龙陵地震的孕育、发生和衰减过程的探讨

——孕育地震应力场的演变

刘祖荫

（云南省地震研究所）

摘　要

本文根据阚荣举等对1970—1980龙陵地区2518个小震初动符号的研究结果，讨论了应力场变化对龙陵地震的孕育、发生和衰减过程的作用。提出大地震的发生可能具有大面积的外部应力加载、特殊构造部位的应力集中、震源应力场的形成、大震发生、应力场衰减等几个环节。龙陵地区特殊的构造环境为我们提供了观察这几个环节的良好“窗口”。它造成的震源应力场与区域应力场不一致，本文提出一个解释这种现象的模式。此外，对龙陵地震发生时出现的一些特点也提出了初步看法。

一、前　言

1976年5月29日云南省龙陵地区发生了7.3、7.4级地震。地震发生后，立即进行了宏观破坏现象和地震地质现场考察。龙陵地震与其它地震相比，有其不同的特点[1]：

1、两次主震和多数强余震均发生在三条断裂围限的花岗岩块体内。块内没有大的构造线通过。

2、两次主震的等震线均近似呈不规则的园形。有4个九度区和一个八度异常区。

3、两次主震的震源都不深，约为22公里。但地表未见明显的原生或次生地震裂缝带，到处所见只是花岗岩表面的小剥皮。

4、震源机制在花岗块内和块外有分区的特点，主震机制与区域应力场不一致。

以上诸特点综合如图1所示。

这些特点自然引起不少研究者对这次地震的兴趣。几年来先后发表了不少文章，试图从各自的研究结果去解释这些特点，并探讨该地震的破坏过程。有的同志认为是共轭地震[2]；有的认为是双共轭破裂[3]；有的则认为是共轭构造活动[4]等等。

研究大地震破裂过程的目的是为了认识地震发生时的受力过程，进而探讨地震在孕育中，应力场与地壳岩石之间矛盾的产生、增强、转化或衰减，并解释各种地球物理前兆的出现和地震发生时出现的种种现象。研究强震震例无疑对认识地震成因和地震预报都具有重要意义。

近几年来，不少作者对唐山[5]、海城[6]、通海[7]等地震做过研究。但是，他们多是从前兆资

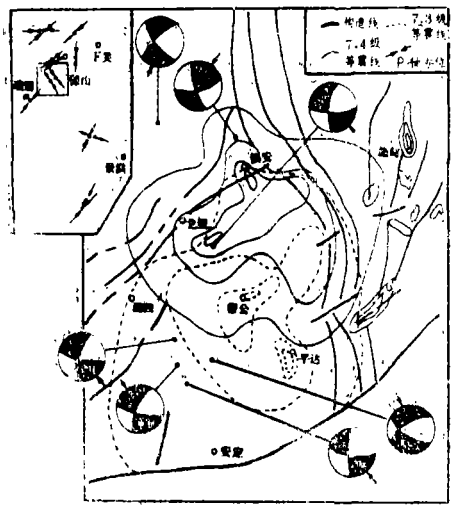

图1　龙陵地震的地质构造，烈度分布和震源机制结果

料出发，间接推断在地震孕育中应力场的作用过程。本文直接以龙陵地震的主震、余震及其前后小震平均机制的研究结果为基础，并结合其他资料进行综合分析，探讨应力场的演变对龙陵地震兴衰的作用。同时也对龙陵地震发生时出现的一些特点提出初步看法。

二、龙陵地震震源应力场的形成与增强

1、主震震源机制P轴方位与区域应力场不一致。

阚荣举等[8]对龙陵两次主震和全部强余震的震源机制做了详细的研究，并与其他作者[9,10]的研究结果做了比较，虽然与文献〔9〕〔10〕不完全一致，但它们共同的特点是与区域应力场相差较大。文献〔8〕〔9〕的结果相近，主震的P轴方位呈北北西（141°～148°）向与北北东向的区域应力场平均相差达45°（图1）。

根据文献〔8〕的结果，强余震的震源机制还有分区的特点(图1)。在三条断裂围限的花岗岩块体内与主震的结果相近，呈北北西向，但块外的北部区，两次M≥6.0级的强余震却为北北东向与区域应力场相一致。

因此，很自然地提出一个非常有意义的问题：花岗岩块体内产生龙陵地震的震源应力场是在什么条件下产生的？它与区域应力场有什么关系？它是何时开始形成的？对龙陵地震的孕育、前兆的出现有什么影响？要回答这些问题，在目前，研究小地震的平均应力场随时间的变化是一个良好的途径。

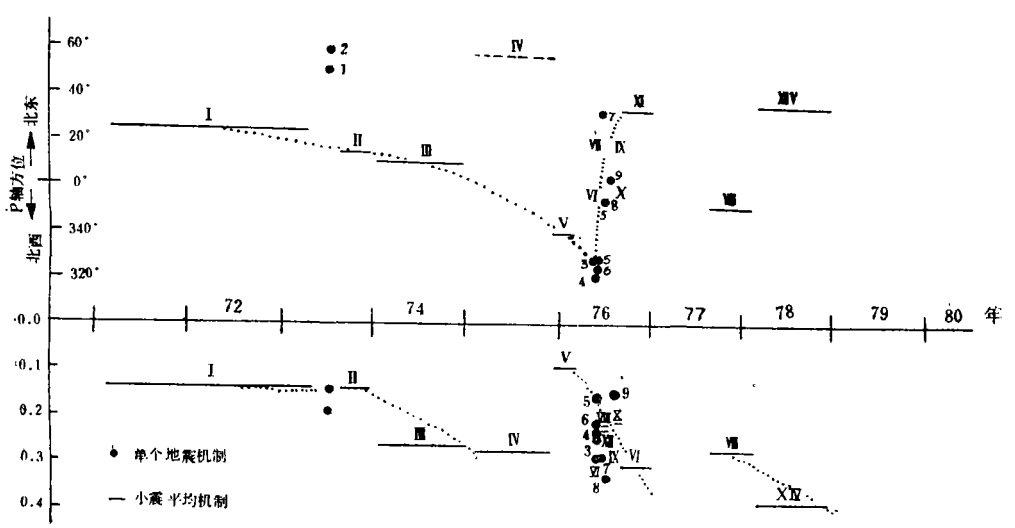

图2　P轴方位随时间变化

2、小震平均应力场的变化

阚荣举[11]对龙陵地区（23.5°～25.5°N，97.5°～100°E）1971年至1980年8月共2518个小震P波初动符号做了研究，求得8个时段的小震平均机制解。其结果与龙陵强震群的机制结果综合绘在图3上。

从图上可以看到，1971.2到1976.5.29龙陵两次主震发生前的5个时段里小震平均节面解结果有很大的不同。时段Ⅰ（1971.2—1973.4）P轴方位为北东25°，时段Ⅱ（1973.6.6—1973.12）P轴为195°（即北东15°），两者与区域应力场接近一致（图1）。时段Ⅲ（1974.1～12）、Ⅳ（1975.1～10），虽然也能作出北北东—北东P轴方位（191°，58°），但图面符号紊乱，矛盾比增大（图2b）；1975.11—1976.5.4（时段Ⅴ，大震前半年）的结果完全不同，小震P波初动符号在图面上分布规律性较好（见文献〔11〕），矛盾比较小，各个节面解参数变化很小，结果是可信的。它的P轴方位为北北西向（340°），与紧跟着发生的两次主震及花岗岩块内的强余震的P轴方位均相差在20°以内，基本一致。它与第Ⅰ时段（或区域应力场）却向北西旋转了45°之多。

很遗憾，我们不能确定1971年以前龙陵地区的小震平均应力状态，因为该地区从1971年起才开始有地震台记录。但是，距龙陵震中170多公里的下关台建于1966年，基本可以控制震区M≥3.0级的地震。从图3中可以看到1966—1970极少观测到该区M≥3.0级地震，1971年起不断发生了一些中强震，小震活动也日益增多[12]。因此，初动符号矛盾比不高的时段Ⅰ和时段Ⅱ，平均P轴方位稳定呈北北东向优势分布，与区域应力场一致，是反映区域应力场在这时增强的一种直接显示。

时段Ⅲ、Ⅳ的小震机制结果精度较差，矛盾比分别为0.26、0.27。矛盾比大，反映各次小震发生时作用的应力场是不统一的。这可能是在区域应力场增强的过程中，受到迅速增强的北北西向应力场的影响。因为时段Ⅴ，即龙陵大震前半年，以极小矛盾比得到的小震平均P轴方位，与主震的北北西向P轴方位一致。因此，小震机制结果表明，导致龙陵大震的北北西向应力场在1975年11月已完全控制了龙陵地区的应力状态。

综上所述，龙陵大震前5年内，小震平均应力轴取向变化了45°，它反映了由区域应力场的增强，导致震源应力场形成的演变过程。这是在一个特殊的构造条件下形成的。

3、随应力场演变过程前兆出现的时间。

岩石的物理性质是与岩石的受力状态有密切关系的。地壳中应力的空间分布状态发生改变，地球物理场也将发生变化，在某些合适的构造部位将观测到不同的地球物理场变化所出现的前兆物理现象。因此，岩石中应力场的改变是地震前兆观测的物理基础。

如第二节所讨论的，龙陵地震前应力场的变化有两个明显的时期：一个是1971—1973，区域应力场增强的时期；另一个是1975.11开始到大地震发生时，震源应力场明显占优势的时期。

在第一个时期，区域应力场的增强，使得较大面积的应变加速。这时出现一些地震活动性、波速、地形变等中期前兆现象。从图3a可以看到，1966年瑞丽震群发生后，一直到1971年小震重新活跃起来，使M3.0级地震的频度显著增高。如果把龙陵地区看成一个强固区（或闭锁区），那么1966年瑞丽震群将是一组关键性的地震（图4a），它使龙陵花岗岩块体西南端部畹町断裂和龙陵—瑞丽断裂的交汇处解锁，为这两条断裂东北交汇端部应力集中创造了条件。当区域应力场增强时，加载应力由附近一带小的闭锁区承受着。应力超过岩石强度时，1977年2月首先在畹町断裂的东北端部发生了5.8级地震。此后，中强震不断向震区迁移（图4）。1972年9月波速比开始下降，1973年6月靠近震中附近发生了5.0级震群。这些中强震在空间上呈北东向分布，它们与区域应力场P轴方位一致。

反映地形变的路线水准测量成果，1973年与1958年相比，在澜沧江以西有明显抬升，特别是屯冲至芒市抬升最高，达50几毫米（图3c）。虽然这是15年累积的结果，但它反映该区大面积已处于应变积累的阶段。

一些短期前兆大都在第二个时期开始前后出现或发生转折，这明显的与北北西向占优势的震源应力场密切相关（图3），如波速回升，水气异常回返等。小震活动更显示规律性的变化，1975.11—

1976.1在龙陵至屯冲发生了一串小震群，此后到大震持续了4个月的震前平静。这一串小震群呈北北西向分布，与震源应力场的P轴方位一致（图4，D）。从图4c又可以看到，小震活动呈北东、北北西两个方向活动，这段时间正好是1974—1975年，是小震平均机制解矛盾比大的时期。小震活动的条带方向变化也间接地的反映了龙陵地区主应力轴方位由北北东向区域场到北北西向震源应力场的变化。

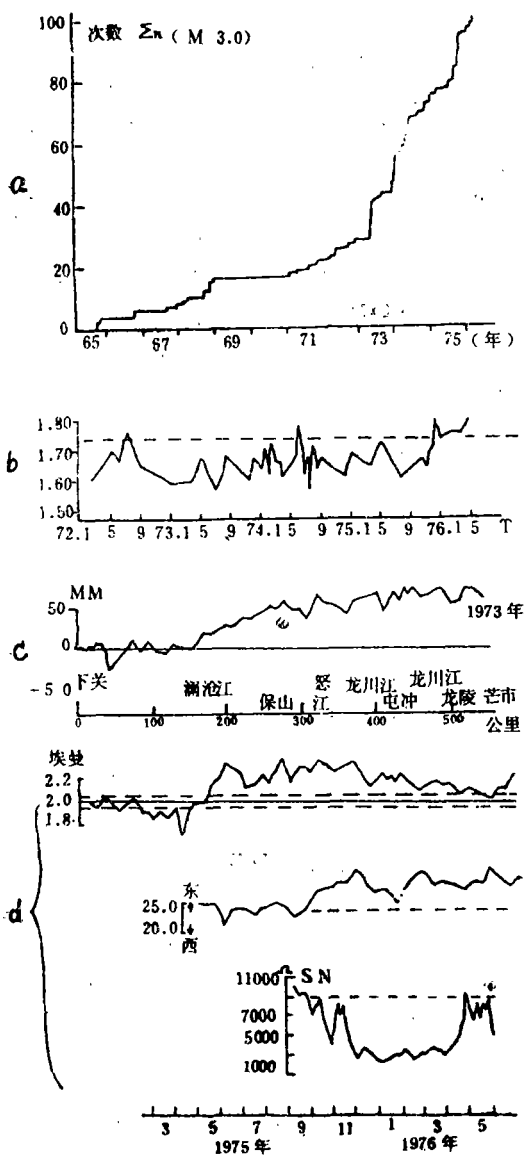

图3　各种前兆变化

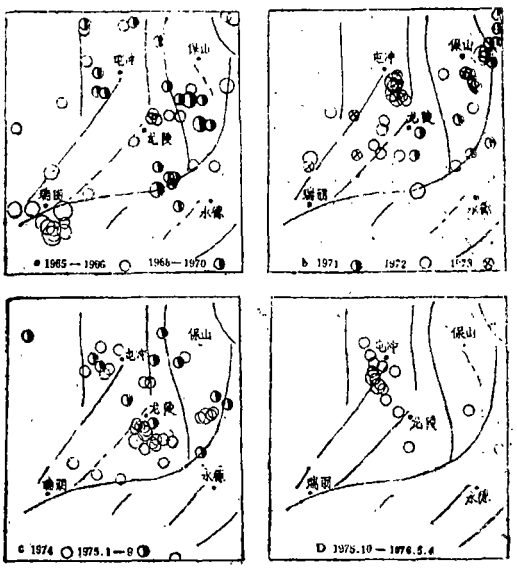

图4　龙陵地震前的地震活动

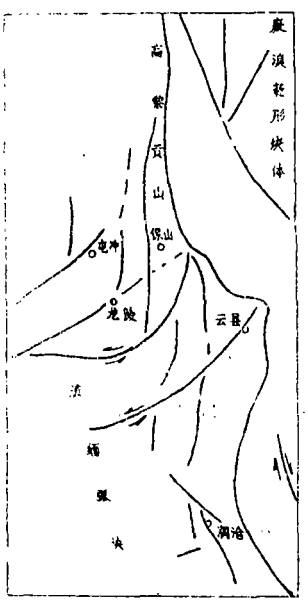

图5　震区及邻区的地震地质环境

三、龙陵震源应力场形成的一种解释

1、震区及邻区的地震地质环境

龙陵地震发生在一个由三条断裂围限的花岗岩块体内。南边和东南边是呈左旋错动性质的畹町弧形断裂；东边是右旋错动的怒江断裂；西北边是呈左旋运动的瑞丽—龙陵断裂。这三条断裂把花岗岩块体切成扇形。它不仅限制了宏观等震线的分布，也限制了初期的余震活动范围（图7）。

震区北部是高黎贡山和怒江断裂等形成的南北向构造；再往东北跨过红河断裂是向南南东插入的康滇菱形断块。震区南边是由南西向北东推移的滇缅弧形块体，从卫星照片上看似有反时针旋转[18]。龙陵震区就处在东北向构造线和南北向构造线之间的交接带上（图5）。

2、震源应力场形成的力源

高黎贡山、龙陵地区、滇缅弧形块体处在缅甸弧中深源地震带的东北侧，印度洋板块长期向这一带施加北东向的侧向作用力。高黎贡山成为压缩带；滇缅弧形块体向北东推移。这使得龙陵—瑞丽断裂相对南边的畹町断裂运动速度较慢。因此龙陵震区的扇形块体受到南边块体快速运动的强烈牵引。北东向的区域应力场促使块体内的局部应力场发生畸变。

图6是根据龙陵地区的构造条件和受力状态抽象出来的理想模式。设想在扇形块体的弧缘受着与切线方向成45°的作用力，由于怒江断裂和瑞丽—龙陵断裂的限制，扇形块体不易转动，作用力被分解成两个分力：一个分力沿弧缘切线方向（即畹町断裂）以断层滑动而失效。畹町断裂上水系一致的左旋扭曲[1]就是这种断层滑动的证据。另一个分力通过扇形块体的圆心并垂直于弧缘。这个方向正好是龙陵主震震源应力场主压应力轴的方向。这个加载应力场是随北北东区域应力场增强而增强，最后在局部区域形成优势分布，并超过岩石强度，导致龙陵大地震发生。

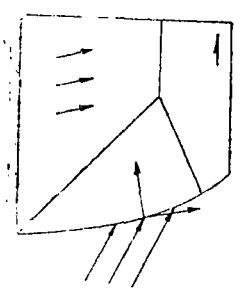

图6 龙陵震源应力场形成模式

当然，龙陵花岗岩块体内的北北西向应力一般情况下要比区域应力场小得多。不过，这块花岗岩完整性比较好，积累的应变能释放较慢。要酿成7级多的大地震，需要长时间的积累能量。更重要的还需要像1970年起川滇大面积区域应力场增强的条件。这些因素可能是该地区历史上强地震活动较少的缘故。

四、主震和强余震后的力学变化

1、对龙陵地震时出现的一些现象的看法

如前所述，龙陵地震的特点之一是没有地震裂缝带，但有4个Ⅸ度高烈度区和大范围的山头剥皮。为了确定两次主震的主破裂区，我们认真研究了龙陵余震的空间分布[14]。发现龙陵地震是由7个相对独立的次级序列组成的强震群，每个序列都有一定的空间时间分布范围。如两次主震之后主要集中在帮公、唐家两个高烈度区，长轴呈北北东和北东东向分布。平达和镇安两个高烈度区极少有余震活动（图7）[14]。震后短时间的余震活动是主破裂带上剩余应力释放的表现。在震源不深，破裂面倾角大的地震，余震在地表震中的集中区指示出主破裂的位置。因此，我们认为帮公、唐家应是7.3、7.4级地震的破裂带。

产生龙陵地表宏观破坏现象和微观余震的分布特征是与龙陵震区的构造条件和介质性质密切相关的。花岗岩介质是一种不均匀的介质。茂木[15]在他的实验中证明了花岗岩在大破裂前先出现不少小破裂，即有不少前震发生。这在龙陵大地震前已观测到（图4）。它表明在龙陵震区应变能不是在一处积累，而在多点集中。因此，容易产生多点破裂或多重破裂。在没有大的断裂通过的地区，释放的

大部分地震能量并非消耗在推动岩块位移的粘滑运动上，而是消耗在分离物质分子键上，造成“脆性”破裂。

在造成龙陵地区花岗岩脆性破裂的同时，可能在大范围内还伴随有长达20分钟以上的慢地震或地形变。这在日本九州中部的阿苏台上清楚地观测到[9]。平达、镇安两处余震少、度烈高可能与此有关。施甸至酒房的环形烈度异常带也可能与这一原因有一定的关系。

2、震后应力场的变化

龙陵地震序列另一个重要特点是六月九日以前的余震活动基本集中于花岗岩体内；六月九日起，北部块外地震活动时，块内余震活动迅速减弱。特别是七月二十一日6.6级地震发生后一段时间内（约半个月），块内基本没有地震活动。龙陵地震序列在空间上这种有先后秩序出现的现象是与各处应力状态不同及其变化有关的。

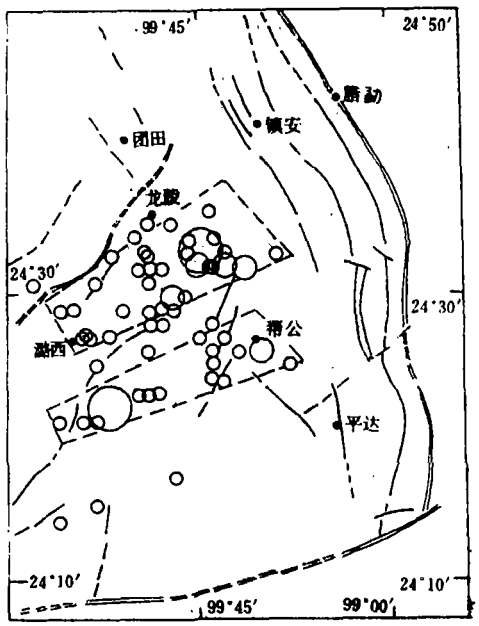

图7 龙陵地震后两天（M≥3.0）余震分布

两次主震的发生释放了大量应变能，使花岗岩石中的应力下降很多，随后5月29日至6月1日的多次中强余震的发生，再次使块体内岩石中的应力下降，使北北西向的应力场逐渐松弛、减弱。这样，本来已增强的北北东向区域应力场也就突出出来。图2中的小震平均应力轴的变化清楚地显示了这一变化过程。从图中可以看到5.29—5.31的平均P轴为176°，6.1—6.9为197°。短短的10天内应力轴变化了20度，即由北北西向转向北北东向。当北北东向小震平均应力场出现优势时，于是分别于6月9日和7月21日在块外北部发生了两次强余震。这两次地震的P轴方位分别为33°和185°，表明它们是在与区域应力场一致的应力场作用下发生的。从这两次地震的震源机制烈度分布前主余震序列及空间分布特征，是与7.3级、7.4级地震有很大的不同的。这种现象可能表明震群型地震在特殊的构造、介质条件下，应力在多点集中，形成多点孕育地震的特点。

3、应力场的衰减。

图2中还给出1976年6月9日至7月3日、7月4日至7月21日小震平均P轴方位，它们分别为196°和197°。但是从1977年1月以后，小震P波初动符号极其紊乱，矛盾比分别达0.38和0.4，不再能够形成统一的应力场。随着应力场的衰减余震活动也逐渐减弱。在龙陵震区里，1977年1月8日发生了一次5.0级强余震以后，直到1980年再没有一次M≥5.0级的地震发生。

五、讨论与结论

屯冲地区是我国云南省有名的火山地区，历史上这里发生过不少最大达6.5级的主震或震群，被认为可能与火山活动有关。邻近的龙陵地区历史上没有查明有过大于6级的地震发生。1966年川滇地区开始进入地震活动的高潮期。这时，瑞丽发生了5.0级震群。这是一组重要的地震，它为畹町断裂和瑞丽—龙陵断裂的西南交汇点解锁，为龙陵地区的应力增强创造了条件。1970年初，发生了通海地震，川滇地区全面进入地震活动的鼎盛时期。接着发生了1973年的炉霍地震，1974年的昭通地震以及不少大于6级的地震。在短短的几年内发生这么多强震，这在川滇历史上不曾有过的。从1971年起，龙陵地区小震活动直线增加，区域应力场迅速增强。最后导致大地震发生。由此看来，龙陵地震是在川滇应力场全面增强的背景下孕育的。大面积的应力加载可能是大地震孕育的外部条件，然而，特殊的地质构造环境可能是大地震形成的内在原因，不同的岩石性质是产生不同地震类型及其特征的主要

因素。

从龙陵地区的强震和小地震机制的详细研究中，我们观察到龙陵地区区域应力场的增强、震源应力场的形成与解体、区域应力场的衰减全过程，并随应力场的改变，出现各种不同地球物理前兆，地震活动也出现兴、盛、衰的不同时期。因此，研究大地震前后的应力场的变化，可能是认识地震孕育过程的一把钥匙。

龙陵地震是发生在一个特殊的构造环境里，由区域应力场的增强，导至震源应力场。两者的主应力轴方向不一致，可以利用小震平均机制结果来观察这一变化过程。对于大多数震源应力场与区域应力场一致的大地震，如唐山地震等。显然利用小地震的平均机制解是不能分清这两者的。这就需要寻求别的研究方法。

参考文献

〔1〕陈立德等编著 1976年龙陵地震 地震出版社

〔2〕刘正荣 晏凤桐 龙陵共轭地震群的特征 地震研究 第一卷 第二期 1978

〔3〕韩新民 赵维城 龙陵地震的四个九度区——双共轭型极震区 地震研究 第二卷 第一期 1979

〔4〕张四昌 徐杰，1976年龙陵地震地震地质特征的探讨 地震研究 第一卷 第三期 1978

〔5〕郑治真等，根据地下水资料的数字滤波探讨唐山大地震的孕育过程 地球物理学报，Vol.22, No.3，1979.

〔6〕邓起东等 关于海城地震震源模式的讨论 地质科学 1976年 第三期

〔7〕刘祖荫 通海地震序列的时空分布和孕震过程的讨论 地震研究 第二卷 第三期 1979

〔8〕阙荣举等 龙陵地震序列的震源机制特征 地震研究 第二卷 第四期 1979

〔9〕Tomeo Nagamune, Time characteristics of crustal deformation of the yunnan earthquake of May, 29, 1976, as inferred from tilt recording, J,phys.earth, Vol, 25, No.2, 1977.

〔10〕晏凤桐等 龙陵地震的震源机制 地震研究 第一卷 第一期 1978

〔11〕阙荣举等 龙陵大震前后平均应力轴向随时间的变化 地球物理学报，待刊

〔12〕阙荣举 龙陵大震前的地震活动 地震研究 第一卷 第一期 1978

〔13〕P.Molnor and P.Tappnnier Cenoyoic tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision, Science, Vol 89, 1975.

〔14〕王绍晋等 龙陵地震序列的空间特征 地震研究 第二卷 第二期 1979.

〔15〕K.Mogi, study of elastic shocles causeol loy the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthguake phenomena, Bull.Earth.Res.Inst.40 125—173.1962.