

鲁宝亮,孙晓猛,张功成等.南海北部盆地基底岩性地震-重磁响应特征与识别.地球物理学报,2011,54(2):563~572,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.036

Lu B L, Sun X M, Zhang G C, et al. Seismic-potential field response characteristics and identification of basement lithology of the northern South China Sea basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2):563~572, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.036

南海北部盆地基底岩性地震-重磁响应特征与识别

鲁宝亮¹,孙晓猛^{1*},张功成²,张 斌^{1,3},郎元强¹,王璞珺¹

1 吉林大学地球科学学院,长春 130061

2 中海油研究总院,北京 100027

3 辽河油田勘探开发研究院,盘锦 124010

摘 要 针对性选取东南沿海露头剖面 18 条,采集 245 件南海盆地基底可能出现的岩性样品,测定其密度和磁化率,建立各种岩性的密度-磁化率交会图版,以此约束过井地震剖面和重磁异常的地质解释,总结出南海北部盆地基底火山岩、侵入岩、变质岩和沉积岩 4 大类 11 亚类岩性的地震-重磁响应特征.应用重磁震-岩性解释模型逐一对南海盆地北部主干剖面进行地质-地球物理综合解释,从而实现了盆地基底岩性的平面填图.这种从盆缘剖面到盆地内部、从岩石物性测量到地质-地球物理综合解释的方法,在资料获取难度大、地质条件复杂的南海盆地基底地质研究中,业已证明是行之有效的,相信在其他盆地研究中也会有借鉴意义.

关键词 南海北部,基底岩性,岩石物性,地震,重磁异常

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.036

中图分类号 P631

收稿日期 2010-07-17,2011-01-25 收修定稿

Seismic-potential field response characteristics and identification of basement lithology of the northern South China Sea basin

LU Bao-Liang¹, SUN Xiao-Meng^{1*}, ZHANG Gong-Cheng², ZHANG Bin^{1,3},
LANG Yuan-Qiang¹, WANG Pu-Jun¹

1 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2 CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

3 Institute of Exploration and Development of Liaohe Oilfield Company Ltd., Panjin 124010, China

Abstract We selected 18 outcrop sections along the southeastern coast and acquired 245 rock samples which may occur in South China Sea Basin basement. Their density and magnetic susceptibility are measured and the density-magnetic susceptibility crossplot is established that is used to constrain the geological interpretation of seismic profiles through wells and potential anomalies. Then, we have summarized the seismic-potential field response characteristics of basement rocks, which contain volcanic rock, intrusive rock, metamorphic rock and sedimentary rock, in 4 categories and 11 sub-categories in the northern South China Sea Basin. Application of the geological-geophysical interpretation model to each main profile in South China Sea Basin, the basin basement lithology mapping is well achieved. So, this method, from the section of basin margin to the inner basin and from the measure of rock density and magnetic susceptibility to the

基金项目 国家科技重大专项(2008ZX05025)和国家“973”项目(2009CB219303)联合资助.本文获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和 2009 年教育部基本科研业务经费(“吉林大学创新团队发展计划”)支持.

作者简介 鲁宝亮,男,1984 年生,博士研究生,石油地质专业. E-mail: luskys333@yahoo.com.cn

* **通讯作者** 孙晓猛,男,1954 年生,教授,主要从事区域、盆地构造和地层学研究. E-mail: sunxiaomeng5210@163.com

geological-geophysical interpretation, has proven to be effective in the South China Sea Basin where the data acquisition is difficult and geological condition is complex. And this study also has a certain reference value for other basins.

Keywords Northern South China Sea, Basement lithology, Physical properties of rock, Seismic, Gravity and magnetic anomalies

1 引言

基底是盆地形成演化的物质基础,也与上覆盆地的形成及其含油气性有关,因此是盆地基础地质研究的重要组成部分.但另一方面,基底位于盆地主力沉积层序之下、埋深大、钻井揭示少、研究难度大.对于南海这样的海域(尤其是深水区)盆地尤为如此.前人主要从南海基底的分布、组成及地球物理结构等方面进行研究.刘以宣等(1994)^[1]依据南海围区地质及重磁资料研究认为南海变质基底基本轮廓是由中央向周缘自老变新的拼盘式褶皱基底.刘海龄(2004)^[2]在综合分析地质、地球物理、地球化学、古生物学等多方面资料的基础上对南海西北部控制新生代沉积盆地的基底做了研究.郝天珧(2009)^[3]利用磁异常小波处理及反演对磁性基底进行了研究,认为海盆南北两侧的磁性基底宏观特征存在一定差异,并不完全对称,从拉张模式来看,可能为纯剪与单剪模式的混合.此外,通过钻井揭示的火山岩及其与盆缘露头剖面的对比研究,在南海盆地(中)新生代火山岩特征^[4,5]、成因^[6,7]和构造背景^[8~10]等方面,也取得了很多成果.通过对区域地质研究及地球物理资料的各种处理及解释^[11~13],证实了南海东北部前新生代盆地的存在,并且对中生界石油地质条件也做了很多研究工作^[14,15].陈洁(2010)对南海重磁异常做了大量的计算反演^[16,17].另有学者通过对南海区域的速度结构^[18,19]、重磁场处理^[20,21]对南海的地壳及基底结构做了研究.周蒂(2006)^[22]计算重力异常水平总梯度值并结合深反射资料,证实了南海北部中生代俯冲增生带的存在.还有学者对中生代古地理、构造演化及沉积盆地做了详细研究^[23~25].另外,陈洁等(2007)^[26,27]对南海油气资源潜力做了研究,认为南海的油气勘探前景巨大,但也同时指出我国海上勘探开发技术,尤其是深海领域仍然比较落后,制约了我国海洋石油的发展.

基底作为盆地演化的基础,对油气勘探十分重要.但是南海盆地基底埋深大,上覆巨厚新生代地层^[28],钻遇基底井少,而且在大面积的深水区(水深

大于 300 m,图 1)没有钻井,获取资料难度大,地震资料在基底以下信噪比低,这些实际状况是导致南海基底研究难度大的客观因素.另一方面,现有(尤其是新获取的)重磁震资料尚没有充分用于基底研究.笔者基于南海地区基底海-陆连片的地质条件,充分利用新的重磁震和钻井资料,以南海北部盆地陆缘区野外剖面研究和岩样密度与磁化率测量为基础,约束地震剖面和重磁解释,研究南海北部盆地基底岩性的地震-重磁响应特征,进而实现了全区的基底岩性平面成图.这些方法和研究流程在南海盆地基底研究中显示出综合性和实用性的优势,相信对其他类似盆地研究也会有借鉴意义.

2 南海北部陆缘剖面区岩石密度及磁化率特征

虽然南海北部钻遇基底的钻井少、采样难度大、

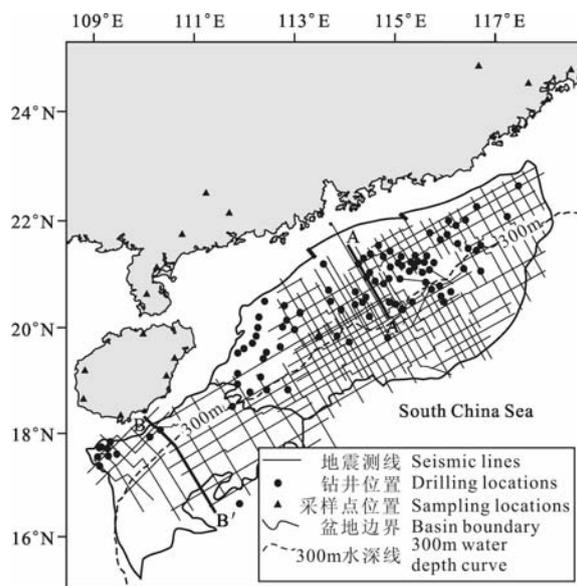


图 1 南海北部钻井、地震剖面及陆区采样点位置分布图.

AA'和BB'分别是图3和图4地震测线所在位置

Fig. 1 Location map showing interpreted seismic profiles and wells in the northern South China Sea and rocks sampling along Southeast coast of China. AA' and BB' lines are seismic profiles respectively displayed in Fig. 3 and Fig. 4

岩石类型揭示不全,但从已有资料分析及其与盆缘的对比,仍可说明南海北部盆地基底是华南大陆基底向海的延伸部分,它们具有相同的基底组成和构造演化特点^[1,2].笔者在福建、广东和海南精选出 18 条野外地质剖面进行测量,对采集的 245 件南海盆地基底可能出现的岩性标本进行室内密度及磁化率的测量,并通过岩石薄片鉴定后筛选出 234 块岩石

样品,按密度-磁化率关系对所有岩石进行了分区,结果见图 2 和表 1.

四大类岩性的密度及磁化率分布特征:

①火山岩类:玄武岩具有中-强的磁化率($(125\sim 70000)\times 10^{-6}$ SI),但密度变化范围较大.这主要取决于玄武岩的气孔发育程度,当气孔发育时其密度较小.安山岩也具有中-强磁化率($(500\sim 1500)\times 10^{-6}$ SI),

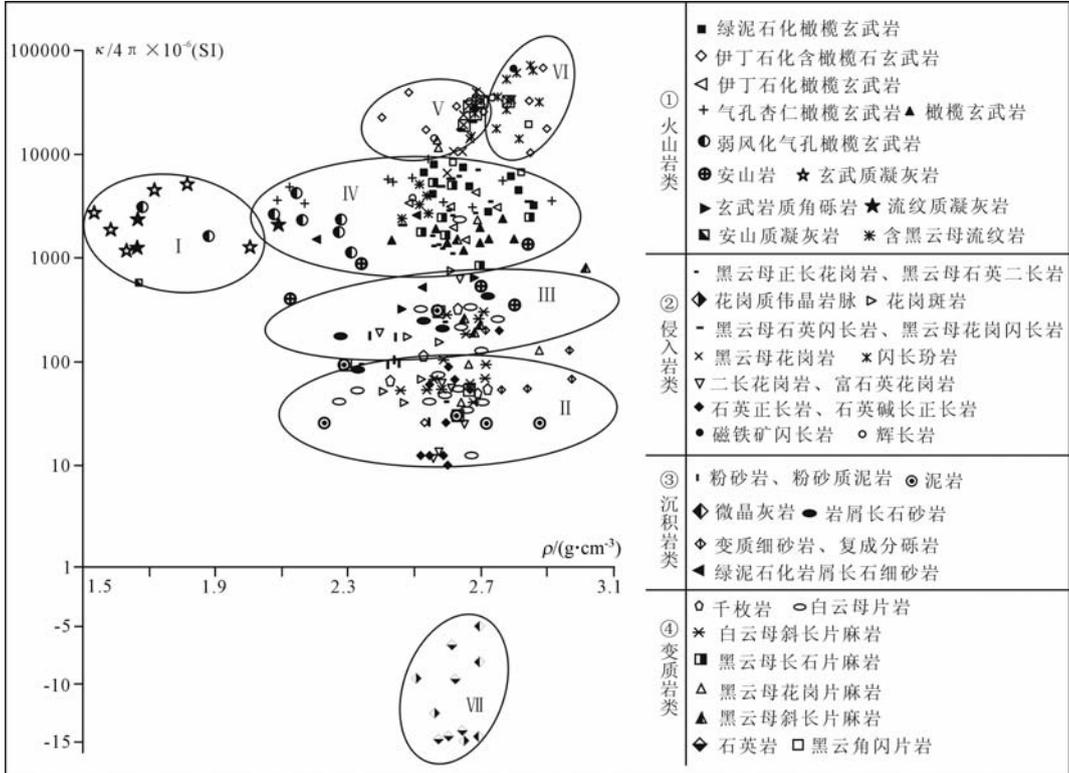


图 2 东南沿海岩石密度-磁化率交会图

Fig. 2 Density-magnetic susceptibility crossplot of the rock samples along southeast coast of China

表 1 岩石密度-磁化率分级表

Table 1 Classification of rock density-magnetic susceptibility

分级区号	密度、磁化率 分级	密度 $\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 磁化率 $\kappa(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$	样品总数	岩石类型(测试样品数)
I	低密度、 中强磁性	$\rho < 2.1$ $3000 < \kappa < 10000$	11	玄武质凝灰岩(6)、气孔玄武岩(2)、流纹质凝灰岩(2)、安山质凝灰岩(1)
II	中密度、 无磁性	$2.1 < \rho < 2.7$ $0 < \kappa < 100$	55	泥岩(5)、石英花岗岩、花岗斑岩(8)、千枚岩(13)、白云母片麻岩(11)、白云母片岩(9)、石英正长岩(9)
III	中密度、 弱磁性	$2.1 < \rho < 2.7$ $100 < \kappa < 700$	38	砂岩、砾岩(14)、千枚岩(2)、白云母斜长片麻岩(4)、白云母片岩(5)、花岗斑岩(3)、安山岩(4)、黑云母斜长片麻岩(4)、石英花岗岩(2)
IV	中-高密度、 中强磁性	$2.1 < \rho < 2.8$ $700 < \kappa < 3000$	80	玄武岩(38)、黑云母正长花岗岩、黑云母石英二长岩(10)、含黑云母流纹岩(5)、片麻岩(5)、黑云母片岩(2)、闪长玢岩(4)、黑云母长石片麻岩(6)、安山岩(1)、流纹质凝灰岩(1)、安山岩(1)
V	中-高密度、 极高磁性	$2.4 < \rho < 2.7$ $\kappa > 10000$	22	黑云母(角闪石)花岗岩(9)、闪长玢岩(7)、闪长岩(1)、玄武岩(5)、辉长岩(2)
VI	高密度、 极高磁性	$2.7 < \rho < 3.0$ $\kappa > 10000$	18	闪长玢岩(11)、橄榄玄武岩(4)、磁铁矿闪长岩(1)、黑云母角闪片岩(1)、辉长岩(1)
VII	中-高密度、 逆磁性	$2.4 < \rho < 2.8$ $\kappa < 0$	10	花岗质伟晶岩脉(5)、微晶灰岩(3)、石英岩(2)

具有较高的密度. 流纹岩磁化率变化较大($(50 \sim 5200) \times 10^{-6}$ SI), 既有中强磁性的, 也有无磁性的. 而密度普遍偏高. 但总体上还是玄武岩磁化率明显高于流纹岩. 这与文献[3]报道的流纹岩磁化率低的结论在总体趋势上相似. 然而, 研究样品中含有一定量磁铁矿的流纹岩都显示较高的磁化率($(3200 \sim 5200) \times 10^{-6}$ SI). 凝灰岩类, 不管是玄武质、流纹质、还是安山质, 都具有较强的磁化率, 但是密度普遍小.

②侵入岩类: 花岗岩磁化率变化很大($(10 \sim 100000) \times 10^{-6}$ SI), 从无磁性到强磁性均有分布. 二长花岗岩、石英花岗岩、石英正长岩为无磁性, 且密度变化范围小. 闪长岩具有中-高密度和极高的磁性. 中基性的岩脉、黑云母花岗岩具有很高的磁化率, 且都具有较大的密度. 花岗质伟晶岩脉具有中密度逆磁性.

③沉积岩类: 磁性普遍低($(-15 \sim 520) \times 10^{-6}$ SI), 基本上是无磁性或弱磁性的. 岩屑长石砂岩是沉积岩中磁性最强的, 也仅为弱磁性. 泥岩、粉砂岩和砾岩为无磁性. 微晶灰岩具有中密度逆磁性.

④变质岩类: 磁化率变化大($(-15 \sim 20000) \times 10^{-6}$ SI), 岩石磁性与原岩类型及变质程度有关^[29], 通常副变质岩(原岩为沉积岩)磁性与沉积岩相似, 比较弱; 而正变质岩(原岩为火成岩)则磁化率变化较大. 黑云母片麻岩、黑云角闪片岩因其含有黑云母和角闪石而具有强磁性. 千枚岩、白云母片岩和白云母片麻岩均具有较低的磁化率, 因其原岩为低磁性的沉积岩、中酸性火山岩碎屑岩或中酸性侵入岩^[12]. 变质岩密度普遍较大, 这是变质作用过程中压力作用的结果. 石英岩具有逆磁性. 但也有部分含有大量石英的片岩、片麻岩, 因其含有铁镁质矿物, 而具有中强磁性.

3 南海北部基底岩性地震-重磁响应特征与综合识别

3.1 基底岩性钻井揭示情况和重磁异常基本规律

南海北部火山岩从中生界到新生界均有钻遇, 中生界火山岩主要以酸性为主, 新生界主要以基性玄武岩为主, 也有少量中性及酸性火山岩. 侵入岩钻遇最多的是侏罗纪-白垩纪酸性岩, 以晚白垩世花岗岩为主. 沉积岩类在琼东南盆地钻遇了古生界的灰岩, 珠江口盆地东部钻遇了中生界的泥岩、砂岩、砂砾岩. 钻遇的变质岩主要以古生代和中生代的片麻岩、变质砂砾岩及石英岩为主.

根据对东南沿海大陆野外岩石磁化率及密度测定的结果, 认为南海北部磁异常主要是具有强剩磁的侵入岩和火山岩及切入到岩体中的基性岩脉引起, 并且磁性从酸性-中基性-基性具有逐渐增加的趋势. 南海北部基底岩性和新生代火山岩具有很明显的磁异常规律. 密度也有相同趋势, 但不如磁性明显. 密度重叠区域较大, 区分度较低. 熔岩因气孔发育程度不同而使密度变化较大, 而侵入岩密度则较为稳定.

在解释地震剖面时, 地震相单元给出反射特征, 熔岩类的基性-中性-酸性火山岩地震反射特征都非常相似, 但是基性-中性-酸性火山岩的磁性却具有较大差异, 因此依靠磁力异常可以大致区分岩性. 南海北部盆地基底的侵入岩大多数是晚燕山期, 并且部分具有很强的磁性. 根据钻井和化极磁力异常对比, 发现在侵入岩区磁异常普遍高、跳跃性大、幅值变化也大, 花岗岩和闪长岩都呈现这样的特点.

3.2 基底岩性地震-重磁响应特征

对不同岩石类型的地震-重磁特征分析, 合理利用地质-地球物理资料可提高岩性解释的精度. 通过研究, 总结出了南海北部盆地基底 4 大类 11 个亚类岩性的地震-重磁响应特征(见表 2).

3.3 基底岩性地震-重磁综合识别

(1) AA' 剖面

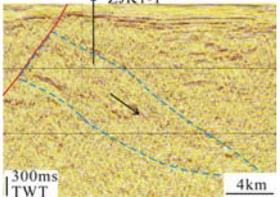
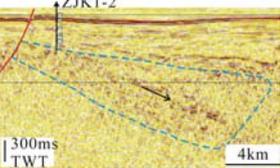
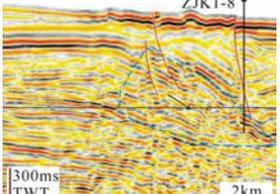
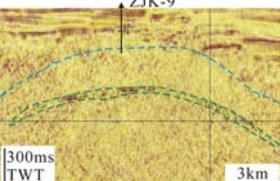
AA' 剖面位于珠江口盆地中部, 全长 194 km, 由西北向东南经过北部隆起、西江凹陷、恩平凹陷、番禺低隆起. 根据地震反射特征, 识别出三个主要反射界面, 即 Tg、Tm、Tp, 见图 3. 通过区域地质研究, 认为 Tg 反射界面是前新生代的顶面, Tm 是中生界底面, Tp 为古生界底面.

Tg-Tm 构造层内部主要为亚平行、杂乱状反射, 中强振幅-弱振幅, 高频-中低频, 连续性中等, 顶部局部见褶皱, 推测该层为中生代沉积岩. Tm-Tp 构造层内部反射结构为亚平行、杂乱反射, 中强振幅-弱振幅, 低频, 连续性差, 重磁表现为局部低值, 根据珠江口西部钻井钻遇早古生代的变质石英砂岩(YJ35-1-1、YJ36-1-1)和早古生代变质粉砂岩(KP1-1-1)^[30], 推测该层主要为古生界变质砂砾岩. 而 Tp 以下推测为前寒武纪低磁性片麻岩, 可能是白云母片麻岩.

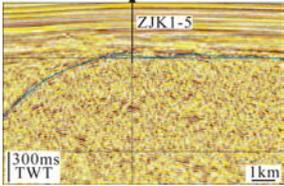
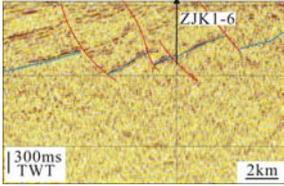
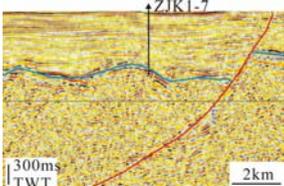
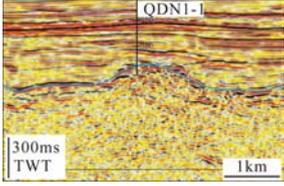
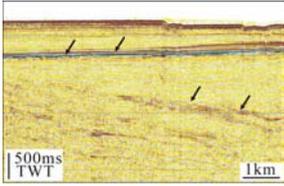
在 0~80 km 处, 基底以下地震反射外部形态为丘状, 内部反射结构为杂乱状、板状, 不连续, 中强振幅. 重磁异常表现为重力异常高, 磁力异常高, ΔT 值在 0~200 nT 之间. 根据 ZJK2-1 和 ZJK2-3 井钻遇晚白垩世黑云母花岗岩, 推测 Tg 以下的隆起主

表 2 南海北部基底岩性地震-重磁响应特征

Table 2 Seismic-potential field response characteristics of basement lithology in the northern South China Sea basin

岩性	地震反射特征			密度-磁化率分级区 (据表 1)	重磁特征		典型实例	
	外形	边界	内部		空间重力异常特征	化极航磁异常特征		
火山岩	(1) 玄武岩	楔状 丘状 席状 透镜状	顶面:强-中振幅,连续-断续,断线状 底面:强-中振幅,断线状	倾斜层状反射特征,局部连续,呈断线状强-中振幅.终止于断层	主要分布在Ⅳ区和Ⅰ区.为中-高密度中强磁性.(其中Ⅰ区主要为气孔很发育的玄武岩)	由于多为新生代玄武岩,因此埋深不是很大.一般具有正重力异常,为局部重力高;变化受埋深以及地形起伏影响较大	磁力异常普遍为正高值.具有高剩磁,局部磁力高.幅值变化大,跳跃性大	
	(2) 安山岩	楔状 席状 透镜状	顶面:中-弱振幅,断线状 底面:弱振幅,模糊,难以确定	倾斜层状反射特征,杂乱,局部连续,中-弱振幅	主要分布在Ⅲ区.中密度弱磁性	重力异常局部重力高;受埋深以及地形起伏影响较大	磁力异常正负都有,异常幅值不大,一般小于玄武岩的异常值.在-100~100 nT之间变化	
	(3) 流纹岩	楔状 席状	顶面:强-中振幅,连续 底面:中-弱振幅,连续	呈倾斜层状反射,杂乱状、拖网状,中-强振幅	由于流纹岩样品中含有磁铁矿,导致磁化率高,分布在Ⅳ区.根据文献[3]则应分布在Ⅱ、Ⅲ区	重力异常局部高;受埋深以及地形起伏影响较大	磁力异常幅值变化不大,常呈现负值.跳跃性较大	
	(4) 凝灰岩	层状 丘状	顶面:强-中振幅,不连续 底面:难以确定	中-弱振幅,杂乱,弱层理反射.内部偶见强振幅同相轴,可能为熔岩夹层(见右图)	分布在Ⅰ区.低密度中强磁性	重力异常偏低,局部重力低	基本上磁力异常值较高,但是总体上还是低于玄武岩的磁异常,并且受规模限制,磁异常规模也较小	

续表 2

岩性	地震反射特征		密度-磁化率分级区 (据表 1)	重磁特征		典型实例	
	外形	边界		空间重力异常特征	化极航磁异常特征		
侵入岩 (5) 黑云母花岗岩 闪长岩 (6) 石英正长岩 二长花岗岩 石英花岗岩	丘状 宝塔状	顶面: 反射通常都是强振幅, 正极性, 连续性较好, 反射平滑, 但是也有可能是不规则反射特征; 底面: 无底或很少确定	杂乱状、空白反射, 局部为乱岗状, 不连续, 局部连续性差, 中强振幅、弱振幅	主要分布在 IV、V 区. 中-高密度强-极强磁性 在 II 区、III 区均有分布. 中-高密度无或弱磁性	重力异常, 局部重力高; 与侵入规模有直接关系	侵入岩磁异常普遍较大, 高值可达 500 nT. 局部高值. 跳跃性大 磁力普遍局部低值, 到 -200 nT. 跳跃性大	
变质岩 (7) 片麻岩 片岩 (8) 千枚岩 板岩	板状 断箕状 层状	顶面: 强-中振幅, 假整合、反射削截 底面: 难以确定	内部为亚平行、乱岗状、波状, 连续性中等、连续性差-不连续, 中强振幅和中振幅为主, 局部弱振幅	主要分布在 II 区、III 区. 中密度-弱磁性. 在 IV 区中也有少量分布, 主要是与原岩关系密切	由于变质岩埋深较大, 重力异常受上覆地层影响较大, 在重力异常无明显特征. 部分埋深较浅的, 可出现局部高值异常	受埋深及原岩的影响, 磁力异常变化较大, 并且变质作用对磁性影响大, 导致跳跃变化大 磁力异常低, 变化平缓	
变质岩 (9) 石英岩	板状 丘状 层状	顶面: 强振幅, 连续性一般 底面: 难以确定	呈亚平行、乱岗状、波状, 连续性中-差, 中-强振幅, 局部弱振幅	主要分布在 VII 区. 中密度逆磁性	由于变质岩埋深较大, 重力异常受上覆地层影响较大, 在重力异常无明显特征	局部磁力低, 变化平缓	
沉积岩 (10) 灰岩	丘状 剥状	顶面: 通常为强振幅, 较为连续, 常呈现削蚀 底面: 很少能被识别	杂乱, 乱岗状反射, 中-强振幅, 连续性差	主要分布在 VII 区. 中-高密度逆磁性	由于多为古生界灰岩, 密度较大, 重力异常为正值. 常呈现局部重力高	局部磁力低, 变化平缓	
沉积岩 (11) 砂岩 砾岩 粉砂岩 泥岩	层状	顶面: 中-强顶超/削蚀 (黑色箭头所指) 底面: 难以确定	内部平行、亚平行, 大倾角反射, 连续性好-中等, 中-弱振幅	主要分布在 II 区. 中密度无磁性	重力异常变化与起伏有关, 变化平缓.	局部磁力低, 变化平缓	

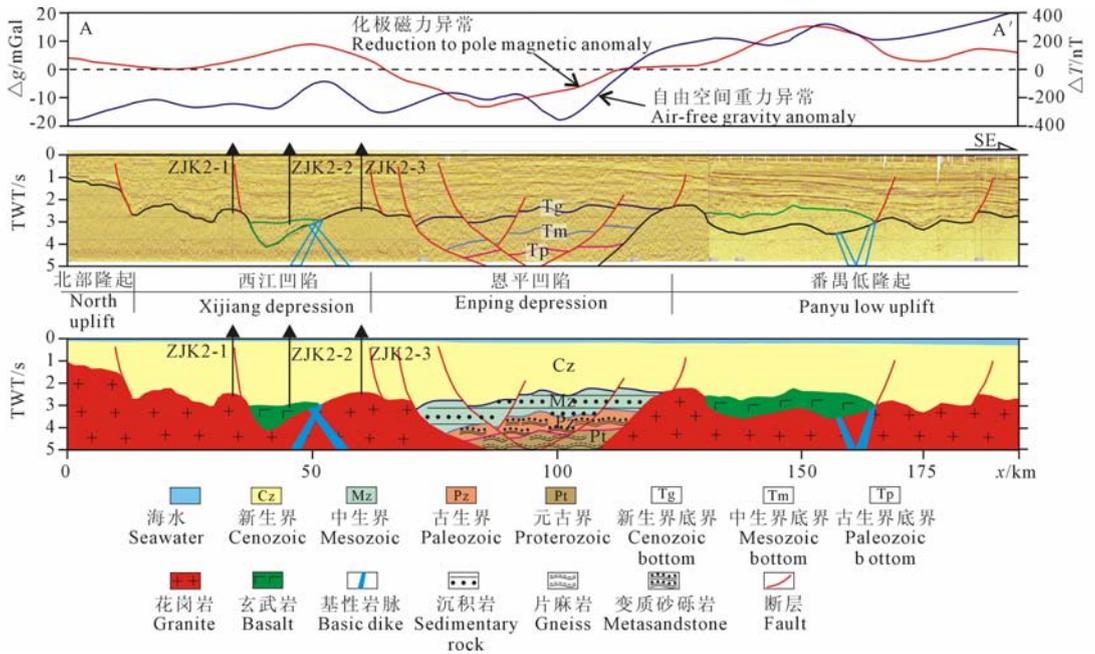


图3 珠江口盆地 AA'剖面地质-地球物理解释(位置见图1)

Fig. 3 Geological-geophysical interpretation of AA' profile in Pearl River Mouth Basin (Location in Fig. 1)

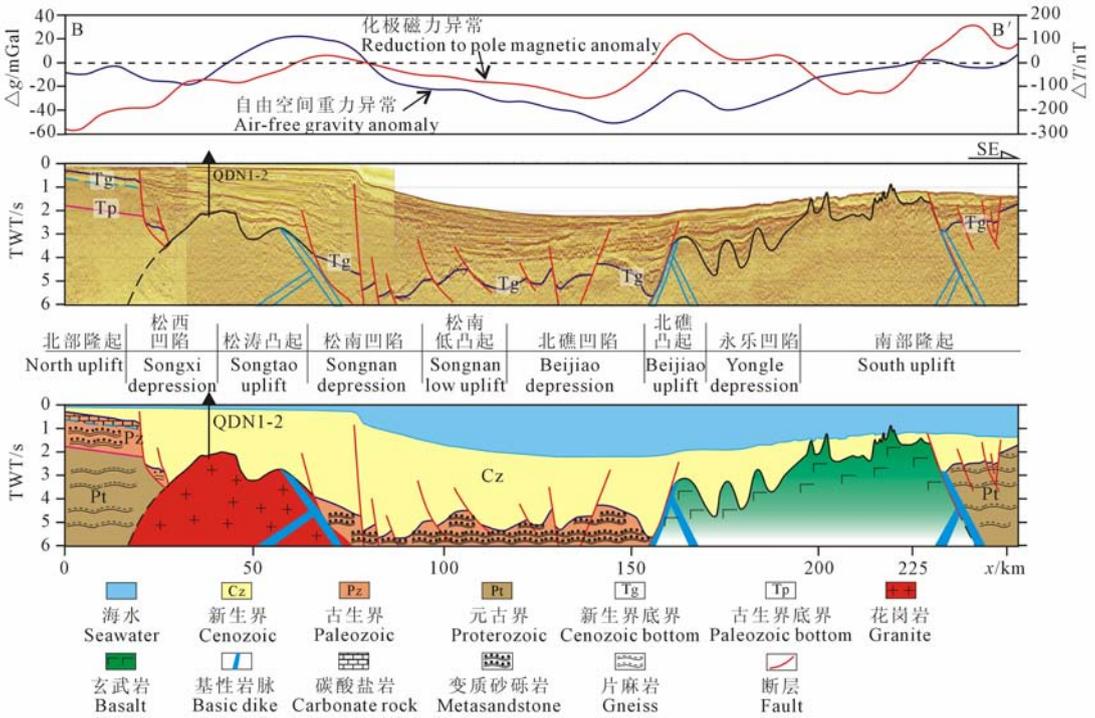


图4 琼东南盆地 BB'剖面地质-地球物理解释(位置见图1)

Fig. 4 Geological-geophysical interpretation of BB' profile in Southeast Hainan Basin (Location in Fig. 1)

要为黑云母花岗岩。在 40~50 km 处,在推测的花岗岩体上部的楔状反射体,内部倾斜层状反射特征为局部连续,呈断线状,强-中振幅;并且化极磁力异常呈现局部高值,重力局部高值,与玄武岩地震-重磁响应特征非常吻合,且 ZJK2-1 井钻遇玄武岩,因此综合解释为玄武岩。值得注意的是,磁异常高点偏

向玄武岩的右侧,说明更强的磁性体存在于玄武岩右侧的花岗岩中,很可能是与玄武岩浆活动有关的一系列基性岩脉。

在 110~194 km 处,番禺低隆起基底以下地震反射外部形态为丘状,内部反射结构为杂乱状、板状,不连续,中强振幅。重磁异常表现为重力和磁力

异常高, ΔT 值在 0~300 nT 之间, 推测为黑云母花岗岩. 在此花岗岩体上部有一楔状地震反射体, 内部倾斜层状反射, 局部连续, 强-中振幅; 并且化极磁力异常有个明显高值, 达 300 nT, 因此推测为玄武岩体. 同样, 在与磁异常高值对应的下伏花岗岩内, 也可能存在基性岩脉.

(2) BB' 剖面(图 4)

BB' 剖面位于琼东南盆地中部, 全长 253 km, 由西北向东南经过松西凹陷、松涛凸起、松南凹陷、松南低凸起、北礁凹陷、北礁凸起、永乐凹陷、南部隆起. 根据钻井揭示(QDN1-1, QDN1-3), 琼东南盆地缺失中生界地层, 而根据西永 1 井(位置见图 1)钻穿新生界地层后钻遇了元古界的片麻岩^[31], 推测在盆地南部则部分缺失中生界地层和古生界地层.

在 0~20 km 处, 松西凹陷北侧, 基底深度最小, 双程走时深度在 0.25~0.75 s 之间. 在基底 Tg 构造层以下约有 0.3s 厚的弱反射层, 连续性好, 振幅弱-中, 低频. 重磁特征表现为低磁异常, ΔT 值在 -290~-190 nT 之间, 重力异常低, 变化平缓. 该套反射层在琼东南盆地北部至海南岛之间大面积分布, 根据琼东南盆地 QDN1-1, QDN1-3 井和海南岛三亚等地大量发育有古生代碳酸盐岩和变质砂砾岩, 推测这套 0.3 s 厚的弱反射层为古生代碳酸盐岩和变质砂砾岩组合. 在这套弱反射层下部至 Tp 构造层之间约有 1 s 厚的强反射层, 局部可见亚平行反射结构, 中强振幅, 高频, 连续性差, 推测为古生代的变质岩, 可能为变质砂砾岩. Tp 构造层以下为杂乱反射, 推测可能为元古代片麻岩.

在 20~70 km 处, 松西凹陷、松涛凸起之间, 基底以下地震反射外部形态为丘状, 内部反射结构为杂乱状、板状, 不连续, 中强振幅. 重磁异常表现为重力异常高, 磁力异常高, ΔT 值在 -100~30 nT 之间. 根据 QDN1-2 井钻遇情况, Tg 构造层以下的隆起主要为花岗岩. 在海南印支期花岗岩体(尖峰岭岩体)中发育大量的白垩纪基性岩脉, 并有磁高异常, 因此推测在断裂附近有基性岩脉发育.

在 70~155 km 处, 松南凹陷、松南低凸起和北礁凹陷之间, 基底双程走时深度大于 4.5 s. Tg 构造层以下为中强反射层, 内部反射结构为乱岗状、杂乱状, 连续性差. 重力异常随基底埋深和海水的增大而降低, 变化平缓; 磁力异常低, ΔT 值在 -150~0 nT 之间, 变化平缓. 根据上述特征, 推测基底岩性主要为古生代的变质砂砾岩.

在 155~230 km 处, 北礁凸起、永乐凹陷一直

到南部隆起北部, 新生界沉积层之下, 地震反射的外部形态表现为宝塔状、尖峰状、锥状, 内部为斜层或板状反射, 中强振幅, 其底面难以确定. 在 200~230 km 处为海底山. 与凸起对应位置表现为重力高异常; 磁力异常高低变化较大, ΔT 值在 -130~150 nT 之间. 推测其岩性为玄武岩. 海山对应的位置磁力异常为局部极小负值, 根据金钟(2003)研究南海中部海盆分布的众多海山的磁异常特征, 认为南海海山是由于多期火山作用所形成的, 为非均匀磁性体^[32], 因此会出现海山对应于异常负值. 但在海山左侧且有异常高值, 推测其下有基性岩脉侵入.

在 230~253 km 处, 在南部隆起(西沙隆起)的南部, 基底 Tg 构造层以下为亚平行、乱岗状、杂乱状反射, 连续性差-中等, 中强振幅. 重、磁异常均有降低的趋势. 根据西沙隆起西永 1 井钻井揭示情况, 推测该套地层以元古代的片麻岩为主, 且后期沿断裂有基性岩脉侵入.

4 结论与讨论

通过南海北部陆区岩石样品密度和磁化率测量分析而建立了密度与磁化率的 7 个分区. 把重磁与地震结合起来, 在过井剖面上可识别出 4 大类 11 个亚类的盆地基底岩性. 各种基底岩性的地震-重磁响应识别特征, 规律如下:

(1) 火山岩类: 可识别出 4 亚类(流纹岩、安山岩、玄武岩和凝灰岩). 熔岩类在地震反射特征上十分相似, 单从地震特征难以区分, 但是由于磁化率的区分, 可以识别出火山岩的三类熔岩, 即玄武岩、安山岩、流纹岩. 凝灰岩类密度低, 常呈现局部重力异常底, 磁性比熔岩类低, 比沉积岩高.

(2) 侵入岩类: 可分为 2 个亚类. 地震反射特征难以区别其岩性. 常呈现局部重力高值, 结合磁性区别, 黑云母花岗岩和闪长岩高磁性为一类, 石英正长岩、二长花岗岩和石英花岗岩低磁性为一类.

(3) 变质岩类: 分为 3 亚类, 即板岩和千枚岩, 片岩和片麻岩, 石英岩. 前两类地震上难以区分, 主要是根据分布的层位及磁性特征识别. 第一类无磁性或弱磁性, 第二类具有较强磁性. 第三类在地震特征与前两类具有明显区别, 而且磁性低.

(4) 沉积岩类: 分为 2 亚类, 即碳酸盐岩为一类, 砾岩、砂岩、粉砂岩及泥岩为一类. 这两类地震反射特征具有明显识别标志, 再辅助以弱磁性特征, 区别于其他岩类.

通过地震剖面解释,我们还取得了对南海北部盆地基底的几点认识:向中央海盆方向玄武岩海山发育.剖面 AA'显示,珠江口盆地基底具有三层结构,即中生界、古生界、前寒武系.剖面 BB'显示,琼东南盆地基底中生界地层仅有零星分布,大部分缺失;而在盆地南部古生界也缺失,导致基底结构更为复杂.因此认为琼东南盆地基底结构与珠江口盆地基底结构具有明显不同的演化历史,相关问题还有待进一步研究.

参考文献(References)

- [1] 刘以宣,詹文欢.南海变质基底基本轮廓及其构造演化.安徽地质,1994,4(1-2):82~90
Liu Y X, Zhan W H. Basic outline and tectonic evolution of the metamorphic basement in the South China Sea. *Geology of Anhui* (in Chinese), 1994, 4(1-2):82~90
- [2] 刘海龄,杨恬,朱淑芬等.南海西北部新生代沉积基底构造演化.海洋学报,2004,3(26):54~67
Liu H L, Yang T, Zhu S F, et al. Tectonic evolution of Cenozoic sedimentary basements in the northwestern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2004, 3(26):54~67
- [3] 郝天珧,徐亚,赵百民等.南海磁性基底分布特征的地球物理研究.地球物理学报,2009,52(11):2763~2774
Hao T Y, Xu Y, Zhao B M, et al. Geophysical research on distribution features of magnetic basements in the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(11):2763~2774
- [4] 朱炳泉,王慧芳,雷琼地区 MORB-OIB 过渡地幔源火山作用的 Nd-Sr-Pb 同位素证据.地球化学,1989,20(4):251~251
Zhu B Q, Wang H F. Nd-Sr-Pb isotopic and chemical evidence for the volcanism with MORB-OIB source characteristic in the Leiqiong area, China. *Geochimica* (in Chinese), 1989, 20(4):251~251
- [5] 王贤觉,吴明清,梁德华.南海玄武岩的某些地球化学特征.地球化学,1984,4:332~340
Wang X J, Wu M Q, Liang D H. Some geochemical characteristics of basalts in the South China Sea. *Geochimica* (in Chinese) 1984, 4:332~340
- [6] Tu K, Flower F J, Carlson R W, et al. Magmatism in the South China Basin; 1. Isotopic and trace-element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chemical Geology*, 1992,97(1-2):47~63
- [7] 邹和平,李平鲁,饶春涛.珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其地球动力学意义.地球化学,1995,24(增刊):33~45
Zou H P, Li P L, Rao C T. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in Pearl River Mouth Basin and its geodynamic significance. *Geochimica* (in Chinese), 1995, 24(Suppl.):33~45
- [8] Flower F J, Zhang M, Chen C Y, et al. Magmatism in the South China Basin; 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China. *Chemical Geology*, 1992, 97(1-2):65~87
- [9] 阎贫,刘海龄.南海及周缘中生代火山活动时空特征与南海的形成模式.热带海洋学报,2005,24(2):33~41
Yan P, Liu H L. Temporal and spatial distributions of Mesozoic Cenozoic igneous rocks over South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2005, 24(2):34~41
- [10] Yan Q S, Shi X F, Wang K S, et al. Major element, trace element, Sr-Nd-Pb isotopic studies of Cenozoic alkali basalts from the South China Sea. *Science in China (Ser. D: Earth Sciences)*. 2008, 51(4):550~566
- [11] 刘光鼎,陈洁.中国前新生代残留盆地油气勘探难点分析及对策.地球物理学进展,2005,20(2):273~275
Liu G D, Chen J. Analysis of difficulties in gas petroleum prospecting in Chinese Pre-Cenozoic relic basin and the corresponding solutions. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, 20(2):273~275
- [12] 郝天珧,杨长春,王真理等.海区前新生代残留盆地油气研究的综合地球物理技术.地球物理学进展,2008,23(3):731~742
Hao T Y, Yang C C, Wang Z L, et al. Comprehensive geophysical technology on oil & gas resources of Pre-Cenozoic residual basin in Chinese marine area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(3):731~742
- [13] 郝天珧,黄松,徐亚等.南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究.地球物理学报,2008,51(6):1785~1796
Hao T Y, Huang S, Xu Y, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese). 2008, 51(6):1785~1796
- [14] 邱燕,温宁.南海北部边缘东部海域中生界及油气勘探意义.地质通报,2004,23(2):142~146
Qiu Y, Wen N. Mesozoic in the eastern sea area of the northern margin of the South China Sea and its significance for oil/gas exploration. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2004, 23(2):142~146
- [15] 杨少坤,林鹤鸣,郝沪军.珠江口盆地东部中生界海相油气勘探前景.石油学报,2002,23(5):28~33
Yang S K, Lin H M, Hao L J. Oil and gas exploration prospect of Mesozoic in the eastern part of Pearl River Mouth basin. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 2002, 23(5):28~33
- [16] 陈洁,高德章,温宁等.南海磁场特征研究.地球物理学进展,2010,25(2):376~388
Chen J, Gao D Z, Wen N, et al. Characteristics of the geomagnetic field in the South China Sea. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2010, 25(2):376~388
- [17] 陈洁,温宁.南海地球物理图集.北京:科学出版社,2010
Chen J, Wen N. *Geophysical Atlas of the South China Sea* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [18] 胥颐,李志伟,郝天珧等.南海东北部及其邻近地区的 Pn 波速度结构与各向异性.地球物理学报,2007,50(5):1473~1479

- Xu Y, Li Z W, Hao T Y, et al. Pn wave velocity and anisotropy in the northeastern South China Sea and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(5): 1473~1479
- [19] 刘建华, 胥颀, 郝天璠等. 中国边缘海及邻区地壳和上地幔速度结构特征. 地球物理学进展, 2005, **20**(3): 594~599
Liu J H, Xu Y, Hao T Y, et al. Three dimensional velocity structure feature in the crust and upper mantle beneath Chinese marginal seas and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **20**(3): 594~599
- [20] 吴湘杰, 周蒂, 庞雄等. 白云凹陷地球物理场及深部结构特征. 热带海洋学报, 2005, **24**(2): 62~69
Wu X J, Zhou D, Pang X, et al. Geophysical field and deep structures of Baiyun sag, Pearl River mouth basin. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2005, **24**(2): 62~69
- [21] 王家林, 张新兵, 吴健生等. 珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究. 热带海洋学报, 2002, **21**(2): 13~22
Wang J L, Zhang X B, Wu J S, et al. Integrated geophysical researches on base texture of Pearl River mouth basin. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2002, **21**(2): 13~22
- [22] 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. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, **36**(3): 209~218
Zhou D, Wang W Y, Pang X, et al. Mesozoic subduction-accretion zone revealed by geophysical data in the northeastern South China Sea. *Science in China Ser. D Earth Sciences* (in Chinese), 2006, **36**(3): 209~218
- [23] 周蒂, 孙珍, 陈汉宗等. 南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化. 地学前缘, 2005, **12**(3): 204~218.
Zhou D, Sun Z, Chen H Z, et al. Mesozoic lithofacies, paleogeography, and tectonic evolution of the South China Sea and surrounding areas. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2005, **12**(3): 204~218
- [24] 倪金龙, 夏斌, 刘海龄. 南海及邻区前中生代构造演化与东特提斯构造域. 海洋地质动态, 2005, **21**(10): 11~16
Ni J L, Xia B, Liu H L. South China Sea and adjacent areas tectonic evolution in Pre-Mesozoic and the East Tethyan tectonic domain. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2004, **23**(2): 142~146
- [25] 王平, 夏戡原, 张毅祥等. 南海东北部深部构造与中生代沉积盆地. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(4): 59~65
Wang P, Xia K Y, Zhang Y X, et al. Relationship between the deep structure and Cenozoic/Mesozoic sediment basins in the northeastern, South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 2002, **22**(4): 59~65
- [26] 陈洁. 潮汕坳陷地球物理特征及油气勘探潜力. 地球物理学进展, 2007, **22**(1): 147~155
Chen J. Geophysical characteristics of the Chaoshan depression and its hydrocarbon exploration potential. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(1): 147~155
- [27] 陈洁, 温宁, 李学杰. 南海油气资源潜力及勘探现状. 地球物理学进展, 2007, **22**(4): 1285~1294
Chen J, Wen N, Li X J. The status of the resource potential and petroleum exploration of the South China Sea. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(4): 1285~1294
- [28] 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
Yao B C, Zeng W J, Chen Y Z, et al. The crustal structure in the eastern part of the northern margin of the South China Sea. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1994, **37**(1): 27~35
- [29] 李色篆, 蒲绍东, 张益明等. 岩石磁性研究方法及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 243~247
Li S Z, Pu S D, Zhang Y M, et al. Magnetic Properties of Rocks and Minerals and Its Application (in Chinese). Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988. 243~247
- [30] 龚再升, 李思田. 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. 31~35
Gong Z S, Li S T. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997. 31~35
- [31] 孙嘉诗. 西沙基底形成时代的商榷. 海洋地质与第四纪地质, 1987, **7**(4): 5~6
Sun J S. Discussion of the formation age of Xisha basement. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1987, **7**(4): 5~6
- [32] 金钟. 南海中部海盆海山磁性反演及初步解析. 海洋学报, 2003, **25**(2): 57~66
Jin Z. Inversion magnetic anomalies of seamounts and preliminary analysis in the central basins of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(2): 57~66