

深层碳酸盐岩地震储层预测 ——以塔里木盆地哈得逊区块一间房组为例

狄贵东^{1,2}, 彭更新³, 庞雄奇², 刘立峰¹, 李国会³, 李刚³, 谭杨³

(1. 中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地碳酸盐岩油气藏具有埋藏深, 储集空间和流体性质十分复杂, 地震反射信号弱的特点。传统叠后地震资料和技术手段难于准确预测这类油气藏的分布和品质。基于地震资料保幅叠前道集, 运用纯纵波储层反演技术分析岩溶储层发育的有利部位; 运用频率依赖 AVO 反演方法预测一间房组含油气性, 实际应用效果证实预测结果良好; 通过古地貌恢复技术预测碳酸盐岩储层有利分布区, 能够为溶蚀孔洞储层的展布提供可靠的地质依据。以此为基础, 进一步探讨了该区深层次生碳酸盐岩油气藏的分布主要受古地貌、断裂、不整合、构造背景下的上倾部位等因素的控制。地球物理新方法在碳酸盐岩油气藏预测中的成功应用对塔里木盆地下一步深层油气勘探具有重要意义。

关键词:储层; 流体; 预测; 一间房组; 古地貌; 碳酸盐岩; 控制因素; 塔里木盆地

中图分类号: P631.4; TE122

文献标志码: A

Seismic Reservoir Prediction of Deep Carbonatite

—A Case Study of Yijianfang Formation in Hadexun Zone of Tarim Basin

DI Gui-dong^{1,2}, PENG Geng-xin³, PANG Xiong-qi², LIU Li-feng¹,

LI Guo-hui³, LI Gang³, TAN Yang³

(1. Laboratory for Integration of Geology and Geophysics, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: The hydrocarbon reservoirs of carbonatite in Tarim Basin have the characteristics of deep buried, complicated reservoir space and fluid properties and weak seismic reflection signal. The conventional post-stack seismic data and corresponding techniques are not competent to accurately predict the distribution and quality of this kind of reservoirs. Based on the preserved pre-stack gathers of seismic data, the pure longitudinal wave reservoir inversion technology was used to analyze the favorable position of karstic reservoir; the frequency-dependent AVO inversion method was used to predict the oil-gas-bearing of Yijianfang Formation; the paleogeomorphology recovery technology was used to predict the favorable distribution of carbonate reservoirs in order to provide a reliable geological basis for the distribution of dissolved pore reservoir; further, the distribution of deep secondary carbonate reservoirs was discussed. The results show that the prediction results by the frequency-dependent AVO inversion method are

收稿日期: 2016-01-25

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05004003)

作者简介: 狄贵东(1984-), 男, 甘肃天水人, 工学博士研究生, E-mail: cup_dgd@126.com。

通讯作者: 庞雄奇(1961-), 男, 湖北崇阳人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: pangxq@cup.edu.cn。

coincident with the actual drilling and logging data; the distribution of carbonate reservoirs is controlled by paleogeomorphy, fault, unconformity and the updip part of tectonic setting. The above new geophysical method is successfully applied in the prediction of carbonate reservoirs, promoting the further deep hydrocarbon exploration in Tarim Basin.

Key words: reservoir; fluid; prediction; Yijianfang Formation; palaeogeomorphy; carbonatite; controlling factor; Tarim Basin

0 引言

哈拉哈塘地区位于塔里木盆地北部,东与轮南低凸起相连,西与英买力低凸起相接,南部紧邻满加尔凹陷,北部为塔北隆起轮台凸起。该区碳酸盐岩是塔里木盆地油气勘探的重点领域之一,勘探面积约 4 000 km²,拥有巨大的油气资源潜力^[1]。哈得逊区块位于哈拉哈塘东南侧哈得逊鼻状隆起构造带主体构造高部位上,其奥陶系一间房组以发育厚层—巨厚层灰色和褐灰色砂屑灰岩、鲕粒灰岩和砂砾砂屑灰岩为主,具有低孔、低渗的特点^[2-3]。长期有利于大气淡水淋滤溶蚀的物理条件及地质条件使得哈得逊地区岩溶得到充分发育,位于一间房组不整合面以下发育的次生溶蚀孔洞缝为有效的储集空间。这些储集空间类型多种多样,主要包括洞穴型、孔洞型、裂缝-孔洞型等^[1-7]。

溶蚀孔洞缝常在叠后剖面上表现出强的反射振

幅特征,按规模大小主要包括“串珠状-片状”大型缝洞体[图 1(a)、(b)]及单独“串珠状”[图 1(c)]强反射,这也是传统方法依据叠后资料进行这类储层识别的基本依据。图 1 为哈得逊井区针对强反射的 30 口已钻井的钻探效果统计和典型叠后反射特征。从图 1 可以看出:虽然有 22 口井成功获得工业油流(占全井总数的 73.3%),但仍有 7 口井(占全井总数的 23.3%)以钻遇出水为主。显然,传统单一叠加资料可以找到储层的发育区域,但难以判别储集体的流体(水、油气等)充填性质。此外,传统叠加资料受 AVO 效应(振幅随偏移距变化而变化)的影响并非真正的零检距反射,对储层的具体分布描述精度有限^[8]。

实际上,对于这类深层复杂碳酸盐岩油气藏的精细预测,须从叠后预测方法^[9-17]走向叠前,结合地下介质的声波和横波属性来区分储层与流体的性质,通过缝洞型储层与流体的综合预测来指导勘探、

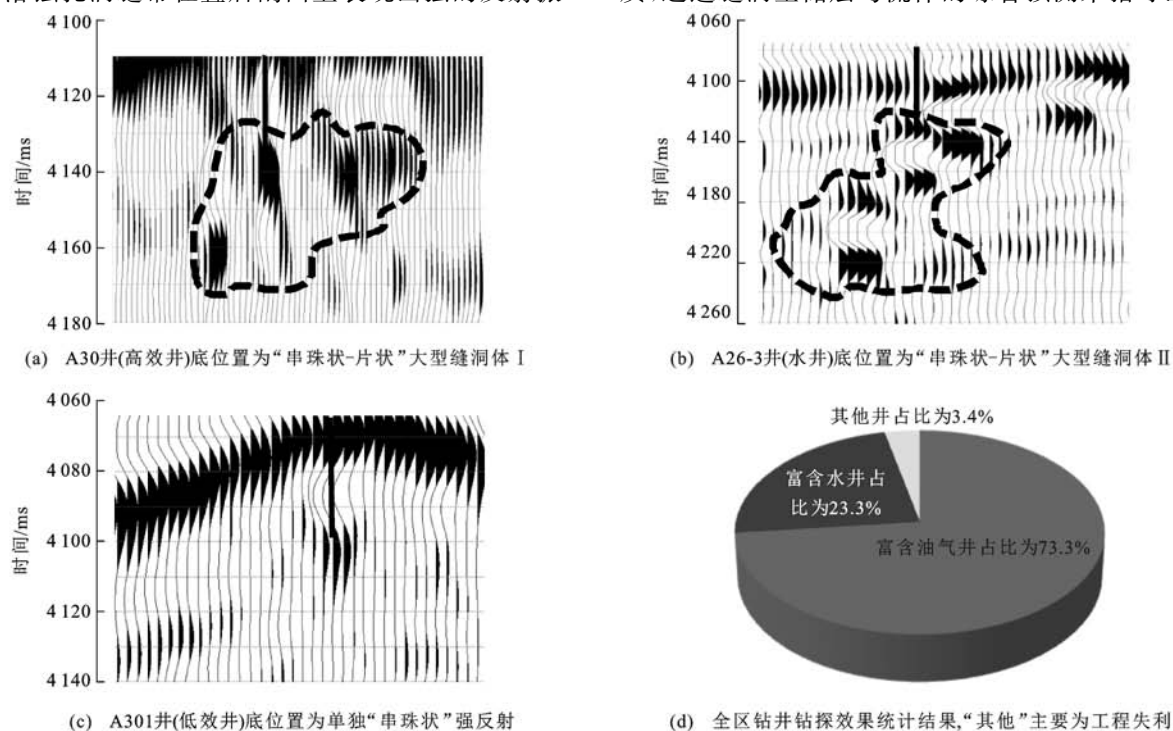


图 1 塔里木盆地哈得逊区块典型反射特征及已钻井钻探效果统计

Fig. 1 Typical Reflection Characteristics in Hadexun Zone of Tarim Basin and Drilling Result Statistics of Drilled Wells

开发与生产。本文以哈得逊井区实际资料为例,基于地震资料保幅叠前道集,运用叠前弹性反演对一间房组溶蚀孔洞型储层、流体进行预测,分析了深层复杂油气藏的分布规律及主控因素,从而为有效评价深层复杂碳酸盐岩油气藏提供依据。

1 地球物理预测方法

1.1 纯纵波反演对储层的识别

水平叠加的初衷是为了提高资料的信噪比,但在动校正速度不准,构造复杂,偏移距太大等情况下,动校正常常存在剩余时差,因而叠加会降低地震信号的分辨率^[18]。实际上,即便道集完全平直,由于碳酸盐岩非均质性岩性或者流体差异产生的AVO效应也会使得叠加降低资料分辨能力和准确程度,所以将叠加的资料当作纵波垂直入射反射资料进行解释分析必然会产生误差^[8]。

与之相对,应用广泛的纵波叠前反射系数公式^[19-23],叠前反演在反演横波、纵横波速度比、泊松比、密度等弹性参数的同时,也可以获得去除了AVO效应的纯纵波信息。基于高品质的地震资料,依据纵波叠前反射系数公式即可反演获得各种叠前的弹性参数用于储层与流体识别。如果在反演过程中没有去除地震子波,那么反演的纯纵波即为纯纵波地震数据,其结果也不受人为子波估算误差的影响^[8,21]。

纯纵波资料具有高于传统叠加资料的分辨率和准确度,据其进行构造解释或储层预测也更加准确。图2为哈得逊井区典型的全叠加剖面与纯纵波剖面对比。由图2可以看出:反演的纯纵波数据[图2(d)]明显具有比传统全叠加资料[图2(a)]更高的分辨率,其同向轴的变化规律和接触关系更加清晰,对奥陶系地层[图2(a)、(d)中箭头位置]的反射规律刻画也更加完善。同时,由于去除了调谐效应造成的成像假象,图像对断点位置的反映更加精确[图2(e)],从而使得断层接触关系在纯纵波剖面上更加明显。而原来基于传统叠后资料预测的部分储层实际上由于降低了地震信号的分辨率,井底处表现为弱反射[图2(c)],显示储层发育程度为中等一差,但实钻结果为高产油气流,日产油42 t,日产气6 012 m³,纯纵波资料[图2(f)]指示其为优质储层发育区域。

与常规AVO反演在不同分角度叠加数据体中分别提取多次子波不同,在获取纯纵波资料的基础上,通过提取一次与地震资料最匹配的井旁道子波,针对目标层进行在纯纵波资料提取基础上的叠后反

演,使得反演更加稳定,分辨率更高^[21],从而可以更为准确地获取纵波阻抗结果。通过与全区实际钻井结果对比发现,预测结果与储层发育情况能够很好地吻合,反映了该方法的可靠性与有效性。

1.2 频率依赖 AVO 反演对流体的预测

地下介质中充填流体会导致地震波发生频散效应,且由于频散程度不同,进而导致地震波反射系数及纵横波速度变化率与频率有关。频率依赖AVO反演方法已被证明是一种行之有效的判断流体类型的方法^[24-32],但是其可靠性很大程度上依赖于AVO反演近似公式的准确程度以及频散反演公式中纵横波速度比值。传统方法通常是建立在Smith & Gidlow两项反演近似公式^[24]和纵横波速度比值为常值的假设前提之上。这种方法有两个缺陷:Smith & Gidlow两项反演近似公式通过Gardner近似公式将密度变化率项近似到了纵波速度变化率项,使得最终所得的纵波速度变化率不够准确;而纵横波速度比值恰是区分储层内流体类型的主要参数,同时也是区分储层与非储层的重要指标,传统的频率依赖AVO反演方法将该值定为常数,不能准确地在反演中进行流体类型识别以及储层与非储层的划分。

针对上述两个缺陷,Sun等基于Aki & Richards三项反演近似公式,消除了密度变化率与纵波速度变化率之间的近似假设,取代传统的Smith & Gidlow两项反演近似公式,同时考虑到储层中不同流体类型的纵横波速度比差异,将振幅域叠前AVO反演得到的纵横波速度比作为改进的频率依赖AVO反演方法中纵横波速度比的输入信息,替代了纵横波速度比值为常值的假设^[30]。该方法得到了很多的应用,均取得良好的效果。本文采用该方法进行反演,通过对速度变化率项进行一阶泰勒展开求导,并利用最小二乘反演方法,最终求解得到反映速度随频率变化程度的纵波和横波频散梯度值。

从频率依赖AVO反演结果与实际钻井的标定结果可知,纵波频散梯度对流体响应较为敏感,与实际钻井的吻合率达到94.1%,工区边缘由于资料可靠性不高,吻合性较差。测井解释成果表明,研究区次生储层的孔隙度为1.8%~22.1%,油气层的含油饱和度在66.4%~78.7%之间。对于本区这类次生储集系统,当充填油气时的纵波频散梯度明显高于充填水时的纵波频散梯度,且纵波频散梯度为280~1 000之间时其为油气发育区,水区对应的纵

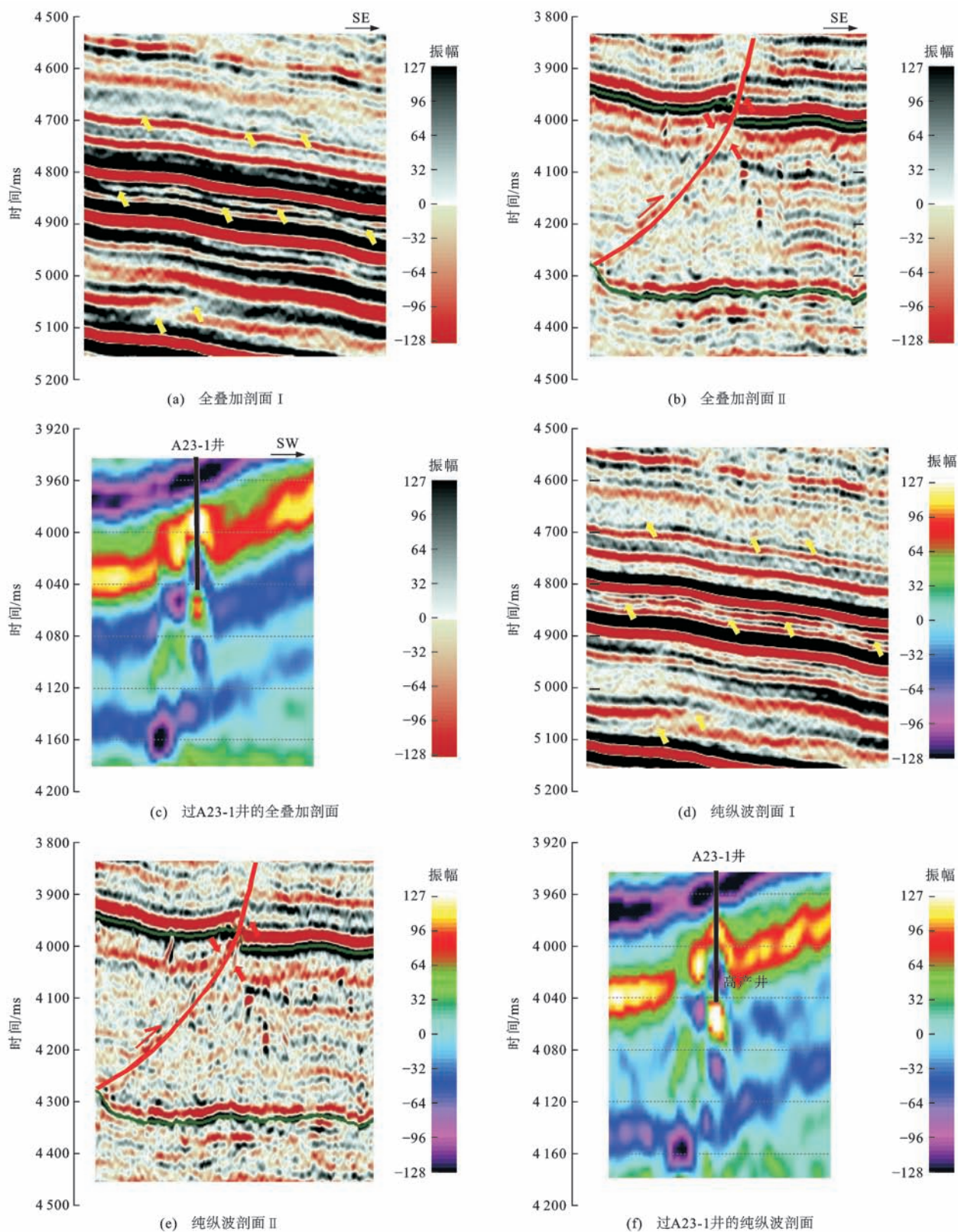


图2 全叠加剖面 and 纯纵波剖面对比

Fig. 2 Comparisons of Full Stack Section and Pure Longitudinal Wave Section

波频散梯度则介于 $0 \sim 280$ 。从图 3 可以看出:A30 井以裂缝孔洞型储层为主,井底位置预测纵波频散梯度值为 950,以富含油气为主,实钻结果也表明该

井为一高产油气流井,日产油 70.84 t,日产气 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$;而 A281 井及其侧钻目标 A281C 井均具有低的纵波频散梯度,为两口出水失利井。

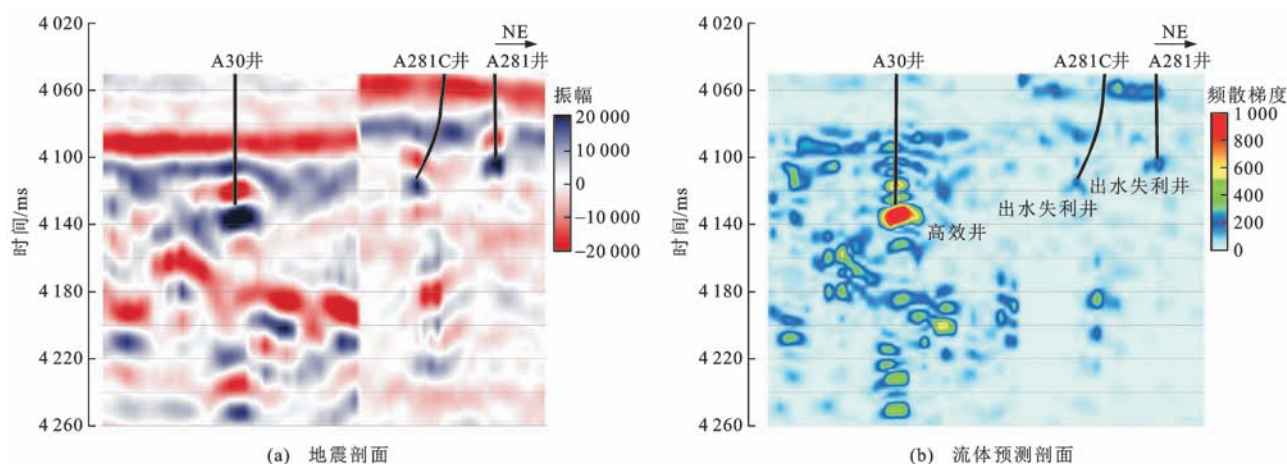


图3 3口典型井的地震剖面及流体预测剖面

Fig.3 Seismic Section and Fluid Prediction Section of Three Typical Wells

1.3 古地貌恢复对有利储层发育区的预测

加里东中期—海西期,哈拉哈塘地区一间房组沉积后发生暴露剥蚀,产生古岩溶分化壳^[3,33-34];古岩溶分化壳的发育受到构造运动、气候环境及岩溶持续时间等因素的影响,而构造运动是古岩溶发育的基础,同时也控制了岩溶地貌的分区;岩溶高地及斜坡是溶蚀淋滤作用最为强烈的地区,也是碳酸盐岩次生孔隙最为发育的部位,而岩溶洼地通常为汇水区域,次生孔隙发育较差。因此,古地貌研究是进行碳酸盐岩油气藏研究的重要环节。

目前,塔里木盆地奥陶系古地貌的恢复主要采用印模法或残余厚度法^[35-44]。由于哈拉哈塘地区一间房组及以上良里塔格组无泛海沉积存在,在其内部很难获得一个相对稳定的波阻抗界面,所以在利用印模法时将存在用一个剥蚀面恢复另一剥蚀面的问题,无法准确恢复古岩溶地貌。而在一间房组以下,鹰山组地层未见沉积间断,分布稳定,因此,采用残厚与残厚趋势面相结合的方法恢复一间房组古岩溶地貌较为合适,能够代表该时期岩溶发育的地貌特征。图4为利用该方法恢复的古地貌。从研究区古地貌恢复结果(图4)可以看出,一间房组古岩溶地貌整体呈现北高南低的格局,南北地形起伏较大,且以SE向倾斜为主。区内喀斯特地貌非常发育,形态极不规则。北部岩溶残丘呈群体分布,以错综复杂的岩溶残丘丛、岩溶冲蚀沟为特点,且沟谷走向多以SE向为主;中部地势最高,岩溶最为发育,丘丛分布杂乱无序,总体呈EW向展布;南部地势最低,属径流排泄区域,以岩溶洼地发育为主。从岩溶古地理的角度分析,地表水系较为宽缓,并未形成呈树枝状分布的分支河道,该区应属于岩溶地貌演化

过程中初期的岩溶地貌特征。

2 综合预测与评价

2.1 预测结果

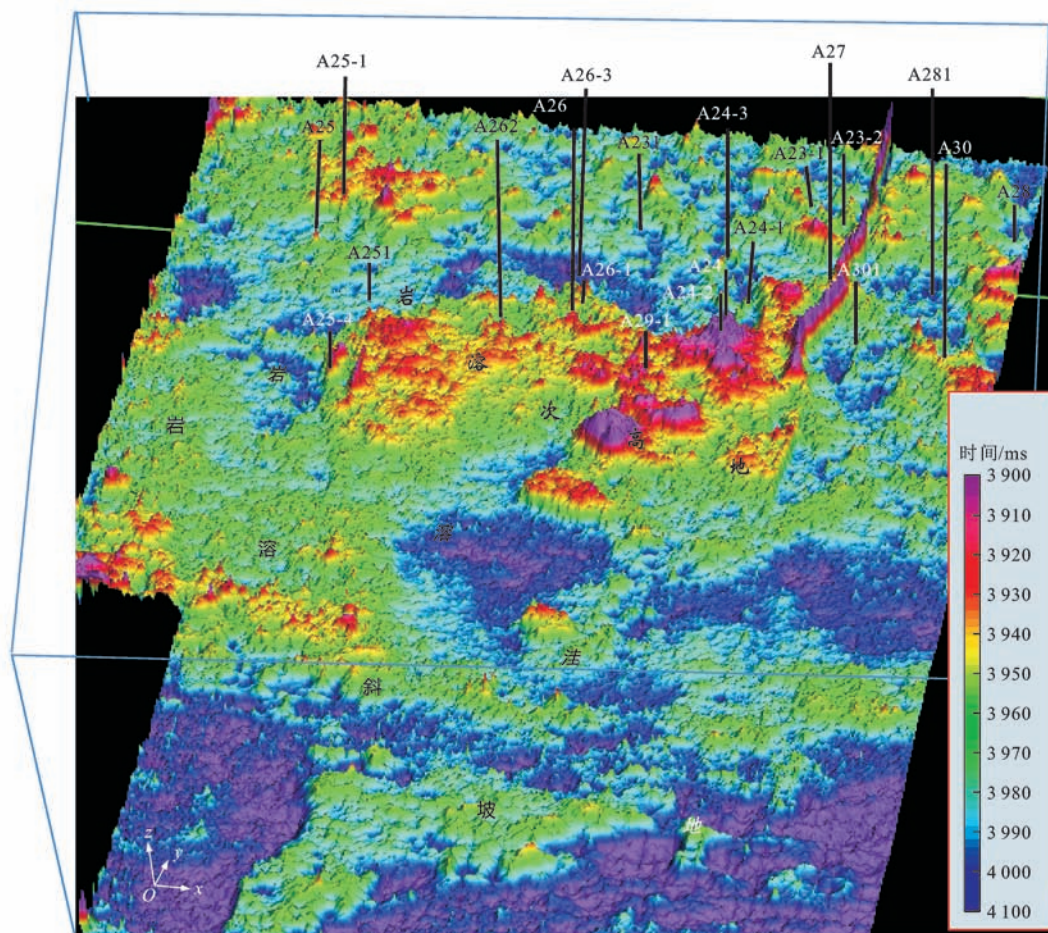
本区次生孔隙的孔隙度为1.8%~22.1%。经过与实际井标定发现,纯纵波反演的纵波阻抗处于 $(1.30\sim 1.47)\times 10^7\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 之间,代表该类次生储集体。对于含油饱和度为66.4%~78.0%的油气层,对应的纵波频散梯度为280~1 000,而水层则介于0~280之间。图5、6为叠前弹性反演得到的储层及流体预测结果。通过与全区油气井、产水井的实钻结果对比发现,预测结果与各钻井所揭示的储层及流体实际发育情况都有良好的对应关系。以洞穴型储层为主的A24井、A30井、A25井等高产井预测储层发育,流体检测也以含油气为主;而A231C井、A26-3等井位置,以I、II类孔洞-裂缝孔洞型储层发育为主,虽然这两口井储层发育,但流体检测富含水,实钻结果也为水层。该区油气藏经过地质历史时期多期的调整改造作用,油气水分布受到多种因素控制,在不同部位具有不同的特点。

2.2 分布特征

依据地球物理分析结果,结合研究区复杂碳酸盐岩的地质研究,该区油气藏形成与分布主要受岩溶地貌、不整合、断裂、构造背景下的上倾部位等4种因素的控制。

2.2.1 岩溶高地和岩溶斜坡是储层改造的有利场所

哈拉哈塘地区在侏罗系沉积以前长期处于隆升阶段^[1]。由于多期构造运动抬升,该区所在的古隆起及斜坡部位遭受大规模的碳酸盐岩出露,受多期岩溶作用、多期不整合及断裂系统的影响,形成古隆



A25、A25-1、A25-4、A262、A26、A26-1、A24、A24-2、A27、A29 和 A30 井为高效井；A26-3 和 A281 井为出水失利井；
A251、A24-1、A24-3、A23-1、A23-2、A301 和 A28 井为高产低效井

图 4 一间房组古地貌三维图

Fig. 4 Three-dimensional Diagram of Palaeogeomorphology in Yijianfang Formation

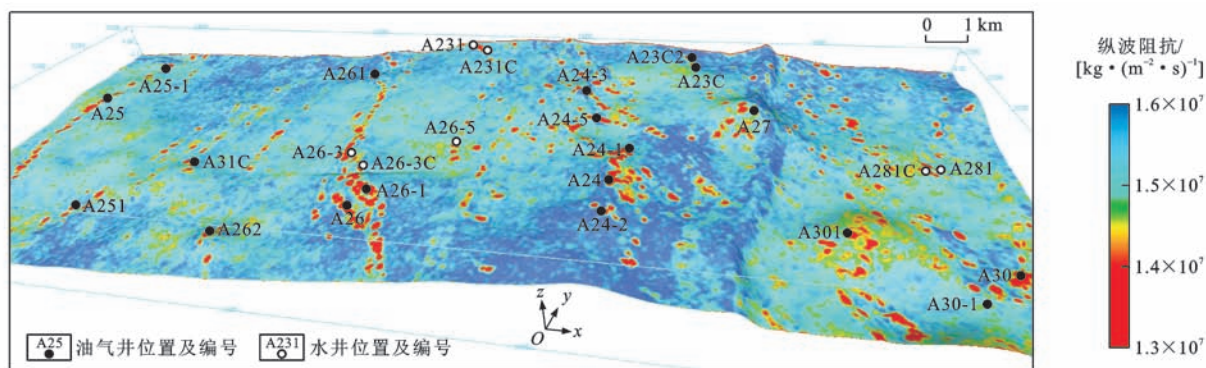


图 5 一间房组预测储层平面分布

Fig. 5 Reservoir Prediction Plane Distribution of Yijianfang Formation

起及斜坡区一间房组广泛发育的岩溶储层。从叠前弹性反演结果可知,奥陶系风化壳岩溶储层主要分布于不整合面向下 80 ms 约 140 m 的范围;在平面上,优质储层在岩溶高地及斜坡上呈准层状分布,横向连续性较好,预测的油气井均位于岩溶高地及岩溶斜坡位置(图 4、6)。

从古地貌恢复结果可以看出,研究区在加里东中期总体处于北高南低的岩溶地貌环境(图 4)。区内中、北部多处于岩溶斜坡或岩溶残丘高地部位,溶蚀孔洞普遍发育,是洞穴型(A25、A29-1 井)、裂缝-孔洞型(A27、A30 井)等优质储层的主要发育区;工区南部以岩溶洼地为主,且断裂不发育。这种储层

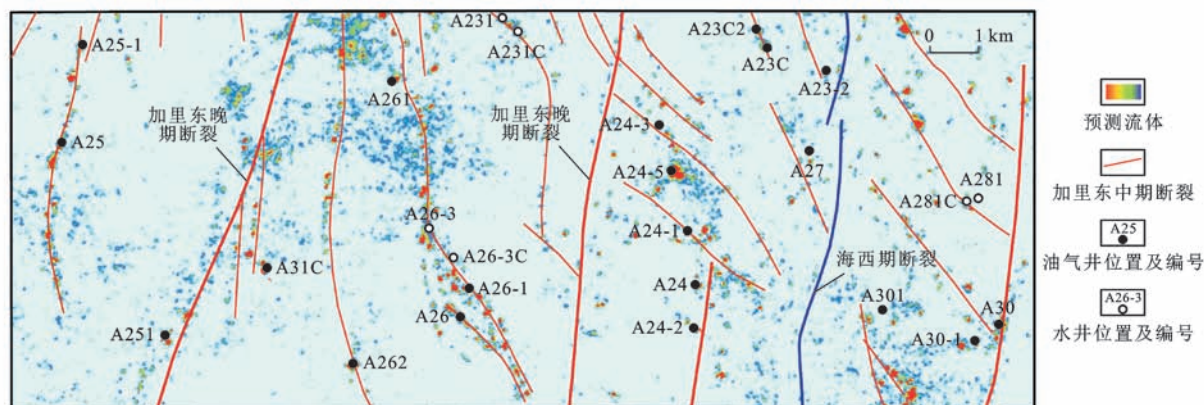


图6 一间房组流体预测平面分布

Fig. 6 Fluid Prediction Plane Distribution of Yijianfang Formation

的差异分布特征与不同部位多期构造运动对岩溶体系的叠加改造有关。通过统计全区高效井、高产低效井及出水井的分布情况,古岩溶发育部位与单井产能具有密切的关系:岩溶次高地有利于地表及地下水系发育形成汇水溶蚀区,从而形成溶洞及缝洞型储层,高效井多发育于该部位,如A29-1井、A30井等;岩溶斜坡储层改造次之,多以高产低效井为主,如A251井、A23-1井;而A26-3等出水井多分布于岩溶洼地(图4),这种岩溶洼地由于位置较低,不利于储集层改造及油气充注。

2.2.2 不整合面是岩溶作用发育的重要条件

岩溶不整合面是一个构造薄弱面,在不整合面附近的断裂及裂缝发育,可以构成有利于岩溶水汇集运移的复合系统。通过该区实际钻井放空漏失段的统计可知,放空漏失段多集中于距一间房组顶面10~140 m的范围。张学丰等认为,哈拉哈塘地区主要的岩溶阶段是加里东中期I幕和III幕,即一间房组沉积后的短暂暴露岩溶及桑塔木组沉积后的风化壳岩溶^[45]。从预测结果可以看出,在不同的部位,储集体规模及延伸深度各有差异[图7(b)]:第一套缝洞系统主要分布于距不整合顶面向下约80 m的位置,具有横向准层状分布的特征,可能受加里东中期I幕一间房组灰岩沉积后短暂暴露的影响,在表层岩溶带形成较好的岩溶储层岩^[1];而80~140 m范围内的第二套缝洞系统相对第一套延伸较深,呈垂向分布特点,可能是由于受加里东中期III幕岩溶作用的控制,沿断裂等疏导体系在径流带形成较深的溶蚀体系^[4]。

2.2.3 加里东期—海西期断裂控制储层改造及油气输导

三维地震资料解释揭示该区加里东期—海西期

断裂以NE—SW向、NW—SE向及近SN向3组断裂为主(图6),具有早期形成、后期继承性发育的特征^[1]。其中,加里东期断裂为走滑性质断裂,断层面从寒武系到奥陶系桑塔木组,而海西期断裂为一逆冲断裂,断穿奥陶系,向上延伸至二叠系。该区经历了加里东中晚期—海西期强烈的构造隆升,使奥陶系长期遭受风化剥蚀,同时烃类演化有机酸、岩浆活动酸性热流体、大气淡水热液流体等沿继承性发育的基底断裂发生渗滤,形成了广泛发育的内幕岩溶发育区,在这些区域常形成大量的溶蚀孔洞缝,有效改善了碳酸盐岩储集性能及渗流能力。

另一方面,哈拉哈塘地区在加里东中晚期—海西期,寒武系烃源岩进入生油高峰期,有机质处于高成熟演化阶段,而在海西晚期进入过成熟生干气演化阶段^[46-47]。断裂及裂缝组成网状的优势运移通道使得油气垂向及侧向沿着这类优势输导格架运移,是流体运聚的有利方向。图6流体预测结果也表明,沿断裂走向,由于断裂带岩溶储层较为发育,油气具有条带状展布的特征。同时,加里东期走滑断裂和海西期逆冲断裂形成时间及断穿层位的不同造成油气水分布特征的差异。从图8可以看出:A24-5井处于加里东期走滑断裂发育部位,同时由于土木休克组—桑塔木组灰泥岩的存在,该井井底部位油气富集条件较好,目前日产油34 t;而部署在海西期逆冲断裂上的A24-4-H1井正是由于逆冲通天断裂沟通井底附近油气系统,造成该井富含水。

虽然海西期逆冲断裂带对油气藏起到了调整改造作用,导致一间房组整体含油气性较差(图6),但从预测结果可以看出,沿海西期逆冲断裂两盘也体现出油气藏分布不均衡的特点,呈现出局部油气藏在逆冲断裂上盘聚集的特征。海西期断裂西侧的上

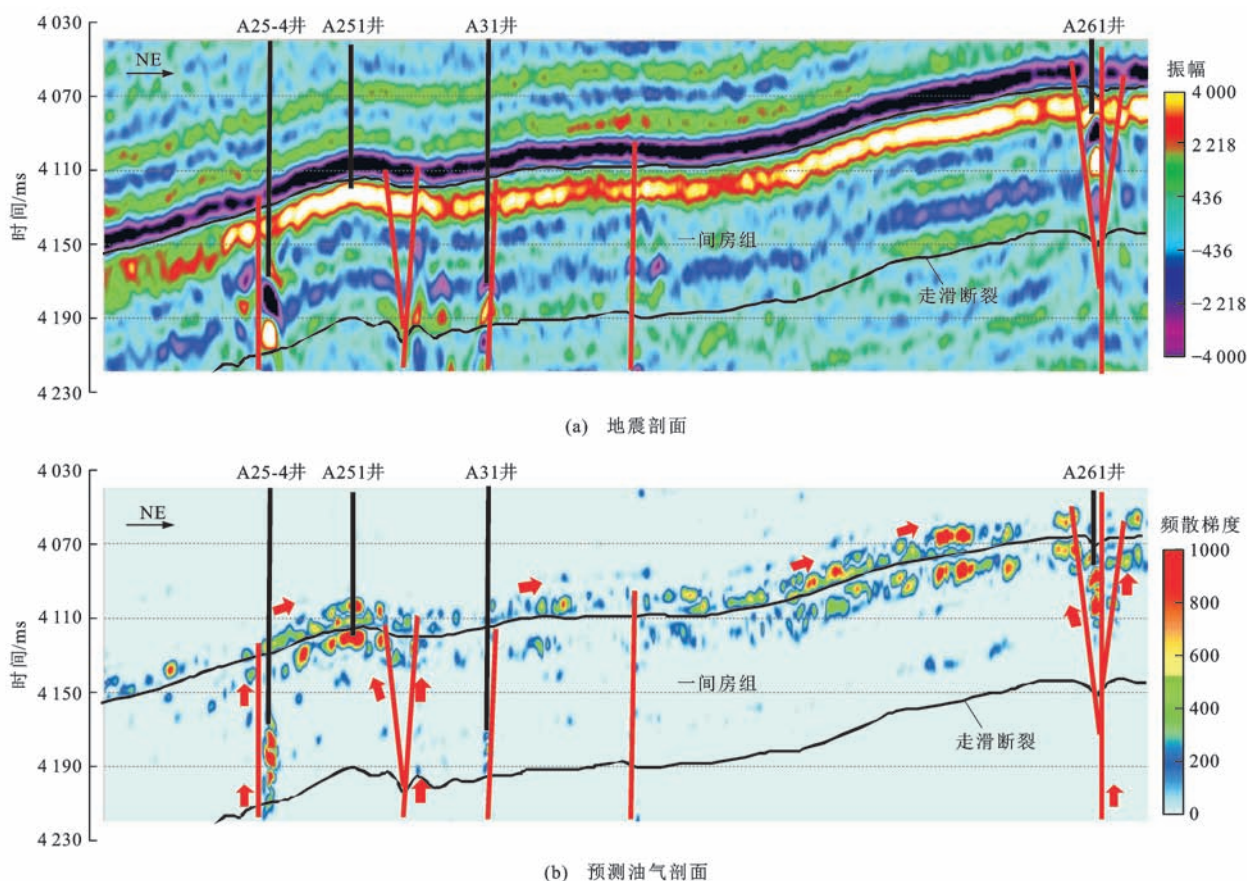


图7 构造背景下的油气聚集特征

Fig. 7 Characteristics of Hydrocarbon Accumulation Under the Condition of Tectonic Setting

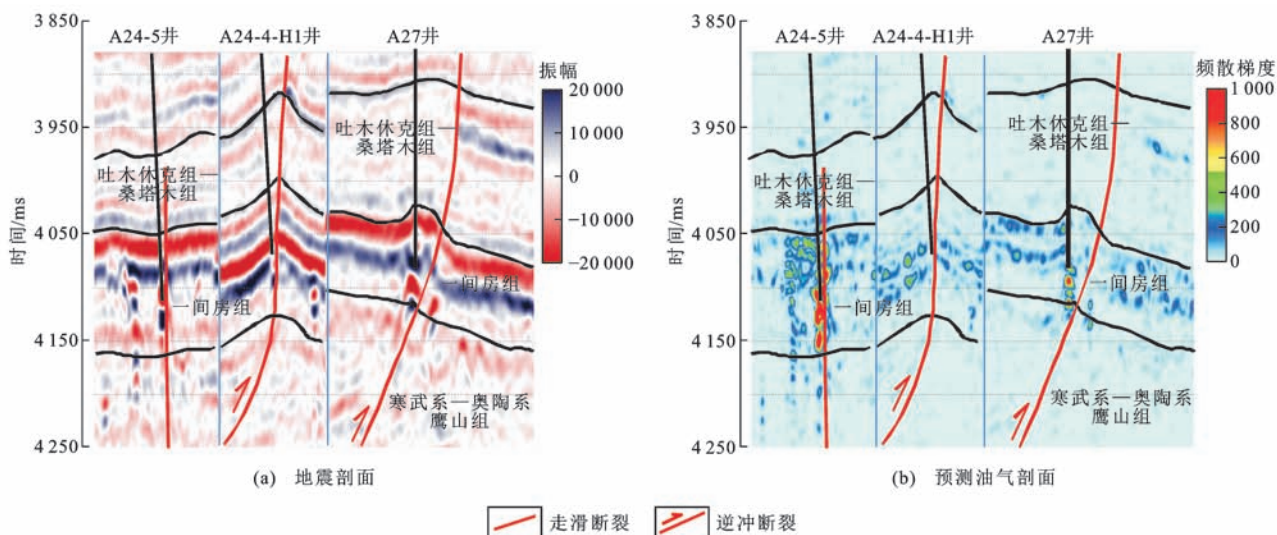


图8 不同性质断裂对储层及油气的控制

Fig. 8 Controls of Different Faults on Reservoir and Hydrocarbon

盘相对东侧下盘含油气性要好,以 A27 井、A23-2 井等油气井为典型代表(图 8)。这是由于在应力场的施加过程中,海西期逆冲断层上盘由于断移的距离大,成为断层活动的主动盘,在断层活动过程中能够产生逆牵引背斜;这些部位对储集体改造作用较

强,有利于油气的充注,而对于逆冲断层的下盘,断距较小,活动性较小,输导效率没有上盘高。

2.2.4 构造背景下的上倾部位有利于油气聚集

塔北古隆起是一个长期继承性发育、晚期深埋与库车新生代山前拗陷之下的前侏罗纪古隆起^[1]。

由于长期隆起,塔北古隆起地层在构造旋回的挤压期处于剥蚀状态的时间更长,且受到多期岩溶作用、多期不整合与断裂系统的影响,古隆起及斜坡区岩溶储层广泛发育。在地貌单元上,古隆起表层岩溶带及径流溶蚀带较为发育^[4],发育多套溶蚀孔洞。

流体势差异及古隆起上具有较好的储集条件使得长期发育的古隆起成为烃源岩油气运移的方向,始终是古生界满加尔凹陷油气运移的指向区^[48-49]。多期成藏形成的油气沿输导系统向古隆起高部位的奥陶系风化壳运移聚集成藏,形成以奥陶系巨厚泥岩为盖层、中下奥陶统层间岩溶为储集体的油气系统。

从图7(b)可以看出,位于构造上倾方向的高产工业油气流井(A25-4井和A261井)具有高的频散梯度(800~1 000),而位于构造较低部位的A31井以富含水为主,流体检测结果也以出水为主。油气藏具有沿构造上倾方向高部位聚集的特点,且具有准层状展布的特征。

3 结 语

(1)常规资料由于对地震道集的叠加处理以及岩性或流体差异产生的AVO效应影响,使得对地震资料分辨率和储层预测精度的影响误差非常明显。因此,常规纵波勘探只能粗略确定储层发育程度,无法准确预测流体。本文通过纯纵波储层反演技术预测储层非均质性和频率依赖AVO反演方法预测含油气性的综合研究,能够较为客观地预测储层及流体的分布。

(2)储层及流体预测结果与实钻结果具有很好的对应关系。对于孔隙度为1.8%~22.1%的次生孔洞缝储集体,其对应的纵波阻抗介于 $(1.30 \sim 1.47) \times 10^7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,而对于含油饱和度为66.4%~78.0%的油气层,纵波频散梯度为280~1 000,水层的频散梯度介于0~280,综合预测结果与钻探结果比较吻合。

(3)深层碳酸盐岩油气藏的分布主要受古地貌、不整合、断裂、构造背景下的上倾部位等因素的控制。其中,古地貌及断裂是造成油气藏分布差异最为重要的因素。岩溶高地及岩溶斜坡为储层的改造提供了有利场所,更有利于储层的次生改造形成缝洞型储层,从而形成油气聚集区,岩溶洼地由于位置较低,不利于油气富集,以产水为主;不整合是岩溶发育的重要条件,溶蚀孔洞多集中于不整合面以下10~140 m的范围;加里东期—海西期断裂有利于储层改造及油气疏导,油气具有沿断裂走向展布的

特点,加里东期断裂由于没有切穿一间房组盖层,有利于油气聚集,而海西期断裂穿透奥陶系延伸至二叠系,造成油气藏的调整改造,整体沿海西期断裂奥陶系油气分布较差,并且海西期断裂上盘具有明显好于下盘的特征;构造背景下的上倾部位为油气的聚集与保存提供了条件,为油气聚集的重要场所。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 朱光有,杨海军,朱永峰,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J].岩石学报,2011,27(3):827-844.
ZHU Guang-you, YANG Hai-jun, ZHU Yong-feng, et al. Study on Petroleum Geological Characteristics and Accumulation of Carbonate Reservoirs in Hanilcatam Area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3):827-844.
- [2] 倪新锋,张丽娟,沈安江,等.塔里木盆地英买力—哈拉哈塘地区奥陶系岩溶储集层成岩作用及孔隙演化[J].古地理学报,2010,12(4):467-479.
NI Xin-feng, ZHANG Li-juan, SHEN An-jiang, et al. Diagenesis and Pore Evolution of the Ordovician Karst Reservoir in Yengimahalla-Hanilcatam Region of Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(4):467-479.
- [3] 高计县,唐俊伟,张学丰,等.塔北哈拉哈塘地区奥陶系一间房组碳酸盐岩岩心裂缝类型及期次[J].石油学报,2012,33(1):64-73.
GAO Ji-xian, TANG Jun-wei, ZHANG Xue-feng, et al. Types and Episodes of Fractures in Carbonate Cores from the Ordovician Yijianfang Formation in the Halahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(1):64-73.
- [4] 赵宽志,淡永,郑多明,等.塔北哈拉哈塘地区奥陶系潜山岩溶储层发育特征及控制因素[J].中国岩溶,2015,34(2):171-178.
ZHAO Kuan-zhi, DAN Yong, ZHENG Duo-ming, et al. Characteristics of Karst Reservoirs in the Ordovician Buried Hills of the Halahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2):171-178.
- [5] 倪新锋,张丽娟,沈安江,等.塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系[J].中国地质,2009,36(6):1312-1321.
NI Xin-feng, ZHANG Li-juan, SHEN An-jiang, et al. Paleokarstification Types, Karstification Periods and Superimposition Relationship of Ordovician Carbonates in Northern Tarim Basin[J]. Geology in China, 2009, 36(6):1312-1321.

- [6] 崔海峰,郑多明,腾团余.塔北隆起哈拉哈塘凹陷石油地质特征与油气勘探方向[J].岩性油气藏,2009,21(2):54-58.
CUI Hai-feng, ZHENG Duo-ming, TENG Tuan-yu, et al. Petroleum Geologic Characteristics and Exploration Orientation in Halahatang Depression of Tabei Uplift[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 54-58.
- [7] 客伟利,张光亚,潘文庆,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系一间房组岩溶储集层地震识别与控制因素[J].古地理学报,2014,16(1):125-132.
KE Wei-li, ZHANG Guang-ya, PAN Wen-qing, et al. Seismic Identification and Controlling Factors on Karsted Carbonate Reservoir for the Yijianfang Formation of Ordovician in Hanikatan Area of Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 125-132.
- [8] SUN S Z D, ZHANG Y Y, FAN C Y. An Iterative AVO Inversion Workflow for Pure P-wave Computation and S-wave Improvement[J]. The First Break, 2014, 32(10): 47-50.
- [9] 文华国,郑荣才,沈忠民,等.四川盆地东部黄龙组古岩溶地貌研究[J].地质论评,2009,55(6):816-827.
WEN Hua-guo, ZHENG Rong-cai, SHEN Zhong-min, et al. Study on the Carboniferous Palaeokarst Landform in Eastern Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 816-827.
- [10] 欧阳诚,韩 翀,石 新,等.岩溶高地风化壳有利勘探区的储层地震预测技术:以鄂尔多斯盆地苏₅区块马五₁层为例[J].天然气工业,2014,34(11):48-54.
OUYANG Cheng, HAN Chong, SHI Xin, et al. Seismic Prediction of the Weathered Crust Reservoirs on Karst Highlands: A Case from Ma 5₁ in Block Su 5 of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11): 48-54.
- [11] 王宏斌,张虎权,孙 东,等.风化壳岩溶储层地质-地震综合预测:以塔中北部斜坡带下奥陶统为例[J].天然气地球科学,2009,20(1):131-137.
WANG Hong-bin, ZHANG Hu-quan, SUN Dong, et al. Application of Integrated Seismic-geology Prediction Techniques to Weathering Crust Karst Reservoir: An Example from Lower Ordovician, Northern Slope of Tazhong Area[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 131-137.
- [12] 卫平生,潘建国,张虎权,等.地震储层学的概念、研究方法和关键技术[J].岩性油气藏,2010,22(2):1-5.
WEI Ping-sheng, PAN Jian-guo, ZHANG Hu-quan, et al. Concept, Method and Technology of Seismic Reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(2): 1-5.
- [13] 张进铨.地震解释技术现状及发展趋势[J].地球物理学进展,2006,21(2):578-586.
ZHANG Jin-duo. Present Status and Future Trend of Seismic Data Interpretation Techniques[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 578-586.
- [14] 贺振华,蒲 勇,熊晓军,等.川东北长兴—飞仙关组礁滩储层的三维地震识别[J].物探化探计算技术,2009,31(1):1-5.
HE Zhen-hua, PU Yong, XIONG Xiao-jun, et al. 3D Seismic Identification of Organic Reef and Oolitic Shoal Reservoirs in Changxing-Feixianguan Formation in Northeast Sichuan Basin[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 31(1): 1-5.
- [15] 杨海军,胡太平,于红枫,等.塔中地区上奥陶统礁滩复合体储层地震预测技术[J].石油与天然气地质,2008,29(2):230-236.
YANG Hai-jun, HU Tai-ping, YU Hong-feng, et al. Seismic Reservoir Prediction of Reef-flat Complexes in the Upper Ordovician, Tazhong Area[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(2): 230-236.
- [16] 郑多明,李志华,赵宽志,等.塔里木油田奥陶系碳酸盐岩缝洞储层的定量地震描述[J].中国石油勘探,2011,16(5/6):57-62.
ZHENG Duo-ming, LI Zhi-hua, ZHAO Kuan-zhi, et al. Quantitative Seismic Characterization of Ordovician Fracture-cavity Carbonate Reservoirs in Tarim Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(5/6): 57-62.
- [17] 刘喜武,宁俊瑞,刘培体,等.地震时频分析与分频解释及频谱分解技术在地震沉积学与储层成像中的应用[J].地球物理学进展,2009,24(5):1679-1688.
LIU Xi-wu, NING Jun-rui, LIU Pei-ti, et al. Seismic Time-frequency Analysis for Frequency Decomposition with Applications to Seismic Sedimentology and Reservoir Imaging[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1679-1688.
- [18] 牟永光,陈小宏,李国发,等.地震数据处理方法[M].北京:石油工业出版社,2006.
MOU Yong-guang, CHEN Xiao-hong, LI Guo-fa, et al. Seismic Data Processing Method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [19] 郑晓东. Zoeppritz 的近似及其应用[J].石油地球物理勘探,1991,26(2):129-144.
ZHENG Xiao-dong. Approximation of Zoeppritz Equation and Its Application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1991, 26(2): 129-144.
- [20] 贺振华,贾义蓉,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,2011,33

- (1):1-5.
- HE Zhen-hua, JIA Yi-rong, 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, 33(1):1-5.
- [21] SUN S Z D, WANG P F, HE G Q, et al. Pure-P Data Inversion and Its Application in Thin Gas Shale Bed Prediction[C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. Tulsa: SEG, 2015: 3425-3429.
- [22] GOODWAY B, CHEN T W, DOWNTON J. Improved AVO Fluid Detection and Lithology Discrimination Using Lamé Petrophysical Parameters, " $\lambda\rho$ ", " $\mu\rho$ ", and " λ/μ Fluid Stack", from P and S Inversions[C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1997. Tulsa: SEG, 1997: 183-186.
- [23] ZHANG Y Y, SUN Z D, FAN C Y. An Iterative AVO Inversion Workflow for S-wave Improvement[C] // EAGE. 75th EAGE Conference and Exhibition Incorporating, SPE EUROPEC 2013. Vienna: EAGE, 2013: 47-50.
- [24] SMITH G C, GIDLOW P M. Weighted Stacking for Rock Property Estimation and Detection of Gas[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35(9): 993-1014.
- [25] SUN S Z D, XIAO X, CHEN L, et al. P-wave Fracture Prediction Algorithm Using Data with Limited Azimuth Distribution[J]. The Leading Edge, 2012, 31(2): 198-205.
- [26] CHAPMAN M, ZATSEPIN S V, CRAMPIN S. Derivation of a Microstructural Poroelastic Model[J]. Geophysical Journal International, 2002, 151(2): 427-451.
- [27] CHAPMAN M, LIU E, LI X Y. The Influence of Fluid Sensitive Dispersion and Attenuation on AVO Analysis[J]. Geophysical Journal International, 2006, 167(1): 89-105.
- [28] WILSON A, CHAPMAN M, LI X Y. Frequency-dependent AVO Inversion[C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. Tulsa: SEG, 2009: 341-345.
- [29] WU X Y, CHAPMAN M, WILSON A, et al. Estimating Seismic Dispersion from Pre-stack Data Using Frequency-dependent AVO Inversion[C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010. Tulsa: SEG, 2010: 425-429.
- [30] SUN S Z D, YUE H Y, HU L G, et al. An Improved Frequency-dependent AVO Inversion Algorithm For Fluid Detection[C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014. Tulsa: SEG, 2014: 543-547.
- [31] 周丽, 顾汉明, 梁彬, 等. 地震反射 AVO 理论及其应用研究进展[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 175-179.
- ZHOU Li, GU Han-ming, LIANG Bin, et al. Progress on AVO Theory and Its Application[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(2): 175-179.
- [32] 狄贵东, 孙赞东, 庞雄奇, 等. 塔里木盆地深层复杂碳酸盐岩油气藏地球物理预测与评价: 以 ZG8 井区鹰山组为例[J]. 石油学报, 2015, 36(增2): 82-91.
- DI Gui-dong, SUN Zan-dong, PANG Xiong-qi, et al. Geophysical Prediction and Evaluation on Deep Complex Carbonate Reservoir in Tarim Basin: A Case Study of Yingshan Formation in ZG8 Well Block[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S2): 82-91.
- [33] 张朝军, 贾承造, 李本亮, 等. 塔北隆起中西部地区古岩溶与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 263-269.
- ZHANG Chao-jun, JIA Cheng-zao, LI Ben-liang, et al. Ancient Karsts and Hydrocarbon Accumulation in the Middle and Western Parts of the North Tarim Uplift, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 263-269.
- [34] 张庆玉, 梁彬, 曹建文, 等. 哈拉哈塘一间房组古地貌及岩溶发育条件研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(4): 413-415.
- ZHANG Qing-yu, LIANG Bin, CAO Jian-wen, et al. Palaeogeomorphology and Karst Development Conditions of Yijianfang Formation in Hanilcatam Area[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2014, 21(4): 413-415.
- [35] 胡修权, 施泽进, 田亚铭, 等. 川东南地区茅口组岩溶古地貌恢复及特征[J]. 地质通报, 2014, 33(6): 874-882.
- HU Xiu-quan, SHI Ze-jin, TIAN Ya-ming, et al. The Restoration of Karst Ancient Landform of the Maokou Formation in Southeastern Sichuan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(6): 874-882.
- [36] 高艺, 姜在兴, 李俊杰, 等. 古地貌恢复及其对滩坝沉积的控制作用: 以辽河西部凹陷曙北地区沙四段为例[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 40-46.
- GAO Yi, JIANG Zai-xing, LI Jun-jie, et al. Restoration of Paleogeomorphology and Its Controlling Effect on Deposition of Beach-bar Sand Bodies: A Case Study of the Fourth Member of Shahejie Formation, Shubei Area, Liaohé Western Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 40-46.
- [37] 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 Si-cong, TAN Xiu-cheng, 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.
- [38] 汪 洋, 李树同, 牟炜卫, 等. 乌审旗—志丹地区奥陶系岩溶古地貌与马五₁气水分布关系[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2): 64-69.
- WANG Yang, LI Shu-tong, MOU Wei-wei, et al. Effect of Karst Paleogeomorphology of Ordovician on Gas-water Distribution of Ma 5₁ in Wushenqi-Zhidan Area[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2): 64-69.
- [39] 张庆玉, 陈利新, 梁 彬, 等. 轮古西地区前石炭纪古岩溶微地貌特征及刻画[J]. 海相油气地质, 2012, 17(4): 23-26.
- ZHANG Qing-yu, CHEN Li-xin, LIANG Bin, et al. Characterization of Precarboniferous Karst Microgeomorphology in the West Part of Lungu Oilfield, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(4): 23-26.
- [40] 周丽梅, 张江江. 海西早期岩溶改造作用及古地貌恢复: 以塔河 2 区为例[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 51-56.
- ZHOU Li-mei, ZHANG Jiang-jiang. Early Hercynian Karst Reconstruction and Ancient Landform Recovery: Take Area 2 in Tahe Oilfield as an Example[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(4): 51-56.
- [41] 金民东, 谭秀成, 曾 伟, 等. 四川盆地磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组构造古地貌恢复及地质意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 634-644.
- JIN Min-dong, TAN Xiu-cheng, ZENG Wei, et al. Reconstruction of the Tectonic Palaeogeomorphology of Longwangmiao Formation During the Caledonian-Hercynian Period in Moxi-Gaoshiti Area, Sichuan Basin and Its Geological Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 634-644.
- [42] 淡 永, 邹 灏, 梁 彬, 等. 塔北哈拉哈塘加里东期多期岩溶古地貌恢复与洞穴储层分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 304-312.
- DAN Yong, ZOU Hao, LIANG Bin, et al. Restoration of Multistage Paleogeomorphology During Caledonian Period and Paleokarst Cavernous Reservoir Prediction in Halahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(3): 304-312.
- [43] 王建民, 王佳媛, 沙建怀, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶古地貌特征及综合地质模型[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(2): 409-418.
- WANG Jian-min, WANG Jia-yuan, SHA Jian-huai, et al. Karst Paleogeomorphology and Comprehensive Geological Model of the Ordovician Weathering Crust in the Eastern Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(2): 409-418.
- [44] 肖 笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1992-2002.
- XIAO Di, TAN Xiu-cheng, SHAN Shu-jiao, et al. The Restoration of Palaeokarst Geomorphology of Middle Permian Maokou Formation and Its Petroleum Geological Significance in Southern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(10): 1992-2002.
- [45] 张学丰, 李 明, 陈志勇, 等. 塔北哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征及主要岩溶期次[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 815-826.
- ZHANG Xue-feng, LI Ming, CHEN Zhi-yong, et al. Characteristics and Karstification of the Ordovician Carbonate Reservoir, Halahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 815-826.
- [46] 张水昌, 梁狄刚, 朱光有, 等. 中国海相油气田形成的地质基础[J]. 科学通报, 2007, 52(增 1): 19-31.
- ZHANG Shui-chang, LIANG Di-gang, ZHU Guang-you, et al. The Geological Basis of the Formation of Marine Oil and Gas Fields in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 19-31.
- [47] 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- ZHANG Shui-chang, LIANG Di-gang, ZHANG Bao-min, et al. Formation of Marine Oil and Gas in the Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [48] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- JIA Cheng-zao. Tectonic Characteristics and Petroleum of Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [49] 赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. 科学通报, 2007, 52(增 1): 9-18.
- ZHAO Wen-zhi, WANG Ze-cheng, ZHANG Shui-chang, et al. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Enrichment Zones of Deep Marine Strata in the Superimposed Basins of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 9-18.