

文章编号:0253-9985(2012)03-0467-12

大牛地气田盒一段低孔渗砂岩储层特征

侯瑞云

(中国石化 华北分公司,河南 郑州 450006)

摘要:鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部大牛地气田下二叠统下石盒子组盒一段辫状河道砂岩储层以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,成分成熟度中等偏低,结构成熟度中等偏高,储层非均质性较强,砂岩孔隙度和渗透率主要分布区间分别在4%~14%和 $0.05 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔低渗至致密砂岩储层。研究区砂岩储层成岩阶段达到晚成岩阶段A₂亚期至晚成岩阶段B期,机械压实以及石英加大和方解石胶结是降低孔隙度的主要成岩作用,砂岩孔隙类型以粒间溶蚀孔隙为主,影响储层物性的主要因素有沉积作用和成岩作用。根据沉积微相、储层宏观和微观特征等多种参数,运用灰色关联分析法开展了储层综合评价,将盒一段砂岩储层划分为3类,其中I类为相对高孔高渗天然气储层,II类为相对中等孔渗储层,并预测了3类储层的分布区带,建立了盒一段砂岩储层评价标准体系。

关键词:低孔渗;储层特征;灰色关联分析法;储层评价;下石盒子组盒一段;大牛地气田

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Reservoir characteristics of low porosity and permeability sandstone of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field, Ordos Basin

Hou Ruiyun

(SINOPEC Huabei Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: Daniudi gas field is located in the northeastern part of Yishan slope in Ordos Basin. One of the major reservoirs is the braided channel sandstone in Member I of the Lower Permian Xiashihezi Formation. The sandstones consists mainly of lithic sandstones and lithic quartz sandstones with medium compositional and structural maturity. The sandstone reservoir is of strong heterogeneity. The porosity and permeability of the reservoirs are 4-14% and $(0.05-2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ respectively, which represent the typical characteristics of low porosity and permeability reservoirs or even tight reservoirs. The reservoir is at A₂-B substage of the late diagenetic stage. Mechanical compaction, quartz overgrowth and calcite cementation are the main diagenesis for decreasing porosity of sandstone. Intergranular dissolution pore is the major pore type. Sedimentary microfacies, lithology and diagenesis are the main factors influencing reservoir properties. Using grey relational analysis (GRA) method, this paper divides the reservoirs in Member I of Xiashihezi Formation into three types based on multiple parameters such as sedimentary microfacies, reservoir macro-and micro-characteristics. Type I reservoirs have relatively high porosity and permeability, while type II has relatively moderate porosity and permeability. The distributions of three different types of reservoirs are predicted and the evaluation criteria of the reservoirs in Member I of Xiashihezi Formation are also established.

Key words: low porosity and permeability, reservoir characteristics, grey relational analysis, formation evaluation, Member I of Xiashihezi Formation, Daniudi gas field

收稿日期:2012-04-08;修订日期:2012-05-13。

作者简介:侯瑞云(1964—),女,高级工程师,油气地质。

基金项目:国家自然科学基金项目(41072093);国家“十二五”科技重大专项(2011ZX05005)。

三段(P_1h^3)含气层系。大牛地气田储层砂体展布规模大,多层叠置,非均质性强,物性参数反映为低孔低渗至致密储层。截止2010年底,大牛地气田累计天然气探明地质储量约 $4\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据旋回性, P_1h^1 细分为3个小层即: $P_1h^{1(1)}$ 、 $P_1h^{1(2)}$ 和 $P_1h^{1(3)}$,盒一段气层动用程度相对较低,需要深入开展储层特征及综合评价研究,为盒一段气层的合理开发提供支撑。

2 储层特征

2.1 储层岩石学特征

根据44口探井的1 024块砂岩样品薄片鉴定资料,按照Folk^[9]的砂岩分类方案,盒一段储层的岩石类型主要为岩屑砂岩,约占砂岩样品55.4%;其次为岩屑石英砂岩,约占31.2%;少量的长石岩屑砂岩和石英砂岩,分别约为6.5%和5.0%(图2)。盒一段砂岩储层成分成熟度方面表现出中等偏低的特点,石英含量为55.0%~85.0%,平均值为70.1%;岩屑含量占碎屑总体含量的15.0%~45.0%,平均值为25.4%,岩屑主要为变

质岩、中酸性火山岩、泥质岩、多晶石英及燧石等。其中,泥质岩岩屑中的绢云母和少量微晶石英定向排列,多被挤压充填变形,以假杂基的形式充填于颗粒间。不含长石或长石含量少,约为0~10.0%,平均值为4.5%,多蚀变且较严重。从表1可看出盒一段3个小层($P_1h^{1(1)}$ 、 $P_1h^{1(2)}$ 和 $P_1h^{1(3)}$)的砂岩类型组成有一定的变化, $P_1h^{1(1)}$ 小层岩屑砂岩样品最多,约占样品总数的60.4%; $P_1h^{1(3)}$ 岩屑石英砂岩样品最多,约占样品总数的36.2%。

砂岩储层结构成熟度方面表现为中等偏高的特点,颗粒粒度主要为中-粗粒度,分布于0.3~0.8 mm,分选中等-好,磨圆主要为次棱角,其次为次圆状,孔隙式胶结,颗粒支撑,点-线接触。

2.2 储层物性特征

根据孔隙度、渗透率分类标准^[10],盒一段砂岩为低孔低渗至致密天然气砂岩储层,实测孔隙度分布在0.3%~19.3%,平均值为7.61%,主要分布区间为4%~14%,有工业产能的孔隙度下限约为4%,孔隙度大于4%的样品约占总样品的

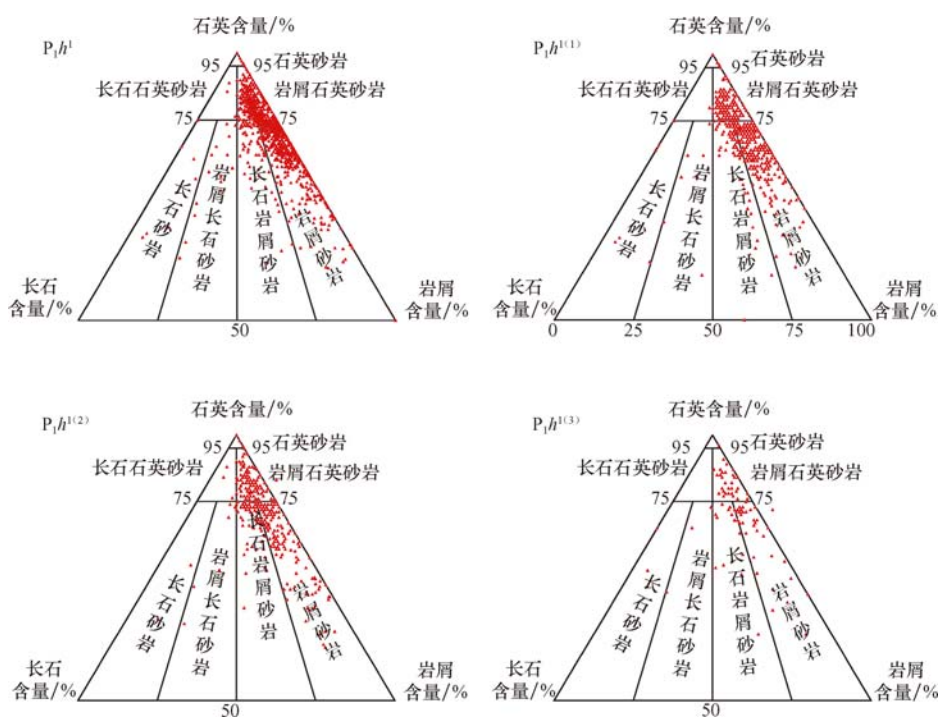


图2 大牛地气田盒一段及各小层储层砂岩分类

Fig. 2 Classification of sandstones in Member I of Xiashihezi Formation and each sublayer in Daniudi gas field

表 1 大牛地气田盒一段不同砂岩类型百分含量数据对比

Table 1 Comparison of percentage of different sandstone types in Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

砂岩类型	含量/%							样品数/个
	石英砂岩	岩屑石英砂岩	岩屑砂岩	长石岩屑砂岩	岩屑长石砂岩	长石石英砂岩	长石砂岩	
P ₁ h ¹⁽¹⁾	3.8	29.7	60.4	4.6	1.1	0	0.4	548
P ₁ h ¹⁽²⁾	7.3	31.9	49.2	9.2	1.3	0.5	0.5	382
P ₁ h ¹⁽³⁾	2.1	36.2	51.1	7.4	2.1	0	1.1	94
P ₁ h ¹	5.0	31.2	55.4	6.5	1.3	0.2	0.5	1 024

83.21%; 实测渗透率分布在 $0.003 \times 10^{-3} \sim 39.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主要分布区间为 $0.05 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 有工业产能的渗透率下限约为 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率大于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品约占总样品的 57.03%。孔隙度和渗透率呈正相关关系, 但孔隙度与渗透率关系较为离散, 反映了成岩作用对物性的显著影响(图 3)。

2.3 储层孔隙结构特征

2.3.1 储层孔隙类型

研究区孔隙类型按成因分为原生和次生两种类型, 次生孔隙为主要储集空间, 以粒间溶蚀孔(图 4a)为主, 粒内容蚀孔(图 4b)、铸模孔、自生矿物晶间孔(图 4c)和微裂缝(图 4d)次之; 原生孔隙以残余原生粒间孔隙(图 4e)为主。粒间溶蚀孔是在残余原生粒间孔的基础上, 由粒间胶结物、泥质杂基、假杂基和碎屑颗粒因成岩流体作用其易溶成分遭受溶解而成。溶蚀作用改善了储层微观孔喉结构, 为气体的流动和聚集提供了有效通道和空间。原生孔隙是沉积物经过机械压实作用和化学胶结作用之后所保留的那部分储集粒间孔

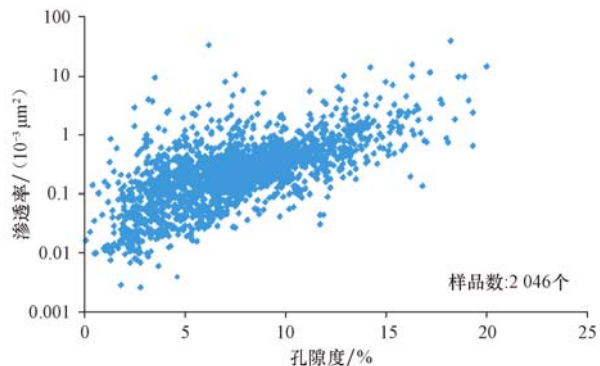


图 3 大牛地气田二叠系盒一段砂岩储层孔隙度与渗透率分布

Fig. 3 Porosity vs. permeability of reservoir sandstones in Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

隙, 因研究区储层埋藏较深, 机械压实和胶结作用强烈, 原生孔隙保存很少, 仅有少数残余原生粒间孔存在, 呈不规则状, 分布不均。

2.3.2 储层孔隙结构

目前研究岩石孔隙结构的方法有毛细管压力法(压汞法)、铸体薄片法、扫描电镜法和图像分析法。最常用是毛细管压力法, 是研究岩石孔隙结构的经典方法。

毛细管压力测定的几个参数能直接反映砂岩孔隙结构的特征, 反映孔喉大小的参数有排驱压力、中值压力、最大孔喉半径、平均孔喉半径、中值孔喉半径; 表征孔喉分选特征的参数有分选系数、结构系数、歪度系数和均质系数。分选系数是反映吼道大小分布集中程度的参数; 结构系数是表征真实岩石孔隙结构特征与假想毛管束模型之间的差别, 它既反映分选程度, 又反映孔喉连通程度, 此值愈小, 岩样孔隙结构愈差; 歪度系数是反映喉道大小的主要参数, 是指孔隙大小偏于粗孔径还是细孔径; 均质系数是表征储层岩石孔隙介质中每一个喉道与最大喉道半径的偏离程度, 均质系数变化在 0~1 之间, 均质系数愈大, 孔喉分布愈均匀。根据 28 个砂岩样品的压汞分析可知, 砂岩的压汞曲线特征与粒度有密切的联系(图 5; 表 2), 粒度越粗, 排驱压力及中值压力越小, 所对应的最大孔喉半径及中值喉道半径越大。由图 5 可见粗砂岩及含砾粗砂岩的排驱压力均小于 1 MPa, 而中砂岩与中细砂岩排驱压力均大于 1 MPa。

本区砂岩以细孔为主, 少量中-粗孔, 平均配位数较低, 孔喉较差, 孔隙大小分布不均。

2.4 储层成岩作用

2.4.1 成岩作用类型

通过薄片观察与鉴定, 扫描电镜、X-射线衍

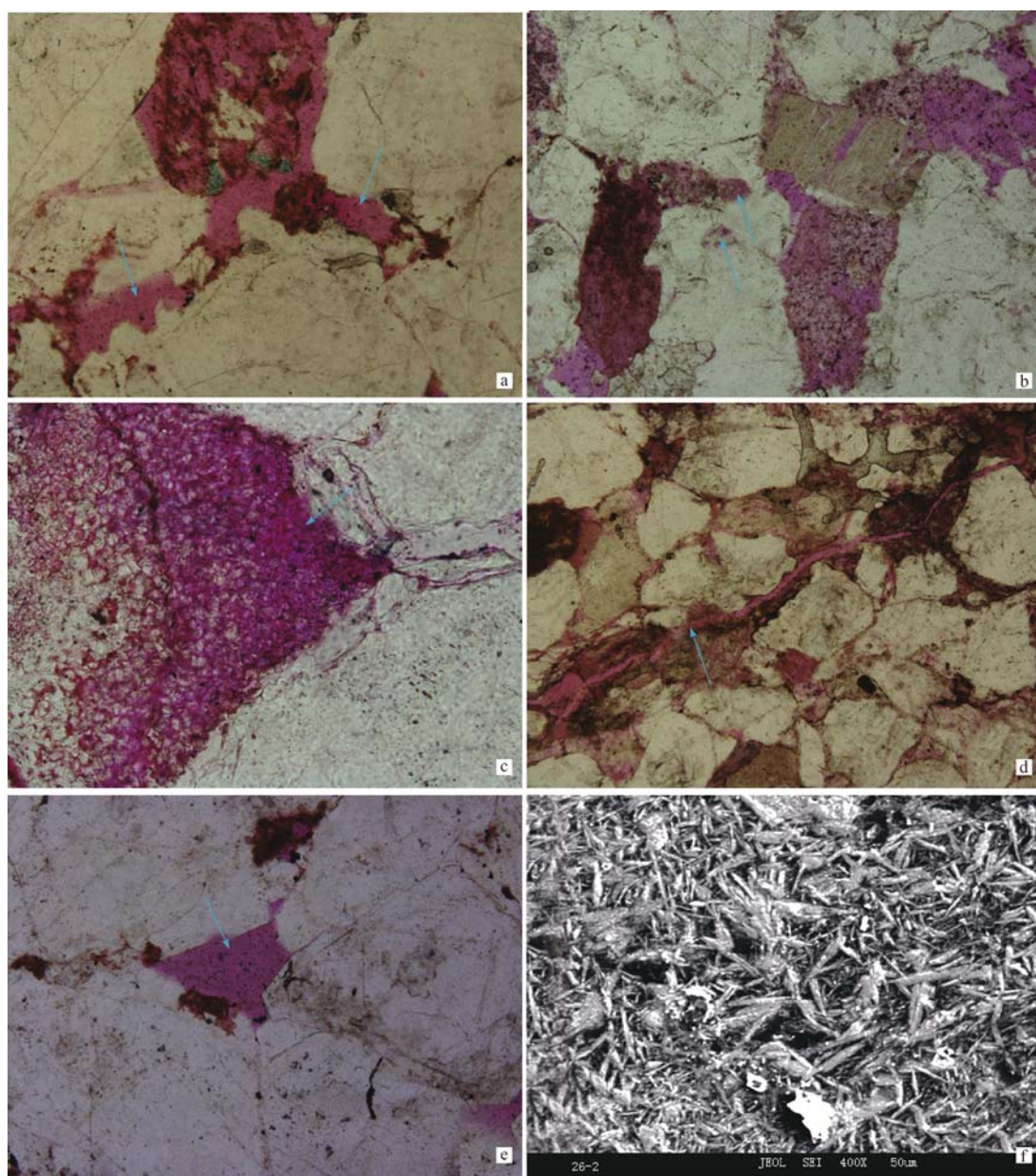


图4 大牛地气田盒一段砂岩铸体薄片镜下照片和伊利石扫描电镜典型照片

Fig. 4 Casting thin section and illite SEM photos of sandstone samples from

Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

a. 粒间溶蚀孔(箭头所指), D61井, 2 716.48 m, (—), 红色铸体薄片; b. 粒内溶蚀孔(箭头所指), D61井, 2 716.48 m, (—), 红色铸体薄片; c. 高岭石晶间孔(箭头所指), D61井, 2 716.48 m, (—), 红色铸体薄片; d. 微裂缝(箭头所指), D65井, 2 669.60 m, (—), 红色铸体薄片; e. 残余原生粒间孔(箭头所指), D65井, 2 669.60 m, (—), 红色铸体薄片; f. 针叶状伊利石充填、分割粒间孔, D26井, 2 444.00 m, 背散射图片, 扫描电镜

射、阴极发光等分析测试手段,对鄂尔多斯盆地大牛地气田盒一段砂岩的成岩作用类型进行了系统研究。研究表明,本区的成岩作用类型主要有压实及压溶作用、胶结作用、交代蚀变作用和溶蚀作用等。

2.4.2 成岩作用阶段划分

埋藏成岩过程中,随着埋深的增加以及温度和压力的提高,粘土矿物发生一系列复杂的转变和演化,粘土矿物的演化程度,尤其是 I/S 混层粘

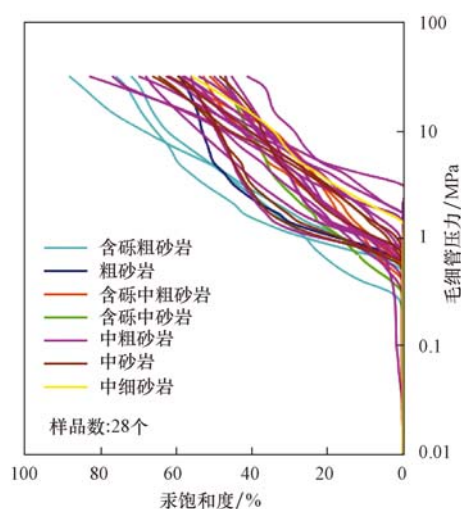


图5 大牛地气田盒一段储层不同粒径砂岩压汞曲线

Fig. 5 Mercury injection curves of sandstones with different grain sizes in Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field, Ordos Basin

表2 大牛地气田盒一段储层28个样品砂岩毛管压力给出的孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters from capillary pressure of 28 sandstone samples of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

孔隙结构特征参数	最大值	最小值	平均值
排驱压力/MPa	1.73	0.28	0.89
中值压力/MPa	29.70	2.83	14.25
最大孔喉半径/ μm	2.71	0.24	1.11
平均孔喉半径/ μm	0.39	0.11	0.26
中值孔喉半径/ μm	0.16	0.03	0.08
分选系数	0.38	0.05	0.20
结构系数	8.28	0.14	2.13
歪度系数	3.11	1.21	2.23
均质系数	0.30	0.05	0.16
孔隙度/%	13.10	3.90	8.18
渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	1.26	0.08	0.53

土矿物转化是划分成岩阶段的良好标志。砂岩中粘土矿物X-射线衍射分析结果表明,大牛地气田砂岩的粘土矿物中伊-蒙间层矿物有序度很高,69个样品中有15个样品的伊-蒙间层比为15%,23个样品为20%,16个为25%,12个为30%,处于晚成岩阶段A₂亚期和晚成岩阶段B期(伊-蒙间层比 ≤ 15)。

孔隙类型及孔隙发育带的情况也是判断成岩阶段的标志之一。一般情况下,原生孔隙反映砂岩成岩早期的孔隙特征,次生孔隙发育于成岩中、晚期,到了成岩晚期阶段,原生孔隙消失,次生孔

隙大量消减直至消失,随之出现的是大量的裂缝。大牛地砂岩储层的孔隙度普遍小于10%,以次生溶孔为主并见裂缝。孔隙类型和孔隙发育带反映出成岩阶段已达到晚成岩阶段B期。

另外,大牛地气田上古生界煤系源岩的热演化程度较高,镜质体反射率(R_o)集中分布在1.1%~1.5%, T_{max} 为460~480℃,也说明晚成岩阶段A₂亚期(R_o 为0.7%~1.2%, T_{max} 为460~470℃)和晚成岩阶段B期(R_o 为1.2%~2.0%, T_{max} 为470~480℃)。盆地数值模拟结果显示,地史时期大牛地气田区经历最大温度介于130~175℃,同样是处于晚成岩阶段A₂亚期至晚成岩阶段B期。图6显示了大牛地气田区盒一段自生矿物成岩序列,孔隙度演化趋势及成岩作用影响。

2.5 储集物性的主要影响因素

研究区盒一段砂岩储集物性的主要影响因素是储层沉积微相以及岩性和成岩作用等。

2.5.1 沉积微相

盒一段地层为辫状河沉积,发育的沉积微相有心滩、辫状河道、溢岸和洪泛平原,各小层沉积微相及砂体发育程度有一定差别(图7—图9)。P₁h⁽¹⁾小层主要发育有3条北北东-南南西向主河道,3条河道在大10井至大23井区交汇在一起(图7a);P₁h⁽²⁾小层主要发育有4条北东-南南向主河道(图8a);P₁h⁽³⁾小层主要发育有两条南北向主河道,其中途径大8井区的河道向下游分为两条河道(图9a)。

沉积相带是控制储层展布及物性的重要因素,沉积作用控制了砂体类型、厚度和展布等,同时控制了砂岩的岩性特征,包括岩石的矿物成分、粒度、磨圆和分选性等。对于水道型砂岩体,河道主体砂岩的物性相对较好,其边缘物性相对较差。从非均质性来看,情况较为复杂,河道主体物性较好,但非均质性较强;河道边缘物性较差,但非均质性较弱。

2.5.2 岩性

砂岩岩性的不同反映了其存在的沉积相带不同,但相同的沉积相带可以有不同的岩性发育。辫

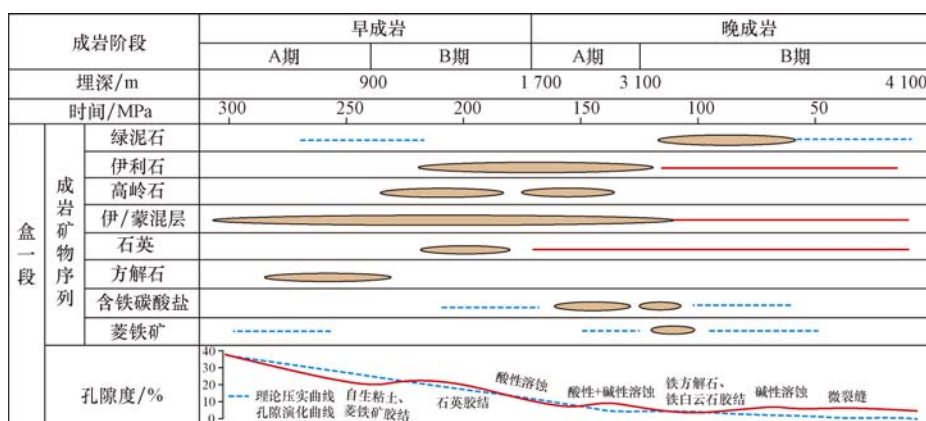


图6 大牛地气田盒一段自生矿物成岩序列及孔隙度演化趋势

Fig. 6 Diagenetic sequence of authigenic minerals and porosity evolution of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

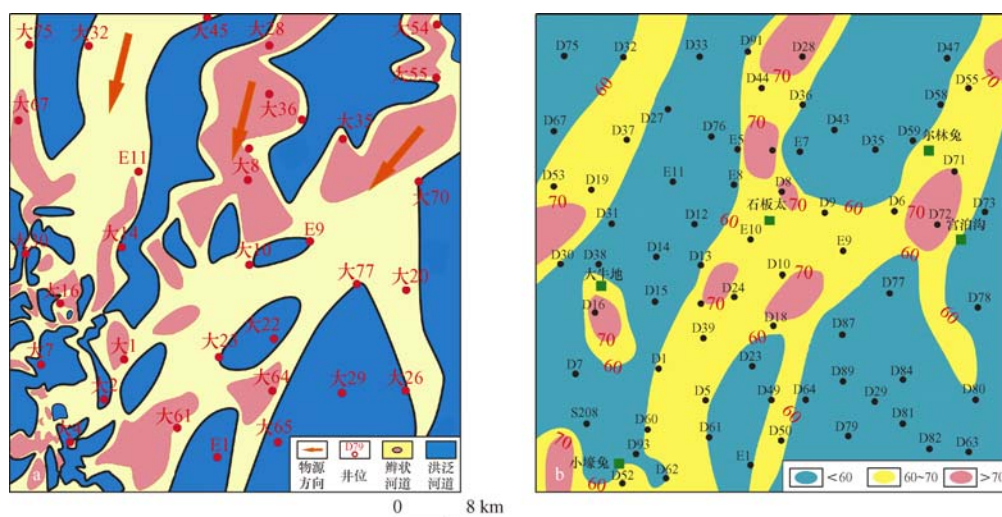


图7 大牛地气田 H1-1 储层沉积微相和综合评价

Fig. 7 Sedimentary microfacies and comprehensive evaluation score for H1-1 reservoir in Daniudi gas field, Ordos Basin

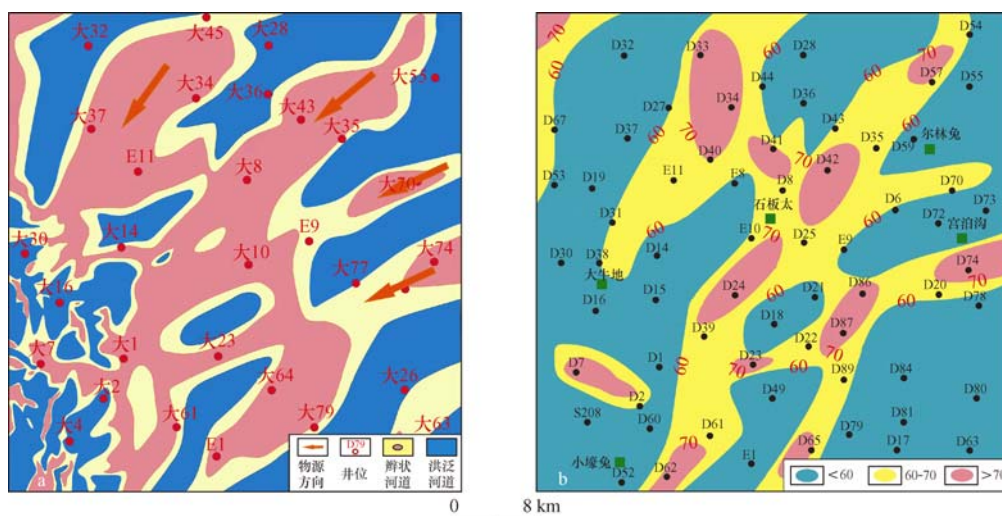


图8 大牛地气田 H1-2 储层沉积微相和综合评价

Fig. 8 Sedimentary microfacies and comprehensive evaluation score for H1-2 reservoir in Daniudi gas field, Ordos Basin

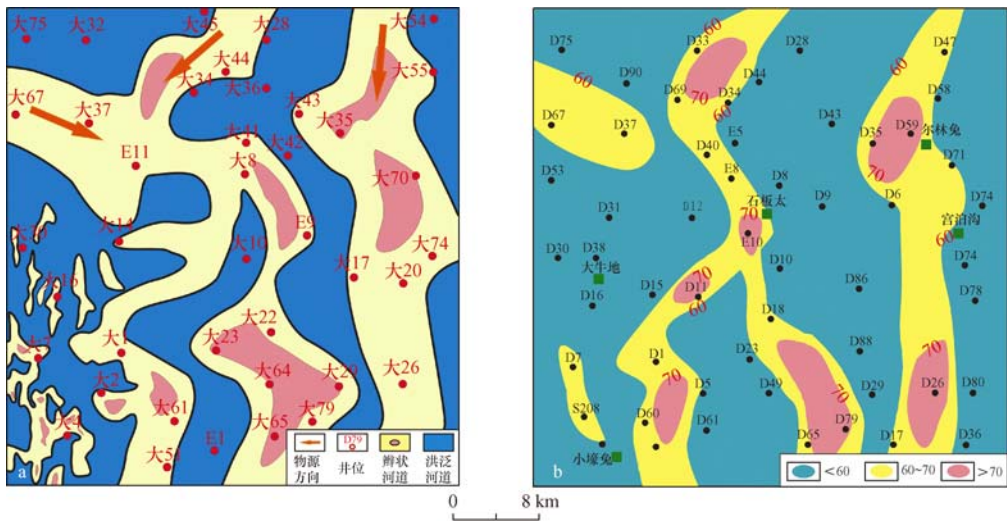


图9 大牛地气田 H1-3 储层沉积微相和综合评价

Fig. 9 Sedimentary microfacies and comprehensive evaluation score for H1-3 reservoir in Daniudi gas field, Ordos Basin

表 3 大牛地气田盒一段砂岩储层岩性与物性关系统计

Table 3 Statistics of lithology and physical properties of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

物性参数	Ph ¹⁽¹⁾			Ph ¹⁽²⁾			Ph ¹⁽³⁾		
	粗砂岩	中砂岩	细砂岩	粗砂岩	中砂岩	细砂岩	粗砂岩	中砂岩	细砂岩
孔隙度/%	最大值	19.3	16.0	11.7	18.4	18.4	9.4	16.3	10.4
	最小值	1.3	0.4	0.6	1.9	0.9	0.5	0.1	0.7
	平均值	8.4	7.4	5.2	8.4	7.3	4.7	8.4	5.7
渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	最大值	32.40	2.97	3.12	13.60	13.60	3.85	1.90	0.68
	最小值	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003
	平均值	0.51	0.26	0.13	0.54	0.34	0.22	0.26	0.11
样品数/个	310	227	118	205	205	52	104	68	11

状河沉积体系中的辫状河道是主要砂岩储集体发育的微相,岩性包括河道底部滞留沉积、中部的中粗砂岩及上部的细砂岩沉积。通过研究区不同岩性的物性资料(样品总数为 1 300 个)进行统计分析(表 3),并绘制不同岩性的孔隙度与渗透率交会图(图 10),可以看出物性明显受砂岩岩性即颗粒大小的影响。总体来看,含砾粗砂岩和粗砂岩的物性好于中砂岩或与中砂岩相当,细砂岩较差。

2.5.3 成岩作用

压实作用主要受岩石结构成熟度、成分成熟度和埋藏深度等因素综合控制。研究区盒一段砂岩储层压实作用强,压实作用造成大量的原生孔隙损失,由于盒一段各小层岩石结构、成分等具有不均一性,压实对砂岩低孔渗所起的作用存在一定的差异。

胶结作用对储层物性的影响较大,胶结作用是破坏性的成岩作用,对储层的物性影响较大。

研究区储层胶结物主要以石英加大、方解石和高岭石胶结为主,强烈的胶结作用是造成储层渗透率降低的重要因素之一,同时早期方解石胶结物可以减少压实率,为后期产生次生孔隙的溶蚀作用提供物质基础^[11]。

溶蚀作用是改善储层物性的主要因素。研究区盒一段砂岩常规薄片、扫描电镜和阴极发光分析显示,长石颗粒的溶蚀现象较普遍,常沿着解理溶蚀,可以形成大量的粒间溶孔和粒内微孔,大量的溶蚀孔隙和一些微裂缝是研究区重要的储集空间。微裂缝对改善储层的渗透性起到不容忽视的作用。

3 储层非均质性

3.1 层间非均质性

储层层间非均质性研究属于宏观非均质性研究范畴,主要指各小层之间及小层内各沉积单元

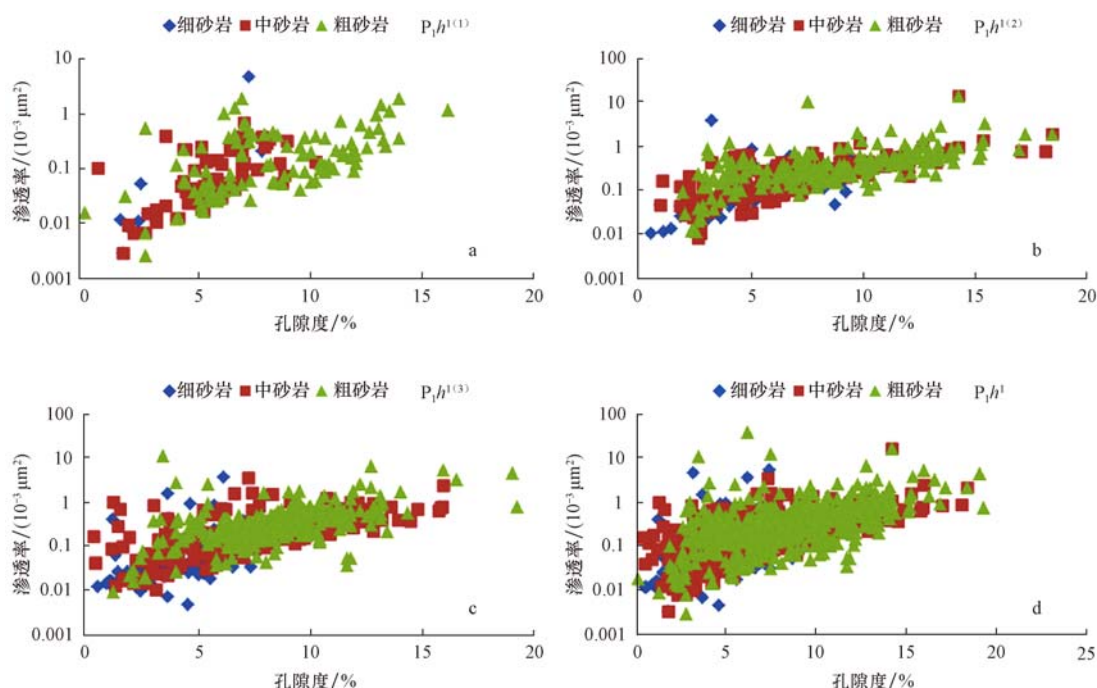


图 10 大牛地气田盒一段岩性与物性的关系

Fig. 10 Relation between lithology and physical properties of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

之间储层特征的垂向差异性^[12-13],其强弱受控于沉积环境和沉积作用的历史演变。层间非均质性是层间干扰和单层突进形成的内因,也是造成垂向层间油气分布不均、水淹状况及剩余油气分布状况不同的根本原因。主要通过研究各小层之间储层分布及物性垂向差异来描述层间非均质性特征。

通过统计大牛地气田盒一段的 $P_1h^{1(1)}$, $P_1h^{1(2)}$ 和 $P_1h^{1(3)}$ 小层的地层平均厚度、砂体平均厚度、平均砂地比、实测和测井解释的平均孔隙度与平均渗透率等参数(表4),可以看出,不同小层之间存

在较大的差异,表明不同小层之间存在比较强的非均质性;从砂体厚度和物性上看, $P_1h^{1(2)}$ 和 $P_1h^{1(3)}$ 之间的差异大于 $P_1h^{1(2)}$ 与 $P_1h^{1(1)}$ 之间的差异。

3.2 平面非均质性

储集平面非均质性研究也属于宏观非均质性研究范畴。砂体平面非均质性是指一个储集砂体的几何形态、规模大小、连续性以及由孔隙度和渗透率的空间变化所引起的非均质性^[14]。砂体储层物性在平面上的变化,主要取决于沉积时高能带和低能带的分布。

平面非均质性主要研究储层非均质性在平面上的变化规律。这种变化是由于沉积相带在平面上的变化所引起的。因此,它是基于同一地层单元的沉积微相平面展布基础上的非均质性研究。本研究主要通过渗透率变异系数、突进系数和级差在区块内的平面分布情况来描述储集体平面上的非均质性。盒一段3个小层中,各单井同一地层单元之间变异系数、突进系数和级差都反映存在严重的非均质性(表4)。

3.3 层内非均质性

层内非均质性是指一个单砂层规模内垂向上

表4 大牛地气田盒一段各小层85口钻井的
储层参数及物性数据统计

Table 4 Statistics of reservoir parameters and physical properties from 85 wells in Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

层号	地层厚度/m	砂岩平均 厚度/m	平均砂 地比	平均孔 隙度/%	平均渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
$P_1h^{1(3)}$	$\frac{2.81 \sim 25.0}{12.33}$	3.96	0.32	7.02	0.50
$P_1h^{1(2)}$	$\frac{5.00 \sim 36.0}{17.75}$	9.52	0.54	7.40	0.37
$P_1h^{1(1)}$	$\frac{6.59 \sim 38.5}{19.5}$	11.86	0.61	7.24	0.32

注:地层厚度一栏为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

的储层性质变化,主要受控于砂体粒度和沉积构造的垂向变化^[15],可以用变异系数(V_k)、突进系数(S_k)和渗透率级差(N_k)等指标来定量描述。对盒一段各小层的变异系数、突进系数和级差 3 个指标分别进行了统计计算(表 5)。可以看出,盒一段的 $P_1h^{(1)}$ 、 $P_1h^{(2)}$ 和 $P_1h^{(3)}$ 3 个小层储层均属于强非均质类型。

4 储层灰色关联分析法评价

灰色关联分析是对一个系统发展变化趋势的定量描述和比较方法。通过对系统中有限数据列的分析,寻求系统内部各因素之间的相互关系,找出影响目标值的主要因素,进而从总体上把握系统变化的规律。按照规定性、偶对称性、整体性和接近性四条原则,确定参考数列和比较数列之间的关联系数和关联度^[16-17]。

储层综合评价要求从多个方面采用多项参数综合评价储层。不同勘探开发阶段有不同目的储层综合评价方法和参数,选择哪些参数作为评价指标以及给以各项参数“权重”的大小体现了储层综合评价不同目的^[18-19]。本次储层评价所选取的参数有:储层有效厚度、孔隙度、渗透率、突进系数、变异系数、沉积微相等 6 个参数,以储层有效厚度为母序列,其余 5 个因子为子序列。

利用灰色关联分析法求得各参数的权重系数(α)(表 6)。每口井盒一段 3 个小层的上述 6 个参数经标准化后,得到各参数评价得分值,以各参数的得分值与各参数的“权重”系数相乘可得各参数单项得分,把各参数单项得分累积后以百分制可得每口单井盒一段各小层的最终综合得分,将其命名为“储层质量综合评价得分值(Q)”。需要

指出的是由于参与评价的参数较多,数学平均值总体不会太高,但的确可以反映各小层储层物性的相对大小及孔隙结构的特征差异。参考国内对低孔低渗砂岩储层评价选取的参数和标准^[20-26],结合大牛地气田砂岩储层低孔低渗、溶蚀孔隙发育等地质特点,根据各单井储层质量综合评价得分值的大小差别情况确定分类标准,将大牛地气田下石盒子组盒一段 3 个小层砂岩储层划分为 3 类即 I 类、II 类、III 类,其分类标准为:储层综合评价得分值 $Q = 100 \sim 70$ 为 I 类储层; $Q = 70 \sim 60$ 为 II 类储层; $Q < 60$ 为 III 类储层。综合评价结果反映了盒一段各小层储层的岩性、孔隙度、渗透率、孔隙结构等特征,储层综合评价得分值、综合评价结果及类别与储层评价标准体系对应情况见表 7。盒一段各小层的储层平面得分范围和评价结果如图 7、图 8 和图 10 所示。

5 认识与结论

1) 对大牛地气田盒一段低孔渗到致密天然气砂岩储层的岩石学、物性、孔隙结构等特征研究表明,砂岩以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,普遍表现为成分成熟度中等偏低,结构成熟度中等偏高的特点,孔隙类型以粒间溶蚀孔为主,砂岩孔隙度和渗透率主要分布区间分别为 $4\% \sim 14\%$ 和 $0.05 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层非均质性较强。

2) 本区的成岩作用类型主要有机械压实作用、胶结作用、交代蚀变作用和溶蚀作用等,储层物性主要受沉积微相分布、岩性、成岩作用等因素影响,机械压实以及石英加大和方解石胶结是减孔的主要成岩作用。研究表明,大牛地气田砂岩成岩阶段达到晚成岩阶段 A_2 亚期到晚成岩阶段 B 期。

表 5 大牛地气田盒一段各小层渗透率非均质程度参数计算值统计

Table 5 Calculated values of heterogeneity parameters of permeability within Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

层号	V_k			S_k			N_k			井数/口
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
$P_1h^{(3)}$	3.04	0.001	0.88	26.00	1.00	4.53	229.47	1.00	35.77	69
$P_1h^{(2)}$	5.04	0.17	1.11	50.41	1.43	7.35	206.68	1.76	40.13	85
$P_1h^{(1)}$	3.13	0.15	0.83	24.32	1.21	5.22	173.67	1.73	23.76	85

表6 大牛地气田盒一段储层各参数权重系数

Table 6 Weighting coefficients of reservoir parameters of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

评价参数	储层有效厚度	孔隙度	渗透率	突进系数	变异系数	沉积微相
权重系数	0.269	0.173	0.136	0.128	0.131	0.163

表7 大牛地气田盒一段储层综合评价和分类及评价标准

Table 7 Comprehensive evaluation, classification and evaluation criteria for reservoirs

in Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field

储层综合评价得分值		>70	60~70	<60
主要岩性		含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩	粗砂岩、中砂岩	中砂岩、细砂岩
物性	孔隙度/%	>10	5~10	<5
	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	>0.8	0.1~0.8	<0.1
毛管压力 曲线	排驱压力/MPa	0.4~0.8	0.7~1.0	>1.0
	中值压力/MPa	<4.25	4.06~17.39	>17.39
	喉道半径峰值/μm	1~16	0.63~10.00	0.1~2.5
综合评价结果		好	中等	差
类别		I	II	III

3) 利用沉积微相、储层宏观和微观特征等多种参数,运用灰色关联分析法对储层进行了综合评价,将盒一段储层划分为3类,其中I类为相对高孔高渗天然气砂岩储层,II类为相对中等孔渗砂岩储层。进行了3类储层的分布区带预测,并建立了大牛地气田盒一段低孔渗到致密其天然气砂岩储层的评价标准体系。

参 考 文 献

- [1] 郝蜀民,李良,尤欢增. 大牛地气田石炭-二叠系海陆过渡沉积体系与近源成藏模式[J]. 中国地质,2007,34(4): 607-611.
Hao Shumin, Li Liang, You Huanzeng. Permo-Carboniferous paralic depositional systems in the Daniudi gas field and its near-source box-type gas accumulation-forming model[J]. Geology in China,2007,34(4):607-611.
- [2] 李仲东,郝蜀民,李良,等. 鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律[J]. 石油与天然气地质,2007,28(4):466-472.
Li Zhongdong, Hao Shumin, Li Liang, et al. Compartments in the Upper Paleozoic of northern Ordos basin and their relationship with gas enrichment[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4):466-472.
- [3] 李良,袁志祥,惠宽洋,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. 石油与天然气地质,2000,21(3): 269-282.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Hui Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in north Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology,2000,21(3):269-282.
- [4] 杨智,何生,邹才能,等. 鄂尔多斯盆地北部大牛地气田成岩成藏耦合关系[J]. 石油学报,2010,31(3):373-378.

Yang Zhi, He Sheng, Zou Caineng, et al. Coupling relationship between reservoir diagenesis and natural gas accumulation of Daniudi gas field in north Ordos basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2010,31(3):373-378.

- [5] Salem A M, Morad S, Mato L F, et al. Diagenesis and reservoir quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and up lift: evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Recôncavo basin, Northeastern Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2000,84(7):1015-1040.
- [6] Ceriani A, DiGiulio A, Goldstein R H, et al. Diagenesis associated with cooling during burial: an example from Lower Cretaceous reservoir sandstones(Sirt Basin, Libya)[J]. AAPG Bulletin,2002,86(9):1573-1591.
- [7] 宋子齐,谭成仔. 灰色理论油气储层评价[M]. 北京:石油工业出版社,1995:120-132.
Song Ziji, Tan Chengqian. Oil and gas reservoir evaluation by gray theory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 120-132.
- [8] 赵云胜,龙昱,赵钦球,等. 灰色系统理论在地学中的应用研究[M]. 湖北 武汉:华中理工大学出版社,1997: 150-161.
Zhao Yunsheng, Long Yi, Zhao Qinqiu, et al. The application of gray system theory in geology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,1997:150-161.
- [9] Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks[M]. Austin Texas: Hemphills,1974:159.
- [10] 何生,叶加仁,徐思煌,等. 石油及天然气地质学[M]. 湖北 武汉:中国地质大学出版社,2010:64-66.
He Sheng, Ye Jiaren, Xu Sihuang, et al. Petroleum geology[M]. Wuhan: Chinese Geology University Press, 2010: 64-66.
- [11] 何生,杨智,何治亮,等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近深层砂岩碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙形成机理[J]. 地

- 球科学——中国地质大学学报,2009,34(5):759-768.
- Yang Zhi, He Sheng, He Zhiliang, et al. Mechanism of carbonate cementation and secondary dissolution porosity formation in deep-burial sandstones near the top overpressured surface in central part of Junggar basin[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences),2009,34(5):759-768.
- [12] 徐真,张春明. 冀中地区文安油田原油非均质性及其意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):321-326,334.
- Xu Zhen, Zhang Chunming. Heterogeneity of crude oil from Wen'an oilfield in Jizhong area and its implications[J]. Oil & Gas Geology,2010,31(3):321-326,334.
- [13] 窦之林,董春梅,林承焰. 孤东油田七区中馆4-馆6砂层组储层非均质性及其对剩余油分布的控制作用[J]. 石油大学学报(自然科学版),2002,26(1):8-10.
- Dou Zhilin, Dong Chunmei, Lin Chengyan. Controlling function of reservoir heterogeneity for remaining oil distribution in Guan 4-6 sand bed set in the center of Seventh District of Gudong oilfield[J]. Journal of The University of Petroleum, china, 2002,26(1):8-10.
- [14] 杨少春. 储层非均质性定量研究的新方法[J]. 石油大学学报(自然科学版),2000,24(1):53-56.
- Yang Shao chun. A new method for quantitatively studying reservoir heterogeneity[J]. Journal of the University of Petroleum, China,2000,24(1):53-56.
- [15] 叶成林,王国勇,何凯,等. 苏里格气田储层宏观非均质性——以苏53区块石盒子组8段和山西组1段为例[J]. 石油与天然气地质,2011,32(2):236-244.
- Ye Chenglin, Wang Guoyong, He Kai, et al. Macro heterogeneity of reservoirs in Sulige gasfield—a case study of the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in the Su53 Block[J]. Oil & Gas Geology, 2009,30(2):236-244.
- [16] 周俊杰,李颖川,钟海全,等. 基于灰色关联分析的低渗气藏产水气井分类评价[J]. 石油天然气学报,2011,33(11):143-145.
- Zhou Junjie, Li Yingchuan, Zong Haiquan. Classification and evaluation of water producing gas wells in low permeability gas reservoir based on grey correlation analysis[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2011,33(11):143-145.
- [17] 赵加凡,陈小宏,张勤. 灰关联分析在储层评价中的应用[J]. 勘探地球物理进展,2003,26(4):282-286.
- Zhao Jiafan, Chen Xiaohong, Zhang Qin. Application of grey association analysis in reservoir evaluation[J]. Progress in Exploration Geophysics,2003,26(4):282-286.
- [18] 张昌民. 储层研究中的层次分析法[J]. 石油与天然气地质,1992,13(3):344-350.
- Zhang Changmin. Hierarchy analysis in reservoir researches[J]. Oil & Gas Geology,1992,13(3):344-350.
- [19] 李东安,宁俊瑞,刘振峰. 用神经网络和地质统计学综合多元信息进行储层预测[J]. 石油与天然气地质,2010,31(4):493-498,503.
- Li Dongan, Ning Junrui, Liu Zhenfeng. Reservoir prediction with integrated information based on artificial neural network technology and geostatistics[J]. Oil & Gas Geology,2010,31(4):493-498,503.
- [20] 朱春俊,王彦斌. 大牛地气田低渗储层成因及评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(1):49-56.
- Zhu Chunjun, Wang Yanbin. Reservoir genesis and evaluation for the low porosity and permeability sandstone in the daniudi gasfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition),2011,33(1):49-56.
- [21] 侯瑞云,刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):118-128.
- Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology,2012,33(1):118-128.
- [22] 杨正明,张英芝,郝明强,等. 低孔渗透油田储层综合评价方法[J]. 石油学报,2006,27(2):64-67.
- Yang Zhengming, Zhang Yingzhi, Hao Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica,2006,27(2):64-67.
- [23] 刘钰铭,李园园,张友,等. 喇嘛甸油田密井网砂质辫状河厚砂层单砂体识别[J]. 断块油气田,2011,18(5):556-559.
- Liu Yuming, Li Yuanyuan, Zhang You, et al. Identification of single sand body in thick sand layer of braided river under the condition of dense well pattern in Lamadian Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2011,18(5):556-559.
- [24] 王永建,王延斌,李霞,等. 大牛地气田上古生界储层物性差异影响因素[J]. 石油实验地质,2011,33(5):513-516.
- Wang Yongjian, Wang Yanbin, Li Xia, et al. Controlling factors of physical property of Upper Paleozoic reservoir, Daniudi Gas Field[J]. Petroleum Geology & Experiment,2011,35(5):513-516.
- [25] 尹昕,应文敏. 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界低孔低渗砂岩储层评价[J]. 矿物岩石,2005,25(2):104-109.
- Yin Xin, Yin Wenmin. Reservoir evaluation for the low porosity and permeability sandstone of upper paleozoic in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005,25(2):104-109.
- [26] 杨正明,姜汉桥,朱光亚,等. 低渗透含水气藏储层评价参数研究[J]. 石油学报,2008,29(2):252-255.
- Yang Zhengming, Jiang Hanqiao, Zhu Guangya, et al. Research on reservoir evaluation index for low-permeability water-bearing gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica,2008,29(2):252-255.

(编辑 高岩)