2020年6月, 第26卷, 第3期, 313-322页 June 2020, Vol. 26, No.3, pp. 313-322

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019089

引用格式:江涛,韦涛,范旭,许卫凯,李勇.2020.鄂尔多斯盆地东缘 C-P 煤系致密砂岩储层敏感性分析[J]. 高校地质学报,26(3):313-322

鄂尔多斯盆地东缘C-P煤系致密砂岩储层敏感性分析

江涛1,韦涛1,范旭1,许卫凯2,李勇2*

中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司,天津 300450;
 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京100083

摘要:鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密砂岩储集层中矿物组成多样、孔隙结构复杂且黏土矿物含量高,直接影响储层 改造和开发效果。文章基于X衍射、铸体薄片、气测孔渗、压汞和敏感性实验,系统研究了储层敏感性及其影响因素。结 果表明研究区砂岩中石英和岩屑含量高,长石含量较低,以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩和石英砂岩为主。黏 土矿物主要为伊利石、高岭石、绿泥石以及伊/蒙混层;储层普遍低孔低渗,孔隙结构较差。速敏以太原组最强,山西组最 弱,与伊利石+绿泥石含量正相关,高岭石含量负相关。水敏下石盒子组最强,太原组最弱,与伊/蒙混层含量正相关。盐 敏与水敏有类似特点,与伊/蒙混层含量表现出正相关。酸敏山西组最强,下石盒子组最弱,与绿泥石和铁白云石矿物含量 正相关。碱敏性山西组最强,太原组最弱,受长石、石英和高岭石含量影响。相关认识有助于指导研究区钻井、压裂等施 工工艺选择和排采控制。

Sensitivity Analysis of Tight Sandstone Reservoirs of Carboniferous– Permian Coal-series in the Eastern Margin of the Ordos Basin

JIANG Tao¹, WEI Tao¹, FAN Xu¹, XU Weikai², LI Yong^{2*}

CNOOC Energy Technology & Services-Oil Production Service Co, Tianjin 300450, China;
 School of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: The Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the Linxing area of the Ordos Basin show various rock and mineral compositions, complex pore structures, and high clay mineral contents, which directly affect the reservoir engineering and development. Based on X-ray diffraction, casting thin sections, gas porosity and permeability test, mercury intrusion porosimetry and sensitivity experiments, the reservoir sensitivity and its influencing factors were systematically investigated. The results show that the sandstones in the study area are of high contents of fragment quartz and lithic, while the feldspar content is low. The sandstones consist mainly of lithic, lithic quartz, feldspar lithic, and quartz sandstones. Clay minerals are mainly of illite, kaolinite, chlorite and illite/smectite (I/S) mixed layer. The reservoir properties are of low porosity and permeability, with poor pore structure. The sandstones of Taiyuan Formation show the strongest velocity sensitivity, while the Shanxi Formation sandstones are of the weakest, positively correlated with illite and chlorite content, while negatively correlated with kaolinite content. As for water sensitivity, the Xiashihezi Formation sandstones are the strongest while the Taiyuan Formation sandstones are the weakest, which are positively correlated with the I/S contents. The salt sensitivity is similar to water sensitivity, showing a positive correlation with I/S contents. The acid sensitivity of the Shanxi Formation sandstones is the strongest while the Xiashihezi Formation sandstones is the weakest, which is positively correlated

收稿日期: 2019-10-27; 修回日期: 2019-12-27

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05066);国家自然科学基金(41702171)联合资助

作者简介:江涛,男,1973年生,工程硕士,中级工程师,主要从事石油工程及交通运输工程领域研究; E-mail: jiangtao12@cnooc.com.cn *通讯作者:李勇,男,1988年生,博士,副教授,主要从事非常规油气地质和开发的工作; E-mail: liyong@cumtb.edu.cn

with the contents of chlorite and ankerite. The alkali sensitivity is strong in the Shanxi Formation sandstones and weak in Taiyuan Formation sandstones, being associated with the contents of feldspar, quartz, and kaolinite. The results are helpful in guiding well drilling, fracturing and reservoir engineering processes, and also gas drainage controls.

Key words: tight sandstone gas; sensitivity; diagenesis; clay minerals; pore structure

Corresponding author: LI Yong, Associate Professor; E-mail: liyong@cumtb.edu.cn

储层敏感性分析是判别油气储层损害程度的 重要手段之一,可以揭示孔渗结构变化的影响因 素,为油气资源的经济性开发提供指导(王玉霞 等, 2018; 邵东波和陈建文, 2017)。中国致密气 资源丰富,但是气藏储量丰度低,产能递减快 (戴金星等, 2012)。油气藏投入生产开发之后, 致密砂岩储层因其低孔低渗的储层物性、复杂多 样的孔隙结构以及分布不均的矿物组成,外来流 体或地质条件的改变极易引发孔隙度和渗透率的 储层敏感性,从而使油气产量不同程度的受到损 害(李群等, 2009; 盛帅英等, 2016; 崔璀等, 2018)。储层敏感性主要包括速敏、水敏、盐敏、 酸敏和碱敏等。不同沉积体系的砂岩对应的敏感 性存在明显的差异(邱隆伟等, 2009; 邵东波和 陈建文, 2017; 李勇等, 2020), 已有工作尚未系 统研究储层敏感性,尤其是对特定层位、特定沉 积环境下的储层敏感性差异认识较少,对储层敏 感性控制特征尚不明确。因此,查清不同层位、 不同类型储层敏感性对指导气藏高效开发具有重 要的指导意义。

鄂尔多斯盆地东北缘临兴地区是国内致密气 和煤系气勘探开发的热点地区,其主要开发层位 包括石炭系一二叠系的太原组、山西组和下石盒 子组(赵达等,2016)。其中,太原组属于海陆过 渡相沉积,山西组为陆相河流一三角洲一湖泊相 沉积,下石盒子组则主体为河流相沉积(李勇 等,2017;Lietal,2019)。基于此,本文通过开 展临兴地区石炭系—二叠系致密砂岩的物质组成 和五敏实验测试,系统分析不同层位的岩矿组成 及孔渗结构对储层敏感性的影响,进而明确不同 层位物质组成差异对储层敏感性的控制机理。本 研究成果可为后续钻井和压裂工程的施工及排采 管理工作提供地质保障和理论依据。

1 区域地质背景

研究区位于晋西挠褶带和伊陕斜坡交接之处

(图1),构造较为平缓,总体为向西倾斜的单斜构造,由南向北构造发育程度逐渐增大,鼻隆幅度逐渐升高(谢英刚等,2016;赵达等,2016)。受早白垩世紫金山岩体侵入的影响,局部隆起,使得研究区东部断裂呈放射状。研究区上古生界地层自下而上分别发育本溪组、太原组、山西组、石盒子组和石千峰组,其中山西组的5(4+5)号煤层和太原组9(8+9)号煤层是区内主要含煤和含气地层(谢英刚等,2016;李勇等,2017;Lietal.,2019)。

2 岩石学和矿物学特征

2.1 岩石类型

X衍射全岩分析表明,研究区矿物组分主要以 石英、长石和岩屑为主,方解石含量高。其中下 石盒子组石英含量44.1%~90.3%,平均70.3%;长 石含量0~27.2%,平均9.0%;岩屑含量9.7%~ 45%,平均20.7%。含有少量菱铁矿等酸敏矿物, 平均1.6%,不含铁白云石,黏土矿物平均含量为 11.4%。主要岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑石英 砂岩为主,长石砂岩等不发育(图2a;图3a)。

山西组石英含量1.4%~92.7%,平均66.6%; 长石含量0~12.2%,平均0.8%;岩屑含量7.3%~ 98.7%,平均32.6%,铁白云石平均含量3.1%,另 外还有少量的菱铁矿和黄铁矿,黏土矿物平均含 量17.6%。以岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主,发育 少量长石岩屑砂岩和石英砂岩(图2b;图3b)。

太原组石英含量0~93.2%,平均65.0%;长石 含量0~47.6%,平均8.2%;岩屑含量6.1%~62%, 平均26.8%,铁白云石平均含量4.7%,菱铁矿平 均含量4.8%,还有少量黄铁矿,黏土矿物平均含 量14.9%。岩性以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩为主, 其次是长石岩屑砂岩和石英砂岩,偶见岩屑长石 砂岩(图2c;图3c)。

总体而言,研究区下石盒子组、山西组和太 原组以细粒、细一中粒和中粒砂岩为主,碎屑成





分主要为石英、长石和岩屑。填隙物主要是黏土 杂基和自生胶结物,以硅质胶结和泥质胶结为 主,其次是碳酸盐胶结,接触方式主要为凹凸接 触和线一凹凸接触。

2.2 黏土矿物组分

研究区黏土矿物主要包括高岭石、伊利石、 绿泥石、伊/蒙混层以及少量的绿/蒙混层。伊利石 主要呈片丝状产出,充填孔隙,易水化膨胀和迁 移(黄思静等,2009;孟万斌等,2011)。高岭石 多呈书页状和蠕虫状,产状主要为充填式,多由 长石蚀变而来,结构松散。绿泥石多呈针叶状, 其产状主要为薄膜状充填孔隙,易酸蚀,不易水 化膨胀。伊/蒙混层多呈片状,遇水易膨胀(高 翔,2017; Boles et al., 1979)。 下石盒子组中伊利石相对含量5%~84%,平均 49.6%;高岭石相对含量3%~40%,平均19%;绿 泥石相对含量3%~43%,平均17.5%;伊/蒙混层相 对含量3%~32%,平均13.7%。山西组中伊利石相 对含量0.59%~86%,平均26.0%;高岭石相对含量 0~56%,平均10.8%;绿泥石相对含量0~58%,平 均10.7%;伊/蒙混层相对含量0~21%,平均5.6%。 太原组伊利石相对含量5%~100%,平均69.7%; 高岭石相对含量0~92%,平均15.1%;绿泥石相对 含量1%~74%,平均10.5%;伊/蒙混层相对含量 0~18%,平均4.7%(图3d, e, f)。

2.3 孔渗结构特征

储层的储集性能和产能在很大程度上由储层 的孔隙度和渗透率影响,储层物性是储层微观孔





隙结构的宏观反映, 孔隙结构则在微观尺度上控制着储层物性(王峰等, 2009; 郭艳琴等, 2019)。气测孔渗结果表明,研究区下石盒子组孔隙度主要分布在2.47%~13.14%,平均5.00%;渗透率则分布在0.00~1.46 mD,平均0.14 mD。山西组孔隙度在0.59%~8.67%,平均为4.79%;渗透率在0.00~0.39 mD,平均为0.11 mD,孔隙度和渗透率都最低。太原组孔隙度在0.66%~11.59%,平均5.34%;渗透率一般小于1 mD,平均为0.18 mD,相对山西组物性较好,比下石盒子组较差(图4)。

根据压汞法毛细管压力曲线测定(表1),结 果表明,下石盒子组储层排驱压力大,为0.034~ 6.893 MPa,平均1.046 MPa。储层最大连通孔喉半 径较小,渗透性较差,歪度平均-0.208,属细歪 度,峰态平均0.842,表现为低缓峰,孔喉分布不 均匀。山西组排驱压力更大,平均1.888 MPa;歪 度为-0.185 (细歪度),峰态为0.765 (低缓峰), 半径均值为0.115 μm。太原组砂岩的排驱压力为 1.342 MPa,介于下石盒子和山西组之间,其他压 汞曲线参数也表现出相应的特征,这与孔隙度和 渗透率表现出很好的一致性(图5)。







 Table 1
 Characteristic of pore structure of tight sandstones revealed by mercury porosimetry

参数		排驱压力/MPa	歪度	峰态	半径均值/µm
下石 盒子组	最大值	6.893	0.553	1.450	4.179
	最小值	0.034	-1.000	0.453	0.023
	平均值	1.046	-0.208	0.842	0.404
山西组	最大值	13.780	0.439	1.102	0.217
	最小值	0.672	-1.000	0.510	0.020
	平均值	1.888	-0.185	0.765	0.115
太原组	最大值	6.882	0.558	1.268	1.312
	最小值	0.138	-1.000	0.477	0.005
	平均值	1.342	0.087	0.919	0.292



3 敏感性特征

根据石油天然气行业标准 SY/T 5358-2010 (油气田开发专业标准委员会,2010),储层敏感 性流动实验评价方法对储层岩样进行敏感性评 价,本文引入渗透率比值的概念,并依次定义速 敏、水敏、盐敏、酸敏及碱敏渗透率比值为Kvs、 Kws、Kss、Kacs及Kals。在五敏实验数据的基础 上,计算得到敏感指数和渗透率比值,主要得到 以下参数(图6)。

$$K_s = \frac{K_n}{K_{is}} \times 100\%; \quad D_s = 1 - K_s$$

K。一渗透率比值;

 K_{is} —(i 依次表示: v, velocity; w, water; s, salt; ac, acid; al, alkali)

D。一渗透率损害率;

K_a一当前实验条件下的渗透率的值;

K_i一地层原始渗透率。

3.1 速敏性

速敏性是因流体流动速度变化引起储层内矿物迁移,堵塞孔喉而造成的渗透率下降的现象(张振成等,2004;邵东波和陈建文,2017;王玉 霞等,2018)。分析发现,下石盒子组速敏指数 0.15~0.44,渗透率损害率15.38%~44.12%,表现为 弱、中等偏弱速敏,注入流体储层损害程度较低。 山西组速敏指数0.16~0.31,渗透率损害率15.56%~ 31.11%,表现为弱、中等偏弱速敏,注入流体对储 层损害程度较低。太原组速敏指数0.17~0.79,渗透



率损害率21.0%~79.42%,表现为弱、中等偏弱和 强速敏,注入流体对储层影响相对下石盒子组和山 西组较强,三个层位的速敏性总体较弱。

3.2 水敏性

水敏性是指当有与储层不匹配即矿化度低的 外来流体进入后,引起黏土矿物的水化、膨胀、 分散及迁移堵塞孔喉而导致储层渗透率下降的现 象(宫清顺等,2012;廖纪佳等,2012)。水敏实 验分析表明,下石盒子组水敏指数0.38~0.83,渗 透率损害率38.46%~82.67%,表现为中等偏强、强 水敏,表明储层水敏性较强。山西组水敏指数 0.64~0.71,渗透率损害率63.51%~72.76%,表现 为强水敏,表明储层水敏性更强。而太原组相对 来说水敏指数0.32~0.89,渗透率损害率31.71%~ 89.40%,表现为中等偏弱、强水敏。储层水敏性 差别较大,表明储层黏土矿物分布不均。

3.3 盐敏性

盐敏性是指当外来流体与地层水矿化度不匹

配时,引起的黏土矿物水化、膨胀以及分散运移 堵塞孔喉而造成储层渗透率下降(高波等, 2005; Yin et al., 2017)。通过实验分析临界盐度 的分布可知,下石盒子组临界盐度12.5~50 g/L, 表现为弱、中等偏弱盐敏,表明注入流体对储层 的损害程度较低。而山西组临界盐度24.19~40 g/L, 表现为弱、中等偏弱盐敏,表明注入流体对储层 的损害程度较低。太原组临界盐度10.8~40 g/L, 表现为弱、中等偏弱盐敏,表明注入流体对储层 的损害程度较低。总体而言,研究区三个层组盐 敏偏弱,注入流体对储层影响较弱。

3.4 酸敏性

酸敏性是指储层注入酸液后,与矿物发生反 应产生沉淀或使矿物颗粒脱落,导致储层渗透率 发生变化(杨建等,2006;柳娜等,2008)。由实 验分析结果知,下石盒子组酸敏程度0.06~0.8,渗 透率损害率5.88%~80.15%,表现为弱、中等和强 酸敏,以弱酸敏为主,表明酸液进入储层后对储 层的损害程度由较高到低。山西组酸敏程度0.35~ 0.54,渗透率损害率36.24%~54.14%,表现为中等 酸敏,表明酸液对储层的损害程度适中。太原组 酸 敏 程 度 0.30~0.89,渗透 率 损害 率 30.03%~ 89.43%,表现为中等酸敏、强酸敏,以中等酸敏 为主,表明酸液对储层的损害程度适中。

3.5 碱敏性

碱敏性是指高PH值流体注入储层与岩石和流体接触发生反应,地层岩石脱落迁移或产生沉淀堵塞孔喉导致储层渗透率下降(李云等,2014; 王玉霞等,2018)。下石盒子组碱敏程度-0.20~0.68,渗透率损害率-20.10%~68.13%,表现为无碱敏、弱碱敏、中等偏弱和中等碱敏,表明碱液对储层的损害程度较弱。山西组碱敏程度0.27~0.42,渗透率损害率27.0%~42.10%,表现为弱、中等偏弱碱敏,表明碱液对储层损害程度较弱。太原组0~0.39,渗透率损害率0~38.66%,表现为无碱敏、弱碱敏,表明碱液对储层损害程度较弱。

4 影响因素讨论

造成储层敏感性的原因主要包括储层岩石矿 物组成、孔喉结构以及自身流体性质等(尹昕, 2005;李芳芳等,2012;李云等,2014)。本文在 岩矿特征的基础上,分析储层敏感性与岩矿特征 之间的耦合关系,以期为研究区油气资源后续开 发提供指导。

4.1 岩石学特征与敏感性的相关性

通过前文研究发现,研究区岩石中不稳定组 分较高,外来流体进入储层更容易发生物理化学 作用,导致储层渗透率损害(盛帅英等,2016; 康逊等, 2017; 王玉霞等, 2018; 崔璀等, 2018)。通过图3(a)和图6可以看出,山西组刚 性的石英颗粒和碎屑组分含量最高,而下石盒子 组和太原组含量相对较低,刚性的石英骨架颗粒 支撑原有孔隙结构,外来流体的介入不易造成矿 物颗粒的脱落而堵塞孔喉(赵梓彤, 2015)。因 此,山西组表现出较弱的速敏和水敏指数。储层 长石含量较高时,酸性介质易与长石作用形成含 钙沉积或者非晶质SiO2凝胶体,从而堵塞孔隙, 或者在强碱介质下,容易产生新的硅酸盐沉淀物 或硅胶凝聚物(张绍槐, 1994; 田永东和武杰 等, 2014), 所以, 山西组相对于下石盒子组和太 原组由于长石含量较高,在酸性或者碱性介质的 作用下更容易产生沉淀进而堵塞孔喉,因而表现 出更强的酸敏和碱敏程度。

4.2 矿物学特征与敏感性的相关性

成岩矿物与储层敏感性存在着千丝万缕的联 系,本文从储层基本特征出发,结合敏感性评价 试验结果,分析其相关性(图7)。

4.2.1 速敏相关性

实验结果表明,储层速敏性与伊利石+绿泥石 含量和高岭石含量存在较好的相关性。其中,伊 利石+绿泥石与速敏指数弱正相关(图7a),高岭 石与速敏指数弱负相关(图7b)。高岭石平均相对 含量在下石盒子组为19%,山西组为10.8%,太原 组为15.1%。伊利石平均相对含量下石盒子组为 49.6%,山西组为26.0%,太原组为69.7%,伊利 石含量太原组最高,山西组最低,与速敏指数存 在较好的正相关性。进一步分析认为,高岭石粒 径较小,小于孔喉直径,微粒被流体冲出形成 "出砂",高岭石不会堵塞孔喉,不是主要的速敏 性因素。而伊利石和绿泥石含量较高,且伊利石 主要呈片丝状产出,流速变化容易引起矿物颗粒 脱落,在喉道处堆积,造成"桥堵"引起储层渗 透率损害,是主要的速敏因素(李芳芳等,



(a) 伊利石+绿泥石与速敏相关性;(b) 高岭石与速敏相关性;(c) 伊利石+绿泥石与水敏相关性;(d) 伊/蒙混层与水敏相关性;
 (e) 伊/蒙混层与盐敏相关性;(f) 高岭石与水敏相关性;(g) 绿泥石与酸敏相关性;(h) 高岭石与碱敏相关性

图 7 五敏指数与黏土矿物相关性曲线 Fig. 7 Correlation curves between "five-sensitivity" proxies and clay mineral contents

2012;盛帅英等,2016)。因此,太原组砂岩的高 伊利石含量是影响速敏性最主要的因素。

4.2.2 与水敏和盐敏相关性

现有研究中,黏土矿物遇水膨胀能力由强到 弱依次为:蒙脱石、伊/蒙混层、绿/蒙混层、伊利 石和绿泥石,高岭石遇水不膨胀(盛帅英等, 2016;高翔,2017)。通过对研究区岩矿组成特征 和相关性分析可以发现,绿泥石+伊利石含量与水 敏和盐敏指数基本无相关性(图7c),伊利石和绿 泥石遇水基本不膨胀,不是引起水敏和盐敏的主 要因素;水敏和盐敏与伊/蒙混层含量表现出很强 的正相关关系(图7d,e),说明伊/蒙混层由于水 的介入,极易发生膨胀进而堵塞孔喉,另外矿化 度的改变也会引起矿物颗粒迁移。因此,盐敏指数与伊/蒙混层含量相关性略高于水敏;水敏与高岭石含量弱负相关甚至没有相关性(图7f),这与高岭石的遇水稳定性是密不可分的。

4.2.3 与酸敏相关性

铁白云石和绿泥石会与酸发生反应产生沉淀 或胶体,堵塞孔喉,产生酸敏效应(柳娜等, 2008)。下石盒子组几乎不含铁白云石,山西组铁 白云石含量为3.1%,太原组为4.7%。结合图4d可 知,铁白云石是造成酸敏的主要碎屑组分。黏土 矿物中,绿泥石含量与酸敏指数进行相关性分 析,可知绿泥石与酸敏指数表现出正相关关系 (图7g)。 铁白云石与酸反应主要表现为,氢氟酸与含 钙矿物(这里指铁白云石)生成氟化钙沉淀,从 而堵塞孔喉,降低储层渗透率。绿泥石的酸敏性 表现在含铁矿物与酸作用,会膨胀迁移,生成氢 氧化铁胶体,进而堵塞孔喉,降低储层渗透率 (邵东波和陈建文,2017)。实验样品中山西组发 现局部高含量的方解石,判定为方解石脉,但是 方解石与酸反应不会产生沉淀。

4.2.4 与碱敏相关性

本文4.1节已经指出石英、长石类矿物的碱敏 性,这里主要研究黏土矿物的碱敏性。高岭石与碱 敏指数表现出很好的正相关性(图7h),而伊利石+ 绿泥石和伊/蒙混层与碱敏指数基本没有相关性,说 明黏土矿物中主要的碱敏矿物是高岭石,与碱发生 反应堵塞孔喉,对储层造成伤害。有学者认为,强 碱进入储层后会影响黏土矿物颗粒表面电荷分布, 发生物理反应,导致颗粒分散运移堵塞孔喉 (Mohnot et al., 1987),从伊利石+绿泥石与碱敏指数 的相关性可以看出来,两者之间仅仅是表现出微弱 的负相关性,并没有产生储层碱敏性。

4.3 不同层位的差异

通过前文研究,本文从研究区下石盒子组、 山西组和太原组的岩矿组成特征入手,结合储层 敏感性实验数据,分析了岩石学特征和矿物学特征与储层敏感性之间的相关性,但是研究区不同 层位间其储层敏感性因岩矿组成和地质环境的不 同也会存在一定的差异。

4.3.1 速敏性

通过敏感性实验分析数据,分析在不同驱替 速度下研究层组不同层位间渗透率比值的差异 (图8a),结果发现山西组>下石盒子组>太原组, 说明相比较而言,太原组渗透率损害值更大,相 对更加敏感。结合三个层组相关性分析结果及岩 矿组分含量,太原组由于有更高含量的伊利石, 流速的改变会使伊利石矿物颗粒脱落,当孔喉较 小时,会在孔喉处发生堵塞,使得渗透率下降, 具有更强烈的速敏性。下石盒子组和山西组伊利 石含量相对较低,渗透率比值均高于太原组,速 敏性略低。

4.3.2 水敏性

在不同矿化度注入条件下,不同层位样品渗透率比值的变化(图9a),可以看出下石盒子组渗透率损害率最大,太原组最小。结合相关性分析结果及岩矿组分含量可知,水敏性与伊/蒙混层含量正相关,下石盒子组具有更高含量的伊/蒙混层矿物,遇水易膨胀或迁移,在孔喉处堆积发生堵



(a) 渗透率比值随驱替速度变化规律; (b) 不同层位不同pH下渗透率比值; (c) 不同层位不同pH下渗透率比值





塞产生水敏性,导致下石盒子组水敏性最强,山 西组和太原组相对较弱。对于选取不同样品,其 结果略有偏差,说明了储层非均质性强。

4.3.3 盐敏性

分析不同层位样品注入不同矿化度地层水, 渗透率比值的变化曲线,可以定性分析其储层水 敏性(图8b),其中下石盒子组最低,太原组渗透 率比值最高,说明渗透率损害率依次降低。与水 敏类似,下石盒子组有更高含量的伊/蒙混层,一 方面遇水膨胀,堵塞孔喉;另一方面,矿化度的 改变会使伊/蒙混层发生迁移,在孔喉处堆积发生 堵塞,因此,下石盒子组盐敏性最强,相应的山 西组和太原组相对较弱。对于不同样品的选择, 其结果略有偏差。

4.3.4 酸敏性

储层酸敏性研究,一般采用注酸前后渗透率 比值的变化来反映储层酸敏性。通过酸敏性实验 分析(图9b),山西组注酸后渗透率比值最低,说 明山西组渗透率损害最多,储层酸敏性最强。同 理,下石盒子组注酸后渗透率比值最高,渗透率 损害最少,储层酸敏性最弱。前文指出,酸性介 质与绿泥石或铁白云石反应产生沉淀或胶体堵塞 孔喉产生酸敏效应。山西组绿泥石含量并非最 高,铁白云石含量虽然相对较高,但与太原组相 差不大,说明储层酸敏性除了与绿泥石和铁白云 石有关外,必然存在其他的影响因素,在下文具 体指出。

4.3.5 碱敏性

采用不同PH碱液注入样品的方法可以研究储 层碱敏性(朱华银等,2012)。山西组渗透率比值 最低,说明储层碱敏性最强,相应的太原组最 弱。碱敏性主要是石英、长石等碱敏矿物与碱液 反应产生沉淀堵塞孔喉,对渗透率造成损害,或 者含铁矿物反应产生铁质胶体堵塞孔喉。结合相 关性分析及岩矿组成研究,山西组长石和石英含 量略低于下石盒子组,高岭石也略低,铁白云石 含量较高,这也说明碱敏酸敏类似受其他因素控 制(图8c)。同样的,不同样品之间实验结果略有 差异,均表明储层非均质性强。

4.4 孔渗特征与储层敏感性

山西组孔隙度和渗透率相对于下石盒子组和 太原组拥有更差的储层物性和孔隙结构。而储层 敏感性中,无论是速敏、水敏、盐敏、酸敏和碱 敏,都是由于外界条件的变化,引起矿物颗粒脱 落或是产生沉淀进而堵塞孔喉,从而产生所谓的 储层敏感性。由此可知,如果储层物性越差,孔 隙结构以细孔喉为主,矿物颗粒脱落或是产生沉 淀更容易堵塞小孔,进而引发储层敏感性。

在储层孔渗特征和孔隙结构的基础上,结合 不同组储层敏感性的研究。结果表明,山西组砂 岩具有更差的孔隙度和渗透率,较细的孔喉结 构,相应的储层敏感性也会受其控制。也就是 说,由于外界的条件的改变,矿物颗粒的脱落或 是沉淀更容易堵塞孔喉,产生储层敏感性。相应 的下石盒子组和太原组砂岩因为孔渗特征和孔隙 结构相对山西组较好,因而相对于山西组储层敏 感性也相对较弱。

其中,速敏、水敏和盐敏受储层孔隙结构影 响较弱,酸敏和碱敏受储层孔隙结构影响较强。 山西组酸敏和碱敏相对于下石盒子组和太原组敏 感性最强,机理上与敏感性矿物反应导致矿物颗 粒脱落或是沉淀堵塞孔喉有关。山西组敏感性矿 物含量并非最高,孔隙结构是最差的,酸性或碱 性介质反应后,会产生沉淀或胶体,使得窄喉道 更容易被堵塞,酸敏和碱敏最强。不同层位对于 储层敏感性的影响,是一个受多因素影响的结 果,需要进一步定量化不同尺度下敏感性的控制 因素,在未来的研究中将展开更深入的分析。

通过储层敏感性实验分析数据,利用临界渗 透率与初始渗透率的比值计算其储层敏感指数, 分析其敏感性强弱,然后引入渗透率比值的参 数,比较不同层位间储层敏感性的差异,得到如 上结果,其结果虽然略有偏差,但是与储层敏感 性及与岩矿特征和孔隙结构特征的相关性研究结 果基本相吻合,说明实验数据可信度较高,能够 较好地反映不同层位由于岩矿组成和水岩相互作 用的差异而导致的储层敏感性的差异。

5 结论

(1)临兴地区上古生界下石盒子组、山西组和太原组主要岩石类型以岩屑砂岩、岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩和长石砂岩为主,以细粒和中粒为主。黏土矿物主要为伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙混层,绿/蒙混层几乎不发育。具有低孔

低渗的特征,孔隙结构较差,窄喉道占优势。

(2)致密砂岩速敏总体表现为弱一中等偏弱;水敏总体表现为中等偏弱一中等偏强以及强水敏;盐敏表现为弱一中等偏弱;酸敏总体表现为中等、中等偏弱以及弱酸敏;碱敏则总体表现为中等偏弱一弱。

(3)不同层位间不稳定矿物和黏土矿物含量 的差异造成不同层位敏感性差异。速敏性太原组 最强,山西组最弱,与伊利石+绿泥石和高岭石含 量表现出相应的相关性。水敏性下石盒子组最 强,太原组水敏性最弱,与伊/蒙混层含量正相 关。盐敏性与水敏性类似,与伊/蒙混层含量表现 出正相关性,略有起伏,与矿物颗粒脱落相关。 酸敏性以山西组最强,下石盒子组最弱,与绿泥 石和铁白云石矿物正相关,也与较差的孔隙结构 有关。碱敏性以山西组最强,太原组最弱,受长 石、石英和高岭石含量影响,主要与较差的孔隙 结构有关。

参考文献 (References):

- 崔瓘,郑荣才,蒋宜勤,等.2018.准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组储 层特征及敏感性[J].石油与天然气地质,39(2):398-408.
- 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 2012. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 39(3): 257-264.
- 高翔.2017. 黏土矿物学[M]. 北京:化学工业出版社.
- 高波,康毅力,何健,等.2005.特低渗透砂岩储层盐敏实验及应用[J]. 钻井液与完井液,22(4):49-51+86.
- 郭艳琴,何子琼,郭彬程,等.2019.不同煤阶控制下的煤系储层物性研究[J]. 岩性油气藏, 31(5):1-11.
- 官清顺,寿建峰,姜忠朋,等. 2012. 淮噶尔盆地乌尔禾油田三叠系百 口泉组储层敏感性评价[J]. 石油与天然气地质, 33(2): 307-313.
- 康逊,胡文瑄,王剑,等.2017.扇三角洲砂砾岩油藏储层敏感性研究 ──以准噶尓盆地玛湖凹陷百口泉组为例[J].中国矿业大学学 报,46(3):596-605.
- 黄思静,黄可可,冯文立,等.2009.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,38(5):498-506.
- 李芳芳,高旺来,杨胜来,等.2012.安塞油田高52区低渗油藏储层敏 感性研究[J].特种油气藏,19(4):126-129.
- 李云,祁利祺,胡作维,等.2014. 准噶尔盆地阜东斜坡中侏罗统头屯 河组储层敏感性特征[J]. 岩性油气藏,26(1):52-66.
- 李勇, 孟尚志, 吴鹏, 2017. 等. 煤层气成藏机理气藏类型划分——以 鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 天然气工业, 37(8): 22-30.
- 李勇,王延斌,孟尚志,等,2020.煤系非常规天然气合采地质基础理 论进展及展望[J].煤炭学报,45(4):1406-1418
- 李群,郭建华,郭原草,等.2009.华池油田华152区低渗透砂岩储层 敏感性及其形成机理[J].矿物岩石,29(2):78-83.

- 廖纪佳,唐洪明,朱筱敏,等.2012.特低渗透砂岩储层水敏实验及损 害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第8油层为例[J]. 石油与天然气地质,33(2):321-328.
- 柳娜,南珺祥,刘伟.2008.鄂尔多斯盆地中部长6和长8储层特征及酸 敏机理[J].石油学报,(4):588-591.
- 孟万斌,吕正祥,冯明石,等.2011.致密砂岩自生伊利石的成因及其 对相对优质储层发育的影响——以川西地区须四段储层为例[J].石 油学报,32(5):783-790.
- 邱隆伟,于杰杰,郝建民,等.2009.南堡凹陷高南地区东三段低渗储 层敏感性特征的微观机制研究[J].岩石矿物学杂志,28(1):78-86.
- 邵东波,陈建文.2017.鄂尔多斯盆地致密砂岩储层敏感性特征及其控制因素—以新安边地区延长组长6储层为例[J].西安石油大学学报 (自然科学版),32(2):55-67.
- 盛帅英,胡清雄,高辉,等.2016.低渗储层原位条件下应力敏感性评价[J].北京大学学报(自然科学版),52(6):1025-1033.
- 田永东,武杰.2014. 沁水盆地南部高煤阶煤储层敏感性[J]. 煤炭学报, 39(9):1835-1839.
- 王玉霞,周立发,焦尊生,等.2018.鄂尔多斯盆地陕北地区延长组致 密砂岩储层敏感性评价[J].吉林大学学报(地球科学版),48(4): 981-990.
- 王峰,田景春,陈蓉,等.2009.鄂尔多斯盆地北部上古生界盒8储层 特征及控制因素分析[J].沉积学报,27(2):238-245.
- 谢英刚,叶建平,潘新志,等.2016.鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子 组成岩作用类型及其对油气储层的控制作用[J].中国矿业,25(7): 166-172.
- 杨建,康毅力,吴娟,等.2006.富含铁致密砂岩储层的酸敏性评价 ——以川中地区上三叠统须家河组气藏为例[J].油气地质与采收 率,13(6):70-72+110.
- 油气田开发专业标准委员会. 2010. SY/5358-2010 储层敏感性流动实验 评价方法[S]//中华人民共和国石油天然气行业标准. 北京: 石油工 业出版社.
- 尹昕. 2005. 大牛地气田砂岩储层敏感性实验研究[J]. 天然气工业,(8): 56-59+11.
- 赵达,许浩,汪雷,等.2016.临兴地区山西组致密砂岩储层特征及成 因探讨[J].岩性油气藏,28(4):51-57.
- 赵梓彤. 2015. HH油田致密砂岩储层敏感性研究[D]. 武汉:长江大学.
- 朱华银,蒋德生,安来志,等.2012.川西地区九龙山构造砾岩储层敏 感性实验分析[J].天然气工业,32(9):40-43.
- 张绍槐. 1994. 保护储集层技术[M]. 北京:北京石油工业出版社.
- 张振成,孙建孟,刘志云,等.2004.利用测井资料预测大港油田储集 层敏感性[J].石油勘探与开发,31(5):66-70.
- Boles J R and Franks S G. 1979. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of Southwest Texas; implications of smectite diagenesis on sandstone cementation [J]. Journal of Sedimentary Research, 49(1): 55–70.
- Li Y, Yang J, Pan Z, et al. 2019. Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: A discussion of upper Paleozoic coal-bearing strata in the east margin of the Ordos basin, China [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 93(1): 111–129.
- Mohnot S M, Gulf R and Foley W L. 1987. A study of mineral/alkali reactions [J]. Society of Petroleum Engineers, 2(4): P312.
- Yin S, Ding W L, Zhou W, et al. 2017. In situ stress field evaluation of deep marine tight sandstone oil reservoir: A case study of Silurian strata in northern Tazhong area, Tarim Basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 38(2): 409–418.