

准噶尔盆地乌夏地区风城组云质岩 致密油特征及“甜点”预测

张国印¹, 王志章¹, 郭旭光², 周柯全², 潘 潞¹, 孙 乐¹

(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油 新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:玛湖凹陷西斜坡云质岩致密油是准噶尔盆地近年来的重要勘探领域。通过对乌夏地区风城组云质岩特征分析,对云质岩致密油发育的主控因素进行总结,认为风城组地层发育优质烃源岩,其岩性、物性以及裂缝发育程度共同决定了致密油“甜点”分布。根据基质孔隙与裂缝的配置关系,将致密油“甜点”类型分为孔隙型、裂缝型及孔隙-裂缝型。通过地震岩石物理分析和正演模拟进行地震敏感参数分析,确定“甜点”的岩性、物性、厚度及围岩特征对地震响应的影响,在此基础上选择有效的致密油“甜点”预测方法,运用地震多属性分析技术,预测云质岩分布有利区;利用波阻抗反演以及随机模拟反演技术对储层物性参数进行反演,预测孔隙发育有利区;以矿物成分脆性指数评价法和蚂蚁追踪技术,预测裂缝发育有利区。综合岩性、物性、裂缝预测成果,划分Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类“甜点”有利区,为该地区下一步致密油勘探提供依据。

关键词:云质岩;甜点;致密油;风城组;准噶尔盆地

中图分类号:TE132.2 **文献标识码:**A

Characteristics and ‘sweet spot’ prediction of dolomitic tight oil reservoirs of the Fengcheng Formation in Wuxia area, Junggar Basin

Zhang Guoyin¹, Wang Zhizhang¹, Guo Xuguang², Zhou Kequan², Pan Lu¹, Sun Le¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Dolomitic tight oil reservoir in west slope of the Mahu Sag has become an important exploration domain in the Junggar Basin in recent years. Based on characteristic analysis of the dolomitic rock of the Fengcheng Formation in Wuxia area, we summarized the controlling factors of dolomitic tight oil reservoir development, and concluded that high quality source rocks occur in the Fengcheng Formation, and the distribution of ‘sweet spot’ was jointly determined by lithology, porosity and fracture development. According to the association of matrix porosity and fracture, the ‘sweet spots’ were divided into porosity type, fracture type and porosity-fracture type. The influences of lithology, porosity, thickness, surrounding rock of ‘sweet spot’ to seismic responses were studied through seismic petrophysical analysis and seismic forward modeling on sensitive parameters. On this basis, effective tight oil ‘sweet spot’ prediction methods were selected and seismic multi-attribute analysis technique was used to predict the distribution of favorable dolomitic rocks. The distribution of favorable porosity was predicted by using acoustic impedance inversion and stochastic simulation inversion technique. The distribution of favorable fractures was predicted by using mineral composition brittleness index evaluation method and ant tracking technology. The ‘sweet spots’ of type-I, type-II and type-III were identified based on integration of lithology, porosity, fracture prediction results. These study results provide the basis for further tight oil exploration in the region.

Key words: dolomitic rock, sweet spot, tight oil, Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin

近年来,准噶尔盆地致密油勘探取得突破,以吉木萨尔凹陷芦草沟组和玛湖凹陷西斜坡风城组致密云质岩油藏为代表。乌夏地区位于准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡,靠近哈拉阿拉特山地区,发育乌夏断裂(图1),二叠系风城组埋深3 000~4 500 m,厚度500~

1 500 m,发育大量云质岩,断裂带储层受改造作用明显,斜坡带地区物性较差,形成典型源-储共生型致密油藏。2011年,新钻井风南7井在风城组三段(风三段)获得工业油流,预示着乌夏地区云质岩致密油勘探进入新阶段。风城组多套层系云质岩均有不同

收稿日期:2014-08-09;修订日期:2014-11-05。

第一作者简介:张国印(1989—),男,硕士研究生,油气储层地质。E-mail:guoyinzhang@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05008-004-60-64)。

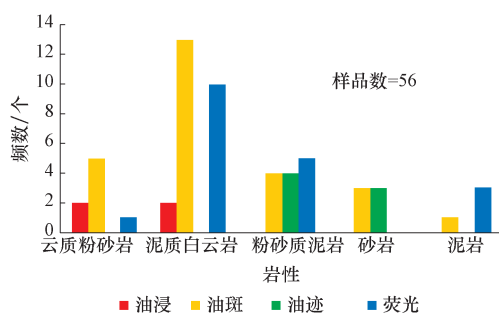


图2 准噶尔盆地乌夏地区风城组不同岩石类型含油性特征

Fig. 2 Oil-bearing property of different rock types of the Fengcheng Formation in Wuxia area, the Junggar Basin

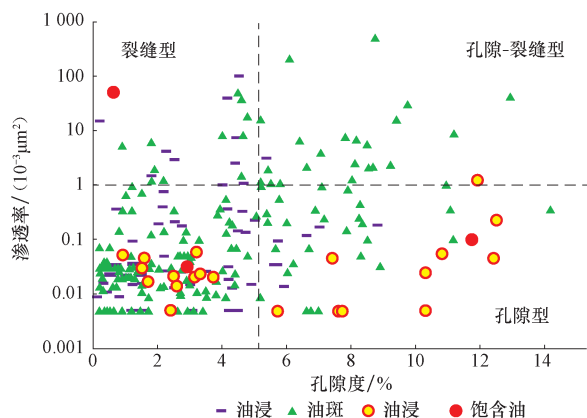


图3 准噶尔盆地乌夏地区风城组物性特征与含油性关系

Fig. 3 Relationship between physical property and oil-bearing property of the Fengcheng Formation in Wuxia area, the Junggar Basin

相对较好(图3)。针对研究区孔、渗特征,选用统计法确定孔隙度下限^[10-11]。当孔隙度下限为3%时,累计产能丢失20%;当孔隙度下限为5%时,样品丢失80%,累计产能丢失40%(图4)。孔隙度大于5%、渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为孔隙型“甜点”;孔隙度小于5%,渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为裂缝型“甜点”;孔隙度大于5%,渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为孔隙裂缝型“甜点”。

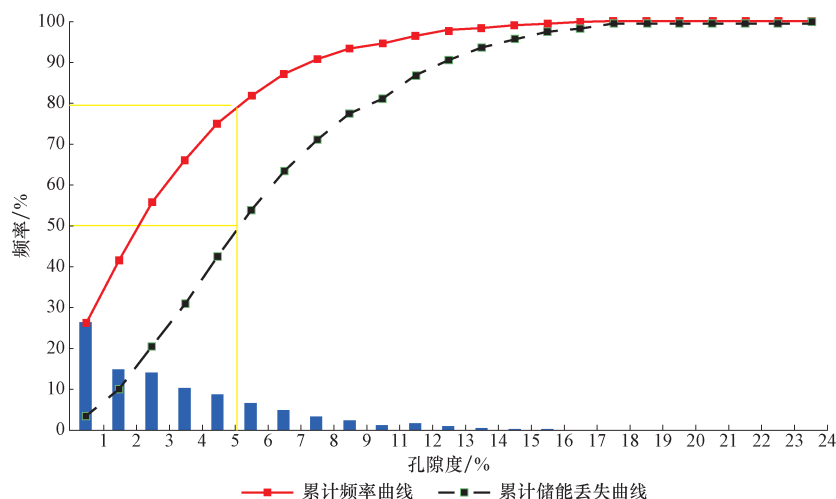


图4 统计法确定“甜点”标准

Fig. 4 Criteria for 'sweet spot' identification with statistical method

该地区云质岩储层孔隙类型有粒间孔、晶间孔、溶蚀孔与裂缝等。粒间孔为压实作用下残余的原生粒间孔隙,晶间孔为由于白云石重结晶形成的孔隙,粒间孔与晶间孔孔径小、渗透性较差。溶蚀孔隙为白云石、长石、石膏、碳酸钠钙石、硅硼钠石、火山凝灰物质^[12-13]等易溶性矿物发生溶蚀作用形成的次生孔隙;裂缝类型主要有斜交缝、直劈缝、充填缝,充填缝或半充填缝是一种无效缝,不能做为储层流体的渗透通道。张开的裂缝不仅可以作为储集空间,还可以作为流体运移通道,沟通溶蚀孔隙形成有效储集空间,并对溶蚀起到促进作用。溶蚀孔和裂缝为研究区主要的储集空间。

1.3 烃源岩特征

据前人研究成果,风城组半深湖相的细粒沉积为该地区的主力烃源岩^[14-15]。风城组烃源岩有机碳含量(TOC)高,在0.48%~4.01%,平均为1.15%;成熟度中等,镜质体反射率(R_o)在0.56%~0.90%,平均为0.69%;干酪根类型为I型和II型生油型干酪根。风城组烃源岩可评价为好—最好的烃源岩,为风城组致密油的形成提供有利条件。风城组白云岩为准同生白云岩和后生白云石化成因^[16-17],白云岩与泥岩紧邻互层发育。烃源岩的生排烃作用使油气近源运移至相邻的白云岩储集空间,同时广泛发育的微裂缝可以作为油气运移通道,为致密油成藏提供有利条件。白云岩与泥岩互层发育的云质岩层段为有利勘探目标。

2 地震敏感参数分析

研究区风城组云质岩致密油特征复杂,致密油孔隙型“甜点”的岩性、物性、厚度和围岩特征对地震振幅、频率和相位响应的影响不清。地震敏感参数分析,

即在明确岩石物理参数基础上,通过一维单井正演特征标定和二维理论模型正演“甜点”地震敏感参数分析,进而为致密油“甜点”的预测方法提供依据。

2.1 地震岩石物理分析

利用岩心和测井数据进行地震岩石物理分析,云质岩和砂砾岩表现为高密度、低声波时差、高阻抗特征,波阻抗分布区间在 $11\,250 \sim 15\,500 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$; 泥岩和沉凝灰岩表现为低密度、高声波时差、低阻抗特征,阻抗范围在 $6\,000 \sim 12\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$; 蒸发岩表现为低密度、低声波时差、中-低阻抗特征,阻抗区间在 $10\,000 \sim 12\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ (图5)。未区分岩性时孔隙度与波阻抗相关性差,仅对云质岩统计分析,发现孔隙度与波阻抗之间存在较好相关性(图6)。将云质岩致密油“甜点”的孔隙度下限定为5%,则“甜点”的声波时差分布区间在 $195 \sim 230 \mu\text{s/m}$,阻抗分布区间在 $11\,500 \sim 13\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 。

2.2 一维单井正演标定

通过对风南1井综合解释,确定“甜点”位置及特征,利用主频为18 Hz 零相位正极性 Ricker 子波制作该井合成地震记录,与井旁道地震记录对比分析。风三段“甜点”位于二叠系风城组三段三亚段顶部与二叠系风城组三段一亚段泥岩段接触的部分,物性好,厚度大,表现为中阻抗特征,位于地震强波峰位置;风二段内甜点相对风三段物性较差,厚度较薄且分散分布,同样表现为高阻抗背景下相对低阻抗特征,位于地震弱波谷位置(图7)。

2.3 二维模型正演分析

建立“甜点”物性变化的正演模型,设计了五种甜

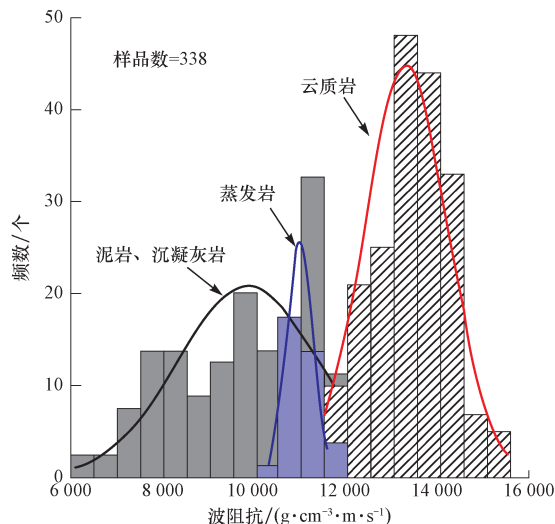


图5 准噶尔盆地乌夏地区风城组主要岩性波阻抗图版
Fig. 5 P-impedance charts of the main lithologies of the Fengcheng Formation in the Wuxia area, the Junggar Basin

点物性模型,“甜点”孔隙度分别为3% (声波时差 $193.5 \mu\text{s/m}$), 5% (声波时差 $199 \mu\text{s/m}$), 7% (声波时差 $205 \mu\text{s/m}$), 9% (声波时差 $213 \mu\text{s/m}$) 和 11% (声波时差 $222 \mu\text{s/m}$)。根据实际地层情况,设计两种甜点分布模式模型:泥岩-上甜点-云质岩模型(风三段)和云质岩-下甜点-云质岩模型(风二段)。云质岩阻抗值 $14\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$, 泥岩阻抗值 $11\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$, 碎屑岩阻抗值 $12\,200 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 。从正演结果可以看出(图8),上甜点模型对应波峰,下甜点模型对应波谷;上、下甜点模型的地震振幅响应均随物性变好而增大,但下甜点模型的振幅增加率要大于上甜点模型。岩性造成的阻抗差异远大于物性变化造成的阻抗差异,振幅属性对岩性最为敏感,同时岩性差异会掩盖物性差异对振幅的影响。

综合分析,地震振幅响应对云质岩储层“甜点”岩

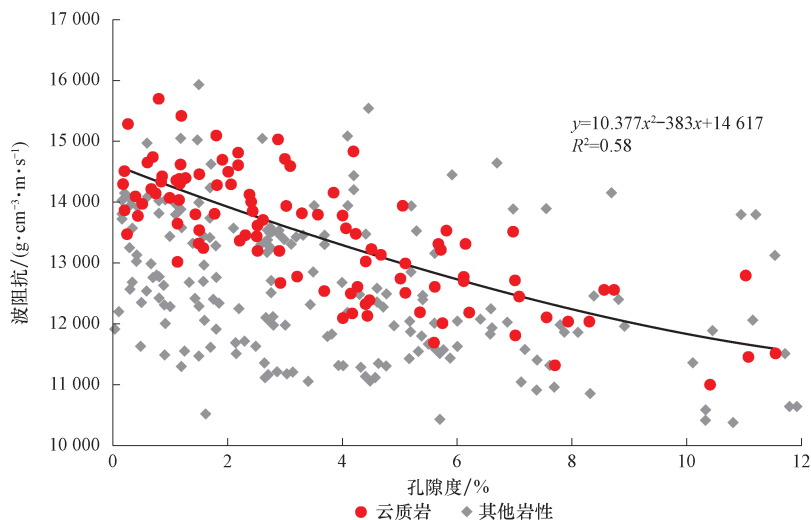


图6 准噶尔盆地乌夏地区云质岩孔隙度与波阻抗关系图版

Fig. 6 Charts for correlation between porosity and p-impedance of dolomitic rocks in Wuxia area, the Junggar Basin

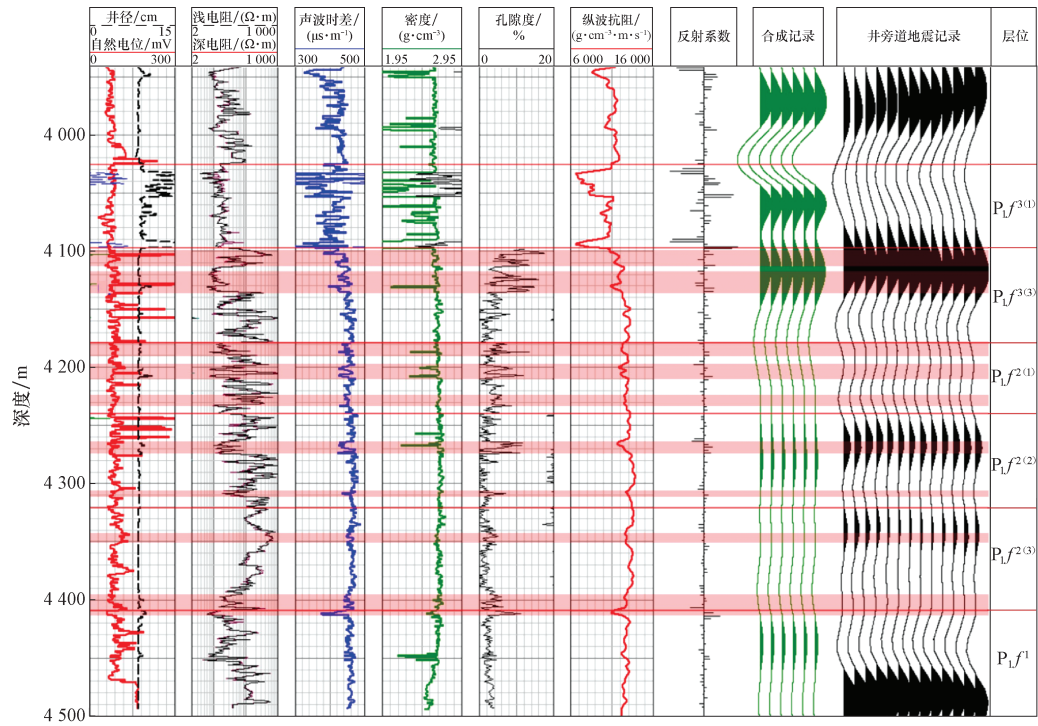


图 7 准噶尔盆地乌夏地区风南 1 井合成记录标定

Fig. 7 Synthetic seismogram calibration of Well Fengnan 1 in Wuxia area, the Junggar Basin

$P_1f^{3(1)}$. 二叠系风城组三段一亚段; $P_1f^{3(3)}$. 二叠系风城组三段三亚段; $P_1f^{2(1)}$. 二叠系风城组二段一亚段; $P_1f^{2(2)}$. 二叠系风城组二段二亚段; $P_1f^{2(3)}$. 二叠系风城组二段三亚段; P_1f^1 . 二叠系风城组一段

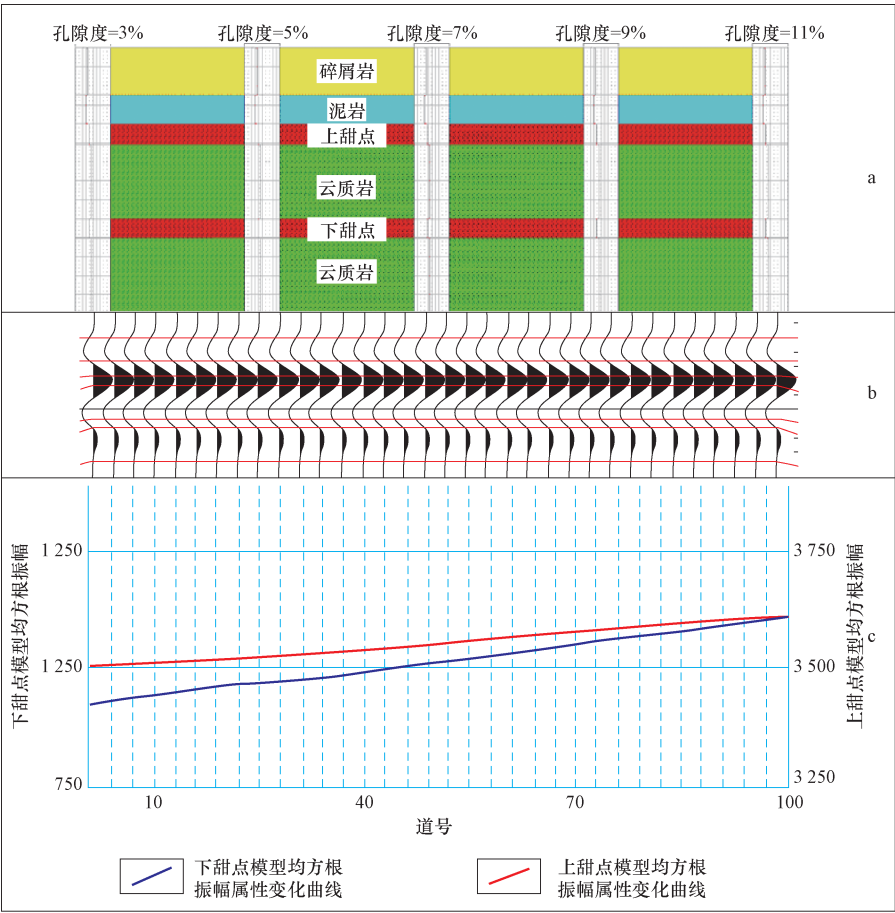


图 8 准噶尔盆地乌夏地区“甜点”物性模型正演分析

Fig. 8 Seismic forward modeling analysis of physical models of ‘sweet spot’ in Wuxia area, the Junggar Basin

a. 孔隙度模型; b. 正演剖面; c. 正演响应分析

性、物性、厚度及围岩特征的变化最为敏感,岩性对振幅影响最大。风三段为泥岩-“甜点”-云质岩的分布模式,且“甜点”厚度较大,物性好,响应为强波峰特征;风二段为云质岩-“甜点”-云质岩的分布模式,且“甜点”厚度较小,物性相对差,响应为弱波谷特征。

3 致密油“甜点”分布预测

在前述地震敏感性分析的基础上,分别应用地震多属性分析技术、波阻抗反演、地质统计随机模拟反演技术、脆性指数评价法以及蚂蚁追踪技术,对风三段致密储层的岩性、物性及裂缝发育特征进行预测^[18-19]。

3.1 地震多属性分析技术

为了达到更好的有利区预测效果,本文采用敏感振幅属性分析和多属性神经网络波形聚类方法。通过前文分析,影响振幅属性变化的因素包括储层的岩性、物性、厚度、围岩特征和含油气性等,其中岩性对振幅属性影响最大。优选特征突出的均方根振幅、标准偏差、绝对振幅积分和算术平均振幅属性进行神经网络波形聚类,得到三类波形。振幅类属性以及波形聚类结果可以较为清楚的反映云质岩分布有利区,通过测井信息标定,A类、B类和C类波形为有利波形,云质岩发育,而D类波形云质岩不发育或受断裂影响难以识别(图9)。

3.2 地震反演技术

通过地震岩石物理分析以及正演模型,赋予了地

震信息较为明确的地质含义。本文采用约束稀疏脉冲反演(CSSI)来进行波阻抗反演。约束稀疏脉冲反演假设地层反射系数非连续而稀疏分布,测井资料起着低频趋势和阻抗范围的约束。按照稀疏的原则抽取反射系数序列,求取地震道与合成记录的残差,修改反射系数序列,如此重复迭代,得到最佳逼近原始地震道的反射系数序列,求得相对波阻抗。最后用 CSSI 的带限波阻抗与 Earth Model 模块低频部分合并求得绝对波阻抗。

孔隙度反演则是在建立孔隙度与波阻抗统计关系的基础上(图6)。利用地质统计学序贯高斯协同模拟随机反演方法,井间协同波阻抗数据体,对孔隙度进行随机模拟反演。以 $11500 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 作为云质岩阻抗下限值,对泥岩和蒸发岩进行镂空,在高阻抗云质岩背景下进行孔隙度反演(图10)。从反演结果可以看出,风城组多套层系发育云质岩孔隙型“甜点”,老井试油均有油气显示,储层改造潜力大。其中,以 $P_{\text{LF}}^{(3)}$ 上部“甜点”厚度最大,物性最好,最为稳定,且已在风南7井获得工业油流。以孔隙度5%作为下限,得到 $P_{\text{LF}}^{(3)}$ 云质岩孔隙型“甜点”分布(图11)。

3.3 裂缝有利区预测

风城组云质岩储层致密,其孔、渗特征受控于裂缝发育情况。裂缝发育程度由地层所受构造应力作用和地层岩石脆性共同决定。地层岩石脆性越大,越容易形成裂缝,同时也有利于储层后期压裂改造。乌夏地区受多次构造应力影响,发育一系列北东或北东东走向断层、裂缝带以及广泛发育的微裂缝,裂缝发育区控

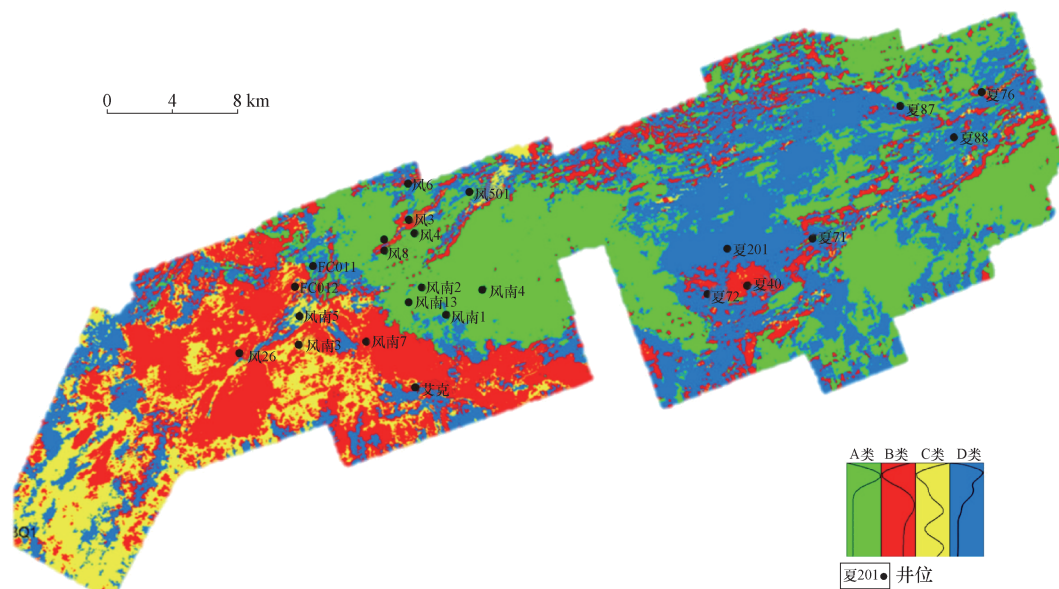
图9 准噶尔盆地乌夏地区 $P_{1f}^{3(3)}$ 波形聚类平面分布

Fig. 9 Plain view of wave form clustering of $P_1f^{3(3)}$ in Wuxia area, the Junggar Basin

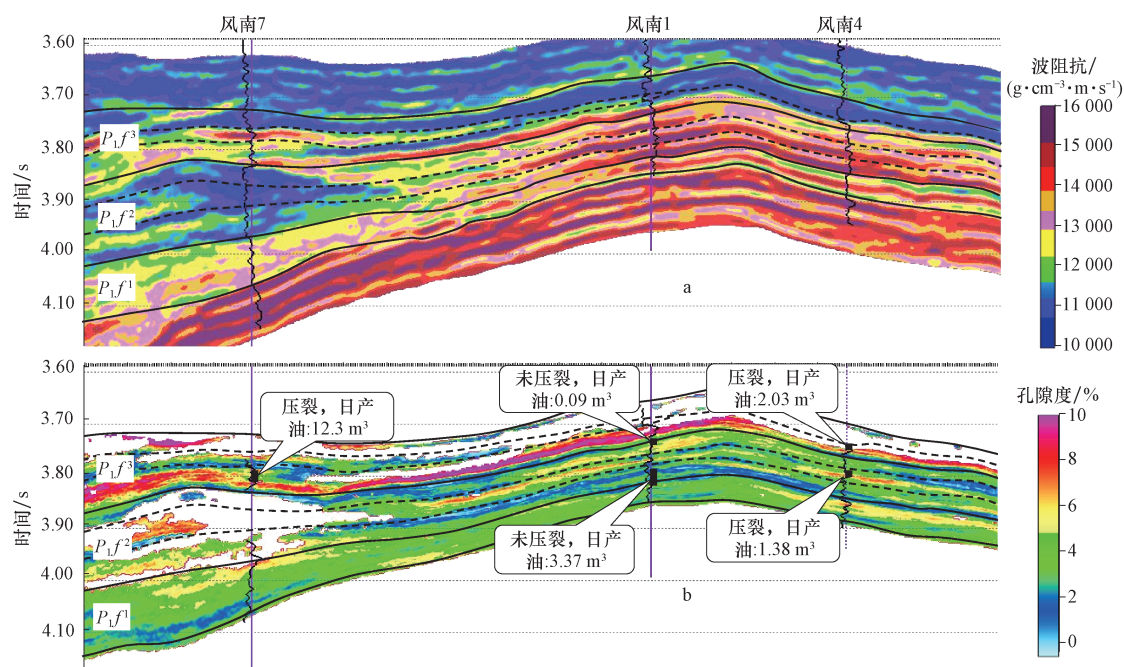
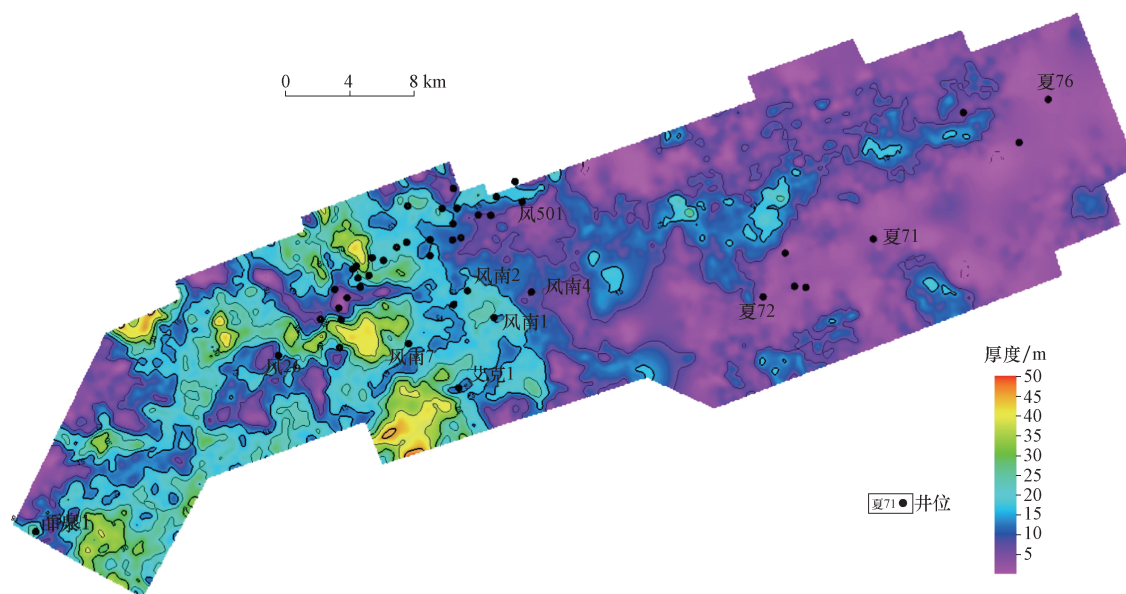


图10 准噶尔盆地乌夏地区波阻抗反演剖面(a)与孔隙度反演预测剖面(b)

Fig. 10 P-impedance inversion section(a) and porosity inversion section(b) in Wuxia area, the Junggar Basin

P_1f^3 . 二叠系风城组三段; P_1f^2 . 二叠系风城组二段; P_1f^1 . 二叠系风城组一段

图11 准噶尔盆地乌夏地区风城组 $P_1f^{3(3)}$ “甜点”(孔隙度 > 5%)厚度分布Fig. 11 Isopach of 'sweet spot' of $P_1f^{3(3)}$ (por > 5%) in Wuxia area, the Junggar Basin

制油气高产区,在断裂带发育裂缝型“甜点”油藏。本部分从岩石脆性和天然裂缝发育带预测两方面进行评价。

3.3.1 脆性有利区预测

岩石脆性受岩石成分的影响。风城组云质岩主要由白云石(2%~80%)、泥质(10%~85%)、硅质(0~40%)、砂质(石英、长石、岩屑)及灰质或盐碱类矿物成分组成。其中,白云石、硅质含量越高,泥质含量越低,岩石脆性越大。因此构造脆性敏感指数: $BI = (\text{白云石} + \text{硅质}) / (\text{白云石} + \text{硅质} + \text{泥质})$ 。经过统计分

析,脆性指数 BI 越大,泊松比变小,杨氏模量变大,岩石脆性越大(图12)。利用随机模拟反演方法对岩石脆性进行预测,从 $P_1f^{3(3)}$ 岩石脆性指数预测平面分布图可以看出(图13),岩石脆性有利区与云质岩有利区具有相关性,岩石脆性受岩性影响较大。

3.3.2 蚂蚁追踪技术裂缝识别

蚂蚁追踪技术以蚁群算法为原理^[20],在地震数据体中撒播大量的“人工蚂蚁”进行追踪,当有蚂蚁发现满足预设的断裂条件时将“释放”某种信号,召集该区

域其他的蚂蚁集中对该断裂进行追踪,直到完成该断裂的追踪和识别。基于这种算法的追踪技术可以突出地震数据的不连续性,通过调节蚂蚁边界、蚂蚁追踪偏差、蚂蚁步长、允许非法步数、必要合法步数和终止条件等参数,不仅可以对断裂进行追踪识别,而且可以对肉眼难以识别的中、大尺度的裂缝或裂缝带进行识别。以风南7井为例,将蚂蚁追踪裂缝识别结果与成像测井识别裂缝进行对比,结果符合率较

高,说明蚂蚁追踪识别的裂缝较为可靠(图14)。提取蚂蚁体层内积分厚度图(图15),可以看出,断裂带或紧邻断裂位置裂缝最为发育,裂缝带控制了油气高产区分布,其中以风3井风三段单井试油产能最高日产 85.7 m^3 。风南斜坡带裂缝距离断裂带较远,但岩石脆性大,发育中小尺度裂缝的可能性仍较大。按照裂缝的发育程度,可以分为裂缝发育带、裂缝次发育带以及裂缝欠发育带。

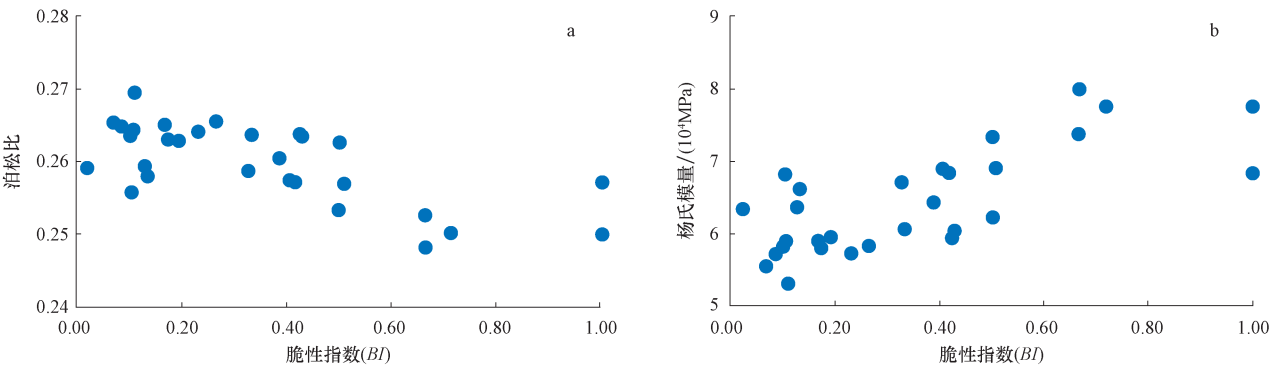


图12 准噶尔盆地乌夏地区脆性指数与弹性参数关系图版

Fig. 12 Charts for correlation between brittleness index and elastic parameters in Wuxia area,the Junggar Basin

a. 脆性指数 - 泊松比关系;b. 脆性指数 - 杨氏模量关系

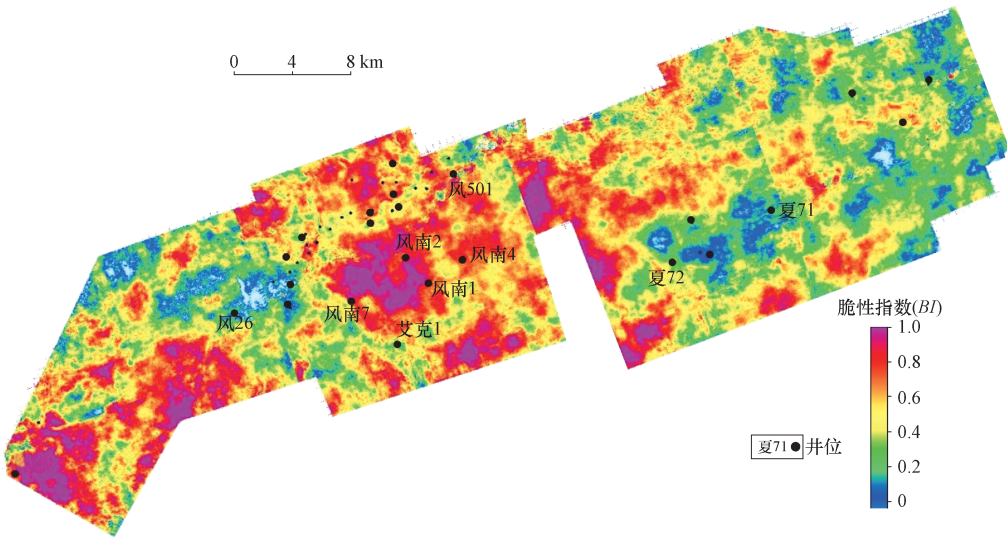


图13 准噶尔盆地乌夏地区风城组 $P_1f^{3(3)}$ 岩石脆性指数预测平面分布

Fig. 13 Brittleness index map of $P_1f^{3(3)}$ in Wuxia area,the Junggar Basin

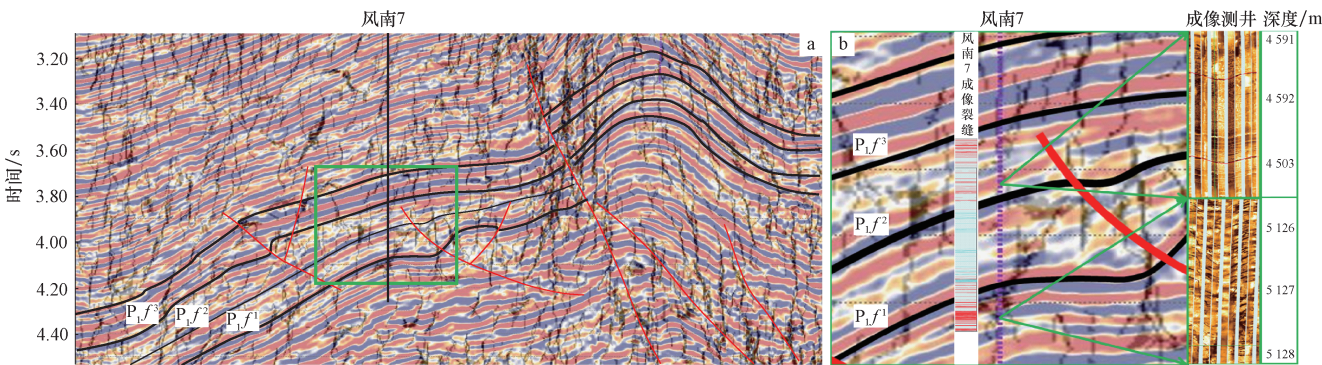


图14 准噶尔盆地乌夏地区蚂蚁追踪裂缝预测剖面

Fig. 14 Ant track section for fracture prediction in Wuxia area,the Junggar Basin

3.4 有利区综合评价

综合考虑风三段岩性、孔隙度、裂缝带、脆性特征及各因素间的配置关系,进行“甜点”有利区评价,将“甜点”发育有利区分为Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类 3 种类型。Ⅰ类有利区,即孔隙裂缝型或裂缝型“甜点”,以云质岩为主,岩石脆性大,多位于断缝带或断缝带附近,但分布范围有限,且探明率高;Ⅱ类有利区,即孔隙型“甜点”,以云质岩为主,岩石脆性大,裂缝次级发育,已钻

井多有油气显示,为下一步重点勘探评价领域;Ⅲ类“甜点”有利区,云质岩发育厚度较薄脆性较差或裂缝欠发育,油气显示不明显,该类有利区可以作为进一步勘探的潜力区(图 16)。

4 结论

1) 乌夏地区风城组发育典型源-储共生型致密油藏,致密油“甜点”的发育受控于地层岩性、物性以及裂

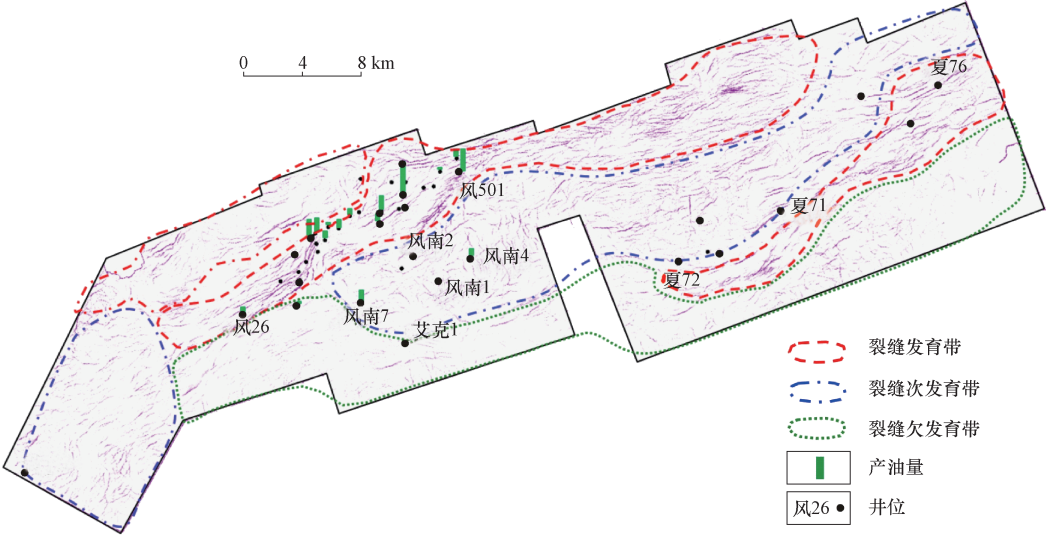


图 15 准噶尔盆地乌夏地区风城组 $P_{L^{3(3)}}$ 蚂蚁追踪技术识别裂缝发育特征

Fig. 15 Fracture characteristics identified by ants tracking technology in Wuxia area, the Junggar Basin

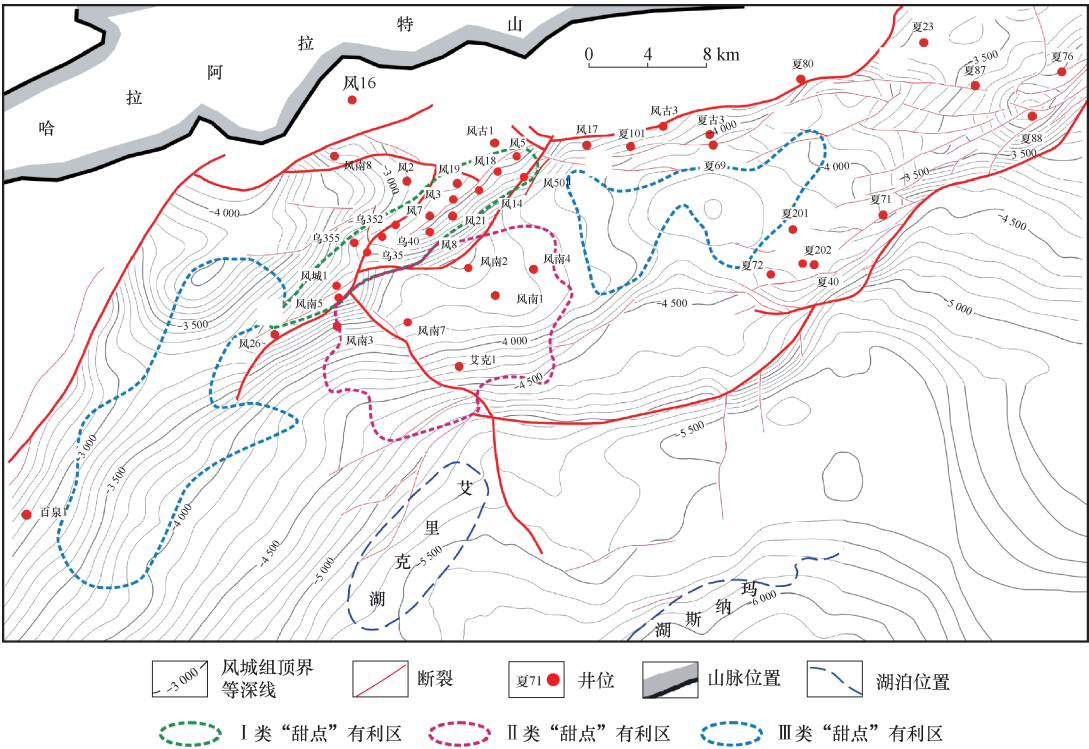


图 16 准噶尔盆地乌夏地区风城组 $P_{L^{3(3)}}$ 有利区分布

Fig. 16 Distribution of play fairways of $P_{L^{3(3)}}$ in Wuxia area, the Junggar Basin

缝发育程度;根据基质孔隙度与裂缝的配置关系,将致密油“甜点”类型分为孔隙型、裂缝型及孔隙-裂缝型。

2) 通过地震敏感性分析,影响地震属性变化的因素包括“甜点”的岩性、物性、厚度、围岩特征和含油气性等,其中岩性对振幅属性影响最大;风三段顶部“甜点”厚度较大,物性好,响应为强波峰特征;风二段“甜点”厚度较小,物性相对差,响应为弱波谷特征。

3) 总结了适用于该地区的风城组风三段致密油“甜点”预测方法。采用敏感振幅属性分析、多属性神经网络波形聚类方法,预测云质岩分布有利区;利用波阻抗反演以及地质统计随机模拟反演技术对储层物性参数进行反演,预测孔隙度分布有利区;以蚂蚁追踪技术和矿物成分脆性指数评价法预测裂缝发育有利区。

4) 综合考虑岩性、孔隙度、裂缝带、脆性特征及各因素间的配置关系,将“甜点”发育有利区分为Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类3种类型,指导进一步勘探。

参 考 文 献

- [1] Popov M A, Nuccio V F, Dyman T S, et al. Basin-centered gas system of the U. S. [R]. USGS, 2000.
- [2] 张金川, 金之钧, 庞雄奇, 等. 深盆气成藏条件及其内部特征[J]. 石油实验地质, 2000, 22(3): 210-214.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Pang Xiongqi, et al. Formation condition and internal features of deep basin gas accumulations[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2000, 22(3): 210-214.
- [3] 杨瑞召, 赵争光, 庞海玲, 等. 页岩气富集带地质控制因素及地震预测方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 339-347.
Yang Ruizhao, Zhao Zhengguang, Pang Hailing, et al. Shale gas sweet spots: Geological controlling factors and seismic prediction methods [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 339-347.
- [4] 斯春松, 陈能贵, 余朝丰, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层沉积特征[J]. 石油实验地质, 2013, 35(5): 528-533.
Si Chunsong, Chen Nengui, Yu Chaofeng, et al. Sedimentary characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 528-533.
- [5] 刘贻军. 鄂尔多斯盆地东缘二叠系煤层气开发“甜点”地区基本地质特征分析[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 219-223.
Liu Yijun. Geological characteristics of the ‘sweet spot’ of Permian coal bed methane exploitation in the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 219-223.
- [6] 许杰, 董宁, 朱成宏, 等. 致密砂岩地震预测在水平井轨迹设计中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 909-913.
Xu Jie, Dong Ning, Zhu Chenghong, et al. Application of seismic data to the design of horizontal well trajectory in tight sandstone gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 909-913.
- [7] Gading, Marita, Lars Wensaas, Paul Collins. Methods for seismic sweet spot identification, characterization and prediction in shale plays[J]. Unconventional Resources Technology Conference. 2013.
- [8] 杨升宇, 张金川, 黄卫东, 等. 吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 272-282.
Yang Shengyu, Zhang Jinchuan, Huang Weidong, et al. ‘Sweet spot’ types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan-Hami Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 272-282.
- [9] 刘丽芳, 张金川, 卞昌蓉. 根缘气“甜点”资源结构预测方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 49-51.
Liu Lifang, Zhang Jinchuan, Bian Changrong. Resource construction assessment methods for sweet spots in source-contaction gas[J]. National Gas Industry, 2006, 26(2): 49-51.
- [10] 郭睿. 储集层物性下限值确定方法及其补充[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 140-143.
Guo Rui. Supplement to determining method of cut-off value of net pay [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 140-143.
- [11] 杨通佑, 范尚炯, 陈元千, 等. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
Yang Tongyou, Fan Shangjiong, Yang Yanzhan, et al. Method of petroleum reserves estimation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [12] 殷建国, 丁超, 辜清, 等. 准噶尔盆地西北缘乌风地区风城组白云质岩类储层特征及控制因素分析[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(5): 83-88.
Yin Jianguo, Ding Chao, Gu Qing, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of dolomitic rocks of Fengcheng Formation in Wufeng area, northwestern margin of Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(5): 83-88.
- [13] 朱世发, 朱筱敏, 吴冬, 等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, (1): 77-85.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, et al. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, (1): 77-85.
- [14] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 657-667.
Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657-667.
- [15] 张善文. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山地区风城组烃源岩的发现及石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 145-152.
Zhang Sanwen. Identification and its petroleum geologic significance of the Fengcheng Formation source rocks in Halaalt area, the northern margin of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 34(2): 145-152.
- [16] 冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 685-692.
Feng Youliang, Zhang Yijie, Wang Ruiju, et al. Dolomites genesis and hydrocarbon enrichment of the Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 38(6): 685-692.
- [17] 薛晶晶, 孙靖, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地二叠系风城组白云岩储层

- 特征及成因机理分析[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 755–761.
- Xue Jingjing, Sun Jing, Zhu Xiaomin, et al. Characteristics and formation mechanism for dolomite reservoir of Permian Fengcheng Formation in Junggar Basin[J]. *Geoscience*, 2012, 26(4): 755–761.
- [18] 雷德文, 文晓涛, 丁靖, 等. 地震方法识别乌夏断裂带风城组白云质灰岩裂缝[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(5): 525–527.
- Lei Dewen, Wen Xiaotao, Ding Jing, et al. Seismic detection method for identification of fractures in Fengcheng dolomitic limestone in Wuerhe-Xiazijie fault belt, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(5): 525–527.
- [19] 赵玉红, 任云鹏, 侯磊, 等. 地震属性对云质岩储层识别的探讨[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(6): 891–895.
- Zhao Yuhong, Ren Yunpeng, Hou Lei, et al. Discussion on seismic attributes of dolomitic rock reservoir identification[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(6): 891–895.
- [20] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 1996, 26(1): 29–41.
- (编辑 张玉银)
-
- (上接第218页)
- [22] Hunt J M. *Petroleum Geochemistry and Geology* [M]. New York: W H Freeman Company, 1979: 1–617.
- [23] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99: 65–82.
- [24] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1–3.
- Li Jinlong, Chen Dongjing. Summary of quanti-fied research method on paleosalinity[J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2003, 10(5): 1–3.
- [25] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20–25.
- Zheng Roucai, Liu Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 20–25.
- [26] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114–120.
- Wen Huaguo, Zheng Roucai, Tang Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 114–120.
- [27] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307–314.
- Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment—taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3): 307–314.
- [28] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geological time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. *Epi-sodes*, 2004, 27(2): 83–100.
- [29] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2005, 25(1): 67–73.
- Song Mingshui. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying Depression[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(1): 67–73.
- [30] 赵增义, 赵建华, 王海静, 等. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用[J]. 天然气勘探与开发, 2007, 30(6): 30–32.
- Zhao Zengyi, Zhao Jianhua, Wang Haijing, et al. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2007, 30(6): 30–32.
- [31] 韩永林, 王海红, 陈志华, 等. 耿湾—史家湾地区长6段微量元素地球化学特征及古盐度分析[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 20–26.
- Han Yonglin, Wang Haihong, Chen Zhihua, et al. Paleosalinity analysis and trace element geochemistry of Chang 6 member in Gengwan-Shijiawan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(4): 20–26.
- [32] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2000.
- Zhu Xiaomin. *Sequence stratigraphy* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- [33] 高先志, 李浩, 刘启东. 高邮凹陷断层控油气作用的多样性[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 20–28.
- Gao Xianzhi, Li Hao, Liu Qidong. Various effects of faults on generation, migration and accumulation of oil/gas in Gaoyou Sag[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(1): 20–28.
- (编辑 李 军)