

Sun W B, He Y S. Characteristics of the subduction zone in the western Pacific and its stress state. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3):433~440

西太平洋 Benioff 带的形态及其应力状态

孙文斌¹ 和跃时²

¹ 黑龙江省地震局, 哈尔滨 150090

² 牡丹江地震台, 牡丹江 157009

摘 要 利用 1970~1998 年的地震资料,研究了西太平洋 Wadati-Benioff 带形态,发现各区域 Wadati-Benioff 带的倾角与板块俯冲速度有关,俯冲速度越大,倾角越小;利用 1976~2002 年哈佛大学的震源机制资料,对各区域地震断层类型进行了统计,结果表明:地震断层类型也与俯冲速度有关,俯冲速度大的地区逆断层数量高达 74% 以上,俯冲速度小的地区正断层数量上升到 45% 左右;本文还探讨了西太平洋板块水平向运移的主动力方向,认为该方向为 283°。

关键词 西太平洋俯冲带 Wadati-Benioff 带 震源机制解 板块运动

文章编号 0001-5733(2004)03-0433-08 **中图分类号** P541 **收稿日期** 2003-04-17, 2003-12-28 收修定稿

CHARACTERISTICS OF THE SUBDUCTION ZONE IN THE WESTERN PACIFIC AND ITS STRESS STATE

SUN Wen-Bin¹ HE Yue-Shi²

¹ Seismological Bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150090, China

² Seismic Station of Mudanjiang, Mudanjiang 157009, China

Abstract The distribution of earthquakes in the western Pacific is studied using the hypocenters determined by ISC. from 1970 to 1998. The result shows that the dip angles of the Benioff zone are correlated with velocity of the plate movement in different regions. The dip angles become smaller when the speed becomes larger. Focal mechanisms of events $M_b \geq 5.0$ from 1976 to 2002 are analyzed using the data from Harvard university. It shows that types of faults are related with velocity of plate motion. In the area of higher velocity of plate motion, the number of thrust faults is more than 74% of the total. In the area of smaller one, the proportion of normal faults raises up to about 45%. The western Pacific horizontal movement dominants force direction, which is 283°.

Key words Subduction zone in the western Pacific, Wadati-Benioff zone, Focal mechanism solution, Plate-motion.

1 引 言

20 世纪 60 年代以来,地球科学取得了一系列重

要研究成果,McKenzie 等^[1]、Morgan^[2]与 Le Pichon^[3]先后提出板块构造学说,并以海洋扩张脊、深海沟和转换断层为界,将全球划分为 6 个大板块,从此,板块构造方面的研究有了新的进展,经过综

基金项目 地震科学联合基金项目(100156)。

作者简介 孙文斌,男,1949 年生,1975 年毕业于长春地质学院,主要从事地震活动性及深震研究。E-mail:sunwenb@0451.com

合、概括建立了一个新的理论体系——板块构造学说。

板块构造学说从物质运动的观点解释了板块的形成、扩展、消亡的演化过程,该过程构成了一次地壳运动旋回,现代地壳运动旋回大约进行了一千万年。支持板块构造学说的一个重要观测现象是俯冲带的发现,Wadati^[4]和 Benioff^[5]先后发现了太平洋中深源地震形成的倾斜地震带,后来称之为 Wadati-Benioff 带。随着地震观测技术的发展,台站数量的增加,定位精度的提高,近年来人们对俯冲带的形态、俯冲带的应力状态、俯冲带的物质组成以及俯冲动力学等问题有了更加深入的认识,吴忠良等^[6]研究了千岛—鄂霍次克海地区的地震分布、震源机制及应力状态,宁杰远等^[7]研究了日本海及中国东北地震的深度分布及其应力状态,臧绍先等^[8]研究了西太平洋俯冲带的分布及特征、西太平洋 Wadati-Benioff 带的形态及俯冲带上的应力状态,朱介寿等^[9]研究了东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像,提供了一些新的研究成果,推动了俯冲带研究的深入发展。

俯冲带的准确、精细描述是认识板块运动过程、消亡过程的基础。本文利用国际地震中心 (ISC) 1970~1998 年地震震源参数及哈佛大学 1976~2002 年的震源机制资料,研究西太平洋 Wadati-Benioff 带的展布形态及俯冲带地震震源机制,并探讨西太平洋板块俯冲速度对 Wadati-Benioff 带形态的影响,进而推断西太平洋板块水平向运移的主动力方向。

2 西太平洋 Wadati-Benioff 带的展布形态

西太平洋 Wadati-Benioff 带北起千岛群岛,中经日本及伊豆—小笠原地区,南至玛里亚纳群岛。

2.1 西太平洋 Wadati-Benioff 带展布特征及剖面形态

利用国际地震中心 (ISC) 提供的 1970~1998 年的地震目录, $M \geq 4.0$, 共 20838 条。图 1 是西太平洋俯冲带的地震平面分布,浅源地震 (0~70km) 震级取 $M_s \geq 6.0$,中、深源地震 (71~700km) 震级取 $M_b \geq 4.0$,图中剔除了属于欧亚板块内的地震。

为了准确、精细的描述剖面形态,编制了俯冲剖面投影计算、作图程序,该程序可以给出任意方向剖面的地震分布。以海沟某一点为剖面“固定端点”,沿板块俯冲倾向的剖面中,只有垂直于海沟走向的地震剖面的倾角最大,所以我们通过调整“移动端

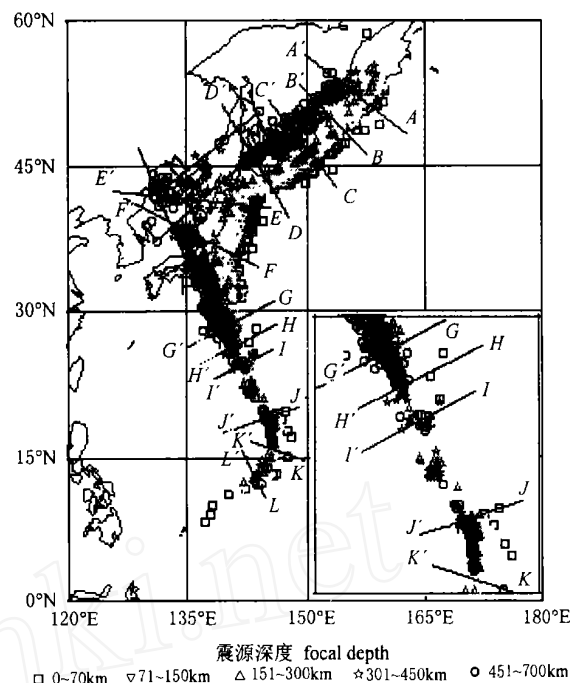


图 1 西太平洋俯冲带地震分布、剖面位置图

A-A, B-B, ..., K-K 为剖面位置。

Fig. 1 Seismic profile and position of cross sections of the subduction zone in the western Pacific region

A-A, B-B, ..., K-K is profile position.

点”经纬度的办法,寻找地震剖面的最大倾角,并以此来确定垂直于海沟走向的地震剖面,表 1 是追踪 E-E 剖面最大倾角的计算过程,其他剖面类同。由于浅部俯冲带具有弯曲形态,为减少这部分数据对倾角计算的影响,取地震深度 $h > 70\text{km}$ 的数据,采用最小二乘法计算 Wadati-Benioff 带剖面倾角。

表 1 E-E 剖面最大倾角追踪数据

Table 1 The tracing data of max dip in E-E section

$N_1/(\circ)$	$E_1/(\circ)$	$N_2/(\circ)$	$E_2/(\circ)$	$\theta/(\circ)$
41.9	130.0	41.4	143.8	27.36
41.9	130.0	41.2	143.8	27.78
41.9	130.0	41.0	143.8	28.06
41.9	130.0	40.9	143.8	28.19
41.9	130.0	40.8	143.8	28.14
41.9	130.0	40.6	143.8	28.12
41.9	130.0	40.4	143.8	27.86

注: E_1 和 N_1 为固定端点经纬度, E_2 和 N_2 为移动端点经纬度, θ 为剖面倾角。

图 2 是西太平洋俯冲带剖面图,震级取 $M \geq 4.0$,保留了欧亚板块内的地震。可以看出,西太平洋 Wadati-Benioff 带具有多样化的展布形态,既有整体的连续性,又有区域的差异性。

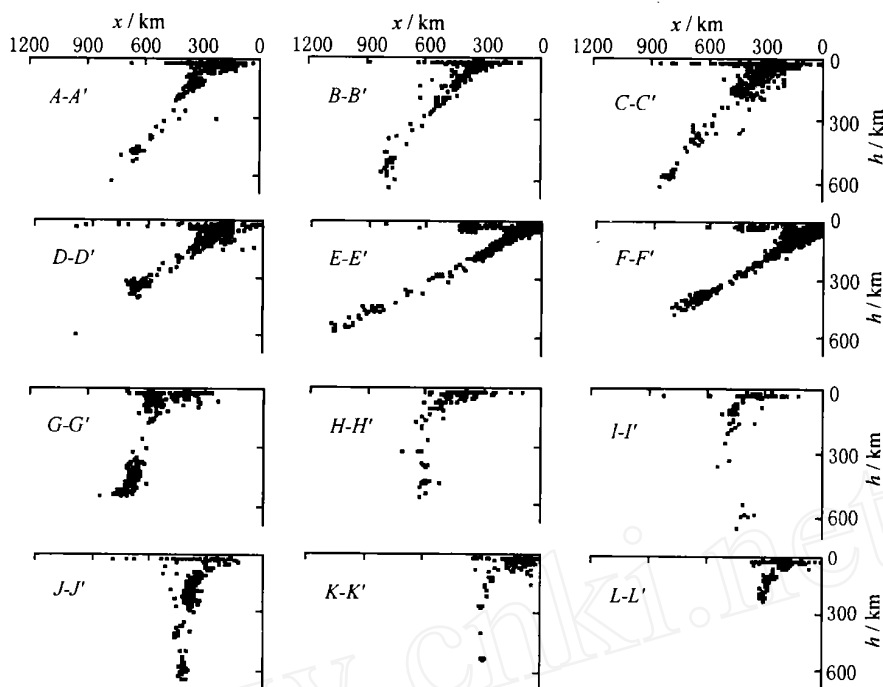


图2 西太平洋俯冲带沿倾向投影地震剖面图

 x 为剖面的水平距离.Fig.2 Focal section drawing project along dip direction of the subduction zone in the western Pacific
 x is distance.

千岛群岛 W-B 带较为规则,呈北东走向,俯冲带倾向 310° ,俯冲倾角由东北端的 47° 向西南减缓到 31° (表 2),平均俯冲倾角 45° . 千岛群岛各剖面形态相近,深部区域 470km 以下倾角变陡(图 2 中 $B-B'$ 、 $C-C'$), $D-D'$ 剖面受日本海俯冲带向西拉动的影响,倾角变缓. 北海道岛浅源地震呈北东东走向,俯冲带倾向 322° ,俯冲倾角 36° ,北海道岛及其附近地区受日本海俯冲带向西强烈俯冲影响,浅源地震分布走向变化较大,由千岛群岛的北东向到该区转为近东西向. 日本海区 W-B 带比较平直(图 2 中 $E-E'$ 、 $F-F'$),走向近南北,俯冲带倾向 283° ,平均俯冲倾角 29° ,其中 $E-E'$ 剖面是西太平洋 W-B 带倾角最小的剖面,倾角为 28° ,也是全球最长的俯冲带,长约 1138km . 伊豆—小笠原地区受日本海俯冲带向西俯冲拉动及菲律宾海扩张作用的影响,W-B 带形变明显,整体呈北宽南窄的楔形状,W-B 带倾向变化较大,倾角由北部的 63° 向南变为接近直立. 西部区域深源地震构成的 W-B 带没有向西展开,而是向东折,在 25°N 附近深源地震震中位置向东越过了中源地震的震中位置(图 1),图 2 的 $I-I'$ 剖面显示深部区域 W-B 带倾向发生反转,由上部向

西倾而转为下部向东倾, 600km 左右的深震相对 400km 左右的深震其水平距离向东移动达 150km . 玛里亚纳 W-B 带整体构成向东凸出形态,W-B 带走向变化较大, $J-J'$ 、 $K-K'$ 剖面 200km 以下的 W-B 带出现直立形态,图 2 的 $J-J'$ 剖面也显示深部 W-B 带倾向发生反转,由上部向西倾而转为下部向东倾, 600km 左右的深震相对 400km 左右的深震其水平距离向东移动约 60km .

2.2 西太平洋俯冲带前端形态

2.2.1 倾角特征

千岛群岛 ($h > 400\text{km}$) W-B 带形成的前端倾角有向下弯曲的趋势,其前端倾角均大于 45° ,中部的 $B-B'$ 剖面前端倾角为 59° ;日本海 W-B 带形成的前端倾角则出现了变缓的趋势, $h > 400\text{km}$ 的 $E-E'$ 、 $F-F'$ 剖面前端倾角为 24° , $h > 500\text{km}$ 的 $E-E'$ 剖面前端倾角变缓为 17° ;伊豆—小笠原及玛里亚纳 $h > 400\text{km}$ W-B 带的 $H-H'$ 、 $I-I'$ 、 $J-J'$ 、 $K-K'$ 剖面,其前端倾角接近直立. 西太平洋俯冲带前端倾角特征决定了深部俯冲带的消亡方式,前端倾角大于 45° 时,俯冲带以垂直消亡方式为主;前端倾角小于 45° 时,俯冲带以水平消亡方式为主.

表 2 西太平洋俯冲带基本参数表

Table 2 Parameters of profile for earthquakes in the western Pacific region

剖面名称	剖面坐标				w/km	$\varphi/(\text{°})$	h/km	$\theta/(\text{°})$	$v/(\text{cm a}^{-1})$
	$\phi_{N1}/(\text{°})$	$\phi_{E1}/(\text{°})$	$\phi_{N2}/(\text{°})$	$\phi_{E2}/(\text{°})$					
A-A	49.89	160.80	54.61	152.66	200	300	632	47	8.0~9.0
B-B	46.21	157.66	53.64	148.94	200	310	675	47	8.0~9.0
C-C	43.39	153.17	50.03	147.50	200	319	620	41	8.0~9.0
D-D	40.90	146.97	51.82	139.31	200	325	603	31	8.0~10
E-E	40.90	143.80	41.90	130.00	200	275	567	28	8.0~10
F-F	35.66	141.63	38.68	133.56	200	291	492	30	8.0~10
G-G	30.80	145.95	25.91	134.50	100	293	554	63	4.5~5.8
H-H	28.51	146.20	24.50	136.57	100	262	572	64	4.5~5.8
I-I	25.95	145.74	22.80	137.94	100	248	650	直立	4.5~5.8
J-J	20.05	148.92	17.50	139.27	100	255	654	直立	2.3~2.8
K-K	15.10	148.06	16.12	145.04	100	289	601	直立	2.3~2.8
L-L	10.84	144.91	13.70	143.40	100	322	245	53	2.3~2.8
M-M	37.25	131.32	47.16	144.75	100				
N-N	50.76	144.15	41.93	130.99	100				
O-O	30.32	139.56	42.66	134.63	100				
P-P	29.79	137.63	42.87	131.20	100				

注: w 为投影宽度, φ 为剖面方位, h 为震源深度, θ 为剖面倾角, v 为俯冲速度.

2.2.2 前缘弧特征

西太平洋俯冲带在日本海一带向西凸出,在中国东北地区形成了深震前缘弧,在前缘弧的东北、东南两侧没有记录到 $h > 450\text{km}$ 的深震,出现了较宽的空白区;在玛里亚纳向东凸出的前缘弧两侧也没有记录到 $h > 450\text{km}$ 的深震,南北侧出现了各约 200km 的空白区(图 1).

2.2.3 空白条带特征

西太平洋俯冲带在前端倾角变化较大的部位,

出现了深部空白条带,如 C-C 剖面倾角为 41° , D-D 剖面倾角为 31° ,其间倾角变化较大,沿 NE 走向投影的 M-M、N-N 剖面地震分布显示:在 C-C 与 D-D 剖面之间的 49°N 、 146°E 附近,深部区域出现了明显的地震空白条带;在 40°N 及 31°N 附近倾角也有明显变化,沿 NW 走向投影的 O-O、P-P 剖面地震分布也显示出在 40°N 及 31°N 附近出现明显的地震空白条带(图 3). 有关前缘弧两侧 的深震空白区以及深部地震空白条带的成因有待进一步深入研究.

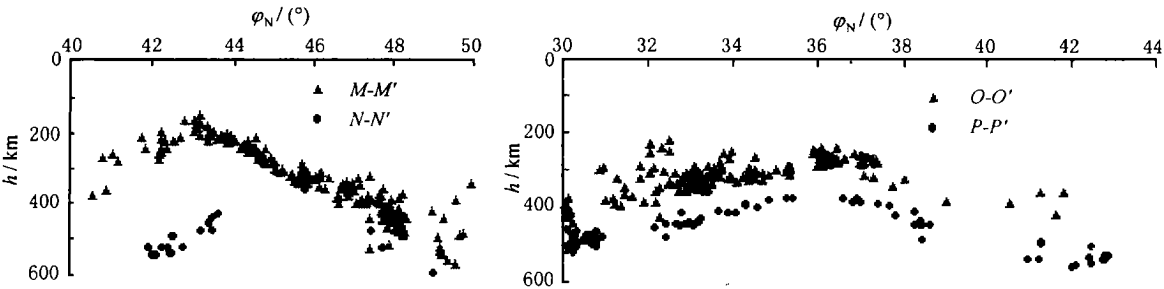


图 3 西太平洋俯冲带沿走向投影地震剖面图

Fig. 3 Focal section drawing project along strike of the subduction zone in the western Pacific

2.3 西太平洋板块俯冲过程中地震能量释放特征

1900~1998 年西太平洋俯冲带发生的 $M \geq 7.0$ 级浅源大地震(全球大地震目录)统计结果表明,浅源大地震占西太平洋俯冲带浅、中、深源地震总数的 84%;在本州—北海道一带($36^\circ \sim 46^\circ\text{N}$)发生的浅源

大地震占西太平洋俯冲带浅源大地震总数的 61%,其中 $M_s \geq 8.0$ 级的浅源大地震占西太平洋俯冲带的 63%. 1964~1998 年西太平洋俯冲带发生的 $M \geq 6.0$ 级地震(ISC)统计结果也表明在本州—北海道一带($36^\circ \sim 46^\circ\text{N}$)发生的浅源地震占西太平洋俯冲

带浅源地震总数的 59%。不同时段、不同资料统计结果表明本州—北海道地区是西太平洋俯冲带地震频度最高、能量释放最强的区段。

3 西太平洋板块俯冲带的震源机制

不同研究机构因使用数据的差异导致地震机制解的计算结果也存在一定的差异,为避免这方面的影响,统一使用 1976~2002 年哈佛大学提供的 3613 条地震机制解,利用统计分析方法研究西太平洋俯冲带应力场分布特征。

3.1 西太平洋 W-B 带地震机制解 P、T 轴方位

西太平洋板块会聚边界 5 级以上浅源地震(0~70km) P 轴方位呈现与海沟相垂直的特点,统计表明 P 轴方位在 35°~60°N 之间集中性较好。千岛群岛 49°~60°N 之间 P 轴优势方位峰值为 123°,优势方位变化范围为 125°±5°,在日本北海道岛 43°~48°N 之间 P 轴优势方位峰值为 128°,优势方位变化范围为 130°±10°;在日本 35°~42°N 之间 P 轴优势方位峰值为 109°,优势方位变化范围为 112°±5°;在伊豆南 30°~35°N 之间 P 轴优势方位峰值不明显, P 轴优势方位变化范围为 87°~96°,在 30°N 以南至玛里亚纳群岛 P 轴方位变化范围较大;浅源地震的 T 轴和海沟走向相垂直的特点也很明显。

西太平洋 W-B 带 5 级以上中源地震(70~300km) P、T 轴方位也具有与海沟相垂直的特点,如在千岛群岛、日本、玛里亚纳群岛及伊豆群岛 P、T 轴方位分布与俯冲方向也表现出一致性,反映出 P、T 轴方位分布和板块俯冲方向有关。

西太平洋 W-B 带 5 级以上深源地震(300~700km)

在 30°~50°N 之间的深源地震 P 轴方位主要分布在 80°~120°范围内,并有向中国东北深震区收敛的趋势;在千岛群岛、日本海深源地震区部分 T 轴方位接近于俯冲带走向,部分接近于俯冲带倾向,伊豆、小笠原及玛里亚纳深源地震 T 轴与俯冲带倾向一致性较好。

3.2 西太平洋 W-B 带地震机制解断层性质

西太平洋板块向欧亚板块俯冲所形成的、逆断层机制地震大多沿海沟走向分布在一个狭窄的条带内,以浅震为主。千岛群岛地区逆断层机制地震数量占该区地震总数的 74%(表 3),日本海区逆断层机制地震数量占该区地震总数的 83%,伊豆—小笠原地区逆断层机制地震数量占该区地震总数的 50%,玛里亚纳地区逆断层机制地震数量占该区地震总数的 51%。逆断层机制地震的数量反映了区域挤压应力场的活动水平,日本海区板块俯冲速度最大为 8~10cm/a,其逆断层机制地震数量也最多占 83%,说明这一地区是西太平洋俯冲带挤压作用最强烈的地区(见图 4)。

正断层机制的地震主要分布在两个区段,一是沿海沟走向分布在 0~200km 深度区段内,比逆断层机制的地震条带略宽,主要是由弯曲凸面的板块表层处于伸张状态而产生;二是分布在深源地震带的底部弯曲部位,如千岛群岛在 49°~54°N 之间有一北东向分布的深源地震正断层条带,伊豆—小笠原及玛里亚纳地区深源地震正断层机制的地震数量也比较集中。正断层机制的地震数量反映了区域引张应力场的活动水平,属正断层机制的地震数量较多的区域也是板块俯冲速度较低的区段,如伊豆—小笠原及玛里亚纳地区板块俯冲速度较低,而且属正断层机制的地震数量也较多。

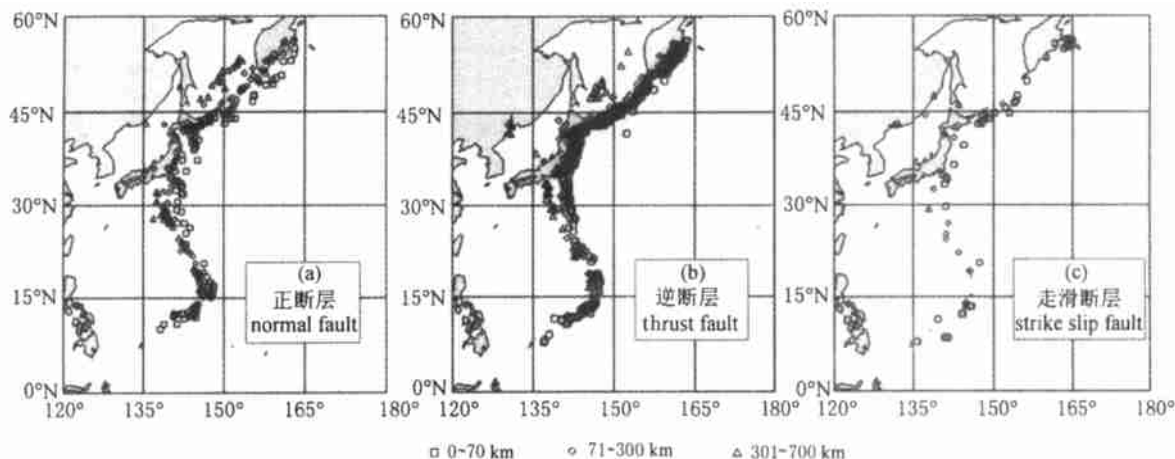


图 4 西太平洋俯冲带震源机制解断层类型分布

Fig. 4 The pattern of seismic fault on the subduction zone in the western Pacific

本州—北海道岛 ($36^{\circ} \sim 46^{\circ} \text{N}$) 是西太平洋俯冲带地震频度最高、能量释放最强的区段, 在本州南侧 35°N 附近、北海道岛东侧 45°N 附近也是走滑断层机制的地震分布比较集中的地带。这两个条带的走滑地震断层可能是西太平洋板块在本州—北海道地区向西强烈俯冲作用的结果, 其构造痕迹显示了板块

运动的主流方向。在玛里亚纳岛向东凸进区的两侧, 也分布少量的走滑地震断层。

3.3 西太平洋 W-B 带应力状态

千岛群岛地区主压应力轴向变化接近于俯冲方向, 反映该区 W-B 带主要受挤压应力所控制 (图 5 中 C-C')。日本海区主压应力轴向变化与板块俯冲

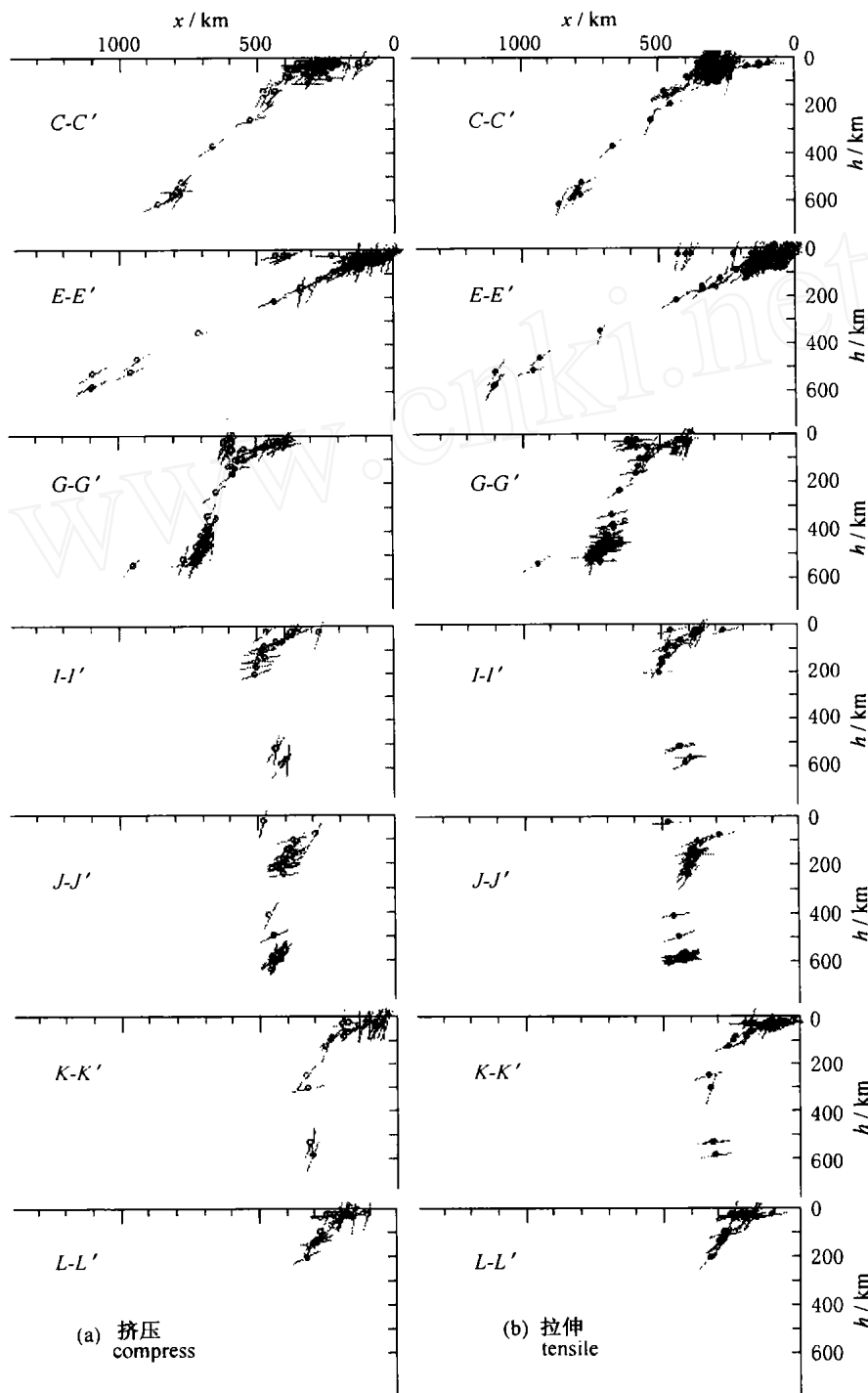


图 5 西太平洋俯冲带应力状态剖面图

(a) 挤压应力; (b) 拉伸应力。

Fig. 5 The stress state of earthquakes in the profile on the subduction zone in the western Pacific region

表 3 各区域断层类型随深度百分比(%)分布
Table 3 Pattern of seismic fault with depth

深度(km)	千岛群岛			日本海区			伊豆—小笠原			马里亚纳		
	T	N	SS	T	N	SS	T	N	SS	T	N	SS
0~100	70	9	4	77	12	2	40	15	2	39	23	3
101~200	2	6	0	2	3	0	6	3	1	9	11	2
201~300	0	1	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0
301~400	0	0	0	1	0	0	1	3	0	1	0	0
401~500	0	1	0	0	0	0	2	18	0	0	1	0
501~600	1	4	0	2	0	0	1	7	0	0	8	0
601~700	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

注:T为逆断层;N为正断层;SS为走滑断层.

方向一致性很好,反映该区 W-B 带主要受挤压应力所控制(图 5 中 $E-E$). 伊豆—小笠原地区主压应力轴向变化接近于板块俯冲方向,反映该区 W-B 带主要受挤压应力所控制(图 5 中 $G-G$ 、 $I-I$). 马里亚纳地区在深部主压应力轴向变化更接近于板块俯冲方向,反映该区 W-B 带主要受挤压应力所控制(图 5 中 $J-J$ 、 $K-K$ 、 $L-L$). 小笠原及马里亚纳地区在 400km 以下深部地区主张应力轴接近水平,可能反映深部区域 W-B 带处于一种水平引张的应力环境.

对比图 2 的 Wadati-Benioff 带地震剖面形态与图 5 主压(张)应力倾角剖面形态,可见有的整体一致性较好,有的局部一致性较好,说明主压(张)应力轴方向变化与俯冲板块形态有关.

4 板块俯冲速度对 Wadati-Benioff 带形态、断层性质的影响

数据表明,西太平洋板块俯冲速度是影响 Wadati-Benioff 带形态的主要因素,俯冲速度大的地区,Wadati-Benioff 带倾角小,如西太平洋板块在日本海一带俯冲速度最大为 8~10cm/a,而俯冲倾角最小平均为 29°,在日本海形成了 Wadati-Benioff 带的隆起;俯冲速度小的地区,Wadati-Benioff 带倾角大,如马里亚纳一带俯冲速度最小为 2.3~2.8cm/a,俯冲倾角最大,在 200 km 以下 W-B 带接近直立,说明 W-B 带倾角和板块俯冲速度呈现相关性. 这种特征反映了俯冲板块的动力过程,板块俯冲速度越大,板块水平方向运动的动力越强,因而俯冲倾角越小;板块俯冲速度越小,板块水平方向运动的动力越弱,受负浮力^[10]的影响,俯冲板块向下弯曲,导致倾角变大. 由此可知,西太平洋 W-B 带的展布形态主要受板块俯冲速度所控制. 板块俯冲速度也决定了地震断层类

型分布,板块俯冲速度与逆断层数量呈现正相关,与正断层数量呈现负相关(图 6).

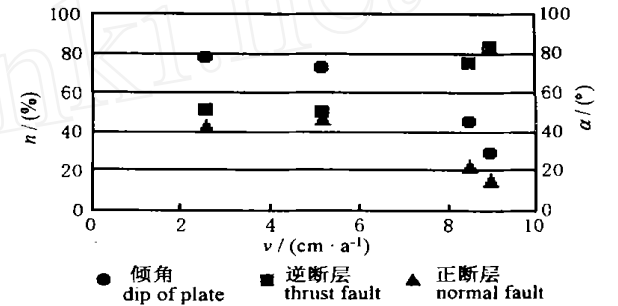


图 6 板块俯冲速度与倾角、断层类型关系
n 为断层数量.

Fig. 6 The velocity of plate moving relative with dip of plate and type of fault
n is number of fault.

5 结论与讨论

本文利用西太平洋俯冲带剖面倾角、地震断层类型数据,分析了与板块俯冲速度的关系,主要得出以下结论:

5.1 板块俯冲速度与俯冲倾角呈现负相关,与逆断层数量呈现正相关,与正断层数量呈现负相关,因此,可以认为,影响西太平洋俯冲带的形态变化与地震断层类型数量分布差异的主要因素是板块俯冲速度.

5.2 日本海俯冲带位处西太平洋俯冲带向西凸进的前端,地震活动频度最高、能量释放最强,俯冲倾角最小,逆断层数量最多,日本海俯冲带北侧的北海道岛及南侧的本州岛走滑断层分布相对集中. 这些特征表明西太平洋板块在日本海区形成了以水平分量为主的向西凸进区,成为西太平洋板块水平向移动的主流,日本海俯冲带的倾向(283°)代表了西太

平洋板块水平向运移的主动方向。

5.3 俯冲带前端特征是研究俯冲带消亡方式、建立区域板块动力模型的基础。日本海俯冲带 $h > 500\text{km}$ 深源地震形成的前端倾角为 17° , 同上部中、深源地震构成的倾斜带相比有变平缓的趋势, 反映了向前运移的“无震”俯冲带可能更加接近水平, 由此认为, 日本海俯冲带以水平消亡为主。Fukao 等^[11] 和 Van der Hilst^[12] 等认为日本海俯冲带前端停留在 660km 间断面之上, 水平展布约 1000km , 应该在中国东北下部有明显的显示; 周元泽等^[13] 发现牡丹江地震台和海拉尔地震台下方地幔间断面结构有着不同特征, 海拉尔台下方 410 、 520 、 660km 间断面相当清楚, 更接近于全球的平均结果。而牡丹江台下方结果与海拉尔台下方结果不太一样, 520km 间断面较弱, 在 660km 间断面的强度也比海拉尔台的要弱, 并有一定的倾斜, 认为可能反映了俯冲带的影响。深部俯冲带的这种水平运移对上覆壳幔产生一定的影响, 东北深震与华北浅震相关活动的特征^[14] 印证了这种影响作用; 吉林长白山火山群、黑龙江镜泊湖火山群以及五大连池等火山群的火山活动也可能与俯冲带在上地幔水平运移有关。

千岛群岛、小笠原以及玛里亚纳俯冲带因前端倾角明显大于 45° , 俯冲带以垂直消亡为主, 深部俯冲带的这种垂直消亡过程对上覆壳幔影响很小, 沿俯冲方向没有火山活动^[15], 也极少有 M_s 6.0 级地震发生。

5.4 小笠原及玛里亚纳地区在 400km 以下深部区域 W-B 带倾向发生反转以及主张应力轴接近水平的现象,可能是菲律宾海深部区域扩张作用的结果。

臧绍先教授对本文提出宝贵的修改意见, 本课题得到钱家栋研究员、刘瑞丰博士的热情指导和支持, 在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] McKenzie D P, Parker R L. North Pacific: an example of tectonics on sphere. *Nature*, 1967, **216**: 1276 ~ 1280
- [2] Morgan W J. Rises, trenches, great faults and crustal blocks. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**: 1959 ~ 1982
- [3] Le Pichon X. Seafloor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**: 3661 ~ 3697
- [4] Wadati K. On the activity of deep-focus earthquakes in the Japan islands and neighborhoods. *Geophys. Mag.*, 1935, **8**: 305 ~ 325
- [5] Benioff H. Orogenesis and deep crustal structure: additional evidence from seismicity. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1954, **65**: 385 ~ 400
- [6] 吴忠良, 臧绍先. 千岛—鄂霍次克海地区的地震分布、震源机制及应力状态. 地震地质, 1989, **11**(2): 85 ~ 95
Wu Z L, Zang S X. Distribution and focal mechanism of earthquakes and stress state on Kuril islands and sea of Okhotsk. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1989, **11**(2): 85 ~ 95
- [7] 宁杰远, 臧绍先. 日本海及中国东北地震的深度分布及其应力状态. 地震地质, 1987, **9**(2): 49 ~ 61
Ning J Y, Zang S X. The distribution of earthquakes and stress state in the Japan sea and the northeast China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1987, **9**(2): 49 ~ 61
- [8] 臧绍先, 宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义. 地球物理学报, 1996, **39**(2): 188 ~ 202
Zang S X, Ning J Y. Study on the subduction zone in western Pacific and its implication for the geodynamics. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1996, **39**(2): 188 ~ 202
- [9] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像. 地球物理学报, 2002, **45**(5): 646 ~ 664
Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal seas. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2002, **45**(5): 646 ~ 664
- [10] 臧绍先, 宁杰远. 俯冲带的负浮力及其影响因素. 地球物理学报, 1994, **37**(2): 174 ~ 183
Zang S X, Ning J Y. The negative buoyancy of the subduction zone and its affecting factors. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1994, **37**(2): 174 ~ 183
- [11] Fukao Y, Obayashi M, Inoue H, et al. Subducting slab stagnant in mantle transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**: 4809 ~ 4822
- [12] Van der Hilst R D, Engdahl E R, Spakman W, et al. Tomographic imaging of subducted Lithosphere below northwest Pacific island arcs. *Nature*, 1991, **353**: 37 ~ 43
- [13] 周元泽, 臧绍先. 牡丹江和海拉尔台下方地幔间断面结构及推论. 地球物理学报, 2001, **44**(6): 761 ~ 773
Zhou Y Z, Zang S X. Mantle discontinuities beneath the stations MDJ and HIA and its implications. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2001, **44**(6): 761 ~ 773
- [14] 孙文斌, 和跃时, 李英波. 日本海区板块俯冲与华北地震. 地震学报, 1985, **7**(1): 33 ~ 44
Sun W B, He Y S, Li Y B. Subduction of the Pacific plate in the sea of Japan and earthquakes of northeastern China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1985, **7**(1): 33 ~ 44
- [15] 洪汉净, 于泳, 郑秀珍等. 全球火山活动分布特征. 地学前缘, 2003, **10**(增刊): 11 ~ 16
Hong H J, Yu Y, Zheng X Z, et al. Global volcano distribution: pattern and variation. *Earth Science Frontiers*, 2003, **10**(Suppl.): 11 ~ 16