

文章编号: 0253-2697(2014)02-276-10 DOI:10.7623/syxb201402007

# 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响

——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例

朱世发<sup>1,2</sup> 朱筱敏<sup>1,2</sup> 刘学超<sup>1,2</sup> 李 超<sup>1,2</sup> 王星星<sup>1,2</sup> 谈明轩<sup>1,2</sup> 耿名扬<sup>1,2</sup> 李艳平<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学地球科学学院 北京 102249;

3. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院地球物理研究所 新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 通过镜下观察(岩石、铸体薄片和扫描电镜)与岩心分析,结合地层水分析结果、岩矿组成和物性数据等,以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例,系统研究了含火山物质油气储层中不同自生矿物成因机理、自生矿物对油气储集空间的影响、孔隙演化及其控制因素,对储集空间具有重要影响的自生矿物主要有绿泥石、沸石(包括方沸石、片沸石和浊沸石)、方解石、钠长石和自生石英。研究表明,酸性水的加入促使早期碱性条件下析出的沸石、钠长石和方解石易于溶蚀;钾长石或斜长石溶蚀后,非等体积矿物转化析出钠长石。早期适量的绿泥石衬边和包膜对储集空间有保护意义,但成岩后期大量的绿泥石胶结破坏孔隙。与基性岩相比,中酸性熔岩和火山碎屑岩未见大规模绿泥石胶结,储层物性较好。NaHCO<sub>3</sub>型地层水和有机酸影响下的方沸石胶结砂(砾)岩中,次生溶孔发育,为有利的碎屑岩储层。总体上,火山物质的成岩作用及蚀变演化很大程度上改善了中深层油气储层质量。

**关键词:** 蚀变火山物质;自生矿物;成因机理;储层质量;下二叠统;准噶尔盆地

中图分类号: TE122.14

文献标识码: A

## Alteration products of volcanic materials and their influence on reservoir space in hydrocarbon reservoirs; evidence from Lower Permian strata in Ke-Xia region, Junggar Basin

Zhu Shifa<sup>1,2</sup> Zhu Xiaomin<sup>1,2</sup> Liu Xuechao<sup>1,2</sup> Li Chao<sup>1,2</sup> Wang Xingxing<sup>1,2</sup>  
Tan Mingxuan<sup>1,2</sup> Geng Mingyang<sup>1,2</sup> Li Yanping<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Geophysical Research Institute of the Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** This study investigated the genesis of different authigenic minerals in hydrocarbon reservoirs associated with alteration of volcanic materials and their influences on reservoir space, as well as the pore evolution and its control factors. A case study was carried out on the Lower Permian strata in Ke-Xia region, Junggar Basin by light and scanning electron microscopic examinations of rock samples and thin-sections and core analysis, combined with the results of formation water analysis as well as rock composition and lithological data. Authigenic minerals that exerted great influences on reservoir space mainly included chlorite, zeolites (including analcime, heulandite, and laumontite), calcite, albite, and quartz. The addition of acidic water promoted the dissolution of zeolite, albite, and calcite that were precipitated under alkaline conditions in an early stage; after the dissolution of potash feldspar or anorthose, the non-isopyknic minerals were transformed through albitization. Proper chlorite rims in pores and grain coatings preserved reservoir pore space in an early stage; however, the presence of massive chlorite cements reduced the reservoir quality in a late stage of diagenesis. Compared with basic volcanic rocks, neutral-silicic lavas and pyroclastic rocks contain less authigenic chlorite and thus may have improved reservoir property. As influenced by NaHCO<sub>3</sub>-type formation water and organic acid, coarse glutenite bearing soluble analcime cements has well-developed secondary pores and serves as the favorable clastic reservoir. Overall, the diagenesis and diagenetic evolution of volcanic materials significantly have improved the quality of hydrocarbon reservoirs at middle-to-deep depths.

**Key words:** altered volcanic material; authigenic mineral; genesis; reservoir quality; Lower Permian; Junggar Basin

针对油气储集层中火山物质蚀变形成的不同自生矿物对储集空间的影响,前人缺乏系统、全面的研究,仅限于对单一矿物的描述。例如,蚀变产物蒙脱石后期可以转化形成绿泥石,Clough<sup>[1]</sup>、Karig<sup>[2]</sup>和 Ehren-

**基金项目:** 国家重大科技专项(2011ZX05009-002-104)、国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41202107)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20120007120004)、中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-01-20)资助。

**第一作者及通信作者:** 朱世发,男,1982年7月生,2005年获中国石油大学(北京)学士学位,2011年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)讲师,主要从事储层地质学与沉积学教学和研究工作。Email: zhushifa\_zsf@163.com

berg<sup>[3]</sup> 研究认为, 厚而连续的绿泥石包膜抑制石英的次生加大, 作为孔隙衬边增加岩石强度, 保护原生孔隙。不同沸石矿物在不同的成岩环境中对油气储层有不同的影响。在准噶尔盆地克-夏地区二叠系火山岩屑质的砂(砾)岩储层中, 方沸石溶蚀改善储层, 片沸石胶结破坏储层<sup>[4]</sup>。如果片沸石后期转化为浊沸石或斜长石蚀变形成的浊沸石溶蚀, 能够增加储集空间<sup>[5-7]</sup>。方解石胶结破坏孔隙, 但早期的胶结物为后期溶蚀提供了物质基础<sup>[8]</sup>。钾长石和斜长石被钠长石交代使矿物体积收缩, 形成一定的微孔<sup>[9-10]</sup>, 增加储集性能, 同时为后期酸性流体进入钾长石和斜长石提供了通道。

前人在单一矿物影响储集空间方面, 做了大量的工作。但前人并没有系统讨论各种自生矿物与火山物质蚀变的成因联系, 未系统总结不同自生矿物析出的控制因素、成岩演化以及对储集层的改善或者破坏作用。研究区火山岩类及以火山岩岩屑为主要岩石成分的碎屑岩是重要的油气储层类型。研究岩石成分中火

山物质的蚀变过程、形成的自生矿物及孔隙演化规律对油气勘探具有重要的意义。通过镜下薄片观察(偏光显微镜和扫描电镜)、岩心分析、岩矿组成和物性数据等, 在前人工作基础上, 侧重分析研究区含火山物质油气储层中各种自生矿物的成因、自生矿物与储集空间的关系以及成岩演化和孔隙演化的控制因素等, 为含火山物质的油气储层评价、预测提供地质依据。

### 1 地质背景

研究区位于准噶尔盆地西北部, 属于西部隆起区内的克-夏断阶带二级构造单元<sup>[11]</sup>, 勘探面积近 5 000 km<sup>2</sup>。目前钻、测井资料及周缘山系出露地层揭示, 研究区火山活动频繁, 主要集中在泥盆纪、石炭纪一早二叠世<sup>[12]</sup>, 火山喷发方式为裂隙式喷发<sup>[13]</sup>。下二叠统自下而上沉积了佳木河组和凤城组; 上覆夏子街组和乌尔禾组。下二叠统埋深主要在 2 400~5 000 m, 沉积厚度 1 000~1 500 m, 大套砂、砾岩中发育多期火山岩和火山碎屑岩(图 1)。

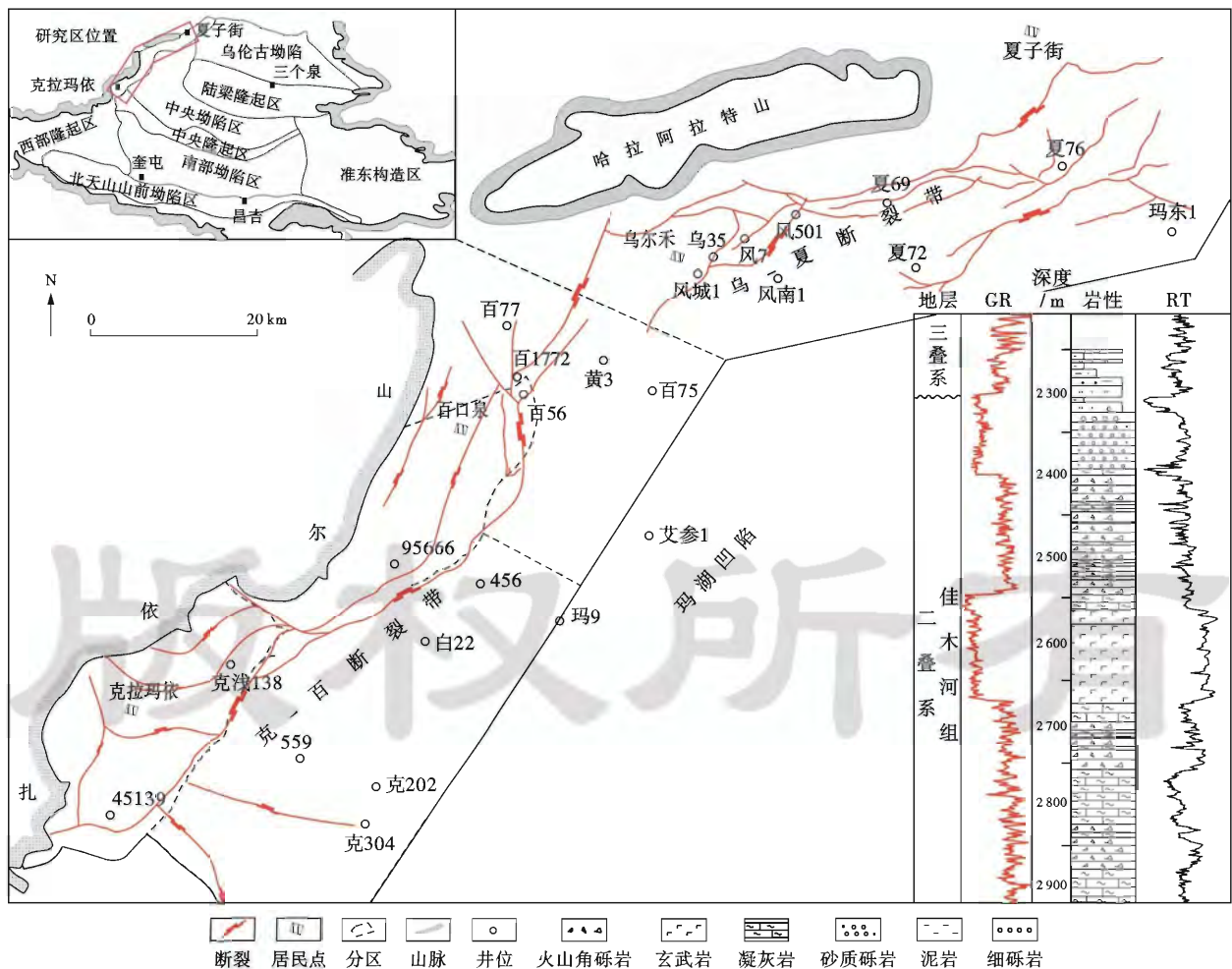


图 1 准噶尔盆地克-夏地区位置及岩性剖面

Fig. 1 Location and lithological profiles of the Ke-Xia region in Junggar Basin

下二叠统的粗粒碎屑岩(粗砂岩、含砾粗砂岩等)主要由北部石炭系火山岩区供源,成分成熟度和结构成熟度低,碎屑成分以凝灰岩、安山岩等火山岩屑为主(图2),平均含量大于70%。下二叠统火山岩系与粗碎屑岩扇体平面相邻、垂向间互,组成复合岩性油气储层,是西北缘地区克拉玛依油田主力产油层系之一<sup>[4,8]</sup>。文中将火山岩屑质砂(砾)岩与火山岩放在一起讨论,是因为它们中的火山物质都以中基性为主,推测为同源岩浆成因<sup>[13]</sup>,且蚀变特性大体相同。

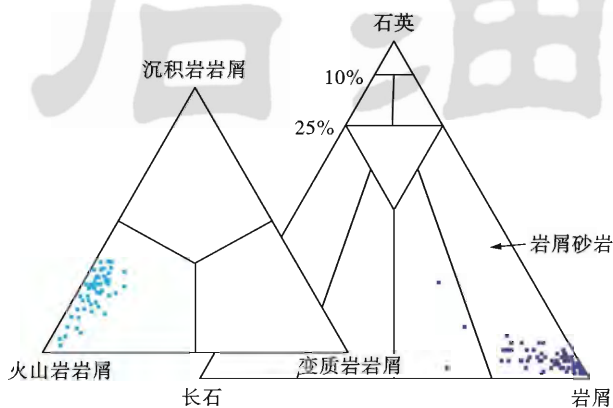


图2 下二叠统粗砂岩骨架碎屑成分(图版据文献[14])

Fig. 2 Framework grain composition in the Lower Permian sandstones

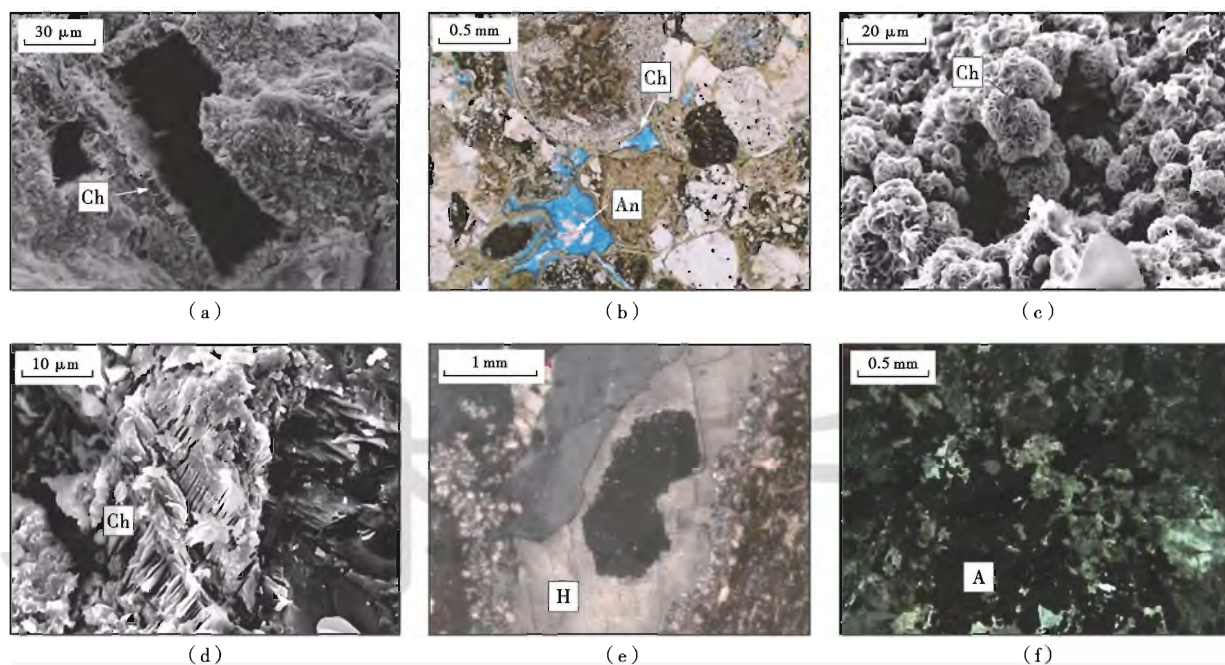
## 2 自生矿物特征及成因

在研究区下二叠统碎屑岩和火山岩混合储层中,常见的且对储集空间具有重要影响的自生矿物主要有绿泥石、沸石(包括方沸石、片沸石和浊沸石)、方解石、钠长石和自生石英等。不同矿物产出特征、成因以及与火山物质蚀变的关系各不相同。

### 2.1 绿泥石

薄片观察发现,自生绿泥石通常有以下5种产状:①孔隙的环边(也称为衬里)[图3(a)和图3(b)],片状单晶紧密排列,多见于结构成熟度较高的砂、砾岩粒间孔或火山岩的气孔中;②孔隙及裂缝充填,多为绒球状[图3(c)];③火山玻璃基质掺杂,一般呈放射状或不规则片状,多发育在凝灰岩或熔岩的玻璃基质中;④长石解理处沉淀,具有典型的叶片状晶形[图3(d)];⑤交代火山岩中辉石、角闪石斑晶和云母碎片。

自生绿泥石的形成与岩石成分中火山物质蚀变关系密切。岩心及镜下岩石学特征表明,研究区自生绿泥石成因可以总结为以下3种:①成岩环境孔隙水中绿泥石自生沉淀;研究区下二叠统  $R_c$  值介于 0.53%~1.80%,处于中成岩阶段。碎屑岩储层随着埋深的增加,在孔隙间易于形成绿泥石胶结物,如图3(a)和图3(b)



(a)粒间孔与衬垫式产出的绿泥石(Ch),厚而连续的环边对保护孔隙有效,含砾不等粒砂岩,孔隙度为9.42%,拐104并3286.74 m; (b)绿泥石(Ch)包膜和方沸石(An)溶孔,注意绿泥石包膜对孔隙的保护,岩屑砂岩,孔隙度为6.65%,561并2449.71 m,铸体(蓝色)单偏光; (c)孔隙中充填的绒球状绿泥石(Ch),砾岩,克304并3677.19 m; (d)绿泥石交代长石,形成晶间孔,砂质砾岩,克83并3560.09 m; (e)浊沸石(H)杏仁体,流纹质凝灰熔岩,孔隙度为4.61%,玛东1并4266.28 m; (f)基质方解石化后又被溶蚀,填充沥青(A),岩屑屑凝灰岩(+),孔隙度为3%,风21并3372.1 m。

图3 自生矿物绿泥石、沸石和方解石微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of authigenic chlorites, zeolites and calcites

所示,铁镁离子可能来源于易溶的铁镁矿物碎屑和泥岩<sup>[15-16]</sup>。②火山玻璃蚀变及黏土矿物的转化:早期火山玻璃蚀变形成蒙脱石,蒙脱石随着埋深和温压条件增高,在铁镁离子富集的情况下转化为绿泥石(详见后文中“成岩演化”)。③非黏土矿物蚀变和交代:包括辉石、角闪石、黑云母等铁镁矿物蚀变以及长石和火山岩岩屑被富铁镁孔隙水交代,沉淀绿泥石。这种成因的绿泥石在研究区最为常见。富钙长石向绿泥石蚀变,伴随矿物溶解形成一定溶蚀孔或晶间孔[图3(d)],同时方解石析出。

## 2.2 沸石

研究区主要发育方沸石、片沸石和浊沸石。方沸石晶形多呈不规则的等轴粒状,常见不同程度的溶蚀现象。区内片沸石发育普遍,片状晶体多沿着碎屑颗粒的边缘大致垂直生长;板状和条状晶体则以半充填或全充填方式产于碎屑岩或火山岩的裂隙中;连生状晶体为全充填式胶结物,析出于粒间孔隙之中,对储层破坏严重。柱状浊沸石集合体常常作为孔隙充填的胶结物出现[图3(e)]。

受同生逆掩断层影响,研究区二叠系沸石矿物形成于开放的水文环境,成因与大量火山物质的水化、蚀变关系密切,常见与玻璃物质、黏土矿物共生(详见后文中“成岩演化”)。这些火山物质在砂、砾岩储层中主要是凝灰岩岩屑,在火山(碎屑)岩中为火山玻璃等易溶且不稳定的岩石成分。前人研究表明,自生沸石的析出与原始物质组成有关,并受地层孔隙水的化学性质等因素控制<sup>[6,17]</sup>。研究区火山物质的沸石化蚀变过程为:火山玻璃—斜发沸石—方沸石—片沸石—浊沸石<sup>[4]</sup>。

## 2.3 方解石

方解石晶体常与绿泥石、沸石、自生石英等矿物伴生;在碎屑岩的粒间孔和火山岩的气孔、裂缝中,方解石充填胶结。火山岩和火山碎屑岩基质中常见斑状的细晶方解石交代物[图3(f)],是火山玻璃和富钙斜长石碳酸盐化的产物。

含火山物质的油气储层中,自生方解石的沉淀与火山物质的蚀变具有成因联系,特别是析出于斜长石蚀变和火山玻璃的水解过程。Orajaka 研究美国得克萨斯州 TranS—PecoS 油矿区 Tas-cotal 组的岩石特征时发现,当少量玻璃质溶解时,方解石开始沉淀;当更多的玻璃质溶解时,方解石持续析出,直到溶液最终没有溶解的 CO<sub>2</sub> 时才停止<sup>[18]</sup>。在西北缘乌-夏断裂带下二叠统风城组,大量凝灰岩基质中发育的白云石为早期富钙斜长石蚀变形成的方解石、后期被富镁卤水成岩交代成因<sup>[8]</sup>。钙质火山灰发生白云石化作用,将

耗尽地层水中的镁离子,因此绿泥石的发育可能受到抑制。另外在火山玻璃蚀变以及沸石化过程中,斜发沸石向方沸石转化等成岩过程析出钙离子,将利于方解石的沉淀。

## 2.4 钠长石

研究区火山岩类中的自生钠长石晶体呈板状或板条状,充填于气孔或火山基质的空隙中[图4(a)和图4(b)]。砂、砾岩中的钠长石沿斜长石解理面生长,也可以作为斜长石碎屑边缘次生加大边出现[图4(c)]。

研究区钠长石的形成推测与多种火山物质蚀变关系密切,包括酸性、中酸性火山(碎屑)岩和砂、砾岩中钾长石蚀变,通常出现在 120~150℃<sup>[19]</sup>;基性、中基性火山(碎屑)岩和砂、砾岩中的斜长石在蚀变过程中,由于 Na<sup>+</sup> 离子半径要比 Ca<sup>2+</sup> 小,钠离子容易交代斜长石中的钙离子而形成富钠长石<sup>[20]</sup>,如图4(d)显示的长石溶模孔中充填的自生钠长石。另外,常见火山玻璃物质蚀变[图4(b)]及沸石的后期钠长石化。

## 3 火山物质蚀变作用对储层的影响

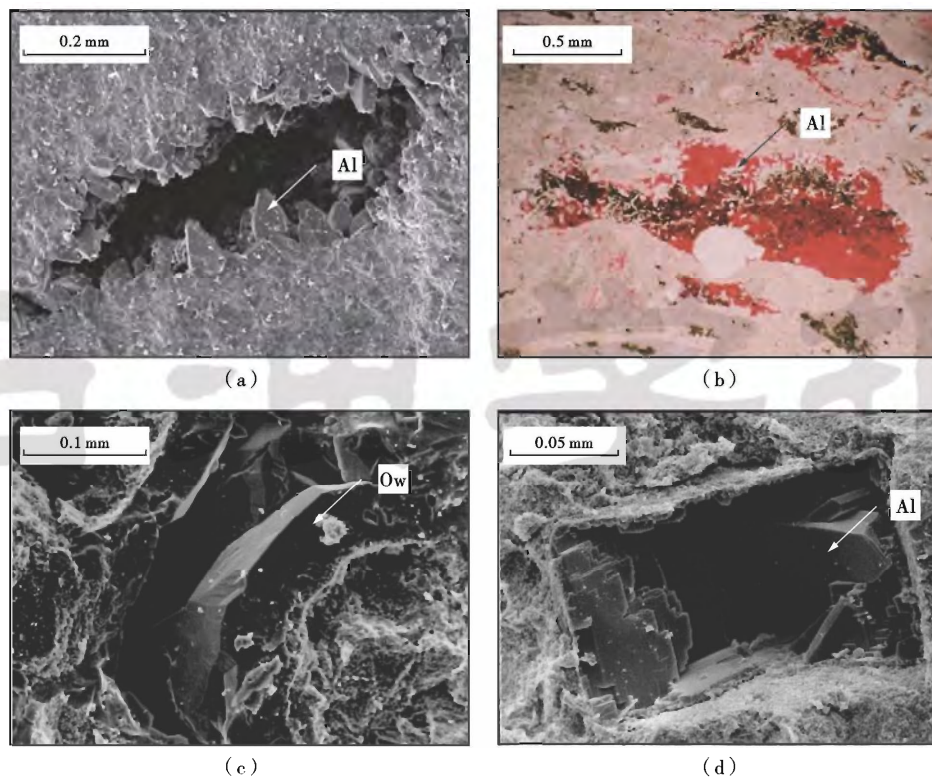
火山物质的成岩作用及蚀变演化严重影响其赋存的油气储集层孔隙演化,很大程度上改善中深层油气储层质量。研究区下二叠统火山-沉积岩混积油气储层中火山物质的蚀变可以概括为脱玻化、绿泥石化(黏土化)、沸石化、钠长石化和方解石化(碳酸盐化)5个主要的成岩变化。不同的成岩变化及成岩阶段对储集层的影响差异明显(表1,图5)。

### 3.1 脱玻化

图5(a)显示方沸石和方解石交代脱玻化的火山基质,同时基质内有大量晶间孔和溶蚀孔产生。含火山物质的油气储层中,火山玻璃可以是火山(碎屑)岩中的玻璃基质物质,也可以是碎屑岩火山岩屑中的玻璃屑,其脱玻化作用可以产生大量的微孔隙即脱玻化孔,是由于自生矿物析出而体积缩小形成的收缩孔、脱水孔、晶间孔等等,如图4(b)中的钠长石晶间孔,明显改善油气储层物性。

### 3.2 绿泥石化

研究区自生绿泥石孔隙衬边保护原生或者早期的次生孔隙[图3(a)和图3(b)],防止被后期压实作用和胶结作用破坏,抑制次生加大石英等矿物的增长。厚而连续的绿泥石衬边有效[图5(c)];分散且薄的、不连续的可能无效。前人研究表明,火山物质蚀变形成的各种自生矿物充填孔隙空间时,少量胶结物对岩石物理性质有积极影响,如提高沉积物强度、抗压实变形,保存孔隙<sup>[21-23]</sup>。实验工作也证明少量的颗粒包膜如绿泥石能够增加沉积物的强度<sup>[1-2]</sup>。



(a) 钠长石(Al)充填气孔,流纹质角砾熔结凝灰岩,孔隙度为14.2%,夏202井4824.11m;(b)浆屑和火山灰钠长石化孔,改善储集物性,流纹质凝灰岩,孔隙度为13.36%,809井3047.60m;(c)钠长石次生加大(Ow)及粒间孔,砂质砾岩,孔隙度为12.7%,百101井2658.44m;(d)长石溶模孔中充填的钠长石(Al),表明钠长石化过程是非等体积矿物转化,细砂岩,孔隙度为13.33%,拐104井3311.7m。

图4 自生钠长石镜下特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of authigenic albites

研究区内长石向绿泥石转化是一个长石溶解析出、绿泥石自生矿物沉淀的过程,由于钾离子和二氧化硅被移去,体积缩小,长石发育大量的粒内溶孔[图3(d)]。火山岩屑的蚀变和长石向绿泥石转化是同时进行的,前者为后者提供铁镁离子。另外,成岩绿泥石发育50%的微孔隙即绿泥石晶间孔<sup>[24]</sup>,这些晶间孔的一部分可能是有效的储集空间。

### 3.3 沸石化

在研究区下二叠统粗碎屑岩中,方沸石溶蚀对储层改善明显[图5(a)];片沸石和浊沸石胶结普遍,对储层破坏严重[图3(e)和图5(d)]。前人研究已经发现,沸石矿物的成岩作用明显影响油气储层质量,控制岩石的孔隙性和渗透性<sup>[4,25]</sup>。火山岩屑质和长石质的砂岩中,沸石胶结物对分析砂岩体的储层特征和成岩演化十分重要<sup>[26]</sup>。已知最早关于油气储层中天然沸石的报道是加利福尼亚州 San Joaquin 盆地中新世砂岩储层中的浊沸石胶结物<sup>[27]</sup>。Surdam 等强调干酪根热降解过程排出的有机酸对长石和浊沸石溶蚀、形成次生孔隙的重要作用<sup>[6-7]</sup>。在中国鄂尔多斯盆地东部

上三叠统,含浊沸石的长石砂岩由于浊沸石溶蚀形成次生孔隙而成为重要的油气储层<sup>[5]</sup>。在 Yurihara 油田硅质凝灰岩储层中,自形的方沸石和冰长石微晶之间可以形成大量的晶间孔,孔隙度约为20%<sup>[28]</sup>。

### 3.4 钠长石化

在火山灰基质中,自生钠长石间发育大量晶间孔[图4(b)]。钾长石和斜长石被钠长石交代是一个溶解—沉淀的过程。在中浅层,钾长石的溶解速率远远大于钠长石的沉淀速率,前者表现为大量粒间和粒内溶孔的形成[图4(d)],而后者在扫描电镜下仅见到微粒自形晶以及碎屑长石中的微条纹,非等体积的矿物转化增加了岩石的孔隙。在富钙长石碎屑钠长石化过程中,由于体积收缩和矿物溶解形成一些钠长石晶间微孔和钙长石溶解孔。

### 3.5 方解石化和自生石英

自生方解石和石英可以形成于火山物质蚀变的各个阶段,伴随不同自生矿物一同沉淀[图5(b)]。早期方解石胶结物破坏原生孔隙;但随着烃源岩层排出的有机酸进入岩层,自生方解石的后期溶蚀明显提高储

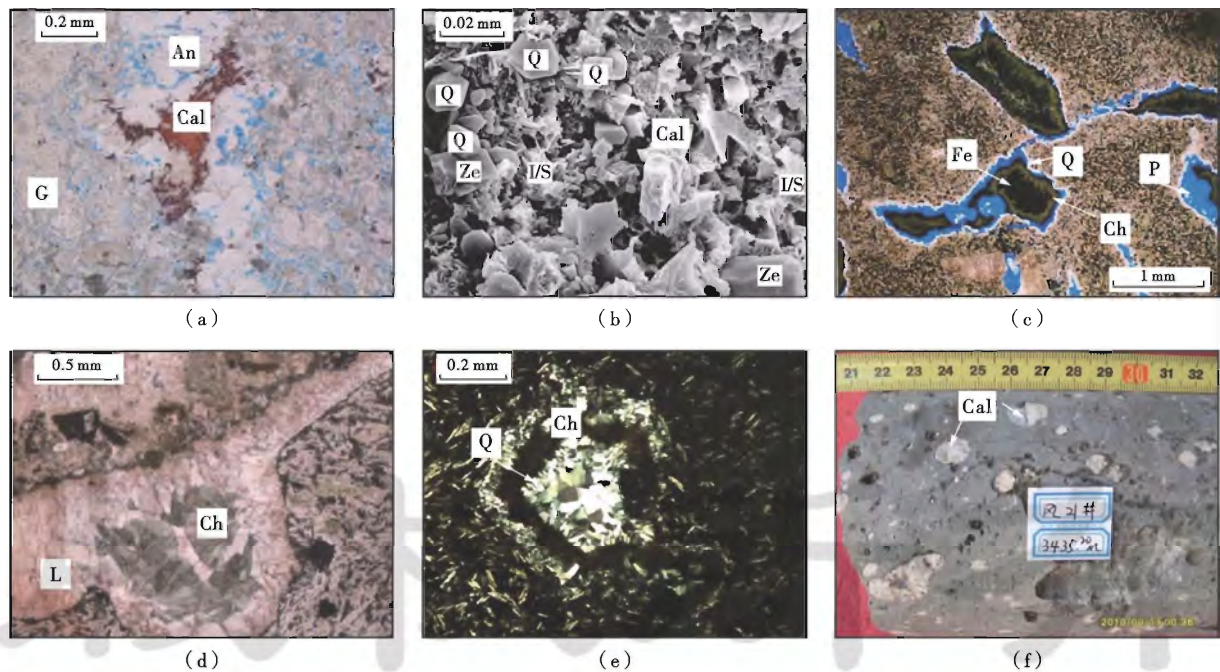
层物性<sup>[29]</sup>。凝灰质被碳酸盐交代后再溶解可形成次生孔隙[图 3(f)和图 5(f)]。自生石英通常充填粒间孔、气孔或裂缝,对储层具有破坏作用[图 5(e)]。部分充填气孔的石英,也可能是埋藏之前形成。

表 1 准噶尔盆地下二叠统含火山物质油气储层自生矿物特征及对储层质量的影响

Table 1 Characteristics of authigenic minerals and their impacts on the volcanics-bearing hydrocarbon reservoirs of Lower Permian in Junggar Basin

自生矿物	成分	分布深度/m	赋存的岩石类型	产出特征	形成温度/℃	成因分析	对储层影响	样品孔隙度范围
绿泥石	$Fe_3Mg_4Al_6-Si_6O_{20}(OH)_{16}$	2300~5000	基性火山熔岩和凝灰岩中多见,碎屑岩次之	孔隙的环边衬里;孔隙及裂缝充填;火山玻璃基质掺杂;长石解理处沉淀;铁镁矿物被交代	85~160	铁镁矿物、长石等非黏土矿物蚀变;火山玻璃蚀变及黏土矿物的转化;成岩环境孔隙水中自生沉淀	早期适量的绿泥石衬边和包膜对储集空间有保护意义,但后期大量的绿泥石胶结破坏储层	早期少量胶结,孔隙度可达 9%~18%;晚期致密,降至 4%~6%
沸石	方沸石: $NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$ 片沸石: $Ca_4KAl_9Si_{27}O_{72} \cdot 26H_2O$ 浊沸石: $CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$	2300~5000	火山岩屑质砂(砾)岩、玻璃质硅质凝灰岩及火山熔岩	火山熔岩气孔充填;裂缝充填;碎屑岩粒间孔胶结	85~140	火山玻璃在低温(<200℃)和埋藏成岩环境中水解蚀变;各种沸石的转化	早期沸石胶结破坏原生孔隙,后期方沸石溶蚀明显提高储层物性;区内片沸石和浊沸石难溶	方沸石溶蚀,孔隙度可达 10%~23%;片沸石和浊沸石胶结,降至 4%~6%
钠长石	$NaAlSi_3O_8$	2600~5000	基性火山熔岩和凝灰岩中多见,碎屑岩次之	板状或板条状,充填气孔或火山基质的空隙中;砂、砾岩中沿斜长石解理面生长;见钠长石次生加大边	120~150	火山玻璃物质蚀变及沸石、钾长石和斜长石的后期钠长石化	钠长石晶间孔和溶蚀孔改善储层质量	一般为 13%~16%
方解石	$CaCO_3$	2300~5000	碎屑岩、凝灰岩和火山熔岩	火山基质方解石化呈斑状或星点状分布,一般为细晶;砂、砾岩粒间孔和火山岩的气孔、裂缝中方解石嵌晶胶结	85~160	矿物中钙离子析出,在 $CO_2$ 的水溶液中沉淀	早期破坏原生孔隙,但后期的溶蚀明显提高储层物性	由胶结和溶蚀程度决定,变化范围:2%~24%

注:形成温度是基于镜质体反射率( $R_o$ )数据和流体包裹体分析得到。



(a) 方沸石(An)和方解石(Cal)交代脱玻化的火山基质(G),安山质凝灰熔岩,百 73 井 1 448. 25 m,蓝色铸体(-);(b)伊/蒙混层(I/S)与自生石英(Q)、碳酸盐类矿物(Cal)、沸石类矿物(Ze)共生,砂岩,玛 4 井 3 528. 48 m;(c)气孔内绿泥石(Ch)收缩,气孔(P)边缘硅质(Q)充填,收缩缝连通气孔,黑色为铁质(Fe),安山岩,孔隙度为 12. 5 %,克 84 井 3 027. 66 m,蓝色铸体;(d)早期片沸石(L)和后期放射状致密绿泥石(Ch)胶结,注意孔隙空间被严重破坏,砾岩,克 82 井 4 037. 07 m,(+);(e)早期马牙状硅质(Q)、中期绿泥石(Ch)、晚期粒状石英(Q)充填气孔,杏仁状玄武岩,孔隙度为 2. 14 %,风南 1 井 4 471. 6 m;(f)方解石杏仁体(Cal)溶蚀,后期充填绿泥石;半充填气孔含沥青,熔结凝灰岩,风 21 井 3 435. 2 m。

图 5 不同自生矿物对储集空间的影响

Fig. 5 Influences of different authigenic minerals on reservoir spaces

## 4 孔隙演化控制因素

### 4.1 成岩演化

结合前人研究及镜下观察,在下二叠统含火山物质的油气储层中,早期的成岩作用以发育压实作用、水化反应、脱玻化和蒙脱石化为典型特征(图6);随着地层温度的升高(44℃)<sup>[25]</sup>,形成一定量的早期沸石矿物类型(如斜发沸石)<sup>[4]</sup>和自生微晶石英[图5(b)]。至中成岩阶段,蒙脱石向伊利石转化[图5(b)]、长石向绿泥石转化[图3(d)]。在研究区,蒙脱石矿物少见,多以伊/蒙混层产出,推测部分转化为绿泥石。早期的沸石随着温度的升高和阳离子比率的改变转化为方沸石、片沸石和浊沸石<sup>[4]</sup>。镜质体反射率数

据表明,钠长石常出现在温度高于120℃的地层,是方沸石、钾长石或斜长石蚀变而成。在中成岩阶段,伴随烃源岩成熟,有机酸排出,方沸石大量溶蚀形成次生孔隙[图5(a)]。

钾长石和斜长石被钠长石交代是一个体积收缩的成岩过程,大量晶间孔形成。至中成岩B期,孔隙演化特征表现为胶结减孔[图5(d)]。中基性火山物质蚀变影响绿泥石胶结物大量生成,破坏孔隙空间。自生的石英和方解石可以出现在火山物质蚀变的整个成岩过程[图5(b)]。总体上,在中成岩阶段,火山岩成岩作用以绿泥石化、方解石化、自生石英的析出为典型特征;(火山)碎屑岩以沸石化和方沸石的溶蚀最为常见,钠长石化其次(图6)。

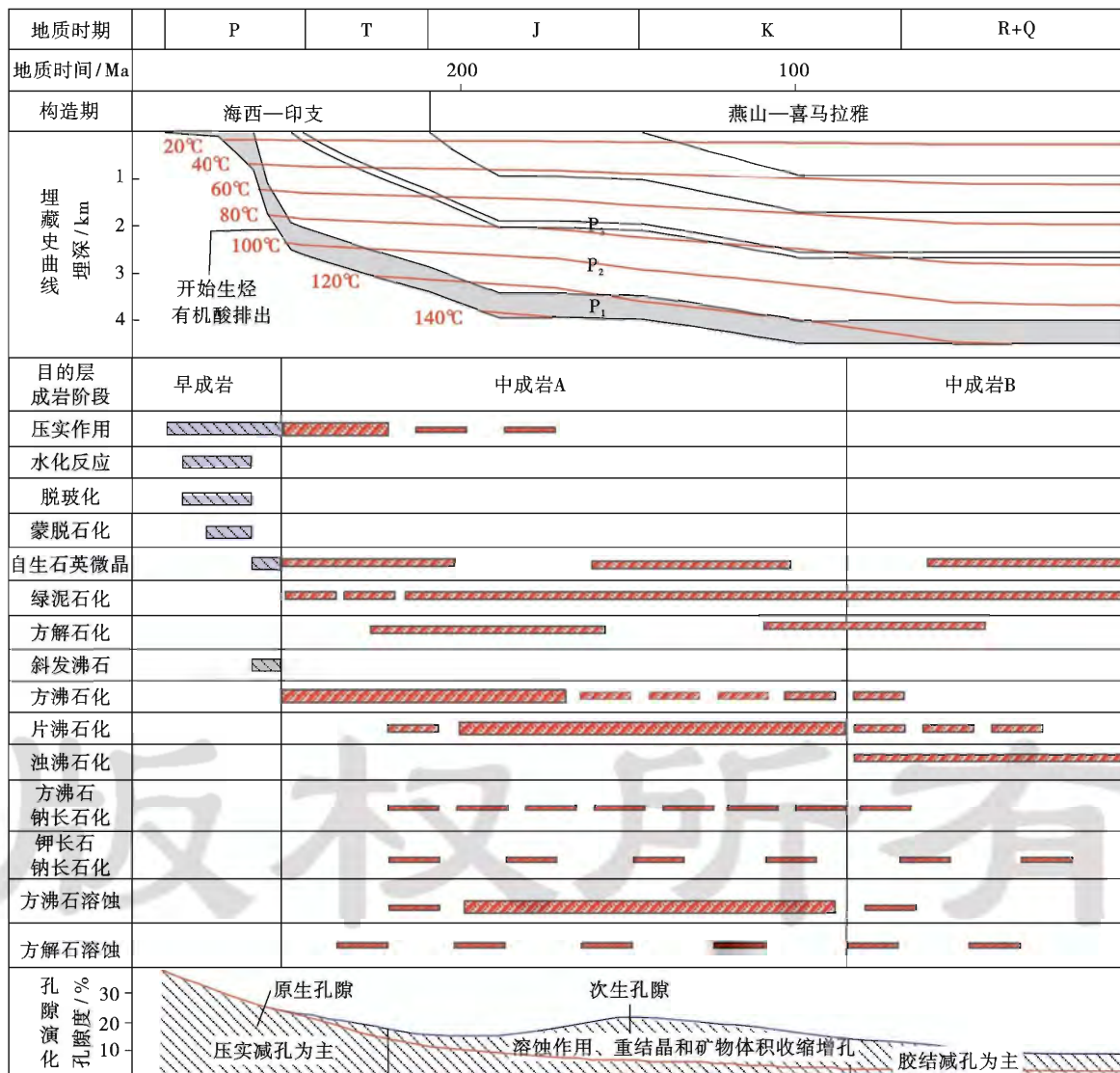


图6 研究区下二叠统含火山物质储层成岩演化及孔隙演化

Fig. 6 Diagenetic evolution and pore evolution in the Lower Permian

### 4.2 关于孔隙演化控制因素的探讨

下二叠统含火山物质的油气储层孔隙演化一定程

度上受控于火山碎屑的蚀变程度、析出的自生矿物类型及后期的溶蚀作用,与母岩物质组成、粒度密切相

关,并受地层温度、压力、孔隙水的化学性质(如 pH、阳离子比例)等因素控制。

研究区中基性为主的火山物质成分对蚀变矿物组合具有明显的影响。碎屑岩-火山岩混合储层中这些高含铁镁矿物的火山物质蚀变影响绿泥石、白云石等含镁矿物的形成。在中酸性熔岩和火山碎屑岩中未见大规模绿泥石胶结,孔隙性相对较好[图 5(c)];基性玄武岩气孔中绿泥石强烈胶结,孔隙性较差(图 7)。在碎屑岩和中基性熔岩中钠长石的形成主要是钾长石或斜长石被钠长石交代所致,中基性母岩不稳定的斜长石组分含量高,可能更利于钠长石化发生,从而形成大量钠长石晶间孔。

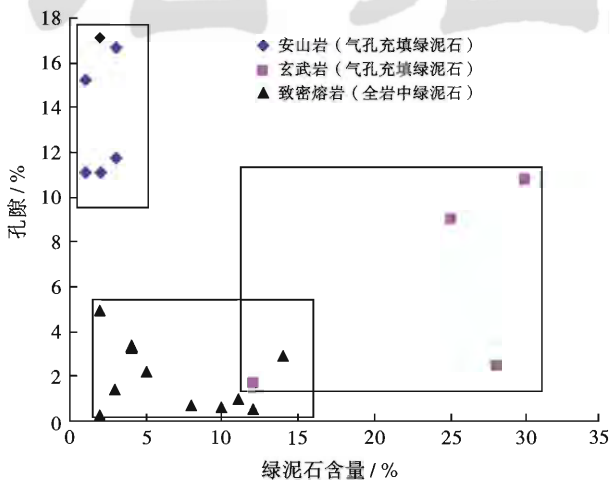
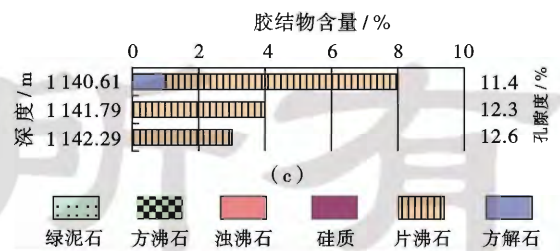
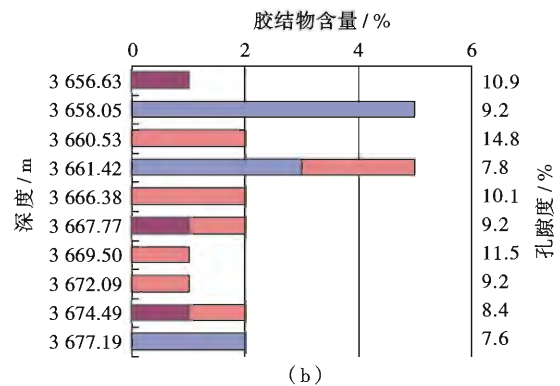
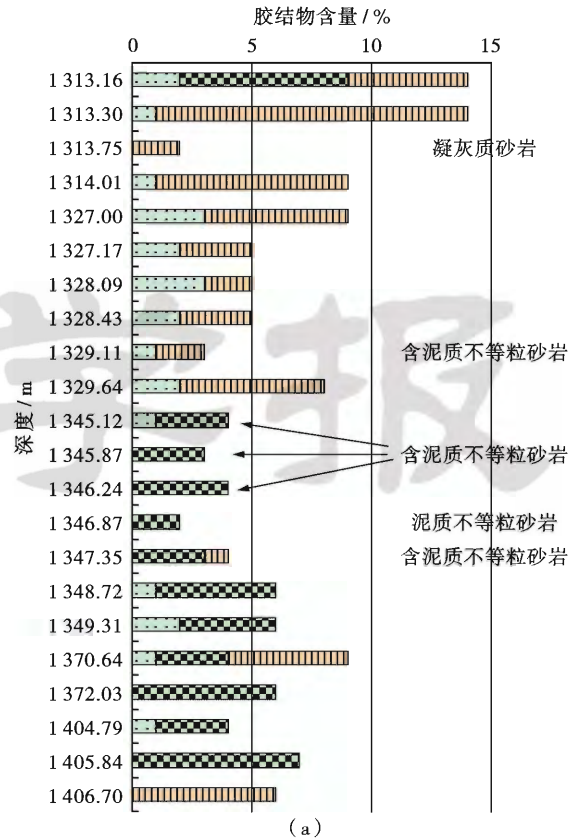


图 7 下二叠统不同火山岩绿泥石含量与孔隙度的关系  
Fig. 7 Content of chlorite vs. porosity among different rocks of Lower Permian

克-夏地区下二叠统碎屑岩储层主要为发育在断裂下盘的近源扇三角洲沉积,沉积水动力强,河道沉积的砂、砾岩分选与磨圆较好,渗透性高,流体连续流入,杂基含量少,易于自生矿物的析出和酸性地下水的流动,为自生矿物的溶蚀提供了有利条件。受逆冲断裂影响,百 1772 井(井位见图 1)佳木河组埋深较浅,地层水活跃,胶结作用明显。如图 8(a)所示,对百 1772 井佳木河组砂、砾岩系统取样分析发现,泥质或含泥的岩屑砂岩其胶结物相对较少,通常小于 5%(未见明显溶蚀现象);而杂基含量少的粗砂岩和砾岩胶结较致密,胶结物平均含量大于 7%。

图 8(b)和图 8(c)数据分别来自克 304 井和风 501 井风城组粗砂岩和砾岩,杂基含量少。分析表明,酸性水溶解先期的胶结物(如方沸石和浊沸石),同时次生孔隙产生,形成的现今孔隙度为 9%~14%(埋深大于 3 650 m);如果胶结物不溶或难溶(如片沸石),压实胶结后剩余的孔隙度约为 7.6%~9.2%[图 8(b)],即使在小于 1 200 m 的浅埋藏条件下,孔隙度也只能保存 11%~13%[图 8(c)]。



(a)样品来自百 1772 井碎屑岩,未标注岩性的样品均为砾岩或粗砂岩;(b)样品来自克 304 井砾岩和粗砂岩;(c)样品来自风 501 井砾岩和粗砂岩。微量的自生矿物(胶结物)未在图中显示,如克 304 井 3 677.19 m 的砾岩样品,见有少量的绿泥石,微观照片见图 2(b)。

图 8 研究区下二叠统碎屑岩粒度(泥质含量)、胶结物含量和孔隙度关系  
Fig. 8 Grain size (shale content) vs. the cement content and the cement content vs. the porosity in Lower Permian



火山物质的蚀变过程及不同自生矿物的析出对温度和压力条件非常敏感<sup>[18,30]</sup>,温度升高及压力增加可能有利于脱玻化及成岩蚀变。克-夏地区石炭纪至早二叠世一直以来的火山活动使岩层温度升高<sup>[8]</sup>,有利于玻璃质中质点的活动及重新排列。玻璃质变为结晶质体积变小。克-夏地区长期大规模的逆掩推覆和构造挤压加快玻璃质的脱玻化进程,在断裂带附近的岩心样品中发现大量晶间孔和基质孔;而在远离断裂的百75井(井位见图1)未见钠长石和浊沸石等晚期成岩产物,可能说明在挤压应力相对较小的情况下火山物质蚀变进程相对较慢。

二叠系风城组为克-夏地区主力烃源岩层,随着埋深的增加和温度的升高,有机质热演化过程中释放出大量的CO<sub>2</sub>和有机酸。这些溶解力强的酸性水随泥岩压实进入砂体中,导致早期在碱性孔隙水中比较稳定的沸石矿物发生溶蚀。另外,后期通过克-夏同生逆掩断裂渗入的大气水和黏土矿物成岩转化脱水作用形成的孔隙水也是下二叠统酸性水的重要来源<sup>[4]</sup>。通过对研究区地层水类型分析发现,下二叠统大面积发育CaCl<sub>2</sub>型地层水,但方沸石等自生矿物溶蚀地区主要为NaHCO<sub>3</sub>型相对偏酸性地层水,即方沸石溶蚀区与NaHCO<sub>3</sub>型地层水分布区重叠。CaCl<sub>2</sub>型地层水中Ca<sup>2+</sup>富集,不利于钙质铝硅酸盐矿物(如片沸石和浊沸石)的溶蚀。

## 5 结论

(1) 通过对研究区下二叠统火山岩-碎屑岩混合储层研究发现,自生绿泥石主要形成于铁镁矿物、中基性火山玻璃蚀变以及黏土矿物和长石的转化;方沸石、片沸石和浊沸石形成于火山玻璃的水化和沸石化,常充填粒间孔和气孔;方解石的形成与火山物质中钙离子的迁移和析出有关;钠长石常常作为钾长石、斜长石以及玻璃质火山灰和各种沸石的交代产物。

(2) 火山物质蚀变过程中不同的成岩变化对储集层的影响显著不同。脱玻化通常形成大量的微孔;钠长石化表现为改善储层质量;方沸石、浊沸石和方解石胶结物早期破坏原生孔隙,但后期的溶蚀明显提高储层物性;早期适量的绿泥石衬边和包膜对储集空间有保护意义,但成岩后期大量的绿泥石胶结破坏储层。

(3) 含火山物质油气储层的孔隙演化一定程度上受控于火山碎屑的蚀变程度、析出的自生矿物类型及后期的溶蚀作用,与母岩物质组成、粒度(泥质含量)密切相关,并受地层温度、压力、孔隙水的化学性质等因素控制。温度和压力增大促进脱玻化形成大量微孔;酸性水的加入促使早期在碱性条件析出的沸石、钠长石和

方解石易于溶蚀。基性凝灰物质的水解蚀变形成大量的绿泥石,破坏储层;相比之下,中酸性熔岩和火山碎屑岩储层物性较好。NaHCO<sub>3</sub>型地层水和有机酸影响下的含方沸石砂、砾岩储层为有利的碎屑岩储层。

## 参考文献

- [1] Clough G W, Sitar N, Bachus R C, et al. Cemented sands under static loading [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1982, 107(6): 799-817.
- [2] Karig D E, Hill I A, Taira A, et al. Reconsolidation tests and sonic velocity measurements of clay-rich sediments from the Nankai Trough [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1993, 131: 247-260.
- [3] Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite: examples from the Norwegian Continental Shelf [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(7): 1260-1286.
- [4] Zhu S F, Zhu X M, Wang X L, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55(3): 386-396.
- [5] 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 lomonitic sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1985, 6(1): 1-8.
- [6] Surdam R C, Sheppard R A. Zeolites in saline, alkaline-lake deposits [M]// Sand L B, Mumpton F A. *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use*. New York: Pergamon Press, 1987: 145-174.
- [7] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [8] Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Niu Huapeng, et al. Genetic mechanism of dolomitization in Fengcheng Formation in the Wu-Xia area of Junggar Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2012, 86(2): 447-461.
- [9] Morad S, Bergan M, Knard R, et al. Albitization of detrital plagioclase in Triassic reservoir sandstones from the Snorre Field, Norwegian North Sea [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60(3): 411-425.
- [10] 王宏语, 樊太亮, 肖莹莹, 等. 凝灰质成分对砂岩储集性能的影响 [J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 432-439.  
Wang Hongyu, Fan Tailiang, Xiao Yingying, et al. Effect of tuffaceous components on physical property of sandstone reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 432-439.
- [11] Jiao Yangquan, Yan Jiaxin, Li Sitian, et al. Architectural units and heterogeneity of channel reservoirs in the Karamay Formation, outcrop area of Karamay oil field, Junggar basin, northwest China [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(4): 529-545.
- [12] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结

- 构与地层油气成藏机制[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(11):1613-1626.
- Zou Caineng, Hou Lianhua, Yao Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 55(2): 221-235.
- [13] 毛翔,李江海,张华添,等. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报,2012,28(8):2381-2391. Mao Xiang, Li Jianghai, Zhang Huatian, et al. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2381-2391.
- [14] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- [15] Moncure G K, Surdam R C, McKague H L. Zeolite diagenesis below Pahute Mesa, Nevada Test Site[J]. Clays and Clay Minerals, 1981, 29(5): 385-396.
- [16] 张丽媛,纪友亮,刘立,等. 火山碎屑岩储层异常高孔隙成因——以南贝尔凹陷东次凹北洼槽为例[J]. 石油学报,2012,33(5):814-821. Zhang Liyuan, Ji Youliang, Liu Li, et al. Origin of anomalously high porosity in pyroclastic reservoirs: a case study on the northern region of the east sub-sag in Nanbeier sag[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(5): 814-821.
- [17] Hay R L. Geologic occurrence of zeolites[M]//Sand L B, Mumperton F A. Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use. New York: Pergamon Press, 1987: 135-143.
- [18] Orajaka I P. Behaviour of uranium during the formation and diagenetic alteration of silicic volcanoclastic sediments—a critical review[J]. Uranium, 1987, 4(1): 1-23.
- [19] Mohamed B B, Bertrand F, Benoit M. Diagenetic albitization of K-feldspar and plagioclase in sandstone reservoirs; thermodynamic and kinetic modeling[J]. Journal Sedimentary Research, 1993, 63(6): 1100-1109.
- [20] Land L S. Frio sandstone diagenesis, Texas Gulf Coast; a regional isotopic study[G]. Clastic Diagenesis; AAPG Memoir 37, 1984: 47-62.
- [21] Schnaid F, Priccio P D M, Consoli N C. Characterization of cemented sand in triaxial compression[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10): 857-868.
- [22] Saidi F, Bernabe Y, Reuschle T. The mechanical behaviour of synthetic, poorly consolidated granular rock under uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 2003, 370(1): 105-120.
- [23] Spinelli G A, Mozley P S, Tobin H J, et al. Diagenesis, sediment strength, and pore collapse in sediment approaching the Nankai Trough subduction zone[J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119(3/4): 377-390.
- [24] Hurst A, Nadeau H P. Clay microporosity in reservoir sandstones; an application of quantitative electron microscopy in petrophysical evaluation[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4): 563-573.
- [25] Iijima A. Zeolites in petroleum and natural gas reservoirs[M]//Bish D L, Ming D W. Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications. Washington: Mineralogical Society America, 2001: 47-402.
- [26] Galloway W E. Deposition and diagenetic alteration of sandstone in Northeast Pacific arc-related basins; implications for graywacke genesis [J]. Geological Society America Bulletin, 1974, 85(3): 379-390.
- [27] Kaley M E, Hanson R F. Laumontite and leonhardtite cement in Miocene sandstone from a well in San Joaquin Valley, California [J]. American Mineralogist, 1955, 40: 923-925.
- [28] Yagi M. Regional metamorphism and hydrothermal alteration related to Miocene submarine volcanism ("green tuff") in the Yurihara oil and gas field, northwest Honshu island, Japan[J]. The Island Arc, 1994, 2(4): 240-261.
- [29] 陈国俊,吕成福,王琪,等. 珠江口盆地深水白云凹陷储层孔隙特征及影响因素[J]. 石油学报,2010,31(4):566-572. Chen Guojun, Lü Chengfu, Wang Qi, et al. Characteristics of pore evolution and its controlling factors of Baiyun Sag in deepwater area of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 31(4): 566-572.
- [30] Christidis G E. Formation and growth of smectites in bentonites; a case study from Kimolos Island, Aegean, Greece[J]. Clays and Clay Minerals, 2001, 49(3): 204-215.

(收稿日期 2013-07-26 改回日期 2013-10-22 责任编辑 熊英)