

谭皓原, 王志. 2018. 菲律宾群岛深部速度结构成像与双向俯冲板片构造特征. 地球物理学报, 61(12):4887-4900, doi:10.6038/cjg2018L0792.

Tan H Y, Wang Z. 2018. Seismic velocity imaging and tectonic characteristics of the bidirectional subducting slabs under Philippine Archipelago. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(12):4887-4990, doi:10.6038/cjg2018L0792.

菲律宾群岛深部速度结构成像与 双向俯冲板片构造特征

谭皓原^{1,2}, 王志^{1*}

1 中国科学院南海海洋研究所, 边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 菲律宾群岛受到欧亚板块、菲律宾海板块和印度—澳大利亚板块的碰撞作用, 地质环境复杂, 构造因素多样. 尽管近几年来已经有了少数关于该区域层析成像的研究, 但这些研究的区域主要集中在马尼拉海沟、吕宋岛及中菲律宾地区, 而关于群岛周围其他海沟和南菲律宾地区的讨论相对较少. 到目前为止, 还没有同时获得过关于菲律宾群岛深部纵、横波速度结构的研究, 本次研究通过反演 155779 条 P 波震相和 59642 条 S 波震相, 同时获得了菲律宾群岛从地表至 150 km 深度的纵、横波速度结构. 地震层析成像结果表明该地区的壳幔速度结构具有较强的不均一性, 地壳内部存在着广泛的低速异常, 而表征俯冲板块的高速异常则沿着群岛周边的海沟展布. 南海块体在马尼拉海沟中段的俯冲角度和俯冲活动性比南段小; 菲律宾海板块在东吕宋海槽南段微弱的俯冲作用很有可能同本哈姆海台的碰撞有关. 菲律宾群岛大部分 $M_w > 6.0$ 的强震沿着各个板块的边界发生, 体现出菲律宾海板块同欧亚板块之间的强耦合作用, 群岛西侧的南海块体在马尼拉海沟 16°N — 20°N 之间呈现出的弱耦合状态可能跟北吕宋地区的拉张应力环境有关, 南海块体在 16°N 以南的地区同上覆块体之间的耦合作用较强; 群岛东侧的菲律宾海板块在 14°N 以北的地区没有强震发生, 它与菲律宾群岛之间的耦合程度从北向南逐渐增强, 在 12°N 以南的地区要强于 12°N 以北的地区; 此外苏禄海盆和菲律宾构造带之间也存在着强耦合关系.

关键词 地震层析成像; 马尼拉海沟; 双向俯冲; P 波和 S 波速度结构; 板块耦合

doi:10.6038/cjg2018L0792

中图分类号 P315, P738

收稿日期 2018-04-27, 2018-11-20 收修定稿

Seismic velocity imaging and tectonic characteristics of the bidirectional subducting slabs under Philippine Archipelago

TAN HaoYuan^{1,2}, WANG Zhi^{1*}

1 Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The complicated geological settings and tectonics of the Philippine Archipelago is mainly caused by the convergence of the Eurasian, the Philippine Sea and the Indian-Australian plates. Although a few seismic tomographic studies have been conducted in the Philippine Archipelago, most of them focused on the Manila Trench, Luzon Island arc and the middle Philippine. So far few

基金项目 国家海洋局全球变化与海气相互作用国际合作项目(GASI-GEOGE-05-02), 国家自然科学基金项目(41572201, 41372229), 中国科学院百人计划(17314059)资助.

第一作者简介 谭皓原, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事地震层析成像研究. E-mail: tangle_L@163.com

*** 通讯作者** 王志, 男, 研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: mike-wang@sohu.com

P- and S-wave tomographic studies in the crust and upper mantle of the Philippine Archipelago and its surrounding regions have been carried out. We obtained V_P and V_S velocity structures of Philippine Archipelago for the first time by inverting 155779 P-wave rays and 59642 S-wave rays simultaneously. Our seismic tomography shows strong heterogeneities seated in the crust and upper mantle beneath Philippine Archipelago. Widely spread low velocity anomalies emerge in the crust which may be caused by dehydration of oceanic crusts and sediments whereas high velocity anomalies extend along trenches around Philippines. Smaller dip angle and weaker subduction activity in the middle part of South China Sea Plate than the south part are shown. Little subduction can be seen in the south terminal of East Luzon Trough and northern part of Philippine Trench, which could be ascribed to the subduction of Benham Rise. We therefore suggest that strong coupling between Philippine Sea Plate and Eurasia Plate is revealed by the occurrence of $M_w > 6.0$ earthquakes along plate boundaries, weak coupling between 16°N to 20°N in South China Sea slab along Manila Trench might be caused by the extensional stress in north Luzon, on the contrary, strong coupling are shown south of 16°N . On the east side of Philippine Archipelago, no big earthquake occurred north of 14°N in the Philippine Sea Plate, interpolate coupling becomes stronger from north to south, coupling extent is much bigger to the south of 12°N than to the north. Besides, strong coupling exists between Sulu Sea basin and Philippine Mobile Belt too.

Keywords Seismic tomography; Manila Trench; Bidirectional subduction; V_P and V_S structure; Interplate coupling

0 引言

菲律宾群岛位于欧亚板块、菲律宾海板块和印度—澳大利亚板块的碰撞交汇地带,三大板块之间的相互作用使得该地区的应力环境十分复杂,板块间的碰撞、岩石圈的俯冲和变形、火山岛弧的广泛发育、地壳的增生和抬升以及洋盆关闭等地质现象成为该地区构造演化的重要特征. 菲律宾群岛由一个双向的俯冲系统所包围:西侧的南海块体沿马尼拉海沟向东俯冲,苏禄海盆沿着内格罗斯海沟和苏禄海沟俯冲,西南侧的苏拉威西海盆沿着哥打巴托海沟俯冲;而东侧的菲律宾海板块分别沿着东吕宋海槽和菲律宾海沟向北西和南东方向俯冲(图 1)(Yumul et al., 2008). 根据全球板块运动模型 HS2-NUVEL1 (Gripp and Gordon, 1990)的计算结果显示,群岛东侧的菲律宾海板块在吕宋岛东北部以 $70 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、NW 方向与欧亚板块俯冲汇聚,其运动速率沿着菲律宾海沟向南逐渐增大,在棉兰老岛的东南部达到最大值,约为 $90 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;而群岛西侧的欧亚板块以 $10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率做同向运动,因此欧亚板块和菲律宾海板块在菲律宾地区呈现出强烈汇聚的状态(Bautista et al., 2001),汇聚产生的大部分动能由围绕菲律宾群岛的双向俯冲系统所调节,剩下的部

分被横贯菲律宾群岛的菲律宾断裂带所吸收(Aurelio, 2000).

到目前为止,关于菲律宾群岛的动力演化过程已经做了较多的讨论,通过对地质学、地球化学、地震分布、俯冲带动力学模拟及地震层析成像等多学科的研究,现已发现了南海块体沿着马尼拉海沟发生俯冲撕裂的证据(Fan et al., 2014),南海板片的撕裂在吕宋岛中部的上地幔形成了板片窗并造成了台湾—吕宋西火山岛链的消亡和岩浆通道的东移(Yang et al., 1996; Bautista et al., 2001; 刘再峰等, 2007; 范建柯和吴时国, 2014);巴拉望微块体在民都洛岛和班乃岛之间的区域同菲律宾构造带发生的碰撞导致南海块体在马尼拉海沟南端的俯冲角度急剧变陡,同时发生的板片撕裂可能导致了岩浆或上地幔物质的上涌,在地表形成了麦克劳德火山走廊,另外还发现了疑似古南海洋盆完全俯冲的证据(Yang et al., 1996; Besana et al., 1997; Bautista et al., 2001; 陈志豪等, 2009; Fan et al., 2017);在中菲律宾地区的地震层析成像研究还揭示了菲律宾海板块俯冲的初始位置及年代(Fan et al., 2017).

菲律宾群岛地质环境复杂,构造因素多样,不同区域的地质情况差异很大,地震层析成像的研究能够为该地区的构造演化历史、板块间的碰撞接触关系等重大科学问题提供参考和依据. 然而前人关于

菲律宾群岛的成像研究绝大多数都集中于马尼拉海沟、吕宋岛及中菲律宾地区,关于群岛周围其他海沟和南菲律宾地区的讨论相对较少,此外对菲律宾群岛两侧俯冲板片形态特征的研究一直十分薄弱,近年来仅有少数科学家(刘再峰等,2007; 范建柯和吴时国,2014; Fan et al., 2016, 2017)做了相应的讨论. 尽管前人开展了层析成像的研究并取得了相应的成果,但关于该地区深部纵、横波速度结构的研究却一直没有取得进展. 由于地震纵波和横波速度能够反映出岩石不同的物理性质,因此地震纵横波的速度结构对于探讨和揭示菲律宾群岛两侧俯冲板片的脱水作用、岛弧深部的岩浆活动、板块间的相互耦合以及俯冲型大地震的诱发机制等科学问题都能起到至关重要的作用. 本文利用菲律宾群岛的区域地震数据,同时反演整个菲律宾群岛地壳及上地幔的纵、横波速度结构,据此分析菲律宾群岛两侧双向俯冲系统的构造形态,进而讨论群岛周边各个俯冲板片同上覆地块之间的耦合关系,为研究该地区的构

造演化提供了地震学依据.

1 数据和方法

1.1 地震数据

本次研究的地震数据来自国际地震中心(International Seismological Centre, ISC)1960年至2015年公开的地震资料,区域地震事件的选取范围为 5°N — 21°N , 118°E — 128°E ,使用的地震台站为ISC的区域地震台站,共计129个,地震和台站的分布如图2所示. 地震数据的挑选遵循以下原则:(1)地震的震源深度小于400 km, P波射线的走时残差小于2.5 s, S波射线的走时残差小于3.5 s;(2)为了避免地震事件过于密集所造成的地震射线路径高度近似,我们对地震事件进行了去丛集化处理;对P波事件挑选出震级大于3.5级,台站接收数大于6个的地震事件,以此地震为球心,剔除掉半径5 km内的其他地震;S波地震事件的震级大

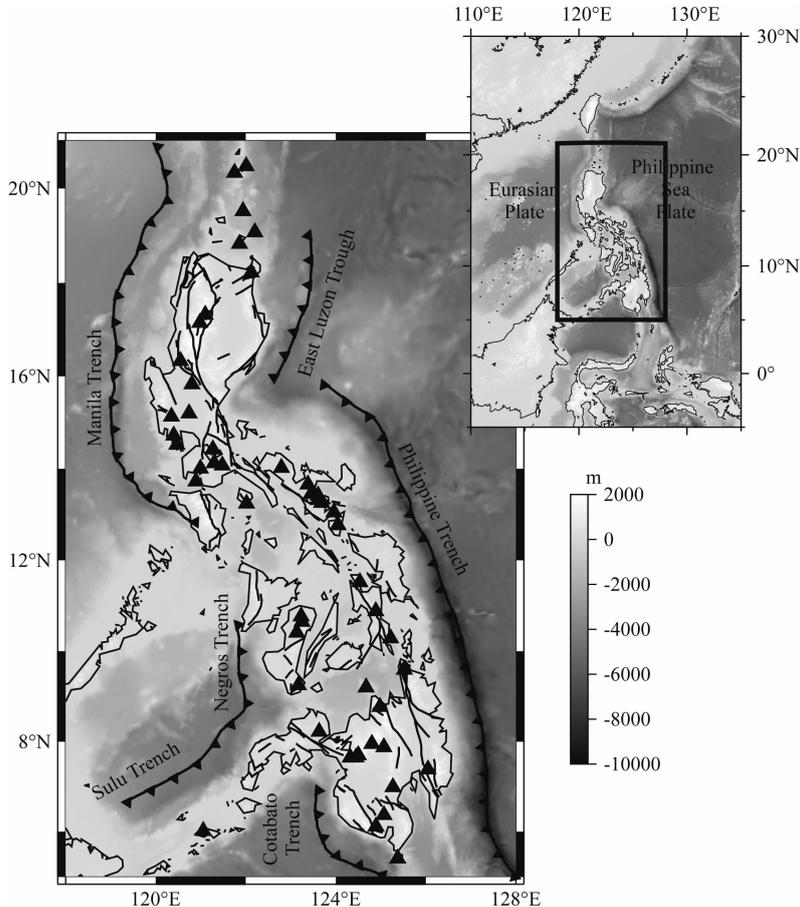


图1 菲律宾群岛的地形构造图

图中黑色三角代表火山,地形高程如色标所示.

Fig. 1 Tectonic settings of Philippine Archipelago

Black triangles represent volcanoes. The terrain elevation are shown in the color bar.

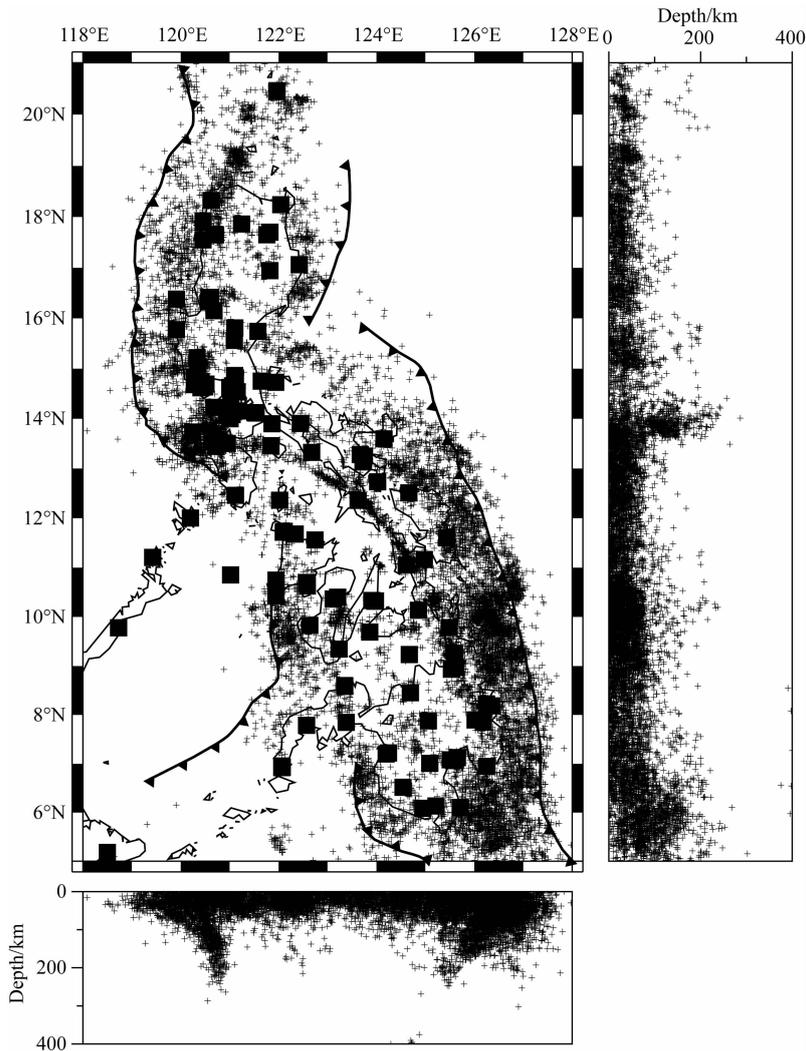


图2 研究区域的地震和台站分布图

黑色十字和黑色方块分别代表地震和台站的位置。

Fig. 2 Distribution of earthquakes and seismic stations in study region

Black crosses and squares denote earthquakes and stations, respectively.

于 3.5 级,台站接收数大于 5 个,剔除半径也是 5 km. 最终挑选出 P 波事件 13504 个,P 波射线 155779 条,S 波事件 7818 个,S 波射线 59642 条. 通过地震定位和走时反演,地震射线的绝对走时残差得到了明显的收敛,其中 P 波射线的平均绝对走时残差从 2.097 s 下降到 1.487 s,减少了 49.84%;S 波的平均绝对走时残差从 6.487 s 下降到 2.836 s,减少了 56.28%(图 3),这确保了我们的最终成像结果的可靠性.

1.2 初始模型

本次所选用的初始模型研究参考的是 CRUST1.0 全球地壳模型和 IASP91 速度模型,如图 4 所示. 根据研究需要将研究区域的地壳分成上下两层,其深度分别为 13 km 和 33 km,上地壳的速度为 $5.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,下地壳的速度为 $6.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

(胥颐等,2007;范建柯和吴时国,2014);莫霍面以下参考 IASP91 速度模型.

1.3 反演方法和分辨率测试

本文使用 Zhao 等(1992,1994)发展的地震层析成像方法,该方法使用伪弯曲法和斯涅尔定律来计算射线理论走时,在速度连续变化的模型空间内采用伪弯曲法来确定射线路径,在速度间断面处根据斯涅尔定律来计算射线的出入角,由此求出射线路径及地震波的理论走时. 通过在初始模型中引入速度不连续面(如康拉德面、莫霍面、410、660 km 速度间断面等),该方法能够有效地降低地震波的走时残差,提高计算的效率和精度. 本文使用的速度不连续面参考的是 CRUST1.0 全球地壳模型,研究区域的康拉德面和莫霍面的深度分布如图 5 所示,从图中可以看到菲律宾群岛及巴拉望、三宝颜—苏禄

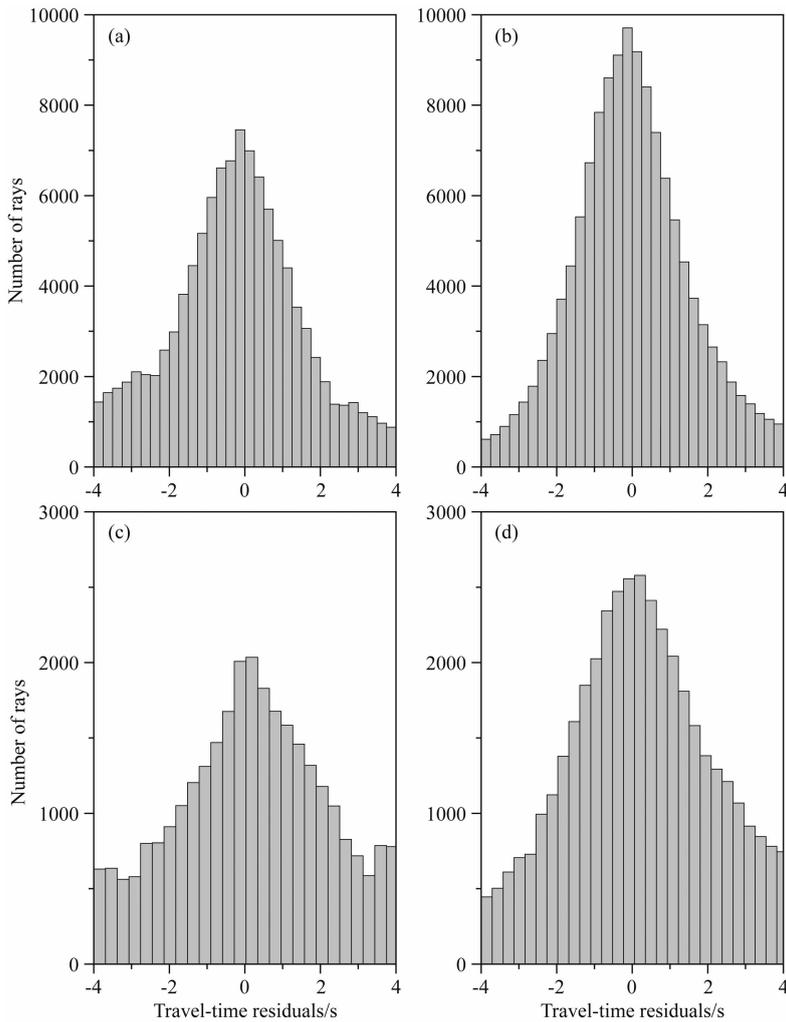


图3 反演前后走时残差统计

(a)(b)分别为P波反演前后的走时残差,(c)(d)分别为S波反演前后的走时残差。

Fig. 3 Statistic of travel-time residuals

P-wave residuals before (a) and after (b) inversion, S-wave residuals before (c) and after (d) inversion.

半岛的地壳较厚,在群岛的陆地区域厚度可达35 km左右,而西菲律宾海盆、南海海盆、苏禄海盆和苏拉威西海盆的洋壳厚度多为10~15 km,反映了菲律宾地区典型的洋壳俯冲特征。

在初始模型的三维网格设置上,我们使用的是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的水平网格,深度方向上分别设置了0 km, 8 km, 20 km, 35 km, 50 km, 70 km, 100 km, 150 km, 200 km, 共计9层网格。为保证成像质量,在反演前我们首先进行了地震射线分布的模拟(图6)以及检测板分辨率测试(Checkerboard resolution test, CRT),分辨率测试的结果如图7和图8所示。可以看到P波和S波在菲律宾群岛大部分地区的分辨率测试效果都比较理想,这与地震射线的分布有着很好的对应关系,菲律宾群岛下方的地震射线相对密集、交会程度也比较高,而俯冲板片的边界虽然偏

离了地震台网覆盖的范围,但是大量地震射线从不同角度穿过这些区域,因此仍然能够保证检测板分辨的要求;随着深度的增加,地震的射线数量及射线的交会程度在逐渐降低,从而导致检测板的恢复效果逐渐下降,P波检测板的分辨率在150 km平面上在巴士海峡、本哈姆海台下降明显,而S波检测板的分辨率在100 km的平面图上就有明显下滑,在150 km的平面图上只在吕宋岛南部、民都洛岛、维萨亚斯群岛和棉兰老岛能够较好地分辨。值得注意的是P波和S波的检测板测试在20 km的切片上出现了低分辨的情况,分辨率较差的区域位于菲律宾群岛的陆区和岛屿间的海区,即吕宋岛南部到棉兰老岛北部这一带,这很有可能是地震射线在这一深度交会较差所导致的。整体而言S波的分辨率要低于P波,这与S波射线较少、交会程度较低有关,特别是

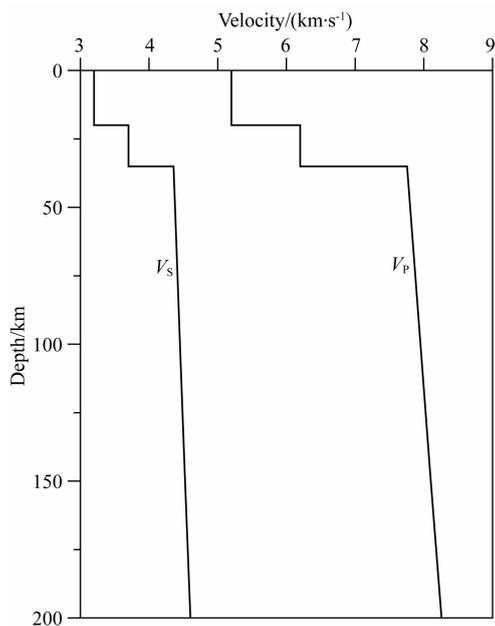


图4 本次研究使用的一维速度模型示意图

Fig. 4 1-D velocity model used in this study

在 150 km 深度上, S 波检测板的恢复效果在吕宋岛北部和中菲律宾地区较差。

2 结果与讨论

2.1 成像结果

本次研究最终的成像结果如图 9 和图 10 所示,

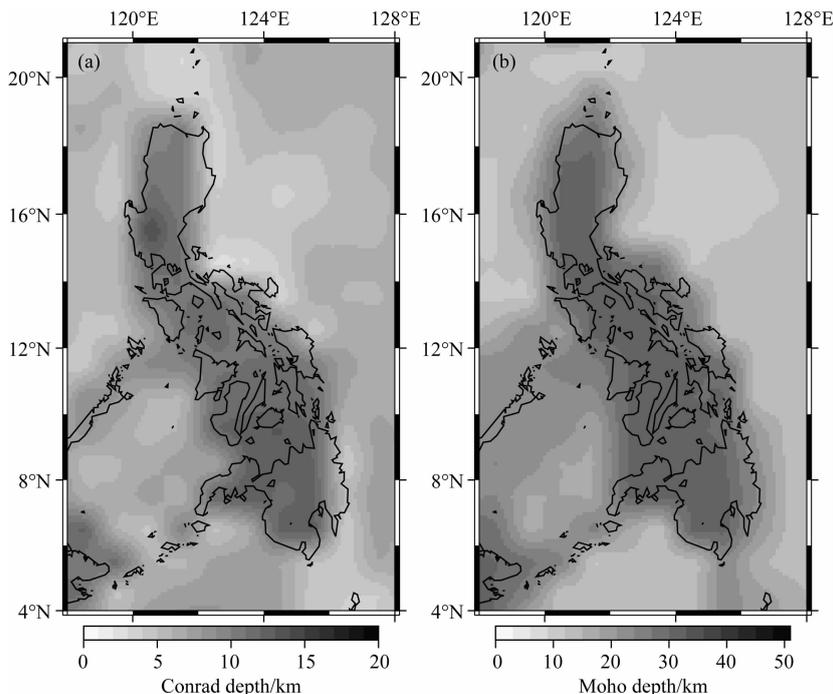


图5 研究区域的康拉德面(a)和莫霍面深度(b)分布图

Fig. 5 Depth distribution of (a) Conrad and (b) Moho in study region

从图上可以看到 P 波和 S 波的成像效果比较一致. 在 8 km 和 20 km 的切片上最显著的特征是围绕菲律宾群岛海域出现的大规模低速异常, 这个结果和胥颐等(2007) Pn 波速度结构的研究成果非常一致, 反映出俯冲板块和菲律宾群岛岛弧岩石圈之间强烈的构造活动和挤压变形特征, 这与菲律宾群岛两侧俯冲板片的汇聚、碰撞、岛弧岩浆以及地震活动有关. 在 35~150 km 的速度切片上可以看到南海块体和菲律宾海板块分别沿着马尼拉海沟和菲律宾海沟展布所呈现出的高速异常.

此外, 我们还在菲律宾地区截取了 6 条剖面, 如图 11 和图 12 所示. AA' 剖面中, 南海块体在马尼拉海沟中段以中等角度向东俯冲到 150 km 的深度, 而菲律宾海板块在东吕宋海槽中部以更大的角度向西北俯冲到约 100 km 的深度. 在 BB' 剖面中, 南海块体以类似的角度俯冲到 150 km 的深度, 而菲律宾海板块在东吕宋海槽末端的俯冲作用很微弱, 这很有可能是吕宋岛东侧的本哈姆海台同菲律宾构造带的碰撞所导致的, 由于水深高点阻碍了菲律宾海板块的俯冲 (Martinod et al., 2005, 2013, 2016; Espurt et al., 2008), 加上本哈姆海台本身轻物质浮力作用的共同影响 (范建柯和吴时国, 2014; Mason et al., 2010), 导致了菲律宾海板块在东吕宋海槽的俯冲强度减弱, 俯冲板片以近水平的角度俯冲到约 50 km 的深度 (Rosenbaum and Mo, 2011),

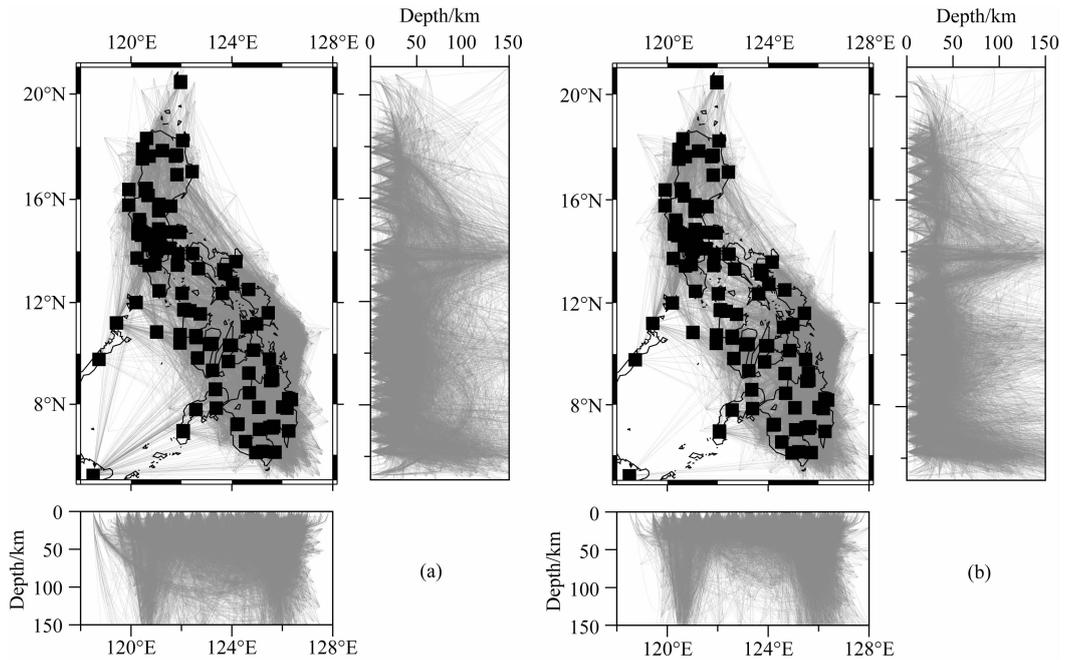


图 6 P 波和 S 波三维射线分布图

(a) P 波射线; (b) S 波射线. 黑色方框为地震台站.

Fig. 6 3-D distribution of P- and S-rays

(a) P-rays; (b) S-rays. Black squares denote seismic stations.

由此造成了如今东吕宋海槽和菲律宾海沟被本哈姆海台隔断的构造格局. 在 CC' 剖面上, 南海块体在马尼拉海沟的南端以近垂直的角度俯冲至 150 km, 这与前人的研究十分吻合 (Yang et al., 1996; Bautista et al., 2001; 瞿辰等, 2007; 范建柯和吴时国, 2014; Fan et al., 2017), 而菲律宾海板块在菲律宾海沟中北段以较小的角度向南西方向俯冲至 150 km 的深度. 在 DD' 至 FF' 的剖面中, 菲律宾海板块的俯冲角度从北到南逐渐增大, 在菲律宾海沟南端以近垂直的角度俯冲; 群岛西南侧的苏禄海盆沿着内格罗斯海沟俯冲到 150 km 的深度, 而群岛最南侧的苏拉威西海盆的俯冲活动并不强烈, 俯冲深度约为 100 km.

2.2 菲律宾群岛壳幔速度结构的不均一性

菲律宾群岛的地质构造复杂, 从经度方向上来看大致为沟-弧-沟体系, 此外在吕宋岛的东西两侧分别有本哈姆海台和古南海洋中脊两个水深高点的俯冲, 在中菲律宾地区和南菲律宾地区还有巴拉望微块体和三宝颜-苏禄半岛同菲律宾构造带的碰撞. 在菲律宾群岛 8~20 km 深的中上地壳出现的低速异常很有可能是围绕群岛的俯冲板片在俯冲的过程中在地壳浅部发生脱水所致的, 含水的俯冲洋壳及沉积物在俯冲过程中由于受到挤压从而释放出大量的自由水, 这些自由水通过岩石孔隙进入上覆地块的地壳中, 导致上覆地壳或上地幔发生部分熔

融, 从而降低地壳岩石地震波速, 造成广泛的低速异常 (Hyndman et al., 1997; Schmidt and Poli, 1998; Wang and Zhao, 2005; 陈爱华和许鹤华, 2014; 郑永飞等, 2016); 类似的低速异常也出现在巴拉望半岛北端至民都洛岛一带和棉兰老岛西北部, 这有可能是巴拉望微块体以及三宝颜-苏禄半岛同菲律宾构造带发生碰撞, 使得该地区的地壳在增生加厚的同时发生大量脱水所导致的 (Yumul et al., 2009). 从层析成像的平面图 (图 9, 图 10) 上可以看到, 地壳浅部 (8~20 km) 的高速异常主要集中在马尼拉海沟、苏禄海沟和菲律宾海沟, 其中菲律宾海沟的高速异常只在 8°N—14°N 的区域发育, 随着俯冲深度的加深, 高速体同时向南北两侧发展, 北部的东吕宋海槽在小于 100 km 的深度能观测到高速异常的存在, 而棉兰老岛东南部的高速异常则发展到 150 km (Fan et al., 2017), 关于中菲律宾地区的层析成像研究也得出了类似的结果; 此外我们在马尼拉海沟还发现一个低速体 (约 19°N, 120°E) 在 8~35 km 的深度将南海块体分割, 这与前人的成像结果类似 (范建柯和吴时国, 2014), 我们推测这个低速异常很有可能是该地区地壳的拉张应力阻碍了南海块体的俯冲所导致的, 根据对该地区重力势能和应力场的研究 (Lin and Lo, 2013), 巴拉望微块体同菲律宾构造带的碰撞导致吕宋岛发生了逆时针旋转 (Yumul et

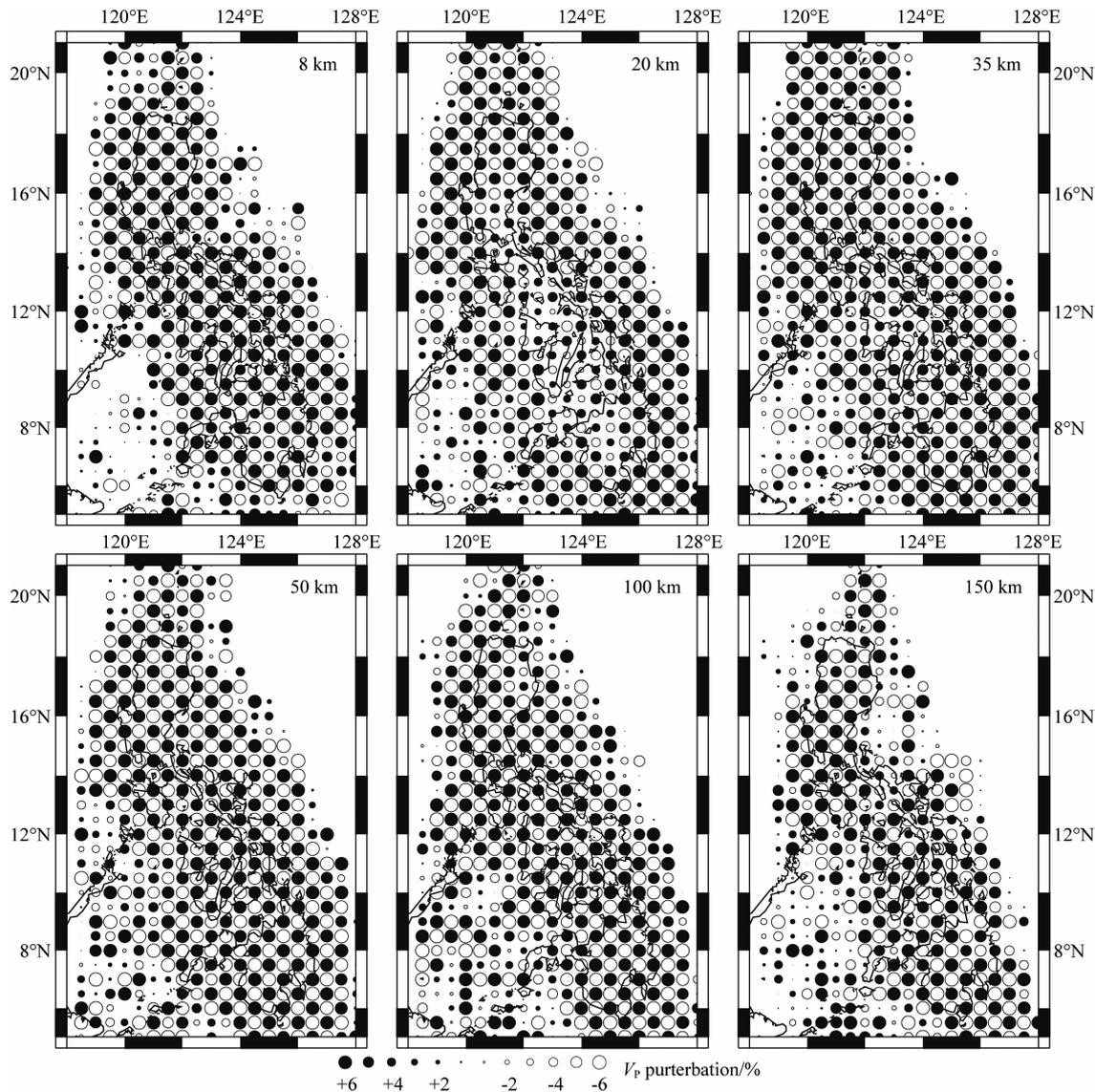


图 7 P 波的检测板分辨率测试结果

Fig. 7 Checkerboard resolution test (CRT) of P-wave

al., 2003), 由于不同地区旋转速率的差异导致了北吕宋地区拉张应力的产生; 另外关于震源机制和地震应变能的研究 (Bautista et al., 2001) 也说明了该地区处于一个拉张的弱耦合弱应变的受力环境, 这也支持了我们的推论。

2.3 大震分布与板块耦合

层析成像的平面图 (图 9, 图 10) 和剖面图 (图 11, 图 12) 中的紫色五角星表示 1903 年至 2017 年在菲律宾群岛发生的 $M_w > 6.0$ 强震。从平面图上可以看到, 同一个深度范围内的强震绝大多数都发生在俯冲板片的边界附近, 在菲律宾群岛西侧的马尼拉海沟中南段、内格罗斯海沟、哥打巴托海沟以及群岛东侧的菲律宾海沟都有强震发生, 表现出菲律宾海板块和欧亚板块在板块边界的强耦合状态。根据

板块相对运动模型的研究, 菲律宾海板块向 NW 方向的运动速率要远大于欧亚板块, 因此二者的碰撞汇聚十分强烈 (Bautista et al., 2001), 这与我们的研究结果相一致。此外在平面图上还能观察到马尼拉海沟在 $16^\circ\text{N} - 20^\circ\text{N}$ 的范围内没有 $M_w > 6.0$ 强震的发生, 剖面 AA' 中的强震发生于吕宋岛下方而非板块边界, 大部分 $M_w > 4.0$ 的地震集中在板片边界的浅部地壳之中, 只有少量地震随着南海板片的俯冲而展布, 反映出南海块体在 $16^\circ\text{N} - 20^\circ\text{N}$ 之间同上覆的吕宋岛之间的弱耦合关系, 这可能与该地区的拉张环境有关, 由于西吕宋岛的逆时针旋转所产生的拉张效应阻碍了南海块体的俯冲, 导致了板块间应力积累的不足 (Bautista et al., 2001; Lin and Lo, 2013), 关于地壳应变的研究也显示吕宋岛中西部地

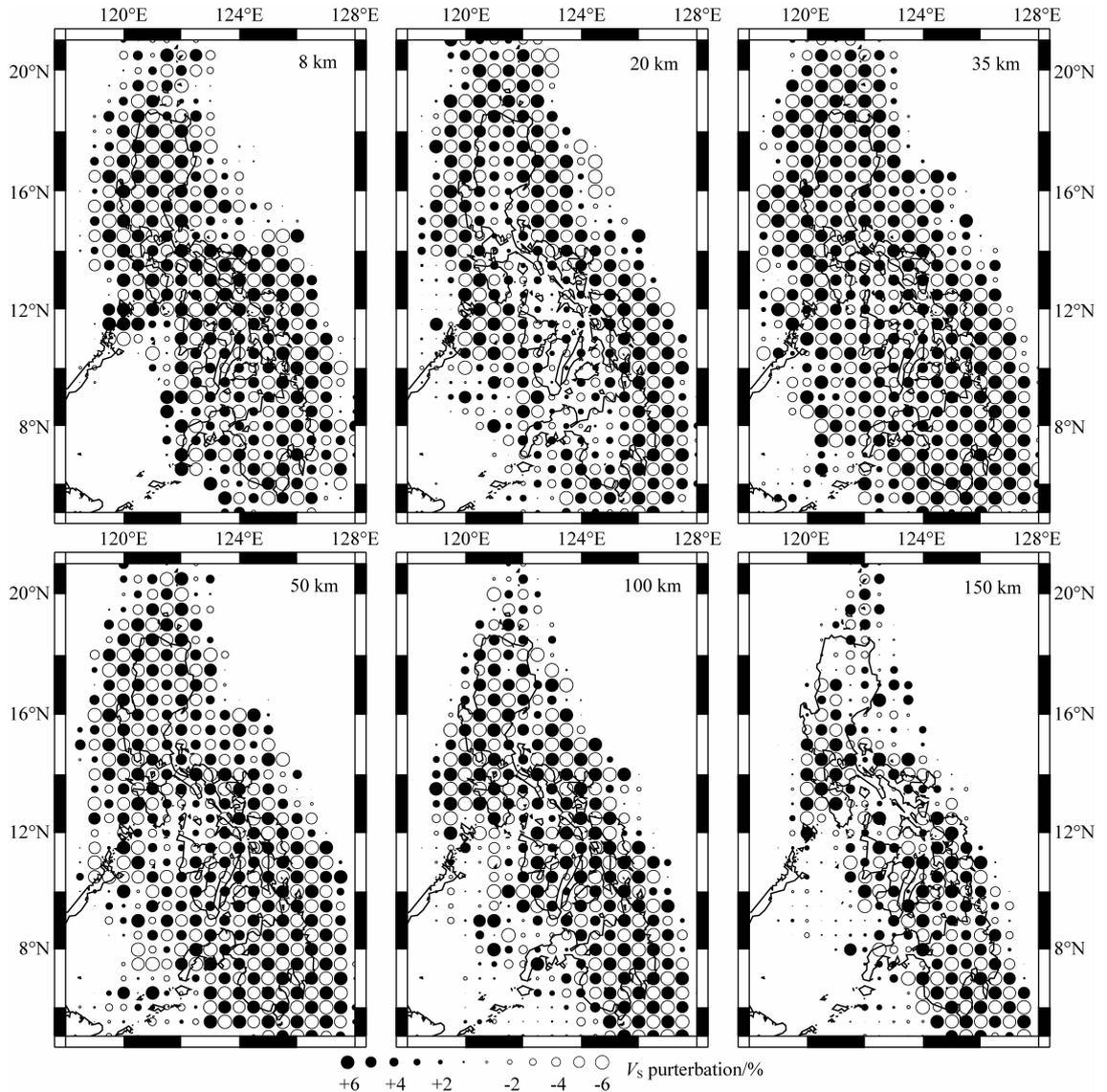


图 8 S 波的检测板分辨率测试结果

Fig. 8 Checkerboard resolution test (CRT) of S-wave

区存在较大的张应变率和剪应变率(Sun et al., 2011);在研究区域的北侧,即 20°N 以北的地区,马尼拉海沟在 $8\sim 20\text{ km}$ 的深度范围内仅有少量 $M_w > 4.0$ 的地震产生,这很有可能同南海块体海底高原的俯冲活动有关(Bautista et al., 2001; Fan et al., 2016),在海底高原的俯冲过程中,大量轻物质被带入地幔深部,其产生的浮力会阻碍俯冲板片的俯冲活动,从而减弱了南海块体在该区域的活动性,在浅部造成了局部地震缺失的现象.在 BB' 和 CC' 剖面中能看到马尼拉海沟中南段绝大部分的强震都沿着高速异常和低速异常的边界展布,说明俯冲的南海块体在 16°N 以南的区域同上覆板块之间存在着强耦合的关系,同时在 CC' 剖面中出现的地震数量要远大于 BB' 剖面,说明马尼拉海沟的活动性在南段要远大于中段和北段.

发生在群岛东侧菲律宾海沟的强震在浅部主要集中于 $12^{\circ}\text{N}\sim 14^{\circ}\text{N}$ 之间,在 14°N 以北的区域以及东吕宋海槽没有强震出现,此外强震在 $35\sim 100\text{ km}$ 的陆地幔沿着菲律宾海沟逐渐向南发展,在 100 km 的深度仅在棉兰老岛东南侧能够观察到强震的发生.根据俯冲板片地震带的研究,板片的俯冲速率越大则越容易发生高角度俯冲(张克亮和魏东平,2011),从我们的剖面结果上看,菲律宾海板块在 $\text{CC}'\text{-FF}'$ 剖面中出现的强震基本沿着板块上边界或高低速异常体的边界分布,说明菲律宾海板块和上覆的菲律宾群岛存在着强耦合的关系,而菲律宾海板块的俯冲角度在 $\text{CC}'\text{-FF}'$ 剖面逐渐增大,在板块的上边界出现由大量 $M_w > 4.0$ 的地震组成的贝尼奥夫带,其发展的深度及密度从北向南逐渐增加,这与板块相

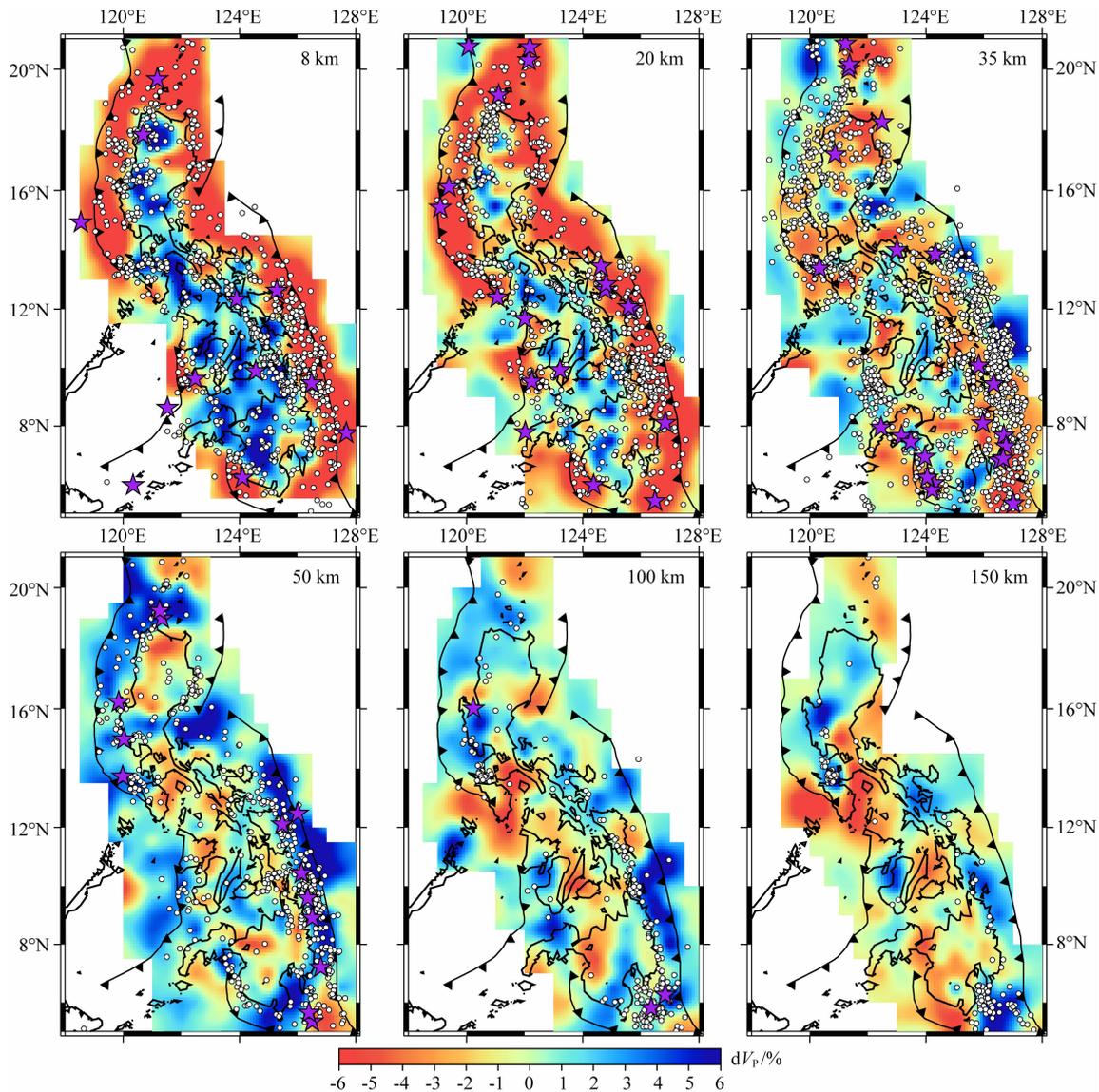


图9 P波的成像结果

图中紫色五角星和白色圆点分别代表该深度切片上 $M_w > 6.0$ 和 $M_w > 4.0$ 的地震。

Fig. 9 Tomographic result of P-wave

Purple stars and white dots represent $M_w > 6.0$ and $M_w > 4.0$ earthquakes, respectively.

对运动模型的计算结果十分吻合(Bautista et al., 2001),因此我们推测菲律宾海板块同上覆块体之间的耦合程度从北向南逐渐增大,在 12°N 以南的区域要远大于 12°N 以北的区域。另外民都洛岛和班乃岛在地壳内部发生的强震可能源自于巴拉望微块体同菲律宾构造带的碰撞,而内格罗斯岛及棉兰老岛西北部发生的强震则很有可能同苏禄海盆的俯冲有关,反映出苏禄海盆和菲律宾构造带之间强耦合的关系。

3 结论

本文使用地震层析成像的方法同时获得了菲律

宾地区地壳及上地幔 P 波和 S 波的速度结构,展示了菲律宾群岛两侧的双向俯冲系统的构造形态:南海块体在马尼拉海沟中段以中等角度俯冲,而在马尼拉海沟南端变为近垂直俯冲;菲律宾海板块在浅部只在 8°N — 14°N 的区域活动,随着深度的增加逐渐向南北两侧发育,其俯冲角度从北向南逐渐增大;苏禄海盆沿着内格罗斯海沟俯冲到 150 km 的深度,苏拉威西海盆沿着哥打巴托海沟向东俯冲至 100 km 左右的深度。

菲律宾群岛地壳内部出现的大规模低速异常可能是含水的洋壳及沉积物在俯冲的过程中发生脱水所导致的,巴拉望半岛北端和棉兰老岛西北端出现

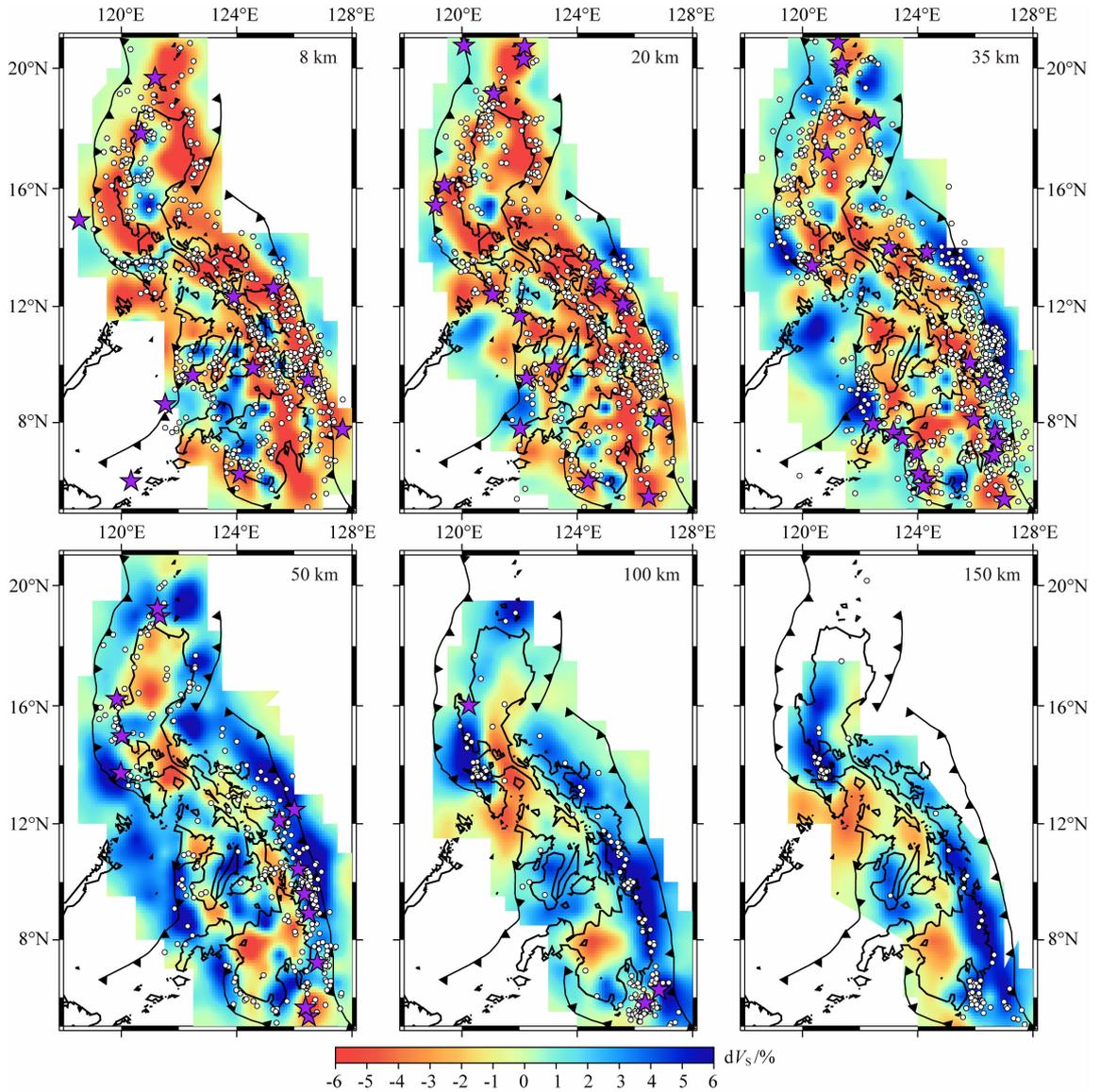


图 10 S 波的成像结果

图中紫色五角星和白色圆点分别代表该深度切片上 $M_w > 6.0$ 和 $M_w > 4.0$ 的地震。

Fig. 10 Tomographic result of S-wave

Purple stars and white dots represent $M_w > 6.0$ and $M_w > 4.0$ earthquakes, respectively.

的低速异常则可能与微块体的碰撞有关。围绕群岛出现的高速异常和各个海沟的展布十分一致,反映出俯冲洋壳的特征,此外还发现了一个低速异常体分割了南海块体,可能是由该地区的拉张应力所造成的。

发生在菲律宾群岛的 $M_w > 6.0$ 强震大多数都沿着俯冲板片的边界展布,体现出菲律宾海板块和欧亚板块强耦合的关系,马尼拉海沟在 16°N — 20°N 的范围内没有强震的发生,可能与该地区的拉张环境有关;菲律宾海板块的活动性在 12°N 以南的区域比 12°N 以北的区域强烈;巴拉望微块体和菲律宾构造带的碰撞有可能导致强震的发生;苏禄海盆

和菲律宾构造带之间存在着强耦合的关系。

致谢 感谢日本东北大学赵大鹏教授提供的地震层析成像程序,感谢国际地震中心(International Seismological Centre, ISC)提供的地震事件和台站数据,本文涉及到的图件均由 GMT(The Generic Mapping Tools)软件绘制。

References

- Aurelio M A. 2000. Shear partitioning in the philippines; Constraints from philippine fault and global positioning system data. *Island Arc*, 9(4): 584-597.
- Bautista B C, Bautista M L P, Oike K, et al. 2001. A new insight

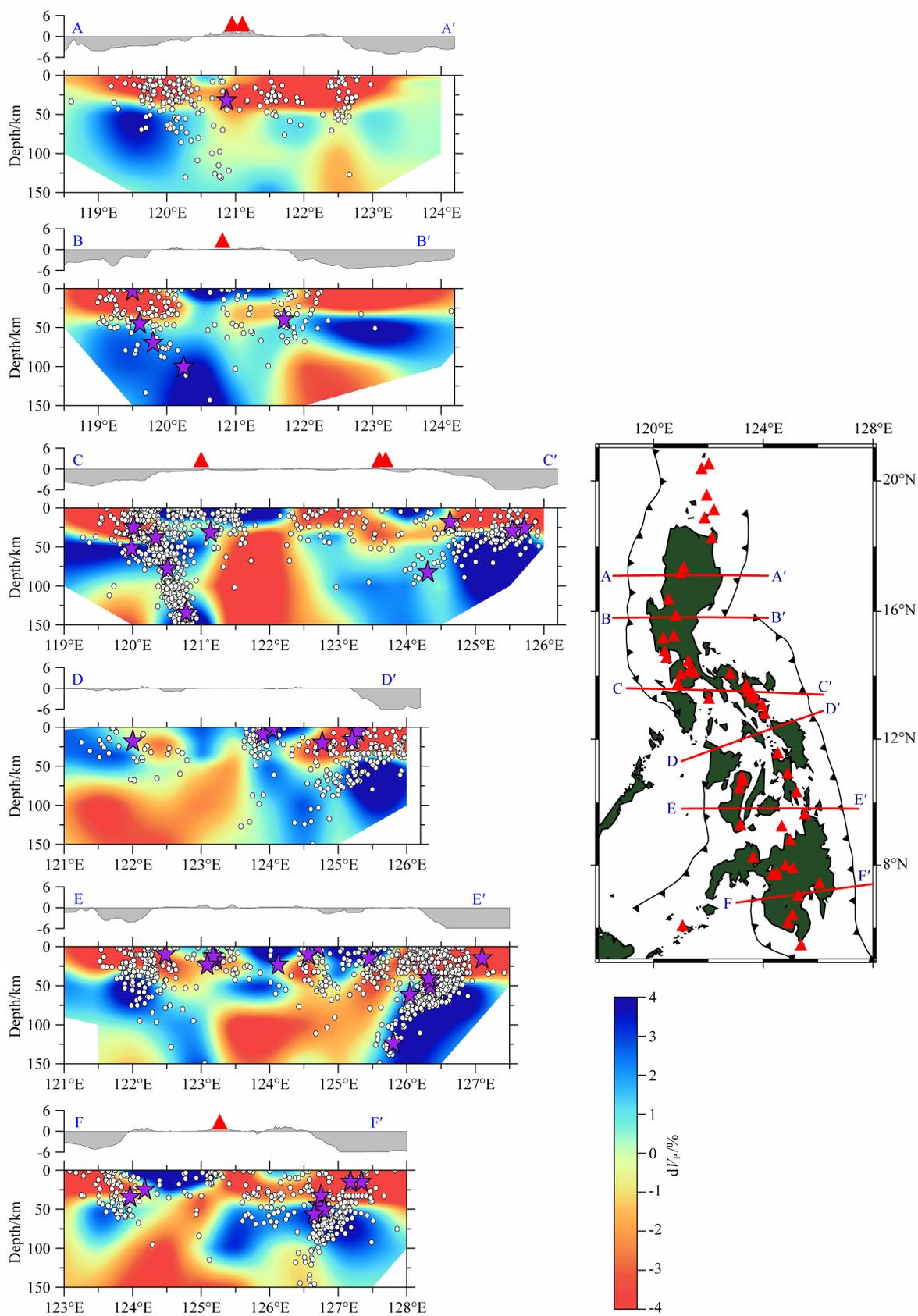


图 11 P 波成像的垂直剖面图

紫色五角星和白色圆点分别代表该剖面上 $M_w > 6.0$ 和 $M_w > 4.0$ 的地震, 红色三角代表火山分布.

Fig. 11 Vertical profile of P-wave

Purple stars and white dots represent $M_w > 6.0$ and $M_w > 4.0$ earthquakes, respectively. Red triangles denotes volcanoes.

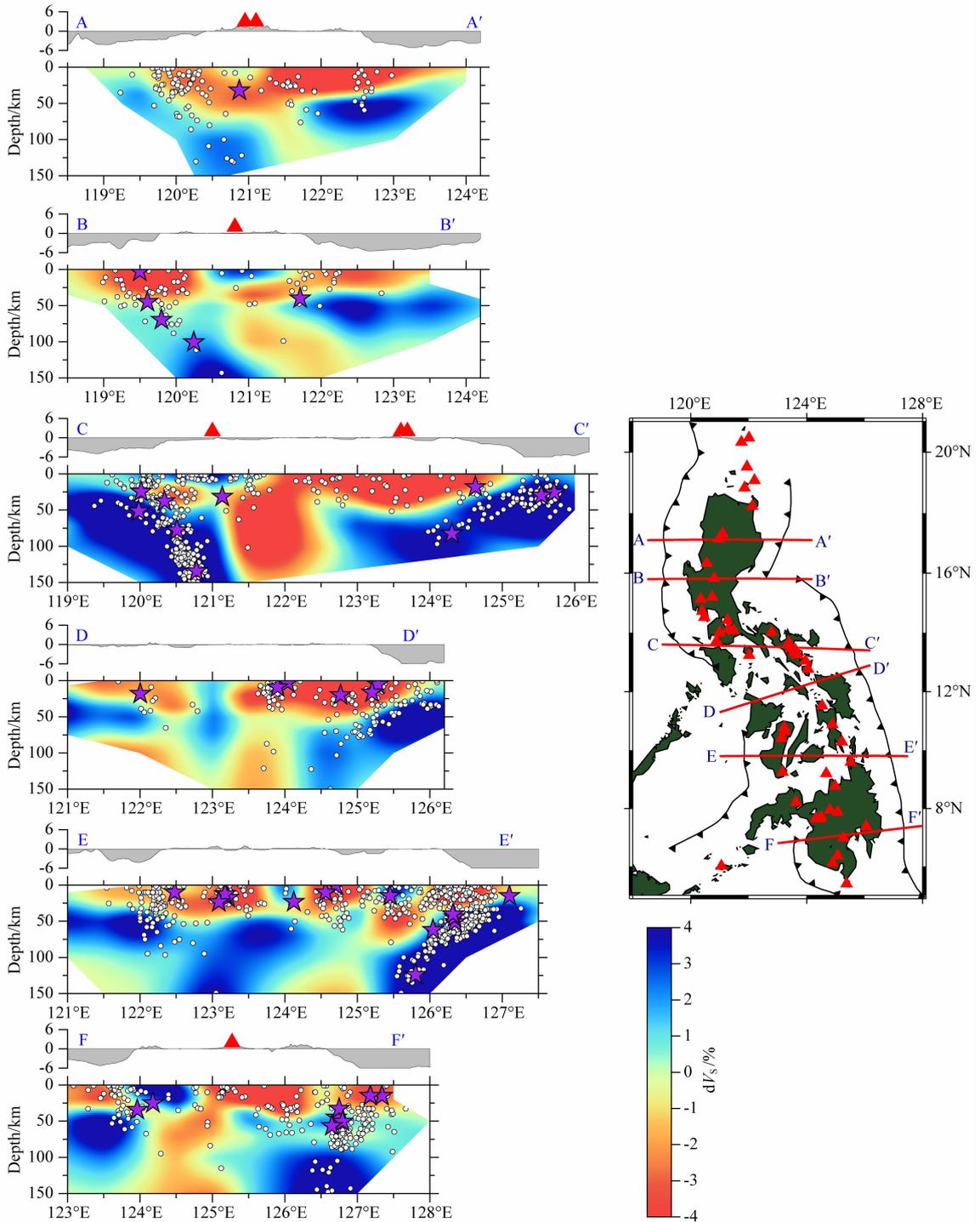


图 12 S 波成像的垂直剖面图

紫色五角星和白色圆点分别代表该剖面上 $M_w > 6.0$ 和 $M_w > 4.0$ 的地震, 红色三角代表火山分布。

Fig. 12 Vertical profile of S-wave

Purple stars and white dots represent $M_w > 6.0$ and $M_w > 4.0$ earthquakes, respectively. Red triangles denotes volcanoes.

on the geometry of subducting slabs in northern Luzon, Philippines. *Tectonophysics*, 339(3-4): 279-310.

Besana G M, Negishi H, Ando M. 1997. The three-dimensional attenuation structures beneath the Philippine archipelago based on seismic intensity data inversion. *Earth and Planetary Science Letters*, 151(1-2): 1-11.

Chen A H, Xu H H. 2014. Phase transformation and study of

earthquakes formation mechanism of Manila trench. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 49(3): 924-934.

Chen Z H, Li J B, Wu Z Y, et al. 2009. Tectonic evolution implication of geometry shape characteristics for manila trench. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 29(2): 63-69.

Esput N, Funicello F, Martinod J, et al. 2008. Flat subduction

- dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. *Tectonics*, 27(3): TC3011, doi: 10.1029/2007TC002175.
- Fan J K, Wu S G, Spence G. 2014. Tomographic evidence for a slab tear induced by fossil ridge subduction at Manila Trench, South China Sea. *International Geology Review*, 57(5-8): 998-1013.
- Fan J K, Wu S G. 2014. P-wave seismic tomography of the Manila subduction zone. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(7): 2127-2137, doi: 10.6038/cjg20140709.
- Fan J K, Zhao D P, Dong D D. 2016. Subduction of a buoyant plateau at the Manila Trench: Tomographic evidence and geodynamic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 571-586.
- Fan J K, Zhao D P, Dong D D, et al. 2017. P-wave tomography of subduction zones around the central Philippines and its geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146: 76-89.
- Gripp A E, Gordon R G. 1990. Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model. *Geophysical Research Letters*, 17(8): 1109-1112.
- Hyndman R D, Yamano M, Oleskevich D A. 1997. The seismogenic zone of subduction thrust faults. *Island Arc*, 6(3): 244-260.
- Lin J Y, Lo C L. 2013. Earthquake-induced crustal gravitational potential energy change in the Philippine area. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 215-223.
- Liu Z F, Zhan W H, Zhang Z Q. 2007. Tectonic implications of the double island arc between Taiwan and Luzon. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 31(2): 145-150.
- Martinod J, Funicello F, Faccenna C, et al. 2005. Dynamical effects of subducting ridges: Insights from 3-D laboratory models. *Geophysical Journal International*, 163(3): 1137-1150.
- Martinod J, Guillaume B, Espurt N, et al. 2013. Effect of aseismic ridge subduction on slab geometry and overriding plate deformation: Insights from analogue modeling. *Tectonophysics*, 588: 39-55.
- Martinod J, Regard V, Letourmy Y, et al. 2016. How do subduction processes contribute to forearc Andean uplift? Insights from numerical models. *Journal of Geodynamics*, 96: 6-18.
- Mason W G, Moresi L, Betts P G, et al. 2010. Three-dimensional numerical models of the influence of a buoyant oceanic plateau on subduction zones. *Tectonophysics*, 483(1-2): 71-79.
- Qu C, Zhou H L, Zhao D P. 2007. Deep structure beneath the west margin of Philippine Sea plate and South China Sea from P and S wave travel time tomography. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(6): 1757-1768.
- Rosenbaum G, Mo W. 2011. Tectonic and magmatic responses to the subduction of high bathymetric relief. *Gondwana Research*, 19(3): 571-582.
- Schmidt M W, Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1-4): 361-379.
- Sun J L, Xu H L, Cao J H. 2011. Crustal movement and its dynamic mechanism of the Taiwan-Luzon convergent zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3016-3025, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.004.
- Wang Z, Zhao D P. 2005. Seismic imaging of the entire arc of Tohoku and Hokkaido in Japan using P-wave, S-wave and sP depth-phase data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 152(3): 144-162.
- Xu Y, Li Z W, Hao T Y, et al. 2007. Pn wave velocity and anisotropy in the northeastern South China Sea and adjacent region. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(5): 1473-1479.
- Yang T F, Lee T, Chen C H, et al. 1996. A double island arc between Taiwan and Luzon: Consequence of ridge subduction. *Tectonophysics*, 258(1-4): 85-101.
- Yumul G P Jr, Dimalanta C B, Tamayo R A Jr, et al. 2003. Collision, subduction and accretion events in the Philippines: A synthesis. *Island Arc*, 12(2): 77-91.
- Yumul G P Jr, Dimalanta C B, Maglambayan V B, et al. 2008. Tectonic setting of a composite terrane: A review of the Philippine island arc system. *Geosciences Journal*, 12(1): 7-17.
- Yumul G P Jr, Dimalanta C B, Marquez E J, et al. 2009. Onland signatures of the Palawan microcontinental block and Philippine mobile belt collision and crustal growth process: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 610-623.
- Zhang K L, Wei D P. 2011. On the influence factors of double seismic zones. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(11): 2838-2850, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.014.
- Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P wave and S wave velocity structure beneath Northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B13): 19909-19928.
- Zhao D P, Hasegawa A, Kanamori H. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11): 22313-22329.
- Zheng Y F, Chen R X, Xu Z, et al. 2016. The transport of water in subduction zones. *Science China Earth Sciences*, 59(4): 651-682.

附中文参考文献

- 陈爱华, 许鹤华. 2014. 马尼拉俯冲带相变与地震成因机制研究. *地质科学*, 49(3): 924-934.
- 陈志豪, 李家彪, 吴自银等. 2009. 马尼拉海沟几何形态特征的构造演化意义. *海洋地质与第四纪地质*, 29(2): 63-69.
- 范建柯, 吴时国. 2014. 马尼拉俯冲带的地震层析成像研究. *地球物理学报*, 57(7): 2127-2137, doi: 10.6038/cjg20140709.
- 刘再峰, 詹文欢, 张志强. 2007. 台湾—吕宋岛双火山弧的构造意义. *大地构造与成矿学*, 31(2): 145-150.
- 瞿辰, 周蕙兰, 赵大鹏. 2007. 使用纵波和横波走时层析成像研究菲律宾海板块西边缘带和南海地区的深部结构. *地球物理学报*, 50(6): 1757-1768.
- 孙金龙, 徐辉龙, 曹敬贺. 2011. 台湾—吕宋会聚带的地壳运动特征及其动力学机制. *地球物理学报*, 54(12): 3016-3025, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.004.
- 胥颐, 李志伟, 郝天晓等. 2007. 南海东北部及其邻近地区的 Pn 波速度结构与各向异性. *地球物理学报*, 50(5): 1473-1479.
- 张克亮, 魏东平. 2011. 双地震带的影响因素探讨. *地球物理学报*, 54(11): 2838-2850, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.014.
- 郑永飞, 陈仁旭, 徐峥等. 2016. 俯冲带中的水迁移. *中国科学: 地球科学*, 46(3): 253-286.