

致密砂岩储层埋藏-成岩-油气充注演化过程与孔隙演化定量分析

——以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段天然气储层为例

李 杪¹, 侯云东², 罗静兰¹, 陈娟萍², 罗晓容³, 贾亚妮²

(1. 西北大学 地质系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021;

3. 中国科学院 油气资源研究重点实验室/中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:目前国内对致密砂岩的成岩-孔隙演化过程、埋藏-热演化史、油气充注史基本停留在相对独立和单一的静态研究阶段,因此,对于砂岩的岩石学组分及其差异性成岩演化过程导致的储层致密化过程与油气充注时序关系的研究依然十分薄弱。通过各类薄片显微镜下研究与定量统计,结合扫描电镜、阴极发光、包裹体均一温度与激光拉曼探针成分等多种分析测试手段,开展了鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段不同类型致密砂岩的埋藏-成岩-油气充注-孔隙动态演化历史的精细研究,在此基础上讨论了各砂岩致密化过程与油气充注在时序关系上的差异性。研究结果显示,钙质胶结砂岩和高塑性岩屑砂岩的成岩-油气充注演化过程相对简单,前者经历中成岩阶段A期碳酸盐胶结作用后基本成为致密储层,时序关系为先充注后致密;而后者经历早成岩阶段压实作用后一部分成为致密储层,时序关系为先致密后充注;石英砂岩和岩屑石英砂岩经历了较为复杂的成岩-油气充注演化过程,时序关系为边充注边致密。

关键词:砂岩类型;成岩序列;孔隙定量演化;致密砂岩;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Burial, diagenesis, hydrocarbon charging evolution process and quantitative analysis of porosity evolution: A case study from He 8 tight sand gas reservoir of the Upper Paleozoic in Eastern Ordos Basin

Li Miao¹, Hou Yundong², Luo Jinglan¹, Chen Juanping², Luo Xiaorong³, Jia Yani²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oil Field Company, PetroChina, Xi'an Shaanxi 710021, China;

3. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Current researches about the evolution process of diagenesis-porosity, the burial-thermal history, and the hydrocarbon charging history of tight sandstone reservoirs are still in a static stage in China. Apparently, less attention has been paid to the relevance between hydrocarbon charging and tightening process caused by the petrological components of sandstones and its differential diagenetic evolution process. In order to better understanding the dynamic evolution history of burial-diagenesis-hydrocarbon charging-porosity of tight sandstone, samples from the 8th Member of Xiashihezi Formation (He8) of the Upper Paleozoic in eastern Ordos Basin were studied in detail through the identification and quantitative statistics of cast sections, together with various analysis methods such as SEM, CL, homogenization temperature and chemical composition of fluid inclusions etc. Furthermore, the differences of the timing of densification process and hydrocarbon charging among different sandstone layers were discussed. The results indicate that the diagenesis-hydrocarbon charging evolution processes of both the calcium-cemented sandstone and high plastic lithic sandstone are relatively simple. The former became tightened after carbonate cementation in the stage A of middle diagenesis phase, which confirms that hydrocarbon charging was early than tightening; while the latter became tightened after compaction in the early dia-

收稿日期:2016-11-02;修订日期:2016-11-07。

第一作者简介:李杪(1985—),女,博士研究生,沉积学、石油地质学。E-mail:174427283@qq.com。

通讯作者简介:罗静兰(1957—),女,教授,沉积学、成岩作用。E-mail:jlluo@nuw.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41272138;41572128);国家科技重大专项(2011ZX05008-004-061;2016ZX05008-004-032)。

genetic stage, which confirms that tightening occurred before hydrocarbon charging. In contrast, the quartz sandstone and lithic quartz sandstone are complicated in diagenetic-charging evolution process and their tightening and hydrocarbon charging synchronous.

Key words: sandstone type, diagenetic sequence, quantitative porosity evolution, tight sandstone, Ordos Basin

成岩作用是沉积物在埋藏过程中为适应新的环境(温压和流体条件)而发生的岩石矿物和结构的转变^[1],其贯穿于盆地油气成藏的整个阶段。目前成岩作用的研究逐渐由局部单井拓展到全盆地,在地温场、应力场及流体场等盆地的大背景下分析成岩作用对储层质量的影响,建立微观小尺度的成岩作用特征与宏观盆地大尺度的埋藏-成岩-孔隙演化的空间-时间响应^[2-6]。储层孔隙的演化规律受成岩作用、构造演化史、埋藏热史及油气生成史等诸多因素的共同控制^[7-10],将成岩作用、沉积盆地动力学以及油气充注相结合的研究思路与方法成岩作用研究未来的发展趋势^[5,7,11-15]。

研究区北起伊金霍洛旗,南至石楼,西起横山,东抵临县,位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东北部(图1)。区内上古生界烃源岩厚度大、生烃强度高、储层以砂岩为主、层数多、分布广,整体显示低孔低渗的特点^[16]。

其中,二叠系下石盒子组8段(盒8段)为盆地内的主要产气层之一。前人对研究区主力含气层的成岩作用进行过一些研究,如部分学者多借助于岩石铸体薄片,以成岩演化序列为约束,通过定量统计各种成岩作用产物和溶解孔隙的含量,达到恢复储集层孔隙度演化之目的^[17-25];另一些学者则多借助于流体包裹体中保留的主要信息(包括压力、温度和成分等),结合埋藏热史的恢复,来判断成岩作用历史,估算成藏时间^[16,26-31]。目前对致密砂岩成岩-孔隙演化的研究,缺乏将成岩-孔隙演化置于盆地埋藏-热演化史、油气充注史的统一动力学演化系统中,成岩-孔隙演化过程研究、埋藏-热演化史研究、油气充注史研究仍处于彼此独立的静态研究阶段,因而储层成岩-成藏-孔隙演化的部分成因信息被掩盖。

本研究在对鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段致密砂岩储层不同砂岩类型的岩石学与孔隙发育特征等精细研究的前提下,尝试将微观尺度下致密砂岩的成岩-孔隙演化过程研究与宏观尺度上的埋藏热史-油气充注过程相结合,建立致密砂岩储层与埋藏史、油气充注史相应的成岩-成藏-孔隙演化史,从而实现致密砂岩成岩-孔隙演化在时空上的定量化研究。该研究对丰富鄂尔多斯盆地致密砂岩在以盆地埋藏热演化-油气充注史背景下的成岩-孔隙演化过程的理论认识上具有重要的意义,进一步指导研究区致密砂岩气的勘探部署。

1 砂岩类型及其成岩演化

1.1 致密砂岩成岩演化序列的镜下微观证据

依据研究区24口取心井岩心观察及常规薄片、铸体薄片、荧光薄片、包裹体薄片显微镜下骨架矿物成分、成岩产物及共生组合关系、孔隙类型、包裹体分布特征等鉴定统计结果,按岩石学组分并结合储层特征,盒8段砂岩可划分4类:钙质胶结砂岩(碳酸盐胶结物的含量 $\geq 15\%$)、高塑性岩屑砂岩(塑性岩屑含量 $\geq 15\%$)、石英砂岩、岩屑石英砂岩^[32]。不同岩性的砂岩由于在成岩作用过程中发生不同的水-岩反应,其成岩作用的产物与含量存在一定的差异性(表1),进而导致差异性成岩演化过程,再结合荧光与包裹体薄片显微镜下观察,分别建立了各类型砂岩的成岩演化序列。

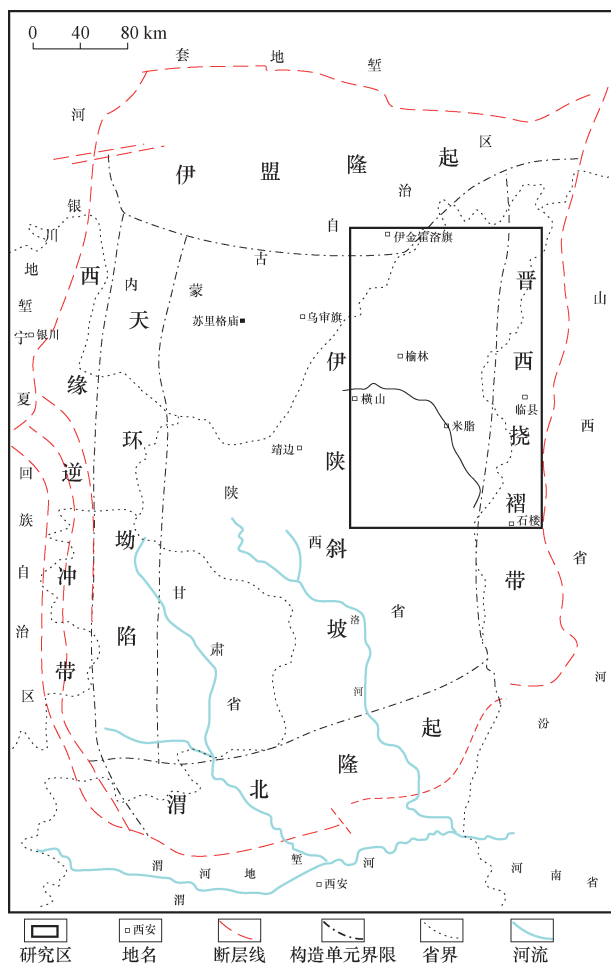


图1 鄂尔多斯盆地研究区地理位置

Fig. 1 Location map of the study area in the Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地东部盒 8 段不同岩性砂岩岩石学组分百分含量统计

Table1 Percentage statistics of petrological components for different lithologic sandstones from the He 8 in eastern Ordos Basin

岩石类型	岩石组分含量/%										
	石英	长石	岩屑	刚性岩屑	塑性岩屑	高岭石	伊+蒙+伊/蒙	绿泥石	凝灰质	碳酸盐类	硅质
钙质胶结砂岩	52.1	0.2	17.9	12.7	5.1	0.1	1.4	0.1	0.0	23.5	0.0
高塑性岩屑砂岩	60.8	0.8	27.5	9.6	17.9	1.6	4.9	0.8	0.1	1.2	1.4
石英砂岩	78.3	0.1	5.1	3.0	2.2	4.2	3.9	0.1	0.1	0.9	6.4
岩屑石英砂岩	67.9	0.4	15.0	7.8	7.2	2.4	5.2	0.7	1.1	1.0	2.9

盒 8 段钙质胶结砂岩和高塑性岩屑砂岩的成岩作用过程相对简单,而石英砂岩和岩屑石英砂岩则经历了多期复杂的成岩作用过程(图 2)。各类型砂岩成岩演化序列总结如下。

1) 钙质胶结砂岩

绿泥石薄膜—方解石 I—压实作用—油气充注 I—高岭石—微晶石英—伊利石—构造作用—方解石 II。

2) 高塑性岩屑砂岩

绿泥石薄膜—压实压溶作用—油气充注 I—石英加大/硅质—高岭石—油气充注 II—伊利石—方解石。

3) 石英砂岩

绿泥石薄膜 I—压实作用—油气充注 I—石英加大 I—绿泥石薄膜 II—石英加大 II—高岭石 I—伊/蒙混层转化—溶蚀 I—高岭石 II—微晶硅质—伊利

石—油气充注 II—构造作用—方解石—溶蚀 II—油气充注 III。

4) 岩屑石英砂岩

绿泥石薄膜 I—压实作用—油气充注 I—石英加大 I—绿泥石薄膜 II—石英加大 II—高岭石—溶蚀 I—微晶硅质—伊利石—油气充注 II—构造作用—方解石—溶蚀 II—油气充注 III。

1.2 致密砂岩成岩演化的流体包裹体证据

盒 8 段致密砂岩储层中的成岩流体包裹体较为丰富,其形状不规则,大小为 $5\text{ }\mu\text{m}\times 8\text{ }\mu\text{m}\sim 10\text{ }\mu\text{m}\times 12\text{ }\mu\text{m}$,个别直径可达 $15\text{ }\mu\text{m}$,主要呈分散状、串珠状或成群发育在石英颗粒表面、边缘、愈合裂缝及石英次生加大边上,少数在方解石胶结物表面、边缘与愈合裂缝中发育。

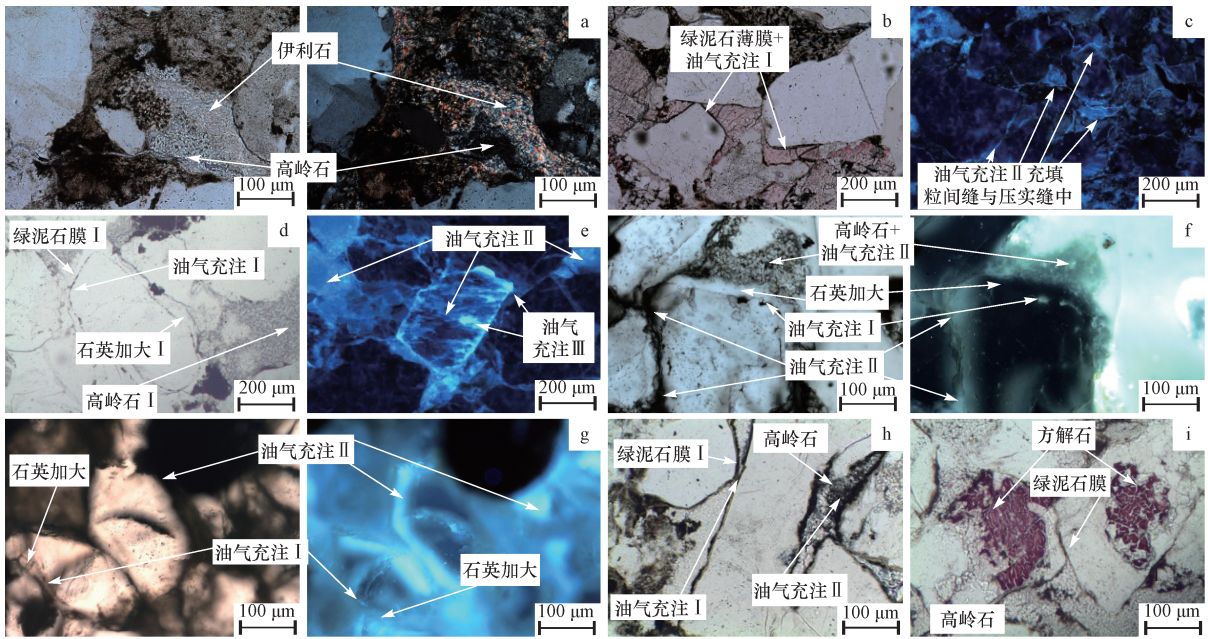


图 2 鄂尔多斯盆地东部盒 8 段不同类型砂岩的成岩演化证据

Fig. 2 Evidences of diagenetic evolution of different Sandstones in He 8in eastern Ordos Basin

a. 伊利石附在高岭石上并且包裹高岭石,高岭石—伊利石,钙质胶结砂岩,神 8 井,埋深 1 972.55 m,单偏光及正交照片;b. 油气充注 I 浸染绿泥石薄膜,绿泥石膜—油气充注 I,钙质胶结砂岩,神 8 井,埋深 1 972.55 m,单偏光照片;c. 油气充注 II 充填粒间缝与压实缝中,高塑性岩屑砂岩,米 9 井,埋深 1 558.08 m,荧光照片;d. 绿泥石膜 I—油气充注 I—石英加大 I—高岭石 I,石英砂岩,台 10 井,埋深 2 570.47 m,单偏光照片;e. 油气充注 II (蓝色荧光)分布于粒间与粒内溶孔中,油气充注 III (亮蓝色荧光)分布于填隙物与长石粒内溶孔中,并交代、部分覆盖油气充注 II,石英砂岩,神 8 井,埋深 1 968.65 m,荧光照片;f. 油气充注 I—石英加大—高岭石—溶蚀—油气充注 II,石英砂岩,霍 2 井,埋深 2 418.01 m,单偏光及荧光照片;g. 油气充注 I—石英加大—油气充注 II,岩屑石英砂岩,米 1 井,埋深 2 092.10 m,单偏光及荧光照片;h. 绿泥石膜 I—油气充注 I—高岭石—油气充注 II,岩屑石英砂岩,榆 10 井,埋深 2 270.80 m,单偏光照片;i. 绿泥石膜—高岭石—方解石,岩屑石英砂岩,台 10 井,埋深 2 544.10 m,单偏光照片

选取与烃类包裹体同期的盐水包裹体,利用冷-热台方法获得盒8段34口井40个砂岩样品中645个测点的流体包裹体的均一温度。实验结果显示,储层砂岩的流体包裹体均一温度从68.5~305℃连续分布(图3e),显示该区储层经历了从早成岩→中成岩→晚成岩阶段的演化过程,且呈现出80~110℃与120~160℃两个明显峰值。盒8段砂岩中少量包裹体均一温度(220~305℃)高于地层最大埋深时的古地温(150~210℃),占总测点数的5.7%,出现该现象的原因可归结以下3种可能^[33]:①实验所得包裹体是继承性原生包裹体,其温度代表了母岩矿物形成时捕获流体的温度;②实验所得包裹体发生再平衡作用,使其体积增大,密度减少,导致均一温度异常;③在成岩过程中实验所得包裹体可能在一定程度上受到与地质热事件相关的深部热液流体的影响。研究区所测均一温度较高的盐水包裹体一般呈串珠状分布在石英愈合裂缝及石英次生加大边中,其冰点温度相对较小(小于-12℃),部分低于-150℃仍未结冰,盐度相对较大,形态较规则并未发生变形,而继承性包裹体一般个体较大,体壁较厚,散乱分布在石英颗粒表面;发生再平衡作用的包裹体的盐度和冰点温度基本上没有发生变化,只是体积发生改变,均一温度增加。由此可以推断,该类包裹体受到了后期热液的影响。前人的研究表明^[34-38],鄂尔多斯盆地在中侏罗世一早白垩世发生

过一次构造热事件,此次热事件使得地下深部高温热流体沿断裂通道上涌过程中,对该时期捕获的流体包裹体温度造成影响,使其具有较高的均一温度。

利用激光拉曼分子微探针技术测定盒8段36个烃类包裹体的成分,实验结果显示,研究区储层砂岩经历了2期较明显的烃类流体充注(图3b)。均一温度在80~110℃的烃类包裹体主要发育在未切穿石英颗粒的愈合裂缝及石英次生加大边中,气相成分以CO₂(平均72.2%)、CH₄(平均19.2%)含量较高、N₂(平均6.7%)含量较低、含微量H₂S(平均0.01%)、H₂(平均0.8%)为特征;液相成分以H₂O(平均99.63%)为主,含微量CO₂(平均0.36%)、CH₄(平均0.01%)(图3a, d)。均一温度在120~160℃的烃类包裹体主要发育在切穿颗粒的裂缝、石英加大边的微裂缝及亮晶方解石胶结物中,其气相成分以CH₄(平均63.7%)、N₂(平均19.8%)、CO₂(平均10.1%)含量较高, H₂S(平均3.7%)、H₂(平均2.7%)含量较低为特征;液相成分以H₂O(平均99.93%)为主,含微量CO₂(平均0.05%)、CH₄(平均0.02%)(图3c, f)。烃类包裹体气相成分中不含H₂O, CH₄与CO₂的含量呈明显的互消长关系,体现了有机质由低成熟向高成熟的演化过程。部分烃类包裹体气相成分中不含CO₂,仅含CH₄、H₂S气体,说明有机质已演化至高成熟-过成熟阶段(中成岩阶段B期)。

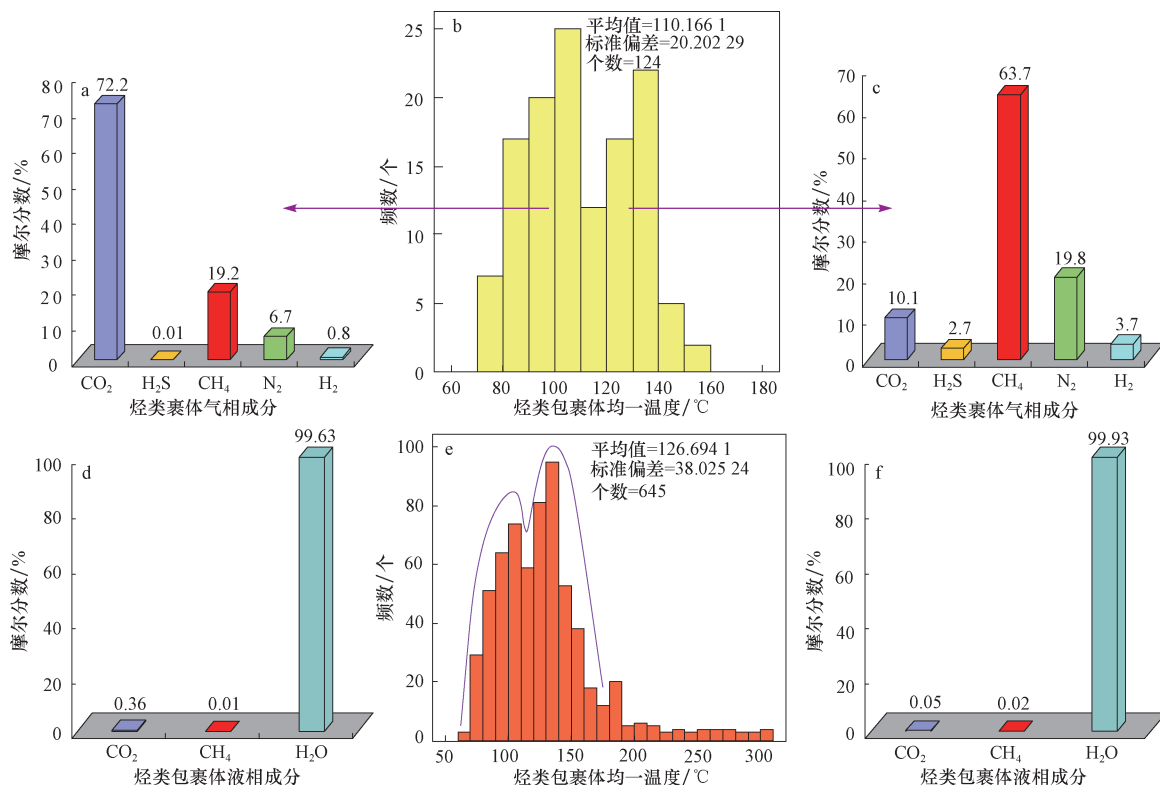


图3 鄂尔多斯盆地东部盒8段流体包裹体均一温度与成分直方图

Fig. 3 Histogram of homogenization temperature and composition of fluid inclusions from He 8 in the eastern Ordos Basin

2 埋藏-成岩-油气充注演化史

本研究利用盆地模拟软件 PetroMod 对研究区典型井盒8段的埋藏-热演化史进行模拟,结合成岩期次、油气充注期次、流体包裹体温度与成分、所处地层的镜质体反射率等研究成果,建立与地质时代相应的埋藏-成岩-油气充注演化史。

2.1 典型井盒8段的埋藏-热演化史特征

鄂尔多斯盆地东部8口典型井的埋藏-热演化史恢复模拟结果显示(图4),研究区上古生界经历了三个阶段的沉积构造演化:早二叠世至三叠世末期(280~213 Ma,海西末期和印支期)的持续沉降阶段,有机质处于未成熟阶段($R_o < 0.55\%$);三叠世末期至早白垩世末期(距今213~97.5 Ma)不稳定的波动沉降阶段,该阶段受早-中期燕山运动的影响,表现为多次的抬升波动,埋深与古地温持续升高,直

至早白垩世末达到最大埋深与最大古地温(3 200~4 100 m, 150~210℃),最大埋深与古地温呈现出东北部较低(3 200~3 900 m, 150~180℃)(如府2井、神8井、双52井)、西部(如双1井、台10井)及西南部(如米27井、榆14井、榆87井)较高(4 000~4 100 m, 190~210℃)的特征。有机质处于低成熟-高成熟阶段($0.55\% \leq R_o \leq 2.0\%$);早白垩世末至第四纪(距今97.5~0 Ma)燕山晚期和喜马拉雅期的构造抬升是持续时间最长的剥蚀事件,造成自上古生界以来最大的地层剥蚀量。早白垩世末西部和西南部普遍进入干气阶段($R_o > 2.0\%$),但东北部部分地区未到达干气阶段。

2.2 油气充注期次与时间

在测定与烃类包裹体同期的盐水包裹体均一温度的前提下,结合该盆地的古地温史,确定包裹体捕获时的古深度与埋藏史,进而可推算油气充注的时间^[39-40]。

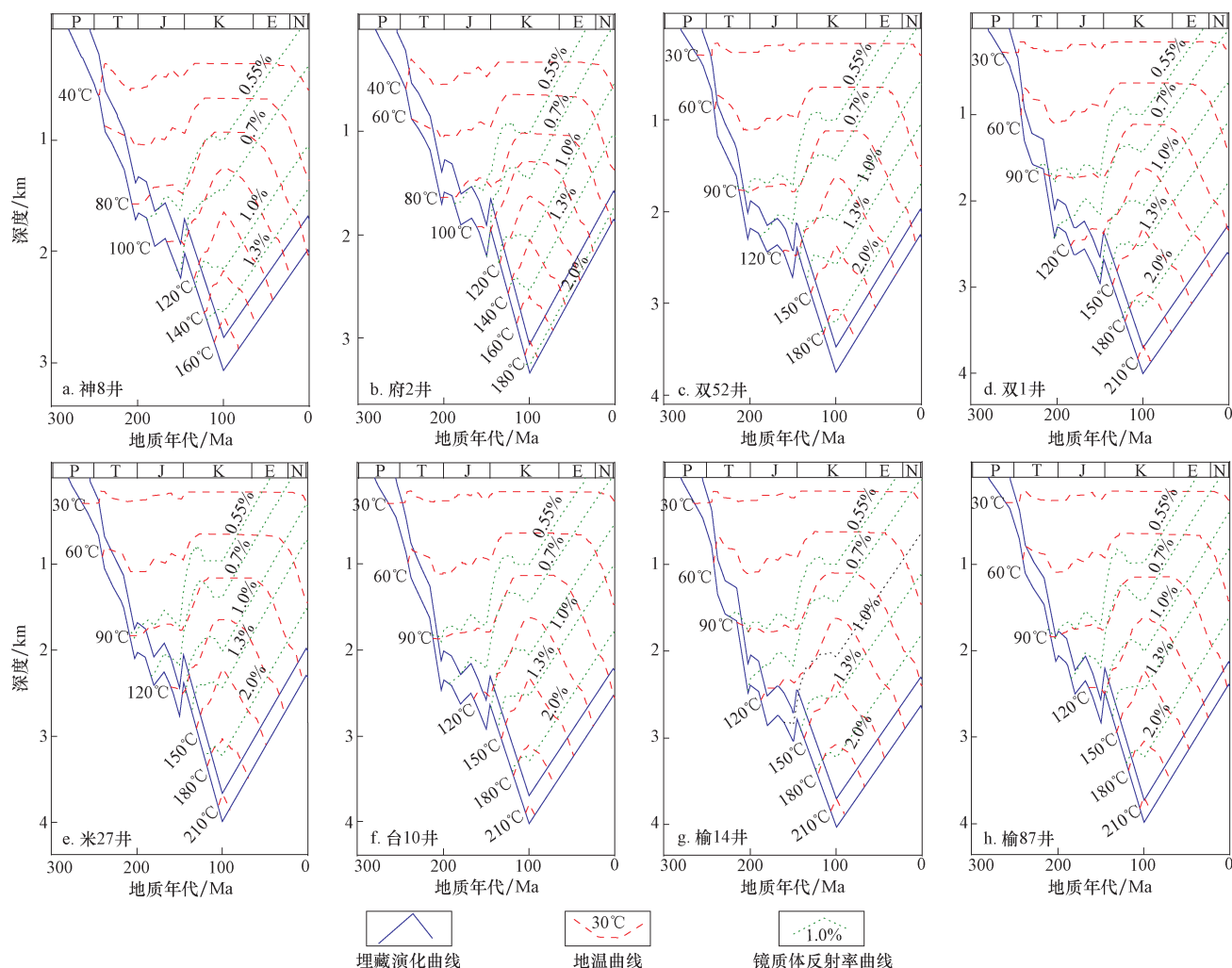


图4 鄂尔多斯盆地东部典型井石盒子组埋藏-热演化史模拟结果

Fig. 4 Burial-thermal evolution modeling for the Shihezi Formation in typical wells in eastern Ordos Basin

研究区典型井石盒子组埋藏-热演化史模拟结果显示,侏罗纪末期目的层地层温度为 $90 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,白垩纪末期最大埋深时的温度高达 $150 \sim 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。依据各单井流体包裹体均一温度峰值,结合该井古地温演化的趋势图,可以推算出流体包裹体捕获时的时间^[33]。研究区流体包裹体主要形成在中侏罗世末-早白垩世末(距今 $165 \sim 100\text{ Ma}$),盐水包裹体与烃类包裹体在该时期同时形成,因此,烃类主要在中侏罗世末-早白垩世末进入储层。此外,晚白垩世(距今 $90 \sim 70\text{ Ma}$),三叠纪末期至早侏罗世末期(距今 $210 \sim 175\text{ Ma}$)有少量的油气充注。

2.3 埋藏-成岩-油气充注演化史

研究区盒8段埋深普遍在 $2\,300 \sim 3\,400\text{ m}$,镜质体反射率 R_o 为 $1.3\% \sim 2.0\%$,伊/蒙间层比小于 10% ,自生石英中流体包裹体均一温度为 $100 \sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据中华人民共和国石油天然气行业标准(2003)^[41],目的层处于中成岩阶段B期。综合研究区盒8段不同岩性砂岩成岩作用特征及成岩演化过程的研究,结合盆地埋藏-热演化史与油气充注过程,鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段致密砂岩的埋藏-成岩-油气充注演化过程可归纳如图5。

2.3.1 早成岩A期(P_1 末期)

早二叠世末(距今 $280 \sim 270\text{ Ma}$),研究区盒8段砂岩储层处在早成岩A期。该时期盆地处于稳定下沉阶段,埋深普遍小于 900 m ,古地温小于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,镜质体反射率 R_o 小于 0.35% ,有机质演化位于未成熟阶段。砂岩中黑云母、火山岩岩屑的蒙脱石化和绿泥石化作用使储层碱度提高,且二者分解产生 Mg 离子和 Fe 离子,有利于颗粒绿泥石薄膜衬边的形成。与此同时,钙质胶结砂岩中由于孔隙流体中碱度的提高,促进了早期方解石胶结作用的进行。该时期沉积物处于初步压实阶段,骨架颗粒间逐步倾向于排列紧密,塑性岩屑颗粒(黑云母等)发生水化膨胀或假杂基化填充孔隙,原生粒间孔较发育。

2.3.2 早成岩B期(P_2 — J_2)

中二叠世—中侏罗世(距今 $270 \sim 160\text{ Ma}$),盒8段砂岩处于早成岩B期。该时期盆地处于波动下沉阶段,埋深在 $900 \sim 1\,800\text{ m}$,古地温 $65 \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, R_o 为 $0.35\% \sim 0.5\%$,有机质演化位于未成熟-半成熟阶段。该时期各砂岩以压实作用为主,胶结作用主要表现为绿泥石、硅质、高岭石胶结。由于部分腐殖酸的生成,各砂岩孔隙流体呈酸性,长石、黑云母、岩屑等不稳定组分的硅酸盐矿物蚀变析出 SiO_2 ,并产生少量的

HCO_3^- 。在酸性的介质条件下,孔隙水沉淀析出晶形较好的高岭石胶结物充填于粒间孔中。发生在 $210 \sim 175\text{ Ma}$ 的第一期油气充注(油气充注I)规模有限,油气主要分布在碎屑颗粒边缘并浸染绿泥石膜。由于流体活动在该时期相对不强烈,砂岩中未捕获到与其对应的烃类包裹体。

2.3.3 中成岩A期(J_3 — K_1)

晚侏罗世—早白垩世(距今 $160 \sim 100\text{ Ma}$)盒8段砂岩储层进入中成岩A期。该时期盆地仍处于波动下沉阶段,埋深在 $1\,800 \sim 4\,100\text{ m}$,古地温 $85 \sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, R_o 为 $0.5\% \sim 1.3\%$,有机质演化位于低成熟-成熟阶段。该时期各砂岩胶结作用主要表现为高岭石、硅质、伊利石、晚期碳酸盐等的胶结作用,以及发生在 $165 \sim 100\text{ Ma}$ 的第二期油气充注事件,对应前述均一温度相对较低($80 \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$)的烃类包裹体。第二期油气充注规模较大,为研究区主要的油气充注期。油气主要分布在高塑性岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、石英砂岩中的颗粒裂缝、解理缝等原生缝隙以及各类溶孔与裂缝中。

该时期是烃源岩与储集岩系统中有机-无机反应最活跃的时期,形成的大量有机与无机酸性流体对盒8段砂岩中的长石等不稳定铝硅酸盐矿物、粘土矿物及早期碳酸盐胶结物进行溶蚀并形成次生孔隙。由于硅酸离子半径大、不易扩散,因此,长石等不稳定铝硅酸盐矿物在溶蚀过程中,随着温压条件的升高, SiO_2 在孔隙流体中的溶解度增加,在粒间孔中沉淀形成硅质胶结物。与此同时,在酸性介质条件下,长石溶解析出的高岭石胶结物充填于长石粒内溶孔中。之后随着温压条件的继续升高和有机酸的消耗、粘土矿物大量失水,不稳定矿物溶蚀和离子交换过程中释放出 Na^+ 、 K^+ 等碱性阳离子,致使孔隙流体 PH 升高,蒙脱石开始向伊/蒙混层转化,成岩环境变为弱碱性环境,伊/蒙混层与部分高岭石向伊利石转化,少量晚期碳酸盐胶结物生成。

2.3.4 中成岩B期(K_1 末— K_2)

早白垩世末—晚白垩世(距今 $100 \sim 65\text{ Ma}$)盒8段砂岩储层进入中成岩B期。该时期盆地处于构造抬升阶段,埋深大于 $3\,100\text{ m}$,早白垩世末达到最大埋深,最大为 $4\,100\text{ m}$,古地温达 $140 \sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, R_o 为 $1.3\% \sim 2.0\%$,有机质演化位于高成熟阶段。由于有机质演化位于高成熟阶段,干酪根成熟并转化为烃类,发生第二期溶蚀作用,消耗酸性介质和释放 K^+ 、 Al^{3+} 等碱性阳离子,羧基的脱落减弱或趋于终结,水介质由弱碱性变为碱性,有利于中成岩A期生成的伊利石和晚期碳酸

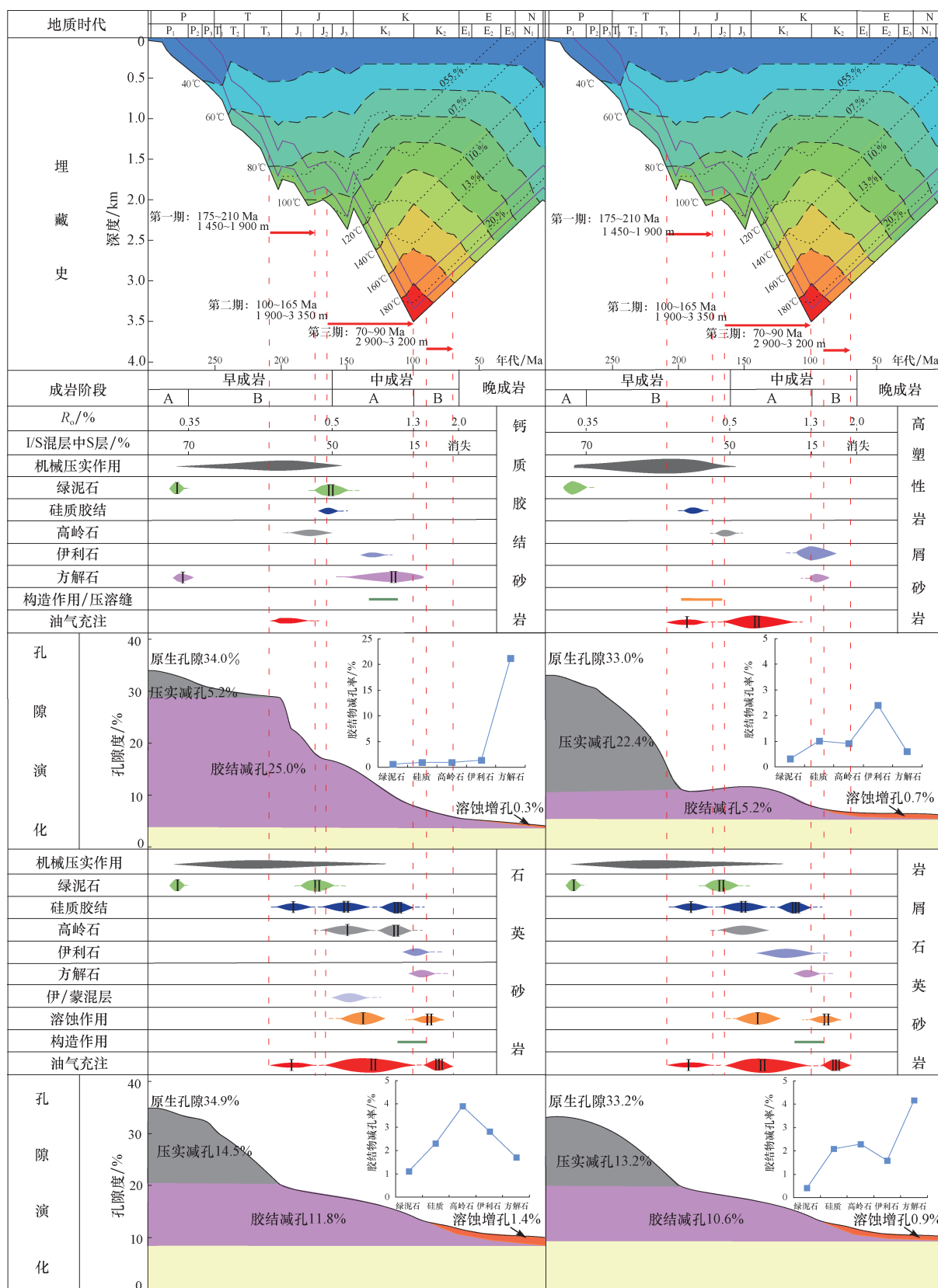


图5 鄂尔多斯盆地东部砂岩储层埋藏-成岩-油气充注-孔隙演化过程

Fig. 5 Burial-diagenesis-hydrocarbon charging-porosity evolution process of sandstone reservoir in the eastern Ordos Basin

盐胶结物继续发育。在构造应力下,岩石破裂形成微裂隙。后期(90 ~ 70 Ma)发生了第三期油气充注,其充注规模较油气充注Ⅱ略小,油气主要沿岩屑石英砂岩、石英砂岩中的裂缝及溶蚀缝系统进入储层,在油气

充注Ⅱ分布地带,交代、溶蚀并局部覆盖油气充注Ⅱ,这期油气充注对应前述均一温度相对较高(120 ~ 160 ℃)的烃类包裹体。

3 致密砂岩成岩作用对孔隙影响的定量评价

研究区盒8段储层砂岩进入埋藏成岩阶段后所经历的压实、胶结、溶解及交代等成岩作用都是相互联系、相互影响的,共同控制着储集空间的再分配,并影响了储集层的孔隙发育。为合理解释研究区致密砂岩储层孔隙演化过程,针对不同岩性砂岩成岩作用在储集层的孔隙生成和损失方面进行定量评价。

3.1 不同岩性砂岩原始孔隙度恢复

砂岩颗粒的分选性影响砂岩的原始孔隙度,且与砂岩的粒度无关。恢复砂岩的原始孔隙度可以利用 beard 经验公式(1973):

$$\text{原始孔隙度} = 20.9 + 22.91/S_0 \quad (1)$$

式中: S_0 指特拉斯克分选系数, $S_0 = P_{25}/P_{75}$, P_{25} 及 P_{75} 在累积曲线上分别代表 25% 及 75% 处对应的颗粒直径。

结果显示,研究区盒8段储层砂岩以石英砂岩的原始孔隙度最高(平均 34.9%),钙质胶结砂岩(平均 34.0%)与岩屑石英砂岩(平均 33.2%)的原始孔隙度居中,高塑性岩屑砂岩的原始孔隙度最低(平均 33.0%)。

3.2 不同岩性砂岩主要成岩作用孔隙减孔率

1) 压实作用孔隙减孔率计算公式

通过压实率的计算可以定量描述压实作用的强度,恢复压实作用的孔隙减少量,前人计算公式^[42-43]如下:

$$\text{压实作用损失的孔隙度} = \text{原始孔隙度} \times \text{压实率} \quad (2)$$

其中, $\text{压实率} = (\text{原始孔隙度} - \text{粒间体积}) /$

$$\text{原始孔隙度} \quad (3)$$

而, $\text{粒间体积} = \text{粒间孔隙含量} + \text{胶结物含量} +$

$$\text{杂基含量} \quad (4)$$

2) 胶结作用孔隙减孔率计算公式

通过胶结率的计算可以定量描述胶结作用的强度,恢复胶结作用的孔隙减少量,前人计算公式^[36-37]如下:

$$\text{胶结损失的孔隙度} = \text{原始孔隙度} \times \text{胶结率} \quad (5)$$

其中, $\text{胶结率} = \text{胶结物含量} / \text{原始孔隙度} \quad (6)$

研究区盒8段不同岩性砂岩由主要成岩作用造成的孔隙丧失率不同。钙质胶结砂岩由胶结作用造成的孔隙丧失率高达 25.0%,而由压实作用造成的孔隙丧失率较低(平均 5.2%)。钙质胶结砂岩中发育呈嵌晶式或基底式胶结的碳酸盐类胶结物,平均高达 23.5%

(表1),因此,碳酸盐的胶结作用是造成钙质胶结砂岩孔隙丧失的主要成岩作用。经压实作用与胶结作用之后,钙质胶结砂岩的剩余孔隙度很低(平均 3.8%)。高塑性岩屑砂岩由压实作用造成的孔隙丧失率高达 22.4%,而由胶结作用造成的孔隙丧失率较低(平均 5.2%)。高塑性岩屑砂岩中塑性岩屑的含量较高(平均 17.9%)(表1),其在压实作用过程中水化膨胀或假杂基化,使得孔隙迅速减少,深埋后基本不能为后期流体活动提供有效空间,因此压实作用是造成高塑性岩屑砂岩的孔隙丧失的主要成岩作用。经压实作用与胶结作用之后,高塑性岩屑砂岩的剩余孔隙度较低(平均 5.4%);石英砂岩与岩屑石英砂岩由压实作用(平均分别为 14.5% 和 13.2%)和胶结作用(平均分别为 11.8% 和 10.6%)造成的孔隙丧失率相比前两种类型砂岩均属中等,二者共同影响着储层孔隙的丧失。经压实作用与胶结作用之后,石英砂岩与岩屑石英砂岩的剩余孔隙度相对较高(平均分别为 8.6% 和 9.4%)。

3.3 不同岩性砂岩溶蚀作用孔隙增孔率

溶蚀作用产生的次生溶孔在很大程度上对砂岩储层的储集性能起到改善作用。通过溶蚀率的计算可以定量描述溶蚀作用的强度,恢复溶蚀作用的孔隙增加量,前人计算公式^[42-43]如下:

$$\text{溶蚀作用增加的孔隙度} = \text{原始孔隙度} \times \text{溶蚀率} \quad (7)$$

其中, $\text{溶蚀率} = \text{溶蚀孔隙} / \text{原始孔隙度} \quad (8)$

计算结果表明,研究区盒8段储层砂岩以石英砂岩的溶蚀作用孔隙增孔率最高(平均 1.4%),岩屑石英砂岩(平均 0.9%)与高塑性岩屑砂岩(平均 0.7%)的溶蚀作用孔隙增孔率居中,钙质胶结砂岩的溶蚀作用孔隙增孔率最低(平均 0.3%)。各砂岩中溶解组分略有差异:石英砂岩与岩屑石英砂岩中溶解的矿物主要为长石、岩屑中易溶组分及碳酸盐胶结物;高塑性岩屑砂岩主要为岩屑中易溶组分的溶解;而钙质胶结砂岩中溶解的矿物则以碳酸盐胶结物和岩屑中易溶组分为主。

综上所述,各砂岩储层原生孔隙含量急剧下降的主要因素是早成岩阶段的压实作用。经历压实作用之后,钙质胶结砂岩、高塑性岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、石英砂岩的原生孔隙度分别降至 28.8%, 10.6%, 20%, 20.4%(图5)。高塑性岩屑砂岩经过早成岩阶段(距今 270~210 Ma),大部分孔隙丧失已基本成为低孔-低渗储层。根据致密砂岩物性下限(孔隙度一般小于 10%,空气渗透率一般小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)[⁴⁴⁻⁴⁵],部分这类砂岩在晚三叠世末期(距今 210 Ma)已演化为致密储层;钙质胶结砂岩由于早期碳酸盐胶结物的形成抵抗了压实作用的强度,所以压实作用后剩余的原生孔隙度较高。砂岩中方解石胶结物流体包裹体均一

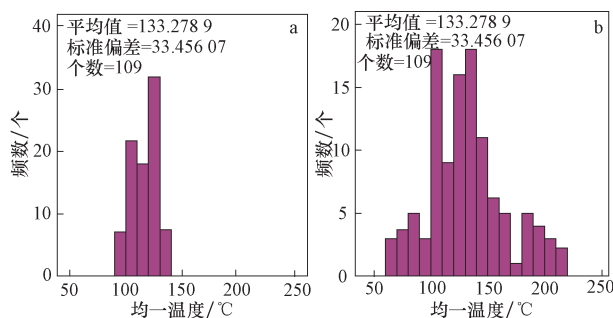


图6 鄂尔多斯盆地东部盒8段砂岩中包裹体均一温度直方图
Fig. 6 Histogram of fluid inclusion homogenization temperature from He 8 sandstone in the eastern Ordos Basin

a. 方解石胶结物中包裹体温度; b. 石英次生加大边中包裹体温度

温度(90 ~ 140 °C)^[32]测定结果显示(图6a),中成岩阶段A期是碳酸盐胶结物主要形成期。该时期钙质胶结砂岩没有发生油气充注,介质条件偏碱性,碳酸盐胶结物频繁沉淀,广泛分布并交代碎屑颗粒及填隙物,使砂岩更加致密,原生孔隙度降至3.8%,经历中成岩A期后(距今160 ~ 120 Ma),钙质砂岩基本成为致密储层,几乎完全丧失储集性能,但可作为成岩圈闭层,有助于保存天然气。石英次生加大是导致石英砂岩和岩屑石英砂岩致密的胶结物,其主要形成在100 ~ 170 °C(图6b)的中成岩阶段^[32],经历石英次生加大胶结后,其原生孔隙分别下降至8.6%和9.4%,储层已致密,储层致密化时间在距今140 ~ 110 Ma。

4 结论

1) 盒8段储层存在三期明显的油气充注。第一期油气充注(T_3 末— J_1 ,距今210 ~ 175 Ma)的充注强度较弱、规模有限,未捕获到与之对应的流体包裹体;第二期油气充注(J_2 — K_1 ,距今165 ~ 100 Ma)发生在晚期碳酸盐胶结之前,伊利石胶结之后,捕获的烃类包裹体成分以 CO_2 和 CH_4 为主,均一温度为80 ~ 110 °C;第三期油气充注(K_2 ,距今90 ~ 70 Ma)发生在晚期碳酸盐胶结之后,该期烃类包裹体成分以 CH_4 为主,均一温度为120 ~ 160 °C。

2) 盒8段各砂岩差异性成岩演化过程对孔隙演化的影响不同,致使其致密化与油气充注过程存在差异。钙质胶结砂岩记录了1期油气充注(距今210 ~ 175 Ma),其致密化时间在距今160 ~ 120 Ma,油气充注主要发生在致密之前,应该是先充注后致密;高塑性岩屑砂岩记录了2期油气充注(距今210 ~ 175 Ma, 165 ~ 100 Ma),其致密化时间较早(距今270 ~ 210 Ma),应该是先致密后充注;石英砂岩与岩屑石英砂岩记录了3期油气充注与多期复杂的成岩作用过程,其孔隙丧失归因于压实作用和胶结作用的共同影响,在

中成岩阶段A期(距今140 ~ 110 Ma)成为低孔低渗—致密储层,该两类砂岩的致密化过程与前两期油气充注的关系是边充注边致密,而与第三期油气充注的关系是先致密后充注。

参考文献

- [1] 李忠,韩登林,寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性[J]. 岩石学报,2006,22(8):2151-2164.
Li Zhong, Han Denglin, Shou Jianfeng. Diagenesis system and their spatio-temporal attributes in sedimentary basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2151-2164.
- [2] Willinson M, Haszeldine R S. Oil charge preserves exceptional porosity in deeply buried, overpressured sandstones; Central North Sea, UK[J]. Journal of the Geological Society, 2011, 168(6): 1285-1295.
- [3] S. Henares, L. Caracciolo, G. Cultrone, et al. The role of diagenesis and depositional facies on pore system evolution in a Triassic outcrop analogue(SE Spain) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 51(2): 136-151.
- [4] 李忠,陈景山,关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J]. 岩石学报,2006,22(8):2113-2122.
Li Zhong, Chen Jingshan, Guan Ping. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2113-2122.
- [5] 潘高峰,刘震,赵舒,等. 砂岩孔隙度演化定量模拟方法—以鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组为例[J]. 石油学报,2011,32(2): 249-256.
Pan Gaofeng, Liu Zhen, Zhao Shu, et al. Quantitative simulation of sandstone porosity evolution: A case from Yanchang Formation of the Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(2): 249-256.
- [6] 曹青. 鄂尔多斯盆地东部上古生界致密储层成岩作用特征及其与天然气成藏耦合关系[D]. 西安: 西北大学, 2013.
Cao Qing. Characteristics of diagenesis and diagenesis-gas accumulation for Upper Paleozoic tight reservoir in Eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2013.
- [7] 叶聪林,郑国东,赵军. 油气储层中水岩作用研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(1): 89-97.
Ye Conglin, Zheng Guodong, Zhao Jun. Research review of water-rock interactions in reservoir rocks[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(1): 89-97.
- [8] 张荣虎,姚根顺,寿建峰,等. 沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 145-151.
Zhang Ronghu, Yao Genshun, Shou Jianfeng, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 145-151.
- [9] 刘贵满,孟元林,魏巍. 松辽盆地北部泉三、四段低渗透储层孔隙度演化史[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3): 266-274.
Liu Guiman, Meng Yuanlin, Wei Wei. Porosity evolving history of low permeability reservoirs in the third and the fourth members of the Quantou formation in the northern Songliao basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(3): 266-274.
- [10] 王艳忠,操应长,蒯克来,等. 碎屑岩储层地质历史时期孔隙度演化恢复方法—以济阳坳陷东营凹陷沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1100-1111.

- Wang Yanzhong, Cao Yingchang, Xi Kelai, et al. A recovery method for porosity evolution of clastic reservoirs with geological time: a case study from the upper submember of Es₄ in the Dongying depression, Jiyang subbasin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34 (6): 1100 - 1111.
- [11] 祝海华, 钟大康, 张亚雄, 等. 川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(1): 65 - 76.
- Zhu Haihua, Zhong Dakang, Zhang Yaxiong, et al. Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(1): 65 - 76.
- [12] Higgs KE, Zwimgmann H, Reyes AG, et al. Diagenesis, porosity evolution and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki Basin, New Zealand [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77 (12): 1003 - 1025.
- [13] Machel H G, Buschkuehle B E. Diagenesis of the Devonian Southesk-Cairn Carbonate Complex, Alberta, Canada; Marine cementation, burial dolomitization, thermochemical sulfate reduction, anhydritization, and squeegee fluid flow [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78(5): 366 - 389.
- [14] Wilkinson M, Haszeldine R S. Oil charge preserves exceptional porosity in deeply buried, overpressured, sandstones: Central North Sea, UK [J]. *Journal of the Geological Society*, 2011, 168 (6): 1285 - 1295.
- [15] 刘建清, 赖兴运, 于炳松, 等. 成岩作用的研究现状及展望[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(1): 65 - 72.
- Liu Jianqing, Lai Xingyun, Yu Bingsong, et al. The current situation and developing tendency of the study on diagenesis [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(1): 65 - 72.
- [16] 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.
- [17] 王瑞飞, 陈明强. 储层沉积-成岩过程中孔隙度参数演化的定量分析-以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J]. *地质学报*, 2007, 81(10): 1432 - 1438.
- Wang Ruifei, Chen Mingqiang. Quantitative analysis of porosity evolution during the reservoir sedimentation-diagenesis-taking the yan25 and zhuang40 areas in the ordos basin as examples [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(10): 1432 - 1438.
- [18] 于雯泉, 李丽, 方涛, 等. 断陷盆地深层低渗透天然气储层孔隙演化定量研究[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(3): 397 - 405.
- Yu Wenquan, Li Li, Fang Tao, et al. Quantitative Research for porosity evolution in low permeability deep gas reservoir of rift subsidence basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(3): 397 - 405.
- [19] 王雅楠, 李达, 齐银, 等. 苏里格气田苏14井区盒8段储层成岩作用与孔隙演化[J]. *断块油气田*, 2011, 18(3): 297 - 300.
- Wang Yanan, Li Da, Qi Yin, et al. Diagenesis and pore evolution of He 8 reservoir in Well Block Su 14 of Sulige Gas Field [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(3): 297 - 300.
- [20] 操应长, 远光辉, 王艳忠, 等. 准噶尔盆地北三台地区清水河组低渗透储层成因机制[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 758 - 771.
- Cao Yingchang, Yuan Guanghui, Wang Yanzhong, et al. Genetic mechanisms of low permeability reservoirs of Qingshuihe formation in Beisantai area, Junggar basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(5): 758 - 771.
- [21] 鲁新川, 张顺存, 蔡冬梅, 等. 准噶尔盆地车拐地区三叠系成岩作用与孔隙演化[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1123 - 1129.
- Lu Xinchuan, Zhang Shuncun, Cai Dongmei, et al. Diagenesis and pore evolution of the triassic reservoirs in Cheguai area, northwestern margin of Junggar basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30 (6): 1123 - 1129.
- [22] 何涛, 王芳, 宋汉华. 苏里格气田南部盒8段储层成岩作用及孔隙演化[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2013, 35 (2): 31 - 35.
- He Tao, Wang Fang, Song Hanhua. Diagenesis and pore evolution of reservoir of 8th member of lower Shihezi formation in the south of Sulige gas-field [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(2): 31 - 35.
- [23] 钟大康, 祝海华, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 61 - 68.
- Zhong Dakang, Zhu Haihua, Sun Haitao, et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstones in Longdong area, ordos basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 61 - 68.
- [24] 罗静兰, 刘新社, 付晓燕, 等. 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响: 以鄂尔多斯盆地上古生界盒8天然气储层为例[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2014, 39 (5): 537 - 545.
- Luo Jinglan, Liu Xinshe, Fu Xiaoyan, et al. Impact of petrologic components and their diagenetic evolution on tight sandstone reservoir quality and gas yield: a case study from He8 gas-bearing reservoir of Upper Paleozoic in northern ordos basin [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39(5): 537 - 545.
- [25] 张兴良, 田景春, 王峰, 等. 致密砂岩储层成岩作用特征与孔隙演化定量评价——以鄂尔多斯盆地高桥地区二叠系下石盒子组盒8段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 212 - 217.
- Zhang Xingliang, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Diagenetic characteristics and quantitative porosity estimation of tight sandstone reservoirs: a case from the 8th Member of Permian Xiashihezi Formation in the Gaoqiao region, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35 (2): 212 - 217.
- [26] 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.
- [27] 杨伟伟, 柳广弟, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透砂岩油藏成藏机理与成藏模式[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 132 - 139.
- Yang Weiwei, Liu Guangdi, Liu Xianyang, et al. The accumulation mechanism and accumulation models of oil in ability reservoir Formation in Longdong Area, Ordos Basin [J]. *Earth Science frontiers*, 2013, 20(2): 132 - 139.
- [28] 罗春艳, 罗静兰, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地中西部长8砂岩的流体包裹体特征与油气成藏期次分析[J]. *高校地质学报*, 2014, 20 (4): 623 - 634.
- Luo Chunyan, Luo Jinglan, Luo Xiaorong, et al. Characteristics of Fluid Inclusions and Its Application in Analysis of Hydrocarbon

- Accumulation Stages from the Chang 8 Sandstone in the Middle West Area of Ordos Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(4): 623–634.
- [29] 倪培, 范宏瑞, 丁俊英. 流体包裹体研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 1(1): 1–5.
- Ni Pei, Fan Hongrui, Ding Junying. Progress in fluid inclusions [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 1(1): 1–5.
- [30] 金晓辉, 闫相宾, 孙冬胜, 等. 长岭断陷深层储层包裹体特征与油气成藏过程 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 609–613.
- Jin Xiaohui, Yan Xiangbin, Sun Dongsheng, et al. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation process of deep reservoirs in Changling rift, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 609–613.
- [31] 时保宏, 张艳, 张雷, 等. 运用流体包裹体资料探讨鄂尔多斯盆地姬塬地区长9油藏史 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 17–22.
- Shi Baohong, Zhang Yan, Zhang Lei, et al. Dating of hydrocarbon accumulation by fluid inclusion characteristics in the Chang9 of Yanchang Formation in Jiuyan area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 17–22.
- [32] 李杪, 罗静兰, 赵会涛, 等. 不同岩性的成岩演化对致密砂岩储层储集性能的影响—以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段天然气为例 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 97–106.
- Li Miao, Luo Jinglan, Zhao Huitao, et al. Impact of the diagenetic evolution of different lithology on tight sandstone reservoir performance: A case study from He 8 natural gas reservoir of the upper paleozoic in Eastern Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 97–106.
- [33] 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.
- [34] Allen P A, Allen J R. Basin Analysis Principles and Application [M]. Oxford London: Blackwell Scientific Publication, 1990: 451.
- [35] Sachsenhofer R F, Privalov V A, Zhykalyak M V, et al. The Donets Basin (Ukraine/Russia): coalification and thermal history [J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 49(1): 33–55.
- [36] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 172.
- Ren Zhanli. Tectonic thermal evolution research of sedimentary basin in north China [M]. Beijing: Petroleum industry press, 1999: 172.
- [37] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨 [J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674–684.
- Ren Zhanli, Zhang sheng, Gao Shengli, et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674–684.
- [38] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊): 23–32.
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal evolution history and the accumulation of metallogenic significance in Ordos basin [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(增刊): 23–32.
- [39] 王乃军, 赵靖舟, 罗静兰, 等. 利用流体包裹体法确定成藏年代—以鄂尔多斯盆地地下寺湾地区三叠系延长组为例 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 22–25.
- Wang Naijun, Zhao Jingzhou, Luo Jinglan, et al. Determination of the age of accumulation by fluid inclusion with an example from triassic Yanchang formation in the Xiasiwang area, Ordos basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(2): 22–25.
- [40] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 多期次油气成藏流体包裹体间接定年—以鄂尔多斯盆地东北部二叠系油藏为例 [J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1003–1011.
- Chen Gang, Ding Chao, Xu Liming, et al. Indirect dating of multistage hydrocarbon accumulations by fluid inclusion data: a case study of the Permian hydrocarbon accumulation in the northeast Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1003–1011.
- [41] 石油地质勘探专业标准化委员会. SY/T 5477–2003, 中华人民共和国石油天然气行业标准—碎屑岩成岩阶段划分 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Petroleum geological exploration professional committee for standardization. SY/T 5477–2003, The oil and gas industry standard of the People's Republic of China—clastic diagenetic stage division [S]. Beijing: Standards press of china, 2003.
- [42] Houseknecht. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(6): 501–510.
- [43] Ehrenberg S N. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones; discussion; compaction and porosity evolution of pliocene sandstones, Ventura Basin, California; Discussion [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1989, 73(10): 1274–127.
- [44] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129–144.
- Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129–144.
- [45] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13–26.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13–26.

(编辑 张亚雄)