

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019100701

# 苏拉威西俯冲带结构与俯冲起始机制的三维地震观测

吕川川<sup>1,2,3</sup>, 郝天珧<sup>1,3,4,5</sup>, Rawlinson Nicholas<sup>2</sup>, 赵亮<sup>3,5,6</sup>, 徐亚<sup>1,3,5</sup>, 刘丽华<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029

2. Bullard Labs, Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Cambridge CB3 0EZ UK

3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

4. 自然资源部第二海洋研究所, 自然资源部国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州 310012

5. 中国科学院大学, 北京 100049

6. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

**摘要:** 苏拉威西海具有独特的演化过程——位于北婆罗洲及苏禄岛弧下的苏拉威西海板块停止俯冲后, 其俯冲板块的另一侧开始向苏拉威西岛俯冲, 形成了诸如俯冲转换边缘、对向俯冲系统等独特的地质现象。针对这种同一板块一侧俯冲停止后在板块另一侧发育新俯冲的过程, 科学界提出了众多的板块初始俯冲机制模式, 如前陆盆地碰撞后发育新俯冲、大陆/岛弧边缘重力失稳后解耦后俯冲、岩石圈浅部小范围的地幔对流活动导致俯冲等 14 种初始模式。由于难以获得处于俯冲初始阶段俯冲带的深部岩石圈的地震观测资料, 造成这些板块活动模式仍止步于推测。苏拉威西海区的天然地震观测资料不仅是研究苏拉威西海俯冲系统岩石圈深部构造及演化的基础, 而且也是认识俯冲过程初始机制的关键一环。本文重点介绍了国家自然科学基金委员会重大研究计划“西太平洋地球系统多圈层相互作用”所属重点项目“苏拉威西海与古南海对向俯冲系统的三维地震观测与板块活动机制”在苏拉威西海区针对北苏拉威西海俯冲板片结构所开展的三维地震观测研究。该项研究实验以揭示俯冲系统深部结构与板块活动机制为目标, 通过多边国际合作, 于 2019 年 8 月 15—25 日在苏拉威西海区成功投放了 27 台国产宽频带海底地震仪 (BBOBS), 拟采集 10 个月的天然地震数据。同时计划利用印尼合作方的陆区地震台站数据, 与 OBS 数据一同开展研究区岩石圈三维结构的地震学与数值模拟, 认识俯冲下插板片的变形形态与特征、上覆地壳增厚程度及与俯冲系统持续作用过程之间的关系, 讨论该地区独特俯冲系统的初始机制。

**关键词:** 对向俯冲系统; 俯冲起始机制; 海底地震仪; 三维地震观测; 苏拉威西海

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

## Introduction to the 3-D seismic observation of the north Sulawesi subduction zone and the study of initiation mechanism

LU Chuanchuan<sup>1,2,3</sup>, HAO Tianyao<sup>1,3,4,5</sup>, Rawlinson Nicholas<sup>2</sup>, ZHAO Liang<sup>3,5,6</sup>, XU Ya<sup>1,3,5</sup>, LIU Lihua<sup>1,3</sup>

1. Key Lab of Petroleum Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Bullard Labs, Department of Earth Science, University of Cambridge, Cambridge CB3 0EZ, U.K.

3. Innovation Academy for Earth Science, CAS, Beijing 100029, China

4. Key Laboratory of Submarine Science, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

6. State Key Lab of Lithosphere Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** The Celebes sea has a unique evolutionary history. When the oceanic crust of Celebes below the north Borneo and Sulu arcs stopped subducting, the plate on the other side began to subduct towards the northern arm of the Sulawesi Island. Several unique geological structures, such as the subduction transform edge propagator, double inward subduction were formed. This dynamic tectonic process, from subduction

**资助项目:** 国家重点研发计划资助项目国家质量基础的共性技术研究与应用“战略性新兴产业关键国际标准”研究课题(2016YFF0202704); 国家自然科学基金重点研发计划“西太平洋地球科学系统多圈层相互作用”项目(91858212); 中国科学院国际合作伙伴计划“一带一路专项”项目(132A11KYSB20180020), “全球变化与海气相互作用”专项国际合作项目(GASI-GEOGE-1); 国家自然科学基金联合基金(U1505232), 国家自然科学基金重点项目(41730532)

**作者简介:** 吕川川(1983—), 男, 博士, 现为英国剑桥大学艾萨克牛顿基金会 Reseach Fellow, 从事海洋构造地球物理研究, E-mail: clu@mail.iggcas.ac.cn  
iggcas.ac.cn

**通讯作者:** 郝天珧(1957—), 女, 研究员, 主要从事油气综合地球物理研究, E-mail: tyhao@mail.iggcas.ac.cn

**收稿日期:** 2019-10-07; **改回日期:** 2019-10-18. 文凤英编辑

cessation to initiation in a relatively short period of time is a distinctive feature of the western Pacific subduction system. To explain its physical mechanisms of the process, many models to explain the subduction initiation mechanism have been proposed, such as the post-collision development from foreland arcs, gravity instability initialization at the arc/continental margins and sub-lithospheric mantle convection etc.. Due to deficiency of high resolution seismological data of the incipient subduction zone structure, these mantle dynamic models are still remaining in debate. Acquiring earthquake observation data from the incipient subduction system is not only the basis for studying the deep structure and evolution of its lithosphere, but also a key element in understanding the initial mechanism of the subduction process. This paper introduces the 3-D offshore earthquake observation experiment focusing on the structure of the incipient subduction zone of the North Sulawesi, which is supported by the National Science Foundation of China key project "3-D seismic observation and plate movement mechanism of the inward subduction system in Celebes Sea and proto-South China Sea". The objective of this experiment is to reveal the deep structure of the incipient subduction system and the mechanism of plate movement, 27 broadband ocean bottom seismometers (OBS) were deployed from August 15 to 25, 2019 through international collaboration to record seismic data for 10 months. It plans to study the 3-D structure of the lithosphere of the north Sulawesi subduction zone and carries out numerical simulation analysis of its plate movement. Using the OBS and the land seismic stations data together, we can study the deformation pattern and characteristics of subducting plates, overlying crust and its relationship with the continuous shorting of double subduction, to reveal the mechanism of this incipient subduction system.

**Key words:** double subduction system; incipient subduction mechanism; ocean bottom seismometer; 3-D seismic observation; Celebes Sea

板块俯冲系统对地球板块运动起着至关重要的作用,它在关闭大洋的同时也带来了岩石圈内的岩浆活动并导致上覆板片的地壳增生和下插板片的回落,在威尔逊循环中起到了承前启后的作用,是地球构造演化不可或缺的一环。其俯冲过程重要的一个阶段——俯冲作用的起始过程对应着构造应力环境的转变,但由于这种地质现象不易观测到,俯冲起始过程因此成为板块构造理论中一个需要解决的问题<sup>[1]</sup>。针对起始过程的研究包括了俯冲起始机制的模拟和俯冲带形成的构造环境的控制因素两方面的内容。目前关于板块俯冲初始机制的大部分模式都来自数值和物理模拟的理论研究,缺乏直接的观测证据。其原因不仅在于俯冲带需要海陆联合观测,也因处于俯冲初始阶段的俯冲带数目非常有限<sup>[2]</sup>。Robert J Stern 在回顾了全球针对俯冲带机制的研究后<sup>[3]</sup>,根据俯冲带的起始机制将俯冲带分为两类<sup>[4-5]</sup>,诱发俯冲型(Induced Subduction Initiation,简称 ISI)和自发俯冲型(Spontaneous Subduction Initiation,简称 SSI)。将可以自我维持进行的板块俯冲作为起始俯冲作用完成的标志的话<sup>[6]</sup>,那么 ISI 型需要在长时间压应力作用下,使已经存在的薄弱结构在主导走向上逐渐收敛,使俯冲板片俯冲到一定深度直至其板块运动可以自我维持进行。而另一种 SSI 型,通常发育在大洋转换断层或者被动大陆边缘颈缩地区,一般是在走滑断裂导致或经岩石圈伸展的薄弱位置处发生。由于该地区两侧不同性质的板片的重力失稳进而塌陷,导致一侧板块的下插俯冲。这两种初始机制的分类是依据早期对由菲律宾海转换断层发育的伊豆-小笠原-

马利亚纳(Izu-Bonin-Marianas)弧前火山弧和阿曼地幔蛇绿岩(Ophiolite of Oman)剥露的研究证据所建立的,但由于两个研究区俯冲作用至少已经分别持续了 50 和 90 百万年<sup>[7-10]</sup>,所以,仅依靠来自两个地区的岩石学证据和模拟实验结果来检验俯冲起始机制模式仍然比较困难。特别是由于针对俯冲初始过程所带来深部地幔脱水、深部岩浆运移、上覆地壳形变和增生范围等地质现象的观测还远远不足,因此导致对地幔深部作用机理研究较为薄弱。究其原因就是缺乏足够的、针对处于俯冲初始阶段的俯冲带深部地震观测和探测数据,影响了俯冲初始机制和地幔深部作用机理的研究。

印度尼西亚东部海域(苏拉威西海、北班达海)有着世界上最丰富的板块俯冲系统,其形成年代较晚,现今活动俯冲带主要发育在早中新世(约 20 Ma)以后<sup>[11]</sup>。该地区俯冲带并不像世界上其他处于起始阶段的俯冲带——发育自洋中脊的转换断层地区(如南大西洋南三明治海沟和地中海直布罗陀弧),而是发育自被动大陆边缘——俯冲带不是由两个构造板块在压应力环境下发育,而是由伸展应力环境转变发育而成<sup>[11]</sup>。位于班达海的苏拉深渊(Sula Deep)和 Tolo 海槽,苏拉威西海的科托巴托海沟(Cotabato trench)和北苏拉威西海沟(North Sulawesi trench),它们的俯冲分别起始于洋中脊的转换断层或被动陆缘的洋陆过渡带(Ocean-Continent Transition)地区,属于典型的自发型俯冲。更为重要的是,以上 4 个俯冲带都是独立发育,并处于初始俯冲状态下的不同阶段,因此具有研究俯冲起始机制的独特优势。我们选择北苏拉威西俯冲带开展深部地震



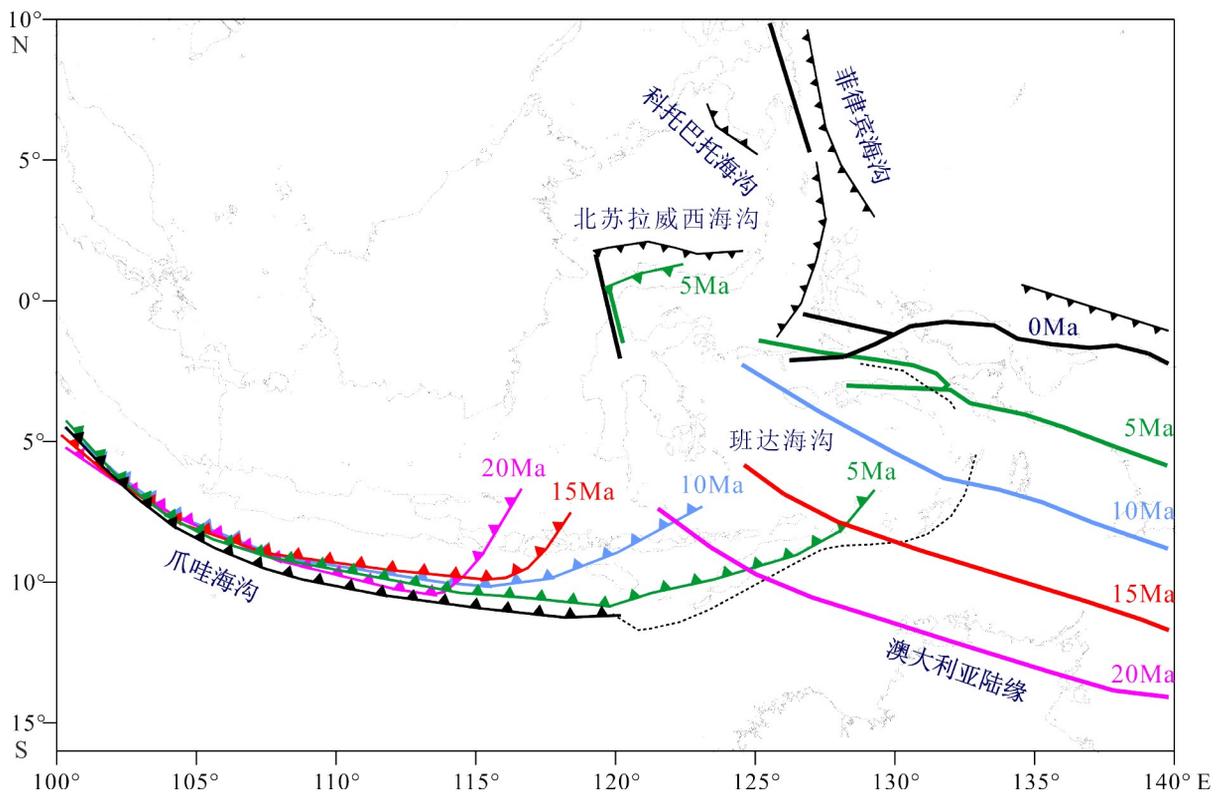


图2 近20 Ma以来印尼东部海域及澳大利亚北部陆缘地区海沟后撤示意图<sup>[11]</sup>

板块边界每5 Ma为单位间隔以不同颜色标示出

Fig.2 Sketch of the trench retreat in the eastern part of Indonesia and the continental margin of northern Australia in the past 20 million years<sup>[11]</sup>

Plate boundaries are marked with different colors every 5 million years

之间的古近纪断裂发展为 Palu-Koro 左旋走滑断裂, 岛北支也同时以其东端为轴, 开始顺时针方向的旋转(参见图2)且旋转角速度大约为  $4^\circ/\text{Ma}$ , 因此北苏拉威西俯冲带的板片俯冲速度是西快东慢。此外沿着海沟走向, 长度大于 500 km 的增生楔前缘由于不同的俯冲速度, 增生楔(或推覆岩席)的范围和厚度都不相同<sup>[22]</sup>。

经过 5 百万年的俯冲作用, 虽然苏拉威西海古洋脊已经俯冲至苏拉威西岛北支之下, 但是由于其俯冲深度有限<sup>[23]</sup>, 该俯冲并未在岛北支形成对应的火山弧(而位于岛北支东端的火山群是由于摩鹿加海俯冲作用形成的火山弧)。此外位于滑脱面的增生楔范围有限且保留了较为完整的变形序列<sup>[13]</sup>, 俯冲带从被动陆缘发展成主动陆缘这一过程仅仅持续了不到 5 百万年, 且该俯冲带东西两侧板片俯冲程度也不同——由于岛北支的旋转, 其俯冲速度自东向西线性递增。针对改俯冲带开展三维地震观测研究, 可以在同一俯冲带下观测不同俯冲速度作用下的岩石圈结构, 为研究自发俯冲型的初始机制提供第一手地震观测资料。

## 2 三维地震观测设计

为了能够较为完整地观测北苏拉威西俯冲系统, 地震台网的设计需要涵盖未受俯冲带影响的苏拉威西海洋盆、俯冲增生楔和弧前盆地地区。但是由于北苏拉威西俯冲带年龄仅有 5 百万年, 尚未形成弧前盆地<sup>[13]</sup>, 为此, 可将海底地震观测台网布设于增生楔后的陆坡上, 同时还要考虑俯冲带转换边缘的影响, 需要在岛北支西侧布设地震台以控制俯冲转换边缘(Palu-Koro 断裂带)的地质结构。据此设计理念, 中国科学院地质与地球物理研究所和英国剑桥大学地球科学系的科研人员共同合作, 设计出北苏拉威西海俯冲带三维地震观测台网(图3)。2019年8月15—25日, 中国科学院、英国剑桥大学、印尼万隆科技学院的科研人员使用印尼国家海洋地质研究所的科学调查船“海洋地质三号”和中国科学院地质与地球物理研究所研发的长周期宽频带海底地震仪(OBS), 完成了 OBS 投放航次, 共投放 27 台 OBS, 站位间隔为 50~70 km(图3), 三维



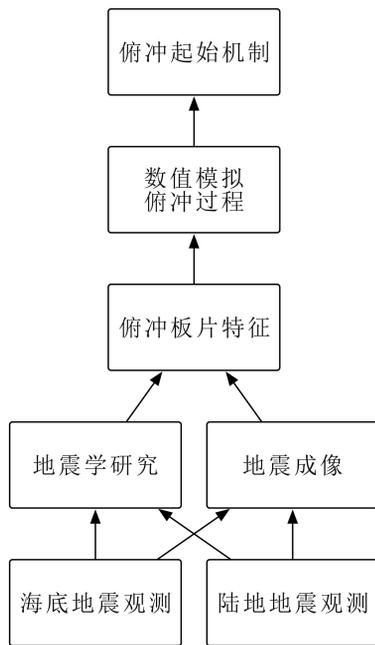


图4 研究技术流程图

Fig.4 Research Flow Chart

设立与实施为实现这一目标提供了良好的契机与强有力的支撑。

**致谢：**感谢国家自然科学基金重大研究计划“西太平洋地球系统多圈层相互作用”项目的支持和国家重点研发计划资助项目国家质量基础的共性技术研究与应用“战略性新兴产业关键国际标准研究课题（2016YFF0202704）”的资助。本项研究同时也得到了自然资源部第二海洋研究所李家彪院士的学术指导和中国科学院地质与地球物理研究所游庆瑜研究员及其OBS研发团队的大力支持，OBS投放航次是由中科院地球物理研究所郝天珧研究员团队与剑桥大学地球科学系Nick Rawlinson教授团队合作完成，航次得到了印尼合作方万隆科技学院和印尼海洋地质研究所的支持，特别是印尼科学调查船“海洋地质三号”的全体船员为投放航次的完成提供了有力保障，在此一并致谢！

#### 参考文献 (References)

- [1] McKenzie D P. The initiation of trenches: a finite amplitude instability[M]//Talwani M, Pitman W C. Island Arcs, Deep Sea Trenches, and Back-Arc Basins. Washington, D. C.: AGU, 1977, 105: 57-61.
- [2] Gerya T. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019: 369-405.
- [3] Stern R J. Subduction zones [J]. *Review of Geophysics*, 2002, 40(4): 1012.
- [4] Stern R J. Subduction initiation: spontaneous and induced [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(3-4): 275-292.
- [5] Stern R J, Gerya T. Subduction initiation in nature and models: a review [J]. *Tectonophysics*, 2018, 746: 173-198.
- [6] Lévy F, Jaupart C. The initiation of subduction by crustal extension at a continental margin [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 188(3): 779-797.
- [7] Uyeda S, Ben-Avraham Z. Origin and development of the Philippine Sea [J]. *Nature Physical Science*, 1972, 240(104): 176-178.
- [8] Casey J F, Dewey J F. Initiation of subduction zones along transform and accreting plate boundaries, triple-junction evolution, and forearc spreading centres—implications for ophiolitic geology and obduction[M]//Gass I G, Lippard S J, Shelton A W. Ophiolites and Ocean Lithosphere. Geological Society, London, Special Publications, 1984, 13(1): 269-290.
- [9] Coleman R G. Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, 86(B4): 2497-2508.
- [10] Boudier F, Ceuleneer G, Nicolas A. Shear zones, thrusts and related magmatism in the Oman ophiolite: initiation of thrusting on an oceanic ridge [J]. *Tectonophysics*, 1988, 151(1-4): 275-296.
- [11] Hall R. The subduction initiation stage of the Wilson cycle [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2018, 470(1): 415-437.
- [12] Govers R, Wortel M J R. Lithosphere tearing at STEP faults: response to edges of subduction zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236(1-2): 505-523.
- [13] Kopp C, Flueh E R, Neben S. Rupture and accretion of the Celebes sea crust related to the North-Sulawesi subduction: combined interpretation of reflection and refraction seismic measurements [J]. *Journal of Geodynamics*, 1999, 27(3): 309-325.
- [14] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [15] Weissel J K. Evidence for Eocene oceanic crust in the Celebes basin[M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington, D. C.: AGU, 1980: 37-47.
- [16] Silver E A. A new tectonic map of the Molucca Sea and East Sulawesi, Indonesia, with implications for hydrocarbon potential and metallogenesis[M]//Barber A J, Wiryosujono S. The Geology and Tectonics of Eastern Indonesia. Bandung: Geological Research and Development Centre, Special Publications, 1981, 2: 343-347.
- [17] Silver E A, McCaffrey R, Smith R B. Collision, Rotation, and the Initiation of Subduction in the Evolution of Sulawesi, Indonesia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B11): 9407-9418.
- [18] Hinz K, Fritsch J. Geoscientific Investigations in the Celebes Sea and on the adjacent Subduction Zones (GIGICS)-SO98, Report on the SONNE cruise SO98/2, Geophysical Survey in the Indonesian Part of the Celebes Sea, 1 November 1994-28 November 1994[R]. Unpubl. report BGRno. 113.095, 1995.

- [19] Rangin C, Silver E A, Von Breymann M T, et al. Summary of shipboard results [C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Repo. College Station, TX, 1990, 124: 415-419.
- [20] Rangin C, Silver E A, Von Breymann M T, et al. General introduction [C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Repo. College Station, TX, 1990.
- [21] Hall R. Late Jurassic–Cenozoic Reconstructions of the Indonesian Region and the Indian Ocean [J]. [Tectonophysics](#), 2012, 570-571: 1-41.
- [22] Otofuji Y I, Sasajima S, Nishimura S, et al. Paleomagnetic evidence for clockwise rotation of the northern arm of Sulawesi, Indonesia [J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 1981, 54 (2): 272-280.
- [23] Surmont J, Laj C, Kissel C, et al. New paleomagnetic constraints on the Cenozoic tectonic evolution of the North Arm of Sulawesi, Indonesia [J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 1994, 121 (3-4): 629-638.