张萌,文鑫涛,李金香,等.震后快速评估影响场精度评价[J].地震工程学报,2027,49(1):193-204.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250122002

Zhang Meng, Wen Xintao, Li Jinxiang, et al. Accuracy evaluation of post-seismic rapid-assessment influence field[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 193-204. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250122002

震后快速评估影响场精度评价

张 萌[1], 文鑫涛[2], 李金香[3], 王尅丰[2]

(1. 贵州省地震局,贵州 贵阳 550001;
2. 中国地震台网中心,北京 100049;
3. 新疆维吾尔自治区地震局,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 地震应急快速评估产品是震后应急指挥工作的重要支撑,精准可靠的快速评估影响场是此类产品的基础。为评价震后快速评估影响场的应用效果,以2001—2024年间的94次破坏性地震为研究对象,分析调查烈度圈与评估影响场在震中位置、长轴方向与衰减关系三个方面的偏差及其原因。结果表明:(1)宏观震中与微观震中的位置偏差多在5 km范围内,但震害叠加、房屋分布、地震地表破裂带等因素会增大偏差;(2)基于断裂带信息评估的长轴方向能够满足多数情况下的应用需求,而发震断层信息缺失或判断错误、居民点分布方向与断层走向不一致等因素会增大评估偏差;(3)椭圆衰减模型能够反映多数地震沿长、短轴方向的烈度衰减差异,但调查烈度圈受地形、居民点分布等因素的影响,其形状会发生变化;此外,此类模型对引发大尺度同震地表破裂的地震事件评估效果不佳。

关键词: 衰减关系;地震烈度评估;快速评估;等震线

中图分类号: P315.9 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2027)01—0193—12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250122002

Accuracy evaluation of post-seismic rapid-assessment influence field

Zhang Meng[1], Wen Xintao[2], Li Jinxiang[3], Wang Keifeng[2]

(*1.Guizhou Earthquake Agency, Guiyang 550001, Guizhou, China;*
2.China Earthquake Networks Center, Beijing 100049, China;
3.Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Earthquake emergency rapid-assessment products constitute critical support for post-earthquake emergency command operations, and accurate and reliable rapid-assessment influence fields inform emergency response products. To evaluate the practical performance of post-seismic rapid-assessment influence fields, this study considers 94 destructive earthquakes that occurred from 2001 to 2024 as research cases and systematically analyzes the discrepancies and corresponding causes between sur-

收稿日期:2025-01-22

基金项目:贵州省地震局科技创新团队(GZSDZJDZKJJJ202104);新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2023D01A103)

第一作者简介:张 萌(1994-),女,硕士,工程师,主要从事地震应急服务工作。E-mail: cheungm@126.com。

veyed intensity contours and assessed influence fields from three aspects: epicenter location, long-axis orientation, and attenuation relationship. (1) The positional deviation between macro- and micro-epicenters is generally within 5 km, whereas factors such as seismic damage superposition, building distribution, and coseismic surface rupture zones can further enlarge such deviations. (2) The long-axis orientation determined by fault zone information can meet the application requirements for most rapid assessments. Meanwhile, missing or misjudged seismogenic faults and inconsistent orientations between residential settlements and fault strikes increase assessment errors. (3) The elliptical attenuation model can reasonably characterize the intensity attenuation relationship along the major and minor axes for most earthquakes. However, surveyed intensity contours are affected by local topography and residential distribution, and this model does not apply to earthquake events accompanied by large-scale coseismic surface ruptures.

Keywords: attenuation relationship; seismic intensity assessment; rapid assessment; isoseismal line

0 引言

破坏性地震灾害发生后,受信息收集耗时以及通讯网络等基础设施损毁影响,受灾范围、人员伤亡等关键灾情信息无法及时传至外界,灾区一度处于“黑箱”或“灰箱”状态[1-2]。此时,依托烈度衰减关系、地震断层展布、人口与建筑等信息的地震灾情应急评估[3]结果,可提供地震影响场、人员伤亡和建筑物破坏情况等关键信息,是应急响应决策的重要依据。其中,地震影响场的快速评估是地震灾害应急处置的关键环节[4-5]。

震中位置、长轴方向与烈度衰减关系是评估地震影响场的核心参数[6]。在地震初期,影响场评估主要依赖有限的地震信息与经验模型。例如,通常假定震中位置与微观震中一致,但其常与地震现场考察确定的宏观震中存在偏差。有学者对此偏差进行分析,获得其概率分布经验参数,并提出通过建立余震质心与主震震中的关系来修正宏观震中位置的方法[7-8]。其次,可依据震中附近断裂带的走向确定影响场长轴方向;也有研究借助震源区历史强震的震源机制解、余震与影响场方向的时空关系,或基于P波信息快速判定地震破裂方向[9-10]。此外,可通过烈度衰减关系计算等震线的长、短轴半径,如第五代地震动参数区划图建立的针对东部强震区、中强地震区、青藏区和新疆区的分区烈度衰减关系[11],以及云南、甘肃等地区的区域性烈度衰减关系[12-14];也有研究采用余震信息加权回归、空间分析等方法进行震后烈度评估[15-16]。

真实地震影响场与快速评估得到的影响场在震中位置、长轴方向及烈度衰减等方面存在偏差,研究者已从模型构建与震后动态校正等角度提出改进思路。为系统探究上述偏差的成因与特征,本文以2001—2024年中国大陆地区的破坏性地震事件为样本,统计分析评估影响场与实地调查烈度图在不同震级与烈度等级下的差异特征及其成因,以期为震后影响场的快速评估、动态修正及烈度调查等应急辅助决策工作提供科学参考。

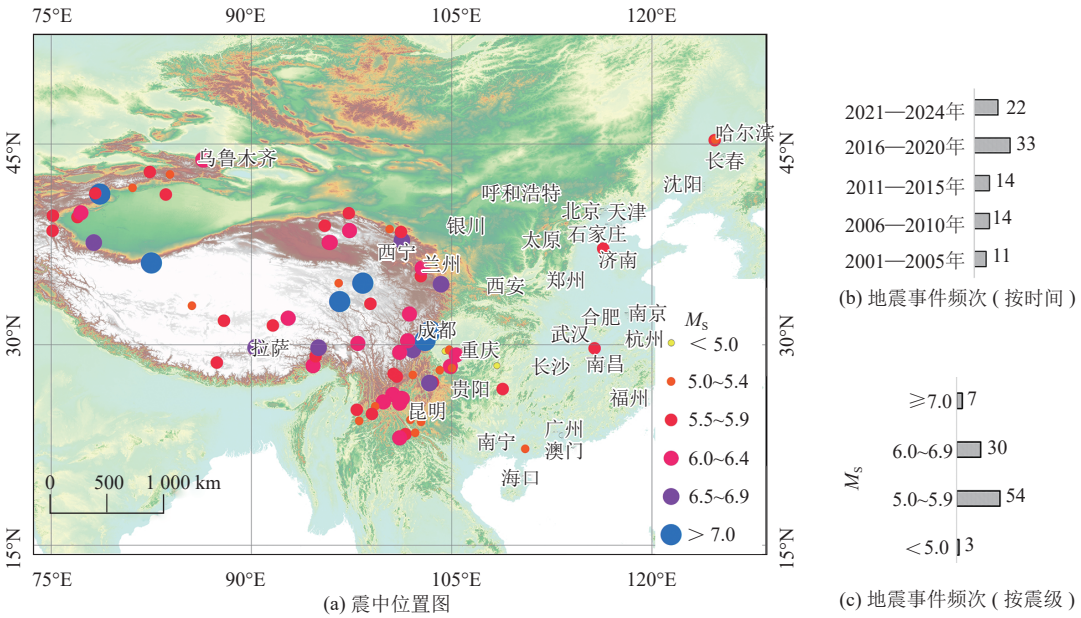
1 研究资料与数据

选取2001－2024年中国大陆地区发生的94次地震事件,其微观震中位置、震源深度、震级等信息来源于中国地震台网正式速报目录。对于双震或震群型地震,取其中震级最大的地震速报参数。所选震例均为浅源地震,其中:5.0级以下地震3次,5.0～5.9级地震54次,6.0～6.9级地震30次,7.0级以上地震7次。震中位置分布及地震事件年频度见图1。

实地调查获取的烈度等震线(亦称“烈度圈”)信息来源于应急管理部、中国地震局及各省(自治区)地震局发布的烈度图、灾害损失评估报告和震害调查文献等[17-18]。等震线的长、短轴长度采用允许长轴方向变化的方法量取。宏观震中优先采用烈度图或现场调查报告中给出的结果;若文件中未明确给出,则依据国家标准《地震现场工作 第3部分:调查规范(GB/T 18208.3－2011)》[19],取极震区的几何中心。

假设极震区为区域S,其密度函数为$F(x,y)$,则质心坐标$(S_{\bar{x}},S_{\bar{y}})$的计算公式为:

$$S_{\bar{x}}=\frac{\iint_s xF(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\iint_s F(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{1}$$



(a) 震中位置图　(b) 地震事件频次（按时间）　(c) 地震事件频次（按震级）

图 1　地震事件分布与频次

Fig. 1　Distribution and frequency of earthquake events

$$S_{\bar{y}}=\frac{\iint_s yF(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\iint_s F(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{2}$$

由于极震区 S 内部烈度均匀，密度函数 $F(x,y)=1$，质心坐标 $(S_{\bar{x}},S_{\bar{y}})$ 即为极震区的几何中心。

本文基于各省区的烈度衰减关系[20]计算评估结果。烈度衰减关系均采用地震烈度椭圆衰减模型，公式如下：

沿长轴方向：

$$I_a=A_1+B_1M+C_1\lg(R_a+R_{0a})+\varepsilon_a \tag{3}$$

沿短轴方向：

$$I_b=A_2+B_2M+C_1\lg(R_b+R_{0b})+\varepsilon_b \tag{4}$$

式中：I_a、I_b 分别为长、短轴方向的地震烈度；M 为面波震级；R_a 和 R_b 分别为长、短轴方向震中距，单位为 km；A_1、B_1、C_1 和 A_2、B_2、C_2 均为回归系数；R_{0a} 和 R_{0b} 分别为长、短轴方向烈度衰减的近场饱和因子；ε_a 和 ε_b 分别为长、短轴方向回归分析的不确定性随机变量，假定服从对数正态分布，其均值为 0，标准差为 σ。研究中，场地因素可选择常用对数（lg）或者自然对数（ln）表示。地震目录、评估影响场和调查烈度圈信息列于附录 A。

本文采用箱线图展示和对比地震事件评估影响场与调查烈度圈的特征值差异。假设地震样本数量为 n，则下四分位数（Q_1）、中位数（Q_2）、上四分位数（Q_3）和四分位距（Interquartile Range，IQR）的计算公式为：

$$Q_1=\frac{n+1}{4} \tag{5}$$

$$Q_2=\frac{n+1}{2} \tag{6}$$

$$Q_3=\frac{3(n+1)}{4} \tag{7}$$

$$\mathrm{IQR}=Q_3-Q_1 \tag{8}$$

式中：Q_1 和 Q_3 分别为箱体的上、下边界。文中将区间 $[Q_1-1.5\times\mathrm{IQR},\ Q_3+1.5\times\mathrm{IQR}]$ 内的值视为正常值，超出此范围的视为异常值。

为分析评估影响场和调查烈度圈信息的偏差分布离散程度与统计学特征，采用了 t 检验方法，t 值计算公式如下：

$$t=\frac{\bar{X}-\mu}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \tag{9}$$

式中：$\bar{X}$ 为样本均值；S_d 为样本标准差；n 为地震事件样本数量；μ 为偏差检验值，检验无偏差时取 $\mu=0$。

2　评估影响场与调查烈度圈偏离量统计分析

2.1　震中位置偏差分析

速报震中坐标（微观震中）是震源在地面上的

投影，而宏观震中坐标是能量传递到地表时破坏最严重的位置，通常依据建筑物的破坏程度判定。受铲形断层（包括推覆构造与伸展构造）的影响，微观震中与宏观震中客观上存在偏差[7]。图2(a)统计了不同震级范围内宏观震中与微观震中的位置偏差情况。

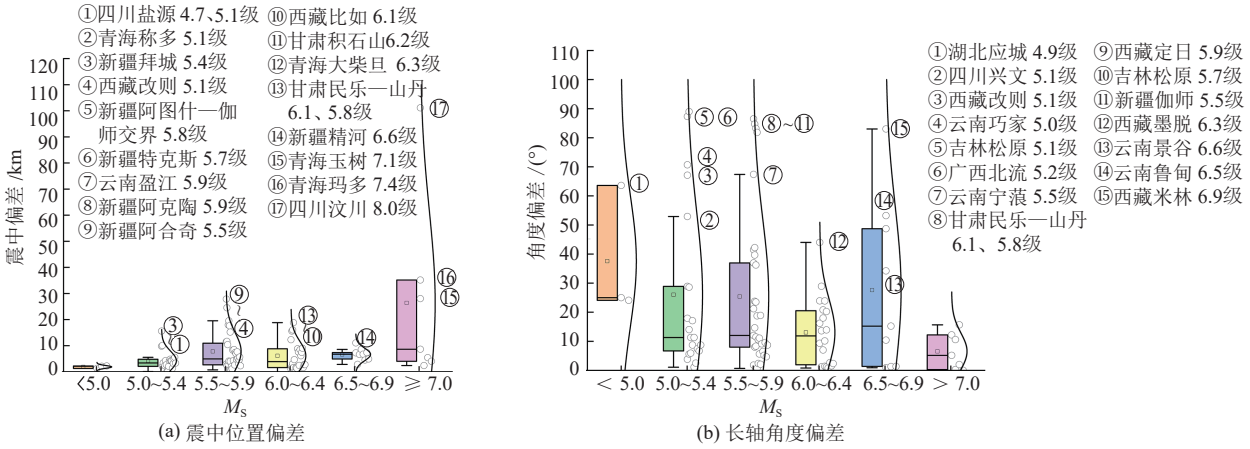


图2 震中位置、长轴角度偏差分布图

Fig. 2 Distribution of deviations in epicenter location and long-axis azimuth

由图2(a)可知，多数震例的震中位置存在偏差，且偏差距离多集中在5 km左右。不同震级范围的偏差中位数和均值差异较大，数据呈偏态分布，并受到个别地震事件极端值的影响。此外，震中位置偏差的中位数总体随着震级增加而有扩大趋势。

表1所列地震事件样本震中位置偏差的显著性检验与置信区间结果表明：当震级M_S<7.0时，显著性（双尾）p值小于0.05，表明差异显著，且偏差符合正态分布；震级在6.5～6.9范围时，t值最大，差异最显著，与图2(a)的分布一致；震级M_S≥7.0时，t值最小，p>0.05，且95%置信区间范围宽，说明此时震中位置偏差离散程度大，分布随机性高。

表1 震中位置、长轴方向偏差的置信区间与显著性检验

Table 1 Confidence intervals and significance tests for deviations in epicenter location and long-axis azimuth

震级范围M_S	t值		显著性（双尾）		差值95%置信区间	
	震中位置偏差	长轴方向偏差	震中位置偏差	长轴方向偏差	震中位置偏差	长轴方向偏差
<5.0	6.105	2.885	0.026	0.102	[0.5,3.2]	[−18.5,93.6]
5.0～5.4	5.234	4.130	0.000	0.001	[2.5,5.9]	[12.9,39.2]
5.5～5.9	6.179	5.471	0.000	0.000	[5.2,10.3]	[16,34.9]
6.0～6.4	5.255	5.014	0.000	0.000	[3.7,8.5]	[7.6,18.5]
6.5～6.9	8.299	2.848	0.000	0.022	[4.8,8.5]	[5.2,49.9]
≥7.0	1.974	2.761	0.096	0.033	[−6.3,59.1]	[0.7,12.4]

结合震害调查情况，对图2(a)中偏差较大的异常值进行分析，可将主要原因归纳为以下三类：(1)多次地震震害叠加影响：多次地震的震害范围不重合，导致宏观震中位置偏移。例如，图2(a)中④、⑦分别对应西藏改则5.0、5.1级地震和云南盈江5.0、4.9、5.9级地震，其宏观震中的确定均考虑了多次地震的叠加破坏情况。(2)地表人口和建筑物分布影响：宏观震中是极震区的几何中心，而极震区判定以地表房屋或工程结构破坏为依据。例如，图2(a)中⑨、⑤、⑪、⑫、⑯，分别对应新疆阿合奇5.5级地震、新疆阿图什—伽师5.8级地震（其烈度圈向微观震中北部推测，并将南部人口集中的居民点作为宏观震中）、甘肃积石山6.2级地震（因极震区位于逆冲断层上盘且建筑抗震性能弱，导致大河家镇破坏严重，故以其作为宏观震中[21-23]）、青海大柴旦6.3级地震（以大煤沟煤矿锅炉支座破损为依据），以及青海玛多7.4级地震（依据设防烈度为Ⅷ度野马滩大桥及附近房屋毁坏确定）。(3)地震地表破裂带影响：地表破裂与形变既是烈度判定依据，也会加剧周边建筑物震害。例如，图2(a)中③、⑮、⑰分别对

应新疆拜城 5.4 级地震（极震区地裂缝致房屋严重破坏）、青海玉树 7.1 级地震（裂缝穿过玉树县城导致西南侧严重破坏），以及四川汶川 8.0 级地震（极震区与地表破裂带关系密切）[24]。

大地震的破裂和能量释放过程较中强震更为复杂，其破裂从起始点向外扩展，直到整个震源破裂完成，因此其震中位置偏差也更大[25]。根据图 2（a）和表 1 可知，7.0 级及以上地震事件共 7 次，且偏差离散度较高。其中，四川汶川 8.0 级地震、青海玉树 7.1 级地震与青海玛多 7.4 级地震的震中位置偏差较大。与其他地震事件相比，这三者均产生了规模较大的同震地表破裂（长度分别约 300 km、34 km 与 158 km）。新疆于田 7.3 级地震虽出现了长度 25 km 的地表破裂带[26]，但因高山无人区的Ⅷ度、Ⅸ度烈度圈均为推测，极震区几何中心与微观震中的差异较小。由此推测，大地震的宏观震中偏移与同震地表破裂尺度相关性较高，但也受地表建筑或工程结构分布的影响。

宏观震中和微观震中的位置偏差受地震现场多种因素影响。为减小二者偏差，有研究提出可利用震后一定时间内的余震信息修正影响场的震中位置，从而为震后快速评估提供更可靠的依据[7, 27]。

2.2　极震区长轴方向偏差分析

在实际应用中，将地震影响场长轴方向与调查烈度等震线的长轴方向偏差小于 10°评定为“好”、10°～20°为“较好”、20°～30°为“可接受”、大于 30°则视为无法满足评估工作需求[10]。

图 2（b）展示了不同震级范围极震区的长轴方向偏差情况。图中，长轴角度偏差的均值和中位数均在 30°以内。其中，评估效果“好”的地震事件占比约 40.4%，“较好”的占比约 24.5%，“可接受”的占比约 12.8%。5.0 级以上地震的长轴方向偏差中位数在 20°以内，表明多数地震事件评估结果在“较好”及以上；7.0 级以上地震的偏差中位数在 10°以内，其长轴方向评估结果为“好”。

表 1 所列地震事件样本长轴方向偏差的显著性检验与置信区间结果表明：在 $M_S<5.0$ 和 $6.5<M_S\leqslant 6.5$ 这两个区间，t 值较小，偏差的离散程度较高；其显著性（双尾）p 值仅在 $M_S<5.0$ 时大于显著性水平 0.05；在 $M_S\geqslant 7.0$ 时，置信区间范围最小。$M_S\geqslant 5.0$ 震例的长轴方向偏差符合正态分布特征，但个别地震事件内的偏差离散度相对较高。

图 3 展示了长轴方向偏差较大的地震烈度等震线与断裂分布，这些事件分别对应图 2（b）中的异常值⑭、⑦、⑮、⑩、⑪、⑨。结合现场调查文献，对图 3 中震例偏差因素分析如下：

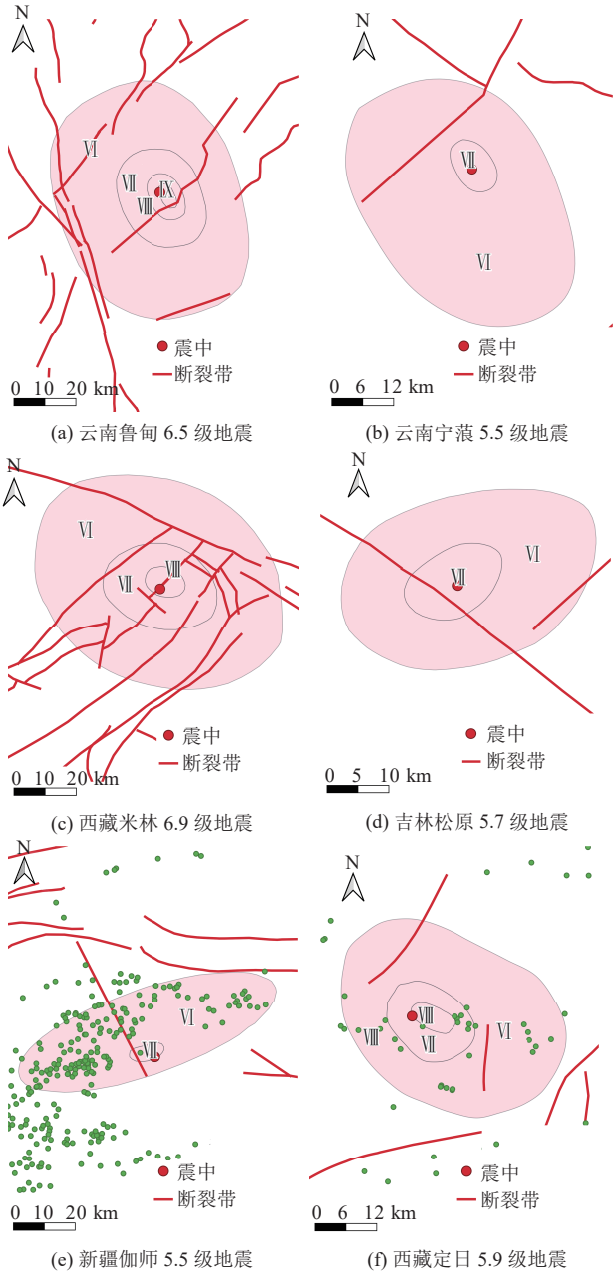


图 3　地震烈度等震线与断裂分布

Fig. 3　Isoseismal contours of earthquake intensity and fault distribution

（1）缺少发震断层信息或未探明发震断裂，导致长轴方向评估效果较差。如图 3（a）、（b）所示：云南鲁甸 6.5 级地震、云南宁蒗 5.5 级地震在评估时，缺少震中附近 NW 向的包谷垴—小河断裂、永宁活动断裂数据[28]，导致长轴评估效果较差。

（2）震中构造背景复杂，仅依据微观震中与断

层的水平距离评估长轴方向易产生误差。如图3(c)、(d)所示：西藏米林6.9级地震的发震断层为NW向，但震中最近的断裂为NE向；吉林松原5.7级地震震中处于NNE-NE向扶余－肇东断裂和NW向第二松花江断裂的交会部位[29-30]，评估时参考了空间位置稍近的第二松花江断裂，因发震断裂判断错误，导致长轴方向评估效果差。

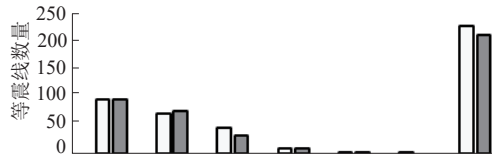
(3) 调查区房屋与人口分布的影响。图3(e)、(f)中，采用行政村示意震区的房屋和人口分布，但极震区长轴方向与行政村分布方向接近。例如：新疆伽师5.5级地震，其发震构造难以判断[31]，现场调查依据地面房屋震害与余震信息确定了长轴方向；西藏定日5.9级地震为NNW向的正断层破裂，但该地区房屋沿WNW向的河谷河漫滩地形分布，调查等震线方向与房屋分布一致[32-33]。

综上所述，仅依据震中附近活动断裂信息来估计影响场长轴方向的方法，可能因缺少发震断层信息或发震断层判定错误而产生偏差。有研究指出，可采用震中附近历史震源机制解和断裂走向综合判定长轴方向，或者利用余震分布进行修正，为地震应急救援快速决策提供更可靠的依据[10, 27]。

2.3 烈度衰减关系偏差分析

2.3.1 极震区烈度

本文选用的地震事件共产生调查等震线233条(含15个烈度异常区)，评估影响场等震线204条。剔除烈度异常区与形状不完整等震线后的统计结果如图4所示。



	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	Ⅹ	Ⅺ	合计
□调查	93	69	44	9	2	1	218
■评估	93	72	30	8	1		204

图4 评估与调查等震线数量

Fig. 4 Number of isoseismal contours from rapid assessment and field investigation

图4表明，总体而言，调查等震线数量多于评估影响场，这表明现场调查确定的极震区最高烈度普遍高于评估最高烈度。评估烈度与调查烈度不一致的地震事件共30次，约占总数的32%。其中，评估烈度高于调查烈度的事件8次，约占事件总数的9%；评估烈度低于调查烈度的事件22次，约占事件总数的23%。由此可见，基于烈度衰减经验关系计算的评估烈度与调查烈度存在差异，但多数情况下与调查结果相符。

由附录A与图4可知，对于Ⅶ度评估等震线，评估数量多于调查数量，表明评估模型在一定程度上高估了该烈度的影响范围。其中，个别震级$M_S \leqslant 5.7$的地震事件存在高估极震区烈度的情况。对于Ⅷ度评估等震线，评估数量少于调查数量，表明评估模型倾向于低估高烈度区的影响范围。具体而言，少数震级在5.8～6.0区间的地震事件低估了极震区烈度。

2.3.2 等震线长短轴

为进一步分析评估等震线与调查等震线之间的偏差，以评估影响场的长短轴比值为横轴、调查烈度圈的长短轴比值为纵轴绘制散点图，其中散点大小表示震级。图5(a)～(d)分别展示了Ⅵ～Ⅸ度等震线评估轴比与调查轴比的对比关系。

由图5可知，评估与调查等震线长短轴比值较为接近，表明烈度衰减关系能够反映烈度沿发震断层方向、垂直断层方向的衰减差异，以及远场因发震构造作用减弱、等震线形状趋近于圆形的特点；长短轴比值的均值与中位数均随烈度升高逐渐增加，表明烈度越高，长轴方向的地震破坏风险更高；随着烈度升高，评估与调查等震线的长短轴比值差异逐渐增大，说明椭圆衰减模型对部分Ⅷ度以上地震事件的评估效果较差。

对比表2中评估影响场和调查烈度圈长短轴比值的统计特征可知，二者均通过显著性检验，符合正态分布。然而，评估影响场的t值和置信区间均小于调查烈度圈，表明调查烈度圈长短轴比值的离散程度较评估结果更大，不确定性更高。

结合地震现场调查情况分析，图5中偏差较大的震例，其等震线形状多受到地形、人口与房屋分布的影响，部分地震的等震线边界依据仪器烈度数据进行推测[31, 34-38]。例如：云南巧家5.0级地震的调查区人口集中分布于山坡及山底，调查等震线沿山谷方向展布，形态较该地区同等震级地震的典型等震线更为狭长；四川康定6.3级地震，折多山纵贯县境，其Ⅷ度等震线沿山谷展布，呈细长不规则椭圆形；新疆阿合奇5.5级地震、新疆伽师5.5级与6.4级地震、新疆于田7.3级地震，因地形和人口分布影响，对其无人区的等震线进行了推测；青海玛多7.4级地震烈度区地广人稀、村落分散，且地裂缝错动

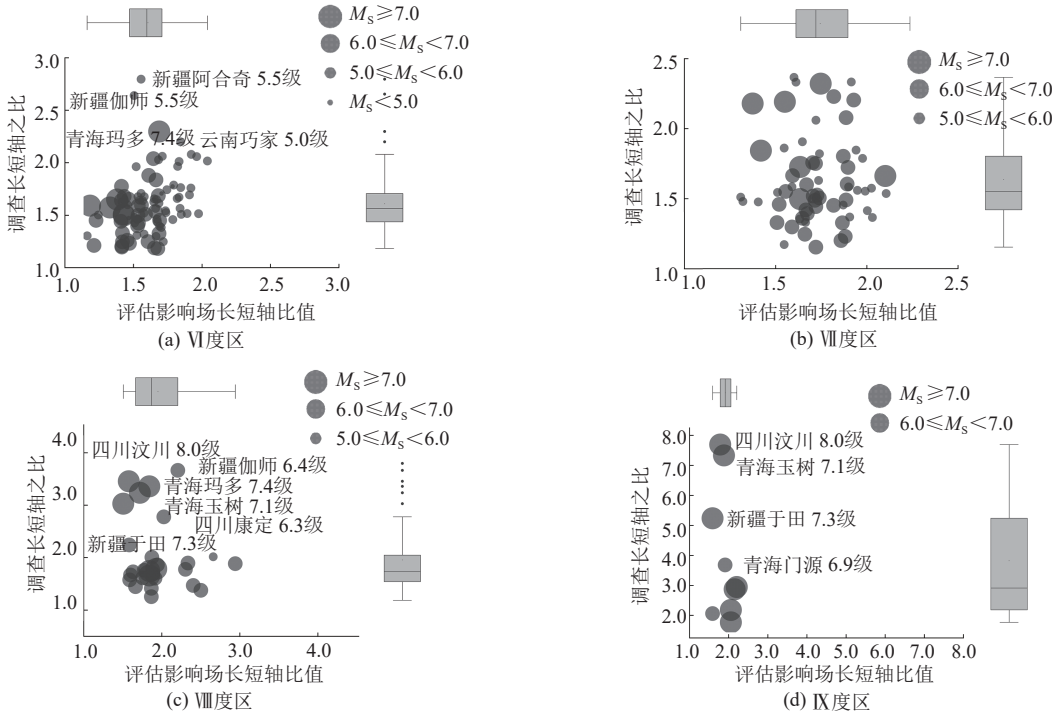


图 5　评估、调查等震线长短轴之比

Fig. 5　Ratios of long to short axes of isoseismal contours from rapid assessment and field investigation

表 2　评估、调查等震线长短轴之比的置信区间与显著性检验

Table 2　Confidence intervals and significance tests for the ratios of long to short axes of isoseismal contours from rapid assessment and field investigation

烈度值	t值		显著性（双尾）		差值95%置信区间	
	评估	调查	评估	调查	评估	调查
Ⅵ度	84.863	48.421	0.000	0.000	[1.57,1.64]	[1.56,1.69]
Ⅶ度	71.218	40.776	0.000	0.000	[1.69,1.79]	[1.57,1.73]
Ⅷ度	30.027	19.675	0.000	0.000	[1.83,2.1]	[1.73,2.12]
Ⅸ度	25.285	5.627	0.000	0.000	[1.74,2.09]	[1.97,4.62]

加剧了房屋破坏，推测了大部分Ⅵ～Ⅷ度等震线。

图 5 显示，部分大地震的调查等震线与评估等震线在高烈度区的长短轴之比存在明显差异，烈度等震线呈狭长条状。这些差异显著的地震通常具有破裂尺度较大、震源浅、破裂持续时间长的特点，并伴随长距离的同震地表破裂。例如，四川芦山 7.0 级地震[39]、四川九寨沟 7.0 级地震[40]、新疆乌什 7.1 级地震[41]，其地表破裂长度仅为 2～3 km 或未产生同震地表破裂，虽然震级较高，但评估长短轴之比未出现较大偏差。相比之下，青海门源 6.9 级地震、青海玉树 7.1 级地震、新疆于田 7.3 级地震，其地表破裂长度在 20～30 km 之间；而青海玛多 7.4 级和四川汶川 8.0 级地震的地表破裂长度更达到 150 km 以上。这些地震的评估与调查所得Ⅷ度、Ⅸ度等震线的长短轴之比出现了明显偏差。

分析认为，对于引起了较大规模同震地表破裂的地震事件，椭圆衰减模型在垂直断层走向会高估烈度，在沿断层走向的两端则会低估烈度，不能准确反映真实的烈度分布。因此，建议在影响场评估中引入基于震级-破裂尺度关系或有限断层模型构建的烈度衰减模型。

3　结论与讨论

本文利用 2001—2024 年中国大陆 94 次破坏性地震的评估影响场与调查烈度圈数据，从建立快速评估影响场所涉及的震中位置、长轴方向和烈度衰减关系三个角度，对二者的差异进行了分析。其差异主要表现为以下特点：

（1）震中位置偏差：多数地震的微观震中与宏观震中距离偏差在 5 km 范围内；由于多次震害叠加、人口与建筑物分布不均、地震地表破裂带等因素影响，部分地震的偏差增大。大地震因能量释放过程特殊，更易引发大尺度同震地表破裂，导致震中偏差范围明显扩大。

（2）长轴方向偏差：采用断裂带信息评估的地震长轴方向结果多在可接受范围内；但若缺少发震

断裂信息、震中附近地质构造复杂，或受人口与房屋分布等因素影响，评估结果可能出现误差。

（3）烈度衰减与等震线形状偏差：椭圆衰减关系能够反映大多数地震的烈度衰减特征，但受地形、房屋分布等因素影响，或当调查等震线为推测结果时，调查与评估的长短轴比值差异会增大；此外，椭圆衰减关系对大尺度地表破裂地震的评估效果较差。

文中大多数地震事件的评估结果与调查结果相符，表明第一阶段的盲场评估能够为震后应急决策提供初步支持。然而，地震实际破坏情况受震源特性、传播介质、建筑物结构类型等多种因素综合影响，当前的评估模型未能充分考虑这些因素。为进一步提升评估结果的可靠性，可通过余震、震源机制解、破裂过程、仪器烈度和专家经验等对评估影响场进行动态修正。此外，随着国家地震烈度速报与预警工程、全国自然灾害综合风险普查的建设成果投入防灾减灾应用，以及地震现场调查工作方法的标准化与规范化发展，相关数据和成果日益丰富。利用这些海量数据，结合深度学习等智能方法建立新的评估模型，深入挖掘其在减少评估不确定性、提升地震评估科学性和可靠性方面的作用，具有重要的研究价值。

附录A 地震目录、评估影响场和调查烈度圈信息

表A.1 地震目录、评估影响场和调查烈度圈信息表

Table A.1 Information of earthquake catalog, rapid-assessment intensity fields, and field-investigated intensity contours

序号	发震日期	震中参考地名	震级（M_S）	评估影响场信息			调查烈度圈信息		
				微观震中坐标	长轴方向	震中烈度	宏观震中坐标	长轴方向	震中烈度
1	2001-02-23	四川雅江－康定	6.0	101.1°E, 29.4°N	66.1°	Ⅶ	101.06°E, 29.34°N	64.9°	Ⅷ
2	2001-04-11	云南施甸	5.9	99.02°E, 24.8°N	126.7°	Ⅶ	99.01°E, 24.87°N	129.1°	Ⅷ
3	2001-05-24	云南宁蒗－四川盐源	5.8	100.9°E, 27.6°N	45.3°	Ⅶ	100.83°E, 27.67°N	59.9°	Ⅶ
4	2001-10-27	云南永胜	6.0	100.57°E, 26.23°N	80.1°	Ⅷ	100.83°E, 27.7°N	51.2°	Ⅶ
5	2002-12-14	甘肃玉门	5.9	97.3°E, 39.8°N	150.7°	Ⅶ	97.26°E, 39.73°N	139.2°	Ⅶ
6	2002-12-25	新疆乌恰	5.7	75.13°E, 39.63°N	161.8°	Ⅶ	75.08°E, 39.63°N	0.6°	Ⅶ
7	2003-07-21	云南大姚	6.2	101.23°E, 25.95°N	156.7°	Ⅷ	101.15°E, 25.94°N	146.6°	Ⅷ
8	2003-09-02	新疆阿克陶	5.9	75.1°E, 38.5°N	114.8°	Ⅶ	75.33°E, 38.68°N	123.5°	Ⅶ
9	2003-10-16	云南大姚	6.1	101.3°E, 25.92°N	156.7°	Ⅶ	101.29°E, 25.9°N	157.5°	Ⅷ
10	2003-10-25	甘肃民乐－山丹	5.8	101.2°E, 38.4°N	176.7°	Ⅶ	100.98°E, 38.41°N	139.8°	Ⅷ
11	2004-08-10	云南鲁甸	5.6	103.6°E, 27.17°N	66.9°	Ⅶ	103.58°E, 27.16°N	61.3°	Ⅷ
12	2005-06-02	西藏墨脱	5.9	94.8°E, 29.1°N	39.3°	Ⅶ	94.86°E, 29.14°N	179.7°	Ⅵ
13	2005-11-26	江西九江－瑞昌	5.7	115.7°E, 29.7°N	33.7°	Ⅶ	115.78°E, 29.7°N	23.2°	Ⅶ
14	2006-08-25	云南盐津	5.1	104.12°E, 28.05°N	39.7°	Ⅶ	104.07°E, 28.08°N	33°	Ⅶ
15	2007-06-03	云南宁洱	6.4	101.1°E, 23°N	109.9°	Ⅷ	101.05°E, 23.03°N	112.5°	Ⅷ
16	2007-07-20	新疆特克斯	5.7	82.4°E, 42.9°N	14.8°	Ⅶ	82.18°E, 42.9°N	16.9°	Ⅵ
17	2008-05-12	四川汶川	8.0	103.4°E, 31°N	50.9°	Ⅹ	104.2°E, 31.6°N	45.7°	Ⅺ
18	2008-08-20	云南盈江	5.9	97.9°E, 25.1°N	90.1°	Ⅶ	97.92°E, 24.93°N	79°	Ⅷ
19	2008-08-30	新疆和静	5.3	83.9°E, 42.7°N	175.7°	Ⅵ	83.93°E, 42.72°N	4.4°	Ⅵ
20	2008-10-06	西藏当雄	6.6	90.35°E, 29.8°N	111°	Ⅷ	90.37°E, 29.74°N	76.8°	Ⅷ
21	2008-11-10	青海大柴旦	6.3	95.9°E, 37.6°N	170.4°	Ⅷ	95.72°E, 37.62°N	156.5°	Ⅷ
22	2009-04-19	新疆阿合奇	5.5	78.3°E, 41.3°N	44.5°	Ⅶ	78.5°E, 41.1°N	25.6°	Ⅵ
23	2009-07-09	云南姚安	6.0	101.1°E, 25.6°N	88.3°	Ⅷ	101.15°E, 25.56°N	112.2°	Ⅷ
24	2009-08-28	青海海西	6.4	95.8°E, 37.6°N	169.7°	Ⅷ	95.7°E, 37.6°N	148.9°	Ⅷ
25	2010-04-14	青海玉树	7.1	96.6°E, 33.2°N	153.9°	Ⅷ	96.85°E, 33.06°N	154.2°	Ⅷ
26	2011-03-10	云南盈江	5.8	97.9°E, 24.7°N	35.5°	Ⅶ	97.95°E, 24.7°N	29°	Ⅷ
27	2011-08-11	新疆阿图什－伽师	5.8	77.2°E, 39.9°N	176.8°	Ⅶ	77.37°E, 39.81°N	167.7°	Ⅶ
28	2012-06-24	云南宁蒗－四川盐源	5.7	100.7°E, 27.7°N	44.6°	Ⅵ	100.7°E, 27.77°N	126.4°	Ⅶ
29	2012-09-07	云南彝良	5.7	104°E, 27.5°N	18.3°	Ⅷ	104.04°E, 27.53°N	42°	Ⅷ

续表 A.1

序号	发震日期	震中参考地名	震级（M_S）	评估影响场信息			调查烈度圈信息		
				微观震中坐标	长轴方向	震中烈度	宏观震中坐标	长轴方向	震中烈度
30	2013-03-03	云南洱源	5.5	99.7°E, 25.9°N	111.9°	Ⅶ	99.82°E, 25.99°N	135.4°	Ⅷ
31	2013-03-29	新疆乌鲁木齐	5.6	86.8°E, 43.4°N	144.5°	Ⅶ	86.86°E, 43.4°N	139.3°	Ⅵ
32	2013-04-20	四川芦山	7.0	103°E, 30.3°N	81.6°	Ⅸ	103.04°E, 30.29°N	65.9°	Ⅸ
33	2013-07-22	甘肃岷县－漳县	6.6	104.2°E, 34.5°N	138.2°	Ⅷ	104.13°E, 34.55°N	139.6°	Ⅷ
34	2013-08-12	西藏左贡－芒康	6.1	97.96°E, 30.05°N	120.4°	Ⅶ	97.97°E, 30.04°N	118.9°	Ⅶ
35	2013-08-31	云南香格里拉	5.9	99.4°E, 28.2°N	145.9°	Ⅷ	99.37°E, 28.2°N	136.3°	Ⅷ
36	2014-02-12	新疆于田	7.3	82.5°E, 36.1°N	14.6°	Ⅸ	82.49°E, 36.08°N	25.2°	Ⅸ
37	2014-08-03	云南鲁甸	6.5	103.34°E, 27.1°N	73°	Ⅸ	103.38°E, 27.08°N	121.7°	Ⅸ
38	2014-10-07	云南景谷	6.6	100.5°E, 23.32°N	77.9°	Ⅷ	100.5°E, 23.38°N	131.1°	Ⅷ
39	2014-11-22	四川康定	6.3	101.69°E, 30.26°N	103.6°	Ⅷ	101.67°E, 30.27°N	117.5°	Ⅷ
40	2015-03-30	贵州剑河	5.5	108.82°E, 26.65°N	20.2°	Ⅶ	108.81°E, 26.6°N	56.4°	Ⅶ
41	2015-07-03	新疆皮山	6.5	78.2°E, 37.6°N	144.4°	Ⅷ	78.2°E, 37.53°N	154.8°	Ⅷ
42	2016-05-11	西藏丁青	5.5	94.94°E, 31.99°N	156.1°	Ⅶ	94.95°E, 31.97°N	151.4°	Ⅶ
43	2016-12-08	新疆呼图壁	6.2	86.35°E, 43.83°N	163.9°	Ⅷ	86.38°E, 43.82°N	143.7°	Ⅷ
44	2017-08-08	四川九寨沟	7.0	103.82°E, 33.2°N	123.9°	Ⅸ	103.86°E, 33.24°N	121.9°	Ⅸ
45	2017-08-09	新疆精河	6.6	82.89°E, 44.27°N	162.8°	Ⅷ	82.76°E, 44.3°N	147.6°	Ⅷ
46	2017-11-18	西藏米林	6.9	95.02°E, 29.75°N	50.2°	Ⅷ	95.05°E, 29.79°N	147.2°	Ⅷ
47	2018-05-06	青海称多	5.3	96.53°E, 34.56°N	150.4°	Ⅵ	96.59°E, 34.49°N	139.1°	Ⅶ
48	2018-05-28	吉林松原	5.7	124.71°E, 45.27°N	143.5°	Ⅶ	124.7°E, 45.28°N	48.2°	Ⅶ
49	2018-08-13	云南通海	5.0	102.71°E, 24.19°N	61.5°	Ⅵ	102.72°E, 24.2°N	79.4°	Ⅵ
50	2018-09-04	新疆伽师	5.5	76.98°E, 39.51°N	117.3°	Ⅶ	76.95°E, 39.53°N	23.8°	Ⅶ
51	2018-09-08	云南墨江	5.9	101.53°E, 23.28°N	116.1°	Ⅶ	101.55°E, 23.27°N	116.8°	Ⅷ
52	2018-10-31	四川西昌	5.1	102.08°E, 27.7°N	81.8°	Ⅵ	102.09°E, 27.73°N	98.9°	Ⅵ
53	2018-12-16	四川兴文	5.7	104.95°E, 28.24°N	10.1°	Ⅶ	104.92°E, 28.24°N	147.9°	Ⅶ
54	2019-01-03	四川珙县	5.3	104.86°E, 28.2°N	10.1°	Ⅵ	104.85°E, 28.22°N	7.6°	Ⅵ
55	2019-02-25	四川荣县	4.9	104.49°E, 29.48°N	112.2°	Ⅵ	104.49°E, 29.49°N	87.2°	Ⅵ
56	2019-04-24	西藏墨脱	6.3	94.61°E, 28.4°N	27.6°	Ⅷ	94.61°E, 28.41°N	78.3°	Ⅷ
57	2019-05-18	吉林松原	5.1	124.75°E, 45.3°N	143.5°	Ⅵ	124.72°E, 45.27°N	56.2°	Ⅵ
58	2019-06-17	四川长宁	6.0	104.9°E, 28.34°N	168.2°	Ⅶ	104.9°E, 28.36°N	152°	Ⅷ
59	2019-09-08	四川威远	5.4	104.79°E, 29.55°N	30.9°	Ⅶ	104.77°E, 29.57°N	38.3°	Ⅵ
60	2019-09-16	甘肃张掖	5.0	100.35°E, 38.6°N	131.2°	Ⅵ	100.35°E, 38.6°N	117.2°	Ⅵ
61	2019-10-02	贵州沿河	4.9	108.38°E, 28.4°N	34.3°	Ⅵ	108.4°E, 28.41°N	58.4°	Ⅵ
62	2019-10-12	广西北流	5.2	110.51°E, 22.18°N	37.1°	Ⅵ	110.51°E, 22.18°N	126.1°	Ⅵ
63	2019-10-28	甘肃夏河	5.7	102.69°E, 35.1°N	167.3°	Ⅶ	102.73°E, 35.11°N	159.3°	Ⅶ
64	2019-12-18	四川资中	5.2	104.82°E, 29.59°N	30.9°	Ⅵ	104.82°E, 29.59°N	39.6°	Ⅵ
65	2019-12-26	湖北应城	4.9	113.4°E, 30.87°N	24.4°	Ⅵ	113.39°E, 30.89°N	140.8°	Ⅵ
66	2020-01-16	新疆库车	5.6	83.6°E, 41.21°N	3.9°	Ⅶ	83.59°E, 41.21°N	2.1°	Ⅵ
67	2020-01-19	新疆伽师	6.4	77.21°E, 39.83°N	177.7°	Ⅷ	77.25°E, 39.83°N	176.3°	Ⅷ
68	2020-02-03	四川成都	5.1	104.46°E, 30.74°N	59.9°	Ⅵ	104.48°E, 30.74°N	65.5°	Ⅵ
69	2020-03-12	西藏改则	5.1	85.55°E, 32.88°N	156.3°	Ⅵ	85.6°E, 33.01°N	89.2°	Ⅶ
70	2020-03-20	西藏定日	5.9	87.42°E, 28.63°N	54.1°	Ⅶ	87.46°E, 28.63°N	150.9°	Ⅷ
71	2020-04-01	四川石渠	5.6	98.92°E, 33.04°N	146.3°	Ⅶ	98.93°E, 32.94°N	104.8°	Ⅶ
72	2020-05-18	云南巧家	5.0	103.16°E, 27.18°N	41°	Ⅵ	103.16°E, 27.22°N	111.7°	Ⅵ
73	2021-03-19	西藏比如	6.1	92.74°E, 31.94°N	7.6°	Ⅶ	92.87°E, 31.95°N	169.6°	Ⅷ
74	2021-03-24	新疆拜城	5.4	81.11°E, 41.7°N	8.5°	Ⅵ	81.1°E, 41.79°N	37.1°	Ⅶ
75	2021-05-21	云南漾濞	6.4	99.87°E, 25.67°N	110.7°	Ⅷ	99.91°E, 25.69°N	134.6°	Ⅷ

续表 A.1

序号	发震日期	震中参考地名	震级（M_S）	评估影响场信息			调查烈度圈信息		
				微观震中坐标	长轴方向	震中烈度	宏观震中坐标	长轴方向	震中烈度
76	2021-05-22	青海玛多	7.4	98.34°E，34.59°N	161°	Ⅸ	97.98°E，34.7°N	161°	Ⅹ
77	2021-06-10	云南双柏	5.1	101.91°E，24.34°N	128°	Ⅵ	101.9°E，24.38°N	122.1°	Ⅵ
78	2021-06-12	云南盈江	5.0	97.89°E，24.96°N	91.2°	Ⅵ	97.85°E，24.98°N	120.1°	Ⅵ
79	2021-08-26	甘肃阿克塞	5.5	95.5°E，38.88°N	158.2°	Ⅶ	95.5°E，38.9°N	137°	Ⅶ
80	2021-09-16	四川泸县	6.0	105.34°E，29.2°N	50°	Ⅶ	105.32°E，29.2°N	40.7°	Ⅷ
81	2021-11-30	西藏双湖	5.8	87.94°E，31.76°N	22.9°	Ⅶ	88.04°E，31.82°N	31.2°	Ⅶ
82	2022-01-02	云南宁蒗	5.5	100.65°E，27.79°N	49.8°	Ⅶ	100.65°E，27.8°N	117.2°	Ⅶ
83	2022-01-08	青海门源	6.9	101.26°E，37.77°N	167.2°	Ⅸ	101.24°E，37.79°N	165.9°	Ⅸ
84	2022-01-23	青海德令哈	6.0	97.33°E，38.5°N	99.3°	Ⅶ	97.33°E，38.5°N	93.2°	Ⅶ
85	2022-04-06	四川兴文	5.1	105.03°E，28.22°N	10.1°	Ⅵ	105.06°E，28.19°N	137.2°	Ⅵ
86	2022-06-01	四川芦山	6.1	102.94°E，30.37°N	43.8°	Ⅶ	102.93°E，30.36°N	42.6°	Ⅷ
87	2022-06-10	四川马尔康	6.0	101.82°E，32.25°N	143.8°	Ⅶ	101.81°E，32.25°N	130.2°	Ⅷ
88	2022-09-05	四川泸定	6.8	102.08°E，29.59°N	112.3°	Ⅷ	102.14°E，29.55°N	111.4°	Ⅸ
89	2022-11-19	云南红河县	5.0	102.26°E，23.37°N	156.5°	Ⅵ	102.25°E，23.37°N	160.3°	Ⅵ
90	2023-05-02	云南保山	5.2	99.28°E，25.35°N	113.6°	Ⅶ	99.28°E，25.39°N	112.5°	Ⅵ
91	2023-08-06	山东平原	5.5	116.34°E，37.16°N	47.8°	Ⅶ	116.33°E，37.16°N	59.8°	Ⅶ
92	2023-12-02	云南芒市	5.0	98.08°E，24.26°N	38.5°	Ⅵ	98.09°E，24.29°N	49.8°	Ⅵ
93	2023-12-18	甘肃积石山	6.2	102.79°E，35.7°N	105.5°	Ⅷ	102.79°E，35.84°N	98.5°	Ⅷ
94	2024-01-23	新疆乌什	7.1	78.63°E，41.26°N	33.5°	Ⅸ	78.68°E，41.19°N	21.3°	Ⅸ

参考文献（References）

[1] 聂高众，安基文，邓砚．地震应急灾情服务进展[J]．地震地质，2012，34(4)：782-791.
Nie Gaozhong，An Jiwen，Deng Yan. Advances in earthquake emergency disaster service [J]. Seismology and Geology，2012，34(4)：782-791.

[2] 孙艳萍，陈文凯，史一彤．地震灾害伤亡人员快速评估研究：以汶川地震为例[J]．地质论评，2023，69(增刊1)：512-514.
Sun Yanping，Chen Wenkai，Shi Yitong. Study on rapid assessment of death in Wenchuan earthquake [J]. Geological Review，2023，69(S1)：512-514.

[3] GB/T 30352—2013 地震灾情应急评估[S].
GB/T 30352—2013 Assessment of earthquake disaster situation in emergency period[S].

[4] 帅向华，冯蔚，董翔，等．震后分时段地震烈度影响场快速判识方法研究[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2020，45(8)：1195-1204.
Shuai Xianghua，Feng Wei，Dong Xiang，et al. Rapid identification method of earthquake intensity influence field in divided-period after earthquake[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2020，45(8)：1195-1204.

[5] 康燈杰，陈文凯，赵怀群，等．基于有限断层模型和地震动衰减模型的地震烈度评估方法研究：以中国西部地区为例[J]．地质论评，2023，69(增刊1)：527-529.
Kang Dengjie，Chen Wenkai，Zhao Huaiqun，et al. Research on the rapid assessment method of earthquake intensity based on finite fault model and ground vibration attenuation model-Western China as an example[J]. Geological Review，2023，69(S1)：527-529.

[6] 白仙富，戴雨茭，赵恒．地震影响场应急评估方法研究[J]．自然灾害学报，2014，23(4)：91-102.
Bai Xianfu，Dai Yuqian，Zhao Heng. Study on the emergency evaluation of earthquake influence field [J]. Journal of Natural Disasters，2014，23(4)：91-102.

[7] 王伟锞，李志强，李晓丽．利用余震法快速判定宏观震中的研究[J]．震灾防御技术，2011，6(1)：36-48.
Wang Weike，Li Zhiqiang，Li Xiaoli. Rapid determination of macro epicenter based on aftershocks[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2011，6(1)：36-48.

[8] 赵怀群，何少林，陈文凯，等．基于余震序列的地震烈度快速评估方法研究：以青海门源6.9级地震为例[J]．地震工程学报，2022，44(2)：432-439.
Zhao Huaiqun，He Shaolin，Chen Wenkai，et al. A rapid evaluation method of earthquake intensity based on the aftershock sequence：a case study of Menyuan *M*6.9 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal，2022，44(2)：432-439.

[9] 席楠，李小军，杨天青．基于实时观测数据快速判定地震破裂方向的方法研究[J]．中国地震，2021，37(1)：185-196.
Xi Nan，Li Xiaojun，Yang Tianqing. Research on the method of quickly determining the earthquake rupture direction based on real-time observation data[J]. Earthquake Research in China，2021，37(1)：185-196.

[10] 徐志双，任静，谭专条，等．利用震源机制解走向判定地震

影响场长轴方向[J]. 地震研究，2022，45(1)：88-99.
Xu Zhishuang，Ren Jing，Tan Zhuantiao，et al. Determination of the long-axis direction of the seismic influence field using the strike of the focal mechanism solution[J]. Journal of Seismological Research，2022，45(1)：88-99.

[11] 俞言祥，李山有，肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术，2013，8(1)：24-33.
Yu Yanxiang，Li Shanyou，Xiao Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2013，8(1)：24-33.

[12] 周中红，何少林，陈文凯，等. 甘肃地区地震烈度影响场计算模型参数的改进研究与应用[J]. 震灾防御技术，2011，6(2)：180-189.
Zhou Zhonghong，He Shaolin，Chen Wenkai，et al. Parameters in seismic intensity affecting field model of Gansu area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2011，6(2)：180-189.

[13] 张方浩，蒋飞蕊，李永强，等. 云南地区地震烈度评估模型研究[J]. 中国地震，2016，32(3)：511-521.
Zhang Fanghao，Jiang Feirui，Li Yongqiang，et al. Study of the evaluation model of the earthquake influence in Yunnan[J]. Earthquake Research in China，2016，32(3)：511-521.

[14] Liu P，Ren T J. Arias intensity attenuation relationship in Sichuan—Yunnan region，China[J]. Bulletin of Earthquake Engineering，2022，20(12)：6377-6406.

[15] Zhao H Q，Chen W K，Zhang C，et al. Rapid estimation of seismic intensities by analyzing early aftershock sequences using the robust locally weighted regression program (lowess)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences，2023，23(9)：3031-3050.

[16] Zhao H Q，Jia Y J，Chen W K，et al. Rapid mapping of seismic intensity assessment using ground motion data calculated from early aftershocks selected by GIS spatial analysis[J]. Geomatics，Natural Hazards and Risk，2023，14(1)：1-21.

[17] 中国地震局震灾应急救援司. 2001—2005年中国大陆地震灾害损失评估汇编[M]. 北京：地震出版社，2010.
Earthquake Emergency Rescue Department，China Earthquake Administration. Compilation of earthquake disaster loss assessment in Chinese mainland from 2001 to 2005[M]. Beijing：Seismological Press，2010.

[18] 中国地震局震灾应急救援司. 2006—2010年中国大陆地震灾害损失评估汇编[M]. 北京：地震出版社，2015.
Earthquake Emergency Rescue Department，China Earthquake Administration. Compilation of earthquake disaster loss assessment in Chinese mainland from 2006 to 2010[M]. Beijing：Seismological Press，2015.

[19] GB/T 18208.3—2011 地震现场工作 第3部分：调查规范[S].
GB/T 18208.3—2011 Post-earthquake field works：part 3：code for field[S].

[20] 任静，徐志双，段乙好，等. 中国各省区地震烈度衰减关系模型甄别[J]. 地震地磁观测与研究，2020，41(3)：75-82.
Ren Jing，Xu Zhishuang，Duan Yihao，et al. Identification of earthquake intensity attenuation relationship models in various provinces of China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research，2020，41(3)：75-82.

[21] 陈鹏，邱梁才，姚宜斌，等. 基于InSAR和光学影像解译的2023年甘肃积石山 M_S6.2震后地表形变和灾害分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2025，50(2)：257-270.
Chen Peng，Qiu Liangcai，Yao Yibin，et al. Surface deformation and hazard analysis after the 2023 M_S6.2 earthquake in Jishishan，Gansu Province based on InSAR and optical imagery interpretation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2025，50(2)：257-270.

[22] 岳峰，董建华，董鹏飞，等. 甘肃积石山 M_S6.2地震高烈度区震害特征及机理分析[J]. 地震工程学报，2024，46(4)：759-767.
Yue Feng，Dong Jianhua，Dong Pengfei，et al. Characteristics and mechanism of seismic damage of residential buildings in high-intensity areas of Jishishan M_S6.2 earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal，2024，46(4)：759-767.

[23] 郭海涛，贾源源，王会娟，等. 甘肃积石山6.2级地震房屋破坏特征分析[J]. 地震工程学报，2024，46(4)：846-856.
Guo Haitao，Jia Yuanyuan，Wang Huijuan，et al. Damage characteristics of buildings caused by the Jishishan M_S6.2 earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal，2024，46(4)：846-856.

[24] 李志强，袁一凡，李晓丽，等. 对汶川地震宏观震中和极震区的认识[J]. 地震地质，2008，30(3)：768-777.
Li Zhiqiang，Yuan Yifan，Li Xiaoli，et al. Some insights into the macro-epicenter and meizoseismal region of Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology，2008，30(3)：768-777.

[25] 鄢家全，李金臣，俞言祥，等. 论宏观震中及其快速估定方法[J]. 震灾防御技术，2010，5(4)：409-417.
Yan Jiaquan，Li Jinchen，Yu Yanxiang，et al. Discussion of the macro-epicenter and the method of rapid estimation[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2010，5(4)：409-417.

[26] 李海兵，孙知明，潘家伟，等. 2014年于田 M_S7.3地震野外调查：特殊的地表破裂带[J]. 地球学报，2014，35(3)：391-394.
Li Haibing，Sun Zhiming，Pan Jiawei，et al. Field study of the 12 February 2014 Yutian M_S7.3 earthquake：a special surface rupture zone[J]. Acta Geoscientica Sinica，2014，35(3)：391-394.

[27] 孙艳萍，张苏平，朱瑞，等. 基于余震分析的宏观震中、地震影响场方向和极震区初步修正[J]. 地震科学进展，2021，51(7)：309-314.
Sun Yanping，Zhang Suping，Zhu Rui，et al. Preliminary correction of the macro epicenter，the direction of the earthquake influence field and the meizoseismal area based on aftershock

analysis[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2021, 51(7): 309-314.

[28] 李鉴林, 常祖峰, 万永革, 等. 2022年1月2日宁蒗 M_S5.5地震发震构造研究[J]. 震灾防御技术, 2023, 18(3): 536-547.
Li Jianlin, Chang Zufeng, Wan Yongge, et al. Discussion on seismogenic structure of Ninglang M_S5.5 earthquake on January 2, 2022[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(3): 536-547.

[29] 徐钦, 陈琳荣, 张宇, 等. 吉林松原 M_S5.7、M_S5.1地震强震动记录特征分析[J]. 地震研究, 2019, 42(4): 627-634.
Xu Qin, Chen Linrong, Zhang Yu, et al. The characteristics of strong motion records of the Songyuan M_S5.7 and M_S5.1 earthquakes, Jilin Province [J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(4): 627-634.

[30] 李永生, 赵谊, 李继业, 等. 2018年5月28日吉林松原 M_S5.7地震发震构造分析[J]. 地震学报, 2020, 42(1): 12-23.
Li Yongsheng, Zhao Yi, Li Jiye, et al. Seismogenic structure analysis of the M_S5.7 Songyuan, Jilin, earthquake on May 28, 2018[J]. Acta Seismologica Sinica, 2020, 42(1): 12-23.

[31] 温和平, 谭明, 李帅, 等. 2018年9月4日新疆伽师 M_S5.5地震震害研究[J]. 内陆地震, 2019, 33(3): 193-200.
Wen Heping, Tan Ming, Li Shuai, et al. Earthquake damage research on Xinjiang Jiashi M_S5.5 earthquake on September 4th 2018[J]. Inland Earthquake, 2019, 33(3): 193-200.

[32] 张小涛, 姜祥华, 薛艳, 等. 2020年3月20日西藏定日 M_S5.9地震总结[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(4): 193-203.
Zhang Xiaotao, Jiang Xianghua, Xue Yan, et al. Summary of the Dingri M_S5.9 earthquake in Tibet on March 20, 2020[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(4): 193-203.

[33] 张建龙, 尼玛, 司金罗布, 等. 西藏定日 M_S5.9地震烈度评定及震害特征分析[J]. 西藏科技, 2021, 43(1): 48-49, 59.
Zhang Jianlong, Ni Ma, Si Jinluobu, et al. Intensity evaluation and seismic damage characteristics analysis of Xizang Dingri M_S5.9 earthquake[J]. Tibet's Science & Technology, 2021, 43(1): 48-49, 59.

[34] 陈相兆, 孙柏涛, 闫培雷. 四川康定6.3级地震灾害分布特点及结构震害简析[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(2): 1-9.
Chen Xiangzhao, Sun Baitao, Yan Peilei. The characteristics of earthquake disasters distribution and seismic damage to structures in Kangding M_S6.3 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(2): 1-9.

[35] 马建, 姚远, 何金刚. 2020年1月19日新疆伽师 M_S6.4地震烈度分布及房屋震害特征[J]. 内陆地震, 2020, 34(1): 40-48.
Ma Jian, Yao Yuan, He Jingang. Seismic intensity distribution and house damage characteristics of Jiashi M_S6.4 earthquake in Xinjiang on January 19th, 2020[J]. Inland Earthquake, 2020, 34(1): 40-48.

[36] 张原硕, 杨健强, 代博洋, 等. 2020年云南巧家5.0级地震烈度评定及房屋震害特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(3): 209-215.
Zhang Yuanshuo, Yang Jianqiang, Dai Boyang, et al. Intensity assessment and characteristics of buildings' damage in the afflicted area of 2020 Qiaojia M_S5.0 earthquake in Yunnan[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(3): 209-215.

[37] 李鑫, 姚生海, 殷翔, 等. 青海玛多7.4级地震极震区震灾调查及分析[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(3): 429-436.
Li Xin, Yao Shenghai, Yin Xiang, et al. Investigation and analysis of earthquake disaster in the extreme earthquake area of M_S7.4 earthquake in Qinghai Province[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(3): 429-436.

[38] 殷翔, 李鑫, 马震, 等. 青海玛多 M_S7.4地震震害特点分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 868-875.
Yin Xiang, Li Xin, Ma Zhen, et al. Characteristics of seismic disasters caused by the Maduo M_S7.4 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 868-875.

[39] 徐彦, 邵文丽. 2013年4月20日四川芦山7.0级地震震源破裂特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3396-3403.
Xu Yan, Shao Wenli. Rupture details of the 20 April 2013 Lushan M7.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3396-3403.

[40] 郑绪君, 张勇, 汪荣江. 采用IDS方法反演强震数据确定2017年8月8日九寨沟地震的破裂过程[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4421-4430.
Zheng Xujun, Zhang Yong, Wang Rongjiang. Estimating the rupture process of the 8 August 2017 Jiuzhaigou earthquake by inverting strong-motion data with IDS method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(11): 4421-4430.

[41] 张博譞, 钱黎, 李涛, 等. 2024年1月23日新疆乌什 M_S7.1地震地质灾害和地表破裂[J]. 地震地质, 2024, 46(1): 220-234.
Zhang Boxuan, Qian Li, Li Tao, et al. Geological disasters and surface ruptures of January 23, 2024 M_S7.1 Wushi earthquake, Xinjiang, China[J]. Seismology and Geology, 2024, 46(1): 220-234.

(本文编辑:张向红)