

地球物理资料所揭示的南海东北部 中生代俯冲增生带*

周 蒂^{①**} 王万银^② 庞 雄^③ 王家林^④ 蔡东升^⑤ 孙 珍^①

(① 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; ② 长安大学地质工程与测绘工程学院, 西安 710054; ③ 中国海洋石油有限公司深圳分公司, 广州 510240; ④ 同济大学, 上海 200092; ⑤ 中国海洋石油研究中心, 北京 100027)

摘要 根据新处理的重、磁和广角地震图件的解释, 推测在南海北部从台西南盆地到深海盆北缘存在一条大致 NE45°走向的中生代俯冲增生带. 主要依据包括: 台西南-中沙东布格重力异常总梯度峰值带在强度和规模上都与马尼拉海沟俯冲增生带引起的总梯度峰值带相近; 该峰值带与海底地形和新生代构造都斜交, 指示前新生代构造; 该峰值带被 NW 向断层左行错断成雁列状, 符合中生代区域应力场特征; 其西北方在陆架区有与之大致平行的高磁异常带, 指示中生代火山弧. 此外, 海底地震仪资料显示在俯冲增生带位置上出现北倾陡坎、海底地震仪和长电缆反射地震剖面都显示相应部位出现双莫霍面叠置, 也可作为佐证. 这段中生代俯冲增生带的发现正好填补了欧亚大陆东南缘晚中生代俯冲增生带在南海东北部的一段空白.

关键词 中生代 俯冲带 东南亚陆缘 南海东北部 地球物理

中国海域蕴藏油气资源约占全国油气资源总量的四分之一. 南海北部是中国海上油气勘探的重点地区, 在一系列大型沉积盆地中发现许多含油气构造, 油气年产自 1996 年以来连续超过 1000 万吨, 已成为中国第四大油气产地. 但海洋油气开采速度远高于陆地, 扩大后备储量, 开辟油气勘探新领域已成为目前非常紧迫的问题. 目前寄托希望的新领域之一是前新生代油气, 其勘探需要对前新生代基底构

造有更进一步的了解.

迄今在南海北部有近 100 个钻孔遇到前新生代基底, 对前新生代基底的组成和结构进行过许多地质和地球物理反演研究, 揭示了南海北部前新生代基底的一些基本特征^[1~6]. 90 年代以来, 在南海北部陆续实测了 9 条广角地震剖面^[7~11]. 最近, 王万银等¹⁾和王家林等²⁾将海域的卫星重力数据经布格变换得出布格重力异常图, 再由布格重力异常 4 个方向的

收稿日期: 2005-05-18; 接受日期: 2005-10-25

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40238060)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G20000467-02)、中国科学院重要方向项目(批准号: KZCX2-SW-117)资助

** E-mail: zhoudiss@scsio.ac.cn

1) 西安工程学院. 中国海洋石油勘探开发中心. 中国近海及邻区重磁数据处理报告. 2000, 1~29

2) 王家林, 张毅祥. 南海东北部新生代沉积盆地基底特征及构造格局研究. 国家重点基础研究发展规划(G2000046702)课题中期研究报告. 2002, 1~68

水平导数合成布格重力异常水平总梯度峰值带图;又在日本地质调查局在 1994 年编制的东亚磁异常图^[12]的基础上进行化极处理,作出中国东部海陆化极磁力异常平面图。本文根据上述的布格重力异常总梯度峰值带图和化极磁力异常图结合已有地质地球物理资料,推测了南海东北部前新生代地质构造,鉴别出呈北东向贯穿南海东北部的中生代俯冲增生带。这个发现正好填补了环东南亚晚中生代俯冲增生带在南海东北部的一段空白。

1 区域大地构造概况及前人有关研究

本文研究的南海东北部包括 $15^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 的范围(图 1),是华南地块的一部分,目前主要由一系列新生代沉积盆地(琼东南盆地、珠江口盆地、台西南盆地)及其以南的南海深海盆组成。南海深海盆张开于晚渐新世至早中新世^[13-15],在中生代并不存在,因此本文研究的前新生代基底仅存在于陆架和陆坡。

研究区位于欧亚板块的东南部。欧亚板块以东为古太平洋,以南为特提斯洋。根据Nakanishi等^[16]对西北太平洋磁条带的对比,中侏罗世时伊佐奈歧(Izanagi)、太平洋和法拉隆(Farallon)三个大洋板块在西太平洋沙斯基(Shatsky)海隆的热点处开始形成。之后,伊佐奈歧板块在北,太平洋板块在南,其间的NE走向扩张脊由于洋底扩张的综合效应而不断向北迁移并发生顺时针旋转,同时伊佐奈歧板块朝北西斜向俯冲于欧亚板块东缘(即东亚陆缘)之下,目前已俯冲殆尽。因此,从大地构造背景的角度看,在东亚陆缘应该存在NE-SW走向的中生代俯冲增生带。

东亚陆缘在中生代期间最显著特征是火山岩带的发育,以中国东南沿海的中生代火山岩为代表,向北延至日本,向西南可到越南东南部以至加里曼丹岛西南部,绵延 4000 km 以上。这条巨大的火山岩带被认为是与东亚陆缘中生代俯冲增生带相伴的火山弧^[13,14],但其岩石组成以花岗岩和流纹岩为主(各近 50%),含少量玄武岩^[17],而且宽度可达 600 km 以上,这些特点与以安山质火山岩为主的安第斯型火山弧截然不同。为解释中国东南沿海的中生代火山岩带的特征,一些学者提出了火山弧的其他成因,如地幔

热源^[18]、板内剪切升温与俯冲的复合^[19]等。最近,周新民等^[20,21]根据火山岩的时空演化和地球化学特征提出了一个新的模式,以起初非常平缓、以后逐渐变陡的俯冲增生带来解释火山岩带的巨大宽度,以玄武质底侵体在热作用下的分熔来解释酸性岩占绝大多数的特征。

东亚陆缘中生代俯冲增生带的具体位置也是一个令人关注的问题。根据岩石学和年代学的资料,西南日本的美浓带、三波川带及北秩父带^[22,23]和琉球群岛的Yuwan组、Tomuru组等^[24]特点相似,都由强烈破碎的石灰-二叠纪、三叠纪的洋盆-海山岩块和晚侏罗-早白垩世变质泥质基质的混杂岩组成,与晚中生代时古太平洋向欧亚大陆的俯冲和增生有关。台湾中央山脉的太鲁阁高温低压和玉里低温高压变质带被认为是与俯冲有关的双变质带^[25,26],因而西南日本的俯冲增生带可经过琉球群岛延到台湾。类似的俯冲增生杂岩也发现于北巴拉望地块卡拉棉群岛^[27],再向南还可与巴拉望、沙巴的Audio带、加里曼丹岛东南的Meratus带、以及苏门答腊岛的Woyla带的晚侏罗-早白垩世俯冲增生杂岩对比,一起组成巨大的“欧亚东南缘晚中生代俯冲增生带”,俯冲增生时间主要为晚侏罗世到白垩纪^[28-31]。如果上述对比成立的话,这条晚中生代俯冲增生带处于台湾与北巴拉望之间的那一段应该穿过南海北部。

对南海北部存在中生代俯冲增生带已有不少讨论。李唐根等^[32]提出,西起海南岛北部,经广东内陆架,接闽浙近岸 50 m 水深线断裂带,到日本北缘,有一条印支至早燕山期古俯冲增生带。南海海洋研究所^[33]、姚伯初等^[7]根据东沙隆起之下地壳的增厚和高磁异常,以及下陆坡断裂带的存在,认为该俯冲增生带沿下陆坡呈NEE至SWW向延伸,并通到西沙海槽。夏戡原和黄慈流^[34]推测晚古生代到晚三叠世时存在一个近东西向的“东沙海”,与西面的“金沙江-藤条河-黑水河海”及东面的台湾“天祥海”相通,为古特提斯海的一个分支。而在东沙一统暗沙以南,沿水深 2000~3000 m 的下陆坡存在一条呈NE-NEE走向的“东沙南缝合带”,为古特提斯的缝合带。周祖翼^[35]提出浙-闽海外 50 m 水深线为板块缝合带,早白垩世的俯冲形成以莆田基性-超基性岩带,侵位与晚侏罗世

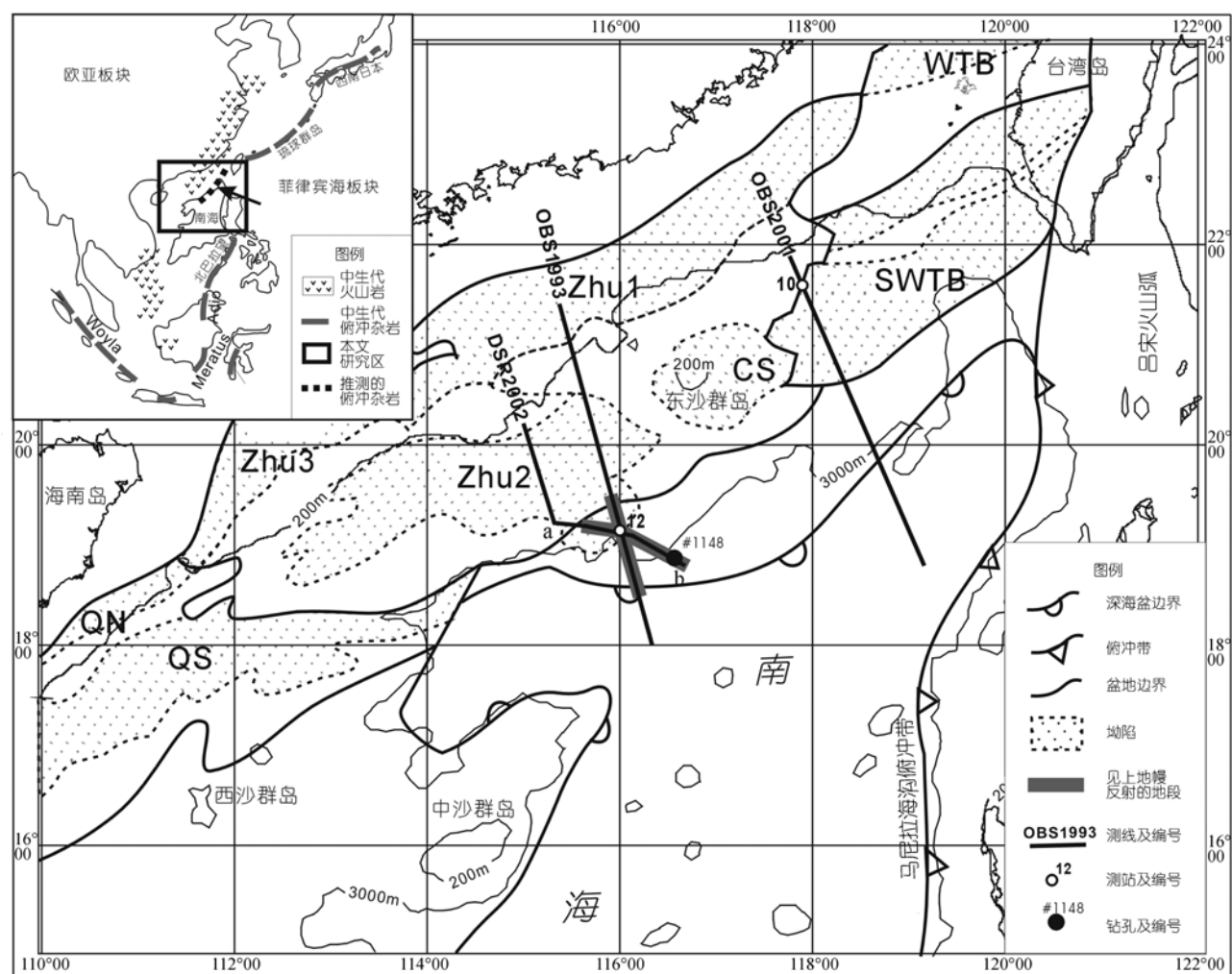


图1 研究区地质简图, 新生代主要构造及广角地震测线

小图示区域大地构造, 箭头指本文所推测的中生代俯冲增生带。粗灰线为广角地震探测到莫霍面之下的反射层的地段; a, b指图4地震剖面的位置。盆地和坳陷: Zhu1: 珠一坳陷, Zhu2: 珠二坳陷, Zhu3: 珠三坳陷, QN: 琼北坳陷, QS: 琼南坳陷, CS: 潮汕坳陷, WTB: 台西盆地, SWTB: 台西南盆地

火山岩中。上述讨论多数涉及印支-早燕山期与古特提斯有关的古俯冲增生带, 少数涉及“早白垩世的俯冲”。

在南海北部, 迄今在珠江口盆地有 60 余个钻孔、在莺歌海盆地东部斜坡带有 14 个孔钻遇新生代基底, 其中大部分为晚白垩纪花岗岩 (116~66 Ma), 只有 2 个孔见晚侏罗世花岗岩 (130 和 153 Ma)。珠三坳陷及以西有 8 个孔见浅变质岩, 主要是石英岩, 推测时代为古生代。此外, 在台西南盆地有 20 余个钻孔见到未变质的早白垩世海相和海陆交互沉积岩,

以及侏罗纪(?)半深海相暗色页岩。结合地球物理解释及与陆上的对比, 认为南海北部陆架和陆坡的前新生代基底在西段属加里东褶皱带, 主要由古生代海相沉积岩组成, 受加里东运动影响发生褶皱和变质; 在中-东段属燕山褶皱带, 主要由白垩纪(尤其晚白垩世)花岗岩组成, 但在台西南盆地发育侏罗纪(?)至早白垩世海相沉积, 根据地震剖面的解释推测可能还有更老的中生代海相地层, 并且向西可延到东沙隆起和潮汕凹陷^[1~7]。

2 重磁资料重新处理及与已知构造的对比

2.1 布格重力异常水平总梯度峰值带图的编制和与已知构造对比

王万银等将海域的卫星重力数据¹⁾经布格变换得出布格重力异常图,其海底地壳密度取 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,海水密度取 $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;之后又将海域的布格重力异常图与陆上的布格重力异常图相拼接,编成中国东部海陆布格重力异常图.与自由空间异常图相比,布格重力异常受地形的影响大大减少,因而能更好地反映地壳结构特征.

布格重力异常总梯度是布格重力异常梯度模量.若用 $\Delta g(x, y)$ 表示布格重力异常,则总梯度 $Dg(x, y)$ 的表达式为

$$Dg(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, y)}{\partial y}\right)^2}.$$

为了减少误差的影响,实际计算时用两组两个互相垂直的水平方向导数合并产生.即分别计算 0° , 45° , 90° 和 135° 四个方向的方向导数,然后按下式进行计算²⁾.

$$Dg(x, y) = \sqrt{\frac{dg_0(x, y)^2 + dg_{45}(x, y)^2 + dg_{90}(x, y)^2 + dg_{135}(x, y)^2}{2}},$$

其中: $dg_0(x, y)$, $dg_{45}(x, y)$, $dg_{90}(x, y)$ 和 $dg_{135}(x, y)$ 分别表示 0° , 45° , 90° 和 135° 四个方向的方向导数.

利用布格重力异常总梯度的极大值可以确定线性构造(断裂或岩性接触面)的位置.但存在两个明显的弱点:一是极大值位置宽缓,不利于准确的确定线性构造位置;二是除极大值之外其他的干扰区域太大.为了削弱非极值处的影响和提高极大值处的分辨率,在总梯度的基础上定义了一个量 $Sg(x, y)$,即水平总梯度 $Dg(x, y)$ 的垂直梯度中大于零的部分,计算公式如下²⁾:

$$Sg(x, y) = \text{Max} \left(0.0, \frac{\partial Dg(x, y)}{\partial z} \right),$$

由 $Sg(x, y)$ 的等值线绘成布格重力异常总梯度峰值带图.该图的解释主要利用其极大值位置,故在曲线绘制时可以不标明等值线的数值.

根据以上方法编制了中国东部海陆布格重力异常水平总梯度峰值带图²⁾,以下简称“布格重力异常总梯度峰值带图”;它揭示了重力场变化梯度最大的地带,即地壳岩石密度变化最大的地带的位置、展布和强度(即梯度大小),有重要的构造指示意义.

将布格重力异常总梯度峰值带图与已知地质构造相对比,发现该图清晰地揭示了 4 类构造特征:(1)俯冲增生带或火山弧,表现为强度最大、连续性最好的总梯度峰值带,如马尼拉海沟俯冲增生带、琉球海沟俯冲增生带、吕宋北火山弧等.(2)地块拼接线或地块内部的深断裂,表现为香肠状成串分布的总梯度峰值带.如扬子地台北界的襄樊-广济深断裂、华南地槽系的北界萍乡-江山-绍兴深断裂、以及地块内部的 NE 向郟城-庐江、长乐-南澳、吴川-四会、宿松-灵山等断裂、EW 向的贵东-泉州等断裂.但丽水-海丰-莲花山断裂带虽然有强度 $-15 \times 10^{-5} \sim -30 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的串珠状布格重力异常^[17],却未见明显的总梯度异常.(3)大的古老花岗岩基,沿其周缘出现环状的总梯度峰值带,如海南岛五指山的海西期花岗岩基.(4) NW 向走滑断裂,主要表现为 NE 向梯度峰值带的中断或错动.多见于海上,而陆上的 NW 向走滑断裂与梯度峰值带的中断或错动对应不好,如沿湛江北-西宁北-巴马、惠州-清远-桂林、阳江-桂平-来宾等地带出现梯度峰值带的中断或错动,前者还延到海上,但与陆上已知的 NW 向断裂(如右江断裂)在位置上不吻合.

2.2 化极磁力异常图的编制和与已知构造对比

由于中国海域磁异常纬度变化较大,对正确认识磁性体的位置造成了很大的困难.南海北部位于北半球中低纬度区,受斜磁化的影响,磁异常的高值相对于磁性体的位置明显偏南.王万银、王家林等在日本地质调查局在 1994 年编制的东亚磁异常图^[12]的

1) <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>

2) 见 209 页脚注 1)

基础上,采用变磁化的自适应滤波化极技术,从南到北分别读取了多个点的磁化倾角,然后进行化极处理,作出中国东部陆海化极磁力异常平面图¹⁾,以下简称“化极磁异常图”。虽然由于各地的磁化方向选值和剩余磁化的影响,实际上的化极场不可能达到真正的磁化磁场,故不能简单的认为化极磁异常最大值位置与磁性体的位置完全对应,但是经过化极后显著减小了磁异常最大值相对于磁性体位置的偏移,因而大大方便了磁异常的解释。

将化极磁异常图与华南大陆的地质构造相对比,可看出以下特征:(1)一、二级构造单元的分界线常表现为磁场分区的界线,如郯庐断裂、扬子地台北、南边界的襄樊-广济断裂和萍乡-江山-绍兴断裂、华南地槽系内的宿松-灵山断裂、赣江-吴川-四会断裂、丽水-海丰断裂等。(2)古老变质岩区,其磁场特征因大地构造背景而有所不同,如华北地台的太古界变质岩区表现为强磁场;华南地槽系的上元古界-震旦系分布区(赣中、武夷山、闽北-浙南)为中强磁场;而扬子地台的江南台背斜虽然其中元古界基底中发育蛇绿岩套,却表现为弱磁场。但它们有一个共同特征,即在平面形态上呈不规则面状。(3)中生代火山岩带,在丽水-海丰断裂以东存在一条闽浙东部高磁异常带,北起浙江义乌,南到福建东山。这一带地表岩性主要为大片晚侏罗世火山岩航磁表明这一带磁异常不仅背景值高(100 nT以上),而且在沿海出现一系列特高值,如浙江临海、福建长乐、莆田、泉州、广东南澳等地^[17]。高磁背景值与具高剩磁强度的晚侏罗世中酸性火山岩的分布相吻合,由具高剩磁强度的晚侏罗世中酸性火山岩引起。而磁异常特高值的来源则是沿长乐-南澳断裂带在莆田、泉州、南澳等地呈串珠状分布的燕山期基性-超基性岩,以及金门、漳州的沿海的新近纪-第四纪玄武岩^[17,35]。

从以上的对比和分析可看出,新作出的布格重力异常总梯度峰值带图和化极磁力异常图很好地反映了重要的地质构造特征,表明所采用的处理技术是成功的,处理结果是可信的,这增强了我们利用这些新资料来研究南海北部前新生代基底结构的信

心。同时,陆上已知构造的重磁异常特征也为我们解释海上的未知构造提供了依据。

3 南海北部中生代俯冲增生带的识别

图2和3分别为按上节所述的方法作出的南海北部(110°~122°E, 15°~24°N)布格重力异常总梯度峰值带图和化极磁力异常图,图上还表示了本文识别的前新生代断裂构造。

从图2可见,在南海北部,强度最大、延伸最长的布格重力异常水平总梯度峰值带(以下简称峰值带)有3条:马尼拉海沟峰值带(BB'B'')、吕宋火山弧峰值带(CC')、台西南-中沙东峰值带(AA'A'')。前两条的成因已经清楚了,而台西南-中沙东总梯度峰值带正是本文研究的重点。该带北起从台湾岛西缘,向SW经过台西南盆地的北部凹陷延至中沙群岛东侧,走向NE45°左右,被NW向断层左行错断成雁列状。该梯度峰值带斜穿陆架、陆坡到深海盆,北端水深小于200 m,南段水深大于3000 m。由于该梯度带与等深线大角度斜交,跨越不同的布格重力异常背景,因而不容易被识别;现在由于采取了总梯度峰值带的处理技术才得以凸现出来。实际上,如果仔细观察过去发表的^[36]和本次新作出的布格重力异常图,还是可以发现该梯度带存在的迹象的。

本文认为台西南-中沙东总梯度峰值带是中生代俯冲增生带的证据之一,理由如下:第一,该带在布格重力总梯度的强度和规模上仅次于马尼拉海沟峰值带和吕宋火山弧峰值带,在强度上不及中沙群岛、西沙群岛周缘的环形峰值带,而高于南海北部任何其他峰值带;它又以没有磁异常而与吕宋火山弧总梯度峰值带不同,因此有可能是俯冲增生带的表现,类似于马尼拉海沟,但由于上覆新生代沉积而降低了其布格梯度。第二,该带不仅与海底地形斜交,也与主要呈NEE走向的新生代构造斜交,应为前新生代构造的表现。第三,其NE走向与华南陆上的中生代断裂带一致,其被NW向断层左行错断的特征也符合在中白垩纪变革运动之前的华南压性应力场特征^[37,38],与新生代的NW向右行错动明显不同,因此最可能是中生代构造。此外,该带之北西约50~200

1) 见209页脚注1), 2)

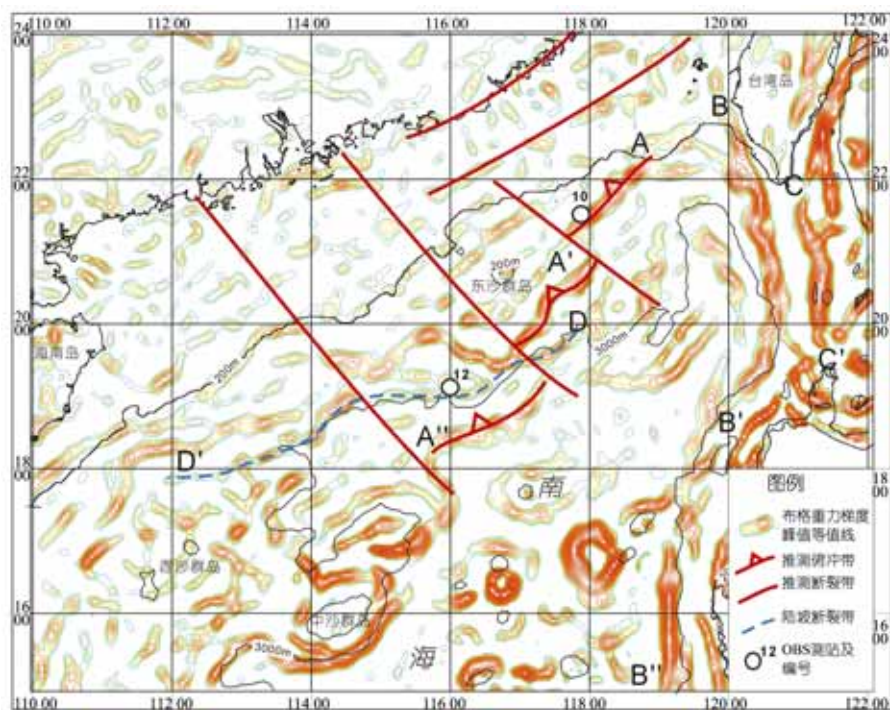


图 2 南海北部布格重力异常水平总梯度峰值带图及推测的中生代俯冲带和断裂带
AA'A', BB'B', CC'C'分别为: 台西南-中沙东峰峰值带、驱拉海沟峰值带、吕宋火山弧峰值带, DD'D' 为姚伯初等^[2]解释的陆坡断裂带

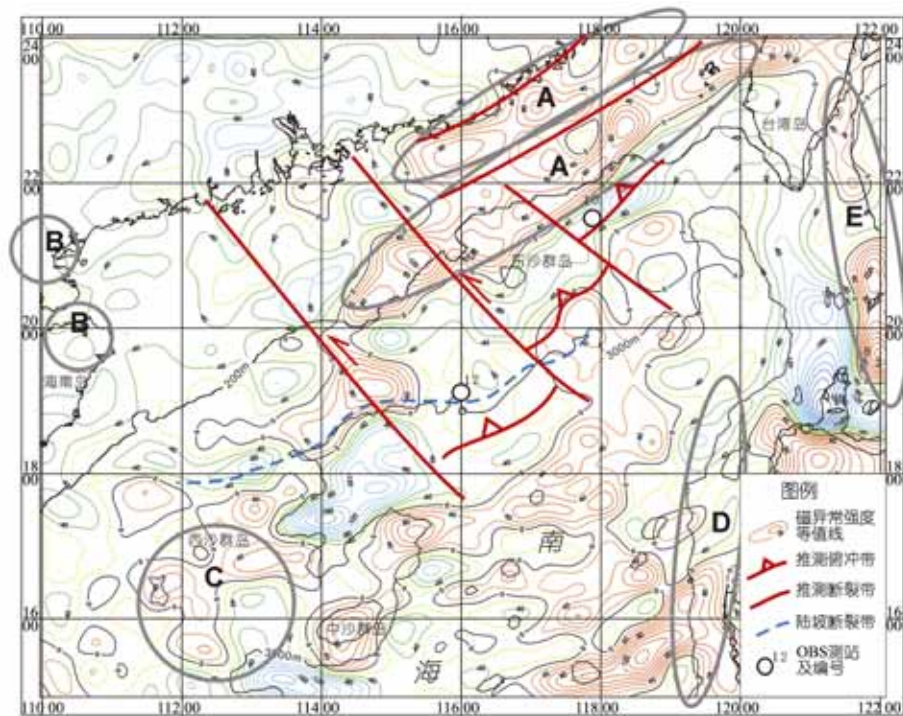


图 3 南海北部化极磁异常图及推测的中生代俯冲带和断裂带
灰色椭圆 A~E 所示的内容见正文

km 的距离出现指示火山弧的高磁异常带,若干广角地震剖面上也出现俯冲板片存在的迹象,都为存在俯冲增生带提供了佐证;详见下面两节的讨论。

4 南海北部高磁异常带是中生代火山岩带的反映

NE向延伸的南海东北部高磁异常带是南海北部磁场的最显著特征,在化极磁异常图上显示有两条(图 3-A),均向NE60°左右延伸,宽约 30~80 km,磁场强度 60~200 nT。北面的一条自广东大亚湾外向NE延至福建金門岛外,与陆上的闽浙东部高磁异常带^[17]相连,向北向陆强度增高。南面的一条自白云凹陷以北向NE延至台湾西部,包括东沙隆起、澎湖隆起、北港隆起及新竹凹陷南部。两条高值带之间以狭窄的低磁异常带相隔,后者与珠盆北缘布格重力梯度峰值带大致重合。两带之南北出现负磁异常。

南海东北部高磁异常带已发现多年,曾被推测为由基性-超基性岩引起,并作为东沙隆起南坡存在一条燕山期俯冲增生带的依据^[3]。可是,马尼拉海沟这条新生代俯冲增生带并没有出现高磁异常(图 3-D);这是因为只有发生了洋壳物质的增生的俯冲增生带才有可能出现高磁异常。在南海北部邻区,前第四纪基性-超基性岩(如雷州半岛、海南岛北部)也能形成磁异常,但规模不大,强度不高(图 3-B),与南海东北部高磁异常带无法对比。

南海东北部高磁异常带是否是元古界、太古界变质基底杂岩的反映?正如本文前面所指出,华南地槽系的上元古界-震旦系分布区(赣中、武夷山、闽北-浙南)以及西沙群岛的前寒武纪变质岩分布区的磁异常(图 3-C)都呈不规则面状分布,且多数为中强磁场,明显不同于南海东北部高磁异常带。

与南海东北部高磁异常带规模相当的磁异常只在吕宋岛弧(图 3-E)和闽浙东部^[17]见到,前者是与新生代俯冲增生相伴的火山岩带的反映,后者(即南海东北部高磁异常的北带在陆上的延伸)是与中生代俯冲增生相伴的火山岩带的反映^[13,14],主要由具有高剩磁强度的晚侏罗世中酸性火山岩引起^[17]。根据类比,我们推测南海东北部高磁异常带与闽浙东部

火山岩带具有相同成因,即代表与中生代俯冲增生带相伴的火山弧。该火山弧亦被NW向断裂左行错动(图 3),向SW可追溯到西北次海盆以北。

5 俯冲增生带存在的广角地震佐证

在南海东北部有三条实测广角地震剖面(位置见图 1)穿过所推测的中生代俯冲带,都看到了一些可作为俯冲增生带存在的佐证。OBS1993 剖面由南海海洋研究所与日本东京大学等合作于 1993 年实测,使用了炸药震源和海底地震仪记录,其 11 至 13 站的莫霍面之下约 8~10 km 深还发现另一个反射层(阎贫等^[39]之图 6)。DSR2002 剖面是中国海洋石油总公司于 2002 年完成的长电缆多道地震剖面,也在下陆坡部位莫霍面之下约 4 km 深处发现另一组强反射^[40,41](图 4),平面位置与 OBS1993 剖面所揭示的上地幔反射层相近,可以认为是俯冲洋壳的莫霍面。OBS2001 剖面由南海海洋研究所与台湾海洋大学于 2001 年联合实测^[42],在第 10 站之下发现莫霍面向北下掉数公里(图 5);非常“巧合”的是,该站正好位于台西南-中沙东总梯度峰值带上(图 2),这个莫霍面北倾台阶可解释为俯冲洋壳转折部的反映。

6 结论和讨论

本文根据重、磁资料的新处理成果在南海东北部识别出东亚陆缘中生代俯冲增生带的一段,从 119°E, 22°20'N 延至 115°30'E, 18°10'N, 大致呈 NE45°走向展布,被 NW 向断层左行错动。俯冲增生带显示为强的布格重力异常水平总梯度峰值带;广角地震剖面上相应部位出现莫霍面向北陡倾下掉,以及莫霍面以下数公里深处可能指示俯冲板片下界面的反射。其北约 50~200 km 出现与之大致平行的高磁异常带,指示与俯冲有关的火山弧。由于这条俯冲增生带与海底地形和新生代构造都斜交,而且被 NW 向断层左行错断的情形符合中生代区域应力场特征,故认为俯冲增生的时间在中生代。

从区域大地构造来看,西南日本-琉球群岛-台湾存在一条长 1500 km 以上的晚侏罗世-早白垩世俯冲增生杂岩带,同样特征的俯冲增生杂岩带也在北巴

1),2) 见 209 页脚注 1),2)

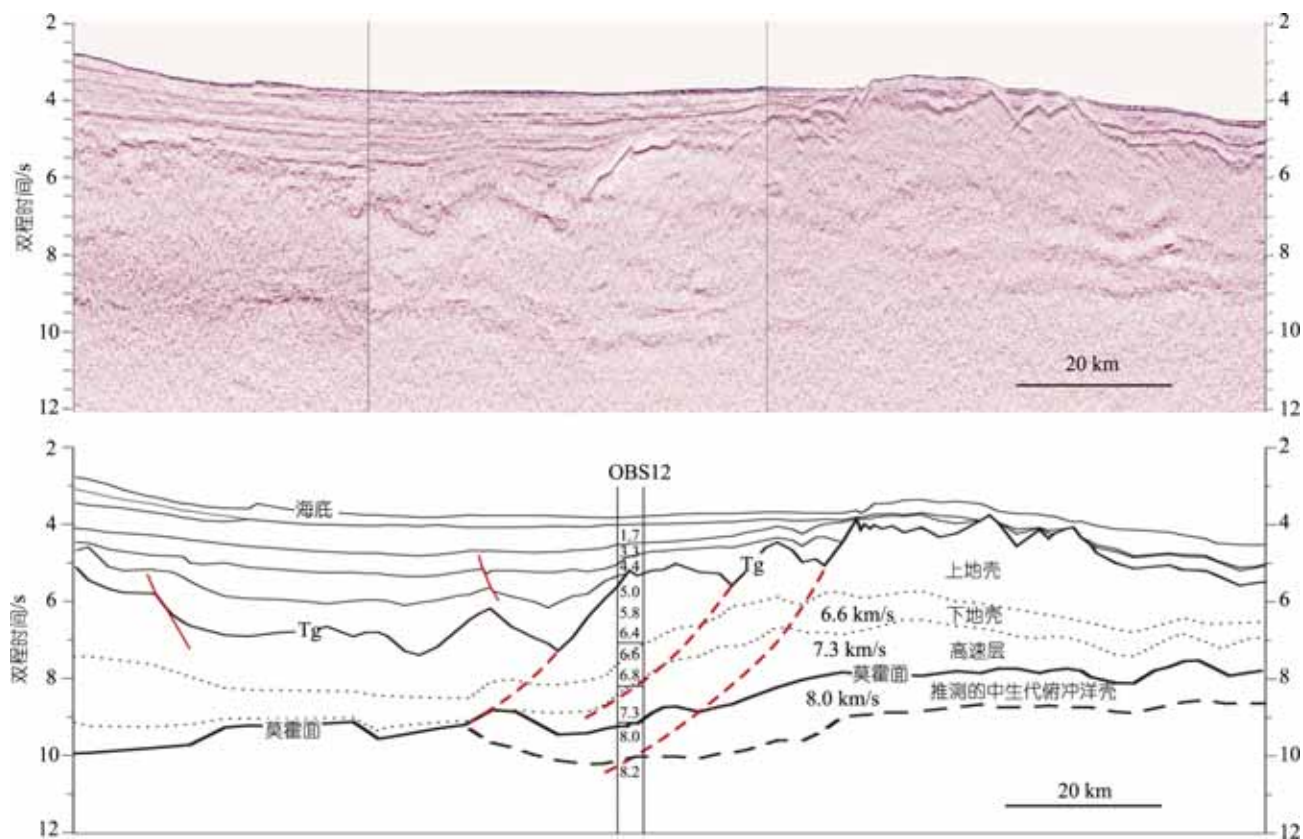


图 4 深反射地震记录剖面 DSR2002 过南海北部陆坡的一段(上)及其地壳结构解释(下)^[41]

剖面位置见图 1 中 DSR2002 剖面上的 a, b 段. OBS12 之下的柱子内的数字显示海底地震测线 OBS1993 的 12 站之下的速度. Tg 指示新生界的底面

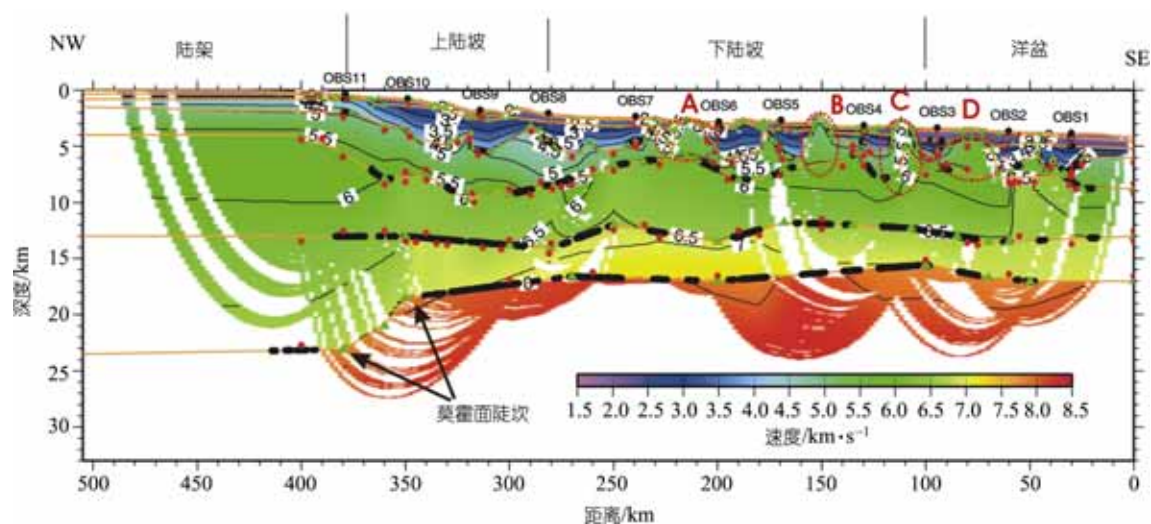


图 5 南海东北部根据海底地震仪记录所模拟的 P 波地壳速度结构剖面(据 Wang 等^[42])

剖面位置见图 1 中 OBS2001 线. 箭头指莫霍面北倾台阶的位置. 对应于本图和图 1 中 OBS2001 线的测站 OBS10 之下. 海底小黑点代表 OBS 位置, 剖面上红点和绿色三角分别代表速度和界面的格点, 界面上的黑点代表反射点, A~D 及相应的虚线椭圆指示所识别的火山

拉望发现,并可向南西追溯到巴拉望、沙巴的Audio带、加里曼丹岛东南的Meratus带、以及苏门答腊岛的Woyla带(详见本文第2节及文[31,43])。本文在南海东北部新识别出的一段俯冲增生带正好填补了台湾与北巴拉望之间的空缺,因此可推测其俯冲时间也主要在晚侏罗世-早白垩世,增生于白垩纪中期,与其他俯冲增生杂岩带一起组成巨大的“欧亚东南缘晚中生代俯冲增生带”(图1之小图)。

当然,上述推断还有待更多的资料检验;如果正确的话,对南海的构造研究将提出一些待研究的新问题,如:(1)台西南盆地北部凹陷、潮汕凹陷以及白云凹陷位于俯冲增生带与火山弧之间,出现强的负磁异常,钻探或地震揭示有中生界沉积存在,它们在中生代时是不是弧前盆地?(2)南海西北次海盆的性质和时代要重新研究。如果西北次海盆是与南海主体一起在新生代才张开的小洋盆的话,它应该切断中生代俯冲增生带并使其产生一段“空挡”;但现在看到它位于俯冲增生带的靠陆一侧,中生代俯冲增生带成为它与东部次海盆的分界。从磁异常图(图3)可看出,西北次海盆显示强而宽的负磁异常,与东部次海盆的正负相间条带状磁异常明显不同。Wissmann等[44]从地震剖面上曾注意到始新-古新世地层覆盖在西北次海盆洋壳之上的现象,指出该洋壳属于中生代也是可能的;当然,他所解释的上覆地层的年代尚未得到钻探确认。(3)中沙群岛东南缘也出现很强的布格重力异常水平总梯度峰值带,目前还不清楚它是纯地形引起还是有俯冲增生带的叠加。如果是后者,则对南海西北次海盆的性质问题又增加了一个考虑的因素。

致谢 中海石油(中国)有限公司提供了DSR2002长电缆地震剖面图和《中国近海及邻区重磁数据处理报告》,丘学林和王天凯提供了OBS2001待发表的海底地震剖面解释图件,Shigeki Hada提供了琉球群岛和西南日本的有关论文,特此一并致谢。

参 考 文 献

- 李平鲁,周再苍,崔广仁.珠江口盆地基底结构及演化.珠江口盆地(东部)石油地质科研报告集(一),1988,291~316
- 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
- 中国科学院南海海洋研究所,石油工业部南海石油地质研究所.珠江口外盆地基底构造研究,1983,46~54
- 金庆煊.南海地质与油气资源.北京:地质出版社,1989
- 王家林,吴健生,陈冰.珠江口盆地和东海陆架盆地基底结构的综合地球物理研究.上海:同济大学出版社,1997
- 郝沪军,林鹤鸣.潮汕坳陷中生界——油气勘探的新领域.中国海上油气(地质),2001,15(3):157~163
- 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.南海北部陆缘东部的地壳结构.地球物理学报,1994,37(1):27~35
- 夏戡原,周蒂,苏达权,等.莺歌海盆地速度结构及其对油气勘探的意义.科学通报,1998,43(4):361~367
- Yan P, Zhou D, Liu Z. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. Tectonophysics, 2001, 338(1): 1~21[DOI]
- Qiu X, Ye S, Wu S, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. Tectonophysics, 2001, 341: 179~193[DOI]
- McIntosh K D, Nakamura Y. TAICRUST combined onshore/offshore datasets provide improved crustal-scale velocity structure of the Taiwan collision. In: New Era of Western Pacific Margin Geology International Conference, Taipei. Abstract, 2001, B-6-8
- Geological Survey of Japan, Magnetic Anomaly Map of East Asia. Miscellaneous Map Sr. No.32. 1994. <http://www.gsj.jp/>
- Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basin. In: Hayes D E, ed. The Tectonic and Geologic Evolution of South Eastern Asia Seas Islands, I. Washington D C: Am Geophys Union, 1980. 89~104
- Holloway N H. The north Palawan block, Philippines: its relation to the Asian mainland and its role in the evolution of the South China Sea. Am Assoc Petrol Geol Bull, 66(9): 1355~1383
- Briaies A, Patriat Ph, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implication for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. J Geophys Res, 1993, 98(B4): 6299~6328
- Nakanishi M, Tamaki K, Kobayashi K. Mesozoic magnetic anomaly lineations and seafloor spreading history of the northwestern Pacific. J Geophys Res, 1989, 94(B11): 15437~15462
- 陆志刚,陶奎元,谢家莹,等.中国东南大陆火山地质及矿产.北京:地质出版社,1997.73~239
- 张用夏.华南地区中生代岩浆活动与地幔热源的关系.南京地矿所所刊,1986,7(4):53~64
- 周祖翼,丁晓,廖宗廷,等.边缘海盆地的形成机制及其对中国东南地质研究的启示.地球科学进展,1997,12(1):7~14
- Zhou X M, Li W X. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 2000, 326: 269~287[DOI]
- 李武显,周新民.古太平洋岩石圈消减与中国东南部晚中生代火成岩成因——岩石圈消减与玄武岩底侵相结合模式的补充证据.大地构造与成矿学,2001(1):55~63
- Hada S, Ishii K I, Llandis C A, et al. Kurosegawa Terrane in

- southwest Japan: Disrupted remanants of a Gondwana-derived terrane. *Gondwana research*, 2001, 4(1): 27~38[DOI]
- 23 Mizutani S, Yao A. Radiolarians and terranes: Mesozoic geology of Japan. *Episodes*, 1991, 14(3): 213~216
 - 24 Kizaki K. Pre-Cretaceous rocks in the Ryukyus. In: Ichikawa, et al. eds. *Pre-Cretaceous Terranes of Japan*. IGCP 224, 1990, 217~224
 - 25 Yan T P. The metamorphic belts within Tanan'ao schists terrane of Taiwan. *Proc Geol Soc China*, 1963, 6: 72~74
 - 26 Biq C C. A fossil subduction zone in Taiwan. *Proc Geol Soc China*, 1971, 14: 146~154
 - 27 Isozaki Y, Amisicaray E A, Rillon A. Permian, Triassic and Jurassic bedded radiolarian cherts in North Palawan Block, Philippines: Evidence of Late Mesozoic subduction-accretion. Report N0.3 of the IGCP project 224: *Pre-Jurassic Evolution of Eastern Asia*. Osaka, 1988, 99~115
 - 28 Hutchison C S. *Geological Evolution of South-east Asia*. Oxford: Clarendon Press, 1989. 355
 - 29 Barber A J. The origin of the Woyla Terranes in Sumatra and the Late Mesozoic evolution of the Sundaland margin. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 713~738[DOI]
 - 30 Wakita K. Cretaceous accretionary-collision complexes in central Indonesia. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 739~749[DOI]
 - 31 周蒂, 陈汉宗, 孙珍, 等. 南海中生代三期海盆及其与特提斯和古太平洋的关系. *热带海洋学报*, 2004(2): 16~25
 - 32 李唐根, 邱燕, 姚永坚. 大地构造特征. 见: 刘光鼎主编. *中国海区及邻域地质地球物理特征*. 北京: 科学出版社, 1992. 248~271
 - 33 中国科学院南海海洋研究所. *南海地质构造与陆缘扩张*. 北京: 科学出版社, 1988. 144~146
 - 34 夏戡原, 黄慈流. 南海及邻区中生代(晚三叠纪-白垩纪)地层分布特征及含油气性对比. *中国海上油气(地质)*, 2004, 18(2): 73~83
 - 35 周祖翼. 闽东沿海构造带. 见: 刘光鼎主编. *中国海区及邻域地质地球物理特征*. 北京: 科学出版社, 1992. 320~326
 - 36 李唐根. 南海地质地球物理图集, 布格异常图(1: 2000 000). 见: 何廉声, 陈邦彦主编. *南海地质地球物理图集*. 广州: 广东省地图出版社, 1987
 - 37 朱夏. 中国新生代沉积盆地构造发展述略. 见: 朱夏, 徐旺主编. *中国中生代沉积盆地*. 北京: 石油工业出版社, 1990. 1~6
 - 38 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用. 北京: 地质出版社, 1993. 1~103
 - 39 阎贫, 刘海岭. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析. *热带海洋学报*, 2002, 21(2): 1~12
 - 40 Pang X, Yang S, Zhu M, et al. Deep-water Fan Systems and Petroleum Resources on the Northern Slope of the South China Sea. *Acta Geol Sinica*, 2004, 78(3): 626~631
 - 41 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*, 2005, 50(11): 1131~1138
 - 42 Wang T K, Chen M K, Lee C S, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. Manuscript submitted to *Tectonophysics*, 2006, 412: 237~254
 - 43 周蒂, 陈汉宗, 孙珍, 等. 南海及其围区中生代岩相古地理及有关大地构造和资源问题. 见: 李家彪, 高抒主编. *中国边缘海海盆演化与资源效应, “中国边缘海形成演化系列研究”丛书第三卷*. 北京: 海洋出版社, 2004. 65~76
 - 44 Wissmann G, Kudrass H, Hinz K. Continuing rifting on the South China margin, results of cooperation by State Geoscience Institutes BGR/Hannover and SOA/Hangzhou in SONNE cruises 49 and 58. *Geowissenschaften*, 1996, (7/8): 310~312