



## 西太平洋俯冲板块正断层系统与动力学特征

王悠昆, 周志远, 林 间, 张 帆

### Subduction plate boundary thrust system and dynamic characteristics in the Western Pacific

WANG Youkun, ZHOU Zhiyuan, LIN Jian, and ZHANG Fan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082502>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 西太平洋雅浦俯冲带的地貌及地层结构特征

GEOMORPHOLOGY AND STRATIGRAPHIC FRAMEWORK OF THE YAP SUBDUCTION ZONE, WESTERN PACIFIC

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 23

#### 西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

#### 西太平洋-北印度洋及其洋陆过渡带: 古今演变与论争

West Pacific and North Indian Oceans and Their Ocean-continent Connection Zones: Evolution and Debates

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 1

#### 新几内亚-所罗门弧俯冲体系动力过程: 板块起始俯冲的制约

Subduction dynamics of the New-Guinea-Solomon arc system: Constraints from the subduction initiation of the plate

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 115

#### 板块俯冲侵蚀雅浦岛弧的地形制约

TOPOGRAPHIC CONSTRAINTS ON THE SUBDUCTION EROSION OF THE YAP ARC, WESTERN PACIFIC

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 41

#### 西太平洋板内玄武岩的同位素地球化学特征

ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF INTRAPLATE BASALTS IN WEST PACIFIC

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 15



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王悠昆, 周志远, 林间, 等. 西太平洋俯冲板块正断层系统与动力学特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 173-180.

WANG Youkun, ZHOU Zhiyuan, LIN Jian, et al. Subduction plate boundary thrust system and dynamic characteristics in the Western Pacific[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 173-180.

# 西太平洋俯冲板块正断层系统与动力学特征

王悠昆<sup>1</sup>, 周志远<sup>1</sup>, 林间<sup>1,2,3</sup>, 张帆<sup>2,3</sup>

1. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055

2. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广州 511458

3. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 中国科学院-巴基斯坦高等教育委员会, 巴基斯坦伊斯兰堡 45320

**摘要:** 俯冲带是地球上最大地震的发源地。俯冲板块正断层为海水进入上地幔, 引起蛇纹石化提供通道, 其地震可能引发大海啸。研究其动力学机制, 对推动俯冲带动力学过程研究及保护人类生命安全都具有重要意义。本文综述了西太平洋汤加海沟、马里亚纳海沟、伊豆-小笠原海沟和日本海沟俯冲板块外缘隆起带到海沟附近的正断层分布与变形特征, 量化阐明了地球动力学模拟方法揭示的西太平洋俯冲板块正断层形成过程。研究发现汤加海沟和马里亚纳海沟的正断层平均断距最大; 俯冲板片有效弹性厚度变化直接影响正断层形成区域, 而有效弹性厚度与板块年龄相关性较大。本文系统性回顾了西太平洋俯冲动力学研究并且提出了对未来相关研究的启示。

**关键词:** 俯冲带; 正断层; 地球动力学; 西太平洋

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082502

## Subduction plate boundary thrust system and dynamic characteristics in the Western Pacific

WANG Youkun<sup>1</sup>, ZHOU Zhiyuan<sup>1</sup>, LIN Jian<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Fan<sup>2,3</sup>

1. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

2. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China

3. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan

**Abstract:** The majority of the world's greatest earthquakes are generated in subduction zones. Normal faults in subducting plates provide pathways for seawater intrusion, which facilitates mantle serpentinization and consequently triggers seismic activities or large tsunamis. The formation mechanisms of these normal faults need to be better understood to advance the understanding of subduction zone dynamics and ensuring human life safety. This paper reviews the characteristics of normal faults and deformation of subducting plates in the Tonga Trench, Mariana Trench, Izu-Bonin Trench, and Japan Trench in the western Pacific Ocean, describe in quantitative detail the formation of bending-related normal faults through geodynamic modeling. The study finds that the Tonga Trench and Mariana Trench exhibit the largest average fault throws among these subduction systems. The variations in effective elastic thickness of the subducting plate directly influence the distribution of normal faulting region. There is a significant correlation between plate effective elastic thickness and plate age. This paper provides a systematic review of research on the dynamics of the Western Pacific subduction zone and offers insights for future studies in this field.

**Key words:** subduction zone; normal fault; geodynamics; Western Pacific

俯冲带是地球循环系统的重要组成部分。在俯冲过程中, 俯冲板块沉入地幔深处, 并因其板块弯曲, 在板块上部产生拉伸应力, 在板块下部产生挤压应力<sup>[1-4]</sup>。大量研究表明, 俯冲带中由板块弯曲

引起的正断层在上地幔蛇纹石化、板内地震、板块中的流体活动以及外缘隆起带断层引起的海啸中发挥着重要作用<sup>[5-6]</sup>。西太平洋处于 4 个板块交界之处, 北为北美板块, 西为欧亚板块, 西南为菲律宾

资助项目: 国家自然科学基金“西太平洋俯冲起始机制与俯冲带水-碳循环”(92258303), “东南亚环形俯冲系统的三维地球动力学模拟与演化研究”(41890813), “南海地幔演化过程及与周边俯冲系统相互作用的三维地球动力学模拟研究”(41976066), “马里亚纳海沟俯冲板片应力分布与破裂机制的三维地球动力学模拟研究”(41976064)

作者简介: 王悠昆(2000—), 男, 硕士生, 从事海洋科学研究, E-mail: 504077659@qq.com

通讯作者: 周志远(1987—), 男, 博士, 从事海洋地球物理学研究, E-mail: zhouzy@sustech.edu.cn

收稿日期: 2023-08-25; 改回日期: 2023-09-28. 文凤英编辑

海板块,东南为太平洋板块。其中,北美板块和欧亚板块为大陆板块,菲律宾海板块和太平洋板块为大洋板块,两个大洋板块向两个大陆板块俯冲汇聚。西太平洋俯冲带是板块年龄最老、海沟最深和板块挠曲程度最大的俯冲系统。其洋盆发育了众多海山和海底高原,对海沟的几何形态产生了较大影响<sup>[7]</sup>。板块边界地震、火山活动活跃,西太平洋俯冲板块中的正断层地震通常发生在板块边界附近,因此可能构成巨大的海啸威胁。例如,1933年,日本海沟发生了8.4级地震,这是有记录以来最大的俯冲板块外缘隆起带(Outer rise)正断层地震,在日本三陆沿海地区引发了海啸<sup>[8]</sup>。2009年9月29日,汤加海沟发生8.1级外缘隆起带正断层地震,并引发了毁灭性的海啸<sup>[9]</sup>。因此,研究西太平洋俯冲板块正断层的动力学机制具有重要意义。

已观察到正断层在外缘隆起区到海沟轴部之间普遍存在。观测显示,与板块弯曲有关的正断层可能是板块俯冲过程中产生的新断层,或是在大洋中脊形成的重新激活的深海丘陵断层<sup>[10]</sup>。前期地球动力学模拟研究表明,正断层开始在距离海沟轴部一定距离处形成,然后向海沟轴部方向生长<sup>[11-12]</sup>。海沟附近发育了丰富的挠曲正断层,这些断层除了会诱发板内地震之外,也是流体进入板块内部和俯冲带深部的主要通道<sup>[13]</sup>。西太平洋海沟的观测与模拟研究相对丰富,包括汤加、日本、伊豆-小笠原

和马里亚纳海沟等。这些俯冲带的构造特征变化很大,包括海沟深度、俯冲倾角、板块内和板块间地震活动,这使它们成为研究海沟动力学和板块相互作用的理想场所。本文综述了西太平洋俯冲板块弯曲与正断层的观测,并总结分析了正断层模拟研究揭示的正断层形成过程,这对进一步揭示俯冲带动力学机制有着十分重要的意义。

## 1 西太平洋俯冲板块正断层特征

汤加、日本、伊豆-小笠原和马里亚纳海沟均位于西太平洋(图1),且都是板块年龄相对较老(均超过100 Ma)的俯冲板块,因而远端的板块厚度可能相对较大,并且在4个海沟之间变化不大,因此可以直接比较各海沟的正断层特征,并揭示它们的共同特征。高分辨率海底多波束测深数据是从NOAA美国环境信息中心的多波束测深数据库(MBBDB)和海洋地球科学数据系统(MGDS)的全球多分辨率地形合成(图1)而成,网格平均分辨率约为100 m<sup>[14]</sup>。基于此数据,前人分别提取了汤加、日本、伊豆-小笠原和马里亚纳海沟的14、9、15和15个垂直于海沟的剖面,以计算平均断层走向和密度,得到4个海沟的正断层特征(图2)。高分辨率多波束测深数据显示,正断层在4个海沟的俯冲板块上普遍存在。

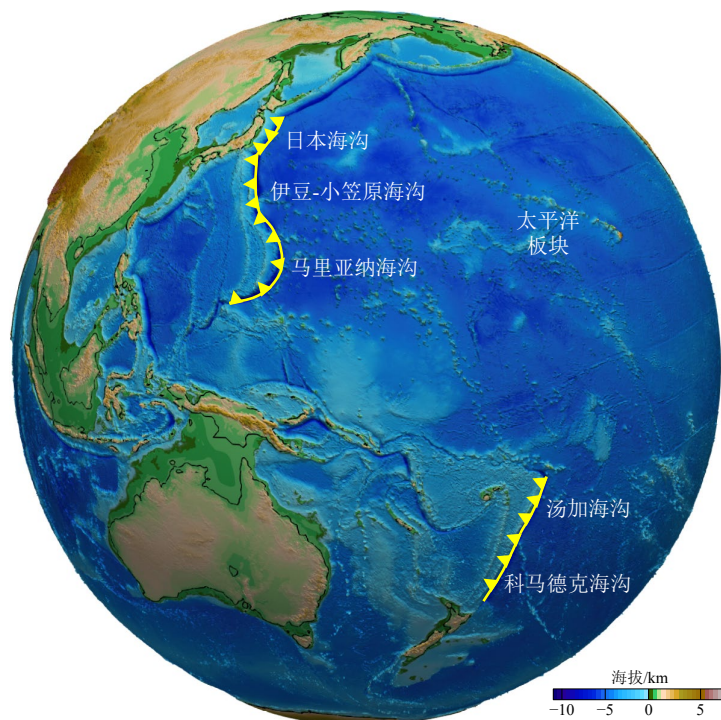


图1 西太平洋俯冲系统的汤加海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟

Fig.1 Tonga Trench, Japan Trench, Izu-Bonin Trench, and Mariana Trench in the western Pacific subduction system



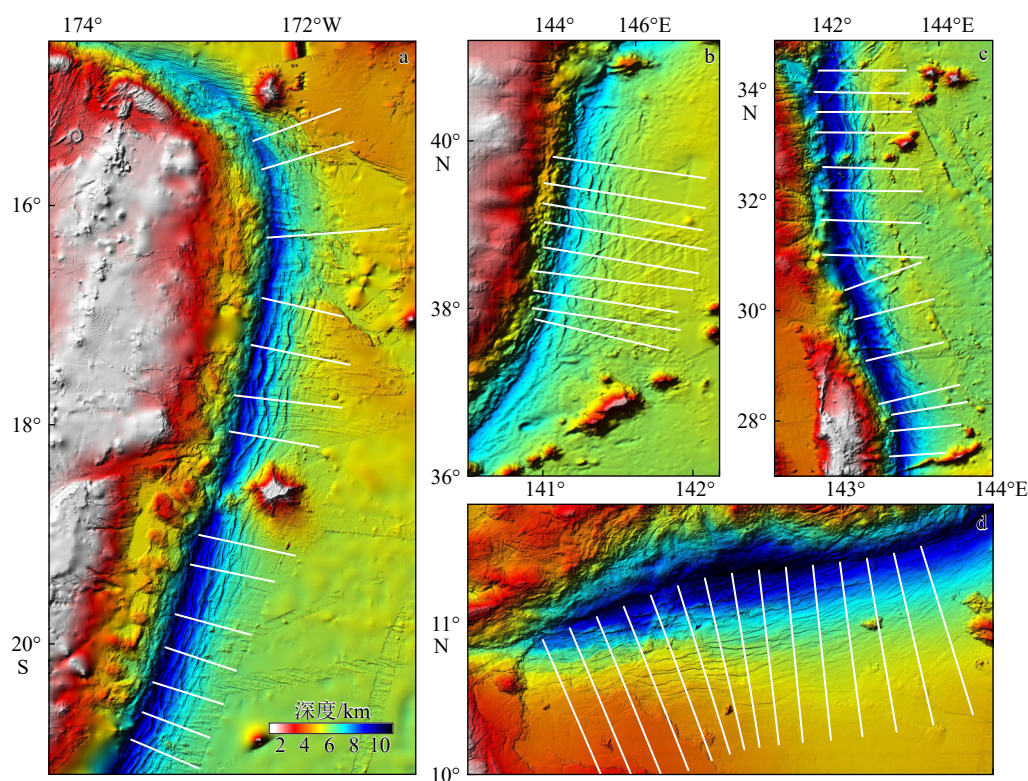


图 2 汤加海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟、马里亚纳海沟海底地形

图 a-d 分别为汤加海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟, 白色线段为选取的断层剖面位置<sup>[15]</sup>。

Fig.2 Seafloor bathymetry of the Tonga, Japan, Izu-Bonin, and Mariana Trenches

a-d: the Tonga Trench, Japan Trench, Izu-Bonin Trench, and Mariana Trench, respectively. White lines depict the deployment of transection profiling<sup>[15]</sup>.

通过对比实际观测与弹塑性变形模型, 前人研究了沿着汤加、日本、伊豆-小笠原、马里亚纳海沟的板块挠曲与正断层特征(图 2)。观测表明, 平均海沟挠曲量在日本海沟最小(3 km), 在马里亚纳海沟最大(4.9 km), 而平均正断层垂直断距在日本海沟最小(113 m), 汤加海沟最大(284 m)。而后模拟了俯冲板块在 3 种构造加载的作用下发生弯曲变形并产生正断层的过程, 3 种构造加载分别为: 垂向加载( $V_0$ )、弯矩( $M_0$ )和水平拉张力( $F_0$ )。在板块挠曲与正断层特征的双重约束下, 反演得到了 4 个海沟的最佳模型解。

汤加海沟的平均断层垂直断距最大, 最大值为 420 m, 平均值为 284 m(图 3a)。伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟的断层垂直断距相似, 最大值均为 320 m, 平均值分别为 238 m 和 148 m。在汤加海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟, 可识别的断层起始点距离海沟轴线分别为 85、80、100 和 115 km。

据观测, 马里亚纳海沟正断层密度最大, 伊豆-小笠原海沟的正断层密度最小(图 3b)。在马里亚纳海沟, 从距海沟轴线 80 km 处开始, 断层密度开

始明显增加, 而其他海沟的断层密度则在距海沟轴部近 50 km 处开始增加, 表明在马里亚纳海沟, 正断层带最宽, 断层密度最大。

## 2 西太平洋俯冲板块变形机制

观测到的海底地形受到各种组成部分的影响, 包括沉积物厚度、板块冷却引起的沉降和艾里均衡补偿地形<sup>[16-18]</sup>, 去除这些影响后, 可得到非均衡地形, 能够最大程度地反映板块弯曲变形的情况。以非均衡地形作为板块变形程度的观测, 结合薄板弯曲理论模型, 前人反演了 4 个海沟的最佳构造载荷。图 4 为西太平洋 4 个海沟俯冲板块的平滑弯曲形态。对于每个海沟, 黑色细虚线表示单个剖面, 红色粗曲线表示海沟的平均剖面。每个海沟截取的多条剖面上的最大变形量( $W_0$ )平均值用蓝点标记。远场参考海底深度用灰色线标记。红色箭头标记表示弯曲曲率降低到可忽略值( $0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ )的特征距离( $X_c$ )。

前人系统性地研究了西太平洋汤加-克马德克、马尼拉、菲律宾、日本以及马里亚纳海沟的俯

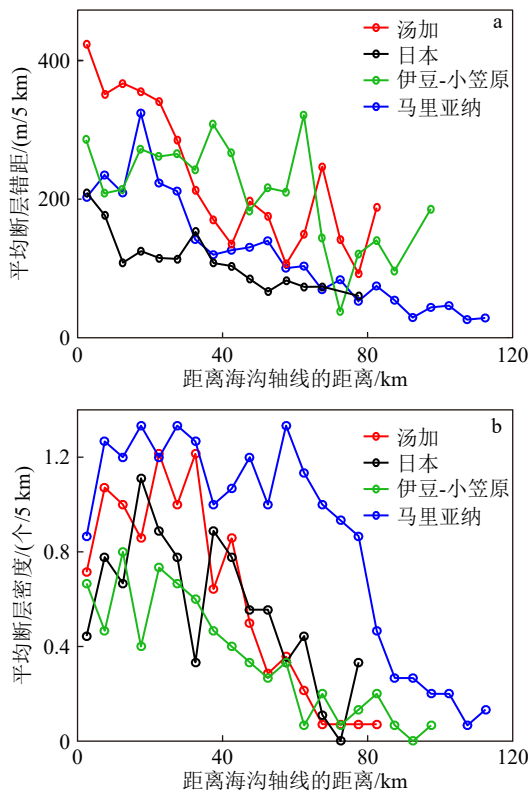


图3 汤加海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟跨海沟剖面上每5 km的平均断层错距(a)和断层密度(b) [16]

Fig.3 The average fault offset (a) and fault density (b) per 5 kilometers on the cross-trench profiles of the Tonga Trench, Japan Trench, Izu-Bonin Trench, and Mariana Trench [16]

冲板块变形研究并进行对比。图5a为海沟附近板块弯曲示意模型,显示预期的拉伸屈服变形区(红色网格纹)和压缩屈服变形区(蓝色网格纹)。图5b中 $X_0$ 是板块的宽度,也是垂直变形 $W=0$ 的位置。在板块弯曲过程中,正断层发育的最大深度主要是由轴向垂直载荷( $V_0$ )控制,而正断层最大深度离海沟的距离是由轴向弯矩( $M_0$ )所控制的。西太平洋4个海沟板块变形对比研究表明,最大变形量( $W_0$ )和板块宽度( $X_0$ )主要由靠近海沟的由于断层作用降低的有效弹性厚度控制,并且几乎不受远端俯冲板块的初始有效弹性厚度的影响。板块有效弹性厚度的降低导致了海沟的显著加深和变窄,而板块的有效弹性厚度的变化与其年龄又存在着密不可分的联系 [19]。通过汤加-克马德克海沟与马尼拉、日本、马里亚纳海沟等俯冲板片弯曲的分析对比(图5b),发现对于较年轻或较老板块的情况,无论海沟处加载量如何变化,板块的年龄都可能是控制海沟弯曲形状的主要因素(图5)。

### 3 西太平洋俯冲带板块正断层模拟与含水量估算

西太平洋的俯冲带板块正断层的模拟研究中,俯冲板块在板块弯曲演变过程中的水平偏差应力

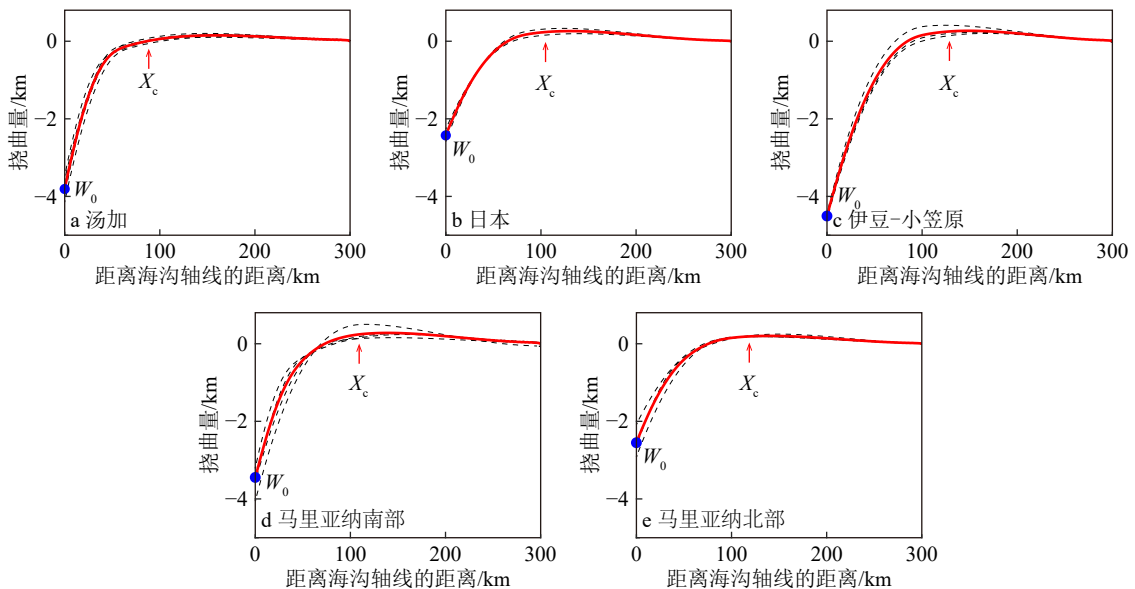


图4 汤加海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟南北部的观测挠曲量及其平均值  
黑色虚线细曲线显示单个剖面,红色粗曲线显示沟槽的平均剖面,远场参考海底深度用灰色线标记。蓝点所在位置为多个海沟轴部最大变形量 $W_0$ 的平均值,红色箭头所指位置 $X_c$ 为弯曲曲率可忽略值 [19]。

Fig.4 Observed flexures and their average values of the Tonga Trench, Japan Trench, Izu-Bonin Trench, and Mariana Trench

The thin black dashed curves: the individual profiles; the thick red curves: the average profile of the trenches; the grey line: the far-field reference seafloor depth.  $W_0$ : the average of the maximum deformation in the axial part of several trenches.  $X_c$ : the negligible value of the bending curvature [19].

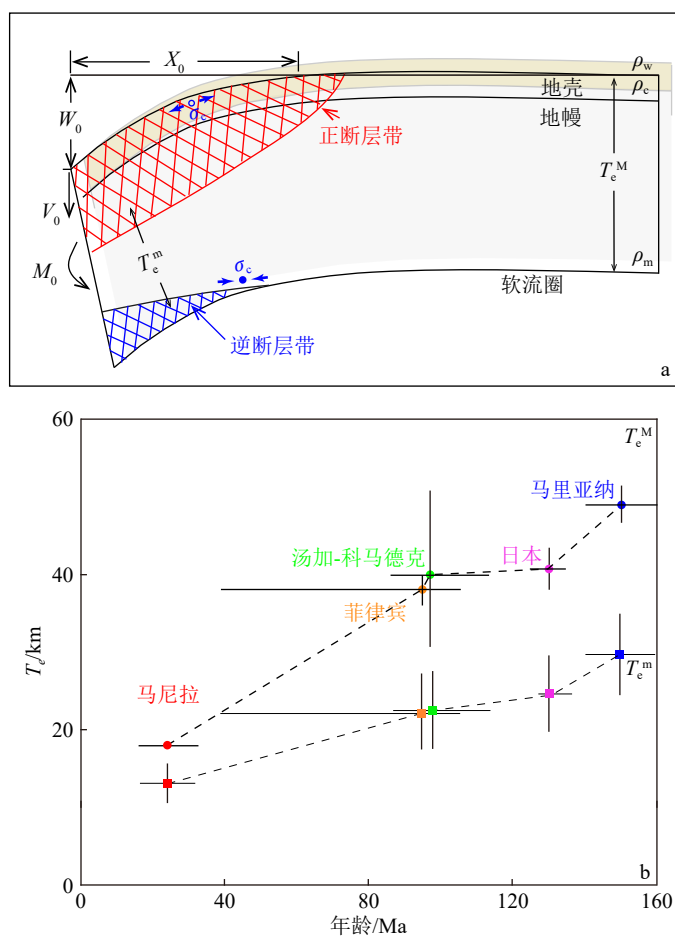


图 5 海沟板块附近弯曲的示意图模型 (a) 和汤加-克马德克、马尼拉、菲律宾、日本以及马里亚纳海沟俯冲板块年龄与板块弯曲参数的关系 (b)

$X_0$  为板块宽度,  $W_0$  为最大变形量,  $V_0$  和  $M_0$  是弯曲参数<sup>[19]</sup>。

Fig.5 Schematic modelling of buckling near the trench plate (a) and the relationship between subducting plate age and plate buckling parameters in the Tonga-Kermadec, Manila, Philippine, Japan, and Mariana Trench subducting plates (b)

$X_0$  is the slab width,  $W_0$  is the maximum deformation, and  $V_0$  and  $M_0$  are the bending parameters<sup>[19]</sup>.

能直接反映断层形态。根据最佳拟合模型得到 4 个海沟的俯冲板块的正断层模式(图 6a-d)。根据计算,正断层发育在上塑性屈服破裂带内。

结果显示,在日本海沟、伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟中,大多数正断层都是向海沟方向倾斜的。但汤加海沟既有向海沟倾斜的断层,也有向海洋倾斜的断层。经计算,日本海沟和汤加海沟的正断层比伊豆-小笠原海沟和马里亚纳海沟的正断层浅。研究区域内现有的重定位正断层地震均位于计算出的拉伸屈服破裂带内(图 6a-d)。黑色虚线曲线表示拉伸屈服带的最大深度。带误差条的黑圈显示了 Emry 和 Wiens 研究区域内可重新定位的正断层地震<sup>[20-24]</sup>。

在构造加载的作用下,俯冲板块在距离海沟 100 km 左右处的外缘隆起区开始产生正断层,逐步向海沟轴部发育,随着断层横向发育的过程中断层

深度也逐渐增大,直至断层形态趋于稳定<sup>[16]</sup>。模型结果显示,日本海沟的水平张力分别比马里亚纳、汤加和伊豆-小笠原海沟小 33%、50% 和 60%。汤加、日本、伊豆-小笠原、马里亚纳海沟的正断层最深可达海底以下 29、23、32 和 32 km(图 6),这与重新定位后的日本与伊豆-小笠原地震深度一致。此外,反演得到的水平张拉力与观测到的平均垂直断层距呈一定正相关性,而计算得到的有效弹性厚度减少量与观测到的海沟挠曲量也相关。这些结果表明,水平张拉力在正断层发展过程中起着关键控制作用,板块弱化可导致板块挠曲量的显著增加。

根据计算的水平偏应力,按照前人的方法<sup>[25-27]</sup>,计算了由于板块弯曲和正断层作用而产生的有效弹性板厚度  $T_e$  变化(图 6c-h)。结果表明,有效板厚度向海沟轴线逐渐减小,汤加、日本、伊豆-小笠原和马里亚纳海沟的最大  $T_e$  减少量分别为 25、



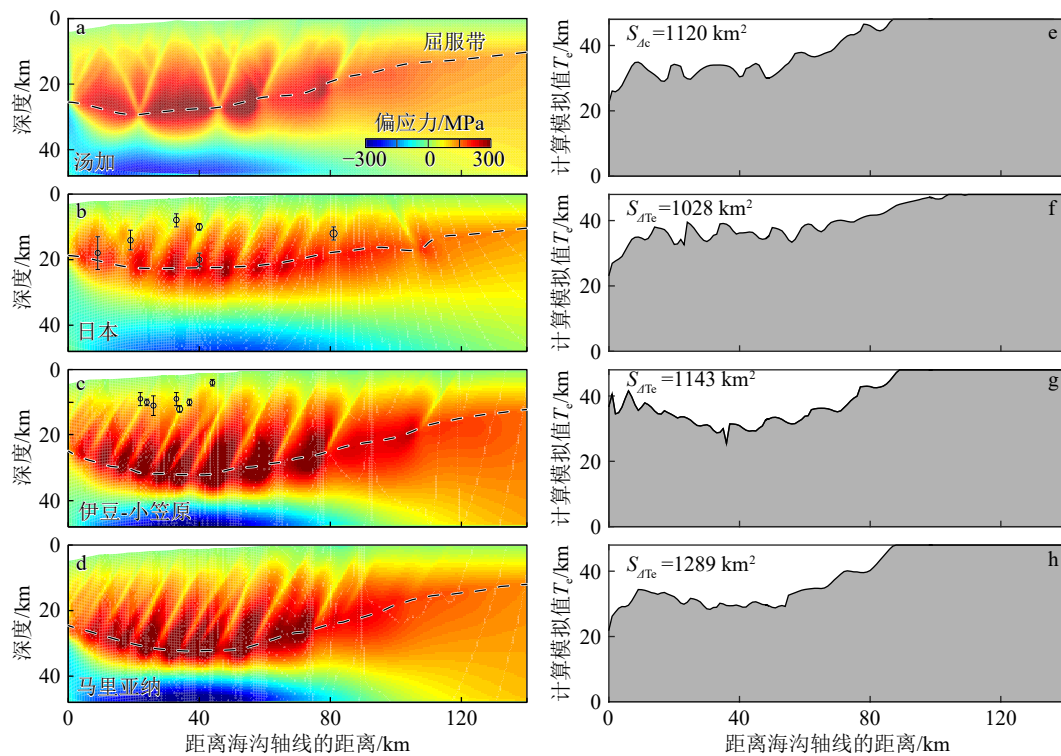


图6 汤加、日本、伊豆-小笠原、马里亚纳海沟俯冲板块正断层特征以及板块有效弹性厚度变化、计算的水平偏应力和有效弹性板厚度

a-d 中黑色虚线表示伸展屈服带的最大深度, 带误差条的黑圈显示了研究区域内可重新定位的外升正断层地震; e-h 中是 4 个沟槽计算的  $T_e$  (黑色曲线) 和计算的面积  $S_{\Delta T_e}$  (白色区域)<sup>[15]</sup>。

Fig.6 Normal faulting characteristics in the subducting plates of the Tonga, Japan, Izu-Bonin, and Mariana Trench and variations in the effective plate elastic thickness

The black dashed lines in a-d indicate the maximum depth of the stretching yield zone, and the black circles with error bars show the relocatable outgoing uplift normal fault earthquakes in the study area; e-h are the calculated  $T_e$  (black curves) and calculated area  $S_{\Delta T_e}$  (white areas)<sup>[15]</sup>.

24、22 和 26 km。然后, 通过对跨轴距离上的  $T_e$  还原进行积分来计算  $T_e$  还原的面积  $S_{\Delta T_e}$ 。计算得出  $S_{\Delta T_e}$  的变化值中马里亚纳海沟最大, 日本海沟最小。同时, 计算得出  $T_e$  还原区的宽度中日本海沟最大, 其他 3 个海沟几乎相同。因此, 日本海沟的平均  $T_e$  减少量最小, 马里亚纳海沟的减少量最大。

大多数利用薄板弯曲理论的研究已经认识到垂直载荷和弯矩的重要性, 然而很少有研究调查水平张力( $F_0$ )的重要性。基于先前的研究表明,  $F_0$  对于解释板块弯曲和断层垂直断距至关重要, 特别是在控制最大断层断距海沟轴部距离方面<sup>[28-30]</sup>。计算的  $F_0$  与观测到的 4 个海沟的平均断层垂直断距呈正相关。这一结果表明, 较大的  $F_0$  有利于俯冲板块中较大正断层的发育。基于以上结果, 可以推断  $F_0$  在控制正断层模式中起着关键作用。由于研究存在局限性, 即只研究了相对古老板块的俯冲带, 因此想要证实这个结论还需要进一步的研究。

西太平洋俯冲板块因其年龄老、具有较高的刚度, 形成的断裂分布广且断距大, 进一步促进了流体进入地幔, 并引起地幔蛇纹石化<sup>[31-32]</sup>。前人通过研究表明进入板块内地幔水化的范围和程度可以被用来估计带入俯冲带的水量<sup>[33-35]</sup>。汤加、日本、伊豆-小笠原和马里亚纳海沟的累计断层长度(即单个可识别断层的总和)分别为 240、260、360 和 450 km。并且通过对 Cascadia 海沟的地震反射研究, 估算单个断层周围的透水断层带宽度为 75~600 km, 从而估计透水断层带的体积为 18.0~144.0、19.5~156.0、27.0~216.0 和 34.0~270.0 km<sup>3</sup>, 汤加、日本、伊豆-小笠原和马里亚纳海沟的地幔蛇纹石化百分比分别为 0.4%~3.4%、0.4%~3.1%、0.6%~5.1% 和 1.4%~10.8%。这一结果表明, 马里亚纳海沟的地幔蛇纹石化程度可能明显大于其他 3 条海沟, 相当于汤加和日本海沟的 350%, 伊豆-小笠原海沟的 230%。

## 4 结论与展望

(1)观测表明马里亚纳海沟、日本海沟、伊豆-小笠原海沟和汤加海沟都有显著的正断层特征,且汤加海沟的平均断层错距最大,马里亚纳海沟的正断层平均密度最大;(2)板块有效弹性厚度的降低导致了海沟的显著加深和变窄,并且无论海沟处的加载如何变化,板块的年龄都可能是控制海沟弯曲形状的主要因素;(3)屈服带模型揭示马里亚纳海沟的有效弹性厚度变化最多,导致其正断层特征更为明显,这也符合对正断层的观测。这些发现对于理解俯冲带的动力学过程具有重要意义。

当前的研究仍存在一定的局限性,包括:(1)地球动力学模型可能无法完全考虑实际地质过程中的所有复杂因素;(2)当前的俯冲板块弯曲动力学模型基本上都是二维模型,而实际的海沟走向并非直线而全部为曲线形态,因而亟需三维地球动力学模拟方法来解释观测到的板片弯曲和正断层形态;(3)很多海沟仍缺乏实测的高精度海底地形数据,限制了不同区域的对比研究。今后的研究应朝着以上方向去探索,以提高对西太平洋俯冲板块动力机制的更深理解。

### 参考文献 (References)

- [1] de Bremaecker J C. Is the oceanic lithosphere elastic or viscous? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(14): 2001-2004.
- [2] Hilde T W C. Sediment subduction versus accretion around the Pacific [J]. *Tectonophysics*, 1983, 99(2-4): 381-397.
- [3] Melosh H J. Dynamic support of the outer rise [J]. *Geophysical Research Letters*, 1978, 5(5): 321-324.
- [4] Parsons B, Molnar P. The origin of outer topographic rises associated with trenches [J]. *Geophysical Journal International*, 1976, 45(3): 707-712.
- [5] Watts A B, Taiwani M. Gravity anomalies seaward of deep-sea trenches and their tectonic implications [J]. *Geophysical Journal International*, 1974, 36(1): 57-90.
- [6] Beavan J, Wang X, Holden C, et al. Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009 [J]. *Nature*, 2010, 466(7309): 959-963.
- [7] Christensen D H, Ruff L J. Outer-rise earthquakes and seismic coupling [J]. *Geophysical Research Letters*, 1983, 10(8): 697-700.
- [8] Kanamori H. Seismological evidence for a lithospheric normal faulting—the Sanriku earthquake of 1933 [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1971, 4(4): 289-300.
- [9] Lay T, Ammon C J, Kanamori H, et al. The 2009 Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet [J]. *Nature*, 2010, 466(7309): 964-968.
- [10] Kao H, Chen W P. Seismicity in the outer rise-forearc region and configuration of the subducting lithosphere with special reference to the Japan Trench [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B12): 27811-27831.
- [11] Lefeldt M, Ranero C R, Grevemeyer I. Seismic evidence of tectonic control on the depth of water influx into incoming oceanic plates at subduction trenches [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(5): Q05013.
- [12] Kobayashi K, Nakanishi M, Tamaki K, et al. Outer slope faulting associated with the western Kuril and Japan trenches [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 134(2): 356-372.
- [13] Turcotte D L, McAdoo D C, Caldwell J G. An elastic-perfectly plastic analysis of the bending of the lithosphere at a trench [J]. *Tectonophysics*, 1978, 47(3-4): 193-205.
- [14] Ivandic M, Grevemeyer I, Berhorst A, et al. Impact of bending related faulting on the seismic properties of the incoming oceanic plate offshore of Nicaragua [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5): B05410.
- [15] Zhou Z Y, Lin J, Zhang F. Modeling of normal faulting in the subducting plates of the Tonga, Japan, Izu-Bonin and Mariana Trenches: implications for near-trench plate weakening [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(11): 53-60.
- [16] Zhou Z Y, Lin J, Behn M D, et al. Mechanism for normal faulting in the subducting plate at the Mariana Trench [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4309-4317.
- [17] Ranero C R, Morgan J P, McIntosh K, et al. Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench [J]. *Nature*, 2003, 425(6956): 367-373.
- [18] Ranero C R, Sallarès V. Geophysical evidence for hydration of the crust and mantle of the Nazca plate during bending at the North Chile Trench [J]. *Geology*, 2004, 32(7): 549-552.
- [19] Zhang F, Lin J, Zhou Z Y, et al. Intra- and intertrench variations in flexural bending of the Manila, Mariana and global trenches: implications on plate weakening in controlling trench dynamics [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(2): 1429-1449.
- [20] Tilmann F J, Grevemeyer I, Flueh E R, et al. Seismicity in the outer rise offshore southern Chile: indication of fluid effects in crust and mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 269(1-2): 41-55.
- [21] Wessel P, Smith W H F. New, improved version of generic mapping tools released [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1998, 79(47): 579-579.
- [22] Zhang F, Lin J, Zhan W H. Variations in oceanic plate bending along the Mariana Trench [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 401: 206-214.
- [23] Masson D G. Fault patterns at outer trench walls [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1991, 13(3): 209-225.
- [24] Ranero C R, Villaseñor A, Morgan J P, et al. Relationship between bend-faulting at trenches and intermediate-depth seismicity [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(12): Q12002.
- [25] Zhou Z Y, Lin J. Elasto-plastic deformation and plate weakening due to normal faulting in the subducting plate along the Mariana Trench [J].



- [Tectonophysics](#), 2018, 734-735: 59-68.
- [26] 林间, 孙珍, 李家彪, 等. 南海成因: 岩石圈破裂与俯冲带相互作用新认识 [J]. 科技导报, 2020, 38(18): 35-39. [LIN Jian, SUN Zhen, LI Jiabiao, et al. South China Seabasin opening: Lithospheric rifting and interaction with surrounding subduction zones[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(18): 35-39.]
- [27] 林间, 李家彪, 徐义刚, 等. 南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破 [J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 125-140. [LIN Jian, LI Jiabiao, XU Yigang, et al. Ocean drilling and major advances in marine geological and geophysical research of the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(10): 125-140.]
- [28] Lin J, Xu Y G, Sun Z, et al. Mantle upwelling beneath the South China Sea and links to surrounding subduction systems[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 877-881.
- [29] Sun Z, Lin J, Qiu N, et al. The role of magmatism in the thinning and breakup of the South China Sea continental margin: special topic: the South China Sea Ocean Drilling[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 871-876.
- [30] 汪品先, 翦知潜. 探索南海深部的回顾与展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1590-1606. [WANG Pinxian, JIAN Zhimin. Exploring the deep South China Sea: retrospects and prospects[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1473-1488.]
- [31] 徐敏, 狄会哲, 周志远, 等. 俯冲带水圈-岩石圈相互作用研究进展与启示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(5): 58-70. [XU Min, DI Huizhe, ZHOU Zhiyuan, et al. Interaction between hydrosphere and lithosphere in subduction zones[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(5): 58-70.]
- [32] Han S S, Carbotte S M, Canales J P, et al. Seismic reflection imaging of the Juan de Fuca plate from ridge to trench: new constraints on the distribution of faulting and evolution of the crust prior to subduction [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 1849-1872.
- [33] Zhu G H, Wiens D A, Yang H F, et al. Upper mantle hydration indicated by decreased shear velocity near the southern Mariana Trench from Rayleigh wave tomography[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15): e2021GL093309.
- [34] Zhang J Y, Zhang F, Lin J, et al. Yield failure of the subducting plate at the Mariana Trench[J]. *Tectonophysics*, 2021, 814: 228944.
- [35] 张江阳, 林间, 张帆, 等. 西太平洋俯冲带岩石圈变形研究 [J]. 科技导报, 2023, 41(2): 29-34. [ZHANG Jiangyang, LIN Jian, ZHANG Fan, et al. Lithospheric deformation in western Pacific subduction zones[J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41(2): 29-34.]