

文章编号:0253-9985(2010)06-0871-08

塔中地区碳酸盐岩溶洞储层体积定量化正演模拟

孙 东¹, 潘建国¹, 潘文庆², 韩剑发², 敬 兵², 于红枫²

(1. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020;

2. 中国石油天然气股份有限公司 塔里木油田分公司 石油勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:采用波动方程正演模拟方法, 针对储层地震响应特征分析和缝洞体体积计算等制约塔中地区碳酸盐岩勘探开发的关键问题进行了探讨。通过大量正演模拟, 明确了碳酸盐岩串珠状强振幅、羊排状强振幅、杂乱反射和弱振幅等各类复杂地震响应特征的地质意义, 同时开展了正演校正下溶洞体体积计算新方法的探索。研究表明这是一套行之有效的碳酸盐岩溶洞体积计算方法, 可以为高效开发和储量计算提供参考依据。

关键词:地震响应特征; 体积计算; 正演模拟; 碳酸盐岩; 储层预测; 塔里木盆地

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Quantitative forward modelling of cavity volume in carbonate reservoirs in Tazhong area

Sun Dong¹, Pan Jianguo¹, Pan Wenqing², Han Jianfa², Jing Bing² and Yu Hongfeng²

(1. Northwest Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: In this paper, we discuss key issues constraining exploration and development of carbonate reservoirs in the Tazhong area such as analysis of seismic response characteristics and calculation of cavity volume by using wave equation forward modelling. Through many forward modellings, we figure out the geological implication of various complex seismic responses such as moniliform high amplitude, mutton chop-shaped high amplitude, chaotic reflection and low amplitude. We also bring forward a new method for calculating cavity volume with forward modelling correction. The study shows that this method is an effective way to calculate cavity volume of carbonates and can provide help for efficient development and reserve estimation.

Key words: seismic response feature, volume calculation, forward modelling, carbonate rock, reservoir prediction, Tarim Basin

在国际油价居高不下、国内石油供需矛盾仍未缓解的情况下, 油气资源取得重大发现更显得重要而紧迫。塔里木盆地海相碳酸盐岩勘探潜力巨大^[1~3], 截止 2008 年底, 累计探明油当量已突破 4×10^8 t, 但产能依然很低。虽然塔里木盆地海相碳酸盐岩的勘探开发目前主要依赖的地质-地震综合储层预测技术已经形成了较为完善的技术系列^[4~8], 但要提高勘探开发

的成功率, 必须加大综合储层预测技术攻关的力度。

目前最为紧迫的问题是碳酸盐岩储层地震响应特征复杂和溶洞体体积难以准确计算。由于储层地震响应特征分析是开展储层预测的前提, 因此必须先明确各类复杂地震响应特征的地质意义才能有效地进行储层综合预测; 溶洞体体积的准确计算可以为高效开发和储量计算提供参考依

收稿日期: 2010-03-29。

第一作者简介: 孙东(1977—), 男, 工程师, 碳酸盐岩储层预测与综合评价。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2008E-0702)。

据,前人利用多种方法进行了探索^[9]。

正演模拟技术是解决上述问题的关键技术之一。对正演模拟方面国内外均开展了大量工作,国内以涉及到碳酸盐岩储层方面为主,研究主要包括:1)关于串珠状反射形成机理方面,普遍认为岩溶储层的存在会引起绕射地震波场,对这些绕射波进行收敛会形成短反射段,也就是所谓的串珠状反射;同时前人针对不同级别、不同形态的溶洞开展了正演模拟^[10~14]。2)关于碳酸盐岩顶界塌陷洞地震响应方面,研究认为由于碳酸盐岩表层塌陷洞的存在,会使灰岩顶界强反射变为弱反射,同时内幕呈现强振幅、低速度、低频率的特点,与周围围岩有明显的能量差异^[13,15]。3)关于储层与灰岩顶界强反射之间的相互影响方面,研究认为由于内幕岩溶储层的存在,会使灰岩顶界强反射减弱,岩溶储层越发育,灰岩顶界强反射振幅衰减越明显^[16]。4)关于缝洞系统的正演模拟方面,研究认为缝洞发育带越宽,其地震响应越明显;大型缝洞系统在地震资料上会形成明显的地震响应,与周围围岩有明显的能量差异^[17,18]。5)关于溶洞充填物不同时的数值模拟方面,认为充填物越疏松,总体地震响应特征越复杂,越出现许多难以收敛的杂波,剖面面貌越差;充填物越致密,上下界面反射波越简单^[13,19];气藏顶底边界点存在极性反转现象,同时在气藏的底部出现同相轴下拉现象^[20]。6)储层发育空间位置方面,认为溶洞顶界位于串珠的波谷位置^[21]。

本次研究充分参考前人研究成果,采用波动方程正演模拟方法针对储层地震响应特征分析和溶洞体体积计算等问题进行了探讨。

1 弹性波波动方程正演模拟方法

溶洞型油气藏的正演模拟包括模型建立、弹性波波动方程正演计算和地震资料处理 3 个部分。

1.1 模型建立

采用交互手绘多边形的方式建立模型,为保证研究更具有针对性,建立模型时尽量参考塔中实际地震资料条件来确定各主要参数。统计 8 口井垂直地震测井资料,确定上奥陶统碳酸盐岩地层平均速度为 5 695 ~ 6 221 m/s,模型目的层平均

速度定为 6 000 m/s;上覆桑塔木组泥岩盖层平均速度为 4 500 m/s。统计多井声波、密度测井资料,确定溶洞纵波速度为 3 000 m/s,密度为 2 200 kg/m³。

采用点式震源进行激发,参考塔中深层碳酸盐岩实际地震资料,主频定为 25 Hz。采用中间放炮,两侧接收方式进行数据采集。参考野外实际采集方式,炮距定为 50 m,检波距为 25 m。最大炮检距为 1 000 m,基本满足动校正拉伸畸变限制和速度分析精度的要求。空间采样率定为 4 ms。

1.2 正演计算

针对建立的各种储层地质模型,开展全波场波动方程数值模拟,采用弹性波波动方程进行计算。

根据虎克定律和牛顿第二定律可导出各向同性、完全弹性、非均匀介质中的波动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho(x,z)} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho(x,z)} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu \frac{\partial v_x}{\partial z} + \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda = \rho(v_p^2 - 2v_s^2) \quad (2)$$

$$\mu = \rho v_s^2 \quad (3)$$

式中: $\rho(x,z)$ 为介质密度,g/cm³; λ 和 μ 均为拉梅常数 g · cm/s²; v_x, v_z 是质点速度,m/s; τ_{xx}, τ_{zz} 为正应力分量,kg/cm²; τ_{xz} 为切应力分量,kg/cm²。

再由泰勒近似对上述弹性波动方程组逼近,通过差分解代替微分解,进而能在计算机上实现模拟地震波在介质中的传播情况。

具体实现时,采用了交错网格差分算法,较常规的差分算法局部精度提高了 4 倍。用吸收边界条件实现边界吸收,给出震源子波,满足稳定性条件。

1.3 地震资料处理

得到炮集记录后,进行合并并切除初至波,

因模型中地层界面均为水平方式,所以将共炮点道集抽取为共中心点道集。在此基础上生成速度谱,进行道集文件与速度谱文件的联动解释,并利用得到的叠加速度完成动校正。采用共中心点叠加方式进行叠加,并采用叠后克希霍夫偏移方式进行偏移,适当调整梯度、偏移速度和偏移孔径等参数,得到最终的地震记录用于分析。

2 计算结果分析

2.1 溶洞储层地震响应特征分析

利用一体化研究平台,结合成像测井、钻井成果等资料,通过储层精细标定和溶洞储层地震

响应特征的统计分析,明确了塔中古生界碳酸盐岩包含4种储层地震响应:串珠状强振幅、羊排状强振幅、杂乱反射和弱振幅。

2.1.1 串珠状强振幅

串珠状强振幅是碳酸盐岩中最为常见的储层地震响应,表现为地震剖面上的强振幅短反射段,总体波形特点表现为两谷夹一峰(图1)。

关于串珠状强反射的成因,前人已多有论述,普遍认为岩溶储层的存在会引起绕射地震波场,对这些绕射波进行收敛就会形成短反射段,也就是所谓的串珠状反射^[11~14]。本次正演模拟进一步验证了前人的结论,从成像结果看,串珠状反射的波形特点表现为两谷夹一峰,与实际地震剖面表现一致(图2)。

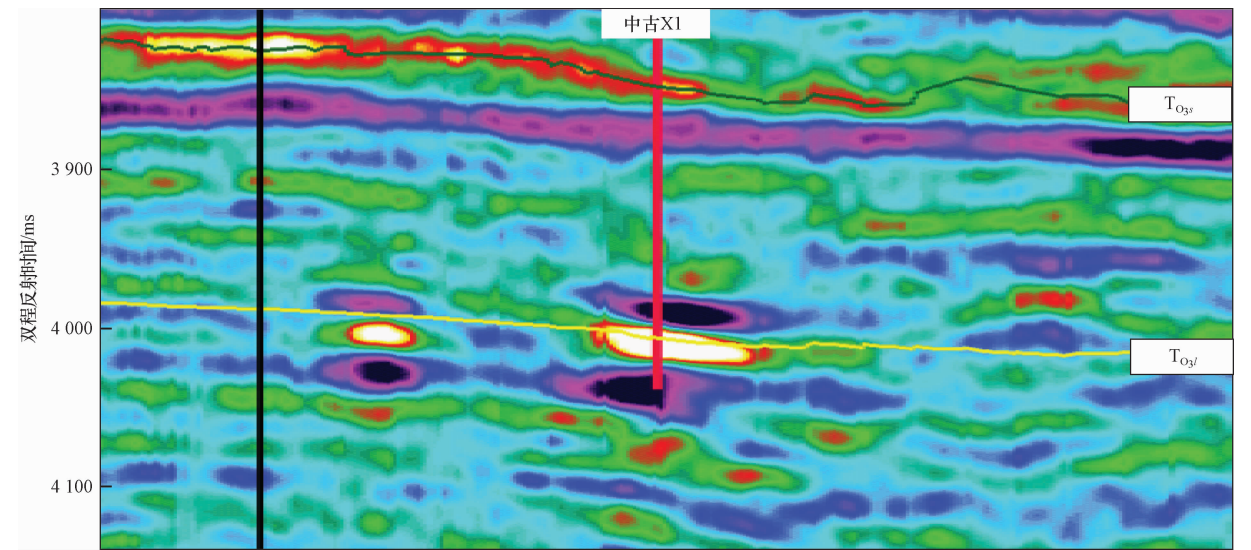


图1 塔中地区串珠状强振幅地震响应特征

Fig.1 Moniliform seismic responses with high amplitude in Tazhong area

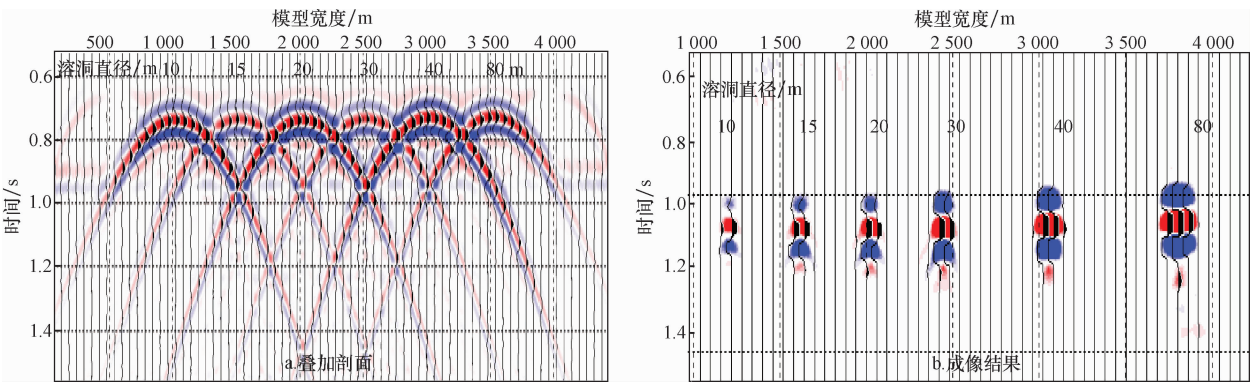


图2 塔中地区不同尺度溶洞模型叠加剖面与成像结果

Fig.2 Stacked cross sections and images of different-size cavity models in Tazhong area

2.1.2 羊排状强振幅

羊排状强振幅表现为横向上延伸较长的强振幅,分为横向有变化、横向较均一以及下拉、上翘等形态(图3)。

从正演模拟结果看,单个溶洞体如果宽度较大,可以形成羊排状反射;组合溶洞体(横向排列)也可以形成羊排状反射。单个溶洞体形成的羊排状反射横向较均一;组合溶洞体如果间距小于40 m,可以形成横向均一的羊排状反射,间距超过80 m后,会形成横向有变化的羊排状反射(图4)。

对正演模拟记录进行偏移时,如果偏移孔径设定不合适,会出现下拉式和上翘式反射。偏移孔径值不同,偏移结果有很大差异:偏移孔径为

100 m时,绕射波收敛不足,强反射呈现两侧下拉的现象;偏移孔径为500 m时,在偏移剖面上则是偏移收敛的短反射段;偏移孔径为2 000 m时,强反射呈现两侧上翘的现象。同时,偏移速度设定过高或过低会出现同样的效果(图5)。

2.1.3 杂乱反射

这类储层地震响应钻遇较少,主要为以中古X5井为代表。实钻结果表明,该井在下奥陶统钻遇裂缝型储层(图6)。

2.1.4 弱振幅

弱振幅储层地震响应以中古X6井为代表,该井在下奥陶统弱振幅中钻遇裂缝型储层(图7)。

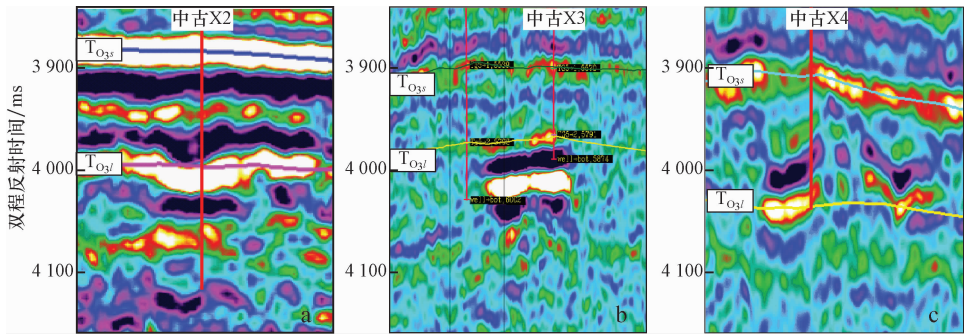


图3 塔中地区羊排状强振幅地震响应特征

Fig. 3 Mutton chop-shaped seismic responses with high amplitude in Tazhong area

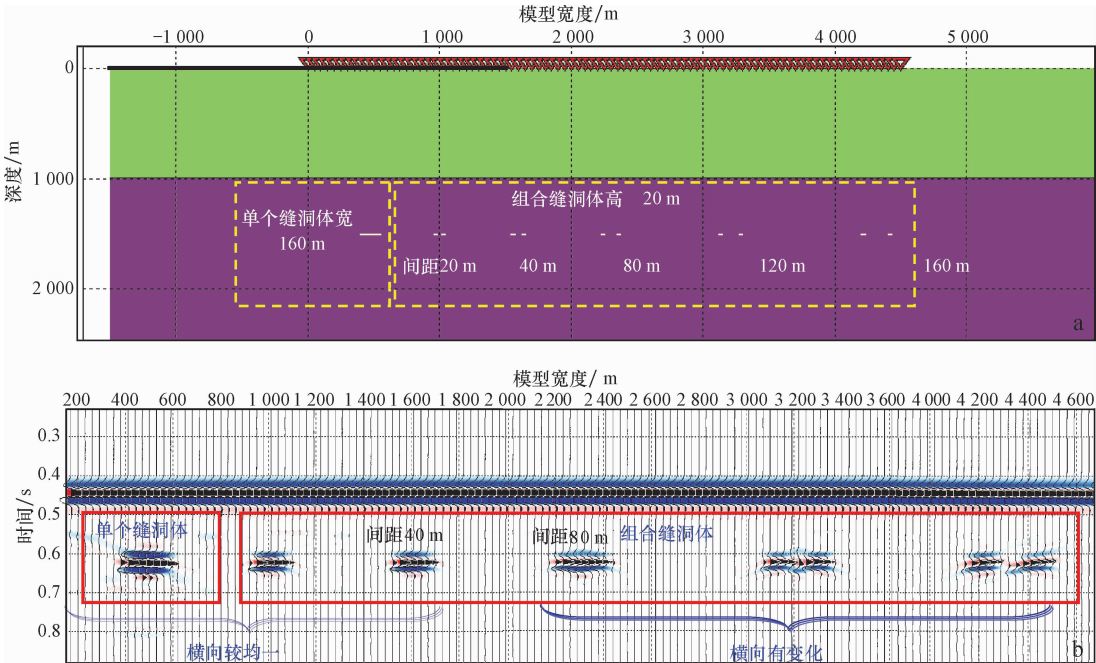


图4 塔中地区羊排状强振幅形成机制正演模拟结果

Fig. 4 Forward modelling of mutton chop-shaped seismic responses with high amplitude in Tazhong area

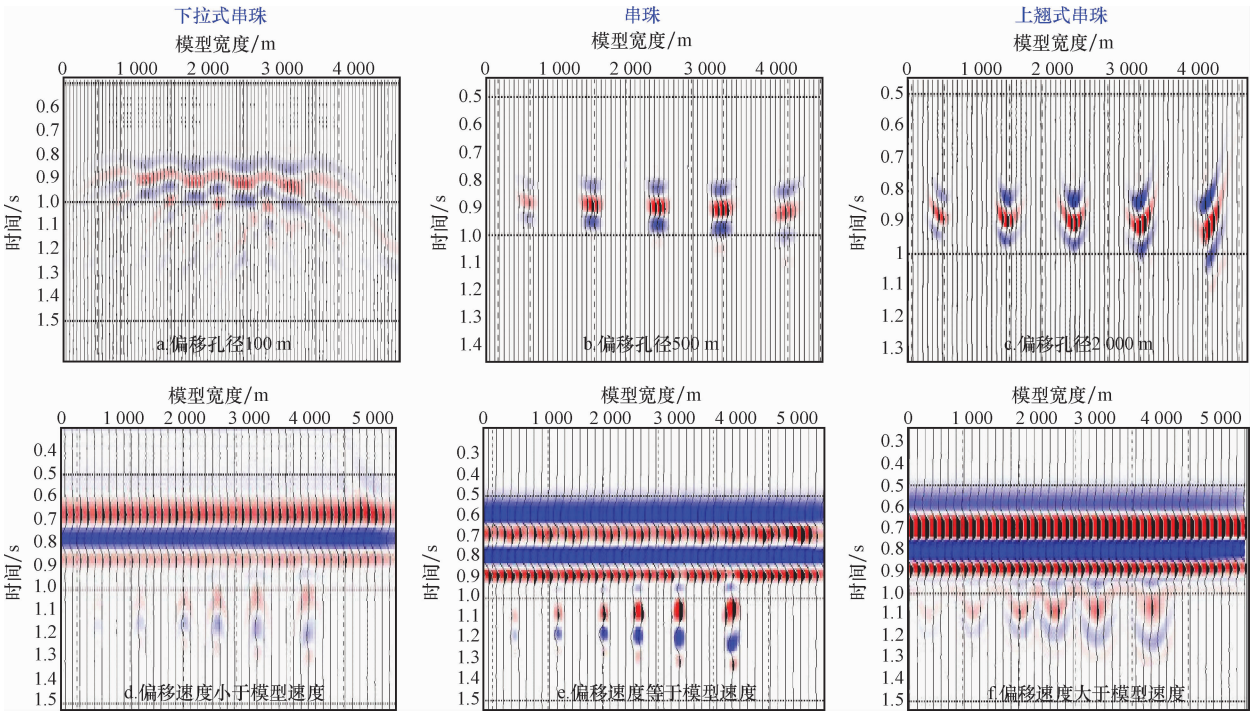


图5 塔中地区下拉、上翘式串珠形成机制正演模拟结果

Fig. 5 Forward modelling of drop-down, normal and upwarping moniliform seismic responses in Tazhong area

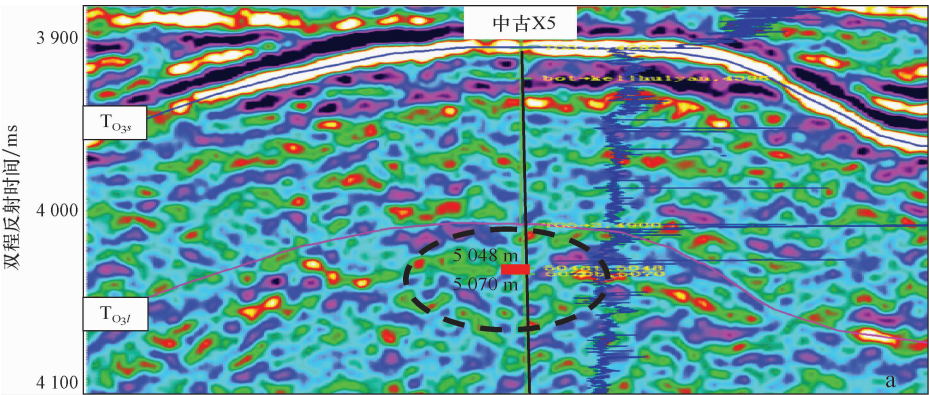


图6 塔中地区杂乱反射地震响应特征

Fig. 6 Chaotic reflection seismic responses in Tazhong area

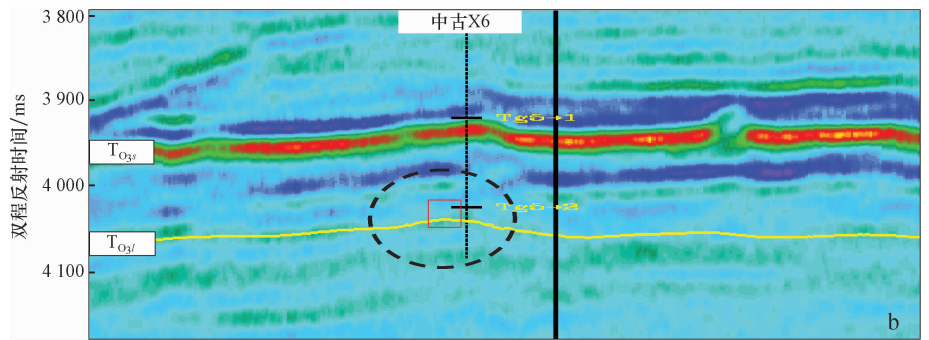


图7 塔中地区弱振幅地震响应特征

Fig. 7 Low amplitude seismic responses in Tazhong area

针对裂缝型储层开展正演模拟,图中所示溶洞规模一致,第一个溶洞在顶部和右下部发育裂缝带,而第三个溶洞没有裂缝发育。从正演模拟结果看,两者所产生串珠状反射规模一致,裂缝在叠后偏移记录上并没有明显的表现,只在第一个溶洞叠后记录相应位置上呈现弱振幅,由此也验证了实钻结果(图 8)。

2.2 正演校正下的溶洞体体积计算

碳酸盐岩串珠状反射相对溶洞体来说普遍存在放大效应,因此必须经过校正以后才能求得真实的溶洞体体积。校正思路如下:首先建立不同规模溶洞的正演模型,得到其叠后偏移记录以后提取其地震属性,量取各溶洞地震属性的宽度

与模型宽度进行对比,得到其宽度校正系数;量取各溶洞地震属性的高度与模型高度进行对比,得到其高度校正系数;在此基础上,编程实现溶洞体积校正(图 9)。

采用前述模型建立方法,建立 8 个正演模型。模型 1 和 2 高度为 20 m,宽度从 10 m 变化至 1 200 m 的溶洞模型;模型 3 和 4 高度为 40 m,宽度从 10 m 变化至 1 200 m 的溶洞模型;模型 5 和 6 宽度为 25 m,高度从 10 m 变化至 400 m 的溶洞模型;模型 7 和 8 宽度为 50 m,高度从 10 m 变化至 400 m 的溶洞模型(表 1)。在此基础上,进行正演计算和地震资料处理后得到各模型叠后偏移记录,经过对比后,得到溶洞体高度和宽度校正量板(图 10,图 11)。

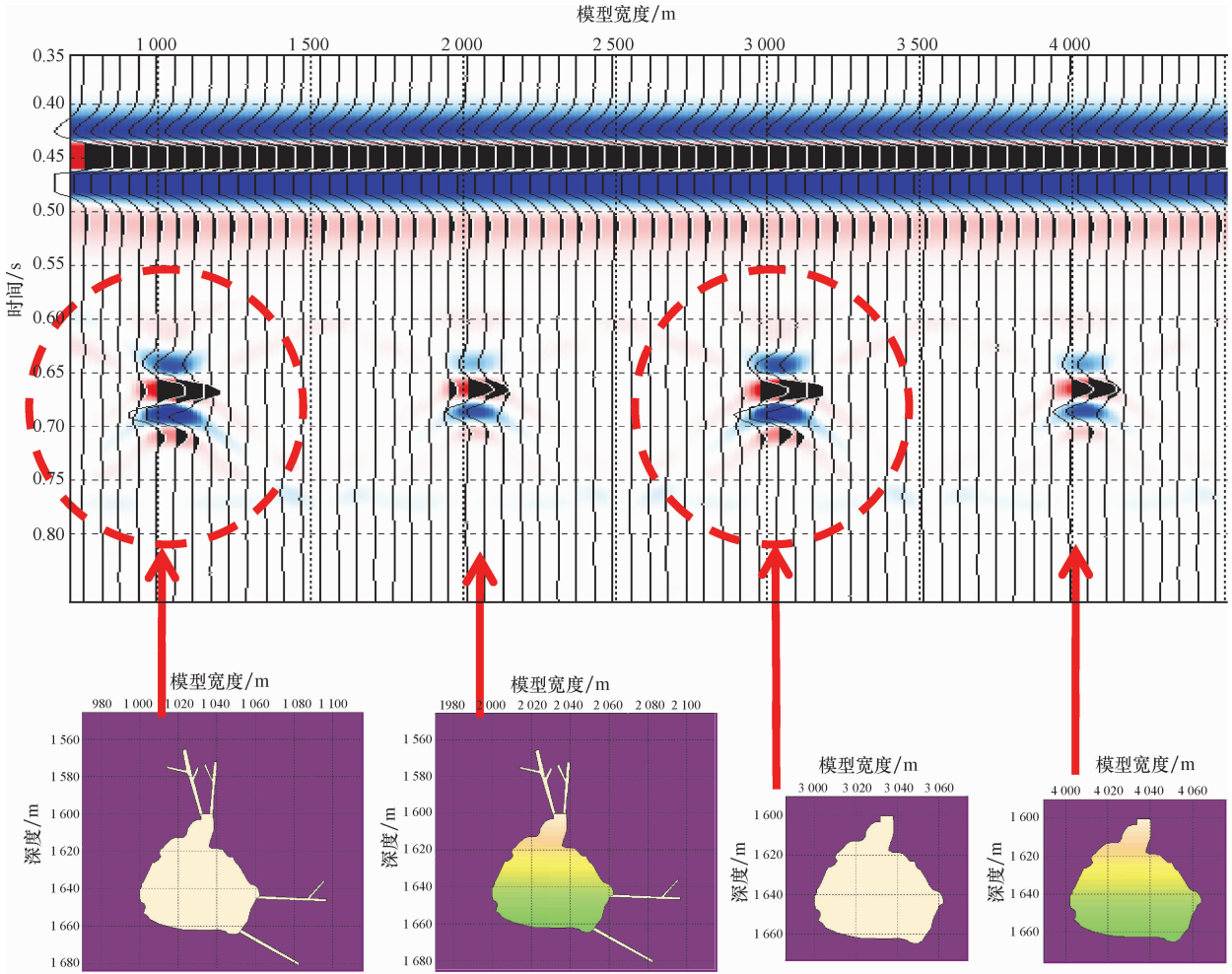


图 8 塔中地区裂缝型储层地震响应正演模拟结果

Fig. 8 Forward modelling of seismic responses of fractured reservoirs in Tazhong area

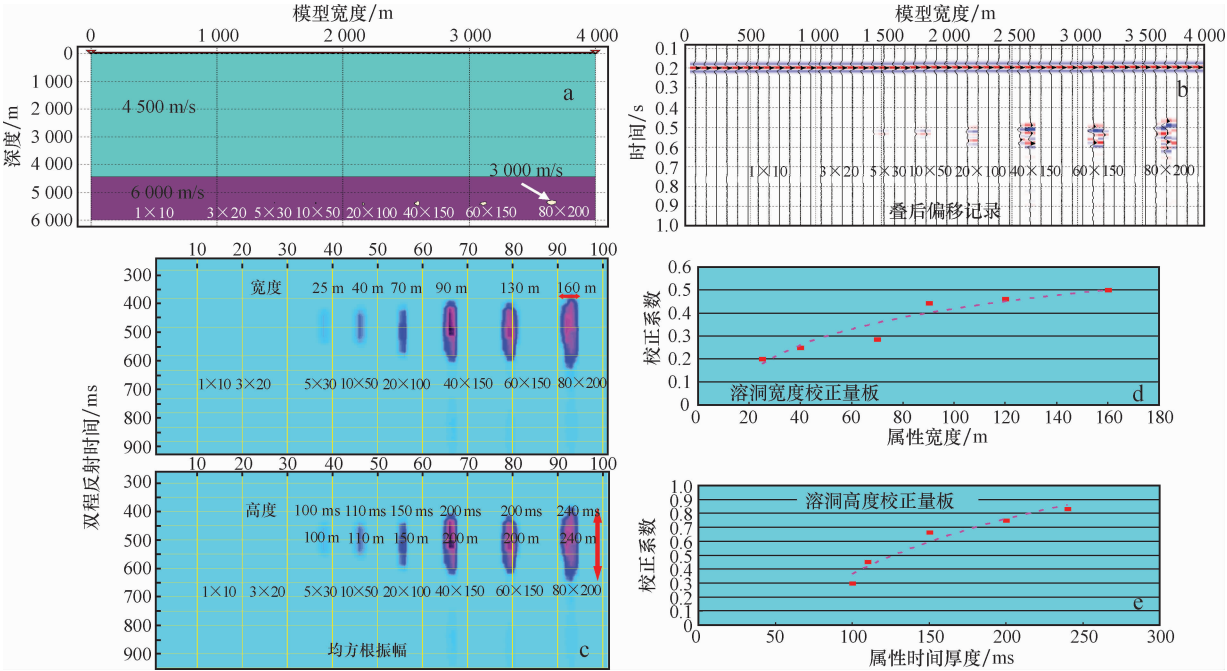


图 9 塔中地区正演校正流程图

Fig. 9 Flowchart of forward modelling correction in Tazhong area
(1×10 表示溶洞的规模,宽度 1m、高度 10m)

表 1 塔中地区溶洞体定量描述模型参数

Table 1 Model parameters for quantitative description of cavity in Tazhong area

序号	模型特征	参数变化(48 个溶洞)		
		高度/m	宽度/m	模型分类
1	溶洞体宽度变化	20	10, 15, 20, 30, 40, 80, 120, 160	模型 1
		20	200, 400, 800, 1 000, 1 200	模型 2
		40	10, 15, 20, 30, 40, 80, 120, 160	模型 3
		40	200, 400, 800, 1 000, 1 200	模型 4
2	溶洞体高度变化	10, 20, 30, 40, 60,	25	模型 5
		80, 120, 160, 200, 300, 400	25	模型 6
		10, 20, 30, 40, 60	50	模型 7
		80, 120, 160, 200, 300, 400	50	模型 8

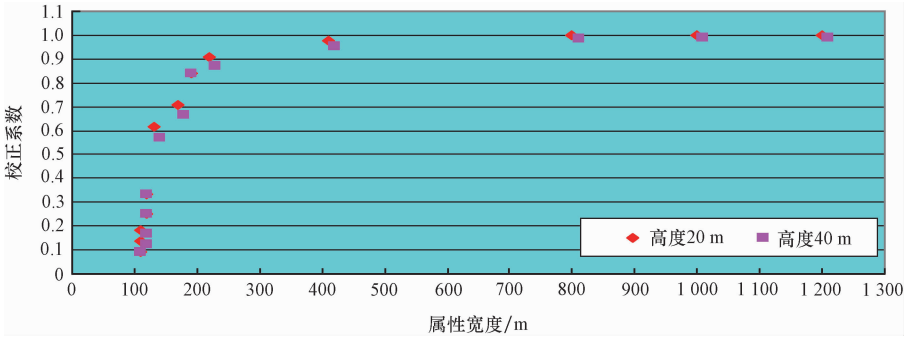


图 10 塔中地区溶洞宽度校正量板

Fig. 10 Correction template of cavity width in Tazhong area

从溶洞宽度校正量板可以发现,随着属性宽度的增大,其校正系数向 1 靠近,当属性宽度达 400 m 时,校正系数基本接近 1;也就是说,溶洞越宽,其地震记录的横向宽度越接近真实溶洞宽度,

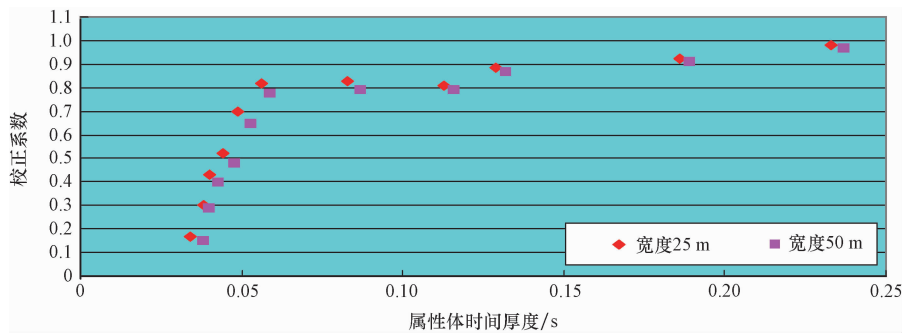


图 11 塔中地区溶洞高度校正量板

Fig. 11 Correction template of cavity height in Tazhong area

溶洞越小,其地震记录的横向宽度越夸大。

从溶洞高度校正量版可以发现,随着属性时间厚度的增大,其校正系数向 1 靠近,当属性时间厚度达到 240 ms 时,校正系数基本接近 1;也就是说,溶洞越高,其地震记录的高度越接近真实溶洞高度,溶洞越小,其地震记录的高度越夸大。

在中古 X7 井区截取 25 km² 地震数据(图 12),提取均方根振幅属性后,结合上述溶洞体宽度和高度校正量板编写程序进行属性体体积校正。该区块溶洞体原始体积为 3 738 × 10⁴ m³,校正后体积为 2 508 × 10⁴ m³。

3 结论

1) 运用波动方程正演模拟技术,明确了串珠

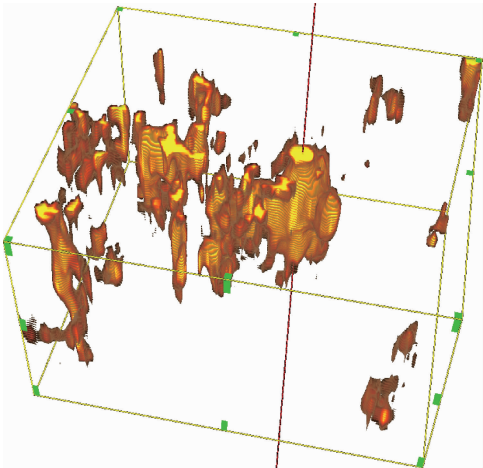


图 12 塔中地区中古 X7 井区溶洞体空间雕刻图

Fig. 12 3D image showing cavity space of carbonate reservoirs in Zhonggu-X7 wellblock in Tazhong area

状强振幅、羊排状强振幅、杂乱反射和弱振幅等储层地震响应特征的形成机制,为储层预测奠定了基础。

2) 正演校正下的溶洞体体积计算是一套行之有效的碳酸盐岩溶洞体体积计算方法,可以为高效开发和储量计算提供参考依据。

3) 正演校正量板若经实钻井的校正后则更为可靠,另外地震数据的保幅性也是预测成功的关键之一。

参 考 文 献

1 金之钧,云金表,周波. 塔里木斜坡带类型、特征及其与油气聚集的关系[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):127~125

2 聂保锋,于柄松,刘永顺,等. 塔里木盆地塔中-巴楚地区侵入体温度场演化特征及其与油气储层的关系[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):59~64

3 吕海涛,张仲培,邵志兵. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(1):76~84

4 陈广坡,潘建国,陶云光. 碳酸盐岩岩溶型储层综合预测评价技术的应用及效果分析[J]. 石油物探,2005,44(1):33~36

5 韩革华,漆立新,李宗杰,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):860~870

6 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

7 崔海峰,张年春,郑多明,等. 塔里木盆地牙哈断裂构造带寒武系白云岩潜山储层预测[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):116~111

8 李江龙,张宏方. 物质平衡法在缝洞型碳酸盐岩油藏能量评价中的应用[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):773~778

9 吴清岭,李伟,陈可为,等. 无反射波动方程正演模型及其应用[J]. 石油地球物理勘探,2000,35(2):147~153

10 胡中平. 溶洞地震波“串珠状”形成机理及识别方法[J]. 中国西部油气地质,2006,2(4):423~426

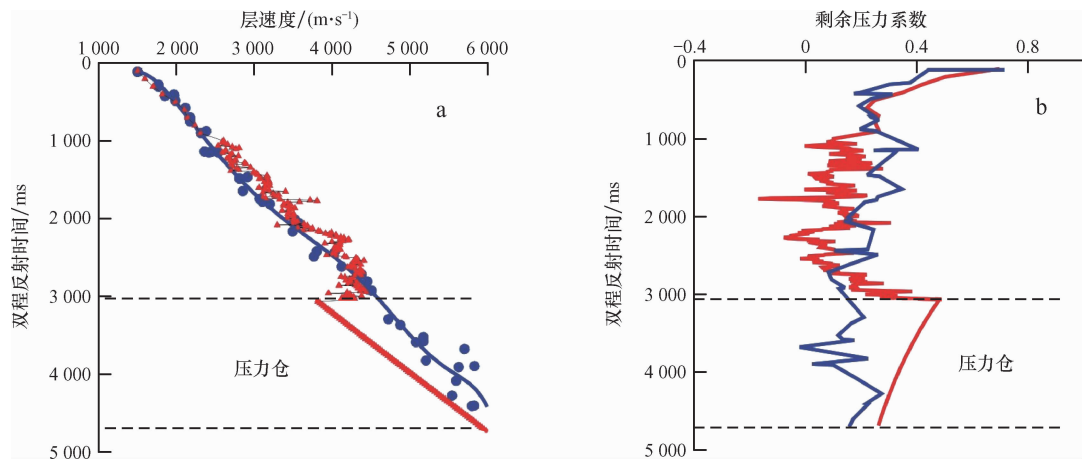


图 3 外推压力仓内地层层速度的实例

Fig. 3 An example of extrapolation of interval velocities in the overpressured fluid compartment

a. 蓝色圆点是根据速度谱计算的层速度,蓝色曲线是其拟合多项式曲线,压力仓外的红色三角是实测钻井层速度,压力仓内密集红色三角形(每 20 ms 一个)连成的线是外推层速度;b. 蓝色线是根据速度谱计算的层速度预测的剩余压力系数,压力仓外的红色线是根据测井层速度预测的剩余压力系数,压力仓内红色线是外推剩余压力系数

4 结论

在盆地深部实测层速度与根据速度谱计算的层速度存在很大差异情况下,如果深部存在压力仓,那么可以基于 Hunt 提出的“压力仓模型”约束钻井深度以下的深部层速度外推,外推的基本公式是 Fillippone 提出的层速度和地层压力之间函数关系式。这种基于“压力仓模型”约束的外推,提高了层速度外推的可靠性。

参 考 文 献

1 Fillippone W R. Estimation of formation parameters and the predic-

tion of overpressure from seismic data [J]. The SEG Research Symp, Geopressure Studies, 1982, 10: 51 ~ 57
2 许浚远,陈荣书. 含油气盆地地层压力仓群模式 [A]. “八五”地质科技重要成果学术会议论文选集 [C]. 北京:冶金工业出版社, 1996. 565 ~ 567
3 余晓宇,吴亚军,罗开平,等. 利用地震层速度和声波时差预测盖层封闭能力 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 155 ~ 159
4 邵新军,许响,吕中锋,等. 地层流体压力预测方法的讨论 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 100 ~ 102
5 魏茂安,陈潮,王延江,等. 地层孔隙压力预测新方法 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 396 ~ 400
6 Hunt J M, Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1 ~ 12

(编辑 高 岩)

(上接第 878 页)

11 姚姚,唐文榜. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 623 ~ 629
12 Yao Yao, Xi Xian. Reflected wavefield in random media: a review [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2004, 1(2): 147 ~ 152
13 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
14 吴永国,贺振华,黄德济. 串珠状溶洞模型介质波动方程正演与偏移 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 539 ~ 544
15 陈广坡,潘建国,管文胜,等. 碳酸盐岩岩溶型储层的地球物理响应特征分析 [J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(3): 43 ~ 46
16 何军,王奕. 模型正演技术在碳酸盐岩储层预测中的应用——以川东南地区茅口组为例 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2006,

19(2): 3 ~ 5
17 杜正聪,贺振华,黄德济. 缝洞储层地震波场数值模拟 [J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(2): 103 ~ 108
18 杜正聪,贺振华,黄德济,等. 缝洞模型波动方程正演与偏移 [J]. 成都理工大学学报, 2003, 30(4): 386 ~ 389
19 邬长武,龚福华,魏建新,等. 地震物理正演模拟在古岩溶储层研究中的应用 [J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(3): 74 ~ 76
20 孙东,张虎权,潘文庆,等. 塔中地区碳酸盐岩洞穴型储集层波动方程正演模拟 [J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 44 ~ 46
21 孙东,张虎权,王宏斌,等. 一体化研究方法在塔中地区碳酸盐岩储层预测中的应用 [J]. 海相油气地质, 2010, 15(1): 68 ~ 72

(编辑 张亚雄)