

# 鄂尔多斯盆地中央古隆起东部古岩溶地貌 小型沟槽的识别

高建荣, 徐旺林, 郭彦如, 赵振宇, 刘俊榜, 张延玲, 张月巧

(中国石油勘探开发研究院鄂尔多斯分院)

**摘要** 鄂尔多斯盆地中央古隆起东部奥陶纪末古岩溶地貌发育, 古地貌中沟槽的准确刻画识别对研究油气成藏和提高勘探成功率具有重要意义。沟槽在震相上的响应主要是槽的深度而不是宽度, 当地层倾角大于 $5^\circ$ 时, 沟槽的响应特征模糊; 而当地层倾角小于 $5^\circ$ 时, 槽的侵蚀深度在 $10\sim 5\text{m}$ , 它的地震同相轴相位会反转。如果侵蚀深度在 $30\sim 10\text{m}$ , 那么它的同相轴增益会增大; 如果侵蚀深度大于 $30\text{m}$ , 它的同相轴会呈复波型。利用井数据和实际地质资料建立沟槽充填模型, 应用全波场数值模拟技术生成叠后偏移剖面, 结合地震响应特征分析, 推测描述了中央古隆起东部马家沟组五段中、下组合中小型沟槽的分布。

**关键词** 鄂尔多斯盆地; 奥陶系; 风化壳储层; 岩溶沟槽; 全波场正演模拟

中图分类号: TE112.23 文献标识码: A

## 1 概述

鄂尔多斯盆地中央古隆起(图1)东部古岩溶发育, 下古生界奥陶系马家沟组古风化壳是典型的古岩溶型储气层。早古生代中奥陶世海退之后, 受加里东运动晚期的古构造运动、古气候、古水动力场共同影响, 区内形成了特殊的古岩溶地貌, 古岩溶残丘和古沟槽密布发育。因而, 该区古岩溶气藏的分布不仅与成岩环境和气源条件密切相关, 而且还严格受古岩溶地貌尤其是古沟槽的控制<sup>[1]</sup>。勘探表明, 如何准确识别沟槽, 并在井位部署中避开沟槽, 已成为提高该区钻井成功率的关键<sup>[2]</sup>。

近年, 在靖边气田西部的一些探井, 有发现工业气流的, 但也有失利的。经对这些井的地质研究发现, 如果这些井钻遇了古岩溶残丘, 那么它的储集性就好, 就有利于成藏; 但如果钻遇了沟槽, 那么它会因地层遭遇剥蚀而不能成藏(靖边气田的开发经验也是如此)。因此, 古岩溶地貌的识别显得尤为重要。

以宜川—黄龙探区为例。在洛1井和宜2井相

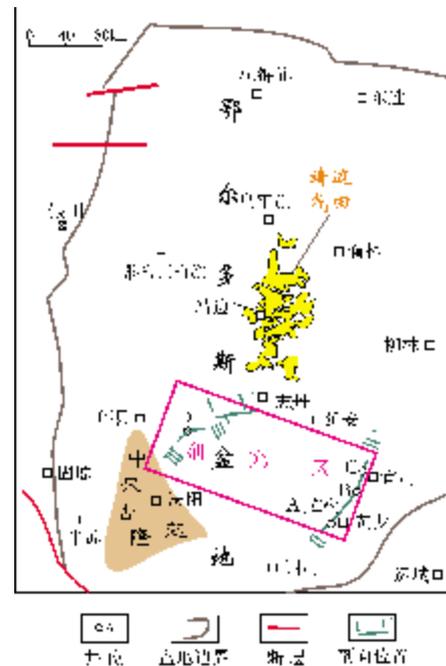


图1 研究区位置图

收稿日期: 2012-03-13; 改回日期: 2012-05-17

基金项目: 本文受中国石油勘探开发研究院中青年创新基金(项目编号 2010-A-26-12)资助

高建荣: 1977年生, 博士, 工程师。主要从事天然气勘探研究。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路20号910信箱; 电话: (010)83597711

继钻探后,该区未钻遇下奥陶统马家沟组六段和马五<sub>1</sub>亚段气层,仅在下部层间岩溶发育的马五<sub>4</sub>等亚段获得日产几千立方米天然气的产能,从而在相当长的一段时间内放慢了对该区勘探的进程。直到2009年在宜6井(即图1中的A井)钻遇马六段和马五<sub>1,2</sub>亚段气层,发现了日产上万立方米的工业气流。截至2011年底,宜川—黄龙探区完钻探井16口,其中部分探井在奥陶系顶部钻遇马家沟组五段风化壳储层<sup>[3]</sup>。

钻探揭示,宜川—黄龙地区宜6井周围奥陶系顶部地层保留较全,马五<sub>1,2</sub>亚段分布较为稳定。虽然该区早期已经有地震资料并进行过沟槽展布预测,但是对于岩溶古地貌,特别是古沟槽的刻画还很不完善,需要进一步研究。

中央古隆起东部的奥陶系岩溶古地貌识别一直以来是难点,原因是没有三维地震数据,只有二维地震测线,而黄土塬区地震采集处理后的数据品质低,很多沟槽的刻画只能依靠井资料,即使利用地震资料,也只能识别宽度上百米、侵蚀深度大于30m的古沟槽。然而,靖边气田的开发过程显示,该区大多是分支更细的小型沟槽,随着靖边气田的西扩,迫切需要落实小型沟槽的位置,预测残丘的分布和厚度,笔者为

此开展了靖边气田小型沟槽岩溶古地貌识别的研究。

## 2 沟槽预测方法

### 2.1 前人识别古沟槽的方法

古沟槽是风化壳表面被水流侵蚀切割而成的岩溶地表水和地下水的排泄通道。传统的识别古沟槽方法,有印模法和残余厚度法<sup>[1]</sup>,其原理主要是基于地震轴的形态,如果地震轴呈“V”形或者“U”形<sup>[4]</sup>(图2),那么认为这就是古沟槽。传统的识别法,受地震网密度大小和层位解释人为因素的影响,精度较低。这种方法能识别宽度上千米、侵蚀深度大于30m的古地貌,但是对于宽度比较小、深度比较浅的古沟槽则很难识别,特别是宽度几十米、深度小于30m的古沟槽,而这种古沟槽在靖边气田西部恰又是分布最广泛的。顾岱鸿等人<sup>[2]</sup>从二维地震中提取地震属性,通过插值、平滑后来判别沟槽,尽管该方法比传统方法精度高,但毕竟二维地震网密度有限,测线之间插值区的预测精度难以保证。张宏等<sup>[4]</sup>采用新的三维地震古地貌研究方法,在富县区块识别出了较小的次级分支沟槽(槽宽50~300m,切割深度10~20m)。

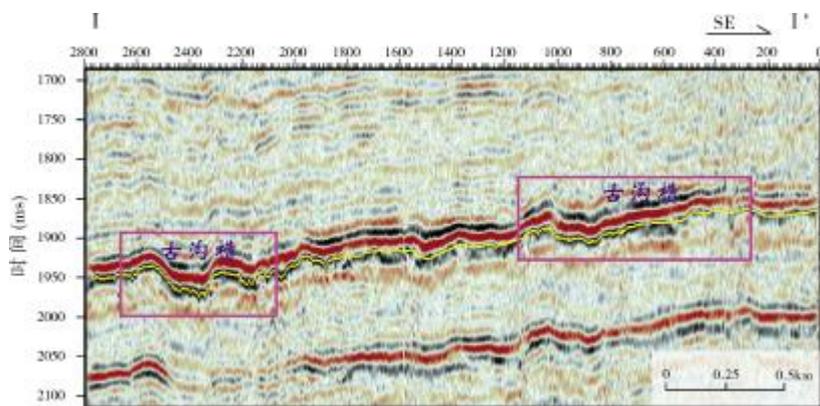


图2 前人用地震剖面识别的古沟槽

I—I'剖面位置见图1

### 2.2 地震全波场波动方程数值模拟预测法

本次研究应用了地震全波场正演模拟技术。这一技术过去在地球物理研究中之所以没被广泛地应用,主要原因在于没有足够的计算机能力,其次是没能找到基于射线追踪和有限差分标量波动方程的简化算法以减少计算工作量。因此,我们的地震勘探工作方法只能是基于各种反演处理的结果来认识复杂的地下地质情况,而且因为事先无法评估反演的结

果是否正确,所以最终只能用昂贵的钻井来验证。

采用全波场波动方程数值模拟交错网格高阶差分来模拟地震波在介质中的传播,能最大程度地解决模拟中的频散、稳定性和边界反射等问题。本次研究的具体方法是,先通过五种模拟方法(垂直入射地震波正演模拟、基于标量波动方程正演模拟、基于声波方程正演模拟、基于弹性波方程正演模拟、各向异性介质弹性波方程正演模拟)来进行优选,然后结合研究区真实地震反射特征来调整相关参数,最终选

择了适合该区域地质情况并且模拟效果较好的基于弹性波方程的正演模拟。

本次正演模拟,应用真实的测井数据和沟槽类型建立了模型(图 3),并应用生产中的排列方式布设了炮点和检波器。在进行了模拟放炮和接收了地震反射数据之后,对这些数据进行常规地震处理,主频选择 45Hz(通过该区真实地震数据提取),得到了叠后偏移时间剖面,在这些处理后的地震剖面上识别出了小型沟槽在地震剖面上的响应特征。由此得到如下结论:

(1)沟槽在地震上的响应特征主要是深度,而不是宽度。

(2)沟槽深度变化时,它们在地震上的响应特征有明显的变化,如果槽的深度在 10m 至 5m(图 3 桩号 5 830 处),那么它的地震同相轴出现相位反转(图 4 桩号 5 830 处);如果槽的深度在 30m 至 10m(图 3 桩号 5 100、5 400、5 600 处),那么它们的同相轴增益会增大(图 4 桩号 5 100、5 400、5 600 处);如果槽的深度大于 30m(图 3 桩号 4 700—4 800 处),那么它

的同相轴呈复波型(图 4 桩号 4 700—4 800 处)。

(3)沟槽识别的精确度与它的上覆岩性和接触界面有关。界面速度差异越大,那么槽的响应越清楚。同样,沟槽中充填物的速度与围岩速度差异越大,地震响应也越清楚。此次实验根据实际地质情况充填物为煤层(速度为 4 100 m/s)。

(4)沟槽在地震上的响应特征与地层倾角有关。如果地层倾角大于  $5^\circ$ ,那么它的响应特征就非常模糊,只是略微呈增益增强,一般很难区分。如果地层倾角继续加大,响应特征就更加不清,这与地震波场频散有关。

通过以上这些特征,能够快速有效地识别沟槽的展布。通过与新钻探井的资料对比,也证实了这种方法的有效性。

### 2.3 钻井沟槽约束和地质控制

靖边气田西侧目前已经有多口探井钻遇沟槽。这些井所揭露的地层分布情况证实了沟槽的宏观展布

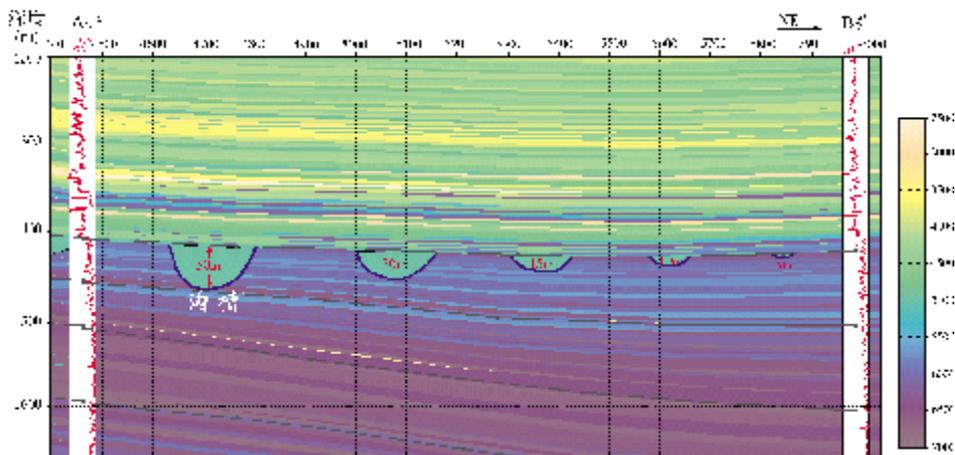


图 3 由测井数据和地质资料建立的沟槽正演模型

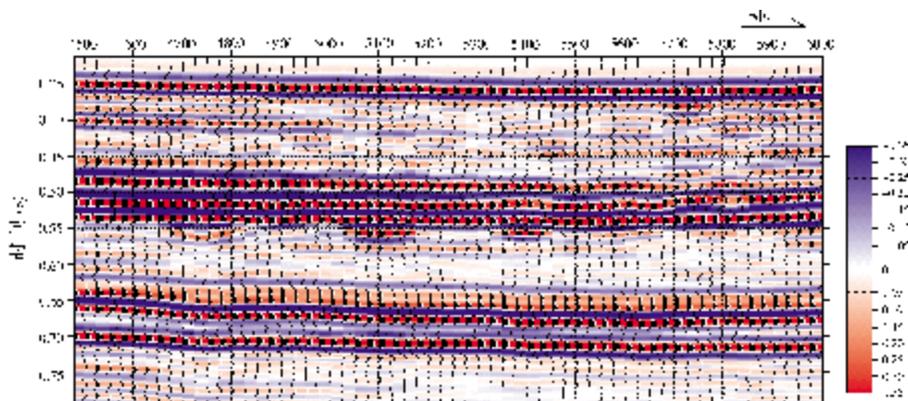


图 4 全波场数值模拟后正演模型的叠加偏移剖面

形态,在地质剖面图(图 5)上,A 井钻遇奥陶系顶部马六段灰岩,B 井钻遇马五段白云岩,C 井又钻遇马六段灰岩,而 B 井处于 A 井和 C 井中间,因此推测 B 井应该在沟槽里,它所在的马六段已被淋滤剥蚀了。

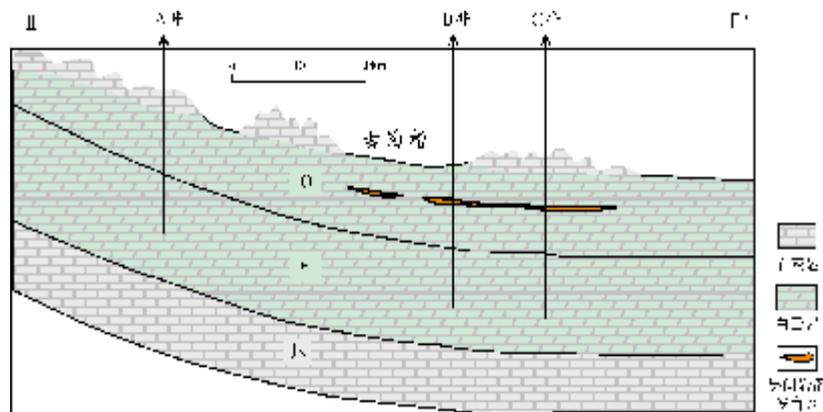


图 5 钻井揭示的古沟槽在连井剖面上的分布  
II—II'剖面位置见图 1

在某一沟槽内,各小层的平面出露关系始终是连续的。出露宽度依沟槽的坡度而变,如果坡度缓,则出露宽度大,如果坡度陡,则出露宽度小;如果小层厚度大,则出露宽度大,如果小层厚度小,则出露宽度小<sup>[5-6]</sup>。

### 3 岩溶古地貌沟槽分布预测

#### 3.1 岩溶古地貌与成藏特征

奥陶纪末—早石炭世,鄂尔多斯盆地内部由于在盆地西部存在近南北向分布的古隆起,古地势是西高东低,奥陶系在遭受长期的风化剥蚀及岩溶作用后,自西向东依次发育岩溶高地(台地)、岩溶斜坡以及岩溶洼地。其中岩溶高地(台地)区及岩溶斜坡区岩溶作用强烈,形成了以溶蚀角砾岩、古土壤及铝土岩等典型风化残积物为主的多个北东向沟槽分布的沉积。而且,在岩溶斜坡的沟槽比岩溶高地的要宽,侵蚀深度也更深;在岩溶洼地,由于地势平缓,所以沟槽分布多,宽度大,侵蚀浅,并在距风化壳顶部一定深度范围内易发生层间岩溶作用,发育大小不等的溶洞、溶孔、溶斑和溶缝等<sup>[7]</sup>,它们是形成奥陶系有效储层的关键。

在古隆起东部共发育三套马家沟组含气组合,其烃源岩均为上古生界煤系地层。

上组合 主要层位为马五<sub>1-4</sub>亚段,储集空间为含膏白云岩溶孔,以奥陶系顶部铝土质泥岩为盖层,多个含气层分布稳定,连片性好,气藏规模大,是靖边气田的主体<sup>[8]</sup>。

中组合 主要层位为马五<sub>5-10</sub>亚段的白云岩,储集空间以滩相白云岩晶间孔为主,向东侧上倾方向一般相变成致密灰岩,可以形成有效封堵而构成岩性圈闭,尽管气藏规模较小,但具有局部高产富集的特点。

下组合 以马四段白云岩晶间孔、晶间溶孔型储层为主和以岩性相变形成的岩性圈闭为主<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 应用实例

本文主要针对中央古隆起东部的岩溶高地和岩溶斜坡进行古沟槽分布预测,这里发育的层位主要是奥陶系马家沟组中、下组合。根据钻井的地层分布和地震预测,结合构造和沉积背景,预测了中央古隆起东部奥陶系岩溶古地貌(沟槽)的分布(图 6)。在

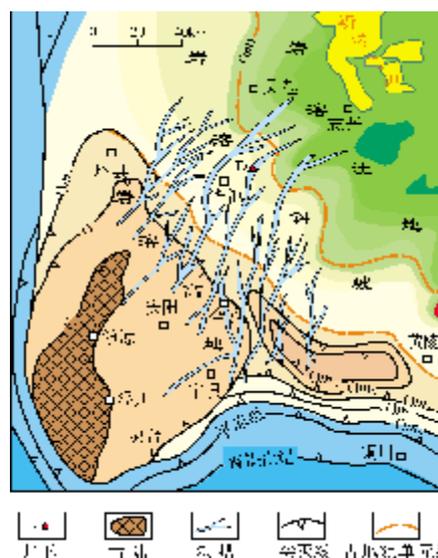


图 6 鄂尔多斯盆地中央古隆起东部马家沟组沟槽分布预测  
Om 马家沟组

岩溶斜坡的已钻井——D井证实了发育小型沟槽(槽宽约75m,槽深约7m),与地震预测结果(图7)一致。D井揭示奥陶系顶部的剥露地层为马五<sub>4</sub>亚段,表生岩溶储层已经被剥蚀,在下部层间岩溶储层有气显示。

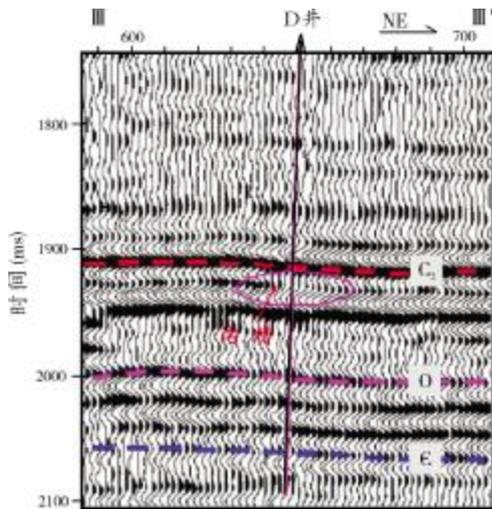


图7 中央古隆起东部小型沟槽的地震相位反转  
Ⅲ—Ⅲ'剖面位置见图1;D井位置见图1和图6

## 4 结论

鄂尔多斯盆地岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地中存在众多古沟槽。在井位部署中准确识别沟槽,有

利于提高钻井成功率。通过全波场地震模拟技术研究认为,由地震同相轴的相位反转、增益增强、复合波形等特征能够识别出宽度小于100m,侵蚀深度5~30m的小型沟槽。利用目前已经钻遇的沟槽和地质推测,综合分析描述了中央古隆起东部岩溶古地貌中小型沟槽的展布,已钻探井证实了预测方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 顾岱鸿,代金友,兰朝利. 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):60-65.
- [3] 刘宝宪,王红伟,马占荣,等. 鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区马五段白云岩次生灰化作用特征与成因分析[J]. 天然气地球科学,2011,22(5):789-795.
- [4] 张宏,董宁,郑浚茂,等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古沟槽三维地震识别方法[J]. 石油学报,2010,31(3):415-491.
- [5] 程付启,金强,刘文汇,等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳混源气成藏分析[J]. 石油学报,2007,28(1):38-42.
- [6] 赵俊兴,陈洪德,张锦泉,等. 鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究[J]. 石油学报,2005,26(5):38-41.
- [7] 沈安江,潘文庆,郑兴平,等. 塔里木盆地地下古生界岩溶型储层类型及特征[J]. 海相油气地质,2010,14(2):20-29.
- [8] 侯方浩,方少仙,何江,等. 鄂尔多斯盆地靖边气田区中奥陶统马家沟组五<sub>1-5</sub>亚段古岩溶型储层分布特征及综合评价[J]. 海相油气地质,2011,16(1):1-13.

编辑:赵国宪

## Identification of Small Karst Paleogrooves in Eastern Central Uplift, Ordos Basin

Gao Jianrong, Xu Wanglin, Guo Yanru, Zhao Zhenyu,  
Liu Junbang, Zhang Yanling, Zhang Yueqiao

**Abstract:** Ordovician karst landforms are wide distributed in eastern Central Uplift, Ordos Basin. The accurate characterization and identification of small karst paleogrooves is important to approach hydrocarbon accumulation and improve success rate of exploration. The seismic response of paleogrooves is the depth of the grooves instead of the width of them. It is shown that as the dip angle is more than 5°, the seismic response is unclear. As the erosion depth of them is at 10 m to 5 m, seismic phase axis is reversed. As the erosion depth of them is at 30 m to 10 m, the seismic phase axis gaining even increases. As the erosion depth is greater than 30 m, the seismic displays compound waves. By this method, a group of the middle and small karst paleogrooves have been effectively identified and confirmed in the Middle array of Ordovician Majiagou 5 Submember using well data and available geologic data and post-stack migration profiles.

**Key words:** Ordovician; Weathering crust reservoir; Karstified groove; Full-wave field modeling; Ordos Basin

Guo Jianrong: male, Ph.D., Geology Engineer. Add: Research institute of Petroleum Exploration and Development PetroChina, 20 Xueyuan Rd., Beijing, 100083, China