

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.054

文章编号: 1006-6616 (2021) 04-0652-10

基于星点状方解石胶结与溶解的识别查明砂岩粒间孔隙类型——以雅布赖盆地新河组砂岩为例

王建国¹, 周晓峰¹, 唐海忠², 魏 军², 韩小松², 郭 伟³

WANG Jianguo¹, ZHOU Xiaofeng¹, TANG Haizhong², WEI Jun², HAN Xiaosong², GUO Wei³

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2. 中国石油 玉门油田分公司 勘探开发研究院, 甘肃 酒泉 735019;

3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083

1. *College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*

2. *Research Institute of Exploration and Development, Yumen Oilfield Company, PetroChina, Jiuquan 735019, Gansu, China;*

3. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*

WANG J, ZHOU X, TANG H, et al., 2021. Identifying intergranular pore types by distinguishing between cementation and dissolution of dotted calcite: A case study of the Xinhe Formation sandstones in the Yabrai Basin, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 652-661. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.054

Abstract: There is still no consensus among researchers about whether intergranular pores in oil-bearing sandstone are primary pores or secondary pores. Distinguishing between cementation and dissolution of dotted calcite can effectively identify intergranular pore types. In this paper, taking the diagenetic environment evolution and diagenesis sequence as the thread, we carefully observed the casting slices from the Xinhe Formation sandstones in the Yabrai Basin and finely dissected the microphenomenon by focusing on the calcite cements in its relation between the origins of substance and dissolution fluids and the occurrence mode. The genesis of the dotted calcite was clarified thus, and then the intergranular pore types and reservoir space types in the sandstones were identified. The study results show that the dotted calcite in the intergranular pore is the dissolution residue of the disseminated calcite formed in the early diagenetic stage, and the dissolution type is the consistent dissolution. The dissolution fluid, organic acid fluid formed during the middle diagenetic stage, caused the secondary pores. Therefore, it is concluded that the reservoir space in the Xinhe Formation sandstones in the Yabrai Basin consists of the secondary intergranular pores and the secondary intragranular pores such as dissolution pores of cements of feldspar, lithoclast, lithoclast.

Key words: dotted calcite; cementation and dissolution; intergranular pore; Xinhe Formation sandstones; Yabrai Basin

摘 要: 目前含油气砂岩中粒间孔隙是原生孔隙还是次生孔隙的认识仍不一致, 而对星点状方解石胶结与溶解的识别能够有效地查明粒间孔隙的类型。文章通过铸体薄片细致地观察雅布赖盆地新河组砂岩中的微观现象, 以成岩环境演化和成岩序列分析为主线, 重视方解石胶结物的赋存状态与物质来源和溶蚀流体来源的配置关系, 精细解剖微观现象, 从而弄清楚星点状方解石的成因, 进而查明砂岩的粒间孔隙

基金项目: 中国石油科技创新基金 (2019D-5007-0202)

This research is financially supported by the PetroChina Innovation Foundation (Grant No. 2019D-5007-0202)

第一作者简介: 王建国 (1978—), 男, 博士, 讲师, 从事油气田开发地质研究。E-mail: wjglww@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-09-08; **修回日期:** 2021-01-31; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 王建国, 周晓峰, 唐海忠, 等, 2021. 基于星点状方解石胶结与溶解的识别查明砂岩粒间孔隙类型: 以雅布赖盆地新河组砂岩为例 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 652-661. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.054

类型和储集空间类型。结果表明,粒间孔隙中的星点状方解石是成岩早期浸染状方解石胶结物的溶蚀残余,溶蚀流体为成岩中期的有机酸流体,溶蚀类型为一致性溶解,形成的粒间孔隙为次生孔隙。鉴于此,雅布赖盆地新河组砂岩的储集空间由次生粒间孔隙和次生粒内孔隙(长石、岩屑、方解石胶结物的溶蚀孔隙)组成。

关键词: 星点状方解石; 胶结和溶解; 粒间孔隙; 新河组砂岩; 雅布赖盆地

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

0 引言

含油气砂岩的次生粒间孔隙与原生粒间孔隙都出现在碎屑颗粒之间而难以分辨,这就造成在同一研究对象的不同研究成果之中对储集空间类型的认识不一致。美国路易斯安那州上志留统塔斯卡卢萨组砂岩的粒间孔隙有原生粒间孔隙和方解石胶结物溶解形成的次生粒间孔隙之争(Pittman et al., 1992)。准噶尔盆地腹部侏罗系三工河组砂岩的储集空间以原生粒间孔隙为主(张江华和相鹏, 2019),或以混合孔隙为主(王建伟等, 2006),或以次生粒间孔隙为主(何生等, 2009; 刘惠民等, 2020)。酒泉盆地营尔凹陷下沟组砂岩以方解石胶结物溶解形成的次生粒间孔隙为主(吕成福等, 2010)或仅有次生孔隙(唐海忠等, 2019)。究其原因,缺乏方解石胶结和溶解作用的典型岩石学证据是储集空间类型认识不一致的根本原因(远光辉等, 2015; 唐海忠等, 2019)。以原生粒间孔隙为主的砂岩油气勘探开发的重点是寻找有利沉积相带,以次生孔隙为主的砂岩油气勘探开发要着力发现溶蚀流体的指向区。因此,确定含油气砂岩的储集空间类型,不仅是一个基础地质问题,更关乎油气的高效勘探开发(黄军平等, 2015)。

砂岩中普遍发育形成于成岩各个阶段的方解石胶结物,占据原生粒间孔隙,造成砂岩致密化(Loucks and Dutton, 2019)。但在适宜的成岩地质条件下,遇到酸性流体,方解石发生一致性溶解,形成溶蚀孔隙(Emsbo and Hofstra, 2003)。若溶蚀时间足够长,溶蚀强度足够大,方解石被溶蚀殆尽而形成的次生粒间孔隙与原生粒间孔隙差异较小,但方解石溶蚀所留下的片段记录较少(Pommer and Sarg, 2019),进而造成对储集空间类型认识的多解性。因此,只有找到方解石胶结作用和溶解作用的典型岩石学证据,提取片段记录

的有效信息,才能确定碎屑颗粒之间的孔隙是原生粒间孔隙还是次生粒间孔隙,进而确定砂岩的储集空间类型。

雅布赖盆地的油气勘探始于20世纪60年代,历经多轮勘探思路调整,先后钻探20余口井,仅有少数钻井经压裂在新河组砂岩中获得工业油流,展现出油气分布的复杂性。以往对雅布赖盆地油气地质条件的分析主要集中在中侏罗统新河组的构造演化方面(李明杰等, 2004; 钟玮等, 2013; 杨波等, 2018)与油气成藏方面(吴晓智等, 2015; 高岗等, 2017),而鲜有关于储层的研究。文中主要利用铸体薄片细致地观察方解石胶结和溶解的现象及与其他矿物和碎屑的相互关系,寻找粒间孔隙与方解石胶结和溶解的可能信息,正演方解石胶结和溶解的过程,明确粒间孔隙的具体归属(原生粒间孔隙或次生粒间孔隙)和砂岩储集空间类型。

1 地质背景

雅布赖盆地地跨内蒙古和甘肃两省,面积约 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1),大地构造位置处于华北克拉通西缘阿拉善地块的北部活化带(翟明国, 2019),经历了侏罗纪—早白垩世断陷阶段及晚白垩世—新近纪的挤压拗陷阶段,最终形成了现今的构造格局及构造单元(薛明旺等, 2020)。雅布赖盆地由东部隆起和西部拗陷两个一级构造单元组成。东部隆起大面积出露前中生界基底岩系,西部拗陷南部为萨尔台凹陷,北部为红杉湖凹陷。萨尔台凹陷自西向东依次划分为盐场次凹、黑沙凸起、小湖次凹、红刺梁凸起和梭托次凹等5个三级构造单元。西部拗陷中新生界冲积扇—河流—湖泊相沉积盖层逾4000 m,由下至上依次为下侏罗统筵筵沟组、中侏罗统青土井组和新河组、上侏罗统沙枣河组、下白垩统庙沟组、上白垩统金剛泉组和新生界。

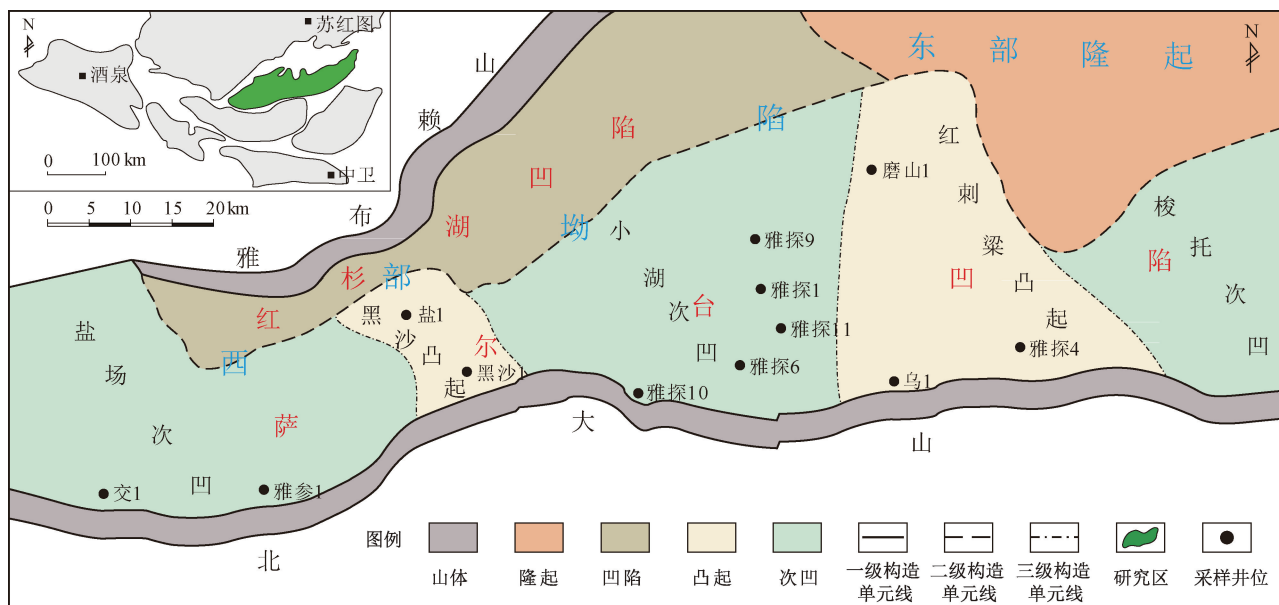


图1 雅布赖盆地地理位置与构造单元划分

Fig. 1 Sketch map showing the location and tectonic units of the Yabrai Basin

雅布赖中生代盆地主要历经两期成盆作用和两期盆地改造作用（李明杰等，2004；钟玮等，2013；杨波等，2018）。燕山运动早期，伸展动力学背景下，形成南断北超的箕状不对称断陷湖盆，堆积厚达4000 m的侏罗系。侏罗纪末期，西伯利亚板块向南运动的碰撞造山作用，引起盆地急剧抬升，导致侏罗系剥蚀厚度超过1000 m。其中，黑沙凸起和红刺梁凸起剥蚀至新河组，东部隆起出露基底岩系。燕山晚期，受蒙古-鄂霍茨克洋闭合碰撞造山及太平洋板块北西向俯冲作用的联合影响，盆地北部处于强烈伸展状态，而南部处于类前陆盆地的前渊环境，形成北部强烈断陷下沉、南部挤压下沉和中部相对隆起的山间湖盆。其中，红杉湖凹陷沉积厚度最大，达1600 m。喜马拉雅期，由于印度板块向北俯冲并与欧亚板块碰撞的远程效应，雅布赖盆地再次抬升，堆积的新生界冲（洪）积红色粗碎屑厚度不超过100 m。

新河组沉积时期是中生代雅布赖湖盆发育的鼎盛期，发育有扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊等3种沉积相类型（石英涛等，2015；张少敏等，2016）。烃源岩与储集层配置较好，成藏条件较好。勘探实践和研究结果表明，新河组烃源岩是盆地主要的优质油源岩，有机质类型好、丰度高、热成熟度适中（王彦博，2014；董义国，2014；都鹏燕，2016；高岗等，2017；都鹏燕等，2018）；储集层以三角洲前缘块状砂岩为主。

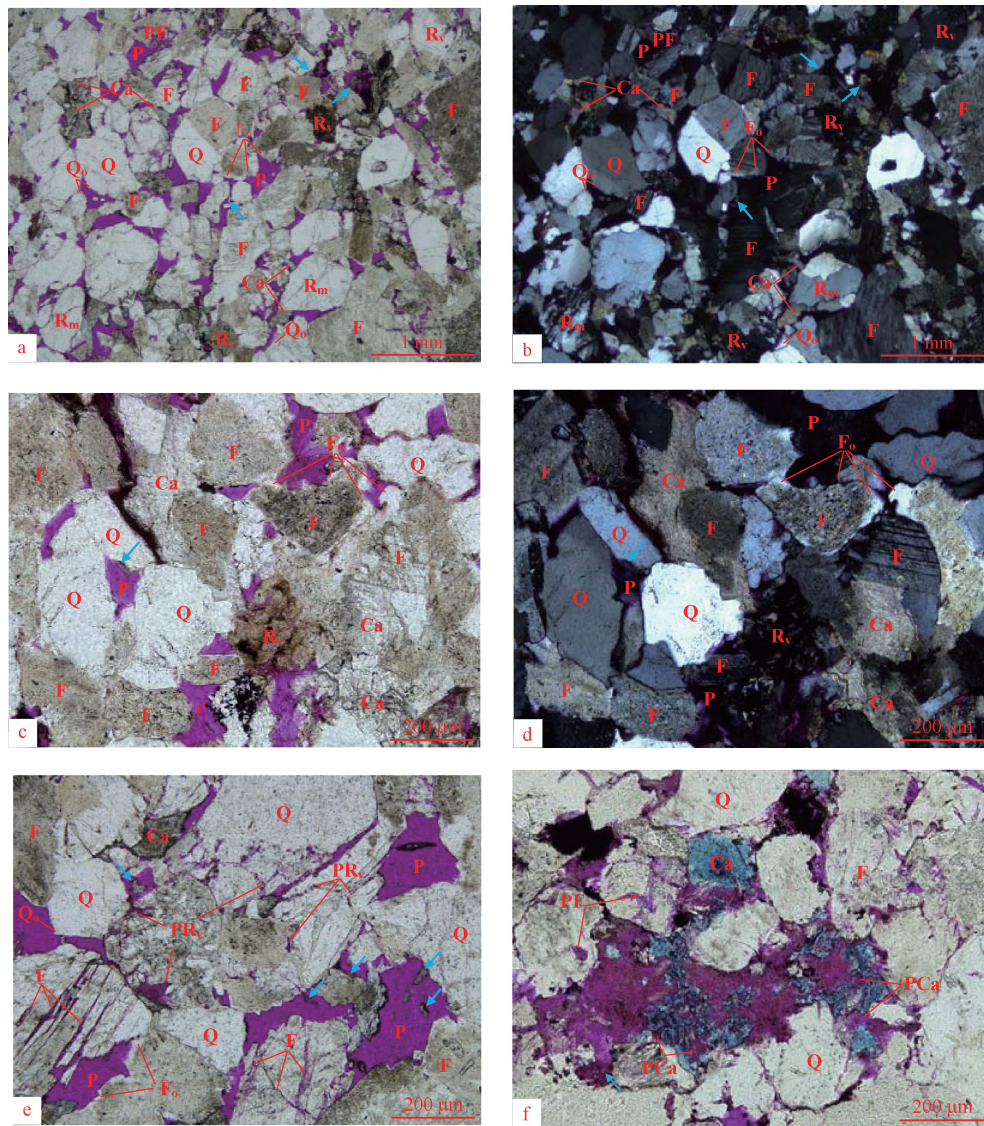
2 砂岩基本信息

2.1 样品岩石学特征

勘探证实，小湖次凹新河组砂岩的油气显示最为活跃。镜下观察发现，小湖次凹新河组砂岩的成岩作用现象丰富（图2），具有研究储集空间类型的典型岩石学证据。此次研究的砂岩样品选自小湖次凹新河组砂岩。

小湖次凹新河组砂岩碎屑颗粒成分以石英、长石、火山岩岩屑、变质岩岩屑为主，成分成熟度低。岩石碎屑颗粒粒径不一，细砂、中砂、粗砂、细砾等混杂堆积（图2），结构成熟度低。填隙物以方解石胶结物为主，鲜见次生长石加大和次生石英加大。储集空间类型有粒间孔隙、长石溶蚀孔隙、岩屑溶蚀孔隙和方解石胶结物溶蚀孔隙。粒间孔隙中常见星点状方解石胶结物（图2，蓝色箭头所指处）。

由图2可知，雅布赖盆地新河组砂岩的结构特征具有5个特点：①碎屑颗粒间的接触关系多样化，表现为点状、线状和基底式等接触关系共存；②在碎屑颗粒之间呈基底式接触关系的微域，碎屑颗粒漂浮在方解石胶结物之中；③方解石胶结物发育的微域，缺乏碎屑颗粒次生加大；④粒间孔隙中通常可见碎屑颗粒次生加大和星点状方解石胶结物，但次生加大发育处不见方解石，同时



Q—石英; F—长石; R_v —火山岩屑; R_m —变质岩屑; Q_o —一次生石英加大; F_o —一次生长石加大; Ca—方解石胶结物; P—粒间孔隙; PF—长石溶蚀孔隙; PR_v —火山岩溶蚀孔隙; PCa—方解石胶结物溶蚀孔隙

a、b—雅探6井, 2651.57 m, 石英、长石、火山岩屑、变质岩屑大小混杂堆积, 方解石胶结物多, 次生长石加大和次生石英加大少见, 粒间孔隙中可见零星分布的方解石(蓝色箭头所指处), a为单偏光, b为正交偏光; c、d—雅探11井, 2597.64 m, 团块状方解石胶结物发育的微域碎屑颗粒间接接触或基底式接触, 次生长石加大发育, 粒间孔隙中可见星点状方解石(蓝色箭头所指处), c为单偏光, d为正交偏光; e—雅探6井, 2651.57 m, 粒间孔隙、长石溶蚀孔隙、岩屑溶蚀孔隙, 粒间孔隙中常见星点状方解石(蓝色箭头所指处), 单偏光; f—雅探7井, 2406.62 m, 方解石经混合液染色呈蓝色, 方解石溶蚀孔隙发育, 单偏光

图2 雅布赖盆地新河组砂岩岩石学特征显微照片

Fig. 2 Microscopy photos of petrological characteristics of Xinhe Formation sandstones, Yabrai Basin. (a, b) The Well YT6, 2651.57 m; large and small mixed accumulation of quartz, feldspar, volcanic and metamorphic debris. Calcite cements are more than feldspar overgrowths and quartz overgrowths; calcite distributes sporadically in intergranular pores (where the blue arrows point); a is taken under single polar and b is taken under crossed polar. (c, d) The well YT11, 2597.64 m; in the micro domain where the massive calcite cements are developed, the clastic particles are in point contact or basal contact; feldspars overgrow; dotted calcites are distributed in intergranular pores (where the blue arrows point); c is taken under single polar and d is taken under crossed polar. (e) The well YT6, 2651.57 m; there are intergranular pores, feldspar dissolution pores and debris dissolution pores; dotted calcites are distributed in intergranular pores (where the blue arrows point); e is taken under single polar. (f) The well YT7, 2406.62 m; calcite was dyed blue by mixed solution; the dissolution pores of calcite are well developed; f is taken under single polar

Q—quartz; F—feldspar; R_v —volcanic debris; R_m —metamorphic debris; Q_o —Quartz overgrowth; F_o —feldspar overgrowth; Ca—calcite cement; P—intergranular pore; PF—dissolution pore of feldspar; PR_v —dissolution pore of volcanic rock; PCa—dissolution pore of calcite cement

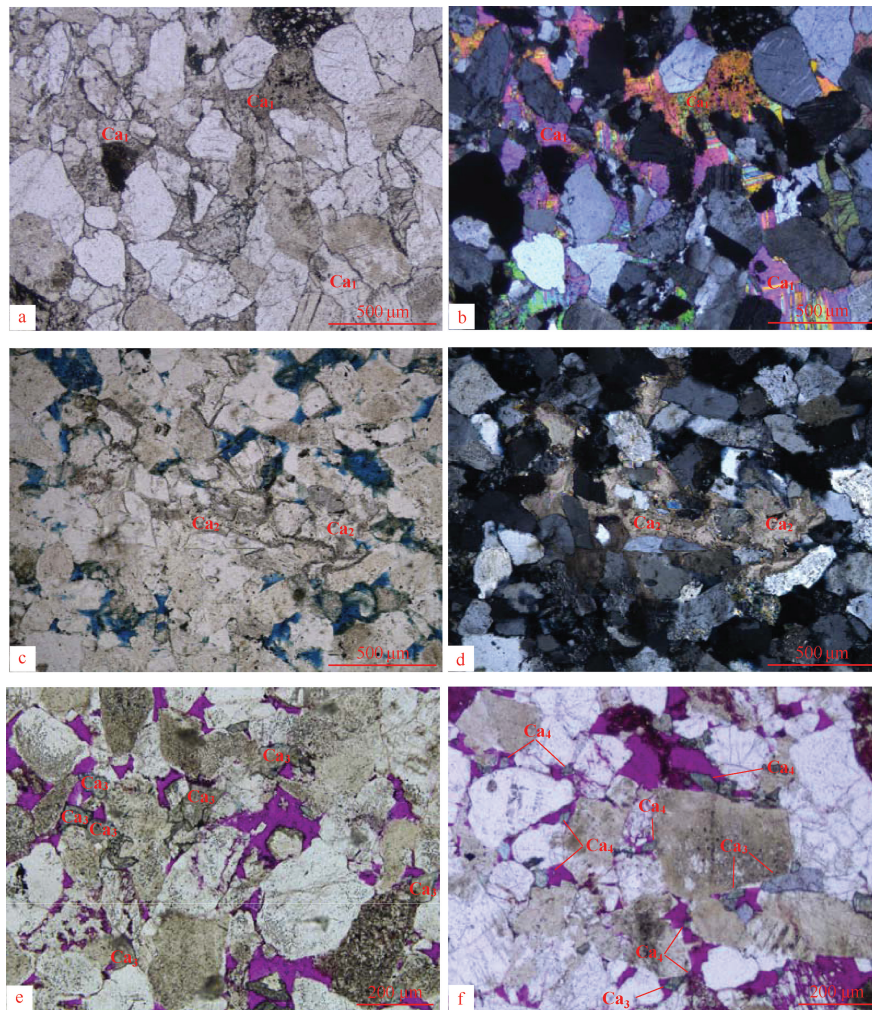
星点状方解石出现的地方也未见碎屑颗粒次生加大;⑤方解石胶结物发育的微域粒间孔隙少,而方解石胶结物不发育的微域粒间孔隙多。

方解石胶结和溶解两种现象共存,指示砂岩经历过碱性和酸性成岩环境的交替。碱性成岩环境中,方解石晶体从孔隙流体中沉淀出,结晶胶结碎屑颗粒使原始砂质沉积物固结成岩石。酸性成岩环境中,遇酸容易发生溶解反应的方解石、长石、岩屑等颗粒遭受溶蚀。长石和岩屑通常发生不一致性溶解,形成粒内溶蚀孔隙的同时,在

溶蚀区内还形成新的矿物,如石英次生加大和长石次生加大。而方解石通常发生一致性溶解,仅留下方解石溶蚀孔隙。

2.2 方解石胶结物赋存状态

充分利用单偏光下孔隙最为清晰,正交光下各种颗粒容易分辨,低倍镜下现象丰富,高倍镜下细节信息量大等特点来取全、取准微观现象。鉴别出小湖次凹新河组砂岩方解石胶结物具有4种赋存状态:浸染状、团块状、斑块状及星点状(图3)。



Ca₁—浸染状方解石胶结物, Ca₂—团块状方解石胶结物, Ca₃—斑块状方解石胶结物, Ca₄—星点状方解石胶结物

a、b—雅探6井, 2654.75 m, 浸染状方解石胶结物, 形成钙质砂岩, a为单偏光, b为正交偏光; c、d—雅探1井, 2914.71 m, 团块状方解石胶结物, 与粒间孔隙接触处方解石胶结物溶蚀成港湾状, c为单偏光, d为正交光; e—雅探6井, 2653.34 m, 斑块状方解石胶结物, 边缘参差不齐, 单偏光; f—雅探6井, 2651.82 m, 星点状和斑块状方解石附着在粒间孔隙壁面上, 方解石表面凹凸不平, 单偏光

图3 雅布赖盆地新河组砂岩方解石胶结与溶解显微照片

Fig. 3 Microscopy photos of calcite cementation and dissolution in Xinhe Formation sandstones, Yabrai Basin. (a, b) The well YT6, 2654.75 m; disseminated calcite cements form calcareous sandstones, a is taken under single polar and b is taken under crossed polar. (c, d) The well YT1, 2914.71 m; the massive calcite cements next to intergranular pores are dissolved into a harbor, c is taken under single polar and d is taken under crossed polar. (e) The well YT6, 2653.34 m; the edge of patchy calcite cements are uneven, e is taken under single polar. (f) The well YT6, 2651.82 m; the dotted and patchy calcites adhere to the walls of intergranular pores, and the surface of calcites are uneven; f is taken under single polar.

Ca₁—disseminated calcite cement; Ca₂—massive calcite cement; Ca₃—patchy calcite cement; Ca₄—dotted calcite cement

浸染状方解石占岩石体积的15%以上,全部充填于碎屑颗粒之间的孔隙,造成砂岩致密,形成钙质砂岩(图3a、3b)。钙质砂岩的碎屑颗粒之间以点状接触为主,常见线状接触和基底式接触。方解石完全充填原生粒间孔隙的胶结作用方式,有效地抵抗机械压实作用,阻止砂岩的体积减小,为后期方解石一致性溶解形成次生粒间孔隙准备了物质基础和空间基础(Pettijohn et al., 1972)。

团块状方解石通常胶结数个碎屑颗粒组成一个致密的微域,在孔隙砂岩中常见且极易辨别(图3c、3d)。单偏光下,这个微域的体积明显大于围岩碎屑颗粒的体积。正交光下,团块状方解石显艳丽的金属色,与碎屑颗粒的接触关系更加清晰。该微域中,碎屑颗粒之间以点状接触为主,常见线状接触和基底式接触。团块状方解石与粒间孔隙接触处多呈港湾状,标示方解石胶结物曾经有过溶蚀。

斑块状方解石体积较小,一般情况下胶结的碎屑颗粒数目不超过3个(图3e)。该微域的碎屑颗粒间接触关系类似于团块状微域的碎屑颗粒间接触关系,点状、线状和基底式等接触关系共存。方解石的边缘参差不齐,说明溶蚀现象丰富。

星点状方解石出现在粒间孔隙的壁面上,体积微小,多为孤立的小点(图3f)。星点状方解石在单偏光下常常被忽略,只有在正交光下高倍放大才能发现其蛛丝马迹。利用单偏光与正交光的反复切换观察显示,雅布赖盆地小湖次凹新河组砂岩的粒间孔隙中星点状方解石胶结物普遍存在(图2,蓝色箭头所指处)。总体上看,星点状方解石表面多凹凸不平,标示方解石胶结物发生过溶蚀现象。

由图2、图3可知,团块状、斑块状、星点状方解石杂乱无章地分布在粒间孔隙发育的储层砂岩中,而浸染状方解石胶结形成致密的钙质砂岩。

3 储集空间类型

研究区新河组砂岩的储集空间有粒间孔隙、长石溶蚀孔隙、火山岩屑溶蚀孔隙和方解石胶结物内溶蚀孔隙等4种类型(图2,图3)。后三者是次生粒内(包括碎屑颗粒和胶结物颗粒内)孔隙,这一点无异议。无法准确判断粒间孔隙是原生粒间孔隙还是次生粒间孔隙的原因在于难于判别星

点状方解石是晚期胶结物还是早期胶结物的溶解残余。若是早期方解石胶结物的溶解残余,那么粒间孔隙是次生孔隙;若是晚期胶结物,则粒间孔隙是原生孔隙。于是,储集空间类型的识别就转化为对星点状方解石胶结和溶解的识别。

为了充分地识别粒间孔隙是原生孔隙还是次生孔隙,先假设两种情况,即星点状方解石是晚期胶结物或早期胶结物溶蚀残余,然后从镜下观察入手,以成岩作用序列为主线将微观现象有机地联系起来,进而分析哪一种假设更具有客观真实性。文中将油气成藏之前、之时和之后的砂岩成岩过程分别称之为成岩早期、成岩中期和成岩晚期。雅布赖盆地构造演化史分析表明,新河组砂岩油藏的形成时间为晚侏罗世中后期,之后,埋藏深度变浅,烃源岩停止生烃,油气成藏活动基本结束(吴晓智等, 2015; 高岗等, 2017)。

3.1 假设星点状方解石为晚期胶结物

假设星点状方解石为成岩晚期的胶结物,则粒间孔隙为原生粒间孔隙。

浸染状方解石胶结的砂岩,碎屑颗粒间的接触关系通常表现为点状或基底式接触,标示其形成于成岩早期,这种认识已被广泛接受。在团块状和斑块状方解石发育的微域中,碎屑颗粒之间也通常表现为点状或基底式接触关系,说明团块状和斑块状方解石也形成于成岩早期。

陆相砂岩中,碎屑颗粒次生加大的物源通常是长石和富长石质碎屑溶蚀所产生的流体,而长石和富长石质碎屑颗粒的溶蚀需要酸性流体作为溶蚀剂。一般情况下,酸性溶蚀流体有3个来源:有机酸流体、大气水和深源CO₂流体(Shanley and Cluff, 2015)。分析具体地质情况可知,新河组砂岩经历过构造抬升,但并未曾到达地表遭受过大气水淋滤。虽然发育基底断裂,但目前仍未发现有深源CO₂流体对新河组砂岩溶蚀的迹象。因此,有机酸流体是砂岩遇到酸性溶蚀流体的唯一机会,这已经被构造演化(钟玮等, 2013; 杨波等, 2018)和油气成藏研究所证实(吴晓智等, 2015; 高岗等, 2017)。

综合微观现象分析,推断雅布赖盆地新河组砂岩的成岩作用序列为:成岩早期的浸染状、团块状、斑块状方解石胶结物→成岩中期油气充注→成岩早期的方解石胶结物溶解→长石和火山

岩屑溶蚀→碎屑颗粒次生加大→成岩晚期星点状方解石胶结→团块状、斑块状和星点状方解石溶解。但基于这种假设的成岩作用序列分析有以下3点不足之处。

(1) 上已述及,成岩中期的有机酸是砂岩遇到酸性溶蚀流体的唯一机会,因此,成岩晚期的星点状方解石胶结物错过了有机酸对其进行改造的时间。那么,星点状方解石的溶蚀流体谁提供的说不清楚。

(2) 成岩早期能够形成体积较大的团块状和斑块状方解石,为何不在邻近的原生粒间孔隙中沉淀体积较小的星点状方解石。这显然难以给出合理的回答。

(3) 点状方解石胶结的微域,原生粒间孔隙多,碎屑颗粒间的接触关系也常见点接触和基底式接触,表明压实作用较弱,这显然不符合一般

地质规律。浸染状、团块状、斑块状方解石发育的微域,因方解石形成于成岩早期,具有抗压实作用,碎屑颗粒之间点状和基底式接触是符合常理的。而粒间孔隙发育的微域,在成岩中期埋深曾超过3000 m的情况下,碎屑颗粒间仍能保持点状和基底式接触关系是令人难以接受的。

3.2 假设星点状方解石为早期胶结物的溶解残余

成岩中期的有机酸是新河组砂岩遭遇酸性溶蚀流体的唯一机会,那么,具有溶蚀现象的团块状、斑块状和星点状方解石是浸染状方解石的溶蚀残余的解释最为令人信服,其典型成岩作用序列为:成岩早期浸染状方解石胶结→成岩中期油气充注→浸染状方解石溶解为团块状、斑块状及星点状残余→长石和火山岩岩屑溶蚀→碎屑颗粒次生加大,成岩晚期没有发生过明显的成岩现象(图4)。

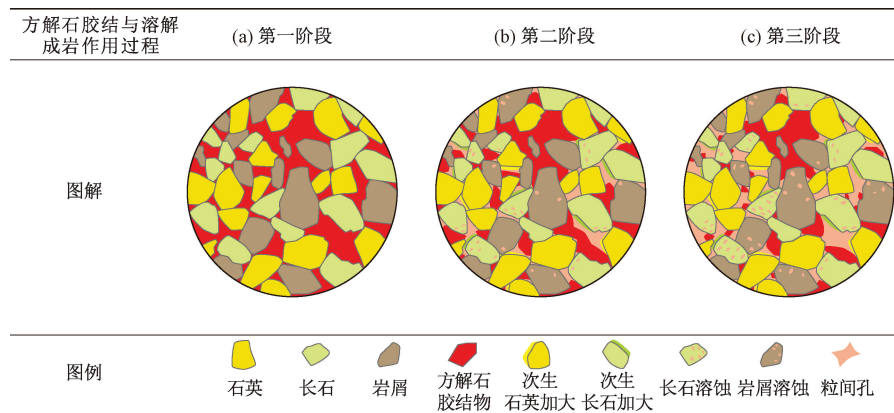


图4 雅布赖盆地新河组砂岩方解石胶结与溶解成岩作用过程图解

Fig. 4 Diagenesis process of caltite cementation and dissolution in the Xinhe Formation sandstones, Yabrai Basin

成岩早期,泥质沉积物压实作用的强度大于砂质沉积物压实作用的强度,砂、泥质沉积物中的流体产生压差,于是泥质沉积物中的碳酸钙过饱和和压释水源不断地进入相邻砂岩,方解石在碎屑颗粒之间沉淀下来,形成浸染状方解石胶结物,砂质沉积物转化为致密的钙质砂岩(图4a)。

成岩中期,有机质达到热成熟,开始生成油气并产生有机酸。在生烃增压作用下,油源岩与砂岩之间产生压力差,油气携带有机酸进入砂岩。浸染状方解石遇到有机酸发生一致性溶解,产生方解石溶孔,赋存状态转化为团块状,并使部分碎屑颗粒有机会与流体接触。长石和火山岩岩屑遇到有机酸发生非一致性溶解,产生次生粒内孔隙,并在就近的碎屑颗粒表面形成次生加大(图4b)。

随着油气持续充注,方解石继续发生一致性

溶解,团块状方解石大多转化为斑块状和星点状方解石,方解石溶蚀孔隙转化为次生粒间孔隙,物性得到明显改善,流体运移通道畅通,长石和火山岩屑溶蚀产生的流体能够及时地移出,它们的溶蚀作用由非一致性溶解转化为一致性溶解,碎屑颗粒的次生加大作用停止(图4c)。成岩中期末,由于构造抬升,油源岩生烃作用停止,油气充注活动结束,砂岩油藏形成。

成岩晚期,砂岩的孔隙空间几乎全被石油占据,成岩作用停止。

从两种假设的对比分析可以看出,星点状方解石为成岩早期浸染状方解石的溶解残余的说法更为合理,成岩环境演化和成岩作用序列脉络清晰,所有微观现象都能够得到很好地解释。

调研相关研究文献发现,对方解石胶结物形

成时间的看法目前仍然比较混乱,主要表现在以下3个方面:①以赋存状态确定形成时间,将浸染状、团块状、斑块状及星点状方解石视为不同时期从孔隙流体中沉淀的,认为星点状方解石所在的粒间孔隙为原生孔隙(谭先锋等,2015;沈健,2020);②认为浸染状方解石形成于成岩早期,其他赋存状态的方解石为成岩中期或成岩晚期的胶结物(钟金银等,2011,李阳等,2018;陈秀艳等,2020);③依据地球化学(如碳氧同位素、流体包裹体)分析测试数据确定形成时间,认为各种赋存状态的方解石形成于成岩中期或成岩晚期(Sun et al., 2014; 付锁堂等, 2015; 王晔桐等, 2020)。这些认识的不足之处有6点:①实验结果表明,体积1 cm×50 cm×50 cm、孔隙度40%、含3倍过饱和海水的砂层只能沉淀一个直径约1.25 mm的方解石球粒(Pettijohn et al., 1972),因此要形成砂岩中的方解石胶结物需要有足够的过饱和和碳酸钙流体源源不断地供给,除泥岩压释水外,还有哪种流体可以持续不断地向砂岩提供如此多的过饱和和碳酸钙?②成岩中期,油气携带有机酸进入砂岩,砂岩总体处于酸性流体中,不适宜方解石沉淀;③成岩后期,孔隙中通常是可流动油气和束缚水,总体表现为惰性成岩场,不可能形成大量方解石或其他碳酸盐胶结物;④不同赋存状态方解石发育的微域,碎屑颗粒之间的接触关系通常极为相似,以基底式接触、点接触和线接触共存,这表明它们大致形成于同一时间;⑤碳氧同位素和流体包裹体分析测试数据多解性强,对它们的解释必须服从于岩石学证据(Pettijohn et al., 1972; 王大锐, 2000; 周晓峰等, 2018);⑥方解石有溶蚀现象的情况下,往往难以弄清楚溶蚀流体来自哪里。

综上所述可知,精细解剖微观现象,以成岩环境演化和成岩作用序列为主线,重视方解石的物质和溶蚀流体来源研究,弄清楚方解石的胶结和溶解过程,合理地解释各种微观现象的相互关系,才能有效地识别储集空间类型。此次研究查明,雅布赖盆地新河组砂岩中的粒间孔隙为次生孔隙,储集空间类型由次生粒间孔隙和次生粒内孔隙组成,次生粒间孔隙是浸染状方解石胶结物一致性溶解的产物,次生粒内孔隙包括长石粒内溶蚀孔隙、岩屑粒内溶蚀孔隙和方解石胶结物溶蚀孔隙。

4 结论

(1) 方解石通常是含油气砂岩体积最大、赋存方式多样化的胶结物,成岩信息丰富,其中粒间孔隙中星点状方解石成因(胶结或溶解)的认识对查明粒间孔隙的类型进而指导油气勘探有重要意义。星点状方解石为成岩晚期的胶结物则粒间孔隙为原生孔隙,而星点状方解石为成岩早期方解石的溶蚀残余则粒间孔隙为次生孔隙。

(2) 雅布赖盆地方解石胶结物具有浸染状、团块状、斑块状及星点状等赋存方式,浸染状方解石形成于成岩早期,而团块状、斑块状及点状方解石是浸染状方解石胶结物的溶蚀残余,溶蚀流体为成岩中期的有机酸流体,溶蚀类型为一致性溶解,形成的粒间孔隙为次生孔隙。

(3) 含油气砂岩中粒间孔隙是原生孔隙还是次生孔隙的认识仍不一致,推荐以星点状方解石的成因(胶结或溶解)研究作为含油气砂岩粒间孔隙类型研究的突破口,研究过程中强调以岩石学特征作为第一手资料,以成岩环境演化和成岩序列分析为主线,重视方解石胶结物的赋存状态与物质来源和溶蚀流体来源的配置关系。

References

- CHEN X Y, WANG J, ZHANG L P, et al., 2020. Sedimentary characteristics and genesis of carbonate cements in carboniferous Donghe sandstone member, Hanilcatam area of Tarim basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50 (2): 509-517. (in Chinese with English abstract)
- DONG Y G, 2014. Hydrocarbon source rocks evaluation in Jurassic of YaBulai basin of Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 15-20. (in Chinese with English abstract)
- DU P Y, 2016. Distribution of Jurassic effective source rocks in the Yabrai basin and its control to petroleum [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- DU P Y, GAO G, WEI T, et al., 2018. Effective Source Rocks in Jurassic Xinhe Formation in Sartai Sag, Yabrai Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 48 (1): 29-38. (in Chinese with English abstract)
- EMSBO P, HOFSTRA A H, 2003. Origin and significance of postore dissolution collapse breccias cemented with calcite and barite at the Meikle gold deposit, northern Carlin Trend, Nevada [J]. Economic Geology, 98 (6): 1243-1252.
- FU S T, WANG Z L, ZHANG Y S, et al., 2015. Origin of carbonate cements in reservoir rocks and its petroleum geologic significance: Eboliang structure belt, northern margin of Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33 (5): 991-999. (in Chinese with English abstract)

English abstract)

- GAO G, ZHAO L Y, MA G F, et al., 2017. Formation conditions of the Jurassic Xinhe Formation tight oil reservoirs and resource potential in the Yabrai Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 38 (3): 478-488. (in Chinese with English abstract)
- HE S, YANG Z, HE Z L, et al., 2009. Mechanism of carbonate cementation and secondary dissolution porosity formation in deep-burial sandstones near the top Overpressured surface in central part of Junggar basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34 (5): 759-768, 798. (in Chinese with English abstract)
- HUANG J P, YANG Z L, MA G F, et al., 2015. The geological characteristics and exploration potential of tight oil in small fault-subsided lake Basins, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 26 (9): 1763-1772. (in Chinese with English abstract)
- LI M J, ZHENG M L, CAO C C, et al., 2004. Evolution of superposed Jurassic and Cretaceous basins in Beishan-Alxa area [J]. *Oil & Gas Geology*, 25 (1): 54-57. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, ZHANG W X, LI S T, et al., 2018. Characteristics of carbonate cements and their effects on properties in Chang 8 sandstone reservoir, Ordos Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 37 (4): 175-183. (in Chinese with English abstract)
- LIU H M, WANG X J, DU Z J, et al., 2020. Study on pore structure characteristics of tight sandstone in Block 4 of the central Junggar basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (1): 96-105. (in Chinese with English abstract)
- LOUCKS R G, DUTTON S P, 2019. Insights into deep, onshore gulf of Mexico Wilcox sandstone pore networks and reservoir quality through the integration of petrographic, porosity and permeability, and mercury injection capillary pressure analyses [J]. *AAPG Bulletin*, 103 (3): 745-765.
- LV C F, QIN C W, CHEN G J, et al., 2010. Diagenesis of lower cretaceous reservoir sandstones from Jiudong depression in Jiuquan basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 21 (6): 939-946. (in Chinese with English abstract)
- PETTJOHN F J, POTTER P E, SIEVER R, 1972. Sand and sandstone [M]. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag: 383-437.
- PITTMAN E D, LARESE R E, HEALD M T, 1992. Clay coats: Occurrence and relevance to preservation of porosity in sandstones [M] //HOUSEKNECHT D W, PITTMAN E D. Origin, diagenesis, and petrophysics of clay minerals in sandstones. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology: 241-255.
- POMMER M, SARG J F, 2019. Biochemical and stratigraphic controls on pore-system evolution, Phosphoria Rock Complex (Permian), Rocky mountain Region, USA [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 18 (2): 25-60.
- SHANLEY K W, CLUFF R M, 2015. The Evolution of Pore-scale fluid-saturation in Low-permeability Sandstone reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 99 (10): 1957-1990.
- SHEN J, 2020. Carbonate cementation characteristics and genetic mechanism of tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 32 (2): 24-32. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y T, LIAO Y T, TANG J R, et al., 2015. Characteristics of sequence stratigraphy and sedimentary facies in the lower Xinhe formation of Xiaohu Sub-sag, Yabulai basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 34 (5): 38-45. (in Chinese with English abstract)
- SUN G Q, WANG H F, ZOU K Z, et al., 2014. Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate cements in Jiulongshan region, north edge of Qaidam basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 25 (9): 1358-1365. (in Chinese with English abstract)
- TAN T, REN Z L, WU X Q, et al., 2015. Apatite fission track analysis of Meso-cenozoic tectonic-thermal history in Sartai depression, Yabrai Basin [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46 (8): 2974-2982. (in Chinese with English abstract)
- TAN X F, HUANG J H, LI J, et al., 2015. Origin of carbonate cements and the transformation of the reservoir in sandstone under the deep burial condition-A case study on Eocene Kongdian formation in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Geological Review*, 61 (5): 1107-1120. (in Chinese with English abstract)
- TANG H Z, WEI J, ZHOU Z H, et al., 2019. Characteristics of calcite cements in deep Xiagou Formation sandstones of Ying'er Depression, Jiuquan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 30 (5): 652-661. (in Chinese with English abstract)
- WANG D R, 2000. Stable isotope geochemistry of oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 123-145. (in Chinese)
- WANG J W, SONG S J, BAO Z D, et al., 2006. Analysis of the quality reservoir development controlling factors of J_1s_2 formation of Zhuang-1 area in Zhungeer Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyong University (Natural Science Edition)*, 21 (1): 11-14. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y B, 2014. Analysis on geochemical characteristics and potentials of Xinhe formation in Yabrai Basin [D]. Xi'an: Xi'an Shiyong University: 16-23. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y T, SUN G Q, YANG Y H, et al., 2020. Characteristics and significance of carbonate cement in the No.7 area of Lenghu, Northern Margin of Qaidam Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 42 (1): 45-56. (in Chinese with English abstract)
- WU X Z, WANG G J, ZHENG M, et al., 2015. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in Yabulai Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 50 (1): 74-87. (in Chinese with English abstract)
- XUE M W, ZHANG T, DING W L, et al., 2020. Fluid potential characteristics of Carboniferous and the division of hydrocarbon migration and accumulation units in the eastern depression of the Bayanhaote Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (1): 65-73. (in Chinese with English abstract)
- YANG B, HOU J, CHEN H Q, et al., 2018. Characteristics of the Yabulai Mesozoic Basin and its exploration strategy [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 53 (S2): 314-320. (in Chinese with English abstract)
- YUAN G H, CAO Y C, JIA Z Z, et al., 2015. Research progress on anomalously high porosity zones in deeply buried clastic reservoirs in petroliferous basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 26 (1): 28-42. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI M G, 2019. Tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (5): 722-745. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J H, XIANG P, 2019. Genetic mechanisms of low-permeability reservoir of Sangonghe Formation in Block 1 of central Junggar Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyong University (Natural Science)*, 34 (1): 43-49. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG S M, CAO Y C, ZHU R K, et al., 2016. The lithofacies and depositional environment of fine-grained sedimentary rocks of Xiaohu Subsag in Yabulai basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 27 (2): 309-319. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG J Y, HE M, ZHOU T, et al., 2011. Origin analysis of carbonate cements in Chang 8 reservoir in southeastern margin of Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 23 (4): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG W, LIN C M, WU C, et al., 2013. The Mesozoic tectonic in the Yabrai Basin [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 33 (1): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X F, LI J, ZHANG J X, et al., 2018. Revisiting the compaction time of Chang 8 sandstones in Southwestern Ordos Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 40 (3): 1-10. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈秀艳,王剑,张立平,等,2020.塔里木盆地哈拉哈塘地区石炭系东河砂岩段碳酸盐胶结物沉积特征及其成因[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,50(2):509-517.
- 董义国,2014.内蒙古雅布赖盆地侏罗系烃源岩评价[D].北京:中国地质大学(北京):15-20.
- 都鹏燕,2016.雅布赖盆地侏罗系有效烃源岩分布及其对油气的控制作用[D].北京:中国石油大学(北京):20-25.
- 都鹏燕,高岗,魏涛,等,2018.雅布赖盆地萨尔台凹陷侏罗系新河组有效烃源岩研究[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,48(1):29-38.
- 付锁堂,王震亮,张永庶,等,2015.柴北缘西段鄂博梁构造带储层碳酸盐胶结物成因及其油气地质意义:来自碳、氧同位素的约束[J].*沉积学报*,33(5):991-999.
- 高岗,赵乐义,马国福,等,2017.雅布赖盆地侏罗系新河组致密油形成条件与有利区资源潜力[J].*石油与天然气地质*,38(3):478-488.
- 何生,杨智,何治亮,等,2009.准噶尔盆地腹部超压顶面附近深层砂岩碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙形成机理[J].*地球科学—中国地质大学学报*,34(5):759-768,798.
- 黄军平,杨占龙,马国福,等,2015.中国小型断陷湖盆致密油地质特征及勘探潜力分析[J].*天然气地球科学*,26(9):1763-1772.
- 李明杰,郑孟林,曹春潮,等,2004.北山-阿拉善地区侏罗-白垩纪盆地的叠合演化[J].*石油与天然气地质*,25(1):54-57.
- 李阳,张文选,李树同,等,2018.鄂尔多斯盆地长8砂岩储层碳酸盐胶结物特征及其对物性的影响[J].*地质科技情报*,37(4):175-183.
- 刘惠民,王学军,杜振京,等,2020.准中4区块致密砂岩孔隙结构特征研究[J].*地质力学学报*,26(1):96-105.
- 吕成福,秦长文,陈国俊,等,2010.酒泉盆地酒东凹陷下白垩统低孔渗储层成岩作用研究[J].*天然气地球科学*,21(6):939-946.
- 孙国强,王海峰,邹开真,等,2014.柴北缘九龙山地区侏罗系砂岩中碳酸盐胶结物特征及意义[J].*天然气地球科学*,25(9):1358-1365.
- 沈健,2020.鄂尔多斯盆地陇东地区致密砂岩储层碳酸盐胶结物特征及成因机理[J].*岩性油气藏*,32(2):24-32.
- 石英涛,廖远涛,汤建荣,等,2015.雅布赖盆地小湖次凹新河组下段层序及沉积相特征[J].*地质科技情报*,34(5):38-45.
- 谭先锋,黄建红,李洁,等,2015.深部埋藏条件下砂岩中碳酸盐胶结物的成因及储层改造:以济阳坳陷始新统孔店组为例[J].*地质论评*,61(5):1107-1120.
- 唐海忠,魏军,周在华,等,2019.酒泉盆地营尔凹陷深层下沟组砂岩方解石胶结物特征[J].*天然气地球科学*,30(5):652-661.
- 田涛,2015.雅布赖盆地萨尔台凹陷热演化史与油气成藏期次研究[D].西安:西北大学:13-18.
- 田涛,任战利,吴晓青,等,2015.雅布赖盆地萨尔台凹陷中—新生代构造热事件的磷灰石裂变径迹分析[J].*中南大学学报(自然科学版)*,46(8):2974-2982.
- 王大锐,2000.油气稳定同位素地球化学[M].北京:石油工业出版社:123-145.
- 王建伟,宋书君,鲍志东,等,2006.准噶尔盆地庄1井区J₁s₂段优质储层发育控制因素[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*,21(1):11-14.
- 王彦博,2014.雅布赖盆地新河组烃源岩地化特征及资源潜力分析[D].西安:西安石油大学:16-23.
- 王晔桐,孙国强,杨永恒,等,2020.柴北缘冷湖七号地区碳酸盐胶结物特征及其意义[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,42(1):45-56.
- 吴晓智,王桂君,郑民,等,2015.雅布赖盆地构造演化与油气聚集[J].*地质科学*,50(1):74-87.
- 薛明旺,张坦,丁文龙,等,2020.巴彦浩特盆地东部坳陷石炭系流体势特征及油气运聚单元划分[J].*地质力学学报*,26(1):65-73.
- 杨波,侯军,陈海清,等,2018.雅布赖中生代叠合盆地特征及勘探方向[J].*石油地球物理勘探*,53(S2):314-320.
- 远光辉,操应长,贾珍臻,等,2015.含油气盆地中深层碎屑岩储层异常高孔带研究进展[J].*天然气地球科学*,26(1):28-42.
- 翟明国,2019.华北克拉通构造演化[J].*地质力学学报*,25(5):722-745.
- 张江华,相鹏,2019.准噶尔盆地中部1区三工河组低渗透储层成因机制[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*,34(1):43-49.
- 张少敏,操应长,朱如凯,等,2016.雅布赖盆地小湖次凹细粒沉积岩岩相特征与沉积环境探讨[J].*天然气地球科学*,27(2):309-319.
- 钟金银,何苗,周韬,等,2011.鄂尔多斯盆地东南缘长8油层组碳酸盐胶结物成因分析[J].*岩性油气藏*,23(4):65-69.
- 钟玮,林常梅,吴超,等,2013.雅布赖盆地中生代构造特征[J].*四川地质学报*,33(1):7-11.
- 周晓峰,李景,张建欣,等,2018.鄂尔多斯盆地西南部长8砂岩致密时间再认识[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,40(3):1-10.

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

