

碱性长石溶蚀微孔发育特征及其对致密砂岩 储层物性的改造作用

——以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段3亚段为例

孙光远¹, 王哲麟^{2,3}, 刘培刚^{3,4}, 张志强³

[1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 4. 中国石油大学(华东) 计算机科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:长石次生溶孔是致密砂岩储层微-纳米级别孔喉网络的重要组成部分。为进一步明确碱性长石溶孔发育特征及其对致密砂岩储层物性的改造作用,以鄂尔多斯盆地中南部华庆地区三叠系延长组6段3亚段(长⁶亚段)致密砂岩储层为研究对象,利用能谱分析获取各类长石的钾、钠元素分布特征及组成特点;基于Image J软件对场发射环境扫描电镜图像进行二值化处理及参数提取,分别对具有典型溶蚀特征的波状条纹长石和斑块状条纹长石进行图像分析和理论计算,提出了基于溶蚀强度参数评价储层溶孔对储集空间贡献程度的方法;定量评价了长石溶蚀对孔隙发育的影响,精准刻画了长石发育特征、溶蚀率及孔隙度贡献率等参数。图像分析和理论计算结果表明,研究区碱性长石溶蚀微孔主要由弱溶蚀作用形成,形态特征为条带状和蜂窝状,面孔率大小分布在2.06%~35.20%,平均值为13.99%,因溶蚀作用形成的孔隙面积占比与碱性长石中K⁺富含区域面积大小呈负相关。

关键词:碱性长石;溶蚀孔隙;储层物性;致密砂岩储层;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Dissolved micro-pores in alkali feldspar and their contribution to improved properties of tight sandstone reservoirs: A case study from Triassic Chang-6³ sub-member, Huaqing area, Ordos Basin

Sun Guangyuan¹, Wang Zhelin^{2,3}, Liu Peigang^{3,4}, Zhang Zhiqiang³

[1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. College of Computer Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China]

Abstract: Secondary dissolved pores in feldspar account for a major part of the micro-nano pore-throat system in tight sandstone reservoirs. To further clarify the characteristics of these pores and their contribution to improved physical properties of tight sandstone reservoirs, this paper takes the third sub-member of the sixth member of Yanchang Formation (Chang-6³) in the Huaqing area, Ordos Basin as the research object. The energy-dispersive spectrometry is used to obtain the distribution and composition characteristics of sodium and potassium of all kinds of feldspar in the member and field emission environmental scanning electron microscope images of feldspar samples are processed binarily to extract parameters with Image J software. Two kinds of feldspar, wavy perthite and mottled perthite, with typical dissolution characteristics are imaged and analyzed to establish a method for evaluating the contribution of the dissolved pores to reservoir space based on dissolution intensity parameters and the impact of feldspar dissolution on pore development. Parameters for characterizing feldspar development, dissolution rate, porosity contribution are determined. The results show that the dissolved micropores in alkali feldspar in the study area are mostly in banded and honeycombed morphology as a result of weak dissolution. The porosity contribution rate is between 2.06 % and

收稿日期:2021-12-02;修订日期:2022-03-10。

第一作者简介:孙光远(1995—),男,硕士研究生,油气地质。E-mail: 3130000936@zju.edu.cn。

通讯作者简介:刘培刚(1979—),男,博士、讲师,信息地质、数据科学与应用。E-mail: dongfangwy@upc.edu.cn。

35.20%, with an average of 13.99%. Moreover, the proportion of pore area formed by dissolution is negatively correlated with the potassium ion enrichment area size in alkali feldspar.

Key words: alkali feldspar, dissolved pore, reservoir physical property, tight sandstone reservoir, Yanchang Formation, Ordos Basin

引用格式:孙光远,王哲麟,刘培刚,等. 碱性长石溶蚀微孔发育特征及其对致密砂岩储层物性的改造作用——以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段3亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 658-669. DOI: 10. 11743/ogg20220314.

Sun Guangyuan, Wang Zhelin, Liu Peigang, et al. Dissolved micro-pores in alkali feldspar and their contribution to improved properties of tight sandstone reservoirs: A case study from Triassic Chang-6³ sub-member, Huaqing area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 658-669. DOI: 10. 11743/ogg20220314.

致密储层孔隙结构的精细表征是近年来国内外学者的研究热点,也是评价储层有效性的重要内容之一^[1-2]。致密砂岩储层纳米级孔喉网络广泛发育,主体孔径分布在40~700 nm^[3]。长石作为砂岩储层中分布最广泛的易溶骨架颗粒,次生溶孔广泛发育,在北海盆地 Brent 组, McArthur 盆地 Barney Creek 组, 渤海湾盆地沙河街组, 鄂尔多斯盆地延长组及准噶尔盆地百口泉组储层中,均发现长石溶蚀产生的次生孔隙^[4-8]。

前人研究结果表明,碎屑岩储集层中的碱性长石差异溶蚀现象十分普遍,在不同地质条件下各类长石受元素组成与晶体结构特征的影响溶蚀孔隙特征具有差异性,导致不同地区储层次生孔隙发育特征主要受矿物组构特征制约^[9-16],通常对于储层物性具有建设意义。目前针对长石溶蚀的次生孔隙研究要从直观描述和定量计算角度分析,包括溶蚀孔隙发育特征、形成与演化、成岩作用及流体等成因机制等,前人研究主要从长石溶孔与孔喉半径关系、长石溶蚀孔增长模型及自生矿物含量与物性关系等定量计算角度分析^[5, 17-20]。此外,也有学者倾向于利用溶解反应式对次生孔隙体积和孔隙度进行定量计算^[21],并对不同长石的溶蚀强度进行比较^[12-13],然而现有研究仍然缺乏针对不同组分的长石溶蚀孔隙形态特征、孔径分布特点以及孔隙度贡献程度的定量评价^[21-25]。

基于现有的储层表征技术^[26-29],论文主要从3个角度开展长石溶孔定量化表征:①根据样品场发射环境扫描电镜(FE-SEM)图像的实际观测,分析长石发育类型与溶蚀孔隙特征,并计算各类型长石的实际溶蚀率;②根据长石溶蚀反应前后的矿物类型和含量变化情况,测算各类型长石的理论溶蚀率;③采用溶蚀强度对长石溶蚀孔隙发育状况进行表征。在此基础上进行相关性分析,对控制长石溶孔发育特征的相关因素进行了分析探讨。这对于明确埋藏较深、原生孔隙保存较差的致密砂岩储层其微-纳米尺度的长石次生溶孔对储渗条件的改善原理及作用机制具有一定意义。

1 样品特征与研究方法

1.1 样品来源

鄂尔多斯盆地华庆地区位于盆地内伊陕斜坡的西南部(图1),发育有典型的深水重力流成因的致密砂岩储层,主力产层延长组6段3亚段(长6³亚段)形成于湖盆深水-半深水,周缘坡折带西陡东缓^[30]。位于东部坡折带的Y井区发育呈NE-SW向展布的席状、透镜状砂体,沉积主体为砂质碎屑流及部分浊流、泥质碎屑流沉积,局部可见三角洲前缘水下分流河道砂质碎

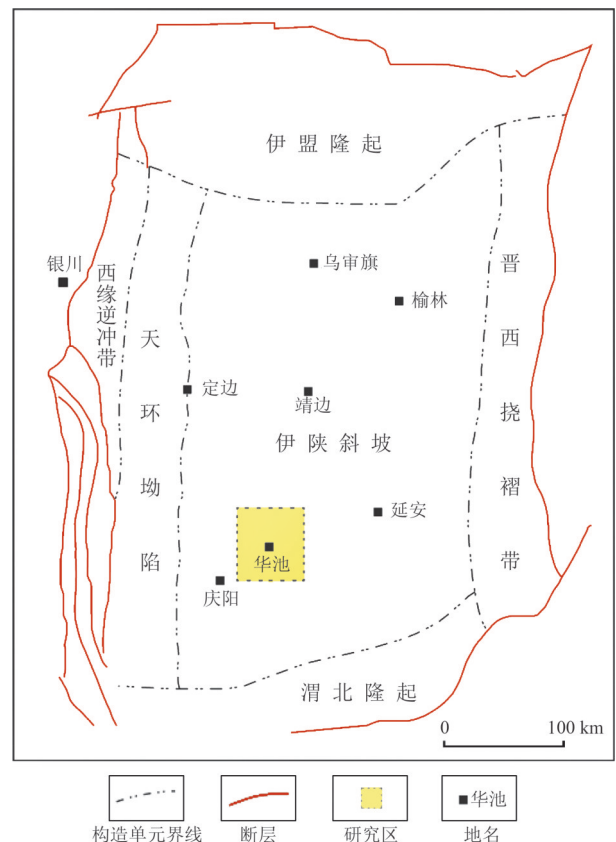


图1 鄂尔多斯盆地位置^[30]

Fig. 1 Location of the Ordos Basin^[30]

屑流沉积^[22,30-34]。样品取自研究区内的探井及评价井,取心样品埋深介于1 980~2 210 m。

基于区内1 761个物性测量数据对储层物性进行分析,结果表明:研究区长6³亚段砂岩平均孔隙度为9.86%,小于10%的样品约占62%;水平渗透率主要为 $(0.01 \sim 0.50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品约占47%,在 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品约占49%。该砂岩为一套低孔-特低孔、超低渗致密储层。

1.2 研究方法

场发射环境扫描电镜是研究岩石微观结构、孔隙类型以及矿物形貌学特征的主要手段,联合能谱分析(EDS)以及元素面扫分析可以确定矿物组分特征。本次研究使用FEI Quanta 650高分辨率场发射扫描电镜,为使样品尽可能保留在原始地层状态,取心样品在磨片前均未洗油,此外,为了提高成像质量,实验观察前样品经过氩离子抛光并进行喷铬处理。

首先利用扫描电镜的背散射和二次电子成像技术对储层中的长石矿物进行高分辨率成像,在对研究区长6段致密砂岩储层的扫描电镜图像观察的基础上,利用能谱分析获取各类长石的钾、钠元素的分布特征及组成特点,基于Image J软件对图像进行二值化处理及参数提取,分别对具有典型溶蚀特征的波状条纹长石和斑块状长石进行图像分析和理论计算,采用溶蚀强度参数评价储层溶孔对储集空间的贡献程度,并以此为依据探讨钾-钠长石差异溶蚀的影响机制、分析长石溶孔对储渗性能的改善作用进行探讨。

1.3 样品基本特征

根据显微镜下铸体薄片的孔隙发育特征及面孔率等参数,对研究样品进行分类评价,不同类型储层孔喉发育特征差异明显。一类储层(图2a—c)骨架颗粒粒径大,原生粒间孔隙和粒间残余孔隙发育,孔径总体较大,平均面孔率7.3%,喉道类型包括孔隙缩小型和颈缩状,有较好的储渗空间;二类储层(图2d—f)粘土矿物包裹骨架矿物导致表面粗糙,并且充填粒间孔隙,因此,此类储层主要发育粘土矿物晶间孔,孔隙半径小,平均面孔率5%左右,喉道以颈缩状和弯片状为主;三类储层(图2g—i)颗粒粒径小,主要以泥质粉砂岩和粉砂质泥岩为主,粒间残余孔隙孔径小,发育粒内溶蚀孔隙,并且呈现明显的成层性分布,面孔率很低,一般低于4%,喉道以片状和弯片状为主。

元素全面扫描分析是利用电子束在试样表面平面

扫描通过,使得所定义元素在显示器上以不同颜色的点分别显示出分布图像,根据SEM-EDS元素-矿物判别方法^[35],对研究区内样品的常见骨架矿物和粘土矿物进行识别和显示。结果表明(图3),华庆地区样品矿物组分主要包含有石英(30.86%)、钠长石(23.12%)、钾长石(10.03%)、方解石(11.34%)、白云石(8.16%)、菱铁矿(0.12%),粘土矿物以绿泥石为主(4.79%),其次为蒙脱石(2.98%),再次为伊利石和高岭石,含量分别为1.54%和1.28%。

2 碱性长石基本特征

2.1 元素组成

具有条纹特征的碱性长石是指在炙热的熔融状态下含有钠和含有钾的长石均匀的混溶在一起,冷却时两种长石结晶后显示出了不同的条纹特征,在场发射电子显微镜下反馈的图像信息为不同灰度值长石的差异性聚集分布,相对于钾长石中富含的钾离子(K^+),钠长石中的钠离子(Na^+)原子序数小,因此钠长石在背散射或二次电子条件下的图像呈现的灰度值较小,颜色较深,为深灰色(图4)。

基于场发射扫描电镜和能谱分析,对研究区碱性长石的元素组成以及钾、钠长石的互溶状态进行研究,发现鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层中的长石具有典型的条纹长石特征,表现形式为钾长石和钠长石不同程度的混溶。依据钾长石与钠长石的互溶状态及元素分布特征将研究区内的碱性长石划分为波状条纹长石和斑块状条纹长石两类,能谱分析结果显示波状条纹长石(图4a)与斑块状条纹长石(图4b)的元素组分特征基本一致(表1),均为钾(K)、钠(Na)、钙(Ca)、铝(Al)、硅(Si)、氧(O),由于样品从矿场获得后未经洗油处理,元素组成中还可见到一些由沥青残留形成的碳元素(C)。

2.2 碱性长石混溶特征

2.2.1 波状条纹长石

波状条纹长石属于钠长石和钾长石不完全类质同象系列,发育主要是由于低温条件下钾长石与钠长石发生固溶体分离,二者沿一定析出结晶,形成了明显的纹层(图5)。依据其内钾长石和钠长石含量占比,波状条纹长石可分为波状正条纹长石和波状反条纹长石,不同类型的矿物发育特征和含量占比对次生溶蚀孔隙的发育具有重要作用。

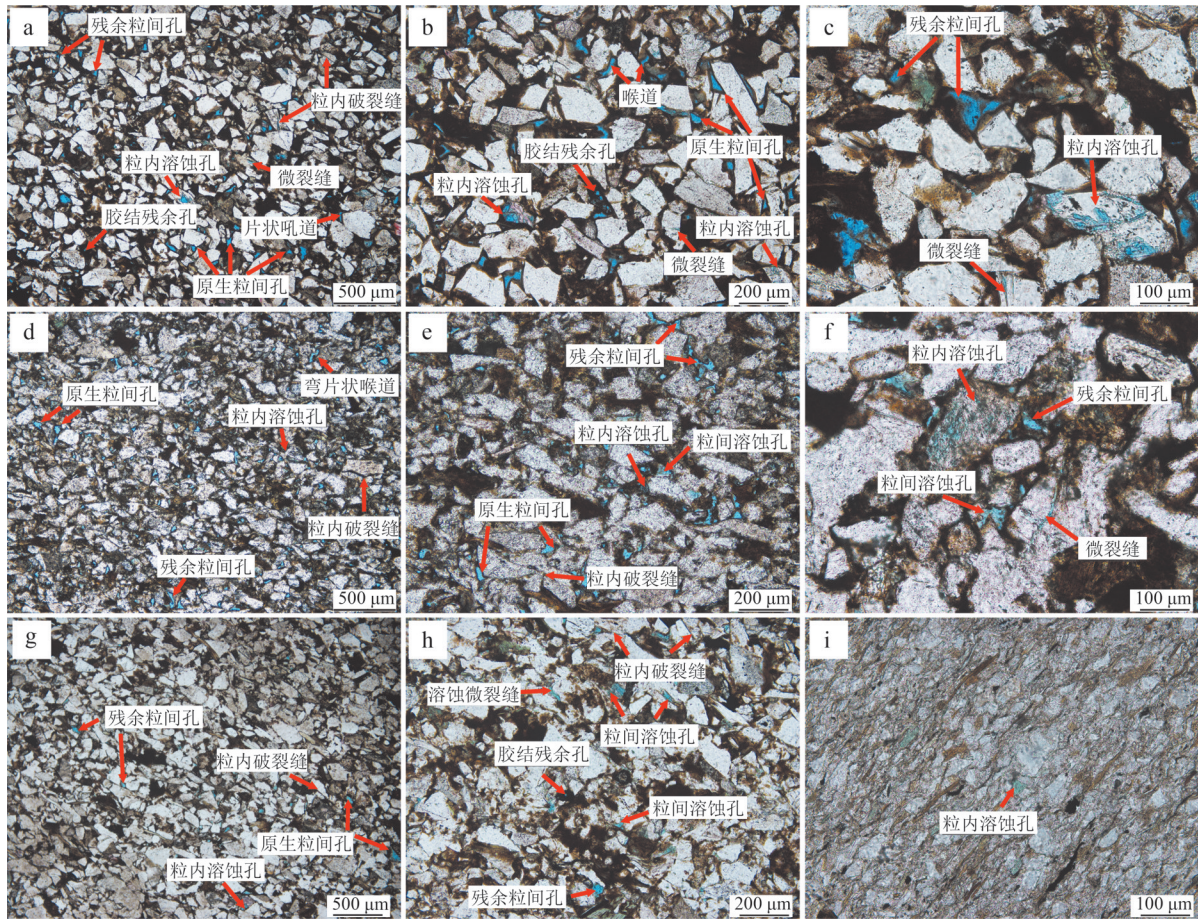


图2 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层孔隙结构特征铸体薄片照片(单偏光,蓝色铸体)

Fig. 2 Images of casting thin sections showing the pore structure of Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin (with plane polarized light and blue casting)

a-c. Y416井,埋深2 143.5 m,一类储层,碎屑颗粒较大,原生粒间孔发育; d-f. Y413井,埋深2 204.7 m,二类储层,残余粒间孔发育; f-i. Y284井,埋深2 191.3 m,三类储层,碎屑颗粒较小且压实紧密,面孔率低且孔径小

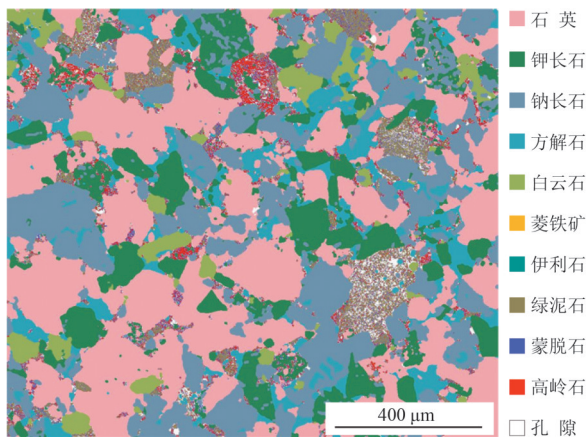


图3 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层SEM-EDS面扫元素-矿物判别结果

Fig. 3 SEM-EDS element-mineral discrimination of Chang-6³ tight sandstone, Huaqing area, Ordos Basin

对具有典型特征的波状条纹长石样品进行统计,发现在波状条纹长石中,波状正条纹长石占比较高,占

比大于70%,而波状反条纹长石不足30%。此外,波状正条纹长石中钾长石面积占比较大,介于51.26%~85.27%,平均68.09%,钠长石面积占比较小,介于14.73%~48.74%,平均31.91%;波状反条纹长石中,钠长石面积占比较大,介于62.79%~79.59%,平均69.37%,钾长石面积占比较小,介于0.41%~37.21%,平均30.63%(图6)。

2.2.2 斑块状条纹长石

与波状条纹长石类似,文中描述的斑块状条纹长石是在低温条件下,当完全解理和不完全解理同时发育时,钾长石与钠长石是不完全类质同象体或有限互溶的固溶体,从而形成相互交代的斑块状结构(图7),为钠长石与钾长石的互溶系列。根据钾长石和钠长石含量占比,可分为斑块状正条纹长石和斑块状反条纹长石。

对具有典型特征的斑块状条纹长石进行图像处理

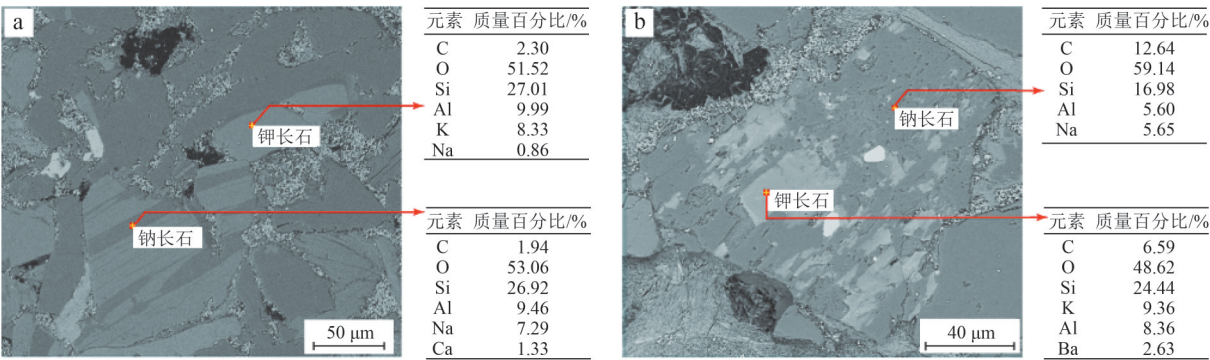


图4 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层能谱分析结果

Fig. 4 EDS (energy-dispersive spectrometry) result of Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin
a. Y414井,埋深1 978.7 m,波状条纹长石; b. GJ143井,埋深2 204.7 m,斑块状条纹长石

表1 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层碱性长石能谱数据

Table 1 EDS statistics of alkali feldspar in Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin

分类	测试编号	矿物类型	元素含量/%						
			K	Na	Ca	Al	Si	C	O
波状条纹长石	1	钾长石	5.13	0.77	0	6.43	19.44	2.70	65.53
	2	钾长石	4.82	1.04	0	6.24	19.89	4.29	63.72
	3	钾长石	5.22	0.70	0	6.06	19.44	2.79	65.79
	4	钾长石	7.01	0	0	5.51	18.40	2.64	66.44
	5	钾长石	5.14	0.75	0	6.21	19.33	3.84	64.73
	6	钾长石	4.76	0	0	6.17	17.32	11.29	60.46
		平均值	5.35	0.54	0	6.10	18.97	4.59	64.45
	7	钠长石	0	5.96	0	5.85	19.48	2.38	66.33
	8	钠长石	0	6.28	0.58	6.48	17.85	3.05	65.76
	9	钠长石	0	5.73	0	6.00	18.76	3.63	65.88
	10	钠长石	0	6.17	0.65	6.82	18.66	3.14	64.56
	11	钠长石	0	5.65	0	5.60	16.98	12.63	59.14
	12	钠长石	0	6.27	0	6.00	18.63	6.06	63.04
斑块状条纹长石		平均值	0	6.01	0.62	6.13	18.39	5.15	64.12
	1	钾长石	4.99	0	0	6.27	20.42	3.60	64.72
	2	钾长石	5.14	0.71	0	5.90	19.00	4.68	64.57
	3	钾长石	5.49	0.26	0	6.17	19.40	3.32	65.36
	4	钾长石	5.41	0.26	0	6.23	19.04	3.45	65.61
	5	钾长石	5.68	0.67	0	5.86	18.76	2.86	66.17
	6	钾长石	5.29	0.38	0	6.57	19.76	3.85	64.15
		平均值	5.33	0.38	0	6.17	19.40	3.63	65.10
	7	钠长石	0	5.95	0.82	7.06	18.21	2.37	65.59
	8	钠长石	0	6.56	0	6.18	18.80	4.19	64.27
	9	钠长石	0	6.23	0.54	6.32	18.72	3.16	65.03
	10	钠长石	0	6.27	0	6.11	18.99	2.51	66.12
	11	钠长石	0	5.30	0	4.80	14.99	17.74	57.17
	12	钠长石	0	6.65	0	6.26	19.49	2.51	65.09
		平均值	0	6.16	0.68	6.12	18.20	5.41	63.88

和统计(图8)发现以钾长石为主导的斑块状正条纹长石占比较高,达75%,而以钠长石为主的斑块状反条纹长石仅占比25%。其中斑块状正条纹长石中钾长石面积占比较大,介于51.72%~81.46%,平均65.12%,

而钠长石面积占比较小,介于18.54%~48.28%,平均34.88%;斑块状反条纹长石中钠长石面积占比较大,介于54.76%~72.19%,平均64.40%,钾长石面积占比介于27.81%~45.24%,平均35.60%。

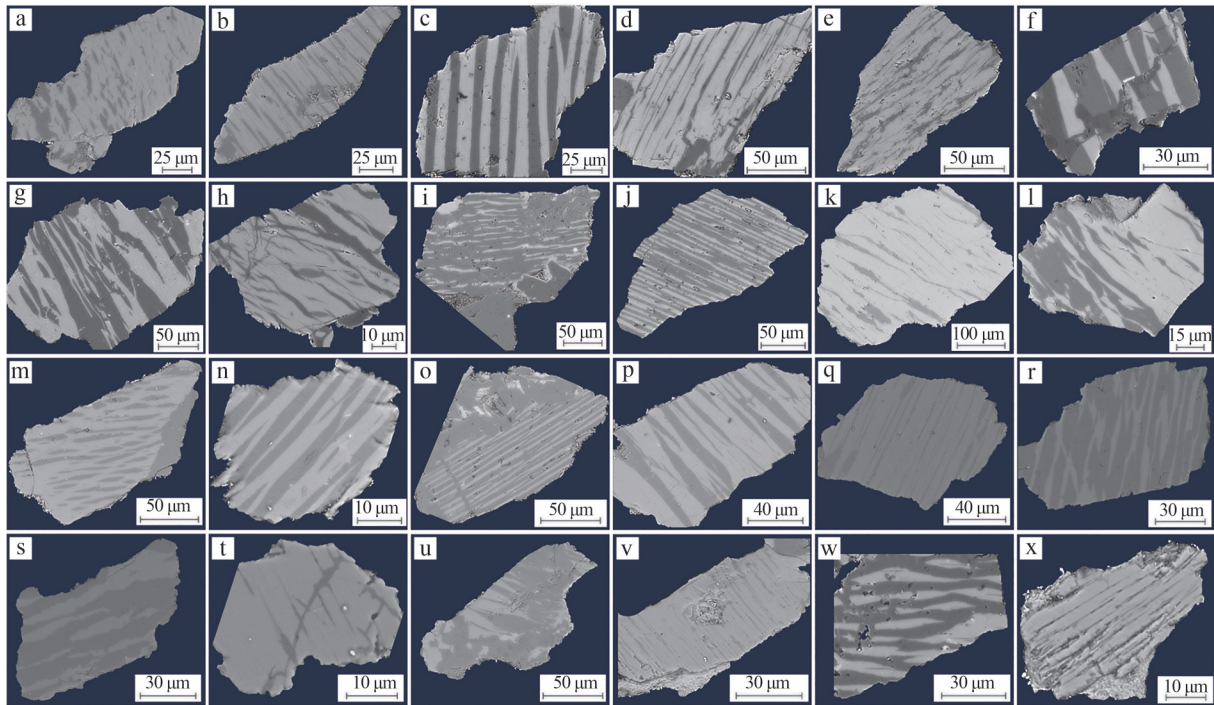


图5 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层FE-SEM电镜下波状条纹长石发育特征照片

Fig. 5 FE-SEM images showing the development characteristics of wavy perthite from the Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin

a, b. Y284井, 埋深2 188.08 m; c—h. Y284井, 埋深2 191.30 m; i—l. Y295井, 埋深2 176.71 m; m—p. Y414井, 埋深1 978.70 m; q—s. Y424井, 埋深1 982.45 m; t—v. GJ141井, 埋深2 220.35 m; w, x. GJ143井, 埋深2 204.70 m

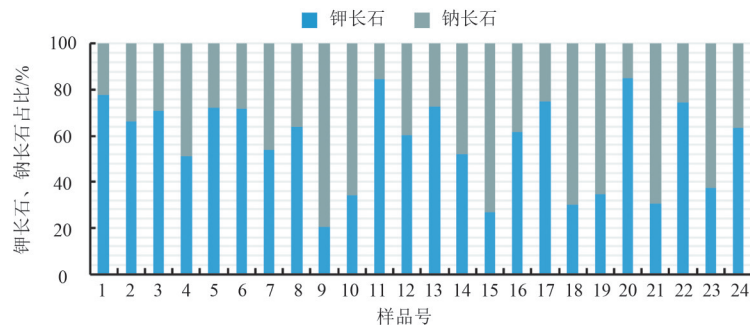


图6 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层典型样品波状条纹长石中钾长石、钠长石占比
(样品“1—24”分别对应图5中的“a—x”)

Fig. 6 The proportions of orthoclase and albite in wavy perthite from typical samples in Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin (sample numbers “1—24” corresponding to “a—x” in Fig. 5 respectively)

3 碱性长石溶蚀微孔发育特征

3.1 基于图像处理分析溶蚀微孔发育特征

研究区长6³亚段致密砂岩储层中的碱性长石具有差异溶蚀的特征,钾长石会发生大量溶蚀,产生溶蚀孔隙,而钠长石溶蚀现象不常见,溶蚀孔隙发育较少。部分样品仅发生初步溶解,形成的条带状溶蚀孔隙占比较少,另一部分长石则溶蚀强烈,形成较大孔

隙,部分甚至只剩下长石残骸。一部分溶蚀微孔被新生粘土矿物和碳酸盐矿物充填,而另一部分未被充填,溶蚀后的溶液被迁移他处,典型样品图像分析处理结果显示,由碱性长石溶蚀形成的孔隙面积占比为12.82%~40.15%,平均24.40%。

溶蚀孔隙的形态特征取决于钾长石与钠长石的互溶状态及元素分布特征。波状条纹长石中常见有条带状孔隙,溶蚀沿着一组解理优先发育,形成平行于双晶接合面方向的条带状孔隙,是长石溶蚀孔隙的主要类

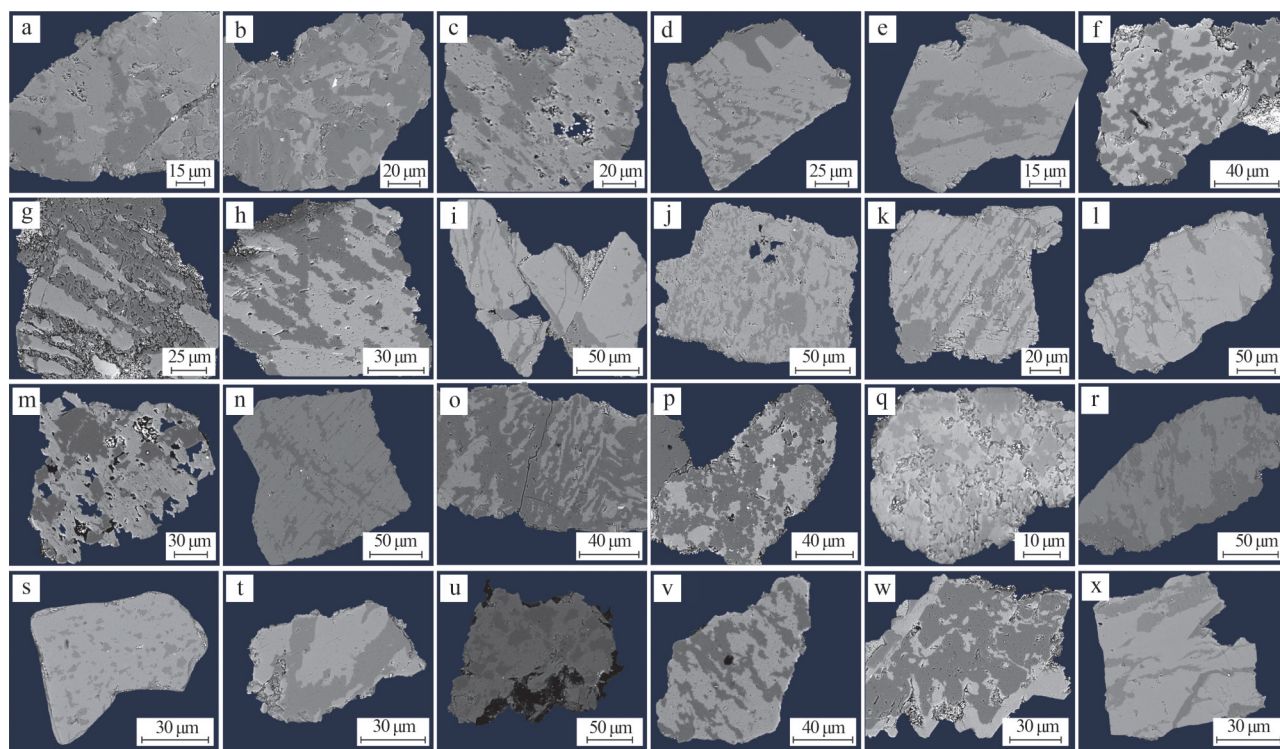


图7 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层FE-SEM电镜下斑块条纹状长石发育特征照片

Fig. 7 FE-SEM images showing the development characteristics of mottled perthite from the Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin

a—e. Y284井,埋深2 188.08 m; f—h. Y295井,埋深2 176.71 m; i—l. Y414井,埋深1 978.7 m; m, n. Y284井,埋深2 191.30 m; o, p. Y416井,埋深2 143.5 m; q. Y295井,埋深2 176.71 m; r. Y424井,埋深1 982.45 m; s, t. GJ141井,埋深2 223.43 m; u, v. GJ143井,埋深2 204.70 m; w, x. GJ141井,埋深2 205.54 m

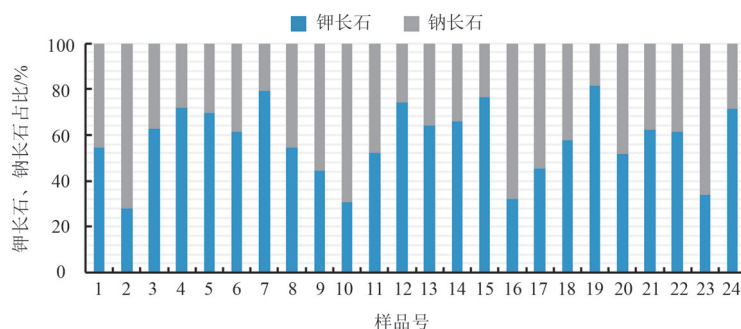


图8 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层典型样品斑块状条纹长石中钾长石和石钠长石占比(样品编号“1—24”分别对应图7中的“a—x”)

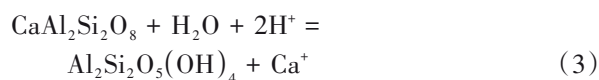
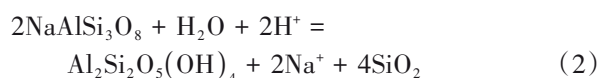
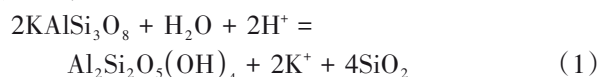
Fig. 8 The proportions of orthoclase and albite in mottled perthite from typical samples in Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin (sample numbers “1—24” corresponding to “a—x” in Fig. 7 respectively)

型,其宽度为0.05~6.00 μm,平均2.00 μm(图9a—c);在斑块状条纹长石则发育蜂窝状孔隙,由于两组解理发育,长石溶蚀呈不规则的半连通状,孔隙半径为0.2~10.00 μm,平均可达4.00 μm(图9d—f)。

3.2 基于理论计算分析溶蚀微孔发育特征

随着长石矿物的溶蚀,产生大量的溶蚀产物,主要包括伊利石、高岭石。前人研究表明,根据钾长石和钠

长石发生的溶蚀作用,前期的溶蚀先生成自生粘土矿物高岭石,主要反应方程式如下:



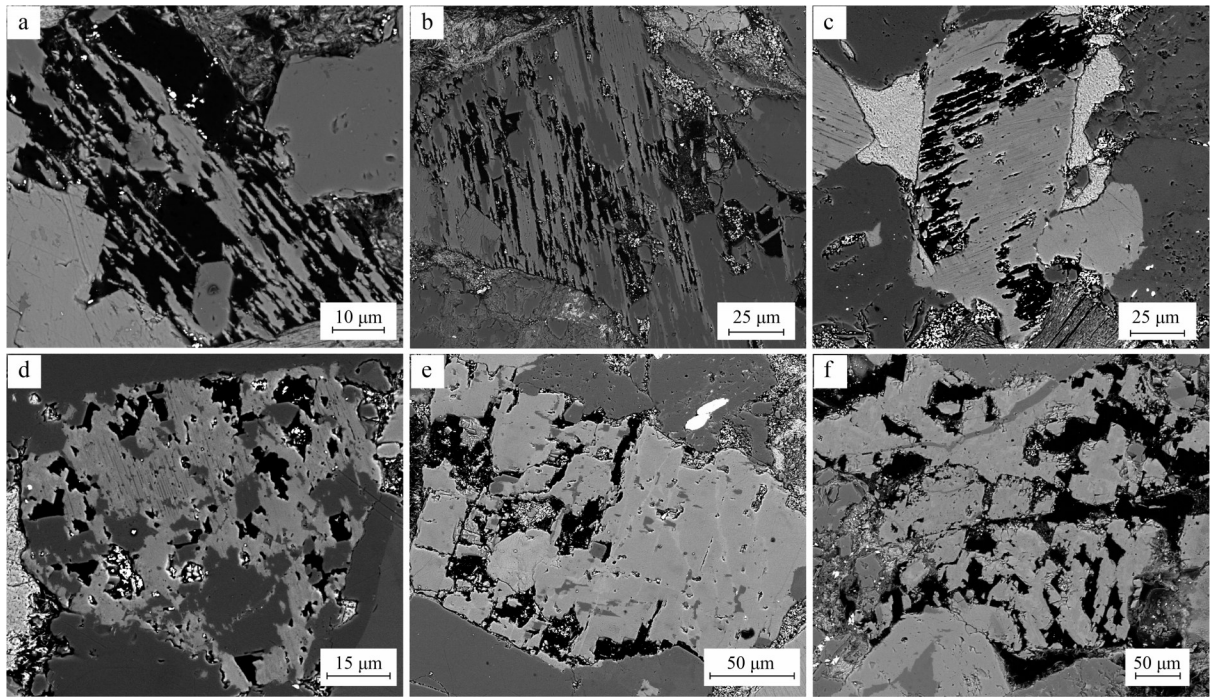
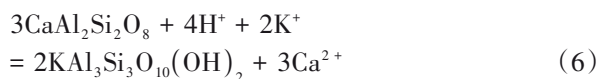
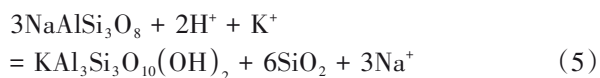
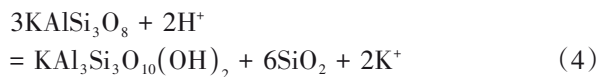


图9 鄂尔多斯盆地华庆地区长⁶亚段致密砂岩储层长石溶蚀微孔FE-SEM照片

Fig. 9 FE-SEM images showing dissolved micro-nano pores in feldspar from the Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin

a. Y284井,埋深2188.08 m,条带状溶蚀孔隙; b. Y295井,埋深2176.71 m,条带状溶蚀孔隙; c. Y284井,埋深2191.30 m,条带状溶蚀孔隙;
d. GJ414井,埋深1978.70 m; e. Y295井,埋深2176.71 m,蜂窝状溶蚀孔隙; f. Y284井,埋深2191.30 m,蜂窝状溶蚀孔隙

随着溶蚀产生的K⁺和Na⁺浓度增加,高岭石逐渐向伊利石转化。钾长石溶蚀沉淀出大量的伊利石,反应方程式如下:



根据质量守恒定律,利用反应关系式中溶蚀反应前后的产物类型和单矿物摩尔体,可得到反应前后的物质体积差,将体积差与总反应体积做比值计算从而

得到理论溶蚀孔隙度。从表2中可以看出,不同类型的长石溶蚀理论孔隙度差异较大,钾长石>钠长石>钙长石^[28-29],当反应产物不同时,同类长石溶蚀孔隙度也存在差异,通常伊利石大于高岭石,计算结果与镜下图像观测结果一致。

3.3 碱性长石溶孔发育程度量化评价方法

论文采用溶蚀强度对长石溶蚀孔隙发育状况进行表征:长石溶孔在总孔隙中占比越大,其对致密储层物性的改善贡献越大,溶蚀强度越大。基于前人研究,结合研究区长石溶蚀状况,将溶蚀强度划分为弱溶蚀(0~15%)、中溶蚀(15%~30%)、强溶蚀(30%~

表2 致密储层长石次生溶孔孔隙度理论计算结果^[24-25]

Table 2 Secondary dissolution porosity of feldspar in the tight sandstone reservoir based on theoretical calculation^[24-25]

矿物类型	长石溶蚀过程反应式	反应前、后矿物体积差/cm ³	参加反应矿物总体积/cm ³	理论溶蚀孔隙度/%
钾长石	初期:1 mol 钾长石→1/2 mol 高岭石+2 mol 石英	-14.05	109.1	12.88
	后期:1 mol 钾长石→1/3 mol 伊利石+2 mol 石英	-16.80	109.1	15.40
钠长石	初期:1 mol 钠长石→1/2 mol 高岭石+2 mol 石英	-5.15	100.2	5.14
	后期:1 mol 钠长石→1/3 mol 伊利石+2 mol 石英	-7.93	100.2	7.91
钙长石	初期:1 mol 钙长石→1 mol 高岭石	-1.40	100.7	1.39
	后期:1 mol 钙长石→2/3 mol 伊利石	-6.97	100.7	6.92

注:单矿物摩尔体积钾长石 109.1 cm³/mol, 钠长石 100.2 cm³/mol, 钙长石 100.7 cm³/mol, 石英 22.7 cm³/mol, 高岭石 99.3 cm³/mol, 伊利石 140.6 cm³/mol。

50%)及极强溶蚀(>50%)。结果如表3所示,长石溶蚀孔贡献率为2.06%~35.20%,平均为13.99%,钾长石通常对溶蚀孔隙的贡献程度更大。鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层的溶蚀强度以弱溶蚀为主,占64.3%,其次为中溶蚀,占28.6%,强溶蚀现象较少,仅占7.1%,并未出现极强溶蚀强度的现象。

表3 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层长石溶孔率与溶蚀强度判定

Table 3 Dissolved porosity contribution and dissolution intensity of feldspar in Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin

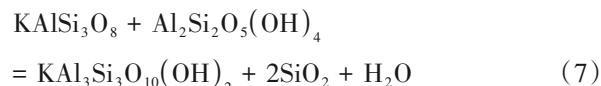
样品 编号	溶孔率/%		总孔隙度/ %	溶孔贡献率/%		总溶孔 贡献率/%	溶蚀强度 判定
	钾长石	钠长石		钾长石	钠长石		
2	0.70	0.33	10.90	6.43	3.03	9.45	弱溶蚀
4	0.60	0.28	5.95	10.14	4.78	14.92	弱溶蚀
7	1.16	0.55	8.84	13.16	6.20	19.37	中溶蚀
11	0.22	0.10	15.38	1.40	0.66	2.06	弱溶蚀
13	0.36	0.17	14.03	2.53	1.19	3.73	弱溶蚀
14	0.79	0.37	7.82	10.15	4.78	14.93	弱溶蚀
16	0.84	0.40	8.00	10.51	4.95	15.46	中溶蚀
17	0.48	0.23	7.49	6.47	3.05	9.52	弱溶蚀
18	1.63	0.77	6.83	23.93	11.28	35.20	强溶蚀
19	0.61	0.29	10.40	5.91	2.78	8.69	弱溶蚀
23	0.27	0.13	8.58	3.18	1.50	4.68	弱溶蚀
25	0.95	0.45	10.70	8.86	4.18	13.04	弱溶蚀
26	1.31	0.62	8.08	16.18	7.63	23.81	中溶蚀
27	1.53	0.72	10.74	14.28	6.73	21.01	中溶蚀

4 讨论

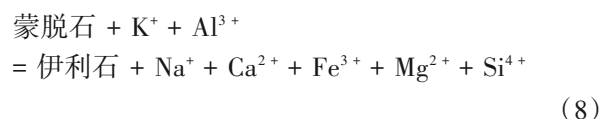
4.1 粘土矿物发育特点与长石溶孔发育程度

研究区样品的自生伊利石含量较高,而高岭石含量普遍较低(图3),说明在钾长石溶蚀过程中,存在高

岭石向伊利石的转化,反应方程如方程式(7)所示,并与方程式(5)有协同作用。



蒙脱石的伊利石化是耗K⁺过程,只要蒙脱石存在,钾长石就会持续溶蚀,而且Na⁺的产生抑制了钠长石的溶蚀作用,产生明显的钠长石次生加大现象,反应过程如下:



而样品中伊/蒙混层含量较高,且主要分布在粒间孔隙的中间部位,说明在长石溶蚀过程中,发生了蒙脱石向伊利石的转化。但其中的自生伊利石比例不大,主要分布在溶蚀孔隙中间和颗粒周边。

通过电镜图像观察和EDS矿物元素面扫分析发现,研究区长石所含的金属元素主要为钠离子和钾离子。根据溶蚀反应方程式,可对钾长石、钠长石反应前、后的体积差进行计算,并得到溶蚀自生矿物与长石溶孔率之间的关系[公式(9),公式(10)]。

$$\frac{\text{自生伊利石含量}}{140.6} = \frac{\text{自生石英含量}}{136.2} = \frac{\text{钾长石溶孔率}}{50.5} \quad (9)$$

$$\frac{\text{自生伊利石含量}}{140.6} = \frac{\text{自生石英含量}}{136.2} = \frac{\text{钠长石溶孔率}}{23.8} \quad (10)$$

图10显示了14个样品的溶孔率理论值计算结果,样品的钾长石溶蚀孔隙率为0.22%~1.63%,平均0.82%,钠长石溶蚀孔隙率为0.10%~0.77%,平均0.39%,且不同样品的结果变化较大。钾长石溶孔对长石溶孔的贡献率高达68%,钠长石溶孔对长石溶孔的贡献率32%,说明钾长石溶孔是研究区溶孔的主体,这与基于图像处理的溶蚀微孔结果基本一致。

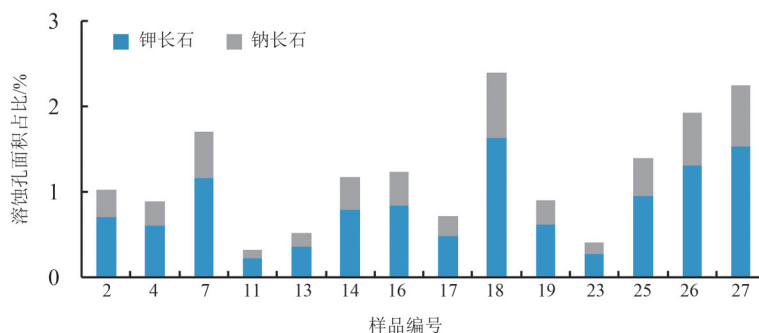


图10 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段致密砂岩储层碱性长石中钾长石和钠长石溶孔率理论计算值

Fig. 10 Theoretically calculated dissolution porosity contribution of orthoclase and albite from Chang-6³ tight sandstone reservoir, Huaqing area, Ordos Basin

4.2 碱性长石溶孔发育程度与储层物性的制约关系

相关性分析结果表明,储层总孔隙度与钾-钠长石溶蚀孔隙的贡献率呈现明显的负相关关系(图 11a—

c)。在样品总孔隙度较大的情况下,碱性长石溶蚀微孔孔隙度贡献率相对较小,说明此类储层粒间孔隙较发育。相反地,当储层致密程度增大,粒间孔减少,此时碱性长石中的溶蚀微孔对储层的改善作用增强(图 11d)。

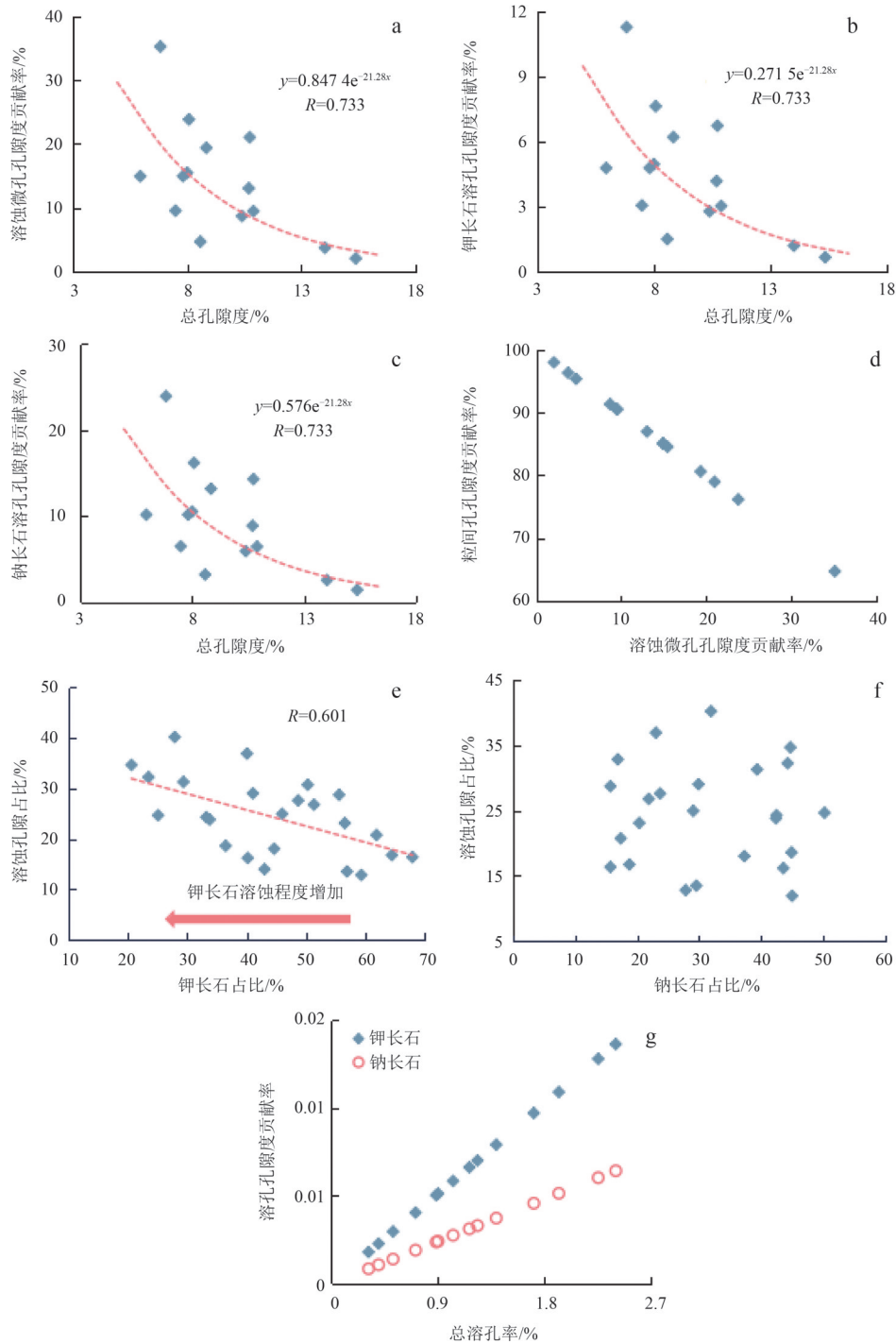


图 11 鄂尔多斯盆地华庆地区长 6³ 亚段碱性长石性质与储层物性相关性

Fig. 11 Correlation analysis between alkali feldspar properties and reservoir physical properties,

Chang-6³, Huaqing area, Ordos Basin

a. 总孔隙度与溶蚀微孔孔隙度贡献率相关关系; b. 总孔隙度与钾长石溶孔孔隙度贡献率相关关系; c. 总孔隙度与钠长石溶孔孔隙度贡献率相关关系; d. 粒间孔孔隙度贡献率与溶蚀微孔孔隙度贡献率相关关系; e. 钾长石占比与溶蚀孔隙占比相关关系; f. 钠长石占比与溶蚀孔隙占比相关关系; g. 总溶孔率与钾长石、钠长石溶孔孔隙度贡献率相关关系

从碱性长石元素组成的角度来看,长石中 K^+ 富集区域面积占比增大时,溶蚀孔隙面积占比随之减小(图11e),而 Na^+ 富集区域面积大小则与溶蚀孔隙面积大小无明显相关性(图11f)。此外,随着溶蚀孔隙度增长,钾长石和钠长石的溶蚀孔隙贡献率都呈现线性增长趋势,但二者的斜率相差较大(图11g),钾长石溶蚀孔隙在总孔隙中占比越来越大,说明钾长石溶孔率贡献度逐渐增加,而钠长石溶孔率贡献度逐渐减小。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段的长石类型以具有 K^+ 和 Na^+ 差异性富集特征的碱性长石为主,电子显微镜下表现为钾长石与钠长石的不同程度混溶。钾长石和钠长石的矿物含量平均值分别为7.6%和30.5%,二者的混溶现象形成波状条纹长石和斑块状条纹长石。

2) 碱性长石溶蚀微孔发育程度与 K^+ 富集区域面积大小呈负相关,说明随着钾长石含量的减小溶蚀程度逐渐增加。理论计算结果也表明钾长石溶孔对长石溶孔的贡献率高达68%,钠长石溶孔对长石溶孔的贡献率只有32%,说明钾长石溶孔是研究区长6³亚段致密砂岩储层碎屑长石颗粒内溶孔的主体。

3) 鄂尔多斯盆地华庆地区长6³亚段碱性长石溶蚀微孔主要由弱溶蚀作用形成,其形态特征取决于钾长石与钠长石的互溶状态及元素分布特征。波状条纹长石多形成条带状孔隙,而斑块状条纹长石多形成蜂窝状孔隙,溶蚀微孔的孔隙度贡献率为2.06%~35.20%,平均为13.99%。

参 考 文 献

- [1] 吴松涛,朱如凯,崔景伟,等. 非常规储层孔隙结构表征:思路、思考与展望[J]. 地质评论, 2020, 66(S1): 151-154.
Wu Songtao, Zhu Rukai, Cui Jingwei et al. Ideas and prospect of porous structure characterization in unconventional reservoirs[J]. Geology Review, 2020, 66(S1): 151-154.
- [2] 朱如凯,吴松涛,苏玲,等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1321-1336.
Zhu Rukai, Wu Songtao, Su Ling, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1323-1336.
- [3] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [4] 贺艳祥,张伟,胡作维,等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组砂岩中长石的溶解作用对储层物性的影响[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 482-488.
He Yanxiang, Zhang Wei, Hu Zuowei, et al. Affect of feldspar dissolution to properties of sandstone reservoir of Chang-8 Oil layer in Jiyuan Area Ordos Basin[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 482-488.
- [5] 于川淇,宋晓蛟,李景景,等. 长石溶蚀作用对储层物性的影响——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 765-770.
Yu Chuanqi, Song Xiaojiao, Li Jingjing, et al. Impact of feldspar dissolution on reservoir physical properties: a case from Dongying Sag the Bohai Bay Basin[J]. Oil Gas Geology, 2013, 34(6): 765-770.
- [6] 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.
- [7] Elizabeth T, Baruch M J, Kennedy S. C., et al. Feldspar dissolution-enhanced porosity in Paleoproterozoic shale reservoir facies from the Barney Creek Formation (McArthur Basin, Australia)[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(9): 1745-1770.
- [8] 康逊,胡文瑄,曹剑,等. 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.
Kang Xun, Hu Wenxuan, Cao Jian, et al. Relation between hydrocarbon bearing fluid and the differential corrosion of potash feldspar and albite: a case study of Baikouquan Formation in Aihou oilfield, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1381-1393.
- [9] 崔景伟,朱如凯. 致密砂岩层内强钙质胶结物成因机制及其意义:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 957-967.
Cui Jingwei, Zhu Rukai. Mechanism of strong calcium cementation in tight sandstone and its significance: A case study on triassic Chang 7 oil Formation of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 957-967.
- [10] 符勇,白玉彬,黄礼,等. 靖边地区长6段致密砂岩储层孔隙结构及影响因素[J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 34-39.
Fu Yong, Bai Yubin, Huang Li, et al. Pore structure and influencing factors of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jingbian area[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1): 34-39.
- [11] 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 Xujiache Formation, Western Sichuan Depression[J]. Geochemica, 2009, 38(5): 498-506.
- [12] 李汶国,张晓鹏,钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220-223.
Li Wenguo, Zhang Xiaopeng, Zhong Yumei. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose[J]. Oil Gas Geology, 2005, 26(2): 220-223.
- [13] 刘翰林,王凤琴,杨友运,等. 西峰油田DZ—ZY地区长8储集层长石溶蚀特征及溶蚀强度计算[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(1): 27-33.
Liu Hanlin, Wang Fengqin, Yang Youyun, et al. Characteristics and intensity calculation of feldspar dissolution in Chang-8 reservoir of district DZ-ZY, Xifeng oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(1): 27-33.

- [14] De Ros L F, Morad S, Sgarbi G N C. Multiple authigenesis of K-feldspar in sandstones: Evidence from the Cretaceous Areado Formation, Sao Francisco basin, central Brazil [J]. *Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes* (United States), 1994, 64(4): 778-787.
- [15] Huang W L, Longo J M. The effect of organics on feldspar dissolution and the development of secondary porosity [J]. *Chemical Geology*, 1992, 98(3-4): 271-292.
- [16] 王琪, 许勇, 李树同, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8致密储层溶蚀作用模拟及其影响因素[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(2): 225-237.
- Wang Qi, Xu Yong, Li Shutong, et al. Dissolution simulation of Chang-8 tight reservoir in Jiyuan area of Ordos basin, China and its influencing Factors [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(2): 225-237.
- [17] 董姜畅, 王爱国, 樊志强, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组长7段致密储层成因及控制因素[J]. *断块油气田*, 2021, 28(4): 446-451.
- Dong Jiangchang, Wang Aiguo, Fan Zhiqiang, et al. Origin and dominated factors of Chang 7 Member tight reservoirs in Yanchang Formation, central Ordos Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(4): 446-451.
- [18] 王永田, 付兴亮, 王一航, 等. 长石溶蚀作用特征及对储层的影响——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长4+5油层组为例[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2017, 14(15): 9-13.
- Wang Yongtina, Fu Xingliang, Wang Yihang, et al. The feature of feldspar dissolution and its influence reservoirs —— by taking Chang4-5 Reservoir of Jiyuan Area in Ordos Basin for example [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)* 2017, 14(15): 9-13.
- [19] Ma B B, Cao Y C, Jia Y C, et al. Feldspar dissolution with implications for reservoir quality in tight gas sandstones: evidence from the Eocene Es⁴ interval, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 150: 74-84.
- [20] Gao Z Y, Feng J R, Cui J G. Physical simulation and quantitative calculation of increased feldspar dissolution pores in deep reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3): 387-398.
- [21] 卢进才, 李玉宏, 魏仙样, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(6): 928-932.
- Lu Jincai, Li Yuhong, Wei Xianyang, et al. Research on the depositional environment and resources potential of the Oil shale in the Chang 7 Member, triassic Yanchang formation in the Ordos basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(6): 928-932.
- [22] 杨华, 付金华, 何海清, 等. 鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 641-648.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin [J]. *Petroleum exploration and Development*, 2012, 39(6): 641-648.
- [23] Zou C N, Wang L. Deep-lacustrine transformation of sandy debrites into turbidites, Upper Triassic, Central China [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 265: 143-155.
- [24] 林传仙, 白正华, 张哲儒. 矿物及有关化合物热力学数据手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Lin Chuanxian, Bai Zhenghua, Zhang Zheru. Handbook of thermodynamic data for minerals and related Compounds [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [25] Andri S. Dissolution of primary minerals of basalt in natural waters. I. Calculation of mineral solubilities from 0 °C to 350 °C [J]. *Chemical Geology*, 2001, 172: 225-250.
- [26] 王林生, 叶义平, 覃建华, 等. 陆相页岩油储层微观孔喉结构表征与含油性分级评价——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 149-160.
- Wang Linsheng, Ye Yiping, Qin Jianhua, et al. Microscopic pore structure characterization and oil-bearing property evaluation of lacustrine shale reservoir: A case study of the Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 149-160.
- [27] 魏赫鑫, 赖枫鹏, 蒋志宇, 等. 延长致密气储层微观孔隙结构及流体分布特征[J]. *断块油气田*, 2020, 27(2): 182-187.
- Wei Hexin, Lai Fengpeng, Jiang Zhiyu, et al. Micropore structure and fluid distribution characteristics of Yanchang tight gas reservoir [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(2): 182-187.
- [28] 王付勇, 程辉. 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩孔喉结构与油藏物性表征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(3): 721-731.
- Wang Fuyong, Cheng Hui. Characterization of Pore Structure and Petrophysical Properties of Tight Sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(3): 721-731.
- [29] 王松, 肖玲. 鄂尔多斯盆地新安边地区长7¹储层特征[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(1): 47-51.
- Wang Song, Xiao Ling. Characteristics of Chang 7¹ reservoir in Xin'anbian area of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(1): 47-51.
- [30] 陈朝兵, 赵振宇, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组6段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1098-1111.
- Chen Zhaobing, Zhao Zhenyu, Fu Ling, et al. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deepwater tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1098-1111.
- [31] 刘池洋, 王建强, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1011-1029.
- Liu Chiayang, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1011-1029.
- [32] 阮昱, 王超, 代超. 华庆地区长6³深水重力流沉积及油气地质意义[J]. *石油地质与工程*, 2020, 34(2): 1-7.
- Ruan Yu, Wang Chao, Dai Chao. Deep water gravity flow sedimentation of Chang 6³ in Huaqing area and its petroleum geological significance [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2020, 34(2): 1-7.
- [33] 任战利, 祁凯, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1030-1042.
- Ren Zhanli, Qi Kai, Li Jinbu, et al. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1030-1042.
- [34] 李易隆, 贾爱林, 冀光, 等. 鄂尔多斯盆地中—东部下石盒子组八段辫状河储层构型[J]. *石油学报*, 2018, 39(9): 1037-1050.
- Li Yilong, Jia Ailin, Ji Guang, et al. Reservoir architecture of braided river in Member 8 of Xiashihezi Formation central-eastern Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(9): 1037-1050.
- [35] Liu P, Wang Z, Zhang Z. A new quantitative approach for element-mineral determination based on "EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) method" [J]. *Geofluids*, 2021: 1-15.