

## 潮汐在地壳运动中的作用\*

池顺良

钟荣融

(中国河南鹤壁 456650 鹤壁市地震办公室) (中国河南鹤壁 456650 鹤壁市建委)

### 摘要

通常认为,潮汐力在造山运动(地槽活动)及岩浆活动等地壳运动中的作用极为微弱,其作用可略而不计。

本文则提出潮汐力在岩浆形成、地槽活动及造山运动等地壳运动中都起着不可忽视的作用的新观点,并给出了在潮汐力驱动下,岩浆囊形成的潮汐耗散加热模式及潮汐交变力作用下地槽活动、造山过程的初步的力学描述(有限元模型)。

**关键词** 潮汐能流; 潮汐应力; 岩浆活动; 造山运动; 潮波驱动力

### 1 前 言

我们在《固体地球中的潮汐机械能流》一文中指出,因潮汐作用而在固体地球中产生的潮汐机械能流大于地球中的热能流,因而地壳的构造运动可能起源于潮汐作用。

潮汐能又是怎样转化为地壳运动能的呢?

我们先讨论固体潮及海洋负荷潮汐在海底火山和岩浆活动中的作用。

### 2 潮汐在海底火山及岩浆活动中的作用

火山爆发无疑是地球上壮丽的自然景观,沸腾的熔岩湖、壮观的熔岩瀑布给人留下难忘的印象。

但是,实际上火山热只是地球放射出的热的很少一部分(傅承义等,1985)。研究火山的实质问题,在于弄清为什么很少量的热会在地壳的局部集中(Yoder, 1976)。

多方面的考察推断,火山活动的熔岩来自浅处(2—10km)的岩浆贮源(岩浆囊),问题是岩浆囊中的岩浆又来自何处。

图 1 是当前流行的岛弧带火山和地幔热点上方火山的成因模式。

这些火山活动模式都需要与地幔连通的细长的岩浆通道提供火山活动所需的热。

不引入岩浆通道的假定,能用潮汐能的耗散解释海洋地壳中数公里深处的岩浆囊的形成吗?

根据岩石学的研究,形成玄武岩浆所需的熔解热约 0.4 MJ。在海洋拉斑玄武岩和玄武岩中,放射性元素的总生热率为  $0.08 - 0.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。假如全部生成热都被保持,岩石熔为岩浆需要 80—500 百万年。

\* 1992 年 7 月 22 日收到本文初稿,1992 年 11 月 24 日决定采用。

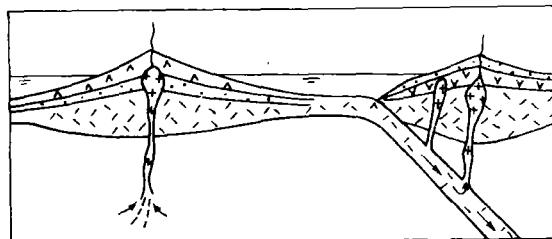


图1 岛弧火山和热点上方火山模式

但实际测量说明,岩浆的形成和岩石中放射性元素丰度之间没有明显的相互关系。岩浆中既没有异常的放射性,特别活动的火山区的放射性也不高。

洋壳在固体潮及海洋负荷潮的作用下产生潮汐应力  $\sigma_{tt}$  和潮汐应变  $\epsilon_{tt}$ , 潮汐耗散产热率  $C$

$$C = Q^{-1} \cdot \sigma_{tt} \cdot \dot{\epsilon}_{tt} \quad (1)$$

对于海洋地壳,  $Q$  为 200—500。由此可算出潮汐耗散的产热率只有放射性产热率的数千分之一。

然而,这是没有考虑实际的地层不均匀性时的潮汐产热率。对于地层中存在断裂、软弱夹层、局部地方发生部分熔融等情形,潮汐产热率就会在局部地区增强,增幅可能达到数千到数万倍。这是由于:

(1) 地层的各种非均一性都会使应变能向局部区域集中。例如,按断裂力学的分析,在断裂端点部位,应变能将上千倍的增强。

(2) 局部地区发生塑性流动变形时  $Q$  值骤降。此时,大部分应变能耗散为热。

(3) 应变能与应力间的非线性关系,使叠加在自重应力上的海洋负荷潮汐应变能大幅度增强。

因此,虽然平均来说,地壳中的放射性产热率高于潮汐耗散产热率,但在局部地区,潮汐产热率可超过放射性产热率。岩石温度一旦达到熔点,发生部分熔融,  $Q$  值急剧下降产热率上升,导致雪崩式的熔岩形成过程。

岩浆囊形成后,熔岩体积约增大 16%,若上覆地层胀裂,熔岩在减压条件下溢出,一座新的海底火山开始爆发。

Yoder 在“玄武岩浆成因”一书中谈到,固体地球中散逸的潮汐能量约为  $10^{12}$  J/s, 估计大约每年有  $30 \text{ km}^3$  的岩石在潮汐耗散加热下转变

成岩浆。这个岩浆量大约是熔岩年产量的 3—5 倍。而现在夏威夷火山的喷出物只有约 50% 的岩浆到达了地表。它的岩浆可能完全是潮汐能量转变形成的。

在太平洋底部约有一万座火山分布在广阔的洋底。许多火山既不在洋中脊,也不在设想中的热点的上方。这些火山活动所需的热又是如何集中的?

热能的流动,尤其是热能的集中很困难。这就是已提出的火山活动模式都离不开通向地幔的细长的岩浆通道的原因。

机械能的运动和集中却十分快速而高效。图 2a 是用边界元计算的洋壳中的软弱夹层在固体潮和海水负荷潮作用下剪切应变能的集中效应。等值线标出的数值表示能量的集中倍数。图 2b 是岩层在剪切耗散加热下发生熔融的雪崩特征。

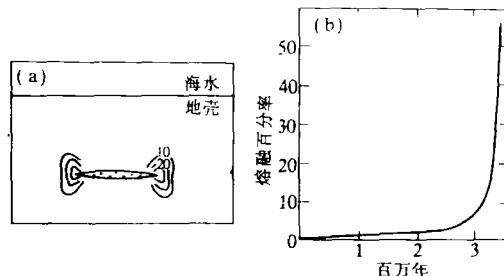


图 2(a) 软弱夹层引起应变能的集中

图 2(b) 剪切熔融的雪崩特征

上面讨论的是海底岩浆囊及火山的一种可能的形成机制，下面探讨造山带活动的潮汐作用机制。

### 3 造山运动的现象规律

上面已探讨了潮汐应变能转化为热能的物理机制。交变的潮汐力如能派生出驱动地球内部物质作定向运动的驱动力，潮汐力就能在地壳构造运动中起作用。

李瑞浩指出：“实际地球接近粘弹性体，因此，潮汐力所转化的应变能将有一部分在地幔和地壳中消耗掉，其消耗的方式可能有两种：第一是摩擦过程中转化成热能，第二则可能在地壳和地幔的弹性特征( $\lambda, \mu, \rho$ )不连续的地方以构造应变能的形式储藏起来，也就是说将有一部分潮汐应变能转换成构造应变能”（李瑞浩，1988）。现在我们就来探讨这第二个可能。

地质学提供的地壳运动的现象规律将引导我们寻找这种驱动力。

地质调查指出了一个极重要的现象规律：形成大山脉的地层原来都是在海底沉积的，沉积地层的厚度往往在万米以上。在经过数千万年至上亿年的沉积过程后，这些沉积地层又会在相对短暂的百万年中快速回返上升，隆起成为山脉！沉降带两侧通常总是隆起带。这种称为地槽的沉降带的活动有其特定的模式（Белоусов, 1978）。

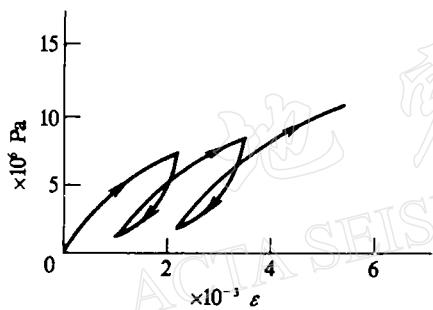


图3 石英岩的加载及卸载曲线

这种称为地槽的沉降带的活动有其特定的模式（Белоусов, 1978）。现在，还没有能提出一种实体机制，可动力学地解释上述的地槽沉降及回返造山活动过程。

但是，一些杰出的地质学家已经意识到地槽活动中本质的物质过程在于：“……与壳下基底中物质水平方向上的流出和流入有关”（Кропоткин, 1958）。我国著名的地质学家李四光在讨论地槽的沉降时谈到：“……我们不得不问，那个槽子底下的物质到哪里去了？如果我们否定槽子底下的物质向侧面移动，以至在它的侧面形成隆起地带，我们就无法答复上面提出的问题”（李四光, 1973）。

确实，如果地槽底部莫霍面上方的下地壳物质能向两侧移动，而地槽两侧莫霍面下方的上地幔物质则相向地向地槽底部集中，李四光所设想的地槽的沉降及两侧地区升降的实体机制在物理上就能实现。

### 4 地槽沉降的潮汐驱动机制

地球在引潮力作用下不断发生胀缩、剪切变形。由于各层物质力学常数的差别，地球各层介质之间一直处于交变的潮汐剪应力的作用中（丁中一、王仁, 1986）。

问题是交变的潮汐力能否产生驱动物质作定向运动的驱动力？

笔者曾看到一种散粒物体的振动输送机而受到启发。这是一种内壁带有螺旋形坡道，装有散粒物料的圆筒，在磁铁驱动下作肉眼难以分辨的圆周振动。只是向一个方向振动时，筒体稍向上抬；而向另一个方向振动时，筒体稍向下降。由于这一微小的运动不对称，圆筒振动时，筒内的散粒物会自行沿着螺旋坡道以很快的速度上爬。可见，交变的小幅度的作用是可以引起物质宏观运动的。关键在于交变运动中要存在某种“不对称”性。

在交变潮汐应力策动下的地壳-地幔系统中存在两种不对称性：一是界面的起伏造成交界条件的不对称；一是地壳及地幔物质在加载和卸载时的应力-应变路径的不对称。

图3是一种石英岩的加载及卸载特性。加、卸载曲线不重合，加、卸载等效模量有显著的差别，使得

一个周期的潮汐力作用后,地壳-地幔中会残留一些变形。

对于图4所示的地壳-地幔系统,当岩石的加、卸载特性符合某些要求时,这种塑性残留变形相当于莫霍面两侧的物质沿图中箭头所示方向定向迁移。

微弱的潮汐应力的量级为 $10^4\text{Pa}$ ,岩石的应变速率极小。但当物质迁移区的粘滞系数因热量积累而降到 $10^{16}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下时,应变速率可达到 $10^{-12}/\text{s}$ 的量级而引起地壳运动。对于图4所示的地壳-地幔系统,莫霍面两侧物质的定向迁移,使中间地壳减薄两侧地壳增厚。因而,中间成为沉降带而两侧成为隆升带。问题是在定量上,上述机制能够成为造山运动的驱动力吗?

虽然潮汐力可以精确地计算,但是高温高压下岩石的加、卸载特性尚不清楚。我们将通过一些基于对称性讨论的方法,来分析计算上述机制的现实可能性。

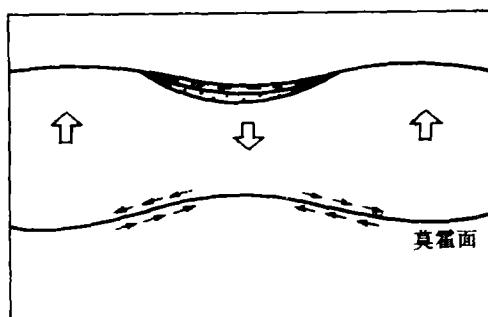


图4 潮汐交变应力作用下的残留变形引起地壳和地幔物质沿箭头方向流动。莫霍面两侧物质向相反方向迁移使中间地壳不断沉降,两边地壳下断隆升

## 5 潮波驱动力机制的有限元数值试验

我们建立二维的地壳-上地幔区域的有限元模型,检验上述机制的可能性。

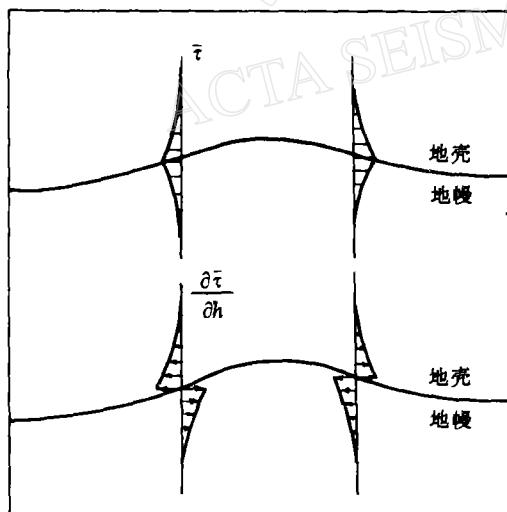


图5 交界面上的潮汐剪应力分布。界面扰动后交变应力的平均值 $\bar{\tau}$ 不再为零。由此产生等效的体积力 $\partial\bar{\tau}/\partial h$ 将驱动界面两侧物质移动

隆起”集中,又使地壳底部物质向两侧流变,初始的界面扰动扩展成为更大的起伏波动。

我们把这种等效的体积驱动力称为“潮波驱动力”,它的强度大约只有重力的数十分之一,但它具有李四光讨论地槽沉降时设想的那种机制。

另外,我们假定“潮波驱动力”相对集中于莫霍面两侧。

交变应力作用下残留的塑性变形影响根据塑性力学,可化为沿塑性流动方向的体积力作用。但我们将按如下考虑,确定这种体积力。取出莫霍面附近的一个小区域,当壳-幔界面为一平面时,潮汐切应力沿界面的分布是均匀的。因此,界面无起伏时交变应力的平均值为零。界面上存在扰动起伏,沿界面的切应力分布将发生畸变。可近似地假设,由于界面扰动而引起的附加切应力的大小和界面的斜度成比例,在远离界面处附加应力渐趋消失。这样,界面上切应力的平均值不再为零(图5)。

由于潮汐周期远小于壳幔物质的松弛时间,上述应力的时间平均将对岩石流变发生作用。不难看出,界面无扰动处的平均切应力为零;界面有扰动时,平均切应力不再为零。这项切应力将在壳-幔界面两侧产生相反方向的水平驱动力,使地幔物质向已有的“地幔

计算模型由密度 2.7, 粘滞系数  $10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的地壳及密度为 3.3、粘滞系数为  $10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的上地幔组成。在莫霍面两侧, 有两层 0.5 km 的薄层, 粘滞系数取为  $10^{15} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。计算用牛顿粘性流体单元, 作用力有重力和潮波驱动力两种。重力作用在整个体系上而潮波驱动力只作用于莫霍面两侧, 其大小与莫霍面的斜率成比例。

计算中考虑了由于地表的剥蚀与沉积引起的负荷重分布。计算由大致厚薄均匀的地壳系统开始, 时间步长为 0.6 万年。图 6 分别为起初时刻和 120 万年时的地壳结构。

图中显示了两条沉降带三条隆起带。地壳最厚处为 38 km, 最薄处为 20 km, 地面地形高差达 2 000 多米。

由上面的数值试验的结果可以看出, 微弱的潮波驱动力能够在地质尺度时间中明显地改变地壳的厚度而造成地壳的沉降和隆升。

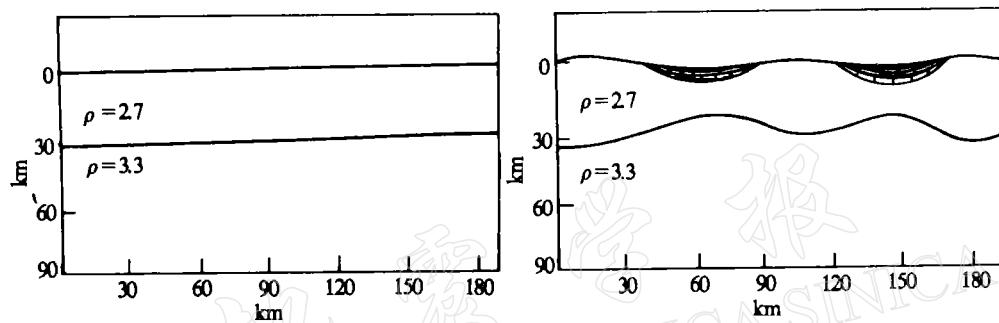


图 6 在重力、潮波驱动力、大气营力联合作用下的地壳演变。由厚薄均匀的地壳开始计算 120 万年后的地壳结构。左图为初始的地表和莫霍面

重力构造学派的研究已经指明, 只要能说明原始的地壳厚度差异的形成, 关于断裂、地震、褶皱甚至推覆及逆掩等构造地质活动, 都可用已经形成的地壳厚度差异中蕴藏的巨大的重力势能的释放来解释(马杏垣, 1989; 周玖, 1981)。

因此, 潮汐力虽然微弱, 但它在地壳运动中的作用却是不可忽视的。

## 6 结语

我们曾经指出, 潮汐能流和热能流是地球中两股最强的能量流, 而且潮汐能又是较高级的机械能, 能量的运动及转化都比较容易, 转化的效率也比较高(池顺良, 1992)。因此, 潮汐能在地壳运动中的作用正在引起越来越广泛的注意。

上面, 我们探讨了潮汐力在岩浆活动、地壳的升、降等运动中可能起的作用并提出了海洋地壳中岩浆及火山活动的一种可能的机制。根据岩石加载、卸载特性的不对称性, 指出下地壳和上地幔物质在交变潮汐应力作用下产生残余变形与定向迁移的可能机制, 并用于解释地槽的沉降及两侧的隆升。那么, 潮汐作用能否解释如全球大洋中脊体系的存在、海陆分布的全球特征、硅铝质的陆壳与硅镁质的洋壳的差异等全球性的现象呢? 对这些重要问题, 我们将另文探讨。

笔者衷心感谢骆鸣津、许厚泽、陈鑫连、朱灼文、苏恺之和陈益惠诸研究员对此项研究给予的帮助和支持。

## 参 考 文 献

池顺良, 1992. 固体地球中的潮汐机械能流. 地震学报, 14, 243—246.

- 丁中一、王仁,1986. 引潮力的全球位移场及应力场. 地球物理学报, 29, 584—587.
- 傅承义、陈运泰、祁贵仲,1985. 地球物理学基础, 78—79. 科学出版社, 北京.
- 李四光,1973. 地质力学概论, 9—10. 科学出版社, 北京.
- 李瑞浩,1988. 重力学引论, 264—265. 地震出版社, 北京.
- 马杏垣,1989. 重力作用与构造运动, 5—71. 地震出版社, 北京.
- 周玖,1981. 青藏高原地壳的地球动力学特征. 地震科学研究, 2, 35—41.
- Yoder, H., 1976. *Generation of Basaltic Magma*, 53—89. National Academy of Sciences, Washington, D. C.
- Белоусов, В., 1978. Тектоносфера Земли, 24—53. Изд. Наука Москва.
- Кролоткин, П. Н., 1958. Аномалии Силы Тяжести На Материках и Океанах и их Значение для Тектоники, 57—68.  
Московского Университета.

地  
震  
学  
报  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA