

综述与评述

# 我国地震地下流体观测研究 40 年发展与展望<sup>\*</sup>

刘耀炜<sup>1)</sup> 陈华静<sup>2)</sup> 车用太<sup>3)</sup>

- 1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085
- 2) 中国地震台网中心, 北京 100036
- 3) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

**摘 要** 本文简要回顾了我国地震地下流体学科 40 年观测研究发展的历史, 分析了目前存在的主要关键科学问题和当前国际地震流体观测研究动态, 并对今后的发展趋势提出了一些认识。

**关键词** 地震; 地下流体; 观测研究; 回顾; 展望

**中图分类号** P315.72 **文献标识码** A

1966 年邢台宁晋 7.2 级地震发生后, 我国开展了以水文地质学和水文地球化学为基础学科的地震流体观测研究。经过 40 年的发展, 已形成了通过观测地下水、地下气和地热的动态获取地震孕育、发生以及成灾过程中地球物理场和地球化学场变化的观测网, 建立了一套基于理论指导下的经验性地震预测体系, 在我国防震减灾工作中发挥着积极作用。

40 年我国地震观测研究的实践表明, 地震孕育与发生离不开流体的作用, 而且由于流体具有很强的信息传递能力, 对突破地震预测科学难关将会起到十分关键的作用。因此, 大力推进地下流体基础研究和实用技术研究, 符合国际地震科学发展的趋势。陈云泰院士明确地提出: “要关注地下流体与地震的关系”, “地下水对地震很敏感”<sup>[1]</sup>。

在世界上享有盛名的美国著名地质学家 T. 戈尔德于 1990 年曾在《SCIENCE》上著文指出, “非常精确的岩石应变测量”, “严密的数学分析”不是我们应该追求的地震预报途径, 可以用来预报地震的信息是什么? 是“一种与来自地下的喷气有关的特殊气味、地面雾、地温、地声、地下水位的急剧变化以及泉水流量的变化”<sup>[2]</sup>。

我国地震地下流体观测研究工作与其他国家在观测目的上的区别在于, 除了为探索地震科学问题而积累资料之外, 重点是要承担地震监测预报工作。因此, 我国地震地下流体监测网建设规模较大, 观测站分布在全国各省区 (除港、澳、台), 观测项目包括国际上普遍观测的项目和一些探索性项目。面对新的地球科学发展趋势, 作为世界上观测台网布设最广、观测研究开展的最早的国家之一, 如何跟踪当前国际地震科学发展的动态, 总结科学问题, 提出发展方向, 是需要

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006-07-01。

广大地震流体同仁们共同思考和研究的问题。

## 1 40年观测研究基础与现状

### 1.1 监测系统建设和观测技术发展<sup>[3-7]</sup>

我国地下流体观测网是从大震现场的监测预报需要发展起来的震前兆观测系统。40年来,建成了以水文地球化学(氡和汞)、地下水动态(水位和流量)和地热(水温和地温)3大固定观测网和现场流动观测系统,并大力推进数字化观测技术的发展。

1969年7月渤海7.4级地震后,在全国开始建立水文地球化学观测网,至1975年海城地震前,全国形成了以华北和西南地震带为重点,兼顾其他地区的全国水化地震观测网。1980年开始,在全国开展了以干扰因素研究、观测资料质量以及地震监测效能评价等方面的工作,到1990年为止,完成了对全国水化观测网的调整验收工作,由68个基本台(国家级),110个区域台(省级)和152个地方台(市县级)构成的全国水文地球化学观测网正式建成。

1966年邢台地震以后,李四光先生多次过问并推动建立地震“地下水动态观测网”。1968年开始,首先在京津地区新打专用深井,同时筛选出一批民用井建成专群结合的地下水动态观测网。1980年,在安徽召开的全国地震地下水动态观测网建网工作会议上,明确提出将全国地下水动态观测网划分为华北、华东、华南、东北、西北、西南6个区域网。从1980年开始,陆续对这6个区域网、共计255个观测站进行全面资料整理、评价和验收工作,到1986年我国专业化地下水动态观测网正式建设完成。

1979年,我国开始研究高精度井水温度测量技术,希望通过对地下中、浅层地温和深井、温泉水温变化的观测与分析,探讨在构造应力作用下热物质运移、介质能量转化

和水动力条件改变引起的地壳介质温度变化过程。1987年在云南建成了11个深井水温观测站,并首次获得了1988年澜沧耿马7.6级地震前的一组前兆异常资料。此后,全国陆续建设了一批深井水温、地温(如青海平安地温等)观测站,至1995年形成了由114个观测站组成的全国地热(水温)观测网。

自20世纪70年代以来,我国在强震区陆续开展了地下流体流动观测,初步形成了以地球化学项目观测为主的技术系统。在1978年唐山7.8级地震等强震区,以及1998年张北尚义6.2级地震前后,开展了流动观测并取得了地震短期预测和震后趋势判定的异常信息。“十五”期间,我国在华北、西北、西南建设3个流动观测技术系统,其任务是:进行主要固定观测站的背景值观测;在强震危险区或危险区进入短期阶段开展加密观测和宏观异常的评估;在强震发生后开展现场观测。

20世纪80年代在云南开展的深井水温观测成功实现了数字化观测技术,随后水位观测于20世纪80年代末实现了数字化观测,到20世纪90年代中期,氡与汞观测实现了数字化。此后又开发出氡、氢、二氧化碳的数字化观测技术。“九五”和“十五”期间,开展了CO<sub>2</sub>、气体总量、PH值、浊度、微流量等新的数字化仪器的研制。数字化观测技术的应用与推广标志着我国地震地下流体观测网在科学技术上的重大进步。

目前,观测技术的发展主要体现在高新技术和综合技术的应用方面。如探索研究耐高温、耐高压的光纤传感器、纳米技术传感器、网络传感器、温度和水位综合传感器、高精度孔隙压传感器等。

### 1.2 理论方法与前兆研究

40年来,地震地下流体学科不断探索理论方法和地震前兆机理的研究工作。早期国内外关于地下流体前兆和后效机理的动力

作用可以概括为应力脉冲状的加强、破裂混合作用、振动作用、流变作用、热力作用和电磁作用等<sup>[8]</sup>。郭增建先生用地震组合模式讨论了地下水位上升下降的机理，认为地下水异常的上升或下降可能与孕震区构造特征有关<sup>[9]</sup>。

20 世纪 70 年代初，人们对地下流体前兆异常的解释仅限于与震源联系起来，认为地震发生之前应力作用方位及异常正负都是成四象限分布。但这种“震源 前兆模式却不能解释“远场 区的地下流体异常特征。到 20 世纪 80 年，流体前兆机理的研究，才从传统的“震源效应 转向“场、源 效应，提出了地下水氡浓度前兆异常的“扩散 收缩模式”<sup>[10]</sup>，应用应力 含水层变形 水动力条件改变等作用过程，解释了地下水位上升、下降的机理<sup>[11]</sup>，及基于前兆的空间分布特点和在地震预测中的作用，提出了“源兆、场兆与远兆 的观点<sup>[12]</sup>。

基于地下流体对地壳应力应变响应的机理，研究了地下流体同震响应的现象发现，井孔记震能力的变化与地震活动有一定关系<sup>[13]</sup>，同震响应和震后效应现象是目前国内外学者研究的热点之一。2004 年苏门达腊 8.7 级地震的同震观测点最远达 5400 km，我国大陆共获得了 78 个水位及 59 个水温同震变化和 52 个水位震后效应的数字化资料<sup>[14]</sup>。井水位前驱波现象可能与大地震断层大破裂之前的慢破裂产生有关<sup>[15-16]</sup>。经过“九五”、“十五 攻关研究，提高了地下流体活动对地震孕育和发生的动力作用认识。提出地下流体储量变化是地震和多种前兆发生的附加力源的观点<sup>[17]</sup>，提出了深部流体对孕震过程有控制作用的论点和地壳硬夹层与流体促震假说<sup>[18-19]</sup>，对前兆异常产生的机理提出了破裂力学成因、介质状态变化成因和物质运移成因等 3 种成因类型<sup>[20]</sup>，提出了前兆的深浅部流体耦合作用伴生模式<sup>[21]</sup>。

### 1.3 野外实验和室内实验研究

#### 1.3.1 野外实验

早在地震科学研究的初期，野外实验研究就被作为一种非常重要的研究手段。1969 年，在北京大安山煤矿开始了我国第一次水氡实验，发现爆破数小时后不同水点的氡都有升高的现象，首次获得了水氡与爆破之间的定性关系<sup>[22]</sup>。此后，为了进一步研究地下流体的对动力加载效应的响应特征，观测项目除水氡外，还连续观测氧、二氧化碳、气体总量、硫化氢、电阻率、流量、水位等。结果表明，试验测项的变化显著程度与构造背景关系密切，在断裂带测点上的灵敏组分氡、汞、水位、流量等异常显著<sup>[4]</sup>。

1985 年在福建开展了以研究地下流体前兆“压裂效应”为目的的“水压致裂 实验研究。在压裂井孔 6~300 m 周围有 6 个井孔，并布设了土壤气观测剖面。试验证明，当地表受到足够大的附加应力之后 ( $> 35 \times 10^5$  Pa)，可以观测到地下流体化学和水动力学的响应效应<sup>[23]</sup>。

利用动力加载作用研究地下流体前兆产生的力学机制是长期以来采用的主要手段。如利用重锤实验研究井 - 含水层导水系数等参数<sup>[24-25]</sup>。利用列车动荷载作用研究水位、水温等的应力响应特点<sup>[26]</sup>。“十五 期间，利用我国三峡水库蓄水过程的缓慢加载作用，研究了库区周围水位、水温以及气氡连续变化的过程<sup>[27]</sup>；在甘肃利用井下爆破实验，开展了地声、流量、深井温度以及水化学组分的应力加载实验，对比 5 台强震记录，进行了振动能量定量分析研究，研究应力加载过程中的流体前兆机理。

#### 1.3.2 室内实验

我国地震地下流体室内实验研究，模拟

刘耀炜, 马胜利, 卢军, 等. 2005. “十五 国家科技攻关项目: 强地震短前期前兆物理机理研究 (2004BA601B01-05)。

了多种边界条件下的不同介质的压裂、振动、溶滤等作用,以了解地下流体动态变化与应力应变之间的关系,解释流体前兆及其变化的物理机制,对推进地震地下流体学科的发展起到了积极作用。

较早的实验工作以混凝土及花岗岩类岩石为试样,进行单轴下压力下氩射气变化的实验研究,结果表明试件在破裂时,氩射气出现几倍至十几倍的增长<sup>[28]</sup>。20世纪80年代,许多研究者从不同角度开展了大量研究。对多块岩石标本进行重复加压观测到了岩石变形、破裂过程中氩射气变化的动态,CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>等在岩石破裂过程中气体发散量显著增大。研究加压条件下岩石射气在气相和水中的分配,提出含水层受压时,岩石中的氩射气会更多的溶解于水中。超声振动进行非破坏性岩石振动实验,探讨氩、氢等气体的析出机理,发现化学纯水在超声振动作用下有H<sub>2</sub>产生和释放现象<sup>[4]</sup>。利用岩石试件受力与孔隙压关系的实验研究,探讨了并孔水位微动态形成机理<sup>[29~30]</sup>。

目前,地下流体的实验研究不仅重视前兆异常信息形成机理,还注意信息的传递与表现机理的研究。如利用水动力学模型完成了地下水化学和逸出气异常信息迁移的实验研究<sup>[31]</sup>等。

## 1.4 预报方法与预报实践

### 1.4.1 地震预报方法

在观测分析水氩、水位等地震前兆特征过程中,分析预报人员希望能够建立一套相对一致性的资料处理和分析预报方法,提出相对地震异常而言的“正常动态”和“年变”的概念,并开始应用数据处理方法排除干扰,提取异常信息。如利用数字滤波方法处理地下水资料,利用谐波分析、频谱分析方法来研究水氩正常动态,利用逐步回归分析方法进行水氩影响因素的排除和异常识别方法等研究。

“七五”地震预报实用化攻关期间,完成

了地下水动态和水文地球化学方法地震预报方法指南的编制,开展了干扰因素定量排除方法的研究,探索断层气观测方法和预测地震理论<sup>[32]</sup>。“八五”期间,建立了地下水位短临预报指标体系<sup>[33]</sup>,开展了前兆场动态图像演化特征研究<sup>[34]</sup>。“九五”期间,进行地下水化学和地下水物理中短期前兆指标体系及其预报效能评价研究<sup>[35]</sup>,总结了前兆群体异常的阶段性、配套性和协调性问题<sup>[36]</sup>,完了水位水化短临预报综合判定方法软件<sup>[37]</sup>和地热(水温)前兆数据处理软件系统<sup>[38]</sup>。“十五”期间,研究了地震短期异常信息特征,建立了强地震流体异常短期预报思路与方法<sup>[39]</sup>。与此同时,系统总结了中国大陆地下流体典型异常的调查与研究实例,为科学认识地下流体异常提供丰富的资料<sup>[40]</sup>。

### 1.4.2 地震预报实践

1966年邢台宁晋7.2级地震发生后开展了地震现场监测工作,并且对3月26日发生在宁晋百尺口6.2级地震提出了较好的预测意见,这也是中国第一次对强余震获得成功预测的范例。做出这次预测意见的主要依据之一就是震中区水位急剧涨落、井水翻花、发浑等临震异常。1969年7月18日渤海7.4级地震前,北京、天津、河北等地多并孔水氩出现了长达半年以上的趋势性异常,临震阶段,不少并孔的水氩测值出现了突变性异常。1975年2月4日海城7.3级地震前,辽阳汤河温泉水中氩浓度升高,及时采取加密取样分析,观测到了临震前的急剧大幅度变化异常,是成功预报海城地震的重要临震异常之一<sup>[41]</sup>。

40年来分析预报人员利用地下流体异常对大陆发生的某些强震作出了较好的预测意见。如1976龙陵7.4级地震(水氩、水温)、松潘7.2级地震(水位、水氩、水化组分)、1990青海共和7.0级地震(水氩)、1994年云南澜沧7.4级地震(水温)、1998

年张北 6.4 地震 (水氡、水温、 $\text{CO}_2$ ) 等。据中国地震局有关部门统计,我国自 1975 ~ 2001 年间成功预测破坏性地震 24 次,其中地下流体观测网为成功预测提供依据 16 次,提供决策性预测依据 13 次,居测震之外的各类前兆学科之首<sup>[42]</sup>。

根据我国 40 年地震震例统计,地下流体异常的数量在整个前兆异常中占有较大比例,在我国地震预测实践中起着非常重要的作用<sup>[43]</sup>。

## 2 主要科学问题

40 年的实践表明,要发挥地震地下流体在地震预测科学研究中的重要作用,必须深入认识地下流体在地震预测与预报中的优越性与特殊性。越来越多的事实表明,地震的孕育与流体的作用具有比较复杂的关系,尽管许多著名科学家对地下流体给予很高的期望,但纵观我国地下流体发展的现状和科学基础,仍然存在着以下主要科学问题。

### 2.1 观测基础仍然很薄弱

首先是观测网的布局问题。地震频发地区的高质量观点的密度不足,难以满足中强地震前兆监测的需求;一些经常发生强地震的地区,如西藏、新疆、青海等地台网密度很低,甚至是某些监测区为“空白区”;一些过去认为“少震弱震”的一些地区,也缺少可以有效监测深层地下流体活动的观测站。

其次是高质量的台站(点)不多。一是对台站(点)的基础条件研究不够,关键环节得不到科学保障,观测数据的科学价值受到影响;二是浅层观测层位环境受到干扰,使许多有价值的台站在城镇化进程不断加速中不得不废弃,已有的观测台网格局被打破。

### 2.2 观测技术相对滞后,标准化研究不够

长期以来重视观测仪器的自主研发,忽视仪器生产的产业化发展,随之而来的是该类仪器的稳定性、抗干扰性,以及标定问题得不到解决;对国外和系统外先进的观测技

术引进不够,设备技术指标起点低,资金投入不足,低成本的仪器运维现状导致观测资料质量的下降;科学研究成果满足不了工程建设的需要,直接影响到地震流体观测技术的整体发展。

多年来的理论研究和观测实践使人们认识到,在地震地下流体观测方法中,不同的装置系统和观测技术具有不同的物理特性(观测原理、准确度、分辨能力、长期稳定要求、抗干扰能力等),因而对观测场地、观测装置、观测系统等要求不尽相同,这些问题也直接影响到地下流体观测质量和观测水平的提高,在某些方面无法与国际通用标准接轨。

### 2.3 观测资料的比测研究相对薄弱,地震前兆信息缺乏科学评估

长期受到观测条件的限制,地震流体观测主要以单手段(或单测项)为主,很少开展比测研究,观测资料的客观性和科学性无法验证。尽管目前获得的浅层地震流体观测资料中仍然含有可用的信息,但需要花费大量精力来排除越来越多的干扰,使用各种数据处理方法来提取可能的异常。

另外,针对出现的宏、微观异常情况,无法拿出科学依据来判定和评估其异常的可靠性,即便是想开展一些深入的研究,也是由于环境干扰或缺少基本的介质参数而无法深入进行;提取的地震前兆异常指标,仍然停留在少样本的“统计”基础上,对地震三要素的判定,尚缺少对地壳介质参数变化观测的物理判据。

### 2.4 基础理论研究深度不够,缺少解释构造活动区流体变化的理论模式

长期以来对浅层地下流体的动态研究的较多,而对控制大陆强震活动的块体边界带温度场、介质孔隙流场、深浅部气体地球化学场演化过程没有进行深入监测和研究;一般性讨论流体与应力关系的较多,而深入开展地下流体场对应力作用、地球化学作用的

响应特征研究的不多；将地下流体的变化与干扰因素的分析较多，而结合断裂介质流体的动力学方法，研究反映孕震动力过程和构造活动特征的地壳流体现象却很薄弱。

另外，流体观测资料的分析往往是与地震对应关系研究的较多，而通过对区域水文地质条件和活动构造格局关系的详细调查及必要的对比观测分析研究较少；在基础科学研究工作中，考虑流体的直接效应较多，而建立适合流体观测系统响应应力应变的物理模式较少，因而对地震前兆异常的时空变化规律的合理解释缺少理论依据。

### 3 国际动态及发展趋势

#### 3.1 概况

苏联是世界上最早提出系统发展地下流体观测研究的国家，但大规模开展此项研究则是在 1966 年 4 月塔什干地震之后，主要以水文地球化学研究为基础，进行地震预测方法、理论和实验研究，并在中亚、远东地区建立地震实验场。美国的地下流体研究主要以水位、深井水温、孔隙压和氡浓度观测为主，在实验场断裂带附近建设相对密集的观测台，进行地下岩石介质力学响应实验观测和物理模型解释，其中美国学者肖尔茨提出了膨胀 - 扩容假说，并以裂隙造成岩石表面积增加来解释氡浓度的增加，另外开展水位的同震响应特征观测与理论模型研究。日本从 1973 年开展包括水位、水温、地下水氡浓度和水化学离子、气体组分的观测和实验，为避开地表地下水的干扰，重点发展深度在 1000 m 以下的深层地下流体的观测研究。

尽管限于目前的观测技术水平，人类还无法大规模开展对地壳深部直至震源形成过程的观测研究，但现在许多国家和地区已经开始尝试探测深部震源处的信息，探测在断层活动区域中，地下介质的热动力条件、应

力环境、断层活动的热效能转换等特征，其中包括长期观测地震断层上流体孔隙压和岩石热状态等。

分析美国、日本、俄罗斯、欧洲等国家地震预报研究思路，在理论研究方面重视观测资料的反演问题，建立模型进一步解释地壳介质动力学特征；在分析前兆资料对地震预测的作用方面，注重资料的可靠性和、稳定性。在观测技术方面，重视多手段的比测研究，发展尽可能避开地表环境干扰、接近深部物质活动的观测技术。对地震前兆机理的认识，仍然建立在前兆观测对构造活动应力 - 应变响应的基础上。

#### 3.2 发展趋势

##### 3.2.1 观测及其技术发展

美国把板块边界观测站 (PBO) 和圣安德列斯断裂深部观测站 (SAFPRD)，把研究大地构造和地壳中流体之间的关系作为非常重要的内容。SAFPRD 将对断裂带物质 (岩石和流体) 进行直接取样，测量多种多样断裂带的特性。其中需要验证在圣安德列斯断裂深部是否存在高孔隙压流体，开展的内容包括对孔隙压、温度和应变进行连续监测。

日本对地震观测网和处理系统一直在不断调整、更新和强化，推广先进观测技术，尽可能避开地表干扰。对地震地下流体的观测重视深、浅流体的对比观测研究，大力推进多测项一体化的综合传感器；地下水化学组分的探测采用深井直接取样技术进行快速观测，水温、水位与钻孔应力、井下倾斜观测的综合分析。

台湾地区在集集地震的断裂带附近，进行深度大于 2000 m 的直接深井温度和化学成分观测，以探测在断层活动区域的地下介质热动力条件、断层活动时的热效能转换和物质活动特征的数据。

##### 3.2.2 同震效应研究

同震效应研究是揭示地壳介质对应力 - 应变过程响应最直接的手段。利用 InSAR 资

料和对比数值模拟结果，证明震后变形主要为孔隙流体流动所致，并为该地区空间分布的水位变化所证实<sup>[44]</sup>。地震引起的地壳变形和地面震动会带来流速和流量、以及井水位的变化；能否观测到水位的变化，则取决于地震引起的贮层应变是否大于  $10^{-8}$ ；流速和流量的变化取决于是否有液化现象发生<sup>[45]</sup>。远震对井水的扰动主要是因为地震地面运动，而同震形变的作用相对比较小，这种现象一般发生在不同储层间存在相串通的裂缝条件下<sup>[46]</sup>。毛细管现象和非线性流变现象是非水相孔隙流体流动的主要控制因素，模型显示，较低强度的低频弹性波就可以使小的外部压力梯度下的流量显著提高<sup>[47]</sup>。

### 3.2.3 流体作用及其机理

通过对海洋地壳热通道中颗粒边缘水的析出导致断层失稳这一观点研究后认为：在高压地震机制里，极少量的水就可以触发断层的不稳定性<sup>[48]</sup>。高孔压流体可以引起断裂带静滑，地震层析成像可以显示高孔隙压力带。利用该项研究结果有可能对波速比前兆异常的成因以及“无震”前兆给出合理的机理解释<sup>[49]</sup>。过去获得的有关地下水气体组分对固体潮响应的研究结果都是浅层地下水的观测结果，日本学者（2003）采用对 100 m 深度的井直接抽取含水层中的溶解气进行测试，其中， $\text{CH}_4/^{40}\text{Ar}$  的比率显示出了明显地每日和半日的潮汐波<sup>[50]</sup>，因此，认为气体组分是监测地震活动性的一个有用参数。

## 4 我国地下流体学科发展方向

我国地震地下流体学科发展方针是：以防震减灾事业的需要，作为学科发展的机遇；以观测技术的突破，提升原始创新和集成创新能力；以解决关键科学技术问题为核心，充分利用学科交叉研究成果，提高基础

研究科技水平；以团队人才的成长，夯实学科发展的基础，促进学科的可持续发展。

### 4.1 推进监测技术的发展

监测技术的突破是我国地下流体完成跨越式发展的基础，今后将大力推进由平面台网向立体监测网发展，由单一方法向综合观测的发展，由地表观测向深部观测发展。

在观测台网布局方面重点研究台网布设的科学依据，研究选择观测台址的科学指标和方法；推进综合项目观测的科学方法的研究，建立观测仪器的技术指标及其性能检测技术体系。

在观测技术传感器研究方面，将大力推进基于现代传感器技术理念，研制多种物理、化学参数稳定性强、连续观测的综合传感器，实现一井多参量观测。解决的关键技术包括：高温、高压深井压力和温度传感器及测量技术，深层地下水化学组份直接取样与测量技术等。

### 4.2 加快观测技术标准建设

针对目前地下流体台网现状，推进流体台网布设标准与评估体系建设；开展深井观测技术预研，建立地震深井观测仪器的技术指标试验、检测方法标准，推进流体深井观测技术研究与标准建设；针对目前地下流体观测技术多样化特征，开展地下流体综合项目的观测技术与方法标准研究；根据流体观测网建设需要，推进观测仪器的技术指标试验、检测方法和试验基地建设；根据地震分析预报异常判定的需要，推进数据资料的可靠性判定及其评估体系标准建设。

### 4.3 地下流体预报方法研究

结合井孔水文地质条件与构造活动特征，研究流体参数之间的协调性特征，分析同一构造活动区流体变化特征与其它物理参数的关系，研究主要影响因素和可能的动力学关系。分析地下流体数字化观测资料，建立资料处理方法和信息识别技术；开展地下水潮汐因子时空变化特征研究，提取空间演

化图像和震例检验结果;系统收集地下流体对地震的响应过程的资料,分析地下流体对地震响应的空间分布特征,研究与短期强震关系及判定指标。

以深井观测和深循环温泉的长期资料为基础,研究趋势资料处理、干扰排除和异常的提取方法,研究流体加速与转折变化信息的时空特征;考虑测点与构造关系,研究大陆各活动地块边界带地下流体观测的动态特征与协调性;开展流体趋势变化与其他物理参量资料的对比分析研究,给出中国大陆块体边界带流体趋势变化特征分析结果和动态特征变化的机理解释,建立大陆重点区强震前流体趋势变化与强震危险区判定指标。

#### 4.4 地震监测预报实验场

结合中国地震监测预报试验场,开展野外观测实验,获取更加科学、可靠的观测资料,探讨地震孕育发生过程的地震前兆机理,提高预报方法的物理基础,建立指导地震预报实践的理论模型。

选择断层结构清晰、构造变形强烈、区域介质及构造认识较为深入的区域,建立综合性、立体式流体观测点,沿断裂布设较密集的流动观测,开展前兆野外综合观测实验。通过动力作用加载观测,包括断层活动与不同含水层流体变化过程、同震加载响应过程,人工动力加载(爆破或振动)实验研究,探寻引起流体异常变化的应力或能量量级,为数值模拟提供基本参数;通过野外观测分析和实验室研究,揭示典型短期前兆现象的动力响应条件和物性机制;对流体异常变化物理机理、参量之间的相互关系及同源应力响应特征等进行自洽的物理解释。

## 5 结语

地壳流体是沟通地壳应力与固体变形之间关系最敏感的物质。地震地下流体观测与研究,赋予了探索地震孕育、发生和预测其结果的重要使命。地震地下流体学科的发展已不仅仅是地震科学的需要,而是整个地球科学研究的必然趋势。

地下流体学科的发展是与我国地震监测预报这一关键的需求紧密相关,40年的历史表明,流体在地震预测预报中具有独特的优势,只要我们坚信地震是可以预报的,那么地下流体学科在地震预测、特别是短临预测中就可以发挥其重要作用。回顾40年的地震预测的实践,流体有着不少辉煌的历史,如在唐山地震前根据流体异常作出了有震危险的判定,松潘地震前根据流体异常场的迁移特征做出了较好的短期预测,在张北地震前通过对流体异常的跟踪结果,提出了较为准确的中期与短临预测意见;在2006年吉林前郭5.0级地震前,流体学科也提出了较明确的前兆异常和震情判定意见。尽管以上工作还有许多科学问题需要解决,但却用事实证明地下流体在关键时刻是发挥了重要的作用。

在纪念邢台地震40周年、唐山地震30周年之际,撰写此文谨献给为我国地震地下流体科学的发展做出贡献,以及坚守在监测一线而默默无闻的所有流体界的同仁们,让我们共同为推进我国地震流体科学的发展做出自己的贡献。

(作者电子信箱,刘耀炜: liuyw@gssh.gov.cn)

#### 参考文献

- [1] 陈运泰. 地震预报战略研究会上的发言. 国际地震动态, 2005(5): 34
- [2] 戈尔德. T(陈华译). 预报地震的方法. 中国地质矿产信息研究院, 1993: 108-109
- [3] 汪成民主编. 中国地震地下水动态观测网. 北京: 地震出版社, 1990
- [4] 张伟主编. 水文地球化学地震前兆观测与预报. 北京: 地震出版社, 1992



- [5] 张炜, 李宣瑚. 我国地震水文地球化学观测台网概述. 中国地震, 1991, 7(4): 72-78
- [6] 付子忠. 地热动态观测与地震前兆. 地壳构造与地壳应力, 1988(1): 1-7
- [7] 车用太, 王吉易, 李一兵, 等. 首都圈地下流体监测与地震预测. 北京: 气象出版社, 2004
- [8] 蔡祖煌, 石慧卿. 地震流体地质学概论. 北京: 地震出版社, 1980
- [9] 郭增建, 秦保燕, 冯学才. 从震源孕育模式讨论大震前地下水位变化. 地球物理学报, 1974, 17(2): 99-105
- [10] 李宣瑚. 水氢异常的扩散收缩现象. 地震, 1981, 1(5): 41~43
- [11] 车用太, 杨会年. 井孔水位微动态形成机理的探讨. 地震地质, 1985, 7(3): 43-50
- [12] 车用太, 鱼金子, 刘五洲. 地下流体的源兆、场兆、远兆及其在地震预报中的意义. 地震, 1997, 17(3): 283-289
- [13] 汪成民, 等. 地震引起的深井水位振荡现象. 地震, 1983, 1(2): 34-38
- [14] 中国地震局监测预报司. 2004年印度尼西亚苏门达腊 8.7级大地震及其对中国大陆地区的影响. 北京: 地震出版社, 2005
- [15] 汪成民, 车用太, 万迪堃, 等. 地下水微动态研究. 北京: 地震出版社, 1988, 7
- [16] 车用太, 鱼金子, 张淑亮. 山西朔州井水位的“前驱波”记录及其初步分析. 地震学报, 2002, 24(2): 210-216
- [17] 王吉易, 董守玉, 万迪堃. 地下流体附加力源的研究新思路. 华北地震科学, 1995, 13(2): 61-65
- [18] 车用太, 刘五洲, 鱼金子. 地壳流体与地震活动关系及其在强震预测中的意义. 地震地质, 1998, 20(4): 431-436
- [19] 车用太, 刘五洲, 鱼金子, 等. 板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设. 地震学报, 2000, 22(1): 93-101
- [20] 刘耀炜, 范世宏, 曹玲玲. 地下流体中短期异常与地震活动性指标. 地震, 1999, 19(1): 19-25
- [21] 中国地震局监测预报司(刘耀炜等主编). 强地震短期前兆异常的物理解释. 北京: 地震出版社, 2004
- [22] 北京市地震队. 爆破地震、氦气、天然地震. 地震战线, 1971(6):
- [23] 车用太, 朱清钟. 汤坑水压致裂试验的井孔水动态观测与研究. 地震, 1986, 6(6): 9-17
- [24] 殷积涛, 黄保井. 孔含水层系统特征的现场试验. 中国地震, 1989, 5(1): 17-22
- [25] 张昭栋, 郑香媛, 殷积涛. 鲁 29#重锤试验的解释. 华南地震, 1989, 9(1): 8~16
- [26] 万登堡, 王家彬, 刘国寿. 列车荷载作用对某些前兆观测的影响. 地震, 1994, 14(3): 91~94
- [27] 车用太, 刘五洲, 颜萍, 等. 三峡井网地下流体动态在水库蓄水前后的变化. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(2): 14-22
- [28] 罗光伟, 石锡忠. 岩石标本受压时氢和钍射气量的实验结果. 地震学报, 1980, 2(2): 198-204
- [9] 国家地震局科技监测司. 地震监测与预报方法清理成果汇编 - 地下水分册. 北京: 地震出版社, 1988
- [30] 车用太, 纪辉. 不同结构的岩石试件变形破坏与孔隙压力关系的实验研究. 地震, 1995, 15(4): 333-339
- [31] 鱼金子, 徐峰, 刘五洲, 等. 地下水化学异常信息迁移的水动力学模型实验研究. 地震, 2000, 20(1): 91-95
- [32] 国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究论文集 水位、水化专集. 北京: 地震出版社, 1990
- [33] 董守玉, 蓝秀英. 地下水位地震短临预报前兆标志体系研究. 华北地震科学, 1996, 14(1): 1-10
- [34] 贾化周, 秦清娟. 利用地下水位预报地震的新思路与新方法. 华北地震科学, 1996, 14(3): 28-37
- [35] 中国地震局监测预报司(罗兰格等主编). 强地震短期预报方法及其效能研究. 北京: 地震出版社, 1997, 180-229
- [36] 刘耀炜, 施锦. 强震地下流体前兆信息特征. 地震学报, 2000, 22(1): 59-64
- [37] 刘耀炜. 水化、水位地震预报综合判定方法软件. 地震, 1997, 17(1): 54-60

- [38] 国家地震局科技监测司. 地震短临预报的理论与方法——“八五”攻关三级课题论文集. 北京: 地震出版社, 1997
- [39] 中国地震局监测预报司 (张晓东、丁鉴海主编). 中国大陆地震短期异常特征和综合预报方法研究. 北京: 地震出版社, 2005
- [40] 车用太, 鱼金子, 等编著. 地下流体典型异常的调查预研究. 北京: 气象出版社, 2004
- [41] 陈棋福. 海城地震预报过程的回顾及地震预报发展思考. 国际地震动态, 2005, 5, 154-155
- [42] 岳明生. 地震预测研究发展战略几点思考. 国际地震动态, 2005, (5): 7-21
- [43] 简春林. 中国大陆地震地下流体异常特征研究. 地震, 2004, 24(1): 42-49
- [44] S Jonsson, et al Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients NATURE Vol 424, 10, July, 2003
- [45] D R Montgomery & M Manga Streamflow and water well responses to earthquakes SCIENCE, Vol 300, 27, JUNE, 2003
- [46] R Wang, et al Modelling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes Geophys J. Int (2004) 157, 717-726
- [47] P P Iassonov & I A Beresnev A model for enhanced fluid percolation in porous media by application of low-frequency elastic waves J. G. R., Vol 108, No 0, ESE, 2003
- [48] Junfeng Zhang et al Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust NATURE, Vol 428, 8, April, 2004
- [49] S Kodaira, et al High Pore Fluid Pressure May Cause Silent Slip in the Nankai Trough SCIENCE, Vol 304, 28, May, 2004
- [50] F Tsunomori, K Kawai and G Igarashi Tidal variations of gas composition in groundwater Geochimica et Cosmochimica Acta, 67, A495, 2003

## Retrospect and Prospect of Observation and Study on Seismic Underground fluid in China

Li Yaowei<sup>1)</sup>, Chen Huajing<sup>2)</sup> and Che Yongta<sup>3)</sup>

1) Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China, Email: Liuyw@eq-icd.cn

2) China Earthquake Network Center, CEA, Beijing 100036, China

3) Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China, Email: che@ies.ac.cn

**Abstract** After reviewing the development of observations and studies on the seismic ground fluid subject in China during past 40 years, the key scientific problems at present have been analyzed and recent developments of seismic underground fluid in world seismology are summarized. Finally, our viewpoints on the future development in this field have been presented.

**Key words** earthquake; underground fluid; observation and research; retrospect; prospect