

# 大尺度地层内的分层运动

许绍燮

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**[摘要]** 报告了观察到大尺度地层内分层运动的新发现, 以及大尺度层块活动的直接证据——大尺度地层垂向同步运动, 其层块的尺度可大到数千公里洲际尺度。分析了我国超长周期 (360~3 000 s)地震监测台站记录中的层块活动区域性高强颤振事件。发现格尔木台 (2001年11月份)记录到的高强颤振事件与发生在其附近 (2001-11-14) 昆仑山口西 M8.1 大震有一定关系。这些信息对于探索地震预测, 以及认识大地构造动力具有重要意义。

**[关键词]** 大尺度地层内的分层运动; 高强颤振事件; 地震预测

**[中图分类号]** P315.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2006) 06-0014-09

在油田, 经常遭遇井管被错断的事故。一般认为这与油井所在地区地层内的层间滑动有关。这类事件表明了地层内的分层间是可以产生相对运动的。其运动的规模如表1中所示, 属于a类, 即小尺度准静态规模: 层深为百米级, 展布面积跨度为公里尺度, 运动显示变异时间需要经历年的尺度。本文报告观察到大尺度地层内分层运动的新发现, 则属于表1中A类大尺度动态规模: 层深达十公里级, 展布面积跨度为数千公里洲际尺度, 运动显示瞬变时间, 只有时分秒的尺度。如此巨大的层块, 如此快速的运动, 其所涉及的能量是相当惊人的。如能对其性态进行进一步的查证与研讨, 有可能为探索预测地震的发生找到一种新的途径。

表1 层间活动分类

Table 1 Classify movement between sub-layers

类	规模	层深	展布面积跨度	运动时间尺度
a	小尺度 (准静态)	百米级	公里级	年
A	大尺度 (动态)	十公里级	1 000 km 级	时-分-秒

## 1 分档震级—分层活动—构造特征形态

### 1.1 分档震级地震所展示的构造特征形态

图1~图4 (见本期封3) 是不同分档震级地震所展示的不同构造特征形态。

图1是震级分档 ML2.0~2.9 地震事件, 2003—2005 年期间, 在我国中东部所展示的构造活动形态。图1中呈现出许多线性构造的特征图像。它与构造地质查明的活动断裂相呼应。例如在图1左上部, 祁连山地区所显示的北西向震中线性密集带, 就与河西走廊的北西向活动断裂一致; 图1右上中部, 华北地区所显示的北东向震中密集带, 就与我国华北地区的北东向新华夏系构造相一致; 图1左下角, 川滇地区, 则显示出震中分布的正交网格与菱形块体状特征。

图2是震级分档 ML3.5~4.9 地震事件, 是2003—2005 年期间在我国大陆所展示的构造活动形态。与图1不同的是, 图2中的震级分档 ML3.5~4.9 地震事件具有依傍大江、大河的倾向。沿着长江与黄河, 图2中地震事件的分布颇为显著。例如

在我国境内西部,沿30度纬线的震中有序排列,伸展至东经105°以东,则基本上是按长江的走向排列了。例如在东经105°以东,黄河的北侧地震多,南侧地震少,差异性颇为显著。

图3是震级分档 $ML \geq 4.0$ 地震事件,时段选用了稍长一点的1995—2005年,在我国大陆所展示的构造活动形态。其地震分布的最突出特色是,沿鄂尔多斯盆地周边与横断山脉东侧的事件的规则性排列。河谷、流域、盆地周边,常有地震事件的密集有序排列。可以认为,图3中的事件分布,可能是受控于盆—山构造一类的大型地块的物性差异与地形起伏。

图4是震级分档 $ML \geq 5.0$ 地震事件,2003—2005年期间,在我国大陆所展示的构造活动形态。图4与图1~图3具有不同的特色是,发生在图4中的事件多数都具有在经向上或纬向上的成对性。例如展布在经线80°,90°,95°,101°~102°,104°,112°,118°上的地震与展布在纬线22.5°,25°,26°,27°,30°,35°,38°,40°,42°,43°,44°,45°,50°上的地震都是或在经向上,或在纬向上成对。从而可以认为控制这一震级分档地震的动力,地球自转的作用是不能忽视的了。

上述图1~图4震级分档地震事件,确实展示出了不同的构造特征。同一地区,同一时段,仅不同的震级分档,为什么会展现出如此不同的构造特征呢?笔者认为不同震级分档的地震事件,可能是由不同层厚分层所控制;而不同的分层控制着不同的构造特征。

## 1.2 不同分层控制不同的分档震级事件

1.2.1 高震级地震的特征间距受控于能干层的层厚 考查我国大陆内部高震级地震间的间隔距离,发现自古至今,大致都集中在5°(1°=111 km),10°,20°,……等等的特征间隔距离上。这种现象我们曾用地震能干层受力屈曲具有特征波长给予解释<sup>[1]</sup>。

我国的高震级地震基本上均发生在10~25 km的深度范围内(西部稍深为15~30 km)。浅于10(15) km,很少能发生强震;深于25(30) km,除少数深震区外,也少发生强震。笔者将这一层——能蕴育发生强震的15 km层厚的分层称为地震能干层。与地震在垂直方向上的分布非常局限相对照,地震在水平方向上的展布却极为广阔,经常是千、百公里连绵不绝。所以地震能干层应是宽/厚比极

大的薄壳结构。薄壳结构受力极易屈曲变形,变形波纹具有特征波长。柱壳块的屈曲波纹半波长 $\lambda$ 为<sup>[1-3]</sup>:

$$\lambda = \pi(R^2 h^2 / 12(1 - \nu^2))^{1/4} \approx 1.72(Rh)^{1/2} \\ \approx 530 \text{ km} \approx 5^\circ$$

上式中, $R$ 地球半径, $h$ 能干层厚, $\nu$ 泊松系数。半波长即约为高震级地震的第一个特征间隔距离5°。笔者认为高震级地震的特征间距应是由能干层屈曲变形波长所控制。

1.2.2 大小地震间发生次数的比例关系 $b$ 值,受控于地震分布在空间上的几何关系 在文献[4]中,我们探讨过大小地震次数( $N$ )的比例关系 $b$ 值的物理含义:

$$\log N = a - bM$$

$$\log(N_0/N_1) = b$$

震级 $M$ 差1级时,其地震次数的比值( $N_0/N_1$ )的对数值即为 $b$ 值。例如 $b=1$ 时,震级差1级,地震次数差10倍。

若为地层屈曲控震,因其特征间距与层厚关系为: $\lambda \approx ch^{1/2}$ ,在文献[4]中已论证了 $b$ 值应为0.75。相当于震级差1级,地震次数差约为6倍。这是实际震情中较常遇见的情况。

震级 $M$ 与层厚 $h$ 以及 $b$ 值的关系。在三种典型的几何状态下分别为:

$$\text{体分布} \quad M \approx h \quad b = 1.5$$

$$\text{面分布} \quad M \approx h^{1/2} \quad b = 0.75$$

$$\text{线分布} \quad M \approx h^{1/3} \quad b = 0.5$$

小地震可以成群发生为震群,多分布在一种体积内, $b$ 值为1.5;大地震易受控于大断裂带,沿断裂线性分布, $b$ 值为0.5;一般地震则为面分布, $b$ 值为0.75。

1.2.3 分档震级应由不同层厚的分层所决定 如上所述,地震发生时其强度的震级分档,基本上是由参与活动的有效层厚所决定。故可认为,分档震级地震事件所展示的构造特征,实质上也就是参与活动的有效层厚的分层构造特征。

## 2 大尺度层块活动的直接证据——大尺度地层垂向同步运动

### 2.1 超长周期JCZ-1地震仪监测台站

JCZ-1超宽频带地震仪,在360 s~20 Hz频带内,采用速度平坦型设计,采样率为50 SPS,在360~3 000 s频带内,采用加速度平坦型设计,采样率

为 1 SPS, 仪器的动态范围是 140 dB。我国共建立了成都 CD2、高台 GTA、格尔木 GOM、广州 GZH、和田 HTA、黑河 HEH、呼和浩特 HHC、沈阳 SNY、泰安 TIA、武汉 WHN 等共计 10 个 JCZ-1 台站<sup>[5]</sup>。

## 2.2 检测到了大尺度地层垂向同步运动

### 2.2.1 同向同步与反向同步 在 9 个台站中 (沈

阳台记录因故缺失), 其中 6 个台站 (格尔木、呼和浩特、成都、黑河、泰安、广州) 记录到了垂向分量为同向同步; 另 3 个台站 (高台、和田、武汉) 记录到了垂向分量与前 6 个成反向同步, 而这 3 个台, 相互间又属同向同步。

图 5 展示了其中的 18 道 (2001 年 11 月 5 日 18

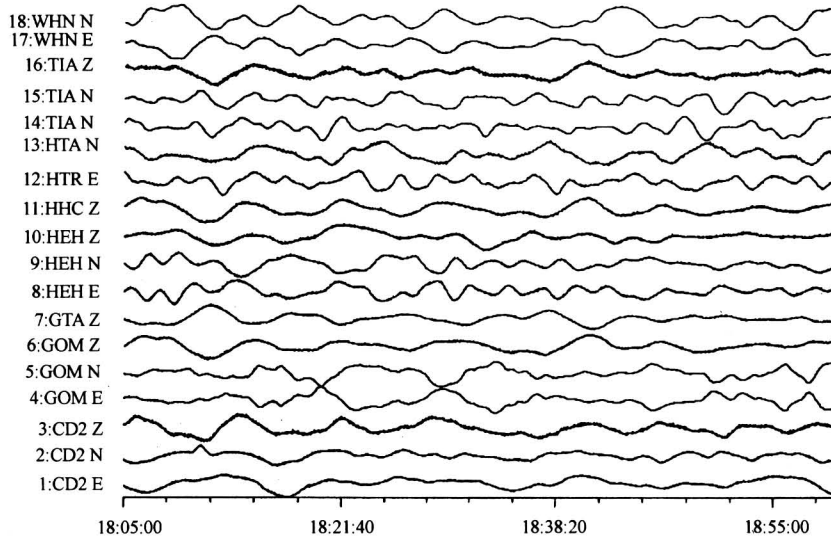


图 5 JCZ-1 多台多分量记录波形图

Fig.5 Wave records of multi-component of multi-station (JCZ-1)

时 GMT) 记录。第 1~3 道为 CD2 (成都) 台记录。从图可见第 1 道 E 东西分量, 第 2 道 N 南北分量, 两道水平分量的波形极其相似, 呈现出同向同步振动的现象。这种两道水平分量呈现出同向同步振动的还出现在 TIA (泰安) 台第 14、第 15 道记录的左侧段。第 4~第 6 道为 GOM (格尔木) 台记录。与成都台不同的是, 格尔木台两道水平分量呈现出反向同步振动。两道水平分量呈现出反向同步振动的还可以在呼和浩特 (HEH) 台第 8、第 9 道, 武汉 (WHN) 台第 18、第 19 道, 以及和田 (HTA) 台第 12、第 13 道的记录的右侧段见到。

图 5 中特征显示得最为突出的是各台的垂直分量。上述两水平分量间的同向同步与反向同步, 那还只是在同一个台站上存在。但对于垂直分量, 同步振动则存在于多台之间。其中第 7 道高台 GTA 台的垂直分量反向同步于其他 5 台: 成都台第 3 道、格尔木台第 6 道、黑河台第 10 道、呼和浩特台第 11 道、泰安台第 16 道。而这 5 台之间又呈现出良好的同向同步。

多台垂直分量间的同步振动 (图 6 (a) 即为

图 5 中的各台 Z 垂直分量), 不是大概率事件。经常出现的是互相关不太大或不相关的振动, 如图 6 的 (b), (c), (d) 所示。可以认为, 应该须有具备相应的大尺度的动力控制, 出现在图 6 (a) 中这样的同步现象才有可能。

### 2.2.2 JCZ-1 台网检测到单脉冲的同步特征

各台还均检测到了 (2001-11-06T01-53 (GMT)) 一次大幅度单脉冲, 如图 7 中所示。据此可以对比它们的到时先后顺序与振幅相对大小 (根据实际测定, 它们的到时差别仅在数秒至数 10 s 以内)。

### 2.2.3 垂向同步运动的大尺度地层

考察了上述这些实际证据, 我们注意到了其特别巨大的空间跨度, 从新疆和田至东北黑河距离可达 4 000 km 以上, 从呼至广州也超过 2 000 km, 但它们间同步时差仅为秒级或 10 s 级, 因之其视速度均已超过了 (100~1 000) km/s。特别是注意到垂直向的初动, 不同台站还可以有正负之分, 因之它们不可能是远震从地球对观测点垂直投射上来的。所以这样高的同步速度, 决非单一力学体系所能解释的。如笔者在文献 [6] 所指出的, 我们认为电磁动力的

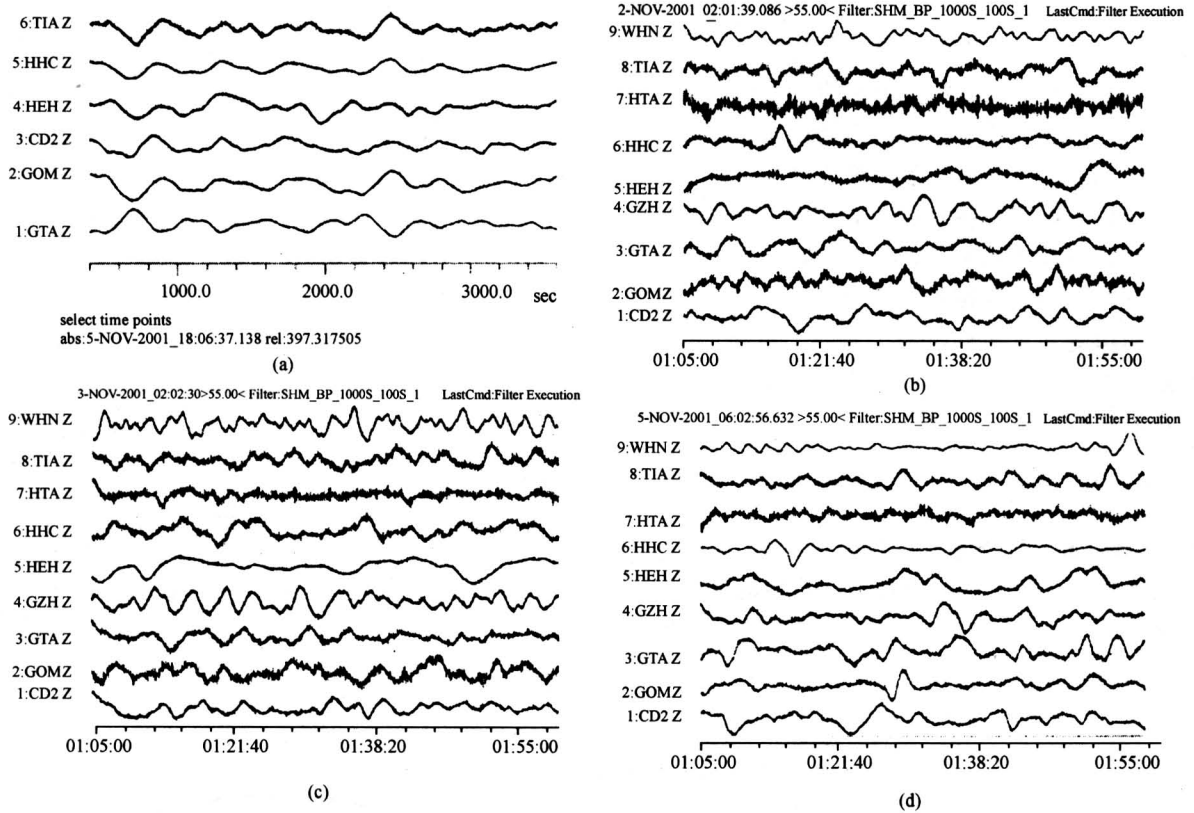


图 6 多台垂直分向的多种振动记录

Fig.6 Records of vertical component of multi-station

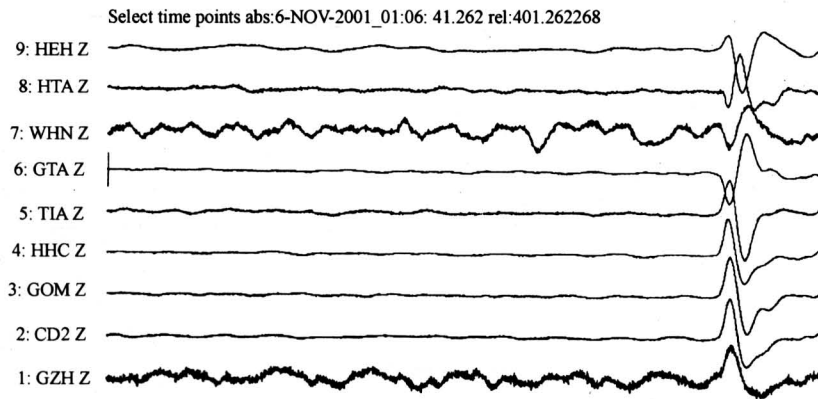


图 7 JCZ-1 台网检测的一次大幅度单脉冲

Fig.7 One big single pulse detected by JCZ-1 station network

参与机制是特别值得查证的。据此可认为观察到的大尺度地层垂向同步运动应是确凿无疑的。

2.3 水平向运动则具有各自台站的地方色彩

考察图 5 中各台两个水平分量的表观波形，大致有三种类型。第一类是，表观波形同向同步；第二类是，表观波形反向同步；第三类是，相位有时延或较无规。记录图方向设置，在地震界定规的约

定，均是图中向上表示地面运动，即垂直分量向上，东西分量向东，南北分量向北。因之图中如第一类，表观波形同向同步，实为质点运动呈北东—南西向运动，成都台属于这一类型；如第二类，表观波形反向同步，实为质点运动呈北西—南东向运动，格尔木、黑河、武汉台属于这一类型；若进一步考查各台站当地的地震活动构造，适巧成都台处

在地震北东活动带；格尔木、黑河、武汉台处在局域地震北西活动带。因此认为，有可能水平向的运动是受到垂直向的激发派生出来的，而各台又以台站当地的地震构造活动方向，为最易受到的垂向激励，而呈现为水平优势分布，故各台有其不同的水平向定向性。还有一些台站，表现形式较为复杂，有时延的，也有偶尔为同向同步，偶尔为反向同步的。这些第三类，表现型式较为复杂的台站，适其当地活动构造的定向性也较为复杂。故我们认为，水平运动部分台站的复杂表现，并不妨碍我们对大尺度地层垂向同步运动的认可。

### 3 层块活动局域性高强颤振事件

#### 3.1 局域性高强颤振事件的观测记录

以上所述是我们考查大尺度层块活动的直接证据。伴随着大尺度层块这种活动，我们还观测到了层块活动局域性的高强颤振事件。这种高强颤振事件，与前面所述的大尺度层块活动不同，在各台站间（有时甚至同一个台站的三分向间），可以没有精确的同步性。一般仅表现为松散的同周期性，甚至有时表现为无规。但因为信号极强，决非无中生有。鉴于目前 JCZ-1 台站的稀疏，尚无能力多台同时捕捉同一颤振源；上述信号的出现，尚不能找

到与台站位置的关联定位；而强弱有无也呈现出无一定之规，因之我们认为这些信号可能只来自一个台站附近的一种局域性事件。在当层块被启动成为大范围运动时，层块中的某些局域，还可同时再另被激发特定的高强颤振。但在空间上的关联性，就完全不如前面所述的大尺度层块运动了。

但初步研究认为，其对探索预测地震的发生，可望提供重要线索，应该值得重视。

#### 3.2 颤振事件记录相似波形在格尔木台多次重复

格尔木台多次重复记录到了局域性高强颤振事件的相似波形。图 8 (a) — (d) 中展示了其中的 4 次：

- (a) 2001 - 11 - 06T09 - 22 - 33 GOM (ENZ)
- (b) 2001 - 11 - 10T11 - 23 - 53 GOM (ENZ)
- (c) 2001 - 11 - 14T05 - 27 - 06 GOM (ENZ)
- (d) 2001 - 11 - 20T09 - 43 - 00 GOM (ENZ)

图 9 是上述波形的细结构展示。类比其时程形态，很似电路中的斩波器的产出。

设想地块中的某局域区，既受到固体潮的作用，又受到地电流激发的电磁力的作用，从而使该局域区获得了抬升。但抬升到某一临界值，该区结构却可促使地电流的突然断路（或减弱），失去了

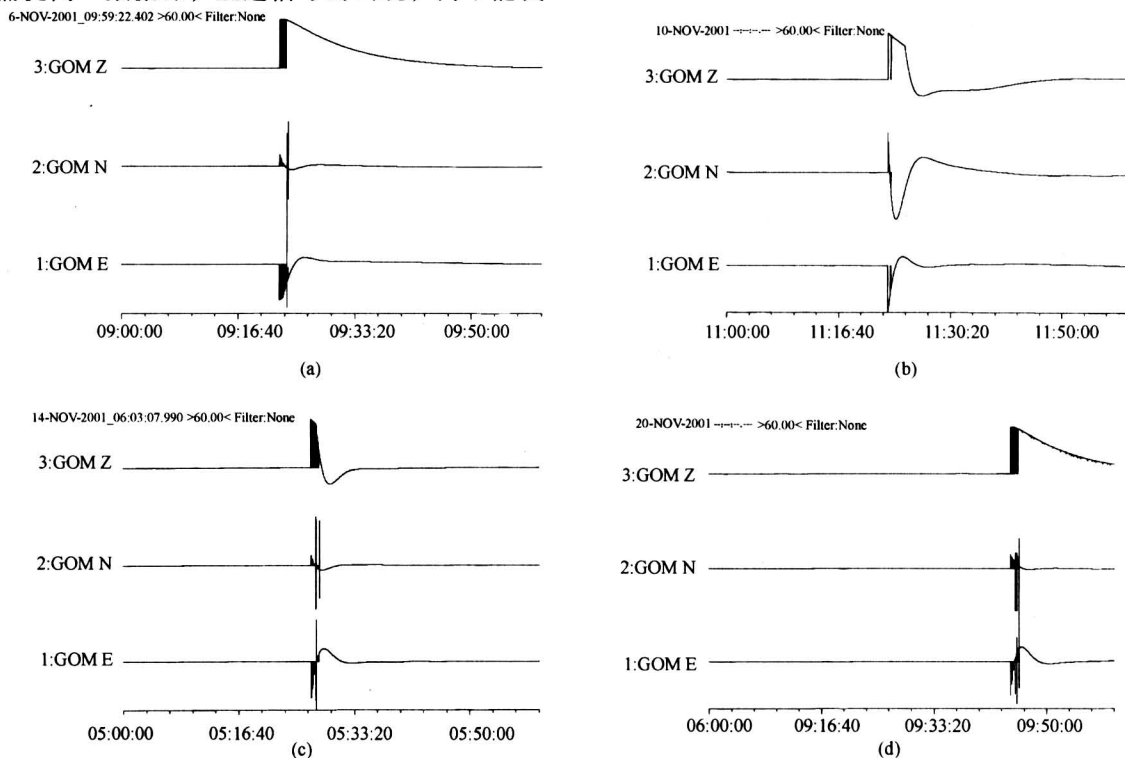


图 8 颤振事件的相似波形

Fig.8 Similarity waveform of Events with tremble

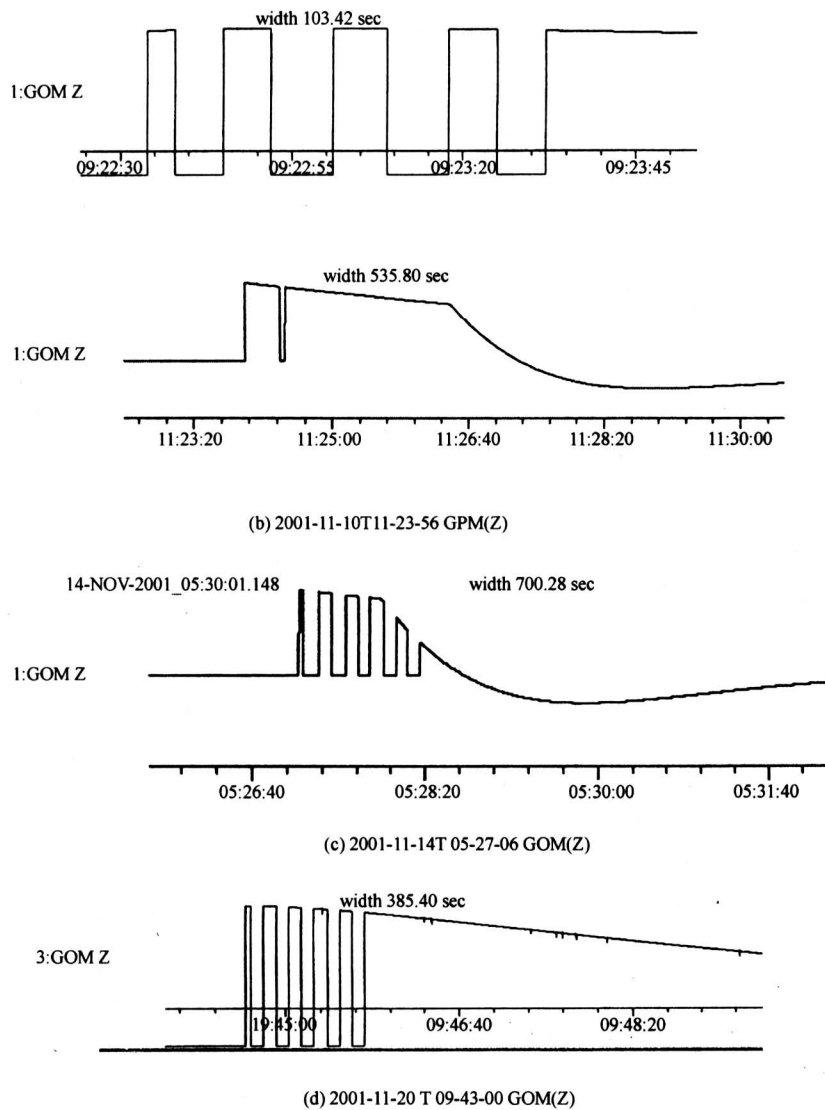


图 9 颤振波形细结构展示图

Fig.9 Displayed detail structure of waveform of events with tremble

抬升力，致使层块跌落回到原来的位置。回落后，地电通路又恢复（或增强）了，抬升力再次产生。如此反复，形成了颤振，犹如电路中的斩波器机制。

### 3.3 多台有大致同期的颤振事件记录

多台有大致同期的颤振事件记录，但无精确同步。图 10 (a) — (e) 中展示了其中的 5 次：

- (a) 2001 - 11 - 07T03 - 22 - 00 GOM (ENZ)  
HTA (N) GTA (ENZ)
- (b) 2001 - 11 - 07T07 - 26 - 00 GOM (ENZ)  
HTA (N) TIA (ENZ)
- (c) 2001 - 11 - 14T03 - 11 - 00 GOM (ENZ)  
GZH (ENZ)

(d) 2001 - 11 - 14T05 - 27 - 06 GOM (ENZ)  
HTA (N)

(e) 2001 - 11 - 20T09 - 43 - 00 GOM (ENZ)  
HTA (N) GTA (E)

### 3.4 不同监测仪器间的相互印证

格尔木台有 3 种频段 (DD-1; SK; JCZ-1) 各有 3 个分量 (E, N, Z) 共计 9 道地震仪同时进行连续记录。图 5 ~ 图 10 中 JCZ - 1 仪器所记录到的颤振事件都能在 DD - 1 与 SK 相应分量上获得印证。从而表明这些事件确实是客观的信号。特别值得指出的是格尔木台的磁照图可能具有重要参考价值。初步发现事件的发生与当地磁场的变化存在着一定的关系。这是今后值得进一步深入研究的课题。

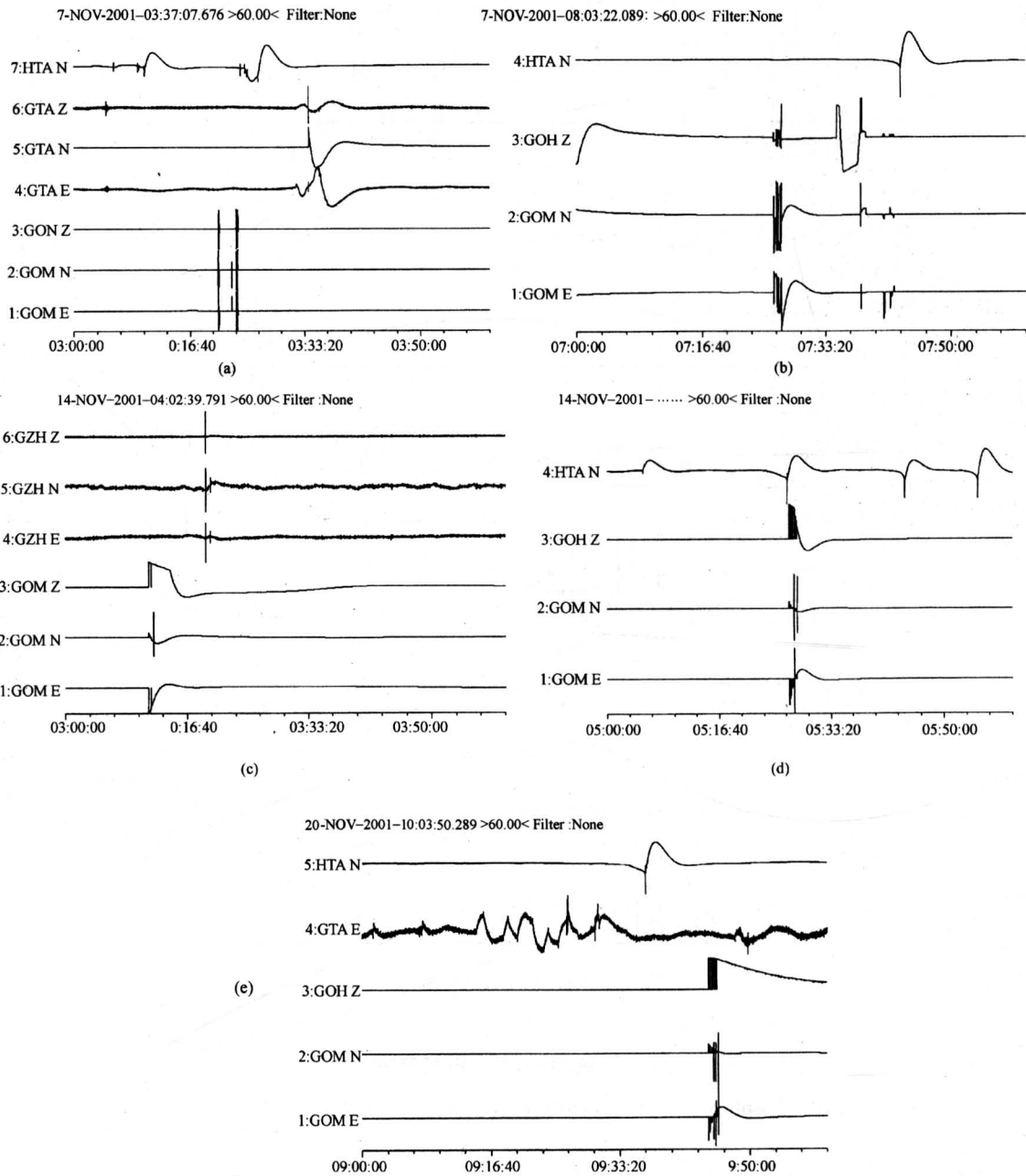


图 10 多台有大致同期的颤振事件记录

Fig.10 Events with tremble of multi-station occurred in synchronize period

3.5 颤振事件发生时辰分布与大地震发震时刻相似

根据 2001 年 11 月 6—30 日, 昆仑山口 (2001-11-14 M8.1) 大震发生前后, 共计 25 天期间的格尔木台记录统计, 该台共记录到颤振事件 12 次。历次颤振发生时辰全列于表 2。

在文献 [7] 图 6 中, 我们曾指出, 我国西南地区, 大地震发震时刻的太阳地方时分布, 具有特

征性的集中时段。图 11 (请见封面图) 复制了文献 [7] 中的图 6。在该图中用红色箭头标出了格尔木台所记录到颤振事件的时刻。

从图 11 可见, 颤振事件发生时刻, 似也具有与该地区历史上大震发生时刻的特征性的集中时段。从而表明两者可能具有相似的动力成因。特别是图 11 中, 同时也还标出了昆仑山口 (2001-11-14 M8.1) 主震的发震时刻 (蓝色箭头), 这实际

表 2 格尔木台记到颤振时刻表

Table 2 Occurrence time of events with tremble recorded by Golmud Station

年月日	国际时	北京时	
2001-11-06	09-22-33.6	17-22-33.6	
2001-11-06	11-14-05.1	19-14-05.1	
2001-11-07	03-22-00	11-22-00	
2001-11-07	07-26-00	15-26-00	
2001-11-07	12-45-30.6	20-45-30.6	
2001-11-09	19-17-24.5		
2001-11-10		03-17-24.5	
2001-11-10	11-23-52.6	19-23-52.6	
2001-11-13	13-53-33.1	21-53-33.1	
2001-11-14	03-11-21.5	11-11-21.5	
2001-11-14	05-27-06.6	13-27-06.6	
2001-11-20	09-44-35.4	17-44-35.4	
2001-11-30	13-14-15.9	21-14-15.9	
2001-11-14	09-26-00	17-26-00	M8.1 主震

上也是对文献 [7] 中图 6 的一次成功验证。M8.1 主震所处位置正好落在了颤振事件分布的中间部位，这也可以认为是对颤振事件可能与大震具有共同的动力成因的一种认可。

### 3.6 格尔木台记录到的颤振波形与 M8.1 主震波形相似

特别耐人寻味的是离昆仑山口 M8.1 震中最近的格尔木台记到的有些颤振波形（即运动时程）竟与其后来记到 M8.1 主震的波形有非常相似的形态。图 12 中展示的是格尔木台记录的 M8.1 主震与另一次高强局域颤振波形经滤波与未经滤波的原记录的对比图。

图 12 中，上部两图为 2001-11-14 M8.1 主震波形，下部两图为 2001-11-10-11<sup>h</sup> 一次颤振事件的波形。图中右侧是均经过滤波后的波形，左侧

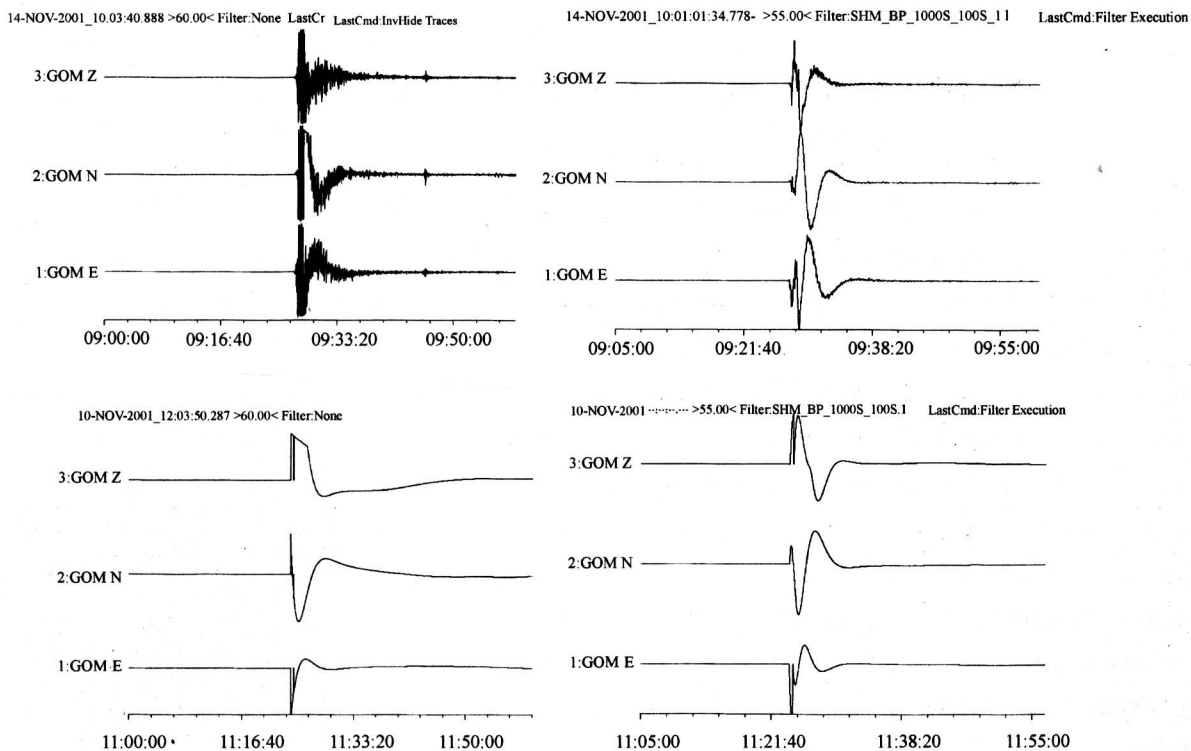


图 12 颤振与 M8.1 主震波形相似对比图（格尔木台记录）

上部—主震；下部—颤震；右侧—经滤波；左侧—未滤波

Fig. 12 Waveform of event with tremble compared with similarity waveform of main shock (recorded by Golmud Station)

upper—main shock; down—event with tremble; right—with filter; left—non filter

是均未经滤波的原记录。它们的波形如此相似，好像两种波形间仅仅差了一个放大率。这是否意味着这些局域性高强颤振，虽有无规的一面，但其中仍有可能预示着会有大地震的源信息。这正是我们认

为应该予以重视的。

## 4 结语

本文报告了新发现的大尺度层块内的分层活动



(自然界在瞬时间内,在如此广阔的地域中,可以调动起如此协调的动力),有可能为我们认识地震发生过程提供新的途径(它也应对地球构造动力的认识提供新的思路)。特别是因为它与 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 M8.1 大震有诸多瓜葛,人们有理由期盼它可为攻克大地震的短临预报提供更深刻的信息。

**致谢:** 国家对我国地震事业的投入,地震局同仁为地震事业的持久奋斗,中国工程院对院士继续创新提供的支持,是本报告获得成果的根本保证。笔者借此机会向有关方面致以敬意。同事王春珍高工在数字波形处理方面参与了共同工作(详情将有另文报告),在此一并致谢。

#### 参考文献

- [1] 许绍燮,沈佩文.北京周围地区地震的分布特点与地壳屈曲[J].地震学报,1980,2(2):153~168
- [2] 许绍燮,沈佩文.北京地区地震活动的构造特征[A].第六专题组.北京市地震地质会战[R].1980.3~42
- [3] 马丽.大陆地区强震的空间分布特征[A].国家地震局地球物理研究所硕士论文[D].1984
- [4] 许绍燮,沈佩文.地震活动性图像[J].地震学报,1982,4(3):239~250
- [5] 中国地震台网中心(2005).中国地震台网年报(2005)
- [6] 许绍燮.地震电磁研究专辑序[J].国际地震动态,2005,11
- [7] 许绍燮.探索地震预报[J].国际地震动态,2003,2(总290期).1~6

## Sub-layer Movement in the Large-scale Stratum

Xu Shaoxie

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

**[Abstract]** It was reported that a new find on sub-layer movement in the large-scale stratum had been observed. Earthquakes with different division magnitude can represent movement of sub-layer with different thickness. Earthquakes with different division magnitude can display the different characteristic of tectonics, in a same region and same time period. A direct evidence of movement, synchronal movement in vertical direction, in the as large-scale stratum has been reported in this paper. Stratum scale can be large as up to several thousand kilometers, as in a continent dimension. Events with strong tremble of sub-layer movement have been analyzed, which were recorded by stations with seismograph of super long period (300~3 000 s). A certain relationship between events with strong tremble recoded by Golmud Station in November, 2001 and earthquake occurred at west of Kunlun Mountain Pass, nearby the station, on 2001-11-14, has been found. That information is very important for earthquake prediction research and geodynamic recognition.

**[Key words]** sub-layer movement in the large-scale stratum; events with strong tremble; earthquake prediction