

熊亨, 关利军, 印森林, 等. 基于气测烃组分差异的 CO₂ 气体评价新方法——以恩平凹陷为例[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(8): 44-51.

基于气测烃组分差异的 CO₂ 气体评价新方法 ——以恩平凹陷为例

熊亨^{1,2}, 关利军¹, 印森林³, 蒋钱涛¹, 曹英权⁴, 程乐利³

(1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067; 2 长江大学地球科学学院, 武汉 430100;

3 长江大学录井技术与工程研究院, 湖北荆州 434023; 4 中法渤海地质服务有限公司, 天津塘沽 300450)

摘要:针对地下 CO₂ 气体受物理及化学性质、储层岩性、物性等因素的影响, 现有的常规录井评价方法在定性识别与定量评价方面存在不足。利用现场气测录井资料、结合地层测试资料和电缆泵抽取数据, 在对恩平凹陷油层、CO₂ 气层、含 CO₂ 油层气测烃组分响应特征分析基础上, 提出了基于气测烃组分差异的 CO₂ 定性识别与定量评价方法的解释图版。研究表明: ①优选 C₁%、(C₃+C₄+C₅)/C₁ 作为气测烃组分特征参数建立了 CO₂ 气层的识别图版; ②利用气测录井 C₁% 与地层测试、电缆泵抽取样的 CO₂ 含量进行相关性建模, 建立了定量评价关系。最后, 应用该方法对近期完钻的 2 口探井中 3 个显示层进行验证, 解释符合率达 100%, 很好地解决了勘探阶段 CO₂ 定性识别与定量评价难题, 为勘探作业快速决策以及后期开发方案制定提供了强有力的技术支持。

关键词:CO₂; 气测烃组分; 流体性质; 定性识别; 定量评价; 恩平凹陷

中图分类号:P744.4; P618.13

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.182

0 引言

在南海东部油田的勘探过程中, 先后在恩平、阳江、白云、番禺等诸多区块发现 CO₂ 气藏。CO₂ 气体的存在与否及含量高低是决定油气田是否具有开发和上产价值的重要因素^[1-2], 因此, 对于 CO₂ 气藏的定性识别与定量评价对于后续开发决策具有重要的意义^[3-4]。目前, 国内学者利用测井和录井两类方法尝试对 CO₂ 气层进行评价, 如孟祥水等^[5]、罗智等^[6]利用中子密度与孔隙度交汇特征以及 SIGMA 曲线特征来定性识别 CO₂, 但上述方法受储层岩性、物性等因素影响, 在实际评价中往往具有局限性, 且多以定性识别为主, 无法满足生产作业需求; 廖茂林等^[7]、窦辉等^[8]、张可操等^[9]尝试利用常规录井实时监测钻井液中 CO₂ 含量的变化来识别 CO₂ 气层, 陈春涌等^[10]通过统计实时监测

CO₂ 气体含量与生产或 MDT 测试得到的 CO₂ 气体含量之间的关系, 利用关系模型来回归地层 CO₂ 气体含量, 但 CO₂ 气体易溶于水, 且溶解度随温度、压力变化而变化; 另外, 钻井液一般为碱性, 会与溶于水的 CO₂ 发生化学反应, 导致录井的随钻监测无法检测 CO₂ 的存在或检测到的 CO₂ 气体含量往往难以匹配储层真实 CO₂ 含量^[11], 给油气勘探、评价工作带来了极大困扰。

针对上述问题, 本文通过对研究区 284 组测井、取样及测试落实的油层、CO₂ 气层、含 CO₂ 油层的气测烃组分特征进行研究, 利用测试、电缆泵抽取数据为样本, 优选特征烃组分参数, 建立用于定性识别油层以及 CO₂ 气层的气测烃组分轻、重比值图版; 利用地层测试及电缆泵抽取样实测的 CO₂ 气体含量与 C₁% 进行相关性建模, 实现了对储层中 CO₂ 气体占比的定量评价。

1 区域地质概况

恩平凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷西端, 南北被北部断阶带和番禺低隆起加持, 东西界分别与西江凹陷和珠三坳陷相邻(图 1)^[12]。在新生代恩平凹

收稿日期: 2020-11-20

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“我国含油气盆地深层油气分布规律与资源评价”(2017ZX05008-006-004-002)

作者简介: 熊亨(1989—), 男, 在读博士, 主要从事海上油气勘探方面的研究工作。E-mail: xiongting3@cnooc.com.cn

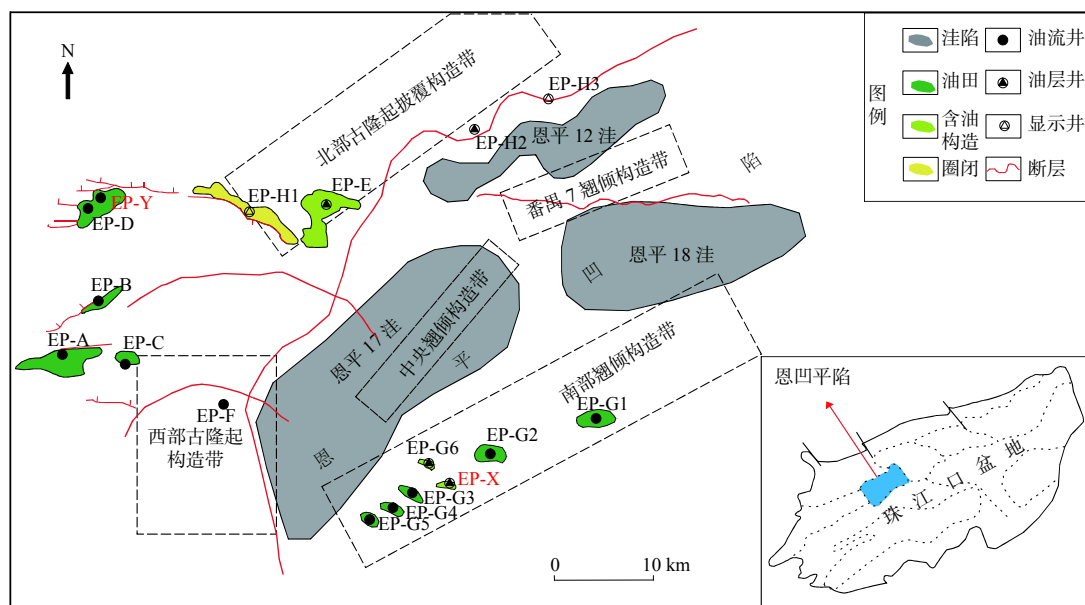


图 1 恩平凹陷区域构造及研究区位置

Fig.1 Regional geological map in Enping Sag

陷经历了晚白垩世—早渐新世裂陷、晚渐新世—中中新世坳陷以及中中新世以后断块升降 3 个构造演化阶段,充填的沉积物厚度超过 8 000 m,平面展布达 5 000 km²,是珠江口盆地重要的油气富集区,总地质资源量达 8.43×10^8 m³ 油当量^[13-15]。已钻井揭示该区主要目的层为下韩江组、珠江组、珠海组以及恩平组。储层岩性、物性差异大,其中,浅层储层以疏松、薄互层细粒泥质粉砂岩、粉砂岩为主,深层则主要为低孔、低渗的中—细砂岩储层。流体性质复杂多变,有油有气,其中气层以 CO₂ 气为主。研究表明,研究区在新近纪具有断裂活化与岩浆集中喷发,大量深部幔源无机成因 CO₂ 顺着沟源断裂调节至浅层,其富集成藏与分布主要受控于沟通地壳深部的基底深大断裂及次生活动断裂发育展布,实际钻探揭示在凹陷南北两翼及古近系—新近系地层中均有分布^[16],且在北部断裂发育带分布更为广泛;在成藏上为“两期油、两期 CO₂”充注,具有早期原油充注,晚期 CO₂ 气体驱替及改造的特点,使得区域流体识别难度大^[17]。因此,如何快速、准确识别该地区复杂储层条件下油层、CO₂ 气层与含 CO₂ 气体油层以及定量计算储层中 CO₂ 占比均是恩平凹陷勘探作业阶段亟待解决的难题。

2 CO₂ 气层录井响应特征

通过对恩平凹陷 6 口探井(EP-A、B、C、D、E、F,图 1)的录井实时 CO₂ 监测资料统计、分析发现,

CO₂ 气层的录井响应特征可分为录井实时 CO₂ 监测异常与无异常 2 类。为了厘清 CO₂ 气层的录井响应特征,在录井 CO₂ 实时监测的基础上,对气测录井各烃组分进行百分比归一化处理分析,建立烃组分图版(即 Bar 组分图版),精细表征各烃组分的变化情况:

(1) 录井 CO₂ 实时监测异常

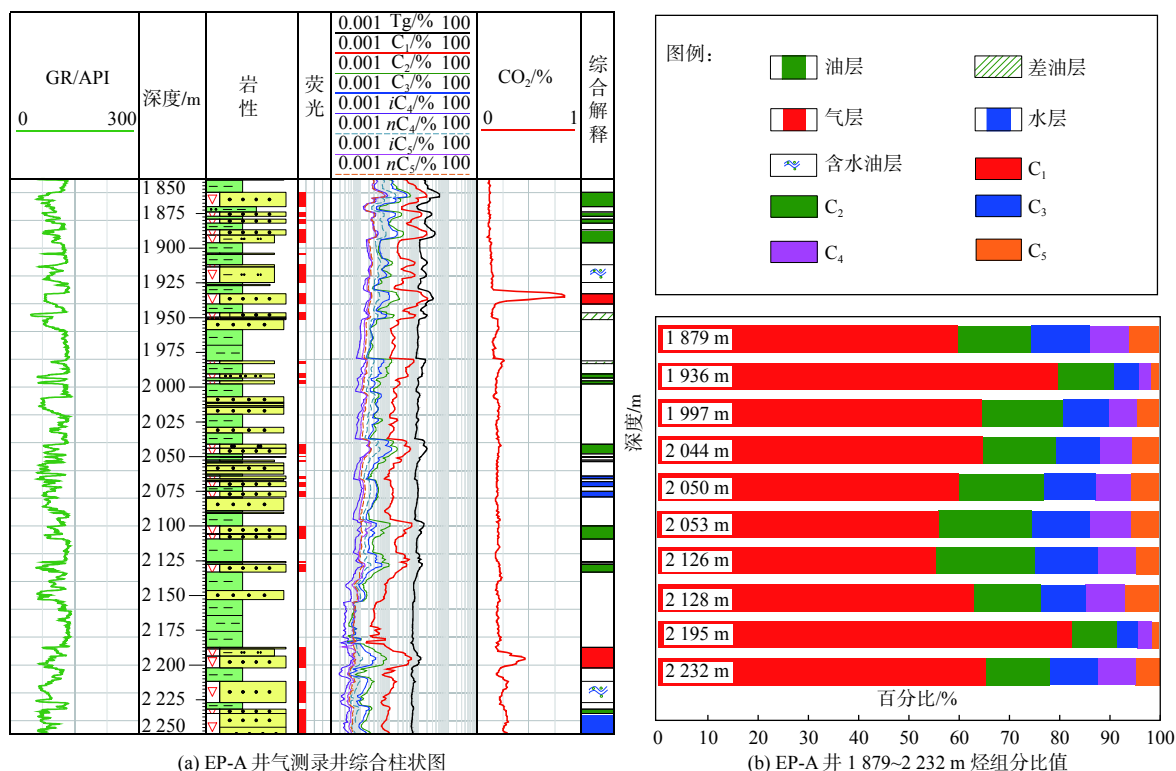
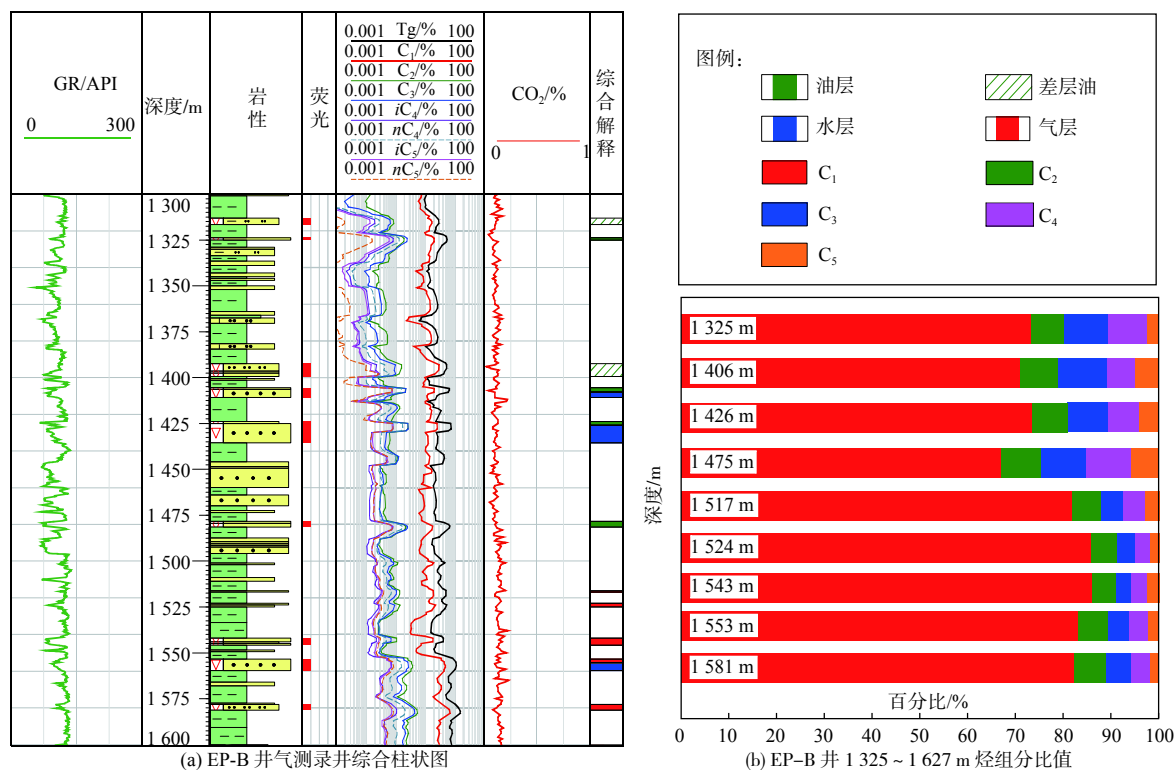
CO₂ 异常与储层(显示层)气测异常同步,实测 CO₂ 异常值明显高于 CO₂ 基线值(异常幅度 > 2,图 2a)。根据 Bar 组分图分析,CO₂ 气层气测烃组分与油层相比表现为高 C₁%、低 C₂₊组分,特别是 C₃、C₄、C₅ 等烃组分百分比下降更为明显(图 2b),在深度 1 936 m,CO₂ 含量达到最高,随着深度的增加,逐渐递减;在深度 2 195 m,CO₂ 含量变大,其气测 Bar 组分特征图与 1 936 m 一致,证实 CO₂ 气层气测烃组分响应特征具有一致性。

(2) 录井 CO₂ 实时监测无异常

CO₂ 气层录井实时监测值与上下油层的 CO₂ 实时监测值无明显差异(异常幅度 < 2,图 3a);已证实的 CO₂ 气层的气测 Bar 组分图与油层相比也表现为高 C₁%,低 C₂₊组分(图 3b),与 CO₂ 气层实时监测异常录井响应特征一致。根据电缆地层测试取样分析,随 CO₂ 占比增加,表现出更高的 C₁% 和更低的 C₂₊%。

3 CO₂ 的定性识别与定量评价

气测烃组分录井响应特征分析表明,气测烃组

图2 EP-A 井 CO₂ 录井响应特征及烃组分图版Fig.2 Mud logging response chart to hydrocarbon composition of CO₂, Well EP-A图3 EP-B 井 CO₂ 录井响应特征及烃组分图版Fig.3 Mud logging response chart to characteristics and hydrocarbon composition of CO₂, Well EP-B

分的差异变化与 CO₂ 含量高低密切相关,而气测录井检测的气测烃组分为油藏中游离气和溶解气,相同油源条件下区域内油层的气测烃组分基本上一

致,只有在次生改造作用下才会导致气测烃组分存在较大差异^[18]。姜风光等^[19]研究表明,晚期 CO₂ 充注对原油中的中、轻组分的萃取作用显著,造成

气顶区以 CO₂ 组分为主, 底油或油环中溶解 CO₂, 使得 C₇₊ 以上重组分明显偏高, 造成流体组分与分布特征不同于正常油层^[19-21]。通过对研究区油层、CO₂ 气层的气测烃组分录井响应特征进行分析, 以 CO₂ 气体充注、萃取作用机理作为理论基础, 本文提出利用气测烃组分差异特点来开展 CO₂ 气体的定性识别与定量评价研究的方法。

3.1 CO₂ 定性识别

为了达到快速区分油层与 CO₂ 气层的目的, 通过对 31 组测试、电缆地层测试取样、完井解释油层的气测烃组分数据与 16 组电缆地层测试取样、完井解释 CO₂ 气层的气测烃组分数据进行研究, 结合油层与 CO₂ 气层气测烃组分 Bar 录井响应特征, 二者在轻、重烃组分上差异非常明显。其中, CO₂ 气层轻组分 C₁% 占比高, 受影响因素小, 与含气性密切相关; 油层重组分 C₃%、C₄%、C₅% 占比相对高, 与含油性密切相关。考虑气测录井资料受地质、工程、仪器等因素的影响, 采用比值法剔除各类影响因素, 因此优选 C₁%、(C₃+C₄+C₅)/C₁ 两个烃组分参数建立气测烃组分轻重比值图版(图 4)。从 C₁% 与 (C₃+C₄+C₅)/C₁ 图版上可知, 该图版能够较好的区分该区 CO₂ 气层与油层, CO₂ 气层区间为 C₁% > 76%, (C₃+C₄+C₅)/C₁ < 0.2; 油层区间为 C₁% < 76%, (C₃+C₄+C₅)/C₁ > 0.2。

3.2 CO₂ 定量评价

通过 C₁% 与 (C₃+C₄+C₅)/C₁ 烃组分参数构建的轻、重比值图版能够快速准确区分油与 CO₂ 气, 但该图版法无法进行储层 CO₂ 的定量评价。为了实现储层 CO₂ 气体的定量计算, 统计并分析了研究

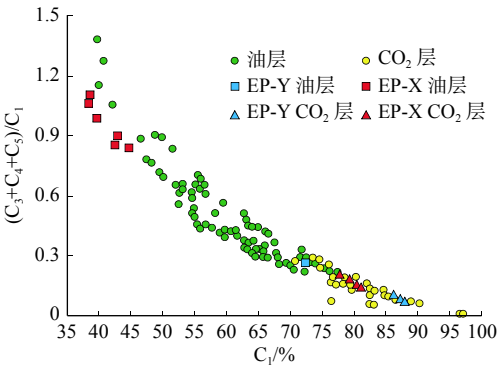


图 4 气测烃组分轻、重比值图版
Fig.4 Ratio of light and heavy hydrocarbon components from gas logging

区 3 口井 11 个深度点的录井实时 CO₂ 监测数据、电缆地层测试取样数据(表 1)。研究表明, 录井实时监测的 CO₂ 含量与 MDT 泵抽取样 CO₂ 含量之间无明显相关性, 但与 C₁% 具有较好正相关性。基于上述录井响应特征, 提出了利用 C₁% 与电缆地层测试取样的 CO₂ 含量进行相关性建模(图 5), 建模后得到的相关系数为 0.8523, 说明二者的相关性较好。其相关性计算公式为:

$$y = 4.879\ 9x - 328.22$$

式中: y 为电缆地层测试的 CO₂ 含量;
x 为气层烃组分中 C₁ 百分比。

4 案例应用

4.1 EP-X 井

EP-X 井是位于恩平凹陷南部斜坡带的一口预探井, 钻探目的主要是为落实该区深层古近系含油气性。该井恩平组 4 123~4 260 m 井段岩性为细

表 1 气测烃组分 C₁% 与监测 CO₂、MDT 泵抽取样 CO₂ 含量数据统计表

Table 1 Statistical table of C ₁ % gas hydrocarbon component and measured CO ₂ and MDT pump sampling CO ₂ content					
井名	泵抽取样深度点/m	录井监测CO ₂ %	泵抽取样CO ₂ %	C ₁ %	结论
EP-A	1 627	0.24	95	83.34	CO ₂ 气层
EP-A	1 634	0.18	9	69.43	油层
EP-A	2 780.8	1.84	96	84.2	CO ₂ 气层
EP-B	1 397.1	0.11	4	71.61	油层
EP-B	1 528.5	0.51	16	75.09	油层含CO ₂
EP-B	1 631	0.25	21	67.45	油层含CO ₂
EP-B	1 983.4	0.42	100	90.13	CO ₂ 气层
EP-B	1 991.1	0.49	97	88.99	CO ₂ 气层
EP-D	3 653.3	0.75	90.02	82.74	CO ₂ 气层
EP-D	3 939.5	2.28	87.254	83.92	CO ₂ 气层
EP-D	3 971.5	2.32	50.07	79.3	CO ₂ 气层

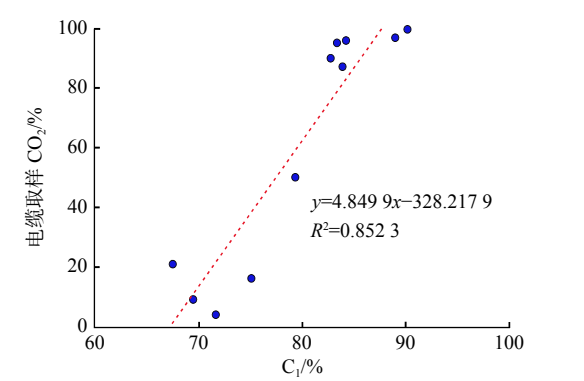
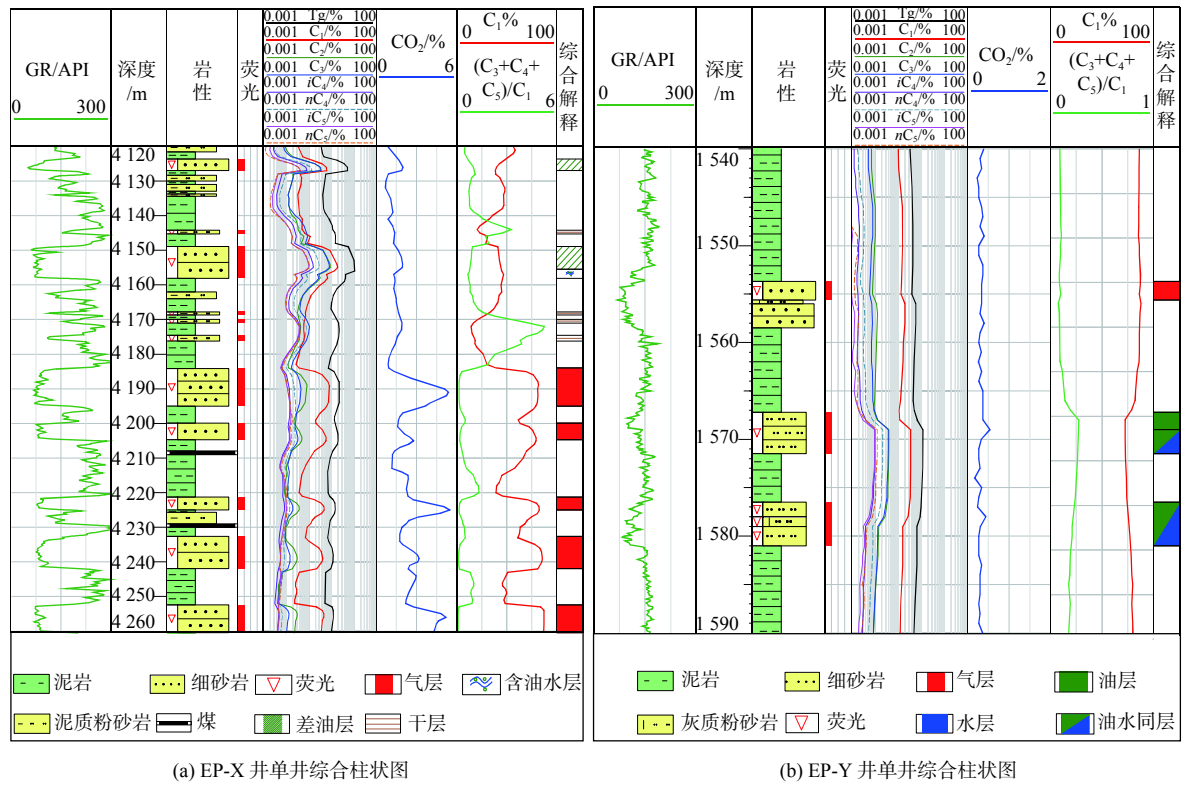


图 5 C₁ 与 CO₂ 电缆取样百分含量关系模型

Fig.5 Relationship model between C₁ and CO₂ cable sampling percentage

砂岩, 荧光面积为 5%~10%, A/C 反应中速(图 6a)。井场实时 CO₂ 监测 1、2 号层与基线相比无明显异常(基线 2.0%), 3、4、5、6、7 号层存在较为明显异常。由各井段 C₁%、(C₃+C₄+C₅)/C₁(表 2)在气测烃组分的轻、重比值图版投点可知, 1、2 号层为油区, 3、4、5、6、7 号层为 CO₂ 气区(图 4)。应用 C₁% 与 CO₂ 电缆取样百分含量关系模型计算, 3、4、5、6、7 号层 CO₂ 含量均>60%(表 2), 因此, 综合评价为 CO₂ 气层。

本井段由于埋藏较深、井况较差, 随钻工具故障, 三孔隙度资料仅有密度曲线, 结合随钻电阻情况, 测井解释为差油层。为了快速落实储层流体的



(a) EP-X 井单井综合柱状图 (b) EP-Y 井单井综合柱状图

图 6 EP-X、EP-Y 井单井综合柱状图

Fig.6 Single well composite bar charts for Well EP-X and EP-Y

表 2 EP-X 井、EP-Y 井各层气测烃组分计算参数表

Table 2 Calculation parameters of hydrocarbon composition in each layer of Wells EP-X and EP-Y

井名	层号	深度段/m	C ₁ %	(C ₃ +C ₄ +C ₅)/C ₁	计算CO ₂ %	结论
EP-X	1	4 123.6~4 127	38.4	1.06	0	油层
EP-X	2	4 148.9~4 158.1	42.3	0.89	0	油层
EP-X	3	4 184.2~4 195	81.2	0.12	68.02	CO ₂ 气层
EP-X	4	4 199.9~4 204.7	79.3	0.2	58.75	CO ₂ 气层
EP-X	5	4 221.3~4 225	82.6	0.13	74.85	CO ₂ 气层
EP-X	6	4 232.6~4 241.9	85.5	0.09	89.01	CO ₂ 气层
EP-X	7	4 252.4~4 260.4	87.3	0.08	97.79	CO ₂ 气层
EP-Y	1	1 553.7~1 555.6	87.2	0.08	97.3	CO ₂ 气层
EP-Y	2	1 567.2~1 571.5	72.3	0.27	24.59	油层含CO ₂
EP-Y	3	1 576.5~1 578	74.1	0.24	33.38	油层含CO ₂

质进行了电缆测压取样和井壁取心作业, 其中, 在 3 号层 4 185.3 m 进行电缆地层测试取样指数以 CO₂ 为主, 占比 73.25%, 证实为 CO₂ 气层; 井壁取心

(图 7a、b、c) 自上而下荧光显示变差, 指示含油性变差。测压取样及井壁取心验证了研究方法的准确性。

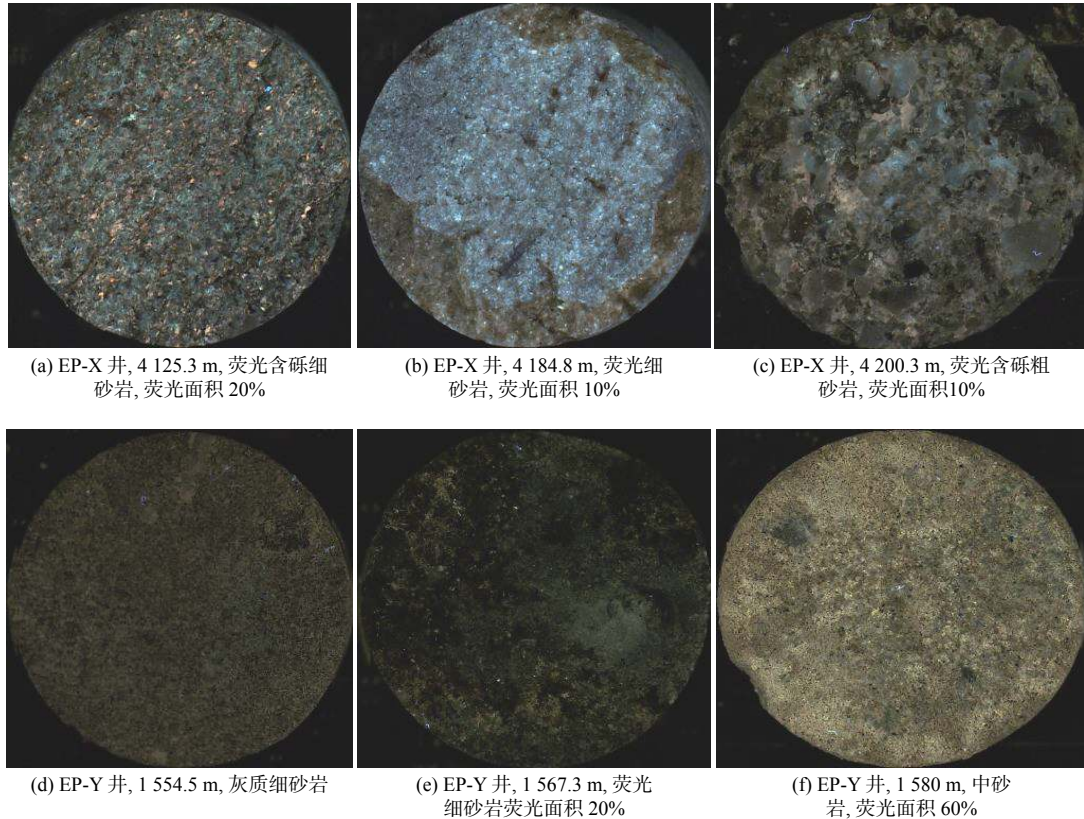


图 7 井壁取心荧光扫描照片

Fig.7 Fluorescence scanning photos of sidewall cores

4.2 EP-Y 井

EP-Y 井是位于恩平凹陷北部斜坡带的一口评价井, 该井韩江组 1 534~1 596 m 井段岩屑录井岩性为粉砂岩、细砂岩, 荧光面积 5%, A/C 反应慢速 (图 6b)。气测组分齐全且异常明显, 实时 CO₂ 监测 1、2、3 号层与基线相比无明显异常 (基线 0.32%)。计算各井段 C₁、(C₃+C₄+C₅)/C₁ (表 2) 在气测烃组分轻重比值图版投点见图 4, 1 号层气测组分特征表现为高 C₁%、低 (C₃+C₄+C₅)/C₁ 的特征, 落在 CO₂ 气区; 2、3 号层气测组分特征表现为低 C₁%、高 (C₃+C₄+C₅)/C₁ 的特征, 落在油区 (图 4)。为了准确评价储层含 CO₂ 情况, 应用 C₁% 与 CO₂ 电缆取样百分含量关系模型进行计算, 其中 1 号层 CO₂ 含量为 97.3% (表 2), 因此基于气测烃组分差异评价为 CO₂ 气层。

本井段分别进行 MDT 泵抽取样及井壁取心, 其中 1 555.2 m 处取样以 CO₂ 气体为主, 占比达

87.6%; 在 1 567.4 m 处取样为油, 含有一定的 CO₂, 泵抽平稳后, 大约含 11.3% 的 CO₂。井壁取心 (图 7d、e、f) 指示荧光显示从无到 60%, 含油性变好。取样及井壁取心证实气测烃组分差异评价结果与泵抽取样结论一致, 验证了研究方法的合理性。

目前, 该方法在恩平凹陷取得了较好的应用效果, 具有广泛的推广应用前景。但该方法是基于气测烃组分差异原理展开, 所以在气测烃组分不全、次生改造严重情况下 (如生物降解重质、稠油油藏以及纯甲烷气藏) 具有一定的局限性, 需要结合其他的方法来综合判断。

5 结论

(1) CO₂ 气体对于油藏的驱替、萃取等次生改造作用改变了油藏的组分特征, 导致气测烃组分发生改变, 随着 CO₂ 气体含量的增加, 气测录井 C₁ 增加, C₂₊ 组分占比下降。

(2)根据油层、CO₂气层的气测烃组分的录井响应特征差异性,优选C₁、(C₃+C₄+C₅)/C₁气测烃组分轻、重比值参数,建立起研究区CO₂气层的定性识别标准。

(3)利用C₁与CO₂气体之间的相关性,以地层测试、电缆泵抽取样CO₂的含量为标定,建立起研究区CO₂气体的定量解释模型,为后续该区CO₂定量评价奠定了基础。

(4)CO₂的定性识别和定量评价新方法在近期完钻的探井中进行验证,解释符合率达100%,取得了很好的应用效果。

参考文献:

- [1] 李阳.低渗透油藏CO₂驱提高采收率技术进展及展望[J].油气地质与采收率,2020,27(1):1-10.
- [2] 侯秋元,黄亮,程晓钰,等.桑托斯盆地超临界CO₂流体体积分数识别图版[J].长江大学学报(自然科学版),2020,17(4):23-28,6.
- [3] 陈红汉,米立军,刘妍鹤,等.珠江口盆地深水区CO₂成因、分布规律与风险带预测[J].石油学报,2017,38(2):119-134.
- [4] 孙金山,代一丁,姚振河,等.珠江口盆地南部深水区CO₂对天然气成藏影响的探讨[C]//中国科学技术协会、广东省人民政府.第十七届中国科协年会一分9南海深水油气勘探开发技术研讨会论文集.中国科学技术协会、广东省人民政府:中国科学技术协会学会学术部,2015:211-216.
- [5] 孟祥水,张晋言,孙波.利用测井视孔隙度差异识别二氧化碳和烃类气[J].测井技术,2003,27(2):132-135.
- [6] 罗智,张恒山.利用测井资料识别气藏中CO₂[J].天然气勘探与开发,2012,35(4):34-36.
- [7] 廖茂林,韦远发.南海某气田CO₂监测和分布特征分析[J].录井工程,2006,17(2):8-12.
- [8] 窦辉,杨光照,滕工生,等.CO₂气层录井识别影响因素分析与解释评价[J].录井工程,2008,19(2):37-40.
- [9] 张可操,曹凤俊.深层天然气井气水层录井解释评价方法探讨[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2005,27(5):728-731.
- [10] 陈春涌,廖茂林,马勇新,等.统计回归法修正CO₂录井值研究[J].录井工程,2012,23(3):37-40.
- [11] 李瑞林.二氧化碳气体的检测、识别及评价[J].西部探矿工程,2016,28(4):61-63.
- [12] 刘方圆,叶加仁,舒誉,等.恩平凹陷含油气系统划分与评价[J].西安石油大学学报(自然科学版),2014,29(4):37-47.
- [13] 刘培,于水明,王福国,等.珠江口盆地恩平凹陷海相泥岩盖层有效性评价及应用[J].天然气地球科学,2017,28(3):452-459.
- [14] 邓超,韩建辉,王天宝,等.基底先存逆冲断裂对新生断裂生长演化的影响:以珠江口盆地珠一坳陷恩平凹陷为例[C]//西安石油大学、陕西省石油学会.2019油气田勘探与开发国际会议论文集,2019.
- [15] 宋亚民,戴朝强,张丽萍,等.恩平凹陷南部斜坡断层阴影带构造恢复方法研究[J].地球物理学进展,2020,35(6):154-162.
- [16] 王振峰,何家雄,张树林,等.南海北部边缘盆地CO₂成因及充注驱油的石油地质意义[J].石油学报,2004,25(5):48-53.
- [17] 熊万林,朱俊章,杨兴业,等.恩平凹陷北部隆起构造带油气成因来源及成藏过程研究[J].中国海上油气,2020,32(1):54-65.
- [18] 蔡明华,陆军,江波,等.气测含油性指标的创建及在油藏评价中应用[J].录井工程,2013,24(2):18-21.
- [19] 姜风光,王小林,陈志海.二氧化碳侵入前油气藏流体性质定量分析[J].天然气地球科学,2017,28(3):488-493.
- [20] 生如岩,毛振强,刘洪营,等.CO₂气藏开发中几个关键问题的探讨[J].油气地质与采收率,2001,8(4):60-62.
- [21] 何家雄,张伟,陈刚.莺歌海盆地CO₂成因及运聚特征的初步研究[J].石油勘探与开发,1995,22(6):8-15,99.

A NEW EVALUATION METHOD OF CO₂ GAS BASED ON THE DIFFERENCE OF HYDROCARBON COMPONENTS BY GAS LOGGING: A CASE STUDY IN THE ENPING DEPRESSION

XIONG Ting^{1,2}, GUAN Lijun¹, YIN Senlin³, JIANG Qiantao¹, CAO Yingquan⁴, CHEN Leli³

(1 Shenzhen Branch of CNOOC (China) , Ltd., Shenzhen 518067, China; 2 College of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 434000, China;

3 Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China;

4 China-France Bohai Geoservices Co.Ltd., Tanggu 300452, Tianjin, China)

Abstract: Influenced by gas properties, reservoir lithology, reservoir physical properties and other factors, conventional logging methods are not efficient enough for both qualitative identification and quantitative evaluation of CO₂ gas. Taking the Enping depression as a case, based on the characteristics of hydrocarbon components in the oil layer, CO₂ gas layer and CO₂ oil layer, this paper, using the field gas logging data together with formation testing data and cable pumping sample data, creatively proposed some explanation charts for qualitative identification and quantitative evaluation of CO₂ based on the difference in hydrocarbon components in gas log. ① An effective qualitative identification chart is established for CO₂ gas reservoir, selecting C₁% and (C₃+C₄+C₅)/C₁ as the characteristic parameters of hydrocarbon components from gas log. ② A quantitative relationship between the CO₂ content and the C₁% of the reservoir is established with the data from gas log for quantitative calculation of the CO₂ content in the exploration stage. The method is applied for 3 fluorescence display layers in 2 exploration wells recently completed, and the interpretation coincidence rate reaches 100%. It has solved the problem of CO₂ qualitative identification and quantitative evaluation in the exploration stage, and also provided a strong technical support for the rapid decision-making of exploration and development operations.

Key words: CO₂; hydrocarbon components in gas logging; fluid properties; qualitative identification; quantitative evaluation; Enping Depression