

# 基于震源机制的地震区划与地震预测方法讨论<sup>\*</sup>

郭增建, 郭安宁

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 主要讨论了震源机制与烈度区划的历史及相关问题, 震源一致性与前震鉴别的关系, 震源断层破裂错动产生的科里奥利力效应和余震强度的关系及预测方法。

**关键词:** 震源机制; 地震烈度区划; 前震鉴别; 科里奥利力余震效应

**中图分类号:** P315.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)04-0509-05

## 0 引言

震源机制是地震发生后地震台网产出的一个常规结果, 基本每次地震后都作为地震产出之一而及时通过网络发布(胡幸平等, 2008; 郭祥云等, 2010; 李晓峰等, 2013; 郭安宁等, 2016)。大地震发生后, 地震台网会相继给出震源机制与地震破裂过程(姚家骏, 2015; 李春燕, 徐辉, 2015)。

对一些大地震发生后延续几十年的余震序列的研究现今仍在继续, 虽然不是对未来将发生强震的预测, 但是作为基础研究目前还在不断进行着资料积累与研究, 其作用与意义还是需要更深的挖掘(张宏志等, 2008; 李轶群, 王健, 2008)。

震源机制主要是研究震后问题的, 但也可用于超长期地震预测(地震烈度区划)和某些情况下的短临预测。本文在介绍我们已有研究的基础上, 结合不同期限要求的地震预测方法, 对震源机制对预报科学的作用做进一步的讨论。

本文基于郭增建和姜秀娥(1965)的研究成果, 讨论了震源机制与烈度区划及地震预测的关系, 阐述了将震源机制用于烈度区划的历史、首次建立震级-断层长度公式的过程及存在的问题。以及1974年郭增建以中国震源机制的结果为依据, 划分的中国大陆块体在后期大地震发生的验证。之后介绍了郭增建等(1973)提出的组合模式为理论指导的基础下, 用震源机制一致性鉴别前震群的方法及问题所在, 讨论了用大地震发生时震源断层破裂错动产生科里奥利力与余震

强度的关系。

在综合历史以及其他研究者的基础上, 对震源机制与预测的关系做了进一步的讨论, 以期能对超长时间大地震、临震以及强余震预报起到一定的参考作用。

## 1 震源机制应用于超长期地震预测(烈度区划)回顾

郭增建和姜秀娥(1965)根据48个强震的震源机制资料(绝大部分是P波初动解), 通过研究发现中国的强震在多数以走滑错动为主, 建议在地震烈度区划中除考虑垂直运动的地质指标外, 还应考虑水平运动的地质迹象。之所以提出这一点是因为1956年编制中国第一代地震烈度区划图只考虑了垂直运动的地质指标。目前在烈度区划中考虑水平运动指标已成共识, 例如第五代中国地震动参数区划图的说明书中就有类似论述。

1974年, 在为地震烈度区划和开展地震预测而划分中国发震地壳块体交界带工作中曾应用了震源机制资料。对此, 闫志德和郭履灿(1983)指出: 1974年郭增建把我国地壳划分为9个巨块, 以七级以上大地震的分布、大震极震区的方向、大断裂延伸的方向以及由地震波得到的震源错动方向为依据来划分巨块交界, 并划出青藏高原复杂区块又分南北两块。闫志德和郭履灿(1983)进而对北块作了有价值的研究和讨论。值得回顾的是1974年划分出来的青藏高原北块的西南边界西段和东南边界分别于2001年和2008年发生了昆仑山口西和汶川特大地震。在已公布的第五代地

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-06-08.

震烈度区划图的说明书中,也有类似观点的论述。

1965 年由于国家三线备战对地震烈度评定的需求,郭增建等基于大震发生时在地表形成的断层错动资料,建立了震级与震源断层长度  $L$  以及与错动幅度  $D$  之间的公式。因对同类震级地震取其地表断层长度和错动幅度最大者建立公式,故可认为它们能代表震源地方的断层长度和错动幅度(郭增建等,1973)。断裂长度  $L$  与震级  $M_s$  之间的关系:

$$M_s = 3.3 + 2.1 \lg L \quad (1)$$

该公式曾于 1965 年在甘肃河西走廊的地震烈度评定中用于由构造分段长度推求未来相应的最大震级。

震级与破裂错动幅度的关系是:

$$\lg D = 0.52 M_s - 1.25 \quad (2)$$

式中:  $D$  为地震时断层破裂错动的幅度,单位 cm。

由(2)式可知,如果知道 2 个地壳块体相对运动的速度或一个大断层两盘相对运动的速度,则可求得完成这一错动幅度所需的时间,进而可大致评估相应于一定幅度的地震其孕育所需时间。一般在广义的震源机制参数中也包括震源断层长度和错动幅度。但上述的公式是由宏观资料得到而不是由地震波得到。

这个当时由很少数据资料建立起来的公式,据文献检索,除在全国为首次外,在国际上也是最早进行的研究之一。把宏观地质构造与地震的震级建立了定量的关系在国内也是首次。另外这个公式在近年西北地区进行的地震安全性评价时,较为适用。

## 2 利用震源机制鉴定前震群

郭增建等(1973)提出了震源是由应力积累单元和两端的应力调整单元组合而成的模式,称组合模式。这个模式的特点是补充了早年美国地震学家 Reid 的弹性回跳理论中的缺陷,即无震源端部条件的问题。因为端部条件与大震发生时震源断层传播的止裂有关。

组合模式的震源是由沿两块体的交界带或断裂带上摩擦阻力较大的地段孕育的,此段即为应力积累单元,在此摩擦阻力较大地段其两端断层

的摩擦阻力较小,可产生蠕滑或进行塑性变形。对于地震预报来说,郭增建等(1973)讨论了应力积累单元地段中临震前如发生小震群所表现出的特征。由于积累单元发生小震群是该单元紧临发生大震前能量预释放的指标,因此它就是前震群。这是用小震在主震震源体中的位置就可判断的。但在实际中我们并不知道小震所在的主震震源体背景,因而不能用主震震源模式判断小震群是否是前震。该情况只能用这个小震群的本身特征去鉴别它后面是否会跟随大震,即判别它是否为“前震”。

郭增建等(1973)共讨论了 4 个与预测大震有关的测震学指标,最后一个就是用震源机制的一致性鉴别前震群。下面作具体介绍。

在中、短、临时间尺度的地震预测中,人们最感兴趣的是大震孕育到晚期和临震前的小震活动特点。

所谓大震孕育到晚期就是震源孕育的最后时段,也是震源应力积累较高的时段。在这个时段中,一方面区域构造力继续给震源施加应力,另一方面调整单元还继续把区域构造力加给自己的应力积累单元调整转移(通过蠕滑转移,这是组合模式的特点)。这两种应力的叠加,使主震震源的两断层盘中的应力分布较高且不均匀。在这个不均匀应力场中,那些较浅的、走向不一的易滑断层可能发生小震,另外震源的调整单元断层段上也可能伴有小震。这两方面小震大致在同一时段内发生,它们的震源机制是不一致的。这是主震震源孕育到晚期的特点。

随后进入临近大震发生时段。此时主震震源断层面上介质开始稍有塑性变形(相当于摩擦阻力降低,这是国外学者用模拟实验证明过的),则主震震源的两个断层盘就会有相对运动。这个相对运动就是大震前的预位移,这个预位移会使主震震源断层盘内的应力减小,致使盘内易滑面的小震不再发生。随后小震单独集中在主震震源断层带中发生。由于它们的环境和受力相似,因而震源机制也将相似。由于它们与随后的主震都是同一断层带上的错动,所以其震源机制与主震也相似。

综上所述,孕震晚期阶段向大震将要发生的临震阶段过渡,表现在小震震源机制上,就是由“不一致”向“一致”过渡。前者相应于主震震源

区最后积累应力程度，后者相应于主震积累能量的预释放，预释放是在积累高应力的状态下发生的。由于我们所讨论的小震震源机制一致性是在临大震之前发生的，所以形成震源机制一致性就是大震发生前该前震的特点。但是，由于当时无实际震例相配，所以在“机制一致性”之前加了“可能”二字。

金严等（1976）对1975年海城7.3级地震的前震群震源机制进行了研究，发现震源机制是一致的（通过 $\bar{P}$ 和 $\bar{S}$ 垂直分量最大振幅之比的一致性进行推论，它等效于震源机制的一致性），并对余震进行了研究，其震源机制是不一致的，又对国内某些震群进行了研究，也发现震源机制的一致性较差。

金严等（1976）还研究了海城大震前44天在本溪发生的水库震群，其中有一个较强的4.8级地震，在这次地震前小震的震源机制相似，但这次4.8级地震后，小震的震源机制就不一致了。如这一结果1975年得出，可判定本溪不会再发生更大的地震，于是把注意力转向辽宁其他地区。

随后几十年来我国学者也用与金严等（1976）类似的研究思路，在全国不同地区展开了研究，发现震源机制的一致性指标确实在紧临大震前存在。当然也有其复杂的一面，有的主震前符合小震机制一致性指标的地区范围较大，未来大震位置不好判断。有的发现符合一致性指标出现后要很长时间才发生主震，这又对主震的时间预测带来不确定性。对此还需进一步从震源物理方面进行研究，近年来还不断在这个方面进行深入的研究（荣代璐，2014；曹凤娟等，2016；高朝军等，2016）。

### 3 主震震源机制的科里奥利力之余震效应

郭增建等（1992）提出了用主震断层盘错动的科里奥利力效应（以下简称科氏力效应）来速判强余震的方法，随后对此又作了大量的研究工作。在技术处理步骤上提出了用吴尔富网求解科氏力的方法（郭安宁，陈家超，2000）。科氏力效应可归纳为以下2条原则。

（1）如果科氏力使断层两盘互相挤压，则不利于主震能量彻底释放，后面最大余震震级大，

它与主震震级 $M_{\text{主}}$ 之差为：

$$M_{\text{主}} - M_{\text{余}} \leq 1 \quad (3)$$

（2）如果科氏力使断层两盘互相拉离，则有利于主震能量的彻底释放，后面最大余震震级小，它与主震震级之差为：

$$M_{\text{主}} - M_{\text{余}} \geq 1 \quad (4)$$

式（3）、（4）中都有一个等号，但含义是不同的，对断层两盘互相挤压的情况来说，最强余震的震级与主震震级差最大是1级，对于断层两盘互相拉离的情况下震级之差最小是等于1级。

以上观点曾得到国内多位学者的支持（吕坚等，2003；陈荣华，刘杰，2005），但也有学者提出了不同意见（盛书中等，2009），他们认为科氏力是存在的，但是量值太小，不足以影响余震的强度。笔者认为大震是断层两盘之间的剪应力稍超过断层面上摩擦力时，就发生地震错动了，即断层两盘是在稍超过互相平衡的情况下发生错动的，因之很小的科氏力仍可影响主震震源区释放能量的程度，从而影响最大余震强度。

由于科氏力余震效应的原理是比较可靠的，判断的指标简单清晰，有利于推广应用。中国大陆除南北走向的纯走滑错动以及东西走向的纯倾滑错动外（这两类都很少），其余类型的震源错动一般不会出现科氏力为零的情况。所以绝大多数地震发生后，其科氏力在震源断层面法线方向上就有分量（不论其量值大小）都可应用（3）（4）式进行判断。实际上，盛书中等（2009）最有说服力的挤压型震源科氏力的统计，断层面的科氏力法向分力在小值和大值时都有对应地震的实例，这与我们速判时不管科氏力在断层面法线上的量值，皆认为都可影响余震的强度这一点是不相悖的。这样科氏力余震效应的判断就可大大简化为以下6条，统计表明与实际相符率可达80%以上。

（1）对于右旋走滑型震源，其科氏力使震源两断层盘互相挤压，最强余震与主震震级差满足公式（3），也就是余震强度较大。

（2）对于左旋走滑型震源，其科氏力使震源断层两盘互相拉离，最强余震震级与主震震级差满足公式（4），即最强余震震级较小。

（3）对于逆断层型震源来说，如上盘错动方

向朝过震源子午线东侧（过震源子午线就是与震中区铅直线夹  $90^\circ - \varphi$  的向北的那条直线， $\varphi$  是震中的纬度角），则最强余震震级与主震震级差满足公式（4），即强余震震级小。如 2008 年 5 月 12 日汶川大地震就是上盘错动方向过震源子午线东侧。

（4）对于逆断层型震源来说，如果上盘错动方向过震源子午线西侧，则最强余震震级与主震震级差满足公式（3），即强余震震级大。如 1999 年 9 月 21 日台湾集集地震就是上盘错动方向过震源子午线西侧。

（5）对于正断层型震源来说，其判据与上述逆断层情况相同。

（6）如果是走滑与倾滑混合的震源类型，则各按它们单纯情况判断后再加起来作平均。

## 4 结语

本文总结了震源机制在地震预测中的意义。从处理方法上而言，震源机制处理多采用 CAP 方法（赵凌云等，2010，2014；郑建常等，2015），也有用矩张量方法进行的研究，但它们与早期用 P 波初动求解震源机制是一脉相承的（刘瑞丰等，1999；王卫东，李少睿，1999；许康生，李若，2004；林向东等，2013；陈继锋，2015；吴微微等，2015）。

关于震源机制与地震预报，有学者有不同的观点。Aki（1972）在《构造物理》14 卷 3~4 期《强震前兆专辑》中指出：“在地震学中，地震机制的研究大多属于地震发生后的现象。所以除了更好的理解震后现象可能帮助说明地震前我们所能预料到的情况外，这类研究对本次会议讨论强震前兆将无多大直接贡献”。我们与安艺敬一的观点部分不悖，但震源机制的研究结果也有应用于地震预测的一面，要求从广义角度来研究震源机制与地震的联系。

震源机制还可以间接地为震灾防御领域服务，如震源机制解来推断发震构造，以及可以用小震震源机制来推断现代的活动断裂（彭利媚，魏娅玲，2016）。

震源机制与强地面运动之间也有关联（孙丽娜等，2015）。综上所述，震源机制是基于震源的物理过程，地震学家能根据一个特定区域内发生的中小地震的震源机制判断未来大地震的发生情

况，或根据构造与地质情况推断出未来可能发生大地震的震源过程，其间有一定的相似性，这些结果就可以在震灾防御的诸多方面起到一定的作用。

## 参考文献：

- 曹凤娟,张博,杨牧萍,等. 2016. 营口—海城地区震群的震源机制一致性特征[J]. 地震工程学报,38(1):4-11.
- 陈继锋. 2015. 2012 年 5 月 3 日甘肃金塔  $M_s 5.4$  地震矩张量反演[J]. 地震工程学报,37(4):1124-1128.
- 陈荣华,刘杰. 2005. 科里奥利力效应与昆仑山口西 8.1 级地震后两侧地震活动的可能关系[J]. 地震,25(3):43-48.
- 高朝军,张志鹏,夏爱国. 2016. 2012 年新疆新源、和静交界  $M_s 6.6$  地震前后震源机制解一致性参数变化特征[J]. 地震工程学报,38(1):19-25.
- 郭安宁,陈家超. 2000. 中国大震问题[M]. 北京:地震出版社.
- 郭安宁,李鑫,白雪见,等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震及相关参数[J]. 地震工程学报,38(1):150-158.
- 郭祥云,陈学忠,李艳娥,等. 2010. 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震与部分余震的震源机制解[J]. 地震,30(1):50-60.
- 郭增建,姜秀娥. 1965. 用震源机制资料讨论中国境内的现代构造运动[C]//中国地球物理学会 1963 年年会论文集. 北京:科学出版社.
- 郭增建,秦宝燕,徐文耀,等. 1973. 震源孕育模式的初步讨论[J]. 地球物理学报,26(1):43-48.
- 郭增建,秦保燕,李革平. 1992. 未来灾害学[M]. 北京:地震出版社.
- 胡幸平,余春泉,陶开,等. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报,61(4):1711-1718.
- 金严,赵毅,陈隅,等. 1976. 辽宁海城地震前震的位错特征[J]. 地球物理学报,19(3):156-164.
- 李春燕,徐辉. 2015. 2014 年阿拉善块体西缘两次中强地震震源机制解[J]. 地震工程学报,37(4):1129-1131.
- 李晓峰,裴惠娟,徐辉,等. 2013. 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震震源机制解[J]. 地震工程学报,35(3):459-462.
- 李铁群,王健. 2008. 唐山余震区中小地震震源机制解分区特征的初步研究[J]. 中国地震,24(2):150-158.
- 林向东,葛洪魁,徐平,等. 2013. 近场全波形反演:芦山 7.0 级地震及余震矩张量解[J]. 地球物理学报,56(12):4037-4047.
- 刘瑞丰,陈运泰,周公威,等. 1999. 地震矩张量反演在地震快速反应中的应用[J]. 地震学报,(2):3-10.
- 吕坚,高建华,刘吉夫,等. 2003. 有关科里奥利力效应与昆仑山口西 8.1 级地震余震活动趋势的讨论[J]. 地震学报,24(4):432-440.
- 彭利媚,魏娅玲. 2016. 由  $M_L \geq 4.0$  地震震源机制解推断四川理县—黑水断裂构造特征[J]. 华南地震,36(3):9-16.
- 荣代谔. 2014. 研究中强地震前中小地震震源机制变化的一种方法[J]. 地震工程学报,36(2):286-291.
- 盛书中,万永革,田力. 2009. 科里奥利力对断层作用的统计研究[J]. 中国地震,25(3):256-264.
- 孙丽娜,王晓山,杨家亮,等. 2015. 震源机制类型对近场峰值加速度

- (PGA)分布的影响——以唐山和汶川震区为例[J]. 地震工程学报, 37(1): 159–167.
- 王卫东, 李少睿. 1999. 利用地震矩张量反演阿尔金断裂带现今运动学特征[J]. 地震地质, 21(2): 76–80.
- 吴微微, 杨建思, 苏金蓉, 等. 2014. 2013年吉林前郭—乾安震源区中强地震矩张量反演与区域孕震环境研究[J]. 地球物理学报, 57(8): 2541–2554.
- 许康生, 李英. 2004. 兰州数字地震台网的格林函数库与快速矩张量反演研究[J]. 地震地磁观测与研究, 25(增刊1): 103–110.
- 闫志德, 郭履灿. 1983. 论甘青川发震块体及其地震活动特征[J]. 科学通报, 28(2): 111–115.
- 姚家骏. 2015. 2013年肃南—门源交界  $M_s 5.1$  地震重新定位、震源机制及发震构造研究[J]. 地震工程学报, 37(4): 1077–1081, 1094.
- 张宏志, 习桂苓, 张秀萍, 等. 2008. 1976年唐山7.8级地震震区现今地震震源机制分析[J]. 地震研究, 31(1): 1–6, 99.
- 赵凌云, 邓津, 陈俊华, 等. 2010. 基于CAP方法的震源机制研究[J]. 长江科学院院报, 27(5): 81–84.
- 赵凌云, 张辉, 陈俊华, 等. 2014. 基于CAP方法的2013湖北巴东5.1级地震震源机制与发震构造研究[J]. 地震工程学报, 36(4): 1014–1018.
- 郑建常, 林眉, 王鹏, 等. 2015. CAP方法反演震源机制的误差分析: 以胶东半岛两次显著中等地震为例[J]. 地球物理学报, 58(2): 453–462.
- 盛书中, 万永荣, 田力. 2009. 科室奥力力对断层作用的统计研究[J]. 中国地震, 25(3): 256–264.

## Seismic Zonation Based on Focal Mechanisms and Discussion on Earthquake Prediction Methods

GUO Zengjian, GUO Anning

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

### Abstract

Based on our previous studies, we further discuss the research history of focal mechanisms and seismic zonation and relevant issues, and also the relation between source uniformity and foreshock detection. And we discuss the Coriolis force effect created by the fault rupture, and it's relation with aftershock magnitude and earthquake prediction method.

**Keywords:** focal mechanism; earthquake intensity regionalization; foreshock recognition; Coriolis force effect