

杨天青, 姜立新, 董曼, 等. 基于余震序列分布信息的地震极灾区快速判断方法研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 8-15.
[Yang Tianqing, Jiang Lixin, Dong Man, et al. Rapid determination method of extreme earthquake disaster area based on aftershock sequence spatial distribution [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 8-15.]

基于余震序列分布信息的地震极灾区 快速判断方法研究^{*}

杨天青, 姜立新, 董曼, 潘博, 席楠

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 利用震级加权标准差椭圆法研究了基于震后短期内(24 h)余震序列判定地震极灾区的方法, 研究结果表明: ①利用该方法判断宏观震中是一种比较可行的方法, 不同震源破裂方式的震例利用该方法判断宏观震中的精度不同, 倾滑-近倾滑型破裂方式的震例利用余震序列判定宏观震中的精度最高; ②整体上看, 利用该方法判断极灾区长轴方向的准确性低于利用距震中最近活动断裂判断的准确性, 但对于倾滑-近倾滑型破裂方式的震例, 利用该方法的准确性高于利用断层数据判定的准确性。

关键词: 标准差椭圆; 余震序列; 宏观震中; 地震极灾区

中图分类号: P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0008-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.003

地震的发生具有突发性、瞬时性和破坏性等特点, 进入21世纪以来, 我国大陆地区已经发生6.0~6.9级地震28次, 7.0~7.9级地震4次, 8.0级以上地震2次, 这些巨大地震共造成88 441余人死亡, 直接经济损失近1万亿元, 为国家经济和社会稳定带来了强大冲击和深远影响。汶川8.0级、玉树7.0级、芦山7.0级等地震的应急救援经验表明, 地震发生后, 特别是特大地震发生后, 能够迅速、及时、准确地判断极灾区的范围或破坏等级, 对于实施科学合理的应急救援决策具有至关重要的意义。目前, 我国已经发展了基于烈度衰减模型地震烈度快速评估^[1-2]、基于余震信息的灾情快速判定^[3-7]等多种震后黑箱期或灰箱期的灾害范围快速判定方法, 并在历次地震初期的应急工作中发挥了很好的作用。但同时还存在一定的局限性, 主要体现在特大地震极灾区的判断能力稍显薄弱, 若能尽快地圈定大地震的极灾区, 将有助于提高抗震救灾的效率。汶川地震时, 仪器震中位于汶川县漩口镇, 最初把主要救援力量都集中到了汶川县, 而距汶川县100 km多的北川县城, 同样是受灾最严重的地区, 由于地震当天的灾情不明, 错过了对北川等地的最佳救援期, 玉树地震也是如此, 仪器震中位于玉树州隆宝镇

东南约16 km处, 而破坏最严重的地方却在仪器震中东南向45.7 km处的人口稠密的结古镇洪达附近。这也是造成这两次典型震例的震后快速评估结果偏差较大的主要原因。

大地震发生后近期余震区的分布在一定程度上是大地震破裂图像的反映^[8]。Richter最早明确将地震破裂范围与余震分布联系起来, 并证明余震空间分布的复杂性, 余震分布是随着时间向破裂面以外轻微扩展^[9]。根据余震与主震之间的空间位置关系, Kisslinger和Jones把余震划分为3类^[10]: 第一类发生在主震破裂面上, 是主震后短时间内的早期余震, 早期余震的分布已能勾划出主震破裂面的基本特征; 第二类同样发生在主震破裂断层上, 但可以位于初始滑动段落之外, 表征了初始余震区的扩展, 可能反映了断裂带性质的空间差异性及破裂端部与力学障碍物之间相互作用的结果^[11-12]; 第三类余震发生在比主震破裂尺度大得多的较远处, 从机理上讲主要是由于主震的远程触发而产生。余震是否发生于某个地点, 不仅取决于该地点是否本来就是比较薄弱的地方, 还和压力优势传播积累的地方有关, Tajima和Kanamori利用美国国家地震信息中心(NEIC), 根据1963-1980年的44个余震能量释放轮廓, 研究发

^{*} 收稿日期: 2014-06-17 修回日期: 2014-07-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK15B06-02); 地震科技星火计划项目(XH14056)

作者简介: 杨天青(1978-), 女, 吉林敦化人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震灾害和地震应急技术研究。

E-mail: y tq@seis.ac.cn

表 1 文中所用震例列表

序号	发震日期	纬度	经度	震级(M)	地点	破裂类型
1	1970-01-05	24.1	102.6	7.8	云南通海	SS
2	1971-04-28	22.8	100.1	6.7	云南宁洱	
3	1973-02-06	31.5	100.4	7.6	四川省炉霍	SS
4	1974-05-11	28.1	104.0	7.1	云南省大关	SS
5	1975-02-04	40.7	122.8	7.3	辽宁省海城	SS
6	1979-03-15	29.1	101.3	6.8	云南省普洱(磨黑)	DS
7	1981-01-24	31.0	101.2	6.9	四川省道孚	SS
8	1985-08-23	39.4	75.4	7.4	新疆乌恰	OS
9	1990-04-26	36.1	100.1	7.0	青海省共和	DS
10	1993-03-20	29.4	87.2	6.8	西藏拉孜西北	DS
11	1993-10-02	38.3	88.7	6.6	新疆若羌	OS
12	1995-10-24	25.8	102.3	6.5	云南省武定	SS
13	1996-02-03	27.3	100.2	7.1	云南省丽江	DS
14	1996-03-19	40.1	76.6	6.9	新疆阿图什	OS
15	1996-11-19	35.4	78.4	7.1	新疆和田	SS
16	2000-09-12	35.3	99.5	6.6	青海省兴海(前震-主震-余震)	SS
17	2003-02-24	39.6	77.3	6.6	新疆伽师	OS
18	2003-04-17	37.7	96.6	6.6	青海德令哈	DS
19	2007-06-03	23.1	101.0	6.7	云南普洱哈尼族彝族自治县	SS
20	2008-05-12	31.0	103.4	8.0	四川汶川	DS
21	2008-10-06	29.8	90.3	6.6	西藏当雄县	OS
22	2010-04-14	33.2	96.6	7.1	青海玉树	SS
23	2012-06-30	43.4	84.7	6.6	新疆伊犁哈萨克自治州 新源县、巴音郭楞和静交界	SS
24	2013-04-20	30.3	103.0	7.0	四川芦山	DS
25	2013-07-22	34.5	104.2	6.6	甘肃岷县、漳县	OS
26	2014-02-12	36.1	82.5	7.3	新疆于田	SS

现,有些地震的余震分布是随着时间扩展的,有些却不是^[12]。一般情况下,余震分布轮廓基本在震后 7 d 内形成,以后的余震仅仅是填空^[13-14]。

地震烈度是地震引起的地面震动及其影响的强弱程度^[15],是多种震害现象的综合量度,所以影响地震烈度的因素,除事物本身之外,还必然包括震源与传播条件这两个方面^[16]。我国大量的历史地震等震线资料及大地震现场宏观考查资料表明,内圈等震线长轴的方向基本上受地表破裂面走向所控制^[8],而地表破裂面又可以通过初期余震分布来反映,所以本文拟通过震后初期的余震分布研究地震极灾区的判定方法,为震后初期的地震灾害规模判定提供一种思路。

1 资料与分析

地震极灾区是指遭受地震灾害直接损失最严重的区域,不包括对社会经济无影响的地震地质灾害区^[17]。地震极灾区是通过地震烈度调查评估后确定的,地震现场烈度调查视地震破坏规模大小一般在震后 3~10 d 内完成^[18],实际调查烈度

应该是包含主震和开展地震现场烈度调查前的强余震的共同作用造成的破坏,所以在进行震后地震烈度快速判断时要充分考虑主震及其震后短期内发生的强余震的共同影响。

(1)资料选取

本课题选择 1966 年以来发生在中国大陆地区震级 M≥6.5 级、余震记录比较完备、宏观烈度调查等震线资料齐全的主余震型破坏性历史地震(如表 1)。

2 研究方法

余震分布特点,除个别大地震外,余震分布区通常为椭圆形,一般认为,余震是主震断裂的参与滑动,能量重新分配导致岩石破裂的结果^[19],强震余震区形状和余震随时间分布的阶段性受发震断裂带组合方式制约^[20]。由于发震构造的影响,地震烈度等震线在近场一般呈椭圆形或者共轭椭圆形,在远场响则逐渐变为圆形^[21],基于两者上述分布特点,本文标准差椭圆的工作原理绘制震

后短期内余震信息的定向分布椭圆,分析该椭圆是否可以作为中强地震极灾区的判定参考。

2.1 标准差椭圆基本原理

标准差椭圆是由经典统计分析学中样本标准差演变而来,用以描述地理要素的空间分布趋势特征:中心趋势、离散和方向趋势,它是由中心点、长短轴、短轴、旋转角四个元素确定。主要用于反映样本点的空间位置相对于平均中心位置的空间距离在长短轴方向的离散程度^[22]。如图1所示,样本点集的原始坐标系(XOY),样本点的平均中心为 O' 为所有样本点集中所有点的平均值中点 (\bar{X}, \bar{Y}) ,样本点集的优势分布方向为 $O'Y'$,从正北方向旋转到 $O'Y'$ 的角度 θ 就是样本点集的标准差椭圆旋转角。

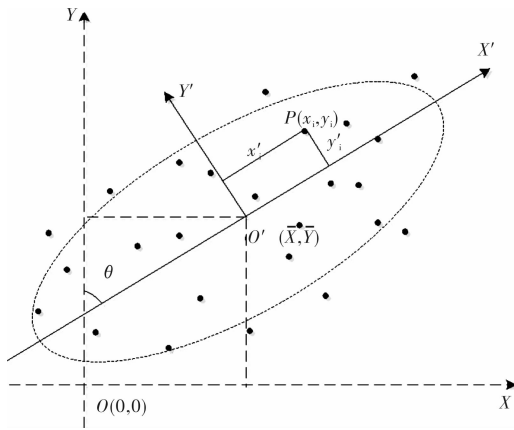


图1 标准差椭圆示意图

(1) 计算中心点

地理中心点计算公式:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (2)$$

式中: x_i, y_i 标识为第 i 的样本点的经纬度; n 为标识整个样本点的个数。

如果在衡量地理要素集空间趋势分布中,仅需要测量样本点的位置特征,则只需计算要素的平均中心即可;如果除了位置信息外,还有一些属性参数代表各个要素的重要性差异,则可以通过设置权重字来体现这些要素的差别^[22]。

加权地理中心点计算公式:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad (3)$$

$$\bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}. \quad (4)$$

式中: x_i, y_i 标识为第 i 的样本点的经纬度; n 为标识整个样本点的个数; ω_i 为第 i 个样本点的权重值。

(2) 计算旋转角

旋转角 θ 表示椭圆长轴从正午方向顺时针旋转的角度,计算公式如下:

$$\tan \theta = \frac{A+B}{C}, \quad (5)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2, \quad (6)$$

$$B = \sqrt{(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i)^2}, \quad (7)$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i, \quad (8)$$

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{X}, \quad (9)$$

$$\tilde{y}_i = y_i - \bar{Y}. \quad (10)$$

式中: \tilde{x}_i 和 \tilde{y}_i 距地理中心的 X, Y 轴方向的坐标偏差, $\tan \theta > 0$ 说明从正北方向旋转 θ 度角与长轴重合; $\tan \theta < 0$ 时,说明从正北方向旋转 θ 度角将于短轴重合。

(3) 计算标准差椭圆的长轴和短轴方向的标准差 σ_x, σ_y 。

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos \theta - \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{n}}, \quad (11)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \sin \theta + \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{n}}, \quad (12)$$

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{X}, \quad (13)$$

$$\tilde{y}_i = y_i - \bar{Y}. \quad (14)$$

式中: x_i 和 y_i 代表第 i 样本点的坐标值, $\{\bar{X}, \bar{Y}\}$ 代表样本点的地理中心 O' 的坐标值, n 表示样本点个数。

2.2 实验方案

本文利用震后短时间内余震数据集($M_L \geq 3.0$)的震级作为权值因子进行试验,计算不同时间段内的余震分布标准差椭圆的相关参数,包含余震空间分布的中心位置和余震分布的优势方向,研究震后2 h、震后4 h、震后12 h、震后24 h内基于标准差椭圆建立的震级加权余震序列空间分布中心位置和优势分布方向是否和宏观震中、极震区方向有一定的关联。

2.3 实验结果

2.3.1 与宏观震中的距离分析

按照上述实验方案的计算结果如表2所示。

(1) 不同时段地震序列震级加权中心与宏观震中的距离分析

计算不同时段地震序列震级加权中心距宏观震中的距离结果如表3所示,结果表明不同时段余震序列的震级加权中心与宏观震中之间的距离均小于微观震中与宏观震中之间的距离,且随着时间的推移,余震序列震级加权中心逐渐逼近宏观震中

表 2 距宏观震中距离计算结果列表

序号	发震日期	发震地点	震级(M)	破裂类型	R_{2h}/km	R_{4h}/km	R_{12h}/km	R_{24h}/km	D/km	极灾区烈度
1	1970-01-05	云南通海	7.8	SS	28.95	31.07	26.52	19.95	18.15	IX
2	1971-04-28	云南普洱	6.7		14.88	14.88	8.98	9.45	16.09	VIII
3	1973-02-06	四川炉霍	7.6	SS	13.43	8.46	7.09	6.69	13.43	IX
4	1974-05-11	云南大关	7.1	SS	4.71	3.148	2.35	3.34	12.06	IX
5	1975-02-04	辽宁海城	7.3	SS	5.36	5.75	4.88	4.88	6.61	IX
6	1979-03-15	云南宁洱	6.8	DS	1.74	2.59	2.97	3.41	4.94	IX
7	1981-01-24	四川道孚	6.9	SS	5.45	5.45	6.02	7.33	5.45	VIII
8	1985-08-23	新疆乌恰	7.4	OS	7.28	6.04	5.79	4.98	10.23	VIII
9	1990-04-26	青海共和	7.0	DS	3.8	3.14	2.22	2.05	6.67	IX
10	1993-03-20	西藏拉孜西北	6.6	DS	39.55	39.55	21.99	21.99	39.55	VIII
11	1993-10-02	新疆若羌	6.6	OS	14.83	17.45	16.56	16.06	22.14	VIII
12	1995-10-24	云南武定	6.5	SS	3.27	5.05	4.38	3.51	11.78	IX
13	1996-02-03	云南丽江	7.0	DS	22.46	22.46	3.88	1.19	22.46	IX
14	1996-03-19	新疆阿图什	6.9	OS	30.71	29.22	29.27	30.5	41.42	IX
15	1996-11-19	新疆昆仑山	7.1	SS	25.33	23.21	27.45	28.14	12.62	VIII
16	2000-09-12	青海兴海 (前震-主震-余震)	6.6	SS	6.38	6.56	6.15	5.42	12.48	VIII
17	2003-02-24	新疆伽师	6.8	OS	25.29	22.74	19.51	18	30.71	IX
18	2003-04-17	青海德令哈	6.6	DS	10.25	7.92	8.17	9.36	17.21	VIII
19	2007-06-03	云南普洱哈尼族 彝族自治县	6.7	SS	7.37	6.93	5.92	5	6.16	VIII
20	2008-05-12	四川汶川	8.0	DS	53.75	46.63	31.73	25.96	87.21	X
21	2008-10-06	西藏当雄县	6.6	OS	2.83	2.6	2.53	3.17	8.25	VIII
22	2010-04-14	青海玉树	7.1	SS	13.33	13.79	14.11	12.09	31.51	IX
23	2012-06-30	新疆新源县、巴音 郭楞和静交界	6.6	SS	12.13	12.06	11.32	11.11	10.61	VIII
24	2013-04-22	四川芦山	7.0	DS	5.88	6.19	5.11	5.51	4.17	IX
25	2013-07-22	甘肃岷县、漳县	6.6	OS	7.82	7.83	7.65	7.61	8.58	VIII
26	2014-02-12	新疆于田	7.3	SS	5.37	8	7.47	7.38	7.7	IX

备注:(1) 极灾区取值说明:取实际地震烈度分布中连续分布最大的烈度圈为极灾区的计算烈度,宏观震中的位置取极灾区的几何中心;(2) 参数说明: R_{2h} 、 R_{4h} 、 R_{12h} 、 R_{24h} 分别表示震后 2 h、4 h、12 h、24 h 地震序列震级加权中心到宏观震中的距离, D 表示微观震中到宏观震中的距离;(3) 破裂类型说明:对滑动角 λ 与主震断层破裂形式之间的关系约定是^[22], $0^{\circ} \leq \lambda < 30^{\circ}$ 为走滑和近走滑型破裂(strike slip), $30^{\circ} \leq \lambda < 60^{\circ}$ 为斜滑型破裂(oblique slip,OS), $60^{\circ} \leq \lambda < 90^{\circ}$ 为倾滑-近倾滑型破裂(dip slip,DS)。

(图2)。利用震后 2 h、4 h、12 h 和 24 h 的余震序列震级加权中心判断宏观震中的位置比微观震中判定的精度可分别提升 20.54%、23.38%、38.09%、41.48%(表3)。

表 3 不同时段地震序列震级加权中心距宏观震中的距离均值计算结果

	R_{2h}	R_{4h}	R_{12h}	R_{24h}	D
均值	14.31	13.8	11.15	10.54	18.01
标准差	12.86	11.962	9.199	8.513	17.51
提升率/ q	20.54	23.38	38.09	41.48	

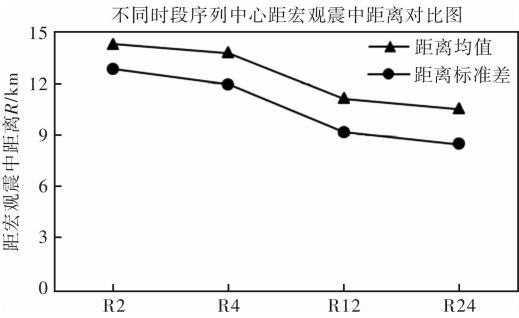


图 2 不同时段地震序列震级加权中心距宏观震中对比图

(2) 不同主震破裂类型地震序列震级加权中心

表 4 不同破裂类型余震序列震级加权中心与宏观震中距离分析表

破裂类型	样本数		R_{2h}	R_{4h}	R_{12h}	R_{24h}	D
DS	7	距离均值/km	19.63	18.35	10.87	9.92	26.03
		距离标准差/km	20.069	18.269	11.441	10.027	29.76
		提升率/%	24.59	29.50	58.24	61.89	
OS	6	距离均值/km	14.79	14.31	13.55	13.39	20.22
		距离标准差/km	11.061	10.495	10.081	10.093	13.724
		提升率/%	26.85	29.23	32.99	33.78	
SS	12	距离均值/km	10.92	10.97	10.31	9.57	12.38
		距离标准差/km	8.357	8.353	8.385	7.478	7.045
		提升率/%	11.79	15.77	19.52	25.29	

表 5 震例不同时段余震优势分布方向结算结果列表

序号	发震日期	发震地点	震级 M	破裂类型	θ_{2h}	θ_{4h}	θ_{12h}	θ_{24h}	A 极灾区	A_f	极灾区烈度
1	1970-01-05	云南通海	7.8	SS	124	91	113	120	124	122	IX
2	1971-04-28	云南普洱	6.7		109	109	120	115	48	4	VIII
3	1973-02-06	四川炉霍	7.6	SS	107	111	110	107	128	130	IX
4	1974-05-11	云南大关	7.1	SS	113	94	90	98	139	54	IX
5	1975-02-04	辽宁海城	7.3	SS	101	104	102	101	106	120	IX
6	1979-03-15	云南宁洱	6.8	DS	115	109	116	117	124	27	IX
7	1981-01-24	四川道孚	6.9	SS	149	149	149	136	128	130	VIII
8	1985-08-23	新疆乌恰	7.4	OS	142	100	94	95	133	121	VIII
9	1990-04-26	青海共和	7.0	DS	95	89	101	98	111	155	IX
10	1993-03-20	西藏拉孜西北	6.6	DS	93	93	153	153	135	93	VIII
11	1993-10-02	新疆若羌	6.6	OS	173	166	151	158	83	77	VIII
12	1995-10-24	云南武定	6.5	SS	133	127	143	120	97	2	IX
13	1996-02-03	云南丽江	7.0	DS	17	17	178	178	3	17	IX
14	1996-03-19	新疆阿图什	6.9	OS	97	97	97	93	95	59	IX
15	1996-11-19	新疆昆仑山	7.1	SS	64	78	70	94	114	114	VIII
16	2000-09-12	青海兴海	6.6	SS	99	99	100	100	152	154	VIII
17	2003-02-24	新疆伽师	6.6	OS	85	41	49	102	147	84	IX
18	2003-04-17	青海德令哈	6.6	DS	24	37	40	52	114	98	VIII
19	2007-06-03	云南普洱哈尼族彝族自治县	6.4	SS	117	120	108	100	154	57	VIII
20	2008-05-12	四川汶川	8.0	DS	48	51	51	52	52	53	X
21	2008-10-06	西藏当雄县	6.6	OS	153	159	156	156	15	3	VIII
22	2010-04-14	青海玉树	7.1	SS	164	169	173	143	115	120	IX
23	2012-06-30	新疆新源县、巴音郭楞和静交界	6.6	SS	99	99	90	93	107	103	VIII
24	2013-04-22	四川芦山	7.0	DS	32	34	33	35	31	51	IX
25	2013-07-22	甘肃岷县、漳县	6.6	OS	70	77	82	82	122	118	VIII
26	2014-02-12	新疆于田	7.3	SS	52	68	67	67	70	77	IX

与宏观震中的距离分析

许多研究表明,主震的破裂过程和由此导致的应力变化很大程度主导着地震序列的活动性,不同破裂类型的余震序列的空间分布具有不同的特点^[14,24-28],本文的研究结果也同样证实了这一点,通过分析主震不同破裂类型的余震序列震级加权中心与宏观震中的距离发现(表4):①不论主震是何种破裂方式,其平均余震震级加权中心都随着余

震数据的不断积累逐渐逼近宏观震中;②对于倾滑-近倾滑破裂方式(DS)的主震,利用余震序列震级加权中心判断宏观震中的准确性最高,利用震后24h的余震序列中心判断宏观震中,精度可提升61.89%;③对于走滑近-走滑型破裂方式(SS)的主震,利用余震序列震级加权中心判断宏观震中的准确性最低,其震后24h的余震序列中心判断宏观震中,精度仅提升25.29%。

表 6 不同时段余震序列优势分布方向与极震区长轴方向夹角分析结果表

破裂类型	样本数	项目	$I\theta_2$	$I\theta_4$	$I\theta_{12}$	$I\theta_{24}$	$I\alpha_f$
ALL	26	夹角均值	31.38	32.27	31.82	26.44	26.42
		夹角标准差	26.18	24.39	25.86	22.62	29.95
DS	7	夹角均值	25.06	24.65	16.81	15.73	28.16
		夹角标准差	31.484	26.665	26.112	21.537	30.55
OS	6	夹角均值	42.74	45.5	44.94	39.61	22.11
		夹角标准差	33.048	29.56	27.9	23.34	23.017
SS	12	夹角均值	26.87	27.66	30.67	22.66	24.18
		夹角标准差	17.876	18.266	20.2	17.97	36.39

注:表中 $I\theta_i$ 表示震后 i 时段内余震优势分布方向与极灾区长轴方向夹角; $I\alpha_f$ 表示断层方向与极灾区长轴方向夹角。

2.3.2 余震序列优势分布方向、断层倾角与极灾区倾角关系分析

余震序列优势方向 θ 是利用标准差椭圆的方法,加入震级权值计算得到震后不同时段余震序列的优势分布方向;极灾区倾角定义 $A_{\text{极灾区}}$ 为以正北方向为起点,顺时针旋转至极灾区长轴方向的角度;断层倾角 A_f 定义为距震中最近的断层倾角。计算结果如表 5 所示。

为判断余震优势分布方向与距震中最近断层方向对极灾区长轴方向的控制作用,我们定义他们各自与极震区长轴方向的夹角作为衡量参数,夹角越小,代表其对极震区长轴方向的控制作用越强,从表 6 中的夹角计算结果可见:①从整体样本来看,利用震中距离最近断层的倾角作为极灾区长轴方向的准确性高于利用震级加权的余震优势分布方向;②对于倾滑-近倾滑型破裂方式(DS)的震例来讲,利用震级加权的余震分布优势方向作为极灾区长轴方向的准确性要高于利用最近断层的倾斜方向;③对于斜滑型或者走滑和近走滑型破裂方式(OS)的震例来讲,利用震中距离最近断层的倾角作为极灾区长轴方向的准确性高于利用震级加权的余震优势分布方向。

究其原因,可能有以下几点:①样本量偏少,无法代表普遍性;②对于走滑型破裂方式的余震分布来讲,其余震分布和断层的空间展布有关,不同倾角的断层破裂映射到地表的位置表现不同;③目前的权值系数设置比较单一,仅用震级代表每个余震点对于整个破裂区的影响稍显薄弱,可考虑增加其他参数,例如地形因素、与断层的距离因素等;④不同震例的能量释放过程不同,震后短时间内能量释放比较充分的震例的余震代表性较强,反之,余震的代表性较弱;⑤不同地区的地震监测能力导致地震序列定位精度,尤其是倾滑型破裂方式的 6 个震例,集中分布在新疆西藏等历史上地震监测能力较弱的地区,其地震序列的定位精度相对较差。

3 结论与分析

3.1 研究结论

基于前文所列的 26 个历史震例资料,本文利用震级加权标准差椭圆方法研究了基于震后短期内(24 h)余震序列判定地震极灾区的方法,研究结论如下。

(1)基于震后短期内余震序列资料,利用震级加权标准差椭圆方法判定宏观震中为地震灾害快速评估提供一种可参考的判断方法。研究结果表明不论主震是何种破裂方式,其平均余震震级加权中心都随着余震数据的不断积累逐渐逼近宏观震中;对于倾滑-近倾滑型破裂方式(DS)的主震,利用余震序列震级加权中心判断宏观震中的准确性最高;对于走滑和近走滑型破裂方式(SS)的主震,利用余震序列震级加权中心判断宏观震中的准确性最低。

(2)整体上看,基于震后短期内余震序列资料,利用震级加权标准差椭圆方法判定极震区长轴方向的可靠性低于利用最近断层走向判断的方式,但是区分不同的主震震源破裂方式,其判断精度也不同,研究结果表明对于倾滑-近倾滑型破裂方式(DS)的震例来讲,利用震级加权的余震分布优势方向作为极灾区长轴方向的准确性要高于利用最近断层的倾斜方向;对于斜滑型或者走滑和近走滑型破裂方式的震例来讲,利用震中距离最近断层的倾角作为极灾区长轴方向的准确性高于利用震级加权的余震优势分布方向。

(3)通过本文的分析,余震序列判定地震极灾区间对历史震例是具有一定的代表性,该研究结果还需要进一步积累资料进行验证,细化分区分类研究,提高其适用性。

3.2 结果分析

目前,我国已经发展了多种基于余震信息的灾

表 7 三种基于余震信息的地震宏观震中定量判定方法比较

方法	比较项	R_{2h}/km	R_{4h}/km	R_{12h}/km	R_{24h}/km	方法概述
标准差椭圆法 (本研究)	距离均值	11.91	12.3	7.86	6.55	以位置为输入参数,震级为加权参数的标准差椭圆法
	距离标准差	10.496	10.967	8.51	6.436	
余震质心法 ^[5]	距离均值	13.2	14.32	8.11	7.4	以余震位置为参数的余震质心法
	距离标准差	14.658	13.958	8.365	6.528	
线性回归法 ^[4]	距离均值	13.5	14.16	9.76	8.49	以余震位置为参数的一元线性回归法
	距离标准差	11.487	11.032	7.983	8.849	

情快速判定方法,分别从不同角度研究了如何通过余震序列快速判定地震极灾区或宏观震中,韩渭滨等^[6]通过将 1966 年以来大华北和川滇地区 7.0~7.9 级地震的余震区长度的统计,认为余震区长度受震级影响明显,受覆盖层厚度不同的地区性影响不大,似乎与震源破裂面长度的关系更密切;鄢家全等^[7]通过对唐山地震和汶川地震的余震序列研究表明,大震后 24 h 的余震分布范围基本相当于 IX 度区的范围,宏观震中也大体在余震分布区的中心地带;大震后 4 h 或 8 h 的余震震中分布已较为显著地体现出震源区的范围;白仙富等^[4]以云南地震 1966 年以来 6 级以上地震为资料基础,利用一元线性回归法研究了适合云南地区的基于余震信息的地震宏观震中快速判定方法;王伟铤等^[5]为全国 1970 年以来近 40 组破坏性地震为资料基础利用余震质心法研究了利用余震信息进行地震宏观震中的定量快速判定方法,表 7 是以本文中 7 个云南地区震例为例,对比分析了三种基于余震信息判定宏观震中的定量研究方法的计算结果。对比结果表明:①基于震级加权的标准差椭圆法的宏观震中判定结果精度略优于其他两种方法;②从算法实现的复杂度以及输入参数角度,三种算法都比较简单易行,适合作为实际地震应急中震后宏观震中的快速判定思路。

4 结语

通过本文研究,基于震后短期内余震序列判定地震极灾区是有一定规律性的,利用震级加权标准差椭圆法对 1966 年以来 $M \geq 6.5$ 级资料比较齐全的 26 个震例的余震序列进行分析,其结果表明该方法可以作为震后初期快速判断宏观震中一种比较可行的方法,判定结果精度较以往研究成果有一定程度的提高。从地震成灾理论角度讲,一次地震造成的灾害,是由主震及其震后短期内发生的强余震的共同影响的结果,如何快速、客

观、科学地评价余震序列对于整次地震灾害的影响,必须综合考虑震源物理学、构造地质学、地震灾害学等相关理论知识,研究基于余震信息的极灾区综合判定方法,为地震应急和灾害预估提供参考。

致谢:感谢云南省地震局白仙富工程师为本研究提供了 1979 年 3 月 15 日云南省普洱(磨黑)6.8 级地震烈度的数字化数据,为本文提供了很好的支持。

参考文献:

- [1] 郁曙君. 中国东部平原和西北部地区烈度衰减关系的研究[J]. 地震学报, 1995, 17(2): 203-211.
- [2] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 2000, 16(2): 99-106.
- [3] 吴开统. 强余震的灾害评估[J]. 中国地震, 1995, 11(4): 368-373.
- [4] 白仙富, 戴雨茨, 李永强, 等. 基于余震信息的宏观震中和影响场方向快速判定方法[J]. 地震研究, 2011, 34(4): 525-532.
- [5] 王伟铤, 李志强, 李晓莉. 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.
- [6] 韩渭滨, 蒋国芳. 强震等震线、余震区形状与地震构造关系的研究[J]. 地震, 2010, 30(4): 32-39.
- [7] 鄢家全, 李金成, 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.
- [8] 林邦慧, 陈天长, 蒲晓红, 等. 鲜水河断裂带强震破裂过程与地震活动[J]. 地震学报, 1986, 8(1): 1-20.
- [9] Richter C F. Foreshocks and aftershocks: in earthquakes in Kern County, California during 1952 [J]. Div. Mines Bull, 1955, 171: 199-202.
- [10] Kisslinger C, Jones L M. Properties of aftershocks sequences in southern California [J]. J Geophys Res, 1991, 96: 11947-11958.
- [11] Mogi K. Development of aftershock area of great earthquakes[J]. Bull Earthq Res Inst Tok o Uni, 1968, 46: 175-203.
- [12] Tajima F, Kanamori H. Global survey of aftershock area expansion patterns[J]. Phys Earth Planet Interi, 1985, 40(2): 77-134.
- [13] Pegler G. Studies in Seismotectonics[M]. Ph. D. thesis. University of Oxford, Oxford. 1995.

- [14] Henry C, Das S. Aftershock zones of large shallow earthquakes; fault dimensions, aftershock area expansion and scaling relations [J]. *Geophysical Journal International*, 2001, 147: 272–293.
- [15] GB/T 17742–2008 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [17] GB/T 18208.4–2011 地震现场工作 第4部分 灾害直接损失评估[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] GB/T 18208.1–2006 地震现场工作 第1部分: 基本规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [19] 加来良二. 余震域の理論的の形状[J]. 日《地震》, 1985, 30: 46–48.
- [20] 韩渭滨, 蒋国芳. 强震等震线、余震区形状与地震构造关系的研究[J]. 地震, 2010, 30(4): 32–39.
- [21] 陈达生, 刘兴汉. 地震烈度椭圆衰减关系[J]. 华北地震科学, 1989, 7(3): 31–42.
- [22] Andy Mitchell. The Esri Guide to GIS Analysis Volume 2: Spatial Measurement & Statistics[M]. California: Esri, 2009.
- [23] 周翠英, 王铮铮, 蒋海坤, 等. 华东地区现代地壳应力场及地震断层错动性质[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 273–288.
- [24] Carlos Mendoza, Stephen H Hartzell. Aftershock and main shock faulting[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(4): 1438–1449.
- [25] Pegler G, Das S. Analysis of the relationship between seismic moment and fault length for large crustal strike-slip earthquakes between 1977–92[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(9): 905–908.
- [26] Christopher H. Scholz. Size distributions for Large and small earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(4): 1074–1077.
- [27] Das S, Henry C. Spatial relation between main earthquake slip and its aftershock distribution[J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(3): 1–16.
- [28] Woessner J, Schorlemmer D, Wiemer S, et al. Spatial correlation of aftershock locations and on-fault main shock properties[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B8): 1–17.

Rapid Determination Method of Extreme Earthquake Disaster Area Based on Aftershock Sequence Spatial Distribution

Yang Tianqing, Jiang Lixin, Dong Man, Pan Bo and Xi Nan
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract: Determination method on earthquake disaster area based on aftershock sequence in a short time after an earthquake (within 24 h) is studied by using the magnitude weighted standard deviation ellipse method. The results are as follows: ① It's feasible to use this method in determining the macro-epicenter, while the accuracy varies with earthquake cases of different seismic source rupture types. Cases of the dip-slip rupture type have the highest accuracy; ② Generally, this method shows a lower accuracy in determining the direction of long axis than the method of using active faults closest to the epicenter. However, as to cases of the dip-slip rupture type, this method is higher than method of faults data judgment in accuracy.

Key words: standard deviational ellipse; aftershock sequence; macro-epicenter; extreme earthquake disaster area