

doi:10.3799/dqkx.2010.119

# 低渗低阻产水气藏气水层识别： 以广安气田须家河组为例

兰朝利<sup>1</sup>, 张君峰<sup>2</sup>, 何顺利<sup>1</sup>, 张红玲<sup>1</sup>, 杨明慧<sup>3</sup>, 王金秀<sup>3</sup>

1. 中国石油大学石油工程学院石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司, 北京 100001

3. 中国石油大学地球科学学院油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

**摘要:** 广安气田上三叠统须四段和须六段气藏发育了构造气藏、构造—岩性气藏和岩性气藏。储层具有低孔、低渗、低阻和高束缚水饱和度特征。空间上, 储层孔渗相关关系变化大, 气水分布复杂, 气水层识别困难。根据岩心对测井的标定, 研究了须四段和须六段四性关系, 认识到储层为细砂岩、中砂岩和粗砂岩, 具有低自然伽马、低补偿密度、低电阻率和高声波时差特征, 而物性与含气性无明显相关性。采取了分层、分区块建立储层孔隙度、渗透率模型, 提高了物性解释精度。不同气藏类型具有不同的气水分布, 应用阵列感应、核磁共振和综合判识3种方法进行了气水层识别, 提高了广安气田气水层识别精度。这些方法在广安气田的应用表明可以准确识别构造气藏和构造—岩性气藏的气、水层, 但对构造幅度低的岩性气藏识别精度不高, 因为在这些岩性气藏中气水分异不彻底, 气层与气水同层、水层含水饱和度是渐变的。

**关键词:** 测井解释; 气水层识别; 产水气藏; 石油地质; 广安气田。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2010)06-1053-07

收稿日期: 2009-11-20

## Gas and Water Pay Recognition of Water-Producing Reservoir with Low Permeability and Resistivity: A Case from the Xujiahe Formation in Guang'an Gasfield of Sichuan Basin, Southwestern China

LAN Chao-li<sup>1</sup>, ZHANG Jun-feng<sup>2</sup>, HE Shun-li<sup>1</sup>, ZHANG Hong-ling<sup>1</sup>, YANG Ming-hui<sup>3</sup>, WANG Jin-xiu<sup>3</sup>

1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Exploration and Development Branch Company, PetroChina, Beijing 100001, China

3. State Key Laboratory for Petroleum Resources and Prospecting, College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract:** The fourth and sixth members of upper Triassic Xujiahe Formation develop structural, structural-lithological and lithological reservoirs with characteristics of low porosity, permeability, resistivity and high irreducible water saturation in Guang'an gasfield of Sichuan basin, southwestern China. In space, relationship of the reservoir porosity and permeability varies greatly, and the reservoir gas and water distribution is complex, resulting in difficulty in gas and water pay recognition. Based on the core calibration of logging data, relationships among lithology, logging characterization, petrophysical property and gas-bearing capacity of the target zones were explored. It can be concluded that the reservoirs are made up of fine, medium- and coarse-grained sandstones with characteristics of low values of gamma ray, density and resistivity and high values of sonic, while the porosity and permeability show no correlation with gas-bearing capacity. The porosity and permeability model were established by considering the sixth and fourth members of Xujiahe Formation separately and subdividing the study area into four blocks, which improves precision of the porosity and permeability interpretation. On the recognition that different gas reservoir types have different gas and water distributions, three methods of high definition induction logging, nuclear-magnetic resonance logging and comprehensive discrimination were jointly applied to distinguish gas and water pays, which increases the

**基金项目:**国家科技重大专项(No. 2008ZX05009);“973”重点基础研究规划项目(No. 2003CB214602);中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金项目(No. 04E7023)。

**作者简介:**兰朝利(1972—),男,博士,讲师,从事油气藏描述和开发方向的教学与研究工作. E-mail: lanchaoli@163.com

accuracy of gas and water pay identification. The application of these methods in the Guang'an gasfield show they are suitable for gas and water pay recognition of structural and structural-lithological reservoirs, whereas not feasible for lithological reservoirs with low structural magnitude whose water saturations of gas pay are transitional with those of water and gas- and water-bearing pay due to incomplete separation of gas and water.

**Key words:** logging interpretation; gas and water pay identification; water-producing reservoir; petroleum geology; Guang'an gasfield.

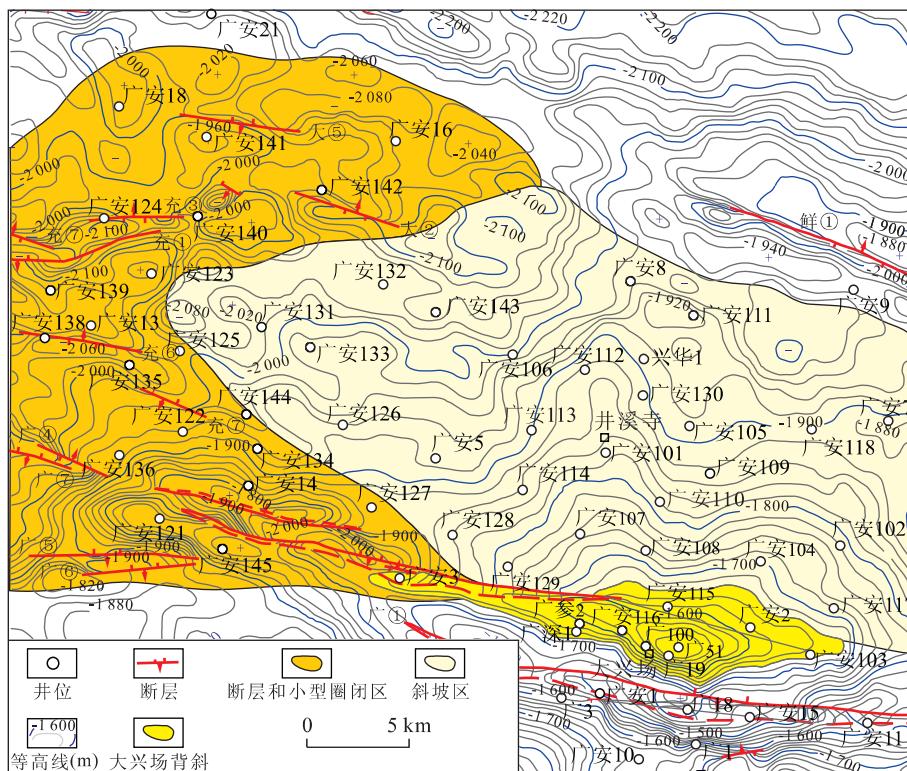
广安气田目的层为上三叠统须家河组须四段和须六段砂岩。其储层测井解释主要面临以下困难：

(1) 气水层具有相似电性特征, 导致常规测井气水层识别困难; (2) 渗透率与孔隙度相关关系在不同区块, 甚至同一区块的不同孔隙度区间都存在区别, 需要分层、分区块、分孔隙度区间建立渗透率模型。齐宝权和甘秀娥(2007)应用成像、核磁、阵列声波和阵列感应测井新技术对目的层储层进行了解释, 应用效果较好。由于这些新技术测试昂贵, 所以大部分井并未全部实施。为此, 本文首先根据岩心化验分析和常规测井资料进行孔渗饱二次解释; 在研究控制气水层分布的地质机理及其相应的不同气水分区基础上, 采用阵列感应、核磁共振和综合判识 3 种方法识别气水层, 以提高气水层判识精度。其中, 气水层的解释结论结合核磁和阵列感应测井解释结论与试气、试采数据共同标定。

## 1 气藏特征

广安气田须四段和须六段构造特征具有较好继承性。整体表现为一个核部被逆断层错段的东西向不对称背斜, 背斜南翼陡北翼缓, 翼部发育一系列 NWW、NW 或 NEE 走向的鼻突或高点。构造最高部位为背斜北翼的大兴场圈闭, 最大鼻突为工区中部、背斜北翼的井溪寺鼻突。研究区构造可划分为 3 个典型单元, 即大兴场背斜、斜坡区(包含井溪寺鼻突)以及西部断层和小型圈闭区(图 1)。不同构造分区发育了不同类型的气藏, 在大兴场背斜发育构造气藏(徐樟有等, 2009), 构造幅度低缓的斜坡区发育构造—岩性或岩性气藏(车国琼等, 2007; 徐伟等, 2007; 谢继容等 2008; 邹才能等, 2009), 而断层和小型圈闭区则发育断层遮挡气藏和断背斜气藏。

须四段和须六段储层砂体分布受三角洲平原分



流河道、前缘水下分流河道和河口坝微相控制,主要沉积了成分成熟度较低的细粒、中粒长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和岩屑砂岩。砂岩经历了较强烈压实和中—强胶结,局部保存了残余粒间孔,决定了储层总体的低孔、低渗特征(孔隙度主要分布在6%~12%之间,渗透率主要分布在 $(0.1\sim10)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间),后期溶蚀形成了粒内溶孔,粘土充填与胶结提供了大量细小的杂基孔。这些杂基孔的存在使得储层喉道总体偏小,因此束缚水饱和度普遍较高(30%~70%),平均达40%。地层水水型为 $\text{CaCl}_2$ 型,矿化度较高,多在100 g/L以上。由此,储层普遍表现出低阻特征(司马立强等,2007)。

气井产水普遍,仅须六气藏在大兴场背斜顶部气井产水量较小或不产水。气井无水生产期短,大部分须四气藏几乎开井即见水。气井产水量变化大,但产水量相对较稳定。产水井多分布在构造相对较低部位,且构造位置越低,产水量相对越大。

## 2 四性关系

四性关系研究在测井数据环境校正和标准化基础上进行,包括以下几种:(1)岩性与电性关系。粉砂岩、灰质砂岩和泥质砂岩普遍具有较高的深电阻率和补偿密度,而细砂岩、中砂岩和粗砂岩的自然伽马、电阻率和密度普遍较低,且砂岩粒度越粗,自然伽马、电阻率和密度相对越低。岩性与补偿中子相关性弱(图2)。(2)岩性与物性关系。细砂岩、中砂岩和粗砂岩物性相对较好,孔隙度多在4%~16%,渗透率多为 $(0.1\sim1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;同等条件下,粗砂岩渗透性最好。粉砂岩、灰质砂岩、泥质砂岩物性相对较差,孔隙度多小于4%,渗透率多小于 $0.1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。(3)物性与电性关系。随着砂岩孔隙度升

高,即粒度相对变粗,深电阻率和补偿密度降低,声波时差和补偿中子升高。(4)岩性、电性、物性与含气性关系。岩性与含气性相关性不明显,电性有随着含水饱和度( $S_w$ )升高而降低趋势。物性与含气性呈现阶段相关关系,当孔隙度小于8%时,含水饱和度随着孔隙度升高而升高趋势,当孔隙度大于8%时,含水饱和度随着孔隙度升高而略有降低(图3)。

## 3 测井解释模型

(1)孔隙度模型。广安气田须六段和须四段储层电性与孔隙度具有不同的相关关系,为精确解释各层孔隙度分布,分层建立了储层孔隙度测井解释模型(图4)。

对须六段,孔隙度计算公式为:

$$P = 0.18791AC - 33.32048, \quad (1)$$

$$P = 90.45939 - 33.60914DEN. \quad (2)$$

式中: $P$ 为孔隙度(%); $AC$ 为声波时差( $\mu\text{s}/\text{m}$ )。

对须四段,孔隙度计算公式为:

$$P = 0.19289AC - 33.10626, \quad (3)$$

$$P = 92.12963 - 34.34179DEN. \quad (4)$$

式中: $DEN$ 为补偿密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

(2)渗透率模型。渗透率模型根据岩心分析孔隙度与渗透率相关关系。在广安气田,岩心孔隙度与渗透率关系在不同井区甚至在同一井区不同孔隙度区间内存在一定差异,可能呈多项式、乘幂或指数规律,且这些规律性往往只与井区有关,而与层位相关性较小。为精细解释渗透率的空间分布差异,根据沉积相分析和物源分析,在统计分析与组合岩心孔隙度与渗透率相关关系基础上,划分出5个区分别建立渗透率解释模型(图5和图6),回归出相应的渗透率计算公式。其中,I、II-III和IV区分别代表了3

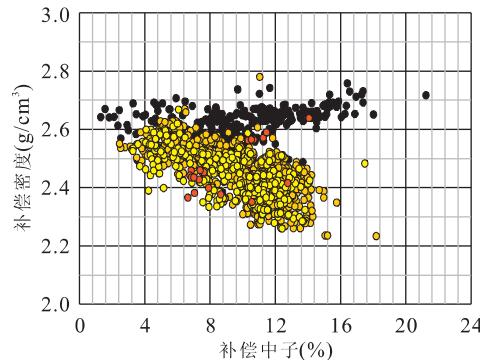
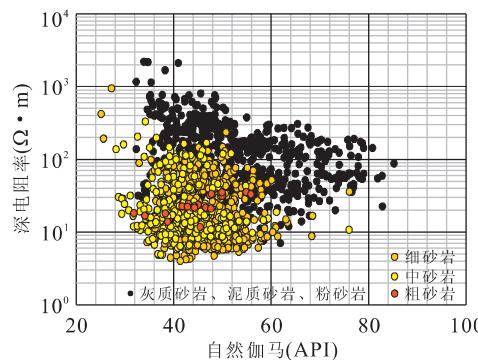


图2 广安气田岩性与电性相关关系

Fig. 2 Lithology and logging correlation of Guang'an gasfield

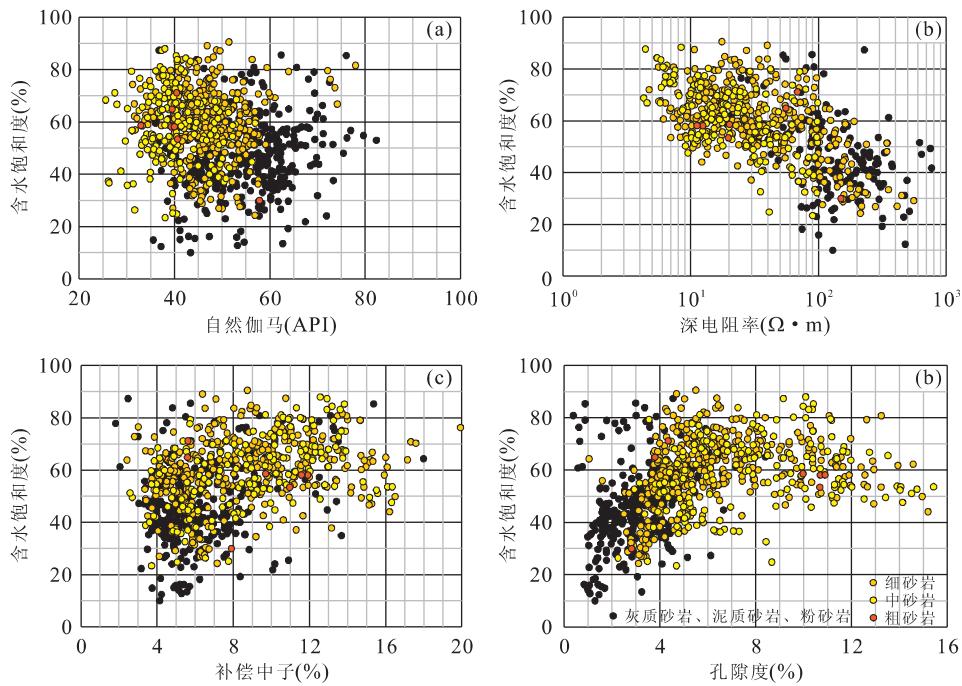


图 3 广安气田岩性、电性、物性与含气性相关关系

Fig. 3 Lithology, logging, physical property and gas-bearing capacity correlation of Guang'an gasfield

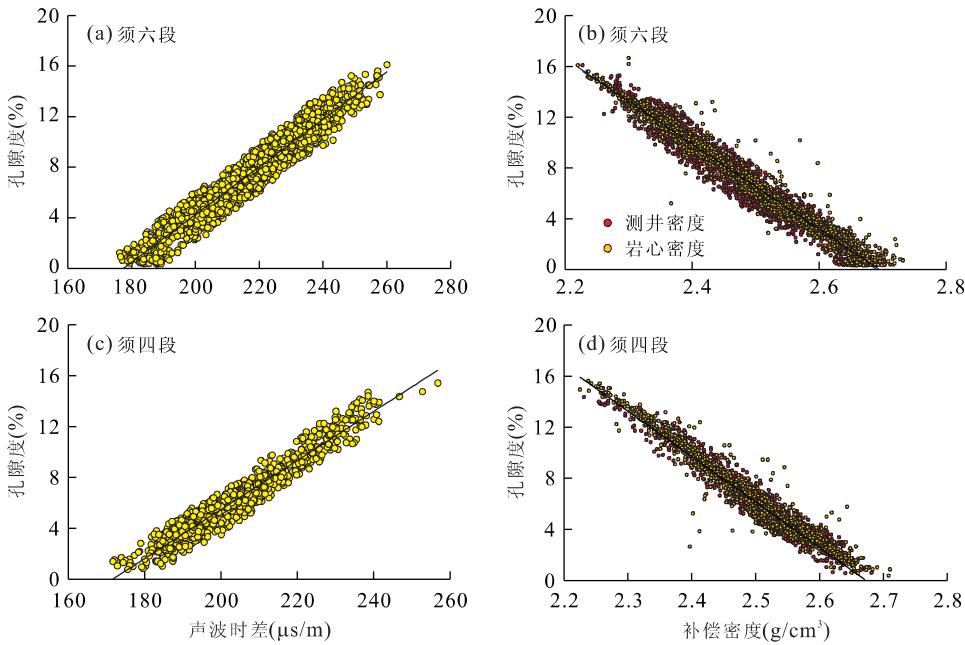


图 4 广安气田储层孔隙度解释模型

Fig. 4 Reservoir porosity interpretation model of Guang'an gasfield

个相对独立的三角洲沉积，在Ⅱ-Ⅲ组合中，Ⅱ以三角洲前缘为主，Ⅲ以三角洲平原为主。

I 区。对须六段，渗透率计算公式为：

$$K = 0.01287 P^{2.10579}, \quad (5)$$

式中： $K$  为渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。

对须四段，渗透率计算公式为：

$$\text{如果 } P < 3\%, K = 0.0158 P^{2.17635}; \quad (6)$$

$$\text{如果 } P \geq 3\%, K = 0.08276 e^{0.28625P}. \quad (7)$$

II 区。对须六段，渗透率计算公式为：

$$K = -0.08314 + 0.24111P - 0.1953P^2 + 0.08319P^3 - 0.01759P^4 + 0.00196P^5 - 0.00011P^6$$

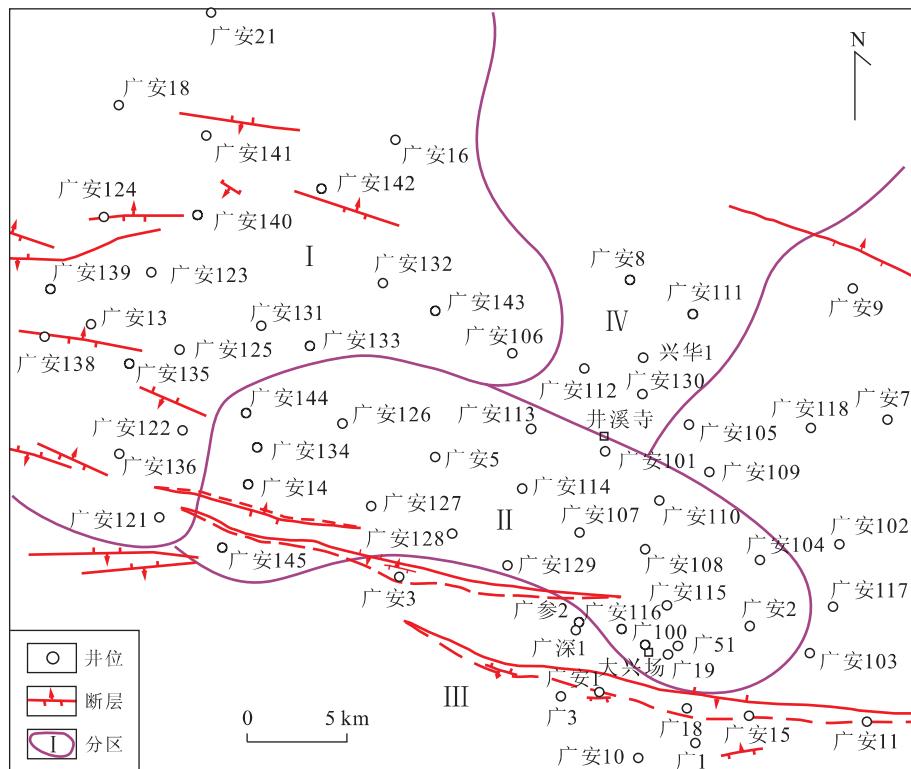


图 5 广安气田渗透率模型分区

Fig. 5 Permeability model partition map of Guang'an gasfield

$$+0.000\ 002\ 6P^7. \quad (8)$$

对须四段,渗透率计算公式为:

$$\text{如果 } P < 6.5\%, K = 0.012\ 71P^{1.593\ 15}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{如果 } 6.5\% \leqslant P < 13\%, K = -2.241\ 99 - \\ 0.207\ 26P + 0.778\ 8P^2 - 0.253\ 1P^3 + 0.035P^4 - \\ 0.002\ 27P^5 + 0.000\ 057P^6; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{如果 } P > 13\%, K = 0.000\ 000\ 97e^{1.145\ 25P}. \quad (11)$$

III区. 对须六段,渗透率计算公式为:

$$\text{如果 } P < 11\%, K = 0.000\ 65P^{2.384\ 82}; \quad (12)$$

$$\text{如果 } P > 11\%, K = 0.000\ 15e^{0.645\ 4P}. \quad (13)$$

对须四段,渗透率计算公式为:

$$\text{如果 } P < 4\%, K = 0.000\ 93P^{2.329\ 99}; \quad (14)$$

$$\text{如果 } P \geqslant 4\%, K = 0.005\ 73e^{0.380\ 22P}. \quad (15)$$

IV区. 对须六段,渗透率计算公式为:

$$K = -0.002\ 29 + 0.068\ 53P + 0.026\ 51P^2 - \\ 0.007\ 23P^3 + 0.000\ 51P^4. \quad (16)$$

对须四段,渗透率计算公式为:

$$K = 0.000\ 74P^{3.148\ 2}. \quad (17)$$

## 4 气水层识别

根据四性关系分析,可知广安气田砂岩岩性、物

性与含气性相关性均不明显,仅电性有随着含水饱和度升高而降低趋势。然而,试气解释的气层、气水同层或水层的电阻率分布范围往往重叠,导致利用常规测井深侧向电阻率区分气层与气水同层或水层失效。为此,在试气、试采资料对测井的标定基础上,首先应用阵列感应和核磁共振判识气水层,最终综合地质上对气水分布的认识进行气水层识别。

(1) 阵列感应识别气水层。该方法根据气、水层的阵列感应差异来识别流体性质。广安气田高的地层水矿化度导致水层增阻侵入现象明显,为利用阵列感应判识气水层提供了条件。对气层, M2RX 数值相对较高,不同探测深度曲线为正差异;对水层, M2RX 数值相对较低,不同探测深度曲线为负差异。其中, M2RX 为最大探测深度电阻率,单位  $\Omega \cdot m$ 。当  $M2RX > 8 \Omega \cdot m$  时,可判识为气层,  $M2RX < 8 \Omega \cdot m$  时,可能为水层或气水同层。显然,阵列感应对识别气水同层与水层效果较差。

(2) 核磁共振识别气水层。在广安气田,判别流体性质常用的核磁共振差谱分析法效果不佳,因为水层有时也具有差谱信号。采取了根据核磁共振计算的有效孔隙度、自由流体孔隙度和可动水饱和度 3 个参数来识别气水层。当有效孔隙度大于 6%,自

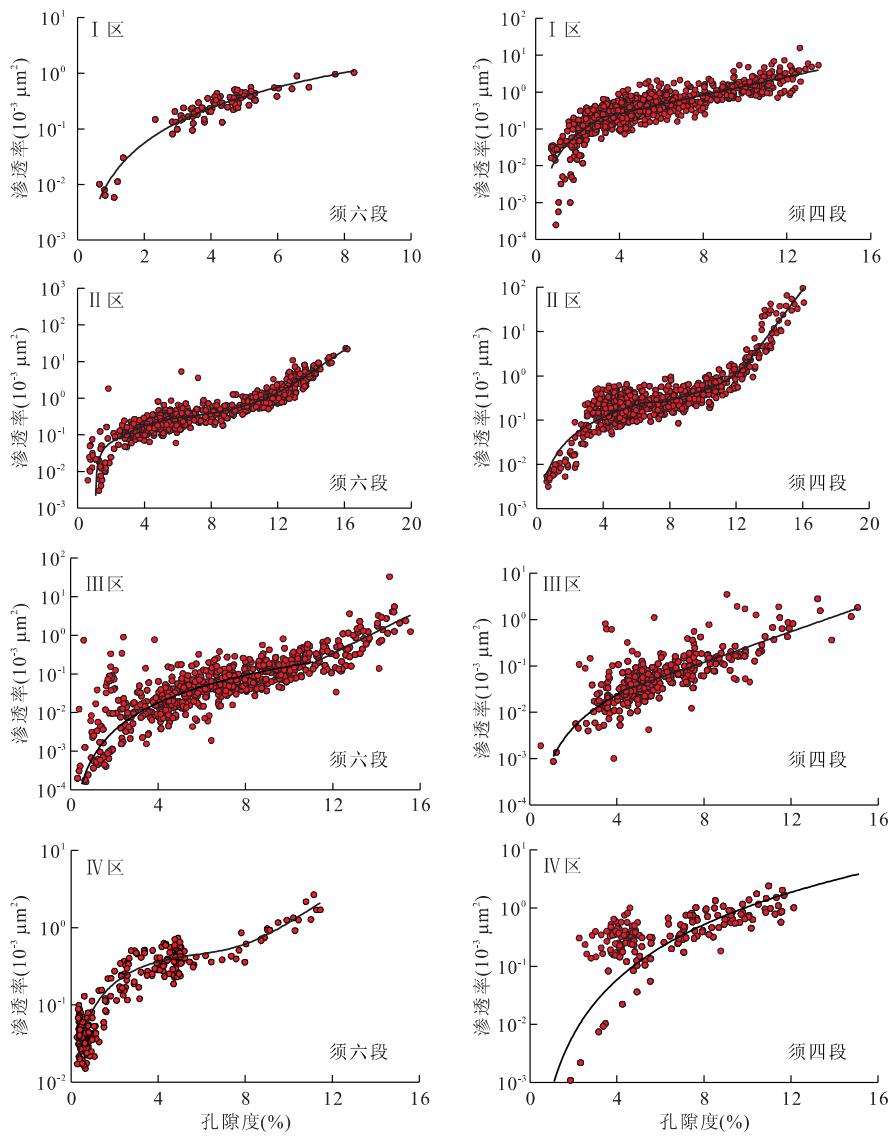


图 6 广安气田储层渗透率模型

Fig. 6 Reservoir permeability interpretation model plate of Guang'an gasfield

由流体孔隙度大于 3%, 且可动水饱和度小于 5% 时, 判识为气层; 而水层和气水同层有效孔隙度大于 6%, 自由流体孔隙度大于 3%, 且可动水饱和度大于 10%. 同样, 核磁共振对识别气水同层与水层效果变差.

(3) 气水层综合判识. 根据对川中地区须家河组成藏条件和成藏机理的认识, 广安气田气藏类型为构造控制下的构造—岩性气藏、构造气藏或岩性气藏. 实际上, 广安气田须四段和须六段储层流体分布控制因素在不同构造分区存在差异. 根据试气、测井解释和构造解释成果, 研究了须六段和须四段气水分布控制机理, 认识到须六段气水分布受储层物性、构造隆起幅度和地层倾角控制. 大兴场构造发育构

造气藏, 由于隆起幅度大, 气水分异较彻底, 气层和水层发育、气水同层不发育或分布范围窄, 其气层与水层电性差异可能较明显; 井溪寺鼻突发育岩性气藏或构造—岩性气藏, 由于隆起幅度小, 地层倾角小, 气水分异不彻底, 气水分布受储层物性和构造位置高低控制, 由物性好、构造位置相对较高区域向物性差、构造位置低区域含水饱和度增加, 发育不同含水饱和度的分带, 气层、水层相对不发育, 而气水同层发育, 其气层与气水同层或水层电性差异可能不大. 须四段气水分布受断层、储层物性、构造隆起幅度和地层倾角控制. 断层和小圈闭发育区构造隆起幅度相对较大、地层倾角较大, 气水分异较彻底, 其气水分布与须六段大兴场背斜相似; 斜坡区构造隆

起幅度小和地层倾角小,气水分异不彻底,其气水分布与须六段井溪寺鼻突相似。

根据这种认识,结合阵列感应和核磁共振气水层判识结论,对须四段和须六段分区进行了气水层综合识别,提高了目的层气水层识别精度。在须六段大兴场背斜和须四段断层区,气层与气水同层、水层易区分,气层电阻率 $>10 \Omega \cdot m$ ,气层识别符合率达94%;而在须六段井溪寺鼻突和须四段斜坡分区,气层与气水同层和水层存在较大重叠。应用该方法能更有效识别广安气田构造气藏或构造—岩性气藏的气水层识别,但对于岩性气藏,由于其发育在地层倾角低缓的广安构造背斜北翼斜坡上,气藏内部高差小,导致气水分异很不彻底,储层含水饱和度从气藏最高点到最低点表现出渐变特征,这决定了气层与气水同层、气水同层与水层含水饱和度差异较小,因此识别能力有限。实际上,应用核磁共振和阵列感应也无法有效区分这类气层与气水同层。

## 5 结论

(1)广安气田上三叠统须四段和须六段构造可划分为大兴场背斜、斜坡区以及断层和小型圈闭区3个单元,不同构造单元气水分布控制机理不同,气水分布各异;气藏类型包括构造气藏、构造—岩性气藏和岩性气藏。储层具有低孔、低渗、高束缚水饱和度和低阻特征。(2)储层为粒度较粗的细砂岩、中砂岩和粗砂岩,它们具有低自然伽马、低补偿密度、低电阻率和高声波时差特征,但储层物性与含气性不具有明显相关性。(3)针对目的层孔渗相关性在空间上的差异,采取了分层、分区块建立储层孔隙度和渗透率模型,更精确刻画了物性的差异。(4)在阵列感应和核磁共振气水层识别基础上,从气水分布控制机理角度,根据常规测井资料,按气藏发育类型分区进行气水层识别,发现构造气藏和构造—岩性气藏气水层识别精度高,而对于地层倾角小、气水分异不彻底的岩性气藏气水层识别精度不高。应用该方法提高了气水层判断的准确性。

## References

- Che, G. Q., Gong, C. M., Wang, N., et al., 2007. Gas accumulation condition in the Xujiahe Group of Guang'an area. *Natural Gas Industry*, 27(6): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Qi, B. Q., Gan, X. E., 2007. New logging techniques used in

evaluation on Xujiahe Group reservoirs in Guang'an area. *Natural Gas Industry*, 27(6): 15—18 (in Chinese with English abstract).

- Sima, L. Q., Wu, F., Lai, W. R., et al., 2007. Formation mechanism of low-resistivity gas reservoirs in Xujiahe Formation of Guang'an area. *Natural Gas Industry*, 27(6): 12—14 (in Chinese with English abstract).
- Xie, J. R., Zhang, J., Li, G. H., et al., 2008. Exploration prospect and gas reservoir characteristics of Xujiahe Formation in Sichuan basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 30(6): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Yang, H. Z., Chen, Z. H., 2007. Characteristics of the sixth member of Xujiahe Formation ( $T_3x_6$ ) gas reservoirs in Guang'an area and its development tactics. *Natural Gas Industry*, 27(6): 19—21 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Y., Song, L., Wu, X. S., et al., 2009. Typical gas reservoirs and main controlling factors of reservoir-forming of Upper Triassic Xujiahe Formation in Central Sichuan basin. *Lithologic Reservoirs*, 21(2): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Tao, S. Z., Zhu, R. K., et al., 2009. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: a case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan basin. *Petroleum Exploration and Development*, 36(3): 307—319 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 车国琼,龚昌明,汪楠,等,2007.广安地区须家河组气藏成藏条件.天然气工业,27(6):1—5.
- 齐宝权,甘秀娥,2007.测井新技术在广安地区须家河组储层评价中的应用.天然气工业,27(6):15—18.
- 司马立强,吴丰,赖未蓉,等,2007.广安地区须家河组低阻气层形成机理.天然气工业,27(6):12—14.
- 谢继容,张健,李国辉,等,2008.四川盆地须家河组气藏成藏特点及勘探前景.西南石油大学学报(自然科学版),30(6):40—44.
- 徐伟,杨洪志,陈中华,2007.广安地区须六段气藏特征及开发策略.天然气工业,27(6):19—21.
- 徐樟有,宋丽,吴欣松,等,2009.川中地区上三叠统须家河组典型气藏解剖与天然气成藏主控因素分析.岩性油气藏,21(2):7—11.
- 邹才能,陶士振,朱如凯,等,2009.“连续型”气藏及其大气区形成机制与分布——以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例.石油勘探与开发,36(3):307—319.