

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0010-09

南海珠江深水扇系统的形成特征与控制因素

彭大钧¹ 庞雄² 陈长民² 朱明² 黄先律¹ 舒誉²

(1. 成都理工大学 成都 610059; 2 中国海洋石油深圳分公司技术部 广州 510240)

摘要 到 2001 年底, 已从全球六大洲 18 个盆地大于水深 500m 地域发现 580 亿桶油当量, 90% 的油气储量发现于深水浊流沉积体系, 这是与近三十年来在全球范围内对深水海域的不懈探索与科学技术进步有着密切的关系。

南海珠江深水扇系统特指广布于南海珠江口盆地近海海域上第三系深水沉积物, 主体位于盆地南缘珠二坳陷, 属与陆架边缘三角洲体系相联系的、发育于低水位时期的深水沉积系统, 其形成具有重要的地质背景, 它处于若干重大地质事件的交汇地域, 具对应于青藏高原隆升的沉积响应, 有独特的由持续沉降所体现的纵向叠置特征, 并因应于全球海平面升降变化、呈幕式推进的海侵型沉积系列, 构成极为理想的油气储盖组合。因此, 以时间耦合、空间耦合与地球动力学耦合为纽带, 用整体、系统的论点研讨与分析南海深水扇系统的形成特征, 获得一球五源(缘)是南海深水扇系统的主控因素的结论。

关键词 南海珠江深水扇系统 青藏高原隆升 海平面升降变化 低水位体系域 珠江口盆地

第一作者简介 彭大钧 男 1934 年出生 教授 博士生导师 隐藏油气藏及油气富集规律

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 引言

区域地质研究成果、珠江口盆地珠一坳陷地球物理勘探与钻探成果、珠二坳陷层序地层学的研究成果等的综合研究表明, 珠江口盆地晚白垩世—始新世(40Ma 以前)的沉积物与大陆内部断陷沉积物类似, 均为陆源碎屑物, 具有相似的特征, 晚渐新世恩平组(32~40Ma)及其以前的神狐—文昌组(40~48Ma)均为分割明显的断陷型湖泊、沼泽、河流、三角洲碎屑沉积。神狐—文昌组主要充填了冲积与洪积相杂色泥岩, 砂岩夹火山碎屑岩沉积, 湖相泥岩夹砂岩; 恩平组则以河湖、沼泽和三角洲相砂泥岩夹煤层^[1]。华南陆缘的海陆变迁发生在晚渐新世, 晚渐新世末恩平组顶部(32Ma 土)以地震反射界面 T₇ 代表的破裂不整合面(南海运动), 反映了盆地与大陆同时遭受准平原化作用。沿滨海断裂带, 大陆抬升遭受剥蚀, 普遍缺失上第三系地层, 而陆缘则下降, 海侵由南向北进入盆地, 沉积了珠海组至第四系的海陆交互相和海相沉积, 其中, 在 32Ma 至 8.2Ma 期间(东沙运动以前), 断裂活动转入相对静止阶段, 全盆地相对统一的沉降作用明显加速, 且沉积作用未能补偿不断增长的可容空间, 导致海水由南向北推进, 逐渐淹没众多的沉积

凹陷^[2]。从晚第三纪开始, 盆地由断陷转化为坳陷, 分割的凹陷连成统一的坳陷, 盆地从局限小盆地变为开阔海盆, 从此, 在盆地稳定沉降的构造背景和全球海平面升降作用下, 由北往南, 依次出现河流—三角洲—滨岸—浅海陆架(碎屑岩及碳酸盐岩)—陆坡及深水(浊积岩)等沉积体系, 10Ma 以后, 盆地仍处于继续沉降的过程, 其沉积物总体上往上变细、水体变深。但是, 在 23.8Ma 及 13.8Ma 层序底界面上, 在珠江口盆地南缘的珠二坳陷出现分布广阔、规模宏大的以低水位期粗碎屑砂岩沉积为特征的深水扇系统, 从而引起广泛的关注, 国家自然科学基金重点项目“南海深水扇系统及其油气资源”的系统研究就在此背景下深入地展开。

本文南海深水扇系统特指广布于南海珠江口盆地近海海域上第三系深水沉积物, 准确的称谓为南海珠江深水扇系统, 主体位于盆地南缘珠二坳陷, 属与陆架边缘三角洲体系相联系的陆坡深水区, 并发育于低水位时期的深水扇系统, 沉积物总厚度可达 4~6km, 具有层序地层学所描述的深切谷充填、滑塌体、斜坡扇、盆底扇以及低位进积复合体等典型低水位期的层序结构特征以及众多纵向与横向的叠置与变迁特征^[2]。

国家自然科学基金项目“南海深水扇系统及油气资源(批准号: 40238060)”部分研究成果。
收稿日期: 2005-01-02 收修改稿日期: 2005-03-28

综合研究成果表明,南海深水扇系统形成的地质年代,应当以晚第三纪(32Ma±)为起始,但早第三纪(32~48Ma±)是其重要的背景,考虑到此时期曾发生众多重大的地质事件,宏观地研究南海深水扇系统不能不首先把此关键时期作为研究工作的聚焦期。

40Ma前后时间,在今南海及周边地区发生若干重大的地质事件,对深水扇系统的形成、发展与演化的研究而言,不能简单地只谈及其时代及过程,而应当将它的物质来源、运载体系、沉积系统与控制因素放在更大的地质视野中进行观察与思考,并回答珠江口盆地怎么会从分散、陆相、局限、多物源、分割性很强的断陷,演化为统一的、开阔的、以北物源为主的大规模拗陷?为什么会在经历长时期的沉降、沉积数千米的沉积物以后拗陷继续朝向可容空间不断增大,最终成为饥饿状沉积盆地直至演化为深水沉积条件?为什么作为珠一拗陷主要含油气产层珠海组沉积物具有如此优越的储集物性条件,且延展到百余千米外的珠二拗陷,并会在珠二拗陷形成与发育了深水扇系统?回答这些地质科学问题并不容易,它要求把此类地质思考放在更大的地质背景中去观察,而32~48Ma时期正是这一个关键时期。在此关键时期及研究地区周边,正发生着太多重大地质事件,这就迫使我们的地质思考应当由局部地域、局部现象跳跃到更大范围的众多地质事件的联想,特别是重大地质事件的联想。

2 南海深水扇系统的特征

2.1 形成于重大地质背景中

40Ma时期以来,在今南海及周边地区发生的重大地质事件有:南海扩张,印度—澳大利亚板块、欧亚板块与太平洋板块的会聚与碰撞,青藏高原隆升,以及中国大陆地貌格架的重大变革(图1)。深入探讨这些重大地质事件的内涵不是本文的主题,但是,研究重大地质事件所诱发的后续效应以及对本地区晚第三纪深水扇系统形成的控制作用,却是我们探索的重要内容。

上述重大地质事件均有重要的研究成果^[1,3-7],其中有的已涉及到今南海地区,不少学者^[8]认为“南海的演化可分为晚中生代—早第三纪的古南海和晚新生代的今南海两个发展阶段。古南海是古特提斯海向东退缩成为古太平洋的一部分;今南海的形成则经历了不同方向的两幕扩张……”、“早中新世末,南海海底扩张活动停息,之后,在盆地下沉的背景上,该

区普遍发生大规模海进,最后在欧亚、印度—澳大利亚和太平洋等三大板块进一步相撞的环境下,南海的地质环境进一步复杂”^[8]

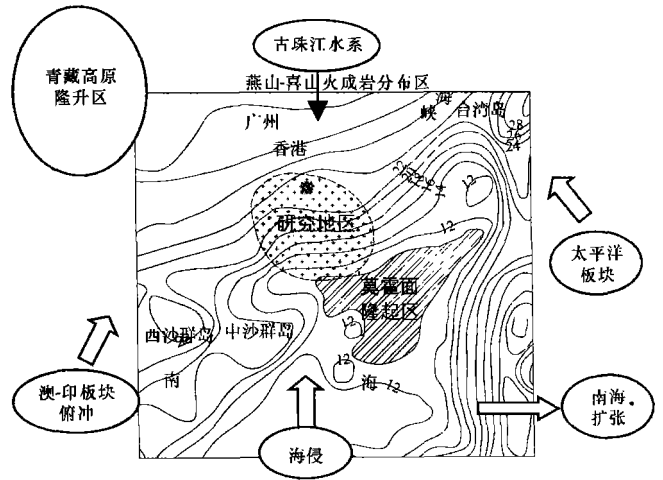


图 1 研究地区及周边重大地质事件图

Fig 1 Map of research region and important geological events around this region

这种复杂的地质环境显然应当涵盖青藏高原的隆升,中国西部造山带岩石圈强烈碰撞增厚变形构造区均是围绕青藏高原碰撞—隆升过程进行的;中国重大水系的形成演变均与青藏高原隆升过程息息相关;同时,在青藏高原形成过程中,在其内部及周边地区均形成了巨大的沉积盆地并接受了巨量的沉积物质。没有持续的隆升背景,此类沉积响应是不可想象的^[9]。

有意义的是,南海珠二拗陷在厚达11.2km的沉积物正是40~10Ma期间形成的。通过发现与深化有关地域沉积记录的研究,揭示深水扇系统的特征,完全有可能将地球深部活动机制对盆地的控制、板块碰撞与下切导致青藏高原隆升并引发对南海物源供给的远距离效应,以及全球海平面变化制约层序地层格架的变化等科学问题的探索引向深入。

2.2 南海深水扇系统是对应于青藏高原隆升的沉积响应

板块碰撞、青藏高原隆升、南海海底扩张、软流圈物质上涌及随后的热冷却、大规模海平面的升降变化等发生在晚第三纪的重要地质事件是否影响与控制着南海地区晚第三纪的沉积并留下确实的沉积响应与可靠的沉积纪录;就南海地区沉积系统的研究而言,如何科学地解释32Ma以来稳定的北物源,优质的储层、巨厚的低位扇系统,由浅水沉积环境演变为深水饥饿沉积环境等科学问题,也需要在重大地质事

件背景中去观察才能获得较为深刻的认识。

多年来,以南海珠江口盆地珠二拗陷为中心,展开了系统的研究,编制了大量图件,这些图件基础均是高信噪比的地震资料,并且经过近年来的精细处理与解释。研究工作涉及到层序地层格架、沉积相带的展布、层序界面的确认,体系域的空间分布、古陆架坡折带的位置以及纵向叠置特征等,并与前人编制的珠江口盆地海平面变化图相结合,确认了珠二拗陷具有低水位时期的沉积特征。在这些图件中,与本文探讨主题最有关联的是第三纪不同时期的层序地层格架图件与沉积厚度图以及由此衍生出的相关图件。

珠江口盆地断陷期的沉积速率与拗陷期的沉积速率有着重要差异;而且,平稳的陆架发展期沉积速率与快速沉降的陆坡发展期的沉积速率也有着重要差异,它是正在发生与曾经发生过重大地质事件的迟后响应,是远距离效应的延迟体现,也是沉积体系发生变革的响应。

比较渐新世恩平组(32~40 Ma)与其下伏的文昌—神弧组(40~48 Ma)在不同的陆相断陷盆地的沉积速率可知,文昌组沉积速率大多大于 250 m/Ma 代表着断陷早期的急速填平补齐的沉积活动;而恩平组沉积速率相当多数小于 200 m/Ma 说明断陷盆地后期的沉积活动,在渐新世晚期(25 Ma)已接近完成, T₇不整合面(早第三纪末期)代表当时盆地与大陆同时准平原化,并为形成较为平坦的珠海组期沉积物创造很好的基础;

进入晚第三纪以来,珠一拗陷不同次级凹陷其沉

降速率与早第三纪晚期较为接近。例如,18.5~21 Ma 期间珠一各次凹陷其沉降速率大多变化在 216~235 m/Ma 个别(如西江凹陷)其速率可达 324 m/Ma 差异不大,与恩平组大致相当,均属沉降的平稳期,此平稳期总共延续约 10 Ma 以上,直到 18.5 Ma 形成全盆地大范围的海侵,沉积了以 T₅海进泥质岩类为主体的高位沉积(可在全盆地范围内追踪)。珠二拗陷在相同时期内其沉积速率也大致相当,最高也不超过 360 m/Ma 均属平稳期沉积;18.5~16.5 Ma 的 200 万年期间沉积的珠江期沉积物,珠一拗陷各次凹陷沉积厚度普遍超过千米,大多厚为 1100~1300 m,沉积速率普遍大于 650 m/Ma 较前期约大一倍,代表快速沉降期,其沉积速率较珠二拗陷(500 m/Ma)为高;但紧接着在随后的 16.5~10.5 Ma 的 600 万年期间,珠二拗陷的沉积速率,最大可达 1900 m/Ma 一般则为 1150 m/Ma 5 倍于同期的珠一(普遍小于 200 m/Ma)的沉积速率,为珠江口盆地沉降的最高速期间,表示珠一与珠二拗陷在此期间沉降速率发生了巨大差异,前者表现为陆架的平稳沉积,后者则形成为陆坡性质的急剧沉降,而且,层序地层学的研究表明这些巨厚的沉积均是低位期的沉积物,包括深切谷、滑塌堆积,斜坡扇、盆底扇以及低位进积复合体等。

从珠一拗陷沉积厚度曲线图(图 2 B)可以明显地看出在 21~16.5 Ma 期间,特别是 18.5~16.5 Ma 期间有一个最大沉积速率陡变时期,无论是恩平次凹、西江次凹或惠州次凹其基本特征是完全一致的;相应的在珠二拗陷沉积厚度曲线图(图 2 C)可以看

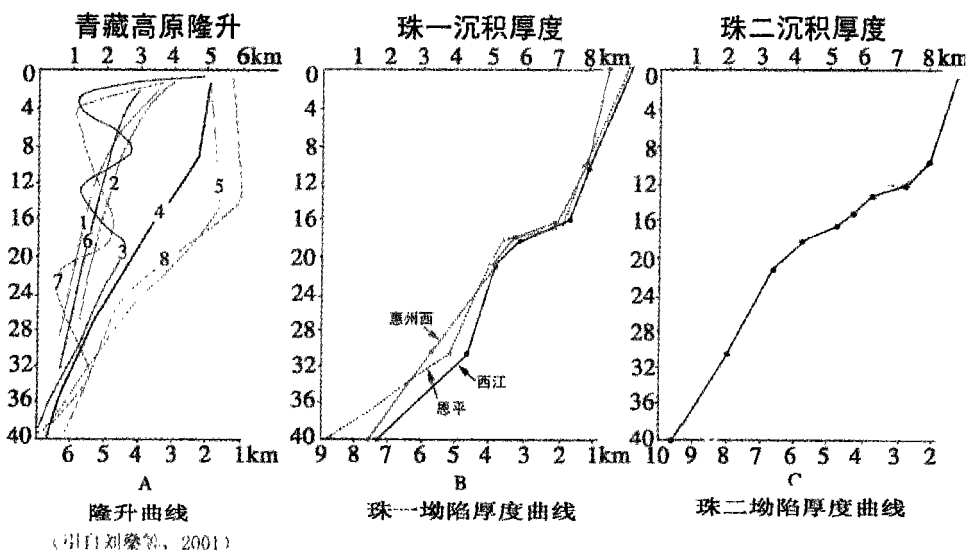


图 2 隆升及沉降速率对比图 (A. 引自刘燊等)

Fig 2 Correlation map of up lifting and sedimentation

到,从 21~10.5 Ma 期间其沉积速率完全不同于 21 Ma 之前,其明显加速期分别为 21~16.5 Ma 以及 13.8~10.5 Ma。由于盆地的沉降快速,沉积物质补偿困难,逐渐演化为饥饿沉积,沉积厚度没有出现相应增厚,但水深则明显加深,形成深水沉积体系。

掌握沉降的平稳期与急速变化期,十分有助于说明与此相关联的若干地质事件对其的控制作用,也说明了快速的热沉降,使珠二拗陷形成持续稳定的可容空间增量,对应着来自北方的巨大物源供给及海平面频繁的变迁(层序周期由 SB₂₁^{17.5}的 3.5 Ma 逐渐变化到 SB_{17.5}^{16.5}、SB_{16.5}^{15.5}、SB_{15.5}^{13.8}、SB_{13.8}^{12.5}等层序的周期约 1 Ma 左右),凹陷仍能以快速沉降适应快速隆升激发的快速剥蚀与快速搬运;快速隆升意味着板块陆内俯冲的加剧,这也正与南海珠二拗陷的快速沉降相对应。

有关青藏高原隆升演化历史与确切时间段至今仍无定论(图 2A)。有 20 Ma 前开始脉动隆升说;有隆升高峰期为近期的两大隆升阶段说(10.9~7.5 Ma 和 0.9 Ma);也有四阶段论(43~38 Ma、25~17 Ma、13~8 Ma、3 Ma~现今);乃至七阶段说;也有认为高原自印度板块和欧亚板块碰撞以来,在持续的挤压应力作用下一直处于上升状态,并不存在夷平降低的过程(Ruddiman);也有人认为新生代青藏高原的高度存在着构造隆升和夷平剥蚀的交替。显然,有关青藏高原隆升的高度变化也存在着不同的观点^[10]。但从研究珠江口盆地的观点出发,我们可以取其趋势进行选择与对比。其隆升趋势可以概括如下:

A. 无论何种学说,均认为自 40 Ma 以来青藏高原隆升的总趋势是不断升高,直至形成当今规模宏伟、气势澎湃、全球瞩目、影响巨大的高原。

B. 对波动说我们难以作出确切评价,暂先搁置;但是,显然在 24~13.8 Ma 期间高原发生快速隆升时期,曲线 1、2、4、5、6、8 等曲线均支持此快速隆升时期。

C. 如果将其与珠江口盆地沉降曲线比较则可发现曲线 5、8、4 等隆升曲线,其基本形态已与沉降曲线相匹配,差异仅在隆升启动时间偏早。这是巧合还是有内在联系,要作出结论显然还应作更多的工作。但考虑到青藏高原的持续隆升、珠江口盆地珠二拗陷的持续沉降、古珠江水系延续 2000 余万年年均稳定南流,我们可以推论这是高原隆升的远距离控制与沉积的滞后响应。

上述比较还应在古生物年代学的层面上进行确切比较。所幸的是,珠二拗陷的层序界面可以与大洋

勘探成果相比较而获得证实,而珠一拗陷的年代学特征已有 50 余口井的古生物地层资料所证实^[11],并且与全球海平面变化曲线可作对比。基础资料的可靠性是确切无疑的。因此,由此引出的推论是:印澳板块与欧亚板块碰撞导致的青藏高原隆升是长达 20 Ma 以来控制珠江口盆地单一物源(北物源)的基本要素,它是稍早时间隆升与稍晚时期的快速沉积的直接响应,细致地划分与对比珠江口盆地的沉积响应,例如按古生物年代学去细致地确认沉积记录,去研究沉积速率,可以反过来推断(考虑到提前效应)高原的隆升经历;或者有关高原隆升的任何新的进展均有可能反馈到盆地的沉积演化研究中去。要知道,在青藏高原以东及以南的我国领域内,能够获得青藏高原隆升的沉积响应,特别是比较连续的记载,可能只有从南海北部诸盆地的沉积记录中去破译。

显然,没有珠江口盆地,特别是珠二拗陷的持续沉降,青藏高原隆升的连续记录是不可能获得的;没有介于珠一与珠二拗陷之间似存的深断裂,低水位期的沉积响应也很难保存下来。

进一步来看,没有深部软流圈热上涌及随后的热冷却,珠江口盆地,尤其是珠二拗陷,很难形成持续沉降的基本格局;没有板块碰撞导致青藏高原在 40 Ma 以来的持续隆升,珠江口盆地的北物源也很难形成规模,也很难想象存在 20 Ma 以上的古珠江水系能持续地携带巨量碎屑物进入盆地;没有裸露在华南古陆的大片燕山期与喜山期花岗岩区,古珠江流经地区难以确保能出现 23.8 Ma 时期的大面积优质碎屑岩储层,也很难想象在 13.8 Ma 时期会出现砾石级的碎屑岩储层;没有全球海平面周而复始地上升与下降,没有海进与海退的旋回,在今天远距陆缘百余千米的珠二拗陷可能是一片海相淤泥而不会成为低水位扇系统发育的主要场所,不可能成为古珠江水系穿越古大陆架百余千米进入新的拗陷的另一巨型的沉积场所。

因此,总结南海深水扇系统的形成与控制要素,必须从重大地质历史事件入手,至于盆地内部的沉积结构,包括沉积微相的展布,沉降中心的迁移,以及沉积物属性等,则均受控于其它要素,将在以后文章中探讨。

2.3 持续沉降形成独特的纵向叠置特征

从以长电缆深反射地震剖面为代表的诸多地震剖面的研究中,揭示了珠二拗陷一系列独特的纵向叠置特征(图 3):

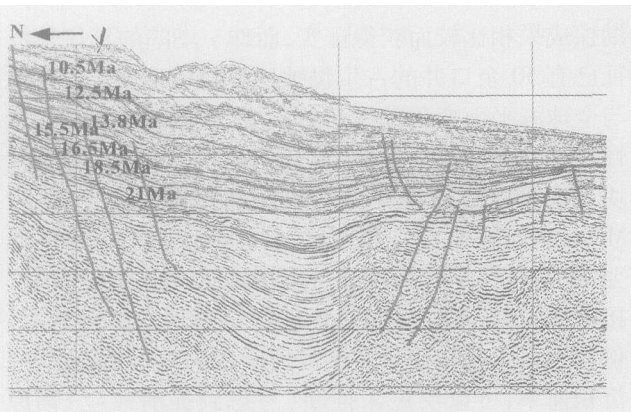


图 3 长电缆深反射地震剖面图

Fig 3 Deep reflection seismic profile of PRMB

• 早第三纪陆相断陷盆地与晚第三纪海相坳陷盆地的纵向叠置, 即在不同时期具有不同类型盆地(断陷与坳陷)、不同沉积物来源(陆相、海陆交互相、海相)、不同物源方向(多物源与单物源)、不同沉积体系(河流—滨岸—浅海陆架—深水低水位扇系统)的纵向叠置; 近期新的研究成果表明, 前第三纪白云凹陷为弧前盆地, 早第三纪属减薄地壳、拉张背景形成的断坳盆地, 晚第三纪为陆坡内盆地, 正是由于中生代的弧前盆地使白云地区从此成为地壳软弱带, 成为持续沉降的中心地区;

• 在 23.8~10.5 Ma 期间, 不同层序低位体系域的纵向叠置, 即在不同层序低水位期发育阶段(23.8 Ma, 21 Ma, 17.5 Ma, 16.5 Ma, 15.5 Ma, 13.8 Ma, 12.5 Ma 以及 10.5 Ma) 低位沉积物均终止于珠二坳陷的北缘, 起始于陆架坡折带以南, 往南延伸到珠二坳陷的南凹, 并在白云主凹形成巨厚的南海珠江深水扇系统。

• 相应的, 不同时期古陆架、古陆架坡折带、古陆坡以及沉积中心均呈相对稳定的纵向叠置, 强烈地说明, 23.8 Ma 以来它是受稳定与均衡的热沉降所控制, 尽管沉降的具体空间走向有所变迁, 但从宏观来看稳定在一个变化不大的范围内, 既包括上游的古陆架体系, 也包括相应的古陆坡体系, 以及相应的深水扇系统。

• 稳定的北物源, 往南呈现沉积相带的依次更迭, 并在珠二坳陷形成沉降与沉积中心。从沉积相展布特征分析可知, 珠一坳陷由北往南依次出现河流—三角洲—滨岸—浅海陆架的沉积体系, 往南在穿越番禺低隆起进入陆架坡折带以后, 在珠二坳陷依次出现深切谷充填—滑塌体—盆底扇—斜坡扇(大量发育水道及天然堤沉积微相)以及低位进积复合体等低

位深水扇系统沉积物, 并形成源—谷(渠、沟)—汇的对应沉积体系。整个珠江口盆地的沉积与沉降中心始终位于珠二坳陷的白云凹陷。

从上述众多的纵向叠置特征获得的基本概念是: 珠江口盆地南缘的珠二坳陷是 48 Ma 以来始终处于持续沉降的断陷—坳陷盆地, 它与北部的珠一坳陷似以深断裂联系并保持着低水位沉积的特征; 它接受巨量沉积物质并保持稳定沉积, 意味着深部的软流物质上涌及随后的热沉降制约着盆地持续沉降; 由于白云深水区位于减薄的过渡地壳上, 从白云凹陷北缘往南经下陆坡直到南部洋陆分界处, 莫霍面深度由 29 km 往南阶段式的抬升变浅至 21 km、16 km、12 km, 白云主凹之下强烈地减薄至 7 km (不计上复沉积岩厚度)^[12]; 从重力总梯度图、高磁异常带分布及区域莫霍面的分布来看, 白云主凹及其南凹正位于区域性的莫霍面上隆地带, 受深部地幔隆起的持续作用以及在裂隙之后持续热沉降, 幔流隆升与盆地沉降成镜像关系, 造成白云主凹的持续性沉降, 并沉积了巨厚的新生代地层, 这与珠二坳陷所处的大地构造部位及地壳软弱带有密切关系。而且, 从沉积相态、沉积过程以及层序地层分析表明, 它是经由早第三纪的多物源逐渐转向单一北物源, 最终从晚第三纪起形成稳定的北物源; 由于持续沉降, 23.8 Ma 以来珠二坳陷已由浅水沉积演化为深水沉积, 直至现今的饥饿沉积, 并且相应地从陆相沉积演化为海陆交互相以至海相沉积。

形成这种纵向叠置状态的必要条件, 至少是晚第三纪以来北部是持续隆升的背景, 南部则应为持续沉降, 携带巨量碎屑物质的则应是源于北方的大水系—古珠江水系, 并且至少从 25 Ma 以来始终是流经北方广阔火成岩剥蚀区不倦载体, 在高水位时期则将搬运物质卸载于珠一坳陷, 并受沉积相展布规律的制约; 而在低水位时期则往南穿越宽阔的珠一古大陆架(200 余千米), 并在古番禺低隆起以南卸载于珠二坳陷。

2.4 因应于全球海平面升降

就深水扇系统的形成而言, 目前的基本概念是在相对海平面下降时, 古珠江穿越华南古陆火成岩裸露区携带大量碎屑物质穿越珠一坳陷和番禺低隆起的古陆架进入古陆坡, 并在珠二坳陷形成大规模的低水位体系域。因此, 海平面周期性下降变化、古珠江大河恒久的输入沉积物质和白云主凹持续沉降是发育大规模低位扇体、并使各层序低位扇系统垂向叠置的重要原因。然而, 要使上述认识获得有力的支持, 扎实的以层序地层学为核心的基础研究十分关键。

多年前为了适应层序地层学研究的需要,便对珠江口盆地内 50 余口探井的微古生物进行地层年代和沉积环境的系统研究。50 余口探井高精度微体古生物定量分析为珠江口盆地建立了生物地层的时代格架,它揭示了珠江口盆地存在海平面升降的周期性变化;进一步研究发现珠江口盆地相对海平面变化的旋回性与全球海平面变化基本一致,反映海平面的变化主要受全球性事件的影响,从 23.8~10.5 Ma 期间共有 6 次海平面升降。以珠一坳陷探井为基础的生物地层的时代格架与海平面升降旋回对比为珠江口盆地层序地层学研究奠定了极为重要的基础。

当研究工作进入深水领域时,面临的首要矛盾就是如何针对珠二坳陷的勘探程度,将层序地层学的研究引向深入。为此进行两项重要的基础研究: 珠二坳陷的层序格架研究; 番禺低隆起 PY33-1-1 探井通过长电缆深反射地震剖面与大洋钻探井 ODP1148 站相联系的年代地层学的研究。

层序格架的研究表明,白云深水凹陷高分辨地震剖面的层序识别获得重要进展,立足于精度较好,保真程度较高的二维地震资料,精选出能够较为充分表达层序地层学特征的地震剖面,细致地研究与识别层序界面,依据有无海岸上超的往下转移、沉积相向盆地转移、河流回春作用以及是否存在陆架坡折带等四类标志加上其它辅助标志,在上渐新统至中新统的地层范围内识别出七个层序底界面,即从 23.8~10.5 Ma 的时间间隔中辨识出 6 次海平面周期性变化,这与在珠一坳陷基于 50 余口探井高分辨层序地层学研究成果所绘制的海平面相对变化曲线以及全球性海平面变化周期所揭示的特征是吻合的^[21]。随即进行长达六年的全坳陷范围的层序格架研究,经历反复的比较,特别是与 PY3 探井及大洋钻探井 ODP1148 站的年代地层学的精细研究,通过长电缆深反射地震剖面进行的反复比较与探索,确认层序底界面的划分、层序格架的成果及相应的系列图件是科学的、可靠的,可以作为深入研究的基础。

它说明,自 32 Ma 南海扩张以来,白云凹陷三级海平面变化旋回基本上与全球三级海平面变化一致,均经历着低位与高位的周期性变迁,低水位期沉积物的主体沉积在珠二坳陷,且时期配合协调,说明白云主凹三级海平面变化旋回可进行全球性的对比。但是,值得注意的是,珠江口盆地的海平面变化曲线体现为海侵型的变化,即从 32 Ma 以来,总的趋势是海侵范围不断扩大,海侵前缘不断往北推进,23.8 Ma

之前在低水位时期海平面下降到白云主凹 BY7-1-1 以南地带;而在 23.8~12.5 Ma 期间,海平面下降已北移到白云凹陷北坡,北进上百千米;在 10.5 Ma 以来,海平面下降又进一步北移到珠一坳陷南部,又北进数十千米。这种海侵型的海平面变化曲线体现出幕式的推进,并与全球海退型海平面变化形成鲜明的对比(图 4)。

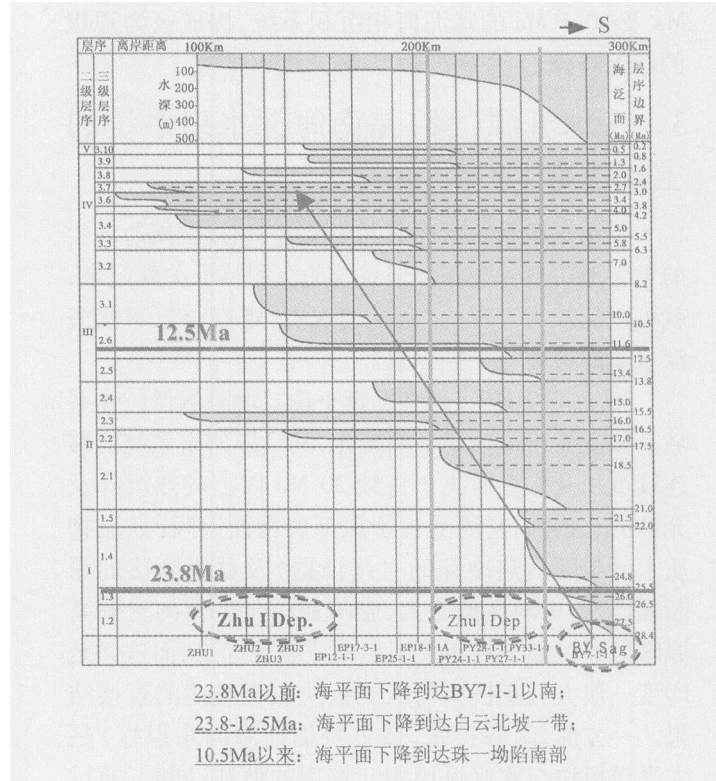


图 4 海侵特征图(据庞雄, 2004)
Fig 4 Characteristic of sea level change
(after Pang Xiong 2004)

南海运动使早第三纪的断陷盆地均被填充,形成辽阔的夷平面,在 23.8 Ma 低位期形成辽阔的浅水三角洲体系与浅水陆架体系,从 PY3 探井沿着地震反射层追踪可直达珠二坳陷南缘的大型前积反射层,反映了当时的陆架坡折带已到达白云凹陷之南,古珠江三角洲已推进到白云凹陷南侧,即在 23.8 Ma 时期白云凹陷也属古陆架的一部分。23.8 Ma 之后,海侵范围的扩大,或者珠二坳陷的快速沉降。使南海北部的陆架坡折带北移到白云凹陷的北坡一带,乃至在随后的千余万年期间基本稳定。陆架坡折带的进退,很大程度上说明珠江口盆地海平面变化的特殊性,即低位期的沉积边界从地质历史的角度来看是海侵型的;也可以认为,珠二坳陷的强烈沉降可能是主要的控制因

素,它导致陆架坡折带向大陆方向北移。

海侵型沉积系列的基本沉积特征是具有下粗上细的层序组合,极为有利于形成优越的储盖组合,例如 23.8 Ma 形成的浅水三角洲—滨岸砂泥岩储盖组合,在其上覆的是广布的深水海相泥质沉积物并直到 18.5 Ma 的最大的海泛面的全区性复盖;13.8 Ma 的含砾粗砂岩为主体的富砂深水扇系统上覆的是 12.5 Ma 及 10.5 Ma 的富泥海相沉积系统,构成极为理想的储盖组合。

3 一球五源(缘)是南海深水扇系统的主控因素

以深水扇系统形成时间为耦合核心,把周边发生的重大地质事件与深水扇系统的沉积特征关联起来,就可以从较为宏观的、系统的观点,观察与思考南海深水扇的形成与主控因素。

23.8~10 Ma 以来发育于珠二坳陷的低位体系域直接受控于全球海平面变化,其巨厚的扇系统能够连续沉积及保存取决于持续 20 Ma 以上的热沉降及充沛的北物源,它既受控于深部莫霍面上隆(软流物质上涌及随后热冷却的直接证据)及盆缘隐伏的深断裂体系,更与规模宏大、影响亚洲与世界的青藏高原隆升通过稳定物源及沉积响应联系起来,而这又是印度—澳大利亚板块与欧亚板块相互碰撞的直接结果。一方面,南海扩张(或古特提斯海向东退缩)是太平洋板块与欧亚板块相互作用的例证;同时,通过珠江口盆地折射出的沉积响应特征,正是另一对板块体系碰撞的例证。它们共同的制约因素是燕山运动以来全球地球动力学机制发生的重大转变。

因此,现在我们可以将南海深水扇系统的主控因素概括为一球五源(缘),即:

总体上受全球海平面的控制;

青藏高原隆升所形成的远距离效应,应当作为重要的考察思路,即远源效应;

软流圈热上涌及随后的热沉降,是控制盆地持续沉降的深部要素,即深源效应;

以弧前盆地、陆相断陷盆地与海相坳陷盆地的继承性发展形成众多纵向叠置的渊源效应;

在宽广陆架与相对陡峻狭窄陆坡之间长期稳定发展的潜伏深断裂要素所体现的盆缘效应;

渊源流长、连续 2000 余万年古珠江水系途经华南火成岩裸露区,既形成稳定供源体系,又提供优质储层的物源效应。

一球五源(缘)从时空耦合与地质重大事件耦合的观点,总结了南海深水扇系统形成的控制要素,它还将随着层序地层学、年代地层学与深水扇系统结构特征的深入研究,深化我们对深水扇系统的形成模式的认识。

4 结论

主体位于珠江口盆地南缘深水区的南海深水扇系统主要发育期为晚第三纪中新世,由于它所处的特殊的空间部位,新生代处于东亚—西太平洋大陆边缘,特提斯—喜马拉雅构造域与太平洋构造域的复合地带,以及形成的特殊时期——40~23.8 Ma 期间两大板块体系碰撞、青藏高原隆升、南海海底扩张,软流圈物质上涌及随后的热冷却、大规模海平面的升降变化、中国大陆地貌格架重大变革以及巨大水系的变迁,因而在研究南海深水扇系统的形成特征时必须以时间耦合、空间耦合以及地球动力学耦合为纽带,用整体、系统的论点研讨与分析南海深水扇系统的形成、特征及其宏观控制因素。

研究表明,南海深水扇系统形成于重大地质背景中,具备一系列独特的纵向叠置特征,包括不同类型盆地的纵向叠置,不同层序低水位发育期的纵向叠置,不同时期古陆架、古陆架坡折带、古陆坡以及沉降中心的相对稳定、恒古的古珠江物源输送区以及巨厚的陆源碎屑物堆积;通过珠江口盆地沉降曲线与青藏高原综合隆升曲线比较,印澳板块与欧亚板块碰撞导致的青藏高原隆升,是长达 2000 余万年控制珠江口盆地单一物源(北物源)的最基本要素。本文同时指出由热上涌及随后的热沉降所控制的珠二坳陷持续沉降,是在我国领域内可能获得青藏高原隆升的沉积响应,特别是比较连续记载的主要场所。

本文将南海深水扇系统的主控因素概括为一球五源(缘),即总体上受全球海平面控制(球),远源效应(青藏高原隆升所形成的远距离效应),深源效应(软流圈热上涌及随后的热沉降),渊源效应(不同类型盆地叠置并在软弱带基础上形成的诸多纵向叠置),盆缘效应(潜伏深断裂、继承性陆架坡折带),以及物源效应(2000 余万年古珠江穿越华南燕山、喜山期火成岩裸露区提供优越的碎屑物)。

参考文献(References)

- 1 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.北京:科学出版社,2003 1~25[Chen Changmin, Shi Hesheng]

- eng Xu shi'e *et al.*, Original condition of the Tertiary Oil and gas accumulation Pearl River Mouth Basin. Beijing Science Press, 2003. 1~25]
- 2 彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等. 南海珠江口盆地深水扇系统的发现. 石油学报, 2004, 25(5): 17~23 [Peng Dajun, Pang Xiong, Chen Changmin, *et al.* Discovery of deep-water fan system in south china sea. *Acta Petroli Sinica*, 2004, 25(5): 17~23]
 - 3 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆起与环境变化. 广州: 广东科技出版社, 1998 [Shiyafeng Lijijun Li Bingyuan, Uplift and Environmental Change of Tibet Plateau in Late Cenozoic Era. Guangzhou Kwangtung Press of Science, 1998]
 - 4 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学 (D 辑), 1996, 26(4): 289~295 [Chung Dahi Ding Lin Uplifted process and its mechanism of the Tibet plateau. *China Science (D)*, 1996, 26(4): 289~295]
 - 5 迟效国, 李才, 金巍, 等. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升. 地质论评, 1999, 45(增刊): 978~985 [Chixiaoguo Li Cai Jinwei *et al.* Time and Space evolution of Late Cenozoic volcanicity in north Tibet and the uplift of Tibet Plateau. *Geology Comment*, 1999, 45(Supp): 978~985]
 - 6 许志琴, 姜枚, 杨经绥. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用. 地质学报, 1996, 70(3): 195~206 [Xu Zhiqin Jiang Meij Yang Jinsui. Deep tectonic geophysics of the uplift in North Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(3): 195~206]
 - 7 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 等. 南海的右行陆缘裂解成因. 地质学报, 2002, 76(2): 180~189 [Zhou Di Chen Hanzong Wu Shimin, *et al.*, Opening of the South China Sea by dextral Splitting of the East Asian continental margin. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 180~189]
 - 8 刘宝明. 南海盆地演化及碳酸盐岩油气勘探. 海相油气地质, 2003, 8(1~2): 10~15 [Liu Baoming. basins evolution and carbonate oil-gas exploration in the south china Sea. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2003, 8(1~2): 10~15]
 - 9 王成善, 丁学林. 青藏高原隆升研究新进展综述. 地球科学进展, 1998, 13(6): 526~531 [Wang Chengshan, Ding Xuelin. The new researching progress of Tibet plateau Uplift. *Advance in Earth science*, 1998, 12, 13(6): 526~532]
 - 10 刘燊, 迟效国, 李才, 等. 青藏高原的形成和隆升机制综述. 世界地质, 2001, 20(2): 105~112 [Liu Shen, Chixiaoguo, Li Cai *et al.*, The summarizing for the forming and uplifted mechanism of Qinghai-Tibet Plateau. *World Geology*, 2001, 6, 20(2): 105~112]
 - 11 杨少坤, 黄丽芬. 珠江口盆地特殊层序地层模式及其对勘探的指导意义. 中国海上油气 (地质), 1996, 10(3): 8~15 [Yang Shaokun Huang Lifen. Special Stratigraphic model and its exploration al meaning in Pearl River Mouth Basin. *South China Sea. Ocean Oil-Gas Geology*, 1996, 10(3): 8~15]
 - 12 黄春菊, 周蒂, 陈长民, 等. 深反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构. 科学通报 [Huang Chunju, Zhou Di, Chen Changmin, *et al.* Deep crust architecture exposed by deep reflecting seismic profile in Baiyun sag. *Science News* (accepted)].
 - 13 Peng Dajun, Chen CM, Pang Xiong *et al.* Discovery of deep-water fan system in Pearl River Mouth Basin, South China Sea. AAPG International Conference & Exhibition. A73. Sep 2003
 - 14 Chen Changmin, Pang Xiong. The deep-water lowstand fan and its exploration potential of Pearl River Mouth Basin (PRMB). (世界石油大会文章), 2001
 - 15 Dorrik Stov A V, Mike Mayall. Deep-water sedimentary systems. New models for the 21st century. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17
 - 16 Sharmugan G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s~1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17, 285~342
 - 17 Richards M, Bowman M. Submarine fans and related depositional systems. II. variability in reservoir architecture and wireline log character. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15, 821~839
 - 18 Galloway W E 著, 黄春菊译. 硅质碎屑岩陆坡和坡麓沉积体系的相组成、地层结构及分类. 国外油气勘探第 6 卷, 1999, 6: 657~676 [Galloway W. E (Huang Chunju translated). Siliceous clastic slope depositional system, its facies, internal architectures and classification. *Petroleum exploration (abroad) No. 2*, 1999, 6: 657~676]
 - 19 Apps G M, Peel J, Travis C J, Yeilding C A. Structural controls on Tertiary deep water deposition in the Northern Gulf of Mexico. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research Conference Stratigraphic Analysis, 1994, 1~7
 - 20 Luca Baffinji, Carlo Cavalli, Lorenzo Papani. Detailed stratal correlation and stacking patterns of the Gromiasco and Lower Castagna turbidite systems. Tertiary Piedmont Basin, Northwestern Italy. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research conference Stratigraphic Analysis, 1994, 9~21
 - 21 Amold H Bouma, Deville H W ickens, Tanqua Karoo. Ancient analog for fine-grained Submarine Fans. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research conference Stratigraphic Analysis, 1994, 23~34
 - 22 Cesar Cagnelli. Shelf processes and canyon/channel evolution controlling turbidite systems: examples from the Sergipe-alagoas Basin, Brazil. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research Conference Stratigraphic Analysis, 1994, 39~50
 - 23 Ekehoi A, Norm H, Anderson E S, Dowdeswell J A, *et al.* On the origin and flow behavior of submarine slides on deep-sea fans along the Norwegian-Barents sea continental margin. *Geomarine Letters*, 1997, 17, 119~125
 - 24 Reading H G, & Richards M. Turbidite systems in deep-water basins: magings classified by grain size and feeder system. *AAPG Bulletin*, 1994, 78, 792~22
 - 25 Wells N A. Clastic sedimentology-deep sea. *Geotimes*, 1998, 43, 31~32
 - 26 Pang Xiong, Yang Shaokun, Zu Ming, Li Jinsong. The deep-water fan systems and petroleum resource in northern slope of South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 78(3): 626~631

The Characteristics and Controlling Factors for the Formation of Deep-water Fan System in South China Sea

PENG Da-jun¹ PANG Xiong² CHEN Chang-min²

ZHU Ming² HUANG Xian-hu¹ SHU Yu²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. China National Oceanic Oil company, Shenzhen Branch, CNOOC Guangzhou 510240)

Abstract Until the end of 2001, more than 58×10^9 barrels OOIP have been discovered with the water depth of greater than 500 m in 18 basins whole world. Among them, 90% of oil and gas reserves discovered in turbidite sedimentary system. These are the results of deeply exploration and the progress of science and technology.

The Deep-water Fan System (DWFS) refer to such a sedimentary system which locate in Zhu 2 depression related with the continental margin delta system and developed in lowstand tract since 23 Ma. The formation of DWFS had an important geological background connected with the uplifting of Tibet Plateau, the expansion of South China Sea and the global sea level change. The vertical stacked pattern is unique and consist of idealized reservoir-caprock complex. Using the systematic theory coupled with geological time-space and earth dynamic, discuss the formation of DWFS, and reveal the main controlling factors including the Tibet Plateau Uplifting, mantle bulge, and continuous subsidence of depression, subtle deep faulting systems, sedimentary supplies of classic sediments from granite area in south of mainland, and the global sea level change.

Key words deep-water fan system, uplifting of Tibet Plateau, global sea level change, Lowstand Tract, Pearl River Mouth Basin