

[引著格式] 周晓峰, 陈波, 凡睿, 等. 川东北地区须家河组四段特低渗致密砂岩储层孔隙结构特征及分类评价 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (5+6): 10~15.

川东北地区须家河组四段特低渗致密砂岩储层孔隙结构特征及分类评价

周晓峰 (非常规油气湖北省协同创新中心 (长江大学); 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

陈波 (非常规油气湖北省协同创新中心 (长江大学), 湖北 武汉 430100)

凡睿 (中石化勘探分公司, 四川 成都 610041)

周林 (非常规油气湖北省协同创新中心 (长江大学), 湖北 武汉 430100)

金成林 (长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

[摘要] 致密砂岩储层微观孔隙结构特征是制约勘探开发的主要问题, 也是气藏精细描述和储层分类评价的重点内容。通过常规压汞、岩石薄片和扫描电镜等资料对川东北地区须家河组四段 (T_3x_4) 特低渗致密储层砂岩的孔隙结构特征进行研究。结果表明, 研究区储集空间类型以粒内溶孔、粒间溶孔为主, 残余粒间孔和微裂缝次之, 溶蚀矿物以长石、变质岩岩屑和填隙物为主。 T_3x_4 储层砂岩毛细管压力曲线可分为 3 类: 中等排驱压力——细喉型; 较高排驱压力——微细喉型; 高排驱压力——微喉型。储层孔隙结构参数中的中值孔隙度、分选系数、最大进汞饱和度与物性呈明显正相关关系。结合典型孔喉结构特征参数、镜下鉴定和物性数据, 建立了研究区 T_3x_4 特低渗致密砂岩储层的分类评价标准。

[关键词] 孔隙结构; 特低渗储层; 储层分类评价; 川东北地区; 须家河组四段

[中图分类号] TE122.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 05+06-0010-06

致密气是非常规天然气勘探的重点, 目前全球致密气产量约占非常规气产量的 1/4^[1]。中国致密气的勘探发展迅速, 截至 2011 年底, 致密气累计探明储量为 $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全国天然气探明储量的 2/5; 可采储量 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 约占全国天然气可采储量的 1/3^[1~3]。近年来, 四川盆地上三叠统须家河组 (T_3x) 的致密气勘探也取得了重大突破, 在川中广安、合川、安岳以及川西新场等地相继发现特大型致密砂岩气田, 在川东北元坝-通南巴地区也取得了良好的勘探成果, 其邻区九龙山、龙岗等地区陆相地层中亦获得了一定规模的储量, 勘探前景良好^[4,5]。前期对川东北地区 T_3x 的勘探主要集中在须家河组二段 (T_3x_2)、三段 (T_3x_3)、四段 (T_3x_4) 的勘探程度相对较低, 其研究重点主要集中在沉积成因、层序划分、成岩作用及储层控制因素等方面^[6~10]。笔者主要通过对致密砂岩储层孔隙结构特征进行研究, 从微观上阐述优质储层特征, 并对研究区 T_3x_4 特低渗致密砂岩储层进行综合评价。

1 区域地质概况

川东北地区隶属于上扬子地台, 位于米仓山-大巴山推覆构造带前缘, 西临龙门山推覆构造带, 南靠川中隆起北斜坡, 地理上属于四川盆地北部的中、高山区^[5,6] (图 1)。晚三叠世, 勉略洋盆关闭, 褶皱隆起, 川东北地区整体抬升, 海水全部退出, 逐渐由海盆转变为陆盆; 随后西部龙门山和北部米仓山开始大面积逆冲隆起, 在山前形成逆冲断褶带, 盆地基底缓慢下降, 为川东北地区输送了大量陆源碎屑

[收稿日期] 2015-03-12

[基金项目] 国家科技重大专项 (2011ZX05007-001); 中国地质调查局国土资源大调查项目 (1212011120962)。

[作者简介] 周晓峰 (1991-), 女, 硕士生, 现主要从事沉积学与储层地质学方面的学习与研究; 通信作者: 陈波, chpo@yangtzeu.edu.cn。

物质^[5,6]。在 T_3x_2 、 T_3x_4 沉积时期，盆地处于“过补偿”状态，碎屑颗粒沉积速率大，常形成纵横向连续的砂体；在 T_3x_3 、须家河组五段 (T_3x_5) 沉积时期，水体上涨，物源萎缩，盆地处于“欠补偿”状态，形成大面积细粒沉积物^[6]。研究区 T_3x_4 在晚三叠世中期（印支运动二幕）开始接受沉积，经历了构造相对稳定的 T_3x_3 沉积期之后，盆缘造山带活动加剧，西部龙门山继续抬升，同时米仓山、大巴山开始进入强烈的逆冲推覆和造山隆升阶段^[7~9]，川东北前陆凹陷幅度急剧增大，物源供给量骤增，山前堆积大规模以硅质、碳酸盐质砾石为主的砾岩沉积物，平面上，从盆缘至工区岩性由砾岩、砂砾岩逐渐过渡为砂岩。

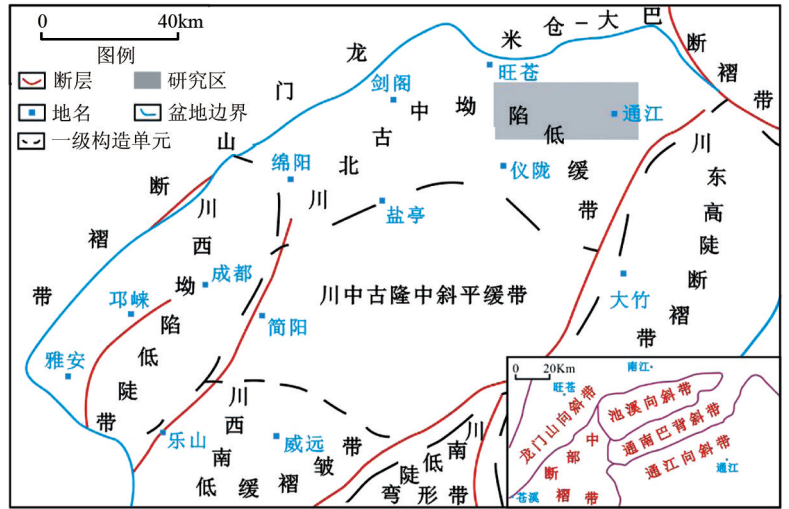


图 1 研究区位置及构造单元划分

2 岩石学特征与储集物性

根据研究区 15 口井的岩心观察、镜下鉴定及扫描电镜资料， T_3x_4 储层岩性主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩，石英砂岩和长石岩屑砂岩次之。石英和岩屑的体积分数较高，平均为 60.1% 和 32.6%，岩屑以变质岩岩屑和沉积岩岩屑为主，岩浆岩岩屑较少，长石的体积分数相对较低，平均为 7.3%；杂基的平均体积分数为 6.2%，主要为黏土矿物和泥质，碎屑颗粒分选中等-好，磨圆较好。说明川东北地区 T_3x_4 沉积时期的物源主要来自于北东向的米仓山-大巴山物源，受西部龙门山物源的影响较小，平面上距离物源较近，成分、结构成熟度相对较低。根据研究区 T_3x_4 的 280 多个物性测试数据统计，其孔隙度分布范围为 0.69%~6.79%（平均为 3.06%），89% 的样品孔隙度介于 2%~6%；渗透率分布范围为 0.004~0.94mD（平均为 0.0234mD），99% 的样品渗透率小于 0.5mD，按照中石化储层划分标准，川东北地区 T_3x_4 储层属于典型的特低孔-特低渗储层。

3 储层孔隙类型

3.1 储集空间类型

研究区 T_3x_4 储集空间类型包括粒间溶孔、粒内溶孔、残余粒间孔、铸模孔和微裂缝，其中以次生溶孔和微裂缝为主^[9~11]。孔隙形态多样，有半圆形、三角形、不规则多边形等；孔隙分布不均，连通性差，非均质性较强。粒内溶孔是研究区 T_3x_4 的主要储集空间类型（图 2 (a)~(c)），溶蚀矿物主要为长石，岩屑和填隙物次之。长石一般沿节理面溶蚀形成斑点状、蜂窝状的粒内溶孔（图 2 (a)）。当整个颗粒完全被溶蚀后，形成铸模孔隙，仅保留颗粒的边框^[4]，粒内溶孔较细小，一般小于 0.05mm。显微镜下可见不同大小的粒间溶孔（图 2 (d)），边缘具有明显的溶蚀痕迹，大多与粒内溶孔伴生出现。残余粒间孔的分布范围较局限，仅出现在研究区分选较好且抗压实矿物含量较高的砂岩储层中，在原有粒间孔的基础上，碎屑颗粒边缘遭部分溶蚀形成扩大孔；或者由于石英次生加大以及绿泥石包膜保护，导致原生孔隙得以保存而形成缩小孔（图 2 (e)）。受到喜马拉雅期构造运动的影响，研究区微裂缝较为发育，其对面孔率的贡献较小，一般沿颗粒边缘或沿节理面延伸，呈长条状穿过一个或几个颗粒（图 2 (f)）。

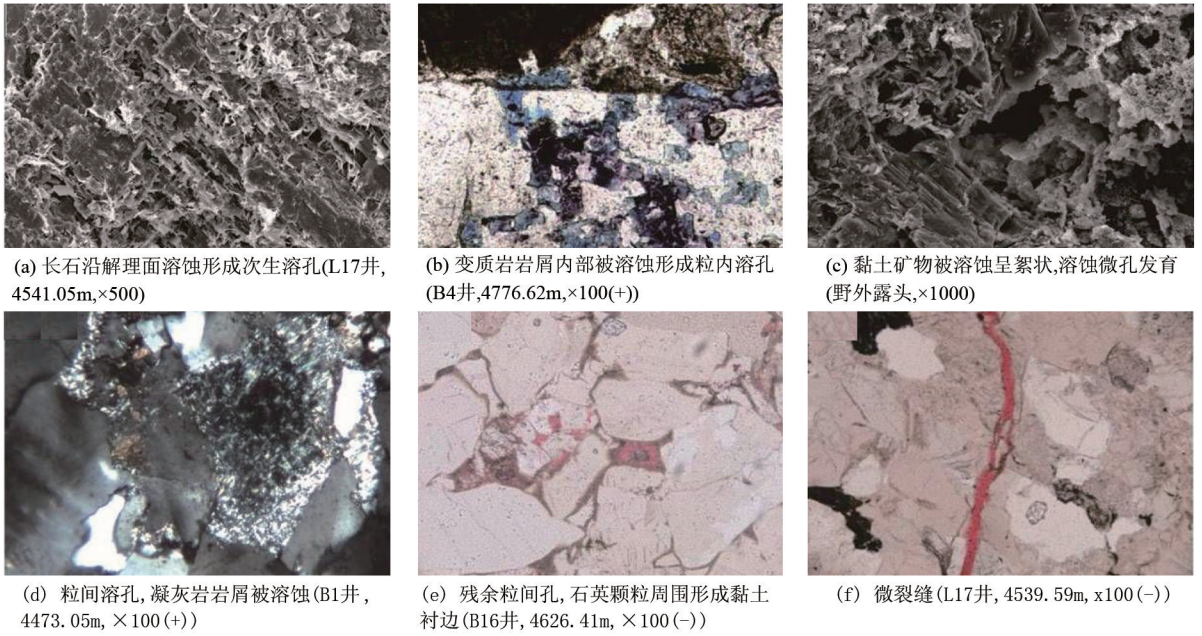


图2 川东北地区 T₃x₄ 典型储集空间类型照片

3.2 喉道类型

储层喉道大小和形态主要受沉积和成岩作用影响，包括砂岩粒度和分选，颗粒接触类型以及后期复杂的成岩改造作用^[12~15]。根据铸体薄片观察，研究区 T₃x₄ 储层砂岩孔隙结构复杂，喉道类型主要以片状、弯片状、管束状为主。

1) 片状、弯片状喉道 由于岩石受到较强烈的压实或压溶作用，晶体再生长时，其再生长边所包围的孔隙变小，一般呈四面体或多面体状网状相连，连通喉道极细，呈片状或弯片状，多在 0.01~0.05mm 之间。该类储层砂岩中填隙物一般为黏土矿物，其主要类型为伊利石及绿泥石，其次为伊-蒙混层，研究区 T₃x₄ 储层以该种喉道为主，在区内发育较为普遍，对储层连通性具有重要意义。

2) 管束状喉道 颗粒排列更加紧密使得之间呈线接触，以微细孔为主，孔隙本身就是喉道，像微毛细管交叉分布于杂基及胶结物中^[15]。研究区该类储层砂岩杂基内微孔、基质孔隙及细小的粒内溶孔之间普遍发育该种喉道，其连通性差，孔渗极低，孔喉比小，喉道一般小于 0.1mm。

4 孔隙结构特征

4.1 压汞曲线特征

通过高压压汞法对 83 块样品进行研究发现，区内 T₃x₄ 毛细管压力曲线特征为“短初始段、长平缓段、无上翘段”，综合铸体薄片和扫描电镜等资料，将储层孔隙结构分为 3 类（图 3）：①中等排驱压力——细喉型，主要出现在物性相对较好的储层中，分布频率为 23%，歪度略粗，分选中等，主要发育在辫状河三角洲水下分流河道、次河道和河口沙坝砂体中；②较高排驱压力——微细喉型，占 64%，分布在储集性能相对较差的储层中，歪度细，分选好-中等，主要出现在水下分流河道细粒砂体

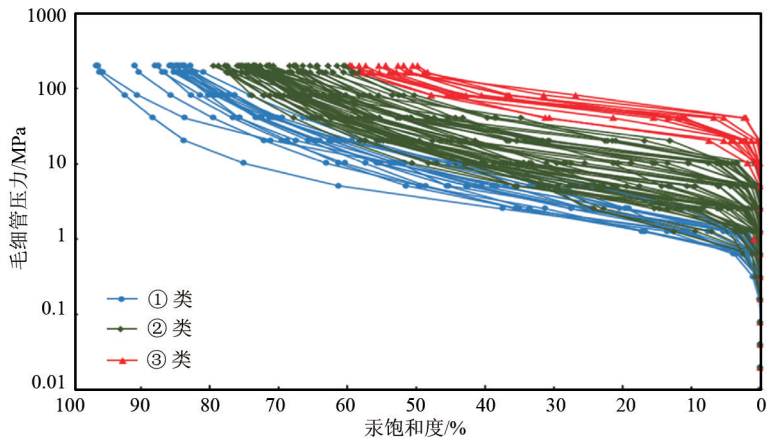


图3 川东北地区 T₃x₄ 毛细管压力曲线分类

③较高排驱压力——微细喉型，占 64%，分布在储集性能相对较差的储层中，歪度细，分选好-中等，主要出现在水下分流河道细粒砂体

中；③高排驱压力——微喉型，歪度极细，分选好，不具备储集能力，主要出现在水下分流河道的边缘以及分支间湾薄层砂体中。

4.2 孔隙结构参数特征

通过进一步分析发现，储层储集能力的大小与孔隙结构密切相关，孔隙结构的好坏严重影响着储层物性^[12~15]。研究区 T_3x_4 储层砂岩中值孔喉半径与孔隙度和渗透率呈正相关关系（图 4（a）、（b）），中值孔喉半径与孔隙度的相关系数为 0.7812。中值孔喉半径越大，其线性拟合关系越差，即在相对较好储层中，相同的中值孔喉半径对应的孔隙度和渗透率存在较大差异，说明研究区 T_3x_4 储层孔隙结构十分复杂，而且孔喉半径差异较大。

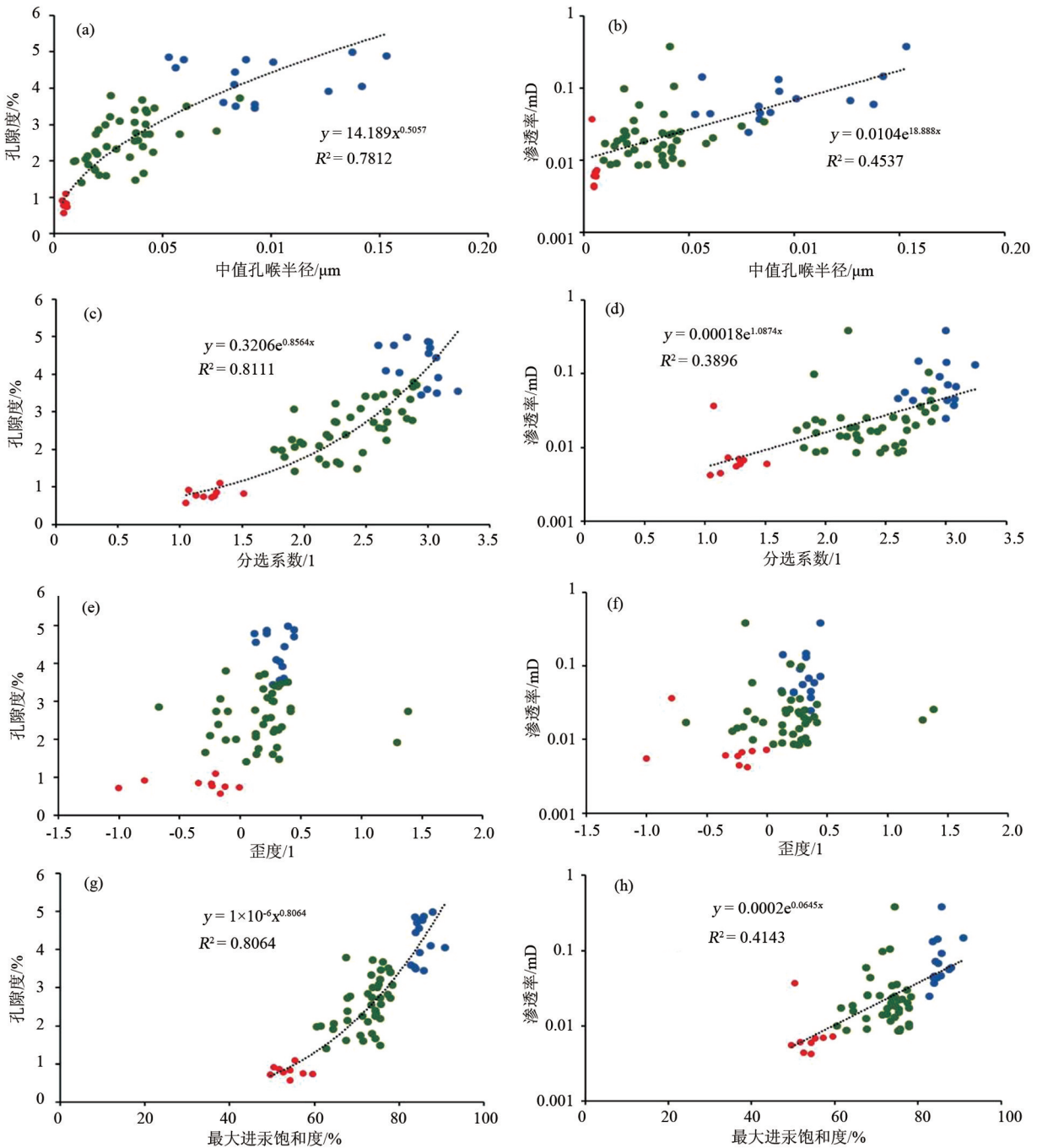


图 4 川东北地区 T_3x_4 孔隙结构参数与物性相关关系图

分选系数指孔喉的均匀程度,分选系数越小,孔喉越均匀。研究区 T_3x_4 储层砂岩孔喉分选系数与孔隙度和渗透率均呈现出明显的正相关关系(图4(c)、(d)),即当分选系数增大时,储层物性随之变好,分选系数与孔隙度的相关系数为0.8111。在长石、岩屑溶蚀的粒内孔隙较发育的储层段,其分选系数大,说明孔喉类型多样且大小分布不均。随着压实和胶结作用进行,孔喉半径趋于减小且相对均一,微细孔喉的大量发育是储层严重致密化和储集能力降低的主要原因。

孔喉歪度主要反映喉道众数的相对位置,即歪度越小,岩石孔喉大小分布则越偏向于小孔,歪度越大,岩石孔喉大小分布越偏向于大孔。研究区 T_3x_4 储层砂岩歪度与孔隙度和渗透率不具相关性(图4(e)、(f)),大多数样品孔喉分布为负歪度,表明研究区 T_3x_4 发育一定数目的较大孔喉,但主要以细孔喉为主,未受到成岩后溶蚀作用的改造。

最大进汞饱和度为最高压力时汞所侵入的孔喉体积百分数,最大进汞饱和度越大,被汞饱和的孔喉体积越小,孔喉的连通性越好^[12]。研究区 T_3x_4 储层砂岩最大进汞饱和度与孔隙度呈正相关关系,相关系数为0.8064,但其与渗透率的相关性较差,在储集物性相对较好的砂岩中尤为显著(图4(g)、(h)),相同的最大进汞饱和度,其渗透率有差异,这说明在特低渗砂岩储层中微裂缝对渗透率的贡献较大。

5 储层分类评价

确定储层物性下限是储层描述的重点内容,也是储集层评价和储量评估的基础工作^[15]。根据生产测试资料,综合经验统计法和测井储层解释结论认为,川东北地区 T_3x_4 孔隙度下限为2.5%,渗透率下限为0.025mD。根据储层物性分布范围,参考测井解释结果,结合与之相关性较好的孔喉特征参数,将研究区 T_3x_4 特低渗致密砂岩储层分为3类(表1)。

表1 川东北地区 T_3x_4 储层分类评价表

储层类型	孔隙度/%	渗透率/mD	压汞曲线特征	中值孔喉半径/ μm	排驱压力/MPa	分选系数/1	最大进汞饱和度/%	孔隙类型	岩石类型	评价
I	>5	>0.04	中等排驱压力 ——细喉型	>0.1	<2	>3	>80	残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、微裂缝	粗、中粒岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主	较好
II	2.5~5	0.02~0.04	高排驱压力 ——微细喉型	0.01~0.1	2~15	1.5~3	60~80	粒间溶孔、粒内溶孔、微裂缝	中、细粒岩屑石英砂岩、长石岩屑石英砂岩为主	中等
III	<2.5	<0.02	高排驱压力 ——微喉型	<0.01	>15	<1.5	<60	粒间微孔、粒内溶孔	细粒岩屑石英砂岩为主	较差

1) I类储层 主要岩性为粗、中粒岩屑砂岩、长石岩屑砂岩,岩屑含量较高,利于溶蚀孔隙的发育;孔隙类型以粒内溶孔、粒间溶孔和部分残余粒间孔为主,且连通性相对较好;孔隙度大于4%,渗透率大于0.04mD。毛细管压力曲线初始段较短、较陡,中间平缓段较长,出现一个低缓的平台,相对偏向左下方,歪度略粗,中值孔喉半径大于0.1 μm ,排驱压力小于2MPa,最大进汞饱和度大于80%,表明孔喉连通性好,渗流阻力小,渗透率主要由少数较大孔喉贡献,代表研究区储集性能较好的储层,对应测井解释的气层、差气层。

2) II类储层 岩性以中、细粒岩屑石英砂岩,长石石英砂岩为主;粒间溶孔和粒内溶孔的数目较I类减少,主要以微裂缝-孔隙的组合形式出现;孔隙度为2.5%~4%,渗透率为0.002~0.04mD;毛细管压力曲线中间平缓段相对较陡,歪度略细,孔喉分选较好,中值孔喉半径为0.01~0.1 μm ,排驱压力为2~15MPa,最大进汞饱和度为60%~80%;小孔隙发育程度增加,孔喉大小趋于均一,微裂缝的存在对提高储层的渗流能力起到了较大的作用,为研究区的主要储层类型。

3) III类储层 以细-粉砂岩为主;晶间、晶内微孔发育,为微孔微喉组合类型;孔隙度小于2.5%,渗透率小于0.02mD;毛细管压力曲线特征为歪度细、分选好,排驱压力大于15MPa,中值孔喉半径小于0.01 μ m,最大进汞饱和度小于60%。该类储层储集渗流条件极差,渗流阻力大,不能形成有效流动,在研究区属于非储层。

6 结论

1) 川东北地区 T_3x_4 储层砂岩经历了强烈的机械压实和后期破坏性成岩作用,使得储层严重致密化,孔隙度集中分布于2%~6%,渗透率小于0.5mD,属于典型的特低孔-特低渗储层,其主要储集空间以粒内溶孔、粒间溶孔为主,残余原生孔隙较少,微裂缝较发育。

2) 研究区储层的孔隙结构可分为3类:①中等排驱压力——细喉型,②较高排驱压力——微细喉型,③高排驱压力——微喉型。孔隙结构严重影响储层的储集渗流能力,中值孔喉半径、分选系数、最大进汞饱和度与储层物性呈正相关关系,与孔隙度的相关性好于渗透率。

3) 建立了川东北地区 T_3x_4 特低渗致密砂岩储层分类评价标准,将储层划分为3类:I类是研究区的优质储层,发育少量较大孔喉,孔隙连通性较好;II类是研究区主要储层类型,小孔集中发育,孔喉分选较好,微裂缝的存在对该类储层的渗流能力起重要作用;III类储层孔喉细微,分选均匀,储集性能差或无油气储集能力。

[参考文献]

- [1] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385~399.
- [2] 邱中建,赵文智,邓松涛.我国致密砂岩气和页岩气的发展前景和战略意义[J].中国工程科学,2012,14(6):4~8.
- [3] 杨涛,张国生,梁坤,等.全球致密气勘探开发进展及中国发展趋势预测[J].中国工程科学,2012,14(6):64~68.
- [4] 盘昌林.四川盆地元坝地区上三叠统须家河组天然气成藏条件研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [5] 张峰.川东北地区上三叠统须家河组层序岩相古地理研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [6] 郝景宇.川东北地区须家河组沉积与层序特征精细研究[D].荆州:长江大学,2012.
- [7] 罗志立,赵锡奎,刘树根.龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化[M].成都:成都科技大学出版社,1994.
- [8] 王金琪.安县构造运动[J].石油与天然气地质,1990,11(3):223~234.
- [9] 谢武仁,杨威,李熙喆,等.四川盆地上三叠统砂岩储层特征研究[J].天然气地球科学,2008,19(5):623~629.
- [10] 盘昌林,刘树根,马永生,等.川东北须家河组储层特征及主控因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(3):27~34.
- [11] 李阔,曾韬,潘磊.川东北地区须家河组储层特征研究[J].岩性油气藏,2012,24(1):46~51.
- [12] 蔡玥,熊琦,李勇,等.低渗透砂岩储层孔隙结构对储层质量的影响——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例[J].岩性油气藏,2014,26(5):69~74.
- [13] 唐海发,彭仕宓,赵彦超.大牛地气田盒2+3段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J].矿物岩石,2006,26(3):107~113.
- [14] 王瑞飞,陈明强,孙卫.鄂尔多斯盆地延长组超低渗透砂岩储层微观孔隙结构特征研究[J].地质论评,2008,54(2):270~277.
- [15] 尹昕,应文敏.鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界低孔渗砂岩储层评价[J].矿物岩石,2005,25(2):104~109.

[编辑] 邓磊