

文章编号: 1000-0747(2017)06-0907-12 DOI: 10.11698/PED.2017.06.08

基于坡度属性的生物礁边界精细预测方法 ——以四川盆地罗顶寨地区二叠系长兴组为例

吴勇¹, 周路^{1,2}, 钟斐艳³, 钟克修⁴, 袁兵⁵, 周洁玲¹

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500; 2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500; 3. 西南石油大学电气信息学院, 成都 610500; 4. 中国石油西南油气田公司川东北气矿, 四川达州 635000; 5. 中国石油川庆钻探工程公司地球物理勘探公司, 成都 610213)

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“四川盆地东部多重滑脱构造变形系统及其控油气作用”(41430316)

摘要: 基于地貌学中的坡度理论, 将坡度作为一种面属性, 并结合古地貌分析方法, 建立一种利用地震构造精细解释层位数据进行高精度坡度属性计算的台缘型生物礁边界识别方法。综合采用常规地震预测方法、钻井成果和地层厚度资料对该方法进行了验证和补充, 并对川东北罗顶寨地区二叠系长兴组生物礁边界采用坡度属性进行平面“成像”。研究表明, 该方法识别的生物礁边界特征与钻井揭示的生物礁分布特征一致, 生物礁边界局部特征更加精细, 对比采用相同地震解释层位为基础数据识别生物礁边界的常规地震预测方法, 该方法对台缘型生物礁边界的平面“成像”结果不存在多解性问题。图 13 表 3 参 29

关键词: 四川盆地; 二叠系长兴组; 生物礁; 地震解释; 坡度; 边界识别

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Fine prediction of reef boundary based on slope attributes: A case study of Permian Changxing Formation in Luodingzhai area, Sichuan Basin, SW China

WU Yong¹, ZHOU Lu^{1,2}, ZHONG Feiyan³, ZHONG Kexiu⁴, YUAN Bing⁵, ZHOU Jieling¹

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. Northeast Sichuan Gas Field, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Dazhou 635000, China; 5. Chuanqing Drilling Engineering Company, Geophysical Exploration Company, PetroChina, Chengdu 610213, China)

Abstract: Based on the slope theory in geomorphology, a method, which can identify the boundary of platform reef by high precision slope attribute calculation based on the horizon data of fine seismic interpretation, combining the ancient geomorphic analysis method, was established. The conventional seismic prediction methods, drilling results and the thickness data of Changxing Formation were used to verify and supplement this method. Then, this method was used to identify the boundary of uplifted reef on the planar image in the Permian Changxing Formation in Luodingzhai area of Sichuan Basin. The results show that the reef boundary imaged by this method is consistent with the reef distribution revealed by the drilling, and is clearer in local details. Compared with conventional seismic prediction methods, the reef boundary identified based on the same fine seismic horizon interpretation results by this method has no multiple solution on the planar image.

Key words: Sichuan Basin; Permian Changxing Formation; reef; seismic interpretation; slope; boundary identification

引用: 吴勇, 周路, 钟斐艳, 等. 基于坡度属性的生物礁边界精细预测方法: 以四川盆地罗顶寨地区二叠系长兴组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 907-918.

WU Yong, ZHOU Lu, ZHONG Feiyan, et al. Fine prediction of reef boundary based on slope attributes: A case study of Permian Changxing Formation in Luodingzhai area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 907-918.

0 引言

生物礁是在一定地质条件下原地生长, 主要由生物和生物作用形成的, 具有(古)地貌隆起的碳酸盐

岩体, 常呈现丘状的外部形态^[1-3]。生物礁型油气藏主要是发育在碳酸盐台地边缘沉积相带的台缘礁及台地相的台内礁油气储集体内, 地震精细预测难度较大^[3-4]。刘殊等^[5]将四川盆地二叠系长兴组生物礁型油气藏勘

探开发历程通俗地描述为“想打的打不到，不想打的又碰到”，诠释了生物礁型储集层地震预测难的问题；贺振华等^[6]总结认为，生物礁油气藏特殊的岩性特征、储集层空间分布的强非均质性、储集层与围岩存在较大差异、埋藏深度较大及地震资料品质低等因素，是地震识别和流体检测难度较大的主要原因。国内外学者针对生物礁的发育及空间分布特征，进行了大量的地震预测方法研究，重点分析生物礁在地震资料中的地震反射结构、能量差异等特性，实现对生物礁进行定性及半定量的地震预测^[7-14]。以上地震预测方法在一定条件下提高了生物礁型储集层预测的吻合度，但由于生物礁的生长发育规模受控于沉积作用^[4,15-17]，生物礁在平面上分布边界的精细预测难度较大，多解性强。

台缘型生物礁生长发育及其特殊的地质环境，是造成上覆地层底部沉积地貌局部突变的重要因素^[1-2,4,15]。周路等^[18]认为地形坡度的突变是坡折带控制可容纳空间和沉积作用的重要因素，利用坡折带上下的坡度变化特征实现了坡折带平面分布的定量预测。台缘型生物礁的地貌特征同样会造成地形坡度的变化，特别是生物礁两侧，地形坡度会发生一定的突变^[15,17]。坡度

是描述地形突变及起伏形态的重要地质参数，主要反映地面的倾斜程度^[18-19]。笔者在坡折带定量研究的基础上，根据坡度算法，利用三维地震层位解释数据求取发育生物礁地层顶的曲面坡度，根据坡度的变化特征，对四川盆地罗顶寨地区二叠系长兴组生物礁边界进行预测研究。综合生物礁常规地震预测方法，建立了一种以地层坡度分析为主的生物礁边界的精细预测方法。该方法减小了断层对生物礁边界识别的影响，提高了生物礁边界识别的可靠性。

1 台缘型生物礁地震响应特征

四川盆地东北部地区在二叠系长兴组沉积时期由碳酸盐缓坡演变为开阔台地的相对深水的陆棚沉积环境，环开江—梁平深水陆棚相的台地边缘相带发育晚二叠世和早三叠世的礁滩组合，为油气勘探的重要靶点^[3-4,15]。罗顶寨地区位于川东高陡构造区北部边缘地带，北邻黄龙场构造，南接五百梯、大天池构造（见图1）。研究区二叠系长兴组生物礁是发育在环开江—梁平陆棚相的台地边缘礁的一部分^[3-4,15]。

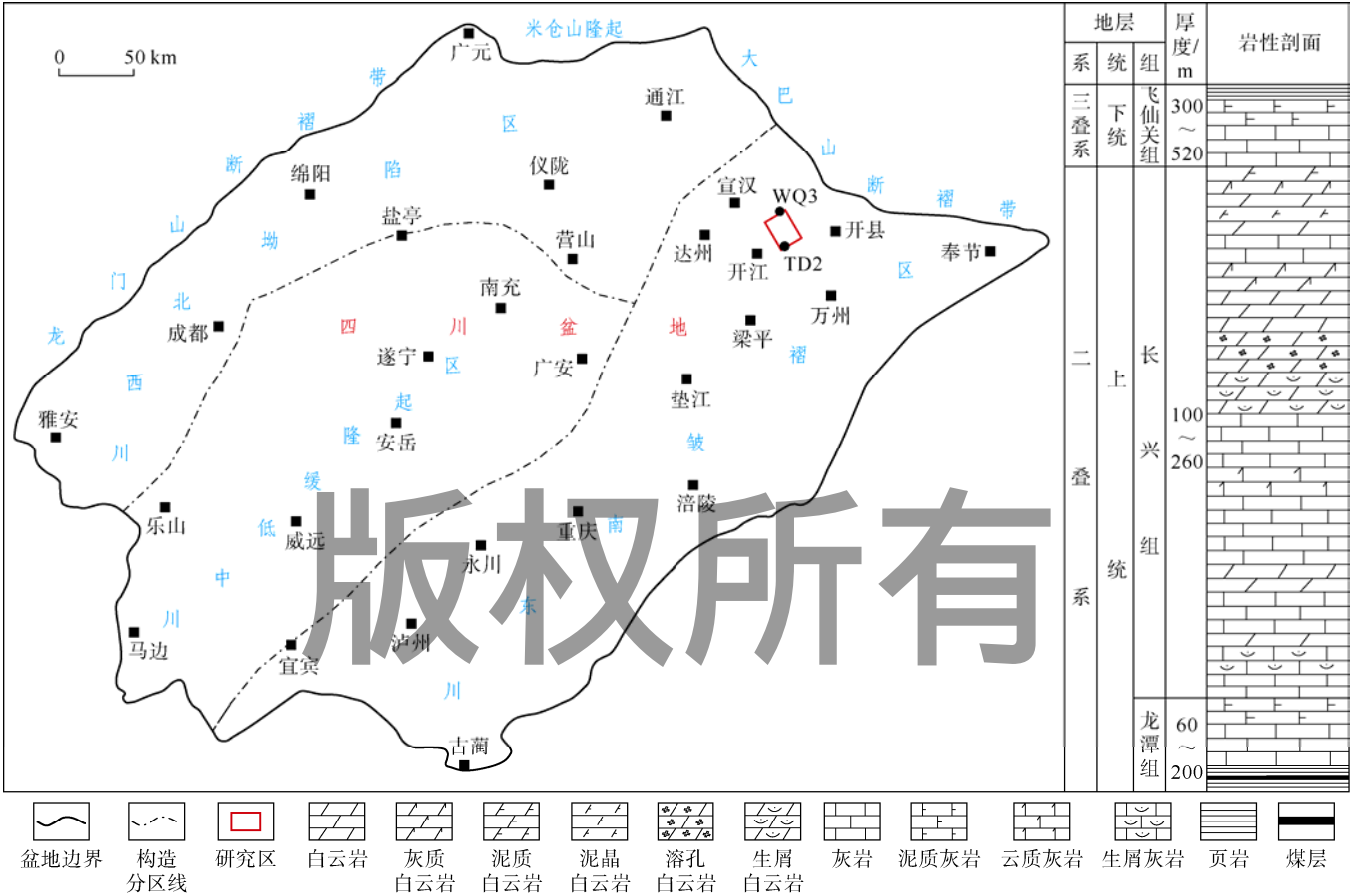


图1 研究区位置及地质概况图

1.1 长兴组生物礁单井地震相

罗顶寨地区二叠系长兴组生物礁的岩性在纵向上具有明显的上、中、下三段式的叠置特征。上部以含溶孔白云岩、云质灰岩和白云岩为主，与上覆三叠系飞仙关组一段的泥质灰岩对比，具有低声波时差（高声速）、高密度的特征；地震正演模拟显示该段为较强振幅的波峰反射特征，含气段地震波振幅相对较弱（见图 2）。中部主要以灰岩为主，夹多套白云岩，厚度相

对较大。相对上部，具有高声波时差（低速度）、低密度的特征，地震反射特征表现为弱振幅反射或大段的空白反射特征。在含气段，声波速度降低，低电阻率特征明显，产生相对较强振幅的波峰反射特征（见图 2）。下部地层富含有机质，岩性多以灰岩为主，自然伽马值明显偏高，声波时差和电阻率值较高，为台地边缘相礁基沉积，地震反射特征表现为弱振幅的波谷反射（见图 2）。

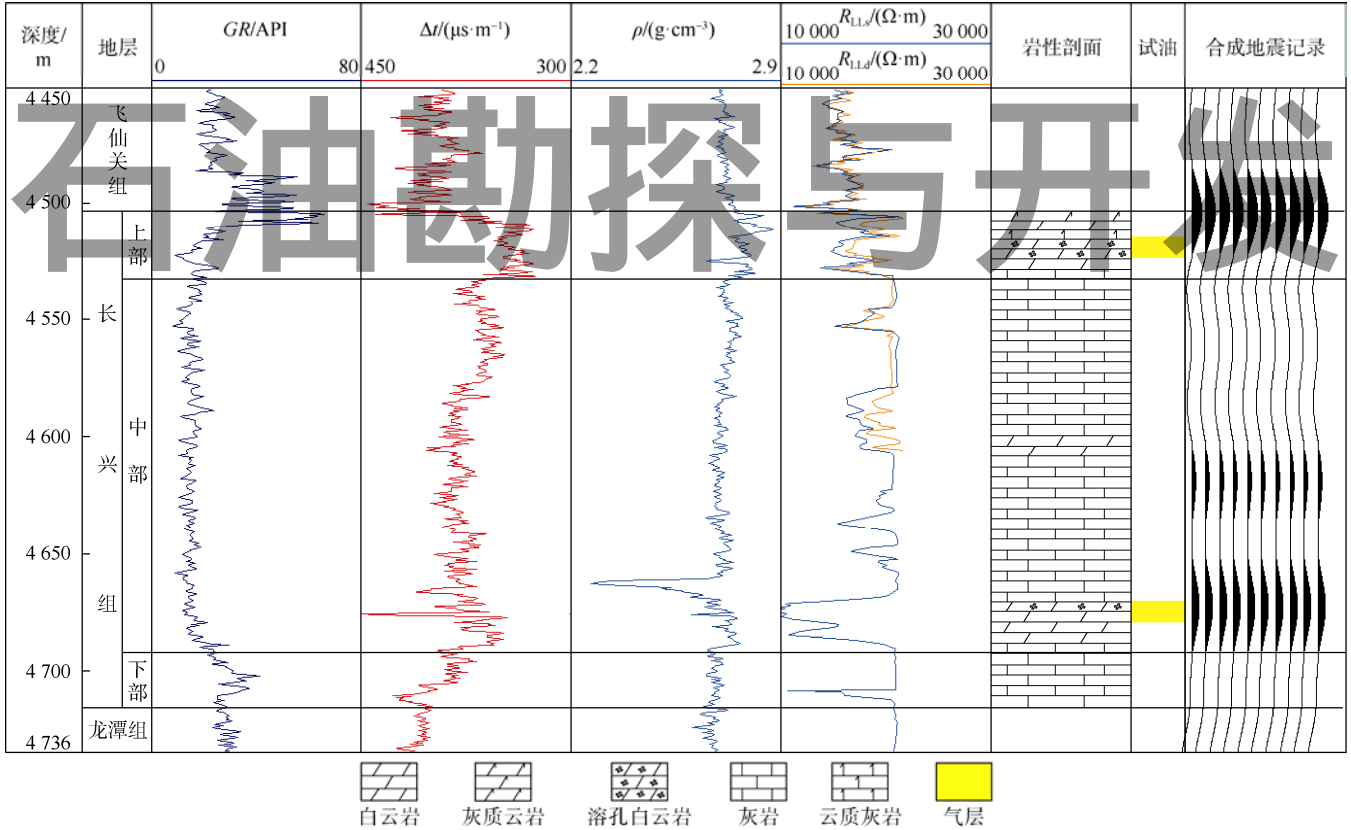


图 2 四川盆地罗顶寨地区 DT002-6 井长兴组生物礁单井地震标定图

1.2 长兴组生物礁地震相特征

选取既过典型井、又在地震剖面存在类似生物礁地震反射特征的连井地震剖面，采用罗顶寨地区 TD2 井生物礁的岩石物理参数，以岩性替换的方式，建立地质模型，并进行二维地震正演模拟。正演模拟响应剖面与实际地震剖面具有极高的相似性，特别是进行岩性替换的剖面东侧位置，正演结果与实际地震剖面反射特征吻合，从而证实工区东侧极有可能发育生物礁（见图 2、图 3）。

根据地震正演模拟结果，建立该区地震相与沉积相的对应关系（见表 1），利用长兴组层间地震振幅切片，以表 1 为相带划分基础，进行相带的平面分布分析和划分，初步勾画出长兴组生物礁的平面分布特征（见图 4）。长兴组沉积相在平面上由西向东划分为陆

棚、台地边缘相和开阔台地相^[3-4,15]。陆棚相为强振幅连续的平行反射；台地边缘相以弱振幅反射为主，地震剖面具有丘状反射特征，生物礁内部呈现断续或杂乱的地震反射特征，地层厚度明显增加，形成了两条北西—南东（NW—SE）向延伸的厚度异常条带，但受构造运动的影响，其断层发育带地层厚度也明显增厚，形成了南西—北东（SW—NE）向的厚度异常带（见图 5）；开阔台地相为中—弱振幅较连续反射，剖面上具有亚平行波组反射特征（见图 3、图 4）。

2 坡度分析方法

根据对生物礁在地震剖面上丘状反射形态的分析，发现在发育生物礁位置的地层顶部通常呈现异常凸起，且异常凸起的横向宽度与生物礁发育宽度基本

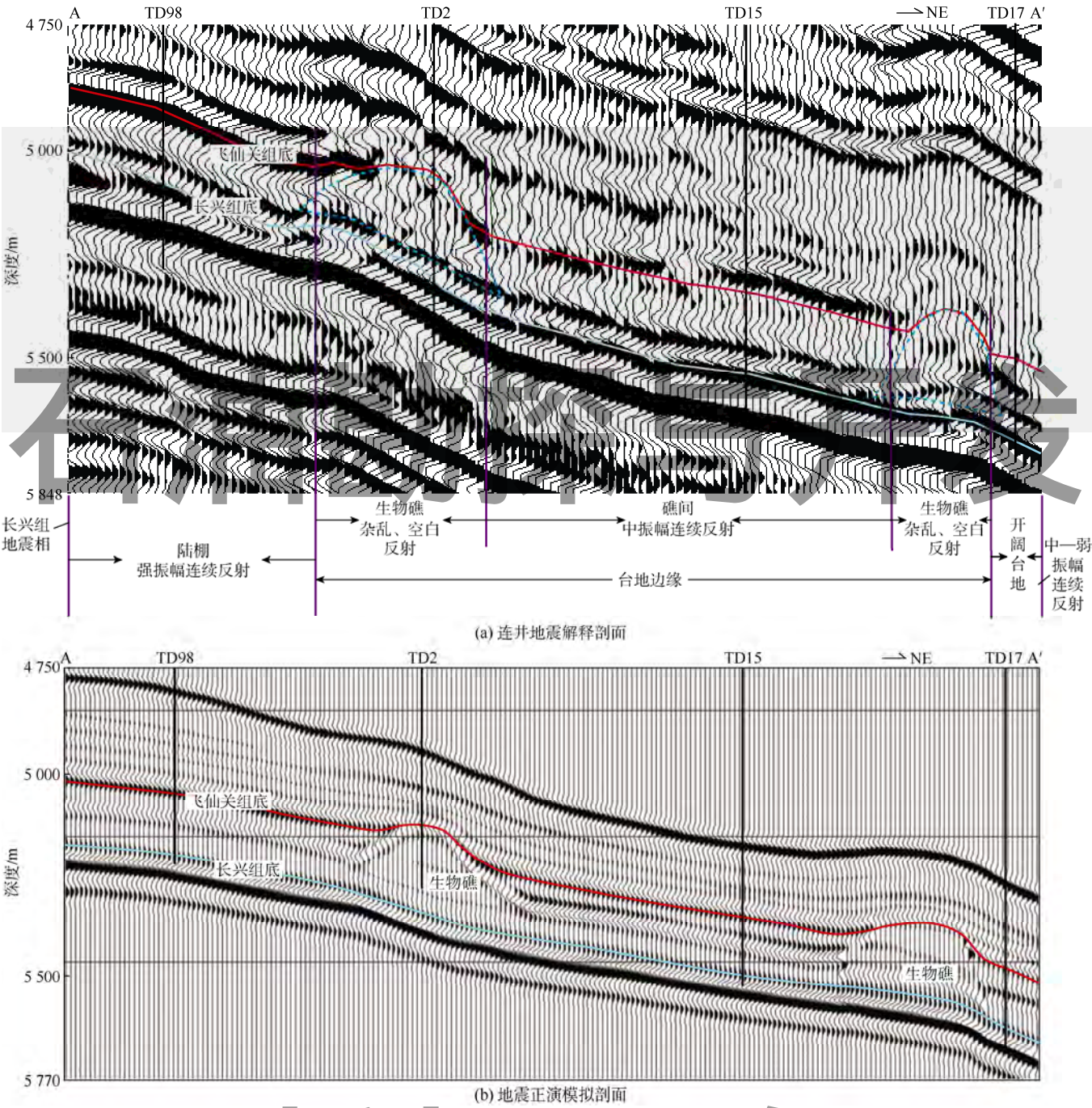


图3 过TD98—TD2—TD15—TD17井地震正演模拟对比剖面(AA')图

表1 罗顶寨地区长兴组沉积相带与地震相对应关系表

层段	沉积相	亚相	地震相特征	钻遇井
长兴组	碳酸盐台地	陆棚(缓坡)	强振幅连续反射	TD98、DT002-2、TD1、DT3
		开阔台地	中—弱振幅较连续反射	TD17
	台地边缘	生物礁	弱振幅断续反射	DT002-6、DT002-1、TD76、TD2、TD002-11、TD71、TD59、TD11
		礁间	中振幅连续反射	DT2、TD15、TD52

一致(见图3)。未发育生物礁的位置,地震反射波同相轴为亚平行反射特征,从而凸显出生物礁的发育对地层的地貌形态及厚度造成了重要的影响(见图3、图5)。据此,笔者引入坡度分析的方法^[18],对长兴组顶部进行坡度计算,建立坡度的异常变化与生物礁边界的关系。

2.1 坡度计算方法

2.1.1 计算方法

坡度是对曲面倾斜程度的数学表征,其计算具有

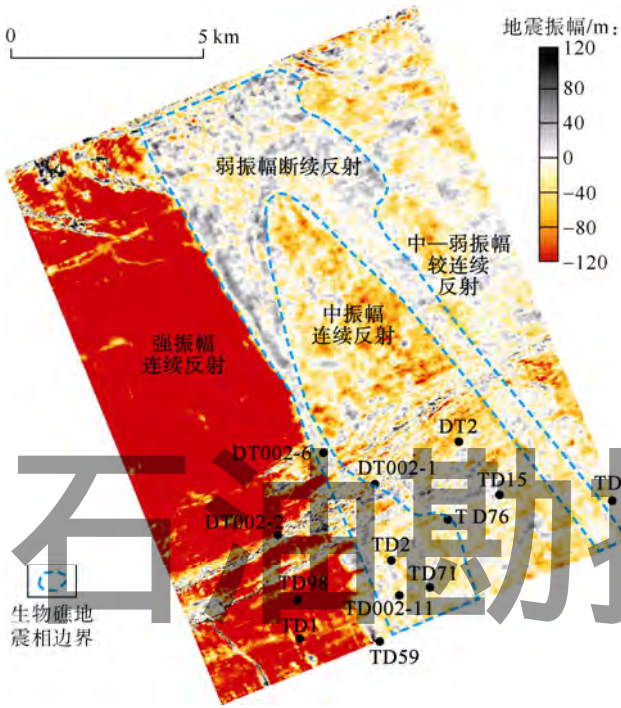


图 4 长兴组地震振幅切片与地震相叠合图

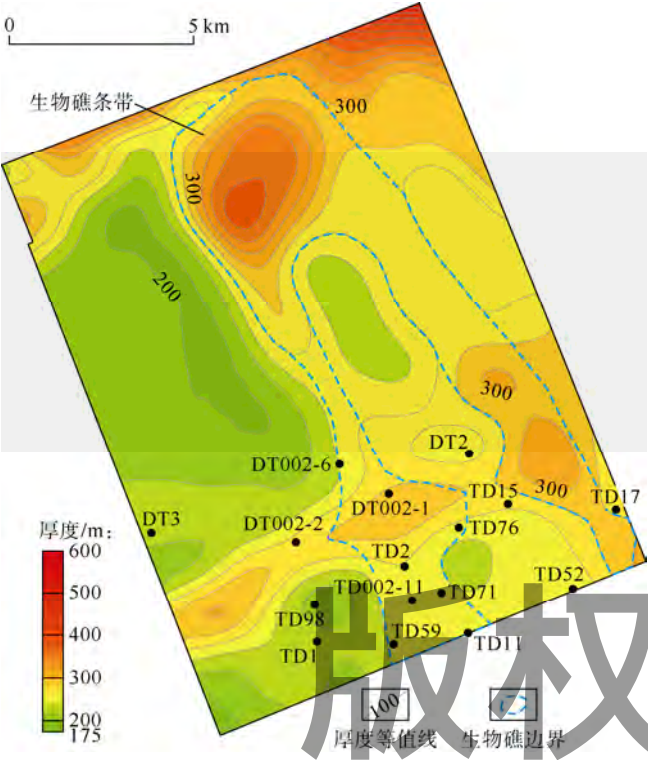


图 5 长兴组地层厚度图

方向性，沿着坡向计算的相对下降值既是反映该坡面倾斜程度的量值，亦是空间曲面倾斜程度的综合反映^[19-23]。

假设一空间曲面 $t=f(x, y)$ 在平面上表示具有地形起伏形态特征的等值线数组 $f(x, y)=t_0$ (t_0 为任意常

数)，当 t_0 为地表起伏高程时则表示为地形等高线。对于曲面上任意一点 $T(x, y)$ ，沿 T 的梯度反方向， $f(x, y)$ 取其下降最快值，该值即为任意点 $T(x, y)$ 的坡度，其下降最快方向即为该点的坡向。其表达式为^[22]：

$$\beta=\arctan \sqrt{f_x^2+f_y^2} \quad (1)$$

$$\alpha=180-\arctan \left(f_y / f_x\right)+90\left(f_x /\left|f_x\right|\right) \quad (2)$$

坡度 β 表征曲面上每一点的倾斜程度，坡向 α 是曲面上每一点坡度的倾斜方向，一般以正北方向为起始方向，并按照顺时针方向度量。公式 (1) 和 (2) 中，关键是计算偏导数。Horn^[24] 采用局部曲面拟合的计算方法，在规则的局部窗口（如 3×3 窗口）利用多项式拟合地表高程，通过拟合函数的系数与偏导数的对应关系求取 x 与 y 方向的偏导数。Florinsky^[24] 则采用 5×5 局部窗口 3 次多项式拟合的方法，得到了高精度的坡度和坡向计算方法；卢兴华等^[22] 根据最小二乘法原理，得到 5×5 局部窗口 3 次多项式拟合的系数矩阵，并考虑地层空间相关性，引入反距离平方加权，优化系数矩阵，获得高精度的坡度计算结果^[18]。

地震数据采集网格正好满足曲面坡度的计算要求，采用 5×5 局部窗口 3 次多项式拟合的高精度坡度计算方法，利用深度域地震层位解释成果对长兴组顶进行坡度计算^[18]。对比生物礁的地震相特征（见图 3、图 4、图 5），坡度平面结果显示： $8^{\circ} \sim 22^{\circ}$ 的坡度值对生物礁边界特征的反映明显，形成了北西—南东（NW—SE）向两对高坡度异常值的窄条，实现了生物礁边界坡度异常的平面“成像”（见图 6）。但受断层的影响，对断层发育区的生物礁边界的“成像”效果较差，因此需要考虑消除或减小断层对坡度计算的干扰。

采用坡度分析法对台缘型生物礁边界进行坡度异常的平面“成像”研究，虽然获得了较清晰的平面特征，但对局部生物礁边界也难获得好的效果。因此，笔者从坡度计算的数据基础和对地质体识别的地质基础两方面对坡度分析法的适用性进行探讨。

2.1.2 数据基础

坡度计算要求基础数据具有很高的采集精度，并成网格状的分布特点，网格间隔减小，一定程度上可提高曲面坡度的计算精度^[18]。采用地震解释层位进行坡度计算，要求地震层位解释结果具有较高的精细度和可靠性。因此，若采用二维地震解释层位进行坡度计算，则无法从基础数据的角度满足坡度分析的基本要求，而高密度采集的三维资料为坡度分析方法应用

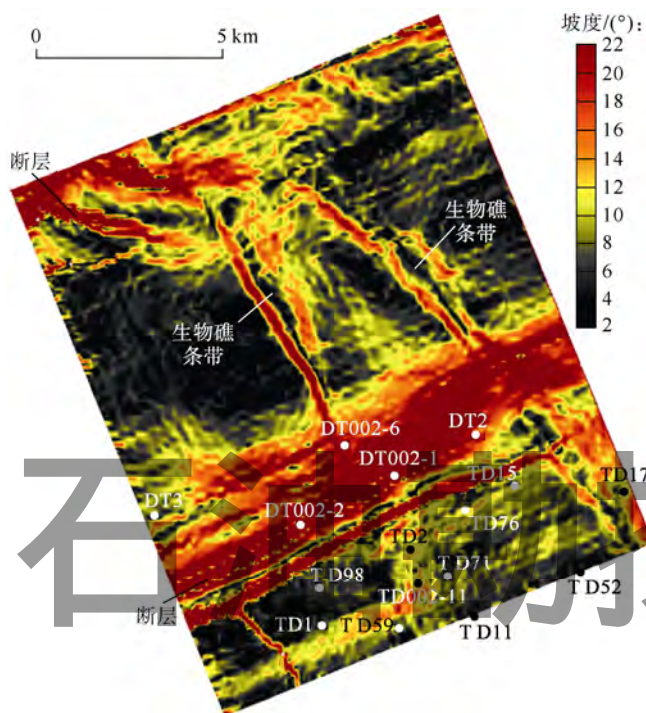


图6 长兴组顶现今坡度属性平面图

提供了更好的基础数据。

2.1.3 地质基础

坡度分析法要求研究对象(地质体)具有一定的地貌起伏特征,如坡折带的定量分析要求坡折带上下具有明显坡度异常^[18],而生物礁边界的坡度分析则要求生物礁具有一定的隆起高度,即对丘状外形的生物礁(如台缘礁、点礁等)具有较好的应用效果。同时要求构造相对简单,特别是断层不发育。如果构造相对复杂,且断层发育,则只能在断层平面延伸方向较一致的情况下(如罗顶寨地区),坡度计算才可取得较好的效果。

2.2 古坡度分析

古地貌的恢复有助于对地层沉积时期地貌起伏特征的研究^[25-28],同时长兴组现今残余厚度对生物礁的平面分布预测具有重要的意义。受长兴组沉积厚度的影响,其上覆地层的起伏形态呈现继承性发育,嘉陵江组沉积后期为明显的地层填平补齐沉积期,形成了须家河组底界面的地层沉积分界面(见图7)。据此,笔者采用残余厚度法进行古地貌恢复,并对古地貌进行曲面坡度计算,其计算结果即为古坡度。

选取须家河组底界面作为标志层,对须家河组沉积期长兴组顶古地貌进行坡度计算,并利用长兴组地层残余厚度数据进行坡度分析。对比长兴组顶现今坡度值,古坡度值域范围具有明显的不同:坡度最大值

从22°减小至13°,表征生物礁边缘的坡度值域也降为7°~13°。须家河组沉积时期长兴组顶的古坡度平面特征对生物礁边界产生的平面“成像”效果明显优于现今坡度,生物礁的坡度异常值窄条带特征与东西向延伸的断层坡度异常特征都有清晰的坡度平面“成像”(见图6、图8)。长兴组残余厚度的古坡度平面特征相对更清晰,特别是对生物礁发育带以外的区域呈现出更好的坡度一致性特点,有利于平面上更好地区分不同沉积相带(见图8、图9)。

统计显示,0°~7°对应古坡度平面上的陆棚相、开阔台地相和礁间沉积;而断层主要对应的古坡度范围为12°~13°,集中表现为高值异常;表征生物礁边缘的古坡度值域较大(7°~13°),7.0°~9.5°为浅灰色—黄色的低值区,主要对应北部椭圆形地层厚度增厚区,其分布宽度较大,而造成生物礁顶部古坡度值较小;9.5°~12.0°为黄色—橙黄色的中值区,主要对应生物礁东侧边缘;12°~13°的高值异常主要对应断层和生物礁西侧边缘(见表2、表3、图8、图9)。

表征生物礁边缘的坡度异常窄条均表现为中间高值、两侧相对低值的特点,根据台缘型生物礁边缘的坡度变化特征,窄条中线的连线即是生物礁的边界(见图9)。通过钻井验证,钻遇生物礁的井(DT002-6、TD76、TD2井等)均位于古坡度值域对应的生物礁条带范围内;钻遇礁间相的井主要分布在东部生物礁条带的左侧(DT2、TD15、TD52井);台盆相被西侧的古坡度高值异常条带与台地边缘相分隔,该区内钻井(TD98、DT002-2、TD1、DT3井)情况与识别结果吻合;而TD17井正好被阻隔在东南部生物礁古坡度异常条带以外的开阔台地相分布区(见表2、表3、图8、图9)。

2.3 相对坡度分析

古坡度对生物礁边界的识别更加清晰,并一定程度上削弱了断层的影响(见图6、图8、图9),但主要断层在古坡度平面上具有清晰的反映,对生物礁边界的平面“成像”具有一定的影响。根据坡度的计算原理,采用特定坡向的坡度信息拾取方法,消除或压制断层的影响,在坡度计算中引入任意方向的相对坡度,其表达式为^[18]:

$$\beta_r = \beta \cos(\alpha - \theta) \quad (3)$$

式中,选定的特定坡向角度 θ 是与正北方向顺时针的夹角。

采用特定方向整体扫描与固定方向不同坡度扫描的两种方式,进行相对坡度计算。两种结果差异明显:

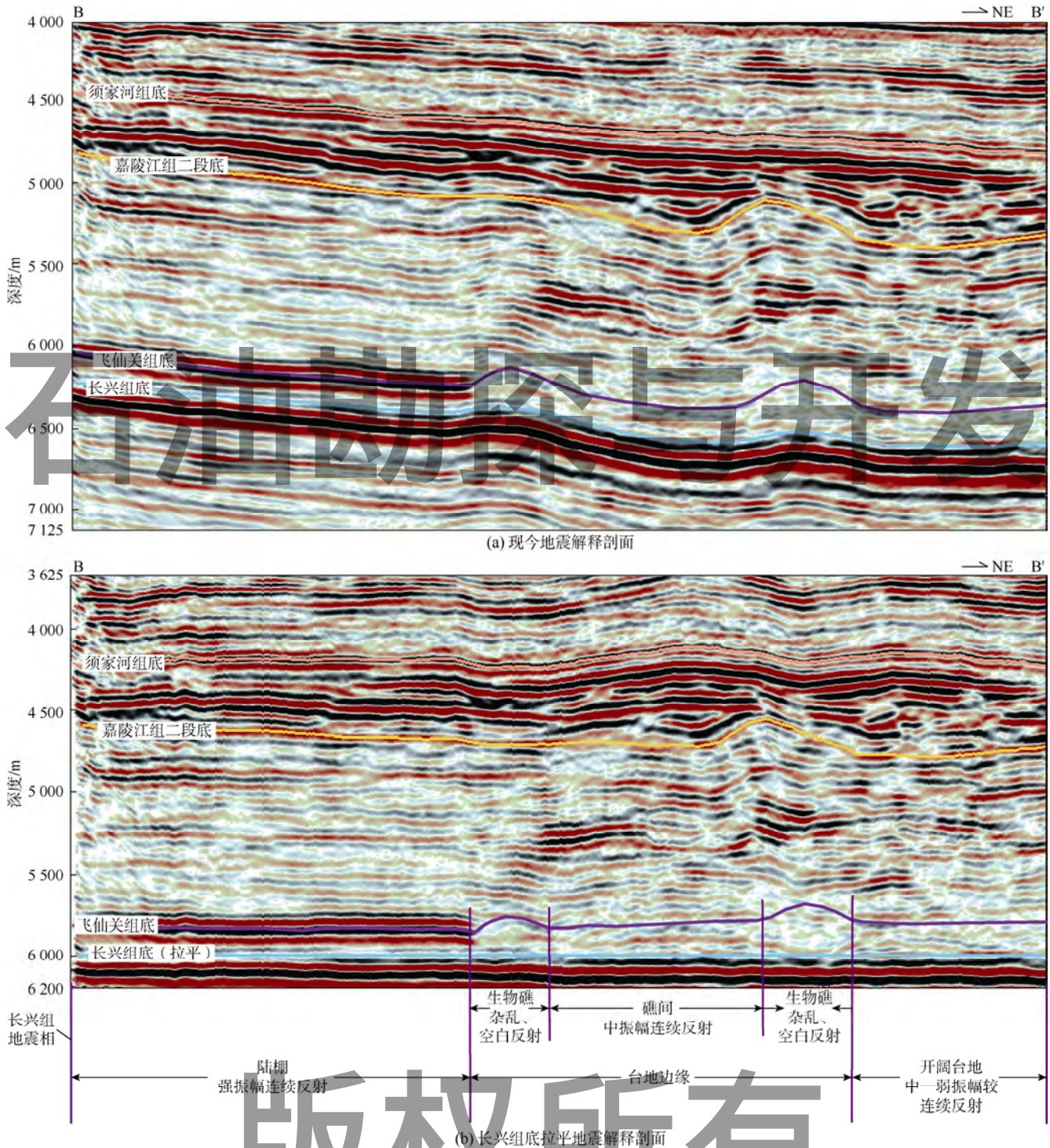


图 7 地震解释剖面及长兴组地震相分析图

前者明显削弱了断层的反映，虽然大断层的特征仍然存在，但对生物礁边界的影响相对减弱（见图 8、图 9、图 10a）；后者消除断层的效果显著，但对生物礁边界的“成像”影响相对较大（见图 8、图 9、图 10b）。

统计不同方法消除或减弱断层影响后对生物礁边界坡度平面“成像”的损伤，进行定量分析：以特定方向整体扫描方式对生物礁边界的坡度“成像”的损

伤量为 8.6%，而以固定方向不同坡度扫描对生物礁边界“成像”的损伤量最小可达 13.2%。因此，采用特定方向整体扫描的方法消除断层影响，并在处理中参考固定方向不同坡度的处理信息。

3 生物礁边界综合识别

采用坡度分析法实现了对台缘型生物礁边界的精

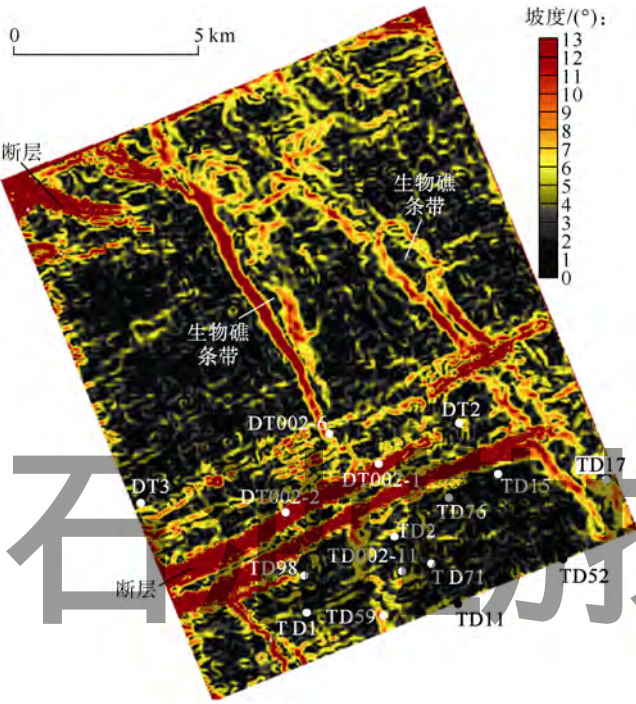
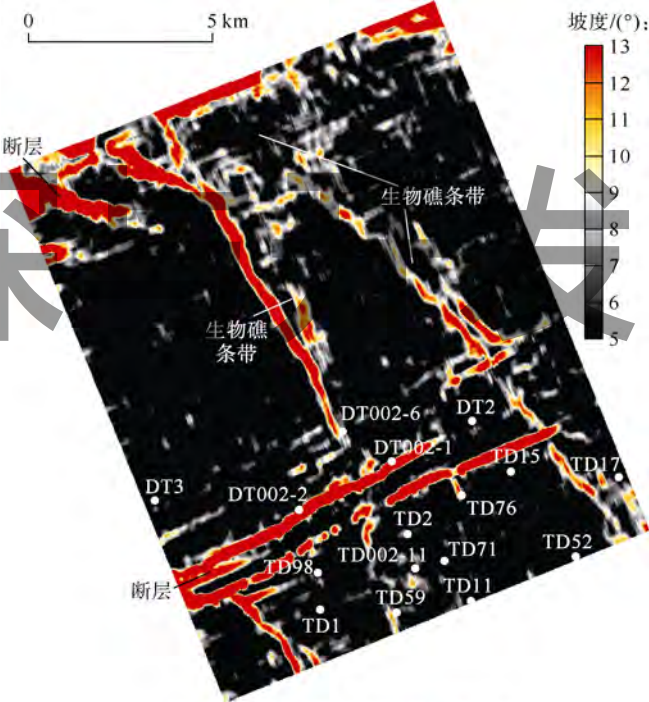


图 8 须家河组沉积期长兴组顶古坡度属性平面图

表 3 长兴组顶古坡度与沉积相对应关系表			
层段	沉积相	亚相	古坡度/(°)
长兴组	碳酸盐	陆棚(缓坡)	0~7
	台地	开阔台地	0~7
	台地边缘	生物礁	7~13
		礁间	0~7



(a) 特定方向整体扫描的相对坡度平面图

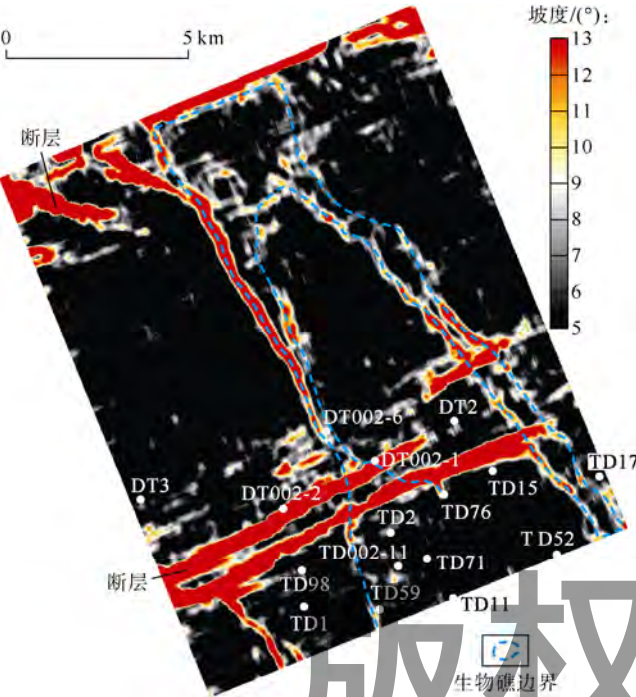
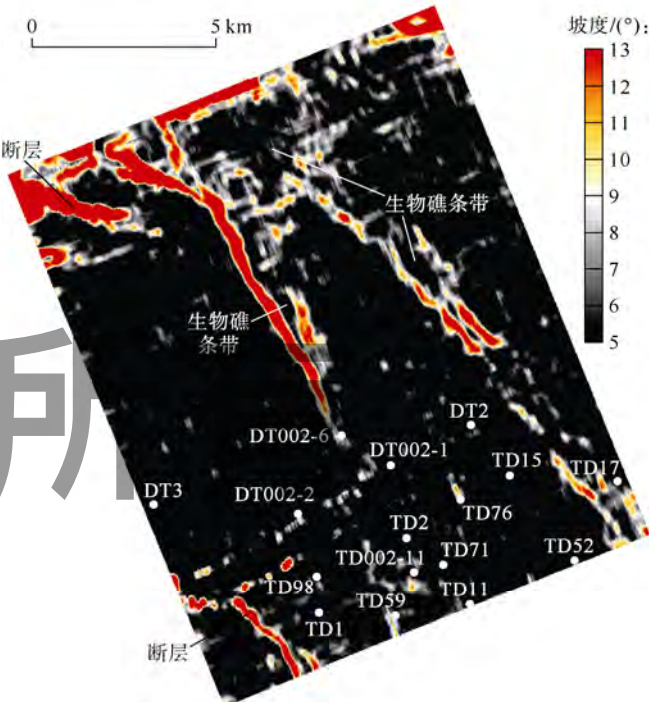


图 9 长兴组残余厚度古坡度分析平面图

表 2 长兴组顶古坡度与构造沉积位置对应关系表	
古坡度/(°)	构造沉积位置
0~7	陆棚、开阔台地、礁间
7.0~9.5	生物礁边缘(低坡度)
9.5~12.0	生物礁边缘(中坡度)
12~13	生物礁边缘(高坡度)、断层



(b) 固定方向坡度80°扫描的相对坡度平面图

图 10 相对坡度平面图

细识别，但受断层和生物礁隆起高度的影响，坡度识别的生物礁边界仍存在小的瑕疵。借助常规地震识别方法，对长兴组生物礁分布范围进行预测，补充坡度平面“成像”存在瑕疵的区域。

3.1 生物礁常规地震识别

根据台地边缘型生物礁的地震反射特征，采用地

层倾角、振幅、分频能量和相干属性算法等对生物礁平面分布特征进行预测和描述^[6-7,9,11]。

长兴组地震振幅方差属性在平面上形成“裤状”北西—南东(NW—SE)向分布的低值异常的生物礁条带，未钻遇生物礁的 TD17 井落在预测的生物礁分布区，与实际钻井矛盾(见图 11a、图 11d)。

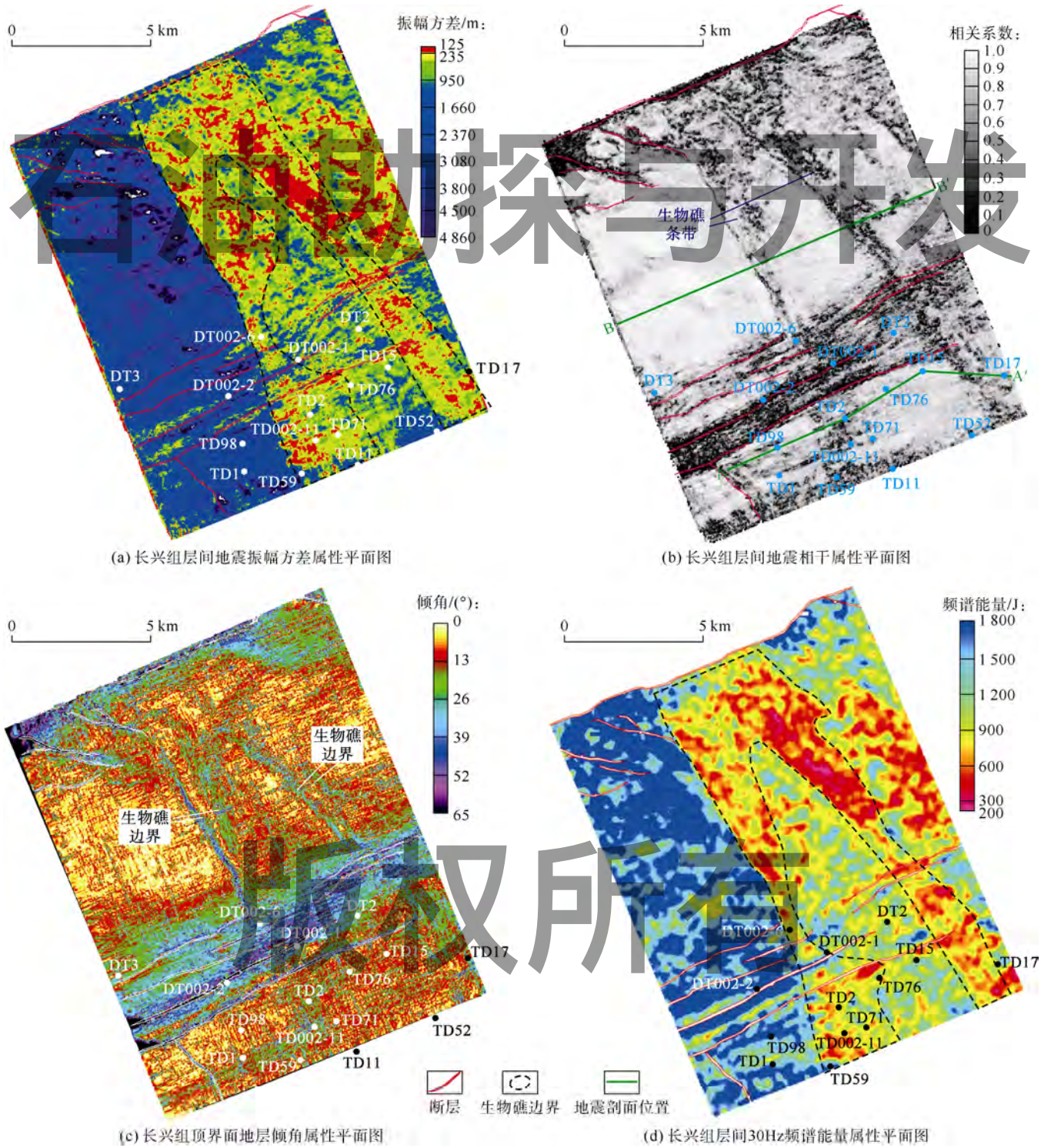


图 11 罗顶寨地区长兴组地震属性平面图

沿层相干切片对南部地区多条南西—北东 (SW—NE) 向延伸的断层获得较清晰的成像, 同时形成了北西—南东 (NW—SE) 向延伸的两条明显的不相干窄条带, 对应生物礁的发育区。研究区南部和东部生物礁边界成像较模糊 (见图 11b)。

长兴组顶部地层倾角多为 $5^{\circ}\sim 13^{\circ}$, 南部地区在地层倾角属性平面图上形成了一条高倾角的急剧变化带, 最高倾角达到近 70° , 平面上形成北西—南东 (NW—SE) 向延伸的两对高倾角 ($21^{\circ}\sim 60^{\circ}$) 窄条, 其位置与近东西向地震剖面上生物礁两侧地层倾角变化相吻合。但受限于地震资料的品质, 地层倾角计算的精度不高, 断层影响较大^[29] (见图 3、图 11b、图 11c)。平面上以地形起伏高程为基础, 并以度为单位计算的坡度与倾角是一致的, 且坡度计算受地震资料品质影响较小。

地震预测方法对生物礁边界识别效果较差, 且不统一, 对比分析发现: 沿层相干切片对生物礁发育区的成像特征与坡度分析结果具有较好的一致性, 但其受断层的影响比坡度属性更大。针对坡度对生物礁平面“成像”存在瑕疵的区域, 采用地震振幅和能量属性变化的生物礁岩性预测结果, 对生物礁边界的刻画进行有效补充 (见图 11a、图 11d)。

3.2 生物礁边界综合识别

现今坡度对生物礁边界平面识别效果与古坡度的结果存在一定差异, 钻井吻合率为 75%。而古坡度和相对坡度对生物礁边界的识别效果高度一致, 钻井吻合率为 87.5%。不吻合的两口钻遇生物礁的井 (TD71、TD11 井), 主要受断层和生物礁隆起高度的影响, 即对未形成一定丘状形态或断层发育区的生物礁边界坡度“成像”效果较差。而常规地震预测方法中的地震频谱能量属性对生物礁岩性特征具有较好的预测效果 (见图 11d)。

因此, 以古坡度生物礁边界平面“成像”结果为主, 叠合不同坡度生物礁边界及地震频谱能量类属性生物礁岩性预测结果, 对长兴组生物礁边界进行综合识别及精细刻画 (见图 12)。生物礁在平面上呈现“裤状”展布形态, 左侧生物礁条带的宽度南北变化较大, 而右侧为不均匀的窄条状, 总面积约 32 km^2 (见图 13)。

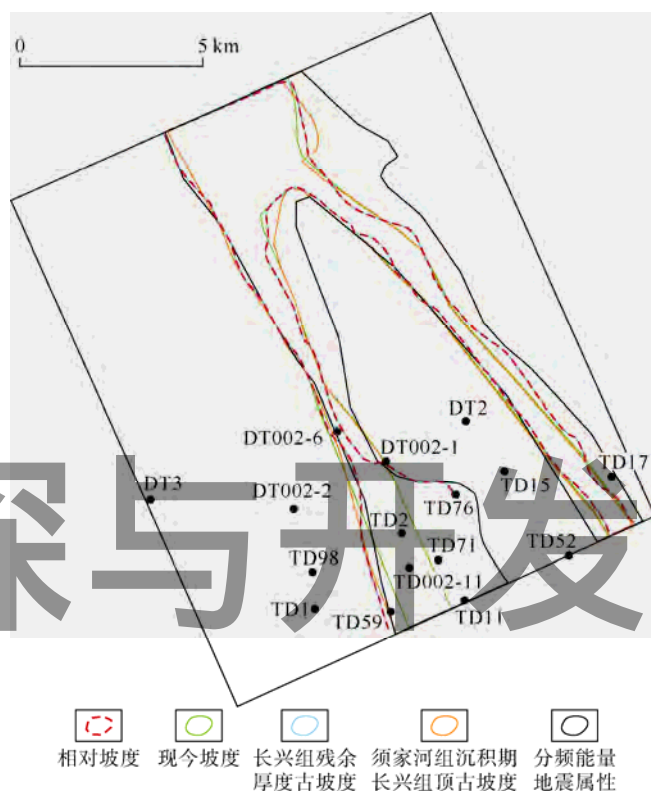


图 12 不同坡度属性及分频能量属性预测生物礁边界叠合图

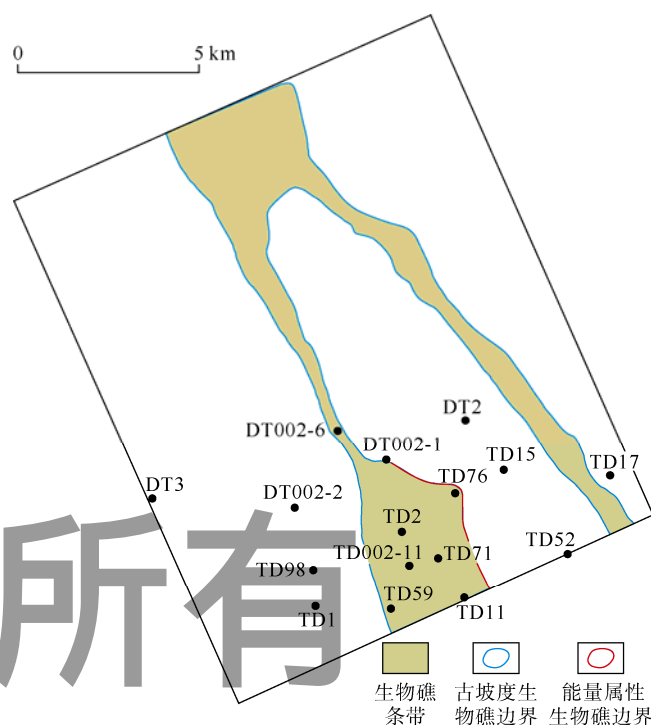


图 13 罗顶寨地区长兴组生物礁分布图

4 结论

本文基于高精度的坡度计算方法, 结合古地貌分析技术, 提出了一种利用古坡度和相对坡度平面异常

特征对台缘型生物礁的边界进行精细识别的方法。识别的生物礁边界与钻井结果吻合率高,不存在多解性,且古坡度对生物礁边界的成像具有一定的抗噪性(减弱断层影响)。

该方法是基于地震层位解释数据的曲面拟合,要求计算前取得精细的三维地震层位解释成果,且研究对象具有一定的地貌起伏特征是坡度计算成功的关键。

采用坡度与常规地震预测方法相结合,综合预测罗顶寨地区二叠系长兴组台缘型生物礁边界,研究表明:长兴组在台地边缘相发育两个生物礁条带,平面上呈现东西宽度不一的“裤状”形态,已钻遇生物礁的井均分布在西侧的生物礁条带南部,北部和东侧的生物礁条带是该区油气勘探的潜力区。

符号注释:

f_x —— x 方向偏导数; f_y —— y 方向偏导数; GR ——自然伽马, API; R_{LLd} ——深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{LLs} ——浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; α ——坡向, ($^\circ$); β ——坡度, ($^\circ$); β_r ——相对坡度, ($^\circ$); Δt ——声波时差, $\mu s/m$; θ ——选定的特定坡向角度, ($^\circ$); ρ ——密度, g/cm^3 。

参考文献:

- [1] CAMOIN G F, MONTAGGIONI L F. High energy corallgal-stromatolite frameworks from Holocene reefs (Tahiti, French Polynesia)[J]. *Sedimentology*, 1994, 41(4): 655-676.
- [2] RIDING R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: Concepts and categories[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58(1/2): 163-231.
- [3] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 13-25.
ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 13-25.
- [4] 陈洪德, 钟怡江, 许效松, 等. 中国西部三大盆地海相碳酸盐岩台地边缘类型及特征[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 609-621.
CHEN Hongde, ZHONG Yijiang, XU Xiaosong, et al. Types and characteristics of carbonate platform margins of marine carbonate rock in three major basins in Western China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 609-621.
- [5] 刘殊, 杨继友. 一个可能的生物礁预测[J]. *石油物探*, 2004, 43(1): 20-25.
LIU Shu, YANG Jiyu. A possible organic reef[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2004, 43(1): 20-25.
- [6] 贺振华, 贾义荣, 蒋炼, 等. 碳酸盐岩礁滩油气储层地震预测方法探讨[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 31(1): 1-5.
HE Zhenhua, JIA Yirong, JIANG Lian, et al. Research on the methodology of carbonate reef-shoal reservoir description by 3D seismic data[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 31(1): 1-5.
- [7] 蒲勇. 元坝地区深层礁滩储层多尺度地震识别技术[J]. *天然气工业*, 2011, 31(10): 27-31.
PU Yong. Multi-scale seismic identification of deep reef-bank reservoirs in the Yuanba Area[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(10): 27-31.
- [8] 陈勇. 川东北元坝地区长兴组生物礁储层预测研究[J]. *石油物探*, 2011, 50(1): 107-114.
CHEN Yong. Prediction on reef reservoir in Changxing group of Yuanba Area, Northeast Sichuan Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2011, 50(1): 107-114.
- [9] 唐武, 王英民, 杨彩虹, 等. 生物礁、生物丘及滩相沉积的地震特征对比与识别[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(2): 56-64.
TANG Wu, WANG Yingmin, YANG Caihong, et al. Contrast and identification of seismic reflection features among reefs, bioherms and shoal flats[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(2): 56-64.
- [10] 姚清州, 孟祥霞, 张虎权, 等. 地震趋势异常识别技术及其在碳酸盐岩缝洞型储层预测中的应用[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 101-106.
YAO Qingzhou, MENG Xiangxia, ZHANG Huquan, et al. Principles and application of a seismic trend anomaly diagnostic technique[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2013, 34(1): 101-106.
- [11] 彭才, 文其兵, 曹博超, 等. 川东高峰场地区长兴组生物礁地震预测[J]. *石油物探*, 2013, 52(2): 207-211.
PENG Cai, WEN Qibing, CAO Bochao, et al. Seismic prediction of reef in Changxing Formation of Gaofengchang area, Eastern Sichuan Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(2): 207-211.
- [12] 刘殊, 张虹, 唐建明, 等. 川西坳陷二叠系礁滩相预测及油气远景评价[J]. *石油物探*, 2014, 53(1): 106-115.
LIU Shu, ZHANG Hong, TANG Jianming, et al. Prediction of reef-beach facies and evaluation of hydrocarbon resources on for Permian in Western Sichuan Depression[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014, 53(1): 106-115.
- [13] YANG J, WANG J, ZHANG H, et al. The application of seismic prediction technique in the identification of carbonate reef reservoirs [C]//Beijing 2014 International Geophysical Conference & Exposition. Beijing, China: SEG, 2014: 857-860.
- [14] HAMI-EDDINE K, KLEIN P, RICHARD L, et al. A new technique for lithology and fluid content prediction from prestack data: An application to a carbonate reservoir[J]. *Interpretation*, 2015, 3(1): SC19-SC32.
- [15] 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江—梁平海槽的认识[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 326-327.
MA Yongsheng, MOU Chuanlong, TAN Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 326-327.
- [16] 李宏涛. 台内鲕粒滩气藏成藏过程与模式: 以川东北河坝地区下三叠统飞仙关组三段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 723-732.

- LI Hongtao. Accumulation process and pattern of oolitic shoal gas pools in the platform: A case from Member 3 of Lower Triassic Feixianguan Formation in the Heba Area, Northeastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 787-797.
- [17] 赵俊兴, 李凤杰, 朱广社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶纪生物礁基本特征、分布规律及成礁模式[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 747-756.
- ZHAO Junxing, LI Fengjie, ZHU Guangshe, et al. The basic characteristics, spatial-temporal distribution, and building model of reefs in the western margin of the Ordos Basin of Ordovician[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 747-756.
- [18] 周路, 袁兵, 宋永, 等. 坡折带地震定量识别方法[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 940-948.
- ZHOU Lu, YUAN Bing, SONG Yong, et al. A seismic quantitative identification method of slope break belt[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 940-948.
- [19] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. *测绘学报*, 2004, 33(3): 258-263.
- LIU Xuejun, GONG Jianya, ZHOU Qiming, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model(DEM)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(3): 258-263.
- [20] 周启明, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- ZHOU Qiming, LIU Xuejun. *Digital terrain analysis*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [21] FLORINSKY I V. Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation mode[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(2): 213-231.
- [22] 卢兴华, 刘学军, 王永君, 等. 插值条件下格网 DEM 坡度计算模型的噪声误差分析[J]. *测绘学报*, 2012, 41(6): 926-932.
- LU Xinghua, LIU Xuejun, WANG Yongjun, et al. Noise error analysis of slope algorithms based on grid DEM derived from interpolation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(6): 926-932.
- [23] TANTASIRIN C, NAGAI M, TIPDECHO T, et al. Reducing hillslope size in digital elevation models at various scales and the effects on slope gradient estimation[J]. *Geocarto International*, 2016, 31(2): 140-157.
- [24] HORN B K P. Hill shading and the reflectance map[J]. *Proceedings of IEEE*, 1981, 69(1): 14-47.
- [25] 周路, 韦红, 唐勇, 等. 准噶尔盆地车排子地区侏罗系八道湾组沉积古地貌及岩性分布[J]. *古地理学报*, 2013, 15(3): 383-400.
- ZHOU Lu, WEI Hong, TANG Yong, et al. Sedimentary palaeo-geomorphology and lithology distribution of the Jurassic Badaowan Formation in Chepaizi Area of Jungar Basin[J]. *Journal of Paleogeography*, 2013, 15(3): 383-400.
- [26] 张银德, 周文, 邓昆, 等. 鄂尔多斯盆地高桥构造平缓地区奥陶系碳酸盐岩岩溶古地貌特征与储层分布[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 757-767.
- ZHANG Yinde, ZHOU Wen, DENG Kun, et al. Palaeo-geomorphology and reservoir distribution of the Ordovician karstic field carbonate rocks in the structurally-gentle Gaoqiao Area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 757-767.
- [27] 唐大海, 肖笛, 谭秀成, 等. 古岩溶地貌恢复及地质意义: 以川西北中二叠统茅口组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 689-695.
- TANG Dahai, XIAO Di, TAN Xiucheng, et al. Restoration of paleokarst landform and its geological significance: A case from Middle Permian Maokou Formation in northwestern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 689-695.
- [28] 刘宏, 罗思聪, 谭秀成, 等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 283-293.
- LIU Hong, LUO Sicong, TAN Xiucheng, et al. Restoration of paleokarst geomorphology of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin and its significance, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 283-293.
- [29] MARFURT K J. Robust estimates of 3D reflector dip and azimuth[J]. *Geophysics*, 2006, 71(4): 29-40.
- 第一作者简介: 吴勇 (1982-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 西南石油大学地球科学与技术学院讲师, 主要从事地震资料解释、地震岩性与储集层预测等方面的研究与教学。地址: 四川省成都市新都区, 西南石油大学地球科学与技术学院, 邮政编码: 610500. E-mail: wycan_112@126.com
- 联系作者简介: 周路 (1962-), 男, 四川武胜人, 博士, 西南石油大学地球科学与技术学院教授, 主要从事地震资料解释、地震岩性与储集层预测等方面的研究与教学。地址: 四川省成都市新都区, 西南石油大学地球科学与技术学院, 邮政编码: 610500. E-mail: zhoululu9@126.com
- 收稿日期: 2017-04-20 修回日期: 2017-10-16
- (编辑 张朝军)