

鄂尔多斯盆地姬塬地区长2油层低阻主控因素及有效识别方法研究

斯 扬¹, 牛小兵², 梁晓伟², 史立川², 朱玉双¹

(1. 西北大学, 大陆动力学国家重点实验室/地质学系, 陕西西安 710069; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018)

[摘 要]鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组长2段发育低阻油层。为解决前人成果仅适用于局部小区块、无法应用于全区的情况, 本文利用地层水分析、相渗实验、岩心物性、测井及试油资料重新对全区长2油层低阻的主控因素进行了分析, 并提出了更为有效的适用于全区的判别方法。研究表明: 姬塬地区长2油层低电阻率主要控制因素为高矿化度地层水、低含油饱和度、储层物性及淡水泥浆侵入, 前三者大幅度降低了油层的电阻率, 淡水泥浆的侵入则主要提升了水层电阻率, 进一步导致了电阻率增大系数的变小。针对低阻成因的主控因素, 提出了侵入因子-综合含油指数交会图法, 重新建立了长2低阻油层测井识别图版, 该图版与试油符合率达到了94%, 能更加有效地识别姬塬地区长2低阻油层。

[关键词] 长2油层 低阻 主控因素 判别方法 姬塬地区 鄂尔多斯盆地

[中图分类号] TE112.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2019)03-09

Si Yang, Niu Xiaobing, Liang Xiaowei, Shi Lichuan, Zhu Yushuang. Main controlling factors of low resistivity and effective identification methods for the Chang 2 reservoir in the Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(3): 0882-0890.

0 引言

低阻油层一直是国内外油气勘探领域的难点问题, 近三十年来, 国内外在低阻油气层的勘探领域内取得了丰硕的成果。因此, 低阻油气层已成为最具潜力的油田复查增储的目标, 开展低阻油气层的成因分析及有效识别方法研究具有重要的意义(中国石油天然气集团公司油气勘探部, 2000; 李国欣等, 2002; 中国石油勘探与生产公司, 2006; 潘和平等, 2006)。

针对于低阻油气层的成因分析, 国内外学者进行了大量的工作。低阻油气层的成因可以从储层内部及外部因素两方面来解释(中国石油天然气集团公司油气勘探部, 2000; 潘和平等, 2006; 吴金龙等, 2006; 中国石油勘探与生产公司, 2006; 王友净等, 2010; 王赛英等, 2010; 杨涛涛等, 2017)。储层内部因素主要为骨架导电矿物、地层水矿化度、束缚水及

孔隙结构、储层粒度、粘土矿物及泥质的附加导电性等, 外部因素则主要为钻井液侵入及测井探测范围有限等问题。在低阻成因研究的基础上, 目前常用定性判别低阻油气层的方法主要有重叠法、交会图法、自然电位偏移法、灰色聚类识别、BP神经网络方法、核磁共振测井及MDT测试识别低阻油层等, 定量评价方法则主要为可动水分析法、DPSM模型、双孔隙水模型、Waxman-Smits模型以及基于阿尔奇公式改进的饱和度解释模型等(于庆洲, 2005; 罗兴平等, 2008; 程相志, 2009; 赵军龙等, 2011; 肖冬生等, 2010; 陈义国等, 2013; 张小莉, 1999; 施冬, 2012; 杨志浩和李治平, 2017)。纵观前人研究, 认为低阻油层成因具有多样性, 往往由多种因素交织共同影响所致, 且低阻油层的判别方法均具有一定的区域性及个案性(赵军龙等, 2011), 因此, 在低阻油层的评价中, 基于研究区低阻成因主控因素分析提出针

[收稿日期] 2018-08-22; **[改回日期]** 2018-12-28; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 国家重大科技专项项目“低渗-特低渗油藏有效开发关键技术”子课题超低渗油藏改善开发效果关键技术(2017ZX05013004)和中石油股份公司重大科技专项“长庆油田5000万吨持续高效稳产关键技术研究与应用”子课题“鄂尔多斯盆地超低渗透——致密油藏有效开发技术研究”(2016E-0505)资助。

[第一作者] 斯 扬(1989年-), 男, 博士研究生, 主要从事油藏评价方面的研究。E-mail: 304085871@qq.com。

[通讯作者] 朱玉双(1968年-), 女, 博士, 教授, 主要从事油藏评价与油气田开发等方面研究。E-mail: yshzhu@nwu.edu.cn。

对性的判识方法至关重要(于红岩等,2012)。 识别。

1 研究区概况及低阻油层特征

研究区位于鄂尔多斯盆地陕西、甘肃、宁夏三省境内,西起大水坑、东至胡尖山、北自盐池、南抵乔川。构造上横跨鄂尔多斯盆地伊陕斜坡和天环坳陷2 个构造单元(见图1)。姬塬地区是长庆油田勘探开发的重点区域,该区正位于盆地延长组生烃中心,发育了长9、长8、长6、长4+5、长3、长2 及侏罗系延安组油藏。近年来,随着勘探开发规模的扩大,物性好,单井产量高的长2 及其上部侏罗系等中浅层油藏日益成为油田勘探开发的重点层位。但是该地区长2 油层普遍低阻,识别较为困难,在用常规测井方法识别时,常会漏掉部分低阻油层。因此,对研究区长2 低阻成因进行分析,并寻求有效的判识方法,对油田老井复查及增储具有重要意义。

研究区长2 油层主要表现为电阻率偏低,接近水层电阻率,甚至低于水层电阻率,相对于常规电阻率油层,识别、评价难度大。通过对研究区167 个试油小层的电阻率统计可看出:研究区产油层以油水同层为主,电阻率多分布在10 欧姆以下,利用常规的声波时差-电阻率交汇图版难以识别长2 低阻油层。而从不同流体类型储层的电性参数来看,油层、油水层与水层间也并无明显的差异(图2;表1),采用常规测井方法难以有效地对研究区长2 油层进行

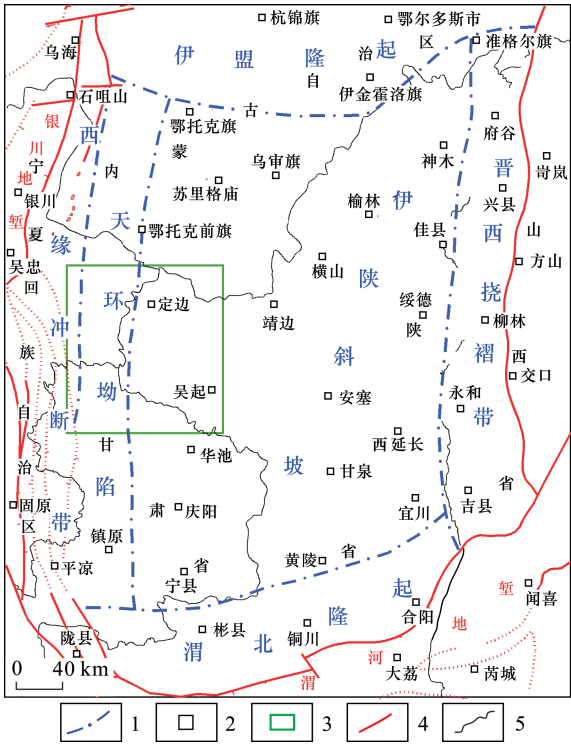


图1 鄂尔多斯盆地构造及研究区位置

Fig.1 Map showing tectonic units of Ordos Basin and location of the study area

1 - 构造单元分界线;2 - 地名;3 - 研究区范围;4 - 盆地边界;5 - 省界
1 - tectonic unit boundary; 2 - place name; 3 - study area; 4 - basin boundary; 5 - provincial boundary

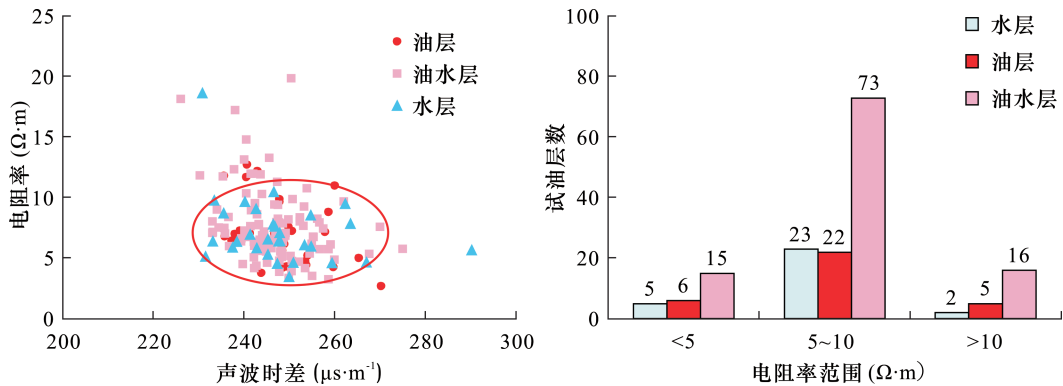


图2 长2 储层声波时差-电阻率交会图及电阻率分布区间柱状图

Fig.2 Acoustic time difference - resistivity intersection(left) and resistivity distribution histogram(right) of the Chang 2 reservoir

表1 研究区不同类型流体电性统计表
Table 1 Statistics of electrical properties of different fluids in the study area

流体类型	层数/个	电阻率/ $\Omega \cdot m$			声波时差/ $\mu s \cdot m^{-1}$			自然伽马/API			密度/ $g \cdot cm^{-3}$		
		Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave
水层	30	3.5	18.7	7.2	231.0	290.1	247.9	57.7	108.5	77.6	2.31	2.45	2.39
油层	33	3.8	19.3	7.4	235.7	265.3	247.1	43.6	105.6	77.6	2.34	2.54	2.42
油水层	104	2.7	19.9	7.6	226.2	275.0	246.9	42.4	118.4	79.4	2.33	2.52	2.42

2 低阻油层成因主控因素分析

前人对姬塬地区长 2 低阻油层也做过的一些相关的分析和研究(王辉,2005;赵虹等,2009;陈娣和杜伟,2009;周丹等,2010;李娜,2010;李长喜等,2010;刘超威等,2015;陈世加等,2017),纵观前人的研究成果,关于研究区长 2 低阻成因主要有以下几点认识:①长 2 低阻油层受高矿化度地层水影响。②长 2 油层低阻主要由复杂孔隙结构下的高束缚水导致。③长 2 油藏构造幅度低,油水置换不完全,低含油饱和度导致油层低阻。④淡水泥浆的侵入对长 2 油层低阻有所影响,其增大了水层、减小了油层电阻率,使得油层电阻增大率进一步缩小,从而难以判识。针对这些成因,前人也提出了相应的判识方法,如侵入因子法、邻近水层对比法、视自然电位差法、灰色聚类法、可动水分析法及地球化学方法等。可以看出,前人对长 2 低阻油层的研究工作成果较为一致,且重点集中在了高矿化度地层水、高束缚水饱和度、低含油饱和度和泥浆侵入的干扰,但是前人没有明确的对全区长 2 油层低阻的优势控制因素进行研究,且判识方法大多针对于局部的小区块,在全区的适用效果并不理想。本次研究主要是针对前人提出的地层水矿化度、束缚水、低含油饱和度及淡水泥浆侵入四种因素在全区进行综合分析,最后确定低阻油层成因的主控因素。

(1) 地层水矿化度对长 2 储层电阻率的影响

地层水矿化度反应了地层水中离子的总量,其直接决定了储层孔隙中地层水电阻率,地层水矿化度越高,电阻率越小,从而直接对储层电阻率产生影响。同时地层水电阻率是运用常规测井评价中应用阿尔奇公式计算储层含油饱和度的关键参数,地层水矿化度分布差异越大,越不利于对于储层含油性的整体评价。针对研究区长 2 层 144 口探评井的地层水分析资料进行了统计分析,可以看出在研究区长 2 层地层水平均矿化度为 $68.36 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,其主体分布区间为 $20 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 3)。长 2 地层水矿化度分布差异较大,地层水电阻率变化大,进而导致研究区长 2 储层没有统一的油水电性下限。

鄂尔多斯盆地内,志靖-安塞地区长 2 地层水矿化度平均为 $31.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,油层平均电阻率 $18.2 \Omega \cdot \text{m}$,姬塬地区油层地层水矿化度平均 68.36 g/L ,油层平均电阻率 $7.5 \Omega \cdot \text{m}$,这一定程度说明了姬塬地区长 2 低阻油层的形成受高矿化度地层水的控制。

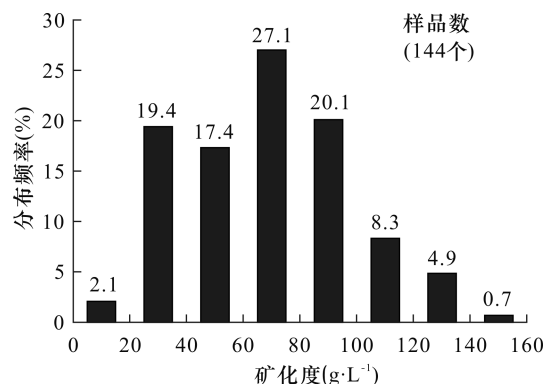


图 3 研究区长 2 地层水矿化度分布柱状图

Fig. 3 Water salinity distribution histogram of Chang2 formation in the study area

对研究区 77 口试油井与地层水矿化度的分析表明(图 4),长 2 储层地层水矿化度对其电阻率有较为明显的影响,同时其对于不同含油性的储层,影响程度不同。对于纯油层,地层水矿化度对其电阻率影响最大,其判定系数 R^2 为 0.8446;其次为地层水矿化度对纯水层电阻率的影响,判定系数 R^2 为 0.343;地层水矿化度对油水同层电阻率的影响相对最弱,判定系数为 0.2008。

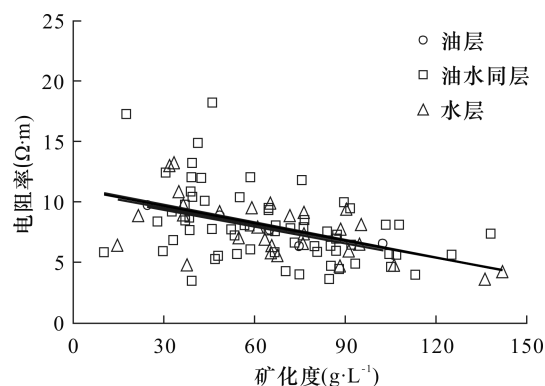


图 4 地层水矿化度与储层电阻率的关系

Fig. 4 Relationship between the salinity of formation water and reservoir resistivity

注:趋势线公式:总: $y = -0.0477x + 10.978$, $R^2 = 0.2314$ ($N = 101$); 油层: $y = -0.0468x + 10.719$, $R^2 = 0.8446$ ($n = 5$); 油水同层: $y = -0.0511x + 11.354$, $R^2 = 0.2008$ ($N = 66$); 水层: $y = -0.0458x + 10.0742$, $R^2 = 0.343$ ($n = 30$)。

分析认为,纯油层意味着储层中没有可动水的存在,地层水矿化度主要通过束缚水来影响储层电阻率,其受其他因素影响相对较小,束缚水的地层水矿化度和饱和度直接决定了纯油层的电阻率;水层则表示可动流体全部是自由水,束缚水和自由水的地层水矿化度应该为水层电阻率的直接控制因素,但是从相关性来看,水层的电阻率很明显也受其他

因素干扰;油水同层中,束缚水、可动水及含油饱和度共同控制着储层的电阻率,此外也有可能受到其他因素的干扰,因此油水同层的电阻率控制因素更加复杂,地层水矿化度对其电阻率的影响程度自然较前二者小;整体来看,地层水矿化度是长 2 储层低电阻率的主要控制因素之一。

(2) 束缚水对长 2 储层电阻率的影响

束缚水主要指在一定压差下储层孔隙中不可流动的水(陈世加等,2017),在一定的地层水矿化度条件下,束缚水和可动水共同构建了储层孔隙空间内的主要导电网络。储层孔隙空间内均会存在一定程度的束缚水,常用的束缚水测试方法主要为相渗

实验和核磁可动流体分析(任颖等,2016)。

相渗实验分析结果显示,研究区长 2 储层束缚水饱和度主要分布在 30% ~ 50%,整体变化不大,平均为 39.5%(表 2)。从束缚水饱和度与电阻率的关系的来看,束缚水饱和度对储层电阻率的有一定的影响,但判定系数 R^2 仅 0.0825;相比之下,储层孔隙度对电阻率的影响更大,判定系数 R^2 为 0.2246(图 5)。分析认为,对于研究区长 2 储层而言,束缚水对油层低电阻率有一定的影响,但是在地层水矿化度变化较大,及其他可能的低阻控制因素的影响下,束缚水饱和度对储层电阻率的控制明显偏弱,相较之下,储层孔隙度与地层水矿化度对长 2 储层电阻率的影响更明显。

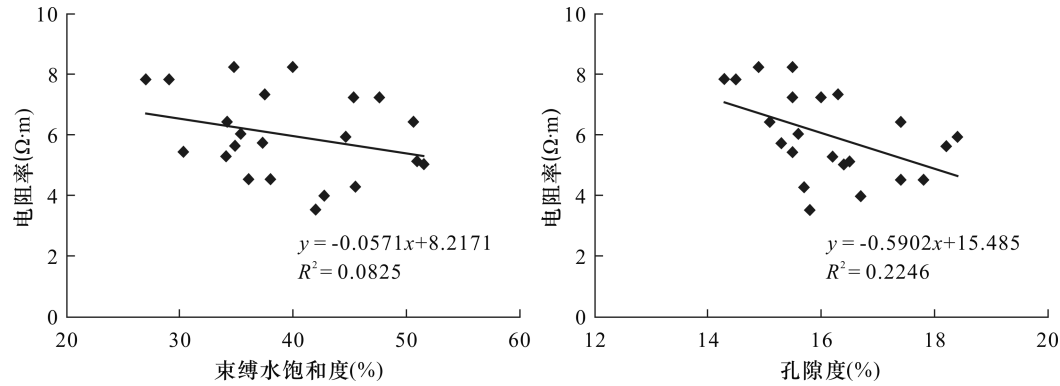


图 5 束缚水饱和度及孔隙度与储层电阻率的关系

Fig. 5 Relationship between irreducible water saturation and porosity with reservoir resistivity

表 2 研究区长 2 储层相渗实验束缚水测试结果统计表
Table 2 Statistics of facies penetration tests for Chang 2 reservoir

井名	顶深/m	底深/m	孔隙度/%	束缚水饱和度/%	电阻率 Ω · m
C204	2213. 57	2213. 77	15. 3	37. 32	5. 7
C204	2216. 29	2216. 49	17. 8	38. 02	4. 5
D630	1793. 78	1794. 01	15. 5	34. 8	8. 2
D630	1802. 32	1802. 53	16. 3	37. 5	7. 3
G109	1984. 91	1985. 09	17. 4	50. 6	6. 4
G109	1986. 48	1986. 63	15. 5	47. 6	7. 2
G109	1988. 12	1988. 27	16. 5	50. 9	5. 1
G109	1992. 56	1992. 74	16. 4	51. 5	5
G131	2090. 52	2090. 77	17. 4	36. 1	4. 5
G131	2093. 12	2093. 33	15. 8	42	3. 5
G149	1987	1987. 2	18. 4	44. 65	5. 9
G151	2112. 23	2112. 48	15. 6	35. 4	6
G155	1917. 33	1917. 6	14. 3	29. 1	7. 8
G158	2136. 29	2136. 49	15. 1	34. 2	6. 4
G159	2103. 96	2104. 17	15. 5	30. 35	5. 4
G159	2112. 81	2113. 02	18. 2	34. 9	5. 6

续表 2
Continued Table 2

井名	顶深/m	底深/m	孔隙度/%	束缚水饱和度/%	电阻率 $\Omega \cdot m$
G166	2190.11	2190.35	15.7	45.5	4.25
G227	2053.34	2053.54	16.2	34.1	5.25
H130	1742.96	1743.15	14.9	39.97	8.2
H130	1787.3	1787.5	16	45.33	7.2
L179	2054.03	2054.23	16.7	42.74	3.95
Y259	1970.75	1970.95	14.5	27.03	7.79

注：本表数据收集于长庆油田勘探开发研究院，2016 年。

(3)低含油饱和度条件下,储层物性对长 2 储层电阻率的影响

储层含油饱和度对电阻率的影响显而易见,因此在常规储层测井评价中,可以通过电阻率来评价储层含油性。姬塬地区长 2 油藏油源主要来自于长 7 优质烃源岩,纵向上距离油源较远,油气充注程度低,此外构造幅度低,油水置换不完全,及束缚水饱和度偏高(39.5%),因此长 2 油藏整体含油饱和度低,试油出油段多以油水同出为主。

物性对储层电阻率的影响依赖于储层的含水饱和度和,在长 2 油藏整体低含油饱和度,高含水饱和度的条件下,储层物性越好,孔隙含水体积越大,束缚水及可动水组成的连通的导电网络越发达,储层电阻率相应越低。储层物性越差,储层内部流体导电网络越差,电阻率反而会较高。

对研究区储层岩心分析孔隙度及相应层段的测井电阻率进行了分析(图 6),可以看出研究区储层孔隙度与储层电阻率有一定的相关性($R^2 = 0.1421$)。从不同含油性储层孔隙度对电阻率的影响程度来看,孔隙度对纯油层电阻率影响最大,判定系数 R^2 为 0.4421,储层孔隙度对水层电阻率影响次之,判定系数 R^2 为 0.2999;储层孔隙度对油水同层电阻率的影响最弱,判定系数 R^2 仅为 0.0449。分析认为长 2 储层束缚水饱和度较高,纯油层的储层导电网络主要通过一定矿化度的束缚水膜来建立,储

层物性越好,束缚水膜的连通导电网络越发达,纯油层的电阻率自然会降低。从油层、水层和油水同层的矿化度(图 6)及孔隙度对电阻率影响程度来看,油层、水层及油水同层的电阻率除了受矿化度、孔隙度、含油饱和度影响外,还受其他因素影响,且相对于油层,其他因素可能对水层及油水同层的电阻率影响程度更大。

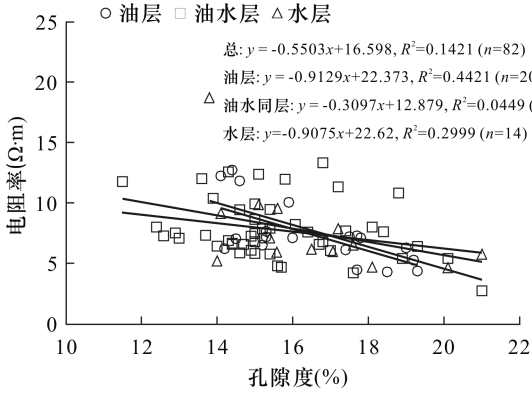


图 6 孔隙度与电阻率的关系
Fig. 6 Relationship between porosity and resistivity

对姬塬地区长 2 及其下伏主力油层长 4 + 5、长 6、长 8、长 9 的各项储层参数进行了对比(表 3),也可以看出在矿化度和束缚水饱和度相近的条件下,储层物性对电阻率有着较为明显的影响。这也进一步说明了低含油饱和度下的良好的储层物性为长 2 储层低电阻率的重要控制因素。

表 3 长 2 及其下伏储层参数统计表
Table 3 Statistics of parameters of the Chang2 and underlying reservoirs

层位	电阻率/ $\Omega \cdot m$	孔隙度/%	渗透率/mD	束缚水饱和度/%	矿化度/ $g \cdot L^{-1}$
长 2	7.5	16.6	7.43	39.5	68.36
长 4 + 5	21.4	12.5	0.99	32.6	84.5
长 6	24.9	12.1	0.81	33.0	79.2
长 8	79.6	10.3	1.46	37.0	30.1
长 9	25	12.2	9.55	32.9	30.6

(4) 淡水泥浆侵入对长2 储层电阻率的干扰

前人对淡水泥浆侵入对储层电阻率的影响做了较为细致的研究工作(李薇等,2004;李长喜等,2005;2007;2010)并指出了淡水侵入对储层电阻率的主要影响。李长喜通过模拟实验对研究区长2 油层和水层进行了钻井液侵入模拟研究。其研究结果认为,研究区长2 油藏构造幅度低,含油饱和度低,且长2 储层距井底较远,钻井过程中钻井液浸泡时间长,在高矿化度地层水的背景下,钻井液侵入对感应测井电阻率产生了影响,钻井液的侵入对油层的电阻率影响不大,只是略微降低,但是水层的电阻率却得以大幅度提升,因此,淡水泥浆的侵入进一步降低了油水层的电阻率差异,造成了油水识别的困难。同时,也得到了油层侵入因子较小,水层侵入因子相对较大的结论。

淡水泥浆侵入对长2 纯油层、油水同层和水层电阻率的干扰程度不同,其对油层的干扰最弱,对水层的电阻率干扰最大,油水同层由于可动水与束缚水同时存在,淡水泥浆侵入也会对其电阻率的干扰更加复杂。淡水泥浆侵入对储层电阻率的影响结果也与地层水矿化度及储层孔隙度对油层、油水同层及水层电阻率的不同影响程度吻合,这也说明淡水泥浆侵入对长2 储层电阻率具有有不可忽视的控制作用。

(5) 低阻成因综合分析

通过对研究区长2 储层地层水矿化度、束缚水饱和度、储层物性及钻井液侵入对储层电阻率影响的综合分析,认为:在矿化度和束缚水饱和度相近的条件下,孔隙度越大,储层含水体积越大,且渗透率越大,储层连通性越好,储层导电网络越发达,电阻率越低。研究区长2 储层平均孔隙度 16.6%,平均渗透率 7.43mD,为中孔-低渗储层,相对于延长组下部长4+5、长6 及长8 储层,物性较好,在高矿化度及低含油饱和度的背景下,良好的储层物性沟通了储层孔隙空间中的可动水及束缚水,形成了良好的储层导电网络,从而造成了长2 储层电阻率普遍较低,同时淡水泥浆的侵入使水层电阻率大幅提升,进一步降低了油层的电阻增大率。因此,研究区长2 油层低阻的主控因素为变化范围较大的高地层水矿化度及低含油饱和度条件下的储层物性,淡水泥浆的侵入则为研究区油水电阻率界限的主要干扰因素。

3 低阻油层判识方法

考虑到在高层水矿化度和淡水钻井液侵入共同影响下,结合前人对研究区长2 低阻油层的判识方法,认为李长喜提出了利用侵入因子来判识油水层较为有效。侵入因子为 $(R_{ILM} - R_{ILD})/R_{ILD}$,相对于阵列感应电阻率,根据感应电阻率的探测深度,侵入因子也可以用 $(AT30 - AT60)/AT60$ 来代替。

通过对试油层段电阻率及侵入因子交会图(图7)的分析可以看出,一般水层侵入因子大于0.2,油层侵入因子小于0.2,当侵入因子为负时,表明由于泥浆侵入,形成了低电阻率环带,可以直接解释为油层。

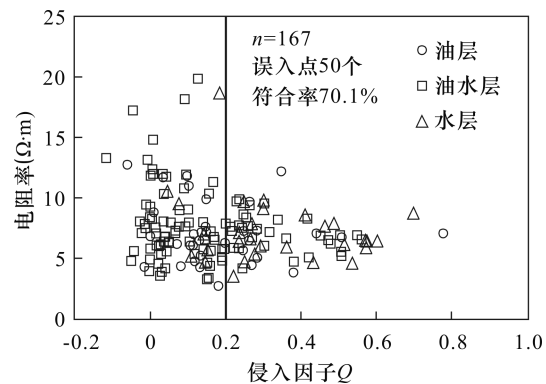


图7 侵入因子法识别油水图版

Fig.7 Intrusion factor method to identify oil and water

可以看出,由于长2 油层低阻还受到其他因素的影响,因此单凭侵入因子判识仅能识别部分长2 低阻油层,与试油符合率仅 70.1% (图7)。因此针对储层物性和地层水矿化度的影响,基于视电阻率增大法及邻近水层对比法(李娜,2010),构建了综合含油指数:

$$\text{综合含油指数 } Z = (R_t * \Phi) / (R_w * \Phi_w)$$

式中: R_t - 目标层电阻率, $\Omega \cdot m$; Φ - 目标层计算孔隙度, %; R_w - 邻近水层电阻率, $\Omega \cdot m$; Φ_w - 邻近水层计算孔隙度, %。

通过引入综合含油指数,建立了综合含油指数与电阻率的交会图版(图8),该图版与试油的符合率提高到了 86.7%。最后结合侵入因子,建立了综合含油指数-侵入因子交会图版(图9),此图版与试油的符合率提高到了 94%。依据此图版建立了出油层段的判识标准(表4),能够对姬塬地区长2 低阻油层进行有效判识。

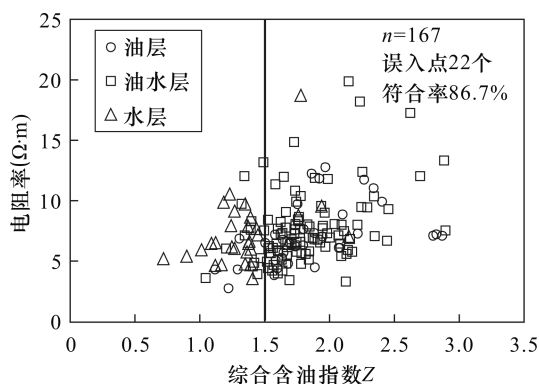


图8 综合含油指数法识别油水图版

Fig.8 Integrated oil index method to identify oil and water

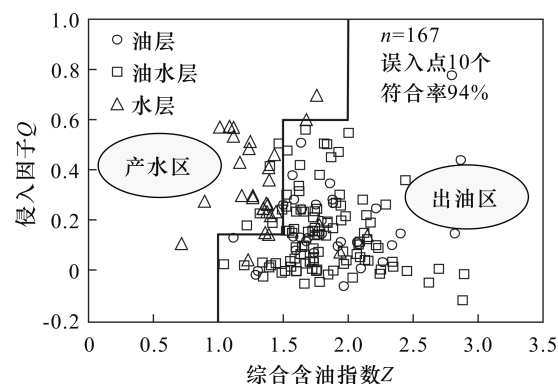


图9 综合含油指数-侵入因子交会识别油水图版

Fig.9 Integrated oil index - invasion factor intersection to identify oil and water

表4 姬塬地区长2低阻油层判别标准

Table 4 Low-resistivity oil identification standards of Chang 2 reservoir in the Jiyuan area

判别标准		解释结论
综合含油指数 Z	侵入因子 Q	
≥ 2	/	油层/油水层
$[1.5, 2)$	< 0.6	
$(1, 1.5)$	< 0.15	
≤ 1	/	水层
$(1, 1.5)$	≥ 0.15	
$[1.5, 2)$	≥ 0.6	

4 结论

(1)鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组长2油层低阻主要受高矿化度地层水、良好的储层物性及低含油饱和度控制,束缚水饱和度对长2油层低阻有一定的影响,但并非低阻的主要控制因素。淡水钻井液的侵入,增大了水层电阻率,并进一步降低了油层电阻率,对油层和水层的识别造成了干扰,从而使油水电阻率界限难以确定。

(2)基于对长2油层低阻成因分析,针对低阻主控因素,结合前人的研究成果,提出了综合含油指数与侵入因子联合识别长2低阻油层的方法,该方法与试油符合率为94%,能有效的识别研究区长2低阻油层。

(3)综合含油指数实质上是储层内部纵向上流体性质差异的体现,也可作为邻近水层对比法的定量参数,其能够有效的避开孔隙(孔隙度)及流体性质(地层水矿化度)差异对储层电阻率的影响,其应用必须在分析储层孔隙度与电阻率之间的关系的前提下进行,且需要较为精确计算测井储层孔隙度。此外,在储层空间及流体性质(束缚水饱和度、地层

水矿化度等)平面上变化较大的区域内,纵向上的对比会更加有效,因此综合含油指数对于油田勘探中后期大规模的老井复查工作有一定的应用价值。

[References]

- Chen Di, Du Wei. 2009. Study on quantitative interpretation method of low-resistivity oil horizon at Jiyuan area [J]. Petroleum Geology and Engineering, 23(1): 43-45 (in Chinese).
- Chen Shijia, Gao Xingjun, Yu Jian, Ma Jie, Huang Hai. 2017. An analysis of the causes of Chang 2 low resistivity in middle-western Ordos basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 39(2): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yiguo, Ren Laiyi, He Yonghong, Gao Shengli, Meng Wangcai, Dong Lihong. 2013. Fluids replacement identification technology of low-contrast reservoir and its application [J]. Well Logging Technology, 37(4): 401-405 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Xiangzhi. 2009. Study of recognition technology and distribution law on low-resistivity oil reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China): 1-132 (in Chinese).
- Geological Survey of CNPC. 2000. Logging technology and interpretation method of low-resistivity oil reservoir in the offshore Bohai Bay basin [M]. Beijing: Petroleum industry Press: 1-263 (in Chinese).
- Li Changxi, Ouyang Jian, Zhou Cancan, Xiu Lijun. 2005. Forming mechanism and application of low resistivity annulus in oil reservoirs inva-

- ded by fresh drilling mud[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 32(6): 82–86 (in Chinese with English abstract).
- Li Changxi, Shi Yujiang, Zhou Cancan, Li Xia, Liu Bingyu, Tang Liangmin, Li Shujing. 2010. Evaluation of low amplitude and low resistivity pay zones under the fresh drilling mud invasion condition[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 36(6): 696–702 (in Chinese with English abstract).
- Li Changxi, Li Chaoliu, Zhou Cancan, Ou Yangjian, Xiu Lijun, Shi Yujiang. 2007. Effects of fresh drilling mud invasion on logging responses of dual induction and dual lateral to reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 34(5): 603–608.
- Li Guoxin, Ouyang Jian, Zhou Cancan, Liu Guoqiang. 2006. Advancement of petrophysics research and well – logging recognition and evaluation for low – resistivity oil – layer by PetroChina[J]. *China Petroleum Exploration*, 11(2): 43–50 (in Chinese with English abstract).
- Li Na. 2010. Research on the logging evaluation technology of low resistivity reservoir in area A of Jiuyan oilfield[D]. Xi'an: Chang'an University: 1–63 (in Chinese).
- Li Wei, Yan Wei – lin, Bai Jian – ping. 2004. Theoretical and experimental study of invasion influence of fresh drilling mud on oil pay resistivity[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 31(3): 143–145 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chaowei, Chen Shijia, Yao Yitong, Huang Youlin, Zhang Xiaowen. 2015. Causes of low oil saturation for Chang 2 reservoir in Jiuyan area of Ordos basin[J]. *Fault – Block Oil & Gas Field*, 22(3): 305–308 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xingping, Su Dongxu, Wang Zhenlin, Wang Gang. 2017. Application of NMR logging in low-resistivity reservoir evaluation: A case study of Toutunhe Formation on the eastern Fukang slope, Junggar basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 38(4): 470–476 (in Chinese with English abstract).
- Pan Heping, Huang Jian, Fan Zhengjun, Ma Yong. 2002. Evaluation of low resistivity oil (gas) – bearing reservoirs using well logging information[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 25(6): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Petro China Exploration & Production Company. 2006. Logging identification evaluation method and technology for low resistivity reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 1–368 (in Chinese).
- Ren Ying, Sun Wei, Zhang Xi, Ren Dazhong, Wu Yanjun, Liu Dengke, Wei Xiao'e, Ma Xiaoling. 2016. Characteristics of movable fluids and study of production performance in different flow units of low – permeability reservoirs: An example from the Chang 6 block of the Jiuyan oilfield in Ordos [J]. *Geology and Exploration*, 52(5): 974–984 (in Chinese with English abstract).
- Shi Dong, Zhang Chunsheng, Shi Binqun. 2012. Grey evaluation on low – resistivity oil zones based on rough set[J]. *Progress in Geophysics*, 27(6): 2511–2517 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hui. 2005. Research of identification method to oil reservoirs with low resistivity caused by high content bound water with well – log data in Jiuyan area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1–36 (in Chinese).
- Wang Saiying, Zhao Guanjuan, Zhang Ping, Deng Yonghong, Chen Delin. 2010. Formation mechanism and logging identification of low resistivity reservoirs[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 17(4): 10–14 (in Chinese with English abstract).
- Wang Youjing, Song Xinmin, He Luping, Chen Nengxue, Yu Hongwei. 2010. Geologic origin of low – resistivity layers in deep reservoir of Gaoshangpu oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 31(03): 426–431 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jinlong, Sun Jianmeng, Zhu Jiajun, Geng Shengchen, Li Zhaocheng, Zhang Yuanchun. 2006. Study on macro – geologic control genesis of micro – geological causes in low – resistivity oil layer of Jiyang depression[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 30(3): 22–25, 35 (in Chinese).
- Xiao Dongsheng, Qiao Dongsheng. 2010. New method for identifying low resistivity reservoirs and its application[J]. *Fault – Block Oil & Gas Field*, 17(4): 509–512 (in Chinese).
- Yang Taotao, Wang Xia, He Wenchang. 2017. Analysis of genesis of low resistivity oil gas layer and its logging identification evaluation[J]. *Petroleum Geophysics*, 15(4): 1–6 (in Chinese).
- Yang Zhihao, Li Zhiping. 2017. A new method for choice of water – control fracturing segments in horizontal wells based on the BP neural network system[J]. *Geology and Exploration*, 53(4): 818–824 (in Chinese with English abstract).
- Yu Hongyan, Li Hongqi, Guo Bing, Sun Haitao, Zhang Haixia. 2012. Low – resistivity oil layers fine evaluation approaches based on mechanism [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 336–343 (in Chinese with English abstract).
- Yu Qingzhou. 2005. Mechanism study on the main causes of forming low resistivity pay[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1–79 (in Chinese).
- Zhang Xiaoli. 1999. Characteristics of low resistivity oil reservoir in Yanchang Formation Shanbei Triassic System and its origin[J]. *Well Logging Technology*, 23(4): 276–278 (in Chinese).
- Zhao Hong, Dang Ben, Yao Jingli, Lin Hongbin, Chen Yongsheng, Zheng Xiaojie, Wang Xiaolin. 2009. Forming mechanism of Chang 2 low resistivity oil layer, Yanchang Formation, Jiyuan region, Ordos basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(6): 587–592 (in Chinese).
- Zhao Junlong, Li Gan, Zhu Guangshe, Han Yonglin, Li Chuanhao, Chen Shoumin. 2011. Review of logging evaluating method and contributing factors or mechanism on low resistivity reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 26(4): 1334–1343 (in Chinese).
- Zhou Dan, Li Hongyan, Gu Liang, Tang Tiezhu. 2010. Reservoir characteristics and genesis analysis of Chang 2₂ low resistivity oil layer in Geng 231 well block in Jihuang 37[#] region, Ordos basin[J]. *Petrochemical Industry Application*, 29(8): 60–62 (in Chinese).

[附中文参考文献]

- 陈 娣, 杜 伟. 2009. 姬塬地区低电阻率油层定量解释方法研究 [J]. *石油地质与工程*, 23(1): 43–45.
- 陈世加, 高兴军, 喻 建, 马 捷, 黄 海. 2017. 鄂尔多斯盆地中西部长2油层低阻成因分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 39(2): 1–8.
- 陈义国, 任来义, 贺永红, 高胜利, 孟旺才, 董丽红. 2013. 低对比度储层流体替换识别技术方法与应用[J]. *测井技术*, 37(4): 401–405.

- 程相志. 2009. 低阻油气层识别评价技术及分布规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东): 1-132.
- 李国欣, 欧阳健, 周灿灿, 刘国强. 2006. 中国石油低电阻油层岩石物理研究与测井识别评价进展[J]. 中国石油勘探, 11(2): 43-50.
- 李娜. 2010. 姬塬油田 A 区低阻油藏测井评价技术研究[D]. 西安: 长安大学: 1-63.
- 李薇, 闫伟林, 白建平. 2004. 淡水钻井液侵入对油层电阻率影响的理论分析和实验研究[J]. 石油勘探与开发, 31(3): 143-145.
- 李长喜, 李潮流, 周灿灿, 欧阳健, 修立军, 石玉江. 2007. 淡水钻井液侵入对双感应和双侧向测井响应的影响[J]. 石油勘探与开发, 34(5): 603-608.
- 李长喜, 欧阳健, 周灿灿, 修立军. 2005. 淡水钻井液侵入油层形成低电阻率环带的综合研究与应用分析[J]. 石油勘探与开发, 32(6): 82-86.
- 李长喜, 石玉江, 周灿灿, 李霞, 刘炳玉, 唐良民, 李树晶. 2010. 淡水钻井液侵入低幅度-低电阻率油层评价方法[J]. 石油勘探与开发, 36(6): 696-702.
- 刘超威, 陈世加, 姚宜同, 黄国霖, 张潇文. 2015. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 2 油藏低含油饱和度成因[J]. 断块油气田, 22(3): 305-308.
- 罗兴平, 苏东旭, 王振林, 王刚. 2017. 核磁共振测井在低阻油层评价中的应用-以准噶尔盆地阜东斜坡头屯河组为例[J]. 新疆石油地质, 38(04): 470-476.
- 潘和平, 黄坚, 樊政军, 马勇. 2002. 低电阻率油气层测井评价[J]. 勘探地球物理进展, 25(6): 11-16.
- 任颖, 孙卫, 张茜, 任大忠, 吴彦君, 刘登科, 魏晓娥, 马晓玲. 2016. 低渗透储层不同流动单元可动流体赋存特征及生产动态分析-以鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 段储层为例[J]. 地质与勘探, 52(5): 974-984.
- 施冬, 张春生, 施斌全. 2012. 基于粗糙集的低阻油层灰色评价[J]. 地球物理学进展, 27(06): 2511-2517.
- 王辉. 2005. 姬塬地区高束缚水成因低阻油层测井识别方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-36.
- 王赛英, 赵冠军, 张萍, 邓永红, 陈德林. 2010. 低阻油层形成机理及测井识别方法研究[J]. 特种油气藏, 17(04): 10-14, 120.
- 王友净, 宋新民, 何鲁平, 陈能学, 俞宏伟. 2010. 高尚堡深层低阻油层的地质成因[J]. 石油学报, 31(03): 426-431.
- 吴金龙, 孙建孟, 朱家俊, 耿生臣, 李召成, 张元春. 2006. 济阳坳陷低阻油层微观成因机理的宏观地质控制因素研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 30(03): 22-25, 35.
- 肖冬生, 乔东生. 2010. 低阻油层识别新方法及其应用[J]. 断块油气田, 17(4): 509-512.
- 杨涛涛, 王霞, 何文昌. 2017. 低阻油气层成因及测井识别评价方法分析[J]. 油气地球物理, 15(4): 1-6.
- 杨志浩, 李治平. 2017. 基于 BP 神经网络的底水油藏控水压裂选段新方法[J]. 地质与勘探, 53(4): 818-824.
- 于红岩, 李洪奇, 郭兵, 孙海涛, 张海霞. 2012. 基于成因机理的低阻油层精细评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(02): 335-343.
- 于庆洲. 2005. 低阻油层的主要成因机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-79.
- 张小莉. 1999. 陕北三叠系延长组低阻油层特征及其形成机理分析[J]. 测井技术, 23(4): 276-278.
- 赵虹, 党彝, 姚涇利, 蔺宏斌, 陈永胜, 郑小杰, 王晓林. 2009. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 2 低阻油层成因机理[J]. 石油实验地质, 31(6): 587-592.
- 赵军龙, 李甘, 朱广社, 韩永林, 李传浩, 陈守民. 2011. 低阻油层成因机理及测井评价方法综述[J]. 地球物理学进展, 26(4): 1334-1343.
- 中国石油勘探与生产公司. 2006. 低阻油气藏测井识别评价方法与技术[M]. 北京: 石油工业出版社: 1-368.
- 中国石油天然气集团公司油气勘探部. 2000. 渤海湾地区低电阻油层测井技术与解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社: 1-263.
- 周丹, 李红艳, 古亮, 唐铁柱. 2010. 姬黄 37[#]区耿 231 井区长 2₂²低电阻油层储层特征及成因分析[J]. 石油化工应用, 29(8): 60-62.

Main Controlling Factors of Low Resistivity and Effective Identification Methods for the Chang 2 Reservoir in the Jiyuan Area, Ordos Basin

SI Yang¹, NIU Xiaobing², LIANG Xiaowei², SHI Lichuan², ZHU Yushuang¹

(1. State Key Laboratory for Continental Dynamics and Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi

710069; 2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi

710069)

Abstract: The low-resistance reservoir is common in the Chang2 member of the Yanchang Formation of Triassic in the Jiyuan area, Ordos basin. Previous research on this issue is only applicable to local small blocks, not to the whole area. To further solve this problem, we have analyzed the cause of this low resistance using data of stratum water, phase permeability experiments, core physical property, logging and oil tests and put forward a more effective method to identify the low-resistance reservoir over the whole area. The results show that this low resistivity in the study area is mainly caused by high salinity formation water, low oil saturation, reservoir physical properties and fresh water mud invasion. The resistivity of the reservoir is greatly reduced by the first three factors. The invasion of fresh mud increased the resistivity of the water layer, which further led to the decrease of the resistivity increasing coefficient. In view of the main controlling factors of the cause of low resistance, an intruding factor-synthetic oil index rendezvous method is proposed. The coincidence ratio the interpretation result to the oil test conclusion reached ninety-four percent, which permits to can identify the Chang 2 low resistivity reservoir more effectively in the Jiyuan area.

Key words: Chang 2 reservoir, low-resistivity, main controlling factors, identification methods, Jiyuan area, Ordos Basin