

杨陈, 郭凯, 张素灵, 黄志斌. 2015. 中国地震台网现状及其预警能力分析. 地震学报, 37(3): 508-515. doi:10.11939/jass.2015.03.013.

Yang C, Guo K, Zhang S L, Huang Z B. 2015. Status quo of China earthquake networks and analyses on its early warning capacity. *Acta Seismologica Sinica*, 37(3): 508-515. doi:10.11939/jass.2015.03.013.

中国地震台网现状及其预警能力分析^{*}

杨 陈^{1,2),*} 郭 凯²⁾ 张素灵²⁾ 黄志斌²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 本文讨论了影响地震预警能力的决定性因素. 通过对我国现有地震台网布局、数据传输延时和台网运行状况等方面的讨论, 对能否满足地震预警需求进行了分析, 并对台网现状的改进提出了相应的建议. 总体来说, 中国地震台网现状并不能满足地震预警需求, 除了需要对台网进行加密和提高相应的运行率之外, 还应对现有数据采集器和实时传输软件进行必要升级, 以达到地震预警对数据延时的需求.

关键词 地震预警能力 盲区 数据传输延时 台网布局

doi:10.11939/jass.2015.03.013 中图分类号: P315.61 文献标志码: A

Status quo of China earthquake networks and analyses on its early warning capacity

Yang Chen^{1,2),*} Guo Kai²⁾ Zhang Suling²⁾ Huang Zhibin²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: This paper discussed the decisive factors affecting the ability of earthquake early warning. Based on the distribution of existing seismic networks, data transmission delay and network running state, we analyzed whether they meet the needs for earthquake early warning, and made corresponding recommendations in order to improve the situation. Results show that the status quo of China earthquake networks did not meet the needs for earthquake early warning. Therefore, besides raising the network density and its operation rate, we should upgrade the existing seismic data acquisition system and real-time transmission software so as to satisfy the data transmission demand for earthquake early warning.

Key words: capacity for earthquake early warning; blind area; data transmission delay; layout of seismic networks

* 基金项目 中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20130217)资助.

收稿日期 2014-06-13 收到初稿, 2014-08-24 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: yangchen@seis.ac.cn

引言

地震预警的构想最早由美国科学家 Cooper(1868)提出, 他设想在距旧金山 100 km 外地震活动性很强的霍利斯特地区布设地震观测台站, 一旦地震发生就可以利用电磁波与地震波传播的时间差, 在震后很短时间内及时敲响市议政厅的警钟, 使人们能够采取一些紧急逃生避险措施, 以减少地震造成的人员伤亡。由于当时技术水平的局限, 这一构想并未实现。而随着计算机技术、数据传输处理技术、地震监测仪器以及观测方法的不断发展和成熟, 这一设想正逐渐变为现实。目前, 日本、墨西哥、土耳其、罗马尼亚等国家和我国台湾地区已经建成了各自的地震预警系统(Espinosa-Aranda *et al*, 1995; Erdik *et al*, 2003; Hoshiba *et al*, 2008; Allen *et al*, 2009; Hsiao *et al*, 2009; Kamigaichi *et al*, 2009)。包括我国在内, 美国、瑞士和意大利等国家也在开展地震预警实时测试(Wurman *et al*, 2007; Zollo *et al*, 2009; Peng *et al*, 2011)。

汶川大地震之后, 地震预警作为目前地震灾害防御的重要手段之一正逐步走向我国公众的视野。与此同时, 根据国务院发布的《国家防震减灾规划(2006—2020 年)》提出的目标(国务院办公厅, 2007), 地震预警系统的建设作为目前我国防震减灾的一项重点任务即将全面展开。2013 年 6 月验收的国家科技支撑计划“地震预警与烈度速报系统的研究与示范应用”标志着中国地震预警的研究与建设迈出了坚实的一步; 已经完成立项的“国家地震烈度速报与预警工程”标志着中国地震预警系统的建设已经摆上了地震监测的日程表。在该系统开始建设之前, 对中国地震台网现状进行分析和评估意义重大, 只有这样才能找出相应的不足, 明确改进的方向。本文以此为切入点, 对中国地震台网现状能否满足地震预警需求进行分析, 并提出改进的方向和建议, 希望对我国地震预警系统的建设能有一些参考意义。

1 中国地震台网现状

1.1 测震及强震动台站分布

目前, 我国有 1 个国家测震台网和 32 个省级测震台网组成的覆盖全国的地震监测台网及 1014 个正式运行的测震台站(图 1)。其中包括 148 个国家台站(含境外台站 4 个)、814 个区域台站、33 个火山台站以及 2 个台阵的 19 个台站点。所有正式运行的测震台站均以实时数据流的方式进行全国数据交换。

与测震台站平均分布在各省不同, 我国的强震动台站根据地震危险性的不同主要分布在 21 个地震重点监视防御区内, 其中固定强震动台站共计 1152 个(图 2), 另外还有北京、天津、兰州、昆明和乌鲁木齐五大城市烈度速报台网共计烈度速报台站 300 个。除了部分重点区域正在改造和部分新建的台站具有数据实时传输功能之外, 其它强震动台站均以事件触发的方式进行数据回传。

1.2 台站仪器及运行现状

目前, 我国测震台站所使用的传感器主要有 BBVS-60、BBVS-120、CMG-3ESPC、KS-2000、CTS-1 系列、JCZ-1、FSS-3DBH、CMG-3TB 等, 数据采集器以 EDAS-24 系列、CMG-DM24、TDE-324、SMART-24 为主; 我国强震动台站所使用的传感器以 SLJ-100 加速度计和 ENTA 数采内置的 Epsensor 加速度计为主, 数据采集器主要有 ENTA、

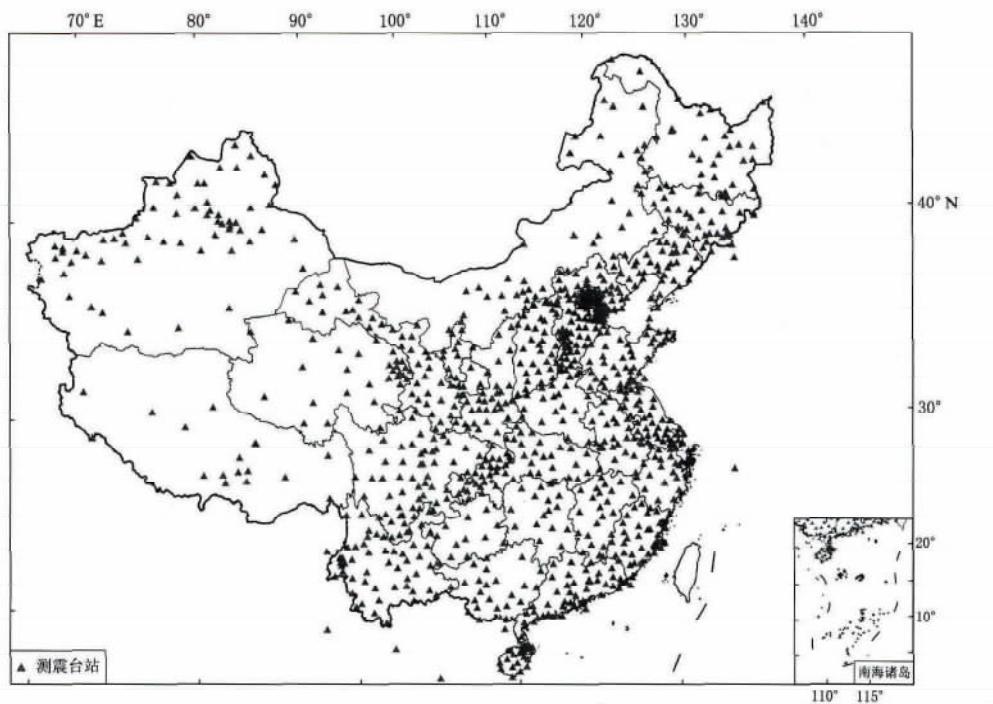


图 1 中国大陆测震台站分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations in Chinese mainland

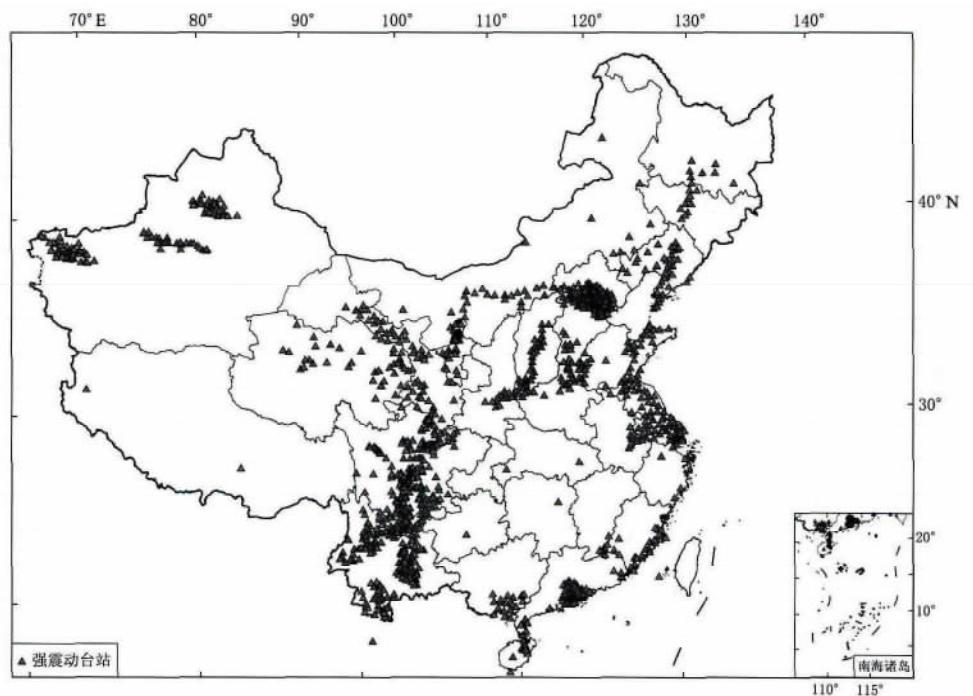


图 2 中国大陆强震动台站分布图

Fig. 2 Distribution of strong motion stations in Chinese mainland

MR2002、GDQJ、GSMA、K2 等, 其中 ENTA 占 55% 左右, MR2002 占 30% 左右。

由于目前我国大部分强震动台站并不具备实时传输功能, 本文仅以测震台站实时运行率来反映中国地震台网运行情况。根据中国测震台网运行年报数据^①, 2009—2013 年的测震台网全网实时运行率分别为 93.74%, 94.89%, 95.46%, 95.22% 和 95.23%, 近几年的总体运行率基本保持在 95% 左右, 继续提高的空间有限且难度不小。

2 地震预警关键技术指标

2.1 预警盲区

通常情况下, 接收到地震预警信号之后, 在破坏性地震波到达之前的这段时间为地震预警反应时间, 该时间段的长度反映了地震预警的效能。其长短与震源的相对位置(决定破坏性地震波到达所需要的时间)和地震预警信号发布的时间直接相关, 而破坏性地震波通常情况下定义为 S 波及其之后到达的面波。本文定义预警盲区为在地震预警警报发出时所对应的 S 波传播区域。很显然, 对于盲区之内的区域, 我们是无法提供预警信息的。同样, 预警盲区范围的大小也直接反映了地震预警系统的效能, 预警盲区越小, 预警系统的效能越高, 反之亦然。

2.2 影响地震预警系统能力的关键因素

在不考虑地震危险性等外部因素的情况下, 决定地震预警系统效能的关键因素为预警盲区的大小。预警盲区的大小由发出地震预警时所花费的时间决定。该时间包括以下几个方面: P 波传播到台站的时间、数据传输延时、地震参数确定的时间、计算机处理及发布时间以及系统反应时间。其中, P 波传播到台站的时间与震源深度、台网密度以及地震发生地点有关; 数据传输延时与仪器和网络相关; 地震参数确定的时间与选取的定位方法和震级确定方法有关; 计算机处理及发布时间与计算机性能及网络状况相关; 系统反应时间与系统本身相关, 不同的系统反应时间不完全相同。出于对中国地震台网现状讨论因素的考虑, 本文主要从数据传输延时和台网密度及台间距这两方面进行分析。

3 我国地震台网的地震预警关键技术指标分析

3.1 数据传输延时

以数据从台站传输到中国地震台网中心地震预警处理系统为例, 对数据传输延时进行讨论。数据传输流程如图 3 所示。可以看出, 数据传输延时主要包括 5 个部分: 数据采集器打包延时 1, 数据传输网络延时 2, 仪器适配器打包延时 3, 省级台网流服务器到台网中心流服务器网络延时 4, 以及台网中心流服务器到地震预警处理系统网络延时 5。

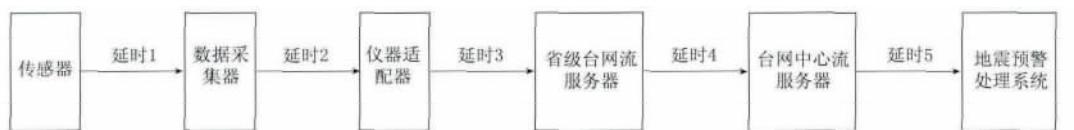


图 3 地震数据传输流程图

Fig. 3 Flow chart of seismic data transmission

^① 中国地震台网中心. 2010—2014. 中国地震台网运行年报(2009—2013).

延时 1 由数据采集器决定。此部分延时分为两个部分：数据本身长度和数据打包时间。现阶段中国地震台网大部分数采所采用的打包方式为总数据量达到 512 字节时，再整体进行传输。由于采用 STEIM 压缩算法，所以 512 字节所包含的采样点数变化较大，平时的地面上噪声因台基差距，512 字节的采样点数多为 350—450 之间，而地震时则压缩率大大降低，甚至完全不能压缩。现有台网设置的采样率为 100 点，大部分情况下，数据长度大约为 3—4 s，而在地震发生时会稍短些。为了适应预警的需求，中国地震局“中国地震背景场探测项目”开始使用新一代数采，如港震公司的 EDAS-24GN 和 REFTEK 公司的 130-REN-3 数采可以采用 0.2 s 打包的方式，此部分最小延时为 0.2 s。数采打包时间与数采本身的性能和打包方式有关，在目前的情况下，大部分数采打包时间都能控制在 1 s 以内。

延时 2 由地震台站到省级台网的网络决定。现阶段地震台站到省级台网的数据传输网络主要有 SDH、MSTP、3G 和卫星等。其中，有线专网（SDH、MSTP 等）传输延时一般在 10 ms 左右，3G 一般在 100 ms 以内，卫星一般在 300 ms 以内。总体来说，此部分延时大部分在 10—300 ms 之间，一般不会超过 1 s。

延时 3 由仪器适配器的打包方式决定。与目前数采的打包方式相同，现阶段使用的仪器适配器采用的打包方式为 512 字节一个包进行对外服务。如果接收到的数采发过来的数据包为 512 字节，则立即对外发送，此时的延时仅为计算机处理时间，单位为 ms 级；如果数据包不满 512 字节，则要等到满 512 字节再对外服务。在目前的情况下，即使采用最新的数采进行 0.2 s 打包，在此环节仍要以 512 字节的方式进行对外服务。

延时 4 由省级台网到台网中心的网络决定。目前此部分网络主要为行业专线，大部分延时在 30 ms 左右或者更少，少数延时较长的一般也不会超过 60 ms。

延时 5 由台网中心内部网络决定。由于是局域网内部，此部分延时一般在 5 ms 以内。

总体来说，延时 2、延时 4 和延时 5 为网络延时，总数一般不会超过 1 s；而延时 1 和延时 3 为仪器及适配器的系统延时，由于存在瓶颈效应，一般在 3—4 s 之间；再加上计算机处理时间，目前台站数据到处理系统的延时一般为 5 s 左右。另外，由于通讯链路堵塞等因素的影响，目前在台网中心实测的数据延时一般在 5—10 s 之间。

3.2 台网密度及台间距

台网布局决定了 P 波传播到台站所需的时间，反映台网布局的一个重要指标是台网密度。由于通常情况下地震发生的概率并非完全相同，而台网布局也并不均匀，为了简化分析问题的指标，我们以一个简单的模型来计算台间距对预警盲区的影响（杨陈，2013）。

假设采用双台预警模式，地震发生在两个台站连线的中间，台间距为 L ，目前地震预警中通常使用的震级测定方法中 P 波截取记录时间长度为 3 s（Wu, Zhao, 2006）。假设理想状况下的数据传输延时及处理、发布等用时累计为 2 s，系统反应时间暂不考虑，取 $v_p = 6.0 \text{ km/s}$, $v_s = 3.5 \text{ km/s}$ ，则此时盲区半径 R_0 为

$$R_0 = \sqrt{[v_s(t_1 + t_2 + t_3)]^2 - h^2} = \sqrt{\left[v_s \left(\frac{\sqrt{L^2/4 + h^2}}{v_p} + t_2 + t_3 \right) \right]^2 - h^2}, \quad (1)$$

式中： t_1 为初至 P 波走时，公式中为 $\sqrt{L^2/4 + h^2}/v_p$ ； t_2 为 P 波截取时间长度，取为 3 s； t_3 为数据传输延时及处理、发布等用时，取为 2 s。

台站间距 L 与盲区半径 R_0 的关系如图 4 所示。由式(1)和图 4 可以看出，盲区半径是存在极限值的。即当 $L=0$ 时，台网密度达到极限，地震发生在双台的下方；当震源深度为

10 km 时, 此时对应的最小盲区半径 R_0 为 21 km.

在采取双台预警的理想状况下, 当震源深度为 10 km 时, 由于极值的存在, 即使无限缩小台间距(加密台站), 盲区半径也不会小于 21 km. 由图 4 可以看出, 当台间距小于 10 km 时, 加密台站对于减小预警盲区的效果并不明显(盲区半径随台站密度的增加而减小得非常慢); 当台间距大于 20 km 时, 此时增加台间距, 预警盲区半径基本随之线性增加. 由此可见, 当台间距小到一定程度之后, 继续加密台站对于缩小预警盲区并不能取得与投入相符的效果. 只有以断层分布为基础, 根据合理的台间距进行台站布设, 综合考虑建设成本和预警的实际需求, 才能建成实用高效的地震预警系统.

3.3 我国地震台网密度及数据延时

在不包括台阵、火山台站和烈度速报台站的前提下, 目前我国正式运行的测震台站有 966 个, 强震动台站有 1152 个. 假设这些台站都能参与预警, 我们对各地区的台网密度和平均台间距作了一个简单的统计, 如表 1 所示.

表 1 各地区台网密度及平均台间距

Table 1 Network density and average station distance of each region

区域	面积 /(10^4 km 2)	测震 台站数	强震动 台站数	台站总数	台网密度 /(个· 10^{-4} km $^{-2}$)	平均台 间距/km
北京	1.68	31	54	85	50.60	14.06
上海	0.63	14	14	28	44.44	15.00
天津	1.13	31	33	64	56.64	13.29
重庆	8.23	12	0	12	1.46	82.82
河北	18.77	70	44	114	6.07	40.58
山西	15.63	32	30	62	3.97	50.21
辽宁	14.59	35	39	74	5.07	44.40
吉林	18.74	23	10	33	1.76	75.36
黑龙江	45.48	28	8	36	0.79	112.40
江苏	10.26	37	50	87	8.48	34.34
浙江	10.18	24	5	29	2.85	59.25
安徽	13.96	24	9	33	2.36	65.04
福建	12.13	33	34	67	5.52	42.55
江西	16.69	24	6	30	1.80	74.59
山东	15.38	38	35	73	4.75	45.90
河南	16.70	21	20	41	2.46	63.82
湖北	18.59	27	2	29	1.56	80.06
湖南	21.18	16	1	17	0.80	111.62
广东	17.98	44	55	99	5.51	42.62
海南	3.54	19	13	32	9.04	33.26
四川	48.14	60	211	271	5.63	42.15
贵州	17.60	13	1	14	0.80	112.12

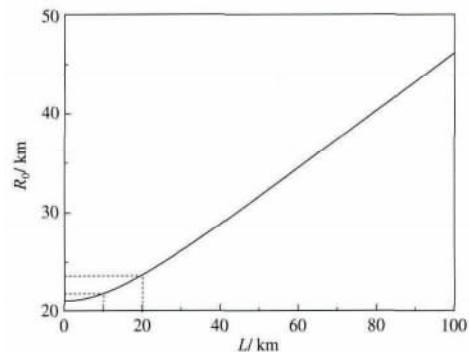


图 4 台间距 L 与盲区半径 R_0 的关系

Fig. 4 Relationship between station interval L and radius R_0 of blind area

续表 1

区域	面积 $/(10^4 \text{ km}^2)$	测震 台站数	强震动 台站数	台站总数	台网密度 $/(个 \cdot 10^{-4} \text{ km}^{-2})$	平均台 间距/km
云南	38.33	48	176	224	5.84	41.37
陕西	20.56	29	15	44	2.14	68.36
甘肃	45.44	44	50	94	2.07	69.53
青海	72.23	30	40	70	0.97	101.58
内蒙	118.30	39	32	71	0.60	129.08
广西	23.67	22	19	41	1.73	75.98
宁夏	6.64	13	47	60	9.04	33.27
新疆	166.00	69	97	166	1.00	100.00
西藏	122.84	16	2	18	0.15	261.24

由前面 3.2 节的初步分析可以得出, 在目前的状况下, 实现地震预警的合理台间距为 10—20 km. 由表 1 可以看出, 即使目前运行的测震台站和强震动台站都能参与地震预警, 但也只有北京、天津和上海地区能满足这个基本条件. 而由于强震动台站的分布并不均匀 (图 2), 其中只有河北、云南、四川等地的部分台站密集地区的平均台间距在 20 km 之内, 能够满足地震预警的基本条件.

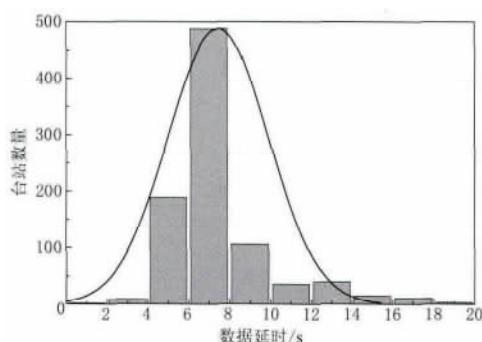


图 5 台站数据传输延时分布

Fig. 5 Distribution of station data transmission delay

对于数据延时, 我们在位于中国地震台网中心的一台服务器上作了一个简单的测算. 具体方法如下: 将该台服务器的时间进行网络授时, 尽可能保证其时间的准确性, 对实时数据流进行简单的解析, 用当前时间减去数据头的时间, 每隔一分钟统计一次, 并持续统计一段时间, 得出各台站延时的平均值. 对于统计数据, 我们去掉了一些由于 GPS 错误和网络堵塞续传等原因造成较大延时的不合理结果, 使用一天的平均延时得到台站数据传输延时分布图, 如图 5 所示. 可以看出, 去除个别异常点, 大部分台站的数据传输延时都

在 4—10 s 之间, 其中以 6—8 s 居多(约占 55%). 延时较大的原因可能跟数采与流服务器的设置有关, 也有部分原因是由于网络堵塞后进行断点续传造成的, 基本符合 3.1 节的分析. 而对于数据异常点(负值或平均延时大于 200 s 的), 经过逐一排查, 其原因都是由于台站 GPS 故障造成的.

4 讨论与结论

根据前面的分析和数据统计结果可以得出, 我国地震台网的现状并不能满足地震预警的需求, 主要表现为大部分地区台站密度不足和整体数据延时较大. 对于前者, 除了根据需要对现有强震动台站进行改造和新建之外, 还应充分发挥各方面的力量, 尽可能地将已经布设的地方台和企业台等纳入地震预警系统中, 为地震预警提供良好的台站基础条件. 对于后者, 需要从两方面进行升级或者改造: 首先要对现有数据采集器进行升级或改造, 改变其打包和传输模式, 将此部分的延时降到合理水平. 由于目前的实时数据传输软件是

针对现有的数采打包和传输模式编写而成, 在数采打包和传输模式改变后, 实时数据传输软件也应相应地进行升级, 只有这样才能保证传输的顺畅, 不至于在某个环节产生瓶颈。至于网络传输部分的延时, 目前已经达到较为合理的水平, 为了满足地震预警的需求, 则需要从稳定性等方面进行加强, 尽量避免网络堵塞及故障的出现。

中国地震局“中国地震背景场探测项目”设置了首都圈和兰州圈预警中心, 目前正在试运行中。随着“国家地震烈度速报与预警工程”立项的完成, 后续工作即将全面展开。这一切均表明, 在我国建设地震预警系统已经逐步摆上了日程。除了对重点区域进行布防和新建台站之外, 还应对现有系统进行改造和升级。只有这样, 才能在有限的成本下, 合理、有效地利用现有基础, 实现资源利用的最大化。而建成后的地震预警系统, 也必将成为重要的支柱力量, 为我国的防震减灾事业做出应有的贡献。

在本文撰写过程中, 吴忠良研究员和杨大克研究员给予了耐心指导, 审稿专家对本文提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 国务院办公厅. 2007. 国家防震减灾规划(2006—2020年)[R]. 北京: 国务院办公厅: 2.
- General Office of the State Council. 2007. *National Earthquake Disaster Mitigation Planning (2006—2020)*[R]. Beijing: General Office of the State Council: 2 (in Chinese).
- 杨陈. 2013. 中国地震预警系统建设的几个关键问题[J]. 工程研究: 跨学科视野中的工程, 5(4): 354—364.
- Yang C. 2013. Some key problems of earthquake early warning system construction in China[J]. *Journal of Engineering Studies*, 5(4): 354—364 (in Chinese).
- Allen R M, Gasparini P, Kamigaichi O, Böse M. 2009. The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview[J]. *Seismol Res Lett*, 80(5): 682—693.
- Cooper J D. 1868. *Letter to Editor*[N]. San Francisco Daily Evening Bulletin, 1868-11-3.
- Erdik M, Fahjan Y, Ozel O, Alcik H, Mert A, Gul M. 2003. Istanbul earthquake rapid response and the early warning system[J]. *Bull Earthq Eng*, 1(1): 157—163.
- Espinosa-Aranda J M, Jiménez A, Ibarrola G, Alcantar F, Aguilar A, Inostroza M, Maldonado S. 1995. Mexico city seismic alert system[J]. *Seismol Res Lett*, 66(6): 42—53.
- Hoshiba M, Kamigaichi O, Saito M, Tsukada S, Hamada N. 2008. Earthquake early warning starts nationwide in Japan [J]. *Eos, Trans AGU*, 89(8): 73—74.
- Hsiao N C, Wu Y M, Shin T C, Zhao L, Teng T L. 2009. Development of earthquake early warning system in Taiwan [J]. *Geophys Res Lett*, 36(5): L00B02.
- Kamigaichi O, Saito M, Doi K, Matsumori T, Tsukada S, Takeda K, Shimoyama T, Nakamura K, Kiyomoto M, Watanabe Y. 2009. Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects[J]. *Seismol Res Lett*, 80(5): 717—726.
- Peng H S, Wu Z L, Wu Y M, Yu S M, Zhang D N, Huang W H. 2011. Developing a prototype earthquake early warning system in the Beijing capital region[J]. *Seismol Res Lett*, 82(3): 394—403.
- Wu Y M, Zhao L. 2006. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning[J]. *Geophys Res Lett*, 33(16): L16312.
- Wurman G, Allen R M, Lombard P. 2007. Toward earthquake early warning in northern California[J]. *J Geophys Res*, 112(B8): B08311.
- Zollo A, Iannaccone G, Lancieri M, Cantore L, Convertito V, Emolo A, Festa G, Gallvic F, Vassallo M, Martino C, Satriano C, Gasparini P. 2009. Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation[J]. *Geophys Res Lett*, 36(5): L00B07.