

# 松辽盆地英台断陷沉火山碎屑岩 储层特征及控制因素

修昊<sup>1</sup>,唐华凤<sup>2</sup>,黄露玫<sup>3</sup>

(1.新疆大学地质与矿业工程学院,新疆乌鲁木齐 830049; 2.吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061;  
3.中国石油西南油气田工程技术研究院,四川广汉 618300)

**摘要:**英台断陷营城组二段沉火山碎屑岩储层埋深超过3 000 m后仍发育高孔隙度带,为明确储层特征及控制因素,从储集空间分布特征入手,分析储集空间组合与岩性、埋深和构造位置的关系以及物性分布规律,并针对成岩作用和高孔隙度带的成因研究储层的控制因素。结果表明,英台断陷营城组二段沉火山碎屑岩储层储集空间包括粒(砾)间孔和粒(砾)内气孔等原生孔隙、溶蚀孔和晶间微孔等次生孔隙以及裂缝;存在2 000~2 100,2 500~2 550和3 300~3 700 m等3个高孔隙度带。储层受埋深压实、充填、交代、溶蚀—溶解和重结晶等成岩作用控制。对于深埋藏沉火山碎屑岩储层改善的主要因素是溶蚀—溶解作用和基质重结晶作用,不稳定矿物斜长石溶蚀—溶解作用最大可增加面孔率0.6%~5.3%,不稳定基质重结晶作用可增加面孔率0.9%~8.3%;沉火山碎屑岩的不稳定成分含量高,为成岩作用的发生提供了物质基础。凸起区中埋深小于3 700 m、溶蚀作用和重结晶作用发育的沉火山碎屑岩均应受到勘探的重视。

**关键词:**沉火山碎屑岩 储层 成岩作用 营城组 英台断陷

中图分类号:TE112.31

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)03-0033-07

## Characteristics and influential factors of sedimentary pyroclastic rocks in Yingtai faulted depression, Songliao Basin

Xiu Hao<sup>1</sup>, Tang Huafeng<sup>2</sup>, Huang Lumei<sup>3</sup>

(1. College of Geology and Exploration Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 830049, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun City, Jilin Province, 130061, China; 3. Research Institute of Engineering, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Guanghan City, Sichuan Province, 618300, China)

**Abstract:** Reservoir with high porosity still developed at the second member of Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression when sedimentary pyroclastic rocks buried underground deeper than 3 000 m. Relationships of reservoir space composition with lithology, buried depth and structural position were analyzed in order to determine reservoir characteristics and its influential factors, and the control factors of reservoir were studied from two aspects: diagenesis and the formation of high porosity zone. The results show that reservoir space of sedimentary pyroclastic reservoir in the second member of Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression is composed of primary porosity such as intergranular pore and intra-particle pore, secondary porosity such as dissolution pore and intercrystal pore and fracture. There are three zones with high porosity: interlayers at 2 000–2 100, 2 500–2 550 and 3 300–3 700 m. Reservoir is controlled by deep compaction, filling, metasomatism, corrosion–dissolution and recrystallization. The main factors about improvement of deeply buried sedimentary pyroclastic reservoir are corrosion–dissolution and matrix recrystallization. The plane porosity can increase 0.6%–5.3% through corrosion–dissolution of unstable plagioclase in this area, and the plane porosity can increase 0.9%–8.3% through recrystallization of unstable matrix. The sedimentary pyroclastic rocks have high content of unstable ingredients, which can provide material for diagenesis. So dissolved and recrystallized sedimentary pyroclastic rocks in uplift area with buried

收稿日期:2016-02-23。

作者简介:修昊(1988—),男,吉林松原人,硕士,从事油气田开发地质方面的研究。联系电话:15008288841, E-mail:470277403@qq.com。

depth less than 3 700 m should be paid more attention by the exploration.

**Key words:** sedimentary pyroclastic rocks; reservoir; diagenesis; Yingcheng Formation; Yingtai faulted depression

国外许多盆地陆续发现(沉)火山碎屑岩油气藏,表明了(沉)火山碎屑岩具有成为有效储层的条件及潜力。如美国 Middle Park 盆地、新西兰 Northern Taranaki 盆地、土耳其 East Anatolia 盆地等<sup>[1-5]</sup>; 中国在渤海湾、二连、海拉尔等盆地也钻遇(沉)火山碎屑岩储层<sup>[6]</sup>,储层岩性主要为(沉)火山角砾岩和(沉)凝灰岩,储集空间包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝3大类,多数埋深较小。当埋深超过3 000 m以后,(沉)火山碎屑岩因压实作用导致低孔、低渗透<sup>[7-10]</sup>,不利于形成有效储层。

松辽盆地下白垩统营城组发育沉火山碎屑岩储层<sup>[11]</sup>,其储层特征与中外火山碎屑岩油气藏具有相似性<sup>[12-15]</sup>。最大的差别在于埋深超过3 000 m后仍发育高孔隙度带,并且超过了文献[16]提出的火山碎屑岩勘探下限。笔者通过岩心、岩屑和测井资料综合分析英台断陷沉火山碎屑岩储层特征和控制因素,以期对沉火山碎屑岩油气藏高效勘探开发提供依据。

## 1 储层特征

英台断陷位于松辽盆地南部的西部斜坡区,面积为1 800 km<sup>2</sup>,具有双断地堑式特征;根据构造位置可分为凸起区和凹陷区,凸起区由南至北又分为凸起 I、凸起 II 和凸起 III(图1)。英台断陷于营城组二段沉火山碎屑岩中获得高产气流,显示了良好的勘探前景。基于研究区13口钻井(沉火山碎屑岩累积进尺955.4 m)、95个岩心/岩屑样品进行沉火山碎屑岩储层特征和控制因素分析,95个岩心/岩屑薄片,75个在凸起区,20个在凹陷区,其中22个在凸起 I,31个在凸起 II,22个在凸起 III。

### 1.1 储集空间类型

参照前人对松辽盆地火山岩储集空间的分类体系<sup>[17-20]</sup>,将英台断陷沉火山碎屑岩储集空间划分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝3类。

#### 1.1.1 原生孔隙

原生孔隙包括粒(砾)间孔和粒(砾)内气孔。粒(砾)间孔是由颗粒支撑形成的孔隙(图2a—2c),发育程度受压实和胶结程度影响。英台断陷营城组沉火山碎屑岩主要表现为沉火山角砾岩角砾间的孔隙以及凝灰岩基质颗粒间的孔隙,多经受压实和充填改造。粒(砾)内气孔是角砾、岩屑自身所具

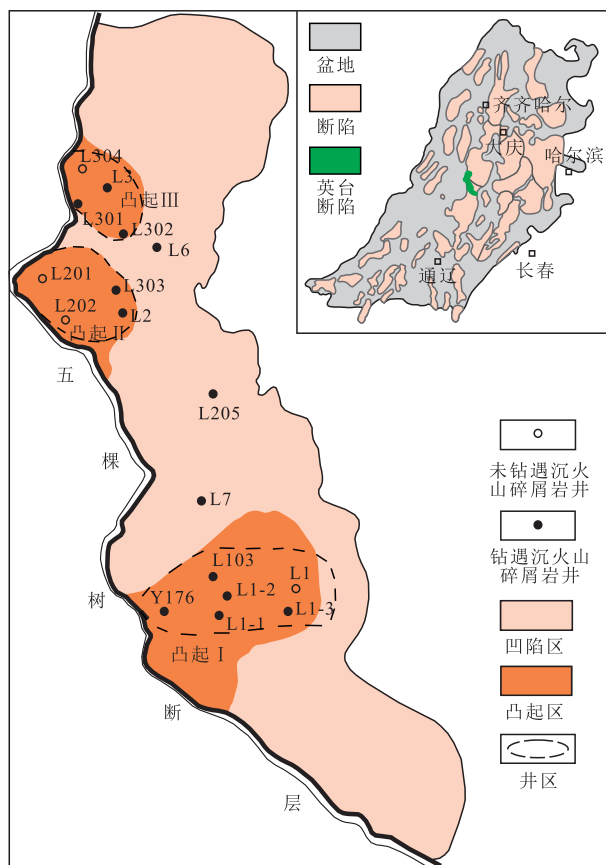


图1 英台断陷营城组井位分布

Fig.1 Distribution of wells of the Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression

有的原生气孔。不同角砾、岩屑中气孔的发育程度影响其所属的沉火山碎屑岩的储集能力,研究区砾内气孔主要为沉火山角砾岩中角砾内原生气孔,例如Y176井2 082.5 m处玄武质沉火山角砾岩角砾内发育大量气孔,杏仁体充填(图2d,2e)。

#### 1.1.2 次生孔隙

次生孔隙包括溶蚀孔和晶间微孔。溶蚀孔是火山碎屑物在固结成岩后经溶蚀—溶解作用形成的孔隙(图2f),包括基质溶蚀孔和晶内溶蚀孔2类。基质溶蚀孔是基质被溶蚀后产生的次生孔隙;晶内溶蚀孔是长石、石英被溶蚀后产生的次生孔隙。研究区营城组沉火山碎屑岩溶蚀—溶解作用较强,普遍发育溶蚀孔。晶间微孔是沉火山碎屑岩基质重结晶过程中产生的微小孔隙,此外斜长石晶屑受轻度溶蚀过程中也可形成该类孔隙(图2g)。

#### 1.1.3 裂缝

裂缝多为构造裂缝,是岩石成岩后受构造应力而形成的缝隙,可将原本孤立的孔隙连通。研究区

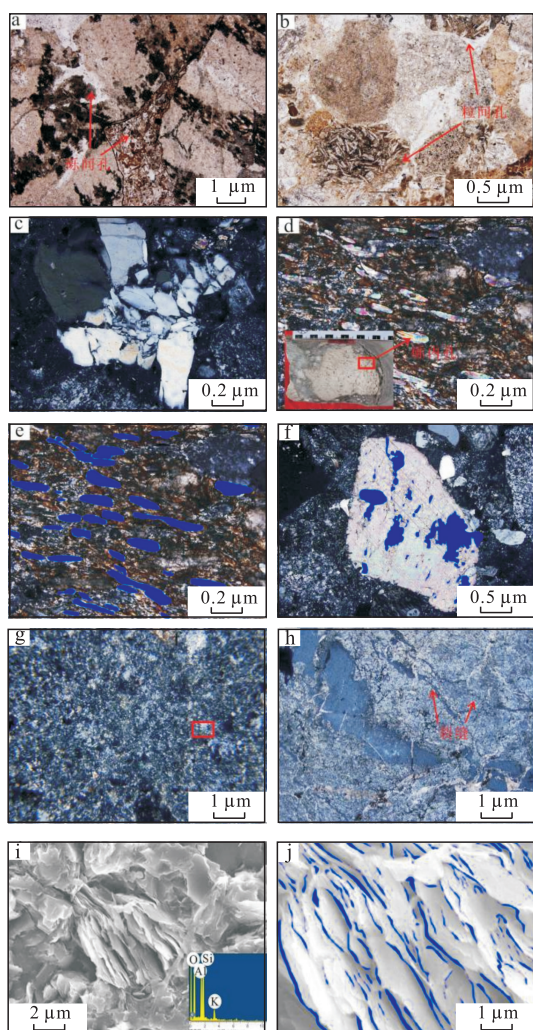


图2 英台断陷营城组沉火山碎屑岩储集空间类型  
Fig.2 Reservoir space types of sedimentary pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression

营城组沉火山碎屑岩中发育的构造裂缝多被充填, 充填程度为20%~100%, 充填物受溶蚀—溶解作用后可形成溶蚀裂缝(图2h)。

### 1.2 储集空间组合与岩性的关系

英台断陷营城组沉火山碎屑岩可分为沉火山角砾岩、沉角砾凝灰岩和沉凝灰岩3大类, 具体又可分为玄武质沉火山角砾岩、安山质沉角砾凝灰岩、

安山质沉凝灰岩、流纹质沉火山角砾岩、流纹质沉角砾凝灰岩、流纹质沉凝灰岩、英安质沉凝灰岩等。不同岩性的储集空间组合存在差异, 沉火山角砾岩储集空间主要为砾间孔、粒(砾)内气孔; 沉角砾凝灰岩储集空间主要为粒(砾)间孔、粒(砾)内气孔、溶蚀孔和晶间微孔; 沉凝灰岩储集空间主要为粒间孔、溶蚀孔和晶间微孔。沉火山角砾岩储集空间以原生孔隙为主; 沉角砾凝灰岩兼有原生孔隙和次生孔隙; 沉凝灰岩则以次生孔隙为主(表1)。

### 1.3 储集空间组合与埋深的关系

英台断陷沉火山碎屑岩储集空间类型随埋深变化明显(图3a), 粒(砾)内气孔在2 000~3 000 m发育, 3 000~4 000 m显著减少, 4 000 m以下未见; 粒(砾)间孔、溶蚀孔在3 000~4 000 m最发育, 4 000 m以下明显减少; 晶间微孔随埋深增加逐渐增加, 4 000 m以下晶间微孔较发育, 其他储集空间相对较少。随着埋深增加, 不同深度的储集空间组合方式也不同, 2 000~3 000 m以粒(砾)内气孔、粒(砾)间孔等原生孔隙为主, 见少量溶蚀孔; 3 000~4 000 m以粒(砾)间孔和溶蚀孔为最主要的储集空间, 次生孔隙开始增加; 4 000 m以下原生孔隙显著减少, 储集空间以晶间微孔为主。

### 1.4 储集空间组合与构造位置的关系

凸起区储集空间总体较凹陷区发育(图3b), 凸起区粒(砾)内气孔、粒(砾)间孔、溶蚀孔均比凹陷区发育, 晶间微孔凹陷区较凸起区发育。凸起区储集空间组合以粒(砾)内气孔和粒(砾)间孔等原生孔隙为主, 凹陷区原生孔隙与次生孔隙均不发育, 主要储集空间为晶间微孔等次生孔隙。

3个凸起区中, 粒(砾)内气孔仅在凸起I发育; 粒(砾)间孔、溶蚀孔在3个凸起均发育; 晶间微孔仅在凸起III发育。凸起I以粒(砾)内气孔和粒(砾)间孔等原生孔隙为主, 次生孔隙不发育; 凸起II以粒(砾)间孔和溶蚀孔为主; 凸起III粒(砾)间孔发育, 次生孔隙以晶间微孔为主(图3c)。

表1 英台断陷营城组沉火山碎屑岩储层特征

Table1 Characteristics of sedimentary pyroclastic reservoir of the Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression

岩性	主要储集空间组合	孔隙度, %		累积进尺/m	典型井
		范围	平均值		
玄武质沉火山角砾岩	粒(砾)间孔+粒(砾)内气孔+裂缝	0.1~18.77	5.8	135	Y176
安山质沉角砾凝灰岩	粒(砾)间孔+溶蚀孔+晶间微孔+裂缝	0.01~7.38	2.8	52	L103
安山质沉凝灰岩	粒间孔+溶蚀孔+晶间微孔+裂缝	0.05~1.44	0.1	9	L2
英安质沉凝灰岩	粒间孔+溶蚀孔+晶间微孔+裂缝	0.01~3.9	0.1	52	L7
流纹质沉火山角砾岩	砾间孔+粒(砾)内气孔+裂缝	0.04~10.3	3.4	263.1	L301
流纹质沉角砾凝灰岩	粒(砾)间孔+溶蚀孔+晶间微孔+裂缝	0.02~11.6	4.8	231.1	L3
流纹质沉凝灰岩	粒间孔+溶蚀孔+晶间微孔+裂缝	0.02~19.2	3.7	213.2	L205

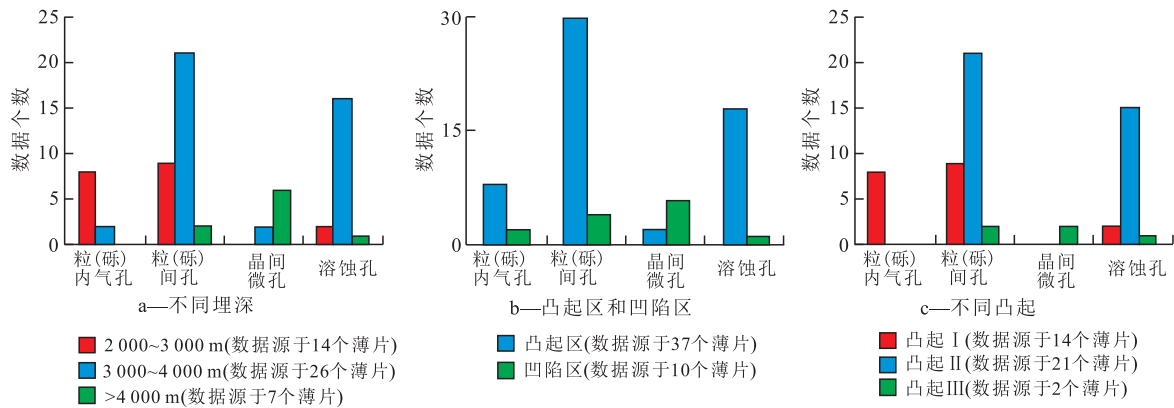


图3 英台断陷营城组沉火山碎屑岩储集空间分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of reservoir space type in sedimentary pyroclastic reservoir of the Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression

## 2 储层物性分布规律

### 2.1 纵向分布规律

利用英台断陷沉火山碎屑岩测井解释孔隙度分析储层物性纵向分布规律,孔隙度解释结果是基于实测孔隙度校正。研究区沉火山碎屑岩测井孔隙度总体呈现随埋深增加而下降的趋势(图4),

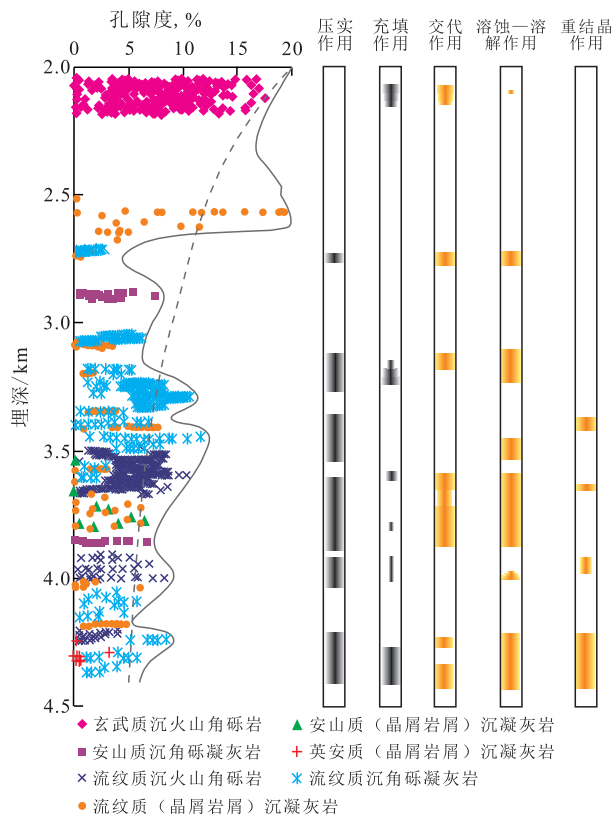


图4 英台断陷营城组沉火山碎屑岩纵向分布特征及其与成岩作用的对应关系

Fig.4 Vertical distribution characteristics of sedimentary pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression and its corresponding relations with diagenesis

2 000~2 100 和 2 500~2 550 m 处孔隙度最高可达 20%,岩性主要为玄武质沉火山角砾岩、流纹质沉角砾凝灰岩;2 600~2 700 m 处孔隙度急剧减小,不足 5%;当埋深大于 3 000 m 后,3 300~3 700 m 处存在高孔隙度带,孔隙度最高约为 15%,岩性为流纹质沉火山角砾岩;当埋深大于 4 000 m 后,孔隙度平均值小于 5%,但埋深为 4 200 m 处的流纹质沉角砾凝灰岩孔隙度约为 10%,具备成为有利储层的条件。

### 2.2 横向分布规律

利用英台断陷沉火山碎屑岩测井解释孔隙度分析储层物性横向分布规律。由图5可以看出,凸

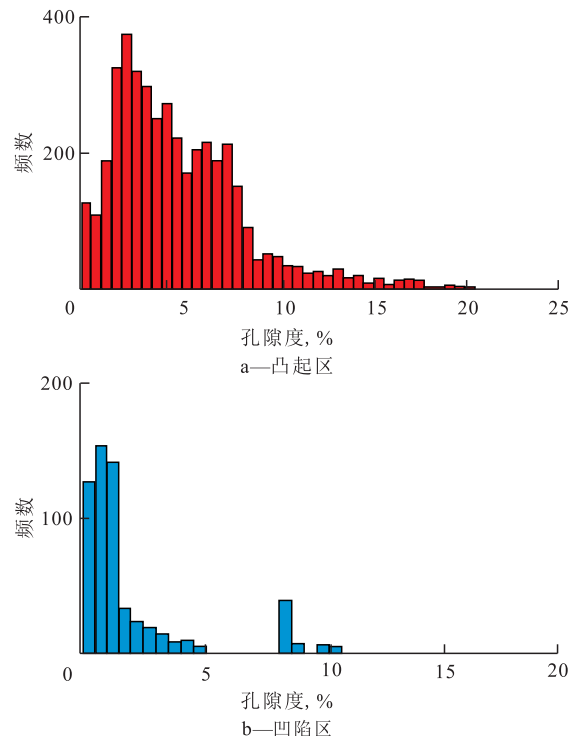


图5 英台断陷营城组沉火山碎屑岩测井孔隙度频数分布

Fig.5 Frequency graph of logging porosity for sedimentary pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Yingtai faulted depression

起区孔隙度呈单峰态,峰值为3%,平均值为4.6%;凹陷区孔隙度峰值为1%,平均值为1.86%;凸起区孔隙度高于凹陷区。3个凸起中,凸起I钻遇岩性包括沉火山角砾岩、沉角砾凝灰岩、沉凝灰岩,孔隙度分布分散,储层非均质性较强,呈单峰态分布,平

均值为5.79%;凸起II钻遇岩性主要为沉凝灰岩及沉角砾凝灰岩,孔隙度呈双峰态,峰值分别为2.5%和6%,平均值为3.89%,非均质性强;凸起III钻遇岩性主要为沉角砾凝灰岩,孔隙度分布集中,非均质性弱,呈单峰态,平均值为4.03%(图6)。

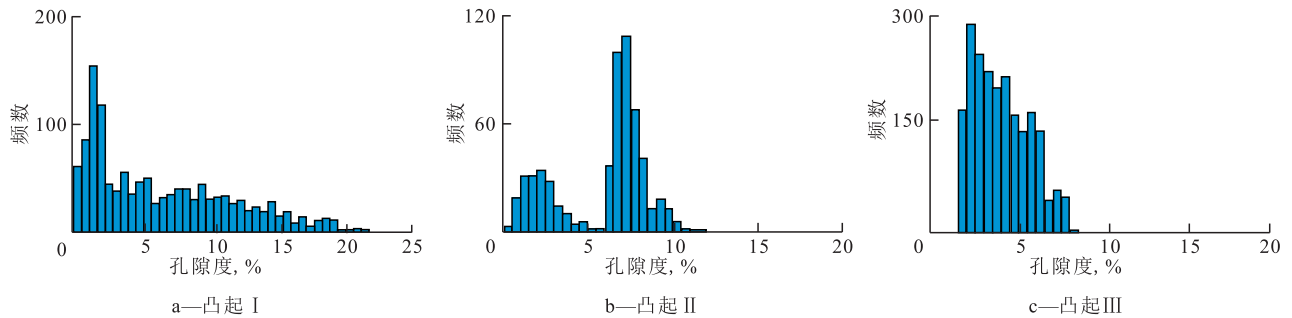


图6 英台断陷不同凸起营城组沉火山碎屑岩测井孔隙度频数分布

Fig.6 Frequency graph of logging porosity for sedimentary pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in different uplifts of Yingtai faulted depression

### 3 储层控制因素

#### 3.1 成岩作用对储层的改造

英台断陷沉火山碎屑岩的成岩作用主要有压实、充填、交代、溶蚀—溶解及重结晶作用。按照成岩作用对孔隙度的贡献,溶蚀—溶解、重结晶和交代作用对储层起改善作用;压实、充填作用对储层起破坏作用<sup>[21]</sup>。通过对17个薄片进行面孔率分析,半定量描述成岩作用对孔隙度的影响(表2)。

表2 英台断陷营城组沉火山碎屑岩成岩作用对储层影响特征

成岩作用	影响的主要岩性	影响的主要储集空间	对孔隙度的影响	典型井
溶蚀—溶解	沉凝灰岩	溶蚀孔、溶蚀缝	增加面孔率 0.6%~5.3% (斜长石)	L2
重结晶	沉凝灰岩	晶间微孔	增加面孔率 0.9%~8.3% (基质)	L7
交代	沉凝灰岩	溶蚀孔、溶蚀缝	增加较小	L2
充填	沉火山角砾岩/ 沉角砾凝灰岩	粒(砾)间孔、粒(砾)内气孔、裂缝	减小孔隙度	L303
压实	火山角砾岩	粒(砾)间孔	减小孔隙度	Y176

溶蚀—溶解作用 沉火山碎屑岩成岩后,易溶物质被溶蚀—溶解,可以增加大量次生孔隙。研究区沉火山碎屑岩表现为钾钠长石晶屑的晶内溶蚀孔(图2g)、粒(砾)间孔、粒(砾)内气孔和构造缝中

的充填物质溶解后形成溶蚀孔和溶蚀缝,基质溶解后形成溶蚀孔。通过面孔率图像分析,斜长石溶蚀最大可增加面孔率5.3%(图2f)。

重结晶作用 重结晶作用是沉火山碎屑岩中火山玻璃脱玻化,转化成雏晶和微晶的成岩作用。研究区表现为基质中、充填粒(砾)间孔的火山玻璃脱玻化,重结晶为长英质矿物和粘土矿物,同时发育晶间微孔(图2g,2i),通过面孔率图像分析,最大可增加面孔率达8.3%(图2j)。

交代作用 交代作用是沉火山碎屑岩成岩后期地层水对岩石作用产生的,其作用类型有方解石交代原生颗粒及基质、方解石交代绿泥石充填物、方解石交代基质等。研究区主要表现为方解石交代沉火山碎屑岩长石晶屑及基质(图2f),方解石交代后可生成少量的微观孔隙,但对于孔隙度的贡献较小<sup>[22]</sup>。

充填作用 充填作用是沉火山碎屑岩成岩后由于后期热液活动,热液等物质充填岩石的孔隙和裂缝。研究区表现为方解石、沸石、绿泥石等矿物充填、半充填粒(砾)间孔、粒(砾)内气孔、晶间微孔及裂缝,例如Y176井玄武质火山角砾岩砾内气孔被充填,形成杏仁构造,充填程度可达30%~100%(图2e)。充填程度越高,储层孔隙度越低。

压实作用 压实作用是沉火山碎屑岩成岩阶段发生的,随着埋深的增加,压实作用增强,表现为沉火山碎屑岩孔隙减少,颗粒紧密接触,例如L6井4021m流纹质沉凝灰岩中晶屑颗粒间经压实后呈碎裂状(图2c)。

### 3.2 高孔隙度带成因

英台断陷沉火山碎屑岩纵向上存在3个高孔隙度带,分别为2 000~2 100, 2 500~2 550和3 300~3 700深度段(图4)。

2 000~2 100 m深度段埋深浅,压实作用弱,但充填作用较强,粒(砾)内气孔和粒(砾)间孔普遍充填方解石和沸石,充填程度为30%~100%;交代、溶蚀—溶解和重结晶作用不发育,所以火山岩储层主要是继承了原生孔隙,受压实作用和充填作用的破坏。2 500~2 550 m深度段溶蚀作用较强,其他特征与2 000~2 100 m深度段相似。凸起I高孔隙度带埋深为2 000~2 100 m,储层形成主控因素是沉火山碎屑岩形成时的熔浆挥发份捕获形成的原生粒内孔,同时较浅的埋深、较弱的压实作用使粒内孔和粒间孔得以保存。

3 300~3 700 m深度段压实作用增强,原生孔隙大量损失;相比较而言充填作用减弱,保留下来部分孔隙;溶蚀—溶解作用强,使沉火山碎屑岩中原本充填程度高的孔隙和颗粒间的填隙物发生溶蚀,发育基质及晶内溶蚀孔,增加了火山碎屑岩的次生孔隙,所以该高孔隙度带储层形成的主要因素是不稳定成分的溶蚀—溶解作用。凸起II和凸起III高孔隙度带埋深为3 300~3 700 m,受压实作用的影响,这2个凸起区原生孔隙保存较少,而斜长石晶屑、火山岩岩屑和基质的溶蚀—溶解作用,以及玻璃质基质的重结晶作用产生的次生孔隙较发育。此外凸起III的不稳定成分含量小于凸起II,所以能提供溶蚀—溶解作用的物质基础稍差,使得储层稍差于凸起II。

## 4 结论

英台断陷营城组沉火山碎屑岩储层岩性主要包括沉火山角砾岩、沉角砾凝灰岩和沉凝灰岩3大类。储集空间主要包括粒(砾)间孔、粒(砾)内气孔、溶蚀孔、晶间微孔及裂缝。沉火山角砾岩孔隙度最高,沉角砾凝灰岩次之,沉凝灰岩最低。高孔隙度带发育的埋深可达到3 300~3 700 m,凸起区储层孔隙度高于凹陷区。

英台断陷营城组沉火山碎屑岩储层孔隙度受压实、充填、交代、溶蚀—溶解、重结晶等成岩作用控制。溶蚀—溶解作用使面孔率最大增加5.3%;重结晶作用最大可增加火山碎屑岩基质面孔率达8.3%;充填作用使孔隙的充填程度达到30%~100%;凸起I高孔隙度带形成主控因素是沉积火山碎屑

岩形成时的熔浆挥发份捕获形成的原生粒内孔,同时较浅的埋深、较弱的压实作用使粒内孔和粒间孔得以保存。凸起II和凸起III高孔隙度带的原生孔隙保存较少,而斜长石、火山碎屑和基质的溶蚀—溶解作用、玻璃质基质的重结晶作用产生的次生孔隙较发育。凸起区中埋深小于3 700 m溶蚀作用和重结晶作用发育的沉火山碎屑岩均应受到勘探的重视。

### 图2说明:

a—角砾间孔未充填、半充填,充填物为火山玻璃,L301井3 498 m,流纹质火山角砾岩,单偏光;b—岩屑间孔,后期被热液充填,L303井3 216 m,流纹质含角砾晶屑岩屑凝灰岩,单偏光;c—长石晶屑受压实作用呈碎裂状,L6井4 021 m,流纹质岩屑晶屑凝灰岩,正交偏光;d—粒(砾)内气孔,角砾内发育原生气孔,部分被方解石、沸石充填,形成杏仁构造,Y176井2 078.8 m,玄武质火山角砾岩,正交偏光(左下角为岩心);e—粒(砾)内气孔被方解石、沸石充填,减小总孔隙度10.3%,Y176井2 078.8 m,玄武质火山角砾岩,正交偏光;f—方解石交代斜长石晶屑,并发育晶内溶孔,增加孔隙度5.3%,L303井3 149.5 m,流纹质含角砾岩屑晶屑凝灰岩,正交偏光;g—基质火山玻璃后期受脱玻化和重结晶作用,转化为雏晶和微晶,L301井3 199 m,流纹质晶屑凝灰岩,正交偏光;h—构造裂缝未充填、半充填,充填物为方解石,L301井3 662 m,流纹质凝灰岩,铸体薄片;i—重结晶作用、充填作用。成岩作用晚期不稳定火山玻璃发生脱玻化作用,重结晶为长英质矿物雏晶和粘土矿物,并发育晶间微孔。而后伊利石矿物沉淀结晶,充填于晶间微孔内,L301井3 199 m,流纹质晶屑凝灰岩,扫描电镜(右下角为伊利石能谱图);j—重结晶作用、充填作用形成的晶间微孔对于基质孔隙度的影响,可增加8.3%的孔隙度,L301井3 199 m,流纹质晶屑凝灰岩,扫描电镜。

### 参考文献:

- [1] Vernik L.A new type of reservoir rock in volcanoclastic sequences [J].AAPG Bulletin, 1990, 74(6): 830-836.
- [2] Bergman S C, Talbot J P, Thompson P R. The Kora Miocene submarine andesite stratovolcano hydrocarbon reservoir, northern Taranaki basin, New Zealand [C]. New Zealand Oil Exploration Conference, proceedings. Wellington: Ministry of Commerce, 1992: 178-206.
- [3] Levin L E. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs: examples from the Caucasus and the NW Pacific [J]. Journal of Petroleum Geology, 1995, 18(3): 267-288.
- [4] Gecer B A. The diagenesis of the upper Oligocene and Mio-Pliocene sandstones and its relevance to hydrocarbon exploration in the East Anatolia Basin, Turkey [J]. Journal of the Geological Society of India, 2005, 65(4): 468-478.

- [5] Remy R R.Porosity reduction and major controls on diagenesis of Cretaceous–Paleocene volcanoclastic and arkosic sandstone, Middle Park basin, Colorado [J].*Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64(4): 797–806.
- [6] 赵澄林.火山岩储层储集空间形成机理及含油气性[J].*地质论评*, 1996, 42(增刊): 38–43.  
Zhao Chenglin. Formation mechanism of reservoir space and oil possibility of volcanic reservoirs [J].*Geological Review*, 1996, 42 (Supplement): 38–43.
- [7] 李浩,高先志,杨德相,等.二连盆地赛汉塔拉凹陷白垩系火山岩储集层特征及分布预测[J].*石油实验地质*, 2014, 36(4): 442–449.  
Li Hao, Gao Xianzhi, Yang Dexiang, et al. Characteristics and distribution prediction of Cretaceous volcanic reservoirs in Saihantala Sag, Erlian Basin [J].*Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(4): 442–449.
- [8] 刘爱永,李令喜,杨国臣,等.查干凹陷苏红图组火山岩储层及其油气成藏特征[J].*油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 54–57.  
Liu Aiyong, Li Lingxi, Yang Guochen, et al. Study of volcano rock reservoir and oil and gas accumulation characteristics of Suhongtu member in Chagan depression [J].*Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 54–57.
- [9] 苗春欣,傅爱兵,关丽,等.车排子地区火山岩储集空间发育特征及有利区带预测[J].*油气地质与采收率*, 2015, 22(6): 27–31.  
Miao Chunxin, Fu Aibing, Guan Li, et al. Reservoir space characteristics and favorable area prediction of volcanic rocks in Chepaizi area, Junggar Basin [J].*Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(6): 27–31.
- [10] 高晔,苏立萍,王莉,等.大港探区南部油田火山岩储层测井识别[J].*特种油气藏*, 2015, 22(3): 66–69.  
Gao Ye, Su Liping, Wang Li, et al. Identification of volcanic rocks and reservoir beds by well logging in southern oilfields of Dagang Prospect [J].*Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(3): 66–69.
- [11] Huang Yulong, Wang Pujun, Chen Shumin. Distribution and characteristics of volcanic reservoirs in China [J].*Global Geology*, 2009, 12(2): 64–79.
- [12] 黄玉龙,王璞珺,舒萍,等.松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理[J].*岩石学报*, 2010, 26(1): 82–92.  
Huang Yulong, Wang Pujun, Shu Ping, et al. Characteristics and formation mechanism of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin, NE China [J].*Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 82–92.
- [13] 吴彦雄,王璞珺,吴艳辉,等.火山岩储层储集空间的构成——以松辽盆地为例[J].*天然气工业*, 2011, 31(4): 28–33.  
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Wu Yanhui, et al. Components of volcanic reservoir space: A case study from the Songliao Basin [J].*Natural Gas Industry*, 2011, 31(4): 28–33.
- [14] 侯启军.松辽盆地南部火山岩储层主控因素[J].*石油学报*, 2011, 32(5): 749–756.  
Hou Qijun. Main controlling factors of volcanic reservoirs in the southern Songliao Basin [J].*Acta Petrologica Sinica*, 2011, 32(5): 749–756.
- [15] 蔡周荣,夏斌,郭峰,等.松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩受控机制分析[J].*石油学报*, 2010, 31(6): 941–945.  
Cai Zhourong, Xia Bin, Guo Feng, et al. Controlling mechanism on volcanic rocks of the Yingcheng Formation of the Xujiaweizi rift depression in the northern Songliao Basin [J].*Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31(6): 941–945.
- [16] 黄玉龙,王璞珺,邵锐.火山碎屑岩的储层物性——以松辽盆地营城组为例[J].*吉林大学学报:地球科学版*, 2010, 40(2): 227–236.  
Huang Yulong, Wang Pujun, Shao Rui. Porosity and permeability of pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Songliao Basin [J].*Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(2): 227–236.
- [17] 杨双玲,刘万洙,于世泉,等.松辽盆地火山岩储层储集空间特征及其成因[J].*吉林大学学报:地球科学版*, 2007, 37(3): 506–512.  
Yang Shuangling, Liu Wanzhu, Yu Shiquan, et al. Pore textures and its causes of volcanic reservoir in Songliao Basin [J].*Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(3): 506–512.
- [18] 王璞珺,迟元林,刘万洙,等.松辽盆地火山岩相:类型、特征和储层意义[J].*吉林大学学报:地球科学版*, 2003, 33(4): 449–456.  
Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: classification, characteristics and reservoir significance [J].*Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2003, 33(4): 449–456.
- [19] 黄薇,邵红梅,赵海玲,等.松辽盆地北部徐深气田营城组火山岩储层特征[J].*石油学报*, 2006, 27(增刊): 47–51.  
Huang Wei, Shao Hongmei, Zhao Hailing, et al. Characteristics of Yingcheng Formation's volcanic reservoir in Xushen Gas Field in northern Songliao Basin [J].*Acta Petrologica Sinica*, 2006, 27(Supplement): 47–51.
- [20] 张斌.松辽盆地南部张强凹陷义县组火山岩储层特征及成藏规律[J].*石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 508–515.  
Zhang Bin. Characteristics and hydrocarbon accumulation patterns of volcanic rocks in the Yixin Formation Zhangqiang depression, southern Songliao Basin [J].*Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 508–515.
- [21] 高有峰,刘万洙,纪学雁,等.松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J].*吉林大学学报:地球科学版*, 2007, 37(6): 1 251–1 257.  
Gao Youfeng, Liu Wanzhu, Ji Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin [J].*Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1 251–1 257.
- [22] 瞿雪皎,王璞珺,修立军,等.松辽盆地营城组流纹岩成岩作用的测井响应及其储层效应[J].*地球物理学进展*, 2011, 26(6): 2 153–2 162.  
Qu Xuejiao, Wang Pujun, Xiu Lijun, et al. Well-logging responses and reservoir effects of rhyolite's diageneses of Yingcheng Formation (K<sub>1y</sub>) in the Songliao Basin [J].*Progress in Geophysics*, 2011, 26(6): 2 153–2 162.