

文章编号:0253-9985(2011)05-0760-08

鄂尔多斯盆地延长探区奥陶纪末古地貌 恢复与储层预测

韩敏强¹, 蒲仁海², 刘海娟², 郭向东³, 刘宝平³

(1. 中国煤炭地质总局 航测遥感局 遥感应用研究院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 延长石油集团 油气勘探公司 天然气勘探开发部, 陕西 延安 716000)

摘要: 延长探区下古生界奥陶系马家沟组天然气勘探获得重大突破, 勘探显示含气层的发育和分布与奥陶系顶沟槽古地貌关系密切。通过马家沟组钻井小层的精细划分与对比、制作不整合面上具填平补齐作用的本溪组厚度图、侵蚀沟谷正演模拟结果进行地震剖面沟谷识别以及地震反演等技术手段, 综合编制前上古生界古地质图, 在探区内识别出了两个北西-南东向奥陶系顶面侵蚀沟槽。综合分析古地貌图与波阻抗平面图显示, 奥陶系低波阻抗显示的有利储层分布与侵蚀沟谷及其两侧的侵蚀斜坡位置吻合, 也与目前的奥陶系产气井和有利油气显示井的位置吻合; 甘泉地区的 Y112 井附近、工区西北方向的 Y113-Y101 井及工区中部 Y118-Y119-Y108 井一带有利储层发育, 应为奥陶系下一步勘探部井的重点区域。

关键词: 古地貌; 侵蚀沟谷; 正演模拟; 波阻抗反演; 马家沟组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Reconstruction of the Late Ordovician palaeogeomorphology and reservoir prediction in Yanchang exploration area, the Ordos Basin

Han Minqiang¹, Pu Renhai², Liu Haijuan², Guo Xiangdong³ and Liu Baoping³

(1. Remote Sensing Application Institute, Aerophotogrammetry and Remote Sensing Bureau, CNAGG, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. Department of Gas Exploration and Development, Oil and Gas Exploration Company of Yanchang Petroleum Group, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: Major breakthroughs have been achieved in gas exploration in the Ordovician Majiagou Formation in Yanchang exploration area. These discoveries show that the development and distribution of gas-bearing layers have a close relationship with the furrow erosion palaeogeomorphology on top of the Ordovician. By using such techniques such as fine subdivision and correlation of the Majiagou Formation, thickness mapping of the Benxi Formation on the unconformity, forward modeling-based identification of eroded furrows on seismic section, and seismic inversion, we mapped the paleogeology of the pre-Upper Paleozoic and recognized two NW-SE trending eroded furrows on top of the Ordovician. The comprehensive analysis of the paleogeomorphologic map and wave impedance map shows that the distribution of favorable reservoirs with low wave impedance in the Ordovician is consistent with the locations of erosion furrows and the eroded slopes on both sides. Moreover, it is also consistent with the locations of wells that produce gas from the Ordovician and that have favorable oil/gas shows. The research indicates that favorable reservoirs occur near Y112 well in Ganquan area, Y113-Y101 wells in the northwest of the study area and Y118-Y119-Y108 wells in central of the study area. These areas should be the major target areas for further exploration of the Ordovician.

收稿日期: 2010-05-20; 修订日期: 2011-07-01。

第一作者简介: 韩敏强(1984—), 男, 助理工程师, 遥感应用。

Key words: palaeogeomorphology , eroded furrow , forward modeling , impedance inversion , Majiagou Formation , Ordos Basin

延长探区位于鄂尔多斯盆地东南部,大致位于绥德以南,志丹以东,黄河以西,洛川以北的区域,西与靖边大气田相邻。在奥陶系沉积后受加里东运动影响,发生了一亿四千万年的风化剥蚀淋滤,在西高东低的古地貌背景下,形成了侵蚀潜台、侵蚀斜坡、侵蚀沟槽 3 种地貌单元。侵蚀沟槽和斜坡不同程度上缺失了马家沟组五段 1 至 2 小层(马五₁₊₂),被泥岩为本溪组充填覆盖,后者承当了盖层和侧向遮挡层。储层主要为白云岩溶蚀孔和晶间孔,系不整合暴露期间大气淡水侧向渗透溶蚀和白云石化形成^[1-3]。靖边气田勘探经验和气藏地质特征显示,马五₁₊₂碳酸盐岩储层为其主力储层,储层物性相对较好,溶蚀孔洞缝最为发育。这表明奥陶系马家沟组碳酸盐岩储层发育程度和保存程度主要受古地貌控制,尤其是含气条件较好的马五₁₊₂的溶蚀白云岩储层的形成与侵蚀沟谷密切相关^[4-5]。因此,有效识别侵蚀沟谷,恢复古地貌格局,是进行储层厚度和展布、物性和有利区块预测的基础。

根据区内较多钻井的小层划分及剥蚀残留情况对比分析,可以恢复探区内侵蚀沟槽地貌^[6]。根据侵蚀沟槽的地震响应特征,从三维地震和二维地震剖面上或三维属性图上可以大致推断侵蚀沟槽的位置。含孔隙的碳酸盐岩储层与致密的碳酸盐岩相比往往具较低的速度或波阻抗,所以,利用波阻抗反演也可推断和预测有利的白云岩储层发育区。本文主要结合钻井和地震资料开展古地貌恢复和侵蚀谷的识别,然后利用波阻抗反演进一步印证和预测有利储层的分布。

1 小层特征与地震层位解释

该区下古生界缺失中、上奥陶统,保留了下奥陶统马家沟组,从下至上依次可划分为马家沟组五段 5 小层、4 小层、3 小层、2 小层、1 小层和马家沟组六段共 6 个岩性段。

依据 K₁、K₂ 和 K₃ 3 个标志层和白云岩、泥岩的自然伽马、声波时差、电阻率测井的差异可对马家沟组进行小层对比划分^[7-8]:K₁ 层为马五₄¹ 小层的底部,马五₁ 为灰色白云岩、泥质白云岩;K₂

层分布在马五₂² 小层底部,马五₂ 为灰质白云岩、深灰色泥质灰岩,马五₃ 为高自然伽马深灰色泥质白云岩、灰色石膏质白云岩;K₃ 层位于马五₄¹ 底部,该段为含石膏质白云岩、灰黑色泥质灰岩,马五₅ 为平直低声速低伽马深灰色泥晶灰岩段,其顶为马五₄ 的底界(图 1)。

由于下古小层马五₁—马五₃ 单层厚度较小,平均为 10 ~ 20 m,受地震解释精度所限,根据合成记录标定,可识别追踪 3 个马家沟组有关的地震反射界面(图 2)。

1) 本溪组底 TC₂b² 反射层(相当于奥陶系顶界):为上、下古生界界限,是一个由碎屑岩转变为碳酸盐岩的突变面,声速曲线反映为一个明显的由小变大的台阶;地震上形成中振幅波峰反射,是

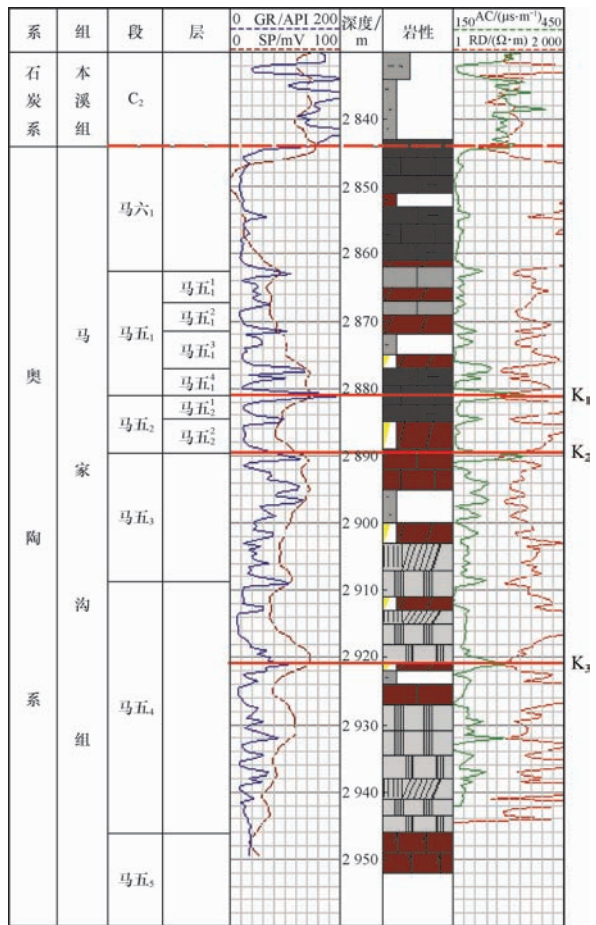


图 1 鄂尔多斯盆地延长探区马家沟组小层划分

Fig. 1 Division of the Ordovician Majiagou Formation in Yanchang exploration area, Ordos Basin

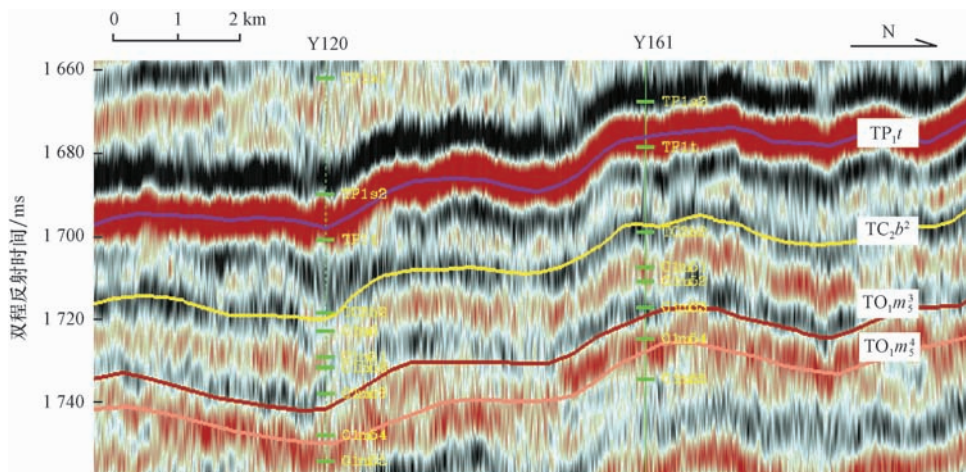


图 2 鄂尔多斯盆地延长探区下古生界地震层位

Fig. 2 Seismic horizon of the Lower Paleozoic in Yanchang exploration area, Ordos Basin

全区最重要的标志层之一。

2) 马五₃ 底界面($TO_1m_5^3$): 马五₃ 为较高自然伽马段深灰色泥质白云岩、灰色石膏质白云岩。马五₃ 底界面在常规地震剖面上对应于奥陶系顶部向下约 25 ms 左右的一上峰下谷拐点上。

3) 马五₄ 底界面($TO_1m_5^4$): 与马五₄ 相比, 其下伏的马五₅ 速度偏高、自然伽马偏低。二者界面在地震剖面上标定在马五₃ 底界拐点之下的波谷最大值处。

该区下古气田储层集中分布在奥陶系顶部风化壳马五₁₊₂ 层段。

2 古地貌恢复

2.1 前上古生界古地质图法恢复古地貌

本区主要借助 57 口钻井的残留马家沟组小层划分对比参数, 编制了马家沟组末期古地貌沟槽分布图。已有的钻井小层对比表明, 该区马家沟组缺失的地层主要为马家沟组六段、马五₁¹、马五₁²、马五₁³ 和马五₁⁴ 小层。尚无发现缺失马五₂ 的钻井。所以恢复的古地貌图上, 蓝色的侵蚀沟槽为马五₁⁴ 分布或部分残留区(图 3)。

奥陶系末期古地貌图上, 存在 3 种古地貌: 一是古潜台, 即碳酸盐岩地层保存比较完整的红色马家沟组六段残留区; 二是古斜坡, 即橙色的马五₁¹—马五₁³ 残留区; 三是古沟槽, 即蓝色的马五₁⁴ 残留区。主要发育两个北西—南东的古沟槽, 一个经过 Y113—Y108 井从工区西北角流向工

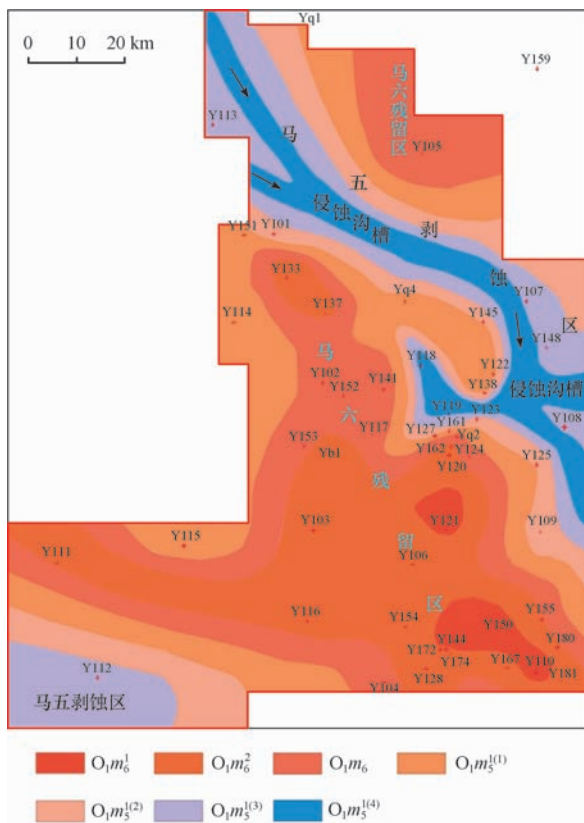


图 3 鄂尔多斯盆地延长探区马家沟末期古地貌

Fig. 3 Paleogeomorphological map at the end of deposition of the Majiagou Formation in Yanchang exploration area, Ordos Basin

区东界中部一带, 另一个流经工区西南角 Y112 井。

2.2 本溪组厚度法恢复古地貌

依据探区 3 800 km 二维地震和 144 km² 的三维地震资料, 结合钻井分层数据, 制作了本溪组沉

积厚度图(图4)。由于本溪组厚度与奥陶系古地貌呈镜像关系,从图上可以看出本溪组厚度增大的位置,即蓝色虚线包括的范围与前述侵蚀沟槽位置大致一致。

在工区东北蚀沟谷、岩溶斜坡等地势相对较低的部位,本溪组厚度较大,一般大于40 m。在工区中部古潜台马家沟组六段残留区,本溪组厚度较薄,一般20~30 m。工区西南部本溪组受古构造影响厚度本来就减薄,所以侵蚀谷区厚度只是相对较大,为15~25 m。

2.3 正演模型与侵蚀沟谷识别

侵蚀沟槽是反映古地貌和储层分布的骨架。利用地震正演模型也可模拟不同深度的侵蚀沟槽或缺失不同马五段的侵蚀沟槽地震响应特征,据此可在地震剖面或三维层切片上识别侵蚀沟槽^[9]。钻井资料表明延长探区的侵蚀沟槽最深也只剥蚀了马五₁段,全区均保留了马五₂。按照马五₁不同的侵蚀量的统计建立模型,模拟振幅和波形特征与侵蚀量之间的对应关系^[10]。正演模型子波频率为35 Hz,正极性。本溪组底界标定在地

震模型上的红色波峰处。全区存在以下四种不同侵蚀量的模型(图5)。

1) 未侵蚀型

为马家沟组六段残留出露区。其最大厚度为25 m左右,剥蚀后残余厚度介于0~25 m不等。地层总体平坦,无侵蚀沟槽发育,正演模型地震反射平整(图5a)。

2) 上窄谷下宽峰相位加宽型

侵蚀沟槽内缺失马五₁¹—马五₁²,谷深为12 m,波形特征为本溪组波峰与其上波谷间距变大,频率变低,下波峰振幅降低明显,而上波谷振幅几乎未变或微有降低(图5b)。

3) 弱振幅上谷下峰间零相位透镜型

侵蚀沟槽内缺失马五₁¹—马五₁³,谷深为16 m,地震响应反映出在本溪组波峰与其上波谷间出现一个零相位弱振幅透镜,上谷下峰同相轴振幅微变弱(图5c)。

4) 常振幅上谷下峰间零相位透镜型

缺失马五₁¹—马五₁⁴,谷深为20 m,地震响应反映出在本溪组波峰与其上波谷间出现一个零相位弱振幅透镜,上谷下峰同相轴振幅无变化(图5d)。

以上正演模型对在地震剖面上识别侵蚀沟槽提供了参考依据。如三维区过Y119和Y123井的TRACE606剖面的沟槽地震反射特征与上述模型较吻合(图6)。Y119井缺失了马五₁¹—马五₁⁴,属于上述模型4的情况。地震剖面上可看出其本溪组底界波峰与其上波谷之间出现一个透镜体,井点振幅与两侧相同。Y123井剥蚀到了马五₁²,与模型2反射特征类似,即出现本溪组底界振幅变弱,其上波谷振幅基本无变化的特点。

根据以上正演模型所反映的振幅、波形与侵蚀沟槽的关系可用于三维层振幅或波形资料来识别侵蚀沟槽的平面展布^[11-13]。模型表明,马五₁部分或全部缺失所形成的侵蚀沟槽在地震剖面上主要反映在本溪组的顶底反射变化,所以提取本溪组顶底之间的振幅和波形信息即可识别与此有关的侵蚀沟槽。图7是三维地震区块沿本溪组底界向下2 ms向上24 ms提取的平均振幅图,图中红色高振幅区代表侵蚀沟槽边缘斜坡特征,反映了强振幅北东向一侧弱振幅区有12~16 ms的侵蚀沟槽。图8是本溪组底界上提2~20 ms的三维波形分类图,与图7类似,该图中白色波形区显示了一个与高振幅范围类似的趋势,同样反映了侵

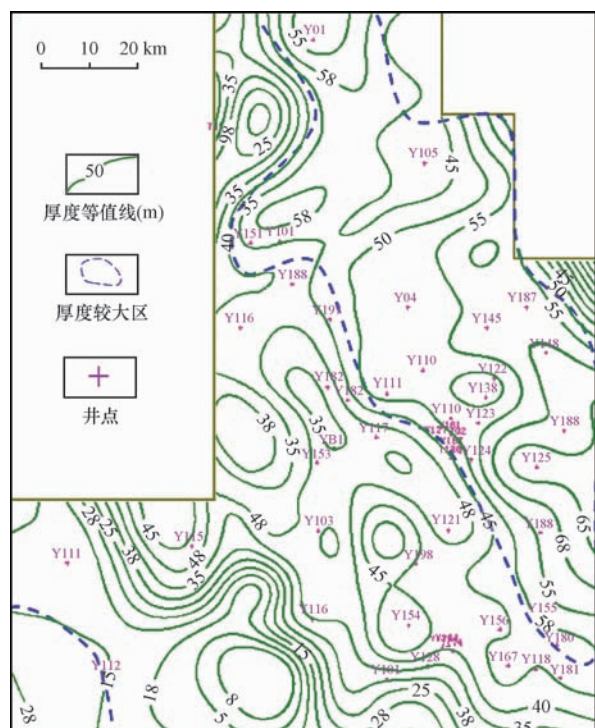


图4 鄂尔多斯盆地延长探区本溪组厚度

Fig. 4 Thickness map of the Benxi Formation in Yanchang exploration area, Ordos Basin

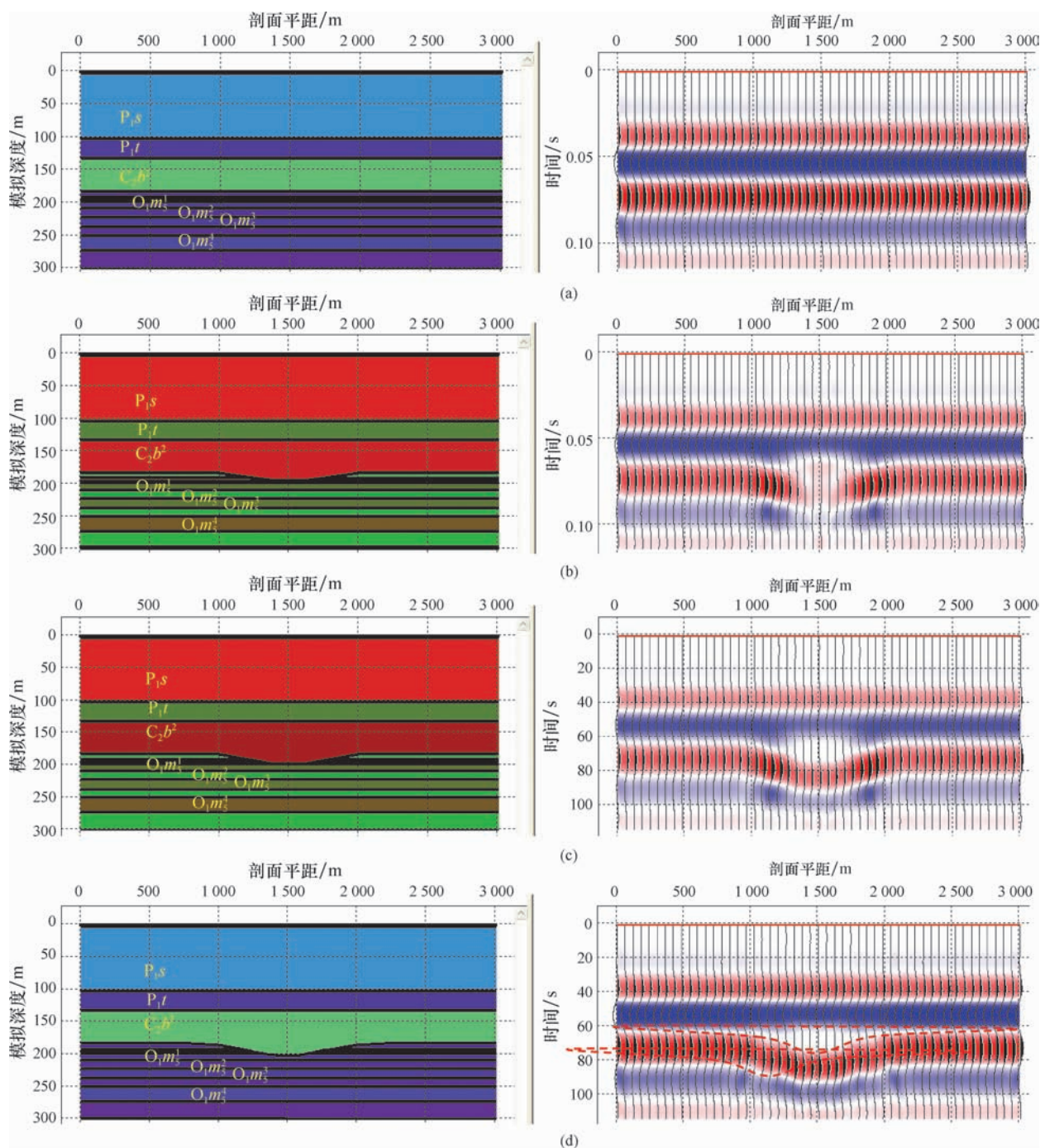


图5 侵蚀沟谷的正演地震模型及地震响应

Fig. 5 Seismic forward model and seismic responses of eroded furrow

a. 未侵蚀型; b. 上窄谷下宽峰相位加宽型; c. 弱振幅上谷下峰间零相位透镜型; d. 强振幅上谷下峰间零相位透镜型

P_{1s}. 灰色细砂岩和黑、深灰色泥岩; P_{1t}. 深灰色灰岩; C_{2b2}. 深灰色泥岩、泥质灰岩夹灰白色石英砂岩

蚀斜坡和马五₁ 有利储层发育区。

3 波阻抗反演与碳酸盐岩储层识别

无论是马家沟组六段灰岩还是马家沟组五段

白云岩,其速度或波阻抗与碳酸盐岩的孔隙度和泥质含量有关。本区以开阔台地为主,小层岩性稳定,横向可对比性强,特别是同一小小层在不同井的 GR 测井值几乎完全相同,说明泥质含量横向变化不大。所以,波阻抗横向变化应主要反

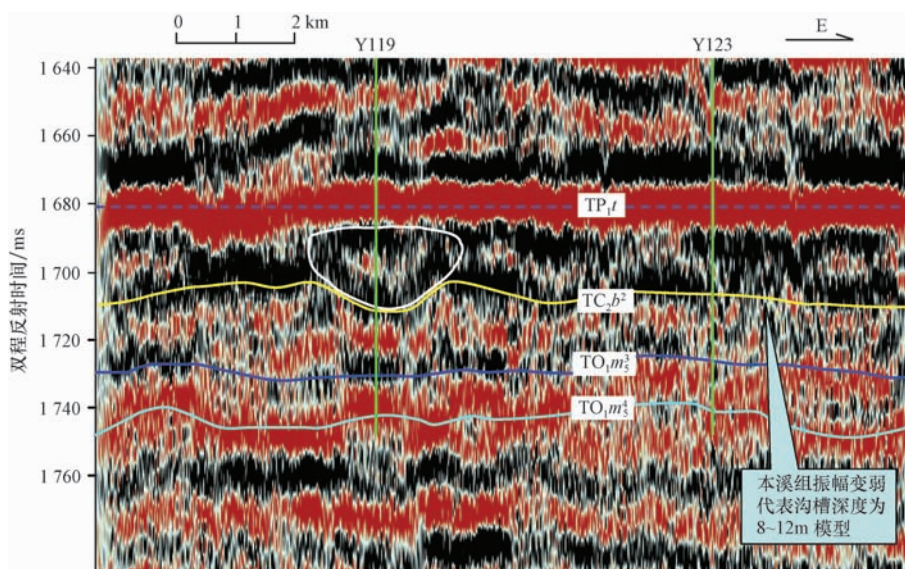


图6 TRACE606 测线地震剖面沟槽地震响应特征

Fig. 6 Seismic responses of eroded furrows on line TRACE606

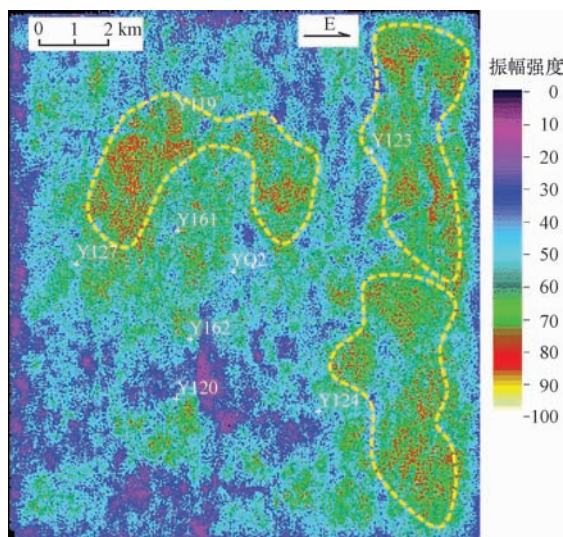


图7 三维区本溪组底平均振幅平面图

Fig. 7 Average amplitude map at the base of the Benxi Formation in the 3D acreage

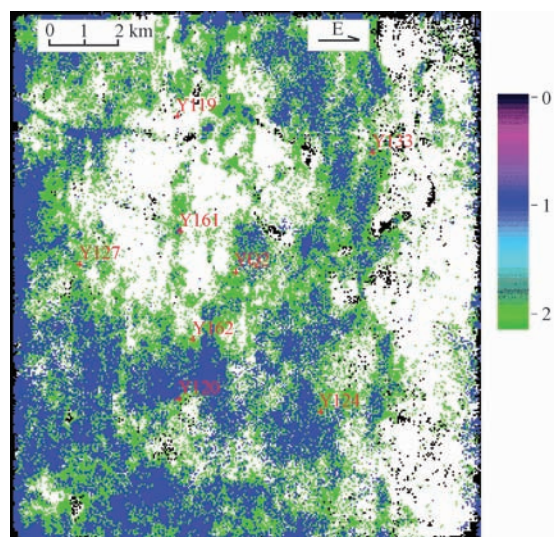


图8 三维区本溪组底波形分类

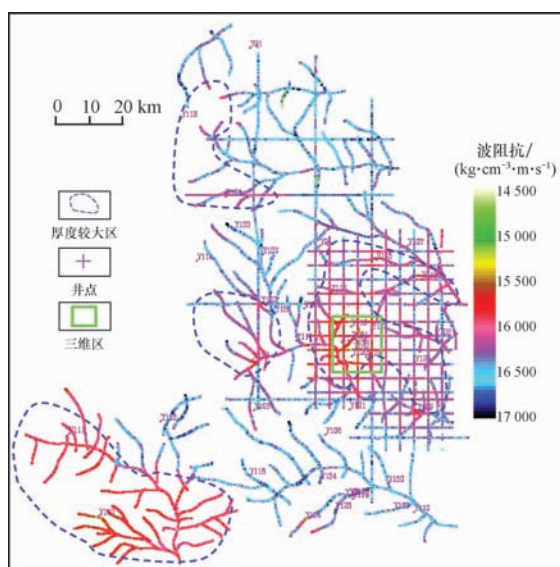
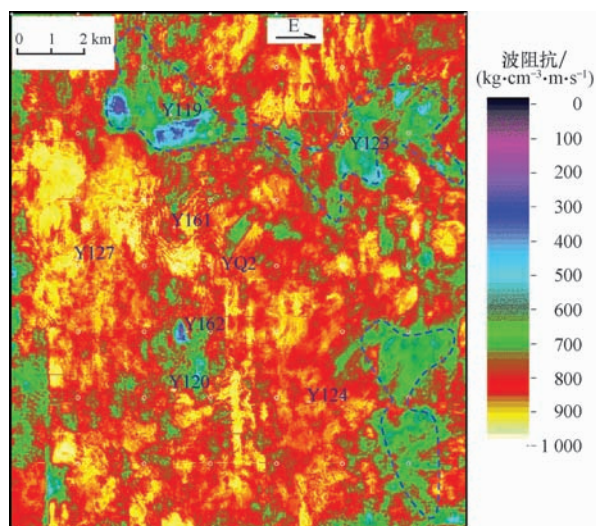
Fig. 8 Waveform classification at the base of the Benxi Formation in the 3D acreage

映孔隙度的变化。根据二维及三维地震反演低波阻抗分布可定性的识别有利高孔隙储层发育带^[14-15]。

对本区二维、三维区块的地震资料进行了精细测井约束波阻抗反演。根据合成记录的标定结果,由本溪组底向下13 ms的时窗代表主要储层段马五₁₊₂。从二维波阻抗反演平面图上可以明显看出马五₁₊₂两个低波阻抗异常区(图9):一个呈北西向展布,位于工区中部—西北部,在西北角Y113—Y101井区至中部偏西的Y102—Y153井区为异常

低值,一个呈北西西向展布位于工区西南部Y111—Y112井区(甘泉地区)。这种分布趋势与前面古地貌图反映的侵蚀沟谷和斜坡位置基本吻合。

三维区马五₁₊₂波阻抗反演平面图上更精细的显示区有利储层展布区,显示出过Y119和Y123井北西向绿色低波阻抗窄带,在三维区块东界低波阻抗带转向南向流经Y124井以东,带宽0.5~2 km,长大于12 km,呈不连续状和不规则的弯曲窄带。另外在三维区的西界和Y162和Y120井区也发育马五₁₊₂低波阻抗有利储层(图10)。

图9 二维区马五₁₊₂波阻抗反演平面图Fig. 9 Impedance inversion map of Ma 5₁₊₂
in the 2D acreage图10 三维区马五₁₊₂波阻抗反演平面图Fig. 10 Impedance inversion map of Ma 5₁₊₂
in the 3D acreage

4 有利储层识别的验证

有多口井在下古生界碳酸盐岩存在气测录井显示,但仅有个别井对奥陶系进行了测试。Y112和Y113井两口井在马五₁达到了日产 $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的无阻流量,Y101井和Y156井则出出了 $4\,000 \sim 8\,000 \text{ m}^3$ 的低产气量(表1)。总体来看,这些显示较好的井均位于低波阻抗反映的有利储层发育区内,同时也位于侵蚀沟槽或斜坡区域。尤其是两个具工业产能的井Y112井、Y113井距侵蚀沟槽中心较近,反演结果也反映了较低的波阻抗特征。说明应用侵蚀沟槽和低波阻抗预测的有利储层分布是可信的。

5 结论

1) 利用前上古生界古地质图法、本溪组厚度法、正演模型法、波阻抗反演法等识别出的侵蚀沟槽(主沟槽)展布形态及范围是一致的,延长探区识别出了两个主要的奥陶系顶面侵蚀沟槽,发育两条北西-南东向主沟槽,一个过Y113—Y108井从工区北西角流向工区中东部;另一个发育于工区西南角的甘泉地区,自Y111井流向Y112井。

2) 正、反演结果验证了沟谷的发育深度和规模。沿主沟槽分布的Y113,Y118,Y119,Y108等井马五₁³均被剥蚀,最深剥至马五₁⁴,最大剥蚀量达到20 m以上。沿沟槽两侧岩溶斜坡是最有利储集层发育和天然气成藏的地貌单元。

3) 地震反演波阻抗低值异常分布区与良好物性的储层展布相关性较好。通过波阻抗反演显示的储层有利区在古地貌图上与侵蚀沟谷及斜坡有较高的吻合性。已有产气井的试气结果也印证

表1 2006—2008年下古生界试气结果

Table 1 Formation test results of the Lower Paleozoic during 2006—2008

井号	层位	射孔井段/m	累计气体厚度/m	无阻流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
Y112	马五 ₁ ¹ 、马五 ₁ ³	3338 ~ 3341, 3346 ~ 3349	8	21 631
Y101	马五 ₁ ³ 、马五 ₁ ⁴	3241.6 ~ 3244.2, 3247.5 ~ 3249.0, 3257 ~ 3260	5.1	4 241
Y113	马五 ₁ ³ 、马五 ₁ ⁴	3381.1 ~ 3384.1, 3387.0 ~ 3389.5	20	29 313
Y156	马五 ₁ ⁴	3669.7 ~ 3672.7	3.6	8 681

了这一点。将古地貌图与波阻抗反演平面图对照分析,确定的有利储集区主要分布在甘泉地区的 Y112 井附近、工区西北方向的 Y113—Y101 井及工区中部 Y118—Y119—Y108 井等侵蚀沟槽沟槽和斜坡位置。

参 考 文 献

- [1] 郑和荣,胡宗全,周小进,等. 中国前中生代海相储层发育的构造-沉积条件[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 574-581.
Zheng Herong, Hu Zongquan, Zhou Xiaojin, et al. Tectonic and sedimentary conditions of pre-Mesozoic marine reservoirs in China [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 574-581.
- [2] 杨华,黄道军,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌气藏特征及勘探进展[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(3): 1-5.
Yang Hua, Huang Daojun, Zheng Congbin. Characteristics of gas reservoir and exploration achievement for Ordovician paleokarst landform in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(3): 1-5.
- [3] 何江,方少仙,侯方浩,等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 350-356.
He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Characteristics of karst reservoirs in the Middle Ordovician Majiagou Formation of gas fields in the central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 350-356.
- [4] 宁宁,陈孟晋,孙粉锦,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古油藏的确定及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 280-286.
Ning Ning, Chen Mengjin, Sun Fengjin, et al. Determination and its significance of ancient oil pools in Ordovician weathering crust, Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2): 280-286.
- [5] 周义军,杨遂正,王欣. 鄂尔多斯盆地奥陶系顶面演化与岩溶储层[J]. 石油物探, 2006, 45(3): 304-307.
Zhou Yijun, Yang Suizheng, Wang Xin. The structural-interface evolution in Ordovician and karst reservoir in Ordos basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 304-307.
- [6] 顾岱鸿,代金友,兰朝利,等. 靖边气田沟槽高精度综合识别技术[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 60-64.
Gu Daihong, Dai Jinyou, Lan Chaoli, et al. High-precision integrative recognition technology for flutings in Jingbian Gas-field, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 60-64.
- [7] 樊政军,柳建华,张卫峰. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层测井识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 61-65.
Fan Zhenjun, Liu Jianhua, Zhang Weifeng. Log interpretation and evaluation of the Ordovician carbonate rock reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 61-65.
- [8] 凌云研究组. 测井与地震信息标定研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(1): 68-74.
Ling Yun. Study of logging and seismic information labeling [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(1): 68-74.
- [9] 邹新宁,孙卫,张盟勃,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系侵蚀沟谷及顶面形态识别[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 610-614.
Zou Xinning, Sun We, Zhang Mengbo, et al. Recognition of eroded channel-vale and top fluctuant configuration for Ordovician in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2006, 36(4): 610-614.
- [10] 何自新,黄道军,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶系古地貌、古沟槽模式的修正及其地质意义[J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 25-28.
He Zixin, Huang Daojun, Zheng Congbin. Modification and geology implication of Ordovician paleogeomorphology and paleogeosyncline distribution models in Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(2): 25-28.
- [11] 王光付. 碳酸盐岩溶洞型储层综合识别及预测方法[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 47-51.
Wang Guangfu. Integrative identification and prediction methods for carbonate rock cave reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 47-51.
- [12] 王士敏,鲁新便. 塔河油田碳酸盐岩储层预测技术[J]. 石油物探, 2004, 43(2): 153-158.
Wang Shimin, Lu Xinbian. Prediction techniques for deep carbonate reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2004, 43(2): 153-158.
- [13] 王振卿,王宏斌,龚洪林,等. 塔中地区碳酸盐岩储层预测技术[J]. 天然气技术, 2009, 3(1): 23-26.
Wang Zhenqing, Wang Hongbin, Gong Honglin. Reservoir Prediction Technologies of Carbonate Rock in Central Tarim Basin [J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(1): 23-26.
- [14] 吴俊峰,姚姚,撒利明. 碳酸盐岩特殊孔洞型构造地震响应特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(2): 180-185.
Wu Junfeng, Yao Yao, Sa Liming. Analysis on seismic response of special cavernous structure of carbonate [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(2): 180-185.
- [15] 张明振,印兴耀,谭明友,等. 对测井约束地震波阻抗反演的理解与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 699-702.
Zhang Mingzhen, Yin Xingyao, Tan Mingyou, et al. Realization and application of logging-constrained seismic wave impedance inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6): 699-702.

(编辑 张亚雄)