

朱永莉, 黎大虎, 龙承厚, 孙泽涛. 2015. 不同仪器烈度算法在四川地区历次地震中的比较应用. 地震学报, 37(2): 335–346. doi:10.11939/jass.2015.02.013.

Zhu Y L, Li D H, Long C H, Sun Z T. 2015. Comparative study of different instrumental intensity algorithms for the earthquakes in Sichuan region. *Acta Seismologica Sinica*, 37(2): 335–346. doi:10.11939/jass.2015.02.013.

不同仪器烈度算法在四川地区 历次地震中的比较应用^{*}

朱永莉^{*} 黎大虎 龙承厚 孙泽涛

(中国成都 610041 四川省地震局)

摘要 强震观测资料包括强震动时程记录资料和宏观震害调查资料两大类,前者是定量的微观数据,后者则是定性的宏观指标. 本文明晰给出了微观仪器烈度与宏观仪器烈度、微观考察烈度与宏观考察烈度的概念,并在此基础上提出了只有在宏观仪器烈度与宏观考察烈度之间进行比较才具有实质性的意义;同时对国内外常见的仪器烈度算法进行了比较性研究,得出了袁一凡仪器烈度算法可靠性更高的结论;最后以四川地区历年来重要震例的强震动记录为依据,对修正的袁一凡仪器烈度算法的可靠性进行了比较应用. 结果表明,对袁一凡仪器烈度算法修正与扩展的应用是可行的,同时也验证了将微观仪器烈度与宏观考察烈度直接进行比较会存在较大的差距.

关键词 宏观仪器烈度 宏观考察烈度 强震动记录 反应谱

doi:10.11939/jass.2015.02.013 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Comparative study of different instrumental intensity algorithms for the earthquakes in Sichuan region

Zhu Yongli^{*} Li Dahu Long Chenghou Sun Zetao

(Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: Strong motion observation data is classified into two categories, one is strong motion time history data, the other is seismic damage investigation data. The former is the microscopic quantitative data, and the latter is the macroscopic qualitative indexes. Firstly we define the concept of microscopic instrumental intensity and macroscopic instrumental intensity, microscopic inspection intensity and macroscopic inspection intensity in the present paper. And then we propose it is significant to compare macroscopic instrumental intensity with macroscopic inspection intensity. Meanwhile we also conduct a comparative study about the instrumental intensity algorithms at home and abroad. The results indicate that Yuan's instrumental intensity algorithm is more reliable. In addition, based on the strong motion records of Sichuan earthquakes, the

^{*} 基金项目 四川省地震局地震科技专项项目(LY1401)资助.
收稿日期 2014-06-23 收到初稿, 2014-11-07 决定采用修改稿.
^{*} 通讯作者 e-mail: ZYL_EQ@163.com

modified Yuan's algorithm is applied to calculate seismic intensity. The results show that it is feasible to revise and expand the Yuan's instrumental intensity algorithm, and also prove that there exists large difference when the microscopic instrumental intensity is compared with macroscopic inspection intensity directly.

Key words: macroscopic instrumental intensity; macroscopic inspection intensity; strong motion record; response spectrum

引言

地震工程学是一门以观测为基础的实用性学科(胡聿贤, 2006; 袁一凡, 田启文, 2012). 强震动观测资料包括强震动时程记录资料和宏观震害调查资料两大类, 前者是微观的定量数据, 后者则是宏观的定性指标. 两者之间如果能够建立直接的因果关系, 就可以深入认识强震造成损失破坏的原因. 从当前紧迫的社会应用角度来看, 就可以借助现代通讯手段实现烈度速报和损失快速评估, 直接为抗震救灾服务.

最初地震动的强度是用烈度表示的, 它是地震动振幅参数、频谱和持时综合考虑下的宏观描述. 振幅参数一般指地震动加速度、速度和位移时程的峰值或等效值; 频谱一般指反应谱和傅里叶谱; 持时参数包括绝对持时和相对持时. 但是, 众多统计资料表明(Wu *et al.*, 2003; Wald *et al.*, 2006), 由于峰值地面运动加速度(peak ground acceleration, 简称为 PGA)或峰值地面运动速度(peak ground velocity, 简称为 PGV)只是一个瞬时量, 其对应计算地震烈度具有较大的离散性, 不能完全代表地震动的破坏能力. 图 1 给出了不同地震的 PGA 时程图. 可以看出, 在整个地震动时程中, PGA 随着震级的减小而越来越不具有代表性(PGV 类似). 以图 1c 上海 $M_s 1.1$ 地震为例, 白莲泾强震台记录到的垂直向强震动记录峰值加速度为 86.0 cm/s^2 , 这种瞬间的高加速度峰值很难与地震破坏发生联系.

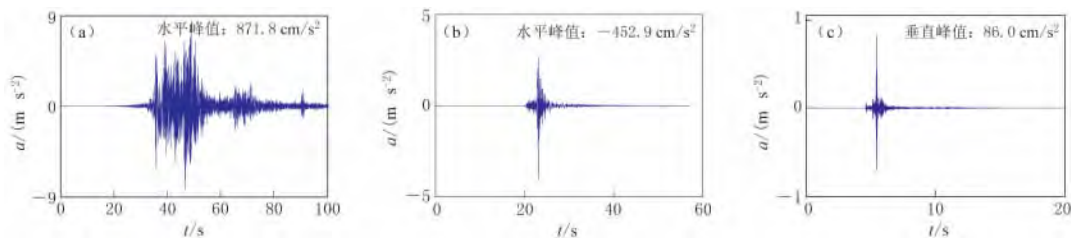


图 1 典型大震、小震和近震的加速度时程

(a) 汶川 $M_s 8.0$ 地震 051MZQ 台站水平合成记录; (b) 炉霍 $M_s 5.3$ 地震 051LHT 台站水平合成记录; (c) 上海 $M_s 1.1$ 地震白莲泾台站垂直向记录

Fig. 1 Acceleration time histories for typical large, small and near earthquakes

(a) Horizontal component synthetic record of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake at the station 051MZQ;

(b) Horizontal component synthetic record of Luhuo $M_s 5.3$ earthquake at the station 051LHT;

(c) Vertical component record of Shanghai $M_s 1.1$ earthquake at the station Bailianjing

我国“九五”建设以来的 20 年间, 随着近千台强震动观测台站的兴建, 以及数字化宽频带强震仪的广泛使用, 涌现出大量的强震动记录, 在常用的依靠 PGA 或 PGV 得到仪器烈度的方法中就随之出现了不符合实际地震破坏情况的问题. 国内专家据此提出了新的方法和思路: 延续原来的思路, 选用有效峰值加速度作为地震动强度参数. 金星等(2013)对国

内外这方面的进展有比较全面和深入的阐述;按照“地震烈度取决于地震动的峰值、频率成分和持时”的概念,探讨更具有动力学意义的算法,王玉石(2010)对国内外这方面的进展进行了比较全面和深入的阐述。

本文通过对仪器烈度与考察烈度的概念辨析,提出了应该在宏观仪器烈度与宏观考察烈度之间进行比较,同时对常见的仪器烈度算法进行了比较性研究,最后介绍了本文应用修正的袁一凡仪器烈度算法的情况以及该算法在四川地区历次地震中的应用。

1 仪器烈度与考察烈度概念辨析

1.1 微观仪器烈度与宏观仪器烈度

根据强震台站的实际地震动记录,按某一地震仪器烈度计算方法得到的仅属于该台站的仪器烈度值,称之为微观仪器烈度。由于场地效应,几十米外如果得到了另外一个差异较大的微观仪器烈度,不足以构成彼此的否定。

台网散点状分布的微观仪器烈度,按数学等值线或基于地震烈度衰减模型的成图规则得到的仪器烈度分布图,其每一点的值称为宏观仪器烈度。显然,某一点的宏观仪器烈度由台网所有站点的微观仪器烈度共同决定,它并不一定与自身的微观仪器烈度(若该点恰好有一台站记录)相同。

1.2 微观考察烈度与宏观考察烈度

烈度考察通常以一个居民点为单位给出微观考察烈度。由于同类建筑的破坏程度也可能很不相同,所以微观考察烈度表达的实际上是这个小范围内的平均值,这是微观考察烈度与微观仪器烈度不一样的地方。但由于这个小范围,使两者之间似乎有了一点概念上的相似性。

烈度考察指挥部对前方报告进行汇总成图时,各居民点的微观考察烈度有可能调整,称为宏观考察烈度,它与宏观仪器烈度在概念上对等,只是其取值可能含有主观干扰因素。由于烈度考察工作人员之间的互动,微观考察烈度与宏观考察烈度在数值上也可能趋于一致。

1.3 仪器烈度与考察烈度的比较

综上所述,由于各自取值方法不同,因此将微观仪器烈度与微观考察烈度进行比较会存在较大的差距,而将微观仪器烈度与宏观考察烈度进行比较则差距更大。作者认为正确的比较应该是宏观仪器烈度与宏观考察烈度的比较,也就是宏观仪器烈度图与宏观考察烈度图的比较,并适当过滤一些宏观考察烈度图的主观因素的干扰。

对于宏观仪器烈度图与宏观考察烈度图的比较,在核心区域应以小于Ⅰ度为考核指标。由于宏观考察烈度图是余震叠加的复合烈度,因此还应有宏观仪器烈度图小于宏观考察烈度图的原则定性。

2 常见仪器烈度算法的比较性研究

模拟强震仪记录的波形图一般类似于图 1a,其与数字强震仪的不同之处在于强度大小和持时长短,其 PGA 或 PGV 在整个地震过程中有一定的强度代表性,因而基于此的地震烈度表算法长期以来具有现实应用基础。

为解决单纯采用地震动峰值参数 PGA 或 PGV 计算地震仪器烈度具有较大不确定性

的问题,王玉石(2010)和金星等(2013)采用有效峰值加速度作为地震动强度参数.其思路为:首先采用纯幅值滤波器滤除高频成分,降低地震记录波形中的尖锐脉冲;然后确定新的持时参数,要求选取幅值变动趋于稳定的某一阈值(如 0.3 s 或 0.5 s)时的幅值,并将其定义为有效峰值加速度;最后重新建立有效峰值加速度与烈度标准之间的联系.采用有效峰值加速度作为地震动强度参数的基本思路就是对图 1b, c 类的地震记录波形中的尖锐脉冲降低到类似图 1a 的地震记录波形,因此都可归为对常用仪器烈度计算方法的修正.

2.1 常用地震仪器烈度计算方法

1) 中国地震烈度表(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2009)中推荐的地震动峰值参数 PGA、PGV 与烈度的关系分别为

$$I = 3.32\lg\text{PGA} + 0.04, \quad (1)$$

$$I = 3.28\lg\text{PGV} + 3.42. \quad (2)$$

2) 美国 ShakeMap 系统中采用统计烈度与地震动峰值参数 PGA 和 PGV 的关系得到了地震仪器烈度的相应计算方法.该计算方法认为当烈度小于 V 度时,峰值加速度 PGA 与烈度的相关性高于峰值速度 PGV;当烈度大于 VII 度时,与峰值加速度 PGA 相比,峰值速度 PGV 与烈度的相关性更好;中段两者相当,即

$$I = \begin{cases} 2.20\lg\text{PGA} + 1.00 & \text{I} \leq I < \text{IV} \\ 2.10\lg\text{PGV} + 3.40 & \text{I} \leq I < \text{IV} \\ 3.66\lg\text{PGA} - 1.66 & \text{V} \leq I < \text{VIII} \\ 3.47\lg\text{PGV} + 2.35 & \text{V} \leq I < \text{IX} \end{cases}. \quad (3)$$

3) 日本气象厅(Japan Meteorological Agency, 简称为 JMA)研究人员在对地震动振幅参数、频谱和持时等影响的综合考虑下,制定出了气象厅计测烈度计算方法. JMA 烈度标准采用的是有效峰值加速度(effective peak acceleration, 简称为 EPA)来计算仪器烈度,即

$$I = 2\lg\text{EPA} + 0.94. \quad (4)$$

由于日本气象厅的最高地震烈度为 VII 度,为便于定性比较,取其烈度值越大地震动强度也越大的线性假定,将式(4)右端乘以 12/7 得到相当于我国的地震烈度 I_c 为

$$I_c = 3.43\lg\text{EPA} + 1.611. \quad (4a)$$

假定日本气象厅的有效峰值加速度 EPA 与峰值加速度 PGA 有一个平均性的倍数关系,即 $\text{EPA} = k \cdot \text{PGA}$, 则

$$I_c = 3.43\lg\text{PGA} + 3.43\lg k + 1.611. \quad (4b)$$

结合前面中国地震烈度表的对比分析可以看出,式(1)与式(4b)中 PGA 的斜率大致一致,可以认为两者同源,即 $3.43\lg k + 1.611 = 0$, 则常数项 $k = 0.339$. 即日本气象厅的有效峰值加速度 EPA 相对来说只有峰值加速度 PGA 的 1/3.

4) 台湾“中央气象局”速报系统采用的台湾地区 PGA 与地震烈度之间的地震仪器烈度计算公式为

$$I = 2\lg\text{PGA} + 0.7. \quad (5)$$

5) 福建地方标准借鉴日本气象厅测定烈度的思路,采用 EPA 计算仪器烈度为

$$I = 2.71\lg\text{EPA} + 2.39. \quad (6)$$

6) 袁一凡地震仪器烈度模糊判别算法(袁一凡,1998)的要点是选取记录波形的水平向峰值加速度 PGA 的最大值,单独考虑的垂直向峰值加速度与常见结构固有频率相对应

的 8, 5, 2 和 1 Hz 的反应谱值, 以及卓越频率和记录持时等 8 个地震动参数, 通过震害经验设定各参数对应各烈度而建立的一系列隶属函数矩阵与模糊判定向量组成的模糊判别矩阵, 再根据模糊判定得到的模糊向量对仪器烈度进行综合判定。

7) 利用汶川地震和姚安地震等我国现有多组强震动记录数据, 李敏(2010)采用多元线性回归的统计方法分析了不同周期加速度反应谱与地震烈度之间的对应关系, 即

$$I = 2.86 + 0.162\lg\text{PGA} + 0.912\lg S_a(T = 0.03) + 0.117\lg S_a(T = 0.075) + 0.266\lg S_a(T = 0.15) + 0.158\lg S_a(T = 0.28) + 0.17\lg S_a(T = 8) + 0.496\lg S_a(T = 20), \quad (7)$$

式中, $S_a(T=T_0)$ 为周期 T_0 对应的水平向加速度反应谱(阻尼比为 0.05)值。

2.2 地震仪器烈度算法的比较性研究

图 2 给出了上述仪器烈度算法的比较结果, 由峰值加速度 PGA 计算仪器烈度的曲线可以看出:

1) 日本气象厅采用有效峰值加速度计算得出的仪器烈度曲线与我国地震烈度表推荐公式计算得出的仪器烈度曲线基本平行。由于日本气象厅采用的是有效峰值加速度, 因而其计算仪器烈度值在同样的加速度下偏高是合理的。结合前文所述可知, 日本的有效峰值加速度相对来说只有峰值加速度的 1/3, 这在 $M5-6$ 地震的近场强震记录中是成立的, 而在小于 $M5$ 地震的近场强震动记录中则可能小于 1/3, 在大于 $M6$ 地震的近场强震动记录中则可能要超过 1/3。因此, 日本气象厅计测烈度曲线的斜率应比我国地震烈度表公式曲线的小。

2) 美国 ShakeMap 系统推荐公式所采用的数据基础是 1971—1994 年美国加州地区的 8 次较大地震的地震记录, 统计分析中使用的样本集对该统计公式的可靠性和适用性影响较大。从图中可以看出, 计算的仪器烈度曲线存在一个 V 度拐点, 由于地震动参数具有连续性, 因此其考虑得不够全面和合理, 而且这个 V 度拐点在应用上也存在较大的不确定性, 因此美国 ShakeMap 系统在 V 度以下采用 PGA 是可行的。

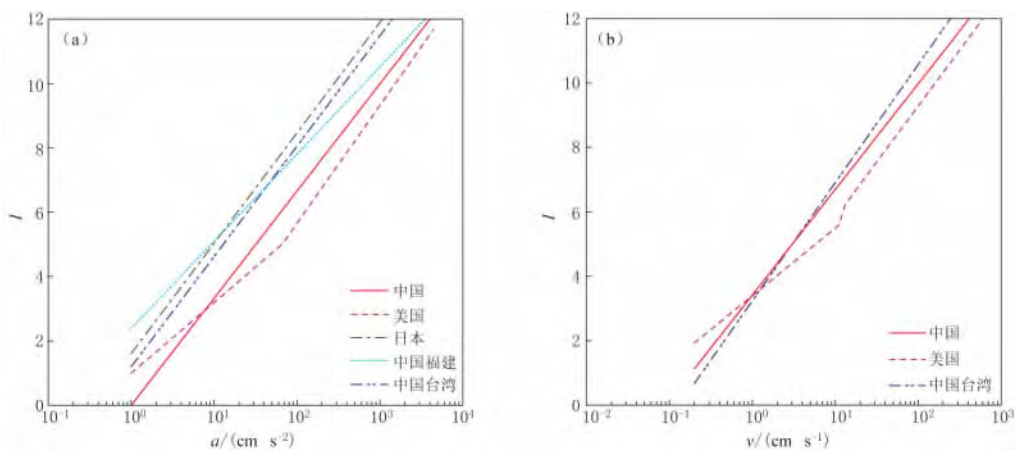


图 2 各国(地区)的地震烈度标准比较

(a) 由 PGA 或 EPA 计算的地震烈度; (b) 由 PGV 或 EPV 计算的地震烈度

Fig. 2 Comparison of seismic intensity standards for different countries (areas)

(a) Seismic intensity calculated by PGA or EPA; (b) Seismic intensity calculated by PGV or EPV

3) 台湾“中央气象局”采用的是 PGA 与地震烈度之间的对应关系, 但其与日本气象厅计测的烈度曲线平行且仅低 0.24 度, 结合前文所述可知这将高估仪器烈度值. 至于由峰值速度 PGV 计算的仪器烈度曲线, 由于测震仪的量程限制, 大的速度记录只能来自强震仪的加速度积分. 因此与图 2a 中的 PGA 仪器烈度对比, 图 2b 中的 PGV 或 EPV 仪器烈度显得间接了一些.

最后我们再对利用加速度反应谱值确定仪器烈度的算法进行比较性研究. 因为引入了反应谱值参数, 李敏(2010)给出的关系式与袁一凡(1998)提出的仪器烈度模糊算法类似, 但其表达方式仍然类似于地震烈度表的公式型算法, 不再具有袁一凡模糊算法的学术延展性; 也因为引入了反应谱值参数, 可以对不具有代表性的 PGA 自动进行过滤, 这与 EPA 算法的初衷类似, 但利用加速度反应谱值确定仪器烈度的算法是对地震动物理指标的过滤, 而 EPA 算法是对地震动波形的过滤.

利用加速度反应谱值确定仪器烈度的算法和王玉石等(2008)提出的基于假设检验的地震动强度(烈度)方法, 在思路上与 Housner(1952)定义的“谱烈度”概念是一脉相承的, 都是避免单独使用地震动峰值与烈度建立联系, 但他们采用的都是类似于地震烈度表的公式型算法. 因此, 尽管袁一凡利用模糊算法确定仪器烈度的方法在我国起步比较早, 但却是在这一思路中最彻底的. 这大概也是王玉石等(2013)认为在汶川地震和芦山地震中, 利用谱烈度值或加速度反应谱值等确定仪器烈度的算法和袁一凡模糊算法可靠性更高的原因.

3 实例

本节的前 3 个实例中均给出正式公布的宏观考察烈度图与本文给出的宏观仪器烈度图的对比分析, 同时对 051BXD 台站记录进行个案分析, 结果表明利用多因素模糊方法确定仪器烈度的修正的袁一凡算法判定烈度是可行的. 为了体现微观仪器烈度与宏观考察烈度之间的差距, 对微观仪器烈度与宏观考察烈度差距大于 I 度的, 还配以表格予以对比说明. 下面给出的各实例仪器烈度计算均采用修正的袁一凡仪器烈度算法. 该算法中采用三维最大地震动方向的合成记录作为计算依据, 体现了仪器烈度计算与仪器观测方位无关的特性; 用统计模型替换模糊判别矩阵, 使地震动参数得到连续使用, 从而突破了原算法的使用范围. 宏观仪器烈度图采用基于共焦点椭圆衰减模型的成图规则, 其基本思路是: ① 所有等烈度线均为椭圆; ② 所有椭圆的焦点均为断层破裂的两个端点; ③ 各级等烈度线的衰减快慢由台网的散点微观仪器烈度统计决定. 该模型可以保证整个断层破裂上的烈度为一个常数, 有效克服了点椭圆衰减模型的缺陷.

3.1 汶川地震

在 2008 年 5 月 12 日的汶川 $M_s 8.0$ 地震中, 中国数字强震动观测台网共有 432 个自由场地观测台站、1 个地形影响台阵和 2 个结构观测台阵获得了强震动记录. 在宏观考察烈度图中有 66 个自由场地观测台站位于 VI 度区域内. 图 3 给出了该地震宏观仪器烈度图、宏观考察烈度图(袁一凡, 2008)及其与微观仪器烈度比较.

通过图 3a 与 b 对比可以看出, 基于修正的袁一凡仪器烈度算法和共焦点椭圆衰减模型绘制的宏观仪器烈度图与宏观考察烈度图在 VI—XI 度区域的等震线形状上比较接近, 是可应用的, 同时其满足了宏观仪器烈度图应小于宏观考察烈度图的原则定性. 图 3c 表明, 即使将微观仪器烈度与宏观考察烈度进行比较, 两者之差的绝对值平均为 0.5 度, 这是对

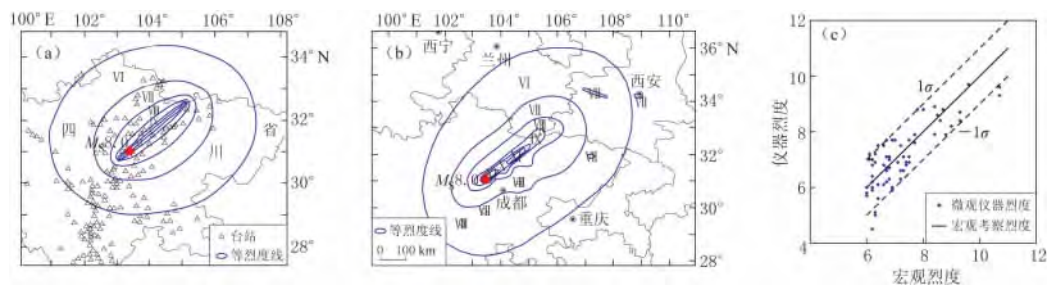


图 3 汶川地震宏观仪器烈度(a)、宏观考察烈度(b)及其与微观仪器烈度比较(c)

Fig. 3 Macroscopic instrumental intensity map (a), macroscopic inspection intensity map (b) and its comparison with microscopic instrumental intensity (c) of Wenchuan earthquake

图 3a 与 b 对比的数据解析说明. 如果对比其算术平均值, 则修正的袁一凡仪器烈度算法所得微观仪器烈度较宏观考察烈度低 0.1 度, 这是对宏观仪器烈度应小于宏观考察烈度原则定性的数据解析说明.

表 1 列出了修正的袁一凡仪器烈度算法所得微观仪器烈度与宏观考察烈度之差的绝对值大于 I 度的 7 个未校正峰值加速度记录数据. 以表中汶川卧龙台(台站编号为 051WCW)和绵竹清平台(台站编号为 051MZQ)获取的强震动记录为例, 所给出的两种烈度结果体现了微观仪器烈度与宏观仪器烈度在概念上的本质差异, 场地的宏观仪器烈度必须由所有站点的微观仪器烈度共同决定.

表 1 汶川 $M_s8.0$ 地震微观仪器烈度与宏观考察烈度的比较

Table 1 Comparison of microscopic instrumental intensity with macroscopic inspection intensity for Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

台站编号	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)				烈度	
	EW	NS	UD	三分向	微观仪器	宏观考察
051MED	-28.2	24.2	19.2	31.1	4.5	6.2
051MZQ	-840.9	819.1	635.6	940.8	9.2	10.7
051KDT	-22.1	34.9	16.8	35.4	5.1	6.3
051MEZ	58.8	43.3	36.3	60.4	5.1	6.3
051LDD	111.7	-114.4	-57.2	125.1	7.2	6.1
051WCW	976.3	665.6	966.5	1 079.3	9.6	10.7
051HYQ	145.2	127.7	55.5	153.1	7.4	6.4

3.2 攀枝花地震

在 2008 年 8 月 30 日的攀枝花 $M_s6.1$ 地震中, 四川省数字强震动观测台网在宏观考察烈度图的 VI 度区域内有 11 个自由场地观测台站获得了强震动记录. 图 4 给出了该地震宏观仪器烈度图、宏观考察烈度图(中国地震信息网, 2008)及其与微观仪器烈度比较.

图 4a 与 b 的最内侧烈度等震线均为 VIII 度, 是比较合理的宏观仪器烈度图. 图 4c 表明, 即使将微观仪器烈度与宏观考察烈度进行比较, 两者之差的绝对值平均为 0.7 度. 对比其算术平均值, 修正的袁一凡仪器烈度算法所得微观仪器烈度较宏观考察烈度低 0.4 度.

表 2 列出了修正的袁一凡仪器烈度算法所得微观仪器烈度与宏观考察烈度之差的绝对值大于 I 度的全部 4 个记录数据. 该表同样体现了微观仪器烈度与宏观仪器烈度在概念上的本质差异.

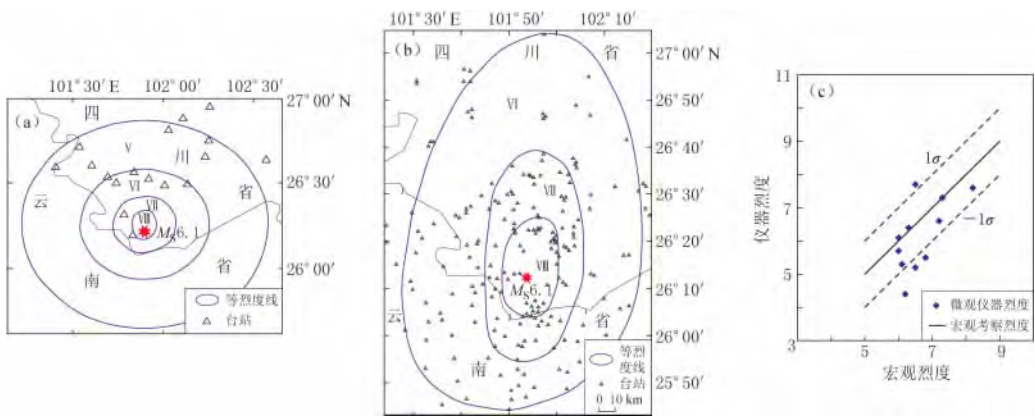


图 4 攀枝花地震宏观仪器烈度(a)、宏观考察烈度(b)及其与微观仪器烈度比较(c)
Fig. 4 Macroscopic instrumental intensity map (a), macroscopic inspection intensity map (b) and its comparison with microscopic instrumental intensity (c) of Panzihua earthquake

表 2 攀枝花 $M_s6.1$ 地震微观仪器烈度与宏观考察烈度的比较

Table 2 Comparison of microscopic instrumental intensity with macroscopic inspection intensity for Panzihua $M_s6.1$ earthquake

台站编号	峰值加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$				烈度	
	EW	NS	UD	三分向	微观仪器	宏观考察
051PZW	-30.9	47.8	-20.4	48.9	4.5	6.2
051PZN	-128.4	133.0	77.1	152.9	5.3	6.5
051PZR	128.9	-145.9	-142.3	156.7	5.6	6.8
051YBH	-267.0	176.9	-89.6	274.2	7.7	6.5

3.3 芦山地震

在 2013 年 4 月 20 日的芦山 $M_s7.0$ 地震中,中国数字强震动观测台网共有 112 个自由场地观测台站、3 个岩洞观测点和 1 个结构观测台阵获得了强震动记录,其中四川省境内获得 83 个强震观测记录.在宏观考察烈度图中有 17 个自由场地观测台站位于 VI 度区域内.图 5 给出了该地震宏观仪器烈度图、宏观考察烈度图(中国地震局,2013)及其与微观仪器烈度比较.

对比图 5a 与 b 仍然可以看出,本文所提出的宏观仪器烈度图在核心区域是可行的.与汶川地震核心区域烈度太高、主观干扰缺乏高估空间不同的是,芦山地震的宏观考察烈度图在破裂的前端延伸似乎过大.从图中可以看出,基于修正的袁一凡仪器烈度算法和共焦点椭圆衰减模型绘制的宏观仪器烈度图是满足外圈趋于圆这一宏观定性的.图 5c 表明,基于修正的袁一凡仪器烈度算法的微观仪器烈度与宏观考察烈度之差的绝对值平均为 0.6 度.对比其算术平均值,修正的袁一凡仪器烈度算法所得微观仪器烈度较宏观考察烈度高 0.3 度.

表 3 列出了修正的袁一凡仪器烈度算法所得微观仪器烈度与宏观考察烈度之差的绝对值大于 I 度的全部 7 个未校正峰值加速度记录数据.该表同样说明场地的宏观仪器烈度必须由所有站点的微观仪器烈度共同决定.

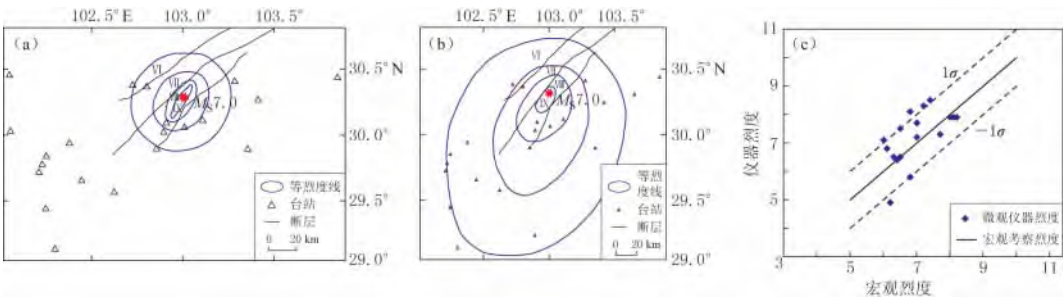


图 5 芦山地震宏观仪器烈度(a)、宏观考察烈度(b)及其与微观仪器烈度比较(c)

Fig. 5 Macroscopic instrumental intensity map (a), macroscopic inspection intensity map (b) and its comparison with microscopic instrumental intensity (c) of Lushan earthquake

表 3 芦山 $M_s7.0$ 地震微观仪器烈度与宏观考察烈度的比较

Table 3 Comparison of microscopic instrumental intensity with macroscopic inspection intensity for Lushan $M_s7.0$ earthquake

台站编号	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)				烈度	
	EW	NS	UD	三分向	微观仪器	宏观考察
051BXZ	594.6	322.4	-394.8	609.5	8.4	7.2
051BXM	-394.7	203.7	134.6	408.8	8.0	6.8
051BXD	-1 024.8	839.4	487.3	1 100.5	8.6	7.4
051HYW	60.0	46.8	38.7	61.7	5.1	6.2
051LDL	140.5	-199.3	73.9	211.7	7.1	6.0
051HYQ	-78.7	50.1	-29.3	86.5	5.8	6.8
051PJD	156.6	-187.9	-105.5	242.2	7.5	6.5

3.4 051BXD 台站记录个案分析

051BXD 强震台站位于 3/4 山坡上,地形十分陡峭,在芦山 $M_s7.0$ 地震中该强震台站记录到了超过 $1g$ ($1g=9.8 \text{ m/s}^2$) 的未校正单向峰值加速度记录. 在 300—400 m 山下河滩处的宝兴中学校门传达室内,另有成都高新减灾所布设的地震仪器获得的单向峰值加速度记录约 $0.4g$. 这两个台站的记录参数见表 4.

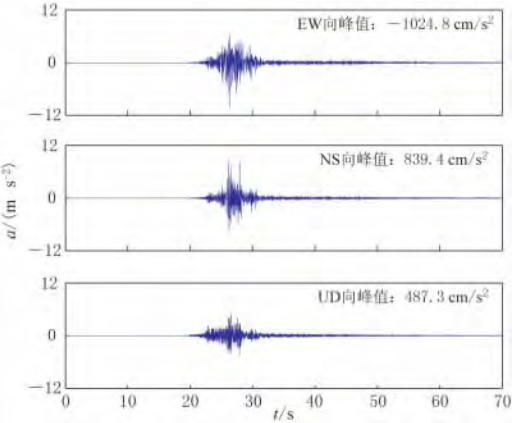


图 6 051BXD 台站记录的未校正加速度时程

Fig. 6 Uncorrected acceleration time histories recorded by the station 051BXD

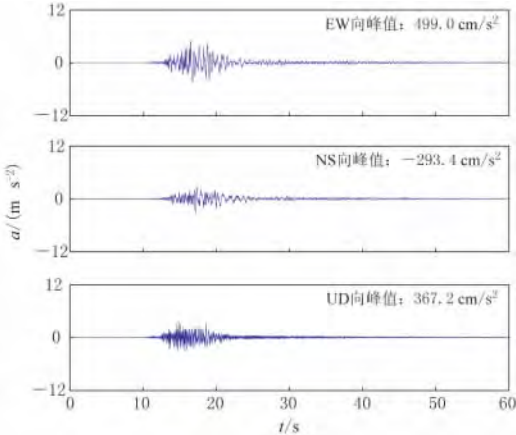


图 7 宝兴中学观测点记录的未校正加速度时程

Fig. 7 Uncorrected acceleration time histories recorded by the Baoxing middle school observation point

表 4 芦山 $M_s7.0$ 地震 051BXD 台站及宝兴中学观测点所记录的未校正强震动参数

Table 4 Uncorrected strong motion parameters of Lushan $M_s7.0$ earthquake recorded by the station 051BXD and Baoxing middle school observation point

台站 (观测点)	峰值加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)			三分向	烈度	
	EW	NS	UD		微观仪器	宏观考察
051BXD	-1 024.8	839.4	487.3	1 100.5	8.6	7.4
宝兴中学	403.0	-262.2	293.9	405.6	8.8	7.4

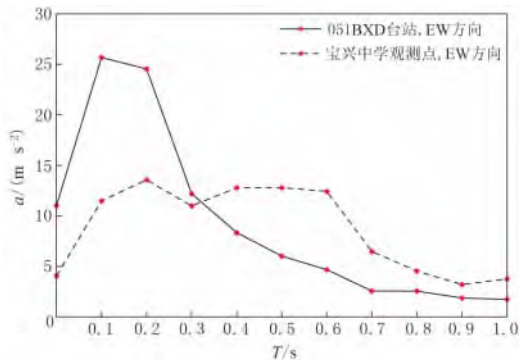


图 8 051BXD 台站与宝兴中学观测点记录的反应谱比较

Fig. 8 Comparison of response spectrum recorded by the station 051BXD with that by Baoxing middle school observation point

图 6—8 分别给出了 051BXD 台站和宝兴中学校门传达室内的地震仪器在芦山地震中获得的 3 个观测方向的加速度记录时程及其反应谱比较. 图 9 给出了 051BXD 台站及其附近的震害示意图. 可以看出, 051BXD 台站的两层砌体办公楼有水平贯穿裂纹, 已不适合办公使用, 属严重破坏. 但总体来看, 宝兴县城的震害不算特别严重. 从图 6—9 可以看到, 利用基于模糊方法的修正的袁一凡仪器烈度算法计算微观仪器烈度时, 如果该强震动记录 PGA 不具有代表性, 则其对仪器烈度计算结果影响不大.



图 9 051BXD 台站及其附近的震害示意图(引自温瑞智等, 2013)

- ① 6 层框架剪力墙(1995 年建)基本完好; ② 6 层框架剪力墙(1990 年建)严重破坏;
- ③ 6 层框架剪力墙(1995 年建)基本完好; ④ 4 层框架剪力墙(1995 年建)基本完好;
- ⑤ 051BXD 台站观测室完好; ⑥ 2 层砌体结构(1970 年建)严重破坏

Fig. 9 Damage schematic diagram at the station 051BXD and its surrounding areas (after Wen *et al*, 2013)

- ① 6-storey frame-shear wall built in 1995 was intact; ② 6-storey frame-shear wall built in 1990 subjected to severe damage; ③ 6-storey frame-shear wall built in 1995 was intact; ④ 4-storey frame-shear wall built in 1995 was intact; ⑤ The strong motion observation station 051BXD was intact; ⑥ 2-storey masonry structure built in 1970 subjected to severe damage

4 讨论与结论

仪器烈度与考察烈度一致性对比的最大概念性困扰, 在于局部场地效应问题. 因此,

首先应该明晰微观仪器烈度与宏观仪器烈度、微观考察烈度与宏观考察烈度的概念,在此基础上我们认为只有将宏观仪器烈度与宏观考察烈度进行比较才具有实质性的意义,从本文的实例中也可以看出将微观仪器烈度与宏观考察烈度直接进行比较会存在较大的差距。

即使在一般场地,随着我国高密度强震动台网的兴建以及数字化宽频带强震动仪的使用,我国强震动台网在历次地震中仍旧获得了大量的强震动记录,其中存在一些与地震宏观考察烈度不匹配的强震动记录峰值,所以仅使用单个 PGA 或 PGV 值评价地震宏观烈度的方法并不十分合适。现在常见的有效峰值加速度 EPA 及有效峰值速度 EPV 的方法,本质上是通过现代强震仪的记录波形进行过滤,使其大致能还原到传统模拟强震记录的峰值代表性特征;而利用谱烈度值或加速度反应谱值等确定仪器烈度的算法与豪斯纳的“谱烈度”概念是一脉相承的,因为引入了反应谱值参数,其实质也是对不具有地震动强度代表性的峰值进行过滤。

理论上讲,袁一凡仪器烈度算法在谱烈度思路是最彻底的,由于其放弃了传统的公式型算法,转而采用不同地震反应谱值独立进行烈度评价后的综合评判,保留了烈度成因的复杂性解析,更为贴近地震破坏的实际情况,因而王玉石等(2013)认为,在我国近年来的大震实践中该算法可靠性更高。本文实例部分也详细地解析了这一点。另一方面,由于袁一凡仪器烈度算法是采用模糊数学方法判定烈度,每一个判定因子相对不同烈度只是隶属程度不同,因此该算法的倒数第二步可以理解为不同烈度值的概率分布,这可以与震害预测理论并轨从而将烈度速报台网提升为损失快速评估台网,这是一种可能的尝试,我们将继续对此展开研究。

参 考 文 献

- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 第2版. 北京:地震出版社:3-10.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press: 3-10 (in Chinese).
- 金星, 张红才, 李军, 康兰池, 韦永祥, 马强. 2013. 地震仪器烈度标准初步研究[J]. 地球物理学进展, 28(5): 2336-2351.
- Jin X, Zhang H C, Li J, Kang L C, Wei Y X, Ma Q. 2013. Preliminary study on instrumental seismic intensity standard [J]. *Progress in Geophysics*, 28(5): 2336-2351 (in Chinese).
- 李敏. 2010. 地震动加速度反应谱与地震烈度的关系研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 44-52.
- Li M. 2010. *A Study on the Relationship Between Seismic Intensity and Spectral Accelerations of Strong Motion*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 44-52 (in Chinese).
- 王玉石, 周正华, 王伟. 2008. 基于假设检验的地震动强度(烈度)速报方法[J]. 地震工程与工程振动, 28(5): 49-54.
- Wang Y S, Zhou Z H, Wang W. 2008. A hypothesis testing based method for seismic intensity rapid assessment by strong ground motion parameters[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 28(5): 49-54 (in Chinese).
- 王玉石. 2010. 地震动强度及其特征分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 44-52.
- Wang Y S. 2010. *Analyses of Strong Ground Motion Intensity and Its Characteristics*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 44-52 (in Chinese).
- 王玉石, 李小军, 梅泽洪, 刘燕. 2013. 几种仪器烈度算法在汶川地震与芦山地震中的可靠性比较[J]. 地震学报, 35(5): 759-770.
- Wang Y S, Li X J, Mei Z H, Liu Y. 2013. Reliability comparison of instrumental seismic intensity algorithms in 2008 Wenchuan earthquake and 2013 Lushan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 759-770 (in Chinese).
- 温瑞智, 任叶飞, 齐文浩, 卢滔, 杨振宇, 单振东, 汪云龙. 2013. 2013年4月20日芦山地震最大加速度记录分析[J].

- 西南交通大学学报, **48**(5): 783–791.
- Wen R Z, Ren Y F, Qi W H, Lu T, Yang Z Y, Shan Z D, Wang Y L. 2013. Maximum acceleration recording from Lushan earthquake on April 20, 2013[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, **48**(5): 783–791 (in Chinese).
- 袁一凡. 1998. 由地震动三要素确定地震动强度(烈度)的研究[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 1–42.
- Yuan Y F. 1998. *Research on Seismic Intensity Calculation Method by Using the Three Elements of Ground Motion*[R]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 1–42 (in Chinese).
- 袁一凡. 2008. 四川汶川 8.0 级地震损失评估[J]. 地震工程与工程振动, **28**(5): 10–19.
- Yuan Y F. 2008. Loss assessment of Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **28**(5): 10–19 (in Chinese).
- 袁一凡, 田启文. 2012. 工程地震学[M]. 北京: 地震出版社: 1–9.
- Yuan Y F, Tian Q W. 2012. *Engineering Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–9 (in Chinese).
- 中国地震局. 2013. 中国地震局发布四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图[EB/OL]. [2013-04-25]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20130426185746117952058/index.html>.
- China Earthquake Administration. 2013. The intensity map of Lushan $M_s 7.0$ earthquake in Sichuan Province on April 20, 2013 issued by China Earthquake Administration[EB/OL]. [2013-04-25]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20130426185746117952058/index.html>.
- 中国地震信息网. 2008. 四川省攀枝花市仁和区、凉山彝族自治州会理县交界 6.1 级地震烈度分布图[EB/OL]. [2008-09-25]. http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111c5c558b00001/_content/08_09/25/1222331919959.html.
- China Seismic Information. 2008. The intensity map of $M_s 6.1$ earthquake occurred at the border of Renhe, Panzhihua-Huili, Liangshan Yi autonomous prefecture, Sichuan Province[EB/OL]. [2008-09-25]. http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111c5c558b00001/_content/08_09/25/1222331919959.html.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2009. 中国地震烈度表(GB/T 17742—2008)[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–4.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2009. *The Chinese Seismic Intensity Scale*(GB/T 17742—2008)[S]. Beijing: China Standards Press: 1–4 (in Chinese).
- Housner G W. 1952. Spectrum intensity of strong-motion earthquake[C]// *Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures*. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute: 20–36.
- Wald D J, Worden B C, Quitoriano V, Pankow K L. 2006. *ShakeMap Manual*[M/OL]. [2006-06-19]. <http://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/>.
- 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 Seismol Soc Am*, **93**(1): 386–396.

作者简介



赵荣涛 中国地质科学院地质力学研究所固体地球物理专业硕士研究生。2012 年山东科技大学地质工程专业毕业, 获学士学位。现从事天然地震的定位和震源机制反演方面的研究工作。



崔丛越 北京大学固体地球物理专业在读本科生。主要从事地震波场数值模拟等方面的研究。



吴萍萍 防灾科技学院助教。2010 年中国地质大学(北京)地球物理专业毕业, 获学士学位; 2013 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业, 获硕士学位。主要从事地震各向异性和地震层析成像

研究。



郑晨 中国地震局地球物理研究所在读博士研究生。2011 年中国科学技术大学固体地球物理专业毕业, 获学士学位。主要从事地震定位及地球内部结构研究。



李光光 东北大学计算机软件与理论专业硕士研究生。2013 年石家庄经济学院软件工程专业毕业, 获学士学位。2013 年 9 月份进入东北大学信息科学与工程学院的嵌入式技术实验室地震网络小组, 主要

研究方向为地震网络及复杂网络。



李娜 中国地震局地球物理研究所博士。2012 年中国海洋大学勘查技术与工程专业毕业, 获学士学位。现从事浅层地震勘探与面波勘探, 以及噪声层析成像等方面的研究。



田鑫 中国地震局地球物理研究所工程师。2007 年北京邮电大学计算机信息管理专业毕业, 获学士学位。曾从事地震资料处理技术方面的研究, 现从事浅层介质各向异性研究。



朱永莉 四川省地震局工程师。2008 年西南交通大学岩土工程专业毕业, 获工学硕士学位。曾从事边坡地震危险性分析及土层地震反应分析的研究, 现从事仪器烈度速报及地震动衰减关系方面的研究。

注: 王秀英、秦满忠、何永锋、印兴耀、夏彩韵、晏锐、车用太等的简介分别见本刊 Vol. 31, No. 6; Vol. 34, No. 1; Vol. 27, No. 3; Vol. 36, No. 5; Vol. 36, No. 6; Vol. 30, No. 2; Vol. 17, No. 1.