

10

58-65

山东聊古一井水化学组分地震异常的 场源兆特征及其机制讨论

p315-7

耿杰 张昭栋

(山东省地震局, 济南 250014)

摘要 从山东聊古一井构造地质和水文地质条件的分析入手, 以实际观测的水化学组分地震前兆异常变化实例为基础, 讨论了该井水化学组分震前异常变化的场源兆特征. 利用断层位错理论和岩石力学实验获得的认识探讨了聊古一井水化学组分变化场源兆异常形成的物理力学机制及预报意义. 所获成果丰富了对场源兆地震前兆的认识, 同时对地震预测预报也有一定的意义.

关键词 水化学组分, 场兆, 源兆, 力学机制 聊古一井

地震异常

1 引言

聊古一井是国家地震局 I 类水化学综合观测井. 自 1981 年正式投测以来, 对其周围一定范围内的 5 级以上地震具有良好的映震能力, 但各次地震前水化组分的异常变化差异较大. 造成这种差异的原因是什么? 各次地震前聊古一井水化组分异常差异在哪里? 对各次地震的响应机制又是什么? 毫无疑问, 从异常的场源兆鉴别入手, 正确认识这些问题, 对地震预报具有重要的现实意义.

2 聊古一井的构造地质、水文地质和观测概况

2.1 构造地质条件

聊古一井位于聊考断裂的北段, 井孔周围的构造地质条件可概括为断块构造发育, 断裂活动强烈, 地震和应力活动水平较高.

燕山运动时期, 产生了不同类型的深大断裂, 把本区分割成大小不等的断块, 断块之间的差异运动明显. 聊古一井就位于聊城凹陷与阳谷凸起差异运动的接合带上^[1].

聊考断裂带是一条区域性的深大断裂带, 总体呈北北东向展布, 由一系列北北东向正断层组成, 显示多期活动. 新第三纪时期, 断裂以左旋反扭运动为主; 第四纪以来, 断裂呈右旋张性正断活动^[2]. 地球物理勘探、化学探测(R_n , γ 等)、钻探、卫星影象和形变测量资料证实, 聊考断裂是一条具有深部构造背景而且近期仍在活动的断裂带. 沿断裂带, 历史上发生 $M_s \geq 4$ 地震 20 余次. 断裂南段先后发生过 1937 年 7 级和 $6\frac{3}{4}$ 级、1948 年 5.5 级及 1983 年 5.9 级地震.

上述事实说明, 聊考断裂带所在区域构造应力活动水平较高.

收稿日期: 1997-04-09

第一作者简介: 耿杰, 女, 1965 年生, 助理研究员, 现主要从事地下流体地震预报研究工作

2.2 水文地质条件及观测概况

聊古一井深 2 337.72 m, 自上而下为: 第四系和第三系组成的古潜山盖层(厚 785 m)、奥陶系灰岩夹白云岩(厚 882 m)和寒武系鲕状灰岩、页岩夹石膏地层(厚 640 m)。在基底太古界泰山群花岗片麻岩中进尺 30.72 m 终孔(图 1)。

该井的最大流量为 1 800 m³/d, 现控制在 140~160 m³/d, 井口压力 110~120 kg/cm², 水温 51.5°C, 该井矿化度高, 且富含微量元素。库尔洛夫式为:

$$M_{5300} \frac{Cl_{54.16}SO_4^{2-} 42.23}{Na^+ 43.3 C_2^{2+} 41.35 Mg_{13}^{2+}}$$

该井深层承压水的主要补给形式为深层水平迳流, 其运动相当滞缓。由于深层承压水与上部潜水、微承压水之间有多层厚度大、分布广的新生界粘土隔水层, 上部层间水无法混入, 故二者无垂直的水力联系。

根据气体水文地球化学特征划分, 该井在水平方向处于华北地区氮氢富集带与二氧化碳富集带的交汇地区。由于该井的地下水是大气成因的, 故水中溶解的气体以氮气为主, 且富含二氧化碳和氦气。

聊古一井自 1978 年 8 月试测, 1981 年 1 月正式开始水氢、气体水质及其它物理参数的综合观测。聊古一井多年的观测资料连续可靠, 获得国家地震局水化学观测资料评比六连冠。

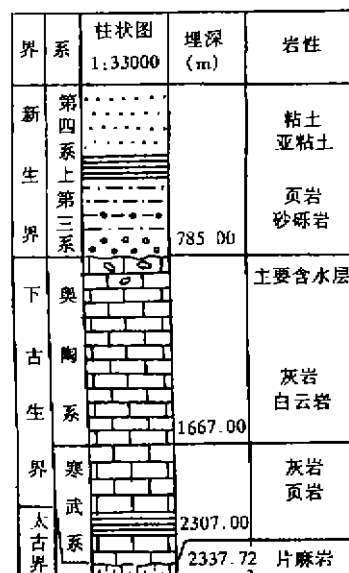


图 1 聊古一井地层柱状图

Fig. 1 Geological column of the well Liaogu-1.

3 聊古一井水化学组分变化的场源兆特征

聊古一井自水化学观测以来, 对其周围 500 km 范围内的 5 级以上地震具有良好的反映(图 2), 在 1981 年宁晋 5.8、1983 年菏泽 5.9、1991 年大同 5.8、1992 年黄海 5.3 和 1995 年苍山 5.2 级地震前均出现异常变化。根据八五期间的研究成果^①将震源应力场孕育引起的异常称为源兆, 将区域构造应力场增强引起的异常称为场兆。显然, 菏泽 5.9 级地震与聊古一井同处在聊考断裂带上, 菏泽 5.9 级地震的发生和聊古一井水化组分震前异常均与聊考断裂的活动密切相关。故将菏泽 5.9 级地震前聊古一井水化组分异常变化归属源兆异常, 而其它 4 次地震与聊古一井处于不同的构造带上, 故将该井震前水化组分的异常变化归属场兆异常, 下面分别讨论聊古一井水化学组分变化的场源兆特征。

3.1 菏泽 5.9 级地震前聊古一井水化学组分的源兆特征

聊古一井水溶气体多组分、水氢 FD-105K 及流量、水氢 FD-125 模糊分维值, 在 1983 年 11 月 7 日山东菏泽 5.9 级地震前均表现出了明显的异常变化特征, 分述如下:

3.1.1 水溶气体多组分的异常变化特征

1983 年 5 月下旬, 聊古一井气体总量测值明显大幅度下降, 至 6 月上旬超出二倍均方差控制线, 7 月下旬测值恢复至正常波动范围, 8 月上旬又一次出现较大幅度下降, 并超出二倍均方差, 9 月中旬恢复至正常波动范围, 之后测值逐渐恢复上升至正常值(图 3a)。上述气体总量

^① 张肇诚, 洪汉净. 中国大陆地震前兆与构造运动异常史例的对比研究及现代区域构造变形分析——中国大陆的构造运动与地震前兆. 1995.

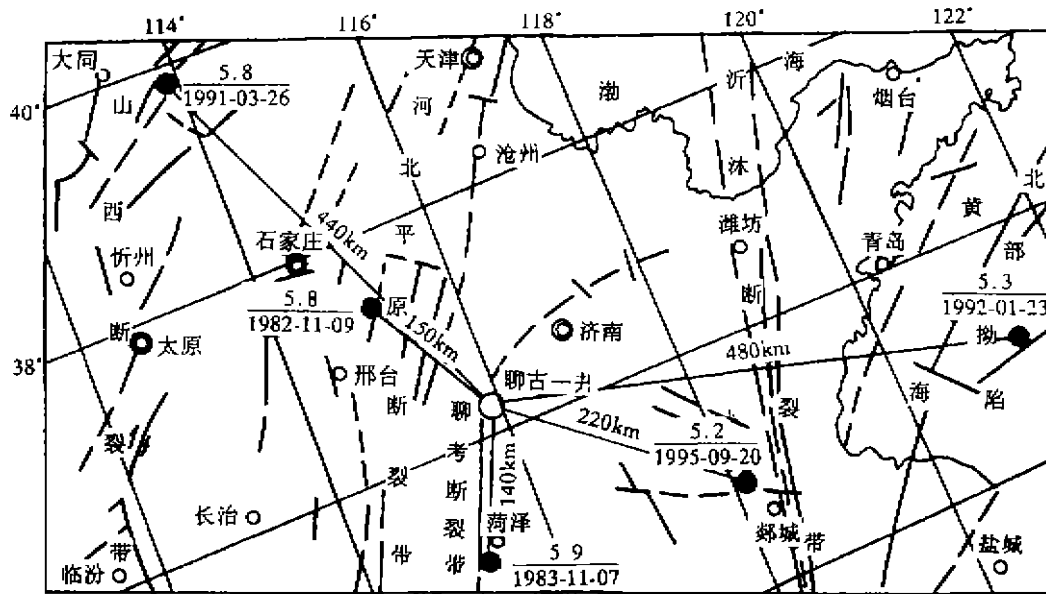


图2 聊古一井水化学组分异常对应地震(1981~1995)及构造图

Fig.2 Structural sketch and epicentre distribution of earthquakes (1981~1995) around the well Liaogu-1.

低值异常过程持续3个月,于当年11月7日发生菏泽5.9级地震。

1982年以来,聊古一井氦气含量测值均较平稳,自1983年6月底,测值大幅度下降,至7月上旬,测值低于二倍均方差控制线,测值持续低值水平两个月,9月中旬测值逐渐上升恢复至正常水平(图3b),之后50天发生了菏泽5.9级地震。

菏泽5.9级地震前,聊古一井二氧化碳含量的变化有明显的高值异常过程(图3c)。1983年6月中旬,测值明显上升,7月上旬测值超出二倍均方差,一个半月之后逐渐下降恢复,9月上旬降至正常值,之后2个月发生菏泽5.9级地震。

上述水溶气体组分在菏泽5.9级地震前的异常变化具有时间上的同步性。

3.1.2 聊古一井流量和水氦FD-105K的异常变化特征

实验结果^[1]和数年的观测资料分析均表明,聊古一井水氦FD-105K随流量的增加呈上升的同步变化。1983年7月,聊古一井水氦FD-105K和流量打破了正常的年动态变化,在时间上同步出现了水氦FD-105K上升和流量的下降变化(图4),震前十几天变化速度加快,震后逐渐恢复。

3.1.3 聊古一井水氦FD-125模糊分维变化特征

采用模糊集理论与分形理论相结合的模糊分维方法^[3],计算得到聊古一井水氦FD-125的模糊分维随时间变化曲线(图5),发现震前9个月出现了明显的降维现象,该井水氦FD-125模糊分维基值为0.60,1983年2月最低值为0.40。

菏泽5.9级地震前聊古一井的水氦FD-125的模糊分维降低为中期异常;氦气含量、气体总量和二氧化碳含量的同步变化为短期异常;流量和水氦FD-105K测值持续变化为短临异常。水化学组分震前同步变化,中、短、临异常配套,构成了聊古一井水化学组分异常的源兆特征。

3.2 聊古一井水化学组分的场兆变化特征

3.2.1 1991年大同5.8级地震和1992年南黄海5.3级地震前水汞变化特征

聊古一井水汞自1989年12月开始观测,聊城水化站按照实验求得最佳条件,进行了连续的水汞观测,其水汞含量的正常变化不受气象因素等的干扰影响,无明显的年变和季变.1991年1月1日,聊古一井水汞测值在比较平稳的正常背景下出现大幅度上升(图6),测值明显超出三倍均方差,持续高值26天,1月17日为最高值,达1183.0ng/L,1月17日恢复至正常波动范围,2月27日水汞测值又一次出现大幅度上升,3月13日测值达1014.0ng/L,3月17日至正常背景值,8天后发生大同5.8级地震.1991年12月2日,聊古一井水汞测值在正常背景下出现大幅度上升,高达985.2ng/L,持续高值3天,之后测值在正常背景下波动,48天后发生了南黄海5.3级地震.

汞具有较高的电动势、高挥发性和极强的穿透能力,汞蒸气可沿破碎带或裂隙等穿透岩层而溢出,因而成为映震灵敏的组分^[4].

3.2.2 聊古一井气体总量在苍山5.2级地震前的异常变化

聊古一井气体总量观测值,1995年2月表现出明显的上升趋势,3月至5月测值超出二倍均方差(图7).现场调查落实,未发现明显的人为及外界环境干扰因素,认为其变化属于地震异常.上述异常过程结束后4个月发生1995年9月20日苍山5.2级地震.

3.2.3 聊古一井氮氮比在宁晋5.8级地震前的变化特征

氮气在大气中含量高,在地层中随深度的增加而减少,而氦气在大气中含量低,在地层中含量随深度的增加而增加.地层中氮气和氦气的含量与深度的关系恰好相反,因而两种含量的比值更有利于突出异常变化.

聊古一井氮氮比自1981年初开始急速上升,至9月达到最高值,而后转折下降,同年11月9日发生宁晋5.8级地震.震后曲线下降至正常均值附近^[5].

宁晋5.8、大同5.8、南黄海5.3和苍山5.2级地震前,聊古一井水化学组分中的某种敏感组分,如水汞、氮氮比出现明显的异常变化,不同的地震异常出现的幅度、持续时间及异常结束到发震的时间间隔都存在着很大差异,构成了聊古一井水化学组分异常的场兆特征.

4 聊古一井水化学组分的场源兆形成的物理力学机制及其预报意义

4.1 聊古一井源兆异常形成的物理力学机制

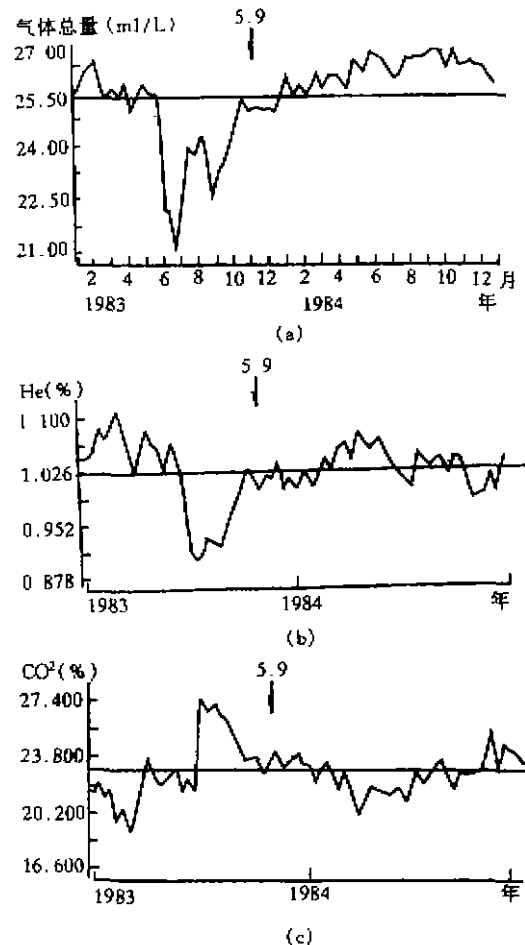


图3 聊古一井气体多组分在菏泽5.9级地震前的异常变化

Fig.3 Curves of anomaly change of some hydrogeochemical elements in well Liaogu-1 before the Heze $M_{5.9}$ earthquake in 1983.

a 气体总量; b 氦气百分含量; c 二氧化碳百分含量

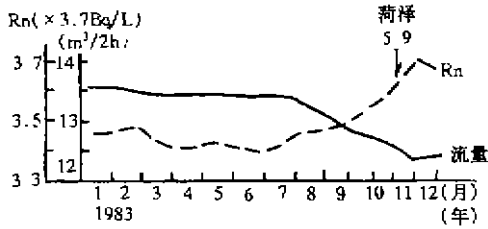


图4 菏泽5.9级地震前聊古一井水氡FD-105K及流量变化曲线

Fig. 4 Curves of water Rn and discharge changes in the well Liaogu-1 before the Heze $M_s5.9$ earthquake in 1983

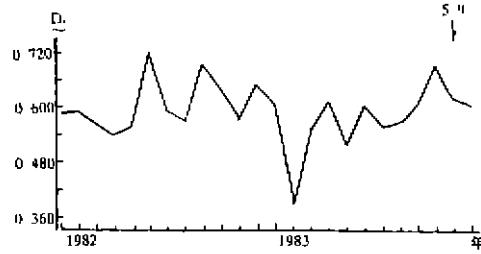


图5 菏泽5.9级地震前聊古一井水氡FD-125的模糊分维变化曲线

Fig. 5 Curve of the fuzzy (fractal) values of water Rn (FD-125) in well Liaogu-1 before the Heze $M_s5.9$ earthquake in 1983.

如图2所示,1983年菏泽5.9级地震发生在聊考断裂南段.研究结果表明^[6-8],菏泽5.9级地震之前,聊考断裂活动加剧.主要证据有:①1981~1983年间,沿聊考断裂带,菏泽至聊城出现长200 km,宽40 km的小震密集条带;②地震前的5~6年间,沿聊考断裂带出现P轴向北东方向偏转集中;③1979~1983年间,沿聊考断裂带,菏泽至聊城出现北北东向展布的低b值(0.6~0.7)区,b值的最低值出现在聊城附近;④震前沿聊考断裂带出现波速比低值异常区.这些事实说明,菏泽5.9级地震前,聊考断裂带活动加剧,破裂由无序向有序发展,局部应力场受断裂活动的扰动.震源机制解结果表明,聊考断裂处在北北东-南南西的挤压应力场中,在这一应力场的作用之下,聊考断裂呈右旋走滑运动.

Chinnery和罗灼礼理论计算结果及马瑾等人的岩石力学实验结果证实,在地震孕育过程中,走滑断层的端部产生应力扰动场,形成的平均应力增量场以断层为中心形成四象限分布,与挤压应力方向平行的为扩容增强区,与之垂直的是挤压增强区^[9-11].聊古一井位于聊考断裂的张应力增强的扩容区.由于地震前聊考断裂活动的加剧,在其端部出现局部张应力的增强,造成井孔周围的压力降低,具体表现为溶解气体总量、氮气含量和流量减少.在平均应力增强场的持续作用下,水氡FD-125的变化从无序向有序发展,出现震前水氡FD-125模糊分维的降维现象.降维出现的时间与聊考断裂带的小震条带和低b值条带形成的时间相一致.聊古

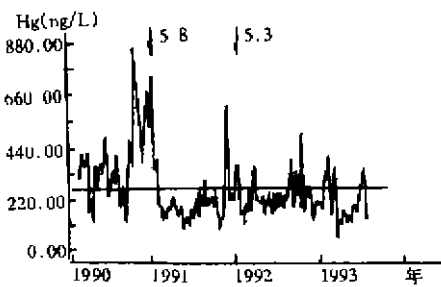


图6 大同5.8和南黄海5.3级地震前聊古一井水汞五日均值曲线

Fig. 6 Curve of 5-day mean values for water Hg in the well Liaogu-1 before the Datong $M_s5.8$ and South Yellow Sea $M_s5.3$ earthquakes

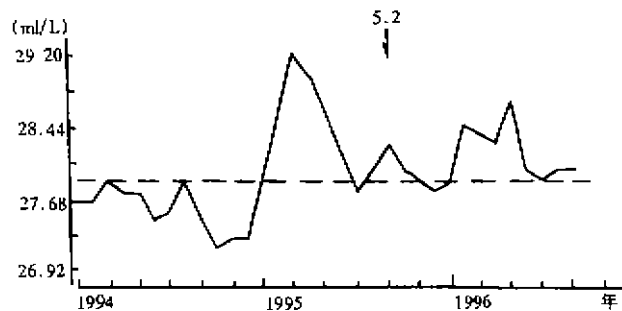
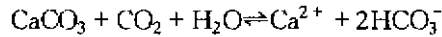


图7 聊古一井气体总量在苍山5.2级地震前的变化

Fig. 7 Change curve for total gases in ground water of the well Liaogu-1 before the Cangshan $M_s5.2$ earthquake in 1995.

一井深层地下水中的二氧化碳主要来源是碳酸盐岩化学变化的产物,其主要反应如下:



反应式是可逆的.在正常情况下,式中重碳酸根和 CO_2 处于平衡状态,当温度等条件不变的情况下,由于井孔周围压力降低,平衡状态被破坏,二氧化碳释放量增加,因而出现了菏泽 5.9 级地震前二氧化碳含量的明显高值异常.

综上所述,菏泽 5.9 级地震前,聊古一井气体总量、流量、氮气含量、二氧化碳含量和水氧 FD-125 模糊分维值等水化学组分的震前异常变化是聊考断裂活动加剧,破裂从无序向有序发展,在断层的端部产生应力扰动场且局部张应力增强造成井孔周围压力减少的结果.聊古一井水化学多组分在菏泽 5.9 级地震前的同步异常变化,说明异常受控于统一的物理力学机制,异常的中、短、临震异常的配套反映了地震孕育及应变能积累的过程.

4.2 聊古一井场兆异常形成的物理力学机制

如图 2 所示,大同 5.8 级地震($\Delta = 440 \text{ km}$)发生在山西断裂带的北段,宁晋 5.8 级地震($\Delta = 150 \text{ km}$)发生在宁晋断裂带上,南黄海 5.3 级地震($\Delta = 480 \text{ km}$)发生在南黄海北部拗陷内,苍山 5.2 级地震($\Delta = 220 \text{ km}$)发生沂沭断裂带上.这些地震与聊古一井处于不同的构造带上,并且相距很远.但上述 4 次地震前,聊古一井水化学组分的某一测项出现明显的震前异常变化,这显然与震源的构造活动无直接的成生联系,不受震源过程的直接影响.马瑾等人岩石力学实验结果表明,一个观测点出现异常是由于外界力学条件变化在该点引起的力学扰动而造成的,这些力学扰动在一些地点可能引起力学失稳而发生地震,而另一些地点则可能仅引起一些异常^[11].一个观测点或在一个区域是否出现前兆异常,必须具备构造不均匀性^[12]和具有强烈响应的观测点.观测点是否有明显的响应,取决于该点与变形构造的关系.如前所述,聊古一井处在凹陷与凸起接合带上现在仍在活动的聊考断裂的端部,是反映区域构造应力场活动的构造敏感区域.毫无疑问,在地震孕育的区域应力场活动增强的动态变化过程中,聊古一井会对区域应力趋势性的活动增强有所响应,破坏了原有的区域应力场与构造部位所处的某种平衡状态,改变了井孔周围的受力环境,从而使该井某些敏感测项(Hg、氮氮比等)出现地震前兆异常.由于场兆异常出现时间、异常持续时间和异常到发生地震的时间间隔与震中距、区域构造应力场作用的方式、应力的传递途径以及对构造应力场的响应程度等多种因素有关,因此,1981 年宁晋 5.8 级地震、1991 年大同 5.8 级地震、1992 年南黄海 5.3 级地震和 1995 年苍山 5.8 级地震前水化学单测项异常的出现时间、持续时间和到发震的时间间隔等都有很大差异,这也反映了来自场的地震异常信息的复杂性.由于构造应力场不象震源应力场在聊古一井周围引起的应力扰动场那么直接,产生的应力扰动也相对较小,因此,往往只有某种敏感水化学测项才在震前出现异常.

4.3 聊古一井场源兆的预报意义讨论

聊古一井水化学多组分对其周围一定范围的 5 级以上地震具有较高的映震能力,既能反映震源应力场的动态变化,也能反映构造应力场的动态变化,具有反映地震场兆和源兆的双重特征.如何将这种场兆异常和源兆异常应用于地震预测预报之中以便为寻找地震发生时、空、强提供依据,无疑是一项十分重要的研究内容.

假若我们将具有统一物理力学机制成因的水化学多组分同步变化的中、短、临异常配套作为源兆的一种重要标志,那么,一旦出现了水化学多组分的同步变化的源兆异常,就应该在井孔所处的同一条断裂带上寻找危险区.具有强烈断裂活动和深部构造背景区、历史上发生过强震和断裂运动产生的挤压区最有可能是强震发生的有利地点.菏泽 5.9 级地震就发生在东明

上地幔隆起及壳幔结构、重力和航磁异常的梯度带上,即聊考断裂带中第四纪的强活动段^[2],位于聊考断裂和成武断裂走滑运动产生的挤压区(图8)。震中附近震前出现了形变隆起^[3]、波速比异常^[14]和水文观测井的水位大幅度上升异常^[15],说明震中区挤压应力增高,佐证了菏泽地震发生在走滑断层产生的挤压区内。

聊古一井水化学多组分同步异常恢复出现在地震前2个月左右,是地震进入短阶段的重要标志,这种多组分同步变化对5级以上地震具有良好的映震能力,可作为发生5级以上地震的重要判据。

聊古一井水化学某一灵敏测项出现显著的地震前兆异常,预示着聊古一井周围500 km范围内在十几天至几个月内,不同地震构造活动带(区)上可能有5级以上地震发生,因此,聊古一井水化学测项的场兆异常可作为该井周围不同地震构造带上发生5级以上地震的一种判据。

5 主要结论与认识

(1) 聊古一井由于其所处的特殊构造部位、良好的水文地质条件、井孔条件和连续可靠的观测,而获得一批有价值的实际观测资料,该井水化学组分的异常变化对其周围500 km范围内的5级以上地震有良好的映震能力,是十分理想的地震水化学观测井。

(2) 聊古一井水化学组分在菏泽5.9级地震前的同步异常变化是聊考断裂带震前活动加剧、破裂从无序向有序发展、在断层端部产生的扰动应力场使局部张应力增强而井孔周围压力减小的结果。菏泽5.9级地震前,聊古一井多组分的同步异常变化的中、短、临异常配套反映了震源应力场孕育的过程,具有统一的物理力学机制,构成了聊古一井水化学组分异常的源兆特征。

(3) 在大同5.8、宁晋5.8、南黄海5.3和苍山5.2级地震前,聊古一井水化学某一测项出现明显的异常变化,它反映了区域构造应力场活动的增强以及聊古一井所处的构造敏感区对构造应力增强活动的响应。由于区域构造应力场没有震源应力场在聊古一井周围引起的应力扰动那么直接,产生的应力扰动也相对较小,因此,只有某些敏感测项在震前出现异常。

(4) 聊古一井水化学多组分的不同场源地震前兆特征具有一定的预报意义。源兆异常的出现预示着同一活动断裂上的某一构造部位在短期内可能发生5级以上地震。场兆异常出现则预示着区域应力场活动增强,在不同的活动构造带上,未来十几天至几个月有可能发生5级以上地震。因此,地震场兆和源兆的鉴别对地震的预测预报是十分重要的。

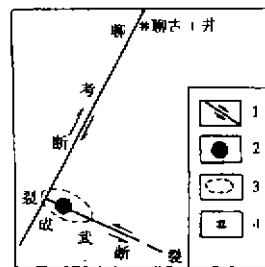


图8 菏泽5.9级地震震中和聊古一井与构造的关系

Fig. 8 Epicenter of the Heze $M_s 5.9$ earthquake and relation of the well Liaogu-1 to the faults

- 1 断层及错动方向; 2 震中;
3 水位上升区; 4 异常观测井

参考文献

- 1 李金泉,肖文成,冯在成,等.聊古一井地震观测干扰因素的研究.地震,1986,(增刊):57~68.
- 2 胡长利.1937年菏泽地震.北京:地震出版社,1991.
- 3 冯德益,刘喜兰,蒋淳,郑熙铭.模糊分维及其在地震研究中的应用.国际地震动态,1991,(10):4~7.
- 4 张炜,阎立璋,申春生,魏家珍.水文地球化学地震前兆观测与新灵敏组分探索.地震,1987,(5):58.
- 5 张昭栋,马红斌,黄华明,董传富.用 Wiener 滤波方法处理聊古一井氮氩比观测资料.内陆地震,1995,9(1):35~42.
- 6 王伟,宋俊高,李文英.菏泽 5.9 级地震前地震活动异常图象.华北地震科学,1984,(4):35~39.
- 7 周翠英.菏泽 5.9 级地震前后鲁西豫北地区小震应力场变化.地震,1987,(3):12~19.
- 8 戴维乐.菏泽 5.9 级地震前小震波速比时空变化特征.华北地震科学,1991,(1):46~50.
- 9 Clunnery. The deformation of the ground around surface fault. B. S. S. A., 1961, 51(3).
- 10 罗灼礼.震源应力场、形变场和倾斜场.地震学报,1980,12(2):169~185.
- 11 马瑾,刘力强,马胜利,邓志辉.复杂构造应力扰动场与发震构造识别问题的研究.地震地质,1995,17(4):372~382.
- 12 大中康.在物理定律基础上建立预报理论方案(彭岩译).国际地震动态,1994(1):26~28.
- 13 贾占岭.菏泽地震前后的地壳垂直形变.地壳形变与地震,1984,(4):329~333.
- 14 周焕鹏.菏泽 5.9 级地震前的波速比异常.地震,1989,9(1):46~49.
- 15 苏鸾声,汪成民,赵宪超,黄保起.菏泽 5.9 级地震中地下水异常特征.地震,1984,4(3):10~15.

**THE DISCUSSION ON THE CHARACTERISTICS AND FORMING MECHANISM
OF THE SEISMIC PRECURSORS FROM SEISMIC SOURCE AND TECTONIC
FIELD IN THE WELL LIAOGU-1 BEFORE EARTHQUAKES**

GENG Jie ZHANG Zhaodong

(Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014)

Abstract

The characteristics of the seismic precursors of hydrogeochemical elements from seismic source and tectonic field in well Liaogu-1 before the Heze $M_S 5.9$ earthquake in 1983, etc. are discussed by analyzing the conditions of structural geology and hydrogeology of the well. Using the knowledges obtained from the theory on fracture displacement and experiment on rock mechanical characters, authors also have probed into the forming mechanism and prediction significance on the seismic precursors of the hydrogeochemical elements from seismic source and tectonic field. The results obtained from the paper enrich the knowledges of seismic precursors from seismic source and tectonic field and are of significance to earthquake prediction.

Key words Hydrogeochemical elements, Seismic precursor from seismic source, Seismic precursor from tectonic field, Forming mechanism, Well Liaogu-1