

CD-CN地区风化壳岩溶储层测井识别与流体性质判别

代 瑾¹, 刘西雷², 吴 丰^{1*}, 梁金萍², 李 鹏³, 张 亚⁴, 陈双玲⁴, 范 玲⁵, 李昱翰⁵, 任丽梅⁵

¹西南石油大学, 地球科学与技术学院, 四川 成都

²中国石化胜利油田分公司, 勘探开发研究院, 山东 东营

³中国石油天然气股份有限公司, 重庆销售仓储分公司, 重庆

⁴中国石油西南油气田分公司, 勘探开发研究院, 四川 成都

⁵中国石油西南油气田分公司, 川中油气矿, 四川 遂宁

Email: *wufengzh@swpu.edu.cn

收稿日期: 2021年2月9日; 录用日期: 2021年3月17日; 发布日期: 2021年3月24日

摘 要

CD-CN地区中二叠统茅口组属于早成岩期风化壳岩溶储层, 勘探开发潜力大。风化壳岩溶储层的岩性、孔隙结构、测井响应特征等极为复杂, 导致储层测井识别及流体性质判别难度较大。首先在岩性识别和储集空间分析的基础上, 基于电成像测井和常规测井, 提出了裂缝型、裂缝-溶洞型和溶洞型三大类储层的测井识别方法; 然后在储层产能数据的标定下, 将三大类储层进一步划分为I类、II类、III类储层; 最后根据油气测试和生产数据, 建立了储层流体性质识别方法。研究表明, 本文在储层识别与级别划分基础上建立的储层级别-RT交会图版的流体性质识别效果较好, 该方法划分出的I类、II类、III类储层的气水电阻率界限分别为 $100\Omega\cdot\text{m}$ 、 $200\Omega\cdot\text{m}$ 和 $300\Omega\cdot\text{m}$, 有效的解决了不同储层类型、不同储层级别和不同流体性质导致的储层电阻率重叠现象, 提高了风化壳岩溶储层的流体性质判别符合率。

关键词

风化壳, 岩溶储层, 茅口组, 测井, 流体性质判别

Reservoir and Fluid Properties Identification of Weathering Crust in CD-CN Area

Jin Dai¹, Xilei Liu², Feng Wu^{1*}, Jinping Liang², Peng Li³, Ya Zhang⁴, Shuangling Chen⁴, Ling Fan⁵, Yuhan Li⁵, Limei Ren⁵

*通讯作者。

文章引用: 代瑾, 刘西雷, 吴丰, 梁金萍, 李鹏, 张亚, 陈双玲, 范玲, 李昱翰, 任丽梅. CD-CN地区风化壳岩溶储层测井识别与流体性质判别[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(3): 290-298. DOI: 10.12677/ag.2021.113025

¹School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

²Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

³Chongqing Sales and Warehousing Branch, PetroChina Company Limited, Chongqing

⁴Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu Sichuan

⁵Middle Sichuan Oil and Gas Field, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Suining Sichuan

Email: *wufengzh@swpu.edu.cn

Received: Feb. 9th, 2021; accepted: Mar. 17th, 2021; published: Mar. 24th, 2021

Abstract

Maokou Formation of middle Permian in CD-CN area belongs to the weathering crust karst reservoir in the early diagenesis stage. It has great potential for gas exploration and development. The lithology, pore structure and logging response characteristics of the weathering crust karst reservoir are very complex, which makes it difficult to identify the reservoir and fluid properties. Firstly, on the basis of lithology identification and reservoir space analysis, and based on electrical imaging logging and conventional logging, the methods of identification of fracture type, fracture-cavern type and karst cavern type reservoirs are proposed. Then, based on the calibration of production data, the three levels of reservoirs are further divided into type I, type II and type III reservoirs. Finally, based on the oil and gas testing and production data, a method for identifying reservoir fluid properties is established. The results show that the fluid identification effect of the reservoir level versus RT plot is better. The gas water resistivity reservoir boundaries of type I, II, III are 100 $\Omega\cdot\text{m}$, 200 $\Omega\cdot\text{m}$ and 300 $\Omega\cdot\text{m}$ respectively. This method effectively solves the overlap phenomenon of the resistivity caused by the mixture of different reservoir types and different reservoir levels and the different fluid properties, and improves the identification rate of the weathering crust karst reservoir fluid property.

Keywords

Weathered Crust, Karst Reservoir, Maokou Formation, Well Logging, Fluid Property Identification

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中二叠统茅口组是 CD-CN 地区的主要产气层之一, 近年来茅口组已在多口井钻遇高产工业气流, 并且在多个构造发现气田, 具有良好的勘探开发潜力[1] [2] [3] [4] [5]。前人研究证实 CD-CN 地区中二叠统茅口组受暴露和风化淋滤的影响, 主要发育早成岩期风化壳岩溶储层, 其储集空间包括孔隙、裂缝和溶蚀孔洞[6] [7] [8]。

目前茅口组的在沉积相、岩溶模式、储层特征、天然气运移等研究方向已取得较为深刻的认识, 但在岩溶储层的测井评价方面研究较少。风化壳岩溶储层岩性复杂, 储集空间非均质性极强, 测井响应特征多变, 因此其储层测井识别和流体性质判别比一般的碳酸盐岩储层难度更大。现有风化壳岩溶储层研究在测井识别方面仍沿用常规碳酸盐岩储层的识别方法, 没有充分考虑风化壳岩溶储层的岩性和储集空

间类型复杂程度,在流体性质判别方面又与储层识别脱节,导致流体性质判别符合率不高。本文针对风化壳岩溶储层测井评价的困难和存在问题,本文充分考虑风化壳岩溶储层的岩性发育规律和缝洞发育特征,在岩性识别和储集空间分析的基础上,建立风化壳岩溶储层的测井识别方法,并将在流体性质判别方面与储层分类识别相结合,在储层级别划分基础上建立流体性质识别图版,提高风化壳岩溶储层识别和流体性质判别精度。

2. 区域地质概况

四川盆地位于上扬子地区西北缘,为大型叠合含油气盆地,其面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地按照构造可划分为川北低褶带、川西低隆褶带、川中平缓褶带、川西南低陡褶带、川东高陡褶带和川南低陡褶带六个次一级构造区,研究区位于 CD-CN 地区(图 1)。

研究区中二叠统茅口组,为一套海侵背景下的碳酸盐岩沉积。茅口组沉积期后,受东吴运动的影响,四川盆地抬升暴露[9] [10],受大气淡水的淋滤和剥蚀,形成了独特的岩溶系统[11]。茅口组地层厚度约 160~280 米,纵向上,茅口组自下而上划分为 4 段[12] [13]:茅一段、茅二段、茅三段和茅四段,其中茅一段和茅二段又分别自下而上细分为 A、B、C 共 3 个亚段,但受强烈剥蚀的影响,茅四段普遍缺失(图 1)。茅一段主要发育生屑泥质灰岩、生屑泥晶灰岩、泥质灰岩夹黑色页岩,泥质含量高,眼球构造发育,局部见燧石结核和燧石团块。茅二段主要发育厚层块状灰岩和生屑灰岩,中上部发育厚层颗粒灰岩夹薄层泥晶灰岩,下部发育含生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、泥质灰岩。茅三段主要发育泥晶-粉晶生屑灰岩,少量云质生屑灰岩、燧石结核和燧石条带。茅四段大部分被剥蚀,厚度一般在 30 m 以下,多为 10 m 左右,岩性主要为灰岩、生物灰岩,含少量泥质、碳质及黄铁矿。

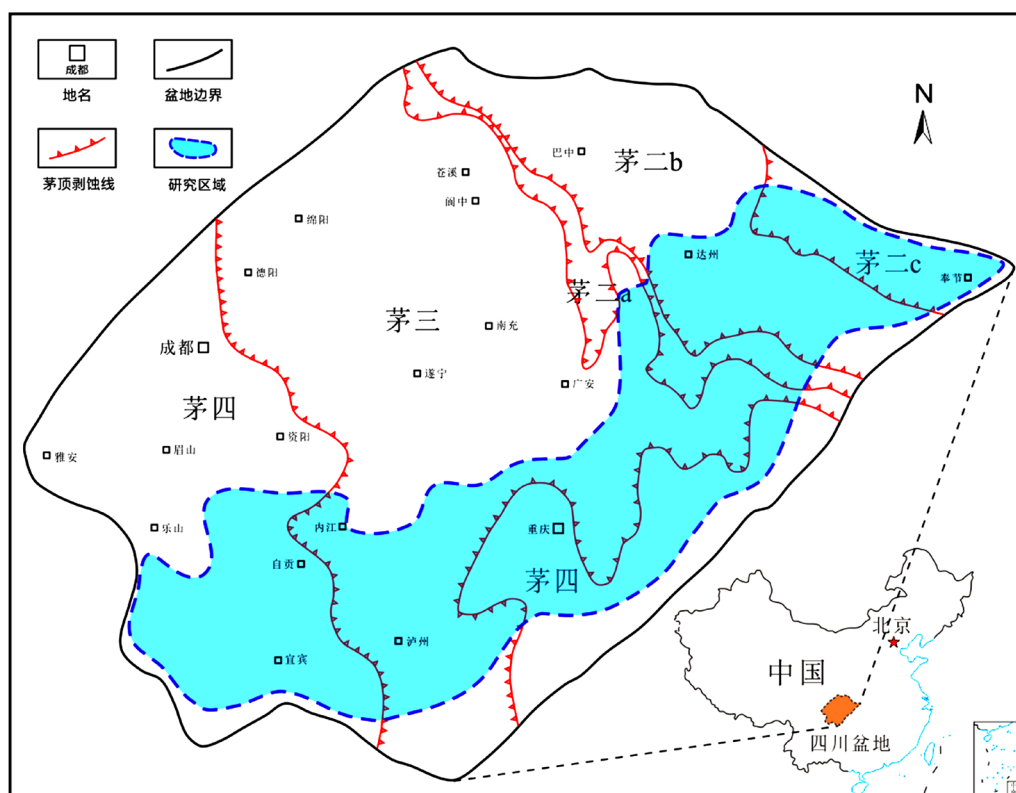


Figure 1. Karst landform of Maokou Formation in the study area

图 1. 研究区域位置及茅口组岩溶地貌

3. 岩性识别

CD-CN 地区茅口组岩性主要归为三类：灰岩、泥质灰岩和白云岩。

1) 灰岩具有较低的自然伽玛，一般在 30 API 以下，密度值接近 2.7 g/cm^3 ，中子值接近 0 p.u ，声波时差在 $50 \mu\text{s/ft}$ 左右，致密灰岩电阻率极高，往往在 $2000 \Omega\cdot\text{m}$ 以上。根据低自然伽玛、低中子、特定的声波时差和密度测井值很容易将致密灰岩识别。随着泥质含量的增加，自然伽玛、中子值、声波时差会增大，电阻率会降低，但下二叠系泥质含量普遍较低，局部自然伽玛较高多为铀含量高导致。致密灰岩在电成像上一般具有块状特征(图 2)。

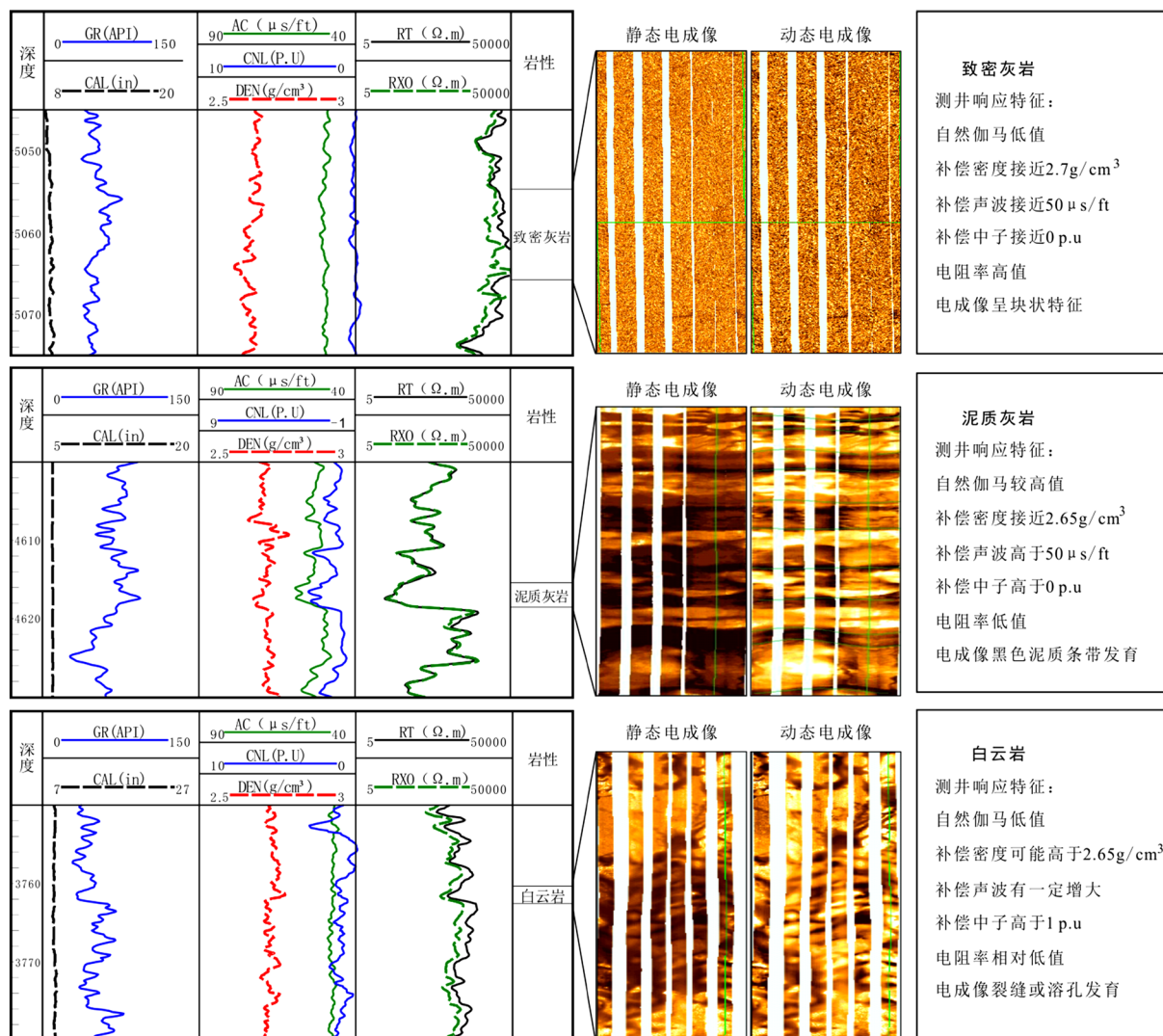


Figure 2. Conventional logging and electrical imaging logging based lithology identification

图 2. 基于常规测井和电成像测井的岩性识别

2) 泥质灰岩具有相对较高的自然伽玛，一般在 30 API 以上；中子值高，可达 10 P.U 以上；与灰岩相比，密度值变化不明显，接近 2.65 g/cm^3 ，中子值高于 0 p.u ，高声波时差，一般在 $50 \mu\text{s/ft}$ 以上，电阻率相对较低，多在 $10 \Omega\cdot\text{m}$ 以下。泥质灰岩常见于茅一段，通过高自然伽玛、高中子值、高声波时差、相对较低电阻率特征很容易将其识别。总体上，下二叠系泥质含量总体较低，但受二叠系有机质含量普遍

较高影响, 茅二段自然伽玛局部偏高, 有的达 80 API 左右, 这是由于铀含量较高造成的。泥质灰岩在电成像上常见黑色泥质条带发育(图 2)。

3) 白云岩常规测井曲线表现为较低的自然伽玛, 一般在 30 API 以下, 中子值为 2~3 P.U; 密度值可能高于 2.65 g/cm^3 ; 声波时差有一定增大, 电阻率相对低值。用自然伽玛、中子、声波时差、密度测井值很容易将白云岩识别。若泥质含量增加, 自然伽玛、中子值、声波时差会增大, 电阻率会进一步降低。白云岩在电成像上一般有裂缝或溶孔发育(图 2)。

4. 储集空间识别

与碎屑岩相比, 碳酸盐岩的孔隙体系要复杂得多, 这主要由于碳酸盐岩具有较强的化学活泼性, 在其沉积以及埋藏历史过程中, 极易受到包括溶蚀作用和白云石化作用在内的多种成岩作用改造, 使得碳酸盐岩储集层往往具有岩性变化大、孔隙类型多、物性变化无规律等特点[7] [14]。根据茅口组野外剖面、岩心和薄片等的详细观察, 根据其成因、形态、大小及分布位置, 将储层的储集空间划分为以下孔隙、裂缝、溶孔、溶洞四类(图 3):

1) 孔隙

孔隙主要包括粒间(溶)孔、晶间(溶)孔、生物体腔孔等类型, 其特征与粒间孔的保存、风化壳岩溶系统疏松充填物间孔隙保存, 多期埋藏岩溶叠加有关。镜下观察孔隙以晶间(溶)孔为主, 其次是岩溶系统中疏松碳酸盐岩砂充填物间孔隙, 岩心观察偶见白云岩针孔。原生孔隙对储层的贡献较小, 测井响应特征不明显。

2) 裂缝

裂缝的发育程度与裂缝产状的差异在测井资料中有不同的响应特征。裂缝在成像测井图像上均表现为正弦波线状, 根据其成因及在成像图上的形态, 裂缝可分为天然裂缝和诱导缝; 根据裂缝填充情况, 天然裂缝又分高阻缝和低阻缝, 高阻缝由于裂缝被方解石等高阻矿物充填, 在成像图像上往往表现为晕圈状的亮黄~白色正弦曲线, 属于无效缝。低阻缝未被方解石、石膏等高阻矿物充填, 一般为有效缝的标志, 在成像图像上往往表现为连续的暗色正弦曲线。裂缝按照倾角又可分为低角度缝、斜交缝、高角度缝三种。研究区主要发育低角度缝、高角度缝及少量斜交缝。低角度缝(倾角小于 30°)在成像图像上响应为规则的暗色正弦线, 正弦线幅度较小。斜交缝(倾角大于 30° 小于 75°)裂缝面多不规则, 在成像图像上响应为不规则断续暗线状, 曲线幅度较高角度缝小, 而高于低角度裂缝。高角度缝(倾角大于 75°)在成像上表现为单一暗色正弦线, 正弦线幅度较大(图 4)。裂缝发育频率由高到低依次为低角度缝 > 斜交缝 > 高角度缝。

3) 溶孔

溶孔的尺寸较小, 其发育一般相对较均匀, 一般表现为声波、中子增加, 密度降低, 且三孔隙度曲线的匹配性较好。双侧向电阻率曲线呈扇状降低, 多为正差异特征, 电成像测井图上表现为密集小圆状低电阻率异常, 成像图上显示的溶孔尺寸可能会有一定的夸大效应(图 4)。

4) 溶洞

当小、中型溶洞发育时, 声波、中子增加, 密度降低, 受孔洞大小的差异及分布非均匀性的影响, 三孔隙度曲线常出现跳动特征, 且曲线之间往往互不匹配或不协调, 即三条测井曲线的相关性不如溶孔型储层好。一般补偿中子基本反映了探测范围内的总孔隙度特征; 补偿声波对连通性好的溶蚀孔洞反映较敏感, 但对孤立或分散的则反映不敏感, 可能时差无明显增大; 补偿密度会有所降低, 降低的幅度一般取决于溶洞的发育程度和连通程度。深浅双侧向多表现为正差异的特征, 电成像图上显示为不规则小圆状或椭圆形斑状暗色低电阻率异常(图 4)。

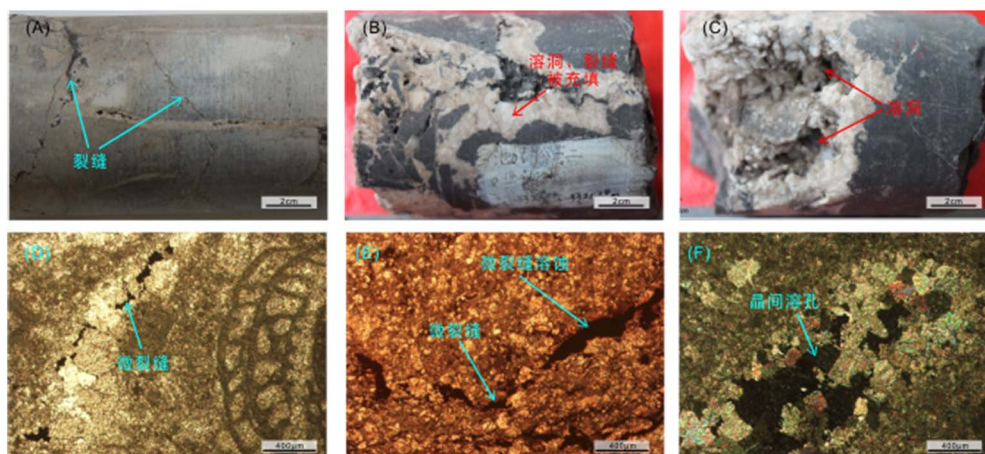


Figure 3. Reservoir space of Maokou Formation (Rock photos and thin section photos)
图 3. 茅口组储集空间类型(岩石照片及薄片照片)

储集空间类型	电成像测井特征 静态 动态	常规测井特征					发育层段
		GR(API)	AC(μs/ft)	DEN(g/cm ³)	CNL(p.u)	RT(Ω.m)	
裂缝	低角度缝	30-45	45-50	2.65-2.75	0-2	尖刺状降低 <2000	茅口 整段
	斜交缝	30-45	50-55	2.65-2.75	>2	指状降低 <2000	茅二a 茅二b
	高角度缝	30-45	45-50	2.65-2.75	0-2	高阻背景 降低 <2000	茅二c 茅一a
溶孔	溶孔	20-55	45-60	2.55-2.75	>3	肩状降低 <2000	茅三 茅二b
溶洞	小洞	20-55	45-55	2.55-2.75	0-3	波动降低 <2000	茅三 茅二a
	中洞	<45	>50	2.5-2.65	>2	尖刺状降低 <1000	茅三 茅二c

Figure 4. Well logging response of the reservoir space of Maokou Formation
图 4. 茅口组储集空间测井响应特征

5. 基于储层级别划分的流体性质判别

CD-CN 地区茅口组岩溶储层按储集空间类型可分为裂缝型、裂缝-孔洞型、溶蚀孔洞型三大类(图 5~7)。根据自然伽马和三孔隙度测井响应特征又可进一步将储层划分为 I 类、II 类、III 类三个级别。由 I 类至 III 类储层, 自然伽马一般越来越高, 说明岩石泥值含量变高, 岩石的脆性和可溶性降低, 裂缝、溶孔和溶洞发育的可能性越来越低; 由 I 类至 III 类储层, 三孔隙度曲线一般表现为声波降低, 中子降低, 密度增大, 说明岩石物性越来越差。图 5~7 展示了分别 I 类、II 类、III 类的裂缝型、裂缝-溶洞型、溶洞型储层测井响应特征, 储层分类与流体产量有较好对应性, 由 I 类至 III 类储层, 天然气或水的产量越来越低。

茅口组岩溶储层储集空间复杂, 并且存在部分溶洞、裂缝被方解石、沥青、泥质填充的情况, 常规测井曲线受多种因素影响, 测井响应特征非常复杂, 因此按照统一标准进行流体性质判别不准确[15] [16] [17]。以常用的 AC-RT 交会图为例(图 8), 气层与水层、气水层的界限模糊, 难以区分不同流体。本文提出在 I 类、II 类、III 类储层划分的基础上, 每个级别分别确定各自的气水界限, 可以极大的提高流体识别的准确率。根据电阻率划分的气、水层界限随着储层级别的升高而降低。依据该方法划分出 CD-CN 地区茅口组储层气水的电阻率界限如下: I 类界限在 100 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右, II 类界限在 200 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右, III 类界限在 300 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右(图 9)。

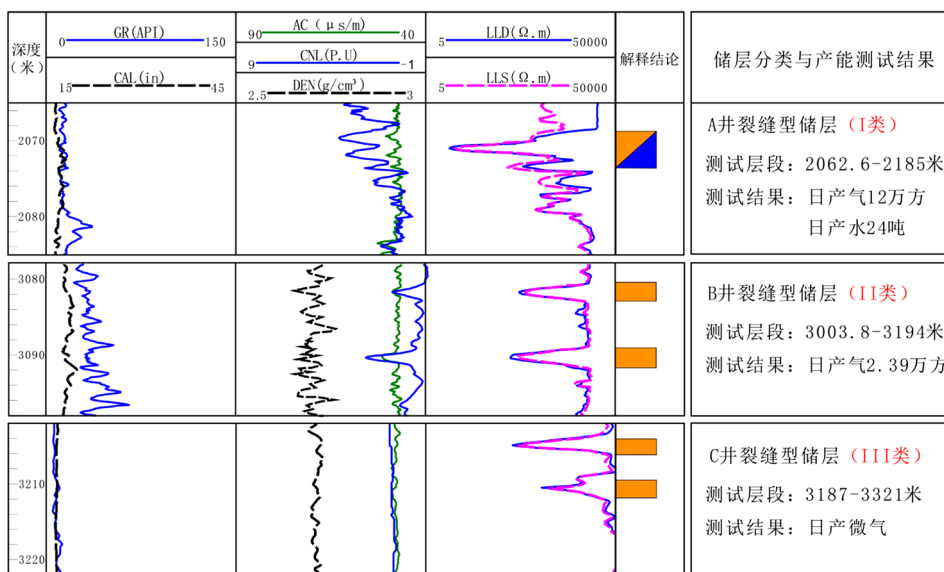


Figure 5. Comparison of well logging characteristics and productivity of type I, II and III fractured reservoirs

图 5. I 类、II 类、III 类裂缝型储层测井特征与产能对比

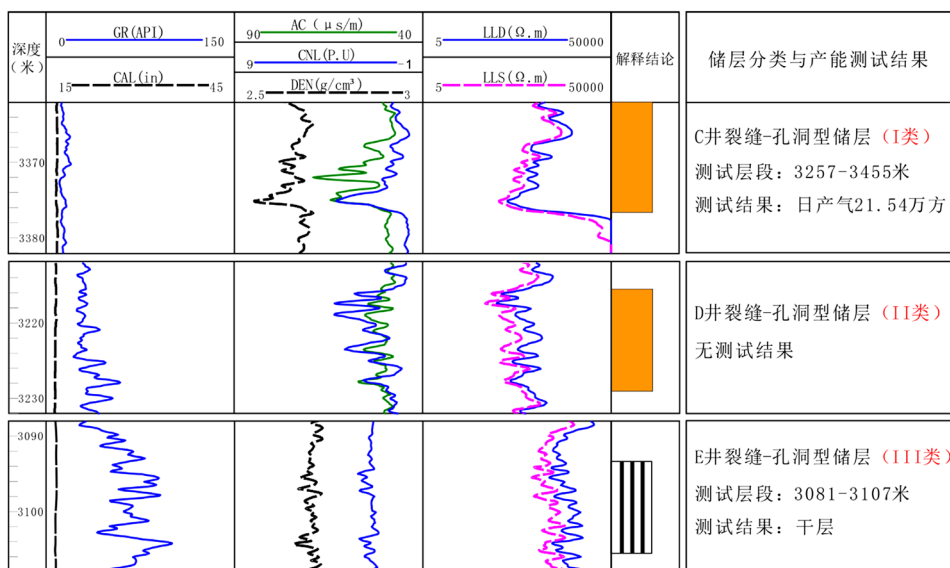


Figure 6. Comparison of well logging characteristics and productivity of type I, II and III fracture-hole reservoirs

图 6. I 类、II 类、III 类裂缝-孔洞型储层测井特征与产能对比

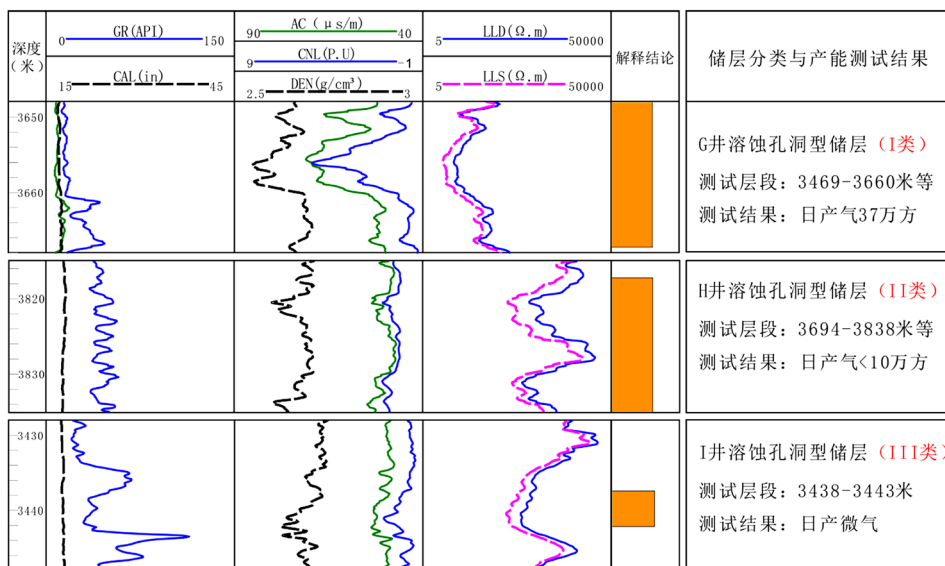


Figure 7. Comparison of well logging characteristics and productivity of type I, II and III cave reservoirs

图 7. I类、II类、III类溶蚀孔洞型储层测井特征与产能对比

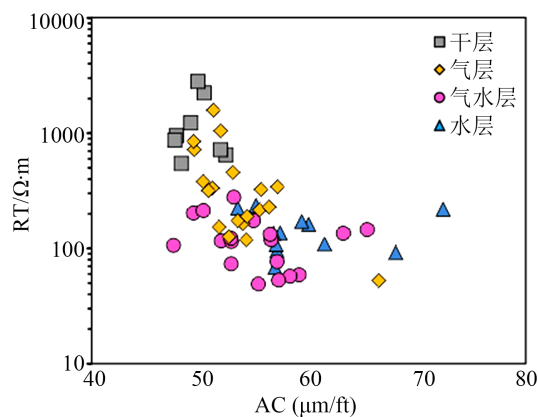


Figure 8. AC versus RT plot for fluid identification

图 8. AC-RT 交会图判别储层流体性质

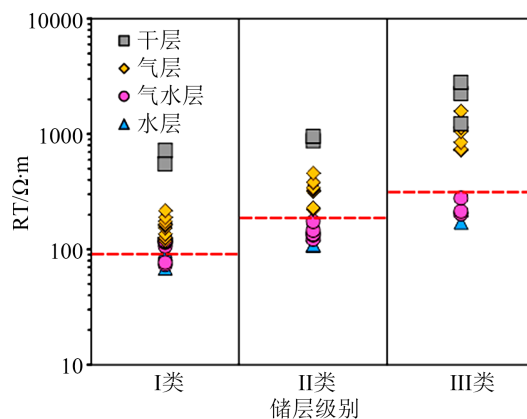


Figure 9. Reservoir type versus RT plot for fluid identification

图 9. 储层级别-RT 交会图判别储层流体性质

6. 结论

1) CD-CN 地区岩溶风化壳储层岩性主要为灰岩、泥质灰岩、白云岩三类, 按照储集空间的组合形式不同, 储层可分为裂缝型、裂缝-溶洞型和溶洞型三大类储层, 结合电成像测井和常规测井建立的岩性识别、储集空间识别图版和储层识别方法效果较好。

2) 按照储层发育程度, 裂缝型、裂缝-溶洞型和溶洞型储层还可进一步分别划分为 I 类、II 类、III 类储层。

3) 将流体性质判别与储层分类结合, 建立的储层级别~RT 交会图版可以更好的识别储层流体性质, I 类、II 类、III 类储层的气水电阻率界限分别划分为 $100 \Omega \cdot m$ 、 $200 \Omega \cdot m$ 和 $300 \Omega \cdot m$ 。该方法有效的解决了不同储层类型、不同储层级别和不同流体性质导致的储层电阻率重叠现象, 提高了风化壳岩溶储层的流体性质判别符合率。

基金项目

四川省重点研发计划(重大科技专项)(编号: 2020YFSY0039); 中石油-西南石油大学创新联合体“复杂碳酸盐岩储层地质-测井-地震联合表征、建模与目标预测技术”(编号: 2020CX010303)。

参考文献

- [1] 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1992-2002.
- [2] 施泽进, 夏文谦, 王勇, 等. 四川盆地东南部茅口组古岩溶特征及识别[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 622-630.
- [3] 徐敏, 梁虹, 邓绍强, 等. 川西北 JLS 地区下二叠统茅口组“断溶体”地震预测[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(11): 21-26
- [4] 张玺华, 陈聪, 张亚, 等. 川西北地区茅口组海槽相地质特征及其油气地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(3): 42-50.
- [5] 胡东风. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 1-10.
- [6] 童崇光. 四川盆地断褶构造形成机制[J]. 天然气工业, 1992, 12(5): 1-6.
- [7] 曹刚, 李其荣, 安辉. 川南地区下二叠统茅口组“岩溶型气藏”地震、地质特征探讨[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(3/4): 76-82.
- [8] 吴丰, 习研平, 张亚, 等. 川东-川南地区茅口组岩溶储层分类识别及有效性评价[J]. 岩性油气藏, 2020(2): 90-99.
- [9] 陈宗清. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(5): 1-11.
- [10] 李凤杰, 郑荣才, 周小进, 等. 中国南方晚古生代构造演化与盆地原型[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(2): 93-99.
- [11] Xiao, D., Tan, X.C., Xi, A.H., Liu, H., Shan, S.J., Xia, J.W., et al. (2016) An Inland Facies-Controlled Eogenetic Karst of the Carbonate Reservoir in the Middle Permian Maokou Formation, Southern Sichuan Basin, SW China. *Marine and Petroleum Geology*, 72, 218-233. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.02.001>
- [12] 江青春, 胡素云, 姜华, 等. 四川盆地中二叠统茅口组地层缺失量计算及成因探讨[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 21-29.
- [13] 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 表生岩溶系统中浅埋藏构造-热液白云岩成因——以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6), 916-927.
- [14] 肖笛, 谭秀成, 郝爱华, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组碳酸盐岩岩溶特征: 古大陆环境下层控型早成岩期岩溶实例[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 457-476.
- [15] 张兆辉, 高楚桥, 高永德. 三元耦合方法评价孔隙型储层有效性[J]. 测井技术, 2013, 37(6): 643-647.
- [16] 吴丰, 司马立强, 梁晓宇, 等. 青西油田隆六区块裂缝型储层流体性质判别[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012, 27(5): 17-20.
- [17] 刘得芳, 林发武, 梁忠奎, 等. 碳酸盐岩储层流体性质综合判别方法[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4): 104-107.