

文章编号: 0253-9985(2009)01-0102-06

文东油田沙河街组三段中亚段油藏裂缝发育规律 及其对注水开发的影响

赵良金^{1,2}, 黄新文², 王 军²(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国石油化工股份有限公司 中原油田分公司
石油勘探开发科学研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 对文东油田古近系沙河街组三段中亚段油藏利用岩心、薄片观察、压力恢复试井研究了天然裂缝的存在。通过凯塞效应、波速各向异性、古地磁、井孔崩落掉块等方法研究了地应力特征。最大水平主应力方向与大断层、天然裂缝走向垂直或近于垂直, 人工裂缝方向基本平行于最大水平主应力方向。运用主曲率法定量预测天然裂缝走向、长度和强弱。天然裂缝以构造成因为主, 主要形成于古近纪东营组沉积时期。在不同的开发阶段, 人工裂缝和天然裂缝对注水开发影响程度不同。针对目前天然裂缝已经基本闭合的事实, 在进行注采井网部署时重点考虑人工裂缝对开发的影响。

关键词: 低渗油藏; 地应力; 天然裂缝; 人工裂缝; 注水开发; 文东油田

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

Pattern of fracture occurrence and its influence on waterflooding in the Es³ reservoirs of Wendong oilfield

Zhao Liangjin^{1,2}, Huang Xinwen², Wang Jun²(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: By analyzing cores, thin section and pressure build-up tests, this paper discusses the occurrence of natural fractures in the reservoirs. The earth stress characteristics are identified through research on Kayser effect, seismic anisotropy, paleomagnetic and borehole cavern. The direction of maximum horizontal major stress is perpendicular or near perpendicular to the direction of the major faults and natural fractures, while is in parallel with the direction of artificial fractures. The direction, length and strength of natural fractures are quantitatively predicted through the methodology of main curvature. The natural fractures are predominantly of tectonic origin and were mainly formed during the deposition of the Tertiary Dongying Formation. During different stages of development, natural and artificial fractures have different degrees of influences on waterflooding. Given the natural fractures being basically closed, attentions should be focused on the artificial fractures when designing injection-production pattern.

Key words: low-permeability reservoir; earth stress; natural fracture; artificial fracture; water-injection; Wendong oilfield

随着国内外低渗透油田开发和注水实践的深入, 人们发现天然裂缝在低渗储层实际开发效果中发挥着重要的作用^[1-10], 油田的有效开发迫

切地需要认识裂缝的特征, 裂缝研究日益受到人们的高度重视, 已成为储层评价和预测的重点内容之一。目前裂缝识别、描述的方法有很

收稿日期: 2008-05-23。

第一作者简介: 赵良金(1963—), 男, 教授级高级工程师、博士研究生, 开发地质。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAB03B05)。

多^[11~16],但由于资料的限制,大多方法较为单一,难以对裂缝特征进行客观的表征。笔者综合应用多种资料、多种方法,动、静结合,对裂缝系统进行了有效的描述,对油田生产井网的部署起到了指导。

文东油田古近系沙河街组三段中亚段(沙三中)油藏位于东濮凹陷中央隆起带文留构造东翼,主要含油层段沙三中4—10砂层组,夹于巨厚的文9盐层(400~600 m)与文23盐层(600~1800 m)之间。与渤海湾盆地的其他油田相比具有特殊的地质条件,井深(3250~3850 m)、异常高温(120~150℃)、高压(压力系数1.71~1.88),储层渗透率低(平均为 $29.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

1 利用多种方法研究裂缝的存在及特征

1.1 岩心、薄片观察

文13-281,文13-54和文13-85等井的岩心观察表明,在沙三中储层中存在天然裂缝(图1),一般缝高6~55 mm,宽约0.6~3 mm,均为垂直裂缝。其中文13-281井3190.0 m处有一垂直裂缝,缝高约40 mm,缝宽3 mm,且为硬石膏充填,表明通过肉眼能观察到的裂缝并不发育。

在镜下观察铸体薄片表明,有多口井均发现有微裂缝存在(图2),缝长0.06~3.00 mm,缝宽0.01~0.10 mm,主要为石英颗粒碎裂,长石、斜长石脆性破裂形成,有的被沥青充填,有的被隐晶白云质充填,还有部分未被充填。

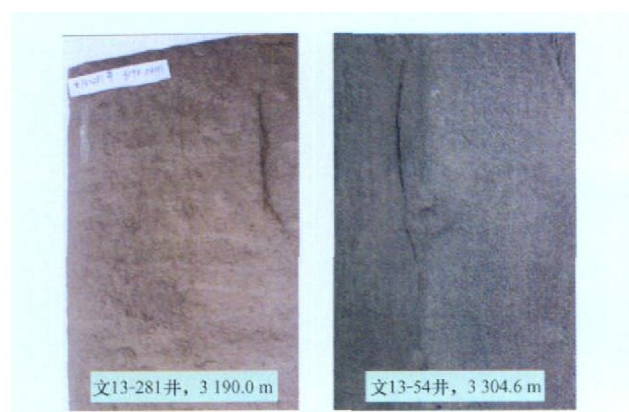


图1 岩心天然裂缝发育规律

Fig. 1 Occurrence of natural fractures in cores

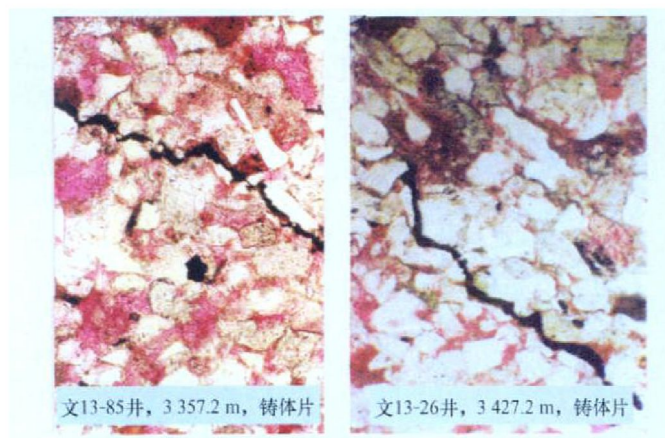


图2 铸体薄片观察到的天然裂缝

Fig. 2 Natural fractures observed in thin sections

1.2 利用压力恢复试井研究天然裂缝的存在

1981年7月—1986年7月,对文东沙三中油藏早期油井18井次(未进行过人工压裂增产措施)的压力恢复数据进行的处理结果看出(表1),有12井次的表皮系数(S)为负值。说明油井在未进行过储层人工压裂改造条件下是超完善的,这是高压低渗裂缝型储层的典型特征,油井初期产量往往较高。部分油井同一层位早期的表皮系数为正值,但随着生产的进行,解除了钻井和作业的污染,表皮系数变为负值,产量稳中有升。还有部分油井随着生产的进行,同一层位的表皮系数由负值变为正值,这是裂缝闭合的表现。

1.3 地应力与裂缝的关系

1.3.1 地应力特征

岩石在地下都受到三向应力的作用,在钻井过程中岩心应力进行释放后,当岩心进行恢复性加载应力研究其声发射与应力关系时,只有载荷等于或近似等于地层所受的应力值时,岩石才会出现声发射现象,即凯塞效应。利用岩石凯塞效应方法,对文13-281井在3187 m处的砂岩岩心进行三向应力值的测量,其水平最大主应力值88 MPa,水平最小主应力值64.9 MPa,垂向主应力值为79.82 MPa。通过凯塞效应、波速各向异性、古地磁、井孔崩落掉块等方法对文东沙三中6口井进行测量,最大水平主应力方向为 $125^\circ \sim 135^\circ$ 左右,将与文东沙三中构造对比发现,水平最大主应力方向与构造的大断层近似于 90° 的夹角(表2)。

表 1 文东油田沙三中油藏早期压力恢复试井成果

Table 1 Results of initial pressure build-up tests in ES3m reservoirs in the Wendong oilfield							
井号	砂层组(沙三中)	油层厚度/m	稳定产油量/(t·d ⁻¹)	累积产油量/t	地层压力/MPa	有效渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	表皮系数
文 13	9	5.6	175.4	5 000	52.75	25.42	-4.30
			30.0	11 500	40.74	15.94	-3.09
	9	16.3	53.0	18 626	55.25	3.86	1.16
			53.0	25 500	59.94	2.12	-19.30
			20.0	67 052	49.89	1.03	-4.97
			230.0	330	57.71	10.19	-2.64
	8	17.9	108.0	13 000	43.94	15.17	9.21
			289.9	19 456	52.15	55.12	4.61
文 13-63	6	10.6	311.5	58 602	46.62	42.58	-1.30
			154.3	86 405	42.63	25.01	-0.42
			189.9	101 610	38.06	46.26	1.60
			188.0	102 165	39.40	34.87	-0.82
			23.9	191	54.92	5.26	4.22
文 13-65	7	4.8	190.0	12 069	47.31	14.06	0.07
	6-7	18.1	123.0	24 000	38.95	48.87	-3.53
			72.8	6 354	49.81	4.75	-0.87
文 204	7	11.0	21.8	232	25.87	22.23	-1.39
文 13-116	10	1.9	302.1	907	52.23	14.10	-2.37
文 270	9	22.1					

水平应力方向。应用 AEO-4A 裂缝监测系统测试结果,最小水平主应力与天然裂缝方向基本一致,最大水平主应力方向与人工裂缝方向平行(图 3),而最大水平主应力方向与断层线垂直或近于垂直;注示踪剂监测水驱方向结果也证实了裂缝与应力的关系(图 4)。根据测量的最大水平主应力方向,推测天然裂缝延伸方向为(45°~50°)±10°,人工裂缝的延伸方向为 125°~135°左右。

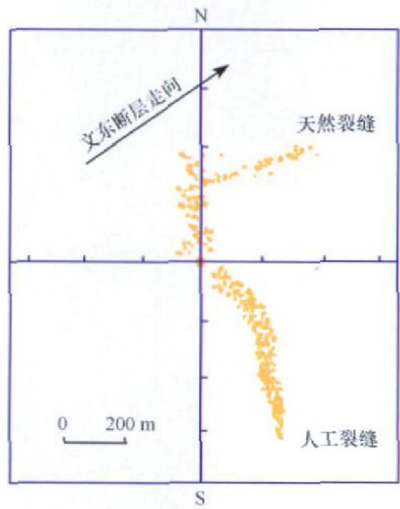


图 3 AEO 裂缝监测
Fig. 3 Monitoring AEO fractures

表 2 文东油田沙三中储层水平最大主应力方向数据

Table 2 Directions of the maximum major horizontal earth stress in Es ³ m reservoirs in the Wendong oilfield			
井号	井段/m	最大水平主应力方向/(°)	与断层的关系
文 13-85	3 329.2~3 442.3	133.0±10	与文 13 断层走向近似垂直
文 210	3 798.0~3 792.9	131.8±10	与徐楼断层走向垂直
文 211	3 495.1~3 597.9	135.5±10	与徐楼断层走向垂直
文 13-281	3 186.0	135.5±10	与文东大断层、文 13 断层走向垂直
文 203-15	3 375.0~3 410.0	124.5±10	与文 203 断层走向垂直

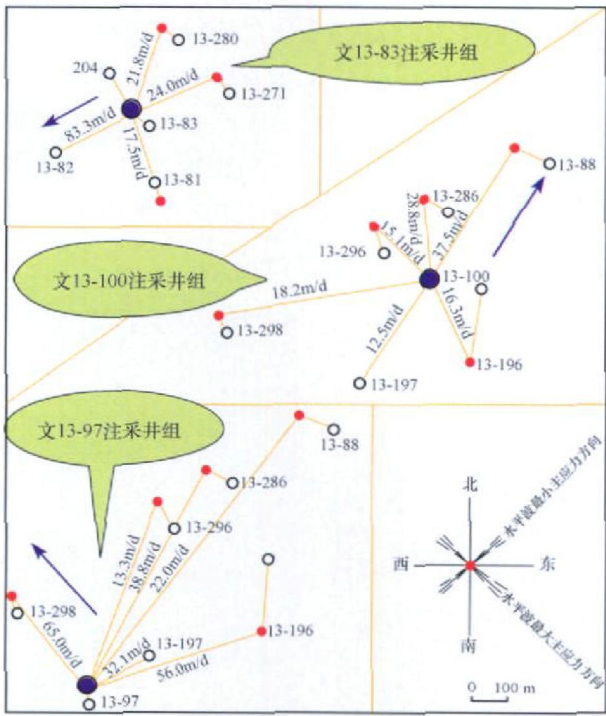


图 4 示踪剂监测水淹方位
Fig. 4 Monitoring watered-out zones with tracers

1.3.2 地应力与裂缝的关系

根据张景和、孙宗炳的研究成果^[6],裂缝是由储层三向应力决定的,符合三向应力理论,无论是天然裂缝还是人工裂缝都是垂直裂缝。从裂缝方位来看,天然裂缝延伸方向基本上垂直于最大水平主应力方向,而人工裂缝方向基本平行于最大

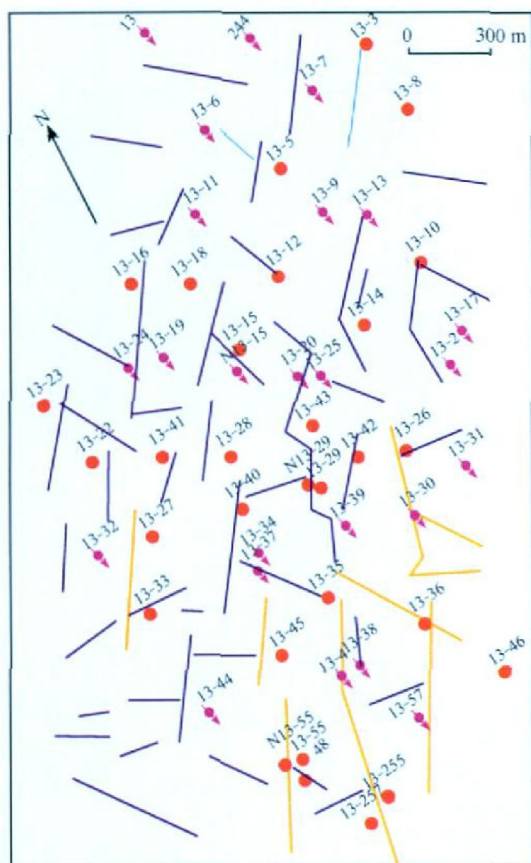


图5 文13北块沙三中5砂层组平面裂缝分布

Fig. 5 Areal distribution of fractures in the 5th sand unit of Es³ in the block to the north of Wenzhong 13 well

1.4 运用主曲率法预测天然裂缝发育规律

利用主曲率法定量预测裂缝发育规律,即利用各砂层组的构造平面图、各井的相应层位埋藏深度,计算各砂层组顶面的曲率变化值,曲率变化强烈的地方,张裂缝也最发育,由此可分析天然裂缝走向、长度和强弱,从而定量圈定天然裂缝发育分布范围(图5)。垂向上,随着埋藏深度的增加,裂缝发育由弱变强又转弱,构成垂向上的分带性及平面上的分片性。

2 天然裂缝的成因类型

文东油田沙三中油藏天然裂缝一般由构造作用和成岩作用形成,根据成因可将其分为成岩裂缝(原生)和构造裂缝(次生)两大类型。其中构造裂缝一般具有剪切裂缝与张性裂缝两种基本类型,是构造应力场的产物,与断层、褶皱有成因关系。与断层伴生的裂缝与断层具同一应力场,一

般为张性裂缝;在一个局部构造上,与褶皱有关的裂缝通常形成两种主要的裂缝网络,两种裂缝网络都是由两组斜交共轭剪切裂缝和一组张性裂缝所组成,只是裂缝走向不同。

由于地层变形幅度不大,因而垂直裂缝的发育、分布与褶皱关系不大,而与断层有密切的联系。根据正断层发育特点,是拉张应力造成的垂直裂缝,且裂缝面光滑平直,常伴生小裂缝、微裂缝,部分裂缝为互相平行的裂缝,为硬石膏、碳酸盐等多种充填物充填。

3 天然裂缝形成的主要时期

据H. C. 索比尔的研究,矿物形成时被捕获的包裹体溶液是单相的均一体系,后来矿物被冷却至室温时,原来呈均一状态的单相体系变为二相或三相的气-液包裹体,气-液包裹体在升温时可以恢复到形成包裹体时的均一状态,刚恢复到均一状态的温度叫均一温度。

根据上述成果预测,文东油田沙三中地层中裂缝充填物充填期间的古地温为70~110℃,而裂缝形成时即开始充填,所以该古地温即代表被充填裂缝形成时的古地温。结合当时的古地温梯度,裂缝形成时的埋藏深度在2 000~2 600 m,相当于古近纪东营组沉积时期。

石油地质研究表明,构造形成期略早于油气生成期,构造主要形成期也正是油气大规模运移期。垂直裂缝形成的主要时期相当于构造、断裂强烈活动期、继续发展和定型期。在这段时期内形成的文东断层、文13断层及次级断层与垂直裂缝的形成有密切关系。

4 裂缝对开发的影响

4.1 室内实验研究

岩心水驱油试验结果表明(表4),当裂缝走向与注水方向夹角呈90°时,水驱油效率最高,达到0.643 2。当裂缝走向与注水方向夹角呈45°时,水驱油效率为0.571 6。当裂缝走向与注水方向平行时,水驱油效率最低,仅为0.425 0,大大低于没有裂缝的水驱油效率。

表 4 裂缝与水驱油效率统计

Table 4 Statistics of fractures and water displacement efficiency

井号	岩样长度/cm	岩样直径/cm	空气渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	驱动速度/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	束缚水饱和度	裂缝方位/($^\circ$)	水驱油效率
13- 45- 4- 2	6. 87	2. 51	9. 54	30	0. 306	90	0. 643 2
244- 3- 3	6. 11	2. 51	10. 12	30	0. 327	45	0. 571 6
244- 1- 1	5. 76	2. 51	13. 66	30	0. 342	0	0. 425 0
13- 28- 1- 2	6. 32	2. 51	11. 22	30	0. 329	无裂缝	0. 587 2

4.2 不同开发时期裂缝对开发的影响

对于低渗油藏来说,裂缝对油藏开发的影响主要有两点。一是提高油井的产能,二是裂缝与注采井网的配置关系,以免注入水沿裂缝窜,造成油井暴性水淹。由于文东沙三中油藏异常高压,储层处于欠压实状态,天然裂缝一般呈开启状态,一般不采用压裂投产。但随着开发的进行,地层压力的下降,天然裂缝逐渐闭合,此时所有油井基本开始进行压裂改造,形成人工裂缝。因此,在开发早期天然裂缝没有闭合,天然裂缝对开发的影响占主导。此时进行注采井网部署,主要考虑天然裂缝对水驱效果的影响,采用油水井连线与天然裂缝垂直或大角度相交。在低含水期时地层压力较高,同时存在基本垂直的天然裂缝和人工裂缝,在注采井网部署时,采用油水井连线与最大主应力呈 45° 左右。进入开发中后期,地层压力进一步降低到静水柱压力附近,天然裂缝已经基本闭合,此时人工裂缝占主导因素。进行注采井网部署主要考虑人工裂缝对水驱效果的影响,采用油水井连线与人工裂缝垂直或大角度相交,即油水井连线与最大水平主应力方向垂直或大角度相交。

文 13- 37 井组是两组裂缝共存时对注水开发影响的典型(图 6),箭头所指为文东断层走向,天然裂缝平行于文东断层,人工裂缝垂直于文东断层。油井文 13- 33 井与注水井文 13- 37 井连线与人工裂缝方向近似平行。文 13- 33 井 1991 年 5 月投产,初期日产油 8.5 t,含水率 33.1%,6 个月后含水率上升到 100%。油井文 13- 45 井与注水井文 13- 37 井连线与天然裂缝方向角度小,1991 年 5 月日产油 40 t 以上,含水率 26%,一年后含水率上升到 76%,含水上升较快。而油井文 13- 35 井避开了天然裂缝和人工裂缝方向,日产油、含水率变化相对稳定。

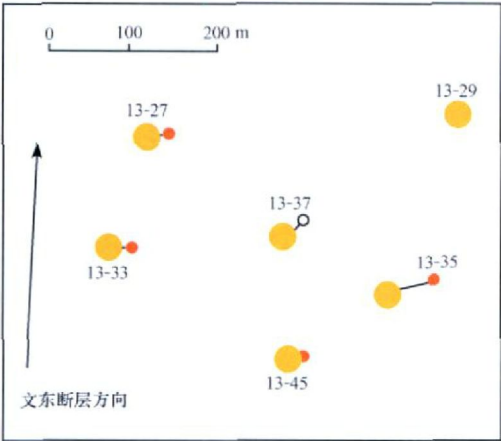


图 6 文 13- 37 井组井位示意图
Fig. 6 Map showing the well locations of the Wenzhong 13- 37 well group

5 结论与建议

- 1) 文东油田沙三中油藏开发中同时存在互相垂直的天然裂缝和人工裂缝,都为垂直裂缝或高角度裂缝,其中部分天然裂缝被硬石膏、白云石充填。
- 2) 裂缝由储层三向应力决定,天然裂缝延伸方向基本上垂直于最大水平主应力方向,人工裂缝方向基本平行于最大水平应力方向;最大水平主应力方向与大断层垂直或近于垂直。
- 3) 在不同的开发阶段,人工裂缝和天然裂缝对注水开发的影响程度不同;针对目前天然裂缝已经基本闭合的事实,在进行注采井网部署时重点考虑人工裂缝对开发的影响。

参 考 文 献

1 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
2 裴泽楠, 刘雨芬, 黄延章, 等. 低渗透砂岩油藏开发模式[M].

- 北京: 石油工业出版社, 1998
- 3 张莉, 岳乐平. 鄯善油田地应力、裂缝系统与油田开发[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 330~ 332
 - 4 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
 - 5 孙樯, 谢鸿森, 郭捷, 等. 构造应力与油气藏生成及分布[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 99~ 103
 - 6 张景和, 孙宗顺. 地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M]. 石油工业出版社, 2001
 - 7 王端平, 时佃海, 李相远, 等. 低渗透砂岩油藏开发主要矛盾机理及合理井距分析[J]. 石油勘探与开发, 2002, 30(1): 87~ 89
 - 8 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998
 - 9 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场与低渗透油田开发[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 91~ 93
 - 10 毕研斌, 石红萍. 油井压裂效果分析方法[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 72~ 75
 - 11 张守仁, 万天丰, 陈建平. 川西坳陷孝泉- 新场地区须家河组二- 四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 70~ 74
 - 12 胡宗全, 廖红伟, 刘人和. 分砂层地质曲率分析在裂缝预测中的应用[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 450~ 454
 - 13 魏春光, 雷茂盛, 万天丰, 等. 古龙- 徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟——构造裂缝发育区带预测及对比研究[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 78~ 84, 105
 - 14 胡宗全. R/S 分析在储层垂向非均质性和裂缝评价中的应用[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 110~ 113
 - 15 王安辉, 宇淑颖, 张英魁, 等. 神经网络在低渗透油田试井解释中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 338~ 343
 - 16 尹志军, 彭仕宓, 高荣杰. 裂缝性油气储层定量综合评价——以辽河油田齐家古潜山基岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 240~ 244
- (编辑 高 岩)

(上接第 101 页)

- 2 冯子辉, 刘伟. 徐家围子断陷深层天然气的成因类型研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 18~ 20
 - 3 付晓飞, 宋岩. 松辽盆地无机成因气及气源模式[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 23~ 28
 - 4 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 1995
 - 5 Wycherley. Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(6): 489~ 494
 - 6 陶士振, 刘德良, 杨晓勇, 等. 无机成因天然气藏形成条件分析[J]. 天然气地球科学, 2004, 11(1): 10~ 18
 - 7 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 中国东部及近海陆架盆地 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 42~ 47
 - 8 侯启军, 杨玉峰. 松辽盆地无机成因天然气及勘探方向探讨[J]. 天然气工业, 2002, 22(3): 5~ 10
 - 9 上官志冠, 孙令昌, 孙凤民, 等. 长白山天池火山区深部流体成分及稳定同位素组成[J]. 地质科学, 1996, 31(1): 54~ 64
 - 10 许多, 朱岳年, 周瑶琪. 地幔源气体的 CO₂/³He 特征及其地质意义[J]. 地质地球化学, 1999, 27(4): 87~ 91
 - 11 Marty B, Jambon A, Sano Y. Helium isotopes and CO₂ in volcanic gases of Japan[J]. Chemical Geology, 1989, 76: 25~ 40
 - 12 Trull T. C-He systematics in hot spot xenoliths: implications for mantle carbon content and carbon recycling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 118: 43~ 64
 - 13 Porcelli D R. Isotopic relationships of volatile and lithophile — trace elements in continental ultramafic xenoliths[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 110: 528~ 538
 - 14 Ballentine C J, Schoell M. Magmatic CO₂ in natural gases in the Permian basin, West Texas: identifying the regional source and filling history [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69(70): 59~ 63
 - 15 戴春森, 宋岩, 孙岩. 中国东部二氧化碳气藏成因特点及分布规律[J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(7): 764~ 771
 - 16 李先奇, 戴金星. 中国东部 CO₂ 气田(藏)的地化特征及成因分析[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 215~ 221
 - 17 杜建国. 中国天然气中高浓度二氧化碳的成因[J]. 天然气地球科学, 1991, 2(5): 203~ 208
 - 18 云金表, 庞庆山, 徐佰承, 等. 松辽盆地南部 CO₂ 气藏的形成条件[J]. 大庆石油学院学报, 2000, 24(2): 82~ 84
 - 19 郭占谦, 杨步增, 李星军, 等. 松辽盆地无机成因气藏模式[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 30~ 33
 - 20 付晓飞, 云金表, 卢双舫, 等. 松辽盆地无机成因气富集规律研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 14~ 17
 - 21 郭占谦, 刘俊峰, 李贵顺. 对大庆油田深层气田气源的讨论[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 441~ 448
 - 22 齐井顺. 松辽盆地北部深层火山岩天然气勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 590~ 596
 - 23 薛海涛, 卢双舫, 付晓泰. 甲烷、二氧化碳和氮气在油相中溶解度的预测模型[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 444~ 449
 - 24 张居和, 李景坤, 闫燕. 徐深 1 井深层天然气地球化学特征与各类气源岩的贡献[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 501~ 504
 - 25 米敬奎, 张水昌, 陶士振, 等. 松辽盆地南部长岭断陷 CO₂ 成因与成藏期研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(4): 452~ 456
- (编辑 董 立)