

油田地震信息 监测研究与应用

张德元 刘元生 李一兵 主编



地震出版社

《油田地震信息监测研究与应用》编辑委员会

主 编：张德元 刘元生 李一兵
编 委 会：张德元 刘元生 李一兵
 张绍衡 刘书文 沈传义
 王安滨 崔桂梅 邵永新

序

国内外大量的资料表明,地下流体是携带和传递地壳深部构造活动信息的最灵敏的载体,也是油气生产状态的最直接的指示剂。在开发油气资源过程中,研究油、气、水等地下流体在地层多孔介质中的运动学和动力学规律以增加油、气产量,既是石油部门努力的目标,也是地震部门为获取地壳深部地震前兆信息的有效途径。因此,深入研究油田开发中的油井动态信息对于油田生产和地震的监测预报均具有重要的意义。

利用油田开发中的地震信息进行地震的监测预报,在我国已有二十多年的历史。吴大铭先生最早报道了1964年台湾嘉义 $6\frac{3}{4}$ 级地震前的油井井口压力变化,引起了人们的注意。但对这一问题进行大规模的深入研究,则是近十余年来随着石油与地震两大部门的科技合作才兴起的,从此,我国油田地震信息的监测及研究进入了一个新的阶段,特别是利用油田的地震信息解决生产中的实际问题,有力地促进了这一学科的发展。

本文集是继《油井动态与地震关系研究》、《油田开发工程与地震减灾》等论著之后的又一新的研究成果,内容包括油井动态地震前兆、深井注水诱发地震、断层蠕滑与套管损坏及应力场等方面研究成果,并将在深层油气水动态地震监测方面取得丰富的震例资料附于书后。由于含油层埋藏较深、构造封闭条件好,是监测地震前后地壳应力应变的重要手段之一。深井注水诱发地震是目前地震科学的前沿课题之一,任845井出现的注水—地震—停(减)注水—停(减)震的规律,对认识地震发生机制及探讨控制地震能量释放的途径有重要理论和实际意义,对研究人工振动增油开辟了新的途径。油田注水引起的蠕滑与套管损坏研究,是油田生产中提出的应用性很强的课题。通过理论分析、现场试验,对大庆、吉林等油田出现的大量套管损坏,已进行了有效的控制,取得了巨大的经济效益。油田应力场的研究,可以为油气水的运移规律和油田开发井网布置和套管损坏原因提供重要依据,展示了广阔的应用前景。

本文集的出版对地震监测预报、地壳应力场和地震机制的研究有一定的理论意义,并对促进油田开发、保障油田正常生产有较强的实用价值。愿本书的出版对进一步研究和解决上述问题起到积极的作用。

葛治洲

1994年3月28日

目 录

第一部分 油田动态及地震前兆

大同 6.1 级地震地下流体前兆异常变化	刘书文 (1)
临盘油田地下水 SO_4^{2-} 地震前兆异常分析	沈传义 张兴乐 (6)
河北巨鹿 $M_s 5.3$ 级地震的分析预报	新同者 (11)
地震前油井动态异常变化分析	徐绍文 (16)
邢台 5.8 级地震前兆异常分析	刘书文 白长仲 (24)
中强地震前郑 1 废井自喷异常变化	吕永生 新同者 (29)

第二部分 油井动态异常机理及综合分析

强震前油井异常变化机理研究	刘元生 张昭栋 崔桂梅 (32)
华北地区油井动态观测并映震能力及其 异常特征的研究	李一兵 张德元 邵永新 (39)
油井地震前兆的形成机理	吴景云 韩秀兰 宋桂林 (46)
天津及邻近地区石油深井水文地质特征与映震能力的分析	李一兵 (52)
观测层深度、厚度不同的油井在中强地震前的异常表现	邵永新 李一兵 (61)
深井压裂过程中流量与压力差异性机制的初步分析	王安滨 (67)
鲁 23 井地震观测效能综合评价	张绍衡 尹志清 李继训 (71)

第三部分 注水诱发地震研究及油田震害

华北油田任 845 井注水诱发地震特征与地震机制探讨	张德元 (75)
华北油田诱发地震及综合对策研究	刘书文 新同者 白长仲 (81)
振动方法增油效果及研究	新同者 刘书文 (90)
任丘油田雾迷山油藏注水诱发地震分析	白长仲 (96)
渤海地震活动及其对胜利油田的震害影响	李继训 张绍衡 尹志清 (103)

第四部分 油田应力场及水力压裂

油田注水开发引起的套管损坏与地应力场变化	张德元 刘子晋 (109)
由震时油井水位变化反演唐山 7.8 级地震引起含水层 应力的调整变化	张昭栋 刘元生 黄华明 (120)
对水力压裂裂缝延伸的等效破裂源理论的研究	刘建中 刘元生 (126)

附录 部分石油深井震例资料汇编 (1987—1992 年)	(136)
-------------------------------------	-------

第一部分 油田动态及地震前兆

大同 6.1 级地震地下流体前兆异常变化

刘书文

(华北石油管理局)

摘 要

本文对 1989 年 10 月大同 6.1 级地震前,华北油田及邻近地区出现的油井动态、水井动态、水化学氡的动态等多项前兆异常进行了总结分析,并介绍了油田对这次地震的分析预报思路、做法及效果,比较正确地估计了油田地震形势,较好地预测了大同地震的时间、地点和强度三项指标,为油田地震预报进行了有益的尝试,并在油田安全生产中发挥了重要作用。对油田如何进一步做好地震监测预报工作进行了探讨。

1989 年 10 月 19 日山西大同发生震群活动,最大地震 6.1 级,造成较大灾害。震前一段时间,在震中附近及毗邻地区出现了多项显著异常变化,且大多数在震前已为我们发现,为油田及时进行地震监测预报发挥了重要作用。

一、华北油田油井异常变化

华北油田已投产多年,主体生产层段主要为蓟县系雾迷山组和奥陶系碳酸盐岩层,孔隙裂隙型储油方式。近几年来增产措施频繁,数据间断较多,为此只选取了在震前当年连续生产或很少间断的油井数据进行分析。分析发现 3 口油井异常,异常项目为产液量。异常井构造位于冀中拗陷、任西断裂东侧河北平原地震带。下面以井分述,异常井孔的构造位置见图 1。

1. 任 342 井异常变化

该井于 1988 年 9 月完井,10 月投产,井深 3259m,泵抽生产,产油层段为井底裸眼部分。1989 年上半年产液量稳定,7、8 月份略增,9 月份大幅度增加,10 月份达最大值,其后 10 多天发生大同地震,最大增液量为 135t/d,相对变化量为 88% (图 2)。

2. 任 821 井异常变化

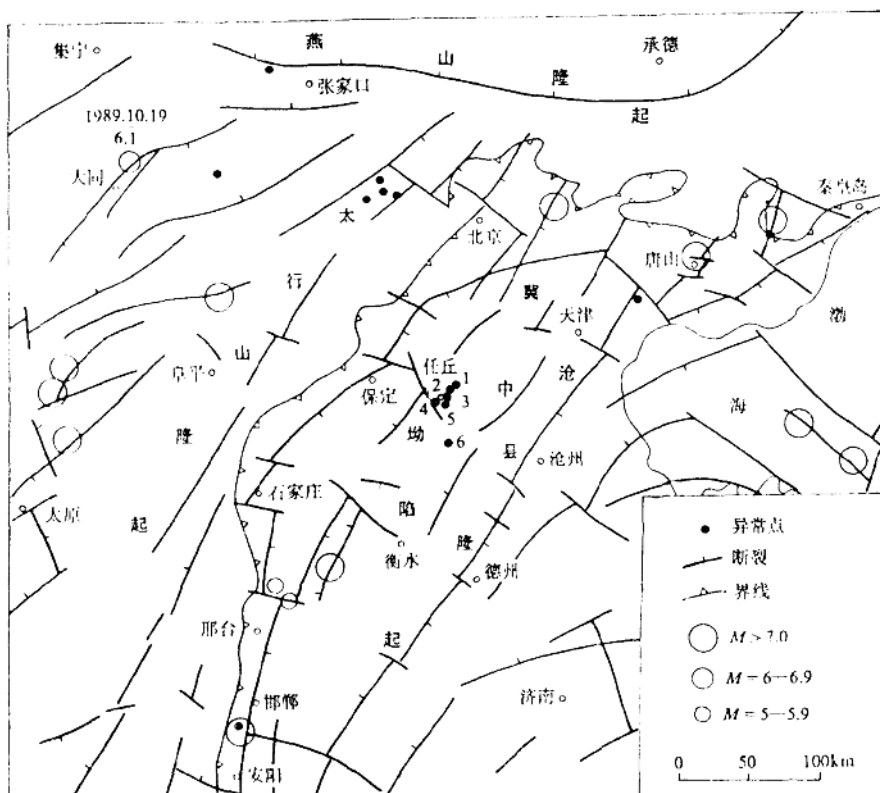


图1 大同地震地下流体前兆异常点构造位置示意图

1.任342井;2.任821井;3.任842井;4.任7-3井;5.研热1井;6.马17井

该井于1983年9月完井,1984年投产,并深3850m,地震前后采用泵抽生产,产油层段为井底裸眼部分。1989年初产液量比较稳定,4月底出现正异常变化,6月份达最大值,其后逐渐恢复,恢复过程中发生大同地震。最大增液量为17t/d,相对变化量为24%(图2)。

3. 任842井异常变化

该井于1983年1月完井,1983年10月投产,并深4130m,地震前后采用泵抽生产,产油层段为井底裸眼部分。1989年初产液量稳定,5月份出现异常变化,9月份达最大值,其后恢复,发生大同地震。最大增液量18t/d,相对变化量为60%(图2)。

二、任丘附近水井异常变化

大同地震前,已掌握数据的水井有3口井,有的井孔曾在过去较好地反映过河北附近的地震活动,在大同地震前都出现了显著异常变化,异常项目有流量、水位和冒沙等三项。异常井孔构造位置见图1。

1. 任7-3井流量异常变化

任 7-3 井于 1977 年 9 月投产,作为生活供水井,长期泵抽连续生产,井深 537.5m,产水层段 505.5—537.5m,岩性为上第三系砂岩,为孔隙承压水,日产水量 1000—1500m³,曾经较好地反映过邢台 1985 年 5.3 级地震,观测精度为 0.6m³/h。

该井流量从 1988 年至 1989 年 5 月比较稳定,于 1989 年 6 月开始出现负异常变化,并逐渐增大,变化较大的时间在 8—10 月,最大(低)点在 8 月底出现,距大同地震约 2 个月,最大变化量为 -5.4m³/h,相对变化幅度达 10%(图 3)。

2. 任丘研热 1 井出沙异常变化

任丘研热 1 井于 1986 年投产,作为生活用热水供水井,泵抽生产,井深 800m,产水层段 770—800m,岩性为第三系砂岩,日产水量 1000m³ 左右,为孔隙型承压水。

该井于 1989 年 9 月 2 日突然随水出沙,为避免严重影响水质,管理人员从井口放喷流沙,日出沙量 30kg 左右,沙粒以中细沙为主,连续出沙 2 天,其后水质混浊约 1 周时间。此异常后约 40 天发生大同地震。

3. 马 17 井水位异常变化

马 17 井于 1981 年投入地震前兆观测,采用动水位观测方式,井深 2694.3m,观测层段 2571.6—2694.3m,岩性为蓟县系雾迷山组白云岩,为岩溶裂隙承压水,观测精度毫米级,曾经多次较好地反映过邢台老震区的地震活动。

该井在 1988 年大致呈冬低夏高的弧形年动态变化,从 1989 年 5 月起出现负异常变化,8 月份达最大(低)值,其后约 2 个月发生大同地震(图 3)。最大变化量为 -0.040m,相对变化幅度达 8%。

上述异常幅度虽小,但远高于观测精度,是观测精度的几至几十倍;虽地点、层位不同但均表现为负异常(出沙为负异常表现之一),异常时间均出现在震前半年之内。

根据上述资料并参考河北地区的水氢多点异常进行分析,把所有异常的起始时间、较大变化出现时间和异常最大(高或低点)值时间汇总成随时间的变化图,则明显反映出不同阶段的异常变化特征(图 4)。其中初期异常点出现作为中期异常的标志,大量异常出现作为中短期异常的标志,异常数减少和最大异常值出现作为短期异常的标志,这种相对数量的变化可作为简便易行的中短期地震预测依据之一(图 4)。

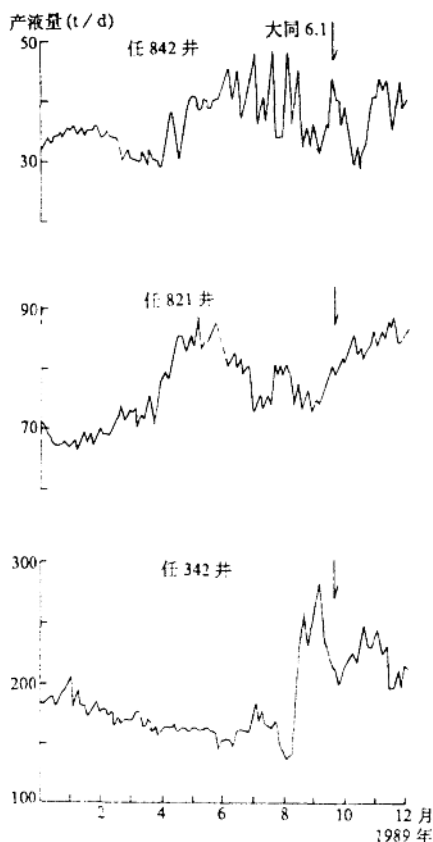


图 2 任丘油井异常与大同地震关系图

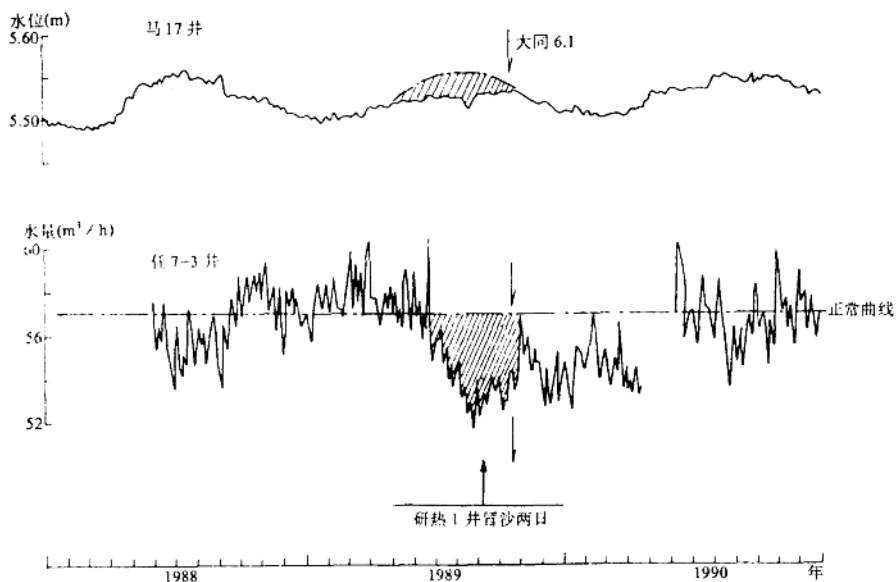


图 3 任丘油田水井异常变化与大同地震关系图

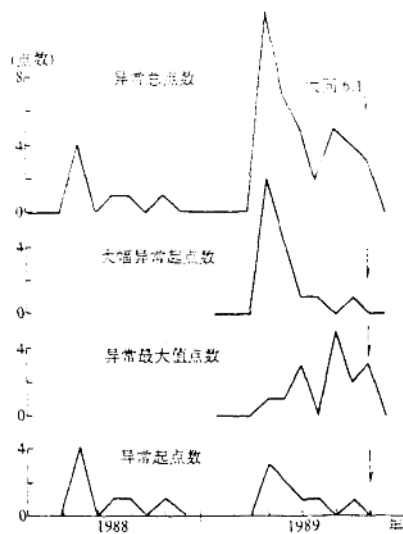


图 4 前兆异常点数变化与大同地震关系图

三、大同地震预测及讨论

综上所述,大同地震的前兆异常显著,资料内容丰富,变化形式多样,出现时间较长,故

震前能为我们发现，给地震分析预报提供了较好的依据。

1. 地震时间预测

根据多项异常、大幅度异常段和异常最大值相继出现的事实认为，短期异常标志已经明朗，因而提出近期有较大地震发生的可能性。

2. 地震地点预测

首先鉴于过去任 7-3 井和马 17 井正异常均反映的沧县隆起带及河北平原地震带的地震活动，而这次负异常显示的地震危险性不在此带；其次从水化异常的大幅度正异常集中在张家口地区，而外围异常点数少且均为负异常，因此提出张家口附近地区是地震危险区。

3. 地震强度预测

从这次异常的主要特征来看，异常幅度较大，异常时间较长（有的长达 1 年以上），异常面较广（达 20 余万平方公里），综合分析认为地震强度可能达到 6 级左右。据此，我们在震前作出预测，即华北油田地区近期无较大地震发生，较远的张家口附近地区近期可能发生较大地震。事实上大同震中就位于张家口西附近。

4. 讨论

油田地震工作人员少、面窄、资料少，不利于深入开展地震预报及研究，有必要加强横向联系，及时沟通前兆信息，采用现代数据分析方法，不断提高油田地震工作水平，为油田生产提供准确的地震分析预报信息。

临盘油田地下水 SO_4^{2-} 地震前兆异常分析

沈传义 张兴乐

(胜利石油管理局临盘采油厂)

摘 要

通过对临盘油田地下水 SO_4^{2-} 的跟踪观测,发现其具有较好的映震能力。对山西地震带的大同阳原地震和忻州地震、河北平原地震带的唐山地震和丰润地震均有明显的异常对应。 SO_4^{2-} 观测数据处理后,当含量超过 $\pm S$ 时,作为区内地震前兆指标具有一定的实际意义。

一、基本概况

临盘油田位于华北台坳济阳坳断的南端,沧东断裂、聊城-兰考断裂带、广饶-齐河断裂带及次一级的北东东向的临邑断裂控制着临盘油田的构造格局(图1),断裂主要活动期为渐新世—始新世和中新世—上新世,根据二维地震剖面显示,该断裂一直延伸至第三系明化镇组上段(图2)。

临盘油田开采地下水主要取之于上第三系明化镇组上段的孔隙水,含水层为粉细砂,底部含有石膏晶片,为氯化物重碳酸硫酸型水。三口地震观测井盘水9、盘水11和临水5位于临邑大断裂带上,是油田主要生活水源并且连续生产(表1)。自1979年开始,对这三口井进行水化组分观测研究,发现 SO_4^{2-} 异常变化与地震有比较明显的对应关系,经数理统计分析,取得了地震前兆异常指标(表2),即当观测井 SO_4^{2-} 出现异常,特别是三口井发生同步异常时,邻近地区在近期内有地震发生的可能,尤以盘水11井反映明显,这一规律在近几年邻近地区发生的几次地震均有较好的反映(表3)(图3)。

表1 观测井一览表

井孔	井孔深度(m)	套 管		含 水 层			工 作 制 度
		深度(m)	直径(mm)	埋 深(m)	岩 性	时 代	
盘水11	410.58	392.94	139	304.75—371.75	细粉砂岩	上第三纪	连续生产井
临水5	457.96	449.64	139	332.0—430.5	细粉砂岩	上第三纪	连续生产井
盘水9	480	389.77	139	225.0—369.15	细粉砂岩	上第三纪	连续生产井

表 2

SO₄²⁻ 离子含量背景浓度值数据

井 孔	平 均 值 (mg/L)	标 准 离 差 S (mg/L)	背景值(mg/L)	
			上限	下限
盘水 11	294	21	315	273
临水 5	301	22	323	279
盘水 9	323	24	345	291

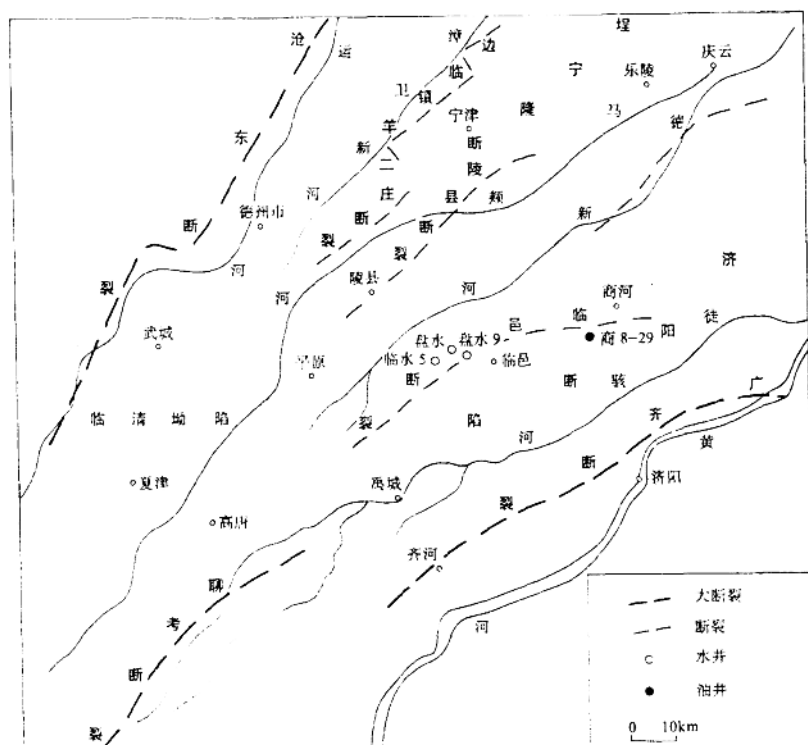


图 1 临盘油田水源井动态地震监测井孔构造位置图

二、几点认识

(1) 地震前后, 由于地下深部应力的改变, 导致了氧化-还原环境的变化和水动力条件的变化, 进而影响脱硫酸作用和水文地球化学效应, 致使临盘油田地下水 SO₄²⁻ 在确定背景值下, 可以找出一定的地震前兆异常规律, 即当地下水 SO₄²⁻ 含量超过背景值 ($\pm S$) 时为地震前兆。

(2) 临盘油田三口观测井, 位于多条深大断裂交汇的特定构造部位, 地下应力的变化信息

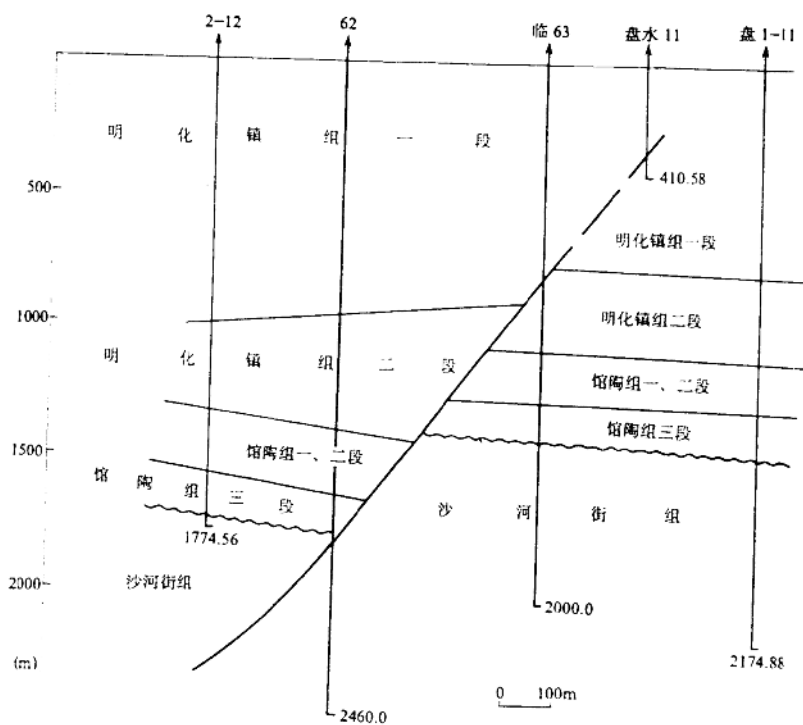


图 2 盘水 11 井剖面(南北向)示意图
(根据 0272.10 地震覆盖剖面)

表 3

地震与前兆异常

地 震			前 兆 异 常			
震中位置	发震时间	震级 (M_L)	观察井	异常发生时间	最大异常值 (mg/L)	震前异常出现时间 (d)
河北 唐山	1989.6.18	4.3	盘水 9	1989.6.21	294	
			盘水 11	1989.6.15	258	21
			临水 5			
	1991.5.29	4.7	盘水 9	1991.5.9	292	20
	1991.5.30	5.0	盘水 11	1991.5.10	268	19
	1991.6.9	3.0	临水 5	1991.5.27	251	2

续表

地 震			前 兆 异 常			
震中位置	发震时间	震级 (M_t)	观察井	异常发生时间	最大异常值 (mg/L)	震前异常出现时间 (d)
山西 大同 阳原	1989.10.18	5.7	盘水 9	1989.10.10	253	8
	1989.10.19	6.1	盘水 11	1989.10.16	252	2
	1989.10.23	5.2	临水 5			
山西 忻州	1991.1.29	5.2	盘水 9	1991.1.14	295	15
			盘水 11	1991.1.10	117	19
			临水 5	1991.1.25	242	4
河北 丰润	1990.7.23	4.5	盘水 9	1990.6.25	283	28
			盘水 11	1990.6.23	270	30
			临水 5	1990.6.25	276	28

能够迅速传递到达,是地震活动反应的灵敏点,当三口井的 SO_4^{2-} 出现同步异常时,地震带内就有地震发生的可能。

(3) SO_4^{2-} 前兆异常的出现,总是表现为短临异常,一般异常出现在震前的 20 天左右,呈现异常产生、突变、持续、回升至恢复 5 个阶段,总的持续时间长短、异常幅度大小、异常性质与地震震级、震中距、震源深度、地震机理有关,其相关性有待进一步研究探讨。

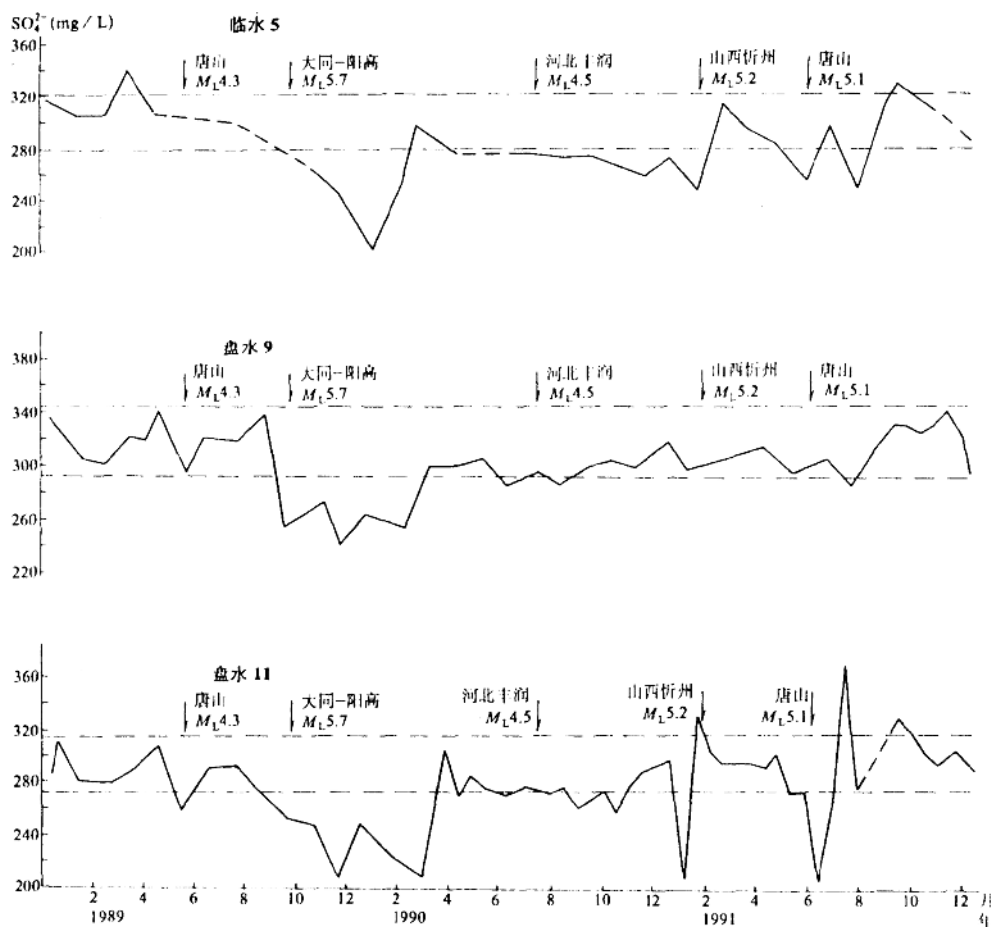


图 3 临水 5、盘水 9、盘水 11 井 SO_4^{2-} 离子含量变化曲线

河北巨鹿 $M_s5.3$ 级地震的分析预报

靳同者

(华北石油管理局)

摘 要

华北油田地震台网在1985年11月30日河北省巨鹿发生 $M_s5.3$ 级地震前进行了较好的分析预报,并及时汇报给上级主管部门,得到了领导好评。本文介绍了本次地震预报的基本情况,又总结补充了油水井等震后发现的前兆异常资料。对油田台网如何进行地震预报谈了几点认识,可供今后油田地震预报工作中借鉴。

华北油田地震台网在进行地震监测的同时,注意地震前兆数据的观测、收集及信息交流,摸索地震活动规律,探索地震预报方法,进行地震研究。1985年11月30日河北省巨鹿地震前,我台网向本油田管理局提交了两次书面预报意见^①。事实证明,这次地震预报是比较准确的。

一、地震预报经过

1985年9月初至11月中旬期间,先后出现了任7-3井流量增大,本台网地应力减小,马17井水位上升,永清、矾山水氢的上升及万全水氢的突降等多种地震前兆异常(图1)。觉察到可能会有新的震情,于是,进行了分析研究,于1985年11月4日提出了地震预报意见:“11月中旬至12月初,沧县隆起带周围可能发生5—6级地震”。其后,11月21日北京门头沟发生4.6级地震。我们当即根据本次异常特征进行了分析,于11月22再次向地震局作了地震预报,提出:“不排除近期再次发生较大地震的可能性”(见附录1、附录2)。时隔8天后,11月30日22点39分在沧县隆起带南端的巨鹿发生了 $M_s5.3$ 级地震(国家地震局地球所定 $M_L5.9$ 级)。

二、地震预报的主要依据和分析

1. 中短期前兆数据异常变化

9月初本台网地应力成直线下降(图2);9月9日任7-3井流量开始增大,至9月21日增加流量1.0L/s,其后基本保持在此水平,在此以前任7-3井流量变化较好地对应了滦县1985年4月22日 $M_L5.0$ 级地震(图3);10月12日马17井水位突升110mm之多(图4);永清水

① 刘书文等,沧县隆起地震预报,华北石油管理局,1985。

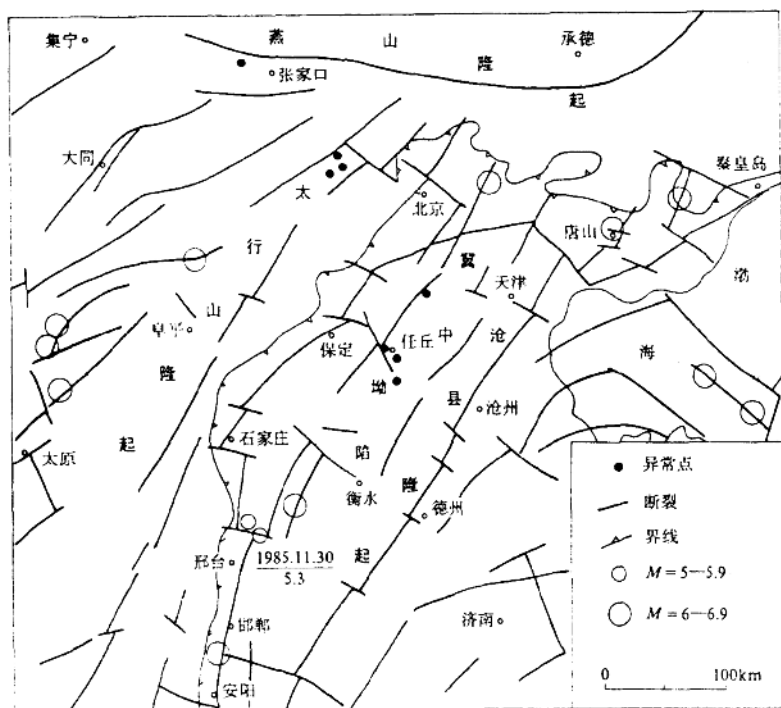


图1 巨鹿 $M_{5.3}$ 级地震震中位置及异常点分布图

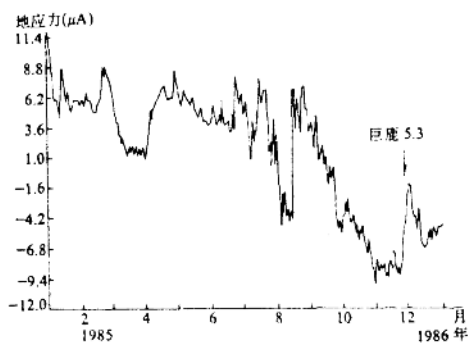


图2 1985年华北油田地震台网地应力变化曲线

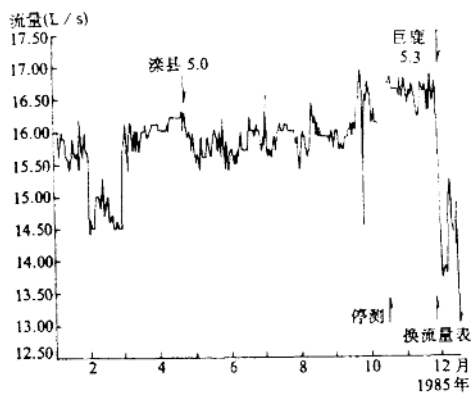


图3 1985年华北油田任7-3井流量变化曲线

氢、矾山水氢、万全水氢都有异常(图5);所有这些变化引起我们高度的注意,密切观察异常变化。

2. 短临期异常变化

马17井水位在11月12日大幅度上升,且从井管中溢出,水位突升超过400mm之多。

本台网地应力、任7-3井流量、永清、矾山、万全水氢等异常继续存在,因此认为较大地震

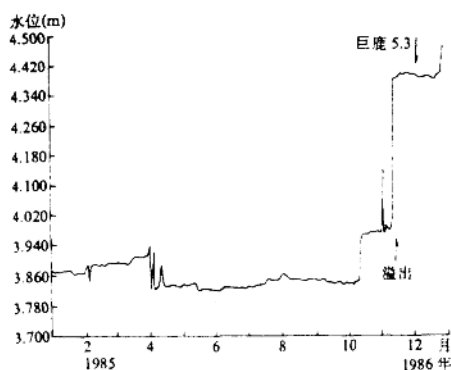


图4 1985年马17井水位变化曲线

2) 发震强度及地点的预测

马17井水位异常与1981年11月9日邢台隆尧5.8级地震异常非常相似，都有两次大的突升，最后都从井管中溢出，另外任7-3井流量本次异常幅度比今年4月份 M_L 5.0级地震的异常幅度大得多，且异常持续时间较长，因此认为发震强度与隆尧地震相接近，强度为 M_S 5—6级。我们考虑异常分布多在沧县隆起带，且马17井水位异常多次较好地反映了沧县隆起带的地震活动，本次异常特征又与1981年邢台隆尧地震异常相似。另外联系到万全、矾山水氡异常现象及观测点异常的有限性、地质构造的复杂性，提出了发震地点范围在“沧县隆起带周围”。

经过分析，于11月14日作出了“11月中旬至12月初，在沧县隆起带周围可能发生5—6级地震”的预报意见，向地震局提交了书面报告。

预报意见发出后7天，11月21日在北京门头沟发生了 M_L 4.6级地震。我们当即进行了分析，认为本次异常所反映的地震能量较大，波及的范围也较大，此期间可能会发生一些4级左右或更小的地震，但主震尚未发生。于是，在11月22日地震简报第19期上再次作出扼要的地震预报意见，提出：“不排除近期再次发生较大地震的可能性”。

预报意见发出后8天，11月30日22点39分在沧县隆起带南端的巨鹿发生了 M_S 5.3级地震。据任7-3井流量减小及地应力回升的变化和地震释放的能量提出：“这次地震发生在沧

将要发生。我们从本次异常变化情况，就可能对发生地震的时间、强度、地点三要素进行如下观测：

1) 发震时间的预测

马17井水位11月12日突升且溢出，其后幅度有增无减，这反映了地震能量积累到了最大阶段，一触即发。同时考虑到天文周期等因素，我们认为11月底发震的可能性最大，其前后可能发生一些地震，但震级要比主震小得多。另外从过去实践经验来看，这些观测项目多以短期异常反映地震，因此，提出时间预测为“11月中旬至12月初”。

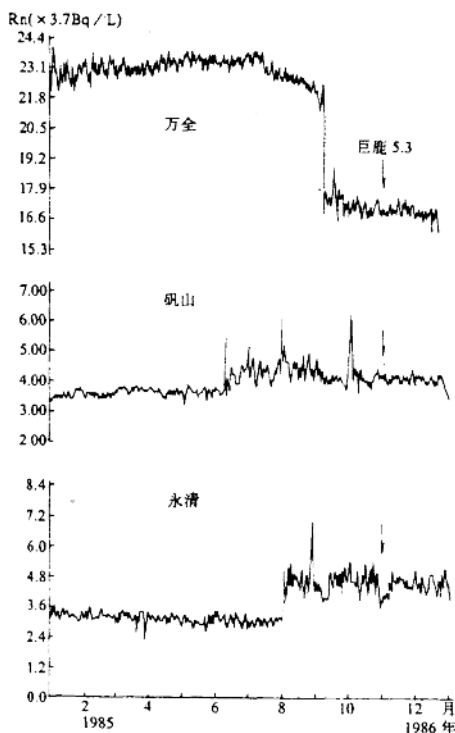


图5 1985年永清、矾山、万全水氡变化曲线