

石英溶解型次生孔隙的成因及其对储层的影响

——以大牛地气田上古生界致密砂岩储层为例

曲希玉¹, 陈修¹, 邱隆伟¹, 张满利², 张向津³

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 烟台外国语实验学校, 山东 烟台 264000;

3. 天津方联科技发展有限公司, 天津 300000]

摘要:以鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界致密砂岩储层中的石英溶解为研究对象,借助偏光显微镜、扫描电镜、阴极发光显微镜、激光共聚焦显微镜的观察及统计,结合X-衍射分析数据及水-岩反应实验,总结了石英溶解的典型形貌特征、成因及其对致密砂岩储层的影响。研究结果显示:1)大牛地气田石英溶解现象普遍发育,且具有典型的电镜形貌特征,常呈“雨痕状”与“蜂窝状”的溶蚀坑洞。2)大牛地气田的石英溶解发生于碱性环境下,具体证据为①水热实验证实石英溶解于碱性环境下更易发生,在致密砂岩储层中很难发生酸性溶蚀;②与石英溶解共生的方解石胶结交代现象普遍;③部分层位富伊利石贫高岭石,并发育数量不等的绿泥石包壳。3)石英的碱性溶解作用形成粒间溶蚀孔、扩大孔等次生孔隙,平均增孔近6%,是大牛地气田致密砂岩储层部分层位优质储层的成因。

关键词:碱性环境;水热实验;石英溶解;优质储层;大牛地气田

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Genesis of secondary pore of quartz dissolution type and its influences on reservoir:

Taking the tight sandstone reservoir in the Upper Paleozoic of Daniudi gas field as an example

Qu Xiyu¹, Chen Xiu¹, Qiu Longwei¹, Zhang Manli², Zhang Xiangjin³

(1. Faculty of Earth Sciences & Technology, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Foreign Language Experimental School of Yantai, Yantai, Shandong 264000, China; 3. Tianjin Fanglian Science & Technology Development Co., Ltd, Tianjin 300000, China)

Abstract: By virtue of polarizing microscope, scanning electron microscope, cathode luminescence microscope, laser scan confocal microscope in combination with X-ray diffraction data and water rock interaction experiment, we studied quartz dissolution in tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic of Daniudi gas field in Ordos Basin, and summarized the typical morphology features, genesis and its influences on tight sandstone reservoir. Results show that: (1) Quartz dissolution is common and has typical SEM morphology features as “rain print” and “honey comb” solution pits and/or vugs. (2) Quartz dissolution in Daniudigas field develops in alkaline environment, and the detailed evidences are as follows: ①hydrothermal experiments verify that quartz dissolves more easily in alkaline environments than in acid conditions; ②calcite cementation and metasomatism associated with quartz dissolution are common; ③some horizons are rich in illite but poor in kaolinite, with some chlorite coatings occurring sporadically. (3) Quartz alkaline dissolution results in secondary pores such as intergranular dissolution pores and enlarged pores, leading to an average incremental porosity of about 6%. This is the cause of quality reservoirs in some tight sandstone intervals of Daniudi gas field.

Key words: alkaline environment, hydrothermal experiment, quartz dissolution, high quality reservoir, Daniudi gas field

近年来,国内学者对碎屑岩储层中石英溶解现象的关注度逐渐增加,陆续在泌阳凹陷^[1]、塔西南坳陷^[2]、济阳坳陷^[3]、塔里木盆地^[4]、辽河滩海西部凹陷^[5]、东营凹陷^[6]、四川盆地^[7]及塔中凹陷^[8]发现了

石英溶解现象,并提出了一种新的储层孔隙成因类型——石英溶解型次生孔隙^[9]。关于储层中石英溶解的条件,大部分学者认为是在碱性地层水环境下发生的^[1-8],并在此基础上提出了碱性成岩作用^[1,3,7,10-11],

收稿日期:2014-10-20;修订日期:2015-08-04。

第一作者简介:曲希玉(1977—),男,博士、副教授,流体-岩石相互作用、储层及沉积。E-mail:quxiyu@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41372133;41472105);国家科技重大专项(2011ZX05016-002;2011ZX05009-002)。

该作用是以碱性地层水活动为背景,以石英溶解及石英溶解型次生孔隙显著存在为主要特征的成岩作用类型^[10],作用的结果是形成石英溶解型次生孔隙。碱性成岩作用的提出,促进了对成岩环境及影响更为深入的认识,准确分析了储层不同成因类型的孔隙特征,丰富和完善了成岩作用理论^[11]。当然在储层成岩流体演化过程中并不能排除酸性流体,尤其是有机酸对石英溶蚀的作用,部分学者在塔里木盆地砂岩储层石英溶蚀成因的研究中,探讨了有机酸对于石英溶蚀的贡献^[4,8],认为有机酸对于石英的溶蚀强烈但很局限。本次在大牛地气田致密砂岩储层研究中,也发现了大量的石英溶解现象,该现象是在何种流体环境下发生的,对致密砂岩储层有什么影响呢?针对这个问题,本文借助砂岩样品的偏光显微镜、扫描电镜、阴极发光显微镜、激光共聚焦显微镜的观察及统计,结合X-衍射分析数据及石英单晶在不同pH值及温度下的水热实验,总结石英溶解的典型电镜形貌特征,证明石英的碱性溶解作用,探讨碱性溶解成岩相对致密砂岩储层的影响。

大牛地气田地处陕西和内蒙古交界,面积2 003.71 km²,位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东北部,为一平缓的西倾大单斜,倾角不足1°,局部构造不发育。本次研究的目的层位为上古生界石炭系太原组(T)、二叠系山西组(S)和下石盒子组(H),太原组分为太一段(T1)和太二段(T2);山西组分为山一段(S1)和山二段(S2),其中山一段三分为S1-1, S1-2, S1-3,山二段二分为S2-1, S2-2;下石盒子组包括盒一段(H1)、盒二段(H2)和盒三段(H3),其中盒一段三分(H1-1, H1-2, H1-3)、盒二段和盒三段二分(H2-1, H2-2, H3-1, H3-2),文中涉及地层符号均与此相同,不再赘述。岩石类型主要为石英砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑砂岩。研究中共采集25口钻井的200余块砂岩样品,对其中的161件样品进行了扫描电镜观察、26件样品进行了激光共聚焦观察,切制普通及铸体薄片200余片。

1 石英溶解的电镜形貌特征

大牛地气田的石英溶解作用较发育,主要是沿石英颗粒和次生加大边缘发生不同程度的溶蚀。石英颗粒边缘可形成港湾状溶解(图1a)和石英溶解“残骸”(图1b),如大48井埋深2 744.7 m处,颗粒的右侧见典型的港湾状溶解,孔隙另一侧的石英颗粒边缘也发生了溶解,形成粒间超大孔(图1a);再如大21井埋深2 728 m处,石英颗粒发生强烈的溶解作用,仅剩余部分石英溶解“残骸”,形成缝状粒间扩大孔(图1b),增

大了储层的孔隙度和渗透率。加大边被溶后断续分布于颗粒周围,在第I期和第III期石英次生加大边中均可见加大边溶解的现象,且第III期较第I期的溶解作用普遍^[12]。通过对大牛地气田17口钻井近200片铸体薄片的镜下观察和统计,发现石英溶解现象在全区各个层位均有发育,太原组二段是石英溶解型孔隙最发育的层段(图2)。

通过对大牛地气田25口钻井161件样品的扫描电镜观察,发现石英溶解作用具有典型的电镜形貌特征,常在石英颗粒表面形成“雨痕状”与“蜂窝状”的溶蚀坑洞。“雨痕状”溶坑是在石英颗粒表面形成雨滴形态的溶蚀凹痕(图1c,d),多出现在溶蚀较弱或溶蚀时间较短的部位;而“蜂窝状”溶坑是雨痕状溶坑溶解形成“孔洞状”(图1e),之后再进一步溶解形成的(图1f),主要发生在溶蚀较强烈或溶蚀时间较长的部位。该石英表面溶解的典型形貌特征,可以根据PBC理论及Kossel晶体理想晶面理论中的K面结构进行类似解释,在Kossel晶体中每一个立方体结构单元脱离晶面的相对难易程度与该立方体结构单元同晶体中其他结构单元相连的键的数目正相关^[13]。如此发育的石英溶解现象是有机酸作用的结果还是碱性流体的溶解呢,本文借助水岩反应实验及典型自生矿物的成岩环境分析,对大牛地气田石英溶解成因进行了分析。

2 石英碱性溶解的证据

2.1 水热实验证据

2.1.1 实验条件及流程

实验所用材料包括六方柱状的石英单晶、固态氢氧化钠、纯乙酸溶液和蒸馏水。实验前将石英单晶加工成长约1 cm的六方柱体;用氢氧化钠配制成pH值为8.0, 8.5, 9.0和9.5的碱性溶液;用乙酸配制成pH值为4.5, 5.0和5.5的酸性溶液。实验设计温度分别为130, 160, 200, 250和300℃,实验过程中的压力均为蒸汽压,平均在3 MPa左右。实验所用仪器为FYX-1型反应釜,型号及各项指标均与文献[14]一致。

实验过程中,将500 mL配置好的特定pH值的溶液放入反应釜中,然后将洗净并烘干的石英样品放入釜内吊篮中并密封,分别在实验设计温度下恒温反应48 h。反应结束后,自然冷却,待釜内温度降至室温,将反应后的样品取出,反复用蒸馏水冲洗、烘干并称量;最后对反应前后的样品进行扫描电镜观察,对比其溶蚀、溶解的形貌特征,所用扫描电镜型号为JSM-6700F型。

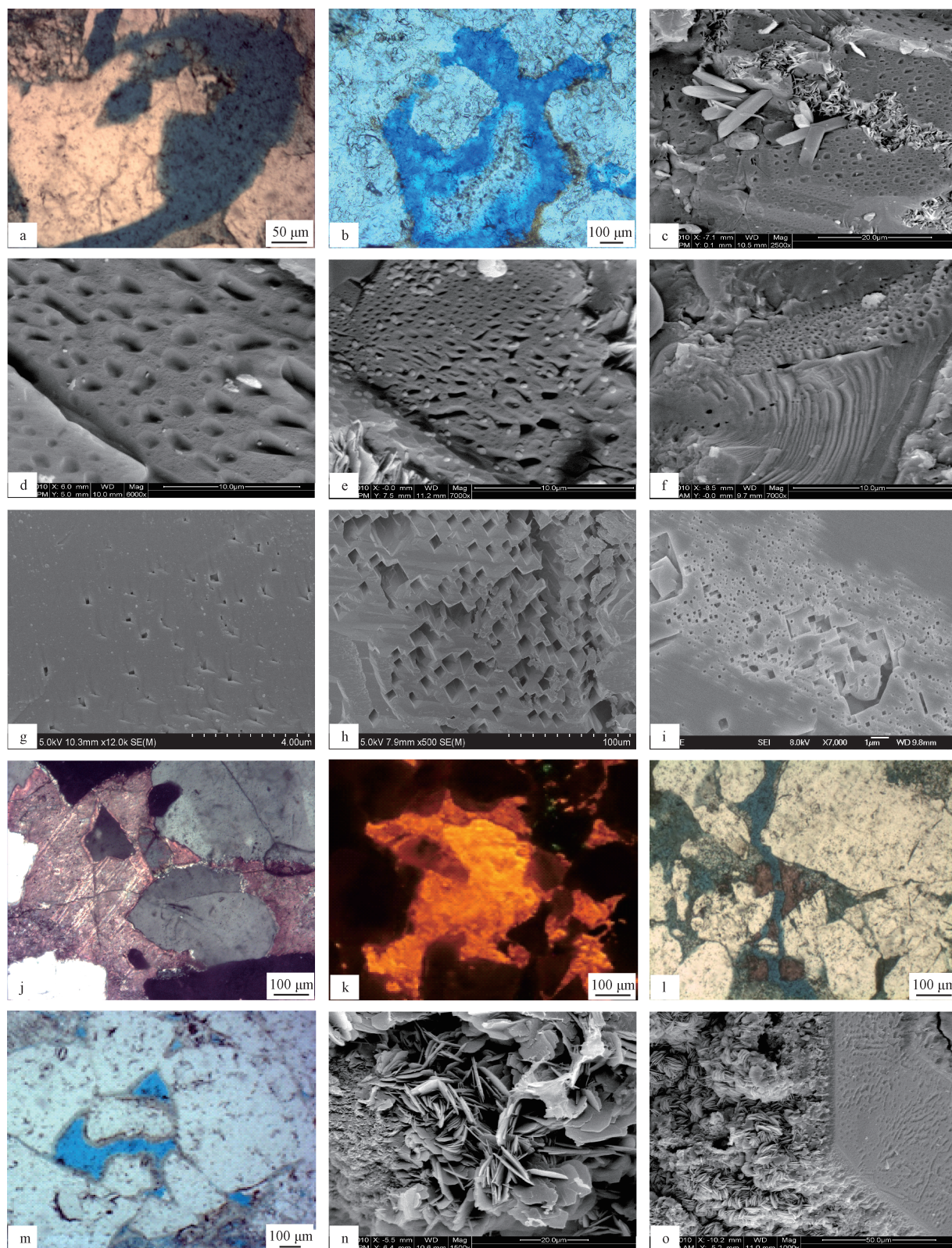


图1 大牛地气田石英溶解及共生成岩作用镜下特征照片(一)

Fig.1 Images of quartz dissolution and associate diagenesis in Daniudi gas field(I)

- a. 大48井,2 744.70 m,H2-1,石英的港湾状溶解;b. 大21井,2 728.00 m,T2,石英强烈溶解呈“残骸”状;c. 大38井,2 811.50 m,S2-2,石英表面雨滴状溶坑,裂缝中见短柱状石膏和叶片状绿泥石充填;d. 大23井,2 799.90 m,T2,石英表面雨痕状溶坑;e. 大47井,2 428.90 m,T2,石英表面由雨滴状溶坑进一步溶解形成的孔洞状溶坑;f. 大4井,2 756.00 m,H1-1,石英表面贝壳状断口及蜂窝状溶坑;g. pH=5.4,T=200℃条件下石英表面的“雨痕状”溶坑;h. pH=8.6,T=250℃条件下石英表面的“蜂窝状”溶坑;i. pH=9.5,T=130℃条件下的石英的“蜂窝状”溶坑;j. 大9井,2 671.40 m,T2,连生方解石胶结,见石英交代残余微晶;k. 大33井,2 593.00 m,阴极发光下呈现褐色和橙色的2期钙质胶结;l. 大48井,2 744.70 m,H2,石英颗粒边缘的港湾状溶解,裂缝两侧铁方解石未见溶蚀;m. 大18井,2 595.70 m,H1-3,绿泥石包壳,形成原生粒间孔;n. 大18井,2 597.30 m,H1-2,叶片状绿泥石充填于粒间孔隙中;o. DK3井,2 665.10 m,H3-2,绒线团状绿泥石充填于粒间孔隙中

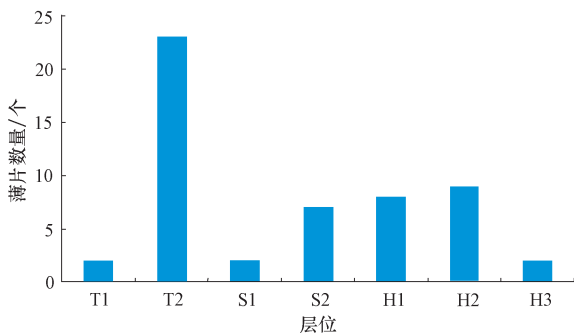


图2 大牛地气田石英溶解现象层位分布

Fig. 2 The horizon distribution of quartz dissolution in Daniudi gas field

2.1.2 实验结果

通过反应后石英样品的扫描电镜观察,发现反应后部分石英样品的晶体表面有溶蚀孔洞形成,其形貌特征与大牛地气田石英溶解的电镜形貌特征相近,形似“雨痕状”和“蜂窝状”(图1g,h)。对比不同温度下石英溶解的电镜相貌特征发现,石英晶体在酸碱溶液中均随温度的升高而溶蚀、溶解程度增强。不同的是,酸性溶液中,在温度为200℃(pH=5.5)条件下,石英表面才开始出现微弱的溶蚀现象,且随温度升高石英的溶蚀规模逐渐变大,温度低于200℃基本观察不到溶蚀现象的存在,相对于pH值,温度对石英溶蚀的影响更明显。而碱性溶液中,在温度为130℃(pH=9.5)条件下,石英溶解现象已经非常明显,可见“蜂窝状”的溶蚀孔洞(图1i),随着温度及pH值的升高石英溶解程度逐渐增强。通过对比不难发现,相对于酸性介质,碱性条件下石英晶体更易溶解,且温度更低。结合鄂尔多斯盆地的地温梯度及石英次生加大边包裹体的均一温度^[15-16],可推断目的层位的地层温度最高不超过150℃,该温度下石英的酸性溶蚀基本不发生。结合石英溶解的水热实验和大牛地气田的地层条件,可以证明大牛地气田的石英溶解是碱性环境下发生的,石英的酸性溶蚀极难发生。

2.2 自生胶结物证据

2.2.1 与石英溶解共生的方解石胶结

大牛地气田的碳酸盐类胶结物十分发育,主要以方解石胶结交代的形式存在,可见大量充填孔隙的连生方解石,并交代石英等骨架颗粒(图1j)。借助阴极发光显微镜,将碳酸盐胶结分为两期,第Ⅰ期为方解石胶结粒间孔,含少量白云石,常呈薄膜状绕孔分布,含量较少;第Ⅱ期为方解石、铁方解石充填粒间孔,分布普遍,铁离子含量相对较高(图1k)。

通过石英溶解作用及与其共生的方解石胶结作用

发育情况的统计,发现大牛地气田存在大量与石英溶解作用共生的方解石胶结交代现象(表1),如大48井2744.70m处,石英颗粒边缘呈港湾状溶解,同时可见裂缝两侧的铁方解石胶结,且该胶结物未见溶蚀(图1l)。由于方解石胶结物发育的储层流体环境为碱性,说明大牛地气田存在碱性流体的活动,而方解石胶结物溶蚀作用不发育或很微弱,从另一个侧面说明石英溶解型次生孔隙并非为碳酸盐胶结物交代石英之后的酸性溶解作用形成,而仅为碱性环境下形成的。

碱性环境下,石英溶解形成的次生孔隙对储层物性的贡献主要取决于胶结量与溶解量的比例,在大牛地气田,当石英的溶解量达到5%以上时方可形成优质储层^[17],如果胶结作用较强,那么石英溶解型次生孔隙并不能形成优质储层。

2.2.2 自生粘土矿物

砂岩中自生伊利石形成于富K⁺的碱性环境,而高岭石是由酸性流体与富Al³⁺矿物反应的产物,形成于酸性环境^[18],如果某个地区或层位发育上述粘土矿物中的一种,说明其形成的流体环境较单一,比如发育伊利石即形成于碱性环境。大牛地气田砂岩储层中的粘土矿物主要为伊利石、高岭石和绿泥石,主要以自生粘土矿物的形式存在,相对含量垂向分层性显著(表2),由上古生界下石盒子组至太原组呈绿泥石含量逐渐减少,伊利石含量逐渐增多的特点。在下石盒子组三段和二段,绿泥石含量相对较高,达50%以上,下石盒子组一段和山西组二段三种粘土矿物的含量相当。而山西组一段和太原组二段表现为富伊利石贫高岭石的特征(图3),山一段伊利石的平均相对含量近83%,太二段更是高达92%以上,个别样品达100%(大21井2844.71m),多数样品未检测出高岭石。山一段和太二段伊利石含量的异常高值说明该层位在成岩演化过程中经历的流体环境主要为碱性环境,为石英溶蚀提供了碱性介质条件。该结论与薄片统计结果略有出入,应该是由于山一段铸体薄片数偏少,导致石英溶解统计数量偏低。

绿泥石是在富Fe²⁺和Mg²⁺的碱性条件下形成的^[18],砂岩中主要以自生胶结物的形式存在于颗粒周围,晶体自形程度较高,可分为颗粒包膜绿泥石、孔隙衬里绿泥石和孔隙充填绿泥石3种产状^[19-20],其中孔隙衬里绿泥石即为绿泥石包壳。世界范围内的43个绿泥石包壳实例中,对储层影响主要表现为抑制石英生长、保护孔隙的积极(43%)和混合(37%)作用,只有3个为消极作用^[21];国内的绿泥石包壳主要发育于鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地及海拉尔等盆地,对储层主体起保护作用,仅个别影响较弱或者降低砂岩储层质量^[22]。

表1 大牛地气田石英溶解及方解石胶结共同发育情况

Table 1 Statistics of quartz dissolution and calcite cementation symbiosis in Daniudi gas field

井名	深度/m	层位	石英溶解特征	方解石胶结特征
DK13	2 666.50	H3 - 2	微弱溶解	连生结构方解石
	2 667.30		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 672.85		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
DK3	2 661.50		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大23 - 1	2 561.80		雨痕状溶解	孔隙充填方解石,交代石英
大54	2 227.20	H3 - 1	微弱溶解	孔隙充填方解石
	2 558.10		微弱溶解	孔隙充填方解石
大69	2 566.00		微弱溶解	孔隙充填方解石
	2 567.95		微弱溶解	孔隙充填方解石
DK3	2 677.80		微弱溶解	孔隙充填方解石
	2 681.80		微弱溶解	孔隙充填方解石
DK18	2 685.55		微弱溶解	局部充填方解石
大54	2 231.28	H2 - 2	微弱溶解	孔隙充填方解石
DK15	2 694.60		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大12	2 674.80	H2 - 1	雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大15	2 694.90		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大15	2 698.41	H1 - 3	雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大18	2 595.00		微弱溶解	局部充填方解石
大18	2 623.50	H1 - 2	微弱溶解	局部充填方解石
大33	2 575.41		微弱溶解	孔隙充填方解石
大43	2 417.85		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 422.80		雨痕状溶解	局部充填方解石,交代石英
大50	2 645.60		蜂窝状溶解	局部充填方解石
大4	2 748.95	H1 - 1	微弱溶解	孔隙充填方解石
	2 754.90		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大23	2 649.20		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 650.65		微弱溶解	连生结构方解石
	2 652.00		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 656.50		微弱溶解	孔隙充填方解石
大28	2 549.35		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 554.25		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大44	2 519.95		微弱溶解	连生结构方解石
	2 526.10		微弱溶解	局部充填方解石
大50	2 664.10		蜂窝状溶解	局部充填方解石
大15	2 739.35	S2 - 2	微弱溶解	连生结构方解石
大38	2 817.00		微弱溶解	孔隙充填方解石
大44	2 543.20		微弱溶解	孔隙充填方解石
大50	2 668.40		雨痕状溶解	孔隙充填方解石,交代石英
大4	2 806.10	S2 - 1	蜂窝状溶解	局部充填方解石
大16	2 801.50		微弱溶解	孔隙充填方解石
大47	2 354.15		微弱溶解	局部充填方解石
大16	2 835.30	S1 - 2	雨痕状溶解	孔隙充填方解石
大8	2 718.00	T2	微弱溶解	孔隙充填方解石
	2 723.40		蜂窝状溶解	孔隙充填方解石
大25	2 703.90		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 712.00		微弱溶解	孔隙充填方解石
大47	2 422.40		雨痕状溶解	局部充填方解石
	2 425.20		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 434.00		雨痕状溶解	局部充填方解石
	2 435.40		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
	2 446.60		雨痕状溶解	孔隙充填方解石
DK22	2 747.48		雨痕状溶解	局部充填方解石

表 2 大牛地气田粘土矿物相对含量
Table 2 Relative contents of clay minerals in
Daniudi gas field

井号	深度/m	层位	粘土矿物相对含量/%			
			伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊蒙混层 (I/S)
D7	2 655.43	H3 - 2	13	17	57	13
	2 656.36		21	17	52	10
D12	2 638.13	H2 - 2	10	15	61	14
D13	2 625.48	H2 - 1	13	12	53	22
D12	2 675.87		15	18	53	14
D16	2 704.75		35	18	36	11
D21	2572.74		67	33	0	0
	2577.22	H1 - 2	26	68	6	0
D10	2574.86	H1 - 1	49	8	30	13
D13	2 673.40		23	10	60	7
D21	2 580.30		26	73	1	0
D12	2 726.37		18	19	58	5
D1	2 737.09		27	18	49	6
	2 743.03		27	10	55	8
	2 747.09		35	20	38	7
D10	2 610.07		23	7	63	7
	2 613.68		23	10	65	2
D13	2 702.94	S2 - 2	18	10	66	6
D21	2 605.80		70	30	0	0
	2 609.52		62	38	0	0
D13	2 730.03	S2 - 1	22	14	60	4
D12	2 745.60		11	11	70	8
D10	2 752.14		31	17	41	11
	2 646.28		35	41	22	2
	2 657.19		60	22	5	13
D12	2 777.40	S1 - 3	72	7	16	5
	2 608.73		87	2	0	11
	2 616.89		90	1	0	9
	2 618.00		89	1	0	10
	2 618.60		89	1	0	10
D17	2 619.11		89	2	0	9
	2 796.10	S1 - 2	75	10	6	9
	2 800.07		95	1	1	3
	2 812.79		92	0	0	8
D10	2 681.49	S1 - 1	84	4	3	9
D20	2 526.70		71	10	8	11
D13	2 769.74		54	23	19	4
	2 775.04		68	20	10	2
	2 776.74		74	16	6	4
D1	2 832.60		90	1	0	9
	2 835.67		85	4	1	12
	2 837.95		81	1	2	16
	2 840.37		88	2	0	10
D3	2 841.34		80	3	2	15
	2 843.30		89	1	0	10
	2 845.05		87	2	1	10
	2 830.60		77	4	2	17
D20	2 831.11		82	2	1	15
	2 832.15		87	1	2	10
	2 562.96		87	2	0	11
	2 566.68		86	1	0	13

续表 2 大牛地气田粘土矿物相对含量
Table 2 Relative contents of clay minerals in
Daniudi gas field

井号	深度/m	层位	粘土矿物相对含量/%			
			伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊蒙混层 (I/S)
D21	2 842.78	T2	95	5	0	0
	2 844.71		100	0	0	0
	2 846.28		98	1	1	0
D10	2 847.95		99	0	1	0
	2 729.14		94	1	2	3
	2 734.96		95	2	2	1
D17	2 664.63		88	0	0	12
	2 668.93		85	0	0	15
	2 672.00		86	0	0	14
D18	2 687.61		85	0	0	15
	2 768.04		89	0	0	11
	2 772.03		92	0	0	8
	2 773.19		91	0	0	9
	2 784.07		93	0	0	7
	2 788.68		95	0	0	5

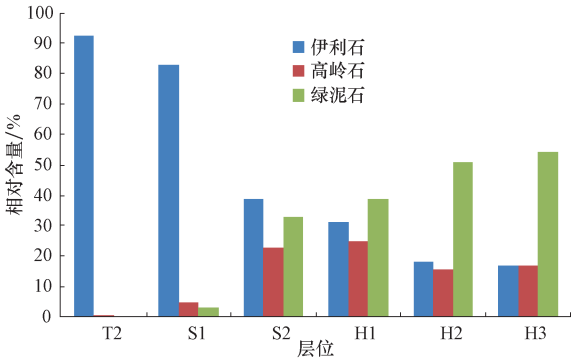


图 3 大牛地气田不同层位自生粘土矿物含量分布特征
Fig. 3 Distribution characteristics of authigenic clay mineral
content in different horizons of Daniudi gas field

大牛地气田的绿泥石包壳厚度为 10 ~ 20 μm,包裹碎屑石英颗粒,形成大量的三角形原生粒间孔(图 1m),且由孔隙边缘向孔隙中心其晶形渐好,颗粒渐大,该产状的绿泥石可抑制石英的次生加大,保护孔隙。绿泥石胶结物主要发育于下石盒子组,尤其是盒二段和盒三段(图 2),而绿泥石包壳在这些层位也最为发育,绿泥石包壳即保护了原生孔隙,又为石英的溶解提供了碱性环境。绿泥石包壳的存在可以证明石英的碱性溶解作用,但并不能说其发育层位储层物性就好,因为在大牛地气田绿泥石包壳并不是普遍发育的现象,而且在绿泥石胶结物发育的层位中,绿泥石主要呈叶片状(图 1n)和绒线团状(图 1o)充填孔隙的形式存在,常堵塞孔喉。因此,绿泥石包壳的存在可以证明石英溶解是在碱性条件下发生的,但其对储层物性的

贡献较小。

3 石英碱性溶解型孔隙对致密砂岩储层的影响

3.1 致密砂岩储层物性的垂向变化

以大牛地气田大18井为例,借助目的层位的26件砂岩样品的激光共聚焦显微镜观察,结合面孔率与实测孔隙度数据,分析致密砂岩储层物性的垂向演化,所用激光共聚焦显微镜的型号为LSM700。

分析结果显示,大18井的孔隙半径最小为3 μm ,最大达332.51 μm ,平均为8 μm 左右,孔隙连通性较好,呈网格状展布(图4a,b)。其最大孔隙半径的垂向变化与孔隙度的垂向变化特征相似(图5),最大孔隙半径发育的层位与孔隙度较高的层位基本一致,说明颗粒之间的溶蚀孔、扩大孔等次生孔隙是致密砂岩储层物性变好的主要原因。大18井是在压实作用(图4c)的背景下,由钙质(图4d)及硅质(图4e)等胶结作用使其致密化,碱性溶解作用形成粒间溶蚀孔、扩大孔等次生孔隙(图4f),进而形成优质储层的成岩演化过程。

3.2 碱性溶解成岩相的物性演化特征

物性演化的研究过程中,主要采用反演回剥法,恢复其各地质历史时期不同成岩阶段的孔隙度,并以现今孔隙结构为基准,结合不同成岩事件造成的孔隙度变化值,恢复储层孔隙结构^[23-24],具体恢复过程如下。

1) 通过 Trask 分选系数(S_o)与储层原始孔隙度($\Phi_{\text{原始}}$)的函数关系,计算储层原始孔隙度:

$$\Phi_{\text{原始}} = 20.91 + 22.90/S_o^{[25]} \quad (1)$$

2) 建立面孔率($S_{\text{面孔率}}$)与孔隙度(Φ)转化关系式:

$$\Phi = 0.9223S_{\text{面孔率}} + 0.4969, R^2 = 0.8528 \quad (2)$$

3) 定量统计关键胶结、溶解作用面孔率的变化量,并计算其对应的孔隙度变化量。

4) 对机械压实作用进行校正,并计算各成岩阶段压实减孔量。

5) 结合埋藏演化史信息,建立孔隙度演化曲线。

在大牛地气田致密砂岩储层成岩作用与物性特征的研究基础上,共划分了4种成岩相,分别为压实压溶硅质胶结成岩相、钙质胶结交代成岩相、碱性溶解成岩相和酸性溶解成岩相。其中,碱性溶解成岩相的颗粒以点、点-线和线接触为主,主要储集空间类型为次生溶孔,部分被泥铁质充填。本次以大12井2746.03 m (T2)样品为例,对碱性溶解成岩相的物性演化特征进

行了研究,其原始孔隙度为33.42%左右,早期压实作用减孔量大,孔隙度减少9.83%,晚期压实减孔量较小,孔隙度仅减少1.8%。早期胶结作用的减孔量较小,孔隙度仅减少1.61%,主要为碳酸盐胶结,而晚期胶结作用的减孔量较大,孔隙度减少18.86%,主要为高岭石等泥质胶结物充填。碱性溶解作用提供大量次生孔隙,起到增孔作用,孔隙度增加11.33%,是储层物性改善的主要原因,该成岩相的现今孔隙度为12.65%,大于致密砂岩孔隙度的下限(10%)。碱性溶解成岩相的孔隙演化特征可概括为:压实作用使原生孔隙减少,胶结作用堵塞孔隙(以粘土胶结为主),压实及胶结作用是致密砂岩储层致密化的主要原因,碱性溶解作用形成次生孔隙,增加孔隙度(图6)。总体上,碱性溶解成岩相中压实、胶结作用使储层物性变差,碱性溶解作用提供优质储层。

统计大牛地气田各层位受碱性溶解作用影响的储层物性数据,发现石英溶解成岩相的储层孔隙度、渗透率明显偏高,其孔隙度为6.40%~18.9%,平均为12.23%,渗透率为 $0.17 \times 10^{-3} \sim 12.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而整个大牛地气田的孔隙度平均值为6.80%,渗透率平均值为 $0.80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。石英碱性溶解形成的次生孔隙很好的改善了大牛地气田的储层孔隙度和渗透率,孔隙度的增加量近6%,渗透率的增加量在 $1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上(图7)。这说明石英的碱性溶解作用为大牛地气田提供了大量的储集空间,是其次生孔隙的主要成因,为个别层位(尤其是太二段)提供了优质储层。

4 结论

1) 大牛地气田石英溶解普遍发育,发育最多的层位是太原组二段,石英溶解具有典型的电镜形貌特征,常在石英颗粒表面形成“雨痕状”、“蜂窝状”的溶蚀坑洞。

2) 大牛地气田的石英溶解是在碱性地层水环境下发生的,具体证据为:水热实验证实石英溶解于碱性环境下更易发生,在致密砂岩储层中很难发生酸性溶蚀;与石英溶解共生的方解石胶结交代现象普遍;部分层位富伊利石贫高岭石,为石英溶解提供了碱性环境;个别层段绿泥石包壳发育,为石英溶解提供了碱性环境,但贡献较弱。

3) 在大牛地致密砂岩储层成岩演化过程中,石英的碱性溶解作用形成粒间溶蚀孔、扩大孔等次生孔隙,平均增孔量近6%,是部分层位(尤其是太二段)优质储层形成的主要原因。

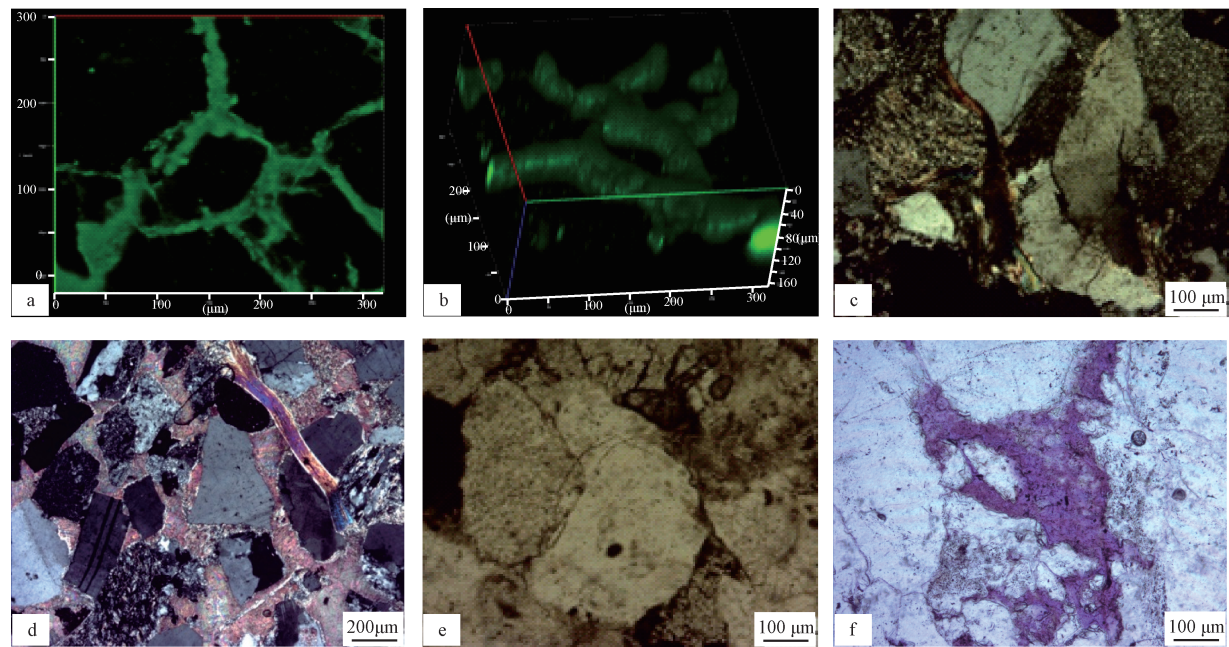


图 4 大牛地气田石英溶解及共生成岩作用镜下特征照片(二)

Fig.4 Images of quartz dissolution and associate diagenesis in Daniudi gas field(II)

- a. 大 18 井,2 745.20 m,S1-1,网格状孔隙展布(二维);b. 大 18 井,2 745.20 m,S1-1,网格状孔隙展布(三维);c. 大 18 井,2 662.02 m,杂基充填孔隙及颗粒变形、破裂;d. 大 18 井,2 595.00 m,连生方解石胶结;e. 大 18 井 2 666.02 m,石英次生加大及孔隙充填高岭石;
f. 大 18 井,2 774.20 m,石英颗粒的强烈溶解,形成粒间溶蚀扩大孔。

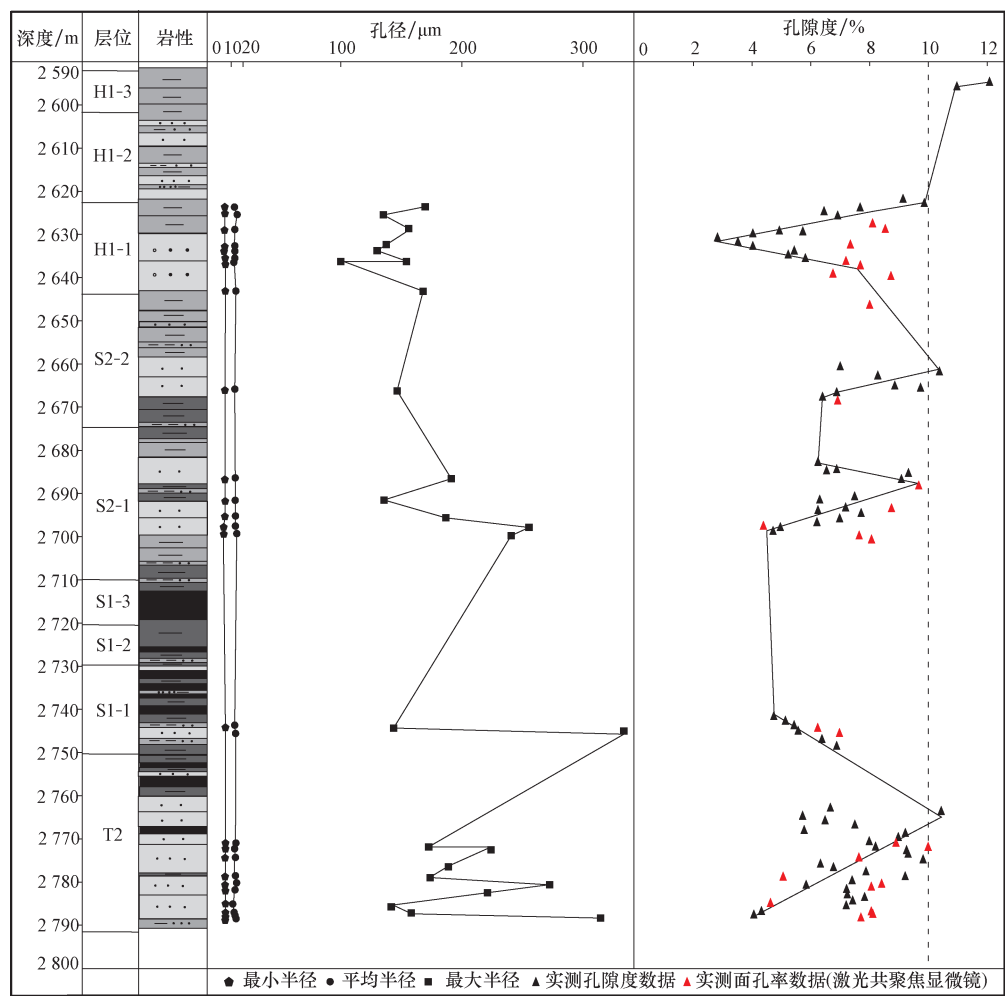


图 5 大 18 井储层孔隙垂向演化

Fig.5 Vertical evolution of reservoir porosity of Well D18 in Daniudi gas field

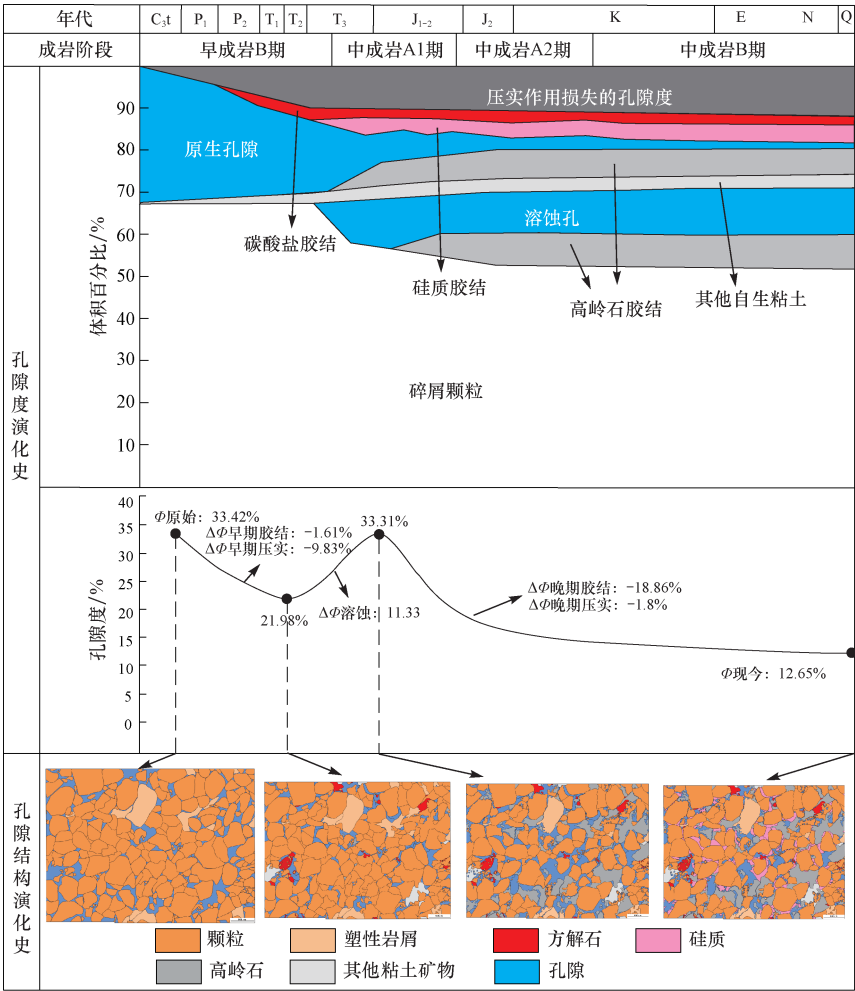


图 6 碱性溶解成岩相的孔隙演化史

Fig. 6 Porosity evaluation history of alkaline dissolution diagenetic facies

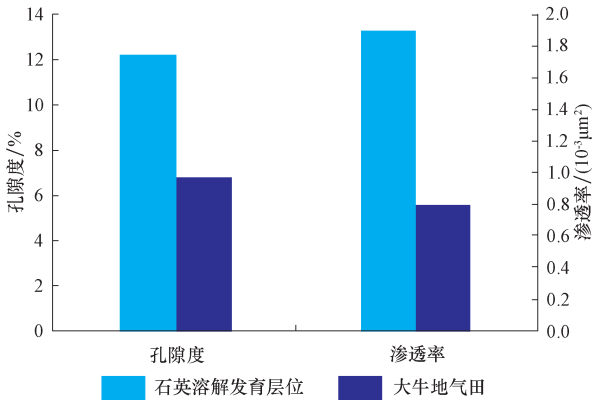


图 7 石英溶解发育层位与大牛地气田物性对比

Fig. 7 Correlation of physical property with horizons of quartz dissolution in Daniudi gas field

参 考 文 献

[1] 邱隆伟,姜在兴,操应长,等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J]. 中国科学(D辑),2001,31(9):752-759.
Qiu Longwei,Jiang Zaixing,Cao Yingchang,et al. Alkaline diagenesis and its influence toreservoir in Biyang depression[J]. Science in China(Series D),2001,31(9):752-759.

[2] 邱隆伟,潘耀. 柯克亚凝析气田石英的溶解现象及其成因[J]. 矿物学报,2005,25(2):183-190.

Qiu Longwei,Pan Yao. A study on direct dissolution of quartz and its genesis in the Kedeya Gas Condensate[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005,25(2):183-190.

[3] 邱隆伟,赵伟,刘魁元. 碱性成岩作用及其在济阳拗陷的应用展望[J]. 油气地质与采收率,2007,14(2):10-15.
Qiu Longwei,Zhao Wei,Liu Kuiyuan. Alkali diagenesis and its application in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2007,14(2):10-15.

[4] 钟大康,朱筱敏,周新源,等. 初论塔里木盆地砂岩储层中 SiO₂ 的溶蚀类型及其机理[J]. 地质科学,2007,42(2):403-414.
Zhong Dakang,Zhu Xiaomin,Zhou Xinyuan,et al. An approach to categories and mechanisms of SiO₂ dissolution in sandstone reservoirs in the Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology,2007,42(2):403-414.

[5] 刘媛媛,于炳松,朱金富,等. 辽河滩海西部凹陷古近系碎屑岩储层成岩作用及其对储层物性的影响[J]. 现代地质,2009,23(4):731-738.
Liu Yuanyuan,Yu Bingsong,Zhu Jinfu,et al. Diagenesis and its influence on physical properties in paleogene clastic reservoir in the West Sag of the Beach Area, Liaohe Depression [J]. Geoscience, 2009,23(4):731-738.

[6] 谭先锋,田景春,李祖兵,等. 碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演化—以山东东营凹陷陡坡带沙河街组四段为例[J]. 地质通报,2010,29(4):535-543.

- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenesis evolution of fragmental reservoir in alkali sediment environment-taking the Member 4 of Shahejie Formation of steep-slope zone in Dongying sag, Shandong, China for example [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(4): 535–543.
- [7] 张胜斌, 刘震, 刘红俊, 等. 四川盆地河包场须家河组碱性成岩作用[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(5): 464–468.
- Zhang Shengbin, Liu Zhen, Liu Hongjun, et al. Alkali diagenesis of Xujiahe Sandstone in Hebaochang Block in Sichuan Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(5): 464–468.
- [8] 万友利, 丁晓琪, 白晓亮, 等. 塔中地区志留系海相碎屑岩储层石英溶蚀成因及影响因素分析[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 138–147.
- Wan Youli, Ding Xiaoqi, Bai Xiaoliang, et al. Quartz dissolution causes and influencing factors in the Silurian marine clastic reservoir rocks in Central Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 138–147.
- [9] 邱隆伟, 姜在兴, 陈文学, 等. 一种新的储层孔隙成因类型——石英溶解型次生孔隙[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 621–627.
- Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Chen Wenxue, et al. A new type of secondary porosity-quartz dissolution porosity [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 621–627.
- [10] 邱隆伟, 姜在兴. 陆源碎屑岩的碱性成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2006, 8: 1–7.
- Qiu Longwei, Jiang Zaixing. Alkaline terrigenous clastic rock diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006, 8: 1–7.
- [11] 张金亮, 张鹏辉, 谢俊, 等. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(9): 957–967.
- Zhang Jinliang, Zhang Penghui, Xie Jun, et al. Diagenesis of clastic reservoirs: advances and prospects [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(9): 957–967.
- [12] 曲希玉, 邱隆伟, 宋璠, 等. 大牛地气田石英次生加大的特征及其对储层物性的影响[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(5): 567–573.
- Qu Xiyu, Qiu Longwei, Song Fan, et al. Characteristics and its effect on reservoir physical property of quartz overgrowth at Daniudi Gas Field [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(5): 567–573.
- [13] Gautier J M, Oelkers E H, Schott J. Are quartz dissolution rates proportional to B. E. T. surface areas? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(7): 1059–1070.
- [14] 曲希玉, 刘立, 胡大千, 等. CO₂ 流体对含片钠铝石砂岩改造作用的实验研究[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(4): 690–696.
- Qu Xiyu, Liu Li, Hu Daqian, et al. Study on the dawsonite sandstones reformation with CO₂ fluid [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(4): 690–696.
- [15] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. *石油学报*, 1996, 17(1): 17–24.
- Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(1): 17–24.
- [16] 罗月明, 刘伟新, 谭学群, 等. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用评价[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(4): 384–390.
- Luo Yueming, Liu Weixin, Tan Xuequn, et al. Diagenesis and reservoir evaluation the Upper Palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi Gas Field, the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(4): 384–390.
- [17] 邱隆伟, 徐宁宁, 周涌沂, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩石英溶解作用及其对优质储集层的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(1): 38–44.
- Qiu Longwei, Xu Ningning, Zhou Yongyi, et al. Dissolution of quartz in tight sandstones of the Daniudi area, Ordos Basin, and its influence to high quality reservoirs [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 38–44.
- [18] 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 9: 63–69.
- Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu. Clay minerals in petroliferous basins of China [M]. Beijing: Petroleum industry press, 2003, 9: 63–69.
- [19] 田建锋, 陈振林, 杨友运. 自生绿泥石对砂岩储层孔隙的保护机理[J]. *地质科技情报*, 2008a, 27(4): 49–54.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Yang Youyun. Protection mechanism of authigenic chlorite on sandstone reservoir pores [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008a, 27(4): 49–54.
- [20] 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 等. 砂岩中自生绿泥石的产状形成机制及其分布规律[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008b, 27(2): 200–206.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, et al. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in sandstone [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008b, 27(2): 200–206.
- [21] Doney P J, Hodgson D M, Worden R H. Pre-requisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: A review of subsurface examples [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 32(1): 63–75.
- [22] 曲希玉, 刘珍, 高媛, 等. 绿泥石包壳对碎屑岩储层物性的影响及其形成环境——以鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界为例[J]. *沉积学报*, 2015, 33(4): 786–794.
- Qu Xiyu, Liu Zhen, Gao Yuan, et al. The influence and formation environment of chlorite Coatings in the clastic rock [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 786–794.
- [23] 操应长, 蕙克来, 王艳忠, 等. 冀中坳陷廊固凹陷河西务构造带古近系沙河街组四段储集层孔隙度演化定量研究[J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 593–604.
- Cao Yingchang, Xi Kelai, Wang Yanzhong, et al. Quantitative research on porosity evolution of reservoirs in the Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Hexiwu structural zone of Langgu sag, Jizhong Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 593–604.
- [24] 王艳忠, 操应长, 蕙克来, 等. 碎屑岩储层地质历史时期孔隙度演化恢复方法——以济阳坳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] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(2): 349–369.