

文章编号: 1000-0747(2018)03-0482-07 DOI: 10.11698/PED.2018.03.13

# 超低渗油藏井网适应性定量评价方法 ——以鄂尔多斯盆地三叠系长 6、长 8 油藏为例

赵继勇<sup>1,2</sup>, 安小平<sup>1,2</sup>, 王晶<sup>1,2</sup>, 樊建明<sup>1,2</sup>, 康兴妹<sup>1,2</sup>, 谭习群<sup>1,2</sup>, 李文青<sup>1,2</sup>(1. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发  
国家工程实验室, 西安 710018)基金项目: 国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程(二期)”(2016ZX05050);  
国家科技重大专项“低渗—超低渗油藏有效开发关键技术”(2017ZX05013-004)

**摘要:** 基于前人的研究并结合超低渗油藏 10 年的开发实践, 应用聚类分析法和灰色关联法, 建立了包括优选评价参数、确定评价参数权重、划分油藏开发阶段、确定分类系数 4 个方面 10 项评价参数的超低渗油藏井网适应性定量评价方法。应用该方法对鄂尔多斯盆地三叠系长 6、长 8 共 13 个主力典型超低渗油藏开展了井网适应性评价, 得到 3 点基本认识: ①超低渗 I 类油藏井网适应性整体较好, 井网形式及井网参数都较为合理; ②裂缝不发育油藏适合正方形反九点井网, 裂缝较发育油藏适合菱形反九点井网, 裂缝发育油藏适合矩形井网; ③超低渗 II 类、III 类油藏需要在坚持井网形式确定原则的基础上, 进一步优化排距, 提高该类油藏开发水平。图 9 表 4 参 20

**关键词:** 超低渗油藏; 井网适应性; 综合评价指数; 鄂尔多斯盆地; 三叠系; 长 6 段; 长 8 段

中图分类号: TE349 文献标识码: A

## A quantitative evaluation for well pattern adaptability in ultra-low permeability oil reservoirs: A case study of Triassic Chang 6 and Chang 8 reservoirs in Ordos Basin

ZHAO Jiyong<sup>1,2</sup>, AN Xiaoping<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, FAN Jianming<sup>1,2</sup>, KANG Xingmei<sup>1,2</sup>, TAN Xiqun<sup>1,2</sup>, LI Wenqing<sup>1,2</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China; 2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil &amp; Gas Fields, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Based on the previous studies and development practice in recent 10 years, a quantitative evaluation method for the adaptability of well patterns to ultra-low permeability reservoirs was established using cluster analysis and gray correlation method, and it includes 10 evaluation parameters in the four aspects of optimal evaluation parameters, determination of weights for evaluation parameters, development stage division, and determination of classification coefficients. This evaluation method was used to evaluate the well pattern adaptability of 13 main ultra-low permeability reservoirs in Triassic Chang 6 and Chang 8 of Ordos Basin. Three basic understandings were obtained: Firstly, the well pattern for ultra-low permeability type-I reservoirs has generally good adaptability, with proper well pattern forms and well pattern parameters. Secondly, square inverted nine-spot well pattern is suitable for reservoirs with no fractures; rhombic inverted nine-spot injection pattern is suitable for reservoirs with some fractures; and rectangular well pattern is suitable for reservoirs with rich fractures. Thirdly, for the ultra-low permeability type-II and type-III reservoirs, with the principles of well pattern form determination, the row spacing needs to be optimized further to improve the level of development of such reservoirs.

**Key words:** ultra-low permeability oil reservoir; well pattern adaptability; comprehensive evaluation parameter; Ordos Basin; Triassic; Chang 6 Formation; Chang 8 Formation

引用: 赵继勇, 安小平, 王晶, 等. 超低渗油藏井网适应性定量评价方法: 以鄂尔多斯盆地三叠系长 6、长 8 油藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 482-488.

ZHAO Jiyong, AN Xiaoping, WANG Jing, et al. A quantitative evaluation for well pattern adaptability in ultra-low permeability oil reservoirs: A case study of Triassic Chang 6 and Chang 8 reservoirs in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 482-488.

## 0 引言

鄂尔多斯盆地超低渗油藏开发已10年,开发矛盾及开发规律逐步显现,具备了系统评价不同类型油藏井网适应性的基础,开展超低渗油藏井网适应性评价对已开发油藏老区稳产及新区上产均具有重要意义。

目前国内外井网适应性评价方法较少。国外文献鲜有报道。国内学者提出了多种井网适应性评价方法,主要为单一指标数学模型评价法<sup>[1-2]</sup>、典型指标定性描述法<sup>[3]</sup>、油藏数值模拟法<sup>[4]</sup>、模糊数学综合评价法<sup>[5]</sup>、灰色关联分析法<sup>[6]</sup>等。单一指标数学模型评价法指将理论曲线与实际曲线对比,该方法简单、明了,在油田得到了广泛应用,但其未能反映注水开发过程中的系统性特征;典型指标定性描述法指通过水驱状况、见效特征等指标进行分析描述继而判断油藏开发效果,如:水驱储量控制程度高、见效程度高等,该方法对于低渗透油藏有明确的评价指标界限,但对超低渗油藏未进一步划分;油藏数值模拟法采用软件模拟不同地质状态来评价开发效果,但超低渗油藏存在启动压力梯度,不满足达西渗流,而数值模拟软件以达西渗流模型为基础,因此对超低渗油藏适应性差;模糊数学综合评价法指将模糊数学理论运用到油藏开发效果评价中,该方法在理论及应用中较为成熟,但在模糊综合评价过程中,评价因素间相关性造成的评价信息重复的问题难以解决;灰色关联分析法可通过对已知信息的处理,实现对未知信息的预测及量化,从中找出各评价参数的关联性,实现评价参数定量描述及比较<sup>[7]</sup>,该方法可消除人为因素对权重分配的影响,但也有计算繁复之不足。为此,本文采用谱系聚类分析与灰色关联分析结合的方法,谱系聚类分析可以解决参数之间的相似关系,优选评价参数;灰色关联法可以通过定量分析来描述评价参数间的次序等。本文在文献<sup>[8]</sup>基础上结合超低渗油藏开发实践,建立井网适应性定量评价指标及方法。

## 1 井网适应性定量评价方法

本文在油田开发水平分级<sup>[8]</sup>的基础上制定了适应超低渗油藏开发的井网适应性定量评价方法,主要包括4方面:①优选评价参数;②确定评价参数权重;③划分油藏开发阶段;④确定分类系数。

### 1.1 评价参数

超低渗油藏有效压力驱替系统难以建立,油井见效程度、含水上升规律、注采静压差、内部收益率等

是体现超低渗油藏开发效果的关键指标。结合油田开发水平分级<sup>[8]</sup>中14项评价参数中的油藏开发指标和工艺指标,初步筛选出12个评价参数(见图1),并通过谱系聚类分析方法<sup>[9]</sup>剔除相关性较高的评价参数,最终选择相对独立的评价参数。

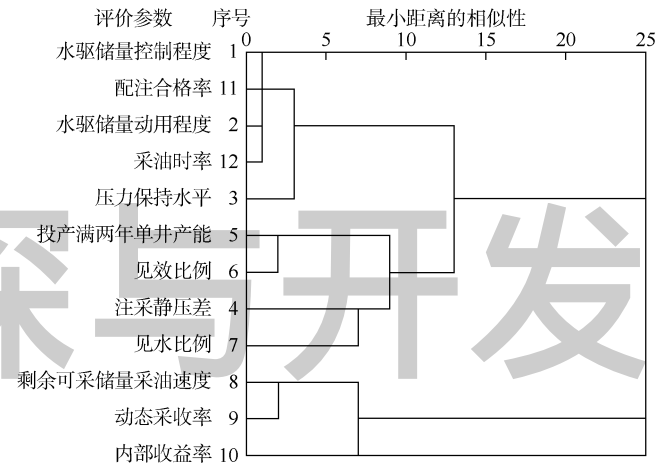


图1 井网适应性定量评价参数谱系图

谱系聚类分析法流程如下:①数据变换;②统计相似性;③聚合归类;④形成谱系图。相似性统计可衡量评价参数之间的相似程度,本文应用距离系数法统计相似性,即评价参数间的亲疏程度用相互距离来衡量,距离值越小,评价参数间的相似程度越大。根据形成的聚类分析谱系图(见图1),剔除了与水驱储量控制程度相关性较高的采油时率及与水驱储量动用程度相关性较高的配注合格率,最终选择了相对较独立的10项评价参数:水驱储量控制程度、水驱储量动用程度、压力保持水平、注采静压差、投产满两年单井产能、见效比例、见水比例、剩余可采储量采油速度、动态采收率、内部收益率。

### 1.2 评价参数权重

灰色关联分析法是分析系统中各因素关联程度的方法<sup>[10]</sup>,它可在不完全的信息中,对所分析研究的各因素进行数据处理,在随机因素序列间找出它们的关联性,发现主要矛盾,找到主要特性和影响因素<sup>[11]</sup>。

#### 1.2.1 数据无因次化

根据上述10个评价参数,通过分析得出最优集 $x_0$ 。设 $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, m\}$ 为参考数列, $x_i = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, m\} (i=1, 2, \dots, n)$ 为比较数列。

由于各参数的量纲不同,为使其具有可比性,可采用下式对各项参数进行无因次化处理:

$$x_i(k)' = [x_i(k) - \min x_i(k)] / [\max x_i(k) - \min x_i(k)] \quad (1)$$

1.2.2 权重系数确定

数据经过无因次化处理后，由(2)式计算  $x_i(k)$  与  $x_0(k)$  的关联系数<sup>[11]</sup>：

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (2)$$

其中分辨系数一般取值为(0, 1)，通常取 0.5。计算出关联系数，然后利用平均值法计算关联度<sup>[11]</sup>：

$$\gamma_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

得到关联度后，经(4)式归一化处理得到权重系数<sup>[11]</sup>：

$$w_k = \frac{\gamma_k}{\sum_{k=1}^m \gamma_k} \times 100 \quad (4)$$

1.3 开发阶段及分类系数

1.3.1 开发阶段的划分

超低渗油藏具有注水见效程度低、见水比例高、采油速度低等特征，结合上述优选的评价指标参数及其权重系数，根据超低渗油藏实际情况对见效比例、见水比例及剩余可采储量采油速度进行开发阶段划分。根据油田开发水平分级<sup>[8]</sup>标准，按可采储量采出程度 50% 为界确定分类系数；见效、见水周期主要根据超低渗油藏矿场统计分析得到。

1.3.2 分类系数的确定

油田开发水平分级<sup>[8]</sup>标准中将各项评价指标分为 3 类(如水驱储量控制程度：一类大于等于 70%，二类大于等于 60%、小于 70%，三类小于 60%)。结合超低渗油藏实际开发状况，对上述标准的指标分类界限进行优化，将超低渗油藏井网开发水平分为 I、II、III 级。根据井网适应性定量评价参数的具体数值确定分类系数的值，其中分类系数根据长庆油田不同类型油藏开发水平分类分级技术规范<sup>[12]</sup>确定，I—III 级分类系数分别为 1, 0.5, 0；动态采收率偏移根据实际值与理论值的相对变化趋势确定(见图 2，如果目前实际值位于理论值左边即向左偏移，反之向右偏移)；内部收益率分类根据中国石油天然气集团公司建设项目经济评价参数<sup>[13]</sup>确定。

1.4 评价指标及流程

综上，超低渗油藏井网适应性定量评价方法流程(见图 3)为：首先通过谱系聚类分析法优选出 10 个评价参数，其次应用灰色关联分析法确定评价参数的权重，再结合超低渗油藏开发实践确定油藏开发阶段划分及分类系数，最后得到综合评价指数。

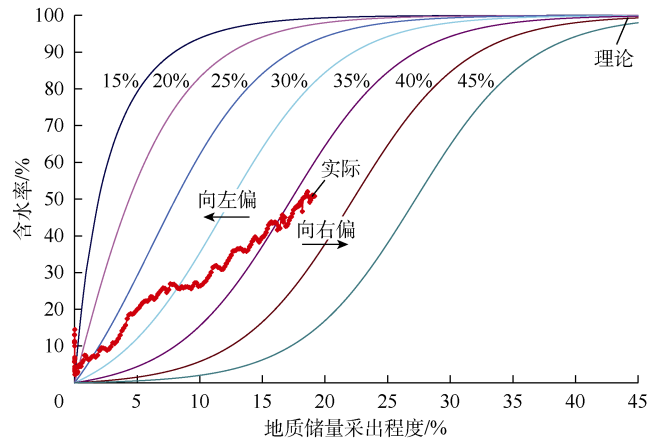


图 2 含水率与地质储量采出程度关系曲线

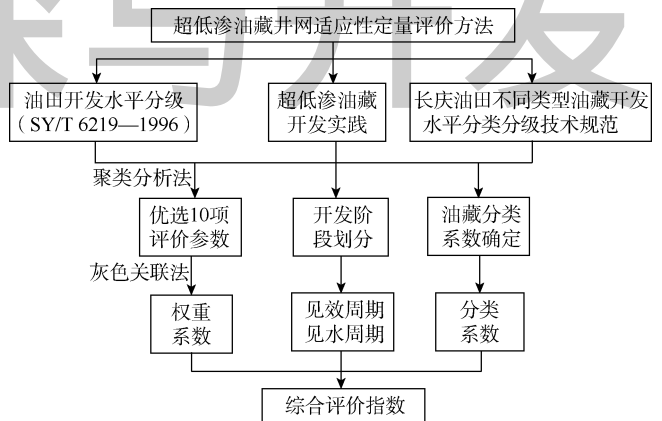


图 3 超低渗油藏井网适应性定量评价方法流程图

$$S = \sum_{k=1}^{10} w_k N_k \quad (5)$$

综合评价指数  $S \geq 70$ ，表示井网适应性好； $50 \leq S < 70$ ，表示井网适应性较好； $S < 50$ ，表示井网适应性较差。

综合上述优选评价参数、确定参数权重、划分开发阶段、确定分类系数 4 个方面，可建立超低渗油藏井网适应性定量评价指标(见表 1)。

2 应用实例

2.1 长庆超低渗油藏简况

截至 2017 年底长庆油田超低渗油藏产量占长庆原油总产量的 35.8%，为油田上产、稳产的主力油藏。超低渗油藏定向井开发主要采用了 3 种井网形式：裂缝不发育油藏采用正方形反九点井网；裂缝较发育油藏采用菱形反九点井网；裂缝发育油藏采用矩形井网。研究及开发实践表明，合理的井网形式及参数是决定油藏开发效果的重要因素<sup>[14-15]</sup>。超低渗油藏储集层孔隙细小，溶蚀孔发育，孔隙以粒间孔隙为主；其天然

表1 超低渗油藏井网适应性定量评价指标

序号	评价参数	开发阶段	权重系数	开发水平分级		
				I级 (N=1)	II级 (N=0.5)	III级 (N=0)
1	水驱储量控制程度/%		9	≥90	[80, 90)	<80
2	水驱储量动用程度/%		9	≥65	[60, 65)	<60
3	压力保持水平/%		9	[90, 100)	[80, 90)或[100, 110)	<80 或 >110
4	注采静压差/MPa		7	<10	[10, 15)	≥15
5	投产满两年单井产能/(t·d <sup>-1</sup> )		12	≥2.0	[1.0, 2.0)	<1.0
6	见效比例/%	见效周期小于等于2年	12	≥70	[50, 70)	<50
		见效周期大于2年		≥80	[60, 80)	<60
7	见水比例/%	见水周期小于等于3年	10	<30	[30, 50)	≥50
		见水周期大于3年		<40	[40, 60)	≥60
8	剩余可采储量采油速度/%	可采储量采出程度小于等于50%	10	≥5	[4, 5)	<4
		可采储量采出程度大于50%		≥6	[5, 6)	<5
9	动态采收率/%		9	向右偏	保持	向左偏
10	内部收益率/%		13	≥12	[10, 12)	<10

裂缝优势方位均为北东向,平均裂缝密度为0.62~1.10条/m。从油藏整体来看,长6、长8油藏具有相似性,表现为岩性更致密、孔喉更细微、物性更差,微裂缝较发育等,注水开发难度较大<sup>[16-19]</sup>。

## 2.2 井网适应性定量评价

结合油藏实际开发情况,在评价参数中优选最优参

数,对数据进行无因次化处理(见表2),计算其关联系数及权重系数(见表3)。取重点区块见效、见水周期的平均值并结合矿场实际确定见效周期(见图4)、见水周期(见图5)开发阶段划分,其中见效周期以2年为界限,见水周期以3年为界限(见表1)。

长庆油田将超低渗透油藏分为I类油藏(渗透率

表2 超低渗油藏评价指标无因次化处理结果

区块	水驱储量控制程度	水驱储量动用程度	压力保持水平	注采静压差	投产满两年单井产能	见效比例	见水比例	剩余可采储量采油速度	动态采收率	内部收益率
A <sub>1</sub>	0.652	1.000	0.638	1.000	0.498	0.503	0.400	0.367	0.794	0.800
A <sub>2</sub>	0	0.616	0.349	0.900	0.561	0.654	1.000	0.455	0.281	0.800
A <sub>3</sub>	0.959	0.747	0.602	0.988	1.000	1.000	0.432	0.331	0.534	1.000
A <sub>4</sub>	0.783	0.515	0.588	0.594	0.327	0.647	0.303	0.124	0.216	0.750
A <sub>5</sub>	0.858	0.283	0.421	0.610	0.776	0.550	0.601	0.137	0.257	0.745
A <sub>6</sub>	0.427	0	0.839	0.817	0.556	0.347	0.745	0.159	0.177	0.714
A <sub>7</sub>	0.704	0.667	0.477	0.762	0.595	0.782	0.386	0.195	0.323	0.681
A <sub>8</sub>	0.940	0.202	0.574	0.388	0.546	0.455	0.418	0.039	0.218	0.600
A <sub>9</sub>	0.809	0.727	0.643	0.910	0.634	0.620	0.388	1.000	1.000	0.750
A <sub>10</sub>	0.858	0.354	0.523	0.444	0.146	0.445	0.308	0.044	0.052	0
A <sub>11</sub>	0.974	0.970	0.492	0.357	0.585	0.466	0.512	0.142	0.268	0.210
A <sub>12</sub>	0.906	0.414	0	0.984	0	0.194	0.641	0	0	0
A <sub>13</sub>	1.000	0.768	0.536	0.535	0.146	0	0	0.448	0.093	0

表3 超低渗油藏无因次评价指标参数关联系数及权重系数

区块	关 联 系 数									
	水驱储量控制程度	水驱储量动用程度	压力保持水平	注采静压差	投产满两年单井产能	见效比例	见水比例	剩余可采储量采油速度	动态采收率	内部收益率
A <sub>1</sub>	0.613	0.350	0.585	0.336	0.902	0.756	0.639	0.711	0.999	0.916
A <sub>2</sub>	0.608	0.477	0.438	0.360	0.810	0.976	0.363	0.811	0.500	0.916
A <sub>3</sub>	0.446	0.425	0.561	0.339	0.475	0.607	0.614	0.676	0.667	0.672
A <sub>4</sub>	0.529	0.528	0.553	0.461	0.823	0.963	0.728	0.529	0.469	1.008
A <sub>5</sub>	0.490	0.698	0.467	0.454	0.602	0.814	0.509	0.536	0.488	0.997
A <sub>6</sub>	0.844	0.899	0.762	0.383	0.817	0.612	0.444	0.550	0.453	0.939
A <sub>7</sub>	0.576	0.456	0.493	0.399	0.768	0.824	0.650	0.572	0.521	0.885
A <sub>8</sub>	0.454	0.786	0.544	0.568	0.830	0.705	0.624	0.486	0.470	0.775
A <sub>9</sub>	0.515	0.432	0.588	0.358	0.725	0.917	0.649	0.546	0.709	1.008
A <sub>10</sub>	0.490	0.636	0.516	0.534	0.636	0.695	0.723	0.488	0.407	0.403
A <sub>11</sub>	0.440	0.358	0.500	0.588	0.780	0.716	0.559	0.540	0.493	0.484
A <sub>12</sub>	0.468	0.590	0.336	0.340	0.537	0.517	0.489	0.468	0.391	0.403
A <sub>13</sub>	0.431	0.418	0.523	0.487	0.636	0.431	0.825	0.801	0.421	0.403
关联度	0.531	0.542	0.528	0.431	0.719	0.733	0.601	0.593	0.538	0.755
权重系数	9	9	9	7	12	12	10	10	9	13

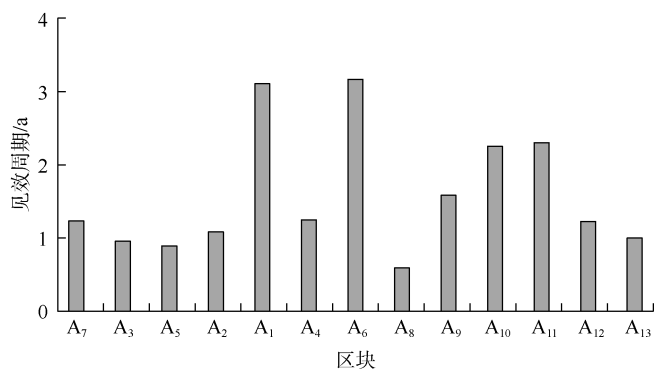


图4 超低渗典型油藏见效周期统计图

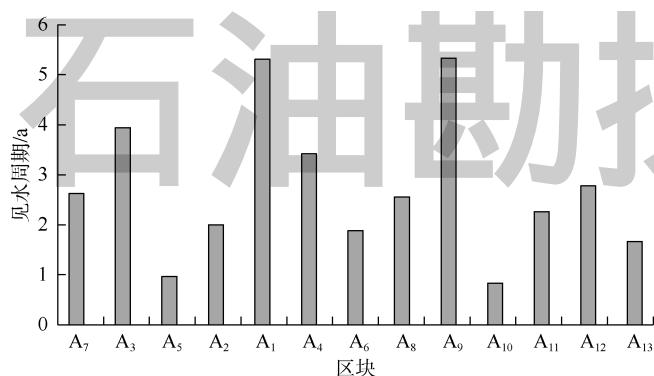


图5 超低渗典型油藏见水周期统计图

大于等于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、小于  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) II类油藏(渗透率大于等于  $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、小于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )和III类油藏(渗透率小于  $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )<sup>[20]</sup>。应用井网适应性定量评价方法评价长庆油田超低渗典型主力油藏13个(见表4),其中井网适应性好的有6个,井网适应性较好的有2个,井网适应性差的有5个。

表4 超低渗油藏井网适应性定量评价结果

油藏分类	区块	裂缝发育情况	井网形式	井排距/(m·m)	综合评价指数	井网适应性
I	A <sub>1</sub>	裂缝不发育	正方形反九点	250×250	72.5	好
I	A <sub>2</sub>	裂缝发育	矩形	480×180	75.5	好
I	A <sub>3</sub>	裂缝不发育	正方形反九点	300×300	100.0	好
I	A <sub>4</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	520×130	69.5	较好
I	A <sub>5</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	480×150	71.0	好
I	A <sub>6</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	520×150	76.0	好
I	A <sub>7</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	520×130	55.0	较好
I	A <sub>8</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	540×220	37.0	差
II	A <sub>9</sub>	裂缝发育	矩形	520×120	78.5	好
II	A <sub>10</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	480×130	38.0	差
II	A <sub>11</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	480×130	32.0	差
III	A <sub>12</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	480×150 520×150	37.5	差
III	A <sub>13</sub>	裂缝较发育	菱形反九点	420×140 340×140	41.5	差

### 2.3 评价结果可靠性

目前还没有关于超低渗油藏井网适应性评价方法

的报道。应用文献[8]中方法计算结果与油藏实际开发效果对比的符合度只有31%,符合程度较低;而应用本文建立的超低渗油藏井网适应性定量评价方法进行评价,评价结果符合度可达85%以上。

#### 2.3.1 井网适应性好的油藏

A<sub>6</sub>区块微裂缝较发育,采用520 m×150 m菱形反九点井网注水开发。平均单井产量大于1.5 m<sup>3</sup>/d稳产了5年(低含水期),目前压力保持水平98%,平均单井产量1.3 m<sup>3</sup>/d,综合含水率35%,地质储量采出程度7%,见效比例75%,见效类型以增产型为主(见图6)。

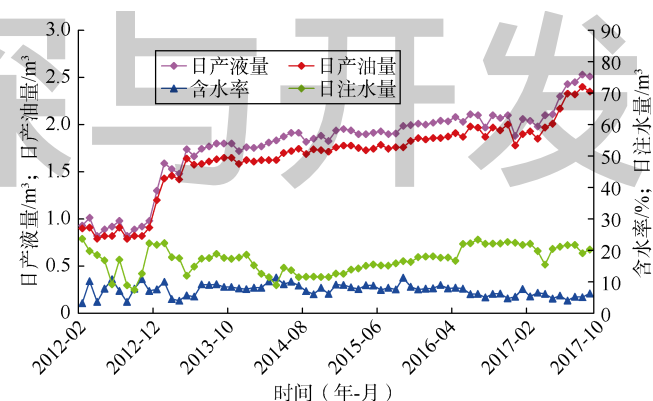


图6 超低渗油藏增产型见效井生产曲线

#### 2.3.2 井网适应性较好的油藏

A<sub>4</sub>区块采用520 m×130 m菱形反九点井网注水开发。目前压力保持水平95%,平均单井产量1.2 t/d,综合含水率63%,地质储量采出程度5%,见效比例63%,油井见效类型以稳产为主(见图7)。

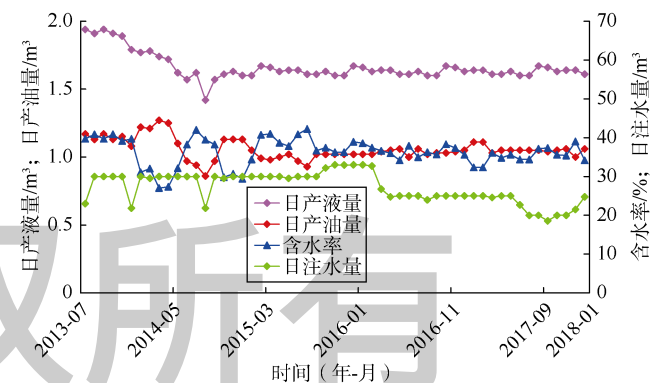


图7 超低渗油藏稳产型见效井生产曲线

#### 2.3.3 井网适应性差的油藏

A<sub>8</sub>区块采用540 m×220 m菱形反九点井网注水开发。目前压力保持水平80%,见效比例46.7%,由于排距过大,导致水驱波及范围小,油井见效类型以低产、稳产为主(见图8)。该油藏井网适应性较差。2006



年开展了缩小排距(缩小至110 m)加密试验。缩小排距后加密井见效明显,试验区压力保持水平由加密前的75%上升到加密后的85%,加密井见效比例达到80%以上,加密井产量在2 m<sup>3</sup>/d以上稳产了4年,目前还稳定在1 m<sup>3</sup>/d左右(见图9),预测采收率可提高4%。

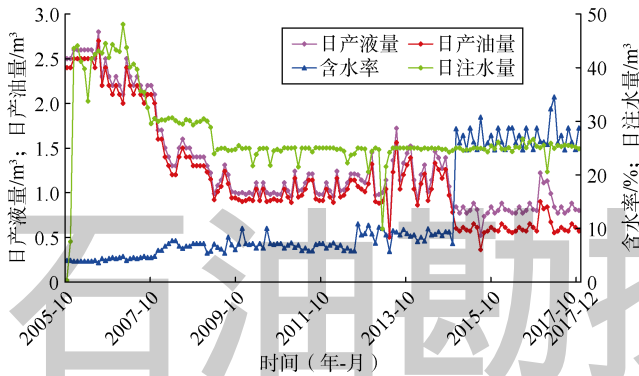


图8 超低渗油藏220 m排距老井稳产型生产曲线

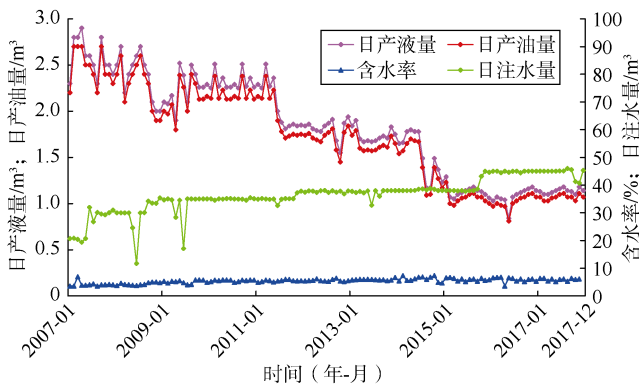


图9 超低渗油藏110 m排距加密井稳产型生产曲线

结合超低渗油藏非主力区块的开发状况,从典型油藏井网适应性评价结果中可以得到3点基本认识:①超低渗I类油藏井网适应性整体较好,井网形式及井网参数都较为合理;②裂缝不发育油藏适合正方形反九点井网,裂缝较发育油藏适合菱形反九点井网,裂缝发育油藏适合矩形井网;根据储集层类型、裂缝发育程度等确定超低渗油藏井网形式的方法基本正确;③超低渗II类、III类油藏需要调整井网,井网调整的方向是在坚持井网形式确定原则的基础上,进一步优化排距,提高该类油藏开发水平。

### 3 结论

应用聚类分析法和灰色关联法,建立了包括优选评价参数、确定评价参数权重、划分油藏开发阶段、确定分类系数4个方面10项评价参数的超低渗油藏井网适应性定量评价方法。该方法将聚类分析法、灰色

关联分析等数学方法应用到油藏开发中,消除了人为因素对权重分配的影响,使得评价结果更加科学、严谨。

应用该评价方法对超低渗主力油藏开展了井网适应性评价,从评价结果可以得到3点基本认识:①超低渗I类油藏井网适应性整体较好,井网形式及井网参数都比较合理;②裂缝不发育油藏适合正方形反九点井网,裂缝较发育油藏适合菱形反九点井网,裂缝发育油藏适合矩形井网;③超低渗II类、III类油藏需要调整井网,井网调整的方向应该是在坚持井网形式确定原则的基础上,进一步优化排距,提高该类油藏开发水平。

符号注释:

$i$ ——评价区块编号; $k$ ——评价参数编号; $m$ ——评价参数总数; $n$ ——各参数取值个数(区块数); $N$ ——分类系数; $S$ ——综合评价指数; $w$ ——评价参数权重; $x_0$ ——参考数列; $x_i$ ——比较数列; $x_i(k)$ —— $x_i(k)$ 的无因次化; $\gamma_i$ ——关联度; $\Delta_i(k)$ —— $x_0$ 与 $x_i$ 第 $k$ 个元素的绝对差值; $\zeta_i(k)$ ——关联系数; $\rho$ ——分辨系数。

参考文献:

- [1] 李芳玉,程时清,雷启鸿,等. 特低渗透油藏水平井开发效果评价指标和分类评价方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(1): 56-60.  
LI Fangyu, CHENG Shiqing, LEI Qihong, et al. Evaluating indexes and classifying-evaluating methods of the developed effects for the horizontal well in ultra-low permeability oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 56-60.
- [2] 苗厚纯,于开春,李琦,等. 基于地质分类进行水驱开发效果评价[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(7): 264-274.  
MIAO Houchun, YU Kaichun, LI Qi, et al. Evaluation about oil field development effect based on geological classification[J]. Mathematic in Practice and Theory, 2016, 46(7): 264-274.
- [3] 王敬瑶,马德胜,李军,等. 低渗透油藏超前注水开发井网适应性分析[J]. 西南石油学院学报(自然科学版), 2011, 33(2): 125-128.  
WANG Jingyao, MA Desheng, LI Jun, et al. Analysis of adaptability of well network to advanced water injection in low permeable reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(2): 125-128.
- [4] 张继风. 水驱油田开发效果评价方法综述及发展趋势[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 118-122.  
ZHANG Jifeng. Evaluation methods of development effect for water drive oilfield and development trend[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(3): 118-122.
- [5] 耿文爽,杨二龙,宋考平. 基于模糊综合评判的宋芳屯油田南部水驱开发效果综合评价[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(6): 76-80.  
GENG Wenshuang, YANG Erlong, SONG Kaoping. Integrated evaluation of waterflooding development effect in south Songfangtun

- oilfield based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Mathematic in Practice and Theory*, 2014, 44(6): 76-80.
- [6] 宋子齐, 赵磊, 康立明, 等. 一种水驱开发地质潜力综合评价方法在辽河油田的应用[J]. *断块油气田*, 2004, 11(2): 32-37.  
SONG Ziqi, ZHAO Lei, KANG Liming, et al. An application of evaluation for water-drive geologic potential in Liaohe Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2004, 11(2): 32-37.
- [7] 徐宏龙, 刘建, 乔诚, 等. 灰色关联分析法在双河油田储层评价中的应用[J]. *油气藏评价与开发*, 2015, 5(5): 17-21.  
XU Honglong, LIU Jian, QIAO Cheng, et al. Application of gray correlative analysis method to reservoir evaluation of Shuanghe oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2015, 5(5): 17-21.
- [8] 中国石油天然气总公司. 油田开发水平分级: SY/T 6219—1996[S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 1996.  
China National Petroleum Corporation. Classification of oil field development level: SY/T 6219—1996[S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 1996.
- [9] 唐俊, 王琪, 马晓峰, 等. Q型聚类分析和判别分析法在储层评价中的应用: 以鄂尔多斯盆地姬塬地区长<sub>8</sub>储层为例[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(6): 28-31.  
TANG Jun, WANG Qi, MA Xiaofeng, et al. Application of Q-type cluster analysis and discriminatory analysis in reservoir evaluation: Taking reservoir Chang<sub>8</sub> of Jiyuan Area in Ordos Basin as an example[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2012, 19(6): 28-31.
- [10] 郭少斌, 黄磊. 页岩气储层含气性影响因素及储层评价: 以上扬子古生界页岩气储层为例[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(6): 601-606.  
GUO Shaobin, HUANG Lei. Gas-bearing influential factors and evaluation of shale gas reservoir: A case study of Paleozoic shale gas reservoir in Upper Yangtze region[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(6): 601-606.
- [11] 梁涛, 常毓文, 郭晓飞, 等. 巴肯致密油藏单井产能参数影响程度排序[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 357-362.  
LIANG Tao, CHANG Yuwen, GUO Xiaofei, et al. Influence factors of single well's productivity in the Bakken tight oil reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 357-362.
- [12] 中国石油天然气股份有限公司长庆油田公司. 长庆油田不同类型油藏开发水平分类分级技术规范: Q/SY—2016[S]. 西安: 中国石油天然气股份有限公司长庆油田公司, 2016.  
PetroChina Changqing Oilfield Company. Classification of different types of reservoirs in Changqing Oilfield: Q/SY—2016[S]. Xi'an: PetroChina Changqing Oilfield Company, 2016.
- [13] 中国石油天然气股份有限公司规划总院. 中国石油天然气集团公司建设项目经济评价参数(2016)[M]. 北京: 中国石油规划总院, 2016: 1-72.  
PetroChina Planning and Engineering Institute. Economic evaluation parameters of China national petroleum corporation construction project(2016)[M]. Beijing: PetroChina Planning and Engineering Institute, 2016: 1-72.
- [14] 王文环, 彭缓缓, 李光泉, 等. 长庆特低渗透油藏注水动态裂缝及井网加密调整模式研究[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(1): 106-110.  
WANG Wenhuan, PENG Huanhuan, LI Guangquan, et al. Research on water flooding dynamic fractures to optimize infill drilling spacing in ultra-low permeability reservoirs, Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 106-110.
- [15] 肖前华, 杨正明, 徐轩, 等. 特低渗透砂岩平板大模型井网适应性评价[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(9): 28-34, 51.  
XIAO Qianhua, YANG Zhengming, XU Xuan, et al. Experimental study on adaptability of well pattern using sandstone plate model with ultra-low permeability[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(9): 28-34, 51.
- [16] 任大忠, 孙卫, 赵继勇, 等. 鄂尔多斯盆地岩性油藏微观水驱油特征及影响因素[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(6): 1043-1052.  
REN Dazhong, SUN Wei, ZHAO Jiyong, et al. Microscopic waterflooding characteristics of lithologic reservoirs in Ordos basin and its influenc factors[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(6): 1043-1052.
- [17] 史成恩, 万晓龙, 赵继勇, 等. 鄂尔多斯盆地超低渗透油层开发特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(5): 538-542.  
SHI Chengen, WAN Xiaolong, ZHAO Jiyong, et al. Development characteristics of super-low permeability oil layers in Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2007, 34(5): 538-542.
- [18] 樊建明, 屈雪峰, 王冲, 等. 鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 740-748.  
FAN Jianming, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 740-748.
- [19] 张忠义, 陈世加, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段致密油藏藏机理[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 590-599.  
ZHANG Zhongyi, CHEN Shijia, YANG Hua, et al. Tight oil accumulation mechanisms of Triassic Yanchang Formation Chang 7 Member, Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 590-599.
- [20] 杨秋莲, 李爱琴, 孙燕妮, 等. 超低渗透层分类方法探讨[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(4): 51-56.  
YANG Qiulian, LI Aiqin, SUN Yanni, et al. Classification method for extra-low permeability reservoirs[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(4): 51-56.

第一作者简介: 赵继勇(1970-), 男, 甘肃镇原人, 博士, 中国石油长庆油田勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事低渗透油田开发研究及技术管理工作。地址: 陕西省西安市凤城四路, 长庆油田勘探开发研究院, 邮政编码: 710018。E-mail: zjy\_cq@petrochina.com.cn

联系作者简介: 王晶(1984-), 男, 陕西铜川人, 硕士, 中国石油长庆油田勘探开发研究院工程师, 主要从事超低渗透油田开发研究工作。地址: 陕西省西安市凤城四路, 长庆油田勘探开发研究院石油开发一室, 邮政编码: 710018。E-mail: WJ920\_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-01-19 修回日期: 2018-04-11

(编辑 郭海莉)