

# 地震力学成因及前兆机理研究<sup>\*</sup>

## ——再“读”唐山地震有感

陈立德, 付虹<sup>✉</sup>, 张翔, 胡小静

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 简述弹性回跳学说、板块构造模型及岩浆活动型地震等地震力学成因的现有观点, 并对其进行了讨论。通过分析唐山震区的壳幔深部结构、前兆异常时空演化等资料, 进一步论证了唐山地震力学成因因为岩浆活动的观点。在此基础上对唐山地震前兆机理进行了研究, 指出岩浆活动既是该地震发生的成因, 也是各类前兆异常的成因, 它们是岩浆活动这枚硬币的两面。最后指出只有正确认识地震和前兆的成因, 才有可能用前兆资料对地震三要素做出较好的预报。

**关键词:** 地震前兆; 岩浆活动; 地震成因; 地震预报

**中图分类号:** P315.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)01-0001-10

## 0 引言

1976年7月28日, 河北唐山发生了7.8级强震, 震中位于华北北部的环渤海地区, 该区自1966年邢台7.2级地震后, 被列为未来几年可能发生强震的重点监视区。因此, 1967—1976年, 在唐山及其邻近地区先后开展了人工及天然地震测深、大地电磁测深、大地测量和流动重力测量等工作, 同期还先后建设了较密集的地电、地磁、地应力、地下流体等定点观测台站。唐山地震后多家研究机构对唐山地震的深部结构、构造等进行过多次探测和研究, 许多学者利用这些资料, 做了大量的研究工作, 提出了一些独到的地震理论观点, 如岩浆侵入导致地震(曾融生, 1985, 1988, 1991), 唐山地震壳内高导层的形成与地壳深部富卤流体的富集和封存有关(徐常芳, 2003)等。唐山地震让地震工作者获得了从震中到外围、从地表到地幔最全面的观测资料。利用这些资料可以开展从震中到外围, 异常开始时间、幅度和范围等方面的前兆异常时空演化特征研究, 这些研究与震源力学成因和前兆机理密切相关。本文主要使用唐山地震、云南地震活动、实验研究结

果等资料, 再次讨论地震的力学成因, 岩浆活动力学、热应力、前兆机理等方面问题。

## 1 地震力学成因现有观点简述

地震力学成因问题是地震预报研究最基础、最根本的问题。符合客观实际的地震力学成因理论, 可较圆满和合理地解释地震的时空分布、前兆异常和时空演化等特征。下面简述现有几种地震成因说法。

### 1.1 弹性回跳学说

将断层活动作为地震成因的思想, 最早于19世纪由澳大利亚地质学家休斯提出, 小藤根据休斯学说(宇津德治, 1990), 讨论了日本1891年浓尾地震, 现场考察发现了地震产生的根尾谷断层崖。

1906年4月18日美国旧金山圣安德烈斯断层发生8.3级大地震, 美国地质学家里德根据沿断裂300多千米范围内发生滑动和地震前后三角测量结果, 提出了弹性回跳理论(张肇诚, 张炜, 2008)。但历史上许多日本学者并没有接受该理论, 其理由之一为震源区的破裂一定比单纯的一个破裂面(断层)的错动更为复杂; 另一理由为

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“云南地区强震地下流体前兆特征及机理研究”(U1602233)资助.

✉ 通讯作者: 付虹(1963-), 研究员, 主要从事地震综合预测研究. E-mail: ynfuhong@qq.com.

里德假设的应变积累过程对断层两侧块体长期逆向运动缺乏合理说明(宇津德治, 1990; 张肇诚, 张炜, 2008)。

2011年3月11日日本东海发生9级巨震, 据媒体报道日本地震协会称该地震系海山崩塌所致, 海山系指海底古火山, 但并未提及与板块或断层活动有关。

### 1.2 板块构造模型学说

板块构造模型认为, 完整坚硬的岩石圈驮载在地幔软流圈上, 在洋脊处被上涌的地幔热流产生的海底扩张力, 向两侧推挤, 最终消失在大陆边缘深海沟处。板块的相对运动只局限在巨大的板块边界附近, 块体间的相互摩擦会引发地震和板块变形。该模型也为弹性回跳理论断层两侧块体运动的力源做出了解释, 因此弹性回跳理论在我国地震界曾被广泛认可。

Aki (2009) 根据板块构造模型提出, 假设地球岩石圈由脆性上地壳、韧性下地壳和上地幔3层组成, 并总体上承受着板块驱动力。他认为构造稳定区之所以稳定, 是因为其下部的韧性层变形速率低, 反之亦然。据此他提出, 加载到岩石圈上的力, 将引起下地壳和上地幔稳态蠕滑, 因此只要岩石圈的三层耦合在一起, 那么下部韧性层的蠕滑变形将引起上地壳脆性层的应力积累, 进而发生地震。

### 1.3 岩浆活动型地震学说

陈立德和付虹(2014)研究了唐山地震重力、地温等前兆资料和地震测深资料, 显示唐山震区地壳内存在低速逆转层, 即有岩浆热物质存在。同时发现唐山极震区宏观烈度等震线呈共轭状分布的特征。地震时, 极震区熟睡的人、器物、房顶被高高抛起, 睡时头朝东、震后头朝西等现象均显示唐山地震时有强大的垂直向上冲击力作用等。据此提出唐山地震力学成因因为深部岩浆活动的结论, 并将其称为岩浆活动型地震。

### 1.4 其他类型地震学说

对于100多千米以下震源的深震, 宇津德治(1990)先后提出了固体间的相变、剪切熔融和塑性蠕变的不稳定成因机制等。

## 2 地震力学成因讨论

综上所述, 浅源地震的力学成因理论可归纳

为两类: 一类为弹性回跳和板块构造学说, 这两种学说都主张块体运动是在大区域水平力作用下, 边界断层两侧块体作相向水平运动, 当断层闭锁段阻止其运动, 并积累应力应变, 且应力应变积累到或超过闭锁段强度极限时, 块体沿断层发生快速滑动或破裂, 即发生地震。简言之, 这两种学说都认为, 地震是在大区域水平力作用下, 由断层活动引起的, 以断层活动为中心。另一类为岩浆活动地震成因学说, 该学说认为壳内岩浆囊或岩浆柱垂直上涌冲击力(势能)或温差热应力(热能), 达到或超过上覆及周围岩层极限强度时, 深部岩层突然快速破裂, 即发生地震。该学说认为, 地震是在岩浆冲击力、温差热应力等局部热能、势能作用下发生的, 是地震引起地表破裂或先存断裂再活动, 以岩浆活动为中心。

经典地质学理论认为, 深大断裂是岩浆活动的通道, 因此深大断裂上发生的地震也可以是岩浆活动型地震。

国外学者对非洲、澳洲、北美洲和南美大陆的地震进行分析后认为, 有些地震沿着与海岸线平行的原始脆弱带分布, 很可能是基性岩浆沿脆弱带有限区域短时间快速迁移的结果(曾融生等, 1985)。2018年墨西哥8.0级地震后不久, 震中附近就发生火山喷发, 这也可作为该地震与岩浆活动有关的证据。

### 2.1 岩浆涌入及附近热源的热应力场分析

#### 2.1.1 岩浆涌入的热应力场分析

图1为地幔高温岩浆热物质涌入地壳后壳内热应力场的分布情况(曾融生等, 1988)。图1a是假设热物体自莫氏面向地壳内涌入深度为5 km, 设左上方长条为深度12 km的断层, 它与热物体中心距离为19 km, 中心温度比周围温度高600℃。上述条件下附加热应力产生的主张、主压及剪应力分布, 分别如图1b, c所示。

图1b显示, 热物体底部莫氏面附近的水平方向主压应力最大, 主张应力最小, 且方向近于直立; 再往上, 压应力逐渐减小, 张应力逐渐增大, 方向发生旋转, 到地表附近与地表平行的水平方向张应力达最大, 顶底之间的中间部位似一中性面, 该面以下为压应力区, 以上为张应力区。图1c为热物体产生的附加剪应力分布情况图。

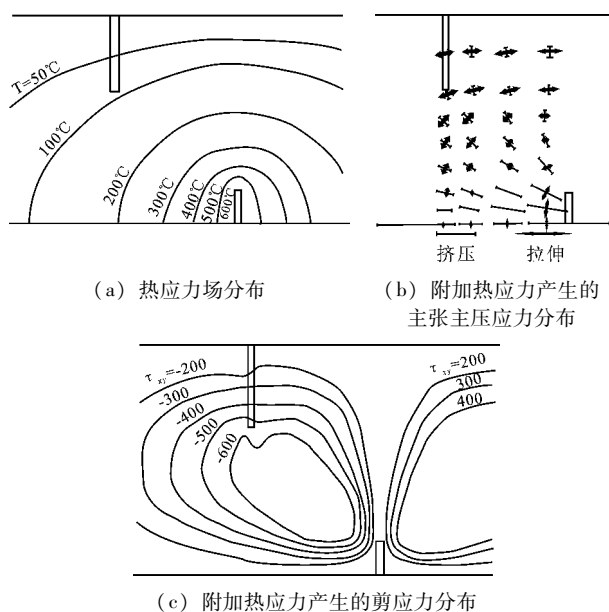


图1 地壳内高温热物体所产生的附加应力场 (据曾融生等, 1988)

Fig. 1 Additional stress fields generated by high temperature and hot bodies in the crust (based on Zeng *et al.*, 1988)

曾融生等(1988)对计算时所设介质物性条件未作介绍, 如果将岩浆涌入区周围介质设为均匀介质, 则与唐山震区实际条件相差甚远, 因此该结果只能作定性参考。

### 2.1.2 附近热源产生的温差热应力分析

唐山震区位于渤中隆起西北缘, 沧东梯度带的东北端。渤中隆起 Moho 面埋深 28 ~ 30 km, 2 km 深处地温高达 80 °C ~ 90 °C, 500 °C 居里面埋深为 14 ~ 16 km。隆起区 Moho 面埋深较北部山区变浅 10 km 左右, 而地温却增高 30 °C, 震源深度 20 km 附近, 渤中隆起地温比北部山区高约 200 °C ~ 300 °C。沧东隆起也是地热异常区。因此唐山震区地壳介质受渤中隆起和沧东梯级带 2 个热源影响。

张之立(1985)将温度变化区简化为圆形、狭长椭圆形变模式, 分别求其解析解计算热应力场。两种模式都表明: 增温区边缘地带是热应力的高值带, 同时具有最大水平剪应力和周向张应力; 两个热源对唐山震区引起的热应力相互叠加。若温度变化 50 °C 和 10 °C, 会分别引起 60 MPa 和 12 MPa 左右水平剪应力变化。因此张之立(1985)认为, 唐山地震主要力源为附加热应力作用的结

果。目前还不能判别, 岩浆活动引发地震, 是岩浆上涌的势能为主, 还是温差热应力为主。唐山 7.8 级、滦县 7.1 级两次主震震源深度均为 22 km, 其后 5 级左右余震震源深度均为 10 km 左右, 以此可以判定发生在岩浆囊(柱)顶部及其附近的地震, 可能以岩浆上涌势能为主, 发生在顶部以下较深部位的地震可能以温差热应力为主。

### 2.2 对弹性回跳学说的质疑

(1) 1966 年邢台 6.8 级地震至今, 中国境内已积累了 200 多次震例研究报告。大量资料表明, 很多地震的主余震空间分布与极震区烈度等震线形状成龟壳状或共轭十字交叉分布, 而不是沿地表断层呈线性分布, 这是“断层活动引起地震”无法解释的。

(2) 有的地震震中区深浅部均无断层。1997 年 1 月至 1998 年 8 月, 新疆伽师地区共发生 6.0 ~ 6.4 级地震 9 次, 5.0 ~ 5.5 级地震 10 次。其中有 2 次 6 级以上地震发震时间间隔仅 1 分 9 秒, 在 10 km 范围内共发生 7 次 6 级以上地震。地震后张先康、刘启元等先后对震区作了地震反射/折射、地震台阵三维深部地壳结构探测, 发现震区地表及深部均无断层, 因此也无法用弹性回跳学说解释(苏迺秦, 王海涛, 2003)。

(3) 1970—1993 年, 云南普洱地区发生 6.0 ~ 6.8 级地震达 7 次, 其中 5 次(71%)地震震中位置集中在半径 10 km 左右范围内, 被称为“地震窝”, 窝内 5 次地震震中距仅为 5 ~ 10 km, 2 次窝外地震, 距窝内地震最近距离分别为 20 km 和 30 km。窝内两次地震间隔时间分别为 1.2, 2.3, 3.5 和 13.9 a。类似于普洱地震呈窝状丛集发生的现象并不少见, 仅云南还有腾冲、宁蒗等地震窝。

张国民(2013)研究发现, 中国境内应变积累速率可划分为小于  $4 \times 10^{-8}/a$ ,  $(4 \sim 8) \times 10^{-8}/a$  和大于  $8 \times 10^{-8}/a$  低、中、高 3 档。破裂应变极限速率为  $10^{-4}/a \sim 10^{-5}/a$ , 一个地震孕育时间应在几百年到几千年之间。

上述普洱地震窝内 2 次地震的发震间隔时间, 显然是大区域块体缓慢水平运动积累应变能有关模式无法解释的。普洱地震窝内有一新生代火山, 现代火山活动已持续几百年上千年, 因此我们推测地震窝丛集发震原因可能与深部岩浆活动有关。

(4) 中国大陆地震多发生在新生代以来强烈隆起或强烈沉降的青藏高原、华北平原凹陷区, 及东南沿海火山、高温温泉活动带上。这些地区壳内温度高, 温度梯度大, 地表断层很难延伸至 10 km 深度处。如华北盆地热流高达  $56.16 \sim 73.82 \text{ mW/m}^2$ , 地震反射探测资料表明, 所有上地壳脆性层断层, 在 6 km 左右处都已消失 (曾融生等, 1991); 西藏羊八井有几句不到 100 m 的钻井, 实测温度高达  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 推测 10 km 深度处, 温度已远超玄武岩  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$  固相线温度。1972 年, 羊八井北 50 km 左右的那曲西发生 6.0 级地震, 震源深度为 15 km, 显然它也与断层无关。云南腾冲火山区热流值高达  $118.07 \text{ mW/m}^2$ , 地温梯度达  $46.1\text{ }^{\circ}\text{C/km}$  (马宗晋, 汪一鹏, 2001; 皇甫岗, 姜朝松, 2000)。该区 1976 年发生龙陵腾冲震群, 其中 5~7.4 级地震 12 次, 震源深度为 16~24 km, 按上述地温梯度计算, 该深度温度已达  $737\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,106\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 也分别超过花岗岩和玄武岩固相线临界温度。

热力学基本理论表明, 物质的力学、电磁、状态等性质, 随温度的变化而变化, 地表断层在地温梯度高的地区, 有理由怀疑它是否能延伸到

10 km 左右的深度。如曾融生等 (1985) 分析研究河北反射地震波探测资料后指出, 河北邢台、唐山凹陷的正断层, 只能延伸到地下 5~6 km 深度。

## 2.3 岩浆活动型地震学说的实证依据

### 2.3.1 岩浆涌入的地壳结构依据

从图 2 可见, 唐山震区下方约 15 km 至 Moho 面 30 km 左右, 有一宽约 80 km 的低速层 (陈立德, 付虹, 2014; 曾融生等, 1985; 梅世蓉, 1982; 刘昌铨, 杨建, 1983)。同一范围大地电磁测深资料显示, 在 20 km 左右该低速层的电性显示为低电阻率特征, 电阻率仅为  $5 \sim 10\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ , 其上、下地层的电阻显著升高至  $102 \sim 103\text{ }\Omega \cdot \text{m}$  和  $104 \sim 105\text{ }\Omega \cdot \text{m}$  (张国民, 2013; 刘国栋, 1984a, b)。陈立德和付虹 (2014) 将该低速层称为地壳内的黑烟囱; 曾融生等 (1991) 认为, 地震波速的降低, 既可能是因物质成分的变化, 也可能为温度增高物态变化为液态, 考虑到低速层的形态, 他认为局部温度异常产生局部低速区的可能性最大; 徐常芳 (2003) 认为岩浆作为熔融电介质, 电阻率比固体岩石低很多; 马宗晋和汪一鹏 (2001) 在研究腾冲火山时, 发现火山区下方岩浆囊即为低速异常区, 且在深度 20~100 km 处存在一个低速柱。

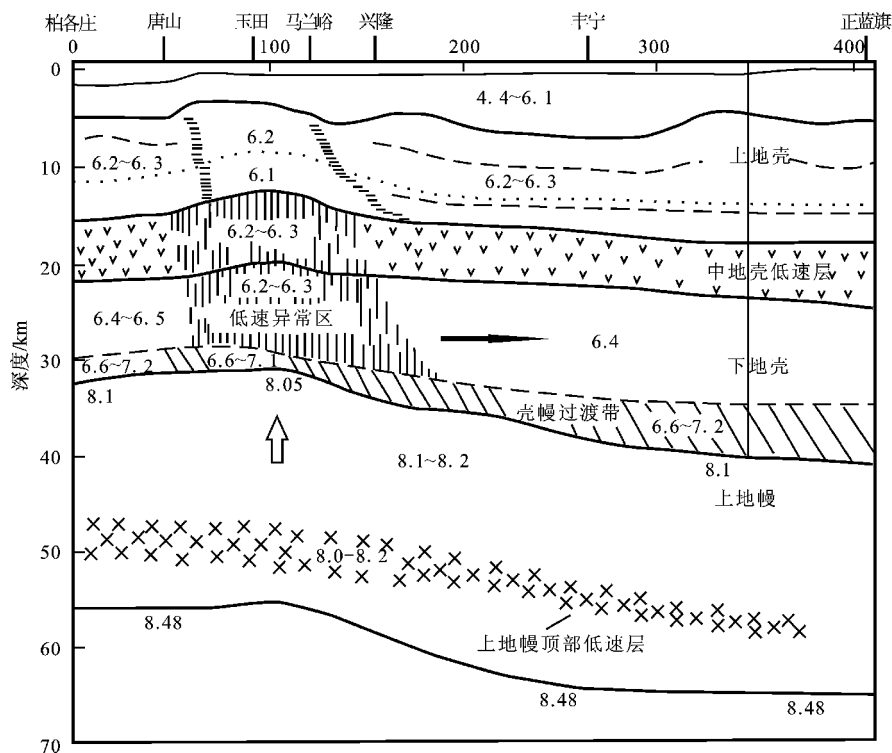


图 2 唐山地震区地壳结构及低速层 (据陈立德, 付虹, 2014)

Fig. 2 Crustal structure and low velocity layer in Tangshan seismic area (based on Chen, Fu, 2014)

图3为唐山震区Moho面附近地震波速度结构图，图中最上方水平横线为NW—SE剖面测线上的人工放炮点及坐标点编号。由图可见，唐山主震以东15 km下方，地震波速8.0 km/s地幔顶部分界线，出现一不连续的缺口，两侧Moho面埋深相差约3~5 km，缺口ES方向Moho

面埋藏较深，为32~37 km，而WN方向则较浅，仅为31~34 km，为Moho面向上隆起区。Moho面缺口区，可能为Moho面下方上地幔顶部热液熔融物质向下地壳侵入形成壳内低速层的入口。图2中地壳内15 km以下的低速体，即与此有关。

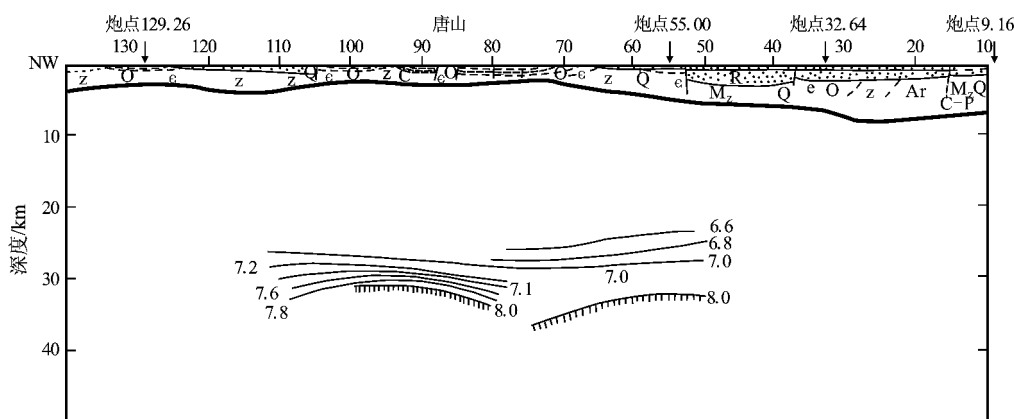


图3 唐山地震区地幔附近速度结构（据曾融生等，1985）

Fig. 3 Velocity structure layer in mantle in Tangshan seismic area (based on Zeng *et al.*, 1985)

### 2.3.2 岩浆涌入的重力、地温异常依据

岩浆涌入还与重力和地温有关，具体表现如下：

(1) 重力值增高。1976年唐山7.8级地震前，经唐山震中区的重力测线分别有北京—天津—山海关铁路测线和北京—三河—玉田—唐山—乐亭公路测线，两测线在唐山的测点分别为火车站（唐山I）和市内（唐山II），两者相距约2 km（图4a）。图4b显示铁路测线若以北京为起点，重力值1971—1975年累计上升130  $\mu\text{gal}$ ，震后逐渐降低（图4b）；1976-03-24—1976-07-03公路测线共有2次测值，震前3个多月唐山震中区重力值上升了165  $\mu\text{gal}$ ，震后略有下降（图4c）。陈运泰等（1980）、张国民（2013）都认为，唐山地震重力异常可能为地壳深部或上地幔熔融热物质涌入地壳浅部引起，据异常量级估算，大约有12.5 km<sup>3</sup>深部物质迁入重力异常区（陈立德，付虹，2014）。

(2) 地温升高。天津市气象局资料显示，震前半个月至1976年7月13日，唐山震中区及其附近地区，相对于周边玉田、承德、秦皇岛、天津、北京、黄骅等地测点的80 cm地温日差值逐渐增大，震前4天（7月24日）唐山震中区及附近昌黎的地温日变率高达1.1  $^{\circ}\text{C}$ ，而玉田、卢龙、北京、秦皇岛一带分别仅为0.5  $^{\circ}\text{C}$ ，0.1  $^{\circ}\text{C}$ （图5）。

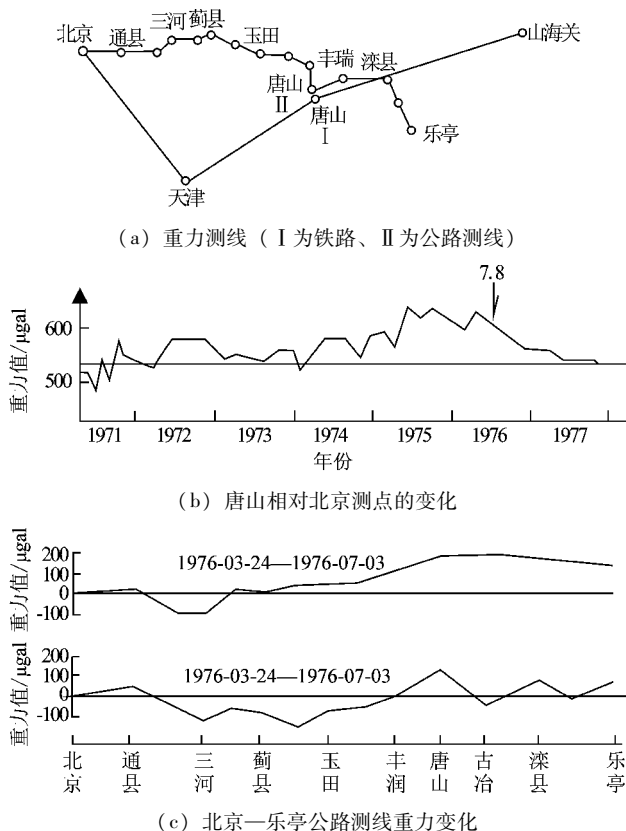
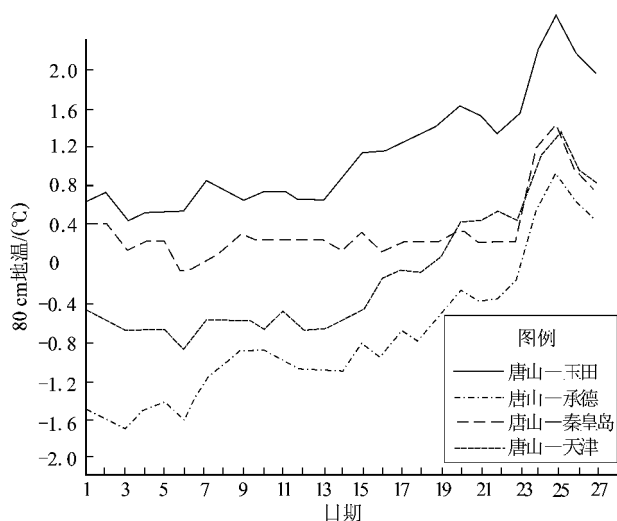


图4 唐山地震前震中区重力变化（据张国民，2013）

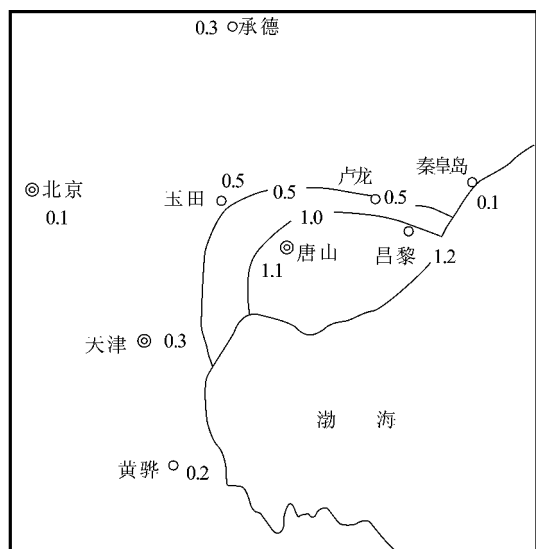
Fig. 4 Gravity variation in epicentre area before Tangshan earthquake (based on Zhang, 2013)

天津气象局多年资料显示, 大气、日照等变化对 80 cm 地温影响仅为  $0.1^{\circ}\text{C} \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。

热力学第二定律表明, 热传导只能由高温物体向低温物体传导, 且不可逆。热传导有分子、热辐射和热物质迁移等多种方式, 分子热传导速度慢、后两种最快。地壳深部温度高于浅部, 地表地温升高显然是深部热物质上涌经孔隙、裂隙、破碎带、断裂带等途径以热辐射、热物质迁移的方式传到浅部, 引起地温升高的结果。这是唐山震区下方有岩浆涌入的又一有力证据。



(a) 1976 年 7 月唐山相对玉田、承德、秦皇岛、天津地温日差值曲线



(b) 唐山地震震中及周围地区 7 月 24 日地温日变化率

图 5 唐山地震前震中及附近地区 80 cm 地温升高 (据梅世蓉, 1982)

Fig. 5 80 cm ground temperature rising in epicentre and its adjacent area before the Tangshan earthquake (based on Mei, 1982)

### 2.3.3 岩浆涌入的其它依据

(1) 地电阻率降低异常。地电阻率观测台站记录资料显示, 1970—1972 年地电阻率较平稳, 1972 年底开始出现下降异常, 主要特点为: 异常首先从震中开始, 后陆续向外扩展, 至 1975 年下半年形成了以唐山为中心, EW 长 300 km, NS 宽 100 km 的异常区。异常持续时间在震中及其附近长达 2.5 年, 在震中外围仅几个月。异常幅度在震中及其附近达 2.5%, 从震中向外至北京地区已衰减至无异常 (图 6, 7) (张国民, 2013)。

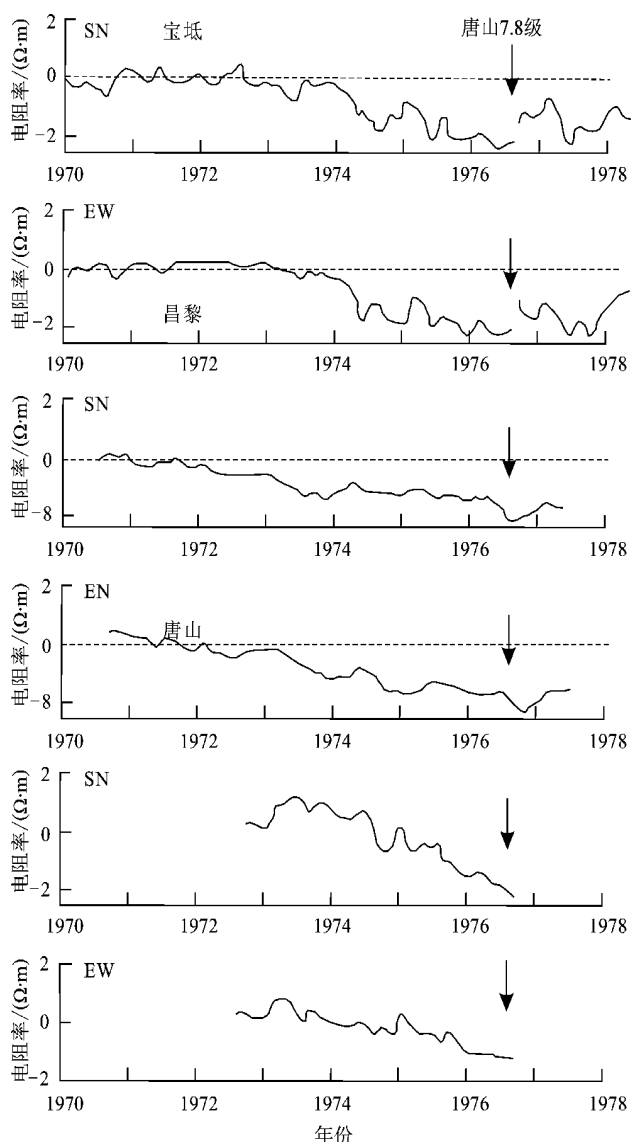


图 6 唐山地震前后电阻率月距平值曲线 (据张国民, 2013)

Fig. 6 The resistivity monthly anomaly curve before and after the Tangshan earthquake (based on Zhang, 2013)

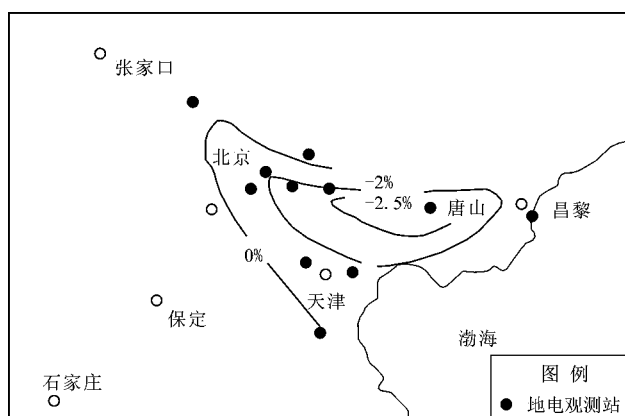


图7 1975年12月京津地区地电阻率异常幅度等值线 (据张国民, 2013)

Fig. 7 Anomalous amplitude isoline of earth resistivity in Beijing-Tianjin area on Dec. , 1975 (based on Zhang, 2013)

(2) 地下水位升降异常。京津唐地区地下水位观测井大多封闭性好、干扰小, 图8列出了7口井的有关资料 (张国民, 2013)。由图可见, 唐山天津一带地下水位异常开始时间为1972年底, 与地电阻率异常开始时间相似; 震中区地下水位以下降为主, 震中外围北京地区异常出现较晚, 多开始于1976年2—3月以后, 且均为上升异常。

(3) 地磁垂直分量异常。对比华北地区地磁垂直分量测值, 地磁异常开始于1975年7月, 异常幅度最大时段为1976年3—4月 (图9) (张国民, 2013), 震中区附近昌黎一带地磁垂直分量异常幅度最大达15 nT, 震中外围至北京一带减小至7 nT左右, 到更远的河北石家庄、红山、山东济南一带则无异常 (张国民, 2013)。

综合地电阻率、地下水位、地磁垂直分量等观测资料可见, 唐山地震前其异常开始和持续时间、幅度等特征, 均显示震中区异常开始早、持续时间长、异常幅度大等特征, 异常范围最远达距震中300 km。

#### 2.3.4 地震与火山喷发前兆极为相似的依据

陈立德和付虹 (2014) 指出, 火山喷发前1~2年和几天至几个月类似于地震的中期和短临时段, 火山口附近观测到的宏观、地形变、重力、电磁、气体等异常与地震中、短期前兆异常极为相似。

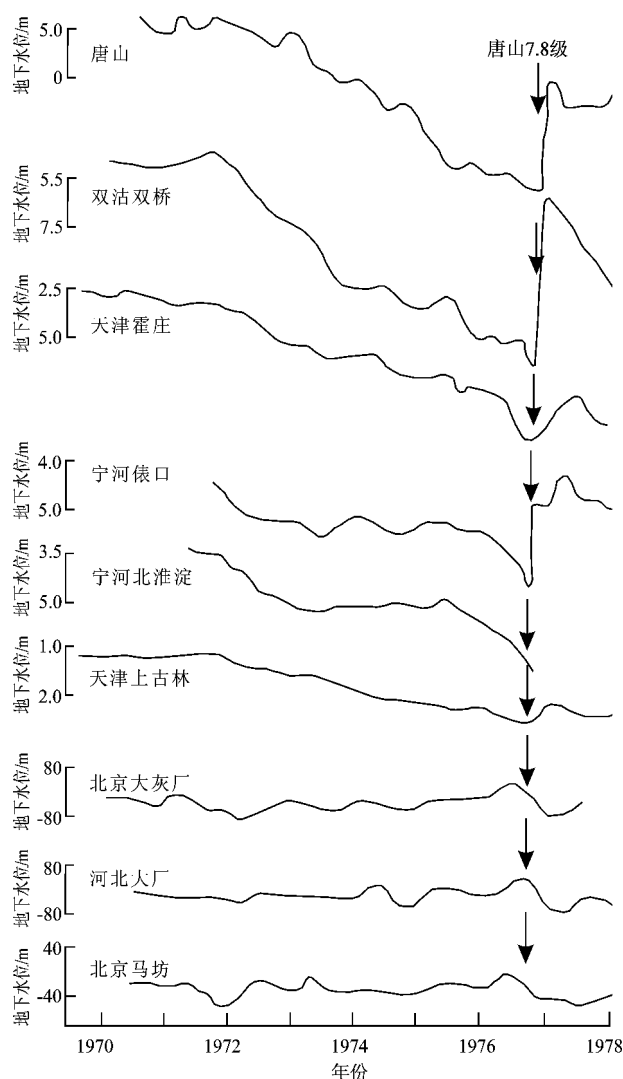


图8 唐山地震前后京津唐地区地下水位异常 (据张国民, 2013)

Fig. 8 Anomaly of groundwater level in Beijing - Tianjin - Tangshan area before and after the Tangshan earthquake (based on Zhang, 2013)

地形变方面, 1944年日本北海道珠火山喷发前0.5~2年, 附近农田出现缓慢隆起, 并向北移动; 1983年俄罗斯勘察加火山喷发前2年, 火山口附近垂直位移达100 mm; 1967年美国夏威夷火山喷发前2年, 岩浆房深约2~3 km, 2年内在水平面内移动过10次, 迁移距离1~2.5 km; 1986年11月日本伊豆大岛火山喷发前1年多, 山顶垂直形变下降约19 mm。

重力场方面, 1982年日本樱岛火山喷发前2年, 重力值由5  $\mu\text{gal}$  增至100  $\mu\text{gal}$ , 据推算, 1975—1982年火山区质量增加约 $(2 \sim 3) \times 10^{11} \text{ kg}$ 。

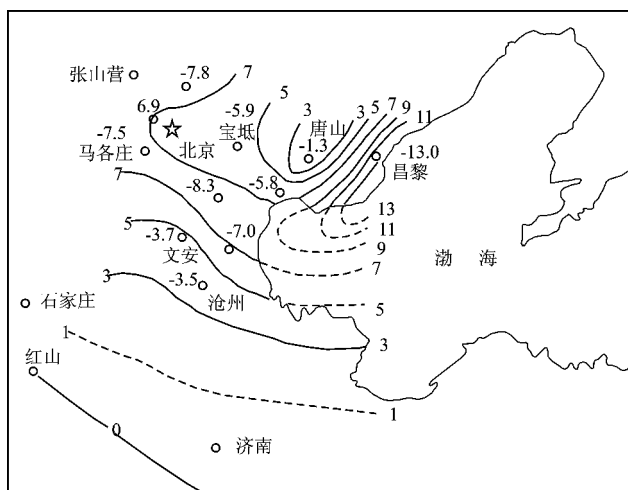


图9 1975年7月至1976年6月唐山地震震中及其邻区地磁异常幅度等值线图 (据张国民, 2013)

Fig. 9 Contour maps of geomagnetic anomalies in Tangshan earthquake epicentre and its adjacent area from Jul. , 1975 to Jun. , 1976 (based on Zhang, 2013)

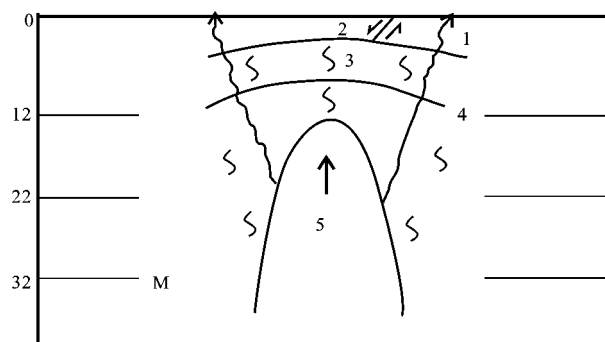
日本伊豆、长崎等火山喷发前10天、30天和90天左右,观测到地倾斜、电阻率、地磁等测值出现急剧变化等情况。如1986年伊豆火山喷发前3个月,地电阻率由 $1.2 \Omega \cdot m$ 下降至 $0.5 \Omega \cdot m$ ,降幅60%;1991年5月云仙岳火山出现熔岩穹丘的前10天,300~600 m范围内地磁总强度增大80 nT (李玉锁等, 1998)。火山喷发前几天至3个月时段,火山口附近能观测到 $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $S^-$ 或 $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $He$ ,  $CO$ 等气体组分出现突然增多或减少等变化。

火山喷发前的上述前兆异常,是由岩浆活动引起,它与地震前兆出现时段及形态特征都极其相似,相似现象必有其相似原因。它为我们推论唐山地震前兆异常与深部岩浆活动有关的结论,提供了又一依据。

### 3 唐山地震前兆机理讨论

唐山地震前,震中区重力场和80 cm地温均出现升高异常,这既是唐山地震前地壳内有岩浆活动的证据,同时岩浆上涌又是重力、地温测值升高的唯一原因。其原因为:①只有物质快速迁入才能引起重力测值快速上升;②只有熔融流体物质才能在壳内快速迁移;③只有高温热物质迁

移到地壳浅部,才能引起极浅处80 cm地温出现升高异常。其它电、磁、地下水异常也与震区岩浆活动有关。电阻率和地磁异常,可能因深部热物质涌入,再经孔隙、裂隙、破碎带、断层等通道(下称通道),以热辐射、热物质迁移等形式传导热量,致使岩浆体周围因岩层温度升高、居里面抬升而产生岩石电阻率降低、磁性减弱等变化(图10)。



1. 气液热物质迁移; 2. 浅层断层活动; 3. 热辐射; 4. 地壳变形;  
5. 岩浆囊; 0~12 km: 上地壳脆性层; 12~22 km: 脆韧性过渡层;  
22~32 km: 下地壳韧性层; M: 莫霍面

图10 岩浆活动型地震力学成因及前兆机理示意图

Fig. 10 Diagram of seismological genesis and precursory mechanism of magmatic activity type earthquake

岩浆囊由高温高压环境下的地壳深处,逐渐上升到中上地壳可能发震的10~20 km较浅部位时,高温高压环境下处于气液混溶状态的液态气,因围压减小将还原成气态。液化气像沸腾的水一样会冲击岩浆囊,产生地脉动、晃动等现象。岩浆冲击地壳脆韧性岩石,在岩石破裂成核的中前期阶段其慢破裂会产生一种低频、振幅大的长周期形变波。1986年11月日本伊豆大岛火山喷发后2个月内,经常记录到低频、振幅大、周期为3.5~7 s的一种波,让人感觉好像地下有一与大岛体积差不多大小的一个岩浆囊在不停地摇动(李玉锁等, 1998; 陈立德, 付虹, 2014)。地壳岩层地温升高,岩石韧性增大, S波速度( $V_s$ )降低,会导致波速比( $V_p/V_s$ )出现升高异常。

岩浆囊或地幔上升隆起,其上覆地壳岩层、先存断裂受垂向冲击压力、水平拉张力、剪切力等作用,当作用力接近上覆岩层强度极限时,



如前面介绍的火山喷发前的有关前兆一样，地表或浅部岩层，将产生不同程度的升降、拉伸、剪切等变形或破裂。在上述力的作用下，岩浆囊上覆及周围地壳内的含水（油气）层，受到挤压变形，引起岩层孔隙、裂隙减小或闭合，

含水（油气）层水位会出现上升、产水（油气）量增大，甚至出现喷射等异常。若含水（油气）层受到拉张变形、孔隙、裂隙增大，甚至使它们串通到上、下隔水层，水位就会出现下降异常（图11）。

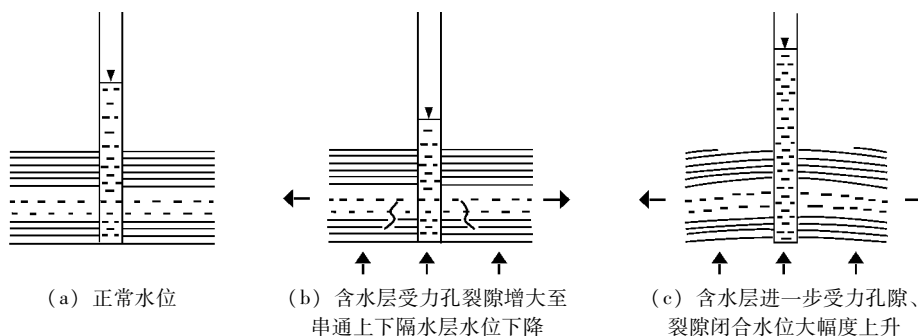


图11 岩浆囊逐渐上涌含水层逐步增大水位异常示意图

Fig. 11 Water level diagram anomaly of aquifer gradually increasing when magmatic bursa gradually upwelling

1976年7月28日唐山地震前，距震中西南向180 km的大港油田庄13井的压力显著增大，7月上旬为2.4~2.5 MPa，于7月下旬增大至3.7~4.0 MPa，10天左右增大1.3~1.5 MPa（徐常芳，2003）。如果认为引起庄13井压力增大变化（ $\Delta P$ ）的力源，为唐山震区下方的岩浆上冲力（ $P$ ）向外传递引起，向外传递的力随距离（ $R$ ）按 $P/R^2$ 衰减，由式 $\Delta P = P/R^2$ ，引用前面数据估算，所得唐山震区下方岩浆上冲力大约为45 360 MPa。利用日本火山喷发资料估算地下500 m深的岩浆压力约为100 MPa，1 000 °C岩浆快速加热地下水可产生1 000 MPa压力，火山喷发压力约为480~570 MPa（陈立德，付虹，2014）。

岩浆热液物质沿通道进入地表温泉或冷泉，水温、离子、气体组分等测值会突然大幅度上升，离子和气体组分在岩浆中又多呈非均匀分布，加上传输通道可能出现时堵时通的情况，离子和气体组分测值会出现时有时无的巨涨落变化，并显现出异常持续时间不长的特征。浅层冷水因形变使裂隙与温泉连通，温泉水温会出现降低异常。

## 4 结论和讨论

本文综合岩浆活动说实证依据，主要得到以下两点认识：

（1）地震属地学，地学是观测性很强的科学。有关它的理论、模型、假说都应能接受实际观测资料的检验和证实。

唐山地震震中下方15 km至地壳底部存在一宽约80 km的低速层，深部20 km左右存在低电阻层。低速层、低阻层均可被认为是高温熔融岩浆层；地幔速度结构资料显示，唐山震区下方地幔8.0 km/s速度界面有一不连续缺口，该缺口被认为可能是地幔顶部岩浆库中热液熔融物质涌进地壳的入口。

因此唐山震区地壳、地幔的速度结构资料可以证明，唐山地震的力学成因是因岩浆活动所致，是典型的岩浆活动型地震。

（2）岩浆活动既是地震发生的原因，同时也是各类前兆测值出现异常的原因。因此可以说地震和前兆异常是岩浆活动这枚硬币的两面，有着密切的联系。

岩浆上涌受阻处是上覆岩层发生破裂的震中区，它既是应力集中的力源区，又是热源区。区内各类前兆测值异常出现早，持续时间长、幅度大，向外逐渐减弱等特征，符合力学、热力学近强远弱、近大远小的有关理论。

地震预报要建立在大量震例研究的基础上，遵循创新驱动原则，采用新概念、新理论、新技术，预报水平才有希望得到提高。

## 参考文献:

- 陈立德,付虹. 2014. 地震预报新概念[M]. 北京:地震出版社,10-24,68-80.
- 陈运泰,顾浩鼎,卢造勋. 1980. 1995 年海城地震与 1976 年唐山地震前后重力变化[J]. 地震学报,2(1):21-30.
- 皇甫岗,姜朝松. 2000. 腾冲火山研究[M]. 昆明:云南科技出版社,334-380.
- 李玉锁,修济刚,李继泰,等. 1998. 火山喷发机制与预报[M]. 北京:地震出版社,68-80.
- 刘昌铨,杨建. 1983. 唐山地区柏各庄—丰南—丰宁地壳测深资料的新解释[J]. 地球物理学报,26(增刊 1):628-640.
- 刘国栋. 1984a. 地壳上地幔结构研究的某些新进展(一)[J]. 地震学刊,(1):29-36.
- 刘国栋. 1984b. 地壳上地幔结构研究的某些新进展(二)[J]. 地震学刊,(2):17-22.
- 马宗晋,汪一鹏. 2001. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学研究[M]. 北京:地震出版社,177-182.
- 梅世蓉. 1982. 一九七六年唐山地震[M]. 北京:地震出版社,405-449.
- 苏迺秦,王海涛. 2003. 1997 年 1 月 21 日至 1998 年 8 月 27 日新疆维吾尔自治区伽师强震群[G]//中国震例(1997—1999). 北京:地震出版社,1-39.
- 徐常芳. 2003. 中国大陆壳内与上地幔高导层成因及唐山地震机理研究[J]. 地学前缘,10(特刊 1):101-111.
- 宇津德治. 1990. 地震事典[M]. 李裕彻,卢振业,丁鉴海,等译. 北京:地震出版社,13-16.
- 曾融生,陆涵行,丁志峰. 1988. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因[J]. 地球物理学报,31(4):383-398.
- 曾融生,张少泉,周海南,等. 1985. 唐山地震区的地壳结构及大陆地震成因的探讨[J]. 地震学报,7(2):125-142.
- 曾融生,朱露培,何正勤,等. 1991. 华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地的成因[J]. 地球物理学报,34(3):288-301.
- 张国民. 2013. 地震预测科学研究论文选[M]. 北京:地震出版社,14-95,152-159.
- 张肇诚,张炜. 2008. 地震预报的历史解读与思考[M]//中国地震局地震预测研究所,中国地震台网中心,中国地震学会. 中国地震预报探索. 北京:地震出版社,100-110.
- 张之立. 1985. 唐山地震热力源的研究[J]. 地震学报,7(3):45-56.
- Aki K. 2009. 预测地震和火山喷发的地震学[M]. 尹祥础译. 北京:科学出版社,20-21.

## Discussion on Cause of Earthquake Mechanics and Precursory Mechanism: Re-study the Tangshan Earthquake

CHEN Lide, FU Hong, ZHANG Xiang, HU Xiaojing  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

This paper gives an overview on some main research results obtained in the cause of earthquake mechanics, including the elastic rebound theory, plate tectonics model and earthquakes caused by magmatic activity. By analyzing of the deep crust-mantle structure and the temporal and spatial evolution of precursor anomalies of the Tangshan earthquake zone, we identified that the cause of the Tangshan earthquake mechanics was magmatic activity. Based on this viewpoint, we researched the precursory mechanism of Tangshan earthquake and pointed out that the magmatic activity was both the cause of earthquake occurrence and the cause of various precursory anomalies. They were the two sides of the magma activity. Finally, it was believed that we could use the precursory data to make better predictions for the three elements of the earthquake only by correctly understand the causes of earthquakes and precursors.

**Keywords:** earthquake precursor; magmatic activity; earthquake mechanics; earthquake prediction