

印度洋板块向北顶撞与我国西部及其邻区 现代构造应力场和地震活动的关系

罗 灼 礼

(四川省地震局)

我国大陆,特别是西部及其邻区,地震活动频繁,历史上发生过多达8级以上的大地震(图1)。大地震活动区如同一个三角形楔子延伸到大陆内部如此之远,强度如此之大,是世界上独有的。造成这个奇特现象的原因,主要是由于印度洋板块与欧亚板块相顶撞而成的。并且这种顶撞至今还影响着我国大陆,尤其是对我国西部地震活动的影响起着最为重要的作用。

一、印度洋板块向北顶撞的作用及其应力分析

喜马拉雅弧是类似于岛弧的一种板块边缘构造。它是在承受印度洋板块正面强大压力作用下逐渐形成的一种最有利于抵抗正面压力的构造形态。

弧形构造,如同拱桥可以比平板桥承受更大压力作用的原理一样,正面的压力大都传递到弧形构造的两边。

从图1可见,喜马拉雅弧的中段大震很少。在弧的内侧,震源机制介的主压应力轴的方向与弧的走向平行,在弧的外侧主压应力轴的方向与弧的走向垂直^[1]。然而在喜马拉雅弧的两端则发生了一系列大地震,并且大多数浅源地震以水平错动为主。在其西端与俾路支弧交汇部位的帕米尔,兴都库什一带,在其东端与缅甸弧交汇部位的印度阿萨姆地区,缅甸的北部和我国滇、川、藏交界地区都发生过8级以上的大地震。如世界上有名的1897年阿萨姆8.7级地震,1950年察隅8.6级地震就发生在喜马拉雅弧的东端,而且这一地区的地震,应力降较大,b值较低,水平错动的分量较大,地震波的高频成份较多^[2]。上述弧形构造的应力场特征,都是由于印度洋板块向北与欧亚板块相顶撞作用的结果。

不仅如此,印度洋板块向北顶撞作用还使喜马拉雅弧与缅甸弧,俾路支弧分别形成的东、西两端的弧顶深深地挤入欧亚大陆。在强大的压应力作用下,使地壳增厚,垂直运动剧烈。伴随着强烈的垂直运动,地壳亦出现某种缩短,使这种顶撞作用的压应力在广大区域内传递,使那些与最大剪切应力迹线一致的老断裂重新活动或沿最大剪切应力迹线产生新的断裂,使相对坚硬的块体相互运动,造成地震活动有规律的分布。使得8级以上地震的空间分布如同三角形楔子深入到大陆内部。

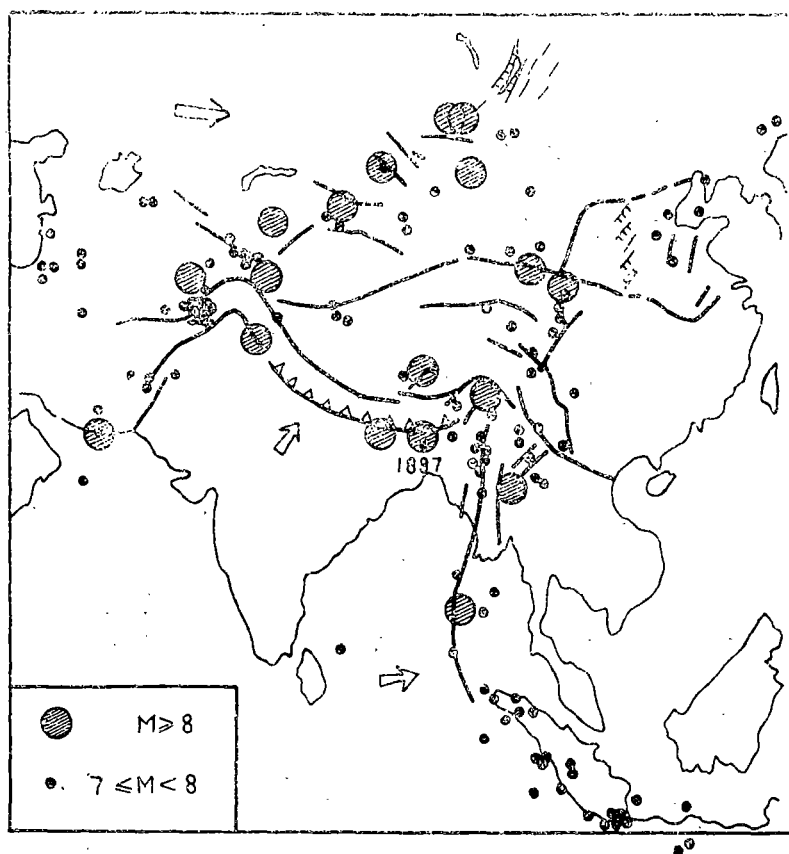


图1 我国大陆及其邻区大震图

因此,研究印度洋板块向北顶撞所造成的区域应力场是很有意义的。为了解释地震活动和震源机制等主要特征,我们采用了均布载荷作用于半无限平板的应力分析方法,似乎能说明一些问题。

根据理论推导^[3],在这种条件下,半无限平板内的最大剪切应力 $\tau_{\max}$ 以及最大,最小主应力 P 和 q 由下式给出。

$$\begin{cases} \tau_{\max} = \frac{P_0}{\pi h} \frac{a}{R} \\ P, q = \frac{P_0}{\pi h} \left(-\alpha \pm \frac{a}{R} \right) \end{cases}$$

式中 P_0 是作用于边界上的单位面积上的压应力, h 是地壳厚度, α 是空间上任一点到均布载荷两端之间的夹角, a 是指均布载荷两端点之间的距离,这里设 a 近似为喜马拉雅弧两端点之间的距离, R 是最大剪切应力等值线圆的半径(如图2所示),这些等值线圆都是以 za 为公共弦。最大主压应力迹线是以弧的两端点为焦点的共焦双曲线族(图3),最小主压应力迹线与之垂直,可以证明它是与这个双曲线族有相同焦点的共焦椭圆族。最大剪切应力迹线与主压应力迹线处处以 45° 角相交(图4)。

应该指出,由印度洋板块向北顶撞产生的区域应力场,实际上远比这里采用的模式所得

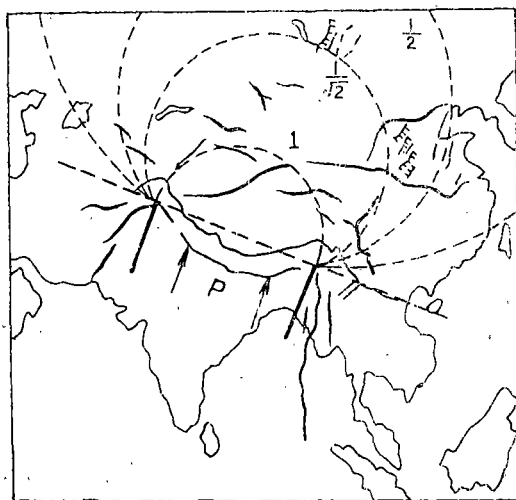


图2 最大剪切应力理论等值线图

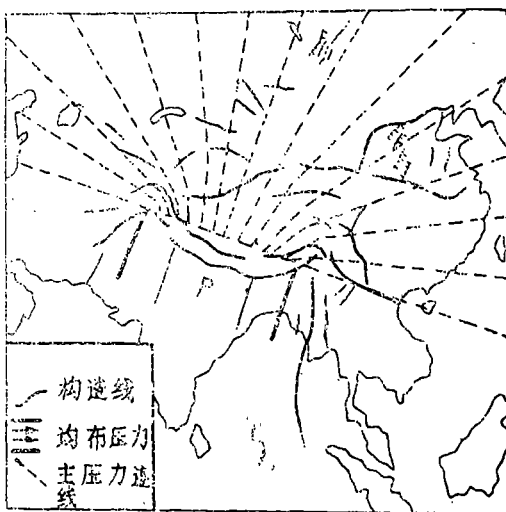


图3 印度板块挤压造成最大主压应力迹线

到的结果要复杂得多，尤其是靠近边界力作用的地区。但是这种简单的模式可以得到一些概略结果。

1. 由最大主压应力迹线所给出的区域应力场最大主压应力方向（即最大主压应力迹线的切线方向），与震源机制介的主压应力轴的平均优势方向是大体相符的。

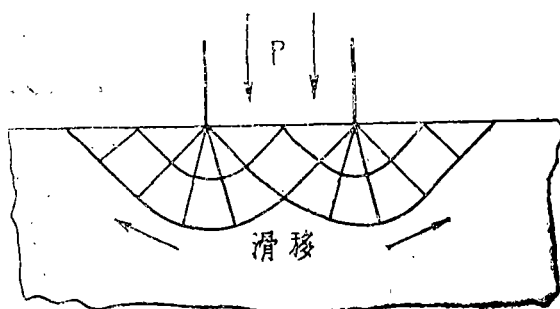


图4

根据震源机制研究结果，我国大陆及其邻区的地震，绝大多数是以水平错动为主的地震，主压应力轴的平均优势方向成有规则的分布：在华北以北东和北东东方向为主，在我国中部南北地震带北段的甘肃、宁夏以及青海等以北东和北北东方向为主，在天山东段和中苏交界的天山地区则以南北或北北西方向为主〔8〕〔4〕。这与图3给出的区域应力场最大主压应力方向在华北是北东东和北东方向，往西逐渐由北东方向转为近南北至北北西方向的结果是一致的。在图3还可以看出，在我国川、滇两省，区域应力场的最大主压应力方向也发生有规则的偏转：在康定以北鲜水河断裂和龙门山断裂上的地震，主压应力方向为北东东方向，在康定以南由近东西向转为北西西至北西方向，这与震源机制介的结果也是一致的〔5〕〔6〕。至于越过江河断裂，震源机制介的主压应力轴又转为以北东方向为主，这一事实的解释我们将在后面论述。

2. 由于沿着区域应力场最大剪切应力迹线介质易于发生断裂、形变、滑移，因此一些与最大剪切应力迹线一致的老断裂会重新活动，或在一些地区顺此迹线产生新的断裂。形成以走向滑动为主的地震带。在我国西部的主要弧形构造带，特别是西南地区形成的大致以北东向弧顶为对称的反S型构造，很可能是代表了由于印度洋板块向北顶撞所造成的最大剪切应力迹线。C. 诺曼 (Roman) 根据对我国西藏、新疆地区的震源机制分析认为 西藏断块相

对新疆向东错动^[1]。莫尔纳和达珀尼尔 (Molnail. Pamd Tapponnier) 根据卫星资料提出由于印度次大陆与亚洲相撞, 中国正在受挤压, 中国有几个地震带似乎是由横向滑动产生的^[8], 并且作了类似的解释。

莫尔纳认为, 在亚洲的大多数古老褶皱带中, 板块边界范围很宽, 以至地震不在一个很确定的平面上发生。在取向上一致的那个参数似乎是P轴, 大致为最大压应力的方向。所以, 在亚洲稳定的地块之间的那些形变带中, 最大压应力方向, 可能比单个地震的滑动方向更有物理意义^[2]。其实, 在我国大陆和邻区大多数浅源地震是以水平错动为主的地震, 滑动向量与地震主压应力轴方向具有同样重要的物理意义。虽然莫尔纳抓住P轴的优势方向来说明印度洋板块与欧亚板块相顶撞的作用是正确的, 但撇开滑动向量并不能说明更多的问题。我国大陆地震与区域应力场的最大剪切应力迹线和地壳块体之间的相互运动有关, 块体之间的边界往往是大的断裂带, 也是地震活动带, 而块体内部地震很少, 如鄂尔多斯地台, 塔里木盆地, 四川盆地等。因此当考虑块体相互运动时, 滑动向量与地震主压应力轴方向具有同样的重要的物理意义, 甚至滑动向量比P轴方向更直接, 更直观。例如我们将在第三节着重讨论的康滇菱形地块往南南东方向运动, 其东边界无论是北西向断裂, 还是南北向断裂都显示出反扭错动的特征以及地震P轴有规则的偏转都说明是由于印度洋板块向欧亚大陆顶撞作用的结果。

二、地震活动特征及大震危险性的讨论

从图1的8级地震的空间分布特点, 考虑到印度洋板块向北顶撞以及缅甸弧和俾路支弧的作用, 在我国及其邻区存在着东、西两条主要地震带。东带从安达曼群岛——缅甸和印度阿萨姆——我国中部南北地震带——至蒙古和贝加尔湖。西带从俾路支弧——兴都库什, 帕米尔——天山、阿尔泰山——至蒙古与东带相交。

东地震带在我国境内的延伸方向与喜马拉雅弧和缅甸弧交汇形成的北东向弧顶的指向基本一致。西带的延伸方向与喜马拉雅弧和俾路支弧交汇形成的向北弧顶的指向约成 45° 。东西两带的这种差异值得研究。西带总体走向为北东向, 仅从印度洋板块向北顶撞似乎还不能得到令人满意的解释, 可能还应考虑大西洋中脊的扩张, 引起欧亚大陆向东运动的可能性以及太平洋板块的俯冲作用。西带很可能是由于欧亚大陆向东运动过程中受到了印度次大陆向北顶撞的阻挡作用, 在大范围的东西向压应力和范围较小, 但更强大的南北向压应力共同作用的结果。

当然, 太平洋板块在日本岛弧下的俯冲对我国大陆, 尤其是东部地区地震活动的影响是不能忽视的。但从更靠近岛弧的黄海和东海的地震活动无论是频度和强度都大大低于华北地区, 说明这是太平洋板块的俯冲作用对我国大陆尤其是西部地区的地震活动影响是次要的, 而印度洋板块向北顶撞的作用是主要的。这可能是由于海洋板块俯冲到另一个板块下面所造成的应力, 要比大陆相顶撞引起的应力小得多。

从近年来地震活动的时间序列, 华北地区和西南地区的地震活动存在着某种呼应关系, 尤其是1976年龙陵、唐山、松潘、宁河、盐源等相继发生地震, 在西南和华北来回跳迁, 表明华北和西南同受统一的应力场控制。但是不同地区的地震活动周期是不同的, 华北的长, 西南的短。在四川境内, 从甘孜到康定的鲜水河断裂, 从1923年起五十年就发生了三次七级

以上地震,而南北向的安宁河断裂和小江断裂的地震活动周期却比鲜水河断裂长,但比华北短,而松潘、龙门山地震带的活动周期又介于鲜水河断裂和安宁河断裂之间。

地震活动周期的不同,除介质条件外,可能主要是与所受到的应力作用大小不同有关,而活动强度不同,可能主要是由于构造条件引起应力集中范围不同有关。从图2可见,华北地区所受到的最大剪切应力至少比西南地区小一半(考虑到弧的两端的应力集中),而鲜水河断裂比安宁河断裂所受到的剪切应力大,这或许就是各地区,各地震带地震活动周期和强度不同的原因之一。

由于是在统一的应力场作用下,因此地震活动,尤其是大地震就存在着某种内在的联系,存在着明显的区域转移和地震迁移现象。

地震区域转移是指地震活动区随时间发生阶段性的大规模空间转移现象。从图5可见,

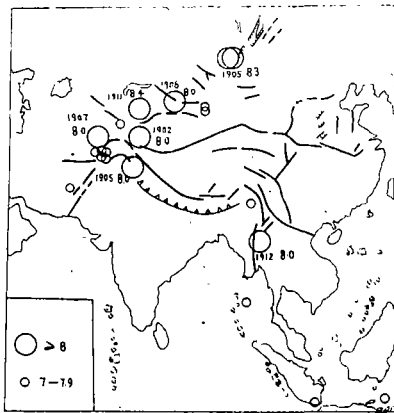


图5 1909—1914震中分布图

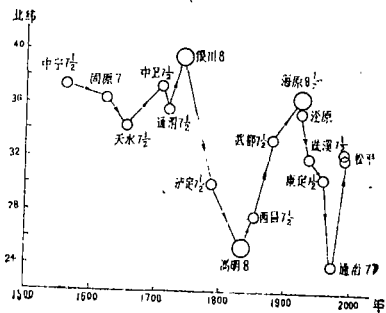


图6 南北地震带大震迁移图

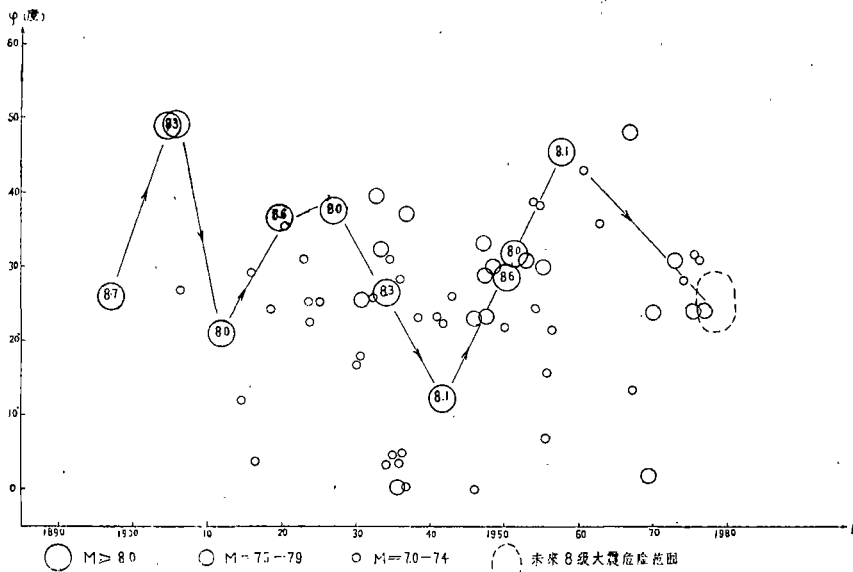


图7 东地震带8级地震迁移图

从1900年至1914年大地震集中在西带,此后转移到东带。在东、西两大地震带上8级地震又存在着明显的来回迁移的现象。

在东带,我们早就注意到在我国中部南北地震带7级以上地震有南北来回迁移的现象(图6),从整个东带上看,8级以上的地震也存在着来回迁移的现象(图7)。平均十年左右此带要发生一次8级或9级以上地震。

随着8级地震的迁移,地震活动区也发生转移。一般在8级地震发生前后,在其周围地区会发生一些次一级的地震,尤其是在弧顶附近发生的8级地震更为明显。如图8,9所示,1934年尼泊尔8.3级地震和1950年察隅8.6级地震前后,在周围地区都发生了一连串的7级以上地震,并且喜马拉雅的西端和缅甸弧的南端的地震活动也活跃起来。

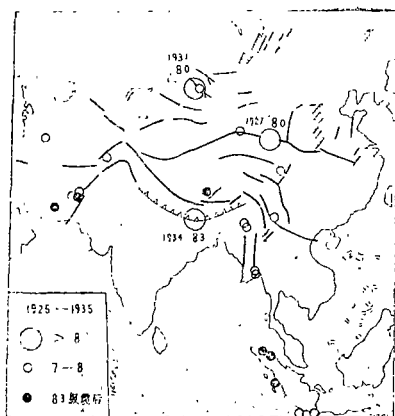


图8 1925—1935震中分布图

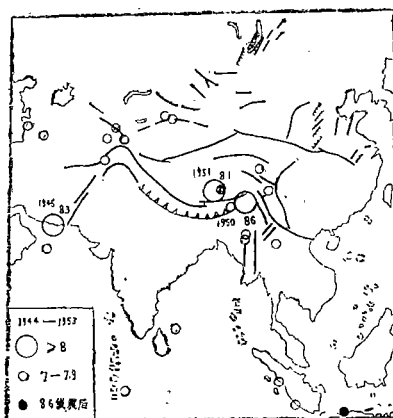


图9 1944—1953震中分布图

不仅如此,在弧顶附近的8级地震,还有从喜马拉雅弧的东段到缅甸弧的北段,来回跳迁的现象(图10)。

因此,8级地震的迁移,实际上也代表了地震活动区的迁移。这种迁移现象,反映了大范围应力的积累,释放和调整的过程。当弧的一端发生强震,也会影响另一端的的地震活动,同时也使受印度洋板块顶撞的中国大陆及其邻区的区域应力场发生某种变化,一些地区的应力更趋集中,另一些地区的应力则相对释放,改变原来的受力状态。因此可以认为所谓地震迁移或相互呼应现象,本质上都是应力场发展变化的结果。

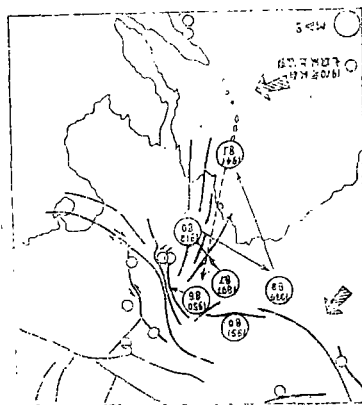


图10 北东向弧顶8级地震迁移图

从图11可见,从1954年至1957年7级以上地震活动在整个东带是比较均匀分布的。1957年蒙古8.1级地震后,地震活动区已经南迁至弧顶附近。尤其是1970年通海7.7级地震后,7级以上地震主要集中在我国西南川、滇两省,而在北段的地震活动则处于相对平静。在予计

西南地区的高潮趋于结束时，地震活动区才往北迁，西北地区可能才活跃起来。

自1957年蒙古地震后，东带已经近22年没有发生8级地震了。根据上述大震迁移和8级地震前7级地震活动特点，未来8级地震的危险主要在弧顶附近（图12）。

从图13a、b可见，从1970年起这里的“震势”很类似于1956年察隅8.6级地震之前的“震势”。察隅地震前，从1946年起在它周围发生了六次7级以上地震，並形成了一个地震围空区。现在，从1970年起，通海、炉霍、永善、龙陵、松潘又先后发生了七次7级以上地震，也形成了一个七级地震的围空区。不同的是，现在的围空区的位置比察隅地震前向东偏移了 3° 左右。从图10也表明察隅8.6级地震后，下一次8级地震可能要往东移。

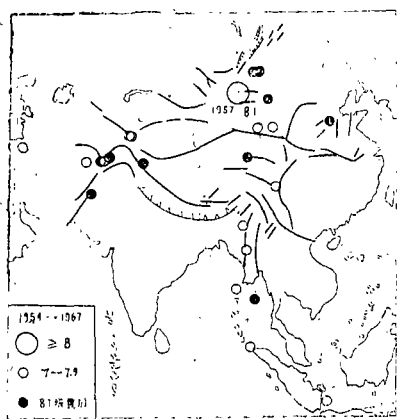


图11 1954—1967震中分布图

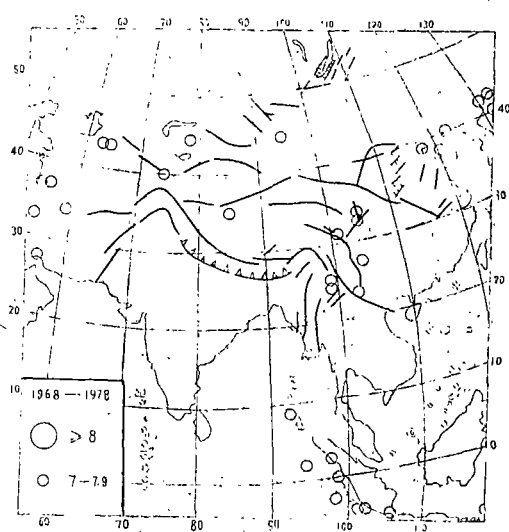
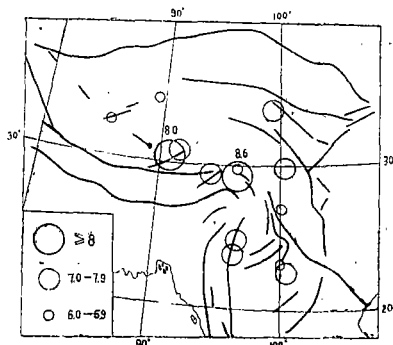
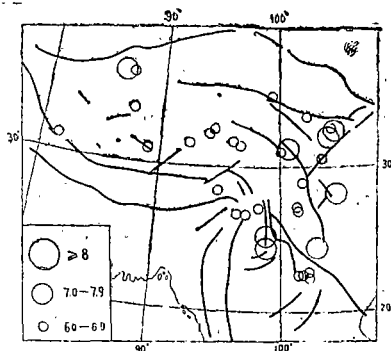


图12 1968—1978震中分布图



a 1966—1971震中分布



b 1970—1978震中分布图

康滇菱形地块往南南东方向运动的讨论

由鲜水河断裂, 安宁河断裂, 则木河断裂, 小江断裂, 红河断裂和巴塘断裂所围成的康滇菱形地块的运动方式, 阚荣举等从震源机制都进行了研究[5,6,9], 虽然他们各自所运用的方法和考虑的角度不同, 但都认为康滇菱形地块有向南南东方向运动的趋势。本文将在此基础上进一步阐述这一观点。

1. 地质构造和地壳形变

如图14所示, 构成菱形地块东边界的鲜水河断裂, 安宁河断裂, 则木河断裂和小江断裂都具有反扭错动的特点。

根据宏观考察和震源机制, 发生在鲜水河断裂上的1973年炉霍7.9级地震是反扭平推错动的地震[10][11]。而且据1975年相对1960年水平形变资料表明, 炉霍地震使鲜水河断裂发生反扭错动, 位移最大在震中附近, 约达1.7米(见图15)。

不仅现代地震的地裂缝具有反扭错动的特征, 从新构造运动, 在第四纪砾石层中的新断层, 都说明鲜水河断裂长期以来作反扭运动。在炉霍附近, 主断裂南西侧发育了9条羽状支流, 在主干断裂处都作北西向的转折, 然后流入鲜水河。根据四川省地震局地震地质队的工作, 鲜水河断裂强烈地斜切了早期大规模的北北西向的褶曲和断裂构造, 在炉霍北西的旦都附近, 鲜水河断裂的北东盘上被剪切错动的早期以二迭系为核心的一翼倒转褶曲构造, 又在道孚附近的麻孜将军桥, 鲜水河断裂的南西盘出露。据此估计相对反扭错动了约70公里。

走向南北的安宁河断裂, 主要断于下元古界花岗岩, 震旦系, 二迭系以及中生界的花岗岩并错断了侏罗纪盆地。晚近活动强烈地表现在冕宁至西昌一段上。从河流阶

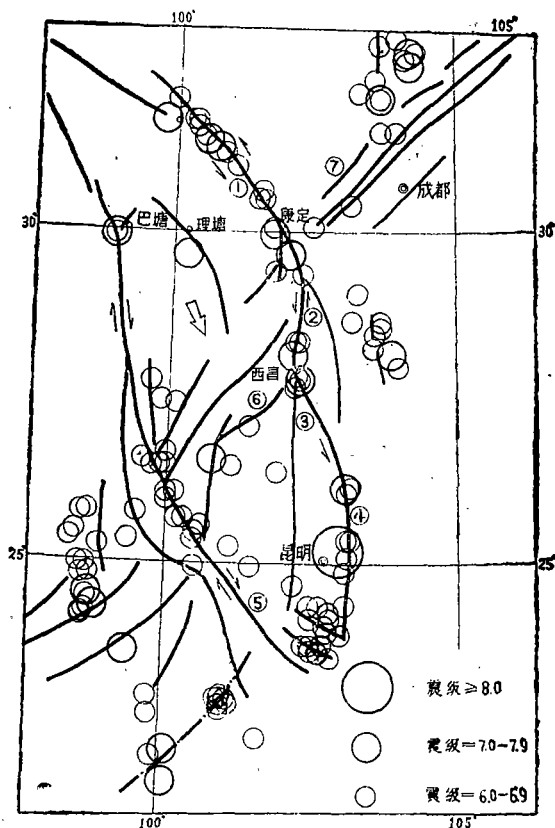


图14 康滇菱形地块弧南南东方向运动及震中分布图

1. 鲜水河断裂 2. 则木河断裂 3. 安宁河断裂 4. 小江河断裂 5. 红河断裂 6. 金河箐河断裂 7. 龙门山断裂

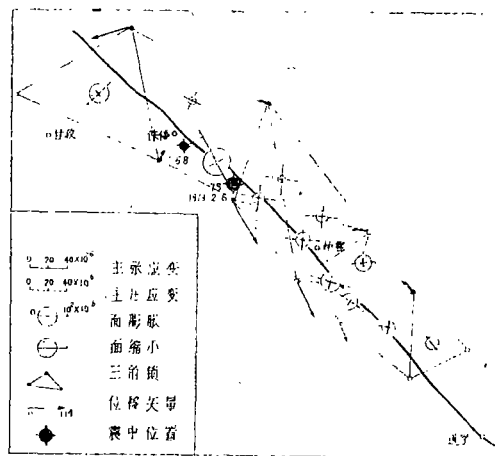


图15 炉霍7.9级地震前后水平形变

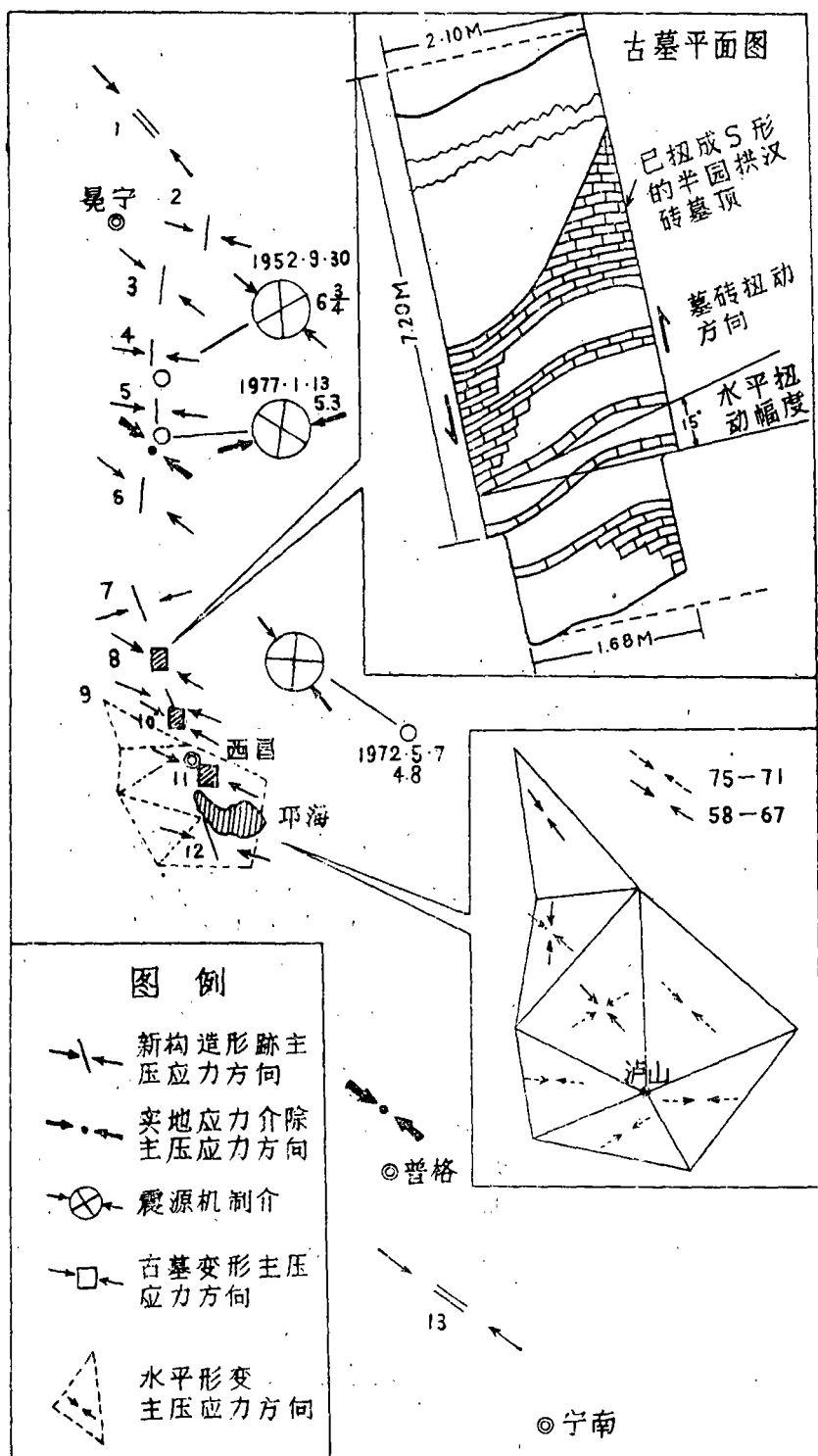


图16 安宁河则木河断裂构造运动分析 (据四川省地震局资料室改作)

地, 洪积扇分布, 人文时期古遗迹的分布, 秦汉以来古墓的压扭性变形, 历史地震的考察, 现今应力的解除以及地形变的侧量, 均说明安宁河断裂是在北西向构造压应力作用下的压扭性断裂, 具有反扭错动的特征(图16)

走向北北西向的则木河断裂, 断于古生代地层, 其把东段发育较早, 据四川省地震局地质队工作的结果, 可能在三迭纪前就开始形成(断裂破碎带有燕山期花岗岩侵入), 北西段发育较晚, 可能在白垩纪末断裂显示才较清楚。断裂规模在南东段普格, 宁南一带大, 带宽可达7—10公里, 越往北西规模越小, 但晚近活动越强烈。据记载, 秦汉以前为沼泽的邻海, 至今湖面不断扩大, 湖水不断加深, 最深处已有36米。类似邻海这类断陷盆地或断陷谷在西南地区为数不少, 它们大都在断裂端部, 拐弯或交汇部位, 是压扭性断裂在水平构造应力作用下长期垂直差异运动的结果(作者将在另文讨论)。根据地质、地震、应力介除等资料说明则木河断裂也是反扭错动为主的活动性断裂, 尤其是与安宁河断裂相汇部位的西昌邻海一带活动更为强烈, 历史上发生过多次破坏性地震, 是个地震“窝”。根据四川省地震局所做的历史地震考古工作初步认为发生在西昌的1536年7¼级地震, 1732年6¼级地震, 1850年7½级地震的极震区都在邻海附近。

与则木河断裂相接的小江断裂是具有反扭错动为主的压扭性断裂〔4〕〔6〕。红河断裂以及巴塘断裂具有顺扭错动性质〔6〕。

因此, 由这几条断裂所围成的康滇菱形地块从整体上有往南南东方向运动的趋势。但造成这种运动的原因, 可能不是如文〔5〕中所说的青藏高原整体作用右旋运动驱使本区菱形地块向南南东楔入的结果, 更可能是由于北东向弧顶挤压川滇藏交界地区, 造成地壳块体沿最大剪切应力迹线向侧旁的滑移。

至于红河断裂南西侧的龙陵, 腾冲、耿马、澜沧一带主压应力以北东向为主〔5〕〔6〕。这一事实也与印度板块向北顶撞作用有关。由于北东向弧顶深深地挤进川滇藏交界地区, 势必带动西侧的地块向北东方向滑移。从卫星照片上, 清楚地显示出龙陵以南的地块向北东方向推挤, 强烈地挤压红河断裂。走向北西的哀牢山和无量山很可能就是由于北东向挤压作用所造成的。同时, 由于地块向北东推进的不均匀性, 产生了一些走向北东或北东东正在发育的断裂, 发生了一系列地震, 显示出顺扭错动的特征。同样在弧顶另一侧的西藏波密、朗县、当雄一带的地块也有向北东方向推进的趋势, 形成了至少有两条北东向的反扭错动为特征的断裂, 导致了雅鲁藏布江的大拐弯, 朗县、波密、当雄等地的强震活动带。据四川省地震局对当雄地震的考察, 通过当雄的北东向断裂新活动明显, 发生在这条断裂上的1952年当雄7½级地震地裂缝显示出反扭错动的特征。因此北东向弧顶两侧存在滑动向量相反的北东向断裂及其强震活动, 可能正是由于北东向弧顶深深地挤入川滇藏交界地区所伴生的现象。这可能就是菱形地块向南南东方向运动的同时, 加以北东向挤压所获得的主压应力轨迹, 总体上最符合现代构造应力场图象〔9〕的介释。

2. 地震活动和地貌特征

从菱形地块往南南东方向滑移的观点, 可以较好地解释本区的地貌特征和地震活动的一些特点。

由于边界的拐弯, 转折处运动将受到阻挡, 因此地壳垂直运动将显得非常强烈。如在康定以南有海拔7590米的贡嘎山。形成这一地貌特征除了由于在构造应力作用下断裂端点附近有明显的差异运动外, 主要是由于菱形地块沿鲜水河断裂向南东方向滑移时受到了四川盆地

的阻挡,使地壳急剧隆起,形成了世界上在这一经度上的最高峰。同样在西昌、宁南、巧家、东川这些转折拐弯处也有明显的垂直差异运动。

由于菱形地块的边界是从鲜水河断裂转安宁河断裂,则木河断裂至水江断裂,所以地震活动就集中分布在这些边界断裂上,因此作为康滇地轴的两支南北向断裂上的地震活动就出现了明显的差异:西支安宁河断裂的北段地震多,强度大,在西昌以南却较少,而东支小江断裂却相反,南段地震多,强度大,北段地震少。

在菱形地块东侧马边、永善一带以及茂汶、松潘、武都一线上的地震活动,从表层看地震活动带与断裂展布关系不明显,不少地震,如1974年永善7.1级地震,1976年松潘,平武7.2级地震以及1933年茂汶7.5级地震,地表都没有明显的断裂。同时在四川东部的自贡、江安、长宁的弱震活动带也都没有明显的相同方向的断裂与之对应。这些地震活动带可能是由于受印度洋板块向北顶撞作用,沿着最大剪切应力迹线正在发育的新的断裂运动,越往东地震活动越弱,显示出北东向弧顶的挤压作用主要是在北东方向上及其近侧,越往东,所受到的应力越小。

3. 关于运动速度

菱形地块的滑移,必然会反映在位移上。也就是说喜马拉雅运动以前与现今康滇菱形地块的地理位置是不相同的。我们注意到康滇古陆西缘,即在西昌以西的金河——菁河断裂(见图14)北延到龙门山深断裂可能是一条古老的板块俯冲带或缝合线^{[12][13]}。沿此带也是现今的重力梯级带,这条重力梯级带向西南延伸到大理后又拐向北西至中甸。我们推测这条深大断裂和重力梯级带至少在两千万年前是顺北东向龙门山断裂延伸至中甸附近,后来由于印度洋板块向北顶撞,促使康滇菱形地块往南南东方向滑移,使这条断裂的位置发生了变化,造成了此区的二迭系和三迭系的岩层相对龙门山断裂向南东方向推进了约100公里。这一数字与前述从鲜水河断裂两侧的构造得到的70公里的水平错距是大体相同的。若果以两千万年来估计,则菱形地块的平均运动速率为0.5厘米/年。这个结果与国家地震局震源机制组根据鲜水河断裂带上的地震,用平均错距方法,求得1811—1973年的平均滑动速率为0.47厘米/年也是一致的。

参 考 资 料

1. 叶洪等 喜马拉雅弧形山系及其邻近地区现代构造应力分析 地质科学 1975(1)
2. P. Molnar. Fault-Plane Solution of Shallow Focus Shock and Recent Tectonic movement of Asia. Earth and Planetary Science Letters 1973, 19, 2 101—110
3. M. M. Frocht 光测弹性力学 II 59—72 科学出版社 1966
4. 时振梁等 我国强震活动和板块构造 地质科学 1973(4)
5. 李坪、汪良谋等 云南、川西地区地震地质基本特征的探讨 地质科学 1975(4)
6. 阚荣举等 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨 地球物理学报 1977(2)
7. Roman, C. Buffering Plate. Set of Continental Collision, New Scientist 57 1973 830

高原区受到的构造应力场的特征。当然,在青藏高原东部出现的近东西向挤压力也不能排除太平洋板块向西推挤的作用。就四省(区)范围内构造运动总的特点而言,仍以印度板块向东北推挤的作用为主。因此,四省(区)的地震活动,其动力来源也主要是印度板块的强大挤压力作用所致。

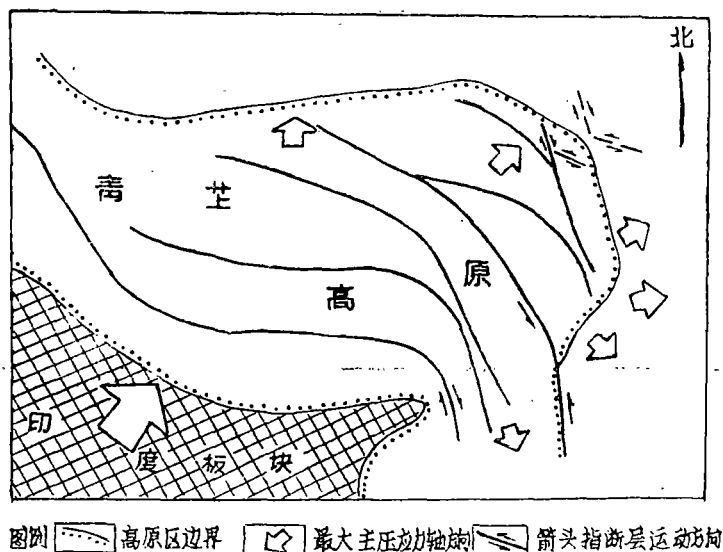


图16

(上接第21页)

8. Molnár, P and Tapponnier, P Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision Science 189 1975 4201
9. 中国科学院地质研究所实验地震研究组西南地区现代构造应力场与地震活动性的实验研究 地质科学 1977(1)
10. 蜀水 炉霍7.8级地震特征和该区的地震活动性 地球物理学报 1974(2)
11. 康荣昌等
1973年炉霍7.9级地震地裂缝特征及地震成因的初步探讨 地球物理学报 1976(1)
12. 中国科学院地质研究所大地构造编图组 中国大地构造基本特征及其发展的初步探讨 地质科学 1974(1)
13. 四川省地质局106地质队四分队 康滇地轴中段前震旦纪地质特征与板块构造的关系 地质科学 1975(2)