

文章编号: 1000-0550(2013)03-0509-07

浊沸石溶蚀过程的热力学计算与次生孔隙发育带预测^①

——以徐家围子断陷深层为例

孟元林¹ 梁洪涛¹ 魏巍¹ 修洪文² 李亚光² 邵红梅² 胡安文¹ 张磊¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

摘要 浊沸石是徐家围子断陷深层砂砾岩中广泛分布的一种胶结物,被有机酸溶蚀后,形成大量次生孔隙,为油气的聚集提供了储集空间。为了预测深层次生孔隙发育带的分布,本研究应用热力学计算方法,定量讨论了徐家围子断陷深层营城组砂砾岩中浊沸石的溶解—沉淀过程和次生孔隙的形成机理,并提出了溶解—沉淀指数 DPI 的计算模型,定量表征溶蚀作用的强度。通过叠合 DPI 等值线图和沉积相图,预测了浊沸石溶蚀形成次生孔隙发育带的分布。结果表明,次生孔隙发育带主要分布于 DPI > 2.5 的扇三角洲前缘和辫状河三角洲前缘砂砾岩体中。

关键词 致密砂砾岩 非常规储层 浊沸石 深层 次生孔隙 徐家围子断陷 松辽盆地

第一作者简介 孟元林 男 1960 年出生 博士 教授 储层与石油地质 E-mail: qhdmyl@163.com

通讯作者 魏巍 1988 年出生 石油地质 hunqiu8854@gmail.com

中图分类号 P618.130.2 **文献标志码** A

徐家围子断陷是松辽盆地深层最大的含气断陷,已在营城组砂砾岩中发现了工业气流,并投入开发。但营城组砂砾岩普遍具有埋藏深、温度高、压力大、胶结作用强、物性差的特征^[1],孔隙度为 0.3% ~ 12.6%,平均为 4%,渗透率为 $0.12 \times 10^3 \mu\text{m}^2 \sim 2.82 \times 10^3 \mu\text{m}^2$,平均为 $0.25 \times 10^3 \mu\text{m}^2$,属于致密砂砾岩储层,是一种非常规储层。砂砾岩的原生孔隙很少,天然气主要储存于次生孔隙中,如 WS5 井砂砾岩中获得无阻流量超过百万方的产能^[2],主要孔隙类型为浊沸石胶结物溶孔。浊沸石是徐家围子断陷深层砂砾岩中最广泛发育的一种胶结物^[3],具有遇酸易溶的特点。因此寻找由浊沸石胶结物溶蚀形成的次生孔隙发育带,就成为该断陷下一步天然气勘探的主要方向。在沉积盆地中存在次生孔隙发育带,已成为不争的事实^[4-11]。然而,有关碎屑岩次生孔隙发育带的预测方法仍处于探索之中。目前,人们主要应用成岩作用数值模拟的方法,结合沉积相的研究成果,预测次生孔隙发育带的分布^[6-8,12-14]。本文试图应用热力学方法,通过计算,确定浊沸石在地下溶解—沉淀的状态,结合沉积相的研究成果,预测次生孔隙发育带的分布,为松辽盆地徐家围子断陷深层天然气的勘探提供科学的依据。同时,也为其他发育浊沸石胶结物沉

积盆地的勘探,提供一种新的研究方法。

1 区域地质概况

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 $4\,749.9 \text{ km}^2$ ^[15]。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(图 1)。其深层主要包括泉头组二段以下、埋深大于 2 500 m 的地层^[16],自下而上依次为火石岭组(K_1h)、沙河子组(K_1sh)、营城组(K_1yc)、登娄库组(K_1d)、泉头组一段(K_2q_1)和二段(K_2q_2)地层。营城组的火山岩和砂砾岩中已发现工业气流,是目前徐家围子断陷深层勘探的主要目的层段。营城组从下到上又进一步分为 4 个岩性段,砂砾岩主要发育于营四段。在营四段沉积时期,徐家围子断陷处于断陷发育的主要时期,地形高差大,山地河流携带大量粗碎屑物质从西部和北部两个方向注入断陷湖盆,在西部和西南部地区主要发育扇三角洲沉积,在北部发育辫状河三角洲沉积,半深湖相沉积位于断陷的中心偏西部地区^②(图 1)。徐家围子断陷深层的烃源岩主要发育于沙河子组煤系地层,有机质类型为 III 型和 II b 型干酪根,镜质组反射率为 1.70% ~ 3.56%,平均为 2.62%,已达到了过成熟阶段。

①国家自然科学基金项目(批准号: U1262106)、黑龙江省研究生创新科研项目(YJSCX2011-118HLJ, YJSCX2012-064HLJ)和全国油气资源战略选区调查与评价国家专项(2009GYXQ13)资助

②李广伟. 徐家围子断陷营城组四段地层沉积模式研究[R]. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 2006
收稿日期: 2012-05-23; 收修改稿日期: 2012-08-31

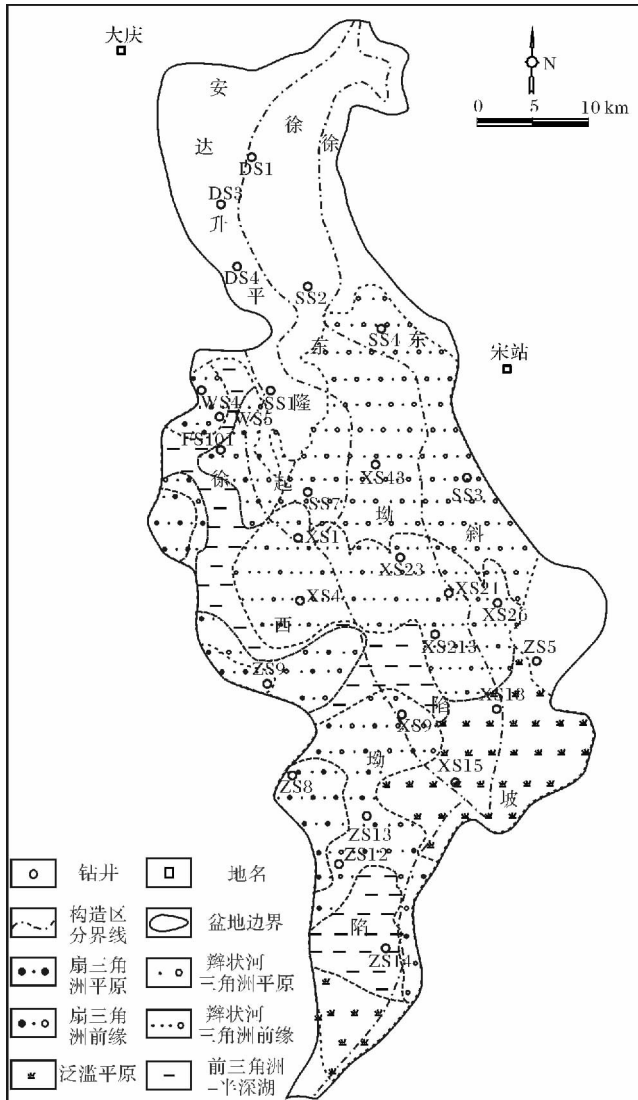


图1 徐家围子断陷营四段沉积相图

Fig. 1 Sedimentary facies of the Member 4 of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression

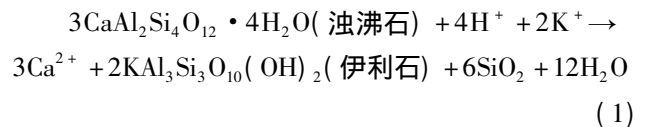
2 浊沸石溶蚀反应的热力学计算原理

浊沸石($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)是一种典型的成岩自生矿物,也是松辽盆地深层最具特色的胶结物。其形成和稳定需要较高的pH值、较低的 CO_2 分压条件,具有遇酸极易溶解的特点^[3,17-19]。目前对浊沸石形成的温度认识与以往有较大不同,美国蒙大拿地区含浊沸石的火山沉积物同页岩和斑脱岩(含有序蒙皂石/伊利石)呈间互层,被作为变质温度 $100 \sim 175^\circ\text{C}$ 的标志。鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石形成于富钠、高pH的孔隙水条件,为早成岩的晚期,包裹体均一温度为 $64 \sim 65^\circ\text{C}$,浊沸石并非一定代表变质矿物^[20]。我们以前的研究表明^[21],松辽盆地北

部浊沸石的形成温度为 $60 \sim 140^\circ\text{C}$, $R_0 = 0.5\% \sim 2.2\%$,相当于中成岩阶段A期—晚成岩阶段,营四段进入中成岩阶段的时间在泉头组沉积末期。由此推测,营四段浊沸石形成的最早时间在泉头期末。

在埋藏成岩的过程中,徐家围子断陷深层碎屑岩的浊沸石胶结物封堵了大量的原生孔隙,破坏了储层的储集物性。徐家围子断陷深层烃源岩主要发育Ⅲ型干酪根,由于Ⅲ型干酪根富含氧原子和含氧基团,在整个成岩演化过程中,脱羧时间较长、生成的有机酸量较大,即使在晚成岩阶段($R_0 > 2.0\%$),仍可脱羧,排放有机酸和 CO_2 ,形成酸性热流体^[8,22],进入储层,降低了地层水的pH,增加了 CO_2 的分压,溶蚀浊沸石胶结物,形成次生溶孔(图2),为油气的聚集提供了储集空间。因此,在埋深较大、成岩作用较强的致密砂砾岩储层中,浊沸石的成岩演化在很大程度上决定了其次生孔隙的分布。

有机酸溶蚀浊沸石的化学反应可用下式表示^[17]:



在热力学研究中,化学反应的吉布斯自由能增量(ΔG)可作为热力学过程进行的方向和限度的判据,以及作为过程不可逆性大小的量度。当 $\Delta G > 0$ 时,化学反应不可能自动发生;当 $\Delta G = 0$ 时,化学反应平衡;当 $\Delta G < 0$ 时,化学反应自动发生(不可逆)。 ΔG 值越小,反应越容易进行。

不同温度、压力条件下,反应物质的吉布斯自由能增量 ΔG ,可用下列方程式计算:

$$\Delta_r G = \Delta_r H^0 - T\Delta_r S^0 + \int_{298.15}^T \Delta_r C_p dT - T \int_{298.15}^T \frac{\Delta_r C_p}{T} dT + \int_{10^5}^p \Delta_r V dp \quad (2)$$

式中 T 为温度, K; p 为压力, MPa; $\Delta_r G$ 为任意 p 、 T 条件下的吉布斯自由能增量变化, kJ/mol,下角标 r 表示反应; $\Delta_r H^0$ 为标准状态下反应进度为1 mol的焓变, kJ/mol; $\Delta_r S^0$ 为标准状态下化学反应进度为1 mol时的熵变, J/molK; $\Delta_r C_p$ 为热容变化, J/molK; $\Delta_r V$ 为体积变化, cm^3/mol 。

由于浊沸石溶蚀反应中有流体相(H_2O)参与,属于固体—流体相反应。对于固体—流体相反应,通常将式(2)中的体积积分项分成固体和流体相处理,即:

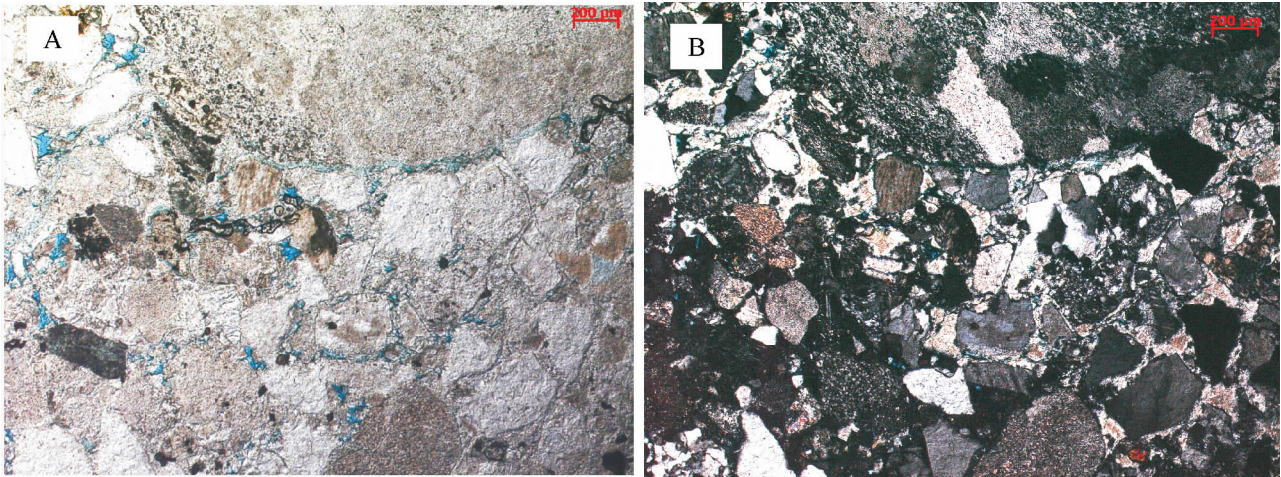


图2 ZS12 井营城组储层溶蚀孔照片

A. ZS12 3511.46m 营城组 浊沸石溶蚀孔 铸体单 5×40; B. ZS12 3511.46m 营城组 浊沸石溶蚀孔 铸体正 5×40;

Fig.2 Typical photos of casting thin sections of the reservoirs of the Yingcheng Formation

$$\Delta_r G = \Delta_r H^0 - T\Delta_r S^0 + \int_{298.15}^T \frac{\Delta_r C_p}{T} dT + \Delta_r V^0 (p - 10^5) + V_B \int_{10^5}^p \Delta_r V_m dp \quad (3)$$

式中 下角标 B 表示反应式中的任一物质; v_B 为该物质的化学计量数; $\Delta_r V^0$ 为标准状态下固体相的体积变化, cm^3/mol ; $\Delta_r V_m$ 为纯流体相的体积变化, cm^3/mol 。

式(3)即为吉布斯自由能增量(ΔG)的基本计算方程^[23]。平衡常数 K 是判断化学反应的程度、预测反应方向的另一个重要的热力学参数,更侧重于衡量反应进行的程度。 K 值越大,反应进行得程度越高,反应越完全;相反, K 值越小,反应进行得越不完全;当 K 值在某一范围恒定时($10^{-3} < K < 10^3$),反应物部分地转化为生成物。

任意温、压条件下,平衡常数 K 可用下式计算^[24]:

$$\log K_0 = - \frac{\Delta G}{RT \ln(10)} \quad (4)$$

式中 $\log K_0$ 表示化学反应处于平衡状态时,反应平衡常数的对数; ΔG 为标准状态下吉布斯自由能增

量 kJ ; R 为摩尔气体常数 $R = 8.314 \text{ J/molK}$ 。

计算中所涉及的热力学参数,详见表 1^[23-27]。以上全部计算,可通过计算机编程实现。

3 计算结果与分析

3.1 浊沸石溶解的热力学过程与次生孔隙形成机理

徐家围子断陷 96 口探井的试油静温数据表明,研究区地温梯度主要分布在 $3.55^\circ\text{C}/100\text{m} \sim 3.99^\circ\text{C}/100\text{m}$ 之间,平均为 $3.83^\circ\text{C}/100\text{m}$,压力系数主要分布在 $0.89 \sim 1.12$ 之间,平均为 1.03 。应用这些温、压参数,本文计算了徐家围子断陷深层浊沸石溶蚀反应的吉布斯自由能增量 ΔG (以下简称 ΔG) 和平衡常数的对数 ($\log K_0$) (图 3,图 4)。

图 3 是浊沸石溶蚀反应的自由能增量 ΔG 和温度的关系曲线。由图可见,当温度 $> 0^\circ\text{C}$ 时, $\Delta G < 0$,溶蚀反应可自行发生。但随地温的增高, ΔG 的值增大。换言之,随埋深和地温的增高,浊沸石溶蚀反应的难度有所增加。

表 1 浊沸石溶解反应有关反应物和生成物的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of the reactant and product of reaction caused by laumontite dissolution

热力学参数	矿物					
	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	SiO_2	H_2O	H^+	K^+
$\Delta_r H_{m0}$ (kJ)	-7233.651	-5972.275	-910.648	-285.830	-251.2	
S_m^0 ($\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$)	485.80	288	41.3	69.91	0	102.5
V_m^0 ($\text{cm}^3\text{mol}^{-1}$)	07.550	140.710	22.688	18.068	09.06	
C_p (J/molK) a	515.47	408.2	46.94	30.5	0	0
b	0.186100	0.110400	0.0343	0.0103	0	0.1556
c	6874000	10640000	1130000	0	0	0

注: 以上参数来自发表的文献及书刊^[23-27]。

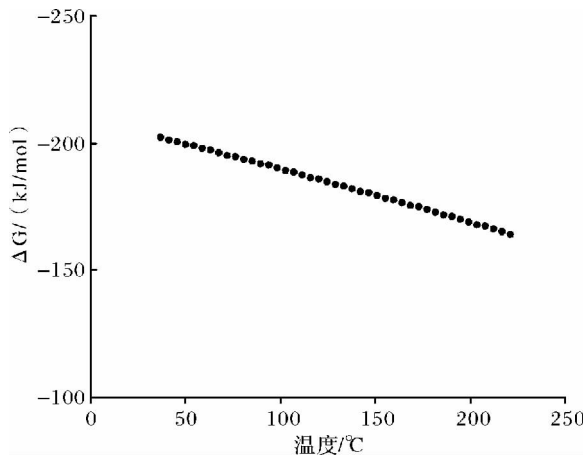


图3 浊沸石溶蚀反应的 ΔG 和温度的关系

Fig. 3 The relationship between ΔG and temperatures for the dissolution reaction of the laumontite

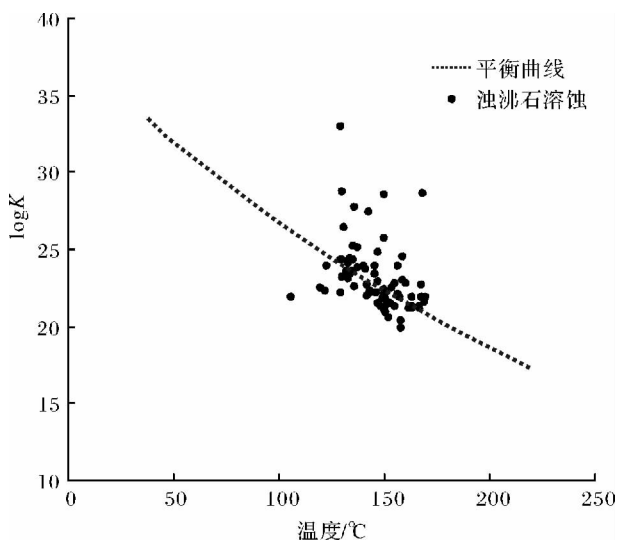


图4 浊沸石溶解—沉淀相图

Fig. 4 Laumontite dissolution - precipitation phase diagram

图4是浊沸石溶解—沉淀相图,横坐标为温度,纵坐标为反应平衡常数对数($\log K$)。图中的虚线表示当浊沸石溶蚀反应处于平衡状态时(浊沸石既不溶解也不沉淀),温度与 $\log K_0$ 的关系, $\log K_0$ 由 ΔG 求出(式4);曲线下方的区域代表浊沸石溶解区,上方的区域代表沉淀区。由图4可见,随着温度的增加, $\log K_0$ 逐渐减小,浊沸石溶解区域的面积减小,浊沸石沉淀区的面积增大。也就是说,随温度的升高,浊沸石的稳定性增高,更易形成胶结物。

需要补充说明的是,图4的 $\log K$ 计算中(式5),包含了地层水中 Ca^{2+} 和 K^+ 的浓度和pH值,因此图4的相图可以适用于不同成岩阶段、不同温度、不同pH值和不同流体中浊沸石溶解和胶结状态的计算,由式(1)可得:

$$\log K = \log \frac{[\text{Ca}^{2+}]^3}{[\text{H}^+]^4 [\text{K}^+]^2} = 3\log [\text{Ca}^{2+}] - 2\log$$

$$[\text{K}^+] + 4\text{pH} \quad (5)$$

式中 $\log K$ 表示任意反应状态下,平衡常数的对数; $[\text{Ca}^{2+}]$ 表示 Ca^{2+} 活度, $[\text{K}^+]$ 表示 K^+ 活度,可应用地层水资料中 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度通过Debye—Huckle活度模型计算得到^[28];pH为地层水的酸碱度。

由式(5)可见,浊沸石在地下的溶解与沉淀是一个可逆反应,地层水中 K^+ 活度越大, Ca^{2+} 活度越小,pH值越小, $\log K$ 越小,浊沸石的溶解反应越容易发生。换言之,在富 K^+ 、贫 Ca^{2+} 的酸性环境中,浊沸石容易溶解,形成次生孔隙;而在贫 K^+ 、富 Ca^{2+} 的碱性环境中,浊沸石容易沉淀,并形成胶结物,堵塞孔隙。

为了定量研究浊沸石的溶解—沉淀状态和溶解程度,本文引入了矿物溶解—沉淀指数DPI(Dissolution—Precipitation Index)的概念:

$$\text{DPI} = \frac{\log K_0 - \log K}{\log K_0} \times 100 \quad (6)$$

由上式可见,当 $\log K > \log K_0$ 时,浊沸石处于沉淀区,此时有 $\text{DPI} < 0$;当 $\log K < \log K_0$ 时,浊沸石处于溶解区,此时有 $\text{DPI} > 0$ 。而且 $\log K$ 越小,DPI越大,浊沸石溶解程度越高,次生孔隙发育越好。

3.2 浊沸石溶解—沉淀指数计算结果分析

为了研究徐家围子断陷营城组浊沸石胶结物的溶蚀作用和次生溶孔的分布规律,本文应用77组地层水的实测 Ca^{2+} 、 K^+ 浓度、pH值和温度,计算了浊沸石溶蚀反应的平衡常数 $\log K$ 和溶解—沉淀指数DPI,并完成了DPI的平面等值线图(图5)。图5中DPI等值线小于0的区域为浊沸石沉淀区,以胶结作用为主;DPI等值线大于0的区域为浊沸石溶解区,以溶解作用为主。由图5可见,在徐东斜坡带北部和徐西拗陷,DPI在2.5~7.5之间,浊沸石溶解程度相对较高。其中WS5、XS4、XS9等天然气发现井所在的区域,浊沸石溶解—沉淀指数较高,溶蚀作用较强。由图5可见,位于深湖相附近的区域(图1),浊沸石溶解—沉淀指数高,次生孔隙可能发育。主要原因是深湖相的烃源岩在生、排烃的同时,排放大量有机酸,溶蚀周围储层中的浊沸石胶结物,形成次生孔隙。

需要补充说明的是,由于本文所计算的是徐家围子断陷深层现今浊沸石溶解和沉淀的状态,并以此研究溶蚀作用形成的次生孔隙、预测次生孔隙发育带的展布,所以计算中只需考虑现今地层水的实测 Ca^{2+} 、 K^+ 浓度、pH值和温度,而可以忽略古代流体的特征

与次生孔隙发育带的发育情况。如果是预测地史时期的次生孔隙发育带,则需要通过流体包裹体分析,测定其中流体的离子成分、浓度及 pH 值。

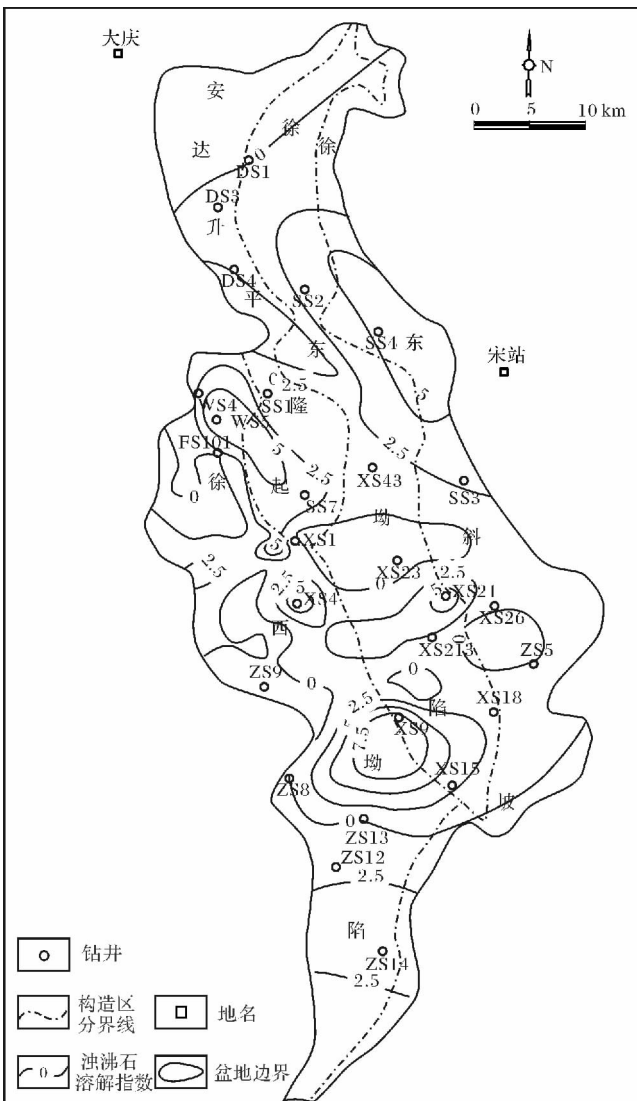


图5 徐家围子断陷营四段浊沸石溶解—沉淀指数等值线图
Fig.5 Laumonite DPI contour map of the Member 4 of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression

4 次生孔隙发育带预测

本文在浊沸石溶解—沉淀指数计算的基础上,结合沉积相的研究成果,通过叠合浊沸石 DPI 指数等值线图(图5)和沉积相图(图1),进一步预测了徐家围子断陷营四段砂砾岩次生孔隙发育的地区(图6)。图中 $DPI \leq 0$ 或无砂体发育的前三角洲和深湖相区域为次生孔隙不发育带,这一地区要么没有砂体,要么溶蚀作用微弱。目前,在这一区域尚未发现好的油气显示。 $DPI > 2.5$ 且有砂体发育的扇三角洲前缘和辫

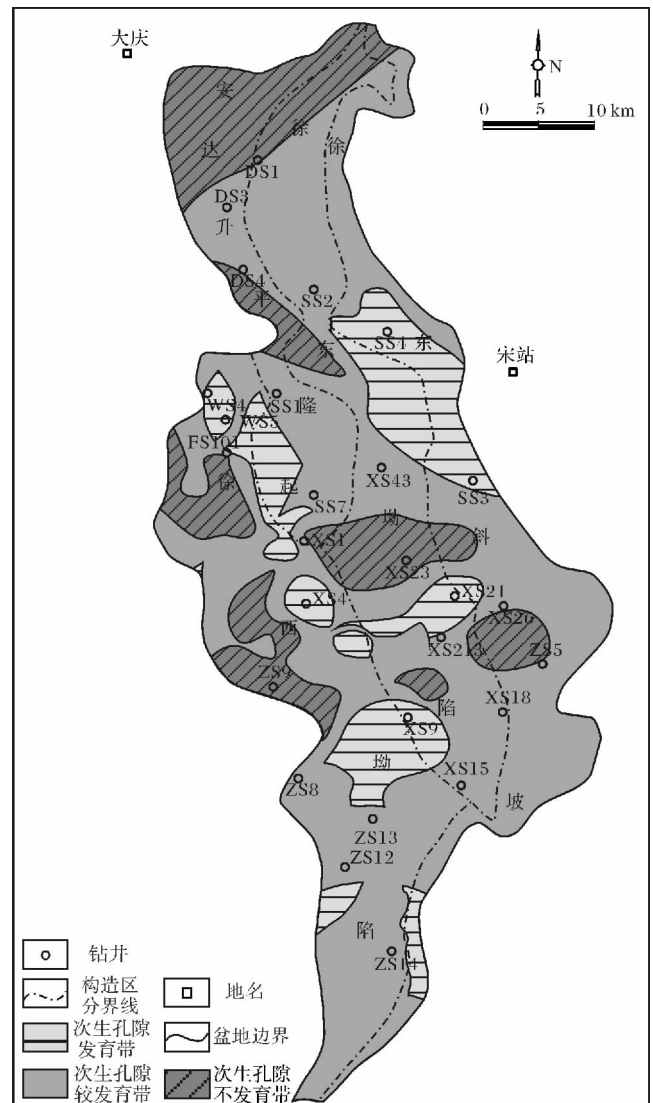


图6 徐家围子断陷营四段次生孔隙发育带预测图
Fig.6 The secondary porosity zones of the member 4 of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression

状河三角洲前缘相带为次生孔隙发育带,在这一地区不仅砂砾岩体发育,而且溶蚀作用强烈,次生孔隙发育,目前已发现工业气流和低产气流的钻井均位于这一区域。图中 $0 < DPI < 2.5$ 且有砂体发育的地区为次生孔隙较发育带(图6),在这一地区有砂体发育,但溶蚀作用不太强烈,仅有少量次生孔隙,储层物性不太好,仅发现了一些油气显示。

徐家围子断陷深部储层中发育营城期、营城期末和嫩江期三期裂缝^[8],在浊沸石溶蚀形成次生孔隙带的过程中,这些裂缝也起到一定作用。当浊沸石处于溶解状态时,切穿砂、砾岩的裂缝提高了储层的渗透率,有利于有机酸的运移和溶解物质的排出,加速了砂、砾岩中次生孔隙的形成,在改善储层性质的同

时,还大大提高了天然气的产能。但裂缝对砂砾岩次生孔隙度的贡献较小,对次生孔隙发育带的平面分布影响不大;当浊沸石处于沉淀状态时,浊沸石将在裂缝中沉淀,堵塞了有机酸运移的通道,不利于次生孔隙的形成和产能的提高,裂缝的存在失去了意义。由于本文主要考虑了砂、砾岩中由浊沸石溶蚀形成的次生孔隙,所以暂时没有考虑裂缝的分布对次生孔隙发育带平面展布的影响,有待进一步改进。

5 结论

(1) 浊沸石在低温、富 K^+ 、贫 Ca^{2+} 的酸性环境中,容易溶解,形成次生孔隙;反之,浊沸石发生沉淀,形成胶结物,堵塞砂砾岩的孔隙。

(2) 通过叠合浊沸石溶解—沉淀指数 DPI 等值线图和沉积相图,可以预测砂砾岩次生孔隙发育带的平面展布;

(3) 次生孔隙发育带主要分布在溶解—沉淀指数 $DPI > 2.5$ 、且有扇三角洲前缘和辫状河三角洲前缘相砂体发育的区域,在其内已发现了工业气流和低产气流。

参考文献 (References)

- 1 王成,邵红梅,洪淑新,等. 松辽盆地北部深层碎屑岩储层物性下限及与微观特征的关系[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(5): 18-20 [Wang Cheng, Shao Hongmei, Hong Shuxin, et al. The lower limits of physical properties for deep clastic reservoirs in north Songliao basin and its relationship with microscopic features[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(5): 18-20]
- 2 邵红梅,刘招君,王成,等. 松辽盆地北部深层砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 世界地质, 2005, 24(1): 58-62 [Shao Hongmei, Liu Zhaojun, Wang Cheng, et al. Diagenesis and porosity evolution of deep sandstone in north of Songliao Basin[J]. World Geology, 2005, 24(1): 58-62]
- 3 王成,邵红梅,洪淑新,等. 松辽盆地北部深层碎屑岩浊沸石成因、演化及与油气关系研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 213-218 [Wang Cheng, Shao Hongmei, Hong Shuxin, et al. Formation and evolution of laumontite and relationship between oil and gas in the clastic rock of the deep strata of the north Songliao Basin[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2004, 23(3): 213-218]
- 4 Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 301-328
- 5 罗平,裴泽楠,贾爱林,等. 中国油气储层地质研究面临的挑战和发展方向[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 142-147 [Luo Ping, Qiu Yinan, Jia Ailin, et al. The present challenges of Chinese petroleum reservoir geology and research direction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 142-147]
- 6 孟元林,高建军,刘德来,等. 辽河拗陷鸳鸯沟地区成岩相分析与异常高孔带预测[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(2): 227-233 [Meng Yuanlin, Gao Jianjun, Liu Delai, et al. Diagenetic facies analysis and anomalously high porosity zone prediction of the Yuan-yangou area in the Liaohe Depression[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(2): 227-233]
- 7 孟元林,吴巍,姜文亚,等. 双清地区异常高孔带分布与成因分析[J]. 中国海上油气, 2008, 20(3): 146-151 [Meng Yuanlin, Wu Wei, Jiang Wenya, et al. An analysis of abnormally high porosity zone distribution and origin in reservoir rocks in Shuangqing area, Liaohe depression[J]. China Offshore Oil And Gas, 2008, 20(3): 146-151]
- 8 孟元林,刘文慧,孟凡晋,等. 松辽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, et al. Distribution and origin of anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 75-84]
- 9 张文才,李贺,李会军,等. 南堡凹陷高柳地区深层次孔隙成因及分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 308-312 [Zhang Wencai, Li He, Li Huijun, et al. Genesis and distribution of secondary porosity in the deep horizon of Gaoliu area, Nanpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 308-312]
- 10 付国民,董满仓,张志升,等. 浊沸石形成与分布及其对优质储层的控制作用——以陕北富县探区延长组长3油层为例[J]. 中国地质大学学报(地球科学), 2010, 35(1): 107-114 [Fu Guomin, Dong Mancang, Zhang Zhisheng, et al. Formation process and distribution of Laumontite in Yanchang 3 Reservoir of Fuxian exploration area in North Shaanxi Province and the controls of the high quality reservoirs[J]. Journal of China University of Geosciences: Earth Science, 2010, 35(1): 107-114]
- 11 朱世发,朱筱敏,王绪龙,等. 准噶尔盆地西北缘二叠系沸石矿物成岩作用及对油气的意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1602-1612 [Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wang Xulong, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Science in China: Earth Science, 2011, 41(11): 1602-1612]
- 12 肖丽华,孟元林,侯创业,等. 松辽盆地升平地区深层成岩作用数值模拟与次生孔隙带预测[J]. 地质论评, 2003, 49(5): 544-551 [Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Hou Chuangye, et al. Diagenetic modeling and prediction of secondary pore zone in the deep of the Shengping Area in the Songliao Basin[J]. Geological Review, 2003, 49(5): 544-551]
- 13 Meng Yuanlin, Liang Hongwei, Meng Fanjin, et al. 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, 7(3): 302-310
- 14 孟元林,丁桂霞,吴河勇,等. 松辽盆地北部泉三、四段异常高孔隙带预测[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(4): 8-13 [Meng Yuanlin, Ding Guixia, Wu Heyong, et al. Prediction of anomalously high porosity zones of K_1q_3 and K_1q_4 in northern Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(4): 8-13]

- 15 冯子辉, 邵红梅, 董英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 760-769 [Feng Zihui, Shao Hongmei, Tong Ying. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen Gas Field, Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 760-769]
- 16 谯汉生, 赵澄林, 田克勤, 等. 中国东部深层石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 254-258 [Qiao Hansheng, Zhao Chenglin, Tian Keqin, et al. Petroleum Geology of Deep Reservoir in the Eastern China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 254-258]
- 17 Crosse L J, Frost B R and Surdam R C. Secondary porosity in laumontite-bearing sandstones, clastic diagenesis [J]. AAPG Memoir, 1984, 37: 225-238
- 18 Wopfner H, Markwot S, Semkiwa P M. Early diagenetic laumontite in the lower Triassic manda beds of the Ruhuhu Basin, southern Tanzania [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(1): 65-72
- 19 Dutton S P. Calcite cement in Permian deepwater sandstones, Delaware Basin, west Texas: Origin, distribution, and effect on reservoir properties [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92: 765 - 787
- 20 杨晓萍, 袁恂楠. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石形成机理、分布规律与油气关系 [J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 628-632 [Yang Xiaoping, Qiu Yinan. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang Formation (upper Triassic) of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 628-632]
- 21 孟元林, 王建伟, 吴河勇, 等. 松辽盆地北部中浅层成岩作用及其对储层质量的影响 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(3): 217-226 [Meng Yanling, Wang Jianwei, Wu Heyong, et al. The diagenesis and its effects on reservoir quality of Middle-shallow reservoirs in the northern Songliao Basin [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2010, 29(3): 217-226]
- 22 孟元林, 胡安文, 乔德武, 等. 松辽盆地徐家围子断陷深层区域成岩规律和成岩作用对致密储层含气性的控制 [J]. 地质学报, 2012, 86(2): 325-334 [Meng Yanling, Hu Anwen, Qiao Dewu, et al. Regional diagenetic law and control of diagenesis over gas-bearing capacity of tight reservoirs in deep Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 325-334]
- 23 殷辉安. 岩石学相平衡[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 78-110 [Yin Hui'an. Petrological Phase Equilibrium [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 78-110]
- 24 Stefansson A. Dissolution of primary minerals of basalt in natural waters. I. Calculation of mineral solubilities from 0°C to 350°C [J]. Chemical Geology, 2001, 172: 225-250
- 25 Helgeson H C, Delany J M, Nesbitt H W, et al. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals [J]. American Journal Science, 1978, 278: 1-298
- 26 Helgeson H C. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. IV. Calculation of activity coefficients, osmotic coefficient and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600°C and 5 kb [J]. American Journal Science, 1981, 281: 1249-1516
- 27 林传仙, 白正华, 张哲儒. 矿物及有关化合物热力学数据手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-180 [Lin Chuanxian, Bai Zhenghua, Zhang Zheru. Thermodynamic Data Handbook of Mineral and Related Compounds [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1985: 1-180]
- 28 Aizawa M, Andersen O S, Austin R H, et al. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering [M]. Greenbaum: Elias, 2010, 4: 45-59

Thermodynamic Calculations of the Laumontite Dissolution and Prediction of Secondary Porosity Zones: A case study of horizon of Xujiaweizi Fault Depression

MENG Yuan-lin¹ LIANG Hong-tao¹ WEI Wei¹ XIU Hong-wen²
LI Ya-guang² SHAO Hong-mei² HU An-wen¹ ZHANG Lei¹

(1. Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083)

Abstract: Laumontites are important and widespread cements formed in middle-late diagenetic stage in the deep-buried glutenites of Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin. They are later dissolved by organic acids released from kerogens during hydrocarbon generation and expulsion, forming secondary porosities. The secondary porosities within deeply buried glutenites are the main reservoir space of hydrocarbons in the deep formation of Xujiaweizi Fault Depression. In order to predict the distribution of secondary porosity zones, the dissolve-precipitation states of the laumontites and the forming mechanism of secondary porosities in the reservoirs of Yingcheng Formation were studied by using thermodynamic method. Dissolution-precipitation index DPI was proposed to quantify the dissolution and precipitation of laumontites. The distributions of the secondary porosity zones were predicted by overlapping the DPI contour map over the sedimentary facies map. As the result shows, the secondary porosity zones mainly distributed in the fan delta front or braided fluvial river delta front glutenites, where DPI is greater than 2.5.

Key words: tight glutenite; unconventional reservoir; laumontite; deep formation; secondary porosity zone; Xujiaweizi Fault Depression; Songliao Basin