

文章编号:1009-9603(2019)06-0028-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.06.004

鄂尔多斯盆地临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物特征及其对储层物性的影响

刘 玲¹, 汤达祯², 王 烽³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 3. 中国石化油田勘探开发事业部, 北京 100728)

摘要:鄂尔多斯盆地临兴区块太原组致密砂岩自生黏土矿物含量较高,是影响储层物性的重要因素之一,但对黏土矿物特征及成因尚未系统研究,影响了优质储层刻画。通过岩心观察、薄片鉴定、X射线衍射、物性分析,明确黏土矿物的含量及形态特征,剖析其成因及与储层物性之间的相关性。结果表明,临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物相对含量由高到低依次为伊利石、高岭石、绿泥石及伊/蒙混层,均呈充填式分布于粒间溶蚀孔隙或晶间微孔隙中,为热水蚀变成因。紫金山岩体影响黏土矿物的含量及分布,岩体附近伊利石、绿泥石及伊/蒙混层含量较高,而高岭石含量较低。伊利石、绿泥石及伊/蒙混层与储层物性呈负相关关系,高岭石与储层物性呈正相关。受黏土矿物影响,太原组物性相对较好的致密砂岩储层分布于研究区的东北及西南部,为下一步油气勘探开发的有利目标区。

关键词:致密砂岩;黏土矿物;热水蚀变;紫金山岩体;临兴区块;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2*3

文献标识码:A

Clay minerals characteristics of tight sandstone and its impact on reservoir physical properties in Taiyuan Formation of Block Linxing in Ordos Basin

LIU Ling¹, TANG Dazhen², WANG Feng³

(1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China*; 2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China*; 3. *Exploration and Production Department, SINOPEC, Beijing City, 100728, China*)

Abstract: The clay mineral content is high in tight sandstone of Taiyuan Formation in Block Linxing of Ordos Basin, and it is one of the important factors influencing reservoir properties. However, its characteristics and formation mechanism have not been systematically studied, affecting the description of high-quality reservoirs. According to core observation, thin section identification, X-ray diffraction and physical property analysis, the content and morphological characteristics of the clay minerals is clarified. Moreover, its formation mechanism and the relationships between the clay minerals and the reservoir physical properties are discussed. The results indicate that the relative contents of clay minerals in tight sandstone of Taiyuan Formation in Block Linxing from high to low are: illite, kaolinite, chlorite, and illite-montmorillonite mixed-layer. Most of them fill in the intergranular dissolution pores or intercrystalline micropores. Hot water erosion is the reason for the clay mineral formation. Zijinshan pluton affects the relative content and plane distribution of clay minerals. The relative contents of illite, kaolinite, chlorite, and illite-montmorillonite mixed-layer are high near Zijinshan pluton, while the relative content of kaolinite is low. There exists a negative correlation between reservoir physical properties and the three types

收稿日期:2019-05-01。

作者简介:刘玲(1984—),女,云南玉溪人,高级工程师,博士,从事储层表征与描述研究。联系电话:13466720893, E-mail:liuling6203203@163.com。

基金项目:国家自然科学基金重点项目“深部煤层气系统及其能量动态平衡机理研究”(41530314)。

of clay minerals, including illite, chlorite, and illite-montmorillonite mixed-layer, while there is a positive correlation between kaolinite and reservoir physical properties. Influenced by clay minerals, the high-quality reservoirs distribute in the northeast and southwest of the study area, and they are the favorable targets for the later exploration and development.

Key words: tight sandstone; clay minerals; hot water erosion; Zijinshan pluton; Block Linxing; Ordos Basin

黏土矿物是具无序过渡结构的微粒质点($<2\mu\text{m}$)含水层状硅酸盐矿物^[1],为碎屑储集岩中最重要的填隙物,按成因可分为受沉积作用影响的它生黏土矿物和受成岩作用影响的自生黏土矿物^[2]。黏土矿物含量、产状及时空分布等影响储层物性^[3-4],孔隙衬里式自生黏土矿物对孔隙起保护作用,充填式自生黏土矿物则对砂岩孔渗不利^[5-6]。鄂尔多斯盆地东部临兴区块上古生界太原组试气日产量最高可达 $10\times 10^4\text{ m}^3$ ^[7],为致密砂岩气主要产层之一,太原组黏土矿物含量较高,体积分数平均为14.69%。前人研究表明,黏土矿物胶结作用是造成临兴区块上古生界砂岩储层致密化的主要原因之一^[8],但对研究区黏土矿物缺乏系统研究,存在热水蚀变及成岩影响2种成因争议^[3,9],且各类黏土矿物的特征、分布及对储层物性的影响不明确,一定程度上制约了后期进一步的油气勘探开发工作。鉴于此,笔者采用矿物学和地球化学方法,分析临兴区块太原组黏土矿物特征,剖析其成因机制,明确其对储层物性的影响,以期在低孔低渗透致密砂岩中寻找优质储层提供参考,也为后期油藏开发措施的实施提供依据。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地东缘上古生界太原组砂岩储层中已发现储量超过千亿立方米的大气田,是天然气开发的重要层位^[10]。临兴区块位于盆地东缘晋西挠褶带(图1a),构造平缓,为一西倾单斜,可进一步划分为断褶带(Ⅰ)、开阔褶皱带(Ⅱ)、岩体侵入带(Ⅲ)和缓坡带(Ⅳ)(图1b),区块北边紧邻神木区块。临兴区块出露紫金山岩体,岩体向东与山西地块吕梁山脉相邻,北西—南东长为7 km,北东—西南宽为4 km,出露面积约为23.2 km²,呈岩筒、岩床状侵入并刺穿中三叠统二马营组砂泥岩地层,上覆第四系^[11],是一个呈NW—SE向展布的典型环状侵入碱性杂岩体,具多阶段、多期次、多岩性特征^[12]。高精度锆石U—Pb年龄测定结果表明其形成于距今138.7~125 Ma,为早白垩世岩浆活动的产物^[13]。紫金山岩体的上拱底辟作用使得岩体顶部和翼部形成了许多呈环形及辐射状分布的断裂,且以高角度构造裂缝为主,42.84%的裂缝未被充填,是油气垂向运移的重要通道^[8,14]。天然气成分显示,太原组

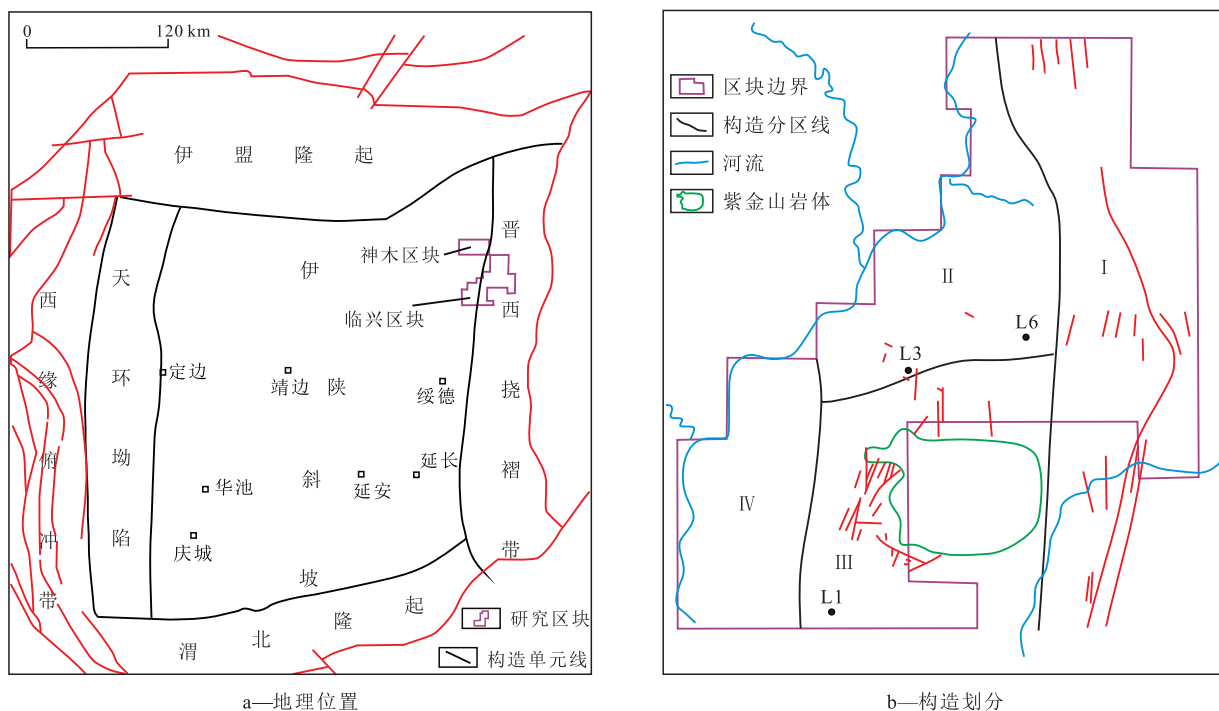


图1 临兴区块地理位置(据傅宁等^[15]修改)及构造划分

Fig.1 Location(revised according to FU Ning et al^[15]) and structural units of Block Linxing

CO₂含量为1.94%,山西组CO₂含量为1.8%,盒8段大部分样品CO₂含量为0,天然气自下而上发生了垂向分馏作用,说明断裂是有效的,可作为流体运移的有效通道。

临兴区块太原组为陆表海煤系地层,发育砂岩、泥岩、炭质泥岩及煤层,砂岩成分成熟度和结构成熟度低,胶结物含量高,主要为硅质和钙质等,二者体积分数均为3%~8%,石英含量平均为71.29%,长石和岩屑含量较低,平均分别为2.35%和26.37%,岩性主要为岩屑砂岩,部分为长石岩屑砂岩,偶见长石砂岩及次长石砂岩,处于中成岩B期偏晚成岩作用阶段。储集空间以残余粒间孔、粒间溶孔和粒内溶孔为主,孔隙结构复杂,孔喉较小,属微孔-微喉型,孔隙渗透性和孔喉连通性差。储层孔隙度为0~14.2%,平均为6.1%;渗透率为0~25 mD,平均为0.32 mD,为典型的低孔低渗透致密砂岩储层。

2 黏土矿物特征及成因分析

2.1 黏土矿物特征

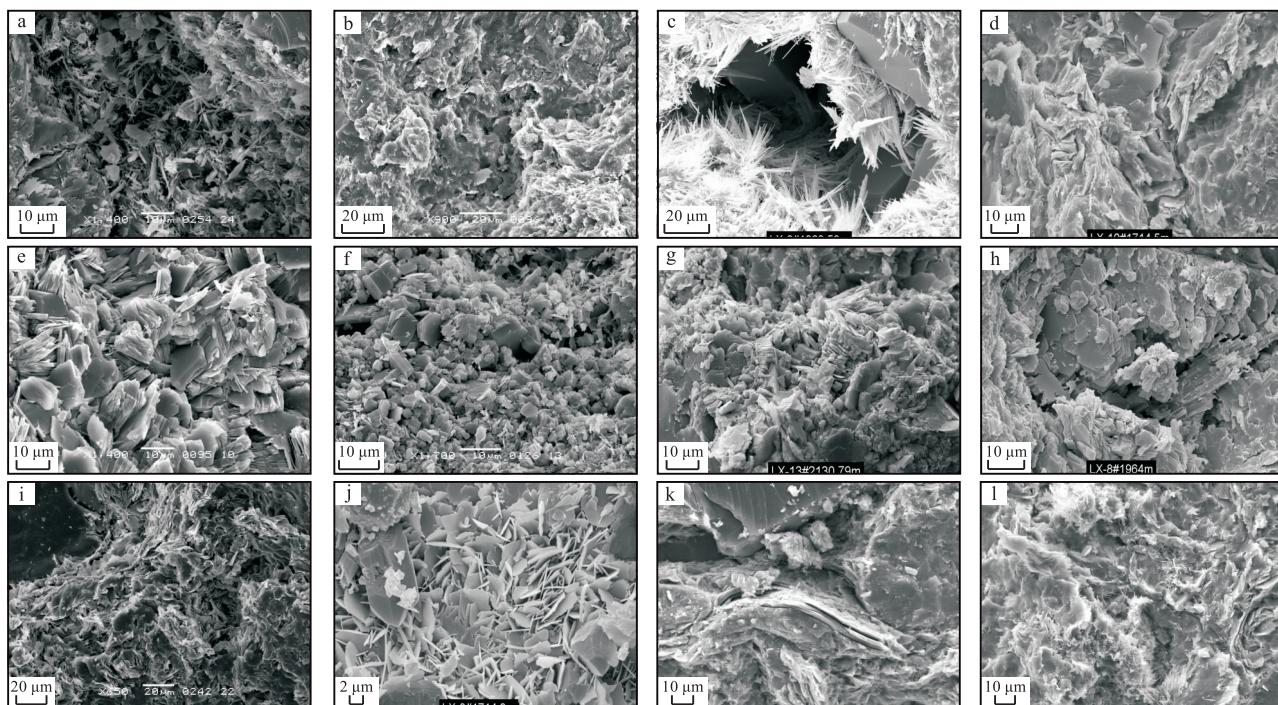
临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物晶形良好,

黏土矿物中Sr/Ba值小于1,表现为贫Sr富Ba特征,不是海相环境中形成的矿物,而是自生矿物^[9]。X射线衍射分析显示,临兴区块太原组主要黏土矿物包括伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙混层,体积分数为2.1%~44%,平均为14.69%;其中,伊利石相对含量最高,为5%~97%,平均为54.25%;高岭石相对含量次之,为0~92%,平均为30.2%;绿泥石和伊/蒙混层相对含量较少,平均分别为9.75%和5.8%。

扫描电镜显示,伊利石主要呈丝片状、丝缕状充填于粒间溶蚀孔隙或晶间微孔隙中,少部分丝片状伊利石集合体呈薄膜结构附着于碎屑颗粒表面,衬垫于碎屑颗粒之间,还可见毛发状伊利石集合体充填于孔隙中(图2a—2d);高岭石自形程度较好,晶体较大,主要呈鳞片状、书页状、片状充填粒间孔隙,部分高岭石棱角部位可见发丝状伊利石,表明高岭石有向伊利石溶蚀转化的趋势(图2e—2i);绿泥石主要呈针叶状、叶片状、挤压片状充填粒间孔隙,绿泥石膜不发育(图2j,2k);伊/蒙混层主要呈絮状、丝片状、弯曲片状充填粒间孔隙(图2l)。

2.2 成因分析

黏土矿物特征分析表明,鄂尔多斯盆地东部太



a—L1井,1 400倍,丝片状、毛发状伊利石集合体充填粒间孔隙中;b—L4井,900倍,丝片状伊利石集合体呈薄膜结构附着碎屑颗粒表面,衬垫于碎屑颗粒之间;c—L8井,845倍,丝缕状伊利石和次生石英充填溶蚀孔隙;d—L10井,1 000倍,长石溶蚀向丝片状伊利石转化,并充填粒间缝隙;e—L4井,1 400倍,书页状高岭石集合体充填粒间孔隙;f—L4井,1 300倍,片状高岭石集合体充填粒间孔隙;g—L13井,1 200倍,鳞片状高岭石充填粒间孔隙;h—L8井,1 360倍,钾长石溶蚀向鳞片状高岭石蚀变,产生微孔隙;i—L1井,650倍,充填于粒间孔隙的片状高岭石集合体被溶蚀伊利石化;j—L10井,2 500倍,粒间孔隙充填针叶状绿泥石;k—L17井,1 600倍,粒间挤压片状绿泥石;l—L18井,1 500倍,粒间弯曲片状、丝片状伊/蒙混层、伊利石

图2 临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物扫描电镜照片

Fig.2 Scanning electron microscope(SEM) of the clay minerals in tight sandstone of Taiyuan Formation in Block Linxing

原组储层黏土矿物中的伊利石和高岭石具蚀变成因特征^[9],而沉积盆地碎屑岩发生的蚀变作用与盆地热水流体作用有关^[16]。对比成岩矿物流体包裹体记录的成岩期流体温度与地层处于最大埋深时的温度可判断研究区是否存在热水流体活动^[17-18],研究区太原组流体包裹体均一温度为50~190 ℃,而埋藏史-热史模拟结果表明最大埋深时的温度为160 ℃(图3),低于古流体温度,说明太原组沉积时期存在热水流体活动。同时,黏土矿物中的稀土元素分布及地球化学参数表明(图4,表1),太原组黏土矿物轻稀土(LREE)平均含量为 111.19×10^{-6} ,重稀

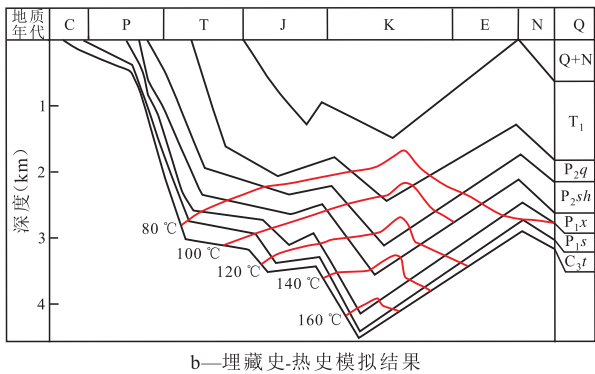
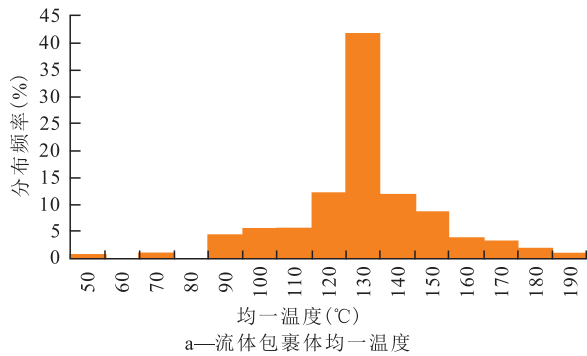


图3 临兴区块太原组流体包裹体均一温度及埋藏史-热史模拟结果

Fig.3 Modelling results of uniform temperature of fluid inclusion and burial history-thermal history of Taiyuan Formation in Block Linxing

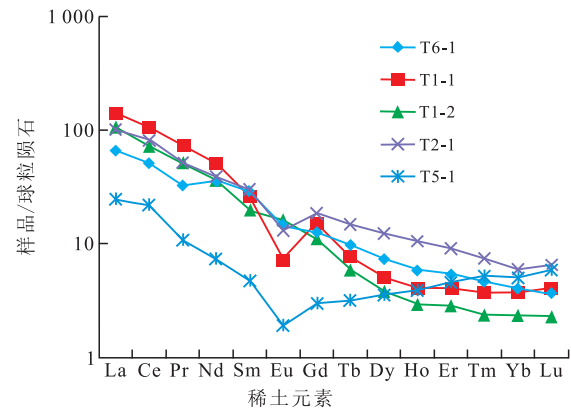


图4 临兴区块太原组稀土元素分布
Fig.4 Distribution map of rare earth elements in Taiyuan Formation of Block Linxing

表1 临兴区块太原组致密砂岩中黏土矿物稀土元素地球化学参数

样品编号	LREE (10^{-6})	HREE (10^{-6})	Σ REE (10^{-6})	LREE/ HREE	(La/ Yb) _N	(La/ Sm) _N	δ Eu	δ Ce
T6-1	93.23	8.77	102.00	10.63	16.26	2.78	0.85	1.11
T1-1	173.83	8.08	181.91	21.52	37.63	6.36	0.40	1.04
T1-2	124.19	5.83	130.02	21.31	46.25	6.40	1.17	0.97
T2-1	132.75	13.86	146.61	9.58	16.94	3.94	0.59	1.12
T5-1	31.92	4.72	36.64	6.76	4.92	6.17	0.57	1.33

土(HREE)平均含量为 8.25×10^{-6} ,LREE/HREE值平均为13.96,具轻稀土富集、重稀土亏损、稀土元素配分模式右倾特征,且 δ Eu为0.40~1.17,平均为0.72, δ Eu整体负异常,但部分样品正异常。肖荣阁等对热水沉积物研究表明,热水交代作用具轻稀土富集、重稀土亏损,稀土元素配分模式表现为Eu正异常的特征^[19],由此可见,临兴区块太原组沉积时期具热水参与作用,且参与程度不均匀。

根据岩石薄片鉴定,临兴区块上古生界砂岩储层普遍含较多的火山物质,如L6井在太原组1 846.96 m处发现了凝灰岩经变质结晶作用形成的变闪长玢岩;L3井在太原组发现了蚀变晶屑凝灰岩,后期石英岩脉穿插或充填裂隙中;L1井在本溪组2 082.98 m和太原组2 100~2 105 m处可见厚度分别约为60和5 m、呈网状侵入的片麻岩,以石英为主,少量角闪石及辉石,多呈星点状分布,可见黄铁矿,石英晶体多为隐晶,少量中、细晶,具片麻结构^[15],砂岩储层中的火山物质说明临兴区块古生界发生了频繁而强烈的火山活动,由此可见,该区的热流体主要是由岩浆作用造成的。

2.3 紫金山岩体对黏土矿物含量及分布的影响

紫金山岩体对黏土矿物的影响主要是通过热液流体影响其蚀变作用,进而影响黏土矿物的类型及分布。研究表明,紫金山岩体发育范围与黏土矿物相对含量及分布具有一定的匹配关系(图5)。伊利石相对含量高值区主要分布于中部岩体侵入带,其值大于50%,围绕岩体侵入带,伊利石相对含量逐渐降低,在东部断褶带及西部缓坡带伊利石相对含量最低,这主要是因为研究区伊利石主要是由蒙脱石蚀变形成的,随着埋深增大,储层温度和压力不断增高,当达到一定温压条件时,富含钾离子的孔隙水与蒙脱石发生反应形成了伊利石,由于伊利石一般在储层演化程度较高时才出现,因此,在岩体附近由于岩体的区域热增温作用,使得伊利石相对含量出现高值(图5a)。

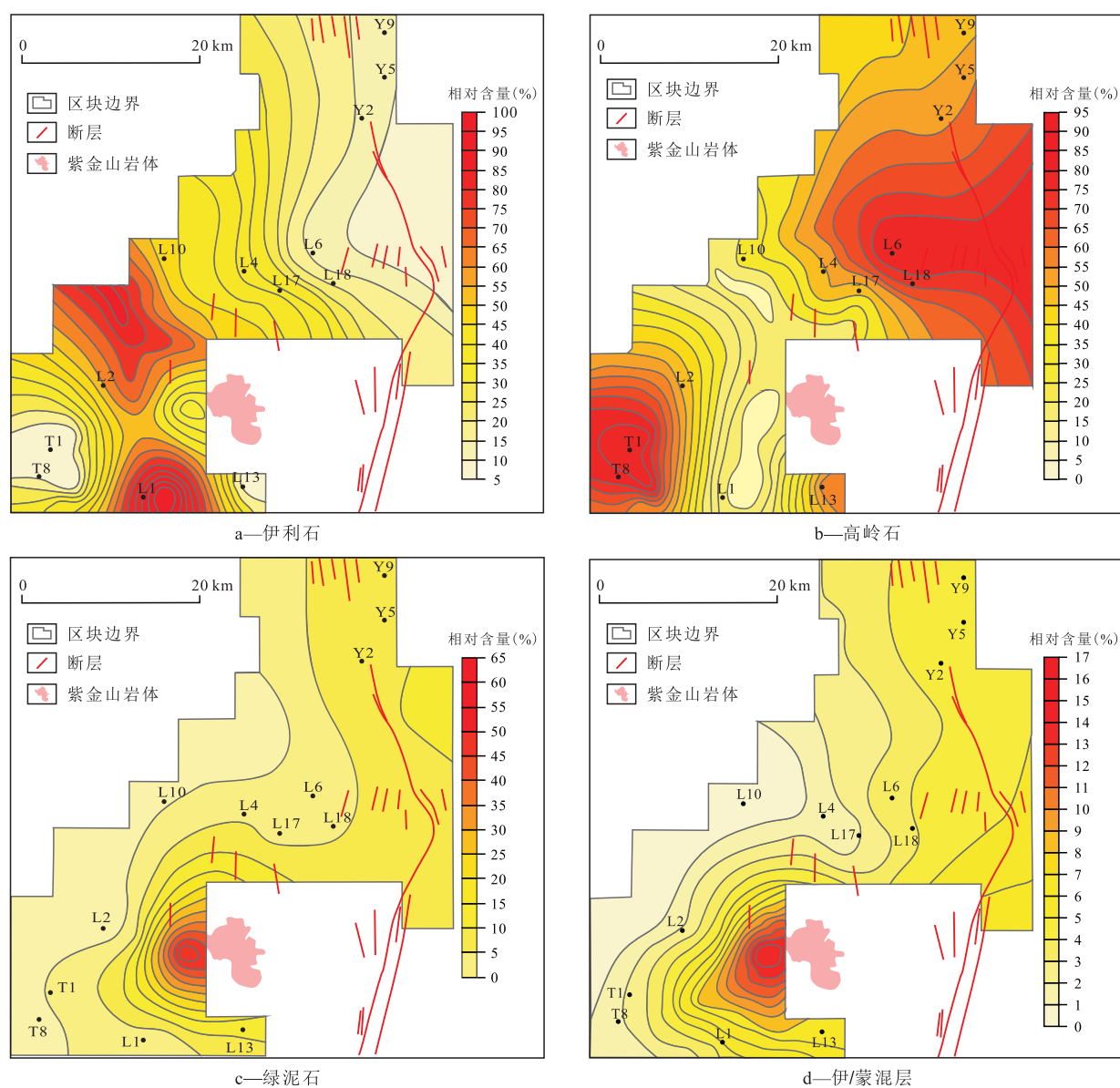


图5 临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物相对含量平面分布

Fig.5 Relative content contour maps of clay minerals of Taiyuan Formation in Block Linxing

高岭石相对含量高值区主要分布于东部断褶带及西部缓坡区,在中部紫金山岩体附近高岭石相对含量较低。这是因为高岭石主要是长石和硅铝酸盐在近地表条件下由大气淡水溶蚀形成,东部断褶带埋深较浅,淡水补给量较大,淡水中溶解的 CO_2 气体为长石溶蚀提供了大量酸源。此外,太原组煤系地层早期泥炭化作用和煤化作用产生了大量 CO_2 气体,使得孔隙水呈酸性,可沿大量发育的逆断层发生垂向运移,也为长石溶蚀提供了充足的酸源;西部缓坡带虽然埋深大,淡水补给少,但烃源岩演化程度高,烃源岩成熟过程中生成大量有机酸,可为高岭石形成提供条件。在岩体附近断裂发育,可为高岭石形成提供大量酸源,但高岭石相对含量较低,这是因为岩体附近 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 含量较高,高岭石

转换形成了绿泥石,且岩体附近温度较高,当温度高于 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且富 K^+ 时,高岭石还会伊利石化,形成伊利石(图5b)。

绿泥石和伊/蒙混层的平面分布规律类似,呈东高西低、南高北低的特征,相对含量高值区分布于紫金山岩体附近(图5c,5d)。绿泥石抗磨损能力差,在长距离搬运后,易破碎形成极小片状,难以保存,且离物源越远,含量越低^[3],但近物源神木区块的绿泥石相对含量为6.08%,低于远物源的临兴区块,分析认为绿泥石是一种铁和镁相对富集的层状硅酸盐矿物,主要产生于铁富集的碱性成岩环境,铁的富集是绿泥石形成的必要条件之一,紫金山岩体附近石炭系-二叠系中可见大量火成岩,岩浆的主要成分是硅酸盐,其中 SiO_2 含量为30%~80%,另

外含有大量的金属氧化物,包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O , 约占 20%~60%。侏罗纪末期燕山运动导致区域发生大面积岩浆侵入, 含有铁、镁和硅酸的岩浆热液沿裂隙上涌, 与孔隙水的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 发生反应, 形成大量的绿泥石矿物, 另外富铁、镁物质的水解作用在早期还能提供一种碱性还原环境, 为绿泥石的产生提供了有利的条件。伊/蒙混层是蒙脱石蚀变成伊利石的过渡产物, 因此, 其分布规律与伊利石类似。

3 黏土矿物对储层物性的影响

黏土矿物相对含量及形态是致密砂岩储层物性的重要影响因素^[20]。研究区伊利石的形态特征使储层孔喉变得十分曲折, 弯曲度大大增加, 将储层中的粗喉道分割成微、细喉道, 将大孔隙分割成了微、小孔隙, 使储层渗流路径变得曲折复杂, 大大降低了渗流能力, 同时还会增加储层的束缚水饱和度, 此外, 伊利石在注水过程中极易膨胀, 断裂堵塞孔隙和喉道, 是重要的速敏物质^[21-22], 研究区太原组致密砂岩储层速敏最大伤害率为 43%, 为中等偏弱速敏。临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物相对含量与储层物性的交会图(图 6)显示, 伊利石相对含量与储层物性呈负相关, 其相对含量越高, 储层物性越差; 高岭石虽然充填孔隙, 占据了孔隙的部分或大部分空间, 但其晶形较好, 仍保留良好的晶间孔, 且高岭石主要形成于开放或半开放的成岩体系中, 因此在其形成过程中还会伴生一些溶蚀孔隙, 是主要储集空间之一, 其与储层物性呈正相关; 绿泥石对储层物性既有正面影响也有负面影响, 当绿泥石以环带形式存在时, 可抑制石英的胶结作用,

保护储层孔隙^[17-18]。临兴区块绿泥石主要以充填孔隙状存在, 并使喉道变得曲折复杂, 大大降低了储层孔隙度和渗透率, 因此, 绿泥石与储层物性呈负相关关系; 伊/蒙混层遇水易膨胀, 并且在高速流体中可产生微粒迁移, 因此其相对含量与储层物性呈负相关关系(图 6)。根据黏土矿物与储层物性的相关性可知, 优质储层多分布于高岭石相对含量高值区, 在伊利石、绿泥石及伊/蒙混层相对含量高值区, 储层物性较差。

平面上, 研究区太原组致密砂岩储层孔隙度和渗透率高值区主要分布于北部 Y2 井和南部 T9 井附近, 中部及南部紫金山岩体附近孔隙度和渗透率较低。通过与黏土矿物相对含量等值线分布对比发现, 黏土矿物与储层物性之间具有较好的相关性, 伊利石、绿泥石及伊/蒙混层相对含量高的地区, 储层孔隙度及渗透率表现为低值, 如研究区中部及南部紫金山岩体附近; 高岭石相对含量高的地区, 储层孔隙度和渗透率则表现为高值, 如研究区东北部及西南部(图 7)。钻井测试显示, T8 井太原组 2 074.8~2 080.4 m 井段平均孔隙度为 7.3%, 含水饱和度仅为 9%, 采用 5 mm 孔板测试, 测试时间为 12.5 h, 平均产气量为 5 000 m^3/d , 从黏土矿物相对含量等值线分布可见, 该井处伊利石、绿泥石及伊/蒙混层的含量较低, 而高岭石含量较高。由此可见, 黏土矿物影响着储层物性, 进而影响了储层产能, 研究黏土矿物类型、含量及分布特征对后期油气勘探开发具有重要的指导意义。

4 结论

临兴区块上古生界太原组致密砂岩黏土矿物

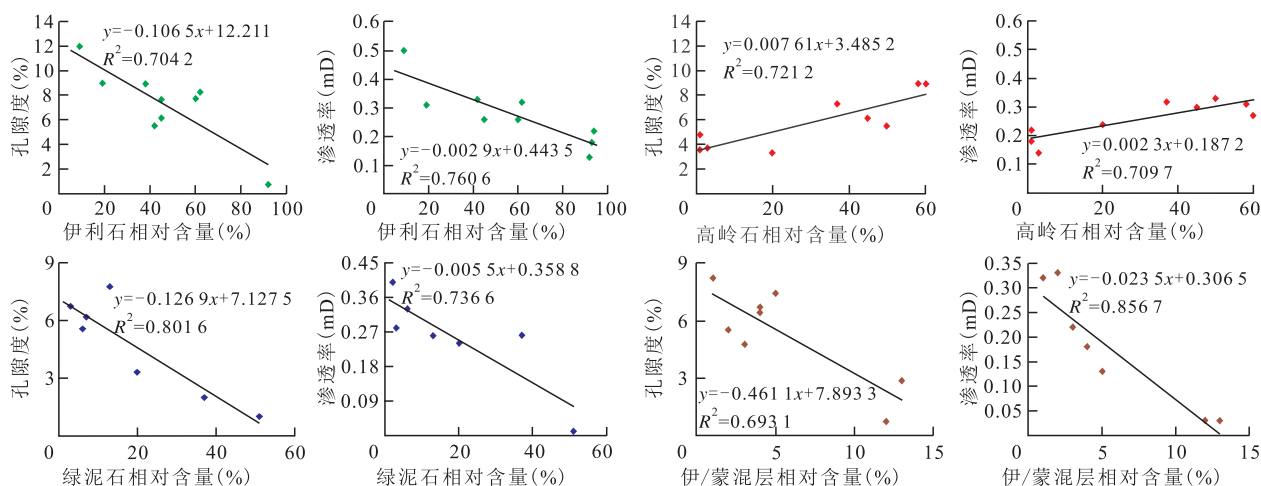


图 6 临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物相对含量与储层物性交会图

Fig.6 Cross plots of clay mineral and reservoir physical properties of Taiyuan Formation in Block Linxing

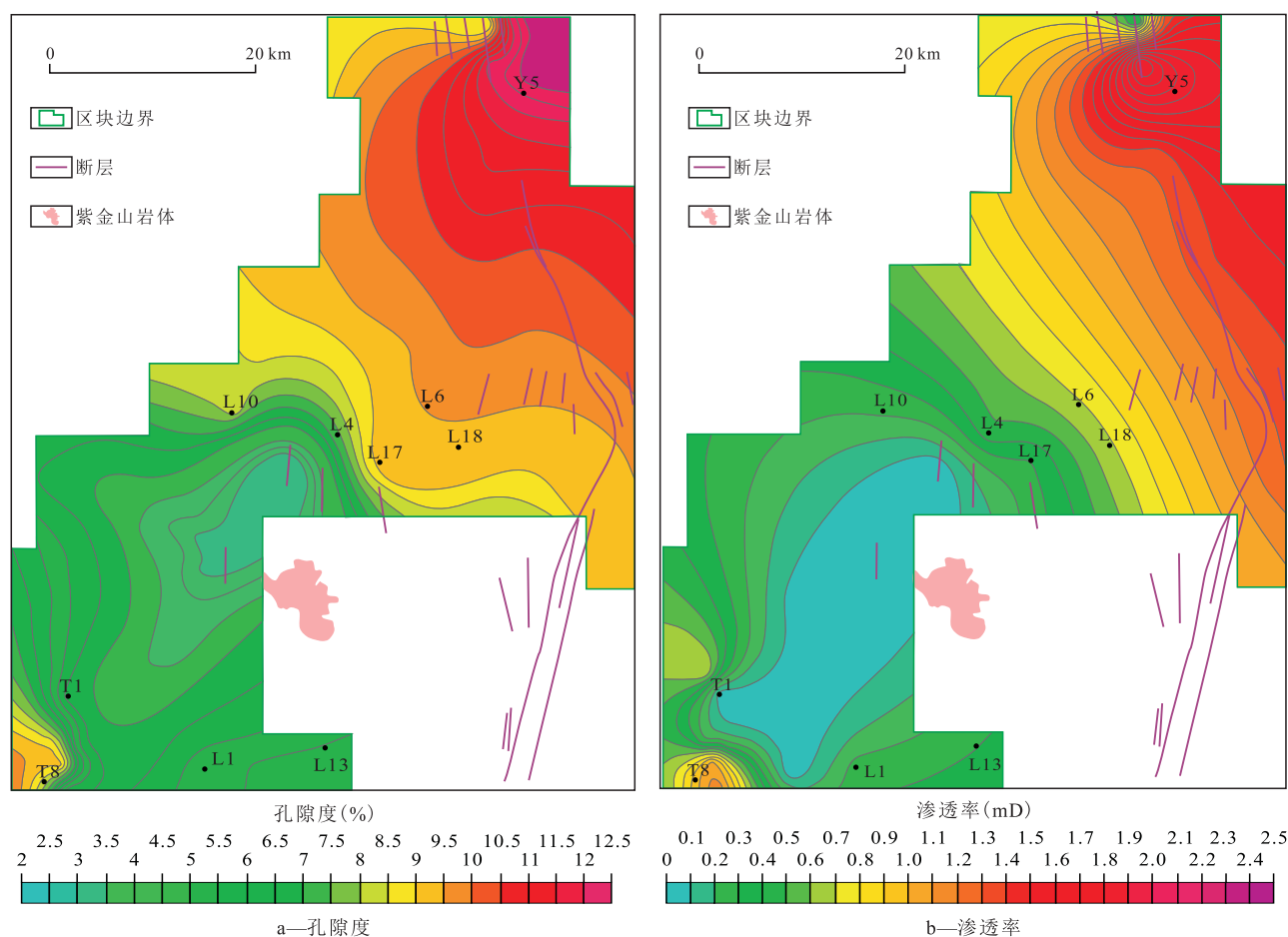


图7 临兴区块太原组致密砂岩储层物性平面分布

Fig.7 Reservoir contour maps of Taiyuan Formation in Block Linxing

含量由高到低依次为伊利石、高岭石、绿泥石及伊/蒙混层,其平均相对含量分别为54.25%,30.2%,9.75%和5.8%,主要呈充填式分布于粒间溶蚀孔隙或晶间微孔隙中。黏土矿物的稀土元素具轻稀土相对富集、重稀土显著亏损,稀土元素配分模式右倾, δEu 整体负异常,但部分样品正异常的特征。岩石薄片中发现火山物质,说明研究区黏土矿物为岩浆作用引起的热蚀变。紫金山岩体影响黏土矿物的相对含量及平面分布,受岩体区域热增温影响,岩体附近的蒙脱石易于蚀变形成伊利石,蚀变不完全时形成伊/蒙混层,高岭石易转化成绿泥石,因此,岩体附近伊利石、绿泥石及伊/蒙混层的相对含量较高,而高岭石相对含量较低。

黏土矿物含量及分布影响储层物性,其中伊利石、绿泥石及伊/蒙混层与储层物性均呈负相关关系,高岭石与储层物性呈正相关关系。受黏土矿物类型、含量及分布的影响,临兴区块太原组物性相对较好的致密砂岩储层主要分布于研究区的东北及西南部,为后期进一步油气勘探开发的有利目标区。

参考文献

- [1] 任磊夫.粘土矿物与粘土岩[M].北京:地质出版社,1992:1-20.
REN Leifu. Clay mineral and clay rock [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-20.
- [2] 伏万军.粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J].古地理学报,2000,2(3):59-68.
FU Wanjun. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(3): 59-68.
- [3] 赵小会,文彩霞,石晓英,等.鄂尔多斯盆地东部上古生界黏土矿物主控因素分析及研究意义[J].地质学报,2016,90(3):534-540.
ZHAO Xiaohui, WEN Caixia, SHI Xiaoying, et al. Controlling factors of upper Paleozoic clay minerals in the eastern Ordos basin and its study significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(3): 534-540.
- [4] 蒋裕强,张春,邓海波,等.黏土矿物对低渗致密砂岩储渗性能的影响[J].西南石油大学:自然科学版,2013,35(6):39-47.
JIANG Yuqiang, ZHANG Chun, DENG Haibo, et al. Influences of clay minerals on physical properties of low permeability and tight sandstones [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(6): 39-47.

- [5] 李明瑞,张清,段宏臻,等.苏里格气田上古生界主要含气层系粘土矿物分布及其主控因素[J].石油与天然气地质,2012,33(5):743-750.
LI Mingrui, ZHANG Qing, DUAN Hongzhen, et al. Clay mineral distribution and its controlling factors in the Upper Paleozoic gas reservoirs of Sulige gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 743-750.
- [6] 张峭楠,丁晓琪,万友利,等.致密碎屑岩中粘土矿物的形成机理与分布规律[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(3):174-182.
ZHANG Shaonan, DING Xiaoqi, WAN Youli, et al. Formation mechanism and distribution of clay minerals of deeply tight siliciclastic reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(3): 174-182.
- [7] 谢英刚,孟尚志,高丽军,等.临兴地区深部煤层气及致密砂岩气资源潜力评价[J].煤炭科学技术,2015,43(2):21-24,28.
XIE Yinggang, MENG Shangzhi, GAO Lijun, et al. Assessments on potential resources of deep coaled methane and compact sandstone gas in Linxing area[J]. Coal Science & Technology, 2015, 43(2): 21-24, 28.
- [8] 刘喜杰,马遵敬,韩冬,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴区块致密砂岩优质储层形成的主控因素[J].天然气地球科学,2018,29(4):481-490.
LIU Xijie, MA Zunjing, HAN Dong, et al. Research on the main factors of high quality tight sandstone reservoir in Linxing block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(4): 481-490.
- [9] 覃小丽,李荣西,席胜利,等.鄂尔多斯盆地东部地区太原组储层粘土矿物特征及成因[J].岩性油气藏,2016,28(1):49-57.
QIN Xiaoli, LI Rongxi, XI Shengli, et al. Characteristics and origin of clay minerals of Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(1): 49-57.
- [10] 杨华,付金华,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J].石油勘探与开发,2012,39(3):295-303.
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(3): 295-303.
- [11] 杨兴科,晁会霞,张哲峰,等.鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体特征与形成的动力学环境-盆地热力-岩浆活动的深部作用典型实例剖析[J].大地构造与成矿学,2010,34(2):269-281.
YANG Xingke, CHAO Huixia, ZHANG Zhefeng, et al. Characteristics of the Zijinshan complex and its dynamic environment in the East of the Ordos Basin-Analysis of a classic example on the deep processes of thermal-magma activity in the basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(2): 269-281.
- [12] 吴利仁.若干地区碱性岩研究[M].北京:科学出版社,1966:1-76.
WU Liren. Study on alkaline rocks in several areas[M]. Beijing: Science Press, 1966: 1-76.
- [13] 杨华,杨奕华,石小虎,等.鄂尔多斯盆地周缘晚古生代火山活动对盆内砂岩储层的影响[J].沉积学报,2007,25(4):526-534.
YANG Hua, YANG Yihua, SHI Xiaohu, et al. Influence of the late Paleozoic volcanic activity on the sandstone reservoir in the interior of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 526-534.
- [14] 刘玲,汤达祯,许浩.临兴上古生界致密储层裂缝发育特征及对致密气富集影响[J].高校地质学报,2019,25(3):457-465.
LIU Ling, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Development of fractures and its effects on gas accumulation in the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs of the Linxing Block[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(3): 457-465.
- [15] 傅宁,杨树春,贺清,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块致密砂岩气高效成藏条件[J].石油学报,2016,37(增刊1):111-120.
FU Ning, YANG Shuchun, HE Qing, et al. High-efficiency reservoir formation conditions of tight sandstone gas in Linxing-Shenfu blocks on the east margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(Supplement 1): 111-120.
- [16] EHYA F. Variation of mineralizing fluids and fractionation of REE during the emplacement of the vein-type fluorite deposit at Bozijan, Markazi Province, Iran[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 112: 93-106.
- [17] MACHEL H G, LONNÉE J. Hydrothermal dolomite: A product of poor definition and imagination[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(3/4): 163-171.
- [18] DAVIS G R, SMITH L B J. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [19] 肖荣阁,张汉城,陈卉泉,等.热水沉积岩及矿物岩石标志[J].地质前缘,2001,8(4):379-385.
XIAO Rongge, ZHANG Hancheng, CHEN Huiquan, et al. Hydrothermal sedimentary rock and indicators of minerals and rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 379-385.
- [20] 程晓玲,何将启,梁世友.粘土矿物在储层定量评价及预测中的应用——以苏北盆地台兴油田阜三段储层为例[J].油气地质与采收率,2006,13(1):17-19.
CHENG Xiaoling, HE Jiangqi, LIANG Shiyu. Application of clay mineral to quantitative evaluation and predication of reservoir-taking Fu3 member reservoir, Taixing Oilfield, Subei Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(1): 17-19.
- [21] 贾统权.粘土矿物与油藏演化的对应关系对储层敏感性的影响——以正理庄油田樊131区块沙四段滩坝砂油藏为例[J].油气地质与采收率,2007,14(5):12-15.
JIA Tongquan. Influence of the correspondent relation between clay mineral and oil reservoir evolution on formation sensitivity—case study of beach-bar sandstone oil reservoirs in Es₄ of Fan131 block, Zhenglizhuang Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(5): 12-15.
- [22] 王滢,唐洪明,杨海博,等.富含伊利石的低渗透砂岩酸化微观实验——以川中某气田须家河组为例[J].油气地质与采收率,2010,17(1):105-107.
WANG Ying, TANG Hongming, YANG Haibo, et al. A microcosmic experimental study on acidulation of low permeability sandstone filled with goethite—a case of Xujiahe Formation, certain gasfield, Central Sichuan[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1): 105-107.