

高青地区上石盒子组致密石英砂岩成岩特征及其演化

赵永福^{1,2}, 杨少春¹, 任 瑞¹, 王 亚¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580;

2. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东东营 257000)

摘要:济阳坳陷东营凹陷高青地区二叠系上石盒子组发育致密石英砂岩。在普通薄片、铸体薄片、阴极发光、扫描电镜、流体包裹体等观察测试基础上,利用埋藏史和油气充注史,对高青地区上石盒子组致密石英砂岩成岩特征、成岩序列和成岩演化进行研究。结果表明:上石盒子组致密石英砂岩经历复杂的成岩改造,压实、胶结、溶蚀是主要的成岩作用类型;强烈的压实作用,多期的石英次生加大胶结作用和多种、多期高岭石、伊利石、方解石等其他不同类型胶结作用是导致石英砂岩致密化的主要因素;经历沉积埋藏→隆起抬升→再次埋藏的构造埋藏演化过程,上石盒子组石英砂岩的成岩演化序列为早期压实作用→长石溶蚀作用,石英加大、高岭石等胶结作用→方解石胶结作用,石英溶蚀作用,伊蒙混层胶结作用→碳酸盐(方解石)溶蚀作用,石英加大胶结作用,微裂缝作用;目前处于中成岩 B 期;研究区东营组沉积晚期以来发生了两期油气充注事件,导致有机酸成岩环境发生了一系列的成岩变化。

关键词:高青地区;上石盒子组;致密石英砂岩;成岩作用;成岩演化

中图分类号:TE 122 **文献标志码:**A

引用格式:赵永福,杨少春,任瑞,等.高青地区上石盒子组致密石英砂岩成岩特征及其演化[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(6):23-31.

ZHAO Yongfu, YANG Shaochun, REN Rui, et al. Diagenetic characteristics and evolution of tight quartz sandstones of Shangshihezi Formation in Gaoqing area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(6):23-31.

Diagenetic characteristics and evolution of tight quartz sandstones of Shangshihezi Formation in Gaoqing area

ZHAO Yongfu^{1,2}, YANG Shaochun¹, REN Rui¹, WANG Ya¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. Management Center of Oil and Gas Exploration, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Gaoqing area is located in Dongying sag of Jiyang Depression. The tight quartz sandstone of Permian Shangshihezi Formation in Gaoqing area is mainly quartz sandstone. On the basis of thin sections, casting thin sections, cathodoluminescence, scanning electron microscopy(SEM), and fluid inclusion observation, burial history and hydrocarbon accumulation history are used to study the diagenesis and diagenetic evolution of diagenetic sequences. The results showed that tight quartz sandstone in the Gaoqing area has experienced a complex set of diagenesis, and compaction, cementation and dissolution are the main diagenesis types, including strong compaction, multi-phase quartz overgrowth cementation, a variety of multiphase kaolinite cementation, illite cementation and calcite cementation which are main factors lead to quartz sandstone tightness. The burial history includes an early deep burial stage, a middle uplift stage, and a late deep burial stage. The quartz sandstone in the B sub-stage of mesogenetic diagenesis has experienced the following evolution sequence: early stage compaction→feldspar dissolution; quartz overgrowth cementation; kaolinite cementation→calcite cementation; quartz dissolution; the

收稿日期:2019-06-01

基金项目:国家科技重大专项课题(2017ZX05009001);山东省研究生教育质量提升计划项目(SDY18029)

作者简介:赵永福(1981-),男,博士研究生,研究方向为油气地质与勘探。E-mail: zhaoyongfu_slyt@sinopec.com。

通信作者:杨少春(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油气地质及油藏描述。E-mail: scyang@upc.edu.cn。

slip layer cementation→carbonate-cement dissolution; calcite cement dissolution; quartz overgrowth cementation and micro-fracture. There have been two hydrocarbon filling events happened in this area from the stage of Dongying Formation, leding to a series of diagenetic changes in the organic acid diagenetic environment.

Keywords: Gaoqing area; Shangshihezi Formation; tight quartz sandstone; diagenesis; diagenetic evolution

近十年来,国内外对致密砂岩的研究文献层出不穷^[1-5],但针对致密石英砂岩成岩特征及其演化的文献则并不多见。近年来在中国一些沉积盆地发现了一些能够储集油气的致密石英砂岩^[6-7],其成因逐渐成为人们关注的热点问题之一。许多学者针对致密石英砂岩进行了一定程度的研究,如认为压实和胶结是导致石英砂岩致密化的主要因素^[4-5,8-9];石英多期加大作用会加剧致密化^[10-12];石英溶蚀的成因机制有两种类型^[13-14];氧化铁、方解石、高岭石的胶结会导致石英砂岩孔、渗降低^[2,15-16];岩石组分和沉积环境影响埋藏成岩作用类型和强度^[17];成岩环境为碱性时石英颗粒会发生溶蚀作用而有效地扩大孔隙空间^[17-18]。在这些认识中成岩特征和成岩演化是致密石英砂岩形成的重要影响因素。济阳坳陷东营凹陷高青地区二叠系上石盒子组发育致密石英砂岩,近几年勘探发现了较好的含油气性,说明致密

石英砂岩中仍发育局部高产优质储层。前人对该地区上石盒子组进行了层序地层、沉积相、构造演化、油气成藏等方面的研究^[19-23],但对致密石英砂岩的成岩特征与成岩演化研究甚少。笔者通过多手段岩矿测试分析,并与埋藏史、油气充注史有机结合研究高青地区上石盒子组致密石英砂岩成岩特征和演化规律,为研究区致密石英砂岩中优质储层预测提供科学依据。

1 地质概况

高青地区位于东营凹陷西南部,东临高青大断层,与博兴洼陷相邻^[22](图 1)。钻井揭示,自上而下发育新生界、中生界和古生界,其中中生界与新生界、上古生界与中生界呈区域不整合接触。钻井显示,上古生界发育不全,其中泥盆系全部被剥蚀;上古生界自下而上主要发育石炭系的本溪组、太原组,

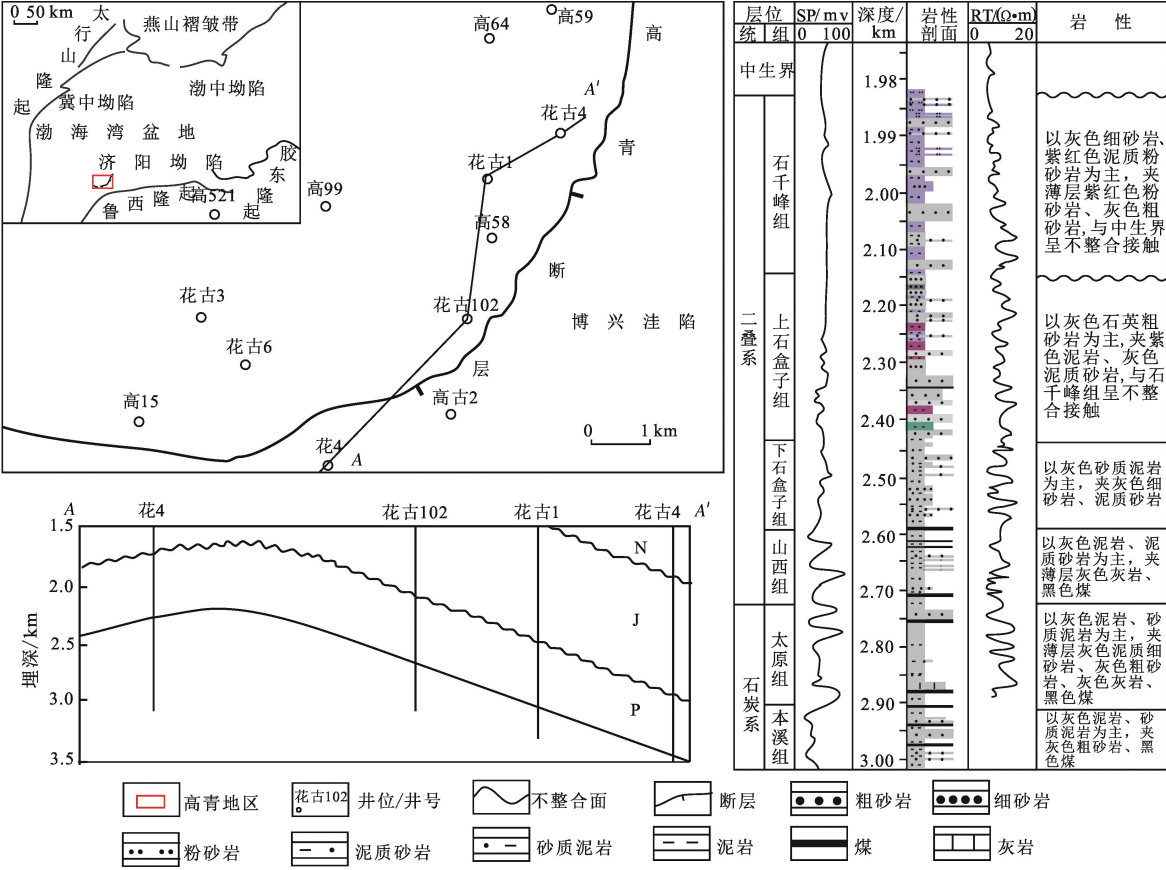


Fig.1 Geological brief map of Gaoqing area

二叠系的山西组、下石盒子组、上石盒子组、石千峰组。其中上石盒子组是研究目的层。高青地区自古生代以来经历了古生代挤压变形、晚三叠纪挤压逆冲、侏罗纪逆冲—拉张过渡、白垩纪初始拉张裂陷和新生代伸展裂陷 5 个构造演化阶段,其中古生界经历印支期挤压隆起作用,燕山期挤压及伸展交替作用,喜马拉雅运动断裂作用,形成 NNE 向走滑控制的潜山带;发育高青大断层,呈现以次级断层为界的南北分区,东西分带特征。此大断层控制了高青地区的地层发育、构造形成、沉积演化、储层改造和油气聚集。高青地区上古生界主要发育河流相沉积,其中二叠系上石盒子组时期,构造稳定,发育曲流河沉积的深灰色石英砂岩、棕红色石英砂岩、灰紫色泥岩、砂质泥岩等岩石类型^[20],石英砂岩是上石盒子组的主要砂体,呈现出致密特征,砂体的孔隙空间以

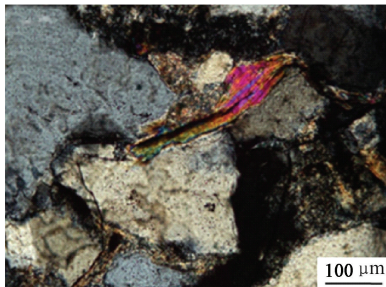
溶蚀孔隙为主,但孔隙度和渗透率均较低。

2 成岩作用类型及特征

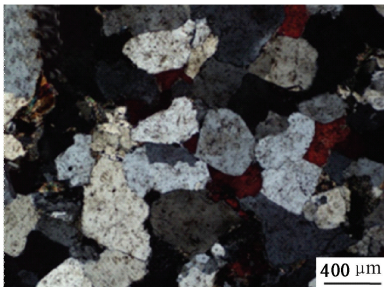
通过花古 102、花古 4 等井上石盒子组共 40 多米岩石取样,50 多张岩石薄片,500 多次显微镜下观察和图像分析及扫描电镜观察、X-衍射分析、阴极发光测试等方法,对成岩作用类型及特征进行研究。

2.1 压实作用

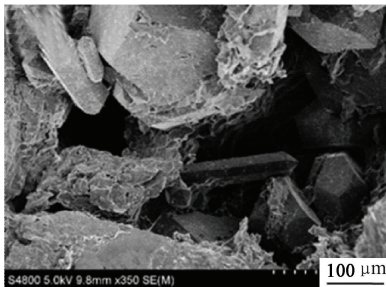
观察岩石薄片发现,上石盒子组石英砂岩中,碎屑颗粒之间相互接触紧密;岩石致密,原生孔隙空间小;云母、泥岩岩屑、片岩岩屑等塑性组分产生拉伸、弯曲和假杂基化(图 2(a));部分石英颗粒可见微裂纹以及粒内轻微位移现象,表现为明显的机械压实作用。此外在石英颗粒间可见到颗粒接触界面呈线接触和凹凸接触(图 2(b)),反映出化学压实作用特征。



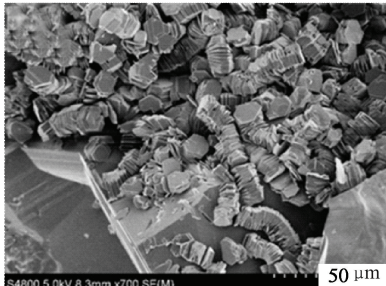
(a) 云母弯曲变形,花古102井,2 385.4 m,正交偏光



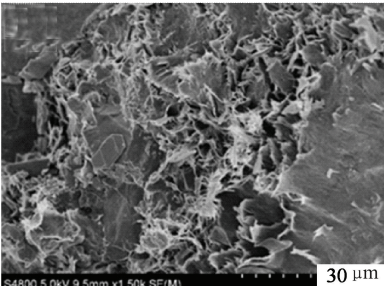
(b) 碎屑颗粒间线接触、凹凸接触,花古102井,2 385.4 m,正交偏光



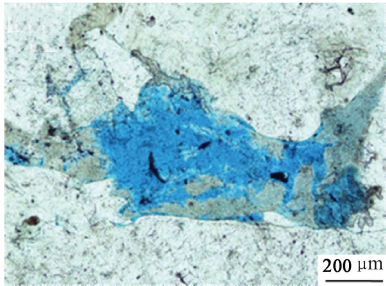
(c) 微晶石英,花古102井,2 371 m,扫描电镜



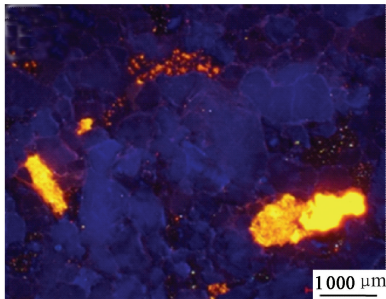
(d) 充填粒间孔隙的蠕虫状高岭石胶结物,花古4井,3 324.5 m,扫描电镜



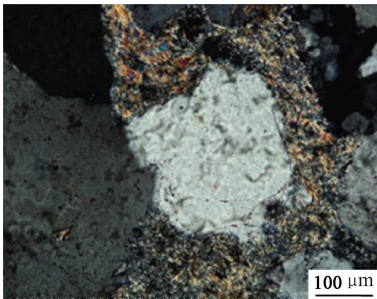
(e) 充填粒间孔隙的丝状、片状伊利石和蒙脱石胶结物,花古102井,2 386.05 m,扫描电镜



(f) 长石溶蚀形成铸模孔,花古4井,3 329.7 m,单偏光



(g) 方解石交代碎屑颗粒后发生溶蚀作用,花古102井,2 374.1 m,阴极发光



(h) 黏土矿物交代石英颗粒和石英加大边,花古102井,2 374.1 m,正交偏光

图 2 高青地区上石盒子组石英砂岩成岩作用特征

Fig. 2 Diagenesis characteristics of Shangshihezi quartz sandstone in Gaoqing area

2.2 胶结作用

显微镜下观察到上石盒子组石英砂岩中存在硅质胶结现象,表现为石英加大边和自生微晶石英(图2(c)),在石英砂岩中普遍出现。普通显微镜下,石英次生加大边生长于粒间孔隙中,尘线不清晰,生长不连续,加大级别多为II级;阴极发光显微镜下石英次生加大呈深棕色或不发光^[24],利用阴极发光显微镜观察到碎屑颗粒间硅质胶结物占据了碎屑颗粒间的部分空间,碎屑颗粒接触界面附近硅质胶结明显。扫描电镜下观察到单个微晶自形石英含量低,垂直于碎屑颗粒边缘向粒间孔隙中生长。

黏土矿物胶结物含量差异较大,分布在4%~10%,其类型主要为伊利石和高岭石。高岭石胶结物主要以书页状或蠕虫状产出于碎屑颗粒之间(图2(d)),呈斑状分布,与碎屑颗粒接触部位附近的部分高岭石发生伊利石化。丝状和搭桥状伊利石充填颗粒间孔隙中,导致粒间孔隙和连通孔隙的喉道发生堵塞。伊蒙混层胶结物呈蜂窝状生长于石英颗粒表面和粒间孔隙中(图2(e)),其中伊利石所占的比例很高。石英砂岩中绿泥石较少,主要呈针状分布于碎屑颗粒表面。

碳酸盐胶结物仅在部分岩石薄片可见,阴极发光下见到方解石胶结物存在不同期次。早期方解石胶结物主要为分散的粒状,阴极发光下为黄色,充填于剩余粒间孔中;个别岩石薄片,方解石连晶状胶结,这种方解石胶结物充填粒间孔隙空间,并交代碎屑颗粒和石英次生加大边,使得碎屑颗粒成漂浮状分布。晚期方解石胶结物主要为含铁方解石,沿碎屑颗粒与方解石胶结物接触界面附近生长,阴极发光下为橙黄色。铁白云石的胶结在上盒子组发育较少,主要成粒状分布于粒间孔隙内。

由上述分析可见,上石盒子组石英砂岩中发育多种、多期不同的胶结现象,形成的主要胶结物为伊利石、高岭石、伊蒙混层等黏土矿物。此外还观察到硅质胶结物和方解石(含铁方解石)等碳酸盐胶结物,是上石盒子组石英砂岩中重要的胶结物类型。

2.3 溶蚀作用

在酸性成岩环境中,长石、岩屑和方解石胶结物发生溶蚀作用^[25];在碱性成岩环境中,石英颗粒、硅质胶结物边缘发生溶蚀^[13,18]。观察岩石薄片发现,长石和岩屑组分几乎完全溶蚀,仅留少量残骸(图2(f));方解石胶结、交代碎屑颗粒后,发生溶蚀形成粒间溶蚀孔隙(图2(g));石英颗粒边缘呈港湾状或不规则状(图2(h)),石英加大边也因部分或完

全溶蚀而看不出原来的形状;高岭石也被丝状伊利石交代溶蚀。说明上石盒子组石英砂岩的溶蚀作用表现形式多样,不同岩矿组分呈现出不同的溶蚀特征,反映出石英砂岩成岩环境的酸碱交替变化。

3 成岩环境与成岩序列

通过上述分析可以看出,高青地区上石盒子组石英砂岩碎屑颗粒压实作用强烈,颗粒紧密排列,且很多颗粒间只充填硅质胶结物,形成镶嵌状结构,说明早期主要发生压实作用。石英颗粒间压溶作用发生界面附近石英加大明显,推测压溶作用可能为石英加大边提供硅质的来源之一,随着压实作用的增强,硅质胶结物持续沉淀。

利用高青地区花古102、花古4等井上石盒子组的岩石样品进行了20多块包裹体薄片测试分析。观察发现,石英次生加大边、石英颗粒粒内微缝和石英颗粒粒内见到大量椭圆形的无色透明状盐水包裹体(图3、表1)。统计测试表明,石英次生加大边中盐水包裹体均一温度为50~128℃(图4),主要分布在60~72℃和118~126℃,代表石英加大边形成时上石盒子组所处理藏环境的两个阶段温度。显微镜下可见长石溶蚀形成的孔隙多被高岭石和硅质胶结物充填,此时适宜有机酸保存的温度范围为80~120℃,而石英加大边中盐水包裹体的均一温度(118~126℃)正处于该温度范围,说明部分石英加大边和高岭石胶结物在早期酸性溶蚀作用之后形成。此阶段可视作长石溶蚀,石英次生加大、高岭石胶结等作用阶段,也即酸性成岩环境阶段。

一般认为,高岭石主要来自于埋藏环境下孔隙溶液中的沉淀,以及酸性水条件下不稳定碎屑颗粒的溶蚀^[26-27];碱性环境中,高岭石向伊利石转化,蒙脱石向伊利石转化^[28]。上述分析表明,上石盒子组石英砂岩中高岭石主要产出于石英加大边形成后的剩余粒间孔隙中,部分被伊利石交代,说明其形成早于伊利石胶结物。高岭石与伊利石之间的矿物转化说明成岩环境由早期的酸性条件向碱性条件变化。碱性环境中,由于石英溶蚀作用及交代作用,大部分石英加大边生长不连续,这类硅质胶结物充填原生孔隙空间,或被方解石包围,或被伊利石交代。产出于粒间孔或溶蚀孔内的单个微晶自形石英,晶粒较细,多由伊蒙混层薄膜或丝状伊利石处垂直于碎屑颗粒边缘向粒间孔隙中生长,说明这种微晶石英晶体的形成晚于伊蒙混层和伊利石胶结物胶结作用。此阶段可视作方解

石胶结、石英溶蚀、伊蒙混层胶结等作用阶段,也即碱性成岩环境阶段。

早期方解石胶结物大量充填粒间溶蚀孔隙和剩余粒间孔,并交代边缘不规则的石英颗粒和粒间硅质胶结物,说明方解石胶结物形成时期晚于主要的硅质胶结形成时期和石英溶蚀时期。方解石发育部位,部分粒间溶蚀孔隙为方解石胶结物溶蚀形成,推测方解石溶蚀作用发生较晚,说明成岩环境又由碱性条件转化为酸性条件。此阶段可视为碳酸盐(方解石)溶蚀,石英加大,微裂缝等作用阶段,也即酸性成岩环境阶段。

综上所述,高青地区二叠系上石盒子组石英砂岩在漫长的成岩过程中,最初发生的是压实作用,形成塑性颗粒堵塞而破坏原生孔隙,此时处于弱酸性成岩环境,发生了长石等酸性不稳定矿物的溶蚀、早

期硅质胶结、自生高岭石形成等成岩事件。此后成岩环境由酸性向碱性转化,在弱碱性环境下发生了石英等碱性不稳定矿物的溶蚀,形成了自生伊利石和伊蒙混层矿物的沉淀,从而阻塞喉道或填充原生孔隙。中生代末期到东营组末期,高青地区所在的青城凸起持续抬升,地表大气淡水顺着不整合面或断层的渗入^[22,28],使储层的成岩环境呈现酸性,再次发生硅质胶结和碳酸盐胶结物的溶蚀。由此推测上石盒子组石英砂岩主要经历了酸性—碱性—酸性的成岩环境,主要的成岩序列为早期压实作用→长石溶蚀作用,石英次生加大、高岭石等胶结作用→方解石胶结作用,石英溶蚀作用,伊蒙混层胶结作用→碳酸盐溶蚀作用,石英加大作用,微裂缝作用。依据碎屑岩成岩阶段划分标准(SY/T 5477-2003),推测现今处于中成岩 B 期。

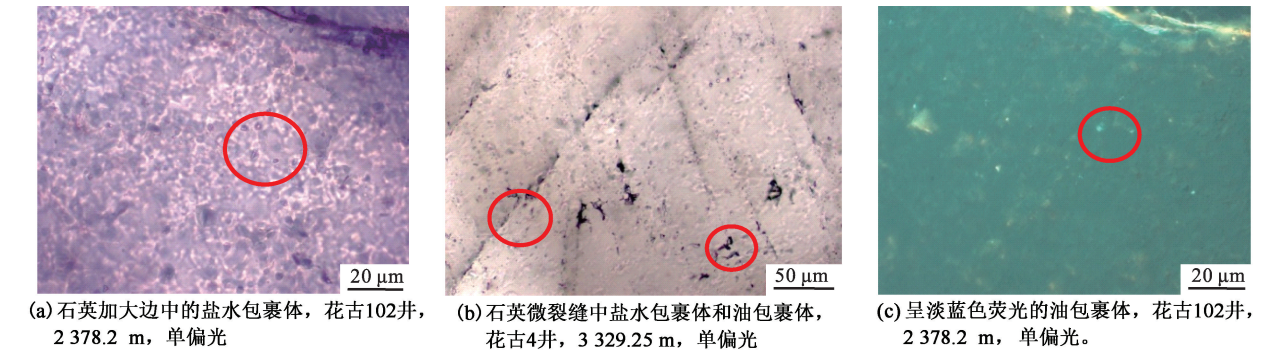


图 3 高青地区上石盒子组流体包裹体特征

Fig. 3 Characteristics of fluid inclusions of Shangshihezi reservoir in Gaoqing area

表 1 高青地区上石盒子组自生矿物包裹体特征

Table 1 Characteristics of authigenic mineral inclusions of Shangshihezi reservoir in Gaoqing area

包裹体类型	成岩次生矿物	包裹体特征	成岩阶段
盐水包裹体	陆源石英碎屑颗粒	椭圆形,1~3 μm,无色透明,气液比 5%~12%	成岩期前
	石英次生加大边	椭圆形,1~3 μm,无色透明,气液比 5%~15%	成岩期
	石英颗粒微裂缝	椭圆形,1~3 μm,无色透明,气液比 5%~15%	成岩期后
油包裹体	石英颗粒微裂缝	椭圆形、滴状、不规则状,1~3 μm,黑色,荧光下发黄色和蓝色光,气液比 5%~40%	油气充注时期

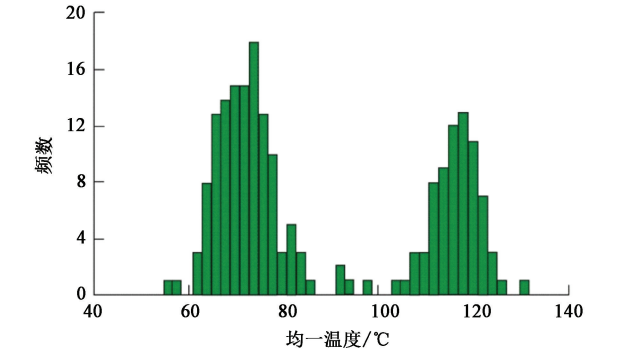


图 4 高青地区上石盒子组盐水包裹体均一温度分布

Fig. 4 Uniform temperature distribution of brine inclusions of Shangshihezi reservoir in Gaoqing area

4 成岩演化

为了分析上石盒子组石英砂岩成岩演化,参考文献[29],结合本研究工作,制作了高青地区花古 102 井上石盒子组埋藏史,综合花古 102 井岩心录井、测井数据对上石盒子组及其上覆各地层层段进行分层,并统计各层段的埋深、厚度数据;对于存在抬升剥蚀的中生界三叠系、白垩系和新生界古近系、新近系,利用测井声波时差法计算剥蚀厚度,同时也结合前人对于高青地区剥蚀厚度恢复的研究成果及认识^[30];参考文献[22],确定花古 102 井上石盒子组及上覆各层段的起始沉积时间、剥蚀时间,并根

据研究区中生代构造演化史对埋藏过程进行调整,并加入流体包裹体测试数据(图 5)。

综合以上分析可以看出,高青地区上石盒子组石英砂岩的成岩作用发生了多期演化过程,砂体所

处的埋藏成岩流体环境也经历了多期变化,其成岩环境的演化表现出酸性—碱性—酸性的过程(图 5)。结合上述成岩序列和埋藏史、油气充注史分析可形成 3 个主要时期的成岩演化认识。

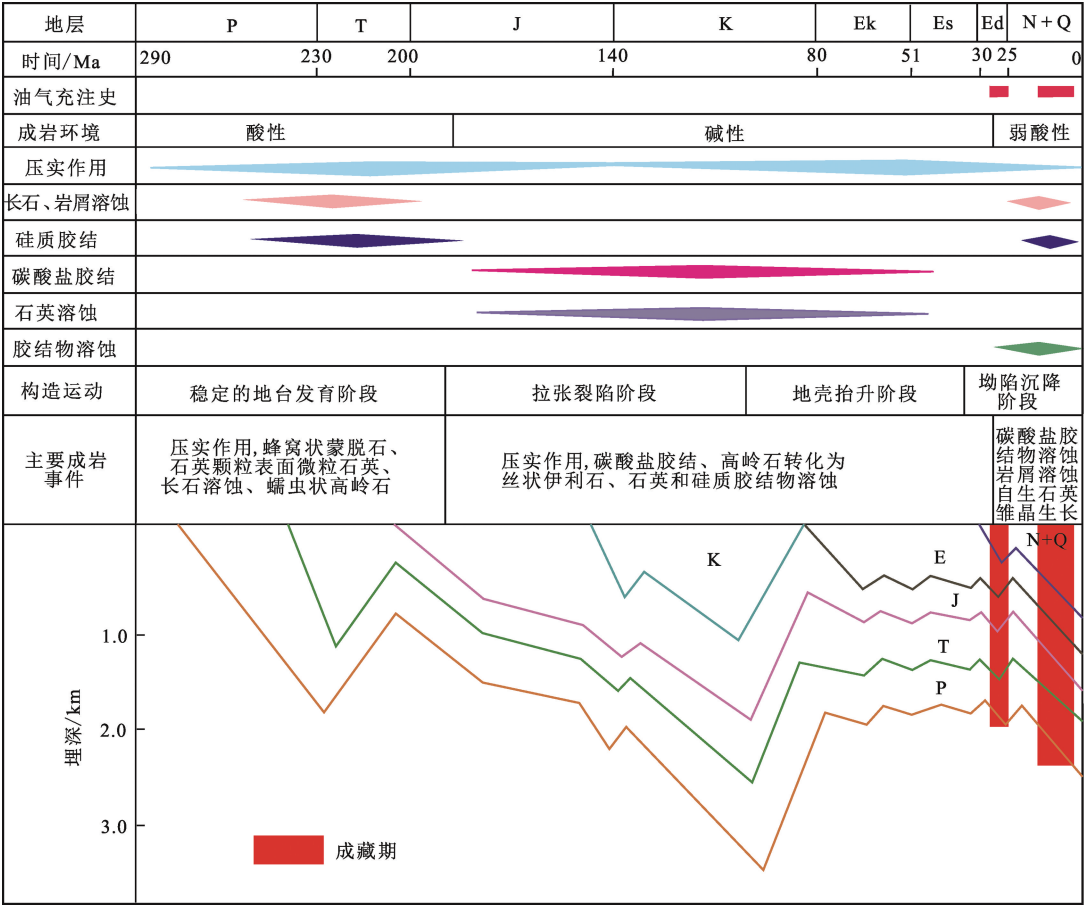


图 5 高青地区花古 102 井上石盒子组埋藏史、油气充注史与成岩演化

Fig. 5 Burial history, hydrocarbon accumulation history and diagenetic evolution of Shangshihezi formation of well Hg102 in Gaoqing area

(1)第一个时期(距今 265 ~ 230 Ma)。二叠系(P)沉积时期,华北板块以升降运动为主;晚三叠纪的印支运动期间,高青地区上古生界小幅度抬升,整体上仍处于早期埋藏阶段,石英砂岩最大埋深小于 2 000 m^[22],受控于煤系地层,这个时期成岩环境总体为酸性环境,主导的成岩作用,早期为压实作用,胶结作用较弱,石英次生边和高岭石开始形成于原始孔隙中。晚期富钙的环境中,蒙脱石开始形成,呈蜂窝状薄膜覆盖于石英颗粒表面,占据粒间孔隙空间。此阶段并无油气充注发生。距今 230 ~ 200 Ma,由于印支期的构造抬升,高青地区缺失三叠系(T)。

(2)第二个时期(距今 200 ~ 96 Ma),中生代侏罗纪(J)到白垩纪(K)是燕山活动时期^[22],处于快速埋藏强机械压实阶段,强烈的压实使原生孔隙空

间大幅缩小。地层水向碱性转变,该期持续时间较长。部分石英颗粒、硅质胶结物和早期形成的高岭石胶结物在碱性环境中被伊利石胶结物交代溶蚀,已形成的蜂窝状蒙脱石向丝状伊利石转化。部分深度段方解石连晶胶结,充填原有的孔隙并交代碎屑颗粒。在白垩纪之后,上石盒子组最大埋深超过 3 000 m,压实作用达到最大程度,在压溶作用下少量自生石英沉淀。岩屑颗粒挤压变形,占据大片临近孔隙空间,导致物性进一步变差。此阶段也无油气充注发生。推测成岩阶段为早成岩 B 期到中成岩 A 期。

(3)第三个时期(距今 96 Ma ~ 现今),中生代末期(白垩纪晚期)到新生代早期,燕山运动造成高青地区所在的青城凸起持续抬升,此时上石盒子组埋深最浅处小于 1 000 m^[22]。东营组(Ed)沉积晚期

至今,上古生界储层处于再次埋藏压实阶段。高青大断层从中生代末期即燕山运动晚期开始活动,断裂带内形成大量微裂缝,一方面一定程度上增强流体渗流能力,改善砂体物性;另一方面断层断裂深度大,大气淡水 and 烃类气体沿断层进入二叠系上石盒子组,生成大量有机酸,并放出二氧化碳等组分。根据包裹体岩相学观察和显微测温结果分析,认为高青地区上石盒子组主要存在两期油气充注事件,分别位于东营组沉积末期以及明化镇组沉积晚期,其中以明化镇组沉积晚期的油气充注规模最大。油气充注所携带的有机酸会导致上石盒子组石英砂岩中孔隙流体由弱碱性向酸性转变。油气充注所主导的有机酸成岩环境中会发生一系列的成岩事件:首先酸性环境中会发生酸性不稳定矿物(长石、碳酸盐胶结物)的溶蚀,形成有机酸溶蚀次生孔隙,改善砂岩物性,同时溶蚀产物形成自生的石英锥晶,并充填在孔隙中;之后随着有机酸逐渐被消耗,溶蚀的产物会与早期碳酸盐以及黏土矿物转化过程中产生且被有机酸氧化后的二价铁离子结合,形成含铁碳酸盐胶结物,并常常呈交代早期碳酸盐胶结物产出。此阶段既有油气充注现象,又有成岩环境再次向酸性转变,形成新的成岩特征。推测成岩阶段达到中成岩B期。

5 结 论

(1)高青地区上石盒子组石英砂岩以粗砂岩和中砂岩为主,岩石致密;压实、胶结、溶蚀是主要的成岩作用类型;强烈的压实作用,多期的石英次生加大胶结作用和多种多期高岭石、伊利石、方解石等其他不同类型胶结作用是导致石英砂岩致密化的主要因素。方解石胶结物和石英颗粒的溶蚀作用使砂体物性得到一定程度的改善。

(2)上石盒子组石英砂岩的成岩演化序列为早期压实作用→长石溶蚀作用,石英加大、高岭石等胶结作用→方解石胶结作用,石英溶蚀作用,伊蒙混层胶结作用→碳酸盐(方解石)溶蚀作用,石英加大作用,微裂缝作用。

(3)上石盒子组石英砂岩的成岩作用发生了多期演化过程,砂体所处的埋藏成岩流体环境也经历了多期变化,其成岩环境的演化表现出酸性—碱性—酸性的过程,呈现出3个主要时期的成岩演化特征;其中研究区东营组沉积晚期以来发生了两期油气充注事件,导致有机酸成岩环境发生了一系列的成岩变化。

参考文献:

- [1] 蔡来星,卢双舫,张训华,等. 松南中央坳陷泉四段上生下储式致密砂岩油藏主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,40(6):9-21.
CAI Laixing, LU Shuangfang, ZHANG Xunhua, et al. Main controlling factors of above-generation and below-storage tight sandstone oil reservoirs at Quantou 4 Formation of central depression in southern Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,40(6):9-21.
- [2] 杨田,操应长,王艳忠,等. 东营凹陷沙三中亚段浊积岩低渗透储层有效性评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(4):1-11.
YANG Tian, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Effectiveness evaluation of low permeability turbidite reservoirs in the middle of the third member of Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(4):1-11.
- [3] OMER B M, HARRIS N B, AHMED H, et al. Controls on reservoir diagenesis in the Lower Goru sandstone formation, Lower Indus Basin, Pakistan [J]. Journal of Petroleum Geology, 2016,39(1):29-48.
- [4] SCHRANK A B S, DE ROS L F. Diagenetic processes in cretaceous sandstones from occidental Brazilian Equatorial Margin [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2015,63:1-19.
- [5] DILLINGGER A, RICARD L P, HUDDLESTONE-HOLMES C, et al. Impact of diagenesis on reservoir quality in a sedimentary geothermalplay: a case study in the Cooper Basin, South Australia [J]. Basin Research, 2016,28:252-272.
- [6] 席胜利,李文厚,魏新善,等. 鄂尔多斯盆地上古生界两大气田不同石英砂岩储层特征对比研究[J]. 沉积学报,2009,27(2):221-229.
XI Shengli, LI Wenhui, WEI Xinshan, et al. Study on the characteristics of quartz sandstone reservoir of the Neopaleozoic of two gas fields in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentary Sinica,2009,27(2):221-229.
- [7] 付金华,王怀厂,魏新善,等. 榆林大型气田石英砂岩储集层特征及成因[J]. 石油勘探与开发,2005,32(1):30-32.
FU Jinhua, WANG Huaichang, WEI Xinshan, et al. Origin and characteristics of quartz-sandstone reservoir of the Yulin gas field, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(1):30-32.
- [8] LAI J, WANG G W, CAI C, et al. Diagenesis and reservoir quality in tight gas sandstones: the fourth member of

- the Upper Triassic Xujiahe Formation, Central Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Geological Journal*, 2017, 00:1-18.
- [9] 赵宏波. 鄂尔多斯盆地榆林地区煤系地层山2段致密石英砂岩储集层特征及形成机理[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(4): 57-63.
- ZHAO Hongbo. Forming mechanism and reservoir characteristics of tight quartz sandstone of coal-bearing strata of the second member of Shanxi Formation in Yulin area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(4): 57-63.
- [10] MOHAMED R S, MOHAMED H H, WAN H A, et al. Diagenesis in the Middle Jurassic Khatatba Formation sandstones in the Shoushan Basin, northern Western Desert, Egypt [J]. *Geological Journal*, 2014, 49(3): 239-255.
- [11] 朱如凯, 邹才能, 张甯, 等. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理: 以四川盆地上三叠统须家河组为例 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2009, 39(3): 327-339.
- ZHU Rukai, ZOU Caineng, ZHANG Nai, et al. Diagenetic fluids evolution and genetic mechanism of tight sandstone gas reservoirs in Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2009, 39(3): 327-339.
- [12] 郑浚茂, 庞明. 石英砂岩的硅质胶结作用及其对储集性的影响 [J]. *沉积学报*, 1988, 6(1): 29-39.
- ZHENG Junmao, PANG Ming. Quartz of cementation in quartz sandstone and its influence on stone porosity [J]. *Acta Sedimentary Sinica*, 1988, 6(1): 29-39.
- [13] 刘金库, 彭军, 石岩, 等. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响: 以川中-川南过渡带须家河组为例 [J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1090-1097.
- LIU Jinku, PENG Jun, SHI Yan, et al. The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: a case study of Xujiahe Formation in the transitional zone of Central-Southern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1090-1097.
- [14] 万友利, 丁晓琪, 白晓亮, 等. 塔中地区志留系海相碎屑岩储层石英溶蚀成因及影响因素分析 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 138-147.
- WAN Youli, DING Xiaoqi, BAI Xiaoliang, et al. Quartz dissolution causes and influencing factors in the Silurian marine clastic reservoir rocks in Central Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 138-147.
- [15] MOHAMED A K, IBRAHIM M H, ALAA M S. Petrography, diagenesis and reservoir characteristics of the Pre-Cenomanian sandstone, Sheikh Attia area, East Central Sinai, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 96: 122-138.
- [16] STROKER T M, HARRIS N B, ELLIOTT W C, et al. Diagenesis of a tight gas sand reservoir: Upper Cretaceous Mesaverde Group Piceance Basin, Colorado [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 40: 48-68.
- [17] 张胜斌, 王琪, 李小燕, 等. 川中南河包场须家河组砂岩沉积-成岩作用 [J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 225-231.
- ZHANG Shengbin, WANG Qi, LI Xiaoyan, et al. Depositional-diagenetic coupling complex of Xujiahe sandstone in Hebaoshan Block in the south part of the Central Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 225-231.
- [18] 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2001, 31(9): 752-759.
- QIU Longwei, JIANG Zaixing, CAO Yingchang, et al. Alkali diagenesis and its reservoir effects in biyang Depression [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2001, 31(9): 752-759.
- [19] 李明娟, 张洪年, 胡全宗. 济阳坳陷上古生界层序划分与等时格架建立 [J]. *石油物探*, 2006, 45(1): 83-87.
- LI Mingjuan, ZHANG Hongnian, HU Zongquan, et al. Division of upper Paleozoic stratigraphic sequence and establishment of isochronal stratigraphic frame in Jiyang Depression [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(1): 83-87.
- [20] 张关龙, 陈世悦, 王海方, 等. 济阳坳陷石炭-二叠系沉积特征及岩相古地理演化 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(3): 11-17.
- ZHANG Guanlong, CHEN Shiyue, WANG Haifang, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies paleogeography evolution of perocarboniferous system in Jiyang Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(3): 11-17.
- [21] 王颖. 济阳坳陷古生界潜山的形成过程及与油气成藏的关系 [D]. 成都: 成都理工大学, 2002.
- WANG Ying. The relationship of forming process and oil & gas concentration of Paleozoic buried hill in Jiyang Depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2002.
- [22] 张森. 高青-平方王潜山带构造特征与演化 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- ZHANG Miao. Structural characteristics and evolution of

- Gaoqing-Pingfangwang buried hill belt [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [23] 王志杰. 高青-平方王潜山带原油地化特征及油源分析[J]. 断块油气田, 2012, 19(3): 289-293.
- WANG Zhijie. Geochemical characteristics of crude oil and oil source analysis of Gaoqing-Pingfangwang buried hill belt [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2012, 19(3): 289-293.
- [24] 李汉瑜. 关于石英的阴极发光特征及其在砂岩研究中的应用[J]. 沉积学报, 1983, 1(2): 166-171.
- LI Hanyu. On the characteristics of cathodoluminescence of quartz and its application to sandstone petrology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1983, 1(2): 166-171.
- [25] 谢继容, 孔金祥. 砂岩次生孔隙形成机制[J]. 天然气勘探与开发, 2000, 23(1): 52-55.
- XIE Jirong, KONG Jinxiang. The formation mechanism of secondary porosity in sandstone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 23(1): 52-55.
- [26] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506.
- HUANG Sijing, HUANG Keke, FENG Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: a case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiache Formation, western Sichuan Depression [J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498-506.
- [27] OSBORNE M, HASZELDINE R S, FALICK A E. Variation in kaolinite morphology with growth temperature in isotopically mixed pore-fluids, Brent Group, UK North Sea [J]. Clay Minerals, 1994, 29: 591-608.
- [28] 张永旺, 曾溅辉, 曲正阳, 等. 东营凹陷砂岩储层自生高岭石发育特征与成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 73-79.
- ZHANG Yongwang, ZENG Jianhui, QU Zhengyang, et al. Development characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite sandstone reservoirs of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 73-79.
- [29] 李蕙生, 陈红汉. 精细埋藏史分析在砂岩成岩-孔隙演化模式研究中的重要性[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 78.
- LI Huisheng, CHEN Honghan. The importance of analysis of burial history on the research of diagenesis and porosity development of sandstones [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 78.
- [30] 张帅. 高青油田成藏规律综合研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- ZHANG Shuai. Comprehensive research on the rule of formation in Gaoqing Oilfield [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.

(编辑 徐会永)