

# 基于压汞系数的储层评价分类方法

杨玲<sup>1</sup>, 程道解<sup>1</sup>, 刘保磊<sup>2</sup>, 白松涛<sup>1</sup>

1. 中国石油集团测井有限公司油气评价中心, 西安 710077

2. 长江大学石油工程学院, 武汉 430100

**摘要** 针对复杂储层评价这一难题, 根据压汞特征参数能够表征储层孔隙结构进而有效反映储层渗透性原理, 提出基于压汞资料的储层分类方法。在确定目的层孔隙度下限和优选敏感压汞特征参数并构建能够描述储层有效性的压汞系数的基础上, 建立研究区储层的压汞分类标准, 最终将区内储层分为四类, 其中 I 类储层品质最好, 为自然高产区; IV 类储层品质最差, 为无效储层区。利用该分类方法对实例井进行处理, 并从孔渗、粒度及试油资料等方面进行效果验证, 结果均证明这一方法合理、可靠。

**关键词** 物性下限; 压汞系数; 储层分类; 孔二段

**中图分类号** TE122

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.006

## Reservoir Classification and Application Based on Mercury Injection Coefficient

YANG Ling<sup>1</sup>, CHENG Daojie<sup>1</sup>, LIU Baolei<sup>2</sup>, BAI Songtao<sup>1</sup>

1. Reservoir Evaluation Center, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China

2. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China

**Abstract** This paper proposes a reservoir classification method based on mercury injection data, according to the principle that the characteristic parameters in mercury injection method reflect the pore structure and permeability of the reservoir. Firstly, the lower limit of porosity was determined and the sensitive characteristic parameters were selected from the mercury injection data. The relationship map of property and oiliness of the study area shows that the lower limit of porosity of Kong 2 Member is 11%, namely the upper limit of the fourth type of reservoir. However, the relationship map between electricity and oiliness shows that the lower limit of porosity of Kong 2 Member is 15%, namely the upper limit of the third type of reservoir. Relationship analysis of the mercury injection parameters and RQI shows the average pore throat radius, replacement pressure and sorting coefficient are the sensitive parameters that reflect effectiveness of the reservoir. The mercury injection coefficient that describes reservoir effectiveness was founded, and the classification standard based on mercury injection data was founded. Finally, the reservoirs are classified into four types. The quality of the first type is the best, and that of the fourth type is the worst. The logging data was processed by this method and the effect was checked by the physical property, particle size and oil test data. The results demonstrate that this method is reasonable and reliable.

**Keywords** lower limit of physical property; mercury injection coefficient; reservoir classification; Kong 2 Member

在相对均质的常规储层评价中普遍存在一个规律, 即孔隙度和渗透率常存在良好的正相关关系, 因此可通过测井曲线值计算出孔隙度大小, 进而准确估算出储层渗透率。在非均质性强的复杂储层或低孔低渗储层中, 孔隙度和渗透率的相关性则不好, 同样大小的孔隙度对应的储层渗透率差别较

大, 孔隙度大小已不能有效反应储层渗透性好坏, 仅利用孔隙度单一参数难以准确估算渗透率。因此前人经常直接利用通过孔隙度计算得到的渗透率对储层进行分类及品质评价, 显然存在不合理性。

微观孔隙结构是决定储层渗透性、影响油气成藏的重要

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-06-12

作者简介: 杨玲, 工程师, 研究方向为油气测井储层评价, 电子信箱: yanglingl@163.com

引用格式: 杨玲, 程道解, 刘保磊, 等. 基于压汞系数的储层评价分类方法[J]. 科技导报, 2014, 32(24): 46-50.

因素,是储层微观物理特性研究的核心所在<sup>[1-3]</sup>。储层孔隙结构是指岩石孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及相互连通和配比关系<sup>[4,5]</sup>。在复杂或低孔低渗储层评价中,孔隙结构的分析尤为重要,它能够更有效地反应储层的渗透性好坏<sup>[6]</sup>。压汞实验法得到的毛管压力曲线特征参数是表征储层孔隙结构的有效资料之一。本文针对大港油田舍女寺地区孔二段复杂储层<sup>[7,8]</sup>,提出基于压汞特征参数的储层分类方法。

### 1 储层物性下限确定

孔隙结构反映储层渗透性,与渗透率关系密切,但储层

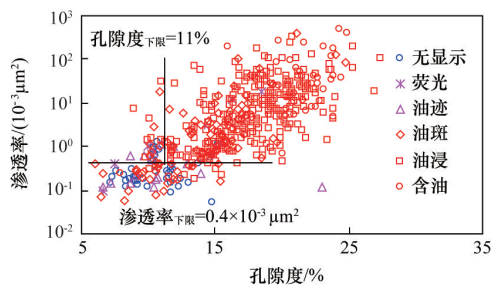


图1 孔二段物性与含油性关系

Fig. 1 Relationship between property and oiliness of Kong 2 Member

品质评价还涉及另一重要参数即孔隙度,因此本文采取综合压汞参数与孔隙度对储层进行分类的方法,以达到分析研究区目的层储层有效性的目的。为使储层分类结果更加合理,先对储层物性下限进行确定。利用物性和油气显示图版所确定的目的层孔隙度  $\varphi$  下限为 11%(绝对下限,相当于IV类储层即无效储层的孔隙度上限)(图1),而用电性和试油结果图版所确定的目的层孔隙度下限约为 15%(通过声波下限值 243  $\mu\text{s}/\text{m}$  换算得到,相当于III类储层的孔隙度上限)(图2)。本次分类过程中采用的孔隙度标准参考以上确定的下限值。

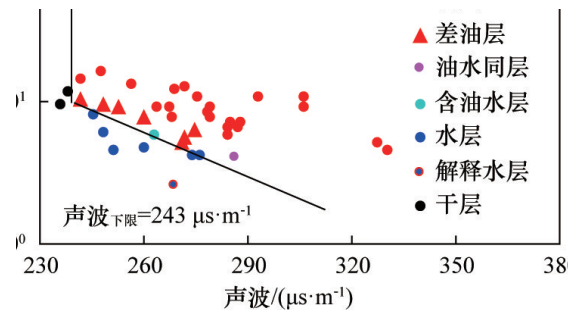


图2 孔二段电性与含油性关系

Fig. 2 Relationship between electricity and oiliness of Kong 2 Member

### 2 压汞系数构建及分类标准建立

毛管压力曲线特征参数较多<sup>[9]</sup>,其中最大孔喉半径和平均孔喉半径反映孔喉大小;排驱压力、中值压力、退汞效率反映孔喉渗流能力;分选系数、变异系数等反映孔喉分选性。通过各参数与储层有效性关系分析,可优选出反映储层品质的敏感特征参数。

储层品质指数( $R_{QI}$ )是评价储层品质的宏观参数,其计算式<sup>[10]</sup>为

$$R_{QI} = \sqrt{\frac{K}{\varphi_E}} \quad (1)$$

式中, $K$ 为储层渗透率, $\varphi_E$ 为储层有效渗透率。

图3为孔二段压汞参数、压汞系数与 $R_{QI}$ 的关系曲线。

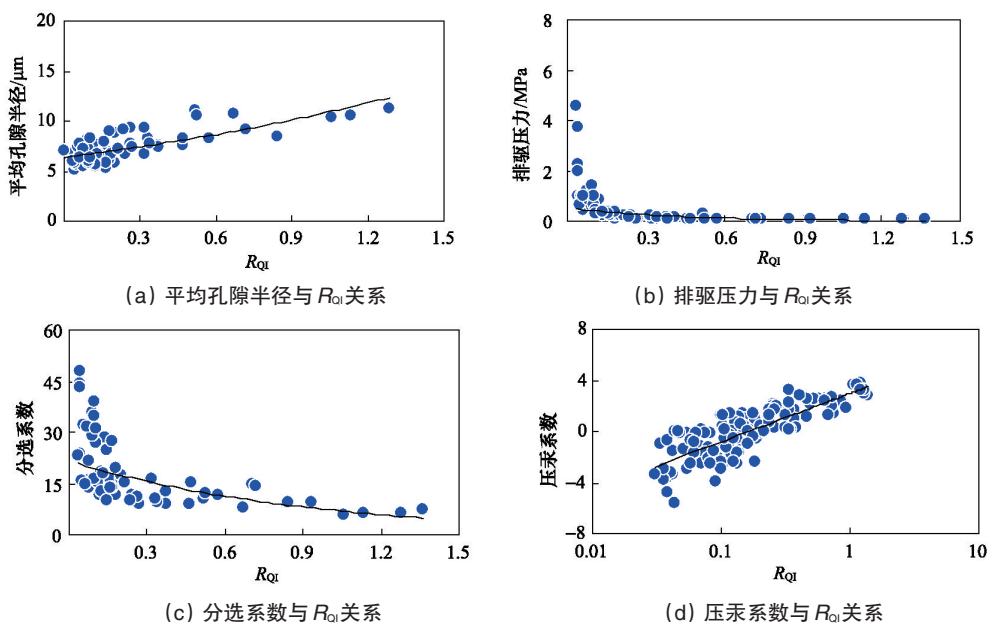


图3 孔二段压汞参数、压汞系数与 $R_{QI}$ 关系

Fig. 3 Relationship between mercury injection parameters and  $R_{QI}$  of Kong 2 Member

相关性分析表明,平均孔喉半径、排驱压力和分选系数是反映储层有效性的敏感参数,平均孔喉半径与 $R_{0i}$ 呈正比关系,最大排驱压力、分选系数与 $R_{0i}$ 呈反比关系。可见毛管压力曲线特征参数可作为储层分类的依据。

由于毛管压力特征参数主要反映储层渗透性,要实现储层品质的准确评价,还需考虑其有效孔隙空间的大小,因此综合以上敏感参数和储层有效孔隙度,构建出描述储层有效性的综合参数即压汞系数( $Y_{GXS}$ ),作为储层分类的直接依据。 $Y_{GXS}$ 计算式为

$$Y_{GXS} = \ln \frac{(\varphi_E / \varphi_{E,max}) \times R_{ave}}{p_d \times \sigma} \quad (2)$$

式中, $\varphi_E / \varphi_{E,max}$ 部分反映储层孔隙性; $\frac{R_{ave}}{p_d \times \sigma}$ 部分反映储层渗透性; $\varphi_E = \varphi \times S_{o,max}$ , $S_{o,max}$ 为最大进汞饱和度; $\varphi_{E,max}$ 为最大有效孔隙度; $\sigma$ 为分选系数; $R_{ave}$ 为平均孔喉半径; $p_d$ 为排驱压力。

$Y_{GXS}$ 与孔隙度、渗透率及 $R_{0i}$ 相关关系较好(图3(d)),表明压汞系数构建的合理性,它能够有效反应储层品质好坏。

基于研究区目的层储层压汞系数,结合孔隙度,建立了储层分类图版及标准(图4,表1)。

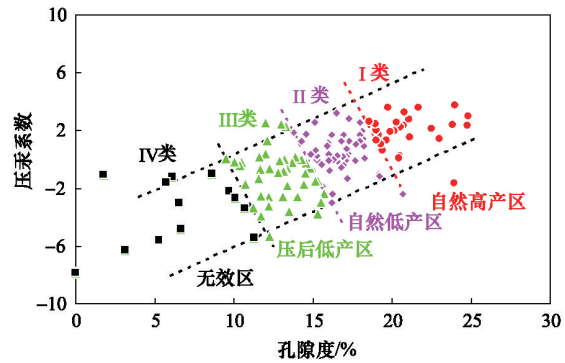


图4 基于压汞系数的分类

Fig. 4 Classification based on mercury injection parameters

表1 孔二段储层压汞分类标准

Table 1 Classification standard based on mercury injection parameters

类别	$\varphi / \%$	$Y_{GXS}$	$G_{0i} / \text{API}$	$A_c / (\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$D_{EN} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
I类	>19	$Y_{GXS} \geq -\varphi / 0.493 + 37.81$	51.1~65.8	>270	2.24~2.35
II类	15~19	$-\varphi / 0.493 + 29.81 \leq Y_{GXS} < -\varphi / 0.493 + 37.81$	56.8~72.5	235~278	2.33~2.47
III类	11~15	$-\varphi / 0.493 + 17.81 \leq Y_{GXS} < -\varphi / 0.493 + 29.81$	61.2~79.0	206~248	2.45~2.51
IV类	<11	$Y_{GXS} < -\varphi / 0.493 + 17.81$	>70	<213	>2.51

对于没有压汞实验数据的储层段,通过测井资料多元回归计算压汞系数,计算式为

$$Y_{GXS} = 0.042054A_c - 0.22652C_{NL} - 0.0698D_{EN} + 0.0344G_R$$

式中, $A_c$ 为声波曲线值, $C_{NL}$ 为补偿中子曲线值, $D_{EN}$ 为密度曲线值, $G_R$ 为伽马曲线值。

### 3 实例验证

图5为女A井的处理实例,第10列为基于压汞参数的分类结果,第9列为直接利用孔渗图版分类的结果。从纵向上看,3331~3357 m井段孔渗分类级别主要为II类和III类,也可见I类,其上段和下段则主要为III类和IV类。该段压汞分类级别主要为III类,部分层段为II类,其上段和下段则主要为IV类。可见,两种分类法均揭示了该井段储层质量相对其上段和下段要好这一规律,分类结果在纵向上具有一致性。

此外本井88#、89#、93#和94#层试油日产油1.17 t(压裂后1.57 t),日产水 $0 \text{ m}^3$ (压裂后 $2.96 \text{ m}^3$ ),属于自然低产、压后也属低产储层。根据研究区目的层分类级别与产能分区对应情况(图5),该段储层分类级别应为II类和III类。而该段孔渗分类结果以II类为主、部分层段为I类,压汞分类结果以III类储层为主、部分层段为II类,显然孔渗分类级别相对高,

压汞分类结果更符合生产实际,可见该分类方法的合理性。

粒度也能在一定程度上反映储层受改造前的孔隙结构及物性情况,用来验证储层分类结果的合理性。从粒度资料上看(图6),女B井17#样属I类储层,所占比例最大的粒径范围为2.48~3.00 mm;女C井77#样属II类储层,占比例最大的粒径范围为3.32~3.98 mm;女C井53#样属III类储层,占比例最大的粒径范围为3.32~3.98 mm和4.47~6.64 mm;女B井9#样属IV类储层,占比例最大的粒径范围为4.47~6.64 mm。可见从I类到IV类,储层粒径由大变小,岩性由粗变细,整体上符合储层质量逐渐变差的规律。

可见,无论从孔渗资料、粒度资料,还是从试油结果等方面对压汞分类方法进行效果验证,结果均表明该分类方法可靠、合理。

### 4 结论

1) 研究区物性和油气显示图版所确定的孔二段储层孔隙度下限为11%,相当于IV类储层的孔隙度上限;电性和试油结果图版所确定的孔二段储层孔隙度下限约为15%,相当于III类储层的孔隙度上限。

2) 各毛管压力曲线特征参数与 $R_{0i}$ 相关性分析结果表

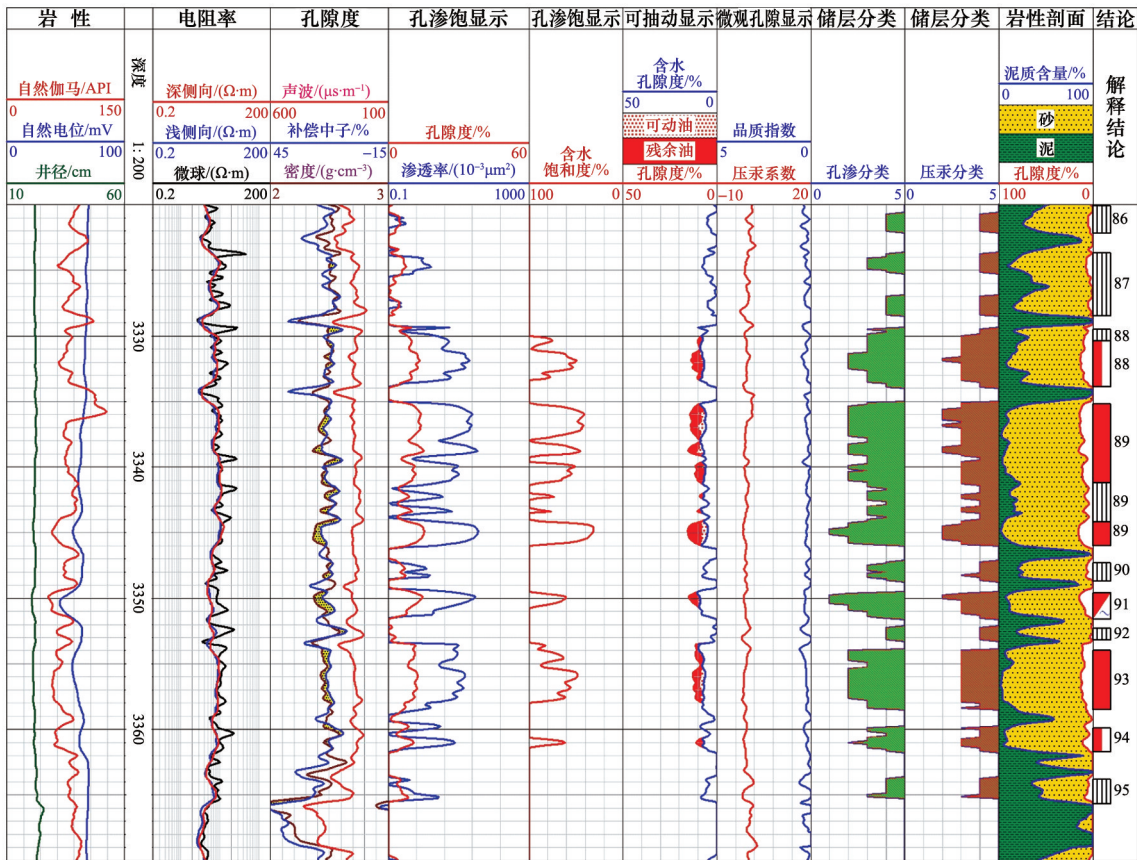


图5 女A井测井解释

Fig. 5 Logging interpretation map

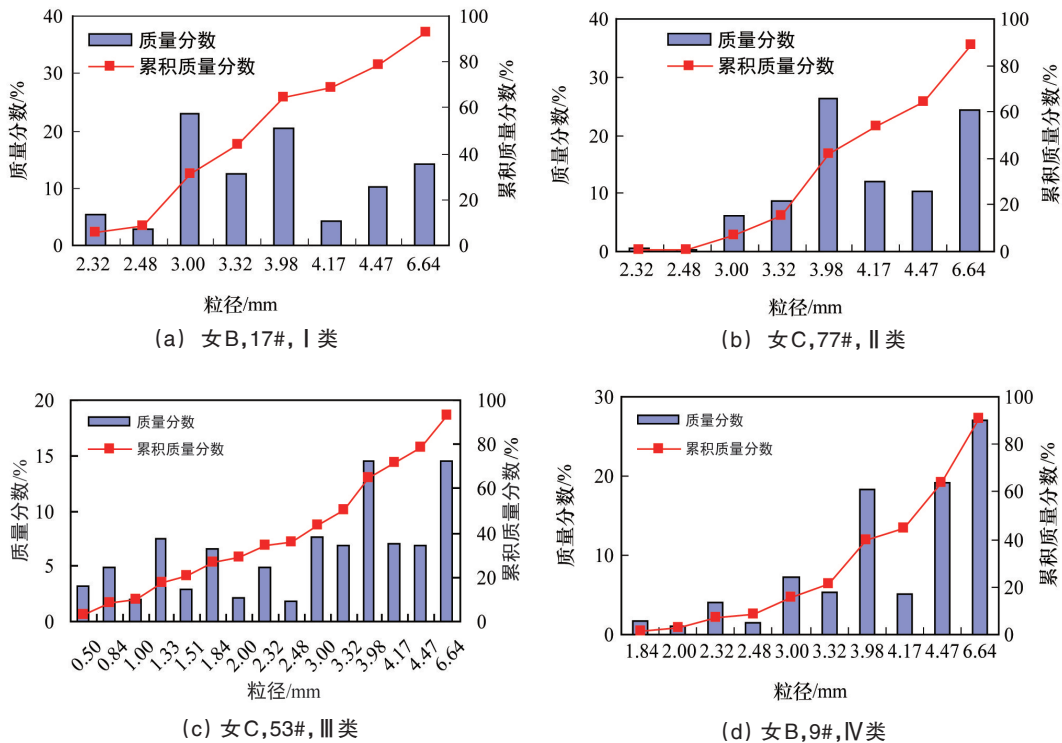


图6 典型岩样粒度分布

Fig. 6 Distribution of granularity of typical rock samples

明,平均孔喉半径、排驱压力和分选系数是表征储层有效性的敏感参数,并基于这些参数,构建出描述储层有效性的综合参数即压汞系数( $Y_{CS}$ )。并结合孔隙度,将区内储层分为四种类型,其中I类储层品质最好,为自然高产区,IV类储层品质最差,为无效储层区。

3)从孔渗资料、粒度资料及试油结果等方面对压汞分类方法进行效果验证,结果均证明了基于压汞系数的储层分类方法的合理性和可靠性,且该方法在研究区储层评价中取得了较好的效果。

#### 参考文献(References)

- [1] 张龙海,周灿灿,刘国强,等. 孔隙结构对低孔低渗储集层电性及测井解释评价的影响[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 671-676.  
Zhang Longhai, Zhou Cancan, Liu Guoqiang, et al. Influence of pore structures on electric properties and well logging evaluation in low porosity and permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 671-676.
- [2] 钟大康,朱筱敏,张枝焕,等. 东营凹陷古近系砂岩储集层物性控制因素评价[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 95-98.  
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Zhihuan, et al. Origin of secondary porosity of paleogene sandstone in the Dongying Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 95-98.
- [3] 马明福,李薇,刘亚村. 苏丹Melut盆地北部油田储集层孔隙结构特征分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 121-124.  
Ma Mingfu, Li Wei, Liu Yacun. Pore structure characteristics analysis of the oilfield in north Melut Basin, Sudan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 121-124.
- [4] 王允诚. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.  
Wang Yuncheng. Reservoir physics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [5] 卢明国,童小兰. 江汉盆地新沟嘴组砂岩孔隙结构与产油潜力[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 31-34.  
Lu Mingguo, Tong Xiaolan. Characteristics of pore structures and oil production potential of sandstone reservoir of Paleogene Xingouzu formation in Jianghan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 31-34.
- [6] 冉新权,吴胜和,付晶,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透储层孔隙结构分类研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 77-85.  
Ran Xinquan, Wu Shenghe, Fu Jing, et al. Research on the pore structure classification of low permeability reservoir or the Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 77-85.
- [7] 李卫成,侯加根,焦巧平,等. 舍女寺油田女14断块潜力区预测[J]. 断块油气田, 2005, 12(1): 7-10.  
Li Weicheng, Hou Jiagen, Jiao Qiaoping, et al. The potential zone prediction of Nv-14 block in Shenshi oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(1): 7-10.
- [8] 王贺强,王仲军,李志军,等. 舍女寺油田油气成藏及分布规律研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 32-35.  
Wang Heqiang, Wang Zhongjun, Li Zhijun, et al. Oil and gas reservoir forming and distribution study in Shenshi Oilfield[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(3): 32-35.
- [9] 王新江,张丽萍,石京平. 海拉尔油田孔隙结构特征分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(6): 91-94.  
Wang Xinjiang, Zhang Liping, Shi Jingping. Analysis of pore structure characteristics in Hailaer Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(6): 91-94.
- [10] 张龙海,刘忠华,周灿灿,等. 低孔低渗储集层岩石物理分类方法的讨论[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 763-768.  
Zhang Longhai, Liu Zhonghua, Zhou Cancan, et al. A method for petrophysical classification of low porosity and low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 763-768.

(责任编辑 赵业玲)

#### ·学术动态·



## 第1期中国科协科技期刊主编(社长)沙龙即将召开

为深入探讨新时期科技期刊发展战略,谋划数字出版和网络传播时代科技期刊发展路径,中国科协2014年9月25日将在河南安阳举办主题为“颠覆与创新——互联网思维下的科技期刊”的“第1期中国科协科技期刊主编(社长)沙龙”活动。

议题:什么是科技期刊的互联网思维;互联网如何影响科技期刊的业态;云传播对科技期刊品牌影响力、传播力、公信力产生的影响;如何让阅读内容与读者的其他行为融合;期刊大数据如何影响科技期刊的生存与发展;论文结构化与期刊多平台发布、多渠道传播如何影响期刊的业态;互联网思维下科技期刊变革的突破口或抓手何在。

欢迎中国科协科技期刊中有一定数字化出版基础,或致力于数字化转型的科技期刊的主编(副主编、责任编辑)、社长、编辑部主任等相关人员积极参会交流。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/15808506.html>。