

# 琼东南盆地陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用

张迎朝,甘 军,杨希冰,徐新德,朱继田,杨金海,杨 璐,李 兴

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司南海西部石油研究院,广东湛江 524057)

**摘 要:**琼东南盆地陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用成为深水区研究的热点。利用钻井地质、地震勘探资料,运用层序地层学、构造解析方法,认识了陵水凹陷的构造动力学机制和构造变形;探讨了陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用;提出了陵水凹陷经历了古新世—始新世断陷、渐新世坳—断、早中新世断—坳和中中新世—更新世坳陷(深水盆地)4 期构造演化阶段的新认识,并认为构造演化控制了深水大气田的形成。①古新世—始新世断陷、渐新世坳—断作用分别控制了湖相、海陆过渡相—海相烃源岩分布,中中新世—第四纪坳陷作用拓宽了烃源岩生气时窗;②渐新世坳—断作用控制发育了扇三角洲储层,中中新世—更新世坳陷作用控制发育了深水限制型、非限制型碎屑岩储层和碳酸盐岩生物礁储层;③渐新世坳—断演化阶段以走滑—伸展构造变形为主,控制发育了断鼻、断背斜圈闭,中中新世—更新世坳陷作用控制发育了深水限制型重力流水道砂岩性圈闭群、非限制型盆底扇岩性圈闭和生物礁地层圈闭;④渐新统、中中新统地层超压产生断裂/裂隙,构成了良好的天然气输导体系。

**关键词:**构造演化;构造变形;构造动力学;深水大气田;陵水凹陷

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.10003

## 1 研究背景

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘,盆地基底发育在华南加里东褶皱带上<sup>[1]</sup>,后期受大量燕山期花岗岩侵入影响,基底埋深 7~13 km,西深东浅<sup>[2]</sup>。目前钻井揭示盆地盖层最老的地层为始新统岭头组,油气地球化学分析和地震勘探资料解释推断始新统为湖相沉积。下渐新统崖城组为

海陆过渡相、滨海—浅海相沉积,上渐新统陵水组为滨海—浅海相沉积。中新世开始,沉积了中中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组和第四系更新统乐东组,主要为滨海—浅海相、半深海—深海相沉积。

本文论述的陵水凹陷位于琼东南盆地中央坳陷(图 1),现今陵水凹陷北部为浅水区,南部为深水(水深>300 m)。近期在陵水凹陷深水上新统莺歌海组—上中新统黄流组岩性圈闭领域获得重大天然气发现<sup>[3-5]</sup>,L17 是琼东南盆地深水首个探明储量超千亿立方米的大气田,其发现“证实”了陵水富生气凹陷。

作为已被“证实”了的富生气凹陷,中外学者和勘探家们特别关注陵水凹陷构造演化及对深水大气田形成的控制作用。近期尚未有针对陵水凹

收稿日期:2017-06-05

基金项目:国家“十三五”科技重大专项“琼东南盆地深水大中小型气田形成条件与勘探关键技术”(2016ZX05026-002)

作者简介:张迎朝(1971—),男,博士,教授级高级工程师,长期从事南海层序地层与沉积学、构造地质学和油气成藏综合研究工作。E-mail:zhangyingzh@cnoc.com.cn

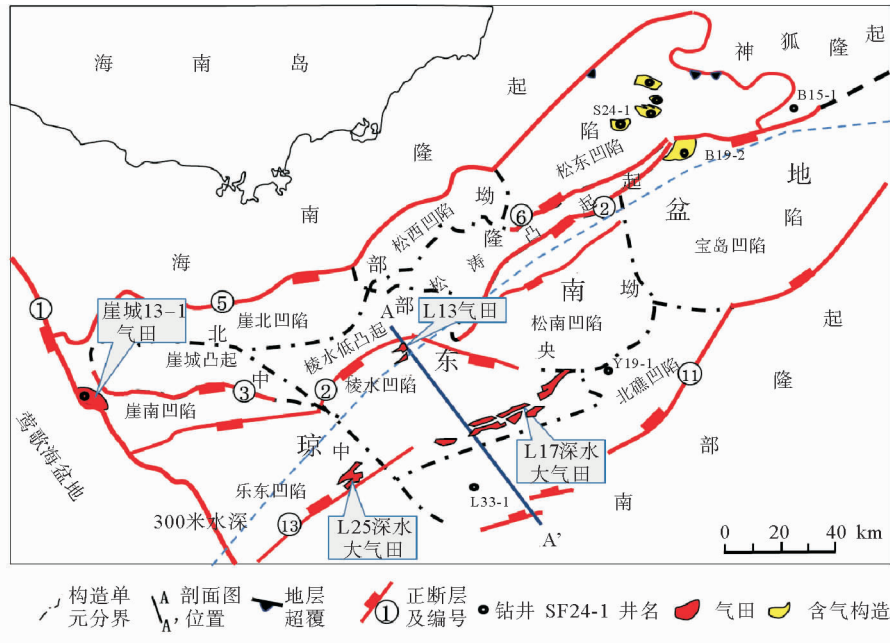


图 1 琼东南盆地构造区划 (据文献[3]修改)

Fig. 1 Tectonic division of the Qiongdongnan Basin (modified from reference [3])

陷构造演化的研究成果发表。前人开展过琼东南盆地及邻区的构造地质研究,提出了多种盆地及邻区构造演化阶段划分方案,如根据钻井及地震勘探资料分析认为,南海北部新生代盆地发育“同裂陷、裂后”双层结构<sup>[6,7]</sup>;依据南海北部新生代沉积特征,将南海北部新生代构造运动划分为早古新世的神狐运动、早始新世末的珠琼运动一幕、中始新世末的珠琼运动二幕、早渐新世末的南海运动及中晚中新世的南沙运动 5 期<sup>[8]</sup>;依据钻井及地震勘探资料揭示的构造特征认为,南海北部深水区新生代经历了裂谷期、热沉降期和准被动大陆边缘 3 个构造演化阶段<sup>[9]</sup>;依据钻井及地震资料构造解析认为,深水区新生代发育“断陷、裂后拗陷、裂后洋盆”3 层结构<sup>[10]</sup>。归结来看,目前人们对于琼东南盆地构造演化认识并不统一,因此,如何认识陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用是当前琼东南盆地深水区勘探首要解决的问题,具有重要的科学理论意义和勘探指导意义。

钻井、层序地层解释是厘定盆地重要构造层序界面的主要手段。断裂体系和构造样式及演化序列是盆地构造演化历程的重要记录。因此,本文在钻井、层序地层解释基础上,开展了断裂体系

与构造样式及演化序列分析,探讨了陵水凹陷构造演化与深水大气田形成的关系,为深水天然气聚集区的预测、勘探部署提供了科学依据。

## 2 陵水凹陷构造演化

在钻井、层序地层解释基础上,笔者认为陵水凹陷发育 4 个关键构造界面,由老而新分别是古近系底面(Tg)、始新统岭头组顶面(T80)、上渐新统陵水组顶面(T60)和下中新统三亚组顶面(T50)。综合断裂体系、构造样式及其演化序列分析,本文提出将陵水凹陷新生代划分为 4 个构造演化阶段,即古新世—始新世断陷、渐新世拗—断和早中新世断—拗和中中新世—第四纪拗陷(深水盆地)演化阶段。

### 2.1 古新世—始新世断陷演化阶段

在古新世—始新世,西太平洋板块沿 NWW 向欧亚板块俯冲<sup>[11,12]</sup>,地幔物质上涌,弧后拉张效应造成琼东南盆地区处于伸展应力状态,使陵水凹陷发生大规模断陷作用,产生了以 NE—SW 走向为主的伸展断裂。同时,受红河断裂左旋走滑影响<sup>[13]</sup>,凹陷东部发育了 NW—SE 走向的走

滑断裂。因此,在古新世—始新世时期,在太平洋板块向欧亚板块 NWW 向俯冲以及红河断裂左旋走滑影响下,陵水凹陷主要发育了 NE—SW、NW—SE 走向的断裂。

Tg、T80 界面是陵水凹陷古新世—始新世断

陷演化阶段的区域性不整合面。古新世—始新世陵水断陷为北部边界受 2-1 号断裂控制的半地堑(图 2a)。根据深水区 Y19-1 井发现的下中新统三亚组原油碳同位素特征、地震勘探资料分析,推断始新统为湖相沉积。

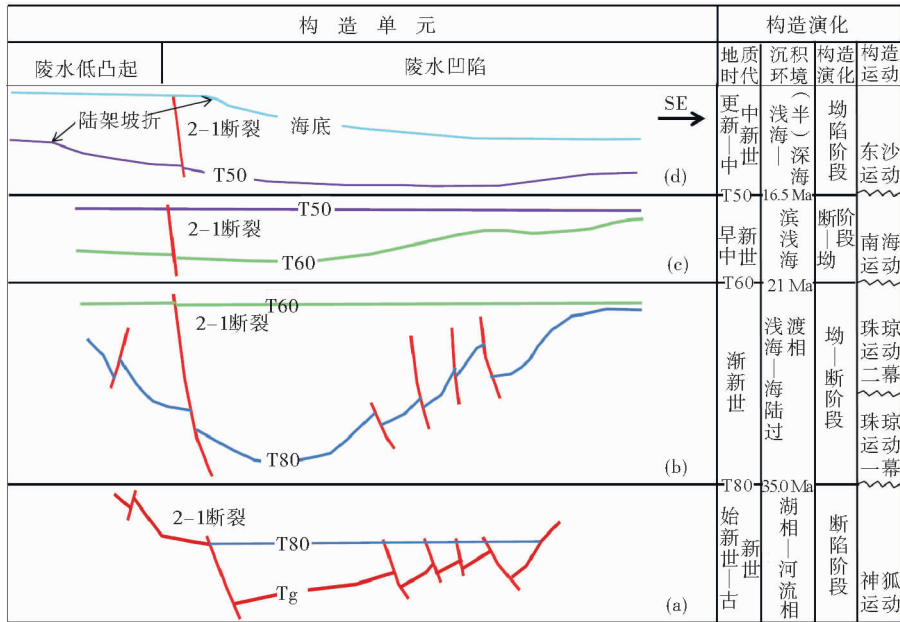


图 2 陵水凹陷构造演化示意图

Fig. 2 Structural evolution of the Lingshui Sag

在古新世—始新世断陷演化阶段,陵水凹陷主要发育伸展断裂体系,断裂走向为 NE—SW;在凹陷东部发育了 NW—SE 走向的走滑断裂(图 3)。凹陷北部发育控凹 2-1 号断裂,代表凹陷发生了强烈伸展活动,控制了凹陷快速拉张并沉积

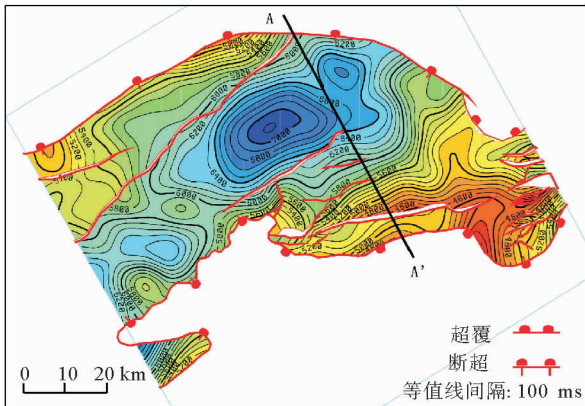


图 3 陵水凹陷始新统顶部 T80 等 t0 图

Fig. 3 The structural map of top Eocene(T80) of the Lingshui Sag

充填了较厚的古新统一始新统;南部斜坡发育反向正断裂,断裂规模小。因此,古新世—始新世陵水凹陷呈现了半地堑特征(图 4),代表了岩石圈在区域伸展构造应力场作用下发生破裂、沉陷而形成的结构形态。

陵水凹陷古新统一始新统发育大型同生控凹伸展断裂构造样式、缓坡反向正断裂构造样式。大型同生控凹伸展断裂构造样式分布在凹陷北部,如 2-1 号断裂;南部斜坡等发育缓坡反向正断裂构造样式(图 5a)。

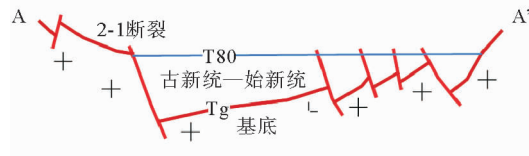


图 4 陵水凹陷古新世—始新世半地堑(剖面位置见图 3)

Fig. 4 Paleocene-Eocene half-graben of the Lingshui Sag (see fig. 3 for profile location)

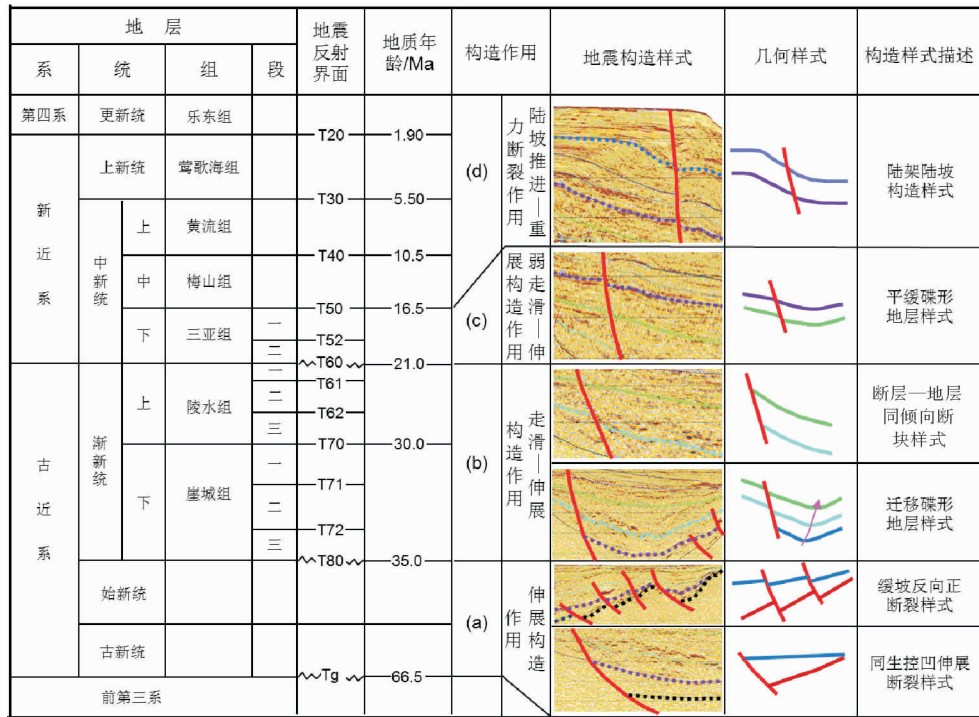


图 5 陵水凹陷主要构造样式

Fig. 5 Major structural styles of Lingshui Sag

2.2 渐新世坳—断演化阶段

自渐新世以来,太平洋板块向西俯冲,南海海盆地幔物质隆升,海底开始扩张<sup>[14,15]</sup>,发育 E—W 走向断裂。笔者认为,随着区域伸展构造应力场由古新世—始新世 NW—SE 向伸展向 S—N 向伸展转换,使早期 NE—SW 走向伸展断裂带产生走滑—伸展构造变形。

T60 界面是古近系和新近系之间的破裂不整合面,也是渐新世坳—断转入早中新世断—坳演化阶段之间的不整合面(图 2b)。渐新世陵水凹陷北部地层受 2-1 号断裂限制,但此时构造沉降、地层沉积中心不沿 2-1 号断裂分布,代表了地壳构造沉降减缓,使凹陷区发育了大规模的海陆过渡相和浅海相沉积,陵水凹陷南部低凸起区 L33-1 井下渐新统崖城组为海陆过渡相沉积,上渐新统陵水组为浅海相沉积,与古新世—始新世断陷演化阶段有着显著差异,尤其是控制了本区早渐新世陆源海相烃源岩的规模发育和分布,对天然气勘探意义重大。因此,本文将渐新世划分为坳—断演化阶段,有别于以往学者将古近纪划归

断陷演化阶段的观点。

渐新世区域构造应力场由古新世—始新世 NW—SE 向伸展应力顺时针转换为 S—N 向伸展应力。先存 NE—SW 走向断裂,在平行断裂面的左旋走滑力偶和垂直断裂走向的伸展构造应力作用下,发生走滑—伸展构造变形,由此提出有别于先存古新世—始新世伸展断裂体系的“渐新世走滑—伸展断裂体系”新类型。NE—SW 走向走滑—伸展断裂主要是陵水凹陷北部的 2-1 号断裂(图 6),在平面上,这类走滑—伸展断裂派生同向或反向调节断裂,且与主干断裂相接,调节断裂以 E—W 走向为主,南斜坡断裂为近 E—W 走向;在倾向上,因走滑—伸展构造变形,靠近 2-1 号断裂的古新统一始新统和渐新统地层发生挤压或逆牵引变形;在走向上,沿 2-1 号断裂地层发生波状起伏构造变形,此时构造沉降、地层沉积中心不沿 2-1 号断裂分布,凹陷区呈坳—断特征(图 7)。

渐新世陵水凹陷 2-1 号断裂走滑—伸展构造变形控制发育了走滑—伸展构造样式,如断裂下降盘挤压区断层—地层同倾向断块样式、迁移碟形叠置地层变形样式(图 5b)。

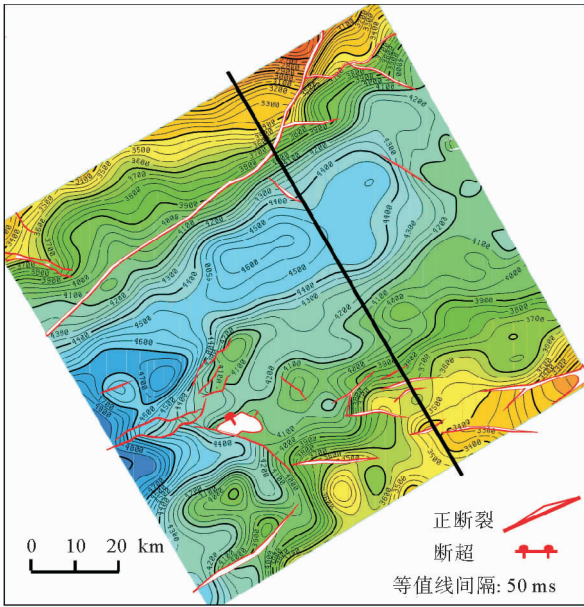


图6 陵水凹陷渐新统顶面 T60 等 t0 图

Fig. 6 The structural map of top Oligocene(T60) of the Lingshui Sag

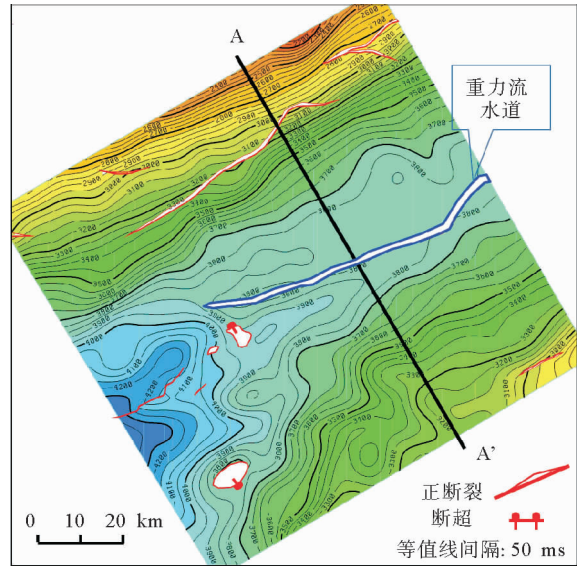


图8 陵水凹陷下中新统顶面 T50 等 t0 图

Fig. 8 The structural map of top Lower Miocene(T50) of the Lingshui Sag

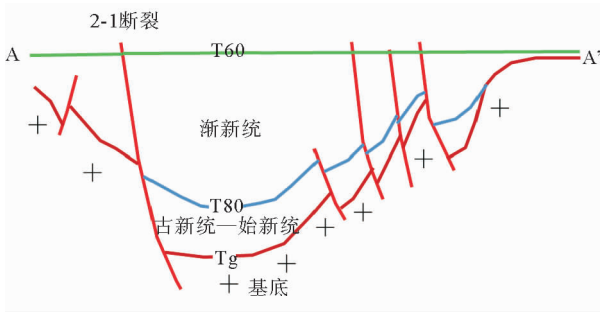


图7 陵水凹陷渐新世“坳—断”结构 (剖面位置见图6)

Fig. 7 Oligocene depressing-Faulting structure of the Lingshui Sag (see fig. 6 for profile location)

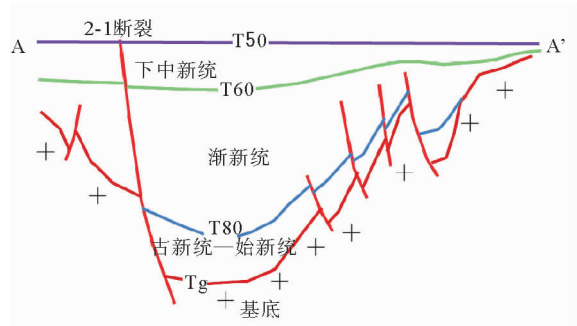


图9 陵水凹陷早中新世“断—坳”结构 (剖面位置见图8)

Fig. 9 Early Miocene Faulting-depressing structure of the Lingshui Sag (see fig. 8 for profile location)

### 2.3 早中新世断—坳演化阶段

至早中新世,受控于太平洋板块俯冲作用变弱、印度板块与欧亚板块持续碰撞,与渐新世断裂走滑—伸展构造变形相比,本文认为该时期陵水凹陷表现为弱走滑—伸展构造变形。

早中新世陵水凹陷是在坳陷基础上发生断裂作用,坳陷作用占主导,早中新世陵水凹陷处于断—坳演化阶段(图 2c)。

与渐新世构造变形强度相比,早中新世走

滑—伸展变形变弱(图 8),断裂以弱走滑—伸展作用为主,发育弱走滑—伸展断裂体系,凹陷中央地层厚、向南向北减薄,下中新统沉积不受 2-1 号断裂控制,陵水凹陷呈现断—坳结构特征(图 9)。

下中新统发育弱走滑—伸展构造样式(图 5c),平缓碟形地层变形样式,下中新统三亚组不受 2-1 号断裂活动控制,凹陷中地层最厚,向边缘减薄,地层厚度横向变化明显小于渐新统。

## 2.4 中中新世—更新世坳陷(深水盆地)演化阶段

在该阶段,地动力主要表现为沉降,受红河断裂晚中新世以来的右旋走滑拉分、太平洋板块向欧亚板块 NW 向俯冲的双重作用,尤其是受红河断裂走滑拉分影响<sup>[16,17]</sup>,琼东南盆地中西部沉降作用加剧,成为整个盆地沉降、沉积中心,陵水凹陷区由陆架、陆坡和陆隆(或陆基)组成,具有欠补偿沉积特点。

据近期陵水凹陷区新钻井地层古水深分析,处于陵水凹陷盆底平原区的中中新统梅山组古水深超过 270 m<sup>[18]</sup>。本文综合层序地层研究认为,

自中中新世陵水凹陷进入坳陷(深水盆地)演化阶段(图 2d)。自中中新世以来,南海扩张趋于停止,陵水凹陷区构造沉降中心向南迁移,盆地南、北物源难以补偿性供给,凹陷北部出现了典型的沉积坡折,地震勘探资料清晰呈现陆架、陆坡、盆底平原沉积层序向海推进(图 10),在重力作用下,2-1 号断裂活化,但活动强度较之前显著降低,不控制沉积。整体显示了大陆边缘离散型盆地的典型结构特征。

中中新世以来,陵水凹陷发育陆架、陆坡、盆底平原沉积层序,随着沉积层序向海方向推进,凹陷北部 2-1 号断裂继承发育重力断裂构造样式(图 5d),断裂不控制沉积。

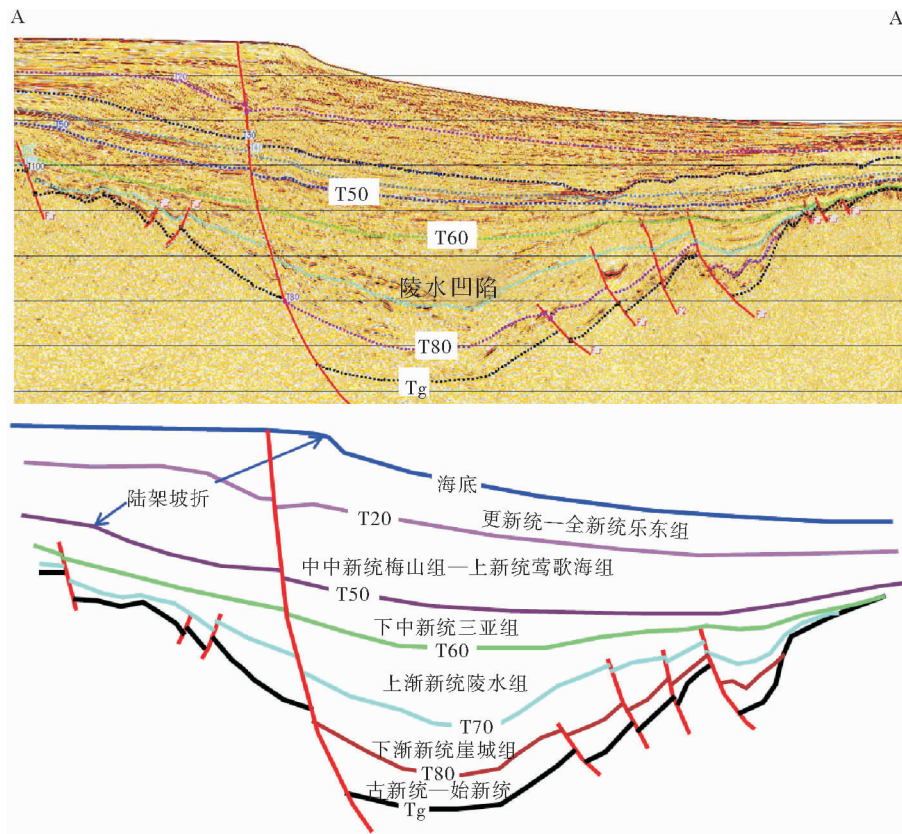


图 10 过陵水凹陷地震测线(1e30795)地质解释剖面

Fig. 10 Geological interpretation section of seismic line(1e30795) crossing the Lingshui Sag

## 3 陵水凹陷构造演化对深水大气田形成的控制作用

据资源评价表明,琼东南盆地陵水凹陷的天然气的资源量丰富。近两年,先后在陵水凹陷浅水、

深水区发现多个气田,取得了自 1983 年琼东南盆地崖城 13-1 大气田发现以来天然气勘探的重大突破。构造演化与油气成藏要素研究认为,陵水凹陷构造演化控制了烃源岩展布与热演化、储集体类型、圈闭形成与天然气输导体系,从而控制了 L17 深水大气田形成、分布。

### 3.1 古新统一始新世断陷、渐新世坳一断作用分别控制了湖相、海陆过渡相—浅海相烃源岩展布

在古新世—始新世，陵水断陷内沉积物具有多物源特点，自边缘至凹陷中心，发育冲积扇—河流—滨浅湖—中深湖沉积。古新统一始新统湖相烃源岩发育在控凹 2-1 号断裂下降盘一侧，北部厚，向南减薄，地震勘探资料预测最大厚度达 1 700 m，分布范围达 3 000 km<sup>2</sup>，推测以暗色泥岩、页岩为主，发育腐泥型有机质，现今处在高一过成熟阶段。邻区珠江口盆地钻探证实始新统发育湖相烃源岩，有机质丰度高，TOC 为 1.6%~1.95%，生烃潜量(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>)为 7.29~13.11 mg/g，氯仿沥青“A”及总烃分别为 0.160 7%~0.225 8%和 530~143 7 μg/g。若深水区不发育始新统湖相烃源岩，北礁凹陷北缘的 Y19-1 井中新统三亚组原油碳同位素就可能偏轻，而该井原油碳同位素与珠江口盆地 W19 油田来源于始新统湖相烃

源岩原油相似，由此本文推断陵水凹陷发育始新统湖相烃源岩。

在早渐新世，2-1 号断裂以走滑—伸展构造变形为主，相对于古新世—始新世断陷演化阶段，2-1 号断裂伸展活动强度变弱，古构造相对平缓，控制了中渐新统崖城组发育海陆过渡相、海相烃源岩(图 11)，分布范围达 5 000 km<sup>2</sup>，厚度最大可达 1 800 m，前者以腐殖型有机质为主，后者为腐泥型—腐殖型有机质，现今处在高成熟阶段。凹陷北部 2-1 号断裂一侧发育海相烃源岩；向南变为海陆过渡相，以灰色泥岩夹薄层含煤地层为主。陵水凹陷南部低凸起 L33-1 井揭示崖城组为海陆过渡相砂泥岩互层，见炭质碎片和煤线，总厚度 419 m，其中泥岩厚达 300 m，TOC 为 0.33%~1.17%，平均为 0.79%。气源对比和天然气成因分析表明，L17 深水大气田天然气来源于陵水凹陷下渐新统崖城组烃源岩生成的高成熟煤型气<sup>[19]</sup>。

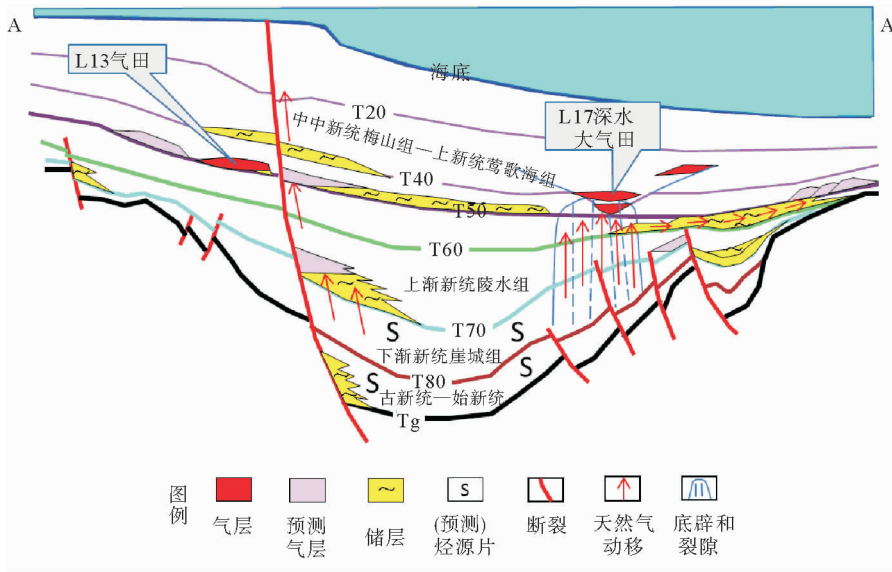


图 11 陵水凹陷 L17 深水大气田成藏模式 (据文献[3])

Fig. 11 Accumulation model of L17 deepwater giant gas field of the Lingshui Sag (from reference [3])

自北向南，从陆架浅水到陆坡盆底深水区，陵水凹陷区 2 套烃源岩热演化差异明显(图 12)。陵水凹陷凹中区始新统、下渐新统烃源岩热演化程度明显高于南斜坡带，前者始新统、下渐新统烃源岩现今分别达到 Ro=4.0%、2.0%以上，后者

分别达到 Ro=2.0%、1.3%~2.0%。本文认为随着中中新世进入坳陷(深水盆地)演化阶段，古深水明显“抑制”烃源岩热演化，至上新世晚期部分崖城组烃源岩仍处于 Ro=1.3%，古深水拓宽了烃源岩生气时窗，使得天然气充注时期与中新

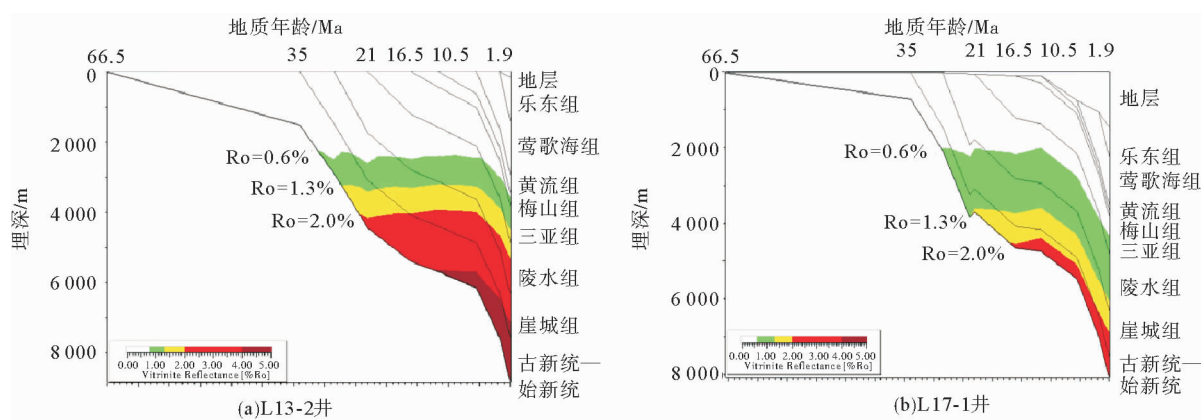


图 12 陵水凹陷钻井埋藏史及烃源岩热演化史 (据文献[3]修改)

Fig. 12 Evolution of burial history and source rock maturity of the Lingshui Sag (modified from reference [3])

统圈闭形成时期相匹配,有利于深水区类似 L17 大气田新近系晚期成藏。因此,古新统一始新统断陷、渐新统拗一断作用分别控制了湖相、海陆过渡相—浅海相烃源岩展布;中中新世以来的拗陷作用抑制了烃源岩热演化,拓宽了烃源岩生气时窗,有利于 L17 深水大气田上中新统黄流组天然气成藏。

### 3.2 渐新统拗一断、中中新世—更新世拗陷作用分别控制了浅水近源扇三角洲体系、深水碎屑岩和碳酸盐岩两大类储层

在渐新统拗一断演化阶段,陵水凹陷北部 2-1 号断裂陡坡带上渐新统陵水组发育近源扇三角洲,扇三角洲规模大,推测以中一粗砂岩为主,是断块或断鼻、岩性圈闭的主要储集类型。南部缓坡带古近系发育点物源三角洲或古构造高背景滩坝相储层。

自中中新世以来,盆地进入拗陷(深水盆地)演化阶段,陵水凹陷中新统、上新统陆坡—盆底平原区发育非限制型斜坡扇、盆底扇和凹中限制型重力水道砂,陆架区富砂三角洲体系为斜坡扇、盆底扇提供了丰富的砂质来源,斜坡扇、盆底扇储层发育(图 11)。勘探实践证实了凹中限制型重力水道砂富砂,钻探揭示了 L17 深水大气田上中新统黄流组优质储层,单层储层为 30~60 m,平均孔隙度为 28%,平均渗透率为  $337 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,钻杆地层测试(Drilling Stem Test)获高产天然气。中中新世以来南部缓坡带、凸起区为深

水环境,远离南、北部物源区,具有形成生物礁的条件,发育碳酸盐岩储集类型,是深水区重要的勘探后备领域。

### 3.3 渐新统拗一断、中中新世—更新世拗陷作用控制了多种类型圈闭形成

陵水凹陷不同构造演化阶段控制发育了多种类型圈闭。

在渐新统拗一断演化阶段,陵水凹陷以走滑—伸展构造变形为主,凹陷北部 2-1 号断裂受到左旋走滑力偶作用,陵水组及下部地层局部挤压抬升,发育断鼻圈闭;南部缓坡带古近系发育反向正断裂,形成反向断块、断鼻等圈闭。

在中中新世以来,陵水凹陷进入拗陷(深水盆地)演化阶段,陵水凹陷中新统、上新统发育斜坡扇/盆底扇和限制型重力流水道砂,富砂的斜坡扇和盆底扇(L13 气田)、限制型重力流水道砂被周边半深海—深海泥岩包裹,发育地层—岩性圈闭(L17 深水大气田);南部缓坡带、凸起区中中新统发育碳酸盐岩储层,能够形成生物礁地层圈闭。

### 3.4 渐新统拗一断、中中新世—更新世拗陷作用控制了天然气输导体系

天然气输导体系是油气从烃源岩到圈闭的运移通道。受近 S—N 向区域伸展构造应力作用,渐新统陵水凹陷内发育 NE—SW、近 E—W 走向的断裂体系,这些断裂是天然气自下渐新统崖城



组烃源岩向上渐新统陵水组断鼻圈闭运移的垂向通道。自中中新世以来,陵水凹陷区深部地层出现超压<sup>[20]</sup>,渐新统断裂体系因超压再次活化、开启,诱发底辟(图 11),下渐新统崖城组烃源岩生成的天然气沿底辟断裂/裂隙进入 L17 上中新统黄流组岩性圈闭,形成了天然气聚集。此外,南部斜坡带渐新统构造圈闭、中中新统生物礁地层圈闭是天然气运聚的重要方向之一,天然气先沿斜坡带断裂垂向运移,再与古近系三角洲或滩坝砂岩储层相接,进入渐新统构造圈闭、中中新统生物礁地层圈闭聚集。

## 4 结论

(1)陵水凹陷经历了古新世—始新世断陷、渐新世坳—断、早中新世断—坳和中中新世—更新世坳陷(深水盆地)4 期造演化阶段。

(2)陵水凹陷构造演化控制了深水大气田的形成,具有重大天然气成藏、勘探意义:①古新世—始新世断陷、渐新世坳—断作用分别控制了湖相、海陆过渡相—海相烃源岩分布,中中新世—第四纪坳陷作用拓宽了渐新统烃源岩生气时窗;②渐新世坳—断作用控制发育了扇三角洲储层,中中新世—更新世坳陷作用控制发育了深水限制型、非限制型重力流碎屑岩储层和碳酸盐岩生物礁储层;③渐新世坳—断演化阶段以走滑—伸展构造变形为主,发育了断鼻、断背斜圈闭,中中新世—更新世坳陷作用控制发育了深水限制型重力流水道砂岩性圈闭群、非限制型盆底扇岩性圈闭和生物礁地层圈闭;④渐新统、中中新统地层超压产生断裂/裂隙,沟通烃源岩,构成了天然气输导体系。

### 参考文献:

- [1] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等. 南海北部陆缘东部的地壳结构[J]. 地球物理学报,1994,37(1):27-35.
- [2] 于 鹏,王家林,钟慧智,等. 琼东南盆地基底结构综合地球物理研究[J]. 中国海上油气(地质),1999,13(6):443-450.
- [3] 张迎朝,徐新德,甘 军,等. 琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J]. 地质学报,2017,91(7):1620-1633.
- [4] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J]. 天然气工业,2014,34(10):1-8.
- [5] 许怀智,蔡东升,孙志鹏,等. 琼东南盆地中央峡谷沉积充填特征及油气地质意义[J]. 地质学报,2012,86(4):641-650.
- [6] 许怀智,张迎朝,林春明,等. 琼东南盆地中央峡谷天然气成藏特征及其主控因素[J]. 地质学报,2014,88(9):1741-1752.
- [7] 龚再升,李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京:科学出版社,1997:1-126.
- [8] 雷 超,任建业,李绪深,等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2011,38(5):560-569.
- [9] 胡见义. 石油地质学前缘[M]. 北京:石油工业出版社,2002:96-143.
- [10] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报,2010,31(4):528-541.
- [11] 能 源,吴景富,漆家福,等. 南海北部深水区新生代盆地三层结构及其构造演化[J]. 地质学报,2013,87(3):403-414.
- [12] Taylor B, Hayes D E. Origin and History of the South China Sea Basin[M]. Washington D C: American Geophysical Union Geophysical Monograph,1983,27:23-56.
- [13] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relation to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. Geology,1995,23:719-722.
- [14] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. Geological Society of London Special Publications,1986,19(1):113-157.
- [15] Hayes D E. The tectonic and geological evolution of Southeast Asia Seas and islands[M]. Washington D C: American Geophysical Union Geophysical Monograph,1980,23:89-104.
- [16] 周 蒂,陈汉宗,吴世敏,等. 南海的右行陆缘裂解成因[J]. 地质学报,2002,76(2):180-190.
- [17] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The red river fault system in the Tonkin gulf, Vietnam[J]. Tectonophysics,1995,243(3/4):209-222.
- [18] 孙 珍,钟志洪,周 蒂. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟[J]. 地球科学,2007,32(3):347-356.
- [19] 刘新宇. 陵水 13-2 构造地层与古水深综合分析[R]. 湛江:中海石油(中国)有限公司湛江分公司南海西部石油研究院,2015.
- [20] 梁 刚,甘 军,李 兴. 琼东南盆地陵水凹陷天然气成因类型及来源[J]. 中国海上油气,2015,27(4):47-53.
- [21] 王子嵩,刘 震,王振峰,等. 琼东南盆地深水区中央坳陷带异常压力分布特征[J]. 地球学报,2014,35(3):355-364.

## TECTONIC EVOLUTION AND ITS CONSTRAINTS ON THE FORMATION OF DEEPWATER GIANT GAS FIELD IN LINGSHUI SAG, QIONGDONGNAN BASIN

ZHANG Yingzhao, GAN Jun, YANG Xibing, XU Xinde, ZHU Jitian, YANG Jinhai, YANG Lu, LI Xing

(Research Institute, Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

**Abstract:** Recently, a deepwater giant gas field has been discovered in the Lingshui sag of the Qiongdongnan basin. As the result, Cenozoic structures and their constraining effects on the formation of deepwater giant gas field has gained great attention from researchers. In this paper, well data and seismic data are applied to study the Cenozoic structural evolution of the sag and their controlling effects over the formation of deepwater giant gas field from viewpoints of sequence stratigraphy and structural analysis. Compared with previous studies, the coupling of structure evolution, tectonic mechanism, sedimentary infilling and natural gas accumulation are emphasized. It is revealed that the Cenozoic structure evolution of the sag consisted of stages of Paleocene-Eocene rifting, Oligocene depressing-rifting, Early Miocene rifting-depressing and Middle-Miocene to Quaternary depressing. Data suggests that: a. Oligocene depressing-rifting controlled the distribution of source rocks of marine-terrestrial transitional facies and marine facies, and the depression from Middle-Miocene to Quaternary expanded the gas generation window. b. Oligocene depressing-rifting provided the opportunity for the formation of fan-delta reservoir, and the depression from Middle-Miocene to Pliocene caused the formation of confined and non-confined deepwater clastic reservoirs and reef carbonate reservoirs. c. Oligocene depressing-rifting later on provided the opportunities for the formation of various structural traps, such as the strike-slip-extension structures, fault-noses, fault-anticlines, and various lithological traps such as deepwater confined channel sandstone of gravity flow, non-confined basinal lithological traps and reef stratigraphic traps. d. overpressure in the stages of Oligocene depressing-rifting and Middle-Miocene depressing stages formed the new faults/fissures as the paths for migration.

**Key words:** structural evolution; structural deformation; tectonic geodynamics; deepwater giant gas field; Lingshui Sag; Qiongdongnan Basin