

中国东北深源地震机理

赵素涛^{1,2}, 金振民^{1,2,3}, 干 微³

1. 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074
2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074
3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

Zhao Sutao^{1,2}, Jin Zhenmin^{1,2,3}, Gan Wei³

1. *Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China*
2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*
3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China*

Zhao Sutao, Jin Zhenmin, Gan Wei. A preliminary study of the focal mechanism of the deep-focus earthquakes in Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 300-311

Abstract: Research of the focal mechanisms of the deep-focus earthquakes plays an important role in the understanding of the driving mechanism and the dynamics of the plate tectonics. In this study, we analyzed distribution characteristics and fault plane solutions of the deep-focus earthquakes in Northeast China. Our results show that: (1) Hypocentral depths of these deep-focus earthquakes become progressively deeper in the orientation from SEE (Japan Sea) to NWW (Northeastern China), but there is no obvious trend in the orientation from SSW to NNE. Furthermore, down-dip compressive stress is dominant in the focal mechanism solutions for these deep-focus earthquakes, suggesting that the deep-focus earthquakes of Northeast China is the result of driving action from the Western Pacific Ocean subducting slab. (2) From Japan-Sea to Northeast area of China, the hypocentral depths of earthquakes exhibit a clear linear correlation with the horizontal distance of these deep focus events measured from the Japan trench and coincide with the Watati-Benioff zone under Japan, suggesting that the deep-focus earthquakes region of Northeast China, like Japan-Sea deep-focus earthquakes, is a part of the Western Pacific Ocean subduction zone. (3) Based on previous slab thermal structure analyses and seismological studies, we postulate that most deep-focus earthquakes in Northeast China are related to metastable olivine wedge, and their occurrence is the result of phase transformation.

Key words: deep-focus earthquakes; distribution characteristics; subduction driving force; focal mechanisms; Northeast China

摘 要: 深源地震机理的研究有助于深入了解板块构造的驱动机制和动力学特征。对中国唯一的深震区——东北深震区的深震分布特征和震源机制解进行了综述和初步研究,初步探索了地震的发震机理、动力源以及地震的空间分布与西北太平洋俯冲板块的关系。分析结果显示:(1)震源深度在 SEE-NWW 方向上有依次加深的趋势,而在 SSW-NNE 方向上却没有明显变化,震源机制解的应力状态以下倾的压缩应力为主,说明中国东北深震的发生与西北太平洋板块向欧亚大陆的俯冲直接相关;(2)从日本海沟到我国东北,震源深度依次加深且几乎是从日本海沟沿直线倾斜下来,说明我国东北深震是日本海深震序列的一部分,同属于环太平洋地震带;(3)通过与东北深震区地球物理资料的对比,发现该区亚稳态橄榄石楔(Meta-

收稿日期:2012-01-28;修回日期:2012-06-20

基金项目:国土资源部行业专项“深部探测技术与实验研究”第八项目(Sinoprobe-08);国家自然科学基金项目(41174076,41204060)

作者简介:赵素涛(1982—),女,讲师,主要从事高温高压实验、岩石流变学和岩石物理学的研究。E-mail:sky_zst@163.com

stable Olivine Wedge, MOW)与深源地震的发生存在很好的相关性,由此推断东北深震的发生很可能是由橄榄石的相变引起的。

关键词:深源地震;分布特征;动力源;震源机制;东北地区

中图分类号:P315.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2012)05-0300-12

1 深源地震研究的简要回顾

深震在这里是指震源深度大于 300 km 的天然地震,尽管其有时震级很大,但相对浅震来说对地表建筑物等的破坏和社会、人类生命安全等的影响却微乎其微,故没有引起世人的密切关注。但作为地震的一种类型,深震与板块俯冲、火山活动、浅震的发生等有着密不可分的关系,对其震源机制、应力状态、运动学参数等进行深入的观测和研究具有重要的地球深部科学和地球动力学理论意义和实际价值。震源机制解(又称地震机理)是指震源区地震发生时的力学过程,它是研究现代构造应力场,特别是研究地球深部包括地幔构造形变特征的基础数据资料之一,所以研究深源地震的机理有助于深入了解板块构造的驱动机制、动力学特征。只占总地震 8% 的深源地震不仅能为我们提供俯冲岩石圈的热动力学特征,而且也能给我们提供俯冲岩石圈的直接力学参数值^[1],因此了解深震震源机制一直是我们所面临的重大地球动力学问题^[2-3]。

然而深源地震的发震机理一直存在争议,至今为止,可能的发震机制主要有 3 种,包括脱水致裂^[4]、剪切失稳^[5-6]以及橄榄石的相变致裂^[7-9]。脱水致裂虽然能够解释中源地震的很多特征,但大部分学者认为其不能解释深度范围超过 300~350 km 的地震,主要原因有:(1)在压力达到 5~10 GPa(深度 150~300 km)和温度达 750℃时,地幔中主要含水矿物(蛇纹石等)的脱水已经反应完全^[10];(2)地震的发生频次在到达 300 km 以后有呈指数下降的趋势,表明引起地震的脱水致裂机制开始减少甚至停止^[8];(3)水对橄榄石的高压相瓦兹利石(Wadsleyite, β -尖晶石)和林伍德石(Ringwoodite, γ -尖晶石)的流变学性质影响很小^[11]。不过仍有部分学者认为这种脱水作用能够持续到地幔转换带的深度^[12]。Jung 等^[13]在高温高压实验研究的基础上认为“脱水致裂孕育地震的过程与深度无关,只要在差异应力下含水相矿物有脱水发生即可”。Zhang 等^[14]在其对榴辉岩的高温高压实验基础上,认为绿

辉石和石榴石中以缺陷存在的羟基也能够使断层不稳定性发生,并在颗粒边界伴随有水的析出和非常少量熔体的产生。这种断层机制主要用来解释俯冲洋壳中高温地震的发生,但也可以被外推到转换带(400~700 km)内有类似水析出现象的深源地震。除此之外,关于俯冲作用是否能把水携带到地幔深度引起了广大地质学家的关注与争议^[15-23]。

剪切熔融失稳模型的发展目前受到若干问题的阻碍,其中包括:(1)不稳定性是否能发生的足够快且范围足够大;(2)先存的有方向性的面状低强度区是否真的存在于俯冲岩石圈板块中;(3)超低频信号中为什么没有观察到震前的这种蠕变。因此剪切熔融失稳是不是深源地震的普遍特征还值得进一步地研究与考虑^[24]。

而对于相变致裂假说,此机制如果要应用到地球深部,则要求超过 400 km 的深度后橄榄石应该继续与尖晶石相橄榄石共同存在,即有亚稳态橄榄石进入到 400 km 以下的地幔转换带中。据笔者了解,现在已经有大量的地震观测和数值模拟证据显示在很多俯冲带内存在有亚稳态橄榄石楔(Metastable Olivine Wedge, MOW), Lidaka 和 Suetsugu^[25]利用深源地震走时余差出示了在伊豆一小笠原俯冲带下的俯冲太平洋板块内存在深达 550 km 的亚稳态橄榄石楔,此亚稳态橄榄石楔的存在也得到了亚稳态矿物数字模拟^[26]和深源地震震相图计算上的支持^[27]。而在斐济—汤加俯冲带内,亚稳态橄榄石楔的存在能够很好地解释为什么快速俯冲板片的前端以压缩应力为主的情况^[28-29]。近来 Kaneshima 等^[30]在马里亚纳俯冲板片内发现了亚稳态橄榄石楔,他们的研究结果显示 MOW 比 lasp91 模型^[31]的波速低 5%;Jiang 等^[32]利用大于 400 km 的 23 个深源地震数据及 forward-modeling 方法,发现在 400 km 深度以下的日本海俯冲太平洋板块内存在一个类似指状的波速异常区域,其 P 波的波速值比周围的板片低约 5%(比正常的地幔低约 3%),暗示了板片中存在着亚稳态橄榄石楔(MOW)。利用日本密集的地震序列数据成像, Kawakatsu 和 Yoshioka^[23]在西南日本下的俯冲板片中也发现有亚稳态橄榄石楔

的存在。

西太平洋俯冲带北起千岛群岛,中经日本及伊豆一小笠原地区,南至马里亚纳群岛,是世界上最典型也最活动的俯冲带,同时也是研究俯冲板块与地幔相互作用的理想区域,已成为地学家们研究的一个热点。经过千岛海沟和日本海沟到达我国东北地区的太平洋板块是全球最老的大洋板块之一(1亿3千万年)^[33],而此俯冲带也是世界上最冷的活动俯冲带之一,与其他俯冲带相比,此俯冲带具有较低的板片俯冲倾角(30°),在海沟处具有约90 mm/a的俯冲速度^[34],并一直俯冲到欧亚大陆下,在中国东北地区东部的东宁、珲春、图们和延吉一带形成NWW向主压应力,造成该地区深源地震的发生^[35-36]。此深震区东临日本海域,西部和北部以敦化—密山断裂为界,南部为富尔河—古洞河断裂,是西太平洋俯冲前缘在中国唯一的深源地震区^[37]。本文对我国唯一深震区地震的分布特征和震源机制解进行初步研究,探索其地震的发震机理、动力源及西太平洋俯冲板块与此区地震空间成因的关系,希望能为我国深源地震机制的研究提供依据,为西太平洋俯冲板块的动力学特征及其与地幔的相互作用提供约束,为自然灾害地质研究提供基础。

2 中国东北深源地震研究现状

众所周知,板块的相互作用是地震的基本成因,地震是板块运动直接或间接的表现。只有对板块的运动规律进行深入研究,才能加强对破坏性地震的认识,从而达到预测的目的。相反,研究板块相关区域的地震发生机制及浅中深源地震的相互关系等,也会促进对板块运动规律的认识和板块动力学研究上的新进展。对于中国唯一的深震区——东北深震区的地震活动来说,很多学者从不同角度进行了研究并取得了一定的研究成果。

早在1992年,郭增建等^[38]曾指出东北深震区是中蒙地区发生8级及8级以上地震的穴位点,并且在后来的研究统计中的确发现7级以上的东北深震与中、蒙地区8级及8级以上浅震的发生密切相关^[39],并给出相应的一系列例子。刘维贺等^[40]的研究结果也发现,中国大陆地震活动高潮期的地震活动水平和6.5级以上东北深震的发生密切相关,给出的大量例证显示,东北深震区在深震发生后的3

年内,中国大陆的强震活动会有明显增强。傅维洲^[41]对东北地区深源地震及其临区浅源地震的统计结果显示,东北深震的韵律性虽然没有浅源地震那么明显,但与东北或临区的浅源地震有呼应关系。东北深震的发生也与邻近地区的深震^[42]、周边的火山活动^[43]、海沟的浅震^[37,44-46]等密切相关。但这些研究的大部分结论都是在对地震活动性进行统计比较上获得的。

关于东北深震的发震机理问题,不同学者给出了不同解释。目前为止,得到相应证据佐证的东北深震发震机理,根据其与西太平洋俯冲板块的关系,可归纳为以下3种:(1)与西太平洋板块向欧亚大陆的俯冲直接相关,也就是由俯冲到中国东北下方的西太平洋板块与中国东北下方地幔相互作用所致。其证据主要有①西太平洋板块的确已经俯冲到欧亚大陆地幔中^[47];②在EW向上,东北深震的震源深度由东向西逐渐加深,反映了太平洋板块的俯冲、挤压作用,NS向震源深度大致相同^[40];③从日本海沟到东北的震源剖面研究中发现,从日本海向中国东北方向,震源深度逐渐加大,依次为浅源、中源、深源地震区,且震源等深线几乎与海沟轴互相平行^[46];④东北深源地震的震源机制解给出的主压应力轴优势方位为NWW向,且平均仰角为26°,与P轴获得的俯冲板块的俯冲角相近^[41-42]。(2)鉴于东北深震刚好位于西太平洋俯冲板块的最西端,也就是深源地震形成的贝尼奥夫带(W—B带)向西凸进的最前端,震源深度都在400~600 km,几乎所有的深震都没有余震发生,且有一定的发震周期等特点,段永红^[48]通过与Lundgren^[49]在千岛、智利、斐济等地区的研究结果相对比,得出东北深震属于“孤立型地震”(isolated deep earthquakes)的结论。他认为东北深震并不一定与西太平洋俯冲板块直接相关,并根据接收函数叠加在俯冲带过渡带发现的多组震相结果,得出东北深震应该为俯冲到欧亚大陆下的西太平洋板块前端裂解的多个断块与欧亚大陆地幔物质相互碰撞摩擦生热致使塑性剪切而使冷的断块发生破裂的结果。(3)认为太平洋俯冲板块插入到地幔下太深(深达620 km)^[50],太远(从日本海沟到中国东北直线距离超过1200 km,约为1340 km)^[46],在炽热的高温环境下,板块早已熔化,不可能俯冲这么远、这么深而引发地震。根据地表地质的研究结果,推测东北深震的发生很可能与锡霍特阿林大断裂处的俯冲带有关^[51]。

表 1 东北地区深源地震目录
Table 1 The catalogue of deep-focus earthquakes in Northeastern China

编号	地震时间		震中位置			震级	震源深度/km	资料来源
	日期	时刻	纬度/(°)	经度/(°)	地区			
1	1905-08-25	17:46:00	43.00	129.00	中国吉林图们西	6.8	470	东北历史地震辑览 ^[44]
2	1917-07-31	11:23:00	42.30	131.00	中国吉林珲春东南	7.5	460	东北历史地震辑览 ^[44]
3	1918-02-10	04:46:00	43.00	130.00	中国吉林图们	6.5	450	东北历史地震辑览 ^[44]
4	1918-04-10	10:03:00	43.30	130.30	中国吉林珲春	7.2	570	东北历史地震辑览 ^[44]
5	1920-05-06	17:40:00	43.00	131.30	中国吉林珲春东	6.3	520	东北历史地震辑览 ^[44]
6	1927-05-18	05:44:00	44.00	131.00	中国黑龙江东宁	6.5	430	东北历史地震辑览 ^[44]
7	1928-06-07	14:24:00	44.00	131.00	中国黑龙江东宁	6.0	430	东北历史地震辑览 ^[44]
8	1933-09-09	13:02:00	44.00	130.00	中国黑龙江牡丹江	6.2	590	东北历史地震辑览 ^[44]
9	1935-03-29	07:47:00	43.00	131.00	中国吉林珲春	6.2	550	东北历史地震辑览 ^[44]
10	1938-10-21	14:46:00	43.30	131.00	中国黑龙江东宁	6.2	550	东北历史地震辑览 ^[44]
11	1940-07-10	13:49:55	44.00	131.00	中国黑龙江东宁	7.3	580	东北历史地震辑览 ^[44]
12	1940-11-22	21:06:00	43.42	131.30	中国黑龙江东宁	6.0	540	东北历史地震辑览 ^[44]
13	1946-01-11	09:33:00	44.00	129.30	中国黑龙江牡丹江	7.2	580	东北历史地震辑览 ^[44]
14	1957-01-03	20:48:00	43.54	130.36	中国黑龙江东宁西	7.0	593	东北历史地震辑览 ^[44]
15	1959-10-29	22:30:00	42.48	131.06	中国吉林珲春	6.2	547	东北历史地震辑览 ^[44]
16	1973-09-10	15:43:34	42.50	131.90	中国吉林珲春	6.4	586	中国地震台网地震目录
17	1973-09-29	44:01:02	41.90	131.00	中国吉林珲春市	7.7	595	参考文献 ^[46]
18	1975-06-29	00:00:00	38.80	130.10	中国吉林	7.4	553	参考文献 ^[46]
19	1976-04-11	00:03:37	42.80	131.10	中国吉林珲春市	5.0	542	国际地震中心地震目录
20	1977-02-03	21:31:56	42.59	130.49	中国吉林珲春市	5.2	505	国际地震中心地震目录
21	1978-07-03	21:01:47	43.21	130.90	中国吉林珲春市	4.6	524	中国地震台网地震目录
22	1979-12-25	00:36:37	42.95	130.99	中国吉林珲春市	5.5	510	中国地震台网地震目录
23	1981-09-19	07:27:00	43.15	131.17	中国吉林珲春市	4.4	560	中国地震台网地震目录
24	1981-11-27	17:21:47	42.88	131.12	中国吉林珲春市	6.1	546	中国地震台网地震目录
25	1981-11-28	00:21:45	42.92	131.15	中国吉林珲春市	6.2	540	中国地震台网地震目录
26	1983-10-08	07:45:31	44.18	130.39	中国黑龙江东宁县	6.1	573	中国地震台网地震目录
27	1984-04-15	07:34:18	42.73	131.24	中国吉林珲春市	5.1	567	中国地震台网地震目录
28	1987-11-21	13:48:57	43.08	131.14	中国吉林珲春市	5.0	574	中国地震台网地震目录
29	1993-11-02	07:14:51	42.99	131.10	中国吉林珲春市	5.3	557	中国地震台网地震目录
30	1994-02-08	05:18:27	43.46	130.87	中国黑龙江东宁县	4.4	563	中国地震台网地震目录
31	1994-11-28	04:57:54	43.24	130.93	中国吉林珲春市	4.1	547	中国地震台网地震目录
32	1996-09-14	11:28:13	43.82	131.14	中国黑龙江东宁县	3.3	518	国际地震中心地震目录
33	1997-04-30	13:57:02	44.59	130.55	中国黑龙江穆稜县	3.9	550	中国地震台网地震目录
34	1999-04-01	21:35:14	42.90	130.80	中国吉林珲春市	7.1	575	中国地震台网地震目录
35	1999-04-08	13:10:40	43.66	130.47	中国吉林汪清县	6.4	565	中国地震台网地震目录
36	2001-11-24	11:50:41	43.27	131.05	中国吉林珲春市	4.5	561	中国地震台网地震目录
37	2002-06-28	17:19:40	43.74	130.45	中国黑龙江东宁县	7.3	582	中国地震台网地震目录
38	2002-09-15	08:39:36	44.77	130.04	中国黑龙江林口县	6.4	589	中国地震台网地震目录
39	2002-11-15	14:08:34	42.93	130.79	中共吉林珲春市	4.2	567	中国地震台网地震目录
40	2004-08-15	15:36:56	43.39	131.01	中国吉林珲春市	4.6	538	中国地震台网地震目录
41	2006-07-26	20:51:06	43.64	130.58	中国黑龙江东宁县	4.4	563	中国地震台网地震目录
42	2007-10-05	14:24:45	43.80	130.93	中国黑龙江东宁县	4.3	562	中国地震台网地震目录
43	2009-04-18	03:56:30	42.80	130.50	中国吉林珲春市	5.4	564	中国地震台网地震目录
44	2009-06-07	16:26:05	43.75	130.85	中国黑龙江东宁县	4.6	578	中国地震台网地震目录
45	2009-07-12	23:31:30	43.56	130.43	中国吉林汪清县	4.1	574	中国地震台网地震目录
46	2009-08-10	12:42:52	43.56	130.59	中国吉林汪清县	5.3	584	中国地震台网地震目录
47	2010-01-17	18:05:31	43.70	131.08	中国黑龙江东宁县	4.1	541	中国地震台网地震目录
48	2011-01-08	07:34:10	43.00	131.10	中国吉林珲春市	5.6	560	中国地震台网地震目录

由此可见,对东北深震的发震机理大部分的研究还主要集中在其动力学来源上,且争议颇大。至于其具体的震源机制,到底是与俯冲板块分裂出来的洋壳滞留堆积物的脱水致裂有关^[1,52-54]、与剪切不稳定性^[6,55-56]有关,还是与亚稳态的橄榄石相变有关^[1,7-8,57-61],这些都需要一些地球物理、高温高压实验等资料上的支持与佐证。

3 东北深源地震机理的初步研究

3.1 数据来源

本文主要对自 1900 年开始使用地震仪记录地震以来发生在我国境内的所有深源地震进行了分析研究,范围大致为 41°~ 45°N,129°~ 132°E,地震目录数据来自东北历史地震辑览、中国地震台网(CSN)和国际地震中心(ISC)。这几个数据库中若有重复数据(相同时间发生的地震),本研究中则以近震源的中国地震台网(CSN)数据库为准。从收集到的东北深源地震资料(表 1)可以看出,我国境内的 48 个东北深源地震震源深度大都超过 500 km,400~500 km 的地震只有 5 次,最深的地震可达约 600 km;这 48 个深源地震中, M_s (震级) ≤ 3.0 级的地震不存在, M_s 在 3.0~3.9 的地震仅有 2 个, M_s 在 4.0~4.9 的地震有 12 个, M_s 为 5.0~5.9 的有 9 个, $M_s \geq 6.0$ 级的有 25 个,震级大于 6.0 的地震占了

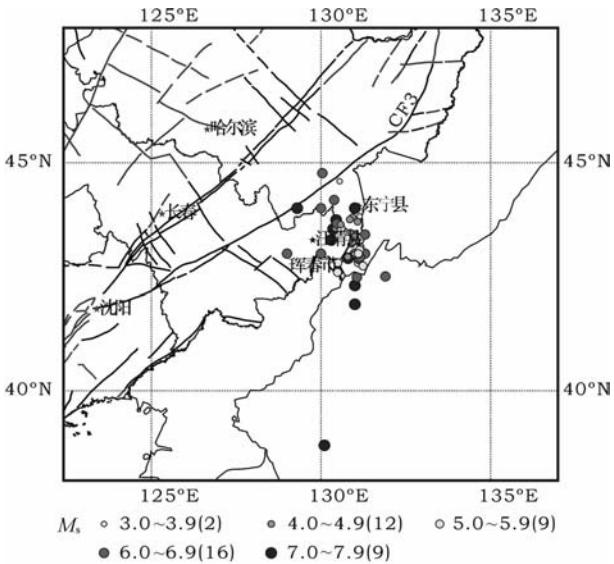


图 1 中国东北深源地震震中分布
(数据来源见表 1)

Fig.1 Distribution of epicenters of the deep-focus earthquakes in Northeast China
纵坐标和横坐标分别为纬度和经度,CF3 为敦化-密山断裂带。

所统计东北深源地震的一半(图 1)。从图 1 中我们还可以看出这些深源地震当中只有一个位于敦化-密山断裂带以西,其余都分布在该断裂带以东(图 1 中的 CF3 断裂),且与浅部断层的分布没有明显相关性。之外,在经度上东北深震主要呈带状分布于 130°~131°E,因此东北深震区也被称为“东北深震带”。

3.2 结果

3.2.1 东北深震震源深度的空间分布特征

为了更好地了解东北深震的发震机理及其相对应的动力源、板块与地幔的相互作用等一系列动力学问题,本文初探了东北深震震源深度的空间分布特征。从图 2a 中,我们可以看到,在 NWW 方向上的地震剖面中,震源深度从 SEE 的 540 km 逐步加深到 NWW 的 590 km,也就是说在 SEE-NWW 方向上东北深震的震源深度有依次加深的趋势。相反,在 SSW-NNE 方向的剖面上(图 2b),震源深度似乎没有明显变化,分布较 SEE-NWW 方向上的剖面均匀。

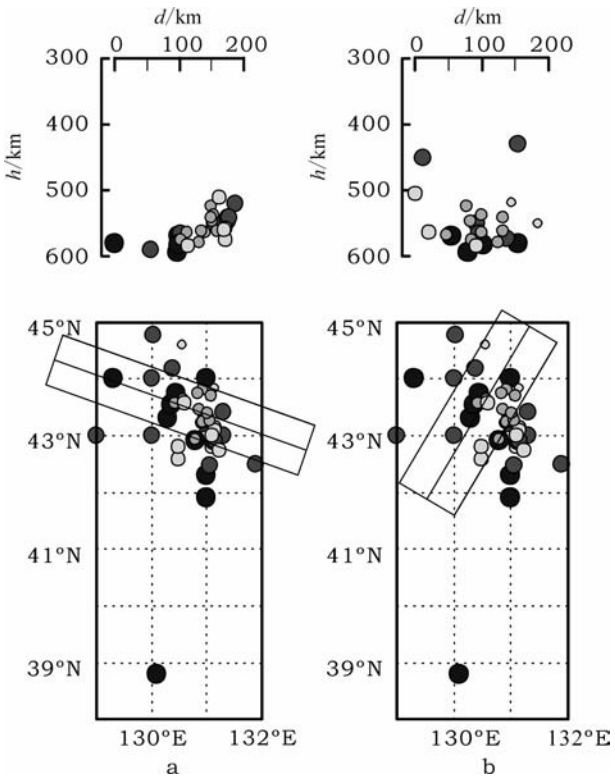


图 2 中国东北深震区震源深度分布剖面图

Fig.2 Profiles of hypocenter depth distribution
a—北西西(NWW)向地震震源分布图;b—北北东(NNE)向地震震源分布图。剖面的位置对应着下面深震震中分布图中方框中线的位置,纵坐标和横坐标分别为纬度和经度。

3.2.2 东北深震的震源机制解

如果说深源地震的空间分布特征能够给出动力来源的俯冲板块几何形态信息,那么震源机制解将为我们提供地震发生时震源区的运动学机制及其应力状态,而应力状态可以为板块运动的驱动机制提供重要的依据。现今对地震机理的研究尚处于探索阶段,不同学者对地震机制解的求解方法亦不完全相同^[62],且考虑到中国地震台网中心测定的矩震级偏差比美国哈佛大学测定结果偏小^[63],所以我们主要利用中国地震台网的宽频带数字地震资料计算获得的我国 M_s 5.0 以上地震和我国边境地区 M_s 6.0 以上地震的快速 CMT 解来获得东北深震的震源机制解,如果在此 CMT 解数据库中未找到我们所需要的数据,再从美国哈佛大学快速震源机制解数据库中进行收集。

从中国地震台网中心 CMT 解数据库和美国哈佛大学快速震源机制解数据库中共收集到我国东北深震的震源机制解数据 13 个(见图 3 和表 2)。从图 3 中我们可以看到,统计的 13 个深源地震的地震机制解大部分为逆断型,应力状态是压性的。而由断层面解很容易求得反映地震前后震源区应力状态变化的压应力轴(P 轴,位于初动是膨胀的象限)和张应力轴(T 轴,位于初动是压缩的象限)。从表 2 中我们可以看到 P 轴的优势方位为 NWW 向,平均

方位是 277° ,这与太平洋俯冲板块的运动方向基本一致。 P 轴的平均仰角是 31° ,这也与前人研究的俯冲板块倾角(30°)相近,而 T 轴的平均仰角为 50.8° ,与 P 轴方向接近垂直。也就是说,东北深震震源机制解中的主压应力轴是与太平洋板块的下插方向相一致的,而主张应力轴与其垂直。

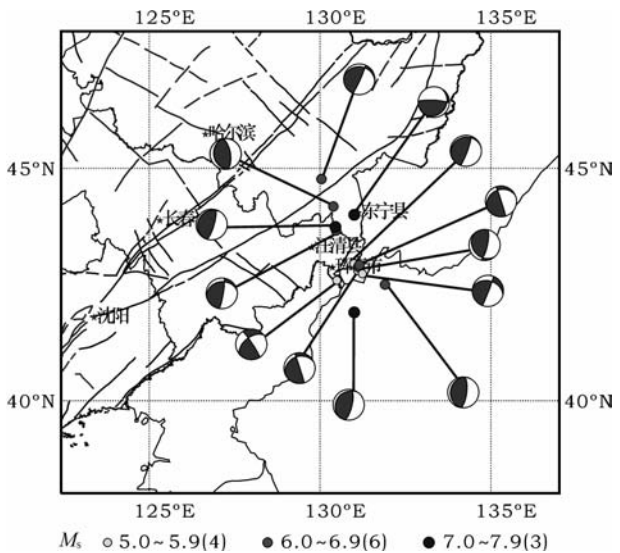


图 3 中国东北深震区有震源机制解的地震震中分布及其相应的震源机制解
Fig. 3 Focal mechanism solutions of the deep-focus earthquakes in Northeast China
详细的数据来源见表 2。

表 2 东北深震震源机制解																			
Table 2 Focal mechanism solutions of the deep-focus earthquakes in Northeast China																			
编 号	地震时间					震中位置			震源		节面 A		节面 B		P 轴		T 轴		资料来源
	年	月	日	时	分	秒	纬度/ (°)	经度/ (°)	震级	深度/ km	走向/ (°)	倾向/ (°)	走向/ (°)	倾向/ (°)	方位角/ (°)	倾向/ (°)	方位角/ (°)	倾向/ (°)	
1	1940	7	10	13	49	55.0	44.00	131.00	7.3	580	93	80	210	20	169	33	23	51	中国 CMT 解数据库
2	1973	9	10	15	43	34.3	42.50	130.90	6.4	586	187	72	7	18	277	27	97	63	中国 CMT 解数据库
3	1973	9	29	8	44	1.2	41.90	131.00	7.7	595	193	72	37	19	289	27	91	62	中国 CMT 解数据库
4	1976	4	11	0	3	36.8	42.80	131.10	5.0	542	193	75	321	23	269	28	126	57	中国 CMT 解数据库
5	1977	2	3	21	31	56.4	42.59	130.49	5.2	504.7	147	84	52	53	274	21	16	30	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
6	1979	12	25	0	36	36.9	42.95	130.99	5.5	510	72	13	200	82	299	36	97	52	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
7	1981	11	28	0	21	45.1	42.92	131.15	6.2	540	66	25	162	88	274	38	48	42	中国 CMT 解数据库
8	1981	11	27	17	21	47.4	42.88	131.12	6.1	546.2	162	88	66	25	274	38	48	42	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
9	1983	10	8	7	45	31.3	44.18	130.39	6.1	572.8	171	65	351	25	261	20	80	70	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
10	1984	4	15	7	34	18.1	42.73	131.24	5.1	566.8	201	86	105	35	319	32	79	39	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
11	1999	4	8	13	10	40.2	43.66	130.47	7.1	575.4	189	82	81	25	299	33	75	48	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
12	2002	6	28	17	19	40.1	43.74	130.45	7.3	581.5	192	77	27	13	285	32	97	58	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
13	2002	9	15	8	39	36.3	44.77	130.04	6.4	589.4	204	85	98	19	310	37	95	47	美国哈佛大学快速 CMT 数据库
平均值															277	31	75	50.8	

3.2.3 东北深震与日本海深震的对比

为了更深刻地了解东北深震,我们把东北深震与日本海深震进行了对比研究。收集范围为 30°~50°N,120°~150°E 的深源地震数据 287 个(见图 4a)。从图 4b 中我们可以看到无论是日本海的深震还是中国东北的深震,其主压应力轴 *P* 轴的方向总体为 NWW 向,且深震的震源深度由日本海沟向中国东北有逐渐增大趋势(图 4c)。从收集到的 0°~60°N、120°~180°E 范围内震级大于 6.0 级的所有地震剖面投影图中(图 5),我们也可以看出,从日本海沟到我国东北地区,震源深度逐渐增加,依次为浅、中、深源地震区。且中国东北深震几乎是从日本

海沟沿着直线直接倾斜下来,中间并没有发生任何裂解、分层等,也就是说从东北深震沿直线向浅处追溯可以一直追溯到日本海沟。

3 讨论

西太平洋俯冲带是世界上最典型也最活跃的俯冲带,是研究俯冲板块与地幔断面之间相互作用的理想区域,从而成为地学界研究的热点。而中国东北地区刚好位于西太平洋俯冲带的最西缘,且也是中国唯一的深源地震带。因此对于东北深震区深部的结构,地球物理学家也进行了大量的研究并取

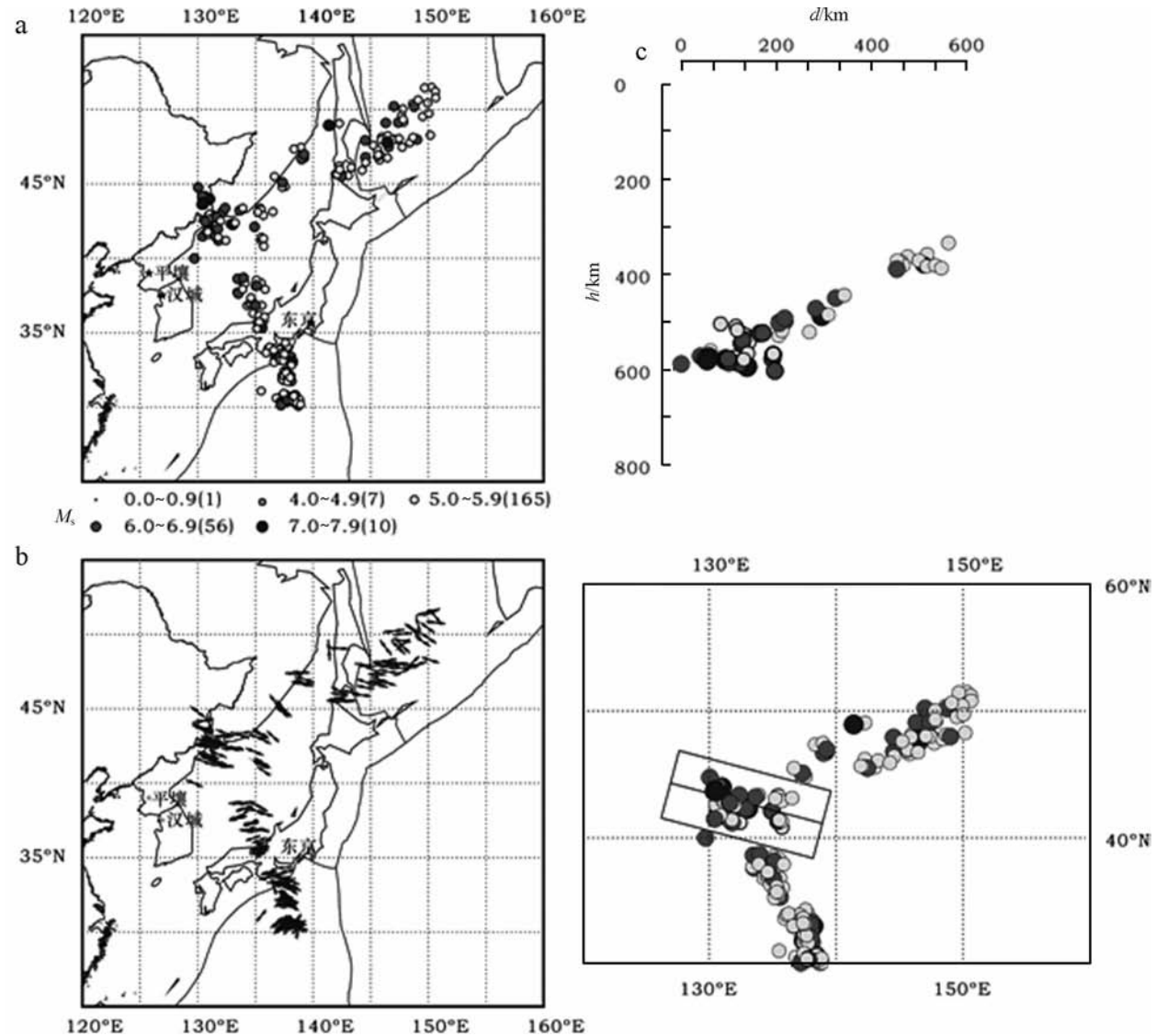


图 4 日本海—东北深震区 (30°~50°N,120°~150°E)

Fig. 4 Deep-focus earthquakes in the region from Japan Sea to Northeast China

a—震中分布图;b—主压应力轴(*P*轴)方位图;c—震源深度剖面图。本图所用到的地震目录来自中国地震台网和国际地震中心台网,震源机制解来自美国哈佛大学快速震源机制解数据库。

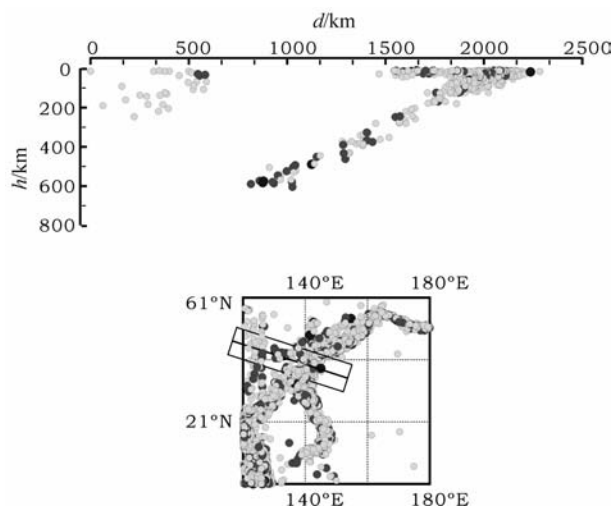


图5 日本海—中国东北深震区($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)震中(下图)分布与方框中中线对应的剖面投影图(上图)
Fig. 5 Distribution of the epicenters and the corresponding profile of hypocenter depths of the deep-focus earthquakes in the region of Japan-Sea - Northeast China ($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)
图中所用到的地震目录来自中国地震台网和国际地震中心台网。

得了许多成果^[34,36,50,64-71]。例如, Nakajima 等^[72]采用局部层析成像研究了日本东北地区下方的三维速度结构发现日本东北地区下方有明显的高速异常体,认为那就是俯冲的西太平洋板块,并发现所有的深源地震几乎都发生在高速异常体的内部^[73-74]。Huang 等^[47]利用由 1 012 个地震台站的 19 361 个地震记录到的 P、pP、PP、PcP 等的波形数据,深入研究了我国及其周边地区下 1 100 km 太平洋板块的俯冲结构,发现当太平洋板块从日本海沟俯冲到约 600 km 深度时,在中国东北地区下的地幔过渡带中由向下的倾斜俯冲转换为横向推移并一直延伸至中国太行山以东地区的下方才停滞。并结合其他的一些层析成像结果^[75-80],认为所有大地震都发生在高速异常体附近。关于太平洋俯冲板块在经过中国东北后向西倾斜,而后在近 660 km 地震不连续面受到很大的阻碍而停滞并聚集在此不连续面上的观点被大多数学者所支持^[77,81-82],但是具体俯冲带向下能渗透多深及其范围大小则众说纷纭。当然还有一些观点认为俯冲板片能冲破 660 km 不连续面而直接插入下地幔^[65,67,83],甚者有些学者的研究结果也发现停滞的板片能渗透到达 1 100 km 深度^[84],因为他们发现 400~1 100 km 深度都有停滞的板片,从而认为 400~1 000 km 是地幔的过渡带而非到 660 km。一些接收函数的研究结果,显示我国东北地区下面 620 km 深处存在低速异常

层^[50],并认为其很可能是由西太平洋俯冲板块中洋壳从俯冲板块分离并滞留堆积而形成的;660 km 或 780 km 深处存在着多重不连续界面的结构认为很可能是石榴石→钛铁矿和钛铁矿→钙钛矿在低温下复合相变的结果^[34]。

根据统计的东北深震资料(表 1)我们可以知道所有深源地震的震源深度都没有超过 600 km,大都分布在 500~600 km,且震中都分布在敦化—密山断裂带以东(图 1)。如果根据上述地球物理资料,俯冲的太平洋板块能横向推移延伸至中国太行山以东地区,那么敦化—密山断裂带向西到太行山之间深处的俯冲板块边界为什么没有深源地震发生?而已经发生的这些深源地震到底是与洋壳滞留堆积物的脱水致裂有关,还是与亚稳态橄榄石的相变有关呢?甚者它是不是像汤加俯冲板块中那样由拆离的古老板块致裂引起的呢^[28]?把我们的结果与地球物理资料进行对比不难发现,东北深震由滞留洋壳脱水造成的概率不大,因为尽管在东北地区下约 620 km 处发现了低速异常,但 Shen 等认为该低速层由水引起的可能性较小^[50];很多学者也认为洋壳脱水在大于 300 km 的地幔深度是很难发生的^[85-87]。基于 Kirby 等^[54]的研究结果,深震与亚稳态橄榄石楔的存在有着密切的关系,且已经在很多俯冲带内发现亚稳态橄榄石楔的确能够到达非常深的地幔^[23,25,29-30,32,88],Jiang 等^[32]认为我国东北日本地区下方太平洋俯冲板块内亚稳态橄榄石楔可深达 560 km,这也与我们获得的东北地区深震震源深度小于 600 km 相一致,因此我们推断我国东北深源地震的发生很可能是由橄榄石的亚稳态相变引起的。而在 520~560 km 深度对应着一个较密集的地震发生段,很可能正好对应着 β 橄榄石向 γ 尖晶石的相变。在深度大于 600 km 之后,由于温度升高到约 800 $^{\circ}\text{C}$ ^[89],亚稳态橄榄石楔已经不复存在,所以也就没有深源地震发生,这也与虽然俯冲的太平洋板块能横向推移延伸至中国太行山以东地区^[47],然而敦化—密山断裂带向西到太行山之间深处的俯冲板块边界没有深源地震发生相一致。如果再深达 660 km, γ 尖晶石转变为钙钛矿和镁方铁矿从而形成了稳定的后成合晶,也不会有深源地震发生。关于深源地震由橄榄石相变引起的观点同时也得到了高温高压实验^[7-8,57]、数值模拟^[90]、地震观测^[91]等资料上的支持与证实。

那么东北深震是不是与早期拆离的古老板块致

裂有关的地震(outboard earthquakes)^[29]?是“孤立型”地震?还是与当今仍在活动的西太平洋俯冲板块相关?从已有的结果,我们不难知道我国东北深震的发生与西北太平洋板块向欧亚大陆的俯冲直接相关,其证据主要有:(1)震源深度在 SEE-NWW 方向有依次加深的趋势,而在 SSW-NNE 方向的剖面上震源深度似乎没有明显变化,分布较 SEE-NWW 方向上的剖面是很均匀的;(2)*P* 轴的优势方位为 NWW 向,平均方位是 277°,而 *P* 轴的平均仰角是 31°,*T* 轴的平均仰角为 50.8°(与 *P* 轴方向接近垂直),也就是说东北深震震源机制解中的主压应力轴是与太平洋板块的下插方向相一致的,而主张应力轴与其垂直;(3)从日本海沟到我国的东北地区震源深度逐渐增加,依次为浅源、中源和深源地震区,且中国东北深震几乎是从日本海沟沿直接倾斜下来,可见中国东北深震与日本海深震一样同属于太平洋地震带,而不是“孤立型”地震。至于它是否受中国大陆内部局部构造影响还需要做进一步调查研究。

4 结论

(1)震源深度分布特征上,从 SSE-NWW 方向上深度依次加深;在 SSW-NNE 方向上没有优势趋向。

(2)深源震区以 NWW 方向的压缩应力为主,且压应力轴平均仰角为 31°,与西北太平洋板块俯冲角相近,说明我国东北深震的发生与西北太平洋板块向欧亚大陆的俯冲、挤压直接相关。

(3)中国东北深震活动是日本海深震序列的一部分,它们同属于环太平洋地震带而不是“孤立型”地震。

(4)通过与东北深震区地球物理资料的对比发现,本区橄榄石亚稳态楔与深源地震的发生存在很好的相关性,因此推断我国东北深源地震的发生很有可能是由橄榄石的相变引起的。

感谢美国芝加哥大学高能放射源中心王雁宾教授对本文提出的宝贵意见及英语部分的修改。

参考文献

[1] Kirby S H, Stein S, Okal E A, et al. Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34

(2): 261-306.

- [2] 金振民. 上地幔流变学[M]//肖庆辉,李晓波,刘树臣,等. 当代地质科学前沿:我国今后值得重视的前沿研究领域. 武汉:中国地质大学出版社,1993:112-120.
- [3] 金振民. 上地幔相变动力学[M]//肖庆辉,李晓波,刘树臣,等. 当代地质科学前沿:我国今后值得重视的前沿研究领域. 武汉:中国地质大学出版社,1993:121-130.
- [4] Raleigh C B, Paterson M S. Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(16): 3965-3985.
- [5] Hobbs B E, Ord A. Plastic instabilities: Implications for the origin of intermediate and deep focus earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(B9): 10521-10540.
- [6] Karato S I, Riedel M R, Yuen D A. Rheological structure and deformation of subducted slabs in the mantle transition zone: Implications for mantle circulation and deep earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 127(1/2/3/4): 83-108.
- [7] Green H W, Burnley P C. A new self-organizing mechanism for deep-focus earthquakes[J]. *Nature*, 1989, 341: 733-737.
- [8] Green H W, Houston H. The mechanics of deep earthquakes[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23: 169-213.
- [9] Green H W. Tiny triggers deep down[J]. *Nature*, 2003, 424 (6951): 893-894.
- [10] Ringwood A E. *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*[M]. New York: McGraw-Hill Press, 1975: 618.
- [11] Chen J, Inoue T, Weidner D J, et al. Strength and water weakening of mantle minerals, olivine, wadsleyite and ringwoodite[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 575-578.
- [12] Omori S, Komabayashi T, Maruyama S. Dehydration and earthquakes in the subducting slab: Empirical link in intermediate and deep seismic zones[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146(1/2): 297-311.
- [13] Jung H, Green I, Harry W, et al. Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change[J]. *Nature*, 2004, 428: 545-549.
- [14] Zhang J, Green H W, Bozhilov K, et al. Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust[J]. *Nature*, 2004, 428: 633-636.
- [15] Panero W R, Benedetti L R, Jeanloz R. Transport of water into the lower mantle: Role of stishovite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (B1): 2039. doi: 10.1029/2002JB00-2053.
- [16] Komabayshi T, Omori S, Maruyama S. Petrogenetic grid in the system MgO-SiO₂-H₂O up to 30 GPa, 1600°C: Applica-

- tion to hydrous peridotite subducting into the Earth's deep interior[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109 (B03206). doi: 10.1029/2003JB002651.
- [17] Ohtani E, Litasov K, Hosoya T, et al. Water transport into the deep mantle and formation of a hydrous transition zone [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 143/144(15): 255-269.
- [18] Kawakatsu H, Watada S. Seismic evidence for deep-water transportation in the mantle[J]. *Science*, 2007, 316: 1468-1471.
- [19] Maruyama S, Okamoto K. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11(1/2): 148-165.
- [20] Iwamori H, Albarède F. Decoupled isotopic record of ridge and subduction zone processes in oceanic basalts by independent component analysis [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9(4): Q04033. doi: 10.1029/2007GC001753.
- [21] Tsuji Y, Nakajima J, Hasegawa A. Tomographic evidence for hydrated oceanic crust of the Pacific slab beneath north-eastern Japan; Implications for water transportation in subduction zones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L14308. doi: 10.1029/2008GL034461.
- [22] Green H W, Chen W P, Brudzinski M R. Seismic evidence of negligible water carried below 400-km depth in subducting lithosphere[J]. *Nature*, 2010, 467: 828-831.
- [23] Kawakatsu H, Yoshioka S. Metastable olivine wedge and deep dry cold slab beneath southwest Japan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303(1/2): 1-10.
- [24] Frohlich C. *Deep Earthquakes*[M]. New York: Cambridge University Press, 2006: 252-301.
- [25] Lidaka T, Suetsugu D. Seismological evidence for metastable olivine inside a subducting slab[J]. *Nature*, 1992, 356: 593-595.
- [26] Vacher P, Spakman W, Wortel M J R. Numerical tests on the seismic visibility of metastable minerals in subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170 (3): 335-349.
- [27] Koper K D, Wiens D A. The wave guide effect of metastable olivine in slabs[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27 (4): 581-584.
- [28] Chen W P, Brudzinski M R. Evidence for a large-scale remnant of subducted lithosphere beneath Fiji [J]. *Science*, 2001, 292: 2475-2479.
- [29] Brudzinski M R, Chen W P. A petrologic anomaly accompanying outboard earthquakes beneath Fiji-Tonga: Corresponding evidence from broadband P and S waveforms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B6): 2299. doi: 10.1029/2002JB002012.
- [30] Kaneshima S, Okamoto T, Takenaka H. Evidence for a metastable olivine wedge inside the subducted Mariana slab[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(1/2): 219-227.
- [31] Kennett B L N, Engdahl E R. Travel times for global earthquake location and phase identification[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(2): 429-465.
- [32] Jiang G, Zhao D, Zhang G. Seismic evidence for a metastable olivine wedge in the subducting Pacific slab under Japan Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(3/4): 300-307.
- [33] Seno T, Gonzalez D G. Faulting caused by earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1987, 35(5): 381-407.
- [34] Ai Y, Zheng T, Xu W, et al. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212(1/2): 63-71.
- [35] 臧绍先, 宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义 [J]. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 188-202.
- [36] 张瑞青, 李永华, 姚雪绒. 西北太平洋俯冲带东北地区壳幔结构研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4): 1080-1085.
- [37] 孙文斌, 和跃时. 东北地区地震活动特征及其与日本海板块俯冲的关系[J]. *地震地质*, 2004, 26(1): 1-11.
- [38] 郭增建, 秦保燕, 李革平. *未来灾害学*[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 438-439.
- [39] 郭增建, 张晓东, 吴瑾冰. 东北深震区: 8级大震的穴位[J]. *内陆地震*, 2002, 16(4): 289-293.
- [40] 刘维贺, 王振亚, 许勤. 东北深地震区的地震活动与中国大陆强震活动相关特征的初步研究[J]. *西北地震学报*, 2000, 22(1): 68-73.
- [41] 傅维洲. 中国东北深震及其构造意义[J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(3): 316-321.
- [42] 马铭志, 刘铁男, 李雪梅, 等. 吉林深震的构造背景和区域地震能量的异常讨论[J]. *地震地磁观测与研究*, 2006, 27 (增刊): 11-16.
- [43] 吴建平. 中国大陆火山监测研究进展[J]. *地震地磁观测与研究*, 2005, 26(5): 1-10.
- [44] 孟宪森, 朱景春, 孙文斌, 等. 东北地区浅源中强震及深震与西太平洋板块俯冲[J]. *东北地震研究*, 1996, 12(2): 12-23.
- [45] 王周元, 何少林, 李勇, 等. 中国中深源地震分布特征及其意义[J]. *西北地震学报*, 2000, 22(3): 288-295.
- [46] 张凤鸣, 张亚江, 许晓艳, 等. 日本海西部—中国东北深震区俯冲运动对东北地区浅源地震的动力作用[J]. *东北地震研究*, 2007, 23(1): 33-39.
- [47] Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research*,

- 2006, 111: B09305. doi: 10.1029/2005JB004066.
- [48] 段永红. 中国东北西太平洋俯冲带火山区地壳上地幔结构研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.
- [49] Lundgren P, Giardini D. Isolated deep earthquakes and the fate of subduction in the mantle[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(8): 15833-15842.
- [50] Shen X Z, Zhou H L. The low-velocity layer at the depth of 620 km beneath Northeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(17): 3067-3075.
- [51] 李春昱, 郭令智, 朱夏, 等. 板块构造基本问题[M]. 北京: 地震出版社, 1986: 10-33.
- [52] Meade C, Jeanloz R. Deep-focus earthquakes and recycling of water into the Earth's mantle[J]. *Science*, 1991, 252: 68-72.
- [53] Kirby S H. Localized polymorphic phase transformations in high-pressure faults and applications to the physical mechanism of deep earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(B13): 13789-13800.
- [54] Kirby S H, Durham W B, Stern L A. Mantle phase changes and deep-earthquake faulting in subducting lithosphere[J]. *Science*, 1991, 252: 216-225.
- [55] Ogawa M. Shear instability in a viscoelastic material as the cause of deep focus earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(B13): 13801-13810.
- [56] Wiens D A. Seismological constraints on the mechanism of deep earthquakes: Temperature dependence of deep earthquake source properties[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 127(1/2/3/4): 145-163.
- [57] Green H W, Zhou Y. Transformation-induced faulting requires an exothermic reaction and explains the cessation of earthquakes at the base of the mantle transition zone[J]. *Tectonophysics*, 1996, 256(1/2/3/4): 39-56.
- [58] Green H W, Marone C. Instability of deformation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 51(1): 181-199.
- [59] Green H W, Jung H. Fluids, faulting, and flow[J]. *Elements*, 2005, 1(1): 31-37.
- [60] Wiens D A, McGuire J J, Shore P J, et al. A deep earthquake aftershock sequence and implications for the rupture mechanism of deep earthquakes[J]. *Nature*, 1994, 372: 540-543.
- [61] McGuire J J, Wiens D A, Shore P J, et al. The March 9, 1994 (M_w 7.6), deep Tonga earthquake: Rupture outside the seismically active slab[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B7): 15163-15182.
- [62] 崔效锋, 谢富仁, 赵建涛. 中国及邻区震源机制解的分区特征[J]. *地震地质*, 2005, 27(2): 298-307.
- [63] 徐志国, 刘瑞丰, 任泉, 等. 中国地震台网中心与美国哈佛大学快速震源机制解的对比[J]. *地震地磁观测与研究*, 2007, 28(4): 1-6.
- [64] Niu F, Kawakatsu H. Complex structure of mantle discontinuities at the tip of the subducting slab beneath northeast China[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1996, 44(6): 701-711.
- [65] Li X, Sobolev S V, Kind R, et al. A detailed receiver function image of the upper mantle discontinuities in the Japan subduction zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 183(3/4): 527-541.
- [66] 周元泽, 臧绍先. 海拉尔和牡丹江台下方地幔结构及有关推论[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(6): 761-773.
- [67] Li X, Yuan X. Receiver functions in northeast China implications for slab penetration into the lower mantle in northwest Pacific subduction zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216(4): 679-691.
- [68] Lebedev S, Chevrot S, van der Hilst R. The 660 km discontinuity within the subducting NW-Pacific lithospheric slab[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 205(1/2): 25-35.
- [69] Hetland E A, Wu F T, Song J L. Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receive functions[J]. *Tectonophysics*, 2004, 386(3/4): 157-175.
- [70] Lei J, Zhao D. P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 2005, 397(3/4): 281-295.
- [71] Shen X Z, Zhou H L, Kawakatsu H. Mapping the upper mantle discontinuities beneath China with teleseismic receiver functions[J]. *Earth Planets Space*, 2008, 60(7): 713-719.
- [72] Nakajima J, Matsuzawa T, Hasegawa A, et al. Three-dimensional structure of V_p , V_s , and V_p/V_s beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B10): 21843-21858.
- [73] Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(11): 22313-22329.
- [74] Zhao D, Xu Y, Wiens D A, et al. Depth extent of the Lau Back-Arc Spreading Center and its relation to subduction processes[J]. *Science*, 1997, 278: 254-257.
- [75] Zhao D, Kanamori H, Negishi H, et al. Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter[J]? *Science*, 1996, 274: 1891-1894.
- [76] Zhao D, Negishi H. The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B5): 9967-9986.

- [77] Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146(1/2): 3-34.
- [78] Kayal J R, Zhao D, Mishra O P, et al. The 2001 Bhuj earthquake: Tomographic evidence for fluids at the hypocenter and its implications for rupture nucleation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (24): 2152, doi: 10. 1029/2002GL015177.
- [79] Nakamura A, Hasegawa A, Ito A, et al. P-wave velocity structure of the crust and its relationship to the occurrence of the 1999 Izmit, Turkey, earthquake and aftershocks [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92 (1): 330-338.
- [80] Mishra O P, Zhao D. Crack density, saturation rate and porosity at the 2001 Bhuj, India, earthquake hypocenter: A fluid-driven earthquake[J]? *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212(3/4): 393-405.
- [81] Zhou H W, Clayton R W. P and S wave travel time inversion for subducting slab under the island arcs of the northwest Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95 (B5): 6829-6851.
- [82] Van der Hilst R D, Engdahl R, Spakman W, et al. Tomographic imaging of subducted lithosphere below northwest Pacific island arcs[J]. *Nature*, 1991, 353: 37-43.
- [83] Tajima F, Fukao Y, Obayashi M, et al. Evaluation of slab images in the northwestern pacific[J]. *Earth Planets Space*, 1998, 50(11): 953-964.
- [84] Creager K C, Jordan T H. Slab penetration into the lower mantle beneath the Mariana and other island arcs of the northwest Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(3): 3573-3589.
- [85] Schmidt M W, Poli S. The stability of lawsonite and zoisite at high pressures: Experiments in CASH to 92 kbar and implications for the presence of hydrous phases in subducted lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 124(1/2/3/4): 105-118.
- [86] Kirby S H. Interslab earthquakes and phase changes in subducting lithosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33 (Suppl): 287-297.
- [87] Ulmer P, Trommsdorff V. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism[J]. *Science*, 1995, 268: 858-861.
- [88] Mosenfelder J L, Marton F C, Ross C R, et al. Experimental constraints on the depth of olivine metastability in subducting lithosphere[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 127(1/2/3/4): 165-180.
- [89] 张立敏, 唐晓明. 西太平洋板块俯冲运动与中国东北深震带 [J]. *地球物理学报*, 1983, 26(4): 331-340.
- [90] Guest A, Schubert G, Gable C W. Stresses along the metastable wedge of olivine in a subducting slab: Possible explanation for the Tonga double seismic layer[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 141(4): 253-267.
- [91] Frohlich C. A break in the deep[J]. *Nature*, 1994, 368: 100-101.