

地震·水库·跺脚

——浅谈地震及地震预报中的一些物理知识

邵宇晓

你观察过烧开的稀饭吗？米粒从底部翻滚上来，又迅速向四周扩散，并在接近锅边处沉下。这是典型的对流运动的形式。我们脚下广阔大地的板块漂移运动在本质上正是源于厚达两三千千米的地幔的对流运动。把米粒米汤分别类比成地壳地幔，尽管对流运动的实质相同，但在表观上至少存在三大差异：首先，在空间上，两者的规模是不可同日而语的。其次，在时间上更有极大的不同——大地的运动慢得我们人类平时根本就无法察觉（除非借助仪器）。不过，倘若能将地球 46 亿年的历史浓缩到几分钟之内，并且在太空中大约同步卫星轨道的位置上观看，那地表的沧海桑田、此起彼伏一定比开锅的稀饭更精彩更热闹得多。再次，米汤中的米粒是一粒粒的，彼此间也隔着些距离；而地幔上的地壳只破裂成数目不多的几块大小不一的板块，它们看起来是一片片的，并且相互间紧紧挨着。如果把烧稀饭换成煮面片，那可能会更像些。

关闭热源，滚开的稀饭并不会立即就停止翻腾，因为散热需要一定的时间。地球也是如此。遥想当初，地球由无数尘埃、碎石乃至小行星在万有引力作用下聚拢而成。那些未来的组成单元在散布于广袤的太空中时，具有很大的引力势能；在它们彼此靠近时，势能转化为动能；而当猛烈相撞时，动能又变成热能。地球在形成之初，这种各碎片先接近再碰撞的过程十分频繁，以至于那时的地球炽热得根本就没有呈固态的地壳。后来，碰撞渐少，地球得以慢慢降温，地表冷却凝固出地壳。但大地深处仍是高温，地幔还处在熔融的流动状态，这种情形一直延续至今。一方面，固态地壳减缓了内部的向外散热，另一方面，地球内部存在着一定数量的放射性元素，它们不断衰变，持续加热着大地内层。也就是说，地球的热源并未完全关闭。甚至还有个别科学家猜测：地核中心有许多铀元素一直在发生着裂变反应，它构成地球的又一热源。地热的第三个来源是地球的自转。月亮及太阳对地球的潮汐力不仅引发了海洋的潮起潮落，也使地球深处的物质周期性地发生程度不同的伸缩起伏，与此相伴的塑

性形变和层间摩擦导致地球持续缓慢地减速，并将地球自转的转动动能的一部分转

化为地球的内能。这与刹车时车轮抱闸而摩擦生热有几分相似。

缓慢却坚定地流动着的地幔牵引着（主要依靠内摩擦力以及黏滞力）它所背负着的地壳在某处不断裂开（如东非大裂谷和大西洋中脊）（图 1），又在另一些地方奋力推挤，使地表抬升降起（如喜马拉雅山脉和安第斯山脉）。在地壳变动的过程中，岩层的伸缩、交错、弯曲、扭转的变形是在所难免的。拉伸和压缩的变形方向垂直于接触面，描述物块是否容易伸缩的物理量是杨氏模量（这是专门名称，通俗来讲可叫做伸缩模量），岩石的杨氏模量大约是 $5 \times 10^{10} \text{ Pa}$ （帕斯卡——牛顿/平方米，它同时也是压强和应力的单位）。弯曲变形的实质是伸缩变形。试想一根被重物压弯的大梁，其弯曲不过是梁的上半部分压缩、下半部分拉伸，越靠近中轴线变形越小，从而实现从压缩到拉伸的逐渐过渡而已。交错变形（也称剪切变形）的变形方向平行于接触面，描述物块是否容易切变的物理量是切变模量，岩石的切变模量大约是 $2 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。扭转变形（想想拧毛巾）的实质是剪切变形。

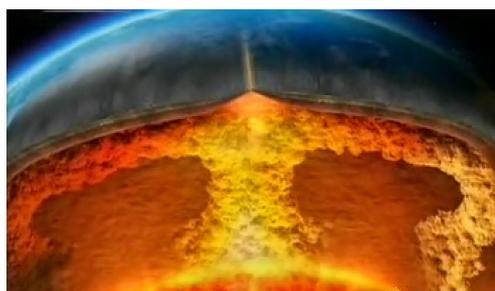
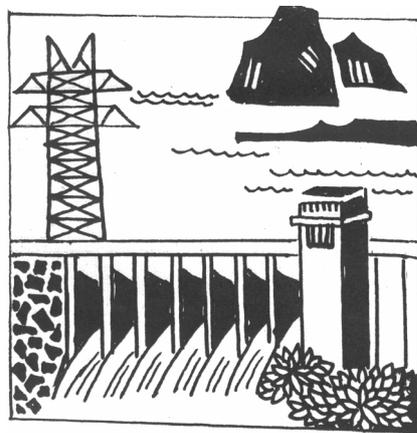


图 1 地壳在对流的地幔上开裂并移动

学过高中物理的人都应该知道：弹簧在拉伸或压缩时会储存弹性势能，岩层也是如此。下面我们

现代物理知识

来粗略地估算下一段变形的岩层到底能储存多少弹性势能。我们参考这样一组数据——汶川大地震中断层长三百多千米，产生了一道深达一二十千米的裂缝，地面错位三到九米。设想一段长方体岩石（图2），其长度 $L=3 \times 10^5 \text{ m}$ ，宽、高相同，即 $k=h=1 \times 10^4 \text{ m}$ ，沿宽度方向有一个压缩量 $y=10 \text{ m}$ （由于不是自由恢复原状，地面错位时要受到阻力，所以实际错位量三到九米小于上面假设的压缩量十米是合理的），取模量 $N=4 \times 10^{10} \text{ Pa}$ （算是杨氏模量与切变模量的平均），设接触面单位面积上的受力为 f （ f 通常被称为应力），长条形岩层侧面的总受力为 F 。根据模量的定义—— $N=f/(y/k)$ （ y/k 即压缩量与岩层在受力方向上的长度这个比值，一般被称为应变，应力与应变之比就是模量）以及 $F=fS=f(Lh)$ 可得： $F=yNLh/k$ 。 F 是岩层压缩了 y 后的受力，在整个压缩过程中的平均力应为 $F/2$ 。弹性势能 E 等于压缩过程中外力所做的功 W ，即 $E=W=(F/2)y=y^2NLh/2k=6 \times 10^{17} \text{ J}$ 。实际的计算几乎是不可能的，因为岩层各处的变形情况差异很大，各处的模量也不是个常数，而这些又很难知道。地震释放的能量主要是从地震台网测得的地震波的形状和大小推算得出的，由此也可定出震级。5.12 汶川大地震的震级是 8.0 级，相应的释放能量约为 $4.2 \times 10^{18} \text{ J}$ ，与上述估算的差别来看还是能够被容忍的。

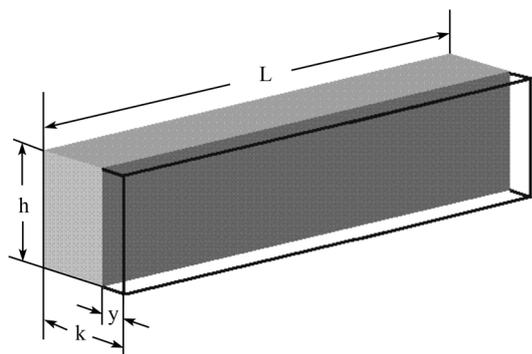


图2 长条岩石均匀压缩的简化模型

有人说是西南地域兴建的多个水库造成了大地震，对此应该予以坚决的驳斥，道理很简单——水库蕴含的能量比岩层的弹性势能小很多。就拿距汶川震中 17 千米处的紫坪铺水库来说吧（图3），我们来估算其中蓄水的重力势能 E 。紫坪铺水库库容约十亿立方米（ $V=10^9 \text{ m}^3$ ），坝高 156m（因水库中的水体上大下小，重心偏上，可大略地设重心高度

$h=100 \text{ m}$ ），水密度 $\rho=10^3 \text{ kg/m}^3$ ，所以， $E=mgh=\rho Vgh=10^{15} \text{ J}$ 。就算库容大上 30 倍的三峡水库（坝高相近），其水体总势能也就 $3 \times 10^{16} \text{ J}$ ，仅有上面估算的岩层弹性势能的 1/20。可见，地震的绝大部分能量不可能是来源于水库。更何况，汶川大地震中各水坝都安然无恙，坝中水体的重力势能根本就还没有释放出来。



图3 紫坪铺水库大坝震后依旧巍然屹立

又有人说，确实不是水体势能惹的祸，而是一两百米高的水体对库底地面的压强高达每平方米一两万吨（相当于十几个大气压），这样的高压造成了岩层断裂而地震。对此，你用“片面”来评价是适宜的。借助上面估算所用模型，可估算出岩层压缩时对应的应力 $f=(y/k)N=4 \times 10^7 \text{ (N)}$ ，这相当于每平方米四千吨的压强。相比之下，水体的压强岂非小巫见大巫？

另有人说，水库不是造成地震，而是触发地震。这回，你可别忙着反对，否则，自己就要犯错误了。如果四千吨的压力已在断裂的边缘，那再加上一百吨的水压，岩层还真可能就断掉了。这不禁令人想起一则寓言：大象、狮子、老虎等一大群动物一起都拔不出来的那个超级大萝卜，小老鼠在后边一拉就出来了。水库确有诱发地震的可能，不少水库的经验也证明了这一点。但另一方面，它也有延缓地震的可能。河谷两侧山体的重压使应力集中在它们的下方，应力的分布不均容易引发地层的错动；而当这河谷蓄水成库时，往往会使应力分布趋于更加均匀，从而抑制了错动。有实例显示，某水库为汛期做准备而放水使水量大减时反而诱发了小规模的地震，这很可能就是应力因放水而又再度集中所致。

延缓地震并非好事，诱使地震提前也不一定是坏事。一般来说，岩层中积蓄的弹性势能总是与日俱增的，越早释放，震级越小，破坏越轻。除了改变应力分布而有可能使地震提前以外，水库还能通

过另外一种途径来提前地震。地震有的是源于岩层的破裂，但更多的是由于已有的断层之间的突然错动。阻碍错动的层间摩擦力越大，岩层就需要变形得更厉害以产生更大的弹力（从而也就积蓄了更多的能量）才能引发错动，相应的震级就大；反之，内摩擦力小，层间不太严重变形时就能错动，相应震级就小。水库的存在必然增加水向地层深处的渗透，而作为流体的水总是起着润滑的作用，它会使层间摩擦力或多或少地减小，从而让小震级的地震提前到来。如果一次八级大震能分成一千次五级小震（这两者释放的能量相近），那前者的能量释放功率是后者的一千倍（假设每次地震的持续时间都差不多是一分钟），相应的破坏程度便会有天壤之别。就像同样多的能量，若让它以爆炸的方式释放，那会要了人的命；若让它以家用炊具或供热设备那样几百上千瓦的功率释放，则它还能帮助人做饭取暖。大量的事实也表明：水库周边地区往往还确实是小震频繁。尽管五级小震也会让人感到恐慌，经常的地震更让人不爽，但它若真是在帮忙消除潜在的大震，那感觉就会舒畅得多了。让水库的建设发挥更有效的防震减灾的作用，应该是一个很有意义的研究方向。

庞大的水库诱发地震叫人容易理解，但要是有人告诉你某次大震是某人跺了一脚的直接后果，你是否会指责他是在胡说八道呢？其实，在“蝴蝶效应”（即北京一只蝴蝶扇动一下翅膀可能导致一个月后纽约的一场风暴）已越来越被大众认可的今天，“跺脚效应”就很难再被判定为无稽之谈了。

大家应该都比较熟悉的多米诺骨牌，不是仅能推倒一连串同等大小的骨牌。由机械能守恒以及动量守恒两个定律容易证明：只要位置、大小、数量合适，轻轻推倒第一块还没巴掌大的骨牌后，它将导致一连串越来越大的骨牌被前面的小骨牌推倒（图4），最终推倒一座摩天大楼也不在话下。这是微小能量（轻轻一推）引起巨大后果的比较容易理解和想象的例子。接下来设想有一大堆大小不一的弹簧，其中最小的只有米粒大小，最大的则超过高楼大厦；它们都用或粗或细的绳子拴成压缩状态，而且每根绳子都到了即将绷断的临界状态；这些弹簧有成千上万个，它们杂乱地、但紧紧地靠在一起。现在一根米粒般的小弹簧上的线绳受到某种扰动而绷断，它的弹开促使近旁的某个稍大些的弹簧上的

线绳也绷断、随即弹簧也弹开……最后那根巨大的弹簧如法炮制，强劲弹开而释放出惊人的势能，将整堆弹簧都“炸”开。有了多米诺骨牌的铺垫，应该不难想象上述情景是可能发生的。地球内部大大小小的岩层处于各种变形状态，这与那一大堆弹簧的模型多少有些相像，于是，跺脚引发大震的过程就不再那么匪夷所思了吧？

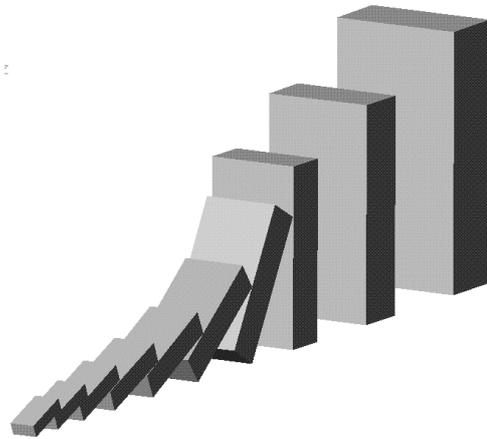


图4 越来越大的多米诺骨牌被推倒

只有极个别的几根很特殊的米粒小弹簧才能导致最大弹簧的弹开，而其他绝大多数的小弹簧都做不到这一点，因为那需要极其特别的位置安排。我们事先能够准确地判断出哪根小弹簧是可以产生有效触发的吗？以往的观点是：理论上可能而实践上极难，因为事先要精确地了解那么多弹簧中每一个的位置、压缩状况、与别的弹簧的接触方式，然后列出并求解成千上万的方程……。20世纪中后期兴起的混沌理论更是“打击”了人类的信心，因为它告诉我们：即便是看上去相当简单的方程（比如著名的洛伦兹方程组，就是发现“蝴蝶效应”的气象学家洛伦兹所采用的那个导致他做出重大发现的方程组（图5）。它是一种描述大气环流演化的简化模型，仅仅包含以下三个简单的方程： $dx/dt=-10x+10y$ ， $dy/dt=28x-y-xz$ ， $dz/dt=8z/3+xy$ ），其解集也可能是无限的复杂（在通常的意义下）。其复杂性的一个突出表现是：方程演化对初值极度敏感（即初始值稍有差别，不长的演化时间后的结果就天差地别），这导致了这种所谓的非线性方程组的内禀的不可预测性。在未使用较高性能的计算机对那些非线性方程（它们中的绝大多数都没有解析解）进行数值求解之前，似乎没人预料到会有这样的复杂性，算过之

后方才震惊地发现这种决定性的方程与其不可预测性的结果竟然也能如此奇异地结合在一起。真是不算不知道，一算吓一跳啊！既然几个小小的方程就已令人找不着北，又怎能奢谈那成千上万个方程的求解呢？

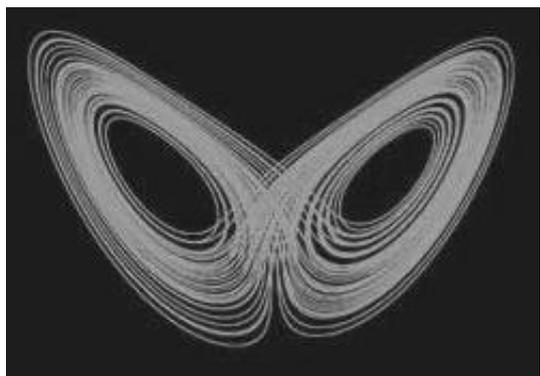


图5 有些像蝴蝶翅膀的洛伦兹奇异吸引子的相图

地球内部的状况比起那一大堆弹簧的模型来恐怕还要复杂许多，更麻烦的是，地球的“不可入性”（即深入地下成百上千千米去测量那里的实际状况是极其困难的，以至于现今的科技都办不到）使我们几乎没有多少可作为已知量来使用的数据。目前的困境不在于那为数众多的高度非线性方程要如何计算求解上，甚至不在于是否能列出准确描述地球内部状态的那些决定性的非线性方程上，单单是作为启动计算所必需的这些方程的初始条件（即已知数据）我们就仍然还是非常匮乏啊！想想那针对同样是非线性系统的大气所作的天气预报吧，现在在比较密集的地面观测点，也有不少探空气球和气象卫星（还要强调一点：大气是透明的，而大地却不是），由此获得了相当丰富的可作为初始条件启动计算的已知数据，那么，我们的天气预报准吗？总的来说，还可以，但不是很令人满意，对吧？尤其是它对突发性的灾难性天气的预报更差。通过对比，地震预报的困难就可想而知了，因此，也不难理解在国内外的地震界流行着这样一种观点——地震的短临预报是不可能实现的。

不过也有不少地震学者反对“不可预报”的观点。一方面，科学的进步永无止境，谁都不能断言未来的科技会发展到怎样一种惊人的程度，也许将来能找到好办法，回过头来再看时，会认为现在的我们是把地震预报想得太复杂了。另一方面，上述

那种解方程做预报的方法可以看作是直捣核心的正面作战的方法，在近期看不到它有取胜机会之际，是否采取“旁敲侧击”的方案（比如从历次地震的统计数据中探寻规律，从震前诸如水源、动植物、地磁地电地光地应力等的异常中搜集线索……）反倒有一线曙光呢？确有部分地震工作者持此观点，他们说：夺去百万人口中至少24万宝贵生命的惨烈的唐山大地震事先已有比较明确的预报，但未获决策者的重视；而百里之外的青龙县的县委书记却重视这一预报，他做出了及时疏散群众的部署，结果是创造了47万人的青龙县震塌房屋数万间，但伤亡仅1人的“青龙奇迹”……由开国总理周恩来和新中国的地质学先驱李四光亲自确定的“群测群防，专群结合，土洋结合”的方针在唐山地震后被悄悄地放弃了，以至于“可预报派”的现已退休并早已边缘化的学者痛心地说：现在中国的地震预报水平比起上世纪70年代，不是进步了，反而是退步了……

到底孰是孰非？现在还是一团迷雾（网上对此有相当激烈的辩论），但隐约可见其中除了正常的学术争论外，还夹杂着不少别的干扰因素。看来，人类追求真理之路远比我们能够想象的还更曲折更漫长。

（福建省机电工业职业中专学校 350101）

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖

