

羌塘盆地北羌塘坳陷上三叠统巴贡组 致密储层成岩作用与孔隙演化

程乐利^{1,2,3}, 印森林¹, 万友利^{2,3}, 王剑^{2,3,4}, 冯兴雷^{2,3}, 李学仁^{2,3}, 曾胜强^{2,3}

(1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北 荆州 434023; 2. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 成都 610081;
3. 自然资源部 沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都 610081; 4. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500)

摘要: 利用物性、铸体薄片、扫描电镜、X衍射及流体包裹体测温等测试分析手段, 研究了羌塘盆地北羌塘坳陷上三叠统巴贡组储层的成岩作用特征和孔隙演化过程。巴贡组砂岩总体成分成熟度和结构成熟度中等偏低, 物性极为致密。主要经历了压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用, 其中胶结物组分主要为硅质、黏土矿物和碳酸盐矿物, 溶蚀组分为长石。根据多方面综合分析, 巴贡组地层在靠近隆起带的浅埋区处于中成岩B期, 坳陷内部的深埋区处于晚成岩阶段。在考虑岩石表观体积变化和压实分段的前提下, 进行了不同成岩相的孔隙演化定量计算。压实作用是储层孔隙度减小的首要原因, 其次为胶结作用; 溶蚀作用和绿泥石衬里的形成对储层有利。

关键词: 致密砂岩; 成岩作用; 孔隙演化; 巴贡组; 上三叠统; 北羌塘坳陷; 羌塘盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Diagenesis and pore evolution of tight sandstone reservoirs in Upper Triassic Bagong Formation, North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

CHENG Leli^{1,2,3}, YIN Senlin¹, WAN Youli^{2,3}, WANG Jian^{2,3,4},

FENG Xinglei^{2,3}, LI Xueren^{2,3}, ZENG Shengqiang^{2,3}

(1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

2. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Petroleum Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China;

4. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The diagenesis and pore evolution process of tight sandstone reservoirs in the Upper Triassic Bagong Formation of the North Qiangtang Depression were studied by means of physical properties, casting thin slice, SEM, X-ray-diffraction and fluid inclusion temperature measurement. The compositional maturity and structural maturity of the Bagong sandstones are moderately low. Their physical properties are extremely tight. The main diagenetic effects include compaction, cementation, dissolution and metasomatism. The cement components are mainly siliceous, clay minerals and carbonate minerals, and the dissolution component is feldspar. According to the comprehensive analysis of various characteristics, the shallow buried area near the uplift is in the middle diagenesis stage B, and the deep buried area inside the depression is in the late diagenetic stage. Under the premise of considering the apparent volume change and compaction of rock, a quantitative calculation of pore evolution of different diagenetic facies is carried out. The calculation results show that compaction is the primary cause of reservoir porosity reduction, followed by cementation, while dissolution and the formation of chlorite lining are beneficial to reservoir porosity.

Key words: tight sandstone; diagenesis; pore evolution; Bagong Formation; Upper Triassic; North Qiangtang Depression; Qiangtang Basin

羌塘盆地位于特提斯构造域东段, 经众多学者在基础地质、石油地质等方面的研究, 初步证实羌

塘盆地具有较好的油气潜力^[1-6], 是青藏地区油气资源潜力最大、最有希望取得勘探突破的地区^[3]。

收稿日期: 2019-08-29; 修订日期: 2019-11-28。

作者简介: 程乐利(1987—), 男, 博士, 讲师, 从事储层地质及录井地质研究。E-mail: chengleli@yangtzeu.edu.cn。

通信作者: 印森林(1983—), 男, 博士, 副教授, 从事油气田开发地质与录井地质研究。E-mail: yinxiang_love@qq.com。

基金项目: 中国地质调查局项目(121201010000161110)和国家青年科学基金项目(41702119)共同资助。

近年来,对于羌塘盆地石油地质条件的认识不断深入,取得了大量新进展,这些新进展和认识聚焦于岩相古地理^[4-5]、盆地性质及构造演化^[2, 5-6]、烃源岩^[7-9]和保存条件等方面^[5, 8-10],油气储层成果较少。上三叠统巴贡组砂岩储层是羌塘盆地的2大重点储集层系之一,主要以低孔低渗为主^[1, 5]。孙冬胜等^[11]在南羌塘坳陷查郎拉地区的储层研究中发现,该地区肖茶卡组三段碎屑岩物性非常致密,储集空间主要为次生溶蚀孔,粒间及粒内溶孔多见,少量铸模孔及微裂缝;胡俊杰等^[12]对沃若山地区的上三叠统土门格拉组砂岩储层进行了详细研究,发现该区砂岩储层以岩屑石英砂岩为主,压实作用导致原生孔隙所剩无几,而次生孔隙以粒间孔、铸模孔为主。上述学者就该套储层及其沉积特征等方面开展了工作,但致密过程中的成岩作用影响尚未开展系统研究。

近年来,我国石油工作者在致密砂岩类型储层中获得了大量油气新发现,同时在致密砂岩成岩特点^[13-17]和绿泥石保孔机制^[18-20]等方面取得了大量新认识。在孔隙演化方面,利用回归拟合进行面孔率和孔隙度的换算^[21]、以压实分段来实现机械压实与热压实校正^[22-24]等方法均取得了较好效果。将这些新认识和新思路应用到羌塘盆地的致密砂岩储层研究中,将有助于在该地区早日实现油气发现。本文以北羌塘坳陷中南部的4条上三叠统典型露头剖面为研究对象,借助铸体薄片、扫描电镜、X衍射及流体包裹体测温等测试分析手段,

探讨其成岩作用特征和孔隙演化规律,为下步的勘探部署工作提供参考。

1 地质背景

羌塘盆地北界为可可西里—金沙江缝合带,南界为班公湖—怒江缝合带,整体呈近东西向长条状展布^[5],构造格局具有“两坳一隆”^[2]的特点,可划分为南羌塘坳陷、中央隆起带和北羌塘坳陷3个一级构造单元^[1](图1)。在考虑细分精度、使用方便的前提下,将北羌塘坳陷上三叠统地层划分为藏夏河组、肖茶卡组、甲丕拉组、波里拉组、巴贡组以及那底岗日组。其中那底岗日组代表上三叠统顶部的火山岩—火山碎屑岩组合,藏夏河组代表坳陷北部的砂泥质深水复理石组合,肖茶卡组代表坳陷西南部菊花山、甜水河一带的灰岩组合。在坳陷的中南部沿用结扎群的三分方案,用甲丕拉组、波里拉组和巴贡组来分别代表紫红色碎屑岩组、碳酸盐岩组和含煤碎屑岩组。

2 储层岩石学特征

对采自北羌塘坳陷沃若山、才多茶卡、麦多以及扎那陇巴4个实测剖面(图1)的砂岩样品进行镜下分析。研究区巴贡组发育6种类型砂岩:岩屑石英砂岩(37.7%)、岩屑砂岩(25.5%)、长石岩屑砂岩(18.2%)、岩屑长石砂岩(13.6%),长石石英砂岩和石英砂岩占比较小。砂岩总体粒度较细,分选较好,磨圆均为次棱角状,胶结类型以压嵌型、

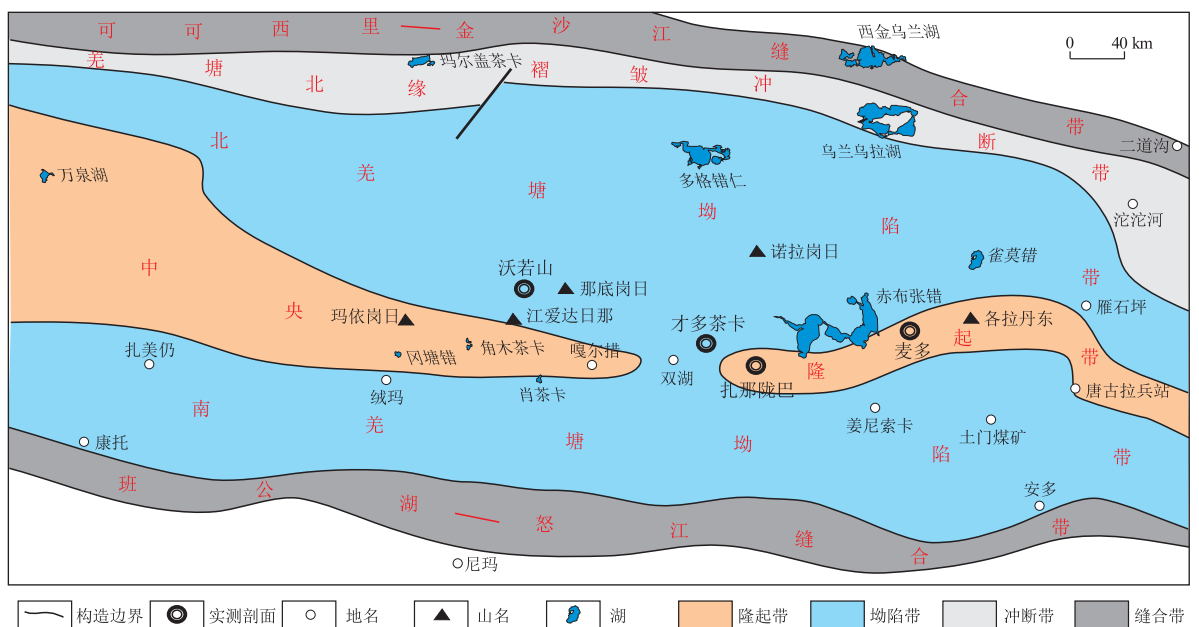


图1 羌塘盆地构造分区及实测剖面位置

Fig.1 Tectonic subdivisions of Qiangtang Basin and location of measured sections

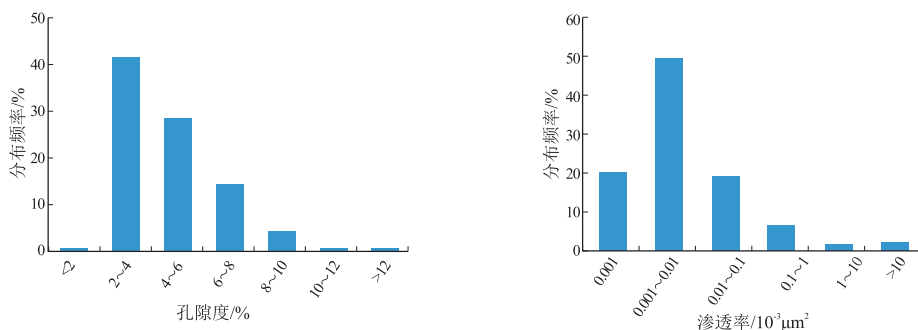


图2 羌塘盆地北羌塘坳陷上三叠统巴贡组砂岩物性分布

Fig.2 Physical properties of sandstones in Upper Triassic Bagong Formation, North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

孔隙一次生加大型、次生加大型和次生加大—压嵌型为主,极少基底型和凝块型,孔隙型胶结未见发育。孔隙度均值为4.31%,渗透率主要在(0.001~0.01)×10⁻³ μm²之间(图2),属于超低孔超低渗透层。

3 成岩作用类型及特征

3.1 压实作用

研究区总体上压实强烈,表现为颗粒间紧密接触(图3a)、长形颗粒定向排列、塑性颗粒变形及脆性颗粒被压裂等。在镜下常见云母等片状矿物顺

层排列,以及云母被压弯,甚至折断(图3b)。不同粒度的砂岩之间,中砂岩的压实强度明显小于极细砂岩。

3.2 胶结作用

胶结作用普遍发育,在各地均有分布,也是使储层物性变差的重要原因之一^[24]。胶结物的类型主要为硅质胶结和自生黏土矿物胶结,其次为碳酸盐胶结等。

3.2.1 硅质胶结

硅质胶结物常以集合体或次生加大充填于孔隙及喉道中,在石英砂岩中,石英次生加大级别可

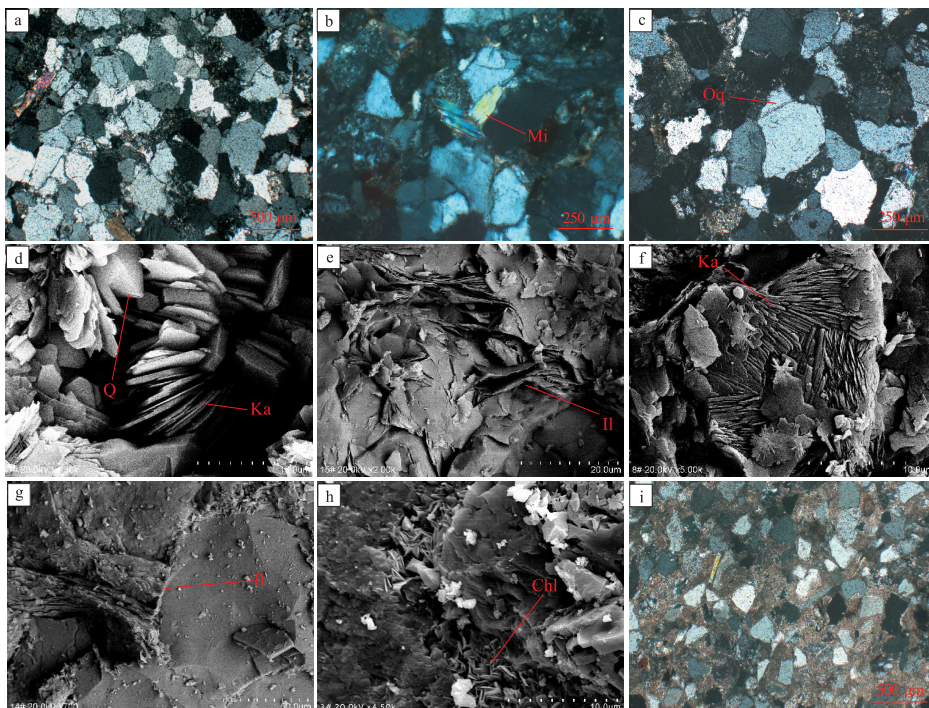


图3 羌塘盆地北羌塘坳陷巴贡组砂岩显微特征

a.颗粒紧密排列,呈线—凹凸接触,×100,(+),沃若山;b.云母颗粒被压断,×200,(+),扎那陇巴;c.石英次生加大发育,颗粒边缘见“脏线”,×200,(+),才多茶卡;d.自生石英晶形完好,与高岭石共生,见剩余粒间孔,才多茶卡;e.自生片状伊利石充填粒间,沃若山;f.颗粒被高岭石完全交代,扎那陇巴;g.颗粒紧密接触,粒间发育伊利石膜,沃若山;h.粒间充填绿泥石衬里,压实作用强烈,粒间孔隙消失,沃若山;i.早期碳酸盐基底式胶结,云母颗粒未变形,压实较弱,×100,(+),沃若山

Fig.3 Microphotographs showing microscopical characteristics of sandstones in Bagong Formation, North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

达Ⅲ级,严重堵塞了粒间孔隙,并降低了储层渗透率,颗粒间呈线—凹凸接触。硅质主要有2种来源:首先为压溶作用,在加大边与石英颗粒之间见黏土“脏线”(图3c),表明早期硅质胶结晚于黏土膜的形成;其次为钾长石溶解,在扫描电镜下可见这一反应产生的高岭石与自生石英共生(图3d)。

3.2.2 黏土矿物胶结

研究区的自生黏土矿物主要为伊利石、高岭石和伊蒙混层,绿泥石和蒙脱石占比较小。

(1)伊利石大多晶形较好,主要以片状、不规则弯曲片状充填于孔隙(图3e),部分以包膜形式生长于颗粒表面(图3g),或以丝缕状与片状伊利石伴生。在早成岩阶段伊利石生成较少,在中成岩阶段通过黏土矿物(高岭石、蒙皂石)、长石及岩屑经过蚀变形形成^[25-26]。研究区砂岩中大部分只含钾长石或高岭石,其余样品的钾长石含量均低于6%,二者仅能微量共存,而巴贡组地层经历的最高地温可达178℃^[27],因此呈片状充填和丝缕状伴生的伊利石主要为高岭石转化形成^[13, 28],以颗粒包膜形式产出的伊利石则多为蒙皂石转化而来^[29]。

(2)高岭石分布差异较大,在沃若山剖面仅底部含有高岭石,其余3个剖面均有分布。砂岩中高岭石的成因可分为沉积成因和自生成因2种^[30],沉积成因的高岭石形态不完整且多呈碎片状^[14];而自生成因的高岭石晶体完整。研究区高岭石多充填于剩余粒间孔(图3d)或长石溶孔(图3f)中,单晶呈完整的六方片状,集合体呈蠕虫状、书页状,因此巴贡组中的高岭石应为自生成因。

(3)绿泥石以孔隙衬里(图3h)和针叶状充填粒间的形态产出。根据铁质的来源,绿泥石衬里的成因分2种:同生期黏土膜转化和富铁镁物质的再结晶^[18]。由于颗粒接触处没有绿泥石发育,绿泥石衬里主要为再结晶成因。泥岩微量元素分析结果^[6]表明,物源以长英质为主,铁镁质极少。由于缺乏铁镁质来源,绿泥石衬里发育情况不佳,主要见于才多茶卡剖面,其他3个剖面极少发育,其中扎那陇巴剖面的砂岩中基本不含绿泥石。绿泥石衬里一般形成于成岩作用较早阶段,通常认为这种绿泥石能够抑制石英的次生加大,并显著提高岩石的机械强度和抗压实能力,对于储层物性的发育有着良好的建设性作用^[19-20]。粒间充填的针叶状绿泥石形成较晚,主要由伊利石、蒙脱石等其他黏土矿物转化形成,部分源自孔隙流体的直接结晶^[28],含量较少,一般分布于较大孔隙中,对储层物性有

破坏作用。

(4)蒙脱石。巴贡组露头中的蒙脱石可能是地层出露后在表生成岩阶段的产物,含量较低,占黏土矿物总量的1%~5%,仅在沃若山剖面较多,说明表生成岩阶段对于沃若山地区有一定影响,其他剖面则基本不受影响。

3.2.3 碳酸盐胶结

碳酸盐胶结物可分为2个期次:第一期为呈基底式胶结的碳酸盐灰泥,可见碎屑颗粒呈漂浮状,压实改造影响较小(图3I),说明胶结于机械压实之前,常形成于常温常压条件下,为同生期、准同生期产物;第二期为镶嵌结构的白云石、(铁)方解石胶结,多呈晶粒结构充填于粒间溶蚀孔^[12],此类白云石可部分交代碎屑颗粒,多形成于晚成岩期。

3.2.4 自生矿物

自生矿物主要为黄铁矿和菱铁矿,仅部分样品有少量分布,为成岩早期产物。

3.3 溶蚀作用

溶蚀作用属于建设性成岩作用。由于早期溶蚀产生的次生孔隙在后期压实中难以保存,因此现有次生溶孔主要来自晚期,发生于强烈压实之后。研究区中的被溶蚀组分有长石、岩屑和碳酸盐胶结物,表现形式有:①长石(图3f,3h)、岩屑及石英等碎屑颗粒被不同程度溶蚀,其中长石溶蚀形成的铸模孔及粒内孔最常见;②方解石胶结物大多被溶蚀形成晶间及晶内溶孔,局部强烈溶蚀形成溶孔。

3.4 交代作用

最常见的交代作用是白云石交代石英、长石,在局部地区十分强烈,使碎屑颗粒边缘呈锯齿或残骸状,甚至彻底消失;其次为黏土矿物交代砂岩中的各种组分,被交代的主要为石英、长石、方解石等,可见长石颗粒完全蚀变成成为高岭石(图3f)。

3.5 破裂作用

羌塘盆地经历了漫长而剧烈的构造活动,形成了大量以近东西向为主的裂缝^[1, 10]。在镜下,根据产状可分为沿颗粒边缘延伸的微裂缝和贯穿颗粒的微裂缝;在地表有大量垂直于层面裂缝成组出现,并相互切割。裂缝可极大地提高砂岩储渗性能^[31],但对油气保存不利。

4 成岩演化和成岩相

4.1 成岩阶段

4.1.1 成岩阶段划分

通过有机质成熟度、埋藏史曲线、成岩作用特征及包裹体温度进行成岩阶段划分:

(1) 有机质热成熟度。上三叠统烃源岩的热演化程度较高, 中西部地区(沃若山、扎那陇巴)泥岩均处于高成熟阶段^[7]; 北部地区(明镜湖、藏夏河)泥岩处于过成熟阶段^[5]。

(2) 埋藏史。据埋藏史曲线^[5], 研究区的中生界地层均经历反复的沉降—上升过程, 本次采样所处的坳陷南部埋深稍浅, 而内部深埋区的最大埋深可达 7 km。

(3) 成岩作用。①压实强烈, 以线—凹凸接触为主, 塑性颗粒强烈变形, 石英颗粒破碎; ②固结程度高, 早期碳酸盐胶结物不发育, 后期发育亮晶白云石、方解石胶结, 石英次生加大级别可达Ⅲ级; ③黏土矿物中蒙脱石不发育, 仅存的少量 I/S 混层中蒙皂石含量均为 10%, 达有序混层阶段; ④次生孔隙较发育, 可见大量长石和岩屑等易溶组分的溶蚀孔。

(4) 包裹体温度。对东部地区巴贡组石英颗粒裂缝中的包裹体进行了测温, 获得的最晚一期主峰为 165~175 ℃, 相邻地区砂岩方解石脉的包裹体测温最大达 159 ℃^[9]; 而在沃若山地区方解石脉中得到的包裹体均一温度为 109 ℃和 178 ℃^[27]。

综合上述特点, 参考酸性水介质碎屑岩成岩阶段划分方案^[32], 认为巴贡组已进入中成岩 B 期—晚成岩阶段。本次采样地点位于北羌塘坳陷边缘地区, 埋藏较浅, 在燕山运动中被抬升, 经历的最晚成岩阶段为中成岩 B 期。而由于抬升幅度小、后续接受了白垩纪—第四纪的巨厚沉积物覆盖, 推测坳陷内部的巴贡组地层已经完全进入晚成岩阶段。

4.1.2 成岩演化序列

沉积物埋藏后, 压实作用最早发生, 随着孔隙水的排出、塑性颗粒变形, 碎屑颗粒重新排列成相对稳定的岩石骨架。呈碳酸盐基底式胶结的砂岩中, 颗粒呈悬浮状, 说明存在早期的碳酸盐胶结。绿泥石胶结物呈孔隙衬里形态产出, 说明绿泥石主

要形成于颗粒固结后。在长石、岩屑等被溶颗粒中有高岭石、伊利石等充填, 说明主要黏土矿物的胶结晚或同步于溶蚀作用。而亮晶白云石交代石英颗粒、或以次生加大充填于溶蚀孔隙, 表明其形成于中晚阶段的碱性环境。因此主要成岩序列依次为早期压实→早期黏土矿物形成→早期方解石胶结→早期硅质胶结→溶蚀作用→晚期黏土矿物形成→晚期碳酸盐胶结→晚期硅质胶结。

4.2 成岩相划分

划分成岩相的目的在于为后续的孔隙演化分析提供基础。本文兼顾分类的实用性和指向性^[15], 采用“成岩特征对物性影响”的方案, 选取压实强度、碳酸盐胶结物含量、面孔率、实测物性等参数, 划分为强溶蚀、绿泥石胶结、碳酸盐胶结和强压实压溶成岩相(表 1)。

(1) 强溶蚀成岩相: 主要为长石石英砂岩及岩屑长石砂岩, 压实作用弱, 碳酸盐和绿泥石胶结物少, 见少量剩余粒间孔, 溶蚀孔隙极为发育, 是物性最好的类型。

(2) 绿泥石胶结成岩相: 以长石岩屑砂岩及岩屑石英砂岩为主, 碳酸盐胶结物少, 绿泥石胶结物发育, 溶蚀孔隙发育, 物性相对较好。

(3) 碳酸盐胶结成岩相: 以长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主, 碳酸盐胶结物普遍发育, 绿泥石胶结物不发育, 镜下见大量碳酸盐胶结物溶蚀孔, 物性仅次于前两类。

(4) 强压实压溶成岩相: 主要为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩, 少量石英砂岩, 压实作用强, 颗粒间呈缝合线—凹凸接触, 碳酸盐胶结物和绿泥石胶结物含量低, 是物性最差的类型。

5 孔隙演化特征

根据文献[22, 24]“压实分段”的计算思路, 由

表 1 羌塘盆地北羌塘坳陷上三叠统巴贡组储层成岩相类型及特征

Table 1 Diagenetic facies types and characteristics of Bagong Formation, North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

成岩相	主要岩性	颗粒主要接触关系	碳酸盐胶结物含量/%	绿泥石胶结物含量/%	面孔率/%		常规物性	
					原生孔隙	次生孔隙	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²
强溶蚀相	长石石英砂岩、岩屑长石砂岩	点—线	1~4.3	0	0.2~2	2~7	5.81~14.38	0.003~0.631
			2.1		0.80	3.8	7.19	0.096
绿泥石胶结相	岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	点—线	0~3.2	1.5~4.32	0~1	1~4	2.24~9.8	0.002~0.175
			2.1	2.5	0.20	2.6	5.51	0.038
碳酸盐胶结相	岩屑石英砂岩	点—线	5~20.4	0	0~0.5	1~5	2.34~6.58	0.001~0.082
			13.2		0.20	2.3	4.26	0.014
强压实相	岩屑砂岩、长石岩屑砂岩	线—凹凸	0.1~2.4	0~0.18	0~0.1	0~2.3	1.12~4.82	0.001~0.049
			0.34	0	0	1.4	2.91	0.006

注: 表中分式的意义为: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{均值}}$ 。

于缺乏钻井资料制作压实曲线,本文以各深度段对应的地层厚度比例来分配压实减孔率,在计算中成岩 B 期的最大埋深时,取剖面样品的 R_0 均值 (1.55%) 作为埋深最大时的热演化程度。

5.1 孔隙度变化的定量计算

5.1.1 初始孔隙度的恢复

通过薄片与 Beard 图版^[33]对比^[22],得到不同成岩相的分选系数,从强溶蚀相、绿泥石胶结相、碳酸盐胶结相到强压实相的均值分别为 1.35, 1.40, 1.41, 1.55。据此可得出其初始孔隙度分别为 37.8%, 37.3%, 37.1%, 35.7%。

5.1.2 成岩作用导致的孔隙度变化

由于面孔率与孔隙度并不完全相等,借助面孔率和常规物性孔隙度之间的关系,可将面孔率数据转化为真孔隙度进行使用^[23]。

(1) 压实作用减孔率计算。由于压实的不断进行,压实后岩石体积小于原始体积。本文通过计算岩石体积减少量 V_R 来表征压实作用减少的孔隙体积 (即压实作用减孔量)^[21],简要表述为:

$$V_R = V_0 - V_C \quad (1)$$

$$V_C = V_{CS} + V_{CM} + V_{CP} \quad (2)$$

在假设压实过程中骨架颗粒只发生移动重排而无磨损减小的情况下,剩余的骨架颗粒体积 V_{CGS} 与粒内溶孔体积 V_{CRS} 之和与原始骨架颗粒体积 V_{CG} 相等:

$$V_{CG} = V_{CGS} + V_{CRS} \quad (3)$$

$$V_{CGS} = V_C - V_{CM} - V_C \cdot \Phi_C \quad (4)$$

$$V_{CG} = V_0 - V_C \cdot \Phi_0 \quad (5)$$

则可得到压实减小的孔隙度 Φ_{CS} :

$$\Phi_{CS} = \frac{V_R}{V_0} = \frac{(V_0 - V_C)}{V_0} = \frac{(\Phi_0 - \Phi_{CM} - \Phi_C + \Phi_{CRS})}{(1 - \Phi_{CM} - \Phi_C + \Phi_{CRS})} \quad (6)$$

式中: V_R 为岩石体积减少量; V_0 为岩石原始体积; V_C

为压实后的岩石体积; V_{CS} 为溶蚀后骨架颗粒体积; V_{CM} 为剩余胶结物体积; V_{CP} 为剩余孔隙体积; V_{CG} 为原始骨架颗粒体积; V_{CGS} 为剩余骨架颗粒体积; V_{CRS} 为粒内溶孔体积; Φ_0 为初始孔隙度; Φ_C 为实测孔隙度; Φ_{CM} 为剩余胶结物面孔率; V_{CPS} 为初始孔隙体积; Φ_{CRS} 为粒内溶孔面孔率; Φ_{CS} 为压实减少的孔隙度。

(2) 根据主要的增减孔效应进行孔隙演化过程分段。在上文基础上,将主要成岩作用分为 4 期:①早成岩 A 期,由压实和绿泥石、伊蒙混层、蒙脱石、早期碳酸盐胶结组成,整体为减孔;②早成岩 B 期,由压实和硅质胶结组成,整体为减孔;③中成岩 A₁ 期,由压实和溶蚀组成,整体为减孔—增孔的复合效应;④中成岩 A₂ 期至中成岩 B 期,由压实和硅质、高岭石、伊利石、晚期碳酸盐胶结组成,整体为减孔。参考北羌塘坳陷中部的埋藏史曲线^[5],巴贡组地层 R_0 达到 0.35%, 0.5%, 0.7%, 1.55% 时的最大埋深分别约为 2 000, 2 600, 4 200, 5 300 m, 按照第①期到第④期的顺序,压实减孔率分配在各期的比重依次为 37.7%, 11.3%, 31.1%, 19.8%。利用胶结物统计结果和式 (5)、(6),可得强溶蚀相、绿泥石胶结相、碳酸盐胶结相和强压实相因压实减少的孔隙度分别为 27.1%, 27.6%, 22.8%, 30.6%。

5.2 孔隙演化过程

根据孔隙度变化定量计算结果 (表 2), 可得巴贡组储层孔隙演化曲线 (图 4): 在早成岩 A 期, 4 类成岩相的孔隙演化趋势基本相同, 随着埋深增加, 孔隙水排出, 原生孔隙迅速下降, 而绝大部分的减孔由压实导致, 只有绿泥石胶结相中有较强的胶结作用, 但此时绿泥石环边对岩石抗压帮助不大; 进入早成岩 B 期, 强溶蚀相中发生了较强的胶结作用, 其他 3 类中压实与胶结作用的减孔量相当, 由于地层迅速深埋, 因而压实的减孔效应尚未充分体现; 在中成岩 A₁ 期, 有机酸大量生成, 地层水介质呈酸性, 长石、岩屑等颗粒大量溶蚀, 在强溶

表 2 根据不同成岩相计算的北羌塘坳陷上三叠统巴贡组储层砂岩孔隙度变量

Table 2 Sandstone porosity variables of Bagong Formation reservoirs in North Qiangtang Depression, calculated according to different diagenetic facies

成岩相类型	早成岩 A 期		早成岩 B 期		中成岩 A ₁ 期		中成岩 A ₂ —B 期		实测孔隙度/%
	胶结作用 减孔量/%	压实作用 减孔量/%	胶结作用 减孔量/%	压实作用 减孔量/%	溶蚀作用 增孔量/%	压实作用 减孔量/%	胶结作用 减孔量/%	压实作用 减孔量/%	
强溶蚀相	1.74	10.23	6.15	3.07	4.33	8.44	4.98	5.37	7.19
绿泥石胶结相	4.10	10.41	3.56	3.12	3.09	8.58	4.70	5.47	5.51
碳酸盐胶结相	2.17	8.53	2.32	2.56	2.38	7.04	13.23	4.48	4.26
强压实相	1.20	11.55	2.79	3.46	1.63	9.53	4.76	6.07	2.91

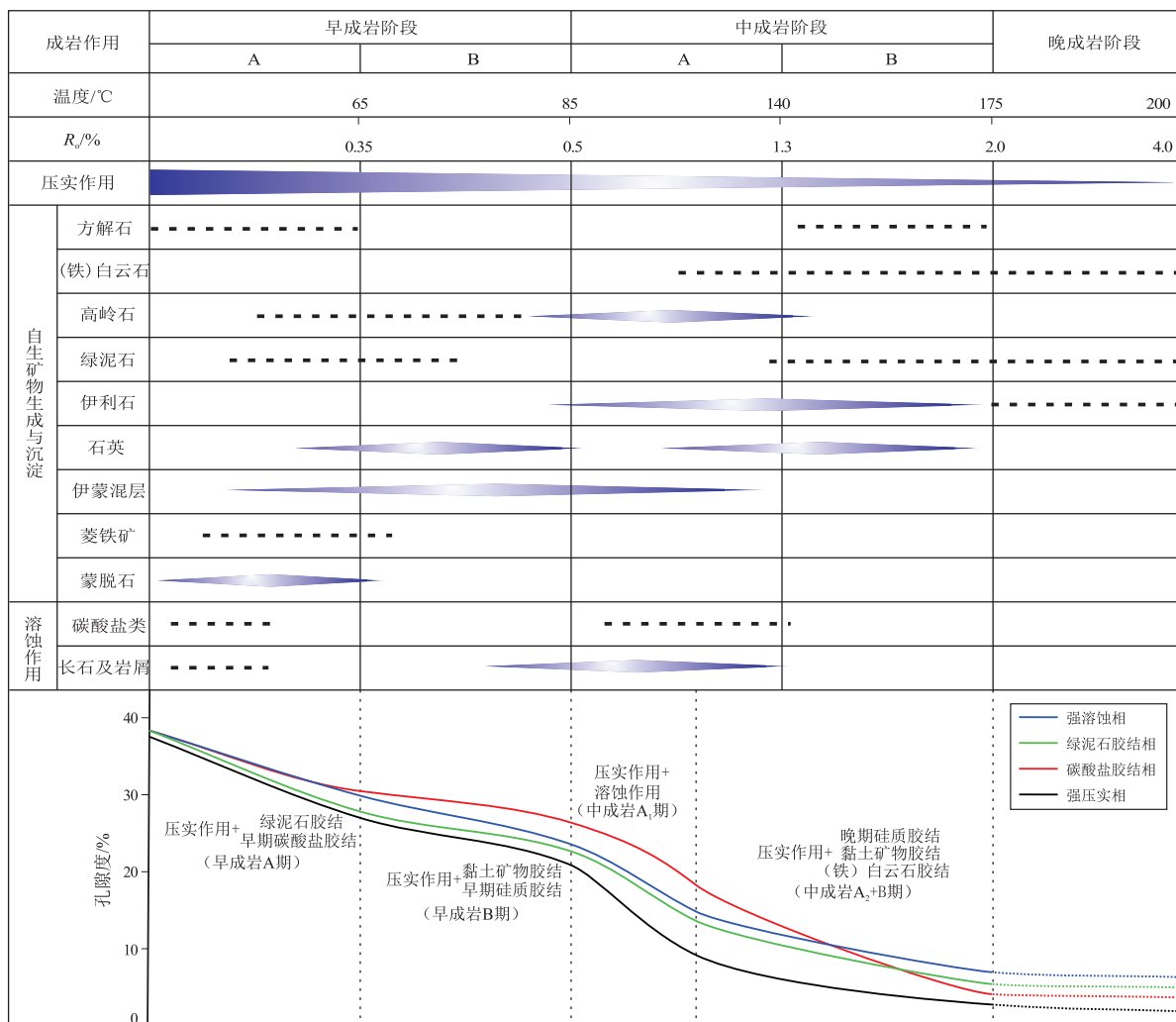


图 4 羌塘盆地北羌塘坳陷巴贡组成岩—孔隙演化史

Fig.4 Diagenesis and porosity evolution histories of Bagong Formation, North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

蚀相中增孔效应最大,绿泥石相次之;在中成岩 A₂至中成岩 B 期,地层水介质开始由酸性向碱性转化,碳酸盐胶结物大量发育,碳酸盐胶结相的胶结减孔量急剧上升,其他 3 类则差异不大。综合比较 4 类成岩相的孔隙演化过程,压实作用是造成孔隙减小的最主要因素;其次为胶结作用;溶蚀作用增孔效应明显,绿泥石衬里的形成对孔隙保存有利。

6 结论与认识

(1) 北羌塘坳陷巴贡组主要为岩屑石英砂岩、岩屑砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩,少量长石石英砂岩和石英砂岩,总体粒度较细,成分成熟度和结构成熟度中等偏低。

(2) 巴贡组主要的成岩序列为早期压实→早期黏土矿物形成→早期方解石胶结→早期硅质胶结→溶蚀作用→晚期黏土矿物形成→晚期碳酸盐

胶结→晚期硅质胶结。在靠近隆起带的浅埋区巴贡组地层处于中成岩 B 期,坳陷内部的深埋区处于晚成岩阶段。4 类成岩相中以强溶蚀成岩相物性最好,强压实压溶成岩相物性最差。

(3) 在考虑岩石表观体积变化和压实分段的前提下,进行了不同成岩相的孔隙演化定量计算。计算结果显示,压实作用是巴贡组储层致密的主因,其次为胶结作用;溶蚀作用增孔效应明显,绿泥石衬里的形成对孔隙保存有利。

(4) 经过对巴贡组储层孔隙与成岩特点研究,建立起该区致密砂岩的成岩序列和孔隙演化模式,为优势储层预测及成藏规律研究提供了重要依据。

参考文献:

[1] 赵政璋,李永铁,叶和飞,等.青藏高原羌塘盆地石油地质[M].北京:科学出版社,2001:23-26.
ZHAO Zhengzhang, LI Yongtie, YE Hefei, et al. Petroleum geology in the Qiangtang Basin, Qinghai - Tibet Plateau [M]. Beijing:

Science Press, 2001: 23-26.

- [2] 王成善,伊海生,李勇,等.西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M].北京:地质出版社,2001:187.
WANG Chengshan, YI Haisheng, LI Yong, et al. The geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang Basin in Northern Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Press, 2001: 187.
- [3] 丘东洲,乃东专,李晓清,等.羌塘盆地与特提斯域油气盆地类比及其含油气远景[J].沉积与特提斯地质, 2007, 27(3): 1-13.
QIU Dongzhou, NAI Dongzuan, LI Xiaoqing, et al. Analog and hydrocarbon potential of the Qiangtang Basin and other petroleum basins in the Asian Tethys[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(3): 1-13.
- [4] 胡明毅,龚文平,文志刚,等.羌塘盆地三叠系、侏罗系石油地质特征和含油远景评价[J].石油实验地质, 2000, 22(3): 245-249.
HU Mingyi, GONG Wenping, WEN Zhigang, et al. Petroleum geological characteristics and oil-prospect evaluation of the Triassic and the Jurassic in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(3): 245-249.
- [5] 王剑,丁俊,王成善,等.青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M].北京:地质出版社,2009:25-28.
WANG Jian, DING Jun, WANG Chengshan, et al. Strategic selection and evaluation of oil and gas resources on the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Press, 2009: 25-28.
- [6] 冯兴雷,付修根,谭富文,等.北羌塘盆地沃若山剖面上三叠统土门格拉组沉积岩地球化学特征与构造背景分析[J].现代地质, 2010, 24(5): 910-918.
FENG Xinglei, FU Xiugen, TAN Fuwen, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Upper Triassic Tumengela Formation in Woruo Mountains, north Qiangtang Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(5): 910-918.
- [7] 陈文彬,付修根,谭富文,等.藏北羌塘盆地上三叠统典型剖面烃源岩地球化学特征研究[J].中国地质, 2015, 42(4): 1151-1160.
CHEN Wenbin, FU Xiugen, TAN Fuwen, et al. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1151-1160.
- [8] FU Xiugen, WANG Jian, TAN Fuwen, et al. New insights about petroleum geology and exploration of Qiangtang Basin, northern Tibet, China: a model for low-degree exploration[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 323-340.
- [9] 廖忠礼,贾保江,陈文彬,等.青藏高原油气资源战略选区羌塘盆地重点区块研究[M].北京:地质出版社, 2013: 187-192.
LIAO Zhongli, JIA Baojiang, CHEN Wenbin, et al. Study on key blocks of Qiangtang Basin in strategic selection of oil and gas resources in Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Press, 2013: 187-192.
- [10] 许建华,张世奇,罗晓容,等.羌塘盆地侏罗系低渗透碎屑岩储集层特征[J].地质科学, 2008, 43(3): 434-444.
XU Jianhua, ZHANG Shiqi, LUO Xiaorong, et al. Characteristics of the Jurassic low-permeable clastic reservoirs in the Qiangtang Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 434-444.
- [11] 孙冬胜,白玉宝,刘池阳,等.羌塘盆地羌南坳陷查郎拉地区储层的基本特征[J].西安石油学院学报(自然科学版), 2001, 16(5): 1-3.
SUN Dongsheng, BAI Yubao, LIU Chiyang, et al. Reservoir characteristics of Chalangla area in south depression of Qiangtang Basin[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2001, 16(5): 1-3.
- [12] 胡俊杰,李琦,张慧,等.北羌塘坳陷沃若山剖面上三叠统土门格拉组碎屑岩储集特征与主控因素[J].东华理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(4): 403-408.
HU Junjie, LI Qi, ZHANG Hui, et al. Characteristics and controlling factors of Upper Triassic Tumengela Formation clastic rocks reservoir in Woruo Mountains, north Qiangtang Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2014, 37(4): 403-408.
- [13] 唐雁刚,张荣虎,魏红兴,等.致密砂岩储层多尺度裂缝渗透率定量表征及开发意义[J].特种油气藏, 2018, 25(5): 30-34.
TANG Yangang, ZHANG Ronghu, WEI Hongxing, et al. Quantitative permeability characterization of multi-scale fractures and its development significance in tight sandstone gas reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 30-34.
- [14] 邱隆伟,穆相骥,李浩,等.杭锦旗地区下石盒子组致密砂岩储层成岩作用对孔隙发育的影响[J].油气地质与采收率, 2019, 26(2): 42-50.
QIU Longwei, MU Xiangji, LI Hao, et al. Influence of diagenesis of tight sandstone reservoir on the porosity development of Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 42-50.
- [15] 白云云,孙卫,任大忠.马岭油田致密砂岩储层可动流体赋存特征及控制因素[J].断块油气田, 2018, 25(4): 455-458.
BAI Yunyun, SUN Wei, REN Dazhong. Characteristics and controlling factors of movable fluid in low-permeability and tight sandstone reservoirs in Maling Oilfield[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(4): 455-458.
- [16] 王明培,夏东领,伍岳,等.鄂尔多斯盆地红河油田长8致密砂岩储层成岩特征[J].石油实验地质, 2018, 40(6): 786-792.
WANG Mingpei, XIA Dongling, WU Yue, et al. Diagenesis features of Chang 8 tight sandstone reservoir in Honghe Oil Field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6): 786-792.
- [17] 张永东,赵永强,马红强.塔里木盆地巴麦地区泥盆系东河塘组砂岩储层致密化及成岩相[J].石油实验地质, 2019, 41(3): 363-371.
ZHANG Yongdong, ZHAO Yongqiang, MA Hongqiang. Densification and diagenetic facies of Donghetang Formation sandstone reservoir in Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 363-371.
- [18] 田建锋,喻建,张庆洲.孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性

- 能的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(3): 741-748.
- TIAN Jianfeng, YU Jian, ZHANG Qingzhou. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(3): 741-748.
- [19] 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.
- HUANG Sijing, XIE Lianwen, ZHANG Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(3): 273-281.
- [20] 马鹏杰, 林承焰, 张世奇, 等. 碎屑岩储集层中绿泥石包膜的研究现状[J]. 古地理学报, 2017, 19(1): 147-159.
- MA Pengjie, LIN Chengyan, ZHANG Shiqi, et al. An overview on study of chlorite films in clastic reservoirs[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(1): 147-159.
- [21] 陈瑞银, 罗晓容, 吴亚生. 利用成岩序列建立油气输导格架[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 43-46.
- CHEN Ruiyin, LUO Xiaorong, WU Yasheng. Construction of hydrocarbon passage framework using diagenetic sequence information[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 43-46.
- [22] 冯旭, 刘洛夫, 李朝玮, 等. 碎屑岩孔隙演化定量计算方法的改进和应用[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1198-1207.
- FENG Xu, LIU Luofu, LI Chaowei, et al. Improvement and application of quantitative calculation of porosity evolution of clastic rock[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1198-1207.
- [23] 任大忠, 孙卫, 屈雪峰, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 6 储层成岩作用特征及孔隙度致密演化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2706-2714.
- REN Dazhong, SUN Wei, QU Xuefeng, et al. Characteristic of diagenesis and pore dense evolution of Chang 6 reservoir of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2706-2714.
- [24] 王艳忠, 操应长, 惠克来, 等. 碎屑岩储层地质历史时期孔隙度演化恢复方法: 以济阳拗陷东营凹陷沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1100-1111.
- WANG Yanzhong, CAO Yingchang, XI Kelai, et al. A recovery method for porosity evolution of clastic reservoirs with geological time: a case study from the upper submember of Es₄ in the Dongying Depression, Jiyang Subbasin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1100-1111.
- [25] 许建华, 候中昊, 王金友, 等. 羌塘盆地流体包裹体特征及其在储层成岩研究中的应用[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 81-86.
- XU Jianhua, HOU Zhonghao, WANG Jinyou, et al. Characteristics of fluid inclusions in the Qiangtang Basin and their application to the study of reservoir diagenesis[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(1): 81-86.
- [26] 占王忠, 格桑旺堆. 羌塘盆地鄂纵错地区上三叠统储层流体包裹体研究[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 52-56.
- ZHAN Wangzhong, KELSANG Wangdu. Fluid inclusion analysis for Ezongcuo Area of Upper Triassic Formation in Qiangtang Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 52-56.
- [27] SANJUAN B, GIRARD J P, LANINI S, et al. Geochemical modelling of diagenetic illite and quartz cement formation in Brent sandstone reservoirs: example of the Hild Field, Norwegian North Sea[M]//WORDEN R H, MORAD S. Clay Mineral Cements in Sandstones. [s.l.]: Blackwell Publishing Ltd, 1999: 425-452.
- [28] 宋春彦, 王剑, 何利, 等. 羌塘盆地含烃类流体活动的基本特征及成藏分析[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(4): 380-385.
- SONG Chunyan, WANG Jian, HE Li, et al. Basic characteristics of hydrocarbon fluid inclusion events and analysis of forming reservoirs in Qiangtang Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4): 380-385.
- [29] STORVOLL V, BJØRLYKKE K, KARLSEN D, et al. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite: a study of the Jurassic Garn Formation from the Kristin and Lavrans Fields, offshore Mid-Norway[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(6): 767-781.
- [30] FRANKS S G, ZWINGMANN H. Origin and timing of late diagenetic illite in the Permian-Carboniferous Unayzah sandstone reservoirs of Saudi Arabia[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1133-1159.
- [31] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 11-17.
- ZENG Liangbo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 11-17.
- [32] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. 碎屑岩成岩阶段划分: SY/T 5477-2003[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 5-7.
- YING Fengxiang, HE Dongbo, LONG Yumei, et al. The division of diagenetic stages in clastic rocks: SY/T 5477-2003[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 5-7.
- [33] BEARD D C, WEYL P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.

(编辑 黄娟)