

准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组岩石物理相特征

于景维¹,付欢²,张宗斌³,吴爱成³,柳妮⁴,文华国⁵

[1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区,新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石油 新疆油田分公司 实验检测研究院,新疆 克拉玛依 834000; 3. 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; 4. 克拉玛依职业技术学院,新疆 克拉玛依 834000; 5. 成都理工大学 沉积地质研究院,四川 成都 610059]

摘要:利用岩心、薄片、钻井、测井等资料,对准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组储集层沉积相、成岩相和压力相进行研究和识别,将储集层进行岩石物理相的划分,对储集层进行综合评价,进而预测有利储集层发育带。通过沉积相、成岩相和压力相的叠加和复合,总结出沉积相+成岩相+压力相的组合,共划分出15类岩石物理相。利用自然伽马、声波时差、密度、补偿中子及深感应电阻率测井曲线,结合Fisher典型判别建立各岩石物理相的定量判别函数,并对识别结果进行检验。以薄片鉴定为基础,以段为单位进行岩石物理相平面分布研究。结合试油资料,对头屯河组储集层进行综合评价分级,归结为四类储层,最终实现有利储集层预测。

关键词:岩石物理相;储层预测;头屯河组;阜东斜坡区;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Petrophysical facies of Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin

Yu Jingwei¹, Fu Huan², Zhang Zongbin³, Wu Aicheng³, Liu Ni⁴, Wen Huaguo⁵

[1. China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang 834000, China; 2. Experimental Geological Center, CNPC Xinjiang Oilfield, Kalamay, Xinjiang 834000, China; 3. Exploration and Development Research Institution, CNPC Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Karamay Vocational & Technical College, Karamay, Xinjiang 834000, China; 5. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China]

Abstract: Core, thin section, logging and drilling data were integrated to study and identify sedimentary facies, diagenetic facies and pressure facies of the reservoir rocks in the Toutunhe Formation of Fudong slope area, Junggar Basin. On this basis, we divided petrophysical facies, performed comprehensive evaluation of the reservoirs, and predicted favorable reservoir development areas. A total of 15 petrophysical facies were identified according to the sedimentary facies, diagenetic facies and pressure facies. Quantitative discriminant functions were built for each of the 15 types of petrophysical facies by using GR, acoustic, density, compensated neutron and deep resistivity logs, and in combination with Fisher typical discriminant, and the correctness of the identification result was tested. The petrophysical facies of the three members in this Formation were mapped based on thin section observation. The reservoirs in the Toutunhe Formation were comprehensively evaluated and classified into four types in combination with production test results, realizing prediction of favorable reservoirs of the Toutunhe Formation.

Key words: petrophysical face, reservoir prediction, Toutunhe Formation, Fudong slope area, Junggar Basin

准噶尔盆地阜东斜坡区位于盆内中央拗陷东部,东接北三台凸起,北临沙奇凸起,西靠阜康凹陷,南接阜康断裂带,勘探面积仅为600 km²(图1)。侏罗系为该区重要的油气勘探层系,自上而下主要发育齐古组

(J_{3q})、头屯河组(J_{2t})、西山窑组(J_{2x})、三工河组(J_{1s})和八道湾组(J_{1b})。侏罗纪准噶尔盆地处于振荡型陆内拗陷盆地演化阶段,对阜东斜坡区影响最大的构造运动是燕山运动。其中燕山运动I幕波及了准噶尔盆

收稿日期:2017-08-07;修订日期:2017-12-10。

第一作者简介:于景维(1985—),男,博士、讲师,层序地层学与储层沉积学。E-mail:yyjjww_1985@163.com。

基金项目:中国石油大学(北京)克拉玛依校区人才引进项目(RCYJ2016B-01-010);新疆自治区高校科研计划青年教师科研启动基金项目(20160621220132602)。

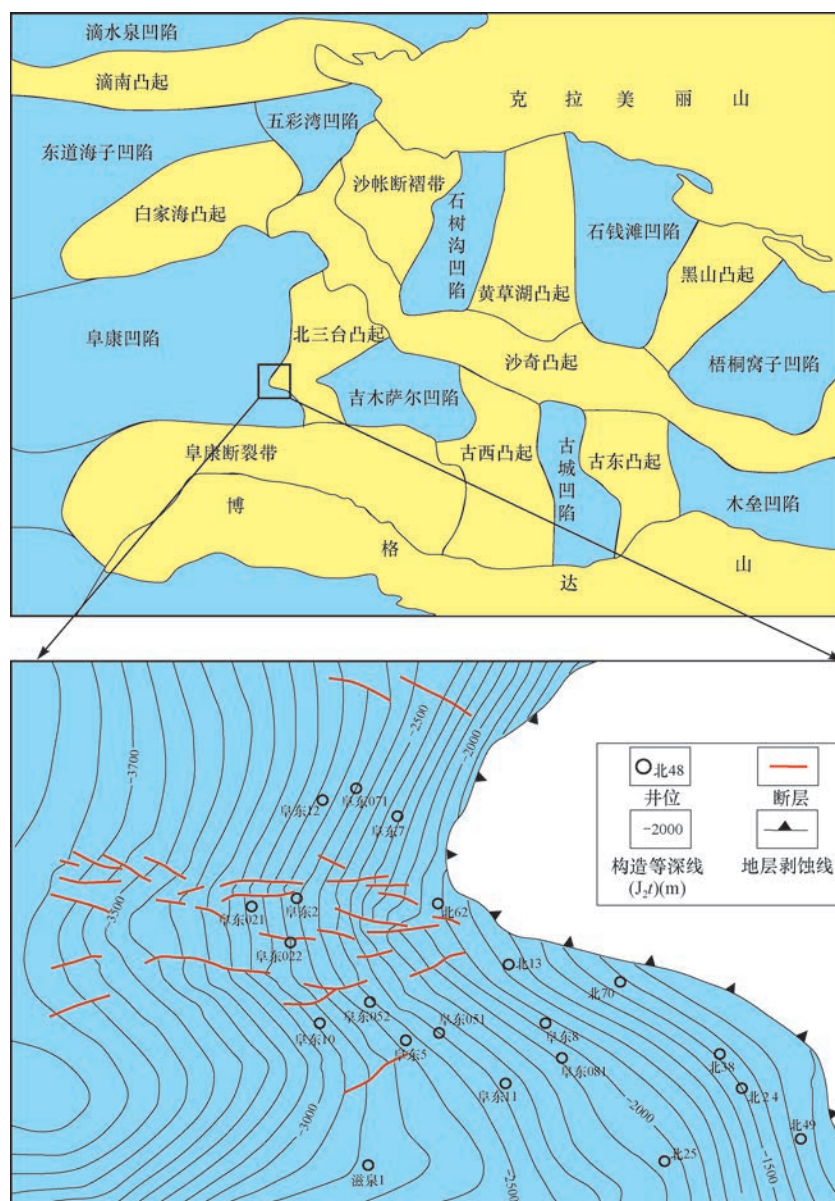


图1 准噶尔盆地阜东斜坡区构造位置

Fig. 1 Tectonic location of Fudong slope area

地广大地区,研究区出现较大规模的隆升,造成西山窑组的全部或部分剥蚀,形成切蚀地形。至头屯河期,各构造单元的持续隆升导致了湖盆的急剧萎缩与消亡,研究区为辫状河三角洲和湖泊所占据,地层呈北薄南厚状^[1-2]。

2011年阜东5井头屯河组油藏的发现,揭开了阜东斜坡区侏罗系油气勘探序幕^[1-2]。受构造、沉积和成岩等多方面因素的影响,储集层的非均质性很强,且储集层孔隙结构复杂,储集性能出现较大差异。前人已对头屯河组层序地层、沉积和成岩等影响储层发育的单因素特征进行一定的分析^[1-7],但随着勘探精细化的要求,单因素研究似乎不能满足现阶段的勘探工作。目前发现的油气藏和岩石物理性质及渗流特征存

在一定的关系,如何基于岩石物理相,准确预测储集层有利区是急需解决的问题。

岩石物理相是指储集层单元在沉积、成岩以及构造作用的改造之下具有一定的岩石物理性质,微观方面主要表现为储集层的孔隙结构特征^[8-9]。前人对于某些地区岩石物理相的分类主要以成岩相划分为主,沉积相和构造相为辅,这就导致后续岩石物理相分析基本为成岩相的研究,不利于正确预测有利储集层分布。本次岩石物理相的研究充分考虑到储集层形成的3个主要控制因素,因此有利储集层的预测相对单因素预测会更加准确。

在前人对研究区头屯河组研究的基础上,利用40余口钻井测井资料,15口井的岩心观察和描述资料,

200 余张薄片,20 余口钻井实测 DST 数据以及覆盖研究区的三维地震资料,结合研究区的构造沉积背景,对影响头屯河组有利储集层分布的沉积相、成岩相和压力相进行研究。并据此对头屯河组储集层岩石物理相进行分类,最终预测有利储集层分布区,为头屯河组油气扩边勘探提供指导。

1 头屯河组岩石物理相控制因素

由于储集层的形成主要受到沉积、成岩以及构造作用影响,岩石物理相充分考虑到储集层形成的这 3 个主要控制因素,其中沉积相和成岩相的研究较为明显,前人往往用裂缝发育特征来表示构造作用^[9]。结合本区沉积构造背景,认为发生于侏罗纪—白垩纪的燕山运动对于研究区头屯河组超压形成起决定性作用。燕山运动造成对地层的水平挤压相当于侧向压实作用,随时间而逐渐增加^[10-11]。由于头屯河组裂缝特征不明显,因此用异常高压特征来代表构造作用对于储集层的影响。因此岩石物理相的分类采取“沉积相 + 成岩相 + 压力相”^[10-11]。对 3 个相进行详细分析,进而对岩石物理相进行精确分类。

1.1 沉积相特征

研究区头屯河组发育一套辫状河三角洲相沉积,根据岩性组合自下而上总共分为 3 个段,头屯河组一段发育辫状河三角洲前缘沉积,头屯河组二段和三段的辫状河三角洲平原沉积面积逐渐扩大。由于区内受构造运动影响不大,加之有平缓的斜坡和较浅的水深,致使(水下)分流河道砂体大面积纵横交错,整体为大面积岩性油气藏的发育提供有力条件。在沉积构造背景的基础上,主要根据岩心资料(图 2,图 3),结合测井资料综合判定头屯河时期沉积环境主要为辫状河三角洲沉积,水下分流河道十分发育,分流河道次之,整体延伸范围较大。由于湖水的冲刷作用较强,河口砂坝规模不大,分流间湾微相发育于河道之间。

水下分流河道砂体岩性主要为灰、灰绿以及灰白色细粒、中细粒砂岩。岩屑含量较高,磨圆和分选较好,杂基含量受湖水的频繁冲刷影响,总体偏低。储集层的储集空间类型主要包括原生粒间孔和剩余粒间孔,储集性能较好,厚度较大,在测井曲线上呈大套钟形和箱形(图 2)。

沉积微相	岩性	沉积构造	测井相标志
主河道	灰色含砾中-粗砂岩,中砂岩	冲刷构造,大型交错层理发育	GR/API 岩性剖面 0 150 h
水下分流河道	灰色细-中砂岩	平行层理	GR/API 岩性剖面 0 150 i
河口坝	灰绿色粉-细砂岩	低角度交错层理	GR/API 岩性剖面 0 150 j
分流间湾	深灰色、灰褐色粉砂质泥岩,泥岩	水平层理,生物扰动	GR/API 岩性剖面 0 150 k

图2 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组沉积特征

Fig.2 Sedimentary characteristics of the Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin

a. 阜东 2 井,头二段,埋深 3 178.2 m,中粒岩屑砂岩;b. 阜东 10 井,头二段,埋深 3 071.3 m,细粒长石岩屑砂岩;c. 阜东 081 井,头二段,埋深 2 656.76 m,粉-极细粒长石岩屑砂岩;d. 台 15 井,头二段,埋深 2 879.35 m,冲刷构造;e. 台 30 井,头二段,埋深 2 409.40 m,平行层理;f. 阜东 2 井,头二段,埋深 3 150.4 m,沙纹层理;g. 北 70 井,头一段,埋深 1 923.66 m,水平层理;h. 阜东 10 井,头一段主河道测井相;i. 阜东 8 井,头二段水下分流河道测井相;j. 阜东 052 井,头一段河口坝测井相;k. 阜东 12 井,头一段分流间湾测井相

分流河道砂体岩性相对较粗,以红色粗中粒砂岩为主,岩屑含量较高,分选性相对较差,填隙物含量较高。储集空间以原生粒间孔为主,储集性能一般,储层非均质性很强,测井曲线常呈钟形。

河口坝砂体岩性较细,以灰绿色粉砂岩为主,岩屑含量最高,分选性较差。储集空间以次生溶孔为主,储集性能很差,测井曲线常呈漏斗形。

分流间湾所形成的的水动力环境较弱,岩性主要为泥岩以及粉砂质泥岩,不能成为有效储层。常以不同厚度的隔夹层形式存在于水下分流河道砂体间,测井曲线呈齿状(图 2)。

岩相是沉积相的重要组成部分,以上 4 种主要的沉积微相中的岩相存在较大差异,决定储集层原始物性明显不同。以岩心以及薄片分析为基础,结合测井资料主要识别出 5 种岩相类型,分别是粗砂岩相、中砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相以及泥岩相。

各岩相类型成分的差异可反映出原始储集层储集性能(表 1),在一定程度上为后期成岩作用改造提供物质基础。粗砂岩相、中砂岩相和细砂岩相中石英含量较高,有利于抵抗后期压实作用,保存原生孔隙,同时大量的长石和岩屑含量有利于后期溶蚀作用;粉砂岩相中石英含量很低,一方面受后期压实作用影响较大,不利于原生孔的保存,另一方面岩屑中凝灰质物质等可溶物质较少,不利于后期的溶解增孔。

包含粗砂岩相和中砂岩相的分流河道砂体孔隙度分布于 10% ~ 34%,渗透率分布于 $1 \times 10^{-3} \sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;包含中砂岩相和细砂岩相水下分流河道砂体孔隙度分布于 5% ~ 27%,渗透率分布于 $0.5 \times 10^{-3} \sim 137.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;包含粉细砂岩相的河口砂坝砂体孔隙度分布于 5% ~ 15%,渗透率分布于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;包含泥岩相的分流间湾基本不具有储集性。

1.2 成岩相特征

与沉积相包含内容类似,成岩相主要包括成岩环境以及在该环境中形成的产物。头屯河组储集层所经历的成岩环境比较复杂,成岩演化过程中储集层受到包括压实、胶结、交代以及溶解等成岩作用的影响。

头屯河组储集层中压实现象普遍存在,主要分为弱压实和强压实现象。弱压实现象主要表现为颗粒之间的点接触,脆性颗粒保存完好(图 4a);强压实主要表现在云母等塑性颗粒受挤压变形,充填于颗粒之间。部分颗粒间表现凹凸接触,已无显孔(图 4b)。

胶结作用主要是将松散的沉积物固结起来,在头屯河组储集层中主要表现为高岭石与碳酸盐的充填以及粘土矿物的包壳等胶结现象,硅质胶结物比较少见(图 4c,d)。

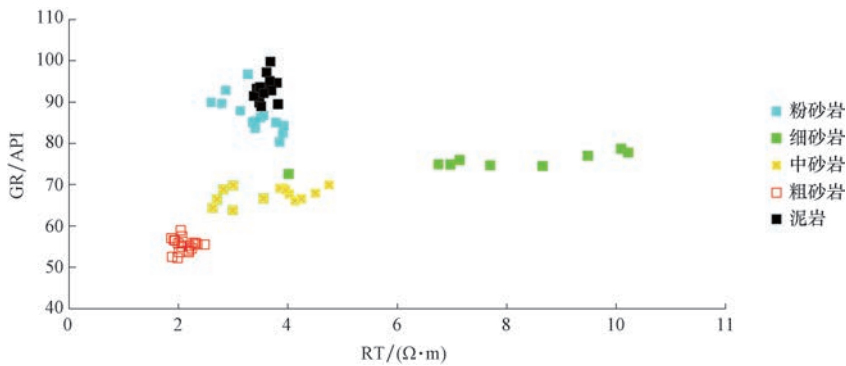


图 3 准噶尔盆地阜东 7 井头屯河组岩 - 电关系

Fig. 3 Litho-electric relationship of the Toutunhe Formation in Well FD7, Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组各岩相类型主要岩石成分含量

Table 1 Main rock compositions of each lithofacies type of the Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin

岩相类型	石英 平均含量/%	长石 平均含量/%	岩屑平均含量/%			合计
			岩浆岩	变质岩	沉积岩	
粗砂岩相	23.00	26.00	38.00	10.00	3.00	51.00
中砂岩相	21.44	22.81	43.30	7.80	4.65	55.75
细砂岩相	19.83	23.35	40.66	12.32	3.84	56.82
粉砂岩相	13.67	22.50	35.00	18.33	10.50	63.83

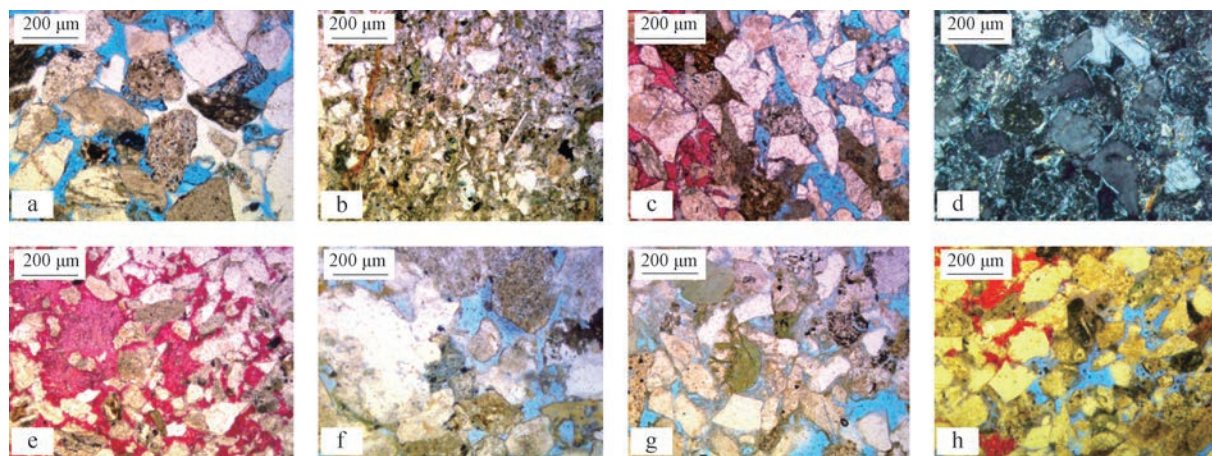


图4 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组储集层成岩作用特征

Fig. 4 Diagenetic features of the reservoir rocks in the Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin

a. 阜东12井,埋深3 361.95 m,弱压实,粒间孔发育,铸体薄片;b. 阜东2井,埋深3 152.07 m,强压实,无显孔,铸体薄片;c. 北27,埋深2 591.78 m,方解石胶结,铸体薄片;d. 阜东052井,埋深3 047.47 m,粘土包壳,铸体薄片;e. 台16井,埋深2 415.94 m,方解石交代,铸体薄片;f. 台17井,埋深2 028.55 m,粒间泥杂基向高岭石转化,铸体薄片;g. 北70井,埋深2 010.70 m,压实强,长石溶孔发育,铸体薄片;h. 阜东10井,埋深3 071.30 m,压实弱,长石溶孔明显,铸体薄片

交代作用主要是等容积的交换,使岩石的化学组成和矿物组成发生变化,在头屯河组储集层中普遍表现为方解石的交代作用,少数为高岭石的交代。被交代的碎屑颗粒边缘形态各异(图4e,f)。

溶解作用往往表现为地下深处流体通过物质与能量的交换对颗粒进行溶蚀,在头屯河组储集层中溶解现象普遍存在,包括对长石、火山岩岩屑和碳酸盐等物质的溶解,在颗粒之间以及内部都可观察到(图4g,h)。

成岩相是在成岩与构造等作用下,沉积物经历一定成岩作用和演化阶段的产物,包括岩石颗粒、胶结物、组构和孔洞缝等综合特征^[9]。本区头屯河组成岩相划分主要在成岩相定义的基础上,结合本区头屯河组4种成岩作用,且以压实作用为主,胶结交代以及溶蚀作用为辅的特征^[12]。将成岩相主要分为6类:弱压实绿泥石包膜弱溶蚀相,弱压实方解石交代相,弱压实力弱溶解相,强压实力强溶蚀相,强压实铁方解石胶结相和强压实高岭石充填相,各自具体特征见表2。

岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,它是成岩后的表现。成岩相是成岩作用的产物,反映岩相的成岩特征和演化,如果寻找有利储集层,应将二者进行结合,否则仅仅讨论结果或者过程意义不大。

1.3 压力相特征

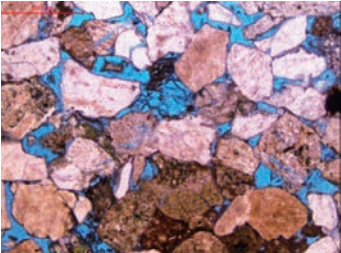
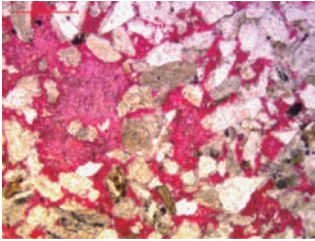
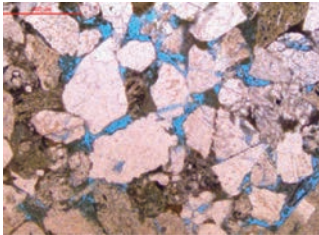
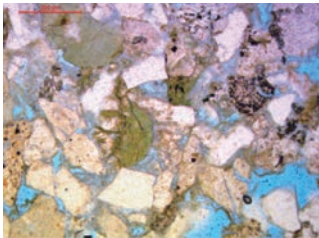
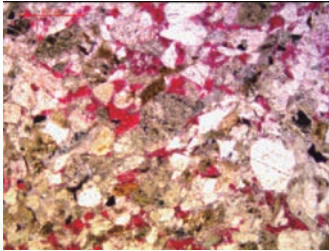
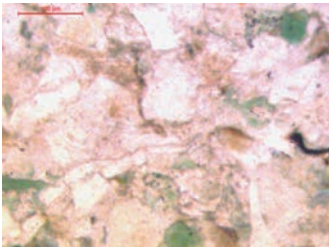
本次研究所定义的压力相主要是构造作用的产物,它同岩相以及成岩相有着不可分割的联系。比如研究区头屯河组异常压力的形成和泥岩含量有一定联系,泥岩本身不仅是塑性岩体,易被压缩,同时大规模

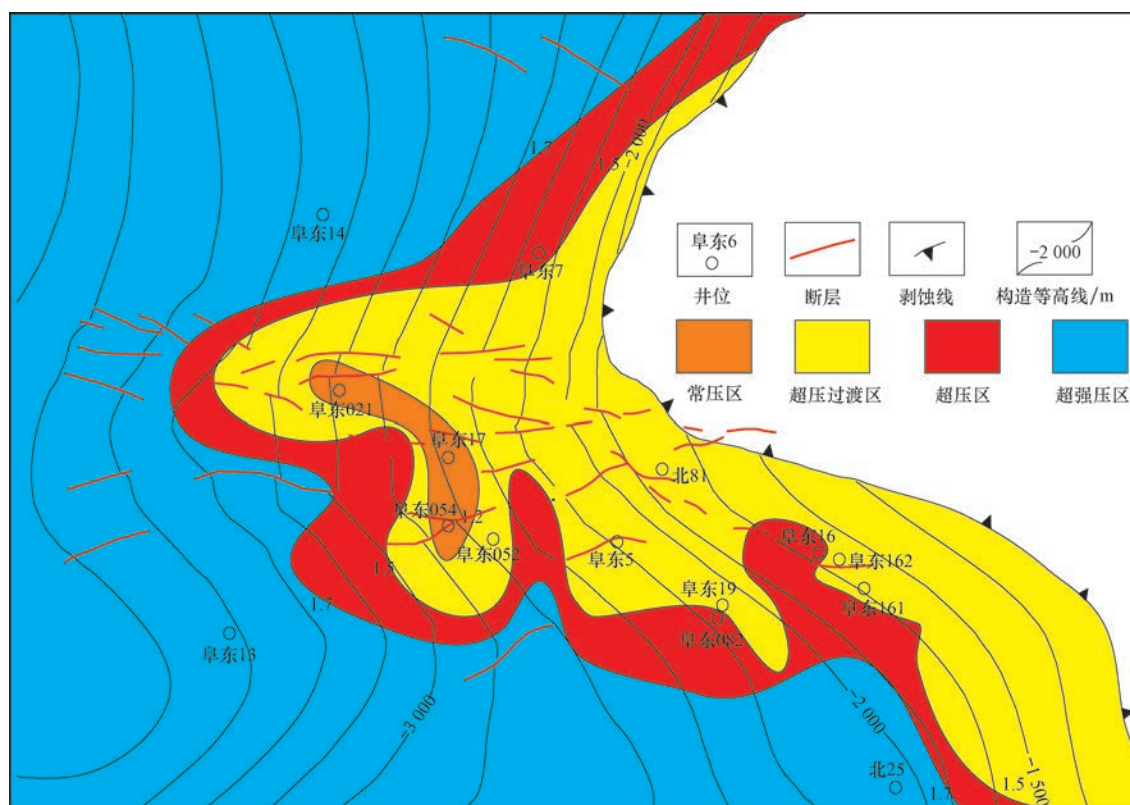
纯泥岩可增加构造断裂封闭性能,防止压力过多释放。对研究区20余口重点井头屯河组纯泥岩含量进行统计,发现泥岩含量大于40%的井,其目的层压力系数92%都大于1.2(超压);而泥岩含量小于40%的井,其目的层压力系数90%在1.2以下^[6]。异常压力同成岩作用也会存在着一定的关系,尤其是和压实作用有一定的关系,它会抵消部分上覆地层的压实作用,但是压实作用的强弱并不能直接反映异常压力的大小。影响异常压力的因素有除了沉降埋藏外,还包括构造挤压作用、快速沉积引起的欠压实作用、烃类的生成、流体热增压、矿物转化脱水作用和他源超压传导作用等^[13-19]。另一方面由于流体的流动性受到限制,胶结作用等成岩作用的程度以及分布规律会受到影响,因此有利储集层的形成,是三者相互作用的结果。

研究区头屯河组普遍存在异常压力,它主要是侏罗纪—白垩纪的燕山运动造成的水平挤压所形成的断裂构造、褶皱构造以及剥蚀等多种综合因素共同作用的结果^[6,13]。依据大量钻测井资料,将压力系数作为划分标准,压力相可分为超强压力相(压力系数大于1.7)、高压过渡相(压力系数在1.2~1.5)、高压相(压力系数在1.5~1.7)和常压力相(压力系数小于1.2)^[6]。超强压力和常压力相分布较少,主要为高压过渡相和高压相(图5)^[6]。异常高压可以明显改善储集层孔渗性,首先异常高压可抵制上覆地层的压实、压溶作用和石英的增生,保存大量原生孔隙;其次,可使流体活动性变弱,限制了胶结作用范围,一定程度上减少了储集层物性降低的幅度;同时,异常高压可产生

表 2 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组各成岩相储集层特征

Table 2 Reservoir characteristics of each diagenetic facies of the Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin

成岩相类型	岩石学特征	储层综合特征描述
弱压实 粘土包膜强溶蚀相		岩石分选好,磨圆以次圆-次棱角状为主,填隙物含量较少;弱压实,保存较多粒间孔,长石溶孔发育,粘土膜发育;面孔率达到 7.8%,储集层具有中孔、低渗特征
弱压实 方解石交代相		岩石分选较好,磨圆以次圆-次棱角状为主,杂基含量较少;颗粒粒级较粗,压实较弱,粘土薄膜发育,保存较多粒间孔,方解石交代现象明显;面孔率达到 6.5%,储集层具中孔、低渗特征
弱压实 弱溶蚀相		岩石分选较好,磨圆以次圆-次棱角状为主;岩屑以中酸性熔岩、凝灰岩为主,粘土薄膜发育,压实弱,显孔发育;面孔率达到 6.5%,储集层具中孔、低渗特征
强压实 强溶蚀相		岩石分选较好,磨圆以次圆-次棱角状为主,填隙物少;强压实,保存较多粒间孔,黄铁矿已氧化成褐铁矿,长石溶孔发育,絮凝粒多;面孔率达到 6%,储集层具中孔、低渗特征
强压实 铁方解石胶结相		岩石分选差,磨圆以次棱角状为主;铁方解石充填孔隙,交代其他组分,无显孔;面孔率为 0%,储集层具低孔、超低渗特征
强压实 高岭石充填相		岩石分选中等-差,磨圆以次棱角状为主;塑性粒和填隙物多,压实后已无显孔;高岭石为长石转化而成;面孔率为 0%,储集层具低孔、超低渗特征



压实高岭石充填相(XI类), 高压过渡-粉砂岩-强压实高岭石充填相(XII类), 高压过渡-中砂岩-强压实高岭石充填相(XIII类), 高压过渡-细砂岩-强压实强溶蚀相(XIV类)和泥岩-压实相(XV类)。需要说明的是, 从有利储层的角度考虑, 泥岩物性较差, 因此不考虑压力相, 将处于不同压力环境下的泥岩统一为一类岩石物理相。

在岩心归位的基础上, 保证岩心深度和测井深度一致, 选取5种对岩性、物性、流体及孔隙比较敏感的测井曲线(DEN, CNL, AC, GR以及RT), 在测井资料标准化的基础上, 利用不同岩石物理相所对应的不同测井值特征, 通过SPSS软件对研究区15种岩石物理相类型进行Fisher典型判别分析, 最终建立15种岩石物理相的线性多元判别函数[公式(1)~公式(15)]。

$$Y_1 = -26\,484.609 + 15\,193.764\text{DEN} + 301.871\text{CNL} + 80.641\text{GR} + 228.410\text{RT} + 18.567\text{AC} \quad (1)$$

$$Y_2 = -29\,070.125 + 15\,350.284\text{DEN} + 377.174\text{CNL} + 78.16\text{GR} + 287.299\text{RT} + 15.153\text{AC} \quad (2)$$

$$Y_3 = -23\,823.58 + 150\,73.877\text{DEN} + 136.6\text{CNL} + 63.976\text{GR} + 118.179\text{RT} + 28.913\text{AC} \quad (3)$$

$$Y_4 = -26\,528.139 + 15\,129.596\text{DEN} + 313.822\text{CNL} + 78.943\text{GR} + 247.668\text{RT} + 17.388\text{AC} \quad (4)$$

$$Y_5 = -26\,515.886 + 15\,217.21\text{DEN} + 312.748\text{CNL} + 78.058\text{GR} + 213.465\text{RT} + 18.283\text{AC} \quad (5)$$

$$Y_6 = -21\,391.544 + 14\,007.693\text{DEN} + 143.622\text{CNL} + 73.907\text{GR} + 133.089\text{RT} + 25.55\text{AC} \quad (6)$$

$$Y_7 = -21\,181.623 + 13\,667.739\text{DEN} + 147.445\text{CNL} + 80.805\text{GR} + 140.691\text{RT} + 24.73\text{AC} \quad (7)$$

$$Y_8 = -21\,580.322 + 13\,745.737\text{DEN} + 154.178\text{CNL} + 82.571\text{GR} + 157.465\text{RT} + 24.285\text{AC} \quad (8)$$

$$Y_9 = -28\,335.918 + 15\,773.064\text{DEN} + 303.335\text{CNL} + 77.635\text{GR} + 223.815\text{RT} + 23.77\text{AC} \quad (9)$$

$$Y_{10} = -31\,923.111 + 15\,989.919\text{DEN} + 346.365\text{CNL} + 89.13\text{GR} + 371.282\text{RT} + 17.809\text{AC} \quad (10)$$

$$Y_{11} = -23\,787.263 + 14\,882.218\text{DEN} + 160.894\text{CNL} + 75.624\text{GR} + 156.338\text{RT} + 25.242\text{AC} \quad (11)$$

$$Y_{12} = -24\,264.974 + 14\,669.969\text{DEN} + 275.884\text{CNL} + 76.839\text{GR} + 205.191\text{RT} + 18.84\text{AC} \quad (12)$$

$$Y_{13} = -25\,998.782 + 15\,330.617\text{DEN} + 274.409\text{CNL} + 76.787\text{GR} + 220.854\text{RT} + 19.727\text{AC} \quad (13)$$

$$Y_{14} = -24\,653.656 + 14\,745.804\text{DEN} + 293.784\text{CNL} + 74.712\text{GR} + 212.789\text{RT} + 17.983\text{AC} \quad (14)$$

$$Y_{15} = -17\,041.323 + 11\,808.278\text{DEN} + 119.073\text{CNL} +$$

$$74.066\text{GR} + 113.751\text{RT} + 23.646\text{AC} \quad (15)$$

上述式中的 Y_1 — Y_{15} 分别代表15类岩石物理相的Fisher判别函数值。可以利用未知样品的测试数据, 代入上式进行计算, 最大值则代表相应岩石物理相类型。为了确保所得结果的合理性, 利用5口已知钻井取心段的5种测井曲线数值, 代入岩石物理相的线性多元判别函数, 将所得结果同岩心所磨薄片的观察结果进行对比, 结果一致则认为是合理, 反之则不合理。通过Fisher定量判别结果, 发现15类岩石物理相的回判符合率达到93%。这是由于有的岩石物理相仅对2~3种测井曲线较为敏感, 并不是针对所有5种测井曲线都能表现出来, 因此理论上回判符合率达不到100%。

以阜东051井为例(图6), 选取头屯河组二段中的取心段测井曲线值, 带入上述公式发现所判别的结果为高压-细砂岩-强压实强溶蚀相。岩心显示为细-极细砂岩, 薄片显示填隙物少, 强压实, 粒间孔保存较少, 长石溶孔普遍发育, 与所判别结果较为一致。究其原因, 发现阜东051井头屯河组泥岩含量超过50%, 同时距离断裂较远, 压力得不到释放, 因此主要为高压环境; 岩石物理相所在的大套水下分流河道砂体主要是由多期河道砂体叠加而成, 在砂体的顶底, 往往表现为冲刷面, 由于冲刷作用使得储集层中填隙物含量较少, 孔隙度和渗透率较好, 孔隙内流体活动较为活跃, 长石以及岩屑的溶蚀作用较为发育。由于上覆地层的压实作用较大, 主要为强压实环境。

3 头屯河组岩石物理相平面分布

岩石物理相的平面分布对勘探具有重要的指导意义^[8-9], 但是岩石物理相种类较多, 同时纵向上的一大套砂体并不一定只有一种成岩相, 这一套砂体可能是由多套河道砂体叠加而成, 因此成岩相可能会产生较大差异。在进行岩石物理相归类的工作时, 对厚度较小、岩性一致的砂体, 测井曲线表现较为一致的前提下可算作一类岩石物理相; 对厚度较大、岩性复杂, 测井曲线变化较大, 则先将大套砂体划分成岩性一致且测井曲线变化一致的砂体, 再进行岩石物理相的判别。最终, 根据同一岩石物理相厚度所占所有岩石物理相的优势百分含量(以砂岩储层为主要优选储层, 达到15%以上的最高的岩石物理相可算作平面分布的代表)。还要说明的是, 有些无井区块的岩石物理相主要是依据地震属性所展现的与砂体连续性有关的信息进行的推测。

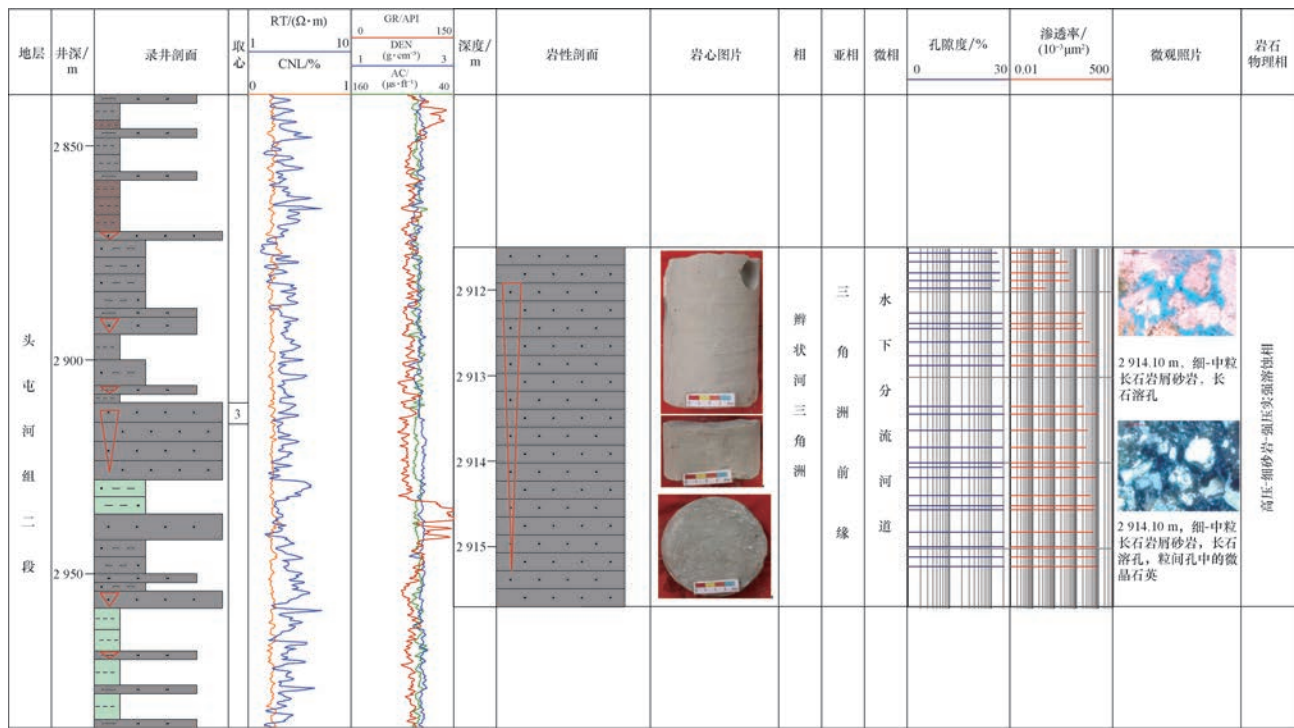


图6 准噶尔盆地阜东 051 井头屯河组二段测井识别结果检验

Fig. 6 Verification of logging identification results of Well FD051, Junggar Basin

以头屯河组为研究单位进行岩石物理相平面分布的研究不满足当前精细勘探的要求,因此本次研究以段为单位,进行岩石物理相平面分布研究,以应对头屯河组的扩边需求。岩石物理相的平面分布主要是建立在头屯河组三个段的岩相古地理和头屯河组压力系数平面分布图的基础上,同时利用上述判别函数对每口井每个段主要的岩石物理相进行分析,将三者进行叠合。

从图 7 中可发现,头屯河组一段主要发育辫状河三角洲前缘沉积,发育高压过渡-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相和泥岩-压实相,在河道边缘主要为高压过渡-粉砂岩-强压实高岭石充填相。头屯河组二段出现“大前缘,小平原”,高压-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相面积逐渐增大,高压过渡-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相面积逐渐缩小,辫状河三角洲平原河道主要发育高压过渡-中砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相;头屯河组三段的剥蚀线逐渐西迁,辫状河三角洲平原面积逐渐扩大,高压-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相。高压过渡-中砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相以及高压-细砂岩-强压实高岭石充填相为研究区主要发育的岩石物理相。

4 头屯河组有利储层预测

对头屯河组已知油气藏进行解剖,发现头屯河组

油藏主要岩相为细-中砂岩,处于高压-高压过渡的环境,以富含粘土矿物包壳为特征^[4-7]。由于影响储层特征的因素是复杂的、多方面的,只有对储层作出符合地质实际的分类与评价,才能提高钻探的成功率,减少勘探乃至开发的盲目性。前述岩石物理相研究已结合物性资料进行的分类,有利储层的评价除了涉及物性资料,还需要结合储集砂体厚度以及含油气性进行综合研究,最大限度使评价结果更加真实可靠。在试油资料的基础上,结合已知油藏特征以及上述岩石物理相分类,对研究区头屯河组储层进行了综合评价(表 3)。

头一段时期大面积分布高压过渡-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相为Ⅱ类储层勘探区域,可能会形成大面积岩性油气藏,小面积分布的高压-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相为Ⅰ类储层勘探区域,但由于连续性较差,可能会形成“小而肥”的油气藏;头二段时期大面积分布的高压-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相为Ⅰ类储层勘探区域,砂体厚度大且连续性较好,可能会形成大面积岩性油气藏,其次是高压过渡-中砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相为次要Ⅰ类储层有利勘探区域;头三段时期大面积分布的高压-细砂岩-弱压实粘土包膜强溶蚀相为Ⅰ类储层勘探区域,但是由于砂体厚度不大,因此可能会形成“大而瘦”的油气藏。

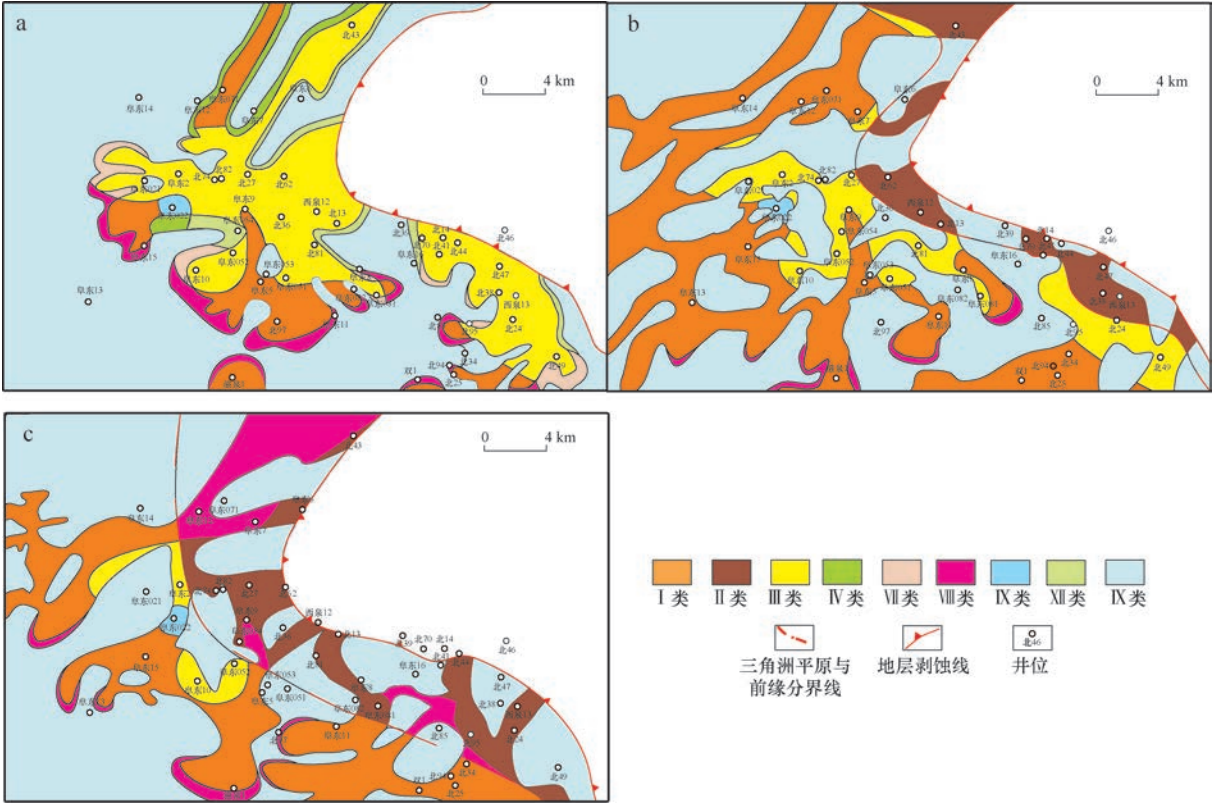


图 7 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组岩石物理相平面分布
Fig. 7 Petrophysical facies map of the Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin
a. 头一段; b. 头二段; c. 头三段

表 3 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组储层综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation results of reservoirs in the Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin

分类指标	I 类储层	II 类储层	III 类储层	IV 类储层
岩石物理相类型	高压 - 细砂岩 - 弱压实粘土包膜强溶蚀相, 高压 力过渡 - 中砂岩 - 弱压 实粘土包膜强溶蚀相	高压力过渡 - 细砂岩 - 弱压 实粘土包膜强溶蚀相, 高压 - 细砂 岩 - 强压实高岭石充填相, 高压 力过渡 - 细砂岩 - 强压实高岭 石充填相, 高压力过渡 - 粉砂岩 - 强压实高岭石充填相	高压力过渡 - 细砂岩 - 弱压 实方解石交代相, 高压力过渡 - 细 砂岩 - 强压实铁方解石胶结相, 常压 - 细砂岩 - 强压实高岭石 充填相	高压 - 粉砂岩 - 强 压实铁方解石胶结 相, 泥岩 - 压实相
砂体厚度	中等 - 厚	较厚	较薄	极薄 - 无
含油气性	好	较好	一般	差
代表井号	阜东 5 井	阜东 2 井	阜东 022 井	阜东 053 井

5 结论

1) 阜东斜坡区头屯河组识别出主要的 5 种沉积岩相类型, 分别是(水下)分流河道粗砂岩相、中砂岩相、细砂岩相、河口坝粉砂岩相以及分流间湾泥岩相; 识别 6 类成岩相, 分别是弱压实绿泥石包膜弱溶蚀相、弱压实方解石交代相、弱压实弱溶解相、强压实强溶蚀相、强压实铁方解石胶结相和强压实高岭石充填相; 识别四类压力相, 分别是超强压力相、高压力过渡相、高压力相和常压力相。

2) 岩石物理相充分考虑到储集层形成的 3 个主要控制因素, 其分类采取“沉积相 + 成岩相 + 压力相”, 共识别出高压 - 细砂岩 - 弱压实粘土包膜强溶蚀相、高压力过渡 - 中砂岩 - 弱压实粘土包膜强溶蚀相等 15 种岩石物理相。利用利用 5 种敏感测井曲线的组合特征, 在测井曲线处理的基础上, 采用 Fisher 典型判别别形成了各岩石物理相的定量判别函数。

3) 在上述成果基础上, 结合试油资料以及砂体厚度认为高压 - 细砂岩 - 弱压实粘土包膜强溶蚀相为最有利储层勘探区域, 其次为高压力过渡 - 中砂岩 - 弱压实粘土包膜强溶蚀相和高压力过渡 - 细砂岩 - 弱压

实粘土包膜强溶蚀相。

参 考 文 献

- [1] 于景维,郑荣才,刘自军,等. 准噶尔东部阜东及西泉地区头屯河组沉积特征及相模式[J]. 新疆地质,2014,32(2):225-230.
Yu Jingwei, Zheng Rongcai, Liu Zijun, et al. Sedimentary characteristic and model of Toutunhe Formation in East of Fukang slope and Xiquan area, Eastern Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(2):225-230
- [2] 于景维,郑荣才,祁利祺,等. 准噶尔盆地阜康凹陷东部斜坡带中侏罗统头屯河组高分辨层序与沉积微相精细分析[J]. 地质论评,2014,60(6):1337-1347.
Yu Jingwei, Zheng Rongcai, Qi Liqi, et al. Precise analysis on high-resolution sequence stratigraphy and micro-facies of Toutunhe Formation of Middle Jurassic in the East slope zone, Fukang Sag, Junggar basin[J]. Geologic Review, 2014, 60(6):1337-1347.
- [3] 于景维,郑荣才,殷新花,等. 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组储集层非均质性综合研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5):567-576.
Yu Jingwei, Zheng Rongcai, Yin Xinhua, et al. A comprehensive research on reservoir heterogeneity of Toutunhe Formation inslope area, east of Fu dong area, Eastern Junggar Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2014, 41(5):567-576.
- [4] 柳妮,文华国,于景维,等. 准噶尔阜康东部斜坡区中侏罗统头屯河组高分辨层序地层格架内储集层宏观非均质性研究[J]. 地质论评,2014,60(5):1158-1166.
Liu Ni, Wen Huaguo, Yu Jingwei, et al. Analysis of macroscopic heterogeneity within high resolution sequence stratigraphic framework in Toutunhe Formation of Middle Jurassic in east of Fukang slope zone, Junggar Basin[J]. Geological Review, 2014, 60(5):1158-1166.
- [5] 于景维,李璐璐,祁利祺,等. 阜东斜坡带头屯河组二段储集层控制因素[J]. 新疆石油地质,2014,35(1):34-38.
Yu Jingwei, Li Lulu, Qi Liqi, et al. Reservoir controlling factors of Toutunhe No.2 Member in Fudong slope zone in Eastern Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1):34-38.
- [6] 于景维,任伟,王武学,等. 阜东斜坡中侏罗统头屯河组异常高压形成机理[J]. 新疆石油地质,2015,36(5):521-525
Yu Jingwei, Ren Wei, Wang Wuxue, et al. Influencing factors study of abnormal pressure and favorable area prediction in Toutunhe Formation of Fudong slope area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5):521-525.
- [7] 于景维,郑荣才,柳妮,等. 准噶尔盆地东部阜东斜坡带头屯河组粘土矿物特征[J]. 石油与天然气地质,2015,36(6):945-954.
Yu Jingwei, Zheng Rongcai, Liu Ni, et al. Characterization of clay minerals in Toutunhe Formation of Fudong slope area in eastern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6):945-954.
- [8] 蒲秀刚,周立宏,王文革,等. 黄骅坳陷歧口凹陷斜坡区中深层碎屑岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):36-48.
Pu Xiugang, Zhou Lihong, Wang Wen'ge, et al. Medium-deep clastic reservoirs in the slope area of Qikou sag, Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):36-48.
- [9] 赖锦,王贵文,陈敏,等. 基于岩石物理相的储集层孔隙结构分类评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):566-573.
Lai Jin, Wang Guiwen, Chen Min, et al. Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: A case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5):566-573.
- [10] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京:石油工业出版社,2010:217-221.
Wu Shenghe. Reservoir characterization and modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:217-221.
- [11] 刘吉余. 流动单元研究进展[J]. 地球科学进展,2000,15(3):303-306.
Liu Jiyu. Advances in study on flow unit[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3):303-306.
- [12] 常秋生,万敏,孙自金,等. 阜东斜坡头二段储集层成岩作用及成岩相研究[J]. 新疆石油地质,2013,34(1):10-13.
Chang Qiusheng, Wan Min, Sun Zijin, et al. Study of diagenesis and diagenetic facies in Toutunhe-2 Member sandstone reservoir in Fudong slope area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(1):10-13.
- [13] 吴晓智,王立宏,宋志理. 准噶尔盆地南缘构造应力场与油气运聚的关系[J]. 新疆石油地质,2000,21(2):97-100.
Wu Xiaozhi, Wang Lihong, Song Zhili. The relations between structural stress field and hydrocarbon migration and accumulation in Southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(2):97-100.
- [14] 付广,薛永超,杨勉. 异常孔隙流体压力的成因及其贡献探讨[J]. 海相油气地质,1999,4(4):46-50.
Fu Guang, Xue Yongchao, Yang Mian. The cause of abnormal pore fluid pressure and its contribution to the discussion[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1999, 4(4):46-50.
- [15] Luo Xiaorong, Vasseur G. Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environment conditions[J]. American Association Petroleum Geology Bulletin, 1992, 76(2):1550-1559.
- [16] Bethke C M. Inverse hydrologic analysis of the distribution and origin of gulf coast-type geopressed zones[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(6):6535-6545.
- [17] 徐国盛,匡建超,李建林. 天山北侧前陆盆地异常高压成因研究[J]. 成都理工学院学报,2000,27(3):255-262.
Xu Guosheng, Kuang Jianchao, Li Jianchao. Research on the genesis of abnormal high pressure in the forland basin to the north Tianshan[J]. Journal of Chengdu Institute of Science and Technology, 2000, 27(3):255-262.
- [18] Baker C. Aquathermal pressuring-role of temperature in development of abnormal pressure zones[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(2):2068-2071.
- [19] Dickey, Cox. Oil and gas reservoirs with subnormal pressure[J]. AAPG Bulletin, 1977, 61(3):2134-2142.
- [20] 李会军,吴泰然,马宗晋,等. 苏里格气田优质储集层的控制因素[J]. 天然气工业,2004,24(8):12-13.
Li Huijun, Wu Tairan, Ma Zhongji, et al. Reserch on the basic characteristics and control factor of high-quality Reservoir in Sulige gas field[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(8):12-13.

(编辑 董立)