

文章编号: 1001-6112(2001)04-0429-04

# 水敏指数变化规律研究

孙黎娟<sup>1</sup>, 乔国安<sup>1</sup>, 邹兴<sup>1</sup>, 沈慧萍<sup>1</sup>, 管菲<sup>2</sup>, 陈立跃<sup>1</sup>

(1. 中国石化中原油田分公司 勘探开发科学研究院, 河南 濮阳 457001;

2. 中国石化中原油气高新股份有限公司 采油四厂, 河南 濮阳 457001)

**摘要:** 探寻水敏指数变化规律, 可有效指导油田开发调整方案。作者通过统计文南油田的水敏试验资料, 找出了水敏指数与岩石空气渗透率和注入水矿化度的关系。结果表明, 其关系式相关程度很高, 利用该式可预测这一地区不同岩石、不同注入水的潜在水敏性。该方法对其它油田或其它方面实验资料的应用具有重要的借鉴作用。

**关键词:** 岩石空气渗透率; 注入水矿化度; 水敏试验; 水敏指数

中图分类号: TE133

文献标识码: A

当不配伍的注入水和储层粘土矿物接触后会起粘土矿物的膨胀、分散、运移, 引起渗透率降低, 因此水敏评价实验是注水开发油田敏感性研究的重要内容, 其研究成果可为油田的注水开发设计提供依据, 同时对已注水开发的油田可通过注入水的矿化度来定量评价水敏程度, 制定相应的调整措施。

但是少量的水敏评价实验不能代替不同岩石、不同注入水的水敏程度。要进行大量的实验, 则需耗费很大的人力和物力。本文对文南油田 25 块天然岩心水敏试验资料分析、统计, 描述其主要表征形式, 找出其内在规律, 利用该关系式可有效预测这一地区不同岩石、不同注入水矿化度的水敏指数, 更利于指导该油田的开发调整方案。本文旨在寻找一个最大限度地使用有限的实验资料的途径, 该方法对其它油田或其它方面实验资料的应用同样具有重要的借鉴作用。

## 1 水敏试验特征

水敏评价实验是按行业标准所规定的三级盐水进行, 根据速敏实验结果, 水敏实验流量控制在 1.5 ~ 2.0 mL/min (主要预防个别样品的速敏现象发生)。首先采用饱和盐水饱和岩心, 然后依次测定饱

和盐水、次盐水(1:1)及淡水的渗透率, 并根据淡水渗透率与饱和盐水之间的降低幅度评价水敏程度<sup>[1]</sup>。

$$I_w = \frac{K_i - K_w}{K_i} \quad (1)$$

式中,  $I_w$  ——水敏评价指数;

$K_w$  ——淡水渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;

$K_i$  ——饱和盐水渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

其判别标准如表 1。

对文南油田 6 口井 25 块样品进行水敏实验, 实验结果见表 2, 所有样品的水敏曲线具有统一形态特征, 如图 1。

(1) 饱和盐水条件下, 渗透率略有下降。为什么岩样饱和盐水渗透率会降低? 究其原因, 估计是实验用饱和盐水与其地层水原始状态物理化学性质不

表 1 水敏性评价指标

Table 1 Evaluation indexes about water sensitive character

水敏指数/ $I_w$	水敏程度	水敏指数/ $I_w$	水敏程度
$\leq 0.05$	无水敏	0.51~0.70	中等偏强水敏
0.06~0.30	弱水敏	0.71~0.90	强水敏
0.31~0.5	中等偏弱水敏	> 0.90	极强水敏

收稿日期: 2000-10-10; 修订日期: 2001-11-16.

作者简介: 孙黎娟(1968-), 女(汉族), 河南濮阳人, 工程师, 主要从事石油开发试验工作.

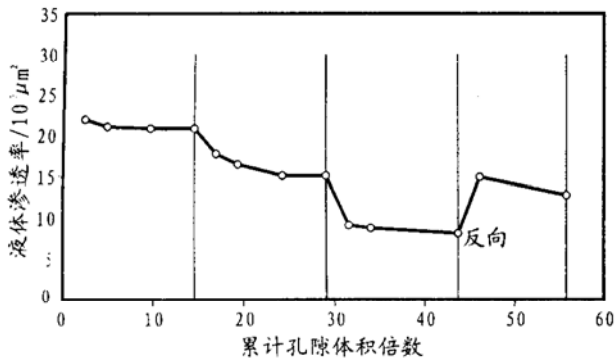


图1 水敏特征曲线

Fig. 1 Curve of water sensitive feature

同所致。文南油田地层水矿化度在  $20 \times 10^4 \sim 39 \times 10^4 \text{mg/L}$  之间, 与饱和盐水盐度和各离子含量均有所区别。更为重要的是, 文南油田深层地层水是  $\text{CaCl}_2$  型水, 属弱酸环境, 而饱和盐水属中性, 二者间的化学环境变化会引起不同的化学反应。例如, pH 值的增加会减弱颗粒与微粒间的范氏引力, 将使

结构力较弱的高岭石、伊利石等脱离颗粒而成为分散微粒堵塞喉道。同样 pH 值的提高会将储层中高岭石等溶蚀, 若浓度较小可改善岩石渗滤条件, 否则浓度较大时将形成胶态硅而堵塞岩石喉道<sup>[2]</sup>。

为建立统一的评价标准, 仍然采用饱和盐水, 用相对稳定时的渗透率作为饱和盐水渗透率进行水敏评价指数的计算。

(2) 次盐水、淡水条件下的渗透率均有一定程度的下降, 下降幅度差异较大。下降幅度次盐水水敏指数范围为 0.13~ 0.49, 属中等偏低, 平均为 0.27; 淡水水敏指数 0.40~ 0.74, 平均为 0.56, 整体具有中等偏强特征。

(3) 反转试验表明普遍存在微粒运移现象, 25 块样品均有不同程度的升幅, 升幅范围为 0.16~ 1.30, 平均为 0.47。引用速敏评价标准(实质上是一样的),  $D_k$  大于 0.7 时为强微粒运移, 样品数为 6, 占 24%; 0.51~ 0.70 为中等偏强微粒运移, 样品数为 2, 占 8%; 0.31~ 0.50 为中等偏弱微粒运移, 样

表2 水敏实验结果统计表

Table 2 Experiment results of water sensitivity

实验 编号	空气渗透率 $/ 10^{-3} \mu\text{m}^2$	液体渗透率 $/ 10^{-3} \mu\text{m}^2$							评 价	
		饱和盐水	1:1 盐水	淡水	反向 1	反向 2	$I_w$	$D_w'$ (反向)	水敏程度	微粒运移
1	4	1.28	0.94	0.61	0.73	0.71	0.52	0.20	中等偏强	弱
2	22	10.89	5.84	3.96	5.98	5.5	0.64	0.51	中等偏强	中等偏强
3	48	19.53	14.43	8.37	16.96	14.43	0.57	1.03	中等偏强	强
4	49	20.78	15.09	8.12	14.92	12.76	0.61	0.84	中等偏强	强
5	3.4	1.17	0.89	0.56	0.65	0.63	0.52	0.16	中等偏强	弱
6	221	71.36	59.37	34.71	49.93	43.79	0.51	0.44	中等偏弱	中等偏强
7	18	7.75	6.73	4.18	6.29	5.63	0.46	0.50	中等偏强	中等偏弱
8	47	4.67	3.34	1.82	2.28	2.19	0.61	0.25	中等偏强	弱
9	719	104.61	77.8	43.38	99.68	76.8	0.59	1.30	中等偏强	强
10	436	89.06	56.39	32.08	68.26	51.88	0.64	1.13	中等偏强	强
11	211	64.3	48.07	30.75	60.48	49.96	0.52	0.97	中等偏强	强
12	42	26.37	19.82	11.8	13.65	12.37	0.55	0.16	中等偏强	弱
13	11	3.94	3.01	1.99	3.2	3.02	0.49	0.61	中等偏强	中等偏强
14	2.5	0.86	0.65	0.41	0.48	0.46	0.52	0.17	中等偏强	弱
15	3.81	1.23	0.99	0.6	0.85	0.83	0.51	0.42	中等偏强	中等偏弱
16	7.87	3.61	2.8	1.69	2.5	2.41	0.53	0.48	中等偏强	中等偏弱
17	25	5.87	4.46	2.5	3.31	3.16	0.57	0.32	中等偏强	中等偏弱
18	9.3	5.24	4.28	3.16	4.6	4.41	0.40	0.46	中等偏弱	中等偏弱
19	15	9.13	6.22	3.3	4.26	4.05	0.64	0.29	中等偏强	弱
20	29	10.55	6.26	3.91	4.96	4.73	0.63	0.27	中等偏强	弱
21	77	41.39	30.57	16.35	21.52	19.7	0.60	0.32	中等偏强	中等偏弱
22	80	35.71	18.08	9.41	11.07	10.77	0.74	0.18	强水敏	弱
23	1.45	1.05	0.87	0.55	0.71	0.68	0.48	0.29	中等偏强	弱
24	175	26.56	20	11.6	14.39	13.26	0.56	0.24	中等偏强	弱
25	4.3	1.45	1.15	0.69	0.81	0.78	0.52	0.17	中等偏强	弱

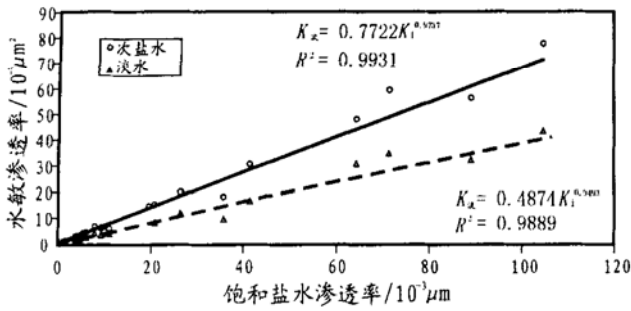


图2 综合水敏曲线

Fig. 2 Synthetical curves of water sensitivity

品数为7,占28%;升幅为0.05~0.30属弱微粒运移,样品数为10,占40%。中等及以上微粒运移占样品数的60%,反映出文南油田水敏试验中,微粒运移是其主要形式。究其原因,文南油田储层粘土矿物中虽然没有强水敏矿物——蒙脱石,但是由于含有相当数量的伊/蒙混层粘土矿物,遇不配伍的水后,蒙脱石层膨胀造成混层粘土解体,伊利石以微粒的形式分散运移,造成渗透率的下降,即水敏是以微粒分散运移的形式堵塞喉道,造成岩石渗透率的降低,而不是简单的膨胀增大、减小喉道所致。因为文南油田地层水矿化度高为 $20 \times 10^4 \sim 39 \times 10^4 \text{ mg/L}$ ,即使使用次盐水,水敏同样客观存在,这也是文南油田注水(注入水矿化度为 $5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ mg/L}$ )相对困难的主要原因之一。

## 2 储层渗透率与水敏程度之间的关系研究

根据表2渗透率与水敏指数间的变化情况看,饱和盐水渗透率变化范围虽然很大,为 $1.1 \times 10^{-3} \sim 104.61 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,但是水敏指数的变化范围却很窄,绝大部分介于0.5~0.6之间,初步表明文南油田储层渗透率的大小与其水敏指数间的关系并不密切,单因素间并不存在统计规律,无法取得储层渗透率与水敏程度之间的定性认识。

根据不同盐度下的渗透率与饱和盐水渗透率之间的变化趋势,则可以发现二者间存在一个显著的表现特征,即物性好的储层,水敏发生后渗透率同样也高,反之亦然,不同盐度下存在同一规律性,如图2。

次盐水与饱和盐水渗透率的关系为:

$$K_{wi} = 0.7722 K_i^{0.9737}, r = 0.9965 \quad (2)$$

淡水与饱和盐水渗透率的关系为:

$$K_w = 0.4874 K_i^{0.9493}, r = 0.9944 \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $K_{wi}$ ——次盐水渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $K_w$ 、 $K_i$ 同前。

根据式(2)、(3),不同盐度下的水敏指数:

$$I_{wi} = \frac{K_i - K_{wi}}{K_i} = 1 - 0.7722 K_i^{0.0263} \quad (4)$$

$$I_w = \frac{K_i - K_w}{K_i} = 1 - 0.4874 K_i^{0.0507} \quad (5)$$

式中: $I_{wi}$ ——次盐水水敏指数;其它符号同前。

由式(4)、(5)可以得到以下基本认识。同一盐度条件下,渗透率大的储层,水敏指数则越大,即水敏程度高,但由于指数项系数很小,其影响增加的幅度并不大;渗透率小的储层,水敏指数则越小,同样因指数项系数很小,其影响减少的幅度并不大。这一规律性的认识有悖于人们目前的感性认识——即“水敏所引起的水化膨胀、分散、运移对低渗储层的损害更大”。根据文南油田水敏的主要表征形式看,该规律性的认识与其储层粘土矿物构成特点相适应。即文南油田水敏损害形式主要是由伊/蒙混层粘土矿物解体、以微粒分散运移形式堵塞孔隙喉道为主,而不是简单的水化膨胀所致。根据桥堵理论,当微粒直径与喉道直径之比为1/3~1/10间最易发生堵塞,微粒直径基本相近的条件下,高渗储层更容易满足这一条件,所以宏观表现出储层渗透率越大,水敏程度略有增加的特征。

## 3 储层水敏指数规律的研究

根据以上各式系数项的变化可以看出,盐水矿化度直接控制着岩石的水敏程度,经统计研究,盐水矿化度、岩石渗透率与岩石水敏指数具有以下统计规律:

$$I_L = 1 - (0.0171C + 0.4952) K_i^{(0.0017C - 0.0512)} \quad (6)$$

式中, $I_L$ ——某一盐度条件下的水敏指数;

$C$ ——盐水矿化度, $\times 10^4 \text{ mg/L}$ ;

$K_i$ ——同前。

上述的岩石渗透率是以饱和盐水渗透率的形式

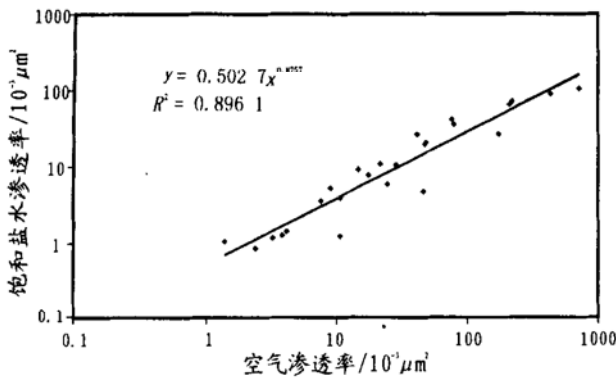


图 3 空气渗透率与饱和盐水渗透率的关系曲线

Fig. 3 Relationship between air permeability and salt-saturated solution permeability

来体现, 易失去实用价值。若采用空气渗透率, 则不用进行饱和盐水实验, 就可进行水敏程度的评价和预测, 经研究本实验 25 块样品空气渗透率与其饱和盐水渗透率间呈极好的幂律关系, 如图 3。

其统计规律为:

$$K_i = 0.5027 K_a^{0.8757}, r = 0.9466 \quad (7)$$

将(7)代入(6), 则有:

$$I_L = 1 - (0.0171C + 0.4952) \times (0.5027 K_a)^{(0.0015C - 0.0448)} \quad (8)$$

上式是文南油田不同层位、不同区块样品的综合研究统计结果, 空气渗透率覆盖范围为  $1.45 \times 10^{-3} \sim 719 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 由此可根据式(8)对文南油田不同渗透率储层和实际注入水矿化度进行潜在的水敏程度评价和预测。

## 4 结论

(1) 文南油田的水敏损害形式主要是由伊/蒙混层粘土矿物解体, 以微粒分散运移形式堵塞孔隙喉道为主, 而不是简单的水化膨胀所致。

(2) 利用水敏指数与岩石空气渗透率、注入水矿化度的关系式, 可有效预测岩石潜在的水敏程度, 更利于指导油田的调整方案设计。

(3) 该方法对其它油田或其它方面实验结果的应用具有重要的借鉴作用。

### 参考文献:

- [1] 中国石油天然气总公司. 砂岩储层敏感性评价实验方法(SY/T5358-93)[S].
- [2] 方少仙, 侯方浩. 石油天然气储层地质学[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1989.

## A STUDY OF WATER SENSITIVE INDEXES DURING OIL FIELD DEVELOPMENT

SUN Liruan<sup>1</sup>, QIAO Guo'an<sup>1</sup>, ZOU Xing<sup>1</sup>,

SHEN Huiping<sup>1</sup>, GUAN Fei<sup>2</sup>, CHEN Lirue<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Zhongyuan Oil Field, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China;

2. The 4th Production Factory, Zhongyuan Gaoxin Petroleum Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China)

**Abstract:** The study of water sensitive indexes may effectively influence development of an oil field. By comparing the experimental data of water sensitivity in Wennan oil field, a relationship among water sensitive indexes, rock air permeability and salinity of injected water was set up. It is showed that there was very high level of association with each other. The relational expression can be used to predict the possible water sensitivity of different rocks and different injected water in the area. It may also have some indication for other oil fields during waterflood development.

**Key words:** air permeability of rock; injected water salinity; water sensitive experiment; water sensitive index