

doi:10.3799/dqkx.2012.080

# 伊通盆地鹿乡断陷低渗储层敏感性机理分析及分布预测

单华生<sup>1,2</sup>, 周锋德<sup>1</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 为了准确认识和预测伊通盆地鹿乡断陷储层敏感性的分布, 从实验分析入手, 测量不同样品的敏感性、物性和粘土矿物等参数, 结合铸体薄片、压汞、扫描电镜等实验方法, 从宏观和微观2个角度分析了储层敏感性与孔隙度、渗透率与各类粘土矿物相对含量之间的关系, 分析了储层敏感性与储层的孔喉类型和粘土矿物产状之间的关系, 建立了不同微相控制下的孔隙度、渗透率、粘土矿物含量、石英和长石含量的解释模型。最后, 选取孔隙度、渗透率、石英含量、长石含量、伊利石含量、高岭石含量、绿泥石含量、伊/蒙混层含量8个参数, 采用Elman神经网络方法分别建立了速敏、水敏、酸敏和碱敏的预测模型。结果表明, 采用神经网络方法预测的储层敏感性指数与实验结果吻合; 五星构造带具有强的速敏、酸敏、碱敏和盐敏, 鹿乡断陷中部和西北部具有强的水敏性。

**关键词:** 低渗储层; 储层敏感性; 影响因素; 预测模型; 沉积学; 油气。

中图分类号: TE348

文章编号: 1000-2383(2012)04-0719-09

收稿日期: 2012-03-07

## Analysis of the Sensitivity Mechanism and Distribution in Low Permeability Reservoir in Luxiang Depression, Yitong Basin

SHAN Hua-sheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Feng-de<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** In order to determine the affecting factors and to build the predicating model of sensitivity in Luxiang depression, this paper firstly analyzes the sensitivity results and some parameters, including porosity, permeability, contents of different kinds of clay minerals tested in laboratory. Then it analyzes the relationship between sensitivity and porosity, permeability, contents of different kinds of clay minerals, throat type, and the distribution of clay minerals, integrated with the lab methods, such as core casting slices, microscope scanning, etc. Next, parameter prediction models are built by relating with sedimentary facies and depth. The porosity, permeability, contents of different clays, contents of quartz and feldspar were predicted based on these models which were used for sensitivity prediction. At last, sensitivity predicating models are built for speed sensitivity, water sensitivity, acid sensitivity and alkali sensitivity using Elman neural network. Results show that the Elman is efficient in sensitivity prediction; there are strong speed sensitivity, acid sensitivity, alkali sensitivity and salt sensitivity in Wuxing structural zone; whereas there is strong speed sensitivity in the center and northwest of Luxiang depression.

**Key words:** low permeability reservoir; reservoir sensitivity; affecting factors; predicating model; sedimentology; hydrocarbon.

在钻井、完井和开发过程中, 由于外来流体与储层的不配伍性, 油气储层绝对或有效渗透率会减少或增加, 这是储层的敏感性所致。储层敏感性通常用来定性或定量评价储层的渗透率变化与某种参数的关系(Civan, 2007)。储层敏感性导致渗透率减小, 从

而降低油气生产和流体注入速度(Civan, 2007)。这种作用结果可能是由于表面润湿性变化导致的毛管压力变化、黏土矿物膨胀、颗粒移动、相对渗透率变化(Hassan *et al.*, 2011)和应力变化(Palmer and Mansoori, 1998; Shi and Durucan, 2004)等因素引

起的. 近年来油田勘探开发实践证明, 储层敏感性是制约油气勘探和开采的重要因素之一, 尤其对低渗透、特低渗透储层, 乃至非常规的致密砂岩、页岩和煤层储层而言更是如此(姜涛和谢习农, 2005; 王京等, 2006; 魏忠元等, 2008). 国内外学者针对常规储层在敏感性实验研究(黄湘通等, 2002; 尹昕, 2005)、敏感性与粘土矿物关系(陈忠等, 1996; 孙建孟等, 1999; 康毅力和罗平亚, 2000; 赵杏媛等, 2005; 张关龙等, 2006)、敏感性评价及预测方法(彭春耀等, 1999; 赵大华等, 2002; 李永林等, 2003; 周锋德等, 2007a, 2007b)等方面进行了许多有益的研究探索.

本文从宏观和微观角度详细分析了伊通盆地鹿乡断陷低渗储层敏感性的影响因素, 提出了按沉积微相和深度建立储层敏感性影响参数的宏观预测模型. 在预测储层敏感性参数的基础上进一步利用 Elman 神经网络方法建立不同敏感性指数的预测模型.

## 1 储层概况

伊通盆地, 也称伊通地堑, 位于吉林省中部, 南

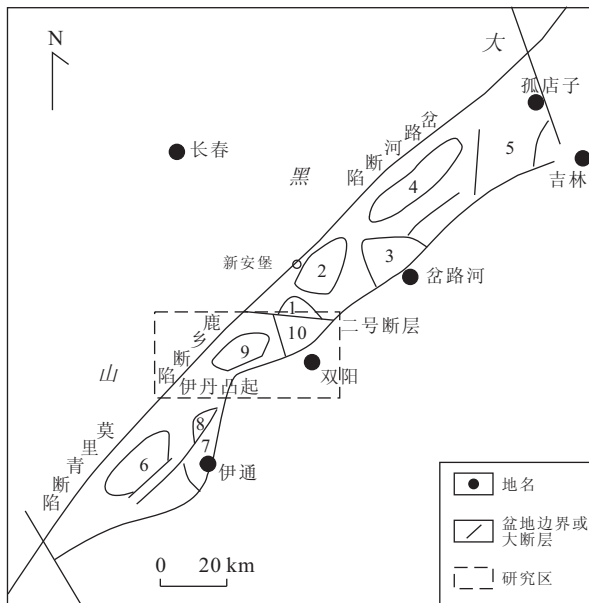


图 1 伊通盆地构造划分及研究区位置

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and structural zones in Yitong basin

1. 梁家构造带; 2. 新安堡凹陷; 3. 万昌构造带; 4. 波太凹陷; 5. 孤店子斜坡带; 6. 靠山凹陷; 7. 尖山隆起带; 8. 马鞍山断阶; 9. 大南凹陷; 10. 五星构造带

北长 140 km, 东西宽 10~20 km, 面积 2 200 km<sup>2</sup>. 地堑为 NE-SW 走向, 南部为呼兰—青龙村加里东褶皱带, 北部为吉林海西晚期褶皱带, 东西被两组北东—南西走向的边界断裂夹持, 为著名的郯庐断裂在中国境内的北延部分, 多期构造抬升、沉降及边界断裂的挤压、走滑作用使盆地内储层质量和油气成藏规律复杂.

伊通地堑包括 3 个一级构造单元, 即盆路河断陷、鹿乡断陷和莫里青断陷(图 1). 鹿乡断陷地处伊通盆地中部, 主要开发层段为古近系始新统的双阳组, 埋深为 2 000~3 200 m. 沉积砂体以辫状分流河道、水下分流河道和河口坝为主, 还有重力流、席状砂、滩坝等微相. 岩性以长石质石英砂岩为主, 少量为长石砂岩和含岩屑长石石英砂岩. 储层孔喉半径 < 1 μm 的孔隙所占比例为 67% 左右, 储层基本为中—细喉的特征. 孔隙度分布在 2%~25%, 平均孔隙度为 12.7%, 渗透率分布在 0.01 × 10<sup>-3</sup> ~ 5 718.00 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup> 之间, 平均渗透率为 43.8 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 本区属低孔、低渗储层.

## 2 储层敏感性分析

### 2.1 敏感性实验分析

敏感性预测方法主要有实验室直接测试和间接分析 2 种方法: 实验室直接测试法是利用实验装置直接测定岩石样品与各种外来工作液接触前后渗透率的变化, 用来评价储集层伤害及敏感性程度; 间接分析法主要指利用离心法毛管压力曲线、试井、测井、完井等方法间接评价储层的渗透率或产能指标. 室内评价实验的研究包括岩石特性评价、敏感性评价、工程试验和储层保护措施等研究.

本次研究工作在鹿乡断陷的星 8 井、星 14 井等 5 组实验样品的储层敏感性测试分析数据的基础上, 又选取该断陷的 2 组样品(星 2 井、刘 2 井), 对这 7 组样品进行五敏实验分析. 采用 SY/T 5358-2002《储层敏感性流动实验评价方法》, 开展速敏性、水敏性、酸敏性、碱敏性和盐敏性实验, 结果见表 1. 根据敏感性指数的大小将储层敏感性强度分为: 强(敏感性指数大于 0.7)、中偏强(敏感性指数介于 0.5~0.7 之间)、中偏弱(敏感性指数介于 0.3~0.5 之间)、弱(敏感性指数介于 0.05~0.30 之间)和无(敏感性指数 ≤ 0.05).

### 2.2 敏感性纵向分布

速敏指当流体在油气层中流动, 引起油气层中

表 1 储层敏感性实验分析结果

Table 1 Experimental results of sensitivity

样号	速敏指数	盐敏指数	水敏指数	酸敏指数	碱敏指数
X2S2-1	0.00	0.48	0.59	0.16	0.29
L2S2-2	0.00	/	0.80	0.00	0.16
X14S1-3	/	/	/	0.55	0.43
X14S2-4	0.00	0.35	0.79	0.16	0.52
X8S2-5	0.00	0.69	/	/	/
X8S2-6	0.00	0.27	0.49	/	0.74
X8S2-7	0.00	0.43	0.84	/	/

注:“/”表示样品未作敏感性试验;敏感性指数的公式为  $D_i = (K_{max} - K_{min}) / K_{min}$ , 式中:  $D_i$  为敏感性指数,  $K_{max}$  和  $K_{min}$  分别为实验测试过程中渗透率的最大值和最小值。

微粒运移并堵塞喉道造成油气层渗透率下降的现象. 这项研究可以为其他各种损害评价实验确定合理的实验流速(其他敏感性实验中流体流动速度一般为 0.8 倍的临界速度)、定量找出由于流速作用导致微粒运移发生损害的临界速度及引起油气层损害的程度和测试储层孔隙度和渗透参数. 研究区实验结果表明该地区储层对流体流动速度不敏感(图 2a).

水敏指当相对矿化度低的水进入地层时, 某些粘土矿物发生膨胀、分散、运移, 从而减少或堵塞孔隙喉道, 造成渗透率降低的现象. 该测试主要用于了解矿物与水的反应过程并定量评价其损害程度. 研究区实验水敏指数在 2 300 m 处有转折点, 2 300 m 以上随着深度增加而增加, 2 300 m 以下也有增加, 水敏指数较大, 表明该地区储层水敏强(图 2b).

酸敏指油气层与进入的酸反应后引起渗透率降低的现象. 该测试主要研究酸液与油气层的配伍性, 为油气层基质酸化和酸化解堵提供依据. 具体做法是注入酸液与岩心进行反应, 然后排出酸液, 测定岩心在反应前后的渗透率值. 研究区实验酸敏指数在

2 550 m 处有转折, 2 550 m 以上随着深度的增加而增加, 2 550 m 以下随深度的增加而减少, 酸敏指数较小, 表明该地区储层酸敏较弱(图 2c).

碱敏指当高 pH 值流体进入油层后(大部分钻井液的 pH 值大于 8), 油层中粘土矿物和颗粒矿物溶解发生改变, 释放大量的微粒, 从而造成油气层堵塞、渗透率下降. 目前国内所用的钻井液、完井液常含有纯碱  $\text{NaCO}_3$  而呈现碱性. 碱中  $\text{CO}_3^{2-}$  会与地层中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  作用生成沉淀, 堵塞孔隙喉道, 造成渗透率下降并损害地层. 研究区实验碱敏指数在 2 300 m 处有转折, 2 300 m 以上随着深度增加而增加, 2 300 m 以下随深度的增加而减少, 碱敏指数较小, 表明该地区储层碱敏较弱(图 2d).

盐敏指由于不同矿化度的工作液进入地层发生矿物析出变化, 造成油气层孔喉堵塞, 引起渗透率下降的现象. 该测试主要用来了解地层岩心在地层水所含矿化度不断下降或在现场使用的低矿化度盐水时, 其渗透率的变化过程, 从而找出渗透率明显下降的临界矿化度(或称临界盐度). 研究区实验盐敏指数在 0.2~0.6 之间, 属中等盐敏性(图 2e).

### 3 储层敏感性影响因素分析及预测

#### 3.1 敏感性影响因素分析

3.1.1 宏观因素分析 (1) 粘土矿物类型、含量和分布对敏感性的影响: 通过对鹿乡地区 3 口井 30 组扫描电镜照片观察发现, 本区粘土矿物主要为高岭石和伊利石, 伊/蒙混层及绿泥石较少见. 高岭石主要以片状、书页状集合体分布, 伊利石主要是丝缕状、绒球状, 伊/蒙混层主要是蜂窝状, 绿泥石主要为叶片状(图 3).

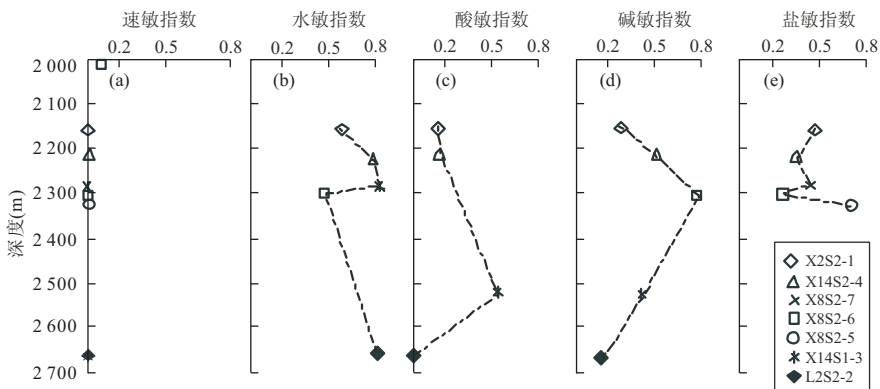


图 2 不同敏感性类型指数纵向分布关系

Fig. 2 Variations of experimental sensitivity index with depth

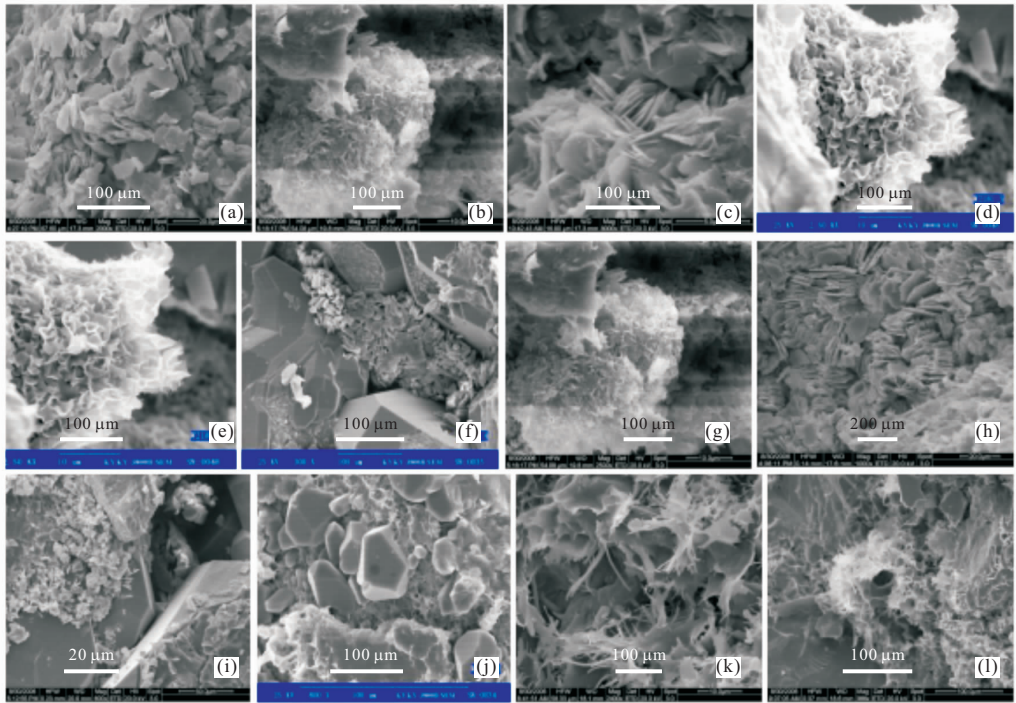


图 3 鹿乡断陷不同粘土矿物类型分布形式

Fig. 3 Illustration of clay minerals by scanning electron microscope (SEM) pictures (samples from Luxiang depression)

a. 片状高岭石集合体(昌 10 井, 1 883.76 m); b. 绒球状伊利石(昌 10 井, 1 883.96 m); c. 片状绿泥石集合体(星 2 井, 2 157.31 m); d. 蜂窝状伊/蒙混层(刘 2 井, 2 666.00 m); e. 伊/蒙混层充填孔隙(刘 2 井); f. 书页状自生高岭石充填孔隙(星 2 井); g. 绒球状伊利石充填孔隙(昌 10 井); h. 片状高岭石分散式充填孔隙(昌 10 井); i. 高岭石片状分散在颗粒表面(昌 10 井); j. 弯曲状伊利石、蜂窝状伊/蒙混层分散在颗粒表面(星 2 井); k, l. 扫描电镜下观察到的伊利石搭桥状分布孔隙间(昌 10 井)

从各样品的物性和粘土矿物相对含量随深度的变化(表 2、图 4)与不同敏感性类型指数纵向分布关系图(图 2)的比较来看:①高岭石相对含量与孔隙度和渗透率有很好的相关性,随着高岭石相对含量的增加,盐敏、水敏、碱敏指数逐渐增强,酸敏指数逐渐减弱;②随着伊利石含量的增加,水敏性逐渐增强,酸敏性和碱敏性增强,盐敏性减弱;③随着绿泥石含量的增加,酸敏指数迅速增加;④随着伊/蒙混层相对含量的增加,水敏指数增强。

(2) 储层流体性质与储层敏感性的关系: 储层流体包括油、气、水 3 相, 与储层损害关系最为密切的是地层水和原油的性质。①地层水性质: 研究区地层水属于  $\text{NaHCO}_3$  型水,  $\text{HCO}_3^-$  离子含量高, 一般为 2 125.90 mg/L, 最高达 5 692.6 mg/L, 次为  $\text{Cl}^-$  离子、 $\text{SO}_4^{2-}$  离子和  $\text{CO}_3^{2-}$  离子, 分别为 567.49 mg/L、179.96 mg/L 和 76.43 mg/L 左右;  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  离子含量高达 1 280.66 mg/L,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子含量低, 分别为 19.12 mg/L、7.02 mg/L; pH 值介于 6~10 之间, 偏中性。据上述数据分析可知, 当外来流体中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$  等侵入储层内时, 易与地层水中的

$\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  发生反应, 生成  $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$  等沉淀物堵塞喉道, 造成储层伤害。本区双阳组矿化度一般为 4 176.06 mg/L 左右, 最高达 24 809.8 mg/L, 且矿化度随深度增加而降低, 随地层水矿化度降低, 盐敏性和水敏性作用越强。②原油性质: 研究区原油含蜡量一般为 26.66%, 属于高蜡原油, 在开采过程中, 由于地层温度下降, 导致石蜡析出, 引起孔隙堵塞的问题。星 14 井储层中原油的沥青质组分比较高, 酸性流体与含沥青原油接触时, 易形成一些不溶性高分子碳氢化合物——酸渣, 造成储层酸敏。据鹿乡 23 口井的原油物性资料分析表明, 在 2 300 m 以上, 随深度的增加, 含蜡量、胶质、沥青、含硫量等参数变化不大; 在 2 300 m 以下, 各参数都相应地大幅度降低。

3.1.2 微观因素分析 (1) 油气层的孔喉类型: 根据岩石薄片鉴定资料分析, 鹿乡地区的储层孔喉绝大部分不大于  $10 \mu\text{m}$ ,  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$  的孔喉所占比例约为 49%。根据喉道分类标准, 大喉的喉道半径  $>1.0 \mu\text{m}$ , 中喉为  $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ , 细喉为  $0.05 \sim 0.20 \mu\text{m}$ , 微喉  $<0.05 \mu\text{m}$ , 说明鹿乡储层基本为

表 2 敏感性实验样品物性和粘土矿物参数

Table 2 Porosity, permeability and clay mineral content of the samples

样号	深度(m)	物性		粘土矿物相对含量(%)				
		孔隙度(%)	气测渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	蒙皂石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层
X2S2-1	2 157. 31	11. 6	1. 8	0	13. 46	74. 73	8. 79	3. 02
L2S2-2	2 666. 00	12. 7	3. 7	0	6. 00	83. 00	0. 00	11. 00
X14S1-3	2 522. 20	2. 1	1. 2	0	18. 60	11. 50	57. 10	12. 80
X14S2-4	2 218. 35	8. 8	1. 5	0	25. 70	65. 70	5. 80	8. 80
X8S2-5	2 310. 50	8. 9	0. 5	0	2. 00	74. 00	8. 00	16. 00
X8S2-6	2 294. 70	12. 7	0. 5	0	6. 00	42. 50	11. 00	40. 50
X8S2-7	2 284. 44	13. 2	1. 8	0	10. 00	11. 00	14. 00	65. 00

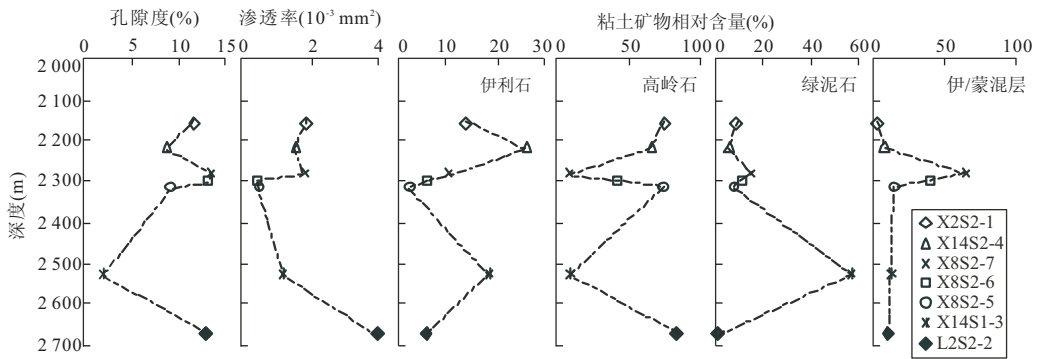


图 4 各样品的物性和粘土矿物相对含量随深度的变化

Fig. 4 Variations of samples' porosity, permeability and clay content with depth

中一细喉的特征。孔喉半径越小,越容易造成储层敏感性增加。对于碱敏性损害而言,随着孔喉半径均值逐渐变大,碱敏指数逐渐减小,碱敏性逐渐减弱,表明孔隙结构参数对碱敏性损害有一定的影响。

(2)粘土矿物产状对储层敏感性的影响:中原油田沙河街组储层岩石中的粘土矿物与骨架颗粒的接触关系(即粘土颗粒在岩石中的存在位置)有薄膜式、栉壳式、桥接式、孔隙充填式 4 种,不同的粘土矿物产状对储层有不同的潜在影响。本区储层中粘土矿物主要呈分散质点式、薄膜式和搭桥式 3 种产状。

①分散质点式:呈孔隙充填方式存在的主要是高岭石、伊利石、伊/蒙混层(图 3e~3h),造成较强的敏感性损害。②薄膜式:主要为伊利石、绿泥石(图 3i, 3j),这些粘土薄膜减小孔隙有效半径,堵塞孔喉,减少了孔隙的空间,易造成速敏和酸敏损害。③搭桥式:存在于粒间孔隙的粘土矿物主要是伊利石,也存在少量的绿泥石,条片状和纤维状伊利石在孔隙中呈搭桥式生长,把砂岩中原来可流动的粒间孔隙变为微细孔隙,大大降低了储层的渗透率(图 3k, 3l)。

### 3.2 储层敏感性预测

目前预测敏感性的方法很多,主要分为两大类:一类是通过储层敏感性机理分析进行储层敏感性的

定性预测;另一类是利用测井资料,计算或解释影响储层敏感性的参数,再通过一定的数学方法,建立不同储层敏感性类型和各参数之间的关系,然后进行敏感性程度的定量分析预测(孙建孟,1999;周锋德等,2007a),常用的数学方法主要有统计分析方法(多组判别分析和多元回归分析)、模糊数学方法和人工神经网络技术。无论是定性敏感性预测,还是定量敏感性预测,首先都要确定储层敏感性伤害的类型及引起不同敏感性的参数及程度,才能建立储层敏感性预测模型。

要准确地预测储层敏感程度,关键是如何准确获取影响敏感性的地质参数。这些参数包括:岩性、物性、岩石结构、粘土矿物、地层水总矿化度等,其中,粘土矿物是造成储层敏感性最重要的因素。根据鹿乡地区的敏感性实验分析结果,笔者选取孔隙度、渗透率、石英含量、长石含量、伊利石含量、高岭石含量、绿泥石含量、伊/蒙混层含量 8 个主要参数来预测敏感性。

3.2.1 参数预测 (1)孔隙度、渗透率解释:孔隙度通过式(1)~(6)解释,渗透率值通过孔渗关系模型来解释:

$$\phi_0 = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_i - \Delta t_m}, \quad (1)$$

$$BSH = \frac{GR - GR_{MIN}}{GR_{MAX} - GR_{MIN}}, \quad (2)$$

$$V_{SH} = \frac{2^{GUR \times BSH} - 1}{2^{GUR} - 1}, \quad (3)$$

$$\phi_1 = \phi_0 \times (1 - V_{SH}), \quad (4)$$

$$C_P = 1.68 - 0.0002 \times H, \quad (5)$$

$$\phi = \frac{\phi_1}{C_P}, \quad (6)$$

式(1)~(6)中： $\phi$ 是经过泥质校正、压实校正后的孔隙度； $V_{SH}$ 为泥质含量； $\Delta t_m$ 为岩石骨架对应的声波时差，取 180(根据不同井的情况而有所变化)； $\Delta t_f$ 为孔隙流体对应的声波时差，取 620(根据不同井的情况而有所变化)； $GUR$ 为经验系数，新地层为 3.7； $GR_{MAX}$ 为纯泥岩地层测井值； $GR_{MIN}$ 为纯砂岩地层测井值； $GR$ 为计算泥质含量选用的测井值； $C_P$ 为压实校正系数； $H$ 为地层深度。

(2)粘土矿物含量的预测，粘土矿物是造成储层敏感性最重要的因素，与深度和沉积环境关系密切。根据鹿乡地区 12 口井 194 块样品的粘土矿物 X 衍射分析结果，总结了不同微相内各种粘土与深度的关系(表 3)，计算了每口井不同深度储层的粘土矿

物含量。

(3)岩矿含量的预测：根据鹿乡断陷 16 口井 97 个样品，总结了不同微相内各种石英、长石与深度的关系。石英和长石随深度的变化较复杂，即使是相同沉积相内，不同井在同一深度上，石英和长石的含量变化也是较大的。因此，随着深度的加大，石英和长石的含量一般不是简单的线性关系，为了达到准确预测的目的，对变化复杂的曲线进行分段拟合，且石英和长石的含量在同一深度上取平均值，这样得出的公式更符合实测结果(表 4)。

**3.2.2 参数的预处理** 为了消除由各参数自身的数据特点造成的误差，对各参数进行了归一化处理，使各参数分布在(0~1)。归一化函数为：

$$D_P = \frac{P - P_{MIN}}{P_{MAX} - P_{MIN}}, \quad (7)$$

式中： $D_P$ 为归一化后的参数； $P$ 为归一化前的参数； $P_{MIN}$ 为  $P$  参数中的最小值， $P_{MAX}$ 为  $P$  参数中的最大值。

**3.3 敏感性模型建立**

储层敏感性的影响因素复杂，各因素与敏感性

表 3 鹿乡断陷不同沉积微相间粘土矿物预测

Table 3 Predicting equations of clay mineral contents within different sedimentary facies

沉积微相	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层
重力流	$I=0.0006D+0.0422$	$K=-0.0060D+19.8530$	$C=0.0017D-0.7636$	$IS=0.0030D-3.6557$
席状砂	$I=0.0006D+0.0422$	$K=-0.0060D+19.8530$	$C=0.0017D-0.7636$	$IS=0.0030D-3.6557$
滩坝	$I=0.0006D+0.0422$	$K=-0.0060D+19.8530$	$C=0.0017D-0.7636$	$IS=0.0030D-3.6557$
水下分流河道	$I=0.0002D+0.9715$	$K=-0.0022D+9.1387$	$C=0.0007D-0.3881$	$IS=0.0015D-1.1948$
辫状分流河道	$I=0.0003D+1.4922$	$K=-0.0021D+10.1700$	$C=0.0014D-1.3310$	$IS=0.0021D-2.0177$
河口坝	$I=0.0082D-3.5918$	$K=-0.0031D+9.3358$	$C=0.0008D-0.6753$	$IS=0.0001D+0.3759$

注： $D$ 为深度，单位 m； $I$ 为伊利石的含量(%)； $K$ 为高岭石的含量(%)； $C$ 为绿泥石的含量(%)； $IS$ 为伊/蒙混层的含量(%)。

表 4 鹿乡断陷不同沉积微相间岩矿含量预测

Table 4 Predicting equations of quart and feldspar contents within different sedimentary facies

沉积微相	石英(Q)(%)	长石(F)(%)
辫状分流河道	$Q=0.0157D+32.389(<2350\text{ m})$	$F=-0.0054D+38.435(<2350\text{ m})$
	$Q=-0.0263D+124.470(>2350\text{ m})$	$F=0.0235D-31.827(>2350\text{ m})$
辫状河道	$Q=-0.0027D+58.151$	$F=0.0112D+12.431$
心滩	$Q=90$	$F=10$
水下分流河道	$Q=1.2D-1914$	$F=-0.7273D+1218.4$
滩坝	$Q=-0.016D+88.728(>1800\text{ m})$	$F=0.004D+23.558(>1800\text{ m})$
	$Q=62(<1800\text{ m})$	$F=25(<1800\text{ m})$
席状砂	$Q=35.7(<1200\text{ m})$	$F=49.4(<1200\text{ m})$
	$Q=0.0282D+1.8176(1200\sim 2220\text{ m})$	$F=-0.0229D+76.929(1200\sim 2220\text{ m})$
河口坝	$Q=64.5(>2220\text{ m})$	$F=26(>2220\text{ m})$
	$Q=-0.003D+74.185$	$F=0.0036D+17.596$
重力流	$Q=-0.016D+88.728$	$F=0.004D+23.558$

注： $D$ 为深度，单位 m； $Q$ 为石英的含量； $F$ 为长石的含量。

指数之间是复杂的非线性关系. 利用 Elman 动态神经网络能够在相关关系不明确的情况下自动调节参数之间的权重的特性, 使预测结果与实测结果之间的误差减到最小(Elman, 1990).

鹿乡地区的敏感性实验数据较少, 考虑到影响敏感程度的机理应该是一致的, 选用伊通地堑 19 口井的敏感性实验数据作为建立神经网络模型的基本参数. 输入层的数据选择了 8 个参数, 输出层的数据是与输入层数据对应的已测敏感性数据.

在建立网络模型的时候, 笔者设置了三层的 Elman 神经网络模型, 由于不同的敏感性样品数不一样, 分别建立了不同敏感性的网络学习函数, 模型建立的过程是一致的(周锋德等, 2007b).

对每种敏感性模型, 随机选择样品中的部分样品, 预留样品作为检验模型样品, 选择结果最好的作为预测模型. 用来建立水敏、速敏、盐敏、酸敏和碱敏预测模型的样品数分别为 24、17、21、21 和 23 个, 预留的样品数分别为 5、4、5、5 和 5 个.

### 3.4 模型结果评价

用最终的网络模型对预留的样品进行预测, 把预测值与实测值的对比结果作为检验网络模型的标准. 从预测结果与实测结果的对比来看(图 5), 速敏性的预测结果与实验值的绝对误差的平均值为 0.04, 水敏性的预测结果与实验值的绝对误差的平均值为 0.001, 盐敏性的预测结果与实验值的绝对误差的平均值为 0.03, 酸敏性的预测结果与实验值的绝对误差的平均值为 0.01, 碱敏性的预测结果与实验值的绝对误差的平均值为 0.02. 所建立的网络模型完全能够达到预测的要求. 预测敏感性指数和实测敏感性指数关系分别为:

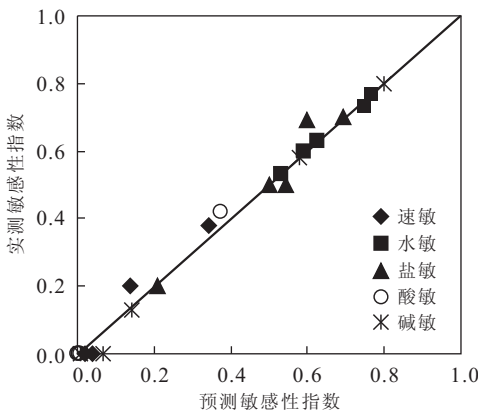


图 5 不同敏感性模型预测的敏感性指数与实验结果对比  
Fig. 5 Relationship of the sensitivity index between the prediction by Elman neural network and the experimental test

$$\text{速敏: } D_{ip} = 0.7918 D_{ie} + 0.0196 (R^2 = 0.962), \tag{8}$$

$$\text{水敏: } D_{ip} = 1.0420 D_{ie} - 0.0268 (R^2 = 0.991), \tag{9}$$

$$\text{盐敏: } D_{ip} = 0.8762 D_{ie} + 0.0196 (R^2 = 0.942), \tag{10}$$

$$\text{酸敏: } D_{ip} = 0.8826 D_{ie} + 0.0048 (R^2 = 0.999), \tag{11}$$

$$\text{碱敏: } D_{ip} = 0.9509 D_{ie} + 0.0317 (R^2 = 0.996), \tag{12}$$

式(8)~12中:  $D_{ip}$  为预测的敏感性指数;  $D_{ie}$  为实验的敏感性指数.

### 3.5 预测敏感性分布

使用以上方法建立的预测模型, 对研究区双二段的储层敏感性进行了预测. 根据敏感性指数的大小将储层敏感性强度分为: 强(敏感性指数大于 0.7)、中偏强(敏感性指数介于 0.5~0.7 之间)、中偏弱(敏感性指数介于 0.3~0.5 之间)、弱(敏感性指数介于 0.0~0.3 之间)和无(敏感性指数=0). 图 6 为其 5 种敏感性预测结果的平面分布. 预测结果显示: 该层段水敏性以中偏强及强为主, 分布范围广; 速敏性在五星构造带东部为强, 其余均无; 酸敏性以强和弱为主, 局部分布; 碱敏和盐敏分布范围较广, 分别以弱和中偏弱为主.

## 4 结论

(1) 本区储层具有较强的水敏性和碱敏性. 当渗透率大于  $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时, 表现出中等偏弱盐敏; 当渗透率小于  $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时, 盐敏性损害与高岭石正相关, 与伊利石、绿泥石、伊/蒙混层含量和渗透率大小负相关; 水敏指数与伊利石、高岭石、伊/蒙混层正相关, 与绿泥石负相关, 与渗透率正相关; 酸敏指数与伊利石、绿泥石、伊/蒙混层正相关, 与高岭石负相关, 与渗透率负相关; 碱敏指数与伊利石、绿泥石、伊/蒙混层、高岭石正相关, 与渗透率负相关; 该地区无速敏性.

(2) 对储层敏感性的影响因素是多方面的, 利用沉积微相控制建立不同敏感性相关参数的深度解释模型可以弥补数据不足问题.

(3) 根据解释的敏感性影响参数, 利用 Elman 神经网络预测的储层敏感性指数误差小. 绘制的不同层段敏感性程度分布图可以为油田开发提供参考.

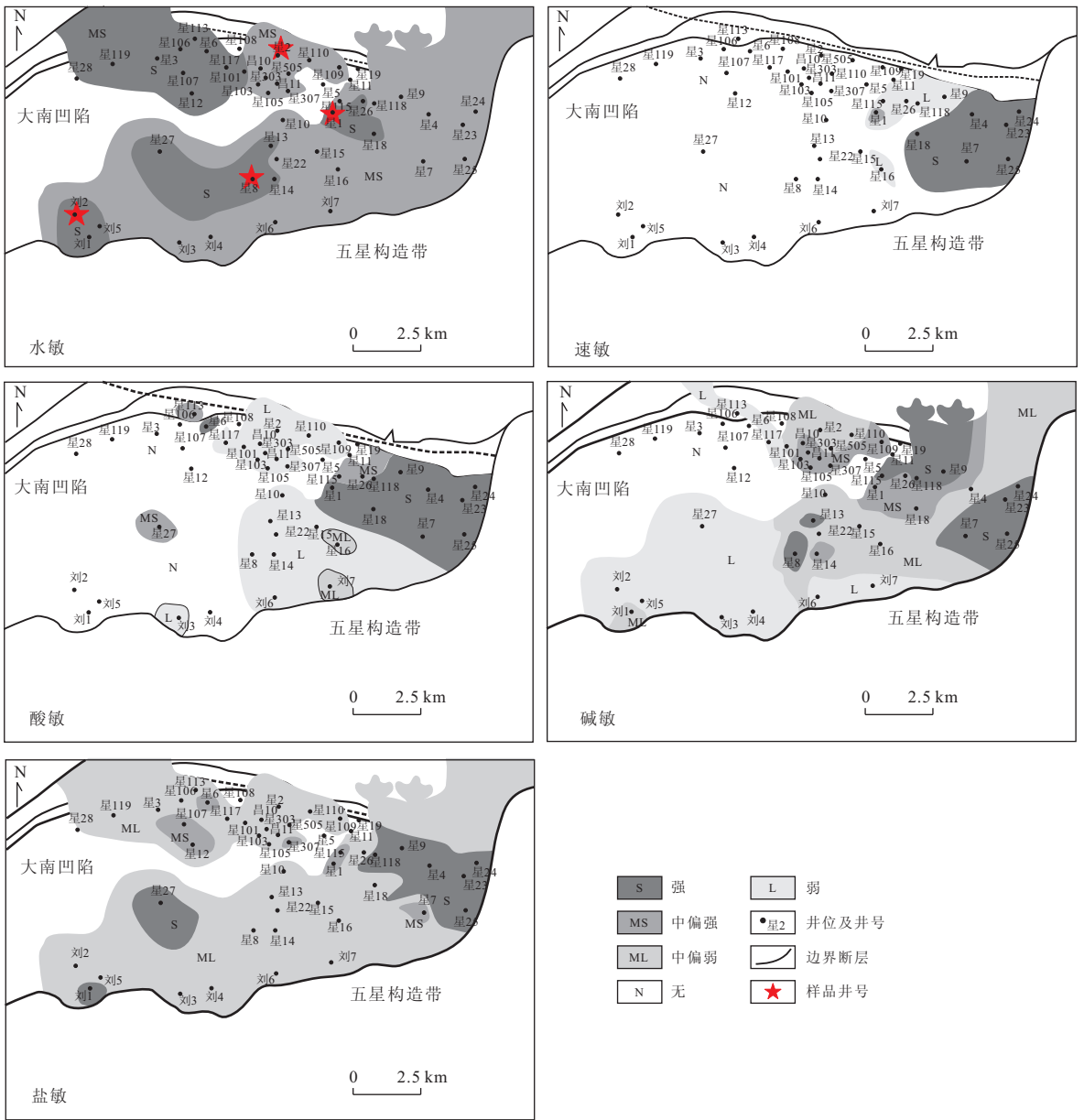


图 6 鹿乡断陷双二段敏感性预测结果平面分布

Fig. 6 Sensitivity distribution by Elman neural network in second section of Shuangyang Formation, Luxiang depression

References

Chen, Z., Zhang, S. N., Shen, M. D., 1996. Potential damages of clay minerals in oil-field protection. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 23(2): 80–87 (in Chinese with English abstract).

Civan, F., 2007. Formation damage mechanisms and their phenomenological modeling—an overview. SPE European Formation Damage Conference, Scheveningen, The Netherlands, 1–12.

Elman, J. L., 1990. Finding structure in time. *Cognitiv. Sci.*, 14(2): 179–211. doi:10.1016/0364-0213(90)90002-E

Huang, X. T., Fang, S., Xu, H. H., 2002. Reservoir sensibil-

ity research on Shuangyang Formation in Moliqing basin of Yitong graben. *World Geology*, 21(4): 372–352 (in Chinese with English abstract).

Hassan, B., Reza, R. M., Nazhat, D., et al., 2011. Evaluation of damage mechanisms and skin factor in tight gas reservoirs. SPE European Formation Damage Conference, Noordwijk, The Netherlands, 1–13.

Jiang, T., Xie, X. N., 2005. Effects of high temperature and overpressure on reservoir quality in the Yinggehai basin, South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(2): 215–220 (in Chinese with English abstract).

Kang, Y. L., Luo, P. Y., 2000. Influence of clay minerals on



- formation damage in sandstone reservoir; a review and prospect in it. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 17(5): 36—40 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Yang, D. Q., Tian, N. X., et al., 2003. The sensitivity evaluation of low permeability reservoir of Jurassic in Yanqi basin. *Mineral Petrol.*, 23(1): 77—80 (in Chinese with English abstract).
- Palmer, I., Mansoori, J., 1998. How permeability depends on stress and pore pressure in coal beds; a new model. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1(6): 539—544.
- Peng, C. Y., Yan, J. N., Li, Y. F., 1999. New ways of predicting reservoir damage of potential sensitivity. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 16(2): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Shi, J. Q., Durucan, S., 2004. Drawdown induced changes in permeability of coal beds; a new interpretation of the reservoir response to primary recovery. *Transport in Porous Media*, 56(1): 1—16. doi: 10. 1023/B: TIPM. 00000. 18398. 19928. 5a
- Sun, J. M., Li, Z. C., Guan, X., 1999. Reservoir sensitivity determination by well logging. *ACTA*, 20(4): 34—38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhao, Y. C., Liu, K., et al., 2006. Superimposing controls of acidic and alkaline dissolutions on sandstone reservoir quality of the Paleozoic Xiashihezi and Shanxi Formations in Tabamiao area, Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 221—228 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z. Y., Yao, G. Q., He, S., et al., 2008. Diagenetic evolution and mode in the Chaluhe faulted depression reservoir, Yitong graben. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 227—234 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X., 2005. Experimental research on sensitive it of sandstone reservoir in Daniudi Ga field in E'erdusi basin. *Natural Gas Industry*, 25(8): 31—34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. L., Chen, S. Y., Yan, J. H., 2006. Characteristics of clay minerals and their effects on formation sensitivity in Sha-1 member in Zhengjia-Wangzhuang area. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 99—106 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. H., Li, B. M., Zhao, H. T., 2002. Evaluating Upper Palaeozoic sand-stone reservoir sensitivity by use of log data. *Natural Gas Industry*, 22(6): 42—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Y., Luo, J. C., Yang, F., 2005. Application of clay mineral study results to hydrocarbon prospecting in Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 26(5): 570—576 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, F. D., Yao, G. Q., Chen, J. X., et al., 2007a. Analysis of affecting factors and predication of sensitivity for low permeability reservoir: a case study of Liangjia-xin' anpu district in Chaluhe depression. *J. Mineral. Petrol.*, 27(3): 101—105 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, F. D., Yang, G. Q., Wang, G. C., et al., 2007b. Elman neural networks applied in the low permeability reservoir sensitivity prediction. *Geological Science and Technology Information*, 26(6): 91—94 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈忠, 张哨楠, 沈明道, 1996. 粘土矿物在油田保护中的潜在危害. *成都理工学院学报*, 23(2): 80—87.
- 黄湘通, 方石, 许海华, 2002. 伊通地堑莫里青盆地双阳组储层敏感性研究. *世界地质*, 21(4): 347—352.
- 姜涛, 解习农, 2005. 莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(2): 215—220.
- 康毅力, 罗平亚, 2000. 粘土矿物对砂岩储层损害的影响——回顾与展望. *钻井液与完井液*, 17(5): 36—40.
- 李永林, 杨道庆, 田纳新, 等, 2003. 焉耆盆地侏罗系低渗透储层敏感性评价. *矿物岩石*, 23(1): 77—80.
- 彭春耀, 鄢捷年, 李玉凤, 1999. 预测储层潜在敏感性损害的新方法. *钻井液与完井液*, 16(2): 1—7.
- 孙建孟, 李召成, 关睢, 1999. 用测井确定储层敏感性. *石油学报*, 20(4): 34—38.
- 王京, 赵彦超, 刘琨, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层“酸性+碱性”叠加溶蚀作用与储层质量主控因素. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 221—228.
- 魏忠元, 姚光庆, 何生, 等, 2008. 伊通地堑岔路河断陷储层成岩演化史与成岩模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(2): 227—234.
- 尹昕, 2005. 大牛地气田砂岩储层敏感性实验研究. *天然气工业*, 25(8): 31—34.
- 张关龙, 陈世悦, 鄢继华, 2006. 郑家一王庄地区沙一段粘土矿物特征及对储层敏感性影响. *矿物学报*, 26(1): 99—106.
- 赵大华, 李保民, 赵会涛, 2002. 用测井资料评价上古生界砂岩储层敏感性. *天然气工业*, 22(6): 42—44.
- 赵杏媛, 罗俊成, 杨帆, 2005. 粘土矿物研究成果在塔里木盆地油气勘探中的应用. *新疆石油地质*, 26(5): 570—576.
- 周锋德, 姚光庆, 陈金霞, 等, 2007a. 岔路河断陷梁家一新安堡地区低渗储层敏感性影响因素分析及预测. *矿物岩石*, 27(3): 101—105.
- 周锋德, 姚光庆, 王国昌, 等, 2007b. Elman 神经网络在低渗储层敏感性预测中的应用. *地质科技情报*, 26(6): 91—94.