引用格式：郭琳，褚杨，林伟，等，2026. 苏门答腊断层的构造演化：综述与展望[J]. 地质力学学报，32（2）：312−332. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025067

Citation: GUO L，CHU Y，LIN W，et al.，2026. Tectonic evolution of the Sumatran Fault: synthesis and perspective[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：312−332. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025067

苏门答腊断层的构造演化：综述与展望

郭 琳[1,2,3]，褚 杨[1,2,3]，林 伟[1,2,3]，雷宜阳[1,2,3]，刘谭杰[1,2,3]，郭宜琳[1,2,3]，孟令通[1,2,3]

GUO Lin[1,2,3]，CHU Yang[1,2,3]，LIN Wei[1,2,3]，LEI Yiyang[1,2,3]，LIU Tanjie[1,2,3]，GUO Yilin[1,2,3]，MENG Lingtong[1,2,3]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029；
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049；
3. 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室，北京 100029

1. *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*;
2. *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
3. *State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution*, *Beijing* 100029, *China*

Tectonic evolution of the Sumatran Fault: synthesis and perspective

Abstract: ［**Objective**］Oblique convergence between the Indo-Australian Plate and the Eurasian Plate produced a ～1,900-km-long dextral strike-slip fault—the Sumatran Fault—within the overriding plate. While previous studies have extensively examined its geometry, kinematics, and seismicity, the tectonic evolution of the fault remains poorly constrained. ［**Methods**］This study integrates multidisciplinary evidence from structural geology, geomorphology, seismicity analysis, geodesy (GPS), low-temperature thermochronology (apatite and zircon (U-Th)/He dating), and volcanic distribution mapping. We systematically synthesize data on fault segmentation, slip rates, cumulative displacement, magmatic-tectonic relationships, and regional geodynamic models to evaluate the fault's spatiotemporal evolution. ［**Results**］The Sumatran Fault is a highly segmented dextral strike-slip system that can currently be divided into 19 segments based on geometric complexity and seismic activity. Slip rates along the fault are relatively uniform from south to north, with an average around 15 mm/yr, and a total cumulative displacement of approximately 20～25 km. Regionally, the distribution of active arc magmatism closely aligns with the trace of the fault, indicating a dynamic interaction between faulting and magmatism: while magma-induced crustal weakening facilitates fault development, extensional zones associated with normal faulting in turn influence the volcanic activity. Despite its tectonic significance, low-temperature thermochronological studies on the Sumatran Fault remain limited. Existing thermochronological data reveal a period of rapid uplift at ～2 Ma, likely driven by dip-slip motion along the fault. ［**Conclusions**］A three-stage model is proposed. Before 2 Ma, oblique convergence was primarily accommodated by forearc faults (e.g., Mentawai Fault) and shear zones. Around 2 Ma, the Sumatran Fault initiated contemporaneously with the Mentawai Fault, manifesting strain localization in the overriding plate. At present, the Sumatran Fault accommodates the majority of the strain, while strike-slip motion on the Mentawai Fault has significantly diminished. The uplift phase correlates with the initial timing of the Sumatran Fault inferred from present-day slip rates and cumulative offsets, suggesting that the current through-going structure of the fault and the modern tectonic framework were established at the same time. ［**Significance**］

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF0803201）；国家自然科学基金项目（92355302，U2344213）

This research was financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFF0803201) and the National Science Foundation of China (Grant Nos. 92355302 and U2344213).

第一作者：郭琳（2001—），女，在读硕士，研究方向为构造地质学。Email：guolin@mail.iggcas.ac.cn

通信作者：褚杨（1984—），男，博士，研究员，主要从事构造地质学研究。Email: chuyang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期：2025−06−12；**修回日期**：2025−09−11；**录用日期**：2025−09−11；**网络出版日期**：2025−09−21；**责任编辑**：吴芳

Received：2025−06−12；Revised：2025−09−11；Accepted：2025−09−11；Available Online：2025−09−21；Handling Editor：WU Fang

This study provides a comprehensive synthesis of multidisciplinary constraints on the Sumatran Fault and establishes a unified spatiotemporal framework for its tectonic evolution. By integrating fault segmentation, slip rates, thermochronological data, and magmatic–tectonic interactions, this study clarifies the timing of fault initiation and the development of the present-day tectonic architecture. The results offer new insights into strain partitioning and the formation of trench-parallel strike-slip faults at obliquely convergent margins, providing a valuable reference for understanding similar plate boundary systems and their associated seismic hazards.

Keywords: Sumatran Fault; fault structure; tectonic activity; oblique subduction; geological evolution

摘　要：印度–澳大利亚板块向欧亚板块斜向汇聚，导致在仰冲板块形成一条长达 1900 km 的右行走滑断层——苏门答腊断层。已有研究对该断层进行了几何学、运动学以及地震活动研究但断层的构造演化过程至今并未得到精确的限定。文章围绕苏门答腊断层的演化，综述对苏门答腊断层已有的认识与限定，并在此基础上探讨苏门答腊断层研究的局限性及未来研究方向。苏门答腊断层是一高度分段的右行走滑断层，结合地震–构造特征可分为近 20 段。苏门答腊断层滑移速率从南至北较一致，为～15 mm/yr，现有结果表明断层的总位移量大约为 20～25 km。区域上弧岩浆活动区域与断层展布相互重合，表明岩浆导致的地壳弱化促进了断层的形成，而断层活动产生的空间则又会控制部分岩浆的运移。现有对苏门答腊断层的年代学工作较少，已有的低温年代学数据表明，在 2 Ma 时期由于断层活动导致了断层附近地壳快速抬升；现今断层活动速率和位移量推算出的断层起始时间与该低温热年代学研究结论较为契合，表明苏门答腊断层在约 2 Ma 时有一期由于断层倾滑导致的快速隆升事件，代表着苏门答腊断层的贯通和现今构造体系的建立。文章通过整合地质、大地测量、地震活动、岩浆活动、低温年代学等多学科证据，系统梳理了苏门答腊断层的时空演化框架，进一步阐明了断层演化历史及现今构造格局的形成过程。研究结果加深了对斜向俯冲背景下应变分配机制及海沟平行走滑断层形成机制的认识，可为全球类似构造体系的研究及地震灾害评估提供重要参考。

关键词：苏门答腊断层；断层结构；断层活动历史；斜向俯冲；地质演化

中图分类号：P315.2; P542+.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)02−0312−21

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025067

0　引言

印度尼西亚的苏门答腊岛是世界第六大岛屿，位于欧亚板块南缘，整体呈北西—南东走向，是特提斯构造带东段的重要组成部分，其构造演化受印度–澳大利亚板块向欧亚板块下俯冲的影响(Hamilton, 1979; 朱日祥等, 2022; 丁巍伟等, 2023; 潘桂棠等, 2025; 王晨旭等, 2025)。

在苏门答腊岛内，苏门答腊断层(Great Sumatran Fault 或 Sumatran Fault)是俯冲带仰冲板块上发育的一条长达约 1900 km 的大型右行走滑断层。该断层呈北西—南东向延伸，与海沟近平行展布，是地球上活动强烈的大型走滑断层之一，多次发生 M_w 6～8 地震，是控制苏门答腊区域构造演化的重要断层(Rafie et al., 2023)。同时，苏门答腊断层是一条构造分段显著的走滑断层，被断层上的几何结构复杂区所分割(Sylvester, 1988)，这些几何结构复杂区同时也会阻碍地震破裂的传播(Wesnousky, 2006)。历史上苏门答腊断层发生的地震破裂大多被限制在各分段内部，且震级不超过 7.6(Rafie et al., 2021)。因此，苏门答腊断层分段是了解地震活动与断层系统演化过程的基础(Irsyam et al., 2020)。

在 20 世纪 70 年代以前，苏门答腊断层的研究重点集中在地震活动性上。Reid(1913)运用 1892 年苏门答腊地震前后的大地测量数据，提出地震活动受控于板块俯冲导致的弹性回跳过程；Berlage(1934)描述了 1933 年南苏门答腊地震的影响，发现其破坏范围可以从拉瑙湖以北一直到巽他盆地(即 Kumering 段以南)。进入 20 世纪 70 年代后，断层几何学逐渐受到关注(Fitch, 1972; Bellier et al., 1997; McCaffrey, 1991)，部分学者开展了断层分段研究(Tjia, 1977; Katili and Hehuwat, 1967)，但对该断层的称呼并不统一(如“Semangko Fault”“Ulu-Aer”或“Great Sumatran trough system”)，也缺乏对苏门答腊断层几何学–运动学的详细研究。直到 Sieh and Natawidjaja(2000) 系统梳理了苏门答腊断层整体的几何学、运动学、地震活动以及火山活动，并对该

断层进行了详细分段,从而建立了现今苏门答腊断层的研究框架。2004年苏门答腊–安达曼大地震后,伴随着俯冲带相关研究快速增长,苏门答腊断层作为苏门答腊俯冲带体系的重要组成部分,也逐渐成为研究活动大陆边缘大型走滑断层的典型区域(McCaffrey, 2009)。

目前对于苏门答腊断层的几何学、运动学、地震活动以及岩浆活动,已经开展了一系列研究。其中,相对全面的地质研究为Hamilton发表在美国地质调查局(USGS)的印度尼西亚地区构造活动的报告,以及Barber等在伦敦地质学会发表的专著(Hamilton, 1979; Barber et al., 2005)。然而由于详细而系统的地质研究仍较为欠缺,许多关键性问题亟待深入探索,如:苏门答腊断层的活动起始时间与活动峰期;苏门答腊断层的构造演化过程;苏门答腊断层如何吸收斜向俯冲水平分量;苏门答腊断层与火山弧之间的联系等。故文章旨在通过对苏门答腊断层几何学、运动学及年代学的研究进行系统梳理,建立断层演化的基本格架,进一步为斜向俯冲背景下与海沟平行的大型走滑断层的发育提供新的认识与理解。

1 地质背景

1.1 板块构造

苏门答腊俯冲体系从南西向北东,可以分为印度–澳大利亚板块(俯冲板块)、苏门答腊海沟/俯冲断层、增生楔(从锡默卢岛延伸到恩加诺岛的近海岛链)、弧前盆地、巴里桑山脉(包括火山弧和苏门答腊断层),以及后缘的含油气盆地(图1a、1b)。俯冲带东侧为正向俯冲的爪哇俯冲带,西侧为斜向俯冲的苏门答腊俯冲带。近20年来,该俯冲带大地震频发,其中在2004年12月26日发生的M_W 9.1~9.3的苏门答腊–安达曼大地震,是1960年智利大地震(M_W 9.5)以及1964年阿拉斯加大地震(M_W 9.2)后最强烈的一次地震(Lay et al., 2005; Chen et al., 2007)。

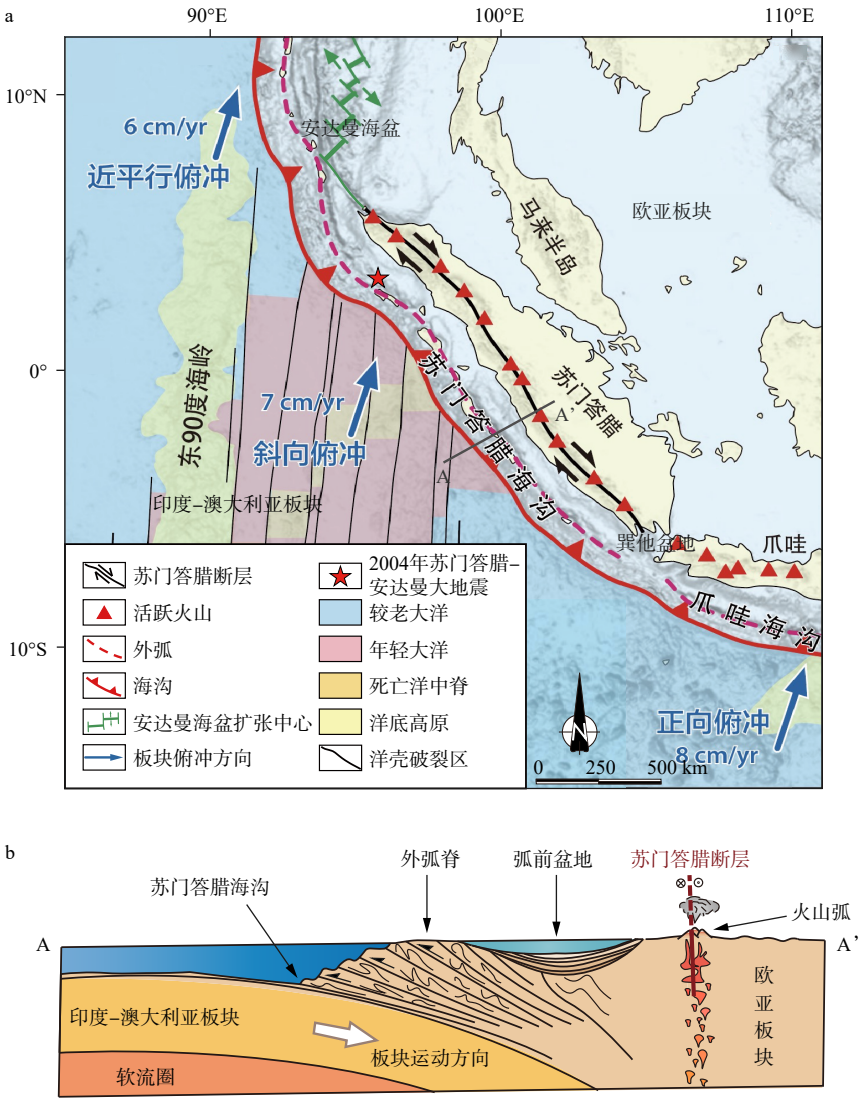
在苏门答腊俯冲体系中,苏门答腊断层是印度–澳大利亚板块斜向俯冲作用下,在欧亚板块形成的大型走滑构造(图1; Fitch, 1972; Jarrard, 1986)。通过板块运动矢量分解,斜向汇聚产生与海沟平行的剪切分量,在仰冲板块形成一条与海沟近平行的走滑断层,将弧前地区撕裂出一条被走滑断层和海沟围限的弧前微板块(sliver plate;图2a; Fitch, 1972; Tikoff and Teyssier, 1994; Teyssier et al., 1995)。斜向汇聚的速度矢量从而可以分解为俯冲板块相对弧前微板块的倾向速度矢量,以及弧前微板块相对仰冲板块的走向速度矢量(走滑断层的运动;郑亚东等, 2022)。在东南亚地区,这种走滑断层在仰冲板块的调节作用甚至可以从缅甸的实皆断裂向南延伸,穿过安达曼海拉分盆地,连接苏门答腊断层,形成长达4400 km的断裂体系(图2b; McCaffrey, 1996, 2009; Curray, 2005)。随着斜向俯冲的进行,这种走滑断裂体系很可能演化成新的板块边界(Jarrard, 1986; McCaffrey, 1992, 2002),重新塑造板块边界的构造体系,进而促进对斜向俯冲板块边界动力学和大陆转换断层形成机制的理解。

1.2 区域地质背景

Metcalfe(1984)首先将分布在古特提斯缝合带西侧、狭长带状分布的二叠纪—三叠纪东南亚区域称为Sibumasu(滇缅泰马)地块,并将苏门答腊归为Sibumasu南延部分(图3)。Hutchison(1994)依据岩石组合、古生物、火山–侵入岩年代学等证据,进一步将苏门答腊岛划分为2个地块:东苏门答腊的地层包括冰水沉积的含砾泥岩,是Sibumasu地块的南延部分,为亲冈瓦纳地块;西苏门答腊地层为暖水沉积,含热带古动物群和华夏型“占碑植物群”,是欧亚大陆边缘分裂出的亲华夏陆块(图3)。

目前,苏门答腊主岛单元划分仍以此为基础,分为东苏门答腊地块、西苏门答腊地块,以及沃拉推覆体(图4),其中东、西苏门答腊地块之间的界线为苏门答腊中央构造带(Medial Sumatra Tectonic Zone, MSTZ)(Metcalfe, 1991; Metcalfe and Irving, 1990; Cameron et al., 1980; Barber et al., 2005, 2009)。苏门答腊中央构造带为一条非连续出露、以片岩和片麻岩为主的强变形带,从安达曼海南侧延伸到苏门答腊岛东南端,全长1760 km(Hutchison, 1994; Barber et al., 2005; Barber and Crow, 2009)。相较东、西苏门答腊地块,对中央构造带变形岩石的构造学和岩石学方面研究还较为缺乏。

苏门答腊岛此前仅在钻孔资料中发现有疑似泥盆纪的地层出露(Barber and Crow, 2009),区域上出露最古老的岩石单元是晚古生代的火山岩系(Barber and Crow, 2009)。近期研究发现苏门答腊北部打京岸地区存在一套花岗质片麻岩,原岩为早志留世(~442 Ma)的S型花岗岩,可能代表了最古老的基底岩石(徐畅等, 2020; Wang et al., 2021)。此外,



a—苏门答腊俯冲带构造框架图（据 Frisch et al., 2011 修改；线段 A–A’指示图 1b 剖面位置）；b—苏门答腊俯冲带剖面图（据 Frisch et al., 2011 修改）

图 1　苏门答腊俯冲带示意图

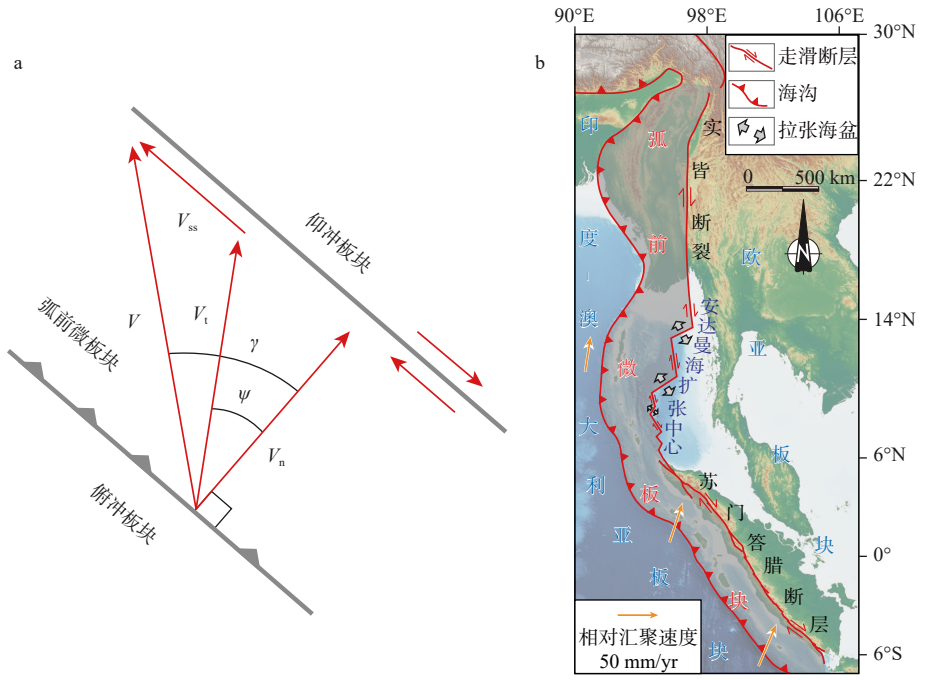
Fig. 1　Schematic diagram of the Sumatra subduction zone

(a) The structural framework of the Sumatra subduction zone (modified after Frisch et al., 2011). Line A–A’ indicates the location of the cross section shown in Fig. 1b; (b) Cross-section of the Sumatra subduction zone (modified after Frisch et al., 2011)

苏门答腊的火成岩和沉积岩中也存在元古宙的碎屑锆石（1720～935 Ma），表明苏门答腊可能存在被覆盖的古老基底（徐畅等，2020; Zhang et al., 2018）。

东、西苏门答腊地块的石炭系为打巴奴里群（图 5）。在东苏门答腊地块，该套岩系下段为砂页岩，中段为灰岩，上段为博霍洛克组含砾泥岩和冰碛岩；但在西苏门答腊地块中缺失上段，无冰碛岩发育，被认为是东、西苏门答腊地块的最主要差别（Barber, 2000）。二叠系珀三甘群与下伏石炭系打巴奴里群呈角度不整合关系，其下段为一套含火山岩夹层的砂岩、页岩、灰岩，中段为灰岩，上段为含燧石的砂岩、页岩（图 5; 徐畅等，2020）。上二叠—下三叠统之间地层缺失，中—上三叠统岩石单元出露较少，主要为瓜鲁组和图胡组碳酸盐岩与硅质碎屑岩。区域岩浆岩以花岗岩为主，包括沿中央构造带分布的同构造花岗岩年龄为晚三叠世至早侏罗世（230～207 Ma）以及侵入沃拉推覆体的白垩纪花岗岩，这些三叠纪—白垩纪的岩浆事件与板块俯冲和剪切带活动相关。

沃拉推覆体位于西苏门答腊西侧（图 3，图 4），



a—斜向俯冲板块运动矢量分解模型示意图(据 McCaffrey, 2009 修改;红色箭头指示板块相对运动矢量;V—俯冲板块与仰冲板块相对汇聚速度矢量;V_{ss}—走滑断层滑动速度矢量;V_t—俯冲板块与弧前微板块之间相对汇聚速度矢量;V_n—垂直于海沟走向的汇聚速度矢量;Ψ—俯冲板块与弧前微板块间汇聚斜向度;γ—俯冲板块与仰冲板块间汇聚斜向度);b—东南亚弧前微板块示意图

图 2 印度–澳大利亚板块与欧亚板块运动学特征及构造变形响应

Fig. 2 Kinematics and tectonic deformation responses of the Indo-Australian and Eurasian Plates

(a) Slip partitioning model of oblique subduction (modified after McCaffrey, 2009); (b) Sliver plate diagram of southeast Asia. Red arrows indicate relative plate motion vectors. Total relative motion vector V, the direction of V_{ss} (the strike-slip vector) from fault orientation, and the azimuth of V_t (the thrust vector) from earthquake slip vectors allow a unique solution to the triangle formed by V, V_t, and V_{ss}, providing estimates of the magnitudes of V_t and V_{ss}. Ψ is the slip vector obliquity, γ is the convergence obliquity, and V_n is the velocity normal to the trench.

以晚侏罗世—早白垩世(约 163～100 Ma)的火山弧岩系(玄武岩–安山岩、火山碎屑岩)和大洋增生杂岩(蛇纹岩、枕状玄武岩、放射虫燧石)为主体,伴生碳酸盐岩(如礁灰岩),代表中特提斯的洋内岛弧与增生杂岩的复合体(Barber, 2000; McCarthy et al., 2001; Barber et al., 2005; Barber and Crow, 2009)。由于该推覆体的洋内弧属性(Metcalfe, 2005),因此其也被称为沃拉弧。由于巽他板块(Sunda Plate,欧亚板块的一部分,位于东南亚,包括安达曼海、苏门答腊在内)陆缘存在与沃拉弧同期的弧岩浆作用,因此 Barber et al.(2005)认为沃拉弧并非在欧亚大陆边缘形成。Hall(2012)提出沃拉弧在晚侏罗世—早白垩世形成于中特提斯洋内,沃拉弧与巽他板块之间的洋壳发生双向俯冲而完全消失;Advokaat et al.(2018)将该消失洋壳命名为 Ngalau 洋。还有一部分学者将该洋壳称为沃拉洋,认为其为中特提斯洋的南延(Metcalfe, 2011, 2021; Hall, 2012; Xu et al., 2024)。

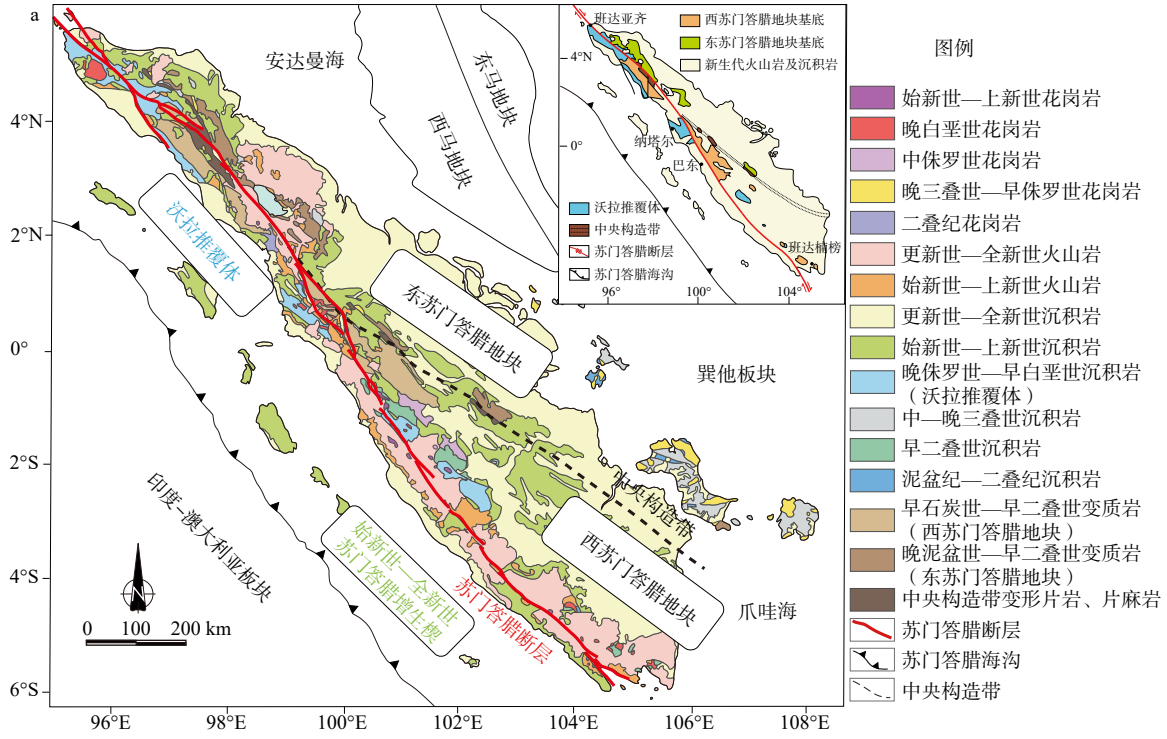
2 苏门答腊断层几何学

2.1 构造分段性

Sieh and Natawidjaja(2000)结合断层几何形态和结构、外弧、弧前盆地以及火山弧等特征,将整条断层带从北向南在构造特征上分为 3 段(图 6)。

(1)北段。从最北端亚齐省到 3.2°N(Tripa 段南端),其主要特征为:①苏门答腊断层几何形状不规则,位于俯冲板片约 125～140 km 之上,有部分大型次级断层北端或南端汇入主断层;②火山弧位于苏门答腊断层周围及其以北;③深达 1～2 km 的弧前盆地;④一条宽阔、在结构和地形上均较复杂的外弧脊;⑤其最南端数百千米处的单斜,与南段的明达威区域结构相似;⑥一条非常狭窄的弧内坡。

(2)中段。从 3.2°N 到赤道,是结构最复杂的一段:①苏门答腊断层包括“赤道分叉”区,与俯冲板片等深线走向不一致;②苏门答腊断层明显穿切火



a—苏门答腊地质图（据 Barber et al., 2005 修改）；b—苏门答腊地质单元简图（据 Advocaat et al., 2018 修改）

图 3　苏门答腊地质图

Fig. 3　Geologic maps of Sumatra

(a) Geologic map of Sumatra (modified after Barber et al., 2005); (b) Simplified map of the geological units of Sumatra (modified after Advokaat et al., 2018)

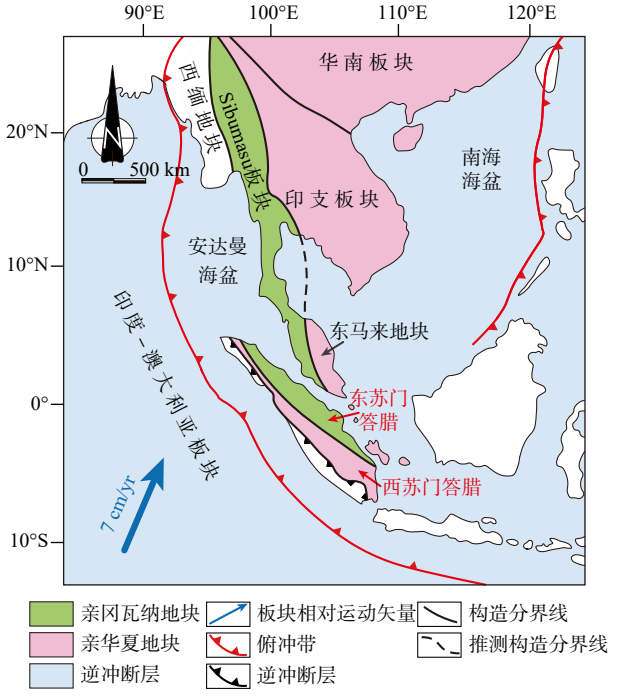


图 4　东南亚大地构造示意图（据 Barber and Crow, 2009 修改）

Fig. 4　Schematic diagram of the tectonics of Southeast Asia (modified after Barber and Crow, 2009)

山弧；③较浅（0.2～0.6 km 深）的弧前盆地，在斜向/正断层作用下破碎成几个块体；④破碎的外弧；⑤外弧脊与弧前盆地之间破碎的单斜；⑥破碎的弧内坡。

（3）南段。从赤道延伸到巽他盆地，是结构最简单的一段：①苏门答腊断层呈右行雁列状分布在俯冲板片之上 100 ～ 135 km；②火山活动的位置主要在断层的北东方向或附近；③弧前盆地结构简单，深约 2 km，未被主要断裂破坏；④外弧脊相对狭窄，形成一个单一的弧前高地，几何形状简单；⑤较完整且相对呈直线的明达威断层和单斜将盆地和脊分开；⑥弧内坡较为均匀，在活动变形前锋与外弧脊之间约中段有一个突出的高原。

2.2　地震分段性

在地震活动性上，苏门答腊断层同样具有高度分段的几何学特征（Bellier et al., 1997; Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2018a, 2018b）。Sieh and Natawidjaja（2000）通过地形图和立体航拍图像结合，以苏门答腊断层上明显的几何结构复杂区作为分段点，如拉分盆地、湖泊，或压扭产生的褶皱、弯折等区域，将整条断层从南至北分为 19 段，名称使用该段

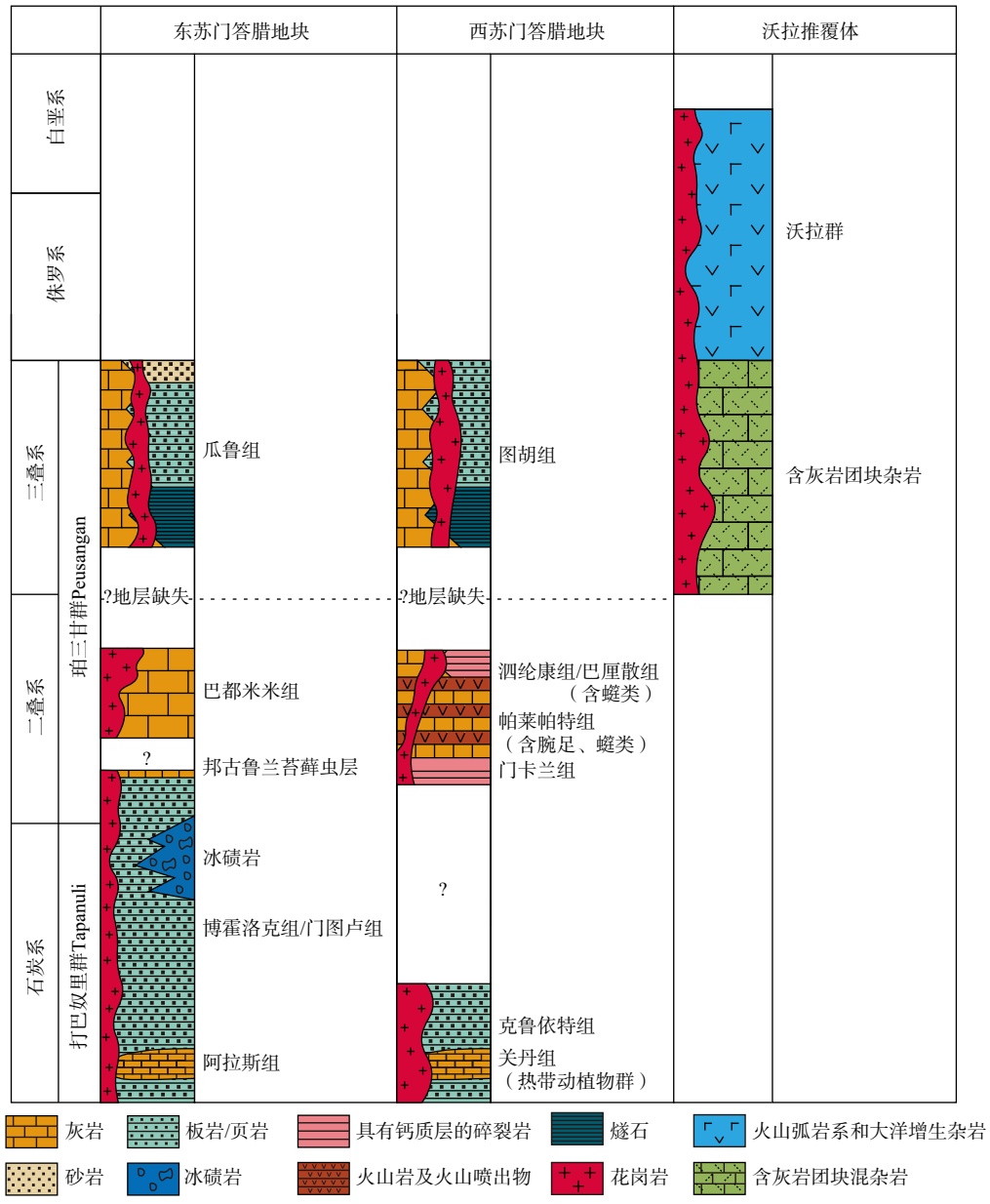
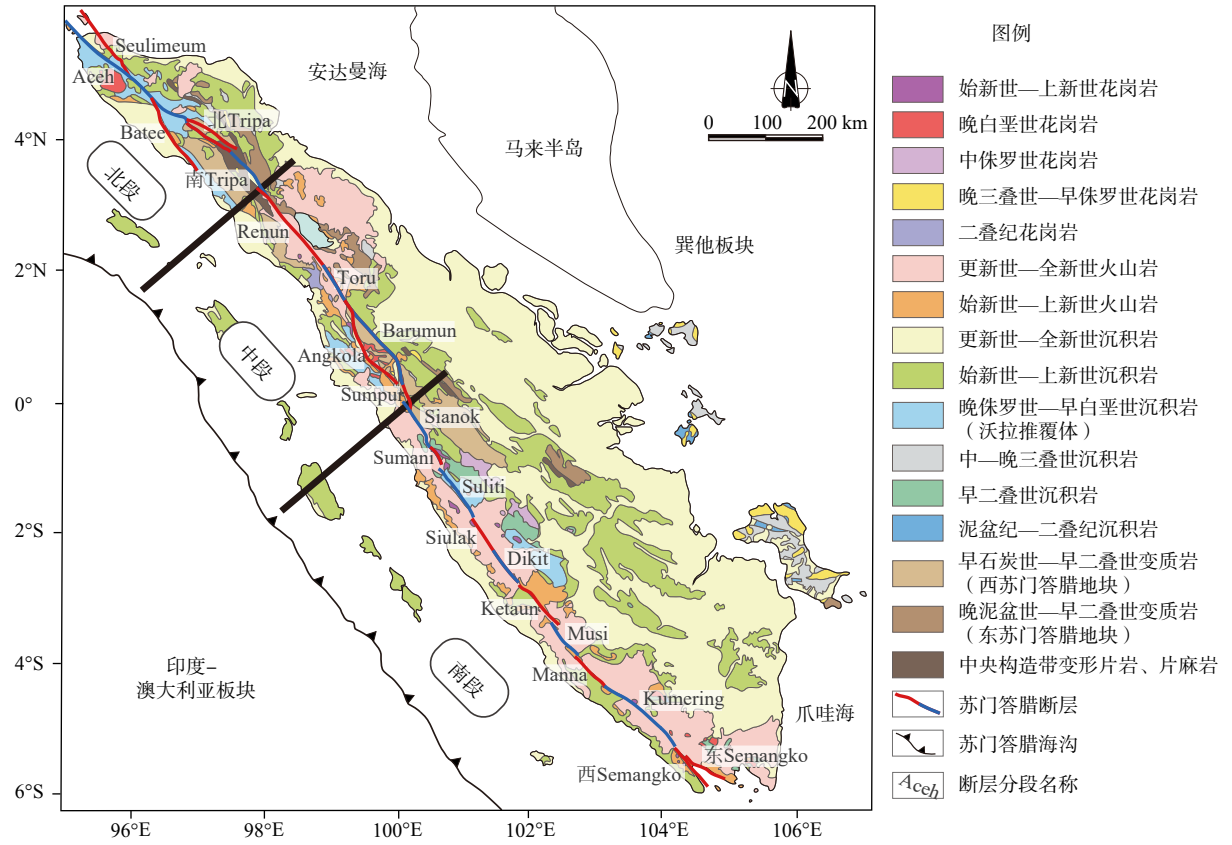


图 5 苏门答腊岛构造及地层单元（据 Barber and Crow，2009；Qian et al.，2025；尚庆华等，2025 修改）

Fig. 5 Tectonic and stratigraphic units in Sumatra (modified after Barber and Crow, 2009; Qian et al., 2025; Shang et al., 2025)

主要河流的名字(图 6, 图 7), 之后的研究都沿用了这一分段标准。野外地质调查表明, 这些断层几何结构复杂区可能会终止地震破裂的传播(Wesnousky, 2006)。对于大地震而言, 地震破裂则可跨过阶区或弯曲这样的几何结构复杂区, 在多个断层分段甚至多条断层上传播, 从而形成级联破裂(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995)。自 1892 年以来, 苏门答腊断层发生了超过 19 次 $M\geqslant$ 6.5 的地震(Hurukawa et al., 2014), 这些地震正由于其分段性而大多被限制在各分段内部, 除了最大的一次地震, 即 1943 年 M_{W} 7.6 地震贯穿了 Sumani 段以及 Suliti 段, 导致的多段破裂(图 7, 表 1; Rafie et al., 2021), 表明苏门答腊断层分段与地震活动的紧密联系(Irsyam et al., 2020)。

在 Sieh and Natawidjaja(2000)划分的 19 段中, 大部分分段长度都小于 100 km, 只有 2 段 ≥ 200 km, 分别为 2.0° ~3.55° N 长 225 km 的 Renun 段和 4.4°~5.4°N 长 200 km 的 Aceh 段(Sieh and Natawidjaja, 2000)。1.8ºN 到赤道出现一条向南西突出的断层, 其在南北两端并入主断层, 被命名为“赤道分叉”(Equatorial Bifurcation), 并被进一步划分出双重走滑构造(Weller et al., 2012; Muksin et al., 2014)。Natawid-



地质图据 Barber et al., 2005 修改；断层分段数据引自 Sieh 和 Natawidjaja(2000)；分段特征详见 2.2 节

图 6　苏门答腊断层分段示意图

Fig. 6　Schematic map of the Sumatran Fault segments

Geological map modified after Barber et al., 2005; fault segmentation data from Sieh and Natawidjaja (2000). Details of the fault segmentation characteristics are given in Section 2.2.

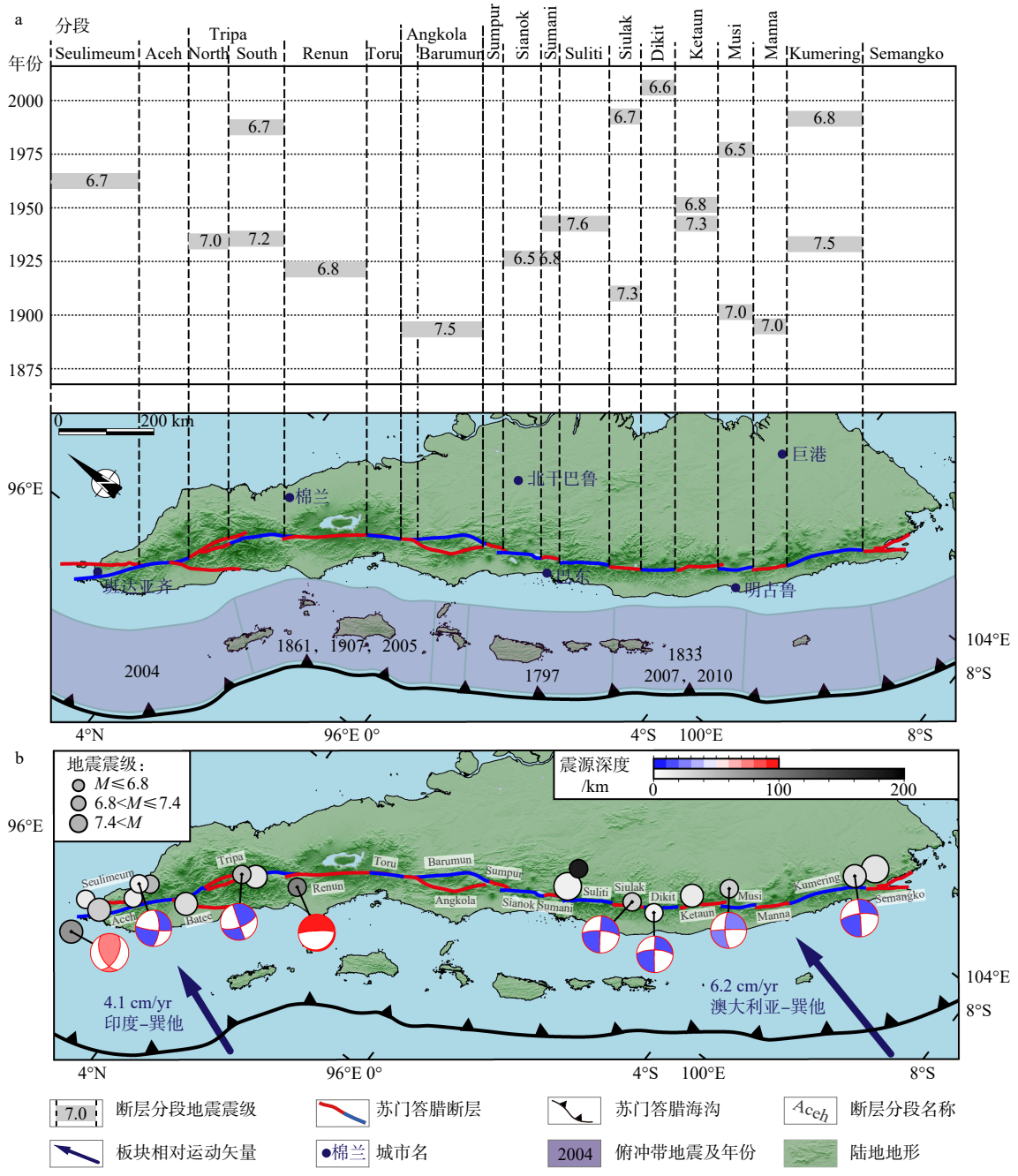
jaja(2018b)基于现代数字高程模型和高分辨率卫星图像更新了苏门答腊断层北端和南端的分段模型，北端在 Aceh 段主断层东侧识别出 5 条次级断层，包括 Pidie、Biruen、Lhok-Sumawe、Peusangan 和 Oreng 断层；南端，苏门答腊断层并非止于巽他盆地，而是继续向南延伸并通过两个拉分盆地围限出 70 km 宽的巨型伸展结构与 Ujung Kulon 右行断层。

除了以上的几何学分段之外，后续的研究还通过地球物理方法对苏门答腊断层进行了更为精细的分段(表 1)。Muzli et al.(2018)发现，2016 年亚齐省 Pidie Jaya 地区 M_w 6.4 的地震是由于一条北东—南西走向的分支断层发生左行走滑。Muksin et al.(2019)基于地震分布、震源机制解和数字高程模型(DEM)的综合分析，将亚齐省中部的断层系统细分为 9 个次级断层，随后通过精确的地震波、震源机制和地貌结构研究了苏门答腊断层的 Tripa 段、Batee 段以及活跃的次级断层 Lokop 段、Langsa 段和 Alas 段(Muksin et al., 2023)，揭示了断层内部的形变分配机制(表 1)，提出次级断层系统受控于印度板块斜向俯冲(Batee 走滑断层、Alas 走滑断层、Lokop 走滑断层)和微板块碰撞挤压(Langsa 逆冲断层)。

3　苏门答腊断层运动学

3.1　断层滑移速率

由于植被覆盖和露头的难接近性，已发表的苏门答腊断层滑移速率结果较少(Bradley et al., 2017)。从 20 世纪 90 年代开始，根据沿断层的断错地貌标志物的位错–年龄数据(如新生代火山沉积物、水系断错)计算平均速率，研究认为断层滑移速率从南边的～6 mm/yr 逐渐增长，北边的滑移速率达到～38 mm/yr(Sieh et al., 1991, 1994; Bellier and Sébrier, 1995; Genrich et al., 2000; Sieh and Natawidjaja, 2000; Hickman et al., 2004)；而这种从南到北显著增加的滑移速率，使



a—苏门答腊断层分段地震活动统计(据 Rafie et al., 2023 修改);b—苏门答腊断层附近部分地震震源机制解(1900—2025 年, $M \geqslant 6.5$);地震震中及震级数据来源:美国地质调查局官网(USGS, https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/),其中 1976 年及以后的地震震源机制解沙滩球数据来自全球矩心矩张量计划(Global CMT, https://www.globalcmt.org/)

图 7 苏门答腊断层地震统计

Fig. 7 Statistics of earthquakes along the Sumatran Fault

(a) Segmented seismicity statistics of the Sumatran Fault (modified after Rafie et al., 2023); (b) Focal mechanism solutions for selected earthquakes ($M \geqslant 6.5$) near the Sumatran Fault (1900～2025).

Data Sources: Earthquake epicenter and magnitude data from the U.S. Geological Survey (USGS) [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/]; Focal mechanism solutions (1976–present) from the Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project [https://www.globalcmt.org/]

众多学者认为弧前地区非刚性,而处于被拉伸状态(Huchon and Le Pichon, 1984; Lassal et al., 1989; McCaffrey, 1991, 2000; Bellier and Sébrier, 1994, 1995; Sieh and Natawidjaja, 2000)。Bradley et al.(2017)对已有的测量的地质滑移速率进行了整理和评估(表 2),认为大部分的数据建立在推测和模糊的卫星照片

表 1　苏门答腊断层各分段特征及次级断层特征

Table 1　Features of segments of the Sumatran Fault and secondary faults

分段	周边次级断层	纬度	长度/km	走向/°	南端特点/分段特征	最大历史地震活动	到变形前锋带距离/km	俯冲界面深度/km	数据来源
Seulimeum段		5.9°～5.0°N	148	148	张扭弯折及拉张阶区, 4 km宽; 深度达16 km; 与Seulawah火山联系较密	1964(M_w=6.96)	—	125～140	Sieh and Natawidjaja, 2000; Muksin et al., 2019
Aceh段		5.4°～4.4°N	200	135	挤压阶区, 3 km宽; 地表活动弱但深部活跃	无震蠕滑	323	105～130	Sieh and Natawidjaja, 2000; Ito et al., 2012; Natawidjaja, 2018b; Tong et al., 2018
	Pidie/Bireun/Lhok-Sumawe断层	5.29°N附近	—	145	右旋走滑, 分担主断层东部应变	2016(Pidie, M_w=6.5), 1942(Bireun, M=6.8)	—	—	Muzli et al., 2018; Natawidjaja, 2018b
	Panteraja断层	5.235°N附近	20	42	左旋走滑(倾角63°), 深度8～28 km; 地表无破裂, 但余震呈线性分布	—	—	—	Muzli et al., 2018
Batee段		4.6°～3.5°N	138	150	向南延伸至增生楔	—	—	—	Natawidjaja, 2018b; Muksin et al., 2019, 2023
	Lokop断层	4.6°N附近	—	170	右旋走滑; 分Lokop段(北)和Kutacane段(南)	—	—	—	Muksin et al., 2023
	Langsa断层	近Langsa市	—	145	逆冲断层(倾向北, 倾角26°), 伴生褶皱-逆冲带; 由苏门答腊–Mergui微板块挤压形成	2018(M_w=5.3)	—	—	Muksin et al., 2023
北Tripa段		4.4°～4.0°N	83	114	地震与地形显示其呈两条平行线分布	1935(M_w=7.0)	295	125～150	Sieh and Natawidjaja, 2000; Burton and Hall, 2014; Muksin et al., 2023
南Tripa段		4.0°～3.2°N	122	144	拉张阶区, 9 km宽	1936(M_w=7.06), 1990(M_w=6.7)			
Renun段		3.5°～2.0°N	220	140	拉张阶区, 3 km宽	1936(M_w=7.06)	286	100～125	Sieh and Natawidjaja, 2000
	Alas断层	3.4°～2.8°N	—	165	南Tripa与Renun段西侧, 浅源走滑	—	—	—	Muksin et al., 2023
Toru段		2.0°～1.2°N	95	152	压扭弯折	1984(M_S=6.4), 1987(M_S=6.6)	294	125～155	Sieh and Natawidjaja, 2000
Angkola段		1.8°～0.3°N	160	145	几何结构复杂区	1892(M_S=7.7)	290	135～155	Sieh and Natawidjaja, 2000
Barumun段		1.2°～0.3°N	125	144	张扭弯折区, 23 km宽	位于应力影中	294	125～170	Sieh and Natawidjaja, 2000
Sumpur段		0.3°～0°N	35	163	拉张阶区, 12 km宽	—	308	165～175	Sieh and Natawidjaja, 2000
Sianok段		0.1°～0.7°S	90	149	拉张阶区, 4.5 km宽	1926(M_w=6.58)	302	135～145	Sieh and Natawidjaja, 2000
Sumani段		0.5°～1.0°S	60	142	拉张阶区, 4.5 km宽	1943(M_w=7.73), 1926(M_S=6.8)	293	130	Sieh and Natawidjaja, 2000
Suliti段		1.0°～1.75°S	95	147	拉张阶区, 4.5 km宽	1943(M_w=7.73)	273	130	Sieh and Natawidjaja, 2000
Siulak段		1.7°～2.25°S	70	148	拉张阶区, 11 km宽	1909(M=7.3), 1995(M_w=6.8)	266	120～130	Sieh and Natawidjaja, 2000
Dikit段		2.3°～2.75°S	60	141	断层几何结构复杂区, 不连续	2009(M_w=6.6)	—	—	Sieh and Natawidjaja, 2000
Ketaun段		2.75°～3.35°S	85	141	拉张阶区, 5～18.5 km宽	1943(M_w=7.38), 1952(M_S=6.8)	271	110～125	Sieh and Natawidjaja, 2000
Musi段		3.25°～3.65°S	81	145	拉张阶区, 5.6 km宽	1979(M_S=6.6)	260	115	Sieh and Natawidjaja, 2000
Manna段		3.8°～4.35°S	85	135	压扭弯折区, 挠度17°	1893(M=7.0)	275	120	Sieh and Natawidjaja, 2000
Kumering段		4.35°～5.3°S	162	131	拉张阶区, 6 km宽	1933(M_w=7.52), 1994(M_w=6.9)	300	100～120	Sieh and Natawidjaja, 2000
西Semangko段		5.25°～6.5°S	95	140	形成西Semangko海沟(水深1800 m); 向南与海沟相连呈三角形开口	—	220～270	50～100	Sieh and Natawidjaja, 2000
东Semangko段		5.25°～5.9°S	116.4	125	形成东Semangko海沟(水深800 m)	—			
	Ujung Kulon断层	6.3°～7.5°S	—	140	右旋走滑, 连接Semangko海沟; 构成SFZ南延传递断层	—	—	—	Natawidjaja, 2018b

注: 分段“到变形前锋带距离”和“俯冲界面深度”数据来源: Sieh and Natawidjaja, 2000; “最大历史地震活动”数据来源: Hurukawa et al., 2014和Rafie et al., 2023。M_w为矩震级, M_S为面波震级, M为未特别指明类型的震级。“Barumun段位于应力影中”指其被邻近的Angkola段1892年地震影响; 1943年Sumani段和Suliti段地震为多段破裂, 两段均发生完全破裂

表 2 苏门答腊断层地质滑移速率表

Table 2 Geological slip rates of the Sumatran Fault

测量地点坐标	滑移速率 mm/yr	数据来源文献	测量方法
北苏门答腊 Aceh 省（约5°N, 95°E）	38±4	Bennett et al., 1981; Genrich et al., 2000	无实际测量
北苏门答腊 Toba（2.3°N, 99°E）	23±3	Detourbet et al, 1993	SPOT卫星影像解译河流错断
北苏门答腊 Toba（2.3°N, 99°E）	27～28	Sieh et al., 1991, 1994	小尺度地形图解译河流错断
中苏门答腊 Toru段（1.6°N, 99°E）	7～14	Hickman et al., 2004	玄武岩穹丘错断（$^{40}Ar/^{39}Ar$定年 270±3 ka）
南苏门答腊 Musi段（3.5°S, 103°E）	10	Sieh et al., 1994	火山熔岩流的错断
南苏门答腊 Kumering段（约5°S, 105°E）	5.5±1.9	Bellier et al., 1999	SPOT影像解译构造线+$^{40}K/^{40}Ar$定年（0.55±0.15 Ma）
北苏门答腊 Toba（2.3°N, 99°E）	14.1±0.5	Bradley et al., 2017	高分辨率卫星影像（Quick Bird/World View-2）精确解译14条河流偏移+$^{40}Ar/^{39}Ar$定年（73.88±0.64 ka）
中苏门答腊 Maninjau（0.2°S, 100.3°E）	14.5±0.5	Bradley et al., 2017	高分辨率影像解译8条河流偏移+^{14}C/火山玻璃裂变径迹定年（51.1±0.9 ka）

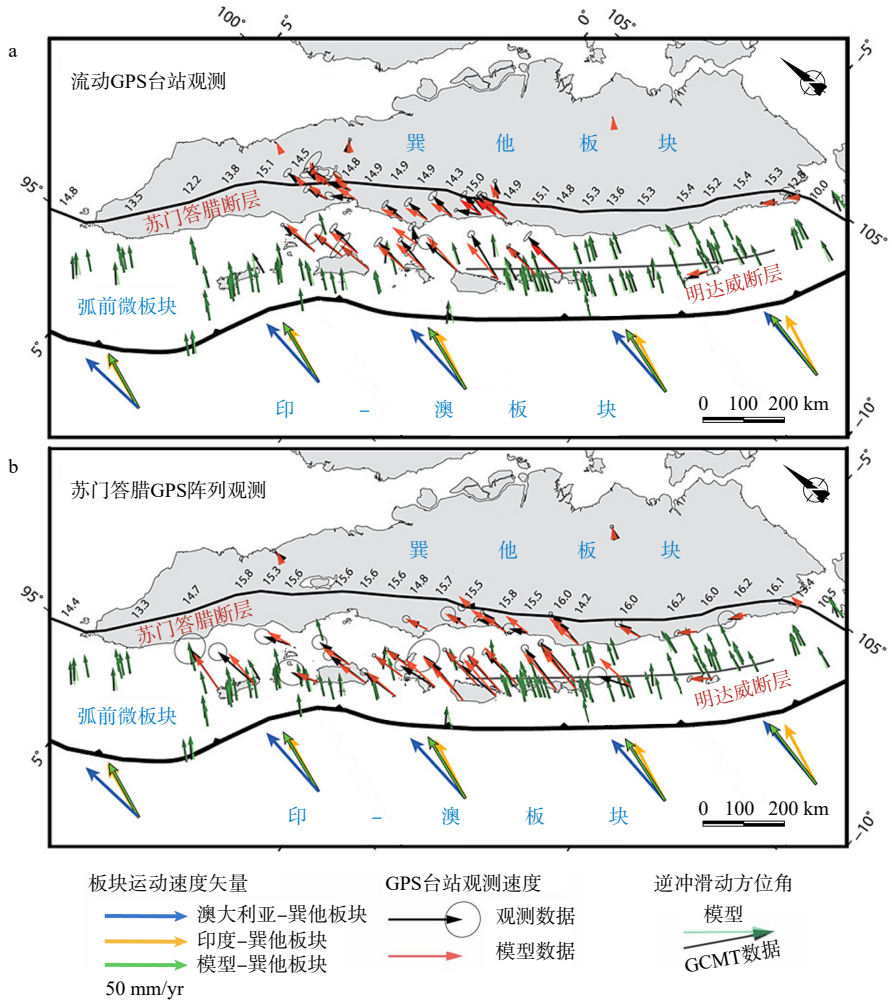
的基础上，因此并不准确可靠；此次研究选取了分别穿过苏门答腊断层北部的 Renun 段和中部的 Sianok 段的新生代火山沉积物的河流，它们由于穿过断层而产生一定的错断，通过对火山喷发年龄以及右行错断位移量的计算，得到这 2 段的走滑速率分别为 14.1±0.5 mm/yr 和 14.5±0.5 mm/yr。

除了地质走滑速率的测定，Genrich et al.（2000）通过 1990—1996 年间苏门答腊岛 GPS 地球动力学项目（GPS-GPS）的 GPS 速度场的观测，限定了 1°S 到赤道的断层走滑速率为 23 mm/yr, 2.7°N的断层滑移速率为 26 mm/yr。2004 年苏门答腊−安达曼地震发生后，通过“亚齐苏门答腊断层系统 GPS 网络（AGNeSS）”的 GPS 观测，Ito et al.（2012）发表了 2005—2010 年间，苏门答腊断层亚齐段北部的无震滑移平均速率为 20±6 mm/yr, 亚齐段南西部的无震滑移平均速率为 16±6 mm/yr。对于这种沿苏门答腊断层 GPS 滑移速率的变化，Bradley et al.（2017）认为既有研究得到的滑移速率实际是整个弧前段的平均速率，并作为苏门答腊断层的滑动速率（Prawirodirdjo et al., 1997; Genrich et al., 2000），虽然该滑动速率恰好与 Sieh and Natawidjaja（2000）得到的 Renun 段的高地质滑移速率相匹配，但高估了断层的实际速率。Bradley et al.（2017）提出，弧前的 GPS 观测台站的长期/震间 GPS 速度是巽他逆冲断层的斜向运动的近场速度与苏门答腊断层滑动的远场速度的总和；而苏门答腊主岛的台站记录的是相对于巽他板块与海沟平行的 GPS 速度，主要受控于苏门答腊断层的活动。通过对台站 GPS 速度数据进行校正，此次研究得到的苏门答腊断层走滑速率从南至北稳定在约 15 mm/yr（图 8），并与其得到的最新地质滑移速率相吻合（Bradley et al., 2017; Natawidjaja, 2018b）。

综合已有的研究，文章认为地质证据限定的滑动速率可以获得断层的长期平均滑移速率，但被错断参考物的选择与年代学误差容易导致其结果误差往往较大，还需要排除河流袭夺等可能性，且该速率不能代表现今滑移速率。GPS 速率只能代表现今断层滑移速率，不能反映断层长期滑移速率。将二者结合进行对比，可以更好地约束苏门答腊断层演化历史以及现今的运动学，而现今的结果显示，苏门答腊断层整体的活动速率横向差异不大，也表明整个弧前微板块以较为刚性的块体存在，整体向北偏东方向移动。

3.2 断层位移量

目前，有关苏门答腊断层的位移量存在较大争议。Curray（1979）认为，苏门答腊断层北部相连的安达曼海盆在过去的 11 Ma 以来扩张了 460 km，所以苏门答腊断层的位移量也应为 460 km。近期的研究却提出，安达曼海盆扩张的 460 km 中只有 118 km 是 4 Ma 后打开的（Raju et al., 2004; Curray, 2005）。苏门答腊断层南侧相连的巽他盆地在过去的 5 Ma 拉张了约 50～70 km（Lassal et al., 1989; Malod and Kemal, 1996; Diament et al., 1992），因此早期研究推测苏门



“模型”为 Bradley et al.(2017)模型校正数据；弧前区域黑色箭头为全球质心矩张量计划(Global Centroid-Moment-Tensor Project, GCMT)测量大型逆冲断层滑动方位角，绿色箭头为模型校正逆冲滑动方位角；数字代表模型计算苏门答腊断层在该处滑移速率，mm/yr

图 8　苏门答腊断层 GPS 测量走滑速率（据 Bradley et al.，2017 修改）

Fig. 8　GPS-measured slip rates along the Sumatran Fault (modified after Bradley et al., 2017)

“Model” represents corrected velocities from the model by Bradley et al., 2017. In the forearc region, black arrows indicate thrust slip azimuths derived from the Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project, green arrows represent model-corrected thrust slip azimuths, and the numbers represent the model-calculated slip rates of the Sumatran Fault.

答腊断层总位移量为 >100 km(Huchon and Le Pichon, 1984; McCarthy and Elders, 1997)。但这种推测基于区域板块动力学，缺少相应的地质观测证据。

由于露头高度风化和地貌影响，苏门答腊断层位移量的地质限定存在较大误差。Katili and Hehuwat (1967)根据区域构造尺度晚古生代—早新生代的岩石的位错，将赤道附近及南部的断层总位移量限定为大约 20～25 km，这一结果也被 Cameron et al.(1983)在 4.1°N 附近出露的渐新世岩石所确定的 20 km 右行位移量所支持。McCarthy and Elders(1997)根据中苏门答腊附近断层两侧同时出露相似结晶基底的孤立露头点位，认为右行走滑位移量大约为 150 km；但这种结晶基底在苏门答腊广泛分布，孤立露头点位的出露并不能代表二者曾位于同一点位，因此该结论并不具有说服力。前期研究均为局部地质观察，并未进行充分统计。Sieh and Natawidjaja(2000)根据高精度卫星图片统计了苏门答腊断层沿线的小型及大型位错，小型河流断错可以达到数百米，而大型的地堑、湖泊位移量均小于 25 km，提出 20～25 km 即为苏门答腊断层的总位移量。此外，由于：①大部分沿断层火山结构的年龄较年轻(< 0.5 Ma)，被侵蚀程度较低，即使斜向俯冲水平分量均由苏门答腊断层承担(～30 mm/yr)，断层总位移量也不超过 ～15 km；②苏门答腊断层的分段长度

范围 35～220 km; ③苏门答腊断层沿线仅有少数河道变形量达到几千米, 大型河流的袭夺现象几乎没有; ④苏门答腊北部一条深切河道位移量为 20～21 km, 可能记录了巴里桑山脉隆升以来断层的位移量, 因此, 苏门答腊断层的总位移量即为 20～25 km (Sieh and Natawidjaja, 2000)。

然而, 苏门答腊断层位移量的地质观测并不能很好地协调和解释其南北所连区域的动力演化过程, 因此, 苏门答腊断层与安达曼海盆、巽他盆地在地质观测上的位移不协调表明, 除苏门答腊断层之外, 还有其他弧前结构容纳了斜向俯冲的水平走滑分量, 如增生楔上的明达威断层、安达曼海扩张盆地西侧的西安达曼断裂等与苏门答腊海沟平行的较小型断层(Diament et al., 1992; Sieh and Natawidjaja, 2000), 但这些断层的位移量和滑动速率目前还缺少确凿的数据, 因此其位移量是否足够支持剩余的走滑分量还需要进一步的工作去验证 (Diament et al., 1992; Barber et al., 2005; Wang et al., 2023)。

4 苏门答腊断层与岛弧火山活动

晚中生代以来, 印度−澳大利亚板块向欧亚板块(巽他板块)之下俯冲, 在苏门答腊区域形成典型的沟−弧−盆体系。其中, 弧岩浆作用在仰冲巽他板块形成了一系列与海沟走向近平行的火山链, 构成全长 1700 km 的巴里桑山脉, 北西—南东走向贯穿全岛(图 1)。同时, 苏门答腊断层位于巴里桑山脉内部, 走向平行岛弧火山链, 二者在地理位置上呈现了非常好的相关性(图 1, 图 9)。但是, 早期研究对于苏门答腊断层与岛弧岩浆活动之间是否影响, 或相互影响的方式, 仅进行了定性描述与讨论, 因此对于二者之间的关系存在多种观点。

一些学者提出, 俯冲作用产生的岩浆弧使地壳局部变弱, 形成像苏门答腊断层这样与海沟平行的断层(Hamilton, 1979; Beck, 1983; Tikoff, 1998)。仰冲板块在热和流体作用下, 剪切方向的抗走滑系数会减小, 从而使与海沟平行的走滑更容易发生(Beck, 1983); 而这一过程也伴随着局部地壳弱化(Karig, 1979; Molnar and Atwater, 1978), 促使大型走滑断层形成。

另一部分学者认为, 断层的几何形态、应力状态影响了区域岩浆活动。Aydin and Nur(1982)提出, 苏门答腊火山构造(岩脉、喷口、火山等)集中在断层的张性区域和拉分盆地; 在这两种情况下, 它们都与正断层有关(Bellier and Sébrier, 1994), 这种张性结构在一定程度上影响了岩浆活动的区域(Aydin et al., 1990; Hickman et al., 2004)。

此外, 也有观点认为苏门答腊断层与火山弧的重合只是一种巧合。在全球范围内, 只有少数与沟平行的走滑断层与火山弧重合(McCaffrey, 2009), 而且年轻的苏门答腊火山与苏门答腊断层在细节上并不重合, 50 座火山中只有 9 座在断层周边 2 km 以内(Sieh and Natawidjaja, 2000)。断层更多地沿着俯冲变形前锋带分布, 而火山则受到俯冲板片深度影响, 例如在多巴火山口周围, 断层和火山弧的分离尤其明显。

近些年, 以断层活动为切入点, Ito et al.(2012)通过高精度 GPS 反演苏门答腊断层北部深部结构, 揭示了该段断层北部在 7.3±4.8 km 深度之上存在持续蠕滑, 而西南部则发生闭锁, 深度达 14.8±3.4 km。由于北部断层区域存在大型侵入岩体(Bellier and Sébrier, 1995), 因此大型侵入岩体通过降低断层强度, 进而促进断层浅部无震蠕滑(Ito et al., 2012; Tong et al., 2018)。但目前依然缺乏岩浆作用(如岩浆房规模)如何影响断层摩擦系数、断层蠕滑启动时间等问题的定量化研究(Rafie et al., 2023), 来揭示苏门答腊断层深部结构与岩浆活动的耦合关系。

另一方面, 以火山活动为切入点, Acocella et al.(2018)对苏门答腊断层如何影响火山喷发过程、喷发量以及火山大小等问题进行了较详细的研究。该研究分析了一万年以来喷发的火山(数据来源: 史密森尼全球火山计划, Smithsonian Global Volcanism Program, SGVP, http://volcano.si.edu)以及 13 座不在 SGVP 火山列表中的喷发年龄小于 0.1 Ma 的火山数据(Sieh and Natawidjaja, 2000), 共 48 座火山, 总结了火山点位与其下板片深度、到海沟和苏门答腊断层距离、火山体长轴方向、喷发体积、苏门答腊断层滑动速率的关系, 以及断层对火山活动的构造控制可能性大小。根据该数据, 在 48 座火山中, 54%(26 座)位于苏门答腊断层附近 10 km 内, 而 27%(13 座)距苏门答腊断层超过 20 km; 而在距断层小于 10 km 的火山中, 46%(12 座)较可能与苏门答腊断层有构造关系; 而只有 27%(7 座)有明显的构造控制, 位于断层形成的走滑拉张区域; 部分张扭区域并没有发育岩浆活动。而其他证据, 如火山口长轴方向倾向于 30°～40°NE, 与相对汇聚方向近平行; 除了走向

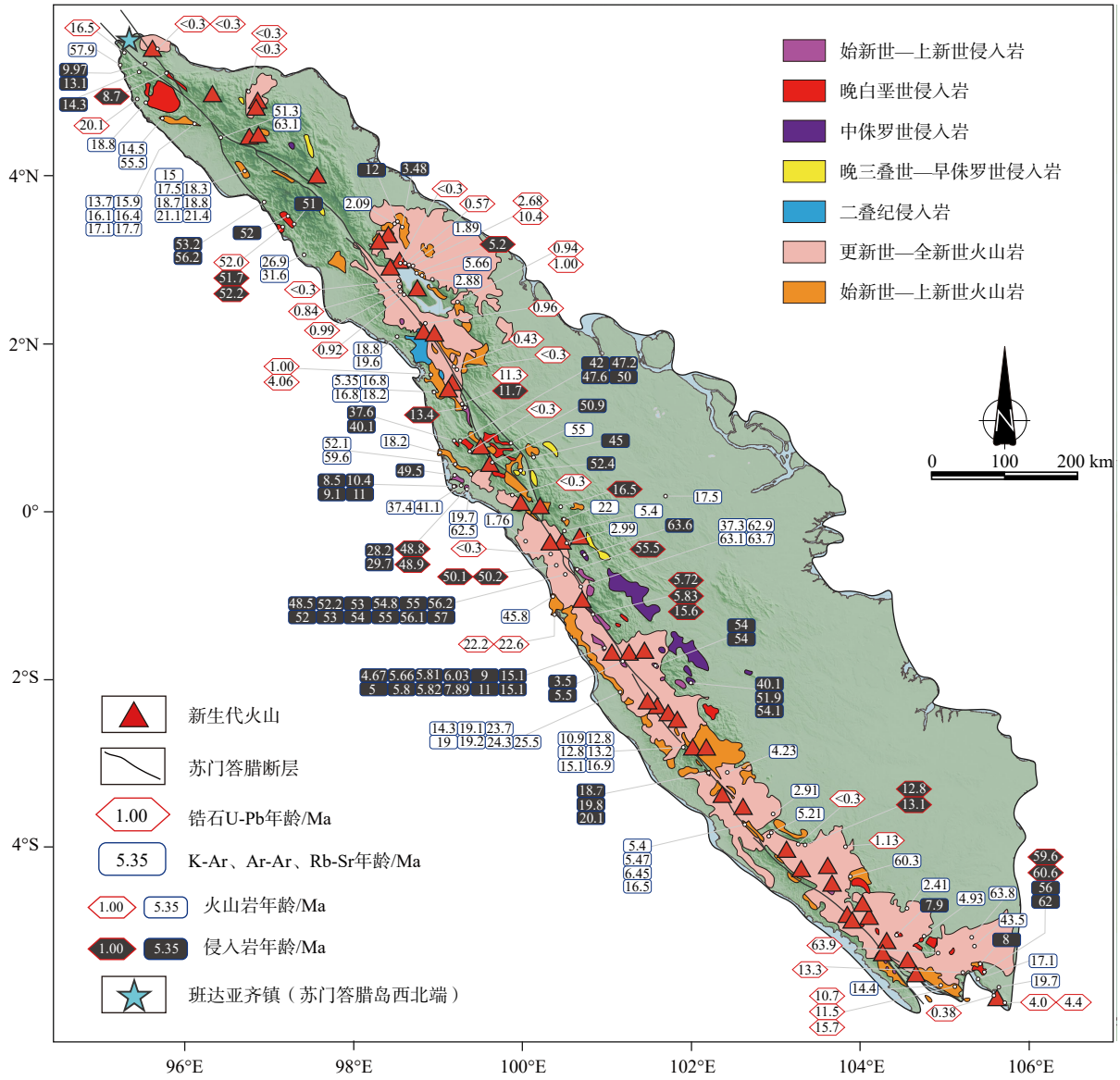


图 9　苏门答腊岛新生代岩浆岩及火山年龄分布（据 Lai et al.，2023 修改）

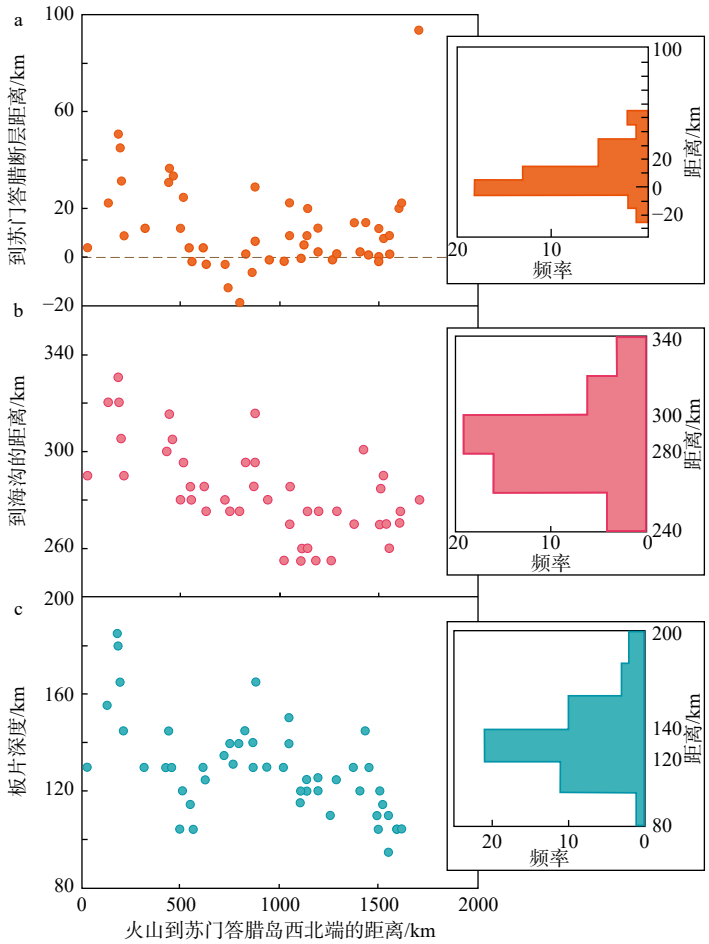
Fig. 9　Ages of igneous and volcanic rocks on Sumatra Island (modified after Lai et al., 2023)

为北西—南东向和北—南向右行走滑断层，西北西—东南东向或北东—南西向正断层也与苏门答腊断层活动不匹配；苏门答腊断层差异走滑速率和一致的火山活动等，均说明构造作用对弧火山作用的影响较小。但是，文章使用的苏门答腊断层走滑速率为从南至北增加，从而得到了断层走滑速率与火山喷发量无关的结论。如果结合 Bradley et al.（2017）的结论——苏门答腊断层走滑速率南北一致，以及结合火山活动和海沟距离、俯冲板片深度等数据（图 10），似乎说明苏门答腊断层的构造活动和火山活动有着明显的相互影响。但对于断层深部结构与火山岩动力学是如何响应的，目前的定量化研究依然缺乏，需要结合地球物理探测来进一步揭示断层与岩浆的耦合机制。

5　苏门答腊断层活动时代与动力学演化模型

断层活动（起始、峰期）及其动力学演化过程是最为重要的地质演化问题，前文对一些关键问题开展的详细阐述，如断层总位移量和滑移速率、区域演化过程（安达曼海和巽他盆地的拉张量和拉分时间）、苏门答腊弧前区域变形的时间、方式和大小等等，均是对苏门答腊断层演化过程的重要约束。

早期研究均未对苏门答腊断层进行直接定年。由于苏门答腊断层与安达曼海盆扩张中心的



图中横坐标测量零点位置见图 9 蓝色五角星位置

a—苏门答腊岛火山–苏门答腊断层距离统计(正值表示火山在断层东侧,反之在西侧);b—苏门答腊岛火山–苏门答腊海沟距离统计;c—苏门答腊岛火山–俯冲板片深度距离统计

图 10 苏门答腊岛火山统计图(据 Acocella et al., 2018 修改)

Fig. 10 Distribution of volcanoeson Sumatra Island as a function of distance from the Sumatran Fault, the trench, and slab depth (modified after Acocella et al., 2018)

(a) Distance from the Sumatran Fault (Positive values indicate volcanoes east of the fault, and negative values indicate west of the fault); (b) Distance from the trench; (c) Distance from the slab depth contour

The measurement origin of the x-axis is marked by the blue five-pointed star in Fig. 9.

转换断层相连,安达曼海盆构造演化被用来与苏门答腊断层的形成时间、总位移量进行类比,苏门答腊断层起始时间被认为在晚中新世以前(>11 Ma),总位移量大于 100 km(Curray et al., 1979)。苏门答腊断层活动以走滑为主,同时存在一定的倾滑分量,并在不同分段表现出正断或逆断的特征(Sieh and Natawidjaja, 2000)。通过约束断层上升盘的快速隆升时代,可以约束断层走滑作用的活动时间。Wang et al.(2023)对断层出露岩石进行了低温热年代定年工作,对苏门答腊断层的演化进行了约束,通过磷灰石/锆石(U-Th)/He(AHe/ZHe)方法限定断层倾滑带来的区域加速隆升事件。数据显示,大部分 AHe 和 ZHe 年龄都集中在 10 Ma 内;断层带内样品 AHe 年龄均为 1～2 Ma,而断层带外 2～5 km 处采集的样品 AHe 年龄则在 5～10 Ma。

因此,苏门答腊断层直到 <2 Ma 才形成并加速活动,而在此之前斜向俯冲产生的水平分量,大部分由仰冲板块的其他与海沟平行断层所吸收,如西安达曼断裂或明达威断层。而 3 个 ZHe 年龄都在 6～10 Ma,与断层带外的样品 AHe 年龄相似且重叠,表明这一时期断层所在区域可能发生一期整体的快速冷却事件;但也可能是苏门答腊断层幕式活动的结果(Wang et al., 2023)。如果按照地质对比获得的断层总位移量 20～25 km(Sieh and Natawidjaja,

2000），并结合苏门答腊断层地质滑移速率（从南东到北西滑动速率基本一致，为 14～15 mm/yr; Ito et al., 2012; Bradley et al., 2017; Natawidjaja, 2017, 2018b），可以获得断层的初始活动时间应该在 1.7 Ma 左右，与该断层定年结果一致。

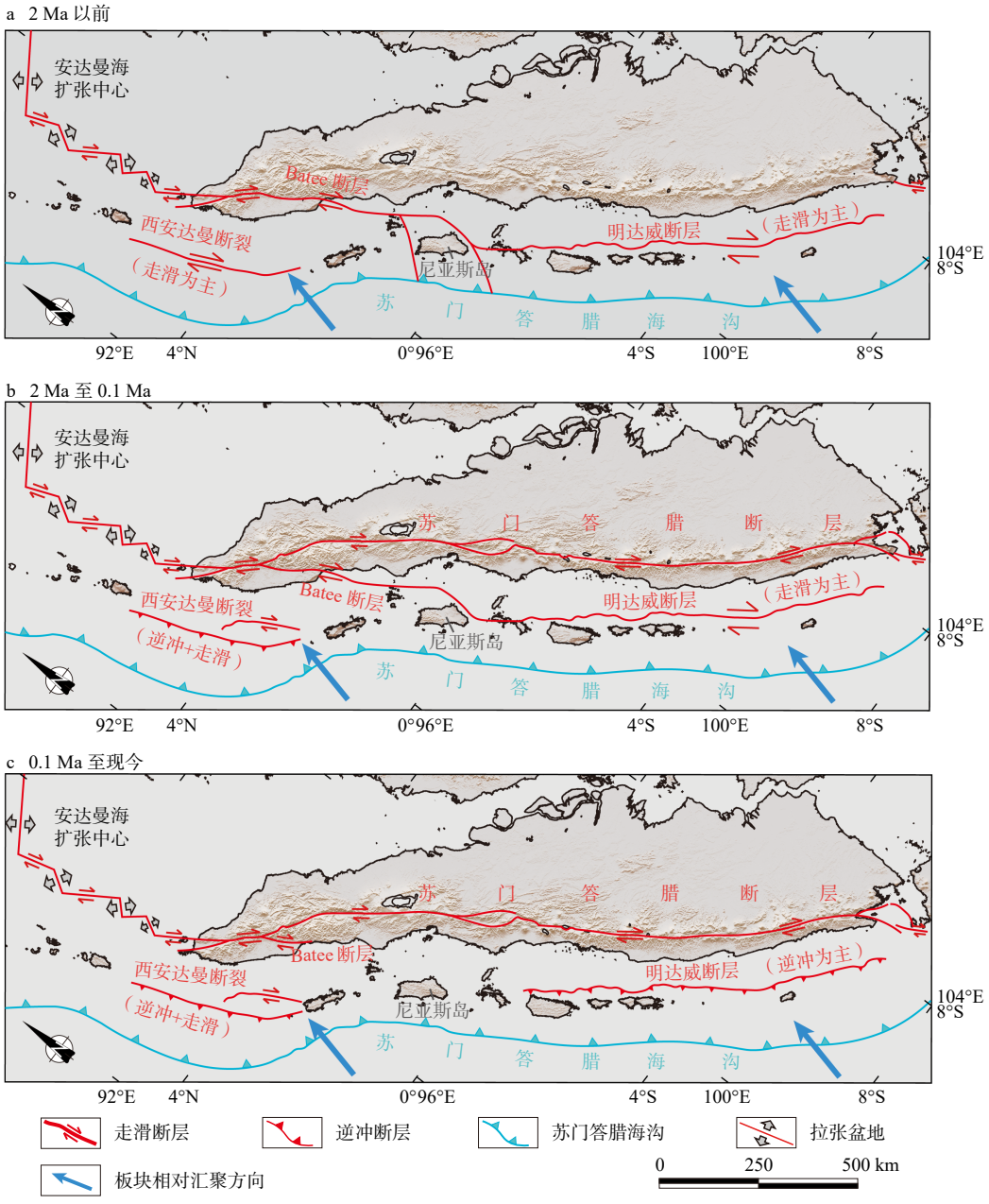
综合苏门答腊俯冲带弧前地区变形的观察（Samuel and Harbury, 1996; Samuel et al., 1997），文章认为苏门答腊断层是一较新且不成熟的断层，断层面不平整，剪切作用常分散于多个分支，其形成和发展存在明显的迁移特征（图 11）：①2 Ma 之前外弧隆起形成，斜向汇聚产生的走滑分量主要集中在苏门答腊岛北端 Batee 断层，并向南延伸至尼亚斯岛附近，断层汇入苏门答腊俯冲断层中（Matson and Moore, 1992），北端则与安达曼海盆扩张脊的转换断层相连，此时明达威断层开始活动，但以压扭活动为主；② 2 Ma 左右，苏门答腊断层形成，其与明达威断层各自承担了一部分斜向俯冲的水平分量，此时也对应着低温热年代学中 2 Ma 左右的快速冷却过程（Wang et al., 2023）；③约 0.1 Ma 至今，明达威断层走滑分量减少/停止，主要以逆冲变形为主（Singh et al., 2010），而 2°N 以北的苏门答腊断层走滑速率增加，斜向汇聚的走滑分量主要通过苏门答腊断层协调。

6　斜向汇聚下的大型走滑断层演化

大型斜向俯冲带/碰撞带经常发育与海沟平行的大型走滑断层（Fitch, 1972）。如太平洋板块与北美板块的斜向汇聚，使仰冲的北美板块之上形成了圣安德列斯断层（San-Andreas Fault, SAF）。该断层是一条长约 1100 km 的右行走滑断层，几何上，该断层系统由多个子断层构成，在不同地区展现出复杂的走向变形和垂向结构变化（Powell and Weldon, 1992; Cooke and Dair, 2011）。运动学上，断层在过去约 20 Ma 累计位移大于 100 km，其中南加州段右旋错动总量约为 300 km，滑移速率在 25～35 mm/yr 之间（ Powell and Weldon, 1992）。圣安德列斯断层的形成与演化受控于太平洋–法拉隆的洋脊俯冲以及随后三联点的迁移（始于早中新世），俯冲型板块边界随之演化成现今的转换断层型板块边界（Atwater, 1970; Dickinson and Snyder, 1979; Furlong, 1984）。早期，位移分布在多个早期活动的断层（如 Clemens Well-Fenner-San Francisquito）上，后逐渐集中至现今的圣安德列斯主干断层之上（Powell and Weldon, 1992）。

而在土耳其，北安纳托利亚断层（North Anatolian Fault, NAF）是一条长约 1200 km 的右旋走滑转换断层。几何学上，该断层呈线性分布，自东向西横贯土耳其，并在爱琴海北部分叉为北、南两支，形成一系列“马尾型”拉分盆地（Sengör et al., 2005）。运动学上，该断层整体滑移速率从约 12～10 Ma 的低速期（～3 mm/yr）逐渐增至现今速率约 23 mm/yr（Le Pichon et al., 2003; Hubert Ferrari et al., 2010），累计右旋位移约 85 km。北安纳托利亚断层演化过程始于约 10～12 Ma，最初以广泛分布的剪切带形式存在，自早更新世（约 2 Ma）起发生应变局部化，逐渐收敛为狭窄的主干断层系统（Rodriguez et al., 2023）。该断层的活动与安纳托利亚板块西向构造逃逸密切相关，这一运动受控于阿拉伯板块对欧亚板块的碰撞挤出和非洲板块俯冲回撤等多重动力学机制（孟建南，2024）。因此，北安纳托利亚断层不仅是典型的走滑转换构造带，也是在大陆碰撞前缘背景下应变局部化与构造逃逸机制交互作用的范例，并最终由大型走滑断层转变为新的板块边界。

苏门答腊断层、圣安德列斯断层与北安纳托利亚断层均源自斜向汇聚构造背景中，通过板块运动的平行海沟分量形成平行海沟的大型走滑断层。这些断层初期均表现为广泛而弥散的剪切区，随后经历应变局部化过程，在数百万年内发展为集中、线性的主干断裂系统。该演化受控于汇聚方向、俯冲板块特性、地壳异质性等因素，例如：板块相对汇聚速度矢量与海沟夹角越小，平行海沟方向的剪切越强，因此更可能产生明显的滑移分解从而形成主干走滑断层，且断层初期位置的选择常发生在剪切最集中的区域，形成初始走滑带；而俯冲板块的弯曲程度、板片岩石密度、古洋脊或断裂带的存在，会影响仰冲板块的应力分布与构造继承，并且在仰冲板块上形成了新的转换断层型板块边界。这些控制因素互相耦合，使得每个断层系统都呈现出特性兼具共性的演化路径。在全球斜向汇聚带中，这些大型走滑断层的演化为研究提供了不同物理模型框架，可帮助研究者们理解不同地区走滑–俯冲耦合构造的共性与差异。同时，大型走滑断层的形成与演化，是斜向汇聚构造带在长期动力学调节下，实现剪切应变空间重组的普遍机制。这一认识对理解其他同类构造环境，如菲律宾、日本、加勒比等斜向俯冲带，提供了重要的参考。



图中灰色区域为水域，其余区域为陆地

a—2 Ma 以前，苏门答腊北部 Batee 断层向北与安达曼海盆扩张脊的转换断层相连，向南延伸至尼亚斯岛附近与弧前的明达威断层，明达威断层开始活动，但以压扭活动为主；b—2～0.1 Ma，苏门答腊断层开始活动，其与明达威断层各自承担一部分水平走滑分量；c—0.1 Ma 至现今，明达威断层走滑分量减少/停止，主要以逆冲变形为主（Singh et al., 2010），2°N 以北的苏门答腊断层走滑速率增加，斜向汇聚的走滑分量主要通过苏门答腊断层协调

图 11 苏门答腊断层演化示意图（据 Sieh and Natawidjaja，2000；Wang et al.，2023 修改）

Fig. 11 Schematic illustration of the Sumatran Fault evolution (modified after Sieh and Natawidjaja, 2000; Wang et al., 2023).

(a) Before 2 Ma (The Batee Fault in northern Sumatra connected northward to the transform fault of the Andaman Sea basin spreading ridge, and extended southward to link with the Mentawai Fault in the forearc near Nias Island. The Mentawai Fault initiated during this stage, with transpressional motion dominating.); (b) 2–0.1 Ma (The Sumatran Fault initiated, with the horizontal strike-slip component partitioned between the Sumatran Fault and the Mentawai Fault.); (c) 0.1 Ma to present (Strike-slip motion along the Mentawai Fault decreased or ceased, transitioning to dominant thrust deformation; Singh et al., 2010. Concurrently, the strike-slip rate of the Sumatran Fault north of 2° N latitude has increased. At this stage, the trench-parallel slip component of oblique convergence is primarily accommodated by the Sumatran Fault.)

Grey shaded areas indicate water bodies, the remaining areas denote land.

7　结束语

苏门答腊断层是全球重要的大型走滑断层之一，通过右行走滑协调了印度–澳大利亚板块和欧亚板块之间的斜向汇聚作用。该断层具有高度分段特征，大地测量结果显示苏门答腊断层的滑移速率大约为 15 mm/yr，从南至北较一致，断层位移量约为 20～25 km；根据现有对苏门答腊断层直接的定年工作，其在约 2 Ma 时有一期由于断层倾滑导致的快速隆升事件，可能表明在该时期苏门答腊断层开始活动。苏门答腊地区的弧岩浆分布和苏门答腊断层展布具有高度相似性，可能是岛弧岩浆活动导致的地壳弱化，使断层易于形成，而断层形成的张性区域则又会影响部分火山的分布，因此，断层与岩浆活动存在强烈的相互作用和影响。

根据以上对苏门答腊断层研究的总结，可以初步认为苏门答腊断层是一条极为年轻的断层，并且与该断层的滑移速率、较小的位移量和高度分段的特征相互匹配。印度–澳大利亚板块向欧亚板块之下的俯冲在约 95 Ma 就已经开始，那么在苏门答腊断层形成前，该地区可能并非斜向俯冲，或者有其他结构容纳了斜向俯冲的水平分量，如现今依然活跃的西安达曼断裂或明达威断层。对这些水下断层以及弧前结构的研究目前还不能提供精确的演化模型，因此，针对陆上的苏门答腊断层开展更详细的工作，有助于更好地理解斜向俯冲过程中仰冲板块对水平分量的调节机制。由于针对苏门答腊断层的精确定年工作目前较少，对于断层演化的具体过程，例如起始活动、断层分段活动次序等，有待更多精细的工作来揭示。

作者贡献声明： 郭琳、褚杨负责论文构思、数据分析、绘图和论文写作；林伟、雷宜阳、刘谭杰、郭宜琳和孟令通参与数据分析和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: GUO Lin and CHU Yang conceived the study, performed data analysis, generated the figures, and drafted the manuscript; LIN Wei, LEI Yiyang, LIU Tanjie, GUO Yilin and MENG Lingtong were involved in data analysis and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

ACOCELLA V, BELLIER O, SANDRI L, et al., 2018. Weak Tectono-Magmatic Relationships along an Obliquely Convergent Plate Boundary: Sumatra, Indonesia[J]. Frontiers in Earth Science, 6: 3.

ADVOKAAT E L, BONGERS M L M, RUDYAWAN A, et al., 2018. Early Cretaceous origin of the Woyla Arc (Sumatra, Indonesia) on the Australian Plate[J]. Earth and Planetary Science Letters, 498: 348-361.

ATWATER T, 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America[J]. GSA Bulletin, 82(12): 3513-3536.

AYDIN A, NUR A. 1982. Evolution of pull-apart basins and their scale independence[J]. Tectonics, 1(1): 91-105.

AYDIN A, SCHULTZ R A, CAMPAGNA D, 1990. Fault-normal dilatation in pull-apart basins: implications for relationship between strike-slip faults and volcanic activity[J]. Ann. Tectonicae Spec. Issue, 4(2): 45-52.

BARBER A J, 2000. The origin of the Woyla Terranes in Sumatra and the Late Mesozoic evolution of the Sundaland margin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18(5): 713-738.

BARBER A J, CROW M J, MILSOM J S, 2005. Sumatra: Geology, resources and tectonic evolution[M]. Geological Society, London, Memoirs, 31: 234-259.

BARBER A J, CROW M J, 2009. The structure of Sumatra and its implications for the tectonic assembly of Southeast Asia and the destruction of Paleotethys[J]. Island Arc, 18(1): 3-20.

BECK M E JR, 1983. On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction[J]. Tectonophysics, 93: 1-11.

BELLIER O, SÉBRIER M, 1994. Relationship between tectonism and volcanism along the Great Sumatran fault zone deduced by SPOT image analyses[J]. Tectonophysics, 233(3-4): 215-231.

BELLIER O, SÉBRIER M, 1995. Is the slip rate variation on the Great Sumatran Fault accommodated by fore-arc stretching?[J]. Geophysical Research Letters, 22(15): 1969-1972.

BELLIER O, SÉBRIER M, PRAMUMIJOYO S, et al., 1997. Paleoseismicity and seismic hazard along the Great Sumatran fault (Indonesia)[J]. Journal of Geodynamics, 24(1-4): 169-183.

BELLIER O, BELLON H, SÉBRIER M, et al., 1999. K-Ar age of the Ranau tuffs: implications for the Ranau caldera emplacement and slip-partitioning in Sumatra (Indonesia)[J]. Tectonophysics, 312: 347-359.

BENNETT J D, et al., 1981. Geologic Map of Banda Aceh Quadrangle, North Sumatra, 1: 250000[R]. Geol. Res. and Dev. Cent, Bandung, Indonesia.

BERLAGE H JR, 1934. De aardbeving in zuid Sumatra van 25 Juni 1933: Waarnemingen in het epicentrale gebied[R]. Natuurwetenschappelijk Tijdschrift voor Nederlandsch-Indië, 94: 15-36.

BRADLEY K, FENG L, HILL E M, et al., 2017. Implications of the diffuse deformations of the Indian Ocean lithosphere for slip partitioning of ob-

lique plate convergence in Sumatra[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(1): 572-591.

BURTON P W, HALL T R, 2014. Segmentation of the Sumatran fault[J]. Geophysical Research Letters, 41: 4149-4158.

CAMERON N R, CLARKE M C G, ALDISS D T, et al., 1980. The geological evolution of northern Sumatra[C]. Proceedings of the Indonesian Petroleum Association, Annual Convention, Jakarta 1980(9): 149-87.

CAMERON N, et al., 1983. Geology of the Takengon quadrangle, Sumatra[R]. Report Geol. Res. And Dev. Cent., Bandung, Indonesia.

CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al., 2007. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 34(13): L13302.

COOKE M L, DAIR L C, 2011. Simulating the recent evolution of the southern big bend of the San Andreas fault, Southern California[J]. Geophys. Res., 116, B04405.

CURRAY J R, MOORE D G, LAWVER L A, et al., 1979. Tectonics of the Andaman Sea and Burma: Convergent margins[C]//WATKINS J S, MONTADERT L, DICKENSON P W, eds. Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 29: 189-198.

CURRAY J R, 2005. Tectonics of the Andaman Sea region[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 25(1): 187-232.

DETOURBET C, BELLIER O, SÉBRIER M, 1993. La caldera volcanique de Toba et filesysteme de faille de Sumatra (Indonesia) vue par SPOT[J]. C. R. Acad. Sci., Ser. II, 316: 1439-1445.

DIAMENT M, HARJONO H, KARTA K, et al., 1992. Mentawai fault zone off Sumatra: A new key to the geodynamics of western Indonesia[J]. Geology, 20(3): 259-262.

DICKINSON W R, SNYDER W S, 1979. Geometry of triple junctions related to San Andreas transform[J]. Journal of Geophysical Research, 84(B2): 561-572.

DING W, ZHU R, WAN B, et al., 2023. Geodynamic processes of the southeastern Neo-Tethys Ocean and the formation mechanism of the curved subduction system in Southeast Asia[J]. Science China Earth Sciences, 66(4): 703-717. (in Chinese with English abstract)

FITCH T J, 1972. Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 77(23): 4432-4460.

FRISCH W, MESCHEDE M, BLAKEY R C, 2011. Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building[M]. Berlin Herdelburg: Springer-Verlag. 212

FURLONG K P, 1984. Lithospheric behavior with triple junction migration: An example based on the Mendocino triple junction[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 36(3-4): 213-223.

GENRICH J F, BOCK Y, MCCAFFREY R, et al., 2000. Distribution of slip at the northern Sumatran fault system[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B12): 28327-28341.

HALL R, 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean[J]. Tectonophysics, 570–571: 1–41.

HAMILTON W, 1979. Tectonics of the Indonesian Region[R]. U. S. Geological Survey Professional Paper 1078: 345 p.

HICKMAN R G, DOBSON P F, VAN GERVEN M, et al., 2004. Tectonic and stratigraphic evolution of the Sarulla graben geothermal area, North Sumatra, Indonesia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 23(3): 435-448.

HUBERT-FERRARI A, KING G, VAN DER WOERD J, et al., 2010. Long-term evolution of the North Anatolian Fault: New constraints from its eastern termination[J]. Geological Society, London, Special Publications, 311(1): 133-154.

HUCHON P, Le PICHON X, 1984. Sunda Strait and central Sumatra fault[J]. Geology, 12(11): 668-672.

HURUKAWA N, WULANDARI B R, KASAHARA M, 2014. Earthquake history of the Sumatran fault, Indonesia, since 1892, derived from relocation of large earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(4): 1750-1762.

HUTCHISON C S, 1994. Gondwana and Cathaysian blocks, Palaeotethys sutures and Cenozoic tectonics in Southeast Asia[M]. Oxford University Press: 388-405.

IRSYAM M, CUMMINS P R, ASRURIFAK M, et al., 2020. Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia[J]. Earthquake Spectra. https://doi.org/10.1177/8755293020951206.

ITO T, GUNAWAN E, KIMATA F, et al., 2012. Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117(B6): B06409.

JARRARD R D, 1986. Terrane motion by strike-slip faulting of forearc slivers[J]. Geology, 14(9): 780-783.

KARIG D, SUPARKA S, MOORE G, et al., 1979. Structure and Cenozoic evolution of the Sunda arc in the central Sumatra region[M]. AAPG Mere., 29: 223-237.

KATILI J, HEHUWAT F, 1967. On the occurrence of large transcurrent faults in Sumatra, Indonesia[J]. Journal of Geosciences, Osaka City University, 10: 5-17.

LAI Y M, LIU P P, CHUNG S L, et al., 2023. Zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic compositions of igneous rocks from Sumatra: implications for the Cenozoic magmatic evolution of the western Sunda Arc[DB/OL]. Geological Society of London Special Publications. Collection. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.6366009.v1.

LASSAL O, HUCHON P, HARJONO H, 1989. Extension crustale dans le detroit de la Sonde (Indonesie): Donnees de la sismique reflexion (campagne Krakatau)[J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II, 309(2): 205-212.

LAY T, KANAMORI H, AMMON C J, et al., 2005. The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004[J]. Science, 308(5725): 1127-1133.

LE PICHON X, CHAMOT-ROOKE N, RANGIN C, 2003. The North Anatolian fault in the Sea of Marmara[J]. Journal of Geophysical Research, 108: 2179.

MALOD J A, KEMAL B M, 1996. The Sumatra margin: Oblique subduction and lateral development of the accretionary prism[M]. Geological Society of London Special Publication, 106: 19-28)

MATSON R, MOORE G, 1992. Structural influences on Neogene subsidence in the central Sumatra fore-arc basin[C]//WATKINS J S, et al., eds. Geology and Geophysics of Continental Margins. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 53: 157-181.

MCCAFFREY R, 1991. Slip vectors and stretching of the Sumatran fore arc[J]. Geology, 19(9): 881-884.

MCCAFFREY R, 1992. Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation[J]. Journal of Geophysical Research, 97: 8905-8915.

MCCAFFREY R, 1996. Slip partitioning at convergent plate boundaries of SE Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 106: 3-18.

MCCAFFREY R, ZWICK P C, BOCK Y, et al., 2000. Strain partitioning during oblique plate convergence in northern Sumatra: Geodetic and seismologic constraints and numerical modelling[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B12): 28363-28376.

MCCAFFREY R, 2002. Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones[C]. AGU Geodynamics Series, 30: 101-122.

MCCAFFREY R, 2009. The tectonic framework of the Sumatran subduction zone[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 37: 345-366.

MCCARTHY A, ELDERS C, 1997. Cenozoic deformation in Sumatra: Oblique subduction and the development of the Sumatran fault system[C]//FRASER A J, MATTHEWS S J, MURPHY R W, eds. Petroleum Geology of Southeast Asia. Geological Society, London, Special Publications, 126: 355-363.

MCCARTHY A J, JASIN B, HAILE N S, 2001. Middle Jurassic radiolarian chert, Indarung, Padang District, and its implications for the tectonic evolution of western Sumatra, Indonesia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 19(1-2): 31-44.

MENG JIANNAN, 2024. Driving Mechanisms for Neotectonic Deformation of Anatolia: Constraints from the 2023, 2020 Earthquake Swarms and GPS Surface Motions [D]. China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)

METCALFE I, 1984. Stratigraphy, palaeontology and palaeogeography of the Carboniferous of Southeast Asia[J]. Mem. Soc. Geol. France, 147: 107-118.

METCALFE I, IRVING E, 1990. Allochthonous terrane processes in Southeast Asia [and Discussion][J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 331(1620): 625-640

METCALFE I, 1991. Late Palaeozoic and Mesozoic palaeogeography of Southeast Asia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 87: 211-221.

METCALFE I, 2005. Asia: South-East[J]. In: Selley, R. C., Cocks, L. R. M., Plimer, I. R. (Eds.), Encyclopedia of Geology, 1. Elsevier, Oxford, pp. 169-198.

METCALFE I, 2011. Palaeozoic-Mesozoic history of SE Asia[A]. In: HALL R, COTTAM M A, WILSON M E J, eds. The SE Asian Gateway: History and Tectonics of Australia-Asia Collision[M]. Geological Society, London, Special Publications, 355: 7-35.

METCALFE I, 2021. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia[J]. Gondwana Research, 100: 87-130.

MOLNAR P, ATWATER T, 1978. Interarc spreading and Cordilleran tectonics as alternates related to the age of subducted oceanic lithosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 41(3): 330-340.

MUKSIN U, HABERLAND C, NUKMAN M, et al., 2014. Detailed fault structure of the Tarutung Pull-Apart Basin in Sumatra, Indonesia, derived from local earthquake data[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 96: 123-131.

MUKSIN U, BAUER K, MUZLI M, et al., 2019. AcehSeis project provides insights into the detailed seismicity distribution and relation to fault structures in Central Aceh, Northern Sumatra[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 171: 20-27.

MUKSIN U, ARIFULLAH A, ANDREAN V H, et al., 2023. Secondary fault system in Northern Sumatra, evidenced by recent seismicity and geomorphic structure[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 245: 105557.

MUZLI M, UMAR M, NUGRAHA A D, et al., 2018. The 2016 M_W 6.5 Pidie Jaya, Aceh, North Sumatra, Earthquake: Reactivation of an Unidentified Sinistral Fault in a Region of Distributed Deformation[J]. Seismological Research Letters. https://doi.org/10.1785/0220180105.

NATAWIDJAJA D H, BRADLEY K, DARYONO M R, et al., 2017. Late quaternary eruption of the Ranau Caldera and new geological slip rates of the Sumatran fault zone in southern Sumatra[J]. Indonesian Geoscience Letters, 4(1): 21.

NATAWIDJAJA D H, 2018a. Major bifurcations, slip rates, and a creeping segment of Sumatran Fault Zone in Tarutung-Sarulla-Sipirok-Padangsidempuan, Central Sumatra, Indonesia[J]. Indonesian Journal on Geoscience, 5(2): 137-160.

NATAWIDJAJA D H, 2018b. Updating active fault maps and sliprates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 118: 012001.

PAN G, REN F, ZHANG K, et al., 2025. The prospect of ocean plate geology: Focusing on the geological reconstruction of the oceanic subduction zone in China and neighboring areas[J]. Earth Science Frontiers, 32(6): 61-88. (in Chinese with English abstract)

POWELL R E, WELDON R J, 1992. Evolution of the San Andreas fault[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 20(1): 431-68.

PRAWIRODIRDJO L, BOCK Y, MCCAFFREY R, et al., 1997. Geodetic observations of interseismic strain segmentation at the Sumatra subduction zone[J]. Geophysical Research Letters, 24(20): 2601-2604.

QIAN X, JIN S, BAI T, YU X, SHELDRICK T C, GAN C, et al., 2025. Triassic tectonic affinity to Indochin-East Malaya Block for West Sumatra and Paleo-Tethys implications: Constraints from Late Triassic igneous rocks[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 26: e2024GC012030.

RAFIE M T, CUMMINS P R, SAHARA D P, et al., 2021. Variations in forearc stress and changes in principle stress orientations caused by the 2004–2005 Megathrust Earthquakes in Sumatra, Indonesia[J]. Frontiers in Earth Science. https://doi.org/10.3389/feart.2021.712144.

RAFIE M T, SAHARA D P, CUMMINS P R, et al., 2023. Stress accumulation and earthquake activity on the Great Sumatran Fault, Indonesia[J]. Natural Hazards, 116: 3401-3425.

RAJU K A K, RAMPRASAD T, RAO B R, et al., 2004. New insights into the tectonic evolution of the Andaman Basin, northeast Indian Ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 221(1-4): 145-162.

REID H, 1913. Sudden earth movements in Sumatra in 1892[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 3(2): 72-79.

RODRIGUEZ M, SAKELLARIOU D, GORINI C, et al., 2023. Evolution of the North Anatolian Fault from a diffuse to a localized shear zone in the North Aegean Sea during the Plio-Pleistocene[J]. Geophysical Journal International, 235(3): 2614-2639.

SAMUEL M A, HARBURY N A, 1996. The Mentawai fault zone and deformation of the Sumatran forearc in the Nias area[C]//HALL R, BLUNDELL D J, eds. Tectonic Evolution of Southeast Asia. Geological Society, London, Special Publications, 106: 337-351.

SAMUEL M, HARBURY N, BAKRI A F, et al., 1997. A new stratigraphy for the islands of the Sumatran forearc, Indonesia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 15(4-5): 339-380.

SENGÖR A M C, TÜYSÜZ O, IMREN C, et al., 2005. The North Anatolian fault: A new look[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 33(1): 37-112.

SHANG Q H, DENG Y, LIN W, et al., 2025. Investigation of the tectonic framework of the Sumatra[J]. Journal of Geomechanics, 31(5): 823-840. (in Chinese with English abstract)

SIEH K, RAIS J, BOCK Y, 1991. Neotectonic and paleoseismic studies in west and north Sumatra[A]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 72(44, Suppl): 460.

SIEH K, BOCK Y, EDWARDS L, et al., 1994. Active tectonics of Sumatra[A]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 26(7): A-382.

SIEH K, NATAWIDJAJA D, 2000. Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B12): 28295-28326.

SINGH S C, HANANTO N D, CHAUHAN A P S, et al., 2010. Evidence of active backthrusting at the NE margin of Mentawai Islands, SW Sumatra[J]. Geophys. Int. 180, 703-714.

SYLVESTER A G, 1988. Strike-slip faults[J]. Geological Society of America Bulletin, 100(11): 1666-1703.

TEYSSIER C, TIKOFF B, MARKLEY M, 1995. Oblique plate motion and continental tectonics[J]. Geology, 23(5): 447-450.

TIKOFF B, TEYSSIER C, 1994. Strain modeling of displacement-field partitioning in transpressional orogens[J]. Journal of Structural Geology, 16(11): 1575-1588.

TIKOFF B, 1998. Sunda-style tectonics and magmatic arc processes[A]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 79(45, Fall Meeting Suppl): F222.

TJIA H D, 1977. Tectonic depression along the transcurrent Sumatra fault zone[J]. Geologi Indonesia (Journal of the Indonesian Association of Geologists), 4(1): 13-27.

TONG X, SANDWELL D T, SCHMIDT D A, 2018. Surface creep rate and moment accumulation rate along the Aceh segment of the Sumatran fault from L-band ALOS-1/PALSAR-1 observations[J]. Geophysical Research Letters, 45(8): 3404-3412.

WANG C X, LI X, 2025. Tectonic characteristics and numerical simulation analysis of an arcuate structural belt: A case study of the middle and southern segments of the Red River fault[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 39-60. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, GAO Y, MORLEY C K, et al., 2023. Pleistocene accelerated exhumation within the Sumatran fault: Implications for late Cenozoic evolution of Sumatra (Indonesia)[J]. Geophysical Research Letters, 50(1): e2022GL100028.

WANG Y J, QIAN X, CAWOOD P A, et al., 2021. Prototethyan accretionary orogenesis along the East Gondwana periphery: New insights from the early Paleozoic igneous and sedimentary rocks in the Sibumasu[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 22(5): e2020GC009622.

WELLER O, LANGE D, TILMANN F, et al., 2012. The structure of the Sumatran Fault revealed by local seismicity[J]. Geophysical Research Letters, 39(1): L01306.

WESNOUSKY S G, 2006. Predicting the endpoints of earthquake ruptures[J]. Nature, 444(7117): 358-360.

WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES, 1995. Seismic hazards in southern California: Probable earthquakes, 1994 to 2024[R]. Bulletin of the Seismological Society of America, 85(2): 379-439.

XU C, WANG Y J, QIAN X, et al., 2020. Geochronological and geochemical characteristics of Early Silurian S - type granitic gneiss in Takengon area of northern Sumatra and its tectonic implications[J]. Earth Science, 45(6): 2077-2090. (in Chinese with English abstract)

XU C, WANG Y J, QIAN X, et al., 2024. Late Jurassic Tethyan igneous records in North Sumatra: Geochronological and geochemical constraints[J]. GSA Bulletin, 136(7-8): 3188-3206.

ZHANG X R, CHUNG S L, LAI Y M, et al., 2018. Detrital zircons dismember Sibumasu in East Gondwana[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(2): 6098-6110.

ZHENG Y D, ZHANG J J, ZHANG B, 2022. Two pillar theories of structural geology in the new century: The MEM criterion and the deformation partitioning[J]. Journal of Geomechanics, 28(3): 319-337. (in Chinese with English abstract)

ZHU R, ZHAO P, ZHAO L, 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean[J]. Science China Earth Sciences, 65(1): 1-24. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

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[J]. 中国科学: 地球科学, 53(4): 687-701.

孟建南, 2024. 安纳托利亚新构造变形驱动机制: 2020年, 2023年地震事件和GPS速度场的约束[D]. 中国地质大学.

潘桂棠, 任飞, 张克信, 等, 2025. 洋板地质学研究展望: 聚焦中国及邻区大洋俯冲消减带地质重建[J]. 地学前缘, 32(6): 61-88.

尚庆华, 邓烨, 林伟, 等, 2025. 苏门答腊大地构造格架探讨[J]. 地质力学学报, 31(5): 823-840.

王晨旭, 李西, 2025. 弧形构造带构造特征及其数值模拟分析: 以红河断裂中南段为例[J]. 地质力学学报, 31(1): 39-60.

徐畅, 王岳军, 钱鑫, 等, 2020. 苏门答腊岛北部Takengon早志留世S型花岗片麻岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学, 45(6): 2077-2090.

郑亚东, 张进江, 张波, 2022. 新世纪构造地质学两大支柱理论: 最大有效力矩准则与变位形分解[J]. 地质力学学报, 28(3): 319-337.

朱日祥, 赵盼, 赵亮, 2022. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 52(1): 1-25.