中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 7 期：2801–2812
论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

花东海盆地球动力学演化与未来大洋钻探选址

赵明辉[1,2*]，朱佳豪[1,2]，张国良[3]，Jean-Claude SIBUET[4]，程锦辉[1*]，钟广法[5]，高红芳[6]

1. 热带海洋环境与岛礁生态全国重点实验室，中国科学院南海海洋研究所，边缘海与大洋地质实验室，广州 510301
2. 中国科学院大学，北京 100049
3. 中山大学海洋科学学院，珠海 519082
4. Ifremer Centre de Brest, Plouzané 29280, France
5. 同济大学海洋地质国家重点实验室，上海 200092
6. 自然资源部海底矿产资源重点实验室，广州海洋地质调查局，广州 510075
* 通讯作者，E-mail：mhzhao@scsio.ac.cn(赵明辉)，jhcheng@scsio.ac.cn(程锦辉)

2025-12-09收稿，2026-03-03修回，2026-03-26接受，2026-06-22网络版发表
国家重点研发计划项目(2024YFF0808201、2025YFE0121400)、 国家自然科学基金项目(91958212、42541601)和国家自然科学基金委员会共享航次项目(NORC2022-08)资助

摘要 中生代西太平洋-东亚地质链接缺失很多构造演化环节，位于菲律宾海板块与欧亚板块结合带的花东海盆，是揭示西太平洋中生代构造演化的关键，其洋盆属性与构造归属因缺乏直接的岩石学证据而长期悬而未决，解决这两个不确定性的唯一途径是开展大洋钻探检验。综合地球物理探测结果显示，花东海盆普遍存在下地壳高速层，地壳厚度(5–7 km)，其结构特征与邻近的新生代西菲律宾海盆不同；加瓜海脊则表现出更厚地壳(12–18 km)与复杂速度结构，其成因存在古扩张脊残留、走滑挤压、俯冲起始等多种假说。这些争议直接制约了对西太平洋中生代—新生代板块重组、俯冲起始及碰撞转换全过程的理解。为解决上述关键科学问题，本文系统整合了研究区深地震探测与历史DSDP钻探资料，提出一个面向中国新一代大洋钻探船“梦想”号的四站位钻探设计方案。站位A(花东海盆中部)以获取基底玄武岩，直接限定洋盆时代；站位B(吕宋岛弧北段)旨在通过沉积序列解析南海与花东海盆的俯冲-碰撞转换过程；站位C(加瓜海脊脊部)与站位D(加瓜海脊东侧盆地)则聚焦揭示加瓜海脊成因及其与花东海盆的构造关系。方案强调沉积序列全取芯与基底岩石取样相结合，以期实现“构造属性-形成时代-演化历史”系统化的科学突破。花东海盆钻探计划不仅是验证西太平洋中生代洋壳残留、阐明板块俯冲-碰撞转换机制的关键科学行动，更是中国依托“梦想”号自主装备主导新一轮国际大洋钻探、抢占西太平洋深部探测制高点的重要机遇，具有重大科学意义。

关键词 花东海盆，加瓜海脊，深地震探测，构造演化模式，站位设计

1 引言

西太平洋是全球洋内俯冲带最为密集的海区，大量大洋岩石圈在此俯冲消亡。同时，西太平洋发育了全球70%以上的边缘海盆，处于特提斯构造域与太平洋构造域的交汇处，两大构造域的叠加效应使得该区域的深部结构和动力学过程极为复杂(丁巍伟等，2023)。花东海盆位于菲律宾海板块(Philippine Sea Plate，PSP)与欧亚板块的交汇处，是西太平洋残留的一个中生代时期形成的洋盆(Deschamps等，2000)(图1和2)。东亚大陆在晚中生代也发生了从主动向被动大陆边缘变化的重大构造转换事件(Zhou和Li，2000)，但是中生代时期俯冲大洋板块的存在及其属性还缺少来自岩石样本的直接证据。因此，花东海盆可能是揭示中生代俯冲洋壳性质的一把钥匙，

中文引用格式：赵明辉, 朱佳豪, 张国良, Sibuet J C, 程锦辉, 钟广法, 高红芳. 2026. 花东海盆地球动力学演化与未来大洋钻探选址. 中国科学: 地球科学, 56(7): 2801–2812, doi: 10.1360/SSTe-2025-0430
英文引用格式：Zhao M, Zhu J, Zhang G, Sibuet J C, Cheng J, Zhong G, Gao H. 2026. Geodynamic evolution of the Huatung Basin and future ocean drilling sites selection. Science China Earth Sciences, 69(7): 2750–2761, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1915-0

© 2026《中国科学》杂志社

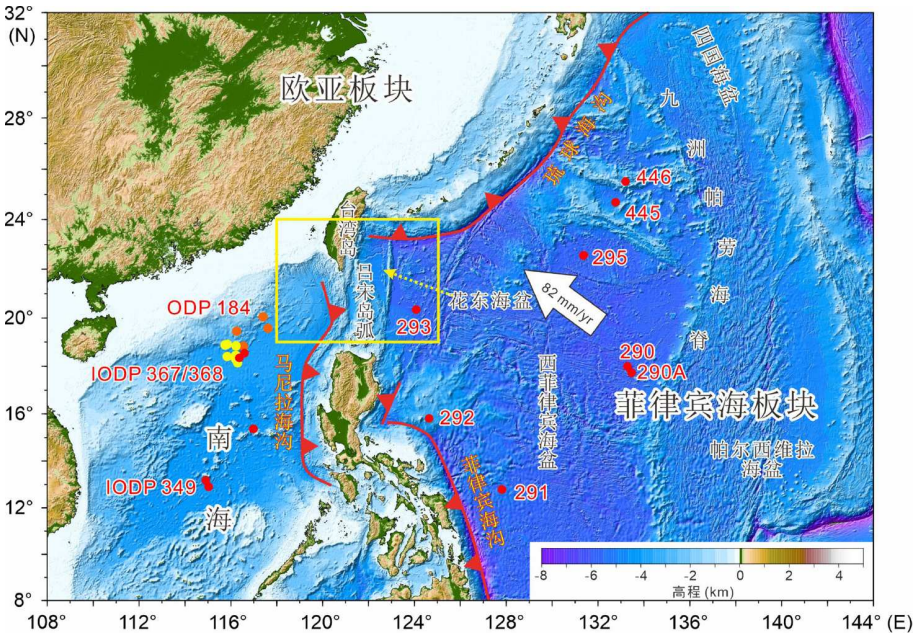


图 1　花东海盆水深图及周边DSDP钻探位置图。黄色方框为图2范围，菲律宾海板块的红色圆点为DSDP钻孔位置(位置来源：Karig等，1975；deVries Klein等，1980；Kroenke等，1980)，南海区域的圆点代表ODP-Leg184(橙色)、IODP-Leg349(红色)、IODP-Leg367/368(黄色)航次的钻孔位置(位置来源：Wang等，2000；Li等，2014；Jian等，2018；Sun等，2018)，红色数字代表DSDP站位号，白色箭头代表板块运动方向及速度(Hsu等，2016)，水深数据来自全球海洋等深图GEBCO项目中的GEBCO_2025全球海洋等深网格数据(https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data)

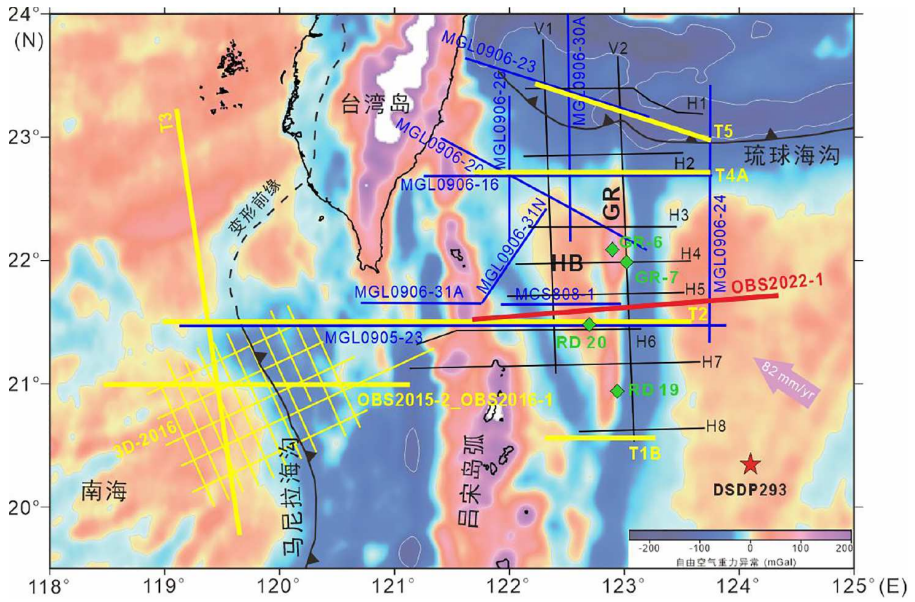


图 2　花东海盆区域深地震测线位置与自由空间重力异常图。黄色粗实线代表二维深地震折射测线位置，黄色细实线代表三维深地震折射测线位置，红色粗实线为OBS2022-1测线，黑色实线代表广州海洋地质调查局实施的多道反射地震测线，蓝色实线代表TAIGER计划实施的多道反射地震测线(TAIGER计划实施的多道反射地震测线数据已在网络公开，网址https://www.marine-geo.org/，本文后续引用相关数据将不再说明)，MCS808-1测线来自Hsu等(2021)，绿色菱形代表取样点(RD19与RD20据Deschamps等(2000)；GR-6与GR-7据Qian等(2021)与Zhang等(2022))，紫色箭头代表板块运动方向及速度(Hsu等，2016)，红色五角星代表DSDP293站点。自由空气重力异常底图数据来自IGPP全球自由空气重力异常网格模型(Sandwell等，2019))。图中缩写：GR，加瓜海脊；HB，花东海盆

在全球板块构造恢复及地球动力学过程中占有举足轻重的地位。在地理位置上，花东海盆位于中国台湾岛东南部海域(约19°–24°N，120°–123°E)，面积约2.23×10^4 km^2，呈长轴南北向的菱形海盆，宽约150 km，长约

250 km，北深南浅(2000–4500 m)(图2)，与台湾岛东部的海岸山脉和北吕宋岛弧相连(Queaño等，2013；黄奇瑜，2017)；其东面是加瓜海脊(Gagua Ridge)(123°E)(Deschamps等，1998)；北面沿琉球海沟向欧亚陆缘俯冲(Gutscher等，2016)，周围被南海、西菲律宾海盆、冲绳海槽等众多新生代洋盆环绕(李春峰等，2007)。

在新生代时期，PSP插入至欧亚板块与太平洋板块之间，为重建中生代时期太平洋板块与欧亚板块两者的构造演化关系带来一定难度与不确定性。古地磁数据指示，在白垩纪时期PSP位于赤道附近(Queaño等，2009，2013；Balmater等，2015)，花东海盆作为PSP楔形体的前锋(Wu等，2016)，随后沿着巨型剪切带一起向北移动，相对于欧亚板块位移近2200 km，运行到现今的位置(Hall等，1995；Lee和Lawver，1995；Hall，2002；Queaño等，2007；Wu等，2016)。充当PSP楔形体前锋的花东海盆(Huang等，2019)，是揭示西太平洋俯冲构造体系地球动力学演化的关键突破口。

大洋钻探计划在国际地球科学发展中起着重要的引领作用(林间等，2017)，中国加入大洋钻探计划以来，成功地在南海实施了“4+1”次的大洋钻探计划(图1)，包括ODP184、IODP349、IODP367/368/368X航次，确立了中国在南海研究中的主导权(汪品先，2018，2019)；未来中国将以更大规模开展大洋钻探的研讨与设计工作(翦知湣，2018；汪品先，2019)。中国自主设计建造的首艘大洋钻探船“梦想”号于2024年在广州正式入列，为未来钻探提供了历史性机遇。其具备全球海域无限航区作业(最大工作水深11000 m)，最大钻探深度可达海底11000 m，同时具备连续完整取芯能力、井下观测设备以及先进的实验室配置(Sun等，2025)，借助其先进的科考能力，新十年阶段的国际大洋钻探计划即将启动。由中国牵头的新一轮国际大洋钻探计划，更是时代赋予我们的责任，这将推动中国与其他国际大科学计划的深度合作。中生代是地球历史演化进程中的关键时期(Sun等，2007)，但是关于中生代时期形成的洋盆研究却很少。花东海盆成为未来大洋钻探的潜在目标与优先区域(李春峰等，2007；黄奇瑜，2017)，需要我们提前开展综合地质地球物理调查与研究，提前优选钻探井位，早日实施打钻，为人类共同探索花东海盆与地球奥秘贡献中国智慧和中国力量。

本文综述了花东海盆综合深地震探测取得的亮点成果，概述了深海钻探计划(DSDP)的现状，阐明了花东海盆地球动力学演化的构造意义，指出当前关于花东海盆年龄和构造属性的认识，主要依赖地球物理探测数据和周边海域拖网样品的分析，仍存在较大的不确定性，而实施大洋钻探是解决这些科学问题的关键途径。本文研究不仅对东南亚中生代演化及板块构造重建这一科学前沿至关重要，而且服务于西太平洋中生代深海油气资源勘探需求。

2 花东海盆综合地球物理探测成果

2.1 探明了花东海盆与加瓜海脊的岩石圈结构与速度空间分布特征

花东海盆海域的深地震探测主要包括2009年中国台湾省与美国、法国合作开展的TAIGER计划(Taiwan Integrated Geodynamic Research)所实施的测线(T1B、T2、T3、T4A和T5)，以及国家自然科学基金委地球物理共享航次分别于2015年、2016年及2022年实施的OBS2015-2、OBS2016-1和OBS2022-1测线(图2)(赵明辉等，2026)。OBS2022-1测线全长270 km，大致呈东西走向，由中国科学院南海海洋研究所使用“实验6”号科考船于2022年7月实施，航次期间共部署了30台便携式海底地震仪(Ocean Bottom Seismometer，OBS)，数据质量良好，速度结构模拟正在处理中，结果还未发表。TAIGER计划中，T1B、T2、T4A和T5深地震折射测线(图2)分别穿过了花东海盆与加瓜海脊(图3)，4条测线探测结果(Eakin等，2014，2015；庞新明等，2019)为该区研究提供了重要的深部结构信息，揭示花东海盆具有正常的洋壳厚度(5–7 km)，加瓜海脊地壳较厚(12–18 km)，两侧表现为西缓东陡的不对称结构。然而由于速度模拟方法限制，这4条测线结果并没有给出莫霍界面，关于花东海盆的地壳结构特征有待进一步梳理。

高分辨率的多道反射地震剖面(图4)显示，花东海盆内部结构极其复杂。此处重点展示两条相互交叉的多道地震测线解释结果(MGL0906-16与MGL0906-26)，测线位置见图2。研究发现，东西向MGL0906-16和南北向MGL0906-26的地震剖面均可以清楚地识别出，花东海盆沉积基底上方存在4套沉积层序，图4中以X、Y、Z三条实线标示。最底部的一层(层序S1)厚度约1–1.5 km，地震相显示出强振幅的连续平行、亚平行反射，代表花东海盆最古老的远洋沉积序列，一般远洋沉积速率为10 m/Ma(Hsieh等，2025)，推测该沉积基底为早白垩世年龄(Deschamps等，2000；Hsu等，2021)。远洋沉积序列之上(层序S2)为块体搬运沉积，代表了吕宋岛弧的主要生长阶段，其主要火山活动发生在6–12 Ma，高振幅的地震反射表明其成分主要为粗粒物质。其上部的沉积序列(层序S3)也是块体搬运，S2与S3两套层序之间存在阻抗差异，层序S3主要呈现低振幅的混杂地震相，表明物

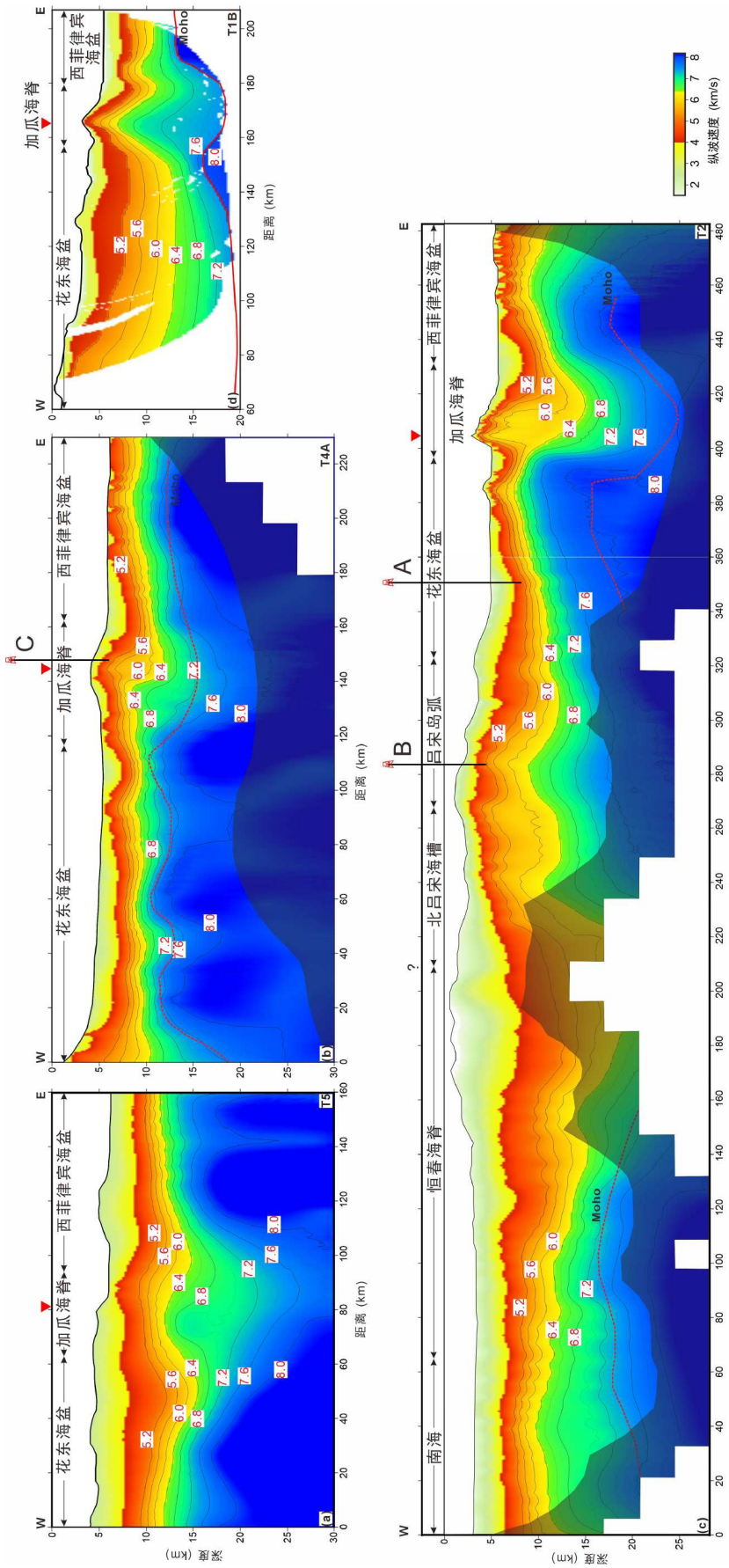
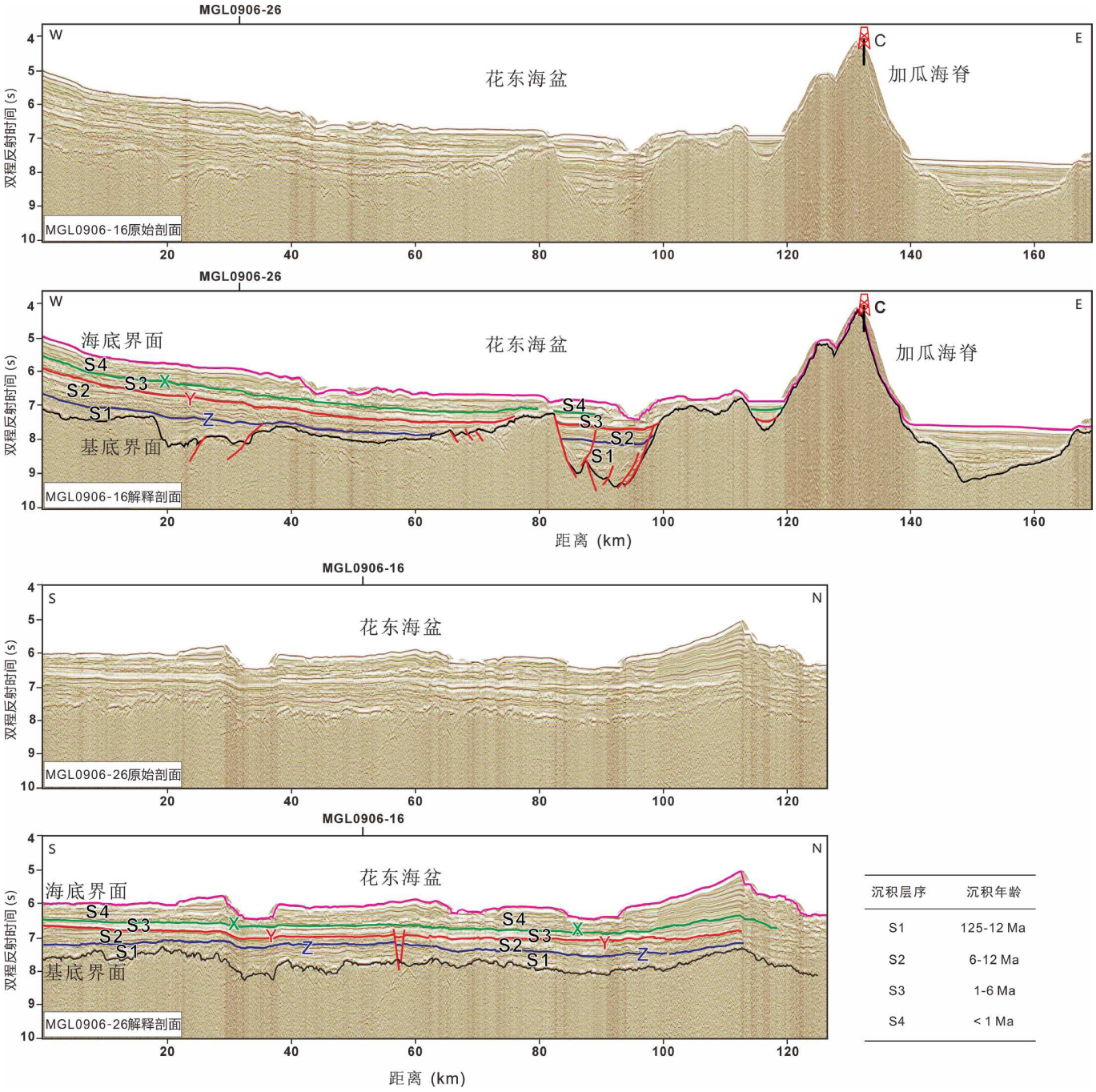


图 3　研究区T1B、T2、T4A和T5速度结构剖面图。T5(a)、T4A(b)、T2(c)、T1B(d)剖面位置见图2。(a–d)为测线从南到北排列顺序。图中红色三角形位置代表加瓜海脊最高点，红色虚线代表T2、T4A测线反演Moho面位置，红色实线代表T1B测线正演Moho面位置，带红色箭头的黑色实线代表设计钻孔在剖面上的位置。图中的阴影部分代表无射线覆盖区域，该区域速度存在多解性。T1B测线的速度结构模型据庞新明等(2019)，T2、T4A与T5测线的速度结构模型据Eakin等(2014，2015)。为了清晰展示研究区速度结构特征，本研究统一了4条测线速度结构模型的比例尺与色标



沉积层序	沉积年龄
S1	125-12 Ma
S2	6-12 Ma
S3	1-6 Ma
S4	< 1 Ma

图 4 花东海盆区域多道地震剖面解释图。多道反射地震剖面MGL0906-16和MGL0906-26位置见图2，S1–S4为四个沉积层，X、Y、Z为层界面(据Hsieh等，2025)，红色粗实线为断层，带红色箭头的黑色实线代表设计钻孔在剖面上的位置。剖面展示的花东海盆四套沉积层序，其年代解释仍存争议(Hsu等，2021；高红芳等，2025)。

质成分主要为细粒物质并且这些细粒物质规模较小，含有部分台湾造山带远距离搬运而来的物质(Hsu等，2021)。顶部最年轻的层序S4，地震相多样，包括高连续发散结构地震相(海底扇)、低振幅或高振幅超覆充填地震相(海底峡谷)以及混杂地震相(Hsu等，2021)；该层序沉积物多来自台湾山脉搬运沉积，主要沉积于1 Ma之后(Hsieh等，2025)。

现今的花东海盆不仅受到东部菲律宾海板块向西北方向的挤压，还受到西部马尼拉俯冲带的东向挤压，盆地内发育断层、褶皱和基底卷入等构造变形，表明花东海盆正在经历着构造缩短和增厚作用。这些结果(图3和4)为花东海盆的地质属性研究提供了重要地球物理依据。

然而，关于剖面展示的花东海盆四套沉积层序(图4)，其年代解释仍存争议(Hsu等，2021；高红芳等，2025)，迫切需要大洋钻探来证实。

2.2　加瓜海脊年龄与成因机制

利用花东海盆已有的拖网辉长岩样品(R19和R20)，样品位置(图2)参考航次报告(Mrozowski等，1982；Evans和Lewis，1984)，两个拖网岩石样品的测年结果较为接近，其单矿物$^{40}Ar/^{39}Ar$测年为131–119 Ma(Deschamps等，2000)和130 Ma(Huang等，2019)，因而推断花东海盆年龄为早白垩纪。近年来，利用在加瓜海脊中间部位上获取的拖网/浅钻样品(图2)有了最新进展。有的研究认为，加瓜海脊火山岩是具有典型岛弧火山岩特征的安山岩，$^{40}Ar/^{39}Ar$测年结果为123–124 Ma，推断由于华夏地块在新生代时向东俯冲，加瓜海脊可能具有从欧亚大陆边缘断裂的大陆碎片，呈现出改造过的具有岛弧性质的地球化学特征(Qian等，2021)；Sibuet等(2021，2024)证实，这种华夏地块可能在南海打开期间首先向南漂移，然后在加瓜海脊下方向东俯冲。而张国良等研究认为，加瓜海脊是形成于早白垩纪时期(131–119 Ma)的洋内岛弧，岛弧岩浆源区主要来自俯冲沉积物和弧下地幔楔的相互作用，指出该区早白垩时期存在太平洋型地幔(Zhang等，2022)。虽然上述研究的样品采自加瓜海脊中部，其测定的年龄并不是花东海盆的真实年龄；但如果加瓜海脊确实是晚于花东海盆形成的洋内岛弧，可以推断花东海盆至少为中生代时期形成的洋盆。因此，加瓜海脊年龄解释主要是由新生代向东俯冲(Qian等，2021)或中生代向西俯冲(Zhang等，2022)形成的。

加瓜海脊的成因机制长期存在争议，目前尚未形成统一认识。其主要假说可归纳为以下三类：(1) 古扩张脊残留假说。认为加瓜海脊是古太平洋板块或西菲律宾海盆早期扩张脊的残留片段(Hilde和Lee，1984；Deschamps等，2000)，然而，该假说难以解释海脊两侧缺乏对称磁条带且其走向与周围新生代海盆扩张方向不协调的问题。(2) 走滑断层伴生的挤压脊。加瓜海脊作为微板块边界，是在走滑运动中形成的挤压脊，造成地壳明显增厚(12–18 km)(Deschamps等，1998)。(3) 俯冲起始构造假说。Eakin等(2015)基于速度结构，提出其可能在板块重组过程中由于向西俯冲夭折而形成的地壳增厚带(图3)；这种高密度、厚地壳特征，与伊豆–小笠原–马里亚纳(IBM)系统早期俯冲带相似，且该区域曾存在向西俯冲的中生代洋壳(Lallemand，2016)。然而，该假说缺乏清晰的弧前盆地或增生楔等伴随构造的直接证据。加瓜海脊的成因争议本质上是其构造属性(洋壳残片、走滑挤压、俯冲起始)与形成年龄的不确定性。这些争议直接影响对花东海盆打开机制、西菲律宾海盆早期演化以及欧亚–菲律宾海板块动力学演化过程的解释。

3　花东海盆与相邻菲律宾海盆的深海钻探结果

国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program，IODP，2013–2023)实施以来，至今还没有在花东海盆、加瓜海脊以及西菲律宾海盆实施。追溯大洋钻探的起源，其始于1957年W. Munk提出的“莫霍钻”建议。随后1968年，启动“深海钻探计划(Deep Sea Drilling Program，DSDP，1968–1983)”，依托“格罗码·挑战者”号大洋钻探船，在计划实施的15年期间开展了96个航次的钻探工作，验证了海底扩张说和板块构造说的基本论点，极大地推动了海洋地质学的发展(吴能友等，2025)。“深海钻探计划”曾在西太平洋实施DSDP-Leg31、DSDP-Leg58和DSDP-Leg59航次的钻探工作，而除上述航次之外，花东海盆与西菲律宾海盆未开展过任何大洋钻探工作。以下重点介绍这3个航次在西菲律宾海盆的站位情况。

DSDP-Leg31航次(执行期间为1969年6–8月)的科学目标包括：验证西菲律宾海盆和日本海盆的起源假说，确定菲律宾海及其周围主要地质事件的时间，更好地了解西太平洋岛弧的形成过程(Ingle等，1975)。菲律宾海盆的钻探主要围绕菲律宾海的起源和演化这一重大科学问题，共完成了6个站位8口钻孔(表1和图1)。该航次钻遇了基底玄武岩，确定了西菲律宾海盆的形成年代(60–37 Ma)，明确了菲律宾海板块在不同年代时的板块位置(Karig等，1975)。距离花东海盆研究区最近的293钻孔(图1)，其玄武岩年龄为42 Ma。

DSDP-Leg58和DSDP-Leg59航次执行于1977–1978年，共完成了10个站位15口钻孔(表1和图1)，其中2个站位(445，446)分布于大东盆岭区、1个站位(447)位于西菲律宾海盆东部(表1)。其钻孔的科学目标主要包括：确定大东盆岭区的洋壳基底的年龄，确定岛弧和弧后盆地的起源与形成时间；确定大东盆岭区沉积事件与该区构造演化的关系(deVries Klein等，1980；Kroenke等，1980)。大东盆岭区445和446站位岩石的古地磁数据表明，大东盆岭区约50 Ma以来从赤道附近向北漂移了2000 km，西菲律宾海盆扩张是在大东盆岭和冲大东盆岭的残留岛弧形成以后开始发生。在第三纪早期，西菲律宾海盆在冲大东盆岭的后方张开，以中央洋脊为中心对称扩张，确定了西菲律宾海盆的形成年代(60–37 Ma)，为西太平洋新生代的洋盆。

综上所述，DSDP在西菲律宾海盆的钻探工作已成功

表1　西菲律宾海盆的DSDP钻探站位情况

航次编号	站位编号	孔号	坐标	构造位置	水深(m)	进尺(m)	取芯长度(m)	终孔层位岩性	最老沉积物时代
DSDP-Leg31(1973年)（Karig等，1975）	290	290	17°44.85′N，133°28.08′E	西菲律宾海盆	6062	255	38.9	基底火山岩	晚始新世
		290A	17°44.05′N，133°28.44′E	西菲律宾海盆	6062	140	1.9	基底火山岩	晚始新世
	291	291	12°48.33′N，127°49.85′E	西菲律宾海盆	5217	126.5	10	基底玄武岩	晚始新世
		291A	12°48.45′N，127°48.98′E	西菲律宾海盆	5217	114.5	1.4	基底玄武岩	晚始新世
	292	292	15°49.11′N，124°39.05′E	本哈姆海台	2943	443.5	242.7	基底玄武岩	晚始新世
	293	293	20°21.25′N，124°5.65′E	西菲律宾海盆	5599	563.5	78.8	基底玄武岩	中始新世晚期
	294	294	22°34.74′N，131°23.13′E	西菲律宾海盆	5784	118	23.2	基底玄武岩	始新世/古新世
	295	295	22°33.76′N，131°22.04′E	西菲律宾海盆	5808	158	19.8	基底玄武岩	始新世/古新世
DSDP-Leg58（1977–1978年）（deVries Klein等，1980）	445	445	25°31.36′N，133°12.49′E	大东盆岭区	3377	892	619.52	含砾砂岩	中始新世早期
	446	446	24°42.04′N，132°46.49′E	大东盆岭区	4952	420.5	197.1	基底玄武岩	早始新世
		446A	24°42.04′N，132°46.49′E	大东盆岭区	4952	628.5	117.09	基底玄武岩	早始新世
DSDP-Leg59(1978年)（Kroenke等，1980）	447	447	18°0.08′N，133°17.37′E	西菲律宾海盆东部	6022	9	0.4	–	–
		447A	18°0.08′N，133°17.37′E	西菲律宾海盆东部	6022	296.5	155	基底拉斑玄武岩	中渐新世

证实该海盆洋壳形成于新生代(60–37 Ma)。这一认识从侧面暗示，与西菲律宾海盆相邻、地球物理特征存在明显差异的花东海盆，或发育中生代洋壳，由此凸显了在花东海盆实施大洋钻探的必要性与紧迫性，亦彰显了其独特的构造研究意义。

4　花东海盆不可替代的构造意义

4.1　独特且正在进行的板块碰撞造山过程

台湾岛被国际地学界视为碰撞造山带“天然的实验室”。花东海盆与台湾造山带则代表了弧-陆碰撞的起点和早期阶段。台湾岛的碰撞造山作用始于约6–7 Ma并持续至今，碰撞过程正在进行中。科学家可以直接观测到正在进行的变形、抬升、地震活动等，为理解造山过程的动力学提供了实时窗口(Wang等，2025)。在台湾岛东部，从东向西可以清晰地观察到花东海盆、火山岛弧、纵谷缝合带(碰撞边界)、中央山脉(变质的欧亚大陆边缘)这一完整、极为罕见的构造单元碰撞序列(图5)；该区是板块汇聚边界的活教材，清晰地展示了当两个板块相遇时，发生了俯冲、碰撞、逆冲等一系列构造运动，最终形成山脉的全过程。花东海盆周缘的琉球海沟和马尼拉海沟是西太平洋典型的俯冲带。研究表明，琉球海沟可能经历了由于加瓜海脊碰撞而导致的俯冲中断与重新起始过程(Lallemand等，2001)，而马尼拉海沟则与板块的碰撞和旋转密切相关(李泯等，2023)。花东海盆具有相对偏厚且强韧的洋壳，花东海盆的抵抗和变形直接影响了台湾造山带的东界和形态，导致了海岸山脉的抬升和纵谷断裂系和其他逆冲构造的形成(Yang等，2025)。因此，开展花东海盆与欧亚板块相互作用研究，将验证斜向汇聚、弧-陆碰撞、俯冲与碰撞的转换过程等板块构造理论中的重要环节，推动地球系统科学的发展。

4.2　花东海盆的动力学演化模式构建

中生代构造演化并不是区域性问题，而是全球性的重大事件。中生代花东海盆是一个巨大的“地质硬盘”，存储了古太平洋板块俯冲消亡、东亚大陆边缘生长演化，以及全球地磁场变化和深部地幔异常的关键数据。科学解读这些数据，可以为整个西太平洋的构造演化模型提

供关键的定标点，这对于理解地球中生代以来的板块运动史、资源分布规律和深部圈层的相互作用具有不可替代的价值。

前人研究大多认为，花东海盆起源于赤道附近(图6)，自始新世开始逐渐向北漂移至现今位置，见证了西太平洋地区从中生代开阔大洋向新生代边缘海的构造剧变(Sibuet等，2024；Huang等，2025)。与花东海盆模糊的磁异常特征不同，西菲律宾海盆具有清晰的磁条带特征。Yeh等(2021)通过对西菲律宾海盆的高分辨率磁异常分析，识别出了清晰的C13–C26磁条带，确认了该海盆从早始新世至早渐新世(约58–33 Ma)的扩张历史，并指出其扩张中心经历了复杂的转向过程。相比之下，花东海盆表现出截然不同的地球物理场特征(Yeh等，2021)，无法通过磁异常条带确定其真实年龄，且地震剖面显示

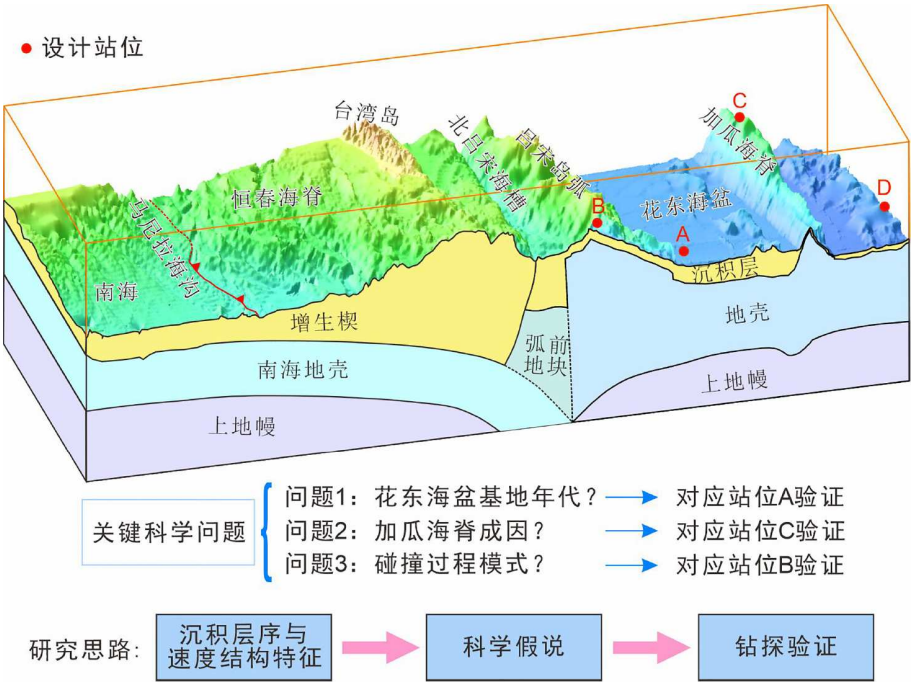


图 5　本文研究思路与研究区构造单元板块碰撞造山示意图。背景参考T2测线速度结构(见图3c)，红色圆点为设计站位(表2)的相应位置

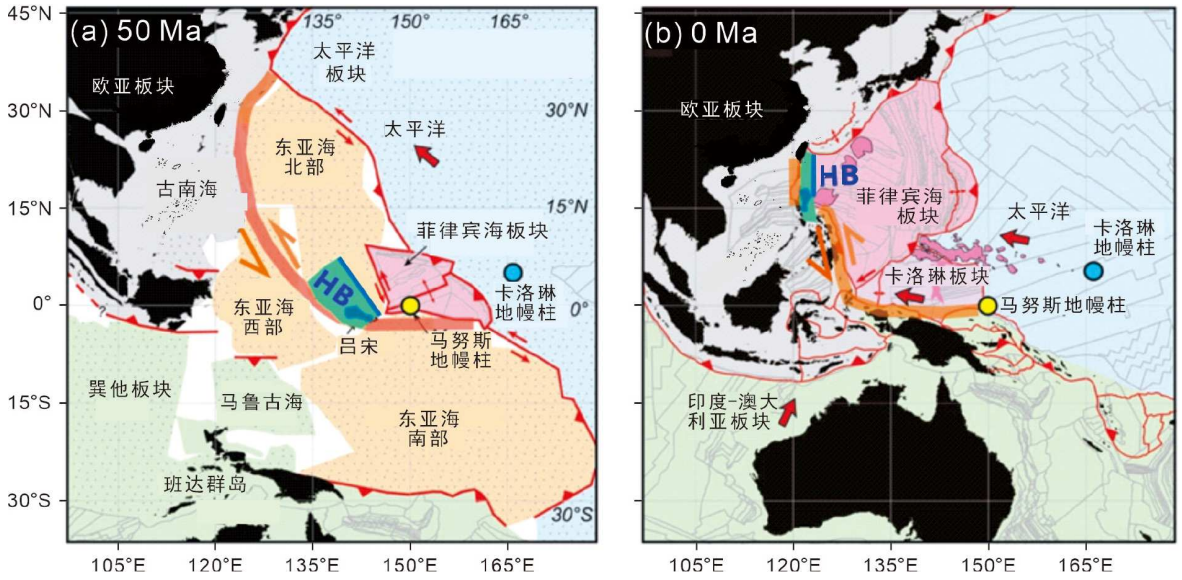


图 6　花东海盆及邻区构造演化模式示意图。底图据Wu等(2016)，图中粉色区域代表菲律宾海板块，起源于黄色圆圈代表的马努斯地幔柱附近，绿色区域代表花东海盆的位置，图中灰色线条代表不同洋盆海底扩张形成的磁异常条带；HB，花东海盆

其地壳性质并非典型的新生代洋壳，具有下地壳高速异常等特征，这种显著差异可能暗示了两者可能具有截然不同的起源机制。花东海盆的复杂性与独特性(如厚地壳、岩浆底侵、速度梯度)是验证和挑战板块构造理论的“前沿阵地”，是重建全球板块拼图中不可缺少的重要一块，是构建中生代与新生代构造演化的桥梁。为验证上述演化模式，亟需通过钻探获取直接证据。

5 花东海盆未来大洋钻探站位选址及其科学意义

中生代是地球构造演化历史上的一个关键时期。尽管晚中生代东亚大陆边缘从主动向被动的重大转换已被广泛认知(Li等，2019)，但关于中生代俯冲大洋板块的存在与属性，因缺乏直接的岩石学样本证据仍然悬而未决。因此，花东海盆将成为揭示中生代俯冲洋壳性质的关键(赵明辉等，2021)。

本文设计4个大洋钻探站位及4个备选站位(表2)，分别位于花东海盆、吕宋岛弧、加瓜海脊及加瓜海脊东部盆地的不同构造位置(图5和7)。力求解决的科学问题：(1) 花东海盆是否为西太平洋残留的中生代洋盆? (2) 加瓜海脊的成因机制是什么(古扩张脊/走滑挤压/俯冲起始)? (3) 花东海盆在欧亚-菲律宾海板块碰撞中扮演何种角色? 上述3个关键科学问题可以通过这些设计站位来解决(图5)。大洋钻探结束后，将开展系统的岩石学与地球化学分析，并结合其他地质地球物理资料，检验本文所提出的科学假说：若站位A钻获早白垩世洋壳，则支持“花东海盆为中生代残留洋盆”假说；若站位C钻获岛弧火山岩，则支持加瓜海脊为俯冲起始或岛弧残片；通过沉积序列重建碰撞时序，验证“斜向碰撞-走滑转换”模式。

下面对各站位的科学意义分别展开叙述：

站点A主要目标钻遇花东海盆的洋壳玄武岩，确定花东海盆年龄(表2)。设计站点A选择在OBS2022-1深地震测线与多道反射地震V1测线交叉的地方(图7)，此处沉积序列完整(高红芳等，2025)，钻探参数储备齐全；同时对花东海盆发育的4套沉积层序(图4)实施完整取芯，可以获得花东海盆从中生代到新生代沉积演化历史。备选站点A’位于MCS808-1测线(Hsu等，2021)沉积层最厚的位置，同样发育花东海盆4套完整的沉积序列，可以作为补充与替代。

站点B(表2)位于吕宋岛弧北段，地震测线OBS2022-1与T2交叉点(图7)，主要目标是建立南海与花东海盆的构造联系。吕宋岛弧北段由中新世-更新世以及下覆始新世火山岩组成(Huang等，2019)。随着花东海盆向北移动，南海板块约18 Ma时沿马尼拉海沟向花东海盆俯冲形成吕宋岛弧(Sibuet等，2024)。古地磁测量进一步揭示，吕宋岛弧在始新世时仍处于赤道附近的低纬度地区，然后在过去的20–25 Ma内快速向北漂移至现今位置(Queaño等，2013)。吕宋岛弧的位置代表了古汇聚带(Florendo，1994)。同时，始新世吕宋岛弧之下为白垩纪花东海盆洋壳基底，吕宋岛弧具有洋内岛弧性质(Zhao等，2019)。设计站点B(图7)可以在时间和空间上约束从转换断层到板块俯冲的构造转换过程，建立南海与花东海盆协同构造演化机制。备选站点B’在地形地貌与站点B相近，同时水深与沉积层厚度更浅，适合作为在岛弧打钻的替代方案。

站点C(表2)位于加瓜海脊、地震测线T4A与V2测线交叉点(图7)。加瓜海脊具有高重力异常、高磁异常，地壳厚度较周围洋壳明显增厚，加瓜海脊成因与花东海盆的构造演化息息相关。如前所述，前人提出几种不同的成因模型(Hilde和Lee，1984；Deschamps等，2000；Eakin等，2015；Lallemand，2016)。站点C的钻探(图5和7)非常重要，在高分辨率地震成像基础上，开展深海钻探的岩石地球化学与年代学系统研究，更好地解决加瓜海脊与花东海盆的形成机制问题。备选站点C’稍偏离加瓜海脊最高峰，位于TAIGER计划多道地震测线MGL0906-20上，此位置与前人取样位置(Qian等，2021；Zhang等，2022)接近，可以与前人的研究结果相互验证。

站点D(图7和表2)位于OBS2022-1地震测线上的加瓜

表2 花东海盆建议钻孔井位参考坐标

站点	经度	纬度	水深(m)	沉积层厚度(m)	钻探深度(m)	目标层位	拟解决的科学问题
A	122.38382°E	21.57868°N	4810.62	2490	2590	基底岩石	花东海盆的年龄 沉积记录
A’	122.22611°E	21.65114°N	4928.68	2000			
B	121.71256°E	21.53052°N	1345.78	100	200	基底岩石	吕宋岛弧的性质及其与花东海盆的协同演化问题
B’	121.59401°E	21.21032°N	558.34	<50			
C	122.98623°E	22.72055°N	3974.16	50	200	基底岩石	加瓜海脊的性质及成因
C’	122.94512°E	22.21121°N	2531.26	<50			
D	123.67965°E	21.67351°N	5073.97	170	270	基底岩石	加瓜海脊东部盆地年龄、性质及其与西菲律宾海盆的关系
D’	123.74403°E	22.40535°N	5012.19	70			

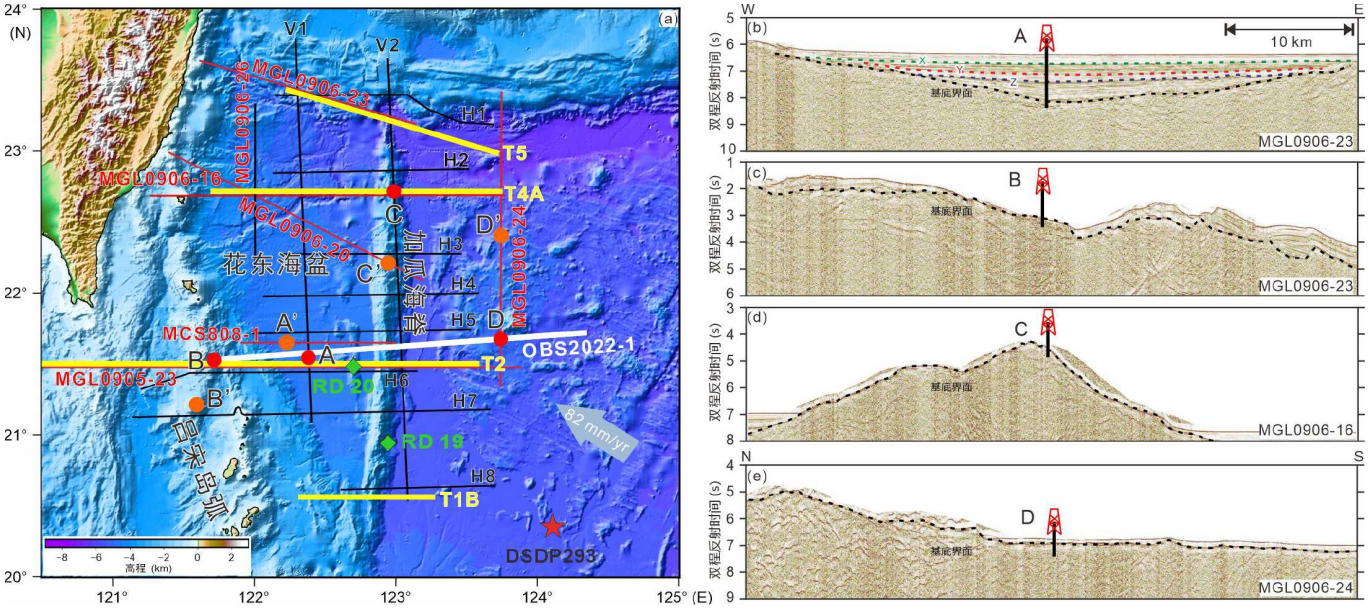


图 7　研究区大洋钻孔设计站位部署图及穿过设计站位的多道反射地震剖面。红色与橙色圆圈分别代表设计站位与备选站位的位置，红色五角星代表DSDP293钻孔，黄色粗实线代表深地震折射测线，OBS2022-1测线用白色粗实线标出，黑色细实线代表广州海洋地质调查局实施的多道反射地震测线，红色细实线代表TAIGER计划实施的多道反射地震测线，MCS808-1测线源自Hsu等(2021)，绿色菱形代表RD19和RD20拖网位置，灰色箭头代表板块运动方向及速度(Hsu等，2016)。图(b–e)分别为穿过设计站位A、B、C、D的多道地震剖面，采取了相同的纵横比例尺，图(b)中花东海盆的沉积层序划分与图4相同，带红色箭头的黑色实线代表设计钻孔在剖面上的位置

海脊东部的洋盆，该盆地的年龄与成因存在分歧。Yeh等(2021)从多道地震及磁异常条带数据中分析，认为其位于磁等时线C22–C20之间，可能是受到冲大东(Oki-Daito)地幔柱影响的宾汉隆起(Great Benham Rise)的一部分，在约49–41 Ma期间随LOFZ的右旋剪切运动从宾汉隆起中拆离。而Zhang等(2022)基于加瓜海脊北段玄武岩和安山岩的主微量元素分析，认为其可能是古太平洋板块残留的一部分，为中生代洋盆。站点D(图7)打钻可解决其年龄、性质与成因等科学问题，判断其是中生代洋壳还是新生代洋壳，与中生代花东海盆及新生代西菲律宾海盆的构造关系如何，这对构建整个西太平洋系统的构造演化模式至关重要。备选站点D’位于TAIGER计划多道地震测线MGL0906-24之上，此点位的地形地貌特征与D点相近，同样可以解决加瓜海脊东部洋盆的地质构造属性问题。

6　主要认识与未来展望

本文在综述花东海盆及其邻区的综合地球物理探测研究，系统梳理了花东海盆的年龄、花东海盆与加瓜海脊的岩石圈速度结构特征、以及区域DSDP钻探历程，取得的主要认识如下：

(1) 阐明了花东海盆具有厚地壳(5–7 km)、下地壳高速层等非典型洋壳特征，其年龄争议亟待钻探解决。

(2) 首次提出了基于“梦想”号的站位设计方案(4设计+4备选)，构建“构造-沉积-年代”三位一体的钻探验证框架。4个站位分别位于花东海盆、吕宋岛弧、加瓜海脊及加瓜海脊东部盆地。站点A直接解答花东海盆的年龄问题，站点B揭示花东海盆与南海间的构造演化关系，站点C约束加瓜海脊的成因机制，站点D将解答加瓜海脊东部盆地的成因争议；上述4个设计站位，环环相扣，息息相关，将共同服务于整个西太平洋系统的构造演化模式的构建。

(3) 阐明了花东海盆地球动力学演化的构造意义，以及该区存在的遗留问题。该区板块碰撞造山正处于进行时，是观测板块之间构造过程转换的天然实验室。加瓜海脊成因、花东海盆与西菲律宾海盆地球动力学演化关系等仍需多学科联合攻关。

未来展望主要体现在：

(1) 充分发挥中国科学家的主导与引领作用。中国作为“梦想”号的拥有者与本次钻探的倡议方，将充分发挥装备、技术与区域研究优势，承担航次主导、岩芯保管与数据集成责任。同时，通过平台、数据、人才的开放协作，让花东海盆钻探成为国际大洋钻探合作的新范式，为推动西太平洋地球系统科学发展贡献中国力量与中国方案。

(2) 建立数据共享与国际合作机制。倡议在IODP或

联合国海洋科学十年框架下，计划设立“花东海盆钻探国际工作组”，由中国科学家牵头，吸引国外在该区域研究优势团队共同参与，依托中国“梦想”号岩芯库及IODP岩芯库，建立分批次、可申请的岩芯共享机制，确保重要样品在保护性研究后及时开放。

(3) 花东海盆研究区将成为地球科学研究热点。打钻完成后，无论其年龄是中生代还是新生代，都将极大地推动东南亚构造演化的研究进程，直接推动中生代以来整个西太平洋俯冲体系的构造重建。大洋钻探获取的沉积物和基底样品，不仅能解决构造演化问题，还有助于理解深部碳循环过程。板块俯冲是地球深部碳循环的关键途径，花东海盆及其周缘的俯冲系统，可能在调节长期地质尺度的碳循环和气候变化中扮演了重要角色。这些科学问题的解决有望补充与完善板块俯冲机制的科学内涵，促使西太平洋地球系统多圈层相互作用的基础研究取得新的突破。

致谢 感谢周蒂、黄奇瑜和Jonny WU三位老师对于文章构思及重大科学问题方面给予的有力指导；感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵意见，在此一并感谢。

参考文献

丁巍伟, 朱日祥, 万博, 等. 2023. 新特提斯洋东南段动力过程及东南亚环形俯冲体系形成机制. 中国科学: 地球科学, 53: 687–701
高红芳, 周洋, 李学杰, 等. 2025. 西菲律宾海盆加瓜海脊沉没事件与西南琉球俯冲带形成时间探讨. 大地构造与成矿学, 49: 34–45
黄奇瑜. 2017. 台湾岛的年龄. 中国科学: 地球科学, 47: 394–405
翦知湣. 2018. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展. 科学通报, 63: 3877–3882
李春峰, 周祖翼, 李家彪, 等. 2007. 台湾岛南部海域的前碰撞构造地球物理特征. 中国科学: 地球科学, 37: 649–659
李泯, 黄松, 郝天珧, 等. 2023. 西太平洋新近纪的俯冲起始模型及俯冲带参数分析. 中国科学: 地球科学, 53: 461–480
林间, 徐敏, 周志远, 等. 2017. 全球俯冲带大洋钻探进展与启示. 地球科学进展, 32: 1253–1266
庞新明, 赵明辉, 刘思青, 等. 2019. 复杂地质结构OBS地震剖面震相识别方法. 地球物理学报, 62: 3482–3491
汪品先. 2018. 大洋钻探五十年: 回顾与前瞻. 科学通报, 63: 3868–3876
汪品先. 2019. 大洋钻探与中国的海洋地质. 海洋地质与第四纪地质, 39: 7–14
吴能友, 胡刚, 朱日祥, 等. 2025. 中国深海科学钻探战略与选址研究. 北京: 科学出版社
赵明辉, 王强, 杨富东, 等. 2021. 花东海盆综合地震探测及其重要的构造意义. 地球科学, 46: 359–368
赵明辉, 袁野, 张佳政, 等. 2026. 南海深地震探测及横波速度结构研究进展. 地球物理学报, 69: 437–450
Balmater H G, Manalo P C, Faustino-Eslava D V, et al. 2015. Paleomagnetism of the Samar Ophiolite: Implications for the Cretaceous sub-equatorial position of the Philippine island arc. Tectonophysics, 664: 214–224
Deschamps A E, Lallemand S E, Collot J Y. 1998. A detailed study of the Gagua Ridge: A fracture zone uplifted during a plate reorganisation in the Mid-Eocene. Mar Geophys Reses, 20: 403–423
Deschamps A, Monié P, Lallemand S, et al. 2000. Evidence for Early Cretaceous oceanic crust trapped in the Philippine Sea Plate. Earth Planet Sci Lett, 179: 503–516
deVries Klein G, Kobayashi K, Chamley H, et al. 1980. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 58. Washington D. C.: U.S. Government Printing Office
Eakin D H, McIntosh K D, Van Avendonk H J A, et al. 2014. Crustal-scale seismic profiles across the Manila subduction zone: The transition from intraoceanic subduction to incipient collision. J Geophys Res-Solid Earth, 119: 1–17
Eakin D H, McIntosh K D, Van Avendonk H J A, et al. 2015. New geophysical constraints on a failed subduction initiation: The structure and potential evolution of the Gagua Ridge and Huatung Basin. Geochem Geophys Geosyst, 16: 380–400
Evans C A, Lewis S D. 1984. The tectonic significance of the Gagua Ridge, Luzon–Taiwan region. Eos Trans Am Geophys Union, 65: 1132
Florendo F F. 1994. Tertiary arc rifting in northern Luzon, Philippines. Tectonics, 13: 623–640
Gutscher M A, Klingelhoefer F, Theunissen T, et al. 2016. Thermal modeling of the SW Ryukyu forearc (Taiwan): Implications for the seismogenic zone and the age of the subducting Philippine Sea Plate (Huatung Basin). Tectonophysics, 692: 131–142
Hall R, Fuller M, Ali J R, et al. 1995. The Philippine Sea plate: Magnetism and reconstructions. Geophys Monogr Ser, 88: 371–404
Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. J Asian Earth Sci, 20: 353–431
Hilde T W C, Lee C S. 1984. Origin and evolution of the West Philippine Basin: A new interpretation. Tectonophysics, 102: 85–104
Hsu H H, Liu C S, Chen T T, et al. 2021. Stratigraphic framework and sediment wave fields associated with canyon-levee systems in the Huatung Basin offshore Taiwan Orogen. Mar Geol, 433: 106408
Hsu Y J, Yu S B, Loveless J P, et al. 2016. Interseismic deformation and moment deficit along the Manila subduction zone and the Philippine fault system. J Geophys Res-Solid Earth, 121: 7639–7665
Hsieh Y H, Suppe J, Liu C S. 2025. Architecture and deep laccolithic inflation of the short-lived (~15 m.y.) Luzon arc near Taiwan—Multiscale integration of marine seismic imaging and outcrop data from the deformed onshore arc. Abstr Geol Soc Am, 2563: 413–453
Huang C Y, Wang P X, Yu M M, et al. 2019. Potential role of strike-slip faults in opening up the South China Sea. Natl Sci Rev, 6: 891–901
Huang Z, Zhao C, Yu P, et al. 2025. Revealing subsurface complexity of the West Philippine Basin by a multi-method magnetic analysis. J Geophys Res-Solid Earth, 130: e2024JB028806
Ingle J C Jr, Karing D E, Bouma A H, et al. 1975. Site290. In: Ingle J C Jr, Karing D E, Bouma A H, et al. eds. Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project, Volume 31. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office. 25–47
Jian Z M, Larsen H C, Zarikian C A, et al. 2018. Expedition 368 Preliminary Report: South China Sea Rifted Margin. Technical Report. International Ocean Discovery Program
Karig D E, Ingle J C Jr, Bouma A H, et al. 1975. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 31. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office
Kroenke L, Scott R, Balshaw K, et al. 1980. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 59. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office
Lallemand S. 2016. Philippine Sea Plate inception, evolution, and consumption with special emphasis on the early stages of Izu-Bonin-Mariana subduction. Prog Earth Planet Sci, 3: 15
Lallemand S, Font Y, Bijwaard H, et al. 2001. New insights on 3-D plates

interaction near Taiwan from tomography and tectonic implications. Tectonophysics, 335: 229–253
Lee T Y, Lawver L A. 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia. Tectonophysics, 251: 85–138
Li C-F, Xu X, Lin J, et al. 2014. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349. Geochem Geophys Geosyst, 15: 4958–4983
Li S, Suo Y, Li X, et al. 2019. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. Earth-Sci Rev, 192: 91–137
Lin A T, Watts A B, Hesselbo S P. 2003. Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region. Basin Res, 15: 453–478
Mizuno A, Okuda Y, Tamaki K, et al. 1975. Marine geology and geological history of the Daito Ridge area, northwestern Philippine Sea (in Japanese with English Abstract). Mar Sci, 7: 484–491, 543–548
Mrozowski C L, Lewis S D, Hayes D E. 1982. Complexities in the tectonic evolution of the West Philippine Basin. Tectonophysics, 82: 1–24
Qian S P, Zhang X Z, Wu J, et al. 2021. First identification of a Cathaysian continental fragment beneath the Gagua Ridge, Philippine Sea, and its tectonic implications. Geology, 49: 1332–1336
Queaño K L, Ali J R, Milsom J, et al. 2007. North Luzon and the Philippine Sea Plate motion model: Insights following paleomagnetic, structural, and age-dating investigations. J Geophys Res, 112: 2006JB004506
Queaño K L, Ali J R, Pubellier M, et al. 2009. Reconstructing the Mesozoic-early Cenozoic evolution of northern Philippines: Clues from palaeomagnetic studies on the ophiolitic basement of the Central Cordillera. Geophys J Int, 178: 1317–1326
Queaño K L, Marquez E J, Aitchison J C, et al. 2013. Radiolarian biostratigraphic data from the Casiguran Ophiolite, Northern Sierra Madre, Luzon, Philippines: Stratigraphic and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 65: 131–142
Sandwell D T, Harper H, Tozer B, et al. 2019. Gravity field recovery from geodetic altimeter missions. Adv Space Res, 68: 1059–1072
Sibuet J C, Zhao M H, Wu J, et al. 2021. Geodynamic and plate kinematic context of South China Sea subduction during Okinawa trough opening and Taiwan orogeny. Tectonophysics, 817: 229050
Sibuet J C, Liu S Q, Zhao M H, et al. 2024. A revolution in understanding SE Asia geodynamics since 20.5–18 Ma. Tectonophysics, 884: 230397
Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. Earth Planet Sci Lett, 262: 533–542
Sun Z, Jian Z M, Stock J M, et al. 2018. South China Sea rifted margin. In: Proceedings of the International Ocean Discovery Program. College Station, TX: International Ocean Discovery Program
Sun Z, Xu Y, Deng Y. 2025. The Moho is in reach of ocean drilling with the Meng Xiang. Nat Geosci, 18: 275–276
Wang P X, Prell W L, Blum P, et al. 2000. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Volume 184. Technical Report. Ocean Drilling Program
Wang X Y, Zhao M H, He X B, et al. 2025. Seismic imaging revealing the processes from subduction to arc-continental collision in the northeastern South China Sea. Tectonophysics, 902: 230684
Wu J, Suppe J, Lu R, et al. 2016. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods. J Geophys Res-Solid Earth, 121: 4670–4741
Yang H Y, Huang H H, Wu E S, et al. 2025. An ML-enhanced earthquake catalog for the 2024 M_W 7.4 Hualien Earthquake sequence: Insights into structural transition from collision to subduction in eastern Taiwan. J Geophys Res-Solid Earth, 130: e2025JB032792
Yeh Y C, Lin J Y, Hsu S K, et al. 2021. Separation of Gagua Rise from Great Benham Rise in the West Philippine Basin during the Middle Eocene. Sci Rep, 11: 21775
Zhang G, Zhang J, Dalton H, et al. 2022. Geochemical and chronological constraints on the origin and mantle source of Early Cretaceous arc volcanism on the Gagua Ridge in western Pacific. Geochem Geophys Geosyst, 23: e2022GC010424
Zhao M H, Sibuet J C, Wu J. 2019. Intermingled fates of the South China Sea and Philippine Sea plate. Natl Sci Rev, 6: 886–890
Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 326: 269–287

（责任编委：李三忠）