

秦满忠, 张元生, 刘旭宙, 李顺成. 2016. 利用甘肃地震台网记录的 sP 前驱波研究汤加—斐济俯冲带“410”间断面深度. 地震学报, 38(1): 53-58. doi:10.11939/jass.2016.01.005.
Qin M Z, Zhang Y S, Liu X Z, Li S C. 2016. On “410” discontinuity depth of the Tonga-Fiji subduction zone by the sP precursor recorded by Gansu seismic network. *Acta Seismologica Sinica*, 38(1): 53-58. doi:10.11939/jass.2016.01.005.

利用甘肃地震台网记录的 sP 前驱波研究 汤加—斐济俯冲带“410”间断面深度^{*}

秦满忠^{1,2),†} 张元生^{1,2)} 刘旭宙^{1,2)} 李顺成³⁾

- 1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所
2) 中国兰州 730000 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地
3) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室

摘要 本文首先利用甘肃数字测震台网和甘东南野外观测流动台阵记录的汤加—斐济俯冲带深震震相 sP, 使用倾斜叠加方法有效提取 sP 在近源区“410”速度间断面底界面反射的弱前驱波 s_{410} P; 其次基于 CRUST1.0 修正的 IASP91 模型, 通过震相 sP 与其前驱波 s_{410} P 的到时差对比, 给出了汤加—斐济俯冲带“410”速度间断面底部反射点的深度约为 398.5 km, 抬升约 11.5 km, 这与俯冲带与近源区“410”间断面的相互作用有关; 最后得到了该区域新的地震波速度模型 IASP91_Tonga. 本文结果将对更好地认识该俯冲带的复杂结构、正确理解地球深部的动力学过程具有重要的参考价值.

关键词 sP 震相 前驱波 s_{410} P 间断面 俯冲带 甘肃数字测震台网 甘东南野外观测流动台阵

doi:10.11939/jass.2016.01.005 中图分类号: P315.63 文献标志码: A

On “410” discontinuity depth of the Tonga-Fiji subduction zone by the sP precursor recorded by Gansu seismic network

Qin Manzhong^{1,2),†} Zhang Yuansheng^{1,2)} Liu Xuzhou^{1,2)} Li Shuncheng³⁾

- 1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China
2) Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China
3) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: The sP seismic phase of the Tonga-Fiji subduction zone have a clear image in the Gansu Digital Seismic Network and southeastern Gansu temporary observation array. In this paper, we extracted the weak precursors s_{410} P by slant stack method, and the s_{410} P precursors are produced by deep focus earthquakes that result from near-source underside reflection off “410”. We compute

^{*} 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IESLZ09)和国家自然科学基金(41504050)联合资助.

收稿日期 2015-06-06 收到初稿, 2015-08-25 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: manzhongqin@eyou.com

the depth of “410” discontinuity by using the differential travel time between sP and its precursor s_{410} P near Tonga-Fiji subduction zone based on the modified velocity model (IASP91_Tonga) in this zone based on CRUST1.0 model. The depth of “410” discontinuity is about 398.5 km, and uplifted about 11.5 km, which maybe relate to the interaction of the subduction zone and the “410” discontinuity in the near-source zone. This result is of great significance to recognize the complex structure of subduction zones and objectively understand the dynamic process of the deep Earth.

Key words: seismic phase sP; precursor s_{410} P; discontinuity; subduction zone; Gansu Digital Seismic Network; southeastern Gansu temporary observation array

引言

地震波(P, S, pP, sP 等)在传播过程中,遇到间断面会发生反射或转换,所产生的新震相(P_{410} P, P_{660} P, S_{410} S, S_{660} S, S_{410} P, S_{660} P, s_{410} P 等)为间断面(“410”, “660”等)的深入研究提供了地震学基础(Flanagan, Shearer, 1998a; Deuss, 2009; Schmerr, Thomas, 2011). 这些前驱震相在单条记录中的能量(幅度)往往很弱,常淹没于噪声之中;但是通过叠加大量的观测波形数据,则可以压制噪声,更加有效地提取与间断面相关的有用信号(Rost, Thomas, 2002; 臧绍先, 周元泽, 2002).

很多研究者利用下行的转换震相在间断面的转换点深度确定该间断面的深度. 例如: Richards 和 Wicks(1990)使用 S_d P 转换波,利用非线性叠加方法对汤加地区下方的“670”间断面的深度和性质进行了深入研究;谢彩霞等(2012)利用 4 次根倾斜叠加方法有效提取了离源下行的 S_d P 次生转换震相,进一步确认了汤加—斐济下方 300 km 附近速度间断面的存在;Li 等(2008)通过叠加 S-P 转换波,计算了中国东北地区“660”间断面的深度,并探讨了俯冲带对“660”间断面的影响.

发生在俯冲带中的深震会在近源区速度间断面产生反射震相(p_{410} P, s_{410} P 等)和转换震相(S_{410} P, S_{660} P 等)(Flanagan, Shearer, 1998b). 长周期震相(PP, SS)前驱波方法对狭窄俯冲带间断面的横向分辨具有很大局限性(Flanagan, Shearer, 1998a; Schmerr, Thomas, 2011). 接收函数方法是研究地球内部间断面的一种有效方法,可以通过 P 波与其上行转换波 P_d s 的到时差来确定间断面的深度(Langston, 1979),但其主要适用于三分量地震台站下方壳、幔间断面的研究.

在深源地震(震源深度 $h > 300$ km)分布密集的俯冲带(如汤加—斐济俯冲带),使用深震震相 sP 在近源区速度间断面底界面反射的震相 s_{410} P 确定狭窄俯冲带间断面的横向变化具有很大的优势. 本文将通过倾斜叠加大量的观测波形数据,有效提取 sP 在近源区“410”速度间断面底界面反射的弱前驱波 s_{410} P,利用 sP 震相与其前驱波 s_{410} P 震相的到时差计算汤加—斐济俯冲带“410”速度间断面的深度.

1 台网资料

甘肃地震台网由甘肃数字测震台网和甘东南野外观测流动台阵构成,二者均处于青藏高原东北缘. 甘肃“十五”数字测震台网自 2008 年 6 月正式运行,由兰州、高台、安西、嘉

峪关和天水等 5 个有人值守的国家数字地震台和 39 个区域遥测数字地震台组成(冯建刚等, 2012), 目前拥有包括邻省(宁夏、陕西、四川、青海、内蒙)在内的 76 个数字测震台站. 甘东南野外观测流动台阵是中国地震局地质研究所和中国地震局兰州地震研究所共同合作在甘东南地区勘址架设, 共设有 7 条测线, 150 个流动台站, 平均台间距约为 10 km (图 1). 所有台站均使用 REF TEK-130 型数据采集器和 Guralp 公司生产的 CMG-3ESPC 宽频带地震计. 甘东南野外观测流动台阵运行期间(2009 年 11 月—2011 年 12 月)积累了连续、可靠、高质量的地震观测波形数据, 为深入研究地球内部物理结构提供了宝贵资料(秦满忠等, 2015).

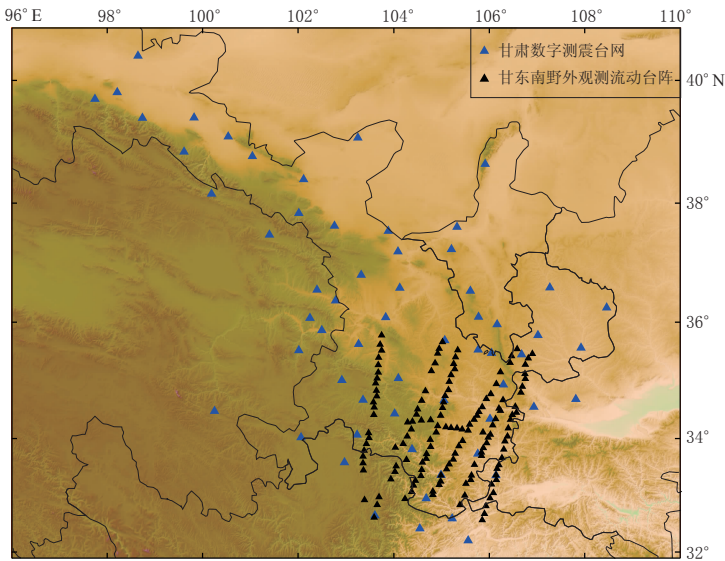


图 1 甘肃数字测震台网和甘东南野外观测流动台阵分布

Fig. 1 Distribution of the Gansu Digital Seismic Network (blue triangles) and southeastern Gansu temporary observation array (black triangles)

本文选取了甘肃数字测震台网和甘东南野外观测流动台阵共同记录的 2011 年 9 月 15 日发生在汤加—斐济俯冲带(21.61°S , 179.53°W , $h=644\text{ km}$, $m_B=7.3$)的深远地震数字观测波形数据, 定位结果参考了 USGS(2011)地震目录.

2 数据处理

深震震相 sP 与其前驱波 $s_{410}\text{P}$ 在地幔中的传播路径基本相同. sP 是上行的 S 波在震中附近地表反射转换的 P 波; $s_{410}\text{P}$ 是上行的 S 波在震中附近“410”间断面底界面反射转换的 P 波(图 2), 该震相在初至震相 P 与 sP 之间到达(图 3).

首先对所选取的汤加—斐济深远地震观测波形数据作重采样、去倾斜、去均值处理;

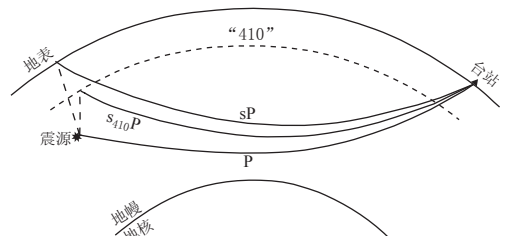


图 2 射线(sP, $s_{410}\text{P}$ 和 P)传播示意图

Fig. 2 Ray paths of sP, $s_{410}\text{P}$ and P

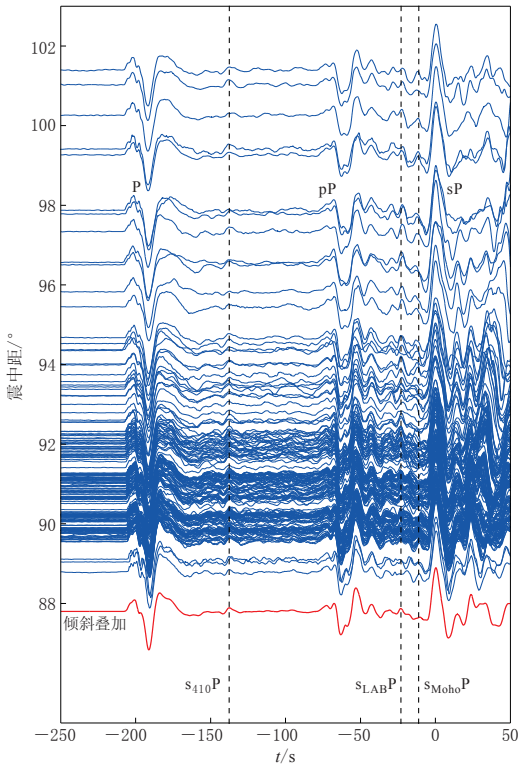


图3 甘肃地震台网记录到的2011年9月15日发生在汤加—斐济俯冲带的深远地震的数字观测波形

s_{MohoP} , s_{LABP} 和 s_{410P} 震相分别表示 sP 在近源区莫霍面, 岩石圈和“410”的前驱波

Fig. 3 Waveforms of $m_B=7.3$ event occurred in Tonga-Fiji on September 15, 2011, recorded by the Gansu Seismic Network

The seismic phases s_{MohoP} , s_{LABP} and s_{410P} are the precursors from near-source underside reflection off Moho, lithosphere-asthenosphere boundary, and “410”, respectively

TauP 软件结合理论 IASP91 全球速度模型得到的 s_{410P} 与震相 sP 理论走时差为 137.04 s; 通过使用基于 CRUST1.0 模型 (Laske *et al.*, 2013) 校正后的汤加—斐济地区速度模型 IASP91_Tonga (图 4), 反算出“410”间断面底部反射点的深度约为 398.5 km, “410”间断面抬升约 11.5 km, 这与俯冲带与近源区“410”间断面的相互作用有关。

3 讨论与结论

甘肃数字测震台网和甘东南野外观测流动台阵记录的汤加—斐济深震震相 pP 和 sP 均具有尖锐、清晰和较大振幅的记录特征, sP 记录振幅甚至超过了直达 P 波, 这为我们使用前驱波 (s_{MohoP} , s_{LABP} 和 s_{410P} 等) 对近源区间断面 (莫霍面, 岩石圈, “410”等) 的深入研究提供了基础资料。

然后作带通滤波处理 (0.1—0.01 Hz), 同时去掉记录畸形、信噪比差的观测波形; 最终选取了甘肃数字测震台网和甘东南野外观测流动台阵共同记录到的 170 条垂直分量观测波形数据。如图 3 所示, 汤加—斐济深远震在台网记录中的震中距为 88° — 102° 。

通过倾斜叠加大量的观测波形数据, 可以压制噪声, 有效地提取与间断面相关的弱信号 (Ritsema *et al.*, 1995; 臧绍先, 周元泽, 2002)。在进行倾斜叠加的过程中, 选取震中距为 94° 的台站 (红崖山台) 作为参考台, sP 为参考震相, 并以 sP 震相到时的零时刻 (图 3)。信号 $i(s_{410P})$ 在任意台 s 的到时的 $\Delta t_{ir} + \Delta p \Delta D_{rs}$, 以红崖山台为参考台的倾斜叠加结果为

$$R_i = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m X_s [\Delta t_{ir} + \Delta p \Delta D_{rs}], \quad (1)$$

式中, Δt_{ir} 为参考震中距记录的信号 $i(s_{410P})$ 与参考震相 sP 之间的走时差, Δp 为信号 i 在任意台 s 的水平慢度与信号 i (震中距为参考台震中距) 水平慢度之差, ΔD_{rs} 为任意台 s 与参考台的震中距之差, m 为使用地震记录的台站数。

以 sP 为参考震相, 使用倾斜叠加方法获得了在震中附近“410”间断面底界面反射的前驱波信号 s_{410P} , 其反射点位置为 (21.25°S , 179.99°W)。该信号在倾斜叠加波形 (图 3 中红色线条) 中成像清晰, 与参考震相 sP 的观测走时差为 137.43 s, 使用

鉴于前驱波震相在单条记录中的能量(振幅)往往很弱, 本文通过倾斜叠加大量的观测波形数据, 获得了在近源区“410”间断面底界面反射的前驱波震相 $s_{410}P$, 并使用 CRUST1.0 模型校正后的汤加—斐济地区速度模型 IASP91_Tonga, 反算出“410”间断面底部反射点的深度约为 398.5 km.

图 3 中震相 $s_{LAB}P$ 和 $s_{Moho}P$ 相对于参考震相 sP 的走时差分别为 23.16 s 和 10.62 s. 我们同样对震源区的地壳及岩石圈结构作了修改(图 4), 使用 TauP 软件计算得到近源区岩石圈的深度约为 46 km, 莫霍面深度约为 10 km.

俯冲带对“410”和“660”的影响是目前研究的一个热点(Li *et al.*, 2008). 该研究涉及到间断面的性质, 又能反映地幔对流的性质和形式. 俯冲带是冷的下沉物质, 其通过间断面时会引起间断面的形态变化. 若“410”为相变界面, 俯冲带会使它抬升(Vidale, Benz, 1992; Collier, Helffrich, 1997); 若“660”为相变界面, 俯冲板块中的冷物质将使它下沉. 因此, 汤加—斐济俯冲带中冷的物质与“410”作用时, 俯冲带及相邻地幔中的橄榄石-尖晶石的相变界面上升(蒋志勇等, 2003). 本文中得到的汤加—斐济俯冲带“410”间断面抬升约 11.5 km 与该结论一致.

本文使用倾斜叠加技术成功提取了 sP 前驱波($s_{410}P$, $s_{LAB}P$ 和 $s_{Moho}P$), 获得了俯冲带间断面的深度, 给出了汤加—斐济俯冲带新的地震波速度模型(IAASP91_Tonga). 本文结果将为深入研究该区域的地球结构提供基础资料, 对正确认识俯冲带的复杂结构以及深入理解地球深部的动力学过程具有重要的参考价值.

参 考 文 献

- 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 陈继锋. 2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, **34**(5): 646–658.
- Feng J G, Jiang C S, Han L B, Chen J F. 2012. Analysis on the monitoring capability of seismic networks and completeness of earthquake catalogues in Gansu region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(5): 646–658 (in Chinese).
- 蒋志勇, 臧绍先, 周元泽. 2003. 鄂霍次克海下间断面的起伏及俯冲带的穿透[J]. 科学通报, **48**(4): 320–327.
- Jiang Z Y, Zang S X, Zhou Y Z. 2003. Topographies of seismic velocity discontinuities and penetrations of subducting slabs beneath the Sea of Okhotsk[J]. *Chinese Science Bulletin*, **48**(4): 320–327 (in Chinese).
- 秦满忠, 李顺成, 刘旭宙, 张淑珍, 张元生. 2015. 核幔界面衍射波 P_{diff} 震相最大记录震中距探讨[J]. 地震学报, **37**(2): 249–256.
- Qin M Z, Li S C, Liu X Z, Zhang S Z, Zhang Y S. 2015. A discussion on the largest recorded epicentral distance for seismic phase P_{diff} diffracted on core-mantle boundary[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(2): 249–256 (in Chinese).
- 谢彩霞, 周元泽, 王卓君, 欧东新. 2012. 汤加—斐济地区 300 km 间断面的 SdP 转换波证据[J]. 地球物理学报, **55**(5): 1591–1600.
- Xie C X, Zhou Y Z, Wang Z J, Ou D X. 2012. Evidence of SdP conversion phases for the 300 km discontinuity beneath

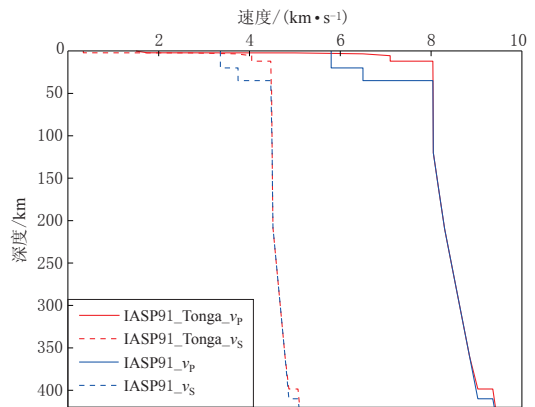


图 4 全球速度模型 IASP91 以及修改后的汤加—斐济地区速度模型 IASP91_Tonga
Fig. 4 IASP91 velocity model and modified velocity model (IASP91_Tonga) of the Tonga-Fiji zone in this paper

- Tonga-Fiji region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(5): 1591–1600 (in Chinese).
- 臧绍先, 周元泽. 2002. N 次根倾斜叠加方法在间断面研究中的应用[J]. *地球物理学报*, **45**(3): 407–415.
- Zang S X, Zhou Y Z. 2002. N -th root slant stack and its application in study of mantle discontinuities[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(3): 407–415 (in Chinese).
- Collier J D, Helffrich G R. 1997. Topography of the “410” and “660” km seismic discontinuities in the Izu-Bonin subduction zone[J]. *Geophys Res Lett*, **24**(12): 1535–1538.
- Deuss A. 2009. Global observations of mantle discontinuities using SS and PP precursors[J]. *Surv Geophys*, **30**(4): 301–326.
- Flanagan M P, Shearer P M. 1998a. Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking SS precursors[J]. *J Geophys Res*, **103**(B2): 2673–2692.
- Flanagan M P, Shearer P M. 1998b. Topography on the 410-km seismic velocity discontinuity near subduction zones from stacking of sS, sP, and pP precursors[J]. *J Geophys Res*, **103**(B9): 21165–21182.
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[J]. *J Geophys Res*, **84**(B4): 4749–4762.
- Laske G, Ma Z T, Masters G, Pasyanos M. 2013. A new global crustal model at 1×1 degrees[EB/OL]. [2015-04-26]. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html#download>.
- Li J, Chen Q F, Vanacore E, Niu F L. 2008. Topography of the 660-km discontinuity beneath northeast China: Implications for a retrograde motion of the subducting Pacific slab[J]. *Geophys Res Lett*, **35**(1): L01302.
- Richards M A, Wicks C W. 1990. S-P conversion from the transition zone beneath Tonga and the nature of the 670 km discontinuity[J]. *Geophys J Int*, **101**(1): 1–35.
- Ritsema J, Hagerty M, Lay T. 1995. Comparison of broadband and short-period seismic waveform stacks: Implications for upper-mantle discontinuity structure[J]. *Geophys Res Lett*, **22**(23): 3151–3154.
- Rost S, Thomas C. 2002. Array seismology: Methods and applications[J]. *Rev Geophys*, **40**(3): 2-1–2-27. doi:10.1029/2000RG000100.
- Schmerr N, Thomas C. 2011. Subducted lithosphere beneath the Kuriles from migration of PP precursors[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **311**(1/2): 101–111.
- USGS. 2011. Search earthquake archives[EB/OL]. [2015-04-26]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- Vidale J E, Benz H M. 1992. Upper-mantle seismic discontinuities and the thermal structure of subduction zones[J]. *Nature*, **356**(6371): 678–683.