

文章编号: 0253-2697(2016)11-1381-13 DOI:10.7623/syxb201611006

钾长石和钠长石差异溶蚀与含烃类流体的关系

——以准噶尔盆地艾湖油田百口泉组为例

康 逊¹ 胡文瑄¹ 曹 剑¹ 杨 召² 吴海光¹ 向宝力²

(1. 南京大学地球科学与工程学院 江苏南京 210023; 2. 中国石油新疆油田公司实验检测研究院 新疆克拉玛依 834000)

摘要:钾长石和钠长石差异溶蚀及与含烃类流体的关系和成储效应是储层地质学与矿物学研究中具有争议的科学问题,以准噶尔盆地西北缘艾湖油田下三叠统百口泉组为例,对该问题进行了探讨。首次在储层中发现了钾长石和钠长石的差异溶蚀现象,即钾长石溶解,而钠长石不溶解,甚至次生加大。这种差异溶蚀具有与含烃类流体密切相关的层间差异性,自下而上百口泉组一段—百口泉组三段,随含烃类流体丰度逐渐降低,钾长石溶蚀(钠长石不溶/次生加大)强度逐渐减弱。这种正相关性的原因在于,与油气充注相关的酸性流体促进了钾长石溶蚀,并且百口泉组一段—百口泉组三段,烃类充注强度不断减弱,从而导致了钾长石溶蚀程度不断降低。因此,这一差异溶蚀过程指示了酸性的含烃类流体与岩石相互作用强度,并产生了次生孔隙,改善了物性,指示研究区玛 18—艾湖 2 井区的上倾位置具有勘探远景。

关键词:钾长石;钠长石;差异溶蚀;含烃类流体;溶蚀孔隙;百口泉组;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Relationship between hydrocarbon bearing fluid and the differential corrosion of potash feldspar and albite: a case study of Baikouquan Formation in Aihu oilfield, Junggar Basin

Kang Xun¹ Hu Wenxuan¹ Cao Jian¹ Yang Zhao² Wu Haiguang¹ Xiang Baoli²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210023, China; 2. Research Institute of Experiment and Detection, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China)

Abstract: The relationship between hydrocarbon bearing fluid and the differential corrosion of potash feldspar and albite as well as reservoir effect are controversial scientific issues in the study of reservoir geology and mineralogy, which were explored with a case study of the Lower Triassic Baikouquan Formation in Aihu oilfield on the northwestern margin of Junggar Basin. The differential corrosion phenomenon of potash feldspar and albite was first discovered in reservoirs, i. e., dissolved potash feldspar, undissolved albite, and even secondary enlargement. The differential corrosion shows a close interlayer difference with hydrocarbon bearing fluid. In the three members of Baikouquan Formation, the corrosion intensity of potassium feldspar (albite insolubilization/secondary enlargement) gradually decreases with the decreasing abundance of hydrocarbon bearing fluid from bottom to top (the 1st to the 3rd Member of Baikouquan Formation). This positive correlation lies in the fact that oil and gas charging-related acidic fluid promotes potash feldspar dissolution and filling intensity of hydrocarbon is decreased from the 1st to the 3rd Member of Baikouquan Formation, thus leading to the continuous decrease of potash feldspar corrosion. Therefore, the differential corrosion indicates the interaction strength of acidic hydrocarbon bearing fluid and rock, which produces secondary pores and improves physical property, indicating the exploration prospect of the updip position of Well Ma 18-Aihu in the study area.

Key words: potassium feldspar; albite; differential corrosion; hydrocarbon bearing fluid; dissolved pore; Baikouquan Formation; Junggar Basin

引用:康逊,胡文瑄,曹剑,杨召,吴海光,向宝力.钾长石和钠长石差异溶蚀与含烃类流体的关系——以准噶尔盆地艾湖油田百口泉组为例[J].石油学报,2016,37(11):1381-1393.

Cite: Kang Xun, Hu Wenxuan, Cao Jian, Yang Zhao, Wu Haiguang, Xiang Baoli, Relationship between hydrocarbon bearing fluid and the differential corrosion of potash feldspar and albite: a case study of Baikouquan Formation in Aihu oilfield, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1381-1393.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 1230312)和国家自然科学基金项目(No. 41573054)资助。

第一作者:康 逊,男,1989年8月生,2011年获中国石油大学(华东)资源勘查工程专业学士学位,现为南京大学博士研究生,主要从事储层沉积学方面的研究工作。Email: kangxunk@163.com

通信作者:胡文瑄,男,1959年10月生,1982年获山东矿业学院地质学专业学士学位,1988年获中国地质大学(北京)矿床学专业博士学位,现为南京大学教授、博士生导师,主要从事石油天然气成藏机理、流体地质作用与成矿方面的教学与科研工作。Email: huwx@nju.edu.cn

碎屑岩储集层中的长石溶蚀是一种常见的地质现象,并通常伴随着溶蚀孔隙的产生,从而改善储层物性,故具有重要的成储成藏效应,是油气储层地质学领域研究的热点^[1-6]。研究发现,这种溶蚀通常表现为差异溶蚀,如北海盆地侏罗系布伦特群和瓮特兰组砂岩中,钾长石大量溶蚀并产生溶蚀孔隙,溶蚀产生的 K^+ 在高岭石的伊利石化过程中被吸收,而钠长石却有明显的次生加大^[3,7];再如中国鄂尔多斯盆地上古生界石盒子组和三叠系延长组的砂岩中,也发现了这种现象^[8]。此外,还有报道提出过富钠斜长石的溶蚀和自生钾长石的沉淀,如巴西中部圣弗朗西斯盆地白垩系艾瑞阿杜组的砂岩^[9]。这种长石的差异溶蚀现象,无疑是储层中流体-岩石相互作用的结果,鉴于同一层组中碎屑岩的岩矿组分相近,因此普遍认为主要是流体的组成和性质控制着地层中长石的差异溶蚀^[10-12]。如 Bowers 等经热力学计算,认为 Na^+ 与 H^+ 、 K^+ 与 H^+ 的浓度比值制约着碱性长石溶蚀的吉布斯自由能增量,进而控制钾长石与钠长石的选择性溶蚀^[13]。Fu 等通过对条纹长石溶蚀的原位观测,证实在 KCl 溶液中会发生钠长石的溶蚀和钾长石的沉淀,并伴生有高岭石等次生矿物^[14]。而前人诸多实验证实,地层流体 pH 值的降低、含烃类流体的充注以及溶蚀产物的迁移等,均可明显提高长石溶蚀的速率^[15-18],进而导致不同类型长石在碎屑岩层空间分布上表现出明显的差异^[3,7]。此外,在实际地层条件下,随埋深和温度的增大,地层中的诸多矿物会发生溶蚀-沉淀平衡的持续作用,地层水性质也在显著变化^[19,20],如蒙皂石或高岭石向伊利石的转化会显著降低地层水中 K^+ 的浓度^[21],进而影响长石的选择性溶蚀。总而言之,地层中流体类型的多样性,以及活动机制的复杂性控制了碎屑岩储层中长石类矿物的差异溶蚀^[22]。因此,尽管碎屑岩中长石类矿物的差异溶蚀是一个普遍的地质现象,但其机制和影响因素非常复杂,其中,与含烃类流体的关系是一个难点,关键在于含烃类流体对长石溶蚀到底能产生什么样的影响,影响又有多大。

准噶尔盆地是中国西北地区的一个大型叠合含油气盆地,其勘探取得重要突破,在西北缘玛湖凹陷西斜坡的下三叠统百口泉组砂砾岩储层中发现了亿吨级的轻质油藏,虽然储层总体致密,但初步的研究发现,长石溶蚀提供了大量有效储集空间^[23],而且有意义的是,研究区这种长石的溶蚀表现为差异溶蚀,即钾长石溶蚀,而钠长石不溶蚀甚至次生加大,自下向上百口泉组一段-百口泉组三段,含烃类流体丰度与钾长石溶蚀强度均逐渐减弱,表现出明显的层间差异,这在最近勘探获得成功的艾湖油田最为典型,为研究碱性长石

的差异溶蚀与含烃类流体的关系及其成储效应提供了良好素材,但前人工作还主要侧重于储层的基本特征描述与成因研究^[23-25],对此未涉及。据此,笔者拟通过系统的地质观测和地球化学分析,研究这一现象的基本特征、机理及控制因素、过程与模式和成储效应,期望研究结果为长石差异溶蚀与含烃类流体的关系及其成储效应这一热点与难点研究提供新实例,同时也可应用于区域油气勘探。

1 地质背景

准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷研究区南北长约 120 km,勘探面积近 5000 km²(图 1),油气源供应充足^[26],其下三叠统百口泉组勘探取得重大突破,自 2013 年以来,位于西斜坡的玛 18 井、艾湖 1 井、艾湖 6 井等获得高产工业油气流,具有大面积、多层段成藏的特点,显示出良好的勘探前景,已建成艾湖油田^[23,24]。

艾湖油田研究区所在的玛湖凹陷毗邻西北缘逆冲断裂带,因此其构造和沉积演化总体也受西北缘逆冲断裂带的控制,为一 NE 走向的陆内凹陷,整体向 ES 倾(百口泉组自西向东埋深逐渐增大,从 2800 m 增至 4400 m),局部发育低幅度平台、背斜或鼻状构造,断裂发育^[24]。

百口泉组与下伏中二叠统下乌尔禾组(P_2w)呈不整合接触(缺失上二叠统上乌尔禾组 P_3w),与上覆中上三叠统克拉玛依组(T_3k)和白碱滩组(T_3b),总体为整合接触。百口泉组地层总沉积厚度 70~180 m,自下向上分为 3 个亚段,即百口泉组一段(百一段, T_1b_1)、百口泉组二段(百二段, T_1b_2)和百口泉组三段(百三段, T_1b_3),如图 1 所示。

在基本沉积特征上,百口泉组超覆于海西晚期逆冲作用形成的边界隆起上,山前沉降幅度大,沉积厚,发育冲积扇粗碎屑沉积体系^[27,28];而至斜坡-凹陷区,变为平缓斜坡背景下的浅水退积型扇三角洲沉积,具有近物源粗碎屑沉积的特点,发育牵引流、重力流双重流体机制下形成的岩相类型^[23]。百口泉组扇体可以划分为 3 种亚相和 11 种微相:即扇三角洲平原亚相的水上泥石流砾岩微相、辫状河道砂砾岩微相、平原河道间砂泥岩微相;扇三角洲前缘亚相的水下主河道砾岩微相、水下河道砂砾岩微相、水下泥石流砂砾岩微相、水下河道间砂泥岩微相、水下河道末端砂岩微相、河口坝-远砂坝砂岩微相;前扇三角洲亚相的前扇三角洲粉砂岩微相和前扇三角洲泥岩微相^[27,28]。研究区主要发育扇三角洲平原及前缘亚相,储层主要发育于扇三角洲前缘相带,对应砂体分布范围广,延伸距离远^[23,24]。

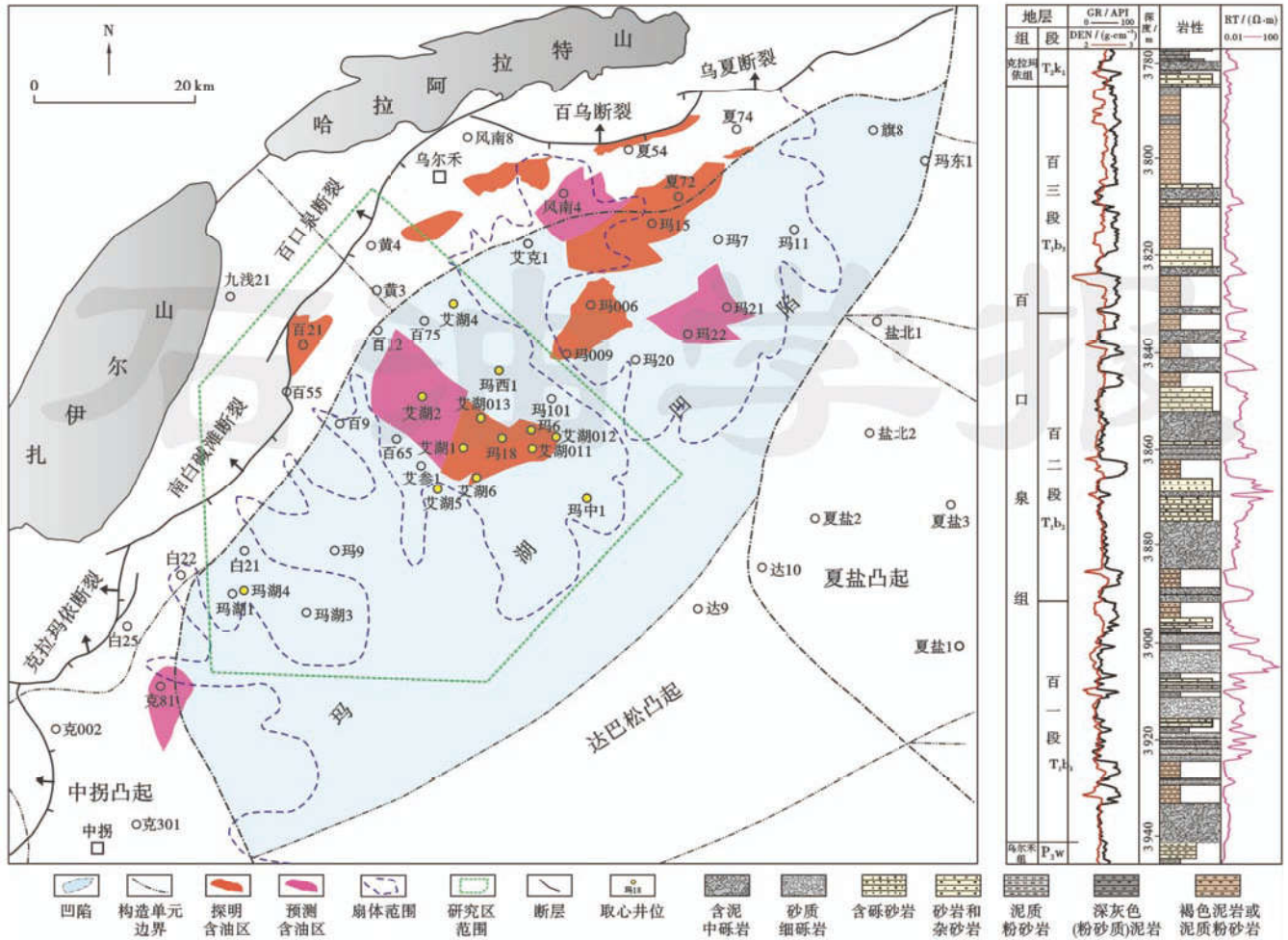


图 1 玛湖凹陷基本地质特征与百口泉组岩性柱状图(以重点井玛 18 井为例)

Fig. 1 Basic geological characteristics of the Mahu sag and generalized stratigraphy of the Lower Triassic Baikouquan Formation (based on representative Well Ma18)

2 实验

筛选了艾湖油田研究区 13 口取心井,重点对玛 18 井和艾湖 1 井进行精细研究,选择了不同层段、不同岩性的样品用于对比,样品点垂向间距在 1 m 以内,累计共取得样品 183 件,其中 2 口重点井玛 18 井 67 件、艾湖 1 井 36 件,其他井 80 件。

所有样品均磨制薄片,首先进行了细致的岩矿鉴定,用以初步确定样品的矿物组成和结构特征。在此基础上,取约 1 mm × 1 mm × 1 mm 的块样,在酒精中用超声清洗 2 次以清洗原油(每次 1 h),再利用场发射扫描电镜(FE-SEM)观察矿物的形貌和微观结构,再针对特征矿物在 FE-SEM 下进行能谱分析(EDS)以了解其元素组成。FE-SEM 测试仪器为 Carl Zeiss Supra 55,成像条件:加速电压 5 kV,30 μm 标准光阑,以二次电子成像(SE)模式运行,捕获时间 40 s。能谱分析(EDS)探头为 Oxford Aztec X-Max 150,分析条件:加速电压 15 kV,以 EDS 模式运行。为进一步明确

研究区百口泉组砂砾岩矿物组成、孔隙分布与特征矿物的元素组成,开展了电子探针(EPMA)背散射电子成像(BSE)观测和元素含量测试。EPMA 测试仪器为 JXA-8100M(JEOL),背散射成像(BSE)和矿物元素分析条件:加速电压 15 kV,束流 20 nA,束斑直径 1 μm。

为了确定样品的岩矿组成,对样品进行了碎屑统计和 XRD 分析。为便于物源区对比,碎屑统计选择小于 2 mm 的颗粒(砂质组分)进行分析,石英、长石和岩屑总数在 300 颗以上,并对岩屑母岩类型进行了识别。在 XRD 测试中,砂岩直接研磨至 200 目送样;对于砾岩和含砾砂岩,考虑到砾石会干扰全岩 XRD 分析结果,因此将岩样破碎后筛取粒径小于 2 mm 的砾间充填物研磨至 200 目送样。仪器为南京大学现代分析中心的日本理学 D/Max-Ra 型 X 射线衍射仪,测试条件为 Cu 靶、电压 40 kV、电流 40 mA、步进扫描、步长 0.02°/步、预置时间 0.2 s/步、扫描范围 3°~ 60°。黏土自然风干样品测试步长 0.01°/步,预置时间 0.2

s/步,扫描范围 $3^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 。利用 Jade 6.0 软件识别并计算各矿物衍射峰高度和面积。各种矿物的鉴定以及相对含量计算按照 Cook 等的方法进行^[21,31]。

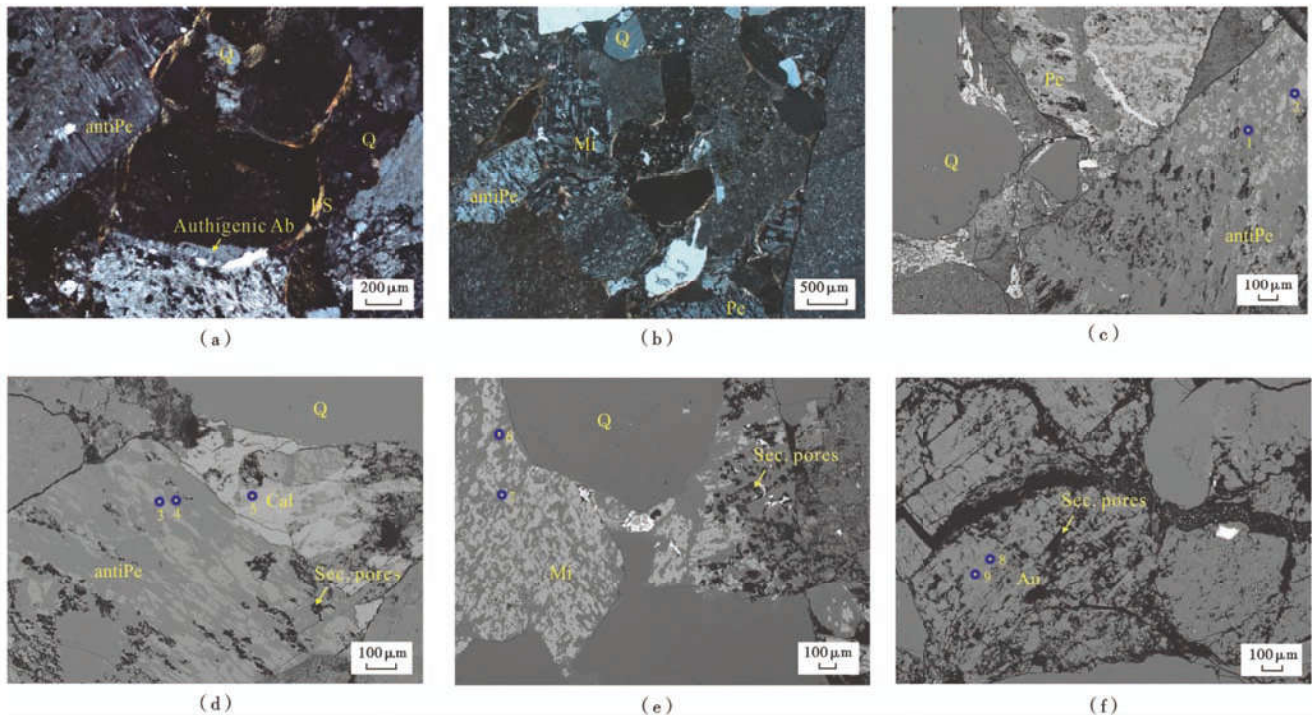
此外,为了评价储层的油气充注情况,进而分析其对长石溶蚀的影响,还在岩心油气显示描述基础上,进行了荧光薄片的观察,并统计分析了油气包裹体颗粒指数(grains containing/with oil inclusions,GOI),即含油包裹体的矿物颗粒数目占总矿物颗粒数目的比例^[32,33]。所用荧光显微镜为 Nikon Eclipse E600WPL,20 倍物镜,统计颗粒数在 450 颗以上。

3 结果与讨论

3.1 储层岩石学背景特征

通过对研究区 13 口取心井 253.3 m 岩心的细致观测、220 余片岩石薄片的精细鉴定,以及 52 件样品

的扫描电镜 FE-SEM 和电子探针(EPMA)背散射(BSE)观测,明确了研究区百口泉组储层岩石学的基本特征(图 2)。百口泉组岩石类型主要为砂砾岩类,包括含砾泥岩(水上或水下泥石流沉积)、含砂砾岩(水下主干河道沉积)、砂质细砾岩(水下分支河道沉积)、砂岩和含细砾砂岩(辫状河道、水下河道末端或河口坝—远砂坝沉积)、褐色粉砂质泥岩(辫状河道或水下河道间洪泛沉积)、深灰色泥质粉砂岩和泥岩(前扇三角洲沉积)。砾石成分主要为花岗岩砾石和凝灰岩砾,见少量板岩砾;砾间砂级颗粒以花岗质岩屑为主,部分长石、石英颗粒;砂岩成分成熟度低,以岩屑砂岩为主,岩屑含量高,一般大于 55%,并发育少量长石岩屑砂岩。百口泉组砂砾岩中广泛发育了碱性长石,包括条纹长石、反条纹长石、发育格子双晶的微斜长石和少量歪长石,为长石的溶蚀奠定了物质基础。



注:Pe—条纹长石(钾长石组分含量 > 钠长石组分含量);antiPe—反条纹长石(钾长石组分含量 < 钠长石组分含量);Authigenic Ab—自生钠长石;Mi—格子状双晶的微斜长石(钾长石组分含量 > 钠长石组分含量);An—歪长石(钾长石组分含量 < 钠长石组分含量);Q—石英;I/S—有序度不断增加的伊/蒙混层;Cal—方解石胶结物;Sec. pores—溶蚀孔隙;BSE 图像长石颗粒中亮灰色为钾长石组分、暗灰色为钠长石组分;1—9 为 EPMA 测试长石颗粒和方解石的位置,表 1 为相应组分的元素含量。

(a) 砂质细砾岩发育反条纹长石和自生钠长石,玛 18 井 3915.15 m,百一段,正交光;(b) 砂质细砾岩发育条纹长石、反条纹长石,以及格子状双晶的微斜长石,玛 18 井 3903.85 m,百一段,正交光;(c) 含泥中砾岩发育条纹长石(含钠长石嵌晶)和反条纹长石,玛湖 4 井 3314.30 m,百一段,BSE;(d) 砂质细砾岩反条纹长石次生溶孔发育,粒间孔隙被方解石胶结,艾湖 2 井 3312.91 m,百二段,BSE;(e) 砂质细砾岩发育微斜长石,图示非格子双晶切面,艾湖 1 井 3815.42 m,百二段,BSE;(f) 砂质细砾岩见次生溶孔发育的歪长石(钾长石组分已被溶蚀),在其具格子双晶的切面可见两组解理,艾湖 1 井 3849.78 m,百一段,BSE。

图 2 百口泉组砂砾岩储层的矿物组成及结构特征

Fig. 2 Mineral composition and structure of sandy conglomerates in the Baikouquan Formation

表 1 百口泉组砂砾岩钾长石、钠长石和方解石主量元素数据

Table 1 Major element content of orthoclase, albite and calcite in the Baikouquan Formation sandy conglomerates

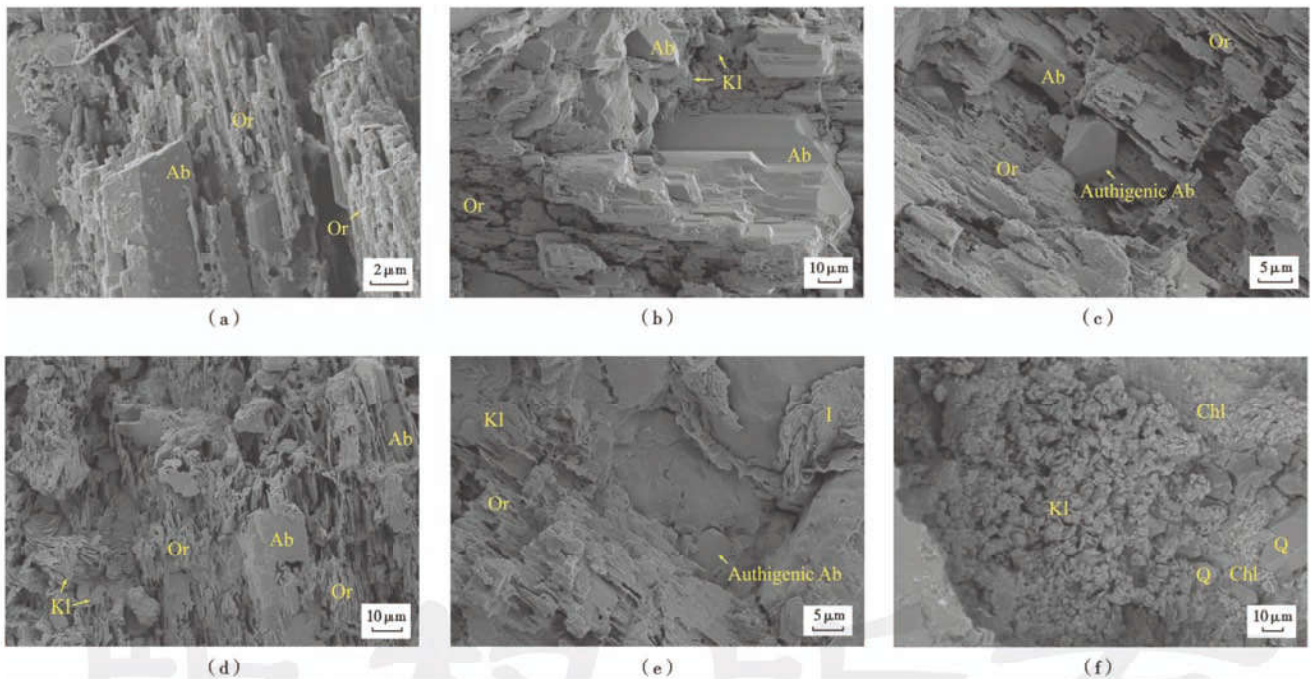
点号	矿物类型	组分含量/%									
		K ₂ O	Na ₂ O	FeO	MgO	CaO	MnO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	总量
1	钠长石	0.21	11.58	0.16	0.07	0.83	0.01	0.05	20.13	67.19	100.22
2	钾长石	15.61	0.37	0.06	0	0.01	—	0.06	19.76	64.27	100.14
3	钾长石	16.49	0.27	0.70	0.06	—	—	0.19	19.24	62.50	99.45
4	钠长石	0.25	10.82	0.18	0.01	0.88	0	0	20.61	66.65	99.40
5	方解石	—	0.01	0.13	0.05	46.4	8.72	0.01	—	—	55.32
6	钠长石	0.28	10.88	0.40	0.04	0.84	0.01	0	20.67	67.22	100.34
7	钾长石	16.16	0.34	0.15	0.02	0.01	—	0.01	18.78	63.81	99.27
8	钠长石	0.59	11.44	0.32	0.11	0.20	0.01	—	20.26	66.65	99.57
9	钠长石	0.15	11.77	0.15	0.01	0.53	0.02	0.01	19.85	67.11	99.60

注:表格中点号与图 2 中各点号一致,“—”表示低于电子探针检测限。

3.2 储层长石差异溶蚀特征

如上所述,百口泉组储层中大量发育的碱性长石为差异溶蚀奠定了基础,细致观测和研究发现,这些碱性长石具有差异溶蚀现象,突出表现为钾长石的溶蚀、钠长石的不溶蚀甚至次生加大。以场发射扫描电镜观测为例(图 3),发现砂砾岩在成岩过程中,钾长石晶体因发生溶蚀而呈镂空状或蜂窝状,最终的溶蚀残体呈平行

于 001 面的窄片状分布[图 3(a)], 相比而言,钠长石晶面完整,无溶蚀痕迹,赋存于碱性长石陆源碎屑中,常发育次生加大,并见自生钠长石的生成[图 3(a)—图 3(d)]。伴随碱性长石中钾长石的选择性溶蚀,大量溶蚀孔隙形成(图 2),反映了成储效应。在二次电子成像中可见,长石溶孔基本沿条纹长石中钾长石纹层方向分布,并且在钾长石纹层表面可见较小的溶孔[图 3(c)—图 3(e)]。



注:Or—钾长石组分;Ab—钠长石组分;I—伊利石;Kl—自生高岭石;Chl—自生绿泥石;Q—自生石英;Authigenic Ab—自生钠长石。

(a) 钾长石溶蚀残体呈平行于(001)面的窄片状,钠长石晶面完整,玛 18 井 3867.15 m,百二段;(b) 钾长石溶蚀残体呈窄片状,钠长石晶面完整,玛 18 井 3904.9 m,百一段;(c) 自生钠长石呈短柱状沉淀,玛 18 井 3855.3 m,百二段;(d) 含细砾砂岩钾长石溶蚀呈镂空状,自生高岭石沉淀,艾湖 2 井 3313.12 m,百二段;(e) 细砾岩钾长石溶蚀伴生的自生高岭石、绿泥石和石英,玛 18 井 3905.1 m,百一段;(f) 砂质细砾岩颗粒被伊/蒙混层包裹,石英碎屑次生加大,玛 18 井 3910.45 m,百一段。

图 3 碱性长石差异溶蚀特征和伴生的次生矿物

Fig. 3 Characteristics of alkali feldspar differential dissolution and concomitant secondary minerals

碱性长石的差异溶蚀在纵向上具有鲜明的层控差异特点,由下至上为百一段—百三段,钾长石溶解强度(钠长石的沉淀强度)逐渐减弱。以典型的产油井玛18井为例,岩石薄片、FE-SEM和EPMA背散射观测显示,该井百一段35块砂砾岩样品中大量发育钠长石,而难以见到钾长石(图4),仅在3块渗透性差的泥石流沉积含泥砾岩见少量与钠长石共存的钾长石,说明钾长石因溶蚀强烈而消耗殆尽,但钠长石相对不溶。向上至百二段,14个砂砾岩样品均见与钠长石共存的钾长石残余(图4),反映钾长石的溶蚀强度比百一段要低。进一步的XRD分析显示,由下至上,百一段3904~3926.25 m的22个样品的钾长石含量从低于检测限到4%,均值1.4%,3个高值样品(3%~4%)均为渗透性差的泥石流沉积含泥砾岩,与显微镜下鉴定结果一致。而在该井段之上的3902~3904 m砂砾岩中,钾长石含量明显增大,2个水下河道砂岩样品分别为8%和9%。至百二段,砂砾岩中的钾长石含量继续增大,14个样品总体分布在4%~12%,均值6.6%。再向上至百三段,3个砂砾岩样品钾长石含量为6%~10%,均值7.7%。可见,钾长石的含量自下而上逐渐增大。与此相反,钠长石的含量自下而上逐渐减少,百一段样品中的钠长石含量为15%~47%,均值35.9%;百二段为17%~39%,均值29.6%,减少了约6%;百三段为27%~31%,均值为29.3%,与百二段含量相近(图4)。可见,百口泉组垂向上钾长石和钠长石差异溶蚀显著,自下向上钾长石含量有增大的趋势,而钠长石含量有减小的趋势,前者是因为溶蚀逐渐减弱,后者是因为沉淀有所减弱。

3.3 储层长石差异溶蚀机制

3.3.1 储层长石差异溶蚀与含烃类流体有关

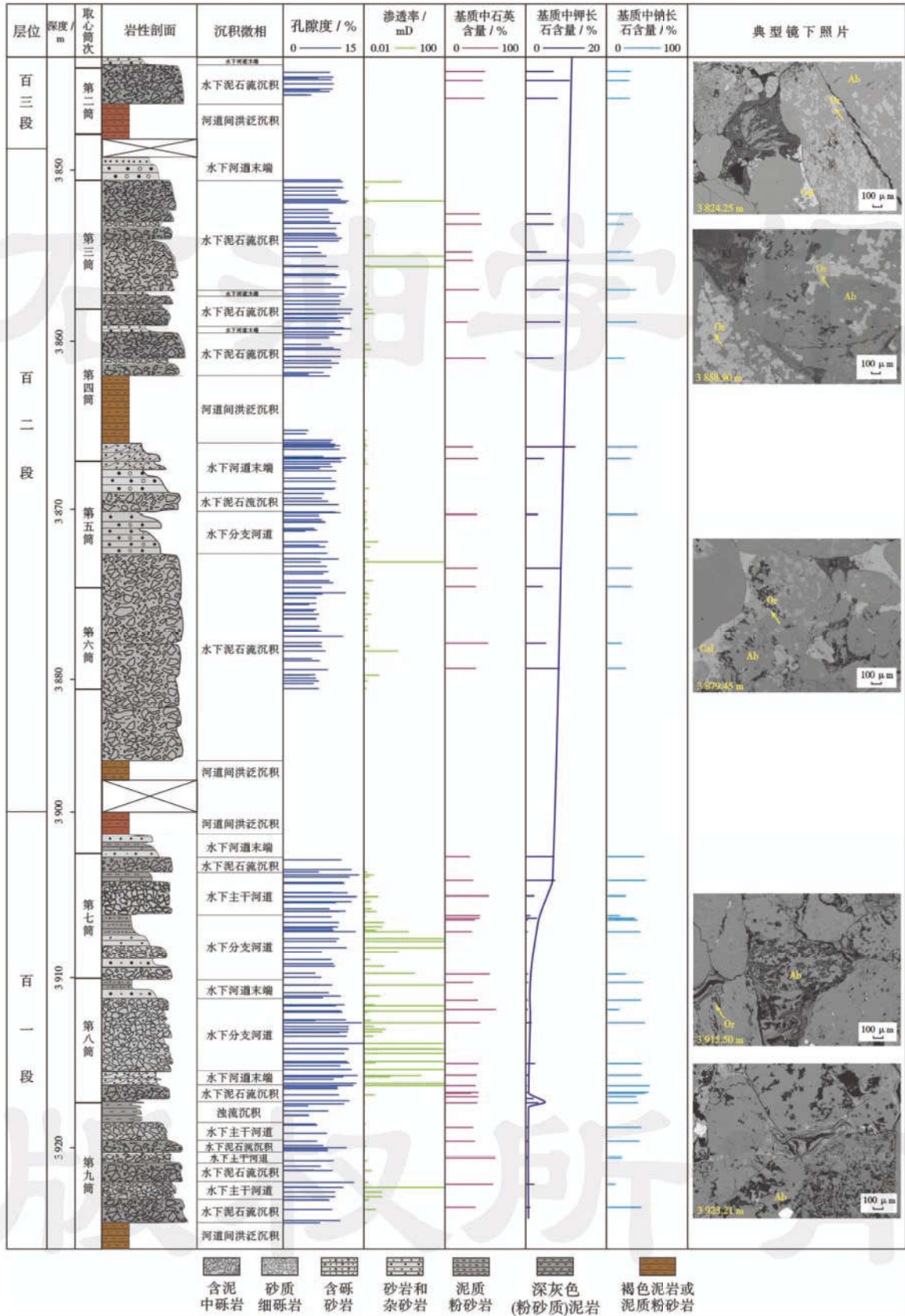
研究区百口泉组储层长石的溶蚀在理论上存在多种可能性,如母岩风化搬运过程中的溶蚀、浅表大气降水的溶蚀,以及埋藏阶段含烃类流体和/或地下水的溶蚀等。综合分析认为,研究的储层长石差异溶蚀与含烃类流体有关。

首先,长石溶蚀不是因为物源区岩性变化或者发生于沉积物搬运阶段。这是因为:①研究区百口泉组3个不同段物源均来自西侧的扎伊尔山与哈拉哈拉特山之间的山口通道^[23]。砂砾岩砂质组分的碎屑统计分析显示,百一段石英相对含量均值为33.5%,长石为18.9%,岩屑为49.5%;百二段石英含量均值为35.5%,长石为18.2%,岩屑为46.4%;百三段石英含量均值为36.4%,长石为18.5%,岩屑为45.1%。可见,由百一段—百三段,石英含量略有增加,岩屑含量略减少,而长石含量基本不变。进一步对砂质组分岩

屑母岩类型统计发现,百一段岩屑中凝灰岩相对含量均值为23.7%,花岗岩为19.4%,沉积岩为5.3%;百二段凝灰岩为22%,花岗岩为17.5%,沉积岩为6.9%;百三段凝灰岩为24.3%,花岗岩为18.5%,沉积岩为2.4%。可见,百一段—百二段岩屑母岩类型几乎没有变化。综上所述,研究区百一段—百三段物源区母岩岩性没有大的变化,母岩供给的钾长石与钠长石含量没有明显的变化,指示母岩性质或物源不是钾长石含量在垂向上变化的主控因素。②在沉积物搬运阶段,研究区距物源区距离较短(小于60 km),不足以造成母岩风化搬运过程中显著的钾长石溶蚀。③百口泉组沉积于早三叠世的干旱气候环境^[29],母岩内长石的风化强度有限;其次,长石溶蚀没有受浅表大气水影响,因为百口泉组上覆克拉玛依组,两者为整合接触,没有经历沉积间断以及该期间的大气水风化淋滤。

据此,长石溶蚀只有可能发生于埋藏阶段。钾长石在埋藏阶段的溶蚀需要酸性流体环境,在含油气盆地中,大气水渗入、深部幔源CO₂供给和含烃类流体影响是保持地层水偏酸性的主要机制^[3,33-36]。因断裂和不整合面沟通的地质背景,同时凹陷内部的玛18井区钾长石溶蚀强度远高于凹陷边缘的艾湖4井区,指示研究区较深的百口泉组没有受到大气水的影响;同时,无深大断裂发育以及不发育热液矿物指示百口泉组砂砾岩也未受到深部幔源CO₂的影响。而含烃类流体活动强度与钾长石溶解程度的显著正相关,以及凹陷内部玛18井区钾长石溶蚀明显强于凹陷边缘艾湖4井区,均说明长石差异溶蚀与含烃类流体有关。

如上所述,研究区百口泉组储层长石的差异溶蚀具有显著的层控特点,这种具有层控特点的差异溶蚀与含烃类流体的活动强度具有显著的相关性,即自下而上,含烃类流体的活动强度也是不断减弱的,这可以从宏观的油气勘探结果和岩心油气显示,以及微观的显微镜下荧光观测,以及(半)定量的含油包裹体颗粒指数(GOI)数据上加以说明。首先,从试油结果来看,百一段最大产油量为48.6 t/d,单井平均产量为21.70 t/d;百二段最大产油量为13.19 t/d,单井平均产量为5.43 t/d;百三段仅艾湖5井见少量产能,产油量为0.24 t/d(表1)。其次,对于岩心油气显示,以典型井玛18井为例,百一段油浸—富油级别取心占21.2%,油斑级别以上取心为67.1%;百二段油浸级别取心占3.6%,油斑级别以上取心占31.8%;百三段无油浸取心,油斑级别以上取心占4.2%。荧光薄片显示,百一段粒间孔隙为明亮的黄橙色、黄绿色[图5(a)],百二段为黄绿色[图5(b)],百三段为无荧光至微弱黄绿色光[图5(c)]。百口泉组不同层段的含烃包裹体丰度



注:百一段钾长石基本已溶蚀殆尽,仅剩下钠长石,而百二段钾长石部分被溶蚀,百三段钾长石仅极少量被溶蚀。Or—呈亮灰色的钾长石组分(箭头所示);Ab—呈暗灰色的钠长石组分;Kl—自生高岭石;Cal—方解石胶结物。

图 4 玛 18 井百口泉组砂砾岩矿物含量

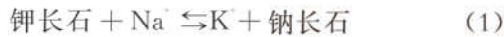
Fig. 4 Minerals content of sandy conglomerates in Well Ma18 of T₁b

(GOD)差异显著:百一段为 6.8%~13.8%,均值为 11.2%;百二段为 4.2%~8.6%,均值为 6.1%;百三段为 1.8%~6.4%,均值为 3.3%(图 5,表 2),由下至上含烃类流体的丰度逐渐降低。综合上述多方面的宏观证据,可见百口泉组由下至上,含烃类流体充注强度具有降低的趋势。

再结合钾长石的溶蚀,可见艾湖油田研究区不同层段含烃类流体活动强度的差异决定了钾长石溶蚀程度的不同。百一段含烃流体活动最强,钾长石几乎被溶蚀殆尽,而百二段含烃流体活动已明显减弱,钾长石大量残留,至百三段仅有微弱的烃类活动痕迹,钾长石溶蚀有限。由此可见,长石的差异溶蚀与含烃类流体的充注具有密切关系。

3.3.2 含烃类流体对长石差异溶解的机理

研究中发现的碱性长石选择性溶解本质在于钾长石和钠长石溶解的差异。在埋藏状态下受诸多因素影响,不同类型长石的相互转化易于发生,其反应模型可简化表示为:



若共存的钠长石和钾长石晶体表面属性一致,且无次生矿物干扰,该溶解作用平衡常数可表示为:

$$K_{ep} \approx \frac{\alpha_{\text{Na}^+}}{\alpha_{\text{K}^+}} \quad (2)$$

因而,地层水中 $\frac{\alpha_{\text{Na}^+}}{\alpha_{\text{K}^+}}$ 和 H^+ 的浓度会显著影响溶解反应式(1)的方向(图 6)。

通常而言,地层水中的 Na^+ 含量远高于 K^+ 含量。玛湖凹陷研究区百口泉组砂砾岩储层的地层水也不例外,以富 Na 贫 K 为特征^[37]。同时,玛湖凹陷研究区百口泉组自下到上不同亚段均分布含有膨胀层的伊/蒙混层,根据 53 个样品中黏土矿物提取物的 XRD 分

析结果,伊/蒙混层的相对含量为 18.2%~78.0%,均值 45.4%。在蒙脱石的伊利石化过程中(伊/蒙混层形成),要消耗大量的 K^+ :



该反应会显著促使溶蚀平衡式(1)向右进行。因此,蒙脱石的伊利石化,主导了百口泉组碱性长石的选择性溶解,即钾长石不断溶解,而钠长石不溶解,甚至在原来晶格基础上次生加大。

对于地层水中 H^+ 的浓度,由于实际地质条件下地层水的 pH 值一般趋于中性^[17],特别是储层中还存在着一定量的碳酸盐胶结物,会缓冲酸性流体的影响,因

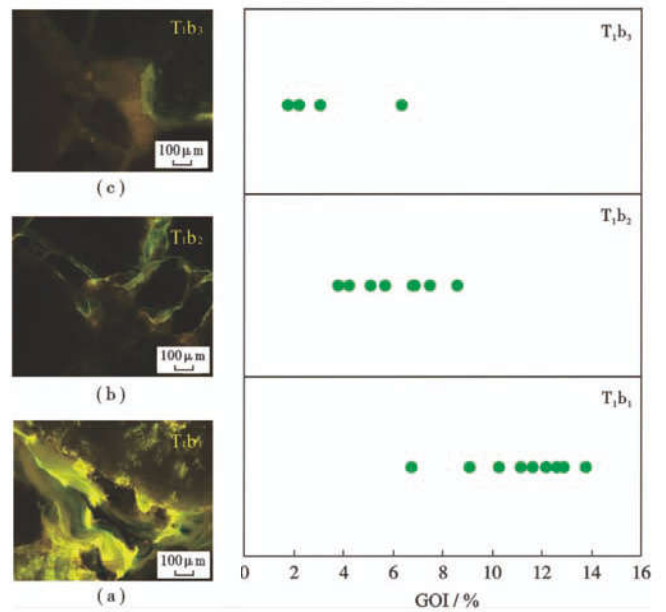


图 5 艾湖油田百一段一百三段含烃类流体充注强度变化特征
Fig. 5 Change features of hydrocarbon-charging intensity from T₁b₁ to T₁b₃ in the Aihu oilfield

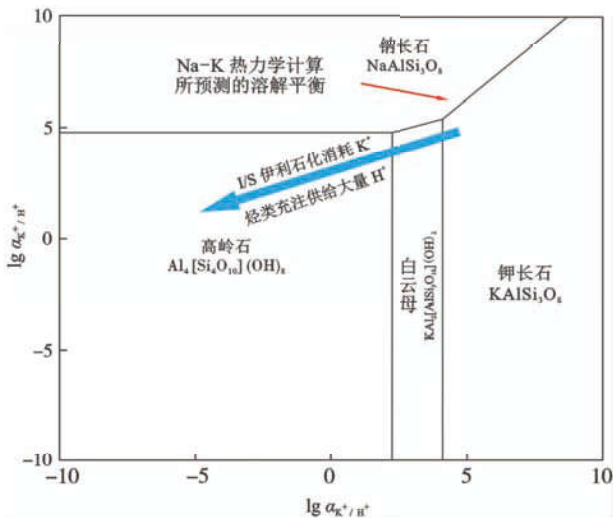
表 2 艾湖油田百一段一百三段试油成果数据

Table 2 Results of production test from T₁b₁ to T₁b₃ in the Aihu oilfield

井号	层位	试油顶深/m	试油底深/m	厚度/m	层数	产油量/(t·d ⁻¹)	产气量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	产水量/(t·d ⁻¹)	试油结果
艾湖 5	T ₁ b ₃	3 796	3 814	6	2	0.24	0	8.49	含油层
玛西 1	T ₁ b ₂	3 582	3 588	6	1	0.27	0	0	含油层
艾湖 2	T ₁ b ₂	3 310	3 336	10	5	5.24	0	0	油层
艾湖 012	T ₁ b ₂	3 839	3 864	9	3	2.37	0	7.94	油层
艾湖 6	T ₁ b ₂	3 878	3 909	12	3	13.19	0.028	0	油层
玛 6	T ₁ b ₂	3 814	3 836	16	3	6.06	0.136	0	油层
玛 6	T ₁ b ₁	3 871	3 880	9	1	6.02	0	0	油层
艾湖 1	T ₁ b ₁	3 848	3 862	8	2	29.82	0.208	0	油层
玛 18	T ₁ b ₁	3 898	3 920	16	2	33.23	0.69	0	油层
艾湖 013	T ₁ b ₁	3 798	3 816	10	2	15.36	0.097	0	油层
玛 601	T ₁ b ₁	3 876	3 910	20	5	19.06	0.367	0	油层
玛 602	T ₁ b ₁	3 876	3 895	16.5	3	11.82	0.128	0	油层
玛 603	T ₁ b ₁	3 871	3 894.5	18	4	24.89	0.504	0	油层
玛 606	T ₁ b ₁	3 787	3 809	15	4	6.49	0	0	油层
艾湖 011	T ₁ b ₁	3 848	3 882	14	4	48.6	0	0.782	油层

表 3 艾湖油田百一段—百三段 GOI 数据
Table 3 GOI results from T₁b₁ to T₁b₃ in the Aihu oilfield

层位	样号	深度/m	岩性	油气显示	油气产能	颗粒总数	含烃包体颗粒	GOI/%
T ₁ b ₃	X1-5	3 559. 20	灰色含砾粗砂岩	油迹	非工业油层	485	9	1. 9
	X1-8	3 556. 05	灰色细砂岩	荧光-油迹		558	10	1. 8
	MX1-3	3 556. 05	灰色细砂岩	油迹		633	20	3. 2
	M18-1	3 822. 60	灰白色中砂岩	油迹		512	33	6. 4
T ₁ b ₂	X1-16	3 588. 90	灰色中细砂岩	油斑	低产油层	586	40	6. 8
	AH2-2-2	3 287. 00	灰色含砾中砂岩	油迹	工业油层	544	23	4. 2
	AH2-4	3 287. 20	灰绿色砂质细砾岩	油迹		504	29	5. 8
	M18-5	3 855. 30	灰色含砾粗砂岩	油斑		560	48	8. 6
	M18-6	3 866. 60	灰色含砾中砂岩	油斑		527	40	7. 6
	M-8	3 870. 40	灰绿色砂质细砾岩	油斑		507	35	6. 9
	M18-8	3 877. 93	灰绿色砂质细砾岩	油斑		517	26	5. 0
	AH6-3	3 883. 00	灰色含砾粗砂岩	油迹		471	18	3. 8
	T ₁ b ₁	M-15	3 904. 90	灰绿色砂质细砾岩	油浸	工业油层	533	65
M-36		3 923. 20	灰绿色砂质细砾岩	油斑		517	35	6. 8
M18-14		3 914. 80	灰绿色砂质细砾岩	富油		556	77	13. 8
M-25		3 910. 10	灰绿色细砾质粗砂岩	油浸		652	76	11. 7
M18-18		3 925. 77	灰绿色含砾粗砂岩	油浸		617	78	12. 6
M18-13		3 911. 64	灰绿色砂质细砾岩	油浸		508	46	9. 1
M-33		3 920. 28	灰绿色砂质细砾岩	富油		511	53	10. 4
AH6-6		3 919. 65	灰绿色砂质细砾岩	富油		544	61	11. 2
AH6-8		3 920. 33	灰绿色含砾粗砂岩	富油		511	66	12. 9



注: α_{Na^+/H^+} — 钠离子与氢离子浓度比值; α_{K^+/H^+} — 钾离子与氢离子浓度比值。

图 6 钾长石-钠长石相互转化与溶解的热力学模型

Fig. 6 Thermodynamic model of orthoclase-albite reciprocal transformation and dissolution

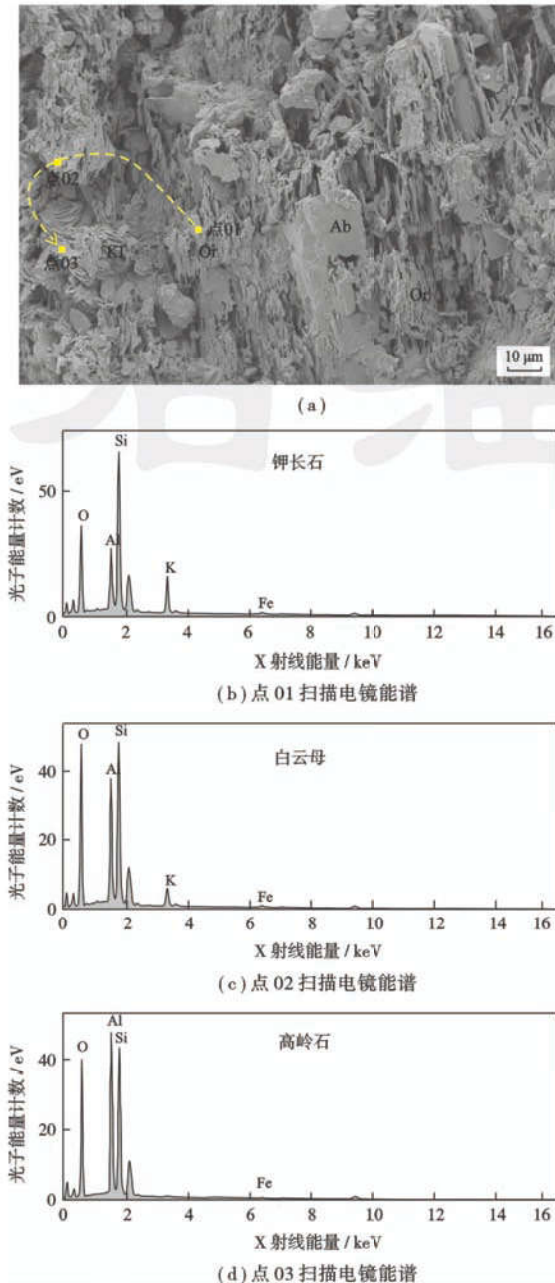
此 H⁺ 浓度较低。同时,因 K⁺ 和 Na⁺ 较易迁移,钠长石—钾长石会以相互转化的形式维持反应体系的平衡^[38](图 6)。而在地层水 pH 值显著降低的情况下,比如受含烃类流体充注影响, α_{Na^+/H^+} 和 α_{K^+/H^+} 值均明显降低,钾长石则发生白云母或水白云母化,在更低 pH 值条件下则经白云母或水白云母化过渡生成高岭石(图 7)。

但相比上文所述各要素对长石选择性溶解方向的控制,含烃类流体的作用主要是对反应速率的影响。众

所周知,长石溶解速率显著受体系温度和溶液 pH 条件的影响^[15-18]。通常认为,酸性条件下,随着溶液温度的增大、pH 值的减小,长石溶解速率不断增大^[15-18];有机酸可显著提高长石的溶解速率,该过程通常认为与有机酸阴离子与 Al 的络合作用利于长石表面 Al 的迁移有关^[2,16,17]。此外,在 30~200℃,CO₂ 溶解所提供的弱酸性条件也可促进长石的溶解^[14,39]。

在玛湖凹陷研究区百口泉组砂砾岩储层,储层水体温度随埋深逐渐加大。但研究区百一段—百三段埋深最大仅差 120 m,地层温度差不超过 3℃^[40],这很难用温度效应来解释百一段—百三段中的钾长石溶解的巨大差异(图 4)。因此,百口泉组储层中钾长石溶解的层控差异应主要与溶液的 pH 条件和流体活动强度差异有关,即与含烃类流体的充注强度密切相关。

含烃类流体在从烃源岩排出时即含有一定量的有机酸和 CO₂^[1,2]。近年来的研究表明,在水和无机矿物参与下,生烃过程中一直有羧酸和 CO₂ 的生成。在德克萨斯州墨西哥湾始新世 Wilcox 群中,埋藏越深 CO₂ 含量越高,甚至在 4 267. 2 m (14 000 ft) 以下深度(约 150℃),有机来源的 CO₂ 可以达到很高的浓度^[41],说明烃源灶中一直有酸性物质的供给。此外,当含烃类流体运移至储集层后,其中烃类在 Fe(Mn) 氧化物或 SO₄²⁻ 作用下,也可持续产生有机酸和 CO₂^[37,38],进而持续保持地层流体的酸性条件。因此,含烃类流体的充注强度是改变储集层地层流体性质的重要原因,可以显著促进长石的溶解。



注:(a)图中虚线指示了钾长石经白云母向高岭石转化的过程;Or—钾长石组分;Ab—钠长石组分;Kl—自生高岭石。

图 7 钾长石溶蚀及其与白云母和高岭石的共生情况

Fig. 7 Concomitant characteristics of K-feldspar dissolution as well as authigenic muscovite and kaolinite

3.4 碱性长石差异溶蚀的成储意义

众所周知,长石的溶蚀通常伴随着溶蚀孔隙的形成,可以改善储层质量^[2,19]。在玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储层中,钾长石的不断溶蚀,在碎屑长石颗粒内产生大量溶蚀孔隙,这类孔隙在长石表面分布密集,孔径集中于 $10\sim 50\ \mu\text{m}$,随溶蚀程度的增大,孔径不断增大,最大可达 $100\ \mu\text{m}$ 以上(图 2),孔隙的连通性不断变好,并有效改善储层物性。

进一步对百口泉组砂砾岩储层的钾长石溶蚀强度

(用残余钾长石含量表征)与岩石孔隙度、渗透率进行了相关关系分析,以定量评价钾长石溶蚀的成储效应。随钾长石溶蚀程度增大(残余钾长石含量低),孔隙度微弱增大,但因孔隙度分布比较分散,两者相关性并不显著[图 8(a)];渗透率随钾长石溶蚀程度的增大有比较明显增大的趋势,但与孔隙度的数据类似,渗透率的数据也较分散,故两者相关性也不是很好[图 8(b)]。但无论如何,都表明研究区钾长石的溶蚀有一定增孔意义,并有效改善了储层的渗透能力,这对于低渗透致密的研究区而言,非常重要^[23]。

虽然对研究区而言,砂砾岩的结构与组分等也影响着百口泉组不同岩石类型的储集性能^[23]。但从垂向上看,如前所述,百一段—百三段受含烃类流体充注的强度逐渐减弱,钾长石溶蚀程度逐渐减弱,对应储集层的孔隙度和渗透率也逐渐变差,这也是长石差异溶蚀具有成储效应的一个证据。对于孔隙度,百一段孔隙度集中于 $6\%\sim 14\%$,均值为 9.7% ;百二段集中于 $6\%\sim 12\%$,均值为 8.5% ;百三段孔隙度较分散,为 $4\%\sim 12\%$,均值为 7.7% [图 9(a)]。对于渗透率,百一段渗透率变化范围大,在 $0.5\sim 30\ \text{mD}$ 较为集中,均值为 $39.9\ \text{mD}$;百二段集中于 $0.1\sim 20\ \text{mD}$,均值为 $13.3\ \text{mD}$;百三段渗透率集中于 $0.1\sim 5.0\ \text{mD}$,均值为 $0.68\ \text{mD}$ [图 9(b)]。另外,孔隙面孔率统计分析显示,钾长石溶蚀孔隙面孔率百一段为 $0.2\%\sim 4.8\%$,均值 2.1% ;百二段为 $0.1\%\sim 2.6\%$,均值 0.9% ;百一段为 $0.1\%\sim 0.8\%$,均值 0.4% 。可见,自下向上,钾长石溶孔的发育程度明显减弱,并且不同岩性钾长石溶孔的发育程度差异显著。

总之,研究区百口泉组储层的物性与钾长石的溶蚀有一定关系,但鉴于无论是孔隙度,还是渗透率,与钾长石溶蚀强度的关系都不是太好,所以推测研究区砂砾岩储层的储集性能非单一因素(钾长石溶蚀)控制,这是很有意义的问题,有待进一步研究。

3.5 油气勘探意义

研究区钾长石的溶蚀通过对砂砾岩储集层物性的改善,在一定程度上影响着油气分布。在烃类充注的促进下,钾长石的溶蚀将水下河道砂岩等层段改造为优质储层的同时,也使之变为极佳的油气运移通道,从而利于深部的含烃流体沿断裂进入百口泉组后不断向玛西斜坡上倾方向运移(图 10)。勘探实践证明,艾湖 011 井—玛 18 井井区为稳定的油气产区,单井稳定最大产量为 $43\ \text{t/d}$ (艾湖 011 井),日产气 $0.7\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。而百口泉组水下河道砂岩等层段中,钾长石溶蚀形成的次生孔隙带指示着玛 18 井—艾湖 2 井区的斜坡上倾位置具有良好的勘探前景。

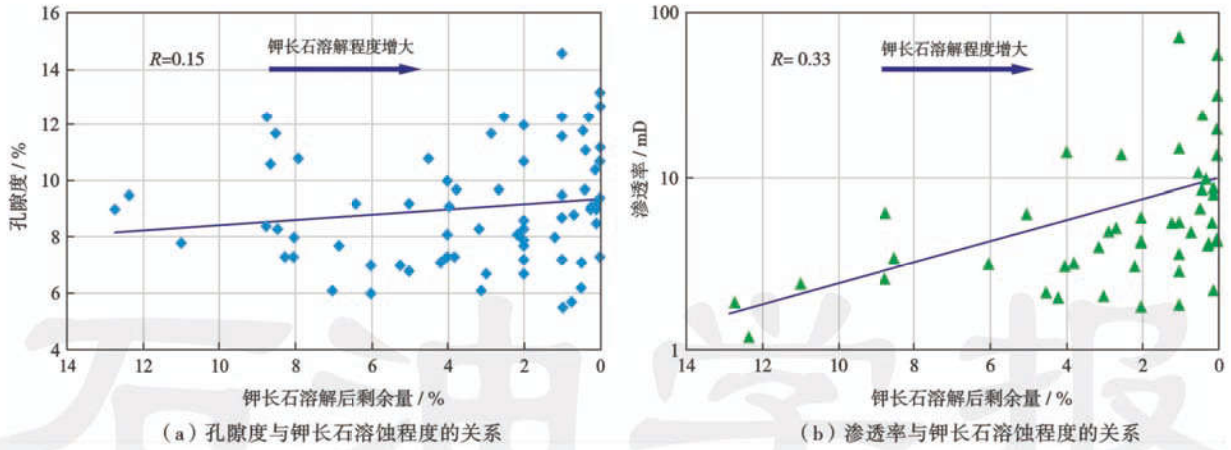


图 8 百口泉组砂砾岩物性与钾长石溶蚀程度的关系

Fig. 8 Relationship between sandy conglomerates physical property and K-feldspar dissolution intensity in T₁b

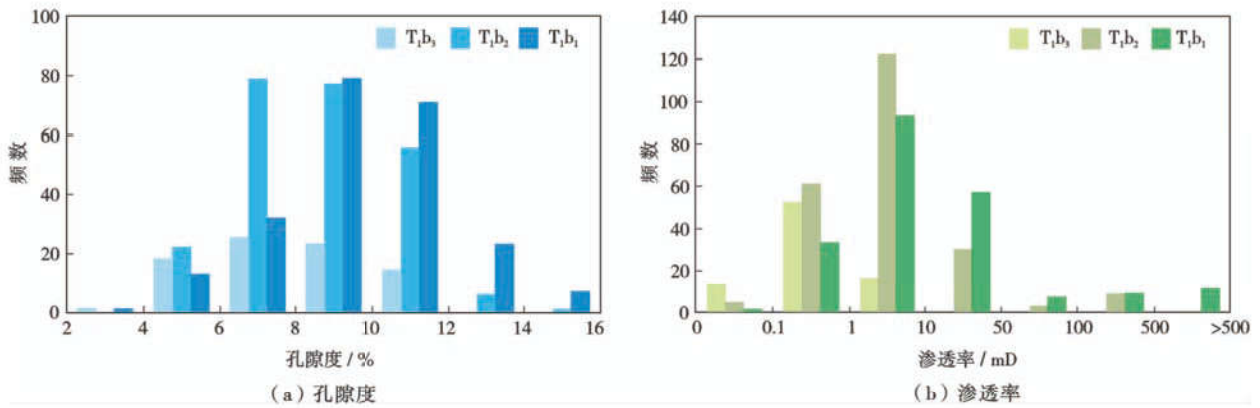
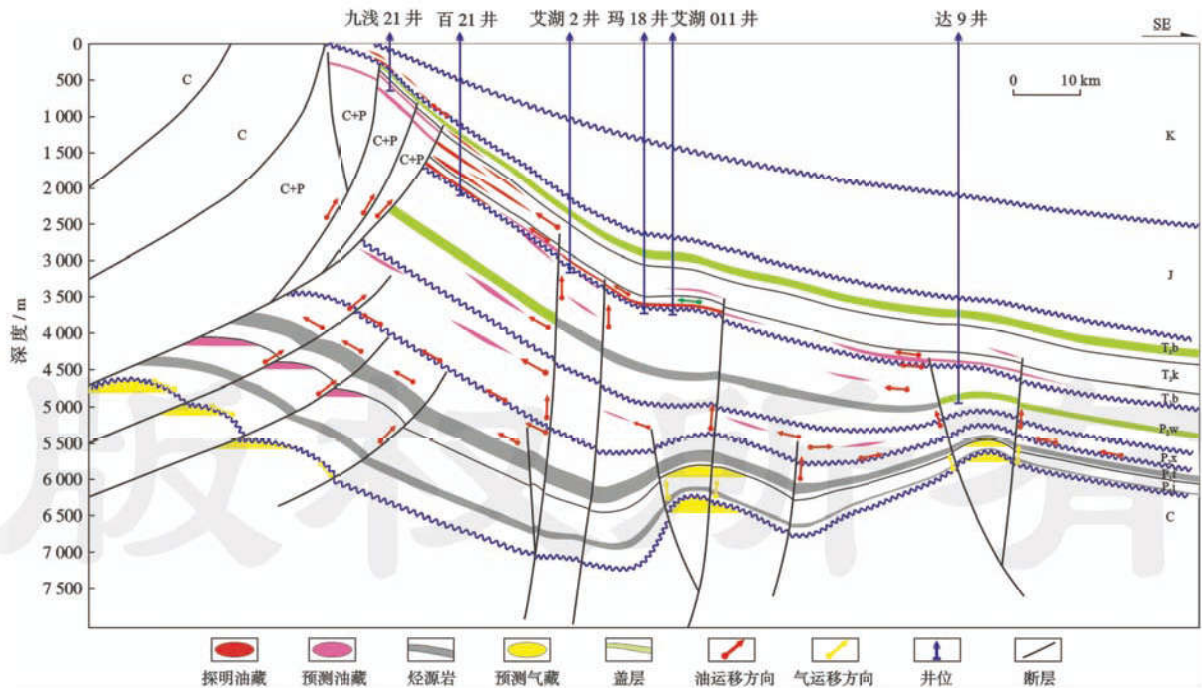


图 9 百一段—百三段不同物性分布直方图

Fig. 9 Distribution histogram of different members sandy conglomerates physical property of T₁b₁—T₁b₃



注: T₁b—三叠系白碱滩组; T₁k—三叠系克拉玛依组; T₁b—三叠系百口泉组; P₂w—三叠系夏子街组; P₁f—三叠系风城组; P₁j—三叠系佳木河组

图 10 玛湖凹陷西斜坡油藏剖面

Fig. 10 The oil reservoir profile located in the west slope of the Mahu sag

4 结 论

(1) 玛湖凹陷西斜坡艾湖油田百口泉组砂砾岩储层中富含碱性长石,包括条纹长石、反条纹长石及微斜长石等,为溶蚀提供了物质基础。

(2) 百口泉组发生了显著的差异溶蚀,即钾长石溶蚀而钠长石次生加大,并具有层控性特点,随埋藏深度的增加/层位变老,钾长石溶蚀程度增大,百一段基本溶蚀殆尽,百二段、百三段仅部分被溶蚀,这与含烃类流体的充注具有密切关系。

(3) 含烃酸性流体进入到百口泉组砂砾岩储层,显著增大了钾长石的溶蚀速率,并且百一段—百三段烃类充注强度减弱,所以钾长石溶蚀程度明显降低。地层水在耗钾的伊/蒙混层形成持续作用下,钠/钾离子比率增大,导致了碱性长石中钾长石的溶蚀和钠长石的次生加大。

(4) 长石溶蚀在一定程度上影响和控制了储层次生孔隙的量与连通程度,并决定了次生孔隙对砂砾岩储层物性有明显贡献(不是唯一贡献),西斜坡玛18—艾湖2井区的上倾位置值得加以注意。

符号注释: K_{sp} —溶解作用的平衡常数; α_{Na^+} —钠离子的浓度, mol/L; α_{K^+} —钾离子浓度, mol/L。

参 考 文 献

- [1] Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity: part 2, aspects of porosity modification[M]// McDonald D A, Surdam R C. Clastic diagenesis. Tulsa, Okla.; American Association of Petroleum Geologists, 1984: 127-149.
- [2] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [3] Bjorlykke K, Nedkvitne T, Ramm M, et al. Diagenetic processes in the Brent Group (Middle Jurassic) reservoirs of the North Sea: an overview[C]// Morton A C, Haszeldine R S, Giles M R, et al. Geology of the Brent group. London: Geological Society, Special Publications, 1992, 61: 263-287.
- [4] Wilkinson M, Milliken K L, Haszeldine R S. Systematic destruction of K-feldspar in deeply buried rift and passive margin sandstones[J]. Journal of the Geological Society, 2001, 158(4): 675-683.
- [5] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳拗陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-204.
Zhu Xiaomin, Wang Yingguo, Zhong Dakang, et al. Pore types and secondary pore evolution of paleogene reservoir in the Jiyang Sag[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 197-204.
- [6] Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Jia Zhenzhen, et al. Selective dissolution of feldspars in the presence of carbonates: the way to generate secondary pores in buried sandstones by organic CO₂[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 60: 105-119.
- [7] Wilkinson M, Haszeldine R S, Morton A, et al. Deep burial dissolution of K-feldspars in a fluvial sandstone, Pentland Formation, UK Central North Sea[J]. Journal of the Geological Society, 2014, 171(5): 635-647.
- [8] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506.
Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: a case study on the Upper Paleozoic Ordos Basin and Xujiahe Formation, western Sichuan depression[J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498-506.
- [9] de Ros L F, Sgarb G N C, Morad S. Multiple authigenesis of K-feldspar in sandstones: evidence from the Cretaceous Areado Formation, Sao Francisco Basin, central Brazil[J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64(4a): 778-787.
- [10] Fournier R O, Truesdell A H. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 37(5): 1255-1275.
- [11] Zhu Chen, Lu Peng. Alkali feldspar dissolution and secondary mineral precipitation in batch systems; 3. Saturation states of product minerals and reaction paths[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(11): 3171-3200.
- [12] Sonney R, Mountain B W. Experimental simulation of greywacke-fluid interaction under geothermal conditions[J]. Geothermics, 2013, 47: 27-39.
- [13] Bowers T S, Jackson K J, Helgeson H C. Equilibrium activity diagrams[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 4-16.
- [14] Fu Qi, Lu Peng, Konishi H, et al. Coupled alkali-feldspar dissolution and secondary mineral precipitation in batch systems; 1. New experiments at 200°C and 300 bars[J]. Chemical Geology, 2009, 258(3/4): 125-135.
- [15] Stillings L L, Drever J I, Brantley S L, et al. Rates of feldspar dissolution at pH 3-7 with 0.8 m M oxalic acid[J]. Chemical Geology, 1996, 132(1/4): 79-89.
- [16] Oelkers E H, Schott J. Does organic acid adsorption affect alkali-feldspar dissolution rates? [J]. Chemical Geology, 1998, 151(1/4): 235-245.
- [17] Blake R E, Walter L M. Kinetics of feldspar and quartz dissolution at 70-80°C and near-neutral pH; effects of organic acids and NaCl[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(13/14): 2043-2059.
- [18] Fenter P, Zapol P, He Haiying, et al. On the variation of dissolution rates at the orthoclase (001) surface with pH and temperature[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 141: 598-611.
- [19] Taylor T R, Giles M R, Hathorn L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: models, myths, and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [20] 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 等. 库车拗陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1057-1069.
Zhang Ronghu, Yang Haijun, Wang Junpeng, et al. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low-porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa depression, Tar-

- im Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1057-1069.
- [21] Peltonen C, Marcussen Ø, Bjørlykke K, et al. Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones; The effects of smectite to illite reaction on rock properties[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 887-898.
- [22] Bjørlykke K, Jahren J. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins; constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(12): 2193-2214.
- [23] 张顺存, 蒋欢, 张磊, 等. 准噶尔盆地玛北地区三叠系百口泉组优质储层成因分析[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1171-1180.
Zhang Shuncun, Jiang Huan, Zhang Lei, et al. Genetic analysis of the high quality reservoir of the Triassic Baikouquan Formation in Mabei Region, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1171-1180.
- [24] 唐勇, 徐洋, 瞿建华, 等. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲群特征及分布[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(6): 628-635.
Tang Yong, Xu Yang, Qu Jianhua, et al. Fan-delta group characteristics and its distribution of the triassic Baikouquan reservoirs in Mahu sag of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(6): 628-635.
- [25] 曲永强, 王国栋, 谭开俊, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组次生孔隙储层的控制因素及分布特征[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(增刊 1): 50-63.
Qu Yongqiang, Wang Guodong, Tan Kaijun, et al. Controlling factors and distribution characteristics of the secondary pore reservoirs of the Triassic Baikouquan Formation in the Mahu slope area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(Supplement 1): 50-63.
- [26] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地下二叠统风城组[J]. *石油学报*, 2015, 36(7): 781-790.
Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(7): 781-790.
- [27] 雷振宇, 鲁兵, 蔚远江, 等. 准噶尔盆地西北缘构造演化与扇体形成和分布[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 86-91.
Lei Zhenyu, Lu Bing, Wei Yuanjiang, et al. Tectonic evolution and development and distribution of fans on northwestern edge of Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 86-91.
- [28] 蔚远江, 李德生, 胡素云, 等. 准噶尔盆地西北缘扇体形成演化与扇体油气藏勘探[J]. *地球学报*, 2007, 28(1): 62-71.
Yu Yuanjiang, Li Desheng, Hu Suyun, et al. Fans sedimentation and exploration direction of fan hydrocarbon reservoirs in foreland thrust belt of the Northwestern Junggar Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(1): 62-71.
- [29] Jia Haibo, Ji Hancheng, Li Xinwei, et al. A retreating fan-delta system in the Northwestern Junggar Basin, northwestern China: Characteristics, evolution and controlling factors[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 123: 162-177.
- [30] 邹妞妞, 史基安, 张大权, 等. 准噶尔盆地西北缘玛北地区百口泉组扇三角洲沉积模式[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 607-615.
Zou Niuniu, Shi Ji'an, Zhang Daquan, et al. Fan delta depositional model of Triassic Baikouquan Formation in Mabei area, NW Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 607-615.
- [31] Cook H E, Johnson P D, Matti J C, et al. Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-ray mineralogy laboratory, deep sea drilling project, university of California, Riverside[C]// Kaneps A G. *Init Repts, DSDP 28*. Washington: U. S. Government Printing Office, 1975: 997-1007.
- [32] George S C, Ahmed M, Liu Keyu, et al. The analysis of oil trapped during secondary migration[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(11/12): 1489-1511.
- [33] 曹剑, 金之钧, 胡文瑄, 等. 应用烃类流体包裹体 GOI 和成分研究凝析气藏成藏过程: 以准噶尔盆地莫索湾地区为例[J]. *岩石学报*, 2007, 23(1): 137-144.
Cao Jian, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Integrate GOI and composition data of oil inclusions to reconstruct petroleum charge history of gas-condensate reservoirs; example from the Mosuowan area, central Junggar Basin (NW China)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(1): 137-144.
- [34] Crossey L J, Karlstrom K E, Springer A E, et al. Degassing of mantle-derived CO₂ and He from springs in the southern Colorado Plateau region-neotectonic connections and implications for groundwater systems[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(7/8): 1034-1053.
- [35] Franks S G, Forester R W. Relationships among carbon dioxide, pore-fluid chemistry, and secondary porosity, Texas gulf coast[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(4): 478.
- [36] Seewald J S. Organic-inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 327-333.
- [37] 陈建平, 查明, 周瑶琪. 准噶尔盆地西北缘地层水化学特征与油气关系研究[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(3): 54-58.
Chen Jianping, Cha Ming, Zhou Yaoqi. Chemical characteristics of formation water in relation with oil/gas in the Northwestern Parts of Junggar Basin[J]. *Geology-Geochemistry*, 2000, 28(3): 54-58.
- [38] Saigal G C, Morad S, Bjørlykke K, et al. Diagenetic albittization of detrital K-feldspar in Jurassic, Lower Cretaceous, and Tertiary clastic reservoir rocks from offshore Norway; I, textures and origin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(6): 1003-1013.
- [39] Lu Peng, Fu Qi, Seyfried Jr W E, et al. Coupled alkali feldspar dissolution and secondary mineral precipitation in batch systems-2; new experiments with supercritical CO₂ and implications for carbon sequestration[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 30: 75-90.
- [40] 邱楠生, 王绪龙, 杨海波, 等. 准噶尔盆地地温分布特征[J]. *地质科学*, 2001, 36(3): 350-358.
Qiu Nansheng, Wang Xulong, Yang Haibo, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(3): 350-358.
- [41] Surdam R C, Jiao Z S, MacGowan D B. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants; a mechanism for significant porosity enhancement in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(9): 1509-1518.