

苏里格地区致密砂岩矿物组成与微观结构及其对水力压裂的潜在影响

李培月, 何晓东, 周长静, 解永刚, 史 华

Mineral compositions and microstructural characteristics of the tight sandstone reservoir in the Sulige area and their potential influence on hydraulic fracturing

LI Peiyue, HE Xiaodong, ZHOU Changjing, XIE Yonggang, and SHI Hua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

吉木萨尔超排液氢氧同位素特征及地下水含量计算

Investigation of the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of the excess fracturing flowback fluid and calculation of groundwater content in the Jimsar Sag

贾俊, 王亮, 孟云涛 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 10–18

黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势

Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level

范文, 魏亚妮, 于渤, 邓龙胜, 于宁宇 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 144–156

上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153–160

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156–156

冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing–thawing cycles

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 96–105

滑带土蠕变过程及微观结构演化分析

Creep process and the microstructural evolution of sliding –zone soil

周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 祝艳波, 宋飞 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 115–121



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211048

李培月, 何晓东, 周长静, 等. 苏里格地区致密砂岩矿物组成与微观结构及其对水力压裂的潜在影响 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 1-11.

LI Peiyue, HE Xiaodong, ZHOU Changjing, *et al.* Mineral compositions and microstructural characteristics of the tight sandstone reservoir in the Sulige area and their potential influence on hydraulic fracturing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 1-11.

苏里格地区致密砂岩矿物组成与微观结构及其对 水力压裂的潜在影响

李培月^{1,2,3}, 何晓东^{1,2,3}, 周长静^{4,5}, 解永刚^{4,5}, 史 华^{4,5}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 (长安大学), 陕西 西安 710054; 3. 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室 (长安大学), 陕西 西安 710054; 4. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 5. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018)

摘要: 致密砂岩气是重要的非常规天然气资源, 致密砂岩储层的矿物组成特征与孔隙微观结构不仅会影响致密储层中天然气的赋存状态, 同时也对水力压裂改造效果具有重要影响。然而, 有关致密砂岩矿物成分及其微观赋存形态对气井水力压裂潜在影响的研究尚不充分, 针对这一问题, 文章以鄂尔多斯盆地苏里格地区主开采层——二叠系下石盒子组盒 8_下段致密砂岩为研究对象, 钻取 5 口气井岩心样品, 利用 XRF、XRD、铸体薄片、SEM 及 EDS 能谱等技术系统分析了该段致密砂岩矿物组成、微观形貌、孔隙分布等储层特征。基于分析结果, 探讨了上述储层特征因素对水力压裂的潜在影响。研究发现, 苏里格地区盒 8_下段致密砂岩主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩, 密度介于 2.44 ~ 2.56 g/cm³ 之间, 孔隙度为 7.7% ~ 12.6%, 渗透率为 0.16 ~ 1.42 mD, 属于典型的低渗透气藏。矿物成分主要为石英和黏土矿物, 而长石矿物和碳酸盐矿物含量极低。其中黏土矿物含量占比为 16.5% ~ 47.4%, 以高岭石、伊利石和绿泥石为主。高岭石在该区致密砂岩中广泛发育, 呈书页状和蠕虫状填充于粒间孔隙及粒表, 形成大量高岭石晶间孔。此外, 致密砂岩中粒间孔隙、粒内溶孔、粒间裂隙及粒内缝均有发育, 为致密砂岩气的赋存提供了良好的储集空间。矿物分析以及压裂液致密砂岩水岩实验结果显示黏土矿物稳定性对于苏里格地区致密砂岩气水力压裂效果至关重要, 尤其是易分散运移的高岭石和伊利石矿物。水力压裂前需要对储层矿物成分及地层水成分展开详细研究, 选择合适的黏土稳定剂优化水力压裂。

关键词: 致密砂岩; 微观形貌; 黏土矿物; 水力压裂; 苏里格气田

中图分类号: P641.4; P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0001-11

Mineral compositions and microstructural characteristics of the tight sandstone reservoir in the Sulige area and their potential influence on hydraulic fracturing

LI Peiyue^{1,2,3}, HE Xiaodong^{1,2,3}, ZHOU Changjing^{4,5}, XIE Yonggang^{4,5}, SHI Hua^{4,5}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory

收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2023-01-08

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072286; 41761144059); 陕西省科技厅秦创原队伍建设项目 (2022KXJ-005); 中国石油科学研究与技术开发项目 (2021DJ2015)

第一作者: 李培月 (1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境水文地球化学方面的教学与科研工作。

E-mail: lipy2@163.com; peiyueli@chd.edu.cn

of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Regions of the Ministry of Education(Chang'an University), Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Key Laboratory of Eco-Hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of the Ministry of Water Resources(Chang'an University), Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 5. Oil and Gas Technology Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

Abstract: Tight sandstone gas is an important unconventional natural gas resource. Mineral characteristics of the tight sandstone not only affect the occurrence of gas, but also have a significant impact on the hydraulic fracturing effectiveness. The potential influence of tight sandstone mineral compositions and microscopic morphology on gas reservoir during hydraulic fracturing was seldom examined. In this study, five tight sandstone gas wells in the Sulige gasfield located in the Ordos Basin were drilled. The core samples of the 8th formation of the lower member of the Permian Shihezi Group (He 8) were collected. The mineral characteristics, microstructure and pore feature of the tight sandstone are systematically analyzed by using XRF, XRD, casting thin section, SEM and EDS technologies and the potential effects of the above factors on hydraulic fracturing are discussed. The results show that the tight sandstone is mainly composed of lithic sandstone and lithic quartz sandstone. The density of the tight sandstone ranges from 2.44 to 2.56 g/cm³, the porosity from 7.7% to 12.6%, and the permeability from 0.16 to 1.42 mD. The mineral compositions are mainly quartz and clay minerals (16.5%–47.4%), and feldspar and carbonate are absent. Kaolinite, illite and chlorite are the main clay minerals. Kaolinite is widely developed, filling the intergranular pores and surface in the forms of “booklets” and worm-like. The intergranular pores, intragranular solution voids, intergranular and intragranular fractures occur in the tight sandstone, which provide basic reservoir space for natural gas. The results of mineral analysis and fracturing fluid-tight sandstone interactions reveal that the stability of clay minerals, especially kaolinite and illite, are crucial for hydraulic fracturing in the Sulige gasfield. It is necessary to understand the mineral compositions and formation water of the tight reservoir and select the appropriate clay stabilizer to optimize hydraulic fracturing.

Keywords: tight sandstone; microstructure; clay minerals; hydraulic fracturing; Sulige gasfield

进入 21 世纪,以致密油气、页岩油气、煤层气和重油为代表的非常规油气得到了迅速发展。目前,致密砂岩气已成为全球非常规油气勘探开发的重要能源领域之一^[1-2]。我国的致密砂岩气工业起步相对较晚,但发展较快,目前已成为世界第三大致密砂岩气产气国。2020 年致密砂岩气年产量已达 $4.7 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 占全国天然气总产量的 24.4%^[3-4]。借鉴北美非常规油气勘探经验和压裂工艺,我国致密砂岩气开发已在四川盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地、塔里木盆地、渤海湾、吐哈盆地等地区取得了一定突破。这些地区的致密砂岩气虽然已经取得了一定产量规模,但研究和认识程度仍然相对较低。此外,我国地质背景与国外相比存在较大差异,表现为多旋回构造演化,岩相变化大,地层分布不稳定、压力系数变化大以及储层非均质性强的特点^[1,4-5]。这就决定了我国致密砂岩气

开发不能照搬国外水力压裂开发模式。鄂尔多斯盆地是目前我国第二大含油气盆地,同时也是我国最大的致密砂岩气生产基地,其上古生界资源量占我国陆上致密砂岩气总资源量的 60% 以上^[4]。位于鄂尔多斯盆地的苏里格气田是目前我国已发现的最大陆上整装气田,随着 2000 年苏里格气田的发现,开启了我国致密砂岩气的快速发展之路^[4-5]。苏里格地区致密砂岩储层具有低渗、低压、低丰度的特点,一般无工业产能,而水力压裂和水平井技术的应用使致密砂岩气的开采从经济角度成为可能,因此水力压裂的成败直接关系到致密砂岩气井天然气的产出^[6]。

前人对苏里格气田的沉积环境、地质条件、气水关系、储层物性以及成岩过程等进行了较为全面的研究^[7-12],为苏里格气田的成功开发提供了诸多理论与实践指导。然而,对致密砂岩气藏的储层条件(尤其

是储层矿物)进行充分的认识是致密砂岩气压裂技术研发及优化的重要前提。目前针对苏里格地区致密砂岩,仍缺少对储层矿物特征的详细表征以及矿物成分及其微观赋存形态对气井水力压裂潜在影响方面的研究。基于此,本文借助X射线荧光光谱(XRF)、X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS)、铸体薄片等测试分析手段,综合分析了苏里格气田主力气层盒8_下段储层岩石矿物、微观形貌及孔隙分布特征,同时开展了压裂液与致密砂岩水岩相互作用实验。从微观尺度上,进一步明确了致密砂岩矿物微观特征对水力压裂过程的潜在影响,为苏里格

气田致密砂岩气精细化水力压裂提供理论基础。

1 研究区概况

苏里格气田位于我国第二大沉积盆地鄂尔多斯盆地西北部,横跨伊陕斜坡和伊盟隆起两大构造单元,勘探面积约5×10⁴ km²。北部隶属于内蒙古自治区,地貌类型为风沙滩地,地势相对平坦,海拔1 200~1 350 m;南部位于陕西省,地貌类型为黄土台塬,沟壑纵横、梁峁交错,海拔1 100~1 400 m(图1)。截至2018年底,致密砂岩气探明储量为1.64×10¹² m³[13]。

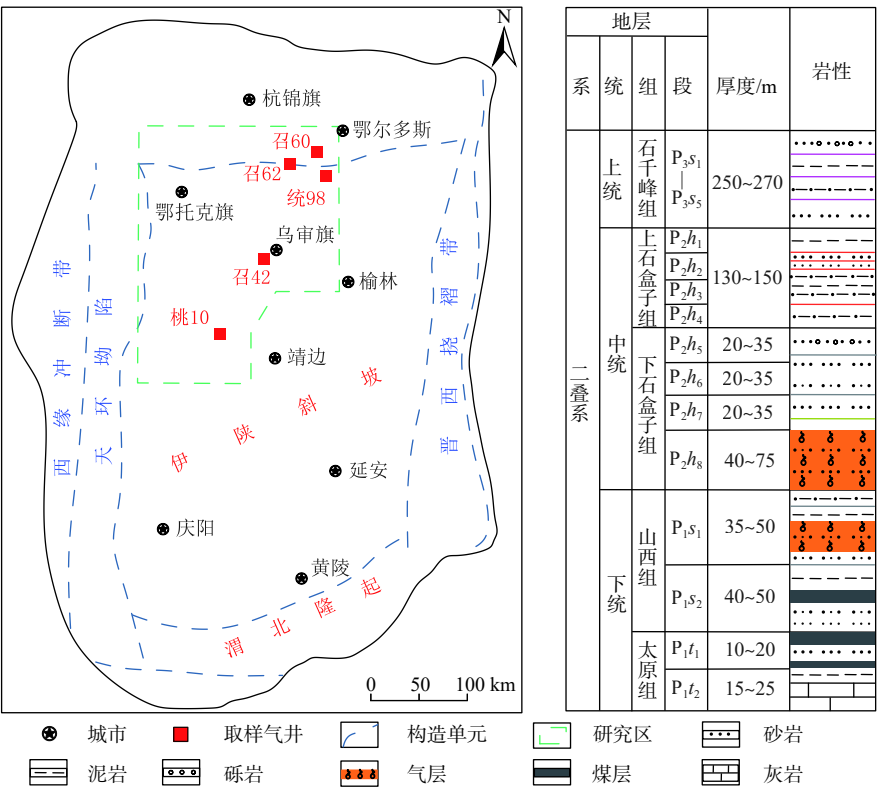


图1 研究区位置及取样井分布
Fig. 1 Location of the study area and samples

苏里格气田上古生界地层中发现了丰富的致密砂岩气,主力产气层为二叠系下统山西组一段和中统下石盒子组八段(图1)。储层埋深2 800~3 700 m。山西组可分为P₁S₂和P₁S₁2段。P₁S₂发育一套含煤地层,为灰色、灰褐色中-细粒砂岩混合黑色泥岩,厚度约40~50 m。P₁S₁段砂岩为中-细岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,厚度约为40 m。石盒子组可进一步划分为下石盒子组 and 上石盒子组。下石盒子组由一套浅灰色含砾粗砂岩、灰白色中-粗粒砂岩和灰绿色岩屑石英

砂岩组成。砂岩中发育大型互层,泥岩、煤层较少。厚度一般为120~160 m。上石盒子组为一套红色泥岩与砂质泥岩互层,厚度范围为140~160 m[14-16]。下石盒子组中,P₂H₈段是主力产气层,又可分为2个亚段P₂H_{8上}与P₂H_{8下}。P₂H₈段总体孔隙度为6%~12%,渗透率为0.1~1.0 mD,属于典型的低渗透气藏[17-18]。苏里格气田含气储层地层水溶解性总固体为29.12~68.30 g/L(平均为48.37 g/L),属高矿化度的氯化钙型水。pH值为5.0~6.0,呈弱酸性。地层环境反映了储

层有利于烃类成藏及保存^[19]。

2 样品采集与分析

在苏里格气田中选取召 60、召 62、统 98、召 42、桃 10 共 5 口代表性气井,采集了苏里格气田主力含气层盒 8_下段储层岩心样品。岩心取样井深度为 2 800 ~ 3 500 m,取样井分布如图 1 所示。岩心属灰白色中-粗粒石英砂岩和浅灰色含砾中-粗粒岩屑石英砂岩。将取回的岩心编号后,进行低温烘干,利用 X 射线荧光光谱仪(NITON XL2)对每块岩心不同部位进行元素成分测试。测试元素包括 Ba、Zr、Sr、Rb、Zn、Fe、Mn、Cr、V、Ti、Ca、K 等 28 种元素。然后将各井岩心粉碎至 2 ~ 5 mm 烘干,混合均匀后取 10 g 样品研磨后过 200 目筛($\phi=0.075$ mm),利用 X 射线荧光光谱仪和 X 射线衍射仪(D/max-2500)对岩心平均元素含量和矿物组成分别进行测定。采用场发射扫描电镜(TESCAN MIRA3)和铸体薄片测试岩心样品的微观形貌和孔隙分布,并对部分岩心微观区域进行 EDS 能谱面扫分析。此外,为了进一步验证致密砂岩储层矿物对水力压裂的潜在影响,利用致密砂岩样品与研究区常用的水力压裂液体系——胍胶压裂液,开展了压裂液与致密砂岩水岩相互作用实验。将粉碎的块状岩心样品 15 g 放入 60 mL 压裂液中进行浸泡处理,并对压裂液处理后岩心样品微观形貌进行扫描电镜测试。

表 1 储层岩心主要元素含量

Table 1 Main elements of the reservoir core

/(mg·kg⁻¹)

样品编号	Zr	Sr	Rb	Zn	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Ca	K
桃10	183.6	71.95	51.43	44.48	24 028	216.1	<LOD	50.81	2 384	3 261	15 949
召42	426.0	112.30	97.93	42.34	31 273	350.0	33.76	114.6	7 667	2 316	32 037
统98	218.9	84.50	58.42	33.52	19 717	397.2	<LOD	<LOD	3 607	14 964	21 756
召60	131.8	82.16	29.92	39.58	16 930	1 429.0	<LOD	36.85	1 812	50 787	9 202
召62	279.8	128.40	103.00	71.20	29 066	272.1	<LOD	104.7	4 542	5 527	39 314

注: <LOD表示低于检出限。

3.2 致密砂岩矿物成分

XRD 衍射结果显示,致密砂岩中矿物种类相对单一,5 口井岩心矿物主要由石英(45.9% ~ 81.6%)和黏土矿物(16.5% ~ 47.4%)组成(表 2)。黏土矿物主要为伊利石(3.9% ~ 27.3%)、高岭石和绿泥石(10.9% ~ 31.8%),而易膨胀的蒙脱石矿物未被检出。长石类矿物含量低,仅在召 42 井中发现少量钾长石(0.2%)和斜长石(0.2%),召 60 井中发现少量方沸石矿物。碳酸盐矿物主要以方解石为主,含量普遍较低(0.4% ~ 1.0%),但存在较大的空间差异性,召 60 井中方解石含量高

3 致密砂岩矿物组成

3.1 致密砂岩元素组成

岩心化学元素组成测试发现同一气井不同深度岩心元素含量存在较大差异,同时空间上 5 口井岩心化学组成也存在明显差异,表明储层致密砂岩岩石矿物分布存在明显的非均质性。储层岩心中主要检出元素如表 1 所示。5 口井储层岩心平均元素含量主要表现为 Ca 与 K 2 种元素存在较大差异。受方解石矿物影响,召 60 井中 Ca 元素含量最高,K 含量最低。Fe 元素主要受绿泥石和赤铁矿含量控制,总体差异较小。硅酸盐矿物中 Sr 通常含量较低,而碳酸盐矿物富含 Sr^[21]。受矿物成分影响,致密砂岩中 Sr 含量分布为 71.95 ~ 128.4 mg/kg,其含量远低于研究区内富含碳酸盐的白垩系常规砂岩(180 ~ 725 mg/kg)^[20]。Rb 主要以类质同象形式分散于含 K 矿物中(如钾长石),在水岩相互作用过程中释放出的 Rb 也易于进入含钾的黏土矿物(如伊利石),导致大部分 Rb 会保留在原地^[21-22]。因此,致密砂岩中 Rb 含量与 K 具有很好的相关性。而 Sr 在长期的水岩作用过程中多以溶解 Sr²⁺的形式由岩石迁移到地层水中,导致致密砂岩中 Sr 含量与 Ca 具有较差的相关性,同时导致地层水中具有高的 Sr²⁺含量^[23]。

达 18.0%,而其余 4 口井方解石含量均未超过 1.0%。此外,赤铁矿普遍存在于致密砂岩中,但含量均低于 1.0%。总体而言,致密砂岩与常规砂岩矿物种类大体相同,但致密砂岩中黏土矿物含量明显高于常规砂岩,表现为高石英和黏土矿物,低碳酸盐和长石矿物的特点。

4 微观结构特征

4.1 矿物形貌与赋存方式

与 XRD 矿物成分测试结果相一致,铸体薄片及扫

表 2 储层岩心矿物组成

Table 2 Mineral compositions of the reservoir core								/ (wt%)
样品编号	石英	斜长石	钾长石	方解石	伊利石	绿泥石+高岭石	赤铁矿	方沸石
桃10	74.6	—	—	0.4	4.2	19.8	1.0	—
召42	65.6	0.2	0.2	0.4	9.8	22.9	0.9	—
统98	81.6	—	—	1.0	5.6	10.9	0.9	—
召60	45.9	—	—	18.0	3.9	31.8	—	0.4
召62	51.5	—	—	0.4	27.3	20.1	0.7	—

描电镜下观察到的矿物类型主要有石英、高岭石、伊利石和绿泥石,少量黄铁矿和方解石矿物,未发现明显的蒙脱石和伊蒙互层矿物。大量黏土矿物填充在石英粒表、粒间及粒内孔隙中(图 2—3)。XRD 矿物成分测试中,由于绿泥石与高岭石在 X 射线衍射谱图中具有接近的特征衍射峰($d=0.715 \sim 0.718 \text{ nm}$),不易区分。而铸体薄片和扫描电镜照片显示致密砂岩中高岭石含量高于绿泥石(图 2—3)。高岭石矿物发育是苏里格气田下石盒子组盒 8 段最为重要的特征。

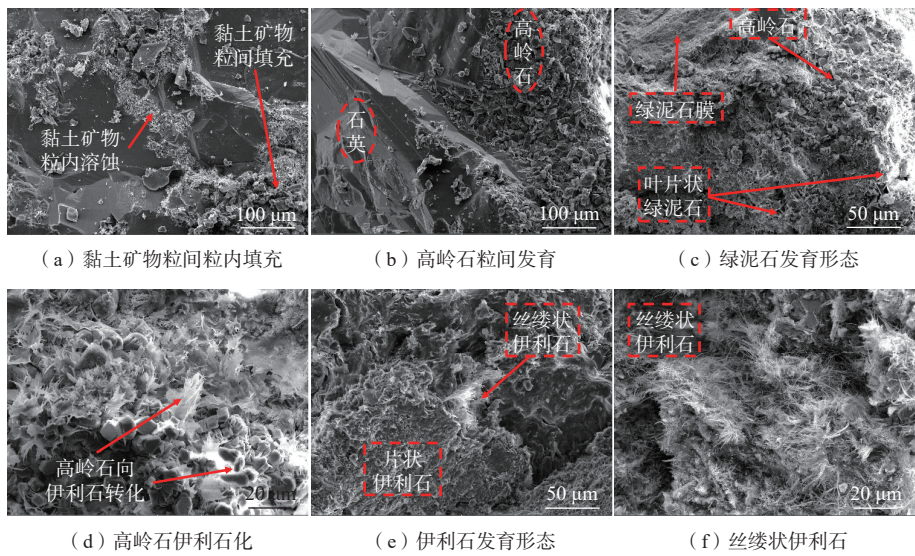
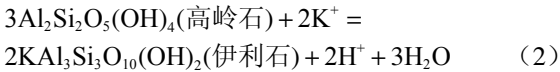
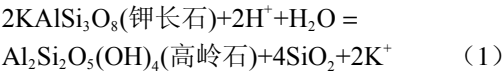


图 2 致密砂岩显微照片

Fig. 2 Micrographs of the tight sandstone

储层中普遍发育高岭石,其晶体呈假六方片状、板状,结晶程度较好,单晶粒径 $5 \sim 15 \mu\text{m}$,厚度 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。集合体多呈蠕虫状、书页状、叠层状分布,集合体团粒大小不一,无序堆叠,见图 2(a)(b)。由于储层属于弱酸性环境,高岭石晶体发育完全,见图 3(c)(d),而伊利石和绿泥石等黏土矿物晶体发育程度较差,多呈碎屑杂基存在。部分绿泥石以绿泥石膜的形式包覆于石英表面,绒球状绿泥石多填充于孔隙中,见图 2(c)。储层中普遍缺乏长石类矿物,长石的减少通常由高岭石溶蚀作用引起(式 1)。此外,扫描电镜下发现部分高岭石晶体末端呈纤丝状,晶体厚度逐渐变薄,处于高岭石向伊利石转变的过渡态,见图 2(d)。钾长石矿物被溶蚀后产生的 K^+ 可为伊利石矿物的形

成提供充足的物质来源(式 2)。验证了致密砂岩成岩过程中发生长石矿物溶蚀并形成以高岭石为主的黏土矿物,同时部分高岭石发生伊利石化现象。伊利石分布形态主要为片状和丝缕状,片状伊利石多分布于粒表,而丝缕状伊利石多发育在粒间或粒内孔隙中,见图 2(e)(f)。



致密砂岩中通常会赋存少量的有机质,其总有机碳含量低于 0.5% ^[24]。本次在镜下发现少量片状、带状菌藻体有机残留物嵌于黏土矿物中,见图 4(a)。方

解石未发现明显晶型, 主要以钙质胶结物形式存在, 见图3(a), 部分可见其阶梯状端口, 见图4(b)。少量

黄铁矿呈团窝状和草莓绒球状分布于粒间, 见图5(a)。

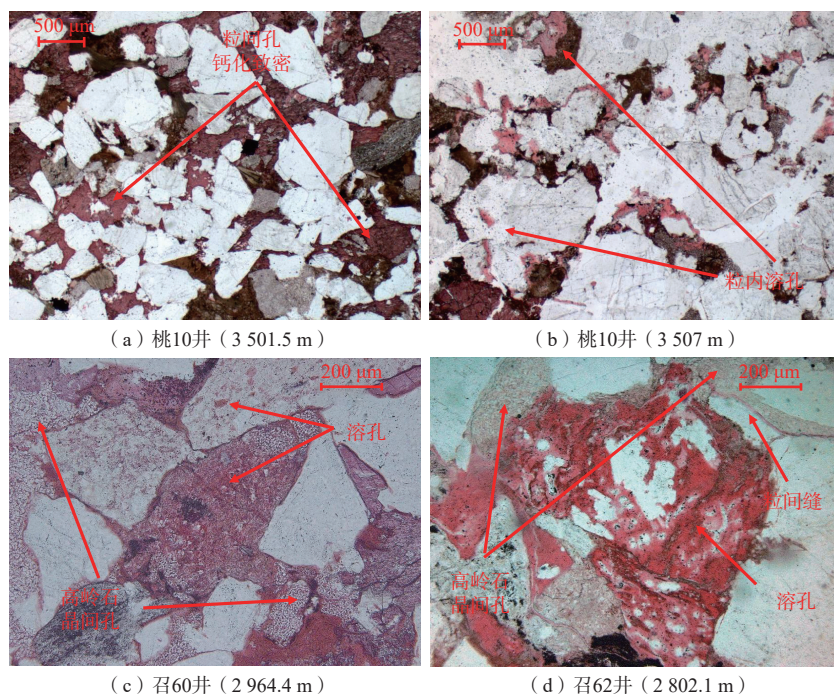


图3 致密砂岩铸体薄片显微照片

Fig. 3 Micrographs of the cast thin section of the tight sandstone

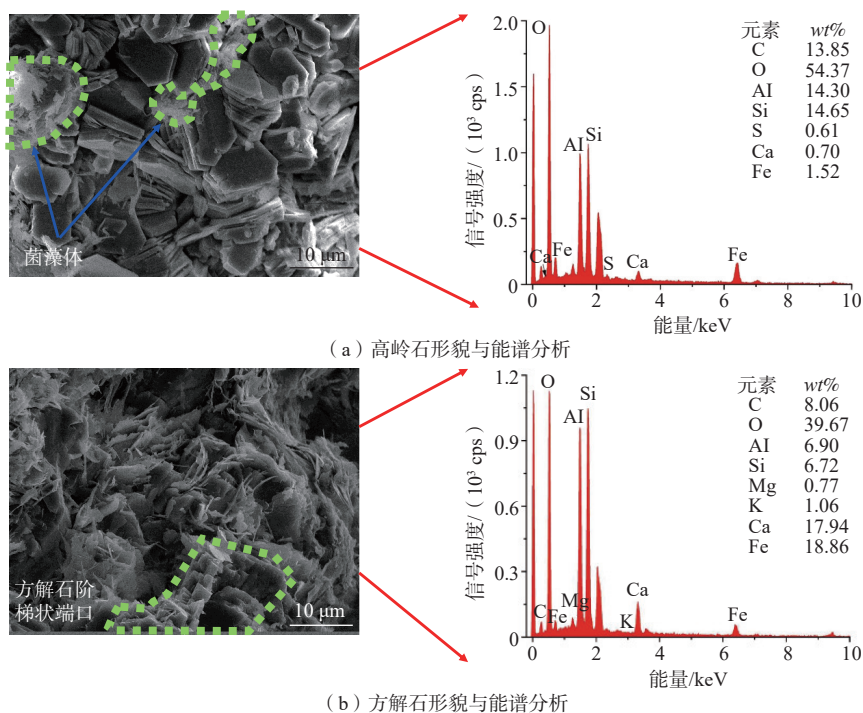


图4 典型矿物显微照片与能谱分析

Fig. 4 SEM and EDS analyses of the typical minerals

4.2 孔隙类型与发育特征

铸体薄片与电镜照片显示致密砂岩中存在粒间

孔隙、粒内溶孔、粒间裂隙及粒内缝(图3、图5)。在扫描电镜下同时还发现了少量团窝状黄铁矿铸模孔,

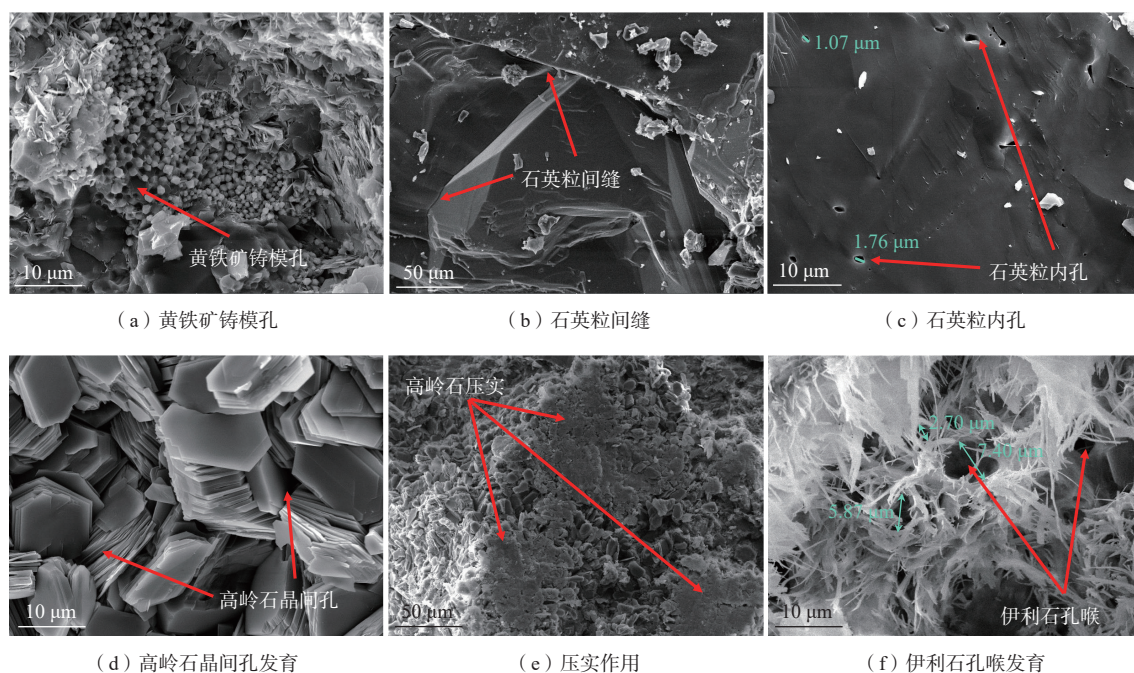


图5 致密砂岩微观孔隙特征

Fig. 5 Microscopic pore characteristics of the tight sandstone

见图5(a),单晶孔径为1~1.5 μm,而草莓绒球状集合体孔径多集中于3~7 μm。薄片结果显示石英内部存在大量溶蚀微孔,扫描电镜结果进一步揭示石英粒间缝及表面存在大小不等的气孔及粒内裂隙。这些粒内孔孔径小到纳米,呈线状排列分布,大到几微米,呈聚集状分布,见图5(b)(c)。薄片结果显示桃10井储层致密砂岩石英粒间孔隙钙化致密,石英晶体具有蚀变迹象,形成溶孔。同时,随着深度的增加,岩石致密程度呈增加趋势。3501.5 m处铸体薄片中存在大量粒间孔,而3507 m处石英体积显著增大,出现石英加大边填充粒间孔隙现象,粒间孔数量和面积急剧减少,而粒内溶孔较发育,部分粒间孔隙呈线状分布,见图3(a)(b)。铸体薄片和电镜照片都显示大量高岭石填充于石英粒间,形成高岭石晶间孔,见图5(d)。对气藏而言,高岭石的晶间孔是重要的储集空间。然而受成岩作用影响,部分高岭石受到压实作用,晶间孔被破坏,见图5(e)。丝缕状伊利石形成典型的束状孔喉,见图5(f),孔径2.7~7.4 μm大小不等。

总体而言,苏里格盒8_下段致密砂岩成岩演化程度高,在成岩过程中发生了溶蚀作用和交代作用,长石溶蚀殆尽,高岭石以原位交代长石的形式存在。同时在胶结作用影响下,钙质和黏土矿物胶结物广泛发育。压实作用导致致密砂岩间主要为颗粒支撑,颗粒之间以线接触为主,部分矿物颗粒晶间孔破坏。总

体而言,压实作用和胶结作用不利于致密砂岩中孔隙发育,而溶蚀作用往往可以增大孔隙。黏土矿物充填粒间孔隙通常会对储层微观孔喉结构具有破坏作用^[25-26]。进一步测试发现,5口气井气层致密砂岩样品密度介于2.44~2.56 g/cm³之间,孔隙度为7.7%~12.6%,渗透率为0.16~1.42 mD,平均密度为2.51 g/cm³,平均孔隙度为9.7%,平均渗透率为0.7 mD。孔隙度与渗透率存在较好的正相关性,同时孔隙度和渗透率随黏土矿物含量增加总体呈减小趋势。

5 储层特征对水力压裂潜在影响

致密储层矿物含量与分布特征会影响储层原生孔隙度和渗透率。一旦水力压裂过程中储层矿物含量与分布发生改变,在储层压裂改造过程中可能对天然气产出产生影响^[27-29]。在水力压裂过程中,大量压裂液被高压注入气层,在储层中形成复杂的裂缝网络,从而增加天然气的流动能力^[27]。但注入的压裂液一般会打破储层原有水岩平衡,与气藏中的岩石发生相互作用,最终影响水力压裂效果。“正向”水岩相互作用有利于储层裂缝扩展,而“负向”水岩相互作用则会导致储层损害,最终降低油气产量^[30-32]。石英矿物性质相对稳定,而盒8_下致密砂岩中可溶性碳酸盐、硫酸盐矿物含量低,所以含量较高的黏土矿物成为影响致密砂岩储层水力压裂效果的关键因素。致密砂岩

中存在的大量黏土矿物(高岭石、伊利石、绿泥石等)容易导致水力压裂过程中黏土矿物失稳现象。黏土矿物为难溶性含水铝硅酸盐矿物,在自然条件下短时间内难以发生化学反应。然而,当外界压裂液被注入气藏时,黏土矿物晶体稳定性容易发生变化^[27, 33]。当蒙脱石与淡水发生相互作用时,会发生水化膨胀,这一现象在蒙脱石含量较高的页岩中较为常见^[28]。与页岩不同,致密砂岩储层中蒙脱石含量普遍较低,因此,黏土膨胀通常不是影响致密砂岩黏土矿物稳定性的主要因素。

电镜照片显示,苏里格盒8_F段致密砂岩中,部分高岭石晶体呈蠕虫状堆积,这种松散的高岭石晶体很容易在水力压裂过程中移动,发生黏土矿物分散现象。此外,虽然高岭石是一种两层结构的不易膨胀黏土,但在碱性环境中容易分散和迁移。胍胶压裂液是致密储层中常用的储层改造液,胍胶压裂液通常需要在碱性条件下交联。因此,当与胍胶压裂液发生相互作用时,高岭石的稳定性易受到扰动,晶体发生迁移,同时高岭石的粒间孔隙被破坏。伊利石呈夹层结构,

稳定性差,易分散膨胀^[27]。胍胶压裂液与研究区致密砂岩水岩实验结果显示,经过压裂液处理后高岭石晶体普遍出现破碎现象,规则六边形晶体破碎为不规则片状,原有晶间孔被破坏,见图6(a)。同时高岭石晶体颗粒对固体骨架的附着力很差,高岭石晶体之间的结合力也很弱。压裂液处理后部分高岭石晶体脱落,并发生微粒运移,堵塞周围孔隙,见图6(b)。伊利石主要以片状和丝缕状分布于粒间孔隙或颗粒表面,丝缕状伊利石会形成大量微孔,但同时也会使孔隙通道变得曲折,导致高的含水饱和度,容易造成水锁,同时微粒运移到孔喉处容易发生堵塞,见图5(f)、图6(c)。分散的黏土矿物晶体颗粒,容易聚集于孔喉部位,阻碍压裂液顺利返排,更不利于气体的产出。绿泥石为三层结构,与水作用时通常不会发生明显膨胀,但富含镁、铁的绿泥石具有较高的酸敏性,与酸性预冲液(HCl)和氧化液(如过硫酸铵破胶剂)接触后容易产生铁氧化物(氢氧化物)次生沉淀^[27, 33]。因此,绿泥石在水力压裂初期容易诱发次生沉淀,导致岩石基质堵塞,渗透率降低。实验发现,胍胶压裂液处理后绿泥

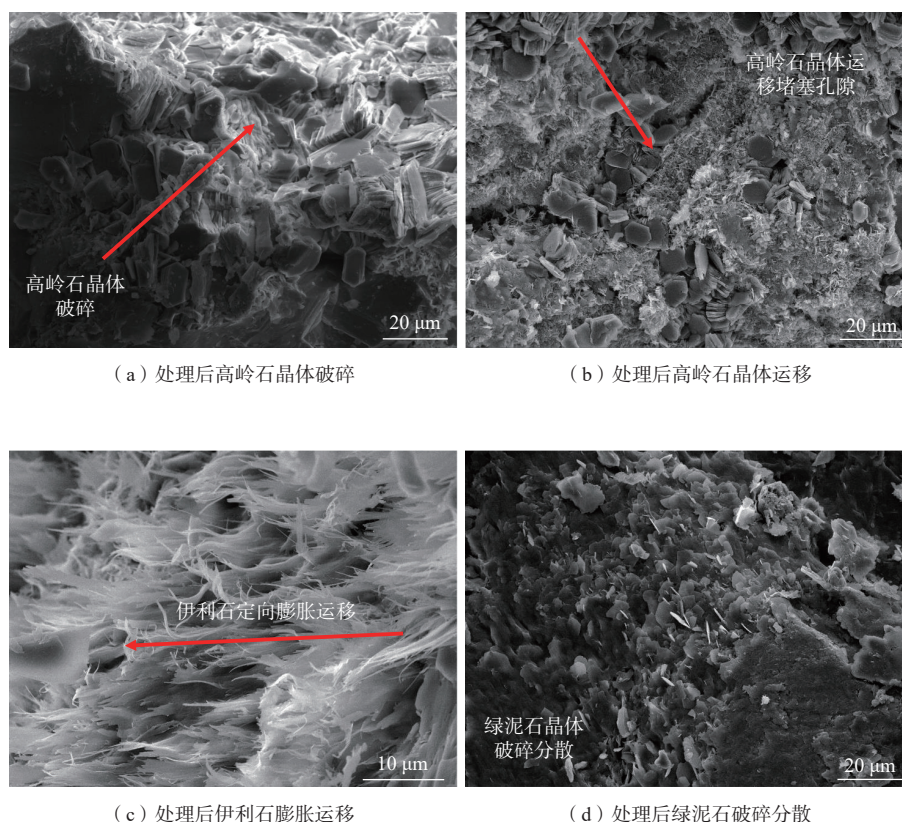


图6 压裂液处理后黏土矿物微观形貌

Fig. 6 Microstructure of the clay minerals after fracturing fluid-tight sandstone interactions

石晶体总体表现稳定,仅部分附着于颗粒表面的叶片状绿泥石晶体发生破碎和运移现象,见图6(d)。

总体而言,致密砂岩中高岭石具有较高的速敏和碱敏性,而伊利石表现出强的速敏性且易造成水锁伤害。这种现象同时也存在于其他致密砂岩气区^[34-35]。此外,不同于主要为干气的页岩储层,致密砂岩储层通常含水饱和度较高,在开发过程中存在气水两相流^[36]。水力压裂过程沟通储层中滞留的地层水,导致地层水和压裂液发生混合,形成高矿化度的环境,导致处于裂缝表面的高岭石和伊利石晶体被释放出来,随气流和返排液发生运移^[37]。同时压裂液与地层水的不均匀混合会导致pH与离子浓度发生剧烈波动,迁移的矿物晶体很容易在孔喉中发生絮凝,形成沉淀,堵塞气流运移通道,破坏储层的渗透率。因此,在致密砂岩水力压裂改造前需要掌握含气储层中黏土矿物含量及赋存形态,有针对性地选择合适的黏土稳定剂(KCl、NH₄Cl等),以缓解压裂过程中黏土矿物的膨胀、分散和运移^[30]。

6 结论

(1)苏里格气田盒8_下段致密砂岩主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,矿物成分主要为石英和黏土矿物,长石矿物和碳酸盐矿物含量低。黏土矿物中,高岭石广泛发育,呈书页状和蠕虫状填充于粒间孔隙,少量衬砌于粒表。伊利石主要以片状形态覆盖于粒表,以丝缕状填充于粒间及粒表微孔隙。绿泥石多以绿泥石膜的形式包覆于颗粒表面,少量呈叶片状、绒球状衬砌于粒间微孔。伊利石和绿泥石总体发育较差,多以黏土矿物杂基形式共存。

(2)致密砂岩密度为2.44~2.56 g/cm³,孔隙度为7.7%~12.6%,渗透率为0.16~1.42 mD。致密砂岩中粒间孔隙、粒内溶孔、粒间裂隙及粒内缝都不同程度发育,伴随少量黄铁矿铸模孔。

(3)黏土矿物的稳定性对苏里格气田致密砂岩储层的水力压裂至关重要,尤其是含量较高且易失稳的高岭石和伊利石矿物。压裂液与致密砂岩水岩实验进一步揭示了在水力压裂过程中高岭石晶体容易剥离脱落,发生微粒运移,引发堵塞;伊利石易形成束状孔喉,并表现出强的分散性,影响水力压裂过程中储层渗透性。因此,水力压裂前有必要对储层矿物及地层水成分特征进行全面了解,并在压裂过程中选择合适的黏土稳定剂优化压裂施工。

参考文献 (References) :

- [1] 邹才能,陶士振,侯连华.非常规油气地质[M].2版.北京:地质出版社,2013. [ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua. Unconventional petroleum geology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2013. (in Chinese)]
- [2] US Energy Information Administration. International energy outlook 2021[R]. Washington: Center for Strategic and International Studies, 2021. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo>.
- [3] 李鹭光.中国天然气工业发展回顾与前景展望[J].天然气工业,2021,41(8):1-11. [LI Luguang. Development of natural gas industry in China: Review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 贾爱林,位云生,郭智,等.中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J].天然气工业,2022,42(1):83-92. [JIA Ailin, WEI Yunsheng, GUO Zhi, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83-92. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 孙龙德,邹才能,贾爱林,等.中国致密油气发展特征与方向[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1015-1026. [SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015-1026. (in Chinese with English abstract)]
- [6] BIRKLE P, MAKECHNIE G K. Geochemical cycle of hydraulic fracturing fluids: Implications for fracture functionality and frac job efficiency in tight sandstone[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109596.
- [7] WANG Yifei, LIU Huaishan, LI Sanzhong, et al. Potentials of low permeability gas in intracratonic basin: Insights from sedimentary facies of the Shan1 member in the Su6-Zhao42 Block of the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Geological Journal, 2018, 53: 201-211.
- [8] 刘毅,李建奇,冯强汉,等.苏里格气田苏48区块石盒子组8段气水识别方法研究[J].石油天然气学报,2014,36(9):84-87. [LIU Yi, LI Jianqi, FENG Qianghan, et al. Gas and water identification method in block Su 48 in the 8th member of Shihezi formation in Sulige gasfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(9): 84-87. (in Chinese)]
- [9] 郭艳琴,何子琼,郭彬程,等.苏里格气田东南部盒

- 8段致密砂岩储层特征及评价[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(5): 1 – 11. [GUO Yanqin, HE Ziqiong, GUO Bincheng, et al. Reservoir characteristics and evaluation of tight sandstone of He₈ member in southeastern Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(5): 1 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨仁超, 董亮, 张吉, 等. 苏里格气田西区地层水成因、分布规律与控制因素[J]. *沉积学报*, 2022, 40(1): 267 – 280. [YANG Renchao, DONG Liang, ZHANG Ji, et al. Origin, distribution and controlling factors of stratigraphic water in the western Sulige gas field[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(1): 267 – 280. (in Chinese with English abstract)]
- [11] FAN Aiping, YANG Renchao, LENHARDT N, et al. Cementation and porosity evolution of tight sandstone reservoirs in the Permian Sulige gas field, Ordos Basin (central China)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 276 – 293.
- [12] WU Heyuan, ZHAO Jingzhou, WU Weitao, et al. Formation and diagenetic characteristics of tight sandstones in closed to semi-closed systems: Typical example from the Permian Sulige gas field[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 199: 108248.
- [13] 邹才能, 郭建林, 贾爱林, 等. 中国大气田科学开发的内涵[J]. *天然气工业*, 2020, 40(3): 1 – 12. [ZOU Caineng, GUO Jianlin, JIA Ailin, et al. Connotation of scientific development for giant gas fields in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(3): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张吉, 余浩杰, 马志欣, 等. 苏里格致密砂岩气储层定量表征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019. [ZHANG Ji, YU Haojie, MA Zhixin, et al. Quantitative characterization of Sulige tight sandstone gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019. (in Chinese)]
- [15] ZOU Caineng, TAO Shizhen, HAN Wenxue, et al. Geological and geochemical characteristics and exploration prospect of coal-derived tight sandstone gas in China: Case study of the Ordos, Sichuan, and Tarim Basins[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2018, 92(4): 1609 – 1626.
- [16] WU Weitao, ZHAO Jingzhou, WEI Xinshan, et al. Evaluation of gas-rich “sweet-spot” and controlling factors of gas-water distribution in tight sandstone gas provinces: An example from the Permian He₈ member in Sulige gas province, central ordos basin, northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 227: 105098.
- [17] 魏新善, 胡爱平, 赵会涛, 等. 致密砂岩气地质认识新进展[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(1): 11 – 20. [WEI Xinshan, HU Aiping, ZHAO Huitao, et al. New geological understanding of tight sandstone gas[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(1): 11 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [18] HUI Wei, WANG Yueshe, REN Dazhong, et al. Effects of pore structures on the movable fluid saturation in tight sandstones: A He₈ formation example in Sulige Gasfield, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192: 107295.
- [19] 窦伟坦, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 767 – 773. [DOU Weitan, LIU Xinshe, WANG Tao. The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 767 – 773. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 苏小四, 吴春勇, 董维红, 等. 鄂尔多斯沙漠高原白垩系地下水锶同位素的演化机理[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(3): 348 – 358. [SU Xiaosi, WU Chunyong, DONG Weihong, et al. Strontium isotope evolution mechanism of the Cretaceous groundwater in Ordos Desert Plateau[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(3): 348 – 358. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杨涵菲, 赵艳, 崔巧玉, 等. 基于XRF岩芯扫描的Rb/Sr比值的古气候意义探讨——以青藏高原东部若尔盖盆地为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(1): 73 – 91. [YANG Hanfei, ZHAO Yan, CUI Qiaoyu, et al. Paleoclimatic indication of X-ray fluorescence core-scanned Rb/Sr ratios: A case study in the Zoige Basin in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 51(1): 73 – 91. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈敬安, 曾艳, 王敬富, 等. 湖泊沉积物不同赋存状态Rb、Sr地球化学记录研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(4): 408 – 417. [CHEN Jing'an, ZENG Yan, WANG Jingfu, et al. The geochemical records of Rb and Sr of different forms in lake sediments[J]. *Bulletion of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(4): 408 – 417. (in Chinese with English abstract)]
- [23] HE Xiaodong, LI Peiyue, SHI Hua, et al. Identifying strontium sources of flowback fluid and groundwater pollution using ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and geochemical model in Sulige

- gasfield, China[J]. *Chemosphere*, 2022, 306: 135594.
- [24] BELYADI H, FATHI E, BELYAD F. Hydraulic fracturing in unconventional reservoirs: Theories, operations, and economic analysis[M]. 2nd ed. Cambridge: Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2019.
- [25] 任大忠,周兆华,梁睿翔,等.致密砂岩气藏黏土矿物特征及其对储层性质的影响:以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(4): 42 – 53. [REN Dazhong, ZHOU Zhaohua, LIANG Ruixiang, et al. Characteristics of clay minerals and its impacts on reservoir quality of tight sandstone gas reservoir: A case from Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(4): 42 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 周康,刘佳庆,段国英,等.吴起地区长61油层黏土矿物对油层低电阻率化的影响[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(2): 26 – 30. [ZHOU Kang, LIU Jiaqing, DUAN Guoying, et al. Effect of clay minerals on low resistivity of Chang 61 reservoir in Wuqi area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(2): 26 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [27] CIVAN F. Reservoir formation damage: Fundamentals, modeling, assessment, and mitigation[M]. 3rd ed. Waltham: Elsevier, 2015.
- [28] 李阳,李树同,牟炜卫,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区长6段致密砂岩中黏土矿物对储层物性的影响[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(7): 1043 – 1053. [LI Yang, LI Shutong, MOU Weiwei, et al. Influences of clay minerals on physical properties of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(7): 1043 – 1053. (in Chinese with English abstract)]
- [29] WANG Ren, SHI Wanzhong, XIE Xiangyang, et al. Clay mineral content, type, and their effects on pore throat structure and reservoir properties: Insight from the Permian tight sandstones in the Hangjinqi area, north Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 115: 104281.
- [30] KHAN H J, SPIELMAN-SUN E, JEW A D, et al. A critical review of the physicochemical impacts of water chemistry on shale in hydraulic fracturing systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(3): 1377 – 1394.
- [31] HUANG Tianming, LI Zhenbin, MAYER B, et al. Identification of geochemical processes during hydraulic fracturing of a shale gas reservoir: A controlled field and laboratory water-rock interaction experiment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(20): e2020GL090420.
- [32] JACOBS T. Improving shale production through flowback analysis[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2015, 67(12): 37 – 42.
- [33] STEUDEL A, BATENBURG L F, FISCHER H R, et al. Alteration of non-swelling clay minerals and magadiite by acid activation[J]. *Applied Clay Science*, 2009, 44(1/2): 95 – 104.
- [34] TANG Hongming, TANG Haoxuan, HE Jiang, et al. Damage mechanism of water-based fracturing fluid to tight sandstone gas reservoirs: Improvement of the evaluation measurement for properties of water-based fracturing fluid: SY/T 5107—2016[J]. *Natural Gas Industry B*, 2021, 8(2): 163 – 172.
- [35] QI Aojiang, QIAN Pinshu, HUANG Hai, et al. Research on the characteristics of microscopic damage to different pore types by slippery water fracturing fluid in the Chang member tight sandstone reservoir, Ordos Basin, NW China[J]. *Geofluids*, 2021: 1 – 8.
- [36] 邹才能.非常规油气勘探开发[M].北京:石油工业出版社, 2019. [ZOU Caineng. Unconventional oil & gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019. (in Chinese)]
- [37] HE Xiaodong, LI Peiyue, NING Jing, et al. Geochemical processes during hydraulic fracturing in a tight sandstone reservoir revealed by field and laboratory experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128292.

编辑:张若琳