

蔡寅, 刘希强, 曲保安, 周彦文, 于澄. 2013. 山东省地震烈度速报系统研制与应用. 地震学报, 35(3): 441-447.

Cai Yin, Liu Xiqiang, Qu Baoan, Zhou Yanwen, Yu Cheng. 2013. Development and application of seismic intensity rapid report system in Shandong province, China. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 441-447.

山东省地震烈度速报系统研制与应用^{*}

蔡 寅^{1),*} 刘希强¹⁾ 曲保安²⁾ 周彦文¹⁾ 于 澄¹⁾

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国山东泰安 271000 山东省地震局泰安基准地震台

关键词 烈度计算模型 WebGIS 烈度速报

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.015 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Development and application of seismic intensity rapid report system in Shandong province, China

Cai Yin^{1),*} Liu Xiqiang¹⁾ Qu Baoan²⁾ Zhou Yanwen¹⁾ Yu Cheng¹⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

2) Tai'an Standard Seismic Station, Earthquake Administration of Shandong Province, Taian 271000, China

Key words: seismic intensity calculation model; WebGIS; intensity rapid report

发展地震烈度速报系统是我国现阶段防震减灾事业的一项重要工作. 其目的是在地震发生后, 对强震动数据进行实时分析和处理, 快速给出强震对地表的破坏程度——地震烈度分布图. 鉴于目前国内强震动台网分布密度及数据传输方式等诸多因素的限制, 多数烈度速报系统是基于美国的 ShakeMap 系统进行二次开发生成烈度分布图, 其计算过程更多地依赖于对地震破裂过程的反演及地震烈度衰减关系, 产出的烈度图是静态位图, 分辨率较低, 与丰富的地理信息难以无缝衔接(Wald *et al*, 1999a; 张晁军等, 2010; 泽仁志玛等, 2006).

随着山东省防震减灾“十一五”规划重点项目建设的完成, 全省数字化监测台网的不断加密, 强震动数据全部实现了基于 IP 网络的实时传输. 在此基础上, 以相对密集的台站实测值作为绘制烈度速报图的主要数据源成为可能. 如果能在快速发布的烈度图中叠加丰富的地理信息, 就能为震后应急救援和灾害评估工作提供更多的决策性依据信息.

本文以山东省“十一五”期间建成的 140 个强震台站和 110 个测震台站的观测数据为研究基础, 建立适合山东地区的地震烈度速报计算模型, 利用可缩放矢量图形(scalable vector graphics, 简称为 SVG)及异步 JavaScript 与 XML(asynchronous JavaScript and XML, 简称为 Ajax)技术, 实现了基于 WebGIS 的地震烈度实时动态发布.

1 地震烈度速报计算模型建立

根据山东地区台站分布情况及各类经验统计关系, 建立了适合山东地区的烈度计算模型示意图(图 1). 地震发生后, 根据地震三要素及触发台站的个数, 判断是否有足量数据进行地震烈度图的绘制. 若不

^{*} 基金项目 国家科技支撑计划“面向公众的地震监测预警技术研究与集成示范”课题(2012BAK19B04)、地震科技星火计划项目(XH12029)和山东省地震局重点基金项目(JJ1104Y)共同资助.

收稿日期 2012-05-28 收到初稿, 2012-09-24 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: caiyin555@gmail.com

满足触发台站的数量,则利用山东地区烈度衰减关系(苗庆杰,许萍,2008)估计地面运动值;若满足触发台站的数据阈值,则对每个台站实际记录到的地面运动数据做场地响应校正,然后将得到的离散数据进行统一的空间网格化处理,计算得到绘制烈度图的必要数据,传递给烈度信息发布平台,快速绘制并发布地震烈度图(董霜,朱元清,2005;泽仁志玛等,2006)。

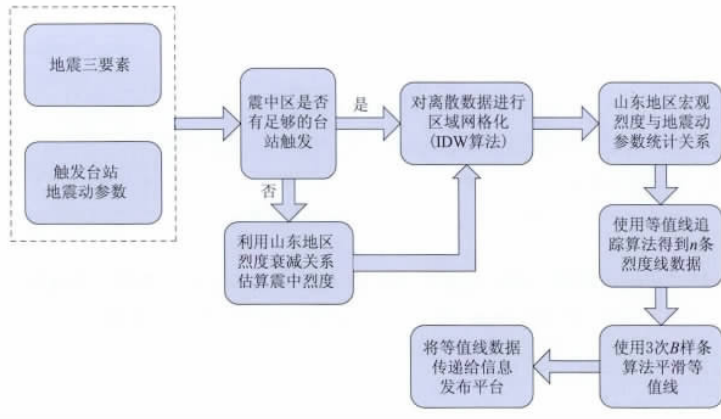


图 1 山东地区地震烈度计算模型

Fig. 1 Seismic intensity computational model of Shandong province

在烈度速报计算模型建立过程中,有两个关键技术点:

1) 峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)与地震烈度统计关系的建立。地震烈度是地震对某一地区破坏程度的宏观度量。这样一个宏观的、模糊的、缺乏物理基础的概念,与实际的仪器记录的物理参数间是不可能建立一个完美的函数关系的。但通过长期的观察,我们发现宏观地震烈度与物理参数之间确实存在一种统计对应关系。这种对应关系的建立也就是地震烈度物理标准的建立,是一个长期的研究积累过程(金星等,2008;郝敏等,2005)。地面运动的强度受到幅度值、持时、谱特性等诸多因素影响(Wu *et al.*, 2003; Boatwright *et al.*, 2003)。其中,地面运动的幅度值是最主要因素。因此峰值加速度和峰值速度成为体现地面运动强度的重要标志(Wu *et al.*, 2001)。

通过对山东地区以往具有宏观考察的地震烈度图的地震事件重新计算,将每一个台站的峰值加速度和峰值速度及其对应的宏观烈度记录下来(表 1)。经过对宏观烈度和峰值加速度与峰值速度的对数分别进行线性拟合,得到适合山东地区的峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)和宏观烈度(I)间的统计关系式为

$$I = 2.43 \lg(\text{PGA}) + 2.58 \pm 0.31 \quad (1)$$

$$I = 1.93 \lg(\text{PGV}) + 5.59 \pm 0.37 \quad (2)$$

在实际应用中,为了提高区域台网密度,烈度速报系统综合使用了测震、强震动台网的实时观测数据,计算触发台站的峰值速度(PGV)或峰值加速度(PGA),分别对应统计关系式(1)、式(2)得到离散烈度值。随着地震事件的增多,特别是强震事件的补充,该统计关系应会更加全面反映真实情况,计算结果有望更加稳定。

2) 等值线数据的生成。在烈度速报数据处理过程中,等值线数据的计算是重要的组成部分。利用实时从各个强震台站获取的峰值加速度(PGA)离散数据,要客观地描述或表征该区域的地震烈度情况,须对该区域进行数据的网格化(李山有等,2002)。而不同的网格化方法有不同的效果,因此,结合本地区的实际情况,通过分析和研究不同的网格化方法的适应范围及参数设置,选取一种最适合本地区的模型,对于客观、正确地描述地震烈度情况有重要的意义。

通过对几种网格化方法的分析比较(刘兆平等,2010),发现反距离加权插值法是利用区域内已知的样点值来预测区域内除样点以外的任何位置的值的数学方法。其特征“任何一个观测值都对邻近的区域有

表 1 山东地区峰值加速度及峰值速度与宏观烈度对应关系(部分)
Table 1 Seismic intensity and its corresponding PGA and PGV for Shandong region

序号	震 例	台 站	宏观烈度	PGA/cm·s ⁻²	PGV/cm·s ⁻¹
1	2003 年 6 月 5 日青岛 4.1 级地震	即墨	4.4	3.9626	0.1162
		青岛	4.6	7.0444	0.2383
2	2005 年 1 月 18 日乳山 4.3 级地震	荣成	2.3	0.6998	0.0278
		莱阳	2.9	1.1489	0.0374
		即墨	2.6	0.9940	0.0232
		青岛	2.2	0.8634	0.0183
3	2005 年 5 月 9 日烟台 4.5 级地震	烟台	4.0	2.2579	0.0754
		荣成	3.2	1.6342	0.0425
4	2005 年 7 月 22 日烟台 4.1 级地震	荣成	2.2	1.2540	0.0302
5	2010 年 1 月 15 日菏泽 4.2 级地震	莘县	2.7	1.0275	0.0560
		濮阳	2.8	1.6145	0.0465
6	2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震	文安	5	12.8440	0.8578
7	2010 年 6 月 18 日栖霞 3.8 级地震	莱州	4.5	12.525	0.1338
		烟台	3	1.5941	0.0317
		莱阳	3	1.8227	0.0352

影响,且具有影响的大小随距离的增大而减小的特征”,符合地震烈度随距离衰减的特性.而且,不忽略孤立点数据也有效防止了烈度异常区的遗漏,适合用于台站分布较密的山东地区离散数据插值.反距离加权插值法基本公式为

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \tag{3}$$

式中, $\hat{Z}(s_0)$ 为 s_0 处的预测值; N 为预测计算过程中要使用的预测点周围样点的数量; λ_i 为预测计算过程中要使用的各样点的权重,该值随着样点与预测点之间的距离的增加而减少; $Z(s_i)$ 为 s_i 处获得的测量值.

通过反距离加权算法完成空间插值后,利用统计关系计算出 I—Ⅲ度烈度对应的峰值,依次从所绘制烈度区域的 4 个方向进行等值线追踪(刘兆平等,2010),得到一条或多条等值线数组.将每条等值线中的点集用 3 次 B 样条曲线拟合即得到平滑的等值线数据,最后将得到的由经度、纬度、烈度值组成的 $n(n \leq 12)$ 条等值线数组传递给烈度信息发布系统.

2 基于 WebGIS 的地震烈度信息发布

为了保证地震烈度信息发布的时效性和高可靠性,需要寻求一种既满足需求又便于实现的开发策略(代志勇,2011;蔡寅等,2010;刘希强等,2010).笔者认为,基于 SVG 的开放式 WebGIS 开发策略,给问题的解决提供一个很好的方案.SVG 可升级矢量图形标记语言是一种使用标准可扩展标记语言(extensible markup language,简称为 XML)来描述二维图像的语言,将地图及图形数据使用 SVG 存储,当涉及大量的数据操作和复杂的分析任务时,可以让计算能力很强的服务器来处理,如台站离散数据的空间化处理分析.当涉及到用户交互较多的任务时,可以用客户机来进行处理,如对地图数据的基本操作.在这种情况下,服务器和客户机可以共享它们的性能和数据处理能力,从而合理地把数据和数据处理程序分配,使系统的整体性能最优.

基于 SVG 的开放式 WebGIS 地震烈度信息发布系统逻辑架构分为 3 层:

1) 数据存储层.数据资源层存放着两种资源数据:一种是以 XML 编码标准的 SVG 地图数据;另一种是存储在关系数据库的触发台站数据,作为绘制烈度分布图的基础数据.对于以 XML 编码的 SVG 地图数据可以直接加载到客户端进行展现,逻辑应用层也可以通过 XML 查询语言(XML query language,

简称为 XQL)对所需的要素数据进行检索并以 XML 文档的形式返回. 对于关系数据库中的触发台站数据, 逻辑应用层可以通过结构化查询语言(structure query language, 简称为 SQL)查询的方式进行数据检索, 将返回数据作为烈度速报计算模型的基础数据.

2) 逻辑应用层. 逻辑应用层采用 ASP.NET 实现, 用于响应前端展现层客户的请求, 利用从数据资源层获取触发台站数据进行地震烈度计算, 将计算结果整理成前端展示层便于解析绘制的 SVG 图形要素, 传递给前端实时显示. 满足触发台站个数的烈度计算模型方法 Intensity Computational Model 主要代码如下:

```
//满足触发台站个数的烈度计算模型方法
//S 为由触发台站的经度、纬度及 PGA 组成的数组
private void IntensityComputationalModel (double[, ] S)
{
    //初始化网格数据
    int rows;
    int cols;
    double[] m_X = new double[cols];
    double[] m_Y = new double[rows];
    double[, ] dataArray = new double[rows, cols];
    //利用反距离加权差值算法进行空间插值
    data Array = (double[, ]) Interpolation_IDW(S, m_X, m_Y);
    int nc = m_CValues.Length;
    //利用等值线追踪算法生成烈度线数组
    ArrayList ContourLines = (ArrayList) Contour.CreateContourLines(dataArray, m_X, m_Y,
IntensityValues);
    //利用 3 次 B 样条算法对等值线数据进行平滑处理
    s_CContourLines = (ArrayList) Contour.SmoothLines(ContourLines);

    //将数组整理成便于前端 SVG 解析绘图的数据格式
    string data = " ";
    int ivale; //烈度值
    ArrayList pointlist = new ArrayList(); //等烈度线点集
    for (int i = 0; i <= s_CContourLines.Count - 1; i++)
    {
        ...//整理过程...
        //使用 “!” 将同一等烈度线点集与烈度值分割, 多条等烈度线之间使用 “?” 分割
        data = pointlist + "\" />" + "!" + "<text fill='red' font-size='10pt' font-family='Sim-
hei>" + iValue + "</text>" + "?";
    }
    Response.ContentType = " text/html";
    Response.ContentEncoding = System.Text.Encoding.UTF8;
    //通过参数 data 传递给前端展现层
    Response.Write(data);
    Response.End();
}
```

3) 前端展现层. 前端展现层采用 javascript 脚本语言实现, 主要完成两部分功能: 一部分功能是客户端的基本 GIS 功能, 例如对地图的放大、缩小、漫游、复位、测距、鹰眼及图层选择等操作, 这些功能在地图数据无变化的情况下, 完全在客户端实现, 不需要与服务交互; 另一部分功能是利用从逻辑应用层传递过来的数据, 实时绘制烈度速报图形要素.

3 系统集成与应用示范

3.1 系统集成

用户通过点击某个触发地震事件来访问 Web 服务器, 利用 Ajax 异步数据传输技术与 Web 服务器的进行信息交互. Web 服务器将客户端用户请求的地震事件相关参数传递给烈度计算模型, 模型根据事件的唯一标示从后台数据库检索相应的台站参数及峰值数据, 进行空间数据分析得到等值线数据, 将经过整理后的等值线数组(经度、纬度、烈度值)返回给发出服务请求的客户端, 在客户端自动完成烈度图的绘制. 系统数据流程图如图 2 所示. 这样在减少服务器端的数据计算压力的同时, 提高了客户端的用户交互体验, 实现了基于 WebGIS 的地震烈度速报信息实时发布.

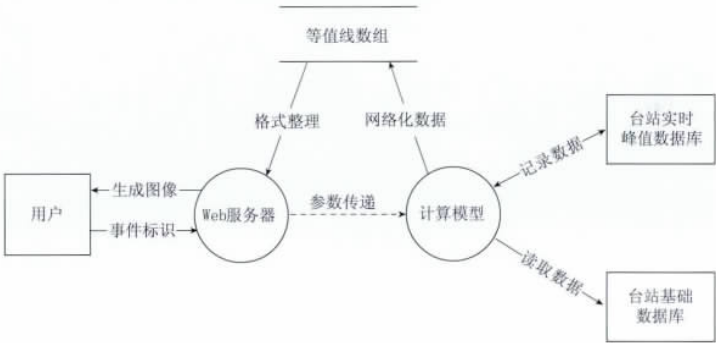


图 2 烈度速报系统数据流程图
Fig. 2 Data flow diagram of intensity rapid report system

3.2 应用示范

自 2010 年 6 月 1 日—2010 年 9 月 30 日, 山东省地震烈度速报系统在山东省地震台网中心试运行. 期间, 山东台网共记录到 $M_L > 3.0$ 天然地震 8 次(表 2). 其中有 3 次地震震中距山东省边界大于 200 km, 烈度速报系统未触发, 其余 5 次全部触发, 平均初报时间 285 s.

表 2 烈度速报系统试运行期间速报情况汇总表

Table 2 Summary of rapid intensity reports during test period of the rapid report system

发震时刻		震中	经度/°E	纬度/°N	M_L	是否触发	发布用时/s
年-月-日	时:分:秒						
2010-06-05	20:58:13	山西阳曲	112.77	38.13	4.9	否	无
2010-06-14	17:07:43	渤海	120.79	37.93	3.5	是	288
2010-06-18	18:59:56	山东栖霞	121.16	37.24	3.8	是	294
2010-07-21	09:10:25	辽宁岫岩	123.26	40.48	4.1	否	无
2010-07-30	22:21:10	河北易县	115.44	39.52	3.8	否	无
2010-08-08	11:05:39	黄海	121.27	34.74	3.0	是	280
2010-09-11	15:41:20	山东高青	117.85	37.17	3.4	是	218
2010-09-18	03:51:17	黄海	123.63	36.32	3.5	是	343

4 讨论与结论

本文以 2010 年 6 月 18 日 18 点 59 分在山东栖霞发生的 $M_L 3.8$ 地震为例, 对烈度速报结果进行分析.

图 3a 为所开发的烈度速报系统给出的烈度图, 图 3c 为震后经过宏观考察所得到的烈度图. 通过与宏观地震烈度考察图的对比, 震中烈度相同, 两者在形态上有一定的相似性.

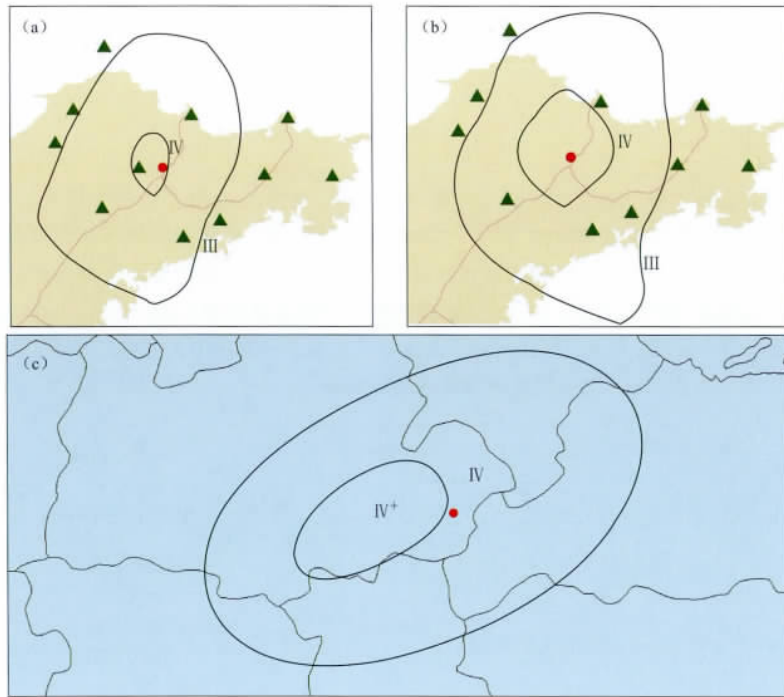


图 3 烈度速报图与震后宏观考察烈度图对比

(a) 烈度速报系统产生的烈度图; (b) 震中附近台站较少时烈度速报系统产生的烈度图;
(c) 震后宏观考察烈度图. 红色圆点表示震中, 绿色三角表示触发的台站

Fig. 3 Predicted intensity map generated by intensity rapid report system and macroscopic observation intensity map after the earthquake

(a) Intensity map generated by seismic intensity rapid report system; (b) Intensity map generated by seismic intensity rapid report system when there were fewer stations near the epicenter;
(c) Intensity map from macroscopic observation after the earthquake. Red circles indicates the epicenter, green triangles denote the triggered stations

为了检验在震中区没有台站或触发台站数量较少的情况下, 系统能否产出相对客观的烈度图, 我们在震后去掉震中 IV 度区触发台站的记录值, 重新绘制烈度图. 系统自动使用烈度衰减关系计算震中区烈度值, 结合周边触发台站的地震动参数重新绘制了烈度图(图 3b). 通过图 3c 与图 3b 的对比可以看出, 后者的 IV 度范围较大, 主要是由于使用烈度衰减关系计算的震中区烈度值较高, 但两者在整体形态具有相似性.

综上所述, 山东省地震烈度速报系统综合利用测震、强震动台网数据, 建立了空间数学模型与烈度衰减关系相结合的烈度计算模型, 实现了基于 WebGIS 的地震烈度信息发布, 10 分钟内提供自动烈度速报结果, 可为政府应急救援工作提供重要参考依据.

参 考 文 献

- 蔡寅, 刘希强, 周彦文, 石玉燕, 赵银刚, 苗庆杰. 2010. 基于 WebGIS 的地震动强度(烈度)速报信息发布系统的研究与应用[C]//中国地球物理 2010. 北京:地震出版社: 413–414.
- 代志勇. 2011. 地震烈度速报中数据处理技术研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学: 1–52.

- 董霜, 朱元清. 2005. 强震烈度速报系统的软件设计与实现[J]. 计算机工程, **31**(3): 226–228.
- 郝敏, 谢礼立, 徐龙军. 2005. 关于地震烈度物理标准研究的若干思考[J]. 地震学报, **27**(2): 230–234.
- 金星, 张红才, 韦永祥. 2008. 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[J]. 国际地震动态, (10): 20–27.
- 李山有, 金星, 陈先, 马强. 2002. 地震动强度与地震烈度速报研究[J]. 地震工程与工程振动, **22**(6): 1–7.
- 刘希强, 蔡寅, 周彦文, 石玉燕, 赵银刚, 苗庆杰. 2010. 山东省地震动强度(烈度)实时速报系统研究[C]//中国地球物理 2010. 北京: 地震出版社: 400.
- 刘兆平, 杨进, 武伟. 2010. 地球物理数据网格化方法的选取[J]. 物探与化探, **34**(1): 93–97.
- 苗庆杰, 许萍. 2008. 山东及近邻区地震烈度衰减关系探讨[J]. 西北地震学报, **30**(3): 282–287.
- 泽仁志玛, 陈会忠, 何加勇, 代光辉, 胡彬. 2006. 震动图快速生成系统研究[J]. 地球物理学进展, **21**(3): 809–813.
- 张晁军, 李卫东, 李大辉, 陈会忠, 侯燕燕. 2010. 有关地震烈度速报信息化发展的思考[J]. 国际地震动态, (4): 23–31.
- Boatwright J, Bundock H, Luetgert J, Seekins L, Gee L, Lombard P. 2003. The dependence of PGA and PGV on distance and magnitude inferred from northern California shakemap data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **93**(5): 2043–2055.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, Kanamori H, Scrivner C W, Worden C B. 1999a. TriNet“ShakeMaps”: Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in Southern California[J]. *Earthquake Spectra*, **15**(3): 537–555.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, Kanamori H. 1999b. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California[J]. *Earthquake Spectra*, **15**(3): 557–564.
- Wu Y M, Shin T C, Chang C H. 2001. Near real-time mapping of peak ground acceleration and peak ground velocity following a strong earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(5): 1621–1632.
- Wu Y M, Teng T L, Shin T C, Hsiao N C. 2003. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and intensity in Taiwan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **93**(1): 386–396.

作者简介



姚 丽 中国地震台网中心副研究员。2005 年中国科学技术大学地球物理专业毕业，获理学硕士学位；2009 年中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气专业毕业，获博士学位。现从事地磁与空间物理研究工作。



石 云 防灾科技学院讲师，湖南师范大学水文水资源专业在读博士研究生。2004 年湖南科技大学地理科学专业毕业，获理学学士学位；2008 年湖南师范大学自然地理专业毕业，获理学硕士学位。2010 至今主要从事地震地下流体研究。



周洪娟 哈尔滨工业大学（威海）讲师，哈尔滨工业大学信号与信息处理专业的在读博士研究生。2005 年天津大学通信与信息工程专业毕业，获硕士学位。曾从事雷达信号预处理等方面的研究。现主要从事

舒曼谐振观测分析与地震电磁信号处理等方面的研究。



李孝波 中国地震局工程力学研究所在读博士研究生。2008 年中国地质大学（北京）土木工程专业毕业，获工学学士学位；2009 年进入中国地震局工程力学研究所攻读岩土工程专业硕士学位，2011 年获得直接攻读岩土工程专业博士学位资格。主要从事岩

土工程抗震和场地地震反应方面的研究工作。



孙小龙 中国地震局地壳应力研究所助理研究员，中国地质大学（北京）在读博士研究生，2007 年中国地震局兰州地震研究所构造地质学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事地震与地下水相互关系的研究。

现从事地震地下流体动力学与地震监测预报研究工作。



蔡 寅 山东省地震局工程师。2007 年大连理工大学软件工程专业毕业，获工程硕士学位。曾从事地震信息化软件开发研究工作。现从事强震动数据分析、地震烈度速报及强震预警研究工作。地球物理

学会会员。

注：池顺良、孟令媛的简介分别见本刊：Vol. 14，No. 1；Vol. 33，No. 5。