



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2023.09.14.02

文章编号: 1674-5086(2025)03-0010-15

中图分类号: TE122

文献标志码: A

逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征

欧成华^{1,2*}, 王泽宇¹, 柳金城³, 李兆亮³, 梅华³

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

3. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202

摘要: 逆冲走滑断层体系广泛分布在含油气盆地富油二级构造带中, 定量表征对油气勘探开发意义重大, 受水平挤压应力与压扭剪切应力叠加耦合作用, 逆冲走滑断层体系内同时发生逆冲推覆位移与走滑位移, 造成体系内地层破碎、断层体系复杂、测井与地震响应杂乱, 断层识别、组合、表征与建模困难。围绕逆冲走滑断层成生机制特点及断层体系复杂性解析与表征, 研发出分区分级解析与三维全景表征技术, 成功应用于柴达木盆地英东油田油砂山断层下盘逆冲走滑断层体系的定量解析与三维全景表征。依靠分区对比, 建立关键标志层交叉引层与分区标定技术, 有效解决了逆冲走滑断层体系破碎地层层位标定多解性强的难题, 实施了对研究区油砂山断层下盘6个关键标志层的有效标定与全区满覆盖追踪。应用多尺度多类型逆冲走滑断层褶皱阶梯状网格建模与全景可视化表征技术, 实现了对研究区油砂山断层下盘逆冲走滑断层剖面-平面-三维立体空间多视域全景可视化表征。

关键词: 逆冲走滑断层; 断层识别与组合; 分区分级解析; 三维全景表征; 油砂山断层

Zoning-grading Analysis and 3D Panoramic Characterization of Thrust Strike-slip Faults

OU Chenghua^{1,2*}, WANG Zeyu¹, LIU Jincheng³, LI Zhaoliang³, MEI Hua³

1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

3. Research Institute of Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, China

Abstract: The thrust strike-slip fault is widely distributed in the oil-rich structural zone, and quantitative characterization is of great significance to oil and gas exploration and development of oil-bearing basin, superposed coupling of horizontal extrusion stress and compression shear stress, the thrust displacement and slip displacement occur simultaneously in the thrust strike-slip fault system, which cause formation fragmentation, complex fault system, and disorderly logging and seismic response, and increases the difficulty of fault identification, combination, characterization and modeling. Aimed at the formation mechanism and the complexity of the thrust strike-slip fault system, a zoning-grading analysis and 3D panoramic characterization technology is developed to implement the quantitative analysis and 3D panoramic characterization of the study area—the lower plate of the Youshashan fault system of Yingdong Oilfield in Qaidam Basin. Relying on the zoning formation correlation, the key marked formation cross leading and zoning formation calibration technology is established, and solves the problem of difficult calibration and strong multiple solutions of the fragmentation formation, and the effective calibration of the six key marked formation and the full coverage tracking of the whole study area is implemented. The panoramic characterization, multi-scale and multi-type thrust strike-slip fault-fold step grid modeling and panoramic visualization characterization technology are used to the panoramic visual characterization of the thrust strike-slip fault profile-plane-3D multivision space of the study area.

Keywords: thrust strike-slip fault; fault identification and combination; zoning-grading analysis; 3D panoramic characterization; Youshashan fault system

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20240625.1449.008>

欧成华, 王泽宇, 柳金城, 等. 逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 10-24.

OU Chenghua, WANG Zeyu, LIU Jincheng, et al. Zoning-grading Analysis and 3D Panoramic Characterization of Thrust Strike-slip Faults[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 10-24.

* 收稿日期: 2023-09-14 网络出版时间: 2024-06-26

通信作者: 欧成华, E-mail: cho-mm@163.com

基金项目: 四川省科技计划(2021YFQ0049); 国家“十三五”重大专项(2017ZX05035003)

引言

逆冲走滑断层广泛分布在柴达木^[1-2]、塔里木^[3]、鄂尔多斯^[4]、四川^[5]、松辽^[6]等含油气盆地中,断层体系内往往储存着丰富的石油和天然气^[2-3, 6],针对该类断层体系的解析与表征,不仅具有重要的学术研究价值,也对油气勘探开发有着重大意义。

当含油气盆地二级构造带的地质构造在受到巨大水平挤压应力作用造成大规模逆冲推覆位移的同时,还因非对称水平挤压产生的强大压扭剪切应力作用产生较大的走滑位移,地质构造的逆冲推覆位移与走滑位移叠加耦合,即形成逆冲走滑断层^[1, 4]。由于水平挤压与压扭剪切过程中应力应变及地层能干性强弱的强非均质性,造成逆冲推覆位移与走滑位移在耦合时空域内的较大差异,增强了逆冲走滑断层体系的复杂性^[7-8]。仅仅依靠现有的钻井识别、测井识别、地震属性识别、自动追踪解释或图像

处理识别等单一方法^[8-9],难以实现对逆冲走滑断层体系的准确解析与表征。为此,提出了逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征新方法,并以柴达木盆地英东油田油砂山断层体系的解析与表征为例,验证该方法的科学合理性与可靠适用性。

1 地质背景与研究思路

1.1 地质背景

英东地区位于柴达木盆地西部,西北为NE—SW走向的阿尔金山,西南为NW—SE走向的昆仑山(图1)。盆山形成过程中,阿尔金断裂左行走滑与昆北断裂右行压扭走滑^[1-2]共同作用,在英东地区产生非对称挤压应力,造成巨大不平衡推覆剪切作用,形成了油砂山逆冲走滑断层体系,断开了下干柴沟组上段(E_3^2)以上地层,断层附近地层破碎,难以识别追踪。

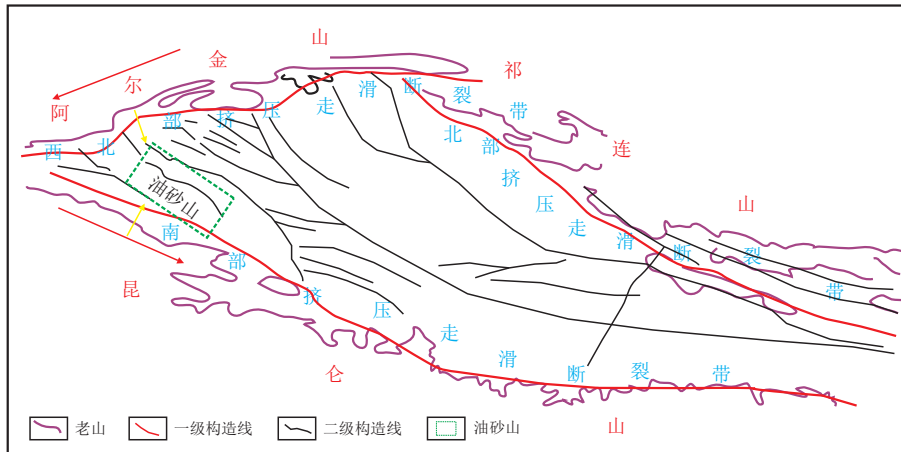


图1 研究区大地构造背景

Fig. 1 Tectonic background of the study area

1.2 研究思路

理论研究与实践^[1-7]均表明,逆冲走滑断层体系常常由一、二级规模较大的主断层加若干伴生的次级断层构成;主断层因受到巨大的正向挤压应力和压扭剪切应力共同作用,呈现出逆冲走滑特性,伴随着规模不等的地层破碎带;受主断层错断过程不同部位水平挤压与压扭剪切应力不同及不同位置地层能干性强非均质等的综合影响,伴生的次级断层的断层性质、几何形态、产状要素、错断规模等将呈现出较大差异,增加了逆冲走滑断层体系的复杂性,使得测井和地震响应杂乱,断层识别、组合、表征与建模均异常困难。

面对上述难题,结合逆冲走滑断层体系的复杂性,需要融合分区、分级、全景的思想,提出分区分级解析与三维全景表征新方法,实现对逆冲走滑断层体系的准确识别、科学组合、可靠检验、全景表征与三维建模,技术流程如图2所示。

首先,针对逆冲走滑断层主断层附近破碎地层测井、地震响应杂乱,难以完成空间定位,难以直接开展地层解析的难题^[10],引入分区对比思路,依靠对比远离主断层的稳定区地层,构建合理的引层路径,将有效确定的地层信息投射到主断层附近的破碎不稳定区,实现对破碎地层的空间定位与可靠对比。

然后,针对逆冲走滑断层体系中不同级别断层

间几何形态、产状要素及错断规模的较大差异,测井和地震有效响应的明显差别,难以采用单一方法,准确识别和组合不同级别断层的难题^[11-12],引入分级解析思路,利用地质、测井及地震等探测手段的测量精度差异,围绕不同级别断层对识别精度要求的不同,建立针对探测手段精度差异及断层规模大小分级的断层分级识别与组合技术,实现对逆冲走滑断层体系内主断层及各次级断层单井断点和单剖

面断层线的可靠识别与有效组合。

最后,针对逆冲走滑断层体系的断层级别多,性质差异大,几何形态、产状特征与生成规模各异,难以在同一个地质模型中完成可视化表征的难题,引入全景的思想,依靠阶梯状网格建模算法^[13-14]和二维或三维视窗技术,完成逆冲走滑断层体系三维可视化建模,从全景多视域角度实现对断层体系的可视化表征。

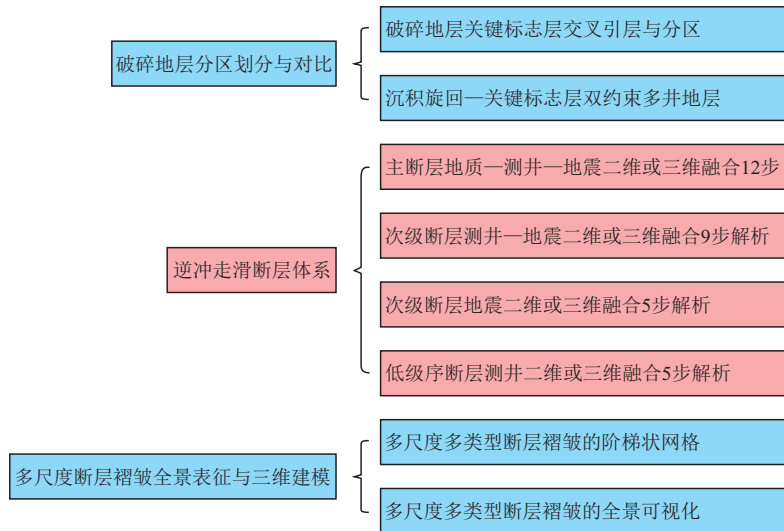


图2 技术流程

Fig. 2 Technical process

2 逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征方法

2.1 破碎地层分区划分与对比

2.1.1 破碎地层关键标志层交叉引层与分区标定

逆冲走滑断层体系所在地层一般较为破碎,测井及地震响应杂乱,无法直接在破碎区开展地层标定,需将地层信息从稳定区引至破碎区。为此,本文提出了破碎地层关键标志层交叉引层与分区标定方法,以实现逆冲走滑断层体系破碎地层的分区、分级梳理,保证各个层组在三维空间的准确划分与闭合对比,为逆冲走滑断层体系分级解析提供可靠的层组分层数据,具体包括如下4个步骤。

1) 标准井标志层分区对比结构剖面建立

选取不同区域内地层完整,岩芯、测井、录井等资料完备井作为分区对比标准井;依靠有限的岩芯资料分析得到沿各个标准井并筒的地层结构、沉积微相、沉积旋回、测井响应4者间的转换关系,建立地层结构—沉积微相—沉积旋回—测井响应转换

模型,利用该转换模型,提取得到整个研究区的地层层序结构及测井、录井响应特征,建立地层层序结构标准剖面,形成标志层划分方案;与此同时,依靠声波和密度曲线,结合研究区优化的地震子波特征,建立标准井人工合成地震记录,建成研究区不同区域内标准井时间域范围和深度域范围标志层对比结构剖面,形成研究区破碎地层标志层分区对比标准。

2) 标志层引层结构剖面建立

由于人工合成地震记录存在较大的人工操作和调试空间,具有极大的多解性和人为性^[15],为了保证地震解释层位的准确可靠,需要利用VSP测试井资料或野外露头勘测剖面的时间—深度对应关系,制作合成地震记录,建立标志层引层结构剖面,形成地震剖面关键标志层引层基础。

3) 地层破碎带范围核定

利用破碎地层测井(倾角、电阻率、密度、声波时差等)和地震(振幅剖面)响应杂乱的典型特征,分别在测井连井剖面和地震解释剖面上识别出地层破碎带的顶底范围,刻画出逆冲走滑断层体系地层破

碎带的空间分布范围及特征。

4) 关键标志层地震测线交叉引层与分区标定

若标志层引层结构剖面与研究区内各个标准井标志层对比结构剖面间的连线均不通过地层破碎带范围,表明两者间地层连续性好,可以直接利用两者间连线建立地震振幅剖面,从而把关键标志层的时间信息,从标志层引层结构剖面直接对比到标准井标志层对比结构剖面所处的地震振幅剖面上,与此同时,把关键标志层的深度信息逆向传递到标志层引层结构剖面,实现各个标准井时间域和深度域关键标志层界面的统一与闭合,形成关键标志层对比地层格架,为利用地震剖面开展关键标志层追层,及利用测井连井剖面开展标志层对比奠定坚实的基础。

然而,由于逆冲走滑断层体系地层破碎,标志层引层结构剖面与研究区内各个标准井标志层对比结构剖面间的连线往往要穿过地层破碎带区域,这时,就不能进行两者间的直线引层,而必须采用交叉引层法,以完成从标志层引层结构剖面到标准井标志层对比结构剖面间的关键标志层核定。

具体做法是:在二维平面上观察标志层引层结构剖面、标准井标志层分区对比结构剖面、地层破碎带范围三者间的位置关系;按照不经过或尽量少经过地层破碎带范围,同时保证行走路径最短的原则,按照主测线+联络测线十字交叉剖面的形式,优化从标志层引层结构剖面到标准井标志层对比结构剖面间的行走路径,建立该行走路径地震振幅剖面,把关键标志层的时间信息从标志层引层结构剖面,经由该优化后的十字交叉地震振幅剖面,对比到标准井标志层对比结构剖面所处的地震振幅剖面上,与此同时,把关键标志层的深度信息逆向传递到标志层引层结构剖面,实现对各个标准井时间域和深度域关键标志层界面的闭合对比,形成关键标志层对比地层格架。

2.1.2 沉积旋回—关键标志层双约束多井地层对比

在完成破碎地层关键标志层交叉引层与分区标定基础上,需要在沉积旋回—关键标志层双约束下,依靠标准井标志层分区对比结构剖面,结合标志层沉积旋回模式,按照网格化对比流程,将标志层对比到所有井,直到标志层完全闭合为止。

一方面,可按照地震追层的常用技术流程,利用主测线和联络测线开展关键标志层地震剖面网格

化对比,在时间域内实现关键标志层在整个研究区内的闭合对比。

另一方面,可开展关键标志层与沉积旋回双约束多井地层对比。通过时深转换,将地震网格化对比获得的关键标志层时间数据转换为深度数据,并与标准井标志层分区对比结构剖面上的关键标志层深度数据及沉积旋回特征相匹配;在此基础上,结合利用标准井标志层分区对比结构剖面上的关键标志层,及地震网格化对比获得的关键标志层深度数据,将关键标志层对比到标准井邻近的其他井,依次逐井对比,直到完成研究区内所有井的关键标志层与沉积旋回对比,并且按照网格化流程,前后左右交叉对比,直到所有井的关键标志层与沉积旋回完全闭合,并与同位置处深度域地震关键标志层匹配一致为止。

2.2 逆冲走滑断层体系分级解析

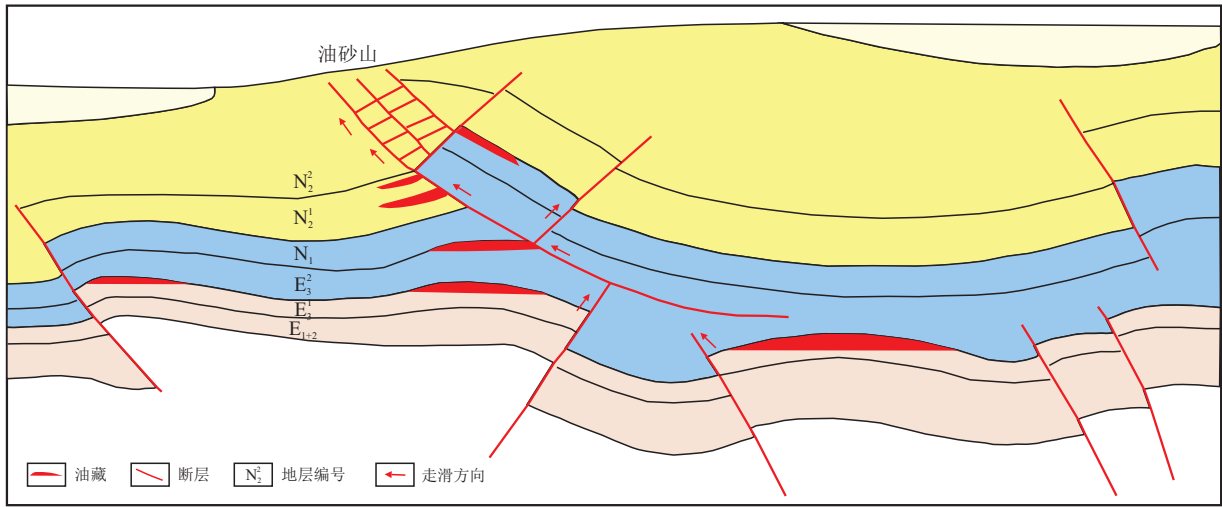
逆冲走滑断层体系一般包括1~2条一、二级主断层,产生一定数量的三、四级次级断层,次级断层进一步诱导,将产生更多的五、六级低级序次级断层^[16-20]。由此可见,逆冲走滑断层体系涵盖了一、二级断层到五、六级断层等几何尺度差异巨大的各个级别的断层。而现有的地质、测井及地震等探测手段对断层的解析识别精度差异较大,需要将不同级别断层的几何规模与对应识别精度的探测手段有机对应并结合起来,才能针对性完成对各级断层的有效识别与组合。为此,研发了4套分别针对主断层、有井三、四级次级断层、无井三、四级次级断层和五、六级低级序断层的解析技术,以满足逆冲走滑断层的分级识别、组合与检验的实际需要。

2.2.1 主断层地质—测井—地震—二维或三维视窗融合12步解析

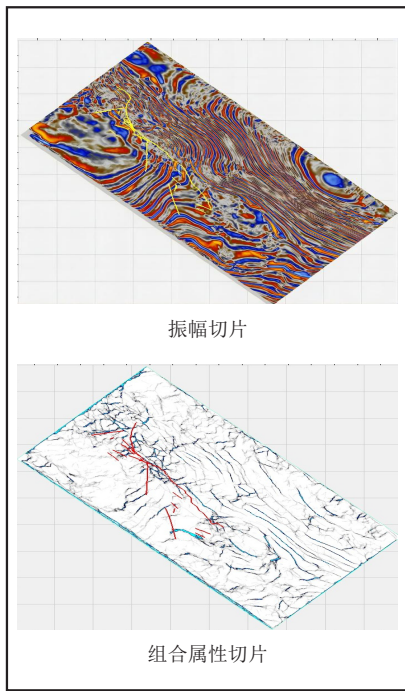
一、二级主断层具有规模大、延伸范围大、地质、测井、地震特征明显及纵横向展布复杂等特征,需要完整运用如图3所述的地质—测井—地震—二维或三维视窗融合12步法,才能准确识别,并完成其空间位置及形态的组合与检验。

1) 结合研究区大地构造背景及地质、地震资料分析,确定一、二级主断层的地质模式。

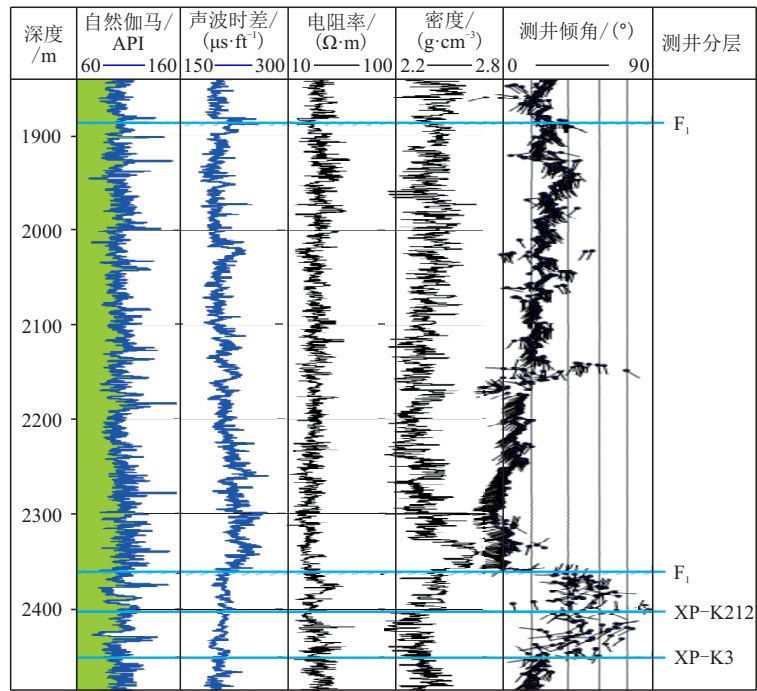
2) 在经过偏移叠加处理的地震数据体基础上,提取地震属性体,截取水平切片,分析不同时间深度,一、二级主断层展布特征,确立主断层整体格架。



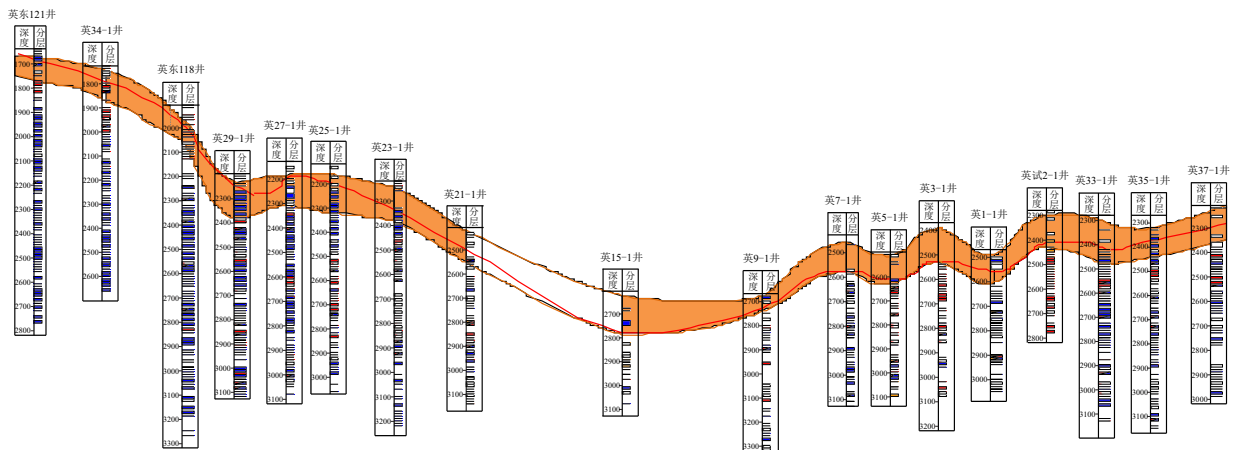
a 断层地层模式



b 地震属性确定断层格架



c 测井识别断点及地层破碎范围



d 地层破碎带多井对比

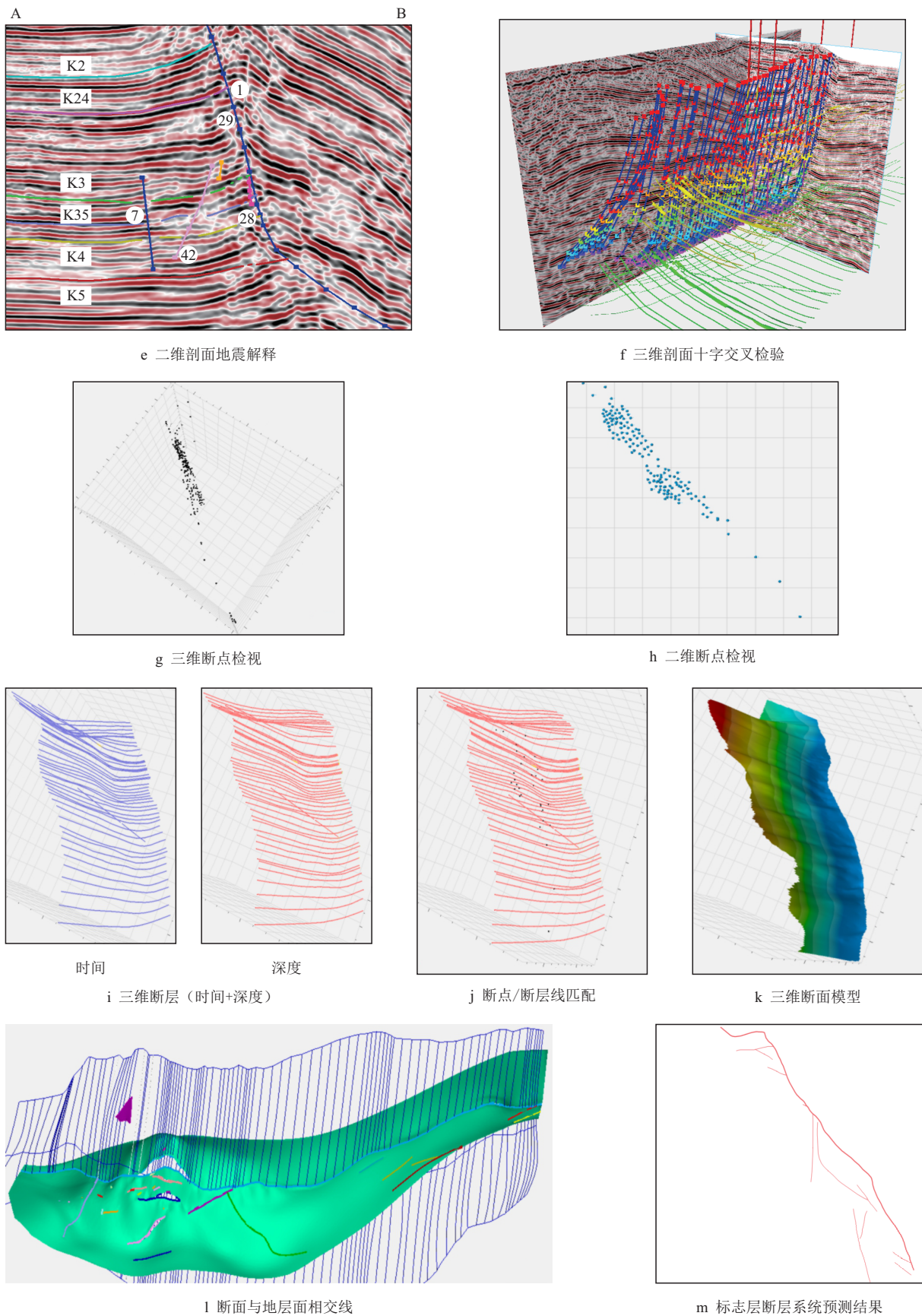


图 3 地质—测井—地震—二维或三维视窗融合 12 步断层识别—组合—检验技术流程图
 Fig. 3 Flow chart of geology—logging—seismic—2D or 3D window fusion 12-step fault identification—combination—inspection technique

3) 利用测井曲线在断层位置处与上下地层相比出现的规模异常,以及倾角测井展现出来的倾角与方位角在断层位置处与上下地层相比出现的规模突变,确定一、二级主断层破碎带范围和断点位置。

4) 对比各单井确定的一、二级主断层破碎带,核定一、二级主断层破碎带的空间分布范围。

5) 利用测井标定地震,在三维地震数据体的二维解释剖面上开展地层追踪和一、二级主断层二维剖面解释,拾取主测线、联络测线上及各二维地震剖面上的关键标志层和断层时间线,完成主断层地震解释。

6) 在三维视窗中,依靠十字交叉剖面变换,动态核实解释所得的关键标志层与断层时间线的空间分布合理性,回到步骤 5 修改完善其中异常的关键标志层或断层时间线,完成主断层三维视窗组合与检验。

7) 在三维视窗中,检查测井解释断点是否在同一平面或曲面上,若是,则可将这些断点视作同一断层,若不是,则这些断点不属该断层,需要组合到其他断层上,采用该方法逐次完成不同测井解释断点的三维视窗组合与检验。

8) 在二维视窗中展示认定的同一断层测井解释断点,初步圈定断层面的几何形态轮廓和分布范围。

9) 制作速度场模型,将地震解释断层时间线转化为断层深度线,利用三维视窗再次检查一、二级主断层组合的合理性。

10) 将深度域地震解释断层线与测井解释断点置于同一三维视窗中,检查该断层井震一体化解释的合理可靠性,剔除其中的异常断点或断层线,或保留这些异常断点与断层线以用于别的断层组合,实现对一、二级主断层三维视窗断点/断层线的组合与检验。

11) 利用组合与检验后的断点和断层线,建立断层曲面模型,完成一、二级主断层断面模型建立。

12) 将建立的所有断层曲面与同一标志层面相交,组合所有交线形成该标志层面上分布的断层系统,用以展示该标志层的平面断层几何特征与分布样式;按照该方法可逐次确定所有标志层的一、二级主断层系统,表征其几何特征与分布样式。

2.2.2 次级断层测井—地震二维或三维融合 9 步解析

经一、二级主断层的诱导,在主断层控制区域

内将产生大量三、四级次级断层,这些次级断层与主断层相比,具有规模小、延伸范围小及纵横向展布简单等特征,地震响应明显,若有井钻遇,则能见到明显的测井响应。可运用 2.2.1 节中的步骤 3、步骤 5~ 步骤 12 阐明的测井—地震—二维或三维视窗融合 9 步法(图 3),完成对这类三、四级次级断层的识别、组合与检验。需要说明的是,次级断层规模远较主断层小,在步骤 3 涉及的测井断点识别时,仅能检测到伽马、声波、密度、电阻和倾角等测井项的局部异常;在步骤 5 涉及的地震断层时间线识别时,也只能检测到中等幅度的同相轴错段。

2.2.3 次级断层地震二维或三维融合 5 步解析

针对 2.2.2 节提到的三、四级次级断层,若没有井钻遇时,只能利用三维地震资料开展次级断层解析。为此,需要在 2.2.1 节步骤 5、步骤 6、步骤 9、步骤 11 和步骤 12 等步骤中,去掉涉及测井的内容,改造形成次级断层地震二维或三维视窗融合解析的 5 步法,实现对无井次级断层的识别、组合与检验。

2.2.4 低级序断层测井二维或三维融合 5 步解析

在一、二级主断层背景中,经过三、四级次级断层的进一步诱导,将产生五、六级低级序次级断层,这些断层比三、四级次级断层的规模和延伸范围更小,纵横向展布也更简单。因识别精度所限,这些低级序断层在地震剖面上常常无响应,只能依靠测井曲线异常结合二维或三维视窗技术开展断层识别,组合与检验。具体做法是:对 2.2.1 节中的步骤 3、步骤 7、步骤 8、步骤 11 和步骤 12 等 5 个步骤进行改造,只保留其中与测井相关的内容,形成低级序次级断层测井二维或三维视窗融合解析的 5 步法。

2.3 多尺度断层褶皱全景表征与三维建模

2.3.1 多尺度多类型断层褶皱的阶梯状网格建模

针对地层跨度大(高达千米)、断层性质差异大(正、逆断层同存)、断层尺度差异大的复杂逆冲走滑断层褶皱体系,需要选用阶梯状网格建模方法,采用如下 4 个步骤完成三维建模。

1) 采用二维视窗制作多边形、或通过确定三维空间坐标的方法建立模型边界。

2) 结合测井解释断点和地震解释断层线,采用确定性建模方法建立断面模型,并依靠对不同断层间交切关系的地质认识,切割整合相交断层,建立断层切割关系模型。

3) 将地震解释或多井对比获得的标志层地层数据输入模型中,厘清各个断层与各个标志层间的

切割关系, 采用角点网格系统, 建立断层褶皱关系模型。

4) 在断层褶皱关系模型基础上, 依据现场实际需要, 设定模型纵向网格数目, 插值建立断层褶皱三维网格模型。

2.3.2 多尺度多类型断层褶皱的全景可视化表征

完成逆冲走滑断层褶皱体系三维建模之后, 即可依靠现有的二维或三维视窗技术, 实现对多尺度多类型断层褶皱的多视域全景可视化展现和表征。

3 英东油田油砂山逆冲走滑断层下盘的分区分级解析与三维全景表征

3.1 断层特征模式与破碎地层分区对比

受阿尔金断裂左行走滑与昆北断裂右行压扭走滑产生的巨大不均衡推覆剪切作用, 以及地层本身能干性强弱差异, 英东油田油砂山逆冲走滑断层(简称 F_1 , 下同)^[21-22] 形成了上部陡峭、中间过渡及下部平缓的剖面分段(图 3a), 以及西北部弯曲、中部

平直和东南部顺弯的平面分区(图 3b)的逆冲走滑铲式断层构造样式。如图 3c 和图 3d 所示, 在 F_1 影响范围内, 出现随空间位置变化而规模大小不等的地层破碎区, 破碎区内纵向上自 K_2 标志层到 K_5 标志层间的 31 个标志层(对比图 4a、图 4b、图 4c, 可以清晰看到 31 个标志层)均发现了破碎现象, 平面上沿 F_1 两盘破碎带的宽度从几十米到数百米不等, 破碎区内的测井及地震响应杂乱, 难以直接开展地层对比, 需要在破碎地层关键标志层交叉引层与分区标定的基础上, 完成沉积旋回-关键标志层双约束多井地层对比。

图 4a 为依靠岩芯资料井确定的研究区地层层序结构标准和三级沉积旋回分层方案; 图 5a 和图 5b 为声波时差和密度测井曲线, 结合研究区优化统计地震子波, 建成的浅(Q 井)、深(S 井)不同区域标准井标志层对比结构剖面, 形成破碎地层标志层分区对比标准。图 5c 是利用 VSP 井资料制作人工合成地震记录, 形成的关键标志层引层结构剖面(Sh 井)。

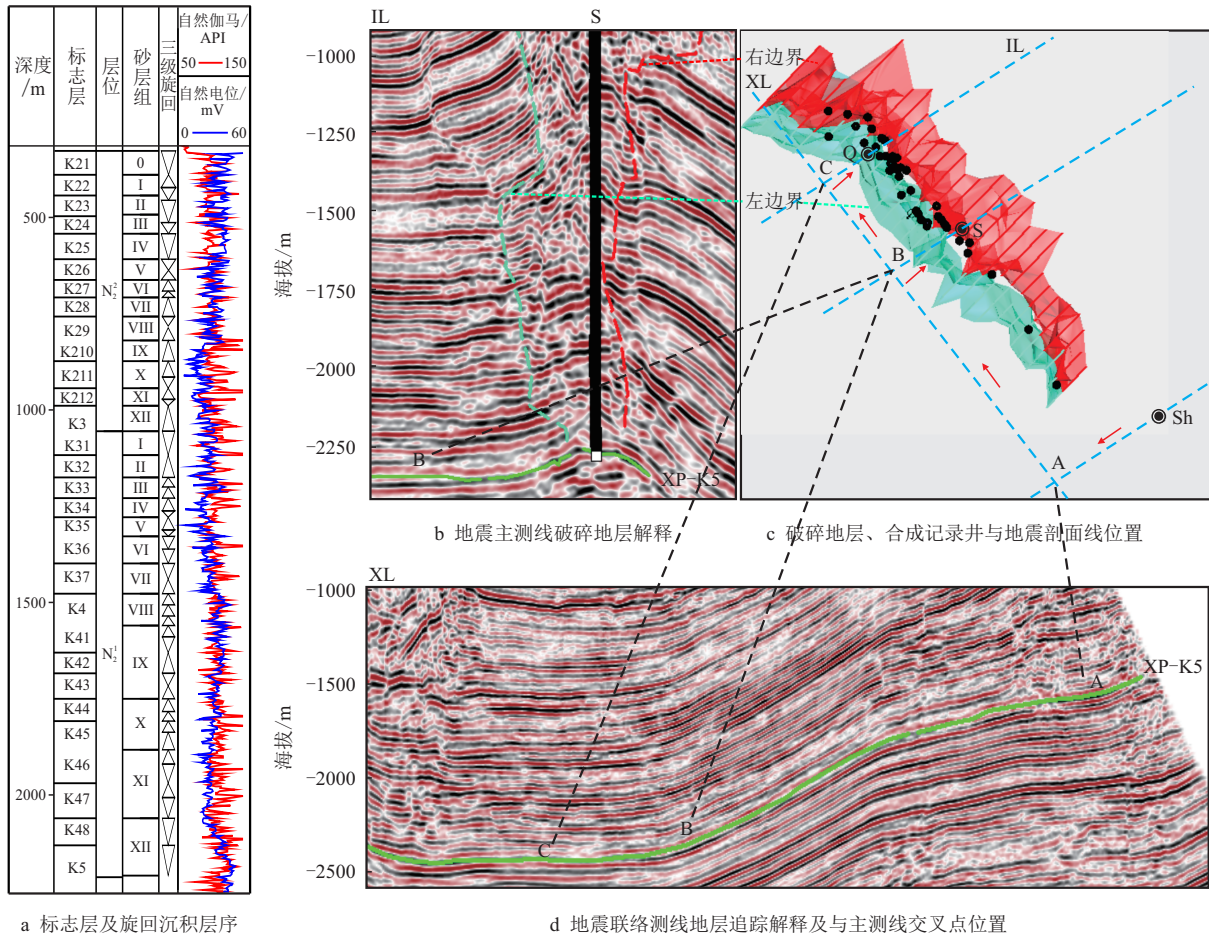


图 4 研究区标志层旋回沉积层序与关键标志层交叉分区引层路径优化示例

Fig. 4 Example of path optimization for cross zoning between marker cycle sedimentary sequence and key marker layer in the study area

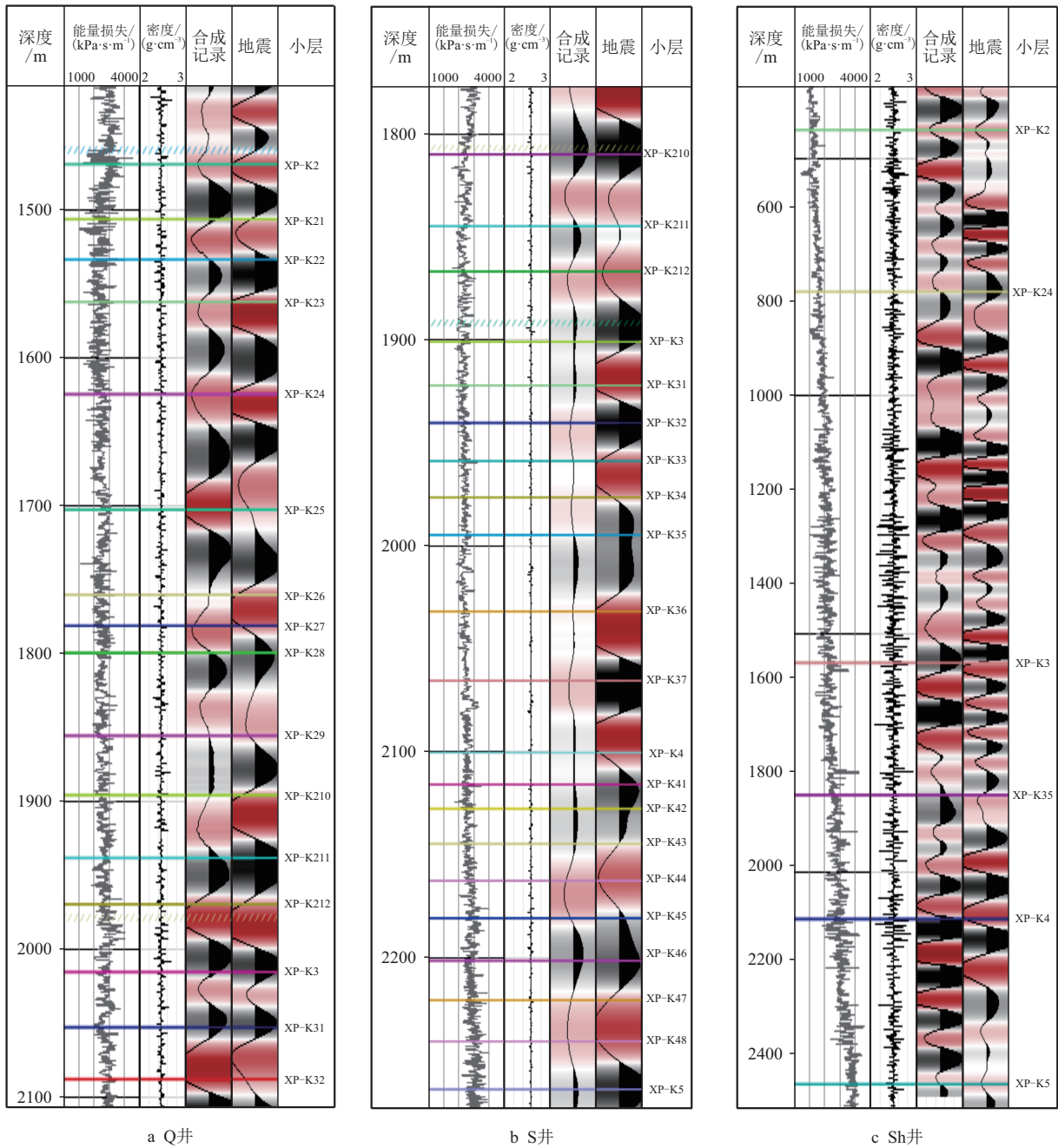


图 5 研究区对比结构剖面与引层结构剖面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the contrast structure section in the study area and the structure section of the approach layer

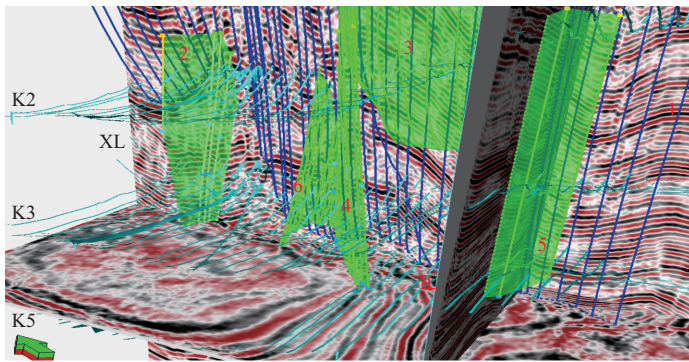
图 4b、图 4c 及图 4d 还详细给出了关键标志层交叉分区引层案例。引层结构剖面所在的 Sh 井处于逆冲走滑断层褶皱体系 F_1 上盘区域,若将 Sh 井的地层时间-深度信息通过直线地震剖面直接引到 Q 井或 S 井(位置见图 4c),引层路径都需要经过破碎地层区域,该区域内地震振幅剖面目标层同相轴错乱不堪(图 4b),势必导致引层失败。为此,先将引层结构剖面所在的 Sh 井关键标志层 K5(为了区分 F_1 上、下盘地层,特在下盘地层编号前加上

“XP-”)通过 IL 测线引到 XL 测线,具体依靠两条测线间的交点 A 开展关键标志层信息转换,将关键标志层信息从过 Sh 井的 IL 测线转换到 XL 测线,经由 XL 测线引到 B 点, B 点为 XL 测线与经过 S 井的 IL 测线的交点;利用 B 点转换,将关键标志层信息由 XL 测线转换到经过 S 井的 IL 测线,再经由通过 S 井的 IL 测线将关键标志层信息转载到 S 井(图 4c,图 4d)。通过上述的两条 IL 测线和一条 XL 测线的交叉引层,建立了从引层结构剖面 Sh

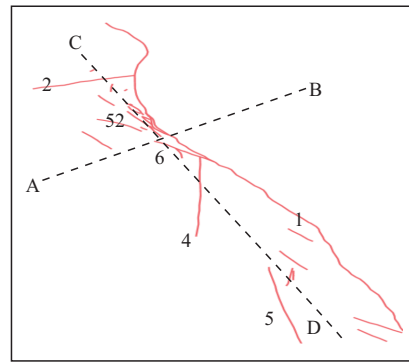
井到标准井标志层对比结构剖面 S 井之间的关键标志层信息联结通道, 实现了关键标志层信息在该联结通道上的正向传递, 用以实时调整 S 井的人工地震合成记录, 确保 S 井的关键标志层时间-深度信息与 Sh 井 VSP 测试井的关键标志层时间-深度信息的一致。按照相同的技术流程, 将 VSP 测试井 Sh 的 6 个关键标志层(图4c)先后引导到 S 井和 Q 井, 从而保证了 S 井和 Q 井 6 个关键标志层与 Sh 井关键标志层时间-深度信息的匹配一致。依据确定的关键标志层时深关系, 分别落实了 Q 井 K2 到 K3 间标志层, 以及 S 井 K3 到 K5 间标志层的时深关系, 建立起全区范围 K2 到 K5 间标志层

的时深关系(图 5a, 图 5b)。分别以 S 井和 Q 井作为出发点, 按照全区覆盖、逐次外推策略, 制作出 44 口合成记录井(图 4c 黑色点), 实现了对破碎地层有井含油区域的全覆盖, 将标志层时深信息传递到了整个研究含油区域范围。

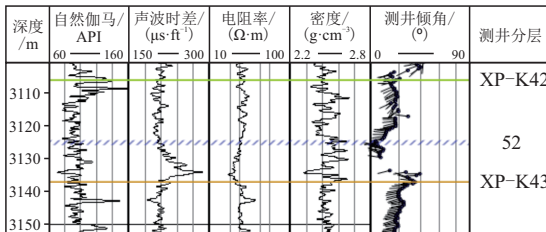
上述过程依靠对合成记录井震信息的分析, 以及对标志层地震响应特征强弱及分布范围大小的判断, 筛选出了特征明显、全区广泛分布的 K2、K24、K3、K35、K4 和 K5 等 6 个关键标志层, 在全区范围内, 利用主测线和联络测线构成的地震剖面网格化对比程序, 完成了地震地层闭合对比工作; 经时深转换后, 形成了深度域地震地层格架(图 6)。



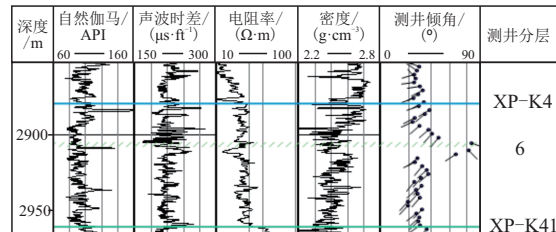
a 三维空间地震解释二级、三级断层切割关系



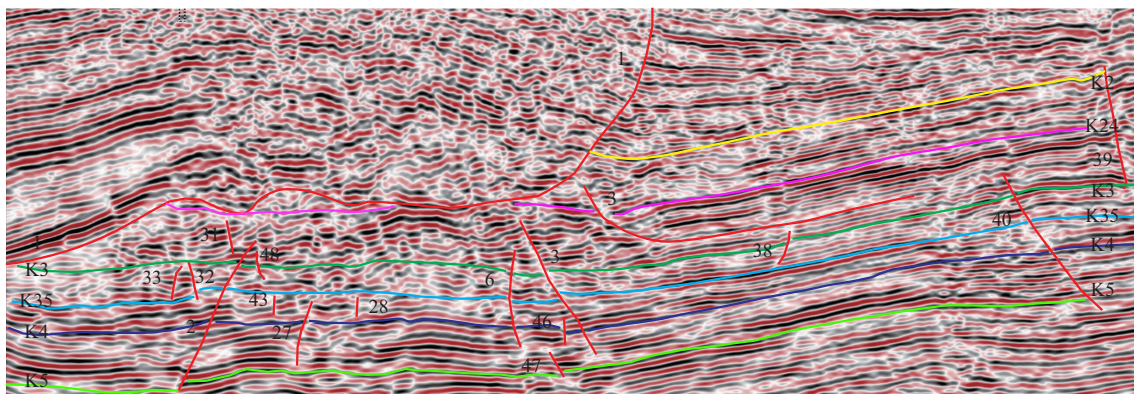
b K3标志层断层体系分布(AB为图3e的所示地震主测线剖面线位置, CD为图6e的剖面线位置)



c 52号断层测井响应识别特征



d 6号断层测井响应识别特征



e 联络测线方向地震追层和断层分级解释成果

图 6 研究区井震一体化地层追踪与分级断层识别、组合与检验部分成果

Fig. 6 Results of integrated formation tracking and classification fault identification, combination and inspection in the study area

在此基础上,进一步依靠前述的关键标志层与沉积旋回双约束策略,以形成的深度域地震地层格架为基准,结合标志层间的沉积旋回特征,开展多井标志层对比,调整梳理所有井的标志层,直到井震标志层匹配一致(图 6),实现了全区范围内所有井、所有标志层在时间和空间上的闭合统一。

3.2 基于不同资料特点的断层分级解析

以英东油田油砂山断裂下盘含油区域为例,依靠建立的逆冲走滑断层体系分级解析技术,针对研究区录取的地质、地震、测井资料特点及对不同级别断层的响应差异,分别采用 12 步法、9 步法和 5 步法,完成了包括一条二级主断层 F_1 、5 条控块三级断层、38 条块内切割致使地层破碎复杂化的四、五级断层的整个断层体系的识别、组合与一致性检验。

图 3 详细给出了识别、组合与检验二级主断层 F_1 的 12 步法的具体实施过程。首先,依靠前人研究获得了断层地质模式(图 3a),结合地震振幅切片和各类组合属性切片(图 3b),得到了断层在研究区的总体轮廓与错断规模。其次,利用常规测井曲线伽马、声波、密度及电阻等与上下地层相比出现的规模异常,以及倾角测井展现出来的倾角及方位角的规模突变,确定的实钻井点处 F_1 造成的地层破碎带范围和实际断点位置(图 3c,图 3d),利用二维或三

维视窗检验解释断点的空间一致性(图 3g,图 3h)。然后,依靠 F_1 巨幅的地震同相轴错断特征,断层地质模式、总体轮廓与错断规模,结合地震追层成果,开展二维剖面地震断层识别与解释(图 3e,图 6e),并通过三维剖面观察及十字交叉检验流程控制断层时间线的空间一致性(图 3f,图 3i)。再次,依靠时深转换,将地震解释时间线转化为深度域断层线(图 3i),并与测井解释断点组合在一起,利用三维视窗进行井震解释一致性匹配检验(图 3j),输入通过检验的测井解释断点和地震解释深度断层线,建立断面模型,并利用三维视窗核定断层的空间分布合理性(图 3k)。最后,求得得到标志层面与断层面间的相交线,刻画出 F_1 断层在标志层上的实际分布范围、几何形态与展布特征(图 3l)。

在 F_1 断层基础上,进一步利用井-震一体化二维或三维视窗融合解析的 9 步法,完成了在 F_1 断层诱导下的两条控块三级断层、1 条块内四级断层和 10 条块内五级断层的识别、组合与检验;利用地震二维或三维视窗融合解析的 5 步法,完成了在 F_1 断层诱导下的 3 条控块三级断层、3 条块内四级断层、18 条块内五级断层的识别、组合与检验;利用低级序次级断层测井二维或三维视窗融合解析的 5 步法,完成了在 F_1 断层诱导下的 6 条块内五级断层的识别、组合与检验(表 1,表 2)。

表 1 研究区断层体系分级分类解析

Tab. 1 Analysis of fault system classification and classification in the study area

断层级别	断开地层	对断层识别敏感的探测手段	解析方法	断层数量/个	控制作用
二级	K2~K5	区域地质、地震和测井	12 步法	1	控制油藏边界
三级	K2~K5 或 K2~K27 或 K24~K4	地震和测井	9 步法	2	控制油藏内部断块边界与断块规模
		仅地震,并未钻遇	5 步法	3	
四、五级	大部 1~6 个标志层,少量 K2~K5	地震和测井有响应	9 步法	11	控制断块内地层破碎程度及流体复杂程度
		仅地震,并未钻遇	5 步法	21	
		地震无响应,测井有响应	5 步法	6	

表 2 研究区断层产状要素特征汇总表

Tab. 2 Characteristics of fault attitude elements in the study area

断层级别	正断层数量/个	逆断层数量/个	延伸长度/m	走向	断面形态	倾向	倾角/(°)	垂直落差/m
二级	0	1	满布研究区东北和东部边界	总体走向由西北向东南,西北段、中段和东南段略有差异	铲式,上部陡峭,中间过渡,下部平缓	由西南向东北,局部略有差异	20~80	600~1 300
三级	1	4	分布在研究区内断块边部,919~5 503 m	断层间走向差异较大	不规则弯曲面或平面	断层间倾向差异较大	10~85	10~123
四、五级	17	19	分布在断块内部	走向各不相同	不规则平面	倾向各不相同	10~82	9~36

图 6a 以研究区二级、三级断层为例,在三维空间中展示了断层间复杂的切割关系;图 3l 和图 6b 分别以 K2、K3 标志层为例,展示了研究区 F_1 主断

层西北部弯曲、中部平直、东南部顺弯的平面分区样式及 F_1 控制下各次级断层的平面分布特点和组合关系;图 3c 和图 6c、图 6d 分别给出了二级(F_1)、

三级(6号)和五级(52号)断层在测井上的响应规模差异及识别特征;图3e和图6e则展示了地震主测线和联络测线上 F_1 主断层上部陡峭、中间过渡及下部平缓的剖面分段样式及 F_1 控制下各次级断层的剖面分布特点及组样式。

表1详细总结了柴达木盆地英东油田油砂山逆冲走滑断层体系中断层分级识别敏感探测手段,断层分级解析方法,采用每种解析方法识别、组合的断层级别和数量,断层对油藏的控制作用特征,每类断层的性质和数量,断层延伸长度、走向、断面形态、倾向倾角、垂直落差等产状要素特征。

3.3 基于断层体系特点的阶梯状网格建模与全景表征

上述分析表明,英东油田油砂山断层下盘断层体系的断开地层、断层性质、错断规模及产状要素各不相同、差异巨大(表1),需要采用阶梯状网格建模方法开展构造建模。

依据2.3.1提供的阶梯状网格建模步骤1和步骤2,建立的英东油田油砂山断层下盘三维断层模型如图7a所示,结合图3l和图6b展示的K2、K3

标志层断层分布,从不同维度再现了水平挤压应力与压扭剪切应力叠加耦合及地层能干性强弱差异的共同作用下,油砂山 F_1 逆冲走滑断层呈现出的西北、中部和西南不同部位断层复杂性及其分布特征的较大差异。在 F_1 西北弯曲部位,构造应力变化与地层能干性强弱的非均质性非常强烈,主断层形态在平面和纵向剖面均发生了畸变,诱导形成的次级断层不仅多、而且分布杂乱; F_1 东南顺弯部位的构造应力变化与地层能干性强弱的非均质性次之, F_1 断层的畸变有所减弱,诱导形成的次级断层数量减少,分布的规律性增强; F_1 中部平直段的构造应力与地层能干性变化减弱,不仅 F_1 断层形态规整,诱导形成的次级断层也明显减少。上述针对逆冲走滑断层体系内部构造差异性特征的精准刻画,有利于油田的精细化管理。

按照2.3.1提供的阶梯状网格建模步骤3和步骤4,建立的英东油田油砂山断层下盘构造三维模型见图7b。该模型由44条断层和33个标志层构成,形成了完整的英东油田油砂山断层下盘构造格架,为后续的油藏精细表征提供了扎实的基础。

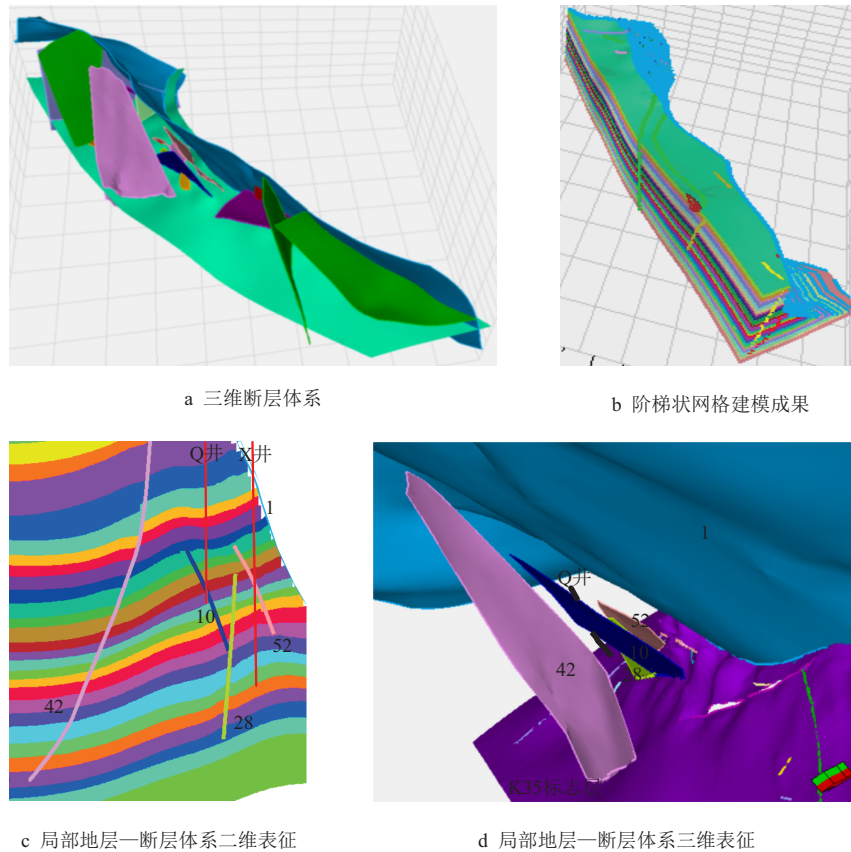


图7 基于断层体系特点的阶梯状网格建模成果与断层体系的全景表征

Fig. 7 Results of stepped grid modeling based on the characteristics of fault system and the panoramic characterization of fault system

图 7c 是在建立的三维构造模型上切割的局部二维剖面(剖面位置见图 4c), 该剖面展示了 Q 井附近的构造细节。邻近 Q 井发育 10 号五级逆断层和 28 号五级正断层, 两侧还发育 42 号四级正断层和 52 号五级逆断层; 受 F_1 二级断层逆冲走滑影响, 10 号和 52 号断层倾向与 F_1 断层一致, 42 号和 28 号断层倾向与 F_1 断层相反, 其中, 10 号断层底部侧缘应力被 28 号断层卸载, 形成被 28 号断层横切遮挡的交切样式, 其余断层均独立分布, 未发生交切; 在地层错断的同时, 受非对称挤压应力影响, 出现了褶皱轴线由下向上逐渐倾斜的斜向逆冲背斜^[23-25](图 7c 黑色虚线)。正、逆断层的共存与斜向逆冲背斜的出现, 为英东油田油砂山断层下盘的逆冲走滑构造体系提供了扎实的构造成因证据。

图 7d 为图 7c 的三维呈现。为了清晰地展示 Q 井附近各条断层在三维空间分布的细部特征, 在制作三维全景表征图时, 只保留了横切断层底部附近的 K35 标志层。该图立体展示了被 F_1 诱导形成的 42 号、28 号、10 号和 52 号断层在三维空间的分布特征与样式, 42 号断层与 F_1 断层围成局部小断块, 28 号、10 号和 52 号断层则使小断块中的地层空间更加破碎复杂, 而 10 号断层底部侧缘被 28 号断层阻隔的特征也清晰可见。

3.4 成果应用

在开展逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征工作之前, 英东油田油砂山逆冲走滑断层下盘构造依靠的是常规地震解释结合测井识别的方法开展构造研究, 研究成果停留在地震响应特征明显的标志层^[26], 识别的断层包括一条二级 F_1 断层和 5 条三级断层。 F_1 断层的平面分布为一条光滑曲线, 三级断层的平面分布也为一条光滑直线, 断层的形态和分布过于理想化, 与实际生产动态矛盾突出, 无法有效指导注采井部署, 高效产出难以为继。

针对上述问题, 本研究依靠建立的逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征方法, 开展了断层特征模式与破碎地层分区对比、基于资料特点的断层分级解析和基于断层体系特点的阶梯状网格建模与全景表征, 完成了 134 口井、49 km² 地震, 31 个标志层的分区对比复核, 构建了全区闭合统一的地层结构模型, 建立了包括一条控边二级断层, 5 条控块三级断层、38 条块内四、五断层的完整的英东

油田下盘断层体系, 刻画了 3 个不同平面构造单元与 8 个不同纵向亚构造的断层褶皱特征与油水分布特征, 系统表征了各条断层在纵横向及平面上的走向、倾向、形态及错断关系等构型样式, 延伸长度、倾角及垂直落差等产状要素, 描述了每条断层的空间位置、展布特征和功能作用等, 经与钻井、地震及生产动态等资料的校验, 证实了上述方法、断层体系的科学性、合理性与可靠性。为油藏下一步注采关系分析提供了地质认识和模型基础。

4 结 论

1) 逆冲走滑构造体系异常复杂, 常规井震结合方法无法完成高质量解析, 需要采用更加注重断层体系内不同断层级别的规模差异、融合不同探测手段断层识别精度差异而建立的分区分级解析与三维全景表征方法, 以实现逆冲走滑复杂构造体系的精细表征与准确解析。

2) 逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景表征方法包含 3 项关键技术和 8 项关键技术环节。其中, 破碎地层分区划分与对比技术, 包括: 破碎地层关键标志层交叉引层与分区标定、沉积旋回—关键标志层双约束多井地层对比; 逆冲走滑断层体系分级解析技术, 包括: 主断层地质—测井—地震二维或三维融合的 12 步解析、次级断层测井—地震二维或三维融合的 9 步解析、次级断层地震二维或三维融合的 5 步解析、低级序断层测井二维或三维融合的 5 步解析; 多尺度断层褶皱全景表征与三维建模技术, 包括: 多尺度多类型断层褶皱的阶梯状网格建模、多尺度多类型断层褶皱的全景可视化表征。

3) 英东油田油砂山逆冲走滑断层下盘的分区分级解析与三维全景表征表明: (1) 依靠开展的断层特征模式与破碎地层分区对比, 建成了英东油田下盘全区闭合统一的地层结构模型; (2) 通过 4 套针对逆冲走滑断层体系内不同级别断层识别与组合技术的分级实施, 建起了研究区内包括 1 条控边二级断层, 5 条控块三级断层和 38 条块内四、五级断层的完整可靠、科学合理的断层体系; (3) 采用基于逆冲走滑断层体系特点的阶梯状网格建模与全景表征, 刻画了 3 个不同平面构造单元与 8 个不同纵向亚构造的断层褶皱特征; (4) 上述成果的成功应用充分证实了逆冲走滑断层分区分级解析与三维全景

表征的适用性和可靠性。

参考文献

- [1] 袁亚娟, 吕宝凤, 刘见宝, 等. 柴达木盆地断裂发育特征及其动力学机制探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(6): 46–52. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2010.06.010
YUAN Yajuan, LÜ Baofeng, LIU Jianbao, et al. The kinematic characteristics of the fault system of Qaidam Basin and its dynamic mechanism[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(6): 46–52. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2010.06.010
- [2] 李明义, 岳湘安, 江青春, 等. 柴达木盆地北缘主要构造带构造演化与油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 461–468.
LI Mingyi, YUE Xiang'an, JIANG Qingchun, et al. Relationship between hydrocarbon accumulation and tectonic evolution in main structural belt of the northern border of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 461–468.
- [3] 陈思明, 侯明才, 房启飞, 等. 塔北隆起英买2地区奥陶系油气成藏特征及富集规律[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 64–71. doi: 10.3969/j.issn.1673-8926-2015.06.009
CHEN Siming, HOU Mingcai, FANG Qifei, et al. Hydrocarbon accumulation and enrichment rule of Ordovician in Yingmai-2 Area, northern uplift of Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(6): 64–71. doi: 10.3969/j.issn-1673-8926.2015.06.009
- [4] 盛书中, 万永革, 黄骥超, 等. 应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 436–452. doi: 10.6038/cjg20150208
SHENG Shuzhong, WAN Yongge, HUANG Jichao, et al. Present tectonic stress field in the Circum-Ordos region deduced from composite focal mechanism method[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2015, 58(2): 436–452. doi: 10.6038/cjg20150208
- [5] 向杰, 陈尚斌, 王阳, 等. 断裂体系对页岩气保存的影响——以滇东北地区五峰—龙马溪组为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3599–3612. doi: 10.13225/j.cnki-jccs.2020.1645
XIANG Jie, CHEN Shangbin, WANG Yang, et al. Effect of fault system on shale gas preservation: A case study of the Wufeng–Longmaxi Formation in northeast Yunnan Area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3599–3612. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1645
- [6] 纪贤伟. 三维地震资料在松辽盆地北部西部斜坡的应用[J]. 非常规油气, 2019, 6(5): 23–31.
JI Xianwei. Application of 3D seismic data to the western slope of northern Songliao Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(5): 23–31.
- [7] OU Chenghua, CHEN Wei, LI Chaochun, et al. Structural geometrical analysis and simulation of decollement growth folds in piedmont Fauqi Anticline of Zagros mountains[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59: 1885–1898. doi: 10.1007/s11430-016-5332-6
- [8] 李婷婷, 侯思宇, 马世忠, 等. 断层识别方法综述及研究进展[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1507–1514. doi: 10.6038/pg2018BB0311
LI Tingting, HOU Siyu, MA Shizhong, et al. Overview and research progress of fault identification method[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1507–1514. doi: 10.6038/pg2018BB0311
- [9] 肖坤泽, 童亨茂. 走滑断层研究进展及启示[J]. 地质力学学报, 2020, 26(2): 151–166. doi: 10.12090/j.issn-1006-6616.2020.26.02.015
XIAO Kunze, TONG Hengmao. Progress on strike-slip fault research and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 151–166. doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.015
- [10] LIN J, STEIN R S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B2): B02303. doi: 10.1029/2003JB002607
- [11] CHEN L, KHAN S D. InSAR observation of the strike-slip faults in the northwest Himalayan frontal thrust system[J]. Geosphere, 2010, 6(5): 731–736.
- [12] LI Yuqiang, WANG Dun, XU Shenghui, et al. Thrust and conjugate strike-slip faults in the 17 June 2018 MJMA 6.1(Mw 5.5) Osaka, Japan, earthquake sequence[J]. Seismological Research Letters, 2019, 90(6): 2132–2141. doi: 10.1785/0220190122
- [13] GRINGARTEN E J, ARPAT G B, HAOUESSE M A, et al. New grids for robust reservoir modeling[C]. SPE 116649-MS, 2008. doi: 10.2118/116649-MS
- [14] ALPAK F O, CHEN T. Dynamic effects of fault modeling on stair-step and corner-point grids[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production, 2021, 11(3): 1323–1338. doi: 10.1007/s13202-020-01082-1
- [15] CHEN Liangzhi, QIN Jie, LU Yongchang. Research on artificial synthetic seismic record based on adaptive positive definite least squares method[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2020, 62(4): 318–326. doi: 10.1504/IJCAT.2020.107422
- [16] VELOSO E E, GOMILA R, CEMBRANO J, et al. Stress fields recorded on large-scale strike-slip fault systems: Effects on the tectonic evolution of crustal slivers during oblique subduction[J]. Tectonophysics, 2015, 664: 244–255. doi: 10.1016/j.tecto.2015.09.022

- [17] RICCIO S J, FITZGERALD P G, BENOWITZ J A, et al. The role of thrust faulting in the formation of the eastern Alaska Range: Thermochronological constraints from the Susitna Glacier thrust fault region of the intracontinental strike-slip Denali fault system[J]. *Tectonics*, 2014, 33(11): 2195–2217. doi: 10.1002/2014TC003646
- [18] HOLLINGSWORTH J, FATTAHI M, WALKER R, et al. Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia-Eurasia convergence in NE Iran since Oligocene[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(3): 1214–1246. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04591.x
- [19] KRSTEKANIĆ N, MATENCO L, STOJADINOVIC U, et al. Strain partitioning in a large intracontinental strike-slip system accommodating backarc-convex orocline formation: The Circum-Moesian fault system of the Carpatho-Balkanides[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 208: 103714. doi: 10.1016/j.gloplacha.2021.103714
- [20] NING Fei, YUN Jinbiao, ZHANG Zhongpei, et al. Deformation patterns and hydrocarbon potential related to intracratonic strike-slip fault systems in the east of central uplift belt in the Tarim Basin[J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(1): 63–72. doi: 10.1016/j.engeos.2021.10.008
- [21] 马达德, 陈琰, 夏晓敏, 等. 英东油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2019, 40(1): 115–130. doi: 10.7623/syxb201901010
MA Dade, CHEN Yan, XIA Xiaomin, et al. The discovery and key exploration and prospecting technology of Yingdong Oilfield in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1): 115–130. doi: 10.7623/syxb2019-01010
- [22] 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探新进展[J]. *石油学报*, 2016, 37(S1): 1–10.
FU Suotang, MA Dade, CHEN Yan, et al. New advance of petroleum and gas exploration in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 1–10.
- [23] 张猛. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析[D]. 南京: 南京大学, 2014.
ZHANG Meng. Three-dimensional structural geometry of fault-related folds[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [24] 欧成华, 陈伟, 韩耀祖, 等. 扎格斯盆地 Buzurgan 背斜斜向逆冲断裂褶皱的几何解析及运动学模拟[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 385–393. doi: 10.3799/dqkx.-2016.030
OU Chenghua, CHEN Wei, HAN Yaozu, et al. Geometric analysis and kinematic simulation of oblique-thrust fault-related-fold of Buzurgan Anticline in Zagros Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 385–393. doi: 10.3799/dqkx.-2016.030
- [25] 张猛, 贾东, 王毛毛, 等. 斜向逆冲断层相关褶皱的正演模型与实例分析[J]. *地质论评*, 2013, 59(6): 1207–1217. doi: 10.16509/j.georeview.2013.06.026
ZHANG Meng, JIA Dong, WANG Maomao, et al. Forward modeling of oblique-thrust fault-related-folds and instances analysis[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1207–1217. doi: 10.16509/j.georeview.2013.06.026
- [26] 梁晓宇, 高树芳, 高志成, 等. 井震结合精细刻画英东油田断块油藏构造[J]. *测井技术*, 2015, 39(2): 232–235. doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2015.02.02
LIANG Xiaoyu, GAO Shufang, GAO Zhicheng, et al. Finely describing fault oil reservoir construction with logging and seismic date in Yingdong Oilfield[J]. *Well Logging Technology*, 2015, 39(2): 232–235. doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2015.02.02

作者简介



欧成华, 1971年生, 男, 汉族, 四川成都人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事地质油藏一体化及人工智能等方面的科研和教学工作。
E-mail: cho-mm@163.com



王泽宇, 1998年生, 男, 汉族, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事油气藏精细描述方面的研究工作。
E-mail: 3528189968@qq.com



柳金城, 1971年生, 男, 汉族, 山东高密人, 教授级高级工程师, 主要从事油藏开发地质方面的研究。
E-mail: liujcqh@petrochina.com.cn



李兆亮, 1982年生, 男, 汉族, 甘肃白银人, 高级工程师, 主要从事地质建模与数值模拟等方面的研究。E-mail: lzlyjqh@petrochina.com.cn



梅华, 1989年生, 女, 汉族, 湖北黄梅人, 工程师, 主要从事油藏地质方面的研究工作。E-mail: meihua44qh@petrochina.com.cn

编辑: 张云云

编辑部网址: <http://zk.swpxb.com>