

文章编号:1673-5005(2024)04-0043-14 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2024.04.005

济阳坳陷车西洼陷二叠系上石盒子组致密砂岩 储层成岩-成藏系统演化

王艳忠^{1,2}, 宋磊^{1,2}, 孟涛³, 操应长^{1,2}, 孙沛沛^{1,2}, 王淑萍⁴, 弭连山⁵

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)), 山东青岛 266580; 3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257000; 4. 中国石油大学(华东)石油工业训练中心, 山东青岛 266580; 5. 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂, 山东东营 257000)

摘要:致密砂岩储层成岩-成藏系统演化决定储层致密化过程和优质储层成因与分布。以车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层为例,通过薄片观察、包裹体分析、激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪分析等技术,结合埋藏史和构造演化史,对致密砂岩储层的成岩-成藏系统演化进行系统研究。结果表明:车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层硅质胶结物主要为来源于石英颗粒压溶作用的第一期石英次生加大边,长石溶蚀供源的第二期石英次生加大边、充填石英颗粒破裂缝型自生石英以及充填粒间孔隙型自生石英;高岭石分别为原始沉积的充填孔隙细晶高岭石杂基,大气淡水淋滤长石形成的充填孔隙粗晶高岭石,深埋藏封闭环境长石溶蚀原位沉淀形成的颗粒形态高岭石;车西洼陷上石盒子组致密砂岩的成岩-成藏系统演化过程为原始沉积的含细晶高岭石杂基的长石质石英砂岩→充填孔隙粗晶高岭石→黄色荧光油充注→硅质胶结物→天然气→充填孔隙粗晶高岭石→硅质胶结物→蓝色荧光油充注→天然气→颗粒形态高岭石、伊利石、绿泥石。

关键词:成岩-成藏系统演化; 硅质胶结; 高岭石; 致密砂岩; 上石盒子组; 车西洼陷

中图分类号: TE 122 **文献标志码:** A

引用格式: 王艳忠, 宋磊, 孟涛, 等. 济阳坳陷车西洼陷二叠系上石盒子组致密砂岩储层成岩-成藏系统演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 43-56.

WANG Yanzhong, SONG Lei, MENG Tao, et al. Evolution of diagenesis-hydrocarbon accumulation system of tight sandstone reservoirs of Permian Upper Shihezi Formation in Chexi Subsag, Jiyang Sub-basin, China[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(4): 43-56.

Evolution of diagenesis-hydrocarbon accumulation system of tight sandstone reservoirs of Permian Upper Shihezi Formation in Chexi Subsag, Jiyang Sub-basin, China

WANG Yanzhong^{1,2}, SONG Lei^{1,2}, MENG Tao³, CAO Yingchang^{1,2},
SUN Peipei^{1,2}, WANG Shuping⁴, MI Lianshan⁵

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. State Key Laboratory of Deep Oil & Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China;
4. Oil Industry Training Center, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
5. Shengli Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: The evolution of the diagenetic-accumulation system in tight sandstone reservoirs determines the densification process and the genesis and distribution of high-quality reservoirs. This study examines the tight sandstone reservoir of Permian Upper

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272165)

第一作者及通信作者: 王艳忠(1980-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为沉积学、成岩作用与储层评价。E-mail: wyzh@upc.edu.cn。

Shihezi Formation (P_2sh) in the Chexi Sag, integrating burial history, tectonic evolution history, and multi-proxy analyses such as thin sections, fluid inclusion analysis, and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry to systematically study the evolution of the diagenesis-accumulation system. Results indicate that siliceous cement is derived from the pressure dissolution of quartz particles, which contributes the first phase of quartz overgrowth and from feldspar dissolution, which represents the second phase of quartz overgrowth and fills microfractures in quartz particles or intergranular pores. The kaolinite includes a fine-grained kaolinite matrix from the sedimentary period, coarse-grained kaolinite from the leaching of atmospheric freshwater through feldspars, and granular kaolinite from feldspar dissolution in a deep-burial closed system. The evolution process of the diagenesis-hydrocarbon accumulation system of the tight sandstone in the Upper Shihezi Formation, Chexi Sub-sag, follows this sequence: original sedimentary feldspar quartz sandstone with fine-grained kaolinite matrix \rightarrow coarse-grained kaolinite \rightarrow yellow fluorescence oil \rightarrow siliceous cement \rightarrow natural gas \rightarrow coarse-grained kaolinite precipitation \rightarrow siliceous cement \rightarrow blue fluorescence oil \rightarrow natural gas \rightarrow authigenic kaolinite precipitation in granular form, illite and chlorite.

Keywords: evolution of diagenesis-hydrocarbon accumulation system; siliceous cement; Kaolinite; tight sandstone; Upper Shihezi; Chexi Sub-sag

致密砂岩是一种特殊的油气储层,常泛指空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度小于 10% 的砂岩^[1]。中国的致密砂岩油气资源丰富,主要分布于鄂尔多斯、四川、塔里木、渤海湾等多个盆地,是现阶段油气增储上产的“重点领域”与“亮点类型”^[2]。储层研究是致密砂岩油气勘探开发的灵魂^[3],成岩演化过程研究是致密砂岩储层致密化过程研究的基础。致密砂岩油气储层致密化过程与油气成藏过程的时空匹配关系决定优质有效储层的分布规律和勘探潜力,是致密砂岩油气勘探开发的关键^[3]。目前国内学者多停留在储层静态致密化成因的层面,通过定量统计沉积作用、成岩作用和构造作用等因素与现今储层物性的关系来说明储层的致密化机制^[4];部分学者从成岩动态演化的角度出发,以成岩演化序列为约束,对致密砂岩储层致密化史-油气成藏史的匹配关系进行过初步探讨^[5]。济阳坳陷上古生界致密砂岩油气已成为胜利油田重要的油气勘探领域,车西洼陷上古生界上石盒子组致密砂岩油气是济阳坳陷的风险勘探区、勘探程度低,但是石炭系山西组和太原组 2 套煤系烃源岩生烃潜力巨大^[6]。近年来,车西洼陷上石盒子组致密砂岩油气勘探取得突破,车古 27 井日产气达到 $7.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,但是接下来多口探井勘探失利。车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层经历复杂的成岩作用过程和多期次油气充注,储层致密化过程和油气成藏匹配关系认识不清是导致油气勘探失利的重要原因之一,但是车西洼陷上古生界致密砂岩油气勘探研究主要集中在烃源岩评价^[7-8]、岩相古地理^[9]、油气成藏期次^[10]、储层特征及控制因素^[10-11]等方面的研究。因此笔者主要目的是恢复车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层成岩-成藏系统一体化演化过程,为致密砂岩储层致

密化史-油气成藏匹配关系提供新的认识。

1 地质概况

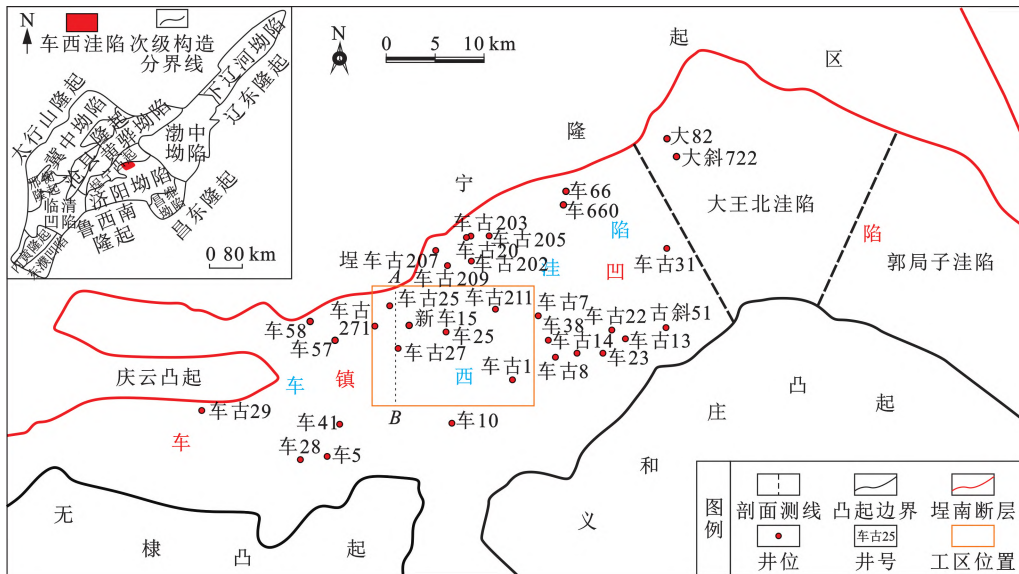
车镇凹陷是渤海湾盆地济阳坳陷北部的一个次级凹陷,平面上自西向东划分为车西洼陷、大王北洼陷和郭局子洼陷(图 1(a))。车西洼陷位于车镇凹陷西部,北部隔埕南断层与埕宁隆起、庆云凸起相接,南以斜坡形式过渡至义和庄和无棣凸起(图 1(a));剖面上自北向南划分为北部陡坡带、中部洼陷带和南部斜坡带(图 1(b))。车西洼陷上古生界地层发育不全,缺失泥盆系和下石炭统,自下而上发育中石炭统、上石炭统和二叠系;中、上石炭统主要发育本溪组、太原组和山西组,二叠系主要发育下石盒子组、上石盒子组,缺失石千峰组。上石盒子组现今厚度在 200~300 m,为一套河流相沉积地层^[9],储层岩石类型主要为石英砂岩,含少量岩屑质石英砂岩,几乎不发育长石,压实压溶作用较强;胶结物主要为硅质和高岭石,平均体积分数分别为 7.3% 和 4.2%;储集空间主要为高岭石晶间孔隙,孔隙度在 1.74%~8.6%,渗透率为 $(0.002 \sim 1.24) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型致密砂岩储层。

2 样品与测试方法

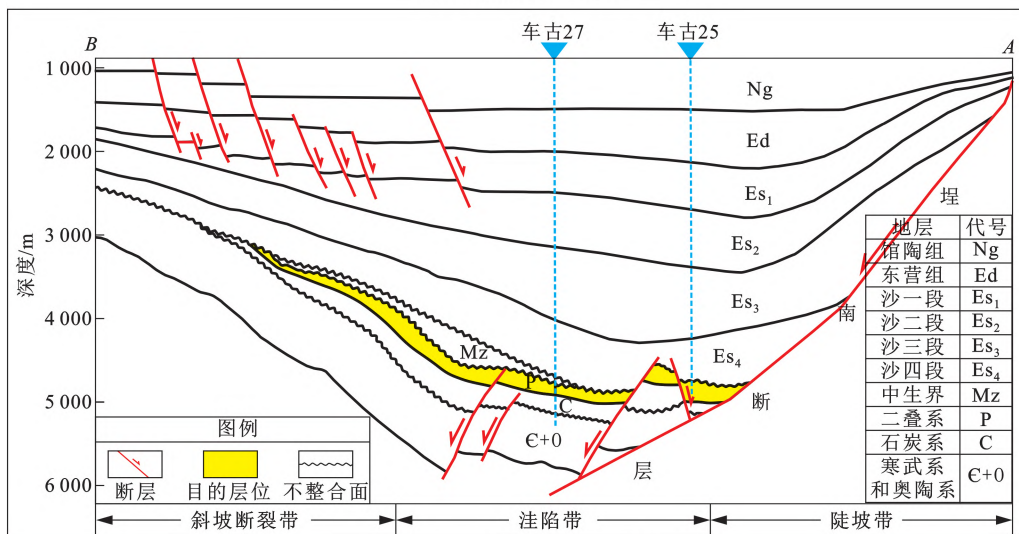
选取车西洼陷上石盒子组深度 5 050.4~5 054.55 m 范围内的 19 块岩心样品。在中国石油大学(华东)深层油气重点实验室,使用蔡司数字透射显微镜观察 18 个铸体薄片;在配备 CL8200-MKSCL 仪器的蔡司光学显微镜下对薄片样品进行阴极发光分析;利用蔡司多功能显微镜对流体包裹体的岩相学特征进行显微观察分析。利用 LABHR-VIS LABRAMHR800 型显微激光拉曼光谱仪对气态烃包裹

体组合进行拉曼分析;依据循环测温流程^[12],使用配备 50 倍物镜、10 倍目镜和校准的 Linkam THMSG600 型冷热台进行包裹体的均一温度测定,测定误差在±1 ℃。在中国科学院地球化学研究所

矿床地球化学国家重点实验室,通过激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪分析,测定长石、硅质胶结物以及高岭石中的微量和稀土元素质量分数,稀土元素分析均采用北美页岩进行标准化^[13]。



(a)车镇凹陷构造单元



(b)车西洼陷南北向构造剖面

图 1 车镇凹陷构造单元划分与研究区位置

Fig.1 Division of tectonic units of Chezhen Subsag and location of study area

3 成岩作用类型及特征

3.1 胶结作用

3.1.1 黏土矿物胶结作用

黏土矿物胶结物主要为高岭石,高岭石集合体发育有 2 种形态,一种是颗粒形态的高岭石,另一种是充填孔隙的高岭石。

颗粒形态高岭石指高岭石集合体具有一定的颗粒外形,与长石颗粒特征相似,高岭石集合体外部轮

廓直径与相邻碎屑颗粒直径相近(图 2(a))。颗粒形态高岭石晶体呈假六方片状,自形程度高,晶粒粒径在 5~12 μm,集合体呈蠕虫状、书页状(图 2(b)),荧光照片显示其不含油(图 2(c)),阴极发光下呈靛蓝色(图 2(d))。指示氧化还原古环境的敏感元素指标 $w(V)/(w(V)+w(Ni))$ 、 $w(Ce_{anom})$ 显示^[14-15],颗粒形态高岭石 $w(V)/(w(V)+w(Ni))$ 为 0.77~1.0, $w(Ce_{anom})$ 为 0.1~5(图 3, $w(Ce_{anom}) = \lg(w(Ce_N)/(w(Pr_N)^2 \cdot w(Nd_N)^{-1}))$, N 表示稀土元

素使用北美页岩进行标准化^[13])。水体盐度的敏感元素指标 $w(\text{Ga})$ 、 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ ^[16] 显示, 颗粒形态高岭石的 $w(\text{Ga})$ 为 $(6.09\sim 48.4)\times 10^{-6}$, 83.3% 样品小于 10×10^{-6} ; $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 大于 1 (图 3)。颗粒形

态高岭石轻稀土元素富集, 重稀土元素贫乏, 稀土元素配分模式为“右倾”特征, 具有明显的 Gd 正异常和 Tb 负异常 (图 4); 微量元素具有明显的 Fe 和 Sr 富集、Co 和 Nb 贫乏的特征 (图 5)。

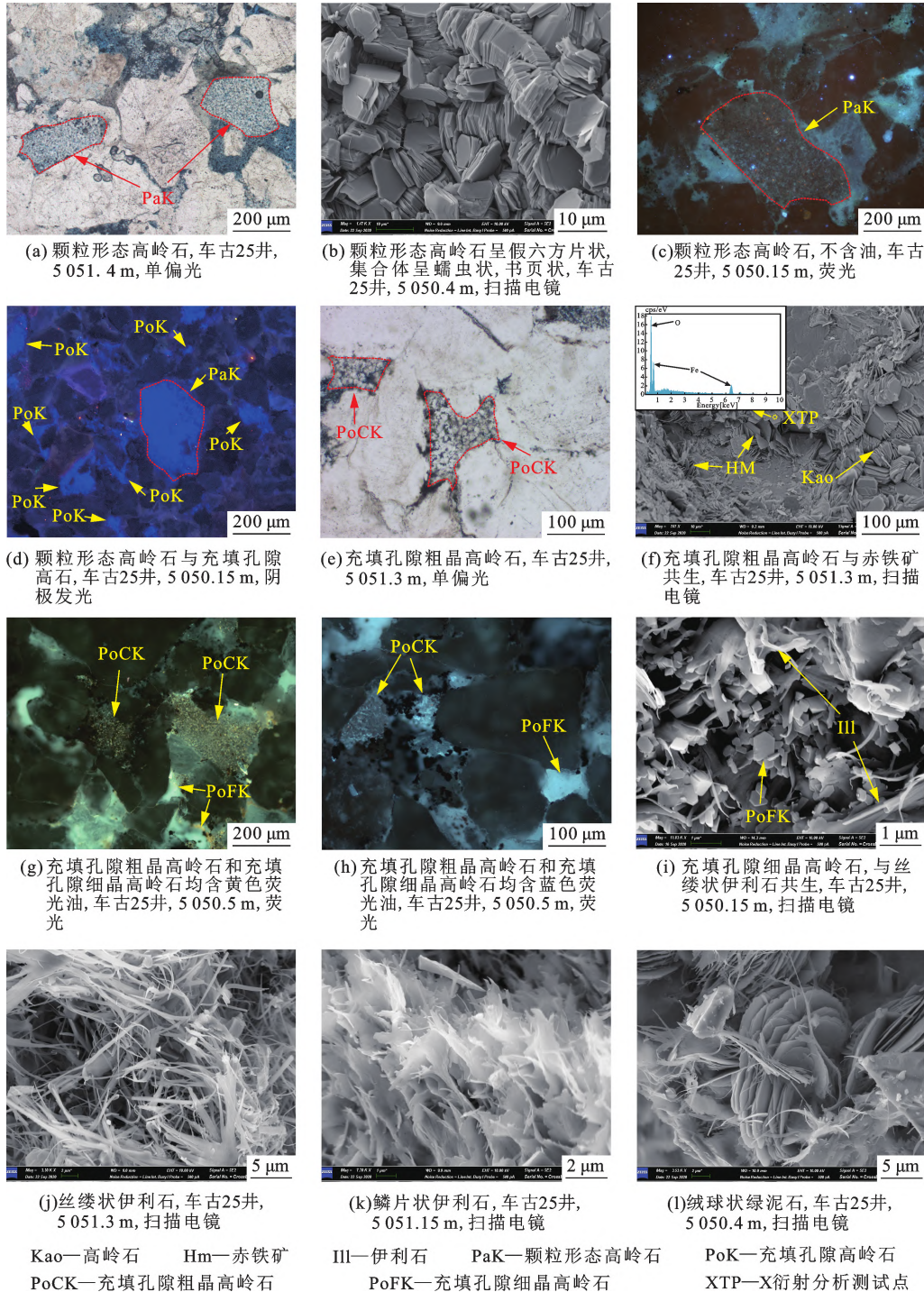


图 2 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层黏土矿物胶结作用特征

Fig. 2 Clay mineral cement in tight sandstone reservoirs of P₂sh in Chexi Subsaq

充填孔隙高岭石指沉淀于粒间孔隙内的高岭石, 不具有颗粒外形, 高岭石集合体轮廓受原生粒间孔隙形态限制 (图 2(e))。充填孔隙高岭石根据晶

粒直径又可分为细晶高岭石和粗晶高岭石。充填孔隙粗晶高岭石晶粒直径在 5~10 μm, 集合体呈蠕虫状, 在扫描电镜下可观察到其与片状赤铁矿相伴生

(图 2(f)), 阴极发光下为靛蓝色(图 2(d)), 荧光照片显示其部分含黄色荧光油(图 2(g)), 部分含蓝色荧光油(图 2(h))。充填孔隙粗晶高岭石的 $w(\text{Ce}_{\text{anom}}) < -0.1$, 均值为 -0.66 , $w(\text{V})/(w(\text{V}) + w(\text{Ni})) < 0.77$, 均值为 0.71 , $w(\text{Ga})$ 大于 8×10^{-6} ; $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 小于 1(图 3)。充填孔隙细晶高岭石晶粒直径在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$, 自形程度较差且集合体没有规则的形态, 分布杂乱, 与伊利石混杂共生

(图 2(i)), 阴极发光下为靛蓝色(图 2(d)), 被黄色和蓝色荧光油浸染(图 2(g)、(h))。充填孔隙细晶高岭石 66% 的样品 $w(\text{Ce}_{\text{anom}}) < -0.1$, $w(\text{V})/(w(\text{V}) + w(\text{Ni})) < 0.77$, $w(\text{Ga})$ 大于 17×10^{-6} ; 83% 的样品 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) < 1$ (图 3)。此外, 还发育丝缕状和鳞片状伊利石(图 2(j)、(k)), 并可见绒球状绿泥石(图 2(l))。

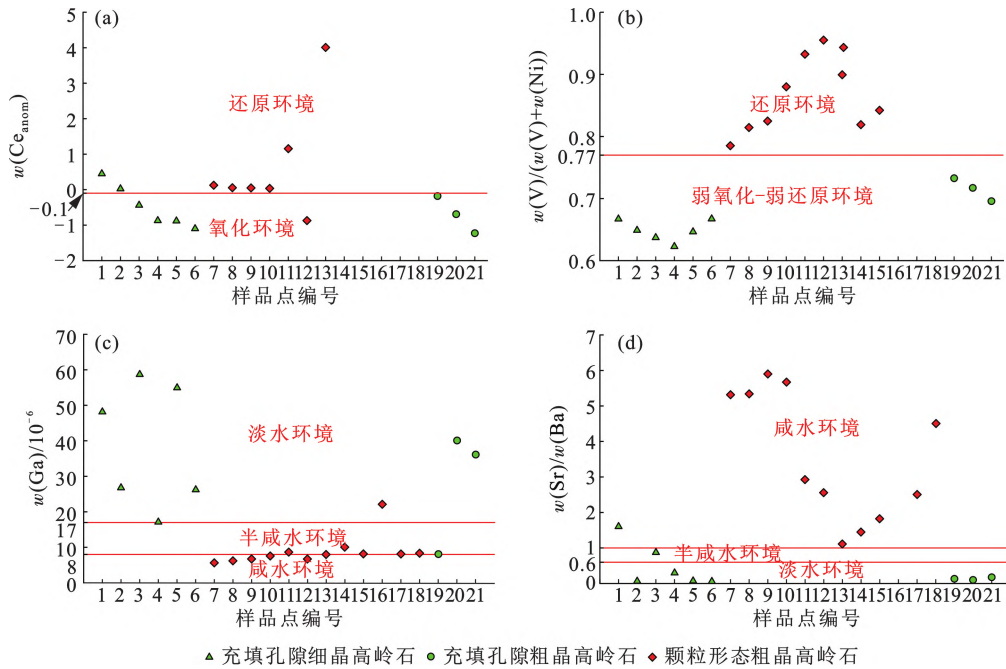


图 3 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层高岭石氧化还原和盐度指标指示图

Fig. 3 Indication map showing redox indicators and salinity index of kaolinites in tight sandstone reservoirs of P₂sh in Chexi Subsag

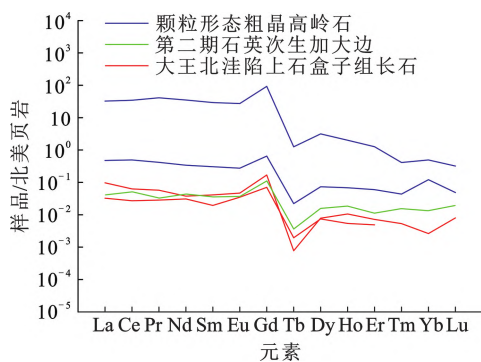


图 4 颗粒形态高岭石、第二期石英次生加大边与长石稀土元素配分模式

Fig. 4 Rare earth element patterns of kaolinites with grain morphology, the second-stage siliceous cement and feldspar grains

3.1.2 硅质胶结作用

硅质胶结物具有 3 种不同产状: 石英次生加大边、充填石英颗粒破裂缝型自生石英以及充填粒间

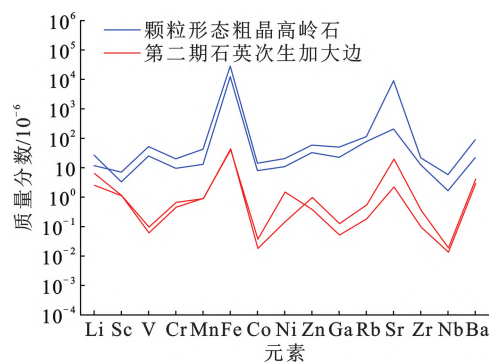


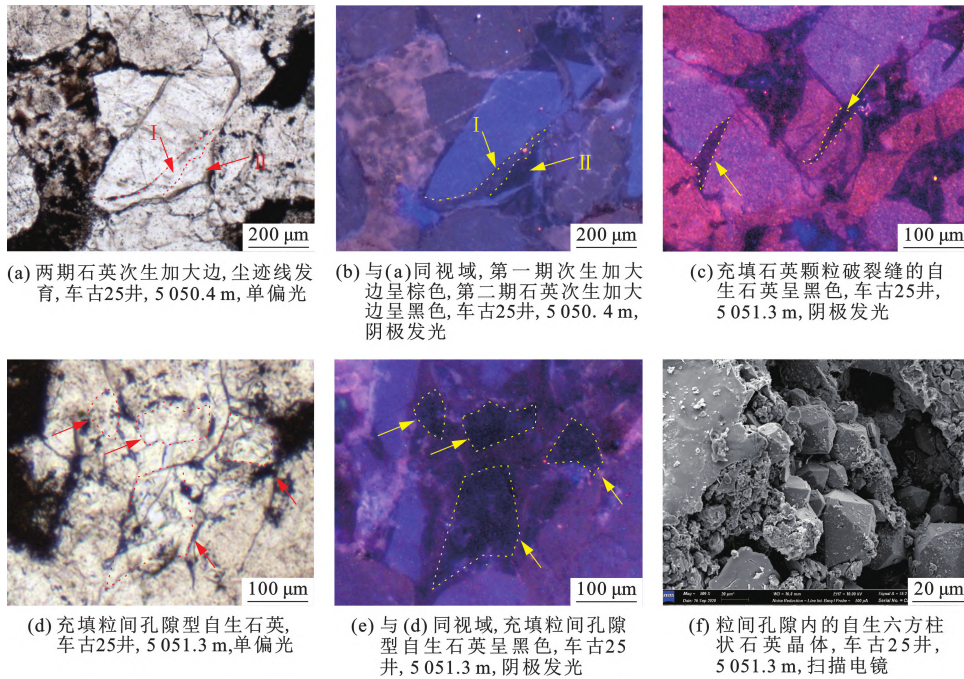
图 5 颗粒形态高岭石与第二期石英次生加大边微量元素特征

Fig. 5 Characteristics of trace elements in kaolinites with grain morphology and second phase of quartz overgrowth

孔隙型自生石英。石英次生加大边最为发育, 在偏光显微镜下可见明显的两期尘迹线(图 6(a)), 发育两期石英次生加大边。第一期石英次生加大边以

石英颗粒为基底环绕颗粒边缘向外生长,不超过 10 μm , 阴极发光下呈棕色(图 6(b)), B、K、Li、Sn、Rb、Sr 与 Al 的分布与石英颗粒相近,质量分数相差不超过一个数量级, $w(\text{Al})$ 均小于 100×10^{-6} (图 7)。第二期石英次生加大边在第一期石英次生加大边的基础上向外生长,发育宽度最大可达 25 μm , 阴极发光下呈黑色(图 6(a)、(b)), 第二期石英次生加大边微量元素特征表现为明显的 Fe、Sr 元素富集, Co 和 Nb 元素贫乏(图 5), B、K、Li、Sn、Rb、Sr 与 Al 的分

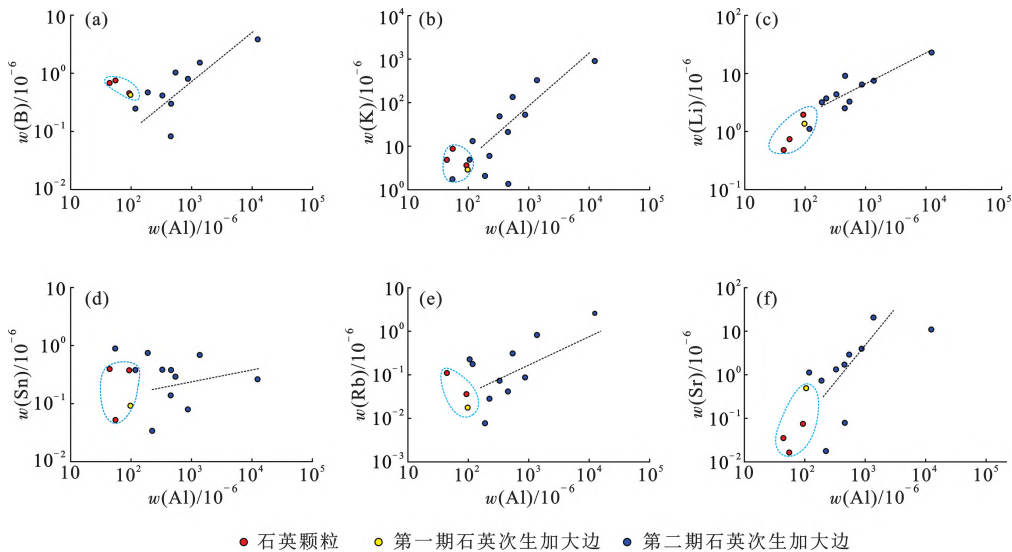
布均与石英颗粒相差很大,几乎不在同一个数量级范围内(图 7), 轻稀土元素富集, 配分模式为“右倾”特征, 具有明显的 Gd 正异常和 Tb 负异常(图 4)。充填石英颗粒破裂缝型自生石英, 发育较少, 粒径不超过 10 μm , 阴极发光下呈黑色(图 6(c))。充填粒间孔隙型自生石英发育较少, 表面纯净(图 6(d)), 阴极发光下呈黑色(图 6(e)), 扫描电镜下可见自生石英典型的六方柱锥状晶体(图 6(f))。



(a) 二期石英次生加大边, 迹迹线发育, 车古25井, 5 050.4 m, 单偏光
 (b) 与(a)同视域, 第一期次生加大边呈棕色, 第二期石英次生加大边呈黑色, 车古25井, 5 050.4 m, 阴极发光
 (c) 充填石英颗粒破裂缝的自生石英呈黑色, 车古25井, 5 051.3 m, 阴极发光
 (d) 充填粒间孔隙型自生石英, 车古25井, 5 051.3 m, 单偏光
 (e) 与(d)同视域, 充填粒间孔隙型自生石英呈黑色, 车古25井, 5 051.3 m, 阴极发光
 (f) 粒间孔隙内的自生六方柱状石英晶体, 车古25井, 5 051.3 m, 扫描电镜

图 6 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层硅质胶结作用

Fig. 6 Siliceous cement in tight sandstone reservoirs of P₂sh in Chexi Subsg



● 石英颗粒 ● 第一期石英次生加大边 ● 第二期石英次生加大边

图 7 石英颗粒和石英次生加大边微量元素质量分数关系

Fig. 7 Relationship of trace element mass fraction between quartz grains and quartz overgrowth edge

3.2 溶解作用

车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层中仅可观察到部分岩屑溶解(图 8(a))。但是邻区大王北洼陷上石盒子组埋藏较浅的砂岩储层中长石溶蚀作用普遍发育(图 8(b)),可见长石溶蚀形成的高岭石(图

8(c));长石颗粒具有轻稀土元素富集的特征,配分模式为“右倾”特征,明显的 Gd 正异常和 Tb 负异常,与车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层中的颗粒形态高岭石和第二期石英次生加大边的稀土配分模式相似(图 4)。

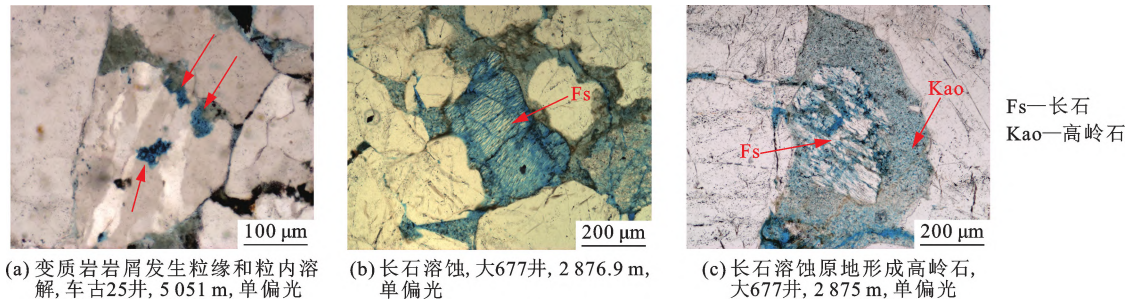


图 8 车西地区和大王北洼陷上石盒子组砂岩溶解作用特征

Fig. 8 Characteristics of dissolution in P₂sh sandstones in Chexi Subsag and Dawang North Subsag

4 流体包裹体岩相学和均一温度

4.1 流体包裹体岩相学

车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层发育单一液相油包裹体、单一气相甲烷包裹体、气液两相盐水包裹体,发育 3 种流体包裹体组合类型:硅质胶结物中的气液两相盐水包裹体组合,石英颗粒破裂愈合缝中的单一液相油包裹体与气液两相盐水包裹体组合、单一气相甲烷包裹体与气液两相盐水包裹体组合。单一液相油包裹体分为两类,第一类为荧光下呈黄色的单一液相油包裹体,单偏光下为棕褐色,直径 3~15 μm,形态从近圆形到不规则多边形均有发育(图 9(a)、(b));第二类为荧光下呈蓝色的单一液相油包裹体,单偏光下多为透明状,部分呈棕褐色,直径在 3~7 μm,形态为近圆形到椭圆形(图 9(c)、(d))。单一气相甲烷包裹体主要发育于石英颗粒破裂愈合缝中,呈条带状或群落状分布,形态一般为椭圆状,长轴长度在 5~9 μm,透射光下为灰黑色,透明度低(图 9(e)、(f)),在 2912 cm⁻¹ 处有明显的甲烷拉曼特征峰^[17](图 9(j))。与烃类包裹体共生的气液两相盐水包裹体,形态一般呈圆到椭圆状,无荧光颜色(图 9(g)~(i)),呈点状、串珠状或群落状分布,直径在 3~8 μm,并在其中可检测到水^[18](图 9(k))。

4.2 流体包裹体均一温度

自生矿物中的气液两相盐水包裹体均一温度能够提供自生矿物结晶时的地层温度,与单一液相油包裹体和单一气相甲烷包裹体共生的气液两相盐水包裹体的均一温度,能够反应地质历史时期石油和

天然气充注时的地层温度^[19]。测温结果显示:第一期石英次生加大边中的气液两相盐水包裹体均一温度分布在 120~130 °C;第二期石英次生加大边和充填粒间孔隙型自生石英中的气液两相盐水包裹体均一温度分布在 110~120 °C(图 10)。与单一液相黄色荧光油和蓝色荧光油包裹体同期的气液两相盐水包裹体均一温度主峰分别在 110~115 °C 和 125~130 °C,与单一气相甲烷包裹体同期的气液两相盐水包裹体均一温度主峰分布在 130~135 °C 和 160~165 °C(图 11)。

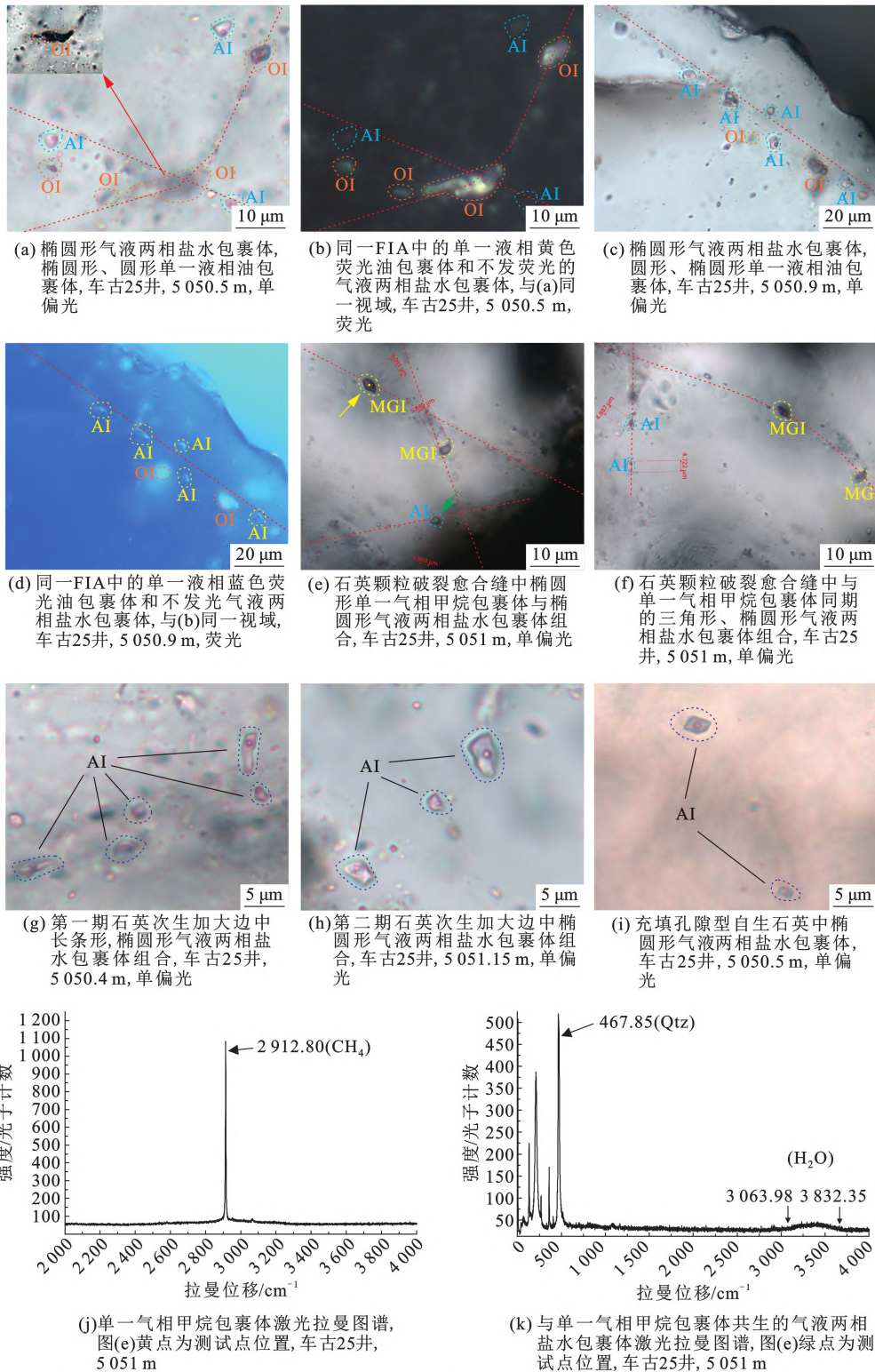
5 成岩-成藏系统演化

建立车西洼陷上石盒子组致密砂岩的成岩-成藏系统演化序列(图 12)和车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层成岩-成藏演化剖面(图 13)。

晚二叠世,车西洼陷上石盒子组沉积一套河流相地层,尽管现今致密砂岩中几乎未见长石颗粒,但是推断原始沉积的砂岩应该是含长石的,主要有以下证据:①邻区大王北洼陷上石盒子组浅埋藏砂岩富含长石颗粒,平均质量分数为 9.1%,晚二叠世济阳拗陷具有相似的沉积构造背景和物源体系^[20],所以车西洼陷上石盒子组原始沉积物应富含长石;②车西洼陷上石盒子组砂岩普遍发育颗粒形态高岭石,其稀土配分模式与邻区大王北洼陷上石盒子组浅层砂岩中长石颗粒相似,未见颗粒形态高岭石的 Eu 元素有异常(图 4),可排除颗粒形态高岭石的深部热液流体来源;大王北洼陷和研究区上石盒子组很少发现火山碎屑物质,可排除高岭石由火山物质碎屑转化的可能;因此认为颗粒形态高岭石很可能

为长石颗粒溶蚀产物原地沉淀;③利用颗粒形态高岭石和充填孔隙粗晶高岭石平均体积分数(平均体

积分数为5.06%),根据长石溶蚀形成高岭石、硅质胶结物的转化方程式^[21],计算原始沉积物中长石平



AI—盐水包裹体 OI—油包裹体 MGI—单一气相甲烷包裹体 红色虚线—石英颗粒破裂愈合缝发育方向

图9 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层中的包裹体组合

Fig. 9 Inclusion assemblages in tight sandstone reservoirs in P₂sh in Chexi Subag

均体积分数约为 10.9%。充填孔隙细晶高岭石自形程度差、孔隙中分布杂乱, $w(V)/(w(V) + w(Ni))$ 、 $w(Ce_{anom})$ 以及 $w(Ga)$ 、 $w(Sr)/w(Ba)$ 表明其形成于弱氧化—弱还原的淡水—半咸水半开放环境(图 3), 因此认为充填孔隙细晶高岭石为原始沉积的杂基。

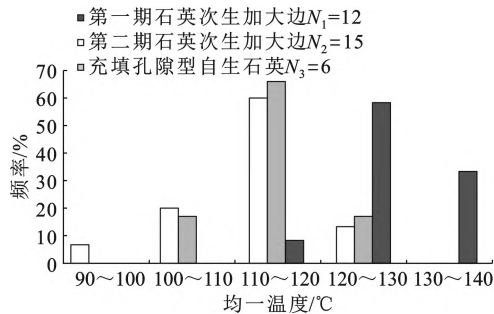


图 10 硅质胶结物中气液两相盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig. 10 Histogram showing homogenization temperature distribution of gas-liquid two-phase brine inclusions in siliceous cement

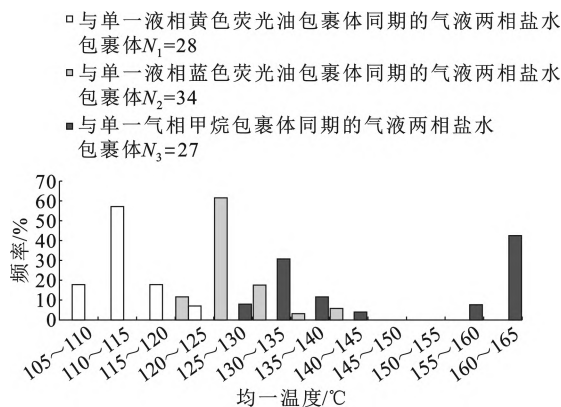


图 11 石英颗粒破裂愈合缝中与单一液相油包裹体、单一气相甲烷包裹体同期的气液两相盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig. 11 Histogram showing homogenization temperature distribution of gas-liquid two-phase brine inclusions coeval with single liquid-phase oil inclusions and single gas-phase methane inclusions in healed fractures of quartz grains

早、中三叠世, 地层持续沉降, 下伏石炭—二叠系太原组和山西组 2 套煤系烃源岩^[22], 埋深不超过 2500 m, R_0 约在 0.5 (图 12), 进入初始生烃阶段, 因油源断层不发育(图 13(a)), 生成的油气可能未充注到上石盒子组储层, 现今也未发现与中三叠世油气相关的烃类包裹体。

晚三叠世, 受印支运动挤压影响, 形成①号、②号两个逆冲断层, 中三叠统及部分二叠系顶部地层

因构造抬升受到剥蚀, 上石盒子组地层抬升至浅地表环境(图 13(b)), 长石受到大气淡水淋滤溶蚀形成第一期充填孔隙粗晶高岭石, 其形成于弱氧化—弱还原的淡水开放环境(图 3), 充填孔隙粗晶高岭石有的含黄色荧光油, 说明其部分形成于黄色荧光油充注之前的浅埋藏环境; 此时烃源岩因受构造抬升生烃停滞。

早侏罗世至早白垩世末期, 受燕山运动影响, 盆地发生负反转, ①号、②号断层转变为正断层, 地层持续沉降(图 13(c))。距今 142~126 Ma, 石英颗粒受压溶作用形成第一期石英次生加大边, 第一期石英次生加大边的化学成分与石英颗粒类似(图 7), 说明其来源于石英颗粒压溶产物^[23]; 早期生成的充填孔隙粗晶高岭石发生少量伊利石化, 形成丝缕状伊利石; 晚侏罗世下伏石炭—二叠系煤系烃源岩埋深在 2800~3200 m, $R_0 > 0.7$, 二次生烃; 距今 148~142 Ma, 上石盒子组发生一期黄色荧光油充注; 早白垩世末期烃源岩持续埋深至 3100 m, $R_0 > 1.3$, 进入初始生气阶段, 距今 112~98 Ma, 油气沿着①号、②号断层向上运移, 上石盒子组发生一期甲烷天然气充注。

晚白垩世末期, 受喜山运动的挤压抬升, 上石盒子组上覆地层接受大范围剥蚀, 石炭—二叠系地层南北两端遭受大气淡水顺层淋滤, 形成淋滤带、过渡带和沉淀带(图 13(d))。长石颗粒再次受大气淡水淋滤溶蚀形成充填孔隙粗晶高岭石, 其形成于弱氧化—弱还原的淡水开放环境(图 3); 充填孔隙高岭石晶间孔含蓝色荧光油(图 2(h)), 说明其部分形成于蓝色荧光油充注之前的浅埋藏环境, 但由于油气充注的非均质性, 与晚三叠世形成的充填孔隙高岭石不能简单以充注不同荧光颜色的石油来加以区分, 还需结合 H-O 同位素或微量元素分析等测试手段进一步研究。由于构造抬升, 早侏罗世至早白垩世末期形成的油气遭受大气淡水淋滤被破坏。

古近纪到第四纪, 三叠纪形成的①号、②号断层停止活动, 受喜山运动影响, 埕南断层形成并开始活动, 地层快速埋深(图 13(e))。封闭体系下有机酸大量生成, 溶蚀长石原位沉淀形成颗粒形态高岭石、第二期硅质胶结物。颗粒形态高岭石形成于还原咸水环境(图 3), 第二期石英次生加大边和颗粒形态高岭石微量元素特征相似、稀土配分模式与大王北洼陷上石盒子组长石相似(图 4、5), 第二期石英次生加大边富含 Al 元素(图 7), 上述证据表明第二期石英加大边和颗粒形态高岭石均为深层封闭环境中长石溶蚀近原地沉淀的产物。第二期石英次生加大

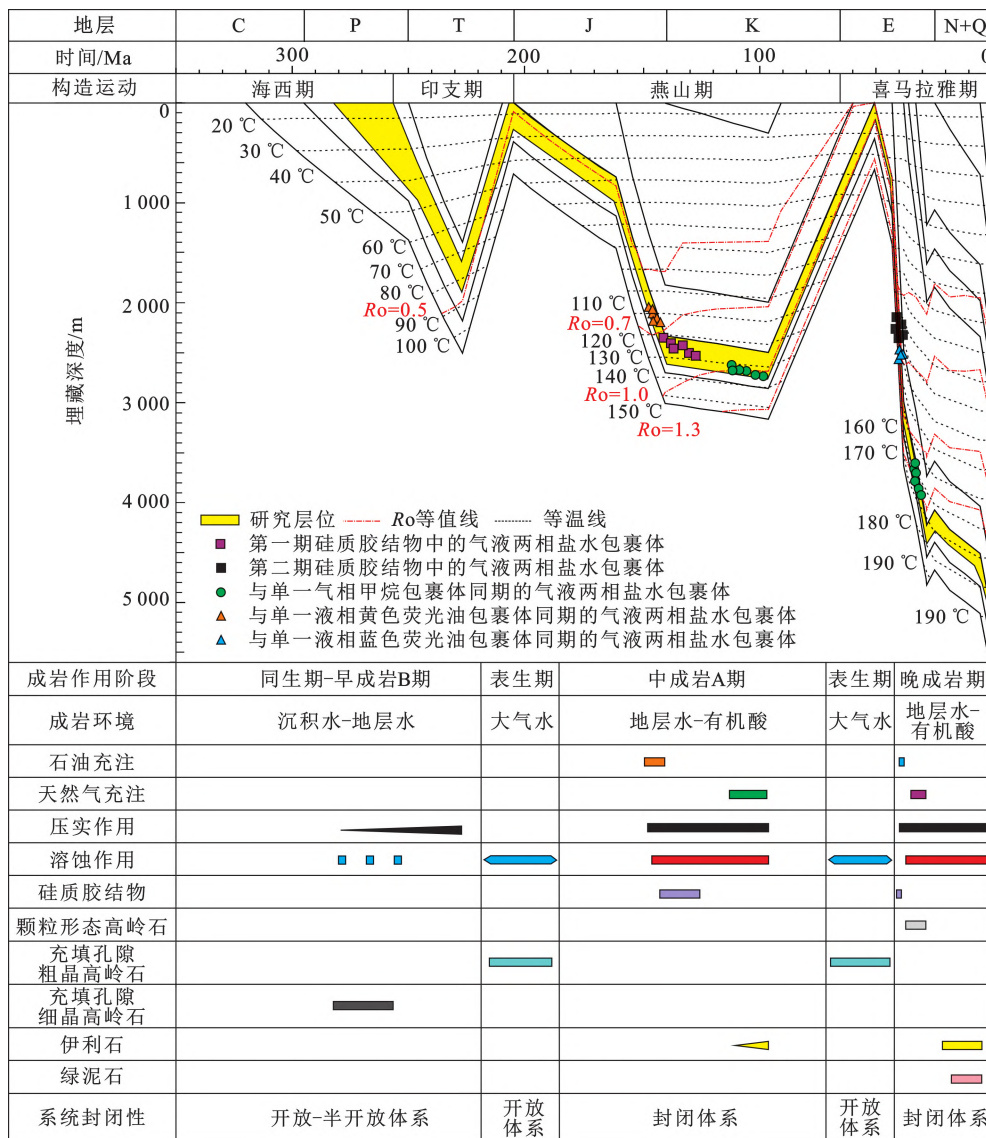


图 12 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层成岩-成藏演化序列

Fig. 12 Diagenesis-hydrocarbon accumulation evolution sequence of tight sandstone reservoirs in P₂sh in Chexi Subag

边与充填粒间孔隙型自生石英中气液两相盐水包裹体均一温度相近(图 10),而且与充填石英颗粒破裂缝型自生石英一样,阴极发光下均呈黑色(图 6),认为三者同为该时期形成的第二期硅质胶结物,形成于距今 40~38 Ma(图 10)。随着地层持续深埋,少量高岭石发生伊利石化和绿泥石化,形成鳞片状伊利石和绒球状绿泥石(图 2(k)、(l))。始新世下伏石炭—二叠系煤系烃源岩埋深在 3 000~3 300 m, $R_o > 1$,发生第三次生烃,主要以凝析油、天然气为主。距今 41~38 Ma,上石盒子组发生一期蓝色荧光油充注(图 11)。车西洼陷上石盒子致密砂岩储层的油气来源目前还存在争议,车古 25 井东侧发育沟通沙三下亚段烃源岩与上石盒子组储层的油源断层,部分学者认为沙三下亚段烃源岩生成的油气存

在沿断层垂向运移至上古生界致密砂岩储层的可能性^[24-25]。车古 27 井上石盒子组原油与石炭系烃源岩和沙三下亚段烃源岩的藿烷和规则甾烷分布形态相似,但是正构烷烃、重排甾烷、4-甲基甾烷、 $w(Ts)/w(Tm)$ 则呈现为后两者的混合状(图 14),说明上石盒子组储层原油可能为石炭—二叠系煤系烃源岩与沙三下亚段烃源岩混合供烃。颗粒形态高岭石不含油(图 2(c)),推测其可能形成于距今 38 Ma 之后的深埋藏期。随石炭—二叠系烃源岩持续快速埋深至约 4 500 m, $R_o > 1.3$,进入生气高峰。距今 35~30 Ma,上石盒子组致密砂岩储层发生一期甲烷天然气充注(图 11),车古 27 井上石盒子组储层甲烷碳同位素和烃类组分分析结果表明车西洼陷上石盒子组致密砂岩气藏类型主要为煤成气藏^[26],说明

研究区主要的天然气来源为石炭—二叠系煤系烃源岩生成的煤成气,该期天然气充注为现今保存的主要油气。车古 27 井区域形成的油气藏侧向因受①号断层的封闭作用以及顶部古生界与中生界之间不整合

遮挡形成有效圈闭,油气得以保存;而车古 25 井区域的油气因受到埕南断层及其派生的③号、④号断层的持续活动影响,生成的油气沿断层逃散(图 13(e))。

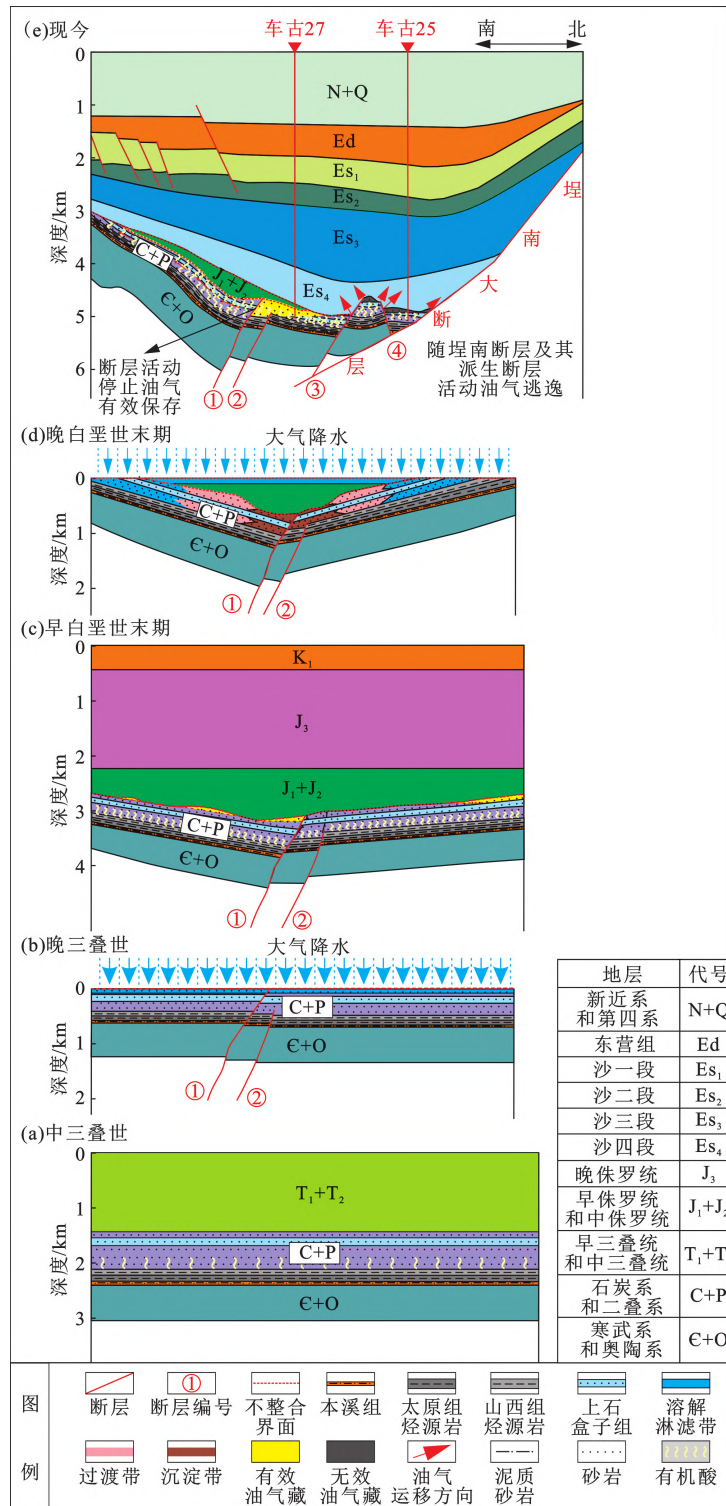


图 13 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层成岩-成藏演化剖面

Fig. 13 Diagenesis-hydrocarbon accumulation evolution section of tight sandstone reservoirs in P₂sh in Chexi Subsag

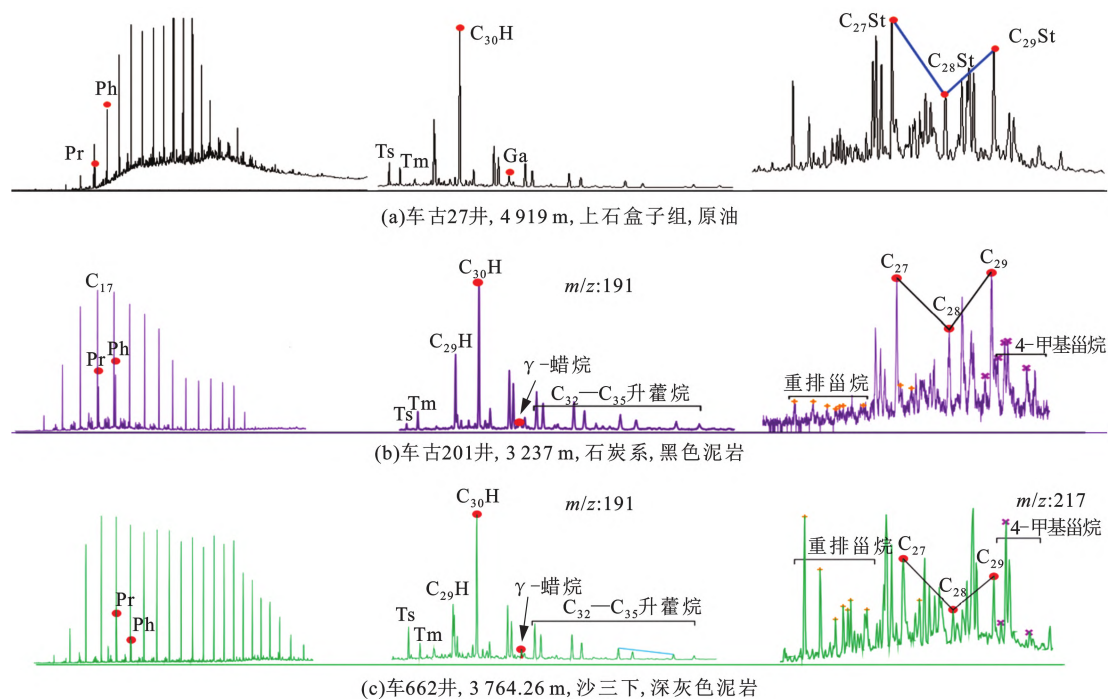


图 14 车西洼陷原油和烃源岩饱和烃气相色谱质谱 ($m/z=85, 191, 217$)

Fig. 14 Gas chromatography-mass spectrum of saturated hydrocarbons in crude oil and source rocks in Chexi Subbasin ($m/z=85, 191, 217$)

6 结 论

(1) 车西地区上石盒子组致密砂岩成岩作用主要为硅质胶结和高岭石胶结。硅质胶结物分别为来源于石英颗粒压溶作用形成的第一期石英次生加大边,长石颗粒受有机酸溶蚀形成的第二期石英次生加大边、充填石英颗粒破裂缝型自生石英以及充填粒间孔隙型自生石英。高岭石分别为封闭体系下长石溶蚀原位再沉淀形成的颗粒形态高岭石,大气淡水淋滤长石颗粒溶蚀形成的充填孔隙粗晶高岭石和原始沉积在长石质石英砂岩中的杂基——充填孔隙细晶高岭石。

(2) 车西洼陷上石盒子组致密砂岩储层经历两期石油和天然气充注。第一期为黄色荧光油和天然气充注,分别发生在距今 148~142 Ma 和 112~98 Ma;第二期为蓝色荧光油和天然气充注,分别发生在距今 40~38 Ma 和 35~30 Ma,第一期油气因构造抬升遭受破坏,以第二期天然气成藏为主。

(3) 车西洼陷上石盒子组致密砂岩经历成岩-成藏系统演化过程为原始沉积的含细晶高岭石杂基的长石质石英砂岩→充填孔隙粗晶高岭石→第一期黄色荧光油充注→第一期硅质胶结物→第一期天然气充注→充填孔隙粗晶高岭石→第二期硅质胶结物→第二期蓝色荧光油充注→第二期天然气充注→

颗粒形态高岭石、鳞片状伊利石、绒球状绿泥石。

参考文献:

- [1] 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257-264.
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [2] 操应长, 葱克来, 刘可禹, 等. 陆相湖盆致密砂岩油气储层集性能表征与成储机制: 以松辽盆地南部下白垩统泉头组四段为例 [J]. 石油学报, 2018, 39(3): 247-265.
CAO Yingchang, XI Kelai, LIU Keyu, et al. Reservoir properties characterization and its genetic mechanism for tight sandstone oil and gas reservoir in lacustrine basin: the case of the fourth member of Lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(3): 247-265.
- [3] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015-1026.
SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015-1026.

- [4] 杨正明,姜汉桥,朱光亚,等. 低渗透含水气藏储层评价参数研究[J]. 石油学报,2008,29(2):52-55.
YANG Zhengming, JIANG Hanqiao, ZHU Guangya, et al. Research on reservoir evaluation index for low-permeability water-bearing gas reservoir[J]. *Acat Petrolei Sinica*, 2008,29(2):52-55.
- [5] 林良彪,余瑜,南红丽,等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组四段储层致密化过程及其与油气成藏的耦合关系[J]. 石油与天然气地质,2021,42(4):816-828.
LIN Liangbiao, YU Yu, NAN Hongli, et al. Reservoir tightening process and its coupling relationship with hydrocarbon accumulation in the fourth member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4):816-828.
- [6] 胡全,朱建辉,周新科,等. 渤海湾盆地中南部上古生界生烃史与天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质,2008(3):312-319.
HU Zongquan, ZHU Jianhui, ZHOU Xinke, et al. Hydrocarbon generating history and exploration prospects of the Upper Paleozoic in the central and south Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008(3):312-319.
- [7] 侯中帅,陈世悦,桑树勋,等. 渤海湾盆地上古生界泥岩地球化学特征[J]. 煤炭学报,2020,45(4):1457-1472.
HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, SANG Shuxun, et al. Geochemical characteristics of Upper Paleozoic mudstone in Bohai Bay Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020,45(4):1457-1472.
- [8] 彭兆蒙,吴智平,彭仕必. 华北东部中、新生代盆地叠合特征与上古生界天然气勘探[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(2):1-7.
PENG Zhaomeng, WU Zhiping, PENG Shimi. Basin superposition characteristics of Mesozoic and Cenozoic and natural gas exploration prospect of Upper Paleozoic in the eastern North China[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010,34(2):1-7.
- [9] 张关龙,陈世悦,王海方,等. 济阳拗陷石炭—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 Permo-carboniferous system in Jiyang depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009,33(3):11-17.
- [10] 韩会军,刘华,刘长江,等. 济阳拗陷石炭二叠系储层特征及其沉积控制[J]. 中国矿业大学学报,2007(4):522-526.
HAN Huijun, LIU Hua, LIU Changjiang, et al. Reservoir characteristics and their depositional control of the Permo-Carboniferous in Jiyang Depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007(4):522-526.
- [11] 林红梅,刘鹏,王彤达,等. 基于母岩类型差异的深层砂砾岩储集体成岩演化机制:以渤海湾盆地车镇凹陷沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报,2019,40(10):1180-1191.
LIN Hongmei, LIU Peng, WANG Tongda, et al. Diagenetic evolution mechanism of deep glutenite reservoirs based on differences in parent rock types: a case study of lower submember of member 3 of Shahejie Formation in Chezhen sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acat Petrolei Sinica*, 2019,40(10):1180-1191.
- [12] GOLDSTEIN R H, REYNOLDS T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals[R]. Tulsa: SEPM Short Course, 1994.
- [13] GROMET L P, HASKIN L A, KOROTEV R L, et al. The "North American shale composite": its compilation, major and trace element characteristics [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(12):2469-2482.
- [14] HATCH J R, LEVENTHAL J S, PHILIP A, et al. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the denis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1992,99(1/2/3):65-82.
- [15] LAWRENCE M G, GREIG A, COLLERSON K D, et al. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland Waterways[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2006,12(1):39-72.
- [16] 王苏民,李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段:以青海湖、岱海为例[J]. 科学通报,1991,36(1):54-56.
WANG Sumin, LI Jianren. Lake sediment as an effective tool for historical climate: the case of Qinghai Lake and Daihai Lake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(1):54-56.
- [17] 张鼎,田作基,冷莹莹,等. 烃和烃类包裹体的拉曼特征[J]. 中国科学(地球科学),2007(7):900-907.
ZHANG Nai, TIAN Zuoji, LENG Yingying, et al. The raman characteristic of hydrocarbons and hydrocarbon inclusions[J]. *Science China:Earth Sciences*, 2007(7):900-907.

- [18] 王鑫涛,陈勇,周瑶琪,等. 东营凹陷岩盐原生流体包裹体中子矿物类型的拉曼光谱分析及其地质意义探讨[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(9):2827-2834.
WANG Xintao, CHEN Yong, ZHOU Yaoqi, et al. Micro-Raman spectroscopy of daughter minerals in primary fluid inclusions of rock salt in Dongying Sag and their geological significances [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(9):2827-2834.
- [19] 刘可禹,Julien Bourdet,张宝收,等. 应用流体包裹体研究油气成藏:以塔中奥陶系储集层为例[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):171-180.
LIU Keyu, JULIEN Bourdet, ZHANG Baoshou, et al. Hydrocarbon charge history of the Tazhong Ordovician reservoirs, Tarim Basin as revealed from an integrated fluid inclusion study[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(2):171-180.
- [20] 张勐,吴智平,王永诗,等. 渤海湾盆地济阳坳陷潜山发育规律及成因类型划分[J]. 地球科学,2023,48(2):488-502.
ZHANG Meng, WU Zhiping, WANG Yongshi, et al. Development law and genetic types of buried-hills in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science, 2023,48(2):488-502.
- [21] GILES M R, DE BOER R B. Origin and significance of redistributional secondary porosity[J]. Marine and Petroleum Geology, 1990,7(4):378-397.
- [22] 陈世悦,马帅,贾贝贝,等. 渤海湾盆地石炭—二叠系含煤岩系沉积环境及其展布规律[J]. 煤炭学报,2018,43(增2):513-523.
CHEN Shiyue, MA Shuai, JIA Beibei, et al. Sedimentary environment and distribution law of Carboniferous-Permian coal-bearing series in Bohai Bay Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (sup2): 513-523.
- [23] BJØRKUM P. How important is pressure in causing dissolution of quartz in sandstones? [J]. Journal of Sedimentary Research,1996(66):147-154.
- [24] 徐伟. 车镇凹陷车西北带下古生界煤成气成藏差异及模式分析[J]. 油气地质与采收率,2021,28(5):13-21.
XU Wei. Differences and control modes of coal gas accumulations in Lower Paleozoic in northwest of Chezhen Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28 (5): 13-21.
- [25] 王学军,向立宏,郝雪峰,等. 车镇凹陷车西洼陷油气倒灌运移成藏特征及机理[J]. 油气地质与采收率,2013,20(1):6-10.
WANG Xuejun, XIANG Lihong, HAO Xuefeng, et al. Mechanism and characteristics of petroleum downward migration in Chexi sag of Chezhen depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013,20(1):6-10.
- [26] 张家震,徐备. 车镇凹陷含油气系统划分及勘探方向[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2009,24(2):13-17.
ZHANG Jiazhen, XU Bei. Division of petroleum system and exploration direction in Chezhen Sag [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009,24(2):13-17.

(编辑 李娟)