

准噶尔盆地阜北地区下侏罗统三工河组二段成岩作用及成岩相

徐文礼¹, 刘冉¹, 文华国^{1,2}, 靳军³, 郑荣才^{1,2}, 李云¹, 于景维⁴

XU Wenli¹, LIU Ran¹, WEN Huaguo^{1,2}, JIN Jun³, ZHENG Rongcai^{1,2}, LI Yun¹, YU Jingwei⁴

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059;

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

3. 中国石油新疆油田公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000;

4. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000

1. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

2. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

3. *Research Institute of Experiment and Detection of PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China;*

4. *Karamay Campus of China University of Petroleum, Karamay 834000, Xinjiang, China*

摘要:利用铸体薄片、扫描电镜、X-衍射、物性、压汞等分析化验资料,对阜北地区下侏罗统三工河组二段储层岩石学特征、物性及孔隙结构特征、成岩作用、成岩矿物、成岩环境、所处成岩阶段、成岩演化序列、成岩相等进行研究。结果表明,阜北地区三工河组二段储层砂岩现今已进入中成岩B期,主要发育压实压溶、胶结、溶蚀等成岩作用,压实作用和胶结作用是孔隙度降低的主要原因,溶蚀作用形成的次生孔隙在一定程度上改善了储层物性。根据成岩作用类型和强度、成岩矿物及其对储层物性的影响,划分出3种成岩相:中等压实弱胶结弱溶蚀相、中等压实中等胶结中等溶蚀相、中等压实强胶结中等溶蚀相,其中,中等压实弱胶结弱溶蚀相和中等压实中等胶结中等溶蚀相为有利成岩相带。

关键词:成岩作用;成岩相;阜北地区;三工河组二段

中图分类号:P534.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)04-0555-10

Xu W L, Liu R, Wen H G, Jin J, Zheng R C, Li Y, Yu J W. Diagenesis and diagenetic facies of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area, Junggar Basin. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(4):555-564

Abstract: Based on the study of casting thin sections, scanning electron microscope analysis, X-ray diffraction, physical property analysis, and mercury intrusion porosimetry, the authors studied the diagenesis and diagenetic facies of the reservoir of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area. The reservoir has experienced compaction, pressure solution, cementation and corrosion, and is now in the stage B of middle diagenetic stage. The decrease of porosity is mainly caused by compaction and cementation. Secondary pores resulting from corrosion can improve the physical property of the reservoir to some extent. According to such factors as diagenesis, diagenetic minerals and their effects on the reservoir, three types of diagenetic facies were recognized, namely facies with medium compaction, weak cementation and corrosion, facies with medium compaction, medium cementation and corrosion, facies with medium compaction, strong cementation and medium corrosion, among which the first two are the favorable diagenetic facies.

Key words: diagenesis; diagenetic facies; Fubei area; 2nd Member of Sangonghe Formation

收稿日期:2016-10-18;修订日期:2017-02-27

资助项目:国家自然科学基金项目《准噶尔盆地乌尔禾地区二叠纪咸化湖盆热液喷流活动的比较沉积学研究》(批准号:4157021099)

作者简介:徐文礼(1982-),男,博士,讲师,从事储层沉积学研究。E-mail: xuwenli5@163.com

阜北地区位于准噶尔盆地东南部,天山北麓北段,面积约 5000km²^[1](图 1-a),构造整体单一,总体为北西高、南东低的单斜构造。研究区下侏罗统三工河组为一套陆相含煤碎屑岩沉积,根据岩性、沉积旋回,可将其自下而上划分为三一段至三三段。其中,三一段和三三段主要形成于辫状河三角洲和滨浅湖沉积环境,岩性以泥岩夹砂岩或砂泥岩互层为主;三二段沉积环境主要为大规模发育的辫状河三角洲,岩性以砂岩为主,是三工河组主要的储集层,研究区内尤以三二段勘探前景和潜力最好。三二段沉积以近物源辫状河三角洲前缘为主,发育水下分流河道、河口坝等微相(图 1-b)。储层虽整体处于有利的沉积相带,但由于地质历史时期经历的成岩作用改造复杂,现今总体表现为物性较差、非均质性强的特征,孔隙结构较复杂,直接影响了油气勘探的效果。寻找具有较高孔隙度和渗透率的优质储层,即“甜点”的分布是研究区现阶段油气勘探的主要目标。

研究表明,成岩相高度概括了沉积物自形成之后直至变质作用发生之前的成岩作用,并综合考虑了成岩矿物、成岩阶段、成岩环境、成岩演化序列等对储层孔隙结构和储集物性的影响,通过成岩相的研究有助于储层的区域评价和预测、寻找优质储集体及含油气有利区的分布^[2~9]。前人对于阜北地区三工河组的研究较少,特别是对成岩作用和成岩相的研究更薄弱。针对三工河组研究现状和存在的问题,综合前人研究成果,在岩心观察基础上,充分利用铸体薄片、扫描电镜、X-衍射、物性、压汞分析等资料,对阜北地区三工河组二段储层的岩石学特征、物性、成岩作用、成岩矿物、成岩环境、成岩阶段、成岩演化序列等进行研究,并划分出有利成岩相带,为研究区三工河组二段储层油气勘探与开发提供地质依据,具有重要的理论和实际意义。

1 三二段储层基本特征

1.1 岩石学特征

薄片鉴定表明,三二段岩性主要为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩(图 2)。三二段储集岩碎屑成分中的石英体积分数主要为 2%~71%,平均值为 39.6%;长石体积分数为 1.0%~28%,平均值为 17.6%,以钾长石

为主;岩屑体积分数为 11%~96%,以凝灰岩岩屑和变质岩岩屑为主。填隙物体积分数较低,为 0.5%~28.4%,平均值为 8.8%,成分主要为碳酸盐、粘土矿物、硅质,含有少量菱铁矿和长石质。颗粒粒度较细,以细-中砂级别为主,分选性较好,磨圆为次棱角状-次圆状,多呈孔隙式胶结,以点-线、线接触关系为主,总体表现为成分成熟度较低而结构成熟度中等偏好的岩石学特征。

1.2 物性及孔隙结构特征

三二段储层总体物性中等偏差。根据物性分析,该段孔隙度为 2.3%~30.8%,平均值为 12.7%,多数集中在 5%~15%之间,渗透率为 $0.045 \times 10^{-3} \sim 1143.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $54.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,多数集中在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,总体属于低孔、特低孔-特地渗、超低渗型储层,局部发育低孔-中渗型储层。储集空间类型以残余原生粒间孔、粒间溶孔和粒内溶孔为主,局部层段发育裂缝、微裂缝。根据取心井岩心柱塞样的压汞实验结果(表 1):储集岩排驱压力为 0.01~3.0MPa,平均值为 0.73MPa;中值压力为 1.1~97.10MPa,平均值为 18.3MPa;中值半径为 0.008~0.67 μm ,平均值为 0.19 μm ;平均喉道半径为 0.047~11.61 μm ,平均值为 1.45 μm ;分选系数为 2.13~4.94,平均值为 2.9;歪度为 0.36~1.74,平均值为 1.33;最大进汞饱和度为 52.76%~98.28%,平均值为 82.04%;退汞效率为 26.2%~45.2%,平均值为 34.7%。总体具小孔、细喉道、细歪度、孔喉分选差的毛管压力曲线特征。

表 1 阜北地区下侏罗统三工河组二段孔隙结构统计
Table 1 Pore structure statistics of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

参数	范围值	平均值
孔隙度/%	2.3~30.8	12.7
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.045~1143.8	54.7
排驱压力/MPa	0.01~3.0	0.73
中值压力/MPa	1.1~97.1	18.3
中值半径/ μm	0.008~0.67	0.19
平均喉道半径/ μm	0.047~11.61	1.45
分选系数	2.13~4.94	2.9
歪度	0.36~1.74	1.33
最大进汞饱和度/%	52.76~98.28	82.04
退汞效率/%	26.2~45.2	34.7

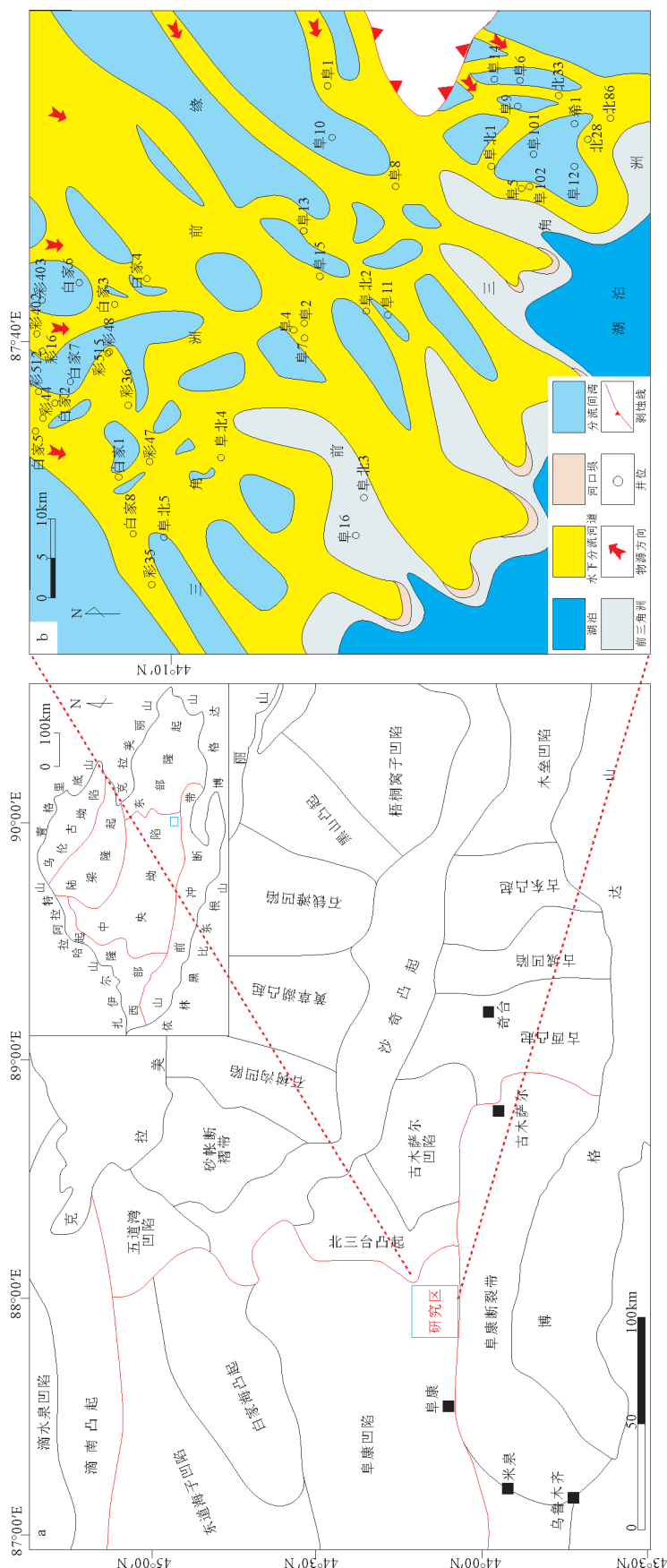


图1 阜北地区下侏罗统三工河组二段沉积相图

Fig. 1 Sedimentary facies of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

2 成岩作用类型及特征

对三二段储层 146 块样品的铸体薄片观察、扫描电镜分析表明,影响三二段储层物性的主要成岩作用有压实压溶作用、胶结作用和溶蚀作用,交代作用、破裂作用等对储层物性影响较小。

2.1 压实压溶作用

压实作用强度主要受控于岩性、成岩胶结强度、埋藏史和地层流体压力等因素^[10-12]。三二段储层压实作用主要表现为塑性颗粒如云母等发生变形,一些柔性岩屑也呈定向排列,颗粒接触紧密,以点-线、线接触为主(图版 I-a),个别为缝合线接触,说明有压溶现象发生。由于三二段属近源辫状河三角洲沉积,沉积物未经过较长距离的搬运与淘洗,导致其塑性岩屑含量较高,而抗压实能力较强的石英含量较少,埋藏过程中持续的压实作用导致其损失了大部分原生孔隙,是三二段储层物性降低最重要的原因。

2.2 胶结作用

三二段储层胶结物类型主要有硅质、钙质和粘土矿物。胶结物对孔隙的充填进一步破坏储层的孔隙性和渗流性能。前人研究认为,当沉积物埋藏深度过大时(一般认为超过 2500m),孔隙损失不再取决于压实作用,而是取决于石英加大及其他一些胶结物含量的多少。因此,胶结作用是三二段砂岩储层致密化的另一个重要原因^[13]。

(1) 硅质胶结

研究区硅质胶结物类型

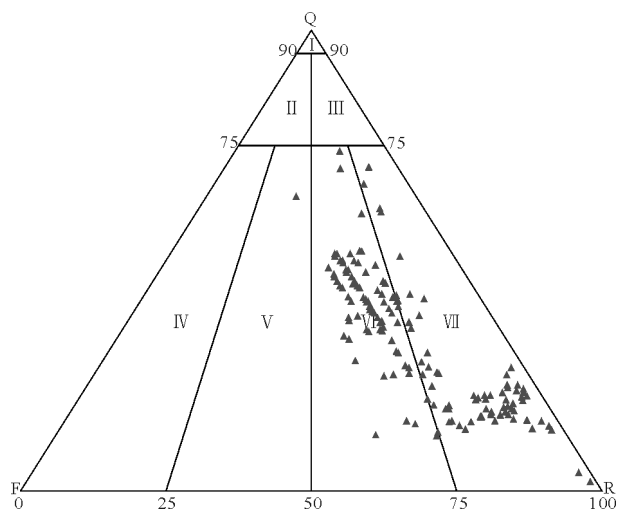


图2 阜北地区下侏罗统三工河组二段储层砂岩类型

Fig. 2 Sandstone types of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩; V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩

主要有石英次生加大及剩余原生粒间孔、粒内溶孔内充填的自生石英。在薄片普遍见石英次生加大现象(图版 I-b),加大边有宽有窄。当石英颗粒周缘有粘土薄膜时,不能形成连续的加大石英,呈孔隙式充填,孔隙充填石英以自形石英充填于粘土薄膜形成后的剩余孔隙空间(图版 I-c)。硅质胶结物的来源主要为酸性环境中的不稳定矿物,如斜长石、钾长石及由其组成的凝灰岩岩屑、花岗岩岩屑发生溶蚀作用析出的 SiO_2 。因此,研究区砂岩中高含量的长石和岩屑为 SiO_2 的生成提供了良好的来源。硅质胶结对储层物性具有双重作用,较早期形成的石英次生加大在一定程度上可以抑制压实作用,保护原生粒间孔,后期形成的石英次生加大和晶体主要堵塞孔隙,造成砂岩物性变差。

(2) 碳酸盐胶结

碳酸盐胶结物在三二段砂岩中普遍发育,质量分数变化较大(1.0%~25%),成分主要为方解石,白云石含量较少,未见铁方解石和铁白云石,表明其主要形成于早成岩阶段。镜下观察发现,主要呈粒间胶结物、交代物形式出现,常见微晶状、晶粒状或连晶状产出充填于原生孔隙(图版 I-d)。

碳酸盐胶结物对储层的孔渗性有较大影响,方解石沉淀堵塞了大部分原生孔隙,降低了岩石的孔隙度和渗透率,但其能抵制压实、压溶作用,

并为以后的溶解作用提供物质基础。

(3) 粘土矿物胶结作用

研究区粘土矿物包括高岭石、绿泥石、伊利石和伊/蒙混层,以高岭石和绿泥石为主。

① 高岭石胶结

高岭石胶结在三二段砂岩中普遍发育,主要为酸性环境下由长石与岩屑等骨架颗粒溶蚀而成,薄片下主要为蠕虫状(图版 I-e),电镜下呈书页状集合体充填于粒间孔隙中,常与石英次生加大和各类溶蚀孔隙密切共生。由于高岭石常充填孔喉生长,堵塞喉道,致使部分成为无效孔喉;但如果高岭石晶间孔隙较大且晶形良好,则对孔喉影响不大,不会造成孔隙度和渗透率的大幅度降低。同时,高岭石作为砂岩中硅铝酸盐骨架颗粒溶蚀作用的产物,发育程度在一定程度上也可指示溶蚀作用的强度。

② 绿泥石胶结

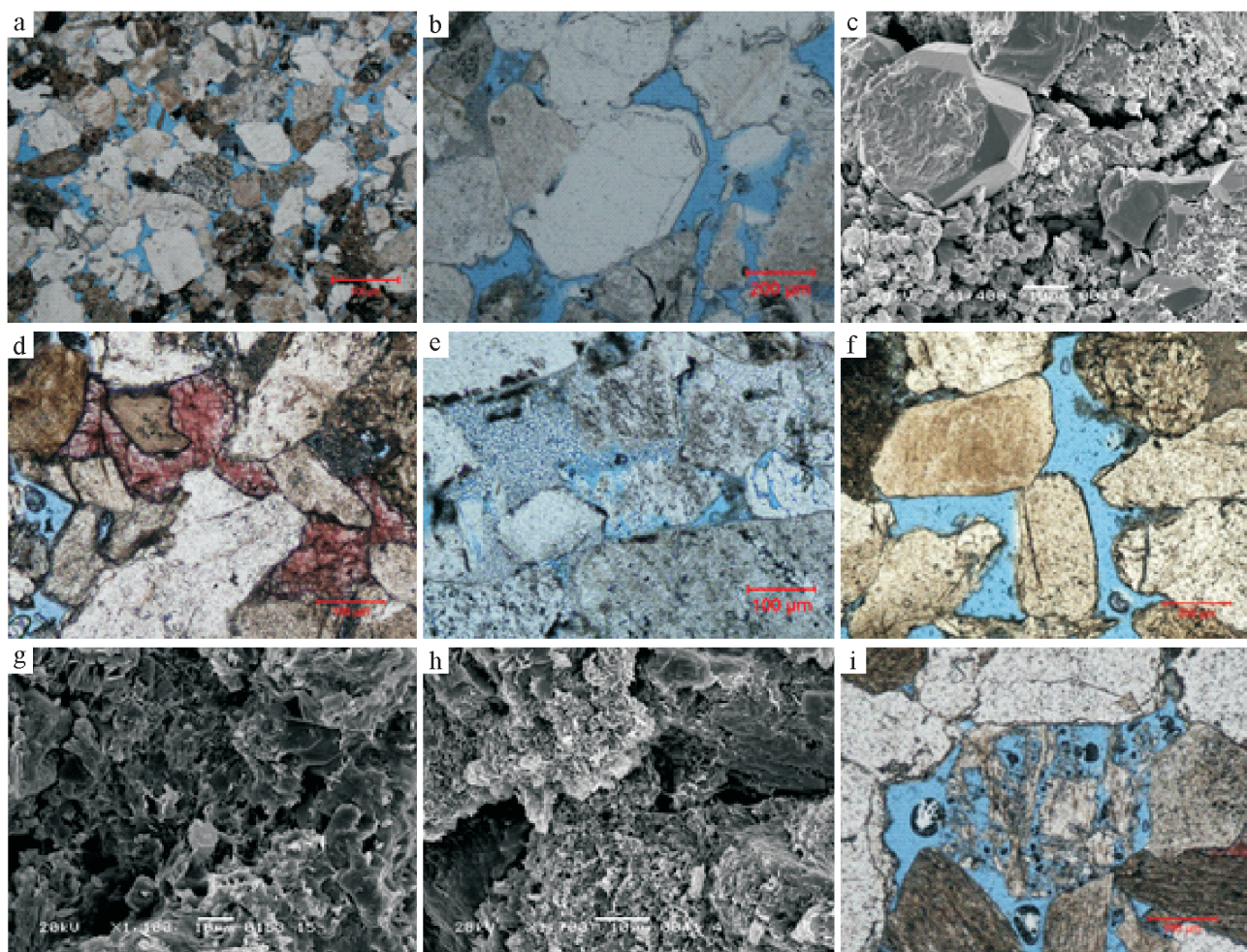
绿泥石胶结物是三二段砂岩中常见的粘土胶结物,其产出方式有多种类型,但主要以孔隙衬里式产出,其形成与火山岩岩屑及云母的蚀变有关。绿泥石胶结物在薄片下呈薄膜状分布于碎屑颗粒表面(图版 I-f),电镜下为叶片状集合体沿碎屑颗粒边缘向孔隙中心呈定向垂直生长,在颗粒与颗粒的接触处,绿泥石包膜较少甚至不存在,薄膜平均厚度为 $11\sim 15\mu\text{m}$ 。薄膜的形成限制了长石、石英次生加大的发育^[14-15],是早成岩阶段的产物。

自生绿泥石对于孔隙演化的影响一直有争议,传统上认为绿泥石阻塞孔隙,对砂岩孔隙具有破坏作用^[16-18],但随着研究的深入,越来越多的人认为,环边状产出的绿泥石膜有利于孔隙空间的保存^[19-25]。研究区绿泥石主要以早期形成的环边式产出,颗粒多为较松散的点接触;而在不含绿泥石膜的区域,颗粒则倾向于更致密的线接触。由此可见,绿泥石膜对原生孔隙空间起保护作用。绿泥石膜对于孔隙的保存有积极作用,主要是由于绿泥石膜包裹于矿物颗粒表面,阻碍了矿物颗粒与孔隙中流体的接触,从而减少了胶结物的沉淀,使颗粒间的原生孔隙得以保存。

③ 伊利石与伊/蒙混层胶结

区内伊利石和伊/蒙混层的含量不高。伊利石常以片丝状和毛发状附着于碎屑颗粒表面(图版 I-g),该生长方式可使原本空间较大的粒间孔隙

图版 I Plate I



- a.彩48井, J_3s^2 (下侏罗统三工河组二段,下同), 2998.35m, 颗粒塑性变形, 颗粒呈点-线、线接触, 局部凹凸接触, 铸体薄片(-);
 b.彩47井, J_3s^2 , 3302.9m, 石英次生加大发育, 铸体薄片(-); c. 白家2井, J_3s^2 , 2798.67m, 次生石英晶体、方解石晶体及高岭石集合体充填于粒间孔隙中, SEM; d.阜北4井, J_3s^2 , 3731.05m, 连生方解石胶结, 充填原生粒间孔, 铸体薄片(-); e. 白家8井, J_3s^2 , 3531.42m, 蠕虫状高岭石充填粒间孔隙, 铸体薄片(-); f.白家1井, J_3s^2 , 3206.05m, 环边状产出的绿泥石胶结物发育, 铸体薄片(-); g.白家2井, J_3s^2 , 2946.14m, 片丝状、毛发状伊利石及高岭石集合体充填于粒间孔隙中, SEM; h.白家8井, J_3s^2 , 3529.7m, 片丝状伊蒙混层集合体充填于粒间孔隙中, SEM; i.阜北4井, J_3s^2 , 3728.65m, 长石溶蚀形成粒内溶孔及粒间溶孔, 铸体薄片(-)

变成极小空间的晶间孔隙, 导致储层储集性能降低。伊/蒙混层多呈现蜂窝状生长于孔隙空间(图版 I -h), 使储层物性变差。

2.3 溶蚀作用

溶蚀作用在整个成岩作用过程中均有发生, 但在中成岩阶段A期表现最强烈, 主要是长石、岩屑等铝硅酸盐矿物的溶蚀普遍较强(图版 I -i)。前已述及, 三二段沉积物成分成熟度较低, 其中不稳定碎屑组分含量较高, 成岩演化过程中有机质脱羧生烃

产生的有机酸是长石等硅铝酸盐矿物和其他易溶组分溶解的重要成岩流体。三工河组下伏地层中发育的烃源岩, 在白垩纪中期开始生烃, 至今仍处于生烃高峰期, 且此时贯穿侏罗系的断层正处于开启状态, 为不稳定矿物的溶解提供了充足的酸性介质来源及运移条件^[26]。不稳定组分, 如钾长石、岩屑等在酸性流体条件下被溶蚀, 形成粒间、粒内溶孔和铸模孔, 长石沿解理、破碎面等薄弱处溶蚀呈窗格状、蜂窝状, 且在溶蚀过程中形成大量的高岭石

和石英。众多薄片可观察到,高岭石的晶间孔成为另一个重要的孔隙来源,但对物性的贡献存在一定的争议^[27-29]。岩屑溶蚀常见斑点状或蜂窝状,主要是富凝灰质的火山岩岩屑的溶蚀作用普遍。溶蚀作用形成的次生孔隙对物性条件的改善起重要作用。

3 成岩阶段及成岩演化序列

三二段包裹体均一温度检测结果表明,其形成温度为85~100℃,泥岩中干酪根镜质体反射率均值为0.72%,I/S中蒙皂石平均含量为8.4%。结合镜下鉴定获得的自生矿物分布和形成顺序、粘土矿物、成岩作用类型、特点等,参照石油天然气行业碎屑岩成岩阶段的划分标准(SY/T5477—2003)^[30],认为三工河组二段砂岩储层经历同生成岩阶段、早成岩阶段A期和早成岩阶段B期,现今处于中成岩阶段A期,部分埋藏较深层段已进入中成岩阶段B期。主要的矿物组合特征为:镜下可见片丝状伊/蒙混

层和伊利石、叶片状绿泥石附着于碎屑颗粒表面或充填粒间孔隙;书页状高岭石集合体、较自形的白云石晶体和方解石晶体充填粒间孔隙,方解石晶体间或与石英颗粒呈紧密镶嵌状接触,胶结作用强烈,岩石致密;石英具有次生加大现象,自形晶面发育,颗粒表面被较完整的自形晶包裹或有自生石英晶体充填粒间孔。

早成岩阶段A期—B期,沉积物压实作用强烈,原生孔隙迅速减少,长石及岩屑的硅酸盐矿物在酸性流体中发生水化作用,促进了石英次生加大的形成,且随着酸性流体的消耗,地层水逐渐转化为碱性,绿泥石附于颗粒表面,方解石充填粒间孔;中成岩阶段A期—B期,有机质热演化过程中生烃的同时产生有机酸和CO₂运移至三二段砂岩储层中,使长石及岩屑颗粒发生强烈溶蚀,形成粒间、粒内溶孔,生成的石英、高岭石充填部分粒间孔或附于碎屑颗粒和方解石表面,使物性降低。

成岩序列为成岩作用的先后顺序,三二段储层成

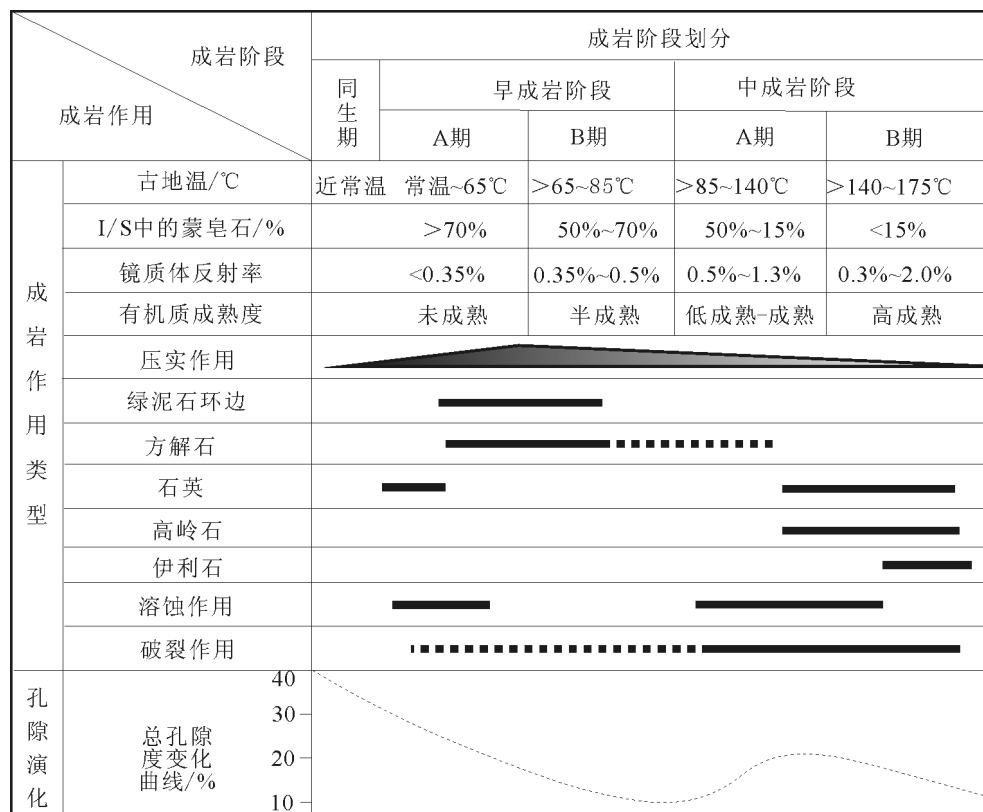


图3 阜北地区下侏罗统三工河组二段成岩序列及孔隙演化

(底图据参考文献[31-32])

Fig. 3 Diagenetic sequence and pore evolution of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

表 2 阜北地区下侏罗统三工河组二段压实作用、胶结作用和溶蚀作用的成岩强度划分标准
Table 2 Diagenesis intensity standard of compaction, cementation and corrosion
of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

成岩强度	压实作用		胶结作用	溶蚀作用	
	视压实率/%	颗粒接触关系	视胶结率/%	视溶蚀率/%	孔隙类型
强	> 70	线接触或线-凹凸接触	> 70	> 60	粒内、粒间溶孔与铸模孔
中等	30 ~ 70	点-线接触或线接触	30~70	25~60	直径小的粒内、粒间溶孔
弱	< 30	点接触	< 30	< 25	零星分布溶孔

岩矿物的形成演化顺序大致为:石英次生加大→绿泥石包膜→方解石胶结→自生石英、高岭石充填→伊利石充填。根据各成岩矿物共生组合、形成先后顺序、相互交代关系及成因,结合各种成岩作用的特征,本区三二段典型的成岩序列特征为:机械压实→石英次生加大→粘土矿物薄膜形成→碳酸盐沉淀(方解石)→易溶颗粒发生溶解(长石及部分岩屑溶蚀)→自生石英、高岭石充填→伊利石充填(图3)。

4 成岩相划分及有利成岩相带

成岩相为成岩环境的物质表现,是沉积物在特定的物理化学环境中,在成岩作用下经历一定成岩阶段和演化序列的产物,包括岩石颗粒、胶结物、结构、孔洞缝等综合特征^[33-34];通常包含两方面内容,即成岩环境和在该环境下的成岩产物,反映了沉积岩目前的面貌^[35]。成岩相的划分一般要考虑沉积物经历的成岩作用、所处的成岩阶段、成岩环境、成岩过程中具有指示意义的矿物标志、主要成岩事件、成岩演化序列等。

4.1 成岩相划分

三二段储层已进入中成岩阶段B期,经历较强压实作用,若压实后以溶蚀作用占优势时,对储层

物性有利;若压实背景下以胶结作用占优势时,则对储层物性起破坏作用。为了定量表征压实作用、胶结作用和溶蚀作用的强度,引入视压实率、视胶结率和视溶蚀率3个参数^[36-38]。根据公式(1)~(3)计算出视压实率、视胶结率和视溶蚀率,分别将压实作用、胶结作用和溶蚀作用定量划分为强、中、弱3个等级。为了更准确地判断成岩强度,引入颗粒接触关系、孔隙类型2个参数来辅助判断压实和溶蚀作用强度(表2)。

视压实率=(原始孔隙度-粒间体积)/原始孔隙度×100% (1)

视胶结率=胶结物体积/(胶结物体积+粒间孔体积)×100% (2)

视溶蚀率=次生溶蚀面孔率/总面孔率×100% (3)

根据成岩作用类型和成岩强度,共划分出3种成岩相类型:中等压实弱胶结弱溶蚀成岩相、中等压实中等胶结中等溶蚀成岩相、中等压实强胶结中等溶蚀成岩相。

4.2 成岩相特征

(1)中等压实弱胶结弱溶蚀相(I)

岩性以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,主要发

表 3 阜北地区下侏罗统三工河组二段储层各成岩相类型岩性、成岩强度和物性参数
Table 3 Statistics of lithology, properties, and diagenetic intensity of various diagenetic facies
in 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

成岩相	岩性	颗粒接触关系	视压实率/%	视胶结率/%	视溶蚀率/%	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
中等压实弱胶结弱溶蚀成岩相	以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主	点-线或线接触为主	8.25~83 /60.52	3.73~91.40 /12.29	0~80.95 /23.97	6.75~30.79 /16.7	0.294~1143.8 /97.9
中等压实中等胶结中等溶蚀成岩相	以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主	点-线或线接触为主	1.25~84.50 /54.1	19.19~97.24 /55.64	0~100 /31.5	1~19.81 /13.9	0.071~6.27 /2.2
中等压实强胶结中等溶蚀成岩相	以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主	线接触为主	13.5~78.25 /65.84	47.9~99.4 /66.27	23.8~100 /41.11	2.81~12.25 /8.3	0.019~6.61 /1.09

注:表中数据为最小值~最大值/平均值

育于三角洲前缘水下分流河道微相。粒度细-中粒或中-粗粒,颗粒多呈点-线或线接触。视压实率平均为 60.52%,压实作用中等。胶结物含量平均为 6.1%,以钙质胶结和硅质胶结为主,其次是粘土矿物胶结,视胶结率平均为 12.29%,胶结程度较弱。视溶蚀率平均为 23.97%,溶蚀较弱。压实作用中等,胶结和溶蚀程度较弱,储层中原生粒间孔隙得以保存完好,连通性较好,次生孔隙发育较差,平均

孔隙度为 16.7%,平均渗透率为 $97.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面孔率 8.0%,是利成岩相(表 3)。

(2) 中等压实中等胶结中等溶蚀成岩相(Ⅱ)

以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,主要发育于三角洲前缘水下分流河道微相。粒度为细-中粒或中粒,颗粒以点-线或线接触为主。视压实率平均为 54.1%,压实作用较Ⅰ相程度偏弱。视胶结率平均为 55.64%,胶结程度中等,胶结物含量平均为

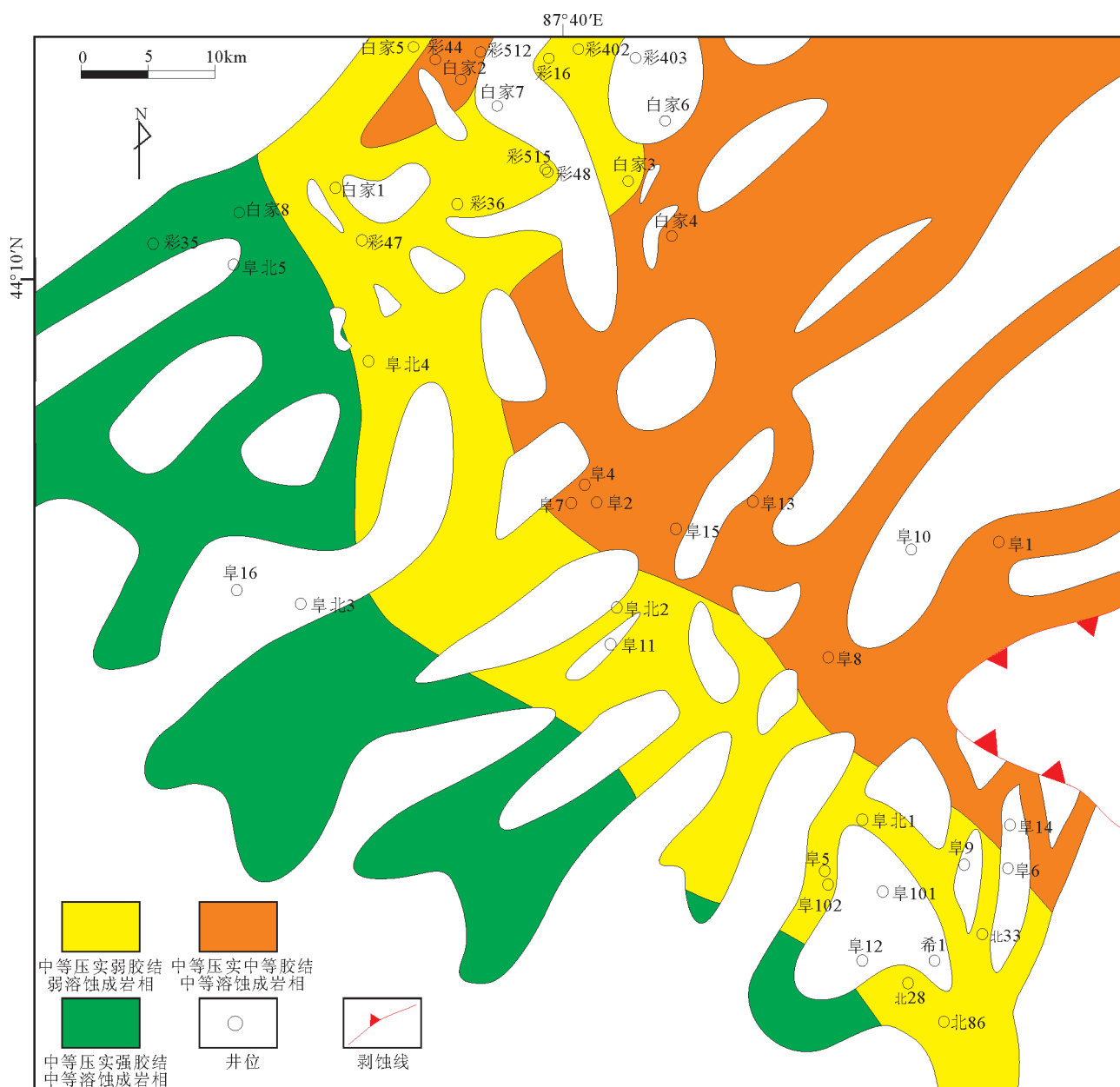


图4 阜北地区下侏罗统三工河组二段储层成岩相分布

Fig. 4 Diagenetic facies distribution map of 2nd member of Lower Jurassic Sangonghe Formation in Fubei area

8.0%,以硅质、钙质和粘土矿物胶结物为主,其中粘土矿物以高岭石为主,绿泥石次之,充填粒间或附着颗粒表面。视溶蚀率平均为31.5%,溶蚀程度中等。该相储层中粒间孔和次生溶孔局部发育,平均孔隙度为13.9%,平均渗透率为 $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面孔率2.6%,是较有利成岩相(表3)。

(3)中等压实强胶结中等溶蚀成岩相(Ⅲ)

以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,主要发育于三角洲前缘水下分流河道和河口坝微相。粒度为细粒和细-中粒,颗粒分选性一般到差,颗粒以线接触为主。视压实率平均为65.84%,压实作用较Ⅰ相、Ⅱ相程度强。视胶结率平均为66.27%,胶结程度强,胶结物含量平均为10.4%,以钙质为主,硅质和高岭石胶结次之。视溶蚀率平均为41.11%,溶蚀作用较Ⅱ相弱。该相储层中粒间孔和次生溶孔发育较差,平均孔隙度为8.3%,平均渗透率为 $1.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面孔率1.55%,是不利的成岩相(表3)。

4.3 有利成岩相带

通过建立取心井段的单井成岩相,结合未取心井段的地球物理测井信息,综合研究区储层的沉积微相、砂体厚度及孔隙度分布特征,遵循优势成岩相划分原则,建立了阜北地区下侏罗统三工河组二段的成岩相平面分布图(图4)。

研究区储层的3种成岩相中,中等压实强胶结中等溶蚀成岩相极大地破坏了储层的原生孔隙,储层物性普遍较差,为破坏性成岩相,中等压实弱胶结弱溶蚀成岩相和中等压实中等胶结中等溶蚀成岩相在一定程度上保护了原生孔隙或产生次生孔隙,改善了储层物性,为建设性成岩相。建设性成岩相的分布受沉积环境的水动力条件控制,三二段水下分流河道中部及上部水动力较强,粒度偏粗,分选性中等偏好,结构成熟度较高,砂体厚度大,碎屑颗粒抗压能力较强,胶结作用强度较弱,有利于原生孔隙的保存,为酸性流体的流动提供了顺畅的渗流通道,易发生溶蚀作用而产生次生孔隙;水下分流河道下部水动力强度较弱,碎屑颗粒粒径细,砂体厚度低,随着压实作用和胶结作用的进行,使原生孔隙损失殆尽,局部发育少量次生溶孔,多形成较致密储层。因此,三工河组二段辫状河三角洲水下分流河道微相中部及上部,岩石组构条件好,砂体厚度较大,原生孔隙和次生孔隙发育,利于油气富集,多发育中等压实弱胶结弱溶蚀成岩相和

中等压实中等胶结中等溶蚀成岩相,为研究区储层的有利成岩相带发育区。

上述研究表明,有利成岩相的分布区是油气产层、优质储层发育区,也是滚动勘探有利储层预测的目标区。因此,通过对有利成岩相的时空分布研究,可为研究区优质储层预测提供坚实的地质依据。

5 结 论

(1)研究区下侏罗统三工河组二段主要为细-中粒的长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,碎屑组分复杂,成分成熟度偏低,结构成熟度较高,储集空间以残余原生粒间孔、粒间溶孔和粒内溶孔为主,孔隙结构具有小孔、细喉道、孔喉分选差的特征,总体属于低孔、特低孔-特低渗、超低渗型储层。

(2)三二段储层经历的成岩作用类型有压实压溶、胶结等破坏性成岩作用及溶蚀等建设性成岩作用,现今已进入中成岩阶段B期。

(3)根据成岩作用类型和强度、成岩矿物及其对储集物性的影响,将研究区三二段储层划分为3种成岩相:中等压实弱胶结弱溶蚀相、中等压实中等胶结中等溶蚀相、中等压实强胶结中等溶蚀相。中等压实弱胶结弱溶蚀相和中等压实中等胶结中等溶蚀相的分布区域为优质储层发育带,是研究区油气勘探的有利目标区。

致谢:成文过程中中国地质调查局成都地质调查中心付修根研究员给予了指导和帮助,审稿专家进行了详细审阅并提出宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]新疆地矿局.新疆维吾尔自治区区域地质志[M].北京:地质出版社,1982:38-44.
- [2]孟元林,李娜,黄文彪,等.辽河拗陷西部斜坡带南段新生界成岩相分析与优质储集层预测[J].古地理学报,2008,10(1):33-40.
- [3]邹才能,陶士振,周慧,等.成岩相的形成、分类与定量评价方法[J].石油勘探与开发,2008,3(5):526-540.
- [4]陈振岩,孟元林,高建军,等.鸳鸯沟洼陷西斜坡成岩作用定量表征及有利区带预测[J].地学前缘,2008,15(1):71-79.
- [5]周勇,纪友亮,张善文,等.胶莱盆地莱阳凹陷莱阳组储层成岩作用及孔隙演化[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(2):340-350.
- [6]杜叶波,季汉成,朱筱敏.川西前陆盆地上三叠统须家河组成岩相研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(3):358-363.

- [7]张琴,朱筱敏,陈祥,等.南华北盆地谭庄凹陷下白垩统成岩相分布及优质储层预测[J].石油与天然气地质,2010,31(4):472-480.
- [8]陈冬霞,庞雄奇,杨克明,等.川西坳陷中段上三叠统须二段致密砂岩孔隙度演化史[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(增刊1):42-51.
- [9]赖锦,王贵文,郑懿琼,等.金秋区块须四段储层成岩相及测井识别[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(5):41-49.
- [10]蒙晓灵,张宏波,冯强汉,等.鄂尔多斯盆地神木气田二叠系太原组天然气成藏条件[J].石油与天然气地质,2013,34(1):37-41.
- [11]张明松,雷卞军,黄有根,等.鄂尔多斯盆地余兴庄—子洲地区上古生界山₂储层砂岩成岩作用与成岩相[J].沉积学报,2011,29(6):1031-1038.
- [12]刘春雷,李文厚,袁珍,等.鄂尔多斯盆地东南缘上三叠统长₈段砂岩储层成岩作用与孔隙演化[J].地质通报,2013,32(5):807-814.
- [13]邹才能,侯连华,匡立春,等.准噶尔盆地西缘二叠—三叠系扇控成岩储集相成因机理[J].地质科学,2007,42(3):587-601.
- [14]罗静兰, Morad S, 阎世可, 等. 河流—湖泊三角洲相砂岩成岩作用的重建及其对储层物性演化的影响: 以延长油区侏罗系上三叠统砂岩为例[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(12): 1007-1015.
- [15]Lander S K, Bonnell L R H. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301-328.
- [16]邢顺淦. 松辽盆地北部扶杨油层砂岩的成岩作用与储层性质研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1990, 9(4): 13-22.
- [17]徐世琦. 吐哈盆地温吉桑构造带中侏罗统砂岩成岩作用对储层储集性的影响[J]. 天然气工业, 1996, 16(2): 16-18.
- [18]傅强. 成岩作用对储层孔隙的影响: 以辽河盆地荣₃块气田下第三系为例[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 92-96.
- [19]柳益群, 李文厚. 陕甘宁盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化[J]. 沉积学报, 1996, 14(3): 87-96.
- [20]Baker J C, Havord P J, Martin K R, et al. Diagenesis and petrophysics of the Early Permian Moogooloo Sandstone, southern Carnarvon Basin, Western Australia[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(2): 250-265.
- [21]Billault V, Beaufort D, Baronnet A, et al. A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs[J]. Clay Minerals, 2003, 38(3): 315-328.
- [22]黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(3): 273-281.
- [23]李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长₈₁低渗透储层成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 209-217.
- [24]Hilliers S, Wilson M J, Merriman R J, et al. Clay mineralogy of the old red sandstone and Devonian sedimentary rocks of Wales, Scotland and England[J]. Clay Minerals, 2006, 41(1): 433-471.
- [25]郭小波, 黄志龙, 王伟明, 等. 台北凹陷温吉桑地区致密砂岩储层特征及其控制因素[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(1): 157-166.
- [26]胡海燕, 吴坚, 黄芸, 等. 白家海凸起油气成藏机理及其主控因素[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(2): 137-139.
- [27]胡宗全, 朱筱敏. 准噶尔盆地西北缘侏罗系储层成岩作用及孔隙演化[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(3): 16-20.
- [28]伏万军. 粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. 古地理学报, 2000, 2(3): 59-68.
- [29]曹剑, 张义杰, 胡文瑄, 等. 油气储层自生高岭石发育特点及其对物性的影响[J]. 矿物学报, 2005, 25(4): 367-373.
- [30]SY/4 5477—2003 碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [31]连小翠, 王振奇, 叶春, 等. 准噶尔盆地白家海地区三工河组储层孔隙结构及影响因素[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 35-40.
- [32]况昊, 王振奇, 瞿建华, 等. 白家海凸起—阜北斜坡中下侏罗统成岩演化特征[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2): 159-161.
- [33]高辉, 孙卫. 鄂尔多斯盆地合水地区长₈储层成岩作用与有利成岩相带[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(3): 542-548.
- [34]赖锦, 王贵文, 王书南, 等. 碎屑岩储层成岩相研究现状及进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(1): 39-50.
- [35]赖锦, 王贵文, 陈敏, 等. 基于岩石物理相划分的储层孔隙结构分类评价: 以鄂尔多斯盆地姬源地区长₈油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 566-573.
- [36]刘伟, 窦齐丰, 黄述旺, 等. 成岩作用的定量表征与成岩储集相研究——以科尔沁油田交₃断块区九佛堂组(J_{9f})下段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 399-403.
- [37]代金友, 张一伟, 熊琦华, 等. 成岩作用对储集层物性贡献比率研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 54-55.
- [38]孙思敏. 低渗透储层成岩作用定量表征与成岩储集相——以吉林新立油田泉头组三、四段为例[J]. 沉积与特提地质, 2007, 27(2): 100-105.