

塔河油田碎屑岩油气运聚模拟及潜力区优选

冯兴强^{1,2,3}, 宋海明⁴
FENG Xingqiang^{1,2,3}, SONG Haiming⁴

1. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
1. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

4. *SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China*

FENG X Q, SONG H M, 2020. Simulation of oil-gas accumulation of clastic rocks and potential areas in the Tahe Oilfield [J]. Journal of Geomechanics, 26 (6): 892-900. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.070

Abstract: To systematically study the oil-gas migration and accumulation of clastic rocks in the Tahe Oilfield, we carried out the simulation of oil-gas migration and accumulation using the comprehensive method of flow routing and percolation on the basis of the geologic character in the study area. The simulation of oil-gas migration and accumulation based on the fault-sandstone migration pathway system were carried out. Based on the study of fault classification and stages, the criterion of fault opening was formed by combining with the actual data at first, and then the model of fault migration framework was established. Using compaction curves and the relationship between porosity and permeability, we built the sandstone migration framework by facies-controlled modeling technology. The simulated results are in good agreement with that of the discovered hydrocarbon reservoirs. It indicates that the method is valid. We pointed out the potential areas by the simulated result as well. The works in this paper have significance and practical value for the exploration of clastic rocks in the study area.

Key words: migration framework; oil-gas migration and accumulation; numerical simulation; clastic rock; Tahe

摘 要: 为了系统研究塔河油田碎屑岩油气运聚过程, 针对研究区目的层的地质特征, 文章采用流径和逾渗综合方法进行油气运聚模拟分析。该方法基于断裂-砂体输导格架来开展油气运聚模拟, 首先通过断层的分级、分期研究, 结合实际资料形成了断层开启性判别标准, 进而建立断层输导格架模型; 综合使用压实曲线和孔渗关系, 利用相控建模技术建立砂体输导格架模型。在断裂-砂体输导格架基础上开展了油气运聚模拟, 模拟结果与现有的油气藏吻合较好, 表明流径与逾渗综合法是一种模拟研究区目的层油气运聚过程的有效方法。同时, 利用模拟结果, 明确了主要目的层的潜力区域, 对研究区碎屑岩的勘探部署有重要意义和实际价值。

关键词: 输导格架; 油气运聚; 数值模拟; 碎屑岩; 塔河

中图分类号: P618 **文献标识码:** A

基金项目: 国家重大科技攻关基金 (2017ZX05005-002); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190085)
第一作者简介: 冯兴强 (1975-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事石油地质与地球物理研究工作。E-mail: 286484521@qq.com
收稿日期: 2020-09-23; 修回日期: 2020-11-02; 责任编辑: 吴芳
引用格式: 冯兴强, 宋海明, 2020. 塔河油田碎屑岩油气运聚模拟及潜力区优选 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 892-900. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.070

0 引言

塔河油田碎屑岩油气来自于下伏寒武系烃源岩和奥陶系油气藏, 烃源岩距离储层较远, 输导体系是控制该区碎屑岩层系油气成藏富集的重要因素。已有研究(陈强路和黄继文, 2004; 李坤等, 2007; 顾忆等, 2007)认为断裂-砂体是塔河油田油气的主要运移路径, 为此在这方面也开展了不少研究工作(江山等, 2010; 韩勇和徐浩, 2020), 但从研究内容上来看, 对断裂输导方面的研究仅局限在大级别通源断裂上, 忽视了非通源断裂的输导性; 同时在砂体输导性分析方面, 还停留在利用沉积相分布来评价其输导性上, 完全没有考虑砂体物性对输导的影响。鉴于这些问题, 导致对该区碎屑岩油气的运聚过程和机理还不甚清楚, 进而影响了对塔河碎屑岩油气富集和聚集的整体认识, 制约了该领域的勘探部署与油气发现。

为此, 在已有研究成果基础上, 文章尝试对

断裂分级、分期评价其输导性, 利用相控建模技术建立砂体的输导格架模型来探讨其输导能力, 同时通过油气运聚数值模拟方法(何家雄等, 2006, 2007), 基于断裂-砂体输导格架对塔河油田碎屑岩层系的油气运聚过程进行了系统研究, 寻找主要目的层的潜力区域, 希望能对研究区碎屑岩的勘探部署提供实际价值。

1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起中段南翼的阿克库勒凸起上(图 1), 跨越顺托果勒隆起的北部、哈拉哈塘拗陷东部以及草湖拗陷西部, 南邻满加尔拗陷, 北邻雅克拉断凸。塔河油田自下而上发育志留系、泥盆系、石炭系、三叠系、白垩系和古近系等碎屑岩地层, 整体处于斜坡构造背景。碎屑岩是塔河油田的勘探主要目的层系, 经过多年的勘探, 塔河油田在志留系、石炭系、三叠系、白垩系和古近系等碎屑岩层系中均有很好的油气成果(冯兴强等, 2013)。

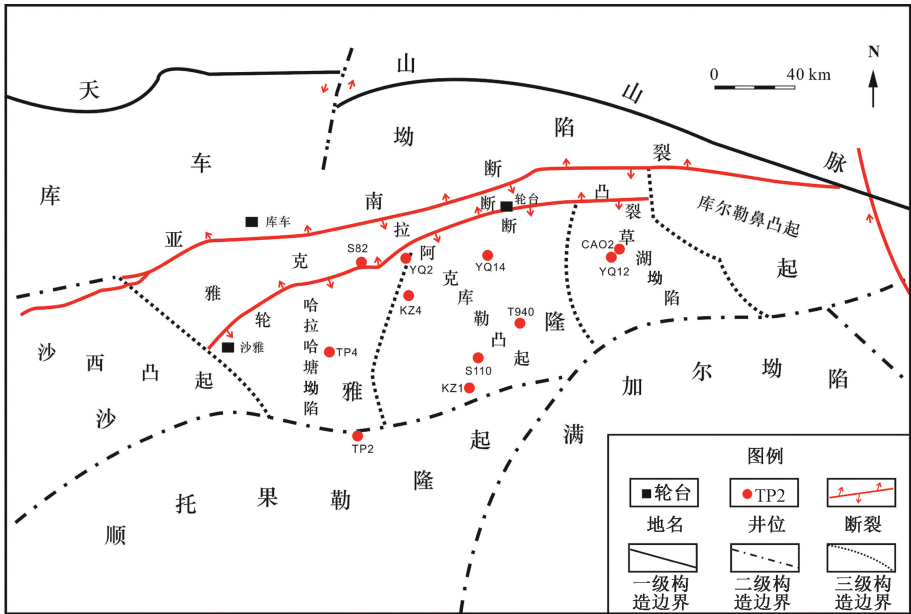


图 1 塔河油田构造位置简图
Fig. 1 Tectonic position of the Tahe Oilfield

2 剖面断裂-砂体输导格架模型

2.1 断裂输导格架模型的建立

对塔河油田断裂的输导性进行了分期分级研究, 对于不同期次不同级别的断裂, 按照其对油气藏的

影响程度, 分别赋予不同的断裂属性。该区断层主要分为两个期次: 古生界断裂和中新生界断裂。断层分级主要分为通源断裂和层间非通源断裂, 通源断裂是油气从古生界碳酸盐油气藏向上运移到碎屑岩储集层的通道。已有研究表明, 古生界的主要通源断裂为托普台中部和北部断裂, 中新生界的主要

通源断裂为轮台断裂、阿克库木和阿克库勒断裂，通源断裂由于规模大，活动期次多，被认为主要以输导为主（陈强路和黄继文，2004）。

对于层间非通源断裂的输导性判别上（姜振学等，2005；李宏义等，2010；王宗礼等，2011；王珂和戴俊生，2012；陈冬霞等，2013；孟宪波等，2019；张林炎等，2019），利用评价断层封堵性的泥岩涂抹系数来判断其开启性（孙立宪等，2017，2013）。众所周知，泥岩涂抹系数作为判断断层封堵性的一种有效参数，一般该参数大于某数值时断层封堵，而小于该数值时断层表现为开

启，正是利用该参数可反向表征断层开启的这种特点，此次研究利用泥岩涂抹系数来表征其输导性。首先利用地震解释成果、钻测井资料等建立了研究区目的层断层和地层框架模型，在该模型基础上，选定资料比较齐全的 T759 断背斜油气藏来进行详细研究，以便建立判别断层开启的标准。T759 油气藏的构造为北倾地层与南东倾向的北东走向 F1 断层共同控制的断背斜，圈闭面积 4.3 km²，闭合高度 25 m。由 T759 井的岩性地层划分可知，T759 井发现油气的层段对应于 K₁s-6H（下白垩统舒善河组第 6 小层）砂岩段（图 2）。

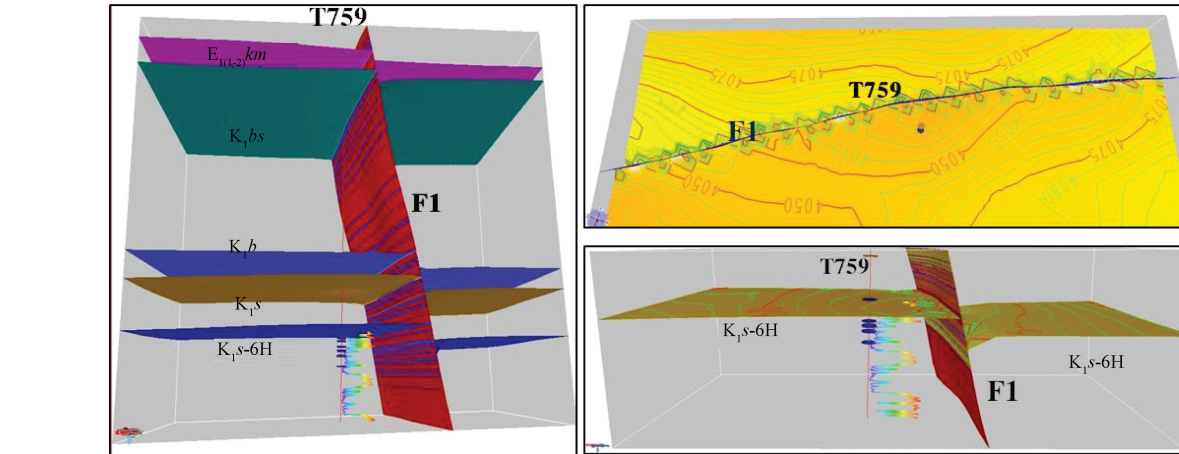


图 2 T759 圈闭构造模型及 K₁s-6H 砂岩顶的构造图
Fig. 2 Structural model of the trap T759 and top structural map of the sandstone K₁s-6H

利用泥岩涂抹系数计算公式，对 T759 断背斜的 F1 断层泥岩涂抹系数进行了计算（图 3），通过分析该油气藏和泥岩涂抹系数关系，确定泥岩涂抹系数判断断层开启性的门槛值为 12%，即当泥岩涂抹系数小于 12%时断层开启。为了检验该门槛值是否合理，选

定了 T756-1H、T756-2H 和 TP13-1H 三个断背斜油气藏进行验证，通过验证表明该门槛值是合理有效的。利用该方法计算了研究区目的层所有层间断裂的断层涂抹系数，并用开启门槛值对它们的开启性进行了表征，进而建立了断层输导格架。

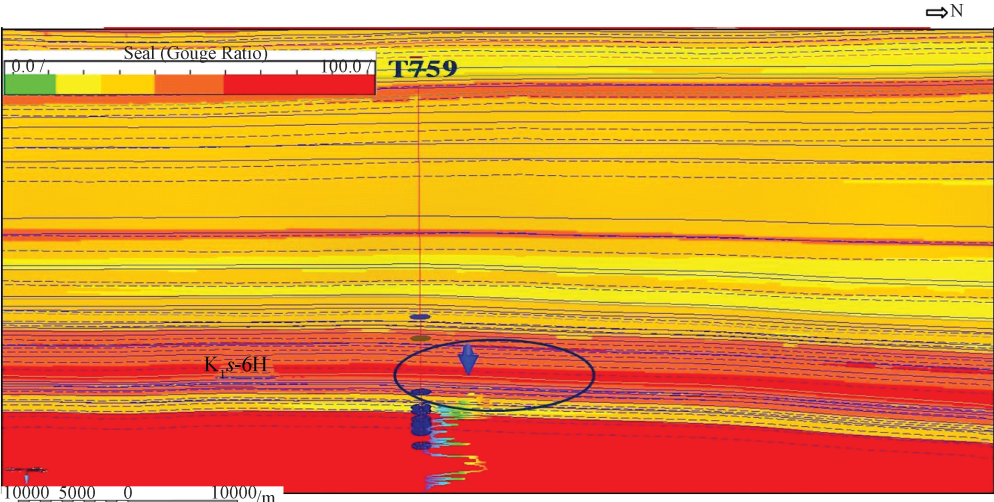


图 3 F1 断层的 SGR 分布图
Fig. 3 SGR distribution map of the fault F1

2.2 砂体输导格架的建立

2.2.1 泥岩压实曲线及孔渗特征

泥岩压实曲线是揭示现今与地质历史演化过程的孔隙度变化的关系,分析确定泥岩的封闭能力,为岩性输导格架在不同时期的油气运聚过程的模拟分析提供关键参数(陈瑞银等,2007)。

通常地层孔隙度随深度增加有规律减小,孔隙度与深度存在以下关系:

$$\phi = \phi_0 e^{(-C \cdot H)} \quad (1)$$

式中: ϕ —深度 H 处的孔隙度,%; ϕ_0 —地表最初孔隙度,%; C —压实系数,%; H —地层埋藏深度,m。根据实验测试数据编制孔隙度与埋深的关系图,根据关系图明确最初孔隙度 ϕ_0 和压实系数 C 。压实系数 C 和最初孔隙度 ϕ_0 的数值由岩性决定,岩性有差异,最初孔隙度和压实系数数值就不一样。从实验结果上看泥岩压实系数最大。

为简化模型和便于压实恢复,建立模型之前,假设如下:压实作用只会减小岩石的孔隙体积,岩石骨架颗粒体积不受压实作用的影响,在压实前后保持不变;同时在不考虑成岩作用当中的不同次生变化前提下,压实过程是不可逆的,即压实前的地层厚度要大于压实后的地层厚度。在这种假设下,设 D_1 、 D_2 分别为某一套碎屑岩地层当前的顶、底界埋藏深度,把这套地层的上覆地层剥去一层后,其顶、底界深度分别为 D'_1 和 D'_2 ,那么存在以下关系:

$$\int_{D_1}^{D_2} (1 - \phi(D)) dD = \int_{D'_1}^{D'_2} (1 - \phi(D)) dD \quad (2)$$

上面等式两边分别代表该套碎屑岩地层恢复前后单位截面积的骨架厚度。求解该式即可得到 D'_1 和 D'_2 ,令左式=A,恢复后的地层厚度 $D'=D'_2-D'_1$,积分得

$$D' = A + \frac{\phi_0}{C} [e^{-CD'_1} - e^{-C(D'+D'_1)}] \quad (3)$$

第一层回剥到地表($D'_1=0$)时,给出 D' 的预估值,通过迭代即可求出 D' 值,则 $D'_2=D'+D'_1$,作为下一层恢复的 D'_1 值,逐层恢复即可完成全部工作。

在以上压实厚度恢复原理的基础上,结合压实模型进行压实厚度的计算,并最终建立了该区的压实厚度/脱压实厚度的关系模型,得到两者之间的函数关系。

通过制作对研究区测井曲线进行分析,明确了泥岩声波时差和埋深的关系,从而建立了泥岩压实曲线。

一般来说,孔隙度和渗透率之间呈正相关关

系,渗透率随孔隙度的增大而增大。对塔河油田碎屑岩主要目的层系的孔隙度和渗透率之间的关系进行交汇分析,建立了研究区目的层的孔渗关系,泥岩压实曲线和孔渗关系的建立是各关键时期主要目的层输导格架建立的基础。

2.2.2 砂体输导格架

根据研究区目的层沉积相展布特征,利用相控建模方法进行相控条件下的砂体岩相建模。在岩相模型基础上,结合压实曲线和孔渗关系建立了研究区目的层砂体物性模型(李铁军和罗晓容,2001;冯增朝等,2007;刘志锋等,2008;罗晓容等,2012),此次研究是采用砂体渗透率模型(王震亮和陈荷立,1999;袁益让等,1999;叶勇军等,2002;张发强等,2003,2004;周波等,2007;赵健等,2011)来作为油气运聚砂体输导格架模拟的数值模型(图4)。

综合研究区目的层断层输导格架模型和砂岩输导格架模型,最终形成断裂-砂体输导格架数值模型(图5)。

3 三维断裂-砂体输导格架

为了在油气运聚模拟过程中充分利用现有主要层位构造图和沉积相图,对构造图进行数字网格化处理,为了能够使模拟过程中具有足够的精度,同时又保证计算机的计算效率,研究采用 200 m×200 m 的网格进行剖分,东西向 677 个网格剖分,南北向 560 个网格剖分,单个层面的网格数约为 38×10^4 个。在对主要层位构造图和主要断层进行网格数字化的基础上,完成三维地质框架模型的建立。三维地质岩相模型的建立,是以沉积相展布为基础,需要对沉积相图进行数字化预处理,按照同样的网格剖分对主要层面的沉积相图进行数字化处理。综合构造图、断层和沉积相图数字化网格数据,结合沉积相的岩性特征,建立三维地质岩相体(图6)。

在三维岩相模型的基础上,结合压实曲线和主要地质历史沉积演化过程中的剥蚀厚度分析成果,进行三维构造演化的恢复,并建立各关键构造期的孔隙度、渗透率体(图7、图8),从而建立三维输导格架模型。

4 油气运聚模拟

研究区目的层油气藏类型多样,发育构造、

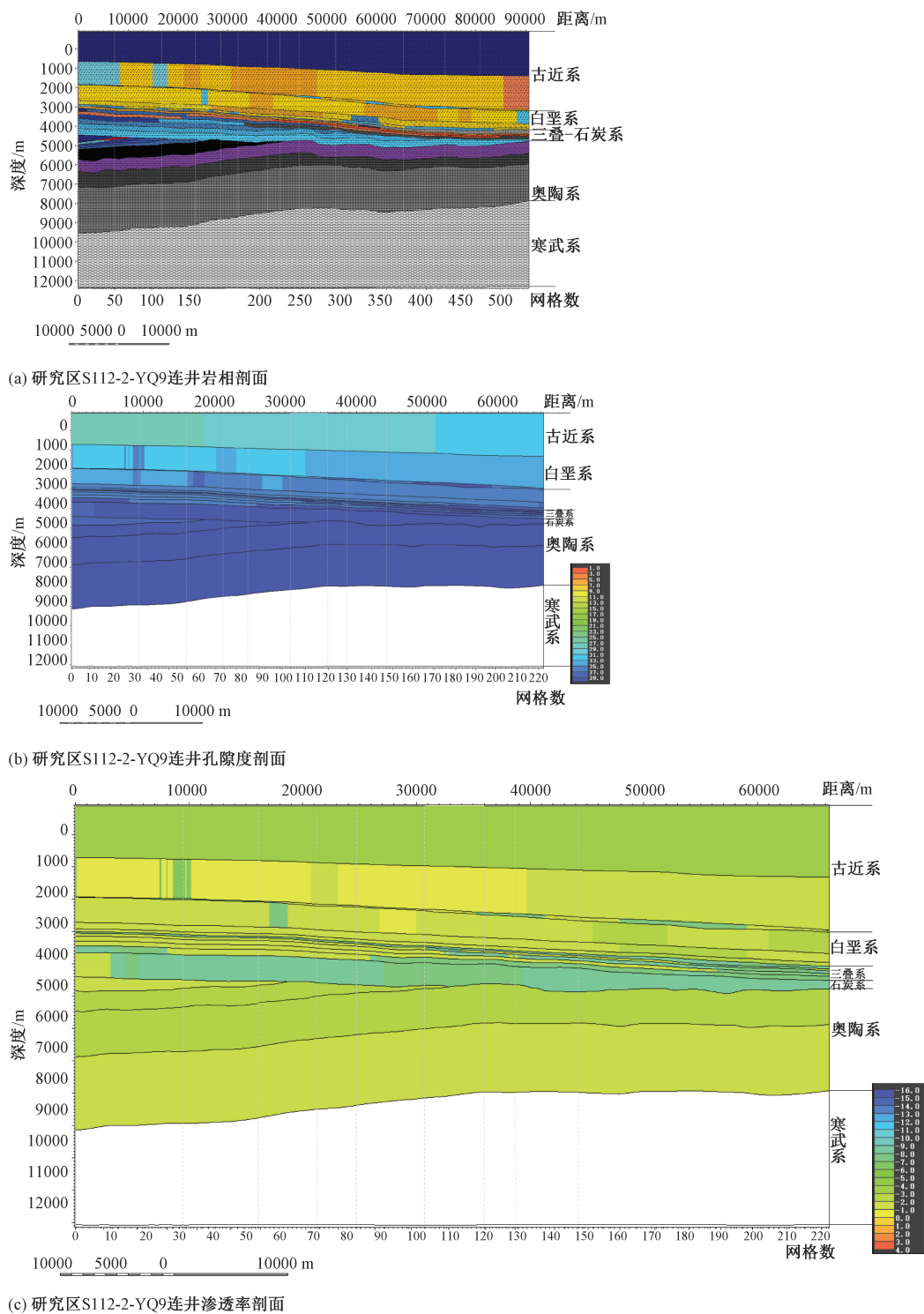


图 4 研究区 S112-2-YQ9 连井岩相、孔隙度、渗透率剖面
Fig. 4 Lithofacies, porosity and permeability profile tied to the wells S112-2 to YQ9

地层及岩性油气藏。志留系的沉积相以潮坪相为主，中新生界发育三角洲和湖泊沉积体系（武芳芳等，2009），砂体横向变化快。单一的流径和逾渗都无法有效地满足该区块的油气的运聚模拟的实现。故用侵入逾渗模型进行输导层的油气的运聚分

析，同时结合流径法进行模拟分析。
模拟结果（图 9—图 11）显示油气从古生界碳酸盐岩油气藏沿着通源断裂向上运移，当遇到砂体输导层时，沿着砂体输导层横向运移，在遇到合适的圈闭的地方形成油气藏。模拟结果与现

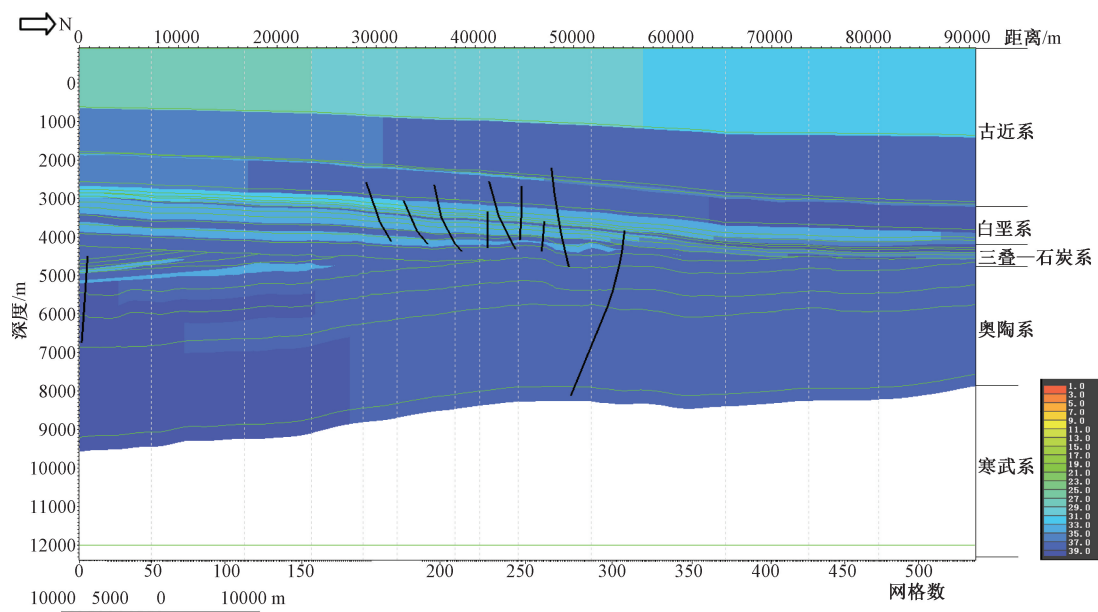


图 5 研究区 S112-2-YQ9 连井断裂-砂体输导格架

Fig. 5 Fault-sandstone migration framework tied to the wells S112-2 to YQ9

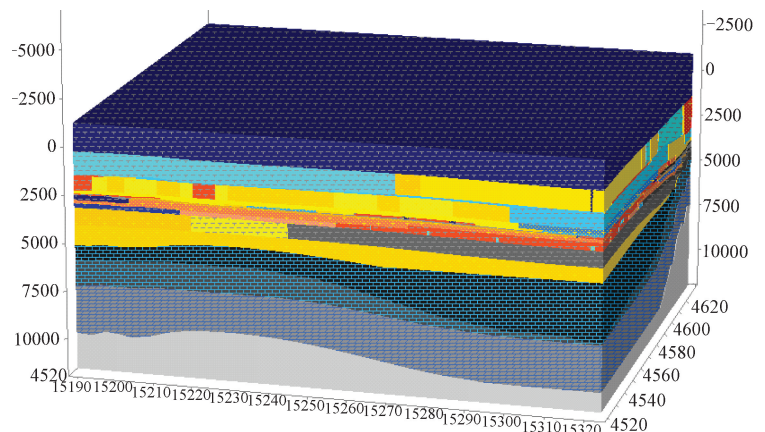


图 6 研究区三维岩相模型（单位/m）

Fig. 6 3D lithofacies model of the study area (unit: m)

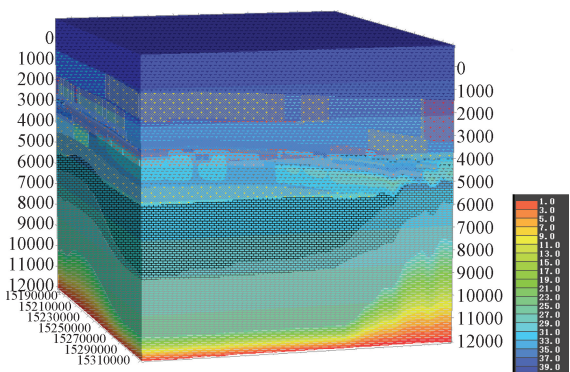


图 7 研究区三维孔隙度模型（单位/m）

Fig. 7 3D porosity model of the study area (unit: m)

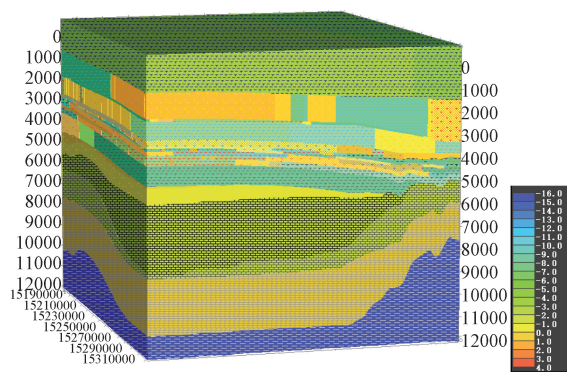


图 8 研究区三维渗透率模型（单位/m）

Fig. 8 3D permeability model of the study area (unit: m)

有的油气藏吻合较好，表明流径与逾渗综合法是 一种模拟研究区目的层的油气运聚过程的有效方

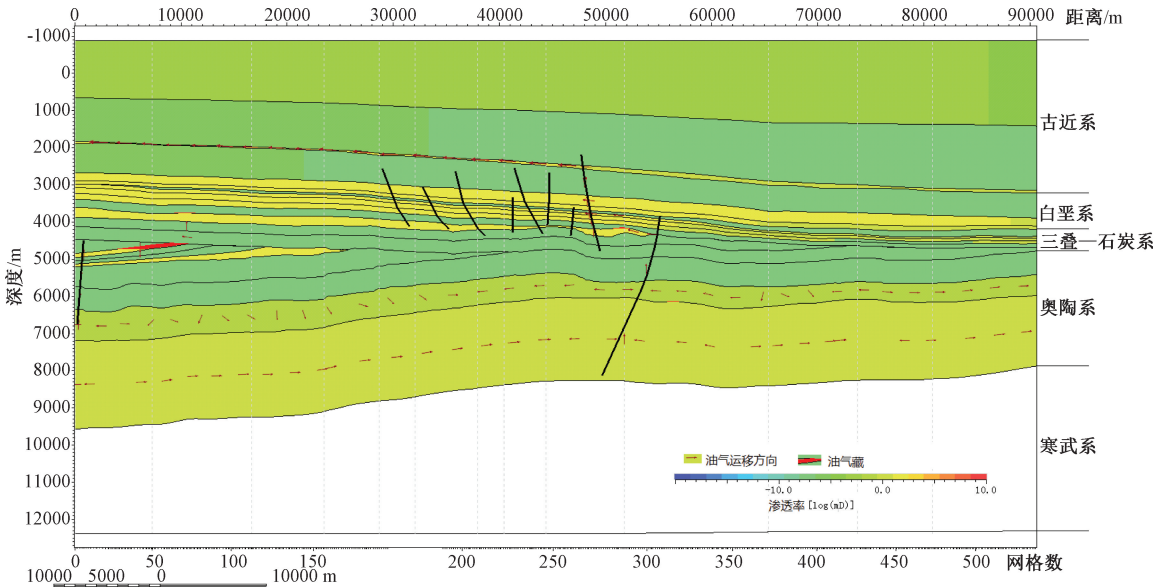


图 9 研究区 S112-2-YQ9 连井剖面油气运聚模拟结果

Fig. 9 Simulated results of oil-gas migration and accumulation tied to the wells S112-2 to YQ9

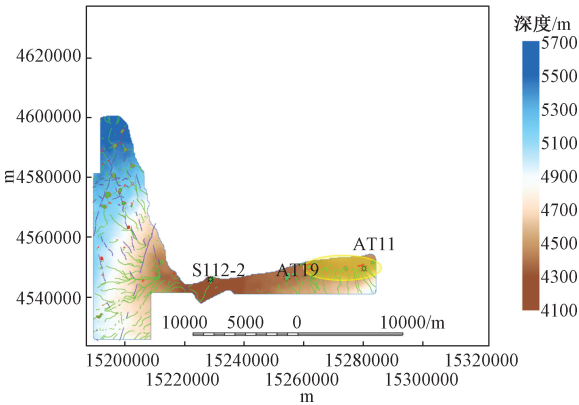


图 10 志留系柯上段油气运聚模拟结果

Fig. 10 Simulated results of oil-gas migration and accumulation for the Silurian upper-Kepingtage formation in the Tahe Oilfield

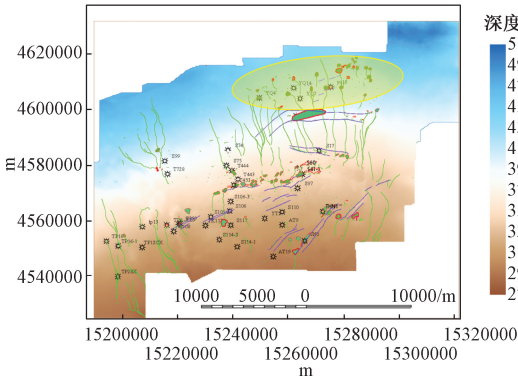


图 11 三叠系油气运聚模拟结果

Fig. 11 Simulation results of oil-gas migration and accumulation for the Triassic formation in the Tahe Oilfield

法, 进一步证实断裂-砂体输导是塔河油田主要输导体系。模拟结果表明志留系的潜力区在塔河东南部, 三叠系的潜力区在于奇地区。

5 结论

(1) 通过对断层分期、分级处理, 针对不同级别断裂, 利用不同表达形式建立了断层输导格架模型; 结合压实曲线和孔渗资料, 利用相控建模技术建立二维砂体输导格架模型, 由此建立二维“断砂”油气运聚输导格架。

(2) 通过对研究区目的层构造图和沉积相图的网格化剖分处理, 建立了研究区三维岩相模型。在此基础上, 结合压实曲线和主要地质历史沉积演化过程中的剥蚀厚度分析成果, 进行三维构造演化的恢复, 并建立各关键构造期的孔隙度、渗透率体, 进而建立三维输导格架模型。

(3) 针对研究区目的层的实际情况, 采用流径-逾渗综合方法进行了油气运聚模拟, 模拟结果与现有的油气藏吻合较好, 表明流径与逾渗综合法是一种模拟研究区目的层的油气运聚过程的有效方法。模拟结果表明志留系潜力区在塔河东南部, 三叠系的潜力区在于奇地区。

References

CHEN D X, WANG L, PANG X Q, et al., 2013. The controlling of fault on the tight sandstone gas migration and accumulation in West

- Sichuan depression [J]. *Geoscience*, 27 (5): 1137-1146. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Q L, HUANG J W, 2004. Hydrocarbon conduit systems and migration-accumulation model in Tahe oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25 (2): 143-146. (in Chinese with English abstract)
- CHEN R Y, LUO X R, WU Y S, 2007. Construction of hydrocarbon passage framework using diagenetic sequence information [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 28 (6): 43-46, 51. (in Chinese with English abstract)
- FENG X Q, ZHANG Z M, ZHANG W B, 2013. Petroleum accumulation characteristics and favorable exploration target of Silurian in Tahe oilfield [J]. *Geoscience*, 27 (1): 180-185. (in Chinese with English abstract)
- FENG Z C, ZHAO Y S, LYU Z X, 2007. Study on percolation law of 2D porous and fractured double-medium [J]. *Acta Physica Sinica*, 56 (5): 2796-2801. (in Chinese with English abstract)
- GU Y, SHAO Z B, CHEN Q L, et al., 2007. Oil migration and accumulation pattern in the Tahe oilfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 29 (3): 224-230, 237. (in Chinese with English abstract)
- HAN Y, XU H, 2020. Characteristics of fault system in Yuqi area of Tahe oilfield [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 34 (3): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- HE J X, XIA B, ZHANG S L, et al., 2006. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas [J]. *Geology in China*, 33 (6): 1336-1344. (in Chinese with English abstract)
- HE J X, YAO Y J, LIU H L, et al., 2007. Migration and accumulation characteristics and resource potential of crust-derived inorganic CO₂ in the Yinggehai basin, northern South China Sea [J]. *Geology in China*, 34 (5): 887-893. (in Chinese with English abstract)
- JIANG S, LIU G Y, YUN L, 2010. Fractal feature of fracture system in Tahe Oil Field and its relation to hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 41 (2): 736-741. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Z X, PANG X Q, ZENG J H, et al., 2005. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 12 (4): 507-516. (in Chinese with English abstract)
- LI H Y, JIANG Z X, DONG Y X, et al., 2010. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Geoscience*, 24 (4): 755-761. (in Chinese with English abstract)
- LI K, ZHAO X K, ZHANG X B, et al., 2007. Hydrocarbon migration pathway system types and evolution in the Akekule rise, Tarim basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 42 (4): 766-778. (in Chinese with English abstract)
- LI T J, LUO X R, 2001. The inhomogeneity of petroleum migration in clastic carrier beds [J]. *Chinese Journal of Geology*, 36 (4): 402-413. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z F, LAI Y T, ZHAO G, et al., 2008. The critical scaling property of random percolation porous media [J]. *Acta Physica Sinica*, 57 (4): 2011-2015. (in Chinese with English abstract)
- LUO X R, LEI Y H, ZHANG L K, et al., 2012. Characterization of carrier formation for hydrocarbon migration: concepts and approaches [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (3): 428-436. (in Chinese with English abstract)
- MENG X B, XU Y D, ZHANG Y J, et al., 2019. Study on the variation law of crustal stress field in tight reservoir under multi field coupling [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (4): 467-474. (in Chinese with English abstract)
- WANG K, DAI J S, 2012. A quantitative relationship between the crustal stress and fault sealing ability [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (1): 74-81. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z L, CHEN H L, 1999. Preliminary approach to the definition and confirmation of effective pathways for migration and accumulation [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 21 (1): 71-75. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z L, LUO Q, LI S L, et al., 2011. Type of petroleum migration pathway system and accumulation model in Langgu Depression, Jizhong [J]. *Geoscience*, 25 (6): 1137-1144. (in Chinese with English abstract)
- WU F F, ZHU G Y, ZHANG S C, et al., 2009. Types of hydrocarbon migration pathways and its controlling effects on hydrocarbon distribution in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 30 (3): 332-341. (in Chinese with English abstract)
- YE Y J, FU G, MA F J, et al., 2002. Research on oil/gas migration and accumulation regularities by the distribution of capillary pressure of transport layer [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 21 (2): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- YUAN Y R, ZHAO W D, CHENG A J, et al., 1999. Simulation and application of three-dimensional migration-accumulation of oil resources [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 20 (9): 933-942. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F Q, LUO X R, MIAO S, et al., 2003. The patterns and its effect factors of secondary hydrocarbon migration [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 25 (1): 69-75. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F Q, LUO X R, MIAO S, et al., 2004. Experiments on oil migrating in a limited pathway and the mechanism analysis [J]. *Chinese Journal of Geology*, 39 (2): 159-167. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L K, LUO X R, LIAO Q J, et al., 2007. Quantitative evaluation of fault sealing property with fault connectivity probabilistic method [J]. *Oil & Gas Geology*, 28 (2): 181-190. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L K, LUO X R, SONG G Q, et al., 2013. Quantitative evaluation of parameters to characterize fault opening and sealing during hydrocarbon migration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34 (1): 92-100. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L Y, SONG L C, LI H J, et al., 2019. The role of geomechanics theory in the exploration of deep oil and gas in China [J]. *Journal of Geomechanics* 25 (6): 1036-1047. (in Chinese

with English abstract)

ZHAO J, LUO X R, ZHANG B S, et al., 2011. A quantitative characterization and effectiveness evaluation on sandstone carrier beds of the Silurian Kalpintag Formation in the Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 32 (6): 949-958. (in Chinese with English abstract)

ZHOU B, JIN Z J, LUO X R, et al., 2007. Changing patterns of hydrocarbon migration pathway in a up-scaling percolation model [J]. *Oil & Gas Geology*, 28 (2): 175-180. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈冬霞, 王雷, 庞雄奇, 等, 2013. 断裂对川西坳陷致密砂气藏天然气运聚的控制作用 [J]. *现代地质*, 27 (5): 1137-1146.

陈强路, 黄继文, 2004. 塔河油田油气输导体系与运聚模式 [J]. *新疆石油地质*, 25 (2): 143-146.

陈瑞银, 罗晓容, 吴亚生, 2007. 利用成岩序列建立油气输导格架 [J]. *石油学报*, 28 (6): 43-46, 51.

冯兴强, 张忠民, 张卫彪, 2013. 塔河油田志留系油气成藏特征及勘探方向 [J]. *现代地质*, 27 (1): 180-185.

冯增朝, 赵阳升, 吕兆兴, 2007. 二维孔隙裂隙双重介质逾渗规律研究 [J]. *物理学报*, 56 (5): 2796-2801.

顾忆, 邵志兵, 陈强路, 等, 2007. 塔河油田油气运移与聚集规律 [J]. *石油实验地质*, 29 (3): 224-230, 237.

韩勇, 徐浩, 2020. 塔河油田于奇地区断裂体系特征研究 [J]. *石油地质与工程*, 34 (3): 7-12.

何家雄, 夏斌, 张树林, 等, 2006. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系 [J]. *中国地质*, 33 (6): 1336-1344.

何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等, 2007. 南海北部莺歌海盆地壳源型非生物 CO₂ 运聚成藏特征与资源潜力 [J]. *中国地质*, 34 (5): 887-893.

江山, 刘国勇, 云露, 2010. 塔河油田奥陶系断裂分形特征及与油气运聚关系 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 41 (2): 736-741.

姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等, 2005. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究 [J]. *地学前缘*, 12 (4): 507-516.

李宏义, 姜振学, 董月霞, 等, 2010. 渤海湾盆地南堡凹陷断层对油气运聚的控制作用 [J]. *现代地质*, 24 (4): 755-761.

李坤, 赵锡奎, 张小兵, 等, 2007. 塔里木盆地阿克库勒凸起油气输

导体系类型与演化 [J]. *地质科学*, 42 (4): 766-778.

李铁军, 罗晓容, 2001. 碎屑岩输导层内油气运聚非均一性的定量分析 [J]. *地质科学*, 36 (4): 402-413.

刘志峰, 赖远庭, 赵刚, 等, 2008. 随机多孔介质逾渗模型渗透率的临界标度性质 [J]. *物理学报*, 57 (4): 2011-2015.

罗晓容, 雷裕红, 张立宽, 等, 2012. 油气运移输导层研究及量化表征方法 [J]. *石油学报*, 33 (3): 428-436.

孟宪波, 徐佑德, 徐佑德, 等, 2019. 多场耦合作用下致密储层地应力场变化规律研究: 以准噶尔盆地某区为例 [J]. *地质力学学报*, 25 (4): 467-474.

王珂, 戴俊生, 2012. 地应力与断层封闭性之间的定量关系 [J]. *石油学报*, 33 (1): 74-81.

王震亮, 陈荷立, 1999. 有效运聚通道的提出与确定初探 [J]. *石油实验地质*, 21 (1): 71-75.

王宗礼, 罗强, 李胜利, 等, 2011. 冀中廊固凹陷油气输导体系类型与成藏模式 [J]. *现代地质*, 25 (6): 1137-1144.

武芳芳, 朱光有, 张水昌, 等, 2009. 塔里木盆地油气输导体系及对油气成藏的控制作用 [J]. *石油学报*, 30 (3): 332-341.

叶勇军, 付广, 马福建, 等, 2002. 利用输导层毛细管阻力分布特征研究油气运聚规律 [J]. *大庆石油地质与开发*, 21 (2): 1-4.

袁益让, 赵卫东, 程爱杰, 等, 1999. 三维油资源运移聚集的模拟和应用 [J]. *应用数学和力学*, 20 (9): 933-942.

张发强, 罗晓容, 苗盛, 等, 2003. 石油二次运移的模式及其影响因素 [J]. *石油实验地质*, 25 (1): 69-75.

张发强, 罗晓容, 苗盛, 等, 2004. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析 [J]. *地质科学*, 39 (2): 159-167.

张立宽, 罗晓容, 廖前进, 等, 2007. 断层连通概率法定量评价断层的启闭性 [J]. *石油与天然气地质*, 28 (2): 181-190.

张立宽, 罗晓容, 宋国奇, 等, 2013. 油气运移过程中断层启闭性的量化表征参数评价 [J]. *石油学报*, 34 (1): 92-100.

张林炎, 宋立才, 李会军, 等, 2019. 地质力学理论对中国深层油气勘查的作用 [J]. *地质力学学报*, 25 (6): 1036-1047.

赵健, 罗晓容, 张宝收, 等, 2011. 塔中地区志留系柯坪塔格组砂岩输导层量化表征及有效性评价 [J]. *石油学报*, 32 (6): 949-958.

周波, 金之钧, 罗晓容, 等, 2007. 尺度放大时逾渗模型中的油气运移路径变化规律探讨 [J]. *石油与天然气地质*, 28 (2): 175-180.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

