



珠江口盆地白云凹陷东北部断裂发育特征及其控油气作用

余一欣, 张 靖, 张忠涛, 张功成, 曾减辉, 余 浪

Fault characteristics and its significances on hydrocarbon accumulation in northeastern Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

YU Yixin, ZHANG Jing, ZHANG Zhongtao, ZHANG Gongcheng, ZENG Jianhui, and YU Lang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022031401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

西湖凹陷Y构造花港组气藏特征及成藏主控因素

Characteristics of gas reservoir and controlling factors for gas accumulation in the Huagang Formation in Y Structure, Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 174

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181



关注微信公众号，获得更多资讯信息

余一欣, 张靖, 张忠涛, 等. 珠江口盆地白云凹陷东北部断裂发育特征及其控油气作用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3): 133-139.

YU Yixin, ZHANG Jing, ZHANG Zhongtao, et al. Fault characteristics and its significances on hydrocarbon accumulation in northeastern Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(3): 133-139.

珠江口盆地白云凹陷东北部断裂发育特征及其控油气作用

余一欣^{1,2}, 张靖^{1,2}, 张忠涛³, 张功成⁴, 曾溅辉^{1,2}, 余浪^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000

4. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 珠江口盆地白云凹陷东北部具有“内气外油”的分布特点, 断裂在油气运聚成藏过程中起到了重要作用。本文主要依据地震资料解释成果, 分析断裂发育特征, 定量评价断裂输导性能, 并结合钻探结果探讨断裂对油气运聚成藏的影响。白云凹陷东北部主要发育 NWW 向和近 EW 向正断层, 在剖面上表现为铲式和板式形态。根据断裂对油气运聚成藏的影响, 划分出油源断裂和控圈断裂。油源断裂在成藏期的活动速率达到 20~40 m/Ma, 在珠江组下段的断层泥比率多大于 50%, 而且断面正压力超过了泥岩的极限抗压强度, 有利于油气沿断裂发生运移。控圈断裂的活动速率一般都小于 20 m/Ma, 在珠江组下段的断层泥比率都大于 95%, 而且断面正压力都小于泥岩的极限抗压强度, 侧封性能良好。白云凹陷东北部表现出油气差异聚集成藏的特点, 远源反向控圈断裂下盘高效封堵聚集原油, 而天然气则主要发生近源聚集。

关键词: 油源断裂; 控圈断裂; 断裂封堵性; 油气成藏; 白云凹陷

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022031401

Fault characteristics and its significances on hydrocarbon accumulation in northeastern Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

YU Yixin^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, ZHANG Zhongtao³, ZHANG Gongcheng⁴, ZENG Jianhui^{1,2}, YU Lang^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Shenzhen 518000, China

4. CNOOC Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China

Abstract: The distribution of oil and gas fields in the northeastern Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin is characterized by the “inner gas, outer oil” pattern, and faults play important roles on hydrocarbon migration and accumulation. Based on seismic interpretation and borehole data, fault characteristics and its significances on hydrocarbon accumulation in the northeastern part of the Baiyun Sag are analyzed in this paper. NWW- and EW-trending faults are predominant in the study area, which are listric and planar shapes in cross section. According to their significances on hydrocarbon accumulation, the faults in the northeastern Baiyun Sag can be divided into oil-source faults and trap-controlled faults. The oil-source faults dipping into source kitchen have an activity rate of 20~40 m/Ma in the key accumulation stage, and a value of shale gouge ratio more than 50% in the lower Zhujiang Formation. Also, the normal stress on oil-source fault surface is larger than the ultimate compressive strength of mudstone. These are helpful for hydrocarbon migration along the oil-source faults. In contrast, the trap-controlled faults have perfect lateral sealing ability, because of activity rate less than 20 m/Ma and value of shale gouge ratio more than 95% in the lower Zhujiang Formation, as well as normal stress on fault surface less than the ultimate compressive strength of mudstone. The feature of differential accumulation of hydrocarbon in the northeastern Baiyun Sag is obvious. Oil is accumulated in the footwall of the far-source antithetic trap-controlled faults, and gas is in the near-source traps.

Key words: oil-source fault; trap-controlled fault; sealing and transporting ability of fault; hydrocarbon accumulation; Baiyun Sag

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“东海陆架盆地西湖凹陷反转构造差异变形及其油气成藏效应”(42072149); 国家科技重大专项“南海北部深水区域流体动力与成藏和油气富集规律研究”(2016ZX05026-007)

作者简介: 余一欣(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事含油气盆地构造地质分析, E-mail: yuxin0707@163.com

收稿日期: 2022-03-14; 改回日期: 2022-03-28. 周立君编辑

断裂是含油气盆地重要的构造组成要素,不仅对盆地的形成、演化和圈闭发育等有重要影响,而且还可以作为油气运移的通道,与砂体、不整合等共同构成油气垂向和侧向运移的复合输导体系,从而对油气藏的形成与分布产生重要影响^[1-6]。珠江口盆地白云凹陷是南海北部陆缘新生代最大的沉积凹陷,也是珠江口盆地重要的有利油气勘探区^[7]。勘探实践已经证实白云凹陷主要是一个天然气聚集区,但近些年在凹陷东北部及邻区也发现了多个具有中等规模储量的油田^[8]。前人研究表明,白云凹陷的形成主要受几乎断穿地壳抵达莫霍面的壳幔拆离断层系统控制^[9],新生界主要发育NWW向、近EW向和NE向伸展断裂体系。断裂是白云凹陷复式油气输导体系的重要组成部分,尤其是晚期(16 Ma以来)的活动断裂控制了油气运移过程,而断裂的输导性能主要受断层性质、活动强度、构造应力场、砂岩质量分数等因素影响^[10-14]。相比较而言,目前,针对白云凹陷东北部断裂发育特征开展的研究相对较少^[15],对断裂在该地区油气运聚成藏过程中的作用仍需进行深入研究。本文主要通过最新的三维地震资料进行解释,并结合钻探成果,解剖白云凹陷东北部断裂发育特征,并在此基础上进一步分析断裂对油气运移和聚集的影响,拟为该地区的油气勘探提供理论基础和科学依据。

1 地质概况

珠江口盆地是南海北部大陆边缘面积最大的含油气盆地,地处太平洋板块、欧亚板块和印度-澳

大利亚板块的相互作用区,是在准被动大陆边缘基础上发育起来的新生代断陷盆地,主要经历了裂谷期、裂后沉降期和新构造活动期等形成演化阶段^[16-17]。珠江口盆地由北向南包括北部隆起带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带等次级构造单元,白云凹陷位于南部坳陷带的珠二坳陷内,面积约 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,凹陷南、北分别以斜坡形态与南部隆起带和番禺低隆起相邻,东、西两侧分别被东沙隆起和云开低凸起所围限,凹陷内部发育主洼、东洼、西洼和南洼等多个生烃洼陷,其中白云东洼可进一步划分为东、西两个次洼(图1)。白云凹陷新生界最大沉积厚度超过10000 m,除古新统神狐组未有钻遇外,自下向上包括文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系(图2),其中文昌组和恩平组是主力烃源岩层系,珠江组下段滨岸-陆架三角洲/陆架边缘三角洲复合沉积砂体与上覆珠江组上段大套泥岩构成储盖组合,为油气成藏提供了优质的生储盖配置条件(图2)。

白云凹陷是珠江口盆地深水区的一个富生气凹陷^[18],目前已发现的气田主要集中在凹陷北坡和东部地区。近些年在白云凹陷东北部及邻区获得了原油勘探突破,先后发现了L1、L2、L3等多个具有中等储量规模的油田,油气分布整体表现出“内气外油”的特点(图1)。这些油气田的发现不仅进一步证实了白云东洼的生烃能力^[19],而且也使该地区成为珠江口盆地深水区油气勘探的重点地区之一。

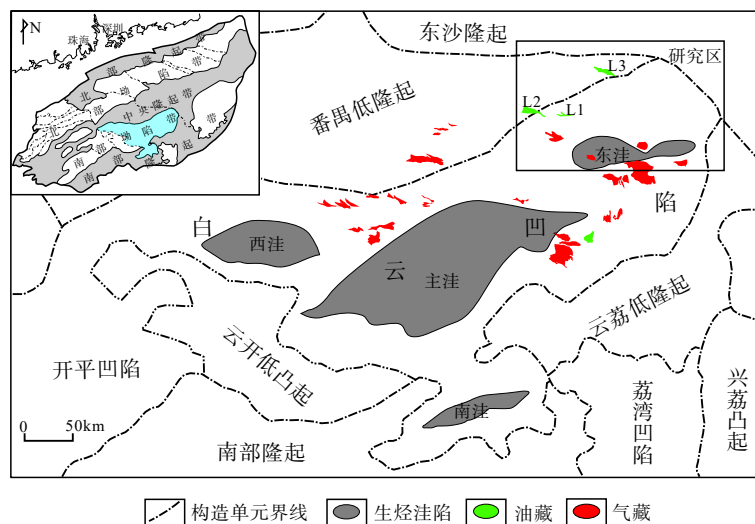


图1 研究区位置与主要油气田分布

Fig.1 Location and distribution of oil and gas fields in the study area

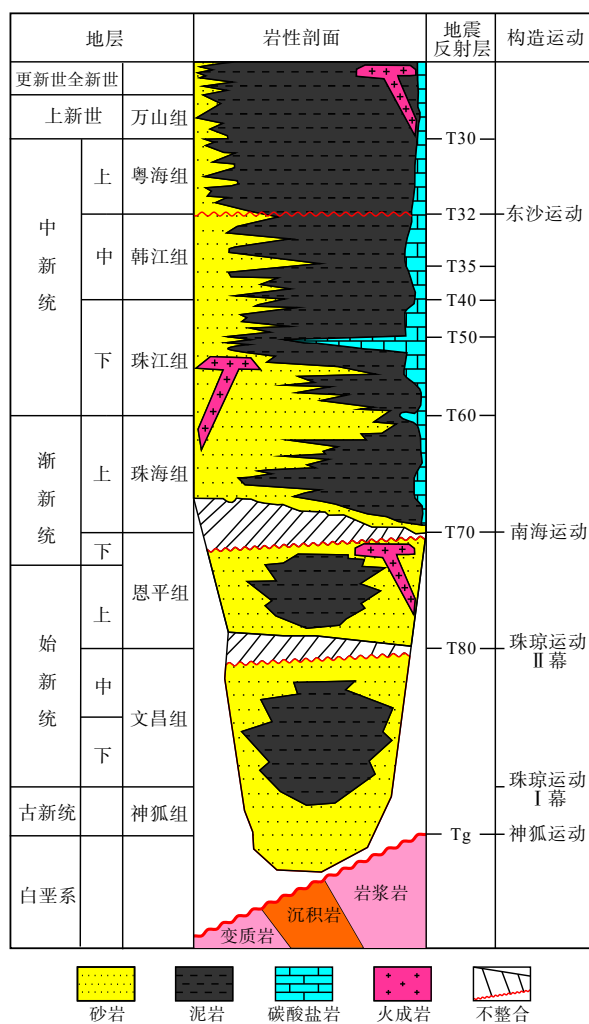


图 2 珠江口盆地白云凹陷地层综合柱状图^[20]

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin^[20]

2 断裂发育特征

白云凹陷东北部正断层在平面上主要呈 NWW 和近 EW 向展布, 倾向以 NNE 和 SW 向为主, 除主干断裂延伸长度最大可达 40 km 外, 多数断裂延伸长度约为 10 km (图 3)。规模较大的断裂主要围绕白云东洼周缘分布, 整体表现出向西发散、向东收敛的“喇叭口”型展布特征 (图 3)。正断层在剖面上的形态主要表现为铲式和板式特征, 常组合成多米诺式、“Y”型和“X”型等样式 (图 4)。从断层切割层位来看, 白云东洼的边界断层都是长期发生活动, 从基底一直断至浅层, 在凹陷北部斜坡部位也发育多条早期发生活动而断至基底并向 NE 方向倾斜的次级断裂 (图 4)。此外, 由于珠江组上段 (T50-T40) 泥岩含量较丰富, 浅层多数晚期活动形成的次级断裂一般都在该地层附近终止 (图 4)。

从断层活动性来看, 白云凹陷东北部不同地区断裂的活动强度存在较明显差异。计算结果表明, 白云东洼边界断层的活动性一般都较强, 活动速率最大可超过 100 m/Ma, 而且部分断裂在晚期 (T32-T40, 韩江组沉积期) 的活动性还有所增强 (图 5a), 而北部斜坡部位控制局部圈闭发育的断裂的活动强度整体都相对较弱, 而且不同时期变化都不大, 活动速率一般低于 20 m/Ma (图 5b)。

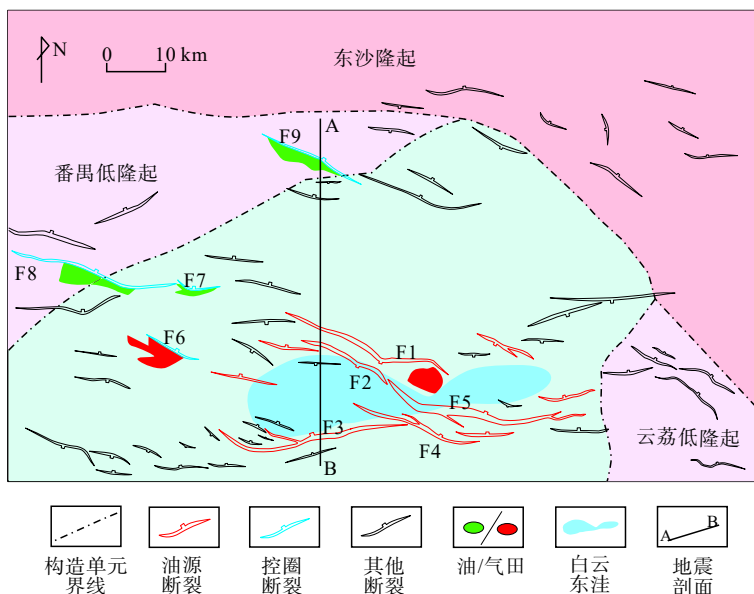


图 3 白云凹陷东北部主要断裂分布

Fig.3 Distribution of faults in the northeastern Baiyun Sag

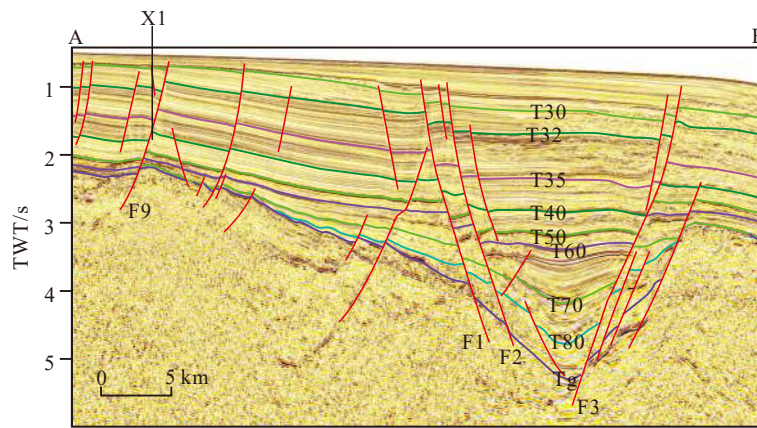


图4 白云凹陷东北部主要断裂发育特征
剖面位置见图3。

Fig.4 Characteristics of major faults in the northeastern Baiyun Sag

See Fig.3 for line location.

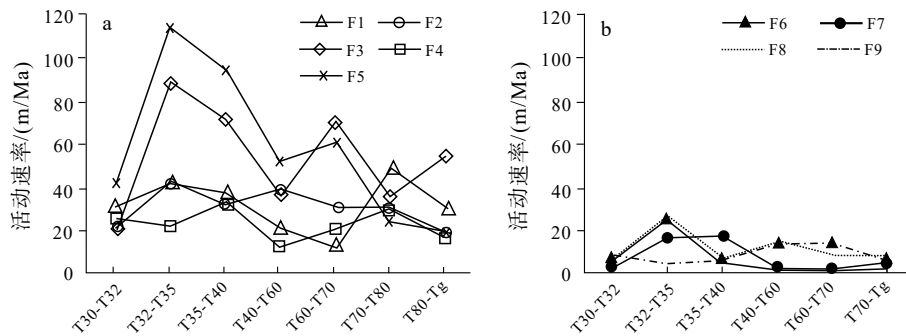


图5 白云凹陷东北部主要断裂活动速率
a. 油源断裂活动速率, b. 控藏断裂活动速率。

Fig.5 Activity rate of major faults in the northeastern Baiyun Sag

(a) Activity rate of oil-source faults, (b) activity rate of trap-controlled faults.

3 断裂控油气作用

白云凹陷东北部断裂对油气成藏的影响主要体现在两个方面,一是控制油气运移过程,二是控制局部构造圈闭的发育。据此,可以将白云凹陷东北部的断裂划分为油源断裂和控圈断裂两类(图3)。

3.1 油源断裂

油源断裂一般直接沟通烃源岩和储层,其活动时间与生排烃期匹配也较好,能起到有效的油气运移通道作用。白云凹陷东北部油源断裂主要分布在白云东洼周缘地区,从古近纪陷陷早期开始发育,并一直持续活动至新构造期,几乎断开所有层位,并向生烃中心(白云东洼)倾斜,为向源型油源断裂,有利于油气沿油源断裂发生垂向运移(图4)。

断裂的活动性与输导性能存在密切关系,而且断裂活动期次与油气运移期的匹配关系对油气运移成藏也有重要影响^[21-22]。研究表明,白云凹陷东北部油源断裂在新生代的活性一直都较强,尤其在主成藏期(10.5 Ma 以来)的活动速率基本都大于 40 m/Ma,部分断裂最大可超过 80 m/Ma(图 5a)。所以,白云凹陷东北部油源断裂有利于油气的晚期输导,这也得到了勘探实践的证实。与此相反,白云凹陷西南部云开低凸起周缘的油源断裂晚期(16 Ma 以来)活性都较弱,一般都小于 10 m/Ma,不利于油气的晚期运移^[14]。

3.2 控圈断裂

控圈断裂主要控制局部构造圈闭的发育,并能起到良好的侧向封堵作用,有利于油气聚集成藏。白云凹陷东北部除东洼周缘部分油源断裂可以充当控圈断裂外,大部分控圈断裂一般都离白云东洼

较远, 主要发育在北部斜坡部位, 规模相对较小, 断裂倾向多与地层倾向相反, 其下盘发育的翘倾断块圈闭是主要的勘探目标(如图 4 中 X1 钻井)。

与油源断裂相比, 白云凹陷东北部控圈断裂在不同时期的活动性整体都较弱(图 5b), 从而能起到较好的封堵作用, 有利于油气聚集成藏。

3.3 断裂封闭性评价

断裂带的泥质含量和断面正压力分别是控制断裂侧向和垂向封闭性的主要因素^[2,23]。本文利用 SGR(断层泥岩比率)方法分别对白云凹陷东北部油源断裂和控圈断裂在主力储层段(珠江组下段)的侧向封闭性进行了定量评价。结果显示, 油源断裂在珠江组下段的 SGR 多大于 50%(表 1), 表明油源断裂可以通过泥岩涂抹作用进行侧向封闭。但对于控圈断裂而言, 由于珠江组下段大套泥岩的涂抹作用, SGR 值很大, 一般都大于 95%, 侧向封堵条件优越, 从而利于油气在反向控圈断裂下盘聚集成藏。

白云凹陷东北部主要油源断裂的断面正压力为 25~67 MPa(表 1), 超过了泥岩的极限抗压强度(22 MPa), 断层泥易发生脆性破裂, 进而导致断层垂向封闭性较差, 有利于油气沿断裂发生垂向输导。与此相反, 控圈断裂的断面正压力多处于 10~22 MPa(表 1), 小于泥岩的极限抗压强度, 断层泥易发生塑性流变, 从而堵塞断裂带内部的裂隙空间, 导致断裂的垂向封闭性较好, 有利于油气聚集。

4 油气运聚成藏特征

通过上述对断裂发育特征以及断裂在油气运聚成藏过程中所起作用的综合分析, 并结合实际勘

探成果, 建立了白云凹陷东北部油气运聚成藏模式(图 6)。白云东洼的文昌组和恩平组烃源岩生、排烃具有“早油晚气”的特点^[19], 但当早期文昌组开始生成并排出原油时, 珠江组内的圈闭大部分都还未形成。当恩平组大量生排油后, 原油开始沿着向源型油源断裂向上发生垂向运移, 并有少量原油在近源圈闭中发生聚集(图 6b)。向上继续运移的原油遇到广覆式分布、连通性较好的珠江组下段砂体, 发生侧向分流向北部斜坡部位进行远距离运移, 最后被反向控圈断裂阻挡, 并受控圈断裂与砂体产状配置关系影响, 原油在控圈断裂下盘翘倾断块圈闭内发生聚集(图 6c)。此外, 原油样品的地化特征还表明, 后期生成的天然气还驱替了近源圈闭中早期聚集的原油继续向北部斜坡部位进行远距离运移^[15], 天然气进而在近源圈闭中发生聚集成藏(图 6d), 从而形成了白云凹陷东北部及邻区“内气外油”的油气分布特点(图 1)。因此, 白云凹陷东北部总体具有油气差异聚集成藏的特点, 其中断裂起到了重要作用。油源断裂和珠江组下段砂体联合输导油气, 远源反向控圈断裂下盘高效封堵聚集原油, 而天然气则表现出近源聚集的特征(图 6)。

5 结论

(1) 白云凹陷东北部正断层主要呈 NWW 向和近 EW 向展布。主干断裂活动性一般都较强, 最大可超过 100 m/Ma, 而控制局部圈闭发育的断裂活动强度整体相对较弱, 一般低于 20 m/Ma。

(2) 白云凹陷东北部发育向源型油源断裂, 其活动速率大, 而且在珠江组下段的 SGR 和断面正压力都有利于油气发生垂向运移。控圈断裂活动速

表 1 白云凹陷东北部主要断裂珠江组下段 SGR 和断面正压力计算结果

Table 1 Shale gouge ratio and positive pressure of major faults in the lower Zhujiang Formation in the northeastern Baiyun sag

断裂类型	断裂编号	泥岩厚度/m	断距/m	SGR/%	断面正压力/MPa
油源断裂	F1	774	948	82	48.77
	F2	627	790	79	66.58
	F3	1051	1217	86	48.79
	F4	331	483	69	47.93
	F5	1967	2152	91	24.58
控圈断裂	F6	233	238	98	23.09
	F7	165	175	94	22.68
	F8	308	321	96	21.69
	F9	116	136	85	19.03

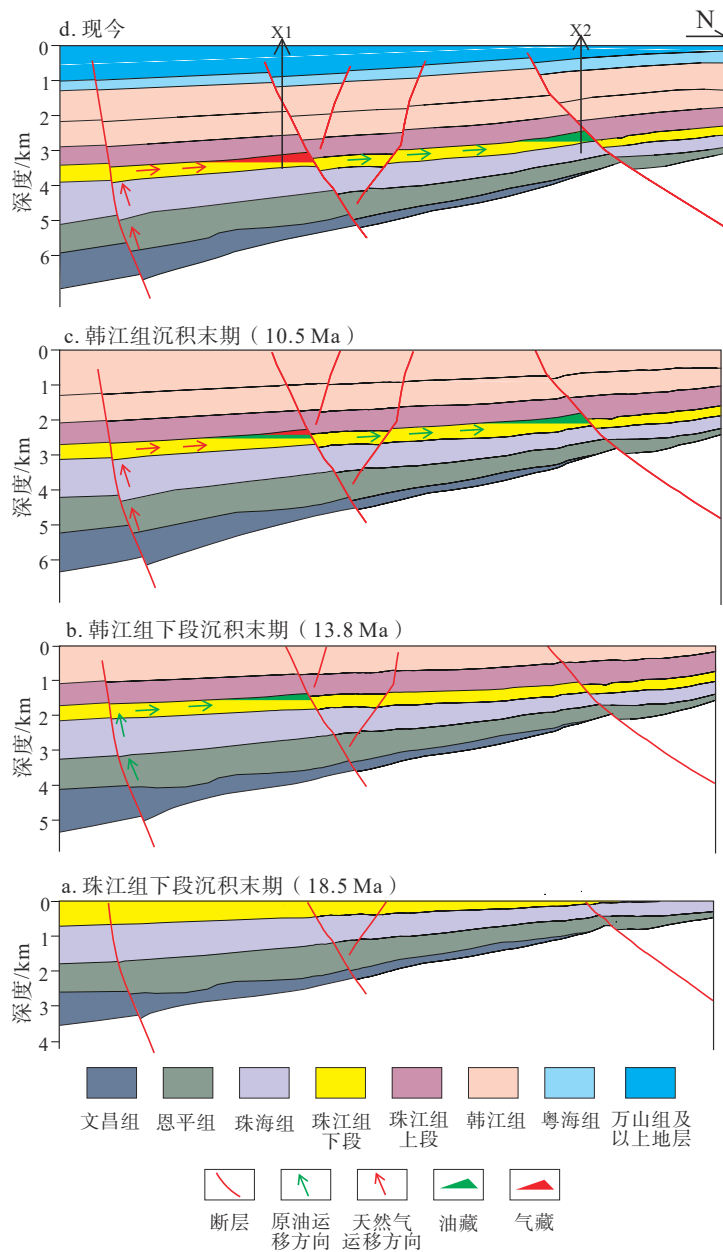


图6 白云凹陷东北部油气运聚成藏模式

Fig.6 Model of hydrocarbon migration and accumulation in the northeastern Baiyun Sag

率较小,在珠江组下段的SGR都大于95%,而且断面正压力都小于泥岩的极限抗压强度,断裂侧封性能良好。

(3)白云凹陷东北部具有油气差异聚集成藏的特点,远源反向控圈断裂下盘高效封堵聚集原油,而天然气则主要发生近源聚集,进而形成“内气外油”的油气分布特征。

参考文献 (References)

[1] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 (7): 803-811.

[2] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (6): 897-917.

[3] 郝芳, 邹华耀, 王敏芳, 等. 油气成藏机理研究进展和前沿研究领域 [J]. 地质科技情报, 2002, 21 (4): 7-14. [HAO Fang, ZOU Huayao, WANG Minfang, et al. Research advances and frontier areas of mechanisms of petroleum accumulation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21 (4): 7-14.]

[4] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系 [J]. 石油学报, 2010, 31 (5): 774-780. [CHEN Wei, WU Zhiping, HOU Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (5): 774-780.]

[5] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32 (2): 273-279. [YU Yixin,

- ZHOU Xinhui, XU Changgui, et al. Characteristics and formation mechanisms of the Cenozoic faults in the Bohai Sea waters [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32 (2): 273-279.]
- [6] 吕延防, 付广, 付晓飞, 等. 断层对油气的输导与封堵作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013. [LV Yanfang, FU Guang, FU Xiaofei, et al. The Transporting and Sealing Roles of Faults on Hydrocarbon[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.]
- [7] 庞雄, 施和生, 朱明, 等. 再论白云深水油气勘探前景[J]. 中国海上油气, 2014, 26 (3): 23-29. [PANG Xiong, SHI Hesheng, ZHU Ming, et al. A further discussion on the hydrocarbon exploration potential in Baiyun deep water area [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26 (3): 23-29.]
- [8] 米立军, 张忠涛, 庞雄, 等. 南海北部陆缘白云凹陷油气富集规律及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45 (5): 902-913. [MI Lijun, ZHANG Zhongtao, PANG Xiong, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Baiyun Sag at northern continental margin of South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45 (5): 902-913.]
- [9] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征: 以南海北部陆缘深水白云凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45 (1): 27-39. [PANG Xiong, REN Jianye, ZHENG Jinyun, et al. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: a case study of Baiyun Sag in the deep-water area of northern South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45 (1): 27-39.]
- [10] 侯读杰, 庞雄, 肖建新, 等. 白云凹陷断裂作为天然气运移通道的地质-地球化学证据[J]. 地学前缘, 2008, 15 (4): 81-87. [HOU Dujie, PANG Xiong, XIAO Jianxin, et al. The geological and geochemical evidence on the identification of natural gas migration through fault system, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15 (4): 81-87.]
- [11] 施和生, 秦成岗, 张忠涛, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡-番禺低隆起油气复合输导体系探讨[J]. 中国海上油气, 2009, 21 (6): 361-366. [SHI Hesheng, QIN Chenggang, ZHANG Zhongtao, et al. A discussion on the complex hydrocarbon transport system in the north slope of Baiyun Sag-Panyu low uplift, Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21 (6): 361-366.]
- [12] 张忠涛, 施和生, 秦成岗, 等. 番禺低隆起-白云凹陷北坡断层封闭性研究[J]. 断块油气田, 2010, 17 (1): 24-27, 51. [ZHANG Zhongtao, SHI Hesheng, QIN Chenggang, et al. Study on fault sealability of Panyu Low Massif and north slope of Baiyun Sag [J]. *Fault-block Oil and Gas Field*, 2010, 17 (1): 24-27, 51.]
- [13] 邵磊, 孟晓捷, 张功成, 等. 白云凹陷断裂特征对构造与沉积的控制作用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41 (9): 1435-1441. [SHAO Lei, MENG Xiaojie, ZHANG Gongcheng, et al. Feature of faults system and its influence on tectonic and sedimentary history of Baiyun Sag [J]. *Journal of Tongji University:Natural Science*, 2013, 41 (9): 1435-1441.]
- [14] Yu Y X, Zhang T L, Zhang Z T, et al. Structural characteristics and its significances on hydrocarbon accumulation in the Yunkai low uplift, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Geologica Sinica:English Edition*, 2021, 95 (1): 21-29.
- [15] Zeng J H, Wang C, Guo S, et al. Petroleum migration characteristics in the northeastern part of the Baiyun depression, Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica:English Edition*, 2021, 95 (1): 208-231.
- [16] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29 (1): 1-9. [ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, GAO Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29 (1): 1-9.]
- [17] 何家雄, 颜文, 马文宏, 等. 南海北部准被动陆缘深水油气地质及与世界深水油气富集区类比[J]. 天然气地球科学, 2010, 21 (6): 897-908, 995. [HE Jiaxiong, YAN Wen, MA Wenhong, et al. Analogy of oil and gas geology between quasi-passive margin of northern South China Sea and global oil and gas enriched areas in deep water [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21 (6): 897-908, 995.]
- [18] 张功成, 杨海长, 陈莹, 等. 白云凹陷—珠江口盆地深水一个巨大的富生气凹陷[J]. 天然气工业, 2014, 34 (11): 11-25. [ZHANG Gongcheng, YANG Haizhang, CHEN Ying, et al. The Baiyun Sag: a giant rich gas-generation sag in the deepwater area of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34 (11): 11-25.]
- [19] Fu J, Zhang Z T, Chen C, et al. Geochemistry and origins of petroleum in the Neogene reservoirs of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 127-141.
- [20] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海北部白云深水之基础地质[J]. 中国海上油气, 2008, 20 (4): 215-222. [PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. Basic geology of Baiyun deep-water area in the northern South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2008, 20 (4): 215-222.]
- [21] 周心怀, 牛成民, 滕长宇. 环渤中地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30 (4): 469-475, 482. [ZHOU Xinhui, NIU Chengmin, TENG Changyu. Relationship between faulting and hydrocarbon pooling during the Neotectonic movement around the central Bohai Bay [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30 (4): 469-475, 482.]
- [22] 彭辉界, 庞雄奇, 李洪博, 等. 珠江口盆地珠一坳陷断裂控藏定量表征与有利勘探区预测[J]. 现代地质, 2016, 30 (6): 1318-1328. [PENG Huijie, PANG Xiongqi, LI Hongbo, et al. Quantitative evaluation of control of faults on hydrocarbon accumulation and play fairway prediction in Zhu I depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Geoscience*, 2016, 30 (6): 1318-1328.]
- [23] Knipe R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81 (2): 187-195.