



移动阅读

郑潇宇, 张翔, 李建, 等, 2023. 塔里木盆地西北地区震旦系苏盖特布拉克组潮坪相碎屑岩成岩作用与成岩演化研究[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 530–541. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04017

ZHENG X Y, ZHANG X, LI J, et al., 2023. Diagenesis and diagenetic evolution of tidal flat facies clastic rocks of Sinian Sugetbrak Formation in Northwest Tarim Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 530–541. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04017

塔里木盆地西北地区震旦系苏盖特布拉克组潮坪相碎屑岩成岩作用与成岩演化研究

郑潇宇¹, 张翔^{1,2*}, 李建³, 田景春^{1,2}, 彭明鸿³, 张琪沅³, 张悦¹

(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, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 塔里木盆地西北地区苏盖特布拉克组发育一套潮坪相沉积, 是该层系油气勘探的主要目标。基于什艾日克剖面、奇格布拉克剖面、肖尔布拉克剖面的地质测量, 采用薄片鉴定、阴极发光、扫描电镜、流体包裹体测温及黏土矿物 X 衍射等分析手段开展海相碎屑岩成岩作用和成岩演化研究, 为塔里木盆地苏盖特布拉克组进一步开展油气勘探部署和甜点储层预测提供地质依据。结果表明: (1) 研究区苏盖特布拉克组发育潮坪沉积环境的砂体, 砂岩类型以岩屑石英砂岩、岩屑砂岩为主, 偶见长石岩屑砂岩, 成分成熟度和结构成熟度中等; (2) 苏盖特布拉克组砂岩经历了压实(溶)作用、胶结作用、溶蚀作用及交代作用等成岩作用, 压实作用是造成储层致密的直接原因, 钙质胶结和硅质胶结是储层致密化的根本因素; (3) 苏盖特布拉克组砂岩的成岩演化阶段已达到中成岩 B 期, 成岩演化序列为: 压实作用/自生黏土矿物(绿泥石)环边—第一期长石、岩屑溶蚀作用—第一期硅质胶结—第一期泥微晶方解石胶结/压溶作用/黏土矿物的伊利化—第二次硅质胶结/第二期铁方解石胶结—钙质胶结物溶蚀。据此建立的成岩演化模式为塔里木盆地超深层致密砂岩中甜点储层预测提供可靠的地质依据。

关键词: 成岩作用; 成岩模式; 潮坪相碎屑岩; 苏盖特布拉克组; 塔西北地区

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

Diagenesis and diagenetic evolution of tidal flat facies clastic rocks of Sinian Sugetbrak Formation in Northwest Tarim Basin

ZHENG Xiaoyu¹, ZHANG Xiang^{1,2*}, LI Jian³, TIAN Jingchun^{1,2}, PENG Minghong³, ZHANG Qiyuan³, ZHANG Yue¹

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 3. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A set of tidal flat facies deposits are developed in the Sugetbrak Formation in the northwest of the Tarim Basin, which is the main target of oil and gas exploration in this formation. Based on the geological survey of Shaiirike, Qigebrak and Qiaoenbrak

收稿日期: 2021-10-11; 改回日期: 2022-04-27; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 万友利

作者简介: 郑潇宇(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事储层沉积学方面的研究。E-mail: 494953459@qq.com

通讯作者: 张翔(1978—), 男, 博士, 副教授, 从事储层沉积学教学和研究工作。E-mail: zhangxiang06@cdut.edu.cn

资助项目: 中国石油化工股份有限公司科技开发项目(P17046-4)

sections, the diagenesis and diagenetic evolution of marine clastic rocks are studied by means of thin section identification, cathodoluminescence, scanning electron microscope, fluid inclusion temperature measurement and clay mineral X-diffraction, so as to provide a geological basis for further oil and gas exploration deployment and reservoir prediction of the Sugetbrak Formation in the Tarim Basin. The results show that: (1) Sand bodies in tidal flat sedimentary environment are developed in the Sugetbrak Formation in the study area, the sandstones are mainly lithic quartz sandstone and lithic sandstone, and feldspathic lithic sandstone is occasionally seen, with medium compositional maturity and structural maturity; (2) The sandstone of the Sugetbrak Formation has experienced diagenesis such as compaction, cementation, dissolution and replacement. Compaction is the direct cause of reservoir densification, and calcareous and siliceous cementation are the fundamental factors of reservoir densification; (3) The diagenetic evolution stage of Sugetbrak sandstones has reached the middle diagenetic stage B. the diagenetic evolution sequence is: compaction / autogenous clay mineral (chlorite) rim - the first stage feldspar and rock debris dissolution - the first stage silica cementation - the first stage mud microcrystalline calcite cementation / pressure dissolution / illitization of clay minerals - the second stage silica cementation / the second stage iron calcite cementation - calcium cement dissolution. The diagenetic evolution model provides a reliable geological basis for the prediction of ultra-deep tight sandstone reservoirs in the Tarim Basin.

Key words: diagenesis; diagenetic stage; tidal flat clastic rock; Sugetbrak Formation; northwest Tarim Basin

0 引言

随着油气勘探程度的加深,浅层常规油气藏的发现越发困难,向深层—超深层进军是全球油气勘探开发的新趋势(贾承造和庞雄奇,2015;马永生等,2022)。近年来,深层—超深层的油气勘探取得了重要突破,特别是四川安岳地区深层震旦—寒武系特大气田的发现,证实四川盆地深层—超深层油气勘探领域资源潜力巨大(邹才能等,2014),在塔里木盆地寒武系也获得良好的油气发现(杨沛等,2021),显示出塔里木盆地在深层—超深层领域具有广阔的油气勘探前景。目前已取得的勘探突破主要集中在碳酸盐岩领域,对深层—超深层碎屑岩领域来说,整体低渗—致密背景下相对高孔/高渗的优质储层是寻觅的甜点,砂体储层孔隙的发育与保存明显受成岩作用控制,因此,开展成岩作用与成岩演化研究是寻觅深层—超深层碎屑岩储层甜点的基础。

塔里木盆地自南华纪在前震旦系结晶基底上发育裂谷—拗拉槽以来,先后经历了加里东期、海西期、印支—燕山期、喜山期4个阶段的构造轮回(李丕龙等,2010)。南华纪为塔里木地块裂谷阶段,盆地以砂砾岩、冰碛岩和火山碎屑岩组合充填为主;震旦纪拗陷阶段,发育海相碎屑岩-碎屑岩与碳酸盐岩混合沉积-厚层白云岩与微生物白云岩的沉积组合(田雷等,2020)。其中,苏盖特布拉克组是早震旦世拗陷阶段滨岸—陆棚沉积环境发育的碎屑岩建造,与下伏南华系裂谷相烃源岩构成良好的

源储组合(闫磊等,2021),是盆地深层—超深层碎屑岩领域潜在的勘探目标。震旦系在盆地周缘的塔西北、塔东北和塔西南均有出露(高振家等,1987;姚春彦,2010;周肖贝等,2015;吴林等,2020)。塔西北地区苏盖特布拉克组以无障壁海岸—有障壁海岸—陆棚沉积为特征(Chen et al., 2020; 石开波等,2016; 康建威等,2016; 姜海健等,2017; 邓浩博,2019; 陈汉林等,2020; 刘若涵等,2020; 吴林等,2020; 吴福志等,2021),有障壁海岸的砂坪和潮道砂体是该层系油气勘探的主要目标。由于盆地内苏盖特布拉克组埋深大、地质条件复杂,且缺少钻井揭示,严重制约了对该层系的油气发现和评价。鉴于此,本次研究基于塔西北地区苏盖特布拉克组剖面观测及样品采集,通过薄片鉴定、扫描电镜观察,结合阴极发光、流体包裹体测温和黏土矿物X衍射分析,在岩石学特征研究基础上,研究其成岩作用类型及成岩作用阶段,建立成岩演化模式,以期为塔里木盆地苏盖特布拉克组进一步开展油气勘探部署和甜点储层预测提供地质依据。

1 区域地质背景

研究区位于塔里木盆地西北缘阿克苏—乌什一线以南的柯坪断隆(图1A),苏盖特布拉克组在区内出露完整,地层厚度为280~450 m(图1B),以角度不整合的形式覆盖在阿克苏群之上,上与奇格布拉克组呈平行不整合接触。按岩性组合将苏盖特布拉克组分为2个岩性段,下段底部发育暗红色砾岩与细粒岩屑石英砂岩,形成多个正韵律旋回,

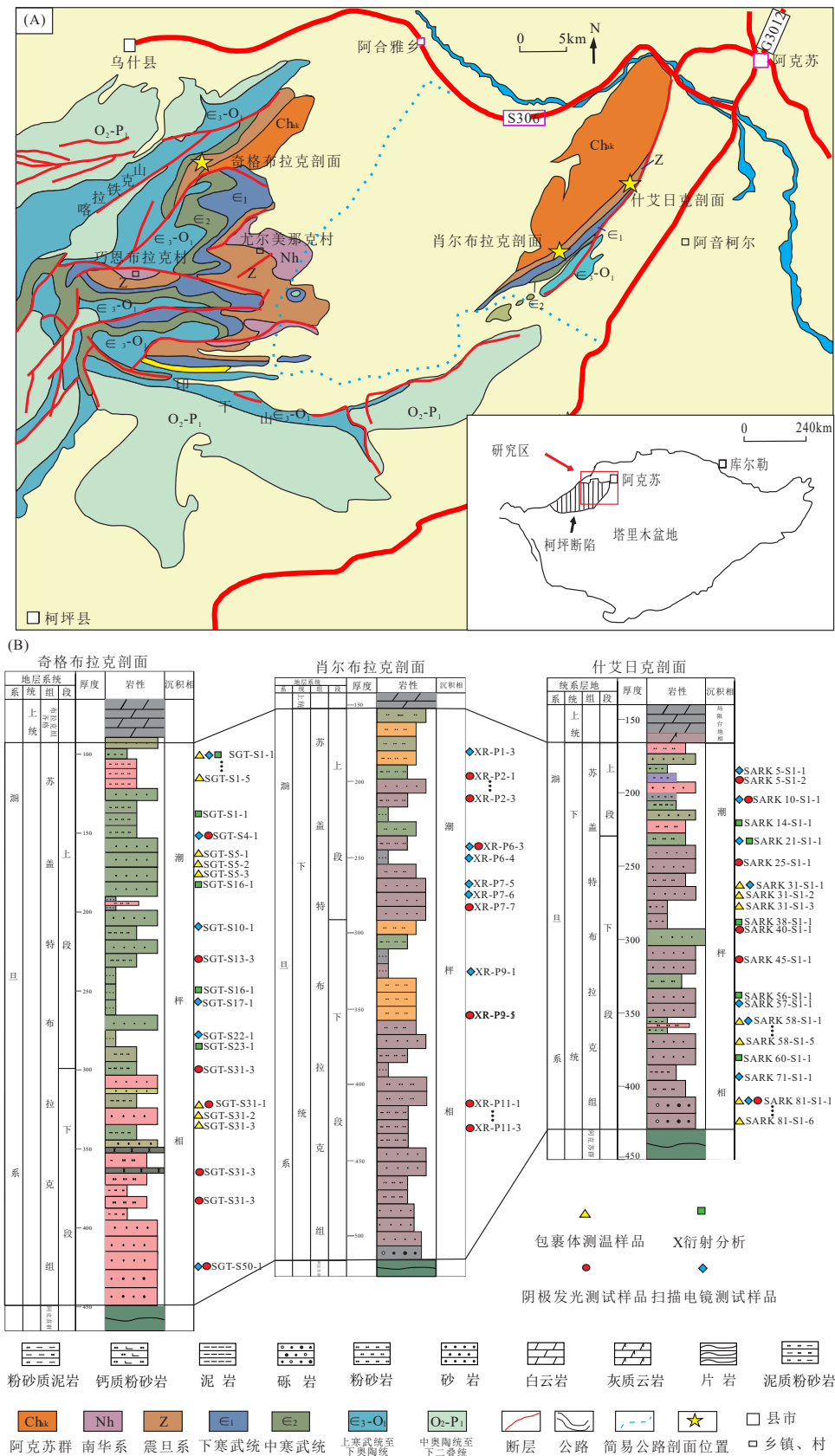


图1 塔西北地区地质简图 (A) (据何金有, 2010 修改) 与苏盖特布拉克组地层对比图 (B)

Fig. 1 Geological brief map of northwestern margin of Tarim Basin (A) (modified by He, 2010) and stratigraphic correlation map of Sinian Sugetbrak Formation (B)

砂岩中广泛发育平行层理、楔状交错层理,是波浪等强水动力条件改造的无障壁海岸沉积(康建威等, 2016; 邓浩博, 2019);中上部为褐红色泥页岩与薄层状细砂岩、粉砂岩互层,发育羽状交错层理、透镜状层理、脉状层理及波状层理等潮汐沉积构造,具有典型有障壁海岸沉积特征。在苏盖特布拉克组中上部夹有2~4层不等的早二叠世时期侵入的辉绿岩(吴鸿翔等, 2020),辉绿岩具有典型的辉绿结构,主要矿物成分包括基性斜长石和单斜辉石。苏盖特布拉克组沉积之后,经历了多期次造山旋回的改造(李丕龙等, 2010),特别是喜山期盆地南侧特提斯域的构造演化过程,即新生代印度次大陆与欧亚板块的碰撞造山,造成青藏高原的隆升,对塔里木盆地油气藏的形成与调整作用明显(张克信等, 2007; 郭刚等, 2014; 李慧等, 2016, 2019)。

2 样品与方法

本次研究的164件砂岩样品采集于塔西北地区的奇格布拉克剖面、肖尔布拉克剖面和什艾日克剖面(图1B)。通过(铸体)薄片鉴定、扫描电镜观察、阴极发光分析,研究成岩作用类型和成岩演化序列,通过硅质胶结物流体包裹体测温 and 黏土矿物X衍射分析确定成岩演化阶段。(铸体)薄片鉴定、扫描电镜观察、阴极发光、流体包裹体测温在成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室完成,黏土矿物X衍射在成都谱检测技术有限公司完成。

薄片观察使用光学显微镜尼康LV100POL,对87个普通薄片进行了鉴定;阴极发光分析使用徕卡显微镜,CL8200MK5发光系统,在18 kV电压和280 μ A电流的工作环境下对22组抛光薄片进行观测;扫描电镜观察使用日立S-3000N(最大分辨率为3.5 nm),在25 kV工作电压下,在放大倍数为35~3 000倍条件下对20个样品进行观察。

流体包裹体测温时,结合薄片鉴定结果,在划分石英次生加大边世代的基础上,分别对不同期次石英次生加大边中的包裹体类型、相态、大小等做详细描述。使用NikorLV100POL光学显微镜,放大倍数为100~500倍、英国Linkam公司生产的THMSG600型冷热台,温控范围在-196~600 $^{\circ}$ C,对包裹体的均一温度进行测试。

黏土矿物X衍射分析时,使用日本理学

Rigaku XRD- Rigaku Ultima IV型X衍射仪对所选取的10个砂岩样品进行X射线衍射分析。先对10个砂岩样品用氢氟酸酸化,去除杂质,然后对处理后的样品进行X衍射分析,使用jade 6软件对获取的X衍射图谱进行矿物相检索,计算各黏土矿物的相对含量。

3 岩石学特征

对3条剖面中87件样品的薄片进行鉴定结果统计,结果表明,研究区苏盖特布拉克组砂岩以岩屑石英砂岩(图2A)、岩屑砂岩(图2B)为主,偶见长石岩屑砂岩(图2C)。根据岩石组分统计结果,砂岩碎屑成分中石英含量较高,介于57%~92%,平均为76%,以单晶石英(图2D)为主;长石含量最少,介于0.6%~27%之间,平均为2%,长石主要为斜长石(图2E),含有少量钾长石(图2F);岩屑含量介于4%~22%之间,平均为22%,岩屑以沉积岩岩屑(图2G)和变质岩岩屑为主,变质岩岩屑主要为变质砂岩岩屑(图2H)和片岩岩屑(图2I)。

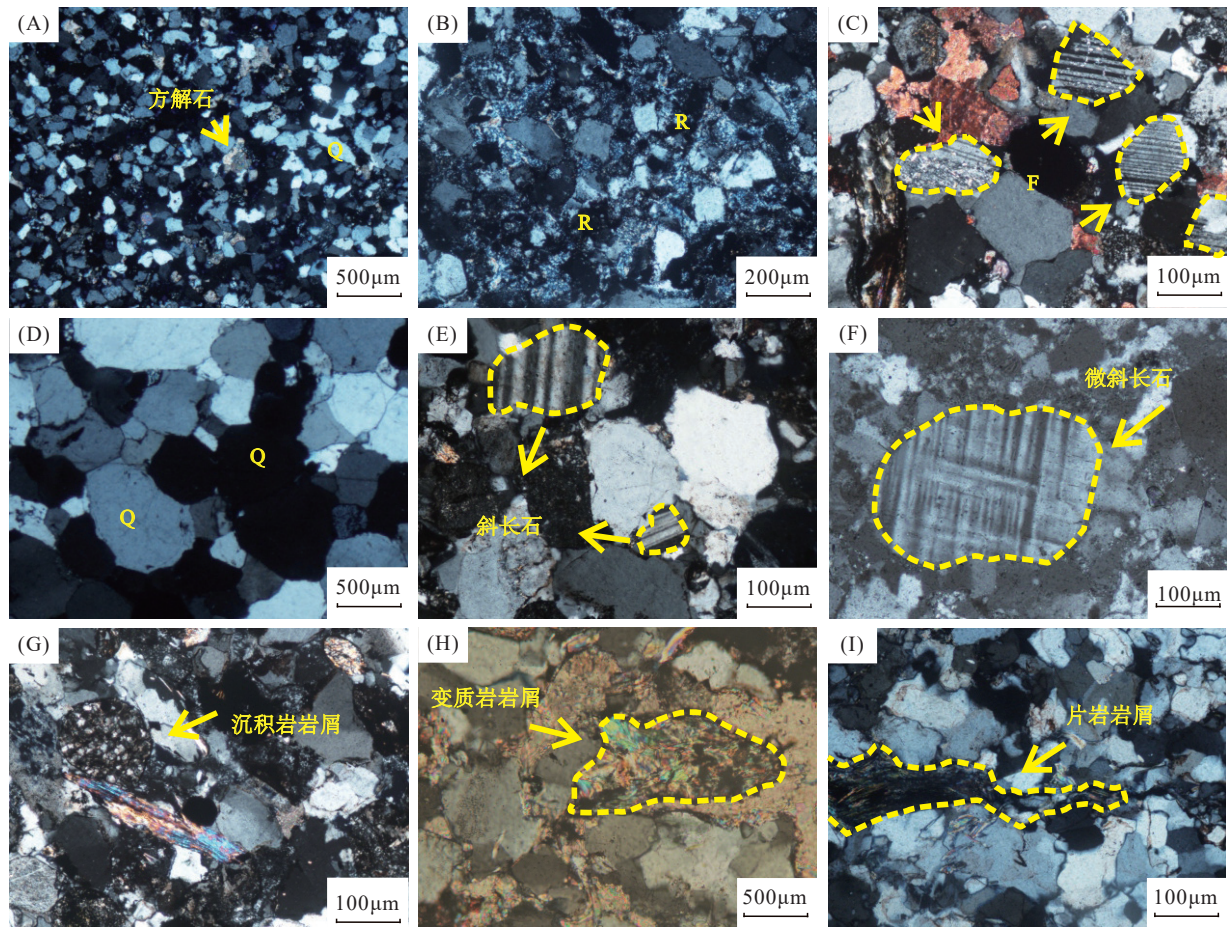
塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩的Q/(F+R)比值为3.4~11.9,成分成熟度中等。填隙物包括杂基和胶结物。杂基含量介于1%~6%,平均为3.3%,成分以泥质杂基和铁泥质杂基为主。胶结物含量较高,介于1%~8%,平均4.1%,主要为硅质胶结物和方解石胶结物。其中,硅质胶结物以石英次生加大边形式产出,I~II级,含量介于1%~8%,平均为2.1%;方解石胶结物含量介于1%~5%,平均为1.2%,以微晶方解石和晶粒状铁方解石为特征。砂岩粒度介于0.1~0.3 mm之间,以细砂岩为主,碎屑颗粒呈棱角一次棱角状,以凹凸接触为主,局部为线接触,分选中等。

4 成岩作用类型及特征

通过薄片鉴定、扫描电镜观察、结合阴极发光分析以及黏土矿物X衍射分析,研究塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩的成岩作用类型及特征。结果表明,苏盖特布拉克组砂岩发育的成岩作用主要包括:压实(溶)作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用。

4.1 压实(溶)作用

苏盖特布拉克组受负荷压力影响,压实作用现象显著。压实作用是造成研究区苏盖特布拉克组砂岩储层致密化的直接原因。薄片鉴定、扫描电



A. 细粒岩屑石英砂岩, 颗粒呈镶嵌接触, 方解石胶结, 奇格布拉克剖面, 正交偏光; B. 细粒岩屑砂岩, 碎屑颗粒呈次棱角状, 什艾日克剖面, 正交偏光; C. 细粒长石岩屑砂岩, 颗粒呈次圆—次棱角状, 方解石胶结, 奇格布拉克剖面, 红色为茜素红染色, 正交偏光; D. 中粒石英砂岩, 单晶石英, 颗粒间以线接触为主, 见镶嵌接触, 硅质胶结, 石英次生加大 I-II 级, 奇格布拉克剖面, 正交偏光; E. 细粒长石岩屑砂岩, 长石为斜长石, 具细而密的聚片双晶, 方解石胶结, 奇格布拉克剖面, 茜素红染色, 正交偏光; F. 微斜长石, 具格子状双晶, 呈次棱角状, 奇格布拉克剖面, 正交偏光; G. 细粒岩屑砂岩, 岩屑中见沉积岩岩屑, 奇格布拉克剖面, 正交偏光; H. 中粒岩屑砂岩, 浅变质岩岩屑发生蚀变, 呈绢云母化, 方解石胶结, 肖尔布拉克剖面, 正交偏光; I. 细粒石英砂岩, 片岩岩屑被压弯变形, 什艾日克剖面, 正交偏光。

图 2 塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩岩石学微观特征

Fig. 2 Petrological microcosmic characteristics of sandstone of Sugetbrak Formation in northwest Tarim Basin

镜观察表明, 苏盖特布拉克组经历的压实作用较强, 表现为岩屑砂岩中石英等刚性颗粒多呈点—线接触 (图 2D), 塑性岩屑因压实而发生变形 (图 3A); 岩屑石英砂岩的石英颗粒呈凹凸接触, 甚至呈缝合线状接触 (图 3B); 部分石英颗粒之间呈压溶现象, 在镜下呈镶嵌接触 (图 3C)。

4.2 胶结作用

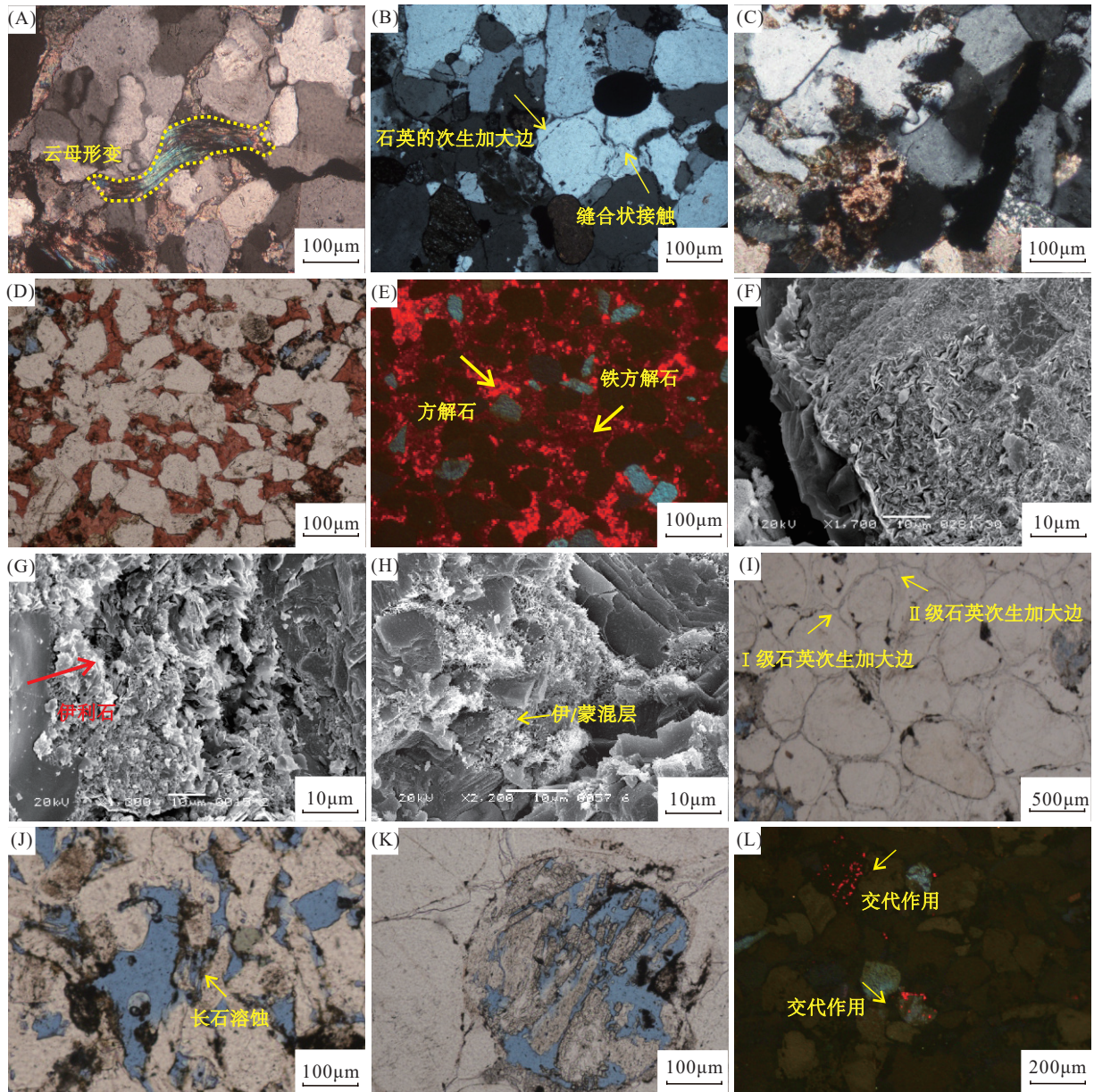
镜下鉴定结果表明, 胶结作用在研究区苏盖特布拉克组砂岩中普遍发育, 胶结物包括钙质、硅质和自生黏土矿物, 这是造成研究区砂岩储层致密化的根本因素。

4.2.1 钙质胶结

研究区砂岩中钙质胶结物呈泥微晶方解石和晶粒状铁方解石两种形式产出, 充填砂岩粒间孔隙。第一期钙质胶结物 (图 3D) 由于形成时间早, 因此结晶程度较差, 主要为泥微晶方解石。第二期晶粒状方解石主要为铁方解石, 呈连生胶结的形式充填于砂岩残余原生粒间孔和次生溶孔中, 在阴极发光下呈暗红色 (图 3E)。

4.2.2 黏土矿物胶结

根据普通薄片鉴定、扫描电镜观察, 结合黏土矿物 X 衍射分析结果, 研究区苏盖特布拉克组砂



A. 细粒石英砂岩中，石英颗粒呈镶嵌接触，云母压弯形变，什艾日克剖面，正交偏光；B. 细粒石英砂岩，颗粒间呈缝合状接触，什艾日克剖面，正交偏光；C. 细粒岩屑石英砂岩中，石英晶体之间呈镶嵌状接触，什艾日克剖面；D. 细粒岩屑石英砂岩，方解石胶结，石英颗粒呈漂浮状分布在方解石胶结物中，局部见残余溶蚀孔，溶蚀孔隙中含少量沥青质，奇格布拉克剖面，茜素红染色，单偏光；E. 细粒岩屑砂岩在阴极发光下，可见亮红色方解石和暗红色铁方解石胶结，什艾日克剖面；F. 石英颗粒表面发育的绿泥石包壳，奇格布拉克剖面，SEM；G. 碎屑颗粒表面发育的丝发状伊利石，局部呈蜂窝状蒙脱石向丝发状伊利石转化形态，什艾日克剖面；H. 扫描电镜下可见伊/蒙混层，什艾日克剖面；I. 细粒石英砂岩，含有少量粒间孔隙，硅质胶结发育，发育两期石英次生加大边，奇格布拉克组，蓝色为铸体，单偏光；J. 细粒岩屑石英砂岩，岩屑和长石溶蚀成孔隙，见沥青侵染孔隙边缘，奇格布拉克剖面，蓝色为铸体，单偏光；K. 中粒石英砂岩，发育石英次生加大边，长石溶蚀为粒内溶孔，见沥青，奇格布拉克剖面，蓝色为铸体，单光；L. 细粒长石岩屑砂岩，在阴极发光下，交代长石和岩屑的方解石呈橙色光，什艾日克剖面。

图3 塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩成岩作用微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of sandstone of the Sugaitbrak Formation in the northwest Tarim Basin

岩中黏土矿物主要为伊利石，含量为 64%~90%，平均含量为 75.2%；其次是伊/蒙混层黏土，含量为

9%~18%，平均含量为 14.1%；再次是绿泥石含量为 5%~36%，平均含量为 9.2%（两件样品未检测出

表 1 塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩黏土矿物 X 衍射分析结果

Table 1 X-ray diffraction analysis content of sandstone clay minerals of the Sugetbrak Formation in the Northwest Tarim

样品编号	I (%)	K (%)	C (%)	I/S (%)	I/S (S%)
SGT-S3	79	0	5	16	5
SGT-S1	73	0	10	17	5
SGT-S16	80	0	6	14	5
SARK-38-S1	64	0	19	17	5
SGT-S23	84	0	5	11	5
SGT-S6	76	0	6	18	5
SARK-56-S1	46	0	36	18	5
SARK-21-S1	89	0	0	11	5
SARK-60-S1	71	15	5	9	5
SARK-14-S1	90	0	0	10	5

注：I—伊利石，K—高岭石，C—绿泥石，I/S—伊蒙混层，I/S (S%)—伊蒙混层比（蒙脱石/%）。

绿泥石)。所有样品中几乎不含高岭石和蒙脱石(蒙皂石)，仅有一件样品中检测出高岭石，可能是样品采集过程中所存的污染现象(表 1)。

苏盖特布拉克组砂岩中片状绿泥石集合体多呈薄膜结构附着于石英颗粒表面(图 3F)，其形成时间较早，是由富 Fe、Ti 类矿物(如黑云母)溶解提供 Mg^{2+} ，与蒙脱石在近地表的半开放环境中形成，能够在一定程度上阻止后期石英次生加大。绿泥石胶结作用是一种保持性成岩作用(张震等, 2011)。研究区砂岩中绿泥石含量分布不均匀，可能与早成岩阶段半开放的成岩环境中水体性质有关。而到中深埋藏阶段，若地层中有富余的蒙脱石和 Mg^{2+} ，可以形成绒球状绿泥石，占据储集空间，破坏孔隙结构(钟广法等, 1996)，推测样品(SARK-56-S1)绿泥石含量高可能是中深埋藏阶段发育绒球状绿泥石所致。

苏盖特布拉克组砂岩中伊利石主要呈片丝状产出(图 3G)，充填于颗粒间孔隙，破坏孔隙结构，大幅度降低储集砂体的渗透率。从成因来说，碎屑岩中的伊利石主要有三种来源，包括继承性伊利石、长石与岩屑等铝硅酸盐的溶蚀和黏土矿物的转化(田建锋等, 2013)。黏土矿物 X 衍射结果表明，研究区苏盖特布拉克组砂岩中伊/蒙混层平均含量为 14.1%，有大量的伊/蒙混层向伊利石转化。伊/蒙混层比中蒙皂石含量仅为 5%，且砂岩中伊/蒙混层呈蜂窝—丝发状(图 3H)，说明伊/蒙混层向伊利石转化的程度较高，蒙脱石可能已完全转化为伊利石。

碎屑岩中长石在早成岩开放环境中可以溶蚀形成高岭石，该阶段形成的高岭石若能被及时带

出反应体系，则碎屑岩中高岭石含量低，在其后封闭的成岩系统中，钾长石的溶蚀也会有高岭石的形成，即表明碎屑岩经历多种类型的溶蚀和蚀变作用后，或多或少都会留下高岭石的“痕迹”。若地层温度达到 120℃ 以上时，高岭石可与钾长石按固态反应机理转化为伊利石($KAlSi_3O_8$ (钾长石)+ $2K_{0.3}Al_{1.9}Si_4O_{10}(OH)_2$ (高岭石)= $2K_{0.8}Al_{2.4}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$ (伊利石)+ $4SiO_2$ ，同时释放 SiO_2)。该反应的触发条件要求非常苛刻，而反应一旦开始，将会一直持续到一方消失殆尽方可停止(黄思静等, 2009)。根据砂岩黏土矿物 X 衍射结果及薄片观察，苏盖特布拉克组砂岩中钾长石(微斜长石)含量极低，同时高岭石含量趋于零，这可能表明在成岩过程中钾长石和高岭石沿固态机理路径转化成伊利石，其中高岭石消耗殆尽，钾长石还有少量残余。

4.2.3 硅质胶结

硅质胶结是当孔隙中 SiO_2 的含量达到饱和或过饱和状态， SiO_2 发生沉淀的过程。由于石英颗粒与硅质胶结物光性特征相似，不易区别，可在镜下根据石英颗粒边界的尘埃线将石英颗粒和硅质胶结物进行区分。塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩中发育两期硅质胶结物(图 3I)，主要以石英次生加大边形式产出。第一期硅质胶结石英次生加大边在石英颗粒边缘生长，加大边的宽度大多分布于 0.06~0.15 mm 之间，加大后的石英颗粒呈贴面接触、镶嵌紧密接触，第二期硅质胶结往往在第一期石英次生加大边之上充填次生孔隙，晶粒较小。

4.3 溶蚀作用

研究区苏盖特布拉克组砂岩中长石、岩屑和

钙质胶结物的溶蚀现象普遍(图 3D、J、K)。研究区的溶蚀作用有两期,早成岩阶段的流体相中对长石和岩屑等铝硅酸盐矿物来说,为未达到饱和状态,促使有利于长石和岩屑颗粒溶蚀,形成粒内孔隙。但由于该时期沉积物还未固结成岩,因此溶蚀作用形成的粒内孔隙会被后期的压实作用破坏。第二期溶蚀作用是钙质胶结物溶蚀,形成粒内孔隙(图 3D),可有效地提高苏盖特布拉克组砂岩储层的储集性能。

4.4 交代作用

通过普通薄片和阴极发光观察,研究区苏盖特布拉克组砂岩中交代作用较为局限,主要表现为方解石矿物交代岩屑和长石(图 3L)。

5 成岩演化序列与模式

由于苏盖特布拉克组沉积于新元古代,相邻的泥岩地层中缺乏可供测定 R_0 的镜质体,因此用硅质胶结物流体包裹体均一温度和黏土矿物 X 衍射结果中的伊蒙混层比(蒙脱石%)来约束成岩阶段。

5.1 成岩作用序列

通过薄片鉴定、扫描电镜观察、结合阴极发光和结合黏土矿物 X 衍射分析结果,苏盖特布拉克组中具有以下可供成岩序列划分的成岩现象:(1)苏盖特布拉克组砂岩经历了较强烈的压实(溶)作用,颗粒间呈线-凹凸接触、缝合线状接触,甚至石英颗粒之间出现压溶现象;(2)自生矿物主要以伊利石和绿泥石为主,几乎不含高岭石和蒙脱石,伊利石由高岭石、蒙脱石和伊/蒙混层转化而来;(3)钙质胶结物主要以泥微晶方解石和晶粒状铁方解石两种形式产出;(4)石英的次生加大多为 I—II 级;(5)发育两期溶蚀作用,第一期为长石、岩屑的溶蚀,第二期为钙质胶结物溶蚀。

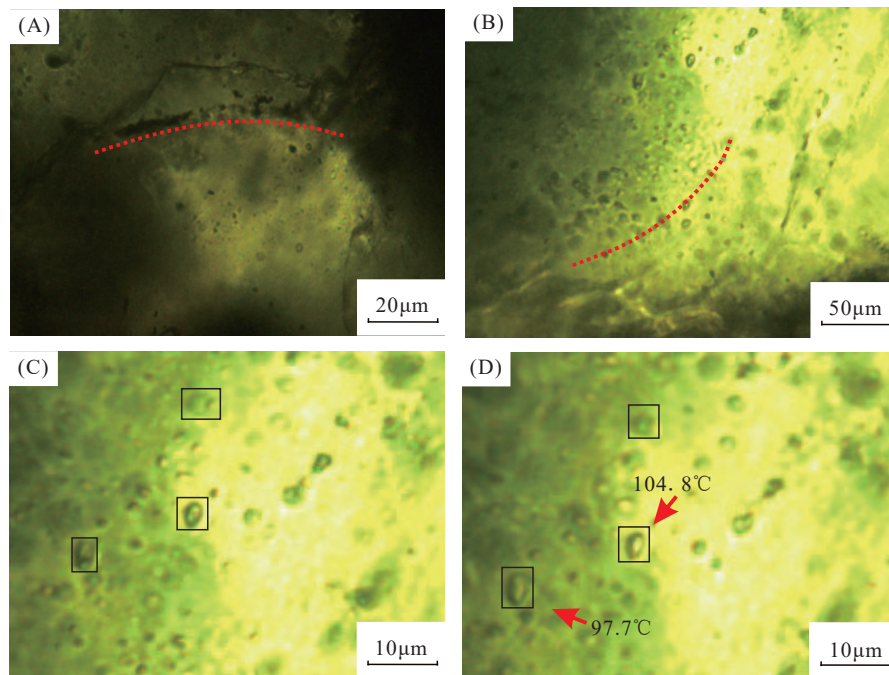
在前述成岩作用特征研究基础上,依据矿物之间的截切关系、矿物的形成温度等证据,确定绿泥石胶结物、硅质胶结物(两期)、钙质胶结物(两期)和溶蚀作用(两期)形成的先后顺序,为成岩序列建立奠定基础。早成岩阶段长石、岩屑发生溶蚀(图 3J)为第一期硅质胶结提供 SiO_2 来源,被绿泥石环边包裹的颗粒不见石英次生加大现象(图 3F),说明长石、岩屑的溶蚀作用和绿泥石胶结均发生在第一期硅质胶结作用之前。镜下鉴定结果进一步表明,第一期石英次生加大边周围发生了压溶现象(图 3B),方解石(第一期钙质胶结物)分布于第一

期硅质加大边周边(图 3D),说明压溶作用和第一期方解石胶结时间均晚于第一期硅质胶结物形成时间。黏土矿物的转化(伊利石化)和压溶作用为第二期硅质胶结提供 SiO_2 来源,说明第二期硅质胶结发生在黏土矿物的转化(伊利石化)和压溶作用之后。方解石中常含有 Mn、Fe 等矿物,当方解石达到一定量时,可形成铁方解石(刘显凡和孙传敏,2013),因此铁方解石一般形成于方解石之后,是成岩晚期的产物。钙质胶结物被溶蚀,说明第二期溶蚀作用是最晚期的成岩作用。

综上所述,塔里木盆地西北地区苏盖特布拉克组的成岩演化序列为:压实作用/自生粘土矿物(绿泥石)沉淀—第一期长石、岩屑溶蚀作用—第一期硅质胶结—第一期泥微晶方解石胶结/压溶作用/黏土矿物的伊利化—第二次硅质胶结/第二期铁方解石胶结—钙质胶结物溶蚀。

5.2 成岩演化阶段

薄片鉴定结果表明,研究区苏盖特布拉克组砂岩中发育两期石英次生加大。加大边中流体包裹体以散布状、群簇状(图 4A-B)分布,包裹体大小 2~5 μm 不等,极少数 > 5 μm ,包裹体形态多以椭圆形、次棱角状、长条状、新月状及不规则形为特征,类型以气液两相包裹体为主,纯液相包裹体较少。对不同期次的硅质胶结物气液两相盐水包裹体测温,当达到均一温度时,包裹体由中心黑色—灰色逐渐趋于透明—半透明状(图 4C-D)。在普通薄片对硅质胶结物形成期次划分基础上,分别在第一期、第二期石英次生加大边中分别选取了 15、10 个流体包裹体对其均一温度进行测试分析(表 2),但冰点温度尚未做研究。流体包裹体均一温度结果表明:第一期石英次生加大边中的包裹体均一温度主要集中在 100~120 $^{\circ}\text{C}$,仅有 4 个包裹体温度低于 100 $^{\circ}\text{C}$,说明第一期硅质胶结的古地温为 100~120 $^{\circ}\text{C}$;第二期石英次生加大边及愈合裂隙中的 10 个流体包裹体均一温度主要集中在 140~160 $^{\circ}\text{C}$,其中仅有 3 个流体包裹体的温度不足 140 $^{\circ}\text{C}$,说明第二期硅质胶结的古地温为 140~160 $^{\circ}\text{C}$ 。根据 SY/T5477—2003《碎屑岩成岩阶段划分标准》,当古地温为 85~140 $^{\circ}\text{C}$ 时,为中成岩 A 期;古地温为 140~175 $^{\circ}\text{C}$,为中成岩 B 期。研究区苏盖特布拉克组第一期硅质胶结的古地温为 100~120 $^{\circ}\text{C}$,表明此第一期硅质胶结处于中成岩 A 期,第二期硅质胶结的古地温为 140~160 $^{\circ}\text{C}$,表



A. 气液两相包裹体, 发育于石英次生加大边, 呈散布状分布, 大小为 2.1~2.7 μm , 什艾日克剖面; B. 气液两相包裹体, 呈散布状分布, 大小为 2.3~3.0 μm , 奇格布拉克剖面; C. 气液两相包裹体, 呈散布状分布, 大小为 4.3~4.5 μm , 体常温状态下中心呈现黑色, 什艾日克剖面; D. 气液两相包裹体, 呈散布状分布, 大小为 4.3~4.5 μm , 升温至 104.8 $^{\circ}\text{C}$ 、97.7 $^{\circ}\text{C}$, 包裹体内由黑色-灰色逐渐趋于透明-半透明状, 什艾日克剖面。

图 4 塔西北地区苏盖特布拉克组硅质胶结物中流体包裹体显微照片

Fig. 4 Micrograph of fluid inclusions in siliceous cement of the Sugetbrak Formation in the Northwest Tarim Basin

明第二期硅质胶结处于中成岩 B 期。

结合黏土矿物 X 衍射结果(表 1)表明, 伊/蒙混层比中的蒙皂石含量分布在 0~15% 范围内, 平均值为 5%。根据 SY/T5477—2003《碎屑岩成岩阶段划分标准》, 伊/蒙混层比中蒙皂石含量在 0~15% 范围内处于中成岩阶段 B 期。综上, 依据两期硅质胶结物测温及黏土矿物 X 衍射结果, 均表明塔西北地区苏盖特布拉克组砂岩处于中成岩阶段 B 期。

5.3 成岩演化模式

根据薄片观察、阴极发光、扫描电镜、包裹体均一温度及黏土矿物 X 衍射分析等方法分析, 表明研究区苏盖特布拉克组砂岩处于中成岩阶段 B 期, 并依据成岩演化序列, 建立其成岩演化模式(图 5)。

塔西北地区苏盖特布拉克组在早成岩期主要发育压实作用、绿泥石胶结及第一期长石、岩屑的溶蚀作用。中成岩作用 A 期发育第一期硅质胶结、第一期方解石胶结及黏土矿物的转化(伊利石化)。到中成岩作用 B 期发育第二期硅质胶结、第二期

方解石胶结及第二期钙质物的溶蚀作用。

6 结论

(1)塔西北地区苏盖特布拉克组为潮坪相沉积, 其中砂岩类型以岩屑石英砂岩、岩屑砂岩为主, 偶见长石岩屑砂岩, $Q/(F+R)$ 比值为 3.4~11.9, 成分成熟度中等; 粒度介于 0.1~0.3 mm 之间, 以细粒砂岩为主, 碎屑颗粒以棱角—次棱角状为主, 分选中等, 结构成熟度中等。

(2)苏盖特布拉克组砂岩经历了压实(溶)作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用等成岩改造, 压实作用是储层致密的直接因素, 胶结作用主要包括黏土矿物胶结、钙质胶结和硅质胶结, 硅质胶结是砂岩储层致密化的根本因素, 溶蚀作用有效地提高了储层的储集性能。

(3)研究区苏盖特布拉克组砂岩成岩演化阶段达到中成岩 B 期, 其成岩演化序列为: 压实作用→早期绿泥石沉淀→第一期长石、岩屑溶蚀→第一期硅质胶结→第一期泥微晶方解石胶结→伊利石化/压溶作用→第二期硅质胶结→第二期铁方解石

表 2 塔西北地区苏盖特布拉克组两期硅质胶结物流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microscopic temperature measurement results of fluid inclusions in the Sugetbrak Formation in the northwest area of the Tarim Basin

样品编号	宿主矿物	产状	形态	大小/ μm	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	包裹体类型
SARK-31-S1-1	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	3.9	75.0	气液两相包裹体
SARK-81-S1-4	I 级石英次生加大边	散布	不规则形	4.1	75.5	气液两相包裹体
SARK-31-S1-2	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	3.7	77.0	气液两相包裹体
SGT-S5-1	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	5.2	91.0	气液两相包裹体
SARK-81-S1-1	I 级石英次生加大边	条带状	长条形	4.3	100.0	气液两相包裹体
SGT-S1-2	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	4.3	101.0	气液两相包裹体
SGT-S5-2	I 级石英次生加大边	散布	不规则形	3.4	104.2	纯液相包裹体
SGT-S1-1	I 级石英次生加大边	散布	长条形	3.6	105.1	气液两相包裹体
SARK-58-S1-4	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	2.6	106.0	气液两相包裹体
SGT-S5-3	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	3.7	106.0	气液两相包裹体
SARK-58-S1-1	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	3.0	107.0	纯液相包裹体
SARK-81-S1-5	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	4.0	108.6	气液两相包裹体
SARK-81-S1-6	I 级石英次生加大边	散布	椭圆形	2.1	111.7	气液两相包裹体
SARK-31-S1-3	I 级石英次生加大边	散布	不规则形	2.8	113.4	气液两相包裹体
SGT-S1-3	I 级石英次生加大边	条带状	椭圆形	2.7	119.0	纯液相包裹体
SGT-S1-4	II 级石英次生加大边	条带状	长条形	3.0	123.4	气液两相包裹体
SGT-S1-5	II 级石英次生加大边	散布	椭圆形	4.0	131.0	纯液相包裹体
SARK-58-S1-3	II 级石英次生加大边	散布	长条形	3.7	136.9	气液两相包裹体
SGT-S31-1	II 级石英次生加大边	散布	椭圆形	4.4	146.0	气液两相包裹体
SGT-S31-3	II 级石英次生加大边	散布	不规则形	4.2	149.9	气液两相包裹体
SARK-58-S1-2	II 级石英次生加大边	散布	椭圆形	3.5	150.0	气液两相包裹体
SARK-81-S1-2	II 级石英次生加大边	条带状	椭圆形	4.5	154.7	气液两相包裹体
SGT-S31-2	II 级石英次生加大边	条带状	椭圆形	3.9	155.0	气液两相包裹体
SARK-58-S1-5	II 级石英次生加大边	散布	椭圆形	3.1	157.3	纯液相包裹体
SARK-81-S1-3	II 级石英次生加大边	条带状	椭圆形	3.4	160.0	气液两相包裹体

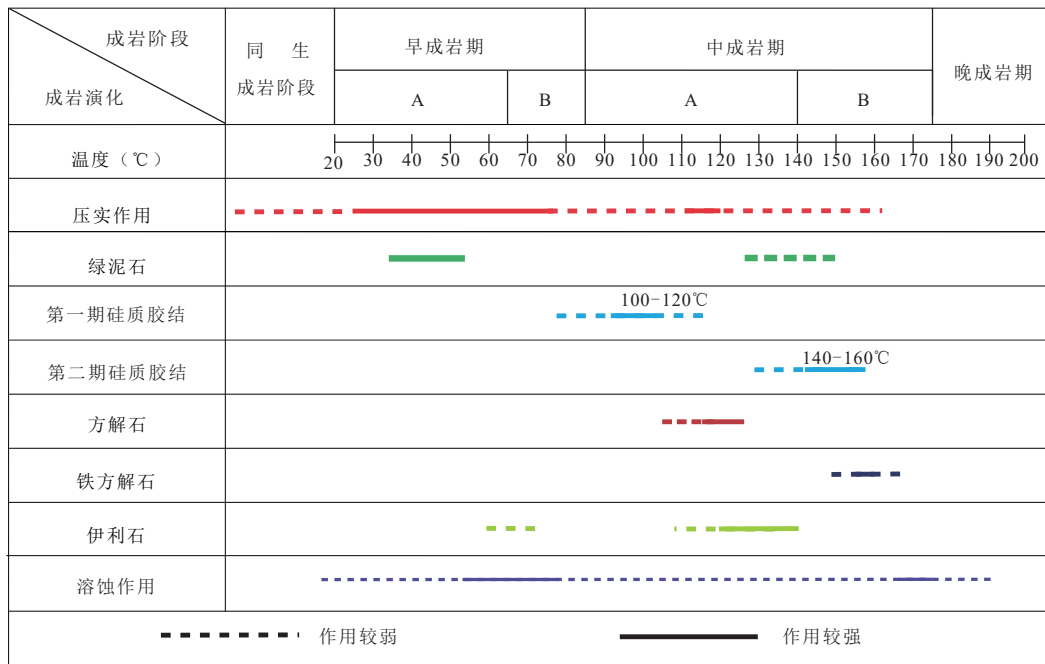


图 5 塔西北地区苏盖特布拉克组成岩演化序列图

Fig. 5 Evolution sequence of the Sugetbrak Formation in the northwest area of the Tarim Basin

方解石胶结→构造破裂及第二期钙质胶结物溶蚀。

References

- Chen H L, Huang W K, Li Y, et al., 2020. Provenance analysis of Sinian sediments on the northwestern margin of Tarim Basin and its restriction on basin types[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42 (5) : 756 – 766 (in Chinese with English abstract).
- Deng H B, 2019. Study on sedimentary facies and reservoir characteristics of the Upper Sinian qigebulake formation in the northern Tarim Basin[D]. Chengdu University Of Technology.
- Guo G, Xu Y S, Ou J, 2014. Evolution of Cenozoic Basin in Basin-range Junction Belt of Southwestern Tarim Basin and Its Relation with Uplift of North Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 47 (4) : 13 – 23 (in Chinese with English abstract).
- Gao Z J, Wang W Y, Peng C W, et al., 1987. Sinian in Xinjiang[M]. Urumqi: Volksverlag Xinjiang.
- Huang S J, Sun W, Huang P P, et al., 2009. Formation mechanism of authigenic illite in clastic rocks of Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin and its influence on reservoir formation[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29 (4) : 25-32.
- Jia C Z, Pang X Q, 2015. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36 (12) : 1457 – 1469 (in Chinese with English abstract).
- Jiang H J, Chen Q L, Yang X, et al., 2017. The Style of Sequence Stratigraphy of Neoproterozoic Rift Basin in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (3) : 588 – 604 (in Chinese with English abstract).
- Kang J W, Mu C L, Zhou K K, et al., 2016. Sequence stratigraphic analysis of the Sinian strata in the Aksu region, Xinjiang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (2) : 47 – 54(in Chinese with English abstract).
- Li H, Shi Hi, Wu J, 2016. The impact analysis of Tibetan Plateau uplifting to the forming of lithologicreservoirs in southwestern Qaidam Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 16 (12) .
- Li H, Wu J, Yu B L, 2019. The evidence from fluid inclusions in the reservoirs of southwestern Qaidam illustrating the relationship between the uplifting activities of Tibetan Plateau and hydrocarbon accumulations[J]. *Science Technology and Engineering*, 19 (6) : 23 – 31(in Chinese with English abstract).
- Li P L, Feng J H, Fan T L, et al., 2010. Tectonic sedimentation and reservoir formation in tarim basin[M]. Beijing: Geology Press.
- Liu R H, He B Z, Jiao C L, et al., 2020. The indication of Neoproterozoic sedimentary characteristics to rift development process in Aksu area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (10) : 3225–3242.
- Liu X F, Sun C M, 2013. Concise Course of Mineralogy (Second Edition) [M]. Beijing: Geology Press.
- Ma Y S, Cai X Y, Yun L, et al., 2022. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49 (1) : 1 – 17 (in Chinese with English abstract).
- Shi K B, Liu B, Tian J C, et al., 2016. Sedimentary characteristics and lithofacies paleogeography of Sinian in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (11) : 1343 – 1360 (in Chinese with English abstract).
- Tian J F, Gao Y L, Zhang P B, et al., 2013. Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 34 (5) : 700 – 707(in Chinese with English abstract).
- Tian L, Zhang H Q, Liu J, et al., 2020. Distribution of Nanhua-Sinian rifts and proto-type basin evolution in southwestern Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47 (6) : 1122 – 1133(in Chinese with English abstract).
- Wu F Z, Liu D N, Zhao F H, et al., 2021. Study on Sedimentary Environment and Tectonic Background of Sugaitebulak Formation in the Northwestern Margin of Tarim Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40 (2) : 478 – 490 (in Chinese with English abstract).
- Wu H X, Huang W K, Li Y Q, et al., 2020. Discovery of Permian mafic sills intrusion event in the Sinian system, Northwest Tarim block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (6) : 1869 – 1882 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z H, Ding W M, Li J, et al., 2020. Study on Sedimentary Geochemistry and Organic Matter Enrichment Mechanism of Lower Cambrian Yuertus Formation in the Western Margin of Tarim Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 56 (4) : 667 – 678 (in Chinese with English abstract).
- Wu L, Guan S W, Feng X Q, et al., 2020. Discussion on stratigraphic division of the Nanhuan and Sinian of the Tarim Basin and its surrounding regions. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (11) : 3427–3441.
- Yao C Y, 2010. Geochemistry of Late Ediacaran Early Cambrian Strata in Aksu Wushi Area, Xinjiang[D]. Nanjing University.
- Yang H J, Chen Y Q, Pan W Q, et al., 2021. Study on tectonic and sedimentary evolution during the Nanhua-Middle Cambrian and its significance for subsalt exploration, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 26 (4) : 84 – 98 (in Chinese with English abstract).
- Yan L, Zhu G Y, Wang S, et al., 2021. Accumulation conditions and favorable areas for natural gas accumulation in the 10 000 meters ultra-deep Sinian-Cambrian in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 42 (11) : 1446 – 1457 (in Chinese with English abstract).
- Yang P, Liu H T, Li N, et al., 2021. Drilling design and optimization technology of ultra-deep wells in the Tarim Oilfield: a case study of Well Luntan 1, the deepest well in Asia[J]. *China Petroleum Exploration*, 26 (3) : 126 – 135 (in Chinese with English abstract).
- Zhong G F, Ling S Q, Hou F H, 1996. Diagenesis and its reservoir quality for sandstones of LOWER HE-3 Member (paleogene) east Biyang Depression, Henan, China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 16 (2) : 40 – 46 (in Chinese with English abstract).
- Zou C N, Du J H, Xu C C, et al., 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41 (3) : 278 – 293 (in Chinese with English abstract).

- Zhang X, Lin C M, Chen Z Y, 2011. The characteristics of chlorite minerals from Upper Triassic Yanchang Formation in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (10): 1659 – 1671 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K X, Wang G C, Chen F N, et al., 2007. Coupling between the Uplift of Qinghai-Tibet Plateau and Distribution of Basins of Paleogene-Neogene. *Earth Science*, 32 (5): 583-597.
- Zhou X B, Li J H, Wang H H, et al., 2015. The type of prototypic basin and tectonic setting of Tarim Basin formation from Nanhua to Sinian[J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (3): 290 – 298 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈汉林, 黄伟康, 李勇, 等, 2020. 塔里木盆地西北缘震旦系沉积物源分析及对盆地属性的制约[J]. *石油实验地质*, 42 (5): 756-766.
- 邓浩博, 2019. 塔里木盆地北部上震旦统奇格布拉克组沉积相及储层特征研究[D]. 成都理工大学.
- 郭刚, 许应石, 欧健, 2014. 新疆塔里木盆地西南缘盆山结合带新生代盆地演化与青藏高原北缘隆升的关系[J]. *西北地质*, 47 (4): 13-23.
- 高振家, 王务严, 彭昌文, 等, 1987. 新疆震旦系[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.
- 黄思静, 孙伟, 黄培培, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地东部太原组碎屑岩中自生伊利石形成机制及其对储层形成的影响[J]. *矿物岩石*, 29 (4): 25-32.
- 贾承造, 庞雄奇, 2015. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. *石油学报*, 36 (12): 1457-1469.
- 姜海健, 陈强路, 杨鑫, 等, 2017. 塔里木盆地新元古代裂谷盆地层序样式[J]. *地质学报*, 91 (3): 588-604.
- 康建威, 牟传龙, 周恩恩, 等, 2016. 塔里木盆地北缘阿克苏地区震旦系露头层序地层研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 36 (2): 47-54.
- 李慧, 施辉, 吴瑾, 2016. 青藏高原隆升对柴西南区岩性油藏形成的影响作用分析[J]. *科学技术与工程*, 16 (12): 20-26.
- 李慧, 吴瑾, 于保禄, 2019. 柴达木盆地西南区油气充注与青藏高原隆升耦合关系的包裹体证据[J]. *科学技术与工程*, 19 (6): 23-31.
- 李丕龙, 冯建辉, 樊太亮, 等, 2010. 塔里木盆地构造沉积于成藏[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘若涵, 何碧竹, 焦存礼, 等, 2020. 新疆阿克苏地区新元古代沉积特征对裂谷发育过程的指示[J]. *岩石学报*, 36 (10): 3225-3242.
- 刘显凡, 孙传敏, 2013. 矿物学简明教程(第二版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 马永生, 蔡勋育, 云露, 等, 2022. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. *石油勘探与开发*, 49 (1): 1-17.
- 石开波, 刘波, 田景春, 等, 2016. 塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古地理[J]. *石油学报*, 37 (11): 1343-1360.
- 田建锋, 高永利, 张蓬勃, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因[J]. *石油与天然气地质*, 34 (5): 700-707.
- 田雷, 张虎权, 刘军, 等, 2020. 塔里木盆地西南部南华纪—震旦纪裂谷分布及原型盆地演化[J]. *石油勘探与开发*, 47 (6): 1122-1133.
- 吴福志, 刘东娜, 赵峰华, 等, 2021. 塔里木盆地西北缘苏盖特布拉克组沉积环境及构造背景研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 40 (2): 478-490.
- 吴鸿翔, 黄伟康, 励音骥, 等, 2020. 塔里木地块西北缘震旦系发现二叠纪基性岩床侵入事件[J]. *地质学报*, 94 (6): 1869-1882.
- 王志宏, 丁伟铭, 李剑, 等, 2020. 塔里木盆地西缘下寒武统玉尔吐斯组沉积地球化学及有机质富集机制研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 56 (4): 667-678.
- 吴林, 管树巍, 冯兴强, 等, 2020. 塔里木盆地及周缘南华系和震旦系划分对比研究[J]. *岩石学报*, 36 (11): 3427-3441.
- 姚春彦, 2010. 新疆阿克苏—乌什地区晚埃迪卡拉纪—早寒武世地层地球化学研究[D]. 南京大学.
- 杨海军, 陈永权, 潘文庆, 等, 2021. 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造沉积演化及其盐下勘探选区意义[J]. *中国石油勘探*, 26 (4): 84-98.
- 闫磊, 朱光有, 王珊, 等, 2021. 塔里木盆地震旦系—寒武系万米超深层天然气成藏条件与有利区带优选[J]. *石油学报*, 42 (11): 1446-1457.
- 杨沛, 刘洪涛, 李宁, 等, 2021. 塔里木油田超深井钻井设计及优化技术——以亚洲最深井轮探1井为例[J]. *中国石油勘探*, 26 (3): 126-135.
- 钟广法, 林社卿, 侯方浩, 1996. 泌阳凹陷核三下亚段砂岩成岩作用及储集性[J]. *矿物岩石*, 16 (2): 40-46.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等, 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 41 (3): 278-293.
- 张霞, 林春明, 陈召佑, 2011. 鄂尔多斯盆地镇泾区块上三叠统延长组砂岩中绿泥石矿物特征[J]. *地质学报*, 85 (10): 1659-1671.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等, 2007. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, (5): 583-597.
- 周肖贝, 李江海, 王洪浩, 等, 2015. 塔里木盆地南华纪—震旦纪盆地类型及早期成盆构造背景[J]. *地学前缘*, 22 (3): 290-298.