

水淹层混合地层水宏观俘获截面逐层计算方法

王婧慈^{1,2}, 令狐松³, 徐文远³, 姚军朋³

1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100
2. 长江大学地球物理与石油资源学院, 武汉 430100
3. 中国石油集团测井有限公司油气评价中心, 西安 710077

摘要 清污水交替注入型水淹层混合地层水矿化度变化较大。在进行脉冲中子类过套管剩余油饱和度测井解释时, 地层水矿化度的多变性将导致地层水宏观俘获截面这一重要参数不易确定。对研究区块水淹层混合地层水的水型和矿化度进行了分析, 分析结果表明不同小层间混合地层水矿化度变化较大, 因而逐层计算混合地层水宏观俘获截面十分必要。本文以脉冲中子-中子测井评价为例, 构建原始含油饱和度解释模型, 对地层流体宏观俘获截面进行信息提取, 提出了利用动静态测井资料确定混合地层水宏观俘获截面的方法。植入解释程序后, 该方法可对同一解释层内水淹程度不一致的地方, 分别计算出混合地层水宏观俘获截面。计算过程较好地考虑了层间差异性, 提高了计算结果准确性, 为利用动静态测井资料联合法对清污混注水淹层进行定量评价提供了思路。

关键词 水淹层; 混合地层水; 宏观俘获截面; 动静态测井资料

中图分类号 P631.8

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.10.003

Layer-by-layer Calculation of the Macroscopic Capture Cross Section of Mixed Formation Water in Water-flooded Zone

WANG Jingci^{1,2}, LINGHU Song³, XU Wenyuan³, YAO Junpeng³

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Wuhan 430100, China
2. School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China
3. Oil and Gas Evaluation Center, China Petroleum Logging Co. Ltd., Xi'an 710077, China

Abstract The salinity of the mixed water in the water flooded zones injected by the fresh water and the sewage has a great variation. As an important parameter in a remaining oil saturation calculation model in a cased hole, the macroscopic capture cross section of the mixed formation water is difficult to determine. The distribution of the salinity and solutes in the mixed formation water from the water flooded layer in the study area shows that it is necessary to calculate the macroscopic capture cross section of the mixed formation water layer by layer. Pulsed neutron-neutron well logging evaluation in the water-flooded zone is taken as an example in this paper. Firstly, the original oil saturation model is established. And then the macroscopic capture cross section of the formation fluid is determined. Finally, the macroscopic capture cross section of the mixed formation water is calculated based on the static and dynamic logging information. As the water flooding degree of some sampling points is inhomogeneous in the same layer, the method can also calculate the corresponding macroscopic capture cross section of the mixed formation water. The practical application shows that this method accurately reflects the variability of the salinity of the formation water. The calculation accuracy is improved because the difference between layers has been taken into consideration. This method also provides a new way for the quantitative assessment of the water flooded zones injected by the fresh water and the sewage by using some comprehensive methods to consider the dynamic and static logging data.

Keywords water-flooded zone; mixed water; macroscopic capture cross section; dynamic and static logging data

收稿日期: 2012-12-21; 修回日期: 2013-01-15

基金项目: 中国石油重大科技专项(2011E-0305)

作者简介: 王婧慈, 博士研究生, 研究方向为地球物理测井解释方法及优化, 电子信箱: 851211wjc@163.com

0 引言

水淹层原始地层水与后期注入水混合,形成混合地层水,其矿化度处于动态变化中。作为利用脉冲中子类过套管饱和度测井技术^[1-3]进行剩余油饱和度计算的重要参数,混合地层水热中子宏观俘获截面随注水开发的进行也发生着动态变化,这为剩余油的评价带来一定困难。

柴达木盆地高原咸化湖盆油气藏水淹层采取清污水交替注入方式,大规模注水开发后,不同小层之间混合地层水矿化度差距不可忽略。研究区块脉冲中子-中子(PNN)测井^[4-5]资料较多,常规的解释方法是根据原始油藏地层水矿化度变化规律、最新的地层水分析资料及采出水水分析资料,利用等效 NaCl 浓度确定出地层水宏观俘获截面。但是,由于水分析资料数量及分布范围的限制,以上方法通常仅能确定出区块中某个油组的地层水宏观俘获截面范围,无法针对单井的单个小层做出判断。由于不同矿化度地层水宏观俘获截面值^[6]跨度较大,实际处理时发现由地层水矿化度改变导致宏观俘获截面的变化是不可忽略的。为了解决这一问题,本文采用一种综合动态测井信息的方法进行混合地层水宏观俘获截面的逐层求取。该方法综合利用了原始含油饱和度、裸眼井测井资料计算储层物性参数、当前地层流体热中子宏观俘获截面,应用效果表明这种逐层求取混合地层水宏观俘获截面的思路更符合清污混注水淹油藏的客观规律,准确性更高。

1 静态测井资料的应用

采用生产井动态测井资料联合法计算每个解释层混合地层水热中子宏观俘获截面的核心是将 3 个时间点的动静态测井信息,即储层原始含油饱和度、裸眼井测井信息、当前过套管剩余油饱和度测井信息(本文中以 PNN 测井为例),进行综合考虑。

1.1 储层原始含油饱和度的计算

油藏水淹后,可动油被水驱替,可动水增加(图 1)。原始含油饱和度是衡量水淹层驱油效率的重要参数。计算储层原始含油饱和度的方法较多,较常用的是利用相渗、压汞、密闭取心等资料对原始含油饱和度和物性特征的关系进行分析^[7,8]。但研究区块中这些资料的数量、分布范围受到制约,代表性不足,无法进行系统研究,不能满足逐点求取原始含油饱和度的需要。

油藏开发初期的电阻率测井资料可以反映出油藏原始含油饱和度,随着油藏的开发,储层油水饱和度不断变化。由于本区块储层水淹后孔隙度、渗透率变化较小,因此可以利用油藏开发初期纯油层物性资料和当时的含油饱和度解释结果,建立原始含油饱和度计算模型,并将该模型应用于油藏大规模开发以后已开采或注入水波及层段原始含油饱和度的求取。本次研究层段为 G 油田中浅层 V~VIII 油组,利用 163 个油藏开发初期纯油层测井资料数据点,建立原始含油饱和度解释模型。

V~VI 油组

$$S_{w0} = 54.03 + 9.9881g\phi + 10.731gK \quad (1)$$

VII~VIII 油组

$$S_{w0} = 46.65 + 5.0481g\phi + 13.231gK \quad (2)$$

其中, S_{w0} 为原始含油饱和度,%; K 为地层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; ϕ 为地层孔隙度, %。

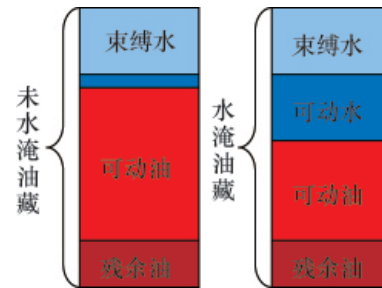


图 1 未水淹油藏与水淹油藏流体组分对比

Fig. 1 Comparison of fluid components in the non-flooded reservoir and water flooded reservoir

1.2 裸眼井测井资料的应用

对于一口生产井而言,在原始油藏演化为当前油藏的过程中,其间某个时间点的测井信息可由裸眼井测井资料反映。孔隙度、渗透率、泥质含量等可由裸眼井资料求出,并进一步用于求取该井原始含油饱和度。考虑到 G 油藏中浅层采用清污混注的注水开发模式,其大规模开发后地层水矿化度发生了变化,如果这时的混合地层水电阻率确定不当,将对含油气饱和度^[9]计算的准确性产生较大影响,因此本文仅利用裸眼井电阻率资料进行水淹程度和驱油效率的定性判断。

2 地层流体宏观俘获截面信息的提取

2.1 PNN 测井资料解释方法简述

PNN 测井仪向地层发射出 14.1MeV 的高能快中子,通过记录尚未被储层俘获的热中子计数率来计算地层宏观俘获截面 Σ_{log} ,最后得出储层剩余油气饱和度^[6]。依据标准体积模型理论, Σ_{log} 可表示为

$$\Sigma_{log} = (1 - V_{sh} - \phi) \Sigma_{ma} + V_{sh} \Sigma_{sh} + \phi (1 - S_w) \Sigma_h + \phi S_w \Sigma_w \quad (3)$$

其中, Σ_{ma} 为岩石骨架的宏观俘获截面, c.u.; Σ_{sh} 为泥质的宏观俘获截面, c.u.; Σ_h 为油气的宏观俘获截面, c.u.; Σ_w 为地层水的宏观俘获截面, c.u.; V_{sh} 为泥质含量; ϕ 为孔隙度。则储层含水饱和度为

$$S_w = \frac{(\Sigma_{log} - \Sigma_{ma}) - \phi (\Sigma_h - \Sigma_{ma})}{\phi (\Sigma_w - \Sigma_h)} - \frac{V_{sh} (\Sigma_{sh} - \Sigma_{ma})}{\phi (\Sigma_w - \Sigma_h)} \quad (4)$$

可见,为准确计算含水饱和度,进而准确求取剩余油饱和度,需选用合理的解释参数。通常依据油密度、溶解汽油比查相应图版获得 Σ_h, Σ_{ma} 主要决定于岩石骨架的矿物成分和含量,可参考研究区域纯泥岩段测量结果获得 Σ_{sh} 。对于特定的研究区域,以上 3 项参数一般波动较小。本研究区域 Σ_h 取值 20.7353c.u., Σ_{ma} 取值 9.8036c.u., Σ_{sh} 取值 37.8158c.u.。

2.2 流体宏观俘获截面信息提取

由式(3)可见,整个地层的宏观俘获截面 Σ_{lg} 由 4 部分组成,可构建流体宏观俘获截面计算式为

$$\Sigma'_{lg} = [\Sigma_{lg} - (1 - V_{sh} - \phi) \Sigma_{ma} - V_{sl} \Sigma_{sh}] / \phi \quad (5)$$

其中, V_{sh}, ϕ 由裸眼井资料求出。 Σ'_{lg} 表示排除岩石骨架和泥质的影响,并将孔隙空间统一到 100% 条件下孔隙内流体的宏观俘获截面值,它反映孔隙内的油水信息,称之为流体宏观俘获截面,有

$$\Sigma'_{lg} = \Sigma_h (1 - S_w) + \Sigma_w S_w \quad (6)$$

则剩余油饱和度

$$S_o = 1 - [(\Sigma'_{lg} - \Sigma_h) / (\Sigma_w - \Sigma_h)] \quad (7)$$

进行上述流体宏观俘获截面值提取的目的在于:流体宏观俘获截面 Σ'_{lg} 与原始含油饱和度 S_{oi} 都是仅体现岩石孔隙内流体信息,因而具有更好的可比性。

3 混合地层水宏观俘获截面的求取

3.1 研究区块地层水宏观俘获截面取值范围分析

地层水宏观俘获截面主要与水型和矿化度有关,通常分布在 22.1~120.0c.u. 之间^[9],在常温下纯水的宏观俘获截面为 22.0c.u.。表 1 为不同离子宏观俘获截面等效 NaCl 质量浓度转换关系。地层水等效 NaCl 浓度与热中子宏观俘获截面的关系近似表示为

$$\Sigma_w = 22.1 + 3.4 \times 10^{-4} C_w \quad (8)$$

其中, C_w 为地层水等效 NaCl 浓度, mg/L。

表 1 典型离子宏观俘获截面等效 NaCl 质量浓度转换表
Table 1 Sodium chloride equivalent concentration of several typical ions in the calculation of macroscopic capture cross section

溶质	转换系数	溶质	转换系数
NaCl	1	Cl ⁻	1.62
Mg ²⁺	0.004	HCO ₃ ⁻	0.01
K ⁺	0.05	Na ⁺	0.038
Ca ²⁺	0.02	SO ₄ ²⁻	0.01

G 油田中浅层油藏包含两套地层: N_1 地层中 NaHCO₃、MgCl₂、CaCl₂ 水型共存, NaHCO₃ 型略占主要地位, pH 值 6.6, 大规模注水开发后混合地层水矿化度 15.68×10⁴~18.22×10⁴mg/L; N_2 地层中以 CaCl₂ 水型为主, NaHCO₃、MgCl₂ 型次之, pH 值 6~8, 大规模注水开发后混合地层水矿化度 9.40×10⁴~17.00×10⁴mg/L。根据式(8)和表 1, 可知 G 油田中浅层油藏 N_1 地层混合地层水宏观俘获截面在 61.95~68.47c.u. 间, 而 N_2 地层混合地层水宏观俘获截面在 22.66~92.139c.u. 间。由此可见, 对于 G 油田中浅层水淹油藏, 特别是对于 N_2 地层而言, 小层间混合地层水宏观俘获截面差距明显, 逐层计算十分必要。

3.2 逐层求取混合地层水宏观俘获截面

在进行 PNN 测井解释时, 首先明确研究区域 $\Sigma_h, \Sigma_{ma}, \Sigma_{sh}$

的取值, 进而计算出原始含油饱和度和地层流体宏观俘获截面。对于每个解释层, 在层内水淹程度较一致, 即驱油效率较一致处选取 A、B 两深度点, 但应避免 A、B 两点原始含油饱和度相等, 即 $S_{oiA} = S_{oiB}$ 。由式(7)可知

$$S_{oiA} - S_{oiB} = \frac{1}{\Sigma_w - \Sigma_h} (\Sigma'_{lgA} - \Sigma'_{lgB}) \quad (9)$$

其中, S_{oiA}, S_{oiB} 分别为 A、B 两点目前剩余油饱和度, $\Sigma'_{lgA}, \Sigma'_{lgB}$ 分别为 A、B 两点流体宏观俘获截面值。可见当驱油效率一致, 即 $S_{oiA} - S_{oiB} = S_{oiA} - S_{oiB}$, 且 Σ_h, Σ_w 一致时, 式(5)计算的流体宏观俘获截面曲线 Σ'_{lg} 与原始含油饱和度曲线变化趋势具有一致性。

选择 A、B 时还需参考裸眼井物性资料, 如厚层物性较好处水淹较强, 物性较差处水淹较弱。具体为: (1) A、B 两点之间由裸眼井资料计算所得的孔隙度、渗透率相差不大; (2) A、B 两点之间补偿密度、纵波时差、补偿中子测井曲线无大的起伏; (3) A、B 两点之间泥质含量变化不大; (4) A、B 两点之间裸眼井电阻率资料无明显水淹程度不一致的特征。

由于 $S_{oiA} - S_{oiB} = S_{oiA} - S_{oiB}$, 即有

$$\frac{1}{\Sigma_w - \Sigma_h} (\Sigma'_{lgA} - \Sigma'_{lgB}) = S_{oiA} - S_{oiB} \quad (10)$$

由式(10)可求出未知数 Σ_w, Σ_h 即为该层混合地层水宏观俘获截面近似值。 Σ_w 的计算过程由程序自动实现。

另外, 物性差异导致吸水性不同, 吸水性的差异导致同一解释层内某些部位混合地层水矿化度不同, 对于水淹程度很不均匀的解釋层, 应按水淹程度将其细分, 并对细分后的小层分别计算混合地层水宏观俘获截面 (如图 2 中第 2 小层所示, 其中 A_1, B_1 和 A_2, B_2 分别用来求取该层的 Σ_{w1} 和 Σ_{w2})。若有厚层中部水淹较强, 而上部、下部水淹较弱的情况, 也应当将该厚层细分后分别计算混合地层水宏观俘获截面 (如图 2 中第 3 小层所示)。

4 应用效果实例分析

X 井位于青海省海西州茫崖镇, V~VIII 油组底深分别为 1699.3、1802.9、1895.7、2004.5m。裸眼井资料测量于 2005 年 11 月, 2010 年 3 月在 1545~1980m 进行了 PNN 测井。图 3 为 V2-16~V2-21 小层解释结果。利用本方法对各小层计算了混合地层水宏观俘获截面的近似值, 并在小层内水淹程度明显不同处分别进行计算, 计算结果体现出混合地层水宏观俘获截面随水淹程度的增强而增加的规律, 即注入水比原始地层水矿化度大, 随着水淹程度的增强, 混合地层水矿化度变大, 其宏观俘获截面值变大, 但各小层注入水矿化度也并非完全相同。比如其中 V2-17 和 V2-18 两小层裸眼井解释结果均为油层, PNN 解释结果为中水淹层, 但它们的混合地层水宏观俘获截面并不相同, 可见这两层注入水矿化度也有所差异, 这在油藏大规模水淹及清污混注的条件下是合理的。V2-21 小层上部较下部水淹程度强, 这一点除可以从流体宏观俘获截面与原始含油饱和度的关系得出外, 还可从孔隙度计算结果及自然电位曲线得到验证, 即上部物性优于下部, 因此对

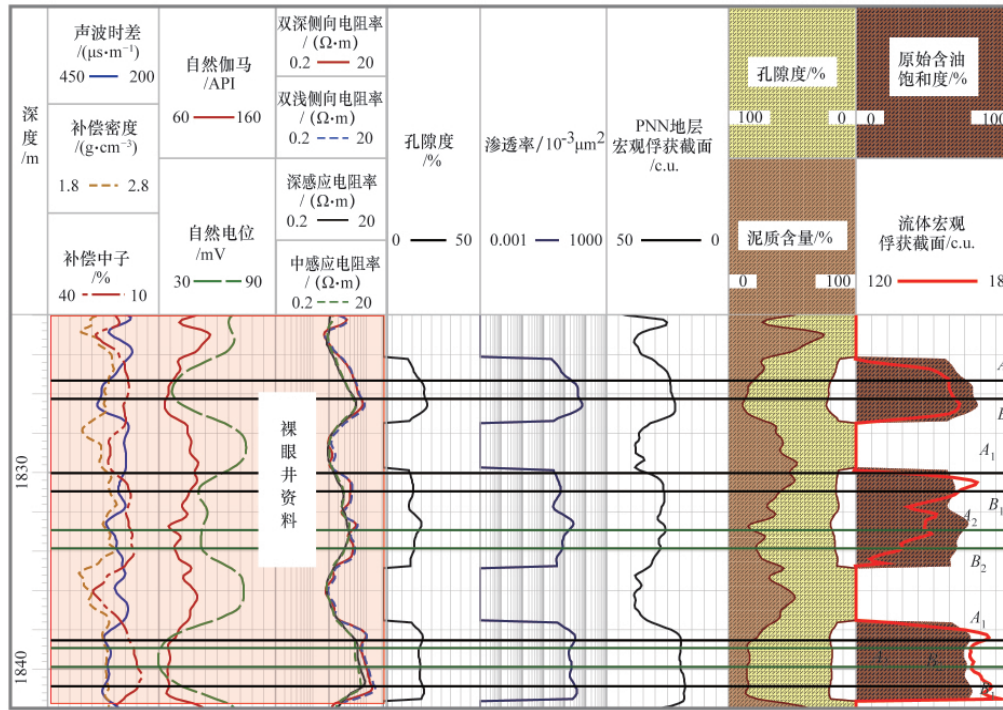


图 2 A、B 点选择示例

Fig. 2 An example of selection of point A and B

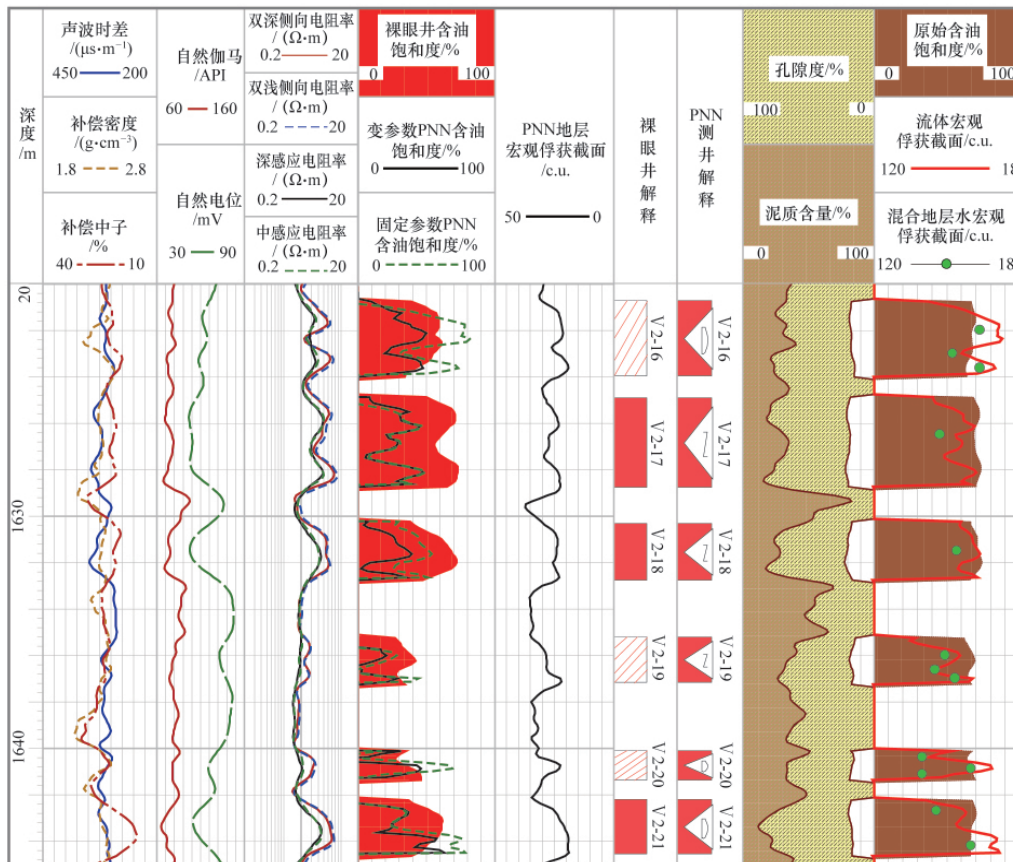


图 3 X 井 PNN 测井解释成果图

Fig. 3 PNN logging interpretation results of well X

该层进行细分并分别计算混合地层水宏观俘获截面。

图3中变参数PNN含油饱和度为利用本方法的解释结果,固定参数PNN含油饱和度为将 Σ_w 固定取为75c.u.的原解释结果。两者对比可见本方法更加合理。V2-17、V2-18两小层PNN含油饱和度分别为20.85%、25.02%,解释结论为中水淹层。这两层2010年5月试油结论为日产油6.5t、含水71%,与本解释结论相符。

5 结论

(1) 油藏经过长时间大规模注水开发后,混合地层水矿化度与原始油藏差异明显,而受注入水矿化度不同的影响,各小层之间矿化度也不尽相同,则地层水宏观俘获截面必然是逐层变化的,这一点在清污混注水淹层尤为明显。

(2) 将原始含油饱和度作为基准,计算地层中流体的宏观俘获截面值,再参考裸眼井物性资料,可寻找出小层内水淹强度大致相当的深度点,进而计算出该小层混合地层水宏观俘获截面的近似值。若裸眼井自然电位测井资料受影响因素多,不适宜计算混合地层水电阻率,则各小层混合地层水宏观俘获截面计算结果可作为同一时期邻近裸眼井连通层混合地层水电阻率的参考。

参考文献 (References)

- [1] 楚泽涵,高杰,黄隆基,等.地球物理测井方法与原理(下)[M].北京:石油工业出版社,2008:159-201.
 Chu Zehan, Gao Jie, Huang Longji, et al. Geophysical logging methods and principles(Vol II)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 159-201.

- [2] 郭海敏.生产测井导论[M].北京:石油工业出版社,2010:478-499.
 Guo Haimin. Introduction to production logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 478-499.
- [3] Morris C, Aswad T. Reservoir monitoring with pulsed neutron capture logs [C]. SPE Europe/EAGE Annual Conference, Madrid, Spain, 2005-06-13.
- [4] 张锋,徐建平,胡玲妹,等.PNN测井方法的蒙特卡罗模拟结果研究[J].地球物理学报,2007,50(6):1924-1930.
 Zhang Feng, Xu Jianping, Hu Lingmei, et al. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1924-1930.
- [5] 张锋,王新光.脉冲中子-中子测井影响因素的数值模拟[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(6):46-51.
 Zhang Feng, Wang Xinguang. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(6): 46-51.
- [6] 卢玉晓,谭茂金,庞栋锴,等.基于PNN测井技术的复杂储层流体识别与饱和度计算[J].石油物探,2011,50(3):310-314.
 Lu Yuxiao, Tan Maojin, Pang Dongkai, et al. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(3): 310-314.
- [7] 陈元千,李盩.现代油藏工程[M].北京:石油工业出版社,2004:55-62.
 Chen Yuanqian, Li Dang. Modern reservoir engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 55-62.
- [8] 闫伟林,李郑辰,殷树军,等.确定油水同层原始含油饱和度的新方法[J].测井技术,2009,33(5):440-443.
 Yan Weilin, Li Zhengchen, Yin Shujun, et al. Well Logging Technology, 2009, 33(5): 440-443.
- [9] 张超谟,张占松,郭海敏,等.水驱油电阻率与含水饱和度关系的理论推导和数值模拟研究[J].中国科学D辑:地球科学,2008,38(S2):151-156.
 Zhang Chaomo, Zhang Zhansong, Guo Haimin, et al. Science China: Earth Sciences, 2008, 38(S2): 151-156.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

2013年度国家自然科学基金项目 申请须知

为防范学术不端行为,避免重复资助,自然科学基金委通过计算机软件对申请书内容进行比对,申请人须注意:

- 1) 不得将内容相同或相近的项目,以不同类型项目向同一科学部或不同科学部申请;
- 2) 受聘于一个以上依托单位的申请人,不得将内容相同或相近的项目,通过不同依托单位提出申请;
- 3) 不得将内容相同或相近的项目,以不同申请人的名义提出申请;
- 4) 不得将已获资助项目,向同一科学部或不同科学部提出重复资助申请。

以上情形如有查实,将视情节轻重给予处理,对确有学术不端行为者将提交监督委员会处理。

详情见:<http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2013xmzn/sqxz.html>。