

三塘湖盆地卡拉岗组火山岩风化壳储层微纳米孔隙演变机制及与含油性关系

田伟超^{1,2,3}, 卢双舫^{1,3}, 王伟明^{1,2,3}, 李进步^{1,3}, 李 壮^{1,3}, 李 杰⁴

[1. 中国石油大学(华东) 深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 4. 中国石油 吐哈油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 哈密 839000]

摘要:综合应用铸体薄片、扫描电镜、全岩矿物分析、低温氮气吸附和高压压汞实验对三塘湖盆地卡拉岗组火山岩风化壳储层孔隙结构进行表征,并进一步探讨微纳米孔隙演变机制,同时结合油气显示资料或试油资料揭示孔喉结构对储层含油性的影响。结果表明:火山岩风化壳储层发育溶蚀孔、残余气孔、晶间孔、裂缝四类储集空间;吸附-脱附等温曲线中的回滞环以H2型和近H2型为主,且样品整体退汞效率都很低,在24.26%~44.91%,暗示孔隙形状以墨水瓶型为主;储层孔径主要分布在1 μm以下,局部发育微米级残余气孔和溶孔。火山岩原始矿物组成中辉石含量越低、斜长石含量越高,会导致岩浆期后热液作用阶段形成低含量绿帘石、高含量沸石,后期储层可以得到有效改造,品质变好。Swanson参数及其对应半径(r_{apex})可以很好地揭示储层基质渗透率,且Swanson参数与火山岩风化壳储层含油性关系最好。当Swanson参数大于2时,储层为油层,介于0.86和2之间,表现为差油层,小于0.86时,储层多为干层。Swanson参数可作为指示储层含油性的关键参数,可为有利区的优选提供依据。

关键词:孔隙结构;演变机制;含油性;火山岩风化壳储层;三塘湖盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evolution mechanism of micro/nano-scale pores in volcanic weathering crust reservoir in the Kalagang Formation in Santanghu Basin and their relationship with oil-bearing property

Tian Weichao^{1,2,3}, Lu Shuangfang^{1,3}, Wang Weiming^{1,2,3}, Li Jinbu^{1,3}, Li Zhuang^{1,3}, Li Jie⁴

[1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
4. Exploration and Development Research Institute of Tuha Oilfield Company Ltd., PetroChina, Kumul, Xinjiang 839000, China]

Abstract: Various data including casting thin section, scanning electron microscopy (SEM), XRD whole-rock mineral analysis, low-temperature nitrogen adsorption (LTNA) and high pressure mercury injection (HPMI) experiments are integrated to characterize the micro/nano-scale pore structure of the volcanic weathering crust reservoir in the Kalagang Formation (C_2k), Santanghu Basin, study in-depth the evolution mechanism of micro/nano-scale pores, and reveal the effect of pore throat structure on the oil-bearing property of reservoir in combination with oil/gas shows and formation testing data. The results show as follows. Four types of reservoir space, namely dissolution pores, residual pores, intercrystalline pores and fractures, are recognized in the volcanic weathering crust reservoir. The adsorption-desorption isotherm curves are dominated by hysteresis loops of Type H2 or near Type H2, and the efficiency of mercury ejection is quite low, varying from 24.26% to 44.91%, in samples as a whole, suggesting that the pores are mainly ink-bottle shaped. The reservoir is dominated by a pore size of below 1 μm, with micro-scale residual pores and dissolved pores developed locally. The lower content of pyroxene and the higher content of plagioclase in the original mineral composition of the volcanic

收稿日期:2018-11-29;修订日期:2019-08-12。

第一作者简介:田伟超(1990—),男,博士研究生,非常规油气地质。E-mail:b16010038@s.upc.edu.cn。

通讯作者简介:卢双舫(1962—),男,教授、博士生导师,油气地球化学与非常规油气勘探。E-mail:lushuangfang@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41672125);国家油气重大专项(2017ZX05070-001);中央高校基本科研业务费专项资金项目(18CX06033A)。

rocks, will result in the development of low-content chlorite and high-content zeolite in the post-magmatic hydrothermal stage. Thereafter the volcanic reservoir can be effectively modified and get better in quality. The Swanson parameter and r_{apex} can well demonstrate its matrix permeability. However, the Swanson parameter is closely related with the oil-bearing property of volcanic weathering crust reservoirs. When the Swanson parameter is greater than 2, the reservoirs are the oil layers; when it varies between 0.86 and 2, the reservoirs are poor pay zones; while when it is less than 0.86, the reservoirs are mostly dry layers. In conclusion, the Swanson parameter can be used as a key parameter to indicate the oil-bearing property of reservoir, and provide a basis for play fairway selection.

Key words: pore structure, evolution mechanism, oil-bearing property, volcanic weathering crust reservoir, Santanghu Basin

中国含油气盆地火山岩中蕴含着丰富的油气资源,其石油资源量在 60×10^8 t 以上,但目前火山岩中的油气探明储量较低,是未来油气增长点之一^[1-2]。三塘湖盆地在火山岩中的油气勘探已取得重大进展,近年连续在条湖-马朗凹陷的条湖组、卡拉岗组(C_2k)和哈尔加乌组(C_2h)火山岩勘探中获得重大突破^[3-5]。其中,卡拉岗组油藏属于风化壳型成藏模式,油气聚集在火山岩顶部受风化淋漓作用改造的火山岩风化壳中,此类油藏是目前三塘湖盆地最具潜力的火山岩油藏^[4,6-7]。

前人研究认为火山岩风化壳储层的油气成藏受控于源岩、油源断裂和有利储层,有利储层受控于风化淋滤带和有利岩相带,有利岩相主要为溢流相的顶部亚相^[1,4,6-8]。然而,依据前人的研究成果进行勘探部署,仍然存在单井产量差异大、失利井和低效井多的问题,目前仍未查找到原因,从而制约了风化壳火山油气藏的规模勘探开发。前人更多的把重点放在宏观因素的分析上,却忽视了微观孔喉结构对火山岩风化壳储层含油性及产能的影响。

因此,本文联合全岩矿物分析(XRD)、铸体薄片、扫描电镜(SEM)、低温氮气吸附(LTNA)和高压压汞(HPMI)实验对马朗凹陷卡拉岗组火山岩风化壳储层的微观孔喉结构进行表征,并探讨微纳米孔隙演变机制,进而从微观角度揭示火山岩风化壳储层含油性的控制因素,最终指导研究区火山岩风化壳油藏的勘探。

1 地质概况

三塘湖盆地是在晚古生代基底上发育形成的一个多旋回叠加的残留盆地^[7,9-10],自北向南可分为东北隆起带、中央拗陷带和西南缘逆冲推覆带。中央拗陷带是最为有利的火山岩油气勘探区,其可进一步划分为5个凹陷(即汉水泉、条湖、马朗、淖毛湖和苏鲁克凹

陷)和4个凸起(即石头梅、盆哈泉、方方梁和苇北凸起)^[6-7](图1)。自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系8套地层,各套地层间均为不整合接触^[7]。火山岩油藏纵向上集中在条湖组、卡拉岗组以及哈尔加乌组,其中,马朗凹陷 C_2k 火山岩风化壳油藏是本次的研究对象,岩性主要为杏仁状玄武岩、安山岩以及自碎角砾岩等。马朗凹陷 C_2k 顶部的火山岩风化壳是油气聚集的有效场所,油气来源于下伏 C_2h 暗色泥岩和炭质泥岩(有机碳含量 $TOC=4.58\% \sim 13.4\%$)^[6-7,11]。

2 样品采集与实验方法

本次采集了来自三塘湖盆地马朗凹陷 C_2k 的12块火山岩样品,样品岩性主要为灰色或灰绿色玄武岩和安山岩,个别样品为火山岩角砾岩。岩心观察发现大部分样品气孔构造较为发育,但多数气孔被浊沸石和绿泥石完全充填或半充填,未被充填气孔常含油。火山岩样品孔隙度在 $3.74\% \sim 12.8\%$ 的范围,气测渗透率变化范围较大,介于 $(0.021 \sim 11.15) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度和气测渗透率相关性较差。XRD分析可知,火山岩矿物组成以斜长石、辉石和沸石为主,其次为粘土矿物,石英和碳酸盐矿物较少,仅在个别样品发育(表1)。

所有样品均为规则柱塞(直径约2.5 cm),实验前对所有样品进行了洗油、烘干处理,并依次开展孔隙度和气测渗透率、铸体薄片、SEM、XRD分析、LTNA和HPMI实验。本次采用3H-2000PS4型比表面及孔径分析仪进行LTNA实验,首先在 150°C 下对样品进行脱气5 h预处理,然后在 77 K 温度下用静态体积法获得样品的等温吸附脱附曲线,孔径检测范围为 $0.4 \sim 200\text{ nm}$ 。HPMI实验采用Autopore IV9505压汞仪进行测试,测量环境温度为 21°C 、湿度为44%,实验最高进汞压力为 200 MPa ,对应最小孔喉半径为 3.68 nm 。

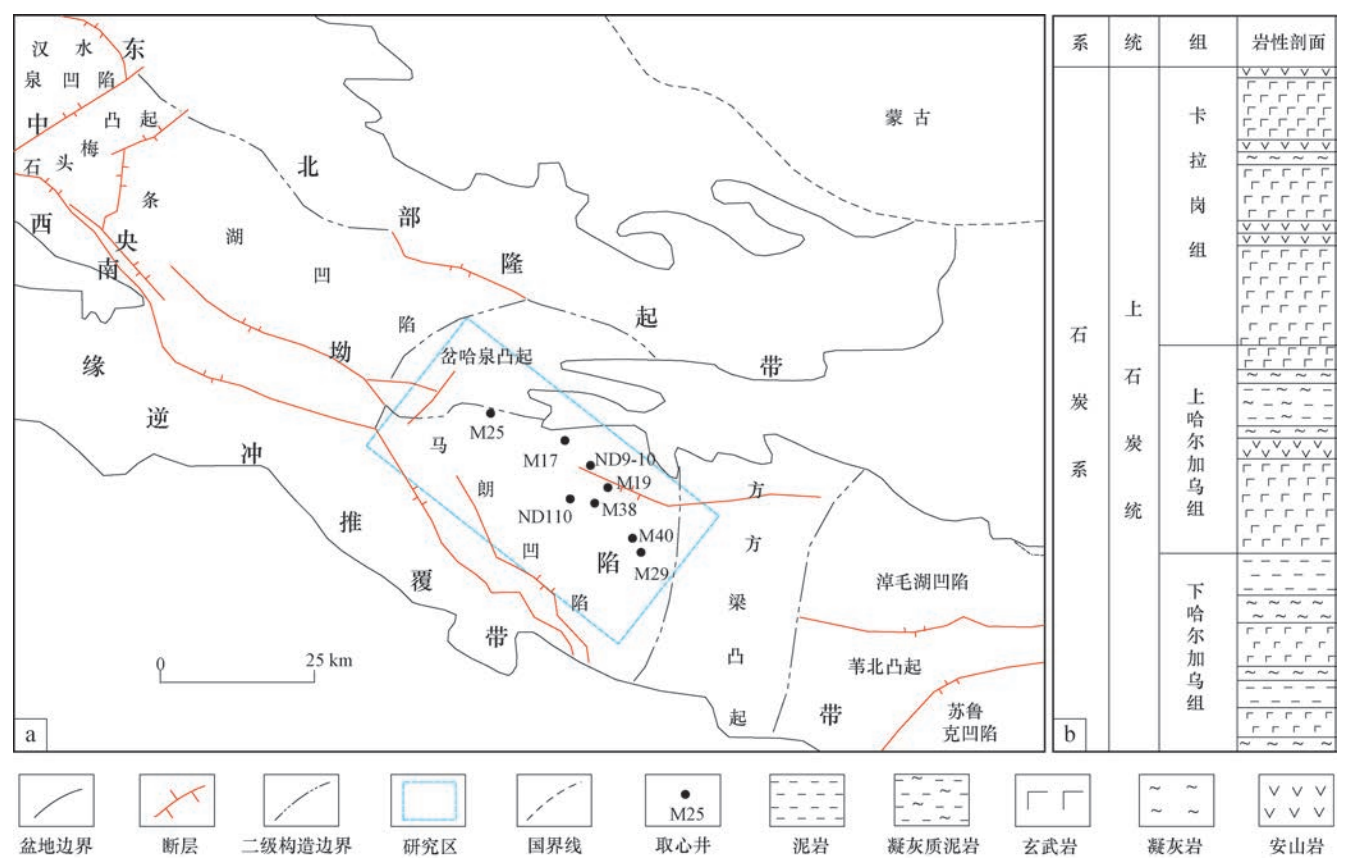


图 1 三塘湖盆地马朗凹陷位置及目的层岩性剖面^[6]
Fig. 1 The location of the Malang Sag in Santanghu Basin, and the lithological section of the target interval^[6]
a. 马朗凹陷位置; b. 目的层位岩性剖面

表 1 三塘湖盆地 C₂k 火山岩风化壳储层样品物性及矿物组成特征
Table 1 Physical properties and mineral composition characteristics of volcanic weathering crust reservoir samples from the C₂k in Santanghu Basin

井号	样号	深度/m	孔隙度/ %	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	矿物相对含量/%							
					石英	斜长石	方解石	铁白云石	菱铁矿	沸石	辉石	粘土矿物
ND110	1	1 781.58	8.31	0.150	1.2	53.6	18.2	1.4	0	6.1	15.8	3.6
M19	2	1 537.22	8.07	0.270	0.8	27.8	0	0	0.5	54.1	7.2	7.1
M38	3	1 775.16	12.78	0.460	1.1	18.4	0	0	0	70.2	5.5	4.8
M38	4	1 684.77	12.80	1.700	7.1	12.2	0	1.2	1.1	49.3	9.2	18.3
ND110	5	1 752.19	5.01	8.810	—	—	—	—	—	—	—	—
M25	6	2 217.92	5.39	1.190	9.8	64.2	0	2.4	0	0	15.5	8.1
ND110	7	1 757.05	6.80	11.150	—	—	—	—	—	—	—	—
M19	8	1 540.53	7.82	0.070	0	15.3	0	0	1.2	55.2	8.0	18.4
ND110	9	1 748.93	7.83	0.260	3.7	83.3	2.7	0	0	0	3.7	6.5
M38	10	1 777.72	7.67	0.021	—	—	—	—	—	—	—	—
M40	11	1 799.92	3.74	0.027	—	—	—	—	—	—	—	—
M29	12	2 442.43	5.11	2.440	—	—	—	—	—	—	—	—

3 火山岩风化壳储层孔喉结构表征

3.1 储集空间类型

综合铸体薄片和 SEM 图像观察发现,火山岩风化壳储层发育溶蚀孔、残余气孔、晶间孔、裂缝四类储集空间。其中,溶蚀孔较为发育,可以分为杏仁体溶孔、斑晶溶孔和基质溶孔 3 种类型,杏仁体溶孔和斑晶溶孔(图 2b,c)孔径较大,多在几十个微米以上,多呈孤立状,而基质溶孔孔径较小,分布在零到几个微米的范围,连通性相对较好(图 2a,h);残余气孔是原生气孔

被沸石、绿泥石等不完全充填而残留的孔隙空间,在研究区也较发育,形状不规则,呈孤立状,孔径多在几十微米以上;晶间孔是自生矿物结晶产生的孔隙(图 2g,i),多为纳米级孔隙;裂缝可分为收缩缝、溶蚀缝等成岩缝和构造缝(图 2e,f),是火山岩被有效溶蚀改造的重要渗流通道。

3.2 LTNA 实验

3.2.1 孔隙形态特征

LTNA 实验结果显示火山岩风化壳储层样品属于 IV 类吸附等温线,在 $P/P_0 > 0.45$ 时存在明显的回滞

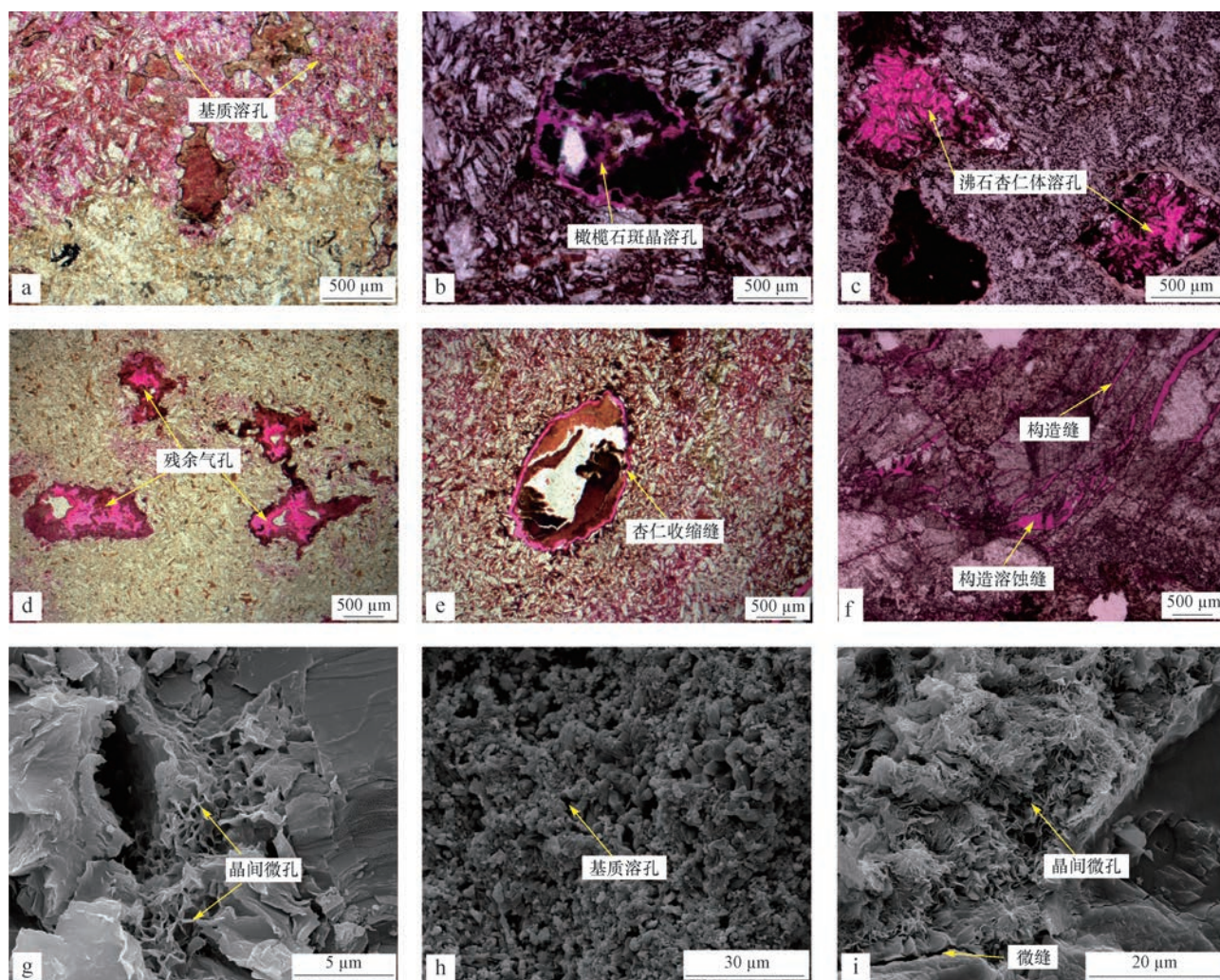


图 2 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳储层孔隙类型

Fig. 2 Pore types of the volcanic weathering crust reservoir in the C_2k in Santanghu Basin

- a. ND110 井,埋深 1 770.56 ~ 1 770.76 m,基质溶孔,铸体薄片单偏光;b. M19 井,埋深 1 525.50 m,橄榄石斑晶溶孔,铸体薄片单偏光;c. M19 井,埋深 1 538.90 m,沸石杏仁体溶孔,铸体薄片单偏光;d. ND110 井,埋深 1 775.26 ~ 1 775.38 m,残余气孔,铸体薄片单偏光;e. ND110 井,埋深 1 777.53 ~ 1 777.68 m,杏仁收缩缝,铸体薄片单偏光;f. M38 井,埋深 1 684.53 ~ 1 684.69,构造缝和构造溶蚀缝,铸体薄片单偏光;g. M38-4 井,埋深 1 684.77 m,晶间微孔,SEM;h. ND110-1 井,埋深 1 781.58,基质溶孔,SEM;i. M38-4 井,埋深 1 684.77 m,粘土矿物晶间微孔和微缝,SEM

环^[12-13]。回滞环的形状可推断多孔介质的孔隙形态,根据国际纯粹与应用化学联合会对回滞环的分类^[12],样品1回滞环属于典型的H3型,回滞环最小,对应孔隙为狭缝型孔,由片状颗粒的非刚性聚集体(如高岭石)形成;样品7、8和9回滞环属于典型的H2型,回滞环最大,对应为墨水瓶型孔;样品4、5和6回滞环与H2型回滞环接近,回滞环较大,反映孔隙以墨水瓶型孔为主;样品2和3回滞环与H3型接近,回滞环较小,反映孔隙以狭缝型孔为主(图3)。因此,从样品1到样品9,小于200 nm的孔隙墨水瓶型孔比例逐渐升高。

3.2.2 比表面积与孔体积特征

不同火山岩样品的比表面积以及总孔体积存在较大差异(表2),比表面积分布在0.58~20.46 m²/g,平均为6.34 m²/g;总孔体积在0.006 4~0.049 3 mL/g,平均为0.0234 mL/g;比表面积和总孔体积整体上呈正相关,孔体积接近的样品,墨水瓶型孔的比例越高,其比表面积越大(表1)。比表面积和孔体积与各矿物

含量关系相似,随石英含量的增加有先增加后减少的趋势,与斜长石和辉石呈负相关关系,与片沸石有一定正相关关系,与粘土矿物和碳酸盐矿物含量关系不明显(图4)。

3.2.3 孔径分布计算模型的选取

BJH模型和DFT模型是利用LTNA实验计算多孔材料孔径分布最广泛的模型,其中BJH模型可利用吸附支或脱附支数据进行孔径分布的计算^[14-16]。本次对不同模型的计算结果进行了对比,以期选取适合计算火山岩孔径分布的模型。从图5可以看出,从样品2~9,利用脱附支计算的孔径分布会在3~8 nm的范围产生一系列峰,而该峰在吸附支BJH模型和DFT模型的计算结果中并未出现,说明该峰是一个假峰。前人研究认为假峰的出现主要是受Tensile Strength Effect(TSE)的影响,而墨水瓶型孔是造成TSE的重要原因^[17],从样品1~9,墨水瓶型孔的比例越来越高,其假峰也越明显。DFT模型与吸附支BJH模型获得孔径

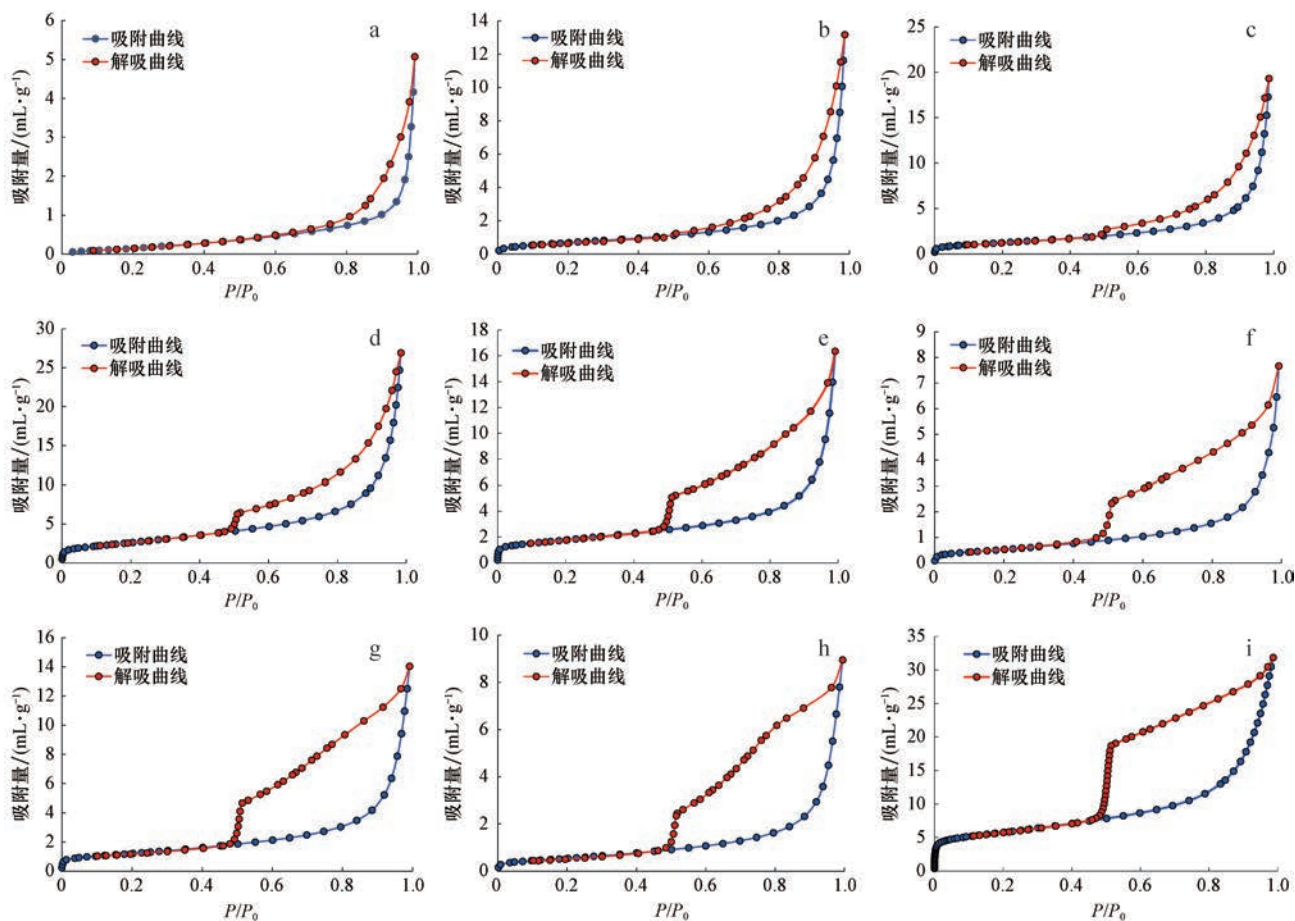


图3 三塘湖盆地C₂k火山岩风化壳储层吸附-脱附等温曲线

Fig. 3 Adsorption-desorption isotherm curves of the volcanic weathering crust reservoir in the C₂k in Santanghu Basin

a. 样品 ND110-1, 油迹玄武岩; b. 样品 M19-2, 荧光安山岩; c. 样品 M38-3, 油迹玄武岩; d. 样品 M38-4, 油斑玄武岩; e. 样品 ND110-5, 荧光火山角砾岩; f. 样品 M25-6, 油迹玄武岩; g. 样品 ND110-7, 玄武岩; h. 样品 M19-8, 油斑安山岩; i. 样品 ND110-9, 荧光玄武岩

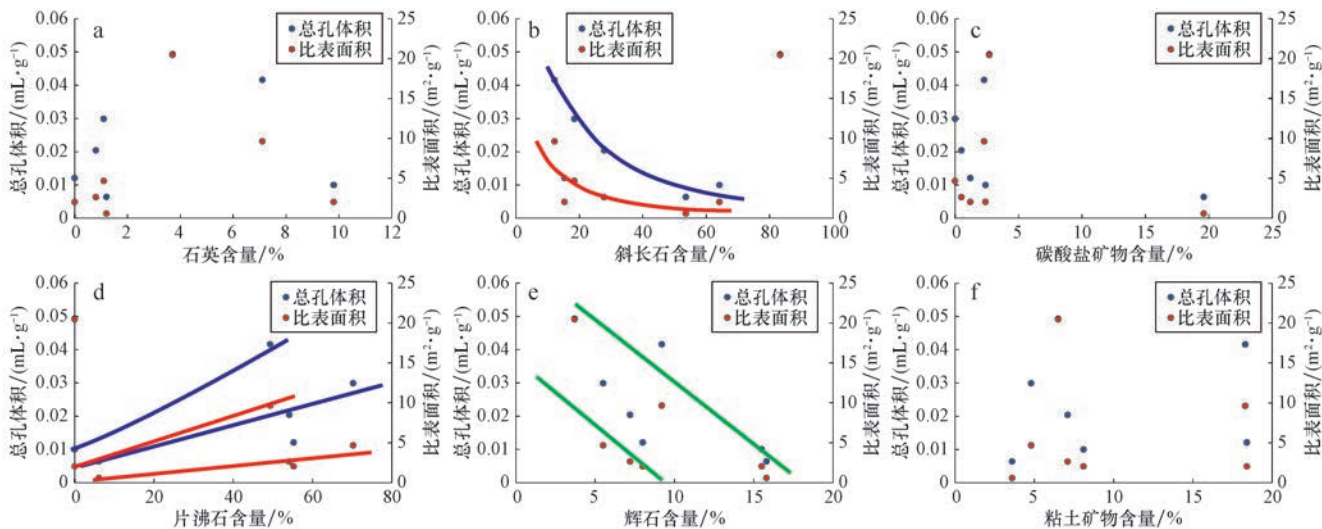


图 4 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳样品各矿物含量与 LTNA 实验获得比表面积、总孔体积的关系

Fig. 4 Mineral contents vs. specific surface area and total pore volume derived from LTNA experiments on the volcanic weathering crust samples taken from the C_2k in Santanghu Basin

a. 石英; b. 斜长石; c. 碳酸盐矿物; d. 片沸石; e. 辉石; f. 粘土矿物

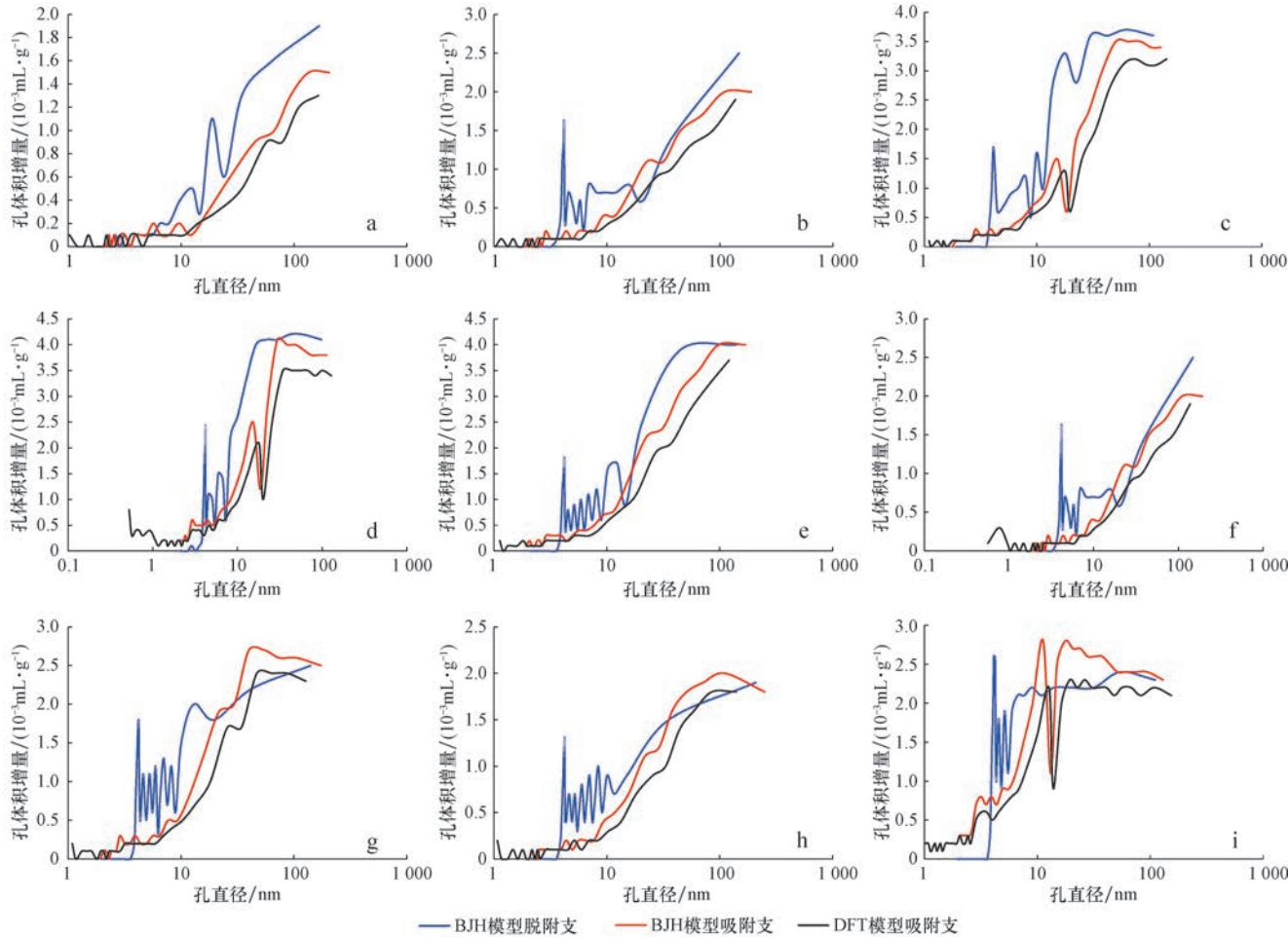


图 5 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳储层基于 LTNA 实验采用不同模型计算孔径分布对比

Fig. 5 The comparison of pore size distributions calculated by different models based on LTNA experiment on the volcanic weathering crust samples taken from the C_2k in Santanghu Basin

a. 样品 ND110-1; b. 样品 M19-2; c. 样品 M38-3; d. 样品 M38-4; e. 样品 ND110-5; f. 样品 M25-6; g. 样品 ND110-7; h. 样品 M19-8; i. 样品 ND110-9

分布总体较为接近,但 DFT 模型在分子水平上描述在狭窄孔道内流体的吸附和相行为,因此,其获得的孔径分布更加准确^[15]。综上,本文采用 DFT 模型计算的孔径分布结果。由图 5 可以看出,利用 DFT 模型计算的孔径分布主要呈半峰和单峰特征,峰位在大于 20 nm 的范围,说明孔体积主要由 20 nm 以上的孔隙贡献。

3.3 高压压汞实验

图 6a 展示了所有样品的进汞-退汞曲线特征,在压力较低阶段(压力<0.1 MPa,对应孔直径>15 μm)仍有部分进汞,进汞饱和度分量多在 7% 左右。根据岩心观察以及铸体薄片裂缝统计结果来看,气孔尺寸多在几十微米甚至毫米级别的大小,微裂缝多在 8~50 μm 的范围(图 2,图 6)。因此,推测这部分进汞可

能与火山岩风化壳储层发育气孔以及微裂缝有关。

由高压压汞曲线可以看出(图 6),进汞曲线可以分为 3 类:一类为样品 1,进汞曲线没有明显的水平段,从 2~200 MPa 为一个缓的斜坡,表明孔喉分选差;第二类包括样品 4 和 9,在 30 MPa 以下存在一个斜坡段,30 MPa 以上是一个近水平段,孔喉分选较差;其余样品为第三类,进汞曲线整体偏向右上方,主进汞段在 30 MPa 以上,近水平,孔喉分选较好,但排替压力明显高于前两类(表 2)。

压汞探测的平均孔隙半径在 7~402 nm,平均为 68 nm(表 2),表明火山岩风化壳储层整体孔喉较小。孔喉与分选系数表现出极好的正相关,说明分选越差,平均孔喉半径越大,这是因为火山岩风化壳储层以小孔喉为主,分选越好,孔喉半径分布越集中在小孔喉,

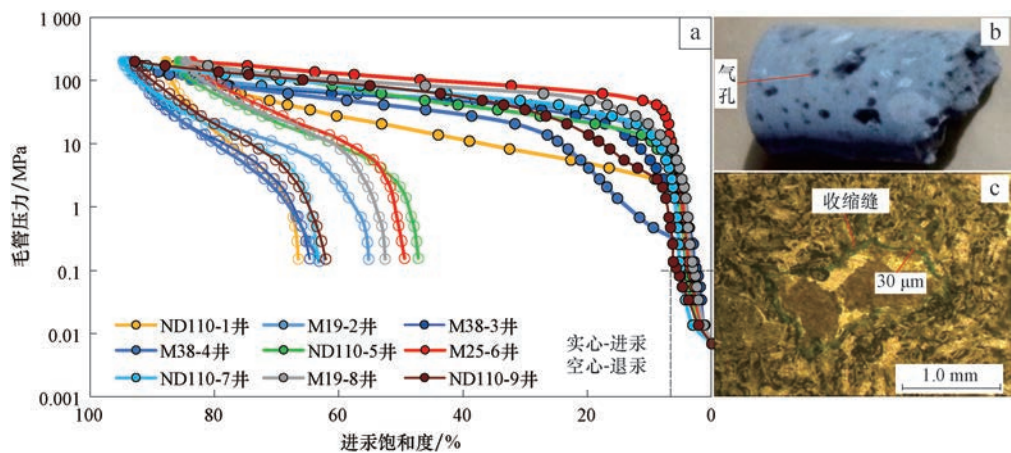


图 6 三塘湖盆地 C₂k 火山岩风化壳储层 HPMI 曲线

Fig.6 HPMI curves of the volcanic weathering crust reservoir in the C₂k in Santanghu Basin
a. 所有样品 HPMI 曲线;b. ND110-1 样品岩心照片;c. M19-2 样品单偏光铸体薄片照片

表 2 三塘湖盆地 C₂k 火山岩风化壳储层 LTNA 和 HPMI 参数

Table 2 Parameters of LTNA and HPMI experiments for the volcanic weathering crust reservoir in the C₂k in Santanghu Basin

井号	样号	深度/m	LTNA 数据			HPMI 数据				
			$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	D_{av}/nm	$V_{\text{N}_2}/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	r_{av}/nm	分选系数	$S_{\text{Hg max}}/\%$	$W_{\text{e}}/\%$	p_{d}/MPa
ND110	1	1 781.58	0.58	53.35	0.006 4	88	2.21	87.80	24.26	2.05
M19	2	1 537.22	2.65	30.81	0.020 4	14	1.11	94.31	41.49	13.79
M38	3	1 775.16	4.68	25.56	0.029 9	14	1.14	93.32	30.71	13.77
M38	4	1 684.77	9.64	17.27	0.041 6	402	2.88	93.47	32.43	0.26
ND110	5	1 752.19	6.32	16.02	0.021 6	17	1.34	85.68	44.91	13.77
M25	6	2 217.92	2.04	23.62	0.010 0	14	0.75	83.61	40.91	41.35
ND110	7	1 757.05	4.34	19.99	0.019 3	12	1.13	94.69	33.10	13.77
M19	8	1 540.53	2.05	26.97	0.012 1	11	1.11	84.63	37.92	13.79
ND110	9	1 748.93	20.46	9.64	0.049 3	44	1.96	92.79	33.08	2.74
M38	10	1 777.72	—	—	—	29	1.61	87.76	32.22	5.50
M40	11	1 799.92	—	—	—	13	1.20	90.62	23.17	13.78
M29	12	2 442.43	—	—	—	457	1.20	92.27	40.51	0.26

注: S_{BET} 、 D_{av} 和 V_{N_2} 分别指 LTNA 实验获得的 BET 比表面积、平均孔直径和总孔体积; r_{av} 、 $S_{\text{Hg max}}$ 、 W_{e} 和 p_{d} 分别指 HPMI 实验获得的平均孔隙半径、最大进汞饱和度、退汞效率和排替压力。

相反,分选越差,孔喉分布范围越宽,大孔喉比例增加,平均孔喉半径也相应增加。样品进汞饱和度高,在83.61%~94.69%,平均值为90.03%,与平均孔喉半径和分选系数均有一定正相关关系。但退汞效率低,在24.26%~44.91%,平均为35.42%(表2),分析发现,平均孔喉半径越大、分选越差,退汞效率越低。前人研究认为多孔介质中未退出的汞多被限制在墨水瓶孔隙中^[18],暗示火山岩的孔喉系统更多的是由墨水瓶型孔组成。

3.4 全孔径分布特征

尝试将LTNA实验和HPMI实验获得的孔径分布进行拼接,以获取火山岩风化壳储层的全孔径分布特征。如何拼接两个实验得到的孔径分布是获得全孔径分布的关键,可根据两个实验的孔径分布变化趋势来确定最佳拼接点。不同实验计算得到的 $dV-d$ 孔径分布变化趋势受实验采样间隔影响较大,本次采用参数 dV/dD

来反映孔径分布的变化趋势,主要因为 dV/dD -孔径分布曲线与任意两个孔径围成的面积代表的是这个孔径范围的孔体积,这样可以消除实验采样间隔对孔径分布变化趋势的影响。

对比LTNA和HPMI在重叠区(7.35~150 nm)的孔径分布(图7)可以看出:在重叠区所有样品的HPMI孔体积远高于LTNA孔体积,这主要是由二者的实验原理不同及特殊的孔隙形状造成的^[19-20]。HPMI获得是喉道大小及其控制的孔隙体积,而LTNA综合表征孔隙和喉道大小分布,从前面的讨论可知,火山岩风化壳储层墨水瓶型孔比较发育,墨水瓶型孔发育导致HPMI获得“瓶颈”(即喉道)范围的孔体积明显高于LTNA,也进一步说明火山岩风化壳储层喉道相对较小,多在100 nm以下。因此,本研究的全孔径分布全部保留了LTNA获得的孔径分布,对于其无法探测的部分采用HPMI数据。

全孔径分布显示火山岩风化壳储层以纳米级孔隙

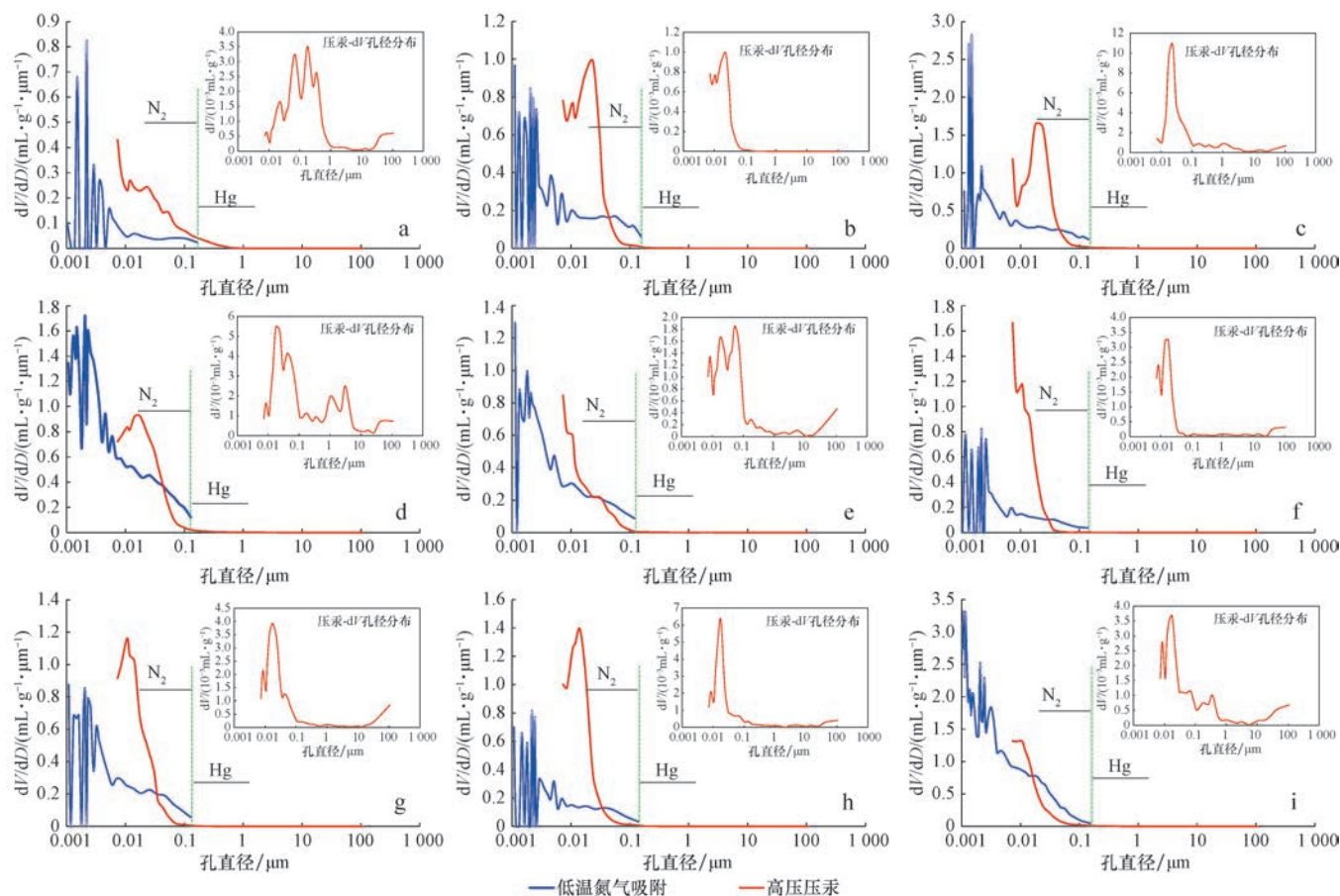


图7 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳储层不同实验孔径分布对比

Fig. 7 The comparison of pore size distributions obtained by different experiments for the volcanic weathering crust reservoir in the C_2k in Santanghu Basin

a. 样品 ND110-1; b. 样品 M19-2; c. 样品 M38-3; d. 样品 M38-4; e. 样品 ND110-5; f. 样品 M25-6; g. 样品 ND110-7; h. 样品 M19-8; i. 样品 ND110-9

为主,然而岩心观察和铸体薄片可见到微米级气孔和裂缝,它们在进汞曲线上表现在低压进汞阶段,其进汞饱和度分量仅有7%左右(图6),对应的孔体积低,但它们孔径范围较宽(几十微米到毫米级),导致在孔径分布上表现为 dV/dD 值极低。

4 讨论

4.1 孔喉结构演变机制

矿物组成的差异导致岩石差异性成岩演化,从而决定了火山岩储层孔隙结构及物性的优劣。研究区火山岩多为基性玄武岩和中性安山岩,矿物成分主要由斜长石、辉石、自生沸石和自生粘土矿物组成。火山岩先后经历了Ⅰ期冷凝成岩阶段、Ⅰ期岩浆期后热液作

用阶段、Ⅰ期风化淋滤作用阶段、Ⅱ期冷凝成岩阶段、Ⅱ期岩浆期后热液作用阶段、Ⅰ期埋藏成岩作用阶段、Ⅱ期风化淋滤作用阶段、Ⅱ期埋藏成岩作用阶段。

冷凝成岩阶段是气孔、收缩缝和自碎缝等原生孔隙(图2d,e和图8e,f)形成的时期。原生气孔孔径相对较大,多为微米—毫米级别,但彼此孤立,连通性较差,很难成为有效储集空间,而收缩缝和自碎缝可成为后期改造过程中的重要渗流通道。

岩浆期后热液作用阶段发生各种热液蚀变作用、水化作用、充填作用和脱玻化作用。其中,火山岩中的辉石组分在碱性环境下易发生蚀变,失去大量 Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,为绿泥石形成提供了物质来源^[21-22],多充填于原生孔隙中(图8a,b),此过程是体积缩小的过程,导致微米级孔隙减少,纳米级孔隙增加。火山玻璃

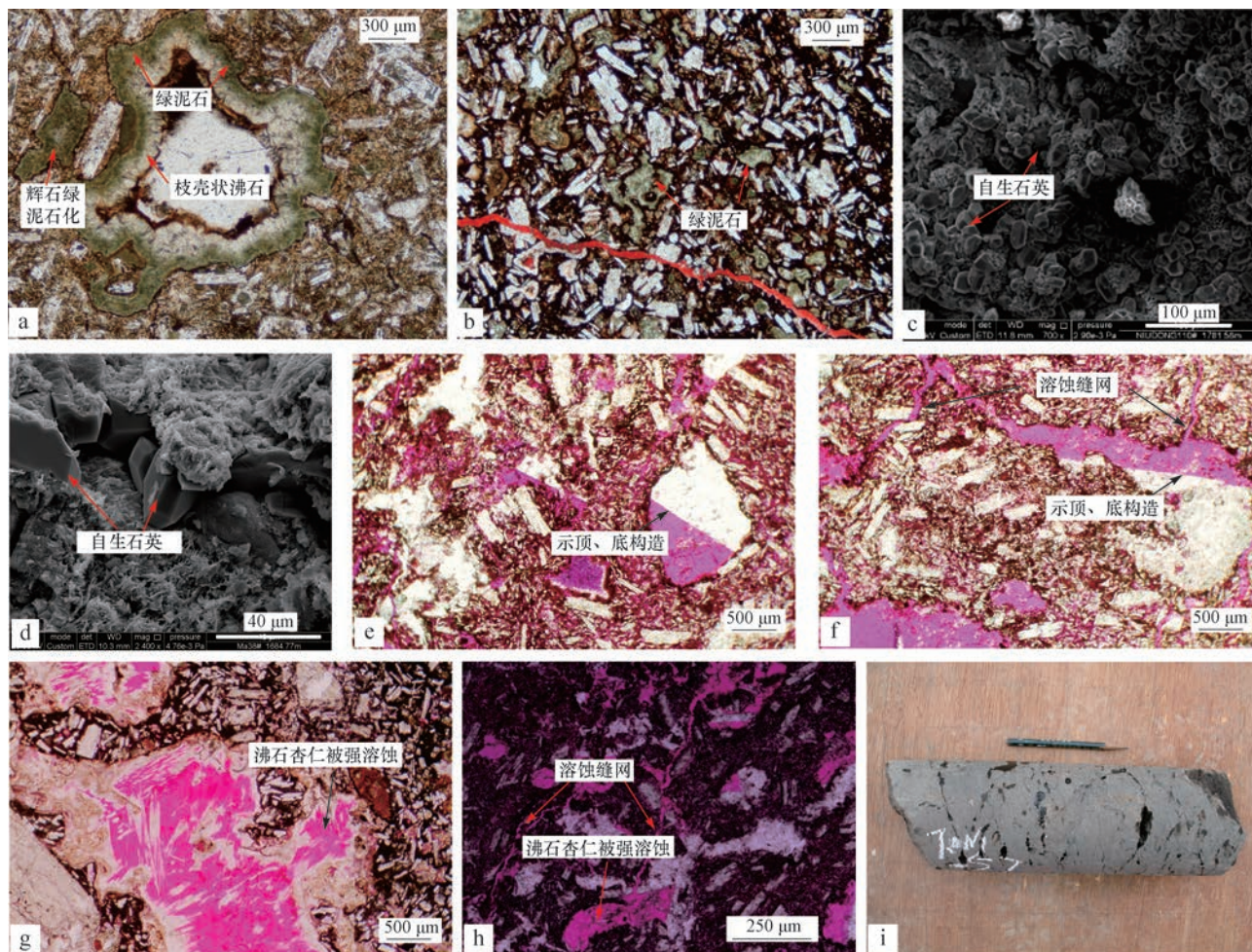


图8 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳储层镜下主要成岩作用

Fig. 8 The major diagenesis of the volcanic weathering crust reservoir in the C_2k under SEM in Santanghu Basin

a. M19井,埋深1540.42 m,辉石和斜长石均发生不同程度蚀变,见绿泥石和沸石充填气孔,普通薄片单偏光;b. M19井,埋深1565.75 m,绿泥石充填气孔,普通薄片单偏光;c. ND110井,埋深1781.58 m,自生石英,SEM;d. M38井,埋深1684.77 m,自生石英,SEM;e. ND9-10井,埋深1555.21 m,示顶、底构造,铸体薄片单偏光;f. ND9-10井,埋深1555.21 m,示顶、底构造,铸体薄片单偏光;g. ND9-10井,埋深1433.1 m,浊沸石杏仁被强烈溶蚀,铸体薄片单偏光;h. ND9-10井,埋深1555.15 m,沿溶蚀缝网的沸石杏仁体溶孔,铸体薄片单偏光;i. ND9-10井,埋深1464.45~1464.75 m,低角度网状缝及孔洞组合,岩心照片

质或斜长石晶体水化和蚀变会产生的大量 SiO_2 及 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 等离子,在 pH(9.1~9.9) 较高及适当的 CO_2 分压时^[22-24],这些离子会从溶液中沉淀形成沸石充填于原生孔隙中(图 8a,f,g),此过程是体积增加的过程,造成微米原生孔隙迅速降低。在火山岩发生碱性热液蚀变后,会在碱性蚀变层位之上排硅形成次生石英(图 8c,d),导致微米级孔隙降低,同时产生一些纳米级石英晶间孔,造成孔隙度降低^[25]。由图 9d

也可以看出,石英与孔隙度具有一定负相关关系。该阶段总体上以充填作用为主,使火山岩中的微米级原生孔隙数量减少以及孔径变小,同时在蚀变和充填的过程中纳米级孔隙的比例在增加,总体表现为孔隙度和渗透率降低。

风化淋滤作用阶段: C_2k 火山岩风化壳主要形成于两个阶段:①由于 C_2k 火山岩为陆上喷发形成,在火山喷发结束至下一期火山喷发之前(即间歇期),暴露

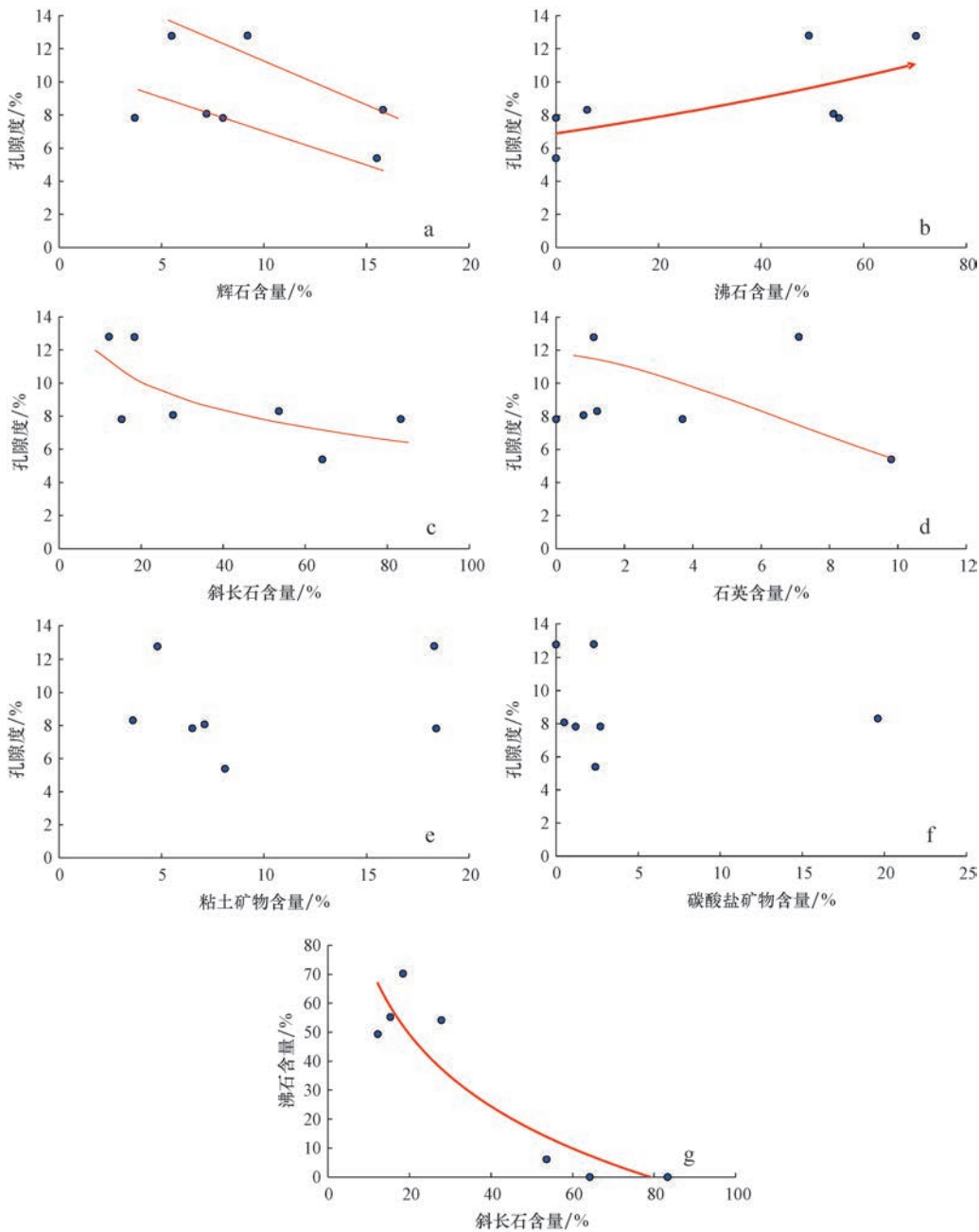


图9 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳储层各矿物含量与孔隙度关系及斜长石与沸石含量关系

Fig. 9 Relationships between porosity and mineral contents of the volcanic weathering crust reservoir in the C_2k in Santanghu Basin

a—f 分别为辉石、沸石、斜长石、石英、粘土矿物及碳酸盐矿物含量与孔隙度关系;g 斜长石与沸石含量关系

于地表,火山岩遭受风化淋滤;②在中-晚三叠世受区域挤压应力控制,马朗凹陷局部抬升,在半干旱气候下,经受沉积间断,使 C_2k 火山岩遭受风化淋滤。风化淋滤作用使火山岩储集性能明显改善,形成火山岩风化壳储层。火山岩风化壳可划分为5层结构,从上往下依次为粘土层、水解带、淋滤带、崩解带和母岩,其中淋滤带储层物性最好,其次为崩解带,均可成为有效储层^[3-4,8,11,26-28]。因此,距离风化面的远近直接影响储层物性的好坏。由图10可以看出,渗透率和距风化壳顶面距离没有明显关系,而孔隙度随着距离的增加先增大后减小。上述现象也证实了火山岩风化壳分层结构的存在,其中有效储层大致发育在距离风化壳顶面18~63 m的范围,但不同井略有不同,如ND9-10井,其有效储层主要发育在距离风化壳顶面18~40 m的范围,主要是因为不同井所处构造位置不同,遭受风化淋滤的程度存在差异。同时,同一口井在距风化壳顶面相近的火山岩物性也有很大差异,这可能与火山岩原始组分有差异导致。前面分析可知,斜长石蚀变可以生成沸石,辉石蚀变易形成绿泥石,然而在风化淋滤作用下沸石易遭受溶蚀形成次生溶蚀孔隙(图2c和图8g,h),而绿泥石较难改造(图8a,b)^[22,27]。由图9可以看出,研究区火山岩孔隙度与辉石和斜长石含量呈明显负相关,与沸石具有极好的正相关关系,同时斜长石与沸石展现出极

好的负相关性,说明沸石溶蚀是火山岩储层品质改善的关键,且沸石主要是由斜长石蚀变形成。同时,基质的普遍溶蚀(图2a,h),形成了大量纳米级孔隙,对孤立的气孔、斑晶溶孔等起到了很好的沟通作用。

埋藏成岩作用阶段是火山岩随周围沉积物一起埋藏所经历的各种物理、化学变化, C_2k 火山岩埋深多小于2 000 m,属于浅埋成岩阶段,火山岩经历了压实作用、胶结作用、烃类充注和有机酸的弱溶蚀作用等。此阶段压实作用对火山岩物性影响不大,胶结作用在一定程度上损害了储层的物性,但早期沸石及方解石胶结为晚期风化淋滤作用提供了物质基础。 C_2k 火山岩的油源来自于 C_2h 炭质泥岩^[6,29],其生成的有机酸多被紧邻的 C_2h 火山岩消耗。因此,相对于风化淋滤作用, C_2k 火山岩受有机酸溶蚀改造比较微弱。

综上,火山岩原始矿物组分中,辉石含量越低、斜长石含量越高,在岩浆期后热液作用阶段形成低含量绿泥石和高含量沸石,为后期火山岩有效溶蚀改造提供了物质基础,使储层品质变好,这一关系与矿物组成与LTNA总孔体积的关系具有相似性,侧面反映了火山岩风化壳储层以纳米级孔隙为主。

4.2 孔喉结构与含油性关系

对于样品5和7气测渗透率很高,大于 $8 \times$

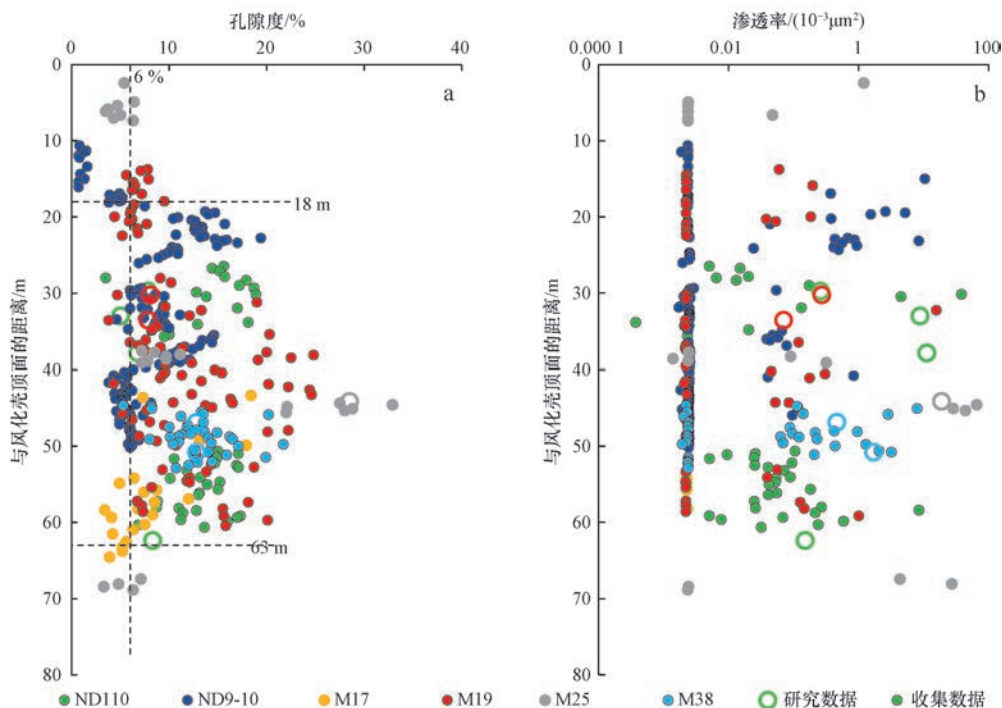


图10 三塘湖盆地 C_2k 火山岩风化壳储层物性和与风化壳顶面距离的关系

Fig. 10 The relationship between physical properties of the volcanic weathering crust reservoir in the C_2k and the distance from the top surface of weathering crust in Santanghu Basin

a. 孔隙度;b. 渗透率

表3 三塘湖盆地C₂k火山岩风化壳储层样品所在地层含油性特征
Table 3 Oil-bearing properties of the intervals from which the volcanic weathering crust reservoir samples were collected in the C₂k in Santanghu Basin

井号	样号	岩性	深度/m	录井解释	测井解释	试油结果	含油性综合分析
ND110	1	灰色油迹玄武岩	1 781.58	油层	油层	油、水同层	
M19	2	灰绿色荧光安山岩	1 537.22	油层	差油层	干层(含油)	
M38	3	灰色油迹安山岩	1 775.16	差油层	差油层	差油层	
M38	4	灰色油斑玄武岩	1 684.77	油层	油层	油层	
ND110	5	灰色荧光火山角砾岩	1 752.19	干层	差油层	未试油	
M25	6	灰色油迹玄武岩	2 217.92	差油层	差油层	低产含油、水层	
ND110	7	灰色玄武岩	1 757.05	干层	差油层	未试油	
M19	8	灰绿色油斑安山岩	1 540.53	油层	差油层	干层(含油)	
ND110	9	灰绿色荧光玄武岩	1 748.93	干层	差油层	未试油	
M38	10	灰色油迹安山岩	1 777.72	差油层	差油层	差油层	
M40	11	灰色荧光火山角砾岩	1 799.92	差油层	干层	未试油	
M29	12	灰色荧光角砾岩	2 442.43	油层	油层	低产油层	

$10^{-3} \mu\text{m}^2$,但录井和测井解释均为非油层,而样品1和4气测渗透率较低,试油结果却为油层(表3),这一现象与常识明显不符。这主要是因为部分火山岩样品成岩缝和构造缝较为发育(图2e,f),导致气测渗透率远高于基质渗透率,而基质渗透率的高低控制着储层供油能力,即基质渗透率越高,储层成为油层的概率越大。因此,如何评价基质渗透率的高低成为判定储层能否成为油层的关键。

借助压汞实验,前人将 S_{Hg}/p_c 的最大值称为Swanson参数,对应的孔隙半径为 r_{apex} 。Swanson参数假设所有控制渗透率的连通孔隙在此点已被汞完全充满^[30-31],

该点对应的 r_{apex} 是小尺寸且连通不好的孔喉到大尺寸且连通性好的孔喉的转折点^[30,32]。同时,前人研究发现Swanson参数和 r_{apex} 均与渗透率呈现极好的正相关性,常用它们来校正未修正的气测渗透率^[31,33]。因此,可以利用Swanson参数和 r_{apex} 来反映基质渗透率的高低。

如图11所示,在 S_{Hg}/p_c 与 S_{Hg} 的曲线图中的顶点对应的 S_{Hg}/p_c 值即Swanson参数,并把获得的 r_{apex} 标定到累计渗透率贡献曲线上发现:大于 r_{apex} 的孔喉对渗透率的累计贡献均在85%以上,且 r_{apex} 越大,这部分孔隙占总孔体积的比例越小,说明储层品质越好,少量连通的大孔喉就对储层渗透率有很大贡献,而储层品质

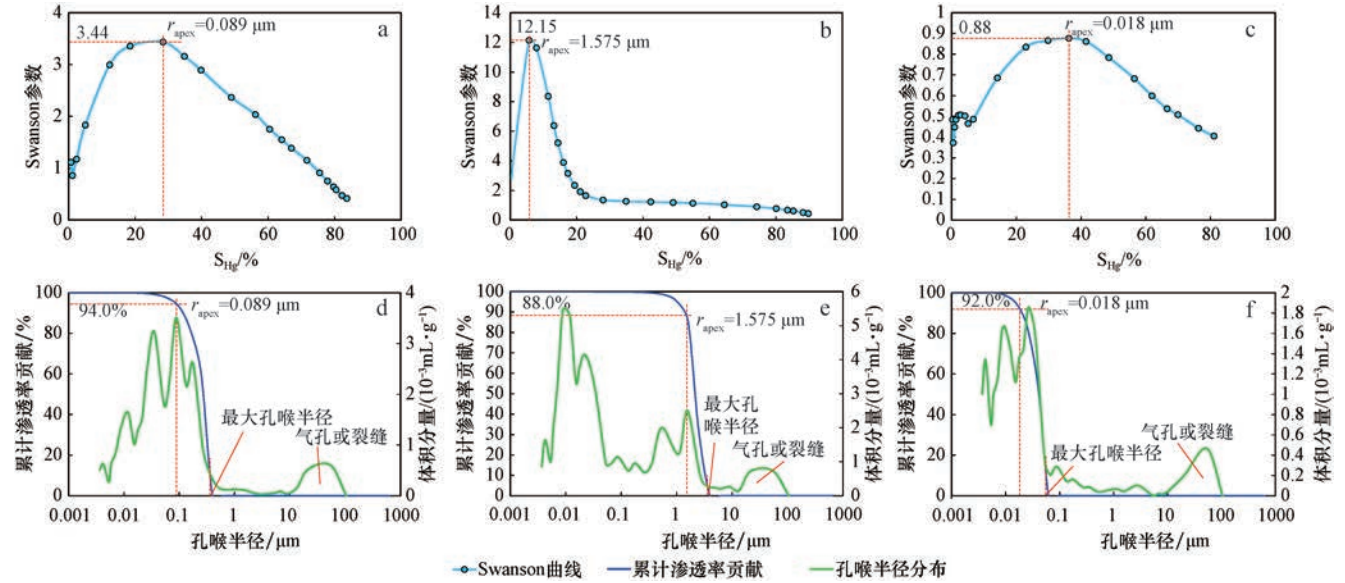


图11 三塘湖盆地C₂k火山岩风化壳储层Swanson曲线、累计渗透率贡献曲线及孔喉半径分布

Fig. 11 Swanson curves, cumulative permeability contribution curves, and the pore throat radius distribution of the C₂k crust reservoir weathered in Santanghu Basin

a—c. 分别为 S_{Hg}/p_c 与 S_{Hg} 的关系图;d—f. 孔喉半径对渗透率贡献图;a和d为样品ND110-1;d和e为样品M38-4,c和f为样品ND110-5

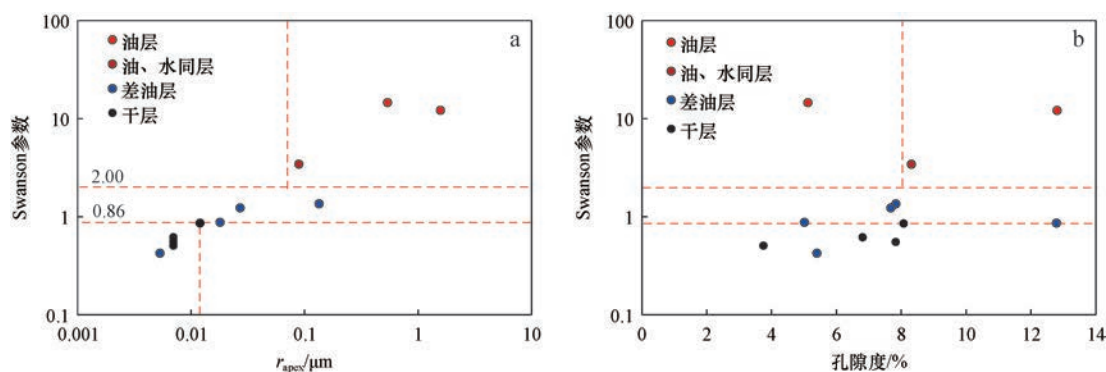


图12 三塘湖盆地不同含油产状火山岩风化壳储层 Swanson 参数与 r_{apex} (a) 和孔隙度 (b) 关系

Fig. 12 Swanson curves, r_{apex} and porosity characteristics of the volcanic weathering crust reservoir with different oil-bearing occurrences in Santanghu Basin

越差,以小孔喉系统为主体,这部分孔喉需累计足够多的体积 (>35%) 才能形成有效渗流网络。

从上面的分析可知,Swanson 参数和 r_{apex} 均能很好地反映基质渗透率的大小。如图12所示,Swanson 参数与火山岩风化壳储层含油性关系最好,其次是 r_{apex} ,而孔隙度与风化壳储层含油性的关系最差。分析可知, r_{apex} 仅反映了储层的渗流特征,无法体现储层的储集能力,孔隙度则相反;而 Swanson 参数反映的是 S_{Hg}/p_c 的最大值,里面既包含了孔径信息 (p_c) 又考虑了孔体积信息 (S_{Hg}),因此,与火山岩风化壳储层含油性关系最好。分析发现,当 Swanson 参数大于2时,储层为油层或油水同层;Swanson 参数介于0.86和2之间时,表现为差油层;Swanson 参数小于0.86时,储层多为干层。综上,Swanson 参数可作为指示储层含油性的关键参数,可为有利区的优选提供指导作用。

5 结论

1) 火山岩风化壳储层主要发育溶蚀孔、残余气孔、晶间孔、裂缝四类储集空间,孔隙形态上表现为以墨水瓶型孔为主,孔径上以纳米孔隙为主。

2) 火山岩风化壳储层品质的优劣及微纳米储集空间的演变是其原始矿物组成和成岩作用共同作用的结果。冷凝成岩阶段是微米级原生孔隙大量发育的阶段,但孔隙较为孤立;岩浆期后热液作用阶段是微米级原生孔被大量充填和纳米孔隙增加的时期;风化淋滤作用阶段火山岩得到有效改造,此过程形成大量的微纳米溶隙,使火山岩成为有效储层。

3) 火山岩渗透率受基质和裂缝双重控制,Swanson 参数和 r_{apex} 可以很好地揭示基质渗透率的高低。

其中,Swanson 参数与火山岩风化壳储层含油性具有极好的相关性,其值越大,储层含油性越好。

参 考 文 献

- [1] 李光云. 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩油藏形成条件与主控因素[D]. 北京:中国地质大学(北京)能源学院,2010.
Li Guangyun. The forming condition and the key controlling factor of the upper Carboniferous volcanic oil pool in Malang Sag of Santanghu Basin [D]. Beijing China University of Geosciences (Beijing): School of Energy Resources,2010.
- [2] 董国栋,张琴,朱筱敏,等. 火山岩储层研究现状及存在问题——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统火山岩为例[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):511-519.
Dong Guodong, Zhang Qin, Zhu Xiaomin, et al. Current status and problems of volcanic reservoir study: an example from the Lower Permian volcanic rocks in Ke-Xia area of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology,2012,33(4):511-519.
- [3] 李森明,陈凤来,漆万珍,等. 马朗凹陷下二叠统风化壳特征与油气成藏关系[J]. 新疆石油地质,2007,28(5):554-556.
Li Senming, Chen Fenglai, Qi Wanzhen, et al. Relationship between weathering crust characteristics and hydrocarbon accumulation of Lower Permian in Malang Sag, Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology,2007,28(5):554-556.
- [4] 刘俊田,朱有信,李在光,等. 三塘湖盆地石炭系火山岩油藏特征及主控因素[J]. 岩性油气藏,2009,21(3):23-28.
Liu Juntian, Zhu Youxin, Li Zaiguang, et al. Characteristics and controlling factors of volcanic reservoir of Carboniferous in Santanghu Basin [J]. Lithologic Reservoirs,2009,21(3):23-28.
- [5] 李光云,毛世权,陈凤来,等. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩油藏主控因素及勘探方向[J]. 中国石油勘探,2010,15(1):11-15.
Li Guangyun, Mao Shiquan, Chen Fenglai, et al. Key controlling factors and exploration direction of volcanic reservoir in Kalagang Formation of Malang Sag in Santanghu Basin [J]. China Petroleum Exploration,2010,15(1):11-15.
- [6] 黄志龙,柳波,罗权生,等. 三塘湖盆地马朗凹陷石炭系火山岩系油气成藏主控因素及模式[J]. 地质学报,2012,86(8):1210-

- 1216.
- Huang Zhilong, Liu Bo, Luo Quansheng, et al. Main controlling factors and models of Carboniferous volcanic hydrocarbon accumulation in the Malang Sag, Santang Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(8): 1210 – 1216.
- [7] 郑曼, 吴晓智, 李建忠, 等. 三塘湖盆地火山岩油藏特征与成藏过程分析 [J]. *地质科学*, 2013, 48(4): 1246 – 1257.
- Zheng Man, Wu Xiaozhi, Li Jianzhong, et al. Characteristics of volcanic reservoir and process of petroleum entrapment in Santanghu Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(4): 1246 – 1257.
- [8] 宋明水, 赵乐强, 吴春文, 等. 准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构及其控藏作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(3): 313 – 321.
- Song Mingshui, Zhao Leqiang, Wu Wenchun, et al. Structure and reservoir-controlling of top Carboniferous weathering crust in Chepai-zi area, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(3): 313 – 321.
- [9] 朱伯生, 冯建新, 胡斌, 等. 对三塘湖盆地基底的认识 [J]. *新疆石油地质*, 1997, 18(3): 197 – 200.
- Zhu Bosheng, Feng Jianxin, Hu Bin, et al. An understanding of the basement of Santanghu Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology* 1997, 18(3): 197 – 200.
- [10] 刘兴旺, 郑建京, 杨鑫, 等. 三塘湖盆地及其周缘地区古生代构造演化及原型盆地研究 [J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(6): 947 – 954.
- Liu Xingwang, Zheng Jianjing, Yang Xin, et al. Paleozoic structural evolution of Santanghu Basin and its surrounding and prototype basin recovery [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(6): 947 – 954.
- [11] 侯连华, 王京红, 邹才能, 等. 火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例 [J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 557 – 568.
- Hou Lianhua, Wang Jinghong, Zou Caineng, et al. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: an example from the Carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 557 – 568.
- [12] Sing K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4): 603 – 619.
- [13] 王民, 关莹, 李传明, 等. 济阳坳陷沙河街组湖相页岩储层孔隙定性描述及全孔径定量评价 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1107 – 1119.
- Wang Min, Guan Ying, Li Chuanming, et al. Qualitative description and full-pore-size quantitative evaluation of pores in lacustrine shale reservoir of Shahejie Formation, Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1107 – 1119.
- [14] Esparza J M, Ojeda M L, Campero A, et al. Development and sorption characterization of some model mesoporous and microporous silica adsorbents [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2005, 228(1–2): 97 – 110.
- [15] Klimakow M, Klobes P, Rademann K, et al. Characterization of mechanochemically synthesized MOFs [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, 154: 113 – 118.
- [16] 侯宇光, 何生, 易积正, 等. 页岩孔隙结构对甲烷吸附能力的影响 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 248 – 256.
- Hou Yuguang, He Sheng, Yi Jizheng, et al. Effect of pore structure on methane sorption potential of shales [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 248 – 256.
- [17] Groen J C, Peffer L A A, Pérez-Ramírez J. Pore size determination in modified micro- and mesoporous materials. Pitfalls and limitations in gas adsorption data analysis [J]. *Microporous and mesoporous materials*, 2003, 60(1–3): 1 – 17.
- [18] Kaufmann J, Loser R, Leemann A. Analysis of cement-bonded materials by multi-cycle mercury intrusion and nitrogen sorption [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 336(2): 730 – 737.
- [19] Adesida A G, Akkutlu I, Resasco D E, et al. Characterization of barnett shale kerogen pore size distribution using DFT analysis and grand canonical monte carlo simulations [C]//SPE annual technical conference and exhibition. Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011: 1 – 14.
- [20] Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion [J]. *Fuel*, 2013, 103: 606 – 616.
- [21] 杨金龙, 罗静兰, 何发歧, 等. 塔河地区二叠系火山岩储集层特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(4): 44 – 47.
- Yang Jinlong, Luo Jinglan, He Qifa, et al. Permian volcanic reservoirs in the Tahe region [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(4): 44 – 47.
- [22] 林潼, 焦贵浩, 孙平, 等. 三塘湖盆地石炭系火山岩储层特征及其影响因素分析 [J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(4): 513 – 517.
- Lin Tong, Jiao Guihao, Sun Ping, et al. Characteristic and influencing factors of carboniferous volcanic reservoirs in Santanghu Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(4): 513 – 517.
- [23] 孙玉善. 克拉玛依油区沸石类矿物特征及其与油气的关系 [J]. *岩相古地理*, 1993, 13(2): 37 – 48.
- Sun Yushan. Mineralogical characteristics of zeolite minerals and their bearings to the reservoir beds in the Karamay oil field [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1993, 13(2): 37 – 48.
- [24] 陈亦寒, 刘大锰, 魏喜, 等. 海外河油田东营组自生沸石的发现成因及其地质意义 [J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(4): 54 – 56.
- Chen Yihan, Liu Dameng, Wei Xi, et al. Discovery and origin of the diagenetic zeolite in Dongying Formation of Haiwaihe Oilfield and its geo-logical significance [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(4): 54 – 56.
- [25] 柳成志, 于海山, 吕延防, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩油气储层特征及其形成机理 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2012, 37(s1): 134 – 142.
- Liu Chengzhi, Yu Haishan, Lv Yanfang, et al. Volcanic oil and gas reservoir characteristics and formation mechanism in Kalagang Formation of Malang Sag in Santanghu Basin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 2012, 37(s1): 134 – 142.