

鲁人齐, John Suppe, 何登发等. 深部俯冲板片三维构造重建及其几何学、运动学研究——以汤加—克马德克地区俯冲板片为例. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3837-3845, doi:10.6038/cjg20131125.

Lu R Q, Suppe J, He D F, et al. Deep subducting slab reconstruction and its geometry, kinematics; a case study for the Tonga-Kermadec slab from tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(11): 3837-3845, doi:10.6038/cjg20131125.

# 深部俯冲板片三维构造重建及其几何学、运动学研究 ——以汤加—克马德克地区俯冲板片为例

鲁人齐<sup>1,2</sup>, John Suppe<sup>2</sup>, 何登发<sup>3</sup>, Jonny Wu<sup>2</sup>,  
Ravi V S Kanda<sup>2</sup>, 刘 波<sup>1</sup>, 陈于高<sup>2</sup>

1 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2 台湾大学地质科学系, 台北 10617

3 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

**摘要** 西南太平洋板块与澳大利亚板块之间的汤加—克马德克俯冲带, 是研究地球动力学最重要的区域之一。本文研究根据 MIT-P08 地震数据, 结合板块构造边界、地震活动分布、海岸地形数据等, 基于 GOCAD 软件平台建立三维地震层析成像, 对西南太平洋板块的汤加—克马德克俯冲板片进行三维解释。地震层析成像显示汤加—斐济地区地幔至少存在三个“高速”异常体。早期汤加—克马德克俯冲板片穿过地幔转换带, 并进入下地幔, 最大深度达 1600 km。三维构造模型揭示了汤加—克马德克板片在深度 600~800 km 处存在断折形变, 该俯冲板片去褶皱恢复后, 测量其俯冲的最大位移达 2600 km。汤加—克马德克板片开始快速俯冲的时间至少在 30 Ma 之前, 平均移动速率为 68~104 mm/a。俯冲板片三维构造重建和恢复, 可以有效揭示俯冲板片几何学、运动学, 为研究深源地震成因、地球深部变化过程和动力学机制提供约束。

**关键词** 地震层析成像, 俯冲板片, 三维构造模型, 几何学、运动学, 汤加—克马德克地区

doi:10.6038/cjg20131125

中图分类号 P315, P541

收稿日期 2012-12-06, 2013-04-28 收修定稿

## Deep subducting slab reconstruction and its geometry, kinematics: a case study for the Tonga-Kermadec slab from tomography

LU Ren-Qi<sup>1,2</sup>, SUPPE John<sup>2</sup>, HE Deng-Fa<sup>3</sup>, WU Jonny<sup>2</sup>,  
Ravi V S Kanda<sup>2</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, CHEN Yue-Gau<sup>2</sup>

1 School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2 The Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, China

3 College of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract** The Tonga-Kermadec subduction zone between the southwest Pacific Plate and the Australian Plate is one of the key regions to the Geodynamics research. In this paper, in order to map the 3-D geometries of subducting slabs, the MIT-P08 seismic tomography dataset have been added to the GOCAD software by integrating with tectonic boundaries, earthquakes and coastlines. The tomography shows there are three anomalously fast regions in the mantle beneath the Tonga-Fiji area. The Tonga-kermadec slab have subducted into the mantle transition zone and penetrated

**基金项目** 国家自然科学基金(40739906, 41202142)、国家科技重大专项(2011ZX05005-003-004)和博士后科学基金(2012M520120, 2013T60027)联合资助。

**作者简介** 鲁人齐, 男, 1982 生, 北京大学博士后, 主要从事构造解析与构造建模研究. E-mail:lurenqi@163.com

into the lower mantle. The maximum subducted depth is about 1600 km. 3-D structural model reveals the Tonga-kemadec slab is faulting and folding at 600~800 km depth. After the subducting slab is unfolding and restoration, measuring its maximum subducted displacement nearly 2600 km. The results indicate that the Tonga-kemadec slab subducted before 30 Ma at least with the average rates of 68~104 mm/a. Reconstruction and recovery of the 3-D slab can reveal the detailed geometry and the kinematics of subducting slab, which is providing the constraints to the deep earthquakes, the deep earth processes and dynamic mechanism.

**Keywords** Seismic tomography, Subducting slab, 3-D Structural model, Geometry and Kinematics, Tonga-Kermadec

## 1 引言

西南太平洋地区的汤加(Tonga)—克马德克(Kermadec)海沟一带,是研究全球活动板块构造与地球动力学的关键领域<sup>[1-2]</sup>。先前的研究根据P波地震层析成像以及深源地震活动等,初步揭示了汤加—克马德克俯冲板片的几何形态<sup>[3]</sup>。随着研究的深入,研究人员发现在澳大利亚北部、汤加—北斐济盆地下方深部,还存在其它的高速异常体<sup>[4]</sup>。美国地质调查局(USGS)基于多个独立的数据集合,包括历史记录以来的地震类别与地震层析成像、CMT解析、全球板块边界、深海测量以及沉积物厚度等信息的非线性拟合,计算出汤加—克马德克俯冲板片的三维模型<sup>[5]</sup>,该俯冲板片模型最大深度近700 km,主要分布在中、上地幔<sup>[6]</sup>。然而,对澳大利亚—汤加地区中、下地幔的高速异常体的研究,因深部地幔地球物理和化学性质的各向异性和板块构造的复杂性<sup>[7-9]</sup>,深部俯冲板片的三维构造建模及其几何学、运动学,长期是研究深部构造中的一项难题。

随着全球和区域地震台网的地震数据数量的不断增加,以及处理质量的大幅度提高,全球地震层析成像在更多细节上可以对地幔构造进行有效约束<sup>[10]</sup>。本文研究侧重于利用新处理地震层析成像,采用复杂构造解析与建模的方法,对俯冲板片空间三维构造进行精细刻画。在此基础上分析俯冲板片几何学、运动学特征,为深入研究和探讨深源地震成因机制、板片俯冲动力学等提供必要的约束。

## 2 地质构造背景

汤加—克马德克海沟(TKT)位于萨摩亚岛与新西兰之间,是西南太平洋板块向澳大利亚板块的汇聚俯冲带<sup>[11]</sup>,并形成全球第二深度的汤加—克马德克海沟

(图1)。GPS观测西南太平洋板块向汤加—克马德克岛弧移动速率最高达240 mm/a,且至少持续了0.78 m/a<sup>[1]</sup>,是全球移动最快的板块之一<sup>[12-13]</sup>。汤加—克马德克岛弧同时相对南太平洋板块顺时针旋转,以新西兰为极点旋转了约9.3±0.3°/(m/a);澳大利亚板块的瓦努阿图一带,在约12 Ma前向新赫布里底斯快速俯冲,测量移动速率约达120 mm/a,并顺时针旋转了约6.0~7.5°/(m/a)<sup>[14-16]</sup>。

汤加—克马德克地区也是全球大地震和火山高发区域。历史地震活动频繁,自1902年以来共发生超过20次大地震和特大地震<sup>[17]</sup>,如1917年的M<sub>w</sub>8.1地震、2006年的M<sub>w</sub>7.9和2009年的M<sub>w</sub>8.0均发生在汤加地区<sup>[18-19]</sup>。其中很多大规模的地震发生在汤加—斐济深部约410~660 km的地幔转换带<sup>[20-22]</sup>。

## 3 数据和方法

本文研究中使用麻省理工大学新处理和计算的P波地震层析成像MIT-P08数据<sup>[10]</sup>,美国地质调查局记录贝尼奥夫带(Benioff zone)自1973—2011年来M<sub>w</sub>≥4.0的地震信息、海岸地形数据(图2),以及现今活动板块构造边界和俯冲带。利用GOCAD软件平台,对地震数据进行UTM坐标和地理坐标系统的转换,将地震台网所采集的MITP08数据投影到直角坐标系统(Rectangular coordinate system)并加载,得到澳大利亚—西南太平洋地区的三维地震层析成像(图3)。

俯冲板片通常在地震层析成像中显示的P波为相对“高速”的地震异常<sup>[12]</sup>,在GOCAD的软件中可以提取出地震层析成像的P振幅属性dvp,并进行数据计算和处理,提高分辨率(图3)。对地震层析成像沿经度、纬度、深度的三维空间中,每间距约50 km进行高密度的剖面解释。通过对地震异常在

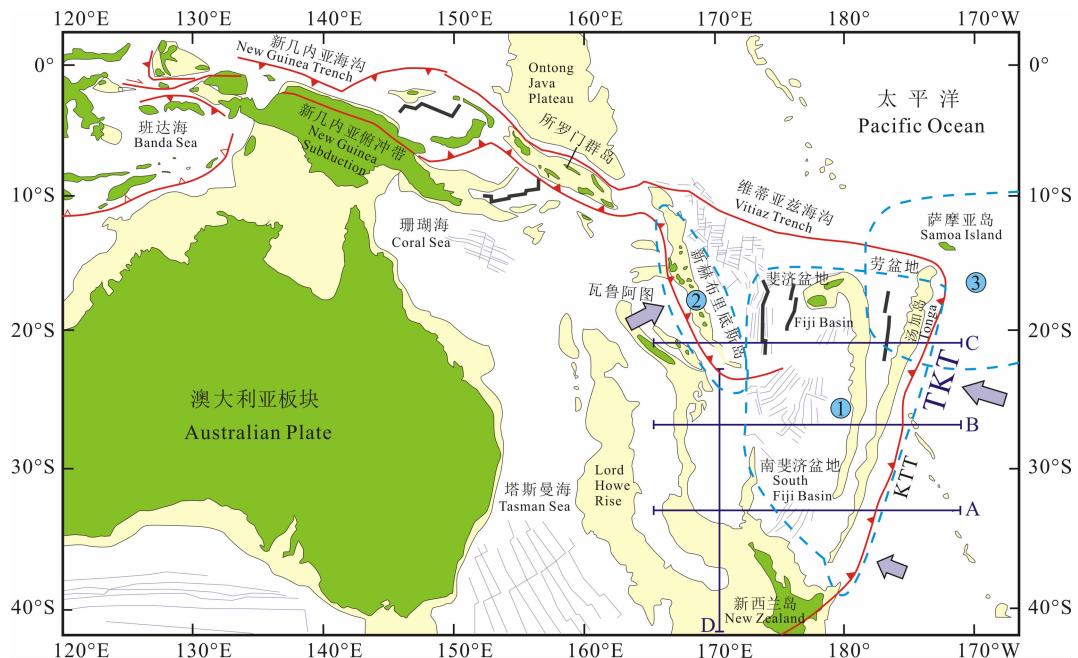


图 1 澳大利亚—西南太平洋板块大地构造图,据文献[15]修改

带三角曲线代表活动俯冲带;黑色实线 A-D 代表层析成像典型剖面;

虚线框内的①、②、③代表 P 波异常区域;TKT:汤加—克马德克海沟.

Fig 1 Tectonic map of the Australia-SW Pacific plate (Modified from Hall R., 2002)

Lines with triangles are active subduction zones,

The A to D bold lines are the slice sections of tomography; The dashed lines show

the P-wave anomaly areas; TKT: Tonga-Kermadec Trench.

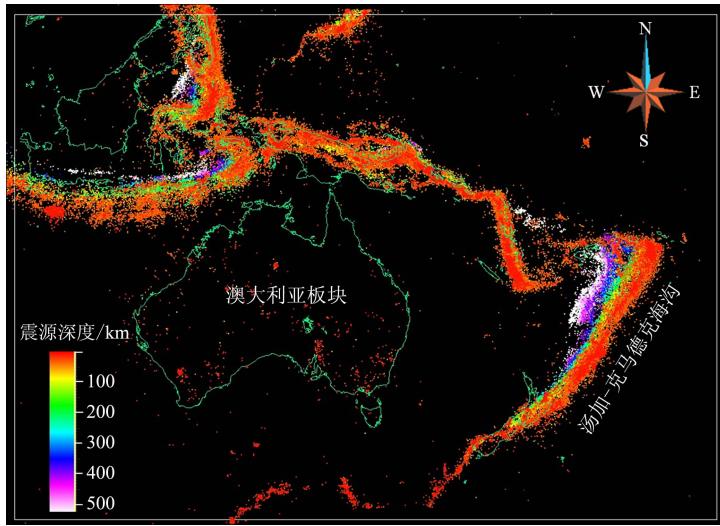


图 2 研究区地震分布与海岸地形图

Fig 2 The coastlines and the earthquakes in the research area

三维空间的精细描绘,将各个剖面上的解释结果造面(Make surface)处理,以及结合地震震源深度、活动板块边界等约束,就可以揭示出俯冲板片的空间三维几何形态。

板块三维构造重建与恢复,还需要将解释合理的板片模型输入 GOCAD 软件中计算并进行去褶

皱恢复(Unfolding).但是,得到的三维模型和去褶皱模型,与真实的俯冲板片形态还有一定的差异,主要原因是地震层析成像解释是建立在直角坐标系统。随着地球半径深度的增加,俯冲板片在直角坐标系统被扩张,因此必须进行缩短量(Shrinking)的计算和恢复(Restoration)。此外,地球密度、粘度等介

质参数对俯冲板片的几何形态也有一定的影响<sup>[23-24]</sup>,但在深度2000 km以上影响较小。最后将得到的板片模型输入Gplates软件中,结合邻区板块边界和构造演化进行对比分析,可以恢复板片俯冲之前的古地理位置。

#### 4 三维构造解释

汤加—克马德克板片通常在上地幔深度约660 km之上,显示出明显的“高速”异常特征(图1,图4A),西南太平洋板块沿汤加—克马德克海沟,以约45°倾角相下俯冲。同时地震层析成像也清楚地显示在沿汤加—克马德克海沟的下地幔,还存在其它的“高速”异常体(图1,图4B),深部异常体可到达的深度约1600 km<sup>[3]</sup>。

汤加—克马德克浅部俯冲板片到达600~700 km已经得到共识<sup>[5,12]</sup>。对于该区深部板片的来源,有两种可能。一种是早期其它板块俯冲到下地幔,形成滞留“stagnant”板片;另一种则可能该深部板片属于

汤加—克马德克板片的一部分。首先,汤加—克马德克浅部和深部的两组板片,倾向和倾角都很接近(图4A,B);其次,汤加—克马德克浅部板片和深部板片整体上具有连续性,只是在地幔转换带“Transition Zone”发生变形挠曲或断裂,呈现出P波低速特征(图4C,D);此外在三维地震层析成像浅部525 km和深度约1080 km的地方,汤加—克马德克俯冲板片都异常明显(图4E,F)。

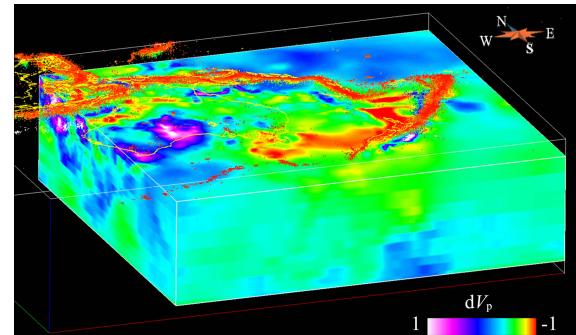


图3 研究区三维地震层析成像与属性特征

Fig. 3 The three-dimension image of seismic tomography show the P wave amplitudes

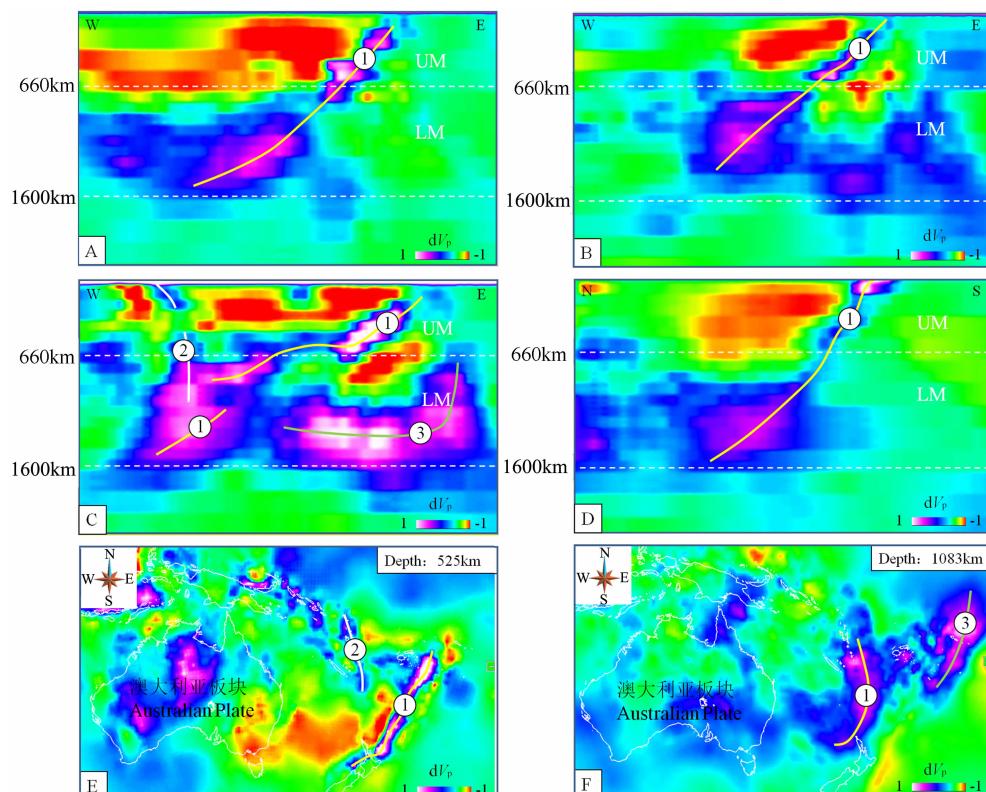


图4 汤加—克马德克地区地震层析成像解释

A-D为不同位置的剖面显示,参见(图1);E和F为垂直深度切片;①:为汤加—克马德克俯冲板片;  
②:新赫布里底斯俯冲板片;③:萨摩亚俯冲板片;UM:上地幔;LM:下地幔。

Fig. 4 Six sections show the slabs beneath the Australian plate-SW Pacific plate

A to D are the slice sections of tomography (Fig. 1). E and F are the vertical depth slices. ①: Tonga-Kermadec slab;  
②: New Hebrides slab; ③: Samoa slab; UM: Upper Mantle ; LM: Lower Mantle.

汤加与瓦鲁阿图一带的构造比较复杂(图 1),由于多个俯冲板片的碰撞和汇聚,导致地震层析成像具有多解性. 我们通过层析成像的三维空间控制,认为该地区至少存在的三个俯冲板片(图 1, 图 4C).

第一个是汤加—克马德克俯冲板片. 该俯冲板片沿着汤加—克马德克海沟分布,从南部新西兰,到北部的斐济盆地之下,都可以发现该俯冲板片(图 1, 图 4D). 整体倾向向西,倾角在  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$  之间,俯冲深度最大约 1600 km; 这个深度可能存在一个极不规则的物理化学界面,很多板片停滞于此<sup>[25]</sup>. 在约 410~660 km 的地幔转换带,汤加—克马德克板片褶皱变形(图 4C),形成一个断坪“flat-lying”<sup>[12]</sup>.

第二个为新赫布里底斯俯冲板片,研究认为这是一个沿着新赫布里底斯俯冲带,以高角度向下俯冲的一个板片(图 4C). 在深度 525 km 的地方,仍可以清楚地识别出该俯冲板片,层析成像显示最深达 700 km(图 4E)其中,在 300~410 km 之间区域可能存在一个相变带,形成空白的反射区;该板片可能俯冲到下地幔,与汤加—克马德克板片交汇碰撞.

第三个为萨摩亚板片,位于萨摩亚—汤加地区下部,“高速”异常非常明显,板片体积比较大;整个板片几乎处于下地幔(图 4C). 地震层析成像揭示该板片的几何形态在空间上变化很大、构造比较复杂,且与汤加—克马德克板片基本上是分离的(图 4F),因此萨摩亚板片应该是早期俯冲到在下地幔的滞留板片.

## 5 几何学、运动学分析

在三维空间中,通过对 P 波速度异常的识别和解释,并充分考虑地震分布以及板块边界的制约(图 2),将解释结果在 GOCAD 中进行造面(Make surface),得到汤加—克马德克俯冲板片的三维构造模型(图 5).

三维构造显示了汤加—克马德克俯冲板片的空间几何学特征,同时也揭示了俯冲板片的复杂性. 主要体现在两个方面:一是汤加—克马德克俯冲板片并非一个完整的块体,该板片中部在深度约 600~800 km 处不连续的间断面(图 4B, 图 5),在北部斐济盆地下方深度 600~1200 km 处形成“空洞”(图 4C, 图 5). 二是俯冲板片在平面上是一个不规则的几何体,板面具有非均一性.

恢复俯冲板片初始的几何形态,需要对俯冲板片去褶皱(Unfolding)计算, GOCAD 软件中的 Kine2D/3D 模块可以实现三维空间恢复. 汤加—克

马德克俯冲板片去褶皱后,可以得到板片俯冲前的几何形态(图 6). 研究发现,在北部斐济盆地下方的“空洞”(图 5)基本上被断坪板片所填补,表明汤加板片产“空洞”可能本身被撕裂造成. 研究认为,汤加—克马德克俯冲板片在沿俯冲方向,可以划分为 I、II 两个带(图 6). 上地幔转换带为两个带的分界,这可能代表两期快速移动和俯冲的结果.

由于解释地震层析成像采用的直角坐标系统,加上地球密度变化和地球非标准圆形,因此去褶皱后的俯冲板片要比实际的面积大. 本项研究中,假定地球为圆形,暂不考虑地球介质等影响因素,对去褶皱后的汤加—克马德克板片在三维空间中进行缩短量的函数计算. 俯冲板片在地球表面缩短率为 0, 缩短量随着地球半径增加而增大,在 1600 km 深度的缩短率约为 25%. 通过编程计算,最终可以得到俯冲板片接近真实的面积与几何形态(图 7).

整体上看,汤加—克马德克板片面积约  $6.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ . 在汤加北部面积较大(图 7),宽度约 2600 km; 中部出现一个凹形,测量宽度约 1700 km; 往南在新西兰群岛下方终止. 俯冲板片面积和宽度,都比之前研究认识的要大很多<sup>[5]</sup>.

南太平洋板块向澳大利亚板块移动,并以较高的速率快速俯冲,其开始俯冲的时间要早于 15 Ma, 至少在 30 Ma 以前,并在最近 10 Ma 产生枢纽折返“Rollback”<sup>[12]</sup>. 根据古地磁等资料研究南太平洋板块和所罗门群岛等汇聚的时间和位置,在 Gplates 软件中可以分析汤加—克马德克开始移动、碰撞并俯冲的时间(图 8). 研究结果表明,汤加—克马德克至少在 30 Ma 开始快速俯冲,其平均移动速率约为 86~104 mm/a.

## 6 讨 论

### 6.1 汤加—克马德克俯冲板片三维构造以及去褶皱恢复结果

与之前认识的板片俯冲深度和面积是有很大不同<sup>[26]</sup>. 前人研究认为,比较单薄的板片不能俯冲到下地幔<sup>[27~28]</sup>. 然而,新的地震层析成像发现汤加—斐济地区下地幔存在多个高速异常体,认为是早期俯冲残留的板片<sup>[4]</sup>. 无论根据地震层析成像<sup>[3]</sup>,还是地球物理模拟计算都支持汤加地区板片可以俯冲到下地幔<sup>[29~31]</sup>. 三维地震层析成像显示,汤加—克马德克前部与深部俯冲板片,在产状、连续性、空间分布上具有良好的匹配关系,汤加—克马德克板片可能经历过两期快速俯冲(图 5). 沿汤加—

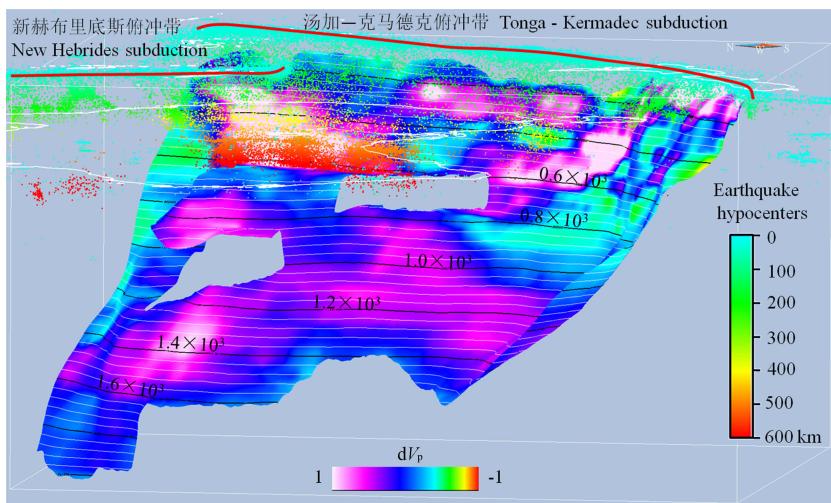


图 5 汤加—克马德克俯冲板片三维构造特征

图中小圆点表示地震分布,颜色表示深度;黑色线条为板片深度等值线,单位:km.

Fig. 5 3-D visualisation showing the Tonga-Kermadec subducting slab

The earthquakes distributed above the lower mantle and show in dots and the color represent depth.

The black lines are the contour of depth. Units:km.

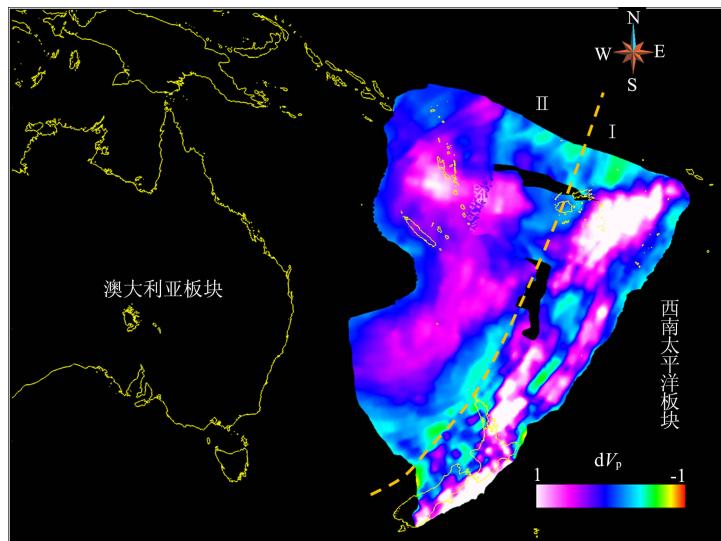


图 6 汤加—克马德克俯冲板片去褶皱恢复

I 区为浅部的俯冲板片; II 为深部俯冲板片.

Fig. 6 Unfolded slab geometries of the Tonga-Kermadec subducting slab

I area is the shallow Tonga-Kermadec subducted slab; II area is the deep Tonga-Kermadec subducted slab.

克马德克分布的劳盆地约在 5 Ma 以来扩张,并以 128 mm/a 的速率沿着汤加—克马德克海沟向南迁移<sup>[32-33]</sup>,可能与汤加—克马德克板片在地幔转换带之下,深度 600~800 km 处产生变形过程有关(图 1, 图 5).

**6.2** 汤加—斐济地区浅源地震通常认为是接近临界状态地区由瞬变效应触发的<sup>[34]</sup>,但对该地区地震的成因机制仍存在很大争议<sup>[13,18-19]</sup>.此外,汤加地区还有很多大规模的深源地震,发生在深度 500~660 km 的地幔转换带<sup>[35]</sup>,地幔转换带是联系上、下地幔的

纽带<sup>[36]</sup>.这些地幔转换带的地震通常被认为是俯冲板片内的变形作用、脱水反应或相变等引起的<sup>[22,28,37]</sup>.有学者研究认为汤加—斐济地区深源地震是瓦努阿图板片拆离与汤加板片碰撞或相变有关,但并没有阐明其拆离的动力学机制<sup>[5]</sup>.三维地震层析成像解释认为,汤加地区地幔转换带的断坪板片,属于汤加—克马德克板片的一部分(图 4, 图 5).前人研究认为,在地幔中存在区域性层状对流以及多层对流环<sup>[23]</sup>,板片“空洞”形成的原因,可能与地幔对流造成撕裂有关<sup>[38]</sup>.俯冲板片在地幔转换带折返形成

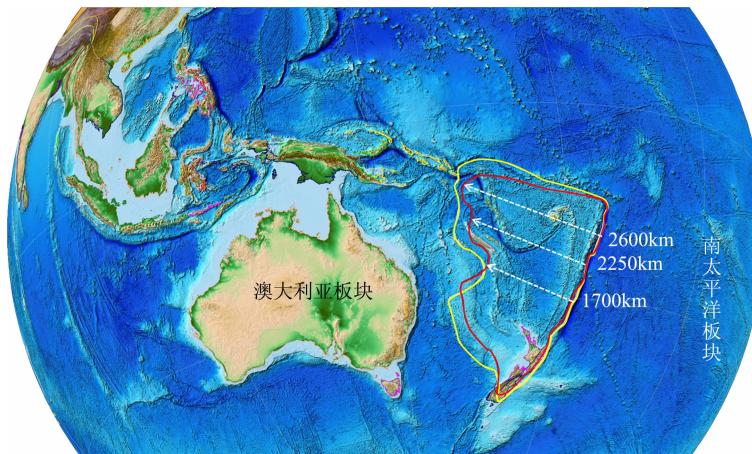
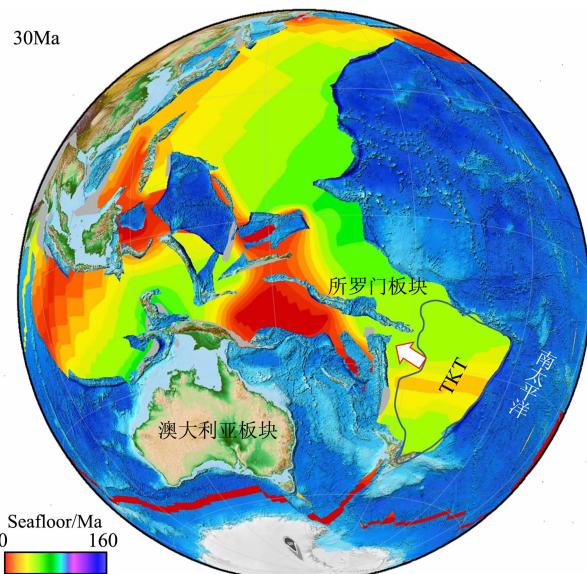


图 7 汤加—克马德克俯冲板片在 Gplates 中几何学恢复

黄色线框为去褶皱后的板片边界;红色线框为计算缩短量后的板片边界.

Fig. 7 Unfolded Tonga-Kermadec subducting slab and restoration in Gplates

The yellow boundary is the unfolded slab; The red boundary is the restoration slab.

图 8 汤加—克马德克俯冲板片  
在 Gplates 中运动学分析Fig. 8 The kinematics of the Tonga-Kermadec  
subducting slab in Gplates

断坪, 板片变形并在枢纽一带可以引发大规模深源地震。

**6.3 地震数据的数量和处理质量的不断提高, 为更精细、全面的研究俯冲板片的三维构造奠定了基础。相对而言, 新近纪以来的洋壳俯冲板片比较“年轻”, 地震层析成像识别要容易些。对早期俯冲的板片, 地球物理模拟实验表明, 板块俯冲到地幔转换带或下地幔, 可能产生多次褶皱叠加变形, 汤加—克马德克俯冲板片位移也可能远大于 2600 km, 其俯冲时间可能更早<sup>[39-41]</sup>。加上地球介质变化、板块运动速率、**

地幔对流以及各项异性等影响<sup>[41-47]</sup>, 都是俯冲板片三维构造建模与恢复中遇到的难题。因此深部俯冲板的三维构造建模, 需要综合古地磁、GPS 观测、地震余震定位、活动板块边界等信息作为约束。同时, 对俯冲板片三维构造的精细刻画及其几何学、运动学分析, 是研究俯冲板片一项非常重要的内容, 为深入研究和探讨板块动力学机制提供依据。

## 7 结 论

三维地震层析成像显示汤加—斐济地幔至少存在三个“高速”异常体。其中汤加—克马德克俯冲板片已进入地幔转换带, 并俯冲到下地幔, 最大深度达 1600 km。三维构造显示汤加—克马德克俯冲板片在深度 600~800 km 处存在明显的断裂形变, 板片具有非均质性。俯冲板片去褶皱恢复后, 计算其俯冲的最大位移约 2600 km。汤加—克马德克板片开始快速俯冲的时间至少在 30 Ma 之前, 平均移动速率为 68~104 mm/a。

**致 谢** 本项目研究得到国家科技重大专项(2011ZX05005-003-004)、国家自然科学基金(40739906, 41202142)和博士后科学基金(2012M520120, 2013T60027)联合资助, 审稿人提供了宝贵建议和修改意见, 在此一并表示衷心的感谢!

## 参考文献(References)

- [1] Zellmer K E, Taylor B. A three-plate kinematic model for Lau Basin opening. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2001, 2 (5), doi:10.1029/2000GC000106.

- [2] Smith I E M, Richard C P. The tonga-kermadec arc and havre-Lau back-arc system: their role in the development of tectonic and magmatic models for the western Pacific. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 156(3-4): 315-331.
- [3] van der Hilst R D. Complex morphology of subducted lithosphere in the mantle beneath the Tonga trench. *Nature*, 1995, 374(6518): 154-157.
- [4] Hall R, Spakman W. Subducted slabs beneath the eastern Indonesia-Tonga region: Insights from tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(2): 321-336.
- [5] Http://earthquake.usgs.gov/research/data/slab/.
- [6] Richards S, Holm R, Barber G. When slabs collide: A tectonic assessment of deep earthquakes in the Tonga-Vanuatu region. *Geology*, 2011, 39(8): 787-790.
- [7] van der Hilst R D, Karason H. Compositional heterogeneity in the bottom 1000 Kilometers of Earth's mantle: toward a hybrid convection model. *Science*, 1999, 283(5409): 1885-1888.
- [8] 傅容珊, 黄建华, 董树谦等. 利用地震层析成像数据计算地幔对流新模型的探讨. 地球物理学报, 2003, 46(6): 773-778.  
Fu R S, Huang J H, Dong S Q, et al. A new mantle convection model constrained by seismic tomography data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(6): 773-778.
- [9] Foley B J, Long M D. Upper and mid-mantle anisotropy beneath the Tonga slab. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38(2), L02303, doi:10.1029/2010GL046021.
- [10] Li C, van der Hilst R D, Engdahl E R, et al. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, 9(5), Q05018, doi:10.1029/2007GC001806.
- [11] Bird P. An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, 4(3): 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- [12] Bevis M, Taylor F W, Schutz B E, et al. Geodetic observations of very rapid convergence and back-arc extension at the Tonga arc. *Nature*, 1995, 374(6519): 249-251.
- [13] Satake K. Earthquakes: Double trouble at Tonga. *Nature*, 2010, 466(7309): 931-932.
- [14] Sager W W, MacLeod C J, Abrahamsen N. Paleomagnetic constraints on Tonga arc tectonic rotation from sediments drilled at Sites 840 and 841 // Hawkins J, Parson L, Allan J et al eds. Proc. ODP, Sci. Results. Ocean Drilling Program, 1994: 763-783.
- [15] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353-431.
- [16] Wallace L M, McCaffrey R, Beavan J, et al. Rapid microplate rotations and backarc rifting at the transition between collision and subduction. *Geology*, 2012, 33(11): 857-860.
- [17] 张勇, 许力生, 陈运泰. 2009年3月19日汤加地震破裂过程快速反演. 地震学报, 2009, 31(2): 226-229.  
Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Quick inversion of the rupture process of the 2009 March 19 Tonga earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, 31(2): 226-229.
- [18] Beavan J, Wang X, Holden C, et al. Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009. *Nature*, 2010, 466(7309): 959-963.
- [19] Lay T, Ammon C J, Kanamori H, et al. The 2009 Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet. *Nature*, 2010, 466(7309): 964-968.
- [20] Dziewonski A M, Anderson D L. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1981, 5(4): 297-356.
- [21] Flanagan M P, Shearer P M. Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking SS precursors. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B2): 2673-2692.
- [22] Okal E A, Kirby S H. Deep earthquakes beneath the Fiji Basin, SW Pacific: Earth's most intense deep seismicity in stagnant slabs. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, 109(1-2): 25-63.
- [23] 傅蓉珊, 王毅, 黄建华等. 黏滞分层地幔中密度异常驱动对流模型的研究. 地球物理学报, 2005, 48(4): 824-833.  
Fu R S, Wang Y, Huang J H, et al. Effect of rheology structure on flow patterns driven by density anomaly in the mantle. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(4): 824-833.
- [24] 朱桂芝, 石耀霖, 张怀. 板片深部俯冲动力学研究的新进展. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 333-342.  
Zhu G Z, Shi Y L, Zhang H. New progress on geodynamics of slab deep subduction. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(2): 333-342.
- [25] Kellogg B L, Hager H H, van der Hilst R D. Compositional stratification in the deep mantle. *Science*, 1999, 283(5409): 1881-1884.
- [26] Richards S, Lister G, Kennett B. A slab in depth: three-dimensional geometry and evolution of the Indo-Australian plate. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(12): Q12003, doi:10.1029/2007GC001657.
- [27] Suetsugu D. Defocusing of teleseismic P-waves by the Tonga-Kermadec Slab. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26(18): 2785, doi:10.1029/1998GL005307.
- [28] Gurnis M, Ritsema J, Jan van Heijst H, et al. Tonga slab deformation: The influence of a lower mantle upwelling on a slab in a young subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(16): 2373-2376.
- [29] Holt G W E. Flow fields within the Tonga Slab determined from the moment tensors of deep earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(8): 989, doi:10.1029/95GL00786.
- [30] Bijwaard H, Spakman W, Engdahl E R. Closing the gap

- between regional and global travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(12): 30055-30078.
- [31] Zhang K L, Wei D P. A kinematic thermal model for descending slabs with velocity boundary layers: a case study for the Tonga subducting slab. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(1): 211-222.
- [32] Taylor B, Zellmer K, Martinez F, et al. Sea-floor spreading in the Lau back-arc basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144 (1-2): 35-40, doi: 10.1016/0012-821X(96)00148-3.
- [33] Ruellan E, Deltail 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. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4, doi: 10.1029/2001GC000261.
- [34] Tibi D A R, Wiens D A, Inoue W H. Remote triggering of deep earthquakes in the 2002 Tonga sequences. *Nature*, 2003, 424(6951): 921-925.
- [35] Richter F. Focal mechanisms and seismic energy release of deep and intermediate earthquakes in the Tonga-Kermadec region and their bearing on the depth extent of mantle flow. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84 (B12): 6783-6795, doi: 10.1029/JB084iB12p06783.
- [36] 周春银, 金振民, 章军锋. 地幔转换带: 地球深部研究的重要方向. *地学前缘*, 2010, 17(3): 90-113.  
Zhou C Y, Jin Z M, Zhang J F. Mantle transition zone: an important field in the studies of Earth's deep interior. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2010, 17(3): 90-113.
- [37] Omori S, Komabayashi T, Maruyama S. Dehydration and earthquakes in the subducting slab: empirical link in intermediate and deep seismic zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146(1-2): 297-311.
- [38] Schubert G, Turcotte D L, Olson P. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [39] Gibert M G, Gerbault M, Hassani R, et al. Dependency of slab geometry on absolute velocities and conditions for cyclicity: insights from numerical modeling. *Geophys. J. Int.*, 2012, 189(2): 747-760.
- [40] Schellart W P, Lister G S, Toy V G. A late cretaceous and cenozoic reconstruction of the Southwest pacific region: Tectonics controlled by subduction and slab rollback processes. *Earth-Science Reviews*, 2006, 76(3-4): 191-233.
- [41] Schellart W P, Kennett B L N, Spakman W, et al. Plate reconstructions and tomography reveal a fossil lower mantle slab below the Tasman Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(3-4): 143-151.
- [42] Schellart W P. Influence of the subducting plate velocity on the geometry of the slab and migration of the subduction hinge. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231(3-4): 197-219.
- [43] Schellart W P. Kinematics and flow patterns in deep mantle and upper mantle subduction models: Influence of the mantle depth and slab to mantle viscosity ratio. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, 9(3): Q03014, doi: 10.1029/2007GC001656.
- [44] Chen W P, Brudzinski M R. Seismic anisotropy in the mantle transition zone beneath Fiji-Tonga. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(13): 1682, doi: 10.1029/2002GL016330.
- [45] Long M D, Silver P G. The subduction zone flow field from seismic anisotropy: A global view. *Science*, 2008, 319 (5861): 315-318.
- [46] Yamato P L, Husson J, Braun J, et al. Influence of surrounding plates on 3D subduction dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36(7), L07303, doi: 10.1029/2008GL036942.
- [47] Li C, van der Hilst R D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from travelttime tomography. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115 (B7), B07308, doi: 10.1029/2009JB006882.

(本文编辑 刘少华)