

南海北部深水油气新认识

朱伟林¹, 郑金云²

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067

摘要 南海北部陆缘深水区由于陆缘地壳的强烈伸展减薄, 形成了多个宽深断陷所构成的盆地群, 发育多种类型烃源岩和大型储集砂体。大型盆地、广泛分布的多类型烃源岩、高-变地温场的耦合共控, 奠定了深水油气资源的物质基础。大型供水系、构造地貌、相对海平面升降的相互作用, 形成3种类型的沉积体系, 控制了深水区大型储集体的发育和展布, 但高热流加速了深水沉积物压实和成岩作用。南海北部陆缘深水油气勘探前景广阔, 烃源岩、有效储层以及热流3因素的复杂多变, 决定了油气勘探中机遇与挑战并存。

关键词 南海北部陆缘; 深水盆地; 深水油气; 深水沉积体系

“深水油气”一词已广泛应用于海洋石油勘探中, 主要用来区别于油气勘探开发装备、技术、成本等不同的浅水区。对于“深水”的界定随着技术的进步不断变化, 由1998年以前的水深大于200 m逐渐提升至300 m、500 m, 不同国家对此的认定标准也有所差别。目前, 一般认为现今水深大于500 m为深水, 而大于1500 m为超深水^[1-3]。中国以300 m水深为界划定深水区, 其主要分布在南海海域, 涉及珠江口、琼东南、台西南、中建南、礼乐、南薇、曾母、北康、万安、文莱-沙巴、九章等20余个沉积盆地, 总面积约 $75 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)^[1,4]。

21世纪以来, 全球海上油气重大发现有一半位于深水区。其中2010—2014年, 全球深水油气

新增概算储量约 $130 \times 10^8 \text{ t}$, 2013年油气产量超过 $5 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量, 已成为常规油气发现最重要的战略接替领域^[5]。中国深水油气勘探主要集中在南海北部陆缘的珠江口盆地和琼东南盆地, 面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[6-7]。其始于20世纪80年代末, 经历了以“对外合作为主-自营合作并举-以自营为主”的发展历程, 取得了荔湾3-1、流花29-1、陵水17-2、陵水25-1等多个大中型油气田的发现, 累计探明储量超过 $4 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量。第1个深水气田荔湾3-1于2014年建成投产, 截至2017年, 累计产气约 $82 \times 10^8 \text{ m}^3$, 凝析油超过 $140 \times 10^4 \text{ t}$, 年产量相当于一个中等大型油气田。同时, 中国的海洋石油拥有了以“海洋石油981”-世界上最先进的第六代深水半

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-07-01

基金项目: 中国-东盟海上合作基金项目(12120100500017001)

作者简介: 朱伟林, 教授, 研究方向为石油地质, 电子信箱: zhuwl@tongji.edu.cn

引用格式: 朱伟林, 郑金云. 南海北部深水油气新认识[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 89-98; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.014

1 深水盆地形成、分布及演化特征

“深水盆地”曾是一个地域概念,主要是指位于深水海域的盆地,或者盆地的深水区,并未阐明其地质意义,或者认为没有本质差别^[10]。直到近几年,随着全球被动陆缘地壳伸展破裂过程的科学研究取得重要进展^[11-13],并在“十二五”“十三五”期间被逐渐引入到南海北部陆缘深水油气勘探研究中,才逐渐认识其特殊性。即深水盆地结构与演化、沉积充填、热演化等均与陆缘地壳的伸展-变薄-破裂过程密切相关,显著不同于浅水区及陆上发育的典型裂陷盆地^[14-17]。

关于南海北部被动陆缘伸展-破裂过程及盆地结构的认识,大致经历了3个阶段:(1) 20世纪80年代以前,认为大陆地壳的伸展是均匀的纯剪切模式,其破裂也是瞬间的地质过程,时间上对应于破裂不整合面^[15]。在裂陷盆地中以破裂不整合面为界,分为裂陷期和裂后拗陷期两大构造层,其中,裂陷期形成的凹陷是由一系列高角度断层控制的、窄而深的箕状断陷构成,浅水区与深水区并无本质区别。(2) 20世纪80年代以来,随着大西洋两岸典型被动陆缘伸展-破裂过程的科学研究,构建了2种端元模式:贫岩浆型和富岩浆型^[18],并由此认识到地壳明显变薄的深水区,盆地结构及充填样式不同于浅水区。贫岩浆型陆缘主要受控于大型低角度断层所形成的断拗或拗陷结构,破裂不整合的界面特征不明显^[10],并在洋-陆过渡带(OCT)发育蛇纹石化地幔橄榄岩;富岩浆型陆缘则主要发育大量岩浆岩,形成向海倾斜反射层(SDR),充填于裂陷期盆地内^[15]。因此,在很长一段时间,认为南海北部被动陆缘为贫岩浆型,尤其是在珠江口盆地的深水区发现一系列大型低角度断裂系统后^[14-17]。(3) 2017—2018年,针对南海北部陆缘伸展-破裂过程的大洋钻探,揭示了其伸展-破裂过程兼具贫、富岩浆双重性,表现出“先贫后富”的特征,不同于大西洋经典模式^[18-19]。深水盆地的结构与充填既受大型低角度断层系统控制,也被岩浆作用所影响或强烈改造,且由陆向洋具有分带差异性。

1) 深水大型盆地的形成受控于地壳的强烈伸

展减薄。

多种地球物理资料的研究证实,南海北部陆缘地壳在伸展过程被强烈减薄,现今地壳厚度最薄可达10 km^[17],自西向东分别位于琼东南盆地的长昌凹陷、珠江口盆地的白云凹陷与荔湾凹陷、台西南盆地的南部凹陷,无一例外均位于深水区,且凹陷规模巨大,如白云凹陷是面积超 2×10^4 km²,地层厚度超 1×10^4 m的“超级凹陷”。

依据 Airy 均衡理论模型,软流圈之上的岩石圈处于整体均衡状态,当地壳在伸展过程中被大型低角度断层所减薄,下部空间将被密度更大的地幔物质所补充,地壳之上空间必然被密度相对小的沉积物和水所充填,这样才能重新达到平衡。因此,陆缘深水区地壳的强烈伸展薄化,必然催生出大型沉积盆地,这与目前在南海北部陆缘观察到的现象基本吻合。

2) 深水盆地发育大型宽深断陷。

就凹陷结构而言,深水区凹陷的结构受控于大型低角度断裂系统,表现出“多阶断控、早断晚拗”的特征,且整体规模大,既宽且深,显著不同于板内高角度断层所控制的、窄而深的箕状断陷盆地。

依据凹陷结构和充填特征,裂陷期地层可以分为3个构造层,分别对应于3个演化阶段:均衡裂陷期、拆离裂陷期、断拗期,即由早期高角度断层控制的断陷,向低角度断裂系统所控制的宽断陷,再向“又断又拗,早断晚拗”的断-拗联控的结构转换。演化过程中,伴有沉积中心的迁移、岩浆的侵入导致的隆升,且由陆向洋,岩浆活动显著增强,相关的韧性变形、凹陷的改造也更加明显。

成因机制上,裂陷期凹陷结构3个阶段的演化,反映了不同时期地壳减薄的方式有所不同。伴随着地壳厚度的减薄,温度的上升,地壳的流变性质发生变化,应变方式也随之不同,即初期以弥散式分布的脆性破裂为主,发育高角度断层;中期以脆-韧性伸展减薄为主,发育可延伸至 Moho 面的大型低角度断裂系统,使得地壳快速减薄;晚期以韧性颈缩为主,断裂的发育程度显著减弱,整体拗陷作用更显著。此外,地壳中韧性剪切层所处的位置越深,低角度断层的拆离面也随之变深,其所控制

的凹陷规模也越大,如珠江口盆地的白云凹陷,拆离面可达 Moho 面附近,而其裂陷期沉积物的体积是浅水区珠一坳陷 22 个半地堑体积之和的两倍多^[10],具有发育大规模烃源岩的条件。

基于上述断裂系统和凹陷结构特征,可以在南海北部陆缘深水区识别出大型深水盆地群,总面积约 11.7 万 km²(图 2、图 3)^[16]。

与大西洋两岸典型的贫岩浆型和富岩浆型被动陆缘相比,南海北部陆缘深水盆地的差别主要表现在岩浆发育程度上,裂陷期缺乏富岩浆型向海倾斜反射层的充填,而岩浆活动的改造作用又显著强于贫岩浆型。岩浆侵入作用在裂陷的中、晚期逐渐增强,既加速了地壳由脆性向韧性的转变,也改造了凹陷结构。这一过程与林间等(2019年)提出南海北部陆缘兼具贫、富岩浆双重性,且表现出“先贫后富”的特征基本吻合。

3) 深水盆地裂后沉降量大、热流高。

深水盆地裂后沉降量显著大于浅水区,从而控制了不同时期陆架坡折带的发育,形成了以牵引流主控的浅水区沉积环境和以重力流主控的深水沉

积环境^[20-21]。海底地形与莫霍面呈镜像对应关系^[17],表明裂后沉降量的大小主要受控于地壳的变薄程度。随着地壳变薄程度的增加,岩石圈等温面的抬高,地壳热流贡献减弱,而地幔热流占主导,使得盆地的热流也随之增大,进而成为热盆(地温梯度 >3°C/100 m)-超热盆(地温梯度 >5°C/100 m)。珠江口盆地白云-荔湾深水区的地温梯度,可由现今陆架边缘的 3.5°C/100 m 左右,逐渐上升至陆缘外侧的 8°C/100 m 以上^[20]。这也可能与南海较年轻,扩张停止后冷却时间相对较短(~16 Ma)有关。

因此,南海北部陆缘深水盆地的形成和演化与南海边缘海复杂板块构造背景下的发育过程密切相关。张裂早期,主要受控于古太平洋的俯冲后撤,地壳以纯剪切的脆性破裂为主,发育高角度断层控制的断陷盆地;随着古南海向南俯冲拖曳的加入,陆缘伸展作用增强,应变逐渐向陆缘深水区集中,发育大型低角度断裂系统,导致地壳快速减薄,并形成了大型宽深断陷;裂陷晚期,随着深水区岩石圈的变薄,地壳等温面随之抬升,地壳韧性增强,局部区域岩浆底侵至下地壳,使得地壳韧性进一步

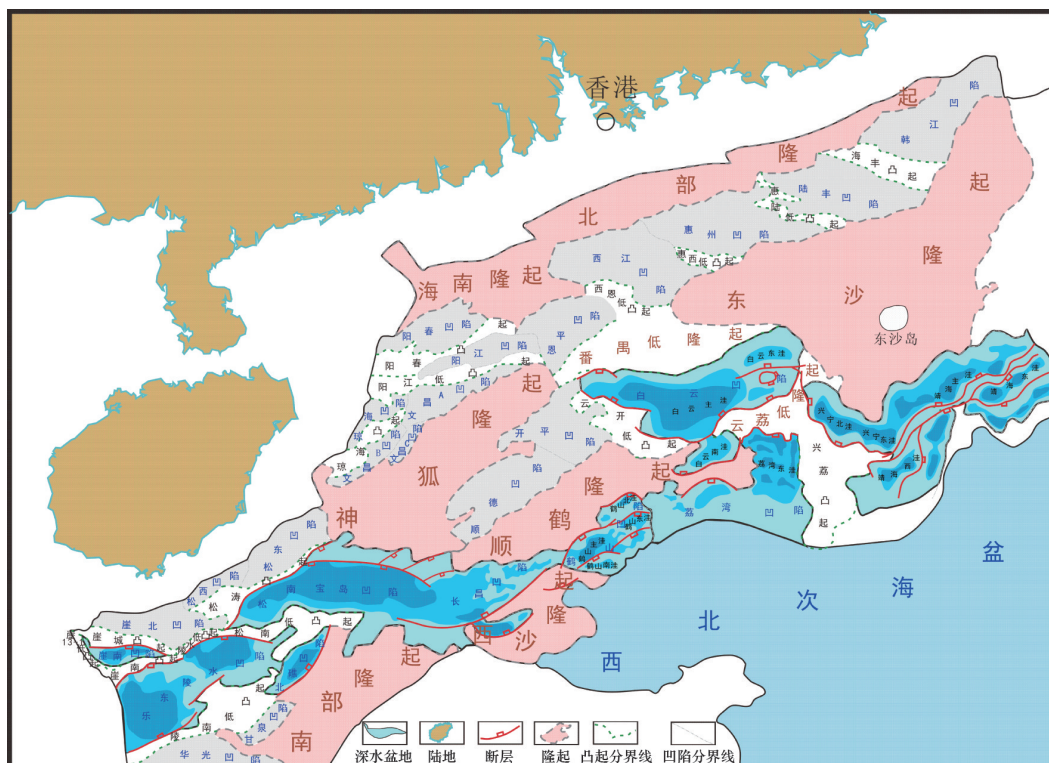


图2 南海北部深水盆地群分布图(据文献[16]修改)

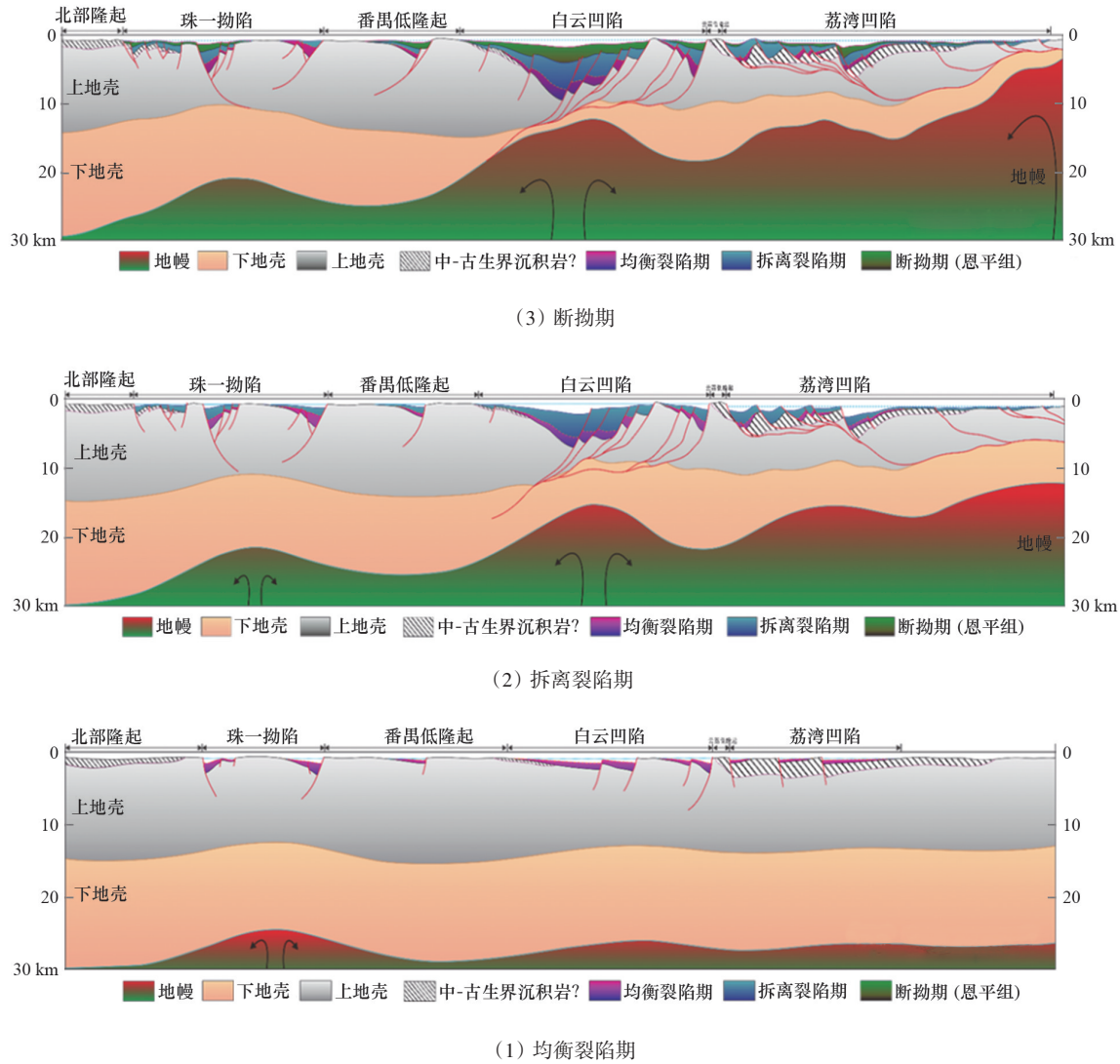


图3 南海北部陆缘深水盆地裂陷期演化模式图(据文献[17]修改)

增强,深水盆地断控作用显著减弱,而拗控作用增强。随着南海的破裂、扩张,陆缘裂陷盆地逐步进入裂后热沉降阶段,并因地壳变薄程度的差异导致沉降量有所不同,从而形成浅水和深水沉积环境。

2 高热流背景下,深海烃源岩的再评价

大型烃源岩体是深水油气生成的物质基础,南海北部深水勘探的早期,根据在浅水区已获得的经验,认为高角度断层所控制的裂陷期地层是盆地的优质烃源岩。但深水区的这套裂陷期地层的发育规模较小,而多以拗陷充填结构为主,因而认为由陆

向洋地层逐渐变新,深水区的烃源岩潜力存在不足,多家外国大型石油公司相继退出合作。经过近十年来深水油气地质研究的深入,并结合勘探实践,彻底改变了这一认识,深水区发育大型烃源岩体,且类型多样,不同于浅水区典型断陷湖盆。

1) “盆-源-热”共控奠定油气生成的物质基础。

南海北部陆缘深水区的低角度断裂系统控制了区内大型盆地群的发育,为大规模烃源岩的形成提供了广阔空间。基于石油公司已钻井的研究表明,深水区发育3套烃源岩:始新世早-中期湖相烃源岩、始新世晚期海陆过渡相烃源岩、早渐新世海

相烃源岩。其中,始新世裂陷期是其主要烃源岩^[7,9,22-23]。在热盆-超热盆的高地温场条件下,烃源岩呈现出生烃早、成熟快、生烃窗口变浅变窄的高温快速演化特征^[10](图4)。因此,在南海北部陆

缘深水区内,大型宽深断陷盆地、广泛分布的多套烃源岩、高热流三者耦合,共同奠定了深水油气生成的物质基础,突破了国外同行“烃源潜力不足”的认识局限^[24-25]。

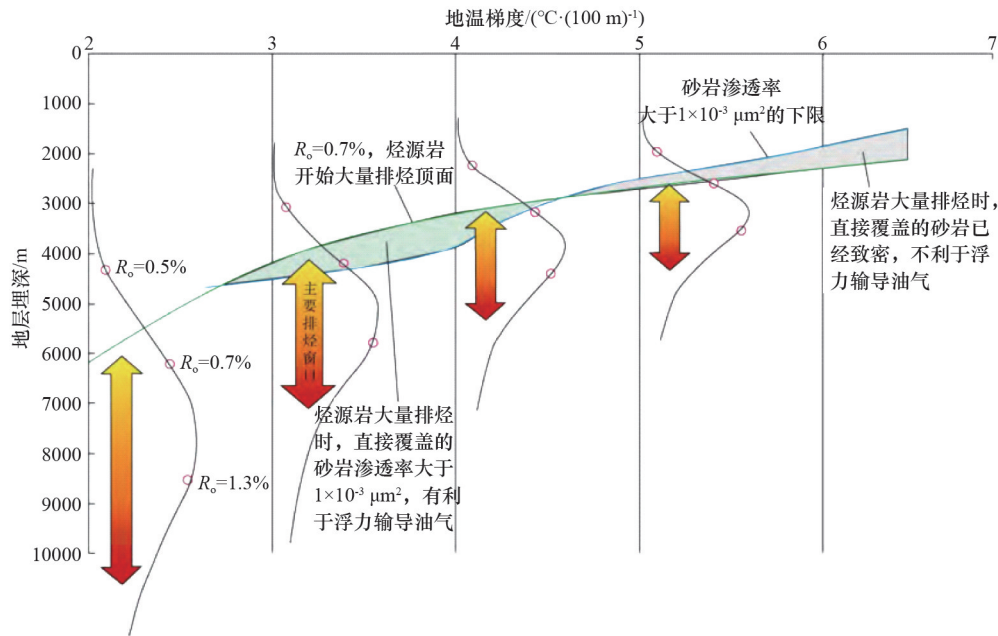


图4 烃源岩相关图件(据文献[10]修改)

2) 始新世从南向北的海侵导致烃源岩类型多样化。

南海北部陆缘IODP 367/368/368X航次研究结果证实,U1501、U1504站位晚始新世为陆架浅水环境,而南部的U1502站位则变为水深超过2000 m的超深水环境^[26]。其北侧白云凹陷已钻井的古生物分析表明,晚始新世凹陷已进入海相沉积环境^[27]。而南海东北部的初始扩张时间为~32—34 Ma^[18],即处于始新世-渐新世之交。由此推测,在南海破裂扩张之前,始新世可能发育古南海,并在南海北部陆缘形成了陆架-深水陆坡的地貌格局。另一种可能性是,南海的破裂扩张由东向西渐进式发育,东部海盆扩张时间较早(>34 Ma),向西延伸形成了较窄的海槽(类似于现今西沙海槽)。但无论如何,始新世从南向北的逐渐海侵必然导致多种类型烃源岩的发育,如湖相、海侵湖相或海陆交互相、海陆过渡相、海相烃源岩等,不同类型烃源岩的发育模式、分布规律均有所不同。因此,由浅水-

深水-超深水区,始新世烃源岩不能简单类比,必须结合南海构造演化背景,分类研究。

3) 高热流背景下渐新世海相烃源岩可以成为重要烃源岩。

在南海北部陆缘的超深水区,渐新世多处于陆坡深水沉积环境,若有大型水系注入(如古珠江水系),提供较为充足的有机质输入,具有发育优质烃源岩的条件。超深水区5°C/100 m以上的超热盆条件,可降低生烃门限的埋深(约2000 m),弥补埋藏深度较浅的不足。因此,沉积环境、有机质供给、热演化三者耦合较好的区域,渐新世海相烃源岩可以成为重要的烃源岩。

3 大型有效储层特征

南海北部陆缘深水盆地在桑田变沧海的演化过程中,垂向上发育3套沉积层;裂陷期大型宽深断陷所发育的大型三角洲-湖相沉积层,裂后拗陷

期陆架边缘三角洲沉积层和深水重力流沉积层^[28]。由于深水油气田的高效开发,需要强劲的产能作为支撑,对储层物性的要求更高,因而目前勘探的主力层系为裂后拗陷期陆架边缘三角洲沉积层和深水重力流沉积层。受物源供给条件、构造地貌、海平面升降的耦合共控,发育3种类型沉积体系,可为深水油气勘探提供大型储集体。

1) 宽陆架、大型供给水系控制下的陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系。

珠江口盆地深水区渐新统珠海组和中新统珠

江组下部是其典型代表(图5),目前已发现的大-中型油气田的储层属于这两套地层。来自华南陆缘的古珠江大型供给水系为其提供充足的物源,宽广平缓的陆架和海平面的升降为沉积物推进至陆架边缘形成大型陆架边缘三角洲提供了条件,构造差异沉降形成了陆架坡折带,为深水重力流的发育提供了地貌条件,而大型陆架边缘三角洲砂体为深水扇沉积提供物源,二次搬运使得深水扇储层的结构成熟度和成分成熟度更高,为优质储层的发育奠定了基础。

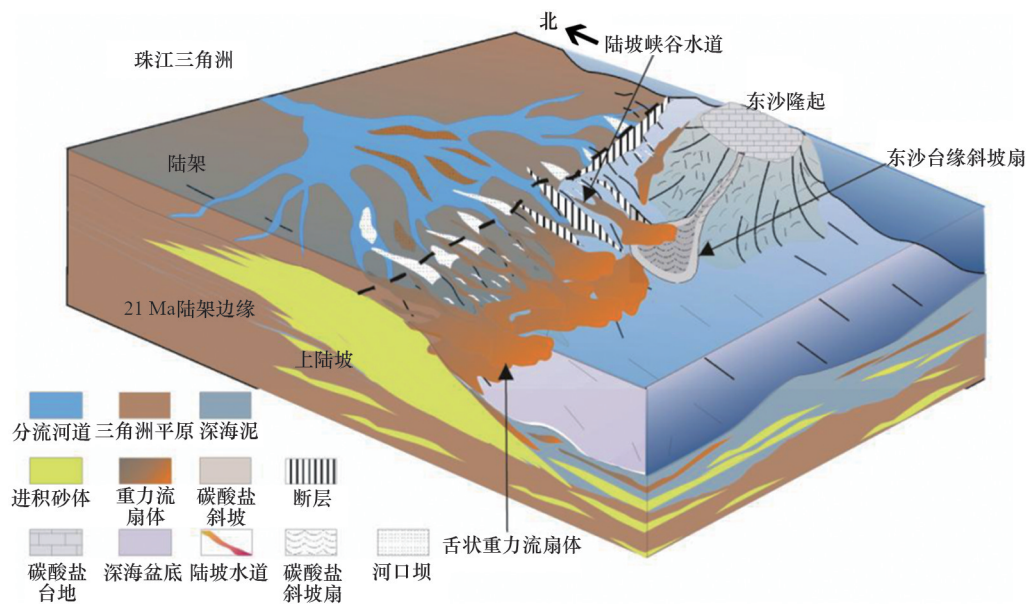


图5 珠江口盆地河流-三角洲-陆坡峡谷-海底扇示意(据文献[6]修改)

由于物源供给与构造沉降匹配关系的差异,珠海组与珠江组陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系的特征略有差异。珠海组形成时期物源供给条件较强,构造沉降差异相对较小,形成海退进积型陆架边缘三角洲-深水扇组合,地震剖面上可识别出6套大型前积复合体构造的三级层序。受~23 Ma以来白云凹陷持续沉降的控制,珠江组下部形成时期陆架坡折带向北迁移,并且稳定分布在白云凹陷北坡,主要在低水位期发育陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系。在平面分布上,珠二拗陷发育珠海组和珠江组两套陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系,

陆缘外侧的珠四拗陷主要发育珠海组陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系。

2) 窄陆架、轴向供给水系控制下的大型峡谷水道深水扇沉积体系。

琼东南盆地深水区晚中新世大型中央峡谷水道是其典型代表。该水道西起莺歌海盆地东部的古红河供给体系,呈NEE向沿琼东南盆地轴向进入南海西北次海盆,绵延约425 km^[29](图6)。目前已发现的陵水17-2、陵水18-1、陵水25-1等大-中型气田的储层均为该沉积体系的深水扇储层。古红河轴向物源供给水系、琼东南盆地中央拗陷带的

沉降所形成的峡谷地貌,为该体系的深水扇发育提供了条件。这一认识的突破,为窄陆架、无大型供水系地区深水扇储层的发育提供了新思路。同

时,在合适物源供给和地貌条件下,深水扇砂体的搬运距离可超过400 km。

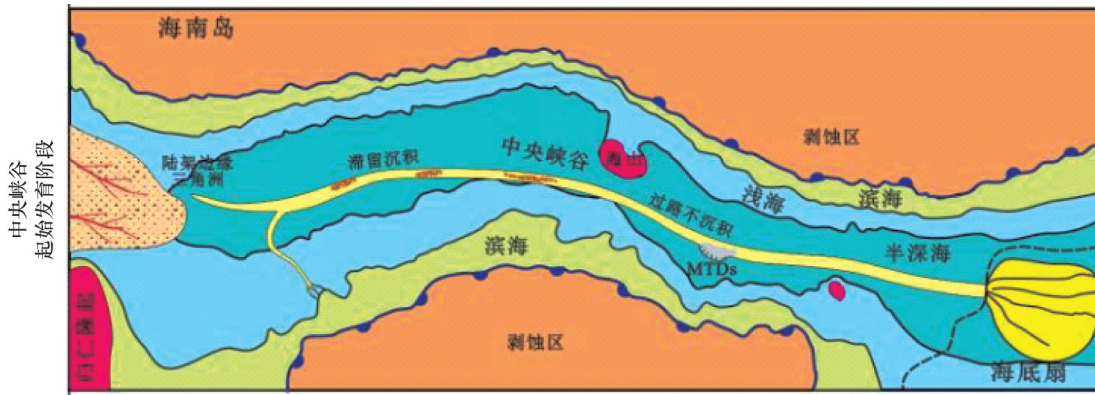


图6 琼东南盆地中央峡谷-海底扇示意(据文献[30]修改)

3) 延伸至陆架区大型峡谷水道供给的深水扇沉积体系。

珠江口盆地晚中新世以来的白云大峡谷-南海西北次海盆深水扇沉积体系是其典型代表。该大型峡谷北起白云凹陷西侧的陆架边缘,呈SSE向穿过白云凹陷和荔湾凹陷,延伸至陆缘外侧的西北次海盆,绵延约300 km,并在海盆区卸载,沉积多套大型深水扇(图7)。IODP 367/368/368X航次在U1499、U1500、U1502、U1503等多个站位钻遇该深

水扇沉积,大量疏松砂岩导致岩芯收获率较低。研究表明,随着白云凹陷沉降的逐渐减弱,在~10 Ma以后形成开放陆坡,陆架区沉积物得以沿大型峡谷水道,搬运至西北次海盆沉积区,形成大型深水扇。由此可见,在物质供给条件和古地貌的控制下,深水重力流搬运能力很强劲,在远离陆架主沉积区约300 km以上,可发育面积超万平方公里规模的深水扇储集体。

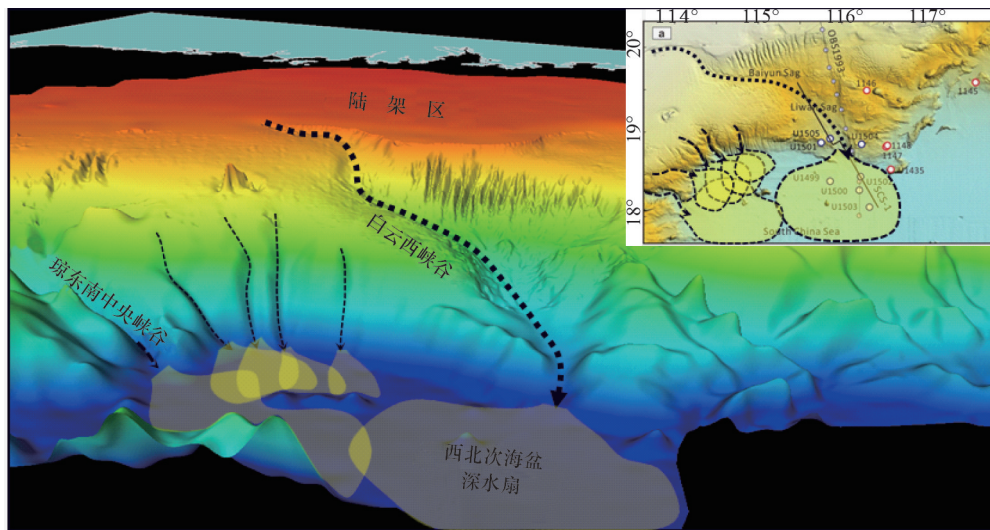


图7 珠江口盆地中新世陆坡峡谷-海底扇示意

然而,由于深水盆地的高热流,加快了储层的压实速率,成岩演化作用提前,使得储层快速低渗化(有孔无渗或低渗),经济有效储层的埋深下限,随着低温梯度的增加而明显变浅^[10],成为深水油气勘探面临的又一挑战。因而,在不同的地温梯度、埋深、压力条件下,深水经济有效储层的研究需要有不同的对策。

4 结论

南海北部陆缘深水盆地区别于浅水区的不仅是水深,其石油地质条件更具有独特性,这与南海的发育、演化过程密切相关。

1) 陆缘地壳伸展-变薄-破裂过程中发育的大型低角度断裂系统,控制了大型深水盆地群的形成与演化,由此产生的大型宽深断陷,具备发育大型烃源岩的条件;随着地壳的强烈伸展变薄,形成高地温场,有利于烃源岩的生烃演化。“盆-源-热”耦合共控,奠定了深水油气生成的物质基础。

2) 始新世从南向北的逐渐海侵,有利于形成多种类型的烃源岩,其发育、分布规律有别;在地温梯度较高、有机质输入及保存条件较好的地区,渐新世海相烃源岩可以成为重要烃源岩。

3) 受控于物源供给条件、沉积地貌、相对海平面变化,南海北部陆缘深水区发育3种类型的陆架边缘三角洲-深水重力流沉积体系,可为深水油气田形成提供大型储集体;但高地温场使得沉积物压实作用增强、成岩作用提前,从而加大了油气勘探中预测经济有效储层分布的难度。

参考文献(References)

[1] 朱伟林. 南海北部深水区油气地质特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 521-527.
 [2] 张功成, 屈红军, 赵冲, 等. 全球深水油气勘探40年大发现及未来勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1447-1477.
 [3] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇及油气[M]. 科学出版社, 2008: 3-4, 312-314.
 [4] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 中国海域深水区油气地质

[J]. 石油学报, 2013, 34(S2): 1-14.
 [5] 张功成, 屈红军, 张凤廉, 等. 全球深水油气重大新发现及启示[J]. 石油学报, 2019, 40(1): 1-55.
 [6] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水区油气成藏与勘探[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1833-1841.
 [7] 朱伟林. 南海北部深水区油气勘探关键地质问题[J]. 地质学报, 2008, 83(8): 1059-1064.
 [8] 谢玉洪. 中国海洋石油总公司油气勘探新进展及展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 26-35.
 [9] 张功成, 李友川, 谢晓军, 等. 南海边缘海构造旋回控制深水区烃源岩有序分布[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 23-36.
 [10] 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区白云凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 27-39.
 [11] Sutra E, Manatschal G. How does the continental crust thin in a hyperextended rifted margin? Insights from the Iberia margin[J]. *Geology*, 2012, 40(2): 139-142.
 [12] Mohn G, Manatschal G, Beltrando M, et al. Necking of continental crust in magma-poor rifted margins: Evidence from the fossil Alpine Tethys margins[J]. *Tectonics*, 2012, 31(1): 1-28.
 [13] Sutra E, Manatschal G, Mohn G, et al. Quantification and restoration of extensional deformation along the Western Iberia and Newfoundland rifted margins[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(8): 2575-2597.
 [14] 庞雄, 施和生, 朱明, 等. 再论白云深水区油气勘探前景[J]. 中国海上油气, 2014, 26(3): 23-29.
 [15] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 102-114.
 [16] 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4901-4920.
 [17] 米立军, 张向涛, 庞雄, 等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 1-10.
 [18] 林间, 李家彪, 徐义刚, 等. 南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 125-140.
 [19] Sun Z, Lin J, Qiu N, et al. The role of magmatism in thinning and breakup of the South China Sea continental margin[J]. *National Science Review*, 2019, doi: 10.1093/nsr/nwz116.
 [20] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 215-222.

- [21] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 234–242.
- [22] 张功成, 张厚和, 赵钊, 等. “源热共控”中国近海盆地石油富集规律[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(4): 38–53.
- [23] 李友川, 邓运华, 张功成, 等. 南海北部第三系海相烃源岩[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 219–225.
- [24] 谢玉洪. 中国海油近海油气勘探实践与思考[J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 1–13.
- [25] 谢玉洪, 高阳东. 中国海油近期国内勘探进展与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 20–30.
- [26] Jian Z M, Jin H Y, Kaminski M A, et al. Discovery of the marine Eocene in the northern South China Sea[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 881–886.
- [27] 张浩, 邵磊, 张功成, 等. 南海始新世海相地层分布及油气地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(4): 660–670.
- [28] 柳保军, 庞雄, 王家豪, 等. 珠江口盆地深水区伸展陆缘地壳减薄背景下的沉积体系响应过程及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 124–138.
- [29] 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.
- [30] 解习农, 孙志鹏, 张道军, 等. 琼东南盆地深水峡谷体系沉积充填及有利储层预测[J]. 第十七届中国科协年会论文集, 2015.

Deep water oil and gas in Northern South China Sea: New insights

ZHU Weilin¹, ZHENG Jinyun²

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) China Limited (Shenzhen), Shenzhen 518067, China

Abstract Several basin groups with wide and deep grabens were formed through intensive stretching and thinning of the continental-margin crust in northern shelf margin of the South China Sea, with various types of hydrocarbon source rocks and massive reservoir sand bodies being developed. It is the coupling control of large-scale basins, widely distributed multiple source rocks and high-variable geothermal fields that established the generic foundation for deep-water hydrocarbon resources. With the interaction of large drainage systems, tectonic relief and relative sea-level fluctuation, three types of depositional systems were formed to control the development and the distribution of large-scale reservoirs whilst the high heat-flow accelerated the compaction and the diagenesis of deep-water sediments. The deep-water hydrocarbon exploration is very promising at the northern shelf margin of the South China Sea although with some challenges due to the complexity and the variability of three factors: source rocks, effective reservoir rocks and heat flow.

Keywords northern shelf margin of South China Sea; deep-water basin; deep-water hydrocarbon; deep-water depositional system ●



(责任编辑 祝叶华)