

准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中 火山物质蚀变及控制因素

朱世发^{1,2}, 朱筱敏^{1,2}, 吴冬^{1,2}, 刘英辉^{1,2}, 李盼盼^{1,2}, 姜淑贤^{1,2}, 刘学超^{1,2}

(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)

摘要:通过岩心分析、显微镜下观察(常规、铸体薄片和扫描电镜)、岩石地球化学分析测试等技术手段,以准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层为实例,研究了火山岩、火山碎屑岩和火山岩屑质砂砾岩中的火山玻璃、火山碎屑、长石以及辉石、角闪石等火山物质的低温-埋藏蚀变作用。镜下观察发现,在含火山物质油气储层中,常见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、钠长石和自生的石英。结合共生关系、元素组成和元素迁移,分析了自生矿物的微观特征和成因,建立了火山物质蚀变的成岩演化序列,可以概括为:①火山玻璃水化—蒙脱石化—沸石化及各种沸石的转化——钠长石化;②铁镁矿物影响的绿泥石化;③长石蚀变向绿泥石和方解石转化,后期发生钠长石化。在研究区,火山物质的蚀变和自生矿物的析出与中-基性的母岩物质组成密切相关,并受地层温度、压力、孔隙水的化学性质控制。研究火山物质蚀变的产物、蚀变过程及控制因素,能够明确含火山物质的油气储层质量差异机理,为优质储层预测提供科学的依据。

关键词:自生矿物;蚀变作用;成岩序列;火山物质;油气储层;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin

Zhu Shifa^{1,2}, Zhu Xiaomin^{1,2}, Wu Dong^{1,2}, Liu Yinghui^{1,2}, Li Panpan^{1,2}, Jiang Shuxian^{1,2}, Liu Xuechao^{1,2}

(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)

Abstract: Based on observations of available cores, thin-sections and SEM and analysis of rock geochemistry, we studied low-temperature-burial metamorphism (alteration) of volcanics in the Lower Permian at northwestern margin of Junggar Basin. These volcanics include volcanic glass, volcanic clasts, feldspar, and mafic minerals such as pyroxene and hornblende, etc., which originate from lavas, pyroclastic rocks, and volcanoclastic sandstones or conglomerates. In oil/gas reservoirs containing volcanics, the authigenic minerals that are common but important to pore spaces include chlorite, zeolites (like analcime, heulandite, and laumontite), calcite, albite, and authigenic quartz. Based on the paragenetic relationship of minerals and the composition and migration of elements, we analyzed the microscopic characteristics and origins of authigenic minerals, and established diagenetic evolution models during volcanic alteration. The alteration can be summarized as follows: ①volcanic glasses hydrolysis-montmorillization-zeolitization-albitization; ②chloritization related to mafic minerals and smectites; ③transformation of feldspar to chlorite, calcite, and finally to albite. The alteration of volcanics and the formation of authigenic minerals in the study area were controlled by various factors such as the precipitation of authigenic minerals, composition of neutral-basic host rocks, temperature and pressure, and the chemical behaviors of pore water. The study on alteration process, alteration products, and control factors is helpful to understand the mechanisms that cause the differences of volcanics-bearing reservoir qualities, so as to provide a scientific geological foundation for the predication of high-quality reservoirs.

Key words: authigenic mineral, alteration, diagenetic evolution, volcanics, hydrocarbon reservoir, Junggar Basin

收稿日期:2013-11-20;修订日期:2013-12-30。

第一作者简介:朱世发(1982—),男,讲师,沉积与储层。E-mail:zhushifa_zsf@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41202107);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)项目(20120007120004);中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-01-20);国家重大油气专项(2011ZX05009-002;2011ZX05001-002)。

火山物质的成岩作用具有明显的特殊性^[1-5],如脱玻化、重结晶等。前人针对火山碎屑岩的成岩作用、自生矿物类型及特征等进行了大量的工作^[6-9],但关于火山物质成岩演化及控制因素的分析相对较少。虽然火山物质的蚀变过程和产物已经被火山岩石学家广泛讨论^[10-14],但蚀变形成的不同自生矿物对油气储集层性能影响的重要性和差异性,前人缺乏系统、全面的研究。

在准噶尔盆地西北缘下二叠统,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。本文通过显微镜下薄片分析(岩石、铸体薄片和扫描电镜)、岩心观察、岩石地球化学分析测试等技术手

段,系统总结研究区含火山物质油气储层中的各种自生矿物特征,分析其成因,探讨火山物质蚀变的成岩演化序列,明确火山物质蚀变和自生矿物析出的控制作用,为具有相似地质背景的含火山物质油气储层评价、预测提供科学的地质依据。

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,勘探面积5 000 km²(图1)。周缘山系出露地层和目前钻、测井资料揭示,研究区火山活动频繁且主要集中在泥盆纪、石炭纪一早二叠世^[15-16],火山喷发方式为裂隙式喷发^[17-19]。

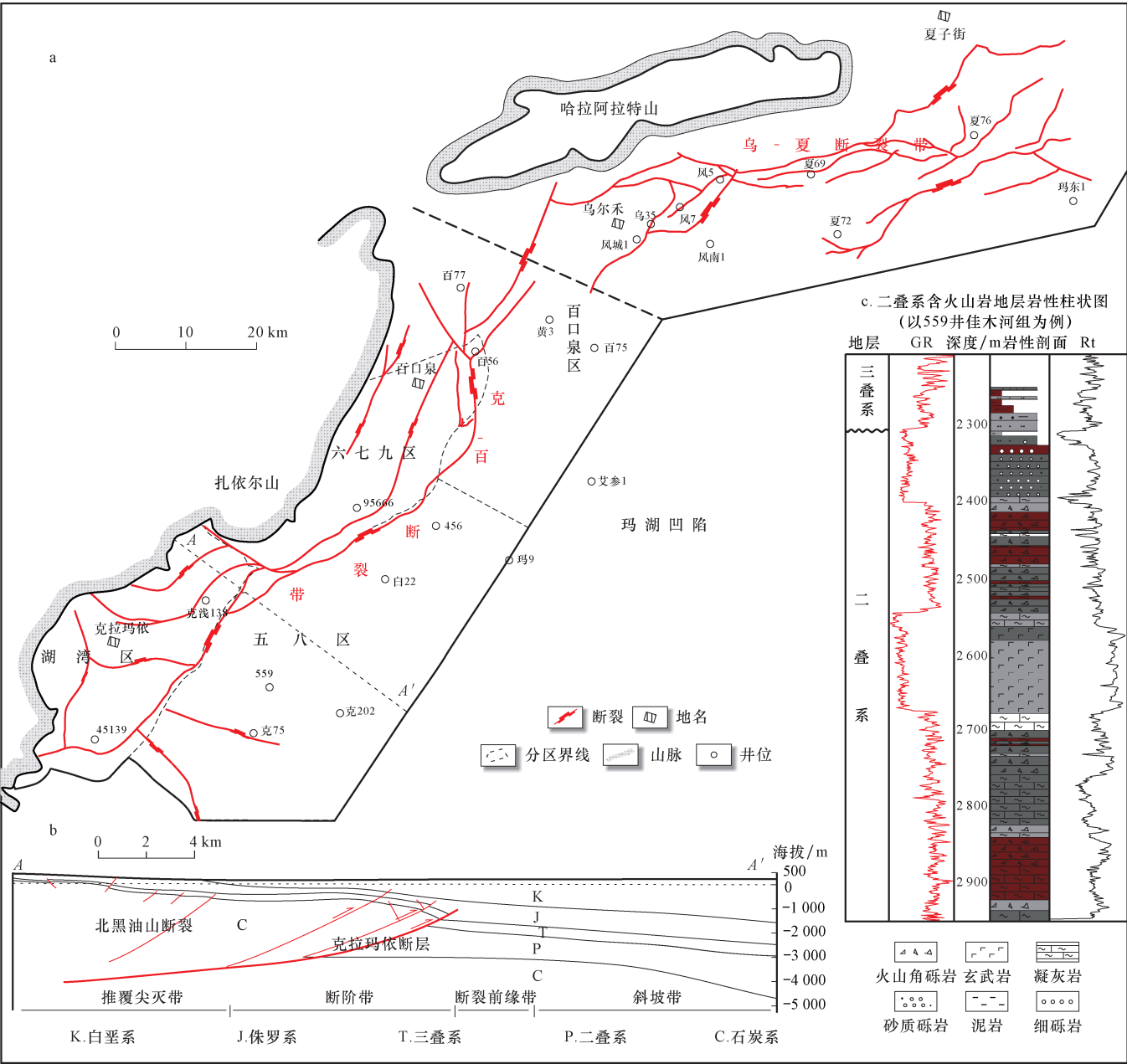


图1 准噶尔盆地西北缘地理位置(a)、构造剖面(b)及岩性柱状图(c)
Fig. 1 Location(a), structural profile(b) and lithologic column(c) of the northwestern margin of Junggar Basin

在断裂带上盘,缺失二叠系,部分地区缺失三叠系和侏罗系;在下盘地层发育较完整,二叠系埋深主要在 2 300 ~ 4 700 m,沉积厚度为 1 000 ~ 1 700 m。以 559 井为例,受断裂逆掩活动影响,二叠系自上而下的乌尔禾组、风城组被挤压抬升,遭受强烈的剥蚀,保留下来的底部佳木河组为扇三角洲沉积,其大套砂砾岩中发育多期喷发的火山岩和火山碎屑岩(图 1)。

总体上,石炭纪-早二叠世,西北缘构造活动强烈伴随频繁的火山喷发,火山岩-火山碎屑岩岩体规模大、分布广,岩性主要为火山碎屑岩和玄武岩、玄武安山岩、安山岩、安山玄武岩等一系列中基性熔岩,仅乌-夏地区风城组见酸性的流纹质火山碎屑岩(图 2)。地球化学分析表明,下二叠统的火山岩类 SiO_2 含量多在 50% ~ 70%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量一般小于 8%,多为亚碱系列。玄武安山岩类基本为钙碱性系列, SiO_2 含量明显高于洋中脊玄武岩 MORB,而与岛弧玄武岩较接近。下二叠统的粗碎屑岩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,岩石成分以凝灰岩等各种火山岩岩屑为主,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。^[13-16,20-21]

2 自生矿物微观特征

在研究区下二叠统混积储层中,常见对储集空间

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、钠长石和自生的石英。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

自生绿泥石在研究区含火山物质的油气储层中主要有以下 6 种赋存状态:①火山玻璃基质掺杂,一般呈放射状或不规则片状(图 3a),多发育在凝灰岩或熔岩的玻璃基质中;②火山岩中辉石、角闪石斑晶和云母碎片蚀变(图 3b),在研究区最为常见;③长石解理处沉淀,具有典型的叶片状晶形,是长石沿解理被交代的产物,在碎屑岩和火山岩储层中均可见;④孔隙的环边衬里,绿泥石呈不规则片状紧密排列,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;⑤孔隙及裂缝充填,多为绒球状,普遍见于砂砾岩和火山(碎屑)岩储集空间;⑥颗粒边缘绿泥石包膜,绿泥石呈针状或不规则片状,仅出现在砂砾岩的碎屑周围,与孔隙的环边相比,显然颗粒的包膜是在碎屑岩强烈压实作用之前形成的。

2.2 沸石

根据沸石的镜下特征和 X-衍射及电子探针分析认为,西北缘地区下二叠统储层中主要发育方沸石、片沸石和浊沸石 3 种类型。方沸石晶形多为四角三八面体或呈不规则的等轴粒状(图 3c),产出于格架颗粒之间

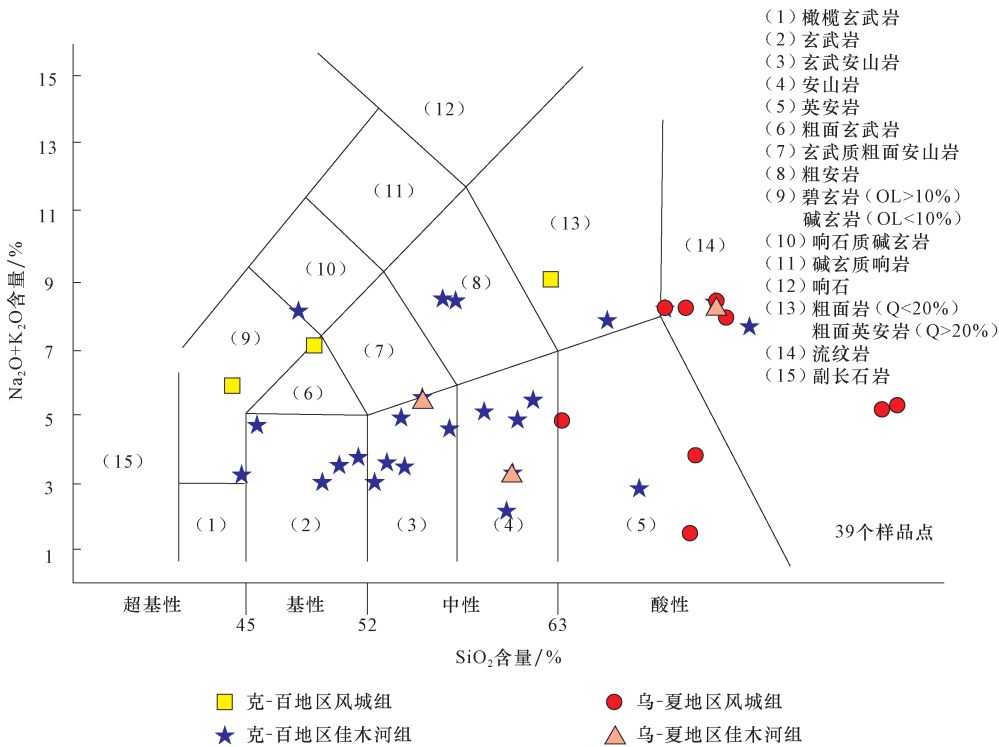


图 2 下二叠统火山岩岩石分类图解

Fig. 2 Classification of volcanic rocks in the Lower Permian

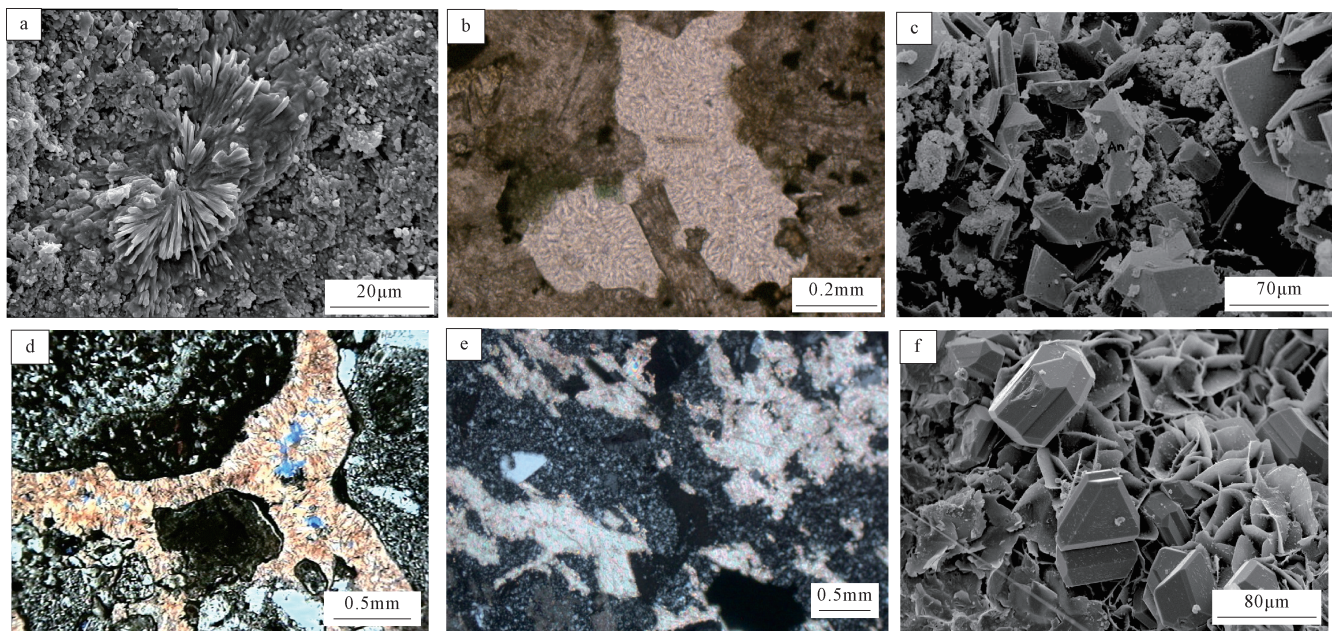


图3 自生矿物镜下特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of authigenic minerals

- a. 基质中分布的放射状绿泥石, 夏202井, 4 826.27 m, 流纹质角砾熔结凝灰岩; b. 辉石角闪绿泥石化, 克202井, 3 966.29 m, 安山岩; c. 溶蚀的方沸石(An)及团粒状绿泥石, 检乌44井, 2 875.71 m, 中粗砂质砾岩, 孔隙度 $\Phi = 14.29\%$; d. 砂砾岩中片沸石晶间孔, 注意片沸石胶结对储层的破坏, b1802井, 2 030.25 m, $\Phi = 5.4\%$, 铸体(蓝色)单偏光; e. 基质碳酸盐化, 808井, 3 117.90 m, 凝灰质角砾岩, $\Phi = 23.41\%$; f. 板状钠长石与玫瑰花状绿泥石, 夏201井, 4 932.77 m, 灰色流纹质角砾熔结凝灰岩, $\Phi = 7.4\%$

或呈交代物沿着颗粒边缘或最薄弱的环节如矿物解理、微细裂缝处析出, 常见方沸石颗粒不同程度的溶蚀现象。区内片沸石发育普遍, 不同晶体形态产出特征不同。片状片沸石晶体多沿着碎屑颗粒的边缘大致垂直生长, 常以半充填方式产出于砂、砾岩的粒间孔隙中; 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, 在板条状晶体之间常发育有晶间孔(图3d); 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, 部分交代斜长石颗粒。

2.3 方解石

方解石在火山基质中一般为细晶或无定形, 且常与绿泥石、沸石、自生石英等矿物伴生; 常见斑状的细晶方解石交代物(图3e); 有时自生方解石含量较少, 呈星点状散布在基质中。火山基质碳酸盐化后, 可以发生溶蚀, 例如凝灰岩孔隙性较差, 但基质碳酸盐化后溶蚀可以形成有效孔隙。在镁离子富集的成岩环境, 方解石化的沉凝灰岩可以发生埋藏白云岩化作用。在砂砾岩的粒间孔和火山岩的气孔、裂缝中, 常见方解石充填。

2.4 钠长石

研究区火山岩类中的自生钠长石晶体通常呈板状或板条状, 常与自生的石英、绿泥石、各种沸石和方解石矿物伴生(图3d), 充填气孔或火山基质的空隙中。

砂砾岩中的斜长石特别是富钙长石蚀变后, 钠长石往往沿其解理面生长; 见钠长石以斜长石碎屑次生加大边的形式出现。

3 成岩序列讨论

混积储层中火山玻璃质始终处于热力学不稳定状态, 自由能高, 特别是在研究区一直以来的火山活动和构造活动影响下, 温压条件高, 极易被蚀变即脱玻化形成更稳定的矿物如粘土矿物和沸石等^[22-23]。本次研究根据自生矿物的微观特征、共生和伴生关系、稳定性以及相应的温度参数, 确定火山物质蚀变成岩演化的序列。

下二叠统储层含大量火山玻璃质, 分布在碎屑岩的凝灰岩岩屑和火山岩的基质中。孔隙水的化学性质早期主要受易溶火山玻璃的溶解作用控制。由于火山玻璃物质粒度细, 并含有大量不稳定的矿物, 在受溶液作用迅速分解后可放出大量 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等离子, 使溶液呈强碱性, 同时为各种自生矿物的形成和转化提供了丰富的物质基础。

随着盐度和碱性的增加, 孔隙水先后到达各个矿物的饱和度。埋深越大, 地温越高, 使火山玻璃质的溶解速率加快, 孔隙水到达矿物饱和度的速率也大大提高。最先在过饱和碱性溶液中析出的矿物是蒙脱石^[24]。在研究区, 蒙脱石部分向伊利石转化形成混层矿物(图4a)。由于孔隙水盐度和pH值增大的速率大

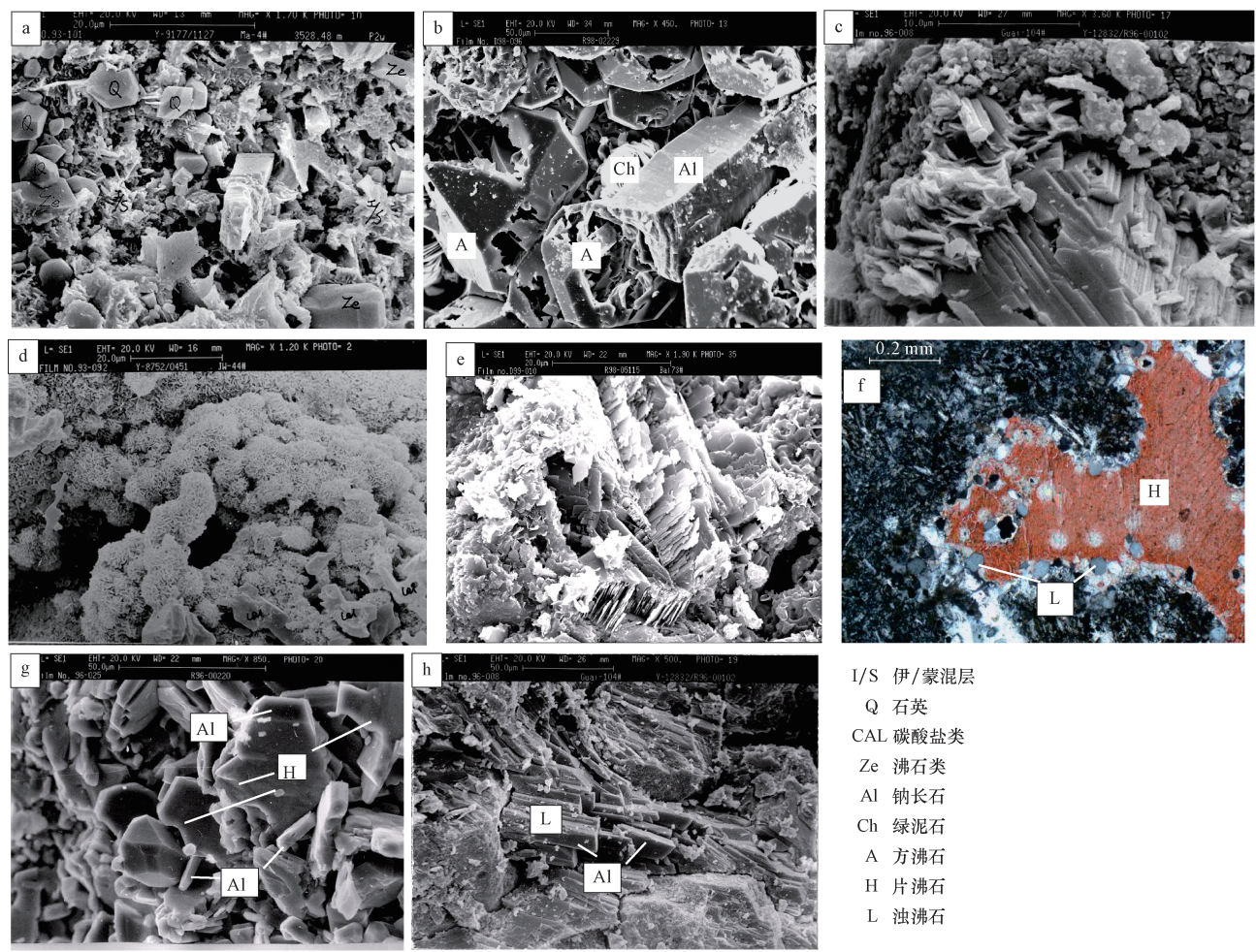


图4 自生矿物伴生关系及成岩序列

Fig. 4 Association of authigenic minerals and their diagenetic sequence

a. 伊/蒙混层与自生石英、碳酸盐类矿物、沸石类矿物共生,玛4井,3 528.48 m,砂砾岩,孔隙度 $\Phi=5.6\%$;b. 钠长石晶体、绒球状绿泥石与方沸石的溶蚀,注意后生成的钠长石较方沸石稳定,检乌32井,2 997.04 m,砂砾岩, $\Phi=12.9\%$;c. 片沸石与不规则片状绿泥石,拐104井,3 300.72 m,泥质砂岩, $\Phi=10.42\%$;d. 粒表叶片状绿泥石及碳酸盐类矿物(CAL),检乌44井,2 871.97 m,含砾砂岩, $\Phi=17.06\%$;e. 长石向绿泥石转化,百73井,1 448.25 m,安山质凝灰熔岩;f. 片沸石后期浊沸石化,克005井,2 794 m,砂岩,正交光;g. 片状片沸石被板条状钠长石交代,百101井,2 643.54 m,砂砾岩;h. 柱状浊沸石向钠长石转化,玛4井,3 525.32 m,砂砾岩

于蒙脱石沉淀的速率,火山玻璃质早期蚀变产物蒙脱石处于过饱和状态,孔隙水盐碱度快速上升到长石稳定范围,钾长石和钠长石析出^[25]。如图3f所示,析出的自生钠长石与粘土矿物伴生。随后斜发沸石和石英沉淀,转化温度大约为44℃^[26]。斜发沸石析出对孔隙水化学性质有着重要的影响,改变孔隙水离子比率。斜发沸石是早期不稳定的沸石矿物类型,随着成岩蚀变的进行,随后斜发沸石在研究区被方沸石和钠长石取代(图4b),转化温度约为84℃^[26]。此时,蒙脱石在铁镁离子富集的成岩环境部分转化为绿泥石(85~160℃)(图4c)。在富钙斜发沸石向方沸石转化过程中,释放的Ca²⁺有利于方解石的形成^[27]。图4c和图4d中的绿泥石推测为蒙脱石转化形成;图4d中方解石的沉淀与火山物质蚀变过程中Ca²⁺离子的溶解析出关系密切。

在火山玻璃水解蚀变的过程中,辉石、角闪石和黑云母等铁镁矿物亦不同程度的发生绿泥石化作用

(图3b)。在铁镁离子参与下,火山(碎屑)岩中的长石斑晶或晶屑以及蚀变析出的钾长石也可能向绿泥石转化(图4e)。

研究区内各种沸石矿物的形成是热力学条件变换的过程,并不代表变质作用的开始。斜发沸石转化而来的方沸石在钙离子参加的条件下,约120℃^[28]向片沸石转化;如图4f,片沸石后期向浊沸石转化,转化温度约为140℃^[29],交代过程可以描述为:

$$\text{Ca}_4\text{KAl}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72} \cdot 26\text{H}_2\text{O} = 4\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 8\text{SiO}_2 + \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 10\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

钠长石化是成岩后期的矿物转化,各种沸石(方沸石在120℃^[22])和长石(钾长石在120~150℃^[30])都可以作为钠长石的交代母质。图4b中后沉淀的钠长石稳定性高于方沸石,钠长石的形成与方沸石溶解、转化密切相关。图4g和图4h分别为片沸石和浊沸石的钠长石化。方解石的沉淀贯穿火山物质蚀变的整个过

程,并非前人研究所说是最终的蚀变产物^[31]。

镜下观察发现,研究区沉积环境中的火山碎屑物质经历了剧烈的蚀变作用。凝灰质砂砾岩中大量的自生矿物(如沸石)与火山物质有关,沉积物的成岩过程包括:火山物质与非火山碎屑物混合堆积,火山碎屑的交代、溶解和析出自生矿物,析出的成岩矿物(特别是沸石和方解石)胶结沉积物,最后埋藏成岩。

综上所述,在研究区火山物质的蚀变过程可以总结为:①火山玻璃水化—蒙脱石化—沸石化及各种沸石的转化——钠长石化(图 4a,b,f,g);②铁镁矿物影响的绿泥石化(图 3b);③长石蚀变向绿泥石和方解石转化,后期发生钠长石化(图 4e)。绿泥石常与钙质矿物如片沸石和方解石共生,这与富钙长石的绿泥石化过程析出钙离子有关(图 4c,d)。在火山物质蚀变过程中,自生的石英和方解石是普遍的伴生矿物。值得注意的是,各成岩转化阶段需要满足一定的温压以及水介质条件(图 5)。

4 火山物质蚀变控制因素

研究区火山物质的蚀变和自生矿物的析出与母岩物质组成密切相关,并受地层温度、压力、孔隙水的化学性质和地质环境的热力学条件(开放或封闭系统)等因素控制。

4.1 母岩成分

研究区中基性为主的原始火山物质成分对蚀变矿物组合具有明显的影响。粗碎屑岩岩石成分中的火山岩屑主要来自北部石炭系火山岩区,石炭系火山岩系与下二叠统同样以中基性为主^[12],因此混积储层中这些富含铁镁矿物的火山物质蚀变很大程度上影响绿泥石、白云石等含镁矿物的形成。浅埋藏条件,硅质凝灰岩中的方沸石由早期沸石转化而来^[27];基性火山灰中方沸石可以脱玻化沉淀^[26]。随着埋深增加,沸石矿物类型和母岩成分之间的关系减弱,研究区中深层(埋深

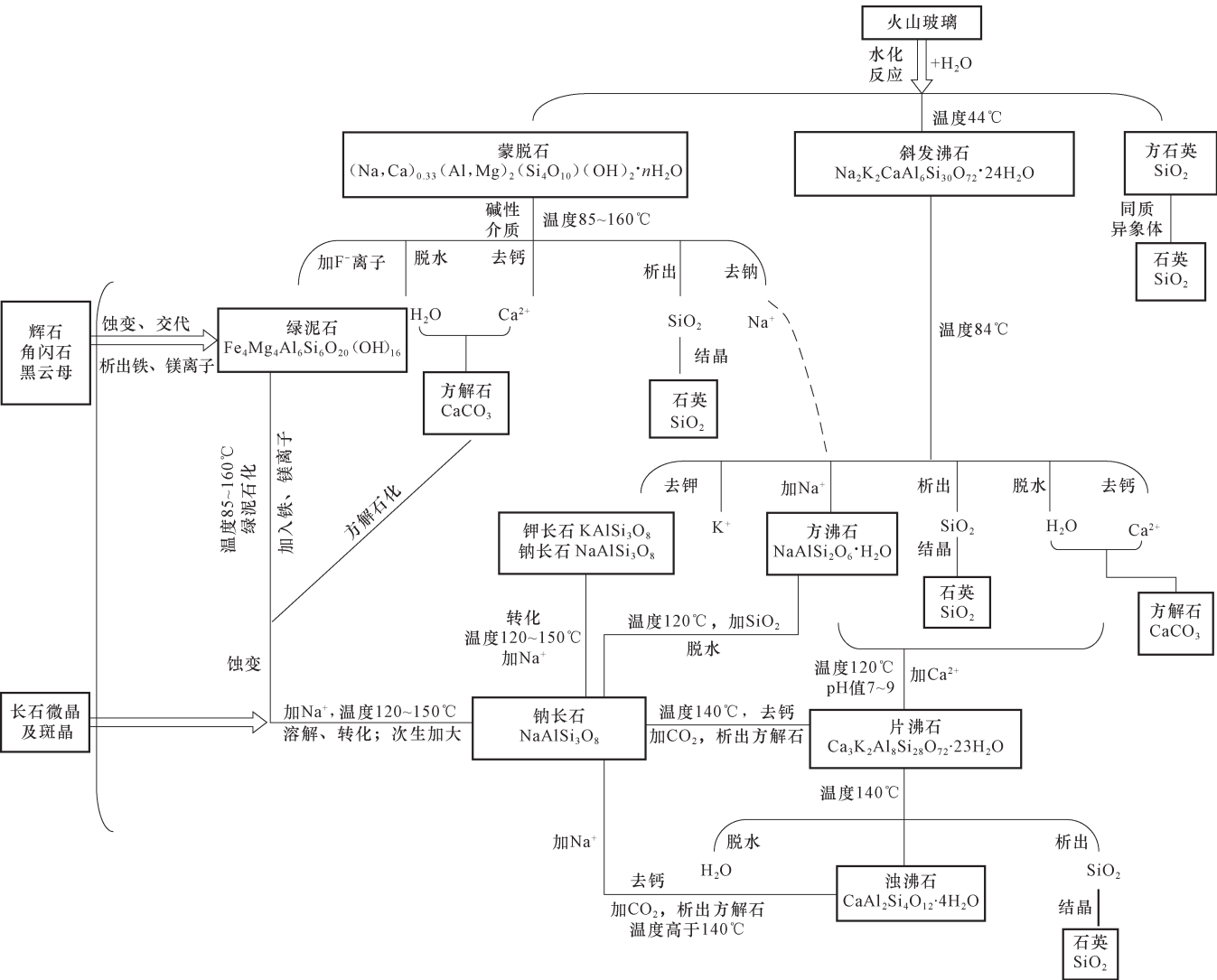


图 5 火山物质蚀变成岩演化序列及自生矿物析出

Fig. 5 Diagenetic evolution and precipitation sequence of authigenic minerals during alteration of volcanics

大于3 000 m)硅铝质和镁铁质凝灰岩中主要沸石矿物为低硅的方沸石、片沸石和浊沸石,非常少见高硅类型的沸石(如斜发沸石和丝光沸石)。另外,在碎屑岩和中基性火山熔岩中钠长石的形成主要是长石的钠长石化,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;乌-夏地区风城组流纹质凝灰岩中,钠长石化直接受流纹质玻璃脱玻化控制。方解石的析出与基性钙长石的水解关系密切。

4.2 温度和压力

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,温度升高及压力增加有利于脱玻化^[32]。西北缘石炭纪至早二叠世以来的火山活动使岩层温度升高,有利于玻璃质中质点的活动及重新排列。另外,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。研究表明,靠近断裂的百56、风5等井区(井位见图1),构造挤压强烈,岩石中火山物质剧烈蚀变,发育大量晚成岩自生矿物如钠长石和浊沸石等;远离断裂的井区如百73井和风南1井,蚀变程度弱,钠长石等矿物少见。

不同矿物的析出及转化需要不同的温度和压力作为临界条件。综合分析表明,研究区的火山物质蚀变是在低温变质(<200 ℃)和埋藏成岩环境进行(图6)。前人基于日本油田的8口钻井资料分析,新鲜火山玻璃与斜发沸石-丝光沸石转换带平均温度约为44 ℃^[23]。随着埋深和温度、压力的增加,贫水的浊沸石比含水较多的片沸石稳定,片沸石转化为浊沸石。在研究区,这一转化过程相对应的 R_0 (镜质体反射率)为1.4%。Iijima^[23]认为,方沸石的钠长石化温度约为123 ℃,这一温度比实验室($p_{H_2O} = p_{总}$)测得数据低得多^[33-34]。在研究区,相对应的 R_0 值为1.05%,温度与Iijima^[26]得到结果相当。

4.3 孔隙水化学性质

水为活动组分,可增加玻璃质中质点运动,缺乏水分很难脱玻化。

研究区下二叠统混积储层岩石成分中含有大量的凝灰岩岩屑和火山灰物质,这些火山物质是形成不同自生矿物的物质基础。由于火山灰粒度细,并含有大量低温(<200 ℃)时不稳定的矿物,在受

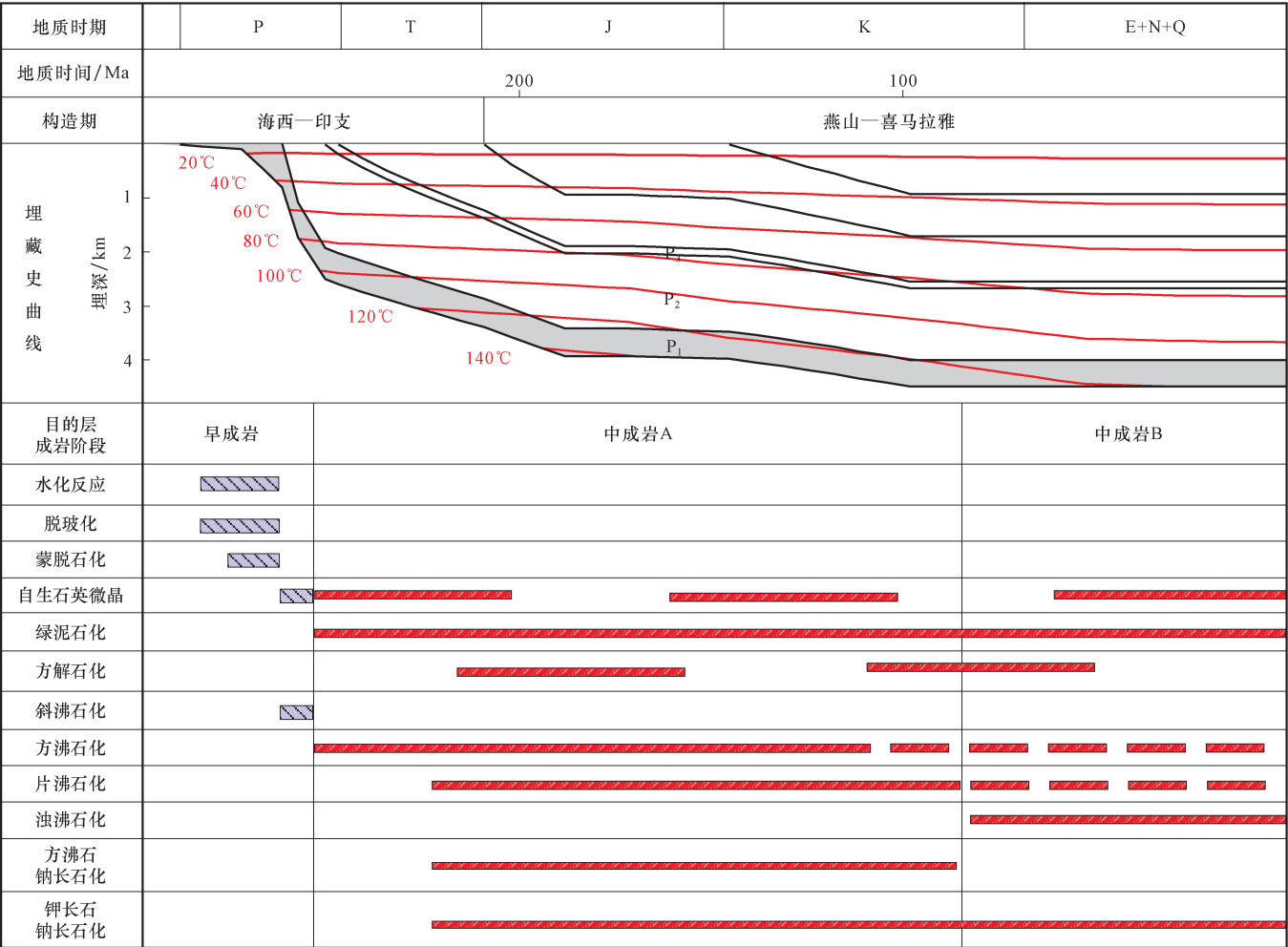


图6 研究区混积储层中火山物质主要成岩事件及与温度的关系

Fig.6 Main diagenetic events of volcanics in the hybrid reservoirs in the study area and their relationship with temperature

溶液作用迅速分解后可放出大量 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,使溶液呈强碱性且盐度升高,很有利于沸石、钠长石等自生硅酸盐矿物的形成和方解石的沉淀。通常沸石形成环境是中性-碱性水,pH 值多为 7~10^[35]。pH 值在 7~9 时,易于形成高 Si/Al 硅铝比的沸石矿物(如片沸石)^[27]。在 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 存在且孔隙水为碱性的条件下,有利于蒙脱石向绿泥石转化。研究区下二叠统现今地层水主要为 $NaHCO_3$ 型,呈弱碱性。

研究区内中基性火山物质水解、蚀变析出大量金属离子,满足多种自生矿物的形成;元素的活动性及离子比例影响成岩演化过程。 Ca^{2+} 与 Na^+ 的比例显然某种程度上影响各种沸石矿物的类型和转化^[11];缺少 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 绿泥石不能形成。单离子类型的沸石如方沸石或浊沸石在缺乏 Na^+ 或 Ca^{2+} 的情况下不能形成。多离子类型的沸石(如片沸石等)可以因离子的特有的活动比率而形成^[23]。在钙离子富集的情况下,满足一定的温度和压力,研究区早期形成的沸石(如斜发沸石、方沸石)向钙质沸石(片沸石和浊沸石)转化。在富钙沸石向贫钙沸石转化过程中,释放的 Ca^{2+} 有利于方解石的析出(图 5)。与富含石英或长石的碎屑岩相比,含火山物质的岩层中自生矿物的早期形成更多受火山物质水解、蚀变控制,后期可能受地层水运移影响。

5 结论

1) 沉积环境中的火山碎屑物质与火山作用形成的火山岩和火山碎屑岩,在低温-埋藏成岩条件下普遍经历了剧烈的蚀变作用,成岩演化多期、复杂。火山物质水解、蚀变析出大量金属离子,满足多种自生矿物的形成。

2) 在准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩-碎屑岩混积储层中,常见的与火山物质蚀变相关且对储集空间具有重要影响的自生矿物主要有绿泥石、各种沸石(包括方沸石、片沸石和浊沸石)、方解石、钠长石和自生的石英等。不同矿物微观特征、成因以及对储集空间的影响各不相同。

3) 基于自生矿物的微观特征、共生关系、稳定性以及相应的温度参数等,建立了研究区火山物质蚀变的成岩演化序列,分析了不同自生矿物析出和转化的成岩条件。

4) 研究区火山物质的蚀变和自生矿物的析出与中-基性的母岩物质组成密切相关,并受地层温度(44~140℃)、压力(如横向构造挤压)、孔隙水的化学性质(如 $NaHCO_3$ 型地层水、阳离子比例)控制。

参考文献

- [1] Garcia-Romero E, Vegas J, Baldonado J L, et al. Clay minerals as alteration products in basaltic volcanoclastic deposits of La Palma (Canary Islands, Spain) [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 174(3): 237-253.
- [2] 程日辉,沈艳杰,颜景波,等.海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用[J].*岩石学报*, 2010, 26(1): 47-54.
Cheng Rihui, Shen Yanjie, Yan Jingbo, et al. Diagenesis of volcanic clastic rocks in Hailaer Basin [J]. *Acta Petrologica sinica*, 2010, 26(1): 47-54.
- [3] 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.
- [4] 刘祥,郎建军,杨清福.火山碎屑沉积物是油气的重要储层[J].*石油与天然气地质*, 2011, 32(6): 859-866.
Liu Xiang, Lang Jianjun, Yang Qingfu. Pyroclastic deposits: an important reservoir for hydrocarbon accumulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 859-866.
- [5] 刘万洙,黄玉龙,庞彦明,等.松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用:矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应[J].*岩石学报*, 2010, 26(1): 158-164.
Liu Wanzhu, Huang Yulong, Pang Yanming, et al. Diagenesis of intermediate and mafic volcanic rocks of Yingcheng Formation in the Songliao basin: sequential crystallization, amygdule filling and reservoir effect [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 158-164.
- [6] 刘立,高玉巧,曲希玉,等.海拉尔盆地乌尔逊凹陷无 CO_2 气储层的岩石学与碳氧同位素特征[J].*岩石学报*, 2006, 22(8): 2229-2236.
Liu Li, Gao Yuqiao, Qu Xiyu, et al. Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO_2 gas reservoir in Wuerxun depression, Hailaer basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2229-2236.
- [7] 刘万洙,庞彦明,吴河勇,等.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)*, 2007, 37(4): 698-702.
Liu Wanzhu, Pang Yanming, Wu Heyong, et al. Relationship between pore-space evolution and deeply buried alteration during diagenetic stage of the volcanic fragments in reservoir greywacke from the Songliao Basin, NE China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(4): 698-702.
- [8] 万从礼,翟庆龙.生油岩与火成岩的相互作用研究初探:有机酸对火成岩的蚀变及过渡金属对有机质演化的催化作用[J].*地质地球化学*, 2001, 29(2): 46-51.
Wan Congli, Zhai Qinglong. Interaction between source rocks and igneous rocks-a preliminary investigation of dissolution of igneous rocks by organic acids and catalysis of transition metals in the generation of hydrocarbons in the source rocks [J]. *Geology Geochemistry*, 2001, 29(2): 46-51.
- [9] 黄思静,李小宁,黄可,等.四川盆地西部栖霞组热液白云岩中的自生非碳酸盐矿物[J].*成都理工大学学报:自然科学版*, 2012, 39(4): 343-352.
Huang Sijing, Li Xiaoning, Huang Ke, et al. Authigenic noncarbonate minerals in hydrothermal dolomite of Middle Permian Qixia Formation in the west of Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39

- (4):343-352.
- [10] Crovisier J L, Thomassin J H, Juteau T, et al. Experimental seawater basaltic glass interaction at 50 °C: study of early developed phases by electron-microscopy and X-ray photoelectron spectrometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(3):377-387.
- [11] Zhou W M, Peacor D R, Alt J C, et al. TEM study of the alteration of interstitial glass in MORB by inorganic processes[J]. *Chemical Geology*, 2001, 174(1):365-376.
- [12] Zhu S F, Zhu X M, Niu H P, et al. Genetic mechanism of dolomitization in Fengcheng Formation in Wu-Xia area of Junggar Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 86(2):447-461.
- [13] 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, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(3):386-396.
- [14] 朱世发, 朱筱敏, 刘继山, 等. 富孔熔结凝灰岩成因及油气意义——以准噶尔盆地乌—夏地区风城组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2):162-171.
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Jishan, et al. Genesis and hydrocarbon significance of vesicular welded tuffs in Fengcheng Formation in Wu-Xia area, Junggar Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2):173-183.
- [15] 张善文. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山地区风城组烃源岩的发现及石油地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2):145-152.
- Zhang Shanwen. Identification and its petroleum geologic significance of the Fengcheng Formation source rocks in Hala'alt area, the northern margin of Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2):145-152.
- [16] 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, Tao 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, 41(11):1613-1626.
- [17] 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(7):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(7):2381-2391.
- [18] 鲜本忠, 牛花朋, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩岩性、岩相及其与储层的关系[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1), 46-55.
- Xian Benzong, Niu Huapeng, Zhu Xiaomin, et al. Early Permian volcanic lithology, lithofacies and their relations to reservoir in northwestern margin of the Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1), 46-55.
- [19] 董国栋, 张琴, 朱筱敏, 等. 火山岩储层研究现状及存在问题——以准噶尔盆地克—夏地区下二叠统火山岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(4):511-519.
- Dong Guodong, Zhang Qin, Zhu Xiaomin et al. Current status and problems of volcanic reservoir study: an example from the Lower Permian volcanic rocks in Ke-Xia area of Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(4):511-519.
- [20] 朱世发, 朱筱敏, 王一博, 等. 准噶尔盆地西北缘克百地区三叠系储层溶蚀作用特征及孔隙演化[J]. *沉积学报*, 2010, 28(3):547-555.
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wang Yibo, et al. Dissolution characteristics and pore evolution of Triassic reservoir in Ke-Bai Area, Northwestern Margin of Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3):547-555.
- [21] 朱世发, 朱筱敏, 陶文芳, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系风城组云质岩类成因研究[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1):38-45.
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Tao Wenfang, et al. Origin of dolomitic reservoir rock in the Permian Fengcheng Formation in Wu-Xia Area of the Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1):38-45.
- [22] Iijima A. Diagenetic transformation of minerals as exemplified by zeolites and silica—a Japanese view [M] // Chilingarian G V, Wolf K H. *Diagenesis II*. Amsterdam: Elsevier, 1988:147-211.
- [23] Sheppard R A, Hay R L. Formation of zeolites in open hydrologic systems [M] // Bish D L, Ming D W. *Natural zeolites: occurrence, properties, applications*. Washington: Mineralogical Society America, 2001:261-276.
- [24] Chipera S J, Goff F, Goff C J. Zeolitization of intracaldera sediments and rhyolitic rocks in the 1.25 Ma lake of Valles caldera, New Mexico, USA [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 178(2):317-330.
- [25] Kastner M. Authigenic feldspars in carbonate rocks [J]. *American Mineralogist*, 1971, 56:1403-1442.
- [26] 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.
- [27] Broxton D E, Bish D L, Warren R G. Distribution and chemistry of diagenetic minerals at Yucca mountain, Nye county, Nevada [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1987, 35(2):89-110.
- [28] Koichi A, Toshie K. Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis [J]. *Sedimentology*, 1980, 27(2):179-188.
- [29] Cho M, Maruyama S, Liou J G. An experimental investigation of heulandite-laumontite equilibrium at 1 000 to 2 000 bar p_{fluid} [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97(2):43-50.
- [30] Mohamed B B, Bertrand F, Benoit M. Diagenetic albitization of K-feldspar and plagioclase in sandstone reservoirs: thermodynamic and kinetic modeling [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(6):1100-1109.
- [31] Kacmaz H, Korkturk U. Zeolites and coexisting authigenic minerals in Miocene tuffs of the Alacati [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2006, 54(5):587-597.
- [32] Christidis G. 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.
- [33] Thompson A B. Laumontite equilibria and the zeolite facies [J]. *American Journal of Science*, 1970, 269(3):267-275.
- [34] Bish D L, Aronson J L. Paleogeothermal and paleohydrologic conditions in silicic tuff from Yucca Mountain, Nevada [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(2):148-161.
- [35] Mariner R H, Surdam R C. Alkalinity and formation of zeolites in saline alkaline lakes [J]. *Science*, 1970, 170(3961):977-980.