李学杰,汪俊,王哲,等.南沙海槽—西北巴拉望构造特征及其意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1081-1094. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220343.
Li Xuejie, Wang Jun, Wang Zhe, et al. Tectonic Characteristics of Nansha Trough-Northwest Palawan and Its Significance. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(4):1081-1094. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220343.

南沙海槽—西北巴拉望构造特征及其意义

李学杰,汪 俊,王 哲,姚永坚,祝 嵩
中国地质调查局广州海洋地质调查局/自然资源部海底矿产资源重点实验室,广州 511400

摘要:南沙海槽—西北巴拉望构造对认识南海成因与演化至关重要。综合南海南缘地质地球物理资料分析认为:南沙海槽极薄地壳可能不是古南海的残余,是夭折的扩张中心;南沙海槽存在挤压逆冲作用,形成时间很晚,与南海扩张无关,是南海形成后挤压的结果。南沙海槽挤压作用与西北巴拉望Pagasa楔变形对比表明,南海南缘的挤压作用停止时间东部早于西部;中、南巴拉望蛇绿岩来自其南部往北逆冲的产物,可能表明古南海由南往北俯冲。综上认为南巴拉望蛇绿岩可能来自新特提斯洋壳,中巴拉望蛇绿岩来自古南海洋壳;不同时期洋壳俯冲残余最终被逆冲至岛弧系之上;巴拉望蛇绿岩是长期由南往北逆冲的结果,最后就位时间可能是中晚中新世。

关键词:南海南缘;南沙海槽逆冲构造;古南海;巴拉望蛇绿岩
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220343 **中图分类号**:P548 **文献标志码**:A

Tectonic Characteristics of Nansha Trough-Northwest Palawan and Its Significance

Li Xuejie, Wang Jun, Wang Zhe, Yao Yongjian, Zhu Song
Guangzhou Marine Geological Survey/Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR, Guangzhou 511400, *China*

Abstract: The tectonics of the Nansha trough-Northwest Palawan is important for understanding the origin and evolution of the South China Sea (SCS). Based on the analysis of geological and geophysical data in the southern margin of SCS, we suggest that the very thin crust of the Nansha trough may not be the remnant of the Proto South China Sea (PSCS), but may be an abandoned spreading center. As a result of a compressional event after the formation of the SCS, the thrusting structures developed very late on the Nansha trough and were not related to the opening of the SCS. The comparison between the extrusion of the Nansha trough and the Pagasa wedge in Northwest Palawan

收稿日期:2023-12-15
作者简介:李学杰(1964—),男,教授级高工,博士,主要从事海洋基础地质调查与研究工作,E-mail: xuejieli@yeah.net
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)
Supported by the Project of China Geological Survey (DD20160138, GZH201300502, DD20190378) and the Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0207)

shows that the time of compressional termination in the east is earlier than in the west in the southern margin of the SCS. The ophiolite in South and Central Palawan was the product of its southern northward thrusting, indicating that the PSCS may subduct from south to north. It is suggested that the Southern Palawan ophiolite may derive from the oceanic crust of Neo-Tethys and the Central Palawan ophiolite may come from the PSCS. The subducted remnants of oceanic crust in different periods were finally overthrusted onto the island arc system. The Palawan ophiolite is the result of a long-term thrusting from south to north, and the time of the final emplacement may be the Middle-Late Miocene.

Key words: Southern margin of South China Sea; Nansha trough thrust structure; Proto South China Sea; Palawan ophiolite

0 引言

南海作为西太平洋的边缘海,受到多种构造应力场的作用,新生代经历复杂的构造演化,改变了周边构造环境,使得其成因的认识难度增大。近几十年来,南海持续受到多方关注,进行了大量的基础地质调查与研究,包括1∶100万海洋区域地质调查和各种资源调查[1],以及3轮大洋钻探(ODP-IODP)[2]。2010年开始,国家自然科学基金委资助"南海深海过程演变"重大研究计划,以多学科、多视角对南海深海过程及其演变进行研究,取得世界瞩目的成果,但南海的形成与演化至今仍存在很大的争议[3]。

南海南缘中南海海槽—西北巴拉望构造对于南海成因至关重要。南海影响最广的成因模型挤出模型[4-5]和古南海俯冲拖曳模型[6-7]对南海南缘有截然不同的认识。李学杰等[8]提出南海成因"弧后扩张—左旋剪切"新认识,南海南缘构造特征是支撑的关键。

南海张开过程中南海南缘南沙—礼乐地块裂离华南大陆往南漂移,其俯冲消亡洋壳边界一直存在争议。国内外学者进行了大量研究[9-13],但观点不一,差异很大[14]。Haile[15]最早提出南沙海槽存在俯冲作用;Hamilton[16]认为南沙海槽是新近纪俯冲的海沟;Hinz等[17]认为海域褶皱逆冲带是陆—陆碰撞的反映,推测区域性挤压导致主逆冲作用持续至今。这种观点已被一些学者所接受[18-20]。通常认为南沙海槽是古南海洋壳俯冲的海沟,洋壳于古近纪—中新世早期往东南俯冲于巴拉望和北婆罗洲之下[13-14,21],这也导致南海洋壳扩张的停止[22],并形成沙巴的Crocker群沉积出现变形和隆升,得到巴拉望蛇绿岩与沙巴蛇绿岩可对比的支持[12]。另一种观点认为,南沙海槽不是古俯冲带,而与巴拉望类似,为仰冲楔状推覆体的前缘,南沙海槽下伏的是陆壳[17,23-24]。Hall[25]认为古南海位于巴拉望南侧,南沙海槽—西北巴拉望是沉积物供给饥饿型前陆海槽,没有证据表明有海沟横穿整个西北巴拉望大陆架[13,26]。Hall[27]认为西北婆罗洲—巴拉望地区没有板块汇聚,新生代大部分变形是拉伸幕,而非挤压的结果。一些学者将海域褶皱逆冲解释为重力滑塌[12],类似于尼日尔三角洲的深水褶皱逆冲带[28]。Hesse等[29]展示褶皱带外侧收缩量,不完全与区域拉伸量匹配,必然有构造缩短成份,且往北增大,认为是重力变形与区域挤压的结合[30-31]。

总之,对南沙海槽的成因有截然不同的认识,既有古俯冲带观点,也有仰冲推覆观点,还有非构造挤压的重力滑塌观点。此外,南沙海槽的地壳性质是否存在洋壳残余也是争论的要点。俯冲观点通常认为是古南海俯冲消亡的残留洋壳[7],逆冲推覆观点及重力滑塌观点认为南沙海槽下伏的是陆壳[17]。姚伯初[32]、苏达权等[33]通过地震剖面及重磁震联合反演认为南沙海槽西南段为洋壳,东北段为陆壳。本文试图通过对南海海槽—西北巴拉望海域及相邻岛屿地质地球物理数据揭示该地区的地质构造特征,为认识南海成因及其演化提供约束。

1 区域地质背景

南海南缘涵盖南海海盆以南的南沙海域以及婆罗洲(加里曼丹岛)、巴拉望等岛屿(图1)。巴拉望以南为苏禄海和苏拉威西海,东面隔菲律宾群岛与西菲律宾海相望。在新生代演化过程,南海南缘形成极为复杂的构造,许多问题尚没有答案,长期以来成为地质构造研究的热点。

南沙海槽位于南海西南部西沙海域与婆罗洲之间,呈北东走向,长约400 km,水深通常大于2 800 m,南起廷贾断裂,北至巴拉巴克断裂,再往东北水深急剧变浅,又称西北巴拉望海槽,但缺乏明显的海槽地形(图1)。

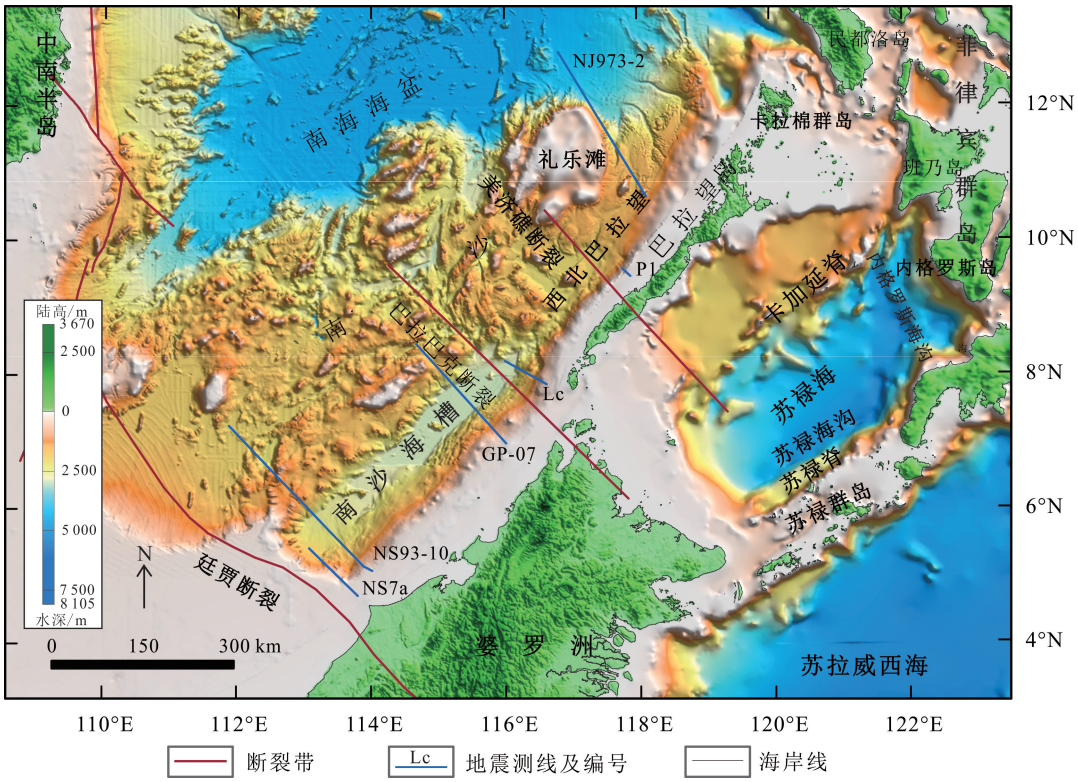


图 1　南海南缘地形及地震剖面位置图

Fig.1　Topography map of southern margin of South China Sea and seismic profile location

巴拉望以南为苏禄海和苏拉威西海。苏禄海以卡加延脊为界可分为水深差异很大的西北苏禄海和东南苏禄海，两者的地壳性质明显不同。西北苏禄海与南沙海域一样为减薄的陆壳，地球物理资料与深海钻探表明，西北苏禄海盆新近纪沉积厚度为 0.5～3.5 s(双程走时)[34]。西北苏禄海盆曾被看作沙巴—巴拉望造山带的东延，或婆罗洲—苏禄碰撞带的一部分[35]。东南苏禄海盆沉积厚度为 1.0～2.0 s，ODP 资料揭示，苏禄海形成于 20～15 Ma 的海底扩张，基底之上最老沉积为晚中新世放射虫红泥，其下伏 250 m 厚的酸性火山碎屑凝灰岩，再往下是枕状熔岩和辉绿岩[36]。

东南苏禄海磁异常与卡加延脊不平行，最老磁条带难以识别[37-38]，且大部分洋壳已沿内格罗斯海沟和苏禄海沟俯冲消亡于苏禄脊和菲律宾群岛之下，因此东南苏禄海的形成时间和成因均存在较大争议。

苏禄海以南的苏拉威西海，Weissel[39] 在该海盆中识别出 20、19 和 18 号磁条带，走向北东，年龄为 47～ 42 Ma，属始新世洋壳。Lee 等[40] 对该海盆磁条带的识别结果不同，认为其时代属晚白垩世—早第三纪(76～62 Ma)。

Hall[41] 认为，40～31 Ma 期间，菲律宾海顺时针旋转并向北运动，当时的西菲律宾海盆扩张脊往西延至苏拉威西海，因此苏拉威西海可能是西菲律宾海的一部分。但姚伯初等[34] 根据区域地质资料分析，认为苏拉威西群岛和苏禄群岛地质时期曾为同一火山弧，中始新世分离为苏禄弧和苏拉威西弧，其间扩张为苏拉威西海盆，因此海盆为弧间盆地。

苏拉威西东南的马古鲁海峡曾拥有宽广的洋壳，现分别往东西俯冲于哈马黑拉岛弧和桑义赫弧之下，形成反 U 形双向俯冲带，洋壳消亡，形成弧—弧碰撞。

南海东缘的菲律宾活动带为近南北向的大型走滑断裂带，其东侧菲律宾海板块是新生代海底扩张的产物，在形成过程中不断往北运动就位。古地磁研究表明菲律宾海板块始新世以来往北运动近 20°(约2 000 km)[42-44]。

2　南海南部地球物理场特征

重、磁异常特征可以为深部地质构造特征提供丰富的信息。利用我们历年对南海进行的大量船测

数据,补充收集全球卫星重力异常和磁异常数据,通过反演可揭示南海南部及其邻区的深部地质构造特征。

南沙海槽具明显的重力低特征,空间重力异常主体为-50～-20 m Gal,其西南终止于廷贾线,往东北延伸至美济礁断裂,地形上南沙海槽东北方向大致终止于巴拉巴克断裂,地形与重力异常特征两者在南沙海槽北延部分明显不同(图2)。南沙海槽南侧的西北婆罗洲陆架有一带状重力高,>50 mGal,与南沙海槽平行。

西北巴拉望海域,西南端巴拉巴克断裂与美济礁断裂之间存在重力低,而美济礁东北缺乏低重力异常。但巴拉望东南,西北苏禄海存在明显的重力低特征,主体为-40～-10 mGal,与西沙海槽相当;其东南的卡加延脊重力高,为50～100 mGal,局部更高,与西北婆罗洲陆架相当。

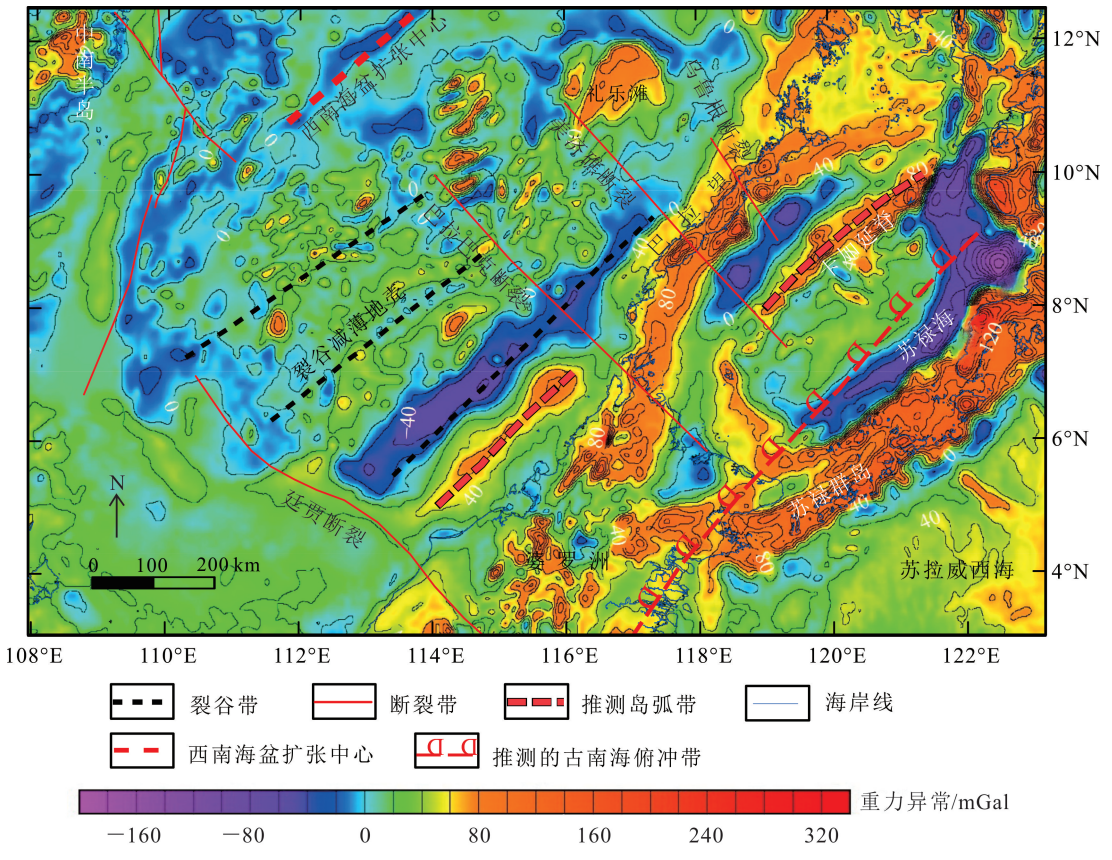
卡加延脊对应的磁异常以低值为主,通常<-50 nT,与之相当的低磁异常出现在其南侧的苏禄群岛(图3),推测两者可能存在相似性,并与增生楔有关。卡加延脊南部的西北苏禄海有明显的磁异常高值区,推测为裂谷基底的侵入岩浆岩。

重磁反演的结晶地壳厚度显示,南沙海域总体厚度比正常陆壳小(图4),一般为14～20 km,属于减薄的陆壳[16],这是南海演化过程中陆缘张裂地壳减薄的结果。南沙海槽南段及其南侧的增生楔下出现厚度很小的区域,厚度为8～12 km,局部<8 m,接近正常洋壳厚度,且厚度最小位置不在南沙海槽的最深处,而是在偏南侧处于增生楔之下。

南沙海域可见多条NE向地壳减薄带,结晶地壳厚度为13～16 km,与南沙海槽及西南次海盆扩张中心大致平行,南沙海槽可以看作这些减薄带中深度最大的一条(图4)。

3 南沙海槽—西北巴拉望构造变形特征

尽管不少学者将南沙海槽—西北巴拉望看作南海南缘往南俯冲的边界[19-20],但不论地形还是重磁



图例下同。

图2 南海南部及邻区空间重力异常等值线图

Fig.2 Contour map of free-air gravity anomalies in southern South China Sea and the adjacent areas

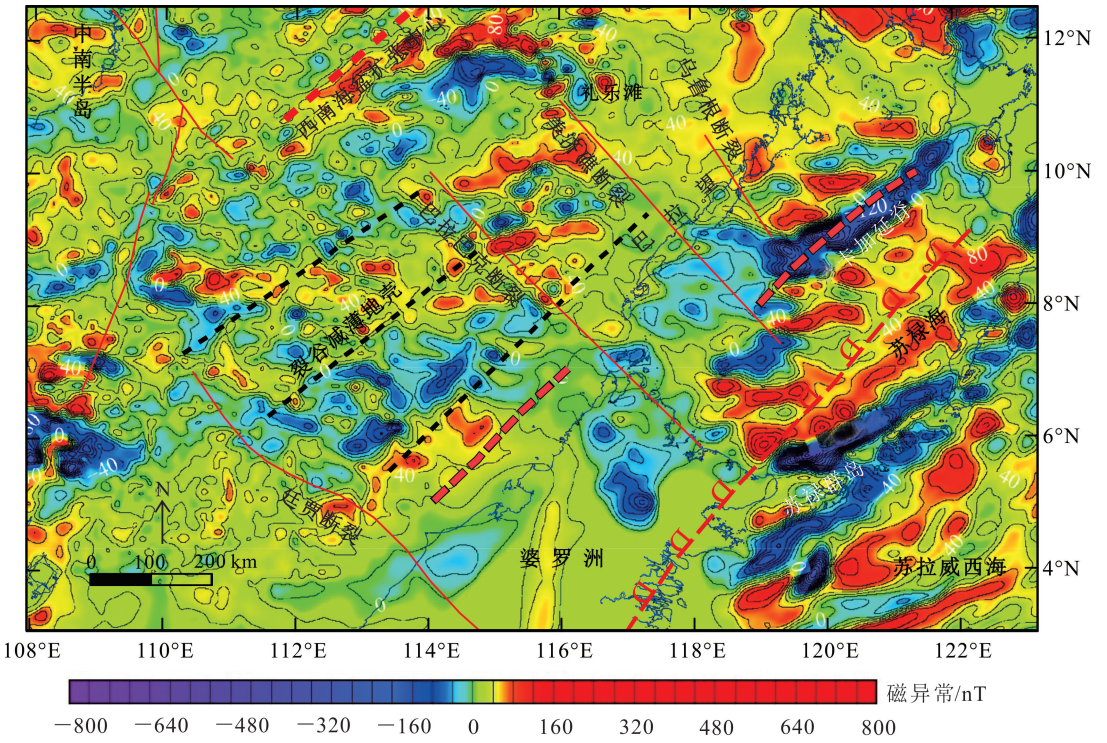


图 3　南海南部及邻区磁异常等值线图

Fig.3　Contour map of magnetic anomalies in southern South China Sea and the adjacent areas

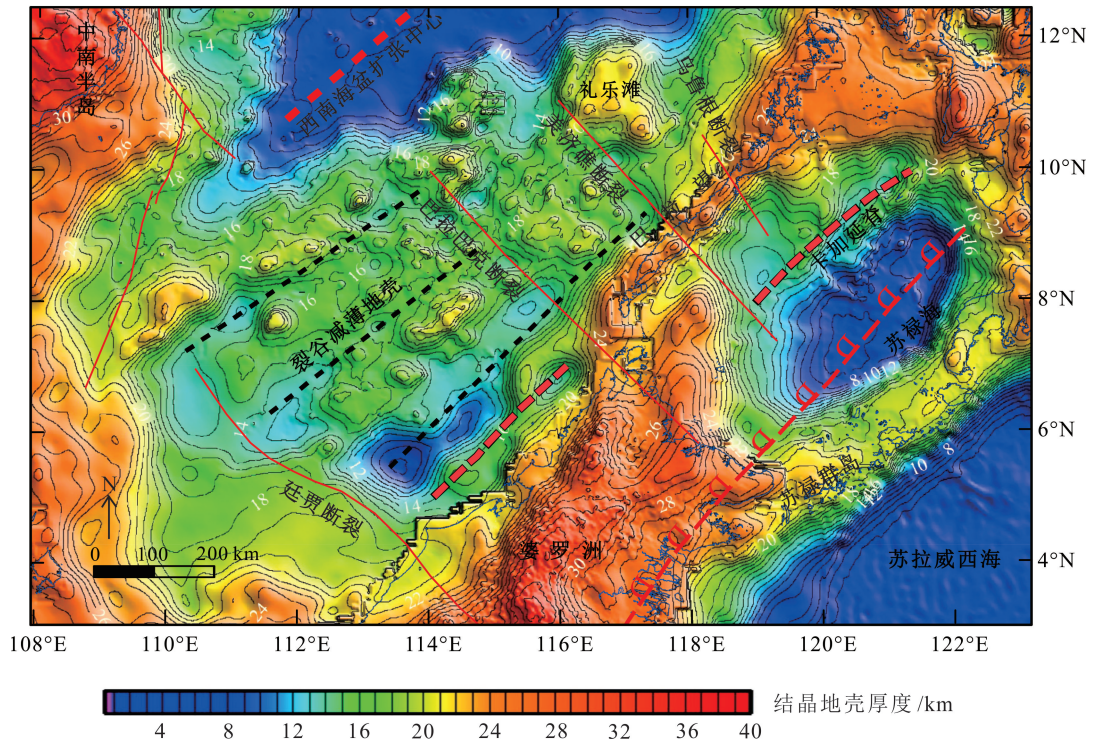


图 4　南海南部及邻区结晶地壳厚度图

Fig.4　Thickness map of crystalline crust in southern South China Sea and the adjacent areas

特征,南沙海槽往东北无法延伸至西北巴拉望海域,而巴拉望岛地质具亲华南的特征,也揭示其来自其北侧的亚洲大陆。这里通过不同位置的地震剖面揭示其构造变形特征。

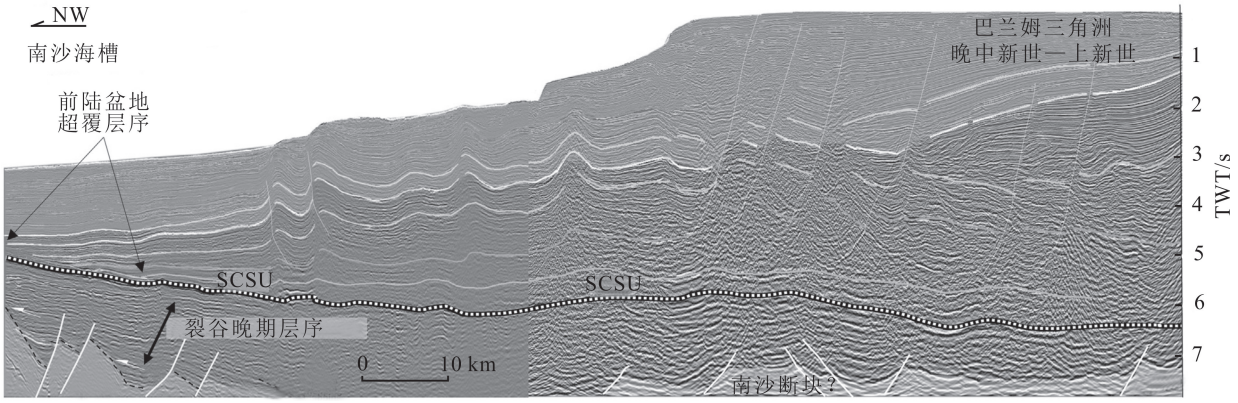
3.1 南沙海槽构造特征

从地震剖面(图5)看,南沙海槽东南缘存在明显的逆冲作用,其逆冲时间很新,逆冲推覆面大致相当于T_3不整合面,即中—晚中新世分界,与国外的SCSU不整合面(南海不整合)[45]或MMU不整合面(中中新世不整合)[17]相当。推覆面存在穿时现象,由东南往西北变新(图5)。这表明南沙海槽东南缘的逆冲是在南海扩张停止后才开始发育的,与南海扩张无关。而且逆冲构造面之下地层没有明显挤压变形,主要发育正断层(图5—7),表明中中新世之前没有出现大规模挤压和俯冲,而以拉伸构造为主,为同裂谷构造。此外,南沙海槽逆冲推覆构造由东南往北西明显不同(图5—7),东南部褶皱紧密,倾角较陡[47],往北西逐渐平缓,与俯冲带构造不同。因此,南沙海槽不可能是古南海的俯冲前缘,是后期逆冲的产物。

南沙海槽东北端(图8)顶部没有逆冲挤压,而在中部出现杂乱反射[13],特征与西北巴拉望相似,逆冲挤压作用未持续至现在。

3.2 西北巴拉望构造特征

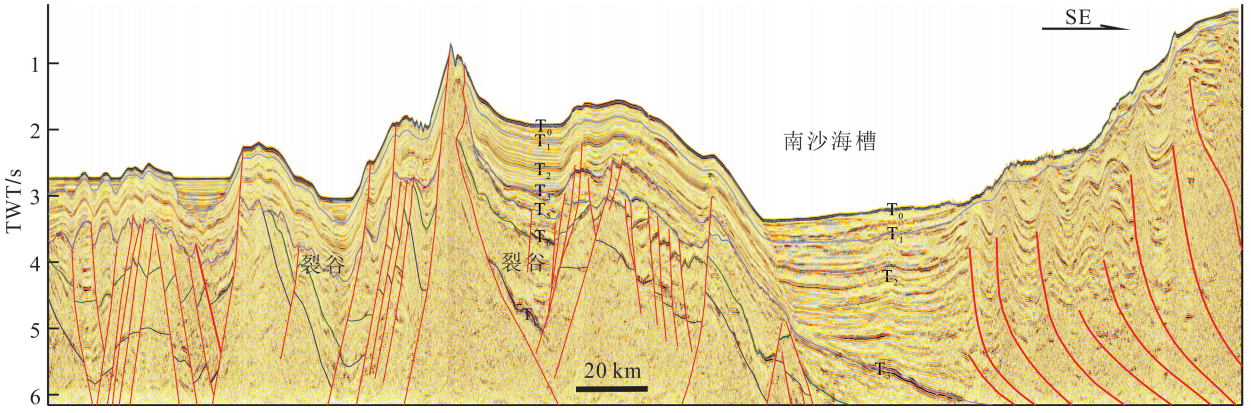
西北巴拉望地震剖面(图9)揭示,从陆坡至深海区主要发育铲状断层和半地堑等拉张构造,无明显的汇聚特征。陆架区三维地震剖面(图10)显示,白垩纪基底之上发育始新世半地堑同裂谷沉积,巴



剖面位置见图1。据文献[12]修编。TWT.双程走时。

图5 南沙海槽NS7a地震剖面

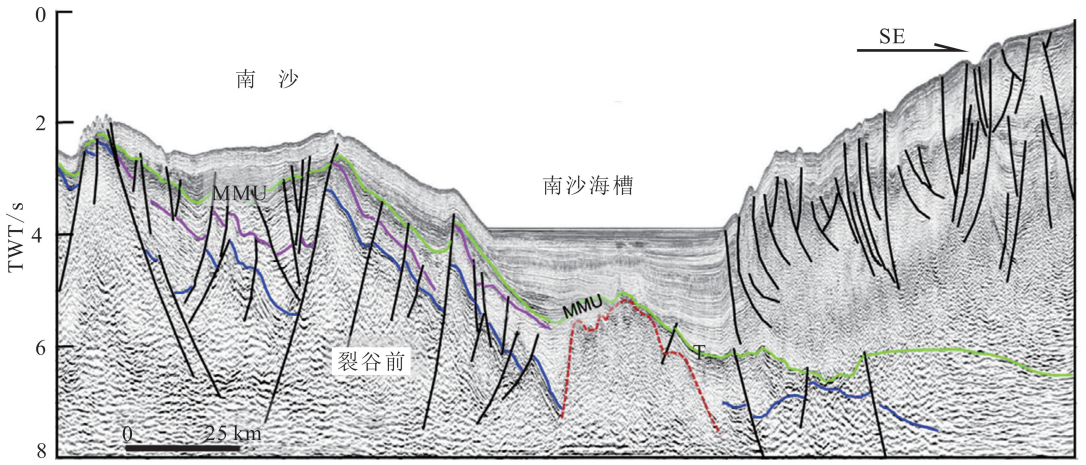
Fig.5 Seismic profile NS7a across Nansha trough



剖面位置见图1。

图6 南沙海槽NS93-10地震剖面

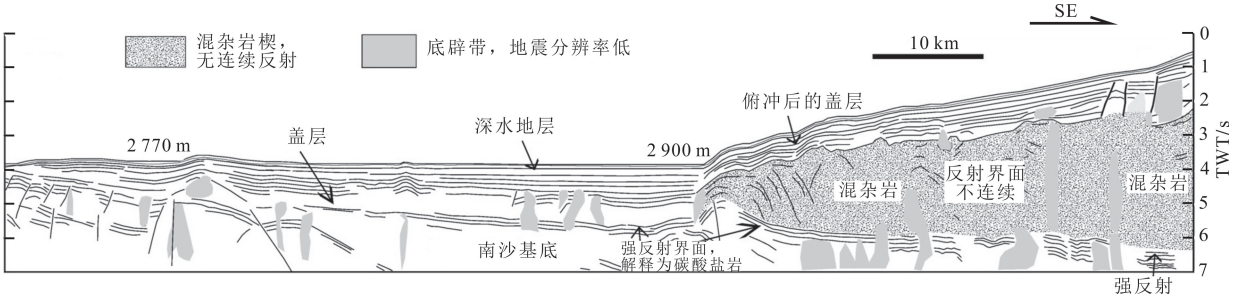
Fig.6 Seismic profile NS93-10 across Nansha trough



剖面位置见图 1。据文献[46]修编。

图 7　南沙海槽 GP－07 地震剖面

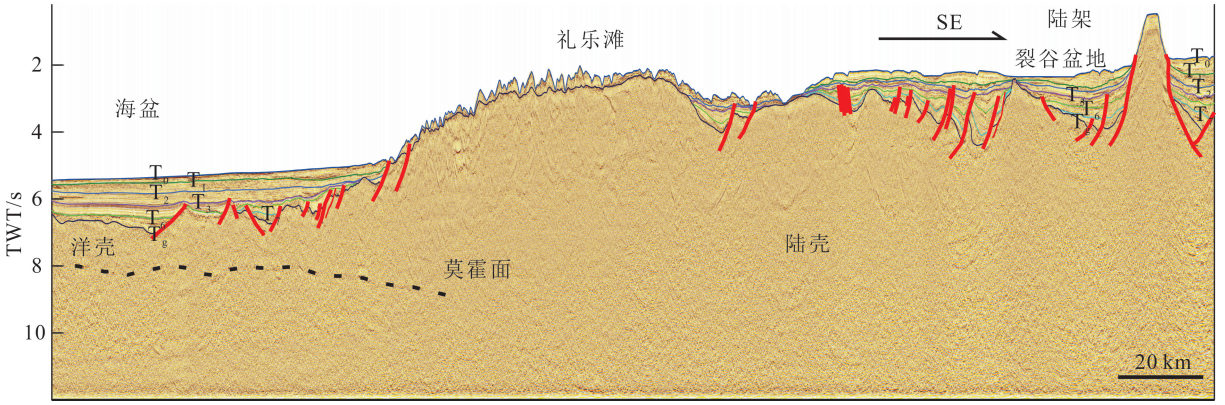
Fig.7　GP－07 seismic profile of Nansha trough



剖面位置见图 1。据文献[13]修编。

图 8　南沙海槽 Lc 地震剖面

Fig.8　Seismic profile Lc across Nansha trough



剖面位置见图 1。

图 9　南海东南部 NJ973－2 地震剖面显示的洋壳莫霍界面

Fig.9　Seismic profiles NJ973－2 in southeast of the South China Sea shown Moho interface

拉望陆地同期沉积 Panas 组浊积岩。海域 Panas 组之上不整合覆盖晚渐新世—早中新世 Nido 灰岩，北巴拉望陆地同期为 St. Paul 灰岩。Nido 灰岩之上为 Pagasa 组，钻井揭示其为泥岩、页岩、粉砂岩、砂

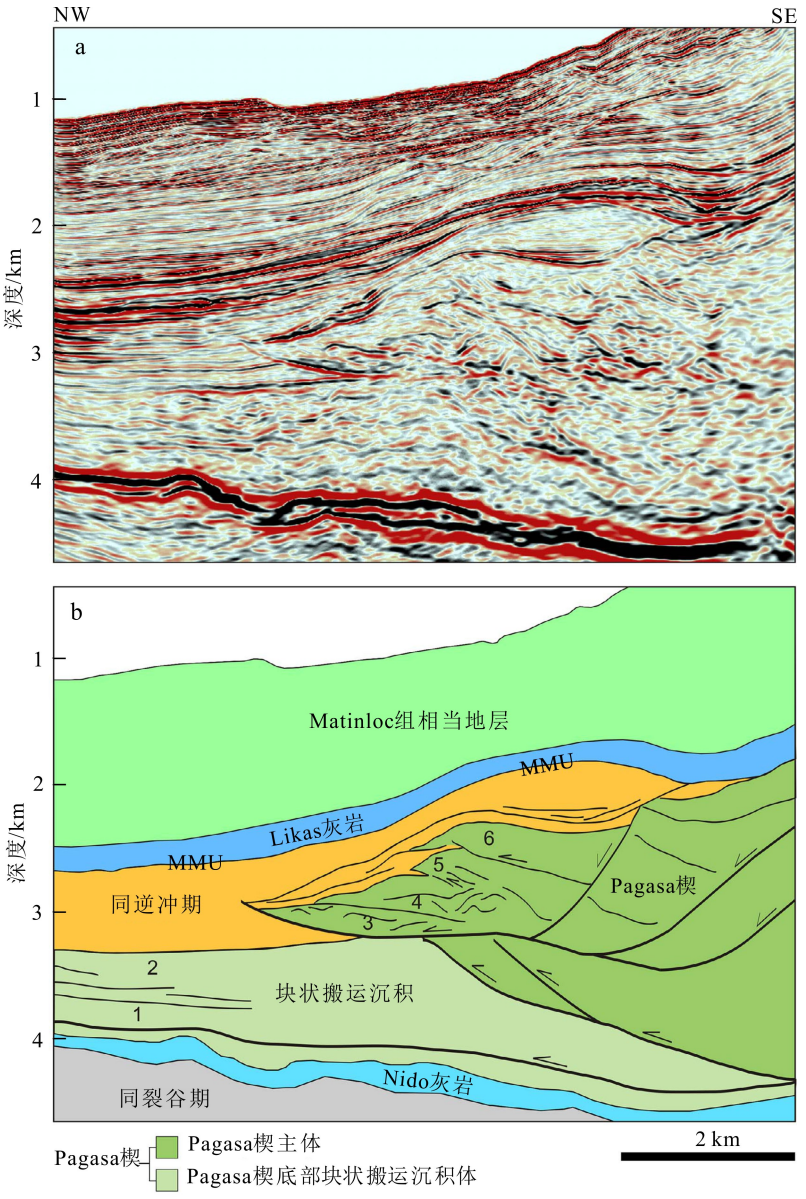
岩偶夹砾岩沉积组合,与陆地 Isugod 组相当[49]。

该区 Pagasa 组出现明显变形,呈杂乱不连续反射,发育大量倾向南的低角度逆冲断层,形成逆冲叠瓦状构造(图 10),称为 Pagasa 楔状构造。该楔体最大厚度超过 2 500 m,逆冲前缘往北西方向,至西北外陆架,逆冲褶皱变形消失,Pagasa 组反射趋于平静,因此是由东南往西北挤压逆冲的产物[14]。

Pagasa 楔顶部不整合上覆为变形的晚中新世—更新世浅海相碎屑沉积和碳酸盐岩,与陆地地层 Alphonso ⅩⅢ组和 Iwahig 组相当[14]。上下界面很好地限定了 Pagasa 楔的变形时间,即晚于 Nido 灰岩,早于披盖层形成时间。

4 中、南巴拉望蛇绿岩

西北巴拉望与礼乐滩之间没有明显的构造边界,巴拉望—民都洛与南沙属同一地块,地壳性质均为减薄的陆壳。巴拉望岛呈北东向展布,长约 600 km,宽约 50 km,可分为南北两个地质构造单元(图 1)。前人[50-51]认为中、南巴拉望蛇绿岩是俯冲洋壳的残余,被后期逆冲的结果;北巴拉望地块



MMU. 中中新世不整合。图 b 据文献[48]修编。

图 10 西北巴拉望海域 P1 地震剖面(a)及其解释(b)

Fig.10 Seismic profile P1 (a) and its interpretation (b) in Northwest Palawan Sea

由大陆成因沉积物和变质岩组成[52]，两者间的构造边界仍有争议，通常以乌鲁根断裂为界。

中、南巴拉望主要由白垩纪—始新世蛇绿岩体（称为巴拉望蛇绿岩）和混杂岩组成[50]。巴拉望蛇绿岩体分析表明，晚白垩世至始新世洋壳形成于巴拉望南侧，由南往北逆冲推覆的结果。

最近对巴拉望中部和南部蛇绿岩中火山岩的详细研究[53]认为，两者的岩石学、地球化学特征、形成时代和成因类型明显不同，将巴拉望蛇绿岩分为中巴拉望蛇绿岩（CPO）和南巴拉望蛇绿岩（SPO）（图 11）。

4.1　南巴拉望蛇绿岩

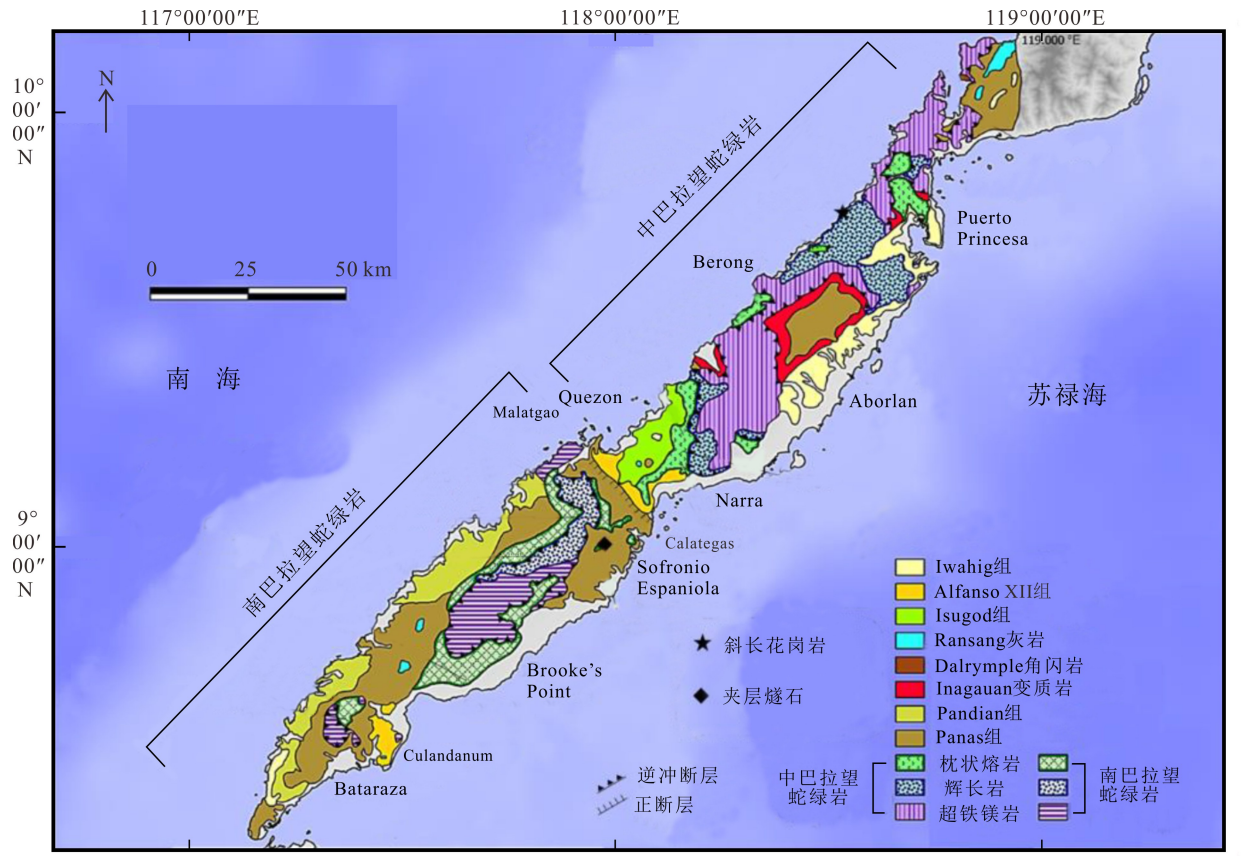
南巴拉望蛇绿岩体，从奎松（Quezon）的马拉特高（Malatgao）至巴塔拉萨（Bataraza）的库兰丹（Culandanum）（图 11），主要由地幔方辉橄榄岩、含纯橄榄岩、辉石岩岩墙、中—细粒层状辉长岩、枕状和块状熔岩、凝灰岩和燧石组成，位于始新世 Panas 组浊积岩之上[14,53]。

南巴拉望蛇绿岩典型火山岩包括碱性玄武岩、似高铌（Nb）玄武岩及玻古安山岩系列火山岩[53]。根据南巴拉望蛇绿岩中所含超微化石组合特征，时代确定为早白垩世阿普第期至阿尔必期[54]。Dycoco 等[55]对其中橄榄石辉长岩和正长岩样品中的锆石进行 U－Pb 测年，平均年龄分别为（100.73±1.07）Ma 和（102.97±1.07）Ma，与超微化石年龄吻合，属早白垩世晚期。

4.2　中巴拉望蛇绿岩

中巴拉望蛇绿岩，从普林塞萨港（Puerto Princesa）地区的乌鲁根湾延伸至纳拉（Narra）的卡拉塔加斯（Calategas）（图 11）。其主要成分为方辉橄榄岩夹纯橄榄岩透镜体、侵入辉绿岩和辉石岩类岩墙、中—粗粒层状枕状和块状熔岩夹燧石和泥岩，其变质基底角闪岩、石榴石角闪岩、绿片岩和蓝晶石片岩代表中巴拉望蛇绿岩等。

中巴拉望蛇绿岩露头构成较完整的蛇绿岩序列，其岩性表现出不同的地球化学特征，构造环境从



据文献[53]修编。

图 11　南、中巴拉望蛇绿岩分布图

Fig.11　Distribution of ophiolites in South-Central Palawan

洋中脊(MOR)到俯冲带上板块(SSZ)[56]。对中巴拉望蛇绿岩中火山岩地球化学特征研究[53]认为,这些火山岩具有类似弧后盆地玄武岩(BABB)特征,是亏损MORB地幔部分熔融的产物。其中角闪岩、石榴石角闪岩中角闪石和白云母$^{40}Ar-^{39}Ar$年龄为(34.2±0.6)Ma[56],斜长花岗岩U-Pb锆石年龄为(35~34)Ma[53,56]。最近Dycoco等[55]提供^{207}Pb校正的斜长花岗岩U-Pb锆石平均年龄为(40.01±0.54)Ma,因此中巴拉望蛇绿岩应形成于晚始新世弧后盆地。

5 讨论

5.1 南沙海槽—西北巴拉望构造特征

北巴拉望块体被认为具亲华南大陆特征,与礼乐之间属同一地块,是南海扩张过程中裂离华南大陆,这已从各种地质与地球物理特征得到证实。西北巴拉望海域地震揭示不存在古俯冲带[29]。因此,将南沙海槽—西北巴拉望海域看作南海南缘的俯冲消亡边界[19-20],显然不合适。同样,古南海俯冲消亡的位置必然在北巴拉望的东南侧,残余洋壳仰冲至南巴拉望之上[57]。不论是地形地貌、重磁异常特征,还是地质构造特征,南沙海槽往东北无法延至西北巴拉望海域,巴拉巴克断裂和美济礁断裂的走滑作用对两者起到应力的调节作用。因此,将南沙海槽—西北巴拉望海域整体作为南海南缘逆冲边界是不合适的。

南沙海槽地壳明显减薄,西南端地壳极薄,与正常洋壳相当,前人推测可能属古南海的残余[7,32]。南沙地块整体为减薄的陆壳,其上发育一系列与西南海盆扩张中心平行的减薄带,南沙海槽是最深的一条(图4)。这一系列深的减薄带可能与西南海盆扩张有关,很可能是扩张前裂谷发育的结果。

从地震剖面来看,地壳减薄带大致对应于基底裂谷带,南沙海槽下部地层主要发育铲状断层和半地堑等拉张构造[57],显然不具俯冲构造特征,不可能代表古俯冲带位置[29]。因此,南沙海槽极薄地壳不应是古南海俯冲消亡的残余,而可能是新生代发育最深的裂谷,其西南段地壳厚度与洋壳相当,可看作夭折的扩张中心。

5.2 南沙海槽东南缘与西北巴拉望海域变形对比

地震剖面揭示,南沙海槽的逆冲推覆作用出现在T_3或MMU之后[45],至今仍在活动,南沙地块与婆罗洲之间现在仍处于挤压状态,表明南沙海槽的逆冲挤压与南海扩张无关,是扩张停止后挤压的结果。南沙海槽不是古南海俯冲消亡的缝合线,这表明南海扩张时古南海的俯冲消亡应在其南侧。卢帕尔线白垩纪蛇绿岩可能是古南海消亡的缝合线,但与南海扩张无关,因为被认为是俯冲增生楔的Rajang群深海沉积,在始新世约37 Ma已隆升,表明南海扩张前曾母地块与北婆罗洲已经碰撞。廷贾线东北地块(块体)被认为是古南海俯冲增生楔的Crocker群深水沉积,时代从晚始新世至早中新世[58],与南海扩张时间吻合。

西北巴拉望海域的挤压,形成Pagasa楔,介于晚渐新世—早中新世Nido灰岩与早中新世Tabon灰岩之间,Nido灰岩和Tabon灰岩可以对楔体的形成年龄提供较好的约束。Nido灰岩的顶部和Tabon灰岩的底部将楔体的发育限定在18~7 Ma之间。Aboabo-A1井,Tabon灰岩的底部直接位于楔形上,其年代约9 Ma[21],Tabon灰岩为楔体变形结束的年龄提供更合理的约束(9 Ma)[21,49]。因此,Pagasa楔是南海扩张即将停止和停止后挤压的结果,即南海南部的南沙地块与其南部地块(卡加延脊?)的碰撞导致南海扩张停止,并在停止扩张后的相当长时间持续挤压,形成Pagasa楔。

两者变形特征表明,东部变形结束时间较早,9 Ma以后挤压作用停止,随后出现张性特征,发育正断层,而西部的南沙海槽至今仍处于活动中。这表明不仅南海扩张是从东往西,南海南缘碰撞导致扩张停止以及停止后的挤压作用也可能从东往西。其间巴拉巴克断裂和美济礁断裂起到应力调节作用。东段挤压作用停止可能与南海板片往东沿马尼拉海沟俯冲于菲律宾群岛之下有关。

5.3 南海南缘巴拉望蛇绿岩成因

巴拉望蛇绿岩的构造成因尚有较大争议,有多种不同的解释,有认为属卡加延脊弧前盆地[59]或弧后盆地(古南海)的一部分[60],也有认为是俯冲过程圈闭于卡加延脊弧前的年轻洋壳岩石圈[56]。因中、南巴拉望蛇绿岩特征与形成时代不同,一种观点认为两者来自不同的洋壳[23,57],另一观点认为两者代表存在于白垩纪—始新世的单一洋壳岩石圈[55]。

Liu等[59]提出的双板块模型,认为巴拉望和西北苏禄海基底的蛇绿岩,以及三宝颜发现的蛇绿岩,都是古苏禄海的残余。古苏禄海是白垩纪—始新世洋壳岩石圈,位于古南海的南测。古南海往南俯冲于古苏禄海之下,形成卡加延洋脊和东南苏禄海盆,

蛇绿岩就位于晚始新世—早渐新世。这似乎可以解释不同时代的蛇绿岩并置现象，但其中不合理的推测太多。该模型要求巴拉望以南存在两个时代不同的洋壳，北部紧邻巴拉望岛的是白垩纪的古南海，南部为始新世的古苏禄海。晚始新世—早渐新世，古南海洋壳俯冲于古苏禄海洋壳之下，同时其南侧扩张形成现在的苏禄海洋壳，该机制极不合理。

鉴于上述双板块模型的不合理性，Dycoco 等[55]更趋向于支持单一洋壳岩石圈模型，将中、南巴拉望始新世和白垩纪蛇绿岩看作同一洋壳的产物，认为中、南巴拉望蛇绿岩可能代表白垩纪古南海内的始新世弧后盆地。印—澳板块往北俯冲于古南海洋壳之下，导致洋内扩张形成弧后盆地。这种洋—洋俯冲以及洋壳内再扩张形成弧后盆地的机制，显然与常理不符。

Gibaga 等[53]对中、南巴拉望蛇绿岩中岩浆岩地球化学和同位素特征进行详细研究认为，两者不仅年龄不同，其地球化学特征也明显有别。中巴拉望蛇绿岩中火山岩具有弧后盆地玄武岩地球化学特征，是亏损 MORB 地幔部分熔融而成；南巴拉望蛇绿岩熔岩表现为地球化学大幅度的变化；这进一步支持了巴拉望岛存在两种蛇绿岩。中巴拉望蛇绿岩代表晚始新世古南海俯冲的弧后盆地的碎片，而南巴拉望蛇绿岩代表早白垩世俯冲地质体的残余。

白垩纪—始新世蛇绿岩不仅出现在婆罗洲北部和中、南巴拉望，而且在巴拉望东北—东部多地出露。民都洛岛中央山脉出露 3 条蛇绿岩带：白垩纪 Mangyan、始新世的 Lubang-Puerto Galera 和中渐新世 Amnay 蛇绿岩体[52]。班乃岛的安蒂克山脉出露晚白垩世安蒂克蛇绿岩，与民都洛晚白垩世的 Puerto Galera 蛇绿岩可对比[61]。因此，晚白垩世—始新世蛇绿岩不仅从婆罗洲东北的沙巴延伸至中、南巴拉望[12,50]，而且延伸至巴拉望东北的民都洛和班乃岛，横跨整个南海南缘。

南巴拉望蛇绿岩与中巴拉望蛇绿岩不仅年代不同，成分也明显有别。南巴拉望蛇绿岩中典型火山岩包括碱性玄武岩、似高铌玄武岩及玻古安山岩系列火山岩等，而中巴拉望蛇绿岩中火山岩具有类似弧后盆地玄武岩(BABB)特征[53]。中巴拉望蛇绿岩在增生阶段(渐新世)以倾向南变形为主[49]，表明洋壳很可能是由南往北俯冲。因此，我们更趋向于认为两者来自不同洋壳，但与 Liu 等[59]不同，我们认为南巴拉望蛇绿岩来自新特提斯洋壳，中巴拉望蛇绿岩来自古南海洋壳。不同时期洋壳俯冲残余最终被逆冲至岛弧系之上。

中、南巴拉望蛇绿岩可能是长期往北推覆的结果。蛇绿岩覆盖于 Pagasa 楔东南之上[49]，其最后运动时间与 Pagasa 楔形成时间相当。

6　结论

综合南海南缘地质地球物理资料分析表明，理清南沙海槽—西北巴拉望构造特征对南海成因机制的认识极为重要。本次取得以下结论：

1)南海南部南沙海域整体为较薄陆壳，发育一系列与西南海盆扩张中心平行的减薄带，南沙海槽是最深的一条，这可能表明南沙海槽极薄地壳不是古南海的残余，而是夭折的扩张中心。

2)南沙海槽存在挤压逆冲作用，但不是古南海俯冲消亡的缝合线，其形成时间很晚，与南海扩张无关，是南海形成后挤压的结果。南沙海槽挤压作用与西北巴拉望 Pagasa 楔变形对比表明，南海南缘的挤压作用可能存在由东往西的迁移特征。

3)中、南巴拉望蛇绿岩是其南部往北逆冲的产物，可能表明古南海由南往北俯冲，不同性质的洋壳可能来自不同洋壳，认为南巴拉望蛇绿岩来自新特提斯洋壳，中巴拉望蛇绿岩来自古南海洋壳。不同时期洋壳俯冲残余最终被逆冲至岛弧系之上。巴拉望蛇绿岩是长期由南往北逆冲的结果，最后就位时间可能是中晚中新世。

参考文献(References)：

[1] 秦绪文，石显耀，张勇，等. 中国海域 1∶100 万区域地质调查主要成果与认识[J]. 中国地质，2020，47(5)：1355－1369.
Qin Xuwen，Shi Xianyao，Zhang Yong，et al. Main Achievements and Understanding of 1∶1 Million Regional Geological Survey of China Seas[J]. Geology in China，2020，47(5)：1355－1369.

[2] 汪品先. 大洋钻探与中国的海洋地质[J]. 海洋地质与第四纪地质，2019，39(1)：7－14.
Wang Pinxian. Ocean Drilling and Marine Geology in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology，2019，39(1)：7－14.

[3] 李春峰，周多，李刚，等. 西太平洋地球动力学问题与未来大洋钻探目标[J]. 地球科学，2021，46(3)：759－769.
Li Chunfeng，Zhou Duo，Li Gang，et al. Geodynamic

Problems in the Western Pacific and Future Scientific Drill Targets[J]. Earth Science, 2021, 46(3):759-769.

[4] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan Red River Metamorphic Belt: Tertiary Left-Lateral Shear Between Indochina and South China [J]. Nature, 1990, 343: 431-437.

[5] Replumaz A, Tapponnier P. Reconstruction of the Deformed Collision Zone Between India and Asia by Backward Motion of Lithospheric Blocks[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 2285.

[6] Holloway N H. North Palawan Block, Philippines: Its Relation to Asian Mainland and Role in Evolution of South China Sea[J]. AAPG Bull, 1982, 66(9): 1355-1383.

[7] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia [J]. Geological Society London Special Publication, 1996, 106(1): 153-184.

[8] 李学杰, 王哲, 姚永坚, 等. 南海成因及其演化模式探讨[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1310-1322.
Li Xuejie, Wang Zhe, Yao Yongjian, et al. The Formation and Evolution of the South China Sea[J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1310-1322.

[9] Hesse S, Back S, Franke D. The Structural Evolution of Folds in a Deepwater Fold and Thrust Belt: A Case Study from the Sabah Continental Margin Offshore NW Borneo, SE Asia [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 442-454.

[10] 陈雪, 林进峰, 许时耕. 南沙海槽南缘逆掩推复构造地区的动力学分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 73-85. Doi: 10.3321/j.issn:0253-4193.2002.01.010.
Chen Xue, Lin Jinfeng, Xu Shigeng. Dynamic Analysis of Nappe Structure Region in the Southern Margin of the Nansha[J]. Act Oceanologica Sinica, 2002, 24(1): 73-85. Doi: 10.3321/j.issn:0253-4193.2002.01.010.

[11] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The Final Rifting Evolution in the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 58: 704-720. Doi: 10.1016/j.marpetgeo.2013.11.020.

[12] Cullen A B. Transverse Segmentation of Baram-Balabac Basin, NW Borneo: Refining the Model of Borneo's Tectonic Evolution [J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(1):3-29.

[13] Hutchison C S. The North-West Borneo Trough[J]. Marine Geology, 2010, 271: 32-43.

[14] Aurelio M A, Forbes M T, Taguibao K J L, et al. Middle to Late Cenozoic Tectonic Events in South and Central Palawan (Philippines) and Their Implications to the Evolution of the Southeastern Margin of South China Sea: Evidence from Onshore Structural and Offshore Seismic Data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 658-673.

[15] Haile N S. The Recognition of Former Subduction Zones in Southeast Asia[C]//Tarling D H, Runcorn S K. Implications of Continental Drift to the Earth Sciences. London: Academic Press, 1973: 885-891.

[16] Hamilton W. Tectonics of the Indonesian Region 1078[C]//U S. Geological Survey Professional Paper. Washington D C: USGS, 1979: 1-345.

[17] Hinz K, Frisch J, Kempter E H K, et al. Thrust Tectonics Along the Continental Margin of Sabah, Northwest Borneo [J]. Geologische Rundschau, 1989, 78: 705-730.

[18] Sapin F, Pubellier M, Lahfid A, et al. Onshore Record of the Subduction of a Crustal Salient: Example of the NW Borneo Wedge[J]. Terra Nova, 2011, 23: 232-240.

[19] Ramkumar M, Santosh M, Nagarajan R, et al. Late Middle Miocene Volcanism in Northwest Borneo, Southeast Asia: Implications for Tectonics, Paleoclimate and Stratigraphic Marker [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 490: 141-162.

[20] Zheng H, Sun X M, Wang P J, et al. Mesozoic Tectonic Evolution of the Proto-South China Sea: A Perspective from Radiolarian Paleobiogeography[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 179: 37-55.

[21] Steuer S, Franke D, Meresse F, et al. Oligocence-Miocene Carbonates and Their Role for Constraining the Rifting and Collision History of the Dangerous Grounds, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 644-657.

[22] Barckhausen U, Engels M, Franke D, et al. Evolution of the South China Sea: Revised Ages for Breakup and Seafloor Spreading [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 599-611.

[23] Hutchison C S. The Southeast Sulu Sea, a Neogene Marginal Basin with Outcropping Extensions in Sabah [J]. Bull Geol Soc Malaysia, 1992, 32: 89-108.

[24] Tan D N K, Lamy J M. Tectonic Evolution of the NW Sabah Continental Margin Since the Late Eocene [J]. Bull Geol Soc Malaysia, 1990, 27: 241-260.

[25] Hall R. Late Jurassic-Cenozoic Reconstructions of the

Indonesian Region and the Indian Ocean [J]. Tectonophysics, 2012, 570/571: 1-41.

[26] Morley C K. Major Unconformities/Termination of Extension Events and Associated Surfaces in the South China Seas: Review and Implications for Tectonic Development [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 120: 62-86.

[27] Hall R. Contraction and Extension in Northern Borneo Driven by Subduction Rollback[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76: 399-411.

[28] Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural Styles in the Deep-Water Fold and Thrust Belts of the Niger Delta [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2005, 89: 753-780.

[29] Hesse S, Back S, Franke D. The Deep-Water Fold-and-Thrust Belt Offshore NW Borneo: Gravity-Driven Versus Basement-Driven Shortening[J]. GSA Bulletin, 2009, 121: 939-953.

[30] Morley C K. Interaction Between Critical Wedge Geometry and Sediment Supply in a Deep-Water Fold Belt[J]. Geology, 2007, 35: 139-142.

[31] Chang S P, Jamaludin S N F, Pubellier M, et al. Collision, Mélange and Circular Basins in North Borneo: A Genetic Link? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 181: 1-13.

[32] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996,16(2): 1-13.
Yao Bochu. Tectonic Evolution of the South China Sea in Cenozoic[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(2): 1-13.

[33] 苏达权，黄慈流，夏戮原. 论南沙海槽的地壳性质[J]. 地质学报, 1996, 31(4): 309-415.
Su Daquan, Huang Ciliu, Xia Kanyuan. The Crust in the Nansha Trough[J]. Scientia Geologica Sinica, 1996, 31(4): 309-415.

[34] 姚伯初，万玲，吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 113-122.
Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. Cenozoic Plate Tectonic Activities in the Great South China Sea Area [J]. Geology in China, 2004, 31(2): 113-122.

[35] Hinz K, Block M. Summary of Geophysical Data from the Sulu and Celebes Seas [C]//Rangin C, Silver E. Proceedings, Ocean Drilling Program Initial Reports.TX: College Station, 1990:87-92.

[36] Silver E A, Rangin C. Development of the Celebes Basin in the Context of Western Pacific Marginal Basin History[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program. Texas: Texas A & M University, 1991:39-49.

[37] Pubellier M, Quebral R, Rangin C, et al. The Mindanao Collision Zone: A Soft Collision Event Within a Continuous Neogene Strike-Slip Setting[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 6: 239-248.

[38] Castillo P, Rigby S, Solidum R. Origin of High Field Strength Element Enrichment in Volcanic Arcs: Geochemical Evidence from the Sulu Arc, Southern Philippines[J]. Lithos, 2007, 97: 271-288. Doi: 10.1016/j.lithos.2006.12.012.

[39] Weissel J K. Evidence for Eocene Oceanic Crust in the Celebes Basin[C]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2. Geophysical Monograph: Series 23. Washington: American Geophysical Union,1980:37-47.

[40] Lee C S, McCabe R. The Banda-Celebes-SuluBasin: A Trapped Piece of Cretaceous-Eocene Oceanic Crust? [J]. Nature, 1986, 322: 51-54.

[41] Hall R. Cenozoic Geological and Plate Tectonic Evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer Based Reconstructions, Model and Animations [J]. Journal of Asian Earth Science, 2002, 20: 353-434.

[42] Haston R B, Fuller M. Paleomagnetic Data from the Philippine Sea Plate and Their Tectonic Significance [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96: 6073-6098.Doi:10.1029/90JB02700.

[43] Queano K L, Ali J R, Milsom J, et al. North Luzon and the Philippine Sea Plate Motion Model: Insights Following Paleomagnetic, Structural, and Age-Dating Investigations [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: B05101. Doi: 10.1029/2006JB004506.

[44] Yamazaki T, Takahashi M, Iryu Y, et al. Philippine Sea Plate Motion Since the Eocene Estimated from Paleomagnetism of Seafloor Drill Cores and Gravity Cores[J]. Earth, Planets and Space, 2010, 62: 495-502. Doi:10.5047/eps.2010.04.001.

[45] Cullen A. Nature and Significance of the West Baram and Tinjar Lines, NW Borneo [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 51: 197-209.

[46] Vijayan V R, Foss C, Stagg H. Crustal Character and Thickness over the Dangerous Grounds and Beneath the Northwest Borneo Trough[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76: 389-398.

[47] 韩冰,朱本铎,万玲,等. 南沙海槽东南缘深水逆冲推覆构造[J]. 地质论评,2015,61(5):1061-1067.
Han Bing, Zhu Benduo, Wang Ling, et al. Deep-Water Fold and Thrust Tectonics in Southeastern Nansha Trough[J]. Geological Review, 2015,61(5): 1061-1067.

[48] 王利杰,孙珍,姚永坚,等. 南海东南部陆缘Nido灰岩发育特征及其构造控制因素[J]. 地球科学, 2021,46(3):956-974.
Wang Lijie, Sun Zhen, Yao Yongjian, et al. Development Characteristics of Nido Carbonate Platform and Its Tectonic Controls in the Southeast of South China Sea Margin[J]. Earth Science, 2021,46(3): 956-974.

[49] Ilao K A, Morley C K, Aurelio M A. 3D Seismic Investigation of the Structural and Stratigraphic Characteristics of the Pagasa Wedge, Southwest Palawan Basin, Philippines, and Their Tectonic Implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018,154: 213-237.

[50] Rangin C, Bellon H, Benard F, et al. Neogene Arc-Continent Collision in Sabah, Northern Borneo (Malaysia) [J]. Tectonophysics, 1990, 183: 305-319.

[51] Aurelio M A, Peña R E, Taguibao K J L. Sculpting the Philippine Archipelago Since the Cretaceous Through Rifting, Oceanic Spreading, Subduction, Obduction, Collision and Strike-Slip Faulting: Contribution to IGMA5000 [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 72: 102-107. Doi: 10.1016/j.jseaes.2012.10.007.

[52] Yumul Jr G P, Dimalanta C B, Marquez E J, et al. Onland Signatures of the Palawan Microcontinental Block and Philippine Mobile Belt Collision and Crustal Growth Process: A Review [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34: 610-623.

[53] Gibaga C R L, Arcilla C A, Hoang N. Volcanic Rocks from the Central and Southern Palawan Ophiolites, Philippines: Tectonic and Mantle Heterogeneity Constraints[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 4: 100038. Doi: 10.1016/j.jaesx.2020.100038.

[54] Müller C. Biostratigraphy and Geological Evolution of the Sulu Sea and Surrounding Area[C]// Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Texas: Texas A & M University, 1991:121-131.

[55] Dycoco J M A, Payot B D, Valera G T V, et al. Juxtaposition of Cenozoic and Mesozoic Ophiolites in Palawan Island, Philippines: New Insights on the Evolution of the Proto-South China Sea [J]. Tectonophysics, 2021, 819: 229085. Doi: 10.1016/j.tecto.2021.229085.

[56] Keenan T, Encarnacion J, Buchwaldt R, et al. Rapid Conversion of an Oceanic Spreading Center to a Subduction Zone Inferred from High-Precision Geochronology [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113: 1-8.

[57] Yu M, Dilek Y, Yumul G P, et al. Slab-Controlled Elemental-Isotopic Enrichments During Subduction Initiation Magmatism and Variations in Forearc Chemostratigraphy[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 538: 116217. Doi: 10.1016/j.epsl.2020.116217.

[58] Hutchison C S, Bergman S C, Swauger D A, et al. A Miocene Collisional Belt in North Borneo: Uplift Mechanism and Isostatic Adjustment Quantified by Thermochronology [J]. Journal of the Geological Society, 2000, 157: 783-793.

[59] Liu W N, Li C F, Li J B, et al. Deep Structures of the Palawan and Sulu Sea and Their Implications for Opening of the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 721-735.

[60] Yumul Jr G P, Dimalanta C B, Gabo-Ratio J A S, et al. Mesozoic Rock Suites Along Western Philippines: Exposed Proto South China Sea Fragments? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 4: 100031. Doi: 10.1016/j.jaesx.2020.100031.

[61] Rangin C, Stephan J F, Müller C. Middle Oligocene Oceanic Crust of the South China Sea Jammed into Mindoro Collision Zone, Philippines [J]. Geology, 1985, 13: 425-428.