

引用格式:靳军,唐洪明,周基贤,等.阜康凹陷头屯河组敏感性评价及主控因素[J].油气藏评价与开发,2022,12(6):935-944.

JIN Jun, TANG Hongming, ZHOU Jixian, et al. Sensitive evaluation and main controlling factors of Toutunhe Formation in Fukang Sag [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 935-944.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.06.013

阜康凹陷头屯河组敏感性评价及主控因素

靳军¹,唐洪明²,周基贤¹,刘淼¹,张文锦²,周翊²

(1. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000;

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:准噶尔盆地阜康凹陷头屯河组储层物性以低孔低渗为主,填隙物类型多,孔隙结构复杂。潜在酸敏损害与室内评价出现严重矛盾,储层敏感性表现出差异性。通过岩心驱替、铸体薄片鉴定、核磁共振、扫描电镜等岩心实验,开展了储层敏感性评价及控制因素研究。结果表明,头屯河组具有弱速敏性、中等偏强—强水敏性、中等偏强—强盐敏、中等偏强的碱敏性以及弱—中等偏弱酸敏性特征。储层敏感性差异与填隙物类型多,孔隙结构复杂等因素有关;富自生石英(直径小于5 μm)胶结物的头屯河组储层,酸碱液溶蚀表层黏土导致自生石英等晶体从骨架颗粒表面剥离,形成可移动微粒,堵塞孔隙,呈现中偏强—强酸敏、碱敏损害,这种形式的损害机理与传统二次沉淀等损害形式不同。敏感性损害机理表明,各类敏感性具有叠加效应。

关键词:阜康凹陷;头屯河组;敏感性;自生石英;控制因素

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Sensitive evaluation and main controlling factors of Toutunhe Formation in Fukang Sag

JIN Jun¹, TANG Hongming², ZHOU Jixian¹, LIU Miao¹, ZHANG Wenjin², ZHOU Yi²

(1. Experimental Testing Institute of Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The Toutunhe Formation in Fukang Sag, Junggar Basin, is mainly characterized by low porosity and low permeability with many types of fillers and complex pore structures. But there is a serious contradiction between the potential acid sensitivity damage and the indoor evaluation, and the variability exists in the sensitivity of the reservoir. Therefore, the reservoir sensitivity evaluation and control factors are studied by the core experiments such as core displacement, casting thin section identification, nuclear magnetic resonance, scanning electron microscope, etc. The results show that in Toutunhe Formation, the velocity sensitivity is weak, the water sensitivity and salt sensitivity are both upper medium to strong, the alkali sensitivity is upper medium, and the acid sensitivity is weak to moderate weak. The difference of reservoir sensitivity is related to many types of interstitial fillers and complex pore structures. In the Toutunhe Formation reservoir enriched with the cement of authigenic quartz, whose diameter is less than 5 μm, the corrosion of the surface clay by the acid-base liquid lead to the exfoliation of the crystals such as the authigenic quartz. Then, these movable particles obstruct the pore throat. The mechanism of this kind of damage which shows a upper medium to strong acid sensitivity is different from that of the other traditional damage such as the secondary precipitation. The sensitivity damage mechanism shows that all kinds of sensitivities have superposition effects.

Keywords: Fukang Sag; Toutunhe Formation; sensitivity; authigenic quartz; control factor

收稿日期:2021-08-30。

第一作者简介:靳军(1970—),男,博士,教授级高级工程师,从事石油地质与开发研究。地址:新疆克拉玛依市友谊路100号,邮政编码:834000。E-mail:jinjun@petrochina.com

通信作者简介:唐洪明(1966—),男,博士,教授,从事油气藏地质学和储层保护技术的研究与教学工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:swpithm@vip.163.com

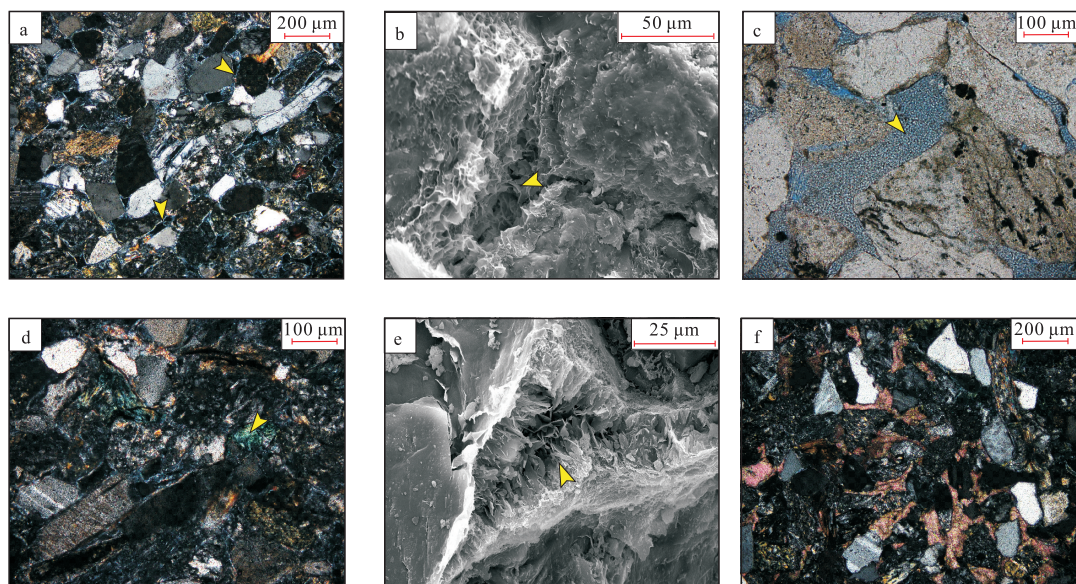
准噶尔盆地阜康凹陷侏罗系头屯河组是该地区的主力产油层位,在钻完井、酸化、压裂、注水、采油、提高采收率等勘探开发过程中,储层敏感性对单井产能影响大,并且制约了油气开发效率^[1-5]。对于储层敏感性损害程度、机理与黏土矿物类型、含量间关系,前人做了大量的研究工作,普遍认为影响敏感性的主要因素为黏土矿物类型及其含量^[6-8],与孔喉大小及碎屑组分也有一定联系。水敏损害率与蒙脱石、伊/蒙间层相对含量呈正相关;酸敏损害率与绿泥石含量呈正相关;速敏损害率与高岭石、伊利石相对含量呈正相关,并且通常孔喉半径越小,越容易造成储集层敏感性增强。但敏感性损害与储层物性的关系,及其他填隙物间类型与含量间的关系研究不够深入,对孔隙结构的损害也并没有进行直观、定量的评价,对系统分析储层敏感性损害程度与机理不全面,甚至出现潜在的损害预测—室内评价—矿场生产三者相互矛盾等问题,难以科学地指导矿场生产措施的顺利实施。因此,以准噶尔盆地阜康凹陷头屯河组为研究对象,在综合分析储层地质特征、敏感性矿物类型与含量、填隙物类型与含量、孔隙结构等基础上,结合大量的敏感性室内评价数据,系统分析低渗储层敏感性损害机理与控制因素,为后期储层保护、注水开发、增产措施、提高采收率等技术的应用推广,提供技术支撑与科学依据,并为综合分析低

渗储层敏感性损害机理提供典型案例。

1 储层地质特征

阜康凹陷是准噶尔盆地西北部油气资源最丰富的地区之一^[9],侏罗系头屯河组属于湖泊辫状河三角洲沉积体系^[10]。岩性以长石岩屑砂岩为主,岩屑组分以凝灰岩为主;填隙物主要为泥质,含量2%~8%,其次为高岭石、方解石、微量黄铁矿以及自生石英等,不同类填隙物含量相差大。孔隙度平均为15.02%,渗透率平均为 $3.68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储集空间主要为原生粒间孔及剩余粒间孔。根据流体资料分析,油藏原油为轻质、低黏度常规油。通过统计头屯河组不同含油饱和度样品(样品数量为19个)的黏土(粒径小于 $16 \mu\text{m}$)绝对含量表明,油层黏土矿物绝对含量平均为3.6%,含油层黏土矿物绝对含量平均为7.28%,油水同层黏土矿物绝对含量平均为5.38%。

头屯河组砂岩黏土矿物中伊/蒙间层相对含量为4%~95%,平均为64.6%;高岭石相对含量为1%~85%,平均为14.6%;绿泥石相对含量为1%~47%,平均为10.4%;伊利石相对含量为2%~43%,平均为9.6%;间层比含量为76%~92%,平均为83.8%。伊/蒙间层在中渗储层中主要表现为薄膜状,具有蜂窝状微结构(图1a、图1b)。高岭石单晶呈六方片状,



a. 细粒岩屑砂岩,黏土呈薄膜状胶结,F5井,3 008 m,铸体薄片(+);b. 薄膜状伊/蒙间层、蜂窝状微观结构,F5井,3 008 m,SEM;c. 蠕虫状高岭石充填粒间,F022井,3 300.02 m,铸体薄片(-);d. 岩屑砂岩,正交偏光镜下的暗灰色绿泥石集合体,F5井,3 008 m,铸体薄片(+);e. 粒间积壳状绿泥石,F051井,3 054.8 m,SEM;f. 连晶方解石胶结,F051井,3 053.5 m,铸体薄片(+).

图1 准噶尔盆地阜康凹陷头屯河组砂岩储层照片及黏土矿物赋存状态

Fig. 1 Reservoir photo and clay mineral occurrence state of Toutunhe Formation in Fukang Sag, Junggar Basin

集合体呈书页状、蠕虫状或者蚀变假象,主要分布在粒间(图1c)。绿泥石主要呈交代假象(粒内分布)(图1d),偶见粒间薄膜状壳状(图1e)等。铸体薄片鉴定统计(样品个数为58)表明,填隙物类型多,以泥质为主(1%~35%,平均为1.75%),其次为方解石(0~10%,平均为1.92%);胶结物类型多,除自生黏土矿物外,还含有少量方解石、黄铁矿、方沸石、自生石英等。方解石以连晶状方式存在(图1f),自生石英微晶充填于粒间孔隙,其多呈垂直颗粒生长,并附着在伊/蒙间层表面。

2 实验流程与实验准备

实验采用岩心流动驱替方法,通过头屯河组9块典型段塞样实验曲线进行机理研究。依据石油行业标准《储层敏感性流动实验评价方法:SY/T 5358—2010》^[11]进行头屯河组敏感性评价。头屯河组地层水总矿化度平均为4 128.23 mg/L,氯离子含量平均为1 863.45 mg/L,水型为NaHCO₃型。头屯河组地层水矿化度低,水敏性损害是按照矿化度逐级降低的顺序评价,地层水矿化度4 128.23 mg/L,次地层水2 064.12 mg/L、蒸馏水;储层盐敏性损害是按照1、2、3、4、5倍模拟地层水矿化度逐级升高的顺序评价。以各个敏感性条件为横坐标,不同条件下岩样渗透率(K_r)与初始渗透率(K_i)的比值为纵坐标,绘制敏感性评价实验曲线。

为进一步深化储层敏感性损害机理,通过苏州纽迈电子科技有限公司生产的MacroMR12-150H-I核磁共振仪测量实验前后岩心的 T_2 谱,对比敏感性损害对孔隙结构的影响程度;利用FEI公司的FEI Quanta 650扫描电子显微镜明确水敏性黏土矿物的膨胀、分散等机理,对比实验前后敏感性矿物产状与形态,深入研究目的层水敏性等损害机理。

3 储层敏感性损害评价及机理

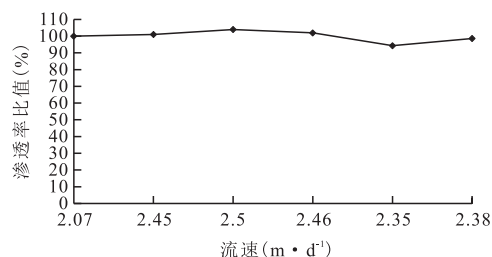
3.1 速敏性损害评价结果与机理

表1和图2为头屯河组典型速敏实验结果,通过统计81块段塞速敏损害结果表明,无速敏和弱速敏样品占比67.9%,中等偏弱速敏样品占比14.8%,中等偏强和强速敏样品占比17.3%。由无速敏岩心的NMR- T_2 响应曲线(图2b)可以看出, T_2 谱呈单峰形态,主要以中孔隙为主。对比实验前后曲线可知,实验后 T_2 谱信号量减小了2%,且减小发生在 $T_2=10$ ms左右谱峰值,推断微粒运移主要发生在相对大的孔隙,其为主要渗流通道,同时微粒运移后会导致岩心孔隙度与孔隙分布的变化。岩心速敏性弱,孔隙分布变化不大。高岭石等是速敏损害源,头屯河组中高岭石呈蠕虫状集合体赋存于颗粒之间,并伴有方解石胶结,微结构稳定(图1c、图1f);伊利石呈毛发状但含量低,不是速敏损害主要损害源。低渗透储层孔隙细小,实验过程中时有驱压过高,流量难以达

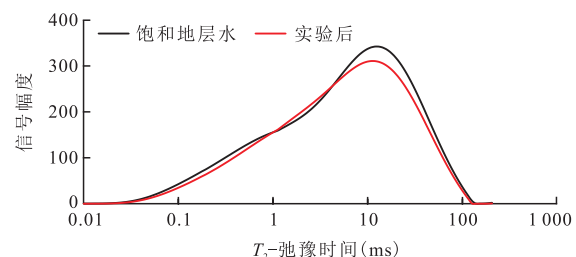
表1 头屯河组储层岩心速敏损害测试数据

Table 1 Reservoir core velocity sensitive damage test data of Toutunhe Formation

井号	深度(m)	孔隙度(%)	气测渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	临界流速(m/d)	饱和地层水 T_2 谱信号量	驱替后 T_2 谱信号量	速敏损害率(%)	损害评价
F022	3 302.37	8.72	0.13	2.50	14 446.44	14 085.28	4.00	无损害



a.流速与渗透率比值关系曲线



b.速敏实验前后NMR- T_2 响应曲线, F022井, 3 302.37 m

图2 头屯河组典型速敏实验结果

Fig. 2 Experimental curve of velocity sensitivity of Toutunhe Formation

到行业标准要求的 $6 \text{ cm}^3/\text{min}$, 根据行业标准, 压力梯度大于 $2 \text{ MPa}/\text{cm}$ 时, 可结束实验。对于小孔隙而言, 流体在其中的渗流速度慢, 分散质点状黏土矿物以及其他一些分散状填隙物等是速敏损害源, 但由于其难发生启动与运移, 不会发生速敏损害。因此, 对于低渗储层而言, 微纳米级孔隙占优, 不管是注水或者采油, 渗流速度有限, 微粒运移压差大, 速敏不是储层主要损害类型。

3.2 水、盐敏感性损害评价结果与机理

表2和图3为头屯河组典型水敏、盐敏实验结果, 通过统计水敏实验结果(样品个数为80)表明, 强水敏和中等偏强水敏样品占比63.8%, 中等偏弱水敏样品占比33.8%, 弱水敏样品占比2.5%, 头屯河组整体具有中等偏强—强水敏性。对比不同矿化度水敏实验前后的NMR- T_2 响应曲线, 峰变化在1 ms左右, 水敏后 T_2 谱信号量减小17%, 说明储层发生水敏

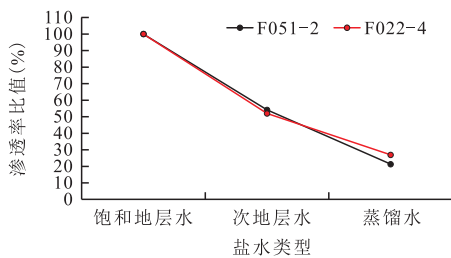
后对岩心孔隙结构造成了一定破坏, 其原因是水敏性黏土矿物(伊/蒙间层)的膨胀与分散运移^[12-14], 黏土膨胀占据更多的孔隙体积(图3b); 同时薄膜状黏土膨胀后, 赋存在薄膜上的其他微粒从颗粒表面剥离下来, 从稳定的微粒, 变为可运移的微粒, 这些微粒包括高岭石、杂基等, 使得水敏反应后还叠加了速敏损害效应。

73块样品盐敏实验结果统计表明, 中等偏强和强盐敏样品占比89.1%, 中等偏弱盐敏样品占比18.8%, 弱盐敏样品占比6.3%, 头屯河组具有中等偏强—强盐敏, 临界矿化度为2倍地层水矿化度($8\ 256.46 \text{ mg}/\text{L}$)。图3d表示不同矿化度流体反应前后NMR- T_2 响应曲线, 主峰在1 ms左右, 以小孔隙为主; T_2 谱对比表明, 盐敏实验后 T_2 谱信号量减少幅度为10%, 小孔体积空间未发生明显变化($T_2 < 1 \text{ ms}$), 分析其原因可能是孔隙太小, 黏土膨胀空间受限, 膨胀强度没有大孔中明显; 而对于相对大的孔隙, 其是

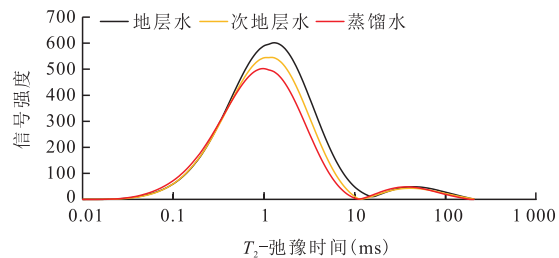
表2 头屯河组储层岩心水敏、盐敏损害测试数据

Table 2 Water/salt sensitive damage test data of reservoir cores of Toutunhe Formation

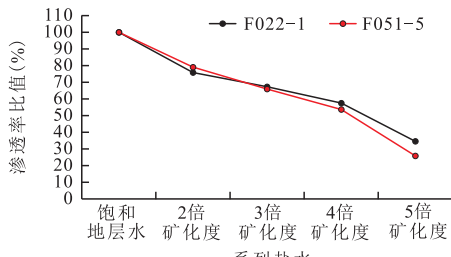
井号	孔隙度 (%)	气测渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	地层水矿化度 (mg/L)	临界矿化度 (mg/L)	饱和地层水 T_2 谱信号量	无离子水/5倍矿化度 T_2 谱信号量	水敏、盐敏损害率 (%)	损害评价	实验项目
F022	8.72	0.13	4 128.23				73.10	强	水敏
F051	11.32	0.28	4 128.23		18 115.05	15 027.16	78.70	强	
F051	8.60	0.16	4 128.23	8 256.46	16 892.92	15 192.90	74.10	强	
F022	10.47	0.28	4 128.23	8 256.46			65.40	中等偏强	盐敏



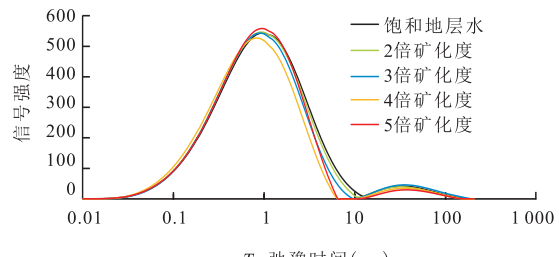
a. 典型水敏实验曲线



b. 不同水敏阶段反应前后NMR- T_2 响应曲线, F051井, 3 054.8 m



c. 典型盐敏实验曲线系列盐水



d. 不同矿化度流体反应前后NMR- T_2 响应曲线, F051井, 3 053.5 m

图3 头屯河组水敏、盐敏感性实验曲线

Fig. 3 Experimental curve of water/salt sensitivity of Toutunhe Formation

流体渗透主要通道,易于与不同类型流体接触反应,即发生伊/蒙间层、蒙脱石等水敏性矿物晶格剥离、分散、运移,在 T_2 谱体现出 $T_2 > 1$ ms对应的孔隙体积减小,而且随着矿化度增加这种趋势变化越明显。因此,盐敏损害后岩心孔隙体积有所减小,盐敏损害发生在相对大孔隙中,黏土分散与运移分割孔隙,导致大孔隙向小孔隙变化,使得岩心渗透率降低。

通过原位电镜观察水敏性矿物的水化膨胀(图4)可见:呈薄膜状充填于粒间与粒表的黏土矿物浸泡后会膨胀且从颗粒表面剥离,流体冲刷下易发生分散运移,同时由于膨胀会形成粒缘缝(图4a、图4b);另一种现象为充填在颗粒间的黏土矿物浸泡后明显发生膨胀,将孔隙充填更“饱满”,颗粒间的缝明显减小(图4c、图4d)。这两种方式的损害均会导致孔隙半径减小,与前述核磁 T_2 谱实验结果吻合。值得注意的是如果伊/蒙间层等表面赋存有自生石英、杂基等微粒,随着水敏性黏土矿物的膨胀与剥离,原本稳定的颗粒也会随黏土的分散运移而发生运移,加剧储层水敏性损害,但这种诱发其他微粒的损害,与传统定义的水敏性矿物膨胀分散运移不同,为水敏矿物损害后的“速敏损害”叠加效应,属于“次生”损害。

3.3 酸敏性损害评价结果与机理

图5是使用土酸液(12% HCl+3% HF)驱替前后的典型酸敏实验曲线。通过49块段塞样品酸敏实验结果表明,无酸敏样品占比16.3%,弱酸敏样品占比

28.6%,中等偏弱酸敏样品占比22.4%,中等偏强酸敏样品占比20.4%,强酸敏样品占比12.2%。整体来说,头屯河组酸敏损害程度范围大,从无酸敏到强酸敏均有涉及,酸敏损害程度主要呈弱—中等偏弱。对于储层物性低、填隙物含量高、钙质组分少的储层,预测有酸敏,实验评价结果也证实存在酸敏,这类储层占比55.0%(中等偏弱—强酸敏);酸敏机理是残酸返排困难,易于形成二次沉淀等,导致孔喉减小,发生酸敏损害。

弱酸敏储层占比28.6%,如图5所示,F022岩样酸敏损害率为3.27%,评价损害程度为无损害(表3),对比酸敏实验前后 T_2 谱表明,酸对储层孔隙结构改变大。由于二次沉淀、微粒运移等,导致相对大孔喉变成中小孔喉,但是渗流率影响不大。

根据储层敏感性矿物类型以及孔隙结构特征预测储层无酸敏,但是实验评价为酸敏损害,原理与机理见4.3。

3.4 碱敏性损害评价结果与机理

碱敏实验2块样品,一块损害率为45.7%,碱敏损害程度为中等偏弱,另一块损害程度为65.6%,碱敏损害程度为中等偏强(表4)。F051样品是一块中孔、中渗岩心,其NMR- T_2 曲线呈双峰形态,NMR- T_2 横坐标数值出现在1~100 ms,驱替完碱性流体后,在NMR- T_2 横坐标数值为10~100 ms变化波动较大。碱性外来流体诱发黏土矿物分散,结构失去稳定,或

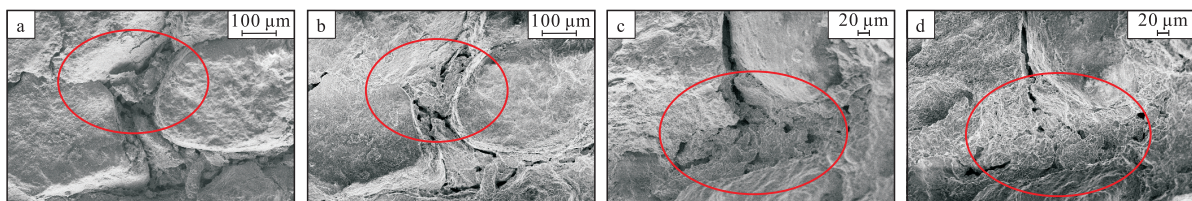


图4 头屯河组浸泡实验前后镜下原位观察
a. 黏土矿物与颗粒间接触紧密(浸泡前); b. 伊/蒙间层中蒙脱石膨胀,黏土从颗粒表面剥离,并形成粒缘缝(浸泡后); c. 伊/蒙间层矿物间和颗粒间存在微孔微缝(浸泡前); d. 粒间充填的伊/蒙间层黏土矿物膨胀,微孔微缝减小(浸泡后)。

图4 头屯河组浸泡实验前后镜下原位观察

Fig. 4 In-situ observation under microscope before and after immersion experiment of Toutunhe Formation

表3 头屯河组储层酸敏实验前后孔隙结构各参数对比

Table 3 Comparison of pore structure parameters before and after acid sensitivity test in Toutunhe Formation

井号	孔隙度 (%)	气测渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	注酸类型	饱和地层水 T_2 谱信号量	酸后 T_2 谱信号量	酸敏损害率 (%)	损害评价
F022	10.85	0.19	12% HCl+3% HF	11 487.71	11 431.42	3.27	无损害
F5	16.76	53.00		17 478.16	16 552.08	54.20	中等偏强

表4 头屯河组储层岩心碱敏损害测试数据
Table 4 Alkaline sensitive damage test data of reservoir cores of Toutunhe Formation

井号	孔隙度 (%)	气测渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	pH = 7 倍 T_2 谱信号量	pH = 13 倍 T_2 谱信号量	碱敏损害率 (%)	损害评价
F051	17.51	72.30	27 601.67	25 750.41	65.60	中等偏强
F022	10.82	0.34	13 605.58	13 163.30	45.70	中等偏弱

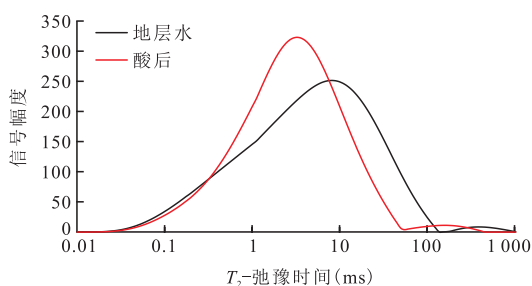


图5 头屯河组酸敏感性实验曲线
Fig. 5 Experimental curve of acid sensitivity of Toutunhe Formation

者与石英、长石等有溶解作用发生。F022岩心碱敏损害率为45.7%，是一块低孔、超低渗岩心，NMR- T_2 曲线呈双峰形态，NMR- T_2 主峰分布在10~100 ms，该岩心以大孔隙为主。岩心驱替后，小孔隙体积减小，大孔隙体积略有增加。

4 敏感性损害控制因素讨论

储层敏感性损害控制因素有很多，包括黏土矿物含量、黏土矿物类型和储层物性特征，其中黏土矿物类型和含量是主要因素^[15-17]。重点讨论头屯河组各因素对敏感性损害程度的影响。

4.1 黏土矿物类型与含量

储层的黏土矿物特征是影响储层敏感性的主控因素，头屯河组究竟是什么相关性呢？图6分别将不同类型黏土矿物相对含量与各敏感性损害率进行对比，结果表明各类黏土矿物的相对含量与速敏损害率相关性不大。据图6b、图6c，水敏、盐敏损害率与伊/蒙间层相对含量呈正相关，主要原因是伊/蒙间层矿物中，富含具有膨胀性和亲水性的蒙脱石（间层比平均为83.8%），并且伊/蒙间层产状多呈蜂窝状。与低于地层水矿化度的流体接触时，蒙脱石发生膨胀，伊/蒙间层由于膨胀层而解体，高岭石等非膨胀性微

粒亦会分散迁移，堵塞孔隙，造成地层渗透率下降^[18-19]。与水敏相似，伊/蒙间层和伊利石对储层盐敏损害率也有重要影响（图6c），当伊/蒙间层与高于地层水矿化度流体相遇时，会压缩黏土颗粒扩散双电层厚度，造成颗粒失稳、脱落，堵塞孔隙喉道，引起储层渗透率的降低。绿泥石是影响储层酸敏感性最主要的黏土矿物，随着伊/蒙间层含量增加，酸敏损害呈一定的正相关性（图6d），但与酸性矿物相关性不强，是因为绿泥石含量低，且大部分绿泥石赋存形式为粒内交代假象。研究区块的主要黏土矿物类型为伊/蒙间层，影响各种敏感性的损害程度，因此，储层敏感性损害强度与黏土矿物类型有关。

4.2 储层物性

速敏的临界流速随渗透率增加，呈加大趋势（图7a），气测渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，储层临界流速小于15 m/d，因为驱替压差高，低渗储层速敏室内评价难以达到行业最高流量6 mL/min。渗透率越大，速敏的临界流速越大且发生中偏强的速敏损害；渗透率低的储层，微孔小，渗流压差大，但产量低，难以启动微粒，发生规模性运移与堵塞。

渗透率对水敏、盐敏损害也有一定的控制，随渗透率增加，水敏/盐敏损害率呈增加趋势。物性好的储层，水敏/盐敏性矿物呈薄膜状特殊产状，与外来流体接触更充分，损害程度更大（图7b）。酸敏损害主要是二次沉淀，以及富含铁镁质元素的火山岩岩屑，碳酸盐矿物等，碳酸盐矿物可通过盐酸预处理预防其二次沉淀，头屯河组绿泥石呈集合状产出，与酸接触面积和强度受限，酸敏损害程度不均匀（图7c），与富铁镁的火山岩岩屑以及其他填隙物有关。

4.3 其他填隙物

研究区绿泥石相对含量偏低，部分井绿泥石相对含量仅有6%，而部分岩心酸敏损害程度室内评价却达到中等偏强，且损害主要发生在物性相对好的

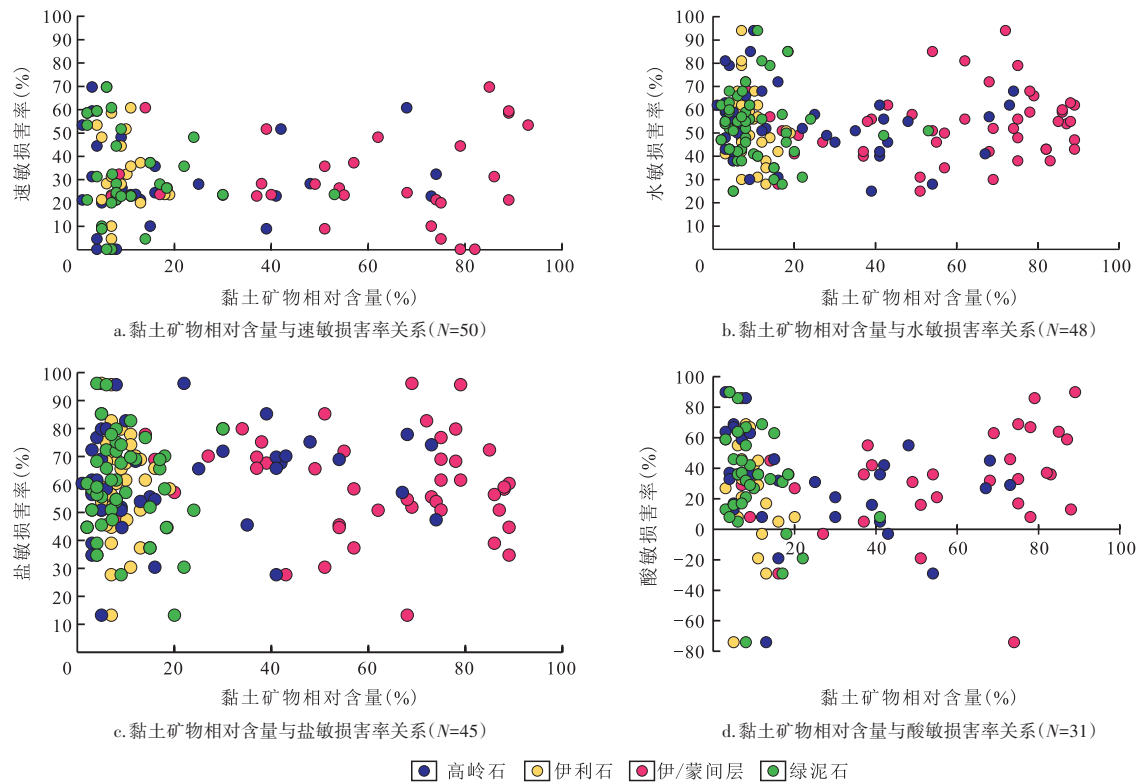


图6 头屯河组黏土矿物相对含量与各敏感损害率关系

Fig. 6 Relation between relative content of clay minerals and sensitivity index of Toutunhe Formation

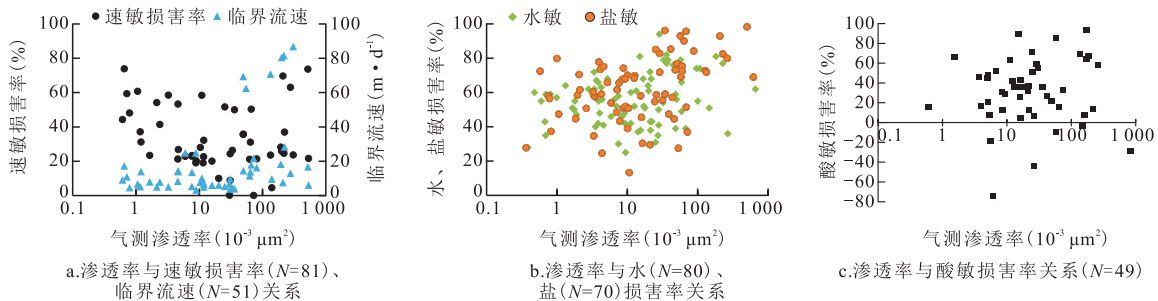


图7 头屯河组渗透率与各敏感性关系

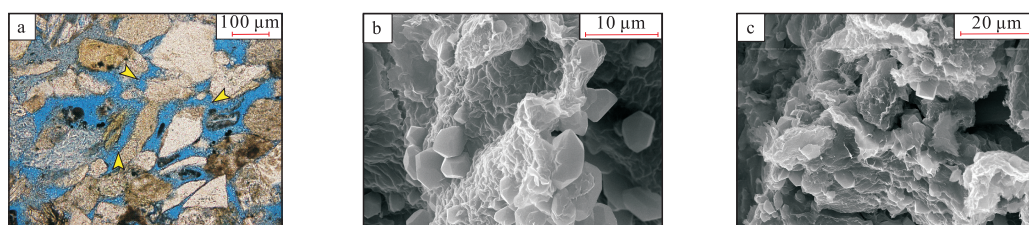
Fig. 7 Relation between permeability and sensitivity of Toutunhe Formation

储层中(渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。这一情况表明绿泥石已不再是影响酸敏性最主要的因素。

铸体和电镜观察表明黏土矿物呈薄膜状产出,同时粒表和粒间赋存大量的自生石英微晶(直径小于 $5 \mu\text{m}$)(图8a—图8b)。根据区域地质背景及成岩演化推测,这种石英微晶可能是凝灰质玻脱化作用形成^[20]。成岩阶段早期,在碱性的埋藏环境下,凝灰质经蚀变转化成蒙脱石,在此过程中释放出的二氧化硅在颗粒表面形成自生石英微晶。这些自生石英微晶多呈垂直颗粒生长,并且附着在伊/蒙间层表面,

由于没有石英碎屑颗粒起到成核作用^[21],即使有充足的二氧化硅也难以生长成较大的自生石英,只能以石英微晶的形态存在。此外,凝灰质的脱玻化作用虽然会产生一定量的微孔隙,但发育空间仍不足够供自生石英生长。

储层中绿泥石平均含量为10.4%且呈集合体假象产出(图1d),碳酸盐岩平均含量为3.0%。从酸敏性矿物类型与含量预测,储层不会存在这么强的酸敏性损害。3.3节讨论了弱酸敏的情况,而出现中等偏强—强酸敏的原因如下。对比NMR- T_2 谱可知,酸



a. 大量自生石英胶结物, F5井, 3 008.08 m, 实验前, 铸体薄片(-); b. 粒间和粒表大量呈分散状自生石英胶结物, F5井, 3 008.08 m, 实验前, SEM; c. 黏土矿物剥离、微晶石英堵塞孔隙, F5井, 3 008.08 m, 实验后, SEM。

图8 头屯河组酸敏实验前后结果

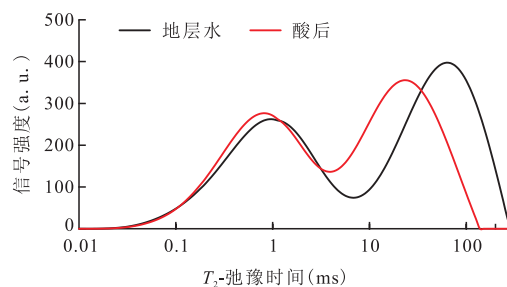
Fig. 8 Results before and after acid sensitivity experiments of Toutunhe Formation

化对岩石孔隙分布改变的影响较大,尤其是相对大的孔隙。F5井岩心酸敏损害率为54.2%,损害程度为中等偏强(表3),酸敏实验前后核磁 T_2 谱(图9)表明驱替后 T_2 谱左移,向NMR- T_2 横坐标数值较小的方向偏移且NMR- T_2 谱信号量减小11%,说明岩石酸化导致的二次沉淀或者其他堵塞物堵塞了孔隙,同时将大孔隙分割成小孔隙,NMR- T_2 谱曲线主峰出现时间由100 ms转变为30 ms。

储层土酸液作用后,酸会溶蚀部分黏土,改变颗粒间电荷平衡,而石英微晶颗粒小,比表面积大,与酸作用后易于从颗粒表面剥离下来,发生迁移,堵塞孔隙,同时产生的 Si^{4+} 会与溶液中的 OH^- 离子结合形成难溶的硅酸盐胶体沉淀,造成渗透率降低(图8c)。结合 T_2 谱对比发现,酸化对这种富石英微晶储层的孔隙结构改造作用强,自生石英成为可运移的微粒,堵塞孔隙,使得孔隙度减小。关于方解石和少量白云石等钙质胶结对储层损害机理等,不再做赘述。富钙镁质的岩屑与填隙物,虽与土酸液不直接产生沉淀,但释放的 Fe^{3+} 与残余的酸液中的 OH^- 离子可形成氢氧化物的等二次沉淀,造成渗透率下降^[22-23],加剧酸敏损害。总之,对于富含自生石英等填隙物的储层,酸化能溶解的矿物组分含量少,酸化除了会产生常规二次沉淀损害储层外,还会产生损害机理与传统二次沉淀等损害形式不同的形式,即溶蚀表层黏土导致自生石英等晶体从骨架颗粒表面剥离,形成可移动微粒,堵塞孔隙,呈现中偏强—强酸敏、碱敏损害。

5 结论

在明确储层地质特征,尤其是敏感性类型与产状基础上,结合核磁共振、电镜与铸体等手段,系统评价



注:温度25℃,3 008.08 m。

图9 F5井使用土酸液流体损害前后NMR- T_2 响应曲线

Fig. 9 NMR- T_2 response curve before and after soil acid fluid damage of Well-F5

了头屯河组储层损害程度与机理,取得了以下认识:

- 1) 头屯河组具有弱速敏性、中等偏强—强水敏性、中等偏强—强盐敏、中等偏强碱敏性以及弱—中等偏弱酸敏性的特征。
- 2) 头屯河组敏感性损害发生在孔隙相对大的主要渗流通道中,孔隙细小的低渗储层承受敏感性损害能力弱。
- 3) 对于富含多种黏土矿物、火山岩岩屑与填隙物的储层,储层敏感性与黏土矿物的类型、含量和产状,储层物性以及填隙物的类型和含量有关,并且不局限于敏感性矿物而导致的单因素诱发的损害,通常是多因素同时发生,尤其是速敏与酸敏、水敏等。
- 4) 建议采用铸体薄片、扫描电镜、核磁共振等多种手段相结合,综合研究储层敏感性损害机理和孔隙结构变化,相对于行业标准重点评价渗透率损害而言,多手段多参数是从不同角度开展储层损害机理研究。

参考文献

- [1] 李云, 祁利祺, 胡作维, 等. 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, 2014, 26(1): 52-57.
LI Yun, QI Liqi, HU Zuwei, et al. Reservoir sensitivity of Middle Jurassic Toutunhe Formation in Fudong slope, Junggar

- Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(1): 52-57.
- [2] 何永宏. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长8储层敏感性研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 87-91
HE Yonghong. Research on sensitivity of Chang 8 reservoir of Jiyuan Oilfield in Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 87-91.
- [3] 田宇, 郭庆, 李燕, 等. 西峰油田长8储层的酸敏性评价[J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 108-110.
TIAN Yu, GUO Qing, LI Yan, et al. Acid sensitivity evaluation at Chang8 reservoir in Xifeng Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(4): 108-110.
- [4] 吕佳蕾, 吴因业. 鄂尔多斯盆地中部地区致密砂岩储层敏感性及其损害机理[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(3): 167-174.
LYU Jialei, WU Yinye. Sensitivities and damage mechanisms of the tight sandstone reservoir in Central Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(3): 167-174
- [5] 任大忠, 张晖, 周然, 等. 塔里木盆地克深地区巴什基奇克组致密砂岩储层敏感性研究[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(6): 27-36.
REN Dazhong, ZHANG Hui, ZHOU Ran, et al. Sensitivity of tight sandstone reservoir of Bashijiqike Formation in Keshen area, Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(6): 27-36
- [6] 王晓雯. 致密油藏储层敏感性评价及主控因素研究[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 103-110.
WANG Xiaowen. Study on reservoir sensitivity evaluation and key control factors of tight oil reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 103-110.
- [7] 于景维, 郑荣才, 柳妮, 等. 准噶尔盆地东部阜东斜坡带头屯河组黏土矿物特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 945-954.
YU Jingwei, ZHENG Rongcai, LIU Ni, et al. Characterization of clay minerals in Toutunhe Formation of Fudong slope area in eastern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 945-954.
- [8] 王剑, 马聪, 罗正江, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡韭菜园子组储集层特征及敏感性[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 38-45.
WANG Jian, MA Cong, LUO Zhengjiang, et al. Characteristics and reservoir sensitivity of Jiucaiyuanzi Formation in Fudong Slope, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 38-45
- [9] 刘银河. 准噶尔盆地侏罗系沉积构造与油气分布[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 12-15.
LIU Yinhe. Jurassic sedimentation, tectonics and petroleum distribution in Junggar basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(5): 12-15.
- [10] 张传林, 赵省民, 文志刚. 准噶尔盆地南缘辫状河三角洲沉积特征及储集性[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(3): 202-204.
ZHANG Chuanlin, ZHAO Shengmin, WEN Zhigang. Sedimentary characteristics and reservoir quality of braided deltas in southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(3): 202-204.
- [11] 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院. 储层敏感性流动实验评价方法: SY/T 5358—2010[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield. Formation damage evaluation by flow test: SY/T 5358—2010 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [12] BERGER A, GIER S, KROIS P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcanoclastic sandstones: Evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan gas field, Pakistan[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(5): 595-615.
- [13] 郑荣才. 辽河盆地第三系砂岩储层的敏感性研究[J]. 矿物岩石, 1997, 17(1): 77-84.
ZHENG Rongcai. Sensitive of sandstones reservoir in paleogene from Liaohhe basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1997, 17(1): 77-84.
- [14] 李永刚. 秦家屯油田储层的敏感性评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(1): 51-54.
LI Yonggang. Estimation of sensitivity of reservoir in Qinjiatun Oil Field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(1): 51-54.
- [15] 柴光胜, 师永民, 杜书恒, 等. 致密砂岩储层敏感性评价及影响因素分析——以鄂尔多斯盆地盐池地区长8储层为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 253-261.
CHAI Guangsheng, SHI Yongmin, DU Shuheng, et al. Sensitivity evaluation and influencing factors analysis of tight sandstone reservoirs: A case study of the Chang-8 reservoir in Yanchi Area of Ordos Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(2): 253-261.
- [16] 邵墨一, 吴朝东, 张大智, 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 101-108.
SHAO Zhaoyi, WU Chaodong, ZHANG Dazhi, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 101-108.
- [17] 王亚, 杨少春, 路研, 等. 渤海湾盆地东营凹陷高青地区中生界低渗透碎屑岩有效储层特征及发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 271-283.
WANG Ya, YANG Shaochun, LU Yan, et al. Characteristics and controlling factors of effective reservoirs of Mesozoic low permeability clastic rocks in Gaoqing Region, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 271-283.
- [18] HILLIER S, FALLICK A E, MATTER A. Origin of pore-lining chlorite in the aeolian Rotliegend of northern Germany[J]. Clay Minerals, 1996, 31(2): 153-171.
- [19] 崔瑾, 郑荣才, 蒋宜勤, 等. 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, 2018, 39(2): 398-408.
CUI Cui, ZHENG Rongcai, JIANG Yiqin, et al. Characteristics and sensitivity of the Middle Jurassic Toutunhe Formation in Fudong slope, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 398-408.
- [20] 王宏语, 樊太亮, 肖莹莹, 等. 凝灰质成分对砂岩储集性能的影响[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 432-439.
WANG Hongyu, FAN Tailiang, XIAO Yingying, et al. Effect of tuffaceous components on physical property of sandstone

- reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 432-439.
- [21] 刘国恒, 黄志龙, 郭小波, 等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷中二叠统芦草沟组泥页岩层系 SiO_2 赋存状态与成因[J]. *地质学报*, 2016, 90(6): 1220-1235.
- LIU Guoheng, HUANG Zhilong, GUO Xiaobo, et al. The SiO_2 occurrence and origin in the shale system of middle Permian series Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(6): 1220-1235.
- [22] BAKER J C, UWINS P J R, MACKINNON I D R. ESEM study of authigenic chlorite acid sensitivity in sandstone reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1993, 8(4): 269-277.
- [23] 魏旭. 鄂尔多斯盆地召30井区盒8段储层特征及储层敏感性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- WEI Xu. Research in reservoir characteristic and reservoir sensitivity of the Member 8 in Zhao 30 Well block, Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

(编辑 徐佩)

(上接第934页)

- [5] STANDING M B. A pressure-volume-temperature correlation for mixtures of California oils and gases[J]. *Drilling & Production Practice*, 1947: 275-287.
- [6] LASATER J A. Bubble point pressure correlation[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1958, 10(5): 65-67.
- [7] GLASO O. Generalized pressure-volume temperature correlations [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1980, 32(5): 785-795.
- [8] 李爱芬, 王守龙, 吕姣, 等. 地层原油组成差异对高压物性参数的影响[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(3): 299-302.
- LI Aifen, WANG Shoulong, LYU Jiao, et al. Effect of the composition of formation crude oil on PVT data[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(3): 299-302.
- [9] 曹刚. 多层油藏层系重组开发指标预测方法[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(4): 212-215.
- CAO Gang. Development index prediction method of layers recombination in multi-layer reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(4): 212-215.
- [10] 石德佩, 孙雷, 李东平, 等. 关于烃-水体系相平衡研究的现状及新进展[J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27(3): 49-53.
- SHI Depei, SUN Lei, LI Dongping, et al. The domestic and abroad situation and the latest development of hydrocarbon-water phase equilibria[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(3): 49-53.
- [11] 范宁磊. 求解大规模全局优化问题的算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- FAN Ninglei. Algorithms for solving large-scale global optimization problems[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [12] 尚飞. 遗传算法在图像处理中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2007.
- SHANG Fei. Application of the genetic algorithm in image processing[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2007.
- [13] 李其朋. 黑油高压物性参数模拟方法及应用[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(3): 79-81.
- LI Qipeng. PVT parameters simulations method and application of black oil[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(3): 79-81.
- [14] 宋春涛. 考虑压力敏感和启动压力梯度的低渗透油藏数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(25): 6319-6326.
- SONG Chuntao. Numerical reservoir simulation considering threshold pressure gradient and stress sensitive phenomenon. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(25): 6319-6326.
- [15] 常玉青, 宋考平. 非线性回归油藏指数敏感性分析[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(22): 5411-5414.
- CHANG Yuqing, SONG Kaoping. Reservoir parameter sensitivity analysis with experimental design[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(22): 5411-5414.
- [16] 张晨朔, 范子菲, 许安著, 等. 含酸气挥发油藏回注溶解气对原油相态与物性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(27): 152-156.
- ZHANG Chenshuo, FAN Zifei, XU Anzhu, et al. Study on the law of elastic recovery of tight reservoir and its influence factors[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(27): 152-156.
- [17] 张茂林, 梅海燕, 李闽, 等. 考虑毛细管压力作用的挥发油气体系相平衡模型[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(5): 48-51.
- ZHANG Maolin, MEI Haiyan, LI Min, et al. A phase equilibrium model in volatile petroleum system under consideration of capillary pressure[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 2002, 16(5): 48-51.
- [18] 王高峰, 秦积舜, 胡永乐, 等. 低渗透油藏气驱“油墙”物理性质描述[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(1): 29-35.
- WANG Gaofeng, QIN Jishun, HU Yongle, et al. Physical property description of gas flooding “Oil Bank” in tight reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(1): 29-35.
- [19] 李文杰, 周光辉, 曹尹平. 一种下降的混合共轭梯度法[J]. *淮北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2): 9-15.
- LI Wenjie, ZHOU Guanghui, CAO Yinping. A descent hybrid conjugate gradient method[J]. *Journal of Huaibei Normal University(Natural Science)*, 2021, 42(2): 9-15.
- [20] 谭承军. 地层原油的泡点压力, 体积系数经验公式在塔里木的应用[J]. *试采技术*, 1994, 15(1): 47-53.
- TAN Chenjun. Application of empirical formula for bubble point pressure and volume coefficient of formation crude oil in Tarim[J]. *Trial Testing and Production Technology*, 1994, 15(1): 47-53.

(编辑 李颖洁)