

李佳威、吴忠良,2016,地震预警系统的“盲区”控制问题——以首都圈地震预警原型系统为例,中国地震,32(4),584~594。

地震预警系统的“盲区”控制问题

——以首都圈地震预警原型系统为例

李佳威 吴忠良

中国地震局地球物理研究所,北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

摘要 以首都圈地震预警原型系统为例,讨论了地震早期预警系统(EEWS)设计中如何通过“盲区”的控制达到最大限度减轻地震灾害损失的目的,认为如果不仅考虑走时,而且考虑有限震源尺度和记录台站的实际工作状况,那么在台间距为 20km 时继续加密台站,虽不再能明显减小“盲区”,却仍可以对控制“盲区”、提高预警系统的减灾效能发挥重要作用。

关键词: 地震早期预警 预警盲区 首都圈

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0584-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在与地震早期预警系统(EEWS,以下简称“地震预警系统”)相关的物理问题(Satriano et al,2011)中,“盲区”是一个关键问题。关于“盲区”,已有多方面的讨论(Kanamori,2005; Wu et al,2005a、2005b; Allen,2007; Allen et al,2009; Ma et al,2012; Kuyuk et al,2013; Peng et al,2013; 张晁军等,2013a、2013b; 韩渭宾等,2015; 杨陈等,2015)。由于 EEWS 的实质是利用 P 波信号对后续 S 波的破坏进行预警,因此“盲区”的存在,完全是由于预警系统自身的原因。一个极端情况是,一些震源较深的地震,实际上并不存在预警“盲区”。

关于 EEWS 中“盲区”产生的机制,早有透彻的分析。例如, Kuyuk 等(2013)以美国“加州统一地震台网”(CISN)为例,用模拟计算的方法给出了当平均震源深度为 8km,且在台间距大于 20km 时,预警“盲区”随台站密度的变化明显,但在台间距小于 20km 时,增加台站的密度并不能显著缩小盲区半径(该半径约 20km)。杨陈等(2015)针对平均震源深度 10km 的情况,得到类似结果。由于长期以来的一系列研究结果,“20km 盲区”和“20km 台间距”成为一个甚至不加说明而直接采用的参考值(袁志祥等,2007; 韩渭宾等,2015)。

但是,上述简单明确的结论,特别是“20km 盲区”或“20km 台间距”的结果,不仅是针对平均震源深度 10¹km 数量级、4 台站触发的情况得到的,而且是针对点源和不考虑台站失效的“理想”情况得到的。实际的地震观测解释工作与这 2 个理想条件是有差距的,这几乎是常识。本文针对这一问题,以首都圈地震预警原型系统为例,讨论在 EEWS 的设计中,如何

[收稿日期] 2016-04-14; [修订日期] 2016-06-07

[项目类别] “国家基础野外观测研究站”专项支持

[作者简介] 李佳威,男,1992 年生,在读硕士研究生。E-mail:lijw@cea-igp.ac.cn

通过“盲区控制”达到最大限度减轻地震灾害损失的目的。此处所说的“盲区控制”是指在考虑到地震观测解释工作和地震震源的实际情况下,尽可能地不使不可避免的“盲区”出现不必要的扩大。一个与以往有所不同的结论是,如果不仅考虑走时,而且考虑地震观测的实际情况和地震震源本身,那么在 20km 台间距情况下适当加密台站,仍不失为提高预警系统效能的有效措施。

1 首都圈地震预警原型系统

首都圈地震预警原型系统由中国地震局地球物理研究所和台湾大学地球科学系在 2007 年开始合作建设并试运行,2010 年全部建设完成。主要基于首都圈地震台网所属的 94 个宽频带(BB)地震台和 68 个短周期(SP)地震台,这些地震台分别位于首都圈西部山区和东部平原地区,平均台间距约 50km(图 1)。Peng 等(2011)详细介绍了该系统的工作状况。

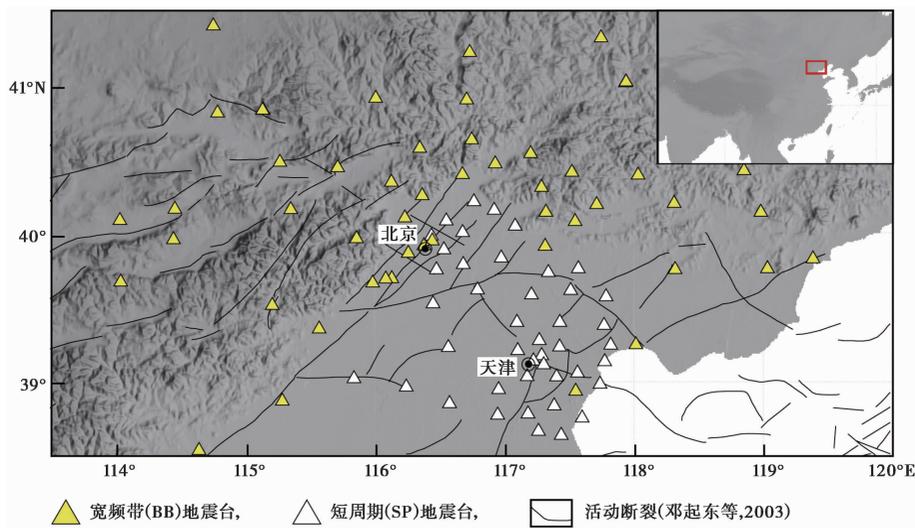


图 1 首都圈地震预警原型系统台站分布

右上方图给出了研究区(38.5°~41.5°N, 113.5°~120°E)。

背景地形使用了全球数字高程 gtopo30 数据(<ftp://edcftp.cr.usgs.gov>)

平均震源深度在预警系统的设计中具有重要意义。为得到首都圈地区的平均震源深度,使用“十五”国家数字地震台网建成后的地震目录进行分析,其中包括 2009-01-01~2015-09-14 共 12947 个地震(地震目录来自中国地震台网中心的全国地震编目系统, <http://10.5.202.22/bianmu/index.jsp>)。首先,用统计地震学工具(<http://www.corssa.org/>),根据 Gutenberg-Richter 关系对目录进行完整性分析。图 2(a)和 2(b)分别给出了未经筛选的 12947 个地震的分布和筛选前后的震源深度的频次统计,可以看出,6km 可作为首都圈地区的震源“优势深度”,这一深度与 Kuyuk 等(2013)讨论的加州地区有相似性,但无论是从地震分布的广泛性和随机性,还是从有地震记录以来的强震情况看,两地仍有较大差别。6km 的“优势深度”结果,其精准度和代表性均有明显的局限性:首先,目前可以得到的地震目录并未提供深度测定的不确定性范围或测量误差估计;其次,现有的地震目录是用均匀分层地

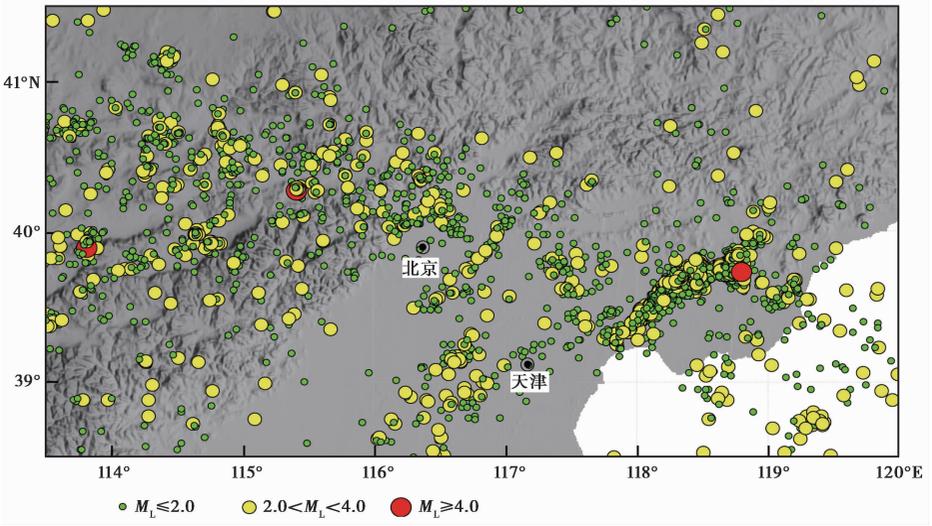


图 2(a) 2009-01-01~2015-09-14 首都圈地区(范围同图 1)12947 个地震的震中分布

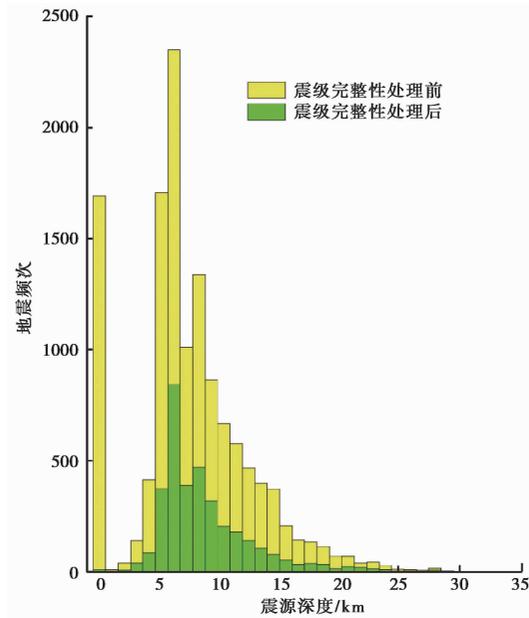


图 2(b) 首都圈地区地震的震源深度统计

对 2009-01-01~2015-09-14 共 12947 个地震进行完整性筛选,并分别进行统计,分别如黄色和绿色柱状图所示,统计的步长和窗长均为 1km。图中 0km 左右的峰值,既包括深度无法测定的地震,也包括人工爆破,因对分析影响不大,故未予考虑

壳模型,由台网常规定位得到的;其次,所用地震为近期中小地震,据此得到的分布是否能全面反映该区历史上长期以来的地震深度分布,特别是 6km 能否作为中强震的“起始深度”,仍是今后需要关注的问题。然而,这一结果,可以像加州地区约 8km 的“平均深度”一样,作为预警系统设计的一个初始参考。中小地震的震源尺度不大,也使得简单的频度统计具有

较为清楚的物理意义。也因此,在图 2(b)中,没有进一步考虑不同地区的深度差别,例如东部和西部的差别。

2 首都圈地震预警原型系统的“盲区”分布

地震预警系统的设计中,通常以一个简单的地壳模型来估计参数。根据以往在华北特别是首都圈地区开展的地球物理探测工作(丁志峰等,1994;李强等,1999;嘉世旭等,2005;齐诚等,2006),结合地震台网定位采用的地壳模型,此处取一个均匀地壳模型,波速分别为 $V_p = 6\text{km/s}$, $V_s = 3.5\text{km/s}$ 。

按照 Kuyuk 等(2013)的方法,图 3 给出了首都圈地震预警原型系统的台站平均间距分布。可以看到首都圈地震预警原型系统的台站密度大致相当于美国加州和日本的中等水平,其中北京、天津与旧金山、东京的差距仍是明显的。应该指出,首都圈地震预警原型系统是一个基于地震台网(中国地震局长期以来称为“测震”台网)的实验性的预警原型系统,因此与“真正的”地震预警系统是有差别的。但另一方面,利用这一原型系统的实验结果,可以为地震预警系统的设计提供参考。而这也正是建设原型系统的目的。

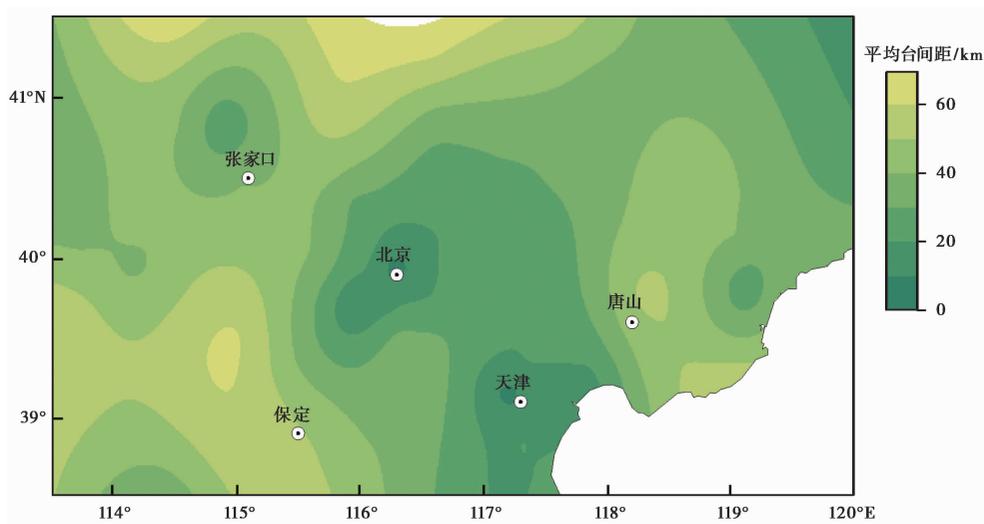


图 3 首都圈地震预警原型系统的“平均台间距”

其中,某一台站位置处相应的“平均台间距”由该台与附近 3 个台的台间距取平均得到(Kuyuk et al, 2013)。等值线在最小曲率法插值的基础上做出(Smith et al, 1990)

“盲区”的地震学图像简单明了(Kuyuk et al, 2013)。假定在均匀地壳中,对于深度为 H 的点源,震中距为 Δ 的台站上接收到的 P 波走时为

$$t_p = \frac{\sqrt{\Delta^2 + H^2}}{V_p} \quad (1)$$

再经过时间 T 的处理, S 波传播的水平距离

$$r_{BZ} = \sqrt{(t_p + T)^2 V_s^2 - H^2} \quad (2)$$

在这个距离范围内,由于用 P 波信号做出的预警尚未发出, S 波即已到达,因而无法实

现利用 P 波的信号对后续 S 波的破坏进行预警。相应地,这个区域也称为“预警盲区”。为与 Kuyuk 等(2013)的结果进行直接比较,此处采用 3s 时间确定震级、1s 时间进行数据处理和传输的“理想”情况,即 $T=4s$ 。可以看到,在这里起决定性作用的 2 个因素,一个是震源深度 H ,另一个是预警系统的处理时间 T ,因此当震中距 Δ 与 H 相差不多,或者走时 t_p 与 T 相差不多时,改变台站的密度,无法对“盲区”半径产生明显的影响。通常,在采用 n 个(例如 4 个)台站记录的情况下,只需将上述震中距 Δ 取做 P 波第 n 个到达的地震台的震中距即可。针对加州的“20km 台间距”的结果,正是在 $n=4$ 的情况下得到的。图 4 按照上述方法和参数,给出了 4 台站触发预警情况下的“盲区”分布。为与 Kuyuk 等(2013)得到的加州的结果进行直接比较,图中采用了与之相同的色标,将 70km 作为“饱和值”。

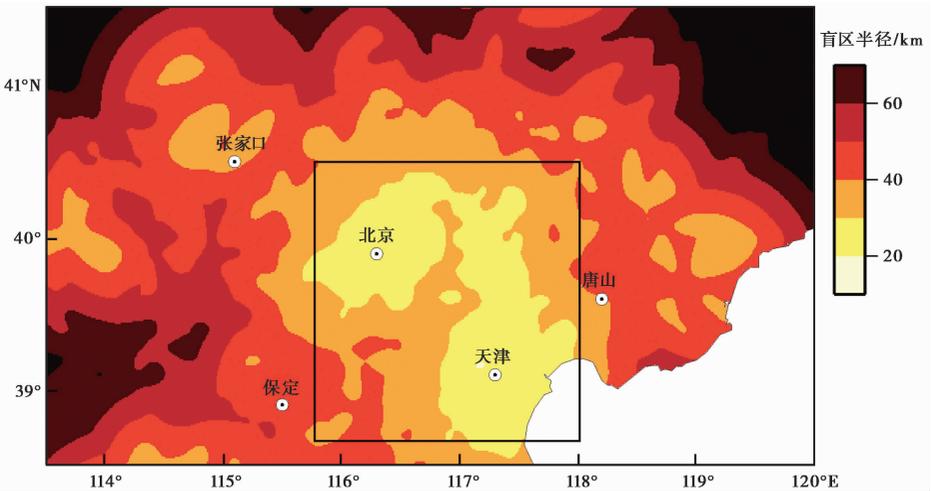


图 4 首都圈地震预警原型系统采用 4 台站触发、处理时间为 4s 的“盲区”半径分布
图中黑色矩形框内的地区“盲区”半径 < 40km

Kuyuk 等(2013)用 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 网格上随机分布的模拟震源、均匀分布的台站和一个无限半空间介质模型,模拟计算得到一系列台间距情况下的平均“盲区”半径(图 5)。这里用此图来说明考察台间距对盲区影响的“等效方法”。由图 5 可见,对于台间距为 30km 的台站分布,采用 4 台站触发时,盲区的半径由 A 点的纵坐标给出。在台间距为 30km 不变时,使触发台站数量为 2,则“盲区”半径由 B 点的纵坐标给出,此时的“盲区”等效于在 4 台站触发条件下(等效于图上 C 点)把台间距减少为 20km 时得到的结果。就是说,在图 5 所示的情况下,若想考察将台间距从 30km 缩小到 20km 时“盲区”的情况,只需在绘图时将 4 个台站触发改为 2 个台站触发即可。

3 “盲区”控制问题

以往的研究中(如 Xu et al, 2008),针对首都圈地区的相似结果已有充分体现。本文的目的既不是将 Kuyuk 等(2013)的方法简单应用于首都圈地震预警原型系统,也不是重复以往对首都圈的评估结果并与加州的结果进行比较,而是试图以这一结果为切入点,对预警系统的“盲区控制”问题作进一步讨论。

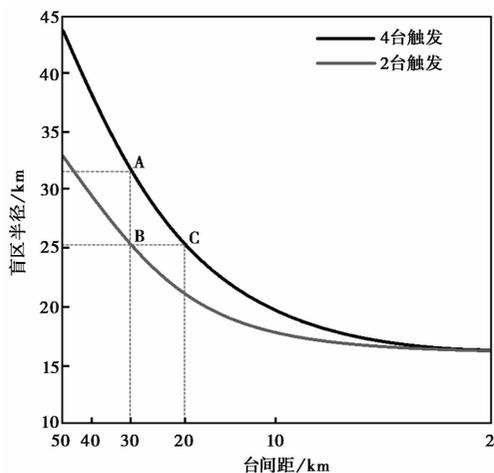


图5 4个台站及2个台站触发时,“盲区”半径随台间距的变化

图4中“盲区”的计算方法是,对于 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 网格上的任一点,假定震源深度为6km,则找到离震中最近的4个台站,对第4个台站,按式(1)、(2)计算“盲区”的半径。从图5可见,如果把4个台站改为2个台站,则所得结果等效于在加密台站或缩小台间距情况下4个台站触发的结果。首都圈地震预警原型系统目前的平均台间距为50km左右,图6表明,在此基础上继续加密台站,可以明显改善预警能力。

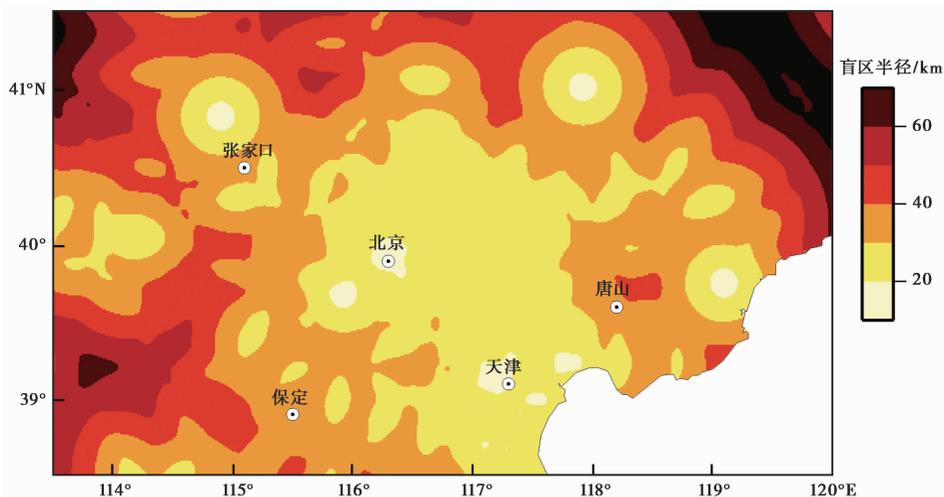


图6 首都圈地震预警原型系统采用2个台站触发、处理时间为4s时的“盲区”半径分布

图5所给出的“等效方法”还可以倒过来使用。在图7中,将4个台站触发变成了5个台站触发,此时预警“盲区”明显扩大,相当于降低了台站密度。从地震观测与解释的角度说,地震台站因各种原因不能完成记录和报警的情况常常是不可避免的。考虑4台站触发的情况,如果在距震中最近的4个台站中有1个台站出现问题,则观测系统不得不使用第5个台站的结果才能完成相应的预警,这等效于扩大了台间距,也等效于增加了“盲区”半径。事实

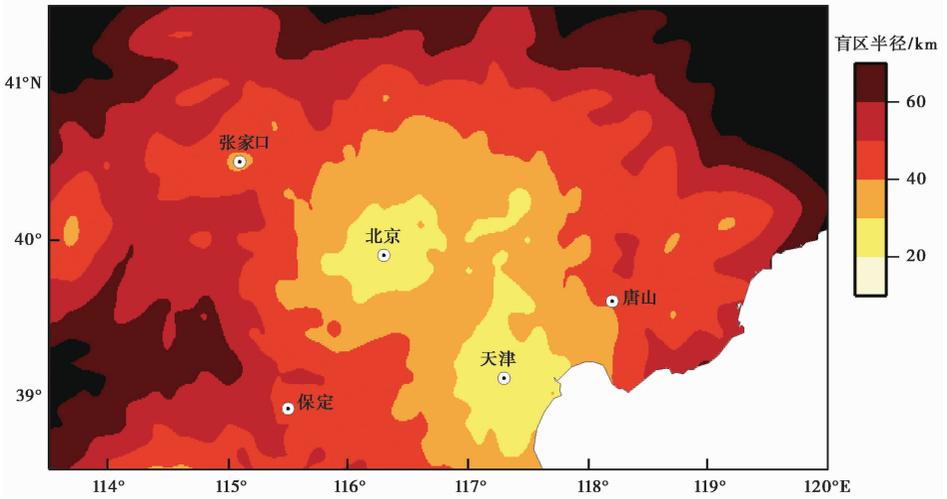


图7 首都圈地震预警原型系统采用5个台站触发、处理时间为4s时的“盲区”半径分布

上,由于“漏报”的存在,在“理想”的“黑色盲区”边界上,理论上存在“灰色盲区”,“灰色盲区”的大小,取决于台站的工作状况。目前对“灰色盲区”的讨论,似乎并未得到足够重视。“在20km台间距情况下继续加密台站已无意义”的看法,与这一情况直接相关。

首都圈地震预警原型系统的实验性运转表明(Peng et al, 2011),5个台站触发,或更多台站触发,可以得到比较好的预警震级估计;对于4个台站触发,预警震级估计的误差可达1个震级单位。这样,在一定的触发震级阈值的情况下,出现“漏报”,以致必须等待更多台站触发,这种情况不可避免,4个台站触发是其可容忍的下限。针对这种情况的一个直接结论就是,在“饱和值”(20km)之内继续增加台站的密度,固然不能使预警“盲区”继续减小,却可以通过上述“增台触发”的机制,控制已有的不可避免的“盲区”不再扩大,或者将上述“灰色盲区”控制在最小(甚至是零)范围。

4 “盲区控制”对减轻地震灾害的重要性:强震的假定情境

预警系统的目的,是最大限度减轻地震灾害损失(郭凯等,2016)。越是对极震区,对这一效用的要求就越迫切。图8(a)给出了1976年7月28日唐山地震的震中位置和烈度分布。可以看出,由于这次7.8级地震的震源尺度的有限性,地震烈度呈椭圆状分布。一个值得注意的情况是,如果把“20km盲区”也同时画在这一图上的话,那么X度区北端约10%的面积,处在“预警盲区”之外。假定此时有预警系统发挥作用的话,那么这一10%面积的X度区的损失,将明显减轻。在这一假定情境(EEWS scenario)下,如果“20km盲区”得不到有效控制,那么全部的X度区都将“沦陷”于“盲区”之中,从而使EEWS的作用将受到严重影响。

事实上,传统上“越是需要预警的地方,EEWS越不能发挥作用”的并不全面的概念,是建立在“前现代地震学时代”的“点源”概念的基础上的。应该说,由于唐山地震的“双侧破裂”的震源性质,这里的假定情境,并不特别有利于说明这个问题。对于单侧破裂性质的2008年5月12日汶川地震,预警“盲区”甚至可以显著地小于震源区本身(Ma et al, 2012)。

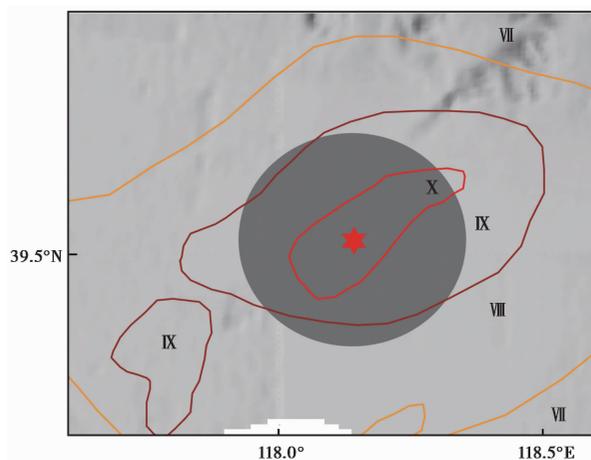


图 8(a) 1976 年唐山地震等震线、震中(陈非比等, 1979; 马宗晋等, 1982)与“20km 盲区”示意图

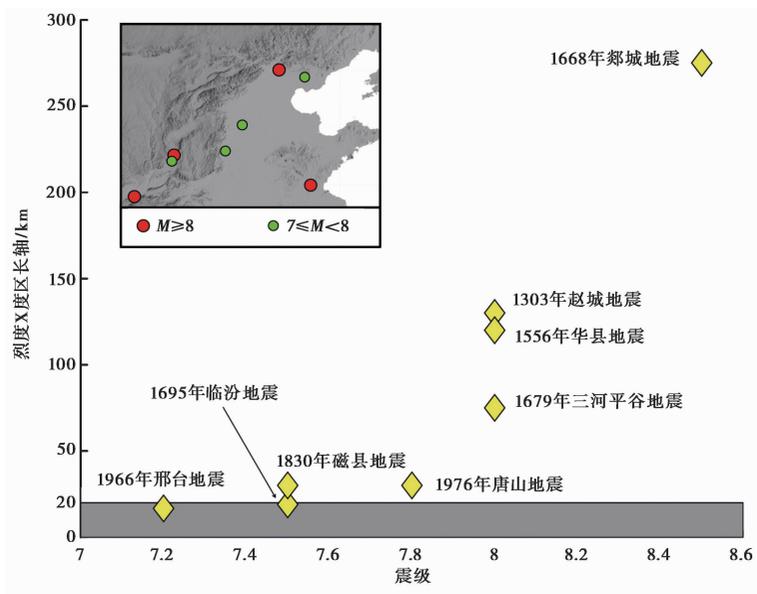


图 8(b) 华北地区历史强震 X 度区长轴与震级的关系

其中 1303 年山西赵城 8 级地震; 1556 年陕西华县 8 级地震; 1668 年山东郟城 8.5 级地震; 1679 年河北三河平谷 8 级地震; 1695 年山西临汾 7.5 级地震; 1830 年河北磁县 7.5 级地震的资料来自国家地震局地球物理研究所等(1990a, 1990b, 1990c)。1966 年河北邢台 7.2 级地震资料来自马宗晋等(1982); 1976 年河北唐山 7.8 级地震资料来自马宗晋等(1982)和陈非比等(1979)。图中用灰色区域标出了“20km 预警盲区”

而如果把大华北地区一些重要的历史地震的 X 度区长轴与“20km 盲区”进行比较(如图 8(b)所示), 则对预警系统的作用会得到更清晰的认识。而即使在这种情况下, 通过适当加密台站来限制“盲区”的措施, 也有助于显著提升预警系统的减灾能力。

5 结论和讨论

“盲区”问题是地震预警系统设计中的一个关键问题。本文以首都圈地震预警原型系统

为例,讨论了地震预警系统的设计中如何通过“盲区控制”达到最大限度减轻地震灾害损失的目的。我们试图指出,如果不仅考虑走时,而且考虑震源尺度的有限性和记录台站的实际工作状况,那么在20km台间距情况下继续加密台站,固然不能显著减小“盲区”,却可以对控制“盲区”、提高预警系统的减灾效能发挥重要作用。一个可能是较为现实的建议是,针对活动地块边界带、地震重点监视防御区、年度危险区等,可以适度加密预警系统的台站。

本文主要针对“盲区”的空间分布进行了讨论,重点是“盲区”这一空间概念。另一方面也不能不注意到,即首都圈地震预警原型系统与真正的预警系统的差距,不仅是台站的空间分布。在前面的讨论中,为与其他地区(例如美国加州、日本)进行比较,采用了理想条件下 $T=4s$ 的延迟时间。在目前该原型系统的实验性运行中,用的是3s时间用于数据打包、3s时间确定震级、1s时间进行数据处理的方案,因此 $T=7s$ 。这样,如图9所示,目前实际运转的原型系统,其“盲区”的半径比“理想的”情况大得多。在从原型系统向真正的预警系统的转变中,将这一时间延迟缩小为4s,也是一项重要的工作。

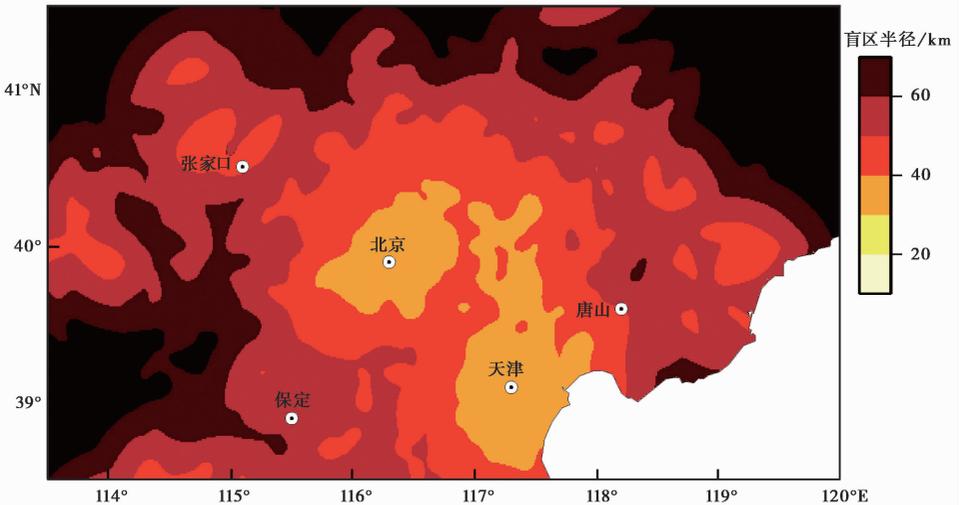


图9 使用首都圈地震预警原型系统实际的时间延迟($T=7s$),采用4个台站触发时的“盲区”半径分布

从时间上看,与其他地区例如美国加州、日本等地区的情况相比,首都圈地震预警系统还面临着一个独特的挑战,就是该地的大地震复发周期,远大于美国加州、日本等地区,因此在预警系统的设计中,必须认真考虑系统本身的寿命和大地震复发周期之间的关系。在地震观测与解释领域,从地震定位、震源参数测定、台网安全性和可持续性等角度对地震台网布局进行优化设计的理论早已有之(例如,Rabinowitz et al, 1990; Doufexopoulou et al, 1992; Rawlinson et al, 2012; Stabile et al, 2013; Kraft et al, 2013)。相比这些工作而言,针对地震预警的台网优化理论,还有很多工作要做。甚至对一些基本概念也要认真研究。

致谢:北京数字遥测地震台网李珀任博士提供了首都圈地震预警原型系统台站坐标,并与作者进行了关于该预警原型系统实际运行情况的讨论;蒋长胜研究员提供了绘制背景地形和活动断裂的程序;房立华副研究员与作者进行了华北地区地下速度结构的讨论;硕士研究生宋潇潇和博士研究生蔡妍在本文成图过程中给予了有益的帮助,作者在此一并致谢。作者同时感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 陈非比、张建华、刘秉良等,1979,唐山地震,地震出版社。
- 邓起东、张培震、冉勇康等,2003,中国活动构造与地震活动,地学前缘, **10**, 66~73。
- 丁志峰、曾融生,1994,用近震资料反演京津唐地区的地壳三维速度结构,华北地震科学, **12**, 14~20。
- 郭凯、温瑞智、杨大克等,2016,地震预警系统的效能评估和社会效益分析,地震学报, **38**, 146~154。
- 国家地震局地球物理研究所、复旦大学中国历史地理研究所,1990a,远古至元时期中国历史地震图集,中国地图出版社。
- 国家地震局地球物理研究所、复旦大学中国历史地理研究所,1990b,明时期中国历史地震图集,地图出版社。
- 国家地震局地球物理研究所、复旦大学中国历史地理研究所,1990c,清时期中国历史地震图集,中国地图出版社。
- 韩渭宾、徐华全,2015,地震预警的特殊性与弱点及对策讨论,华南地震, **35**, 1~5。
- 嘉世旭、张先康,2005,华北不同构造块体地壳结构及其对比研究,地球物理学报, **48**, 611~620。
- 李强、王椿镛、刘瑞丰等,1999,应用层析成像技术研究华北地壳速度结构,地震地磁观测与研究, **20**, 88~97。
- 马宗晋、傅征祥、张郢珍等,1982,1966~1976年中国九大地震,地震出版社。
- 齐诚、赵大鹏、陈颀等,2006,首都圈地区地壳P波和S波三维速度结构及其与大地震的关系,地球物理学报, **49**, 805~815。
- 杨陈、郭凯、张素灵等,2015,中国地震台网现状及其预警能力分析,地震学报, **37**, 508~515。
- 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**, 216~223。
- 张晔军、陈会忠、李卫东,2013a,地震预警的10个问题,国际地震动态, (6), 19~26。
- 张晔军、李卫东、林捷等,2013b,关于地震预警的几个问题,中国地震, **29**, 198~209。
- Allen R M, 2007, The ElarmS earthquake early warning methodology and application across California, In Earthquake Early Warning Systems, ed. Gasparini P, Manfredi G, Zschau J, 21~43, Berlin and New York, Springer.
- Allen R M, Gasparini P, Kamigaichi O, et al, 2009, The status of earthquake early warning around the world: an introductory overview, Seismological Research Letters, **80**, 682~693.
- Doufexopoulou M, Korakitis R, 1992, Resolution analysis of seismic networks, Physics of the Earth and Planetary Interiors, **75**, 121~129.
- Kanamori H, 2005, Real-time seismology and earthquake damage mitigation, Annual Review of Earth & Planetary Sciences, **33**, 195~214.
- Kraft T, Mignan A, Giardini D, 2013, Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland, Geophysical Journal International, **195**, 474~490. doi:10.1093/gji/ggt225.
- Kuyuk H S, Allen R M, 2013, Optimal seismic network sensity for earthquake early warning: a case study from California, Seismological Research Letters, **84**, 946~954.
- Ma X J, Wu Z L, Peng H S et al, 2012, Challenging the limit of EEW: a scenario of EEWs application based on the lessons of the 2008 Wenchuan earthquake, In Advances in Geosciences, Vol 31, ed. Lo C H, 11~22, New Jersey: World Scientific.
- Peng H S, Wu Z L, Wu Y M, et al, 2011, Developing a prototype earthquake early warning system in the Beijing Capital Region, Seismological Research Letters, **82**, 394~403.
- Peng C Y, Zhu X Y, Yang J S, et al, 2013, Development of an integrated onsite earthquake early warning system and test deployment in Zhaotong, China, Computers & Geosciences, **56**, 170~177.
- Rawlinson Z J, Townend J, Arnold R, et al, 2012, Derivation and implementation of a nonlinear experimental design criterion and its application to seismic network expansion at Kawerau geothermal field, New Zealand, Geophysical Journal International, **191**, 686~694. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05646.x.
- Rabinowitz N, Steinberg D M, 1990, Optimal configuration of a seismographic network: a statistical approach, Bulletin of the Seismological Society of America, **80**, 187~196.
- Satriano C, Wu Y M, Zollo A, et al, 2011, Earthquake early warning: concepts, methods and physical grounds, Soil Dynamics & Earthquake Engineering, **31**, 106~118.
- Smith W H F, Wessel P, 1990, Gridding with continuous curvature splines in tension, Geophysics, **55**, 293~305.
- Stabile T A, Iannaccone G, Zollo A, et al, 2013, A comprehensive approach for evaluating network performance in surface and

borehole seismic monitoring, *Geophysical Journal International*, **192**, 793~806. doi:10.1093/gji/ggs049.

Wu Y M, Kanamori H, 2005a, Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 347~353.

Wu Y M, Kanamori H, 2005b, Rapid assessment of damaging potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 1181~1185.

Xu Y, Wu Z L, Jiang C S, et al, 2008, Zonation of early-warning capability in Beijing Capital Circle Region, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Beijing, electronic version, paper No.2137.

Controlling the ‘blind zone’ of an Earthquake Early Warning System (EEWS): A case study of the Beijing Capital Circle prototype EEWS

Li Jiawei Wu Zhongliang

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

Abstract Controlling the ‘blind zone’ of an Earthquake Early Warning System (EEWS), that is, to avoid the unexpected/accidental expansion of the ‘theoretical blind zone’ in the real operation of the EEWS, is one of the key issues in the design and implementation of the system. Taking the prototype EEWS of the Beijing Capital Circle region as an example, we analyzed the control of the EEWS ‘blind zone’ for minimizing earthquake disasters. It is pointed out that, if not only travel times but also the finite size of seismic sources, and the failure of seismic stations are taken into account, increasing the density of seismic stations with inter-station distances less than 20km is still useful for controlling the ‘blind zone’. Decreasing the inter-station distance below 20km, although having minor contribution to reducing the size of the ‘blind zone’, plays an important role in significantly improving the performance of the EEWS.

Key words: Earthquake Early Warning System; Blind zone; Beijing Capital Circle region