

张德元 王优龙 主编

油田开发与地震减灾

石油工业出版社

《油田开发与地震减灾》编委会

编委会成员： 石宝珩 王佑龙 张德元 林志芳
 刘子晋 刘元生 王六桥 赵根模
 李一兵 吕德本

序

原石油工业部与国家地震局在油田开发工程与地壳动态领域内的长期协作有一定实际意义。由中国石油天然气总公司抗震办公室领导编辑的《油田开发工程与地震减灾》一书就反映了两个单位这种协作的部分成果。

“油田开发工程与地震减灾”是近十多年来在我国油气区产生的一个新的实际问题，其内容包括：油井注水引起套管损坏、油田开发中微震监测、深井注水诱发地震的可能性和油田地下应力场动态等方面，它是石油工程学和地震学二者之间的一条边界领域。由于含油层埋藏深、构造封闭条件好，油井动态是引起地壳应力、应变灵敏的因素之一，油田开发注水诱发地震的可能性是在特定的地质构造和开发条件下产生的，我国部分地震研究人员已注意到这一现象。注水开发引起的另一类地质事件是由于高压注水，断层面或岩层抗剪强度降低，出现蠕滑，导致大量套管损坏。这些方面的研究对探讨石油工程和地震发生机制、地壳破裂过程等研究工作有一定参考价值。对减少油田套管损坏有实用价值。

我希望本书的出版能够对油田开发中这一新的问题产生积极的作用。

李士珍
1990.4.27

PREFACE

It is of great significance for the Original Oil Industrial Ministry and State Seismological Bureau to cooperate in the area of the exploitation engineering of oil field and the Seismic hazard reduction for long term. The special issue "Exploitation Engineering of Oil Field and Seismic Hazard Reduction" edited by Department of Scientific-Technical Exploitation and Earthquake-Resistance Office of the General Oil-Gas Corporation of China has reflected the partial results of cooperation of above two organizations.

The relation between the exploitation engineering of oil field and the Seismic hazard reduction is a new problem in the oil-gas region of China in recent 10 years, it is a frontier scientific problem between the oil engineering and Seismology. Its contents include: the casing damage caused by water injection, the microseismic monitoring of oil exploitation, the induced earthquake by water injection in deep wells and the dynamic variations of the stress field in oil field etc., The deep burial of oil bearing formation, the well structural trap conditions and the dynamic state of oil well are the sensitive factors for the crustal stress-strain variation. The earthquake induced by water injection only may occur in the specified geological tectonics and exploitational conditions. This phenomenon was attended by part seismologists of China. Another geological event induced by water injection is a lot of casing damages caused by the rock creeping and slipping under high pressure water injection, the shear-resisting strength decrease of the fault plane or stratum. These results may provide referential significance to studying the oil engineering and the earthquake genesis as well as the process of crustal rupture, and have the practical worth to decrease the casing damage in oil field.

It is considered that this special issue is helpful to solving the abovementioned new problem in oil exploitation.

Weng Wenbo
April 27, 1990

前 言

本世纪六十一七十年代,我国东部地区相继发现了大庆、胜利等一系列油田,并陆续投入开发。此时正值我国大陆地震活动的第四个高潮期,东部油田及其附近地区发生了一系列的大地震。那些耸立于东部大平原的钻机,不仅从地下吸取了珍贵的油气资源,而且也携带了构造应力场的信息,这些信息由于来自深部,可信度更高。广大石油和地震工作者投身到这具有深远意义的探索之中,到80年代,随着石油开发的迅速发展,油田开发中又出现了新的问题,如注水诱发地震问题,套管损坏问题等。石油部门和地震部门的科技工作者再次合作,共同为石油安全生产、持续稳产而努力。

勤耕结硕果。二十多年来,石油和地震科技工作者在地震预报和减轻油田开发次生灾害方面发挥了重要作用,取得了显著的社会效益和经济效益。与此同时,理论研究也取得了显著进步。

为了系统地总结油田开发工程与地震减灾研究方面的科研成果,推广应用,1989年11月,中国石油天然气总公司决定编辑出版《油田开发与地震减灾》一书。这一工作得到了石油、地震两个部门科技工作者的响应和支持,仅几个月时间就收到了近80篇文章。

为搞好该书的审编工作,由石油、地震两部门的专家、学者以及第一线工作的科技工作者组成了编委会,并委托大港石油管理局、天津地震局和江苏地震局组成编辑组,经两个多月的努力工作,于1990年4月完成了编辑工作,同时在北京召开了编委会议,审查通过了书稿与编辑工作。

经近二十年的研究和探索,石油开发工程与地震减灾研究已初步形成自己的学科体系,其主要包括油田应力场、油气水动态的地震监测、注水诱发地震、油田开发与油水井套管损坏等。本书是第一部反映该学科成果的一部著作,也是一部比较全面和系统反应该学科成果和水平的一部著作。

本书虽是一本论文集,但为便于读者阅读,编辑时注意了系统性,并按该学科的几大问题分类编目,另外还增加油田开发与地震减灾有关的其他问题。

本书的编辑出版是在老一辈科学家以及石油、地震部门领导的关心下完成的。在编辑出版中,得到大港石油管理局、天津市地震局、江苏省地震局、石油出版社等单位的大力支持,参加本书编写工作的还有王公学、过娟秀、王小鸿等同志,在此谨向他们表示衷心的感谢。

谨以本书献给“国际减灾十年”,并迎接地震活动的第五个高潮期。本书若能在减轻地震灾害、减少油田开发次生灾害方面,使人们得到些裨益,将是我们编辑者的最大乐趣。

石宝珩

目 录

回顾与展望.....	王优龙 张德元 (1)
一、油井动态与地震前兆	(7)
渤海湾地区油、水井异常与地震的关系.....	
..... 吴振林 佟武 刘安健 邹泉生 张德元 (9)	
唐山地震前后渤海湾地区油井动态的异常变化.....	张德元 赵根模 (18)
强震前油井动态异常特征的初步分析.....	
..... 刘元生 王六桥 张德元 邹泉生 佟武 (26)	
胜利油田油井动态异常与地震关系的初步研究.....	王万青 朱襄玉 (34)
华北盆地北部深层水动力特征与地震的关系.....	
..... 张德元 张伯骅 李一兵 (48)	
利用胜利油田油井动态资料监测地震的几点认识.....	张绍衡 李继训 (55)
海城、唐山地震前后油井生产动态的变化	吴起林 刘安健 (63)
1984年辽宁省营口3.9级地震兴隆台油田的油水井动态异常.....	张金栋 (67)
降雨对井水位的“效应”	邹泉生 陈正品 靖继才 (69)
石油深井水位动态分析.....	刘喜兰 陈荣昌 郑熙铭 (75)
塘沽地区石油井地震中短期前兆异常的统计—模糊识别.....	
..... 王焕萍 冯德益 钱立信 刘乃生 (79)	
尚店—平方王油田油井压力在唐山、宁河地震前的异常反应.....	徐绍文 (88)
马17井水位动态特征及其对油气水动态监测的作用	刘书文 (90)
塘沽地区石油深井油气动态异常与地震关系的分析.....	
..... 杨国军 钱立信 王安滨 (96)	
中强地震前油井动态异常特征.....	张德元 刘元生 崔桂梅 (101)
卢龙地震前后大港油田及其附近地区部分油井油气异常动态分析.....	
..... 刘晓年 杨国军 (105)	
王 ₃ 、王 ₄ 井的水化学组份变化与地震活动	李君英 郑熙铭 (110)
胜利油田水化学动态监测地震的效果分析.....	邹泉生 尤玲 (115)
临盘水井硫酸根离子的地震前兆.....	沈传义 (121)
地震前油、水井自溢异常现象及其机制.....	王六桥 李善因 (125)
压裂试验的地下水动态观测及其意义.....	鱼金子 车用太 (133)
地震前油、水井喷涌异常成因机理扩展的“DSF”理论.....	王六桥 (139)
大地震前后油井压力异常机制和前兆意义.....	张德元 赵根模 (148)
地震前地下水位的短期及临震变化异常	汪成民 张洪波 (153)
二、深井注水诱发地震	(163)
任丘油田注水诱发地震初步研究.....	
..... 刁桂苓 张德元 赵根模 (165)	

任丘油田地质构造与注水诱发地震·····	张德元 赵根模 (171)
任丘油田开发引起的地震活动及危险性分析·····	刘一鸣 和景昊 吴宣 齐胜福 顾玲 (177)
注水诱发地震的尾波衰减和震源物理特征·····	赵根模 杨港生 (182)
胜利油田角07井钻井漏水(泥浆)诱发地震的讨论·····	张绍衡 李继训 (190)
任丘油田诱发性小震群与周围中强震的关系·····	和景昊 李自强 (193)
任845井注水诱发地震的频度分布特征·····	刘书文 (197)
三、油田开发注水与套管损坏 ·····	(201)
吉林扶余油田套管变形原因分析·····	刘春鸿 李冠儒 (203)
吉林油田套管变形机理分析·····	刘建中 刘玉琢 高强 张彦山 李自强 张雪 (210)
岩层滑动和轴向拉伸是扶余油田套管变形的一种可能机制·····	李兴才 杨若义 (217)
注水开发砂岩油田几个合理界限的确定·····	刘子晋 (223)
大庆油田套损防护工程及其效益分析·····	曾树堂 (233)
膨润土夹层及泥页岩与油水井套管损坏·····	刘子晋 (239)
油田断层复活地裂与注水关系探讨·····	刘子晋 (243)
港西油田套管损坏原因分析·····	王振胜 赵荣信 (248)
中原油田盐层的蠕变特性及其对套管的影响·····	黄俊明 (255)
天然地震与油田套管损坏关系的探讨·····	刘子晋 (264)
高压注水引起的地震与非震滑动·····	赵根模 张德元 (268)
国外油井套管损坏的地质因素研究综述·····	赵有芳 (275)
四、油田应力场及形变 ·····	(291)
水力压裂法测定地下深部应力·····	李自强 曹新玲 陈家庚 (293)
水压致裂、孔壁崩落应力测量及其在油气田开发中的应用·····	丁健民 (304)
大庆油田地应力的测定和应用·····	刘子晋 (315)
用钻孔崩落特征研究四川盆地应力场·····	许忠淮 高阿甲 陈家庚 (322)
试论大庆油田高压注水所起的作用·····	李自强 高阿甲 刘建中 (330)
利用地应力提高油藏整体压裂开发效益的设想·····	王世顺 (336)
大庆油田地面形变与抽注水的关系·····	刘子晋 (343)
塘沽地区石油井井管上升现象的分析·····	刘乃生 钱余 (351)
五、油田开发工程与地震减灾的其它问题 ·····	(357)
港西油田注水开发引起地面喷砂现象的研究·····	王振胜 (359)
天津板桥农场机井自喷原因分析·····	张德元 李一兵 王希朝 (365)
油田注水和采油压力变化对承压水位的影响·····	张昭栋 刘元生 丁仁杰 (369)
油田注水和孔隙压力的变化·····	张昭栋 刘元生 (375)
唐山大地震前后的应力变化·····	李自强 刘建中 曹新玲 (380)
区域活动断裂带对地震地球化学灵敏观测点的控制作用初探·····	唐仲兴 (387)
沧东断裂构造特征及其对油井动态的影响·····	张德元 赵根模 (394)

CONTENTS

Review and Prospect.....	Wang Youlong zhang Deyuan (1)
一、 DYNAMIC VARIATIONS IN OIL WELLS AND SEISMIC PRECURSOR	(7)
1. Anomalies in Oil and Water Well Performances observation in Bohai Bay and Earthquakes.....	Wu Zhenglin Tong Wu Liu Anjian Zou Quansheng Zhang Deyuan (9)
2. Anomalous Variations in Oil Wells Distributed in the Bohai Bay Oil Field Before and After the 1976 Tangshan Earthquake	Zhang Deyuan Zhao Genmo (18)
3. A Preliminary Analysis of Anomalous Characters of Oil Wells Before Strong Earthquake.....	 Liu Yuansheng Wang Liuqiao Zhang Deyuan Zou Quansheng Tong Wu (26)
4. Preliminary Atudy of the Anomalies of Oil Wells in Shengli Oil Field and Earthquakes.....	Wang Wanqing (34)
5. Studies of the Relation Between the Hydrodynamic Characteristics of the Plutonic Water and Earthquakes in the Northern Region of the North China Basin.....	Zhang Deyuan Zhang Bohua Li Yibin (48)
6. Some Recognitions on Earthquake Monitoring Data from Oil Wells in Shengli Oil Field	 Zhang Shaoheng Li Jixun (55)
7. Anomalous Variations in Production Oil Wells Before and After the Haicheng and Tangshan Earthquake	Wu Qilin Liu Anjian (63)
8. The Anomaly of Oil and Water Wells in Xinglongtan Oil Field in the 1984 Yingkou Earthquake of $M=3.9$	Zhang Jindong (67)
9. The "Effect" of Rainfall on the Water Level in A Well	Zou Quansheng Chen Zhengpin Jen Jicai (69)
10. Anomalous Analysis of the Water Level in the Deep Oil Wells	Liu Xilan Chen Rongchang Zhen Ximing (75)
11. Statistico-Fuzzy Recognition of Medium-Short-Term Earthquake Precursory Anomalous of Oil Well in Tanggu Region	Wang Huanping Feng Deyi Qian Lixin Liu Naisheng (79)
12. Anomalies of the Pressure of Oil Wells in Shangdiao-Pingfanwang Oil Field Before the Tangshan-Ninghe Earthquake	

.....	Xu Shaoweng (88)
13. Effects of Dynamic Characters of Water Level in M17 Well on Monitoring of Oil, Gas and Water	
.....	Liu Shuwen (90)
14. Earthquakes and Anomalous Variations of Oil and Gas of the Deep Oil Wells	
.....	Yang Guojun Qian Lixin Wang Anbi (96)
15. Anomalous Characteristics of Oil Wells Before the Moderate-Stro- ng Earthquakes	
.....	Zhang Deyuan Liu Yuansheng (101)
16. Dynamic Anomaleis of Oil, Gas and Water in Some Oil Wells in Da- gang Oil Field and Its Adjacent Areas Before and After the Luolo- ng Earthquake	
.....	Liu Xiaonian Yang Guojun (105)
17. Study of the Relation Between the Seismicities and Hydrochemical Composition Variations in Wang 3 and Wang 4 Well of Baodi	
.....	Li Junyin Zhen Ximing (110)
18. Earthquakes and the Hydrochemical Composition Variations in Sh- engli Oil Field	
.....	Zou Quansheng You Ling (115)
19. Seismic Precursor of SO_4^{2-} Ion Content in the Linpan Wall	
.....	Shen Chuanyi (121)
20. Gushing anomalies in Oil and Water Wells and Its Mechanism Be- fore Earthquakes	
.....	Wang Liugiao Li Shanyin (125)
21. Observation of Groundwater under Hydrofracturing Experiment in Wells and Its Significance	
.....	Yu Jinzi Che Yongtai (133)
22. Developmental "DSF" Theory of Formation Mechanism of Gush- ing Anomaly in Oil and Water Wells Before Earthquakes	
.....	Wang Liugiao (139)
23. Precursory Significance of Pressure Anomalies in Oil Wells Before and After Large Earthquake and Its Mechanism	
.....	Zhang Deyuan Zhao Genmo (148)
24. Short term and Impending Anomalies of Water Level Before Earthquakes	
.....	Wang Chengmin (153)
二、INDUCED EARTHQUAKE BY WATER INJECTION IN DEEP WELLS.....	(163)
1. Preliminary Study on Induced Earthquake by Water Injection in Renqin Oil Field	

-Diao Guiling Zhang Deyuan Zhao Genmo (165)
2. The Geological Structure and the Induced Earthquake by Water Injection in Renqin Oil Field.....
.....Zhang Deyuan Zhao Genmo (171)
3. The Risk Analysis and Seismicities by the Exploitation of Renqin Oil Field
.....Liu Yiming He Jinhao Wu Xuan Qi Shengfu Guling (177)
4. Physical Features of Seismic Source and Wave Coda Attenuation of Induced Earthquake by Water Injection
.....Zhao Genmo Yang Gangsheng (182)
5. Discussion on Induced Earthquakes by Leaking Water or Mud in Jiao 7 Oil Well , Shengli Oil field
.....Zhang Shaoheng Li Jixun (190)
6. On the Relation Between the Induced Small Swarm in Renqiu Oil Field and the Moderate-Strong Earthquakes in Its Adjacent Areas
.....He Jinhao Li Ziqiang (193)
7. The Characteristics of Frequency Distribution of Induced Earthquakes by Water Injection in Ren-845 Well.....
.....Liu Shuwen (197)

三、EXPLOITATION OF OIL FIELD BY WATER INJECTION AND CASING DAMAGE

- (201)
1. Causative Analysis on the Deformation of Cased Holes in Fuyu Oil Field.....
.....Liu Chunhong Li Guanru (203)
2. Mechanism Analysis of Casing Deformation in Jilin Oil Field.....
.....Liu Jianzhong Liu Yuzhuo Gao Qiang Zhang Yanshan (210)
3. Axial Stretching and Slip Along Bedding As A Possible Mechanism of Casing Deformation in Fuya Oil Field
.....Li Xingcai Yang Ruoyi (217)
4. Definition of Some Suitable Boundary Surface for Exploitation of the Sandstone Oil Field by Water Injection.....
.....Liu Zijin (223)
5. Casing Damage and Prevention Engineering in Daqing Oil Field and Its Efficacy.....
.....Zeng Shutang (233)
6. Bentonite Band, Clay-Shale and Casing Damage in Oil and Water Wells
.....Liu Zijin (239)
7. Study of the Relation Between the Fault Activities, Ground Fissure of Oil Field and Water Injection

.....	Liu Zijin (243)
8. Causes of Casing Damage in Western Dagong Oil Field	 Wang Zhensheng Zhao Rongxin (248)
9. Creep Characters of Salt Layer in Zhongyuan Oil Field and Its Effect on Casing	 Huang Junming (255)
10. An Approach to the Casing Damage and Earthquake	 Liu Zijin (264)
11. Nonseismic Slip and Reduced Earthquake by High Pressure Water Injection	 Zhao Genmo Zhang Deyuan (268)
12. An Overview of the Geological Geneses of Casing Damage at Abroad	 Zhao Youfang (275)
四、STRESS FIELD IN OIL FIELD AND DEFORMATION	(291)
1. The Determination of Deep Underground Stress by Using the Hyd- rofracturing.....	Li Ziqiang Cao Xinlin Chen Jiageng (293)
2. The Stress Measurement by Mean of Hydrofracturing and Borehole Wall Dilapidation and Their Application in the Exploitation of Oil-Gas Field.....	Ding Jianming (304)
3. Measurement of Underground Stress in Daqing Oil Field and Its Application	Liu Zijin (315)
4. Study of the Stress Field in Sishuan Basin by Using the features of Borehole Breakouts.....	Xu Zhonghua Gao Ajia Chen Jiageng (322)
5. Discussion on the Effect of High Pressure Water Injection in Daq- ing Oil Field.....	Li Ziqiang Gao Ajia Liu Jianzhong (330)
6. An Assumption for Improving Exploitation Effect of the Total Oil Reservoir by using Ground Stress	Wang Shishun (336)
7. On the relation Between the pumping-Injecting Water and Ground Deformation in Daqing Oil Field.....	Liu Zijin (343)
8. Analysis of the Casing Raise of Oil Well in Tanggu Region	 Liu Naisheng Qian Yu (351)
五、RELATED STUDIES	(357)
1. Study of the Gushed Sand of Ground by the Exploitation of Water Injection in Western Dagang Oil Field.....	Wang Zhensheng (359)
2. Analysis of Gushing Cause of A Motor-Pumped Well in the Ban- qiao Farm of Tianjin.....	Zhang Deyuan Li Yibin Wang Xi Chao (365)
3. The Effects of the Pressure Variation Due to Water Injection and Oil Extration on the Water Table of Confined Aquifer.....	 Zhang Zhaodong Liu Yuansheng Ding Renjie (369)
4. Variations of Pore Pressure and Water Injection in Oil Field.....	

-Zhang Zhaodong Liu Yuansheng (375)
5. Variations of stress Before and After the Tangshan Earthquake
 Li Ziqiang Liu Jianzhong Cao Xinling (380)
6. The Effects of Regional active Fault Zone on the Control Function of Sensitive Observational Sites of Seismogeochemistry
Tang Zhongxing (387)
7. The Structural Property of the Cangdong Fault Zone and Its Effect on the Dynamic Variation of Oil Well
Zhang Deyuan Zhao Genmo (394)

回顾与展望

王 优 龙 张 德 元

自1966年邢台地震以来,我国先后发生通海、海城、唐山等大地震。遵照周恩来总理的指示,我国科学工作者以地震预报为中心开展了防震、抗震以及救灾等一系列的研究和探索。

大陆地震活动大多与新生代盆地的边缘及其内部的活动断裂有关,而我国的油田大都分布在新生代断陷盆地中,因此油田开发与地震有着密切的关系。随着石油勘探与开发事业的飞速发展和地震研究的深入和扩大,油田开发与地震减灾研究有了较大的进展。

一、研究工作概况

1969年渤海发生7.4级地震,在胜利油田首次发现油井动态异常,据此,大港油田、辽河油田、华北油田等开展了油、气、水动态监测。在1975年海城7.3级地震、1976年唐山7.8级地震中,大港、辽河等油田均观测到罕见的油、气、水异常现象。为了探讨油气水异常与地震的关系,原石油工业部于1978年召开了“渤海湾地区油井动态与地震关系学术讨论会”,得到地震专家徐煜坚、罗焕炎的支持和关注,会后成立了“渤海湾地区地震预报组”,正式开始了监测与研究的工作,随之研究逐步深入。通过六年的工作,在1984年,石油工业部与国家地震局联合开展了油井动态监测地震的清理攻关工作,石宝珩、葛治洲等同志给予了指导和帮助,进一步推进了油气水动态监测的实用化和规范化。

1975年任丘油田开发,1976年注水,1977年3月起油田出现微震活动,频度和强度逐渐增加。1980年华北石油管理局与国家地震局地球物理研究所签订了协议,同年在任丘油田建立了地震观测站,系统监测油田的地震活动。

大规模开采石油和天然气,特别是注水开发,除了引起任丘等油田发生地震外,在另一些油田还引起了断层和岩层蠕动,使大量油、水井套管变形错断,对油田稳产造成极大威胁。1984年大庆石油管理局与国家地震局地球物理研究所合作,组织了注水诱发微破裂现场试验,开展了套管损坏机理的研究。1986年大庆石油管理局与国家地震局地壳应力研究所、华东石油学院等单位签订协议,开展了“油田套管损坏防治与修复的系统工程”试验与研究。

为了解决油田压裂裂缝方位测定,研究油井动态异常机理及开展地应力的研究工作,1979年石油工业部石油勘探开发研究院与国家地震局地球物理研究所合作研究用地震法解决裂缝方位测定,设计并研制了深度可达3000m的观测系统,并在大港、胜利、吉林、大庆等油田进行了试验。1988年胜利油田和山东省地震局一起组织在渤南油田开展了大型现场压裂试验。与此同时,国家地震局地壳应力研究所、地球物理研究所、胜利油田、大港石油管理局等单位进行了钻孔崩落分析地壳应力场的方法研究,利用法国斯伦贝谢公司来华服务时的四臂测井资料分析得出了四川、华北、中原、胜利、大港等油田的孔壁崩落图形和优势崩落方位,为直接推断主应力方向创造了条件。

为了进一步推动上述各项工作的深入开展,中国石油天然气总公司1988年成立了“油田

与地震协作组”，建立了中国东部油井动态地震监测井网。

此外，为了保证油田开发的顺利进行，保障职工的生命财产安全，国家地震局地球物理研究所、地壳应力研究所、地质研究所、兰州地震研究所、江苏省地震局、吉林省地震办、新疆地震局和同济大学等单位分别为华北油田、胜利油田、大港油田、辽河油田、玉门油田、江苏油田、吉林油田、新疆独山子炼油厂和中原油田做了抗震防灾基础工作（包括地震危险性分析、地震烈度小区划、震害预测）。

二、主要研究成果

在石油和地震系统广大科技人员的共同努力下，十多年来取得的主要成果有以下几个方面：

1. 油井动态与地震前兆

油井动态（包括油、气、水等地下流体动态和油藏压力动态）与地震关系的研究，是我国七十年代以来，在震情监视和地震预报工作中开展起来的新方法之一。与此有关的论文已先后在“石油学报”、“地震学报”、“地震研究”等刊物公开发表了三十余篇。“油井动态与地震”专题论文集和“全国油井动态震例资料汇编”比较系统地收集了这方面的成果。下面做一简要介绍。

吴大铭最早报导了我国油井动态变化的震例：1964年台湾嘉义6.75级地震前，位于震中附近的牛山气田有三口井压力上升，震后恢复正常。1978年王六桥等报导了1977年7月23日新疆库车5.5级地震前，一口抽油井自喷的实例。

1980年吴振林、张德元等根据辽河、大港、胜利三油田的资料探讨了渤海湾地区油、水井异常与地震的关系，认为油、水动态反映地壳的应力、应变变化比较灵敏，指出利用油田深井的油、水动态特征进行地震预报，可能具有良好的前景。1976年7月28日唐山7.8级地震前渤海湾周边及湾内4个油田不少油井出现异常变化，张德元、赵根模研究指出：震前约两年出现趋势性异常，主要表现为产量异常上升；震前几十天出现短期异常，产量有升有降，并出现暂闭井自喷等；震前几天则较普遍地出现大幅度的脉冲型突跳。王万青报导了滨南、平方王、尚店三个油田油井产量、油气比、含水量、静压力的变化与地震的关系及菏泽5.9级地震前后的油井异常。邹泉生、张天庆研究了胜利油田油水井动态异常与地震的关系，指出在同一地区发生的地震，油、水井动态异常有一定的重复性。吴起林、刘安健和张金栋分别研究了海城、唐山两大地震和营口3.9级地震前，辽河油田油井生产动态的变化。杨国军、钱立信等研究了卢龙5.3级地震前后的油井溢油量、压力等的异常变化。

值得指出的是，在大地震前后油井动态异常存在周期性。钱复业、赵玉林提出，唐山地震前青光台自然电场出现周期性变化，它与一口油井（注：大港油田庄9-13井）井口压力变化同步；张德元、赵根模发现庄9-13井井口压力还与沧州台地形变及旺11井周期性喷油一致；汪成民等的资料表明，唐山地震前后某油井（渤中2井）产量与遵化温泉流量变化同步。这些现象也许不是偶然的，可能受某种地球物理因素的制约。

在总结油井动态异常资料的基础上，刘元生、王六桥、张德元等分别对强震和中强地震前油井动态异常特征进行了系统的研究。

在分析油井动态异常过程中，不少作者对油井动态异常机理进行了探讨。吴振林、张德元等认为地震前后油、水动态变化，实质上是反映岩体间隙水压与岩体变形的关系。张德元、赵根模进一步对比了水力压裂与地震破裂过程的有关现象，说明地下流体变化的原因用岩体裂隙演变解释较为合理。王六桥、李善因分析压缩观测水层的持续力，提出了震前油、

水井喷涌异常现象成因机理。

汪成民、车用太、万迪堃、董守玉等关于地下水微动态的研究也涉及到油井异常的机制。张德元、张伯骅、李一兵针对油田的情况，研究了深层地下水（油、气）水动力特征与地震的关系。他们发现深层水的流量、水位等变化有明显的固体潮汐现象，对地壳的应力-应变反映更加灵敏。邹泉生、陈正品等研究了降雨对山东鲁08井水动态的影响。佟武、白敬东等对辽河油田兴1井水位的固体潮汐效应及气压、大风对水位的影响。

为了推进油井动态与地震关系的深入、系统的研究，详细的占有第一性资料是不可缺少的基础工作。刘元生、林志芳组成的编辑组组织石油、地震部门55位科技人员，经过四年努力，完成出版了“全国油井动态震例资料汇编”。汇编刊出了我国石油、地震、地质系统的47口与地震活动有关的油井动态变化资料，具有重要的实用价值。

我国老一辈地球物理学家翁文波、顾功叙先生对石油开发与地震的研究十分关心。顾老曾多次听取地球物理所的工作汇报，鼓励科技人员“到现场抓第一手资料，搞上10年、20年做出成绩来”。《地震学报》发表的有关文章顾老曾亲自审阅和修改。此外，在1982年北京国际地震对策讨论会上，地震专家梅世蓉对油井动态前兆在地震监测中的作用和特点做了分析、总结。在老一辈科学家的关心和指导下，我国广大石油和地震科技工作者经过十多年的努力，取得了较好的成绩。利用油井动态资料曾对某些地震提出过不同程度的预报意见，被认为是地震预报中较有希望的手段之一。

2. 深井注水诱发地震

我国最早的注水诱发地震发生在1972年，江汉油田武5井在钻探过程中，井孔严重漏液10855.83m³，诱发了一系列微震活动。对此，邹学荣、何蒙福进行了研究。1985年胜利油田角07井钻探过程中发生井漏5次，出现井口下陷，并在该井附近诱发小震群，山东省地震局卢守安、刁守中等进行了研究。

我国深井注水诱发地震研究最多的是任丘油田。对此，张德元首先进行研究，并在1979年8月国家地震局地下水会议上做了介绍。1979年10月国家地震局地球物理所到任丘油田，对诱发地震情况进行了现场调查。张德元、赵根模、刁桂苓首先报导并指出任丘油田的地震活动与深井注水的依存关系，引起了有关部门领导和地震工作者的广泛注意。在原石油工业部副部长焦力人、闵豫的指示以后，华北油田与国家地震局地球物理研究所于1980年2月签订了关于建立深井地震监测台网的协议，同年建立了任丘油田地震观测站。

任丘深井台网共使用五口废油井，在深度500~1000m范围内安装了JD-Z型深井地震仪，信号用有线电讯传输，在地震站中心记录室观测记录。1981年元月开始记录，以后又进行了无线传输遥测试验，把任101井信号传输到北京三里河电讯记录，与北京传输台网记录对比。专家们认为任丘油田深井台网建设在国内是首创，有关仪器当时达到了国际水平，为油田地震研究创造了条件。

刁桂苓、张德元、赵根模利用差分法计算，证实了注水是诱发地震的主要因素，获得了地震发生的强度与注水量变化加速度的关系式。

刘一鸣、和景昊等研究指出，油田开发前几年（1966年至1976年），应变释放能量只有 0.38×10^8 尔格^{1/2}，而油田开发后，尤其是1978年开始大量注水后，数值急剧上升，至1981年1月7日已达 8×10^8 尔格^{1/2}以上。

吴宣、刘一鸣等计算了油田地下流体流速，反演流体流动情况与诱发地震之间的关系。

张德元、赵根模对诱发地震的地质构造背景进行了研究，研究认为，油田地震活动的

分布除了与注水井分布区一致外,还受油田地质构造影响。指出断层规模小、密度大、断距小、延伸距离短、吸水能力强、渗流条件好的地段,地震活动相对较弱;断层规模较大、吸水能力及渗流条件差的地段,地震活动相对较强,容易诱发较大地震。

和景昊、李自强等认为,任丘油田地震活动与周围地区的天然地震有关系,所以任丘地震活动变化可以作为观察区域应力场变化的“窗口”。

地球物理研究所用9次 $1.4 \leq M_L \leq 3.1$ 的地震,求出任丘平均压应力轴方向为北西-南东向,与华北平均应力场不一致。许忠淮用20口井孔崩落资料得出最大水平主应力在北东 $60^\circ-85^\circ$ 之间,此结果与华北地区构造应力场方向基本一致。

傅征祥、张国民利用任丘地形变资料,根据位错理论反演计算出任丘油田诱发地震的最大地震破裂长度约为3.8km。

任丘油田有大型储油罐、油、气集输管网,炼油设施及大量楼房建筑,一旦发生破坏性地震,后果不堪设想。因此,油田注水诱发地震的研究与预报是一项非常现实的任务。

国家地震局地球物理研究所诱发地震组根据地震活动范围、震源体积、震源深度、有感范围、烈度分布等特征,估计不致于酿成大地震,但这些地震在油田局部地区小范围内会造成一定损失。

张德元、赵根模、刁桂苓指出,任丘油田发生的 $M_L \geq 3.0$ 级地震4次,均发生在月注水量超过 100万m^3 以后:1979年3月,月注水量超过 128万m^3 ,5月26日发生 $M_L 3.9$ 级地震;1979年10月注水量达到 140万m^3 ,12月18日连续发生了 $M_L 3.7$ 级和 $M_L 3.0$ 级地震。为了保持较高的稳产期和较好的开发效果,注采比应保持在1左右,注水量不出现大幅度增加,可避免地震活动水平的增强。

李自强等根据水力压裂资料计算了油田的地应力,进而求出诱发地震注水压力临界值为6.2MPa。他提出今后任丘可能发生诱发地震的上限为5级。

刘书文、张耀峰发现1986年任北油藏震群与任845井注水有关,并开展了注水一发震一停减注水一停震的试验。他们提出注水量由 300m^3 降到 150m^3 ,诱发地震就可停止。由于对任北油藏震情进行了正确的估计,安定了职工情绪,保证了生产正常进行,取得了较好的经济效益。

3. 油田开发注水与套管损坏

我国油井套管损坏出现较早,研究较多的是吉林油田和大庆油田。特别是大庆油田由于套管损坏对稳产造成严重的威胁,引起了原石油部和大庆油田领导的高度重视。宋治对我国油田套管损坏进行了调查:1977年~1983年大庆、扶余、胜利、大港、玉门、新疆、青海、辽河、长庆等油田套管损坏井已达3600多口。据刘子晋资料,大庆油田截止到1988年8月套管损坏达2677口。为了找到套管损坏的原因,以便采取相应的防治措施,有关油田、高等院校、科研单位共同协作,开展了多项研究工作,大家一致认为我国油田的套管损坏主要是高压注水开发引起。

刘子晋首先提出,大庆油田高压注水使油层出现次生裂缝,断层及地层间应力不平衡,使原有断层出现复活运动。钻遇大庆油田萨尔图1号断层的36口井,从1974年至1981年套管全部损坏,套管损坏点与断点深度一致,证明套管损坏与断层活动有关。

刘春鸿、李冠儒指出,吉林扶余油田从注水开发第二年开始,六年内注水开发区内31.5%的油水井发现套管变形,给油田生产带来极大危害。研究认为套管变形的主要原因是注入水沿套管外串入上覆泥岩层产生滑动所致。

刘子晋统计的1442口套损井中,泥岩损坏809口,油页岩247口,占各类岩层的73.2%。他认为泥岩、油页岩段是套管损坏的“危险段”。

为了寻找高压注水与地层裂缝及断层复活的关系,大庆油田开展了注水诱发微破裂试验。刘一鸣、李自强、刘子晋发现注水量的增加与微破裂的发生有着极好的对应关系。刘子晋进一步指出,注水量的急剧变化(增加或减少)都是微破裂增加的重要原因,注水量变化相对平稳时,微破裂相对也少。

崔孝秉、宋治等研究认为,当注水油田大压差转抽降压时,孔隙压力大幅度下降,油藏构造内部骨架收缩,外围岩体受拉,构造顶层上方的软弱层及地层间断面或岩性间断面由于层间正压力的降低,抗剪力削弱,有较大的可能性产生滑移和裂缝。

黄荣樽、庄锦江等进行了泥岩层蠕变流动条件的试验研究,编制了计算套管随时间而变化的围岩蠕变外载及包括断层面在内的软弱结构面滑动位移的有限元程序。为定量确定注水油田的套管强度,分析套损机理和制定套损的防治措施提出了科学依据。

王曰琰、廖炎光、刘子晋等针对非油层误注水形成水体,水体的扩大和蔓延造成套管成片损坏及泥岩蠕变与套损的关系等情况,提出了防止套管损坏的四条措施:

- (1) 注水井要在油层射孔井段之上,下一级保护封隔器;
- (2) 注水井发现注水异常要立即关井,并查明套管技术状况;
- (3) 发现套管错断、破裂的注水井应立即关井停注;

(4) 新建的注水井固井后要求用清水在15MPa试验不漏,方可转注。实施结果,使大庆油田1987年套管损坏速度比1986年有明显的下降,从年套损528口下降到365口,减少163口,使年套损井数由快速增加转为开始下降,取得了明显效果。据曾树堂计算,1987年至1989年大庆油田由于减少套管损坏可获纯经济效益13721.1万元。

此外,黄俊明研究了盐层蠕变特性对套管的影响。李兴才和杨若义、刘建中和曹新玲对吉林油田套损机理进行了理论计算。赵根模、张德元研究了油田注水引起的地震与无震滑动,从围压、孔压条件改变时的弱化失稳模式讨论了各种破坏机制,提出浅油层、低围压注水易引起泥岩层流变和断层蠕滑;深油层、高围压注水易发生断层粘滑错动引起地震。刘子晋探讨了天然地震与大庆油田套管损坏的关系。

4. 油田应力场及形变

李自强、丁健民结合我国油田的资料,讨论了改进的水压致裂测量应力的计算方法和孔壁崩落应力测量方法。

刘子晋利用水力压裂测定了大庆油田的地应力,给出了大庆油田地应力随深度变化的经验公式,为确定合理的注水井口压力临界值提供了重要依据。

李自强、高阿甲根据大庆油田现场绝对应力测量资料指出,高压注水不仅引起有效应力降低,也会引起水平应力增大。

许忠淮、高阿甲、陈家庚用钻孔崩落特征研究了四川盆地应力场,同时指出,某些孔的孔径在特定方向的缩颈现象,说明构造应力场对裂缝发育的控制作用。

国家地震局地球物理研究所与石油勘探开发研究院开展了裂缝方向观测系统的研制和现场试验,指出水力压裂的破裂面一般沿垂直于最小主应力方向延伸,对合理布设油田开发井网,提高开发效果有指导意义。

王世顺在研究胜利油田的地应力测量数据和钻孔崩落资料的前提下,提出对低渗透油层采取合理的行列注采井网,沿最大水平主应力方向布油水井排,在具有天然裂缝油田打定向