

珠江口盆地靖海凹陷多边形断层系统成因及油气成藏意义

江 宁,何 敏,刘 军,薛怀艳,郑金云,张青林

[中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 深圳 518000]

摘要:珠江口盆地靖海凹陷中新统发育大量密集分布、走向多变、延伸长度有限、断距小、倾角陡且互相切割及平面上呈多边形几何特征的小型正断层。综合研究认为,该系列小断层为非构造成因的多边形断层。多边形断层是由于地层超压诱导的周期性压力释放而形成的微裂缝,超压成因以快速沉积造成的不平衡压实为主,带动水热增压作用和矿物脱水作用。靖海凹陷由始新世—渐新世裂谷断陷期,过渡为早中新世—中中新世的裂后热沉降期,沉积由近海浅湖相过渡为深海—半深海相,沟通断陷期陆相及浅海相烃源岩和坳陷期深海—半深海相储集层的长期断裂不发育,缺乏油气垂向运移的主要通道,成为制约该期成藏的关键因素。多边形断层在靖海凹陷中新统珠江组 and 韩江组中广泛发育,可作为油气运移的输导通道,起到对油气运移分流调节作用,控制成藏区带分布,对靖海凹陷裂后热沉降期油气成藏具有重要的意义。

关键词:多边形断层;油气运移;油气成藏;靖海凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of polygonal fault system in Jinghai Sag of the Pearl River Mouth Basin

Jiang Ning, He Min, Liu Jun, Xue Huaiyan, Zheng Jinyun, Zhang Qinglin

(Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China)

Abstract: Small normal faults are well developed in the Miocene in Jinghai Sag of the Pearl River Mouth Basin and they are characterized by close spacing, highly variable strike, limited trace length, small throw, steep dip, crosscutting and polygonal geometry on plane view. Comprehensive study reveals that they are non-tectonic origin. A polygonal fault system (PFS) consists of small normal faults formed due to periodical pressure release induced by shallow overpressure. The overpressure is mainly caused by differential compaction, aquathermal pressuring and chemically driven volumetric contraction (syneresis) due to rapid sediment deposition. During the Eocene and Oligocene, Jinghai Sag experienced lithospheric stretching, followed by thermal subsidence in the Early and Middle Miocene, with the deposition environment evolved from lacustrine-neritic facies to bathyal-abyssal facies. The poor development of growth faults which play a key role in connecting the source rock of lacustrine-neritic facies and reservoir of bathyal-abyssal facies resulted in the absence of vertical hydrocarbon migration pathways. Polygonal faults are highly developed in the Miocene Zhujiang and Hanjiang Formations in Jinghai Sag and can act as hydrocarbon migration pathways, thus are highly significant for hydrocarbon accumulation during post-rift thermal subsidence.

Key words: polygonal fault system, hydrocarbon migration, hydrocarbon accumulation, Jinghai Sag, Pearl River Mouth Basin

多边形断层系统最早于1990年由Cartwright在英国北海盆地的新生界泥岩地层中发现,随后在全球50多个沉积盆地中发现类似多边形断层系统。多边形断层系统(polygonal fault system)由数量众多、密集分布

的张性正断层组成,断层平均断距为30~100 m,延伸长度介于100~2 000 m,断层倾角介于20°~80°,断面呈上陡下缓的铲状,在平面上断层交切在一起,组成具有多边形几何特征的断裂系统。多边形断层系统主要

收稿日期:2015-08-28;修订日期:2017-02-25。

第一作者简介:江宁(1985—),男,工程师,石油地质。E-mail:jiangning@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05025-006-03)。

发育在富含细粒沉积物的深海-半深海陆坡沉积环境,同样存在于一些深水盆地,以及前陆盆地和内克拉通盆地,超过90%的多边形断层系统发现于被动大陆边缘盆地。目前多边形断层系统成因机制还存在争议,主要的观点包括脱水收缩、密度反转、差异压实、成岩作用等^[1-4]。

珠江口盆地在新生代时期为被动大陆边缘拉张型含油气盆地,早期的油气勘探主要集中在陆架浅水区的珠一坳陷,随着勘探程度不断提高,逐渐转入位于陆坡深水区的珠二坳陷以及珠四坳陷。自晚渐新世到早中新世,南海开始张裂,海水由南往北大规模入侵,珠二坳陷以及珠四坳陷自中新世一直处于大陆斜坡的深海-半深海沉积环境,长期发育的断裂比较少,加上钻井勘探程度低,难以确定有效的油气运移方向和成藏区带^[5]。针对研究现状,本文基于靖海凹陷的高分辨率三维地震资料,利用地震相干切片技术,以及地质统计学方法,对靖海凹陷中新世发育的多边形断层系统的分布规律、成因机制以及油气成藏意义展开研究。

1 区域地质背景

靖海凹陷位于珠江口盆地珠四坳陷东北侧,是由中生代挤压增生大陆边缘过渡到新生代拉张离散大陆边缘背景下发育演化形成的中、新生代叠合盆地,晚白垩世以来,在拉张应力作用下,靖海凹陷经历了断陷期、拗陷期、新构造期等多个演化阶段,具有先断后拗

的凹陷结构,该地区海水深度在1 500~2 300 m。珠江口盆地靖海凹陷、白云-荔湾凹陷同属于南海北部陆架边缘深水陆坡区,近年来在白云北坡的一系列天然气发现和LW-S气区的突破证实该区良好的生烃条件,显示出陆架坡折带范畴内巨大的油气勘探潜力。靖海凹陷发育白垩系、侏罗系和古近系3套烃源岩沉积,以及新近系浅海-陆架边缘三角洲和陆坡大型深水扇两套优质砂岩储层,是珠江口盆地地层-岩性油气藏勘探的重要远景区^[6-7](图1)。

2 多边形断层系统特征及要素

靖海凹陷多边形断层系统发育于中新世上珠江组和下韩江组沉积时期,期间受南海海底扩张影响,靖海凹陷进入相对稳定的热沉降时期,开始深海-半深海相沉积盆地演化阶段,中新统沉积了巨厚的海相泥岩地层。由于靖海凹陷特定的深水沉积环境和稀井条件,以及多边形断层具有断距小、延伸长度短、走向多变且密集发育的特点,研究区缺乏系统的对多边形断层面状和线状结构的归纳和总结(图2)。因此在钻探程度低的海域,基于高分辨率的三维地震资料,结合层拉平和相干切片技术,揭示多边形断层系统的各种构造要素的相互关系。

靖海凹陷多边形断层主要发育在下韩江组和上珠江组之间(介于 T_3^5 和 T_2^0 地震反射界面),该层段地震同相轴连续性好、振幅能量强,地震信号具有较高信噪比,结合剖面地震解释成果,利用相干技术可有效拾取

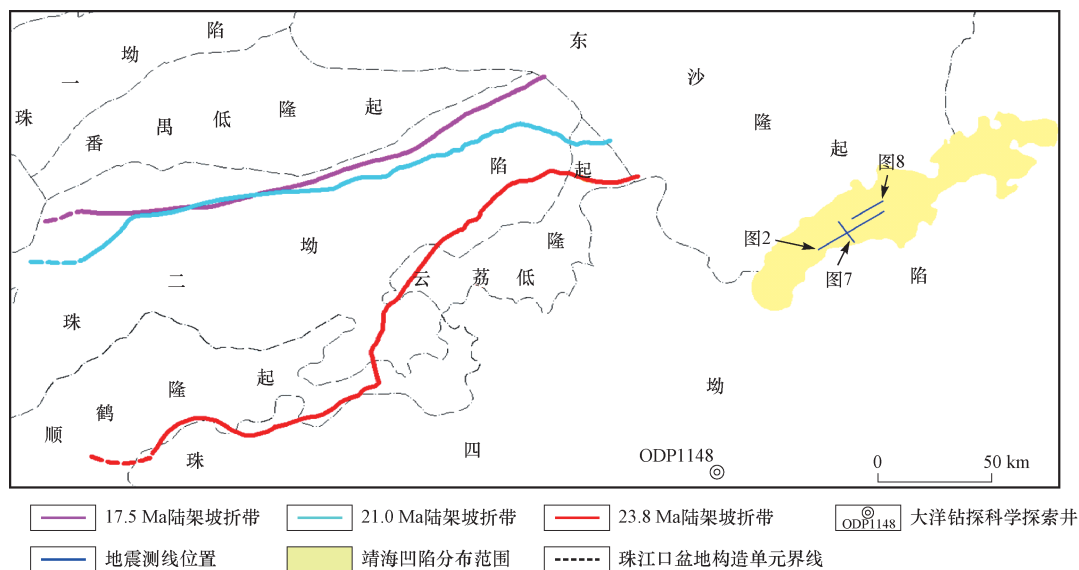


图1 靖海凹陷区域位置及陆架坡折带变迁

Fig. 1 Location of the Jinghai Sag and evolution of the shelf break

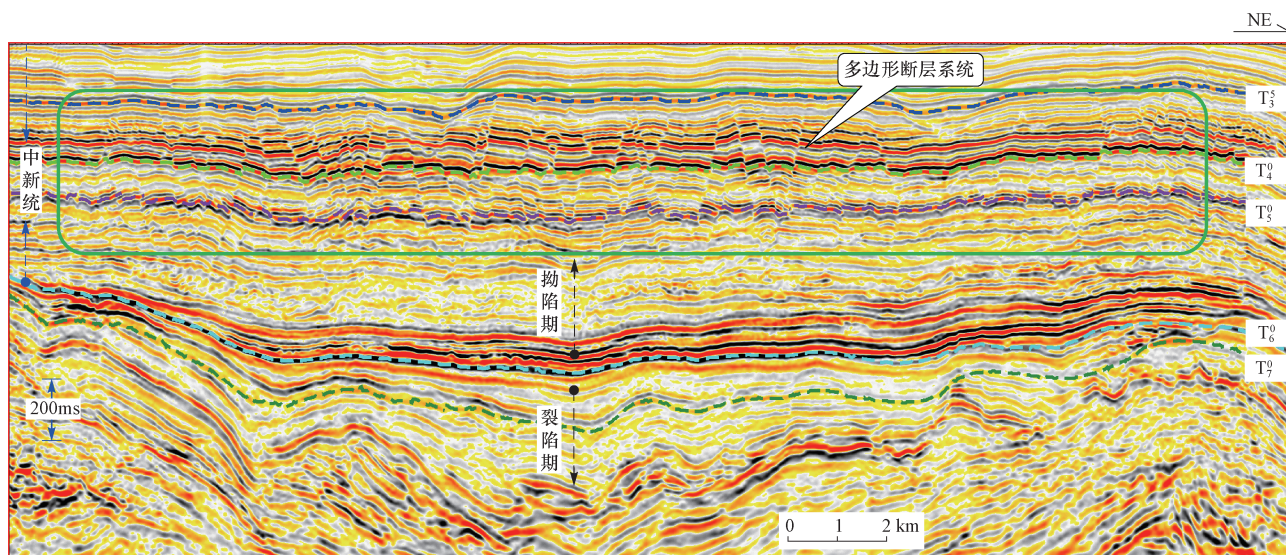


图2 靖海凹陷多边形系统发育层段示意图(剖面位置图见图1)

Fig. 2 Map showing formations with polygonal faults in the Jinghai Sag (section location see Fig. 1)

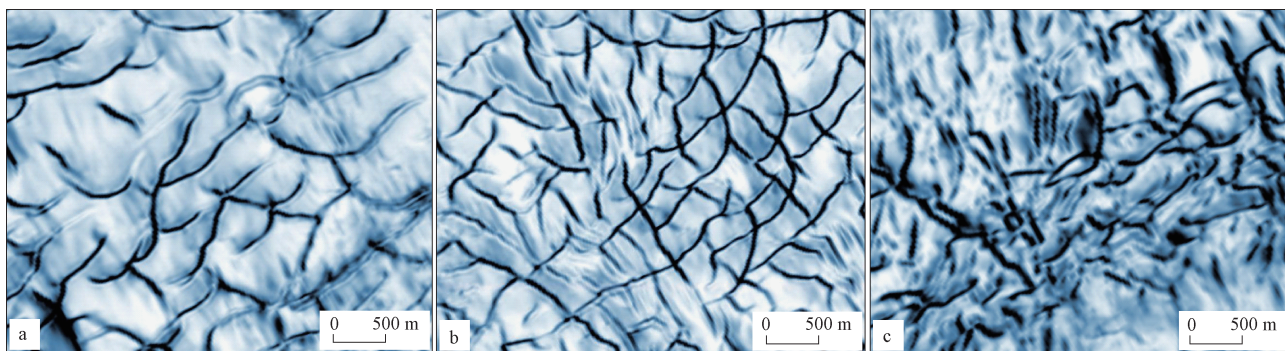


图3 靖海凹陷多边形断层平面组合结构

Fig. 3 Combination of polygonal faults on plane view in the Jinghai Sag

a. 圆弧形结构; b. 正交型结构; c. 杂乱型结构

由于多边形断层引起的波形差异,进而统计多边形断层的产状特征和位移要素。本次研究选取3个(T_3^5 , T_4^0 和 T_5^0)全区可追踪对比的等时界面为参考层,在三维地震相干体数据基础上,以10 ms时间间隔提取一系列地层相干切片,研究中新世不同期次多边形断层发育特征。通过对靖海凹陷多边形断层发育段的地层相干切片进行统计,基于多边形断层的走向、密度及交切参数,可以在平面上将多边形断层划分为3类:①圆弧形结构,地层相干切片上多边形断层分布较均匀,相邻断层交切程度低,交切夹角以大于 90° 钝角为主,断层走向轨迹呈不规则圆弧形(图3a);②正交型结构,地层相干切片上多边形断层分布较均匀,相邻断层交切程度高,以近乎 90° 垂直交切,断层走向轨迹较顺直(图3b);③杂乱型结构,地层相干切片上多边形断层分布不均匀,多边形断层在局部区域较发育,相邻断层互相切割程度介于①和②两种结构,交切角度多变,断

层走向轨迹没有典型共性(图3c)。

由靖海凹陷中新统韩江组至珠江组,优选a—d一共4张地层相干切片,清晰刻画了由韩江组至珠江组多边形断层的展布和演化规律。随着地层深度的增加,多边形断层出现频率逐渐增加、分布范围继续扩大,主要发育在研究区中东部。断层走向玫瑰花图揭示多边形断层走向多变,不存在构造成因断层具备的主应力方向(图4)。多边形断层平面上延伸长度介于200~2 000 m,且延伸长度介于300~1 100 m的多边形断层占据多边形断层总量的80%以上,而延伸长度分布在1 100~2 000 m内多边形断层在各自区间上分布频率均低于10%(图5a)。值得一提的是,延伸长度小于200 m的多边形断层较不易在相干地层切片上被有效拾取,主要原因在于:①延伸长度较小的多边形断层的相干地震波形差异性较小,易与岩性、物性和含油气性变化造成波形差异的相干信号混淆;②由于三维

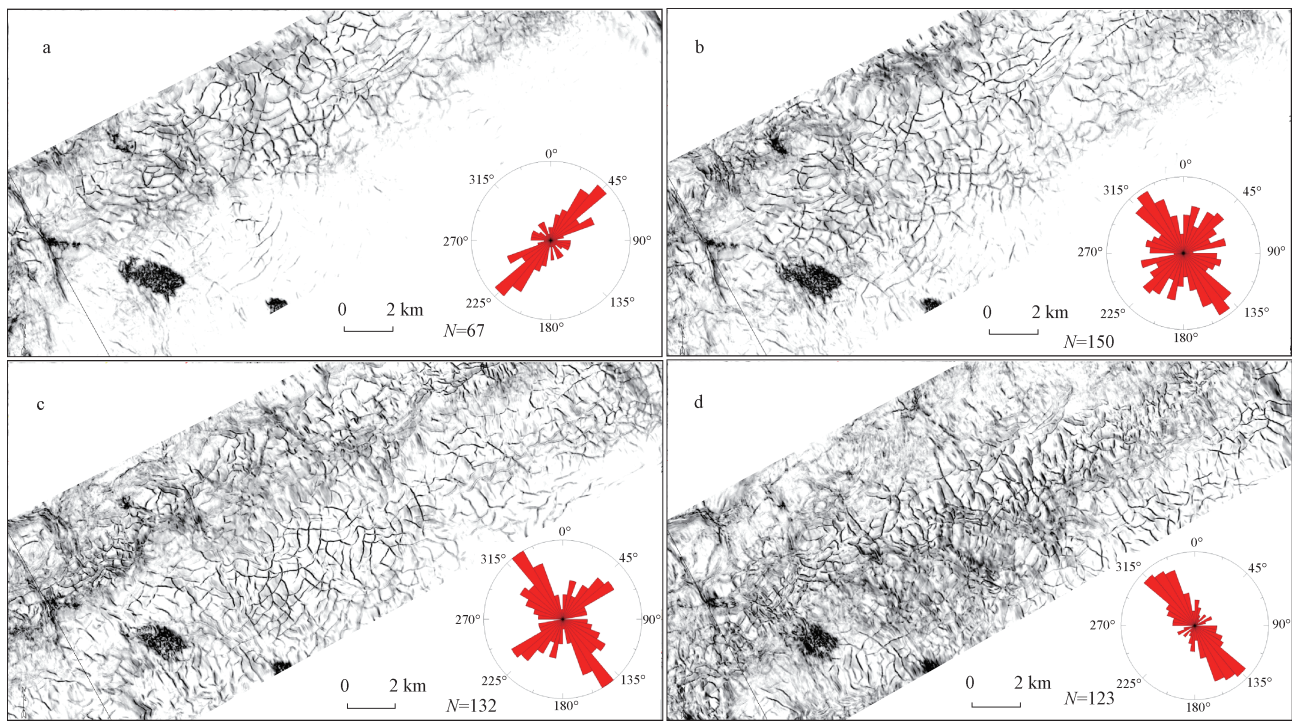


图4 靖海凹陷多边形断层发育层段相干切片

Fig.4 Coherence slices of formations with polygonal faults in the Jinghai Sag

a. 下韩江组上段;b. 下韩江组下段;c. 上珠江组上段;d. 上珠江组下段

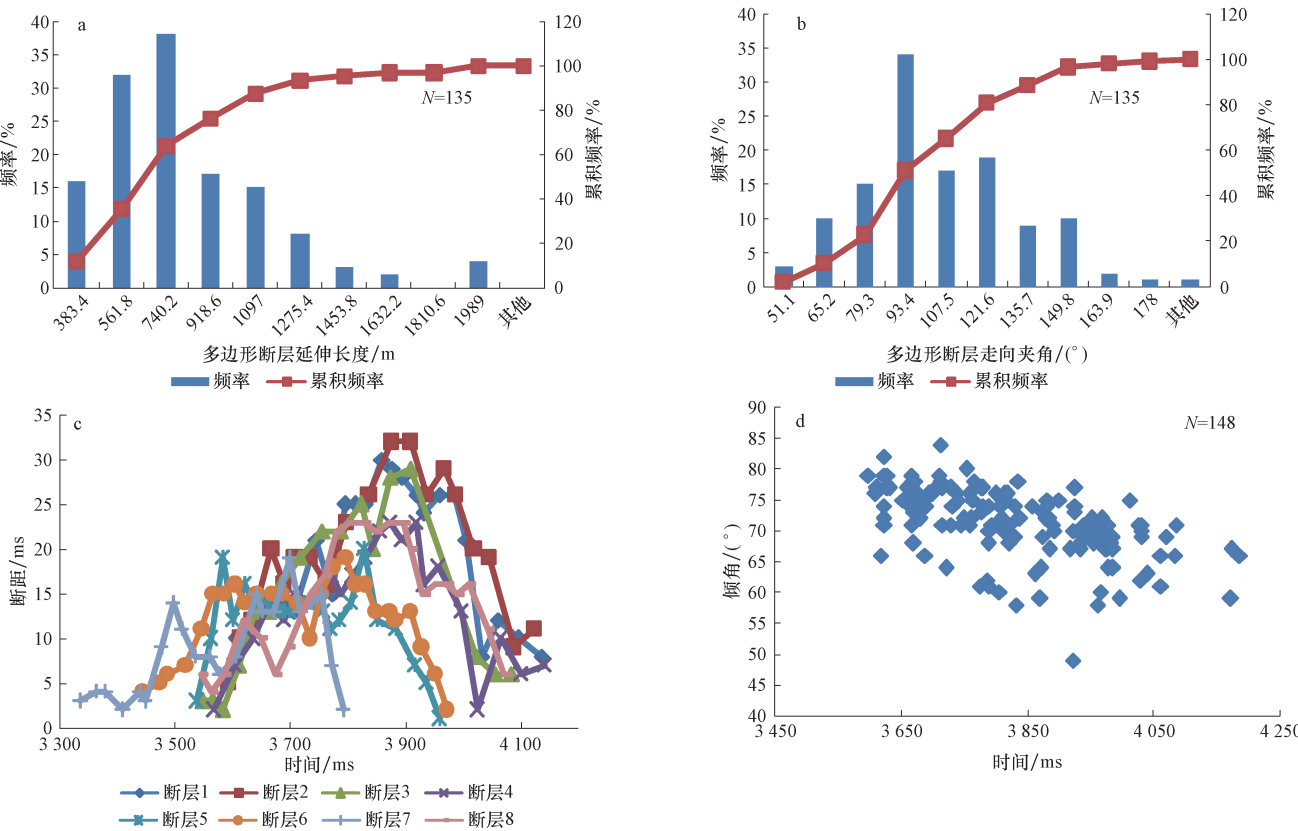


图5 靖海凹陷多边形断层产状与位移要素

Fig.5 Occurrence and displacement characteristics of polygonal faults in the Jinghai Sag

地震资料按一定的线、道间距进行采集和处理,线道间没有记录地震反射信息,如靖海三维地震资料线间距和道间距分别为 25 m 和 12.5 m,延伸长度在 28 m 及以上(线、道间距对角线长度)的多边形断层才能确保被三维数据所记录。多边形断层走向间夹角分布在 $50^{\circ} \sim 180^{\circ}$,走向夹角优势分布区域集中在 90° 附近, $70^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 的走向夹角占据总样本数的 80% 左右(图 5b)。多边形断层断距随着埋深增加而增加,在断层中段断距达到最大,进而随着埋深增加断距逐渐减小,断距大小介于 2 ~ 35 ms(以速度谱拾取该层段平均速度 1 600 m/s 换算,多边形断距介于 1.6 ~ 28 m),断距与埋深交汇趋势线呈现倒“C”型或者“M”型(图 5c)。多边形断层倾角随着埋藏深度增加,倾角逐渐变缓,总体上呈现为上陡下缓的铲式正断层,断层倾角主要分布在 $55^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (图 5d)。

3 多边形断层成因机制

由于珠江口盆地靖海凹陷前期陆坡深水区断裂系统研究,主要是针对新近系的控制盆地沉积演化的控注断层和沟通烃源岩及储层的油源断层,很少对新近系中新统发育的多边形断层进行研究,因此有必要利用现有的钻井、测井和三维地震资料,分析靖海凹陷多边形断层的成因机制,深化多边形断层对油气成藏控制作用的研究。

3.1 多边形断层形成的地质条件

靖海凹陷新生界具有先断后拗的双层垂向结构,下构造层为盆地断陷期发育的古近系近海浅湖相沉积;上构造层则为盆地拗陷期形成的新近系海陆过渡相和海相沉积。靖海凹陷多边形断层主要发育在中新统珠江组和韩江组厚层海相泥岩沉积地层。在早中新世白云运动控制下,海水由珠四拗陷向珠一拗陷大规模侵入,经历 2 次明显海平面快速上升,珠江口盆地陆架坡折带由珠四拗陷北侧迁移至珠二拗陷北侧,珠二拗陷由浅水陆架突变为深水陆坡沉积环境^[8],于珠二拗陷北侧陆架区发育浅水三角洲沉积体系,而在珠二拗陷南侧及珠四拗陷发育深水陆坡沉积体系(图 1)。靖海凹陷在中新世海平面快速上升和沉积速率较高的背景下,形成了独具特色的半深海—深海陆坡沉积环境,是靖海凹陷中新世多边形断层形成的重要地质条件。

3.2 多边形断层的形成机制

靖海凹陷多边形断层多出现在发育巨厚半深海—

深海泥岩的陆坡区,陆坡区具有较高的沉积速率和较细的沉积物的特点。多边形断层的成因是由于地层超压诱导的周期性压力释放造成的,超压成因以快速沉积造成的不平衡压实为主,带动高热流背景下的水热增压作用、矿物脱水作用^[9-13]。

3.2.1 欠压实作用

自中新世 23 ~ 5 Ma 以来,珠江口盆地陆坡区分别于 17.5 ~ 15.5 Ma 和 13.8 ~ 12.5 Ma 出现两次沉积高峰,最大沉积速率分别达到 1 226 m/Ma 和 1 128.5 m/Ma,该最大沉积速率为南海海域已知的最大沉积速率(图 6a,b)^[6]。靖海凹陷位于古珠江出口下倾方的深水陆坡区,发育多边形断层的珠江组和韩江组海相沉积地层厚度分布范围由超覆区 100 多米过渡到洼槽带近 1 600 m,呈东南厚西北薄的特点。靖海凹陷多边形断层在中中新世 16 Ma 左右最为发育,与 17.5 ~ 15.5 Ma 上覆沉积地层厚度急剧增加以及海平面快速上升,存在良好时空响应。由于靖海凹陷还没有钻井资料,因此主要是利用速度谱资料进行压力研究,相对于正常的速度变化趋势,多边形断层发育的下韩江组($T_3^5-T_4^0$)和上珠江组($T_4^0-T_5^0$)泥岩地层较上下围岩具有明显的低速异常,400 ~ 900 m 地层层速度随着埋深增加而减小,揭示现今韩江组和珠江组泥岩地层发育异常高压。上新世和第四纪时期,靖海凹陷沉积中心逐渐往南部洼槽带迁移,中新统上覆地层呈楔形由隆起带往洼槽带增厚,加上陆坡区水深变化快,导致区域上韩江组和珠江组上覆压力存在显著的不同。界定 A、B 和 C 3 点,将多边形断层发育段划分为发育区、过渡区和消亡区,上覆沉积地层由多边形断层发育区 C 点到消亡区 A 点厚度逐渐减薄,厚度由近 700 m 减薄到 200 m 左右,上覆压力(地层及海水)由 C 点 36 MPa 减小到过渡段 B 点 30 MPa,及至消亡区 A 点压力降至 20 MPa,上覆沉积地层厚度差异与多边形断层发育情况存在较好的一致性(图 7)。此外断层活动情况也是造成地层压力变化重要因素,靖海凹陷北侧控注断层一直持续活动,可使断层周边泥岩孔隙流体压力迅速释放,阻止上覆负荷压力在孔隙流体中的持续累积,导致多边形断层由沉积盆地中心到边缘逐渐不发育。

3.2.2 体积变化作用

靖海凹陷超压形成主要受控于欠压实作用,但其特殊的地理位置和沉积环境,导致盆地一直处于高温环境,因此地温对超压的形成起到一定作用。①水热

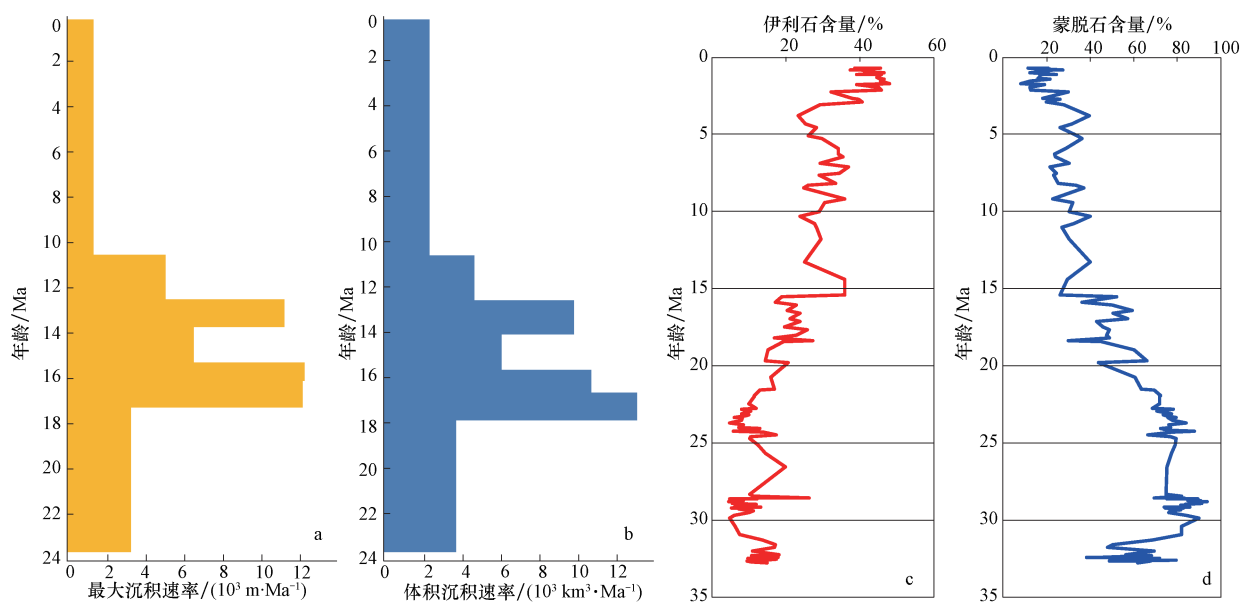


图6 靖海凹陷邻区沉积速率及矿物含量变化

Fig. 6 Deposition rate and mineral content variations in the surrounding area of the Jinghai Sag

a. 白云凹陷最大沉积速率直方图^[6]; b. 白云凹陷体积沉积速率直方图^[6]; c. ODP1148 站沉积物伊利石含量变化曲线;
d. ODP1148 站沉积物蒙脱石含量变化曲线

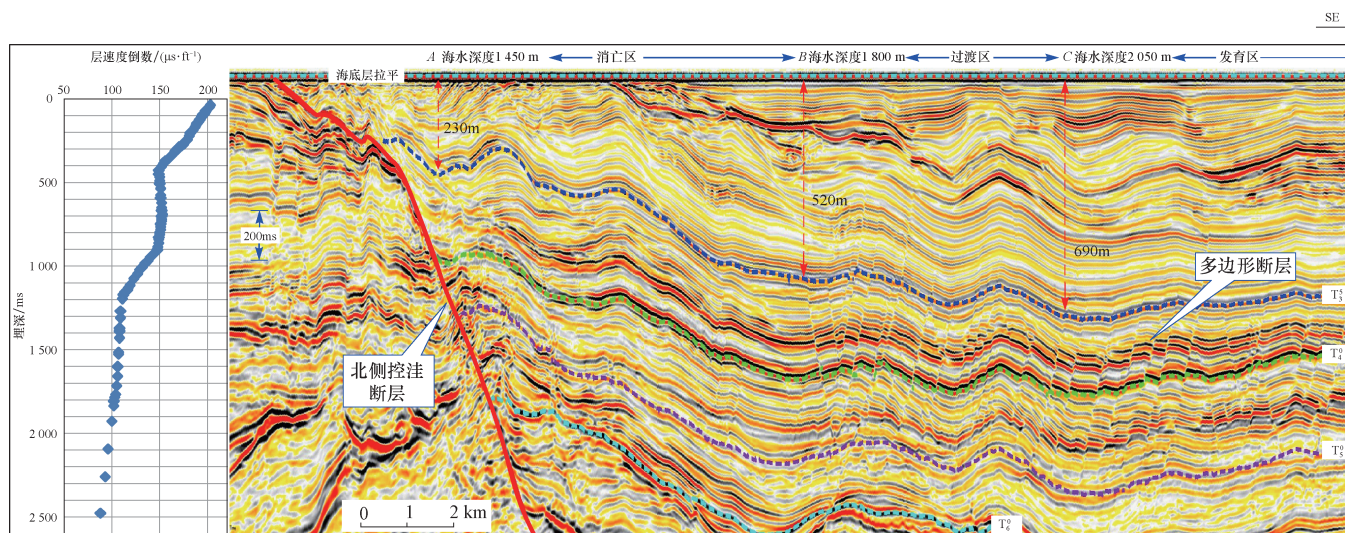


图7 靖海凹陷多边形断层发育区异常压力结构(剖面位置见图1)

Fig. 7 Abnormal pressure of zones with polygonal faults in the Jinghai Sag (Section location see Fig. 1)

增压作用:珠江口盆地是在减薄的大陆地壳背景下发育形成的,受地幔热源和区域构造影响,盆地地温梯度表现为南高北低,东西缓慢变化的特点。靖海凹陷位于珠二坳陷南侧,毗邻南海洋陆转换带(OCT),结合重磁资料推测该区莫霍面深度介于18~24 km,远小于珠一洼陷介于28~30 km的莫霍面深度,地壳的减薄反映了热流趋势由华南沿海往海盆方向增加,与莫霍面的由北往南抬升相对应。靖海凹陷平均热流值约为86 mW/m² 远高于北部坳陷带65 mW/m² 的平均热流值,盆地整体处在一个较高的地热背景之下,推算平均地温可达60 ℃/km^[6]。三维地震资料揭示了靖海凹

陷新生代岩浆活动频繁,多处可识别基性岩浆喷发至海底形成的“U”型坍塌火山口,进一步加剧了该区局部地温的异常。频繁的岩浆活动将产生的很高的热量,陆地油田勘探实践表明,岩浆热事件产生附加热流叠加在正常大地热流背景之上,可形成异常高的古地温场。靖海凹陷不仅具备较高的古地温背景,而且中新统沉积的巨厚深水泥岩,为水热增压创造了良好的封闭条件,随着埋深和温度的增加,流体体积增长的速率明显超过岩石骨架体积扩张速率,从而导致异常高压形成。②矿物脱水作用:南海 ODP1148 站位于靖海凹陷南侧,由于其埋藏较浅,尚处于沉积物成岩作用早

期,其粘土矿物成分变化可以表征古沉积环境信息。根据该站沉积物粘土矿物分析成果,自23.8 Ma进入中新世以来,粘土矿物中蒙脱石逐步转化为伊利石,由33.7 Ma渐新世的80%左右降低到1.81 Ma更新世的15%左右,期间伊利石含量由10%增长到45%左右^[14]。在中新世16 Ma蒙脱石快速转化为伊利石,蒙脱石含量由约60%突降至20%左右,蒙脱石脱水释放的结构水,在压实和热力作用下,逐渐转化为孔隙水,排挤孔隙中原有的流体,当流体不能及时排出时,导致孔隙流体压力增大,产生超压(图6c,d)。16 Ma蒙脱石快速脱水期与前面分析的海平面快速上升及多边形断层大规模发育的时间基本一致,印证了矿物脱水作用在超压形成中起到一定作用。

综合以上分析,靖海凹陷中新统多边形断层形成是以欠压实作用主导,伴随水热增压以及矿物脱水等因素共同作用下,随着孔隙流体压力不断增加,当孔隙压力超过泥岩承受强度,泥岩会形成微裂缝释放孔隙超压,泥岩超压地层内孔隙流体压力降低,导致微裂缝再次封闭,直到下一轮泥岩封闭层的开启和超压孔隙流体的释放,如此反复,形成数量众多、密度极高的多边形断层。

4 多边形断层系统油气成藏意义

珠江口盆地新近系沉积了巨厚的细粒海相泥岩,加之沟通古近系烃源岩的断裂不发育,古近系文昌组和恩平组烃源岩排出的油气受到新近系区域性海相泥岩的封闭,缺乏油气垂向运移到新近系地层的有效通道^[15-16]。多边形断层上方万山组发育的水道砂岩遭受压实产生的瞬间剩余压力远小于泥岩,因此水道下方的泥岩地层排液相对通畅,不会形成诱导多边形断层发育的异常高压,在地层相干切片上水道发育区多边形断层零星分布,且多边形断层走向正交于水道推

进方向(图8a)。水道砂岩成为深层油气横向运移途中的“捕获点”,在充填水道3中可识别“蚯蚓”状强振幅反射,反映了含气砂岩储集体与围岩存在较大波阻抗差异(图8b)。在中新统海相泥岩处于增压阶段,孔隙流体压力还未达到泥岩的突破压力,多边形断层不发育或者处于间歇关闭阶段,新近系发育的厚层海相泥岩为下覆油气藏的区域性盖层,深层古近系生成油气,在韩江组海相泥岩“顶板”控制下,沿着“构造脊”由洼槽带横向向盆地边缘运移;在多边形断层超压释放阶段,在中新统珠江组和韩江组发育密集的小断距正断层,形成了油气垂向输导的周期性通道,深层油气在多边形断层和上覆泥岩盖层联合控制下,由深层向浅层,泥岩向砂岩,由洼陷中心高势区向盆地边缘低势区运移(图9)。

5 结论

1) 靖海凹陷多边形断层主要发育在陆坡深水区珠江组上部和韩江组下部,综合其平面特征,可划分为圆弧型、正交型及杂乱型3种结构。多边形断层平面延伸长度介于200~2 000 m,且平面延伸长度在300~1 100 m的多边形断层占据80%以上,断层倾角主要分布在55°~80°,走向夹角以70°~110°为优势分布区间,多边形断距介于1.6~28 m,且断距与埋深交汇图呈现倒“C”型或者“M”型。

2) 靖海凹陷多边形断层是由于地层超压诱导的周期性压力释放形成的微裂缝,而17.5~15.5 Ma和13.8~12.5 Ma快速沉积造成的不平衡压实作用,及高地热背景下水热增压作用及矿物脱水作用为超压主要成因机制。

3) 由于靖海凹陷中新世沉积厚层海相泥岩及晚期断裂不发育,深水陆坡区缺乏油气垂向运移的有效

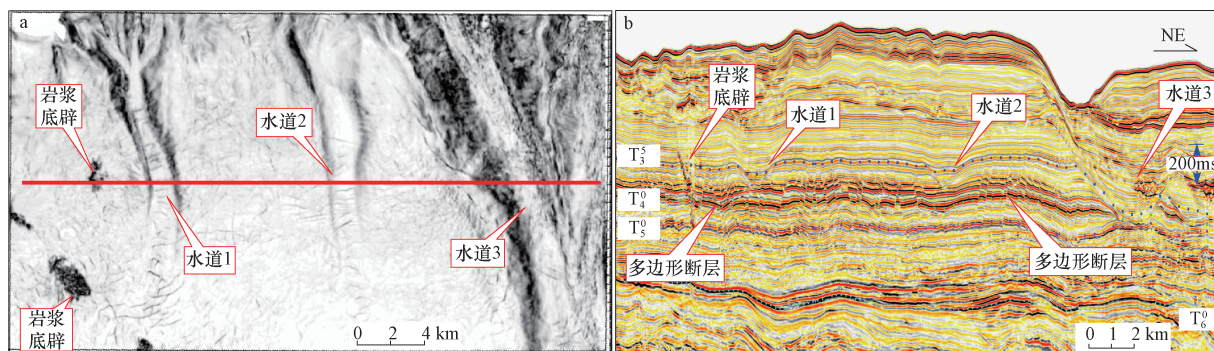


图8 多边形断层与上覆沉积水道油气输导体系(剖面位置见图1)

Fig. 8 Carrier system between polygonal faults and the overlying channel deposits(Section Location see Fig. 1)

a. 过多边形断层及沉积水道地层相干切片;b. 过多边形断层及沉积水道地震剖面

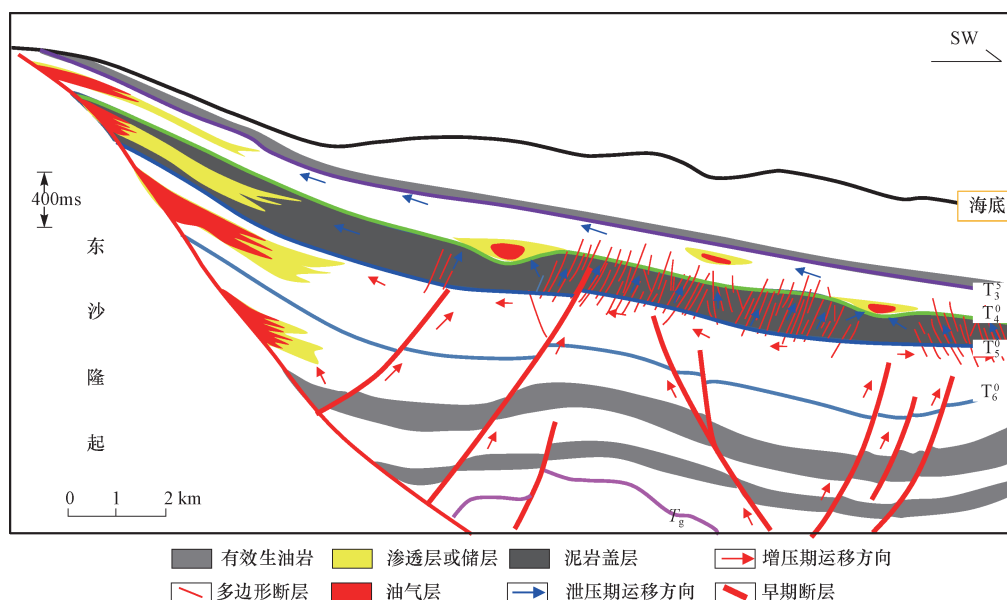


图9 靖海凹陷多边形断层发育区油气成藏模式

Fig.9 Hydrocarbon accumulation pattern of zones with polygonal faults in the Jinghai Sag

通道,在多边形断层封闭期间,油气在上覆泥岩控制下以侧向运移为主;在多边形断层开启阶段,多边形断层成为油气垂向运移的有效通道,油气以多边形断层、连通砂体和构造脊复合输导体系为运移路径。

参考文献

- [1] Cartwright J A. Episodic basin-wide hydrofracturing of overpressured Early Cenozoic mudrock sequences in the North Sea Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(5): 587-607.
- [2] Cartwright J A, Loneragan L. Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: a mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems[J]. Basin Research, 1996, 8(2): 183-193.
- [3] Cartwright J A, Dewhurst D N. Layer-bound compaction faults in fine-grained sediments[J]. GSA Bulletin, 1998, 110(10): 1242-1257.
- [4] Cartwright J A, Loneragan L. Seismic expression of layer-bound fault systems of the Eromanga and North Sea Basins[J]. Exploration Geophysics, 1997, 28(3): 323-331.
- [5] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-8.
- [6] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 135-141.
- [7] 易雪斐, 张昌民, 李少华, 等. 珠江口盆地21Ma和13.8Ma陆架边缘三角洲对比[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 670-678.
- [8] 易雪斐, 张昌民, 李少华, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡新近系层

序构型及油气有利区[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 197-201.

Yi Xuefei, Zhang Changmin, Li Shaohua, et al. Sequence stratigraphic architecture and play fairways of the Neogene on the north slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 197-201.

- [9] Dewhurst D N, Cartwright J A, Loneragan L. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(8): 793-810.
- [10] Gay A, Berndt C. Cessation/reactivation of polygonal faulting and effects on fluid flow in the Vøring Basin, Norwegian Margin[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(1): 129-141.
- [11] Goult N R, Swarbrick R E. Development of polygonal fault systems: a test of hypotheses[J]. Journal of the Geological Society, 2005, 162(4): 587-590.
- [12] Goult N R. Polygonal fault networks in fine-grained sediments-an alternative to the syneresis mechanism[J]. First Break, 2001, 19(2): 69-73.
- [13] James D M D, Goult N R, Swarbrick R E. Discussion on development of polygonal fault systems, a test of hypotheses[J]. Journal of the Geological Society London, 2006, 163(1): 221-223.
- [14] 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 179-185.
- [15] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 46-62.
- [16] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动和油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 133-138.

(编辑 张亚雄)