

深反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构

黄春菊 周蒂 陈长民 孙珍 郝沪军

(中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 中国海洋石油总公司深圳分公司, 广州 510240. E-mail: huangchunju@scsio.ac.cn)

摘要 以过南海北部陆缘的珠江口盆地白云凹陷中部的第一条长电缆深反射地震剖面(14 s)作为研究的基础, 对该剖面进行了速度分析、时深转换及精细地震解释, 探讨了白云凹陷的深部构造特征. 该剖面深部反射特征非常清晰, 莫霍面表现为一个起伏不平、厚薄不一的“层”, 其厚度可达 1~3 km. 地壳厚度从陆架、陆坡向海盆明显阶梯式减薄, 在白云主凹的沉积中心处仅厚 7 km 左右. 在剖面的最东南端下陆坡部位, 深部(10~21 km)有三个略显起伏、彼此大致平行的强反射条带, 推测为莫霍面之下存在俯冲洋壳的显示. 在白云凹陷可能存在深大断裂, 凹陷的持续强烈沉降可能与深大断裂的长期活动有关.

关键词 深反射地震剖面 地壳结构 白云凹陷 珠江口盆地

白云凹陷位于中国南海北部大陆边缘、珠江口盆地的南部, 是南海最具代表性的第三系深水陆坡沉积区(图 1). 由于其处于欧亚板块、太平洋板块和印-澳板块三大板块作用的交汇地带, 使得盆地的发育复杂化^[1-9], 这与国外深水勘探成功的地区如西非的 Gabon, 巴西的 Campos 等被动大陆边缘的断陷盆地有所不同^[10-13]. 南海陆坡的深部演化机理是控制陆坡发育、制约深水扇系统沉积的基础科学问题, 对开辟南海北部深水勘探新领域极其重要, 还涉及到南海北部深部地壳结构、南海扩张机制和演化、南海北部陆缘性质以及受三大板块相互作用的复杂新生代构造演化史等许多重大科学问题. 因此, 研究制约南海陆坡沉积的深部控制因素有重要的科学和经济意义. 要揭示控制南海北部陆坡发育、制约深水扇沉积系统形成的深部演化机理, 深部地壳结构的研究就显得非常重要.

为了更好地了解深水区的盆地形成过程及沉积盆地的构造演化, 2002 年中国海洋石油总公司深圳分公司在珠江口盆地采用特殊的长电缆地震装置采集了南海北部陆缘的第一条深反射地震剖面(2002DSRP), 此剖面跨越番禺低隆起南部、白云凹陷中部、大陆坡直至深海区(图 1), 全长 268 km. 深地震资料的获取采用 576 道长排列, 道间距 12.5 m, 炮间距 37.5 m, 偏移距 200~7400 m, 采样率 2 ms, 记录长度 14 s, 能量源是气枪震源, 取得剖面的记录质量之高和剖面之长, 在中国海域深反射地震史上是空前的.

这是南海北部陆缘的第一条长电缆深反射地震

剖面, 由于深部反射特征非常之清晰, 首次看到了白云凹陷的沉积基底并且首次直接观察到莫霍面的形态, 对揭示珠江口盆地白云凹陷深水区的裂谷构造、地壳减薄、地幔物质上涌、岩浆及断裂活动等构造特征与白云凹陷构造演化的成因联系有重要意义, 这是过去所采集的反射地震资料和折射地震资料所不能达到的. 本文对该剖面进行了速度分析、时深转换及精细地质解释, 并与折射地震、重磁资料的地质解释进行了比较分析, 讨论了南海北部陆缘的深部构造及地壳结构的差异.

1 区域地质背景

珠江口盆地处于南海北部海南岛与台湾岛之间的陆架和陆坡部位, 它的形成和演化受到印度板块与欧亚板块的接触、碰撞以及太平洋板块对欧亚板块 NWW 向俯冲的影响. 晚白垩世至晚渐新世华南陆缘的拉张作用使南海北部陆缘发生了大规模的地壳拉张减薄, 形成了一系列裂谷型的沉积盆地, 如珠江口盆地, 琼东南盆地, 台西南盆地等(图 1). 其中珠江口盆地是在加里东、海西、燕山褶皱基底上形成的中、新生代含油气盆地, 同裂谷期的地层主要由沉积在河流-湖泊环境的古新世~始新世的碎屑岩组成. 珠江口盆地内发育了 NEE-NWW 向以及与之共扼的 NW 向断裂, 造成了盆地具有二拗三隆的南北分带、东西分块的独特构造格局和先断后拗、先陆后海的复杂发育演化历史^[2-4].

珠江口盆地南部的珠二拗陷走向 NEE, 呈长条状展布, 是由多个半地堑、地堑型凹陷所组成的古近系的断陷. 白云凹陷是其中最大的凹陷, 面积约

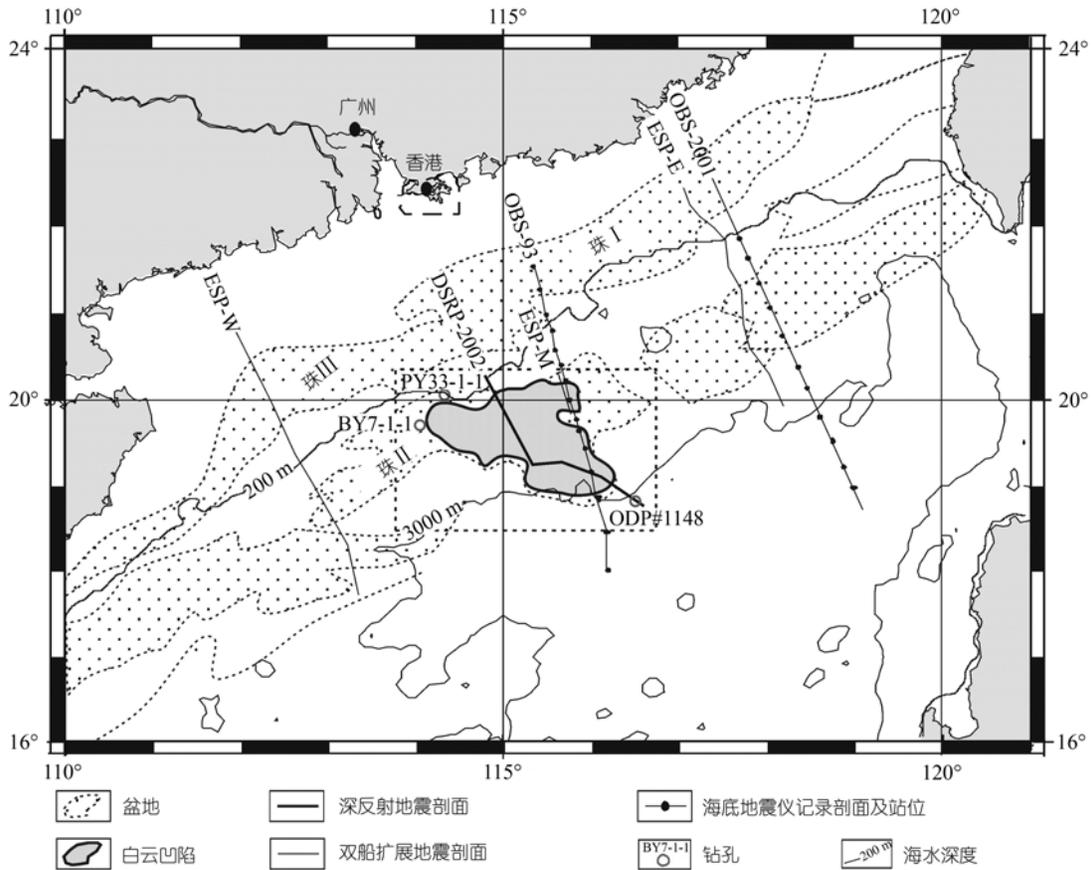


图 1 珠江口盆地白云凹陷的区域构造位置及深反射地震剖面(2002DSRP)位置图

20000 km², 走向近东西, 水深 200~2000 多米, 跨越大陆架边缘与斜坡的过渡带-陆坡-深海区^[14,15]。白云凹陷是一长期稳定下沉的负构造单元, 沉降与沉积中心重合, 发育了巨厚的古近系~新近系沉积物, 具有良好的油气资源前景, 是南海最具代表性的新生界深水陆坡沉积区。白云凹陷主要由白云主凹和白云南凹组成, 主凹位于上陆坡, 南凹跨中陆坡, 主凹与南凹之间以中部低隆起分隔。

2 深反射地震剖面的地层划分对比和时深转换

2.1 剖面的地层划分对比

白云凹陷深反射地震剖面(图 2(a))的下部构造层(古近系)的划分主要根据区域地震资料, 划分出三个超级层序: 即 SS1(T_g~T₈), SS2(T₈~T₇), SS3(T₇~21 Ma)。上部构造层(新近系)的划分主要根据与番禺低隆起南部钻孔、测井、地震、古生物等资料的对比, 从海底到中新统底共识别出三个超级层序^[16,17], 即

SS4(21~16.5 Ma)、SS5(16.5~10.5 Ma)、SS6(10.5 Ma~海底)。本文所采用的层序系统见图 3 所示。

2.2 剖面的时深转换

由于地震反射剖面是在时间域中反映地下地质情况的, 要正确的认识地下地质结构, 必须把时间域中的地震数据恢复到深度域中。从时间到深度的转换是地震资料解释的关键环节, 只有进行正确的时深转换, 才能真实反映地下实际地质构造, 获得可信和可靠的有效地质成果。速度是连接时间域和深度域的桥梁, 要完成地震剖面的时深转换, 就必须对地震速度参数有一个清晰和全面的认识, 掌握其变化规律以及影响和导致其变化的控制因素, 只有这样才能顺利地进行时深转换。

目前研究区北边的番禺低隆起上的最深钻孔已穿透 4800 m, 达到 T₇ 界面。我们首先根据这些钻孔资料的综合速度曲线及其向深部的自然外延对深反射地震剖面作时深转换, 发现下部外延的速度偏大, 如渐新统上部 SS₃ 层序的速度已达到 5.4 km/s, SS₂

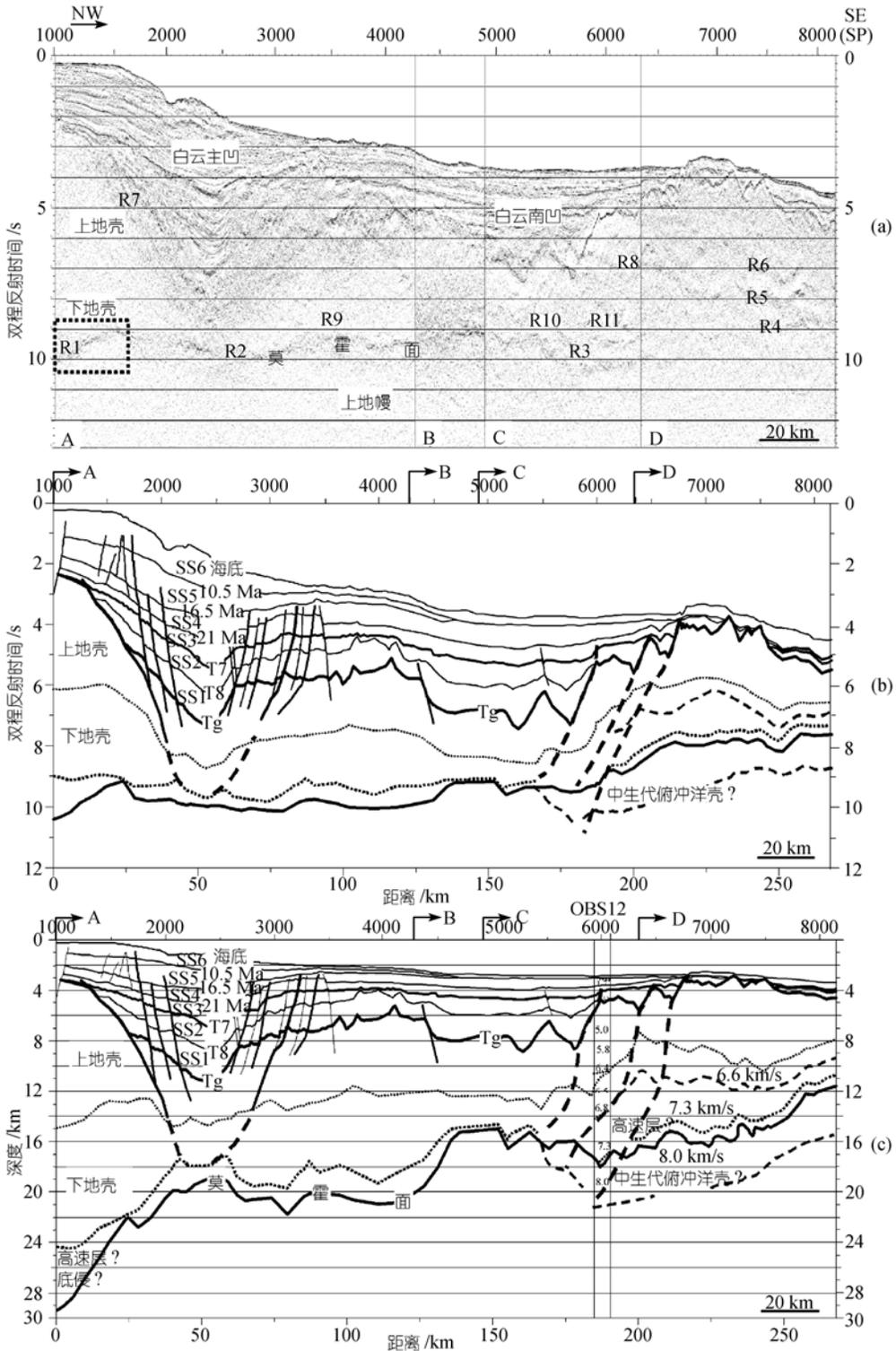


图2

(a) 过珠江口盆地白云凹陷的深反射地震时间剖面(据中国海洋石油总公司深圳分公司采集), 由 A, B, C, D 四段组成, 在白云主凹与南凹之间的中部低隆起的南部转向 SEE 向, 剖面全长 260 多公里, 在剖面北段的 9-10S(TWT)之间莫霍面的强反射排列 R1, R2 和剖面南端的三组近平行的强反射 R4 都非常清晰; (b) 是(a)的相应解释简图; (c) 是(b)的相应深度图, 其纵横比约为 4:1, 示由陆架→陆坡→深海平原莫霍面阶梯式抬升, 莫霍面在白云主凹北部的大陆架处深达 29 km, 而在白云主凹的沉积中心只有 19 km 左右, 地壳厚仅 7 km 左右, 莫霍面起伏与沉积基底形态呈“镜像”关系

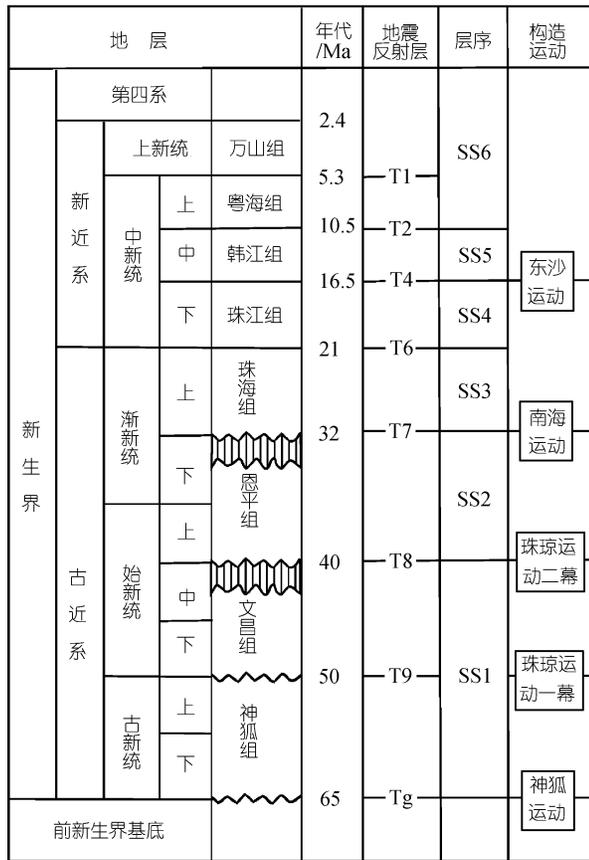


图 3 白云凹陷综合地质柱状图(据文献[16, 17]综合)

层序的速度已达到 6.5 km/s 左右, 这样外延的层速度显然不符合实际. 此外, 因为在番禺低隆起的新生代地层较薄, 而在白云主凹的沉积地层巨厚, 由于压实作用使速度随着深度的增加而增大, 单纯用番禺低隆起的钻井速度来对白云主凹进行时深转换是不合适的.

在采用多井的综合速度对深层进行时深转换都不太理想的情况下, 经过多次实验, 最后我们对各层序采用了恒定的层速度, 其中对浅层采用钻井和地震剖面叠加速度的综合速度, 而对深层主要根据地震剖面叠加速度谱(图 4)和经验值的综合平均层速度. 由于在白云主凹的沉积地层巨厚, 而在其南的中部低隆起和白云南凹及其以南的地方沉积地层明显减薄, 由于沉积压实作用而使沉积地层的速度随着深度的增加而增大, 所以研究区每一个层序的层速度在横向上都有变化. 我们通过用大量地震剖面叠加速度谱分层统计各层的平均速度(图 5), 发现剖面北段白云主凹极厚的沉积地层层序与剖面南段的沉积

较薄的地层层速度差别较大, 这是前人在做时深转换时所没有考虑到的, 因而我们在做时深转换时把整条剖面的每一层都分为南北两段来做, 以白云主凹的南部边界为界, 同一层在白云主凹及以北所用的速度一般大于中部隆起和白云南凹及其以南的速度, 同时在分界处附近采取速度渐变的方式逐渐过渡, 来消除分界处的突变现象. 地壳速度是根据区域海底地震仪探测资料^[18-21]假定的. 所采用的速度见表 1, 已转换为深度的简化地震解释剖面见图 2(c).

与前人的结果相比较, 本文深地震反射剖面 C 段在炮号 6000 附近与中国科学院南海海洋研究所与日本东京大学合作用海底地震仪所测的 OBS-93 测线^[20,21]中的 OBS12 站非常接近(图 1), 本文深剖面所揭示的深部地壳结构与 OBS12 站所反映的基本一致(图 2(c)).

表 1 用于时深转换的各层层速度(km/s)

层序	剖面北段速度	剖面南段速度
海水	1.5	1.5
SS6	2.0	1.75
SS5	3.0	2.0
SS4	3.6	2.3
SS3	4.0	2.75
SS2	4.4	3.4
SS1	4.6	4.25
上地壳层	6.2	6.2
下地壳层	6.6	6.6
高速层/底侵区	7.3	7.3

3 白云凹陷的深部构造特征

在这条深反射地震剖面上(图 2(a)), 可以清晰地看到白云主凹的沉积基底, 这是首次能在反射地震剖面上看到白云凹陷的底; 以前由于地震剖面未能清晰地展示出白云凹陷的深部面貌, 前人解释白云凹陷的沉积基底主要靠重力反演. 从深反射地震剖面上可见, 白云凹陷主凹南北由断裂带所限, 宽约 80 km, 沉积基底(Tg)深 11 公里多, 剖面上呈大致对称的深碟形; 南凹宽约 70 km, 沉积基底深约 9 km, 剖面上近似呈“W”型, 由于剖面在中部隆起的南边开始转为近东西向, 因此南凹的形态是视形态. 主凹和南凹之间称为中部隆起, 为一地震的模糊带, 层序界面起伏不平, 地层厚度尤其是古近系的 SS2 层序及新近系的 SS5, SS6 层序的厚度在此明显减薄.

在深反射地震剖面(图 2(a))的最北段大陆架区在 8.5~10.5 s TWT 深度上有一组厚层状(约 1500 毫秒厚)

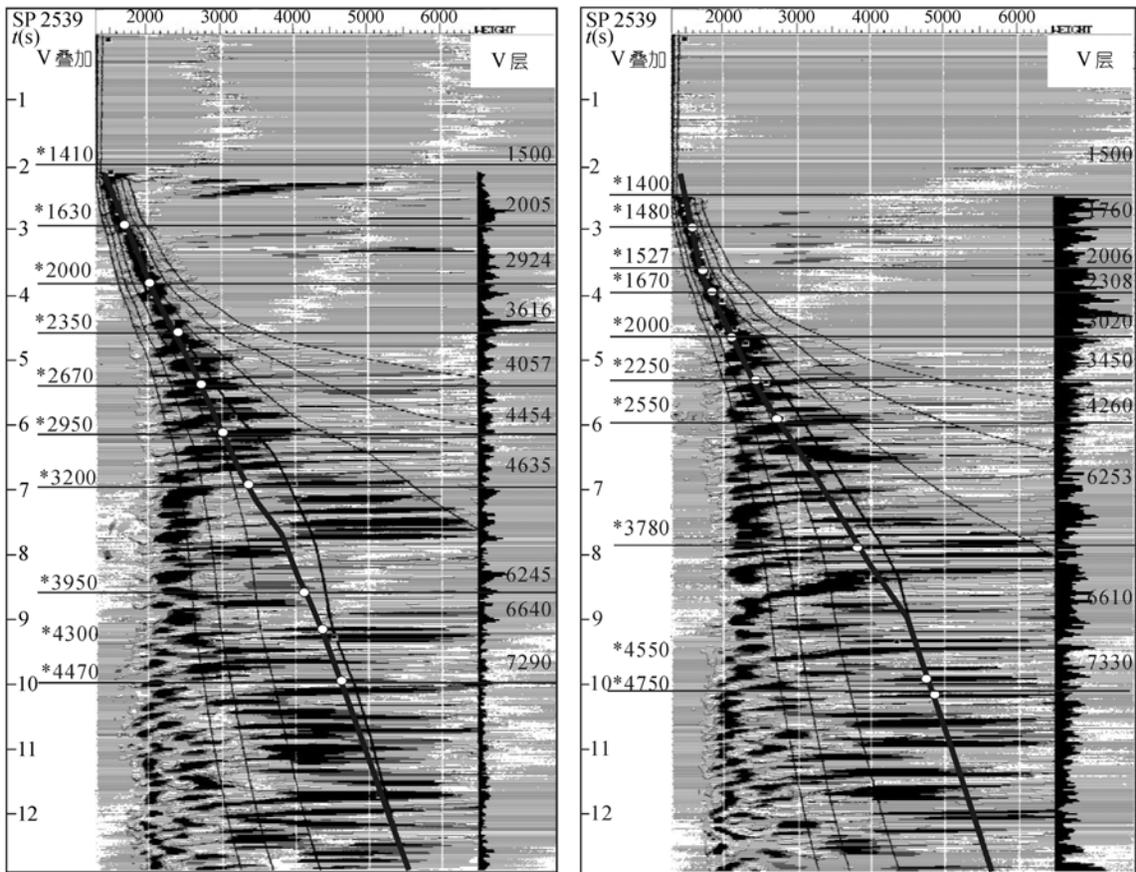


图4 深反射地震剖面上两点的速度谱图和各层序界面的叠加速度及其计算的层速度

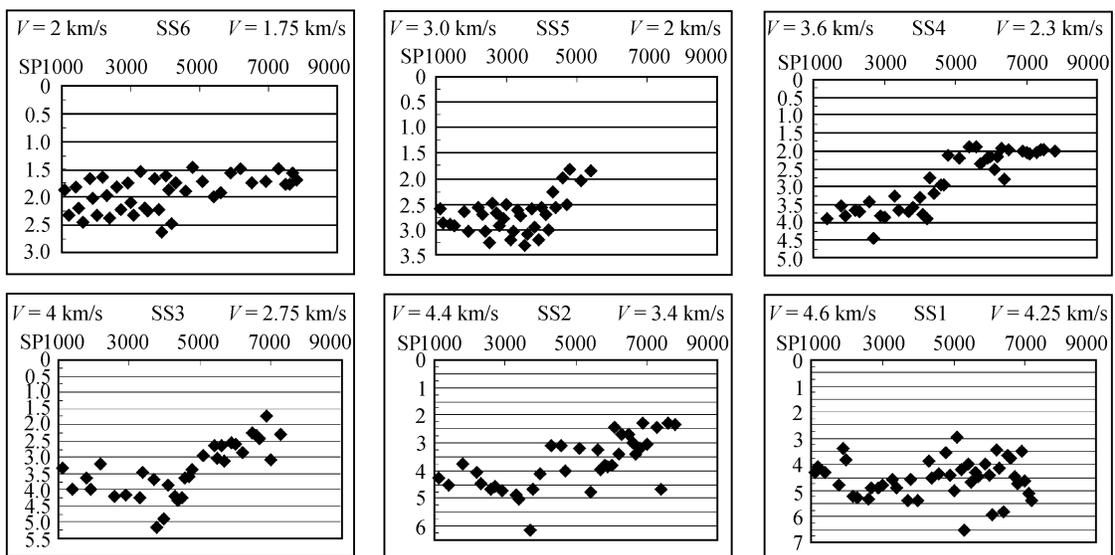


图5 由地震剖面叠加速度谱计算的平均速度分层统计示意图

可见每一层的速度在整个剖面上都明显具有两段式特征。从海底到 SS4 层序所标示的速度是钻井速度与地震剖面叠加速度谱计算的平均速度的综合速度；从 SS3 到 SS1 层序的速度主要是根据地震剖面叠加速度谱计算的平均速度；而 T_g 界面以下地壳层及高速层等层的速度是根据地震剖面叠加速度谱和经验值计算的综合平均层速度

的低频、亚连续、强振幅的强反射R1(图 6), 类似的强反射可向南追索到从陆架坡折以下的R2, 继续向深水区(盆地方向)延伸并呈阶梯状变浅, 在剖面中段约在 9~10 s TWT之间, 在白云南凹的南部边界出现多组强反射R3, 且产状变化较大, 到剖面的末端在 6~9 s TWT之间出现多组近平行的强反射R4, R5, R6. 根据与南大西洋、北大西洋、北海、加拿大东部、巴西以及其他区域所获得的深反射地震剖面的反射特征相类比^[22-31], 我们解释这组深部地震强反射为莫霍面, 但它实际上不是一个简单的面, 而是一个速度递变或互变层, 厚约 1~3 km, 具有明显的构造与岩石组成的复杂性, 侧向变化较大. 强反射组本身可能与莫霍面之上的糜棱岩化地层的滑脱面对应或者与从脆性到韧性地壳的转换带相对应; 或者可能是由于上地幔的岩浆底侵(underplating)而形成的岩浆捕获体^[22,31], 这已被近年来各国的大量的深反射地震资料所证实, 并逐渐得到了地球物理学、岩石学家等的认可^[18,32,33]. 在白云主凹的北部边界见倾斜的强反射组R7, 一直到莫霍面都有反映, 推测为控制凹陷形成的南倾深大断裂; 在白云南凹的南部边界, 也出现多组倾斜的强反射R8, 推测为下陆坡的北倾深断裂^[34-38]. 在中部隆起带的下部及南凹可见多组倾向相反的强反射(R9, 10, 11)本文中称为高速异常体,

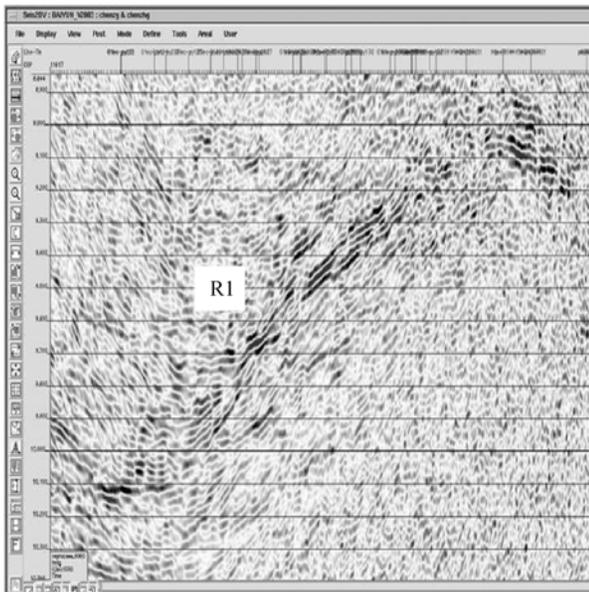


图 6 深反射地震剖面最北段大陆架区在 8.5~10.5 s 深度上的一组厚层状(约 1500 毫秒厚)的低频、亚连续、强振幅的强反射 R1, 指示莫霍面(位置见图 2(a))

其内部的速度比围岩高(图 7).

经过时深转换之后, 莫霍面深度由陆架→陆坡→深海平原呈阶梯式抬升(图 2(c)), 由剖面北端的 29 km 向南阶梯式变浅至 19, 15, 11.5 km, 陡坎分别位于陆架坡折(白云凹陷北缘)、下陆坡、洋陆分界处, 莫霍面和地壳厚度从陆到海的这种阶梯式变浅和变薄与沉积基底呈“镜像”的对应关系. 在深度剖面图上强反射体 R1 的底所对应的莫霍面最深 29 km, 地壳(不包括沉积层)厚 26 km, 到陆架坡折处陆壳迅速减薄, 在白云主凹的沉积中心位置对应的莫霍面埋深仅有 19 km, 地壳厚度仅有 7 km 左右, 莫霍面起伏与沉积基底的地形呈“镜像”关系. 在白云南凹的沉积中心莫霍面抬升到大约 15 km 左右, 莫霍面起伏与沉积基底形态也呈“镜像”关系, 地壳也仅有 7 km 左右的厚度, 接近洋壳的厚度.

在南凹的南部边界以南, 深地震反射剖面上出现多组大致平行的强反射排列 R4, R5, R6, 深度分别为 11, 16, 和 20 km 左右, 向剖面的南端呈波状起伏和抬升, 在剖面的最南端, 变为 7, 11.5 和 15.5 km 的深度, 莫霍面埋深约 11.5 km, 地壳厚 6 km 左右, 这种地壳结构通常是遭受了陆壳的极端减薄的影响, 已靠近陆壳与洋壳的转换带. 这三组强反射中, 上面两组分别与下地壳高速层顶面和莫霍面对应, 这与中日合作海底深折射地震剖面的 OBS12 站的解释一致(图 2(c), 图 8), 而最深的一组推测为另一个莫霍

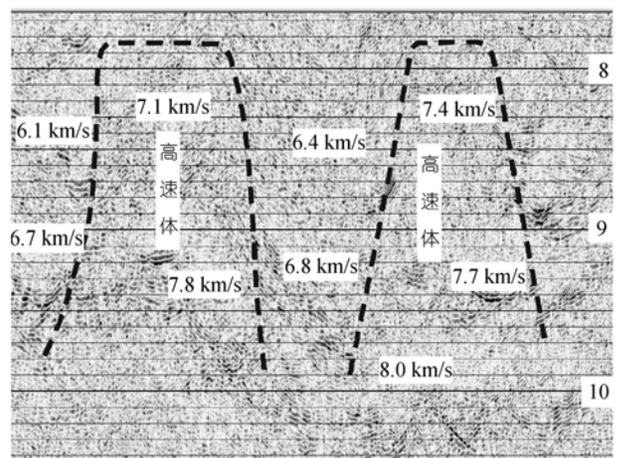


图 7 深反射地震剖面中部在 7.5~10 s 深度上的虚线勾勒出了两个高速异常体的轮廓, 速度比围岩高, 而且在异常体内可见到多组倾向相反的强反射结构

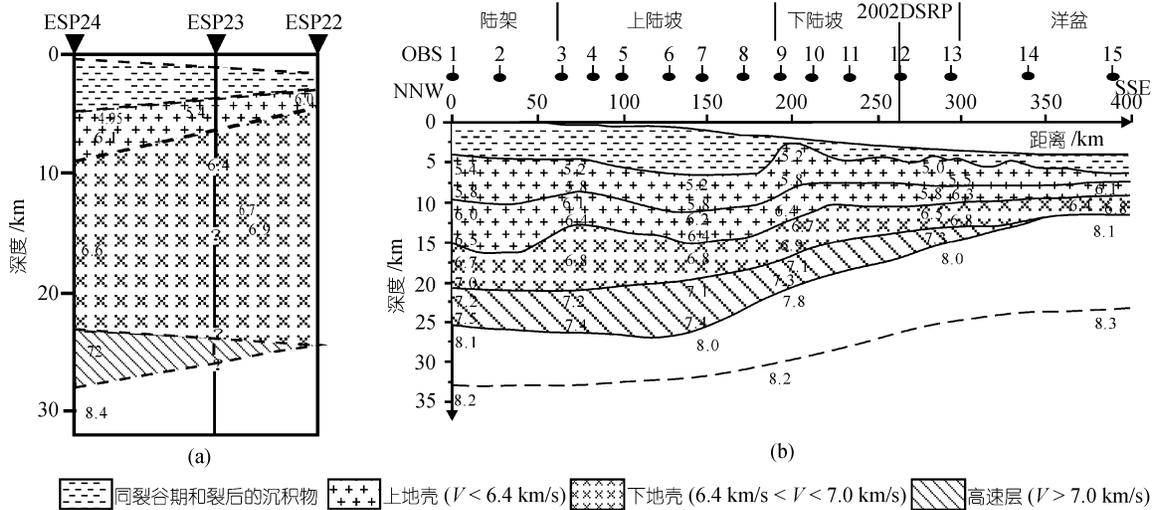


图 8

(a) 1985 年的中美合作南海北部陆缘ESP(双船地震展排列) 中部剖面的解释剖面^[35-37]; (b) 1993 年中日合作海底地震仪所测的深折射地震剖面(OBS-93 剖面)的解释剖面^[20,21], 其中OBS 12 站点处与深反射地震剖面相交. OBS 12 站的解释与深反射剖面的解释相比较如图 2(c)所示, 两个剖面的解释基本一致, 这也达到了相互验证的目的. (a),(b)两图的位置见图 1

面, 即中生代俯冲洋壳¹⁾的底面. 图 8(a)和(b)都解释出了下地壳存在高速层, 但图 8(a)为双船扩展排列地震剖面^[35-37]的解释, 上地壳很薄而下地壳很厚, 下地壳是上地壳的几倍厚; 图 8(b)为海底地震仪所测的深折射地震剖面OBS-93 的解释^[20,21], 上地壳和下地壳的厚度几乎等厚. 本文对深部地壳结构的解释与 OBS-93 剖面的解释基本一致, 但更为详细, 因为深反射地震剖面上所反映的信息更为丰富. 折射剖面的解释都是靠推算出来的, 不能直观的看到地壳的内部结构. 而我们的深反射地震剖面正弥补了这个不足, 它能直接地观察到地壳的内部结构, 但缺点是深部地壳的层速度不是很准确, 解释过程中参考了折射地震的速度.

4 结论

通过对白云凹陷中部的第一条长电缆深反射地震剖面(14 秒)的速度分析、时深转换及精细地震解释, 揭示了白云凹陷的深部构造特征如下:

() 在这条深反射地震剖面上首次清晰地看到了白云凹陷的沉积基底; 在剖面上白云凹陷可分为白云主凹和白云南凹两个次级凹陷, 主凹南北由断裂带所限, 宽约 80 km, 沉积厚度 10 km 以上, 剖面上呈大致对称的深碟形; 南凹宽约 70 km, 沉积厚度约 6 km, 剖面上的视形态近似呈“W”型; 主凹和南凹

有一地震的模糊带, 称为中部低隆起, 层序界面起伏不平, 古近系的SS2层序及新近系的SS5, SS6层序的厚度在此明显减薄.

() 在白云主凹的南北两侧可能存在断至莫霍面的两组深大断裂, 它们控制着白云凹陷的形成; 在白云南凹的南部边界(下陆坡), 也存在一组北倾的深大断裂, 推测可能是在残留的前新生代古缝合带的基础上发展的继承性岩石圈断裂.

() 在深反射地震剖面最南端的深部可观察到三个近平行的强反射条带, 其位置接近陆洋壳边界的转换带处, 上面两组分别与下地壳高速层顶面和莫霍面对应, 而最深的一组推测为中生代俯冲洋壳的莫霍面.

() 莫霍面深度由陆架→陆坡→深海平原呈阶梯式抬升, 由剖面北端的 29 km 向南阶梯式变浅至 19, 15, 11.5 km, 陡坎分别位于陆架坡折(白云凹陷北缘)、下陆坡、洋陆分界处; 地壳结构从陆坡向海盆有一明显减薄的趋势, 在白云主凹之下和下陆坡部位突然减薄; 莫霍面在白云主凹的沉积中心处埋深仅 19 km 左右, 地壳厚仅 7 km 左右, 莫霍面起伏与沉积基底的地形呈镜像关系; 在白云南凹的沉积中心莫霍面抬升到大约 15 km 左右, 也与之呈镜像关系, 地壳也仅有 6 km 左右的厚度, 接近于洋壳.

1) 周蒂, 王万银, 庞雄, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带. 未发表

深反射地震剖面为深部地壳的地质构造研究提供了可靠的地球物理依据, 本文仅对深剖面进行了初步的解释, 获得了白云凹陷的地壳深部的一些结构构造特征, 但此项研究仅处于起步阶段, 对深剖面所揭示的深大断裂、岩浆活动、地幔上隆、底侵等深部构造特征, 以及它们对白云凹陷的形成演化的控制作用和对油气成藏的指示作用等还有待于进一步的深入研究.

致谢 项目研究得益于中国海洋石油总公司深圳分公司庞雄、舒誉、李劲松、陈照光等人以及中国科学院南海海洋研究所研究员阎贫、陈汉宗、许鹤华、吴世敏等人的支持和讨论, 在此表示衷心感谢. 本工作受国家自然科学基金与中国海洋石油总公司联合资助重点项目(40238060)、国家重大基础研究发展规划项目(G2000046702)、中国科学院南海海洋研究所所长基金项目(SJ200402)、中国科学院重要方向项目(KZCX2-117-5)、中国科学院南海海洋研究所领域前沿项目、中国科学院南海海洋研究所与广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室基金(BYH03A05)资助.

参 考 文 献

- 1 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992. 1~30
- 2 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997. 1~52
- 3 李平鲁. 珠江口盆地构造特征与油气聚集. 广东地质, 1994, 9(4): 21~28
- 4 李平鲁. 珠江口盆地新生代的构造运动. 中国海上油气(地质), 1993, 7(6): 11~17
- 5 梁慧娟, 李平鲁. 南海的构造演化及南海型大陆边缘. 南海研究与开发, 1991, (1): 1~7
- 6 钟建强. 珠江口盆地的构造特征与盆地演化. 海洋湖沼通报, 1994, (1): 1~8
- 7 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 1~13
- 8 阎全人. 南海北部陆缘地壳结构特征及其构造过程. 地质论评, 2000, 46(40): 417~423
- 9 吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题. 高校地质学报, 2001, 7(4): 419~426
- 10 Kolla V, Bourges Ph, Urruty J M, et al. Evolution of Deep-Water Tertiary Sinuous Channels Offshore Angola (west Africa) and Implications for Reservoir Architecture. AAPG Bulletin, 2001, 85(8): 1373~1406
- 11 Dorrik A V S, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 125~135[DOI]
- 12 Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): Deep-water processes and facies models—a critical perspective. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 285~342[DOI]
- 13 Reading H G, Richards M. Turbidite Systems in Deep-Water Basin Margins Classified by Grain Size and Feeder System. AAPG Bulletin, 1994, 78: 792~822
- 14 代一丁, 庞雄. 珠江口盆地珠二坳陷石油地质特征. 中国海上油气(地质), 1999, 13(3): 169~180
- 15 金庆焕. 南海地质与油气资源. 北京: 地质出版社, 1989. 1~42
- 16 许仕策. 预测勘探目标中的层序地层学理论与实践—以珠江口

- 盆地为例. 中国海上油气(地质), 1999, 13(3): 152~158
- 17 秦国权. 珠江口盆地新生代地层问题讨论及综合柱状剖面图编制. 中国海上油气(地质), 2000, 14(1): 21~28
- 18 Mohriak W U, Bassetto M, Vieira I S. Crustal architecture and tectonic evolution of the Sergipe-Alagoas and Jacuípe basins, offshore northeastern Brazil. Tectonophysics, 1998, 288(1-4): 199~220[DOI]
- 19 丘学林, 周蒂, 夏戛原, 等. 南海西沙海槽地壳结构的海底地震仪探测与研究. 热带海洋, 2000, 19(2): 9~18
- 20 Yan P, Zhou D, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. Tectonophysics, 2001, 338(1): 1~21[DOI]
- 21 阎贫, 刘海龄. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析. 热带海洋, 2002, 21(2): 1~11
- 22 Mohriak W U, Rabelo J H L, Matos R D, et al. Deep seismic reflection profiling of sedimentary basins offshore Brazil: Geological objectives and preliminary results in the sergipe basin. J Geodynamics, 1995, V20(4): 515~539[DOI]
- 23 Meissner R. The“Moho”as the transition zone. Geophys Survveys, 1973, (1): 195~216
- 24 Clowes R M, Calvert A J, Eaton D W, et al. LITHOPROBE reflection studies of Archean and Proterozoic crust in Canada. Tectonophysics, 1996, 264: 65~88[DOI]
- 25 吴福元. 深反射地震调查对现代大地构造学的贡献. 世界地质, 1994, 13(1): 117~128
- 26 TRANSALP Working Group. First deep seismic reflection images of the Eastern Alps reveal giant crustal wedges and transcrustal ramps. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10): 92-1~92-4
- 27 Nercessian A, Mauret A, Dos Reis A T, et al. Deep reflection seismic images of the crustal thinning in the eastern Pyrenees and western Gulf of Lion]. J Geodynamics, 2001, 31 (2): 211~225[DOI]
- 28 Pickup S L B, Whitmarsh R, B, Fowler C M R, et al. Insight into the nature of the ocean-continent transition off West Iberia from a deep multichannel seismic reflection profile. Geology, 1996, 24(12): 1079~1082[DOI]
- 29 Hopper J R, Dahl-Jensen T, Holbrook W S, et al. Structure of the SE Greenland margin from seismic reflection and refraction data: Implications for nascent spreading center subsidence and asymmetric crustal accretion during North Atlantic opening. JGR, 2003, 108(B5): 2269
- 30 Nielsen L, Balling N, Jacobsen B H, et al. Seismic and gravity modelling of crustal structure in the Central Graben, North Sea. Tectonophysics, 2000, 328 (3-4): 229~244[DOI]
- 31 Detrick R S, White R S, Purdy G M. Crustal Structure of North Atlantic Fracture Zones. Reviews of Geophysics, 1993, 31(4): 439~458[DOI]
- 32 姚伯初. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 1~16
- 33 马昌前. 莫霍面、下地壳与岩浆作用. 地学前缘, 1998, 5(4): 201~208
- 34 刘以宣. 华南沿海区域断裂构造分析. 北京: 地震出版社, 1981. 19~47
- 35 Hayes D E, Nissen S S, Buhl P, et al. Through-going crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension. JGR, 1995, 100(B11): 22435~22446[DOI]
- 36 Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. Deep Penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. JGR, 1995, 100(B11): 22407~22433[DOI]
- 37 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 1~45
- 38 丘学林, 赵明辉, 叶春明, 等. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4): 295~299

(2004-09-29 收稿, 2005-03-11 收修改稿)