

鄂尔多斯盆地北部杭锦旗区块下石盒子组 自生石英形成机制

肖冬生¹, 付强²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 湖北科技职业学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过观察石英阴极发光颜色、扫描电镜及偏光显微镜下颗粒的微观特征, 同时结合自生矿物的宏观分布特点及硅质来源阶段分析, 发现鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区下石盒子组砂岩储层中石英硅质来源包括长石溶蚀、粘土矿物的转化及压溶作用, 且以前两者为主。硅质运移及沉淀机制分析认为, 长石溶蚀和粘土矿物蚀变形成的硅质以层内流体平流携带和扩散运移为主, 压溶作用产生的硅质在颗粒表面沉淀或与蚀变提供的硅质来源混合发生运移, 酸性流体侵入产生的 pH 值变化是控制石英沉淀的主要因素, 温度、压力以及油气的充注对石英沉淀影响很小。

关键词: 自生石英; 胶结作用; 杭锦旗区块; 硅质来源; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P578.4⁺94

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)01-0113-08

The genetic mechanism of authigenic quartz in Lower Shihezi Formation of Hanggin Banner, northern Ordos Basin

XIAO Dong-sheng¹ and FU Qiang²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Hubei College of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The cementation of quartz is one of the very common and important diagenetic actions in sandstone reservoirs. A thorough study of the characteristics and formation mechanism of authigenic quartz is therefore an indispensable means in revealing the reservoir characteristics, analyzing the evolution of diagenesis, and forecasting and evaluating the reservoir. According to the formation mechanism of serrated edges and the microscopic features of quartz in Lower Shihezi Formation and underlying Shanxi Formation, the authors found two corruptions and one overgrowth, with the corruptions taking place respectively before and after the overgrowth. The dissolution of feldspar is considered to be one of the main siliceous sources on the basis of the dissolution theory of feldspar and the residual structural analysis. The distribution of authigenic minerals is characterized obviously by the gradual upward decrease of quartz, the positive correlation with authigenic calcite and kaolinite, and the negative correlation with illite. Therefore, the transformation of clay minerals is considered to be another main siliceous source. The Shanxi Formation microscopically has features of pressure dissolution. In combination with the cathodoluminescence features of the quartz, it is held that there exists the siliceous source of pressure dissolution, which, however, is not the main source. On the basis of the microscopic pressure solution in underlying Shanxi Formation and the cathodoluminescence features of quartz, the pressure solution is thought to serve as a minor siliceous source. The advection flow and the diffusion migration in the reservoir made up the main migration pattern for the silicon derived from the dissolution of feldspar and the transformation of clay minerals, whereas the silicon derived from the pressure solution migrated to pores by chemical potential between particles and pores and precipitated at the grain surface or moved in the mixed source. The change of pH resulting from

the invasion of acid fluids was the main factor controlling silicon deposition, while the temperature, pressure and oil-gas filling had little effects and the wrapping action of clay minerals on the grain surface had no effects on quartz deposition.

Key words: autogenetic quartz; cementation; Hanggin Banner area; origin of quartz cement; Ordos Basin

在大多数砂岩储层中,石英胶结作用是造成孔隙损失、影响储层性质的重要因素,在克拉通盆地中构造稳定区内,成分成熟度较高的中-粗粒石英质砂岩中石英胶结作用最为发育(Yongin and Yong, 2004)。自从 Sorby 在 1880 年首次证实砂岩中存在石英次生加大以来,国内外对石英胶结物已经做了较为广泛的研究,主要涉及其时空分布、硅质来源及沉淀控制因素等,但关于影响石英胶结物时空分布的主要因素、形成石英胶结物的硅质来源及影响硅质运移和沉淀的主要控制因素等问题仍未形成统一的认识(于均民等,2000)。深入研究自生石英的特征及其形成机制,对古温度的定时、了解储层非均质性的成因及储层物性有着重要的意义。本文通过研究鄂尔多斯盆地杭锦旗区块下石盒子组中石英的宏观和微观特征来分析石英胶结物的形成机制。

1 区块背景特征

杭锦旗探区位于鄂尔多斯盆地北部,横跨伊盟隆起和伊陕斜坡两大一级构造单元,总面积为 9 825

km²。根据基底顶面起伏、盖层发育情况以及构造形态特征,杭锦旗探区可划分为乌兰格尔凸起、公卡汉凸起、杭锦旗断阶、伊陕斜坡及天环向斜等 5 个次一级构造单元(薛会等,2009),而杭锦旗区块位于伊盟隆起和伊陕斜坡结合部位(图 1)。研究区位于鄂北地区继承性长期隆起之上,沉积盖层较薄,厚 2~3 km,缺失下古生界地层,上古生界自下而上发育太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组(图 2),以不同层位超覆于下伏前寒武系之上(胡永章等,2009)。

上古生界是在元古界和太古界变质岩系基底上发育起来的一套以陆相碎屑岩沉积为主的沉积地层,主要目的层下石盒子组为一套辫状河沉积体系,与下伏煤系地层呈整合接触,地层旋回特征十分显著,3 个次一级沉积旋回粒度下粗上细,每个旋回底部砂岩中常含细砾岩,据此可将下石盒子组自下而上分为盒 1 段、盒 2 段、盒 3 段(图 2)。储层岩石主要由浅灰绿、灰白、灰黄色块状含砾粗-中砂岩、细砂岩夹紫、棕褐及灰绿色泥岩、粉砂质泥岩组成(曹敬华等,2007),储层以岩屑石英砂岩和长石石英砂

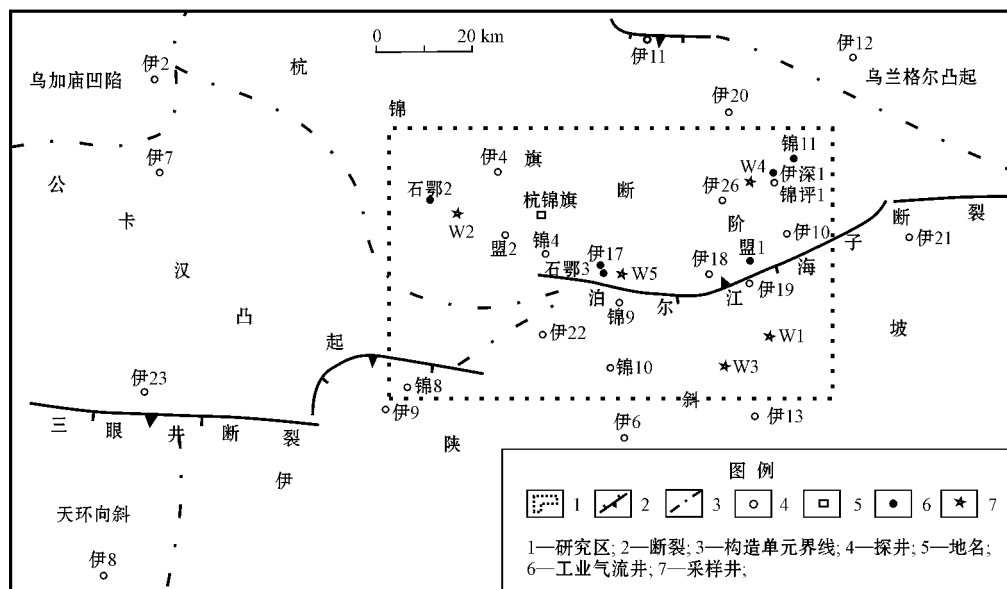


图 1 杭锦旗地区构造单元分区图

Fig. 1 Division of regional tectonic units in Hanggin Banner area

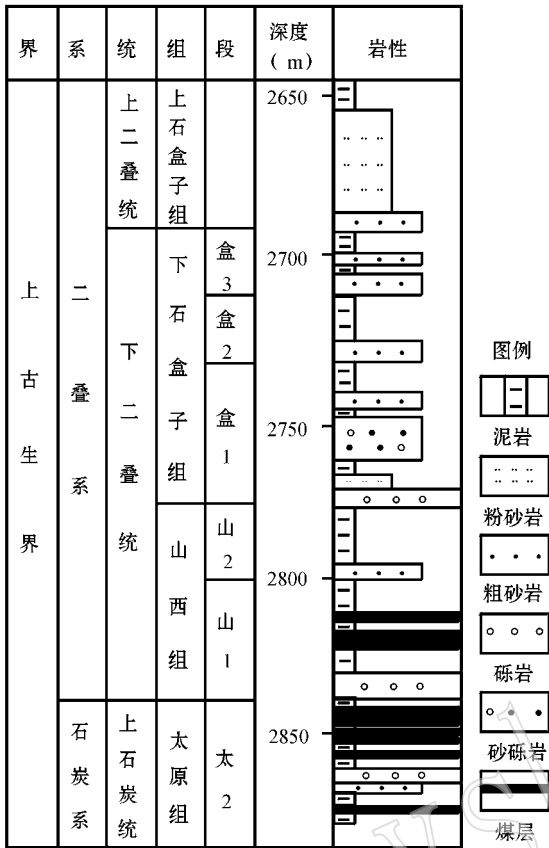


图 2 杭锦旗地区综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of Hanggin Banner area

岩为主(图 3),碎屑含量在 90%左右,主要成分为石英和岩屑,其中石英和燧石占 60%左右,岩屑在 25%~40%之间,而长石含量很少,一般不超过 25%,颗粒粒径在 0.125~1 mm 之间,主要分布在 0.25~0.5 mm 之间。分选中等,磨圆度为次圆-次棱角状,岩石以颗粒支撑、点-线接触、孔隙式胶结为主。填隙物含量较少,普遍小于 10%,局部地方杂基含量较高,但以胶结物为主,包括石英、铁方解石和各种自生粘土矿物等。

2 石英的特征

2.1 石英的微观特征

石英颗粒由于受矿物结晶时的温度、压力、地球化学环境等因素影响,具有不同的阴极发光特性(Carita and Heinrich, 2003)利用石英的阴极发光颜色可以判断其碎屑物质来源。现在国内外对石英的阴极发光的源岩指示意义(表 1)(王英华等, 1990;宋志敏, 1993)已达到了一定的共识,一般认为发紫色

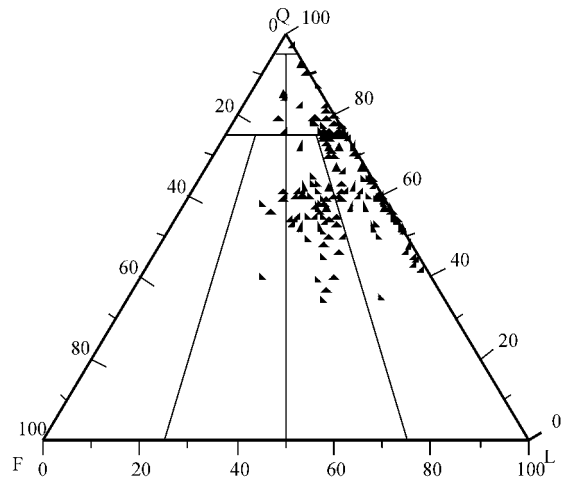


图 3 下石盒子组岩性分类三角图

Fig. 3 Triangular diagram showing classification of rocks of Lower Shihoxi Formation

光的石英为火山岩、深成岩或接触变质岩;发棕色光的石英一般为变质岩;对于沉积物中的自生石英一般认为不发光。但是对澳大利亚 Cooper 盆地 Tirrawrra 砂岩中石英胶结物的研究表明,自生石英的阴极发光特征并不都是不发光的,它可以发棕色和蓝色光,主要受硅质来源和温度的控制(Mohammad and Peter, 1997;史丹妮等, 1999)(表 2)。该区碎屑石英颗粒一般发棕色光、蓝紫色光和褐色光(图 4a、c、e),说明碎屑物质来源有两种:火山岩和变质岩;自生石英绝大部分不发光,但有一些发浅蓝色光和棕

表 1 石英阴极发光特征分类表

Table 1 Classification of quartz cathodoluminescence characteristics

阴极发光颜色	温度条件	产状
以紫色为主 变化于蓝-紫、红-紫之间	>573℃, 冷却“快”	火山岩、深成岩、接触变质岩
	>373℃, 冷却“慢”	深变质岩 (变质的火成岩、变质的沉积岩)
棕色	300~573℃	[接触变质岩、区域变质岩、回火的沉积物 (自生石英)]
不发光	<300℃	沉积物中的自生石英

表 2 澳大利亚 Cooper 盆地 Tirrawrra 砂岩石英胶结物特征表

Table 2 Characteristics of quartz cement of Tirrawrra sandstone in Cooper basin, Australia

阴极发光颜色	棕色	蓝色	棕色
温度/℃	65~80	80~100	125~135
铝的含量/10 ⁻⁶	237	538	58
硅的来源	长石的早期溶解	长石的晚期溶解	压溶作用

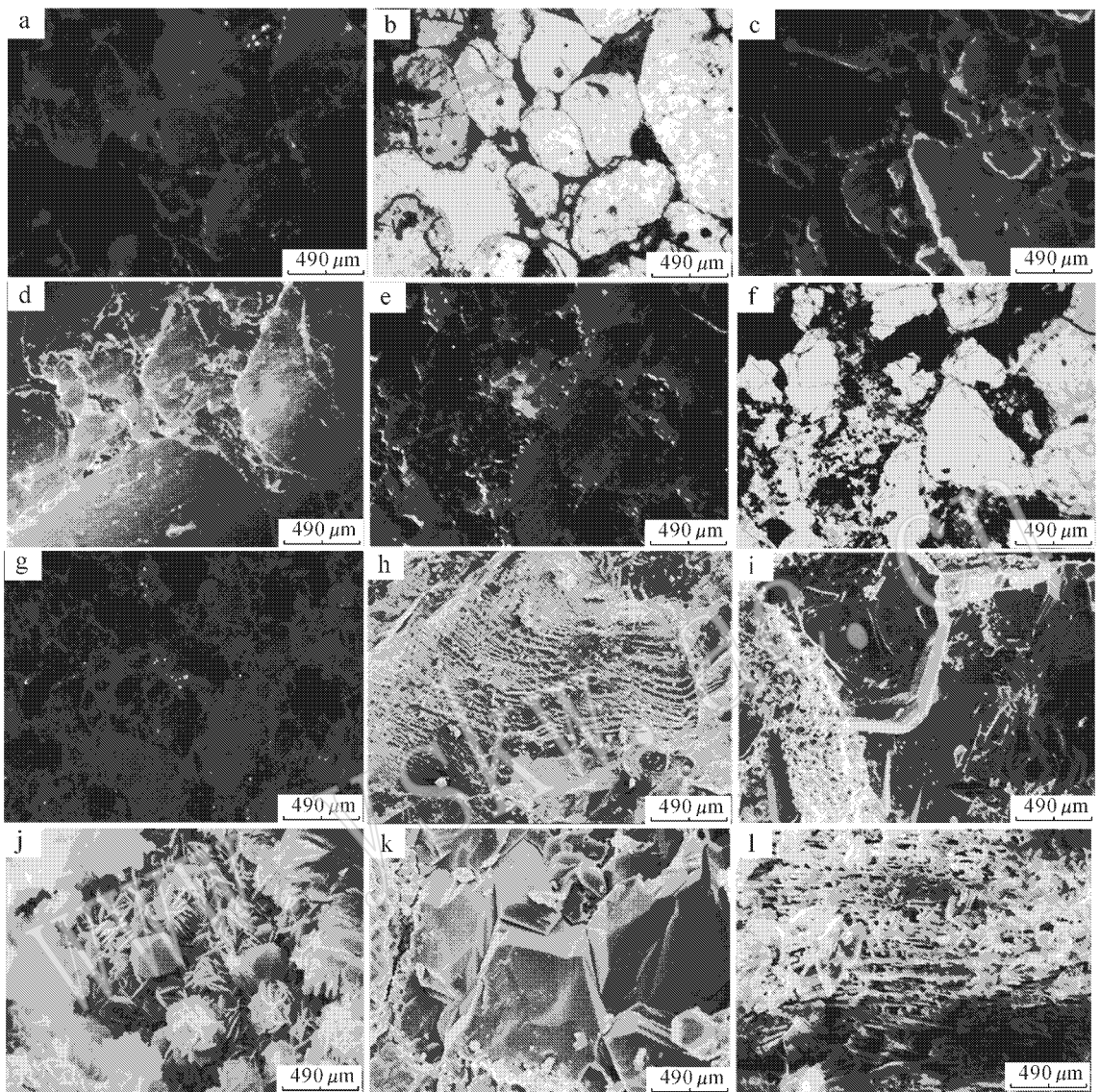


图 4 自生石英微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of authigenic quartz

a—阴极发光, 石英颗粒发棕色、蓝紫色光, 发育两期石英加大边, 第一期加大边不发光, 第二期发棕色光, 遭到溶蚀而成锯齿状, 颗粒接触紧密, 可见压溶特征(2 832.45 m, 山西组, w1 井); b—偏光, 与 a 为同一视域; c—阴极发光, 石英颗粒发棕色、蓝紫色光, 自生石英加大边呈蓝色和棕色(2 688 m, 盒 2 段, w2 井); d—阴极发光, 石英颗粒发棕色、蓝紫色光, 可见石英的破裂愈合现象(2 885.53 m, 太原组, w1 井); e—阴极发光, 石英颗粒发棕色光, 长石发蓝色光, 颗粒遭到强烈溶蚀边缘呈锯齿状, 还发育溶蚀粒内孔隙(2 698.8 m, 盒 1 段, w2 井); f—偏光, 与 e 为同一视域; g—阴极发光, 石英颗粒发棕色、蓝紫色光, 自生石英加大边不均匀且不发光(2 894 m, 山西组, w3 井); h—扫描电镜, 贝壳状断口(2 862.7 m, 山西组, w1 井); i—扫描电镜, 石英具有次生加大, 表面可见硅质沉淀薄膜(2 370 m, 盒 2 段, w4 井); j—扫描电镜, 叶片状自生绿泥石与自生石英晶体共生(2 370 m, 盒 2 段, w4 井); k—扫描电镜, 镶嵌紧密呈凹凸接触状(2 619.12 m, 上石盒子组, w2 井); l—扫描电镜, 长石颗粒遭到强烈溶蚀(2 352 m, 盒 1 段, w5 井)

a—cathodoluminescence, quartz grains with brown and bluish purple light, two overgrowths, with the first one not shining but the second one giving out brown light, dentate and in close contact with pressure solution by dissolution(2 832.45 m, Shanxi Formation, w1 well); b—polarizing, the scope being identical to a; c—cathodoluminescence, quartz grains with brown and bluish purple light, the overgrowth being blue and brown(2 688 m, He2 section, w2 well); d—cathodoluminescence, quartz grains with brown and bluish purple light, assuming fracture-healing phenomena(2 885.53 m, Taiyuan Formation, w1 well); e—cathodoluminescence, quartz grains being brown, blue feldspar with serrated edges and built-in porosity due to strong dissolution(2 698.8 m, He1 section, w2 well); f—polarizing, the scope being identical to e; g—cathodoluminescence, quartz grains with brown and bluish purple light, the uneven overgrowth not shining(2 894 m, Shanxi Formation, w3 well); h—scanning electron microscope, shell-like fracture(2 862.7 m, Shanxi Formation, w1 well); i—scanning electron microscope, quartz grains with secondary overgrowth, visible siliceous thin film on surface(2 370 m, He2 section, w4 well); j—scanning electron microscope, symbiosis of authigenic foliated chlorite and quartz crystals(2 370 m, He2 section, w4 well); k—scanning electron microscope, closely enmeshed with concave and convex margin(2 619.12 m, Upper Shihezi Formation, w2 well); l—scanning electron microscope, feldspar grains strongly dissolved(2 352 m, He1 section, w5 well)

色光(图 4a、c),根据表 2 可以初步判断硅质有长石溶解和压溶作用两种来源。

石英颗粒由于沉积、成岩作用的影响,表面会产生一系列的微观特征,可分为物理作用特征和化学作用特征两类,该区发育的物理作用特征主要有贝壳状断口(图 4h),局部可见颗粒破裂愈合现象(图 4d)。化学作用特征可分为溶蚀作用、沉淀作用和晶体增长特征,该区溶蚀作用比较发育,颗粒表面常见各种溶蚀坑,边缘具不规则的锯齿形(图 4e);同时颗粒表面也发育石英的次生加大和沉淀硅质薄膜(图 4i);孔隙中局部发育呈自形的自生石英晶体(图 4j)。这些现象中最典型、最有意义的特征是石英的溶蚀和沉淀作用形成的锯齿状边缘,根据其形成机理及其镜下特征,可分为以下 3 种典型情况:

(1) 偏光下颗粒显示圆滑状,阴极发光下显示不规则状:由于受孔隙空间和流体特征的控制,颗粒表面具有不均匀的次生加大,由于次生加大部分不发光而使颗粒在阴极发光下显示不规则状石英颗粒(图 4g)。

(2) 偏光下颗粒边缘呈锯齿状,阴极发光下颗粒相对较小,石英颗粒虽有比较均匀的次生加大,但加大边被溶蚀,由于溶蚀的深浅不同而造成这种现象,如果颗粒本身也遭到溶蚀,则阴极发光下颗粒也呈锯齿状,反之则较圆滑。出现此种情况说明石英加大之后发生了溶蚀(图 4a、b),可认为该区最后成岩环境又恢复了碱性。

(3) 在阴极发光和显微镜下观察,其边缘都呈锯齿状,这是石英颗粒本身被溶蚀交代的结果,可分为颗粒和次生加大都溶蚀和只有颗粒溶蚀两种情况(图 4e、f)。

从上述现象中可以看到,该区下石盒子组石英发生了两期溶蚀,一期石英加大,溶蚀分别发生在次生加大前后,因此,下石盒子组后期又恢复了碱性环境。

2.2 石英的产出状态及其分布特征

石英的胶结作用是研究区中较普遍和较重要的成岩作用。其产出形式主要为石英次生加大边,加大边宽度一般在 0.05~0.1 mm 之间,最宽可达 0.3 mm。加大后的石英呈贴面结合或镶嵌紧密呈凹凸接触状(图 4k)。通过统计 5 口代表井的自生矿物含量(表 3)发现,自生石英从下到上具递减的趋势,与自生方解石和高岭石的分布呈正相关关系,而与伊利石呈负相关关系。

表 3 下石盒子组自生矿物分布表

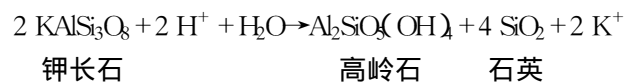
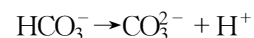
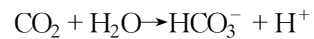
Table 3 Distribution of authigenic minerals in Lower Shihezi Formation

地层	自生矿物含量/%					统计样品数量/个
	高岭石	绿泥石	伊利石	方解石	石英	
盒 3	2.2	0.5	9.2	0.75	0.20	13
盒 2	4.2	2.4	4.0	2.46	0.29	14
盒 1	3.9	0.5	2.9	4.39	0.58	13

3 硅质来源

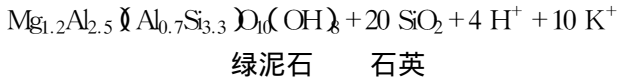
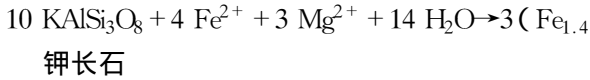
研究表明,石英胶结物的可能来源有多种,根据其形成时期可分为 4 个主要阶段(于均民等,2000):①在新沉积的海相沉积物中,硅质生物遗体、分泌物溶解提供硅质;②在埋藏较浅时,相对不稳定的蛋白石胶结物的溶解以及长石和火山岩碎屑的早期溶蚀提供硅质;③在较深埋藏时,蛋白石的溶解与石英的结晶,粘土矿物的蚀变和转化,长石和火山岩碎屑的溶解,温度压力增加引起的石英溶解度增加,以及压溶作用等提供的硅质;④在沉积层隆起时,砂岩中的不稳定硅酸盐或粘土的风化提供硅质。该研究区主要发育辫状河三角洲沉积体系,其硅质来源集中在上述的第②、③阶段。可能的硅质来源途径具体有以下几种:

(1) 长石的溶蚀。长石在酸性条件下,很容易发生溶蚀(史丹妮等,1999)。据 Worden 和 Barclay (2000)研究表明,当有富含 CO₂ 的流体进入时,将发生下面的一系列反应:

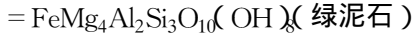
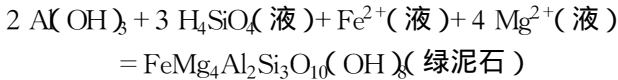


这一系列反应必须同时发生或相继发生,因为钾长石的溶蚀消耗了酸,铁方解石才有可能存在,否则铁方解石将无法存在。在该研究区可见长石溶蚀的残余结构(图 4l),且下石盒子组下伏的含煤地层可以提供酸性流体,同时自生石英的含量具有沿着酸性流体方向递减的分布特点,另外从阴极发光照片中(图 4g)可以观测到,石英加大早于方解石胶结。至于在扫描电镜下观察到绿泥石与石英晶体共生的现象(图 4j),说明石英形成于成岩晚期,酸性流体补给不足的情况下,长石蚀变而成,其过程如下面的化

学反应过程(王行信等,1992;伏万军等,1996);当然,成岩晚期,非晶质的硅、铝、铁和镁的氧化物也可直接结合形成绿泥石(如下式)(王行信等,1992),但长石溶蚀是其中硅质的主要来源。因此从长石溶蚀的原理、时间和空间上都说明它是硅质的一个主要来源。



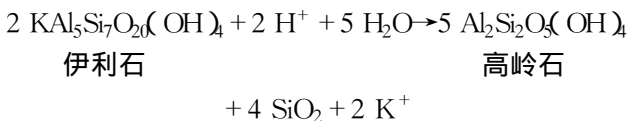
绿泥石 石英



(2) 压溶作用。当上覆层的应力超过孔隙水所能承受的静水压时,或者受较强的构造应力作用时,颗粒接触处的应力和溶解度增高而导致的晶格变形和溶解称为压溶作用。压溶作用一方面进一步减小孔隙体积,使颗粒接触更紧密,另一方面,溶蚀的石英为硅质胶结物提供了硅质来源,常作为石英次生加大,并造成颗粒之间凹凸或缝合线接触的主要因素。图4a中石英颗粒发棕色、蓝紫色光,发育两期石英加大边,第一期加大边不发光,第二期发棕色光,遭到溶蚀而成锯齿状,颗粒接触紧密,可见压溶特征。但压溶作用不十分发育,不是硅质的主要来源。

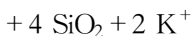
(3) 外来流体的带入。流体运移过程中,将硅质从一点带到另一点,此种硅质来源的自生石英理论上应该具有顺着流体侵入方向递减的变化规律(Yongin and Yong, 2004),但具有此种规律的自生石英并不一定是外来流体带入的。该区虽然存在流体的向上运移,但是流体主要呈酸性,不易携带硅质,故外来流体无法提供硅质来源。

(4) 粘土矿物的蚀变或转化。伊利石发生溶蚀、溶解,可生成自生高岭石和石英(车启鹏等,1995),如下式:



伊利石

高岭石



此反应发生在酸性流体大量排出之时,表3中反映的石英的含量与伊利石的含量呈负相关关系而与高岭石呈正相关关系也证实了这一点,因此这也是硅质的一个重要来源。

(5) 碳酸岩交代石英、长石等硅质颗粒。该区方解石与自生石英呈正相关关系,但方解石以胶结物存在充填于孔隙中,未见其交代石英和长石颗粒

的现象,因此,它并未为石英胶结提供硅质来源。

因此该区的硅质来源为上述(1)(2)(4)种途径,且以长石溶蚀和粘土蚀变为主。

4 硅质的运移及其沉淀机制

不同的硅质来源具有不同的运移机制,根据上面的分析已经可知该区主要由长石的溶蚀、粘土矿物的蚀变和压溶作用提供硅质来源,其中前两种存在一个共同的特点就是需要酸性流体的侵入,而蚀变产物与蚀变矿物在垂向上的分布存在一定的互补性,因此可以认为蚀变产物在垂向上的运移较小,故蚀变形成的硅质以层内流体平流携带和扩散运移为主(Geoffrey, 2001)。由于在压溶作用发生时,接触颗粒表面与孔隙间存在一定的化学势差(Heather *et al.*, 2003),使压溶作用提供的硅质向孔隙运移,然后在颗粒表面沉淀或与蚀变提供的硅质来源混合发生运移。

硅质在适当的地质环境下开始沉淀就形成了各种自生石英,如次生加大、自形自生石英和粒表微晶。其中影响石英沉淀的因素主要有以下几种:

(1) pH值:石英沉淀、溶解是储层中沉积作用、埋藏成岩作用和孔隙水演化的结果,pH值大于8.5时有利于石英的溶解,pH值大于9时 SiO_2 的溶解度随pH值的增大而迅速增高(邱隆伟等,2002),而当pH值小于8.5时则有利于石英的沉淀。该区由于存在酸性流体的侵入,主要呈酸性环境,且硅质也主要在酸性流体侵入时产生,因此酸性环境控制了石英的沉淀,也是硅质在垂向上运移较小的主要原因。

(2) 温度、压力:石英在高温、高压下易于溶解,在低温、低压下易于沉淀。压力和温度的降低很易造成石英的沉淀。该区构造运动不大,特别是在酸性流体侵入前后,基本没有大的构造运动,已有的样本测试也未发现超压现象,整体温度、压力变化不大,另外,硅质的垂向运移也较小。因此,温度、压力对该区石英沉淀的影响很小。

(3) 油气的充注:已有的研究(Ann *et al.*, 2002; Mark *et al.*, 2004)表明,油气的充注可以抑制甚至阻止成岩的进行。因为成岩作用主要是成岩矿物间及其与水介质的相互作用,当油气充注后,岩层中的水介质被驱走,成岩矿物之间失去了物质转移的介质,从而抑制成岩作用的进行(Vidar *et al.*, 2002),石英的胶结作用也不例外。但是,在该区中

由于油气的注入量很少,且是气体,对水介质的驱替作用很小,故对石英沉淀的影响也很小。

(4) 颗粒表面特征:干净的颗粒表面有利于石英次生加大的形成,而当颗粒表面被其他矿物包裹后,特别是石英颗粒被粘土矿物包裹时,可以明显抑制石英次生加大,但并不是只要是粘土就可以抑制石英的次生加大,只有粘土满足下列条件时才能有效地抑制石英的次生加大:①粘土矿物必须形成的较早,即在石英胶结大量形成之前。②粘土要连续地包裹在整个颗粒表面。③绝大多数颗粒都被粘土包裹(Vidar *et al.*, 2002)。该区虽然存在粘土矿物的包裹作用,但是只有少量颗粒、部分表面被包裹,因此无法有效抑制石英次生加大的产生。

不同地区和地质条件下石英的沉淀具有不同的控制因素,对于该区下石盒子组石英沉淀而言,其主要控制因素为流体的 pH 值,当然其他因素也有一定的影响。

5 结论

(1) 根据石英锯齿状边缘形成机理及下石盒子组与下伏山西组石英镜下特征,认为鄂北杭锦旗区块下石盒子组自生石英发生了两期溶蚀,一期石英加大,溶蚀分别发生在次生加大前后。

(2) 通过观察石英颗粒的微观特征,并结合自生矿物的宏观分布特点及硅质来源阶段分析,发现研究区下石盒子组地层硅质来源包括长石的溶蚀、粘土矿物的蚀变或转化及压溶作用,且以前两者为主要来源。

(3) 长石溶蚀和粘土矿物蚀变形成的硅质以层内流体平流携带和扩散运移为主。压溶作用产生硅质在接触颗粒表面与孔隙间化学势差作用下向孔隙运移,然后在颗粒表面沉淀或与蚀变提供的硅质来源混合发生运移。

(4) 综合分析流体 pH 值、温度、压力、油气充注及颗粒表面特征对石英溶解、沉淀的影响,认为酸性流体侵入产生的 pH 值变化是控制石英沉淀的主要因素,温度、压力以及油气的充注对石英沉淀影响很小,而颗粒表面粘土矿物的包裹对石英沉淀没有影响。

References

Ann M E M, Smalley P C, Haszeldine R S, *et al.* 2002. Note on the

- importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 86(9): 1561~1571.
- Cao Jinghua, Zhou Wen, Deng Lizheng, *et al.* 2007. Reservoir physical properties and evaluation of lower Xiashihezi formation in Hangjinqi area of North Ordos basin[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 29(1): 30~34(in Chinese with English abstract).
- Carita A and Heinrich B. 2003. Cathodoluminescence spectra of detrital quartz as provenance indicators for Paleozoic meta-sediments in southern Andean Patagonia[J]. Journal of South American Earth Sciences, 16: 15~26.
- Che Qipeng, Sun Hongbin, Zhang Fenglian, *et al.* 1995. Authigenic kaolinite origin analysis of paleogene sandstone reservoir in Niujia area[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 25(3): 306~309(in Chinese with English abstract).
- Fu Wanjun and Liu Wenbin. 1996. Study on the alteration of feldspar from dastic rock in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 14(suppl.): 84~89(in Chinese with English abstract).
- Geoffrey T. 2001. A model for diagenetic mass transfer between adjacent sandstone and shal[J]. Marine and Petroleum Geology, 18: 743~755.
- Heather A S, John W and Richard H. 2003. An analysis of the roles of stress, temperature, and pH in chemical compaction of sandstones[J]. Journal of Sedimentary Research, 73: 64~71.
- Hu Yongzhang, Lu Gang, Wang Yi, *et al.* 2009. Distribution law of oil, gas and water, and an analysis of controlling factors of Hangjinqi area in Ordos Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 36(2): 128~132(in Chinese with English abstract).
- Mark W, Haszeldine R S and Robert M E. 2004. Hydrocarbon filling history from diagenetic evidence: Brent Group, UK North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 21: 443~455.
- Mohammad R R and Peter R T. 1997. Origin of quartz cement in the Tirramwarra sandstone, southern Cooper basin, south Australia[J]. Journal of Sedimentary Research, 67: 168~177.
- Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Chen Wenxue, *et al.* 2002. A new type of secondary porosity-quartz dissolution porosity[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(4): 621~627(in Chinese with English abstract).
- Shi Danni and Jin Wei. 1999. The origin, migration and precipitation of authigenic quartz in sandstones[J]. Lithofacies Palaeogeographic, 19(2): 65~70(in Chinese with English abstract).
- Song Zhimin. 1993. Cathodoluminescence Geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Vidar S, Knut B and Dag K. 2002. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite: A study of the Jurassic Garn formation from the Kristin and Lavrans fields, offshore Mid-Norway[J]. Marine and Petroleum Geology, 19: 767~781.
- Wang Xingxin and Zhou Shuxin. 1992. Clay Minerals in Sandstone and Reservoir Protection[M]. Beijing: Geological Publishing House: 48~50(in Chinese).
- Wang Yinghua, Zhang Shaoping and Pan Rongsheng. 1990. Application

- of Cathodoluminescence Technology in Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Worden R H and Barclay S A. 2000. Internally-sourced quartz cement due to externally-derived CO₂ in sub-arkosic sandstones, North Sea [J]. Journal of Geochemical Exploration, 69: 645~649.
- Xue Hui, Zhang Jinchuan, Wang Yi, et al. 2009. Relationship between tectonic evolution and hydrocarbon in Hangjinqi block of North Ordos basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 33(2): 206~214(in Chinese with English abstract).
- Yongin K and Yong Y L. 2004. Origin of quartz cement in the Lower Ordovician Dongjeom formation, Korea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 327~335.
- Yu Junmin, Zhou Xiaofeng and Liu Li. 2000. Genesis and significance of quartz cement in sandstones[J]. Globe Geology, 19(1): 20~25 (in Chinese with English abstract).
- 自生高岭石成因分析[J]. 长春地质学院学报, 25(3): 306~309.
- 伏万军, 刘文彬. 1996. 塔里木盆地碎屑岩中钾长石的蚀变作用[J]. 沉积学报, 14(增刊): 84~89.
- 胡永章, 卢刚, 王毅等. 2009. 鄂尔多斯盆地杭锦旗区块油气水分布及主控因素分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(2): 128~132.
- 邱隆伟, 姜在兴, 陈文学, 等. 2002. 一种新的储层孔隙成因类型——石英溶解型次生孔隙[J]. 沉积学报, 20(4): 621~627.
- 史丹妮, 金巍. 1999. 砂岩中自生石英的来源、运移与沉淀机制[J]. 岩相古地理, 19(2): 65~70.
- 宋志敏. 1993. 阴极发光地质学基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王行信, 周书欣. 1992. 砂岩储层粘土矿物与油层保护[M]. 北京: 地质出版社, 48~50.
- 王英华, 张绍平, 潘荣胜. 1990. 阴极发光技术在地质学中的应用[M]. 北京: 地质出版社.
- 薛会, 张金川, 王毅等. 2009. 鄂北杭锦旗探区构造演化与油气关系[J]. 大地构造与成矿学, 33(2): 206~214.
- 于均民, 周晓峰, 刘立. 2000. 砂岩中石英胶结物的成因及其研究意义[J]. 世界地质, 19(1): 20~25.

附中文参考文献

- 曹敬华, 周文, 邓礼正, 等. 2007. 鄂北杭锦旗地区下石盒子组储层物性特征及评价[J]. 物探化探计算技术, 29(1): 30~34.
- 车启鹏, 孙洪斌, 张凤莲, 等. 1995. 牛居地区下第三系砂岩储层中

2009 年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率
1	地质科学	2.735	1667	0.82	16	地球科学进展	1.111	2400	0.94
2	岩石学报	2.603	5468	0.49	17	沉积学报	1.045	2285	0.88
3	矿床地质	2.224	1611	0.80	18	地球化学	0.979	1607	0.93
4	地质学报	1.871	2747	0.88	19	地球学报	0.903	1192	0.86
5	地学前缘	1.629	3384	0.87	20	岩矿测试	0.868	787	0.65
6	高校地质学报	1.611	1202	0.96	21	地质与勘探	0.822	1152	0.66
7	大地构造与成矿学	1.602	778	0.79	22	地质科技情报	0.782	914	0.82
8	中国科学 D	1.500	2881	0.94	23	矿物岩石	0.774	859	0.94
9	中国地质	1.487	1462	0.85	24	吉林大学学报地球科学版	0.772	1262	0.83
10	地质论评	1.470	2231	0.95	25	矿物岩石地球化学通报	0.760	602	0.95
11	地质通报	1.373	2433	0.88	26	矿物学报	0.695	790	0.91
12	地质力学学报	1.256	481	0.67	27	西北地质	0.615	446	0.85
13	地球科学	1.208	2187	0.85	28	地层学杂志	0.522	617	0.80
14	现代地质	1.172	1329	0.77	29	新疆地质	0.319	771	0.94
15	岩石矿物学杂志	1.118	1027	0.84	30	沉积与特提斯地质	0.217	369	0.95

本表数据引自《2010 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。