该方法的原理为,每一个优选的属性都有其特有的有利区域,每一个有利区域分配一个属性色标,然后将多个有利区域进行颜色融合,分别划分出高地、古河和低隆区,由于每一个区域敏感属性特征不同,其显示的颜色也有所差异,因此,可以直观准确地分析不同区域的属性特征,提高古地貌刻画的精度。

2.2 砂体预测

利用三维地震属性和神经网络技术,结合古地貌形态,从定性到定量预测砂体的厚度及展布规律。

2.2.1 地震属性

地震属性是指由叠前或叠后地震数据经过数学变换而导出的用于表征地震波几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征,或纯数学变换引入的物理量^[19]。振幅类属性是地震数据最基本也是最重要的属性,该属性反映了波阻抗差异、地层厚度、孔隙度及流体成分变化等资料。通过与完钻井结合分析,分析优选出来的敏感地震属性与太原组砂岩厚度的关系,最大波峰振幅属性与砂岩厚度呈较明显的正相关(见图6),从图中可以看出,基于优选的最大波峰振幅属性与井点砂岩厚度相关性达到0.625 7,能够反映研究区太原组主砂带的展布。

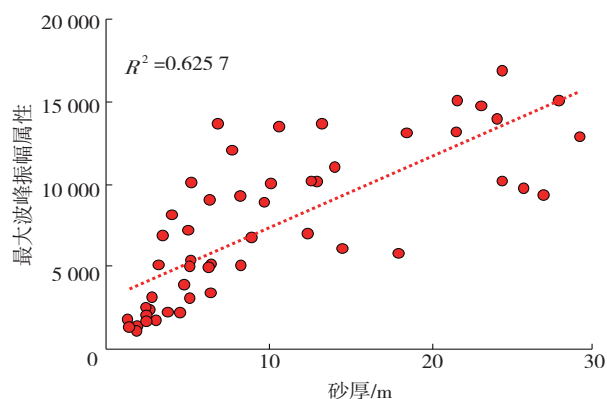


图6 最大波峰振幅属性与砂厚交会图

最大波峰振幅属性对研究区太原组砂体具有较好的反映,图7中红黄色为强振幅高值区,地震剖面表现为明显的强波峰反射,揭示砂体发育;绿色和蓝色为弱振幅区,地震剖面表现为弱反射,揭示砂体不发育。

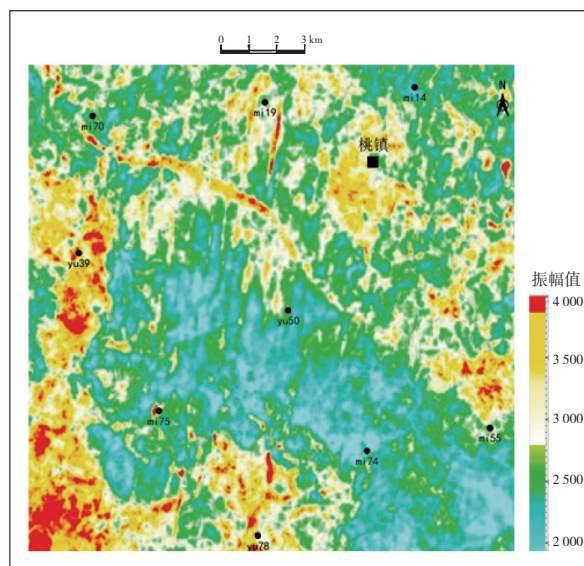


图7 米脂气田太原组最大波峰振幅属性

2.2.2 神经网络技术

神经网络技术对地震波形按已有类别进行处理,输出不同类别波形的变化规律,建立测井曲线与地震属性之间的非线性关系,采用概率神经网络方法对井点处的储层参数进行训练学习,建立反演储层参数和优选的地震属性组合之间的非线性关系,然后将建立的关系推广到整个反演工区范围,实现非线性的多属性反演,从而识别储层的平面分布规律。

图8为神经网络技术预测的砂体展布图,与已知井吻合率高,能够真实反映太原组砂体的发育情况。红黄色值区指示砂岩发育区,砂岩呈条带状展布,走向近南北向。利用预测成果在工区西南部围

绕太原组优选钻井10口,其中9口井钻遇太原组砂体厚度大于10 m,1口井厚度4 m,钻遇符合率达90%以上。

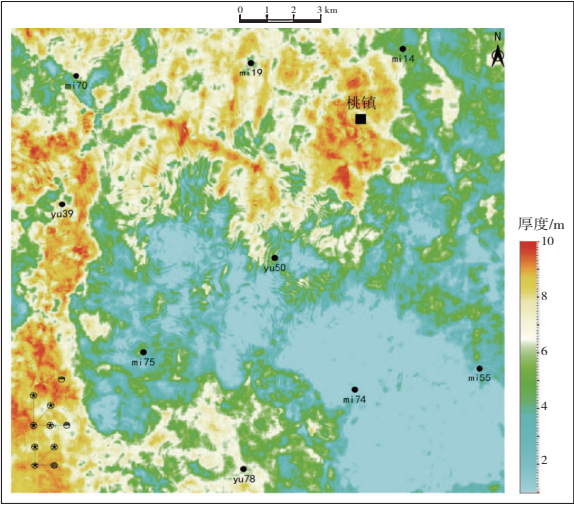


图8 神经网络技术预测太原组砂体展布

3 古地貌对砂体及油气的控制作用

受鄂尔多斯盆地北缘兴蒙海槽、南部秦祁海槽的俯冲和挤压作用,太原组沉积继承了晚石炭世沉积期的沉积格局,在稳定构造沉降的基础上,海侵范围进一步扩大,沉积时中央古隆起已经成为水下隆起,其西部为裂陷后的坳陷盆地,东部为大面积

的浅海,南部为缓坡地带,北部为陡坡地带,盆地整体呈现为北升南降、北陡南缓之势。

3.1 古地貌对砂体的控制作用

随着海侵范围扩大,鄂尔多斯盆地东侧华北海、西部祁连海在太原期沉积时连为一体,形成一个向东南方向敞开的陆表海域。靠近隆起区发育三角洲沉积体系,北部沉积物不断向盆内进积,进一步降低了地形坡度,减少了河水的载荷量,大量沉积物在分流河道中堆积下来,形成分流河道砂,未沉积下来的碎屑物被河水携带着继续前进,在研究区以水下分流河道沉积为主。因此在构造活动和剥蚀及充填作用强的地质时期,古地貌会明显影响盆地内沉积体系的发育及分布,三角洲平原分流河道砂和三角洲前缘水下分流河道砂的发育决定了盆地北部砂体的展布形态。

古地貌对沉积充填的控制作用表现在不同的古地貌单元在沉积物由源到汇的搬运沉积过程中所起的作用是不同的:隆起区或古凸起一般为长期剥蚀地貌,提供物源;古沟谷或河道、古斜坡在沉积早期主要作为输送物源的通道,晚期接受沉积充填;米脂气田开发井组连井剖面对比研究显示(见图9),太原组砂体沉积主要发育在底部,横向变化快,太原组底部砂体受古地貌影响最明显。

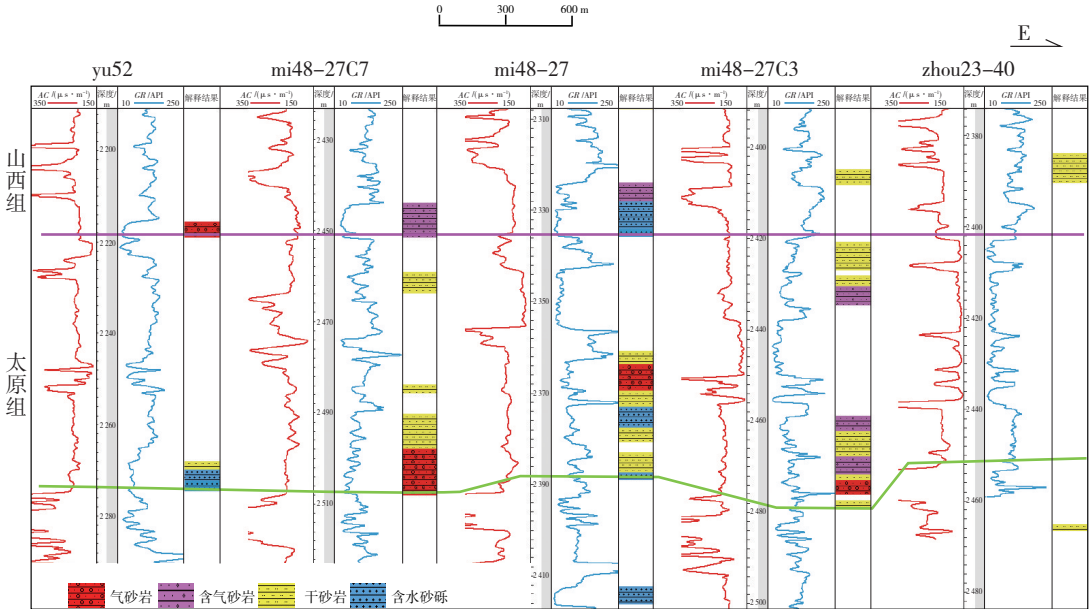


图9 米脂气田太原组地层连井剖面

太原期古地貌起伏变化引起砂体规模变化,特别是太原组底部砂体受古地貌影响最明显,研究区西侧为古地貌低部位,为三角洲前缘水下分流河道

沉积,砂体普遍发育;中部为斜坡区,主要发育泥岩;东侧为低隆区(见图10),在海侵作用下,受海水能量突然发生变化,发育障壁砂坝。

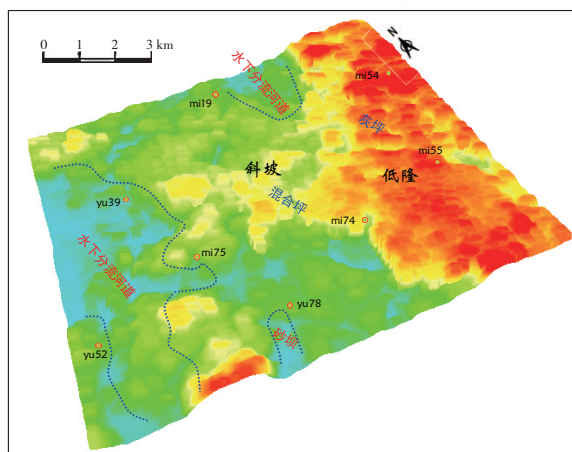


图10 太原组沉积前古地貌形态

3.2 古地貌对油气的控制作用

太原组气藏类型属于低压、致密、定容弹性驱动气藏。按压力划分:压力系数在0.70~0.96之间,平均0.88,属于低压气藏。按储层物性划分:太原组砂岩孔隙度平均7.8%;渗透率平均 $0.322 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低孔、致密型气藏。按驱动类型划分:太原组气藏属于岩性圈闭气藏,气藏受砂体展布和物性控制,无明显边、底水,内部压力值与海拔关系明显,属于定容弹性驱动气藏。

古地貌不仅控制着储层的分布范围、保存条件,还对天然气的差异富集有一定的影响作用。本溪组、太原组和山西组均不同程度发育煤层,其中5#煤层和9#煤层厚度大,单层厚度一般8~10 m,分布广泛,是主要的煤岩层。上古生界煤系烃源岩为主要生烃来源,泥岩在全盆地也广泛分布,厚度50 m左右。研究区构造整体为西倾单斜,相对稳定,对气藏影响较小。所以在构造对成藏作用影响小的这种盆地内,成藏组合的划分主要考虑了岩性圈闭与源岩的关系。煤系地层为主要的烃源岩,其间发育的砂岩储层,有利于形成岩性气藏圈闭,该类成藏组合含气饱和度大,产量高。太原组受古地貌影响,低部位由于河道水动力强,发育水下分流河道砂岩沉积,砂体厚度大(10~15 m),太原组源岩内组合气体在排烃的过程中直接充注入厚砂体中聚集成藏,高部位发育低渗灰岩,可形成良好的侧向封堵。

4 结论

(1)米脂气田太原组砂体沉积受古地貌影响,在填平补齐的沉积作用下地形起伏变化引起砂体规模变化,古地貌低部位发育三角洲前缘水下分流

河道砂体。

(2)三维地震地层水平切片对古地貌的刻画具有明显的优势,同时结合地震属性和神经网络技术可以提高太原组砂体预测的精度和准确性。

(3)新井钻遇太原组砂岩的符合率达到90%,证实了基于古地貌恢复的储层预测技术的可靠性,对米脂气田的效益开发具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 姚泾利,胡新友,范立勇,等.鄂尔多斯盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J].天然气地球科学,2018,29(10):1465-1474.
YAO Jingli, HU Xinyou, FAN Liyong, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10):1465-1474.
- [2] 赵俊兴,陈洪德,时志强.古地貌恢复技术方法及其研究意义——以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J].成都理工学院学报,2001,28(3):260-266.
ZHAO Junxing, CHEN Hongde, SHI Zhiqiang. The way and implications of rebuilding palaeogeomorphology: Taking the research of palaeogeomorphology of the Ordos Basin before Jurassic deposition as example [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28 (3): 260-266.
- [3] 赵俊兴,陈洪德,向芳.高分辨率层序地层学方法在沉积前古地貌恢复中的应用[J].成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(1):76-81.
ZHAO Junxing, CHEN Hongde, XIANG Fang. The possibility of rebuilding paleogeomorphology before basin deposition by high-resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003, 30(1):76-81.
- [4] XIAO D, TAN X C, FAN L Y, et al. Reconstructing large-scale karst paleogeomorphology at the top of the Ordovician in the Ordos Basin, China: Control on natural gas accumulation and paleogeographic implications [J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(6):3234-3254.
- [5] 康海亮,林畅松,牛成民.渤海西部沙东南构造带东营组古地貌特征及对沉积的控制作用[J].地质力学学报,2021,27(1):19-30.
KANG Hailiang, LIN Changsong, NIU Chengmin. Ancient landform of the Dongying Formation in the Shadongnan structural zone, western Bohai Sea area and its control on the sedimentation [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1):19-30.
- [6] 杨哲翰,刘江艳,吕奇奇,等.古地貌恢复及其对重力流沉积砂体的控制作用——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长73亚段为例[J].地质科技通报,2023,42(2):146-158.

- YANG Zhehan, LIU Jiangyan, LYU Qiqi, et al. Paleogeomorphological restoration and its control on gravity flow sand bodies: A case study of the Chang 73 sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2):146-158.
- [7] 李进步, 王继平, 王龙, 等. 古地貌恢复及其对三角洲前缘沉积砂体的控制作用——以鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组13亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5):1136-1145, 1158.
- LI Jinbu, WANG Jiping, WANG Long, et al. Paleogeomorphologic restoration and its controlling effect on deposition of delta-front sand bodies: A case study of Shan 13 sub-member of the Permian Shanxi Formation, Qingyang gas field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5):1136-1145, 1158.
- [8] 帅萍. 济阳坳陷古近纪古地貌特点及其对沉积的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(3):24-26.
- SHUAI Ping. Palaeotopographic features and their depositional control in Palaeogene Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(3):24-26.
- [9] 王延章, 宋国奇, 王新征, 等. 古地貌对不同类型滩坝沉积的控制作用——以东营凹陷东部南坡地区为例[J]. 油气地质与采收, 2011, 18(4):13-16.
- WANG Yanzhang, SONG Guoqi, WANG Xinzheng, et al. Controlling effect of paleogeomorphology on deposition of beach and bar sand reservoir—case study of south slope, east Dongying depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4):13-16.
- [10] 庞军刚, 杨友运, 李文厚, 等. 陆相含油气盆地古地貌恢复研究进展[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(4):424-430.
- PANG Jungang, YANG Youyun, LI Wenhui, et al. Study development of palaeogeomorphology reconstructions in continental facies hydrocarbon basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(4):424-430.
- [11] 赵永刚, 王东旭, 冯强汉, 等. 油气田古地貌恢复方法研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(4):516-529.
- ZHAO Yonggang, WANG Dongxu, FENG Qianghan, et al. Review on palaeomorphologic reconstruction methods in oil and gas fields [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(4):516-529.
- [12] 左丽群. 古地貌恢复方法综述[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(3):12-16, 21.
- ZUO Liqun. Review on methods of paleogeomorphologic restoration [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(3):12-16, 21.
- [13] 龚洪林, 姚清洲, 敬兵. 一种精细古地貌恢复方法——以塔中西部下奥陶统碳酸盐岩潜山为例[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(1):1-4.
- GONG Honglin, YAO Qingzhou, JING Bing. A fine restoration method of palaeogeomorphology: Taking the lower Ordovician carbonate buried-hill in the west of Tazhong area as an example [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(1):1-4.
- [14] 鲜本忠, 王震, 马立驰, 等. 沉积区—剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究: 以渤海湾盆地辽东地区馆陶组为例[J]. 地球科学, 2017, 42(11):1922-1935.
- XIAN Benzong, WANG Zhen, MA Lichi, et al. Paleodrainage system and integrated paleo-geomorphology restoration in depositional and erosional areas: Guantao Formation in east Liaodong area, Bohai Bay Basin, China [J]. Earth Science, 2017, 42(11):1922-1935.
- [15] 郭军, 陈洪德, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地太原组砂体展布主控因素[J]. 断块油气田, 2012, 19(5):568-571.
- GUO Jun, CHEN Hongde, WANG Feng, et al. Main controlling factors of Taiyuan Formation sand body distribution in Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(5):568-571.
- [16] 江东辉, 杜学斌, 李昆, 等. 东海西湖凹陷保俶斜坡带平湖组“古地貌—古水系—古坡折”特征及其对沉积体系的控制[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5):771-779, 789.
- JIANG Donghui, DU Xuebin, LI Kun, et al. Distribution of sedimentary system multi-controlled by palaeogeomorphology, water system and break during the deposition of Pinghu Formation, Baochu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5):771-779, 789.
- [17] 付金华. 鄂尔多斯盆地太原组致密灰岩天然气成藏地质特征与勘探潜力[J]. 地学前缘, 2023, 30(1):20-29.
- FU Jinhua. Accumulation characteristics and exploration potential of tight limestone gas in the Taiyuan Formation of the Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1):20-29.
- [18] 王开燕, 徐清彦, 张桂芳, 等. 地震属性分析技术综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2):815-823.
- WANG Kaiyan, XU Qingyan, ZHANG Guifang, et al. Summary of seismic attribute analysis [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2):815-823.
- [19] 王彬, 朱帅润, 王量, 等. 基于地震属性分析预测河道砂体[J]. 油气地球物理, 2019, 17(2):45-49.
- WANG Bin, ZHU Shuirun, WANG Liang, et al. Prediction of channel sands based on seismic attribute analysis [J]. Petroleum Geophysics, 2019, 17(2):45-49.

(编辑 卞 炜)