

# 汤加-克马德克俯冲带的地质构造与地震火山特征

张志文<sup>1,2</sup>, 杨晓东<sup>1,3,4\*</sup>

1. 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
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
4. 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** 2022年1月15日西南太平洋的洪阿哈阿帕伊岛海底火山发生了爆炸式的剧烈喷发,吸引了全球的关注。洪阿哈阿帕伊岛海底火山位于汤加-克马德克俯冲带,综合前期研究结果,对汤加-克马德克俯冲带的地质构造特征、地震和火山分布进行初步分析,发现:(1)从汤加-克马德克俯冲带弧前向海方向直到俯冲的太平洋板块,构造上主要表现为大规模正断层。(2)路易斯维尔海山链的俯冲将汤加-克马德克俯冲带分为北部的汤加俯冲带和南部的克马德克俯冲带,沿汤加俯冲带板块汇聚率为67~84 mm/a,沿克马德克俯冲带板块汇聚率为41~58 mm/a,板块俯冲速度的差异造成汤加俯冲带和克马德克俯冲带目前俯冲深度的不同。(3)在路易斯维尔海山链以北,太平洋板块上覆沉积物厚度不足0.4 km,而在南侧达到1 km左右,由于俯冲板块上覆沉积物厚度的差异而造成北部的汤加俯冲带和南部的克马德克俯冲带孕育地震能力的差异。这些认识对研究该俯冲带的火山喷发机制、大地震成因机理及其灾害风险具有重要意义。

**关键词** 汤加火山;火山喷发;俯冲带构造特征;俯冲带地震

在西南太平洋,太平洋板块向澳大利亚板块的俯冲形成了汤加-克马德克(Tonga-Kermadec)俯冲带。该俯冲带全长约2700 km,具有典型的沟-弧-盆体系,海沟平均深6000 m,最深可达10882 m,是

收稿日期:2022-10-20;修回日期:2022-12-27

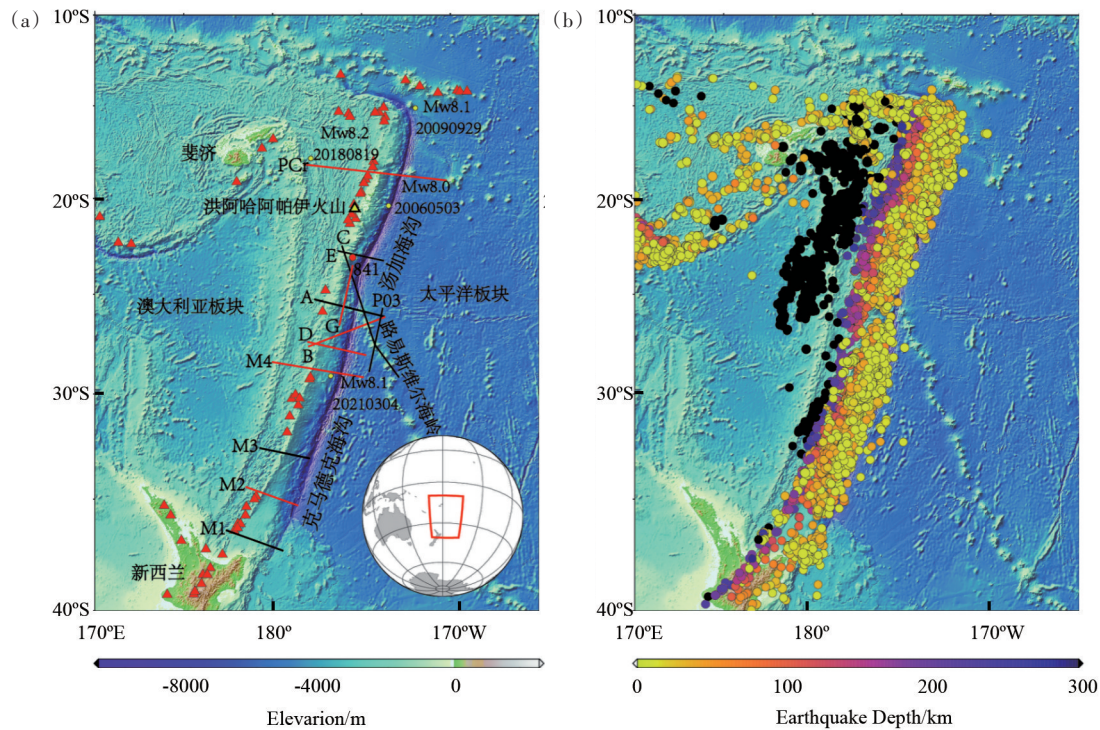
基金项目:国家自然科学基金项目(41890813,42276222);中国科学院国际合作局项目(131551KYSB20200021,133244KYSB20180029);中国科学院人才引进项目(E1SL3C02);中国科学院南海海洋研究所自主部署项目(SCSIO202207)

作者简介:张志文,博士研究生,研究方向为海底构造与地球物理,电子信箱:zhangzhiwen191@mails.ucas.ac.cn;杨晓东(通信作者),研究员,研究方向为海洋地质与地球物理,电子信箱:xyang@scsio.ac.cn

引用格式:张志文,杨晓东.汤加-克马德克俯冲带的地质构造与地震火山特征[J].科技导报,2023,41(2):56-64;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.007

地球上仅次于马里亚纳海沟的第二深海沟,岛弧由40余座全新世活动火山组成,2022年1月15日喷发的洪阿哈阿帕伊岛海底火山是该岛弧上的火山

之一(图1)。由于强烈的板块俯冲与地壳变形,汤加的火山和地震频发,造成了严重的自然灾害。



(a) 汤加-克马德克俯冲带火山(红色小三角形)及地震剖面分布(火山数据来源于 National Oceanic and Atmospheric Administration), 其中黄色小三角形代表2022年1月15日喷发的洪阿哈阿帕伊岛火山;红色小圆圈代表DOP-841 钻孔;黄色小圆圈代表8级以上地震震中;地震剖面用线段表示,其中红色线段为本文提及的地震剖面<sup>[1-3]</sup>;  
(b) 汤加-克马德克俯冲带5级以上地震分布  
(数据来源于 United States Geological Survey)

图1 汤加火山及其邻区构造背景

## 1 汤加-克马德克俯冲带地质构造特征

### 1.1 汤加-克马德克俯冲带主要构造单元及其特征

有限的沉积物覆盖(<100 m)和陡峭的倾角(10°~24°)、高度不规则的基底是外弧的特征<sup>[4]</sup>。在外弧和活跃的火山弧之间,为不活动的始新世火山弧,称为汤加海脊,该海脊从汤加岛群中最北端的瓦瓦乌岛(Vava'u)一直延伸到南纬28°<sup>[4-5]</sup>。在南纬28°以南,前弧为深约2 km、充满沉积物的盆地<sup>[6]</sup>。

活跃的Tofua火山弧和Kermadec火山弧位于各自海沟以西170~200 km处<sup>[7]</sup>。弧后伸展导致Tofua火山弧和Kermadec火山弧与劳-科尔维尔弧(Lau-Colville Ridge)分离,在Lau盆地北部具有更高的扩张率和更复杂的板块结构<sup>[8-9]</sup>。岛弧-弧后系统通过上覆板块沉积和地壳结构的变化记录板块俯冲随时间的变化特征<sup>[10]</sup>。由于板块弯曲和上覆板块的重力加载,俯冲的太平洋板块产生了规模较大的正断层<sup>[5,11]</sup>。沿着其他海沟(例如智利和哥斯达黎加)观察到的类似伸展正断层被认为能够促进上地幔水化,从而降低俯冲板块的刚度<sup>[12-13]</sup>。在弧前

区,海底以下 5 km 的地震波速度为 3.5~4.0 km/s,在 ODP-841 钻孔(图 1(a))岩心中观察到普遍的正断层现象<sup>[5,14-15]</sup>表明弧前受到俯冲侵蚀而产生伸展变形<sup>[16-17]</sup>。上覆板块的结构在沿着海沟和垂直于海沟的方向变化显著。地震反射剖面解释结果表

明,从汤加-克马德克俯冲带弧前向海方向直到俯冲的太平洋板块,构造上主要表现为大规模正断层,局部表现为正断层及其组合,如地堑、地垒以及阶梯状断层(图 2、图 3)。

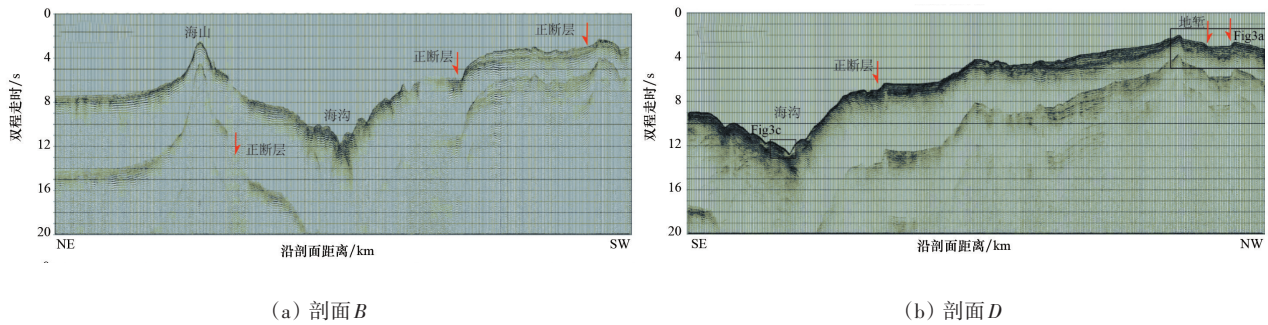
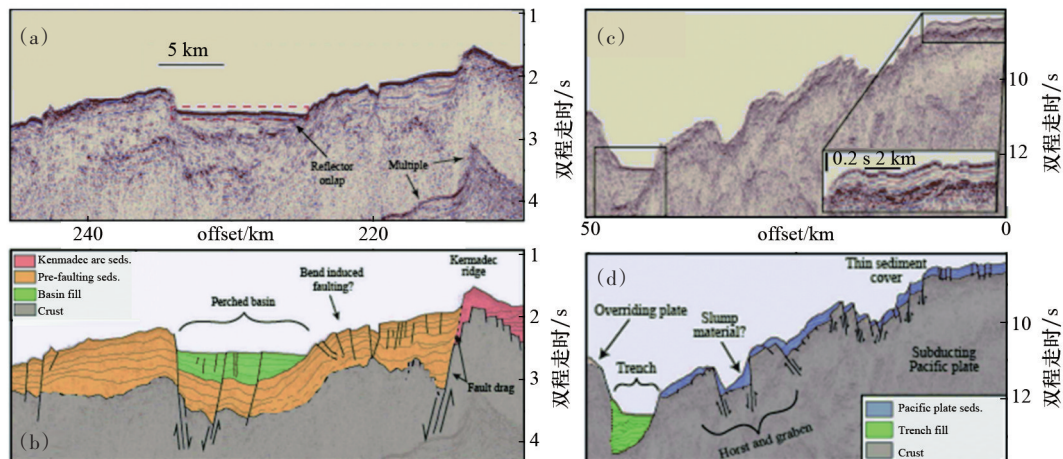


图 2 汤加-克马德克俯冲带地震反射剖面的构造解释,主要表现为大规模正断层<sup>[1]</sup>



(a)和(b)为岛弧处的剖面及其地层划分;(c)和(d)为海沟处的剖面及其解释

图 3 剖面 D 的详细构造解释,主要表现为正断层及其组合<sup>[6]</sup>

## 1.2 汤加-克马德克俯冲带分段性特征

路易斯维尔海山链(LRSC)与汤加-克马德克俯冲系统的碰撞被认为开始于 5~4 Ma 或 >7 Ma<sup>[9,18]</sup>。路易斯维尔海脊海山链(LRSC)在约 26° S 处的俯冲,将这个看似线性的 2000 多 km 长的俯冲系统分为北部的汤加俯冲带与南部的克马德克俯冲带(图 1、图 4)<sup>[7,19]</sup>。与 LRSC 俯冲相关的弧前变形

的活跃区域大致位于奥斯本海山附近,这是该链中最古老的海山。变形表现为海沟变浅约 4 km<sup>[7]</sup>、弧前隆起 300 m<sup>[15]</sup>以及地震活动间隙的存在<sup>[20]</sup>。汤加海脊宽阔、隆起、平顶且覆盖着沉积物,自中新世晚期 Lau 盆地开始开放以来,它经历了几次伸展塌陷事件<sup>[21]</sup>。相比之下,在南部,克马德克海脊很窄,有一个弧前盆地,其中包含向海沟倾斜的地层。

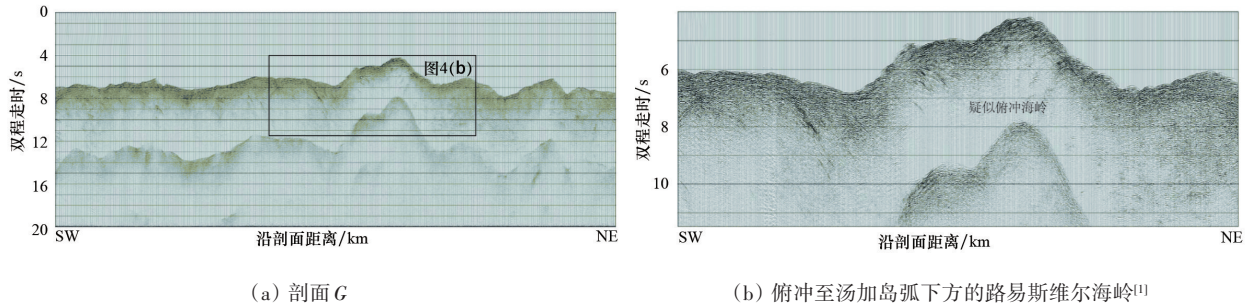


图4 汤加俯冲带地震反射剖面的构造解译

## 2 汤加-克马德克俯冲带火山活动特征及其灾害

始新世的火山活动证据表明,太平洋板块-澳大利亚板块边缘的俯冲起始时间与伊豆-波宁-马里亚纳边缘的俯冲起始时间一致,约为 51 Ma<sup>[10,22]</sup>。板块俯冲造成的火山活动可以分为 3 个阶段:(1) 在火山活动初期,火山活动集中出现在已经被覆盖的汤加海脊上,形成了现在的弧前山脊;(2) 在 45~32 Ma,前弧和汤加海脊从陆上环境迅速下沉到海面以下约 3 km,导致沉积层段向海沟倾斜<sup>[23]</sup>。在火山活动的初始阶段之后直至约 17 Ma,劳-科尔维尔弧成为活动岛弧,南斐济盆地(South Fiji Basin)开始张开<sup>[24]</sup>; (3) 在 5.5 Ma 时,构造应力的转变导致了 Lau 盆地和 Havre 海槽的打开<sup>[9]</sup>,导致火山活动迁移到目前活跃的 Tofua 弧和 Kermadec 弧<sup>[14,25]</sup>,它们大致平行于海沟。

洪阿哈阿帕伊岛(Hunga Haapai)海底火山距离汤加主岛 65 km,是一座高约 1800 m,宽约 20 km 的巨型海底火山,位于太平洋板块和澳大利亚板块之间的“汇聚型板块边界”上,是环太平洋火山地震带汤加-克马德克火山弧的火山之一,此火山弧从新西兰北岛向东北方向延伸到斐济东部海域,沿火山弧分布着 40 余座全新世活动火山,地质活动十分活跃(图 1)。在太平洋板块向澳大利亚板块俯冲过程中,太平洋板块不断将含水和碳的海底沉积物与岩石带进地球深部,随着温度和压力的逐步升高,形成熔融的岩浆,岩浆上涌喷发到海底,产生海底火山(图 5)。

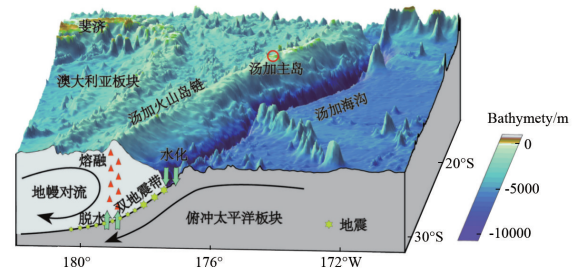
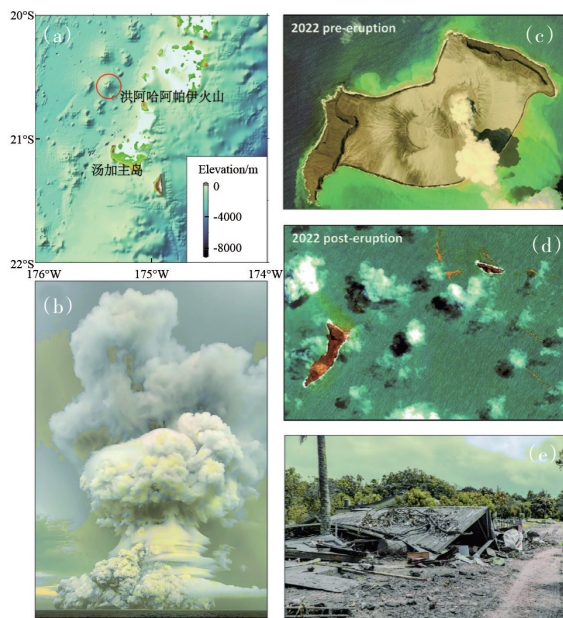


图5 太平洋板俯冲与汤加-克马德克岛弧和弧后盆地系列的形成模式示意

洪阿哈阿帕伊岛海底火山自 1912 年第一次喷发以来,1937、1988、2009、2014、2015 年相继发生了几次小规模海底喷发活动。2021 年 12 月 20 日洪阿哈阿帕伊岛火山又开始喷发,至 2022 年 1 月 13 日大规模喷发前都有间歇性的火山气体逸出等活动迹象。世界时间 2022 年 1 月 13 日 17 时 42 分,该火山出现 2022 年第一次大规模喷发。世界标准时间 2022 年 1 月 15 日 4 时 39 分该火山发生爆炸式大喷发,此次喷发是 21 世纪以来最大规模的火山喷发,火山喷发柱高度达 20 km。这种爆炸性的海底火山爆发会产生大量的气体,主要是来自地球深部的水蒸气、二氧化碳、二氧化硫及一些挥发性物质,还有大量火山碎屑物质及炽热的熔岩喷出,在空中冷凝为火山灰、火山弹以及火山碎屑。海底火山的喷发对水圈、生物圈、大气圈等多圈层的环境造成巨大影响。臭氧卫星(OMPS)数据显示,喷出的火山灰及火山气体已到达了平流层。“哨兵-5P”卫星对大气中 SO<sub>2</sub> 浓度测量结果表明,此次火山喷发排放约 4×10<sup>5</sup> t 的 SO<sub>2</sub>。海底火山的另一个重要

灾害是引发海啸,此次火山喷发产生了太平洋全域海啸,除了给人口约 10.5 万的汤加和周边的斐济、萨摩亚等国带来了严重影响,太平洋周边许多国家包括日本、美国、澳大利亚、新西兰、瓦努阿图、智利等也受到海啸影响,并发布了海啸预警(图 6)。



(a) 洪阿哈阿帕伊岛火山与汤加主岛的位置关系与地形分布;  
(b) 洪阿哈阿帕伊岛火山喷发柱(图片来源:汤加国土与自然资源部(MLNR));(c) 洪阿哈阿帕伊岛火山喷发前的形态<sup>[26]</sup>;(d) 洪阿哈阿帕伊岛火山喷发 3 d 后的形态<sup>[26]</sup>;(e) 汤加境内的建筑物被火山喷发产生的冲击波和海啸所摧毁<sup>[27]</sup>

图 6 洪阿哈阿帕伊岛火山喷发前后

### 3 汤加-克马德克俯冲带地震活动

#### 3.1 俯冲带构造对大地震触发形成的影响

自从板块构造理论被广泛接受以来,为俯冲带特征与地震震级和位置之间的关系开发物理模型成为重点研究方向,这样的模型将是在俯冲带进行地震危险性评估的关键。地震发生在应力累积超过局部断层强度的区域。在某些情况下,大地震的孕育归因于断层上相邻区域的闭锁和蠕变而造成的应力集中,或由于粗糙的俯冲地形(例如俯冲海山)而对区域应力场产生扰动<sup>[28-30]</sup>。然而,一旦发生地震,具有在大空间范围内促进破裂和能够承载大地震滑动的俯冲带更有可能产生最大的巨型逆

冲地震。

早期的研究假设,板块的年龄和收敛速度决定了俯冲带地震的震级,认为年轻的、更快速的俯冲板块导致了更大的地震事件<sup>[31]</sup>。然而,这一观点被随后的大地震事件所推翻,包括 2004 年 Mw 9.1 苏门答腊-安达曼地震和 2011 年 Mw 9.1 日本东北地震,它们发生在收敛相对较慢的俯冲系统(安达曼海沟)或古老的俯冲板块(Tohoku)。对于大于 Mw 8.5 的地震,板块年龄和收敛速度似乎与地震震级无关<sup>[32]</sup>。数值模型显示收敛速度对大地震产生的影响可以忽略不计,但是有研究者认为,具有快速收敛速度的俯冲带可能会经历更频繁的地震,收敛速度可能会在一定程度上影响发震带的宽度,因为以更快的速度俯冲的板块将会到达更深的深度,从而延长发震带沿倾角的长度<sup>[33-34]</sup>。

随后的研究表明,俯冲带巨型逆冲断层地震的震级与俯冲带几何形状、俯冲板块沉积物厚度、俯冲板块粗糙度和上覆板块特性等参数之间存在更强的相关性,这些参数在不同俯冲系统之间可能存在很大差异<sup>[32]</sup>。研究表明,更大的发震带宽度,更小的下倾曲率,以及在某种程度上更小的沿走向曲率,更宽、更均匀的沿走向和下倾几何形状似乎为实现大空间范围的滑移创造了更有利的条件,从而增加了发生重大地震事件的机会。其他特征,例如板块收敛速度、俯冲板块的沉积物厚度、俯冲板块粗糙度和上覆板块结构,可能对大地震的发生产生次要(但仍然重要)控制作用<sup>[32]</sup>。

人们认为,俯冲沉积物的存在,将起到平滑和润滑界面的作用,促进更均匀的应力条件和更低的断层摩擦系数,从而增加了巨型逆冲断层大面积破裂的可能性<sup>[33-35]</sup>。然而,应该注意的是,海沟处沉积物厚度不一定代表沿板块边界本身的沉积物厚度,因为并非所有这些沉积物都俯冲。此外,许多研究集中在俯冲板块粗糙度对巨型逆冲断层滑移行为的影响。观察表明,高地震间耦合和低俯冲板块粗糙度之间存在相关性<sup>[36-38]</sup>。与由于粗糙的俯冲地形而具有非均匀耦合分布的巨型逆冲断层相比,预计相对平滑、沉积较厚的俯冲海底更可能导致更大的震间耦合区。俯冲地形起伏(例如俯冲海山)预

计会导致复杂的前弧结构和非均匀应力,可能有利于抗震蠕变和小地震,但不利于大地震传播<sup>[37,39]</sup>。

### 3.2 汤加-克马德克俯冲带地震活动特征及其灾害

汤加-克马德克俯冲带从新西兰北岛向东北方向延伸,经过汤加海域,直到萨摩亚近海。太平洋板块和澳大利亚板块之间的相互作用使得该海域成为世界上地震最活跃的地区之一。2000年以来,汤加-克马德克俯冲带曾发生过至少28次7级以上地震(图7),部分地震还触发了海啸。其中包括10次深源地震(震源深度大于400 km),5次中源地震(震源深度大于150 km,小于200 km),13次浅源地震(震源深度小于70 km),其中8级以上的巨大地震有4次。

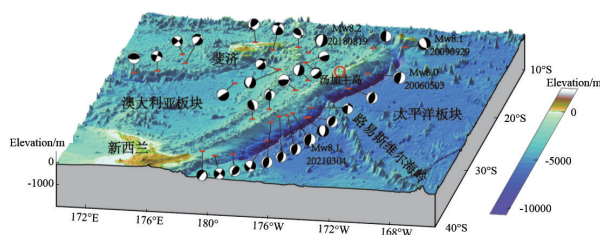


图7 研究区2000年1月以来7级以上地震震源机制解分析  
(数据来源于Global CMT)

发生于不同位置的地震具有不同的孕震机制和破坏影响。例如,2006年5月3日汤加附近海域发生Mw 8.0地震,震中位于汤加俯冲带弧前(20.19°S、174.12°W),震源深度16.1 km,属于浅源地震。此次地震触发小规模海啸,无人员伤亡及财产损失的报道。2个相邻板块在俯冲带汇聚,构造应力在上覆大陆板块内部累积,导致板内形变。一般来说挤压造成地壳缩短,进一步调整板块的汇聚,此次地震正是这种持续挤压的结果<sup>[40]</sup>。而2009年9月29日萨摩亚Mw 8.1地震,震中位于汤加俯冲带北端的外海沟斜坡,为正断层地震事件,地震开始破裂后的2 min内,发生了总地震矩等于8.0的第二个特大地震,它由2次(矩震级均为7.8级)板间下插逆冲大地震组成,导致了周边俯冲带巨型逆断层的破裂<sup>[41]</sup>。联合的断层作用引发了海啸,局

部地区抬升约12 m,导致萨摩亚、美属萨摩亚和汤加192人死亡。发生在俯冲带朝向浅外海沟斜坡区的特大张性断层地震比较少见,其中3次最大的已知事件分别为:1933年日本三陆地震(Mw 8.4)、1977年印度尼西亚松巴哇地震(Mw 8.3)和2007年千岛群岛地震(Mw 8.1)。这些大规模的海洋岩石圈破裂是板块弯曲和板块拉力作用的结果<sup>[42-43]</sup>。本次地震序列展示一少见的例子——特大海沟斜坡的一次板内地震触发了广泛的板间断层活动,颠倒了典型的活动模式,从而广泛地扩大了地震和海啸灾害。此外,2018年8月19日发生在斐济东部海域的Mw 8.2地震,震中位于汤加火山弧后盆地,震源深度570 km,由于震源深度很深,太平洋海啸预警中心未就此次地震发布海啸预警。还有2021年3月5日发生在克马德克群岛海域的8.1级地震,震中位于克马德克俯冲带弧前,震源深度20.0 km。此前,在4日夜到5日凌晨期间,克马德克俯冲带还发生了7.3级和7.4级2次地震事件。按照发生的时间顺序是Mw 7.3地震引发Mw 7.4地震,进而再引发Mw 8.1强震,但是Mw 7.3地震与另外2次地震相隔上千公里,关于在巨型逆冲断层弧前地震引发如此广泛的远程触发活动的实例并无记载。

北部的汤加俯冲带和南部的克马德克俯冲带表现为不同的俯冲特征。从2013年9月以来发生5级以上地震的震源深度分布可见,太平洋板块沿汤加海沟的俯冲深度至少达600 km,而沿克马德克海沟的俯冲深度较前者要小得多(图1(b))。研究认为是由于板块俯冲速度的差异造成的。研究表明,沿汤加俯冲带板块会聚率为67~84 mm/a,沿克马德克俯冲带板块会聚率为41~58 mm/a<sup>[44]</sup>。

汤加俯冲带和克马德克俯冲带的孕震能力也存在差异。2000年1月以来汤加-克马德克俯冲带发生的7级以上地震超过20次(数据来源于Global CMT),其中发生在汤加俯冲带前弧区的仅有3次,而发生在克马德克俯冲带前弧区的有11次(图7)。这可能是由于南北两侧俯冲太平洋板块上覆沉积物厚度的差异造成的。

研究者利用主动源地震折射剖面与海底地形

数据相结合,对汤加-克马德克俯冲带的地壳结构进行约束(图 8<sup>[2]</sup>)。研究表明,北克马德克前弧(32°S~25°S)被埋藏的始新世汤加海脊占据。该脊纵波速度(VP)为 6.5~7.3 km/s,弧前莫霍面深度为(15±2) km,俯冲太平洋板块地壳厚度为(6±1) km,VP 为 6.0~7.2 km/s,覆盖约 1 km 的沉积物,VP 为 1.9~5.0 km/s,在约 19 km 深度处俯冲板块倾角从 8°~9°增加到 17°~18°(图 8(b))<sup>[2]</sup>。南克马德克前弧(37°S~32°S)的特点是中央有一个 4.5 km 深的前弧盆地,盆地下方的地壳厚度 6~7 km,弧前莫霍面深度为 16 km,俯冲太平洋板块地壳厚度为 6 km,表层沉积物厚度约为 1 km,VP 为 1.9~3.9 km/s,外前弧的平均坡度为 2.2°(图 8(c))<sup>[2]</sup>。而在汤加俯冲带,数据显示,在汤加海脊下方,存在一个中等速度层(6~7 km/s),厚达 7.5 km,其速度-深度分布与大陆地壳中发现的安山岩相似,太平洋板块地壳厚 5.5 km,其速度结构与现今东太平洋海隆(EPR)的速度结构相似,此外太平洋板块沉积物厚度不足 0.4 km(图 8(a))<sup>[3]</sup>。

## 4 结论

1) 地震反射剖面解译结果表明,从汤加-克马德克俯冲带弧前向海方向直到俯冲的太平洋板块,构造上主要表现为大规模正断层,局部表现为正断层及其组合,如地堑、地垒以及阶梯状断层。

2) 路易斯维尔海山链的俯冲将汤加-克马德克俯冲带分为北部汤加俯冲带和南部克马德克俯冲带,沿汤加俯冲带板块汇聚率为 67~84 mm/a,沿克马德克俯冲带板块汇聚率为 41~58 mm/a,板块俯冲速度的差异造成太平洋板块沿汤加海沟的俯冲深度比沿克马德克海沟的俯冲深度大得多。

3) 在路易斯维尔海山链以北,太平洋板块上覆沉积物厚度不足 0.4 km,而在南侧达到 1 km 左右,由于俯冲板块上覆沉积物厚度的差异而造成汤加俯冲带的孕震能力比克马德克俯冲带的孕震能力弱。

## 参考文献(References)

- [1] Peirce C, Watts A. R/V Sonne SO215-Cruise Report, The Louisville Ridge-Tonga Trench collision: Implications for subduction zone dynamics[R]. Durham: Durham University, 2011.
- [2] Bassett D, Kopp H, Sutherland R, et al. Crustal structure of the Kermadec arc from MANGO seismic refraction profiles[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(10): 7514-7546.
- [3] Crawford W C, Hildebrand J A, Dorman L M, et al. Tonga Ridge and Lau Basin crustal structure from seismic refraction data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B4): 2195.
- [4] Ballance P F, Ablav A G, Pushchin I K, et al. Morphology and history of the Kermadec-trench-arc-backarc basin-remnant arc system at 30° to 32°S: Geophysical profile, microfossil and K-Ar data[J]. *Marine Geology*, 1999, 159(1/2/3/4): 35-62.
- [5] Contreras-Reyes E, Grevemeyer I, Watts A B, et al. Deep seismic structure of the Tonga subduction zone: Implications for mantle hydration, tectonic erosion, and arc magmatism[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B10): B10103.
- [6] Funnell M J, Peirce C, Stratford W R, et al. Structure and deformation of the Kermadec forearc in response to subduction of the Pacific oceanic plate[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(2): 1286-1302.

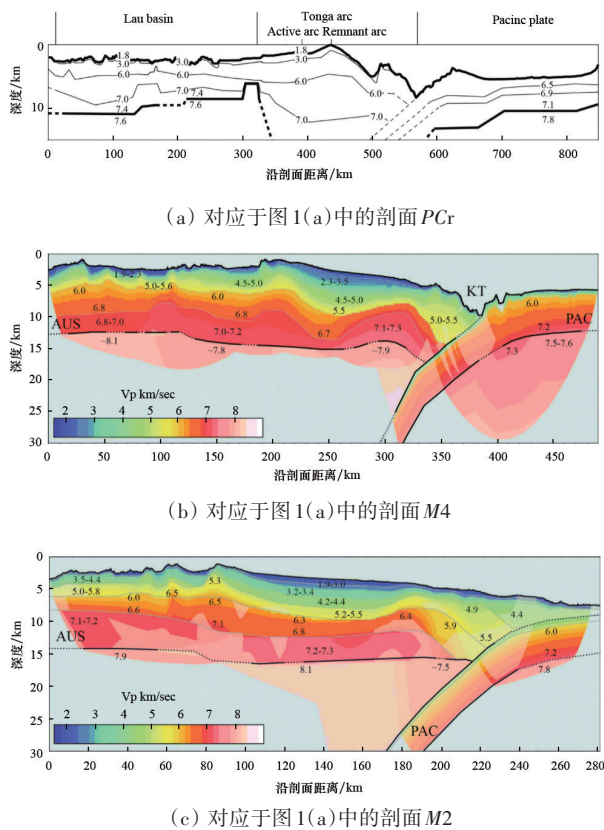


图 8 汤加-克马德克俯冲带地壳结构<sup>[2-3]</sup>

- [7] Ballance P F, Scholl D W, Vallier T L, et al. Subduction of a late Cretaceous seamount of the Louisville Ridge at the Tonga Trench: A model of normal and accelerated tectonic erosion[J]. *Tectonics*, 1989, 8(5): 953–962.
- [8] Zellmer K E, Taylor B. A three-plate kinematic model for Lau Basin opening[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(5): 1020.
- [9] Ruellan E, Delteil J, Wright I, et al. From rifting to active spreading in the Lau Basin–Havre Trough backarc system (SW Pacific): Locking/unlocking induced by seamount chain subduction, *Geochem[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(5): 8909.
- [10] Reagan M K, McClelland W C, Girard G, et al. The geology of the southern Mariana fore-arc crust: Implications for the scale of Eocene volcanism in the western Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 380: 41–51.
- [11] Pelletier B, Dupont J. Erosion, accretion, back-arc extension and slab length along the Kermadec subduction zone, Southwest Pacific[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1990, 310: 1657–1664.
- [12] Billen M I, Gurnis M. Constraints on subducting plate strength within the Kermadec trench[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B5): 1–18.
- [13] Arredondo K M, Billen M I. Rapid weakening of subducting plates from trench-parallel estimates of flexural rigidity[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 196/197: 1–13.
- [14] Clift P D, Bednarz U, Boe R, et al. Sedimentation on the Tonga forearc related to arc rifting, subduction erosion, and ridge collision: A synthesis of results from sites 840 and 841[M]. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1994: 135.
- [15] Stratford W R, Peirce C, Paulatto M, et al. Seismic velocity structure and deformation due to the collision of the Louisville Ridge with the Tonga–Kermadec Trench [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 200(3): 1503–1522.
- [16] von Huene R, Ranero C R, Vannucchi P, et al. Generic model of subduction erosion[J]. *Geology*, 2004, 32(10): 913–916.
- [17] Sallarès V, Ranero C R. Structure and tectonics of the erosional convergent margin off Antofagasta, north Chile (23°30'S)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B6): B06101.
- [18] Timm C, Bassett D, Graham I J, et al. Louisville seamount subduction and its implication on mantle flow beneath the central Tonga–Kermadec arc[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1720.
- [19] Lonsdale P F. A multibeam reconnaissance of the Tonga trench axis and its intersection with the Louisville Guyot Chain[J]. *Marine Geophysical Researches*, 1986, 8: 295–327.
- [20] Bonnardot M A, Regnier M, Christova C, et al. Seismicity and state of stress within the overriding plate of the Tonga–Kermadec subduction zone[J]. *Tectonics*, 2007, 26(5): TC5017.
- [21] Herzer R H, Exon N F. Structure and basin analysis of the Southern Tonga Forearc[M]//*Geology and offshore resources of Pacific island arcs—Tonga region*, Earth Science Series. Vol. 2. Houston: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, 1985.
- [22] Sutherland R. Basement geology and tectonic development of the greater New Zealand region: An interpretation from regional magnetic data[J]. *Tectonophysics*, 1999, 308(3): 341–362.
- [23] Clift P D, MacLeod C J. Slow rates of subduction erosion estimated from subsidence and tilting of the Tonga forearc[J]. *Geology*, 1999, 27(5): 411–414.
- [24] Herzer R H, Barker D H N, Roest W R, et al. Oligocene Miocene spreading history of the northern South Fiji Basin and implications for the evolution of the New Zealand plate boundary, *Geochem[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(2), doi: 10.1029/2010GC003291.
- [25] Bloomer S H, Taylor B, Macleod C J, et al. Early arc volcanism and the ophiolite problem: A perspective from drilling in the Western Pacific[M]//*Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*. Hoboken: Wiley, 1995: 88.
- [26] Terry J, Goff J, Winspear N, et al. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: Globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau[J]. *Geoscience Letters*, 2022, 9(1): 1–11.
- [27] 宋雨佳, 盘晓东, 康建红. 汤加海底火山喷发事件回顾及其灾害影响[J]. *城市与减灾*, 2022, 142(1): 11–14.
- [28] Lapusta N, Rice J. Nucleation and early seismic propagation of small and large events in a crustal earthquake model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B4): 2205.
- [29] Bilek S, Schwartz S, DeShon H, et al. Control of seafloor roughness on earthquake rupture behavior[J]. *Geology*, 2003, 31(5): 455–458.
- [30] Duan B. Dynamic rupture of the 2011 Mw 9.0 Tohoku–Oki earthquake: Roles of a possible subducting seamount[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B5): B05311.
- [31] Ruff L, Kanamori H. Seismicity and the subduction process[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1980, 23(3): 240–252.
- [32] Wirth E A, Sahakian V J, Wallace L M, et al. The occurrence and hazards of great subduction zone earthquakes [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3: 125–140.
- [33] Corbi F, Herrendörfer R, Funicello F, et al. Controls of seismogenic zone width and subduction velocity on interplate seismicity: Insights from analog and numerical models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(12): 6082–6091.

- [34] Oleskevich D, Hyndman R, Wang K, et al. The updip and downdip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models of Cascadia, south Alaska, SW Japan, and Chile[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B7): 14965–14991.
- [35] Brizzi S, van Zelst I, Funicello F, et al. How sediment thickness influences subduction dynamics and seismicity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8): e2019JB018964.
- [36] Lallemand S, Peyret M, van Rijsingen E, et al. Roughness characteristics of oceanic seafloor prior to subduction in relation to the seismogenic potential of subduction zones[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2121–2146.
- [37] Wang K, Bilek S. Invited review paper: Fault creep caused by subduction of rough seafloor relief[J]. *Tectonophysics*, 2014, 610: 1–24.
- [38] van Rijsingen E, Lallemand S, Peyret M, et al. How subduction interface roughness influences the occurrence of large interplate earthquakes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(8): 2342–2370.
- [39] Wang K, Bilek S. Do subducting seamounts generate or stop large earthquakes?[J]. *Geology*, 2011, 39(9): 819–822.
- [40] Hasegawa A. Seismicity, subduction zone[M]//*Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht: Springer, 2011.
- [41] Lay T, Ammon C, Kanamori H, et al. The 2009 Samoa–Tonga great earthquake triggered doublet[J]. *Nature*, 2010, 466: 964–968.
- [42] Taylor M A J, Zheng G, Rice J R, et al. Cyclic stressing and seismicity at strong coupled subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(4): 8363–8381.
- [43] Lay T, Kanamori H, Ammon C J, et al. The 2006 to 2007 Kuril Islands great earthquake sequence[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B11): B11308.
- [44] DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic time scale on estimates of current plate motions[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(20): 2191–2194.

## Geological structures and earthquake and volcano hazards along Tonga–Kermadec Subduction Zone

ZHANG Zhiwen<sup>1,2</sup>, YANG Xiaodong<sup>1,3,4\*</sup>

1. CAS 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
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Guangzhou), Guangzhou 511458, China
4. China–Pakistan Joint Research Center on Earth Science, CAS–HEC, Islamabad 45320, Pakistan

**Abstract** On January 15, 2022, an explosive and violent eruption occurred on the undersea volcano of Hunga Haapai Island in the southwest Pacific Ocean, attracting global attention. The Hunga Haapai Island is located in the Tonga–Kermadec subduction zone. Based on the previous research results, this paper makes a preliminary analysis of the geological structures, seismic and volcanic distribution of the Tonga–Kermadec subduction zone, and finds that (1) The forearc area of the Tonga–Kermadec subduction zone mainly develops large-scale normal faults; (2) The subduction of the Louisville Ridge Seamount Chain divides the Tonga–Kermadec subduction zone into the Tonga subduction zone in the north and the Kermadec subduction zone in the south. The plate aggregation rate along the Tonga subduction zone is 67–84 mm/a, and the plate aggregation rate along the Kermadec subduction zone is 41–58 mm/a. The difference in plate aggregation speed cause differences in the current subduction depth between the Tonga subduction zone and the Kermadec subduction zone; (3) North of the Louisville Ridge Seamount Chain, the thickness of the overburden sediment in the Pacific Plate is less than 0.4 km, and it reaches about 1 km on the south side. Differences in sediment thickness cause differences in earthquake generating capacity in the Tonga subduction zone and the Kermadec subduction zone. These understandings are of great significance for studying the volcanic eruption mechanism, the cause mechanism of major earthquakes and disaster risk in the subduction zone.

**Keywords** Tonga Volcano; volcanic eruption; subduction zone geological structures; subduction earthquake ●



(责任编辑 王志敏)