

壳内流体演化及地震成因(三)*

徐 常 芳

(中国北京 100029 国家地震局地质研究所)

摘要 根据对地壳和上地幔电性结构的研究,提出了地下岩体势能-动能转换地震成因学说.此学说不仅认为地下岩体间弹性应变能的积累对地震的孕育非常重要,而且认为地壳岩体重力势能和深部流体演化对一些地震的孕育和发生起了关键作用.本文根据前两篇文章(徐常芳, 1996 a, b)提出的依据,建立了拉张盆地地壳电性结构及流体演化模型,并据此对历史和现今大量地震过程中出现的异常和地壳排气现象进行了解释.

主题词 地震成因 壳内高导层 地壳深部流体 地壳排气

引言

自 1966 年邢台地震以来,发生在亚洲东部,造成惨痛损失的两个大地震分别是 1976 年中国的唐山地震和 1995 年日本的阪神地震.由于两个地震区都是人口密集区,所以两地区都曾进行了地震危险性研究,并配有较多的地震监测手段.但是,两个地区都未被列为高烈度潜在地震危险区,震前皆未提出预报意见.笔者认为,漏报的重要原因之一是,在地震成因研究方面未取得重大突破,从而影响了地震工作的重点和决策.

1 地震成因理论

以弹性回跳模型为基础建立的地震断层成因说,被地震学界认为是本世纪初地震科学研究的一大重要成就.这一学说认为,当应力积累超过岩石弹性限度以后,断层突然错动,导致应变能的释放而发生地震;并认为,断层是个软弱面,弹性能沿此面积累和释放,因而,地震必然沿断层发生.在地震危险区划和地震监测工作中,根据这一理论,人们开展了大量的工作,例如地形变和活断层研究等.然而,大量观测事实难以用此理论解释.

唐山地震前,20 年的地形变测量未见显著的异常,因而,震前应变能的积累便无可靠依据.唐山地震没有发生在活断层上;频繁的余震表明,地震造成的断层密布唐山地区.大震分布和复发规律表明,其复发间隔在千年以上.这一事实表明,在拉张盆地中,地震造成的断层越发育,地壳越趋于稳定,大地震越不易原地复发.笔者发现,在一些地区,大地震和活断层之间没有密切的关系.唐山地震没有沿大断裂发生.在一些著名的大断裂上,例如,郯庐断裂和红河断裂,地震活动并不强烈.红河断裂晚第四纪以来,平均右旋速

* 国家地震局 85-05 项目资助课题.
1995-06-19 收到初稿,1997-01-26 收到修改稿并决定采用.

率达 2.5 cm/a. 可是, 在弥渡至元阳长约 200 km 的地段上, 历史地震资料表明, 近数百年来, 难以确定发生过大地震(朱成男等, 1982). 因此, 为了发展和实现物理预报, 必须重视地壳上地幔结构的探测研究, 从深部探寻地震成因. 根据前文对地壳电性结构和深部流体演化特征的研究, 为了解释大陆浅源地震成因, 笔者提出了地壳岩体势-动能转换地震成因说. 其主要内容有以下两点: ① 这里所说的势能包括了岩体弹性应变能和重力势能, 岩体受力包括了岩体间的水平作用力、震源上覆岩体的重力、深部流体压力及岩体间的摩擦力等; ② 地壳内部不均一性是地震孕育的重要条件, 使岩体弹性能和重力势能得以积累和释放. 深部流体, 例如壳内高导层中的流体, 造成了地壳的不稳定性. 深部流体的突然释放降低了岩体间的摩擦力, 使运动的岩体获得了较大的动能.

按此学说, 地震成因与地壳深部结构、深部岩石学性质及其演化, 尤其与深部热流体演化有密切的关系. 著名地球物理学家傅承义(1993)说: “我们认为, 地震是地球发展的结果. 在地球发展的过程中, 既发生了地震, 也产生了断层, 后者也是结果之一. 大地震可与大断层伴生, 也可以不伴生. 日本松代地震群震了好几年, 也没有震出个大地震来, 这就是明证. 我们应该从地球发展的观点去寻找可能的前兆, 不必拘泥于寻找活断层.”

2 壳内流体和地震活动性

众所周知, 大陆内有些地区地震活动强烈, 有些地区则未见强震. 例如, 华北平原裂谷系内地震活动强烈, 而扬子地台比较稳定. 据前文所述, 由于前者水平运动速度小于后者, 所以, 前者受到的水平作用力小于后者. 前文指出, 华北地区岩石圈内存在地壳和上地幔高导层上隆. 由于壳内高导层是深部流体演化造成的, 因此, 推测深部超临界流体对地壳结构的演化和地震活动性有如下影响: ① 高温高压流体降低了岩石的刚性, 在 350~400℃ 的条件下, 由于石英弱化作用, 地壳岩石从脆性变形向塑性变形转变. 因此, 大地震通常在脆性中上地壳内发生; ② 存在于破碎带或拆离断层中的流体, 降低了岩体间的摩擦力, 因此地震一旦被触发, 岩体将获得较大的加速度、速度和动能; ③ 存在于壳内高导层中的流体造成其上覆地壳极不稳定. 封闭流体的上覆地层具有巨大的重力势能. 如果流体温压发生变化或流体沿裂隙散失, 岩体的稳定态将被打破, 从而引发地震. 例如, 自 1976~1980 年, 唐山地震释放的地震波总能量为 3.8×10^{16} J(吴开统等, 1982), 约为主震震源上覆地壳下沉所释放的重力势能的 1/4. 笔者认为, 类似于深钻注水诱发地震, 唐山主震后的强烈余震与地壳深部释放的流体有关.

3 拉张盆地内的地震

唐山地震前 4 年, 在唐山地区发生了约 1 cm 的地面隆升形变. 唐山地震造成了一条 8 km 长、NNE 方向的地震断层. 断层北西侧地面稍微隆起, 断层南东侧地壳大面积剧烈下沉(张祖胜, 1982). 这一现象清楚表明, 唐山地震的地震波能量不完全是来自弹性能的积累, 难以用图 1 所示的弹性回跳模型来解释.

根据势-动能转换地震成因说和唐山震区脆性上地壳内存在高角度断层的探测结果(刘国栋, 1994), 本文提出了一个在拉张盆地中的地震成因模型(图 2).

图中, S 为刚性层, E 为塑性层. 地震前, 在封闭体系中, 重力 F_1 等于浮力或流体压

力 F_2 ，相邻岩体间的作用力 F_3 和 F_4 相等. 由于合力为 0，所以岩体 S 的加速度为 0. 如果 E 层中流体散失或温度发生变化，流体压力便会发生变化，并会产生新裂隙. 裂隙中的高温高压流体将极大地降低岩体间的摩擦力. 如果岩体 S 断成两部分，使含流体的 E 层从封闭体系转变为开放体系，如图 2b 所示，右侧岩体将下落，忽略了摩擦力，其初始加速度可用下式表示：

$$a = (1 - \rho_F / \rho_S) g$$

式中， a 为岩体初始下落加速度， ρ_F 为流体平均密度， ρ_S 为岩体的平均密度， g 为自由落体加速度. 右侧岩体的下落必然会将 E 中塑性物质推向左侧，并造成左侧岩体上升. 由于热流体沿断裂上涌，岩体间的摩擦力必然降低，因而，两岩体间发生水平剪切错动势在必然. 据常理推断，这种水平剪切错动不会无限延伸，至少遇到相交断裂将被截断.

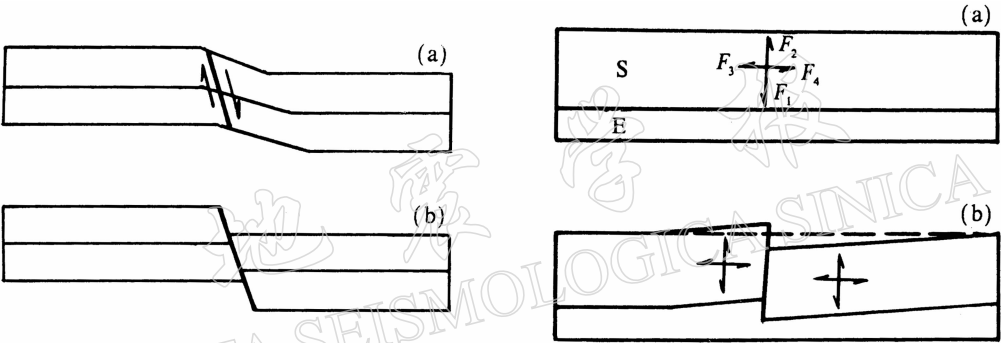


图 1 断层弹性回跳模型

图 2 岩体势能-动能转换模型

1966 年邢台 7.2 级地震产生了类似的地形变，因而，亦可用此模型解释. 笔者认为，由于深部流体造成了岩体重力和弹性势能的积累和释放，并使得岩体获得较高的运动速度，所以，深部流体对地震的孕育和发生起了关键作用.

4 壳内温压状态和电性结构

深钻资料揭示，地壳内存在着高孔隙层和裂隙带，裂隙带中充满了卤水或其它流体. 对水流体而言，在开放体系中，流体压强决定于水柱高度，流体压强低于静岩压. 在上地壳中存在一些低渗透率的致密岩层，Gold (1993) 将其称为临界层. 笔者前文论述了壳内高导层的卤水成因(徐常芳, 1996 b)，并指出壳内高导层的上覆盖层是低渗透层，使壳内高导层成为一个近似的封闭体系. 根据对壳内高导层的研究，本文给出了一个壳内压强和电阻率随深度变化的简化模型(图 3). 图中，设壳内高导层埋深为 20 km， $OBCEp_s$ 直线为静岩压， $OABCDE$ 折线为流体压强， AFD 和 CGE 等虚线为流体压强可能的变化范围， ρ 为电阻率.

图中 OA 段，由于流体是相互连通的，所以流体压强决定于水柱高度；AB 段，由于流体渗透率随深度降低，所以流体压强随深度以较高速率增大；BC 段为由石英自封存机制造成的低渗透层，封闭体系中，流体压强或孔隙压等于静岩压. 作为封闭体系，CDE 和 CGE 表示了壳内高导层中流体压强可能的变化范围，其温度约为 400℃. 由于壳内高导层

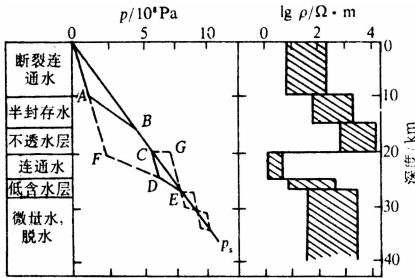


图 3 地壳内水压、岩压和岩石电阻率随深度变化模型

高导层中的卤水来自其下伏地壳，所以此段内岩石的物理和化学性质可能有如下特征和变化：① 可能发生岩石含水熔融和角闪石及云母等含水矿物的熔融、乃至脱水，并造成一些矿物和微量元素的出溶和迁移。其中自由水和卤水的生成和迁移，对壳内高导层的生成起了关键作用。反射下地壳的形成可能与此有关；② 在中下地壳温压条件下，含水矿物中，水的等效密度应略大于 1 g/cm^3 ，但自由水的密度小于 1 g/cm^3 。例如，在压强为 500 MPa 、温度为 600°C 的条件下，自由水的密度为 0.8 g/cm^3 。岩石中的连通水也会降低岩石晶粒间的摩擦力，因此，地壳深部相互连通的超临界流体，导致了岩石从脆性变形向塑性变形转变，下地壳内不会发生大地震。

5 地壳排气和地震

近年来，卫星红外异常与地震关系的研究表明，大地震通常伴随着地面增温异常，在地震前后各两三天内，出现增温高峰期。推测地面增温与地壳排气有关(叶民权等，1994)。大地震前后也伴随一些其它现象，例如地光、壳内高导层的变化、地下水位和地形变异常等等。推测这些现象与深部流体的存在和演化有关。

5.1 地光

自古以来人们就注意到大地震伴随有地光出现，但对其成因说法不一。笔者认为地光和深部高温高压流体的释放有关。大地震中，伴随地下岩石应力的剧烈变化，必然会产生岩石石英压电场的变化。当地下高温高压流体通过岩石裂隙上涌时，将会发生电离和放电，并喷出地面产生各种形式的放电现象。有人认为地光是由可燃气体的燃烧造成的。但是这种说法不能解释，为什么地光能发生在水下？例如海中和湖底。地光中的紫外线能灼伤人的眼睛，地光也能灼伤动植物，但至今未见由地光造成燃烧的遗迹。

5.2 地壳电性结构的变化

很多实例显示，大地震造成了地壳电性结构的变化，特别是地壳表层电阻率的变化。深部流体，特别是壳内高导层中释放出来的流体，可能是造成地壳浅层电阻率变化的根源。图 4 示出了北京东三旗台站壳内高导层上界面地震前后的变化。1987 年 11 月 23 日，

中所含流体为相互连通的超临界流体，具有气体性质，所以其扩散率比较高，而且，接近临界温度时，超临界水的热容量比较大，所以其温度梯度比较低，其压强和电导率是不稳定的。例如，如果其下伏壳幔发生热物质活动，使其温度升高，必然会引起流体压强突升，并导致其上覆脆性地壳产生热裂隙。连通流体压力(不是压强)的变化，将造成区域地壳的不稳定。E 至 p_s 段为壳内高导层的下伏地壳，笔者在前两篇文章中已论述了其对形成壳内高导层的重要作用，认为壳内

在进行大地电磁测深自动记录过程中,在三河、平谷一带接连发生了三次 3 级左右的小地震,震中距约 20 km.

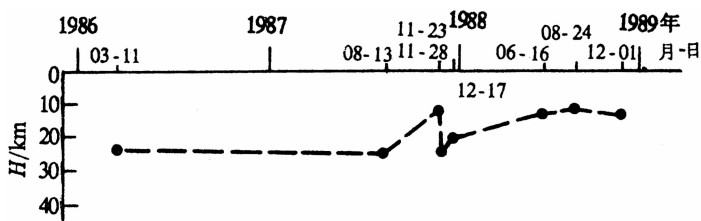


图 4 地震前后壳内高导层的变化

5.3 地下水位变化

唐山地震前后,震中区地下水位的变化有如下规律:震前数年至数月,水位缓慢下降;震前 1 至 2 个月,水位急剧下降;震前几小时至几分钟,水位强烈回升.这一现象被称为“临震回跳.”震时及震后短时间内,水位剧升(汪成民,尹伯忠,1982).通常人们用岩石裂隙的变化解释这一现象.显然,这种解释不能令人满意.众所周知,裂隙增多可容纳更多的水,震前应力剧增,裂隙更加发育,其结果必然会造成水位剧降,不应该造成水位回跳.笔者认为,临震和震时水位的上升,不仅和岩石裂隙有关,更和深部流体的释放有关,例如壳内高导层中流体的释放.尽管深部流体在缓慢释放过程中不可能直达地表,但有可能影响地下水位的变化.

5.4 地形变

大地震前数年内,通常在震中区会出现隆升数厘米的地形变;大地震后地面大面积剧烈下沉,下沉幅度达数十厘米,涉及范围达数千平方公里.这一现象早就引起了人们的注意,唐山地震出现的这种现象只不过是其中一例.如此巨大的地壳物质,在如此短的时间内究竟跑到哪里去了?这一问题不能不引起人们重视,而进行深入研究.笔者认为,这一现象可用深部流体的存在和演化来解释.

前已述及,壳内高导层似乎是一个巨大的超临界流体库.深部构造活动会造成地面形变.例如,根据笔者前两篇文章所述,如果壳内高导层中的流体被来自其下伏地壳或地幔的岩浆或 CO_2 高温流体加热,由于超临界流体具有气体性质,必然会以巨大的压力膨胀,从而造成其上覆地壳上隆.如果地震后部分流体散失、流体压力降低,地面便会突然下沉.例如,假设壳内高导层顶面埋深为 20 km、厚度为 5 km、流体含量为 1%.如果流体失去其总量的 1%,并保持流体压力不变,则地面将产生约 50 cm 的沉降.在地壳沉降过程中,下沉地壳将释放出巨大的重力势能.例如,对于一个面积为 10 000 km^2 的裂谷沉降盆地而言,此高导层上覆地壳下沉 50 cm 年所释放的重力势能,约等于唐山地震自 1976~1980 所释放的地震波总能量的 80 倍,这个能量是十分巨大的.但是,对于一个沉积厚度数公里的裂谷沉降盆地而言,这点能量却是微不足道的.

5.5 气候和地温异常

大地震前后,气候和地温出现异常现象,在中国历史资料中有大量记载.例如,震前地面增温,震后降大雨等现象.这些现象可能和地下热流体释放有关.唐山地震前半个月,80 cm 地温增温率出现了异常,地震前两天出现了高达 1°C 的增温率(图 5).多年统计资料

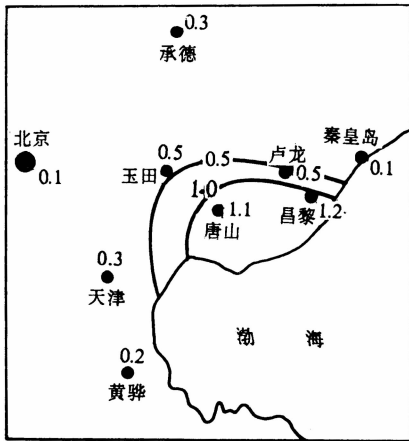


图5 唐山及周围地区7月24日
80 cm地温日变率等直线
(据天津市气象局)

表明, 剧烈的天气变化只能引起 80 cm 地温产生 0.1~0.3℃ 的变化(朱传镇, 黄德瑜, 1982)。显然, 这一现象不能用地下岩石的热传导机制来解释, 而用地下深部热流体的上涌机制来解释比较合理。

6 结语

中国是文明古国, 地震事件的记载十分丰富, 一些古代学者认为地震和地下积气有关。宋代学者程颢和程颐明确提出了“地动只是气动”的观点。清朝皇帝康熙于 1721 年写了阐述地震气动成因的短文(《康熙御制文集》, 第四集, 卷三十, 康熙论地震)。文章说:“朕临揽六十年, 读书阅事务体验至理, 大凡地震皆由积气所致。”又说:“既震之后, 积气已发, 断无再大震之理。”

中国大陆岩石圈电性结构的研究表明, 地壳和上地幔高导层上隆区通常为地震活动比较强烈的地区。壳内高导层的成因研究表明, 超临界卤水的富集可以形成壳内高导层。从而, 可推断地壳深部热流体的存在和演化与大地震有密切关系。本文提出了大陆浅源地震势-动能转换成因说, 并据此学说探讨了大陆浅源地震在不同构造区的分布、迁移和复发规律, 在地壳深部的分布和迁移规律, 以及大地震前后的各种异常现象。由于深部流体对地震孕育起了关键作用, 所以此学说可简称为地震流体成因说。

本文得到国家地震局地质研究所大地电磁测深组的支持, 刘国栋、赵国泽和詹艳等同志提供了部分资料; 刘若新研究员给予了支持和大量帮助。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 傅承义, 1993. 序言. 见: 梅世蓉等(主编), 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社. 1~5
- 刘国栋, 1994. 唐山地震震源构造及动力学过程研究. 见: 刘若新(主编), 现今地球动力学研究及其应用. 北京: 地震出版社. 70~83
- 汪成民, 尹伯忠, 1982. 地下水位异常变化. 见: 梅世蓉等(主编), 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社. 246~270
- 吴开统, 王泽皋, 吕培苓, 1982. 地震参数与序列. 见: 梅世蓉等(主编), 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社. 33~70
- 徐常芳, 1996 a. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律(一). 地震学报, 18(2): 254~261
- 徐常芳, 1996 b. 壳内高层导成因, 高温高压下卤水物态及其电导率(二). 地震学报, 18(3): 352~357
- 叶民权, 吴其勇, 杨忠东, 1994. 卫星红外异常与强震关系研究实例. 科学通报, 39(22): 2 074~2 077
- 张祖胜, 1982. 地形背景与异常分析. 见: 梅世蓉等(主编), 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社. 131~170
- 朱成男, 段加乐, 孔祥红, 1982. 红河断裂带的断错水系与地震活动问题. 见: 丁国瑜(主编), 中国活动断裂. 北京: 地震出版社. 267~272
- 朱传镇, 黄德瑜, 1982. 震兆分析. 见: 梅世蓉等(主编), 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社. 171~200
- Gold T(著); 陈华(译), 1993. 天然气和石油的成因. 见: 杜乐天等(主编), 天然气开发新方向. 北京: 中国地质矿产信息研究院出版. 116~126