中国近年九次强震的构造分类

马宗晋 杨懋源
（国家地震局分析预报中心）

一、地震的多样性表现

地震的多样表现是一个普遍存在的事实，不仅岛孤地壳俯冲带上的地震与大陆区地震的表现有所不同[1]，大陆内部地震的表现彼此也有许多差异。中国大陆区自1966年邢台地震以来，接连发生十余次7级以上强震，它们各自的表现就有许多相同与不同之处。表1、2[2—8]列出了它们一部分明显的表现。从中可以看出，有的表现了某些显而易见的临震前兆，如前震；有的则没有。有的临震前兆出现得较早，有的则很迟，震时有些强震造成上百公里的地面裂缝，如炉霍7.9级地震；而7.8级唐山地震的地裂缝延伸不足十公里，甚至有的强震还根本找不到明显的地面断裂，虽然它们的震源深度和震级都没有原则的差别；有些地震等震线呈单轴扩展，有些则呈双轴扩展，甚至更复杂的形态；不同地震的震时破裂速度也有较大差别；首次强震发生后，有的地震序列很简单，余震衰减很快，有的序列很复杂，强震多、强弱起伏大、空间分布也复杂。中国历史上的强震[9]国外许多强震的表现[10]也有上述种种差别。最近佐滕裕等人报导了日本伊豆半岛1974年和1978年两次7级强震前地形变的显著差异，强调了各震源区蕴震条件的不同[11]。

地震的多样表现对地震预报有直接影响。一九七五年辽宁海城地震前有明显的近期前震，並较早地出现了大量的多次起伏的宏观、微观异常，为临震预报提供了有利的条件，从而作出了成功的预报；唐山地震前虽也作了一定程度的中期预报，由于没有象海城地震那样明显的临震异常，又没有前震，所以最终没能作出临震预报。再者，一次强震之后，由于担心强震群或强余震的危害，往往发出强余震预报，或者担心周围地区发生牵动性连发的强震，所以防震的时间往往拖得很久，防震的区域很广，对社会造成很大影响。这是地震预报面临的很现实的问题，而不仅仅是简单的余震预报问题。

为提高地震预报的能力，需要对地震的震前表现、震时表现和地震序列表现事先有所估计，这就涉及地震多样性的成因和预测的研究，对此，许多人作过研究，提出了地震分类的多种方案。如地震序列分类，破裂的几何学和运动学分类，也从成因上讨论地震的多样性。有人强调介质均匀程度对地震序列的影响，有人强调力的作用方式与作用历史的特点[12—15]。可惜目前还很难预知蕴震区介质的均匀程度和强度，更难了解受力的实际过程，因为应力的测量目前的困难还较多。关于破裂的机理，提出了粘滑机制[16]、断裂尖端的伸展[17]以及断裂带上阻体破碎[18]等设想。无疑，上述工作对认识地震的多样性，以及预测地震的多样性都是有益的。为了地震预报，除了提高对地震多样性表现的预见能力，还需对地震类型作进

一步研究，特别是关于预见性的研究，有必要补充一些单项因素的研究，並进行综合分析，然后加以运用。本文试图针对中国大陆地区壳内地震的实际，从蕴震的地质构造单项条件出发进行研究，对地震的多样性给出补充性的部分解释，並讨论它们在预报中的应用。

二、蕴震的构造分类

目前普遍地认为，地震是地体内应变能的局部集中与突然释放的一种表现。在区域动力的作用下，造成地体内应变能的不均匀分布，其重要条件就是地体内介质的不均匀性，尤其是不连续结构构造的存在。中国大陆各地震分区的地壳运动、地壳厚度与分层、活动断裂带的分布与动态都有不同特点。为了超越区域因素的影响，从更基本的，到处都存在的更直接的蕴震条件入手，作者首先强调活动断裂带的重要意义，以断裂带不同段落的滑动与闭锁的

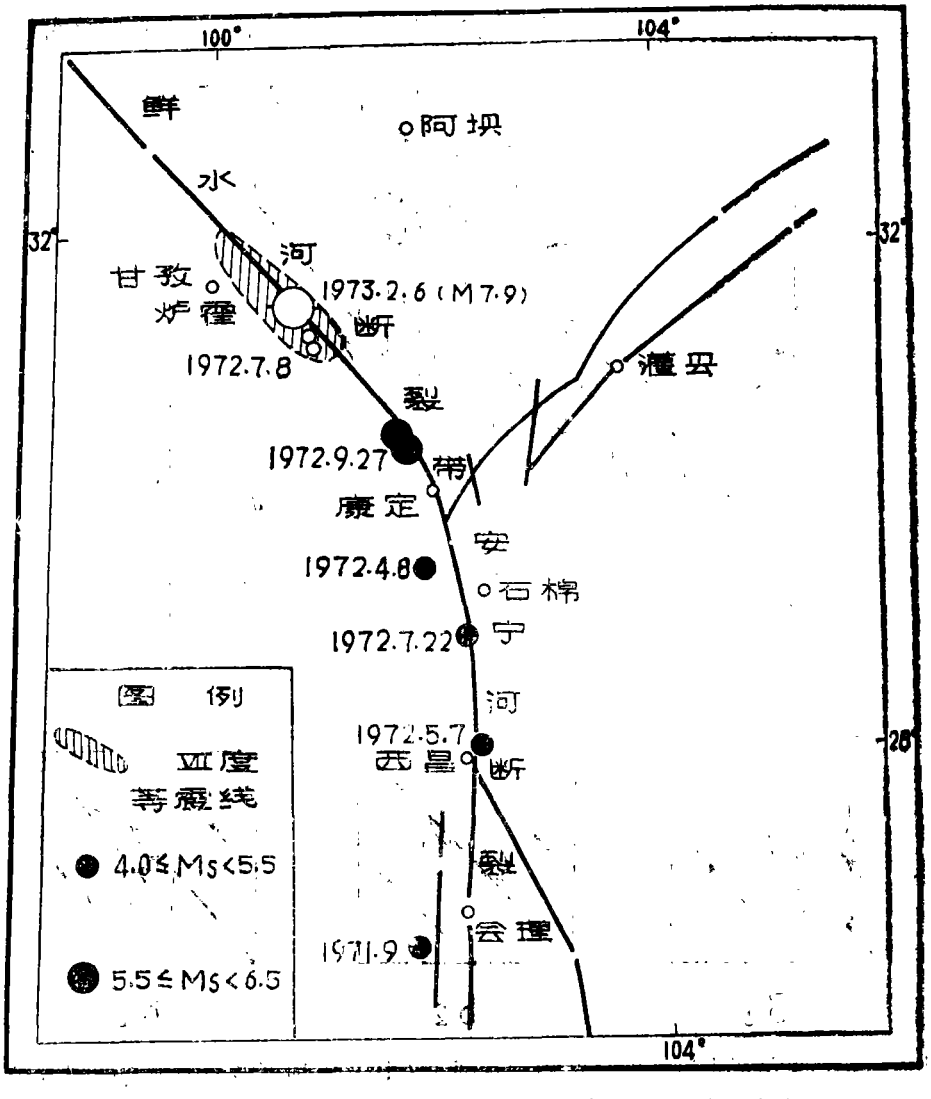


图1 炉霍地震Ⅶ度等震线及震前中、小震沿断裂带的分布

程度，特别是断裂带的组合交接方式、运动方式作为蕴震构造分类的基础。

以表1、2所列九次强震和部分历史强震资料为依据，並考虑到世界上大陆区某些强震的表现，暂提出三种构造类型：A单断走滑型，B双断交错型，C多断迭错型。

A单断走滑型 炉霍、通海等地震可属此类。此类地震发震时主要表现为简单剪切破裂，造成很长距离内连续的地震断裂，水平错距衰减很慢。等震线呈单轴扩展的细长椭圆形，按地震波推算的破裂速度较快。强震蕴震过程中，小震呈单一带状分布[19]，前兆表现主要集中在同一条走滑断裂带附近（图1）。

主震后的余震少、衰减快，延续时间短。主震释放能量占全序列总能量的绝大部分，达95%以上。历史强震中，1923年炉霍7$\frac{1}{4}$级、1932年昌马7$\frac{1}{2}$级、1927年古浪8级等地震，可能都属于此类地震。它们也都表现细长的等震线形态、余震衰减快、延续时间短（表1、2）。推古浪大地震前一小时许发生过有感前震[20]。此类地震主要发生在我国西部几条主要的走滑断裂带上。

作者对这类地震的基本理解是：在地壳内巨大的走滑断裂带上，某些段落或部位，由于

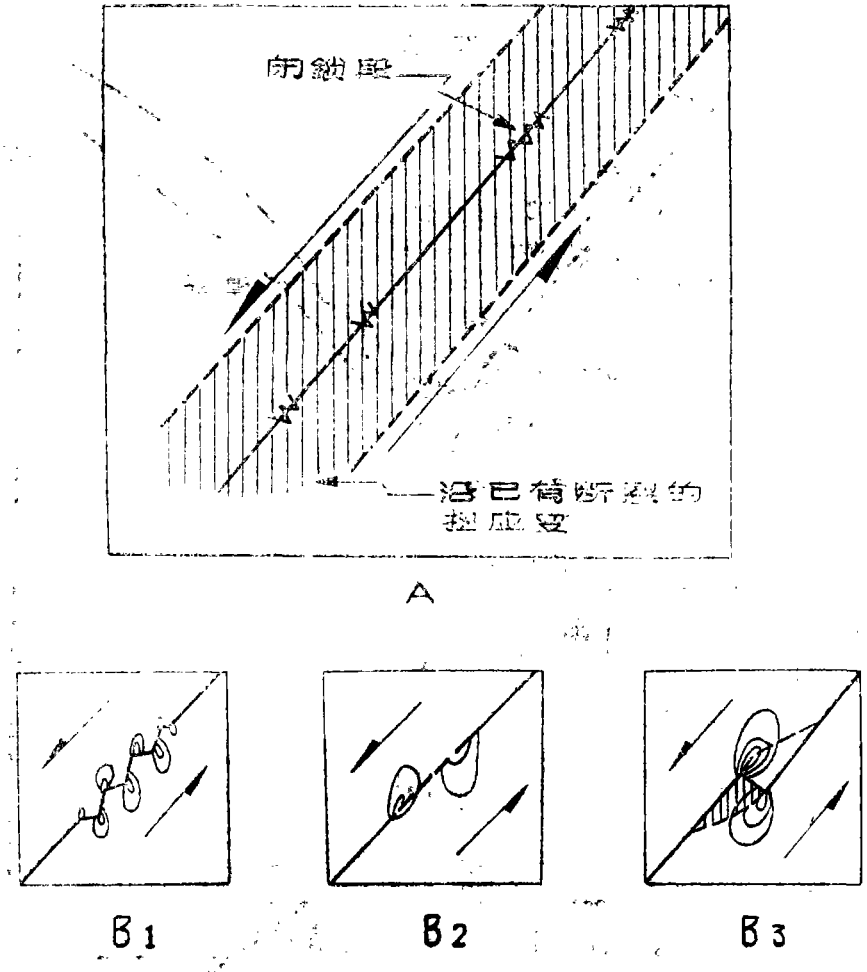


图2 （A）单断走滑断裂带结构示意图 （B）三种可能的闭锁与破裂方式：
B1强磨擦 B2未断通 B3阻体）

以下一些条件而构成闭锁：（1）正应力局部增大提高了磨擦强度，（2）沿断裂受贯入物质的粘结（3）凹凸结构构成突出的阻体（图2）。随着区域构造力的增强，沿断裂带形成扭变带，在低磨擦段发生蠕滑或粘滑，而在那些相对闭锁部位，形成大小不等的应力集中点（图2）。强震发生前，可能一部分或大部分应力集中点先期破裂、震动或发生粘滑，释放一部分应变能，而把另一部分应变能转移给其他应力集中点，这种过程逐步进行，直至最后大型闭锁段的破裂而成强震。对于沿断裂带的扭变带的整体来说，不同段落产生应变的边界条件基本是相同的，但断裂带上不同段落的闭锁程度是不同的，所以低强度的闭锁段必然先期破裂，这可能是余震少，地震裂缝带长，破裂速度快等特征的力学原因。以上这是许多大型断裂带上强震的基本特点。在此基础之上，如果迭加了一些复杂的构造条件，当然也可以导致前震和余震的增多。通海地震主震后，沿着通海至峨山一段曾多次发生5级余震，这可能与该段恰好是一个以窄断陷盆地为代表的构造复杂化地段有关[21]。大型走滑断裂往往与其他方向次级断裂交接，构成局部应力集中条件，但主次相差悬殊，所以仍以单断走滑为主要特征。中国西半部多数走滑断裂上的强震属于这种情况。

B、双断交错型

海城、渤海、昭通等地震属此类。发震时往往表现共轭的剪切破裂，主破裂面往往不易判别，如昭通地震。地表裂缝带规模小或不发育。昭通地震无集中的地震裂缝带，海城地震裂缝带也只断续发育，最长延伸5公里，最大水平错距0.55米。等震线具有明显的双轴延伸特点，发震时破裂速度较慢，震前多出现小震条带交叉分布的现象。前兆异常点，特别是短期、临震异常同样受交叉的地壳断裂所控制（图3）。

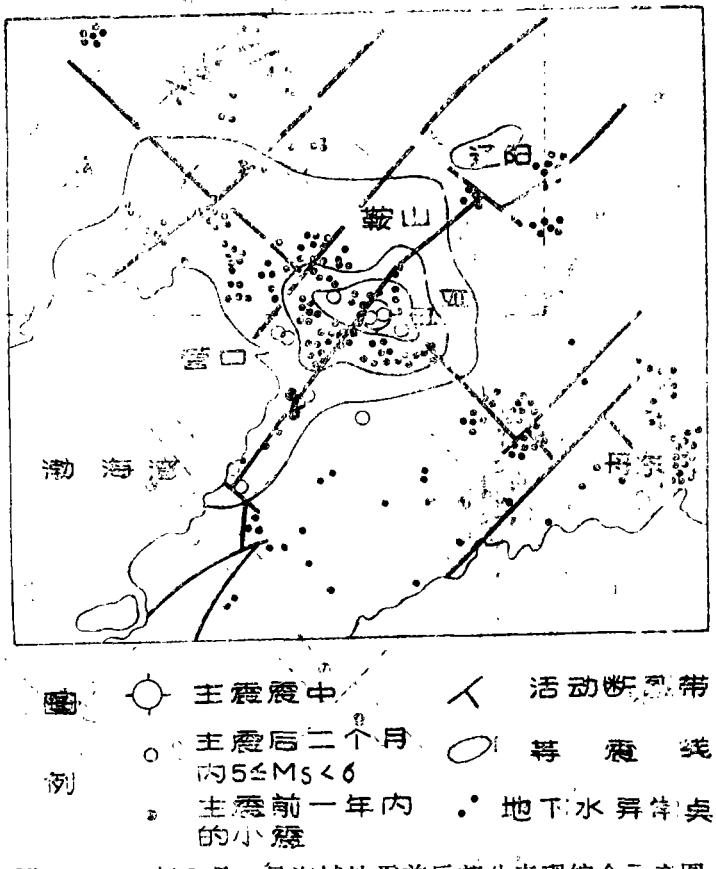
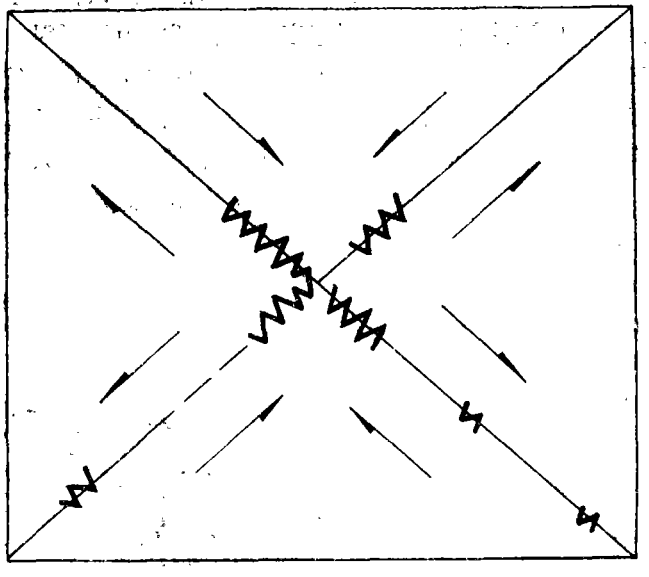


图3 1975年2月4日海城地震前后部分表现综合示意图

三个震例之中海城地震是有明显前震的，昭通地震前震不明显，三者余震都少、小，延续时间短（表1.2），主震能量占序列总能量的绝大部分。历史强震中1830年磁县7½级地震可属此类。

对此类地震蕴震构造的理解是，在地壳内两条活动断裂的互相交接部位，可以构成断裂

滑动的闭锁条件而形成应力集中区。交接的方式可分两种；一是互相切错，如图4中（a）称B1型，二是一条断裂限制另一条断裂的运动[22]，如图4中（C）或（b），称B2型。B1型的交接部位由于贯入物质的粘结、或凹凸结构的阻挡，可以在交叉点附近构成闭锁，这个闭锁点与两条断裂切割的四个断块都有关连，所以应变能突然释放时很可能引起四个断块的同时运动，由此即可造成主破裂面不易判别，双轴等震线，地面裂缝不明显以及其他的动力学特征。昭通地震可能是这个情况的典型代表。B_2型交接关系中，由于滑动的主断裂受副断裂的阻挡，或者主断裂与副断裂汇而不交，中间还余有空段（图4，C），或者受贯入



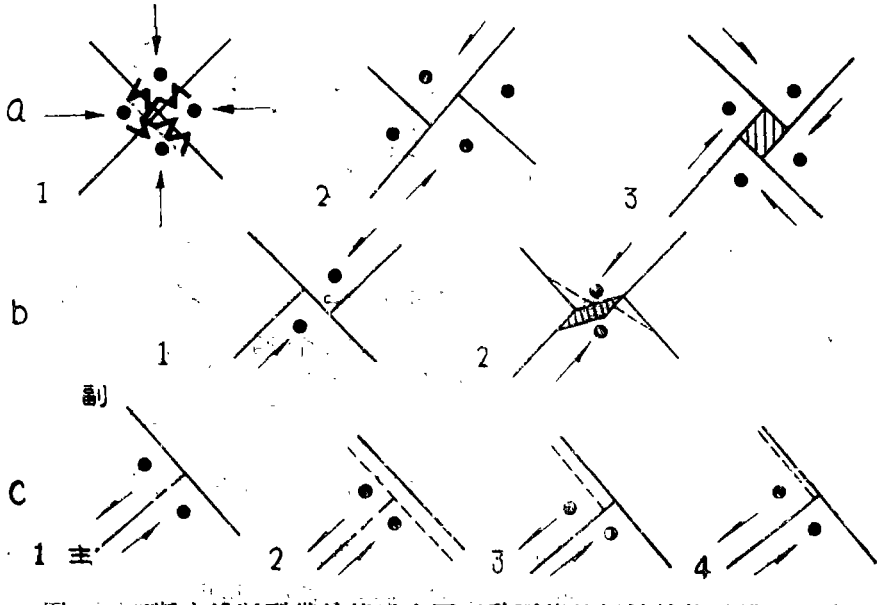


图4 双断交错断裂带结构示意图三种可能的闭锁结构及错动方式（a、b、c）

物质的粘结等，在交接部位都可构成闭锁，引起应力集中。这类条件下发震有两种可能性。第一是副断裂先起让位作用，提供主断裂可错动的空间，主断裂发生后再行反向调整，R台塞尔（R. Teisseyre）曾用位错堆垒的观点论证过这种可能性[23]，海城地震即可能是这种情况，它的余震向西北伸展，明显地受北东向金州大断裂的限止，而且余震机制解中，靠近西端的地震有反向错动的现象。第二种可能即主断裂切穿事先起限制作用的副断裂。渤海地震主震发生前，小震分布的空间形态呈丁字型，北西西向的小震条带被北东向小震条带限制在其西侧，主震发生后，余震带伸向山东半岛以北的海域，这可能是切穿副断裂的一种表现。

B型地震，无论是B1或B2，均以两条断裂的交接为基本条件，这就必须涉及两条断裂和四个断块或三个断块的相互制约，所以双轴等震线，或呈丁字型、三角形等震线轮廓，地表裂缝带不发育，破裂速度低等特点的出现也就易于理解了。交接部位结构可能较复杂，但就形成应力集中区来说，可能还是单纯统一的，所以易于集中释放，这可能是余震少的原因。B类地震在我国东、西两区均有发育，只是东部更显突出，因东部大型走滑断裂不如西部发育，而且早些时期的大型断裂已多为其他方向断裂切错，因而表现更多的交叉断裂的复杂运动。

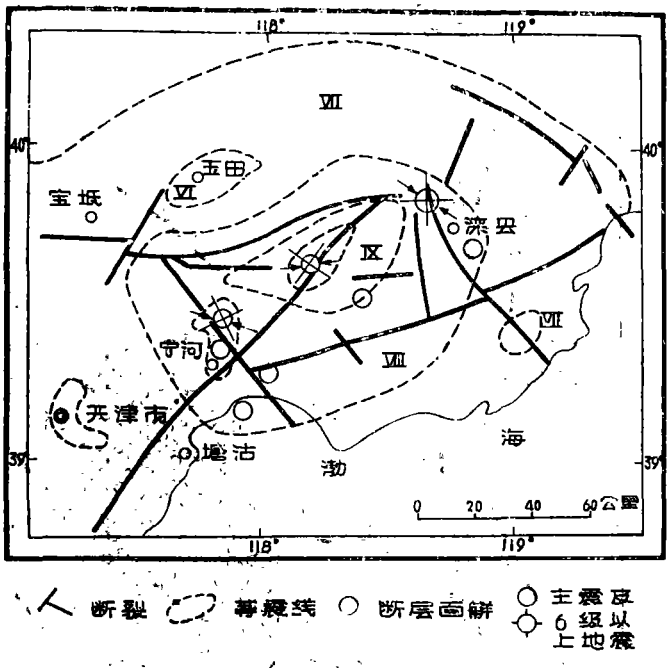


图5 唐山7.8级强震的综合示意图

C多断迭错型 唐山、邢台地震属此类。发震时多为剪张型断裂，地表断裂水平错距明显，但断裂带延伸很短，如唐山地震裂缝水平错距衰减很快。极震区等震线形状很复杂，外围等震线往往也显双轴扩展的特点（图5）。破裂速度

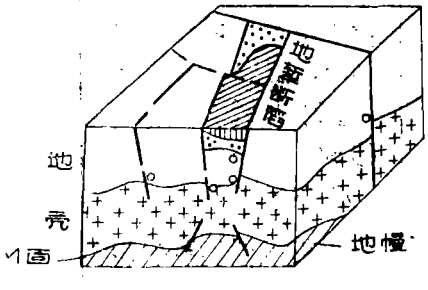


图6 地堑断陷—地壳细颈结构示意图

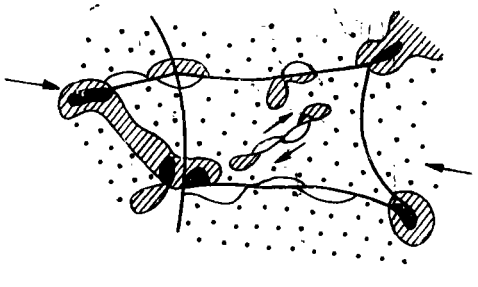


图7 唐山地区断块结构光弹实验示意图
（据虞顺民等1977）

不高，震前在震中区附近没有明显的，呈简单带状的小震和前兆分布，而是沿着由多条断裂复杂交接的小断块体边界出现明显异常。此类地震最大的特点是余震多、强余震多、起伏大、延续时间长、分布复杂、主震释放能量只占序列总能量的90—65%。往往出现几个余震集中区，此起彼伏遥相呼应，反映多条断裂的相互牵动和重迭错动。历史强震中1937年荷泽7级，1699年临汾8级、1679年三河8级、1556年华县8级等地震都可能属此类。它们都是等震线复杂、余震是延续很长的强震。荷泽地震与邢台地震相似，都有明显的前震。

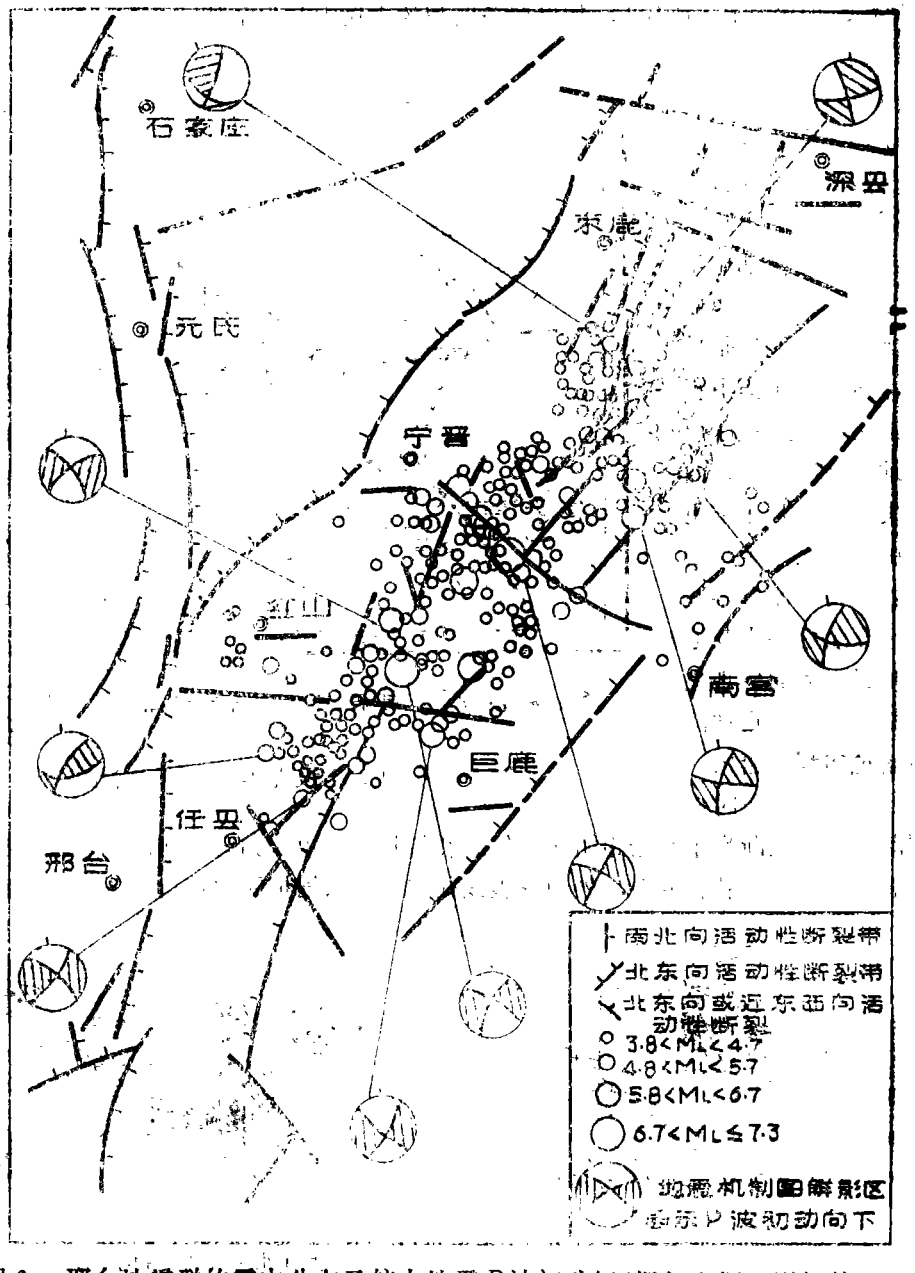


图8 邢台地震群的震中分布及较大地震P波初动解(据何志桐、谢挺等1976)

C类地震蕴震构造都是比较复杂的，以多条断裂的复杂交接为基本特征，地表构造表现为复杂的小断块，如唐山[24]。而更多的是表现为地堑型断陷盆地，如邢台、荷泽、三河、临汾等。所以也可以把这类地震称之为地堑构造型，或者更进一步称之为地壳“细颈”构造地震（图6）。因为这类蕴震区地下构造普遍表现为地幔的隆起或拗曲，与地堑上下对应，造成地壳的“细颈”构造。实验表明，在地壳内局部断块或多组断裂交接的构造条件下可以出现多个闭锁点，构成应力集中点复杂分布的局部应变能集中区，它是一个很复杂的蕴震体（图7）。由于闭锁条件群集，总体上可积累较大的应变能，所以往往酿成大震。大震发生时由于复杂结构的互相约制，不易出现大规模的“自由”走滑，而是受限止的走滑，由此也影响到破裂的速度、长度和等震线形态。同时，由于断块间的互相牵动和能量的快速转移，易于出现多个主震连锁活动，出现多个余震集中区，彼此呼应，构成总序列的多次起伏，和余震分布图案随时间的复杂变化（图8）。C类地震仍主要发育于东部地区，理由与B类相似。此类地震受地幔隆起的影响，可能有垂直力的复合作用，这是与A、B两类有原则差别之点。此类地震张性分量明显也许与此有关。

下面谈谈对松平地震和龙陵地震的简单看法。

松平地震按其等震线形状是长椭园形，余震衰减较快等现象，应列入A类，但它又是双主震，这又有些类似B类。从余震空间分布推测，此地震是受地下同一走向不同倾角的断裂交接所决定的，所以它应属B类，只是它的交接部位是近于水平延伸的。

龙陵地震是一次比较少见的震例，它是在被断层围限的花岗岩断块内部发生的强震群，共发生7次6级以上的地震，震级差小，5级余震也较多，但总的延续时间比C类要短的多。每次6级以上地震所伴随的一串余震可视为次一级的地震序列[25]。最突出的是，它的发震点在岩体内的分布和每次7级强震都造成两个以上的极震区（图9），表现为沿北东、北西两个方向的优势震动，给人以受网状共轭破裂控制的印象。丁国瑜提出这是岩体受共轭断裂破碎解体的地震表现，类似于在半围限的条件下，一块较均质岩块的破碎过程。大破裂前可能有少量微

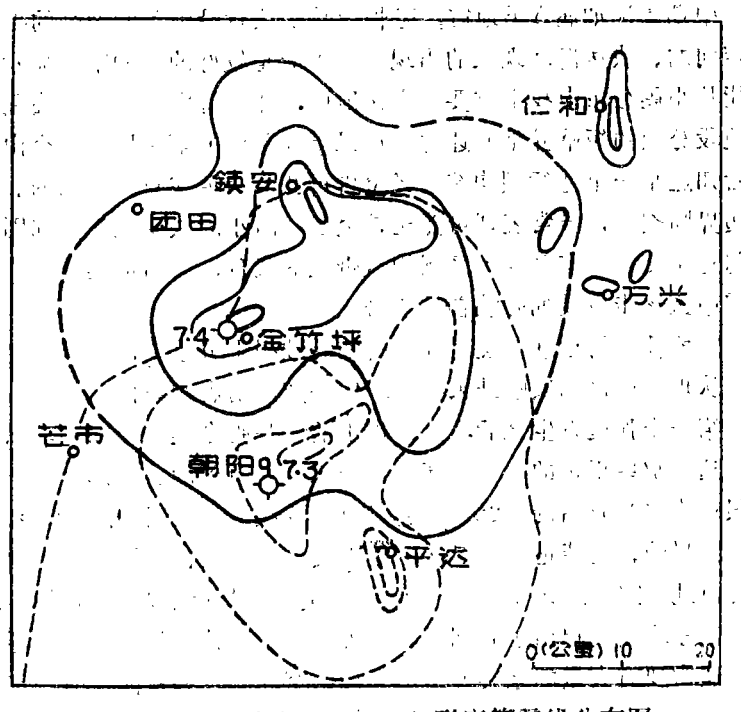


图9 龙陵地震（7.3、7.4）烈度等震线分布图
（据张四昌、徐杰1978）

裂，表现为前震，大破裂后围压减弱，所以余震延续时间短，但大破裂是由多组共轭破裂组成的，所以引起强震成群发生和多个极震区的出现。

三、构造分类在预报中应用的讨论

从多年的预报实践中体会到，预报的具体任务，实际上是随着地震蕴育的发展而不断变化的。地震本身蕴育的阶段不同，暴露的内容与程度不同，所要解决的问题和所能解决的问题也就有所不同。

长中期预报实际上只能指出一个或几个应力比较集中增强的地区，那里表现出较多的异常现象。从能量的积聚来说，那些应力集中区是相似的，但每一个应力集中区的地体结构不会是相同的，因而可能是不同构造类型的蕴震体。所以这就有一个蕴震构造类型的识别问题。

长中期预报中构造类型的估计，主要可以根据两方面的资料，一是区域构造条件，二是小、中地震的时空分布。如果有较多的前兆观测点，则可用其异常出现的早晚、强度和空间形态，帮助圈定应力集中区，以及估计可能的构造类型。从区域构造现有的研究程度来说，哪里是大型的走滑断裂、哪里是明显的新活动地堑区，哪里是大型断裂之间重要的交接地区，事先还是可能作出一些估计的，配合小震和前兆的动态表现，也有助于构造类型的识别。

中期预测如属A类地震，恐怕应特别注意沿整条断裂带的工作部署，努力监视沿断裂带有定向的、快速滑动现象的出现，这可能是较好的一种临震显示。如预测属B类地震，事先若能从小震分布中找出重要的交接地区，即应特别注意该区临震异常的集中出现，而不为其它地段分散的短临异常所迷惑。如果事先预测的蕴震区是一个由多组构造交切构成的小断块或者知道是一个地堑型构造，经验告诉我们需要注意两方面的表现，一是那些小断块或地堑的边界断裂上，异常表现可能比较突出，而小断块或地堑内部则可能並无明显异常；二是注意与这个交汇区有关的大区域构造带上的表现，唐山地震前，至少顺沧东断裂带即有由外围向震中区逐步发展的短临前兆表现。

震前几天的近期前震对地震的临震预报十分重要，可惜我们还没搞清产生前震的必然条件。从现有震例和实验结果推想，似乎产生前震的条件 C>B>A。当然这只是一个推想。

第一个强震发生之后，立即提出的就是强余震预报问题。以往这类问题多是依靠序列分析，这对那些正常的主余震序列地震来说是有效的。但邢台第一个地震是6.8级，按序列分析很难推出半月后的7.2级地震；唐山7.8级主震后时隔四个半月再发生宁河6.9级强震也是难以预料的；龙陵地震有5次7级强震，但6级、5级余震比例很小；松平地震后，1979年的普洱地震（6.9级），按序列预测都提出过6级强余震预报，结果都未发生；上述这些情况都向序列研究提出了新问题。此外，作者建议应加强构造类型的研究。强震发生后一、二天内通常要有大量的余震发生，它们的空间分布如果能及时测定得比较准，即可进一步暴露震源体的构造特征，结合区域地质构造、等震线、地面裂缝、地面运动、断层面解和动力学参数特征等，可以更好地判断其构造类型。如属A类，即可早些解除防震；如属B类，即应注意主副两条断裂带的发育情况，如果均已断通，即可解除防震；如属C类，即应特别注意查明它可能有几个蕴震交接点，监视其各自的发展程度，研究它们彼此的呼应关系，这类地震的防震时间可能会长些。

一次强震之后，人们往往担心在附近与其有关的构造部位接连发生另一次强震，所以时常引起大范围的防震行动。但实际上从历史强震目录中可以看出，本世纪以来在一次6级以上强震发生后，几天至一个月内在几百公里范围内接连发生另一次强震的事件是有限的。中国东部没有，西部川滇地区有8次，新疆有2次，西藏1次。1920年海原8.5级地震后一个月内附近地区强震连发的现象最突出。一个月至一年内的连发事件，华北1次，西北3次，西南12次，以上仅是粗略的统计。所以，一次强震之后，在临近地区连续发生强震的可能性总的来说是小的，而且有明显的区域特征，这可能与区域应力场调整的速度及地震的蕴震构造类型有关，也可能是"板内"地震的一种特征表现，这需要专门研究。从实际防震工作来说，则应考虑上述事实，减少不必要的扩大防震区域的作法。

结束本文时作者想强调一句，三种蕴震构造类型的划分，只是构造单因素的分析，而且也只强调了各自的基本特点，实际上三者之间必须存在参杂与过渡关系，所以才使得地震表现的多样性呈现极复杂的情况。

参 考 文 献

〔1〕Mac Kenzie, D., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region, Geophys. J. Vol. 30. P109—185.

〔2〕何志桐、谢挺，1977. 邢台地震系列的空间分布、构造应力场及其发生过程的探讨，地球物理学报20卷 2期

〔3〕张四昌、刘百篪、1978. 1970年通海地震的地质特征，地质科学 4期

〔4〕唐荣昌等，1976.1973年炉霍7.9级地震的地裂缝特征及地震成因的初步探讨，地球物理学报 19卷 1期。

〔5〕朱成男，1976. 1974年云南省昭通地震破裂机制，地球物理学报19卷4期。

〔6〕刘正荣等，1977. 1974年5月11日云南省永善一大关地震，地球物理学报20卷 2期

〔7〕顾浩鼎等，1976. 1975年2月4日辽宁省海城地震的震源机制，地球物理学报 19卷 4期。

〔8〕邱群，1976. 1976年7月28日河北省唐山7.8级地震的发震背景及其活动性，地球物理学报 19卷 4期

〔9〕中央地震工作小组办公室，1971. 中国地震目录，科学出版社。

〔10〕G. P. Gorshkov, V. Kanik eta l., 1974. Proceedings of the seminar on the seismotectonic map of the Balkan region, UNES CO. Skopje。

〔11〕H. Sato, K. Tsumura,1979. Crustal deformation preceding recent disastrous earthquakes in the Izu Peninsula of Japan,International Symposium On Earthquake Prediction, UNESCO Paris 2—6 April 1979,

〔12〕吴开统等，1976. 海城地震序列的特征，地球物理学报19卷 2期。

〔13〕M. V Gzovsky et al., 1973. Problem of the tectonophysical Characteristics of stresses. deformation, fractures and deformation mechanism of the earth's Crust, Tectonophysics. Vol 18 N 1/,167—205.

〔14〕K. Mogi, 1967. Earthquakes and fracture, Tectonophysics Vol. 5,N。1, 35—55。

〔15〕黄永祥、谭承业，1978．地震孕育类型的实验研究，地震研究 1期
〔16〕J. D. Byerlee. W. F. Brace, 1968. Stick—slip stable sliding and earthquakes—effect of rock type, pressure, strain rate and stiffness, J. Geophys. Res. Vol, 73, 6031—6037。
〔17〕陈培善、谷继成、李文香，1977．从断裂力学观点研究地震的破裂过程和地震预报，地球物理学报20卷 3期
〔18〕李四光，1977．《论地震》之中的"关于地震地质工作的几点意见"（1970）科学出版社
〔19〕蜀水，1974．炉霍7.9级地震特征和该区的地震活动性，地球物理学报，17卷 2期
〔20〕中国科学院地震工作委员会历史组编，1956；中国地震资料年表，科学出版社
〔21〕朱成男，1978．滇南地区新生代构造发育兼论通海地震的地质背景，地震研究 3期
〔22〕邓起东等，1976．关于海城地震震源模式的讨论，地质科学 3期
〔23〕R. Teisseyre, 1970. Crack formation and energy release caused by the contionstration of dislocation along foult planes, Tectonophysics Vol №6
〔24〕虢顺民等，1977．唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论，地质科学 4期
〔25〕梁劳等，1978．龙陵地震序列特征，地震研究 2期

九次强震的序列和临震表现 表1

	炉霍	通海	海城	渤海	昭通	松潘	邢台	唐山	龙陵
首次强震时间	1973.2.6	1970.1.5	1975.2.4	1969.7.18	1974.5.11	1978.6.16	1966.3.8	1976.7.28	1976.5.29
首次强震震级（M_S）	7.9	7.7	7.3	7.4	7.1	7.2	6.8	7.8	7.3
最强与次强震震级差	7.9—6.0	7.7—5.9	7.3—5.5	7.4—5.1	7.1—5.7	7.2—7.2	7.2—6.8	7.8—7.1	7.4—7.3
6.0—6.9级地震次数	1	0	0	0	0	1	4	3	5
5.0—5.9级地震次数	3	8	6	1	0	3	34	16	9
最后6.0级地震距首强震天数	1	0	0	0	0	6	35	278	53
临震时期（几天）前震	无	无	明显	无	有，不明显	无	显明	无	明显
临震突发异常	几天	几天	明显，1—2月	几天	几天	明显，1—2月	几天	几天—几小时	几天

九次强震的一些资料 表2

项目 \ 地震		炉霍	通海	海城	渤海	昭通	松潘	邢台	唐山	龙陵
首次强震震级		7.9	7.7	7.3	7.4	7.1	7.2	6.8	7.8	7.3
地表破裂	长度（公里）	～100	48	(5.5)	海底			30	8	
	最大水平错距（米）	2.3	2—2.7	0.57						
	最大垂直错距（米）	0.5—0.9	<0.5							
	破裂性状	左旋走滑	右旋走滑兼压	左旋剪一张		右旋剪切		右旋剪一张	右旋剪一张	右旋逆冲
内圈等震线	形状	单轴狭长	单轴狭长	双轴		双轴	短椭园	双轴	短椭园三轴	双轴，双极震区
	长短轴比	8：1	10：1	1：1		2：1	3：1	3：1	2：1	1.5：1
地下破裂	长度（公里）	135	74.5	54	34.2	66		～40	114	26.2
	速度（公里/秒）	5.8 (NW)	4.3 (SE)	1.3 (NWW)	～3.1	1.74 (NE)		3.29	2.7	3.4
		2.8 (SE)	2.5 (NW)	1.3 (SEE)						
	错距（米）	1.71 (水平)	1.52 (水平)	1.17 (走向)	0.32 (总量)	0.70 (总量)		0.57 (水平)	1.30 (总量)	0.46 (平均)
		0.34 (垂直)	0.60 (垂直)	0.33 (倾向)				0.11 (垂直)		
	应力降（巴）	24	25	21.8	9.8	74		16.9	6.8	18.6
	地震矩×16^{26}达因·厘米	12	7.8	5.2	～1.1	3.1		1.0	12.4	0.92
资料来源		**	张四昌 **	顾浩鼎等，林邦惠等	**	刘万琴等		**	谷继成等	刘正荣等

* 表中地下破裂栏列出的资料系不同作者使用不同方法所得，本文引用作定性讨论，故权且不涉及其理论与解法的细节。

** 国家地震局震源机制研究小组报告（1973）