



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目: 花东海盆综合地震探测及其重要的构造意义
作者: 赵明辉, 王强, 杨富东, 张佳政, 高红芳, 孙龙涛, 刘思青, 张光学
收稿日期: 2019-12-23
网络首发日期: 2020-03-11
引用格式: 赵明辉, 王强, 杨富东, 张佳政, 高红芳, 孙龙涛, 刘思青, 张光学. 花东海盆综合地震探测及其重要的构造意义. 地球科学.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200311.1236.003.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.3799/dqkx.2020.038

花东海盆综合地震探测及其重要的构造意义

赵明辉^{1,2,4*}, 王强^{1,4}, 杨富东^{1,4}, 张佳政^{1,2}, 高红芳³, 孙龙涛^{1,2}, 刘思青³, 张光学³

1 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广州 510301

2 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广州, 510301

3 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州, 510075

4 中国科学院大学, 地球与行星科学学院, 北京, 100049

摘要：花东海盆位于欧亚板块与菲律宾海板块交汇处，是现今西太平洋俯冲体系中唯一遗留的早白垩纪洋盆，是研究西太平洋俯冲构造演化与动力学机制的一个关键区域。前期研究发现，关于花东海盆的基础科学问题迫切需要解决：花东海盆的性质、年龄及形成演化历史如何？南北走向的加瓜海脊是花东海盆的东部边界吗？其隆升机制和构造属性如何？花东海盆的西部边界是马尼拉俯冲带吗？其各构造单元流体作用及其与花东海盆的构造关系如何？为了解决上述科学问题，在花东海盆开展主动源与被动源的综合地球物理探测和地质采样是非常必要的。一方面，可以采用纵/横波联合反演方法获取花东海盆及其东/西边界的深达地幔的精细速度结构，为构建西太平洋俯冲构造体系跨圈层的构造演化模式提供重要的地质地球物理证据，另一方面，为中国未来在花东海盆大洋钻探计划提供重要的基础数据。

关键词：花东海盆；深地震探测；加瓜海脊；马尼拉俯冲带；构造演化模式

中图分类号：P611

收稿日期：2019-12-23

Seismic survey in Huatung basin and its tectonic significance

ZHAO Ming-Hui^{1,2,4*}, WANG Qiang^{1,4}, YANG Fu-Dong^{1,4}, ZHANG Jia-Zheng^{1,2},

GAO Hong-Fang³, SUN Long-Tao^{1,2}, LIU Si-Qing³ and ZHANG Guang-Xue³

1 Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese

基金项目：国家自然科学基金项目(No. 91958212、41730532、41676043、41376063)，广东省基金团队项目(No. 2017A030312002)，国家自然科学基金委员会共享航次(NORC2020-581)联合资助。

作者简介：赵明辉(1967—)，女，研究员，博士，从事海洋地球物理与深部结构研究。E-mail: mhzhao@scsio.ac.cn, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0848-9210>

Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

*2 Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences,
Guangzhou 510301, China*

3 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China

4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In the western Pacific, the Huatung basin (HB) might be a unique Early-Cretaceous oceanic basin located at the junction between the Philippine Sea plate (PSP) and Eurasia plate (EU). The HB is the key region to understand the geodynamic evolution of the western Pacific as a whole. It is a natural laboratory to investigate the interaction between the Earth's hydrosphere and lithosphere of a subduction system. Some essential scientific questions need to be addressed based on the previous research. What is the nature and age of the crust in the HB? What is its history of formation and evolution? What is the uplift mechanism and tectonic nature of the NS-oriented Gagua ridge? For the Manila subduction zone, acting as the western boundary of the HB, what is the water content in the sediments and in the upper and lower crust of the subducting slab determined by the detailed seismic velocity structure? What is the mechanism of water emplacement? An active- and passive-source seismic experiment is necessary to be carried out also including sample dredges in near future. The crustal and mantle velocity structure beneath the HB could be acquired by the use of joint inversion of *P*- and *S*-waves. These research will not only provide geophysical constraints to understand the interaction of the Earth's hydrosphere and lithosphere of a subduction system, but will also contribute to the understanding of the tectonic framework of the western Pacific. More importantly, it is a pre-requisite before getting drilling ground truth in the HB.

Keywords: Huatung basin; Deep seismic survey; Gagua Ridge; Manila subduction zone; Tectonic evolution mechanism

1 引言

中生代是整个地球历史中的关键地质时期，晚中生代以来太平洋板块的俯冲与后撤对东亚陆缘的构造、岩浆和成矿效应均产生了重要的影响。如：华北克拉通破坏（朱日祥等, 2011, 2012）、中国东部的“黄金转换”（Sun et al., 2007）、南海主动陆缘演变为被动陆缘以及一系列大型沉积盆地形成（李家彪, 2011; 周蒂和孙珍, 2017）等。由于太平洋的西、北和东三侧都在发生俯冲作用，大量洋壳已消失在地球深处，因此，对太平洋和环太平洋构造域演化历史的研究，成为世界前沿科学问题的研究难点。

花东海盆是西太平洋地球系统中残留的一个中生代洋盆，位于菲律宾海板块（PSP）与欧亚板块的交汇处及构造运动的转折点，构造位置极为重要（李春峰等, 2007），是研究西太平洋板块从白垩纪到新生代构造演化与动力学机制的关键区域（图1和图2）。在地理位置上，花东海盆位于我国台湾东南部海域（约19°–24°N, 120°–123°E），面积约 $2.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，呈长轴南北向的菱形海盆，宽~150 km，长~250 km，北深南浅（2000~4500 m）（图2）。在构造位置上，其西面以马尼拉俯冲带为界，花东海盆成为岛弧的基底，与台湾东部的海岸山脉和北吕宋岛弧相连（Quaeño et al., 2013; 黄奇瑜, 2017）；其东面以加瓜海脊（Gagua Ridge）（123°E）为界，与西菲律宾海相隔（Deschamps et al., 1998）；其北面沿琉球海沟向欧亚陆缘俯冲（Gutscher et al., 2016）。

花东海盆的洋盆性质最初是基于在海盆中识别出4个E-W向磁异常条带（Hilde and Lee, 1984）；由于海盆宽度仅150 km，依靠磁异常条带确定的年龄存在多解性，推断盆地的年龄有：41—36 Ma（Hilde and Lee, 1984）、15—30 Ma（Kuo et al., 2009）、52—43 Ma（Sibuet et al., 2002）等。后来，在花东海盆拖网采得辉长岩样品（RD19和RD20，位置见图2），单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年为131—119 Ma（Deschamps et al., 2000）和130 Ma（Huang et al., 2019），因而推断花东海盆年龄为早白垩世，成为迄今在菲律宾海盆与欧亚大陆之间发现的、仍然保存着中生代洋壳的唯一地区。新生代北吕宋火山岛弧坐落在花东海盆之上，海岸山脉形成于花东海盆洋壳之上（黄奇瑜, 2017）。花东海盆以南的菲律宾东部构造活动带也具有白垩纪洋壳基底（Quaeño et al., 2013），是否与花东海盆同属一个洋盆，尚待进行地球化学对比研究（Deschamps et al., 2000）。

在新生代时期，PSP插入至欧亚板块与西太平洋板块之间，给两者关系的研

究带来很大的困难,对于重建中生代时期太平洋板块与欧亚板块之间的运动学和动力学关系成为一个非常有难度的课题。古地磁数据指示,在白垩纪时期花东海盆和菲律宾海板块位于赤道附近 (Quae ño et al., 2009; Quae ño et al., 2013; Balmater et al., 2015), 随后相对于欧亚板块沿着巨型剪切带一起向北移动, 大位移地 (近 2200 km) 运行到现今的位置 (Hall et al., 1995 ; Lee and Lawver, 1995; Hall, 2002; Quae ño et al., 2007; Wu et al., 2016)。花东海盆作为PSP楔入体的前锋, 同时又是板块构造运动遗留给人类的中生代白垩纪的洋盆 (Huang et al., 2019), 因此, 中生代的花东海盆是解开西太平洋俯冲构造体系的动力学过程及其在东亚陆缘构造效应的一把“金钥匙”。

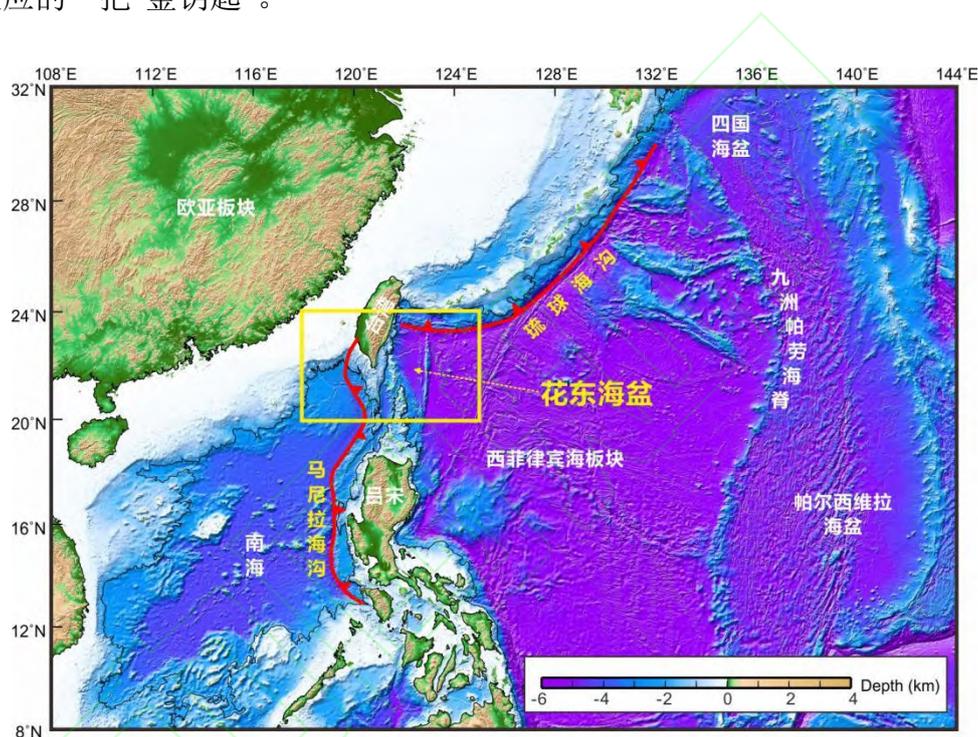


图1 花东海盆区域构造位置与水深地形图

黄色方框为图2范围.

Fig.1 The regional tectonic map and bathymetric topography of Huatung basin

The yellow box is shown the domain in Fig.2.

同时,花东海盆作为未来大洋钻探的潜在目标与优先区域,在花东海盆开展研究可以为大洋钻探计划的实施提供重要的基础数据。大洋钻探计划 (IODP) 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

划二十年（1998—2018）以来，成功地在南海实施了“4+1”次的大洋钻探计划，确立了我国在南海研究中的主导权（汪品先, 2018）；中国设计与建造的大洋钻探船“梦想号”计划于 2021 年下水使用，未来中国将以更大规模开展大洋钻探的战略研讨与设计工作（汪品先, 2019; 翦知潜, 2018）。中生代是地球历史演化进程中的关键时期（Sun et al., 2007），但是关于中生代洋盆的研究却很少，至今世界上还没有中生代洋盆的钻探，因此，花东海盆成为未来大洋钻探的潜在目标与优先区域（黄奇瑜, 2019），切实服务于西太平洋中生代深海油气资源与国家战略安全的重大需求。

在“西太平洋地球系统多圈层相互作用”重大研究计划支持下，为我国科学家在花东海盆开展综合地质地球物理调查与研究带来了前所未有的机遇与挑战。本文首先综述了花东海盆深地震探测结果及研究现状，提出花东海盆研究区急需解决的基础科学问题；然后，为了解决上述科学问题，部署了未来在花东海盆研究区实施的综合地震探测的详细实验计划；最后阐明了花东海盆的研究展望及重要的科学意义。

2 花东海盆深地震探测研究现状

近年来花东海盆受到国际地学界的高度重视，在该区相继开展了一些包括反射地震、重力、磁力、海底地震仪（ocean bottom seismometer, OBS）折射地震等综合地球物理调查（Hsu et al., 1998; Sandwell et al., 2014; 刘思青等, 2017; 孙美静等, 2018; Doo et al., 2018）。深地震探测主要包括2009年中国台湾地区与美国、法国合作实施的TAIGER计划（Taiwan Integrated Geodynamic Research）实施的测线（T1、T2、T3、T4和T5），以及2015年和2016年国家自然科学基金委在南海北部地球物理共享航次实施的OBS2015-2和OBS2016-2测线（图2）。TAIGER计划中，调查船为蓝赛斯号（Marcus D. Langseth），船上的 4×10 的空气枪阵列，震源共有6600立方英寸，气枪震源深度为海面下8 m，广角测线震源间隔120 m，多道气枪震源间隔50 m，多道测线道间距为12.5 m；OBS由台湾大学船只负责投放和回收（Eakin et al., 2015），OBS间距10~20 km，采样频率250 Hz。OBS数据包括东西、南北、垂直和水听器4个分量数据，采样间隔是4 ms。

在2015年南海北部地球物理共享航次中，调查船为中国科学院南海海洋研究所的“实验2”号，完成测线OBS2015-2位于21°N的位置，长为190 km（刘思青等, 2017）。震源由3支Bolt 1500LL型大容量气枪所组成，单枪容量42.475 m³(总容量

127.425 m³), 共激发有效放炮994炮; 该类型震源激发的低频信号主频为4~8Hz, 衰减较慢, 传播距离较远, 非常适合应用于深部地壳结构的研究 (赵明辉等, 2008)。OBS采样率设置为250 Hz, 工作水深最大为5000 m。实验过程中共投放9台OBS, 投放间距约15 km, 回收9台, 但OBS02台站数据损坏, 其余8台数据记录质量良好, 数据完整率接近90%, 信噪比强, 深部结构信息丰富(刘思青等, 2017)。2016年完成的OBS2016-2测线, 与OBS2015-2相连, 长为130 km, 共投放9台OBS, 全部回收 (图2)。2016年同时还完成了三维网格深地震探测 (3D-2016) (图2) (张佳政等, 2018; 赵明辉等, 2018)。这些共享航次为该区俯冲带的深部结构研究积累了大量的基础数据, 为花东海盆西部边界马尼拉俯冲带的深入研究提供了数据基础, 研究成果正在进一步处理之中。

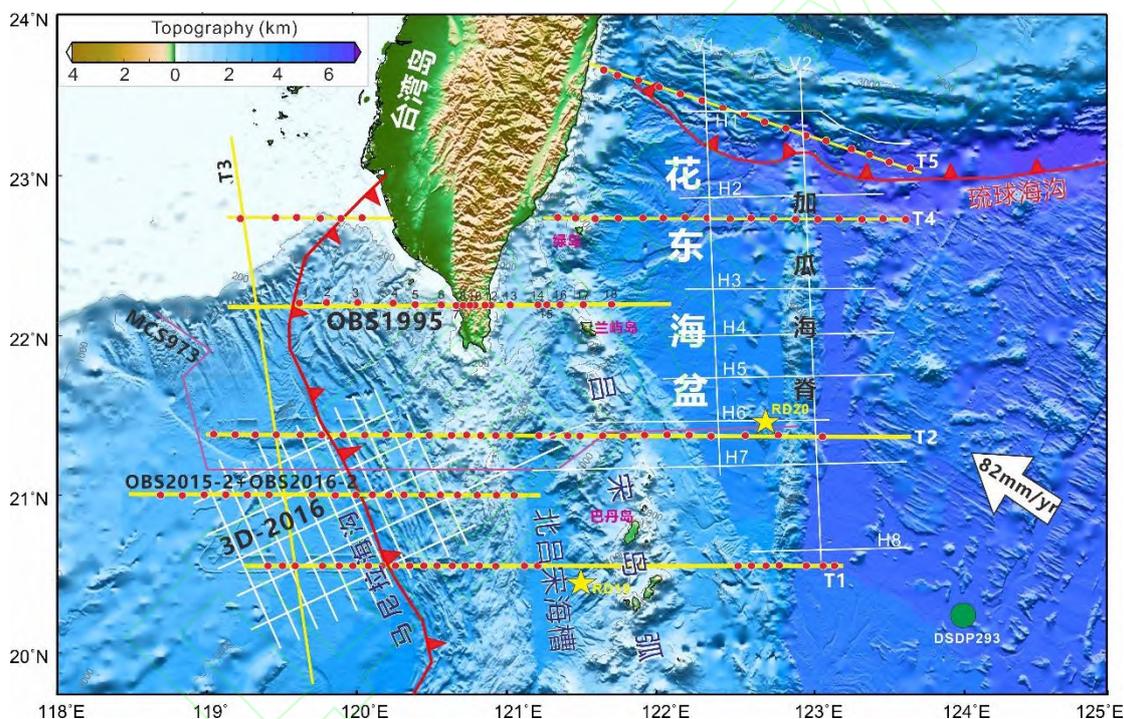


图2 花东海盆及邻区的深地震探测现状图。

OBS1995、OBS2015-2、T1-T5 测线、OBS2016-2 和三维网格 3D-2016 测线为研究区已有的 OBS 深地震测线; 白色实线为 10 条长缆多道反射测线 (H1-H8, V1-V2); 粉红色实线是 MCS973 反射地震剖面。黄星 (RD19 和 RD20) 为辉长岩样品位置; 绿色圆为 IODP 井位 DSDP293。

Fig. 2 Locations of deep seismic profiles in the Huatung Basin and adjacent areas.

The detailed location and deployment are shown in Fig. 6. OBS1995, OBS2015-2, T1-T5, OBS2016-2 and 3D grid 3D-2016 lines are already finished OBS deep seismic lines in the study area; the white solid line is 10 long-cable

multi-channel seismic reflection lines (H1-H8, V1-V2); pink solid line is the MCS973 reflection seismic profile. Yellow stars (RD19 and RD20) are the locations of the gabbro samples; the green circle is the IODP site DSDP293.

T1、T2、T4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 et al., 2015)表明, 花东海盆具有正常的洋壳厚度(5~7 km); 而加瓜海脊地壳增厚到周围地壳的2倍以上(12~18 km), 两侧不对称, 西缓东陡。这些结果(图3), 为花东海盆的地质属性研究提供了重要依据。然而, 花东海盆的这4条OBS测线探测存在着以下不足: (1) OBS台站数量有限, 台站间距稀疏(10~20 km); (2) 位于花东海盆的测线记录长度较短, 炮点激发较少, 导致在模型深度上约束不够(图3); (3) 只获得了纵波(P波)速度结构, 没有开展横波(S波)速度结构研究; (4) 多道反射测线及折射测线延伸到西菲律宾海盆部分, 存在测线末端质量不好, 测线太短, 不足以开展多个构造单元的对比研究(图2); (5) 上述4条折射测线都只是利用了首波走时成像, 没有充分利用后至震相(如: PcP和PmP)来确定重要的速度界面(如: 沉积基底、Moho面等), 因此在获得的深部速度结构中没有约束重要的构造界面(图3), 只是根据多道反射剖面信息示意性地推测了Moho界面的展布(Eakin et al., 2015)。基于上述等因素, 导致深部速度结构分辨率较差, 深部地壳结构可信度不高, 急需开展花东海盆及其与西菲律宾海盆的对比研究。

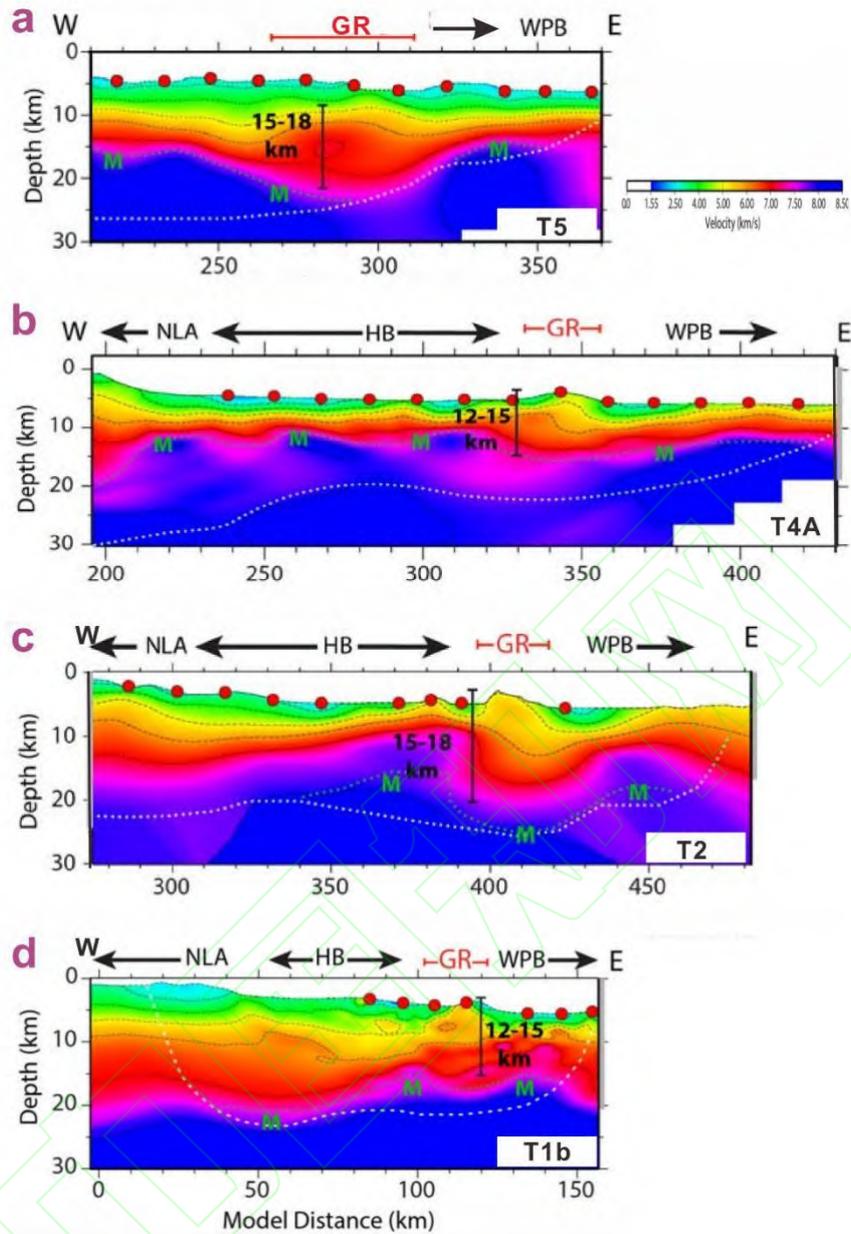


图3 花东海盆 TAIGER 计划中 4 条测线初至波层析成像速度结构图（据 Eakin et al., 2015）

a、b、c 和 d 分别为 T5、T4A、T2 和 T1b 测线的速度结构，测线位置见图 2；白色虚线和 M 是根据反射剖面推测的 Moho 界面；HB：花东海盆；GA：加瓜海脊；NLA：北吕宋岛弧；WPB：西菲律宾海盆

Fig. 3 First-arrival tomographic models along T1b, T2, T4A and T5 profiles across Huatung Basin in TAIGER plan (after Eakin et al., 2015)

a, b, c and d are the velocity structures along the T5, T4A, T2 and T1b lines, respectively. The position of the lines is shown in Fig. 2; the white dotted lines and M are the Moho interface estimated from the reflection profiles; HB: Huatung Basin; GA: Gagua ridge; NLA: North Luzon arc; WPB: West Philippine basin.

3 花东海盆研究面临的重要科学问题

(1) 花东海盆的性质、年龄及形成演化

前面已述及，花东海盆的年龄一直有新生代与中生代之争，由于缺乏钻井资料以及其他充分的地质证据，花东海盆的年龄至今仍然是一个谜题。由于周边中生代的物质大部分已经俯冲消亡了，只有花东海盆可能属于中生代老的洋盆，其作为西太平洋板块上的一颗璀璨的“明珠”，伴随着新生代南海与菲律宾海盆的扩张，记录了新生代以来的西太平洋系统的构造演化过程。虽然在花东海盆拖网采样获得了两块辉长岩样品（图2），根据岩石样品氩氩定年确定为中生代洋盆。然而，有学者质疑，这两块样品，一个采自吕宋岛弧（R19），一个采自加瓜海脊（R20），能否真正地代表花东海盆的年龄？因此，利用拖网/浅钻技术在花东海盆中部获得基底岩石样品，以查明花东海盆的性质、年龄及形成演化对认识西太平洋及其俯冲带构造演化历史及东南亚陆缘的构造和资源效应有极其重要的意义。

(2) 加瓜海脊的隆升机制和构造属性

花东海盆的东部边界为加瓜海脊（Gagua Ridge），与菲律宾海盆相隔。在地形上，该海脊表现为南北走向、长度300 km、宽30 km、高度2~4 km；Hall et al. (1995) 认为加瓜海脊是一条古老的断裂破碎带(Fracture zone)。而Collot et al. (1995)认为，由于太平洋与澳洲板块向北的推挤作用，造成菲律宾海板块形成西北向的作用力，从而加瓜海脊成为菲律宾海板块的转换型板块边界。最新深地震探测数据（图3）认为，加瓜海脊由洋壳组成，与两侧洋壳相比，其地壳厚度增厚至的两倍以上，解释为由于菲律宾海板块向花东海盆的一次“夭折俯冲”的结果（Deschamps et al., 1998; Eakin et al., 2015）；其形成过程可分成了三个阶段（Deschamps et al., 1998）：（1）45 Ma前，菲律宾海板块发生了重组，板块扩张方向从原来的NE-SW向转变成N-S向；此时，洋壳由于地热而抬升，N-S向破碎带形成（图4a），而伴随着地壳抬升作用逐渐形成加瓜海脊的形貌；（2）在41—44 Ma，由于挤压而产生的E-W向应力作用下，N-S向破碎带开始抬升或变形（图4b），加瓜海脊受到压应力作用(transpression)而隆起；（3）到了第三阶段，由于持续的挤压作用，菲律宾海板块俯冲到花东海盆之下，形成加瓜海脊目前的形貌（图4c）。加瓜海脊靠近琉球海沟的区域，有20 km宽且向内凹的形貌，推断有一部分加瓜海脊已经俯冲至琉球海沟之下（Sibuet et al., 1998）。但这些认识只是依据地形、多

道反射和TAIGER资料的解释推断，迄今尚无加瓜海脊的岩石样品证据。对于这个“夭折俯冲”的时间，也有始新世（41—44 Ma）（Deschamps et al., 1998）和中新世（23 Ma）（Eakin et al., 2015）两种观点，对应着不同的构造演化历史。

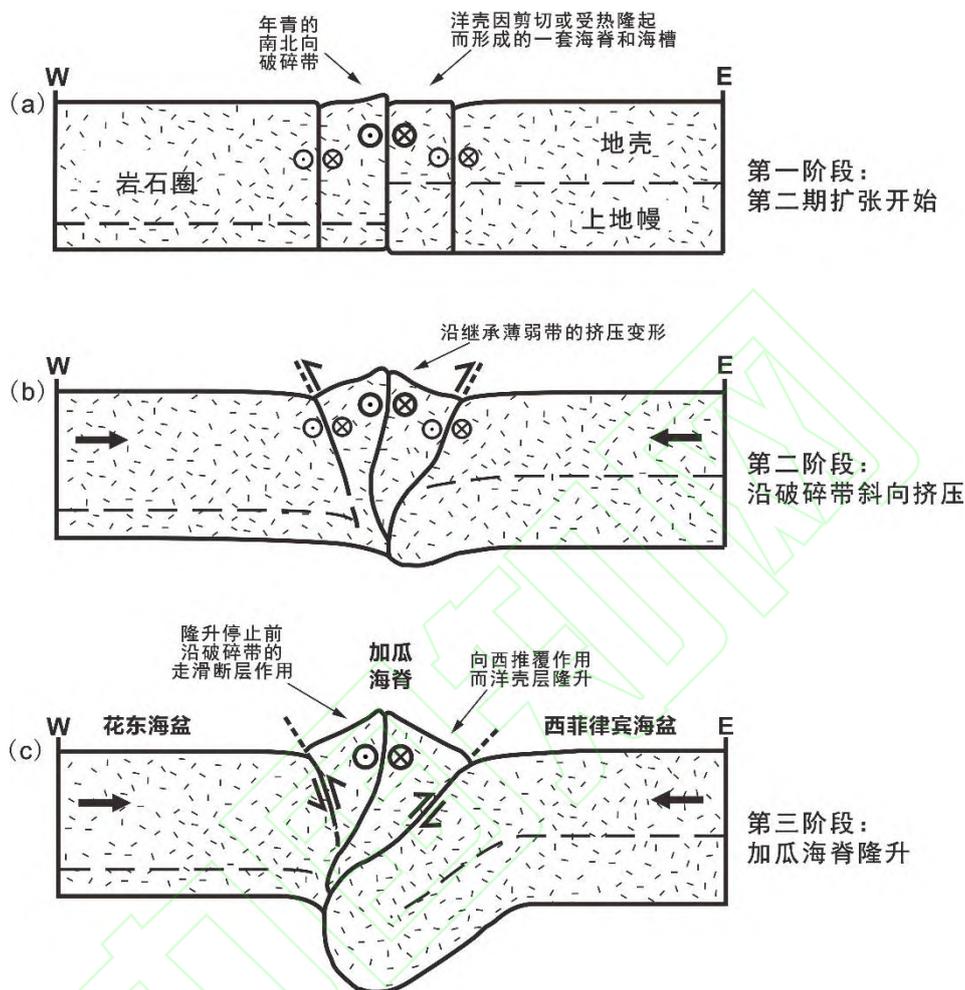


图4 加瓜海脊形成机制示意图（据 Deschamps et al., 1998）

Fig.4 The schematic diagram of the Gagua Ridge formation (after Deschamps et al., 1998)

（3）马尼拉俯冲带作为花东海盆的西部边界，其各构造单元含水量分布与流固作用机制

最新研究认为，马尼拉俯冲带可能是花东海盆的西部边界（图2）（Huang et al., 2019）。海岸山脉形成于花东海盆洋壳之上（黄奇瑜, 2017），花东海盆以南的菲律宾东部构造活动带也具有白垩纪洋壳基底（Quaeño et al., 2013）。但需要开展恒春海脊两侧的地壳结构对比来进一步验证。

马尼拉俯冲带作为新生代以来形成的俯冲带,地震与岩浆活动最为活跃(图5)。南海扩张结束时(~15 Ma),年轻的南海洋壳(~33—15 Ma)(Li et al., 2014)开始沿马尼拉海沟向东俯冲到花东海盆和菲律宾海板块之下(黄奇瑜, 2017; Liu et al., 2018; Huang et al., 2019),新生代北吕宋火山岛弧喷发坐落在中生代花东海盆之上,吕宋岛弧具有洋内岛弧性质(Zhao et al., 2019)。为什么年轻的南海洋壳俯冲到年老的洋壳之下?其起始俯冲机制是什么?与加瓜海脊“夭折俯冲”在构造背景有何关联?其俯冲带各构造单元的速度结构、内部物质组分及状态变化,特别是壳/幔物质相互作用及流体运动路径的深部结构(图5),如何影响着俯冲机制及其动力学过程?俯冲板片含水量如何影响俯冲系统岩石圈速度结构(李忠海等, 2019)?俯冲板片正断层通道如何影响地幔蛇纹石化程度(图5)?上述科学问题是理解俯冲带流固作用机制的重要基础(Stern, 2002),同时是国家自然科学基金委“西太平洋地球系统多圈层相互作用”重大研究计划中所要解决的核心科学问题(牛耀龄, 2018; 徐敏等, 2019; 林间等, 2019),需要多学科、多种技术手段共同努力解决的地球系统科学的研究热点。

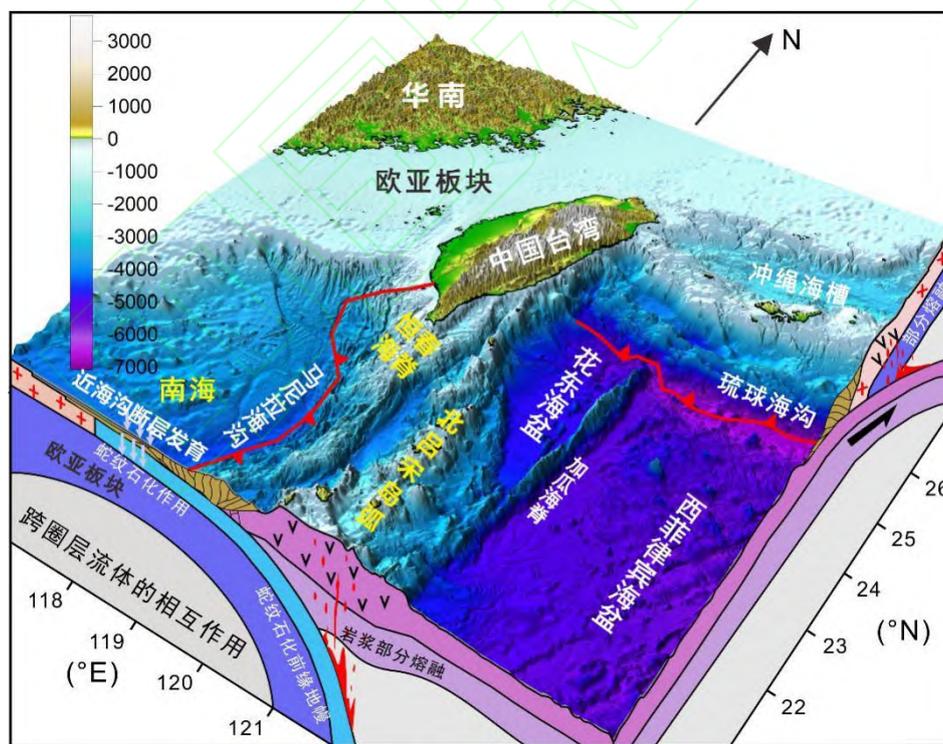


图5 花东海盆及其东/西部板块边界的三维海底地形图及各圈层相互作用示意图(据 Tian et al. 2019 修改)

Fig. 5 Three-dimensional topographic map of Huatung basin and schematic diagram of multi-

4 花东海盆综合地球物理探测的建议

为了解决上述的重要科学问题,建议在花东海盆研究区开展深地震地球物理综合探测实验,以揭示花东海盆与西菲律宾海盆的深部结构特征。设计的深地震测线(OBS2020测线)(图2,6)横穿花东海盆和加瓜海脊,到达菲律宾海盆西北部,西部与OBS1995相连,构成横跨多个地质构造单元的大剖面。测线上布设OBS台站31台,台站间距7 km,人工源激发放炮,并部署7台宽频带OBS实施天然地震联合观测;并针对研究区多条长缆多道反射剖面(图2)重新开展地震解释工作。通过由浅至深的、纵/横波综合研究,获取该测线的精细二维速度结构剖面,(包括:P波速度、S波速度、 V_p/V_s 与泊松比剖面),将重点描绘花东海盆、加瓜海脊及其两侧、和PSP海盆的沉积层和地壳的厚度、速度与深度分布,进行对比分析,从而判断花东海盆及其东/西边界、与菲律宾海盆在地壳性质和年龄上的差异。

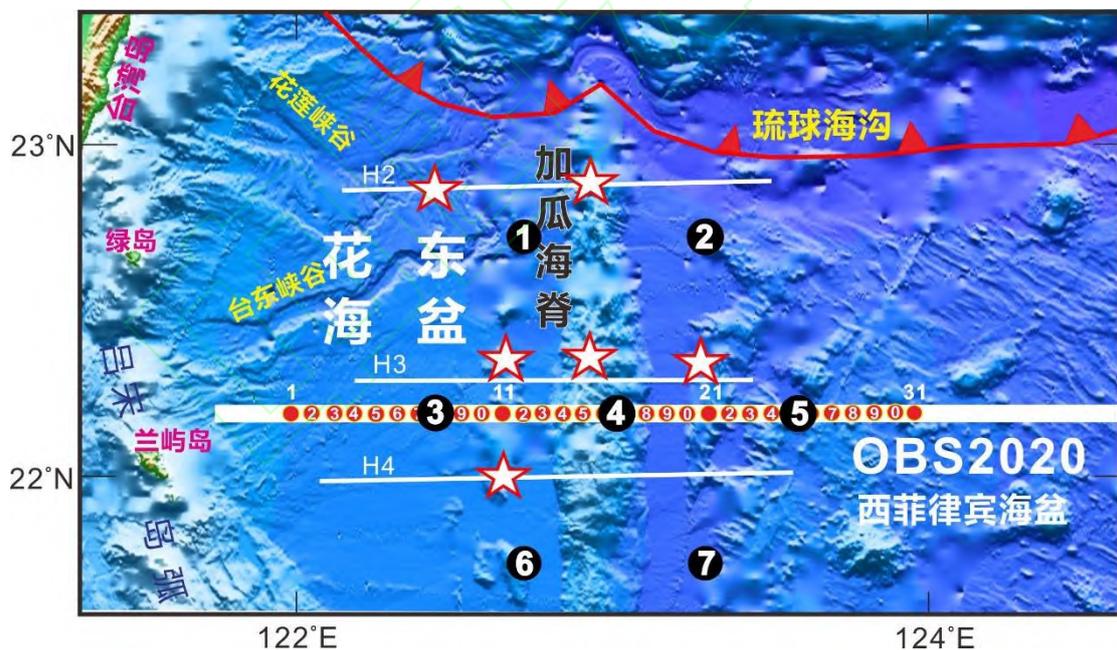


图 6 花东海盆综合深地震探测建议部署图

白色粗线为人工源地震测线 OBS2020, 红色圆为短周期 OBS, 共布放 31 台, OBS 间距 7 km; 黑色圆为 7 台宽频带长周期 OBS, 放置海底 6-8 个月, 用于记录天然地震数据; 红色锯齿实线为琉球海沟板片边界; 红色五角星为 6 个地质拖网/浅钻采样点。

Fig.6 The suggested deployment map of comprehensive deep seismic survey of the Huatung basin.

The thick white line is the air-gun shooting line; the red circles are 31 short-period OBSs with 4-component, 7-km intervals between OBSs; the black circles are 7 wide-band long-period OBSs recording 6-8 months earthquakes on the sea bottom; the red serrated solid line is the boundary of the Ryukyu trench; the red stars are 6 geological sampling sites (trawl/shallow drilling).

此外，可以部署 7 台长达 6 个月记录的宽频带 OBS 数据（图 6），用来可以记录远震的方向（Kuo et al., 2009），主动源与被动源综合地球物质探测结果可以很好地提供各圈层的性质、状态、结构等属性，揭示花东海盆与菲律宾海盆的板块边界的位置和应力状态。

同时，设计 6 个岩石采样点（拖网和浅钻），分别位于花东海盆、加瓜海脊及菲律宾海盆西缘的不同部位（图 2, 6），力求采到基底岩石，进行系统的岩石学与地球化学分析，与其它构造单元的岩石样品进行对比，并结合其它地质地球物理资料，确定花东海盆基底及加瓜海脊的性质、年龄、形成演化，研究其大地构造涵义。

5 花东海盆研究展望

综上所述，花东海盆存在着迫切解决的科学问题，建议针对实施综合地球物理探测（OBS 折射地震探测、天然地震观测、拖网/浅钻采样）。并在已有的多种地球物理资料（多波束地形、多道地震、折射地震、地磁、重力）的基础上，对花东海盆开展综合研究，具有重要科学意义。

利用拖网/浅钻采样数据确定花东海盆年龄是整个花东海盆研究中最关键的科学问题。设计的 6 个岩石采样点（拖网和浅钻），分别位于花东海盆、加瓜海脊及菲律宾海盆西缘的不同部位（图 6），利用浅钻、拖网采样等手段，力求采得基底岩石，进行同位素、地球化学分析。与花东海盆已有的两个样品（RD19 和 RD20）开展对比研究，从同位素年代学和地球化学分析的角度，为花东海盆、加瓜海脊及菲律宾海盆的构造属性提供地质与地球化学证据。同时解决中生代以来整个西太平洋俯冲体系的构造重建的更深层次的重大科学问题，为西太平洋地球系统多圈层的相互作用及地球系统科学基础研究增添新的内容。

花东海盆面积虽小，却有着特殊的板块边界；西部边界以马尼拉俯冲带与南海海盆相连，东部边界以加瓜海脊与西菲律宾海板块相隔（图2和图5）。西部的马尼拉俯冲带是年轻的、活动的俯冲带，地震与岩浆活动强烈。东部的加瓜海脊是菲律宾海板块向花东海盆的起始俯冲夭折而形成的，代表着俯冲起始的阶段。如果花东海盆就是中生代的洋盆，那么，为什么年轻洋壳俯冲到年老洋壳之下？南海块体沿马尼拉海沟俯冲到花东海盆之下，菲律宾海板块也曾短暂地俯冲到花东海盆之下，是由于不同板块的流固作用机制决定吗？还是此处的俯冲带与其它地区不同？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。

致谢：感谢林间、Jean-Claude Sibuet、周蒂和黄奇瑜研究员对于文章构思及重大科学问题方面给予的有力指导；感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见和建议。感谢王卫强、徐敏、舒业强研究员有益的讨论与交流，在此一并感谢。

References

- 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:S0040195115005259. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.024>
- Collot J Y, Lamerche G, Wood R A, et al. 1995. Morphostructure of an incipient subduction zone along a transform plate boundary: Puysegur ridge and trench. *Geology*, 23(6): 519-522.
- Deschamps A, Lallemand S, Collot J Y. 1998. A detailed study of the Gagua Ridge: a fracture zone uplifted during a plate reorganization in the Mid-Eocene. *Mar Geophys Res*, 20(5): 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.

- Doo W B, Lo C L, Hsu S K, et al. 2018. New gravity anomaly map of Taiwan and its surrounding regions with some tectonic interpretations. *J Asian Earth Sci*, 154: 93-100.
- 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.
- 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. *Geophysical Monograph Series*, 371-404.
- Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, models and animations. *J Asian Earth Sci*, 20: 353-431.
- Hilde T W C and Lee C S. 1984. Origin and evolution of the West Philippine Basin: A new interpretation. *Tectonophysics*, 102: 85-104.
- Huang C Y., Wang P C, Yu M M, et al. 2019. Potential role of strike-slip faults in opening up the South China Sea. *National Science Review*, 6: 891-901. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz119>
- Hsu S K, Liu C S, Shyu C T, Liu, et al. 1998. New gravity and magnetic anomaly maps in the Taiwan-Luzon region and their preliminary interpretation. *Terr Atmos Ocean Sci*. 9: 509-532.
- Kuo B Y, Chi W C, Lin C R, et al. 2009. Two-station measurement of Rayleigh-wave phase velocities for the Huatung basin, the westernmost Philippine Sea, with OBS:

- Implications for regional tectonics. *Geophys J Int*, 1793: 1859-1869.
- Lee T Y and 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*, 1512: 4958-4983.
- Liu S Q, Zhao M H, Sibuet J C, et al. 2018. Geophysical constraints on the lithospheric structure in the northeastern South China Sea and its implications for the South China Sea geodynamics. *Tectonophys*, 742-743: 101-119.
- 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(B5).
- 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, Müller R D, Smith W H F, et al. 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346: 65-67. doi:10.1126/science.1258213
- Sibuet J C, Deffontaines B, Hsu S K, et al. 1998. Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution. *J Geophys Res*, 103(B12): 30245-30267.
- Sibuet J C, Hsu S K, Pichon X, et al. 2002. East Asia plate tectonics since 15 Ma: Constraints from the Taiwan region. *Tectonophys*, 344: 103-134.

Stern R J. 2002. Subduction zones. *Rev Geophys*, 40(4): 1012, doi: 10.1029/2001RG000108.

Sun W D, Ding X, Hu YH, et al. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the West Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 262(3-4): 533-542.

Tian Z X, Yan Y, Huang C Y, et al. 2019. Geochemistry and geochronology of the accreted mafic rocks from the Hengchun peninsula, southern Taiwan: Origin and tectonic implications. *J Geophys Res*, 124(3): 2469-2491.

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*, 121: 4670-4741.

Zhao M H., Sibuet J C and Wu J. 2019. Intermingled fates of the South China Sea and Philippine Sea plate. *National Science Review*, 6: 886-890, doi:10.1093/nsr/nwz107.

附中文参考文献

黄奇瑜. 2017. 台湾岛的年龄. *中国科学*, 47(4): 394-405.

翦知潜. 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(36): 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*, 37(5): 649-659.

李家彪. 2011. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展. *地球物理学报*, 54(12): 2993-3003.

李忠海, 杨舒婷, 刘明启, 等. 2019. 板块俯冲带水流体活动及其效应的定量化数值模拟. *地球科学*, 44(12): 3984-3992.

- 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(12): 1253-1266.
- 林间, 李家彪, 徐义刚, 等. 2019. 南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破. 海洋学报, 41(10): 125-140.
- 牛耀龄, 沈芳宇, 陈艳虹, 等. 2018. 俯冲带形成机制的可检验假说和检验方案. 地学前缘, 25(6): 51-66.
- 孙美静, 高红芳, 李学杰, 2018. 台湾东部海域台东峡谷沉积特征及其成因. 地球科学, 43(10): 3709-3718.
- 汪品先. 2018. 大洋钻探五十年: 回顾与前瞻. 科学通报, 63(36): 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(1): 7-14.
- 徐敏, 狄会哲, 周志远, 等. 2019. 俯冲带水圈-岩石圈相互作用研究进展与启示. 海洋地质与第四纪地质, 39(5): 1-12.
- 赵明辉, 杜峰, 王强, 等. 2018. 南海海底地震仪三维深地震探测的进展及挑战. 地球科学, 43(10): 3749-3761.
- 赵明辉, 丘学林, 夏少红, 等. 2008. 大容量气枪震源及其波形特征. 地球物理学报, 51(2): 558-565.
- 周蒂, 孙珍. 2017. 晚中生代以来太平洋域板块过程及其对东亚陆缘构造研究的启示. 热带海洋学报, 36(3): 1-19.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学:地球科学, 41(5): 583-592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学:地球科学, 42(8): 1135-1159.