

万安盆地构造特征及其对油气分布的控制

张亚震, 裴健翔, 甘军, 杜艺可, 史德锋

中海石油(中国)有限公司海南分公司

摘要 万安盆地是南海南部多板块叠合区典型的走滑-拉张盆地,地质条件复杂,研究程度较低,目前对盆地主要凹陷构造特征缺乏针对性的研究,对盆地油气资源潜力及分布情况认识有限。基于精细的地震解释,对万安盆地新生界重要构造变革界面及其不整合面反射特征、断裂体系及构造演化特征、构造对油气分布的控制作用进行了分析。T100(新生界底界)、T60(新近系底界)、T40(上中新统底界)是万安盆地不同时期结构构造、层序样式的关键分界面,体现了盆地裂陷—反转—沉降演化阶段对区域构造事件的响应。万安盆地的断裂主要发育于T40界面以下,其中NE、NEE向断裂最为发育并控制了盆地构造格局。作为控盆断裂的万安断裂具有早期活动性强、晚期活动性弱,中部活动性强、南北部活动性次之的特征。凹陷呈多洼陷结构,反映出典型的裂陷分块与构造演化差异的特征。通过对万安盆地大中型油气藏时空分布的研究,认为烃源岩及其热演化控制了油气的平面分布,围绕在中部凹陷周缘的凸起带、斜坡带、反转带等构造单元控制了油气的空间分布,盆地整体上具有先成凸起带优势成藏、斜坡带立体成藏、中央反转带复式成藏的油气富集规律。

关键词 构造格架; 断裂体系; 构造演化; 油气分布; 万安盆地; 南海

中图分类号: TE121.2 **文献标识码**: A

0 前言

万安盆地作为南沙海域油气增储上产的重要盆地,截至2020年,累计钻井170余口,发现了大熊、Lan Tay、Hai Thach等多个大中型油气田和40余个含油气构造,累计发现石油地质储量超过 3×10^8 t,天然气地质储量超过 $3\,300 \times 10^8$ m³,其中围绕中部凹陷的各构造单元所发现的油气可采储量超过总可采储量的90%,证实了万安盆地中部凹陷为一个巨大的富生烃凹陷,油气勘探潜力可观^[1-4]。

前人对万安盆地的构造格架、沉积演化、油气成藏条件等方面开展了一些工作,认为:万安盆地为走滑-拉分盆地,经历了初始裂陷、主裂陷、断拗转换、反转及区域沉降等五大演化阶段,区域大型断裂的差异性活动控制了不同凹陷的裂陷时间及规模^[5-10];万安盆地经历了晚始新世以来由陆向海的逐渐演化,发育多种类型烃源岩、多套储盖组合,油气主要分布于渐新统一中新统碎屑岩和中新统碳酸盐岩^[11-15]。由于国内地震、钻井等资料有限,

尤其对近期新发现或评价的油气田资料掌握不足,致使在万安盆地构造带划分及构造对盆地油气分布的控制等方面的研究上认识不够。

本文在广泛调研国内外相关研究成果的基础上,结合新的地震、钻井、油气田资料,通过对万安盆地区域层序地层格架、主要断裂的空间展布与活动性及构造对油气分布的控制作用研究,阐明盆地构造特征与油气分布规律,以期为我国在万安盆地深水、深层的油气勘探和研究提供参考和依据。

1 区域地质概况

南海西部海域发育了大规模的走滑断层,如红河断裂、越东断裂、万安断裂等,这些走滑断层控制了一系列沉积盆地^[16-17]。雷超等^[18]认为红河—越东—万安断裂为东南亚地区重要的走滑构造动力边界,该界线将南海及其周缘沉积盆地划分为2个盆地群,即在该界线的西侧为经典的印度—亚洲大陆碰撞所产生的“挤出—逃逸构造区”沉积盆地群,界线的东侧为主要受古南海俯冲及其所引起的区

收稿日期:2021-11-23; 改回日期:2022-07-13; 网络出版日期:2023-02-10

本文受中海石油(中国)有限公司海南分公司项目“南海大中型天然气田形成条件、勘探潜力与突破方向”(编号:KJZH-2021-0003-00)资助

第一作者: 张亚震,工程师,主要从事南沙海域油气地质综合研究。通信地址:570312 海南省海口市秀英区长滨三路御府国际;E-mail: zhangyz@enooc.com.cn

域构造变形场控制的“古南海俯冲拖曳构造区”沉积盆地群。

万安盆地位于印支地块、南沙地块、南海中央海盆叠加区,从属于“挤出-逃逸构造区”沉积盆地群,盆地形成演化与万安断裂带活动、南海扩张密切相关,具有多阶段演化和改造的特征,而叠加的构造活动致使其构造演化过程比典型被动陆缘裂谷盆地复杂^[8,18-21]。万安盆地西接昆仑隆起,南临纳土纳隆起,东与南薇西盆地相邻(图1a),北临南海西南次海盆,是新生代大型走滑-拉张盆地,呈近南北走向,面积近 $6.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。以裂陷期地层分布、大型分割性断裂带及正向构造展布为边界,将万安盆

地自北向南划分为西北断阶带、北部凹陷、北部凸起、中部凹陷、南部低凸起、南部凹陷等六大构造单元^[22](图1a),其中中部凹陷是盆地的沉降中心和沉积中心,最大厚度超过12 km。万安盆地新生代以来经历了由陆向海的演化过程(图1b):始新世-渐新世早期以陆相湖盆沉积为特征;渐新世晚期发育近海湖沼与海岸平原沉积,主要为砂岩、泥页岩及砂泥岩互层;早中新世发育滨浅海沉积及大规模三角洲沉积,以砂岩或砂泥岩互层为主;中一晚中新世发育滨浅海沉积,沉积物粒度逐渐变细,并在盆地内部古地貌高地之上发育碳酸盐台地;上新世-第四纪发育滨海-半深海沉积,以泥岩、砂泥岩互层为主。

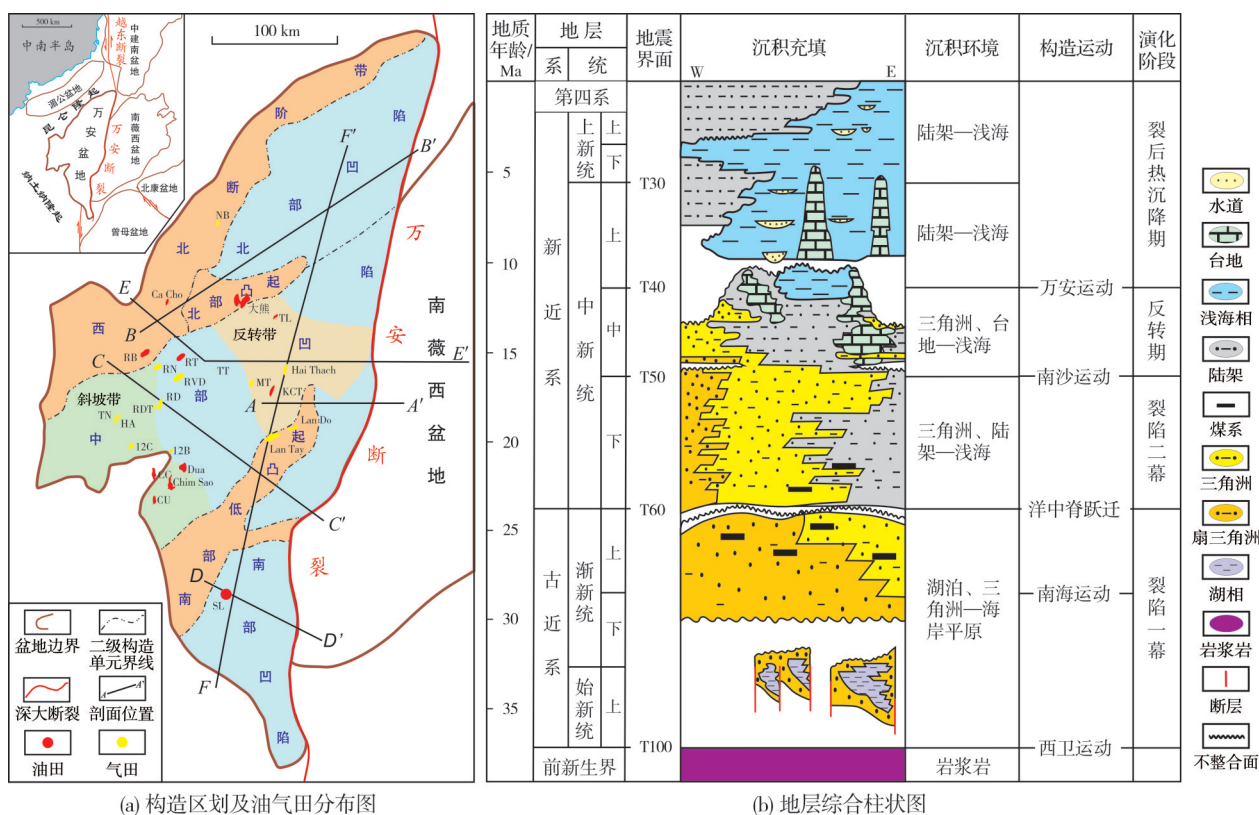


图1 万安盆地构造区划及新生代地层柱状图

Fig. 1 Tectonic zones and Cenozoic stratigraphic column in Wan'an Basin

2 构造-地层格架

2.1 关键界面特征

根据研究区内主要地震资料的不整合面反射特征、井震对比与标定,并参考Dung等学者的成果^[23],在研究区地震剖面中追踪识别出T100、T60、T50、T40、T30等重要构造变革界面(图2)。从构造

意义上讲,T100、T60、T40是盆地不同时期结构构造、层序样式的关键分界面,体现了盆地演化过程对区域构造事件的响应。

T100界面 为盆地的基底界面,对应于西卫运动。T100界面的地震特征表现为中-低频、强振幅、中连续-断续的反射;界面以上为平行结构反射层组;界面以下属于杂乱反射层组,反射同向轴

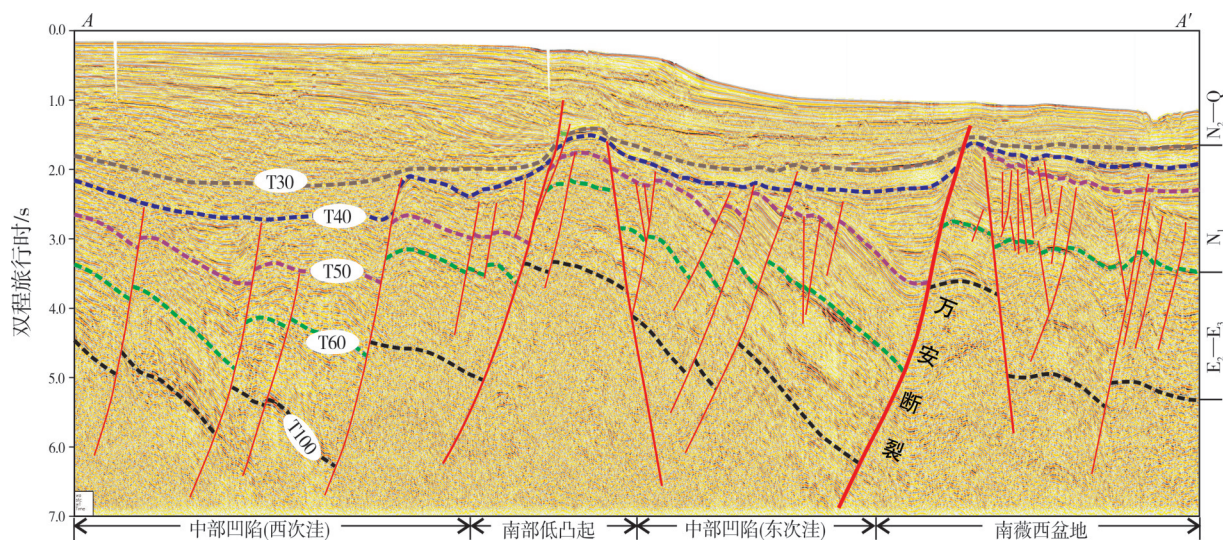


图2 万安盆地区域地震解释剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 2 Regional seismic interpretation profiles in Wan'an Basin (section location is shown in Fig. 1a)

连续性变差,振幅变弱,无明显反射特征(图2)。而在埋深较大的凹陷区因反射能量变弱,该界面多为中—弱振幅、断续反射,不易追踪识别。该界面代表了盆地新生代断陷作用的开始,为一级层序界面,无论在凹陷边缘,还是在凹陷中心,界面之下都呈现为几乎遍及整个盆地的削截不整合,反映新生代基底遭受长期的构造变形和抬升剥蚀的过程。

T60界面 对应于南海西南次海盆扩张,标志着万安盆地由裂陷一幕向裂陷二幕过渡,盆地发生区域性海侵。T60界面的不整合特征明显,总体表现为中—低频、强—弱振幅、中—低连续反射特征;界面之上为近平行结构、厚度较稳定的席状反射波组;界面之下为平行结构反射层组(图2),局部可见具充填外形的杂乱反射波组,分布局限,厚度变化大,上覆地层整合或上超于T60界面。

T40界面 对应于万安运动。中中新世晚期盆地受到挤压反转隆升,形成一系列反转构造,并形成盆内最大的不整合面。该界面特征明显(图2):为中—强振幅、中—高连续、中频反射波组,具有明显的下削上超的反射终止特征;界面之下地层发生强烈褶皱、错断、掀斜,被改造的痕迹明显;界面之上地层连续性较好,呈水平状披覆,在凹陷处上超现象清晰。裂陷期发育的断裂绝大多数上延终止于此界面。

2.2 构造—地层格架特征

在万安盆地二维地震资料的基础上,对比越南

陆架边缘的钻井资料和相关地震数据,整合由东向西、由南向北穿越整个盆地的3条地质剖面,以这些剖面中的重要层序界面的识别、追踪和对比为基础,建立了万安盆地构造—层序地层格架,进行构造—地层解释和对比分析。如图3所示,盆地内各地层充填序列及其厚度在不同构造单元内差异明显,反映出控盆、控凹断层的差异性及对盆地结构的控制作用。

始新统一渐新统(T100—T60)代表早期裂陷期充填,多发育由高角度正断层控制的地堑、半地堑结构,控凹断裂分割性强,形成多个沉积中心。该套地层分布较广泛,厚度变化大,总体上表现为中部凹陷(西次洼)厚度较大。下中新统(T60—T50)在下伏地层结构基础上继承性发育,总体为一套从洼陷中心向斜坡或凸起厚度逐渐减薄的楔形地层,具有超覆结构特征。中中新统(T50—T40)自盆地中部向边缘地层变薄,但厚度差异减小,该时期断层的断距明显减小且逐渐终止活动,这表明万安盆地逐渐向裂后沉降阶段过渡。另外,在盆地中部可见地层发生明显褶皱隆起(图3a, 3b),表明该时期盆地局部存在强烈的挤压作用,并发生了构造反转,形成不对称断弯褶皱。上中新统(T40—T30)代表了盆地裂后热沉降阶段陆架—陆坡体系的发育,发生大规模的前积,凹陷地层较厚而凸起地层较薄。上新统和第四系地层分布广、厚度大,几乎不发育断层。

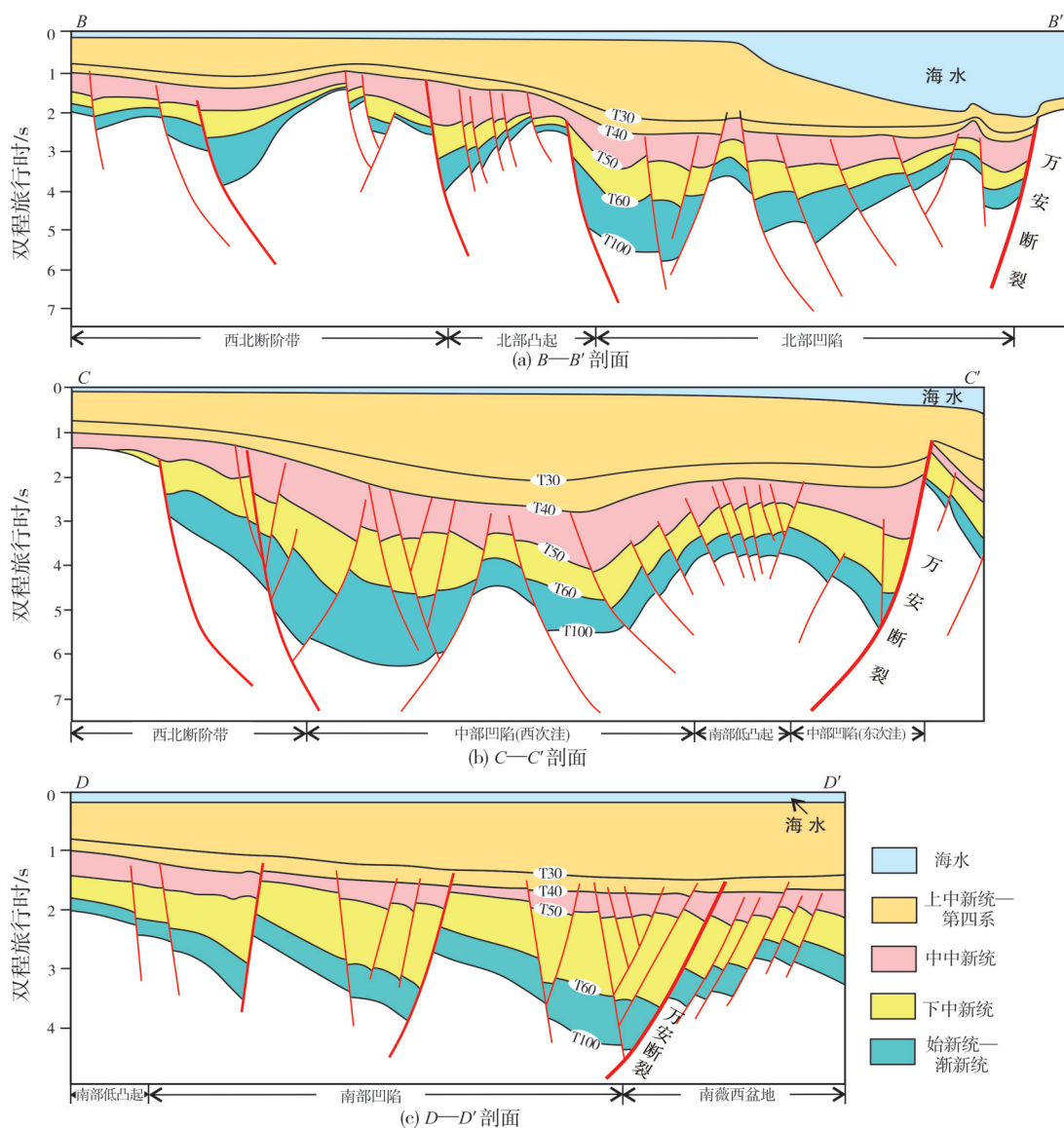


图3 万安盆地区域地质剖面(位置见图1a)

Fig. 3 Regional geological profiles in Wan'an Basin (section location is shown in Fig. 1a)

3 断裂体系及构造演化特征

3.1 断裂展布特征

万安盆地经历了多期次构造运动的叠加,断裂系统主要发育于T40界面以下(图2,图3)。断裂系统从走向上可划分为4组(图4):NE、NNE、NW及EW,其中NE—NNE向断裂分布最为普遍,控制了盆地的构造格局。根据断裂的展布特征及控制作用可划分为3个级次:

一级断裂 万安断裂是盆地的东部边界断裂,亦是控盆断裂,主体为NNE走向(图4),延伸上百公里,是一条形成时代早且多期活动的走滑伸展断裂

带,由帚状断裂系统组成。该断裂切割深度大,剖面上多表现为上陡下缓的铲式结构(图2,图3),局部可见岩浆刺穿构造顺断裂带发育。万安断裂与北部南海西缘断裂带属于同一走滑断裂系统,是南沙地块与印支地块的分界,新生代以来发生左旋或右旋多期走滑运动,控制了万安盆地的形成与演化。

二级断裂 主要控制盆地内部的构造单元,多为控制各构造单元的边界断层,大多为NE、NNE走向(图4),一般延伸几十公里,形成时代较早。

三级断裂 主要控制凹陷内的局部构造带,断裂规模小,数量多,NE—NNE走向占优势(图4),剖面上大多呈板状正断层。

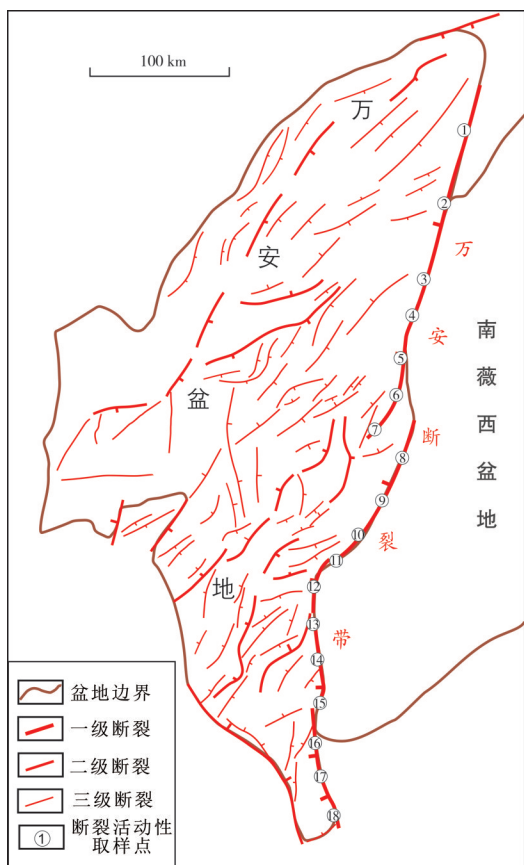


图4 万安盆地断裂平面展布特征

Fig. 4 Plane distribution of faults in Wan'an Basin

3.2 主干断裂活动性

万安盆地的主控盆断裂和次级控凹断裂活动

性表现出多期次性。以万安断裂为对象,选取多条典型剖面(自北向南共18个样点,位置见图4)计算始新世—渐新世(T100—T60)、早中新世(T60—T50)、中中新世(T50—T40)和晚中新世(T40—T30)4个时期的断层活动速率(图5)。结果表明:万安断裂活动时间长,不同区段活动性差异十分明显,体现了断裂对盆地形成演化的差异控制作用。

始新世—渐新世,万安断裂活动强烈,以中部凹陷为活动中心,向两侧逐渐减弱:中部凹陷的断层活动速率较大,达到107 m/Ma,具有明显的控沉积作用;北部凹陷次之,断层活动速率最大为81 m/Ma;南部凹陷最弱,断层活动速率最大为37 m/Ma。

早中新世,受南海西南次海盆扩张的影响,区域伸展作用增强,万安断裂活动速率增大,尤其是中部凹陷与南部凹陷,断层活动速率最大分别达到183 m/Ma、85 m/Ma。

中中新世,南海南部构造格局基本定型,靠近洋盆的地区沉降加快,万安断裂活动速率自北向南减弱,中部凹陷断层活动速率最大达到178 m/Ma。同时,北部凹陷、中部凹陷内部可见明显的挤压反转结构(图2a, 2b),可能是南海西缘断裂带剪切力的变化导致先存断裂的再活动。

晚中新世,万安盆地构造活动减弱,断层活动速率明显降低,万安断裂微弱活动或不活动,主体活动速率小于20 m/Ma。

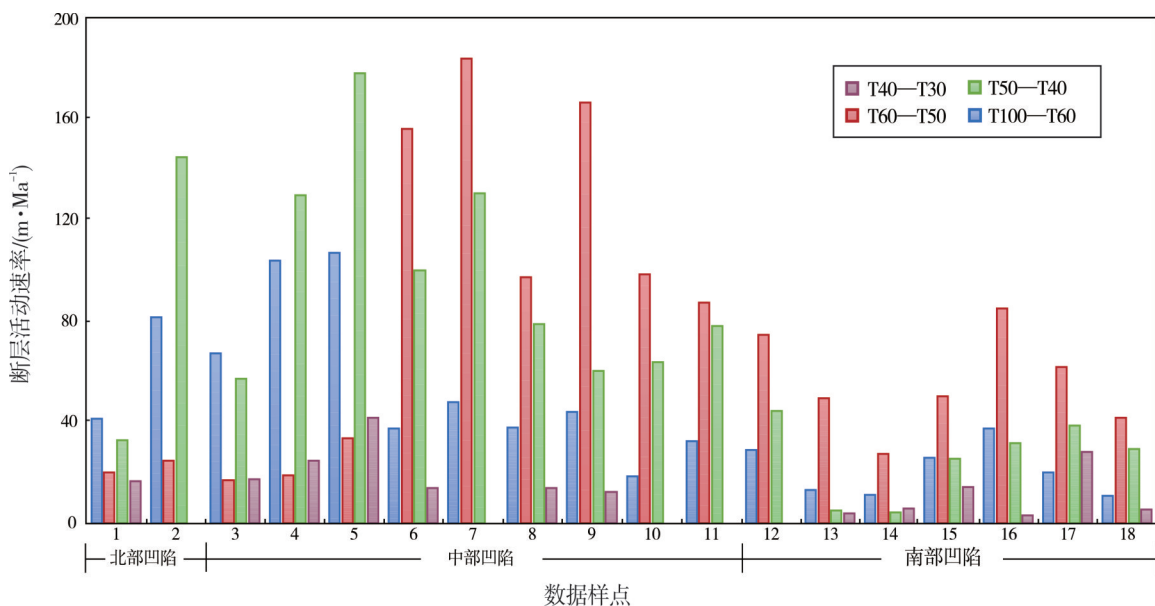


图5 万安断裂活动性分析直方图

Fig. 5 Activity analysis histogram of Wan'an Fault

3.3 构造演化特征

基于万安盆地构造-地层格架及构造发育特征,将盆地构造演化划分为3期4个阶段(图1b,图6)。

始新世—渐新世裂陷一幕 晚始新世印度板块与欧亚板块碰撞,欧亚大陆之下的地幔向东南方向蠕动,印支地块沿南海西缘断裂带向东南挤出,并发生顺时针旋转。万安盆地正是在这种块体旋转和欧亚板块向东南产生的区域拖曳力作用下于渐新世初形成一系列由张性断层所控制的地堑和半地堑。渐新世中期,南海中央海盆开始近南北向海底扩张,万安断裂发生右旋走滑运动,在派生的NW—SE向扭张作用下,万安盆地进入主要裂陷期,形成大量伴生的NE、NNE向断裂和一系列相互分割的NE—SW向的走滑伸展地堑。该时期伸展作用主要发生在万安盆地中北部,形成中部凹陷和北部凹陷2个沉降中心。

早中新世裂陷二幕 早中新世,盆地北部继承早期的构造格局,盆地中部凹陷、南部凹陷断裂活动加强,这与南海中央海盆洋中脊跃迁、西南次海盆开始由东往西呈NW—SE向渐进式海底扩张作用相关。中部凹陷处于南海西南次海盆扩张脊的延伸线上,是万安盆地断裂活动速率最大的二级构造单元。

中中新世反转期 中中新世,随着南沙地块与婆罗洲地块发生碰撞,发生南沙运动(沙巴造山运动),南海扩张终止,南沙地区各盆地形成区域性的构造抬升与褶皱变形,并形成明显的区域不整合界面。受区域性挤压作用的影响,万安断裂从右旋走滑转变为左旋走滑,在研究区产生NW—SE向的压扭作用,地层在靠近断裂的部位发生明显的构造反转,而远离万安断裂,其褶皱变形则逐渐减弱。

晚中新世以来裂后热沉降期 晚中新世以来,万安盆地进入裂后期被动大陆边缘演化阶段,以热沉降为主,断层活动性较小,以陆架—陆坡沉积体系为主。

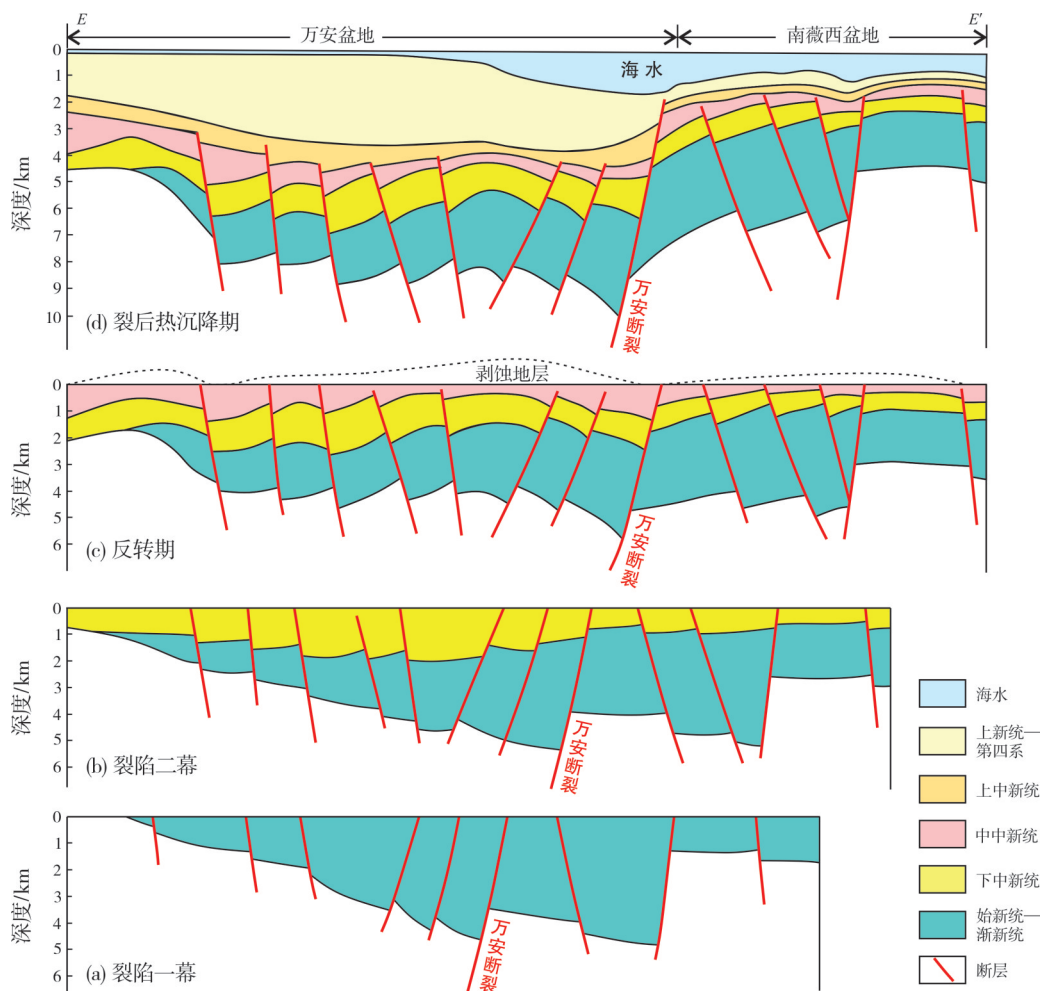


图6 万安盆地构造演化剖面图(剖面位置见图1a)

Fig. 6 Tectonic evolution profile in Wan'an Basin (section location is shown in Fig. 1a)

4 构造对油气分布的控制

4.1 油气分布特征

截至2020年,万安盆地内已发现42个油气藏。按油气藏赋存的地层、储层类型及圈闭类型分别进行统计分析(图7),结果表明:万安盆地油

气藏主要发育在渐新统一中新统的三角洲、碳酸盐岩储层中;圈闭类型主要为伸展构造、地层圈闭、挤压反转构造、基岩潜山及岩性圈闭。按油气藏流体类型的平面分布,油气藏整体具有“外油内气”的分布特点(图1a),体现了凹陷热演化控制油气分布的特征。

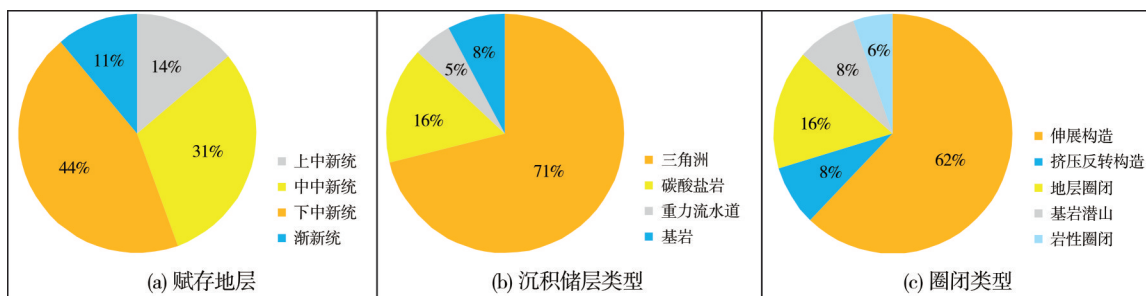


图7 万安盆地油气藏分布饼状图

Fig. 7 Pie charts of oil and gas fields distribution in Wan'an Basin

4.2 断裂控制生烃凹陷, 烃源岩类型及成熟度控烃

受万安断裂差异性活动的影响,各凹陷裂陷期渐新统一下中新统厚度差异明显:中部凹陷厚度超过6 000 m;北部凹陷厚度为3 000~5 000 m;南部凹陷为2 000~3 000 m。

万安盆地主要发育渐新统一下中新统的海陆过渡相泥岩与煤系烃源岩。渐新统烃源岩岩性以灰色—褐灰色泥岩、页岩为主,夹有煤层,含有孔虫

及植物碎片,其中泥岩、页岩的有机碳含量高达1%~10%,干酪根类型以Ⅱ₁-Ⅱ₂型为主。下中新统烃源岩岩性为暗灰色泥岩和页岩,夹煤层,其中泥岩、页岩的有机碳含量为0.69%~0.93%,干酪根类型以Ⅱ₂-Ⅲ型为主^[2]。

不同生烃凹陷的烃源岩分布及热演化具有差异性(图8):中部凹陷烃源岩埋深大,热演化程度高,早期生油,晚期油气兼生,以生气为主;南部凹陷和北部凹陷烃源岩埋深相对较小,热演化程度

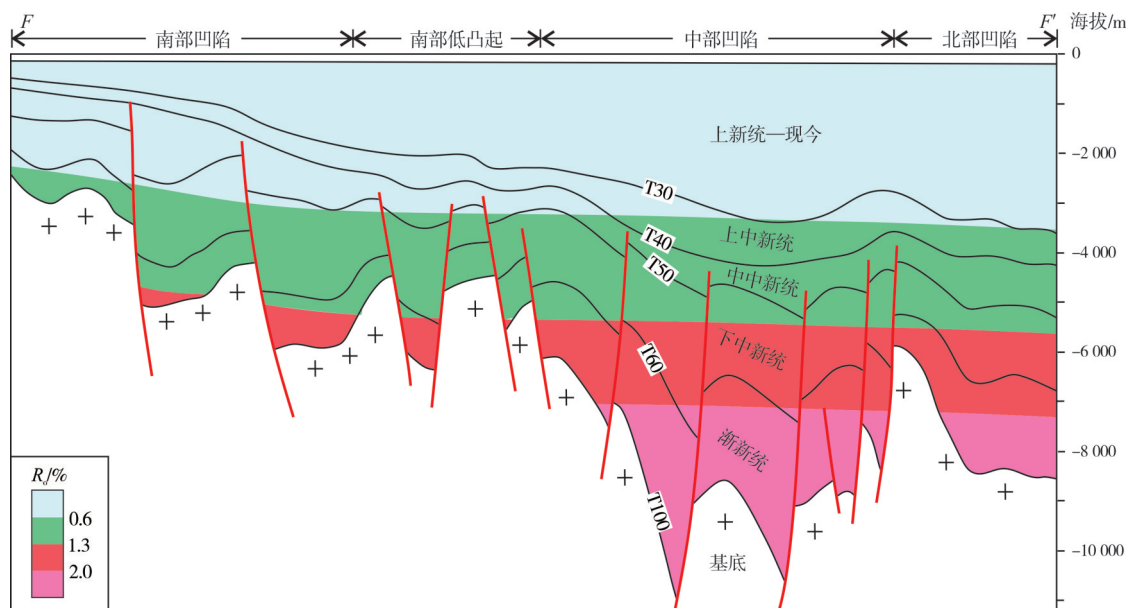


图8 万安盆地热演化剖面图(剖面位置见图1a)

Fig. 8 Thermal evolution profile in Wan'an Basin (section location is shown in Fig. 1a)

较低,油气兼生。万安盆地油气整体具有“外油内气”的分布特点,受烃源岩及其热演化双重因素控制:外环带的油田分布受渐新统海陆过渡相烃源岩及相对低的热演化控制;内环带气田分布主要受渐新统、下中新统海陆过渡相—海相烃源岩(陆源)及相对高的热演化控制。

4.3 构造格局控制大中型油气藏的分布

从构造格局来看,在万安断裂的控制下,盆地东缘至中部主体呈“坳中隆”结构,发育大型的鼻状构造、反转构造,油气多富集于中—上中新统碳酸盐台地、重力流水道等大型储集体;盆地西缘主体

呈斜坡结构,发育大型的断块、断鼻构造,油气多富集于渐新统一下中新统三角洲储集体中(图9)。

(1) 凸起带控制披覆背斜、地层圈闭油气藏分布

万安盆地北部凸起和南部低凸起是中部凹陷周缘的两个大型正向构造单元,凸起上发育一系列新近系披覆背斜圈闭与碳酸盐台地地层圈闭。北部凸起靠近昆仑隆起、纳土纳隆起等物源区,下中新统一中中新统发育大型三角洲沉积,储层具有埋深浅、物性好的特征,上覆裂后沉降期的区域性泥岩盖层,与下伏延伸至生烃灶内的“断—砂—脊”输导体系配合形成了良好的生储盖组合与油气运移通道。如已发现的大熊油田,为典型的披覆背

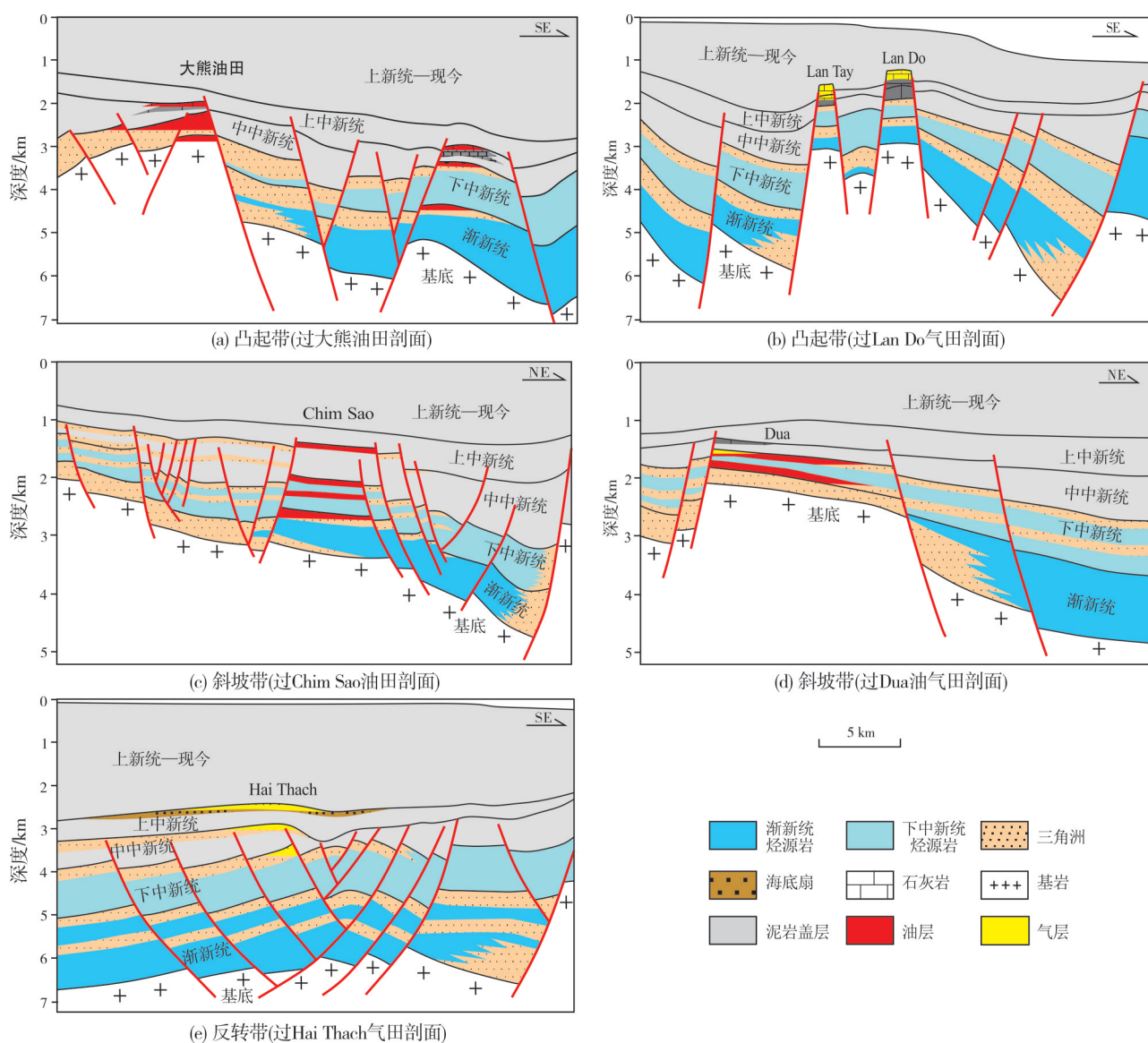


图9 万安盆地不同构造带典型油气成藏模式图

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation models in different tectonic zones of Wan'an Basin

斜油气藏(图9a)。南部低凸起远离物源区,中中新统一上中新统发育大型碳酸盐台地,因处于水下高地,受大气淋滤、海浪改造作用较多,其储层孔隙度为20%~40%,渗透率最大可达 $2\,000\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,是非常优质的储层,与上覆区域性泥岩盖层形成有利的储盖组合,且具有多洼环绕、多源汇聚的油气成藏条件,已钻探发现 Lan Tay、Lan Do 等多个气田(图9b)。

(2) 斜坡带控制中型断鼻、断块油气藏分布

万安盆地中部凹陷整体上为东断西超的箕状凹陷,断陷期地层向西减薄并超覆在斜坡带,整体上为断层发育的单斜背景,受控凹断层、反向断层与古地貌共同控制发育了一系列断块、断垒,形成一系列中小型构造圈闭。斜坡带紧临隆起、凸起,靠近物源,发育近源的河流、三角洲砂体,可与渐新统前三角洲泥岩、下一中中新统浅海相泥岩形成有利的储盖组合,并与构造带上广泛发育的断裂在纵横向相互叠加,形成“网毯”式输导体系,为油气的立体输导提供了有利条件,从而极大地拓展了油气成藏的空间范围,形成了多个油气富集带,具有油

组多、成藏层系多的特点。由于断块、断鼻圈闭规模相对较小,油气藏规模以中小型为主,如已发现 Chim Sao、Dua 等油气田(图9c,9d)。

(3) 反转带控制大型复式油气藏分布

中中新世,盆地中部凹陷中部发生挤压反转隆升,形成多个大型反转构造带,其与来自西部的三角洲和浅海沙坝砂体叠置,断裂沟通下伏生烃主洼。晚中新世,万安盆地逐渐形成陆架、陆坡体系,中部凹陷自西向东发育大型海底扇、浊积砂岩,与上覆浅海、半深海泥岩形成有利的储盖组合。受下伏反转带地貌影响,上中新统形成了一系列与下伏反转带叠置的披覆构造圈闭和构造-岩性复合圈闭。由此,中部凹陷反转带自下而上形成多层“开花”的复式油气藏,如已发现的 Hai Thach 等油气藏(图9e)。

综上所述,万安盆地已发现的油气藏具有明显的分区、分带特征:油气近源成藏,呈环带分布,有利生烃凹陷周缘的凸起带、斜坡带、反转带已证实为油气聚集的有利地区,具有先成凸起带优势成藏、斜坡带立体成藏、中央反转带复式成藏的油气富集规律(图10)。

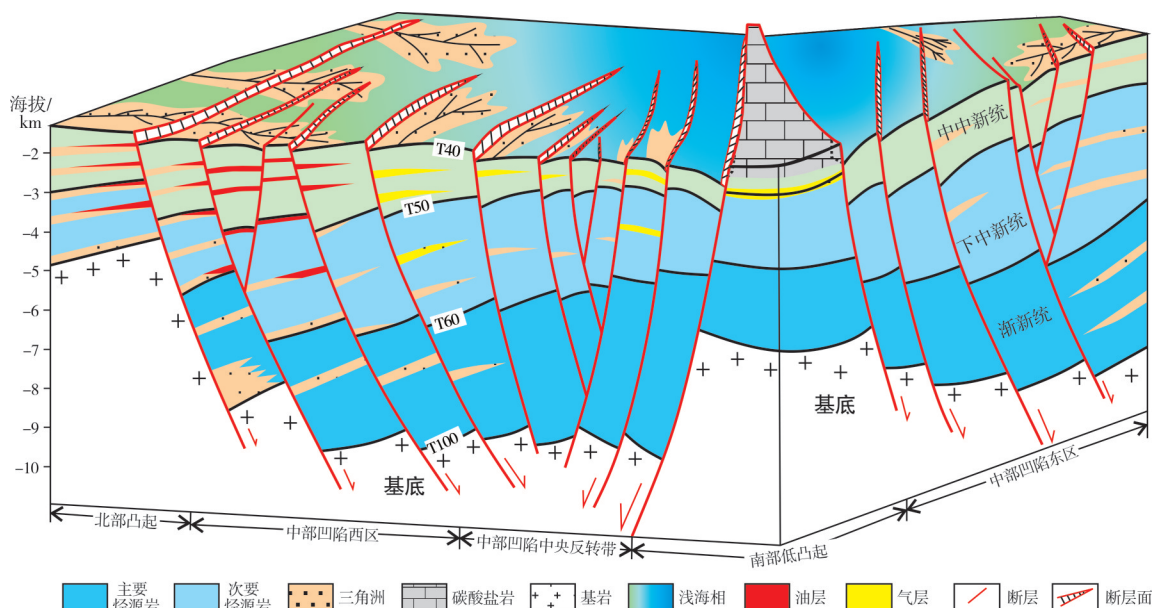


图10 万安盆地油气成藏立体模式图

Fig. 10 Stereoscopic pattern of hydrocarbon accumulation in Wan'an Basin

5 结 论

(1) 基于精细的地震解释,识别出万安盆地新生代重要构造变革界面及其不整合面反射特征,其中 T100(古近系底界)、T60(新近系底界)、T40(上中新

统底界)是万安盆地不同时期结构构造、层序样式的关键分界面。断裂主要发育于T40界面以下,其中NE、NEE向断裂最为发育并控制了盆地构造格局。万安断裂作为控盆断裂,在不同时期、不同区段的活动性差异明显。万安盆地的构造演化可划

分为裂陷期(裂陷一幕、裂陷二幕)、反转期、裂后热沉降期。

(2) 受烃源岩及其热演化双重因素控制, 万安盆地油气藏具有“外油内气”的源控分布特征: 中部凹陷埋深大, 热演化程度高, 早期生油, 晚期油气并举、以生气为主; 南部凹陷和北部凹陷埋深相对较小, 热演化程度低, 整体上油气兼生。

(3) 万安盆地油气田的时空分布与其构造背景相关: 凸起带主要发育大型披覆构造, 斜坡带主要在凹陷边缘发育裂陷期断块、断垒构造, 反转带主要在凹陷中心发育大型反转构造。中部凹陷周缘的凸起带、斜坡带、反转带已证实为油气聚集的有利地区, 具有先成凸起带优势成藏、斜坡带立体成藏、中央反转带复式成藏的油气富集规律。

参考文献

- [1] 金庆焕, 刘振湖, 陈强. 万安盆地中部坳陷: 一个巨大的富生烃坳陷[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 525-530.
JIN Qinghuan, LIU Zhenhu, CHEN Qiang. The central depression of the Wan'an Basin, South China Sea: a giant abundant hydrocarbon-generating depression [J]. Earth science, 2004, 29(5): 525-530.
- [2] 赵志刚, 刘世翔, 谢晓军, 等. 万安盆地油气地质特征及成藏条件[J]. 中国海上油气, 2016, 28(4): 9-15.
ZHAO Zhigang, LIU Shixiang, XIE Xiaojun, et al. Hydrocarbon geological characteristics and reservoir forming conditions in Wan'an Basin, South China Sea [J]. China offshore oil and gas, 2016, 28(4): 9-15.
- [3] 吴敬武, 孙国忠, 鲁银涛, 等. 南海油气藏类型及分布规律[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 29-38.
WU Jingwu, SUN Guozhong, LU Yintao, et al. Types and distribution of oil and gas reservoirs in the South China Sea [J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(3): 29-38.
- [4] 刘伯土, 陈长胜. 南沙海域万安盆地新生界含油气系统分析[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 110-114.
LIU Botu, CHEN Changsheng. Analysis on the Cenozoic petroleum system in the Wan'an Basin, Nansha area [J]. Petroleum geology & experiment, 2002, 24(2): 110-114.
- [5] LÜ Caili, ZHANG Gongcheng, YAO Yongjian, et al. Tectonic evolution of the Wan'an Basin, southwestern South China Sea [J]. Acta geologica sinica, 2014, 88(4): 1120-1130.
- [6] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 113-122.
YAO Bochu, WAN Ling, WU Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the great South China Sea area [J]. Geology in China, 2004, 31(2): 113-122.
- [7] HALL R. Cenozoic plate tectonic reconstructions of SE Asia [J]. Geological Society of London, special publications, 1997, 126(1): 11-23.
- [8] HUTCHISON C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea [J]. Marine and petroleum geology, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [9] 杨木壮, 王明君, 梁金强, 等. 南海万安盆地构造沉降及其油气成藏控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 85-88.
YANG Muzhuang, WANG Mingjun, LIANG Jinqiang, et al. Tectonic subsidence and its control on hydrocarbon resources in the Wan'an Basin in the South China Sea [J]. Marine geology & Quaternary geology, 2003, 23(2): 85-88.
- [10] 钱光华, 樊开意. 万安盆地地质构造及演化特征[J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(2): 73-79.
QIAN Guanghua, FAN Kaiyi. The geological tectonic and its evolution in Wan'an Basin [J]. China offshore oil and gas (geology), 1997, 11(2): 73-79.
- [11] LÜ Caili, WU Shiguo, YAO Yongjian, et al. Development and controlling factors of Miocene carbonate platform in the Nam Con Son Basin, southwestern South China Sea [J]. Marine and petroleum geology, 2013, 45: 55-68.
- [12] 刘振湖. 南海万安盆地沉降作用与油气前景[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(4): 235-241.
LIU Zhenhu. Subsidence and hydrocarbon potential of Wan'an Basin, South China Sea [J]. China offshore oil and gas (geology), 1998, 12(4): 235-241.
- [13] 贺清, 全志刚, 胡根成. 万安盆地沉积物充填演化及其对油气藏形成的作用[J]. 中国海上油气, 2005, 17(2): 80-83, 88.
HE Qing, TONG Zhigang, HU Gencheng. Sediment filling and its effect on hydrocarbon accumulation in Wan'an Basin [J]. China offshore oil and gas, 2005, 17(2): 80-83, 88.
- [14] 王嘹亮, 刘振湖, 吴进民, 等. 万安盆地沉积发育史及其与油气生储盖层的关系[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(3): 144-152.
WANG Liaoliang, LIU Zhenhu, WU Jinmin, et al. Depositional history and its relationship to hydrocarbon of Wan'an Basin [J]. China offshore oil and gas (geology), 1996, 10(3): 144-152.
- [15] 吴蛟岐, 高红芳, 孙桂华. 南沙海域万安盆地地质构造与沉积体系特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 1-11.
WU Jiaoqi, GAO Hongfang, SUN Guihua. Geological structure and sedimentary systems of the Wan'an Basin, Nansha Waters [J]. Marine geology & Quaternary geology, 2012, 32(5): 1-11.
- [16] TJIA H D. Wrench-slip reversals and structural inversions: Cenozoic slide-rule tectonics in Sundaland [J]. Indonesian journal on geoscience, 2014, 1(1): 35-52.
- [17] TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIGO R. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. Geological Society of London, special publications, 1986, 19(1): 113-157.
- [18] 雷超, 任建业, 张静. 南海构造变形分区及成盆过程[J].

- 地球科学, 2015, 40(4): 744–762.
- LEI Chao, REN Jianye, ZHANG Jing. Tectonic province divisions in the South China Sea: implications for basin geodynamics[J]. *Earth science*, 2015, 40(4): 744–762.
- [19] MATTHEWS S J, FRASER A J, LOWE S, et al. Structure, stratigraphy and petroleum geology of the SE Nam Con Son Basin, offshore Vietnam [J]. *Geological Society of London, special publications*, 1997, 126(1): 89–106.
- [20] 段亮, 裴健翔, 张亚震, 等. 南海南部裂离型盆地构造特征[J]. *海相油气地质*, 2018, 23(4): 71–80.
- DUAN Liang, PEI Jianxiang, ZHANG Yazhen, et al. Tectonic characteristics of extensional detachment basin in southern South China Sea [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2018, 23(4): 71–80.
- [21] 张亚震, 裴健翔, 李俊良, 等. 南海南部海域构造-沉积演化及其对区域成藏组合的控制[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(5): 657–674.
- ZHANG Yazhen, PEI Jianxiang, LI Junliang, et al. Tectonic and sedimentary evolution and its controlling effects on regional petroleum plays in the southern South China Sea [J]. *Natural gas geoscience*, 2021, 32(5): 657–674.
- [22] 鲁海鸥, 胡晨晖, 张亚震, 等. 万安—南薇西盆地构造特征及其构造区划认识[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(5): 106–107, 109.
- LU Haiou, HU Chenhui, ZHANG Yazhen, et al. Tectonic features and tectonic zoning in Wan'an and Nanweixi Basin [J]. *China petroleum and chemical standard and quality*, 2020, 40(5): 106–107, 109.
- [23] DUNG B V, TUAN H A, VAN KIEU N, et al. Depositional environment and reservoir quality of Miocene sediments in the central part of the Nam Con Son Basin, southern Vietnam shelf [J]. *Marine and petroleum geology*, 2018, 97: 672–689.

编辑:董庸

Tectonic characteristics and its control on hydrocarbon accumulation in Wan'an Basin

ZHANG Yazhen, PEI Jianxiang, GAN Jun, DU Yike, SHI Defeng

Abstract: Wan'an Basin is a typical strike-slip extensional basin in multi-plate superimposed area of southern South China Sea. Due to the complex geological conditions and lower research degree in China, the structural characteristics of major depressions are lack of targeted research, which limited the understanding of the potential and distribution of oil and gas resources. Based on fine seismic interpretation, the tectonic transformation change and its unconformity characteristics, fault systems and tectonic evolution characteristics, and the control of structures on oil and gas distribution are analyzed in Wan'an Basin. T100 (pre Cenozoic basement interface), T60 (Neogene bottom interface), T40 (upper Miocene bottom interface) are the key geological interfaces of structure and sequence in different periods with response to regional tectonic events. The tectonic evolution of Wan'an Basin can be divided into rifting period including two episodes (T100–T60, T60–T50), inversion period (T50–T40), and post rifting thermal subsidence period (T40–). Faults are mainly developed below the T40 unconformity. The most developed NE, NNE faults control the tectonic pattern of Wan'an Basin. As a basin controlling fault, Wan'an fault has strong early activity in rifting stage and weak late activity in the thermal subsidence stage, and has strong activity in the middle, followed by the north and south in space. Under the transformation of fault, the sag has a multi-depression structure, which reflects the characteristics of typical rift blocks and structural evolution differences. Based on the spatial and temporal distribution of typical oil and gas fields in Wan'an Basin, it is concluded that source rocks and their thermal evolution control the plane distribution of oil and gas fields, and uplift belt, slope belt and reverse belt around the favorable middle sag control the spatial distribution of oil and gas fields. On the whole, it has the oil and gas enrichment laws of preponderant accumulation in the pre bulge zone, three-dimensional accumulation in the slope zone, and compound accumulation in the central inversion zone.

Key words: tectonic framework; fault system; tectonic evolution; hydrocarbon distribution; Wan'an Basin; South China Sea

ZHANG Yazhen, First author: Geological Engineer, mainly engaged in the comprehensive research on petroleum geology in Nansha area. Add: Hainan Branch of CNOOC, Yufu International, Changbin 3rd Rd., Xiuying District, Haikou, Hainan 570312, China