

Pdif 波在中国 CDSN 台站的运动学特征^①

许健生^{1,2}, 隗永刚^{1,2}, 张淑珍^{3,4}

(1. 中国地震局地球物理所北京地震台, 北京 100095; 2. 北京白家疃地球科学国家野外科学观测研究站, 北京 100095;
3. 甘肃省地震局兰州观象台, 甘肃兰州 730046; 4. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃兰州 730046)

摘要:利用中国数字地震台网(简称 CDSN, 下同)11 个台的宽频带长周期(VLP)数字记录对 1990—2012 年间的 124 个极远震记录进行了分析处理, 在震中距 $100.0^{\circ} \sim 179.0^{\circ}$ 之间, 获取了 CDSN11 个台站的 Pdif 波的震相数据, 得到了 Pdif 波在地球核幔界面上衍射的运动学特征和《Pdif 波走时表》。所得结果大大拓展了 Pdif 的记录范围, 在 $144.0^{\circ} \sim 179.0^{\circ}$ 之间弥补了《IASPEI1991 地震波走时表》的缺失, 为更大范围内的 Pdif 震相分析提供了参考标准, 有助于提高中国地震台网的地震分析水平和积累震相分析经验, 以及对地球核幔边界物理性质的认识。

关键词:极远震; Pdif 波走时表; 运动学特征; 中国数字地震台网(CDSN)

中图分类号: P315.31 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)03-0610-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0610

The Kinematic Characteristics of Pdif -waves at CDSN Stations

XU Jian-sheng^{1,2}, WEI Yong-gang^{1,2}, ZHANG Shu-zheng^{3,4}

(1. Beijing Seismic Station of Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100095, China;

2. Beijing Baijiatuan Earth Science State Geophysical Observatory, Beijing 100095, China;

3. Lanzhou Observatory of Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730046, China;

4. Lanzhou National Geophysical Observatory, Lanzhou Gansu 730046, China)

Abstract: The traveling-time curve of the P-wave ends at an epicentral distance (Δ) of about 100° . At epicentral distances larger than 100° ($\Delta > 100^{\circ}$), P-waves pass through the core-mantle boundary (CMB) and start to be diffracted around the core with speeds of ~ 13.7 km/s. The diffracted wave is termed Pdif.

Due to the sharp decrease of the P-wave velocity at the core-mantle boundary from 13.7 km/s to ~ 8.0 km/s, the short period P-wave is strongly refracted into the core with speeds of ~ 8.0 to 11.2 km/s. This refracted wave is termed PKP (PKPab, PKPbc and PKPdf).

The Pdif wave was first recognized on seismogram by Denmark seismologist Lehmann in 1936. The traveling-time curve of the Pdif wave was well defined at distances of 105° to 130° by seismologists Jeffres and Bullen in 1940, using the seismic data from 1930 to 1940, for earthquakes with depths from 33 to 794 km. In 1991, the traveling-time curve of the Pdif wave was updated by Kennett^[6] for distances of 100° to 144° and depths of 0, 100, 300, and 600 km using seismic data from 1964 to 1987.

In the China Digital Seismograph Network (CDSN), the Pdif wave of strong earthquakes, whose distances range from about 100.2° to 179.0° , may be observed so that the Pdif phase can be analyzed perfectly. We collected and analyzed 124 broad-band seismic recordings at the 11 CDSN stations during a period of 1990 to 2012, from very-far-field events with magnitudes of ~ 6.0

① 收稿日期: 2013-04-23

基金项目: 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项项目(DQJB11B07)

作者简介: 许健生(1954—), 男, 甘肃武威人, 研究员, 主要从事地震观测和台站管理工作。E-mail: XJS54105@sohu.com

to 8.8 and depths ~ 4 to 631.3 km. The kinematic characteristics of the Pdif phase are summarized as the following:

(1) There is a good linear relationship between traveling-times and distances, and a systematic bias exists between our results and those of the IASPEI 1991 table; for example, the difference reaches 11.2 s at $\Delta=100^\circ$, and 17.0 s at $\Delta=144^\circ$.

(2) For $\Delta>100^\circ$, the Pdif arrival time is about 4 min and 10.7 s to 29.8 s earlier than the PKP wave, and the time difference between the Pdif and PKP waves with distance could be formulated as:

$$T_{\text{PKP-Pdif}} = -2.835\Delta + 550.7 \quad (h \leq 100 \text{ km}) \quad (100.0^\circ \text{ to } 179.0^\circ).$$

(3) The Pdif wave is about 4 min and 5.4 s to 6 min and 42.0 s earlier than the PP wave, and the time difference between the Pdif and PP waves with distance could be formulated as:

$$T_{\text{PP-Pdif}} = 0.014\Delta^2 + 5.562\Delta - 163.7 \quad (h \leq 100 \text{ km}) \quad (100.0^\circ \text{ to } 179.0^\circ).$$

(4) For deep-focus earthquakes, the diffracted depth phases, pPdif and sPdif, may be observed. The time difference between pPdif-Pdif and sPdif-Pdif is similar to pP-P and sP-P.

A time table, called the Traveling-time Table of the Pdif Wave at CDSN Stations, is proposed. The relationship between traveling-time and epicenter distance for Pdif is suggested to be:

$$T_{\text{Pdif}} = 4.573\Delta + 367.4 \quad (h \leq 100 \text{ km}) \quad (100.0^\circ \text{ to } 179.0^\circ).$$

The time table proposed in this study is a useful complement to the IASPEI1991 table, and it could be used as a standard of Pdif wave analysis. It will be very useful for enhancing the earthquake analysis ability and accumulating analysis experience and for understanding physical characteristics of the mantle-core boundary.

Key words: very-far-field earthquakes; traveling-time table of Pdif waves; kinematic characteristics; China Digital Seismic Network

0 引言

1936 年丹麦女地震学家莱曼首先在地震图上识别出了地球核幔界面上传播的衍射波 Pdif。1940 年由英国地震学家杰弗里斯和澳大利亚地震学家布伦用 1930—1940 年的观测资料给出了地震波在地球内部传播的走时表(简称 J—B 表,下同),给出了震中距 $105^\circ \sim 130^\circ$,震源深度 33~794 km 的 Pdif 波走时。1991 年国际地震学和地球内部物理学联合会(简称 IASPEI)用 1964—1987 年的观测资料给出了《IASPEI1991 地震波走时表》(简称 IASPEI1991 表,下同),该走时表给出了震中距 $100^\circ \sim 144^\circ$,震源深度分别在 0、100、300 和 600 km 的 Pdif 波走时表。

在中国大陆虽然从上个世纪 50 年代就有 SK 型等中长周期地震仪开始观测,但国内鲜有文献讨论 Pdif 波的运动学特征。直到 20 世纪 80 年代随着 763 长周期地震仪台网在中国大陆开始观测,赵荣国^[1]、郭瑛^[2]和唐燕娟等^[3]开始讨论 Pdif 波在北京和其它地震台 763 长周期地震仪器上的记录特征(模拟记录),但都没给出 Pdif 波在震中距 $100^\circ \sim$

180° 间的完整走时表。从 1983 年起中国地震局与美国地质调查局合作陆续建成了中国数字地震台网(简称 CDSN,下同)的 11 个数字化地震台。CDSN 台站的数字地震仪具有宽频带、大动态范围和高线性度等优越性。CDSN 台站位置如图 1 所示,台站情况见表 1。本文使用 CDSN 台站 1990—2012 年间记录到的 124 个极远震资料进行分析处理,研究 Pdif 震相的运动学特征,并给出比 IASPEI1991 表范围扩展的 Pdif 走时表。

1 资料

所用资料全部来自 CDSN 台站在 1990—2012 年间记录到的 124 个极远震宽频带数字记录,地震参数取自美国地震学合作研究协会(简称 IRIS,下同)发布的地震目录。发震时间和地震图上标注的时间均为世界标准时。所用地震目录见表 2。

表 2 中给出的震中距为 IRIS 的测定结果,可见目前 CDSN 台站记录 Pdif 波的震中距范围是 $100.0^\circ \sim 179.0^\circ$ 。震级范围为 6.0~8.8 级,震源深度范围为 4.0~631.3 km。震中主要分布在中美洲和

南美洲的墨西哥、秘鲁和智利等地区(图 1)。

表 1 CDSN 台站信息和观测数据情况

Table 1 The information of Pdif wave and CDSN stations

台站名称	台站代码	高程/m	观测室条件	地质基础	地震计型号	所用资料起止时间	记录到 Pdif 个数
北京台	BJT	198	山洞	石灰岩	STS-1/GS-13	1990—2012 年	77
恩施台	ENH	487	地表	石灰岩	STS-1/STS-2	1993—2012 年	29
昆明台	KMI	1 952	山洞	石灰岩	STS-1/STS-2	1990—2012 年	29
琼中台	QIZ	230	地表	花岗岩	STS-2	1993—2012 年	40
佘山台	SSE	15	山洞	安山岩	STS-1/STS-2	1993—2012 年	37
乌鲁木齐台	WMQ	901	地下 6 m	沙岩	STS-1/STS-2	1993—2012 年	59
海拉尔台	HLR	610	山洞	安山岩	STS-1/GS-13	1990—2012 年	60
牡丹江台	MDJ	250	山洞	花岗岩	STS-1/STS-2	1991—2012 年	58
拉萨台	LSA	3789	山洞	花岗岩	STS-1/STS-2	1993—2012 年	63
西安台	XAN	630	山洞	花岗岩	STS-1/STS-2	1994—2012 年	48
兰州台	LZH	1 552	地表	红沙岩	STS-1	1990—2000 年	26

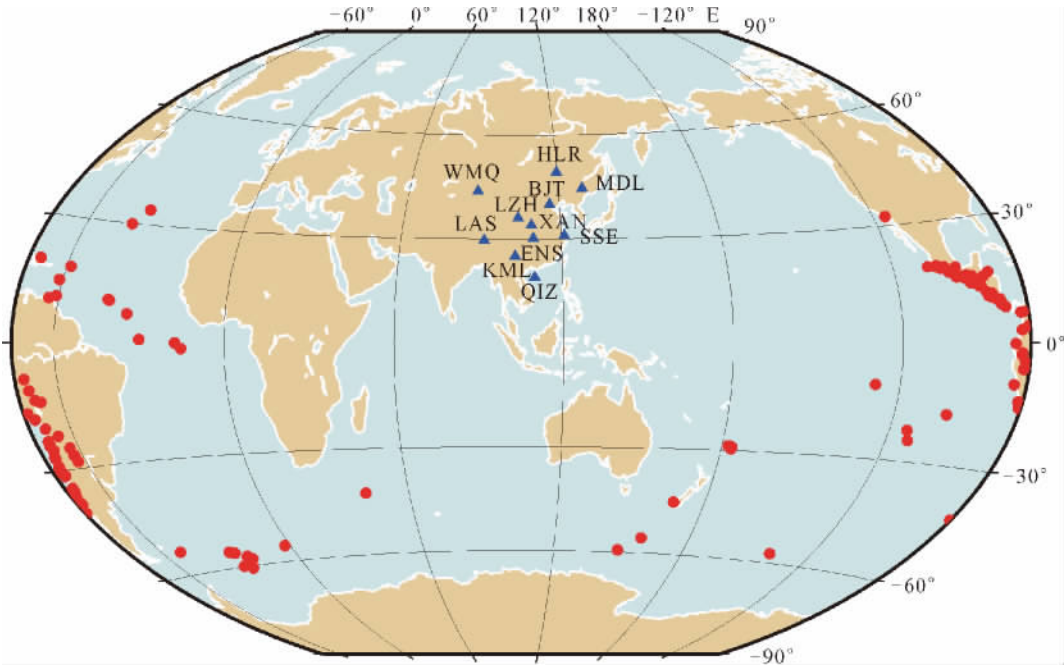


图 1 CDSN 台站位置和震中分布图

Fig. 1 Distribution of earthquake epicenters and CDSN stations

表 2 地震目录

Table 2 The catalogue of used earthquakes

序号	日期	发震时刻 (GMT)	纬度 /(°)	经度 /(°)	地点	深度 /km	震级 /M	记录到 Pdif 台站个数	震中距 范围/(°)
1	1990-03-25	132255.6	+9.92	-84.81	哥斯达黎加	22.2	7.3	2	117.2~133.5
2	1990-07-14	055425.4	0.00	-17.38	阿森松群岛北	11.1	6.6	4	114.8~121.9
3	1990-09-02	042648.0	-0.14	-80.28	厄瓜多尔近海	14.2	6.6	2	128.1~144.0
4	1990-10-17	143013.1	-10.97	-70.78	秘鲁巴西交界	598.8	7.0	1	154.5
5	1991-04-05	041949.5	-5.98	-77.09	秘鲁北	19.8	7.1	2	144.0~150.0
6	1991-06-23	212228.8	-26.80	-63.35	阿根廷	558.0	7.3	2	159.4~165.7
7	1992-03-07	015337.7	+10.21	-84.32	哥斯达黎加	78.9	6.6	3	117.4~133.3
8	1992-05-16	205759.5	-13.67	-76.11	秘鲁近海	56.9	6.1	1	151.6
9	1992-05-30	163001.9	+14.44	-92.93	墨西哥近海	54.9	6.3	2	119.4~127.3
10	1992-10-18	151158.5	+7.10	-76.84	哥伦比亚西近海	10.0	7.2	1	137.1
11	1993-01-10	143900.4	-59.27	-26.21	南桑威奇群岛	61.0	6.7	2	140.4~159.2
12	1993-03-15	160857.8	-26.71	-70.92	智利中部沿海	28.9	6.7	3	155.7~169.6
13	1993-03-20	092032.5	-56.08	-27.80	南桑威奇群岛	115.9	6.3	1	131.3

续表 2

14	1993-07-06	025303.7	-24.60	-111.89	复活节岛北	10.0	6.4	2	126.9~141.0
15	1993-07-11	133622.2	-25.13	-69.96	智利北近海	33.0	6.7	2	155.0~168.1
16	1993-09-03	123500.2	+14.52	-92.71	墨西哥近海	26.5	6.8	5	109.7~127.3
17	1993-09-10	191254.6	+14.72	-92.65	墨西哥近海	34.1	7.2	6	109.6~135.7
18	1993-09-19	141056.1	+14.36	-93.33	墨西哥近海	18.0	6.4	2	110.2~119.3
19	1993-09-27	133732.9	-53.65	-51.62	大西洋南	33.0	6.6	1	155.5
20	1993-09-30	182750.8	+15.42	-94.70	墨西哥格雷罗	19.2	6.5	6	108.0~138.1
21	1993-10-24	075215.6	+16.76	-98.72	墨西哥格雷罗	20.7	6.7	4	114.8~134.7
22	1994-01-10	155349.6	-13.31	-69.39	秘鲁玻利维亚边界	589.0	6.9	3	144.8~156.5
23	1994-01-25	071244.8	+10.60	-41.72	大西洋中部	29.5	6.3	1	109.0
24	1994-02-12	041626.8	-10.79	-128.80	南太平洋	15.0	6.7	4	112.1~126.3
25	1994-03-14	205124.9	+15.99	-92.43	墨西哥危地马拉边界	164.2	6.9	3	108.6~118.2
26	1994-03-15	033619.9	+11.11	-88.08	尼加拉瓜近海	14.5	6.4	1	114.9
27	1994-06-09	003316.2	-13.84	-67.55	玻利维亚北	631.3	8.2	4	146.0~159.6
28	1994-12-10	161741.0	+18.24	-101.35	墨西哥格雷罗	67.0	6.5	1	116.2
29	1995-03-26	021612.5	-55.95	-28.21	南桑威奇群岛	48.4	6.3	2	131.6~133.1
30	1995-04-17	071435.2	+33.78	-38.60	北大西洋海岭	10.0	6.1	1	119.5
31	1995-10-03	015123.9	-2.75	-77.88	秘鲁厄瓜多尔边界	24.4	7.0	4	137.2~162.1
32	1995-10-09	133553.9	+19.06	-104.21	墨西哥近海	33.0	8.0	5	101.6~129.5
33	1995-11-01	003532.7	-28.91	-71.42	智利中部近海	19.9	6.7	2	158.0~170.1
34	1996-01-22	231957.4	-60.61	-25.90	南桑威奇群岛	10.1	6.2	2	128.0~130.3
35	1996-02-16	094458.4	-1.50	-15.28	阿森松群岛北	10.6	6.6	2	114.2~129.4
36	1996-02-19	071006.4	-42.13	-75.28	智利南海岸	7.6	6.0	1	156.6
37	1996-02-21	125103.5	-9.59	-79.59	秘鲁北海岸	10.0	7.5	4	144.2~166.9
38	1996-02-25	030815.8	+15.98	-98.07	墨西哥格雷罗	21.1	7.1	4	115.8~135.7
39	1996-03-03	145511.8	+11.66	-86.86	尼加拉瓜近海	33.0	6.6	5	115.0~138.8
40	1996-03-27	205206.0	+11.78	-87.94	尼加拉瓜近海	33.0	6.0	1	131.1
41	1996-04-19	001932.6	-23.96	-070.37	智利北部	49.5	6.7	4	153.0~169.9
42	1996-06-02	025209.5	+10.80	-42.25	北大西洋海岭	10.0	7.0	3	119.7~130.6
43	1996-07-15	212334.0	-17.60	-100.97	墨西哥格雷罗	18.3	6.8	6	104.3~131.7
44	1996-09-05	081414.4	-22.12	-113.44	东太平洋内	10.0	6.9	3	130.3~152.2
45	1996-11-12	165944.0	-14.99	-75.68	秘鲁近海	33.0	7.7	7	143.5~161.0
46	1996-12-09	112848.6	+29.85	-42.86	北大西洋海岭	10.0	6.0	1	111.1
47	1996-12-10	083618.7	+0.87	-30.04	大西洋中部	10.0	6.7	2	109.0~128.9
48	1997-01-23	021522.9	-22.00	-65.72	玻利维亚南	276.2	7.1	3	157.8~169.0
49	1997-04-22	093123.2	+11.11	-60.89	特立尼达岛东	5.0	6.7	3	118.3~123.7
50	1997-04-28	120737.8	-42.50	+42.69	爱德华王子岛	10.0	6.8	3	102.7~116.3
51	1997-05-01	113736.1	+18.99	-107.35	墨西哥远海	33.0	6.9	4	108.6~127.3
52	1997-05-22	075053.5	+18.68	-101.60	墨西哥格雷罗	70.0	6.5	7	103.0~131.4
53	1997-07-06	095400.7	-30.06	-71.87	复活节岛北	19.0	6.8	5	158.7~176.0
54	1997-07-09	192413.1	+10.60	-63.49	委内瑞拉近海	19.9	7.0	6	120.3~142.0
55	1997-09-02	121322.9	+3.85	-75.75	哥伦比亚	198.7	6.8	2	135.0~151.2
56	1997-09-20	161132.1	-28.68	-177.62	克马德克群岛	30.0	7.0	2	104.6~112.4
57	1997-10-05	180430.0	-59.74	-29.20	南桑威奇群岛	274.0	6.3	2	130.4~141.8
58	1997-10-15	010333.4	-30.93	-71.22	智利中部近海	58.0	7.1	5	158.7~172.1
59	1997-10-28	061517.3	-4.37	-76.68	秘鲁北部	112.0	7.2	8	133.1~159.4
60	1998-01-30	121608.6	-23.91	-70.21	智利近海	42.0	7.1	6	153.1~170.0
61	1998-09-03	173758.2	-29.45	-71.72	智利	27.0	6.6	2	165.0~172.4
62	1999-06-15	204205.9	+18.39	-97.44	墨西哥中部	70.0	7.0	7	105.0~132.5
63	1999-07-11	141416.5	+15.78	-88.33	洪都拉斯	10.0	6.7	2	110.6~120.0
64	1999-08-20	100221.1	+9.04	-84.16	哥斯达黎加	20.0	6.9	8	118.2~149.4
65	1999-08-22	093539.4	-40.51	-74.76	智利南海岸	33.0	6.4	1	175.7
66	1999-09-30	163115.6	+16.06	-96.93	墨西哥格雷罗	60.6	7.5	8	106.2~134.8
67	2000-04-23	092723.3	-28.31	-62.99	阿根廷	608.5	7.0	5	151.9~173.2
68	2000-11-07	001804.9	-55.63	-29.88	南桑威奇群岛	10.0	6.8	4	131.3~148.1
69	2000-11-08	065958.8	+7.04	-77.83	巴拿马哥伦比亚边界	17.0	6.5	4	123.0~142.0

续表 2

70	2001-05-20	042143.8	+18.82	-104.45	墨西哥	33.0	6.3	5	113.8~129.5
71	2001-06-23	203314.1	-16.27	-73.64	秘鲁近海	33.0	8.4	8	145.3~175.7
72	2001-06-26	041831.3	-17.75	-71.65	秘鲁近海	24.0	6.8	5	147.2~178.1
73	2002-10-12	200911.4	-8.30	-71.74	巴西西部	534.3	6.9	6	138.0~158.1
74	2003-01-23	024647.7	+13.63	-90.77	危地马拉近海	24.0	6.5	6	111.4~141.7
75	2003-01-22	020634.6	+18.77	-104.10	墨西哥近海	24.0	7.4	9	100.2~129.8
76	2003-05-14	060335.8	+18.27	-58.63	大西洋北	41.5	6.6	7	111.0~141.2
77	2003-06-20	133041.6	-30.61	-71.64	智利中部近海	33.0	6.8	9	158.2~179.0
78	2003-08-21	121249.7	-45.10	+167.14	新西兰南	28.0	7.2	3	101.5~113.1
79	2003-09-22	044536.2	+19.78	-70.67	多米尼加	10.0	6.5	3	113.3~120.2
80	2003-12-25	071111.5	+8.42	-82.82	巴拿马哥斯达黎加边界	33.0	6.5	1	119.6
81	2004-05-03	043650.0	-37.70	-73.41	智利中部近海	21.0	6.6	3	161.2~164.9
82	2004-06-29	070130.9	+10.74	-87.04	哥斯达黎加近海	9.0	6.3	2	115.7~115.8
83	2004-10-09	212653.6	+11.42	-86.67	尼加拉瓜近海	35.0	6.9	8	115.2~145.6
84	2004-11-20	080722.0	+9.60	-84.17	哥斯达黎加	16.0	6.4	3	117.7~127.2
85	2004-11-20	220145.6	13.3	-90.06	危地马拉近海	40.6	6.3	3	112.0~121.5
86	2005-03-21	122354.0	-24.98	-63.47	阿根廷	579.1	6.9	2	149.9~157.0
87	2005-05-12	111535.3	-57.38	-139.23	太平洋大西洋交界	10.0	6.5	2	117.1~126.3
88	2005-06-13	224433.9	-19.99	-69.20	智利北	115.6	7.8	9	149.4~178.7
89	2005-09-26	015537.6	-5.68	-76.40	秘鲁北	115.0	7.5	6	134.5~160.6
90	2006-04-30	191717.2	-27.01	-70.96	智利北部近海	26.7	6.6	4	156.3~174.0
91	2006-10-12	180558.2	-31.30	-71.33	智利中部近海	45.9	6.4	2	160.2~169.4
92	2006-10-20	104856.0	-13.46	-76.68	秘鲁近海	23.0	6.7	4	141.8~168.4
93	2007-04-13	054223.0	+17.30	-100.20	墨西哥格雷罗	34.0	6.0	2	104.9~113.7
94	2007-06-13	192940.1	+13.55	-90.62	危地马拉近海	23.0	6.5	9	111.6~141.9
95	2007-06-24	002518.4	-55.65	-2.63	南大西洋中部	10.0	6.3	1	137.5
96	2007-08-15	234057.8	-13.39	-76.60	秘鲁近海	39.0	8.0	10	141.7~171.6
97	2007-09-10	014914.2	+2.98	-77.97	哥伦比亚西海岸	31.0	6.8	8	125.7~152.0
98	2007-11-16	031300.1	-2.31	-77.84	秘鲁厄瓜多尔边界	122.9	6.7	8	130.9~157.3
99	2007-11-29	190019.6	+14.97	-61.26	背风群岛	147.5	7.4	10	115.0~145.1
100	2008-02-08	093814.1	+10.67	-41.90	大西洋中部北	9.0	6.9	4	109.1~127.6
101	2008-02-12	125018.4	+16.36	-94.30	墨西哥格雷罗	83.0	6.4	7	107.4~135.6
102	2008-02-23	155719.8	-57.33	-23.42	南桑威奇群岛南	10.0	6.7	4	127.6~140.5
103	2008-04-12	003012.6	-55.66	+158.45	麦夸里群岛	16.0	7.1	5	101.9~115.7
104	2008-05-23	193534.9	+7.31	-34.90	大西洋中部	9.0	6.5	1	125.9
105	2008-06-01	143103.0	-59.38	+149.66	麦夸里群岛西	10.0	6.5	2	101.0~102.9
106	2008-06-30	061744.8	-58.22	-22.10	南桑威奇群岛	19.0	6.9	6	126.9~147.9
107	2008-10-19	194125.7	+14.42	-92.36	墨西哥近海	24.0	6.6	9	110.0~140.2
108	2009-05-28	082445.0	+16.72	-86.23	洪都拉斯	10.0	7.3	5	110.4~137.5
109	2010-02-27	063411.5	-36.12	-72.90	智利中部近海	22.9	8.8	9	160.9~177.4
110	2010-03-11	143943.9	-34.29	-71.89	智利中部近海	11.0	6.9	3	162.7~169.7
111	2010-04-04	224043.1	+32.30	-115.28	美国墨西哥交界	4.0	7.2	4	104.7~113.4
112	2010-08-12	115415.5	-1.27	-77.31	厄瓜多尔	206.7	7.1	3	130.0~145.6
113	2011-01-01	095658.1	-26.80	-63.14	阿根廷	576.8	7.0	2	151.0~157.1
114	2011-01-02	202017.7	-38.36	-73.33	智利中部近海	24.0	7.0	7	161.7~175.3
115	2011-07-06	190318.2	-29.54	-176.34	克马德克群岛	17.0	7.6	2	106.0~113.8
116	2011-10-21	175716.1	-28.99	-176.24	克马德克群岛	33.0	7.4	2	105.8~113.6
117	2011-10-28	185434.0	-14.44	-75.97	秘鲁近海	24.0	6.9	8	142.9~163.4
118	2012-03-20	180247.4	+16.49	-98.23	墨西哥近海	20.0	7.4	8	105.2~133.9
119	2012-03-25	223706.0	-35.20	-72.22	智利中部近海	40.7	7.1	7	160.8~178.5
120	2012-04-11	225510.2	+18.23	-102.69	墨西哥	20.0	6.7	4	101.4~115.3
121	2012-08-27	043719.4	+12.14	-88.59	中美洲近海	28.0	7.4	9	113.8~144.1
122	2012-09-05	144207.8	+10.09	-85.32	哥斯达黎加	35.0	7.6	10	116.2~147.4
123	2012-09-30	163135.9	+1.93	-76.36	哥伦比亚	170.0	7.2	10	127.1~158.3
124	2012-11-07	163546.9	+13.99	-91.90	危地马拉近海	24.0	7.3	10	110.6~140.8

2 Pdif 波的运动学特征

许健生等用 CDSN 北京地震台(1990—2008 年)和 CDSN 兰州地震台(1990—2000 年)的观测资料给出了 Pdif 波在这两个台站的记录特征,并得到了 Pdif 波在 101.9°~175.7°间的 PKP—Pdif 和 PP—Pdif 的到时差与震中距的关系^[4-5]。

本文用 CDSN11 个台的观测资料给出了在 $h \leq 100\text{ km}$ 、 $100 < h \leq 300\text{ km}$ 和 $300 < h \leq 631.3\text{ km}$ 的

表 3 Pdif 波走时表

Table 3 The table of travel-time of Pdif wave

震中距 / (°)	Pdif 走时		
	($h \leq 100\text{ km}$)	($100 < h \leq 300\text{ km}$)	($300 < h \leq 631.3\text{ km}$)
100	13 m44.7 s		
102	13 m53.9 s		
104	14 m03.0 s		
106	14 m12.1 s		
108	14 m21.3 s		
110	14 m30.4 s	14 m16.3 s	
112	14 m39.6 s	14 m25.4 s	
114	14 m48.7 s	14 m34.6 s	
116	14 m57.9 s	14 m43.8 s	
118	15 m07.0 s	14 m53.0 s	
120	15 m16.2 s	15 m02.1 s	
122	15 m25.3 s	15 m11.3 s	
124	15 m34.5 s	15 m20.5 s	
126	15 m43.6 s	15 m29.6 s	
128	15 m52.7 s	15 m38.8 s	
130	16 m01.9 s	15 m48.0 s	
132	16 m11.0 s	15 m57.2 s	
134	16 m20.2 s	16 m06.3 s	
136	16 m29.3 s	16 m15.5 s	
138	16 m38.5 s	16 m24.7 s	15 m39.4 s
140	16 m47.6 s	15 m33.8 s	15 m48.5 s
142	16 m56.8 s	16 m43.0 s	15 m57.5 s
144	17 m05.9 s	16 m52.2 s	16 m06.6 s
146	17 m15.1 s	17 m01.4 s	16 m15.6 s
148	17 m24.2 s	17 m10.5 s	16 m24.7 s
150	17 m33.3 s	17 m19.7 s	16 m33.8 s
152	17 m42.5 s	17 m28.9 s	16 m42.8 s
154	17 m51.6 s	17 m38.0 s	16 m51.9 s
156	18 m00.8 s	17 m47.2 s	17 m01.0 s
158	18 m09.9 s	17 m56.4 s	17 m10.0 s
160	18 m19.1 s	18 m05.6 s	17 m19.1 s
162	18 m28.2 s	18 m14.7 s	17 m28.1 s
164	18 m37.4 s	18 m23.9 s	17 m37.2 s
166	18 m46.5 s	18 m33.1 s	17 m46.3 s
168	18 m55.7 s	18 m42.3 s	17 m55.3 s
170	19 m04.8 s	18 m51.4 s	18 m04.4 s
172	19 m14.0 s	19 m00.6 s	18 m13.5 s
174	19 m23.1 s	19 m09.8 s	
176	19 m32.3 s	19 m18.9 s	
178	19 m41.4 s	19 m28.1 s	
180	19 m50.5 s		

不同震源深度上 Pdif 波在 100.0°~179.0°间的运动学特征和相应的走时表(表 3)。

2.1 浅源地震的 Pdif 波的运动学特征

为了和 IASPEI1991 地震走时表给出的 $h=100\text{ km}$ 时的 Pdif 波走时特征做对比,本文选取了 104 个 $h \leq 100\text{ km}$ 的数据,给出了震中距在 100.0°~179.0°间 Pdif 波的运动学特征。

(1) 由图 2 见, Pdif 波的走时与震中距有很好的线形关系,与 IASPEI1991 地震走时表^[6] 给出的 Pdif 走时直线(虚线)基本平行,但有系统的差异。这种差异反映了中国大陆局部速度模型与全球平均速度模型之间存在系统差异。在震中距 100°时的差值为 11.2 s,在震中距 144°时的差值为 17.0 s。Pdif 波走时与震中距的关系可拟合为

$$T_{\text{Pdif}} = 4.573\Delta + 367.4$$

($h \leq 100\text{ km}$) (100.0° ~ 179.0°) (1)

式中 T 的单位为秒, Δ 的单位为度。

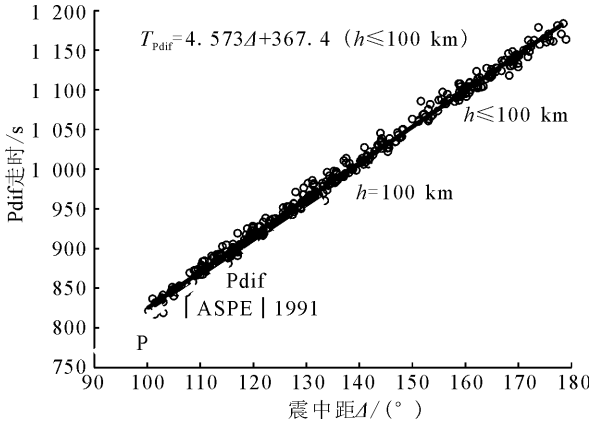


图 2 Pdif 波走时与震中距的关系

Fig. 2 The relation between travel time of Pdif wave and epicenter distance

(2) 当震中距 $\Delta > 100^\circ$ 以后, Pdif 在 PKP 之前出现的时间范围是 4 min10.7 s~29.8 s 之间。由图 3 可见,随着距离增大, Pdif 与 PKP 的时差越来越小。Pdif 与 PKP 时差与震中距之间的关系可拟合为

$$T_{\text{PKP-Pdif}} = -2.835\Delta + 550.7$$

($h \leq 100\text{ km}$) (100.0° ~ 179.0°) (2)

(3) Pdif 在 PP 震相之前出现的时间范围是 4 min05.4 s~6 min42.0 s 之间。由图 4 可见,随着震中距增大 Pdif 与 PP 之间的时差越来越大。Pdif 与 PP 之间的时差与震中距之间的关系可拟合为

$$T_{\text{PP-Pdif}} = 0.014\Delta^2 + 5.562\Delta - 163.7$$

($h \leq 100\text{ km}$) (100.0° ~ 179.0°) (3)

(4) 由图 3 可见, CDSN 台站观测到的 Pdif 波

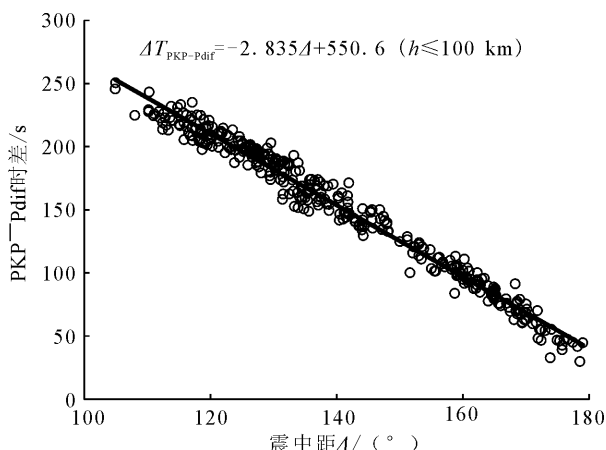


图3 PKP-Pdif 时差与震中距的关系

Fig. 3 The relation between difference time of PKP-Pdif and epicenter distance

的到时与 PKP 的到时差在震中距 $100^\circ \sim 180^\circ$ 间有很好的线性关系,这可能是因为 PKP 波的射线路径主要在地核内,传播路径上介质的一致性较好。

(5) 由图 4 可见,CDSN 台站观测到的 Pdif 波到时与 PP 波的到时差与震中距的关系在震中距 $100.0^\circ \sim 179.0^\circ$ 间可拟合为二次曲线,这可能是因为 PP 波的射线路径主要在地幔内,传播路径上介质的一致性较差,是非线形关系。

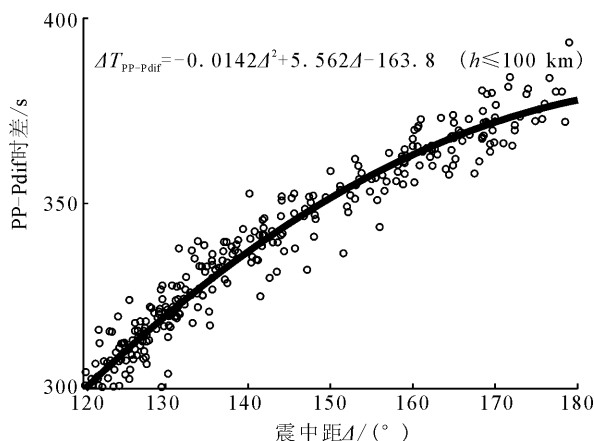


图4 PP-Pdif 时差与震中距的关系

Fig. 4 The relation between difference time of PP-Pdif and epicenter distance

2.2 深源地震的 Pdif 波的运动学特征

为了研究震源深度对 Pdif 波走时的影响,便于和 IASPEI1991 地震走时表给出的 $h=300$ km 和 $h=600$ km 时的 Pdif 波走时特征做对比研究,本文选取了 12 个震中距在 $108.6^\circ \sim 178.7^\circ$ 间,震源深度在 $100 \text{ km} < h \leq 300 \text{ km}$ 间,和 8 个震中距在 $138.0^\circ \sim 173.0^\circ$ 间的数据,给出了不同震源深度的 Pdif 波运动学特征。

(1) 由表 3 可见,在震源深度 $100 \text{ km} < h \leq 300$

km 和 $300 \text{ km} > h \leq 631.5 \text{ km}$ 时,Pdif 波的走时与震中距有很好的线性关系,与 IASPEI1991 地震走时表给出的 $h=300$ km 和 $h=600$ km 时 Pdif 波的走时直线基本平行,在震中距 100° 时的差值分别为 19.5 s 和 5.7 s,在震中距 144° 时的差值分别为 26.0 s 和 9.8 s。

不同震源深度的 Pdif 波走时与震中距的关系可拟合为

$$T_{\text{Pdif}} = 4.586\Delta + 351.9$$

$$(100 \text{ km} < h \leq 300 \text{ km}) \quad (108.6^\circ \sim 178.7^\circ)$$

(4)

$$T_{\text{Pdif}} = 4.531\Delta + 314.1$$

$$(300 \text{ km} < h \leq 631.3 \text{ km}) \quad (138.0^\circ \sim 173.0^\circ)$$

(5)

(2) 由表 3 可见,在 $100 \text{ km} < h \leq 300 \text{ km}$ 和 $300 \text{ km} > h \leq 631.5 \text{ km}$ 时,Pdif 与 PKP 的时差随着震中距的增大在逐渐缩小。Pdif 与 PKP 时差与震中距之间的关系可拟合为

$$T_{\text{PKP-Pdif}} = -2.835\Delta + 550.6$$

$$(100 \text{ km} < h \leq 300 \text{ km}) \quad (108.6^\circ \sim 178.7^\circ)$$

(6)

$$T_{\text{PKP-Pdif}} = -2.991\Delta + 577.4$$

$$(300 \text{ km} < h \leq 631.3 \text{ km}) \quad (138.0^\circ \sim 173.0^\circ)$$

(7)

(3) 由表 3 可见,在 $100 \text{ km} < h \leq 300 \text{ km}$ 和 $300 \text{ km} > h \leq 631.5 \text{ km}$ 时,Pdif 与 PP 的时差关系可拟合为

$$T_{\text{PP-Pdif}} = 0.0142\Delta^2 + 5.562\Delta - 163.8$$

$$(100 \text{ km} < h \leq 300 \text{ km}) \quad (108.6^\circ \sim 178.7^\circ)$$

(8)

$$T_{\text{PP-Pdif}} = 0.0150\Delta^2 + 5.772\Delta - 174.6$$

$$(300 \text{ km} < h \leq 631.3 \text{ km}) \quad (138.0^\circ \sim 173.0^\circ)$$

(9)

(4) 对于有一定震源深度的地震常可观测到 P、S 波在震中附近的反射波 pP、sP 在幔核界面上衍射形成的 pPdif 和 sPdif 波,pPdif-Pdif 和 sPdif-Pdif 的时差分别与 pP-P 和 sP-P 的时差相等。

图 5 给出了乌鲁木齐台、西安台和昆明台在不同震中距记录到同一深度地震的 pPdif 波的典型记录。

3 结论

通过对 1990—2012 年 CDSN11 个台记录到的 Pdif 波的运动学特征分析,可以得出以下结论:

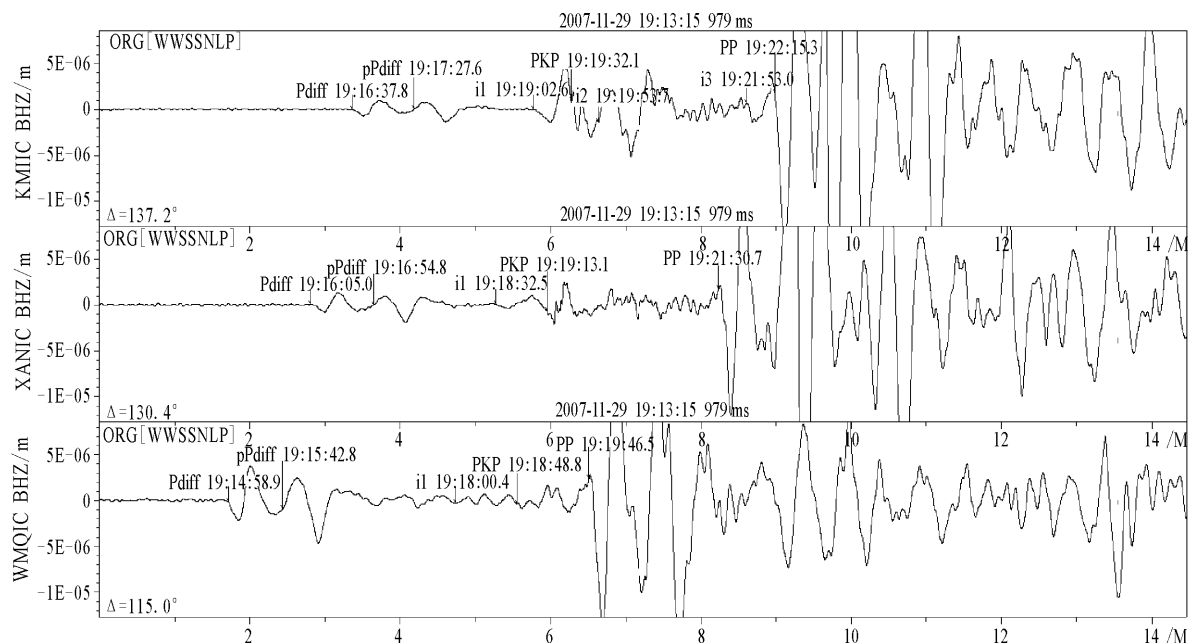


图 5 3 个台站的 2007 年 11 月 29 日 $M_s 7.4$ 背风群岛地震的 pPdif 记录 ($h=147.5$ km, EPC: N14.97°, W61.26°)

Fig. 5 The pPdif wave seismographs of windward islands earthquake with $M_s 7.4$ recorded by three stations

(1) 目前 Pdif 波在 CDSN 台站的记录范围为 $100.0^\circ \sim 179.0^\circ$, 震级为 6.0~8.8 级, 震源深度为 4~631.3 km。与 J-B 表和 IASPEI1991 表相比, CDSN 台站的宽频带数字地震仪大大拓展了 Pdif 震相的记录范围。

(2) 本文给出的不同震源深度的《Pdif 波走时表》是对《IASPEI1991 地震走时表》的有益补充。《Pdif 波走时表》与《IASPEI1991 地震走时表》有系统的差异, 这种差异反映了中国大陆局部速度模型与全球平均速度模型之间存在系统差异。

(3) 震源深度对 Pdif 与 PKP 时差的影响随距离的增大逐渐减小。

(4) 震源深度对 Pdif 与 PP 时差的影响在 140° 时最大, 在震中距 100° 和 180° 时最小。

(5) 深震衍射波 pPdif 和 sPdif 波与 Pdif 波的时差 pPdif-Pdif 和 sPdif-Pdif 分别与 pP-P 和 sP-P 的时差相等, 与 pP-P 和 sP-P 一样可作为测定震源深度的参数。

致谢: 本文的数据处理和震相标注均由黑龙江省地震局和跃时高级工程师提供的“CDSN 地震台站分析软件”完成, 在此深表谢意。

参考文献 (References)

- [1] 赵荣国. 中国 763 长周期台网观测 $\Delta=175.6^\circ$ 的幔-核界面衍射波[J]. 国际地震动态, 1987, (3): 14-16.
ZHAO Rong-guo. Waves Diffracted at the Mantle-core Bound-

ary Were Observed by Type-763 Long-period Seismograph Network of China[J]. Recent Developments in World Seismology, 1987, (3): 14-16. (in Chinese)

- [2] 郭瑛. 关于 $\Delta \geq 140^\circ$ 的地震衍射波 Pdif[J]. 地震地磁观测与研究, 1989, 10(4): 27-30.
GUO Ying. On Diffracted Wave Pdif for $\Delta \geq 140^\circ$ [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1989, 10(4): 27-30. (in Chinese)
- [3] 唐燕娟. 对 P 波衍射波 Pdif 震相记录范围的讨论[J]. 地震地磁观测与研究, 1997, 18(2): 32-36.
TANG Yan-juan. A Discussion on Recorded Distance for Diffraction Wave Pdif of Wave P[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1997, 18(2): 32-36. (in Chinese)
- [4] 许健生, 魏永刚, 张淑珍. Pdif 震相的记录特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(4): 115-121.
XU Jian-sheng, WEI Yong-gang, ZHANG Shu-zhen. The Recording Character of Pdif Phase[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2011, 32(4): 115-121. (in Chinese)
- [5] 许健生, 魏永刚, 张淑珍. Pdif 震相在 CDSN 兰州地震台的记录特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 239-244.
XU Jian-sheng, WEI Yong-gang, ZHANG Shu-zhen. The Recording Characters of Pdif Phase in Seismic Wave at CDSN Lanzhou Seismic Station[J]. Northwest Seismological Journal, 2012, 34(3): 239-244. (in Chinese)
- [6] B L N Kennett. IASPEI 1991 地震走时表[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 108-130.
B L N Kennett. IASPEI 1991 Seismological Tables[M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 108-130. (in Chinese)