

中国南方地区碳酸盐岩储层高电阻率水层地质成因

——以川西地区下二叠统栖霞组为例

黄东¹ 汪华¹ 陈利敏² 袁小玲¹ 石学文¹

1. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 2. 中国石油东方地球物理公司信息技术中心

黄东等. 中国南方地区碳酸盐岩储层高电阻率水层地质成因——以川西地区下二叠统栖霞组为例. 天然气工业, 2012, 32(11): 22-26.

摘要 随着油气勘探工作的不断深入, 一些有别于常规测井的地质现象也不断被发现, 其中报道得最多的是碎屑岩中发现的低电阻率油气层, 而对碳酸盐岩中的高电阻率水层却鲜有报道。为此, 以四川盆地下二叠统栖霞组储层为例, 分别从储层特征、储层充填物特征以及地层水性质出发, 研究分析了造成碳酸盐岩储层中水层电阻率高的地质原因。结果表明, 除了工程原因外, 高电阻率水层的成因主要有: ①碳酸盐岩储层致密导致储层电子导电能力降低, 从而形成高电阻率; ②碳酸盐岩储层内沥青的广泛分布导致储层电子导电能力降低, 也可形成高电阻率; ③储层中的流体为淡水时, 将导致离子数量减少, 降低导电能力, 测井解释时其电阻率特征类同于油气层, 电阻率值较高。该研究成果有助于提高致密碳酸盐岩地区测井解释的符合率。

关键词 中国南方 碳酸盐岩 高电阻率水层 成因 储集层特征 充填物 地层水 四川盆地 早二叠世

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.11.005

中国南方沉积了 8 000~10 000 m 厚的震旦系—中三叠统海相碳酸盐岩地层, 面积约 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$, 这些地层主要分布在川、滇、黔、桂等省区及中下扬子地区。四川盆地是中国大型富含天然气资源的沉积盆地之一, 同时也是一个典型的多期次构造作用叠合的复杂盆地。经过 50 多年的勘探, 基本明确了震旦系、石炭系、二叠系、三叠系等主要含气层位, 建成了新中国第一个产能超过 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气生产基地。近年来, 随着四川盆地勘探程度的不断提高, 科研人员发现了一些有别于常规的地质现象——碳酸盐岩储层中的高电阻率(以下简称高阻)水层。此前对于碎屑岩中的低电阻率油气层已有大量的报道(大庆油田、长庆油田、吉林油田、吐哈油田等)^[1-3], 对其成因也有了较深入的认识; 而对高阻水层却鲜有报道^[4-6], 但这类非常规高阻水层又是油气勘探, 特别是测井解释中一个较难解决的问题。

1 高阻水层的定义

国内外常规油气勘探中, 在评价储层的含流体情

况时, 特别是在评价岩性复杂、油气水关系复杂的储层时, 只根据储层的电阻率或油气饱和度往往不能准确判别流体性质。实际勘探中, 储层中的流体情况, 不仅与其含气饱和度有关, 而且还与储层岩性、物性、流体性质以及储层充填物等多种地质因素有关, 而这些因素之间的关系却又是十分复杂的。众所周知, 在常规石油与天然气在勘探过程中, 水层具有电阻率低的电性特征, 气层和油层具有电阻率高的电性特征。高阻水层是相对于常规勘探中具有低电阻率的水层电性特征而言的, 高阻水层的电阻率比一般水层的电阻率要高, 其电阻率值可与油层或气层的电阻率相当, 因而在测井解释中往往将其误判识为油层或气层, 而试油结论却证实储层内的流体实际上为水。

2 地质背景

四川盆地二叠纪前的云南运动形成了由不同地层组成的准平原化基底。二叠纪开始时, 地壳全面下沉, 除北侧巴武古陆、西侧康滇古陆、摩天岭古陆和东侧江南古陆呈岛链露出水面以外, 上扬子古陆全被淹没, 广

泛的海侵使下二叠统地层覆盖在石炭系或志留系之上^[7-10]。下二叠统栖霞组地层一般划分为两段,从下至上依次为:栖霞一段和栖霞二段,其中栖霞一段又细分为A、B两个亚段,栖霞一段B亚段主要为深水低能沉积的中—薄层状黑灰、深灰色似“眼球”状细粉晶藻屑、含生屑泥晶灰岩夹泥质泥晶灰岩和薄层黑色页岩;栖霞一段A亚段主要由浅水—半深水沉积的中厚层块状灰、浅灰色泥晶生屑灰岩、亮晶生屑灰岩、灰白色的云质“豹斑”灰岩、中—粗晶白云岩和颗粒白云岩等构成;栖霞二段主要为台地边缘滩沉积的中—薄层状深灰色灰岩局部夹薄层灰色白云岩。

川西地区位于四川盆地西部、龙门山前缘,大地构造位置处在四川克拉通盆地西缘的川西拗陷,该区大地构造位置特殊,沉积构造演化过程十分复杂。经过多年的勘探,先后在川西南部和川西北部地区钻井过程中钻遇了栖霞组优质白云岩储层。测井资料表明,该区储层电性特征均为高电阻率特征,但试油结果却显示出该区储层含流体情况较为复杂,既有高产气井(L17),也有

淡水井(K2),还有高矿化度地层水井(HS1)。

3 高阻水层地质成因

按导电机理的不同,岩石可分成两大类,离子导电的岩石和电子导电的岩石,前者主要靠连通孔隙中所含的溶液的正负离子导电;后者靠组成岩石颗粒本身的自由电子导电。高阻水层的形成主要受宏观地质背景、微观孔隙结构、孔隙充填物以及流体性质等因素的影响。从电性特征看,川西南部的汉深1井与川西北部的矿2井电阻率都较高,根据该区图版解释储层流体具有典型的气层特征,但测试结果却与测井解释存在着较大差异,两口井均产水。从其水化学分析结果看,两者水的性质也存在较大差异,从K2井水分析资料来看:Cl⁻含量仅164 mg/L,反映地层水为低矿化度的NaHCO₃型淡水,而HS1井则为高矿化度的CaCl₂型地层水(表1)。虽然两者都产水,但是由于其水的性质不同,因而两者代表着不同的成藏过程和地质意义。下面分别分析高阻水层的成因。

表1 川西地区栖霞组地层水分析数据表

井号	层位	井深/m	离子含量/(mg·L ⁻¹)										总矿化度/ (mg·L ⁻¹)	水型	
			F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺			Mg ²⁺
K2	栖霞组	2 415.20	9.2	164.0	—	1 143.0	—	—	—	80.0	815.0	106.2	6.1	2 300	淡水
HS1	栖霞组	4 800.00	14.5	10 400.0	—	1 710.0	—	—	—	967.0	5 280.0	680.0	371.0	19 400	地层水

3.1 储层致密导致电阻率高

测井电性特征是岩石本身以及岩石内部流体等综合反映的结果,这也是进行测井解释储层及其含流体情况的基础。储层的储集性能主要受沉积环境、成岩作用的影响。依据前人的研究成果,结合野外地质观察发现,川西地区栖霞组储层主要为生物滩,古生物化石从破碎到完整均有,不具抗浪格架,平面上由于位置不同,沉积环境的不同,其结构组分和后期成岩作用也有着明显的差异。根据川西地区栖霞组岩心观察和野外露头结果认为,川西南部地区栖霞组岩性主要为水体能量较低的泥晶灰岩夹细—中晶白云岩化灰岩。从岩心观察看,HS1井栖霞组取心段岩性主要为深灰—灰黑色白云岩,局部发育中晶白云岩(图1)。根据65个栖霞组岩心样品物性分析表明,HS1井孔隙度分布范围较大,介于0.16%~10.39%,主要孔隙度集中在0~2%之间,平均孔隙度仅为1.64%,明显低于川西北部地区K2井栖霞组岩心的平均孔隙度(3.03%),渗透率极低,一般均小于0.005 mD(图2)。储层物性特征表明,川西南部地区栖霞组储层具有低孔隙度、低

渗透率致密碳酸盐岩储层的特征,虽然储层中局部存在高孔隙度、高渗透率段,但总体看来储层储集性能差,根据四川盆地碳酸盐岩储层划分标准来看应属于差储层—非储层。

在地质历史时期,同一地区的不同构造应具有相同或者相似的成藏条件。同样位于川西南部地区的周公山构造的ZG1井栖霞组储层电性特征为低伽马值、低电阻率、高声波时差特征,特别是8号储层,具有典型的水层特征,测试结果也证实流体性质为地层水。为什么同为栖霞组储层,在不同构造上却显示出不同测井响应特征,一个储层为高电阻率特征,另一个储层为低电阻率特征。根据HS1井与ZG1井对比分析表明,HS1井岩心物性较ZG1井物性差,该井栖霞组岩石渗透性差,岩性致密,从镜下薄片看,HS1井栖霞组孔隙不发育且为一些孤立的孔隙,从而导致该层段电性特征表现为低伽马值、高电阻率、相对较高的声波时差气层特征(图3)。也就是说HS1井的高电阻率特征并不反映储层内流体的情况,而是对该层段岩石致密性的一个高电阻率特征反映。

井深/m	岩相柱	颜色	沉积构造	岩石类型及组合	沉积相	与油气的关系	典型岩心照片
4 965.00	[岩相柱状图]	深灰色	[沉积构造符号]	细一中晶白云岩, 溶蚀孔洞发育, 局部含砂糖状白云岩中生物较为发育, 有藻类、腹足、棘皮	均斜台地 台地边缘	可作为储层	[岩心照片]
4 977.00		灰黑色					

图 1 HS1 井栖霞组 (4 965.00~4 977.00 m) 岩石微相及岩石组合图

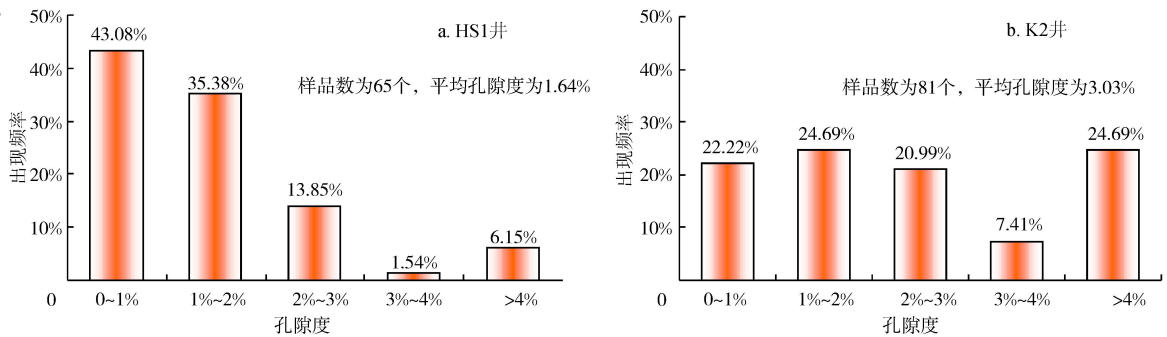


图 2 HS1 井与 K2 井栖霞组白云岩孔隙度对比图

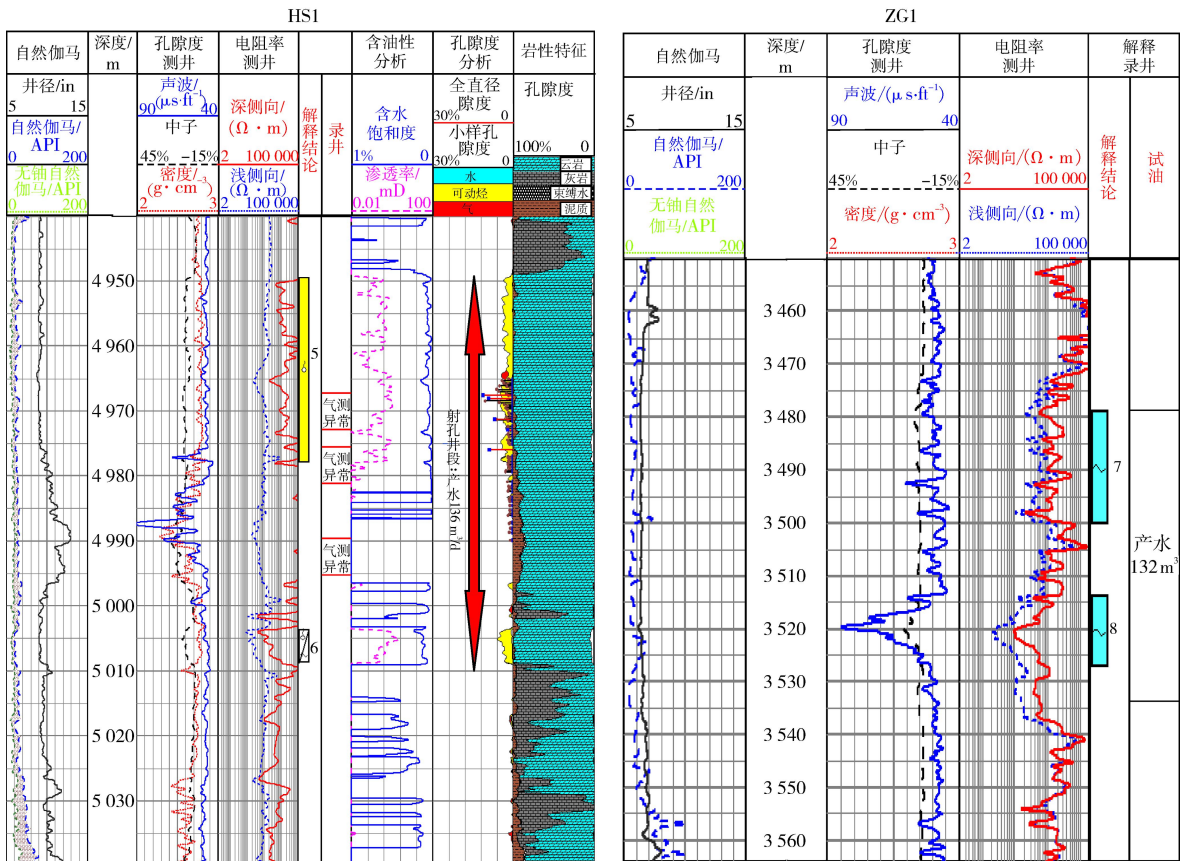


图 3 川西地区 HS1 井与 ZG1 井栖霞组测井解释成果对比图 (1 in=25.4 mm, 1 ft=0.304 8 m, 下同)

3.2 储层沥青含量丰富导致电阻率高

国内外的油气勘探实践表明,当储层中有沥青时,含沥青的储层喉道大小明显比不含沥青的储层小。虽然储层沥青未使孔隙体积明显减小,但会堵塞喉道而使渗透率大大降低,同时使储层的非均质性增强。

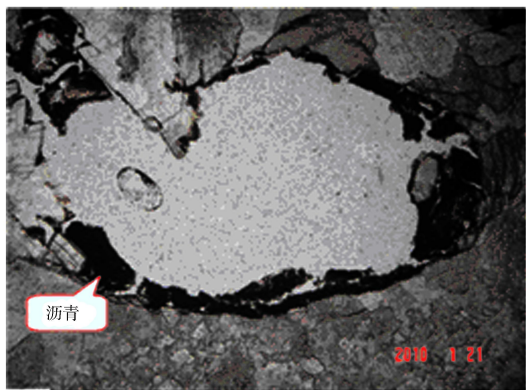
储层沥青的存在不仅改变了储层孔隙结构,导致储层岩电参数变化,而且还会导致物性、含油性和电性的变化。当有沥青充填到储层的孔隙中时,由于沥青的导电性差或不导电性将导致储层电阻率较未含沥青层段电阻率高,从而在测井曲线上表现出高电阻率的电性特征。HS1井和K2井在镜下薄片上均可以见到沥青不同程度的充填,其主要充填于储集层的孔隙或裂缝中,从沥青的产状看,沥青主要充填于晶间和晶间溶蚀溶孔的内壁(图4)。从测井曲线看,当沥青出现在有沥青充填的储层井段时,该段电阻率值明显较同一岩性井段的要高。

3.3 流体为淡水导致电阻率高

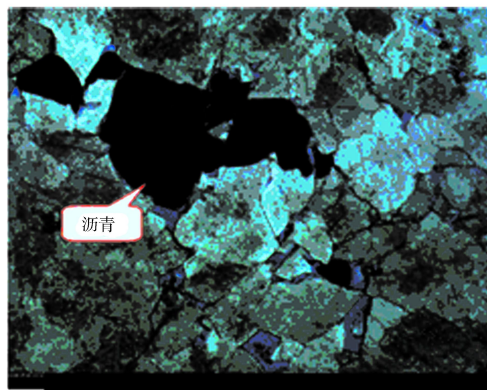
当储层内的流体为低矿化度的地层水或淡水时,由于水中可移动的导电离子数大量减少,从而导致电阻率值增加,在测井电阻率曲线上则表现出高电阻率特征。由于随着勘探程度的不断提高,勘探家们越来越认识到淡水地层的电阻率类同气层,电阻率值较高,

因而按常规解释易出偏差,这也是HS1井栖霞组水层呈现出高电阻率特征易解释失误的原因。K2井栖霞组岩性主要为浅灰—灰色细—中晶白云岩,粗晶(砂糖状)白云岩发育。岩心分析物性表明,孔隙度分布范围介于0.42%~16.61%,孔隙度在各个区间分布较为平均,平均孔隙度为3.03%,明显较HS1井高(图2),储层物性特征明显较致密的HS1井好,属于中等—好储层。从K2井储层测井解释看,栖霞组储层电性特征具有低伽马值、高电阻率、相对较高的声波时差特征,无疑具有典型的气层特征(图5)。但通过该井MDT取样分析却表明:储层段产水。根据本井MDT水样分析资料,其Cl⁻含量仅164 mg/L,矿化度低,反映储层中的水为淡水特征。

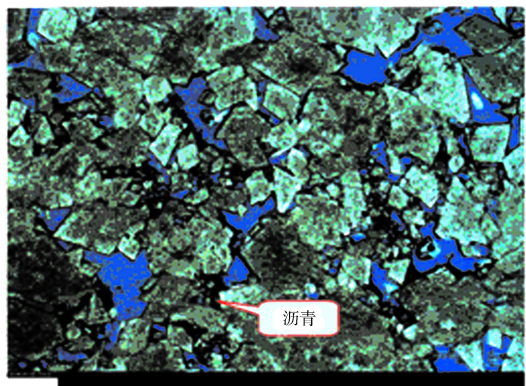
K2井位于川西北部的矿山梁构造,该区地处四川盆地西北部的龙门山和米仓山交汇三角地带,该区曾经经历了多期次的构造运动,地面断层、油砂岩比比皆是。在地质历史时期,由于断层的开启、闭合不断对平衡了的油气藏进行调整、改造及破坏。断层的活动一方面提供了油气调整的动力,另一方面也将地表的淡水带入储层,油气运移出去后,水滞留在储层内,从而导致储层电阻率受地层水控制明显。因此在断层附近或者保存条件较差的地区进行储层流体解释时,应考



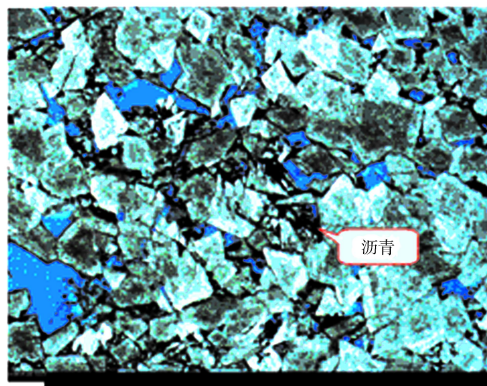
HS1井,栖霞组,4 973.00 m,中晶云岩,溶洞内壁充填沥青(-5)



HS1井,栖霞组,4 971.94 m,粗晶云岩,晶间充填被沥青(-25)



K2井,栖霞组,2 432.00 m,粗晶云岩,晶间充填沥青(-25)



K2井,栖霞组,2 488.07 m,粗晶云岩,晶间充填沥青(-25)

图4 川西地区K2井、HS1井储层沥青镜下薄片图

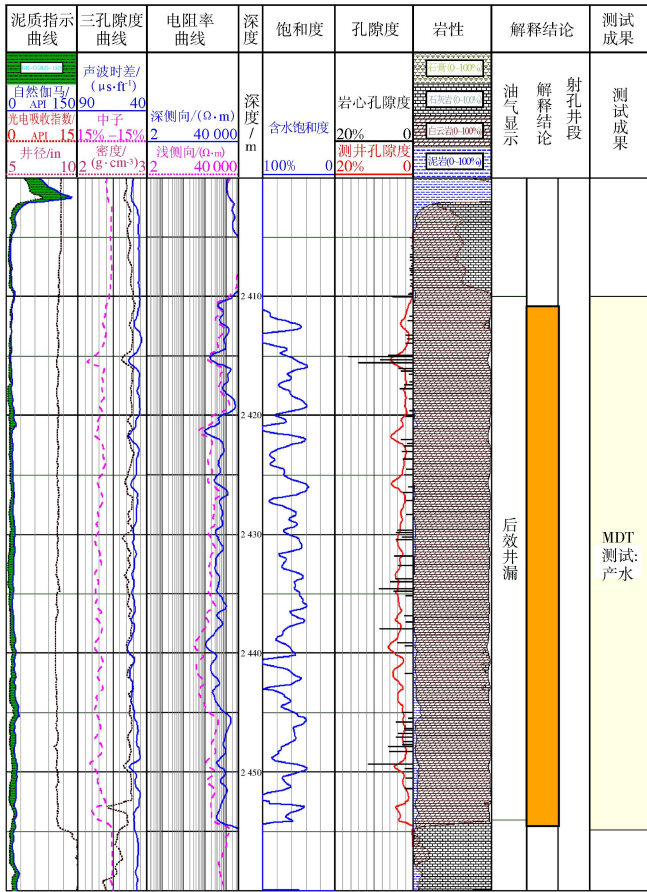


图 5 川西北部地区 K2 井栖霞组测井解释成果图

虑地表水的渗入,避免因淡水渗入储层形成高阻水层的气层假象特征。

4 结论

1)碳酸盐岩储层中高阻水层的发现不仅为测井解释提供了地质依据,而且还提高了测井解释的符合率。

2)除了工程原因外,高阻水层的成因主要有:①碳

酸盐岩储层致密导致储层电子导电能力降低,从而形成高阻;②碳酸盐岩储层内沥青的广泛分布导致储层电子导电能力降低,也可形成高阻;③储层中为淡水时,将导致离子数量减少,降低导电能力,测井解释时其电阻率特征类同于油气层,电阻率值较高。

参 考 文 献

- [1] 修立军,李国欣,欧阳健,等.松辽盆地南部低阻油层分布规律及勘探潜力[J].中国石油勘探,2006,11(5):7-9.
- [2] 中国石油勘探与生产公司.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,2006.
- [3] 欧阳健,修立军,石玉江,等.测井低对比度油层饱和度评价与分布研究及其应用[J].中国石油勘探,2009,14(1):38-52.
- [4] 严焕德,王天祥,赵为永,等.涩北气田高阻水层成因及其对储层参数的影响[J].青海石油,2009,27(2):55-57.
- [5] 刘红,李晓华,毛国良,等.王集小断块油田高阻水层成因分析[J].内蒙古石油化工,2008,14(2):139-140.
- [6] 冯琼,陈新民,李争,等.塔中4油田C I 油组高阻水层成因分析及油层解释方法研究[J].江汉石油学院学报,2001,23(2):38-40.
- [7] 黄东,沈浩.川西地区下二叠统栖霞组含油气地质条件研究[R].成都:中国石油西南油气田公司勘探开发研究院,2012.
- [8] 曾德铭,石新,王兴志,等.川西北地区下二叠统栖霞组滩相储层特征及其分布[J].天然气工业,2010,30(12):25-28.
- [9] 宋文海.四川盆地二叠系白云岩的分布及天然气勘探[J].天然气工业,1985,5(4):22-23.
- [10] 黄先平,杨天泉,张红梅,等.四川盆地下二叠统沉积相及其勘探潜力区研究[J].天然气工业,2004,24(1):10-14.

(修改回稿日期 2012-09-14 编辑 居维清)