

文章编号: 1673-8217(2019)06-0038-05

# 涪陵地区茅口组热液白云岩储层预测研究

曾臻<sup>1</sup>, 屈大鹏<sup>1</sup>, 李文成<sup>1</sup>, 肖伟<sup>1</sup>, 李铮<sup>2</sup>

(1. 中国石化勘探分公司, 四川成都 610041; 2. 中国石化河南油田分公司科技处, 河南南阳 473132)

**摘要:**近年来, 川东南涪陵地区茅口组热液白云岩储层获得勘探突破, 表明其巨大的勘探潜力, 但该区储层薄、非均质性强, 地震识别预测刻画难度大。基于热液白云岩储层发育主控因素认识, 首先开展了以基底断裂精细刻画、生屑滩相有利微相识别等为核心的宏观描述; 其次应用储层测井敏感参数优选及降维融合等定量预测技术, 实现“断控”及“相控”基础上的热液白云岩储层精细描述。结果表明, 热液白云岩储层由于其特殊的成因及控制因素, 主要发育于基底断裂附近的生屑滩有利沉积微相, 远离基底断裂有逐步减薄的趋势。

**关键词:**涪陵地区; 茅口组; 热液白云岩; 降维融合

**中图分类号:** TE112.222

**文献标识码:** A

## Prediction of hydrothermal dolomite reservoirs in Maokou formation in Fuling area

ZENG Zhen<sup>1</sup>, QU Dapeng<sup>1</sup>, LI Wencheng<sup>1</sup>, XIAO Wei<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>

(1. Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan, 610041, China;

2. Science and Technology Department, Henan Oilfield Company, SINOPEC, Nanyang, Henan 473132, China)

**Abstract:** In recent years, the exploration of the hydrothermal dolomite reservoir of the Maokou formation in the Fuling area of southeastern Sichuan province has obtained a huge exploration potential, but the reservoir is thin and heterogeneous, and it is difficult to identify and predict seismic data. Based on the understanding of the main controlling factors for the hydrothermal dolomite reservoir development, the macro-description centered on fine characterization of basement faults and identification of favorable microfacies of bioclastic beach facies is first carried out. Secondly, quantitative prediction techniques such as reservoir logging sensitivity parameter optimization and dimension reduction and fusion are applied to realize the detailed description of hydrothermal dolomite reservoirs based on "fault control" and "facies control". The results show that the hydrothermal dolomite reservoir is mainly developed in the favorable sedimentary microfacies of the bioclastic shoal near the basement fault due to its special genesis and controlling factors, and tends to thin away from the basement fault.

**Key words:** Fuling area; Maokou formation; hydrothermal dolomite; dimension reduction and fusion

川东南涪陵区块地理位置处于重庆市万县以南、涪陵以北、垫江以东、忠县以西的广大地区, 构造位置属于四川盆地川东高陡褶皱带万县复向斜与拔山寺向斜之间, 北西侧为云安厂-大天池高陡构造带, 南东向为高峰场-大池干高陡构造带。区块主体位于四川含油气盆地川东南、川东北、鄂西-渝东天然气高产富集区结合部, 是四川含油气盆地的重要组成部分。近期, 涪陵地区相继在台缘礁滩、致密碳酸盐岩、茅口组白云岩等勘探领域获得突破, 展示了良好的勘探前景。2015年, yx1井在涪陵南部钻遇茅口组热液白云岩储层, 酸化压裂后测试获

1110.00 m<sup>3</sup>/d 天然气流, 不产水, 证实热液白云岩新领域具有良好的勘探潜力; 2016年首口预探井——t16井钻遇茅口组热液白云岩储层 23.1 m, 酸化压裂后测试获 11.08 × 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/d 高产工业气流。t16井的突破, 成功实现了涪陵地区茅口组勘探由岩溶缝洞气藏向层状白云岩岩性气藏的转变。

收稿日期: 2019-07-16

作者简介: 曾臻, 工程师, 1986年生, 2008年毕业于长江大学勘查技术与工程专业, 现从事地震资料解释、储层预测等研究工作。

热液白云岩成因复杂, 储层普遍致密、非均质强、厚度薄、响应特征复杂, 常规预测方法效果差<sup>[1-2]</sup>。为了开展川东南涪陵地区茅口组的整体评价, 本次研究充分利用三维地震资料, 与钻测井资料结合, 开展研究区内储层的地质及地球物理特征研究, 建立储层地震响应特征识别模式; 结合已有地震资料的解释成果, 依据本区热液白云岩储层的展布特点, 初步形成利用宏观的基底断裂识别与地震相精细刻画落实储层发育区带的技术, 微观的叠前密度反演直接预测与叠后拟声波反演间接预测相结合, 来落实茅口组热液白云岩有利储层。

## 1 白云岩储层沉积相分析

茅口组晚期受峨眉地幔柱活动的强烈影响, 积水体变浅, 在川西及川东南地区发育浅滩沉积<sup>[3]</sup>。东吴运动的抬升, 川东南及川西地区遭暴露溶蚀, 有利于风化岩溶储层发育, 是岩溶储层发育有利区(岩溶斜坡+浅滩沉积)<sup>[4]</sup>。东吴运动早期或晚期的岩浆活动, 导致地幔深部的热液沿深大断裂向上运移<sup>[5]</sup>, 在向上运移的过程中将栖霞组-茅口组的高能滩相灰岩交代或将早期细粉晶白云岩重结晶, 形成了热液白云岩<sup>[6]</sup>。四川盆地茅口组为缓坡型碳酸盐岩台地相沉积。根据岩石类型及其组合特征、岩石颜色、沉积构造、古生物化石及其生态特征、测井曲线以及地震资料综合分析, 可识别出碳酸盐岩缓坡、斜坡及盆地等沉积相类型。近年的勘探研究分析表明, 川东南地区茅口组为热液白云岩储层发育有利区<sup>[7]</sup>。

## 2 白云岩储层地震相分析

利用研究区内 yx1 井和 tl6 井的合成记录精细标定与北部泰来地区 tl2 井的标定相结合, 确定了 8 个主要反射层。本区主要目的层地震反射信噪比较高、反射层次丰富、连续性好、地质现象清楚, 横向上能连续对比追踪, 并具有较好相似性。依据不同的地质层位具有的不同反射特征, 可以较好地识别大套地层层位。TP2 反射层地震剖面上表现为二三个强相位, 界面标定在第二个强相位, 为全区地震反射的主要标志层。研究表明, 热液白云岩作用一般发生在构造活动比较强烈的盆地。大量文献表明, 热液流体的大规模运移及由此引起的一系列地质作用都与断裂有关<sup>[8]</sup>, 并且与一些特殊的构造背景有一定

的相关性, 这些特殊的构造背景包括: ①伸展断层(断层的上盘); ②扭张断层(主要为深大走滑断层, 特别在释压断错处); ③上述各种断层(包括转换断层)的交汇处。因此, 精细刻画研究区基底断裂的分布, 对热液白云岩储层预测具有重要的意义<sup>[9]</sup>。

通过研究区及邻区过盆地 15# 基底断裂剖面综合分析看出, 基底断裂在地震剖面上具有以下特征: ①断点清晰, 断面直立, 断面两侧同相轴交叉或错断, 多见断点绕射; ②断层所经过之处, 断层两侧地层上隆; ③断裂向下贯穿基底, 向上消失于吴家坪组、长兴组中。利用地震时间切片、高精度相干及裂缝地震相属性结合地震资料, 精细落实基底断裂, 研究区处于走滑断裂带。

进行茅口组地震相分析, 是通过地震层序内部地震反射特征的分析, 目的在于结合地震相分析和区域地质资料进行沉积相带的精细划分, 指导精细储层预测<sup>[10]</sup>。本次采用非线性稀疏脉冲谱反演提高分辨率处理技术, 有效提高了研究区茅三段地震资料分辨率, 利用提高分辨率数据体和 Stratimagic 的波形分类技术, 根据层段内地震的振幅、频率、相位等属性对地震波进行分类, 茅口组波形特征变化较大, 通过比较划分了 7 类波形。

从涪陵地区平面地震相及沉积相平面图来看, 全区基本分为 4 大类, 第一类主要表现为茅三段波谷变宽, 表现为非对称特征, 茅三段底部波峰振幅强弱横向变化较快, 单井相揭示该类地震相对应中缓坡生屑滩相; 第二类主要表现为茅三段波谷振幅较弱, 具有对称特征, 茅三段底部波峰振幅较弱, 振幅强弱横向无明显变化, 单井相揭示该类地震相对应中缓坡滩间相; 第三类地震上主要表现为茅三段波谷较窄, 具有对称特征, 茅三段底部波峰较平滑, 振幅强弱横向无明显变化, 单井相揭示该类地震相对应中缓坡洼地相; 第四类主要表现为茅三段波谷较窄, 底部波峰较平滑, 振幅较强, 横向变化不明显, 单井相揭示该类地震相对应外缓坡相。

在单井地震相标定的基础上, 按照各类地震相特征, 利用常规地震剖面结合提高分辨率地震剖面, 在涪陵地区开展地震相追踪, 落实了涪陵地区茅三段地震相的展布, 结合单井相分析, 最终落实了涪陵地区茅三段沉积相分布, 其中生屑滩相为热液白云岩发育的有利相带(图 1)。

## 3 白云岩储层的地震属性分析

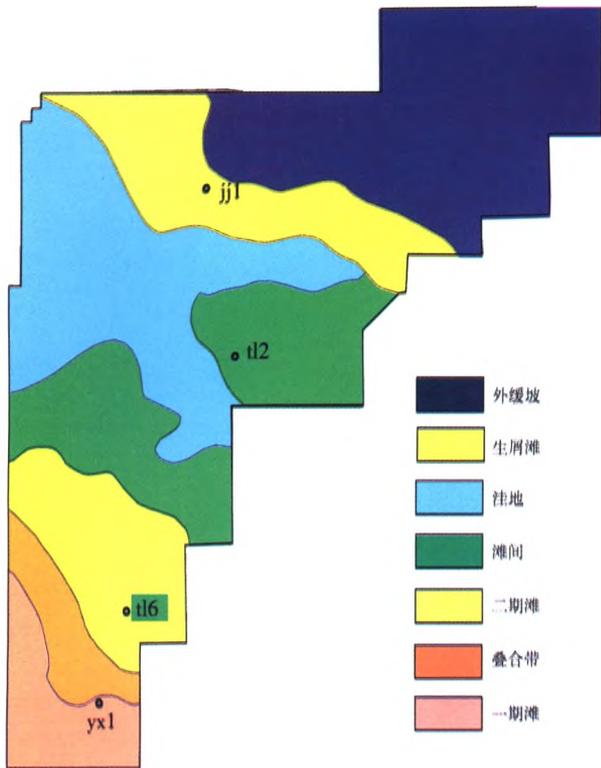


图1 涪陵地区茅三段沉积相平面分布

地震属性分析是目前最常用的储层预测和流体识别方法,结合研究区的实际情况,主要分析了振幅、能量、相位、频率等地震属性,开展研究区热液白云岩储层定性预测。

瞬时频率属性是复能量密度函数初始瞬间中心频率的一种能量,可以有效地反映出地层的岩性、含油气性的变化。从图2中可以清晰的看出,白云岩浅滩主要位于研究区中部位置,如图中青绿色的部分,周缘粉色区域为灰色灰岩,预测结果与实钻结果具有较高的吻合度。受构造运动的影响,白云岩浅滩遭暴露溶蚀,非均质性较强,与周缘致密的灰岩形成明显的差异,应用瞬时频率属性可以较好地刻画出白云岩储层的边界。

### 4 白云岩储层预测

利用钻井曲线资料,开展热液白云岩岩电特征分析,茅三段热液白云岩具有“一低四高”的岩电特征,即低自然伽马、高纵横波速度、高电阻率、高密度、高中子。白云岩和生屑灰岩、泥灰岩和灰岩在波阻抗上存在较大重叠,单纯依靠波阻抗反演无法识别热液白云岩及储层,但是密度曲线对白云岩比较敏感,直方图分析显示以密度阈值为2.726 g/cm<sup>3</sup>可以较好区分白云岩及其他岩性,在密度反演的基础上(图3),利用密度阈值大于2.726 g/cm<sup>3</sup>提取制

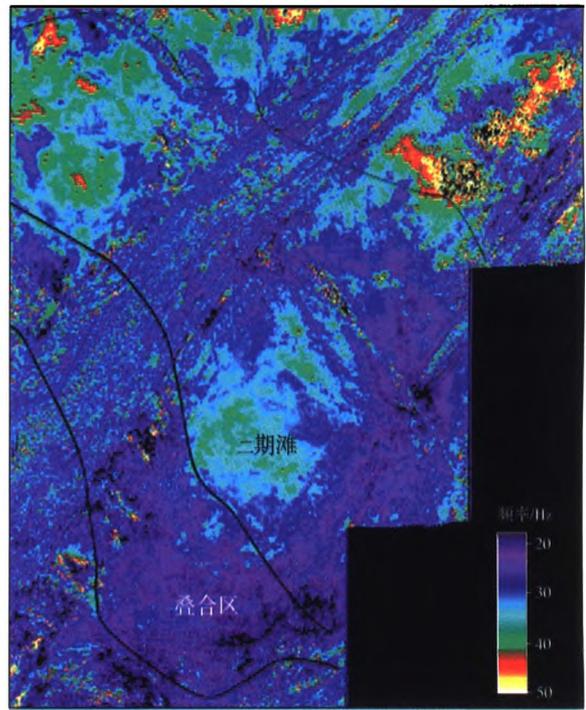


图2 涪陵地区茅三段瞬时频率

作茅三段热液白云岩分布平面图及热液白云岩厚度图,可以看出研究区茅三段热液白云岩厚度为0~37.5 m,厚度大于20.0 m的白云岩连片发育。

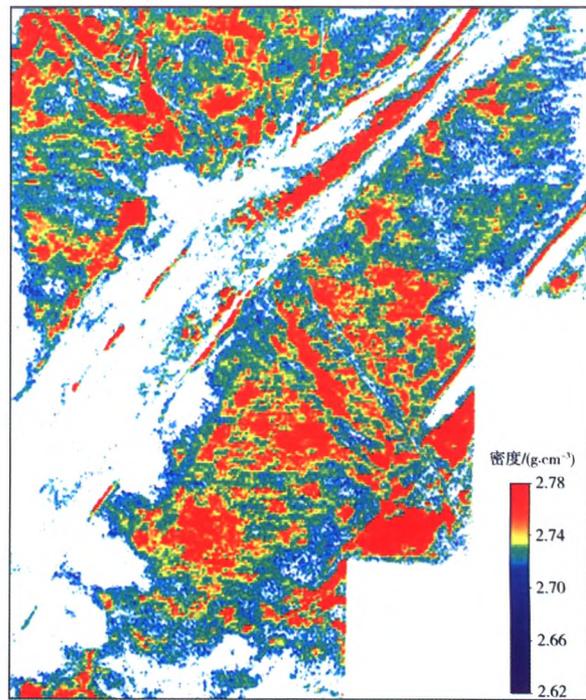


图3 茅三段密度反演分析

涪陵地区茅口组岩性复杂,单独应用密度作为门檻值可能造成高孔白云岩丢失和部分高密度灰岩混入。多参数自动降维技术<sup>[11]</sup>是利用编程的方式实现输弹性参数对以及参考曲线(岩性曲线等)输入,将弹性参数对曲线进行坐标旋转,从1°开始,分别计算每增加1°旋转后曲线与参考曲线的相关系数;

将弹性参数对曲线旋转获得的最大相关系数及旋转角度输出, 应用参数对及旋转角度计算新的储层识

别参数, 去除了人为因素的不确定性, 建立新的储层识别因子, 提高储层的预测精度(图4)。

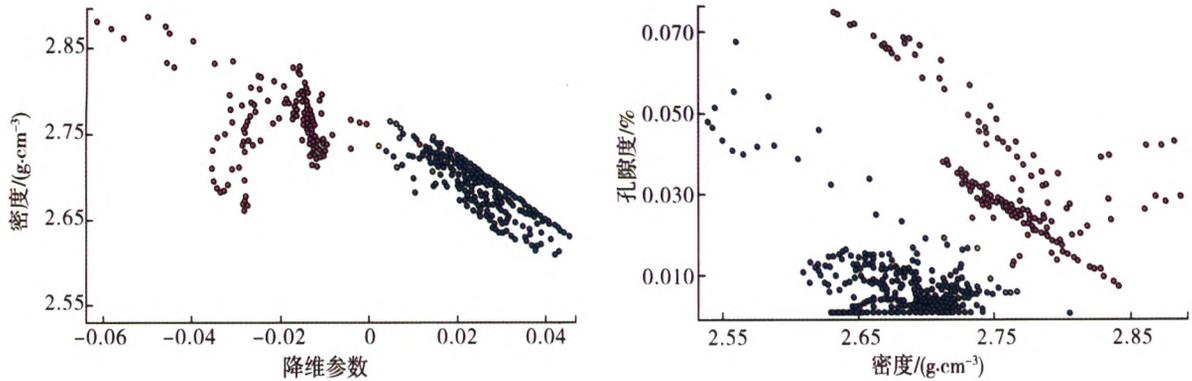


图4 降维前(左)和降维后(右)岩性-密度交会分析

利用孔隙度和密度两个参数进行降维, 将两个参数利用坐标旋转变成一个反映岩性的参数  $LI$ , 具体转化公式为:

$$LI = -0.264256RHOB - 0.964452 \times POR + 0.741581 \quad (1)$$

式中:  $LI$  为岩性降维参数, 无量纲;  $POR$  为孔隙度, %;  $RHOB$  为密度,  $g/cm^3$ 。应用多参数降维反演, 开展白云岩的预测识别, 从图5中可以看出, 热液白云岩的发育受构造控制较为明显, 以近北东向为主, 以苟家场高陡断裂带为界, 热液白云岩发育分为南北两个区域; 以基底断裂为界, 又可将热液白云岩分为东西两个区域, 如图中红色、黄绿色的区域, 受溶蚀和热液的改造, 其内部非均质性较强, 局部发育厚层白云岩储层。

川中-川东地区在茅三段发育一套厚度为20.0~30.0m白云岩、硅质白云岩储层。纵向上发育有2套热液白云岩, 主要集中在茅三段中下部, 平面上主要沿15#基底断裂分布, 其平面展布与基底断裂的北西走向一致, 白云岩储层受基底断裂影响, 呈北西向展布, 区域上呈连续稳定层状分布。为加强茅口组白云岩展布精细研究, 在储层精细预测的基础上, 结合基底断裂、地震相等有利因素, 在涪陵地区南部地区茅三段识别了高安、中丰场两个岩性圈闭, 厚度为15.0~20.0m(图6), 圈闭边界清晰可靠<sup>[12-13]</sup>。

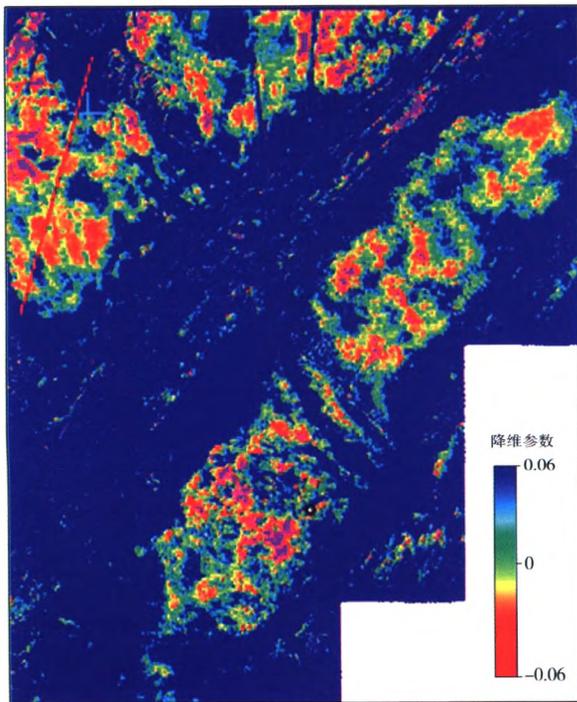


图5 多参数降维预测白云岩平面分布

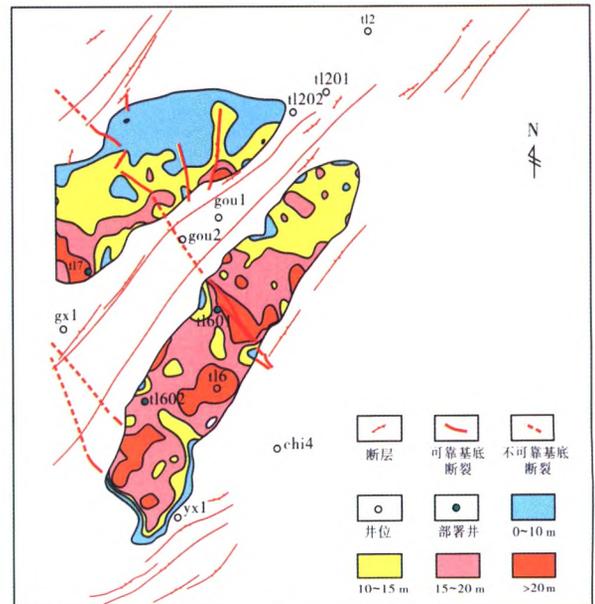


图6 涪陵地区茅口组热液白云岩预测厚度

## 5 结论

(1) 通过热液白云岩响应模式和地震相分析建立了4种沉积相地震识别模式, 中缓坡生屑滩相

表现为连续中强波峰反射特征，滩间相为宽波谷反射、茅三段底界波峰振幅较弱，中缓坡洼地相表现为波谷振幅强、茅三段底部波峰中强连续反射特征，外缓坡相表现为茅三段底部波峰能量较强，波峰横向较为平滑。

(2) 基底断裂在地震剖面上具有断点清晰，断面直立，断面两侧同相轴交叉或错断，多见断点绕射，断层所经过之处，断层两侧地层上隆，断裂向下贯穿基底，向上消失于吴家坪组、长兴组中。

(3) 多参数自动降维技术将弹性参数对曲线旋转获得的最大相关系数及旋转角度输出，应用参数对及旋转角度计算新的储层识别参数，去除了人为因素的不确定性，可以建立新的储层识别因子，提高储层的预测精度。

### 参考文献

[1] 韩小俊. 川东南地区复杂储层识别及预测方法研究及应用[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2007.  
 [2] 李毅, 沈浩, 石学文, 等. 川东-川中地区茅口组白云岩成因初探及“热次盆”概念的提出[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(4): 1-5.  
 [3] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中-粗晶白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 503-510.

[4] 李祖兵, 欧加强, 陈轩, 等. 川中地区下二叠统白云岩储层特征及发育主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(4): 1-8.  
 [5] 肖树芳. 岩石力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 68-70.  
 [6] 汪华, 沈浩, 黄东, 等. 四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 25-32.  
 [7] 杨光, 汪华, 沈浩. 等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 10-16.  
 [8] 汲生珍, 邬兴威, 夏东领, 等. 地震相裂缝分级技术在储层预测中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 71-77.  
 [9] 王丹, 贾跃玮, 魏水建, 等. 新场须四段叠后裂缝综合预测[J]. 物探与化探, 2014, 38(5): 1038-1044.  
 [10] 刘癸. 地震相分析在深反射地震勘探资料中的应用[J]. 地质力学学报, 2005, 11(2): 129-131  
 [11] 陈祖庆, 王静波. 基于压缩感知的稀疏脉冲反射系数谱反演方法研究[J]. 石油物探, 2015, 54(4): 459-466.  
 [12] 王长城. 川东南地区复杂储层地质特征及有效储层预测研究[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2006.  
 [13] 陈从希, 黄江河, 黄明华, 等. 提高春光探区地震资料信噪比和分辨率方法研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(6): 56-58.

编辑: 蒲洪果

(上接第 37 页)

岩敏感属性。相对于常规地震属性，敏感属性生物灰岩预测精度平均提高 35.15%，结合波阻抗反演平面分布特征预测生物灰岩厚度呈南厚北薄，西厚东薄的特征。最后进行地震正演模拟检验建立的地质模型，建立的斜坡正演模型和复合型正演模型与实际地震剖面吻合度较高。

### 参考文献

[1] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 346-354.  
 [2] CHARLES R, WILLIAMSON M, DANE PICARD. Petrology of carbonate rocks of the green river formation (Eocene) [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1974, 44(3): 738-759.

[3] 徐换霞, 韩军风. 地震属性技术在小断层解释中的应用[J]. 陕西煤炭, 2011, 3(5): 117-119.  
 [4] 贺懿. 地震储层参数非线性反演与预测方法研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2008.  
 [5] 唐小彪. 基于支持向量机的地震储层预测方法研究[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2009.  
 [6] 魏勇明. 川东南区块阳新统碳酸盐岩储层裂缝地震预测[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2009.  
 [7] 王文涛. 地震储层评价与预测的贝叶斯反演方法研究[D]. 湖北武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.  
 [8] 曾德铭, 赵敏, 石新, 等. 黄骅拗陷古近系沙一段下部湖相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 新疆地质, 2010, 28(2): 186-190.  
 [9] 刘志峰, 金振奎, 吕玉珍, 等. 黄骅拗陷古近系沙河街组生物灰岩分布特征及其形成条件[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(3): 71-75.

编辑: 赵川喜