

大牛地气田上古生界储层埋藏—成岩演化过程

徐宁宁¹ 邱隆伟¹ 高青松² 宋 璠¹ 刘绪钢² 张向津³ 姜 维⁴

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266580;2.中国石化华北油田分公司勘探开发研究院 郑州 450006;
3.天津方联科技发展有限公司 天津 300280;4.中石化华北油田分公司第一采气厂 郑州 450000)

摘 要 综合运用铸体薄片、扫描电镜、包裹体测温 and 拉曼分析等资料和方法,从地层埋藏历史、地温、压力、储层成岩特征、储层流体差异和物性演化等方面对大牛地气田上古生界致密砂岩储层成岩—成藏过程进行细致解剖。研究表明:大牛地气田上古生界储层埋藏成岩过程可划分为强机械压实阶段、复杂成岩演化阶段、储层定型阶段和抬升—弱改造阶段。四者对应的典型特征分别为储层强烈减孔(压实率约22.2%~97.5%);发生两期油气充注(距今约200 Ma和180 Ma),同时成岩演化类型多样,深刻影响储层物性;发生第三期油气充注(距今约150 Ma),并且多数储层达到致密化程度(孔隙度小于10%);构造大幅度抬升,张裂缝弱发育。油气充注早于储层致密化,微裂缝的发育可能为储层渗透率提升的关键。

关键词 鄂尔多斯盆地 大牛地气田 致密砂岩 成岩演化 流体充注

第一作者简介 徐宁宁 男 1988年出生 博士研究生 油气储层地质学 E-mail:december_13000@126.com

通讯作者 邱隆伟 男 教授 E-mail:qiulw@163.com

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

致密砂岩储层因其巨大的油气储量成为非常规能源中的主力部分,对其研究也日趋成熟。但由于其特殊的地质条件对诸如油气充注机制、油气运移模式和储层物性下限等一些问题,常规储层研究方法的运用效果并不显著。典型致密砂岩如鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层、四川盆地上三叠统储层因其在生储盖等方面的相似性同时被赋予“大气区”或“大气田”的概念^[1-2]。此概念的提出便于针对致密砂岩这一特殊地质概念给予充分的解释空间和特定处理方式,也是针对一些悬而未决之问题的更合理解释。尽管如此,致密储层埋藏成岩过程依旧是诸多问题研究的前提和基础。因其对储层物性演化的影响、对成岩—成藏耦合关系的判定有重要意义,细致解剖和精确解释尤其是对典型致密砂岩而言显得更加重要。

近几年对致密储层埋藏成岩过程研究成果较多^[3-4],主要集中于对成岩阶段划分^[5-7]和成岩环境的演化^[8-10]的总体把握。但对于是否可将埋藏成岩过程进行阶段性划分,以及相对应的阶段性划分方法及划分依据和地质条件还没有较为确切的结论和系统详细的阐述。本文主要以鄂尔多斯盆地北部大牛

地气田上古生界致密砂岩储层为例,立足于地层埋藏过程中的各种先决地质条件如温度、压力、流体等的变化,从成岩演化、流体充注及储层孔隙度演化等角度对致密砂岩的埋藏成岩过程进行详细解剖,力图恢复鄂尔多斯盆地致密储层的形成过程。

1 地质背景

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地北部伊陕斜坡东段(图1),为一平缓的西倾单斜构造。其气源岩主要为石炭系和二叠系厚层泥岩及煤层,储集层段主要为石炭系太原组和二叠系山西组、下石盒子组,盖层主要为区域性分布的石炭系和二叠系泥岩,垂向上构成自生自储型及近源型天然气藏^[11]。沉积环境为海相、海陆过渡相到陆相沉积;储层岩石类型总体表现为低长石含量、高石英含量以及高成分成熟度,其中太原组岩石类型主要为石英砂岩和岩屑石英砂岩,山西组和下石盒子组则以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主;孔隙类型以次生溶蚀孔隙为主^[12]。

2 地层埋藏史及温压场演化

前人对鄂尔多斯盆地地层埋藏过程及热演化史研究成果较多^[4,14-17]。自中生代以来的构造演化大

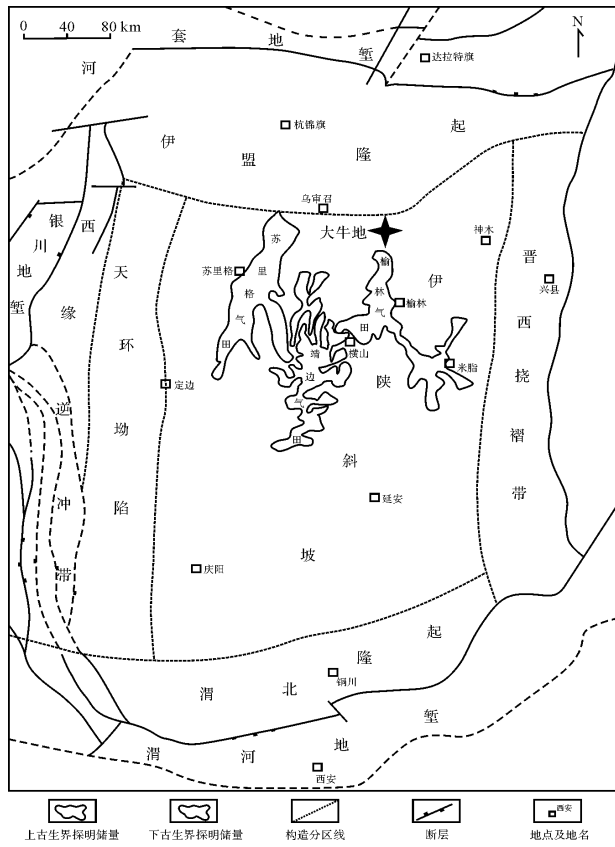


图1 大牛地气田构造地理位置(据文献[13],有修改)

Fig.1 Tectonic setting of Daniudi gas field

体经历了中三叠世平缓构造发育(印支运动期)、晚三叠世—早白垩世古隆起发育(燕山运动期)和现今斜坡形成(喜山运动期)3个阶段^[13, 18]。其中快速沉降阶段发生在中—晚三叠世,在早白垩世晚期地层达到最大埋深之后,又经历了抬升过程^[19]。

从图2中可以看出上古生界地层沉积后,大致经历了快速埋藏(距今300~210 Ma,列为I阶段)和多次小幅短期抬升—再沉降(距今210~140 Ma,列为II阶段)、二次快速沉降(距今140~95 Ma,列为III阶段)和后期大幅抬升(距今95 Ma~现今,列为IV阶段)。伴随着地层的沉降变化,地温梯度整体有先升后降的趋势。其中晚古生代至中生代早期(I阶段)为2.2~2.4℃/100m,中生代晚期地温梯度3.4~4.5℃/100m(II和III阶段),新生代以来降至2.2~3.2℃/100m(IV阶段)^[14]。

石炭—二叠系烃源岩内自晚三叠世初开始出现超压,距今205 Ma(中三叠世末—晚三叠世早期)出现较为明显异常高压。晚三叠世末过剩压力出现5~10 Ma的第一个高峰,之后至晚侏罗世逐渐降低。从早白垩世开始,过剩压力复增加,至早白垩世末(距今110 Ma)形成10~20 Ma的第二个高峰。在晚白垩世末降为常压,并一直保持至今^[20]。由此,整个压力

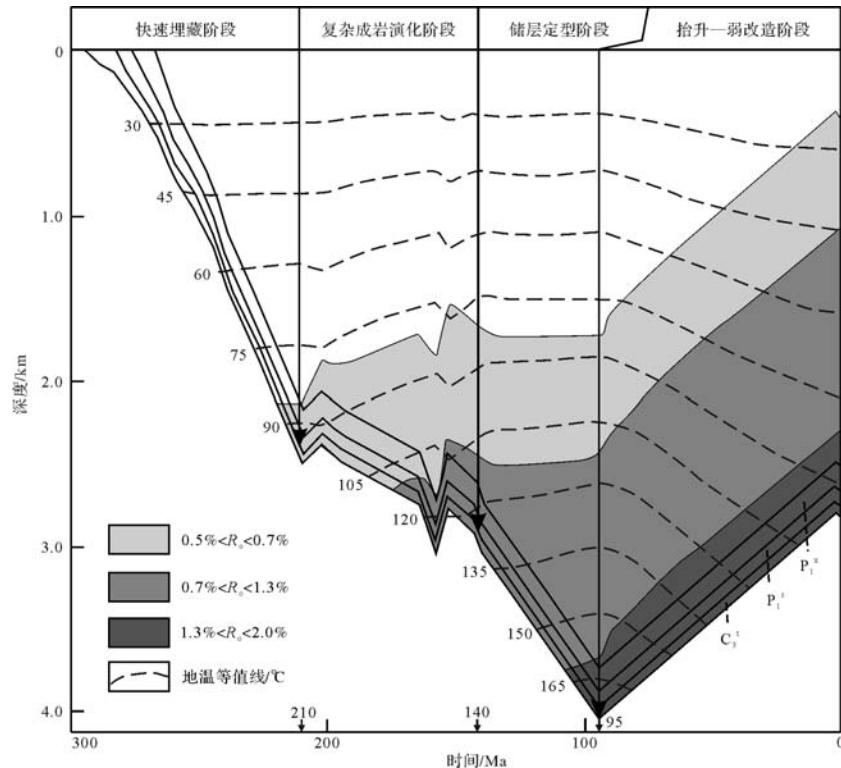


图2 大牛地气田埋藏史图(据文献[11],有修改)

Fig.2 Burial history and division of burial diagenesis of Daniudi gas field

演化可分为超压出现阶段(距今 300~210 Ma)、超压高峰一期(距今 210~140 Ma)、超压高峰二期(距今 140~95 Ma)和常压保持阶段(距今 95 Ma~现今)。

3 储层成岩演化及流体环境

大牛地气田上古生界致密砂岩储层属煤系地层,埋藏深度大约在 2 357~2 920 m。其所处的伊陕斜坡地层镜质体反射率 R_o 值集中于 0.5%~2.0%^[14]。按照碎屑岩成岩阶段划分标准(SY/T 5477—2003),其现今成岩阶段主要处于中成岩 B 期。由图 2 中热演化史(地温等值线)和有机质成熟史(R_o 等值线)可以看出,上古生界地层自沉积以来先后经历早成岩阶段($R_o < 0.5%$, 0℃~85℃, 距今 300~220 Ma)、中成岩 A₁ 阶段(0.5% $<R_o < 0.7%$, 85℃~110℃, 距今 220~160 Ma)、中成岩 A₂ 阶段(0.7% $<R_o < 1.3%$, 110℃~160℃, 距今 160~110 Ma)和中成岩 B 阶段(1.3% $<R_o < 2.0%$, 大于 160℃, 距今 110 Ma~现今)。

3.1 成岩作用类型

压实作用 工区储层历史最大埋深曾达 4 000 m,经历过长期强烈的压实作用。宏观特征表现为钻井岩芯致密普遍物性较低,微观特征上则表现更为明显。云母、泥岩及片岩、糜棱岩等浅变质岩屑颗粒可产生拉伸、弯曲、被刚性颗粒嵌入等效果;碎屑颗粒分布呈压实定向排列;颗粒间呈线接触或凹凸接触(图 3a);部分刚性颗粒表面可见压裂纹。对储层压实作用进行量化计算,压实率约在 22.2%~97.5%之间。储层因压实作用而损失的孔隙在 7.56%~33.15%之间,平均为 25.3%。

胶结作用 发育于成岩作用的各个阶段,且类型多样。其常见类型主要有碳酸盐矿物、硅质胶结物、自生黏土矿物和黄铁矿等。交代作用主要有石英和碳酸盐矿物及黏土矿物之间的相互交代,如石英交代黏土矿物、碳酸盐矿物交代石英及碳酸盐矿物之间的相互交代作用等。

碳酸盐胶结交代作用 大牛地储集层碳酸盐矿物的胶结交代作用发育。早期碳酸盐胶结物以方解石为主,多以填充粒间孔隙的形式产出,有的呈连生式胶结,碎屑颗粒呈漂浮状分布(图 3b);局部地区发育菱铁矿,但含量较少。晚期碳酸盐胶结物有铁方解石、白云石和铁白云石等,晶粒较大,常以交代碎屑颗粒或者自生黏土矿物、充填粒间孔隙的形式产出。

硅质胶结作用 不稳定的铝硅酸盐矿物的溶蚀作用及黏土矿物间的转化会生成大量的 SiO₂。这些

含 SiO₂ 的流体进入储层并达到过饱和时易在孔隙中沉淀下来,形成硅质胶结物。硅质胶结在研究区普遍发育,含量在 0~15%之间,主要有石英次生加大边和自生石英晶体两种产出形式,其常与高岭石胶结相邻发育。显微镜下可见明显的多期次石英次生加大边,其常呈等厚环边状半包裹或包裹碎屑石英颗粒,与原生石英颗粒之间可看到黏土或杂质成分的尘线。研究区可石英发育三期次生加大(图 3c),其中大部分石英次生加大边为 II—III 级。自生石英晶体主要发育于粒间孔或溶蚀孔内,呈零星状分布,单体呈柱状,晶粒粗细均有,最大粒径可达 70 μm,其在太原组纯石英砂岩中比较发育(图 3d)。其形成时间最晚,经包裹体分析其均一温度可达 160℃^[21]。

黏土矿物胶结作用 黏土矿物胶结物主要有高岭石、伊利石、绿泥石及伊/蒙混层,主要生长于孔隙中或绕于颗粒边缘呈环边,其晶体形态以及赋存状态各不相同。

高岭石 根据颗粒形态、结晶程度等可分两类,蚀变高岭石和自生高岭石。蚀变高岭石一般由长石蚀变而来,呈片状或蠕虫状分布在颗粒表面,晶形较差,重结晶后堆积紧密,晶间孔不发育,形成时间比较早;自生高岭石呈典型的书页状充填粒间孔隙,晶形较好,堆积松散,保留有良好的晶间孔(图 3i、图 4c),是重要的储集空间类型。高岭石是在酸性地层水条件下形成的,与长石、岩屑等酸性不稳定矿物的溶解作用有关。

伊利石 分布广泛,常以鳞片状、发丝状分布在粒间孔隙或者以颗粒包膜分布于颗粒边缘(图 3e)。在扫描电镜下常见到丝缕状的伊利石形成搭桥堵塞喉道。绿泥石形成时间较早,呈环边包裹颗粒(图 3f、i),扫描电镜下呈玫瑰花状或绒球状,可一定程度上抑制石英次生加大的发生,同时具有一定的抗压实性。

溶蚀作用 工区储层发生多期不同程度的溶蚀作用,所形成的次生孔隙对改善储集层物性有积极作用。薄片观察和激光拉曼光谱分析发现,研究区经历了酸碱交替的成岩环境。不仅有长石、岩屑等酸性不稳定矿物的溶蚀(图 3h),也有石英溶蚀为代表的碱性溶蚀现象,此种现象在前人的研究中也得到了印证^[22-24]。大牛地气田储层中碱性溶蚀程度相对较高,标志主要有石英颗粒边缘的不规则或港湾状溶蚀、石英次生加大边的溶蚀和石英质岩屑被溶蚀成蜂窝状孔隙(图 3g)。而且石英颗粒发生溶蚀的部位碳

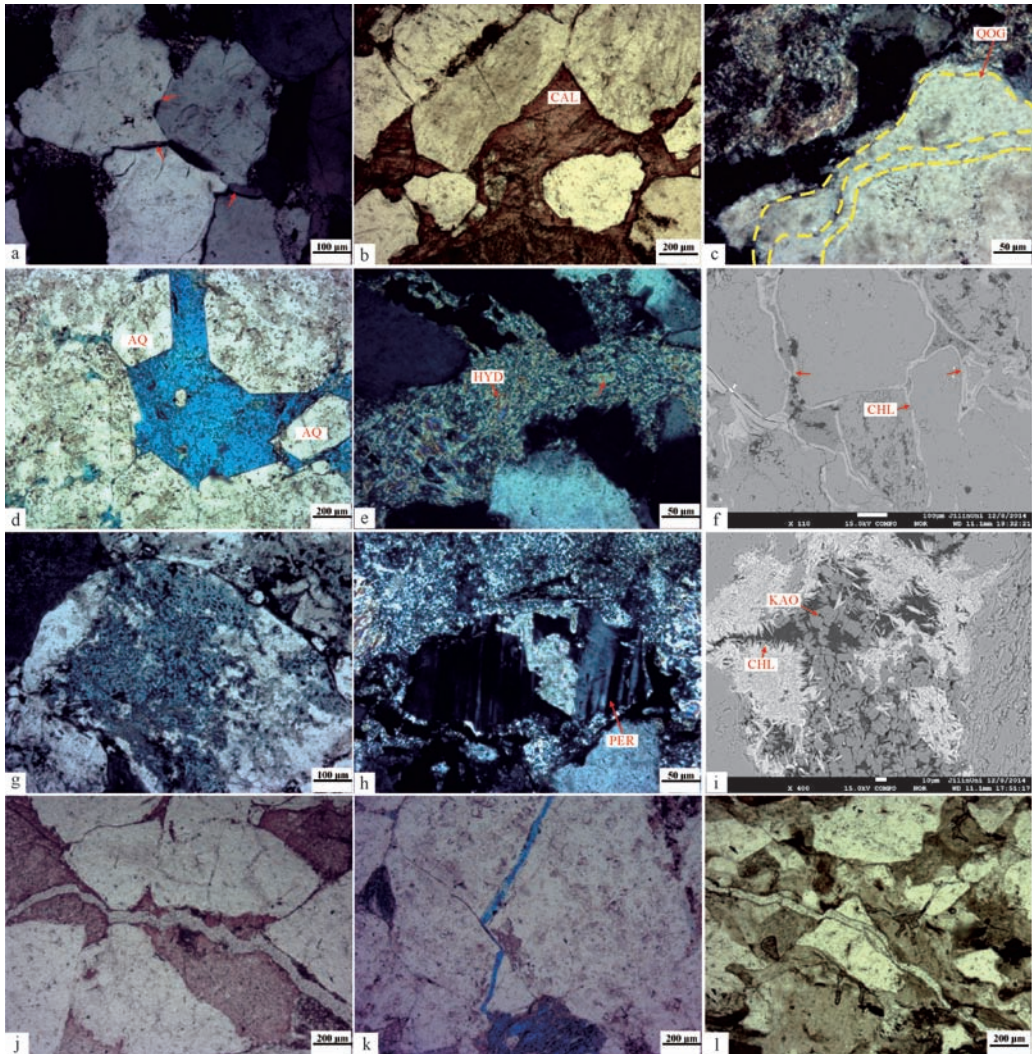


图3 大牛地气田上古生界储层成岩作用特征

CAL.方解石;QOG.石英次生加大边;AQ.自形石英晶体;HYD.水云母;CHL.绿泥石;PER.条纹长石;KAO.高岭石

a.颗粒间紧密接触,大18井,2 771.20 m, C_3t , $\times 100(+)$; b.方解石胶结充填粒间,大49井,2 662.59 m, P_1x , $\times 50(-)$; c.石英三期次生加大边,大28井,2 535.85 m, P_1x , $\times 200(+)$; d.自形石英晶体,大47井,2 438.15 m, C_3t , $\times 50(-)$; e.粒间水云母分布,大28井,2 554.26 m, P_1x , $\times 200(+)$; f.绿泥石包膜,大26井,2 404.90 m, P_1x , $\times 110$; g.石英颗粒发育溶蚀,大61井,2 652.60 m, P_1x , $\times 100(-)$; h.条纹长石被交代钙质,大47井,2 420.50 m, C_3t , $\times 200(+)$; i.绿泥石包膜及高岭石胶结,DK13井,2 663.72 m, P_1x , $\times 400$; j.大49井,2 662.59 m, 裂缝切穿粒间方解石胶结物,无充填物,开度约 $35 \mu\text{m}$, P_1x , $\times 50(-)$; k.大23井,2 657.90 m, 裂缝切穿石英颗粒,无充填物,开度约 $15 \mu\text{m}$, P_1s , $\times 50(-)$; l.大24井,2 667.65 m, 裂缝切穿粒石英颗粒及塑形岩屑颗粒,无充填物,开度约 $15 \mu\text{m}$, P_1x , $\times 50(-)$ 。其中f和i为背散射照片,j和l为普通偏光薄片照片,其余为铸体薄片照片。

Fig.3 Characteristic of diagenesis on Upper Paleozoic reservoir in Daniudi gas field

位碳酸盐胶结物并不发生溶蚀,这同时可作为酸碱环境判别的证据^[25]。

裂缝发育 大牛地上古生界地层在早白垩世经历最大埋深之后发生大幅度的构造抬升作用,抬升距离约为1 000 m。储层在抬升过程中因压力部分释放而产生张裂缝,在微观特征上有明显体现(图3j, k, l)。但裂缝的产状有较大差异,普遍表现为刚性颗粒

如石英、变质岩岩屑的开度较小的粒内裂纹。而对储层物性特征有明显改善的开度较大、延伸距离较长的裂缝则发育相对较少。

3.2 成岩序列与成岩演化

通过观察储层中不同自生矿物的相互接触关系及共生组合关系,以及溶蚀充填特征来判定成岩序列是被普遍采用的简单易行方法^[25-26]。鄂尔多斯盆地

上古生界系煤系地层,可参考石油天然气行业标准碎屑岩成岩阶段划分(SY/T 5477—2003)中对于酸性水介质(含煤地层)碎屑岩各成岩阶段所发育的现象。

现今的高成分成熟度的储层岩石特征是成岩期长石大量溶解殆尽的结果^[27-28]。部分粗碎屑以及绝大部分细粒高杂基含量碎屑岩中仍可观察到残余长石的形态。如图4a中长石颗粒发生溶蚀形成次生孔隙,以及图4b呈短柱状形态的长石发生整体溶蚀而形成的似铸模孔,孔内所分布的高岭石胶结有可能即为长石溶蚀的产物。同时流体可在粒间形成晶间孔式高岭石胶结(图4c)。方解石的主要成因为长石类矿物的酸性溶蚀^[27-29]。早期方解石胶结外围分布有晶间孔式高岭石胶结(图4d),石英次生加大边外缘分布有方解石胶结,同时方解石内部整体呈原始颗粒状的晶间孔式高岭石胶结群体分布(图4e),通过这些现象可判定其成岩作用先后顺序为早期方解石胶

结—早期高岭石胶结—石英次生加大—方解石胶结—晚期高岭石胶结。图4f中石英次生加大边最先发育,其次方解石胶结包裹的石英颗粒发生部分溶解,这说明成岩作用的先后顺序为石英次生加大/长石溶解—方解石胶结—石英溶解。图4g中整体晶间孔式高岭石胶结包围方解石胶结和自生石英晶体,同时方解石有溶蚀现象,则成岩作用顺序为自生石英晶体—方解石胶结—高岭石胶结。图4h中方解石胶结外缘为铁白云石,然后是黄铁矿胶结。成岩作用先后为方解石胶结—铁白云石胶结—黄铁矿胶结。图4i中绿泥石薄膜的外围分布有呈书页状形态的自生高岭石矿物。成岩作用先后为绿泥石薄膜—高岭石。因此,通过上述的判定储层成岩综合序列应为绿泥石薄膜/菱铁矿胶结—早期石英加大/自生高岭石—早期方解石胶结—长石溶解—石英次生加大/高岭石胶结—方解石胶结—硅质部分溶蚀—白云石/铁白云石胶结—自生石英晶体—黄铁矿胶结。

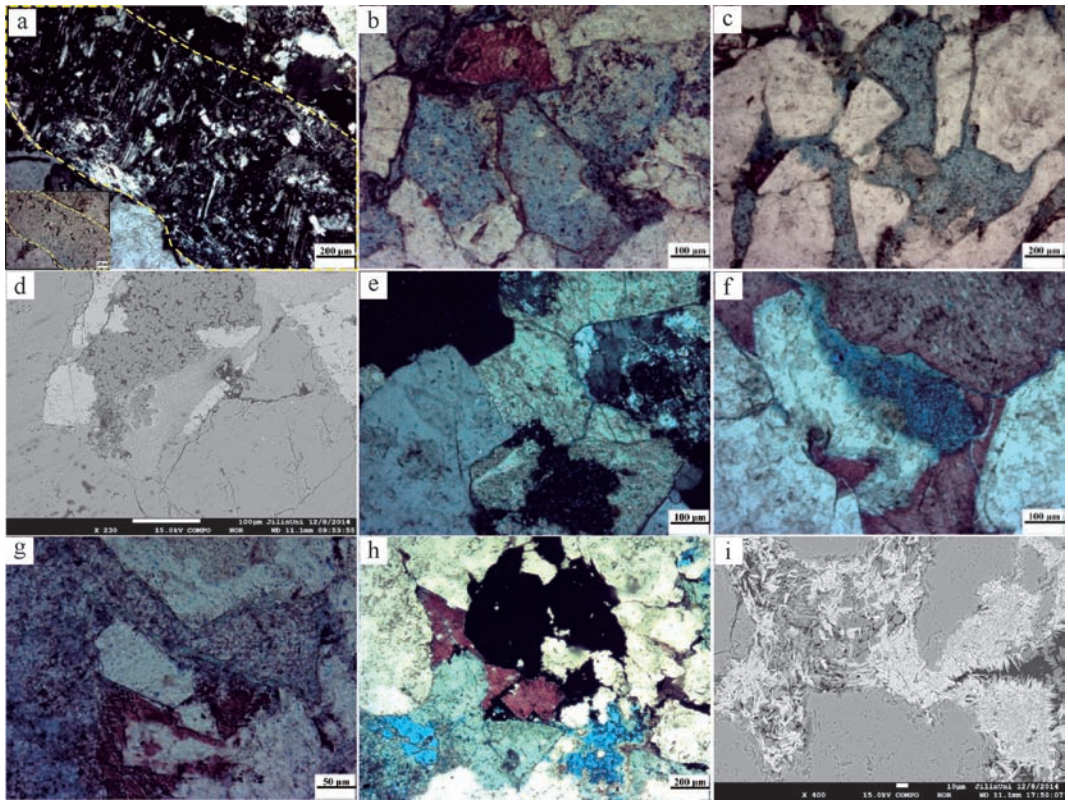


图4 大牛地气田上古生界储层不同自生矿物间接触关系

a.溶蚀残余的斜长石颗粒,大69井,2 559.48 m, P_{1x}, ×50(+); b.绿泥石包膜及分布其间的镶嵌接触式高岭石胶结, DK13井, 2 678.24 m, P_{1x}, ×100(-); c.粒间晶间孔式高岭石胶结, DK18井, 2 689.10 m, P_{1x}, ×50(-); d.方解石胶结及高岭石胶结, 大4井, 2 745.75 m, P_{1x}, ×230; e.石英次生加大边及方解石胶结, 且后者被溶蚀之部位分布有晶间孔式高岭石, 大50井, 2 662.60 m, P_{1x}, ×100(+); f.石英颗粒的溶蚀与粒间大面积方解石胶结, 大50井, 2 662.60 m, P_{1x}, ×100(-); g.高岭石、自形石英及方解石胶结, 大36井, 2 473.11 m, P_{1x}, ×200(-); h.方解石、铁白云石及黄铁矿胶结, 大23井, 2 772.30 m, C_{3t}, ×50(-); i.绿泥石及高岭石胶结, DK13井, 2 663.72 m, P_{1x}, ×400。其中d和i为背散射照片,其余均为普通铸体薄片所摄制照片。

Fig.4 Contacting relationship between different authigenic minerals in Daniudi gas field

成岩阶段	成岩期	早成岩期	中成岩A ₁ 期	中成岩A ₂ 期	中成岩B期	
	地质年代/Ma	294	220	175	108	0
	地温/℃	0	85	110	160	
	R _v /%	0	0.5	0.7	1.3	2.0
成岩作用	压实作用	—————				
	早期菱铁矿胶结	—————				
	绿泥石薄膜	—————				
	早期方解石	—————				
	早期石英加大	—————				
	早期高岭石胶结	—————				
	长石及岩屑溶蚀		—————			
	晚期高岭石胶结		—————			
	晚期石英加大		—————			
	晚期方解石胶结			—————		
	石英及岩屑溶蚀			—————		
	高岭石伊利石化			—————		
	方解石部分溶蚀			—————		
	石英自形晶体				—————	
白云石胶结				—————		
铁白云石胶结				—————		
黄铁矿胶结				—————		
流体环境	酸性—碱性—酸性		酸性	碱性—酸性	酸性—碱性	

图5 大牛地气田上古生界成岩共生序列图

Fig.5 Diagenesis sequence of Upper Paleozoic reservoir in Daniudi gas field

按照成岩演化的顺序,不同自生矿物组合和表现特征具有阶段性特征(图5)。其中早成岩B期早期的煤系地层导致弱酸性—酸性的成岩环境,基性斜长石发生早期溶解,随后由于长期而缓慢的成岩消耗,酸性减弱而碱性增强。成岩序列为绿泥石薄膜/菱铁矿胶结—早期石英加大/自生高岭石—早期方解石胶结,此一阶段对应于强机械压实期;而至中成岩A₁期则成岩表现较为复杂。成岩序列表现为长石溶解—石英次生加大/高岭石胶结—方解石胶结—硅质部分溶蚀,多期胶结和溶蚀作用对储层改造作用明显,此一阶段为复杂成岩演化阶段;至中成岩A₂期,长时间成岩消耗导致流体逐渐呈现弱碱性—碱性。成岩序列以白云石/铁白云石胶结—自生石英晶体—黄铁矿胶结,此一阶段为储层定型阶段,多数储层地质特征已趋于稳定;至中成岩B期,成岩特征已无明显改变,因抬升而形成的微裂缝较为显著,此为抬升—弱构造阶段。

3.3 成岩流体与成岩环境

包裹体测温和激光拉曼光谱测定成为研究储层

成岩作用和成岩流体的有效方法。通过透射光和荧光显微镜对发育于石英次生加大边和石英微裂隙中的包裹体进行岩相观察并测定其均一温度。包裹体均一过程采用英国 Linkam 公司 TS2600 冷热台,可测温度范围为-196℃~600℃。经标准样品校正,100℃以下误差为0.1℃,以上误差为0.5℃。

镜下所观察到的包裹体主要赋存于石英微裂隙和石英加大边中,尤以前者居多。其种类以盐水包裹体、气态烃包裹体、液态烃包裹体和CO₂包裹体为主。其中盐水包裹体,个体较小,呈串珠状分布于石英颗粒裂隙中。直径约3~13 μm,透射光下无色,形态以圆形或不规则形状为主(图6a,b);液态烃包裹体透射光下多呈现褐色,主要分布于石英加大边中,直径范围5~12 μm,荧光下呈蓝白光(图6c,d);气态烃包裹体透射光下多呈现褐色,主要有沿石英颗粒裂隙分布和分布于石英加大边中的包裹体群,粒径范围3~10 μm,有荧光显示但强度较弱(图6e)。CO₂包裹体由气态CO₂、液态CO₂和盐水溶液组成,主要分布于石英次生加大边中,常呈现灰黑色,半透明—不透明

(图 6f)。

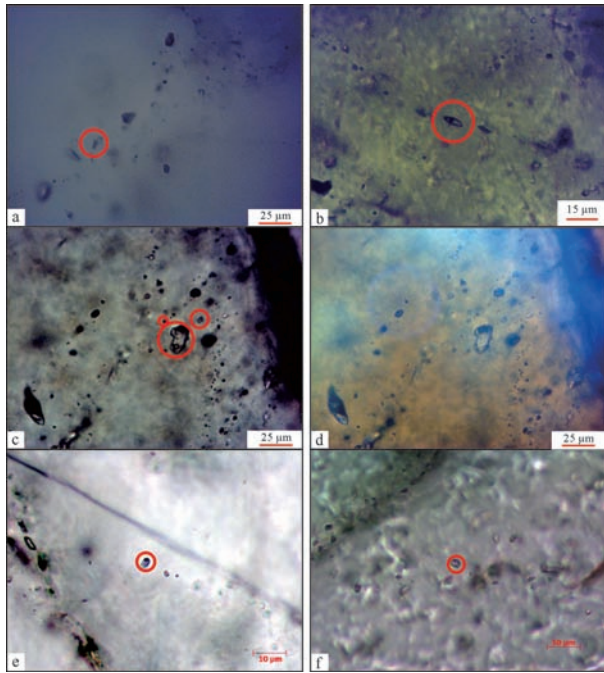


图 6 大牛地气田上古生界储层包裹体显微照片
 a.大 8 井,2 749.95 m,微裂缝内盐水包裹体,荧光下无反应;
 b.大 15 井,2 767.0 m,盐水包裹体;c.大 50 井,2 638.80 m,含液
 态烃包裹体;d.大 15 井,2 767.2 m,含液态烃包裹体;e.大 28 井,
 2 539.85 m,微裂缝内气态烃包裹体;f.大 15 井,2 695.90 m,石
 英加大边中 CO₂三相包裹体。

Fig.6 Micrograph of fluid inclusion of Upper Paleozoic
 reservoir in Daniudi gas field

对 146 个包裹体进行其均一温度的测定并统计其数据分布,发现大致存在 88℃ ~ 96℃、100℃ ~ 108℃ 和 112℃ ~ 120℃ 三个温度区间(图 7)。结合地层埋藏史及热史曲线,可推测所对应的地质时间分别为距今约 200 Ma、180 Ma 和 150 Ma。由此可见,储层埋藏过程中大致存在三期显著的流体充注事件,前两期集中于复杂成岩演化阶段而第三期集中于储层定型阶段。

对储层成岩环境的判定一方面可通过总结反映其变化的一系列成岩矿物的形成与消亡现象;另一方面可通过激光拉曼光谱的方法直接测定流体包裹体中的流体成分。实验所采用法国 J.Y.公司 LabRam—010 激光拉曼光谱仪,该仪器采用显微共焦系统和 CC 信号检测系统,其光学分辨率约 1.5 cm⁻¹。实验所用激光光源波长为 514.5 nm,共焦孔为 1 000 μm,狭缝 400 μm,积分时间为 50 s,积分次数为 5 次,实验环境温度为 19℃。

按照前述埋藏—成岩阶段划分结果,发现不同阶段具不同的流体充注特征。随演化程度增加,煤成熟过程中依次产生 CO₂、C₂⁺烃类和甲烷^[10]。整体具早期 CO₂充注(强机械压实阶段),中期高碳饱和烃充注(复杂成岩演化阶段)和晚期甲烷气体充注(储层定型阶段)的特征,与前人研究成果相一致^[9-10],充注时间集中于早三叠世、侏罗世和早白垩世。如图 8 所示,其中 a 为早期石英加大边内包裹体的拉曼光谱

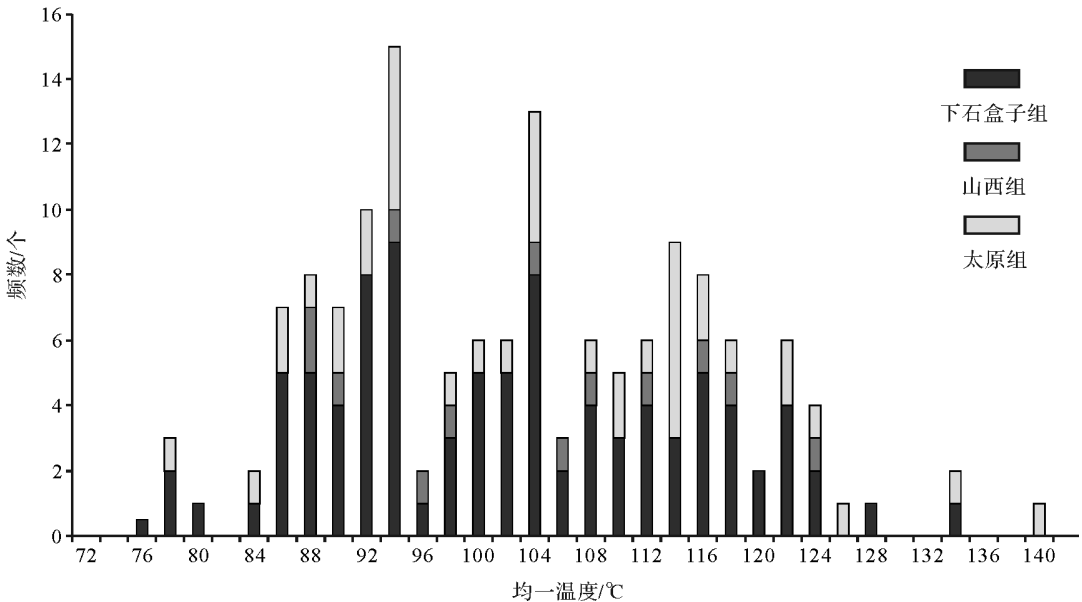


图 7 大牛地气田上古生界储层包裹体均一温度分布直方图

Fig.7 Distribution of homogenization temperature of Upper Paleozoic reservoir in Daniudi gas field

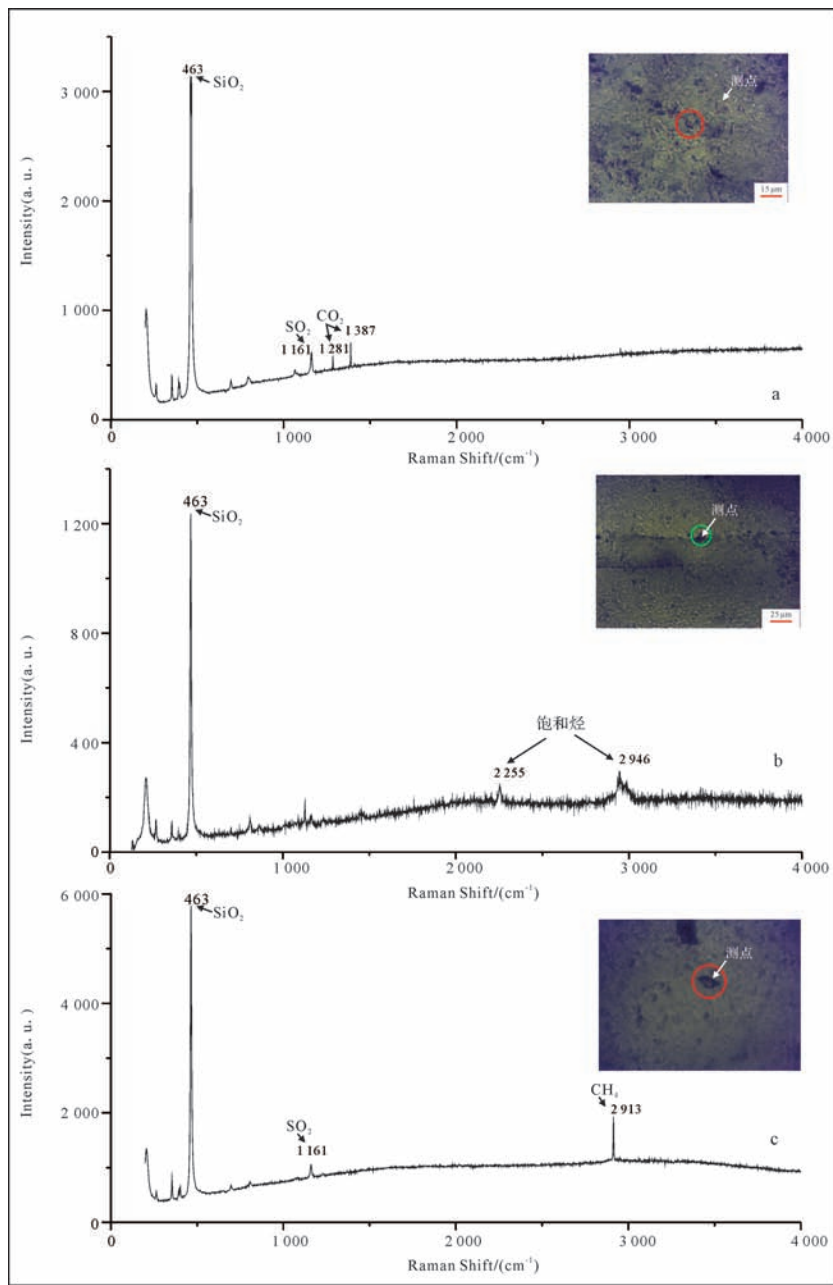


图8 大牛地气田上古生界储层激光拉曼分析谱图

a: DK18井, 2 694.30 m, 液态含 CO_2 包裹体, P_1x ; b: DK22井, 2 734.64 m, 液态烃类包裹体, C_3t ; c: 大8井, 2 749.95 m, 气态烃类包裹体, C_3t 。

Fig.8 Laser Raman resonant measurements on Upper Paleozoic reservoir in Daniudi gas field

图,其均一温度约为 83.2°C ,显示主要充注成分为 CO_2 ; b 为石英微裂隙中包裹体拉曼图谱,其均一温度为 95.92°C ,有机组分以高碳饱和烃为主; c 为石英微裂隙中包裹体拉曼图谱,其均一温度为 113.1°C ,充注成分主要为 CH_4 。

4 储层致密化

不同成岩相类型的储层其后期埋藏过程中孔

隙一成岩演化有别,杂基含量、分选、粒度及原始组分等对其影响较大,前人针对鄂尔多斯上古生界致密砂岩提出过中粗粒岩屑砂岩之强机械压实、中粗粒岩屑石英砂岩之强硅质胶结较强机械压实以及细粒(长石)岩屑砂岩之强压实较强硅质胶结的致密化模式^[30]。本文以强机械压实强硅质胶结的细粒砂岩为例,对其孔隙一成岩演化过程进行说明(图9)。

大牛地气田致密砂岩储层从沉积埋藏开始到三

叠纪中期,处于快速埋藏强机械压实阶段,随埋藏深度增加,储层所经受的压实程度不断增强,原生孔隙迅速大量减少,物性明显降低;同时该阶段处于早成岩B期,早期胶结作用较弱,主要是碳酸盐及黏土包壳胶结,使原生孔隙体积进一步减小。根据 Beard 和 Weyl 对不同分选的储集砂岩的初始孔隙度计算关系式 $\phi_{原} = 20.91 + 22.90/S_0^{[31]}$ 计算得原始孔隙度在 35.22%左右,早期快速压实使原始孔隙度下降了 22%以上。

从三叠纪晚期开始,储层进入中成岩A期,即复杂成岩演化阶段。有机质演化至低熟—成熟阶段,热脱羧作用产生的有机酸进入地层。成岩环境由此呈现酸性,长石、岩屑、早期碳酸盐胶结物等不稳定矿物发生溶蚀,孔隙度大幅度增加。后期碱性溶蚀加强,产生一定量的次生孔隙。溶蚀作用使孔隙度增加约 5%,储层物性得到有效改善。储层定型阶段以晚期胶结作用为主导导致了储层物性持续降低。至最后抬升—弱改造阶段,储层局部发育裂缝,一定程度上改

善储层物性。

5 结论

根据前述对储层埋藏过程、储层成岩演化、储层物性的研究,认为大牛地气田上古生界致密砂岩储层成岩—成藏过程可划分为四个阶段。分别为强机械压实阶段、复杂成岩演化阶段、储层定型阶段和抬升—弱改造阶段。判定的依据主要有埋藏过程及温压场、储层成岩特征和成岩流体和孔隙度等。各节点的选取主要依据埋藏史曲线斜率、有机质演化程度、温压场和成岩—孔隙过程的变化。

(1) 强机械压实阶段 经历中三叠世印支运动,属快速埋藏过程;时间跨度为距今 300~210 Ma,地温梯度 2.2~2.4 °C/100m,地温范围 0°C~85°C,同时超压呈酝酿与蓄势状态;处早成岩期,有机质处未成熟—低熟阶段($R_0 < 0.5\%$);成岩序列以强压实和早期弱硅质胶结为主,储层孔隙度发生大幅度减少,压实率约在 22.2%~97.5%之间。

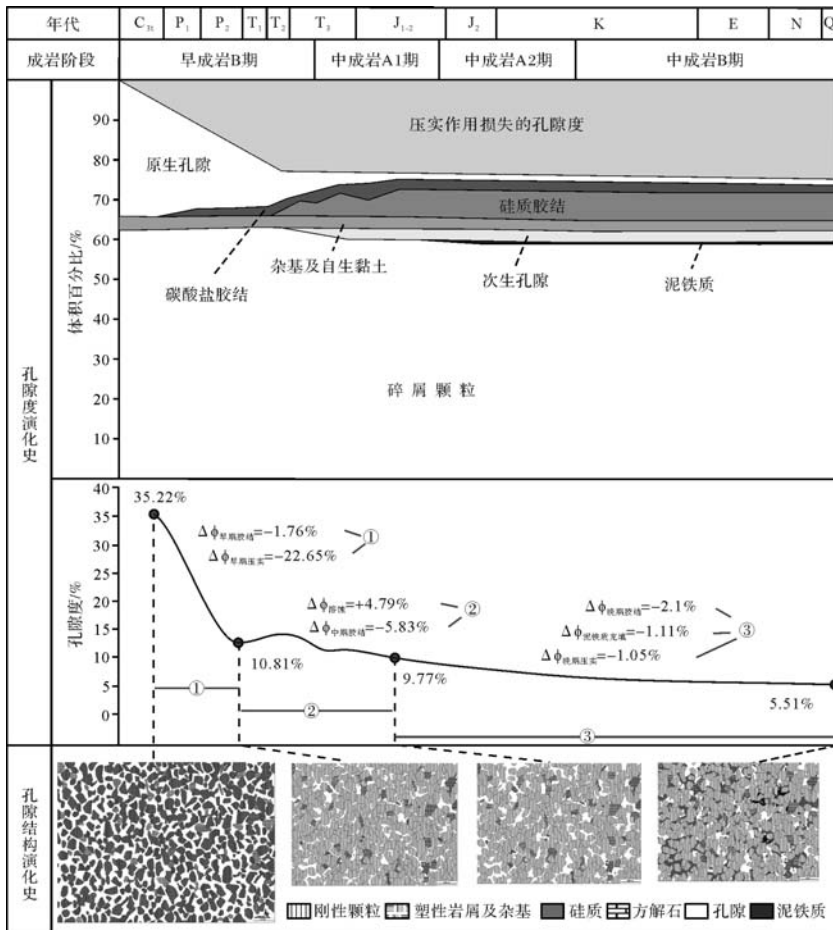


图9 大牛地气田致密砂岩储层成岩—孔隙演化史图

Fig.9 Evolution of tight sandstone porosity in Daniudi gas field

(2) 复杂成岩演化阶段 经历晚三叠世—晚侏罗世早中期燕山运动,地层多次小幅抬升并再沉降;时间跨度为距今 210~140 Ma,地温梯度 3.4~4.5 °C/100m,地温范围 85°C~110°C,出现第一次超压高峰;主要处于中成岩 A₁期,经历多期油气充注和复杂的成岩演化过程,酸碱成岩环境交替出现,储层孔隙度继续减少但幅度变小。

(3) 储层定型阶段 经历早白垩世中晚期燕山运动,地层出现二次稳定沉降;时间跨度为距今 140~95 Ma,地温梯度 3.4~4.5 °C/100m,地温范围 110°C~160°C,出现第二次超压高峰;主要处于中成岩 A₂早中期,晚期碳酸盐胶结发育,成岩环境转为弱碱性,储层孔隙度逐渐达至致密化(小于 10%)。

(4) 抬升—弱改造阶段 经历晚白垩世以来喜山运动,地层大幅度抬升;时间跨度为 95 Ma~现今,地温梯度 2.2~3.2 °C/100m,地温大于 160°C,属常压保持阶段;主要处于中成岩 A₂晚期和中成岩 B 期,储层孔隙度没有发生显著变化。致密储层整体格局形成,地层抬升过程中形成的微裂缝有可能成为储层渗透率显著提升的关键。

大牛地上古生界致密储层先后经历强机械压实阶段、复杂成岩演化阶段、储层定型阶段和抬升—弱改造阶段。每个阶段地层埋藏过程、温压场特征、成岩表现特征、成岩流体与成岩环境以及储层物性有显著性差异。尤其在复杂成岩演化阶段,多数储层经历多期流体充注同时逐渐致密化。对于深刻认识致密储层形成过程中的多种地质属性及特征的演化过程有重要意义。

参考文献(References)

- 1 邹才能,陶士振,张响响,等. 中国低孔渗大气区地质特征、控制因素和成藏机制[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2009,39(11):1607-1624. [Zou Caineng, Tao Shizheng, Zhang Xiangxiang, et al. Geologic characteristics, controlling factors and hydrocarbon accumulation mechanisms of China's Large Gas Provinces of low porosity and permeability[J]. Science China(Seri. D): Earth Sciences, 2009, 39(11): 1607-1624.]
- 2 戴金星,于聪,黄土鹏,等. 中国大气田的地质和地球化学若干特征[J]. 石油勘探与开发,2014,41(1):1-13. [Dai Jinxing, Yu Cong, Huang Shipeng, et al. Geological and geochemical characteristics of large gas fields in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(1): 1-13.]
- 3 李嵘,张娣,朱丽霞. 四川盆地川西坳陷须家河组砂岩致密化研究[J]. 石油实验地质,2011,33(3):274-281. [Li Rong, Zhang Di, Zhu Lixia. Densification of Upper Triassic Xujiahe tight sandstones,

- western Sichuan, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 274-281.]
- 4 陈瑞银,罗晓容,陈占坤,等. 鄂尔多斯盆地埋藏演化史恢复[J]. 石油学报,2006,27(2):43-47. [Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, et al. Restoration of burial history of four periods in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 43-47.]
- 5 林春明,张霞,周健,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组储层成岩作用特征[J]. 地球科学进展,2011,26(2):212-223. [Lin Chunming, Zhang Xia, Zhou Jian, et al. Diagenesis characteristics of the reservoir sandstones in Lower Shihezi Formation from Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 212-223.]
- 6 王京,赵彦超,刘琨,等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层“酸性+碱性”叠加溶蚀作用与储层质量主控因素[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2006,31(2):221-228. [Wang Jing, Zhao Yanchao, Liu Kun, et al. Superimposing controls of acidic and alkaline dissolutions on sandstone reservoir quality of the Paleozoic Xiashihezi and Shanxi Formations in Tabamiao area, Ordos Basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(2): 221-228.]
- 7 杨小萍,张惠燕. 鄂尔多斯盆地乌兰格隆起南坡石盒子组储层成岩孔隙演化史[J]. 西北地质,1998,19(2):28-34. [Yang Xiaoping, Zhang Huiyan. The study on sandstone diagenesis and pore evolution of Shihezi Formation in southern Wulangeer Uplift, Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 1998, 19(2): 28-34.]
- 8 刘小洪,冯明友,罗静兰,等. 鄂尔多斯盆地乌审召地区盒8、山1段储层流体包裹体特征及其意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):360-366,374. [Liu Xiaohong, Feng Mingyou, Luo Jinglan, et al. Characteristics of fluid inclusions in reservoirs in the eighth member of the Shihezi Formation and the first member of the Shanxi Formation in Uxin Ju area, the Ordos Basin and their significance[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 360-366, 374.]
- 9 张文忠,郭彦如,汤达祯,等. 苏里格气田上古生界储层流体包裹体特征及成藏期次划分[J]. 石油学报,2009,30(5):685-691. [Zhang Wenzhong, Guo Yanru, Tang Dazhen, et al. Characteristics of fluid inclusions and determination of gas accumulation period in the Upper Paleozoic reservoirs of Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 685-691.]
- 10 李剑,罗霞,单秀琴,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):54-59. [Li Jian, Luo Xia, Shan Xiuqin, et al. Natural gas accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 54-59.]
- 11 杨智,何生,邹才能,等. 鄂尔多斯盆地北部大牛地气田成岩成藏耦合关系[J]. 石油学报,2010,31(3):373-378,385. [Yang Zhi, He Sheng, Zou Caineng, et al. Coupling relationship between reservoir diagenesis and natural gas accumulation of Daniudi Gas Field in north Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 373-378, 385.]
- 12 付金华,魏新善,南珺祥,等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气田储集层特征与成因[J]. 古地理学报,2013,15(4):529-538.

- [Fu Jinhua, Wei Xinshan, Nan Junxiang, et al. Characteristics and origin of reservoirs of gas fields in the Upper Paleozoic tight sandstone, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(4): 529-538.]
- 13 赵靖舟,王力,孙兵华,等. 鄂尔多斯盆地东部构造演化对上古生界大气田形成的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 875-881. [Zhao Jingzhou, Wang Li, Sun Binghua, et al. Effect of structural evolution on the formation and distribution of Upper Paleozoic giant gas fields in the east Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 875-881.]
 - 14 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 17-24. [Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 17-24.]
 - 15 任战利,赵重远,张军,等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 56-65. [Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan, Zhang Jun, et al. Research on paleotemperature in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56-65.]
 - 16 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 339-349. [Ren Zhanli. Thermal history of Ordos Basin assessed by apatite fission track analysis[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(3): 339-349.]
 - 17 周江羽,吴冲龙,韩志军. 鄂尔多斯盆地的地热场特征与有机质成熟史[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 20-24. [Zhou Jiangyu, Wu Chonglong, Han Zhijun. Geothermal field and maturing history of organic matter in the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1998, 20(1): 20-24.]
 - 18 刘新社. 鄂尔多斯盆地东部上古生界岩性气藏形成机理[D]. 西安:西北大学, 2008. [Liu Xinshe. The accumulation mechanism of lithologic gas reservoir of the Upper Paleozoic in eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2008.]
 - 19 于强. 鄂尔多斯盆地中东部地区古生界热演化史与天然气成藏[D]. 西安:西北大学, 2012. [Yu Qiang. The Paleozoic thermal evolution history and natural gas accumulation of the central and eastern parts of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2012.]
 - 20 李仲东. 鄂尔多斯盆地北部上古生界压力异常及其与天然气成藏关系研究[D]. 成都:成都理工大学, 2006. [Li Zhongdong. Research on the relationship between abnormal pressure and gas accumulation in Upper Paleozoic of northern Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.]
 - 21 毕明威,陈世悦,周兆华,等. 苏里格气田苏6区块盒8段致密砂岩储层次生孔隙成因探讨[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015, 39(1): 8-16. [Bi Mingwei, Chen Shiyue, Zhou Zhaohua, et al. Genesis of secondary pores of tight sandstone reservoir in He 8th Member in Su 6 area of Sulige gas field[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2015, 39(1): 8-16.]
 - 22 刘伟新,王延斌,张文涛,等. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用与产能关系研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 557-563. [Liu Weixin, Wang Yanbin, Zhang Wentao, et al. The relationship between the diagenesis of Upper Palaeozoic reservoir sandstones and the production capacity in Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 557-563.]
 - 23 赵彦超,郭振华. 大牛地气田致密砂岩气层的异常高孔隙带特征与成因[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 62-65. [Zhao Yanchao, Guo Zhenhua. Characteristics and origins of high-porosity zones in tight gas sand in Daniudi gas field, the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 62-65.]
 - 24 刘小洪,罗静兰,张三,等. 榆林—神木地区上古生界盒8段及山2段气层的成岩作用和成岩相[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 200-208. [Liu Xiaohong, Luo Jinglan, Zhang San, et al. Diagenesis and diagenetic facies of gas reservoirs in the Upper Paleozoic 8th member of Shihezi Fm and 2nd member of Shanxi Fm in Yulin-Shenmu area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 200-208.]
 - 25 张善文,袁静,隋风贵,等. 东营凹陷北部沙河街组四段深部储层多重成岩环境及演化模式[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 576-587, 602. [Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui, et al. Multiple diagenetic environments and evolution model in deep formation of the 4th Member, Shahejie Formation in the northern Dongying sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 576-587, 602.]
 - 26 操应长,陈林,王艳忠,等. 东营凹陷民丰北带古近系沙三段成岩演化及其对储层物性的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(5): 6-13. [Cao Yingchang, Chen Lin, Wang Yanzhong, et al. Diagenetic evolution of Es₃ reservoir and its influence on property in the northern Minfeng sub-sag of Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2011, 35(5): 6-13.]
 - 27 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 Xujiahe Formation, western Sichuan depression[J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498-506.]
 - 28 黄思静,佟宏鹏,黄可可,等. 阴极发光分析在恢复砂岩碎屑长石含量中的应用——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]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1013-1019. [Huang Sijing, Tong Hongpeng, Huang Keke, et al. Application of cathodoluminescence analyse to the recovery of feldspar content in sandstone—a case study of Upper Paleozoic of Ordos Basin and Xujiahe Formation of western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(10): 1013-1019.]
 - 29 应凤祥,罗平,何东博. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京:石油工业出版社, 2004: 1-293. [Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo. Clastic Reservoir Diagenesis and Diagenetic Numerical Simulation of China's Oil and Gas Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 1-293.]
 - 30 毕明威,陈世悦,周兆华,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田苏6区块二叠系下石盒子组8段砂岩储层致密成因模式[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 599-613. [Bi Mingwei, Chen Shiyue, Zhou Zhaohua, et al. Densification modes of sandstone reservoir in the 8th Member of

the lower Shihezi Formation, Permian, in Su-6 Area of Sulige Gas Field, Ordos Basin [J]. Geological Review, 2015, 61 (3): 599-613.]

31 Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.

Research on Evolution of Burial Diagenesis of Tight Reservoir of the Upper Paleozoic in Daniudi Gas Field

XU NingNing¹ QIU LongWei¹ GAO QingSong² SONG Fan¹
LIU XuGang² ZHANG XiangJin³ JIANG Wei⁴

(1. School of Geoscience, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute of the North China Oil and Gas Company of SINOPEC, Zhengzhou 450006, China;

3. Tianjin Fanglian Technology Development Co.Ltd, Tianjin 300280, China;

4. The First Gas Recovery Plant, Huabei Oil field Company, SINOPEC Co.Ltd, Zhengzhou, 450000, China)

Abstract: Based on casting thin sections, scanning electron microscope, clay mineral X-ray diffraction, cathodeluminescence, fluid inclusion and laser-Raman spectrum, the paper reveals the process of evolution of burial diagenesis of tight reservoir of the Upper Paleozoic in Daniudi Gas Field from aspects including burial history, temperature, pressure, diagenetic feature of reservoir, diagenetic fluid and porosity evolution of reservoir. The research shows the process of burial diagenesis can be divided to four stages. They are rapid burial stage (a) in which the effect of decreasing of primary porosity was remarkable (compaction rates ranged from 30% to 97.5%), complexly diagenetic stage (b) in which there were two phases of gas charging (B.P. 200 Ma and B.P. 180 Ma); definition stage for reservoir characteristic (c) when there was one phase of gas charging (B.P. 140 Ma) and reservoir tended towards stability and tight and stage of being weak-reworked for reservoir (d) when amplitude of tectonic uplift was about one kilometer and tension fissure weakly developed. Porosity of most reservoir decreased to 10%, and became tight. With several times of gas charging, the reservoir appeared to present the diagenetic and accumulative model of being tight when gas charging. Hydrocarbon-charging happened before reservoir's being tight. Microfractures may be the key factor for improving reservoir's permeability.

Key words: Ordos Basin; Daniudi gas field; tight sandstone; diagenetic evolution; fluid charging