

川西北二叠系栖霞组白云岩储层结构的 井筒高精度刻画 ——以矿2井为例

杨柳^{1,2}, 谷明峰^{1,2}, 杨迅³, 厚刚福^{1,2}, 姚倩颖^{1,2}

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中国石油西南油气田公司川西北气矿)

摘要 以川西北地区矿2井为例,对井筒尺度的储层结构进行了高精度刻画。以成像测井为主要手段,在地质标定的基础之上,建立了川西北栖霞组白云岩储层的标准剖面,有效识别出主要的5种岩石类型(生物碎屑灰岩、“豹斑”白云质灰岩、块状中—粗晶白云岩、斑状中—粗晶白云岩和角砾状白云岩)和4种储集空间类型(溶蚀孔洞、晶间孔、扩溶缝和构造缝)。研究表明川西北栖霞组白云岩发育多重孔隙系统,其中,溶蚀孔洞是最主要的储集空间类型,普遍呈层状或准层状,发育于块状中—粗晶白云岩中,共1层厚39.5m;晶间孔是次一级的储集空间类型,发育于斑状中—粗晶白云岩中,共4个薄层,平均厚1.1m;另外两种储集空间类型(扩溶缝和构造缝)零星发育,对储集性能的贡献不大。块状中—粗晶白云岩发育于三级层序高位域,斑状中—粗晶白云岩仅发育于高位域中四级层序向上变浅旋回的顶部。

关键词 栖霞组;白云岩储层;储层特征;储层描述;成像测井

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

近年来,白云岩储层逐渐成为我国西部含油气盆地的热点勘探领域,并有向深层拓展的趋势,如塔里木盆地寒武系盐下白云岩^[1-4]、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中下组合白云岩^[5-6]、四川盆地震旦系—寒武系白云岩^[7-8]。川西北地区二叠系栖霞组发育一套优质白云岩储层,近两年已有多井突破,被认为是四川盆地继磨溪寒武系龙王庙组和高石梯震旦系灯影组特大气藏发现之后的战略接替领域^[9-10]。深层白云岩非均质性普遍较强且取心又少,严重制约着对储层结构的深入认识。井壁微电阻率成像测井(简称成像测井)具有高分辨率、高覆盖率、高直观性的特点,在与地质充分结合的前提下,成像测井是进行储层结构精细刻画的有效技术手段。目前成像测井的碳酸盐岩储层评价工作主要集中于岩溶型和礁滩型储层,白云岩储层的成像测井研究则相对较少^[11-13]。本次研究在岩心和薄片标定的基础上,以成像测井为主要手段,建立了川西北栖霞组白云岩储层结构的典型剖面,这对于深入客观地认识储层效果明显,同时表明利用成

像测井开展白云岩储层高精度刻画的可行性。

1 研究对象及方法简介

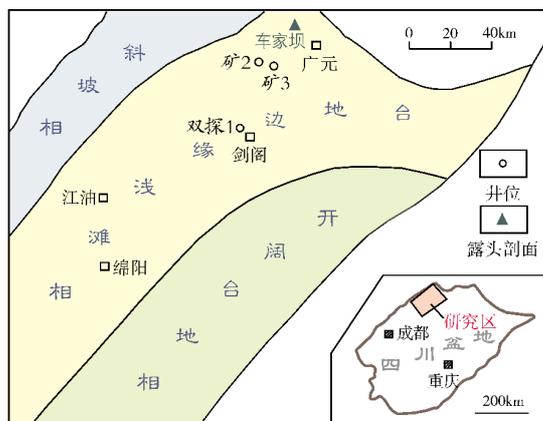
川西北地区二叠系栖霞组白云岩储层埋藏较深,平均约7100m;储层的非均质性较强,如相距仅5000m的矿2井和矿3井(位置见图1a),储层发育特点差异较大,这些都增加了勘探风险。区内栖霞组厚70~130m,按岩性由下至上分为栖霞组一段(简称栖一段)和栖霞组二段(简称栖二段)(图1b)。栖一段主要是开阔台地相的一套低能沉积,主要由泥晶灰岩、含泥质泥晶灰岩、生物碎屑灰岩等组成;栖二段主要是台缘滩相的一套高能沉积,主要由生物碎屑灰岩、“豹斑”白云质灰岩、块状中—粗晶白云岩、斑状中—粗晶白云岩、角砾状白云岩等组成。本次研究以矿2井为实例,开展了井筒储层结构的高精度刻画,该井在栖霞组二段进行了系统取心(共8筒55m),实施了常规测井和成像测井项目,为研究工作提供了资料基础。

收稿日期:2015-06-24;改回日期:2015-09-20

本文受国家油气重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05004-002)资助

杨柳:1986年生,工程师。2014年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所,获理学博士学位,现从事碳酸盐岩沉积储层研究工作。

通讯地址:310023 浙江省杭州市西溪路920号;E-mail:yangliu_cas@163.com



(a) 栖霞组沉积相平面图(据文献[14])

系	统	组(段)	厚度(m)	岩性剖面	岩性描述	沉积相	
						相	亚相
二	中	二	70	[岩性剖面]	“牛眼状”泥质灰岩	碳酸盐岩	台地边缘浅滩
					厚层块状“豹斑”灰岩, 不完全白云石化		
		栖霞组	130	[岩性剖面]	局部地区发育厚层块状褐灰色、浅灰色中—粗晶白云岩为主, 孔隙较发育	台地	台洼
					深灰色、灰色中厚层块状泥晶及亮晶生物灰岩		
梁山组	[岩性剖面]	较深色中—薄层状含生物碎屑泥晶灰岩、泥质含生物碎屑泥晶灰岩夹硅质岩					
					黑灰色泥岩、页岩		



(b) 栖霞组地层柱状图(据文献[15])

图1 川西北二叠系栖霞组沉积相及地层柱状图

成像测井一般有两种表现形式:静态图像和动态图像。静态图像是根据全井段电阻率分布特征统一配色,主要用于大段的地层对比和岩性识别;动态图像是在固定窗长(本次研究窗长选择0.5m)内根据电阻率分布特征按窗长分段配色,它适合于微细地层结构的识别,如溶蚀孔洞、溶蚀缝、构造缝、砾石颗粒等。井筒尺度的储层结构刻画是储层地质研究中最为基础的,对于缺少岩心条件下的深层储层而言,成像测井显然是储层精细表征的有效手段。但需要注意的是,成像测井尽管具有直观性强的特点,但切勿单纯地顾形思义,只有充分结合地质资料的标定工作才是提高解释可信度的有效途径,而这也是测井地质学的核心思想。

2 岩石类型和储集空间的成像测井识别模式

野外剖面、岩心、薄片等地质观察表明,川西北栖霞组主要发育5种岩石类型和4种储集空间类型。在地质标定的基础上,本次研究中以成像测井为主,建立了不同岩石类型和储集空间的识别模式。

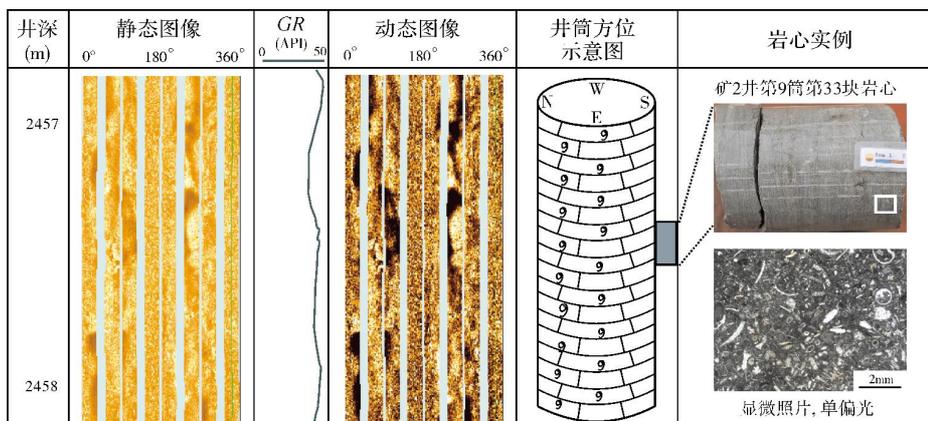
2.1 岩石类型的成像测井识别模式

川西北栖霞组5种主要岩石类型分别是:生物碎屑灰岩、“豹斑”白云质灰岩、斑状中—粗晶白云岩、块状中—粗晶白云岩和角砾状白云岩。

生物碎屑灰岩是区内主要的石灰岩类型(图2)。生物主要有腕足、小有孔虫、苔藓虫等,含量10%~30%,生物体的形态保存完好,重结晶形成亮晶方解石;体腔内及生物碎屑间被灰泥充填,孔隙不发育。由于生物体与充填物的矿物成份均为碳酸钙且致密,致使测井电阻率很高,成像测井静态图像上表现为亮块状;同时由于两者的电阻率大致相同,成像上不会产生差异化图像,故图面显得十分干净(注意图像上两条暗色竖线为井眼垮塌)。因此,生物碎屑灰岩在成像测井上表现为均—亮块模式。

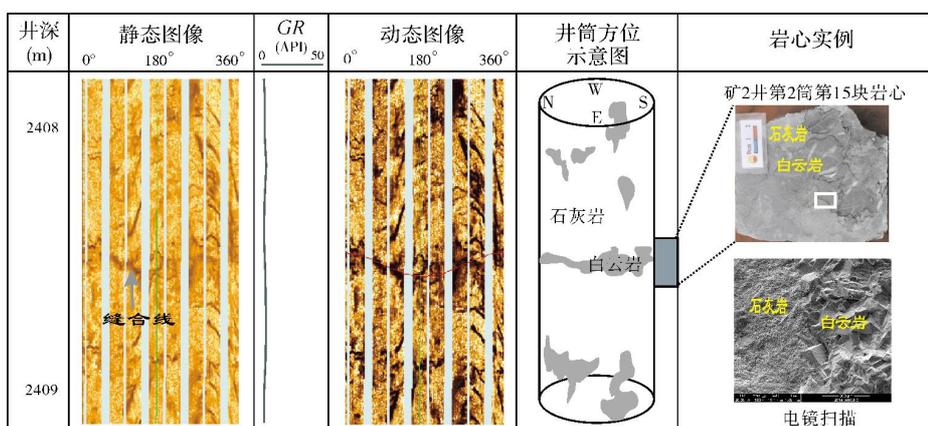
“豹斑”白云质灰岩是区内广泛分布的一种特殊的岩石类型(图3)。它与通常所说的白云质灰岩存在区别,后者中白云石的质量分数在25%~50%之间,且在岩石中分布较均匀。而“豹斑”白云质灰岩中的白云石局部集中发育,质量分数在95%以上,且与基质石灰岩的界线往往是截然的。基质石灰岩和白云岩“豹斑”的孔隙度都很低,因此两者的电阻率都高,静态成像上显示为亮色块状;但由于两者的矿物成分不同,而使电阻率有细微差异,并且白云岩在电镜下可以看到十分细小的微孔,这导致了白云岩的电阻率较基质石灰岩部分略低,这种差值在图像上所表现出的斑状在静态图像上不明显,但在动态图像上较为清晰。因此,“豹斑”白云质灰岩在成像测井上表现为亮块背景下的不规则暗斑模式。

斑状中—粗晶白云岩是区内主要的储集岩类型之一(图4)。岩石由两部分组成:基质为他形的中—粗晶白云岩,晶体为镶嵌接触,较致密;斑块为自形的中—粗晶白云岩,晶体为点线接触,晶间孔发育,斑块大小为3~20cm不等,孔隙度3%~11%。两者明显的物性差别导致电阻率差值大,即使在静态



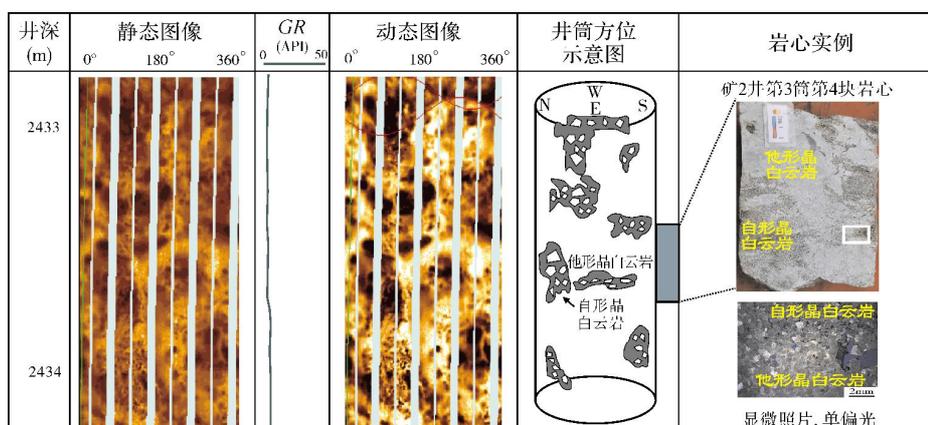
生物碎屑灰岩。生物含量10%~30%，生物体重结晶形成亮晶方解石，体腔内和颗粒间被灰泥充填，矿物成分及组成结构整体均匀，故在动态、静态图像上显示为均一亮色块状。均一亮块模式，矿2井

图2 川西北栖霞组生物碎屑灰岩的成像测井识别图



“豹斑”白云质灰岩。白云质斑块和灰质围岩均致密，但前者在电镜下可见少量微孔，因此电阻率相对灰质围岩略小，这种差值在图像上所表现出的斑状在静态图像上不明显，但在动态图像上较为清晰，为亮块背景下的不规则暗斑模式。亮块背景下的不规则暗斑模式，矿2井

图3 川西北栖霞组“豹斑”白云质灰岩的成像测井识别图



斑状中一粗晶白云岩。岩石由两部分组成：他形晶部分致密；自形晶部分晶间孔发育，面孔率3%~11%。两者明显的物性差别导致电阻率差值大，即使在静态图像上也能呈现十分明显的斑状，动态图像上则更加清晰。岩石整体表现为杂乱亮暗斑模式。杂乱亮暗斑模式，矿2井

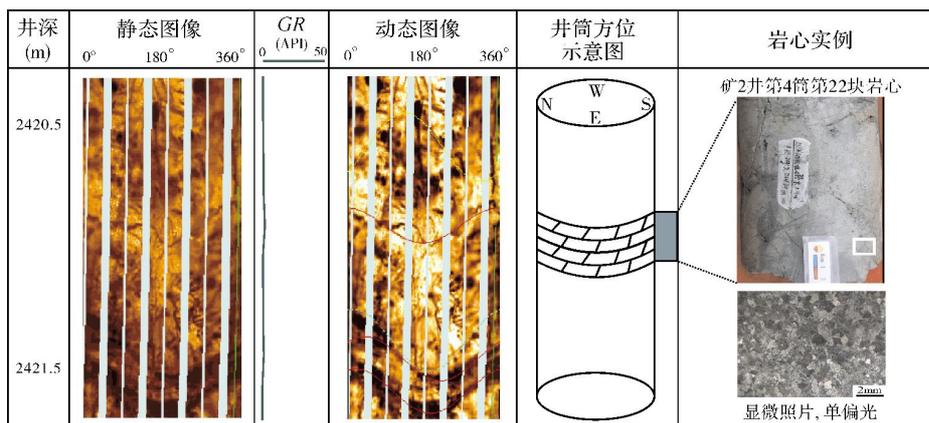
图4 川西北栖霞组斑状中一粗晶白云岩的成像测井识别图

图像上也能呈现十分明显的斑状,动态图像上则更加清晰。岩石整体表现为杂乱亮暗斑模式。

块状中—粗晶白云岩 是区内主要的白云岩类型(图5),完全由他形的中—粗晶白云石组成,晶体镶嵌接触,基质孔隙不发育,一般发育溶蚀孔洞,整体而言电阻率较低,静态图像上为暗色,在动态图像

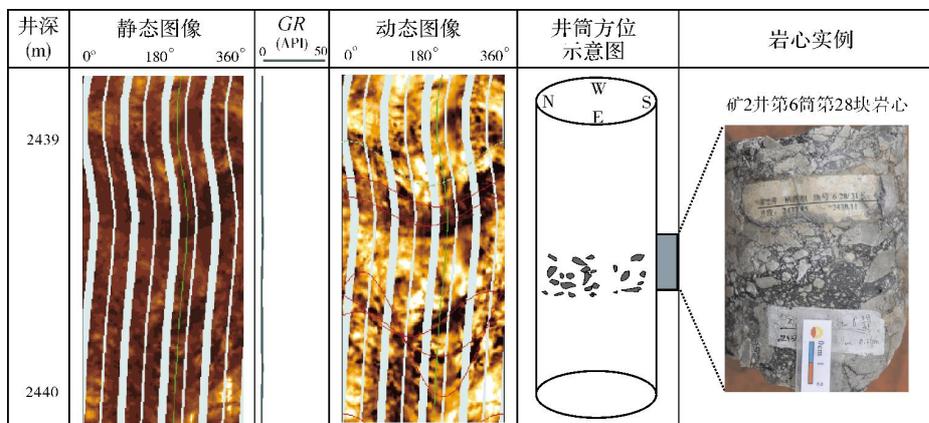
上表现为亮块模式。

角砾状白云岩 在少数井段中发育。砾石相比于砾间填充物而言,电阻率要高,图像上呈亮斑状;砾石几乎没有分选和磨圆,不定向排列,在图像上显得杂乱。因此,角砾状白云岩在动态、静态图像上均表现为杂乱亮斑模式(图6)。



块状中—粗晶白云岩。与斑状白云岩不同,该类岩石完全由他形晶白云石组成,晶体镶嵌接触,基质孔隙不发育,岩石呈整体块状,成像测井上表现为均一块状。均一块状模式,矿2井

图5 川西北栖霞组块状中—粗晶白云岩的成像测井识别图



角砾状白云岩。成像测井上响应为杂乱亮斑状。杂乱亮斑模式,矿2井

图6 川西北栖霞组角砾状白云岩的成像测井识别图

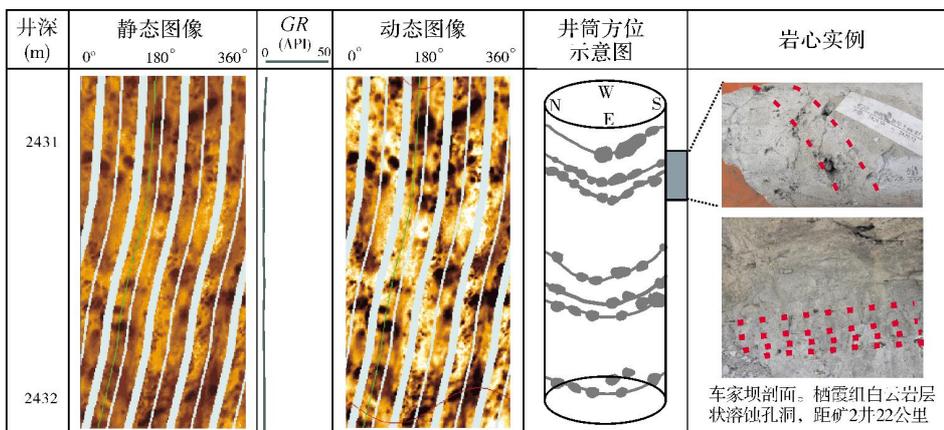
2.2 储集空间的成像测井识别模式

川西北栖霞组的4种主要储集空间类型分别是:溶蚀孔洞、扩溶缝、构造缝和晶间孔。

溶蚀孔洞 孔洞多为圆形或椭圆形(图7),大小3~12cm,普遍呈层状或准层状分布,在成像测井上表现为沿层面分布的规则组合暗斑模式。此类溶蚀孔洞发育于块状中—粗晶白云岩中。

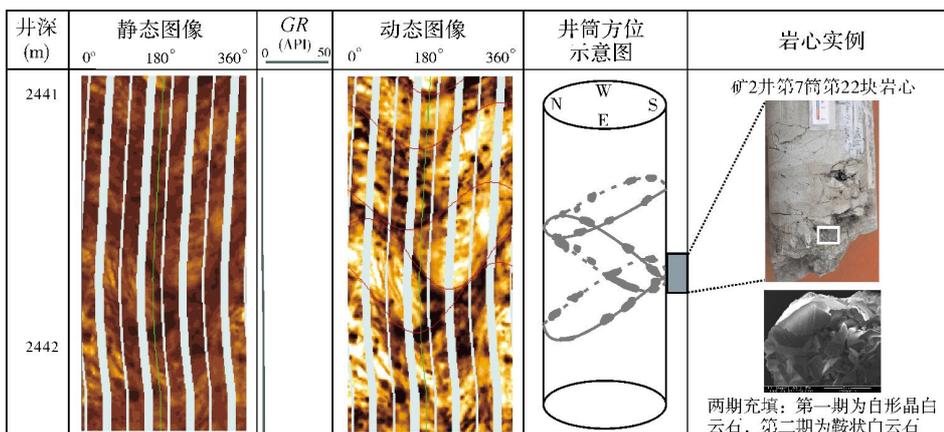
扩溶缝 沿裂缝空间对缝壁发生溶蚀作用,由于溶蚀不均匀,形成沿缝分布的串珠状孔洞,在成像测井上表现为沿正弦线分布的组合暗斑(图8)。扩溶缝发育于块状中—粗晶白云岩和斑状中—粗晶白云岩中。

构造缝 是针对扩溶缝而言的未发生溶蚀作用的裂缝,缝壁平直,在成像测井上表现为规则正弦线(图9)。构造缝在全井段不同岩性中均有发育。



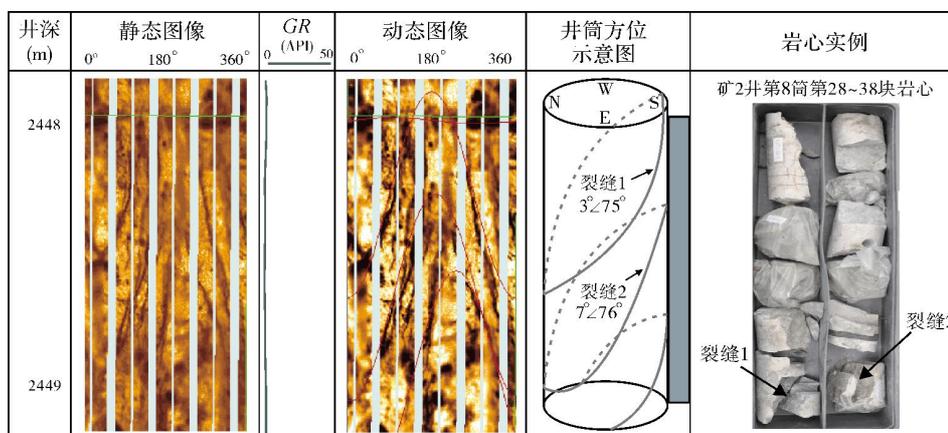
溶蚀孔洞。多为椭圆形或圆形, 一般呈层状或准层状, 在成像测井上表现为沿层面分布的规则组合暗斑模式。规则组合的暗斑模式, 矿2井

图7 川西北栖霞组溶蚀孔洞的成像测井识别图



扩溶缝。沿裂缝发生不均匀的溶蚀作用, 形成沿缝分布的串珠状孔洞, 在成像测井上表现为沿正弦线分布的组合暗斑。矿2井

图8 川西北栖霞组扩溶缝的成像测井识别图



构造缝。成像测井上为规则组合正弦线。区内构造缝以高角度缝为主。规则正弦线模式, 矿2井

图9 川西北栖霞组构造缝的成像测井识别图

晶间孔 成像测井对体状物体的分辨率为5mm,对晶间孔不能单独识别。但是,由于区内栖霞组白云岩储层中的晶间孔绝大多数都发育于斑状中—粗晶白云岩的斑块部分,因此,可以参照斑状中—粗晶白云岩的识别方法。

3 岩石类型和储集空间的纵向分布特征

岩石类型纵向组合关系的识别通常以静态图像为主、动态图像为辅,而储集空间类型纵向组合关系的识别则通常以动态图像为主、静态图像与常规孔隙度测井为辅。如图10为矿2井2400~2460m的成像测井图像,自上而下按不同岩性可分为四段:

第一段(2400~2402m):为二叠系茅口组一段(简称茅一段),发育泥质泥晶灰岩。成像测井上表现为规则的、明暗相间的条带状,发育水平层理;同时GR值较大,说明泥质含量高,二者共同说明该段沉积于水体较深的环境。该段泥质泥晶灰岩孔隙不发育,测井孔隙度为0.2%。

第二段(2402~2410m):为栖霞组顶部“豹斑”白云质灰岩,厚8m,与上覆茅一段GR突变接触,说明两者之间存在着较大的沉积环境变迁,其间可能存在沉积间断;两者的层理发育产状一致,说明上下地层之间没有明显的构造运动。该段白云质灰岩较致密,孔隙不发育,测井孔隙度为0.5%。

第三段(2410~2454.6m):为栖霞组白云岩,厚44.6m。岩石孔洞和孔隙发育,电阻率为低值,在静态图像上表现为整体暗块状,白云岩可进一步细分为三类:块状中—粗晶白云岩(厚39.5m)、斑状中—粗晶白云岩(厚4.4m)和角砾状白云岩(厚0.6m)。这段整体而言,白云岩段的测井孔隙度显示,基质孔隙度不高,平均为1.6%。但从局部来看,白云岩段测井孔隙度中发育有4个小尖峰(见图10),分别是2414.9~2415.7m、2432.8~2434.5m、2440~2441.05m和2450.8~2451.7m,平均厚度1.1m,平均孔隙度7.8%,说明基质孔隙发育;成像测井上显示为斑状中—粗晶白云岩,这与前述斑状中—粗晶白云岩中晶间孔发育的地质认识也相符合。在第三段中,块状中—粗晶白云岩厚度达39.5m,它们的测井孔隙度虽然较低(平均1.3%),但成像测井上显示溶蚀孔洞发育,故仍然为好储层,这些溶蚀孔洞呈层状或准层状分布。此外,第三段中还零星发育扩溶缝和构造缝。

第四段(2454.6~2460m):为栖霞组生物碎屑灰岩,成像测井上表现为整体亮块状。该段生物碎屑灰岩较致密,孔隙不发育,测井孔隙度为0.2%。

综上所述,4种储层空间类型中,溶蚀孔洞是主要储集空间,它们在39.5m的巨厚块状中—粗晶白云岩段中密集发育,呈层状或准层状分布;晶间孔是次一级的储集空间,发育于4套薄层的斑状中—粗晶白云岩中,平均厚度为1.1m;扩溶缝和构造缝对储集性能的贡献不大。

4 单井储层结构与层序结构的关系

综合岩石类型和储集空间类型的纵向分布特征,结合区域沉积地质背景,本文分析了矿2井储层发育与层序结构的关系。

在二叠纪栖霞期,川西地区发育台缘带,矿2井处于台缘颗粒滩相沉积环境。从二叠系梁山组到栖霞组为一个完整的三级层序,由海侵域和高位域组成。通过储层结构的高精度刻画可以看出,储层发育特征与层序结构有明显的相关性:

(1)从岩石类型来看,储层主要发育于白云岩中,而块状中—粗晶白云岩位于三级层序高位域,薄层的斑状中—粗晶白云岩多位于高位域中四级层序向上变浅旋回的顶部(图10),说明沉积作用对白云岩发育具有明显的控制作用;

(2)从储集空间类型来看,白云岩段大量发育层状溶蚀孔洞,这与水平潜流岩溶带的特征极为类似,而白云岩发育段距栖霞组与茅口组之间的地层分界线仅8m,因此很有可能在栖霞组与茅口组之间的三级层序界面附近存在岩溶作用,并对储层发育有显著的改造作用。

倘若如此,那么针对栖霞组白云岩的勘探,笔者建议储层方面的研究工作,在以沉积特征为基础之上,应加强储层成岩作用的研究,特别是岩溶作用的影响应加以考虑。

5 结论

(1)川西北栖霞组5种主要的岩石类型(生物碎屑灰岩、“豹斑”白云质灰岩、块状中—粗晶白云岩、斑状中—粗晶白云岩和角砾状白云岩)和4种储集空间类型(溶蚀孔洞、晶间孔、扩溶缝和构造缝),利用成像测井均可有效识别。

(2)川西北栖霞组白云岩发育多重孔隙系统:溶

蚀孔洞是最主要的储集空间类型,普遍呈层状或准层状,发育于块状中—粗晶白云岩中,共1层厚39.5m;晶间孔是次一级的储集空间,发育于斑状中—粗晶白云岩中,共4个薄层,平均层厚1.1m;扩溶缝和构造缝零星发育,它们对储集性能的贡献不大。

(3)块状中—粗晶白云岩发育于栖霞组三级层序高位域,斑状中—粗晶白云岩仅发育于高位域中四级层序向上变浅旋回的顶部。

参考文献

- [1] 赵文智,沈安江,胡素云,等.塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J].岩石学报,2012,28(3):758-768.
- [2] 赵文智,沈安江,胡素云,等.中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J].石油勘探与开发,2012,39(1):1-12.
- [3] 杨海军,韩剑发,李本亮,等.塔中低凸起东端冲断构造与寒武系内幕白云岩油气勘探[J].海相油气地质,2011,16(2):1-8.
- [4] 王招明,谢会文,陈永权,等.塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生气藏的发现与勘探意义[J].中国石油勘探,2014,19(2):1-13.
- [5] 姚泾利,包洪平,任军峰,等.鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J].中国石油勘探,2015,20(3):1-12.
- [6] 杨华,包洪平,马占荣.侧向供烃成藏——鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识[J].天然气工业,2014,34(4):19-26.
- [7] 杜金虎,邹才能,徐春春,等.川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J].石油勘探与开发,2014,41(3):268-277.
- [8] 徐春春,沈平,杨跃明,等.乐山—龙女寺古隆起震旦系—下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J].天然气工业,2014,34(3):1-7.
- [9] 沈平,张健,宋家荣,等.四川盆地中二叠统天然气勘探突破的意义及有利勘探方向[J].天然气工业,2015,35(7):1-9.
- [10] 杨光,汪华,沈浩,等.四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J].天然气工业,2015,35(7):10-16.
- [11] 李宁,肖承文,伍丽红,等.复杂碳酸盐岩储层测井评价:中国的创新与发展[J].测井技术,2014,38(1):1-10.
- [12] 冯周,李宁,武宏亮,等.缝洞储集层测井最优化处理[J].石油勘探与开发,2014,41(2):176-181.
- [13] 柴华,李宁,夏守姬,等.清晰断岩石结构图像处理方法及其在碳酸盐岩储层评价中的应用[J].石油学报,2012,33(增刊2):154-159.
- [14] 魏国齐,杨威,朱永刚,等.川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J].石油与天然气地质,2010,31(4):442-448.
- [15] 郝毅,周进高,张建勇,等.川西北中二叠统栖霞组白云岩储层特征及控制因素[J].沉积与特提斯地质,2013,33(1):68-74.

编辑:黄革萍

High-resolution Characterization of Borehole-scaled Reservoir Structure: A Case of Lower Permian Qixia Dolostone Reservoir in Well Kuang-2, Northwest of Sichuan Basin

Yang Liu, Gu Mingfeng, Yang Xun, Hou Gangfu, Yao Qianying

Abstract: Depending on the data of high-resolution image log and the geological calibration of dolostone core samples from Well Kuang-2 in the northwest of Sichuan Basin, a typical profile of Lower Permian Qixia dolostone reservoir structure is characterized, by which five types of dolostone and limestone and four types of effective reservoir spaces can be identified. It is shown that multiple pore system develops in Qixia dolostone, in which solution pores and intercrystal pores are contributive commonly. The solution pores appear as layers or quasi-layers in massive medium- and coarse-grained dolostone (in one strata unit with the thickness of 39.5m) and the intercrystal pores exist in porphyritic medium- and coarse-grained dolostone (in 4 strata units with the average thickness of 1.1m). Other two types of reservoir space, including solution-enlarging fractures and late structural fractures are less contributive. The massive dolostone develops in the HST of the 3rd sequence but the porphyritic dolostone only develops in the upper part of the upward-shallowing cycle of the 4th sequence.

Key words: Lower Permian; Qixia Fm.; Dolostone reservoir; Reservoir characteristics; Reservoir description; Image log; Sichuan Basin

Yang Liu: DSc., Geology Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China