

孔洞型储层有效性评价新方法

张兆辉¹,高楚桥²,高永德³

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃 兰州 730020;

2. 长江大学地球物理与石油资源学院,湖北 荆州 434023;

3. 中海石油南海西部研究院,广东 湛江 524057)

摘要:对目前定量评价碳酸盐岩孔洞型储层有效性的方法进行了分析,从储层宏观特征、微观孔隙结构研究入手,通过储层产能影响因素的分析,提出了一种新的孔洞型储层有效性定量评价方法。该方法不仅考虑了一般的宏观孔隙度参数,而且融入了微观孔隙结构参数(排驱压力、平均孔喉半径),其次综合考虑储层纵向发育规模对产能的影响,弥补了单一孔隙度因素表征的不足,提高了有效性定量评价的精度。该方法在塔里木盆地塔中、轮古地区的实际应用中取得了较好的效果。

关键词:塔里木盆地;碳酸盐岩;孔洞型储层;有效性

中图分类号:TE132.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2013)03-0529-05

引用格式:Zhang Zhaohui, Gao Chuqiao, Gao Yongde. New method for effectiveness evaluation of vuggy reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 529-533. [张兆辉, 高楚桥, 高永德. 孔洞型储层有效性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 529-533.]

0 引言

孔洞型储层是碳酸盐岩主要的储层类型,目前对有效性的定量评价大多依据孔隙度的大小^[1-5],经过“十一五”技术攻关研究,中国石油勘探与生产分公司专家^[6]在2009年出版的《碳酸盐岩油气藏测井评价技术及应用》一书中采用 m 值结合相对连通孔隙度评价有效性,同时不少测井工作者引入测井新技术(电成像、声成像等)定性分析有效性^[7-9],在实际的生产中均取得了较好的应用效果。近年来随着塔里木盆地塔中、轮古地区勘探程度的不断提高,仅依靠单一的孔隙度难以描述储层的有效性,暴露出诸多不足,经常出现储层有效性判断错误的现象^[10];孔隙同样发育的孔洞型储层酸化压裂后有些可以形成工业储层,而有些根本达不到工业产能,甚至出现干层,这主要是由于对储层的认识不够系统全面、对储层孔隙结构的认识还不清楚。

笔者从储层宏观特征和微观孔隙结构特征入

手,结合压汞实验、试油资料提出一种新储层有效性定量评价方法。

1 孔洞型储层产能影响因素分析

1.1 孔隙结构

孔洞型储层储集空间以次生的溶蚀孔洞为主,另外还包括一些粒内孔、粒间孔、晶间孔和少量微孔隙,该类储层一般是由原生孔隙溶蚀改造而成,孔隙为主要储集空间,喉道为主要渗滤通道^[6]。孔隙结构的研究评价大多采用压汞实验完成^[11-14]。

通过对塔里木盆地X地区7口井、7个井段50块岩样的压汞实验数据与对应井段的试油成果数据统计(表1)发现:形成工业油流的井段与非工业油流的井段相比,排驱压力小、平均孔喉半径大,二者与储层产能(产能统计中:10 000m³气折合1m³油,下同)有很好的相关性,而孔隙度与储层产能关系不大。为此定义参数 P 。综合反映微观孔隙结构,描述孔隙结构特征与储层产能相互关系(图1),其数

学表达式为:

$$P_s=\frac{\bar{r}}{P_d}\times1\,000$$

(1)

式(1)中: P_s 为孔隙结构特征参数, $\mu\text{m}/\text{MPa}$; \bar{r} 为平均孔喉半径, μm ; P_d 为排驱压力,MPa

为了便于实际生产应用,压汞实验确定的孔隙结构特征参数 P_s 用测井资料直接计算的相关参数来表征。通过研究发现,测井计算的储层段平均有效孔隙度与孔隙结构特征参数的关系密切,且具有很好的相关关系(图 2),因此一定程度上可以表征

储层微观孔隙结构。

另外,通过研究发现平均有效孔隙度与储层产能也具有很好的相关关系(图 3),进一步认为采用平均有效孔隙度评价微观孔隙结构特征参数、产能是合理的。其中,平均有效孔隙度的数学表达式为:

$$\overline{Pro}=\frac{100\times\sum\varphi_i\times Rlev}{Rlev\times N}$$

(2)

式(2)中: \overline{Pro} 为平均孔隙度,%; φ_i 为有效孔隙度,%; $Rlev$ 为采样间隔(通常为 0.125),m; N 为 $\varphi_i>$ 孔隙度下限的采样点数,无量纲。

表 1 孔洞型储层日产量与压汞实验参数、平均有效孔隙度统计

井号	试油层段/m	压汞取 心段/m	孔隙度 /%	渗透率 /($\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)	排驱压力 /MPa	平均孔喉 半径/ μm	平均有效 孔隙度/%	试油日 产量/(m^3/d)
A621	4 851.1~4 885	4 868.4~4 877.8	2.714	1.038	2.374	0.211	4.7	油 148.75、气 6 100
A62-3	5 072~5 177	5 084.4~5 128.6	3.11	0.07	3.97	0.22	5.14	油 7.04、气 14 450、水 34.5
A82	5 349.5~5 385	5 362.9~5 379.1	2.8	0.03	4.1	0.125		油 16.62、气 9 964
A70	4 703.5~4 770	4 720.2~4 764.3	1.93	0.12	5.72	0.06	2.98	油 0.186、气 2 300
A169	4 224~4 283.5	4 248.9~4 272	1.78	0.48	7.11	0.04	3.02	油 1.79
A241	4 811.9~4 920	4 813.7~4 886.3	2.45	0.01	11.2	0.026	2.25	干层
A822	5 614~5 675	5 615~5 638	3		4.47	0.065 5	3.66	气少量、水 0.96

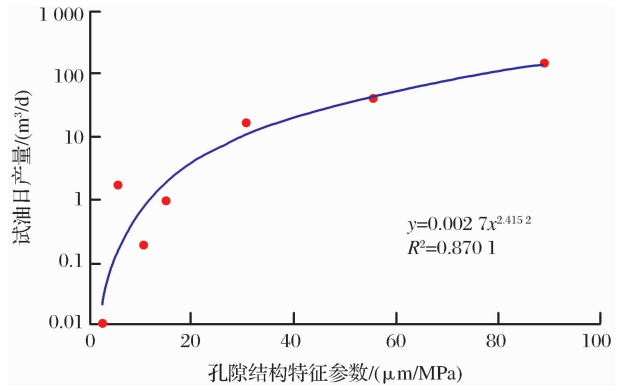


图 1 压汞实验孔隙结构特征参数与产能关系

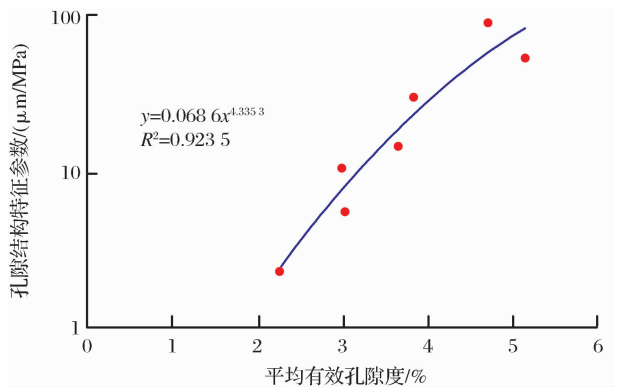


图 2 测井计算平均有效孔隙度与压汞实验孔隙结构特征参数关系

1.2 储层厚度

实际资料分析中,经常遇到很多孔洞型储层,从物性资料和测井资料来看,储层均发育良好,并且录井显示也有油气,但是试油过程中均达不到工业产能,有些层段甚至会出现干层。针对此类情况,通过对塔里木盆地 X 地区 15 口井、18 个孔洞型储层的试油层段(储层信息统计见表 2)进行综合分析认为:孔洞型储层的储集能力除了与孔隙结构等参数有很大的关系外,还与储层的累计有效孔隙厚度有关(图 4,干层未统计)。也就是说,虽然某些储集层段的物性参数很好,但是如果储层达不到一定发

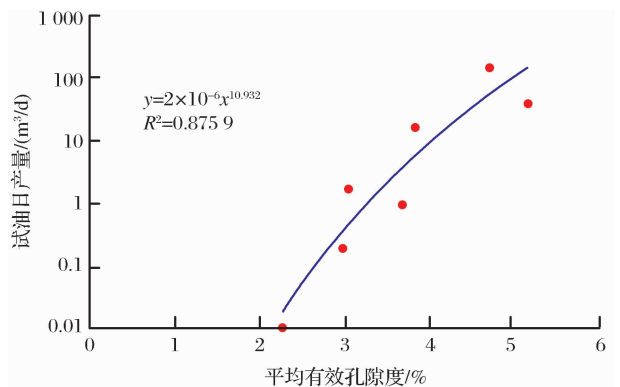


图 3 测井计算平均有效孔隙度与产能关系

育规模,储层的累计有效孔隙厚度达不到一定值时,该储层就有可能得不到很好的产量。

表 2 中累计有效孔隙厚度的数学表达式为:

$$PorF=\sum \varphi_i \times Rlev$$
(3)

式(3)中:PorF 为累计有效孔隙厚度,m; φ_i 为有效孔隙度,%;Rlev 为采样间隔(通常为 0.125),m。

表 2 孔洞型储层日产量与测井计算累计有效孔隙厚度、平均有效孔隙度统计

井号	试油层段/m	累计有效孔隙厚度/m	有效厚度/m	平均有效孔隙度/%	试油结论/(m³/d)
Y38	5 619~5 740	3.122 1	93.73	3.331	油 113、气 350 000
Y391	5 711.4~5 729.4	1.402 4	34.3	5.310 3	油 19.44、气 125 546、水 2.16
YN54	5 441~5 552	2.293 0	104.67	2.190 7	油 49.9、气 425 000
X45	6 020~6 150	1.816 2	41.9	3.38	油 156 、气 59 605
X122	4 707.07~4 733.92	0.357 4	15.35	2.328 3	油 2.77、气 27
X621	4 851~4 885	1.068	30	3.56	油 148.75、气 61 000
X62-3	5 072~5 177	3.324 7	87.875	4.84	油 7.04、气 14 450、水 34.5
X169	4 224~4 283	0.694 4	32.125	2.161 6	油 1.79
X161	4 441~4 452	0.080 6	3.875	2.08	干层
	5 614~5 675	0.97	26.5	3.660 4	气少量、水 0.96
X822	5 720~5 750	0.029	1.375	2.109 1	见油花、2.03(液)
	5 842~5 900	0.227	11.375	2.0	干层
X824	5 706~5 750	0.338 6	13	2.604 6	油 0.23、气 124
X72	4 964~4 978	0.513	13.75	3.730 9	油 0.24、液 0.98
X54	5 752~5 792	0.647	20.25	3.195 1	油 0.82、水 6.03
X241	4 811~4 920	0.38	16.9	2.248 5	干层
X70	4 703.5~4 770	0.885 4	29.75	2.976 1	油 1.38、气 4 673
X825	5 416~5 500	0.17	8.1	2.1	干层

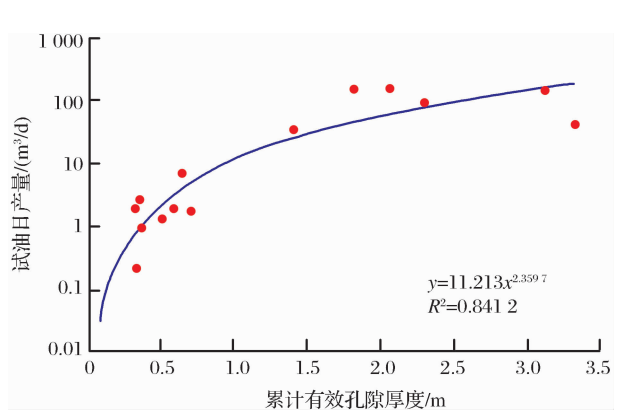


图 4 测井计算累计有效孔隙厚度与产能关系

2 有效性评价方法

通过上述储层产能影响因素的分析,明确了塔里木盆地 X 地区孔洞型储层产能主要受控于孔隙结构特征与储层发育规模。在此认识的基础上,利用上述统计资料建立了塔里木盆地 X 地区孔洞型储层有效性识别图板(图 5),图中 X 轴为累计有效孔隙厚度,Y 轴为平均有效孔隙度,气泡大小代表产量的高低,参数依据上述公式计算。中国石油塔里木油田公司储层分类标准为:Ⅰ类储层,不用酸化压

裂,就可获得工业产能;Ⅱ类储层,经现在工艺技术改造后能获得工业产能的储层;Ⅲ类储层,经现在工艺技术改造后,能产出少量油气,但达不到工业产能的储层;干层,经现在工艺技术改造后,仅产出微量油气,甚至无液体;工业产能,井深大于 4 000m 时,日产油大于 10m³[10]。从图 5 中可以看出,受孔洞型储层本身连通条件的制约,一般达不到Ⅰ类储层,大孔洞型储层一般是Ⅱ类储层,小孔洞型储层多为Ⅲ类储层或干层。

从图5可以看出:当储层的平均有效孔隙度小

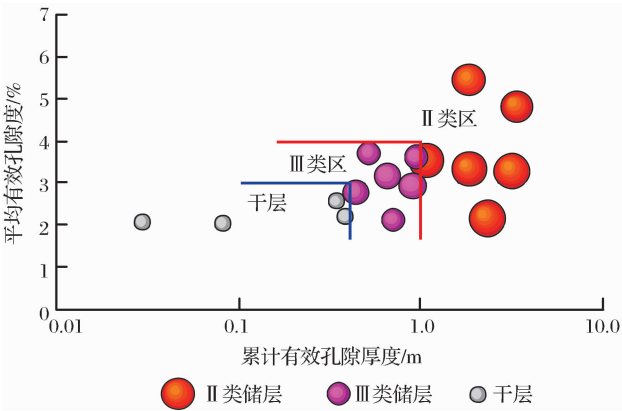


图 5 孔洞型储层有效性识别图版

于4%，累计有效孔隙厚度达到1m以上时，储层才能达到工业产能；而当平均有效孔隙度大于4%时，储层成为有效储层的门槛则可以降低。孔洞型储层有效性与储层厚度和储层平均有效孔隙度的关系可以参照表3，有效性判断模版参照图5。

表 3 孔洞型储层有效性与储层厚度和储层平均有效孔隙度的关系

平均有效 孔隙度/%	Ⅲ类储层 最低厚度/m	Ⅱ类储层 最低厚度/m
2	20	50
2.5	16	40
3	13.3	33.3
3.5		28.6
4		25

3 应用效果

依据本文评价方法，对塔里木盆地塔中、轮古地区11口新钻探井19个试油层段进行储层有效性（等级）评价。表4为11口新钻探井19个试油层段有效性识别结果与试油结论对比，18个层判断正确，符合率为18/19=94.7%，提高了识别成功率。

例如图6为XZ721井5 025~5 080m井段测井处理成果图，FMI成像测井清晰可见，储层为典型的小孔孔洞型储层。5 031~5 074m井段测井计算平均孔隙度为2.7%，根据目前塔里木油田公司孔洞型储层评价标准（Ⅰ类储层：平均孔隙度>5%；Ⅱ类储层：1.8%<平均孔隙度≤5%；Ⅲ类储层：平均孔隙度≤1.8%^[10]）识别为Ⅱ类储层。本文研究测

表 4 储层有效性识别结果与试油结论对比

井名	测井解释						试油		符合性
	深度/m	PorF/m	Por/ %	储层类型	储层等级	深度/m	试油结论		
Y392	6 309.9~6 349.5	0.724 3	1.98	孔洞型	Ⅲ类	6 330~6 350	点火间断可燃,气焰高 3~4m	是	
Y632	6 530.1~6 557.3	0.280 4	1.86	孔洞型	干层	6 528~6 551	干层	是	
X88	6 649.1~6 661.8	0.199 8	2.02	孔洞型	干层	6 649~6 662	干层	是	
	7 199.5~7 215.1	0.025 9	2.43	孔洞型	干层	7 190~7 260	折日产液 2.08m³	是	
...	
X826	5 659.1~5 683.4	0.773 1	4.02	孔洞型	Ⅱ类	5 656~5 673	S1-1,油花,少量气, 日产水 7.2m³	否	
XZ721	5 030.9~5 074.1	0.731 5	2.91	孔洞型	Ⅲ类	5 030~5 070	日产油 8.17m³,日产水 0.2m³,气焰高 0.2~2m	是	

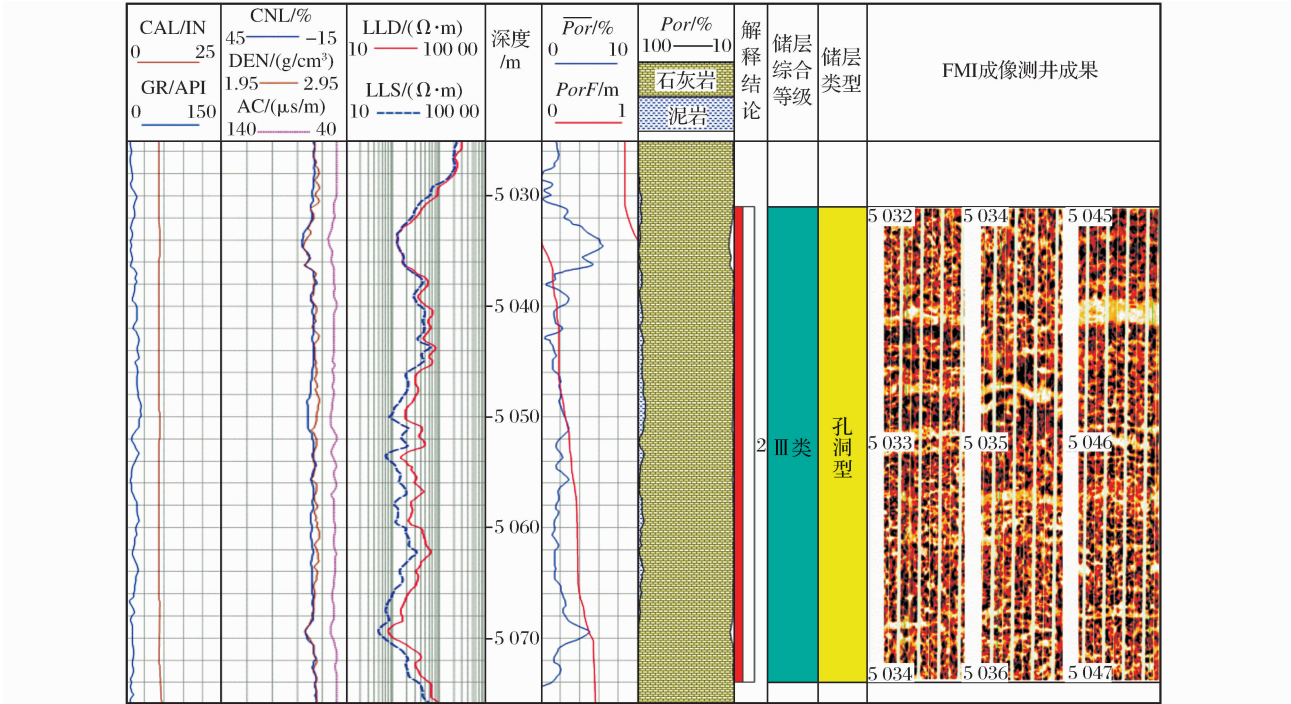


图 6 XZ721 井测井处理成果

并计算平均有效孔隙度为 3.1%、累计有效孔隙厚度为 0.73m,根据孔洞型储层有效性判别图版(图 5)判定为Ⅲ类储层。该井在 5 030~5 070m 井段试油,日产油 8.17m³,日产水 0.2m³,气焰高 0.2~2m,未达到工业产能,评定为Ⅲ类储层,与本文测井综合评价结果相符。

4 结论

(1)微观孔隙结构和储层厚度同时控制储层产能,文中论述的方法技术很好地克服了以往仅靠孔隙度评价的不足,不仅考虑了微观孔隙结构因素,而且包含储层纵向发育规模的影响,很大程度上提高了测井解释成功率。

(2)通过多口新钻探井有效性评价的实际应用,其储层等级解释符合率为 94.7%,方法应用效果显著,展示出良好的应用前景。

参考文献(References):

- [1] Zhao Dongmei, Hu Guoshan, Zheng Yuling. Analysis of the effectiveness of carbonate reservoirs with log data in Ordovician strata in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(2):183-186. [赵冬梅, 胡国山, 郑玉玲. 测井资料在塔河油田储层有效性分析中的应用[J]. 新疆地质, 2005, 23(2): 183-186.]
- [2] Guan Ju, Li Jun, Guo Xiuli. Carbonate reservoir loggin evaluation for Tazhong Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(4):84-86. [关隼, 李军, 郭秀丽. 塔中地区碳酸盐岩储集层测井评价[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 84-86.]
- [3] Zhao Liangxiao, Bu Yong. Carbonate Reservoir Logging Evaluation: Volume 1 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994:48-51. [赵良孝, 补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994:48-51.]
- [4] Zhang Shanghua, Sima Liqiang, Yan Qibin, *et al.* The logging effectiveness evaluation of complex carbonate reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(2):84-88. [张尚华, 司马立强, 颜其彬, 等. 复杂碳酸盐岩储层测井有效性评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2):84-88.]
- [5] Yong Shihe, Zhang Chaomo. Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation: Volume 1 [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1996:284-290. [雍世和, 张超谟. 测井资料处理与综合解释: 卷一[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996:284-290.]
- [6] Exploration and production branch of CNPC. Carbonate Reservoir Logging Evaluation Technology and It's Application: Volume 1 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:5-16. [中国石油勘探与生产分公司. 碳酸盐岩油气藏测井评价技术及应用: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009:5-16.]
- [7] Xu Xing, Zhao Wanyou. Application of Star-II imaging logging in carbonate reservoir evaluation[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(5):358-364. [徐星, 赵万优. Star-II 成像测井在碳酸盐岩储层评价中的应用[J]. 测井技术, 2001, 25(5): 358-364.]
- [8] Wang Liang, Sima Liqiang, Xie Bing, *et al.* Effectiveness evaluation of the complex carbonate reservoir in the Leikoupo of Longgang area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 18(5):37-41. [王亮, 司马立强, 谢兵, 等. 龙岗地区雷口坡组复杂碳酸盐岩储层有效性评价[J]. 特种油气藏, 2001, 18(5): 37-41.]
- [9] Wang Jun, Yang Changchun, Xu Dahua, *et al.* Application and prospect of the formation microresistivity image well logging [J]. Progress in Feopgysics, 2005, 20(2):357-364. [王珺, 杨长香, 许大华, 等. 微电阻率扫描成像测井方法应用及发展前景[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2):357-364.]
- [10] li, Jin Yan, Hai Chuan. Carbonate Reservoir Effectiveness and Fluid Property Evaluation for Tazhong Field[R]. Kuerle: Exploration and Development Research Institution of Trim Oil Field Company, 2005:59-89. [刘兴礼, 金燕, 海川. 塔中地区碳酸盐岩测井储层有效性与流体性质评价[R]. 库尔勒: 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 2005:59-89.]
- [11] Hong Xiue, Dai Shengqun, Guo Jianyu, *et al.* Study on reservoir pore structure by using capillary pressure curve: Taking Es₄ reservoir in Weicheng Oilfield as an example[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(1):53-55. [洪秀娥, 戴胜群, 郭建宇, 等. 应用毛细管压力曲线研究储层孔隙结构——以卫城油田 Es₄ 储层为例[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(1):53-55.]
- [12] Li Yanshan, Zhang Zhansong, Zhang Chaomo, *et al.* Application of mercury injection data to Chang 6 reservoir classification in Changqing area [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2):91-93. [李彦山, 张占松, 张超谟, 等. 应用压汞资料对长庆地区长 6 段储层进行分类研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2):91-93.]
- [13] xian, Sun Wei, Yu Feng. Application of high pressure Hg injection and rate controlled Hg penetration experimental technique to studying reservoir microscopic pore structure: Taking Toutunhe Formation in Niuquanhu area of Santanghu Oilfield as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(4):553-556. [朱永贤, 孙卫, 于锋. 应用常规压汞和恒速压汞实验方法研究储层微观孔隙结构——以三塘湖油田牛圈湖区头屯河组为例[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(4):553-556.]
- [14] Wang Yichao, Wang Huaizhong, Li Lianmin, *et al.* Application of constant velocity mercury injection technique to study microscopic pore structures on various reservoir flow unit in Kongnan area[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2):335-339. [王翊超, 王怀忠, 李炼民, 等. 恒速压汞技术在大港油田孔南储层流动单元微观孔隙结构特征研究中的应用[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2):335-339.]

- troleum geological characteristics of the foreland basins between western China and Central Asia[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(5): 187-191. [高波, 龙胜祥, 刘彬. 中国西部与中亚前陆盆地油气地质特征类比分析[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(5): 187-191.]
- [21] Bian Qiantao, Sha Jingeng. Age and tectonic setting of ophiolite in the Kokoxili region, Qinghai Province[J]. *Geological Review*, 1997, 43(4): 347-355. [边千韬, 沙金庚. 青海可可西里地区蛇绿岩的时代及形成环境[J]. *地质评论*, 1997, 43(4): 347-355.]
- [22] Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, *et al.* The Formation in Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2001. [赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原海相烃源层的油气生成[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [23] Wang Jian, Wang Zhengjiang, Chen Wenxi, *et al.* New evidences for the age assignment of the Nadi Kangri Formation in the north Qiangtang Basin, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(4): 404-409. [王剑, 汪正江, 陈文西, 等. 藏北羌塘盆地那底岗日组时代归属的新证据[J]. *地质通报*, 2007, 26(4): 404-409.]

Evolution Characteristics of the Qiangtang Basin in the Mesozoic Era

NAN Zheng-bing¹, ZHANG Yan-ling², LI Yong-tie¹, TAN Fu-wen³

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*;
2. *China Institute of Geoenvironment Monitoring, Beijing 100081, China*; 3. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China*)

Abstract: Qiangtang Basin is located in the east of Thethys structural domain, in the middle-west part of the Qiangtang-Changdu crustal block, between the two suture zones of Kokoxili-Jiangshajiang and the Bangonghu-Nujiang. Its area is about $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ including central uplift belt. It's the biggest Mesozoic marine residual basin in the Qinghai-Tibet Plateau, and has great exploration potential. There are different ideas about the location in Thethys structural domain in Mesozoic and the basin's character. Based on comprehensive analysis, this study concludes that the basin is located in the south margin of the Laoya continent, and is a typical superimposed basin. It has undergone 5 evolutionary phases, including foreland basin of north Qiangtang, rift of south Qiangtang, passive margin rift stage, passive margin depression stage and fade phase.

Key words: Tectonic evolution; Thetys structural domain; Basin character; Superimposed basin; Mesozoic Era; Qiangtang Basin

(上接第 533 页)

New Method for Effectiveness Evaluation of Vuggy Reservoir

ZHANG Zhao-hui¹, GAO Chu-qiao², GAO Yong-de³

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest (NWGI), PetroChina, Lanzhou 730020, China*;
2. *Geophysics and Oil Resource Institute, Yangtze University, Jingzhou 434023, China*;
3. *Research Institute, West of South Sea of CNOOC, Zhanjiang 524057, China*)

Abstract: Several methods for quantitatively effectiveness evaluating of carbonate vuggy are discussed. Based on the micro- and macro-pore structure and the analyses of influences on reservoir production, a new method was proposed. In addition to general macroscopic porosity parameter, this method also considers some microscopic pore structure parameters (displacement pressure and average pore throat radius) and the reservoir development degree in vertical. It made up for porosity and increased the accuracy of evaluating reservoir effectiveness. It has been applied to Tazhong and Lungu zones of Tarim Basin, and good effects have been obtained.

Key words: Tarim Basin; Carbonate; Vuggy reservoir; Effectiveness