

论宏观震中及其快速估定方法¹

鄢家全 李金臣 俞言祥 潘华 郝玉芹

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 宏观震中与微观震中不仅是概念上的差别, 在实际观测结果中也存在不容忽视的差距。宏观震中还可代表震源区和地震波能量辐射的中心。宏观震中在抗震救灾、震害预测、地震地质和工程地震研究等方面, 具有无可替代的重要作用。在灾害性地震发生后, 可由余震分布来快速估定重灾区范围和宏观震中, 将有助于提高抗震救灾效率。

关键词: 宏观震中 极震区 微观震中 初始破裂

引言

众所周知, 地震有宏观震中与微观震中之分。宏观震中是指极震区(或震源区)的几何中心; 而微观震中则是震源初始破裂位置。因震源区的破裂过程具有多样性, 只有从震源区中心开始的对称破裂型地震, 其宏观震中与微观震中才较一致。随着震级的增大, 地震的震源区范围也越大, 宏观震中与微观震中的差距也可能更加显著。比如2001年11月14日发生在昆仑山口的8.1级地震, 震源区长约440km, 宏观震中(35.75°N, 93.37°E)与微观震中(35.97°N, 90.59°E)之差距达240km; 又比如2008年5月12日发生在四川龙门山的8.0级地震, 震源区长约320km, 宏观震中在北川附近(31.7°N, 104.20°E)与微观震中(31.0°N, 103.4°E)的差距达110km。这么大的差别, 在实际应用中将如何对待? 再者, 由于确定宏观震中的极震区是地面震动最强烈和破坏最重的地区, 若能尽快地圈定大地震的极震区, 将有助于提高抗震救灾的效率。

本文拟从宏观震中的由来及意义、宏观震中与微观震中的差异、宏观震中的用途, 以及快速估定宏观震中的方法等方面进行讨论, 以便更好地服务于防震减灾事业。

1 宏观震中的由来及意义

早在三个多世纪之前, 人们为了了解地震, 就到现场去进行调查, 首先看到的是, 地震影响场的范围是很有限的, 地震动的强弱程度各处不同, 经过仔细调查, 还可以找出一块范围不大而震动最强的地区, 谓之极震区(Meizoseismal area)。地震的强弱程度, 从极震

1 基金项目 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB10B03)资助

[收稿日期] 2010-04-11

[作者简介] 鄢家全, 男, 生于1941年。研究员。主要研究领域: 工程地震与地震区划。E-mail: lijincheng1979@163.com

区向外扩展,距离越大,震动越弱,终至消逝。人们又逐步将在地震现场接触到的各种宏观现象进行比较分析,归纳出评判地震动影响强弱程度的等级标度。这个等级标度就称之为地震烈度(Seismic intensity),度数大者为强,度数小者为弱。在一次地震的烈度分布图中,相邻两度之间的分界线为等震线,等震线以极震区为中心,由强而弱,一环扣一环,逐步扩大。因极震区是地震动最强的地区,又总在地震动影响场的中心,所以又称之为震中区,其几何中心则称之为震中。为了与仪器观测地震波测定的震源区初始破裂相区别,将上述由宏观地震资料所得极震区的几何中心称为宏观震中(李善邦,1981)。

在地震学的发展进程中,宏观震中的概念已广为人知,不仅是近、现代经过现场科学调查的地震,逐个给出了宏观震中参数;对于数千年来的历史地震,也根据其记载资料的详简程度或极震区范围大小,给出了不同精度的宏观震中参数。震中分布图也采用宏观震中参数(国家地震局震害防御司,1995)。现今,宏观震中的概念已深入社会各界,其意义可归述如下:

(1) 宏观震中代表了地震动和地震影响最强烈地区的中心。对于大地震,尤其是特大地震,宏观震中也是重灾区的中心。

(2) 宏观震中代表了震源区的中心。因极震区与震源体在地面的投影范围有关,极震区又称为震源区或震中区。

(3) 宏观震中可视为地震波能量辐射的中心。将地震视作为震源区内应变能的积累与快速释放过程,地震波向四周传播并逐渐衰减,形成地震影响场。凡是用震中距离来描述地震动衰减规律的,都是按宏观震中计算其震中距。

2 宏观震中与微观震中之差距

使用过正规地震目录的读者都清楚,宏观震中与微观震中之间是存在差距的。尤其是灾害性大地震,这种差异就更加令人难忘。为了展示其差距,根据最新版本的《中国近代地震目录》(国家地震局震害防御司,1999)和《中国地震年鉴》(中国地震年鉴编辑部,1991—2006)所记载的有关参数和等震线分布图,将我国境内1912年以来 $M_S \geq 7$ 级地震的情况列于表1。表1中还列出了宏观震中所在极震区的烈度值,同时也列出了微观震中所在的烈度区,以及二者相差的距离等。

需要说明的是,表1中最后一行给出的2008年5月12日四川龙门山(即汶川)8.0级地震情况,其宏观震中系作者根据汶川地震灾害区地震烈度分布图(国家汶川地震专家委员会,2008)中X度区的中心测定的(31.6°N , 104.2°E)。虽然在该烈度分布图中绘有2个XI度区,似乎有2个宏观震中,且有李志强等(2008)认为存在一组宏观震中。但作者考虑到与数千年历史地震震中保持一致性,参照经过仔细调查的地震处理办法,1次大地震只定1个宏观震中。如1976年5月发生在云南龙陵地区的7.3级和7.4级地震,尽管都绘有2个极震区(陈立德等,1979),在1983年版的《中国地震目录》和1999年版的《中国近代地震目录》中,也是1次地震定1个宏观震中。再有1668年山东郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震、1920年宁夏海原8.5级地震、1927年甘肃古浪8级地震和1931年新疆富蕴8级地震等,在其震源区内都存在不同活动性的断层分段,却都是1次地震定1个宏观震中。因此,对于2008年5月12日四川龙门山8.0级地震,只定1个宏观震中为妥。

表 1 中国境内 $M_S \geq 7$ 级地震宏观震中与微观震中之差异Table 1 Difference between the macro- and the micro-epicenter of $M_S \geq 7$ earthquakes in China

序号	地震时间 (年-月-日)	地震地区	震级 (M_S)	宏观震中 (北纬, 东经)	微观震中 (北纬, 东经)	极震区 烈度 (I)	微观震 中烈度 (I)	微观震中与宏观 震中之差距 (km)	资料来源
1	1915.12.03	西藏桑日	7	29°14', 92°13'	29.5°, 91.5°	IX	VII	约 40	中国近代地震目录
2	1918.02.13	广东南澳	7.3	23.5°, 117.2°	23.2°, 117.4°	X		约 40	同上
3	1920.12.16	宁夏海原	8 $\frac{1}{2}$	36.5°, 105.7°	36.7°, 104.9°	XII	IX	约 70	同上
4	1923.03.24	四川炉霍	7.3	31.2°, 100.8°	31.5°, 101.0°	X	<VII	约 40	同上
5	1925.03.16	云南大理	7	25.7°, 100.2°	25.7°, 100.4°	IX ⁺	VIII	约 20	同上
6	1927.05.23	甘肃古浪	8	37.5°, 102.7°	37.7°, 102.2°	XI	IX	约 60	同上
7	1931.08.11	新疆富蕴	8	46.8°, 89.9°	47.1°, 89.8°	XI	IX	约 35	同上
8	1932.12.25	甘肃昌马	7.6	39.7°, 97.0°	39.7°, 96.7°	X	IX	约 30	同上
9	1933.08.25	四川迭溪	7 $\frac{1}{2}$	32.0°, 103.7°	31.9°, 103.4°	X	VIII	约 30	同上
10	1937.08.01	山东菏泽	7	35.2°, 115.3°	35.4°, 115.1°	IX	VII	约 25	同上
11	1941.12.26	云南澜沧	7	22.1°, 100.1°	22.7°, 99.9°	VIII	VI	约 70	同上
12	1949.02.24	新疆库车	7 $\frac{1}{4}$	41.9°, 83.2°	42.0°, 84.0°	IX	VII	约 70	同上
13	1950.08.15	西藏墨脱	8.6	28.5°, 96.0°	28.4°, 96.7°	XII	X	约 70	同上
14	1952.08.18	西藏当雄	7 $\frac{1}{2}$	30°38', 91°26'	31.0°, 91.5°	X	IX	约 50	同上
15	1954.02.11	甘肃山丹	7 $\frac{1}{4}$	38.9°, 101.2°	39.0°, 101.3°	X	VIII	约 15	同上
16	1955.04.14	四川康定	7 $\frac{1}{2}$	30°00', 101°54'	30.0°, 101.8°	X	IX	<10	同上
17	1966.03.22	河北邢台	7.2	37°32', 115°03'	37.5°, 115.1°	X	IX	<10	同上
18	1970.01.05	云南通海	7.8	24.0°, 102.7°	24°12', 102°41'	X	VIII	约 20	同上
19	1973.02.06	四川炉霍	7.6	31°29', 100°32'	31.3°, 100.7°	X	IX	约 40	同上
20	1974.05.11	云南昭通	7.1	28.2°, 103.9°	28.2°, 104.1°	IX	VII	约 20	同上
21	1975.02.04	辽宁海城	7.3	40.7°, 122.7°	40.7°, 122.8°	IX	IX	<10	同上
22	1976.05.29	云南龙陵	7.3	24°37', 98°50'	24.5°, 99.0°	IX	VII	约 25	同上
23	1976.05.29	云南龙陵	7.4	24°27', 98°52'	24.6°, 98.7°	IX	VI	约 25	同上
24	1976.07.28	河北唐山	7.8	39.6°, 118.2°	39.4°, 118.0°	XI	VIII	约 30	同上
25	1976.08.16	四川松潘	7.2	32°37', 104°08'	32.6°, 104.1°	IX	VIII	<10	同上
26	1985.08.23	新疆乌恰	7.1	39°31', 75°27'	39.53°, 75.32°	IX	VIII	约 10	同上
27	1988.11.06	云南澜沧	7.4	22°55', 99°45'	22.92°, 99.79°	IX	VIII	<10	同上
28	1988.11.06	云南耿马	7.2	23°22', 99°30'	23.16°, 99.55°	X	VIII	约 25	同上
29	1996.02.03	云南丽江	7.0	27°05', 100°16'	27°18', 100°13'	IX	IX	约 25	中国地震年鉴
30	2001.11.14	昆仑山口	8.1	35°46', 93°22'	35.97°, 90.59°	XI		约 240	同上
31	2008.05.12	四川龙门山	8.0	31.6°, 104.2°	31.0°, 103.4°	XI	XI	约 110	汶川地震灾区地震- 地质灾害图集

由表 1 所列数据说明, 在 31 次 $M_{S7-8.6}$ 级地震中, 只有个别地震 (如 1975 年 2 月 5 日辽宁海城地震和 1996 年 2 月 3 日云南丽江地震) 的微观震中在极震区内, 绝大多数地震的微观震中都不在极震区内, 有的甚至比极震区低 3 度。微观震中同宏观震中的差距, 少则数公里, 多则数十公里至上百公里。另一方面, 震级较大的地震, 微观震中与宏观震中的差距也越明显; 对于 7 级左右的地震, 近年来微观震中与宏观震中的差距有减小的趋势。

这种微观震中与宏观震中的显著差距, 不仅仅存在于 7 级以上的大地震参数中, 7 级以下的地震也同样存在。比如 1969 年 7 月 26 日发生在广东阳江的 6.4 级地震, 1983 年版的《中国地震目录》(P659—661) 和 1999 年版的《中国近代地震目录》(P222—223) 均记载了同样的参数: 极震区烈度为 VIII 度; 宏观震中为 $21^{\circ}45'N, 111^{\circ}45'E$; 微观震中为 $22^{\circ}10'N, 111^{\circ}48'E$ 。而且微观震中的精度标为 I 类 (误差 $\leq 10\text{km}$), 微观震中却落在该地震烈度分布图的 VI 度区之外的阳春附近, 与宏观震中的差距达 60 余公里。其差距之显著, 已远超过震源区范围, 同样令使用者十分关注。

3 宏观震中的用途

宏观震中与微观震中的概念及意义不同, 在地理位置上又存在差距, 在其使用中应充分考虑这种差别。在阐述其用途之前, 先分析存在差别的主要缘由, 以便区别对待之。

正如本文引言所提及, 由于震源区破裂过程的多样性, 导致微观震中与宏观震中之间存在差距。地震震源区的破裂过程, 尤其特大地震的震源区破裂过程, 绝非瞬间完成, 而是从初始破裂起, 以小于等于地震横波的速度向外扩展, 直至整个震源区的破裂。比如 2004 年底发生在印尼苏门达腊近海的 9.1 级地震, 震源区的断裂带约 $1200\text{km} \times 200\text{km}$, 破裂错动过程用了近 10 分钟 (日本地震学会地震预测研讨委员会, 2009)。在孕育大地震的巨大震源区内, 决定初始破裂的本构关系具有为人难以预料的空间不均匀性。所以, 只有个别从震源区中心开始的对称破裂型地震, 微观震中与宏观震中才比较一致。比如 1975 年 2 月 5 日发生在辽宁海城的 7.3 级地震, 震源区发育有北西西和北北东走向的共轭构造, 前震和主震的初始破裂都在震源区中心的共轭点附近, 其微观震中与宏观震中相距很近 (表 1)。1976 年 7 月 28 日发生在河北唐山的 7.8 级地震, 震源区破裂过程为双侧非对称型, 往东北方向扩展了 70km, 往南西方向扩展了 45km (张之立等, 1980), 其微观震中与宏观震中之间呈现出差距 (表 1)。2001 年 11 月 14 日发生在昆仑山口西的 8.1 级地震, 震源区破裂过程也是双侧非对称型, 往西扩展了 90km, 往东却扩展了 350km (许力生等, 2004), 其微观震中与宏观震中之间差距显著 (表 1)。2008 年 5 月 12 日发生在四川龙门山的 8.0 级地震, 初始破裂位于汶川县映秀镇附近, 沿北东向经北川直至青川附近扩展, 震源区地震断层长度超过 300km, 南段以逆冲为主, 北段以右旋走滑为主 (陈运泰等, 2008), 其微观震中与宏观震中的差距达 110km (表 1)。

另一方面, 观测精度也是导致宏观震中与微观震中之间出现差距的原因。宏观震中的精度决定于极震区或最内等震线的准确程度及范围大小。多数情况下, 凡有 2 条以上完整等震线的地震, 其宏观震中的精度在几公里到十几公里。微观震中的精度则取决于观测数据的质量、地球速度模型的逼真程度和测定方法。早期的观测数据少, 质量有限, 所定震中的精度也不高。我国从上世纪 70 年代起大力发展区域地震台网, 90 年代后逐渐更新扩

建为实时传输的数字地震台网, 观测数据的质量大为提高, 地球速度模型和测定方法也有改进, 所得震中的精度有显著提高。需要指出的是, 地震目录中有关微观震中的精度分类, 是依据交切图的分散情况或修定震中计算程序中的均方差三倍来分的 (顾功叙, 1983)。目前最好情况下的震中定位精度可达 1km 左右 (黄媛等, 2008; 朱艾澜等, 2008)。但在上世纪 60 年代之前的定位精度就要差很多了。因此, 在有详细调查资料的情况下, 宏观震中更容易为人们所认可。比如 1966 年 3 月 8 日发生在河北邢台的 6.8 级地震和 1967 年 3 月 27 日发生在河北河间的 6.3 级地震, 在 1983 年版的《中国地震目录》(P555、P619) 和 1999 年版的《中国近代地震目录》(P177、P205) 中, 都只列有宏观震中参数, 却未列微观震中参数。

鉴于以上所述, 可对宏观震中的用途概括如下:

(1) 抗震救灾需要宏观震中。在灾害性地震发生后, 尽快地圈定宏观震中和极震区范围, 是合理布署抗震救灾工作的必要条件。仅有微观震中是不够的。

(2) 震害预测需要宏观震中。震害预测的基础是对区域未来地震危险性的估计, 即地震危险区划分结果。这种危险区实质上是指未来可能发生地震的宏观震中集合范围, 而绝非其微观震中 (初始破裂) 范围。

(3) 地震地质研究需要宏观震中。这不仅是对那些发震构造直接出露地表的大地震需要, 对于发震构造不直接出露地表的中强地震也需要。如前面提到的 1969 年 7 月 26 日发生在广东阳江的 6.4 级地震, 就是按宏观震中所在阳边海湾研究其地质构造特性, 无人按 60km 外的微观震中去研究。

(4) 工程地震研究需要宏观震中。目前, 在工程地震研究运用的地震危险性分析模型中, 其潜在震源区是指未来可能发生地震的宏观震中集合范围; 地震动衰减关系也是用宏观震中确定的震中距来表述的。

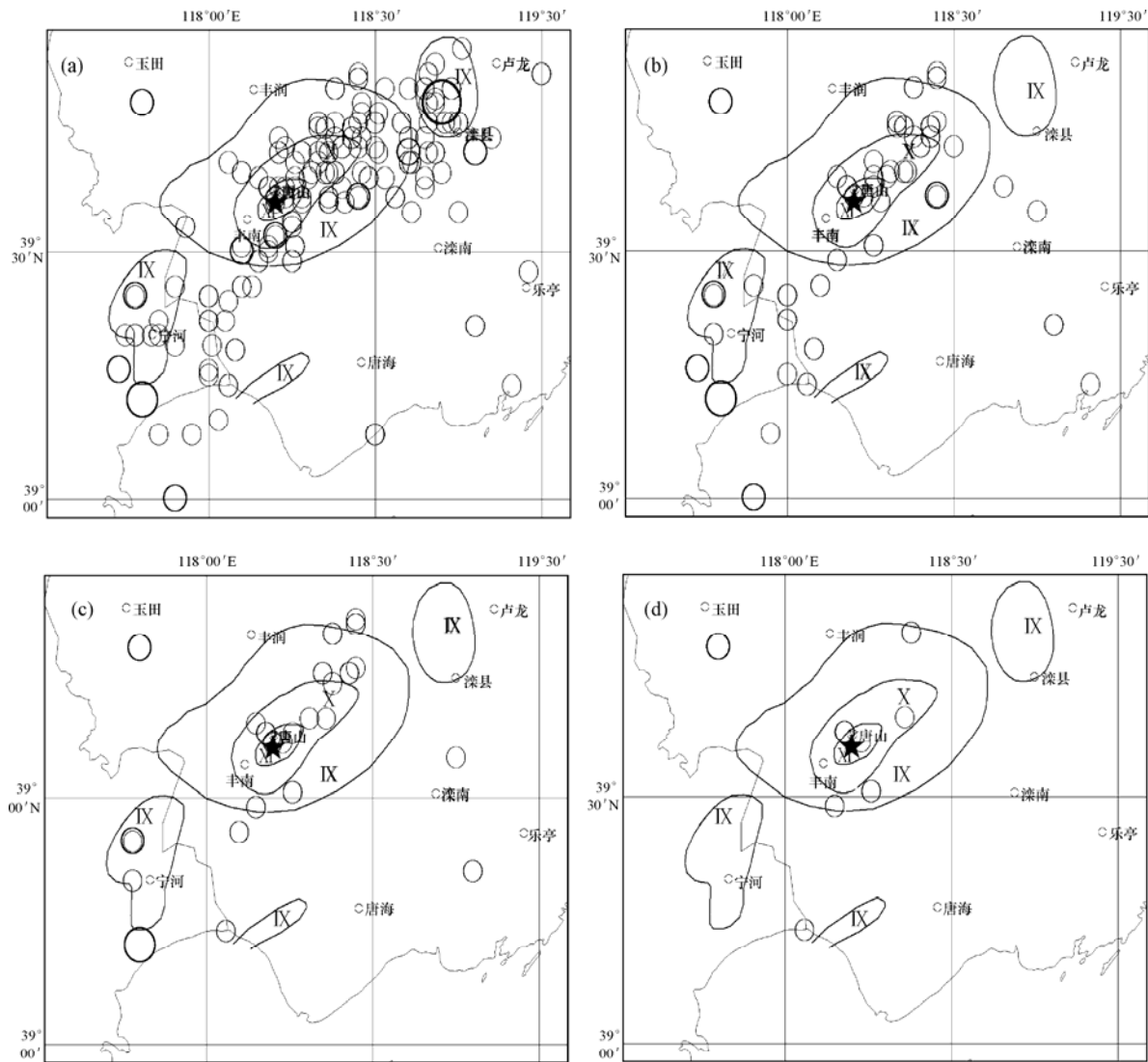
(5) 面向社会的震中分布图需用宏观震中。宏观震中的概念已深入人心。在历次出版发行的《中国地震震中分布图》中, 凡是有宏观震中的地震, 都选用宏观震中参数; 只有发生在边远地区或海域内没有宏观震中的地震, 以及仪器记录到的中小地震, 才使用微观震中参数。这不仅尽可能地表述了地震影响破坏的中心区, 也保持了数千年来地震资料运用的一致性。

当然, 现代地震学观测技术可以在大地震发生后数分钟内初定出微观震中来, 地震快报还是要使用微观震中的, 而且, 在研究震源破裂过程时, 也必然要用微观震中参数。

4 快速估定方法

按传统的办法, 需要经过数天艰苦细致的现场调查工作, 才可能确定极震区和宏观震中。为了满足震后抗震救灾的需求, 尤其像 2008 年 5 月 12 日四川龙门山特大地震那样, 造成大面积通讯和交通中断的情况下, 更需要探索其快速估定重灾区 and 宏观震中的方法。胥广银等 (2008) 已探讨过基于发震构造和震源机制结果, 快速确定破坏范围与极震区的方法。本文拟以余震分布反映的震源区范围来估定极震区和宏观震中。通常认为, 主震释放震源区内的绝大部分应变能, 余震则继续释放其剩余的应变能。余震的空间分布范围, 可以大致反映震源区范围。而随着震源区的应力调整与破裂扩展, 大震后的余震分布也有向外扩展的现象。因此, 只有震后 1—3 天内的余震分布更接近主震的震源区范围。比如 1976 年河北唐山 7.8 级

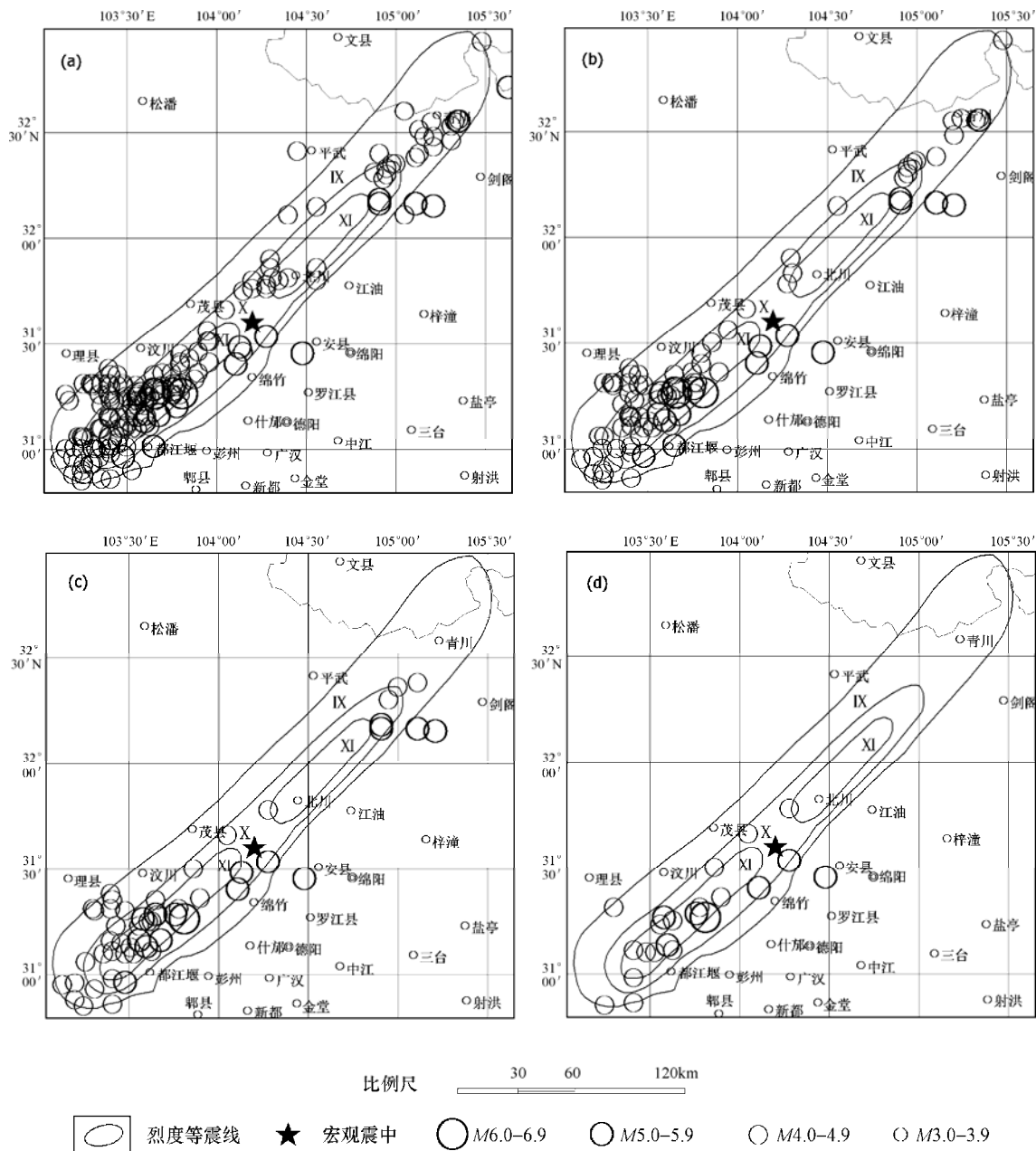
地震后,第1天余震区的总长度达110km,约为最大长轴的76%;第2天达130km,约为最大长轴的90%;以后的扩展速度递减(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组,1982)。为了揭示震后不同时间段内余震分布同主震极震区的关系,下面以1976年唐山7.8级地震和2008年龙门山8.0级地震的余震分布为例(图1、图2),予以探讨。图中还标示了X度和IX区度范围。



(a)震后24小时余震分布;(b)震后8小时余震分布;(c)震后4小时余震分布;(d)震后2小时余震分布

图1 1976年唐山7.8级地震后不同时间段的余震震中分布图

Fig. 1 Aftershock distribution of 1976 Tangshan $M_{5.7.8}$ earthquake in accordance with different time periods



(a)震后24小时余震分布;(b)震后8小时余震分布;(c)震后4小时余震分布;(d)震后2小时余震分布

图 2 2008 年龙门山 8.0 级地震后不同时间段的余震震中分布图

Fig. 2 Aftershock distribution of 2008 Wenchuan $M_S8.0$ earthquake in accordance with different time periods

由图 1 和图 2 所示的结果说明, 若以大震后 24 小时的余震分布范围来代表主震的震源区范围, 则震源区范围比极震区要大许多, 与其 IX 度区的范围大致相当, 且宏观震中也大体在余震分布区的中心地带; 大震后 2 小时的余震震中数目有限, 但都在宏观震中和极震区附近; 大震后 4 小时或 8 小时的余震震中分布已较为显著地体现出震源区的范围来。

需要注意的是: ①大地震后的余震非常之多, 以至于在区域地震台站的记录图中难以分清各次地震的震相来, 只有少数余震能测定其参数; ②大地震数小时后, 余震频次减少, 记

录图的分辨率提高,余震参数的测定效率也就高了;③因地震速报参数测定中所使用的观测数据质量和地震波速度模型精度都有限,余震震中分布较离散,甚至有一定的系统误差是在所难免。通过后期的数据校核和测定方法的改进,可以进一步提高主震和余震的定位精度(黄媛等 2008;朱艾澜等,2008)。

在 1975 年海城 7.3 级地震的现场工作中,作者曾用临时台网各台站最先记录到余震的最小震源距与最大震源距,求取公共范围作为余震震源区的初估值。这种方法虽然较粗,但简便易行,不必等有足够数量的余震震中参数,就能快捷地估定余震震源区的大致范围。

5 结论

根据本文前述内容,可以得出如下结论:

(1) 宏观震中是地震动和地震影响最强烈地区的中心,也代表了震源区和地震波能量辐射的中心。

(2) 宏观震中与微观震中不仅是概念上的差别,在实际观测结果的地震目录中也存在不能忽视的差距。

(3) 宏观震中在抗震救灾、震害预测、地震地质和工程地震研究中的重要作用,是无可替代的。

(4) 在造成大面积通讯和交通中断的灾害性地震发生后,可根据余震分布来快速估定重灾区范围和宏观震中,将有助于提高抗震救灾工作的效率。

参考文献

- 陈立德,赵维城等,1979. 一九七六年龙陵地震. 北京:地震出版社, P81—85.
- 陈运泰,许力生等,2008. 5月12日汶川特大地震震源特性分析报告. <http://www.csi.ac.cn/Sichuan/chenyuntai.pdf>.
- 顾功叙,1983. 中国地震目录. 北京:科学出版社.
- 国家地震局震害防御司,1995. 中国历史强震目录. 北京:地震出版社.
- 国家地震局震害防御司,1999. 中国近代地震目录. 北京:科学技术出版社.
- 国家汶川地震专家委员会,2008. 汶川地震灾区地震-地质灾害图集. 北京:中国地图出版社.
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组,1982. 一九七六年唐山地震. 北京:地震出版社, 53—55.
- 黄媛,吴建平,2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震震序列重新定位研究. 中国科学 D 辑:地球科学, **38** (10): 1242—1249.
- 李善邦,1981. 中国地震. 北京:地震出版社, P6—8, 138—139.
- 李志强,袁一凡等,2008. 对汶川地震宏观震中和极震区的认识. 地震地质, **30** (3), 768—777.
- 日本地震学会地震预测研讨委员会,2009. 地震预测的科学(一). 世界地震译丛, (1): 66—67.
- 许力生,陈运泰,2004. 从全球长周期波形资料反演 2001 年 11 月 14 日昆仑山口地震时空破裂过程. 中国科学 D 辑:地球科学, **34** (3): 256—264.
- 胥广银,高孟潭,俞言祥,2008. 破坏性地震破坏范围的快速估计. 国际地震态, (7): 20—23.
- 张之立,李钦祖等,1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. 地震学报, **2** (2): 111—129.
- 朱艾澜,徐锡伟等,2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析. 地震地质, **30** (3): 759—767.

中国地震年鉴编辑部，1991—2006. 中国地震年鉴. 北京：地震出版社.

Discussion of the Macro-epicenter and the Method of Rapid Estimation

Yan Jiaquan, Li Jinchun, Yu Yanxiang, Pan Hua and Hao Yuqin

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

Abstract There is not only a conceptual difference between the macro- and the micro-epicenter epicenter, but also a big gap in the observed results. The macro-epicenter represents the center of the source area and seismic energy radiation. The macro-epicenter itself plays an irreplaceable and important role in disaster relief, earthquake damage predictions, the research of earthquake geology and engineering. Following the destructive earthquake, aftershock distribution can be used for assessing the extent of the hard-hit areas macro-epicenter, which would be helpful to improve the efficiency of earthquake relief.

Key words: The macro-epicenter; The meizoseismal area; The micro-epicenter; Incipient rupture