

# 西海固地区近期地壳运动讨论

秦保燕 徐纪人 姚立珣 李亚荣

(兰州地震研究所)

## 引 言

由震源机制的统计结果推断,我国大陆板内的地震力源主要来自于印度板块和太平洋板块对中国大陆的水平推挤作用,同时也有垂直力参与作用<sup>[1]</sup>。虽然垂直力居于次要地位,然而它对地震的孕育和发生却起着十分重要的作用。事实上,大地震也通常发生在有强烈的垂直运动地区。因此研究我国大陆地区的垂直力源以及垂直力源分布随时间的变动情况,无疑对研究地震成因和地震预报是十分重要的。目前对于大陆板块下部上地幔的运动情况了解不多,因为要直接地、连续地探测上地幔的重力分异、相变、地幔柱等的动态变化需要耗费大量的投资。本文鉴于垂直力的作用对地震图像变化有重要影响及受垂直力源作用的震源区在发震时震源机制解中包含有垂直力的信息出发来了解大陆板内的垂直力源。利用这个方法还可进一步研究大陆板内垂直力源的动态变化。

根据上述思路本文对西海固地区的中、小地震时空分布以及中、小地震机制进行了详细分析研究,发现西海固地区地壳不仅承受着较强的北东向水平应力场,而且该区地壳还有明显的垂直运动,其垂直运动位于南北地震带上;在这一地区近几年来发生的中强地震近南北向的断层面解和等震线长轴方向是一致的。该区垂直运动的特点将对西海固地区原有的北西向构造起重要的改造作用,并对今后该区的地震活动起重要影响。

### 1. 由地震活动探讨西海固地区地壳垂直运动力源

根据震源机制的研究,我国大陆浅源地震的主要力源是太平洋板块和印度板块对我国大陆的推挤作用,同时也存在着独立的垂直力源(由平推兼正断层地震资料来证明)。此外大地测量资料表明,在我国许多地方存在着纵横尺度相近的垂直形变区,这些形变区很难用区域水平力来解释。特别是在大地震前后,震中及其附近地面的垂直形变表现更为剧烈。这种种现象表明,地壳中不仅存在着巨大水平应力而且也存在着垂直力所引起的应力。根据文献<sup>[1]</sup>的研究,对于具有软夹层的分层地壳来说,在上述水平力和垂直力的共同作用下,在有垂直力作用的地区和其附近的上地壳中就容易孕育地震和发生地震。我们认为垂直力来源于上地幔。

众所周知,上地幔的物质是处于不稳定的状态之中,由于温度的不均匀,物质密度的不均匀以及物质具有流动性等特点,上地幔的物质会产生重力分异、相变、物质对流等运动,甚至在某些地方形成地幔柱。上地幔的这些运动给地壳提供了垂直力源。因为垂直力源远不如水平力源那么稳定,垂直力源的空间分布随时间是变化的。例如文献<sup>[2]</sup>列举了某些大地震前同一地区不同时期的环形空区图像,其前后图像差别很大。这种图像上的差别用垂直力随时间的变化来解释比较合理。根据文献<sup>[2]</sup>,在垂直力作用的上方地壳中剪应力很小。剪应力主要分布在垂直力作用的边缘地区,由于在边缘地区还有水平应力的叠加,因而这里的应力值可能比较大,中小地震比较发育,这样就会造成环形地震空区。当垂

直力的空间分布随时间有变化时，环形空区也随之变化。这样我们就可以由环形地震空区随时间的变化间接地研究上地幔物质的垂直运动。

关于环形空区的地震图像，我国有过很多研究。在这里我们列举了西海固地区中小地震活动图，为了和大地测量资料进行对比（大地测量资料是1974~1978），我们也取了同期的地震活动资料，并把小震活动资料点到大地测量所得到的等值线图上，如图1所示。由图1可以看出在西海固地区最大的负形变区（即下沉区）位于海原至同心地区，在同心附近下沉幅度为最大。1974~1978年小震活动基本上围绕着这一近南北向的下沉区边缘。此外，在同心附近小震活动也较集中。由此可见，环形地震的围空图像是与地面垂直运动的时空图像基本相符的。此外从图1还可以看出在固原的西北和西南分别存在小尺度的地面下沉区和隆起区，而其小震活动也基本上围绕垂直形变较大的地区，特别是在上升区和下沉区的过渡地带，这里的小震活动特别密集，而在上升区和下沉区内部小地震活动则相对较少。特别值得指出的是，一些较强的小震均发生在大地测量资料所显示的地面形变区外围或是上升区或下沉区的过渡地带。这说明这些地带是垂直剪切应力最大的地区。中强地震就发生在上述形变区边缘和环形空区的边缘，例如1982年4月14日海原5.5级地震就发生在这样的地区。以上这些现象是符合文献〔2〕的理论计算结果的。

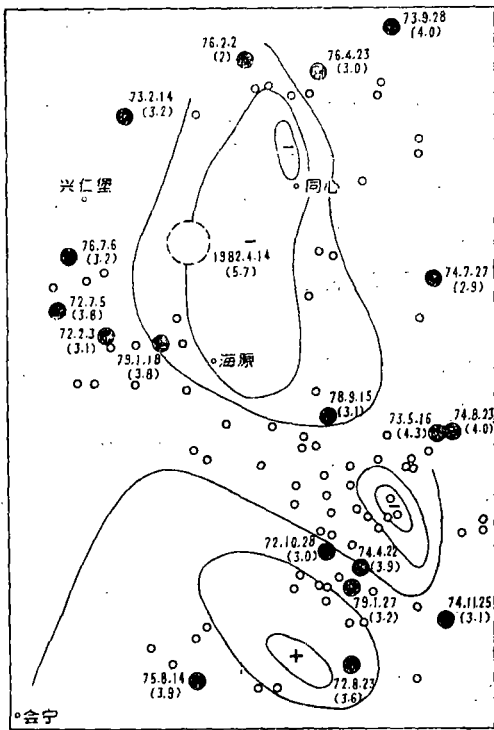


图1 小震活动与大地测量对比图

这个大面积空区我们认为是在这一时期上地幔有一大面积的上升运动所引起的。

由上述所述，我们可以由环形空区的分布初步确定地壳垂直运动较强烈的地区，在此基础上再进一步判断中、强地震危险区。

上述所讨论的地壳上升和下降运动的区域尺度是比较小的，按照理论计算，当地幔运动的面积比地壳厚度大得多时，则在垂直力作用区的边缘不仅剪切应力大，而且拉应力也较大。在垂直力作用的地区内剪切应力很小且拉应力也并不大。这样上地幔垂直运动的面积越大，则地震环

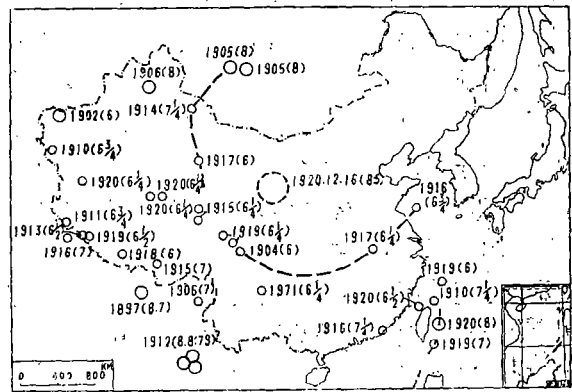


图2 海原大地震前的大空区(1897—1920.5)

形空区将表现更加明显。例如1920年海原大地震前23年曾出现面积很大的空区\*，如图2所示。

\* 郭增建，内陆特大地震——海原大震的强度讨论，1982。

## 2. 由震源机制资料探讨西海固地区地壳的垂直力源

由于我国的大地震的震源机制是以平推为主的，且断层面比较直立，因此人们比较重视由它们去论证中国地震的水平力源以及这种水平力源与板块运动的关系。然而却忽略了从震源机制资料中去提取研究垂直力源的信息。下面我们根据西海固地区的震源机制资料作以下三个方面的具体讨论。

### (1) 由西海固地区的区域应力场研究该区地壳的垂直运动

西海固地区位于1920年海原8.5级大震的极震区范围内，当时大震的震源断层面走向为北西西向。大震发生后该区内发生了很多中强地震（图3）以及发生了更多的小震。我们对1970年以后的中、小地震重新进行了震源机制处理，其结果如表1所示，各地震的P波初动吴尔夫网图附在表1之后。

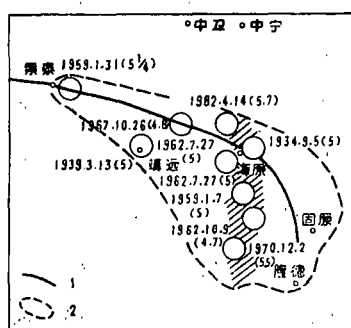


图3 海原大震极震区范围内的中强地震活动

1. 1920年地震断裂带 2. 1920年极震区

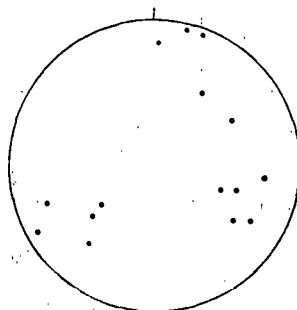


图4 西海固地区及其附近主压应力轴在吴尔夫网上的投影

根据表1我们可以画出主压应力轴在吴尔夫网上的投影，如图4所示。可以看出该区主压应力以北东方向占优势，这一方向与中国东部地区震源机制所推断的主压应力方向大体一致。这可能就是太平洋板块和印度板块对中国大陆推挤作用所产生的水平应力场，因之我们可视北东方向的主压应力为该地区的区域应力。除此之外，该区还存在北西方向和近南北向的主压应力。上述主压应力的汇聚方向在海原地区及其附近，如图5所示。出现这种现象的原因还不太清楚，但联系到前述的海原附近的下沉区和环形空区，主压应力汇聚在海原地区附近可能与该区的垂直下沉运动有关。

### (2) 由西海固地区平推兼正断层机制解讨论该区地壳的垂直运动

根据表1我们可以画出西海固地区中、小地震吴尔夫网投影简图，如图6所示。

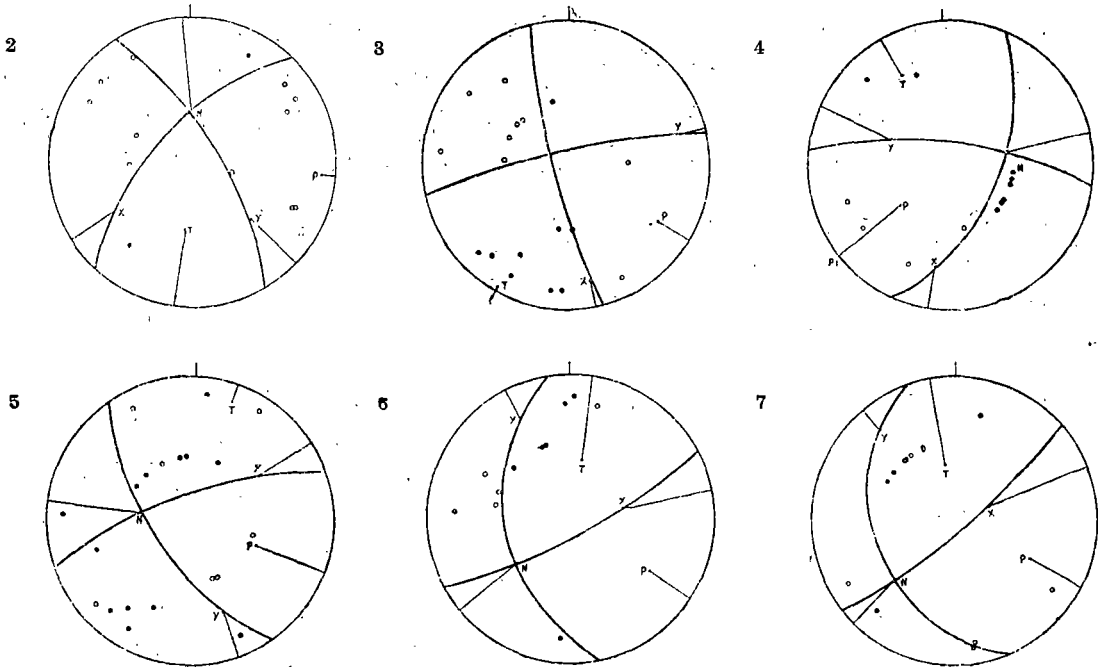
由图6可以看出，围绕着海原地区的地震几乎均为正断层，而其外围则为逆断层。这一现象也正好说明海原及其周围地区地壳中存在着下沉运动，图6中的正断层有可能是地震时地壳的重力作用参与的结果。根据表1中的平推错动分量和倾向错动分量的方位和夹角，我们求得这些正断层的垂直力与水平力之比为0.35。这一结果说明该区的垂直力是相当显著的，因而它在该区的地震孕育和发生的过程中将起着十分重要的作用。

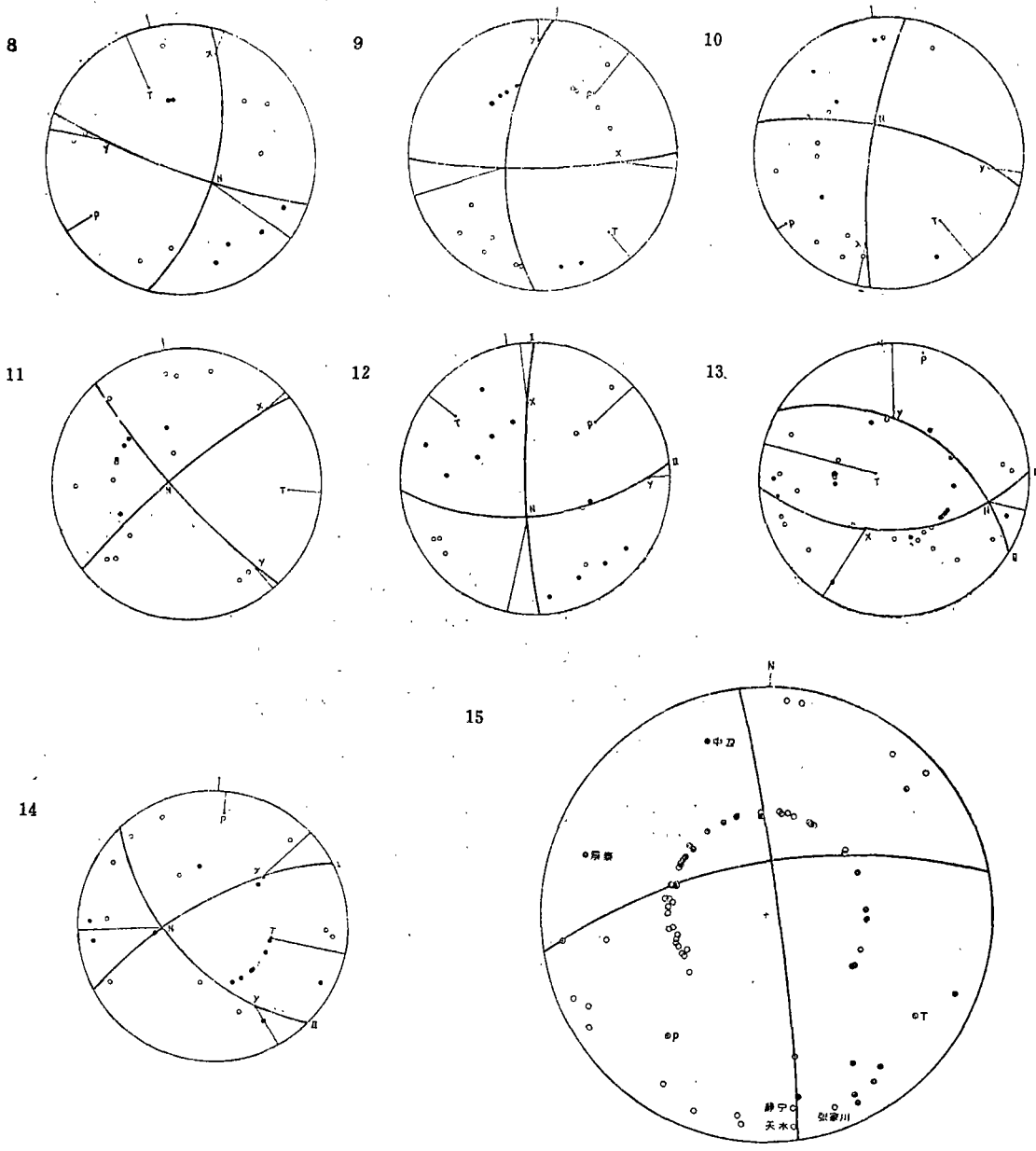
以上是由震源机制资料独立论证海原至同心地区存在着地壳下沉运动的证据，而这一推断恰好与1974年至1978年该区的垂直形变结果完全符合。因此由近年来该区中强地震活动呈现南北向的条带分布（看图6），1970年西吉地震和1982年海原地震宏观等震线呈南北向分

西海固及其附近的中小地震机制解

表 1

编号	地震日期		M	节 面 A			节 面 B			错动力 X <sub>A</sub>		错动力 X <sub>B</sub>		主 应 力						备注	
	震中位置			走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	倾角	方位	倾角	P (压)		T (张)		N (中等)			
	经度	纬度												方向	倾角	方向	倾角	方向	倾角		
1	1970.12.8	35°09'105°55'	5.1	18	NW	46	284	SW	86	194	4	288	44	230	33	339	26	100	46	走滑兼 正断层	
2	1974.1.26	34°59'104°34'	3.5	50	44	SE	60	149	SW	72	238	22	149	30	96	15	189	38	358	53	走滑兼 逆断层
8	1974.4.22	35°49'106°05'	3.9	344	NE	80	76	ESS	80	164	10	74	10	120	15	208	1	297	75	走滑兼 正断层	
4	1974.12.2	35°3'106°32'	3.7	26	NW	51	100	SSW	72	191	18	296	42	234	42	332	19	79	46	正断层	
5	1976.2.13	36°05'106°13'	3.6	20	68	SE	70	323	NE	60	55	30	158	21	109	38	17	6	275	51	正断层
6	1976.4.23	37°08'105°57'	3.0	30	62	NW	75	350	NEE	40	79	50	334	13	124	23	10	45	231	36	逆断层
7	1976.7.6	36°46'104°56'	3.2	26	48	NW	80	338	NE	30	68	60	320	10	116	29	350	48	225	27	逆断层
8	1977.6.4	35°37'105°0	3.0	26	NW	60	121	NE	80	33	10	302	30	250	13	349	30	137	56	逆断层	
9	1977.7.9	36°20'106°17'	3.3	30	82	NNW	80	358	E	60	89	30	352	8	34	28	132	15	245	56	正断层
10	1977.7.17	36°12'106°18'	3.1	13	SEE	75	110	SW	72	200	20	104	15	240	4	148	25	335	45	走滑兼 正断层	
11	1977.8.30	35°52'106°22'	3.0	58	SE	80	146	NE	80	57	10	146	10	13	1	102	14	282	75	走滑兼 逆断层	
12	1979.1.18	36°35'105°29'	3.8	23	10	SEE	82	95	NNE	60	5	30	95	8	59	26	320	16	203	58	走滑兼 正断层
13	1980.6.24	35°01'106°57'	4.3	20	93	N	50	127	NS	45	218	45	6	40	20	2	291	73	109	16	逆断层
14	1980.6.24	35°00'106°58'	3.9	14	58	SE	70	132	NE	56	44	34	148	20	2	9	99	42	264	49	走滑兼 逆断层
15	1982.4.14	36°48'105°33'	5.5	22	352	W	84	79	S	64	169	25	262	5	219	20	123	13	4	63	走滑兼 正断层





布及其震源机制解中有一近南北的P波节面，以及前述的环形空区呈南北方向和地面下沉区呈南北展布来看，西海固地区正在经历着改造该区北西西向老构造的运动，这种结果是以垂直运动起重要作用的，而这种运动势必对该区今后的中、小地震活动继续发生影响。

(3) 由西海固地区地壳内的特殊地震类型讨论该区的垂直力源

在我们重新处理西海固地区的中、小地震震源机制过程中，我们发现了四次特殊的震源机制类型。这四次地震中有二次发生在固原附近，一次发生在西吉附近，还有一次发生在同心。根据文献<sup>[8]</sup>对该区的震源深度的讨论，这里的中、小地震震源深度大多分布在30公里范围内，最深的地震也不超过50公里。根据文献<sup>[4]</sup>，该区的地壳厚度也大致在50公里左右。这四次地震的基本参数如表2所示，其震源机制的吴尔夫网投影如附图所示。

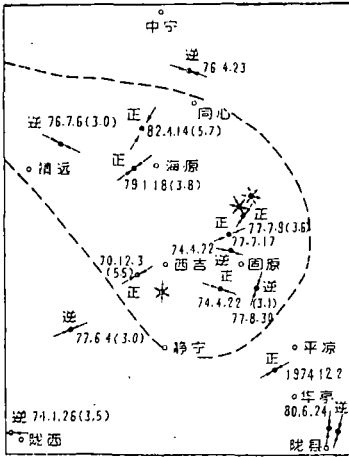


图5 主压应力轴在平面上的投影

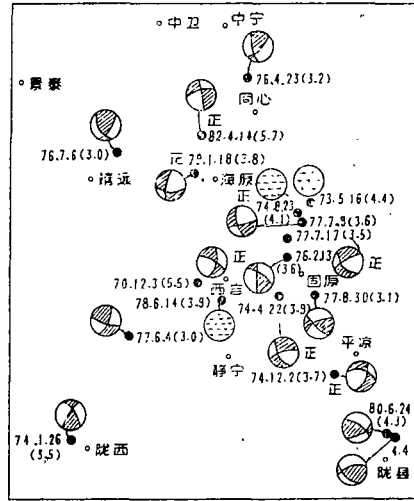
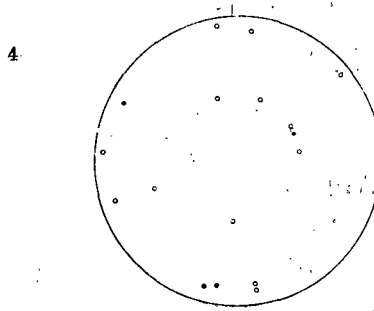
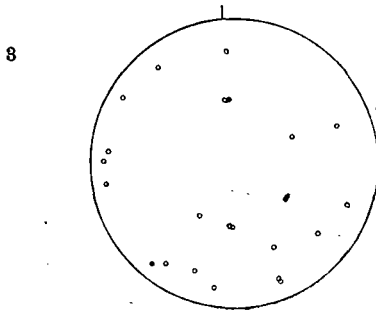
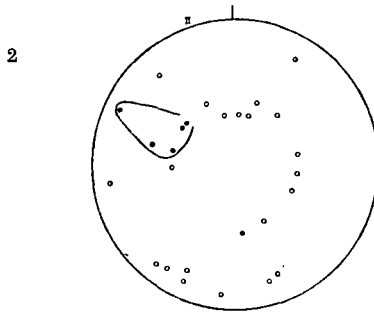
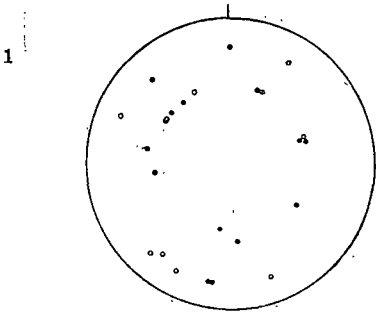


图6 西海固及其附近震源机制略图

四次特殊地震的参数

表2

地震日期	震中位置	M	h (公里)	初动符号
1. 1973. 5. 16	36°24' 106°22' (固原)	4.4	35	以正号为主
2. 1974. 8. 23	36°24' 106°19' (固原)	4.1	15	以负号为主
3. 1978. 6. 14	35°52' 105°38' (西吉)	3.9	16	以负号为主
4. 1981. 3. 31	37°00' 106°08' (同心)	3.9	0	以负号为主



很显然这四次地震都属于地壳内的地震，然而这四次地震的P波初动反映了地震时并不是纯剪切错动，而是属于扩张型或压缩型的。虽然这种地震的发生是由于地壳内介质的相变还是由于震源底部的塌陷引起的目前还不清楚，有待进一步研究，但是这类地震的发生也会给上地壳提供垂直力源。

由此我们认为，中国大陆板内除受到缓慢的上地幔运动（与水平运动相比速度还是较快的）供给的垂直力以外，地壳内扩张型或压缩型地震的发生也会直接给地壳提供垂直力源。

### 3. 有关问题的讨论

这里必须指出的一点是，中国大陆地震中平推兼正断层地震的活动可以看成是地壳在上地幔垂直力源长期作用下所导致的结果（如上地幔作隆起、下沉和垂直差异运动时）。当然我们也不排除地震发生时上地幔直接供给地震垂直力源的可能。但由于中国大多数大地震发生在花岗岩层内，而上地幔与它之间还有玄武岩层起阻隔作用，因此我们认为兼有正断层性质的大多数地震其垂直力源是通过上地幔的长期作用造成地壳垂直形变这种方式提供的（关于上地幔的不同运动方式在地壳中所引起的形变，请参考文献〔5〕）。这可能是大陆板下上地幔运动远不如板块边界处和洋脊处快所造成的。此外从我国平推兼正断层性质的地震活动在我国大陆有普遍分布来看，大陆板下上地幔的运动是很不均匀的。由于这两点，中国大陆内部的大地震具有频度低，且震源分散等特点。再者中国板内的地震强度特别高，这单纯用太平洋板块和印度板块对中国大陆的推挤作用是不够的，特别是对中国大陆中部的一些地震来说更是如此。因为这些地区并不能直接由印度板块向北东方向的运动和太平洋板块由东向西的运动直接提供能量，而需要由板内块体来传递上述的推挤力。显然由于运动的长距离传递，板内的应力会有衰减，因此只从水平应力的能源是不足以说明中国大陆中部的地震为何这么大（如1920年海原8.5级地震、1927年古浪8级地震、1931年富蕴8级大震等）。我们认为上地幔的垂直运动给这些地区也提供了相当的能源。

### 参 考 文 献

- 〔1〕郭增建、秦保燕，地震预报中的某些力学问题，力学，№. 1，1977.
- 〔2〕秦保燕等，大震前震源区的确定与大空区形成的物理机制，西北地震学报，Vol. 5，№ 2，1983.
- 〔3〕赵知军，宁夏及邻区虚波速度与震源深度，地震观测与预报，№. 1，1982.
- 〔4〕张诚等，甘肃及邻近地区的地壳厚度，西北地震学报 Vol. 1，№ 2，1979.
- 〔5〕秦保燕等，由地震时震中区的显著下沉讨论震源的底部条件，西北地震学报，Vol. 1，№. 1，1979.