

多因素下多级交替注入酸液指进实验研究

罗志锋¹, 余洋¹, 赵立强¹, 李小刚¹, 赵兴东²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中国石油西南油气田分公司工程技术研究院, 四川 成都 610000)

摘要: 酸液黏性指进演化特征及最终形态受多种工程地质因素影响, 利用可视化指进实验装置, 以分形维数和多重分形谱宽度表征指进形态, 综合考虑酸液浓度、注入级数、温度、施工排量、前置液酸液黏度比和裂缝倾角六个因素, 探究多因素下酸液黏性指进演化特征及最终形态的变化规律。结果表明: 各个因素对分形维数的影响程度由高到低依次为: 黏度比、注入级数、温度、酸液浓度、施工排量、裂缝倾角; 各个因素对多重分形谱宽度的影响程度由高到低依次为: 黏度比、裂缝倾角、施工排量、酸液浓度、注入级数、温度; 要实现黏性指进酸压, 应当提高黏度比至 100:1~150:1, 控制注入级数为 2~3 级, 设计酸液用量占比 0.3 左右, 并在注入酸液前注入大量前置液降低裂缝壁面温度。

关键词: 酸压; 酸液指进; 物理模拟; 分形维数; 多重分形谱宽度

中图分类号: TE319

文献标识码: A

Multifactorial experiment of acid's fingering phenomenon in the multi-stage alternating injection of acid fracturing

Luo Zhifeng¹, Yu Yang¹, Zhao Liqiang¹, Li Xiaogang¹ and Zhao Xingdong²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Engineering Technology Research Institute of Southwest Oil and Gas Company of CNPC, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: The evolution characteristics and the final shape of acid viscosity fingering are influenced by many engineering and geological factors. So that, we used the visual experimental device to explore the change rules under the multifactor. Six factors were considered, those are the concentration of acid, the injection series, the temperature, the construction displacement, the viscosity ratio of the liquid, and the inclination of crack. The fractal dimension and multifractal spectrum width were used to describe the morphological of fingering. It is concluded that the influence degree of each factor on fractal dimension from high to low is in the order of: viscosity ratio, injection series, temperature, acid concentration, construction displacement, and crack inclination. The influence degree of each factor on the multifractal spectrum width from high to low is in the order of: viscosity ratio, crack inclination, construction displacement, acid concentration, injection series, and temperature. In order to achieve the viscosity fingering of acid fracturing, the viscosity ratio should be increased to the value between 100:1 and 150:1, the controlled injection series are at level 2 to level 3, and the designed acid dosage is about 0.3. Meanwhile, a large number of pre-liquid was injected to reduce the crack wall's temperature before the acid injection.

Key words: acid fracturing, acid's fingering, physical simulation, fractal dimension, multifractal spectrum width

多级注入酸压是目前低渗、特低渗碳酸盐岩储层主流的深度酸压工艺技术。多级交替酸压过程中,前置液黏度高可形成较宽的初始裂缝,有效降低酸液滤失;同时前置液与酸液的大量泵入可有效降

低井筒附近地层温度,从而降低酸岩反应速度,提高酸液有效作用距离^[1]。当注入酸液顶替前置液时,因酸液和压裂液间的黏度差异,酸液将穿入高黏压裂液流动,即产生黏性指进。由于指进的存在,酸液不

收稿日期:2017-10-10。

第一作者简介:罗志锋(1981—),男,副教授,博士,油气藏动态及增产改造理论与技术。

基金项目:国家自然科学基金“致密油气藏体积酸压复杂缝网扩展延伸仿真模型研究”(51404207)。

表1 酸液指进分形特征表征参数
Table 1 Characterization parameters of fractal feature of acid fingering

指标名称	符号	单位	定义	物理意义
分形维数	Daf	无因次	图像标度变换下的不变量	表征酸液填充裂缝空间的能力和整体的无序性、复杂性
多重分形谱宽度	Waf	无因次	多重分形奇异性指数极值之差	表征指进区域酸液分布不均匀程度,刻画不同层次、不同区域特性

均匀刻蚀裂缝壁面,使裂缝不完全闭合,从而获得较高导流的裂缝。

国内外对指进现象进行了大量的物理模拟,其中酸液的指进研究只占少数^[2-12]。最早的是Halliburton公司用矩形槽模拟裂缝,研究了各因素对酸液指进的影响,但只进行了单因素实验。后来Davies等人进行了大规模酸替代物驱替羟乙基纤维素压裂液的实验,并采用两块有机玻璃板模拟裂缝,故与酸岩非均相反应的真实情况相差较大。近来李小刚等人以真实岩板和液体进行了前置液酸压缝中酸液指进的分形研究,但装置尺寸小且耐温耐压能力差,探究的因素及其作用规律有限。

在前人研究的基础上,采用耐温150℃、耐压2MPa的可视化指进实验装置,以分形维数和多重分形谱宽度表征不同因素下的指进形态,综合考虑酸液浓度、注入级数、温度、施工排量、前置液酸液黏度比和裂缝倾角六个因素,探究多因素下酸液黏性指进演化特征及最终形态的变化规律,进而找出影响多级交替注入酸液指进形态的主控因素。

1 实验原理与装置

1.1 实验原理

酸液指进实验采用流动相似准则,结合客观研究环境和酸压施工实际参数确定酸液流动物理模拟装置的比例尺,研究多级交替注入酸液流动反应演化形态^[13]。不同的实验参数下,指进形态各不相同。通过不同实验参数的组合,可以考察各实验参数对缝内酸液指进形态的影响。酸液指进演化特征可用宏观特征(指进长度、指进高度)和分形特征(分形维数、多重分形谱宽度)有机结合的方法进行表征。分形特征表征参数见表1^[14-15]。

1.2 实验装置

多级交替注入酸压酸液指进实验采用实验室自研的酸液指进实验装置,整体如图1所示。装置由溢

流管1、储液罐2、平流泵3、压裂液罐4、酸液罐5、进液阀6、左支架7、后盖板8、右支架9、出液阀10、活塞容器11、废液阀12、压力表13、废液罐14、前盖板15和分液阀16组成。前盖板安装有观察窗,观察窗为玻璃板,可以通过观察窗观察酸液指进形态。

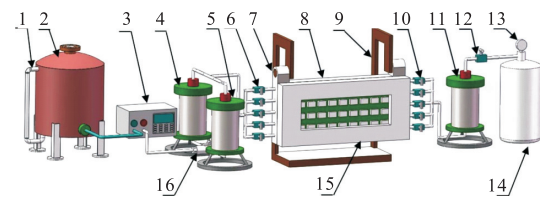


图1 装置示意图

Fig. 1 Device diagram

2 实验方案与结果

2.1 实验方案

为准确模拟多级交替注入酸压过程中酸液的流动反应和演化形态,实验前按照流动相似准则,结合现场工程要求和实验实际情况,将酸压典型参数转化为室内实验参数,参数转化结果见表2。

表2 参数转换结果

模拟参数	酸压典型参数	室内试验参数
裂缝宽度/mm	5	1
裂缝高度/m	50	33
裂缝长度/m	100	1
流体黏度/(mPa·s)	10~250	10~250
酸液浓度,%	15~20	1~5
流体密度/(kg·m ⁻³)	1 050	1 050
实验排量/(m ³ ·min ⁻¹)	3~7	45~105 mL/min
实验温度/℃	150	30~90
射孔数/(孔/m)	16	15
注入级数	2~3	1~5

以分形维数和多重分形谱宽度为指标,综合考虑酸液浓度、注入级数、温度、施工排量、前置液酸液黏度比和裂缝倾角对多级交替注入酸液指进的影响,采用六因素五水平正交实验方案设计。具体实验方案见表3。

表3 实验方案设计

Table 3 Test scheme design

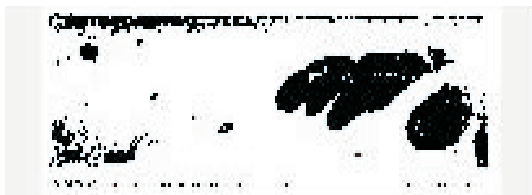
因素	注入级数	黏度比	倾角/ $^{\circ}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	排量/ $(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	酸液浓度, %
实验1	1	150	30	40	20	1
实验2	1	10	45	50	40	2
实验3	1	50	60	60	60	3
实验4	1	100	75	70	80	4
实验5	1	200	90	80	100	5
实验6	2	150	45	60	80	5
实验7	2	10	60	70	100	1
实验8	2	50	75	80	20	2
实验9	2	100	90	40	40	3
实验10	2	200	30	50	60	4
实验11	3	150	60	80	40	4
实验12	3	10	75	40	60	5
实验13	3	50	90	50	80	1
实验14	3	100	30	60	100	2
实验15	3	200	45	70	20	3
实验16	4	150	75	50	100	3
实验17	4	10	90	60	20	4
实验18	4	50	30	70	40	5
实验19	4	100	45	80	60	1
实验20	4	200	60	40	80	2
实验21	5	150	90	70	60	2
实验22	5	10	30	80	80	3
实验23	5	50	45	40	100	4
实验24	5	100	60	50	20	5
实验25	5	200	75	60	40	1

2.2 实验结果

按照实验方案共进行了25组实验,采用高速摄像机拍摄了上述各组实验的最终酸液指进形态图像(图2)。其中实验4的指进原始形态如图2a所示。



a.原始形态



b.数字化形态

图2 实验4指进形态

Fig. 2 Fingering form of test 4

3 数据处理与分析

3.1 处理方法

该文利用实验室自编程序对原始图片进行图像处理,得到各组实验指进现象的数字化形态,并计算出相应的分形维数和多重分形谱宽度,进而表征指进形态的分形特征。处理流程如图3所示,程序界面如图4所示。

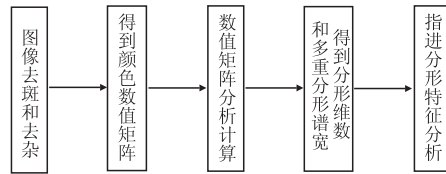


图3 处理流程

Fig. 3 Treatment process

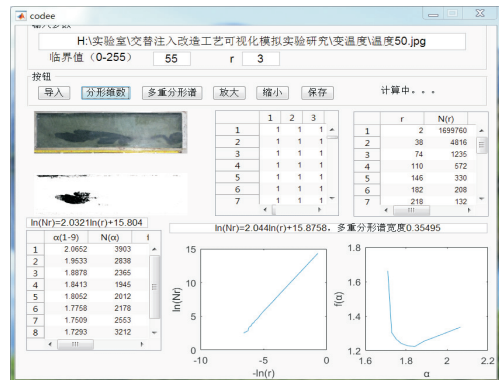


图4 程序界面

Fig. 4 Program interface

3.2 处理结果

对25组实验原始图片进行处理,得到各组实验的分形维数和多重分形谱宽度。其中实验4的指进数字化形态如图2b所示,数据处理详细结果见表4,各因素对分形维数和多重分形谱宽度的影响分别如图5和图6所示。

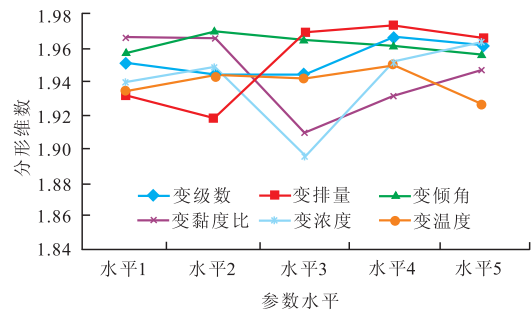


图5 各因素对分形维数的影响

Fig. 5 Influence of multiple factors on fractal dimension

表4 处理结果汇总
Table 4 Summary of processing results

因素	注入级数	黏度比	倾角/°	温度/°C	排量/(mL·min ⁻¹)	酸液浓度,%	分形维数	多重分形谱宽度
实验1	1	150	30	40	20	1	1.981 8	0.422 5
实验2	1	10	45	50	40	2	1.992 9	0.366 3
实验3	1	50	60	60	60	3	1.971 4	0.369 2
实验4	1	100	75	70	80	4	1.9689	0.355 9
实验5	1	200	90	80	100	5	1.978 7	0.403 4
实验6	2	150	45	60	80	5	1.956 5	0.409 7
实验7	2	10	60	70	100	1	1.991 3	0.364 7
实验8	2	50	75	80	20	2	1.987 7	0.375 7
实验9	2	100	90	40	40	3	1.951 7	0.360 3
实验10	2	200	30	50	60	4	1.912 2	0.426 9
实验11	3	150	60	80	40	4	1.962 7	0.401 7
实验12	3	10	75	40	60	5	1.971 9	0.364 3
实验13	3	50	90	50	80	1	1.984 1	0.364 7
实验14	3	100	30	60	100	2	1.957 4	0.375 2
实验15	3	200	45	70	20	3	1.940 7	0.410 2
实验16	4	150	75	50	100	3	1.899 9	0.395 5
实验17	4	10	90	60	20	4	1.993 7	0.357 5
实验18	4	50	30	70	40	5	1.978 6	0.376 7
实验19	4	100	45	80	60	1	1.934 0	0.406 2
实验20	4	200	60	40	80	2	1.933 6	0.400 9
实验21	5	150	90	70	60	2	1.960 1	0.388 6
实验22	5	10	30	80	80	3	1.988 9	0.349 9
实验23	5	50	45	40	100	4	1.974 5	0.374 2
实验24	5	100	60	50	20	5	1.953 1	0.376 7
实验25	5	200	75	60	40	1	1.900 9	0.410 2

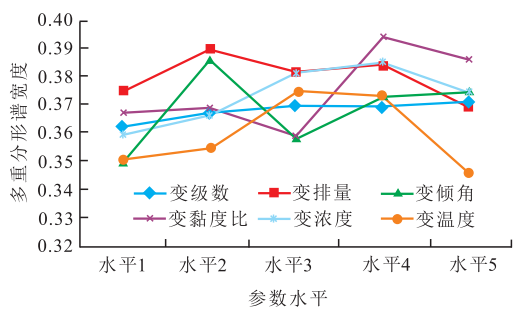


图6 各因素对多重分形谱宽度的影响
Fig. 6 Influence of multiple factors on multifractal spectrum width

3.3 分析方法

实验考虑了六项影响因素,各影响因素之间存在不同程度的线性相关性,增加了综合分析的难度,简单统计分析技术应用受到限制。为了对比各个因素对多级交替注入酸液指进的影响程度,该文采用

偏最小二乘法分析多因素组合的分形维数和多重分形谱宽度,通过分析系统中各个因素间的主要关系,确定各个影响因素影响程度,思路如图7所示。

在已有数据的基础上,建立起分形维数和多重分形谱宽度分析模型:

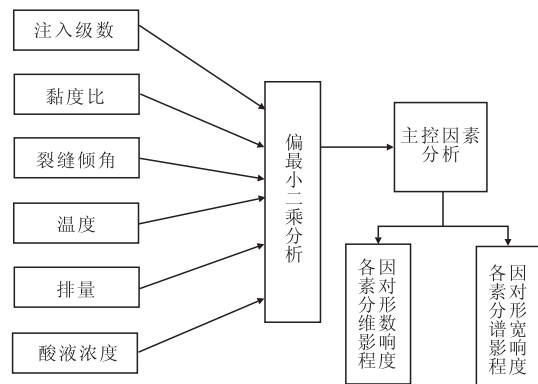


图7 偏最小二乘法分析思路
Fig. 7 Flow chart of partial least squares

表5 偏最小二乘法分析结果
Table 5 Analysis result of partial least squares

影响因素		注入级数	黏度比	裂缝倾角/ $^{\circ}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	排量/ $(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	酸液浓度, %
分形维数	VIP	0.93	2.17	0.09	0.56	0.21	0.24
	影响程度	0.22	0.52	0.02	0.13	0.05	0.06
多重分形谱宽度	VIP	0.12	2.29	0.76	0.02	0.32	0.23
	影响程度	0.03	0.61	0.20	0.004	0.09	0.06

$$y=f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \quad (1)$$

式中: y 为分形维数或多重分形谱宽度, %; $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 为注入级数、黏度比、裂缝倾角、温度、排量及酸液浓度。

自变量 x_i 在解释因变量 y 时的重要性, 可用变量投影重要性指标 VIP 来测度。VIP 值越大, 说明 x_i 对 y 的解释能力越强, 即各影响因素对分形维数和分形谱宽度的贡献程度越大。通过 PLS 方法分析处理, 得到了各个变量 x_i 对应的影响因素 VIP 值, 归一化结果见表 5。

3.4 分析结果

由图 5 和表 5 可以得出各个因素对分形维数的影响程度为: 黏度比 > 注入级数 > 温度 > 酸液浓度 > 施工排量 > 裂缝倾角。各因素对分形维数影响规律有以下几点:

1) 随着黏度比增加, 指进区域内纵向高度减小, 指进现象更为明显; 但当黏度比超过 150:1 后, 黏滞阻力大幅度增加, 指进效果反而降低。因此, 黏度比存在最佳值。

2) 注入级数为三级时, 指进效果最好; 超过三级后, 裂缝远端受温度的影响, 产生大量气泡, 且酸液扩散快, 加剧指进前缘形态破坏, 指进效果变差。因此, 注入级数不宜超过三级。

3) 随着酸液浓度增加, 酸岩反应产生的游离 CO_2 体积增加, 游离态 CO_2 向上移动, 也开辟了阻力最小的流动通道, 加上酸液滤失的影响, 引起酸液向上窜流, 远端酸液均匀分布。

由图 6 和表 5 可以得出各个因素对多重分形谱宽的影响程度为: 黏度比 > 裂缝倾角 > 施工排量 > 酸液浓度 > 注入级数 > 温度。各因素对多重分形谱宽度影响规律有以下几点:

1) 随着黏度比增加, 一定程度上降低了酸液滤失, 酸液容易突破接触到压裂液区域, 有助于酸液指进的形成, 增加酸液非均匀分布程度。

2) 随着施工排量增加, 酸液越早到达裂缝远端, 裂缝远端温度较高, 压裂液黏度降低, 第一级酸液指进形态被破坏。

3) 随着缝壁温度升高, 酸岩反应速度加快, 生产更多 CO_2 气体, CO_2 在缝内不规则运动程度加剧, 造成酸液均匀分布在裂缝远端, 不利于产生酸液指进。因此, 降低裂缝壁面温度是形成指进的关键因素之一。

4 结论与建议

1) 不同实验参数对指进形态影响程度不同, 该研究条件下各个因素对分形维数的影响程度由高到低依次为: 黏度比、注入级数、温度、酸液浓度、施工排量、裂缝倾角; 各个因素对多重分形谱宽的影响程度由高到低依次为: 黏度比、裂缝倾角、施工排量、酸液浓度、注入级数、温度。

2) 要实现黏性指进酸压, 应当提高黏度比至 100:1 ~ 150:1, 控制注入级数为 2 ~ 3 级, 设计酸液用量占比 0.3 左右, 并在注入酸液前注入大量前置液降低裂缝壁面温度。

3) 受现有装置玻璃承压限制, 该次实验仅在 2 MPa 下进行, 其研究条件未达到产生超临界态条件 ($T > 31^{\circ}\text{C}$ 、 $P > 7.2 \text{ MPa}$), 建议继续进行高温高压酸液指进形态可视化实验装置研究。

4) 建议实验研究与数值模拟研究相结合, 实现指进演化形态定量表征。并基于指进研究结果, 开展酸蚀裂缝导流能力及酸液有效作用距离研究, 科学指导酸压设计。

参考文献

- [1] 刘建坤, 蒋廷学, 周林波, 等. 碳酸盐岩储层多级交替酸压技术研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 104-111.
- [2] Schafroth D, Goyal N, Meiburg E. Miscible displacements in Hele - Shaw cells: Nonmonotonic viscosity profiles[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2007, 26(3): 444-453.
- [3] Nagatsu Y, Matsuda K, Kato Y, et al. Experimental study on mis-

- cible viscous fingering involving viscosity changes induced by variations in chemical species concentrations due to chemical reactions[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 571: 475-493.
- [4] Toussaint R, Løvoll G, Méheust Y, et al. Influence of pore-scale disorder on viscous fingering during drainage[J]. *Euro Physics Letters*, 2005, 71(4): 583-589.
- [5] Chen C Y, Wu H J. Fingering instabilities of a miscible magnetic droplet on a rotating Hele-Shaw cell[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2005, 289: 339-341.
- [6] Muggeridge A H, Jackson M D, Agbehi O R, et al. Quantifying bypassed oil in the vicinity of discontinuous shales during gravity dominated flow[M]. 2002.
- [7] Obernauer S, Drazer G, Rosen M. Stable-unstable crossover in non-Newtonian radial Hele-Shaw flow[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2000, 283(1):187-192.
- [8] Davies D R, Bosma M G R, De W. Development of field design rules for viscous fingering in acid fracturing treatments: A large-scale model study[C]// paper SPE-15772-MS presented at the Middle East Oil Show, 7-10 March 1987, Bahrain.
- [9] 李小刚. 酸压过程酸液指进模拟及分形特征研究[D]. 西南石油大学, 2006.
- [10] 李小刚, 杨兆中, 陈锐, 等. 前置液酸压缝中酸液指进的物模与分形研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 29(6):105-108.
- [11] 杨兆中, 李小刚, 蒋海, 等. 指进现象模拟研究的回顾与展望[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(1):85-88.
- [12] 王洋, 袁清芸, 周珺. 不同类型酸液指进可视化研究及应用[J]. *钻采工艺*, 2017, 40(4):50-52.
- [13] 李小刚, 宋瑞, 张汝生, 等. 大尺寸可视化酸液指进模拟装置研制及应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(2):153-162.
- [14] 屈世显, 张建华. 分形与分维及在地球物理学中的应用[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 1991, 33(2):8-13.
- [15] 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 中国科学技术大学出版社, 1993.

(编辑 常燕)

(上接第35页)

一类单元可通过及时实施注水开发来获得相对较长的稳产期,如单元5;④单储压降较大、储层物性较差的单元:这一类单元一般难以形成有效的注采系统,稳产期相对较短,如单元10。单元4由于单储压降和流度稍微偏大,加上储层物性也不是很好,虽然实施注水相对较早,开发效果也一般。

在进行上述分析的基础上,进一步对江苏油田其它的几十个开发单元进行对比分析,也得出了类似的结论。

4 结论

1) 应用实例表明,JS油田注水开发单元产量递减主要受到单储压降和流度两个因素的影响,在综合考虑各个因素作用的基础上,可以分为不同类型的开发单元,从而可以有效指导不同油藏的开发。

2) 利用灰色关联分析法实现了各因素影响程度的量化表征,且对数据点的要求不高。同时,还可以根据研究的需要增加或者减少影响因素项,这些增减的因素项的计算结果不会对已有因素项的计算结果产生影响,计算简单,便于广泛应用。

参考文献

- [1] 苏彦春,王月杰,缪飞飞.水驱砂岩油藏开发指标评价新体系[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(3):61-63.
- [2] 李斌,袁俊香.影响产量递减率的因素与减缓递减的途径[J]. *石油学报*, 1997, 18(3):89-97.
- [3] 缪飞飞,张宏友,张言辉,等.一种水驱油田递减率指标开发效果评价的新方法[J]. *断块油气田*, 2015, 22(3):353-355.
- [4] 缪飞飞,张宏友,刘小鸿,等.水驱油田产量理论自然递减规律研究[J]. *石油地质与工程*, 2014, 28(1):61-64.
- [5] 刘玉忠,尚明忠,朱海燕,等.自然递减率与综合递减率关系研究[J]. *油气地质与采收率*, 2002, 9(4):51-53.
- [6] 张金庆,孙福街,安桂荣.水驱油田含水上升规律和递减规律研究[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(6):82-83.
- [7] 缪飞飞,刘小鸿,张宏友,等.水驱油田含水上升规律综合研究与实践[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2014, 16(2):71-72.
- [8] 宋土顺,刘立,于森,等.灰色系统理论关联分析法在储层评价中的应用[J]. *断块油气田*, 2012, 19(6):714-717.
- [9] 赵选民,薛康.灰色关联分析法在油气开采成本影响因素分析中的应用[J]. *西安石油大学学报*, 2011, 20(6):5-9.
- [10] 刘思峰,党耀国,张岐山.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社, 1999:121-124.

(编辑 常燕)