

doi: 10.12029/gc20200504

王利杰,姚永坚,孙珍,李付成,杨楚鹏,徐子英. 2020. 南海东南部中生界识别及其构造属性[J]. 中国地质, 47(5): 1337-1354.  
Wang Lijie, Yao Yongjian, Sun Zhen, Li Fucheng, Yang Chupeng, Xu Ziyang. 2020. The discrimination of Mesozoic sequence and its tectonic attribute in the southeastern South China Sea[J]. Geology in China, 47(5):1337-1354(in Chinese with English abstract).

## 南海东南部中生界识别及其构造属性

王利杰<sup>1,2</sup>,姚永坚<sup>1,2</sup>,孙珍<sup>2,3</sup>,李付成<sup>2,3</sup>,杨楚鹏<sup>1,2</sup>,徐子英<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室,中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东 广州 510760;2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东 广州 511458;3. 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室,广东 广州 510301)

**摘要:**正确识别南海东南部中生界及其分布,对认识南海形成演化和油气资源潜力具有重要意义。受资料条件约束和地层系统划分差异的影响,南海东南部中生界分布和构造特征一直存在争议。本文在钻井、拖网约束下,通过井震对比、地震反射特征、层速度分析、岩浆岩体与地层接触关系和构造变形特征来综合识别中生界。结果表明,中生界呈平行、连续、低频的反射特征,层速度 3400~4200 m/s,随着埋深或(和)变质程度增强,层速度增大(4500~5500 m/s),反射波组模糊,多数未见明显底界反射。研究区中生代地层发育局限,地震反射波组特征明显,但较难进行区域对比和解释。其中,西北、西南巴拉望盆地、礼乐滩和安渡北盆地中生界呈现低角度掀斜或近水平层状;礼乐滩西南部九章盆地中生界层速度 3500~4500 m/s,高于上覆新生界,与钻井层速度吻合,地层呈高角度掀斜或挠曲变形,可能与岩浆活动侵位相关。结合中生代火山弧和识别的岩体分布,推测前者零散分布在弧前盆地靠火山弧一侧,构造活动相对弱,后者分布于岩浆活动强烈的弧间盆地。

**关键词:**南海东南部;中生代火山弧;层速度;构造变形;弧间盆地;海洋地质调查工程

**中图分类号:**P736.1;P714<sup>+.6</sup> **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2020)05-1337-18

## The discrimination of Mesozoic sequence and its tectonic attribute in the southeastern South China Sea

WANG Lijie<sup>1,2</sup>, YAO Yongjian<sup>1,2</sup>, SUN Zhen<sup>2,3</sup>, LI Fucheng<sup>2,3</sup>, YANG Chupeng<sup>1,2</sup>, XU Ziyang<sup>1,2</sup>

(1. MNR, Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, Guangdong, China; 3. CAS, Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, Guangdong, China)

**Abstract:** Discriminating the distribution of the Mesozoic strata on the southeastern South China Sea (SCS) continental margin is of

收稿日期:2020-04-03;改回日期:2020-07-08

基金项目:中国地质调查局国家海洋专项项目(DD20160138, DD20201118)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0208)、广东省自然科学基金研究团队项目(2017A030312002)及国家自然科学基金项目(41606080)联合资助。

作者简介:王利杰,男,1982年生,博士,工程师,主要从事海洋构造地质与地球物理研究;E-mail:ljwang@scsio.ac.cn。

通讯作者:姚永坚,女,1964年生,博士,教授级高级工程师,石油与天然气地质专业,主要从事海洋油气地质和区域地质的综合研究;E-mail:yjyaomail@163.com。

great importance for understanding the SCS evolution as well as the oil and gas potential. Due to limited data constraints and varied stratigraphic system divisions, the distribution and tectonic features of the Mesozoic sequences in the southeastern SCS have remained controversial. Assisted by drilling and dredging data, the authors comprehensively identified the Mesozoic sequence using a combination of well-seismic comparison, seismic reflection characteristics, internal velocity analysis, contact relationship between igneous edifices and strata, and structural deformation characteristics. The results show that the Mesozoic sequence is characterized by parallel, continuous, and low-frequency reflections, with internal velocity of 3400–4200 m/s. As the burial depth or/and the degree of metamorphism increases, the internal velocity increases to 4500–5500 m/s. The seismic reflections of the Mesozoic strata in the depth is fuzzy, and most of them have no obvious bottom reflection. Despite the fact that the characteristics of seismic reflection are clear in a specific area, it is still difficult to make a comparative study and conduct a whole region seismic explanation because the range of the Mesozoic strata is limited. Among them, the Mesozoic strata in the Northwest, Southwest Palawan basin, Liyue and Andubei basin show low-angle tilting or nearly horizontal characteristics. By contrast, the Mesozoic strata in the northern part of Jiuzhang basin located in the southwest of Liyue have a velocity of 3500–4500 m/s, which is higher than the overlying Cenozoic velocity and coincides with the result constrained by drilling layer. In addition, the Mesozoic strata tilt or deflect at a high angle, which may be related to the emplacement of magmatic activity. Compared with the distribution of Mesozoic volcanic arc and identified igneous bodies, the authors infer that the first style Mesozoic strata are scattered in the fore-arc basin near volcanic arc and thus show a relatively weak tectonic activity, whereas the second style strata are distributed in the inter-arc basin and have a strong magmatic activity.

**Key words:** southeastern South China Sea; Mesozoic volcanic arc; internal velocity; tectonic deformation; inter-arc basin; marine geological survey engineering

**About the first author:** WANG Lijie, male, born in 1982, engineer, mainly engages in the study of marine geology and geophysics; E-mail: ljwang@scsio.ac.cn.

**About the corresponding author:** YAO Yongjian, female, born in 1964, senior engineer, mainly engages in offshore petroleum geology and tectonic geology research; E-mail: yjyaomail@163.com.

**Fund support:** Supported jointly by Geological Survey Project (No. DD20160138, No. DD20201118), Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (No. GML2019ZD0208), Guangdong Natural Science Foundation Research Team Project (No. 2017A030312002), and National Natural Science Foundation of China (No. 41606080).

## 1 引 言

南海是西太平洋俯冲背景下面积最大的伸展型边缘海盆地(Wang et al., 2019)。中生代以来,受周缘三大板块沿特提斯构造域和太平洋构造域的相互作用,南海于晚中生代末发生了从主动大陆边缘向被动大陆边缘的转变(周蒂等, 2005),新生代发生了陆缘拉张减薄、裂解、滑移、旋转、会聚和碰撞等过程(姚伯初等, 2004)。其中,南海中生界记录了主动大陆边缘时期南海处于古太平洋和特提斯洋两大构造域的构造特征和沉积环境,并涉及古太平洋与欧亚板块俯冲、碰撞等重大科学问题,一直是国际地质学界关注的热点(张渝昌等, 1997; 周蒂等, 2005; 邵磊等, 2007; 李学杰等, 2017)。由于构造演化过程复杂,南海中生界受到后期构造变

动、岩浆活动、变质和沉积压实作用影响,一些关键地质问题的认识还存在分歧,从而造成科学家对南海扩张之前所经历的地质过程认识还不够深入,尤其是位于南海东南部的南沙和礼乐地块。地震、钻井和拖网资料显示研究区分布一定范围和厚度的中生界(Kudrass et al., 1986; Scale et al., 1997),并与南海北部潮汕凹陷中生界形成环境类似(Shao et al., 2017)。然而受国际争端、复杂地质背景和资料条件制约,其中生代地层系统和构造特征尚不清楚。主要存在以下两方面问题:(1)由于中生界埋藏相对较深,地震反射相对模糊,在井震对比资料稀疏情况下,相同位置测线存在以中生界和新生界为主的解释差异。前人根据地震相特征(孙龙涛等, 2008)、地层褶皱变形(Yan et al., 2004)、折射波速度(王彦林等, 2012; 邱燕等, 2016)进行中生界识

别。其中,孙龙涛等(2008)把过礼乐盆地地震剖面上具有离散、低频、弱反射且层速度高于5000 m/s的下构造层解释为中生界。Yan et al(2004)和赵美松等(2013)把分割具有低频、水平层状地层特征的上覆地层和具有高频、发育宽缓褶皱和逆断层特征的下伏地层,且核部遭受剥蚀的角度不整合面划分为中生界与新生界的分界面。根据地层变形特征、拖网和钻井资料,Yan et al(2004)将礼乐滩西南部到南薇滩和安渡滩之间的区域划分为形成于中生代的南薇西礼乐挤压带。然而,该挤压带大部分区域与Steuer et al(2014)解释的早中新世南沙地块东南部随古南海俯冲作用发生板块挠曲变形所形成的构造前隆范围重合。通过孙龙涛等(2008)和Yao et al.(2012)在礼乐盆地南部相交测线的解释结果对比,我们发现主要是由于新生界基底解释方案的差异造成了对挠曲变形地层地质时代归属的不同认识。(2)地层系统认识差异,形成了不同的南海演化模式。根据Yan et al(2004)的地层划分方案,赵美松等(2013)在礼乐滩西南部的07ns-6测线上解释了具有褶皱-冲断构造特征的中生代地层,并推断礼乐地块与南海北部陆缘在中生代经历了晚三叠世洋-陆俯冲、早侏罗-早白垩世陆-陆碰撞造山和中生代晚期的造山带塌陷等演化阶段。该模式显示礼乐地块与华南地块之间存在俯冲带,而其他模式认为古南海或太平洋的俯冲带在礼乐地块南侧,礼乐地块为华南地块一部分(Taylor and Hayes, 1980)。

为更准确识别南海东南部中生界分布及大地构造属性,本文在井震对比和地层速度资料综合约束下,确定新生界底界和中生界反射特征,通过研究区二维测线追踪解释、闭合,识别中生界及其分布,分析造成地震解释多解性的原因,最后根据中生界构造变形特征、岩体与地层接触关系和区域地质背景判定地层形成的构造环境。

## 2 地质背景

南海东南部位于东亚陆缘的南段,包括南沙地块东北部(图1a)。其北侧为南海海盆,东侧和南侧分别为巴拉望岛和婆罗洲,西部为南薇西盆地及岛礁区(图1a)。研究区主要由伸展减薄、裂离华南陆缘的礼乐、巴拉望和南沙地块组成(Holloway,

1981),发育多个中生代沉积盆地,包括西北巴拉望、礼乐、安渡北和九章4个断陷盆地,以及西南部的南沙海槽和西南巴拉望盆地断陷-前陆叠合性质的盆地(刘海龄等,2002;熊莉娟等,2012;图1a)。研究区地形地貌复杂,发育陆架、陆坡、海槽和多岛礁。

南海东南部陆缘的构造演化和沉积充填特征受控于中生代以来的周缘板块重组(Holloway, 1981; Schlüter et al., 1996; Sales et al., 1997)。晚中生代时期,欧亚大陆东南侧受到古太平洋或古南海长期的俯冲挤压,发育了大规模的岩浆活动,为典型的安第斯山型主动陆缘,形成了不均一性的大陆岩石圈(Pubellier and Morley, 2014)。随后,白垩纪末期到新生代早期南海北部陆壳强烈的拉张减薄进一步破坏了早期的基底结构,且古南海北侧大陆边缘拉伸程度不断加剧(Hayes and Nissen, 2005),形成了一系列由同张裂作用控制的掀斜半地堑、地堑结构(Sales et al., 1997),并于始新世末期发生岩石圈破裂,随后开始海底扩张(Jian et al., 2019)。在渐新世-早中新世海底扩张阶段,位于往南漂移地块的古隆起、掀斜断块高部位发育了大规模Nido灰岩(Hinz and Schlüter, 1985; 图2)。早中新世末南海停止扩张之后,大部分区域为统一坳陷沉积,局部伴随着阶段性的板内岩浆作用。

目前在南海东南陆缘钻井和拖网获取了大量中生代的沉积岩、岩浆岩和变质岩样品(表1)。巴拉望岛北部露头 and 钻井揭示了来自华南大陆的中生代浅变质岩和沉积岩。其中, Malapaya Sound 组的基质由厚层砂岩、泥岩及凝灰岩组成,包括二叠-侏罗纪的灰岩、泥岩、硅质岩及砂岩等外来岩块(Faure and Ishida, 1990),其上 Barton 群主要由轻度变质的白垩纪岩石组成,包括 Caramay 片岩、白垩纪云母片岩、Conception 千枚岩、白垩纪千枚岩以及毗邻的 Caramay 片岩、晚白垩世砂岩、泥岩和海岸平原相沉积岩(Suzuki et al., 2000)。

西北巴拉望陆架区6口钻井揭示了中生代沉积岩(表1),主要包括上侏罗统石灰岩、页岩、黏土岩和凝灰岩,上侏罗统一下白垩统主要为陆相和海陆过渡相。下白垩统粉砂岩、黏土岩、粉砂岩、钙质(变质)页岩(Schlüter et al., 1996; Sales et al., 1997),而上白垩统沉积岩未钻遇。仅在陆架区南侧的 Cuyo 陆架附近露头发现了海岸平原、浅海相含石

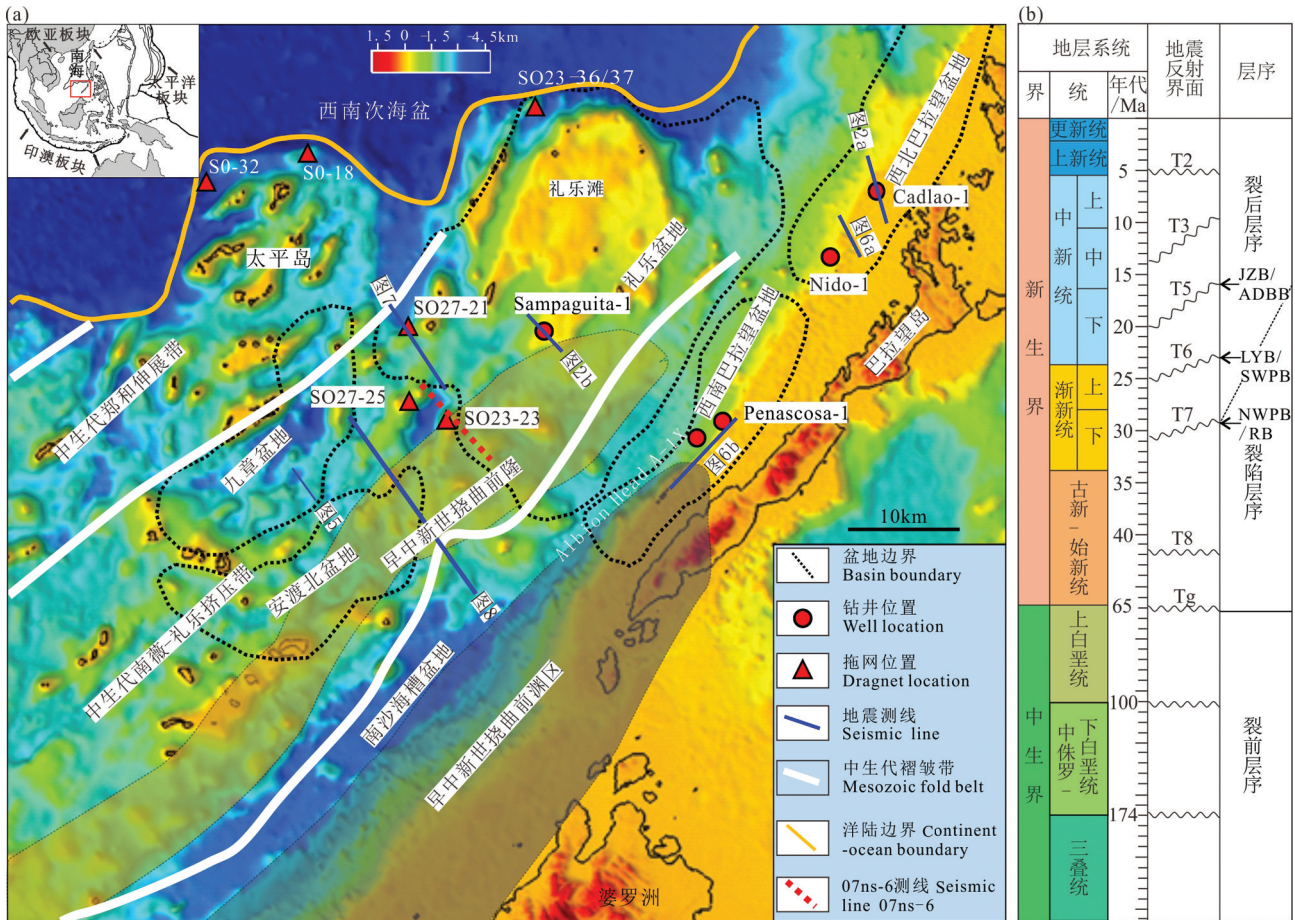


图1 南海东南部地貌(Becker et al., 2009)、构造单元和地质背景分布图(a)(Yan et al., 2004; Kudrass et al., 1986; Schlüter et al., 1996; Yan et al., 2008; 赵美松等, 2013; Steuer et al., 2014)及地层系统柱状图(b)

NWPB—西北巴拉望盆地; SWPB—西南巴拉望盆地; RB—礼乐滩; LYB—礼乐盆地; JZB—九章盆地; ADB—安渡北盆地

Fig.1 Regional geomorphological map (after Becker et al., 2009) with tectonic locations (a) (after Yan et al., 2004; Kudrass et al., 1986; Schlüter et al., 1996; Yan et al., 2008; Zhao et al., 2013; Steuer et al., 2014) and stratigraphic column (b) of continental margin in the southeastern South China Sea

NWPB—Northwest Palawan Basin; SWPB—Southwest Palawan Basin; RB—Reed Bank; LYB—Liyue Basin; JZB—Jiuzhang Basin; ADB—Andubei Basin

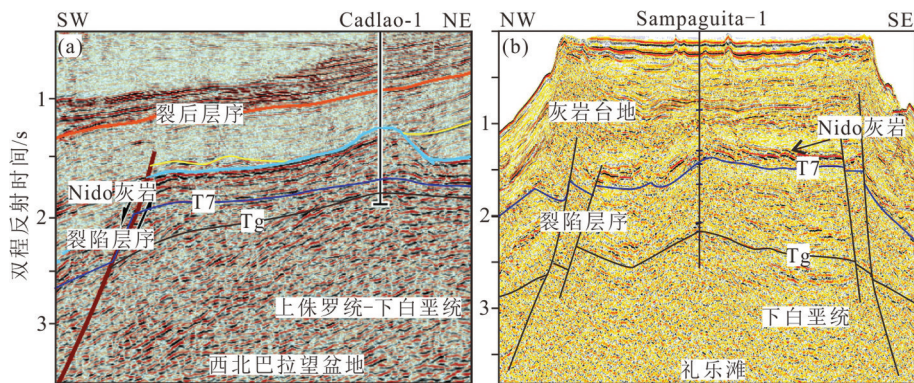


图2 过西北巴拉望盆地和礼乐滩中生界地震反射特征(剖面位置见图 1a)

Fig.2 Mesozoic Seismic profiles in the northwest Palawan basin and Reed Bank (see Fig. 1a for location)

表1 南海东南部陆缘盆地中生代地层钻井岩性及地质时代  
Table 1 Drilling sites Mesozoic sediments and geological date in southeastern South China Sea basins

构造单元	钻井名称	位置	岩性	地质时代	数据来源
西北巴拉望盆地	Malajon-1	119°37.32'E, 12°12.8'N	浅变质砂岩、千枚岩	晚侏罗—早白垩世	
	Destacado A-1X	118°49.71'E, 11°26.77'N	粉砂、钙质泥岩和砂岩	早白垩世	Schlüter et al., 1996
	Guntao-1	118°56.63'E, 11°7.84'N	灰岩	早白垩世或更早	
	Caloc-1	119°18.09'E, 11°59.03'N 12°12.8'N	滨浅海碎屑岩	早白垩世	Sales et al., 1997
	Cadlao-1	118.99651°, 11.32042°	泥岩、砂岩、灰岩和火山碎屑岩	晚侏罗—早白垩世	Steuer et al., 2014
	Camago-1		海陆过渡相—滨海相碎屑岩	侏罗—白垩纪	
	Dumaran-1	119°56.37'E, 10°19.61'N	砂岩、页岩和粉砂岩	早白垩世?	下伏蛇纹石化橄榄岩
Roxas-1	119°38.68'E, 10°04.71'N	砂岩、页岩和粉砂岩	早白垩世		
礼乐滩、岛礁区	Sampaguita-1	116°37.15'E, 10°26.28'N	砂岩、泥岩、凝灰质火山碎屑岩	早白垩世	
	Sampaguita-3a	116°38.60'E, 10°28.12'N	砂岩、泥岩	早白垩世	
	Kalamansi-1	116°53.48'E, 10°31.11'N	粉砂岩	白垩世	
	SO23-23	115°51.82'E, 9°53.82'N	富含软体动物粉砂岩, 黑色页岩, 辉长岩和火山碎屑岩	晚侏罗—早白垩世	
	SO27-21	115°34.60'E, 10°26.45'N'E	千枚岩、片麻岩	早白垩世	
	SO27-24	115°50.10'E, 9°52.98'N	深海相黑色纹层状硅质页岩、流纹凝灰岩、蚀变闪长岩		Schlüter et al., 1996 Yan et al., 2008 邱燕等, 2008
	SO23-36	116°34.60'E, 12°05.51'N	角砾岩含变质沉积岩、气孔玄武岩角闪岩	晚侏罗世 146 Ma	Xiao and Yao et al., 2019
	SO23-37	116°36.59'E, 12°04.97'N'E	石榴石、云母片岩	早白垩世(K <sub>1</sub> ) 113 Ma	Schulter et al., 1996
	S08-18	114.93°, 11.78°	斜长花岗岩	157~159 Ma	
	S08-32	114.08°, 11.47°	二长花岗岩	127/153 Ma	
	1yDG	114°04'E, 11°29'N	细粒黑云母花岗岩	109.7~114.2 Ma	
	2yDG	114°56.6'E, 11°47'N 1129'N	石英砂岩、石英岩、云母石英片岩、花岗岩		
3yDG	114°20'E, 13°28'N 1129'N	花岗岩、沉积—变质岩			
DK52-2	115°55.95'E, 12°42.90'N 1129'N	钙碱花岗岩	122~127/115~123 Ma		
西南巴拉望盆地	Penascosa-1	118°3.82'E, 9°55.37'N	泥岩	早白垩世	
	Albion Head A-1X	117°47.21'E, 9°31.08'N	增生楔碎屑岩	白垩世	
	Catalat-1	118.70972°, 11.32042°	泥岩、砂岩	早白垩世	

英、长石的砂岩、砾石(Sales et al., 1997)。礼乐滩4口井钻遇了下白垩统。岩性主要由中—细粒砂岩、粉砂岩和灰色泥岩组成,发育褐煤和火山喷发岩,含有黄铁矿和海绿石,伴有贝壳碎片和碳化木,古生物化石含有放射虫,孢粉以无突肋纹孢占优势。其中,Sampaguita-3A井在3813~3822 m的钙质超微化石指示其时代为早白垩世。西南巴拉望盆地2口钻井分别在裂隙地层之下和增生楔内钻遇了下白垩统碎屑岩。以上岩性和对应沉积环境表明,研究区在中生代晚期处于滨海、浅海相环境。另外,研究区及周缘钻井和拖网也获得了中生代花岗岩(Kudrass et al., 1986; Yan et al., 2008; 邱燕等, 2008; Xiao et al., 2019)、变质岩(Kudrass et al., 1986)和火山碎屑岩(Taylor and Hayes, 1980; Schluter et al., 1996)样品(表1),指示其形成环境为火山弧背景(Li et al., 2018)。

### 3 中生界及岩浆岩体地球物理特征

#### 3.1 地震反射特征

图2a为位于西北巴拉望盆地过Cadlao-1井的地震剖面。该井钻遇了侏罗系—下白垩统泥岩、砂岩、灰岩和火山碎屑岩(表1; Steuer et al., 2013)。井震对比剖面上显示,中生界以T<sub>g</sub>为顶界,与上覆新生界呈现明显角度不整合,且部分地层被T<sub>g</sub>界面侵蚀(图2a)。中生界在地震剖面上,呈现平行—亚平行、连续反射,反射频率低于新生界,在很大范围内反射特征稳定。其在浅层反射轴连续、中—强反射波组,而往深部,其地震反射相对杂乱,成层性变差,内部未见明显不整合界面。

礼乐滩 Sampaguita-1 井裂隙层序以下 3383~4123.9 m 钻遇了下白垩统(Taylor et al., 1980)。由下往上变粗的碎屑岩和火山碎屑岩组成,主要包括粗粒砂岩、砂岩和粉砂岩(Schluter et al., 1996; Steuer et al., 2014)。过该井的地震剖面显示,下白垩统反射特征为:平行、弱—中等强度振幅、连续性差—中等反射,底界反射不清楚,顶部以T<sub>g</sub>为界与上覆裂隙层序呈现平行不整合(图2b)。位于礼乐滩两侧正断层分割部分中生界。在断层下降盘,基底以下反射模糊,少见平行连续反射,中生代地层反射难以识别(图2b; Franke et al., 2014; 徐东海等, 2018)。

#### 3.2 地层速度

为运用层速度特征辅助识别中生界,本文通过井震标定的层速度分析研究区新、中生界不同岩性为主的地层速度变化规律。根据礼乐滩 Sampaguita-1 和西南巴拉望盆地 Penasocsa-1 井震标定结果得到了研究区不同地层及岩性的速度变化规律(图3)。其中,中生界沉积岩速度为3400~4200 m/s,裂隙层序(古新统一下渐新统)碎屑岩速度为2200~3800 m/s,且层速度呈现由浅往深不断增大,浅部的下渐新统速度为2000~2800 m/s,深部中下始新统一古新统速度达3500~3800 m/s,底部灰岩速度达到了5000 m/s以上。Sampaguita-1井Nido灰岩层速度为3700~4000 m/s,部分速度达5000~6000 m/s,而Penasocsa-1井Nido灰岩速度为5200~5700 m/s,推测速度变化与埋深深度有关。中中新统泥岩速度2700~4000 m/s,随着深度增加速度增大,上新统之上碎屑岩速度2200~2600 m/s,而Sampaguita1井灰岩速度为2000~3000 m/s,可能为未压实,造成速度较低。

#### 3.3 岩浆岩体侵位时代识别

识别沉积盆地岩浆岩类型、规模和侵位时代,有助于盆地热—构造演化史、基底属性和地质环境研究。正确识别南海东南部岩浆活动特征及其与周缘地层的接触关系,有助于中、新生代地层充填时代和构造变形特征的分析,尤其是受岩浆活动影响的中生代地层。

钻井、拖网资料和地球化学证据显示,南海陆缘岩浆活动主要为:(1)晚中生代与古南海或古太平洋往欧亚板块俯冲有关的火山弧背景下岩浆活动;(2)新生代海底扩张后可能与海南地幔柱(Xu et al., 2012)或南海东部洋盆往东侧菲律宾板块俯冲有关的裂后岩浆活动(Lin et al., 2019)。由于不同产状的岩浆岩体往往具有:(1)特殊的结构和形态;(2)与围岩具有显著的岩石物理性质差异;(3)并且一定规模的岩浆岩体侵位过程会对先存的、同侵位期和后期地层产状产生或多或少的影响(Trude et al., 2003),因此岩浆岩体在地球物理资料上会产生一定异常。然而,受资料精度、复杂地形(海底)、岩体规模、埋深、他源干扰和三维地质效应等因素影响,精度较低的卫星重、磁资料在南海,尤其在南沙岛礁发育区域,在识别岩浆岩异常方面存在一定的

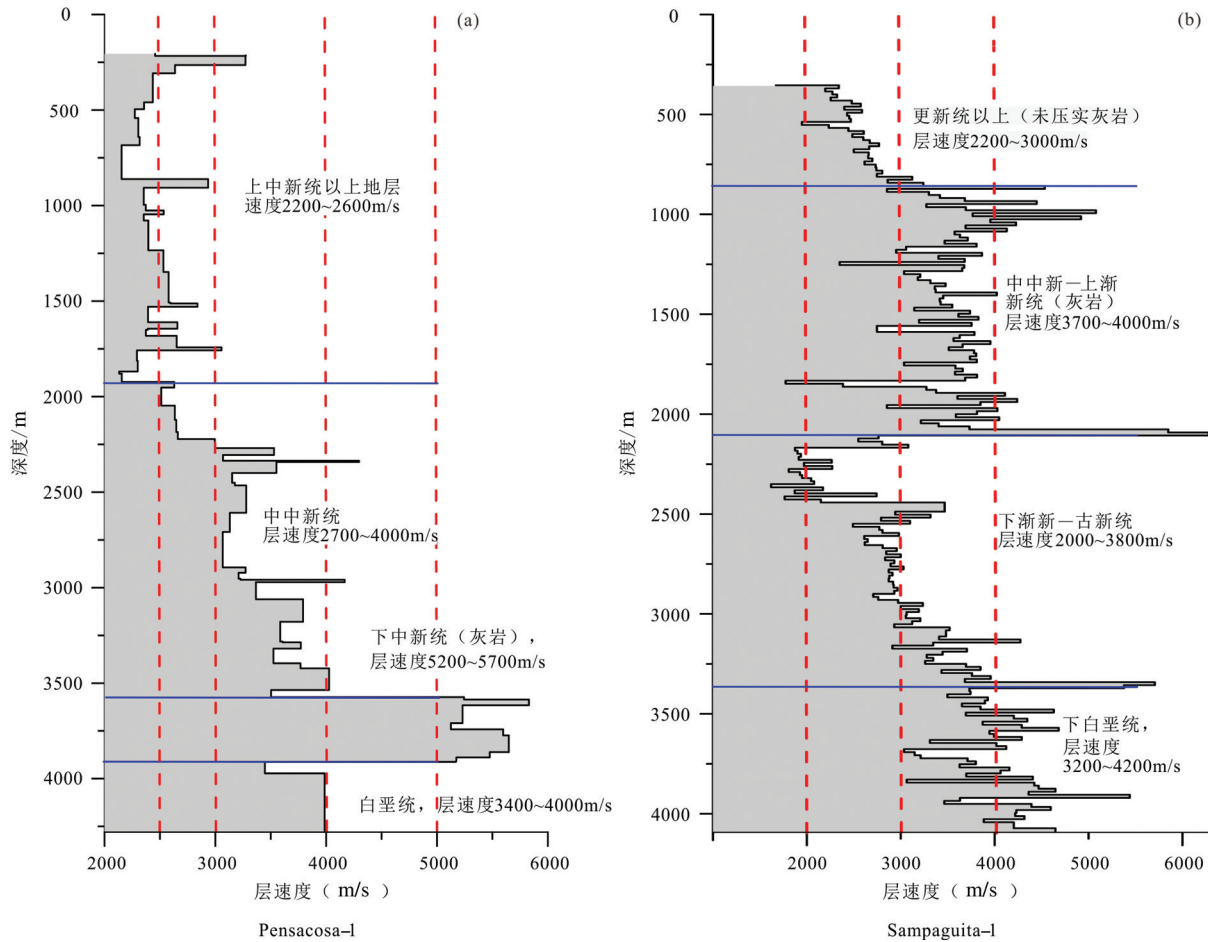


图3 西南巴拉盆地 Pensacosa-1 井和礼乐滩 Sampaguita-1 井地层速度(钻井位置见图 1a)  
 Pensacosa-1 井地层速度与深度关系根据 Rehm(2003) 井震对比结果, Sampaguita-1 井地层速度与深度关系为声波时差井震标定结果  
 Fig.3 Internal velocities from time/ depth correlation within the two wells constructed from the corrected check shot times

(Pensacosa-1, Sampaguita-1, see Fig. 1a for location)  
 The time-depth correlation of Pensacosa-1 is according to the well-seismic comparison from Rehm, 2003; and the Sampaguita-1 is confined by the sonic differential time based well-seismic comparison

多解性。多道地震资料在刻画地层产状、接触关系方面具有一定优势,尤其是三维或一定测网密度二维地震资料在刻画火成岩结构体以及与围岩的接触关系方面已应用于多个沉积盆地。因此,在缺少直接岩石学条件下,依据岩浆岩体与周缘已知年代的地层接触关系、厚度、产状可判别岩浆岩的大致侵位时间 (Trude et al., 2003; Svensen et al., 2004; Hansen and Cartwright, 2006; Infante, 2018)。

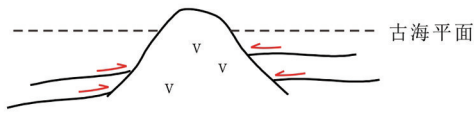
图 4a 为早期侵入岩体剥蚀出露海底(或地表)或喷出岩体与后期地层的接触关系演化示意图。当岩体部分或全部处于海平面以下,后续地层首先主要沉积在岩体两侧凹陷区域,并逐渐超覆在岩体两侧(图 4a(1))。随着沉积作用增强,当岩体逐渐被后续地层埋末后,岩体之上开始发育披覆沉积(图

4a(2))。在沉积差异压实作用下,形成岩体两侧地层厚,顶部地层相对薄的现象(图 4a(3))。图 4b 为地层沉积后晚期岩浆侵位与周缘地层的接触关系演化示意图。假设岩浆侵位前,地层为水平等厚 4b(1),同侵入作用造成上覆地层发生等厚褶皱变形(图 4b(2)),后续地层逐渐超覆或披覆在等厚褶皱变形地层之上(图 4b(3))。

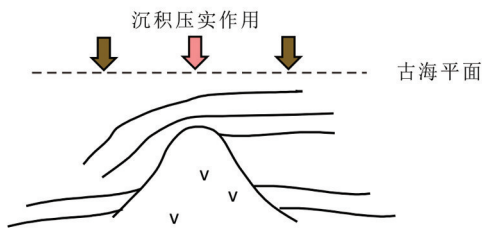
根据以上不同时代岩浆岩体与围岩接触关系,通过钻井、拖网为约束,使用一定测网密度或三维多道地震与船测重、磁资料相结合判断岩浆岩体形成时代和属性,可有效降低单条二维或单道资料受三维空间侧面干扰的多解性。

图 5a 为过太平岛南部九章盆地 NW-SE 向地震剖面。根据区域地层划分方案(Steuer et al., 2014;

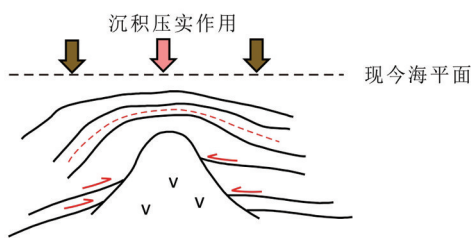
(1) 早期岩体形成后, 晚期地层先超覆在岩体两侧



(2) 早期岩体形成后, 晚期地层先超覆在岩体两侧

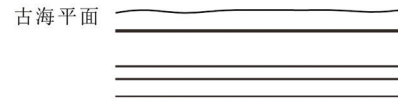


(3) 后续地层披覆覆在岩体之上, 两翼厚顶部薄

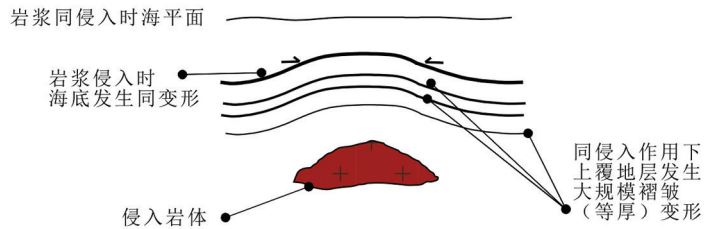


a 早期

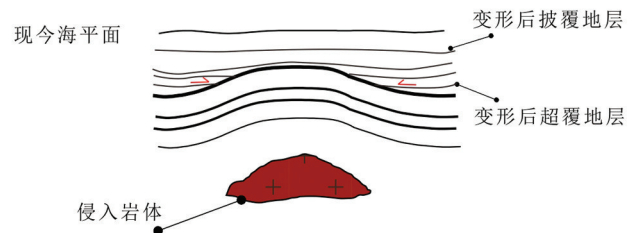
(1) 岩浆侵入前地层呈近水平等厚沉积



(2) 同侵入作用造成上覆地层发生等厚褶皱变形



(3) 等厚变形之上形成后续超覆和披覆地层



b 晚期

图4 不同时期岩浆岩体与围岩接触关系对比图(据 Infante, 2018; Hansen and Cartwright, 2006 修改)

Fig.4 Comparison diagram of contact relationship between igneous bodies and surrounding strata(modified from Infante, 2018; Hansen and Cartwright, 2006)

Ding et al., 2013; 王利杰等, 2019)进行地震解释, 可见九章盆地与其东南侧凸起被一铲式正断层分割, 盆地内主要由楔状充填的裂陷层序(Tg~T5)和上覆平行、发散、充填沉积的裂后层序组成。这些地层沿着断面逐渐上超或披覆在东南侧岩体上, 表明东南侧岩体形成于南海陆缘裂陷作用之前。另外, 该岩体平面上形态为NE-SW走向耸立的海山, 与太平岛北侧的中生代与俯冲有关的花岗岩体类似(Kudrass et al., 1986; Yan et al., 2008; 邱燕等, 2008)。因此, 它们可能形成于类似的构造环境。另外, 西北侧凹陷内可见一垂向岩体, 内部反射模糊, 外部形态清晰。岩体周缘地层可见与其侵位上拱有关的褶皱, 并造成了裂后层序(T5-T2)发生等厚变形, 形成强制背斜。而在T2界面之上, 地层逐渐超覆在背斜上, 后续地层发生披覆沉积。根据图4b 岩浆岩体与地层接触关系, 我们认为该岩体可能形成于T2时期。

因此, 我们可以根据研究区中、新生代岩浆活动规律、发育特征, 地层与岩体接触关系、裂陷和裂

后层序充填特征, 相互约束正确判别中、新生代地层以及岩浆岩体的形成时代。

## 4 中生界分布及构造特征

### 4.1 西北、西南巴拉望盆地

过西北巴拉望盆地 Cadlao-1 井岩性资料显示, 钻遇的中生界上部主要为下白垩统细粒泥岩和粉砂质泥岩, 中部主要为灰岩, 底部由侏罗统火山碎屑岩性、粗碎屑砂泥岩组成(Steuer et al., 2013), 该井地层时代和岩性组合类似于珠江口盆地 LF35-1-1 井(邵磊等, 2007)。过 Cadlao-1 井地震剖面显示, 中生界构造特征与新生界明显不同: 新生界主要为近水平产状, 反应相对稳定构造环境, 而中生界呈现往 NE 方向倾斜, 并伴生一定程度的褶皱现象。中生代地层发生挠曲变形, 但未见明显褶皱相关的逆断层。该地层变形特征与潮汕凹陷北部的中生界低幅度的挠曲变形相似(郝沪军等, 2004; 张江阳等, 2014)。另外, 在西北巴拉望盆地西南部的



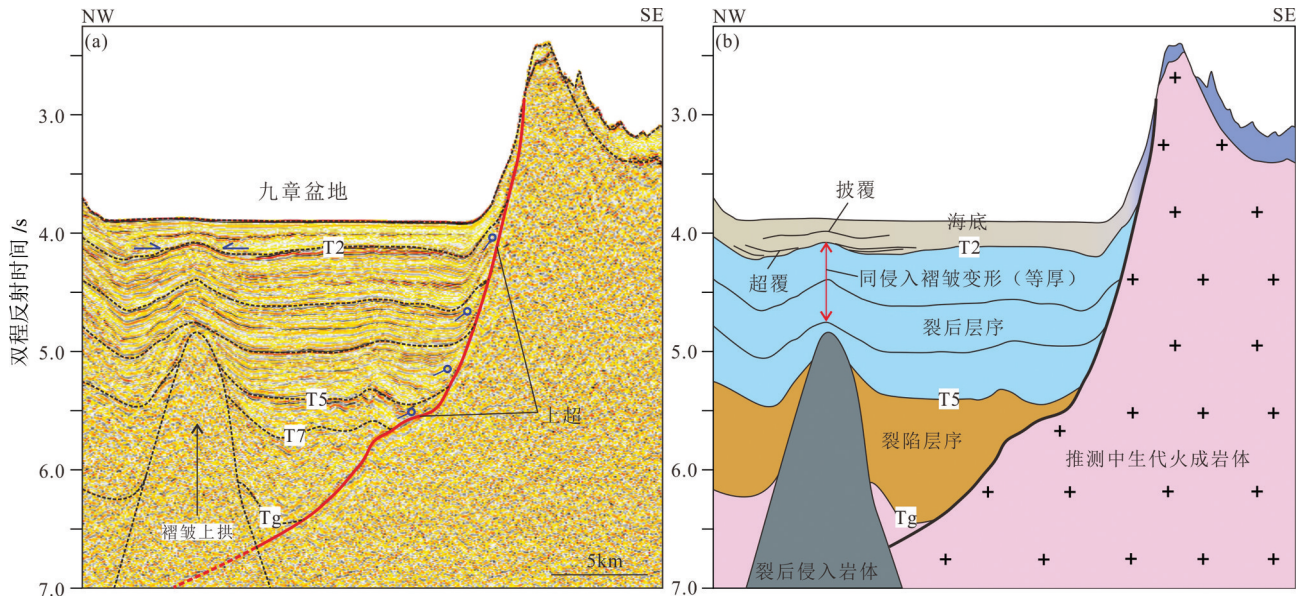


图5 过九章盆地地震剖面及不同时期岩浆岩体与地层接触关系

Fig.5 Seismic profiles across the Jiuzhang basin and the contact relationship between igneous bodies and strata

Signal Head半地堑下部可见与基底呈现角度不整合现象(图6a)。地层反射波组呈中—强振幅、平行、连续反射,地层整体往NE方向倾斜,未见明显褶皱,且与东南侧杂乱反射的基底具有明显分界(Williams, 1997),推测该区域为与Cadlao-1井位置相似构造和沉积环境的中生界。

西南巴拉望盆地3口钻井发现中生代沉积岩夹杂在中中新世逆冲推覆体的混杂岩内(表1),使得中生界受后续构造变形改造严重,难以识别其原始产状(图7)。在过Pensacosa-1井中下中新统Nido灰岩之下钻遇了白垩统泥岩,过该井地震剖面上,钻遇白垩统区域呈空白反射、地层产状难以识别(图6)。空白反射下部发育平行铲式正断层的强反射波组,这些强反射影响过新生界基底,且在两侧断块均可见该强反射(Forbes et al., 2011),推测可能为侵入的岩浆岩体或者干扰波。在剖面西南部,新生界基底面之下可识别似水平或与掀斜断块上新界断陷地层大致平行的多套连续、中强振幅反射波组,表明中生界形成时变形不强烈,其掀斜变形可能与后期受伸展作用有关。

## 4.2 礼乐滩及其周缘

### 4.2.1 礼乐滩

地震资料显示,礼乐滩中生代地层为平行、弱—中等强度振幅、连续差—中等反射。其底界反射

不清楚,可能受变质作用影响沉积层与结晶基底之间波阻抗差异较小,地震反射波难以识别。另外,中生界内未见明显逆断层或挤压构造,地层呈水平或近水平状(图2b),反映沉积时构造环境相对稳定。钻井显示,礼乐滩缺失一定厚度的上白垩统。地震剖面上,新生界底面Tg与下白垩统呈现低幅度的角度不整合,类似于西北巴拉望盆地Cadlao-1井区,表明地层形成后可能遭受一定构造活动,发生抬升剥蚀。

### 4.2.2 礼乐滩西南部

礼乐滩西南部SO23-23拖网站位获得了中三叠世以及晚三叠世—早侏罗世页岩(Kudrass et al., 1986; 表1),表明该区域具有发育海相中生界条件(刘海龄等, 2004)。图7为位于礼乐滩西南部NW-SE向二维多道地震剖面,该剖面过SO27-21拖网站位。在该拖网站位水深为1877~2040 m处获得早白垩世副片麻岩和千石英枚岩(Kudrass et al., 1986)。另外,在珠江口盆地HZ35-1-1、LF2-1-1A和HF28-2-1井,南海西南部万安盆地CIPTA-A井(龚再升等, 1997)以及礼乐滩北部SO23-36站位获得了相似特征的副变质岩(Kudrass et al., 1986)。这些拖网站位同时也获得了晚侏罗—早白垩世的岩浆岩,与区域火山弧背景相关。因此,笔者推测变质岩成因可能与西沙群岛西科1井钻遇的

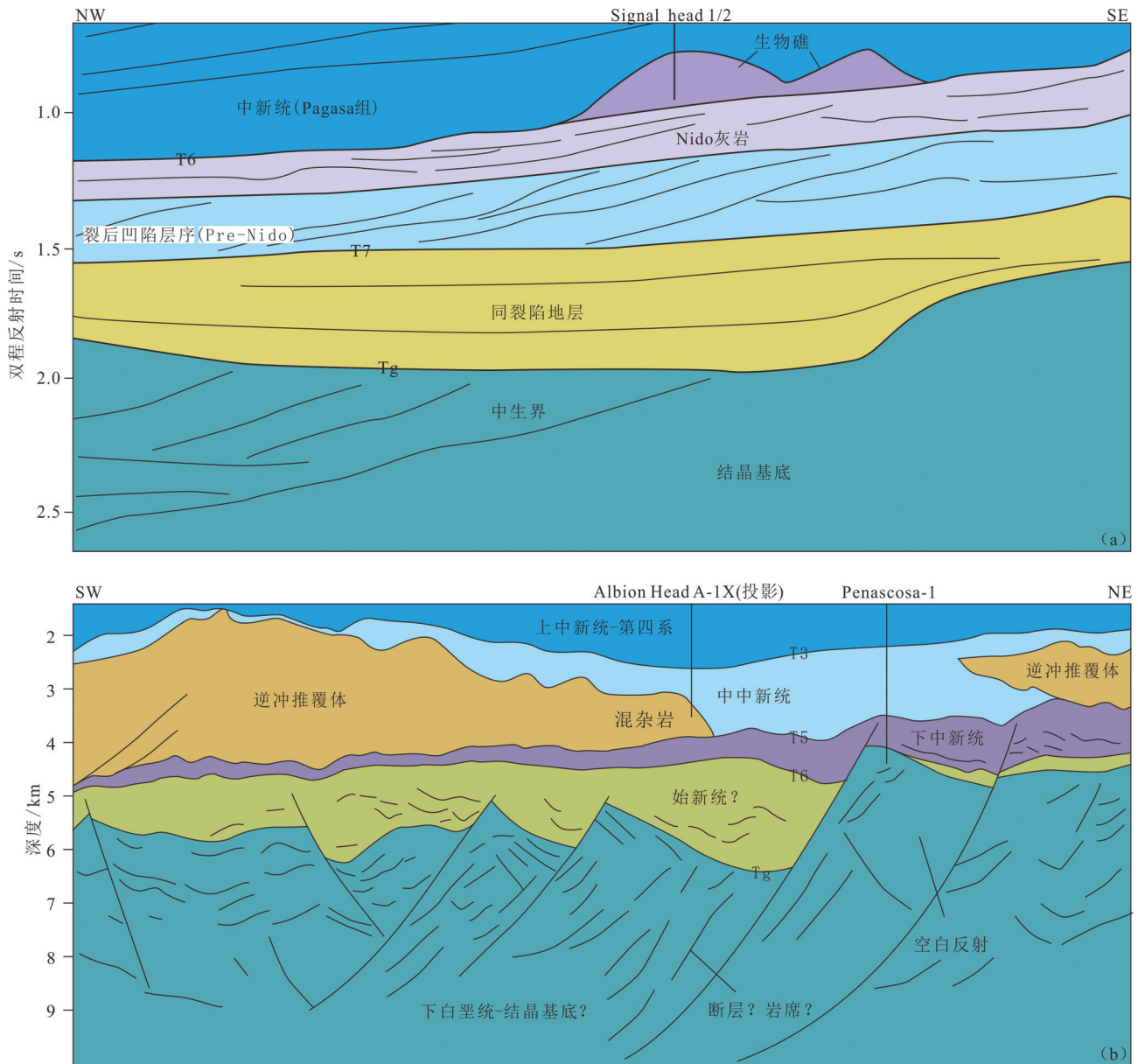


图6 过西北、西南巴拉望盆地中、新生代地层组合及充填特征

Fig.6 Mesozoic and Cenozoic stratigraphic combinations and filling characteristics across the Northwest and Southwest Palawan Basins

晚侏罗世闪斜长片麻岩类似,形成于中生代火山弧背景下晚侏罗世—早白垩世的局部热变质作用(龚再升等,1997;朱伟林等,2017)。剖面显示,拖网站位于出露的似圆锥状岩体一侧,地层逐渐超覆岩体两侧,岩体内部呈杂乱、往岩体中心相向倾向的反射,与南海海盆海山内部反射特征类似。OBS速度反演结果显示其层速度为4000~5000 m/s,与南海钻井揭示的岩浆岩速度相当(Zhao et al., 2016)。该岩体之下为一套中等强度、连续反射波组(双程反射时间4~5.5 s),为此推测该地质体下部为中生代

火成岩体,其底侵作用使得沉积岩发生了变质,形成副变质岩。岩体两侧分别由F1和F2断层控制的楔形断块。其中,西北侧可明显识别连续、强反射新生代沉积基底,以及界面以上的楔形地层(裂陷层序)和发散、平行、高频反射的裂后层序。岩体东南侧F2和F3断层之间Tg和T6界面为连续、强反射,且界面上下地层呈现小的角度或平行不整合。其中,Tg~T6界面之间发育多个东南、西北倾向的正断层,断层大多倾角较大,表明了低伸展速率下的快速沉积(Liang et al., 2019)。该套地层沉积充填

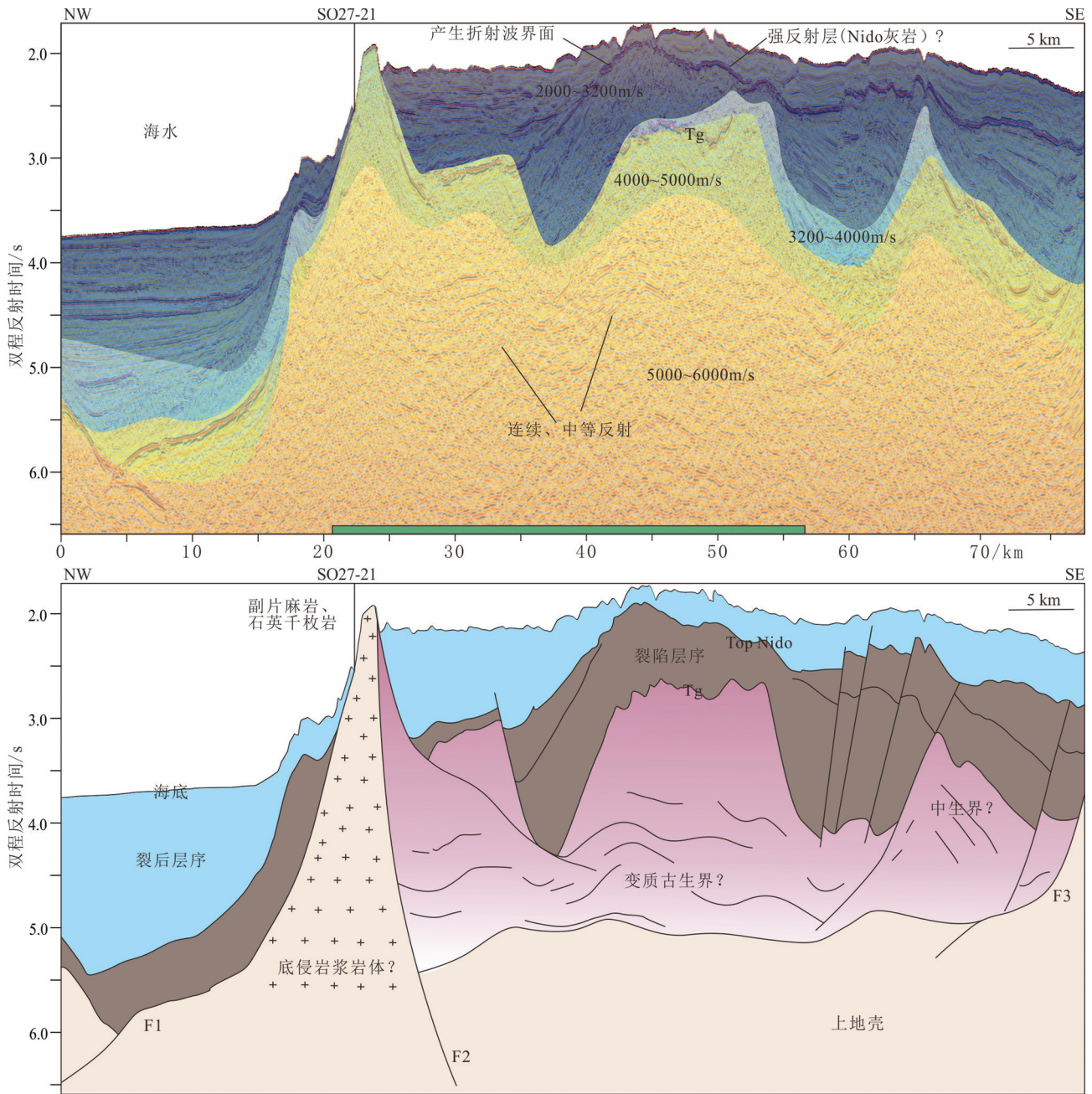


图7 过礼乐滩西南部拖网站位SO27-21地震和层速度叠合剖面(a)及解释图(b)

其中,层速度为沿反射地震测线OBS反演结果(Liang et al., 2019),a图绿色线范围为邱燕等(2016)识别折射波区域,对比发现折射波实际由2~3 s的强反射面(Nido灰岩顶界面)产生

Fig.7 Interpretation of seismic profile and internal velocity across dredging site of SO27-21

The internal velocity is the OBS inversion result along the reflection seismic profile (after Liang et al., 2019). The green line in Fig. 7a delineates the distribution of refraction wave which is induced by the 2~3 s strong reflective surface (top of the Nido limestone) (after Qiu et al., 2016)

和结构特征与礼乐盆地南部凹陷和安渡北盆地类似(王利杰等,2019)。T6的连续强反射特征与西北、西南巴拉望盆地和礼乐盆地南部凹陷Nido灰岩类似,且界面以上为发散、平行、高频反射的裂后层序。另外,海底到新生代沉积基底(Tg)之间层速度

大多为2000~3200 m/s,深部少数达3200~4000 m/s,大致与钻井速度吻合(图3),进一步表征该套地层为新生界。

F2和F3断块之间,Tg界面以下0.5 s范围内地层速度达4000~5000 m/s,且地层中一低频、差一中

等连续反射,与Tg界面呈平行或小角度部整合,推测为中生界或中生界发生部分变质。双程反射4~5.5 s之间地层,可见部分中—低频、中等连续、强反射,层速度达5000~6000 m/s,地层呈现低幅度S型褶皱形态,推测为变质的下中生界或古生界。

#### 4.2.3 九章、安渡北盆地

图8为过九章和安渡北盆地地震、层速度剖面及构造—地层解释图。美济礁西北侧九章盆地可见箕状结构的裂陷层序之下发育层状反射结构(图8c),表现为中—低频、中等连续反射,往深部反射波连续性差,频率降低。地层厚度由西北往东南减小,最大厚度达3.5s(双程反射时间)。地层西北侧明显受到岩浆岩体垂向上涌活动影响而沿着岩体发生强烈牵引扭曲变形,地层内发育近平行岩体断层,连续性较差。地层沿着断层面发生小范围挠曲变形,其顶面与新生界Tg面呈现明显角度不整合。随着裂陷层序沉积中心往西南断层下降盘迁移,地层与Tg面不整合角度逐渐减小。控制裂陷半地堑的边界断层沿着Tg以下地层内不整合面呈现上陡下缓的铲式正断层。该套地层平均层速度达3500~4500 m/s,与井震对比得到的中生界(3700~4200 m/s)相当,大于上覆断层控制的裂陷层序和坳陷充填的裂后层序(图8d)。结合裂陷层序与美济礁下伏岩体(中生代火山岩)接触关系,可以推测西北侧岩体也可能发育于中生代,但早于岩体周围变形的地层。

过安渡北盆地的地震剖面显示Tg界面以下可见部分低频、连续反射强振幅波组,且地层与新生界基底Tg呈平行不整合接触(图8b、c)。地震层速度剖面显示,新生界基底以下地层呈现水平层状,速度不断增大的趋势,且6.5 s到Tg界面之间速度3700~4500 m/s(图8d),推测其可能为与新生界产状一致的中生界。中生界底部反射不清楚,但浅部地层厚度显示新生代正断层活动并未控制中生代地层厚度,地层内也未见其他类型断层,并未见明显褶皱和逆断层,且表现为正断层控制的掀斜断层产状一致,可以推断中生界形成于相对稳定的构造环境,未遭受明显构造变形。

## 5 讨论

### 5.1 中生界识别多解性原因

根据前面论述可知,研究区中生代地层识别存

在多解性问题,主要集中在礼乐滩西南部到安渡北盆地一带(图1)。通过本文的综合分析,笔者认为造成中生界识别多解性的原因主要包括以下三方面:(1)钻遇中生界的钻井位于岛礁和陆架区,地质背景复杂,区域地层对比和解释困难,形成了不同的地震解释方案,从而造成认识的差异;(2)借鉴南海北部潮汕凹陷地层速度规律,对折射波产生条件认识不足,将裂后层序同Nido灰岩产生的折射波的地震界面划分为新生界—中生界的分界;(3)构造变形性质和地质时代认识差异。

首先,与潮汕凹陷中生界—新近系的地层组合规律不同,钻井揭示南海东南部地层系统自下而上为中生界—古近系(裂陷层序)—新近系(裂后层序)较完整的一套中—新生代层序。西北、西南巴拉望盆地钻井和地震资料显示,中生界埋藏相对较深,并多被新生代裂陷和裂后层序覆盖。但后期构造和岩浆活动使得凹陷分割强烈,地震资料信噪比低,区域地层对比和解释困难。礼乐滩3口钻井钻遇了中生界,过礼乐滩到周缘凹陷的地震剖面显示,礼乐滩和周缘凹陷被高角度正断层分割。Yao et al. (2012), Franke et al. (2014)和王利杰等(2019)的解释方案均在断层下降盘凹陷内解释了裂陷和裂后层序,受地震资料条件限制,在凹陷内他们均未识别出中生界。但Yan et al. (2004)和孙龙涛等(2008)将该区域裂陷层序解释为挤压褶皱性质的中生界,其上之间披覆平行、发散反射特征地层,未见与区域断陷作用有关的裂陷层序,这一解释方案与上升盘(礼乐滩)存在裂陷层序和区域地层组合相矛盾。

其次,由于对研究区层速度规律和折射波产生条件认识不清,造成了地层解释误区。南海中生界速度规律最早由郝沪军等(2004)根据潮汕凹陷地震剖面上识别中、新生界分界面(Tg)在炮集资料上所形成的折射波确定,其速度范围为4000~5000 m/s。钻井证实该折射波速度是由界面上下存在较大沉积间断和岩性差异造成的(郝沪军等,2009)。此外,长排列广角地震速度结构显示该套地层速度为4400~5400 m/s(阮爱国等,2009)。根据中生代南沙东部地区可能与南海北部潮汕凹陷相连接,具有相似的地质背景,前人推测两个地区中生界层速度可能具有相似规律,并通过识别相似速度范围形成的折射

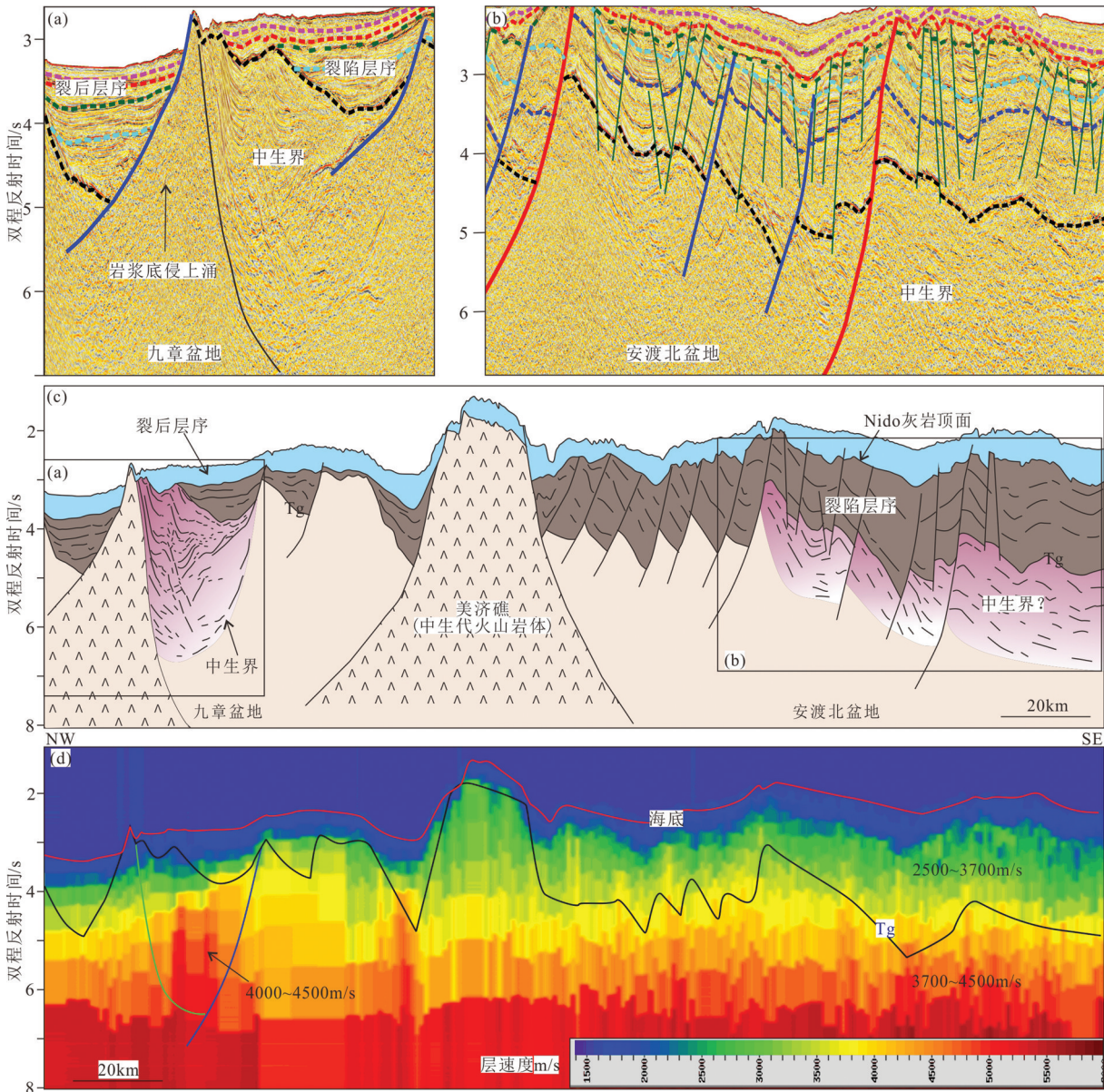


图8 过九章和安渡北盆地构造地层解释剖面(a,b)、地质剖面图(c)和层速度剖面(d)

Fig.8 The seismic profile (a and b), sketch tectonic–stratigraphic interpretation profile (c) and its internal velocity profile (d) across the Jiuzhang and Andubei basin

波来厘定中生界(邱燕等, 2016)。然而该层速度规律与研究区通过声波测井震标定得到的中生界(速度3400~4200 m/s)具有一定差异。通过新生代地层速度、沉积地层和反射特征对比, 笔者发现研究区发育一套规模较大、厚度稳定Nido灰岩(上渐新统一下中中新统; Kudrass et al., 1986; Steuer et al., 2014)。Nido灰岩在 seismic 上具有连续、强波组反射特征, 且该套灰岩速度为3700~4000 m/s, 部分达到5000~6000 m/s(图3), 与前人识别折射波速度范

围大致重合。前人将Nido灰岩与上覆地层速度差异在多道地震炮集记录上可识别到折射波分界面作为识别中生界的标识(邱燕等, 2016)。其次, 可能由于OBS站位间距较大(约20 km, Pichot et al., 2014)以及Nido灰岩厚度薄(2~3个相位), OBS层析成像结果未探测到该套灰岩高速层, 而该地层上下产生折射波界面以上下地层速度为2000~3200 m/s(Liang et al., 2019)。这一层速度范围与研究区裂隙和裂后层序层速度特征类似(图3)。另外,

Nido灰岩强反射界面下覆地层具有正断层控制的掀斜地堑和半地堑结构,界面以上为发散、披覆沉积(图7),且该地层往其西北侧逐渐超覆在中生代岩体上。因此,笔者认为研究区产生折射波可能是裂后层序(速度2000~3200 m/s)与层速度大于5000 m/s的Nido灰岩薄层产生。碳酸盐岩强反射面以下层速度低于中生界速度,为新生代早期的裂陷层序而非中生界。

构造变形性质分析不足造成了解释误区。赵美松等(2013)把图7东南侧距离30 km的NW-SE向地震剖面上与T6~Tg层序具有相似挠曲形态的地层解释为中生界挤压褶皱变形。而该构造变形特征在礼乐滩西南部到安渡北盆地一带也存在。Steuer et al. (2014)和王利杰等(2019)根据区域地层对比解释认为该套地层变形对应的断层为正断层性质,可能是南沙地块随古南海往婆罗洲俯冲碰撞在其东南侧形成板片挠曲有关。Ding et al. (2014)通过构造沉降分析了相同构造层的沉降史,为伸展拉张作用造成断块掀斜发生局部构造沉降速率减小所致。而Yan et al. (2004)的解释方案沿用南海北部潮汕凹陷的思路,中生界褶皱区直接覆盖在平行、发散充填特征的裂后地层下,未见明显的断陷特征的裂陷层序,这与该地区地层组合规律似乎不吻合。

## 5.2 南海东南部中生界构造属性

拖网和钻井资料表明南沙地块及邻区在晚中生代时有强烈的岩浆活动(表1;Hollway, 1981; Kudrass et al., 1986),与南海北部陆架、陆坡区基底发现的大量燕山期岩浆活动类似(邹和平等, 1995)。Li et al. (2018)利用等效源深度法对全南海区域的磁力异常数据进行化极异常处理,进而通过延拓和功率谱计算出磁源的位置和深度。他们根据收集的南海海域200余口钻井和拖网的岩相与地球化学数据,重建了南海陆缘的中生代岛弧和弧前盆地体系。Li et al. (2018)通过对化极磁异常向下延拓40 km,发现在南海海盆周缘保留高的磁异常区块,这些磁异常与钻井、拖网和露头揭示的中生代火山弧性质的中性岩、中生代岛弧成因的花岗岩及集块岩相对应(Fitton, 1971; Marsh and Carmichael, 1974)。所有的中性岩、岛弧成因花岗岩及集块岩都分布在高磁异常条带上,进一步支持

了高磁异常条带可能是中生代火山弧引起的推测(Li et al., 2018)。其中,位于南海东南部的高磁异常带主要集中在礼乐滩和太平岛周围,沿着西南次海盆南部呈NE-SW走向分布(图9),往南沙海槽北侧呈现NEE-SWW向展布,靠西南次海盆西南倾末端,在万安盆地近南北向展布。

根据Li et al. (2018)圈定的火山弧范围,以及已知的中生代火成岩体、新生代裂后岩浆岩的地球物理特征,通过重、磁异常特征(Li et al., 2010)、地震剖面上地层接触关系、新生代沉积地层厚度、现今岛礁分布、地层速度规律、火成岩体的产状,火成岩地震相特征和地层变形特征,进一步圈定中生代火山弧环境下形成的火成岩体(图9)。结果显示,中生代火成岩体以垂向似圆锥、圆柱状大量分布在具有高磁异常背景的火山弧范围内,在火山弧之间也有一定规模的中生代火成岩发育,但在礼乐滩和西北巴拉望盆地类似的岩体较少发育,多为掀斜断块(图6)。在礼乐盆地和西南巴拉望盆地之间,根据相对低的磁异常背景,重力异常垂直导数的线性变化特征(Li et al., 2010; Duang et al., 2016)以及地震反射揭示的凹陷结构和地层接触关系,认为该区主要发育规模较大的中生代岩浆岩体(图9)。

根据地层时代、岩性组合和构造变形特征,我们推测西北巴拉望盆地中生界可能形成于晚中生代古太平洋向西北俯冲华南陆缘靠火山弧一侧,受火山岛弧影响较小的弧前区域,类似潮汕凹陷中北部(郝沪军等, 2004; 张江阳等, 2014)(图10)。在礼乐滩周缘,通过拖网、7口钻井和地震资料解释圈定了中生代沉积层的范围,其他部分中生代地层与Li et al. (2018)在礼乐滩识别的火山弧范围重合,中生界追踪范围和拖网约束表明火山弧可能分布在礼乐滩北侧,范围较小。另外礼乐滩北部拖网和磁异常揭示的火山弧进一步证实中生代晚期礼乐滩和西北巴拉望盆地具有相似的构造位置和沉积环境,即为弧前盆地靠火山弧一侧的浅海环境(图9)。

礼乐滩西南部SO23-23拖网和巴拉望岛获得的三叠世硅质岩、硅质页岩,指示研究区晚三叠世深海环境。在拖网周缘,可识别中生界区域和深部凹陷内(图7)地层反射连续性差,中生界底部反射难以有效识别,多道地震和OBS显示其层速度大多高于5000 m/s,地层厚度大于1~2 s,推测可能由

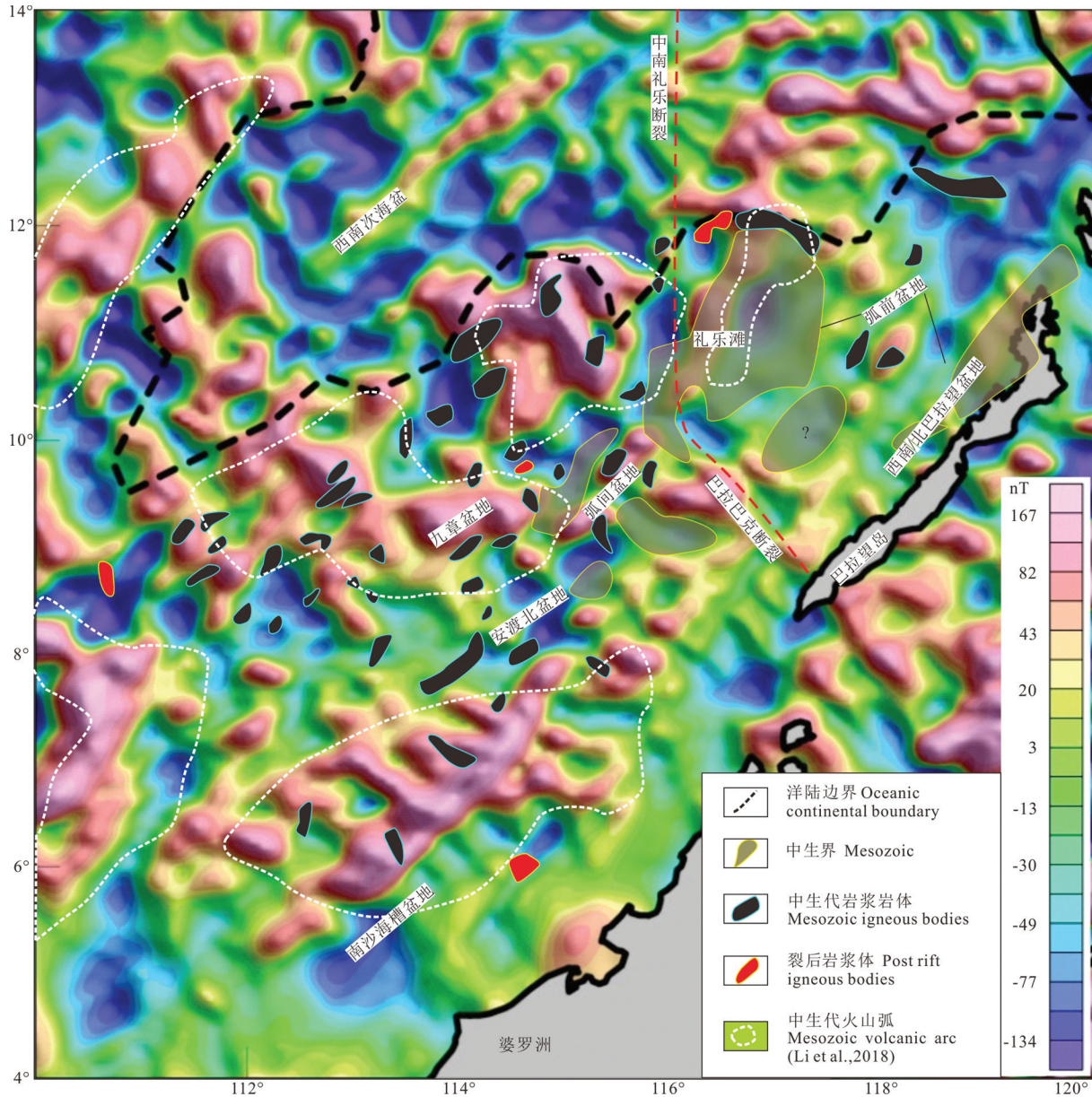


图9 南海东南部陆缘磁力化极、中生代火山弧、新生代裂后岩浆侵入体和中生界沉积盆地分布图(据 Kudrass et al., 1986; Franke et al., 2008; 2014; Chang et al., 2015; Dung et al., 2016; Li et al., 2018)

Fig.9 Map of reduced-to-the-pole magnetic anomaly with the inferred distribution of Mesozoic volcanic arc, Mesozoic and Cenozoic igneous bodies, and inferred Mesozoic sediment basins(after Kudrass et al., 1986; Franke et al., 2008; 2014; Chang et al., 2015; Dung et al., 2016; Li et al., 2018)

于埋藏深度较大压实作用强烈,使得岩石之间波阻抗差异较小,或者中生代晚期区域变质作用,使得部分中生界发生变质成为了结晶基底的一部分。基于研究区和民都洛岛生物地层和岩性特征,推测其在晚三叠世处于西太平洋边缘海深海环境(鲁宝亮等,2014)。

## 6 结论

通过钻井、拖网、井震对比和层速度约束,根据地震反射特征、钻井岩性资料,本文重新识别了南海东南部陆缘中生代地层,取得以下认识:

(1)地震剖面显示,研究区中生代地层发育范

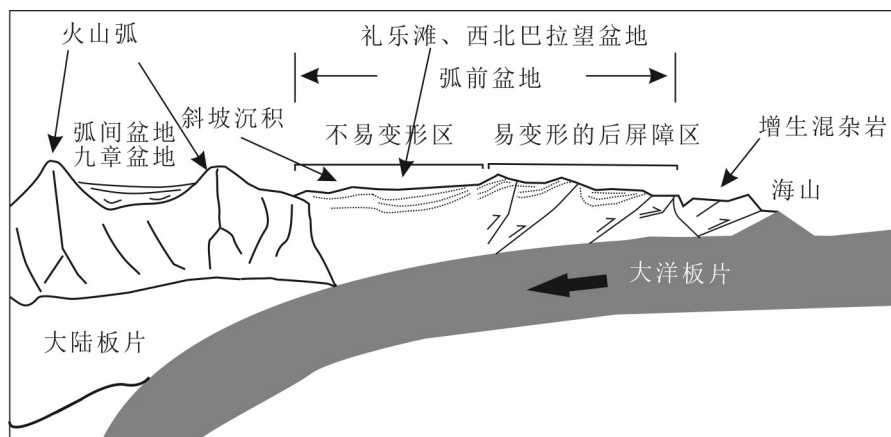


图10 主动型大陆边缘结构示意图(据李付成等,2012和Li et al., 2013修改)

Fig.10 Schematic diagram of the active continental marginal structure (modified after Li et al., 2012 and 2013)

围局限,其地震反射波组特征明显,但较难进行区域对比和解释。中生界呈现低角度挠曲变形和部分未遭受构造变形的地层,分布在西北、西南巴拉望盆地、礼乐滩和安渡北盆地,体现了相对稳定的构造环境。

(2)礼乐滩西南侧中生界位于裂隙层序之下,沉积厚度较大、分布相对局限,深部反射模糊,层速度大于5000 m/s,可能发生变质。九章盆地识别了受中生代岩浆岩体侵位作用影响的高角度掀斜和挠曲变形中生界,层速度为3500~4500 m/s,高于周缘新生界沉积岩速度,与钻井中生界层速度吻合。

(3)结合岩石地球化学和磁异常延拓识别的晚中生代火山弧分布范围及中生代岩浆岩分布规律,推测西北、西南巴拉望盆地、礼乐滩和安渡北盆地中生界形成于弧前盆地靠火山弧一侧构造相对稳定区域,而九章盆地识别的中生界可能形成弧间盆地,并受岩浆岩体侵位作用发生强烈抬升和掀斜变形。

**致谢:**感谢中国科学院南海海洋研究所刘海龄老师和施小斌老师的建设性指导。

## References

- Becker J J, Sandwell D T, Smith W H F, Becker J J, Sandwell D T, Smith W H F, Braud J, Binder B, & Depner J. 2009. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS [J]. *Marine Geodesy*, 32(4): 355–371.
- Chang J H, Hsu H H, Liu C S, Lee T Y, Chiu S D, Su C C. 2015. Seismic sequence stratigraphic analysis of the carbonate platform, north offshore Taiping Island, dangerous grounds, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, S0040195115006733.

- Dung T T, Minh. N Q. 2016. Eruptive–volcanic–basalt structures in the Truong Sa–Spratly Islands and adjacent areas from interpreting [J]. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 39(1), 1–13.
- Ding Weiwei, Franke Dieter, Li Jiabiao, Steuer, Stephan. 2013. Seismic stratigraphy and tectonic structure from a composite multi-channel seismic profile across the entire Dangerous Grounds, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 582: 162–176.
- Ding Weiwei, Li Jiabiao, Dong Chongzhi, Fang Yinxia. 2015. Oligocene–Miocene carbonates in the Reed Bank area, South China Sea, and their tectono–sedimentary evolution [J]. *Marine Geophysical Research*, 36(2/3): 149–165.
- Faure M, Ishida K. 1990. The mid–late Jurassic olistostrome of the west philippines: A distinctive key–marker for the north Palawan block [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 4(1): 61–67.
- Forbes M T, Mapaye C B, Bacud J A. 2011. Structural characterization of offshore southwest Palawan, Philippines using the most recent 2D/3D seismic data[C]//Proceedings of the Southeast Asia Petroleum Exploration (SEAPEX) Meeting, Manila, Philippines, 6 April.
- Franke D, Barckhausen U, Heyde I, Tingay M, Ramli N. 2008. Seismic images of a collision zone offshore nw sabah/borneo [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 25(7), 0–624.
- Franke D, Savva D, Pubellier M, Steuer S, Mouly B, Auxietre J, Meresse F. 2014. The final rifting evolution in the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58, 704–720.
- Hayes D E, Nissen S S. 2005. The South China Sea margins: implications for rifting contrasts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3/4): 0–616.
- Hansen D M, Cartwright J. 2006. The three–dimensional geometry and growth of forced folds above saucer–shaped igneous sills [J]. *J. Struct. Geol.*, 8 (8): 1520–1535.
- Hinz K, Schlüter H U. 1985. Geology of the dangerous grounds, South China Sea, and the continental margin off southwest Palawan:



- Results of SONNE cruises SO-23 and SO-27 [J]. *Energy*, 1985, 10 (3/4): 297-315.
- Holloway N. 1981. The North Palawan Block, Philippines: Its relation to the Asian Mainland and its role in the evolution of the South China Sea [J]. *Geological Society of Malaysia Bulletin*, 14: 19-58.
- Infante Lennon. 2018. Seismic Expression of Igneous Bodies in Sedimentary Basins and Their Impact on Hydrocarbon Exploration: Examples from a Compressive Tectonic Setting, Taranaki Basin, New Zealand[D]. University of Oklahoma.
- Jian Zhimin, Jin Haiyan, Kaminski Michael A, Ferreira Fabricio, Li Baohua, Yu Paisen. 2019. Discovery of the marine Eocene in the northern South China Sea [J]. *National Science Review*, 6(5):881-886.
- Kudrass H R, Wiedicke M. 1986. Mesozoic and Cenozoic rocks dredged from the South China Sea (Reed Bank area) and Sulu Sea and their significance for plate-tectonic reconstructions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 3:19-30.
- Li F C, Sun Z, Yang H F. 2018. Possible spatial distribution of the Mesozoic volcanic arc in the present-day South China Sea continental margin and its tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123:6215-6235.
- Li F C, Sun Z, Hu D, Wang, Z. 2013. Crustal structure and deformation associated with seamount subduction at the north Manila Trench represented by analog and gravity modeling [J]. *Marine Geophysical Research*, 34(3/4): 393-406.
- Li Shuling, Meng Xiaohong, Guo Lianghui, Yao Changli, Chen Zhaoxi, Li Hequn. 2010. Gravity and magnetic anomalies field characteristics in the South China Sea and its application for interpretation of igneous rocks [J]. *Applied Geophysics*, 7(4): 295-305.
- Liang Yao, Delescluse Matthias, Qiu Yan, Pubellier Manuel, Nicolas Chamot-Rooke, Wang Jun, Nie Xie, Watremez Louise, Chang Sung-Ping, Pichot Thibaud, Savva Dimitri, Meresse Florian. 2019. Décollements, detachments, and rafts in the extended crust of dangerous ground, South China Sea: The role of inherited contacts [J]. *Tectonics*, 38(6): 1863-1883.
- Lin Jian, Xu Yigang, Sun Zhen, Zhou Zhiyuan. 2019. Mantle upwelling beneath the South China Sea and links to surrounding subduction systems [J]. *National Science Review*, 6(5):877-881.
- Marsh B D, Carmichael I S. 1974. Benioff zone magmatism [J]. *Journal of Geophysical Research*, 79: 1196-1206.
- Pichot T, Delescluse M, Chamot-Rooke N, Pubellier M, Sun G, Méresse F. 2014. Deep crustal structure of the conjugate margins of the SW South China Sea from wide-angle refraction seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 627-643.
- Pubellier M, Morley C K. 2014. The basins of Sundaland (SE Asia): Evolution and boundary conditions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 555-578.
- Rehm S K. 2003. The Miocene Carbonates in Time and Space On- and Offshore SW Palawan, Philippines[D]. Kiel: Christian Albrechts Universität Kiel (Ph.D. thesis).
- Sales A O, Jacobsen E C, Morado A A, Benavidez J J, Navarro F A, Lim A E. 1997. The petroleum potential of deep water northwest Palawan Block-GSEC-66 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15 (2/3): 217-240.
- Shao Lei, Cao Licheng, Qiao Peijun, Zhang Xiangtao, Li Qianyu, Hinsbergen Douwe J J. 2017. Cretaceous-Eocene provenance connections between the Palawan Continental Terrane and the northern South China Sea margin [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 477: 97-107.
- Schlüter H U, Hinz K, Block M. 1996. Tectono stratigraphic terranes and detachment faulting of the-South China Sea and Sulu Sea [J]. *Marine Geology*, 130:39-78.
- Steuer S, Franke D, Meresse F, Savva D, Pubellier M, Auxietre J L, Aurelio M. 2013. Time constraints on the evolution of Southern Palawan Island, Philippines from onshore and offshore correlation of Miocene limestones [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, 412-427.
- Steuer S, Franke D, Meresse F, Savva D, Pubellier M, Auxietre J L. 2014. Oligocene-Miocene carbonates and their role for constraining the rifting and collision history of the Dangerous Grounds, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 644-657.
- Suzuki S, Shizuo T, Graciano P Y, David S D, Asiedu, D K. 2000. Composition and provenance of the Upper Cretaceous to Eocene sandstones in central Palawan, Philippines: Constraints on the tectonic development of Palawan [J]. *The Island Arc* 9, 611-626.
- Svensen H, Planke S, Malthesørenssen A, Jamtveit B, Myklebus R, Eidem T R, Sebastian S R. 2004. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming [J]. *Nature*, 429 (6991): 542-545.
- Taylor B, Hayes D E. 1980. The Tectonic Evolution of the South China Basin. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian Seas and Islands [J]. *American Geophysical Union*, 1980: 89-104.
- Trude J, Cartwright J, Davies R J, Smallwood J. 2003. New technique for dating igneous sills [J]. *Geology*, 9(31): 813-816.
- Wang Pingxian, Huang Chiyue, Lin Jian, Jian Zhimin, Sun Zhen, Zhao Minghui. 2019. The South China Sea is not a mini-Atlantic: plate-edge rifting vs intra-plate rifting [J]. *National Science Review*, 6(5): 902-913.
- Xiao M, Yao, Y J, Cai, Y, Qiu H N, Xu Y G, Xu X, Jiang Y D, Li Y B, Xia X P, Yu Y J. 2019. Evidence of Early Cretaceous lower arc crust delamination and its role in the opening of the South China Sea [J]. *Gondwana Research*, 76: 123-145.
- Xu Y, Wei J X, Qiu H N, Zhang H H, Huang X L. 2011. Opening and evolution of the South China Sea constrained by studies on volcanic rocks: Preliminary results and a research design [J]. *Chinese Science Bulletin*, 24(57): 3150-3164.

- Yan P, Liu H. 2004. Tectonic-stratigraphic division and blind fold structures in Nansha Waters, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(3):337-348.
- Yan Q, Shi X F, Wang K S. 2008. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of granitic rocks from the Nansha micro-block, South China Sea, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1057-1067 (in Chinese with English abstract).
- Yao Y, Liu H L, Yang C P, Han B, Tian J J, Yin Z X, Gong J L, Xu Q Y. 2012. Characteristics and evolution of Cenozoic sediments in the Liyue Basin, SE South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 114-129.
- Zhao F, Alves, T M, Wu S G, Li W, Huuse M, Mi L J, Sun Q L, Ma B J. 2016. Prolonged post-rift magmatism on highly extended crust of divergent continental margins (Baiyun Sag, South China Sea) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 445: 79-91.
- 郝沪军,汪瑞良,张向涛,薛怀艳,陈照光. 2004. 珠江口盆地东部海相中生界识别及分布[J]. *中国海上油气*, (2):13-17.
- 郝沪军,施和生,张向涛,江天才,汤守立. 2009. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件——基于LF35-1-1探索井钻探结果的讨论[J]. *中国海上油气*, 21(3):151-156.
- 李付成,孙珍,张云帆. 2012. 海山的倾斜俯冲对上覆板块变形的影响[J]. *地球物理学进展*, (4):1406-1415.
- 李学杰,王哲,姚永坚,高红芳,李波. 2017. 西太平洋边缘构造特征及其演化[J]. *中国地质*, 44(6):1102-1114.
- 刘海龄,阎贫,孙岩,郭令智,张伯友,张毅祥. 2002. 南沙微板块的层块构造[J]. *中国地质*, (4):374-381.
- 鲁宝亮,王璞珺,梁建设,孙晓猛,王万银. 2014. 古南海构造属性及其与特提斯和古太平洋构造域的关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(5):1441-1450.
- 邱燕,陈国能,刘方兰,彭卓伦. 2008. 南海西南海盆花岗岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 27(12):2104-2107.
- 邱燕,王彦林,阎贫. 2016. 折射方法在南沙礼乐盆地西南海域中生界研究中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 36(2):181-187.
- 阮爱国,牛雄伟,吴振利,吴招才,薛彬. 2009. 潮汕坳陷中生代沉积的折射波2D速度结构和密度[J]. *高校地质学报*, 15(4):522-528.
- 邵磊,尤洪庆,郝沪军,吴国璋,乔培军,雷永昌. 2007. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. *地质论评*, 53(2):164-169.
- 孙龙涛,孙珍,周蒂,刘海龄. 2008. 南沙海区礼乐盆地沉积地层与构造特征分析[J]. *大地构造与成矿学*, (2):151-158.
- 徐东海,王利杰,姚永坚,孙珍,邱宁. 2018. 礼乐盆地碳酸盐岩时空分布特征及构造意义[J]. *热带海洋学报*, 37(6):49-62.
- 王利杰,姚永坚,李学杰,杨楚鹏,陆应新,徐行,孙珍. 2019. 南沙东部海域裂陷结束不整合面时空迁移规律及构造意义[J]. *地球物理学报*, 62(12):4766-4781.
- 王彦林,阎贫,郑红波,刘海龄,廖林. 2012. 南沙群岛海区北部中生界地震特征分析[J]. *热带海洋学报*, 31(4):83-89.
- 张江阳,孙珍,张素芳. 2014. 珠江口盆地潮汕坳陷中生代构造变形分析[J]. *热带海洋学报*, 33(5):41-49.
- 张渝昌,张尚,孙肇才. 1997. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京:南京大学出版社.
- 熊莉娟,李三忠,索艳慧,刘鑫,余珊,程世秀,薛友辰,安慧婷,戴黎明,马云,王霄飞. 2012. 南海南部新生代控盆断裂特征及盆地群成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(6):113-127.
- 赵美松,刘海龄,吴朝华. 2012. 南海南北陆缘中生代地层-构造特征及碰撞造山[J]. *地球物理学进展*, 27(4):1454-1464.
- 朱伟林,解习农,王振峰,张道军,张成立,曹立成,邵磊. 2017. 南海西沙隆起基底成因新认识[J]. *中国科学:地球科学*, 47(12):1460-1468.
- 邹和平,李平鲁,饶春涛. 1995. 珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其动力学意义[J]. *地球化学*, (S1):33-45.

## 附中文参考文献