

地球深部流体的状态及其在震源物理中的意义*

李世愚^{1 †} 张洪魁² 和泰名¹ 赵玉林¹ 钱复业¹

(1 中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

(2 北京地震局 北京 100080)

摘要 许多地震前兆的机理与地球深部流体相关. 文章介绍了与此有关的地球深部流体状态的研究进展. 通过间接的证据和从若干超深井钻孔探测得到的直接证据, 着重介绍了深部水的数量、存在状态和性质, 估计地球深部流体孔隙压力和连通性. 研究表明, 地球深部高温高压状态下的水处于超临界状态, 超临界水具有许多特殊性质, 这些特殊性质使得流体不仅成为强震前兆的传播媒介和震源破裂过程的影响因素, 而且成为直接参与震源动力过程的介质.

关键词 震源物理 地震前兆 地电阻率 超临界流体

The state of fluids deep inside the Earth and its significance in the physics of earthquake sources

LI Shi-Yu^{1 †} ZHANG Hong-Kui² HE Tai-Ming¹ ZHAO Yu-Lin¹ QIAN Fu-Ye¹

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

(2 Beijing Earthquake Administration, Beijing 100080, China)

Abstract The mechanism of many earthquake precursors is related to fluids deep inside the Earth. In this paper, recent studies on the status of fluids inside the earth are reviewed. The quantity, existence and quality of the water, pore pressure and interconnection characteristics are discussed with regard to indirect and direct evidence from explorations with super-deep drill holes. According to recent results, water under high temperature and pressure within the earth is in a super-critical state and has many special characteristics. As a result, the liquids not only become the propagation medium for strong earthquake precursors and the influential factor in the process of earthquake source rupture, but are also a medium that directly takes part in the dynamic quake process.

Keywords physics of earthquake sources, earthquake precursors, ground resistivity, super-critical fluids

1 引言

大地震是有前兆的. 有许多震前物理异常(地震前兆)的表现与地下流体有关, 例如井水水位、水氡、地电场、地电阻率、断层气体排出和地下水矿化度等. 不难看出, 地面所观测到的许多物理量, 是通过观测点附近的孔隙流体状态转化来的. 例如地电阻率的变化, 就和观测点附近的孔隙结构(连通性)与流体状态(饱和度)有直接关系. 最近的一种理论^[1, 2]认为, 根据地电阻率台站记录, 在震前存在与受潮汐力谐振作用的谐振波(HT波)和强震发生

时震源流体能量释放的共振波(RT波)现象, 这两种波统称为“HRT”波. “HRT”波理论模型和预测方法在许多震例中获得验证, 包括2008年5月12日汶川8.0级(里氏震级, 下同)地震^[3]. 在分析这些前兆理论模型时, 涉及到一系列与流体有关的基础性物理问题:

(1)许多类型的地震前兆反映的是观测点附近孔隙流体状态的变化(连通性、饱和度、孔隙压力、

* 中国地震局地震行业科研专项基金(批准号8-54)资助项目
2008-08-04收到

† 通讯联系人. Email: geolisyen@yahoo.com.cn

流体矿物质含量等),而这种变化又和观测点附近应力状态有关。

(2)观测点的应力变化是孕震区应力变化通过中间介质长距离传递的,其传递路径不仅包括固体格架,而且包括孔隙流体。

(3)流体有可能参与孕震过程和震源破裂的动力过程。

2 地球深部流体的存在

为了研究地震前兆机理与流体的关系,首先需要回答:地球深部流体是否存在?

2.1 地球深部流体存在的证据

(1)火山喷发过程中从深部带到地表的大量水蒸气、二氧化碳,而这些喷发的玄武岩浆来自岩石圈下的软流层或者更深,最深可达核幔边界。

(2)幔源岩石(上地幔物质侵出到地表)中含有矿物,以及在无水硅酸盐矿物(如橄榄石等)中含有大量的流体包裹体^[4]。

以上是通过地质方法在地面得到的间接证据。

(3)直接证据是近30年来从若干超深井钻孔的探测中获得的。

20世纪80年代,前苏联科学家们在科拉半岛上实施的CK-3超深钻(深11660m),在整个钻探过程中都有气体和强烈矿化水流入,并在大范围的变形带中循环。即使在静压力大于300MPa时,在通常认为所有裂隙都将被挤压而闭合的12km深处,仍存在这种通过裂隙循环的矿液。对气体标本的检测表明,其中含有二氧化碳、氦、氢、氮、甲烷及其他碳氢化合物,说明活动的气-水作用可发生在大陆板块结晶岩中很深的部位^[5]。20世纪90年代,德国科学家们在巴伐利亚州实施的KTB超深钻(深9101m),也在地下10km深处直接揭露出大量矿化流体。这些超深井钻都在深部测到高孔隙压力的存在。用地球化学方法分析的结果表明,这些高矿化度的卤水其年龄可高达100Ma(1Ma=1百万年)^[6]以上。

研究结果表明,地壳和地幔中的水以多种形式存在,主要可分为束缚态,包括物理吸附、化学吸附(即结晶水)和自由态。不同学者对地幔中的平均水含量的估计不大一致,用不同方法获得的地幔中的水含量估计值为 0.1×10^{-3} — 1×10^{-3} 。按这个估计值计算,地幔中含水量要比现在海洋中的总含水量

高2—3个量级。水的分布可能会从地幔过渡带一直延伸至核幔边界,甚至外核中^[4]。

2.2 地球深部流体孔隙压力

从近年的超深井钻的原地测量中可以得到一些深部孔隙压力数据。例如德国的KTB计划完成的深井钻探在8km深度测到的剪切应力约为100MPa,孔隙压力也在这个深度存在。注水试验结果显示,当注水压力增加1MPa时,即有诱发小震发生(见图1),表明该处已处于接近岩石破坏的临界状态^[7]。假定该处的岩石剪切破坏强度满足Byerlee定律,可以估计该处的孔隙压力 p_0 已达到50—70MPa。

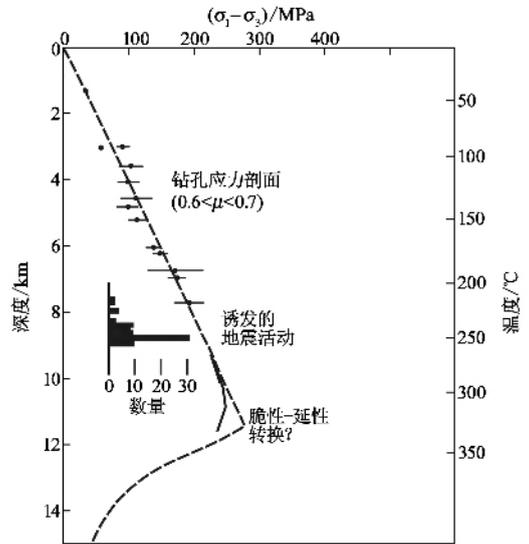


图1 KTB科学研究钻井的测量结果给出一个“坚固”的地壳模式,其破坏状态与库仑理论以及从实验中得到的摩擦系数为0.6—0.7的结果相符合^[7]

上述实例给出的是板内情况,但板缘断层情况则大不相同,那里的孔隙压力作用似乎更大。有趣的是:板缘断层处于低剪切力的状态,其剪切应力值比板内低得多。美国地质调查局和斯坦福大学的科学家和工程师根据在南加州圣安德烈斯断层附近的Cajon Pass的深10000英尺(合304.8m)的钻孔进行的应力测量,确定出了应力值与方向,结果表明,最大主应力作用方向与断层走向几乎垂直,这个结果和该区内最近发生的多次地震的震源机制所确定的主压应力方向一致,说明该断层上的剪应力很低^[8]。一个粗略的估算是,在走滑断层最底部约15km深处,断层面所受到的正压应力约为400MPa,而断层面的剪应力只有20MPa,如果不考虑流体的孔隙压力,使断层产生滑动所需要的摩擦系数就必须满足 $\mu_s \approx 0.05$,这只有一些特殊的人

造材料或自然介质才能具备。另外，如果断层面上只有干岩石在很大剪切力作用下的滑动，在摩擦运动中所释放的能量势必产生大量的热，但该处地面始终观测不到热流异常。对于这些情况历来有不同的解释，反复的争论持续了多年。近年来大量的观测资料（特别是深井钻孔资料）使得大多数地球物理工作者终于达成了共识，对于板块边缘的低剪切应力状态多采用水的作用来解释^[8]。

2.3 超临界流体的性质和作用

地球深部处于高压、高温状态，在这种状态下的水是什么样的性质呢？能不能用我们眼前的常温常压状态下的水来简单外推呢？回答是不能。因为在超高温高压状态下，水的性质会变得出乎所有人的预料。

大家都知道，温度升高会促使水从液态变为气态，而压力升高又会促使水从气态变成液态。如果把温度和压力同时加大，情况会变成什么呢？对于这两种因素综合影响的研究方法需要借助温度-压力相图来说明。

这里首先需要引入临界点的概念。从相平衡的角度上可以把临界点定义为：在物质温度-压力相图上（气液）相平衡曲线（在高温高压方向上）的终止点称为临界点。从气、液密度转变的角度可以把临界点描述为：物质的液相和气相处于平衡态时，随温度和压力升高（沿气-液相平衡曲线），热膨胀使液体密度变小，而压力升高使气体的密度增加。当温度和压力到达特定值时，两相的密度变得相同，气、液之间的区别消失，这时的温度称为该物质的临界温度，这时的压力称为该物质的临界压力^[4]。当温度和压力都超过临界点时，我们称该物质处于超临界状态，这样的流体叫做超临界流体。

超临界流体的概念定义为：温度和压力分别在临界温度和临界压力以上的非凝聚性高密度流体^[9]，相当于图2显示的通过临界点分别与横坐标（温度）平行的虚线上侧和与纵坐标（压力）平行的虚线右侧所划定的范围。

表1列出几种与地壳内部岩石变化相关的物质的临界参数。超临界流体具有一系列极为特殊的性质：

(1)超临界流体的密度介于气体与液体之间，因而许多物理性质，例如扩散系数、粘度值等也介于气体和液体之间。

(2)超临界流体作为溶剂的最大特点是：通过

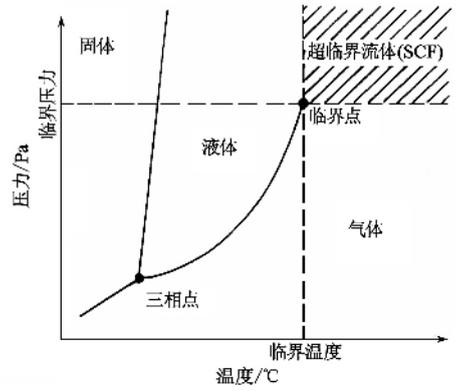


图2 纯物质的 P-T 相图^[4]

压力的微小变化可得到溶剂密度很大的变化。一般说来，溶解度与密度有关。通过增大压力来增大超临界流体的密度，从而使溶解度加大。

(3)超临界流体的渗透性远远超出常温常压状态，因此深部的连通性并不因为孔隙度减少而减弱^[4]。

上述这些特性与岩石破坏、断层活动及各种地质运动的动力学过程密切相关。

表1 若干物质的临界参数^[4]

物质	化学式	临界温度 $T_c/^\circ\text{C}$	临界压力 P_c/MPa	临界密度 $\rho_c/(\text{g}/\text{cm}^3)$
氧 ^[10]	O ₂	-118.4	1.30	0.031
水 ^[9]	H ₂ O	374	22.06	0.32
二氧化碳 ^[9]	CO ₂	31	7.38	0.47
一氧化碳 ^[10]	CO	-140	3.49	0.301
甲烷 ^[10]	CH ₄	-82.3	4.64	0.162

因此，当超临界流体的密度与液体相近时，其扩散率比液体高，黏度比液体小，因而超临界流体作为溶剂时表现出许多优于一般液体的特性。

超临界二氧化碳对于有机物的强烈溶解性质已经被普遍应用于药物有效成分和其他有机物的萃取工艺中。在地学中，超临界甲烷的特殊性质则被用来解释一些煤矿地质灾害现象^[11]。这里我们特别关注的是超临界水在深部地质变化中的作用。

研究表明，临界点附近或超临界状态下水是一种均匀的电解质溶剂，其热物理性质能在很宽的范围内连续变化（从类似气体到类似液体），也就是从一个非电解质溶剂到一个电解质溶剂的转变。它不仅能使离子型溶质在其中溶解，而且也能使许多非极性有机物如烷烃类完全溶解于超临界水中。加上超临界水粘度相对较低，因而溶质分子在超临界水中很容易扩散，所以超临界水是一种活性介质。超临界水能与其他在标准状态下不易混合的物质完全

混溶,例如金以及铈、钽等稀土金属,因此它的溶解能力比王水(盐酸与硝酸按3:1混合)还要强^[4]。这种性质的应用为这些矿藏的勘探工作带来了全新的思路。

由表1可以知道,地表以下几公里,就达到了水的临界压力。根据正常的地热增温率,在大陆区内的20km以下,温度就升至水的临界温度以上。由德国KTB科学研究钻井的测量结果(见图1)可以推断,该地区在14km以下,温度就升至水的临界温度以上。由此可以推断,中下地壳以下的水在孔隙内的自由态都属于超临界水。超临界水的分布可能会从地幔过渡带一直延伸至核幔边界,甚至外核中^[4]。

随着深度增加,压力加大,岩石致密程度提高,孔隙度下降,对水的流通和渗透不利,但在高温高压超临界状态下,水的黏度要比标准状态下小得多,而流动性要大得多,因此水在地球深部的扩散率和渗透性可能不比地表差。这一点已被实验所证实。近期的研究结果认为,水有可能以不同方式参与了地幔热柱乃至外核物质的反应,因此水是地球深部物质演化中最为活跃的流体^[4]。

超临界水在地球深部地震成因的作用可以归纳为以下几点^[4]:

(1)超临界水参与并加快了地球深部大规模物质运移。例如俯冲带、洋脊扩张、地幔热柱、成矿作用(例如金矿或稀土元素矿床等)。这些大规模物质运移导致了应力场的调整和新的应变能积累。

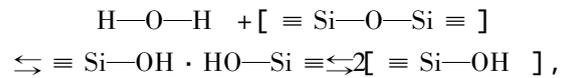
(2)超临界水的强烈应力腐蚀作用导致介质弱化(水致弱化),引起断层的亚临界扩展^[12,13]。

(3)热物质上涌引起温度升高,在地震波或其他摄动作用下,压力的减小导致水从岩石中脱出(解吸),并以超临界状态存在,同时引起孔隙压力加大以及岩石脱水后相变导致脆性破裂。

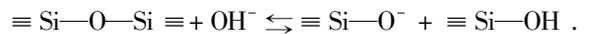
流体的应力腐蚀作用是从20世纪以来首先在金属中发现的,许多固体在与某些液体接触时,其强度会大大降低。例如两端支撑的钢棒放在水银中时,钢棒会因自身的重量发生弯曲。这种现象是前苏联科学院院士雷宾德尔(Ребиндер Н А)首先发现的,故被定名为“雷宾德尔效应”^[12]。根据Griffith理论,水银会使钢内部裂纹表面张力降低,即使表面能 Γ 降低,因而介质的强度也就大大降低。以后又发现流体对非金属,尤其是对岩石的应力腐蚀作用。例如,高温下的液体硫磺就可以使玄武岩的强度降低到常态下的十万分之一,即降低了5个量

级。常温常压下的岩石力学实验表明,水的存在使岩石强度降低。Grigga等^[13]通过高温高压实验发现,在含水体系中,石英、长石、橄榄石、橄榄岩等的强度大为减弱,而流动性和韧性增强,这种现象被命名为水致弱化。

水在岩石亚临界扩展中具有应力腐蚀作用。其机理是^[14]:水分子或电离的羟基 OH^- 起着使岩石中的 $\text{Si}-\text{O}$ 成为弱化的 $\text{Si}-\text{OH}$ 键的作用。例如在有水环境下,硅酸盐玻璃或石英与水的反应是:



在碱性环境下,硅酸盐玻璃受到腐蚀的反应是:



3 地震成因与地震前兆中水的作用

3.1 膨胀-扩散模式(DD模式)

DD模式由美国科学家Nur和Scholz提出^[15,16]。他们认为,地震孕育与水等流体的作用有关,称之为膨胀-扩散(Dilatancy-Diffusion,缩写为DD)模式。

DD模式认为,地震的发生机理是:当板块运动或其他原因引起的构造应力超过一定限度时会产生大量微裂隙,微裂隙集结成比较大的裂隙,这些裂隙进一步集结合成主断裂(成核)。这些不同尺度的微裂隙统称为微破裂。这些微破裂导致地壳岩石产生膨胀。与此同时,岩体内部的水会从原有的孔隙流入新出现的孔隙中,这导致了孔隙压力的减小,形成了膨胀硬化现象,阻止了微破裂的进一步产生。随着水重新流入膨胀岩石,各种物理性质恢复到初值。水的重新流入和孔隙压力的增加,降低了有效围压,加速了破裂发育、集结(成核)或摩擦滑动。

DD模式主要依据了Brace^[17],Nur和Simmons^[15]等的实验。其中差应力下(最大主应力与最小主应力之差称为差应力)岩石的体积膨胀,是由Brace等^[17]通过实验研究确认的。这些实验证明,即使在地下围压很高的条件下,由于构造差应力的存在,也会导致体积膨胀。这个结论成为地震孕育的膨胀模式的重要实验依据。

Brace等根据断裂力学实验结果,认为实验中岩石的扩容现象是样品内部大量微裂纹在差应力作用下的张性扩展所引起。Nur和Simmons^[15]的实验则证明,当多孔岩石由水饱和状态变为非饱和状态时, V_p 和 V_p/V_s 将剧烈减小,与此相关的变化是岩

石电阻率,平行最大压力方向的电阻率可以减小一个量级之多^[17]。

与 DD 模式同时提出的还有 IPE(institute of physics of the earth 缩写为 IPE)模式,它由前苏联大地物理研究所提出。这两种模式都被称作膨胀-扩容模式,但前者强调流体的作用,被称作湿模式;而后者则认为,即使没有流体参与,孕震区的微破裂同样可以完成发育、演化和集结(成核)的过程,也会在地面观测点观测到波速(比)和电阻率的类似变化,被称作干模式。但越来越多的证据表明,多数地震的成因与流体有密切关系。

3.2 流体在地震与断层活动中的作用

3.2.1 流体在地震断层中的存在

早在 20 世纪 60 年代,Evans 发现美国洛基山兵工厂周围地震活动与深井注入废液有关的事实。到了 70 年代,Healy 在美国兰吉利油田进行了注水诱发地震的试验。在我国,也发现多例钻孔诱发地震的事例。另外,还在全球及我国发现了多起水库诱发地震的实例^[6]。

赵大鹏等^[18]利用地震层析成像技术系统研究了 1995 年 1 月 17 日日本神户 7.2 级地震后认为,震源区地壳中充满高压流体导致了这次地震的发生。其标志是地震波低速(V_p, V_s)与高泊松比(ν),震源体内的 P 波与 S 波速度比研究区域的平均值低 1%—4%,泊松比较平均值高 1%—6%。他们认为这种低速高泊松比的力学特征,只有当震源体中充满液体时才有可能。

3.2.2 地震断层中水的形态和变化

Anderson 和 Whitcomb^[19]早在讨论 DD 模式时就指出:在岩石受差应力膨胀硬化阶段,在地壳所处的压力 p 和温度 T 的条件下,孔液的各种性质除粘滞性外都接近正常条件下的水,只是随着孔压的减小变得更近于“汽相”,粘滞性小,密度低,压缩系数高。纵波速度随孔压和体积模量减小而迅速减小。

Brune 等^[20]在实验室研究中,发现泡沫橡胶模型的剪切断裂常常含有断层面的瞬时分离。王其允等^[21]进行了含饱和水的岩石在摩擦滑动和破裂时电阻率变化的实验,他们在测量滑动面上的孔隙水压力时发现,粘滑运动期间水压在滑动面上的变化的大小和方向并不一致,这说明粘滑运动期间滑动面的形变可能是局部变化,也说明滑动面上的水并不处处处于静态平衡状态。

从图 1 给出的 KTB 深井钻测量资料可以看出,在地壳深度达到 14km 的地方,温度增加到 370—380℃,岩石已经处于延性状态。这种条件下,当摩擦面在粘滑过程中出现摩擦面瞬时分离导致孔隙压力突然减低时,岩石中原来溶解的水能否由于溶解度降低而急速脱出?从火山喷发的岩体中,经常看到有多孔的沸石,这就是岩浆内溶解的水急速脱出后留下的。至于在十几 km 深处,类似的过程是否也会发生,目前我们知道的还很少。不过至少有一点,就是周围岩石内的孔隙水会快速流进补充,由于温度很高,原有自由态孔隙水在孔隙压力突然减小时,有可能从液态变为气态。这些因素都会导致孔隙压力恢复。而在孔隙再次闭合时,孔隙压力会比原来还大。

根据 Brune 等^[20]和王其允等^[21]的实验,在粘-滑过程中,断层面之间先是略有张开,然后重新闭合,流体产生周期性的孔隙度增加和减小,外来波动(有人提出包括宇宙线中的高能粒子)或固体潮汐的周期性扰动也可能产生类似的效果。在孔隙度减小的半周期,流体水可能从附近的岩体孔隙内部或岩石内部的吸附状态迅速解析或脱出,并很快汽化。这个情况相当于郭增建等人于 1980 年^[22]最早提出的爆沸现象。这个过程在短期内是单向的,即在孔隙度重新减小的半周期内不能很快重新回到液态或吸附状态。这就使得断层面之间的孔隙压力有所增加。经过若干周期的增量累积,断层面之间的孔隙压力就会大大增加。这种情况可能发生在流体,特别是在超临界流体相变点的温度或压力附近。

高压下贮存在固体内部的流体(或是一种流体在压力下被大量溶解在另一种流体中),在压力突然减低时会发生快速相变成为气体,并从固体(或液体)内部急速脱出,同时使固体发生爆裂,或使流体发生突出。这种现象就是日常生活中见到的“爆米花”,以及在突然打开香槟酒、啤酒瓶时看到的大量二氧化碳气泡突出的现象。在煤矿内,当开挖到高压瓦斯(甲烷)贮存区时,会发生煤与瓦斯突出。这种现象在矿震破裂时也可能发生^[11]。白恩胜^[23]用这种现象解释地震的非剪切能量释放部分,称为“隐爆地震”。在外来的波动传播到临界状态的孕震断层时,由于纵波导致孔隙体积胀缩,在临界条件下会在膨胀半周期内引起孔隙流体急速脱出,由于脱出过程在短期内不可逆(气体脱出过程较快,而重新溶解则较慢),在压缩半周期时,脱出的流体不能立即溶解回到固体内部原处,这样的多次反复就使得孔隙压力

增高,从而引发新的破裂,这在高压液化天然气罐的运输安全中是众所周知的,在油田中已成为振动导出原油成分的工艺,而在地震成因中则可能是核爆地震波激发周围地震活动的机理.这种机理也可以用来解释地震的远程激发现象.

上面所说的流体脱出并汽化过程在短时间内不可逆,主要原因是正过程(脱出并汽化)与逆过程(液化或吸附)的反应方式不同,因而两相界面的面积也大不相同.在正过程中,汽化是以液体内部或固体内部多处发泡的形式进行的,两相界面的面积是这些气泡表面积的总和,而在反过程中,液化或吸附只能通过两相边界的平面进行,反应界面的面积当然比前者小很多.

3.2.3 地震的超远程激发作用及其与流体的关系

地震的超远程激发现象是指一个地震事件可以激发 1 千多公里甚至更远的地震事件或其他物理场的变化^[8,24].激发作用从主震 S 波到达可以一直持续几个星期之久.超远程激发的假说早期只在部分地球物理学家之间得到认可,自从 1992 年 6 月 28 日美国加州 Landers 发生 7.2 级地震后,利用美国西部高密度数字化地震台网和应变记录台网记录到了丰富的超远程激发地震活动现象^[24],这个假说才被普遍接受.该次地震的主震震源断层破裂长度为 70km.该地震发生后,最远的激发地震距离主震震中达 1250km,这个距离不仅大大超出主震震源破裂长度(为主震破裂长度的 17 倍),也大大超出了该主震的余震区(直径约为 100km)的范围.这些激发的地震包括老的地震活动区.许多激发地震发生在地热带和年轻的火山活动带.类似的远程或超远程激发现象在若干次大地震发生后一再被发现,例如 2002 年阿拉斯加 7.9 级地震,激发 3100km 外的美国黄石公园喷泉喷发模式变化和地震震群^[25],并激发了远达 3400km 的加州东部的地热异常及地震^[26].1999 年,土耳其 Izimit 发生的 7.1 级地震激发远离震中 1400km 的希腊地震^[27].尤其是在印尼苏门答腊 2004 年 12 月 26 日的 9.0 级地震后,超远程激发现象不仅延伸到几千公里外的我国云南和甘肃、宁夏一带,甚至激发远到离震中 10800km 的阿拉斯加 Fairbanks 地区井水水位的阶跃式变化^[28],并激发阿拉斯加兰格尔^[29]火山附近的地震活动.Hill 等^[24]认为,用线弹性模型计算的静态断层附加应力变化(即所谓库仑力)显得太小(数量在 0.001—1bar 之间),不足以解释 Landers 地震超远程激发的原因,必须引入新的物理模型来重新解

释.Hill 等^[24]提出了一种新的物理模型,即主震震源辐射的地震波所导致的较大动态形变与地壳中的流体(包括岩浆)的非线性耦合作用.根据地震波到达的震相与超远程激发井水水位变化和激发地震事件的起始时间的相关分析,对这些超远程激发现象的一种解释是瑞雷面波的压缩震相使到达区的流体孔隙压力增加,从而使断层面受到的有效正压应力减小从而引发的断层剪切破裂现象,即动态激发效应.这个新模型实际上是对 DD 模式的新发展,它的最大特点是将流体和震源破裂的动力过程紧密地联系起来.

Hill 等^[24]也指出,由于超远程激发现象往往持续几天甚至十几天,因此对它的解释并不唯一.上述地震波动态激发效应只是其中一种模型.

3.2.4 地震前兆的超远程相关现象和传播激发机制

由于强震前往往没有前震,用上述地震波激发假说对于解释震前物理场的变化就行不通了,我们需要引入其他物理机制.震前超远程物理场的变化可以出现在离主震震中 1000km 以上,这些震前远场异常现象与未来主震的关系叫做远程、超远程相关现象.例如,中国大陆科学钻探工程(CCSZ)在线流体地球化学监测在 2004 年 12 月 10 日至 2005 年 1 月 10 日之间捕获到一段气体地球化学异常.该异常从 2004 年 12 月 24 日晚 23:30 开始变得剧烈,到 12 月 29 日晚 19:30 结束.其中在 12 月 26 日早 7:30 到 29 日晚 19:30 这段异常非常特殊,表现出流体地球化学的剧烈变化.具体表现为流体组分从基本上不含 Ar、He 及 N₂ 跳到富含 Ar、但亏损 He 和 N₂.该异常恰发生在 2004 年 12 月 26 日北京时间 8 时 58 分印尼苏门答腊 9.0 级地震前 1.5 小时.苏门答腊地震震中位于北纬 8°18'36",东经 95°57'.CCSD 穿越地层 5158m,钻井现场位于江苏省北部,北纬 34°25',东经 118°40',离苏门答腊地震震中距离约为 4170km,大于该地震破裂长度 1200km 的 3 倍^[30].该项发现被列为中国大陆科钻第一井获得的重大科学突破之一^[31].与此类似的震前异常现象的远程甚至超远程相关还可以举出许多.除地下深部气体释放等地球化学以外^[32],还有大地电阻率^[2]、电磁波、次声波等多种物理现象.

震前出现的深部水地球化学异常需要用另一种慢波的激发作用来解释.这种慢波不同于固体格架传播的弹性波.赵玉林和钱复业发现地电阻率的震前潮汐力谐振现象和临震共振现象的换相在不同台站之间存在时间差,利用波阵面法得到谐振波(H

波)的传播速度约为 15—30km/h,自激震荡波(RT 波)有快、慢二种波速,分别为 $v_1 \approx 346\text{km/h}$, $v_2 \approx 126\text{km/h}$,基本上和流体内声速处于同一量级,比含孔隙的岩体内传播的地震波慢一个量级^[31]。目前能够解释的就是沿流体通道传播的孔隙压力。

3.2.5 流体作用在震源运动中的表示

流体在震源破裂中的动力作用,也反映到震源运动学中。震源运动学采用地震矩张量表示。构造地震震源的大部分成分为双力偶源(断层两边相互剪切滑动)。但随着地震仪器和分析方法的改进,也观测到了与理想双力偶理论的偏离,并发现越来越多的地震有与剪切破裂不一致的异常机制。用高质量的全球数字地震台网资料进行研究发现,几乎所有地震都与双力偶模型有小的偏离,即使排除了人为干扰或非完善的模拟方法后仍然如此。一些作者^[33]认为,这些非双力偶源的成分有可能是由断层的几何复杂性、张性破裂和断裂中流体作用等因素造成的。这种流体的作用不仅与充填作用有关,而且也可能与流体快速相变导致的膨胀乃至“隐爆”作用有关^[22]。如果这个假说成立,则孔隙流体快速解吸所释放的应变能是不能忽略的。虽然一般构造地震中非双力偶源的成分只占整个震源的很小一部分,但空腔核爆隐蔽(解偶)技术和煤矿瓦斯爆炸在地震台的地震图告诉我们,这可能是传播效应和记录系统造成的。以上假说在矿山地震中得到证据。郑哲敏^[34]利用量纲分析指出,煤与瓦斯突出煤层中瓦斯释放的内能要比煤体的弹性潜能大 1—3 个数量级。地震仪所记录到的是在固体格架中传播的地震波,而孔隙内流体在“隐爆”时辐射的膨胀波在进入固体内部时透射系数为

$$W_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad (1)$$

其中 Z_1, Z_2 分别为孔隙内流体和固体介质的波阻抗 $Z_1 = \rho_1 c_1, Z_2 = \rho_2 c_2$, ρ_1, ρ_2 分别是流体和固体的密度, c_1, c_2 分别是流体和固体的波速^[35]。由于 $\rho_1 < \rho_2, c_1 \ll c_2$, 因此 $Z_1 \ll Z_2$, 使得透射系数 W_{12} 很低。大部分膨胀波所携带的能量并没有进入固体格架,却可能通过流体通道传播。由于流体的不可压缩性,这种波在传播过程中的衰减可能很少,因此可以向远程甚至超远程传播,造成超远程激发的现象。由于上述理由,我们对构造地震震源孔隙流体在地震发生时所释放的非剪切应变能的估计可能大大偏低了。

3.2.6 高热岩浆侵入可能加剧水的相变

岩石的微破裂张开时叫做张裂隙。由于张裂隙的产生,使深部的高热岩浆侵入,导致断层面之间的流体被汽化。在地震发生时因流体突然相变导致膨胀。这种效应成为地震记录矩张量反演结果中的膨胀分量,一般认为,火山地区的地震或俯冲带的地震居多,但对于通常的构造地震,这种可能性依然不能排除。一般震级超过 6 级的地震就切割到地壳莫霍面甚至以下。例如 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼 9.0 级地震最大破裂深度约 90km^[36], 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震的地震断层切割深度约为 31.5km^[37]。由于解耦效应,地震记录中反映流体相变膨胀的能量可能是被低估了。

4 地壳深部孔隙是否连通?

地震前兆物理场能否通过孔隙流体传播,其必要条件之一就是地球深部的孔隙可以连通。表征孔隙连通性首先是渗透性,它由达西定律表述。

4.1 达西定律

流体在一点上的流速 V_x, V_y, V_z 定义为每单位时间通过单位面积上的流体的体积,该速度正比于该点的孔隙压力梯度,在轴的负方向上, V_x, V_y, V_z 为正,则达西定律^[38]表述为

$$V_x = \frac{k'}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, V_y = \frac{k'}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, V_z = \frac{k'}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2)$$

其中 η 是流体的粘度, k' 是仅取决于介质而与流体无关的常数,量纲为面积。

如果讨论的是水,则上式还可以写成比较方便的形式:

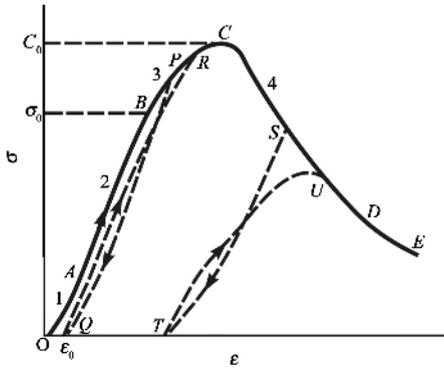
$$V_x = k \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, V_y = k \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, V_z = k \cdot \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (3)$$

4.2 地壳深部岩体孔隙是否闭合?

下面从地壳深部岩体孔隙是否闭合来进一步考虑流体连通性问题。

图 3 显示的是大家都很熟悉的岩石样品的应力—应变曲线,它给出了大多数岩石的本构关系。

在 OA 段,随应力增加,应变增长速度减慢,仿佛岩石随应力增加(做功)而变硬,被称作“做功硬化”阶段。从微观机制上看,OA 段的弯曲实际是岩石中存在的大量微裂纹在压应力作用下闭合所造成的。到 AB 段,岩石的行为才接近于线弹性。在多数

图3 岩石的全应力应变曲线^[38]

单轴压力实验中, OA 段的应力 σ_A 和破坏应力 σ_c 相比很小. 例如大理岩实验, $\sigma_c \approx 120\text{MPa}$, $\sigma_A \approx \sigma_c/5 \approx 20\text{—}30\text{MPa}$.

按照上面所说的结果, 似乎地下一两千米的岩石内孔隙就处于闭合状态了. 但这是个误解. 因为地下岩体并不处于单轴压力下, 而是处于高围压下. 谢洪森曾指出, 围压下岩样的孔隙至少要到 500MPa 以上才开始有闭合迹象. 这比单轴压下的孔隙闭合应力至少大出一个量级. 这可以从岩石力学的体积改变定律和形状改变定律来解释^[39]. 岩石力学的体积改变定律可以表述为

$$\sigma_0 \delta_{ij} = 3K \varepsilon_0 \delta_{ij}, \quad (4)$$

其中 δ_{ij} 称为克罗内克符号 $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$ K 为体积模量, σ_0 为应力球张量,

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{ii} = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (5)$$

式中 σ_{ii} 为应力张量的分量 σ_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 的对角线元素. ε_0 为应变球张量,

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}, \quad (6)$$

式中 ε_{ii} 为应变张量的分量 ε_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 的对角线元素. 体积改变定律可以在很广泛的范围内成立.

形状改变定律可以表述为

$$S_{ij} = 2\mu \Sigma_{ij}, \quad (7)$$

其中 μ 为剪切模量, S_{ij} 为应力偏张量,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}, \quad (8)$$

Σ_{ij} 为应变偏张量,

$$\Sigma_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_0 \cdot \delta_{ij}. \quad (9)$$

由这两个定律可知, 围压的升高只能使岩石的体积按比例压缩, 但不能改变其形状, 因此岩石内部的孔隙也只能按照同一比例压缩, 其形状并不改变. 而岩石内部的孔隙只有一部分是以裂纹形式存

在, 另一部分是以不同形状的孔洞形式存在. 使这些裂纹闭合的因素还必须有差应力存在, 但根据 Brace^[17] 的实验, 过强的差应力又会使部分裂纹产生张破裂. 这样, 地壳深部孔隙的闭合程度可能不像一般的估计那样充分.

由幔源岩石(上地幔物质侵出到地表)的许多研究证明, 在地幔仍然存在介质上侵的通道. 另外, 地壳深部的许多成矿过程都与流体的溶解、迁移和脱水富集过程有关, 而超临界水的特殊性质使得这些过程大大加速. 这些研究结果在资源勘探中将得到验证, 从而为地壳深部流体连通性提供更多的佐证.

4.3 流体孔隙压力的传播

孔隙之间的连通性不仅包括渗透性, 也包括孔隙流体压力的变化传播.

考虑孔隙内流体中任意一点 O 与其相邻点组成的微元的运动, 其运动方程为^[39]

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i, \quad (10)$$

其中 \ddot{u}_i 表示位移 u_i 对时间 t 的二次导数 f 为体力. 将 $\sigma_{ij} = p$ 代入, 就可得到下式:

$$\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial p}{\partial x_3} + f_i = \rho \ddot{u}_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

上式就是孔隙内流体中声波波动方程的分量形式. 由梯度的定义: $\text{grad} p = \nabla p$. 在直角坐标内, $\nabla p = (\partial p / \partial x_i) e_i$. 可见(11)式中的 $\partial p / \partial x_i$ 正是孔隙压力梯度的一个分量. 由此我们可以知道, 声波在孔隙内部能够传播的必要条件就是孔隙压力梯度处处存在并连续. 对比达西定律可以看出, 这里并没有对渗透率提出什么要求, 只要孔隙压力梯度处处存在并连续, 孔隙内部的声波传播就是可行的. 这就是说, 孔隙内部的压力传播的条件要比单纯的渗透条件宽得多. 这个放宽的条件, 在许多不可渗透的界面上仍然存在.

5 展望

流体不仅包括水, 还有甲烷、二氧化碳和熔融状态的岩浆. 在浅部和深部地质运动中都扮演者重要角色. 在浅部的作用最明显表现在滑坡中, 地表雨水的灌注导致孔隙压增加的触发作用. 近期的研究结果表明, 在矿山、水库地震、岩爆、煤与瓦斯突出等其他的灾害性地质过程中, 流体也都扮演着极为重要的角色^[11]. 在地球深部, 水不仅参与了构造地震

的孕育和破裂,而且参与并导致了大规模的物质运移,例如地幔对流、俯冲带、洋脊扩张、成岩与成矿作用、变质作用、构造活动与火山作用等。谢鸿森等认为^[4] 这些大规模的物质运移导致了板块构造运动和局部构造变形,从而为断层破裂和地震的发生创造了应变能累积与释放的条件。最有代表性的一句话就是“没有水,就没有板块构造”^[40]。车用太^[6]认为:地壳中的流体在一系列内动力过程中的作用已不再只是一个与温度、压力等条件并列的“影响因素”,而是与固体介质本身并列的具有决定意义的“介质条件”。Yoshizawa^[41]指出,地壳中流体及其作用的研究,已成为上世纪末以来地球科学研究的新热点。

参考文献

[1] Qian F Y , Zhao Y L , Xu T C *et al.* *Phys. Earth Planet Inter.* , 1990 , 62 : 284

[2] 赵玉林,赵壁如,钱卫等. 国际地震动态,2006,(8):6 [Zhao Y L , Zhao B R , Qian W *et al.* , *Recent Developments in World Seismology* , 2006 (8) 6 (in Chinese)]

[3] 钱复业,赵壁如,钱卫等. 国际地震动态,2008(7):1 [Qian F Y , Zhao B R , Qian W *et al.* *Recent Developments in World Seismology* , 2008 (7) : 1 (in Chinese)]

[4] 谢鸿森等. 地球深部物质科学导论. 北京:科学出版社,1997 [Xie H S *et al.* *Introduction of Science of Deep Mater in the Earth.* Beijing : Science Press , 1997 (in Chinese)]

[5] Kozlovskiy E A 主编,张秋生主译. 科拉超深井. 北京:地质出版社,1989 [Ed. Kozlovskiy E A. *Trans. Zhang Q S. The Kola Super-deep Drill Hole.* Beijing : Geology Press , 1989 (in Chinese)]

[6] 车用太,刘五洲,鱼金子. 地震地质,1998,20:431 [Che Y T , Liu W Z , Yu J Z. *Seismology and Geology* , 1998 , 20 : 431 (in Chinese)]

[7] Zoback M D , Zoback M L. State of Stress in the Earth 's Lithosphere. In : Ed. Lee H K *et al.* , *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* , Amsterdam : Academic Press for International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior , 2002 , Vol. 81A. 559—568

[8] Ruff L J. State of Stress Within the Earth. In : Ed. Lee H K *et al.* , *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.* Amsterdam : Academic Press for International Association of Seismology and Physics of the Earth 's Interior : 2002 , Vol. 81A. 539

[9] Yasuhilo A , Takeshi F. The Review of High Pressure Science and Technology , 1993 , 2(4) 262

[10] 谢锐生著,关德相等译. 热力学原理. 北京:人民教育出版社,1980 [Xie Y S. *Trans. Guan D X. Theory of Thermodynamics.* Beijing : People Education Press , 1980 (in Chinese)]

[11] 李世愚,和雪松,潘科等. 物理,2007,36:136 [Li S Y , He X S , Pan K *et al.* *Wuli (Physics)* , 2007 , 36 : 136 (in Chinese)]

[12] 单修政. 国际地震动态,1986,5:14 [Shan X Z. *Recent Developments in World Seismology* , 1986 , 5 : 14 (in Chinese)]

[13] 嵇少丞. 国外地质,1989,(2):8 [Ji S C. *Geology at A-broad.* 1989 , (2) : 8 (in Chinese)]

[14] Atkinson B K. *Fracture Mechanics of Rock.* London : Academic Press , 1987 (中译本: B. K. Atkinson 主编,尹祥础,修济刚等译. 岩石断裂力学. 北京:地震出版社,1992. 595)

[15] Nur A *et al.* *Bull. Seismol. Soc. Am.* , 1972 , 62 : 1217

[16] Scholz C H. *Science* , 1973 , 181 : 803

[17] Brace W F , Paulding B W , Scholz C. J. *Geophys. Res.* , 1966 , 77 : 3939

[18] Zhao D P , Kanamori H , Negishi H *et al.* *Science* , 1996 , 274 : 1891

[19] Anderson D L , Whitcomb J H. *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Faults System.* Stanford University , 1973. 417

[20] Brune J N , Brown S , Johnson P. *Tectonophysics* , 1993 , 218 : 59

[21] Wang C Y , Sundaram P M , Goodman R E. *Pure Appl Geophys* , 1978 , 116 : 717

[22] 郭增建,秦保燕. 西北地震学报,1980,2(1):18 [Guo Z J , Qin B Y. *Northwestern Seismological Journal* , 1980 , 2(1) : 18 (in Chinese)]

[23] 白恩胜. 隐爆地震浅析. 见:流体地球科学进展编委会编著 流体地球科学进展. 北京:地震出版社,1999. 103—108 [Bai E S. *Analysis of Concealed Explosion Earthquake.* In : Ed. Editorial board of Hydro - Geoscience. *Progress in hydro - Geoscience.* Beijing : Seismology Press , 1999. 103—108 (in Chinese)]

[24] Hill D P , Reasenber P A , Michael A *et al.* *Science* , 1993 , 260 : 1617

[25] Husen S , Taylor R , Smith R B *et al.* *Geology* , 2004 , 32 : 537

[26] Prejction S G , Hill D P , Brodsky E E *et al.* *Bull. Seism. Soc. Amer.* , 2004 , 94 : S348

[27] Brodsky E E , Karakostas V , Kanamori H. *Geophys. Res. Let.* , 2000 , 27 : 2741

[28] Samik S , Freymueller J T. *Earth Planets Space* , 2006 , 58 : 181

[29] West M , Sánchez J J , Mcnutt S R. *Science* , 2005 , 308 : 144

[30] 曾令森,许志琴,罗立强等. 岩石学报,2005,21:521 [Zeng L S , Xu Z Q , Luo L Q *et al.* *Journal of Petrology* , 2005 , 21 : 521 (in Chinese)]

[31] 邓弗崇. 国际地震动态,2006,(1):41 [Deng F C. *Recent Developments in World Seismology* , 2006 , (1) : 41 (in Chinese)]

[32] King C. J. *Geophys. Res.* , 1986 , 91(B12) : 12269

[33] Julian B R , Miller A D , Foulger G R. *Reviews of Geophysics* , 1998 , 36 : 551

[34] 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤和瓦斯突出的机理. 见:郑哲敏文集. 北京:科学出版社,2004:380—392 [Zheng Z M. *Collects Works of Zheng Zhe - Min.* Beijing : Science Press , 2004 380—392 (in Chinese)]

[35] 布列霍夫斯基赫 Л М 著. 杨训仁译. 分层介质中的波. 北京:科学出版社,1985 [Brekhovskih L M. *Trans. Yang X R. Waves in Layered Media.* Beijing : Science Press , 1985 (in Chinese)]

[36] Xu L S , Chen Y T. Source Process of the 2004 Sumatra - Andaman Earthquake. In : Ed. Wing-Huen Ip , Yun-Tai Chen. *Advances in Geosciences (Volume 1)*. Singapore : World Scientific , 2006. 27—40

[37] 陈运泰,许力生,张勇等. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告. 中国地震局地球物理研究所,2008, www. cea - igp. ac. cn [Chen Y T , Xu L S , Zhang Y *et al.* *Report of Source Characteristics of the Extraordinarily Large Earthquake of Wenchuan, May 12, 2008.* Institute of Geophysics , CEA , 2008 , www. cea - igp. ac. cn (in Chinese)]

- [38] Jaeger J C , Cook N G W. Fundamentals of Rock Mechanics , Third edition. London : Chapman and Hall , 1979 [中译本 耶格 J C , 库克 N G W 著 , 中国科学院工程力学研究所译. 岩石力学基础. 北京 : 科学出版社 , 1981. 690]
- [39] 尹祥础. 固体力学. 北京 : 地震出版社 , 1985 [Yin X C. Solid Mechanics. Beijing : Seismology Press , 1985 (in Chinese)]

- [40] Main Z U , Tozer D C. Terra Nova , 1990 , (2) : 455
- [41] Yoshizawa K. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior. In : Edited by Shamir U , Geoscience : the future. Final Report of the IUGG Working Group Geoscience : the future. <http://www.iugg.org/geosciences.pdf> , 2003

· 中国物理学会通讯 ·

中国物理学会关于推选首届黄昆物理奖的通知

为了弘扬我国著名物理学家、中国物理学会前理事长黄昆先生的科学精神及其在开创我国物理学事业中所做出的杰出贡献,经国家科技部批准,于2005年设立了“黄昆固体物理和半导体物理科学研究奖”(简称黄昆物理奖)。

受“黄昆物理奖”基金会的委托,中国物理学会负责组织该奖的推荐评选工作。现将首届黄昆物理奖推选工作的有关事项通知如下:

一、首届黄昆物理奖的推荐评选工作,依照2009年4月8日中国物理学会九届七次常务理事会议通过的“黄昆物理奖章程”进行。

二、依照章程,请基金会委员、评委会委员、中国物理学会半导体物理专业委员会委员及有关专家做好提名推荐工作。请于2009年5月31日(以当地邮戳为准)前将推荐书提交到中国物理学会办公室。

三、被推荐者应符合章程的有关规定。主要工作已获得国家级奖励的项目,不再参评黄昆物理奖。每人每届最多只能参加中国物理学会所组织的一项物理奖的评选活动。

四、评选委员会将依照章程,于2009年8月底之前评出获奖者,形成评选意见,报基金会审批。

中国物理学会办公室
2009年4月8日

学会办公室联系方式

联系人:谷冬梅

电话/传真 010-82649019

E-mail: cps@iphy.ac.cn

通讯地址:北京市中关村南三街八号(邮编:100190)

注:黄昆物理奖章程、推荐书、申报书及初审意见表,请查阅中国物理学会网站 www.cps-net.org.cn。

黄昆奖基金委员会理事会、 评选委员会名单

(任期2009—2013年)

黄昆奖基金委员会理事会名单:

郑厚植	甘子钊	赵忠贤	杨国桢
朱邦芬	于淦	王阳元	

黄昆奖评选委员会名单:

主任:郑厚植

秘书长:李树深

委员(共16人)

郑厚植	甘子钊	秦国刚	夏建白
朱邦芬	郑有焘	沈学础	雷啸霖
解思深	于淦	张守著	范希武
张泽	张裕恒	龚敏	李树深