

# 强震地下水动态中短临异常 空间特征研究<sup>\*</sup>

杜学彬 刘耀炜 倪明康

(中国兰州 730000 国家地震局兰州地震研究所)

**摘要** 研究了中国大陆部分强震、中强震(统称“强震”)地下水动态(水位、流量)观测结果, 得到: 地下水动态短临异常和一年尺度的中短期异常(以下称“中短临异常”)的空间分布及无异常测点分布, 主要与强震发震机制以及震源周围的主要活断层(深大活动性断裂、强活动性断层)有关, 异常空间分布符合“异常-震源地点-发震机制-主要活断层”相互之间的特定关系。最后, 对地下水动态中短临异常空间分布与发震机制和主要活断层之间关系的机理作了讨论, 阐述了研究结果的意义。

**主题词** 地下水动态 中短临异常 发震机制 主要活断层

## 引言

1989~1994年, 笔者研究了地电(地电阻率和地电场)、水氡中短临异常空间不均匀性, 认识到: 地电、水氡异常空间分布、无异常测点分布主要与强震发震机制和震源周围的主要活断层有关; 地下水运移可能是引起地电、水氡中短临异常的主要因素(杜学彬, 1992; 杜学彬等, 1993, 1994a, b, 1996)。初步结果启发了开展地下水动态中短临异常空间不均匀性研究的思路。

本文研究的是与1976年唐山地震等典型强震有关水点的观测资料。这些水点的资料与唐山7.8级主震或强余震的对应情况在文献<sup>①</sup>中已有记载。部分是近年来强震前后的观测资料, 在震前、震后也做过考证, 一般来说观测质量比较可靠。

## 1 地下水动态中短临异常与发震机制及主要活断层

地电、水氡中短临异常空间不均匀分布与发震机制、主要活断层之间的关系如下:

(1) 地电、水氡测点和震中之间的主要活断层走向与发震应力场方向之间的交角 $\theta < 30^\circ$ 左右时, 这些前兆测点一般观测不到异常, 即被断层“阻隔”; 交角 $\theta$ 比较大时, “阻隔”作用弱;  $\theta$ 在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时, 断层无“阻隔”作用。

(2) 观测到异常的地电、水氡测点集中分布在震源区及其周围的地壳薄弱部位(主要活

\* 甘肃省自然科学基金资助项目。

1996-04-19 收到初稿, 1996-11-17 收到修改稿并决定采用。

① 唐山地震资料汇编组, 1980. 一九七六年唐山7.8级地震观测资料汇编(地下水水位部分)

断层上或其附近，活断层交汇部位，过去强震的震中区). 绝大多数测点位于过震中大于发震应力场方向和小于该方向  $35^{\circ}$  左右的两条交线的两个锐角区内，并且与震中之间无“阻隔”断层.

这里，发震应力场指震前短期内叠加在基本应力场背景上某一方向水平挤压或拉张突出的附加应力场，由震源机制解和震后宏观考察确定.

上述关系在历次强震前有明显重复性和普遍性(杜学彬，1992；杜学彬等，1993，1996). 利用上述结果把一次强震周围划分为主异常区、次异常区和非异常区. 划分原则为：① 过震中大于和小于发震应力场方向  $35^{\circ}$  两条交线的锐角区内无主要活断层或断层走向与发震应力场方向之间的交角  $\theta$  在  $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$  范围，则两个锐角区内均为主异常区；② 如锐角区内仅有一条主要活断层，交角约在  $30^{\circ} < \theta < 70^{\circ}$  范围，则该区内断层背离震源一侧为次异常区；③ 任一锐角区内如有一条主要活断层交角， $\theta < 30^{\circ}$  时，断层背离震源一侧为非异常区；如两条以上主要活断层的交角均在  $30^{\circ} < \theta < 70^{\circ}$  范围，则第二条断层背离震源一侧的锐角区为非异常区；锐角区以外的区域为非异常区.

由于地电、水氡中短临异常与发震机制和主要活断层之间的关系是笔者研究观测资料认识的，还没有从理论、力学实验和计算上作更深一层的研究. 活构造的具体位置和震源机制解难免有误差，震后宏观考察又不能具体给出挤压或拉张方位，标定前兆测点也不一定很准确，所以划分不很准确，但不具任意性、倾向性. 另外，还不能明确一次强震异常区展布范围究竟多大，目前对强震地电、水氡资料研究范围最大约 400 km. 本文仅期望通过上述划分向读者更明了的展示异常空间分布和无异常测点分布与发震机制、主要活断层之间的关系.

## 2 震例研究

### 2.1 1976 年唐山 7.8、宁河 6.2、滦县 7.1、宁河 6.9 和 1977 年宁河 6.2 级地震

5 次强震震源机制解主压应力  $P$  轴方位分别为  $75^{\circ}$ 、 $100^{\circ}$ 、 $297^{\circ}$ 、 $289^{\circ}$  和  $271^{\circ}$ . 主震和宁河 3 次强余震  $P$  轴水平或近于水平. 据宏观考察和震源机制研究(国家地震局《一九七六年唐山地震》)编辑组，1982)，7.8 级主震是在 NEE-SWW 向挤压作用下发生的，宁河 3 次强余震是在近 EW 向挤压作用下发生的. 这 4 次强震发震应力场方向为  $P$  轴方位，即  $75^{\circ}$ 、 $100^{\circ}$ 、 $289^{\circ}$  和  $271^{\circ}$ . 事实上，地电、水氡中短临异常空间分布符合上述“异常-震源地点-发震机制-主要活断层”之间的特定关系. 因此，由 4 次强震地电和水氡异常空间分布、无异常测点分布、宏观考察和震源机制解，可反推 4 次强震发震应力场分别为 NEE-SWW、NWW-SEE 和近 EW 的挤压. 同理也可反推 7.1 级强震发震应力场为 NW-SE 向的挤压. 由于 5 次强震发震应力场方向不同，震源周围主要活断层空间格局不同，不能把 5 次强震混同在一起研究该区水点的观测结果. 本文分别研究 5 次强震周围相距主震 200 km 范围内唐山地震资料汇编组(1980)<sup>①</sup>汇编的 30 个水点以及柏格庄、新开口井水位观测资料. 图 1a~e 示出 5 次强震异常区和非异常区. 图 2 和图 3 是显示明显异常的水点水位时序序列.

由图可见：① 中短临异常集中在主异常区和次异常区内及其边缘. 图 1a~c 所示的 3 次强震同一天发生，但是划分出了 3 次强震的异常区和非异常区，就明确了异常与地震的

<sup>①</sup> 唐山地震资料汇编组，1980. 一九七六年唐山 7.8 级地震观测资料汇编(地下水水位部分)

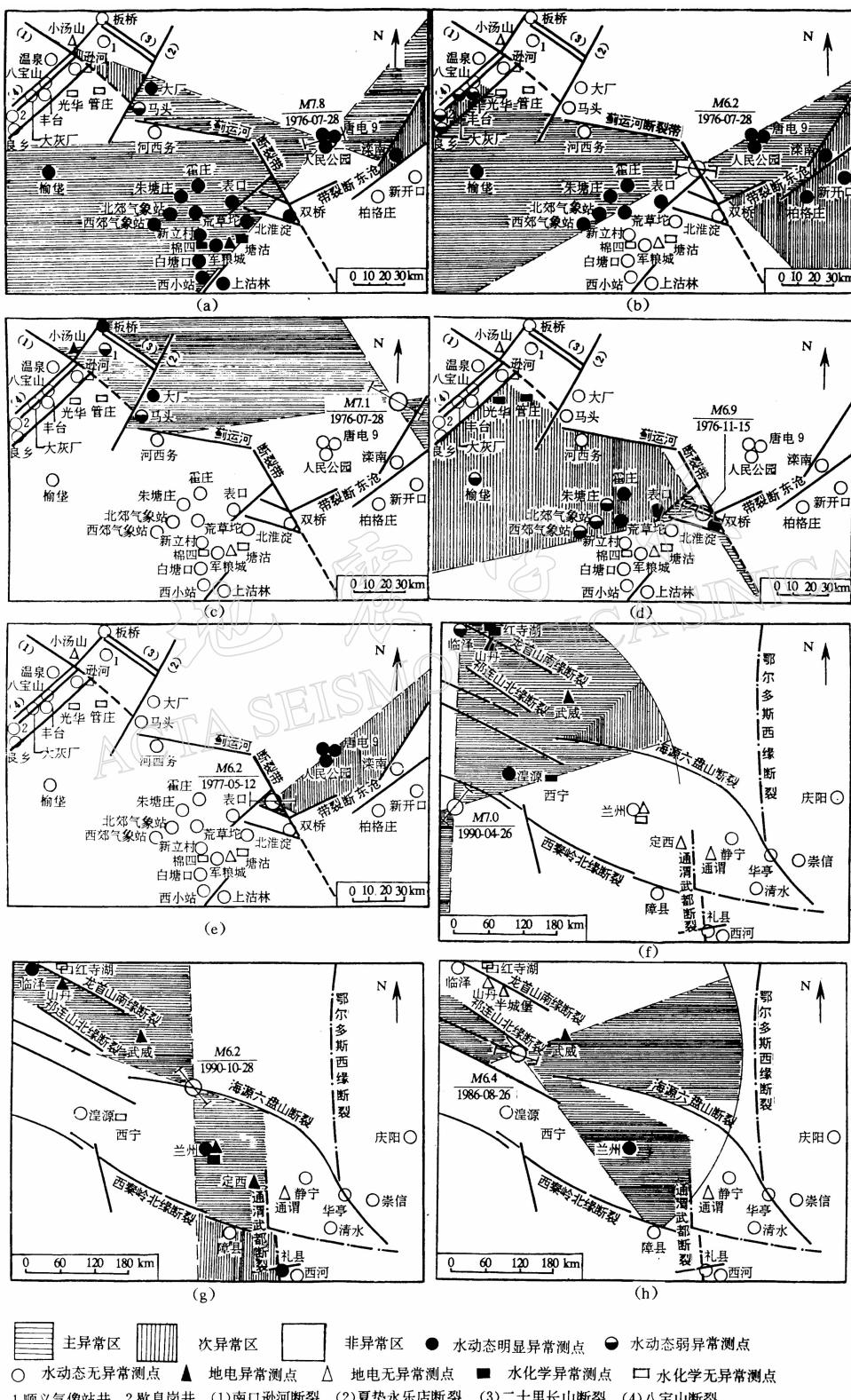


图 1 主异常区、次异常区、非异常区、震中、水点和主要活断层分布图

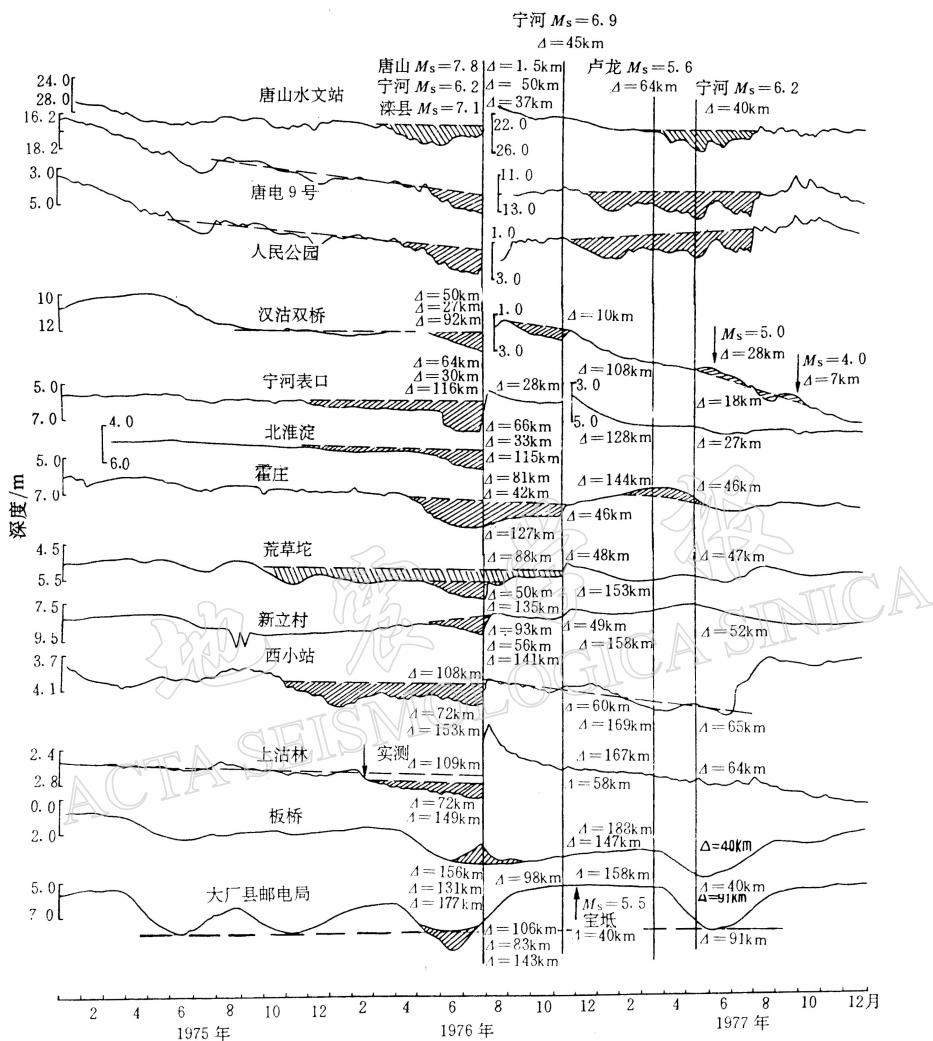


图 2 地下水水位 5 日均值序列

对应关系,少部分异常同时位于两次强震异常区;② 异常区内及其边缘的地壳薄弱部位的水点异常突出。如:双桥、表口、霍庄、荒草屯、新立村和板桥井。7.8 级主震极震区的唐山市人民公园、水文站和唐电 9 号井对 1977 年宁河 6.2 级地震异常比 7.8 级主震还明显(图 2)。这可能因为 7.8 级主震使极震区地壳介质破坏程度高,为地下水运移提供了通道。同时极震区破碎的地壳介质的应力、应变对本次地震孕震过程反应敏感;③ 无异常水点集中在非异常区,即锐角区外或该区内被断层“阻断”的部位。双桥井位于两条大断层交汇部位,7.8、6.9 级和附近的 5.0、4.0 级地震均显示明显短临异常。宁河 6.9 级和 6.2 级(1977)地震发生在该井周围不到 20 km 处,6.2 级地震震中位于 NWW 向岭头断裂以北(国家地震局地质研究所,1985),尽管该断裂纵向规模不大,但其走向与本次地震发震应力

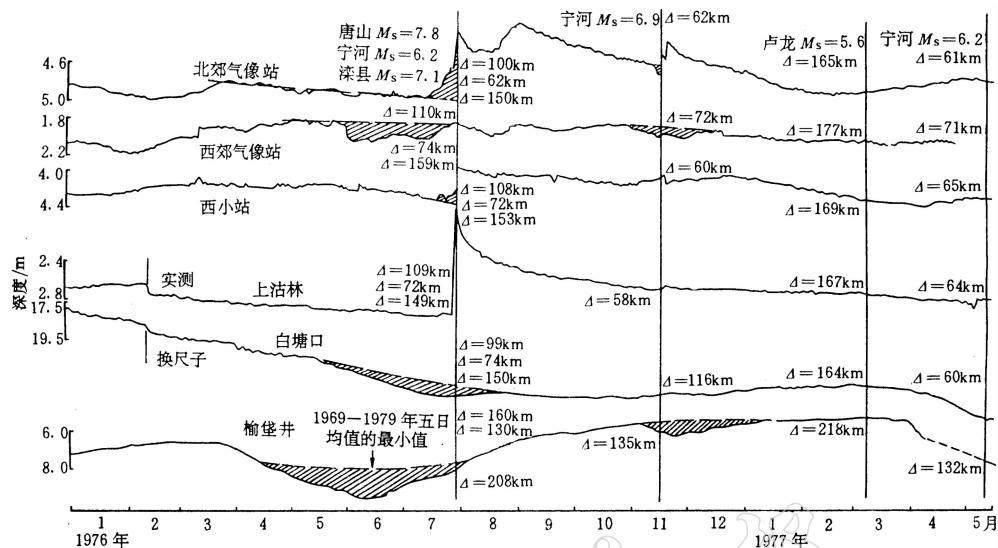


图 3 地下水水位日值序列

场方向之间的交角  $\theta$  不到  $20^\circ$ , 该井位于岭头断裂以南, 未显示异常. 但 6.9 级地震震中位于岭头断裂南侧, 该井与本次地震震中之间无“阻隔”活断层, 且该井位于本次地震主异常区, 短期异常突出, 并显示明显震后效应. 蓼运河 NW 向活断层以南的新立村、白塘口、西小站、上沽林、北淮淀、军粮城 6 口井在 7.8 级主震前异常突出或比较突出(图 2 中未示军粮城井曲线), 但宁河 6.9 级和 6.2 级(1977)两次强余震距这 6 口井  $40\sim70$  km, 却未显示异常(北淮淀井在 7.8 级主震后无资料). 这两次强余震发震应力场方向分别为 NWW-SEE 和近 EW 向, 与两次强余震震中和 6 口井之间的岭头、汉沽两条 NWW 向断裂走向几乎相同, 并且 6 口井也不位于两次强余震异常区内.

尽管该区活构造空间分布复杂，很难准确划分出主异常区、次异常区和非异常区，但是通过上述划分，使原来认为十分复杂、杂乱无序的中短临异常空间演化展示为“异常-震源地点-发震机制-主要活断层”之间有特定关系的空间演化规律。

图 1a~e 中还示出了小汤山地电, 管庄、光华和棉四水化学测点以及塘沽地电、水化学测点。这些测点以及昌平、镇罗营、陡河、赵格庄等地应力观测和宁河、张道口、大灰厂、牛口峪地形变观测也显示“异常-震源地点-发震机制-主要活断层”之间的特定关系。有关观测结果详见国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组(1982)和杜学彬等(1993, 1996)文献。

## 2.2 1990 年共和 7.0、景泰 6.2 和 1986 年门源 6.4 级地震

据向光中和张志坚(1994)共和 7.0 级地震宏观考察结果和震源机制解, 本次地震发震应力场方向为  $P$  轴方位  $39^\circ$ , 即 NE-SW 向挤压。据候珍清和才树华(1990)和温增平(1991)景泰 6.2 级地震震源机制解和宏观考察结果, 本次地震发震应力场方向为  $T$  轴方位  $324^\circ$ , 即 NW-SE 向拉张。据徐纪人等(1986)的研究, 门源 6.4 级地震发震应力场方向为  $T$  轴方位  $106^\circ$ , 即 NWW-SEE 向拉张。3 次强震周围水点不多, 所以把研究范围扩大到 400 km 的水位、流量观测。图 1f~h 是 3 次强震异常区和非异常区。图 4 是显示明显异常水点的时序图。

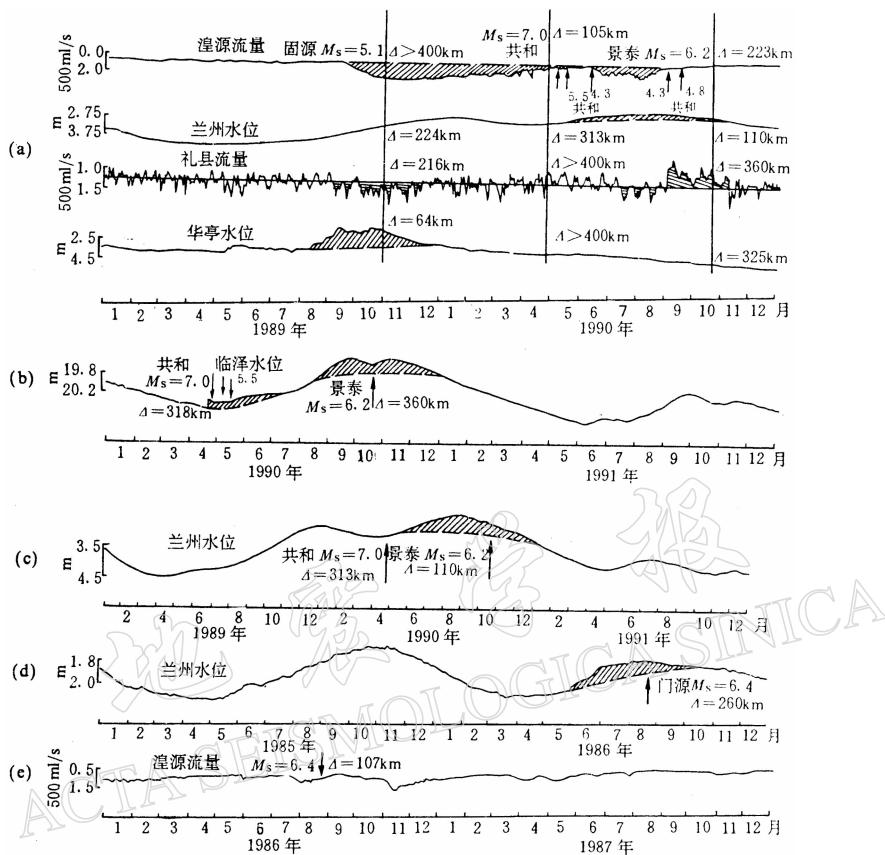


图4 地下水水位、流量时序序列  
(a~b) 日值序列; (c) 5日均值序列; (d~e) 日值序列

由图可见,3次强震异常空间分布、无异常测点分布与1976年唐山地震5次强震相同。兰州大滩水位井位于景泰6.2和门源6.4级地震主异常区,中短期异常非常突出(与该井附近的兰州地电阻率、水氡异常同步),但位于共和7.0级地震非异常区,未显示异常。相反,湟源流量井位于共和7.0级地震主异常区,而位于景泰6.2和门源6.4级地震非异常区,仅对共和地震及其3次中强余震异常突出(与西宁和红寺湖高、低氡观测结果相同)。

图1f~h示出了山丹、武威、定西等地电和西宁水氡、红寺湖高(低)氡以及兰州水氡测点。地电、水化学观测结果与3次强震发震机制和该区主要活断层之间的关系明显(杜学彬等,1994a,b,1996)。门源6.4级地震前后,笔者在山丹县城以东30 km的丰城堡进行定点大偶极电测深野外观测,偶极距分别为5.5 km和7.5 km,该测点对本次地震未显示异常。本文作者没有收集到新开口和柏格庄井1977年的资料,两口井位于宁河6.2级地震(1977)非异常区。

另外,我们还研究了云南澜沧-耿马7.6,7.2(1988)、四川松潘-平武7.2,6.7,7.2(1976)、理塘5.6(1986)、辽宁海城7.3(1975)、宁夏固原5.1(1989)和河北卢龙5.6(1977)等地震有关水点的观测结果,异常空间分布、无异常测点分布也明显存在上述关系。

### 3 讨论和结论

(1) 地壳薄弱部位介质压实程度低, 次级断层、裂隙、介质内部空隙发育, 为地下水运移提供了通道。同时, 地壳薄弱部位介质破碎程度高, 孕震过程中受震源区加剧的力学过程的影响进一步沟通或堵塞这一部位地下水运移的通道, 使原观测水系的物理状态发生变化。另一方面, 地壳薄弱部位对周围一次地震应力、应变反应敏感, 孕震过程中震源区加剧的力学过程易引起这一部位应力、应变发生变化, 改变观测水系的原物理状态。因此, 地下水动态出现异常是与震源力学过程有关的应力、应变变化为源的物理过程。

既然地下水动态中短临异常的源是与震源力学过程有关的应力、应变变化, 由异常空间、时间演化特征似乎再次揭示了, 中国大陆强震前短期内震源区及其周围发育着某一特定方向水平挤压或拉张突出的附加应力场。杜学彬(1992)和杜学彬等(1993, 1994a, b, 1996)关于地电、水氡异常空间、时间特征的研究也取得了这一认识。一次强震可能正是附加应力场引起的震源断层错动(这正是笔者把“附加应力场”称之为“发震应力场”的原因所在)。

据郭增建和秦葆燕(1979)提出的震源孕育的组合模式, 一次地震震源断层两端是应力调整单元, 中间是积累单元。在某一方向水平挤压或拉张变化突出的应力场作用下, 调整单元压实程度低, 断层两侧应力易释放, 而积累单元压实程度高, 断层两侧应力不易释放。这势必形成以震源为“顶点”, 在断层两侧逐步向外围扩展的应力、应变变化突出的区域。单从这方面来看, 震前短期内震源周围应力、应变变化是空间不均匀的。震源周围往往分布有不同走向的主要活断层, 其中有的断层纵向规模大, 切割地壳超过震源深度。某一方面水平挤压或拉张变化突出的应力场和这些断层相互作用也使震源周围的应力场不均匀; 其次地壳薄弱部位是应力、应变变化敏感部位。上述这两个因素使震源周围本来不均匀的应力、应变场更加不均匀, 畸变。当水点位于应力、应变量级大的地壳薄弱部位, 中短临异常突出。从震例研究可见, 显示明显中短临异常的测点正是位于过震中大于发震应力场方向  $35^{\circ}$  和小于该方向  $35^{\circ}$  左右的两条交线的锐角区内, 并且集中分布在该区内地壳薄弱部位, 震中与水点之间无“阻隔”断层。

(2) 地下水动态中短临异常空间分布-震源地点-发震机制-主要活断层之间存在特定关系, 历次强震重复性明显, 与笔者关于地电、水氡中短临异常的研究结果一致(杜学彬, 1992; 杜学彬等, 1993, 1994a, b, 1996)。显然, 把异常与震源力学过程有关的应力、应变变化相联系, 中国大陆强震震前短期内震源区及其周围发育着某一方向水平挤压或拉张变化突出的应力场, 不一定都与当地的基本应力场一致。事实上, 强震震源断层错动的力学特性与当地的基本应力场并不都是协调的。上述认识对强震震源断层错动的力源模型会不会有些启示呢?

(3) 如果仅从震级大小和空间影响尺度上看, 水动态中短临异常在空间上是杂乱无序的。但是, 根据本文的观点和思路, 地下水动态中短临异常显示出“异常-震源地点-发震机制-主要活断层”之间有特定关系的空间演化特征, 无异常测点分布也有明显规律。但是, 客观地说, 一次地震震源区外围地壳薄弱部位地下水动态以及地电、水氡异常不符合上述关系(如 1976 年唐山地震, 远在辽宁、山东、江苏的郯庐断裂带及其附近的个别测点也显示异常), 这与本文研究结果并不矛盾。如果把异常分为源兆和场兆, 即源兆与一次地震孕

育、发生的个体行为特征有关, 而场兆与大范围应力场的调整变化有关。因此, 上述特定关系概括了源兆空间特征, 空间上不符合上述特定关系的异常应属场兆。显然, 源兆占一次地震异常的绝大多数, 空间上集中在有限区域(即异常区)。一次强震总有一定数量的水动态、地电、水氡测点显示异常, 震前显示异常和无异常测点的观测结果是已知的, 主要活断层空间格局是一定的。由上述特定关系可推断强震地点和发震应力场方向, 并识别出异常中的源兆和场兆。追踪源兆空间、时间演化特征能进一步缩小强震发生的空间尺度和时间范围(不能确定具体震级)。这里, 震源区周围的无异常测点也为推断强震地点和发震应力场方向提供了信息。

(4) 杜学彬(1992)和杜学彬等(1993, 1996)认为, 地电、水氡中短临异常变化是与震源力学过程有关的应力、应变变化为源的物理过程, 地下水运移可能是地电、水氡异常的主要因素。由本文可见, 地下水动态异常和地电、水氡异常与发震机制、主要活断层之间的关系是一致的。显然, 这是对上述认识的佐证。军粮城水位井和塘沽水氡井同位于海河断裂附近, 1976年唐山地震前4月水位和氡浓度开始大幅度下降, 此后水位和氡浓度在较长时期均处于下降后的低值, 4月前后两种前兆不同物理量均显示明显差别。昌黎龙家店水位和后土桥地电在同一地点, 7.8级地震临震变化相当同步, 震后至1978年地电阻率与水位变化同步, 似乎还是镜像变化的。另外, 唐山地震除水氡外, 其它一些水化学单测项目以及地形变、地应力观测等典型异常也呈现出与地下水动态、水氡、地电一致的空间演化特征。由此看来, 上述多种前兆中短临异常的机理可能归于同一个源——与震源力学过程有关的应力、应变变化, 而应力、应变变化引起地下水运移是地下水动态、地电、水化学异常的主要因素。似乎国内一些强震的典型地磁中短临异常空间分布、无异常测点分布也显示与发震机制和主要活断层有上述特定关系。因此, 本文研究结果为多种前兆异常机理研究也提出了新思路, 或者说已取得了一些初步认识。

## 参 考 文 献

- 杜学彬, 1992. 临震  $\rho_s$  突变活断层——应力场效应. 地震, (1): 18~22  
 杜学彬, 陈有发, 阮爱国, 等, 1994 a. 祁连地电场变化与地震关系的研究. 西北地震学报, 16(3): 84~87  
 杜学彬, 阎志德, 邹明武, 1994 b. 景泰 6.2 级地震震源动力学过程. 地震学报, 16(3): 296~303  
 杜学彬, 张新基, 张慧, 1996. 中国大陆地震水氡短临异常的空间特征研究. 地震学报, 18(3): 358~364  
 杜学彬, 赵和云, 陈宝智, 1993. 地电阻率临震突变与活断层、发震应力场. 地震学报, 15(3): 303~312  
 国家地震局地质研究所, 1985. 河北平原及其周围新构造图(1: 500 000). 北京: 地震出版社  
 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社. 1~70, 246~270  
 郭增建, 秦保燕, 1979. 震源物理. 北京: 地震出版社. 35~93  
 候珍清, 才树华, 1990. 甘肃景泰-天祝 6.2 级地震. 西北地震学报, 12(4): 48  
 温增平, 1991. 1990 年 10 月 20 日天祝、古浪 6.2 级地震的震源机制解. 西北地震学报, 13(1): 92  
 向光忠, 张志坚, 1993. 共和 6.9 级地震地质背景及地震机制探讨. 内陆地震, 7(4): 325~334  
 徐纪人, 姚立询, 汪进, 1986. 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震及其强余震震源机制解. 西北地震学报, 8(4): 82~84