

松辽盆地徐家围子断陷登二段 致密砂岩之有利储层预测

胡玉双¹, 乔柱¹, 乔德武², 孟元林¹, 肖丽华¹, 田伟志³,
孙洪斌⁴, 张明学¹, 胡安文¹

1. 东北石油大学, 黑龙江 大庆 163318; 2. 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034;
3. 中国石油长城钻探工程分公司, 辽宁 盘锦 124010; 4. 中国石油辽河油田分公司, 辽宁 盘锦 124010

摘要:为了预测松辽盆地徐家围子断陷深层登娄库组二段致密砂岩的有利储层发育区, 本文讨论了沉积相和成岩作用对致密砂岩储层物性的影响。结果表明: 登二段最有利的沉积相是三角洲相和河道亚相, 但进入晚成岩阶段 A 期以后, 致密砂岩储层就难以产出工业气流; 不同沉积相的砂体处于不同的成岩阶段, 形成了登二段致密砂岩三种不同类型的储层(II、III、IV 类)。应用成岩作用数值模拟技术, 结合沉积相的研究成果, 本文预测了登二段致密砂岩各种类型储层的平面分布特征。目前已发现的工业气流井主要位于 II、III 类储层分布的范围内, 这些砂岩就是致密砂岩中有利储层的发育区。

关键词:致密砂岩气; 非常规油气; 成岩作用; 沉积相; 成岩模拟; 徐家围子断陷; 松辽盆地

中图分类号: TE 122.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)04-0361-08

Better Reservoir Prediction of the Tight Sandstones in the Member 2 of the Dengloulou Formation in the Xujiaweizi Rift Depression of the Songliao Basin

HU Yu-shuang¹, QIAO Zhu¹, QIAO De-wu², MENG Yuan-Lin¹, XIAO Li-hua¹,
TIAN Wei-zhi³, SUN Hong-bin⁴, ZHANG Ming-xue¹, HU An-wen¹

1. Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China; 2. Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Beijing 100034, China; 3. Great Wall Drilling Company, PetroChina, Panjin 124010, China; 4. Liaohe Oilfield Branch Company of PetroChina, Liaoning, Panjin 124010, China

Abstract: To predict better reservoirs of tight sandstones in the Member 2 of the Dengloulou Formation (K_1d_2), Xujiaweizi rift depression, Songliao basin, the effects of sedimentary facies and the diagenesis on reservoir porosity were discussed. The results showed that the favorable sedimentary facies of K_1d_2 are delta facies and river channel sub-facies; and that little commercial gas flow was produced from the tight sandstone reservoirs in the late diagenetic stage after the period A. The sandstones in different sedimentary facies and different diagenetic stages had formed three kinds of tight sandstone reservoirs, types II, III, and IV. The tight sandstone reservoir types of the Member 2 of the Dengloulou formation were predicted laterally by the diagenetic numerical model combining with the sedimentary facies. Current commercial gas flow wells are mainly located in the type II and type III, where the most favorable reservoirs are located.

Key words: tight sandstone gas; unconventional oil and gas; diagenesis; sedimentary facies diagenetic modeling; Xujiaweizi rift depression; Songliao Basin

松辽盆地徐家围子断陷在非常规天然气的勘探中取得了重大突破, 在营城组砾岩、火山岩和登娄库组致密砂岩中发现了工业气流^[1,2], 已投入开发。但致密砂岩气的发现井主要局限于盆地隆起带和边

收稿日期: 2011-07-23 收到, 09-11 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872076); 全国油气资源战略选区调查与评价国家专项资助项目(2009GYXQ13)

第一作者简介: 胡玉双(1963—), 女, 教授, 研究方向: 地震资料综合解释与石油地质。E-mail: QHOMYL@163.com

部埋深相对较浅的区域。而盆地大部分地区的登娄库组砂岩则是埋藏深、地温高、压力大、成岩作用强、物性差和产能低^[1]。因此,在普遍低孔、低渗的致密砂岩中更为准确地寻找物性相对较好的有利储层,就成为登娄库组致密砂岩气勘探和开发的重中之重。一般认为,碎屑岩储层的物性主要受沉积相和成岩作用的控制^[3~9]。尽管前人探讨过徐家围子断陷深层成岩作用对储层物性和含油气性的影响^[1,10~11],但在致密砂岩气的实际勘探中,人们仍主要应用层序地层学的方法预测有利的沉积相带和砂体,并以此预测天然气聚集的有利地区^[12,13]。这种勘探方法在徐家围子致密砂岩气的勘探中效果并不理想,尚未取得重大突破。本文试图综合考虑沉积相和成岩作用对储层物性的影响,应用成岩作用数值模拟技术,编绘成岩阶段预测图,通过叠合成岩阶段预测图和沉积相图,预测登娄库组二段致密砂岩有利储层发育区,以期徐家围子断陷乃至我国其他盆地致密砂岩气的勘探提供一种研究方法。

1 区域地质概况

松辽盆地位于我国东北部,是一个大型中、新生代陆相沉积盆地,自下而上依次发育白垩系、古近系、新近系和第四系。白垩系厚度最大,是松辽盆地勘探开发的主要目的层段,自下而上分为火石岭组(K_1h)、沙河子组(K_1sh)、营城组(K_1yc)、登娄库组(K_1d)、泉头组(K_2q)、青山口组(K_2qn)、姚家组(K_2y)、嫩江组(K_2n)、四方台组(K_2s)和明水组(K_2m)。在松辽盆地,一般将泉头组二段以下、埋深大于 2500 m 的地层称为深层^[13]。徐家围子断陷位于松辽盆地北部古中央隆起带东侧,有利勘探面积约 4749.9 km²,是松辽盆地深层勘探程度最高的一个含气断陷。根据其构造特征,进一步分为徐西坳陷、徐东坳陷、徐东斜坡和安达-升平隆起。深层烃源岩主要发育于沙河子组煤系地层^[14],有机质类型主要为 III 型和 II b 型干酪根,镜质组反射率(R_o)平均为 2.62%,已达过成熟阶段。登娄库组的砂岩储层孔隙度平均值低于 10.0%,渗透率平均值低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的致密砂岩^[6]。

2 沉积相对储层物性的影响

登娄库组沉积早期,在松辽盆地北部徐家围子地区由断陷沉积转化为坳陷沉积,总体表现为河流-三角洲-湖泊沉积体系共存(图 1)^[15]。统计表明:沉积相对致密砂岩储层的物性具有明显的控制作用(表 1),332 件孔隙度和 164 件渗透率的统计结果表

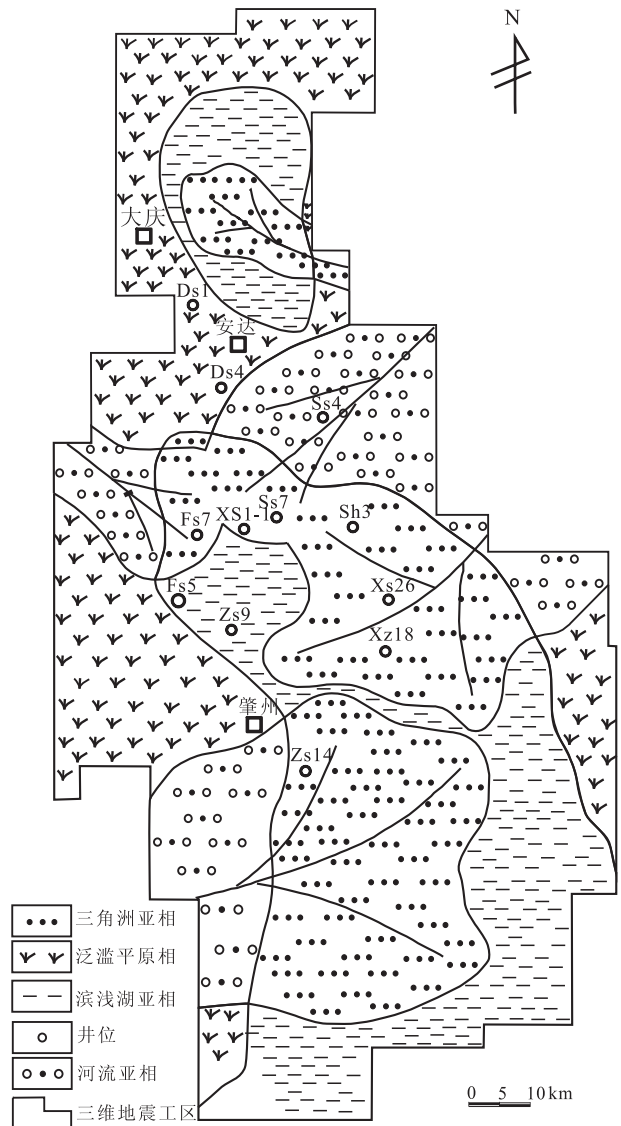


图 1 徐家围子断陷登二段沉积相图^[15]

Fig. 1 Sedimentary facies of the K_1d_2 in the Xujiaweizi Rift Depression^[15]

表 1 登二段沉积相对储层物性的控制作用

Table 1 The effects of sedimentary facies on the reservoir property of the K_1d_2

沉积(亚)相	孔隙度(%)	渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	储层类型
三角洲相	0.7~9.4 5.17(136)	0.03~5.35 0.32(64)	III
河道亚相	0.77~11.2 4.37(109)	0.04~6.82 0.22(49)	
滨浅湖亚相	2~7 3.97(7)	0.01~0.08 0.04(6)	IV
泛滥平原亚相	1.2~8.7 3.74(80)	0.01~1.56 0.08(45)	

注:横线上、下分别为范围值和平均值,括号内为统计样品数

明,登娄库组二段(简称登二段)三角洲相砂体和河流亚相砂体的物性相对较好,泛滥平原砂体和滨浅湖砂体的物性较差,三角洲相、河道亚相、滨浅湖相、

泛滥平原亚相砂体的孔隙度分别为5.17%、4.37%、3.97%、3.74%；渗透率分别为 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。表1中的砂岩储层分类方案，采用了大庆勘探开发研究院提出的松辽盆地天然气砂岩储层分类方案^[16]，该方案根据松辽盆地深层天然气勘探实践，将致密砂岩储层又细分为4类：I类为中高产气水层，孔隙度 $\geq 8.00\%$ ，渗透率 $\geq 1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；II类为中低产气水层，孔隙度为 $8.00\% \sim 5.50\%$ ，渗透率为 $1.00 \times 10^{-3} \sim 0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；III类为低产气水层或干层，孔隙度为 $5.50\% \sim 4.00\%$ ，渗透率为 $0.2 \times 10^{-3} \sim 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；IV类为干层，孔隙度 $\leq 4.00\%$ ，渗透率 $\leq 0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。如不考虑埋深和成岩作用的影响，整体上登二段三角洲相砂体和河流亚相砂体属于III类储层，泛滥平原亚相和滨浅湖相砂体属于IV类储层。由上可见，储层物性主要受沉积环境的控制与影响，水动力较强环境下形成的河道亚相和三角洲相砂体的物性，比水动力相对较弱的泛滥平原相和滨浅湖亚相砂体的物性好。而且在河流-三角洲沉积体系中，由于三角洲砂体的颗粒搬运距离比河流更远，分选磨圆更好，所以三角洲相砂体的物性比河流更好一些。

3 成岩作用对储层物性和含气性的控制

我国现行的石油行业标准(SY/T5477-2003)碎屑岩成岩阶段划分规范^[17]，将早成岩阶段和中成岩阶段A期划分得比较详细，在中浅层碎屑岩的成岩阶段划分和储层地质研究中，得到了广泛的应用。为了更详尽地研究碎屑岩成岩作用对徐家围子断陷深层致密砂岩储层物性的影响，笔者在现行中国石油与天然气行业成岩阶段划分规范的基础上，将徐家围子断陷深层的碎屑岩成岩作用细分为早成岩阶段A期、B期，中成岩阶段A₁亚期、A₂亚期、B₁亚期、B₂亚期、晚成岩阶段A期、B期^[18]。徐家围子断陷碎屑岩深层(埋深 $>2500\text{ m}$)的成岩作用很强，已进入中成岩阶段B期和晚成岩阶段，在断陷中心则可能进入变质阶段。登娄库组仅在盆地边部埋深较浅，目前处于中成岩阶段A期。

统计表明，成岩作用对松辽盆地深层致密砂岩储层的物性具有非常明显的控制作用，尽管压实作用和胶结作用使储层孔隙度减小，溶蚀作用使储层孔隙度增加，但总的来看，随着埋深的增加，成岩作用增强，物性变差(表2)。在中成岩阶段B₁亚期、

B₂亚期、晚成岩阶段A期登二段致密砂岩储层的孔隙度分别为5.12%、3.59%、2.63%，渗透率分别为 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。如果不考虑沉积相的影响，总体上登二段处于中成岩阶段B₁阶段的砂体属于III类储层，而处于中成岩阶段B₂亚期和晚成岩阶段的砂体属于IV类储层。

表2 登二段成岩作用对储层物性的控制作用

Table 2 The effects of diageneses on the reservoir properties of the K₁d₂

成岩阶段	孔隙度(%)	渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	储层类型
中成岩阶段	1.2~11.1	0.01~6.82	III
B ₁ 亚期	5.12(209)	0.26(98)	
中成岩阶段	0.7~11.2	0.01~5.14	IV
B ₂ 亚期	3.59(116)	0.12(60)	
晚成岩阶段	2.2~4	0.01~1.14	
A期	2.63(6)	0.07(6)	

注：横线上、下分别为范围值和平均值，括号内为统计样品数

成岩作用不但对徐家围子断陷深层致密砂岩储层的物性具有明显的控制作用，而且对储层的含气性也有一定影响。油气测试结果统计表明，工业气层和低产气层主要分布在中成岩阶段A₂亚期-中成岩阶段B₂亚期(图2)，这说明成岩作用对储层的含气性具有明显的控制作用，但处于中成岩阶段A₂亚期-中成岩阶段B₂亚期的储层未必一定含气，也有水层发育，这意味着除了成岩作用之外，还有其他因素影响致密砂岩储层的含气性。

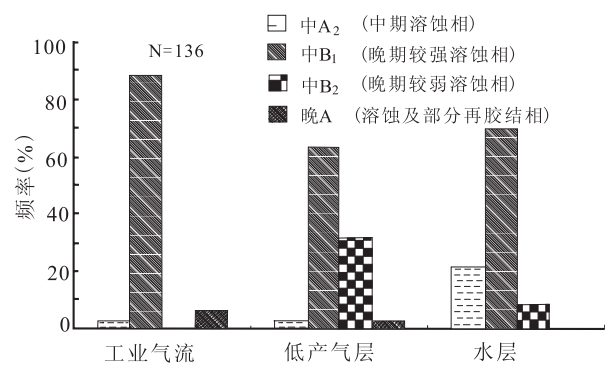


图2 成岩作用对致密砂岩含气性的影响

Fig. 2 The effects of diageneses on the gas-bearing property of the tight sandstones

4 成岩作用数值模拟与成岩阶段预测

4.1 成岩阶段预测基本原理

为了定量研究成岩作用对储层物性的影响，本文综合考虑温度、时间、压力和流体对成岩作用的影响，对成岩阶段划分常用、且能定量模拟的成岩指标古地温(T)、镜质组反射率(R_o)、甾烷异构化指数

(SI)(C_{29} 甾烷 $S/R+S$)、伊/蒙混层中蒙皂石层的含量(S)、自生石英含量(V_q),分别就单项成岩作用随时间的变化规律进行数值模拟^[19~28],并用现今各成岩指标的实测数据标定模拟值,使相对误差 $<5\%$,构造成岩指数 I_D ,在时空领域内,由计算机自动划分成岩阶段,进行大尺度的成岩作用模拟:

$$I_D(x, y, z, t) = a_1 T(x, y, z, t)/T_B + a_2 R_o(x, y, z, t)/R_B + a_3 [100 - S(x, y, z, t)]/(100 - S_B) + a_4 SI(x, y, z, t)/SI_B + a_5 V_q(x, y, z, t)/V_B \quad (1)$$

式中: x, y, z 为三维空间坐标; t 为时间(Ma); T_B, R_B, S_B, SI_B, V_B 分别为 T, R_o, S, SI, V_q 在中成岩阶段 B_2 末的值,分别为 $175^\circ\text{C}, 2.0\%, 5\%, 0.56, 12\%$ 。 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为权系数,其和为 1.0。

根据各指标在成岩阶段的重要性,分别取不同的权值 R_o 。是成岩阶段划分最重要的指标,具有灵敏度高、实测数据丰富、在各沉积盆地中可比性强等优点,所以该指标所占的权重最大,取 0.6; T 和粘土矿物转化(S) 与成岩作用的关系也比较密切,取权重为 0.15;甾烷异构化反应(SI) 和自生石英含量(V_q) 在深层所受的影响因素相对较多,尤其是自生石英的形成除受时温影响外,还受外来流体性质的影响,因此取其权值相对较低,均为 0.05。

将式(1)中 T, R_o, SI, S, V_q 分别取其它各成岩阶段末期的界限值,即可得到徐家围子断陷深层不同成岩阶段对应的 I_D 值^[18]:早成岩阶段 A 期、B 期、中成岩阶段 A_1 亚期、 A_2 亚期、 B_1 亚期、 B_2 亚期、晚成岩阶段 A 期和 B 期末的 I_D 值分别为 0.24、0.35、0.45、0.71、0.84、1.00、1.47、1.68。当 $I_D > 1.68$ 时,就进入变质阶段。

通过成岩作用数值模拟,使碎屑岩成岩作用的研究由定性发展为定量,更重要的是可以在平面上预测成岩阶段的分布规律,为有利储层预测和勘探目标确定提供科学依据。

4.2 登二段成岩阶段预测

本文首先以徐家围子断陷深层的地震解释成果和钻井资料为基础,建立了徐家围子断陷成岩作用数值模拟网络,网络中各模拟点的间距为 1 km,无井点数据取自三维地震解释数据;然后通过模拟各点不同地质时期的 $T, R_o, S\%, V_q\%$ 随时间的变化规律,计算 I_D ,得到研究目的层不同地质时期的 I_D 等值线。

图 3 是现今徐家围子断陷登二段底成岩指数 I_D 等值线和成岩阶段预测图。由图可见,从断陷边部到中心,随埋深的增加,登二段的成岩作用增强,

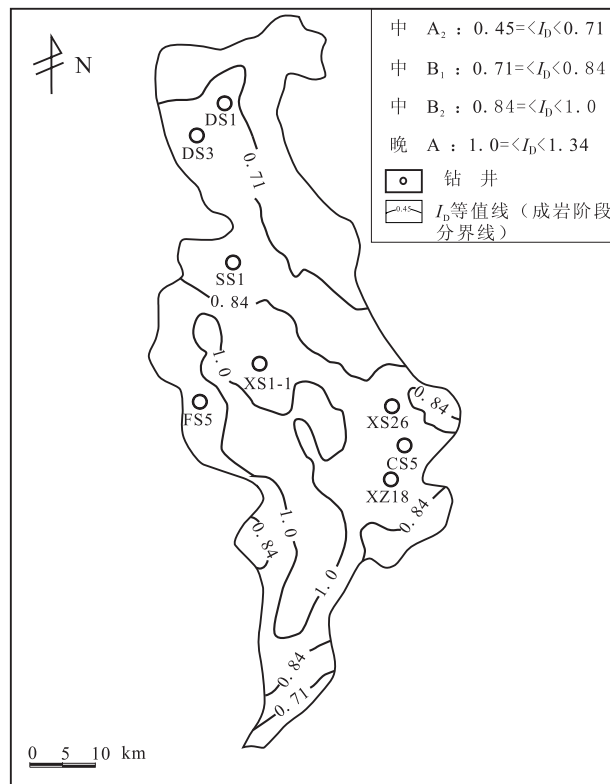


图 3 登二段 I_D 等值线与成岩阶段预测图

Fig. 3 The isopleth of I_D and the predicted diagenetic stages of the member 2 of the Denglouku Formation

成岩作用主要受埋深的控制。从断陷边部到中央,碎屑岩的成岩作用从中成岩阶段 A_2 亚期,经中 B_1, B_2 亚期,到晚成岩阶段 A 期。在徐家围子断陷边部南北两端,登二段埋藏相对较浅, $I_D < 0.71$, 目前处于中成岩阶段 A_2 亚期(图 3), $R_o = 0.7\% \sim 1.3\%$, 有机质进入大量生烃成熟阶段,在生烃同时,还生成大量有机酸,这些都溶蚀储层形成次生孔隙。在盆地 $0.71 \leq I_D < 0.84$ 的地区,登二段砂岩进入中成岩阶段 B_1 亚期,深层富含 III 型干酪根的烃源岩仍可产出大量有机酸,溶蚀储层,形成大量次生孔隙。处于这一成岩阶段致密砂岩的孔隙度平均为 5.12% , 渗透率平均为 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 仍有利于天然气的聚集。在断陷西南部 $0.84 \leq I_D < 1.0$ 的地区,登二段处于中成岩阶段 B_2 亚期,溶蚀作用减弱,但储集性能仍然较好。储层的孔隙度平均为 3.59% , 渗透率平均为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在断陷中心,成岩作用较强, $I_D \geq 1.0$, 登二段进入晚成岩阶段 A 期,溶蚀作用进一步减弱,胶结作用增强,物性变差,砂岩储层的孔隙度平均为 2.63% , 渗透率平均为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总之,从盆地边部到中央,随埋深和成岩作用的增强,储层孔隙度和渗透率降低。

5 有利储层发育区预测

5.1 成岩作用和沉积相对登二段储层物性的综合影响

在储层地质研究中,人们常根据储层的孔隙度和渗透率,亦即物性,对储层分类,1997年中国石油与天然气总公司颁布了中华人民共和国石油与天然气行业有关储层的物性分类标准^[29]。影响碎屑岩储层孔隙度和渗透率的地质因素主要有沉积相、成岩作用^[3~5,8,30,31]。自然界有利沉积相的砂体处于成岩作用较弱的阶段,可以形成有利的储层;不利沉积相的砂体处于成岩作用较强的阶段,则形成质量很差的储层,而不同类型沉积相的砂体处于不同的成岩阶段的就可能形成不同的储层。为了综合研究沉积相和成岩作用对储层物性的影响,更精确地确定不同成岩阶段和沉积相致密砂岩储层的储集性能,本文分成岩阶段和沉积相统计了登二段致密砂岩的孔隙度和渗透率(表3)。这样就可以更好地揭示沉积相和成岩作用对储层物性的影响,其原理就像数学分析中求多元函数偏导数一样,固定其中的一个变量,单独考虑另一个变量对函数的影响。由表3可见:

(1)徐家围子断陷登二段砂岩的孔隙度平均值小于6.00%,渗透率平均值小于 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,无论沉积相的砂体处于何种成岩阶段,整体上均属于致密砂岩。

(2)沉积相对登二段致密砂岩储层的物性具有明显影响。在同一成岩阶段,三角洲相砂体的物性比河流亚相好,滨浅湖亚相砂体的物性比泛滥平原亚相好。现今登二段滨浅湖亚相和泛滥平原亚相的砂岩无论是处于中成岩阶段B₁亚期,还是B₂亚期,平均孔隙度都小于4.00%,属于IV类砂岩,不能产出工业气流。如果不考虑沉积相对储层物性的影响,在中成岩阶段B₂亚期,登二段砂体整体上属于IV类储层(表2),但如果考虑沉积相的影响,在中成岩阶段B₂亚期,三角洲相与河道亚相的砂体就属于III类储层,可能产出工业气流(表3)。

(3)成岩作用对登二段致密砂岩储层的物性和类型具有重要的控制作用。随成岩作用的增强,储层物性变差。例如,当三角洲相砂体分别处于中成岩阶段B₁亚期、中成岩阶段B₂亚期、晚成岩阶段A期时,就依次为II类、III类、IV类储层(表3),其中II、III类储层经压裂改造后,可以产出工业气流,但IV类储层为干层。进入晚成岩阶段A期之后,即使三角洲相砂体也属于IV类储层。

表3 徐家围子断陷登二段砂岩储层物性影响因素与分类表

Table 3 The controlling factors and the classification of the sandstone reservoir properties of the member 2

成岩阶段	沉积相	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	储层类型
中成岩阶段	三角洲相	$\frac{2 \sim 8.9}{5.99(99)}$	$\frac{0.66 \sim 5.35}{0.74(46)}$	II
	B ₁ 亚期	$\frac{2 \sim 11.1}{5.2(50)}$	$\frac{0.04 \sim 6.82}{0.25(18)}$	
中成岩阶段	三角洲相	$\frac{0.77 \sim 11.2}{4.33(58)}$	$\frac{0.04 \sim 5.14}{0.18(31)}$	III
	B ₂ 亚期	$\frac{0.7 \sim 9.4}{4.08(31)}$	$\frac{0.03 \sim 2.75}{0.16(12)}$	
中成岩阶段	滨浅湖相	$\frac{3 \sim 4.4}{3.7(2)}$	$\frac{0.01 \sim 0.07}{0.04(2)}$	IV
	B ₁ 亚期	$\frac{1.2 \sim 8.7}{3.51(58)}$	$\frac{0.02 \sim 1.56}{0.11(32)}$	
中成岩阶段	滨浅湖相	$\frac{1.9 \sim 8.1}{3.55(22)}$	$\frac{0.01 \sim 0.72}{0.05(13)}$	
	B ₂ 亚期	$\frac{2 \sim 7}{3.05(5)}$	$\frac{0.01 \sim 0.08}{0.04(4)}$	
晚成岩阶段	三角洲相	$\frac{2.2 \sim 4}{2.63(6)}$	$\frac{0.01 \sim 1.14}{0.07(6)}$	A期

注:横线上、下分别为范围值和平均值,括号内为统计样品数

(4)储层物性是沉积相和成岩作用综合影响的结果,随成岩作用的增强和沉积相的变化,在徐家围子断陷登二段形成了从II类到IV类三种不同物性类型的致密砂岩储层(表3)。

5.2 登二段储层平面分类与有利储层预测

由于碎屑岩储层的物性主要受成岩作用和沉积相的影响,因此可认为,处于相同成岩阶段、发育相同沉积相储层的物性相近,储层类型和质量相同。基于这一基本原理,本文通过叠合徐家围子断陷登二段沉积相图(图1)和成岩阶段预测图(图3),依据表3中不同沉积相与成岩阶段所对应的储层类型,预测了徐家围子断陷登二段砂岩储层的类型(图4),将致密砂岩在平面上又进一步分为三类。

只有三角洲相的砂体处于中成岩阶段B₁亚期时,才可能形成II类储层,该类储层的物性较好,但在徐家围子断陷登二段分布面积较小(图4)。III类储层在登二段分布面积最大,储层物性较差,处于中成岩阶段B₁亚期的河道亚相和处于中成岩阶段B₂亚期的河道亚相、三角洲相均属于III类储层(表3)。登二段目前已发现的工业气流井绝大多数分布在这类储层中,例如:XS6-101井、FS5井、SS2-7井、XS1-1井等工业气流井分布在该区域。因此,今后应加大这一区域的勘探力度。IV类致密砂岩储层要

么是成岩作用太强,目前已进入晚成岩阶段 A 期;要么就是沉积相较差、而且成岩作用较强,目前处于中成岩阶段 B 期的泛滥平原亚相和滨浅湖亚相砂体,储层物性明显变差,含气性较差,仅有 1 口工业气流井(DSX9)和 1 口低产气流井(WS501)。

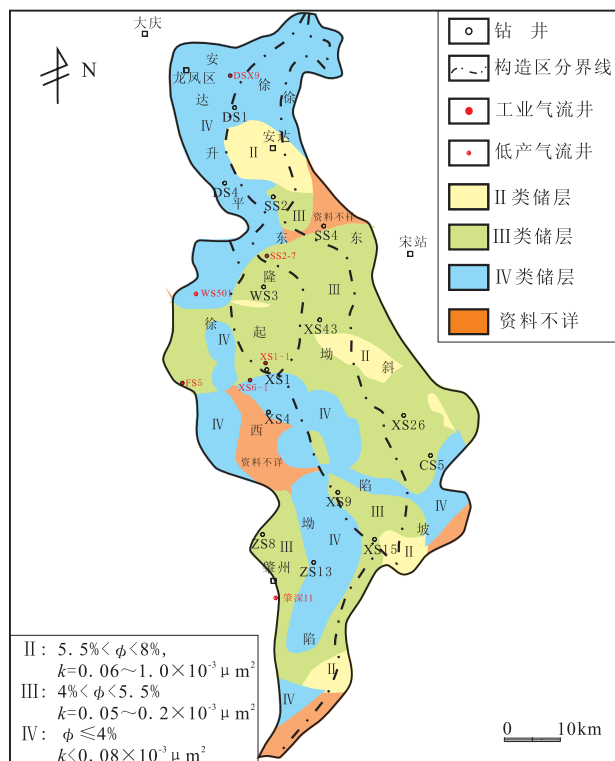


图 4 徐家围子断陷登二段储层类型预测图

Fig. 4 The predicted reservoir types of the member 2 of the Denglouku formation in the Xujiaweizi rift depression

需要补充说明的是,储层类型和有利储层的预测结果仅适用于徐家围子断陷登二段致密砂岩,但本文的研究方法可以推广到其他沉积盆地致密砂岩有利储层的预测。

6 结 论

(1)徐家围子断陷成岩作用对致密砂岩储层的物性和含气性具有明显的控制作用,储层进入晚成岩阶段 A 期后,就变为 IV 类储层,不能产出工业气流。

(2)登二段致密砂岩储层最有利的沉积相是三角洲相和河流亚相。在中成岩阶段 B₂ 亚期,只有三角洲相和河流亚相的砂体可能产出工业气流。

(3)通过叠合沉积相图和成岩阶段预测图,可以预测登二段储层的类型,将致密砂岩在平面上分为 II、III、IV 类三种类型,有利的储层包括 II、III 类储层,工业气流井主要分布在这两类储层中。

参考文献 (References):

- [1] 王成, 马明侠, 张民志, 邵红梅, 洪淑新, 刘杰, 李茹. 松辽盆地北部深层天然气储层特征[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 25-28.
Wang Cheng, Ma Mingxia, Zhang Minzhi, Shao Hongmei, Hong Shuxin, Liu Jie, Li Ru. Characteristics of deep gas reservoirs in the northern Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 25-28. (in Chinese with English abstracts)
- [2] 冯子辉, 印长海, 齐景顺, 董景海. 大型火山岩气田成藏控制因素研究—以松辽盆地庆深气田为例[J]. 岩石学报, 2010(1): 21-32.
Feng Zihui, Yin Changhai, Qi Jingshun, Dong Jinghai. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in large volcanic gas field: A case study of the Qingshen gas field in the Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010(1): 21-32. (in Chinese with English abstracts)
- [3] Ehrenberg S N, Nadeau P H, Steen O. A megascale view of reservoir quality in producing sandstones from the offshore Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(2): 145-164.
- [4] Ma Y Z, Seto A, Gomez E. Depositional facies analysis and modeling of the Judy Creek reef complex of the Upper Devonian Swan Hills, Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1235-1256.
- [5] Stacy A C, Ball N H, Hunt L E. Reservoir characterization and facies prediction within the Late Cretaceous Doe Creek Member, Valhalla field, west-central Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2009, 94(1): 1-25.
- [6] 刘吉余, 马志欣, 孙淑艳. 致密含气砂岩研究现状及发展展望[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 316-319.
Liu Jiyu, Ma Zhixin, Sun Shuyan. Present research situation and prospects of tight gas sands[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 316-319. (in Chinese with English abstracts)
- [7] Meng Y L, Liang H W, Meng F J, Wu H Y, Wang C, Xiu H W, Zhang A D, Li Y G, Guo R X. Study on the distributions and causes of the anomalously high porosity zones in the middle-shallow horizons of the northern Songliao Basin[J]. Petroleum Science, 2010, 12(1): 97-106.
- [8] 应凤祥, 罗平, 何东博. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩作用数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 26-47.
Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo. Diageneses and diagenetic numerical modeling of clastic rock reservoir in the oil and gas bearing basin of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 26-47. (in Chinese)
- [9] 孟元林, 姜文亚, 刘德来, 牛嘉玉, 孙洪斌, 肖丽华, 施尚明, 修洪文. 孔隙度预测与孔隙演化史模拟方法探讨——以辽河拗陷双清地区为例[J]. 沉积学报, 2008, 26: 780-788.
Meng Yuanlin, Jiang Wenya, Liu Delai, Niu Jiayu, Sun Hongbin, Xiao Lihua, Shi Shangming, Xiu Hongwen. Reservoir porosity prediction and its evolving history modeling: A case study of Shuangqing region in the Liaohe west depression

- [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 780—788. (in Chinese with English abstracts)
- [10] 邵红梅, 刘招君, 王成, 冯子辉, 洪淑新. 松辽盆地北部深层砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. *世界地质*, 2006, 24(1): 58—62.
Shao Hongmei, Liu Zhaojun, Wang Cheng, Feng Zihui, Hong Shuxin. Diagenesis and pore evolution of deep sandstone in north of Songliao Basin[J]. *Global Geology*, 2006, 24(1): 58—62. (in Chinese with English abstracts)
- [11] 刘万洙, 庞彦明, 吴河勇, 高有峰, 门广田, 任延广. 松辽盆地深层储层砂岩中火山碎屑物质在成岩阶段的变化与孔隙发育[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 37(4): 698—702.
Liu Wanzhu, Pang Yanming, Wu Heyong, Gao Youfeng, Men Guangtian, Ren Yanguang. Relationship between pore-space evolution and deeply buried alteration during diagenetic stage of the volcanic fragments in reservoir greywacke from the Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 37(4): 698—702. (in Chinese with English abstracts)
- [12] 黄薇, 陈树民, 吴河勇, 冯子辉, 刘振宽, 门广田. 技术进步对大庆油气勘探持续发展的作用[J]. *中国石油勘探*, 2009, (5): 20—27.
Huang Wei, Chen Shumin, Wu Heyong, Feng Zihui, Liu Zhenkuan, Men Guangtian. Technological progress boosts sustainable development of oil and gas exploration in Daqing Oilfield[J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, (5): 20—27. (in Chinese with English abstracts)
- [13] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Hou Qijun, Feng Zhiqiang, Feng Zihui. Continental petroleum geology of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [14] 付广, 王有功. 火山岩天然气成藏要素时空匹配及对成藏的控制作用: 以徐家围子地区深层为例[J]. *地球科学*, 2008, 33(3): 342—348.
Fu Guang, Wang Yougong. Time and space matching relation among accumulation essential factors of gas reservoirs in volcanic rock and its controlling to gas accumulation: A case study of deep strata of Xujiaweizi region[J]. *Earth Science*, 2008, 33(3): 342—348. (in Chinese with English abstract)
- [15] 姜传金. 徐家围子连片三维区深层构造解释与储层预测研究报告[R]. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 2008.
Jiang Chuanjin. Research report of deep structure interpretation and reservoir prediction in the three dimensional seismic prospecting area of Xujiaweizi Rift Depression[R]. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oil Field Company Ltd., 2008. (in Chinese)
- [16] 王成. 松辽盆地北部大庆长垣及以东地区深层碎屑岩储层特征研究[R]. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 2005.
Wang Cheng. The research on deep clastic rock reservoir characteristics to the east of Daqing placanticline in the northern Songliao Basin [R]. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oil Field Company Ltd., 2005. (in Chinese)
- [17] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 林西生. SY/T5477-2003. 中华人民共和国石油天然气行业标准碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Ying Fengxiang, He Dongbo, Long Yumei, Lin Xisheng. SY/T5477-2003. The division of diagenetic stages in clastic rocks (Petroleum industry criterion in P. R. C.) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [18] 孟元林, 胡安文, 乔德武, 解习农, 潘雪梅, 王建伟, 田伟志. 松辽盆地徐家围子断陷深层区域成岩规律和成岩作用对含气性的控制[J]. *地质学报*, 2012, 86(2): 325—334.
Meng Yuanlin, Hu Anwen, Qiao Dewu, Xie Xinong, Pan Xuemei, Wang Jianwei, Tian Weizhi. Regional diagenetic regularity and control action of diageneses on the gas-bearing situation of the deep Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 325—334. (in Chinese with English abstract)
- [19] 肖丽华, 孟元林, 王建国, 王子文, 周书欣. 碎屑岩成岩温度的数值模拟和成岩阶段的预测[J]. *中国海上油气(地质)*, 1995, 9(6): 389—394.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Wang Jianguo, Wang Ziwen, Zhou Shuxin. Modeling of diagenetic temperature and lateral prediction of diagenetic stages for clastic rocks[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1995, 9(6): 389—394. (in Chinese with English abstract)
- [20] Mackenzie A S, Mckenzie D. Isomerization and aromatization of hydrocarbon in sedimentary basin formed by extension[J]. *Geo. Mag.*, 1983, 120: 417—470.
- [21] Sweeny J J, Burham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 1559—1570.
- [22] 肖丽华, 孟元林, 张连雪, 韦阿娟, 李军, 张文才, 殷秀兰, 王志国. 超压地层中镜质组反射率的计算[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(1): 9—12.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Zhang Lianxue, Wei Ajuan, Li Jun, Zhang Wencai, Yin Xiulan, Wang Zhiguo. Vitrinite reflectance modeling in the over pressured formations[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2005, 32(1): 9—12. (in Chinese with English abstract)
- [23] Walderhaug O. Modeling quartz cementation and porosity in Middle Jurassic Brent Group sandstones of the Kvitebjørn field northern North Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84: 1325—1339.
- [24] 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 孙洪斌, 殷秀兰, 肖丽华, 高建军, 胡宝林. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 461—467.
Meng Yuanlin, Huan Wenbiao, Wang Yuechuan, Sun Hongbin, Yin Xiulan, Xiao Lihua, Gao Jianjun, Hu Baolin. A kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 461—467. (in Chinese with English abstract)
- [25] Meng Y L, Yang J S, Xiao L H, Li C, Tan X Q. Diagenetic

- evolution modeling system and its application[A]. Hao D H [S]. Treatises of X III Kerulien international conference of geology[C]. Shijiazhuang, P. R. China: Shijiazhuang University of Economics[C]. 2001: 25-27.
- [26] 肖丽华, 孟元林, 牛嘉玉, 王志国, 殷秀兰, 祝文亮, 张连雪, 王昕. 歧口凹陷沙河街组成岩史分析和成岩阶段预测[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 346-362.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Niu Jiayu, Wang Zhiguo, Yin Xiulan, Zhu Wenliang, Zhang Lianxue, Wang Xin. Diagenetic history and diagenetic stages prediction of ShanHeJie formation in the Qikou sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(3): 346-362. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孟元林, 李娜, 黄文彪, 肖丽华, 刘德来, 张清华, 孙洪斌, 修洪文, 高建军. 辽河坳陷西部斜坡带南段沙三段成岩相分析与优质储层预测[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 33-41.
Meng Yuanlin, Li Na, Huang Wenbiao, Xiao Lihua, Liu Delai, Zhang Qinghua, Sun Hongbin, Xiu Hongwen, Gao Jianjun. Diagenetic facies analyses and high-quality reservoir predictions in the southern part of the western slope of Liaohe Depression[J]. J. Palaeo-geography, 2008, 10(1): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [28] 孟元林, 王又春, 姜文亚, 张景军, 刘德来, 牛嘉玉, 孙洪斌, 施尚明, 古团, 修洪文. 辽河坳陷双清地区古近系沙河街组四段孔隙度演化模拟[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 225-232.
Meng Yuanlin, Wang Youchun, Jiang Wenya, Zhang Jingjun, Liu Delai, Niu Jiayu, Sun Hongbin, Shi Shangming, Gu Tuan, Xiu Hongwen. Porosity evolution simulation of the Member 4 of Shahejie Formation of Paleogene in Shuangqing area, Liaohe Depression[J]. J. Palaeo-geography, 2009, 11(2): 225-232. (in Chinese with English abstract)
- [29] 赵澄林, 胡爱梅, 陈碧珏, 梁官忠. 油气储层评价方法(中华人民共和国石油与天然气行业标准 SY/T 6285-1997)[S]. 北京: 石油工业出版社, 1997, 8-9.
Zhao Chenglin, Hu Aimei, Chen Bijue, Liang Guanzhong. Evaluating methods of oil and gas reservoirs(Petroleum industry criterion in P. R. C. SY/T 6285-1997) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 8-9. (in Chinese)
- [30] 孟元林, 高煜婷, 吴河勇, 王成, 修洪文, 张安达, 李亚光, 姜文亚. 松辽盆地北部中浅层区域成岩规律及其影响因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 97-106.
Meng Yuanlin, Gao Yuting, Wu Heyong, Wang Cheng, Xiu Hongwen, Zhang Anda, Li Yaguang, Jiang Wenya. The regional regular diagenetic characteristics and controls of the middle-shallow horizons in the northern Songliao Basin[J]. J. Palaeo-geography, 2010, 12(1): 97-106. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 梁伯勋, 王建伟, 潘雪梅, 田伟志, 王维安, 丁桂霞, 周振东, 肖丽华. 盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 75-84.
Meng Yuanlin, Liu Wenhui, Meng Fanjin, Wang Jianwei, Pan Xuemei, Tian Weizhi, Wang Weian, Ding Guixia, Zhou Zhendong, Xiao Lihua. Distribution and causes of the anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi Fault Depression[J]. J. Palaeo-geography, 2011, 13(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)
-
- (上接第 353 页)
- [13] 陈江峰, 江博明. 钕、锶、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[A]. 郑永飞. 化学地球动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 262-287.
Chen Jiangfeng, Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotopic tracer and continental crust evolution of SE China [A]. Zheng Yongfei. Chemical geodynamics[M]. Beijing: Science Press, 1999: 262-287. (in Chinese)
- [14] Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1978, 37: 380-392.
- [15] 刘昌实, 朱金初, 沈渭州, 徐士进. 华南陆壳改造花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. 地质学报, 1990, 64(1): 43-52.
Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, Xu Shijin. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China[J]. Acta Geologica Sinica, 1990, 64(1): 43-52. (in Chinese with English abstract)