

普光地区上三叠统小塘子组泥岩分布地震预测

晋达

(中国石化中原油田物探研究院,河南 郑州 450046)

摘要:普光地区多井在雷口坡顶部气测显示较好,化验分析表明其上覆地层小塘子组发育优质烃源岩,因此,小塘子组作为重要的烃源层和盖层,其泥岩分布预测对普光地区雷口坡组顶部风化壳储层具有重要的意义。在明确小塘子组泥岩的岩石物理特征及测井响应特征的基础上,首先利用已钻井及三维地震资料,对泥岩进行精细井震标定、地质建模与正演模拟,明确小塘子组泥岩的地震反射特征;最终结合古地貌分析、属性分析等手段,确定泥岩发育的有利相带,并以此为基础,应用稀疏脉冲反演对泥岩厚度进行了定量预测,建立了一套适应于普光地区小塘子组泥岩的地震预测方法,预测了普光地区上三叠统小塘子组泥岩的分布,通过与已完钻井泥岩厚度的对比,证实了预测结果的可靠性。

关键词:普光地区;小塘子组;属性分析;地震反演;泥岩地震预测

中图分类号:P618

文献标识码:A

Prediction of mudstone distribution on top of middle Triassic Xiaotangzi formation in Puguang area

JIN Da

(Geophysical Exploration Research Institute, Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: Gas logging of multiple wells at the top of Leikoupo formation in Puguang area is better. The laboratory analysis shows that high quality source rocks are developed in Xiaotangzi formation of the overlying strata. Therefore, as an important hydrocarbon source layer and caprock, the mudstone distribution prediction of Xiaotangzi formation is of great significance to the top weathered crust reservoir of Leikoupo formation in Puguang area. On the basis of defining the petrophysical characteristics and logging response characteristics of mudstone in Xiaotangzi formation, the fine well-seismic calibration, geological modeling and forward modeling of mudstone were carried out by using the drilling and 3D seismic data, and the seismic reflection characteristics of mudstone in Xiaotangzi formation were clarified. Finally, combined with paleogeomorphology analysis, attribute analysis and other means, the favorable facies belt of mudstone development was determined. On this basis, the thickness of mudstone was quantitatively predicted by sparse pulse inversion, a set of seismic prediction method suitable for mudstone of Xiaotangzi formation in Puguang area was established, and the distribution of Upper Triassic was predicted. Then the comparison of mudstone thickness with that of completed drilling confirmed the reliability of the prediction results.

Key words: Puguang area, Xiaotangzi formation, attribute analysis, seismic inversion, mudstone prediction in seismic

普光气田行政上位于四川省达州市宣汉一达县,现今构造上处于川东高陡褶皱带、川北低平褶皱带、大巴山前缘推覆构造带交汇处。普光气田天然气总资源量 $8\ 916 \times 10^8 \text{ m}^3$,累积上报探明天然气地质储量 $4\ 121.73 \times 10^8 \text{ m}^3$,主力产气层为长兴组和飞仙关组,对雷口坡组关注较少。近年来,川西地区在雷口坡组顶部取得重大突破^[1-6],雷口坡组顶部的风化

壳岩溶储层成为勘探热点。测井解释结果表明,普光地区雷口坡顶部风化壳储层广泛发育,但气测显示较弱,该地区雷口坡组的勘探进程受到气源的限制。雷口坡组上覆的小塘子组泥岩较为发育,经化验分析认为是一套优质的烃源岩;同时,雷口坡组顶部有气测显示的区域均为小塘子组泥岩较发育的区域,认为小塘子组泥岩可能为雷口坡组提供气源。

收稿日期:2017-10-24。

作者简介:晋达(1986—),女,硕士,工程师,碳酸盐岩储层预测。通讯地址:河南省郑州市郑东新区祥盛街绿地原盛国际2号3单元,中国石化中原油田物探研究院,邮政编码:450046。E-mail:591467689@qq.com

因此,小塘子组泥岩的厚度及分布对雷口坡顶部风化壳储层的研究具有重要的作用。

泥岩往往具备较低的纵、横波速度,在地震剖面上响应特征较为明显。GISLAIN和GEORGE(2003)^[7]分析了泥岩和含气储层在纵横波速度比上的差异,并用综合使用纵波阻抗和纵横波速度比区分了泥岩和含气储层;陈学海等^[8](2011)利用地震属性技术预测了北乌斯秋尔特盆地侏罗系泥岩的分布;MORTEZA等^[9](2012)利用地震属性和SOM波形聚类对油气藏岩相进行了分类和识别,识别出高泥、中泥、中砂、高砂4类岩相。利用钻遇至雷口坡组的探井和地震资料,结合地震正演及精细合成记录,研究普光地区小塘子组泥岩的地球物理响应特征,并在古地貌约束下预测泥岩的分布范围。

1 地质特征

四川盆地位于上扬子地台西北被动大陆边缘,在中三叠世雷口坡沉积期主要发育碳酸盐岩镶边台地沉积体系。在中三叠世末期受印支运动的影响,四川盆地整体抬升,海水由北东至南西退出上扬子地台,雷口坡组遭受了大面积的风化剥蚀^[5]。进入卡尼期以后,在印支运动的持续影响下,四川盆地从海相碳酸盐岩沉积转变为陆相碎屑岩沉积。

在海陆转换的过程中,主要涉及4套地层:雷口坡组(海相)—马鞍塘组(残留海相)—小塘子组(海陆过渡相)—须家河组(陆相)。雷口坡组主要为一套海相沉积的碳酸盐岩,沉积相主要为局限台地相和开阔台地相;马鞍塘组为发育在川西的一套浅海陆棚相缓坡型台地相灰岩并夹有硅质海綿礁和鲕粒滩相灰岩(残留海相地层),小塘子组主要发育陆棚—滨岸相的泥页岩和砂岩等海陆过度相沉积,分布更广^[8]。

普光地区位于四川盆地东北角,中上三叠统由下至上分别为雷口坡组、小塘子组、须家河组,没有沉积马鞍塘组。小塘子组从下到上发育4个层段,在川西地区保存最全,从西向东沉积水体逐渐变浅,越往东越缺失下部层段,进入普光地区以后,下部3个层段都已缺失,只剩下顶部的那一套陆棚—滨岸过渡相的砂质泥页岩地层,地层厚度主要为2~40 m,北部厚,南部薄。经化验分析小塘子组发育优质烃源岩,其有机碳含量为2.51%~6.76%。经统计分

析认为,小塘子组泥岩发育的区域,雷口坡顶部气测显示较好,推测其上覆小塘子组泥岩作为烃源层对其进行供气。

2 泥岩预测方法

首先通过地震正演及精细合成记录明确小塘子组泥岩的地震响应特征,建立泥岩的地震识别模式;然后结合古地貌分析,利用波形聚类、最大波谷振幅等属性明确泥岩的宏观分布;最后在古地貌的约束下,运用波阻抗反演对小塘子组泥岩的分布进行了精细预测。在此基础上,总结出一套泥岩预测方法(图1)。

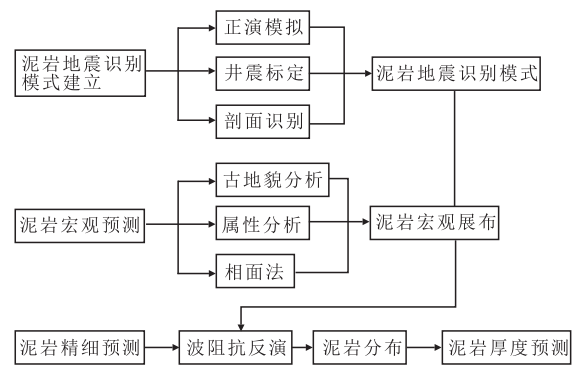


图1 预测方法流程

Fig. 1 Process of prediction measure

3 泥岩地球物理响应特征

3.1 测井响应特征

通过对普光工区内钻遇小塘子组46口探井进行分析,可知小塘子组主要发育有砂泥岩,且泥岩主要表现为高伽马、低电阻、低密度、高声波时差测井响应特征,伽马值一般在60~110 API,速度基本在4 500~5 200 m/s。通过对多口井统计分析得知普光地区小塘子组泥岩纵向变化的规律,当小塘子组泥岩较发育时,雷口坡顶部气显示较好;当上覆小塘子组泥岩不发育时,雷口坡顶部没有气显示。

3.2 地震响应特征分析

3.2.1 地震正演

普光地区小塘子组主要发育砂泥岩。为了明确泥岩地震反射特征,根据实钻井建立模拟泥岩横向

变化的地质模型,利用测井资料统计出速度与密度参数,开展正演模拟(图2)。从图中可以看出,当小塘子组泥岩发育的时候,其底部波谷变强,且与下覆地层形成的不整合面由波峰相位变为波峰与波谷的

零相位上;当小塘子组砂岩发育时,底部波谷变弱。正演结果表明,可以根据不整合面上部波谷的强弱来预测小塘子组泥岩的发育程度。

3.2.2 精细标定

由于雷口坡组为海相地层,而小塘子组为陆相沉积地层,从海相碳酸盐岩沉积到陆相碎屑岩沉积,岩性变化较明显,相应波阻抗差异就比较大。其地震响应特征表现比较明显,易于在地震上进行追踪识别,因此,利用普光地区已完钻井的声波、密度资料,制作合成记录,对雷口坡顶部不整合面上下地层的地震响应特征。

从tb1井合成记录(图3a)可以看出,当上部小塘子组泥岩不发育时,雷顶不整合面位于波峰上,且上

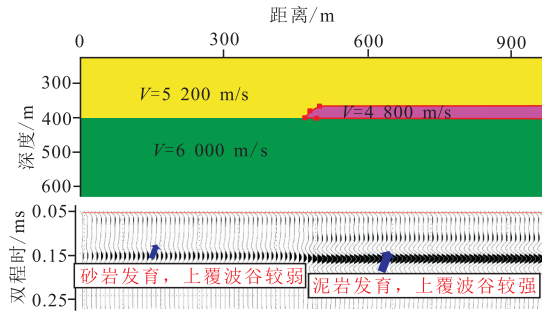
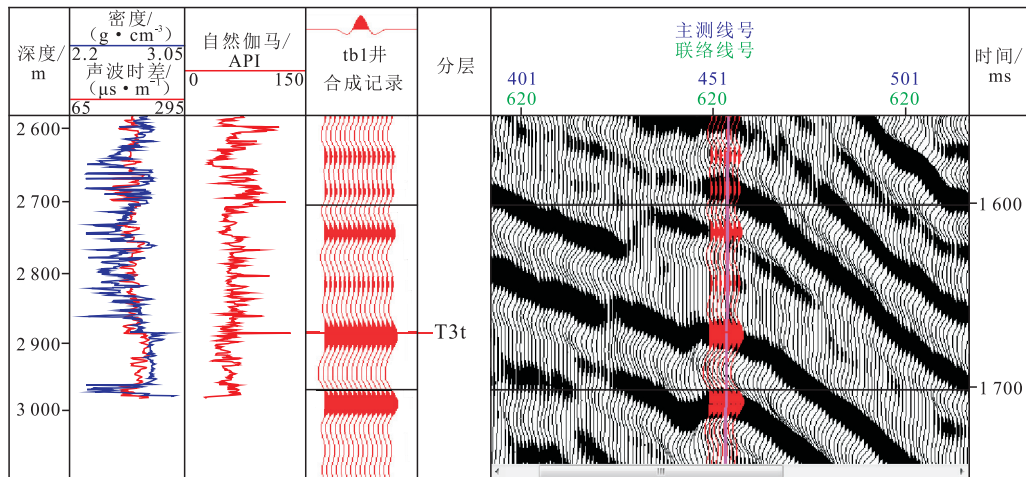
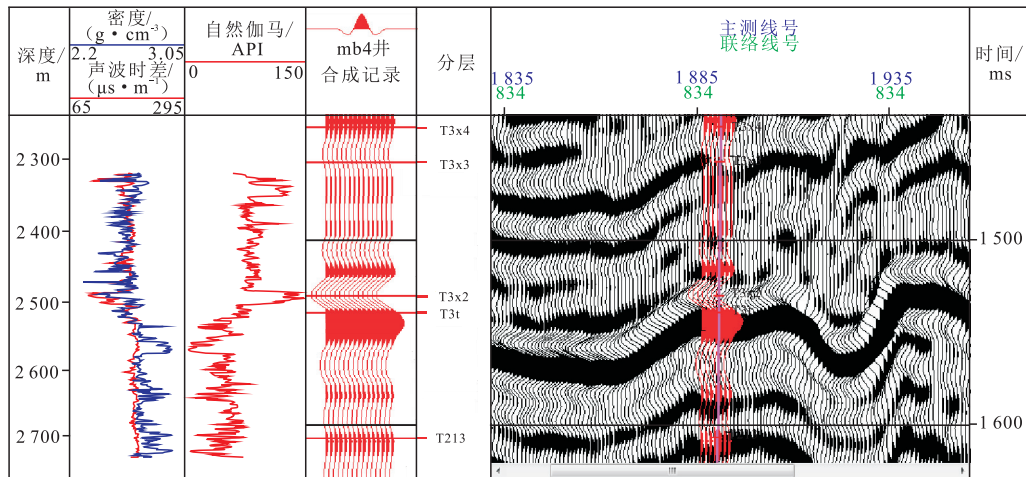


图2 泥岩发育地质模型和正演记录

Fig. 2 Geological model and forward record of developed mudstone



a.tb1井合成记录



b.mb4井合成记录

图3 泥岩地震响应特征

Fig. 3 Seismic response characteristics of mudstone

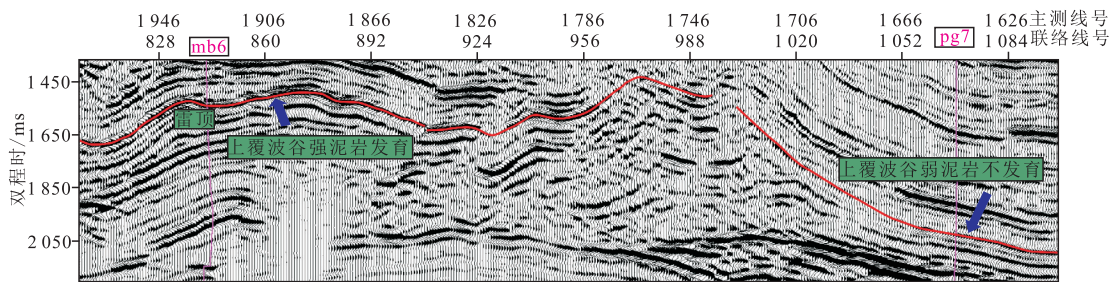


图4 过mb6-pg7井地震剖面
Fig. 4 Seismic profile of well mb6-pg7

覆波谷较弱;而当小塘子组泥岩发育时,从mb4井合成记录(图3b)可以看出,不整合面位于波峰与波谷的零相位上,且上覆波谷较强。之所以会出现这种地震相的变化,是因为当泥岩不发育的时候,不整合面上下波阻抗差异较大,直接由碎屑岩变化到碳酸盐,从而形成强波峰;而当不整合面之上发育泥岩时,由于泥岩表现为低阻抗,与上覆高阻抗砂岩会形成波谷,而与下覆碳酸盐岩又形成波峰,由于干涉效应,因此,不整合面会位于零相位,且小塘子组泥岩越发育,不整合面之上的波谷会越强。

在以上精细合成记录标定的基础上,明确了小塘子组泥岩发育的地震响应特征,即小塘子组泥岩发育时候,其上覆波谷较强,根据这种地震相,我们就可以采用“相面法”对小塘子组泥岩进行初步的定性识别。图4中,mb6井不整合面上覆波谷较强,表明其小塘子组泥岩较发育,而pg7井不整合面上覆波谷较弱,其小塘子组泥岩不发育,这与井上的分析相一致。

4 泥岩分布预测

4.1 古地貌分析

在中三叠世末期受印支运动的影响,四川盆地整体抬升,海水由北东至南西退出上扬子地台,导致了泸州—开江古隆起的进一步抬升剥蚀,靠近开江古隆起的普光工区为海侵期,以局限—蒸发台地沉积环境为主,到雷三段沉积期为全盆标志性大海侵,受区域地壳沉积和大规模海侵影响,普光地区的沉积格局由局限—蒸发台地演变为局限台地沉积。经历了近10 Ma暴露期,雷口坡顶部遭受不同程度的剥蚀,顶部发育大型不整合面与小塘子组呈不整合接触。因此,认为雷口坡组的残余厚度能够较为准确

地代表小塘子组沉积前古地貌。

通过对雷口坡组残余厚度(图5)进行计算,可以看出小塘子组沉积前古地貌特征表现为西边低,东边高,具有明显的分带特征,白线以西主要位于岩溶斜坡带,白线以东主要为岩溶高地,地层易遭受剥蚀;而泥岩往往发育在古地貌较低的地方。

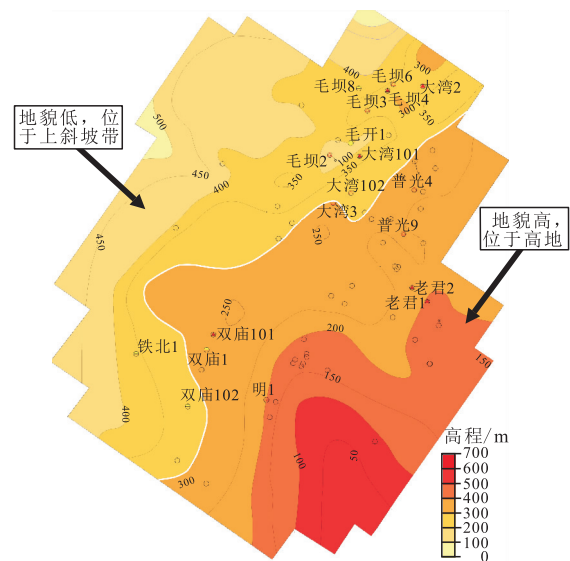


图5 普光地区小塘子组沉积前古地貌
Fig. 5 Pre-sedimentary paleogeomorphology of Xiaotangzi formation in Puguang area

4.2 地震属性分析

地震属性分析主要是在精细井震标定基础上,选取目的层段的时窗,提取地震波的振幅、波形、频率、相位、能量等参数的变化幅度及范围进行分析。由于地震属性具有多样性,因此,需要针对不同的研究目标筛选出敏感的地震属性参数,为后续的精确定量预测做准备^[11-15]。

通过泥岩地震响应特征及正演分析结果表明,

不整合面存在两种地震相,小塘子组泥岩发育时,不整合面位于零相位,且上覆波谷振幅较强;当小塘子组泥岩不发育的时候,不整合面位于波谷与波峰的零相位上,且上覆波谷振幅较弱。由此可知,小塘子组泥岩发育程度在振幅上具有相应的反映。根据这一特点,选取合适的时窗,提取层段内的均方根振幅平面图(图6a)。从振幅图中可以看到小塘子组泥岩主要分布在工区西部及北部,通过与古地貌对比,泥岩多发育在地貌较低的区域。图6b为提取的不整合面之上波形聚类,蓝色和宝蓝色代表的区域为泥岩发育的区域,与振幅属性可以很好地对应。

4.3 波阻抗反演

储层定量预测一般使用波阻抗反演,这是一种应用广泛的储层定量描述技术。通过对小塘子组砂泥岩进行岩石物理分析,可知泥岩表现为低阻抗特

征,以已完钻井位约束,针对小塘子组进行波阻抗稀疏脉冲反演。本次反演在pg、mb、dw、lj、sm、fsl地区各选取了1~2口探井参与波阻抗反演,其他井均作为后验井。结果表明,参与反演的mb4井的泥岩“低阻抗异常”得到了较好的验证(图7中箭头所指蓝色为泥岩发育的区域),pg7井作为后验井,其小塘子组波阻抗相对mb4井更高,泥岩不发育,与测井解释数据相符。总体来讲,反演结果与测井泥岩解释吻合度较高,分辨率亦得到一定程度的提高。

通过多口井岩石物理分析,在波阻抗反演的基础上,利用沉积相带约束,以 1.3×10^7 为波阻抗门限值计算小塘子组泥岩厚度(图8)。从图8可以看出普光工区小塘子组泥岩主要分布在毛坝、双庙、普光部分区域亦即古地貌较低的区域,其厚度最大为25 m左右(红色、黄色为泥岩较厚区域)。表1为普光地区部分探井小塘子组泥岩测井解释厚度,可以看出与图8的预测结果符合度较高。

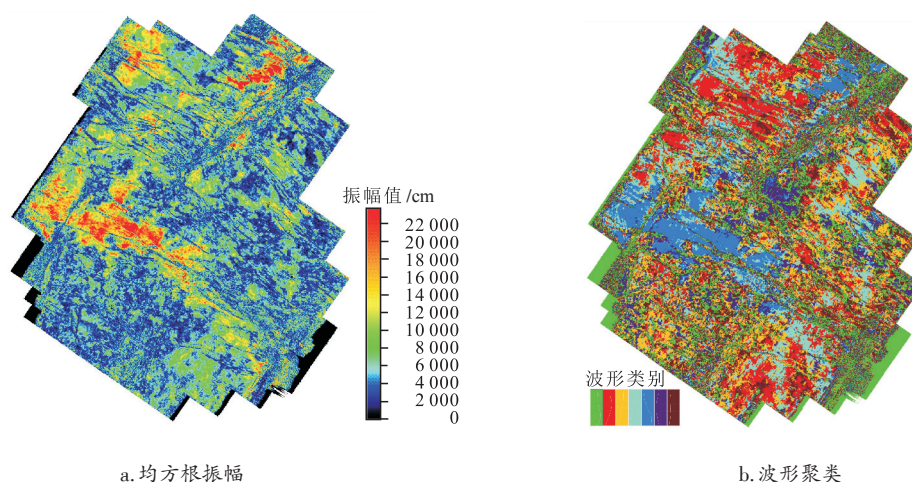


图6 普光地区小塘子组泥岩地震属性分析

Fig. 6 Seismic attribute analysis of mudstone of Xiaotangzi formation in Puguang area

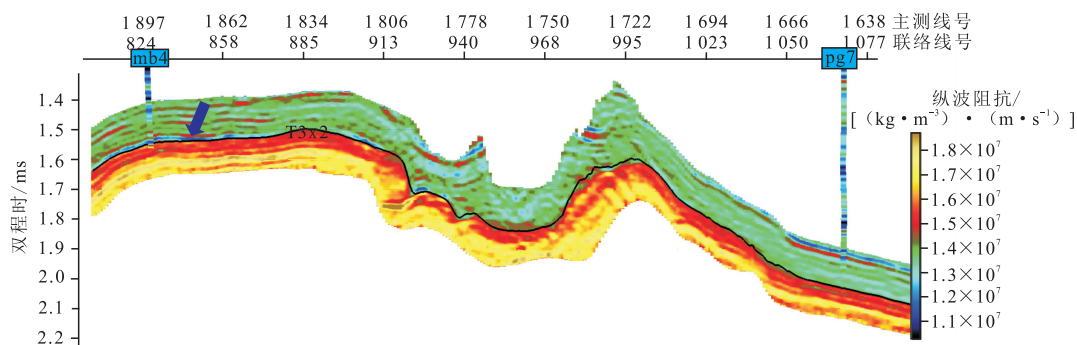


图7 过mb4-pg7井的波阻抗反演剖面

Fig. 7 Inversion profile of wave impedance of well mb4-pg7

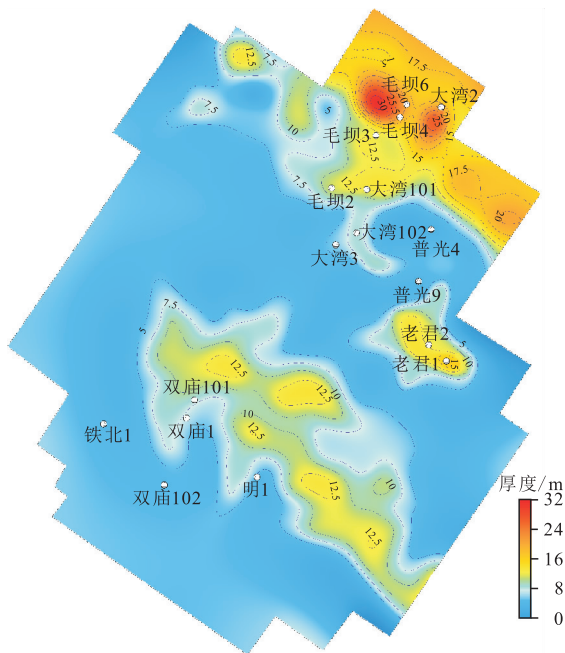


图8 普光地区小塘子组泥岩厚度
Fig. 8 Mudstone thickness of Xiaotangzi formation in Puguang area

表1 普光地区部分探井小塘子组泥岩测井解释厚度
Table 1 Log interpretation thickness of mudstone in Xiaotangzi formation of some exploratory well in Puguang area

井号	泥岩厚度/m	是否与预测结果相符
pg3	21	是
pg101	12	是
lj1	18	否
mb2	28	是
mb3	32	否
mb8	28	是
dw101	19	是
dw2	27	是

5 结论

1) 经过精细井震标定及正演模拟分析,不整合面存在两种地震相,这两种地震相反映了上覆地层小塘子组的发育程度,当小塘子组泥岩发育时,不整合面位于波峰与波谷之间的零相位,且泥岩越发育,上覆波谷振幅越强;当小塘子组泥岩不发育时,不整合面位于波峰上。

2) 在对泥岩地球物理响应特征分析的基础上,采用古地貌分析、属性分析等手段,确定泥岩发育的有利相带,并以此为基础,应用稀疏脉冲反演对泥岩

厚度进行定量预测,建立了一套泥岩的预测方法,预测了普光地区小塘子组泥岩的分布,小塘子组泥岩主要分布在双庙、毛坝、普光部分区域,且最大厚度为25 m左右。

参考文献

- [1] 钟怡江,陈洪德,林良彪,等. 川东北地区中三叠统雷口坡组四段古岩溶作用与储层分布[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2272-2280.
- [2] 甯濛,刘殊,龚文平. 川西坳陷三叠系雷口坡组顶部白云岩储层分布预测[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 30-37.
- [3] 杨光,石学文,黄东,等. 四川盆地龙岗气田雷四—三亚段风化壳气藏特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 17-24.
- [4] 许国明,宋晓波,冯霞,等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 8-14.
- [5] 宋晓波,王琼仙,隆轲,等. 川西地区中三叠统雷口坡组古岩溶储层特征及发育主控因素[J]. 海相油气地质, 2013, 18(2): 8-14.
- [6] 徐宝亮,臧殿光,李明杰,等. 岩溶储层综合预测技术在四川盆地Y地区的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(S1): 47-51.
- [7] MADIBA G B, MCMECHAN G A. Seismic impedance inversion and interpretation of a gas carbonate reservoir in the Alberta Foot-hills, western Canada[J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1460-1469.
- [8] 陈学海,卢双舫,薛海涛,等. 地震属性技术在北乌斯丘尔特盆地侏罗系泥岩预测中的应用[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(2): 67-71.
- [9] RAEESI M, MORADZADEH A. Classification and identification of hydrocarbon reservoir lithofacies and their heterogeneity using seismic attributes, logs data and artificial neural networks[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2012, 82-83(2): 151-165.
- [10] 施振生,赵正望,金惠,等. 四川盆地上三叠统小塘子组沉积特征及地质意义[J]. 古地理学报, 2012, 14(4): 477-486.
- [11] MATOS M C D. Unsupervised seismic facies analysis using wavelet transform and self-organizing maps[J]. Geophysics, 2007, 72(1): 9-12.
- [12] SARASWAT P, SEN M K. Artificial immune-based self-organizing maps for seismic-facies analysis[J]. Geophysics, 2012, 77(4): 45-53.
- [13] CHEN Q, SIDNEY S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring[J]. The Leading Edge, 1997, 16(5): 445-450.
- [14] 缪志伟,别静,季春辉. 川东北元坝地区飞仙关组二段鲕滩储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 329-337.
- [15] 刘国萍,游瑜春,冯琼,等. 元坝长兴组生物礁储层精细雕刻技术[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(3): 583-590.

(编辑 尹淑容)