

# Karst Reservoir Seismic Identification and Prediction

## —Take Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo Formation for Example

Yuping Li, Dapeng Qu, Mingfei Wang

Research Institute of Exploration, Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan  
Email: [mingfei.w@foxmail.com](mailto:mingfei.w@foxmail.com)

Received: Jul. 6<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jul. 18<sup>th</sup>, 2015; published: Jul. 24<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

### Abstract

Based on Indosinian movement, there deposited karst reservoir in Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo Formation. Via seismic study, the karst reservoir's seismic characteristics were determined, which were of low seismic energy and multi-wave reflection. According to geology and seismic reflection characteristic study, the seismic prediction method on karst reservoirs was developed. It concluded that seismic wavelets decomposition and reconstruction technology could recognize the karst reservoir; coherent weight energy variation attribute could predict the area of dolomite reservoirs; seismic cube curvature could illustrate the karst reservoir area. There were five weathering crust zones predicted, which provided objective basement data for exploration of Leikoupo formation.

### Keywords

Karst Reservoir, Seismic Wavelets Decomposition and Reconstruction, Coherent Weight Energy Variation Attribute, Seismic Cube Curvature, Leikoupo Formation, Yuanba

---

# 岩溶缝洞储层地震识别及预测

## —以元坝地区雷四<sup>2</sup>亚段为例

李宇平, 屈大鹏, 王明飞

中石化勘探分公司研究院, 四川 成都  
Email: [mingfei.w@foxmail.com](mailto:mingfei.w@foxmail.com)

收稿日期：2015年7月6日；录用日期：2015年7月18日；发布日期：2015年7月24日

## 摘要

受印支运动影响，元坝地区雷四II亚段发育古岩溶风化壳白云岩储层，通过地震响应特征分析，明确雷四II亚段岩溶缝洞储层发育的地震响应特征为：须家河组底界面地震同相轴能量变弱，出现复波。针对岩溶缝洞储层发育特点及地震响应特征，开展了岩溶缝洞储层识别及检测的地球物理方法研究。明确多子波分解与重构技术能够识别岩溶缝洞储层的地震响应特征；相干加权能量变化属性能够有效反映雷四II亚段白云岩储层分布范围；体曲率技术能够刻画岩溶缝洞储层分布范围，并预测元坝地区雷四II亚段可能存在5个岩溶缝洞发育群，预测结果为元坝地区雷口坡组勘探提供了基础材料。

## 关键词

岩溶缝洞储层，多子波分解与重构，相干加权能量变化，体曲率，雷四II亚段，元坝

## 1. 引言

目前，在四川盆地雷口坡组已经探明了川中磨溪气田、川东卧龙河气田、川西中坝气田等，产层主要集中在雷一段和雷三段。随着勘探程度的不断深入，元坝、龙岗等地区多口井在雷四II亚段风化壳储层内获得工业气流，使得印支期雷四II段古岩溶风化壳储层越来越受到关注[1]-[3]。但是由于雷四II亚段岩溶时间短、溶洞规模小，受印支期岩性不整合界面控制[4] [5]，地震资料分辨率低，储层识别和预测难度大。本次通过井震结合研究，首先分析雷四II亚段岩溶缝洞储层发育的地震响应特征；然后，针对岩溶缝洞储层的地震响应特点，开展了地球物理检测技术研究，采用了相干加权能量变化属性，边缘检测以及体曲率等技术，开展岩溶区带刻画、有利储层特征识别及裂缝预测等工作。

## 2. 沉积特征

根据本区雷四段储层地质模式(图1)及地质认识，古地貌控制了岩溶储层的发育与分布，岩溶洼地顶部白云岩储层剥蚀严重，且次生灰岩含量较高，储层不发育；而坡地及残丘地貌，地下水流动性强，不易产生次生矿物，储层较好。

## 3. 地震识别及预测

目前，国内对岩溶缝洞储层刻画比较成功的是塔河油田奥陶系地层，所采用的主要技术方法系列包括精细成像、地震振幅变化率、地震反射特征、本征值精细相干、趋势面差异分析、波形分析、三维可视化、地震测井联合反演等技术[6] [7]。优选了以地震反射特征分析为核心的振幅变化率、趋势面差异分析、本征值精细相干多参数的井位优选技术。通过井震资料综合分析发现，无论从发育规模和厚度上，雷四II亚段岩溶缝洞储层都比塔河油田奥陶系的要小，即由于雷口坡组岩溶时间很短，溶洞发育规模小，给储层的地震识别和预测带来巨大挑战。

为了有效精细的刻画雷四II亚段岩溶缝洞储层分布范围，本次优选地震横向变化类属性检测地质体及断裂边界，其中相干加权能力变化检测白云岩储层发育区，边缘检测刻画断裂边界；优选地震高级几何属性，主要采取本征值相干和体曲率属性刻画岩溶缝洞发育群。

### 3.1. 地球物理响应特征

通过对元坝4井雷四II亚段井震标定发现，元坝4井雷四II亚段发育风化壳岩溶缝洞白云岩储层，

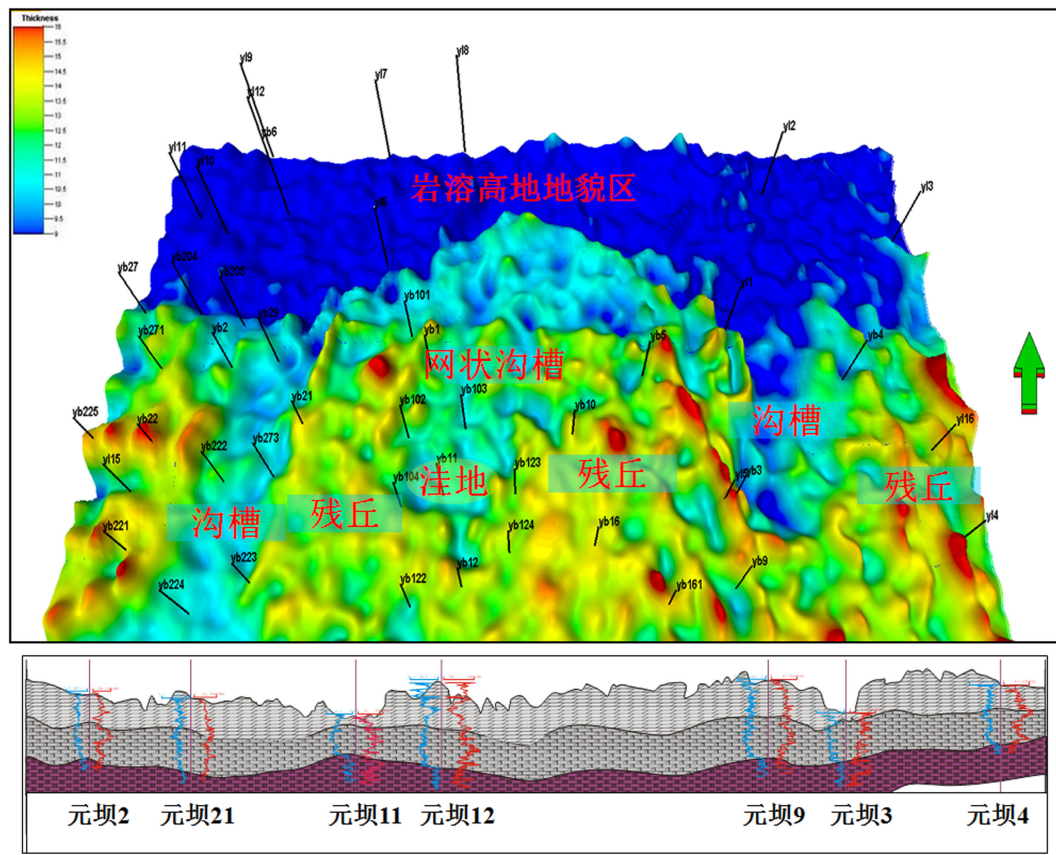


Figure 1. Development model of karst reservoir Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo formation at Yuanba  
 图 1. 元坝地区雷四 II 亚段岩溶发育模式

地震剖面上表现为须家河组底部地震同相轴( $T_3x^1$ )横向上能量变弱, 出现复波的特征(图 2)。在明确这种地震反射特征的基础上, 开展了岩溶缝洞储层检测的地球物理方法讨论。

由于雷口坡组岩溶时间很短, 溶洞规模很小, 储层位于岩性不整合界面之下, 地震反射表现为连续, 强相位波峰特征, 受地震资料分辨率限制, 在地震剖面上很难识别出岩溶缝洞反射特征, 给储层的地震识别和预测带来巨大挑战。

针对此类不整合界面强干扰问题, 采用多子波分解与重构的方法, 对地震波进行分解和重构, 构建反映岩溶缝洞储层发育特征的地震剖面, 达到有效识别岩溶缝洞储层的目的。多子波地震道分解技术突破了许多常规的地震信号处理和解释中单一地震子波假设, 它可以将一个地震道分解成多个不同的形状, 不同主频率的地震子波。在多子波分解的基础上, 采用线性相似地震波形状的分解与合成的方法, 把输入地震数据段分解成若干分量, 第一分量的波形代表在所有输入的地震数据段中具有最大共性, 最大能量的波形; 第二分量则是去掉第一分量后的地震数据段中具有最大共性, 最大能量波形; 第三分量则是去掉第一和第二分量后的地震数据段中具有最大共性, 最大能量波形, 依次类推。

在元坝地区, 通过寻找与储层响应密切相关的子波频率段, 重构新的地震剖面, 剔除不整合界面的影响[8]-[10](图 3), 突出储层横向上的变化特征。

从剖面及平面的结果来看, 多子波分解与重构技术消除强波阻抗界面影响, 突出储层横向细微变化特征, 即有利储层表现为“上强下弱”的响应特征, 非有利储层变现为“上强下强”的响应特征, 其结果与现有井的测试结果非常吻合, 获得工业气流井元坝 2 井分布在有利区域内, 测试干层井元坝 11 井,

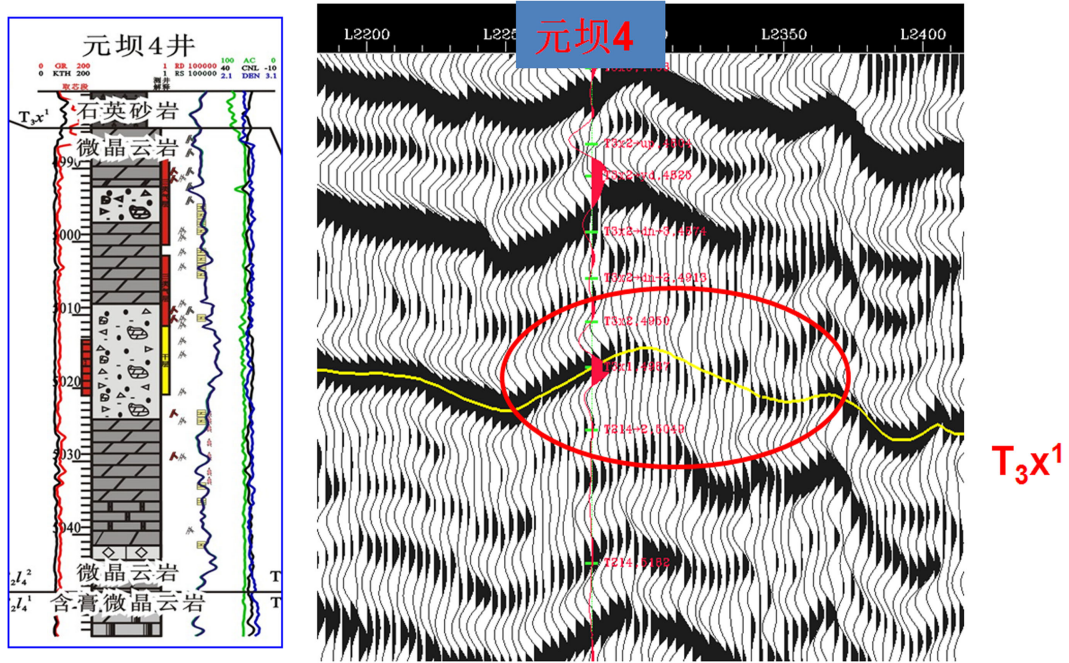


Figure 2. Seismic character of well Yuanba 4's karst reservoir Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo formation  
图 2. 元坝 4 井雷四 II 亚段风化壳岩溶缝洞白云岩储层地震响应特征

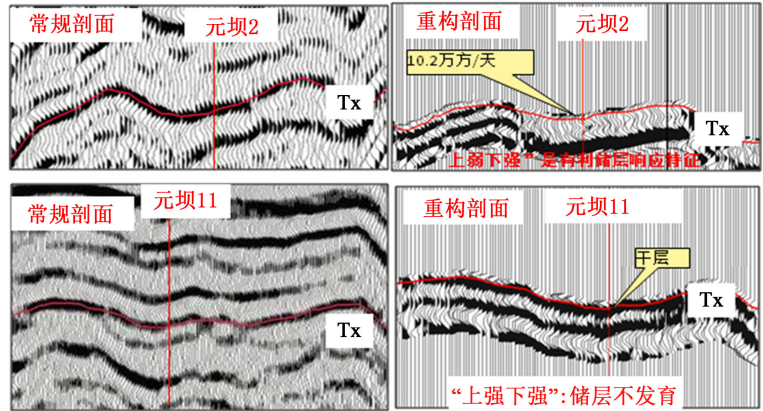


Figure 3. Seismic wavelets decomposition and reconstruction profile comparison with the original  
图 3. 元坝地区雷四 II 亚段原始地震剖面与重构剖面对比

位于非有利区域内。

### 3.2. 岩溶缝洞储层预测

#### 3.2.1. 地震横向变化类属性检测地质体及断裂边界

地震横向变化类属性包括 Sobel 边缘检测，相似性横向变化，谱信息横向变化，相干加权谱能量变化及振幅曲率等。其中 Sobel 边缘检测和相似性横向变化结果相似，可以有效检测目的层段断裂系统发育特征，检测结果表明，研究区雷四 II 亚段主要发育近南北向，北北西向断裂(图 4)。

相干加权能力变化属性，是在分析地震谱能量的变化过程中，用相干对空间变化进行加权。使谱信息预测结果边界更清晰。通过相干加权能量变化属性与波阻抗反演联合研究表明，属性图高亮部分对应

白云岩发育区，与钻井结果吻合度较高，说明相干加权能量变化属性能够有效的检测雷四 II 亚段白云岩的分布范围(图 5)。

综上所述研究表明，地震横向变化类属性对雷四 II 亚段风化壳白云岩储层响应敏感，应用相干加权能量变化属性可以有效检测风化壳白云岩发育区，边缘检测及相似性变化属性可以对研究区断裂系统进行有效刻画，但是对岩溶缝洞发育区检测精度不高。

### 3.2.2. 地震几何属性刻画岩溶缝洞发育群

地震几何属性在断裂、裂缝识别，地质体边界预测方面发挥了重要的作用。第一代地震几何属性出现在 1995 年，当时的几何属性利用三个地震道，在单位时窗内，进行倾角扫描，选择相似性最大的作为相干值。三道相干不仅精度低，而且不能得到地震同相轴的倾角方位角等信息。1997 年出现第二代地震几何属性，第二代几何属性计算的是多道相干，利用一个椭圆面在空间进行扫描，扫描过程中，通过协

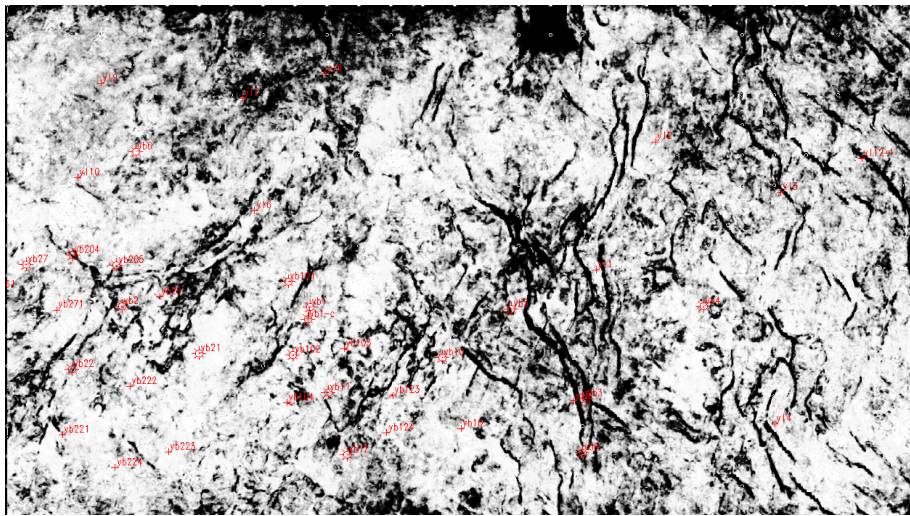


Figure 4. Seismic reflection variation attribute map of Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo Formation  
图 4. 雷四 II 亚段地震横向变化类属性图

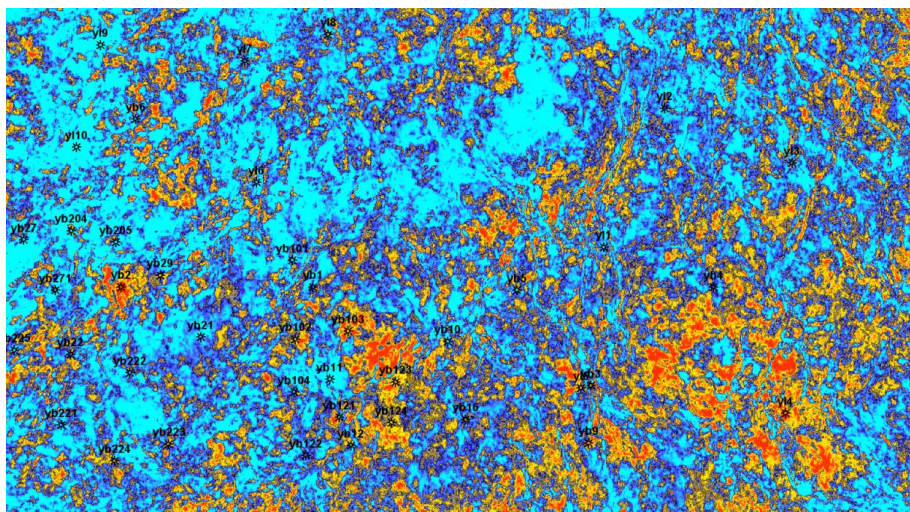


Figure 5. Seismic coherent weight energy variation attribute map of Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo Formation  
图 5. 雷四 II 亚段地震相干加权平均属性图

方差计算椭圆面内地震道的相干。第二代几何属性不但能得到相干还能得到倾角、方位角等重要信息。1999年出现的第三代通过计算协方差矩阵的特征值来计算相干，又称作本征值相干。本征值相干很好解决了相干的计算问题，相干计算的精度高，而且缩短时窗。但本征相干仍然没有很好解决倾角、方位角计算问题，得到的倾角方位角比较粗糙，丢掉了很多细节[11]。

为了精确计算相干，新一代几何属性采用优化算法进行倾角方位角扫描，不再依赖一个平面，而是采用优化方法，得到地震同相轴的曲面，该算法很好保留了地震同相轴的细节。基于这种地震数据体扫描方法和原理，计算得到的相干和曲率，具有高分辨率的特点，本次采用优化算法，得到本征值相干属性和曲率体属性，对研究区断裂系统和岩溶缝洞发育区进行精细刻画(图6)。

本征相干算法是一种优秀的、也是一种较常用，并被大家认可的一种几何属性算法，采用优化算法，得到的本征值相干剖面，地震数据同相轴扭曲、不连续及能量不均匀的地方反映清晰，提高了对地质异常的检测精度。

在全区，采用第四代几何属性算法，即基于全局寻优的空间扫描算法，进行地震数据体曲率属性运算，通过体曲率地震剖面与本征值相干剖面对比分析，体曲率属性对地震剖面断层刻画更加精细，yb4井发育岩溶缝洞储层，最大曲率剖面异常特征更加明显(图7)。

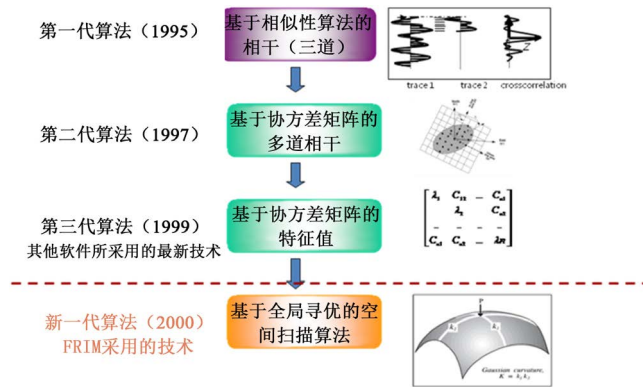


Figure 6. Development of seismic geometry attribute  
图6. 地震几何属性发展历程

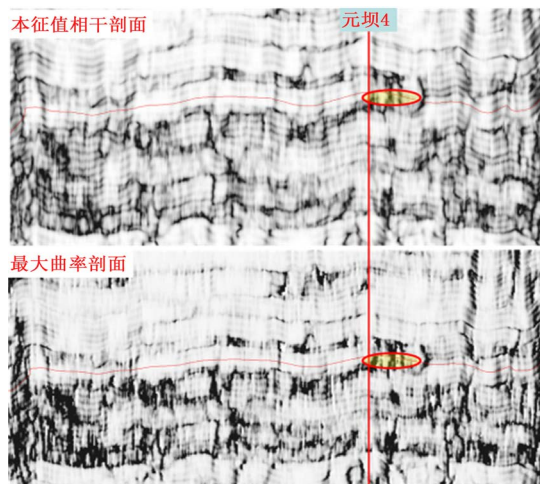


Figure 7. Comparison of seismic coherent profile and seismic curvature profile  
图7. 最大曲率剖面与本征值相干剖面对比

通过与已知钻遇岩溶缝洞储层井元坝 4 井平面剖面对比分析，可以发现，在地震剖面上，地震同相轴能量变弱，出现复波，在平面上呈圆弧形特征，具有典型的岩溶缝洞外形(图 8)。

元坝 2 井区与元坝 4 井在地震剖面与曲率平面中都有相似的特征，同时在相邻区域，发现元坝 22 井区，元坝 21 井以西区域，以及元坝 12 井区呈现类似圆弧形发育异常区(图 9)。

综上所述表明，最大体曲率属性能够有效检测岩溶缝洞分布范围，依据井震平剖综合分析，结合岩溶缝洞发育特征，推测元坝地区雷四 II 亚段可能存在 5 个岩溶缝洞发育群(图 10)。

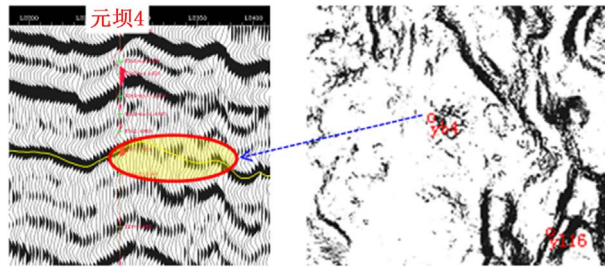


Figure 8. Seismic character of well Yuanba 4 area's karst reservoir

图 8. 元坝 4 井区岩溶缝洞储层地震平剖特征

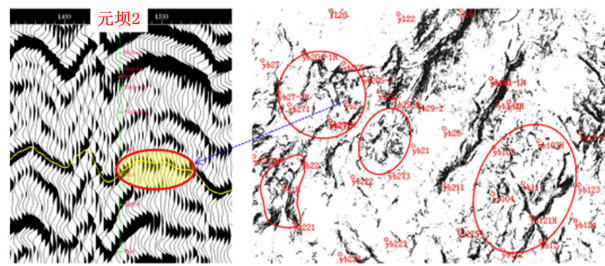


Figure 9. Seismic character of well Yuanba 2 area's karst reservoir

图 9. 元坝 2 井取岩溶缝洞储层地震平剖特征

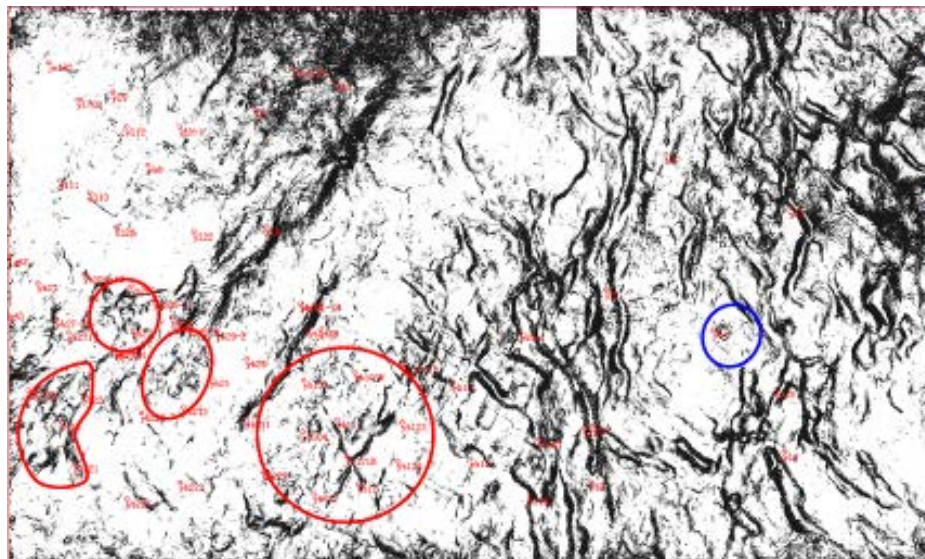


Figure 10. karst reservoir zone comprehensive prediction of Lei4<sup>2</sup> of Leikoupo formation

图 10. 雷四 II 亚段岩溶缝洞发育群综合预测

## 4. 结论

- (1) 通过多子波分解与重构及常规地震剖面分析, 元坝地区雷四 II 亚段岩溶缝洞发育区, 须家河组底界地震同相轴能量变弱, 呈复波反射, 波峰横向具有“强-弱-强”(两强夹一弱)变化特点;
- (2) 地震横向变化类属性能清晰刻画研究区断裂发育区, 并定性预测风化壳白云岩发育范围;
- (3) 井震联合研究表明, 地震高级几何属性能有效检测可能存在的岩溶缝洞发育群, 并预测研究区发育 5 个岩溶缝洞群。

## 参考文献 (References)

- [1] 秦川, 刘树根, 张长俊, 等 (2009) 四川盆地中南部雷口坡组碳酸盐岩成岩作用与空隙演化. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, **36**, 276-281.
- [2] 王宝清, 张金亮 (2009) 古岩溶的形成条件及其特征. *西安石油学院学报*, **1**, 8-10.
- [3] 曾德铭, 王兴志, 张帆, 等 (2007) 四川盆地西北部中三叠统雷口坡组储层研究. *古地理学报*, **9**, 253-266.
- [4] 沈安江, 周进高, 辛勇光, 等 (2008) 四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因. *海相油气地质*, **13**, 19-28.
- [5] 范志伟 (2008) 元坝地区雷口坡组风化壳储层的形成演化. *天然气技术*, **4**, 8-10.
- [6] 李宗杰 (2008) 塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层模型与预测技术研究. 硕士论文, 成都理工大学, 成都.
- [7] 叶勇 (2008) 碳酸盐岩缝洞型储层预测技术及在塔河油田南部的应用研究. 硕士论文, 中国地质大学, 武汉.
- [8] 王西文, 刘全新, 高静怀, 等 (2001) 地震资料在小波域的分频处理与重构. *石油地球物理勘探*, **36**, 78-85.
- [9] Ricker, N.H. (1953) The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophysics*, **18**, 10-40.  
<http://dx.doi.org/10.1190/1.1437843>
- [10] An, P. (2006) Application of multi-wavelet seismic trace decomposition and reconstruction to seismic data interpretation and reservoir characterization. 2006 *SEG Annual Meeting*, New Orleans, 1-6 October 2006, 973-976.
- [11] 王伟 (2008) 地震几何属性识别断层技术研究及应用. 硕士论文, 中国石油大学, 青岛.