

文章编号: 1000-0550(2002)04-0628-05

# 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组 浊沸石的形成机理、分布规律与油气关系<sup>①</sup>

杨晓萍<sup>1</sup> 裘怿楠<sup>2</sup>

1(中国矿业大学 北京 100083) 2(中国石油公司石油勘探开发科学研究院 北京 100083)

**摘 要** 鄂尔多斯盆地延长组长 6 储层中广泛分布浊沸石胶结物, 包体测温结果表明其形成温度在 60~70 °C 之间, 主要形成于早成岩阶段 B 期。浊沸石形成以后, 有机质脱羧作用形成的有机酸对其溶蚀, 并形成大量次生孔隙。勘探结果证实延长统找到的油藏大部分都聚集在这些浊沸石次生孔隙中。因此, 关于浊沸石胶结物的形成机理及分布规律研究对延长组油气藏的成藏机理, 以及油气富集规律研究非常重要。本文从沉积微相研究入手, 通过野外露头、岩心及铸体薄片、包裹体测温、扫描电镜、电子探针等分析, 研究浊沸石的形成机理、分布规律以及与沉积微相的关系, 从而达到通过沉积微相的展布特征来预测浊沸石分布规律。最后通过研究浊沸石次生孔隙的发育特征, 预测油气藏

**关键词** 浊沸石 延长统 鄂尔多斯盆地

**第一作者简介** 杨晓萍 女 1963 年出生 博士 沉积储层及石油地质  
中图分类号 P618.130.2<sup>+</sup>1 P578.974 文献标识码 A

## 1 前言

鄂尔多斯盆地早古生代为海相沉积, 晚古生代以海陆过渡相沉积为主, 到了晚古生代末期海水全部退出, 盆地进入内陆湖盆发育的新阶段, 其中晚三叠统延长组是内陆湖盆发育的鼎盛时期, 沉积了优质巨厚的生油岩(长 7), 鄂尔多斯盆地中生代找到的油藏绝大多数来源于这套生油岩。在这套生油岩之上, 盆地西南缘形成了水下扇、扇三角洲储集体, 盆地北部斜坡上, 从东到西形成了延安、安塞、志靖、吴旗、盐定等三角洲储集体, 这些三角洲砂体与下覆生油岩呈指状接触, 最有利于捕获油气并形成大型三角洲油藏。但是由于强烈的成岩后生作用, 使这些三角洲有利储集砂体中的原生孔隙大部分被充填胶结, 其中最典型是浊沸石胶结物, 但是这些浊沸石被溶蚀后形成的次生孔隙是安塞、靖安两个亿吨级油田的主要储集空间。因此研究浊沸石的形成机理、分布规律以及次生孔隙形成与分布对陕北油气勘探具有非常重要的实用价值。

## 2 储层成岩作用

### 2.1 储层岩石学特征

安塞、志靖三角洲长 6 储层碎屑成份以长石为主, 一般在 50%~60%之间, 石英含量一般 20%~30%,

岩屑+云母含量小于 10%。岩屑以浅变质及中酸性岩屑为主, 云母主要为黑云母, 常常以纹层状分布在水下分流河道顶部及天然堤微相中。另外还有 1%~2%石榴石、锆石、帘石类、楣石、磷灰石等重矿物。因此本区长 6 储层岩石类型主要由长石细砂岩组成。

填隙物包括杂基和胶结物, 在研究区内长 6 储层中杂基含量少, 一般为 2%~3%。胶结物类型多, 含量高, 一般在 10%~15%之间, 主要有绿泥石粘土衬边, 浊沸石、方解石、铁方解石、硅质加大及少量高岭石。其中绿泥石衬边和浊沸石主要分布在三角洲前缘的叠置水下分流河道砂岩中, 而绿泥石粘土衬边和方解石胶结物主要分布在孤立水下分流河道微相中, 硅质加大主要分布在河口坝和远沙坝微相中。

由于研究区长 6 时期主要为三角洲前缘沉积, 储层粒度较细, 主要以细砂岩为主, 其次为中细砂岩, 分选好, 结构成熟度高。

### 2.2 胶结物类型

陕北志靖、安塞三角洲长 6 储层中主要的胶结物主为绿泥石衬边、浊沸石以及方解石, 下面分别描述其特征。

#### 2.2.1 绿泥石粘土衬边

绿泥石粘土衬边, 是整个延长统普遍发育的一种较早期的成岩产物, 这可能与物源区富含 Fe、Mg 等硅酸盐矿物有关, 它呈针叶状、叶片状沿碎屑颗粒边缘垂

<sup>①</sup> 中国石油公司储层重点实验室资助

直生长, 电子探针测定其化学组成为: SiO<sub>2</sub> 31.89%, FeO 28.08%, MgO 11.78%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14.68%, TiO<sub>2</sub> 12.15%, Na<sub>2</sub>O 0.5%。它们由颗粒边缘向孔隙和喉道中心生长, 使孔隙空间逐渐缩小。但是由于它以叶片状垂直颗粒生长, 因此同时也抑制石英次生加大的形成, 保存了较多的原生孔隙。一般来说, 这种绿泥石粘土衬边大部分发育在水下分流河道、河口坝顶部以及水下决口扇中部, 绿泥石粘土衬边发育的砂体, 有利于后期酸性水进入溶蚀浊沸石及长石颗粒并形成次生孔隙, 因此, 绿泥石粘土衬边对延长统次生孔隙的形成起了非常积极的作用。

2.2.2 浊沸石

浊沸石是陕北长 6 储层最具特色的胶结物, 一般含量在 5% ~ 10% 之间, 分布范围广。浊沸石胶结物以其明显的 {110} 解理及波状消光而容易与长石颗粒区分开, 在阴极发光显微镜下浊沸石通常不发光, 它常以联片状充填在粒间孔隙中, 常可观察到浊沸石交代长石颗粒, 偶见方解石交代浊沸石现象。由于浊沸石的 {110} 解理发育, 因此酸性水容易沿解理缝溶蚀, 从而在陕北三角洲储层中形成可观的次生孔隙, 由浊沸石被溶后形成的次生孔隙发育带是长 6 主要富油区。浊沸石主要以胶结物的形式充填于粒度较粗、分选较好及杂基含量少的中细砂岩、细砂岩粒间孔隙中。其成份见表 1。

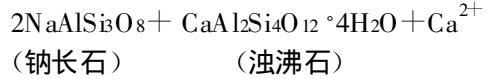
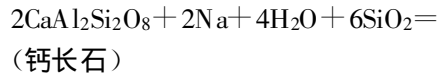
2.2.3 碳酸盐胶结物

本区碳酸盐胶结物主要是方解石和铁方解石。通过薄片观察, 方解石一般呈孔隙状充填, 形成时间与浊沸石同时或稍晚, 而铁方解石的析出要比方解石及浊沸石晚, 而且一般都在分流河道的顶部形成胶结交代致密层, 它的形成与浊沸石的大量溶蚀有关。一般来说在干酪根脱羧期, 大量酸性水进入三角洲砂岩中对浊沸石进行溶蚀, 由于浊沸石是富 Ca 矿物, 因此被溶解的 Ca 离子与酸性水中 CO<sub>2</sub> 在水下分流河道砂的顶部富黑云母段和分流河道砂体的边部形成铁方解石胶结交代致密层, 这种铁方解石使储层层内非均质性大大增强。

3 浊沸石的形成机理与形成温度

3.1 浊沸石的形成机理

浊沸石的形成与长 6 储层中富含斜长石密切相关, 因为斜长石 (Ca, Na<sub>2</sub>) [AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>] 和浊沸石 (Ca [Al<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>]<sup>o</sup>·4H<sub>2</sub>O) 都属架状硅酸盐, 成份和结构相似, 因此浊沸石可在斜长石发生钠长石化过程中形成, 以钙长石为例, 其反应式如下:



从上述反应可以看出, 砂岩中含有较多的斜长石及碱性富钠的孔隙水有利于浊沸石的形成。陕北长 6 储层中富含斜长石 (占碎屑总量的 30% ~ 40%), 而且斜长石的钠长石化现象非常普遍。另外通过扫描电镜分析, 粒间孔隙中见晶形良好的板状钠长石及石盐晶体, 说明孔隙水在成岩期有过富钠、pH 值高的阶段, 有利于浊沸石的形成, 因此陕北长 6 砂岩中浊沸石胶结物主要是其中的斜长石与碱性富钠的孔隙水相互反应的产物, 这一过程主要发生在早成岩的晚期。另一方面, 浊沸石的形成还可能与盆地北部物源区在延长统时期多次火山活动有关, 陕北三角洲长 7 和长 6 地层中发育多层凝灰质层或含凝灰质泥岩, 这是当时火山活动的直接证据。这些凝灰质层呈翠绿色、肉红色、淡黄色等鲜亮颜色夹在灰色、深灰色泥岩中, 单层非常薄, 一般 0.2 ~ 1.0 cm, 常常 3 ~ 5 个薄层集中分布在 1 ~ 2 m 厚的泥岩中。这些含凝灰质泥岩层常表现为高伽玛、低密度、高声波时差等特征, 笔者认为陕北长 6 浊沸石的形成除了与斜长石钠长石化有关外, 还可能与这些火山物质有关。因为形成如此广泛的浊沸石必须要有充足的钙离子来源, 钙离子的来源除了斜长石钠长石化过程中析出部分钙离子外, 还可能来自于凝灰质泥岩。为此我们做了凝灰质泥岩的全岩分析 (表 2)。

从表 2 可以看出, Ca、Mg、Fe、Si、Al 的含量比较

表 1 陕北延长统长 6 储层中浊沸石成分统计表 (电子探针分析%)

Table 1 Laumontite contents in the Chang 6 reservoir, Yanchang Formation North Shanxi (Analyzed by electronic microscope)

项目 样品号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ZJ81-D5	2.09	0.24	22.02	64.33	0.84	9.38	1.07
ZJ10-D2	1.74	0.08	21.74	67.76	1.21	9.57	0.89

表2 陕北延长统凝灰质泥岩全岩成分分析统计表(%)

Table 2 Bulk compositions of tuffaceous mudstone in Yanchang Formation in North Shaanxi Province(%)

项 目	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
样品号										
清涧河	55.42	1.28	30.8	1.72	1.04	0.10	3.07	2.67	2.76	0.8
ZJ81井	53.18	1.15	31.9	1.21	1.89	0.15	3.25	3.52	2.82	0.5

高,因此在早成岩B期,随着埋深增加,凝灰质泥岩中的蒙皂石向伊利石、绿泥石转化过程中大量脱水,并析出Ca、Mg、Fe离子,其Fe、Mg离子与硅酸盐形成绿泥石沉淀,钙离子随后形成浊沸石并充填孔隙。通过对志靖三角洲浊沸石的薄片观察,它常常与绿泥石粘土衬边伴生,而且主要分布在叠置的水下分流河道中,比较薄的孤立水下分流河道中浊沸石含量少,主要为方解石充填孔隙,形成绿泥石一方解石胶结相。这是因为在叠置的水下分流河道厚砂层中,压实作用弱,原生孔隙保存多,孔隙通性好,孔隙水易于流动,因此易于形成浊沸石。

### 3.2 浊沸石的形成温度

#### 3.2.1 根据 $R_0$ 推算浊沸石的形成温度

经典变质岩专著将浊沸石作为低温变质作用的特征矿物,它的出现标志着低级变质作用的开始,对应的形成温度大致为200℃左右。然而,通过对我国陆相砂岩储层研究结果表明,浊沸石并非一定代表变质矿物,它在我国中—新生代陆相碎屑岩储层中普遍可见,从早成岩B期到晚成岩C期均有分布,其形成温度一般在60~160℃之间。

Bacher和Pawlewicz根据世界上35个地区600多个腐植型酞酐根 $R_0$ 和 $T_{max}$ 关系,建立了两者之间的关系式:

$$\ln(R_0) = 0.0078 T_{max} - 1.2$$

通过对陕北长6前三角洲泥岩中分散有机质的镜质体反射率测量与统计, $R_0$ 平均为0.7。由Bacher公式计算结果,陕北长6储层经历的最大地温为90℃左右,因此推算浊沸石的形成温度不超过90℃。这个观点与早在八十年代朱国华教授提出的浊沸石形成温度不超过80℃基本一致。

#### 3.2.2 包裹体测温确定浊沸石形成温度

由于浊沸石{110}解理非常发育,使浊沸石胶结物中包裹体不易保存,因此关于浊沸石胶结物的形成温度主要依据成岩阶段序列进行推测,如陕北延长统浊沸石胶结物为早成岩作用产物,推测温度不超过80~90℃;大庆油田白垩系登娄库组浊沸石为晚成岩期产物,推测其形成温度在150~160℃之间。本次工作中,作者有幸在志靖三角洲ZJ10井长6储层浊沸石胶

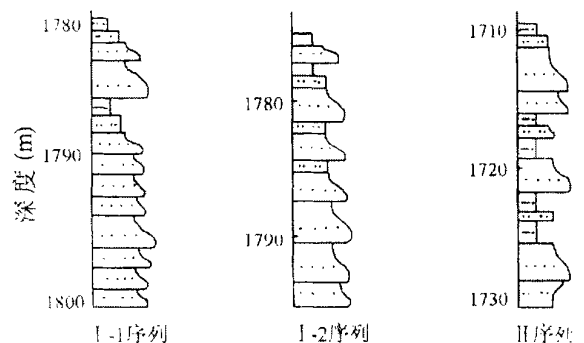
结物中找到了为数不多的气液包裹体,测量其均一温度为64~65℃。另外,我们通过有机包体的期次分析,以及对不同期次有机包体伴生的盐水包体进行测温,间接测得浊沸石的形成温度在64~68℃之间。

## 4 浊沸石及其次生孔隙的分布规律对油气聚集的意义

成岩作用是在沉积作用的背景上进行的,具体说就是不同的沉积微相决定了不同的成岩作用特征和成岩相,因此要搞清浊沸石的分布规律首先要从研究沉积微相入手。本次工作通过对志靖三角洲长6<sub>1</sub><sup>2</sup>和长6<sub>2</sub><sup>1</sup>两个主力油层沉积微相与浊沸石分布规律的研究,发现浊沸石的分布严格受沉积微相控制。在不同的微相纵向迭置序列及不同的沉积微相带浊沸石发育程度不同。

### 4.1 不同的微相纵向迭置序列与浊沸石分布(图1)

第I类充填序列代表多期叠置的水下分流河道充填层序特征。其中I-1类型是在河流作用非常强条件下,后期的分流河道不断截切前期的分流河道,使前期分流河道顶部的粉细粒沉积物,特别是黑云母层不断被截切掉,而主要由粒度比较粗的中细砂岩、细砂岩组成,层内非均质性最弱,原始孔隙度、渗透率最高。而I-2类型同样也是多期水下分流河道充填,但沉积



I-1. 绿泥石膜—浊沸石胶结相; I-2. 绿泥石膜—浊沸石胶结相钙长—硅质胶结相;

II. 绿泥石膜—石解石胶结相钙质—泥质胶结相

图1 不同的微相纵向迭置序列与胶结相关系

Fig. 1 Relationship between vertical sequence and cementation facies in different microfacies

时比 I-1 充填类型水动力条件弱, 因此常常在每个河道的顶部发育粉砂岩、黑云母富集纹层, 使层内非均质性增加。总的说来, I-1 和 I-2 充填类型主要分布在叠置水下分流河道主砂带内, 砂体连通性好, 层内非均质性弱, 原始孔隙度、渗透率高, 压实水、成岩水容易进入其中并形成绿泥石—浊沸石胶结相。其后被酸性水溶蚀形成次生孔隙。第 II 类充填序列代表孤立水下分流河道充填特征。在每个水下分流河道中间夹有水下溢岸沉积的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。这些水下分流河道单个河道砂岩厚度较小, 平面上分流河道改道频繁, 层内、层间非均质性较强, 砂体平面连通性差, 平面非均质性强, 原始孔渗性较低, 易于压实。压实水、成岩水进入这些砂岩中后流动性差, 不易形成浊沸石胶结。因此, 在 II 类充填序列中主要以绿泥石—方解石胶结为主, 由于方解石在有机酸性水中的溶解度远远低于浊沸石, 而且由于这种充填序列中砂体纵向连通性较差, 酸性水也不易大量侵入, 因此, 方解石溶孔不如浊沸石溶孔发育, 含油性也比较差。

#### 4.2 长 $6_2^1$ 和长 $6_1^2$ 主力油层沉积微相与浊沸石分布

##### 4.2.1 长 $6_2^1$ 沉积微相与浊沸石分布(图 2)

由于长  $6_2^1$  油层在志靖三角洲东西两侧沉积特征差异明显, 叠置水下分流河道厚砂带主要分布在三角洲西侧天赐弯—新城—红柳沟—ZJ33 井一带, 而三角洲东侧镰刀湾—张渠一带主要以孤立水下分流河道为主, 因此在两个地带成岩相分布有显著区别, 绿泥石—浊沸石胶结相主要分布在西部, 而东部主要为绿泥石—方解石胶结相。而且西侧绿泥石—浊沸石胶结带在靠近湖盆中心一侧形成大面积浊沸石—长石溶蚀相, 而东侧靠近湖区一侧为绿泥石—方解石溶蚀相, 在分流间湾和水下溢岸沉积区则以钙质—泥质胶结相为主。

##### 4.2.2 长 $6_1^2$ 沉积微相与浊沸石分布(图 3)

在天赐弯—大路沟—五里湾—ZJ33 井区为绿泥石—浊沸石胶结相, 靠近湖区一侧为浊沸石—长石溶蚀相, 在这个主砂带东侧为绿泥石—方解石胶结相, 靠近湖区为长石—方解石溶蚀相, 其余分流间湾与水下溢岸区为钙质—泥质胶结相。

一般来说, 三角洲水下分流河道微相是浊沸石胶结的主要相带, 在河口坝、水下决口扇微相中浊沸石只发育在较粗粒的细砂岩中, 粉细砂岩、粉砂岩中主要以钙质、泥质、硅质胶结为主。另外同是水下分流河道微相, 但因纵向上叠置序列不同使浊沸石的分布也不均匀, 一般来说, 在叠置的水下分流河道砂岩中浊沸石含量最多, 平均 8%~10%, 而在孤立的水下分流河道中浊沸石的含量明显降低, 取而代之的是方解石胶结。

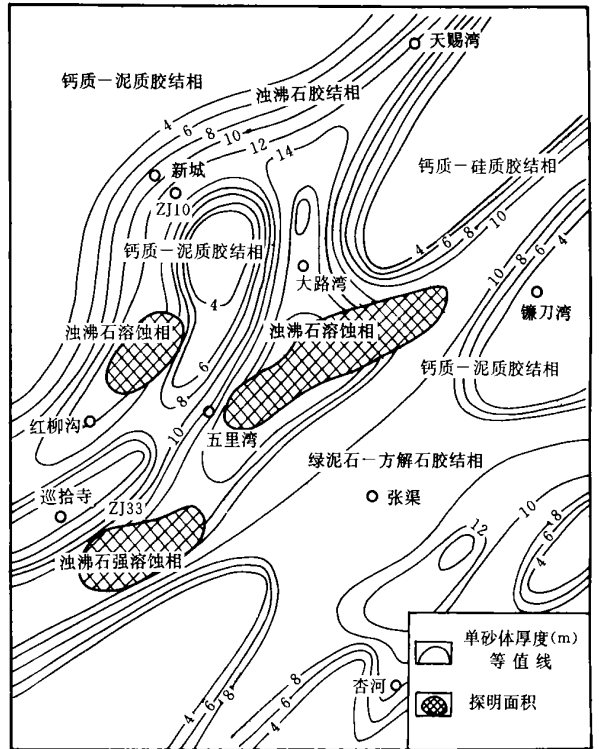


图 2 长  $6_2^1$  主力油层沉积微相与浊沸石成岩相分布  
Fig. 2 Distribution of sedimentary microfacies and laumontite diagenetic facies in the major reservoir of Chang  $6_2^1$

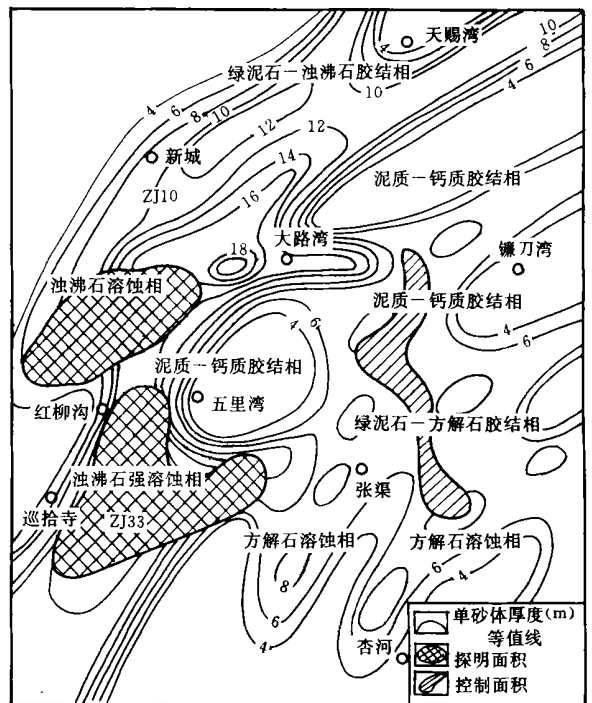


图 3 长  $6_1^2$  主力油层沉积微相与浊沸石成岩相分布  
Fig. 3 Distribution of sedimentary microfacies and laumontite diagenetic facies in the major reservoir of Chang  $6_1^2$

因此在长 6<sub>1</sub><sup>2</sup> 和长 6<sub>2</sub><sup>1</sup> 两个层位中, 浊沸石主要分布在叠置水下分流河道的厚砂带内。主要原因是这些叠置水下分流河道中的原生孔隙发育、孔隙水易于流动, 孔隙水与斜长石离子交换能力强, 因此易于形成浊沸石胶结。浊沸石胶结后又抑制了储层进一步被压实, 而且由于浊沸石胶结物解理非常发育, 酸性水易于沿其解理进行溶蚀。另外据 Sundam 等人研究, 生油岩中形成的有机酸对硅酸盐的溶解能力远远大于对碳酸盐的溶解。因此, 在生油岩大量生烃前脱羧作用形成的酸性水进入三角洲砂体中, 首先溶解叠置河道中的浊沸石并形成次生孔隙, 而且从湖盆中心向湖岸方向浊沸石的溶蚀作用依次减弱, 从而形成了浊沸石强溶蚀相、浊沸石溶蚀相以及浊沸石弱溶蚀相。然后生油岩中形成的油气沿浊沸石次生溶蚀孔隙通道向砂岩上倾方向运移, 并在次生孔隙砂体中形成岩性油气藏。现今探明的油气藏大部分分布在这些叠置砂体中。

## 5 结论

(1) 陕北长 6 三角洲储层中浊沸石的形成除了与斜长石钠长石化外, 还与凝灰质泥岩中提供的物质关系密切。

(2) 首次根据有机包体期次分析和浊沸无机包体测温结果, 确定浊沸石形成温度在 64 ~ 67 °C 之间, 平均 65 °C。

(3) 浊沸石胶结物的形成与分布与沉积微相密切相关, 它主要分布在三角洲前缘亚相的叠置水下分流河道厚砂体中。

(4) 浊沸石从湖盆中心向湖盆边缘溶蚀作用依次减弱, 可进一步分为浊沸石强溶蚀相、浊沸石溶蚀相以及浊沸石弱溶蚀相。

### 参考文献 (References)

- 1 朱国华. 陕北浊沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系[J]. 石油学报, 1985, 6(1): 1~8 [Zhu Guohua. Formation of secondary porous laumontite sandstone and the relation with the oil and gas in north Shaanxi [J]. Acta Petroli Sinica, 1985, 6(1): 1~8]
- 2 张立飞. 陕北鄂尔多斯盆地埋藏变质作用研究[J]. 地质学报, 1992, 66(4): 34~39 [Zhang Lifei. Study on burial metamorphism in Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1992, 66(4): 34~39]
- 3 赵孟为. 鄂尔多斯盆地浊沸石的形成温度及其意义[J]. 石油学报, 1995, 16(9): 58~63 [Zhao Mengwei. Formation temperature of laumontite of Ordos Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 1995, 16(9): 58~63]
- 4 Richard L Hay. Zeolites and Zeolitic Reactions in Sedimentary Rock [M]. The Geological Society of America, INC New York, 1966

## Formation Process and Distribution of Laumontite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos Basin

YANG Xiao-ping<sup>1</sup> QIU Yi-nan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

<sup>2</sup>(Petroleum Institute of Exploration and Development of CNPC, Beijing 100083)

**Abstract** Laumontite cement is mainly distributed in the Yanchang 6 reservoir of the northeast Ordos basin. Through measuring inclusions in laumontite, we know that its forming temperature is between 60 °C and 70 °C and it formed in the B period of early diagenetic stage. However, in the A period of later diagenetic stage, laumontite were dissolved by organic acid which was generated in decarboxylation of kerogen, and a great quantity of secondary pores were formed. Exploration results have proved that newly found reservoirs are largely distributed in the laumontite secondary pore zone. Thus, the formation process and distribution of laumontite cement are very important for exploring reservoirs and hydrocarbon accumulation. In the paper, with the investigations of outcrop, thin section, organic inclusion, scanning electron microscope and electron microprobe, the relationship of the forming process, distribution of laumontite cement and sedimentary microfacies is studied on the basis of sedimentary microfacies. The purpose is that laumontite distribution is predicted by sedimentary microfacies. As a result, reservoir distribution is predicted.

**Key words** laumontite, Yanchang Formation, Ordos Basin