

陈惠芳、康兰池、金星等, 2015, 对我国台湾强震的预警时间研究, 中国地震, 31(4), 721~729。

对我国台湾强震的预警时间研究

陈惠芳¹⁾ 康兰池^{1,2)} 金星^{1,2)} 邵平荣¹⁾ 曹轶¹⁾

1) 福建省地震局, 福州市华鸿路 7 号 350003

2) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150040

摘要 本文收集了福建测震台网记录的台湾 5.0 级以上强震, 通过分析震相特征, 研究震相的走时规律, 进而确定走时模型, 采用两步法拟合得出台湾地震震相走时方程, 扣除处理用时与网络延时, 实现了福建地区对我国台湾地震的预警时间的准确估计, 并已被福建省地震预警系统正式采用。

关键词: 台湾强震 震相特性 走时规律 预警时间

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0721-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震预警, 是根据地震发生地附近地震台站观测到的地震波初期信息, 快速估计地震参数并预测地震对周边地区的影响, 利用电磁波传播速度远远大于地震波传播速度以及地震初始 P 波传播速度大于后继破坏性地震 S 波或面波传播速度的规律, 抢在破坏性地震波到达震中周边地区之前, 发布各地地震动强度和到达时间的预警信息, 使企业和公众能够尽早采取地震应急处置措施, 进而减轻人员伤亡 (Andrew et al, 2005; 赵纪东等, 2009)。虽然预警的时间非常短, 往往只有几秒或十几秒, 但是如此短的时间仍然可以挽救很多生命, 大幅度降低经济损失 (杨马陵等, 2004; 李山有等, 2004; 陈运泰, 2007; 袁志祥等, 2007)。日本地震预警系统在 2011 年 3 月 11 日东日本 9.0 级大地震时, 60s 之内向 37 个城市发出了预警, 为许多人赢得了宝贵的逃生时间, 当然, 距离震中越近的地方获得的预警时间越少, 相对于获得了 60s 预警时间的东京, 距离震中宫城县距离较近的岩手县仅获得了 12s 的预警时间, 此次地震陆上几乎全部区域均获得 10s 以上的预警时间, 因此挽救了很多生命。当时, 有 23 辆新干线列车在载客运行, 位于东京的列车得到预警信息后迅速制动, 在刹车后的 9~12s, 第一轮摇晃开始, 70s 之后, 出现最强烈的摇晃, 所以当时并没有发生脱轨事故。墨西哥的预警系统也有成功发布预警信息的经验, 1995 年 9 月 14 日在墨西哥中部格雷罗洲发生 7.3 级地震, 该系统在 S 波到达之前 72s 发出了公共预警, 地铁在 S 波到达前 50s 停下, 有约 60s 的预警时间, 学校做出了疏散人员的应急响应。(Wyss, 1991; Espinosa et al, 1995、2009; 金星等, 2008a、2008b、2010; 张红才等, 2012)。

[收稿日期] 2015-01-14; [修定日期] 2015-11-04

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划 (XH13012)、福建省地震局科技攻关 (201202) 联合资助

[作者简介] 陈惠芳, 女, 1981 年生, 工程师, 主要从事地震预警、地震编目、地震速报研究。E-mail: 29014409@qq.com

我国台湾地处亚欧板块与太平洋板块的边界,地震活跃,台湾6级以上强震平均每年至少发生2次,7级的地震平均3年1次(Chen et al,2012; Chuang et al,2012),每次地震对福建都产生较大影响,福建现有的预警系统实现对台湾地震进行预警具有重要的现实意义(廖旭等,2002; 马强,2008; 张红才等,2011; Spielhagen,2012; Serdar et al,2014)。预警时间是预警系统重要的服务产品之一,也是预警系统产生减灾实效的重要参数,原预警系统针对台湾强震到达福建地区的预警时间,是利用地方震直达Pg波和直达Sg波计算预警时间,而实际台湾地震到达福建的主要震相是首波(Pn、Sn)(Liu et al,2009; Lin et al,2011)。这直接影响到对预警时间的估计,本文将研究基于台湾强震震相,根据某一个震相的走时扣除处理用时与网络延时,实现福建对台湾地震预警时间的准确估计。

1 资料

福建省测震台网自1998年以来经历了“九五”、“十五”以及“十一·五”(表1,图1)期间的迅速发展,目前福建测震台网

表1 福建测震台网各阶段台站数

台网建设阶段	建设台站个数(个)
九五(1998年12月~2002年11月)	21
十五(2002年12月~2012年12月)	70
十一·五(2013年1月至今)	85



图1 福建地震台网观测台站分布

粉色三角为“九五”期间所建台站;绿色三角为“十五”期间所建台站;
蓝色三角为“十一·五”期间所建台站;红色圆圈为台湾强震震中

已由 85 个测震台站组成。福建测震台网采用的是北京港震机电技术有限公司的 EDAS-24 IP 型数据采集器和 7 种类型地震计(宽频带 CMG-3ESPC-60、宽频带 CMG-3ESPC-120、宽频带 CTS-1、宽频带 BBVS-60、宽频带 FBS-3B、短周期 FSS-3B、短周期 FSS-3M),采样率均为 100Hz。全部建在基岩台基上,平均台间距约 31km,采用电信专线实时传输所观测到的数据(金星等,2007)。

本文地震资料的选取遵循以下基本原则:①震级较大,对福建产生一定影响;②震相清晰,可以准确识别;③震中分布尽可能遍及台湾全岛;④一定区域内震相的走时规律几乎相同,为减轻工作量,本文只选择一些代表性的地震;⑤台湾东北部的台北地区及其附近海域多发生深源地震,此类地震对福建几乎没有影响,也不可能启动预警系统,本文不予选取。基于以上基本原则,本文选取 1999~2013 年福建省地震局记录到的台湾 5.0 级以上的 40 个浅源地震(表 2),因台湾地震对于福建来说均属于网外地震,目前台网现有技术无法准确确定震中位置和发震时间,故本文所有地震信息均以台湾“中央气象局”网站正式发布的速报信息为准(<http://www.cwb.gov.tw>)。

台湾地震波横穿台湾海峡到达福建,因其特殊的传播路径,特别的地质构造,在福建台网记录到大量的台湾地震中,只能识别出 Pn、Sn 震相,首波(Pn)作为第一震相到达(中国地震局监测预报司,2007),Pg 和 Sg 震相均不发育(图 2),经人工分析处理得出清晰的 Pn 震相 893 个,Sn 震相 716 个(表 2、图 3)。

2 方法

预警系统要求预警时间的计算要满足快速、准确的基本条件,前已述及,台湾强震福建台网观测到的震相为 Pn 与 Sn,故本文采用单层一维模型来求取震相的走时,在单层一维模型中首波的走时方程为

$$t = \frac{2H - h}{v_1} \cos i_0 + \frac{\Delta}{v_2} \quad (1)$$

$$\sin i_0 = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

在上式中 t 为 Pn 或 Sn 走时, H 为地壳厚度, h 为震源深度, v_1 、 v_2 分别为 P 波和 S 波波速, Δ 为震中距。显而易见式(1)由两项组成,前一项为在地壳内射向地幔和经地幔滑行后射向地面的地震波走时,该项包含了震源深度的影响,后一项为莫霍界面滑行波走时,本文所用台湾强震震中距在 120km 以上,后一项对式(1)起主要控制作用,因此将前一项简化为常数 T ,式(1)可简化为

$$t = T + \frac{\Delta}{v_2} \quad (3)$$

$$T = \frac{2H - h}{v_1} \cos i_0 \quad (4)$$

采用两步法对式(3)进行拟合。第一步,对第 j 个地震进行拟合,得到 v_j 、 T_j ,令 $t_j^* = t_j - T_j$ 进行第二步拟合,得出平均 v_2 ;然后将得出的 v_2 ,代入式(3),统计得出 T 。

每个地震深度不同,对 T 的影响也不同,因此采用两步法中的第一步可以有效扣除深度

表2 台湾强震地震目录

序号	发震日期 (年-月-日)	发震时刻 (时:分:秒)	震中		震源深度 /km	震级	震中地点	Pn /个	Sn /个
			°N	°E					
1	1999-02-22	21:49:00.2	24.017	122.483	4.2	6.0	花莲海域	无	9
2	1999-09-21	01:47:14.9	23.933	120.817	8.0	6.9	南投	19	19
3	1999-09-21	02:11:53.7	23.983	121.000	8.0	6.4	南投	22	22
4	1999-09-21	02:16:16.6	23.583	121.083	12.5	6.4	南投	16	16
5	1999-09-21	05:46:32.1	23.350	121.200	8.6	6.4	花莲	20	20
6	1999-09-22	08:49:42.4	23.850	120.950	17.4	6.1	南投	23	23
7	1999-09-26	07:52:44.5	23.733	121.300	12.1	6.5	花莲	22	22
8	1999-10-22	11:10:15.5	23.533	120.467	16.7	6.1	嘉义	21	21
9	2000-02-16	05:33:17.4	23.417	120.733	14.7	5.2	嘉义	22	22
10	2000-12-11	03:30:42.8	23.117	120.267	15.5	5.1	台南	16	16
11	2001-01-11	16:36:58.0	24.200	120.900	25.2	5.1	台中	19	19
12	2001-06-14	10:35:25.1	24.567	121.867	17.3	6.1	宜兰海域	7	7
13	2001-09-18	06:44:43.9	24.217	122.833	5.0	5.3	嘉义	21	21
14	2002-01-09	01:00:38.1	24.433	120.800	1.0	5.1	苗栗	23	23
15	2002-09-06	19:02:01.4	21.000	120.583	18.8	5.2	彰化	无	13
16	2002-09-30	16:35:13.4	23.417	120.533	8.0	5.0	嘉义	26	26
17	2003-08-12	00:30:14.0	24.717	121.250	58.5	5.0	新竹	无	11
18	2004-11-08	23:54:56.7	23.967	122.617	10.0	6.4	花莲海域	20	20
19	2006-03-09	12:07:28.1	23.717	120.517	9.9	5.2	云林	12	12
20	2006-04-01	18:02:17.8	22.850	121.133	7.2	6.4	台东	20	20
21	2006-04-16	06:40:54.8	22.933	121.283	17.9	5.9	台东	29	29
22	2006-08-12	07:51:05.7	22.633	121.300	25.4	5.2	台东	15	15
23	2006-10-09	19:08:25.3	20.783	119.933	8.0	5.5	恒春	10	10
24	20061226	20:26:19.9	21.867	120.483	44.1	6.7	恒春海域	无	无
25	2007-06-21	12:08:16.3	21.317	121.300	51.0	5.0	恒春	无	21
26	2007-08-29	11:00:14.7	21.833	121.333	6.8	5.0	恒春	21	21
27	2008-03-05	01:31:46.1	23.233	120.717	11.3	5.0	高雄	19	19
28	2008-04-24	02:28:40.6	22.895	121.779	11.1	6.1	台东	9	9
29	2008-04-24	06:04:15.3	22.878	121.675	13.1	5.2	台东	7	7
30	2008-12-23	08:04:43.1	23.000	120.467	17.1	5.1	高雄	12	12
31	2009-07-14	02:05:01.0	24.100	122.233	18.1	6.1	花莲海域	20	20
32	2009-12-19	21:02:14.4	23.872	121.651	43.8	6.3	花莲海域	无	25
33	2010-03-04	08:18:49.7	22.961	120.707	22.6	6.4	高雄	21	21
34	2010-04-11	12:57:29.7	23.410	122.021	30.3	5.0	台东	无	14
35	2011-03-20	16:00:50.4	22.527	121.350	27.5	5.2	台东	31	31
36	2012-06-06	09:08:33.4	22.454	121.434	18.4	5.6	台东	16	16
37	2012-11-21	01:09:00.4	22.527	121.361	26.9	5.0	台东	33	33
38	2013-03-27	10:03:18.2	23.954	121.119	11.0	6.4	南投	18	18
39	2013-06-02	13:43:01.5	23.830	121.069	31.5	6.6	南投	无	10
40	2013-10-31	20:02:06.5	23.508	121.563	11.0	6.6	花莲海域	13	13

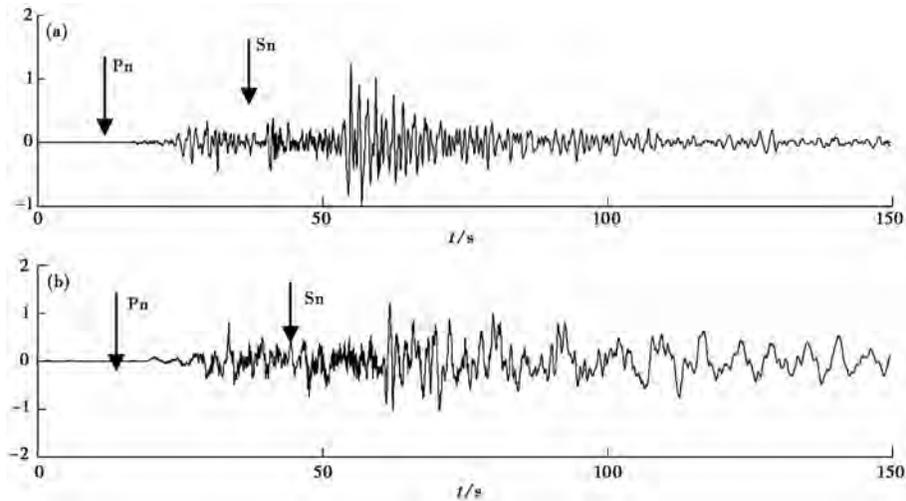


图 2 2013 年 3 月 27 日台湾南投 6.2 级地震

(a) 福建平潭潭城台观测记录, (b) 福建惠安净峰台观测记录

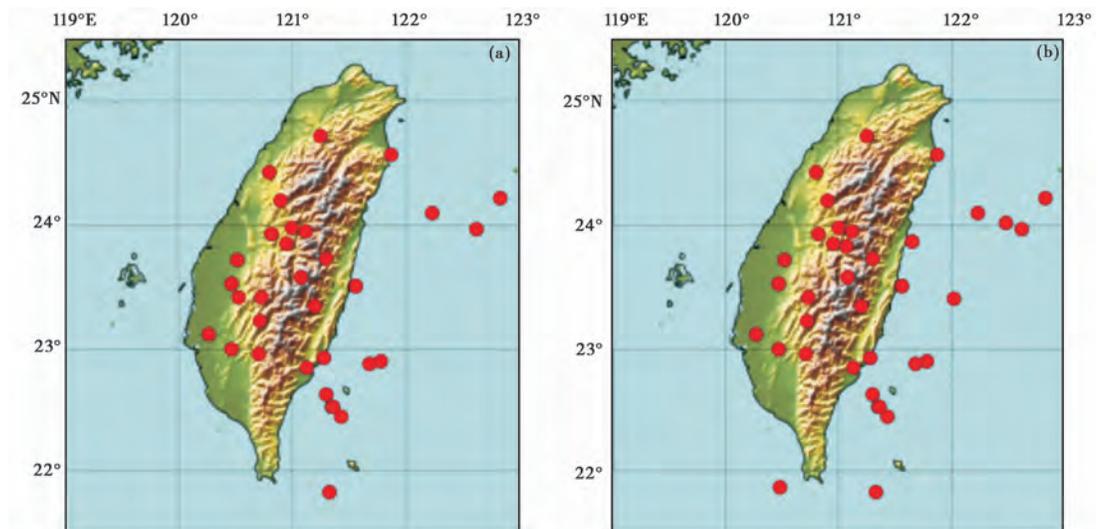


图 3 Pn 与 Sn 震相震中分布图

(a) 本研究使用的 Pn 震相的震中分布; (b) 本研究使用的 Sn 震相的震中分布
实心圆为 1999~2013 年台湾强震震中

的影响,避免因震源深度的不同而影响 v_2 的拟合,可以得到较高精度的地幔波速,而该项又在式(1)中起控制作用,以保证本文结果的准确性。

3 结果与分析

利用两步法对选取 40 个台湾地震进行拟合,拟合结果为

$$t_{Pn} = 6.28 + \frac{\Delta}{8.00}, (\sigma = 0.76) \quad (5)$$

$$t_{\text{Sn}} = 10.21 + \frac{\Delta}{4.57}, \quad (\sigma = 0.86) \quad (6)$$

各参数见表3,结果见图4和5。由图4、5可以看出,本文拟合结果较为准确地反映了Pn与Sn震相的走时规律,地幔 $v_{\text{Pn}} = 8.00\text{km/s}$ 、 $v_{\text{Sn}} = 4.57\text{km/s}$,表1中的二者之差均小于1s,图7所示,Pn波观测走时与推测走时偏差在1s之内概率为98.2%,95%统计走时偏差在0.738s之内,Sn波观测走时与推测走时偏差在1s之内概率为87.1%,95%统计走时偏差在1.989s之内,Pn波的拟合结果优于Sn的拟合结果,经以上分析可以说明本文拟合结果是稳定可靠的。

表3 拟合结果

震相	$v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	T/s	σ/s
Pn	8.00	6.28	0.76
Sn	4.57	10.21	0.86

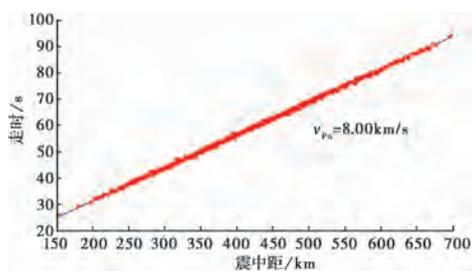


图4 Pn波走时拟合结果

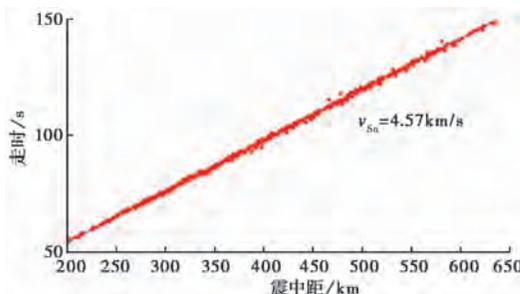


图5 Sn波走时拟合结果

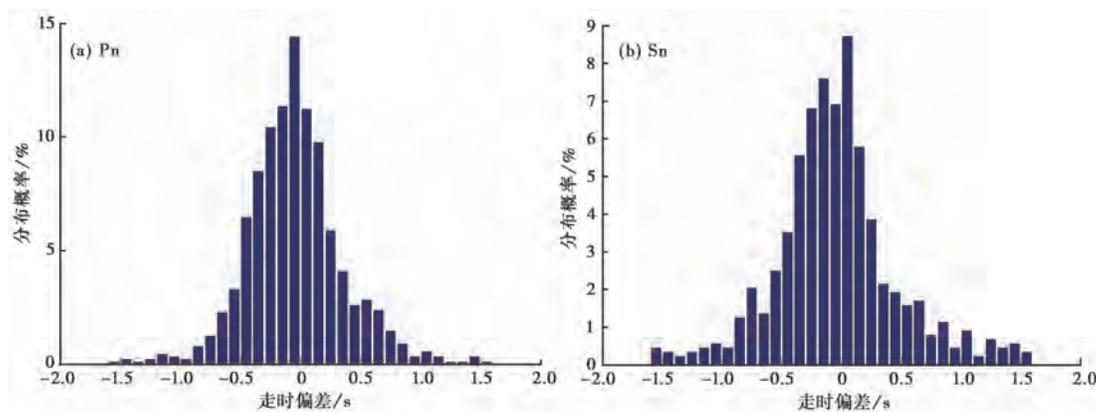


图6 拟合后得到的Pn和Sn分布概率

4 实例

将本文结果与原预警系统预警时间算法进行比较,如图7及表4所示,原预警系统的预警时间算法明显高估了福建对台湾地震的预警时间,随着距离的增大预警时间误差也增大,在400km左右无论Pn波还是Sn波的走时误差均大于10s,本文以2013年的一次地震预警为例,说明本文研究结果的实用性,因定位结果将对预警时间计算产生较大影响,对该次地震,台湾定位结果与预警定位结果非常接近,对这次地震预警系统成功地进行了处理,并在福建省地震局内部发布了S波预警结果,本文选取4个受地震影响较大的城市,其预警系统发布的结果见图8,二者的对比见表5,采用本文研究结果要明显优于原预警系统,更加接近实际。

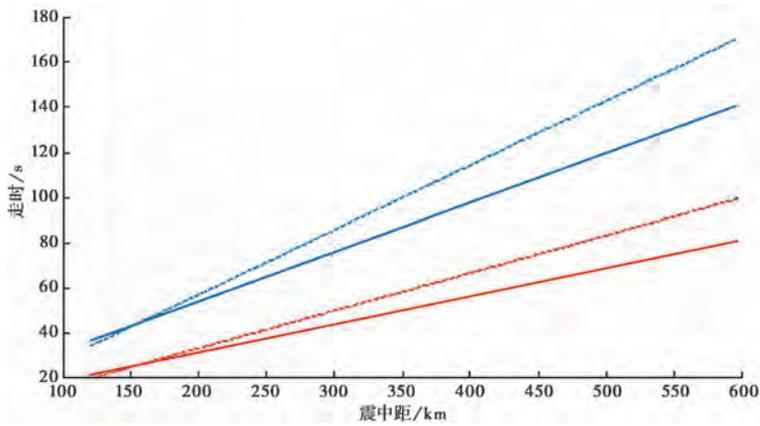


图 7 本文研究结果与原预警系统预警时间算法比较

红色实线为本研究 Pn 走时；蓝色实线为本研究 Sn 走时；红色虚线为现有预警系统给出的 Pn 走时；蓝色虚线为现有预警系统给出的 Sn 走时

表 4 本文研究结果与原预警系统预警时间算法对比

距离 /km	原预警系统给出的结果		本文研究结果		二者差	
	Pn 走时/s	Sn 走时/s	Pn 走时/s	Sn 走时/s	Pn 走时差/s	Sn 走时差/s
200	33.3	57.1	31.3	53.9	2.0	3.2
300	50.0	85.7	43.8	75.9s	6.2	9.9
400	66.7	114.3	56.3	97.7	10.4	16.5
500	83.3	142.8	68.8	119.6	14.6	23.2

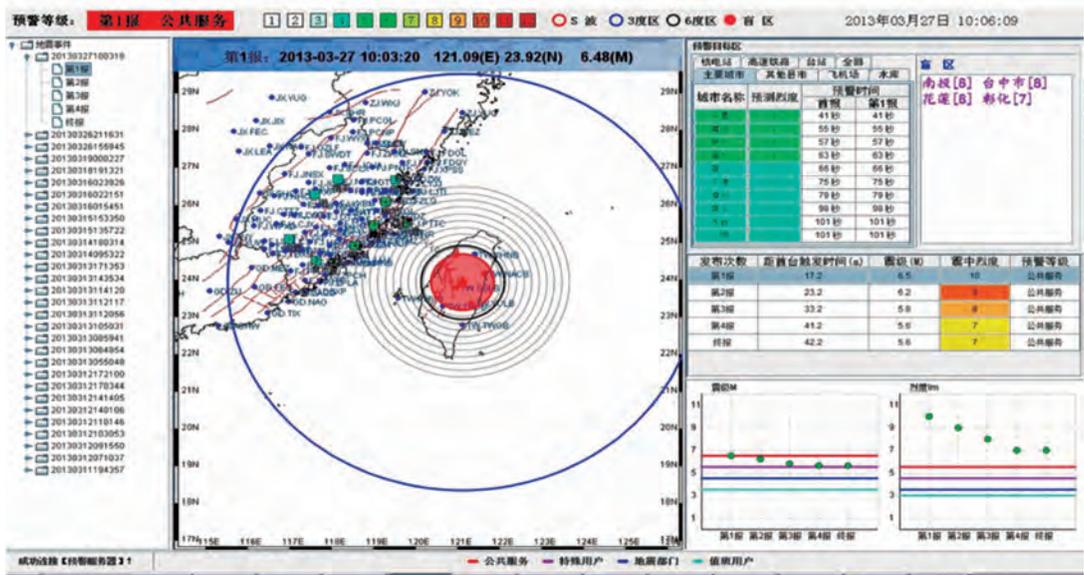


图 8 原预警系统发布界面

5 结论

本研究以提高预警的实用价值为宗旨,以完善预警系统为目的,从预警系统最重要的服务产品——预警时间的角度出发,以快速准确估计预警时间为原则,从分析整理实际观测资料入手,提出了一套基于台湾强震不同震相的预警时间估计方法,取得如下认识:

(1)通过原预警系统给出的预警时间与实际观测资料的对比,认为用本研究的预警系统估计出的预警时间的准确性将有较大提高,表明本文方法可为今后预警系统的进一步完善提供技术支持。

(2)通过对大量台湾强震观测资料的分析整理,得出台湾强震地震波传播到福建的震相为 P_n 与 S_n ,选取单层一维地壳模型,采用两步法统计回归。方法简单明了,物理概念清晰,计算用时短,且精度可以满足预警需求。

(3)随着今后国家大规模预警台网建设及预警技术的推广,本研究可以为其它地区所参考,提出的方法可推广应用于其它地区。

(4)台湾地震的地震波穿越台湾海峡到达福建,路径复杂,地壳结构还未探明,导致台湾地震震相较为复杂,本研究可以为今后台网编目的震相分析提供参考。

参考文献

- 陈运泰,2007,地震预测——进展、困难与前景Ⅱ,地震地磁观测与研究,28(2),1~24。
- 金星、陈绯雯、廖诗荣,2007,区域数字地震台网实时速报系统,地震地磁观测与研究,28(2),51~54。
- 金星、康兰池、欧益萍,2008a,福建地区中小地震地震动峰值衰减规律研究,地震学报,30(3),279~291。
- 金星、张红才、韦永祥,2008b,基于地震台网资料快速发布的震动烈度标准及其应用研究,国际地震动态,(10),20~27。
- 金星、张红才、韦永祥等,2010,基于地震监测台网资料近实时插值计算震动图的初步研究,防灾减灾学报,26(1),1~11。
- 中国地震局监测预报司,2007,地震学与地震观测,169~174,北京:地震出版社。
- 李山有、金星、马强等,2004,地震预警系统与智能应急控制系统研究,世界地震工程,20(4),21~26。
- 廖旭、黄河,2002,企业地震预警系统应用研究,地震工程与工程振动,22(6),142~149。
- 马强,2008,地震预警技术研究与应用,博士学位论文,哈尔滨:中国地震局工程力学研究所。
- 杨马陵、沈繁奎、王正尚,2004,预警等级预报——一种新的地震预报发布形式和对策的思考,国际地震动态,(8),1~12。
- 袁志祥、单修政、徐世芳等,2007,地震预警技术综述,自然灾害学报,16(6),216~223。
- 张红才、金星、李军等,2011,地震预警连续定位方法研究,地震工程与工程振动,31(6),168~176。
- 张红才、金星、李军等,2012,地震预警震级计算方法研究综述,地球物理学进展,27(2),464~474。
- 赵纪东、张志强,2009,地震预警系统的发展、应用及启示,地质通报,28(4),456~462。
- Andrew B L, Richard M A, 2005, Single-station earthquake characterization for early warning, Bulletin of the Seismological Society of America, 95(6), 2029~2039.
- Chen K P, Chang W Y, Cheng C T, 2012, Probability for simulating future earthquakes with $M_w \geq 6.0$ in Taiwan for seismic hazard for the earthquake catalog from 1900 to 2008, Bulletin of the Seismological Society of America, 102(5), 2252~2256.
- Chuang R Y, Miller M M, Chen Y G, et al, 2012, Inter seismic deformation and earthquake hazard along the southern most longitudinal valley fault, eastern Taiwan, Bulletin of the Seismological Society of America, 10(4), 1569~1582.
- Espinosa-Aranda J M, Cuellar A, Garcia A, 2009, Evolution of the Mexican seismic alert system (samex), Seismological Research

表5 本文研究预警时间与原预警系统
预警时间及实际观测对比

台站	本研究 预警时间 /s	原预警系统 预警时间 /s	实际走时 /s
平潭台	37.5	41	36.8
莆田台	40.6	55	40.5
福州台	52.6	63	51.8
厦门台	57.2	66	57.5

- Letters, **80**(5), 694~706.
- Espinosa-Aranda J M, Jimenez A, Ibarrola G, 1995, Mexico city seismic alert system, Seismological Research Letters, **66**(1), 42~53.
- Lin Y P, Zhao L, Hung S H, 2011, Assessment of tomography models of Taiwan using first-arrival times from the TAIGE active-source experiment, Bulletin of the Seismological Society of America, **101**(2), 866~880.
- Liu K S, Tsai Y B, 2009, Tsai large effects of Moho reflections(SmS) on peak ground motion in northwestern Taiwan, Bulletin of the Seismological Society of America, **99**(1), 255~267.
- Spielhagen R F, 2012, Hot spots in the Arctic: Natural archives as an early warning system for global warming, Geology, **40**(1), 1055~1056.
- Serdar H, Richard M A, Brown H, et al, 2014, Designing a network-based earthquake early warning algorithm for California: ElarmS-2, Bulletin of the Seismological Society of America, **104**(1), 162~173.
- Wyss M, 1991, Evaluation of proposed earthquake precursors, American Geophysics Union, Washington DC, **94**(1), 1~20.

A study on the early warning time of the strong earthquakes in Taiwan

*Chen Huifang*¹⁾ *Kang Lanchi*^{1,2)} *Jin Xing*^{1,2)} *Shao Pingrong*¹⁾ *Cao Yi*¹⁾

1) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract The paper collects the records by the Fujian Digital Seismic Network of 40 Taiwan shallow earthquakes with $M_s \geq 5.0$ from 1999 to 2013, analyzes the seismic phase(Pn, Sn phase) characteristics and travel-time rules, determines travel-time models and develops a seismic phase travel-time equation by two process fitting. With the deduction of processing time and network delay time, the method can provide an accurate estimation of early warning time of Taiwan earthquakes for the Fujian region, and has been officially employed in the earthquake early warning system of Fujian Province.

Key words: Strong earthquakes of Taiwan Characteristics of seismic phases Travel-time rule Early warning time