

低幅构造识别技术研究与应用

王震¹, 计智锋¹, 张艺琼¹, 王雪柯¹, 林雅平¹, 孔令洪¹, 蒋黎², 张孝珍²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京博达瑞恒科技有限公司, 北京 100101)

摘要: 针对滨里海盆地东缘阿克若尔构造带低幅度构造识别的问题, 开发基于反演层速度法和构造趋势面拟合法的低幅构造识别方法。该方法适用于局部发育速度异常体、速度变化快、斜坡区目的层埋藏深度大且圈闭幅度小的情况; 优选构造解释层位趋势和单井速度约束下的层速度反演的方法建立研究区速度模型, 对地震层位进行标定, 克服了常规层速度反演方法横向连续性的限制, 对复杂地层具有更好的适应性; 构造趋势面拟合法对研究区低幅构造进行有效识别, 克服了因构造幅度低、同相轴平直并且变化幅度小而难以识别的问题, 对滨里海东缘深度域构造图进行构造趋势面拟合, 取得了较好的效果。

关键词: 低幅构造; 速度模型; 反演; 构造趋势面拟合

中图分类号: P65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)14-0210-10

随着高精度地震勘探程度的深入和地震识别技术的不断进步, 圈闭幅度小、识别难度大的低幅构造已得到更广泛的关注, 地幅构造通常具有“小而肥”的油藏潜力。2023年, 柴兵强等^[1]使用“统计法”进行低幅构造识别的研究; 2023年, 王羽君等^[2]利用测井数据构建速度场进行低幅构造识别; 2021年, 何文刚等^[3]在层序地层学方法理论上进行三维地质建模, 将低幅构造可视化; 2020年, 胡秋媛等^[4]构建趋势面追踪识别低幅构造; 2020年, 魏真真等^[5]利用S变换构建沉积旋回体特征模型追踪低幅构造; 2020年, 郭延辉和候克鹏^[6]优化特征点法建立移动趋势面来识别低幅构造; 2017年, Wu等^[7]利用趋势分解法及小波分解法识别低幅构造; 2017年, 肖炎辉^[8]在趋势分解法及小波分解法之前对地震资料进行去低频化, 并取得一定的应用效果。研究区存在盐岩、低速泥岩等地质异常体, 应用前人的识别方法存在无法准确建立速度变化较大的三维速度场, 对下覆地层在成像及速度场建立等方面存在较大的影响。本文通过多种方法试验, 最终选定基于反演层速度法和构造趋势面拟合法完成对研究区低幅构造的识别, 效果较好。

1 区域地质概况

滨里海盆地位于里海北部, 东西长约600 km, 是世界主要含油气盆地之一^[9], 主要包括Kotyrta North、Novobogatinsk、kirikli在内的多个油气田。研究区阿克若尔构造带位于滨里海盆地东部成藏带西部缓坡区, 呈中南部略高、向南北逐渐变低的狭长状展布特征, 南北长约130 km, 东西宽6~15 km, 面积约为1 100 km²。阿克若尔构造带石炭系地层南北向整体平缓, 略有起伏, 发育局部高点, 二叠系地层南部厚度变化大, 北部较厚, 南部减薄^[10-12]。阿克若尔构造带从南至北发育低幅度构造圈闭, 油气主要受岩性控制, 油气藏类型为构造-岩性油气藏, 陡坡带主要发育断块圈闭和岩性圈闭^[13-15]。阿克若尔构造带油气分布特征复杂, 存在多套油水系统, 尤其是缓坡区低幅度构造识别和陡坡区的小断层刻画是难点^[16-18]。

2 低幅构造识别方法

2.1 井震结合联合标定

滨里海盆地东缘目前有4块三维地震, 从4块三维地震资料目的层(上泥盆统至下二叠统地层)

收稿日期: 2024-04-14

基金项目: 中石油集团公司十四五海外勘探前瞻性基础性技术攻关项目(2021DJ31004)

作者简介: 王震(1976—), 男, 河北保定人, 博士, 高级工程师, 研究方向为含盐盆地油气勘探; 计智锋(1970—), 男, 河北承德人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海外风险勘探和勘探规划; 张艺琼(1990—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 工程师, 研究方向为大地构造及油气成藏; 王雪柯(1996—), 女, 重庆人, 硕士, 工程师, 研究方向为海外油气勘探与开发; 林雅平(1981—), 女, 江苏丹阳人, 研究方向为测井解释及海外油气勘探; 孔令洪(1976—), 男, 湖北潜江人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海外油气勘探; 蒋黎(1982—), 女, 四川南充人, 硕士, 工程师, 研究方向为油气田勘探与开发; 张孝珍(1982—), 女, 山东济宁人, 硕士, 工程师, 研究方向为油气田勘探与开发。

频谱特征基本一致,频宽为 5~45 Hz,主频为 20 Hz,T-I 区块全区覆盖二维地震资料,目的层段 P1、KT-I、KT-II 以及 Visean 地震剖面反射特征清楚,同向轴连续性较好,频宽为 5~50 Hz,主频为 25 Hz;近东西向与近南北向地震测线无闭合差。

基于井震结合的二维和三维谱与测井分析技术,根据测井资料和地震资料进行正演^[19-20],利用正演和谱分析技术建立层序模型,通过对比分析谱旋回和测井沉积旋回特征,再把测井旋回标定到地震剖面上,根据多口井的旋回特征追踪地震剖面上的沉积界面,可以对低幅构造进行地层追踪。通过井震结合确定以 KT-II 为全区连续对比的标志层,对阿克若尔地区多口钻井进行精细标定,从井震标定结果看,井震特征响应和各地震工区目的层的波组特征对比基本一致(图 1)。地震标定特征为:P1 层为盐丘底面,强波谷的地震反射,横向连续性好;KT-I 为碎屑岩与碳酸盐岩的分界面,强波峰反射,横向连续性较差,在研究区中西部尖灭;MKT 层为碳酸盐岩与泥岩的分界面,强波谷反射,横向连续性较好,在研究区中西部尖灭;KT-II 层为泥岩与碳酸盐岩的分界面,强波峰反射,

横向连续性好;Visean 顶为碳酸盐岩与碎屑岩的分界面,强波谷反射,横向连续性好。

2.2 速度模型优化

建立速度模型通常有以下三种思路:一是地震解释层位与井分层相对应建立速度模型,该模型直接将时间层位校正到对应的地质分层上,两者生成的平均速度沿层内插生成速度模型,该速度模型建立过程较粗泛,未考虑层内速度的变化;二是用测井时深表建立速度模型,该模型利用制作井合成记录时生成的时深表,内插生成区域的速度模型,该模型的特点是井点处速度准确,不考虑横向上的不连续性,通过该模型得到的速度数据进行时深转换,井点处准确,井间不确定性大;三是利用速度谱数据建立速度模型,速度谱数据是在地震资料处理中得到的叠加速度数据,用速度谱数据内插即可得到速度模型,该模型能够显示出地下介质形态上的变化,反映横向的速度变化,但是速度值不够精确,用该模型进行时深转换,井间符合地下特征,井点处不够准确。

针对研究区目的层存在上覆异常体,所以速度建模在充分利用层位、速度谱、井震标定及地震反

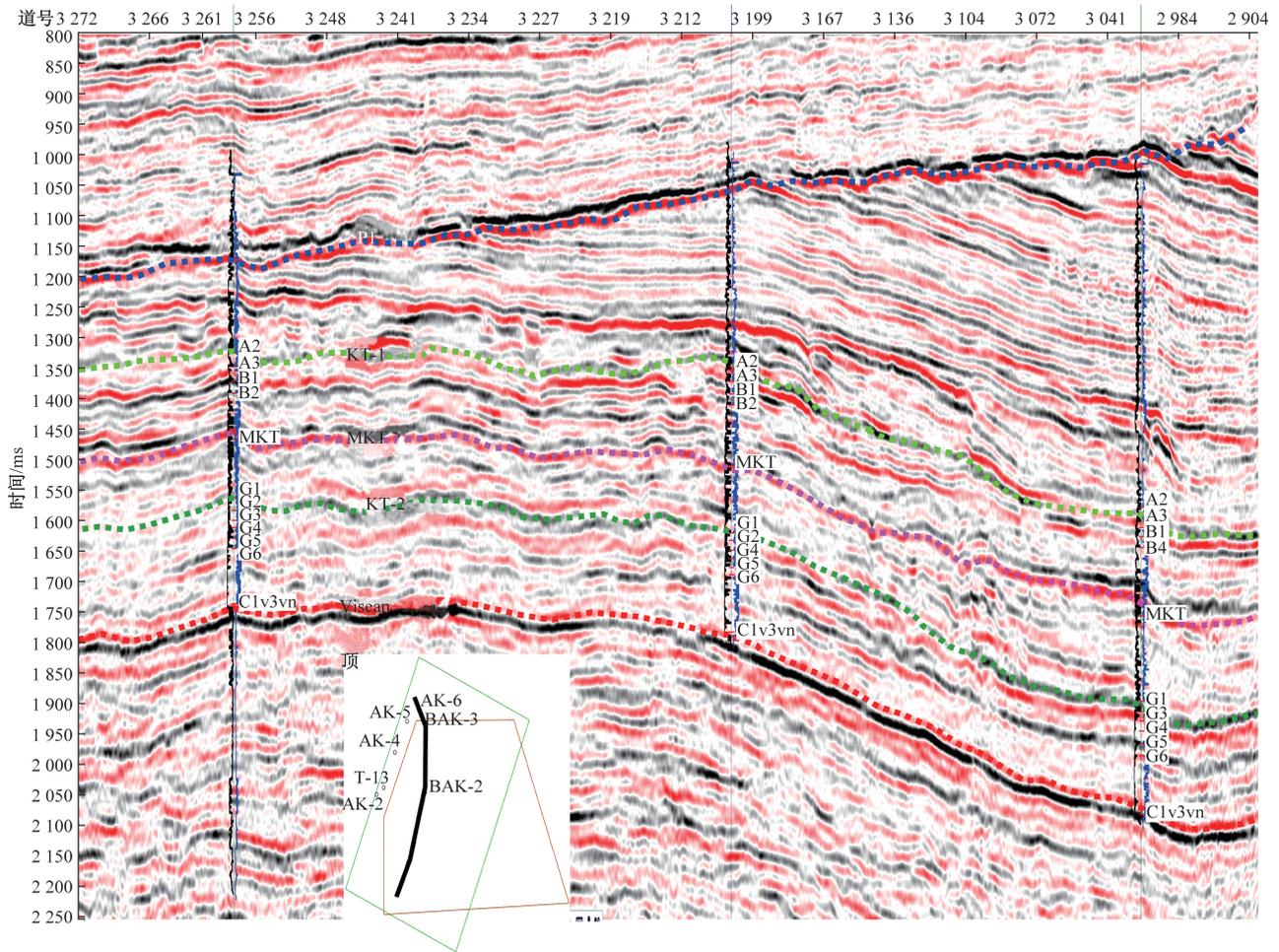


图 1 研究区连井地层对比剖面

演信息的基础上,建立更精细的层速度模型,提高速度场精度,识别低幅度构造圈闭。反演层速度法速度建模流程如图 2 所示。

2.2.1 速度谱点分析

速度谱分析的目的是确定最佳的叠加速度,主要是找出速度谱线的主峰值所对应的速度值,用折线联结起来,也就是叠加速度曲线,为叠加提供动校正用的速度参数^[21-23];速度谱上较强的能量团应与水平叠加时间剖面上的强反射一致,如果不一致,说明二者之间可能存在一定问题;速度谱中如果在深层出现较低的能量团, t_0 时间又与速度相近的浅层能量团的 t_0 时间成倍数关系时,则可能是由多次

反射波形成的能量团,它对应的反射同相轴可能是多次反射波;若速度谱资料的质量较高,则可以求取层速度,用不同符号把层速度标在时间剖面上,故可得到层速度剖面图。通过对过 C 井地震剖面与速度谱对比(图 3 和图 4),纵向上 MKT 泥岩低速层,速度谱未反映出来;P1 内部速度谱变化与地震反射特征对比,说明速度谱由于精度较低,不能对局部变化的速度场很好地刻画,需要对井点速度进行约束校正。

2.2.2 井中速度趋势建模

在进行速度趋势建模之前要对异常速度进行校正,在目的层段需要开展速度场替换,用速度谱数据替换时深关系顶部和底部缺失或质量较差的数据,同时不影响其他部分数据。研究区内选取 D 井、E 井、F 井进行时深关系拟合,得到速度趋势线(图 5)。

2.2.3 叠加速度谱与井中速度趋势协同建模

基于生成的速度趋势线插值生成速度体,利用井时深关系生成的速度趋势模型与叠加速度谱,采用协同克里金方法进行协同速度建模,生成层速度反演初始模型(图 6)。协同建模速度场纵、横向分辨率都得到了很大的提高,能够有效刻画出速度场内部的地质体速度细节。

2.2.4 层速度反演

通过单井层速度对比可得,KT-I、MKT、KT-II 段各井的速度变化规律基本一致;下二叠 P1 段岩性相对复杂,泥岩、泥灰岩、灰岩互层;P1 段底部存在一套相对稳定的泥岩-泥灰岩低速层,向北逐渐增厚的趋势(图 7)。为了进一步提高研究区目的层段层速度的准确性,利用构造解释得到的层位数据,

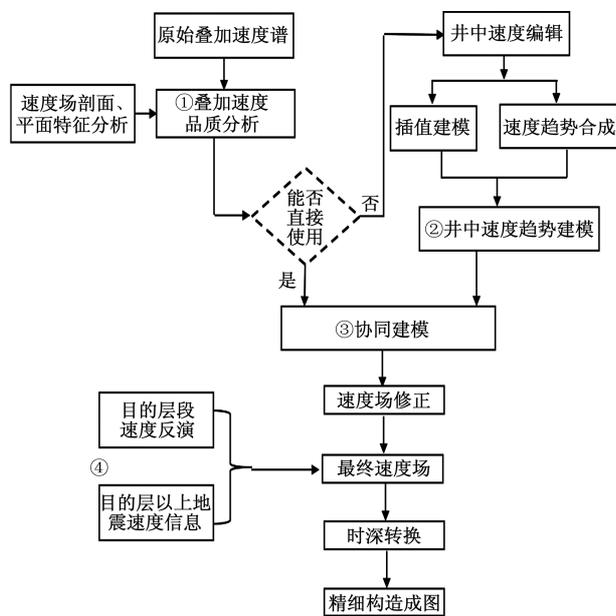


图 2 反演层速度法速度建模流程

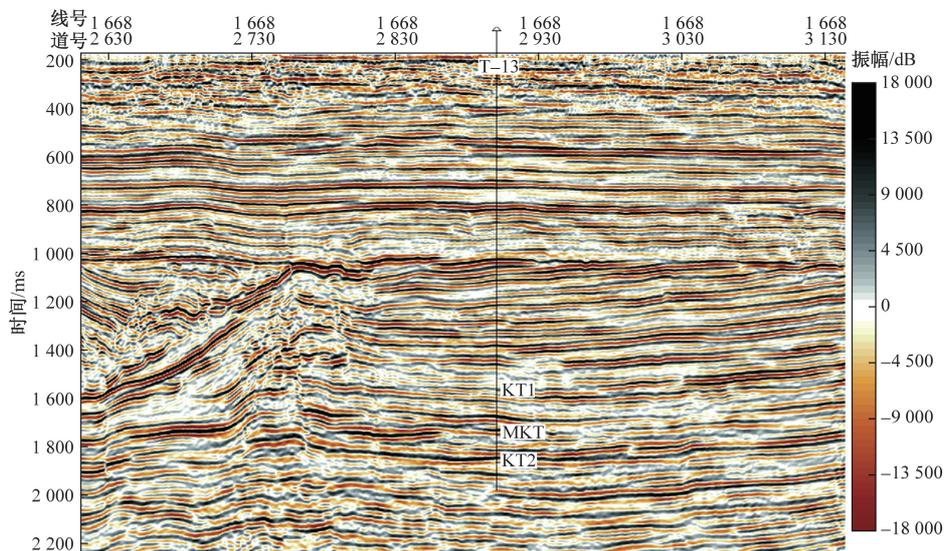


图 3 研究区过 C 井近东西向地震剖面

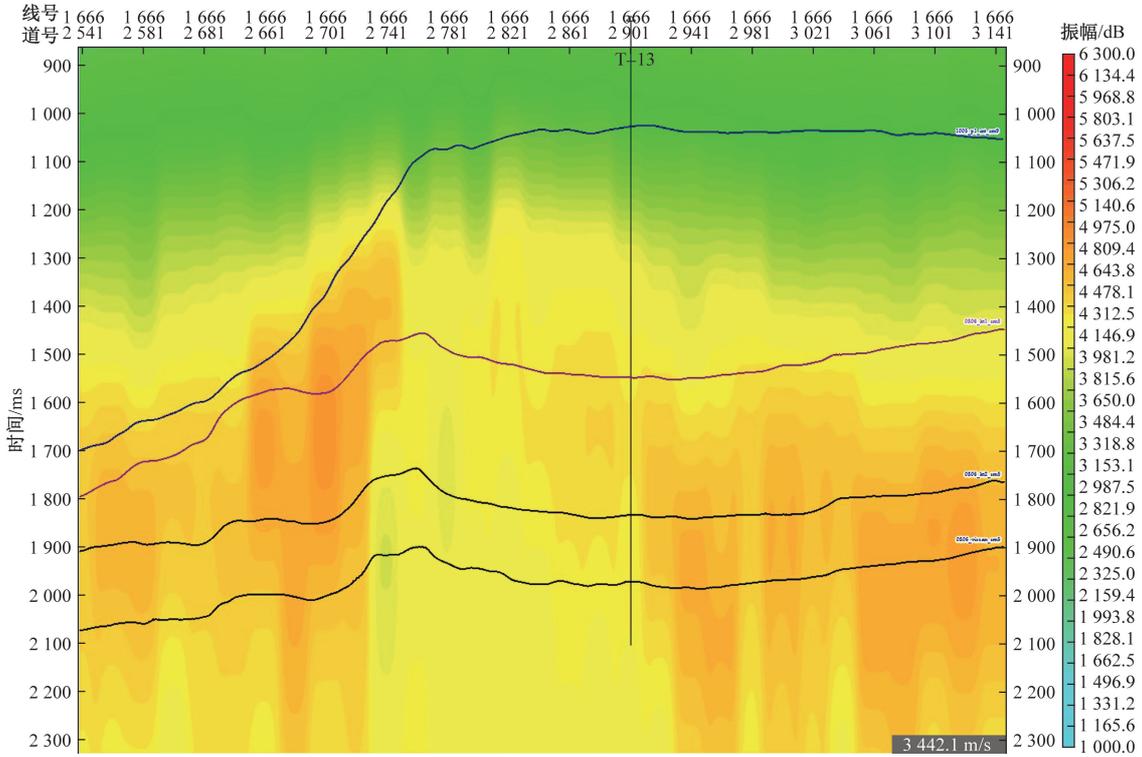


图 4 研究区过 C 井近东西向速度谱剖面

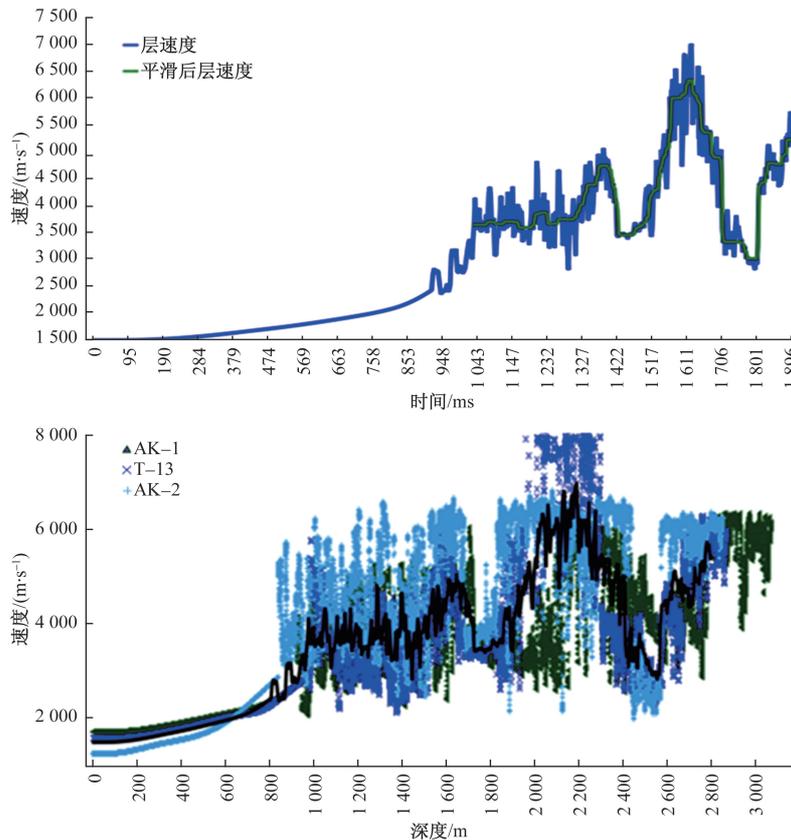


图 5 研究区 3 口井速度趋势线拟合

结合测井得到的声波时差数据,利用地震资料反演方法获得目的层段的层速度数据,并且将协同建模得到的速度场与反演得到的目的层段层速度进行

拟合,获取最终时深转换速度场。在目的层段构造解释层位趋势和单井速度的约束下,进行层速度反演,得到研究区的层速度体,通过过井层速度反演剖

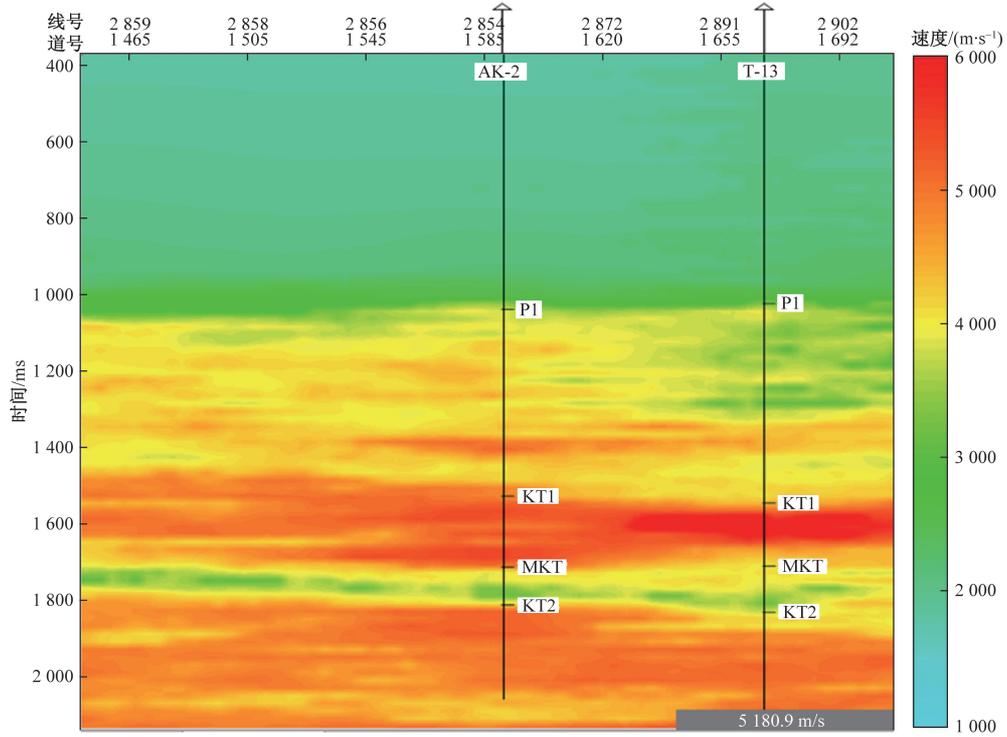


图 6 研究区过 D 井-E 井协同速度模型

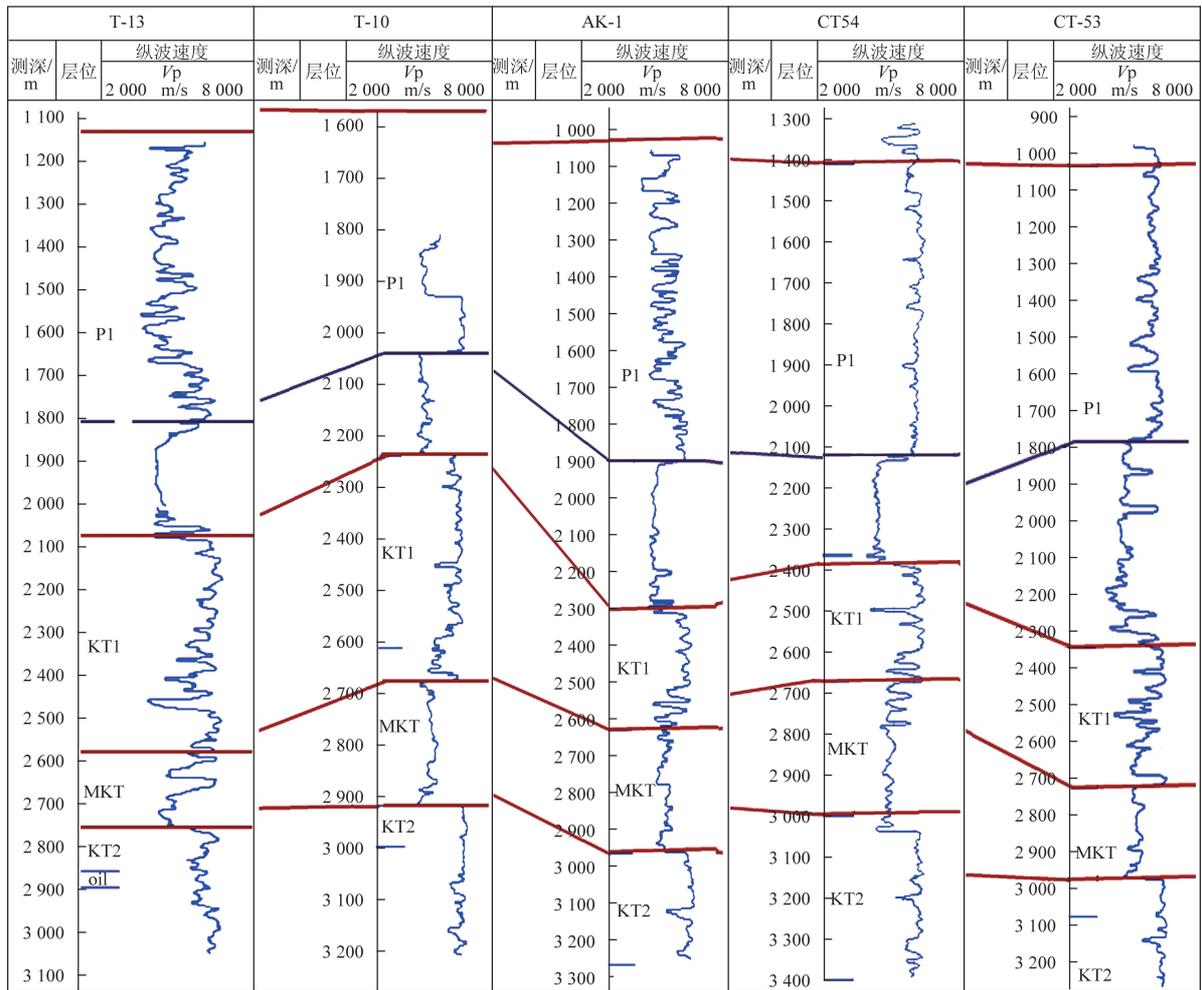


图 7 研究区单井速度对比

面可知,预测的反演层速度与单井速度趋势吻合较好,同时表明层速度反演比较合理。

P1 层上覆的速度采用地震速度谱的速度信息,将上覆地震速度体与目的层(P1、KT-I、MKT、KT-II)反演速度相融合,并将层速度转换为平均速度,用于时深转换。图 8 为过 G 井平均速度剖面图,可以看出速度场具有从浅向深平均速度逐渐增大的趋势,横向速度变化较自然。

表 1 为钻井分层对比进行误差统计,井点误差最大值为 4.09 m,最大相对误差为 2.17%。

2.3 基于构造趋势面法突显低幅度构造

目前,构造趋势面采用一次或二次曲面拟合的方法,该方法可控性较差,往往仅能适应于构造相对简单的区域,在构造起伏大的区域,对局部构造的描述能力较差。因此本文引入稀疏网格法,并与一次和二次面拟合法进行了对比,稀疏网格法拟合的构造趋势面能更好地反映整体的构造变化趋势特征。

2.3.1 一次项构造趋势面拟合

已知构造曲面为 X、Y、Z 的三维散点数据,Z 与 X、Y 相关,因此可将 X、Y 看成自变量,Z 看成因变量。如图 9 所示,假设构造趋势面为一个平面,采用最小二乘法对构造的趋势特征进行描述,其平面拟合公式如下:

$$\text{Str_tend} = aX + bY + c \quad (1)$$

式中:Str_tend 为构造趋势面;X、Y 分别为地理坐标;a、b、c 分别为拟合系数。

图 10(a)为原始构造,图 10(b)中为采用一次项

表 1 井点实测深度与构造深度误差分析

井名	构造图深度/m	井点实测值/m	误差/m	相对误差/%
A1	2 020.3	2 023.2	-2.87	1.42
A2	2 068.6	2 070.4	-1.86	0.90
A3	1 772.3	1 773.4	-1.12	0.63
A4	2 026.7	2 029.4	-2.76	1.36
A5	2 075.8	2 077.7	-1.90	0.91
A6	2 034.0	2 036.3	-2.30	1.13
A7	1 676.1	1 678.1	-1.96	1.17
A8	1 302.0	1 300.5	1.42	1.09
A9	1 454.7	1 457.8	-3.16	2.17
A10	1 934.1	1 936.2	-2.13	1.10
A11	2 067.2	2 068.8	-1.62	0.78
A12	2 042.3	2 043.9	-1.63	0.80
A13	2 312.6	2 313.9	-1.33	0.58
A14	1 846.2	1 846.6	-0.40	0.21
A15	1 752.7	1 754.2	-1.53	0.87
A16	2 526.7	2 529.5	-2.77	1.10
A17	2 046.4	2 046.8	-0.42	0.20
A18	2 226.7	2 229.7	-3.00	1.34
A19	2 030.0	2 030.7	-0.70	0.34
A20	2 539.9	2 541.1	-1.21	0.48
A21	1 887.0	1 889.4	-2.35	1.24
A22	1 982.2	1 981.7	0.48	0.24
A23	1 905.9	1 908.9	-2.98	1.56
A24	1 989.2	1 993.3	-4.09	2.05
A25	2 108.8	2 110.2	-1.38	0.65
A26	1 930.9	1 929.5	1.43	0.74
A27	1 938.5	1 940.0	-1.50	0.77
A28	2 134.0	2 136.1	-2.12	0.99
A29	1 925.3	1 923.9	1.37	0.71

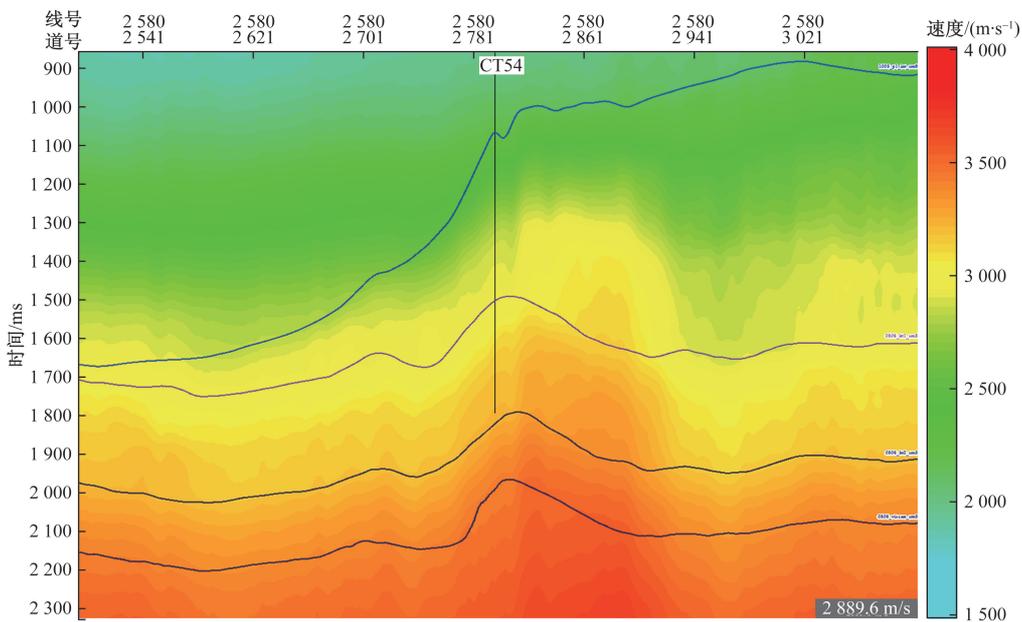


图 8 过 G 井主测线平均速度剖面(近东西向)

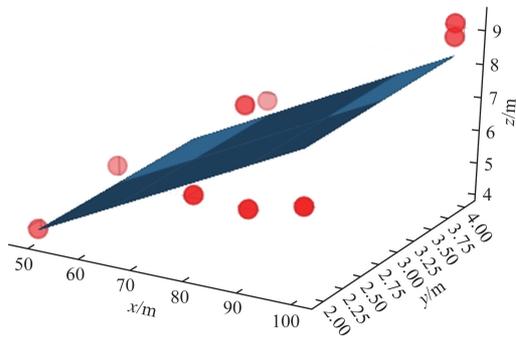


图9 构造面拟合示意图

构建的构造趋势面,图10(c)为原始构造曲面减去构造趋势面影响后的微幅构造。

2.3.2 二次项构造趋势面拟合

假设构造趋势面为曲面,对构造的趋势也在进行描述,拟合公式如下:

$$\text{Str_tend} = aX + bY + cX^2 + dY^2 + e \quad (2)$$

式中:Str_tend为构造趋势面;X、Y分别为地理坐标;a、b、c、d、e分别为拟合系数。

图11(a)为原始构造,图11(b)中为采用二次项构建的构造趋势面,二次项相对一次项构造的构造趋势面更为复杂,图11(c)为原始构造曲面减去构造趋势面影响后的微幅构造。

2.3.3 稀疏网格法构造趋势面拟合

稀疏网格法构造趋势面拟合过程为在平面图上采用预设的网格取出其所在的Z值,并对稀疏后的X、Y、Z值进行平面成图来得到构造趋势面;其核心在于预设的网格大小,在实际操作过程中需要进行

对网格大小进行测试对比,找出最能反映区块的整体趋势面。

图12(a)为原始构造,图12(b)中为采用稀疏网格法的构造趋势面,其相对一次项和二次项拟合的构造趋势面更能反映整体构造趋势的变化,图12(c)为原始构造曲面减去构造趋势面影响后的低幅构造。

通过一次项构造趋势面拟合法、二次项构造趋势面拟合法和稀疏网格法构造趋势面拟合法的对比论证,稀疏网格法构造趋势面拟合法效果较好,最终优选稀疏网格法针对滨里海东缘深度域构造图进行了构造趋势面拟合,突出显示了局部低幅构造圈闭(图13)。

3 结论

(1)本文有效融和了地震成像叠加速度和声波测井速度,建立反演初始模型;利用地震资料反演方法获得目的层段的层速度数据,并且将协同建模得到的速度场与反演得到的目的层段层速度进行拟合,获取最终时深转换速度场。在目的层段构造解释层位趋势和单井速度的约束下,进行层速度反演获得了高精度、高分辨率的层速度体。

(2)在滨里海盆地东缘阿克若尔构造带,利用反演层速度法和构造趋势面拟合法对研究区低幅构造进行识别,解决了研究区低幅度构造难识别的问题,效果显著,对识别未钻井构造圈闭识别也有助力作用,本文方法具有普遍适用性,对低幅构造勘探有一定的借鉴意义。

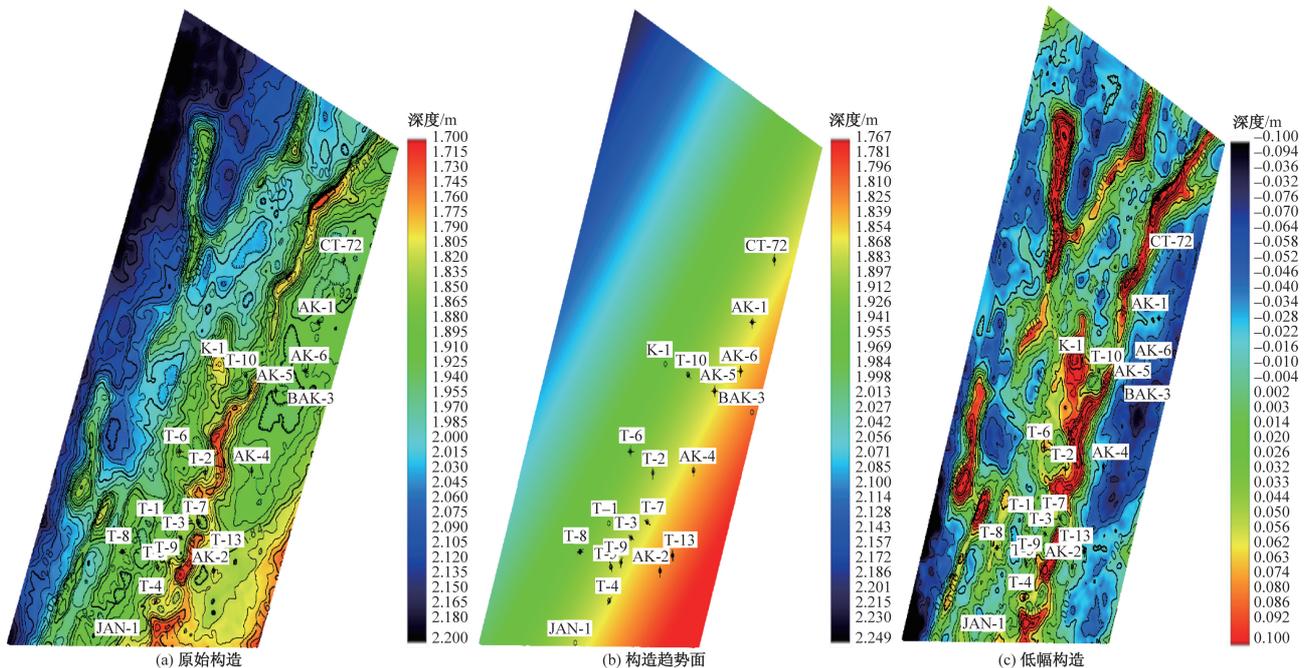


图10 一次项构造趋势拟合

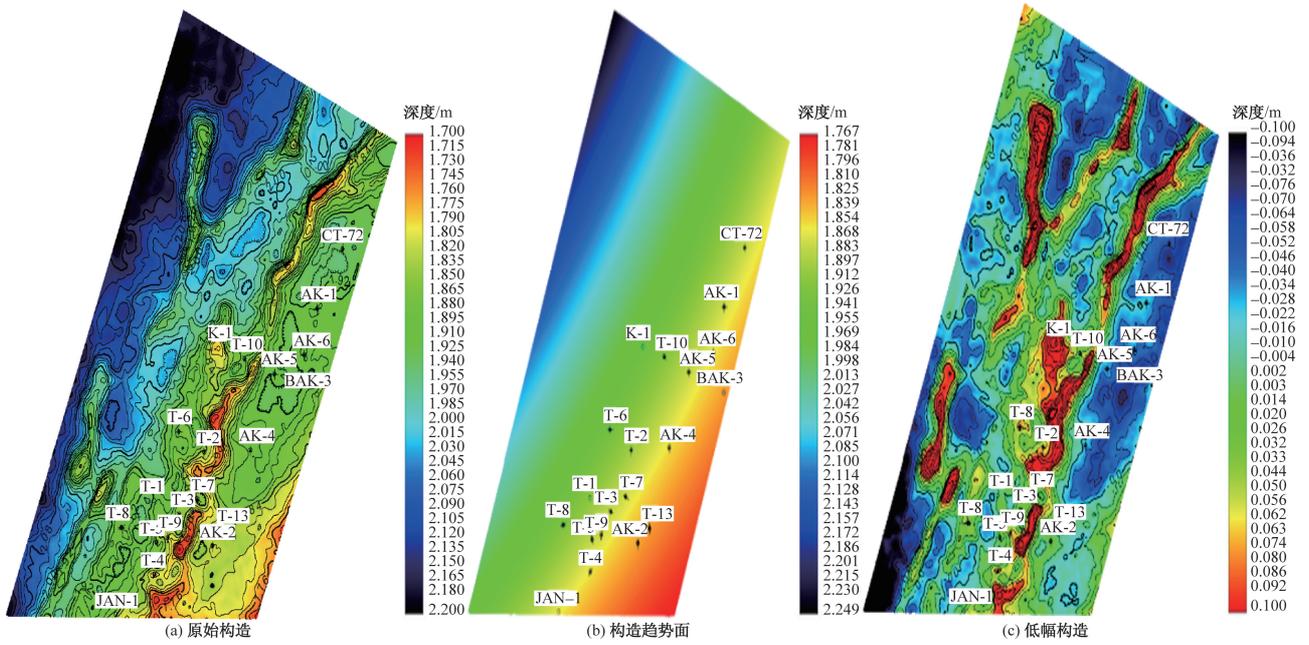


图 11 二次项构造趋势拟合

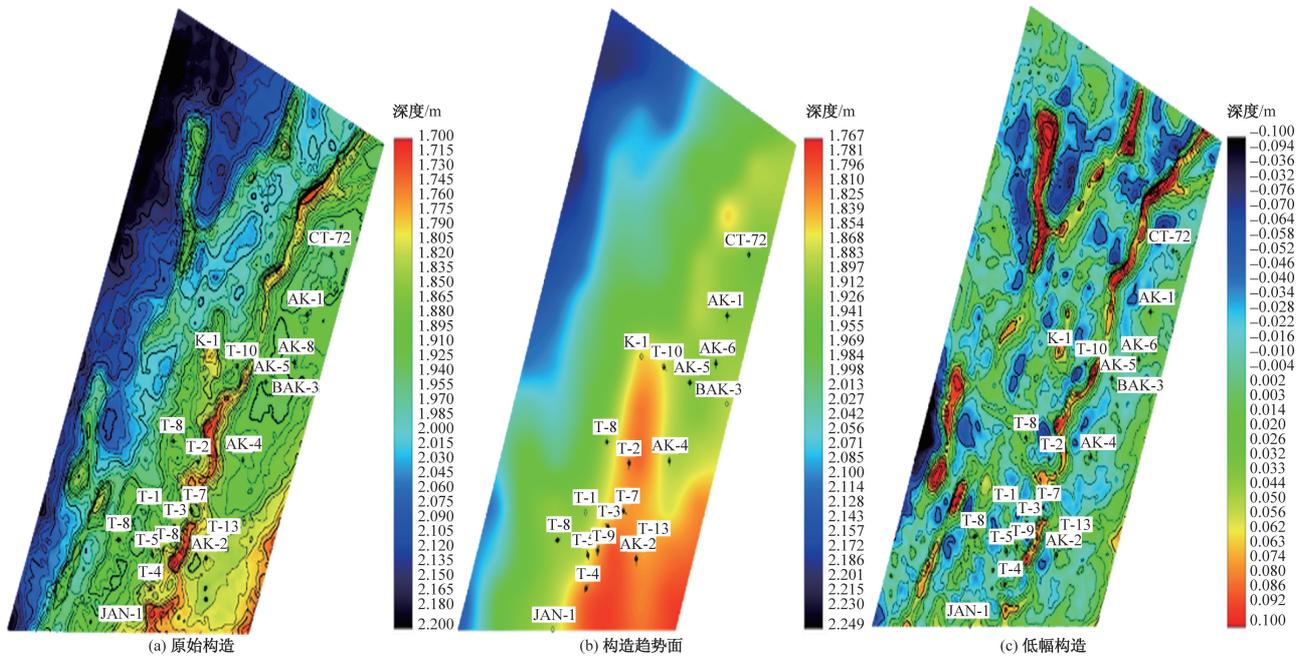


图 12 稀疏网格法构造趋势拟合

参考文献

[1] 柴兵强, 赵峰, 计玉冰, 等. 川东南盆缘复杂构造区龙马溪组页岩孔隙结构及分形特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 4973-4983.

[2] 王羽君, 靳亚勤, 郭金兰. 构造-沉积耦合格架下深层砂体展布及储层特征—以东濮凹陷古近系沙三段中亚段为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1912-1922.

[3] 何文刚, 罗伟, 冯卫平, 等. 特提斯构造域典型构造特征及其控制因素探讨—以物理模拟成果为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 68-76.

[4] 胡秋媛, 董大伟, 杨建磊, 等. 准噶尔盆地中 4 区块构造解析及物理模拟试验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3898-3907.

[5] 魏真真, 王丙贤, 杨静. 歧口凹陷断裂构造特征及其控油气作用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4288-4295.

[6] 郭延辉, 侯克鹏. 基于 FLAC^{3D} 的岩体初始高水平构造应力场反演方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8523-8529.

[7] WU Y, MA T, WANG Y, et al. Multi-parameter analysis of identifying micro amplitude structures by moving trend surface method[J]. Journal of Southwest Petroleum Uni-

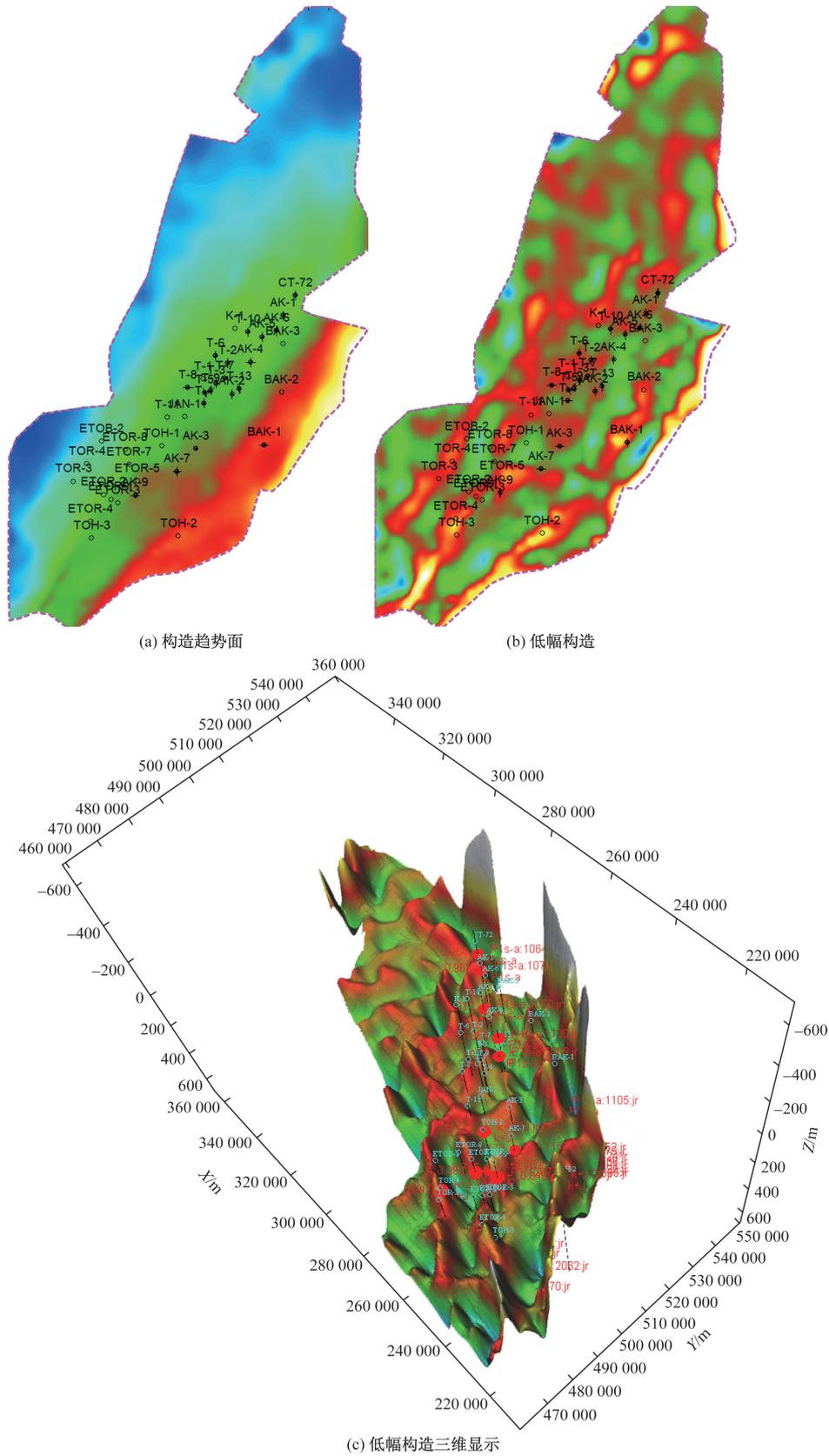


图 13 滨里海盆东缘某层稀疏网格法构造趋势拟合

versity, 2017, 16(3): 54-63.

[8] 消炎辉. 低幅构造识别与储层地震预测方法研究与应用[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.

[9] 夏红敏, 郑小文, 黄捍东, 等. 基于去低频化的低幅度构造识别方法研究及应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(4): 998-1003.

- [10] 李伟强, 穆龙新, 赵伦, 等. 滨里海盆地东缘石炭系碳酸盐岩储集层孔喉结构特征及对孔渗关系的影响[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 958-969.
- [11] 刘洛夫, 朱毅秀, 胡爱梅, 等. 滨里海盆地盐下层系的油气地质特征[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 11-15.
- [12] 王连岱, 沈仁福. 滨里海盆地石油地质特征及勘探方向分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(2): 17-18.
- [13] 钱桂华. 哈萨克斯坦滨里海盆地油气地质特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(5): 60-66.
- [14] 陈荣林, 叶德燎, 徐文明. 滨里海盆地与塔里木盆地油气地质特征的类比[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(3): 261-266.
- [15] 张淮, 饶铁群, 张挺军, 等. 哈萨克斯坦滨里海盆地盐下层系油气成藏组合特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1): 81-86.
- [16] 刘洛夫, 朱毅秀. 滨里海盆地及中亚地区油气地质特征[M]. 北京: 中石化出版社, 2007.
- [17] 穆洁, 史飞洲, 徐颖, 等. 塔河地区火成岩下成像精细速度建模方法应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3470-3475.
- [18] 张莉娜, 张耀祖, 刘欣. 基于蒸汽腔扩展速度的SAGD产能预测模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8271-8278.
- [19] 梁爽, 吴亚东, 王燕翎, 等. 滨里海盆地东缘盐下油气成藏特征与主控因素[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 125-132.
- [20] 李博南. 基于岩石物理分析的碳酸盐岩储层声波速度测井校正方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 77-83.
- [21] 张启帆, 常锁亮, 张生, 等. 基于反演速度的煤系地层时深转换方法及应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 5988-5996.
- [22] 张克费, 李呈呈. 基于岩石物理模型的页岩气储层横波速度估值方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 10-15.
- [23] 史飞洲, 王彦春, 孙炜. 一种精确的纵波速度计算方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 1671-1815.

Research and Application of Low Amplitude Structure Identification Technology

WANG Zhen¹, JI Zhifeng¹, ZHANG Yiqiong¹, WANG Xueke¹, LIN Yaping¹,
KONG Linghong¹, JIANG Li², ZHANG Xiaozhen²

(1. Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. PST Service Co. Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: In response to the problem of identifying low amplitude structures in the Akzor structural belt on the eastern edge of the Caspian Sea basin, a low amplitude structural identification method based on inversion layer velocity method and structural trend surface fitting method was developed. This method is suitable for situations where velocity anomalies are locally developed, velocity changes are rapid, layer burial depth in slope areas is large, and trap amplitude is small. The method of optimizing structural interpretation horizon trends and interval velocity inversion under single well velocity constraints is used to establish a velocity model for the study area and calibrate seismic horizons. This method overcomes the limitations of lateral continuity of conventional interval velocity inversion methods and has better adaptability to complex formations. The structural trend surface fitting method has effectively identified the low amplitude structures in the study area, overcoming the problems that are difficult to identify due to low structural amplitude, flat event axes, and small variation amplitude. The structural trend surface fitting method has been applied to the depth domain structural map of the eastern edge of the Caspian Sea, and good results have been achieved.

Keywords: low amplitude structure; speed model; inversion; structural trend surface fitting