

渤海海域辽东湾地区古近系钙质砂岩成因及分布

——以锦州25-1油田3井区沙三段为例

宋洪亮,黄保纲,张迎春,陈建波,韩雪芳,张琳琳,张占女

(中海石油(中国)天津分公司,天津 300452)

摘要:钙质砂岩基本为致密层或干层,是海上开发井设计尽可能规避的“伪储层”,预测钙质砂岩分布成为规避低效井的首要任务。以锦州25-1油田3井区沙三段为例,从钙质砂岩成因入手,分析了钙质砂岩形成具备的物质条件和环境条件。研究区沙三段深湖泥岩提供了丰富的碳酸盐流体来源,为形成钙质砂岩提供了物质条件;水下分流河道微相优质储层中的砂岩体直接嵌入下伏的富含钙质的泥岩中,砂岩透镜体与泥岩的接触面积较大,并且由于烃源岩排烃作用使砂岩和周围泥岩存在压差,在这种压差作用下碳酸盐流体排出并在砂岩原生孔隙中沉淀,又为钙质砂岩的形成提供了有利的环境,2种条件相互作用、互相影响,最终形成钙质砂岩。钙质砂岩分布主要受沉积微相、与周围泥岩接触方式和古地貌等因素的影响。结合地震相砂体描述成果,预测沙三段中亚段钙质砂岩平面上主要分布于靠近沉积中心一侧、大砂体的西侧边缘,以及构造中东侧次洼中,据此调整了原开发方案中5口设计井的井位,实施后,这5口井均未钻遇钙质砂岩,规避了开发风险。

关键词:钙质砂岩 成因 分布 古近系 锦州25-1油田 辽东湾地区

中图分类号: TE111.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0055-05

碳酸盐胶结物中方解石最为常见^[1-8],因此碳酸盐胶结砂岩常被称为钙质砂岩。钙质砂岩测井响应特征表现为高电阻率、高密度和高速度。薄层钙质砂岩测井曲线呈尖刺状,俗称“钙尖”。研究表明,当碳酸盐胶结物含量高于5%时,储层物性明显变差^[9-10]。渤海海域辽东湾地区锦州25-1油田“钙尖”现象比较普遍,已引起相关研究人员的重视。锦州25-1油田投入开发后,早期的一些开发井在目的层钻遇了一定厚度的钙质砂岩,导致油井有效储层厚度变薄,开发效果不理想。为此,笔者以锦州25-1油田3井区沙三段为例,探讨了钙质砂岩的发育特征、成因及分布规律,以期对后续开发井的部署提供依据。

1 区域地质概况

锦州25-1油田位于渤海海域辽东湾辽西低凸起北部倾末端、辽西凹陷北洼东侧。辽西1号断层(正断层,在研究区内平均断距为600 m)沿北东走向纵贯研究区将其分为西、东两盘,西盘为下降盘、斜坡带,东盘为上升盘、凸起带。锦州25-1油田3井区位于西盘,是依附于辽西1号断层、沿北东向展

布的断背斜构造,被一组近东西向次级断层切割,将3井区分为北、中和南3块。

3井区主要目的层为沙三段中亚段,岩性以大套厚层泥岩为主,泥岩中部集中发育一套厚度达100余米的砂层,单砂层厚度不均,从几十厘米至几十米。在锦州25-1油田,沙三段上亚段缺失,沙三段下亚段为泥岩与灰质粉砂岩不等厚互层。古近纪,东盘遭受剥蚀,是3井区沉积物的主要物源区。在沙三段中亚段沉积时期,沉降中心在3井区西侧,地势西低东高、地形窄而陡,自北向南呈三洼夹两凸的格局。来自东盘的碎屑物质分成数股就近注入相应洼地中,形成半深湖—扇三角洲沉积体系。平面上,各块沉积差异大,北块、南块的连续性比中块差。剖面上,受湖面上升和沉积物间歇供应的影响,发育7期砂体,砂体多呈透镜状,砂体末端向西嵌入湖相泥岩中。

2 钙质砂岩特征及成因

2.1 钙质砂岩特征

根据薄片鉴定资料统计,锦州25-1油田3井区沙三段中亚段钙质砂岩胶结物为碳酸盐、粘土矿物

和氧化硅,以方解石为主。胶结形式主要是基底式胶结,方解石呈镶嵌结构,矿物颗粒漂浮在胶结物中。未发现方解石交代长石和粘土矿物的现象,说明钙质砂岩的成因可能主要与孔隙流体有关。这种胶结物和胶结形式使砂岩基本失去渗透能力,测井解释渗透率甚至不足 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。与其附近的正常砂岩相比,钙质砂岩的测井响应特征总体表现为相对较低的自然伽马和自然电位、较高的电阻率、明显的高密度和高速度。钙质砂岩厚薄不一,单层厚度最大可达几十米,单个“钙尖”厚度通常只有几十厘米。研究区砂体为中深层沉积体,钙质砂岩的地震反射特征不明显。

钙质砂岩在剖面上的分布可归纳为底部型、顶部型、中部型和完全型4种(图1)。底部型形成于正旋回砂体的下半部分,上部为有效储层。厚层钙质

砂岩多发育于箱形正韵律砂体底部,厚度占砂体厚度的90%以上。顶部型发育于反旋回砂体或远砂坝的顶部,以厚度为1~2 m的“钙尖”居多,典型代表为锦州25-1油田东二段下亚段进积成因的浅湖砂坝。顶部型钙质砂岩的形成被认为与上覆页岩或粘土层的半渗透膜效应有关。半渗透膜阻止半径大的 Ca^{2+} 向上逃逸,使其在砂岩顶部相对富集^[2]。中部型见于河口坝等复合韵律砂体。当沉积作用较稳定时,数个水下分流河道砂体或河口坝砂体垂向叠加形成叠置砂体,砂体的内部常发育中部型钙质砂岩,呈1层或多层,含油砂体内部的部分夹层属于此种类型。完全型钙质砂岩通常为一些孤立且被泥岩包裹的薄砂层,整个砂体完全被碳酸盐胶结。

2.2 钙质砂岩成因

赵澄林等认为许多砂岩中的碳酸盐胶结物是早期沉淀形成的^[2]。海水和流动的孔隙水能持续带入溶解的碳酸盐,是碳酸盐胶结物的主要来源。孔隙水溶解碎屑沉积物中的介壳和碳酸盐颗粒,溶解的物质又作为成岩期的胶结物沉淀下来,是深层碳酸盐胶结物的主要来源之一。郭宏莉等通过检测碳氧同位素含量确定碳氧来源,认为地层中碳酸盐有3种成因:成岩碳酸盐、与生物气有关的碳酸盐和与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐^[11-12]。Ali等研究认为 Ca^{2+} 来源主要有3种:①层内溶解作用,泥岩中富含钙质,钙质可发生溶解随流体一起排入临近砂岩中;②沉积水体原生或孔隙水中的 Ca^{2+} ;③泥岩中蒙脱石向伊利石转化可排出 Ca^{2+} ,这种转化主要发生在1 400 m以下^[13]。李丕龙等通过分析区域沉积相及砂泥岩接触关系,认为深层烃源岩生成的有机酸溶解碳酸盐岩矿物,形成的含 Ca^{2+} 流体进入储层后,发生沉淀,形成钙质砂岩^[14-16]。

综合以上分析可知,形成钙质砂岩必须同时具备物质条件和环境条件。物质条件是指地层中存在形成碳酸盐胶结物的基本元素,就方解石而言,主要是 Ca^{2+} 的来源。环境条件主要指富含 Ca^{2+} 的流体如何进入岩石孔隙中并沉淀下来。因此,泥岩、砂泥岩的匹配关系、埋深和成岩作用对钙质砂岩的形成至关重要。

2.2.1 沉积背景提供物质条件

在沙三段沉积时期,研究区区域地壳拉张裂隙作用加剧,盆地处于强烈断陷阶段^[17],此时湖盆深,水域面积大,长时间沉陷,形成一套以厚层暗色泥岩为主的深湖—半深湖沉积。气候温暖潮湿,华北

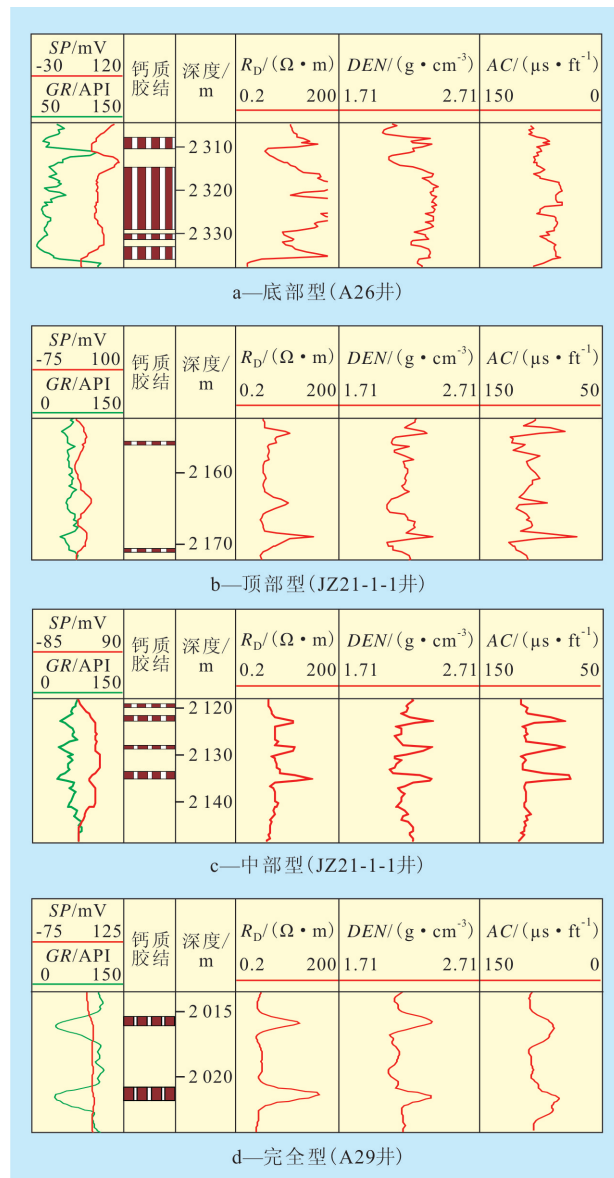


图1 锦州25-1油田3井区钙质砂岩的剖面分布类型

介、渤海藻、副渤海藻等半咸水生物发育。辽西斜坡带重力流沉积、水下扇、扇三角洲等水下砂体比较发育^[18]。以地层较全的锦州25-1-5井为例,该井沙三段泥岩厚度达600余米,砂层集中发育于沙三段中亚段,砂地比约为15%,沙三段岩性剖面整体呈典型的“泥包砂”特征。这种区域沉积背景为钙质砂岩的形成奠定了物质基础:一方面,深湖泥岩提供了丰富的碳酸盐流体来源;另一方面,水下分流河道微相贡献了优质的目标储层。

朱筱敏等研究表明,有机质成熟早期为有机酸的主要形成期^[19-20]。辽东湾地区古近系沙三段泥岩的有机碳含量在1%以上,属于好一极好烃源岩。据镜质组反射率判断,锦州25-1油田沙三段有机质成熟度处于成熟早期阶段,该阶段生成了大量有机酸,有机酸溶解生物介壳和碳酸盐矿物颗粒,是碳酸盐流体的主要来源,锦州25-1油田3井区沙三段下亚段的泥岩均与盐酸发生反应即是证据。沙三段中亚段储层孔隙度一般为20%~25%,渗透率高达 $250 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属中孔、中渗透储层,由这种优质储层构成的砂岩体直接嵌入下伏富含钙质的泥岩中,泥岩和砂岩的这种接触关系显然有利于泥岩中的碳酸盐流体进入砂岩孔隙中。

2.2.2 埋藏成岩作用满足环境条件

在渤海海域发现的钙质砂岩几乎都分布于古近系,如锦州25-1油田3井区沙三段,埋深为2 000~2 800 m。在这种埋藏条件下,由于烃源岩排烃,泥岩内部压力升高,砂岩和周围泥岩存在压力差。在压力差作用下,被有机酸溶蚀的碳酸盐流体会沿侧向或向上运移到邻近孔隙压力相对小、物性相对好的砂层内。

研究表明,在埋藏成岩过程中,方解石的溶解度随温度、压力、pH值的增加而降低,随二氧化碳分压的增加而增加。温度升高使孔隙水中的碳酸盐解离为 CO_2 和 H_2O (或 HCO_3^- 和 H^+),并促使 CO_2 逸失,二氧化碳分压降低,引起碳酸钙溶解度下降和方解石沉淀^[2]。钟大康等认为,在埋藏成岩过程中,温度和压力升高促使烃源岩生成的有机酸溶解碳酸盐矿物^[21-22]。随着有机酸含量的增加,碳酸盐溶解量增加导致流体中 Ca^{2+} 浓度增大,同时烃源岩中碳酸盐矿物溶解导致流体pH值增大,有助于碳酸钙再次沉淀。可见,温度和压力等环境条件与含钙流体形成等物质条件之间相辅相成,互相促进。

通过以上分析可知,研究区钙质砂岩形成的原因为:砂岩透镜体与泥岩接触面积较大,由于烃源

岩内压力较砂体内的大,并且砂体内部 CO_2 分压比泥岩中的低,使碳酸盐流体排出并在砂岩原生孔隙中发生沉淀作用^[23],形成钙质砂岩(图2)。

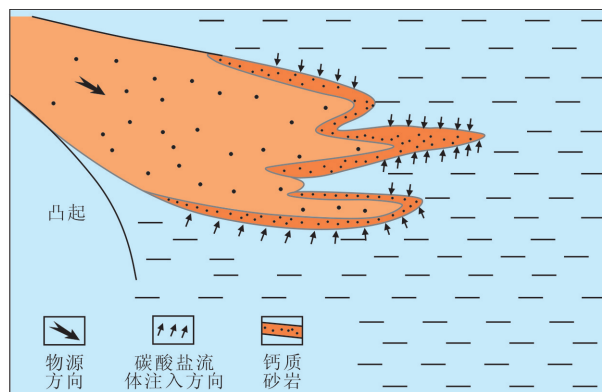


图2 锦州25-1油田3井区钙质砂岩形成模式

3 钙质砂岩分布的控制因素

钙质砂岩分布的控制因素之一是沉积微相,本质上是受砂层原始储集物性控制。从沉积微相来看,水下分流河道微相发生碳酸盐胶结的情况较其他微相多,由于碳酸盐胶结,有效厚度损失也最大。席状砂微相砂层薄,受湖浪充分淘洗,物性较好,容易整体发生碳酸盐胶结。从砂体发生碳酸盐胶结的部位看,凡是正旋回的都发生在底部,反旋回则相反,复合韵律砂体则发生在中部,都处于砂体储集物性最好的部位。正旋回砂体测井曲线有箱形和钟形2种形态,箱形代表水下分流河道中心微相,钟形代表水下分流河道边缘微相。箱形砂体比钟形砂体厚度大、物性好,其底部钙质砂岩的发育程度高、厚度大。与箱形砂体相比,钟形砂体底部钙质砂岩厚度往往只占砂体厚度的20%~35%(图1b)。常规测井资料中,自然电位、电阻率、密度和声波时差反映的是砂体发生碳酸盐胶结后的特征,只有自然伽马(GR)能反映砂体原始的储集物性。统计结果(表1)表明,剖面上发生碳酸盐胶结的部位对应的 GR 值相对低、原始物性相对好。

钙质砂岩分布的另一控制因素是砂体沉积时期以及它们与周围泥岩接触的方式。锦州25-1油田3井区沙三段中亚段钙质砂岩主要发育于早期沉积的砂体中,多发生在第5、6和7小层底部。平面上,发育钙质砂岩的井分布于斜坡洼中,靠近湖盆中心一侧,距辽西1号断层的距离为800~1 000 m。碳酸盐胶结多发生于透镜状砂体的下倾部位、砂体边缘。因此,与沙三段下亚段泥岩有更大接触

表1 锦州25-1油田3井区钙质胶结砂岩形成因素统计结果

井号	构造位置	距辽西1号断层距离/m	小层	砂体埋深/m	砂体厚度/m	砂体韵律	砂体微相	砂体测井曲线形态	钙质砂岩剖面分布类型	钙质砂岩厚度占砂体厚度的比例,%	有效储层段平均GR值/API	钙质砂岩段平均GR值/API
A26	靠近湖盆中心一侧	750	6-1	2 310.2	11.4	正	水下分流河道	钟形	底部型	26.3	80.8	70.6
			6-2	2 336.6	24.3	正	水下分流河道	箱形	底部型	79.0	80.9	66.9~73.0
			2-1	2 086.2	0.7	复合	席状砂	指形	完全型	100.0		73.7
			2-2	2 091.1	4.3	正	水下分流河道	钟形	底部型	34.9	57.7~75.6	60.0
			2-3	2 094.8	1.6	复合	席状砂	指形	完全型	100.0		85.7
A11	洼缘	400	3-1	2 109.6	1.3	复合	席状砂	指形	完全型	100.0		55.0
			3-2	2 113.4	3.8	正	水下分流河道	箱形	底部型	89.5	71.8	58.5
			3-3	2 115.9	2.2	反	砂坝	漏斗形	顶部型	31.8	57.6	68.3
			3-4	2 117.1	0.6	复合	席状砂	指形	完全型	100.0		79.6
A29	靠近湖盆中心一侧	800	6-4	2 325.1	5.7	正	水下分流河道	箱形	底部型	50.9	71.0	70.1
			6-4	2 331.1	6	正	水下分流河道	箱形	底部型	80.0	72.7	65.6
			7	2 343.2	3.8	正	水下分流河道	钟形	底部型	34.2	73.7	69.0
A21	洼中	1 000	5	2 374	29.2	复合	河口坝	箱形—漏斗形	中部型	30.5	84.3~91.5	80.1
A2	洼中	800	5	2 401.3	12.3	正	水下分流河道	钟形	底部型	26.0	75.0	65.5
			6	2 451.8	48.2	正	水下分流河道	钟形叠加	底部型	20.1	73.6	52.9~55.3

面积的砂体、侧向能与早期泥岩充分接触的复合韵律砂体,以及被泥岩包裹的薄层砂体才易于形成钙质砂岩。

钙质砂岩分布也受古地貌和碳酸盐流体供给量等因素的影响。古地貌高处沉积的砂体,距离低部位富钙泥岩相对较远,碳酸盐流体从低部位向上运移到这些砂体所需要的能量相对较大,这些砂体捕获碳酸盐流体的机会就相对较少。在碳酸盐流体不充足的情况下,低部位沉积的、就近的、物性好的砂体将优先获得充注。A2井和A16井即属此种情况,2口井同为砂体边部井,相距仅150 m,但这2口井的砂体沉积高差约为200 m,A2井处于古地貌的低部位,砂体底部形成钙质砂岩,A16井位于古地貌高部位,砂岩未发生钙质胶结。

4 钙质砂岩平面分布预测

基于对研究区钙质砂岩成因和分布规律的认识,结合地震相砂体描述成果,对钙质砂岩的平面发育情况进行分析和预测,认为锦州25-1油田3井区沙三段中亚段钙质砂岩平面上主要分布于靠近沉积中心一侧、大砂体的西侧边缘以及构造中东侧次洼中(图3)。据此调整了原开发方案中位于钙质砂岩分布预测区的5口设计井井位,实施后,这5口井均未钻遇钙质砂岩,从而规避了开发风险。

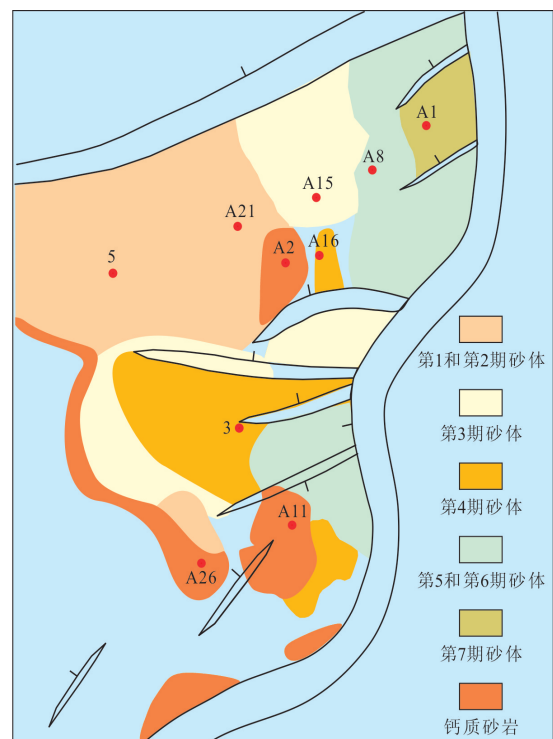


图3 锦州25-1油田3井区沙三段中亚段钙质砂岩平面分布预测

5 结论

锦州25-1油田3井区沙三段钙质砂岩是烃源岩生烃过程中有机酸溶蚀碳酸盐矿物形成的碳酸

盐流体在压力差作用下运移至浅部或相邻储层孔隙中,并随埋深、温度和压力的增加,碳酸盐组沉淀形成的,其成因与沉积背景和埋藏成岩作用有关。3井区沙三段钙质砂岩平面分布主要受沉积微相、储层物性和砂泥岩接触关系等因素控制,同时受古地貌影响。结合地震相砂体描述成果,预测沙三段中亚段钙质砂岩平面上主要分布于靠近沉积中心一侧、大砂体的西侧边缘以及构造中东侧次洼中,据此调整了原开发方案中5口设计井的井位并获得成功,规避了开发风险。

参考文献:

- [1] 张立强,罗晓容.准噶尔盆地高压带碳酸盐胶结层的分布及特征[J].石油实验地质,2011,33(4):388-391.
- [2] 姜秀芳.济阳坳陷湖相碳酸盐岩沉积主控因素[J].油气地质与采收率,2011,18(6):23-27.
- [3] 张敏强,黄思静,吴志轩,等.东海盆地丽水凹陷古近系储层砂岩中碳酸盐胶结物及形成机制[J].成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(3):259-265.
- [4] 孙致学,孙治雷,鲁洪江,等.砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征——以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例[J].石油勘探与开发,2010,37(5):543-550.
- [5] 张永旺,曾濞辉,高霞,等.东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(1):17-22.
- [6] 王芙蓉,何生,何治亮,等.准噶尔盆地腹部永进地区砂岩储层中碳酸盐胶结物特征及其成因意义[J].岩石矿物学杂志,2009,28(2):169-178.
- [7] 王清斌,臧春艳,赖维成,等.渤中坳陷古近系中、深部碎屑岩储层碳酸盐胶结物分布特征及成因机制[J].石油与天然气地质,2009,30(4):438-442.
- [8] 刘丽红,黄思静,王春连,等.碳酸盐岩中方解石胶结物的阴极发光环带与微量元素构成的关系——以塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例[J].海相油气地质,2010,15(1):55-60.
- [9] 李嵘,吕正祥,叶素娟.川西拗陷须家河组致密砂岩成岩作用特征及其对储层的影响[J].成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(2):148-154.
- [10] 张玉玺,周江羽,李晓峰,等.两北地区三叠系深部碎屑岩储层特征及控制因素[J].油气地质与采收率,2012,19(4):10-13.
- [11] 郭宏莉,王大锐.塔里木油气区砂岩储集层碳酸盐胶结物的同位素组成与成因分析[J].石油勘探与开发,1999,26(3):31-32.
- [12] 张立强,李秀国.准噶尔盆地南缘安集海组砂岩碳酸盐胶结物特征[J].油气地质与采收率,2011,18(5):6-8,30.
- [13] Ali H C, James P A. Origin, distribution and significance of carbonate cements in the Albert Formation reservoir sandstones, New Brunswick Canada [J]. Marine and Petroleum Geology, 1996, 13(7):837-846.
- [14] 李丕龙,庞雄奇,等.陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成——以济阳坳陷为例[M].北京:石油工业出版社,2004:254-293.
- [15] 漆滨汶,林春明,邱桂强,等.东营凹陷古近系沙河街组砂岩透镜体钙质结壳形成机理及其对油气成藏的影响[J].古地理学报,2006,8(4):519-529.
- [16] 曾濞辉,彭继林,邱楠生,等.砂-泥岩界面碳酸盐溶解-沉淀反应及其石油地质意义[J].天然地球科学,2006,17(6):760-763.
- [17] 李伟,吴智平,刘华,中.新生代渤海湾地区演化与上古生界煤成气成藏[J].油气地质与采收率,2009,16(1):14-16.
- [18] 赵澄林.油区岩相古地理[M].东营:石油大学出版社,2001:88-94.
- [19] 朱筱敏,张枝焕,钟大康,等.济阳坳陷古近系碎屑岩储层特征和评价[M].北京:科学出版社,2008:172-173.
- [20] 滕建彬.基于低渗透成因分析的储层分类方法——以临南洼陷带沙三段下亚段碎屑岩储层为例[J].油气地质与采收率,2012,19(5):6-9.
- [21] 钟大康,朱筱敏,张琴.不同埋深条件下砂泥岩互层中砂岩储层物性变化规律[J].地质学报,2004,78(6):864-869.
- [22] 曾濞辉.东营凹陷第三系水-盐作用对储层孔隙发育的影响[J].石油学报,2001,22(4):39-43.
- [23] 姚庆生,李惠生.南阳凹陷下第三系核桃园组砂岩中碳酸盐胶结物及其成因的初步探讨[J].地球科学——中国地质大学学报,1991,16(5):550-556.

编辑 经雅丽

欢迎广大科技人员踊跃投稿