文章编号:0253-9985(2020)06-1282-06 doi:10.11743/ogg20200616

特高含水期油田新型水驱特征曲线公式推导

王英圣,石成方,王继强
(中国石油 勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:目前国内部分水驱油藏都进入了特高含水阶段,对于特高含水油藏来说,相对渗透率比值与含水饱和度的关系曲线会发生上翘的现象,这也导致推导出的水驱特征曲线在油田特高含水期产生上翘,使得运用常规水驱特征曲线对实际油田生产进行预测会产生较大的偏差。基于实际油田的数据资料,通过对不同油田区块多条相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线上翘后的部分进行拟合分析,给出了新的相对渗透率比值与含水饱和度关系表达式;同时,根据新的相对渗透率比值与含水饱和度关系表达式推导出新型水驱特征曲线,并将其运用于实际油田的生产。结果表明,新型水驱特征曲线能够很好地预测常规水驱特征曲线产生上翘后的油田生产动态,对特高含水阶段的预测具有较好的适用性。

关键词:水驱特征曲线;曲线拟合;特高含水阶段;水驱开发;可采储量
中图分类号:TE321 **文献标识码**:A

New equations for characterizing water flooding in ultra-high water-cut oilfields

Wang Yingsheng, Shi Chengfang, Wang Jiqiang
(*Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Many oil reservoirs stimulated by water flooding in China have entered the ultra-high water-cut stage. Using the relative permeability ratio versus water saturation curve in the performance prediction of these reservoirs often yields up-warping curves and misleading results. Based on a fitting analysis of the up-warping curves of different oilfields, this study obtained a new expression for the relationship between relative permeability ratio and water saturation. New equations were then deduced to characterize the performance of high water-cut reservoirs. Applications of the equations to oilfields verified their effectiveness in the production prediction of ultra-high water-cut reservoirs.

Key words: water flooding characteristic curve, curve fitting, ultra-high water-cut stage, water flooding development, recoverable reserve

水驱特征曲线是注水开发油田预测开发动态的油藏工程方法,自陈元千[1]推导出甲型和乙型水驱特征曲线公式以来,水驱特征曲线已经广泛地用于预测油田的开发指标和可采储量[2]。常规的水驱特征曲线在油田中高含水阶段有很好的预测性,但是在特高含水阶段,水驱特征曲线会发生上翘的现象[3-9],因此在特高含水阶段常规特征曲线对油田开发动态的预测会产生较大偏差。从理论上分析,水驱特征曲线发生上翘是由于在推导水驱特征曲线公式时所用到的相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线在特高含水阶段也会发生上翘。后来许多学者为解决这一问题进行了研究[10-21],目前最新的对相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线上翘后的阶段的修正公式为王继强[11]的直线型表达式,该直线型表达式在上翘点发生后的早期具有较好的适用性,但随着含水的不断上升,实际数据重新出现上翘偏离。因此本研究对多条相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线进行拟合,提出了一种新的相对渗透率比值关系表达式,发现在特高含水阶段该公式能很好的描述曲线发生上翘后的部分,并运用该公式推导出了新型的水驱特征曲线公式,同时通过实际矿场资料对新型水驱特征曲线的适用性进行了验证。

收稿日期:2019-01-03;**修订日期**:2020-10-10。
第一作者简介:王英圣(1996—),男,硕士研究生,油气藏工程。**E-mail**:511970934@qq.com。
基金项目:国家科技重大专项(ZX201605010-003)。

1　新型 $K_{rw}/K_{ro}-S_w$ 关系表达式

在甲型和乙型水驱特征曲线公式推导的过程中，运用的 $K_{rw}/K_{ro}-S_w$ 关系表达式为：

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=a e^{bS_w} \tag{1}$$

公式(1)在半对数坐标下两者成直线关系，即：

$$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=a_1+bS_w \tag{2}$$

式中：K_{rw} 为水相相对渗透率，无量纲；K_{ro} 为油相相对渗透率，无量纲；S_w 为含水饱和度，%；e 为自然底数，无量纲；a_1，a，b 均为常数，无量纲。

许多学者[3-9]研究发现在特高含水期公式(1)会发生上翘的现象，使得推导的常规水驱特征曲线不适用于特高含水阶段。本研究对实际油田的油水相对渗透率数据进行拟合，得出一种新型的相对渗透率与含水饱和度关系式：

$$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=aS_{wd}^{b} \tag{3}$$

即：

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=a_1 e^{S_{wd}^{b}} \tag{4}$$

其中归一化含水饱和度 S_{wd} 的表达式为：

$$S_{wd}=\frac{S_{we}-S_{wi}}{1-S_{or}-S_{wi}} \tag{5}$$

式中：S_{wd} 为归一化含水饱和度，%；S_{we} 为出口端含水饱和度，%；S_{wi} 为束缚水饱和度，%；S_{or} 为残余油饱和度，%。

图 1 是实际油田油水相对渗透率与含水饱和度关系曲线拟合图，直线段部分均为公式(2)的 $\ln(K_{rw}/K_{ro})-S_w$ 关系曲线，曲线段部分是公式(3)拟合出的 $\ln(K_{rw}/K_{ro})-S_w$ 关系曲线。表 1 统计了每条曲线上翘后的拟合公式及相关度，可以看出新型油水相对渗透率与含水饱和度关系式对上翘后的部分有较好的适用性。

2　新型水驱特征曲线的推导

由本研究给出的 $K_{rw}/K_{ro}-S_w$ 关系表达式[公式(3)]，结合油藏工程的计算方法[11]以及甲型和乙型水驱特征曲线公式的推导方法重新对水驱特征曲线公式进行推导，如下：

根据油、水两相渗流的达西定律，在不考虑毛管力和重力的情况下，含水率的公式为：

$$f_w=\frac{1}{1+\dfrac{\mu_w K_{ro}}{\mu_o K_{rw}}} \tag{6}$$

水、油比 WOR 和含水率 f_w 的关系式为：

$$WOR=\frac{1}{\dfrac{1}{f_w}-1} \tag{7}$$

由公式(6)和公式(7)得

$$WOR=\frac{\mu_o K_{rw}}{\mu_w K_{ro}} \tag{8}$$

将公式(4)代入公式(8)得

$$WOR=a_1\frac{\mu_o}{\mu_w}e^{S_{wd}^{b}} \tag{9}$$

采出程度与地层平均含水饱和度的关系为：

$$R=\frac{N_p}{N}=\frac{\overline{S_w}-S_{wi}}{1-S_{wi}} \tag{10}$$

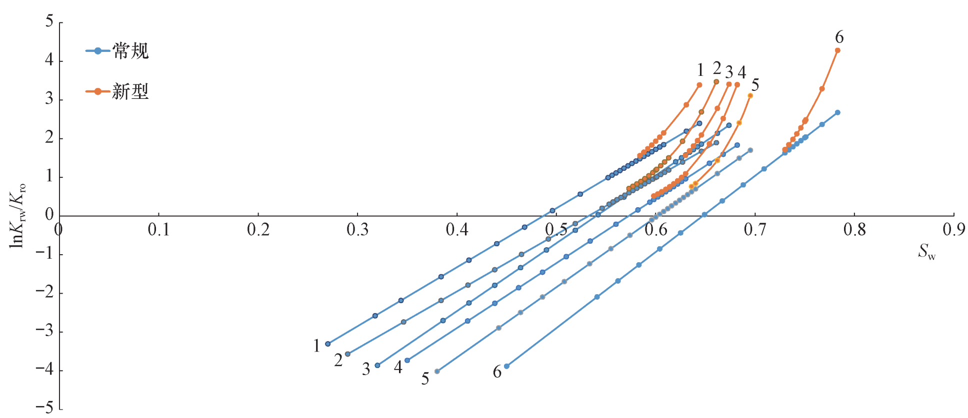

图 1　油水相对渗透率比值－含水饱和度关系拟合

Fig. 1　Fitted curves of oil-water relative permeability ratio vs. water saturation

表1 新型油水相对渗透率比值－含水饱和度关系拟合结果

Table 1 Equations based on fitted curves of oil-water relative permeability ratio versus water saturation

曲线	上翘后拟合表达式	相关系数
1	$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=103.26S_{wd}^{13.011}$	0.991
2	$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=956.56S_{wd}^{15.755}$	0.987
3	$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=797.3S_{wd}^{14.262}$	0.977
4	$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=331.4S_{wd}^{11.588}$	0.972
5	$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=341.95S_{wd}^{11.086}$	0.978
6	$\ln\frac{K_{rw}}{K_{ro}}=110.03S_{wd}^{7.9074}$	0.988

文献[1]中推导证明了在特高含水期地层平均含水饱和度可以由出口端含水饱和度代替，因此公式(10)可写为：

$$R=\frac{N_p}{N}=\frac{S_{we}-S_{wi}}{1-S_{wi}} \tag{11}$$

又极限驱油效率 E_D 为：

$$E_D=\frac{1-S_{or}-S_{wi}}{1-S_{wi}} \tag{12}$$

将公式(5)改写为：

$$S_{wd}=\frac{S_{we}-S_{wi}}{1-S_{wi}}\Big/\frac{1-S_{or}-S_{wi}}{1-S_{wi}} \tag{13}$$

由公式(11)、(12)和(13)得：

$$S_{wd}=\frac{R}{E_D}=\frac{N_p}{NE_D} \tag{14}$$

又投入开发的储量 N_{om} 为：

$$N_{om}=NE_D \tag{15}$$

因此公式(14)改写为：

$$S_{wd}=\frac{N_p}{N_{om}} \tag{16}$$

将公式(16)代入公式(9)并使等式两边取对数有：

$$\ln WOR-\ln\left(a_1\frac{\mu_o}{\mu_w}\right)=\left(\frac{N_p}{N_{om}}\right)^b \tag{17}$$

由换底公式：

$$\ln m=\frac{\lg m}{\lg e}=\frac{\lg m}{0.434} \tag{18}$$

公式(17)可改写为：

$$\lg WOR+C=0.434\left(\frac{N_p}{N_{om}}\right)^b \tag{19}$$

其中 C 为常数：

$$C=-0.434\ln\left(a_1\frac{\mu_o}{\mu_w}\right) \tag{20}$$

公式(19)左侧为 $\lg WOR$ 与一个常数的和，右侧为 N_p 的幂函数形式，可以看出 $\lg WOR-N_p$ 成幂函数关系。在特高含水阶段油田含水率较高，此时水油比 WOR 对数的值远大于常数 C，因此公式(19)可写为：

$$\lg WOR=d\left(\frac{N_p}{N_{om}}\right)^b \tag{21}$$

在可动油储量 N_{om} 未知的情况下，表达式为：

$$\lg WOR=d_1N_p^b \tag{22}$$

式中：f_w 为含水率，无量纲；μ_o 为油相粘度，mPa·s；μ_w 为水相粘度，mPa·s；WOR 为水油比，无量纲；$\overline{S_w}$ 为平均含水饱和度，%；R 为采出程度，%；N_p 为累计产油量，t；N 为原始地层储量，t；N_{om} 为投入开发的储量，t；E_D 为驱油效率，%；C,m,d,d_1 均为常数，无量纲。

公式(21)和(22)即为特高含水期的水驱特征曲线公式，其反映的是水驱开发后期水油比与累计产油量之间的关系，它们适用于预测常规水驱特征曲线产生上翘后的阶段的水驱油田开发动态。

3 实例验证

本研究应用实际油田数据资料对公式(21)和公式(22)水驱特征曲线公式的适用性进行验证，并与常规水驱特征曲线公式的计算结果进行对比。

3.1 冀东柳赞油田某区块生产资料验证

采用文献[11]中冀东柳赞油田某区块生产资料，柳赞油田某区块的实际开发数据见表2，该地区地质储量 910.08×10^4 t，束缚水饱和度为26.5%，残余油饱和度为31.5%，计算出的可动油的储量为 514.9×10^4 t，根据表2中数据绘制出乙型水驱特征曲线(图2)，从图2中可以看出上翘点发生在累计产油量为 202.072×10^4 t 处，此时综合含水率为96.33%。

新型水特征曲线(图3)的公式为：

$$\lg WOR=3.5508\left(\frac{N_p}{514.9}\right)^{1.538} \tag{23}$$

现对数据点中含水率为98.25%时的累计产油量进行预测，由常规乙型水驱特征曲线得到的累计产油量为 248.7×10^4 t，与实际数据比相对误差为12.3%；由新型水驱特征曲线预测的累计产油量为 221.5×10^4 t，此时与实际数据比相对误差为1.2%。与实际值基本相同。

表 2　冀东柳赞油田某区块生产数据

Table 2　Production data of a certain block in Liuzan oilfield, eastern Hebei Province

累计产油量/(10^4 t)	累计产水量/(10^4 t)	含水率/%
36.130	38.770	54.51
45.021	52.912	63.99
55.974	77.770	75.19
66.874	119.046	80.89
78.487	168.082	81.42
91.075	224.639	79.23
112.748	323.435	86.70
132.585	487.499	92.32
145.495	629.021	90.18
156.473	696.680	86.27
167.028	785.458	91.78
175.297	862.522	90.77
178.489	904.996	92.05
182.054	961.163	95.12
185.704	1 030.860	94.77
189.535	1 100.029	94.42
193.759	1 171.939	94.69
196.686	1 230.038	95.29
202.072	1 358.356	96.33
205.934	1 480.184	96.96
208.895	1 606.369	97.71
211.897	1 711.787	96.99
216.829	1 930.118	98.17
218.969	2 045.629	98.25

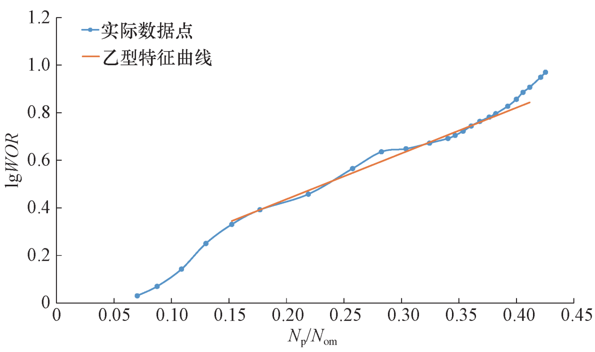

图 2　冀东柳赞油田乙型水驱特征曲线

Fig. 2　Type-B water flooding characteristic curve in Liuzan oilfield in eastern Hebei Province

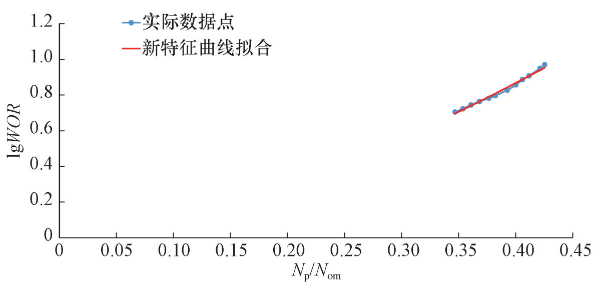

图 3　冀东柳赞油田新型水驱特征曲线

Fig. 3　New water flooding characteristic curve in Liuzan oilfield in eastern Hebei Province

3.2　胜利油田实际数据验证

对文献[12]中实际油田生产资料进行预测,表 3 为胜利油田某区块实际开发数据,由表 3 中数据绘制出该区乙型水驱特特征曲线(图 4),从图 4 可以看出曲线开始上翘时,累计产油量为 7.392 06 × 10^5 t,此时综合含水率为 93.11%。

新型水驱特征曲线(图 5)公式为:

$$\lg WOR = 0.003\ 9 N_p^{2.849} \tag{24}$$

现对含水率为 98.02% 的点进行预测,常规乙型水驱特征曲线预测的累计产油量为 99.368 × 10^4 t,预测误差为 18.3%,而新型水驱特征曲线预测的累计产油量为 84.450 × 10^4 t,误差为 0.5%,与实际数据基本相同。

根据实际油田生产数据预测情况来看,常规乙型特征曲线对特高含水期的预测有较大的误差,而新型水驱特征曲线的预测误差很小,与实际生产情况接近。新型水驱特征曲线在油田特高含水阶段有较好的适用性,可以很好的预测特高含水期的油田生产动态。

表 3　胜利油田某区块生产数据

Table 3　Production data of a certain block in Shengli oilfield

地面累积产油量/(10^4 t)	水油比 *WOR*	含水率/%	地面累积产油量/(10^4 t)	水油比 *WOR*	含水率/%
34.168 7	1.39	58.14	76.153 8	16.12	94.16
36.178 6	1.65	62.33	77.270 4	17.43	94.57
37.741 9	1.92	65.78	77.940 4	19.00	95.00
39.081 8	2.45	70.99	78.833 7	20.05	95.25
40.198 5	2.45	71.04	79.503 7	21.88	95.63
42.655 0	3.24	76.41	79.950 3	23.18	95.86
44.218 3	3.24	76.44	80.843 6	24.75	96.12
45.781 6	3.77	79.03	79.503 7	26.32	96.34
48.461 5	4.30	81.12	79.950 3	27.88	96.54
50.694 7	4.62	82.22	80.843 6	29.97	96.77
53.374 6	4.83	82.84	81.290 3	32.06	96.98
55.607 9	4.84	82.87	81.736 9	33.63	97.11
57.394 5	5.63	84.91	82.183 6	35.46	97.26
59.627 7	5.37	84.31	82.406 9	36.76	97.35
62.307 6	6.16	86.04	82.406 9	38.33	97.46
63.647 6	6.69	86.99	82.630 2	40.15	97.57
65.210 9	7.22	87.83	83.076 9	42.24	97.69
66.327 5	7.48	88.21	83.076 9	43.81	97.77
67.890 8	8.01	88.90	83.300 2	45.89	97.87
69.454 0	9.06	90.06	83.746 0	47.98	97.96
70.124 0	10.37	91.20	83.970 2	49.55	98.02
71.687 3	11.15	91.77	84.193 5	51.37	98.09
72.803 9	12.20	92.42	84.193 5	52.94	98.15
73.920 6	13.51	93.11	84.416 8	55.03	98.22
75.483 8	15.08	93.78	84.640 0	56.85	98.27

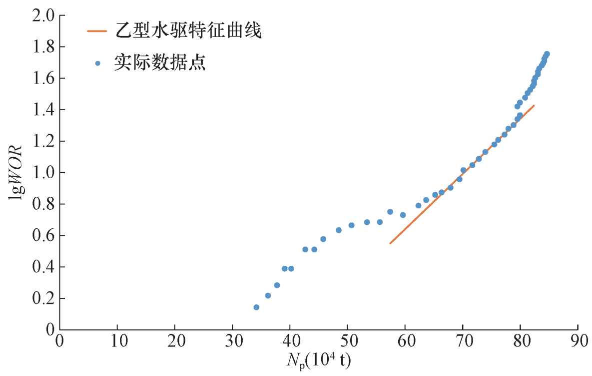

图 4 胜利油田乙型水驱特征曲线

Fig. 4 Type-B water flooding characteristic curve of Shengli oilfield

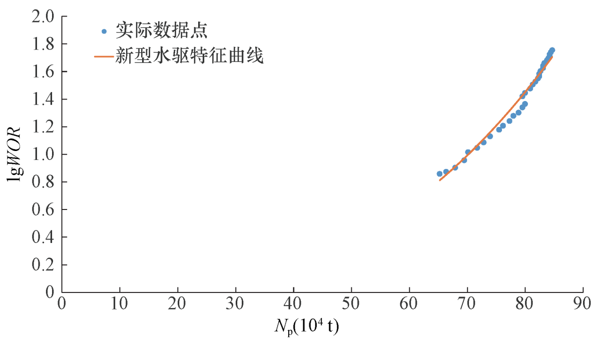

图 5 胜利油田新型水驱特征曲线

Fig. 5 New water flooding characteristic curve of Shengli oilfield

4 结论

1）提出的新型油水相对渗透率比值与含水饱和度关系公式能够很好的表示油田特高含水阶段油水相对渗透率比值与含水饱和度之间的关系，为推导特高含水期水驱特征曲线公式提供了有效的油水相对渗透率比值与含水饱和度关系公式。

2）推导出新型水驱特征曲线表达式，结合实例对比乙型水驱特征曲线与新型水驱特征曲线的预测效果，发现在特高含水阶段（含水率 >90%）新型水驱特征曲线预测误差较小，预测结果与实际值基本相同，因此新型水驱特征曲线对于油田特高含水阶段的动态预测有较好的适用性。

3）新型水驱特征曲线有较好的拟合效果，它适用于表征常规水驱特征曲线发生上翘后的阶段，同时将新型水驱特征曲线外推可以预测出油田可采储量以及最终采收率。

参 考 文 献

[1] 陈元千，陶自强. 高含水期水驱曲线的推导及上翘问题的分析［J］. 断块油气田，1997，4（3）：19－24.
Chen Yuanqian，Tao Ziqiang. Derivation of water drive curve in high water cut stage and analysis of upward problem［J］. Fault-Block Oil & Gas Field，1997，4（3）：19－24.

[2] 王华. 改进型水驱特征曲线计算技术可采储量的公式推导及其应用［J］. 油气地质与采收率，2012，19（4）：84－86.
Wang Hua. Application of improved water drive curve in recoverable reserves［J］. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2012，19（4）：84－86.

[3] 梁保红. 特高含水期水驱特征曲线上翘对油田开发的意义及判断方法研究［J］. 中国石油和化工，2016，4（S1）：220.
Liang Baohong. Study on the significance of upward of water drive characteristic curve to oilfield development and judgment method in the period of extra-high water cut［J］. China Petroleum and Chemical Industry，2016，4（S1）：220.

[4] 管错，李宜强，石成方. 对特高含水期水驱特征曲线上翘问题的新认识［J］. 大庆石油地质与开发，2017，36（2）：64－68.
Guan Cuo，Li Yiqiang，Shi Chengfang. New understandings of the upward problem for the water flooding characteristic curve at extra-high water cut stage［J］. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing，2017，36（2）：64－68.

[5] 于波，孙新敏，杨勇，等. 高含水期水驱特征曲线上翘时机的影响因素研究［J］. 石油天然气学报（江汉石油学院学报），2008，30（2）：127－131.
Yu Bo，Sun Xinmin，Yang Yong，et al. Study on the factors of upward time of water drive characteristic curve in high water-cut stage［J］. Journal of Oil and Gas Technology（JJPI），2008，30（2）：127－131.

[6] 孙红霞. 高含水期水驱特征曲线上翘新认识［J］. 特种油气藏，2016，23（1）：92－95.
Sun Hongxia. New understanding of upward water flooding characteristic curve in high water-cut stage［J］. Special Oil and Gas Reservoirs，2016，23（1）：92－95.

[7] 杨勇. 高含水期水驱特征曲线上翘现象校正方法研究［J］. 石油天然气学报（江汉石油学院学报），2008，30（1）：120－123.
Yang Yong. Study on correction method of upward of water drive characteristic curve in high water cut stage［J］. Journal of Oil and Gas Technology（JJPI），2008，30（1）：120－123.

[8] 时凤霞，王容容，于波. 高含水期水驱特征曲线上翘时机的定量表征［J］. 科学技术与工程，2015，15（11）：53－57.
Shi Fengxia，Wang Rongrong，Yu Bo. The quantitative characterization of upward moment of water-flooding characteristic curve at high water-cut stage［J］. Science Technology and Engineering，2015，15（11）：53－57.

[9] 孙成龙. 水驱曲线上翘时机的判定方法［J］. 石油地质与工程，2014，28（3）：69－70.
Sun Chenglong. Determination method of upward time of water drive curve［J］. Petroleum Geology and Engineering，2014，28（3）：69－70.

[10] Can B，Kabir C S. Simple tools for forecasting waterflood performance［J］. Journal of Petroleum Science and Engineering，2014，120（8）：111－118.

[11] 王继强，石成方，纪淑红，等. 特高含水期新型水驱特征曲线［J］. 石油勘探与开发，2017，44（6）：955－960.
Wang Jiqiang，Shi Chengfang，Ji Shuhong，et al. New water drive characteristic curves at ultra-high water cut stage［J］. Petroleum Exploration and Development，2017，44（6）：955－960.

[12] 崔传智，徐建鹏，王端平，等. 特高含水阶段新型水驱特征曲线［J］. 石油学报，2015，36（10）：1267－1271.
Chui Chuanzhi，Xu Jianpeng，Wang Duanping，et al. A new water flooding characteristic curve at ultra-high water cut stage［J］. Acta

Petrolei Sinica,2015,36(10):1267 -1271.

[13] 王小林,于立君,李治平,等. 特高含水期新型水驱特征曲线[J]. 大庆石油地质与开发,2015,34(6):54 -56.
Wang Xiaolin,Yu Lijun,Li Zhiping,et al. New water-flooding characteristic curves at the stage of extra-high water cut[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing,2015,34(6):54 -56.

[14] 宋兆杰,李治平,赖枫鹏,等. 高含水期油田水驱特征曲线关系式的理论推导[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):201 -208.
Song Zhaojie,Li Zhiping,Lai Fengpeng,et al. Derivation of water flooding characteristic curve for high water-cut oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(2):201 -208.

[15] 刘世华,谷建伟,杨仁锋. 高含水期新型水驱特征曲线[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(S1):158 -163.
Liu Shihua,Gu Jianwei,Yang Renfeng. New water-flooding characteristic curve at high water-cut stage[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2011,30(S1):158 -163.

[16] 范海军,朱学谦. 高含水期油田新型水驱特征曲线的推导及应用[J]. 断块油气田,2016,23(1):105 -108.
Fan Haijun,Zhu Xueqian. Derivation and application of new water flooding characteristic curve in high water-cut oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2016,23(1):105 -108.

[17] 侯健,王容容,夏志增,等. 特高含水期甲型水驱特征曲线的改进[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(6):72 -75.
Hou Jian,Wang Rongrong,Xia Zhizeng,et al. Improvement of water displacement curve for water flooded oil reservoirs at ultra-high water cut stage[J]. Journal of China University of Petroleum,2013,37(6):72 -75.

[18] 高文君,彭长水,李正科. 推导水驱特征曲线的渗流理论基础和通用方法[J]. 石油勘探与开发,2000,27(5):56 -60.
Gao Wenjun,Peng Changshui,Li Zhengke. A derivation method and percolation theory ofwater-drive characteristic curves[J]. Petroleum Exploration and Development,2000(5):56 -60.

[19] 陈军,杨峻懿,刘启国. 特高含水期油藏采油速度研究及影响因素分析[J]. 油气藏评价与开发,2018,8(4):17 -21.
Chen Jun,Yang Junyi,Liu Qiguo. Study on the speed of oil recovery and influence factors in extra-high water content period[J]. Reservoir Evaluation and Development,2018,8(4):17 -21.

[20] 李珂,胡书勇,张金庆. 一种新型水驱特征曲线及其应用[J]. 油气藏评价与开发,2019,9(2):13 -16.
Li Ke,Hu Shuyong,Zhang Jinqing. A new type water flooding characteristic curve and its application[J]. Reservoir Evaluation and Development,2019,9(2):13 -16.

[21] 李立峰,滕世婷,冯绪波. 基于水驱开发全过程的新型水驱特征曲线[J]. 特种油气藏,2019,26(3):85 -88.
Li Lifeng,Teng Shiting,Feng Xubo. A new water-flooding characteristic curve based on the whole water-flooding process[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2019,26(3):85 -88.

(编辑　梁　慧)

(上接第 1281 页)

[10] 张广智,陈怀震,王琪,等. 基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型的横波速度和各向异性参数预测[J]. 地球物理学报,2013,56(5):1707 -1715.
Zhang Guangzhi,Chen Huaizheng,Wang Qi,et al. Estimation of S-wave velocity and anisotropy parameters using fractured carbonate rock physics model[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(5):1707 -1715.

[11] Jakobsen M,Johansen T A, McCann C. The acoustic signature of fluid flow in complex porous media[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical,2003,54(3):219 -246.

[12] 方志雄. 潜江凹陷隐蔽油藏成藏主控因素及勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):804 -812.
Fang Zhixiong. Main controlling factors and exploration direction of subtle oil reservoirs in Qianjiang Depression[J]. Oil and Gas Geology, 2006,27(6):804 -812.

[13] 杜小娟,贺钦. 江汉盐湖盆地盐间泥质白云岩烃源岩特征[J]. 江汉石油科技,2012,22(1):7 -10.
Du Xiaojuan,He Qin. Characteristics of source rocks of inter-salt argillaceous dolomite in Jianghan salt lake basin[J]. Jianghan Pertroleum Science and Technology,2012,22(1):7 -10.

[14] 潘银华,黎茂稳,孙永革,等. 江汉盆地潜江凹陷盐间云质页岩热压生排烃模拟实验研究[J]. 石油实验地质,2018,40(4):551 -558.
Pan Yinhua,Li Maowen,Sun Yongge,et al. Thermo-compression simulation of hydrocarbon generation and expulsion of inter-salt dolomitic shale,Qianjiang Sag,Jianghan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2018,40(4):551 -558.

[15] 吴世强,陈凤玲,姜在兴,等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因[J]. 石油与天然气地质,2020,41(1):201 -208.
Wu Shiqiang,Chen Fengling,Jiang Zaixing,et al. Origin of Qianjiang Formation dolostone in Qianjiang Sag,Jianghan Basin[J]. Oil & Gas Geology,2020,41(1):201 -208.

[16] 龙玉梅,陈曼霏,陈凤玲,等. 潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层发育特征及影响因素[J]. 油气地质与采收率,2019,26(1):59 -64.
Long Yumei,Chen Manfei,Chen Fengling,et al. Characteristics and influencing factors of inter-salt shale oil reservoirs in Qianjiang formation,Qianjiang sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2019,26(1):59 -64.

[17] 吴世强,唐小山,杜小娟,等. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征[J]. 东华理工大学学报:自然科学版,2013,36(3):282 -286.
Wu Shiqiang,Tang Xiaoshan,Du Xiaojuan,et al. Geologic characteristics of continental shale oil in the qianjiang depression,Jianghan salt lake basin[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science),2013,36(3):282 -286.

[18] Mavko G,Mukerji T,Dvorikin J. The rock physics hansbook:tools for seismic analysis in porous media[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1998.

[19] 杜启振,杨慧珠. 线性黏弹性各向异性介质速度频散和衰减特征研究[J]. 物理学报,2002,51(9):2101 -2108.
Du Qizhen,Yang Huizhu. Velocity dispersion and attenuation in anisotropy linear viscoelastic media[J]. Acta Physica Sinica,2002,51(9):2101 -2108.

[20] Wang Y J,Chen S Q, Li X Y,Anisotropic characteristics of mesoscale fractures and applications to wide azimuth 3D P-wave seismic data[J]. Journal of Geophysics and Engineering,2015,12(3):448 -464.

(编辑　张亚雄)