

底水油藏水平井堵水选井决策方法

杨兵¹, 李敬松¹, 祁成祥², 冯祥¹

1. 中海油田服务股份有限公司生产研究所, 天津 300450
2. 中国海洋石油国际有限公司, 北京 100010

摘要 针对底水油藏水平井水淹问题,研究了水平井堵水选井决策方法。考虑对水平井水淹有重要影响的地质因素和开发因素,确定了底水油藏水平井堵水选井决策指标体系。利用专家系统知识的不确定性表示方法,对各指标进行量化表征,应用模糊综合评判建立了堵水井选择的优化模型,根据变权多因素多级决策结果,筛选综合指标较高的井作为堵水井。该方法能够综合考虑影响油井水淹的各种因素,规避奇异因素的影响,使堵水井的选择结果更加科学合理。

关键词 底水油藏;水平井;堵水选井决策;模糊综合评判

中图分类号 TE343

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.25.006

Decision-making of Horizontal Well Water Shutoff for Bottom Water Reservoir

YANG Bing¹, LI Jingsong¹, QI Chengxiang², FENG Xiang¹

1. Production Institute-China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China
2. CNOOC International Corporation Limited, Beijing 100010, China

Abstract For horizontal wells with high water cut, water shutoff operations should be conducted to improve the oil production. But not all the wells with high water cut are suitable for water shutoff. To select the most suitable horizontal well to conduct water shutoff operation, various factors related to well production should be considered. On the analysis of waterflood impact factors, geological parameters and production factors are selected, which have great impact on horizontal well waterflood in building the decision-making system for reservoir with bottom water. Expert system with uncertainty representation method was used for characterizing the filter index. In building the optimized horizontal well water shutoff decision-making model, fuzzy mathematical comprehensive evaluation technology and variable weights evaluation method is used. Using this model, the wells having greater potential to conduct water shutoff operation can be figured out. The case study shows that, in this method all the factors affecting waterflood is considered and negative effect of singular factor on well selection decision-making is avoided, which can make the water shutoff well selection more scientific and logical.

Keywords bottom water reservoir; horizontal well; water shut-off decision making; fuzzy evaluation

0 引言

水平井作为油气田开发的一项先进技术,目前已广泛应用于多种类型的油气藏^[1]。随着油田生产时间的延长,边底水等沿着高渗透层段或裂缝侵入,导致水平井含水甚至水淹关井,成为目前水平井开采中的难题之一^[2]。据统计,轮南、塔中等油田水平井平均含水已超过70%,冀东油田108口水平井平均含水也已达80%以上,迫切需要与之相适应的堵水技术和堵水选井决策方法。目前,对于直井堵水选井决策方法已有较多研究^[3-6],但对于水平井堵水选井决策方法则研究较

少。本文在综合考虑底水油藏水平井相关因素的基础上,提出一种基于模糊综合评判优化模型的水平井堵水选井决策方法。

1 决策指标体系的建立

影响底水油藏水平井堵水成功与否的因素有很多,可概括为两大类,即地质因素和开发因素。地质因素主要包括以渗透率变异系数为代表的地层非均质性。开发因素主要包括水平井轨迹、水平井射孔井段、水平井位置、水平井潜力、水

收稿日期:2013-02-06;修回日期:2013-06-30

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05024)

作者简介:杨兵,工程师,研究方向为油藏数值模拟、水平井堵水及稠油热采,电子邮箱:yangbing1@cosl.com.cn

平井产量、水平井含水率以及水体能量等。在定性分析的基础上,结合数值模拟结果,建立了底水油藏水平井堵水决策指标体系。

1.1 地层非均质指标

受储层非均质性影响,油藏不同部位之间的渗透率相差很大。水平井由于射孔井段在水平方向跨度较大,钻遇储层的非均质性增加。对于底水油藏,水平井生产过程中,底水会

沿高渗透部位突进至井筒,导致水平井很快含水,甚至暴性水淹。

渗透率变异系数 V_k 反映渗透率分布和差异的程度,是评价储层宏观非均质性的最重要参数,其值越大表示储层的宏观非均质性越严重。通过图 1、图 2 所示的数值模拟结果可以看出,渗透率变异系数越大,水平井见水时间越早,含水上升越快。

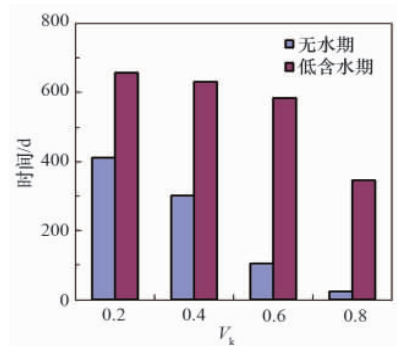


图 1 V_k 对水平井见水时间的影响

Fig. 1 Impact of V_k on the water breakthrough time for horizontal wells

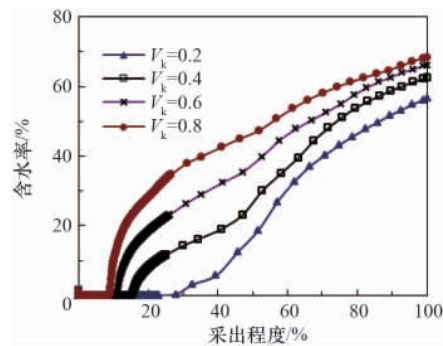


图 2 V_k 对相对采出程度的影响

Fig. 2 Impact of V_k on relative recovery

1.2 水平井轨迹指标

在水平井钻井过程中,因工程及地质等因素影响,会产生凹型或 S 型水平井轨迹,如图 3 所示。如中国东部某油田所钻水平井中,大约 30%的井型为 S 型,25%为凹型。对于底水油藏,水平井井身轨迹的大幅波动往往导致部分井段接近

底水,当这类水平井投产时,井身附近压力下降,底水在压差作用下,向距离最近的生产井段突进,局部见水,很容易发生局部严重水淹的情况。如图 4、图 5 所示,数值模拟结果表明,在同样地质条件和生产制度下,S 型水平井见水最早,含水上升最快;水平型水平井见水时间最晚,含水上升相对较慢。

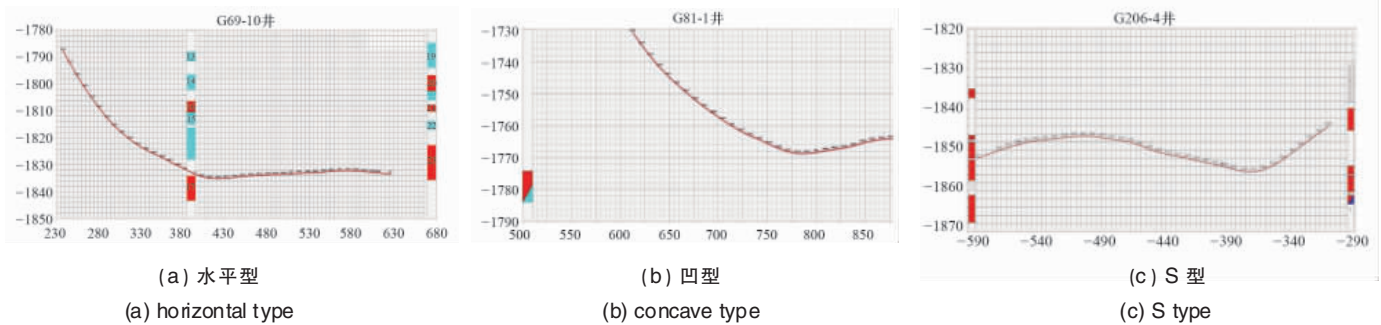


图 3 水平井井身轨迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of horizontal well trajectory

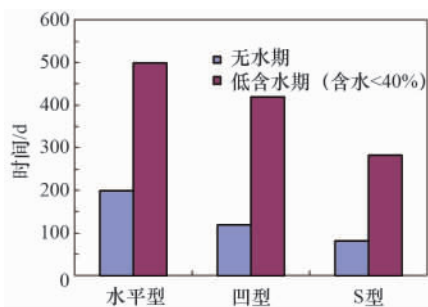


图 4 井身轨迹对见水时间的影响

Fig. 4 Impact of well trajectory on water breakthrough time

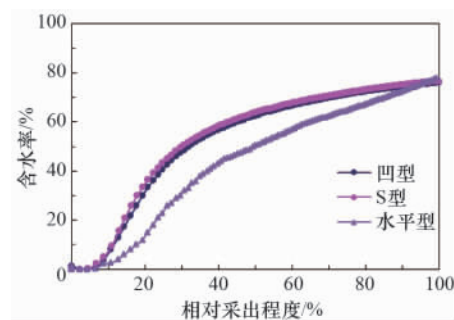
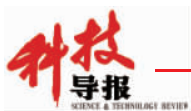


图 5 井身轨迹对含水率变化的影响

Fig. 5 Impact of well trajectory on water cut



1.3 水平井长度指标

由水平井产能计算公式可知,水平井产能与 KL (K 为生产层位平均渗透率, L 为水平井段长度)成正比。因此,水平井长度的增加,有利于增大泄油面积,提高产能。

另一方面,水平井生产井段越长,平面上钻遇的油层范围越广,物性差距拉开的概率越大,即增大了泄油区储层的非均质程度。同时,泄油区域越大,储层油水流动状况也变得更加复杂,增大了水平井局部井段暴性水淹的概率。

1.4 水平井位置指标

对底水油藏而言,水平井的位置是指水平井射孔井段到油水界面的距离,即避水高度。水平井开发底水油藏时,为防止水平井过早见水,水平段应该有一个合理的避水高度。合理的避水高度有利于延长水平井见水时间,提高无水期采收率。数值模拟结果如图 6、图 7 所示,可以看出避水高度 H 越大,见水越晚,含水率上升越慢,开发效果越好。因此,避水高度可以作为水平井选井决策的重要指标。

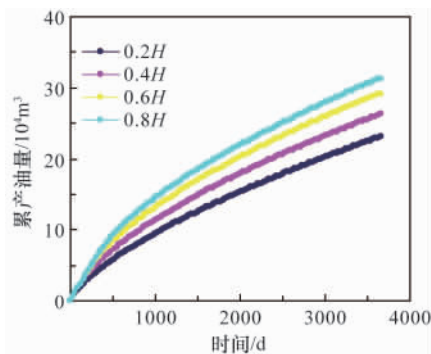


图 6 避水高度对累产油量的影响

Fig. 6 Impact of water avoidance height on cumulative oil production

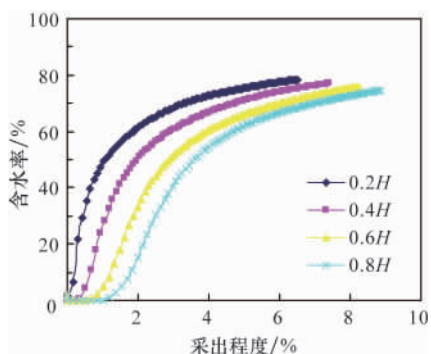


图 7 避水高度对含水率的影响

Fig. 7 Impact of water avoidance height on water cut

1.5 潜力指标

水平井井区剩余地质储量是保障水平井堵水后潜力的物质基础,直接决定水平井堵水措施的可行性。水平井水淹后,井区剩余油的分布和地下水流动关系变得更加复杂,剩余地质储量分布表现为局部富集特征。因此,水平井堵水

决策过程中,应充分利用井区地质资料和开发资料,评估井区的剩余油分布规律、油水运动规律和剩余地质储量大小,确保水平井堵水措施的经济可行性。

1.6 能量指标

充足的地层能量是水平井保持产量稳定的必要条件。当水平井生产一定时间后,井筒附近区域会出现不同程度的压力亏空,地层能量越充足,带来局部暴性水淹的概率也就越大。因此,充足的地层能量也是水平井需要堵水的重要信号。生产井区能量的大小可以由井底流压和动液面高低表示,因此,选用动液面水平作为水平井堵水选井决策的指标。

1.7 产量指标

对于底水油藏,排液速度较大的水平井所需的生产压差也越大。较大的生产压差在非均质性较强的储层中极易引起底水突进,致使油井高含水。因此,水平井日产液量应该作为水平井堵水选井决策的指标。

1.8 含水指标

水平井的含水上 升规律直接反映了水平井井筒附近区域水淹状况。利用实际油井含水资料,结合数值模拟结果将水平井含水变化分为 3 类。

I 类油井:含水变化曲线如图 8 所示,其初期含水低(含水小于 30%),且含水上升至 80%的生产时间大于 150d。为非均质导致水平井局部井段水淹的典型特征,该类水平井最具有堵水潜力。

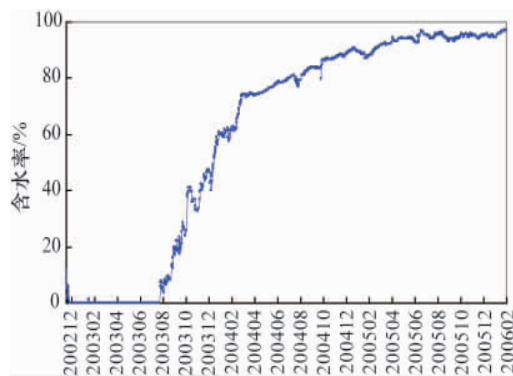


图 8 I 类油井含水率上升曲线

Fig. 8 Water cut curve for wells of Class I

II 类油井:含水变化曲线如图 9 所示,其初始含水率在 30%~80%之间,且含水上升至 90%的生产时间大于 100d,或初期含水率小于 30%,但含水上升至 90%的生产时间小于 150d。该类油井通常因其部分射开井段距离底水较近,水淹较为严重。

III 类油井:此类油井的含水上 升曲线如图 10 所示,其初始含水率高于 80%或低于 80%,含水上升至 90%的时间小于 100d,为水平井整体水淹的典型特征,因射开井段位于底水层,或由于周围老井生产导致油水界面上 升而水淹。

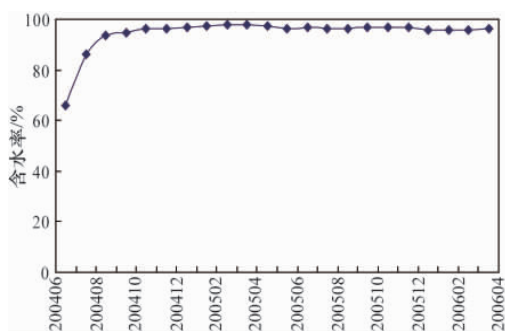


图 9 II 类油井含水率上升曲线

Fig. 9 Water cut curve for wells of Class II

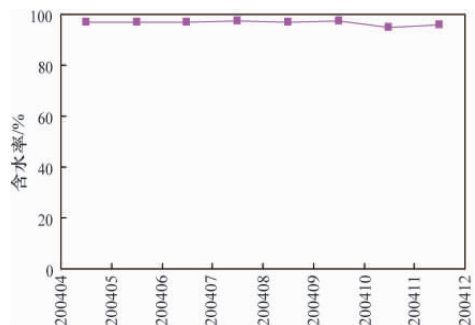


图 10 III 类油井含水率上升曲线

Fig. 10 Water cut curve for wells of Class III

2 选井决策的多因素模糊评判方法

直井的堵水选井决策方法主要是应用常权的多因素模糊评判方法。但是在水平井的堵水选井决策中,由于每口井的资料可能不齐全,如果权重系数不作调整,则与实际情况相悖,应用常权的多因素模糊评判方法存在一定的缺陷,因此必须采用变权的多因素模糊评判方法^[9]。

2.1 变权评判方法

模糊综合评判模型^[10-12]有 3 个基本要素,即因素集、评判集和单因素集(模糊映射)。

因素集:

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$$

评判集:

$$V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

单因素集(模糊映射):

$$\tilde{f}:U \rightarrow F(V)$$

$$u_i | \rightarrow \tilde{f}(u_i) \cong (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \in F(V)$$

由这 3 个基本要素可以得出评判模型。

事实上,由 \tilde{f} 可诱导出一个模糊关系 R ,而 R 可诱导一个模糊变换,即

$$\tilde{T}_R: F(U) \rightarrow F(V)$$

$$A | \rightarrow \tilde{T}_R(A) \cong A \cdot R$$

一般地,各因素对事物的影响是不同的,故因素的权重

分配可视为 U 上的模糊集,记为

$$A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\} \in F(U)$$

式中 a_i 为第 i 种因素 u_i 的权重,它们满足归一化条件,即

$$\sum_{i=1}^m a_i=1$$

这意味着三元体 (U, V, R) 构成了一个模糊综合评判模型。对于多因素堵水选井决策, U 对应选井依据集, V 对应参与决策的井的集合, R 对应单因素决策因子矩阵。

变权评判方法^[3]是把权重矩阵改为变权,但各因素间的相对权重不变,如果第 i 种决断缺少某种因素,则让该因素在该井处的权重为 0,并在这种情况下称该因素为奇异因素。

所以,变权应满足下面两条公理:

1) 归一化 $\sum_{j=1}^m a_j=1$ 。

2) 除奇异因素权值为 0 外,其余因素的相对权值不变,绝对权值发生变化。

由于每口井用于选井决策的资料不同,因此,通过变权处理后每口井的评判权向量也不同,导致用于模糊综合评判的权向量不再是一个一维的常权向量,而是一个大小为 $n \times 8$ 的二维向量,继而确定变权 λ_{ij} 。

第 i 口井的模糊综合变权决策因子为

$$F_z(i)=\sum_{j=1}^8 \lambda_{ij} f_j$$

求出所有井的变权评判因子 F_z 后,选择因子较大的井作为堵水选井的候选井。

2.2 计算步骤

变权评判方法的计算步骤如图 11 所示。

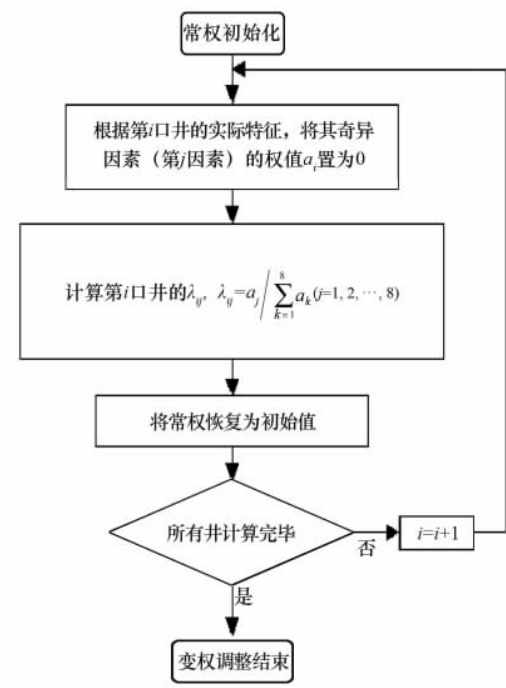


图 11 变权调整流程

Fig. 11 Flow chart of variable weight adjustment

3 算例

中国东部某底水油藏,水平井开发后期含水不断上升,日产油量急剧下降,严重影响油田产量,拟进行堵水。水平井含水上升的原因不同,其堵水效果亦有较大差异。为优选出最具堵水潜力的水平井,获得最佳的堵水效果,首先应对高含水水平井进行筛选评价。该油田7口候选水平井参数见表1。

利用隶属函数方法^[4,19],将水平井相应的参数表达为选择堵水井的无因次决策因子,并采用变权评判方法计算出各候选井的综合指标(表2),为堵水选井决策提供依据。

根据表2给出的计算结果,按综合指标对候选井的堵水潜力进行排序,选择其中综合指标较高的G104-5P15、G104-5P2、G104-5P4、G104-5P10作为最终优选堵水井实施堵水。

表1 候选井的筛选指标

Table 1 Value of screening index for horizontal wells

水平井编号	渗透率变异系数	水平井轨迹	射孔段长度/m	避水高度(小数)	剩余储量/ 10^4m^3	动液面/m	日产液量/ m^3	含水变化率
G104-5P2	0.6486	凹型	86.2	0.37	4.66	623	70.30	—
G104-5P4	0.3220	水平	191.6	0.57	3.89	694	183.55	3.26
G104-5P5	0.5147	倾斜	63.4	0.69	1.25	443	52.31	2.48
G104-5P9	—	水平	91	0.57	2.24	1194	140.30	4.24
G104-5P10	0.6356	水平	—	0.54	11.92	1081	281.89	3.47
G104-5P13	0.3421	水平	90	0.81	2.57	423	68.57	0.72
G104-5P15	0.8228	S型	95.8	0.19	7.54	335	124.44	1.16

表2 候选井的无因次决策因子及计算结果

Table 2 Decision-making factors for well selection

水平井编号	渗透率变异系数	水平井轨迹	射孔段长度	避水高度	剩余储量	动液面	日产液量	含水变化率	综合指标
G104-5P2	0.6486	0.5	0.3620	0.6667	0.1478	0.5279	0.1406	1.0000	0.52
G104-5P4	0.3220	0.0	1.0000	0.3900	0.1048	0.4742	0.3671	0.6524	0.43
G104-5P5	0.5147	0.3	0.1340	0.2331	0.0000	0.6639	0.1046	0.4952	0.33
G104-5P9	—	0.0	0.4100	0.3900	0.0132	0.0950	0.2806	0.8480	0.27
G104-5P10	0.6356	0.0	—	0.4382	0.5512	0.1806	0.5638	0.6950	0.43
G104-5P13	0.3421	0.0	0.4000	0.0682	0.0317	0.6796	0.1371	0.1438	0.25
G104-5P15	0.8228	1.0	0.4580	0.9048	0.3080	0.7461	0.2489	0.2322	0.68

4 结论

本文通过理论分析,结合数值模拟,建立了底水油藏水平井堵水指标体系,并利用模糊数学方法建立了底水油藏水平井堵水选井决策的多因素变权模糊评判模型。通过对各种影响因素的分析评价,计算出每口候选井的综合评价指标,优选其中综合评价指标较高的井作为堵水井。本方法能够综合考虑影响底水油藏水平井水淹的各种因素,使堵水井的选择更加科学合理。

参考文献 (References)

[1] 熊春明,唐孝芬.国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势[J].石油勘探与开发,2007,34(1):83-86.
Xiong Chunming, Tang Xiaofen. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 83-86.

[2] 唐孝芬,刘玉章,向向陶,等.渤海SZ36-1油藏深部调剖剂研究与应用[J].石油勘探与开发,2005,32(6):109-112.
Tang Xiaofen, Liu Yuzhang, Xiang Wentao, et al. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 109-112.

[3] 冯其红,陈月明,姜汉桥,等.模糊数学在区块整体调剖选井中的应用[J].石油勘探与开发,1998,25(3):76-78.
Feng Qihong, Chen Yueming, Jiang Hanqiao, et al. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 76-78.

[4] 刘翔鹏.堵水和剖面调整技术在中国油田的发展和应[C]//第五次国际石油工程会议论文集.北京:石油工业出版社,1995:83-90.
Liu Xiange. The development and application of water plugging and profile control technology in China Oilfield [C]// Fifth International Petroleum Engineering Conference Proceedings. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 83-90.

[5] 赵福麟.注水井井口压降曲线在粘土调剖中的应用[J].石油钻采工艺,1994,16(2):73-76.
Zhang Fulin. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(2): 73-76.

[6] Zimmermann H J. Fuzzy sets theory and its applications[M]. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1984: 106-138.

[7] 李洪兴.工程模糊数学方法及应用[M].天津:天津科学技术出版社,1993:104-132.
Li Hongxing. Engineering fuzzy mathematical methods and applications [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1993: 104-132.



- [8] 姜汉桥, 陈月明. 区块整体调剖堵水方案最优化设计及应用[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 61-65.
Jiang Hanqiao, Chen Yueming. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(4): 61-65.
- [9] 冯其红, 王树义, 吴妍, 等. 变权方法在区块整体调剖模糊选井中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(4): 45-47.
Feng Qihong, Wang Shuyi, Wu Yan, et al. Journal of China University of Petroleum: Science & Technology Edition, 2002, 26(4): 45-47.
- [10] 欧成华, 陈景山. 砂体分类评价的模糊综合评判[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 1998, 20(3): 7-11.
Ou Chenghua, Chen Jingshan. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 1998, 20(3): 7-11.
- [11] 陈民锋, 姜汉桥. 用模糊评判优选井位的CO₂吞吐强化采油技术[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 91-96.
Chen Minfeng, Jiang Hanqiao. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2): 91-96.
- [12] 杨伦标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995: 43-58.
Yang Lunbiao, Gao Yingyi. Principle and application of fuzzy mathematics [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1995: 43-58.
- [13] Zhang Z Y. A reexamination of methods of hierarchic composition in the AHP[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2002, 11(4): 53-59.
- [14] McCaffrey J. The analytic hierarchy process[J]. MSDN Magazine, 2005(6): 42-46.
- [15] 谭秀成, 丁熊. 层次分析法在碳酸盐岩储层定量评价中的应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 38-41.
Tan Xiucheng, Ding Xiong. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(2): 38-41.

(责任编辑 韩星明)

·学术动态·



《科技导报》8 篇论文入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”

中国科学技术信息研究所“精品期刊顶尖论文平台”发布“领跑者 5000”论文名单,《科技导报》8 篇论文入选。

第一作者	论文题目	作者单位	年(期):页码
朱锡锋	生物质快速热解制备生物油	中国科学技术大学	2007(21): 69-75
陈运泰	汶川特大地震的震级和断层长度	中国地震局地球物理研究所	2008(10): 26-27
汪玉	舰艇抗冲瓦整体冲击隔离新概念及其机理研究	中国人民解放军海军装备研究院	2009(3): 19-24
许冲	汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积	中国科学院地质与地球物理研究所	2009(11): 79-81
孙智辉	气候变化对中国农业的影响	延安市气象局	2010(4): 110-117
王飞跃	网络虚拟社会中非常规安全问题与社会计算方法	中国科学院自动化研究所	2011(12): 15-22
邵舸	辅助给水系统配置改进的概率安全评价	上海交通大学机械与动力工程学院	2012(28): 24-28
李克文	油田伴生地热资源评价与高效开发	中国地质大学(北京)能源学院	2012(32): 32-41

2012年10月,中国科学技术信息研究所在中国科学技术部立项实施“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”的平台建设工作,从科技部2008年、2011年遴选的两届“中国精品科技期刊”中,根据定量、定性指标,遴选出5000篇2007—2012年发表的原创性研究论文。入选论文将发布在WOK(web of knowledge)国际检索系统平台上,与SCI数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,有助于在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果。

