

南海第四系厚度分布特征及其主控因素

李学杰^{1, 2}; 孙美静^{1, 2}; 陈家乐^{1, 2}; 高红芳^{1, 2}; 彭学超^{1, 2}; 张勇³; 阮小燕⁴

(1.中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 511400; 2.自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 511400; 3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 4. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

提要:【研究目的】第四系厚度不仅可以反映物源与沉积特征, 也反映构造活动对沉积过程的控制作用。【研究方法】本文以大量单道和多道地震数据为基础, 经钻孔验证, 首次完整编制了南海第四系厚度分布图。

【研究结果】结果表明, 南海第四系沉积厚度变化很大, 最厚超过 2000m, 最薄处近乎剥蚀殆尽。【结论】南海西缘的莺歌海盆地、中建南盆地、万安盆地等海域形成沉积沉降中心, 表明第四纪时西缘断裂带仍在活动, 并控制沉积过程, 形成沉降中心; 南海西北陆坡发育北东向的沉积沉降中心, 表明南海西北部第四纪仍以拉张为主; 南海北部的东沙海域第四系基本被剥蚀掉, 表明该区第四纪以来持续隆升, 并受到强海流的冲刷作用。因此南海北部第四纪表现出西部沉降、东部隆升的格局。南海东缘马尼拉海沟的第四系较厚, 主要是由于构造挤压作用, 使得沉积层堆叠增厚, 同时有来自台湾岛和菲律宾陆地充足的沉积物源供应。

关键词: 第四系; 厚度; 西缘断裂带; 东沙隆起; 海洋地质调查工程; 南海; 中国

创新点: 利用大量多道和单道地震数据首次编制南海全海域第四系厚度分布, 揭示第四纪沉积的主控因素。

Distribution of Quaternary sedimentary thickness in South China Sea and its main controlling factors

LI Xuejie^{1, 2}, SUN Meijing^{1, 2}, CHEN Jiale^{1, 2}, GAO Hongfang^{1, 2}, PENG Xuechao^{1, 2}, ZHANG Yong³, RUAN Xiaoyan⁴

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey Guangzhou 511400, China; 2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR, Guangzhou 511400, China; 3. Qindao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qindao 2666071, China; 4. China University of Geosciences. Wuhan 430073, China)

Abstract: This paper is the result of 1:1,000,000 marine geological survey engineering.

[Objective] Quaternary sedimentary thickness can not only reflect the provenance and sedimentary characteristics, but also reflect the tectonic activity characteristics to a certain extent. **[Methods]** Based on a large number of single channel and multi-channel seismic data and verified by drilling holes, the Quaternary thickness map of the SCS was compiled. **[Results]** The thickness of quaternary sediments in the South China Sea (SCS) varies a lot, with the maximum thickness over 2000m and the minimum one close to 0. **[Conclusions]** Sedimentary and subsidence centers were formed in the western margin of SCS, including Yinggehai, Zhongjiannan and Wan'an sea area, which indicates that the fault zone in the western margin is still active in Quaternary period and controls the development of these subsidence centers. The development of NE trending sedimentary centers on the northwest continental slope of the South China Sea may indicate that the northwestern SCS is still dominated by extension in quaternary. The thickness of quaternary in Dongsha sea area is near 0, indicating that the area has been continuously uplifted and washed by strong current since quaternary. Therefore, the northern South China Sea shows a pattern of subsidence in the

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20160138、GZH201300502、DD20190378)、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 (GML2019ZD0207)

作者简介: 李学杰,男, 1964 年生, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋基础地质调查与研究, E-mail: xuejeli@yeah.net

通讯作者: 孙美静, 女, 1986 生, 硕士, 高级工程师, 主要从事沉积学及海洋地质方面研究; E-mail: sunmeijing0411@163.com。

west and uplift in the east. The relatively thicker Quaternary in the Manila Trench in the eastern margin of the SCS is mainly a result of tectonic compression resulting in sedimentary layers thicker and abundant provenance from Taiwan and the Philippines.

Key words: Quaternary sedimentary thickness, Western margin fault zone, Dongsha uplift, marine geological survey engineering, South China Sea, China

Highlights: Based on a large number of multi-channel and single-channel seismic data, the distribution of Quaternary thickness in the whole area of the South China Sea has been compiled for the first time to reveal the main controlling factors of sedimentation.

About the first author: LI Xuejie, male, born in 1964, doctor, professor, mainly engaged in marine basic geological survey and research; E-mail: xuejieli@yeah.net.

About the corresponding author: SUN Meijing, female, born in 1986, senior geologist, major in sedimentology and marine geology; E-mail: sunmeijing0411@163.com.

Fund support: Supported by the Projects of China Geological Survey (DD20160138、GZH201300502、DD20190378) and Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0207) .

1 引言

第四纪气候、环境与海平面变迁与人类活动息息相关。南海第四纪已进行了大量的研究，在微体古生物学(Wang and Lipps, 2005)、东亚季风与气候(Wang, 1999; Liu et al., 2003; Wang et al., 2006; 田旭等, 2015)、古海洋学(Jianet al., 1999; Li et al., 2008; 李琪等, 2012)、海平面与沉积环境演化(Ma et al., 2021; Jiwarungreangkul and Liu, 2021)、源—汇系统(高红芳等, 2021)等方面取得丰富的成果。但受调查程度影响, 至今缺乏全海域的第四系厚度分布数据。第四系厚度不仅可以反映物源与沉积特征, 也在相当程度上反映第四纪隆升与沉降等重要的构造活动特征。本次利用大量实测数据编制的南海第四系厚度图, 将为南海第四纪新构造活动以及源—汇研究提供重要的基础。

2 材料与方法

第四系厚度图编制, 采用广州海洋地质调查局历年采集单道地震、多道地震数据的解释成果为主, 结合收集的钻井数据和研究成果, 经标定后编制而成。

2.1 第四系底界的确定

根据南海多道地震剖面反射特征, 新生界识别出了 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 、 T_6 、 T_g 等一系列主要地震反射界面(图 1)。 T_1 界面, 全南海基本均有分布, 总体呈高频、中振幅、高连续、双相位反射特征, 反射同相轴总体上相对平直、稳定, 可连续追踪。陆坡区, 界面之上可见地震反射波的上超与下超现象, 界面之下局部有削截现象, 部分地区遭受断层或滑塌体错断。局部地区受隆升和底流冲刷影响, 该界面缺失; 海盆区, 该界面与上、下地震层序的地震波

反射同相轴平行，反射同相轴的连续性好于陆坡；从南到北，频率增强，振幅变弱。

钻井 Ya19-1-1、Ya13-1-4、Ya21-1-1，乐东 30-1-1A 揭示，海南岛南部第四系厚度在 1750~2178m（夏伦煜等，1989；汪品先，1991；郝诒纯等，2000）。多道地震测线 SHD-1 经过 Ya19-1-1 钻孔，利用这些钻孔资料对多道地震剖面井震校验，确定 T_1 为第四系底界面（图 1）。

高分辨率单道地震揭示深度较浅，但分辨率高，根据其反射特征，共识别 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 等界面，利用 HDQ1、HDQ2 等钻孔进行井震校验。对比确定，单道地震的 R_9 界面与多道地震 T_1 界面对应，确定为第四系底界， R_2 至 R_8 为第四系内部界面。

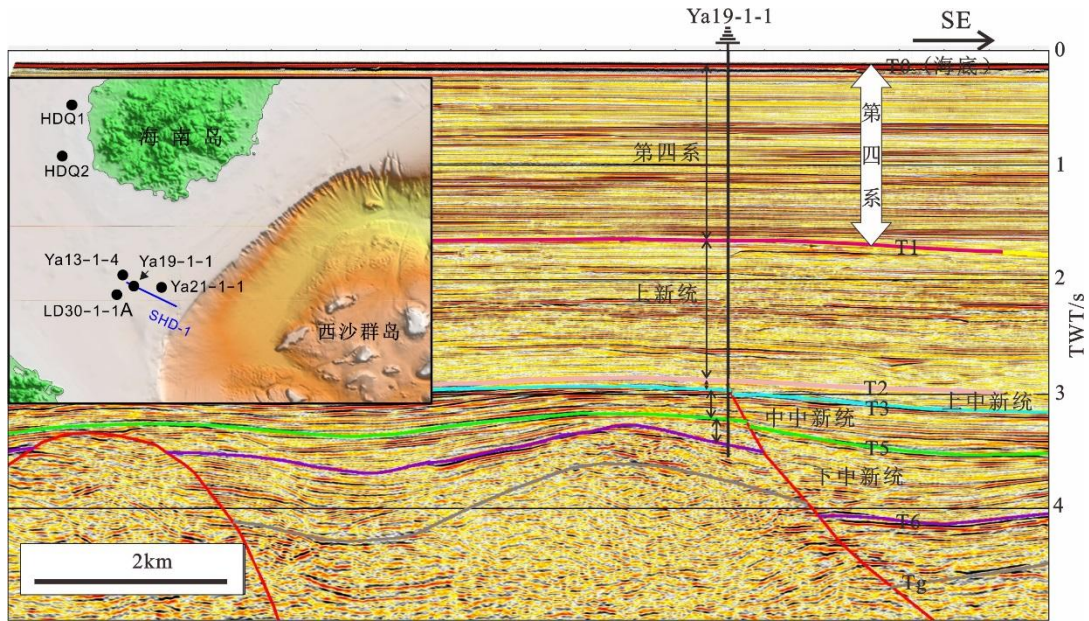


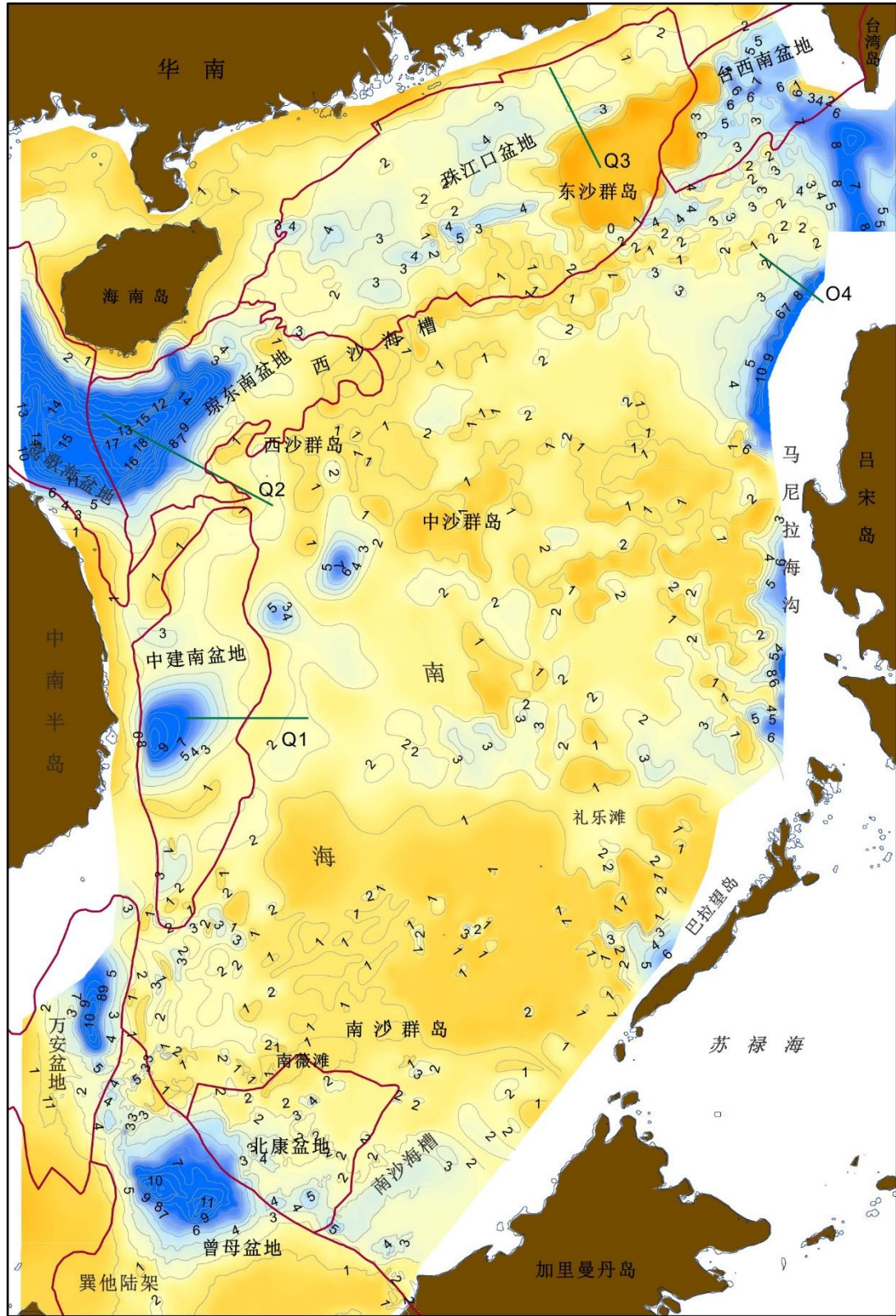
图 1 测线 SHD-1 的多道地震剖面地层界面与 Ya19-1-1 井对比及其位置图

Fig.1 Correlation between stratigraphic interface of multichannel seismic profile SHD-1 and well Ya19-1-1 and their location

2.2 第四系厚度计算

利用 Geoframe 地震解释工作站，根据钻井数据与多道地震、单道地震联合校正后的解释结果，将地震界面 R_9 (T_1) 到 R_0 (T_0 海底) 进行时间域厚度计算，再转换成地层厚度。

通过建立的时深曲线将多道地震 T_1 至 T_0 的时间域厚度转换为实际厚度，而单道地震数据则根据沉积物类型不同在 1500~1800m/s 区间选择定速换算。将换算的深度数据网格化，编制区域的第四系厚度图（图 2）。



图例

盆地边界	第四系厚度等值线, ×100m
Boundary of Basin	Quaternary thickness contour, ×100m
Q1 剖面位置及编号	海岸线
Section location and number	Coastline

图 2 南海第四系厚度分布图 (单位: ×100m)

Fig.2 Distribution of Quaternary thickness in the South China Sea (Unit: ×100m)

3 南海第四系厚度变化特征

南海全海区第四系地层广泛分布，但厚度变化极大（图 2），其中莺歌海—琼东南海域第四系厚度最大、分布范围最广，最大厚度超过 2000m，而南海北部东沙海域厚度接近为 0，基本没有接受沉积，处于剥蚀状态。

南海北部除琼东南海域和东沙隆起区外，总体厚度中等，且相对稳定，通常为 100~300m，由海岸带向外陆架呈增厚趋势。南海西北部琼东南海域第四系沉积中心呈北东向展布，最大厚度 2000m，往东北方向厚度迅速下降至 300m。南海东北部的台西南盆地第四系厚度较大，总体超过 500m，最厚处可达 900m，中部珠江口外海域厚度 200~500m。

南海西缘有 3 个沉积中心，北部莺歌海海域规模最大，呈北西向展布，最大厚度超过 2000m，南端与琼东南沉积中心相连；中部的中建南海域，厚度 300~1000m；南部万安海域，厚度 300~1100m，呈近南北向展布；其余大部分地区沉积厚度在 100~300m，且相对稳定。

南海南部第四纪最大的沉积中心为曾母海域，厚度为 300~1200m，南沙海槽及西北巴拉望部分海域第四系厚度较大，为 200~600m，南沙海域第四系总体厚度较薄，小于 50m。

南海海盆区第四系厚度一般不超过 300m，主体为以 50~200m，呈现中间薄、两翼厚的分布特征。东缘马尼拉海沟附近厚度明显增大，为 400~1000m，呈南北向条带状，中部因黄岩海山链靠近海沟，第四纪沉积减薄。

因此南海北部、西部、南部及东部马尼拉海沟区发育不同规模的第四纪沉积中心，厚度为 300~2000m，沉积中心之间海域以及海盆区第四系厚度较均匀，一般分布在 100~300m 范围。

4 讨论

沉积中心发育的关键是构造与物源。构造控制沉降作用，为沉积发育提供充足的可容空间。物质来源和可容空间决定了沉积厚度，南海北部、西部、西南部及东部均有丰富的物源供给，为这些区域沉积地层的发育提供充足的沉积物。

根据南海第四系厚度分布，反映出南海构造沉降和物源特征。南海北部陆架—上陆坡区域第四系厚度总体比东南部厚，充分反映北部陆架比东南部丰富；而沉积中心和剥蚀区主要受构造作用控制。

4.1 南海西缘第四系与走滑构造

不同海域的构造背景不同，其沉降机制差异很大。新生代南海北部以拉张作用为主；南海西部以走滑运动为主，受哀牢山—红河—莺歌海—南海西缘断裂带控制。南海南部的构造运动较为特殊，在南海扩张过程以拉张为主，随后其南侧受挤压作用，而北侧仍受拉张作用；东缘的马尼拉海沟俯冲带以挤压作用为主（万志峰等，2012；雷超等，2015；张功成等，2018）。



图例
 --- 第四纪沉积中心连线
 Quaternary sedimentary center axis
 — 第四系等厚度线, ×100m
 Quaternary thickness contour, ×100m
 — 主断裂带
 Main Fault

图3 南海西部第四系厚度与主断裂及地形的关系

Fig.3 Relationship between Quaternary thickness and main faults and topography in western SCS

南海西缘的莺歌海盆地、中建南盆地和万安盆地的发育受莺歌海断裂、南海西缘断裂以及万安东断裂的走滑拉张活动的控制（图 3）（林长松等，2009）。该系列断裂带与陆地的哀牢山—红河断裂相连，被认为对南海的形成与演化起到关键作用（Tapponnier et al., 1982; 1990）。西缘盆地第四纪时大规模沉降，表明南海西缘的这些断裂第四纪仍有相当的活动性，对这些盆地发育仍起着重要的控制作用。

南海西缘第四纪沉积中心包括莺歌海、中建南和万安，均有丰富的沉积物源。莺歌海沉积中心主要有来自红河携带的沉积物，中建南有来自南海西部中南半岛河流携带的沉积物，万安附近有湄公河携带的沉积物注入。其中湄公河与红河是向南海输入泥沙量最大的两条河流，输沙量分别为 $160 \times 10^6 \text{t/a}$ 、 $130 \times 10^6 \text{t/a}$ （Milliman 和 Syvitiski, 1992）。

除丰富的沉积物源外，南海西缘第四纪有明显的沉降特征。尤其是莺歌海沉积中心第四系厚度最大厚度达 2000m 以上，表明近 2Ma 以来，最大沉降规模约为 2000m，因为第四纪初是滨浅海环境，平均沉降速率达 1m/ka 。而且这些沉积中心与相应的新生代盆地具有明显的继承性，是盆地在第四纪的继续发展。

另一方面，南海西缘第四纪沉积中心发育与地形密切相关，其中中建南、万安及曾母的沉积中心与陆架外缘坡折带基本吻合（图 3）。中建南沉积中心位于陆架外缘深水区，为沉积物堆积提供足够的可容空间，随着沉积层厚度增大，陆架外缘坡折带不断向海推进（图 4）。上陆坡往外沉积层变薄，处于“沉积饥饿”状态。

南海西南部曾母盆地处于印支地块向东南挤出、古南海向南俯冲结合部位（徐俊杰等，2020），受到剪切、挤压等多重应力作用的控制。吴庐山等（2005）认为曾母盆地自早中新世以来经历了 4 次快速沉降作用，其中上新世—第四纪为区域沉降。从第四系厚度来看（图 2 和图 3），曾母盆地沉积总体较厚，具有明显的区域沉降特征。第四纪沉积中心大致沿陆架外缘坡折带分布，往深海方向受陆源物质供给的影响，沉积厚度减薄。

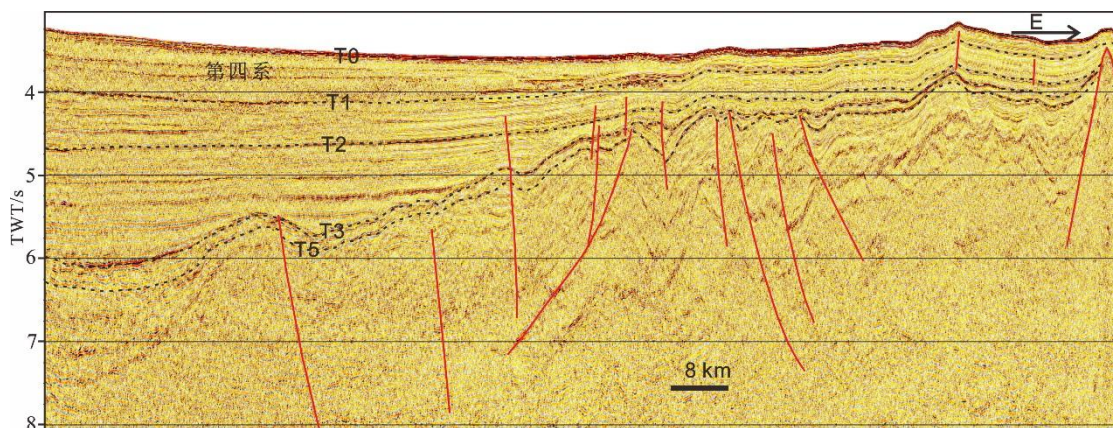


图 4 南海西部 Q1 地震剖面（位置见图 2）

Fig.4 Seismic profile Q1 in the western SCS (see Figure 2 for location)

4.2 琼东南—南海西北陆坡第四系与张性构造

琼东南第四纪沉积中心呈北东—南西方向展布，莺歌海沉积中心呈北西—南东方向展布，二者走向近于垂直，其应力机制明显不同。莺歌海盆地发育于南海西缘走滑构造环境，受控于印—亚碰撞和中南半岛的挤出运动；而琼东南盆地属于南海北部张性构造体系。中建南—珠江口—中沙南沉积中心的轴线，以及琼东南沉积中心，均与西南次海盆扩张轴平行。这表明在南海西南次海盆停止扩张后，南海北部第四纪仍处于拉张状态。

琼东南第四系是南海沉积最厚的区域之一，最厚处可达 2000m 以上，呈北偏东约 40° 方向展布，与西沙海槽西段走向基本一致（图 3）。从沉积厚度分布来看，其物源不仅有来自海南岛，可能更多的来自红河。厚度最大位置处于陆架外缘的坡折带附近，且第四纪以来随着沉积陆架区厚度增大，坡折带在不断往海方向推进（图 5）。

地形上，中建南沉积中心—中沙海槽基本连续，呈明显的负地形，与西南次海盆扩张中心基本平行（图 3）；而作为沉积中心，不连续（图 2），显然受到物源的控制。琼东南—南海西北陆坡明显存在两条北东向沉积沉降带，之间为西沙群岛隆起区，推测第四纪可能仍在活动。

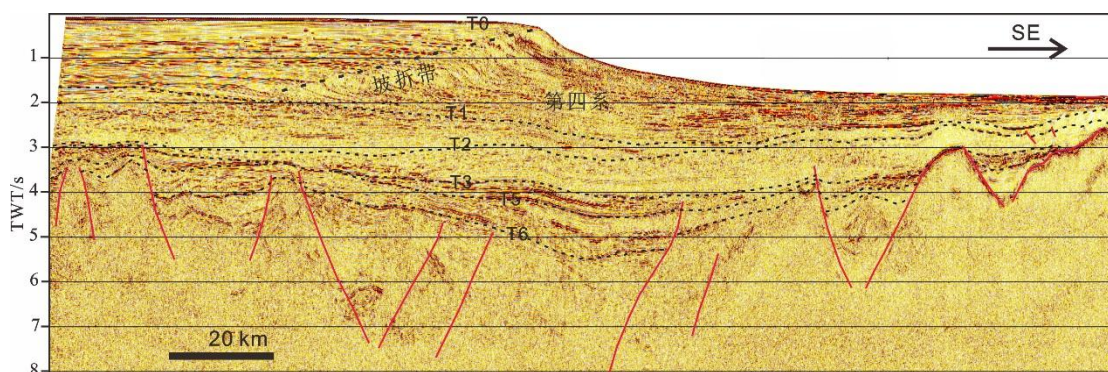


图 5 琼东南 Q2 地震剖面图（位置见图 2）

Fig.5 Seismic profile Q2 in Qiongdongnan (see Figure 2 for location)

4.3 东沙隆起与东沙运动

海南岛以东的南海北部宽广的陆架—上陆坡区，总体第四系厚度相对稳定，为 200~400m（图 3）。东沙海域是明显例外，虽处于外陆架—上陆坡（图 6），且有较丰富的物源，但第四系厚度基本为 0，为完全的剥蚀区，没有接受沉积（图 7）。

东沙海域是新生代的隆起区，称为东沙隆起，位于珠江口盆地珠一坳陷和珠二坳陷之间，晚白垩世已经存在的古隆起区（栾锡武，2011；杜旭东等，2021），在南海停止扩张后再次出现局部性隆升，并被命名为东沙运动（饶春涛 1992）。

东沙运动发生的时间还存在较大争议，许多学者从南海区域构造演化的角度提出其发生于中中新世晚期（姚伯初等，2004；林长松，2006；蔡周荣等，2010）；一些学者对东沙海区构造特征的分析认为其主要发生于晚中新世—上新世早期，如吴时国等（2004）认为是

4.4~9.8Ma, 赵淑娟等 (2012), 认为是5.5Ma。一般均认为该构造运动发生于中中新世之后 (胡雯燕等, 2020)。胡阳等 (2018) 运用三维地震资料分析认为, 东沙隆起区则表现为多期次隆升, 其中上新世以来持续隆升。

从第四系厚度来看, 东沙隆起第四纪以来仍在持续隆升, 与李德生和姜仁旗 (1989) 的观点不谋而合。地震剖面显示, 不仅第四系受到剥蚀, 上新统至上中新统都受到不同程度的剥蚀, 隆起区南部T₆界面在明显抬升 (图7)。局部持续隆升是该区缺乏第四纪沉积, 甚至出现剥蚀的构造背景。该区总体处于水下, 甚至部分区域水深超过1000m, 且有较丰富的物源, 理应不该处于剥蚀环境, 因此应有较强的底流冲刷。

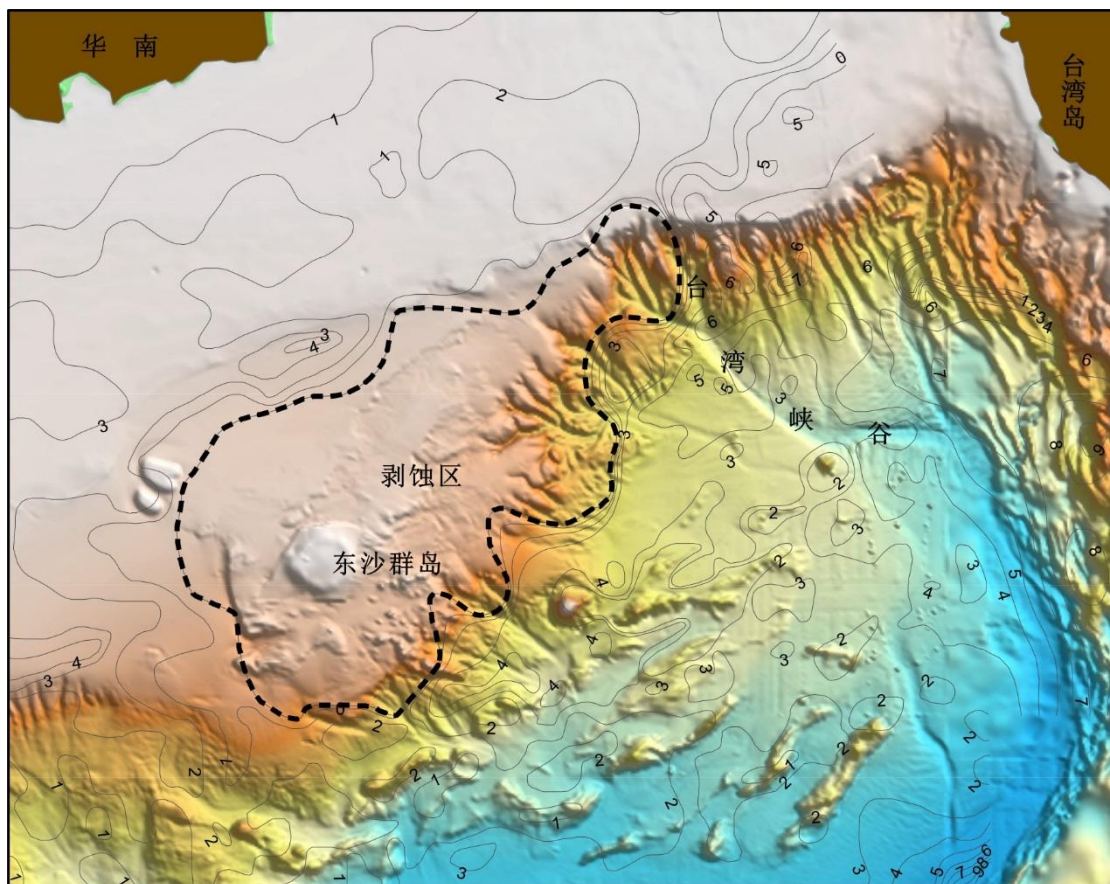


图6 东沙隆起及邻区地形与第四系厚度图

Fig.6 Topography and Quaternary thickness of Dongsha uplift and its adjacent area

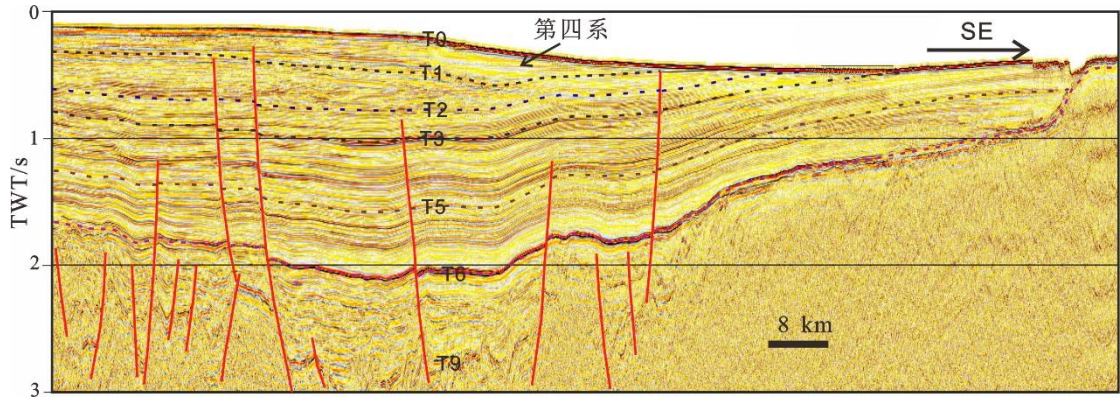


图 7 南海北部 Q3 地震剖面（位置见图 2）

Fig. 7 Seismic profile Q3 in the northern SCS (see Figure 2 for location)

据前人研究，东沙隆起区等深流发育（王海荣等，2007；江宁等，2018），其具有较强的侵蚀作用（王玉柱，2010；郭依群等，2012）。因此，东沙隆起区在隆升过程，又受到等深流或其它底流的冲刷与剥蚀（Shao et al., 2007；Wang et al., 2010；郑红波等，2012；李华等，2013，2014），导致该区域第四纪无沉积。

4.4 南海东缘马尼拉海沟第四系及其挤压作用

南海东缘，中中新世开始南海洋壳沿马尼拉海沟俯冲消亡于菲律宾群岛之下，形成马尼拉海沟俯冲带（朱俊江等，2017；赵明辉等，2021）。马尼拉海沟第四系呈明显增厚特点，主要受两方面因素控制：一方面海沟在俯冲过程，不断沉降，接受来自西侧的菲律宾群岛和北部台湾岛丰富的陆源碎屑供给；另一方面受俯冲作用影响，沉积层受到挤压明显增厚，（图 8）。因此马尼拉海沟第四系增厚是沉积物源供应与构造挤压作用下双重影响的结果。

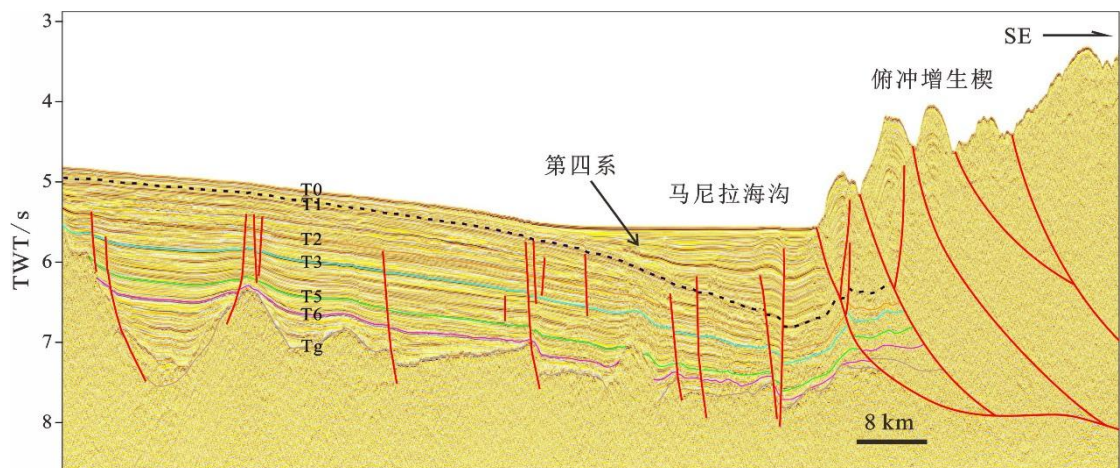


图 8 南海东缘 Q4 地震剖面（位置见图 2）

Fig.8 Seismic profile Q4 in the eastern margin of SCS (see Figure 2 for location)

5 结论

南海周边物源丰富,为第四纪沉积提供物质基础。南海第四系沉积厚度变化较大,最厚超过 2000m,位于莺歌海—琼东南海域。莺歌海海域不仅有丰富的物源,第四纪还在持续沉降。南海西缘的莺歌海、中建南、万安等形成沉积沉降中心,表明第四纪西缘断裂带仍在活动,并控制着沉积作用的发育。

南海西北陆坡发育两条大致北东走向的沉积沉降中心带,与西南次海盆扩张中心基本平行,表明南海西北陆坡第四纪仍以拉张作用为主。东沙海域第四系厚度基本为 0,为剥蚀区,表明其第四纪以来持续隆升,并受到等深流或底流的冲刷。因此南海北部第四纪时期,呈现西部以沉降为主,东部以隆升为主的构造格局。

琼东南、中建南、万安及曾母沉积中心均与陆架外缘坡折带吻合,是陆架区沉积厚度增大,坡折带不断往海方向推进的结果,体现了沉积作用对海底地形的重塑。

南海东缘马尼拉海沟第四系相对较厚,主要是受构造挤压作用,同时有来自台湾岛和菲律宾群岛提供的丰富物源沉积物。

References:

- Cai Zhourong, Liu Weiliang, Wan Zhifeng, Guo Feng. 2010. Determination of Cenozoic tectonic movement in the northern South China Sea and the relationship between oil-gas reservoir and tectonic movement[J]. Marine Science Bulletin, 29(2): 161-165 (in Chinese with English abstract).
- Dai Shibao, Yang Shilun, Cai Aimin. 2007. Variation of Sediment Discharge of the Pearl River Basin from 1955 to 2005. Acta Geographica Sinica, 62(5): 545-554 (in Chinese with English abstract).
- Du Xiaodong, Liu Jun, Xu Leyi, Zhang Qinglin, Zheng Jinyun, Zhang Ming, Wu Qionglin, Cai Guofu, Li Sanzhong, Suo Yanhui. 2021. The Dongsha Movement in the Jieyang Sag at the Northern South China Sea Margin: Control on Hydrocarbon Traps[J]. Geotectonica et Metallogenia, 45(1): 201-210 (in Chinese with English abstract).
- Feng Wenke, Xue Wanjun, Yang Dayuan. 1988. Late Quaternary Geological Environment in the Northern South China Sea[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 80-102 (in Chinese).
- Gao Hongfang, Nie Xin, Luo Weidong. 2021. "Source to sink" analysis of a sea basin: The Quaternary deepwater turbidite fan system in Pearl River Valley-Northwest subbasin, Northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 41(2): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yiqun, Wang Liaoliang, Kuang Zenggui, Zhong Guangfa. 2012. Contour current Sedimentary characteristics[J]. Marine Geology Frontiers, 28(6): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yichun, Chen Pingfu, Wang Xiaoqiao, Dong Junshe. 2000. Late tertiary sequence stratigraphy and sea level changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin[J]. Geoscience, 14(3): 237-245 (in Chinese with English abstract).

- Hu Wenyan, Luo Wei, Huang Chan, Deng Guangjun, Fu Dawei, Lei Xin. 2020.Characteristics of Dongsha movement in Qiongdongnan basin and its petroleum geological significance[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 32(3): 20-32 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yang, Wu Zhiping, He Min, Wang Guangzeng. 2018. Neogene Tectonic Characteristics and Evolution of Pearl RiverMouth Basin, South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 24(3): 433-441 (in Chinese with English abstract).
- Jian Z, Wang L, Kienast M, Sarnthein M, Kuhnt W, Lin H, Wang P. 1999. Benthic foraminiferal paleoceanography of the South China Sea over the last 40000 years[J]. *Marine Geology*, 156: 159-186.
- Jiang Ning, He Min, Liu Jun, Pang Xiong, Zhang Xiangtao, Xue Huaiyan. 2018. Depositional Characteristics and Formation Mechanisms of Contour Currentin South Dongsha Uplift during the Quaternary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(1):120-131 (in Chinese with English abstract).
- Jiwarungrueangkul T, Liu Z. 2021. East Asian monsoon and sea-level controls on clay mineral variations in the southern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary International* 592: 1-11.
- Lei Chao, Ren Jianye, Zhang Jing. 2015.Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4):744-762 (in Chinese with English abstract).
- Li Desheng, Jiang Renqi. 1989. Geological evolution of Dongsha Uplift and its Surrounding Depression in the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 11(6): 737-741(in Chinese).
- Li Hua, Wang Yingmin, Xu Qiang, Tang Wu, Li Dong. 2013. Sedimentary characteristics and types of the Quaternary deep water contourites in northern South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 741-750 (in Chinese with English abstract).
- Li Hua,Wang Yingmin, Xu Qiang, Zhuo Haiteng, Wu Jiapeng,Tang Wu, Li Dong, Xu Yanxia. 2014. Interactions between Down-Slope and Along-Slope Processes on the NorthernSlope of South China Sea: Products, Processes, and Depositional Model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(6):1120-1129 (in Chinese with English abstract).
- Li Q, Wang P, Zhao Q, JunT, Cheng X, Jian Z, Zhong G, Chen M. 2008. Paleoceanography of the mid-Pleistocene South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews* 27: 1217-1233.
- Li Qi, Li Qianyu, Wang Rujian. 2012. Progressin the paleoceanography of the South China Sea over the last 200 ka: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(2): 224-239 (in Chinese with English abstract).
- Lin Changsong, Gao Jinyao, Zhao Lihong, Zhao Jianru. 2009. Geophysical features of the western--edge fault zone of the SouthChina Sea and its significance of tectonic geology. *Haiyang Xuebao*, 31(2): 97-103 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z, Trentesaux A, Clemens S C, Colin C, Wang P, Huang B, Boulay S. 2003. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years[J]. *Marine Geology* 201:133-146.

- Luan Xiwu, Liu Hong, Peng Xuechao. 2011. The geophysical interpretation of a Dongsha ancient uplift on the northern margin of South China Sea. *Chinese Journal of Geophys*, 54(12): 3217-3232 (in Chinese with English abstract).
- Ma Y, Qin Y, Yu K, Li Y, Long Y, Wang R, Fan T, Jiang W, Xu S, Zhao J. 2021. Holocene coral reef development in Chenhang Island, Northern South China Sea, and its record of sea level changes[J]. *Marine Geology*, 440: 1-12.
- Milliman J D, Syvitski J P. 1992. Geomorphic/ tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. *Journal of Geology*, 100:525-544.
- Rao Chuntao. 1992. A unified nomenclature of cenozoic tectonic movement in the northern continental margin basin of the south china sea[J]. *China offshore Oil and Gas (geology)*, 6(1):9-10(in Chinese).
- Shao L, Li X, Geng J, Pang X., Lei Y, Qiao P, Wang L. 2007. Deep water bottom current deposition in the northern South China Sea [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 50: 1060-1066.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D, Wu H, Liu X, Ji S, Zhang L, Zhong J. 1990. The Ailao Shan Red River metamorphic belt—tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature* 343(6257):431–437.
- Tapponnier P, Peltzer G, Ledain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia—new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology* 10(12):611–616.
- Tian Xu, Xu Fangjian, Xu Wei, Liu Xiling.2015. 4400a East Asian monsoon record from sediments in the continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Marine Science*, 39(9):62-68 (in Chinese with English abstract).
- Wan Zhifeng, Xia Bin, Shi Qiuhua, Cai Song, Cai Zhouong. 2012. A review of tectonic setting of northernmargin of South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 28(7): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Yuan S, Gao H. 2010. The contourite system and the framework of contour current circulation in the South China Sea [J]. *Geo-Temas*, 11: 189-190.
- Wang Hairong, Wang Yimin, Qiu Yan, Peng Xuechao, Li Wencheng. 2007. Sediment Waves in the deep water environment of the Northern Continental Margin of the South China Sea[J]. *Progress in Natural Science*, 17(9): 1235-1243(in Chinese).
- Wang P, Li Q, Tian J, He J, Jian Z, Ma W, Dang H. 2016. Monsoon influence on planktic $\delta^{18}O$ records from the South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 142:26-39.
- Wang P, Lipps J H. 2005. Micropaleontology of the South China Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 54:1-3.
- Wang P. 1999. Response of upper ocean structure to the initiation of the North Hemisphere glaciation in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 156:305-318.
- Wang Pinxian, Xia Lunyu, Wang Lvjiang, Cheng Xinrong. 1991. Lower boundary of the Marine Pleistocene in northern shelf of the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 65(2): 176-187 (in Chinese).
- Wang Ying. 1996. *Marine Geography of China*[M]. Beijing: Science Press, 153-172 (in Chinese).

- Wang Yuzhu, Wang Hairong, Gao Hongfang, Wang Zhihong, Zheng Lianghe, Lv Yousheng. 2010. Contour current dynamics process and deposits: A Review[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(2): 141-150 (in Chinese with English abstract).
- Wu Lushan, Qiu Yan, Xie Xinong, Liu Xiaofeng, Jiang Tao. 2005. Analysis of the subsidence history of the Zengmu basin in the southwest South China Sea since the early Miocene[J]. *Geology in China*, 32(3):370-377 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shiguo, Liu Zhan, Wang Wanyin, Guo Junhua, Lüdmann T, Wong H K. 2004. Late Cenozoic Neotectonics in the Dongsha islands region and its responds to collision between Chinese Continental Margin and Luzon[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 35(6): 481-490 (in Chinese with English abstract).
- Xia Lunyu, Mai Wen, Lai Xiahong, Wang Pinxian, Wang Lvjiang. 1989. A Preliminary Study on the Quaternary System in Yinggehai-Qiongdongnan Basin[J]. *China offshore Oil and Gas*, 3(3): 21-28(in Chinese).
- Xu Junjie, Xu Honggen, Liu Daohan, Chen Song, Liu Lei, Liu Hui, Liu Xiao, Liu Pan. 2020. Division, Formation and Evolution of the Prototypes of the Zengmu Basin in Southern South China Sea. *South China Geology*, 2020, 36(3): 221-231 (in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu, Wang Ling, Wu Nengyou. 2004. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area[J]. *Geology in China*, 31(2): 113-122 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Gongcheng, Jia Qingjun, Wang Wanyin, Wang Pujun, Zhao Qingle, Sun Xiaomeng, Xie Xiaojun, Zhao Zhao, Tang Wu. 2018. On tectonic framework and evolution of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophys*, 61(10):4194-4215 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Minghui, Cheng Jinhui, Gao Jinwei, Sun Longtao, Xu Ya, Zhang Jiazheng, Du Feng. 2021. New development on crustal structures of the Manila subduction in the eastern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 40(3):25-33 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shujuan, Wu Shiguo, Shi Hesheng, Dong DongDong, Chen Ruixin, Wang Ying. 2012. Structures and dynamic mechanism related to the Dongsha movement at the northern margin of South China Sea. *Progress in Geophys*, 27(3):1008-1019 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Hongbo, Yan Pin, Xing Yuqing, Wang Yanlin. 2012. Deep—water bottom current research in the northern South China Sea using a reflection seismic method[J]. *Haiyang Xuebao*, 34(2): 192-198 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Junjiang, Li Sanzhong, Sun Zongxun, Li Xianpeng, Li Jian. 2017. Crustal architecture and subduction processes along the Manila Trench, Eastern South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(4):341-351 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡周荣, 刘维亮, 万志峰, 郭峰. 2010. 南海北部新生代构造运动厘定及与油气成藏关系探讨[J]. *海洋通报*, 29(2): 161-165.

- 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 2007. 51年来珠江流域输沙量的变化[J]. 地理学报, 62(5): 545-554.
- 杜晓东, 刘军, 徐乐意, 张青林, 郑金云, 张明, 吴琼玲, 蔡国富, 李三忠, 索艳慧. 2021. 南海北缘东部揭阳凹陷的东沙运动: 对油气成藏的影响[J]. 大地构造与成矿学, 45(1): 201-210.
- 冯文科, 薛万俊, 杨达源. 1988. 南海北部晚第四纪地质环境[M]. 广州:广东科技出版社, 80-102.
- 高红芳, 聂鑫, 罗伟东. 2021. 海盆沉积“源-汇”系统分析:南海北部珠江海谷-西北次海盆第四纪深水浊积扇[J]. 海洋地质与第四纪地质, 41(2): 1-12.
- 郭依群, 王嘹亮, 匡增桂, 钟广法. 2012. 等深流沉积特征[J].海洋地质前沿, 28(6): 1-9.
- 郝诒纯, 陈平富, 万晓樵, 董军社. 2000. 南海北部莺歌海-琼东南盆地晚第三纪层序地层与海平面变化[J]. 现代地质, 14(3): 237-245.
- 胡雯燕, 罗威, 黄灿, 邓广君, 付大巍, 雷新. 2020. 琼东南盆地东沙运动表现特征及石油地质意义[J]. 中国海上油气, 32(3): 20-32.
- 胡阳, 吴智平, 何敏, 王光增. 2018. 珠江口盆地新近纪构造特征与演化[J]. 高校地质学报, 24(3): 433-441.
- 江宁, 何敏, 刘军, 庞雄, 张向涛, 薛怀燕. 2018. 东沙隆起南缘第四系等深流沉积特征及成因机制[J].沉积学报, 36(1):120-131.
- 雷超, 任建业, 张静. 2015. 南海构造变形分区及成盆过程[J].地球科学——中国地质大学学报, 40(4):744-762.
- 李德生, 姜仁旗. 1989. 南海东沙隆起及其周围坳陷的地质演化[J]. 海洋学报, 11(6): 737-741.
- 李华, 王英民, 徐强, 唐武, 李冬. 2013. 南海北部第四系深层等深流沉积特征及类型[J]. 古地理学报, 15(5): 741-750.
- 李华, 王英民, 徐强, 卓海腾, 吴嘉鹏, 唐武, 李冬, 徐艳霞. 2014. 南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用沉积特征、过程及沉积模式[J]. 地质学报, 88(6):1120-1129.
- 李琪, 李前裕, 王汝建. 2012. 20万年来南海古海洋研究的主要进展[J]. 地球科学进展, 27(2): 224-239.
- 林长松, 高金耀, 赵俐红, 赵建如. 2009. 南海西缘断裂带的地球物理特征及其构造地质意义[J]. 海洋学报, 31(2): 97-103.
- 栾锡武, 刘鸿, 彭学超. 2011. 南海北部东沙古隆起的综合地球物理解释[J]. 地球物理学报, 54(12):3217-3232.
- 饶春涛. 1992. 南海北部陆缘盆地新生代构造运动的统一命名[J]. 中国海上油气(地质), 6(1):9-10.
- 田旭, 徐方建, 徐微, 刘喜玲. 2015. 近4400a南海北部陆架沉积物的东亚季风记录[J]. 海洋科学, 39(9):62-68.
- 万志峰, 夏斌, 施秋华, 蔡嵩, 蔡周荣. 2012. 南海北部陆缘构造属性研究进展[J]. 海洋地质前沿, 28(7): 1-9.
- 汪品先, 夏伦煜, 王律江, 成鑫荣. 1991. 南海西北陆架的海相更新统下界[J]. 地质学报, 65(2): 176-187.
- 王海荣, 王英民, 邱燕, 彭学超, 李文成. 2007. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J]. 自然科学进展, 17(9): 1235-1243.
- 王颖. 1996. 中国海洋地理[M]. 北京: 科学出版社, 153-172.
- 王玉柱, 王海荣, 高红芳, 王志宏, 郑良合, 吕友生. 2010.等深流作用机制和沉积的研究进展[J]. 古地理学

- 报, 12(2): 141-150.
- 吴庐山, 邱燕, 解习农, 刘晓峰, 江涛. 2005. 南海西南部曾母盆地早中新世以来沉降史分析[J]. 中国地质, 32(3):370-377.
- 吴时国, 刘展, 王万银, 郭军华, Lüdmann T, Wong H K. 2004. 东沙群岛海区晚新生代构造特征及其对弧—陆碰撞的响应[J]. 海洋与湖沼, 35(6): 481-490.
- 夏伦煜, 麦文, 赖霞红, 汪品先, 王律江. 1989. 莺歌海-琼东南盆地第四系初步研究[J]. 中国海上油气地质, 3(3): 21-28.
- 徐俊杰, 徐宏根, 刘道涵, 陈松, 刘磊, 刘慧, 柳潇, 刘盼. 2020. 南海南部曾母盆地的原型盆地划分及其形成演化过程[J]. 华南地质, 36(3):221-231.
- 姚伯初, 万玲, 吴能友. 2004. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. 中国地质, 31(2): 113-122.
- 张功成, 贾庆军, 王万银, 王璞珺, 赵庆乐, 孙晓猛, 谢晓军, 赵钊, 唐武. 2018. 南海构造格局及其演化[J]. 地球物理学报, 61(10): 4194-4215.
- 赵明辉, 程锦辉, 高金尉, 孙龙涛, 徐亚, 张佳政, 杜峰. 2021. 南海东部马尼拉俯冲带深部结构新认识[J]. 热带海洋学报, 40(3):25-33.
- 赵淑娟, 吴时国, 施和生, 董冬冬, 陈端新, 王莹. 2012. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. 地球物理学进展, 27(3): 1008-1019.
- 郑红波, 阎贫, 邢玉清, 王彦林. 2012. 反射地震方法研究南海北部的深水底流[J]. 海洋学报, 34(2): 192-198.
- 朱俊江, 李三忠, 孙宗勋, 李先鹏, 李健. 2017. 南海东部马尼拉俯冲带的地壳结构和俯冲过程[J]. 地学前缘 (中国地质大学(北京); 北京大学), 24(4): 341-351.