

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. 地震学报, 35(5): 759-770.

Wang Yushi, Li Xiaojun, Mei Zehong, Liu Yan. 2013. Reliability comparison of instrumental seismic intensity algorithms in 2008 Wenchuan earthquake and 2013 Lushan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 759-770.

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^{*}

王玉石* 李小军 梅泽洪 刘 燕

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 破坏性地震发生后, 特别是在通信中断的情况下, 利用仪器烈度快速估计地震动强度(烈度)的分布情况, 可为开展最有效的地震应急救援提供决策依据. 该文介绍了现有的几种仪器烈度算法, 并利用汶川地震与芦山地震中获得的强震加速度记录对各种算法的可靠性进行了比较. 结果表明, 在这两次地震中只利用地震动峰值参数确定仪器烈度的算法可靠性较低, 而考虑反应谱特性的算法可靠性更高. 在未得到更多强震数据的检验前, 建议采用袁一凡提出的仪器烈度算法, 或利用谱烈度值确定仪器烈度的算法, 或利用加速度反应谱值确定仪器烈度的算法.

关键词 仪器烈度 烈度指标 强地震动 反应谱 谱烈度

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.014 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Reliability comparison of instrumental seismic intensity algorithms in 2008 Wenchuan earthquake and 2013 Lushan earthquake

Wang Yushi* Li Xiaojun Mei Zehong Liu Yan

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

Abstract: Rapid and reliable estimation of strong ground motion (or seismic intensity) distribution based on instrumental seismic intensity can give security to earthquake emergency response soon after a destructive earthquake, especially on the situation of communication interruption. The reliabilities of eight instrumental seismic intensity algorithms are discussed using the acceleration records obtained in Wenchuan earthquake and Lushan earthquake. The results indicate that the instrumental seismic intensity evaluated by peak parameters of ground motion, such as PGA or PGV, are of lower reliabilities than the instrumental seismic intensity derived from response spectra. We suggest that the instrumental seismic intensity evaluated by Professor Yuan's algorithm, by Housner's

* 基金项目 国家自然科学基金(51208475)、地震行业专项(201108003)和 973 计划课题(2011CB013601)资助.
收稿日期 2013-05-16 收到初稿, 2013-08-14 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: wysh.igp@gmail.com

spectrum intensity, or by response spectra, could be accepted in China until more data are available to propose a more reliable algorithm.

Key words: instrumental seismic intensity; intensity measure; strong ground motion; response spectrum; spectral intensity

引言

破坏性地震发生后数分钟内,快速估计地震动强度(烈度)的分布,可为合理分配救援力量、开展最有效的紧急救援提供决策依据,震级越大其效果越明显。大地震的破坏范围较广,根据震级估计的发震破裂长度, M_w 7.5 地震平均约为 90 km, M_w 8.0 地震平均约为 200 km(Wells, Coppersmith, 1994)。在通讯中断的情况下,仅仅利用震级、震源位置等地震要素难以准确估计如此大范围内震害的实际分布情况。

利用强震动观测台网获得的强震动记录,通过地震烈度与地震动参数间的统计关系,可以近似估计出强震动观测台站附近的破坏情况,即仪器烈度。如果强震动观测台网足够密集,且地震烈度与地震动参数间的统计关系足够可靠,则可以根据仪器烈度分布得到实际震害情况的估计。目前,我国“国家地震烈度速报与预警工程”已经进入立项程序,计划用 5 年时间建成由 5000 多个台站组成的覆盖全国的地震烈度速报与预警系统。随着观测台网密度的逐渐增加,仪器烈度算法成为关键技术问题。而地震烈度与地震动参数间统计关系的可靠性则制约着仪器烈度的可靠性。

利用全球数据或者区域数据,地震工作者得到了多个地震动参数与地震烈度间的统计关系,所采用的地震动参数包括峰值参数 PGA(peak ground acceleration)或 PGV(peak ground velocity)(Wald *et al*, 1999; Wu *et al*, 2003; Kaka, Atkinson, 2004; Atkinson, Kaka, 2007; Linkimer, 2008)、傅立叶谱(Sokolov, Chernov, 1998; Chernov, Sokolov, 1999; Sokolov, 2002)、反应谱(Boatwright *et al*, 2001; Atkinson, Kaka, 2007)、地震动持续时间(Trifunac, Brady, 1975; Trifunac, Westermo, 1977)、累积绝对速度 CAV(cumulative absolute velocity)(Fahjan *et al*, 2011)、阿里亚斯 Arias 烈度(Margottini *et al*, 1992)以及日本气象厅 JMA(Japan meteorological agency)仪器烈度(Karim, Yamazaki, 2001, 2002; Shabestari, Yamazaki, 2001)等。目前正在应用的烈度速报系统中,美国地质调查局的震动图 ShakeMap 采用的地震动参数是 PGA 和 PGV;日本采用 JMA 仪器烈度;我国台湾采用 PGA,“九五”强震烈度台采用袁一凡(1998)提出的通过模糊方法确定仪器烈度的方法,“十五”城市地震动强度(烈度)速报台网采用王玉石等(2008)提出的利用 PGA、PGV 和豪斯纳谱烈度(Housner, 1952)确定仪器烈度的方法。

本文通过汶川地震与芦山地震中获得的强震动记录,比较我国现有的 8 种仪器烈度算法的可靠性。

1 仪器烈度算法介绍

1.1 中国地震烈度表方法

《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,2008)中第 4.7 条建议,当有自由场强震动记录时,水平向地震动峰值加速度 PGA 和峰值速度 PGV 可作为综合评定地震烈度的参考指标(表 1)。在实际操作过程中,

PGA 或 PGV 一般选取相互正交的两水平向强震加速度记录中峰值较大者。另外, 由于某些近场强震加速度记录存在基线漂移现象, 一般需先对强震加速度记录进行高通滤波后再进行积分, 以获取可靠的 PGV 数值。

表 1 中国地震烈度表建议的地震动参数值

Table 1 Strong ground motion measures suggested in the Chinese seismic intensity scale

仪器烈度	PGA/m·s ⁻²	PGV/m·s ⁻¹	仪器烈度	PGA/m·s ⁻²	PGV/m·s ⁻¹
5	0.22—0.44	0.02—0.04	8	1.78—3.53	0.19—0.35
6	0.45—0.89	0.05—0.09	9	3.54—7.07	0.36—0.71
7	0.90—1.77	0.10—0.18	10	7.08—14.14	0.72—1.41

1.2 ShakeMap 方法

根据 Wald 等(1999)的统计结果, 美国 ShakeMap 综合利用 PGA 和 PGV 确定仪器烈度(表 2)。在实际计算过程中, 先利用 PGA 确定仪器烈度, 当利用 PGA 确定的仪器烈度大于 7 度时, 转而利用 PGV 确定仪器烈度; 当利用 PGA 确定的仪器烈度在 6—7 度之间时, 对用 PGA 和 PGV 确定的仪器烈度进行线插值, 取整后作为最终的仪器烈度。由于美国使用的修正麦加利烈度表与中国烈度表的烈度评定标准稍有差异, 此方法仅供参考。

表 2 ShakeMap 仪器烈度所用的地震动参数值

Table 2 Strong ground motion measures in ShakeMap of USGS

仪器烈度	PGA/m·s ⁻²	PGV/m·s ⁻¹	仪器烈度	PGA/m·s ⁻²	PGV/m·s ⁻¹
1	<0.017	<0.1	7	1.8—3.4	16—31
2—3	0.017—0.14	0.1—1.1	8	3.4—6.5	31—60
4	0.14—0.39	1.1—3.4	9	6.5—12.4	60—116
5	0.39—0.92	3.4—8.1	10+	>12.4	>116
6	0.92—1.8	8.1—16			

1.3 福建地方标准方法

参考日本 JMA 仪器烈度的算法,《地震仪器烈度表》(福建省质量技术监督局, 2012) 利用等效峰值加速度确定仪器烈度。其步骤如下:

1) 采用幅值滤波器对三分向加速度时程进行无相移带通滤波, 滤波器表达式为

$$H(f) = \frac{12.87f^6 + 16.65f^4}{f^8 + 9.18f^6 + 20.77f^4 - 1.34f^2 + 0.13} \quad (1)$$

式中, $H(f)$ 为幅值滤波器的系统函数; f 为自振频率, 单位为 Hz.

2) 采用下式计算合成加速度时程:

$$a = \sqrt{a_{\text{EW}}^2 + a_{\text{NS}}^2 + a_{\text{UD}}^2} \quad (2)$$

式中, a 为合成加速度时程, a_{EW} 、 a_{NS} 、 a_{UD} 分别为采用式(1)滤波后的东西向、南北向和垂直到加速度时程。

3) 采用下式计算仪器烈度:

$$I = 2.71 \lg A_{0.5} + 7.81 \quad (3)$$

式中, I 为强震动记录对应测点处的仪器烈度计算值, 采用四舍五入法取整; $A_{0.5}$ 为合成加速度时程 a 中持续时间 ≥ 0.5 s 时的等效峰值加速度, 单位为 m/s^2 .

1.4 袁一凡的模糊方法

利用中国和美国在 20 世纪 90 年代前获得的强震数据, 袁一凡(1998)提出了利用模糊方法确定仪器烈度的方法。综合用地震动三要素(PGA、傅立叶谱卓越频率和相对持时)和 4 个频率点(8, 5, 2 和 1 Hz)对应的反应谱值, 通过隶属度矩阵进行两级评定, 确定强震动记录对应的仪器烈度。

1.5 利用谱烈度确定仪器烈度的方法

通过统计美国和中国的强震数据, 发现谱烈度 $SI_{0.2}$ 也是一个与地震烈度相关性很好的参数(王玉石等, 2008, 2010; Wang *et al.*, 2013)。谱烈度的概念由 Housner(1952)提出, 其含义为周期在 0.1—2.5 s 的伪速度反应谱的平均值, 即

$$SI_{\xi} = \frac{1}{2 \cdot 4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT \quad (4)$$

式中, S_v 为伪速度反应谱, T 为周期, 阻尼 ξ 一般取 0, 0.05 或 0.2。在实际计算中, 谱烈度的数值一般根据 Karim 和 Yamazaki(2001, 2002)给出的算法获得。

另外, 王玉石等(2010)和 Wang 等(2013)还提出了一种对谱烈度进行修正的方法:

$$SI_{0.2}^M = \begin{cases} 10^{0.3} SI_{0.2} & \text{基岩场地或 } T_p < 0.1 \text{ s} \\ 10^{0.2} SI_{0.2} & 0.1 \text{ s} \leqslant T_p < 0.2 \text{ s} \\ SI_{0.2} & 0.2 \text{ s} \leqslant T_p < 0.4 \text{ s} \\ 10^{-0.3} SI_{0.2} & 0.4 \text{ s} \leqslant T_p < 1.0 \text{ s} \\ 10^{-0.45} SI_{0.2} & T_p \geqslant 1.0 \text{ s} \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_p 为阻尼比 $\xi=0.2$ 时加速度反应谱的特征周期。

根据谱烈度 $SI_{0.2}$ 和修正谱烈度 $SI_{0.2}^M$ 确定仪器烈度的参考值如表 3 所示。

表 3 利用谱烈度确定仪器烈度所用的地震动参数值

Table 3 Strong ground motion measures in instrument intensity determination by spectrum intensity

烈度	$SI_{0.2}/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$SI_{0.2}^M/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	烈度	$SI_{0.2}/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$SI_{0.2}^M/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
5—	<3.5	<4.5	9	[50, 100]	[50, 80)
6	[3.5, 12.6)	[4.5, 10.0)	10	$\geqslant 100$	[80, 100)
7	[12.6, 25)	[10.0, 22.4)	11		$\geqslant 100$
8	[25, 50)	[22.4, 50)			

1.6 利用反应谱确定仪器烈度的方法

李敏(2010)利用汶川地震等我国西部强震数据, 通过多元线性回归得到了加速度反应谱与地震烈度间的统计关系:

$$I = 2.86 + 0.162 \lg PGA + 0.912 \lg S_a(T = 0.03) + 0.117 \lg S_a(T = 0.075) + 0.266 \lg S_a(T = 0.15) + 0.158 \lg S_a(T = 0.28) + 0.170 \lg S_a(T = 8) + 0.496 \lg S_a(T = 20) \quad (6)$$

式中, $S_a(T=T_0)$ 为水平向加速度反应谱(阻尼比为 0.05)在周期 T_0 时对应的谱值, 单位为 cm/s^2 。在实际计算过程中, 分别计算两水平向强震加速度记录对应的仪器烈度值, 取算数平均后根据本方法采用“七舍八入”的原则取整。

2 汶川地震和芦山地震强震动记录

2.1 汶川地震

在 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震中, 我国强震动观测台网的 432 个自由场观测台

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(中国地震局震害防御司, 2008), 记录总条数为1349条, 洪雅台记录垂直向分量缺失。其中, 汶川卧龙台记录的PGA最大, 东西向、南北向和垂直向分量的PGA分别为957.8, 658.1和948.4 cm/s²。根据汶川地震烈度图(袁一凡, 2008), 在获得强震动记录的自由场观测台站中, 1个台(绵竹清平台)位于X度区, 1个台(汶川卧龙台)位于IX度区, 11个台位于VIII度区, 30个台位于VII度区, 59个台位于VI度区, 其它台站均位于VI度区以外。根据VI度区的范围, 我们推测至少有49个台位于V度区。这151个台站的位置示于图1。

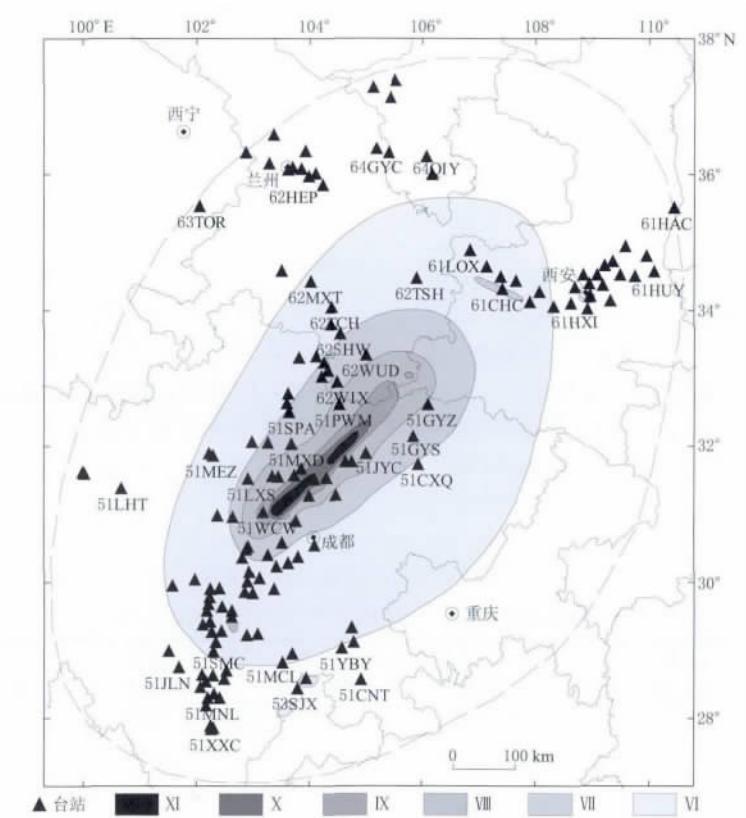


图1 汶川地震加速度记录的台站分布与烈度分布图

Fig. 1 Station positions of acceleration records and seismic intensity distribution for the Wenchuan earthquake used in this study

2.2 芦山地震

在2013年4月20日芦山 M_s 7.0 地震中, 我国强震动观测台网的112个自由场观测台站、3个岩洞观测点和1个结构观测台阵获得了强震动记录, 总记录为378条。其中, 宝兴地办台记录的PGA最大, 东西向、南北向和垂直向分量的PGA分别为1005.4, 823.5和478.0 cm/s²。根据芦山地震烈度图(中国地震局, 2013), 在获得完整强震动记录的自由场观测台站中, 有2个台位于VIII度区, 2个台位于VII度区, 5个台位于VI度区, 其它台站均位于VI度区以外。根据VI度区的范围, 我们推测至少有4个台位于V度区。这13个台站的位置示于图2。

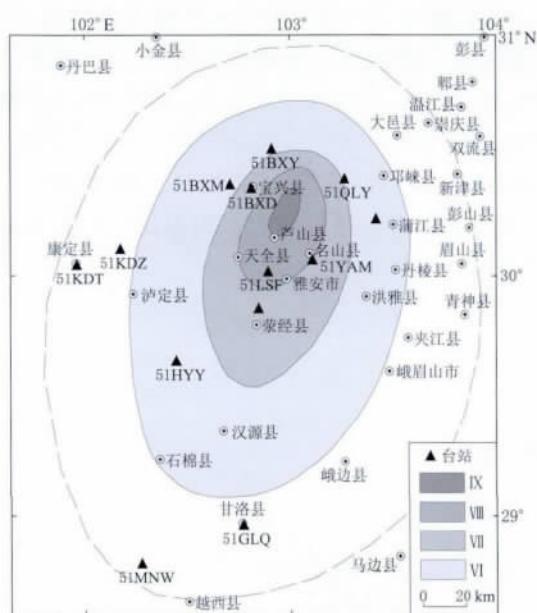


图 2 芦山地震加速度记录的台站分布与烈度分布图

Fig. 2 Station positions of acceleration records and seismic intensity distribution for the Lushan earthquake used in this study

3 仪器烈度计算结果与分析

计算了汶川地震中获得的 151 组三分量强震加速度记录和芦山地震中获得的 13 组强震加速度记录对应的仪器烈度(附表 A)，所用算法分别为：中国地震烈度表给出的 PGA 参考值(I_1)，中国地震烈度表给出的 PGV 参考值(I_2)，ShakeMap 方法(I_3)，福建地方标准方法(I_4)，袁一凡模糊方法(I_5)，表 3 中谱烈度值(I_6)，表 3 中修正谱烈度值(I_7)，式(6)中反应谱值(I_8)。图 3 给出了不同仪器烈度算法计算的误差分布，表 4 为不同仪器烈度算法计算的误差统计结果。从表 4 中可以看出，仪器烈度与地震烈度一致的比例中， I_8 最高， I_5 、 I_7 、 I_1 、 I_3 、 I_6 次之， I_2 和 I_4 稍低；仪器烈度与地震烈度相差 2 度及以上的比例中， I_1 、 I_2 和 I_4 均超过了 5%， I_3 为 3.7%， I_5 、 I_7 和 I_8 均为 1.8%， I_6 为 0。

表 4 不同仪器烈度算法的误差统计

Table 4 Intensity error statistics by different algorithms

仪器烈度 算法	误差为 0 的比例	误差在±1 度 以内的比例	误差 平均值	误差 均方根	芦山地震仪器 烈度误差平均值
I_1	53.7%	94.5%	0.21	0.85	1.54
I_2	36.0%	90.9%	-0.41	0.96	0.08
I_3	53.0%	96.3%	-0.46	0.76	0
I_4	47.0%	92.7%	0.43	0.87	0.85
I_5	61.6%	98.2%	-0.21	0.66	0.31
I_6	51.8%	100%	0.08	0.69	0.31
I_7	58.5%	98.2%	0.12	0.69	0.62
I_8	65.2%	98.2%	0.28	0.65	0.62

表 4 中第 4 列给出了不同仪器烈度计算误差的平均值，从中可以看出， I_2 、 I_3 和 I_4 存在较大的系统误差，其中 I_2 和 I_3 比地震烈度低约 0.5 度， I_4 比地震烈度高约 0.5 度。表 4 中第 5 列给出了不同仪器烈度误差的均方根，从中可以看出， I_5 、 I_6 、 I_7 和 I_8 的仪器烈度误差的均方根相对小一些。

利用 I_6 、 I_7 和 I_8 计算仪器烈度的方法，在统计时都使用了汶川地震中获得的强震动记录，但没有使用芦山地震中获得的强震动记录。表 4 中第 6 列给出了利用不同算法计算芦山地震仪器烈度误差的平均值，从中可以看出， I_1 高估了地震烈度 1.5 度， I_4 比地震烈度高约 1 度， I_7 和 I_8 比地震烈度高约 0.5 度，其它方法确定的仪器烈度与地震烈度接近。

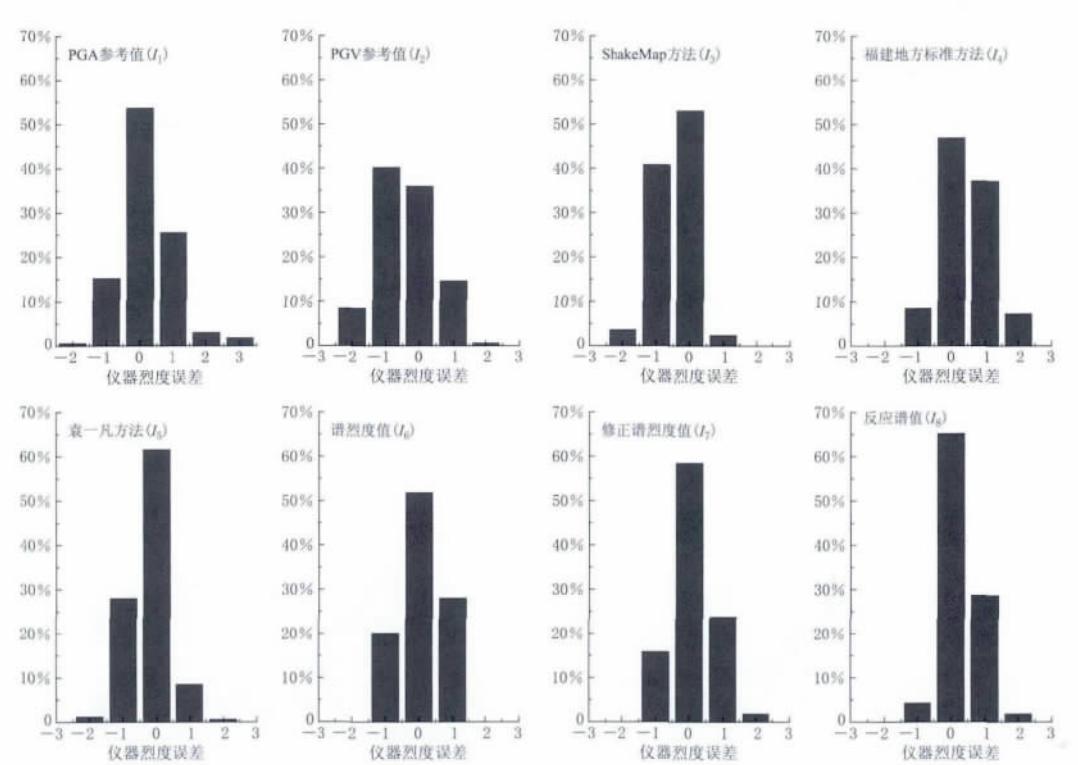


图3 不同仪器烈度算法计算的误差分布

Fig. 3 Intensity error distributions by different algorithms

综上所述，在汶川地震和芦山地震中，作为评价仪器烈度的地震动物理指标， I_1 可靠性中等，且高估了芦山地震的烈度达 1.5 度； I_2 可靠性较低，且存在 -0.5 度的系统误差； I_3 可靠性中等，且存在 -0.5 度的系统误差； I_4 可靠性较低，存在 0.5 度的系统误差，且高估了芦山地震的烈度约 1 度； I_5 可靠性较高，且无明显的系统误差； I_6 可靠性中等，且仪器烈度误差均在 1 度以内； I_7 可靠性较高，但高估了芦山地震烈度约 0.5 度； I_8 可靠性最高，但高估了芦山地震烈度约 0.5 度。

地震烈度作为一种综合的宏观指标，利用强地面运动进行定量衡量有一定的困难，不能苛求仪器烈度与地震烈度完全一致。但是，两者的差距还是越小越好。较好的仪器烈度算法应该使两者一致的比例较高，使两者相差 2 度或更大的比例较小。对汶川地震和芦山地震而言， I_5 、 I_6 、 I_7 和 I_8 在本文述及的 8 种仪器烈度算法中可靠性更高一些。

4 汶川地震仪器烈度图重建

为了进一步比较不同仪器烈度算法的可靠性，本文重建了汶川地震的仪器烈度分布图（图 4）。因为地震应急过程中掌握的信息量有限，在此仅使用了地震震级、震中位置和强震动记录，其它在震后数分钟不能获得的信息均未被采用。

因强震动记录数量有限且分布不均匀，在仪器烈度分布图重建过程中采用了以下假设：

- 1) 烈度等震线受发震断层控制。在我国西部地区，破坏性地震多为浅源地震，烈度分

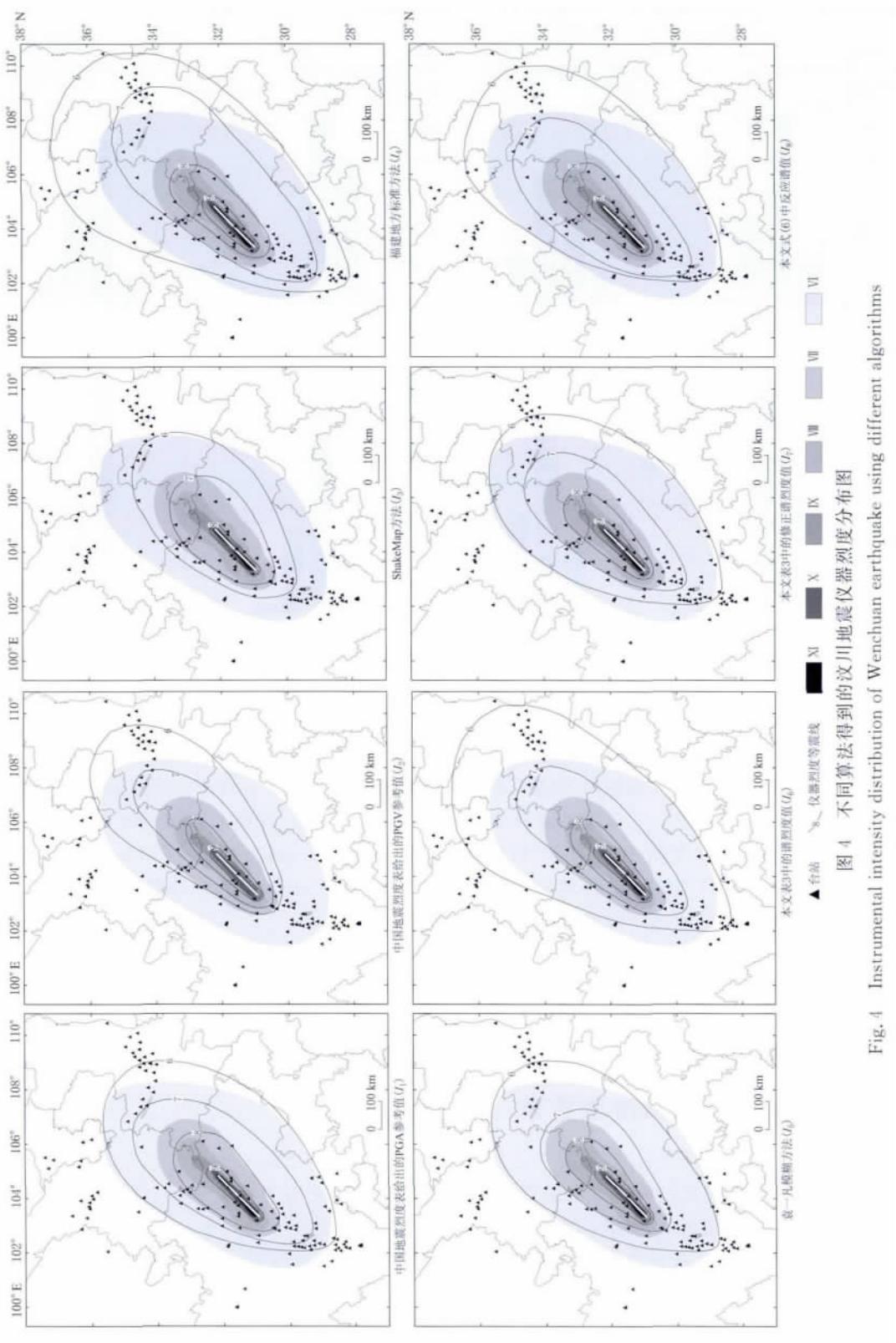


Fig. 4 Instrumental intensity distribution of Wenchuan earthquake using different algorithms

布明显受发震断层地表出露迹线的控制。

2) 发震断层可以简化为一条过震中和高仪器烈度区重心的线段,如图4中白色直线所示。

3) 发震断层长度可由下式估计(Wells, Coppersmith, 1994):

$$\lg L = 0.59M_w - 2.44 \pm 0.16 \quad (7)$$

在震后数分钟内,式(7)中的震级参数 M_w 难以获得,以面波震级 M_s 代替。两者间虽然存在差异但比较接近(汶川地震 $M_s=8.0$, $M_w=7.9$),故 M_s 可用于发震断层长度的粗略估计。

从图4中可以看出, I_1 、 I_3 、 I_5 、 I_7 得到的仪器烈度等震线与实际的汶川地震烈度等震线在形状上比较接近,但 I_1 明显高估了7度和8度区的面积, I_3 则严重低估了各烈度区的面积; I_2 、 I_4 、 I_6 、 I_8 具有相近的趋势,均在北东方向上明显高估了各烈度区的面积,但 I_2 在南西方向上明显低估了各烈度区的面积, I_4 在南西方向上则明显高估了各烈度区的面积。仅从汶川地震仪器烈度分布与实际地震烈度分布的比较可以看出, I_2 、 I_3 、 I_4 的可靠性相对低一些, I_1 、 I_5 、 I_7 的可靠性则相对高一些。

5 结论

本文利用汶川地震和芦山地震中获得的强震动记录,对8种仪器烈度算法进行了比较验证。结果表明,只利用地震动峰值参数的算法可靠性稍差,如中国地震烈度表中给出的PGA和PGV参考值、福建地方标准方法,美国ShakeMap方法的可靠性虽然稍高一些,但这几种方法与中国地震烈度间存在约-0.5度的系统误差;而考虑地震动反应谱特性的仪器烈度算法可靠性更高,如袁一凡模糊方法、谱烈度值方法、修正谱烈度值方法和反应谱值方法。另外,谱烈度值确定的仪器烈度误差均在1度以内,也值得注意。

在未得到更多强震数据的检验且无更可靠的方法之前,本文作者推荐采用袁一凡提出的仪器烈度算法,或利用谱烈度值,或利用加速度反应谱值确定仪器烈度的算法。一种可能的尝试是同时采用3种算法,通过取平均值或者少数服从多数的原则确定仪器烈度。随着地震烈度表的修订、震害评定方法的改进和建筑抗震性能的提高,需要在以后的地震中检验并改进以上仪器烈度算法的可靠性。

感谢国家强震动台网中心提供的强震加速度记录,感谢审稿专家的建设性意见和中肯建议。

参 考 文 献

- 福建省质量技术监督局. 2012. 地震仪器烈度表(DB35/T 1308-2012) [S]. 福州: 福建省质量技术监督局: 1-5.
- 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.
- 王玉石, 周正华, 兰日清. 2010. 利用修正谱烈度确定我国西部地区仪器烈度的建议方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 18(S1): 119-129.
- 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.
- 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: 国家地震局工程力学研究所: 1-42.
- 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.
- 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>.

- 中国地震局震害防御司. 2008. 汶川 8.0 级地震未校正加速度记录[M]. 北京: 地震出版社: 1—5.
- 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. 2008. 中国地震烈度表(GB17742-2008) [S]. 北京: 中国标准出版社: 1—4.
- Atkinson G M, Kaka S I. 2007. Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the Central United States and California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(2): 497—510.
- Boatwright J, Thywissen K, Seekins L C. 2001. Correlation of ground motion and intensity for the 17 January 1994 Northridge, California, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(4): 739—752.
- Chernov Y K, Sokolov V Y. 1999. Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra[J]. *Phys Chem Earth : Pt A*, **24**(6): 523—528.
- Fahjan Y M, Alcik H, Sari A. 2011. Applications of cumulative absolute velocity to urban earthquake early warning systems[J]. *J Seismol*, **15**(2): 355—373.
- Housner G W. 1952. Spectrum intensity of strong-motion earthquakes[C]// *Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures*. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute: 20—36.
- Kaka S I, Atkinson G M. 2004. Relationships between instrumental ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in Eastern North America[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(5): 1728—1736.
- Karim K R, Yamazaki F. 2001. Estimation of the JMA seismic intensity from liquefied record and its correlation with strong motion parameters[C]// *Proceedings of the 26th Japan Earthquake Engineering Symposium*. Sapporo: Japan Society of Civil Engineers: 253—256.
- Karim K R, Yamazaki F. 2002. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **31**(5): 1191—1212.
- Linkimer L. 2008. Relationship between peak ground acceleration and modified Mercalli intensity in Costa Rica[J]. *Revista Geológica de América Central*, **38**(1): 81—94.
- Margottini C, Molin D, Serva L. 1992. Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data[J]. *Eng Geol*, **33**(1): 45—58.
- Shabestari K T, Yamazaki F. 2001. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records[J]. *Earthq Spectra*, **17**(4): 711—723.
- Sokolov V Y. 2002. Seismic intensity and Fourier acceleration spectra: revised relationship[J]. *Earthq Spectra*, **18**(1): 161—187.
- Sokolov V Y, Chernov Y K. 1998. On the correlation of seismic intensity with Fourier amplitude spectra[J]. *Earthq Spectra*, **14**(4): 679—694.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **65**(3): 581—626.
- Trifunac M D, Westermo B. 1977. A note on the correlation of frequency-dependent duration of strong earthquake ground motion with the modified Mercalli intensity and the geologic conditions at the recording stations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **67**(3): 917—927.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, Kanamori H. 1999. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and modified Mercalli intensity in California[J]. *Earthq Spectra*, **15**(3): 557—564.
- Wang Y, Li X, Zhou Z. 2013. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in Western China[J]. *Bull Earthquake Eng*, **11**(4): 913—924.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(4): 974—1002.
- 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.

附表 A 不同算法得到的仪器烈度

Table A Instrumental seismic intensity calculated from acceleration records using different algorithms

编 号	台站 名 称	地震 烈 度	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	编 号	台站 名 称	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	编 号	台站 名 称	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8
1	51MZQ	X	10	9	8	9	9	11	9	29	51HYT	Ⅷ	7	6	6	7	7	7	7	57	514ZG6	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	6	7	6	
2	51WCW	Ⅸ	10	8	7	9	9	9	9	30	51SPA	Ⅷ	$\leqslant 5$	7	7	6	6	7	7	58	514ZG5	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	7	
3	51SFB	Ⅷ	9	9	8	9	9	9	9	31	62WIX	Ⅷ	7	6	6	6	7	7	7	59	514ZG7	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	7	
4	51JYC	Ⅷ	8	7	7	9	8	8	9	32	51PJW	Ⅷ	7	7	6	6	7	7	7	60	61XIA	Ⅷ	6	7	6	6	7	7	6	
5	51MXT	Ⅷ	8	7	7	8	8	9	8	33	61CHC	Ⅷ	7	7	6	8	6	7	7	61	514ZG4	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	7	
6	51AXT	Ⅷ	8	8	7	8	9	8	9	34	51LSF	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	7	62	514ZG3	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	7	
7	51MXN	Ⅷ	9	7	7	9	8	8	8	35	51SPT	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	7	6	63	51JKH	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	7	7	
8	51JYD	Ⅷ	9	8	7	9	8	8	9	36	51LXS	Ⅷ	8	$\leqslant 5$	7	7	6	6	8	64	514ZG2	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	6	
9	51JJYH	Ⅷ	9	7	7	8	8	7	8	37	51LSJ	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	7	65	514ZG1	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	6	
10	51LXT	Ⅷ	8	6	7	8	7	7	8	38	51HSL	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	7	66	51SMM	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	7	6	6	6	6	
11	51LXM	Ⅷ	8	7	7	9	7	8	8	39	51JZY	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	6	6	6	7	67	61LHZ	Ⅷ	$\leqslant 5$	6	7	$\leqslant 5$	6	6	6	
12	51MMD	Ⅷ	8	7	7	8	8	7	7	40	51JZW	Ⅷ	7	6	7	7	6	6	7	68	62TCH	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	6	6	6	6	7	
13	51PWM	Ⅷ	8	7	7	8	7	7	8	41	51XJB	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	7	69	514ZG0	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	6	6	6	6	6	
14	51PXZ	Ⅷ	7	7	6	8	6	7	8	42	51BXD	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	6	6	6	6	7	70	51YBY	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	6	
15	51GYZ	Ⅷ	9	8	7	9	8	8	8	43	51XJD	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	7	6	6	7	71	51JZB	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	7	
16	51CXQ	Ⅷ	8	7	7	7	8	8	9	44	51XJL	Ⅷ	7	6	6	7	6	8	7	72	61YLT	Ⅷ	7	7	6	7	6	7	6	
17	51DYB	Ⅷ	7	7	7	7	8	7	8	45	51HYQ	Ⅷ	7	6	7	6	7	7	7	73	51LDJ	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	6	6	6
18	62WUD	Ⅷ	8	6	7	8	7	7	8	46	62TSH	Ⅷ	7	6	6	8	6	7	7	74	51MNA	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	6	
19	51QLY	Ⅷ	8	6	7	7	7	7	7	47	51YXX	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	7	6	7	6	7	75	51TQL	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	6	6	6	7	
20	51CDZ	Ⅷ	6	6	$\leqslant 5$	7	6	6	7	48	61HXI	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	7	7	76	61QIS	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	6
21	51PID	Ⅷ	8	6	7	8	6	7	7	49	51YAS	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	7	7	77	62ZHQ	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	6	
22	51JZG	Ⅷ	8	6	7	7	7	7	6	50	62SHW	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	7	7	78	51SMW	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	7	6	6	6	
23	51GYS	Ⅷ	8	7	7	8	8	7	8	51	51SMC	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	7	6	7	6	7	79	51FSB	Ⅷ	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	
24	51DXY	Ⅷ	7	7	6	8	7	7	7	52	51YAL	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	7	7	80	62MXT	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	6	6	6	6
25	51BXZ	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	7	53	51JZZ	Ⅷ	8	$\leqslant 5$	7	6	7	6	7	81	61FEX	Ⅷ	6	7	$\leqslant 5$	7	6	6	6	
26	51YAM	Ⅷ	7	6	7	7	6	7	7	54	51HYJ	Ⅷ	6	6	$\leqslant 5$	7	6	7	6	82	51MCL	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	7	
27	51HSD	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	6	6	7	7	55	51LDL	Ⅷ	7	$\leqslant 5$	6	7	6	7	7	83	61QIY	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	7	6	6	6	
28	51BXY	Ⅷ	8	$\leqslant 5$	7	7	6	6	7	56	61LOX	Ⅷ	7	7	6	8	7	7	7	84	51HYY	Ⅷ	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	7	6	6	6	

编 号	台站 名 称	地 震 烈 度	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	编 号		台站 名 称	地 震 烈 度	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	
											I_1	I_2											
85	51LLDD	V	7	$\leqslant 5$	6	7	6	6	6	7	112	51XXC	$\leq V$	≤ 5	6	6	≤ 5	6	≤ 5	≤ 5	6	≤ 5	≤ 5
86	51HYW	V	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	113	61YAL	$\leq V$	≤ 5	6	≤ 5	6	≤ 5					
87	61TAY	V	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	114	61QIY	$\leq V$	≤ 5	6	≤ 5	6	≤ 5					
88	51MNC	V	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	115	62GLA	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
89	51SML	V	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	116	62HEP	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	7	≤ 5	6	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
90	51YXZ	V	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	117	51LBH	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
91	51SMX	V	7	$\leqslant 5$	6	7	6	$\leqslant 5$	6	118	51XCC	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
92	51SPC	V	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	119	61LAT	$\leq V$	6	6	≤ 5	6	≤ 5					
93	51MBD	V	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	120	61HUX	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
94	62ZN1	V	$\leqslant 5$	121	61HUY	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						
95	61QIL	V	$\leqslant 5$	6	122	61WEN	$\leq V$	≤ 5	7	≤ 5	6	≤ 5											
96	53SIX	V	$\leqslant 5$	6	123	61PUC	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						
97	51MEZ	V	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	124	61LID	$\leq V$	≤ 5	6	≤ 5	6	≤ 5					
98	51KDT	V	$\leqslant 5$	6	125	51MNJ	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						
99	51LDS	V	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	126	64GYC	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
100	51MED	V	$\leqslant 5$	6	127	64GYN	$\leq V$	≤ 5	6	≤ 5	6	≤ 5											
101	51SMK	V	7	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	128	51XDG	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
102	51KDG	V	$\leqslant 5$	129	61HAC	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						
103	61LT	$\leq V$	6	$\leqslant 5$	6	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	130	61DAL	$\leq V$	≤ 5	6	≤ 5	6	≤ 5					
104	51MNL	$\leq V$	6	$\leqslant 5$	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	131	51XDM	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
105	61CAT	$\leq V$	6	$\leqslant 5$	5	7	6	6	6	132	63MH	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
106	61GAL	$\leq V$	6	$\leqslant 5$	7	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	7	133	51XCZ	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
107	61CHA	$\leq V$	$\leqslant 5$	6	134	51MNM	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						
108	51CNT	$\leq V$	$\leqslant 5$	6	135	64HYN	$\leq V$	≤ 5	6	≤ 5	6	≤ 5											
109	61JIY	$\leq V$	6	$\leqslant 5$	7	6	$\leqslant 5$	6	$\leqslant 5$	6	136	62JAI	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
110	61XIY	$\leq V$	$\leqslant 5$	6	137	62PAN	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						
111	51MNH	$\leq V$	$\leqslant 5$	138	62DAT	$\leq V$	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5						

注: I_1 — I_8 表示仪器烈度, 所用算法分别为 PGA 参考值方法、ShakeMap 方法、福建地方标准方法、袁—凡模糊方法、谱烈度值方法和反应谱值方法。