

碳同位素录井技术在胜利油区页岩油评价中的应用 ——以渤南洼陷 YYP 1 井为例

牛 强^① 慈兴华^②

(^①中石化经纬有限公司胜利地质录井公司;^②中石化经纬有限公司)

摘 要 页岩油目前已成为国内外油气勘探开发的重要领域,为了探索碳同位素录井新技术在页岩油评价中的作用,选取渤南洼陷页岩油井 YYP 1 井开展碳同位素录井工作。基于系统的碳同位素录井数据,详细分析了沿井身轨迹的碳同位素变化特征及其代表的地质意义,利用钻井液气碳同位素研究了页岩油气的成因及成熟度等油气地球化学问题,通过不同时间序列下岩屑罐顶气碳同位素分馏变化特征,及与钻井液气碳同位素之间的分馏特征,结合气测变化对页岩油“甜点”类型进行评价,为压裂分段分簇方案的制定提供有力的技术支撑。

关键词 渤南洼陷 页岩油 碳同位素录井 甜点识别 沙三下亚段 钻井液气 岩屑罐顶气

中图分类号: TE 132.1 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3969/j.issn.1672-9803.2023.02.002

Application of carbon isotope mud logging technology in shale oil evaluation of Shengli Oilfield: A case study of well YYP 1, Bonan Sag

NIU Qiang^①, CI Xinghua^②

^①Shengli Geological Mud Logging Company of Sinopic Matrix Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China;

^②Sinopic Matrix Corporation, Ltd., Qingdao, Shandong 266001, China

Abstract: Shale oil has become an important field of oil and gas exploitation at home and abroad. In order to explore the role of new carbon isotope logging technology in shale oil evaluation, this paper selects YYP 1 well, a shale oil well in Bonan Sag, to carry out carbon isotope logging work. Based on the systematic carbon isotope logging data, the variation characteristics of carbon isotopes along the wellbore trajectory and their geological significance are analyzed in detail, and the carbon isotopes of drilling fluid gas are used to study geochemistry like the genesis and maturity of shale oil and gas. According to the fractionation characteristics of carbon isotopes of cuttings head space gas and drilling fluid gas under different time series, and combined with gas logging changes, the "sweet spot" types of shale oil are identified, which provides a strong technical support for the formulation of fracturing segmentation and clustering scheme.

Key words: Bonan Sag, shale oil, carbon isotope logging, sweet spot identification, the lower section of Es 3, drilling fluid gas, cuttings head space gas

引用: 牛强, 慈兴华. 碳同位素录井技术在胜利油区页岩油评价中的应用——以渤南洼陷 YYP 1 井为例[J]. 录井工程, 2023, 34(2): 9-14.

NIU Qiang, CI Xinghua. Application of carbon isotope mud logging technology in shale oil evaluation of Shengli Oilfield: A case study of well YYP 1, Bonan Sag[J]. Mud Logging Engineering, 2023, 34(2): 9-14.

0 引 言

目前页岩油是国内外重要的勘探开发领域,中石化胜利油田 2018 年开启济阳坳陷第二轮页岩油的勘探开发,欲在页岩油方面获得突破,力争 2023 年实现页岩油规模性、工业化生产。页岩油“甜点”的识别和

评价始终是页岩油勘探工作的关键,相关学者提出从含油性、储集性、可动性和可压性“四性”评价页岩油甜点,由于评价参数的获取主要来自岩心的实验测试数据,实验成本高,周期长,且数据有限离散,无法获取页岩油段参数的连续变化特征。录井技术能在随钻过程中对岩屑进行及时、快速的分析评价,近年来

牛强 高级工程师,1975 年生,2016 年博士毕业于中国石油大学(北京)地质资源和地质工程专业,现在中石化经纬有限公司胜利地质录井公司从事综合地质研究、录井解释和新技术应用推广工作。通信地址:257000 山东省东营市东营区乐园路 1 号。电话:(0546)8722992。E-mail:slh1q@126.com

录井发展了基于红外光谱的碳同位素分析技术,打破传统实验室质谱检测无法部署钻井现场的局限,实现随钻过程中快速检测烃类气体碳同位素,为页岩油气勘探开发中的评价提供了全新的角度和思路。通过钻井现场对钻井液气及岩屑罐顶气进行采集分析,基于页岩油目的层段的碳同位素特征,结合济阳坳陷渤南洼陷 YYP 1 井工区地质背景,分析页岩油的成因、演化阶段、富集规律以及识别页岩油的“甜点”层段。

1 碳同位素录井技术简介

钻井现场碳同位素检测采用中石化胜利地质录井公司和苏州加州能源研究院联合研发的气相色谱—红外光谱碳同位素检测仪(SL—GRAND型),其基本工作原理为:色谱部分将烃类气体按组分分离,然后进入高温氧化池燃烧成 CO_2 ,进入红外激光光谱测量样品池,利用 ^{12}C 和 ^{13}C 质量差异造成的吸收特征峰不同实现同位素的测量^[1-2]。该仪器5 min以内可完成 C_1 — C_3 的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$)测定,相比实验室质谱检测测量误差小于0.4‰,气体测量浓度范围为0.05%~100%。

碳同位素录井在钻井现场按照一定的间距主要采集钻井液气和岩屑罐顶气两种类型样品。钻井液气为钻头破碎地层所产生的气体,检测样品用密闭性好的气袋在综合录井仪气测放空管线处采集;岩屑罐顶气是岩屑经过一段时间静置所解析出来的气体,检测样品用取样罐装入适量在振动筛处返出的岩屑,倒入少量清水,以固定的时间序列检测岩屑罐顶气中的烃类碳同位素。依据同位素分馏理论,利用钻井液气中碳同位素值进行油气成因、成熟度等传统油气地球化学问题的解释分析,利用不同时间序列的岩屑罐顶气的碳同位素值进行页岩油气甜点段识别等勘探开发生产问题的解释评价。

2 区域地质背景

YYP 1 井位于济阳坳陷沾化凹陷渤南洼陷 Y 17 断阶带,所处的断阶带位于渤南洼陷北部,北邻埕子口凸起,西邻四扣洼陷。渤南洼陷从始新世早中期开始长期处于滨浅湖—河流相环境,沙三段沉积时期湖盆逐渐扩大,渤南洼陷处于还原半深湖相沉积环境,形成了巨厚的暗色泥岩和油泥岩、油页岩^[1]。渤南洼陷沙三下亚段页岩油是重要的接替类型,目前整个渤南洼陷有42口井可见良好的油气显示,其中洼陷北部

出油层段主要为13 x 层组,岩相以泥页岩夹灰条、砂条的夹层型为主。结合源岩、油性、裂缝、脆性、压力五大主控因素,优选有利区域,在 Y 176 井西部署 YYP 1 井,继续探索该区域夹层型页岩油含油气情况,该井一旦突破产能关,将带动整个济阳坳陷演化程度区的页岩油勘探。

YYP 1 井完钻斜深4902.00 m,垂深3540.52 m,实钻A靶斜深3960.00 m,垂深3495.11 m,井底水平位移2059.32 m,水平段长度942.00 m。自三开之后在3360.00~4902.00 m井段开展碳同位素录井,同一深度采集钻井液气和岩屑罐顶气样品,采样间距为2~4 m,其中每一个岩屑罐顶气样品按照静置1 d、3 d、7 d的时间序列检测分析3次。

3 钻井液气碳同位素特征与油气性质

3.1 钻井液气碳同位素特征

钻井液气主要为钻头破碎地层所产生的气体,由于页岩储层致密,油气流动性较差,具有典型的原位赋存特征^[2-3],因此,通过测量钻井液气碳同位素可以直接反映所钻遇地层中赋存页岩油气的同位素特征,进而反映原位油气性质。如图1所示,YYP 1 井沙三下亚段3360.0~4902.0 m井段钻井液气特征 $\delta^{13}\text{C}_1$ 范围为-58.93‰~-51.29‰,平均-55.74‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 范围为-49.68‰~-22.95‰,平均-33.44‰, $\delta^{13}\text{C}_3$ 范围为-37.37‰~-20.14‰,平均-30.05‰,三者表

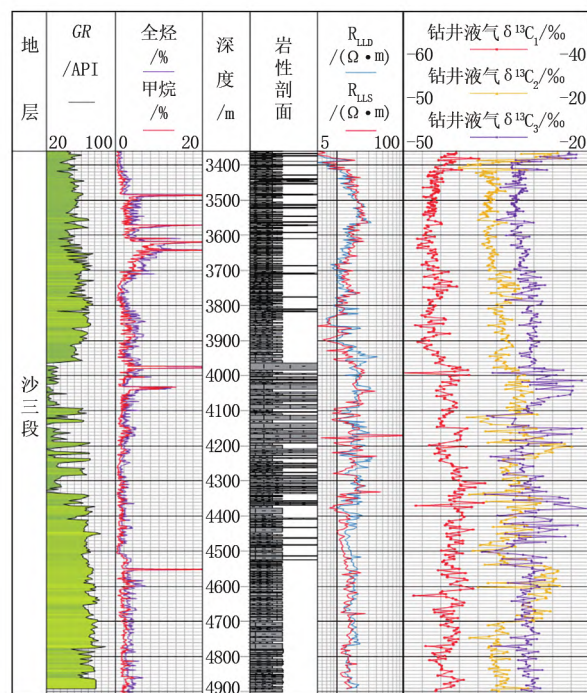


图1 YYP 1 井钻井液气碳同位素特征曲线图

现为正序系列,即 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$,是典型的油型伴生气特征。根据图1中钻井液气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 三者的碳同位素曲线,结合测井资料和岩性资料,可以将3360.0~4902.0 m井段划分为3段,3段特征存在明显差异。

(1)3360.0~3960.0 m井段,该段为A靶之前的造斜段,岩性以灰质油泥岩、灰质泥岩为主, $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均 -55.20‰ , $\delta^{13}\text{C}_2$ 平均 -34.92‰ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 平均 -30.50‰ ,其中 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值自上而下逐渐变重,变化范围在4‰左右, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值自上而下逐渐略变轻,局部变重,变化范围在2‰左右。

(2)3960.0~4500.0 m井段,该段岩性以泥灰岩为主,夹灰质泥岩、灰质油泥岩, $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值变化大,变化范围分别在4‰、7‰、10‰左右,轻重间互特征明显。对比碳同位素与测井曲线,碳同位素值重的段往往对应低自然伽马和相对高电阻率,碳同位素值轻的段往往对应高自然伽马和低电阻率,表明岩石中灰质含量的高低影响了碳同位素的轻重。

(3)4500.0~4902.0 m井段,该段岩性以灰质油泥岩、灰质泥岩为主, $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均 -56.64‰ , $\delta^{13}\text{C}_2$ 平均 -31.95‰ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 平均 -29.99‰ , $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 上下变化相对稳定,变化范围均在2‰左右,但 $\delta^{13}\text{C}_2$ 明显存在两段式分布特征,上段偏重平均为 -28.27‰ ,下段偏轻平均为 -34.75‰ 。

结合岩性、测井曲线特征,钻井液气碳同位素三段式特征分布表明页岩油的非均质性强,页岩油的赋

存储层类型不同,碳同位素的特征不同,第一段页岩油的赋存储层类型主要为泥质岩类储层,第二段为碳酸盐岩储层和泥质岩类储层两种类型,第三段主要为泥质岩类储层。

3.2 基于钻井液气碳同位素的油气性质分析

钻井液气主要为钻头破碎地层所产生的气体,因此可以直接反映所钻遇地层中油气类型及演化程度。图2为YYP 1井 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$ 有机质不同成因烷烃气鉴别图板,也称为“V”型图板, $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_2$ 交会、 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_3$ 交会,将 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值标在图板上,便可知气体成因^[4]。在济阳坳陷页岩油气一般均为同源,因此气体的成因和演化阶段与油是一致的。

YYP 1井钻井液气分别在 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_2$ 鉴别图板(图2a)和 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_3$ 鉴别图板(图2b)上投点落在Ⅵ生物气和混合区以及Ⅱ油型气区内, $\delta^{13}\text{C}_1$ 主体范围介于 -57.5‰ ~ -52.5‰ 之间,按照有机质演化阶段生成油气性质,处于低熟和成熟阶段早期演化阶段。济阳坳陷不同构造位置油气演化程度不一样,与沾化洼陷罗家地区L176井和东营洼陷纯梁地区C113-斜2井数据对比分析如图3所示。L176井的投点落在Ⅵ生物气和混合区, $\delta^{13}\text{C}_1$ 均小于 -55‰ ,按照有机质演化阶段生成油气性质,处于未成熟阶段演化阶段,而C113-斜2井的投点完全落在Ⅱ油型气区,按照有机质演化阶段生成油气性质,处于成熟阶段中期演化阶段。3口井油气成熟度和演化程度由高到低依次为C113-斜2井、YYP 1井、L176井。

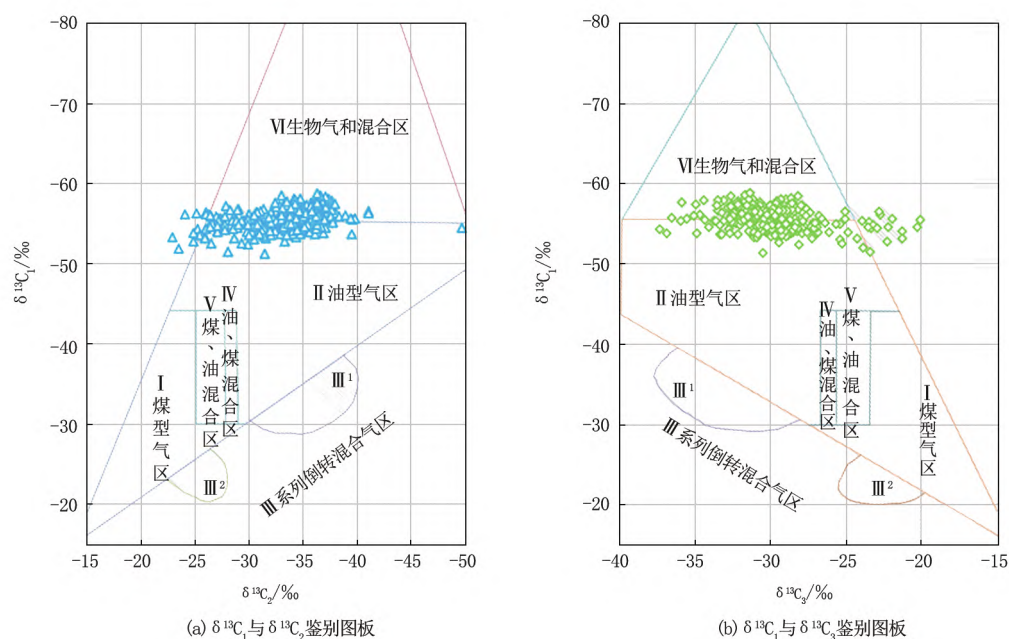


图2 YYP 1井 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$ 有机质不同成因烷烃气鉴别图板

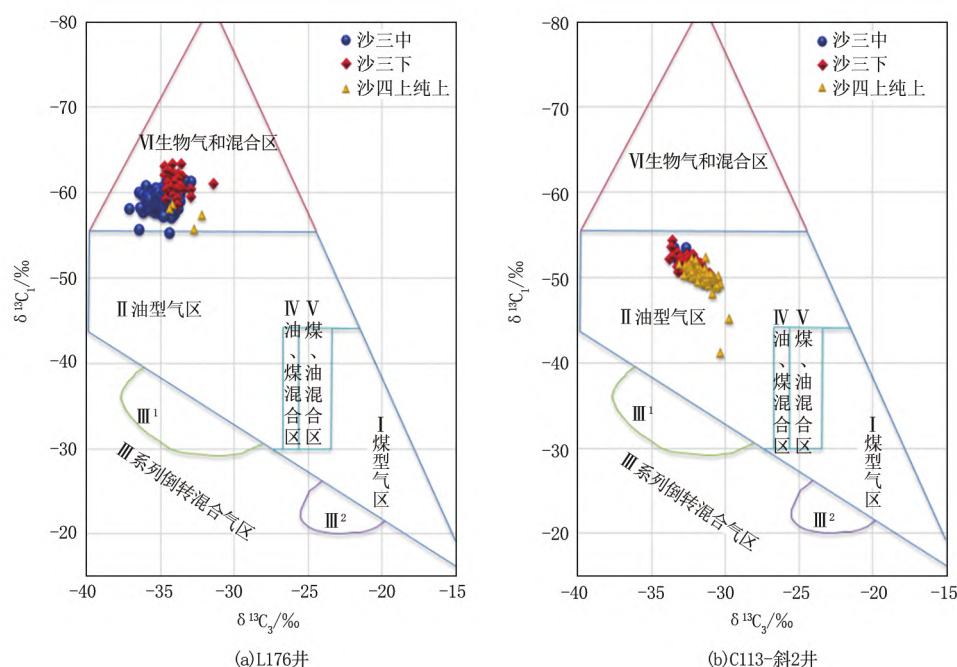


图3 L176井和C113-斜2井 $\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_3$ 有机质不同成因烷烃气鉴别图板

4 岩屑罐顶气碳同位素特征与页岩油甜点

4.1 岩屑罐顶气碳同位素特征

不同井段岩屑罐顶气碳同位素特征、分馏程度及气体释放量存在差异^[5-6]。从YYP1井岩屑罐顶气碳同位素检测结果发现,根据岩屑罐顶气甲烷碳同位素特征以及相对钻井液气甲烷碳同位素分馏程度,整体可以划分为3段,与前面钻井液气碳同位素变化特征基本一致,但表征页岩储层特征更为精细,结合岩屑罐顶气甲、乙烷碳同位素特征以及相对钻井液气甲、乙烷碳同位素分馏程度,详细分析3段的岩屑罐顶气碳同位素特征(图4)。

(1)3360.0~3960.0 m井段,该段为A靶之前的造斜段,整体上7 d岩屑罐顶气甲烷碳同位素相对钻井液气甲烷碳同位素分馏程度大。该段细分上段分馏程度大,变重程度最高达18‰,对应甲、乙烷释放量也大;中段分馏程度小,变重程度最高达5‰,对应甲、乙烷释放量小;下段分馏程度大,变重程度最高达10‰,对应甲、乙烷释放量小;对于7 d岩屑罐顶气乙烷碳同位素相对钻井液气乙烷碳同位素分馏,上段和下段分馏程度大,均表现为岩屑罐顶气乙烷碳同位素重于钻井液气乙烷碳同位素,而中段岩屑罐顶气乙烷碳同位素却轻于钻井液气乙烷碳同位素。

(2)3960.0~4540.0 m井段,整体上7 d岩屑罐顶气甲烷碳同位素相对钻井液气甲烷碳同位素分馏

程度小,对应甲、乙烷释放量中等,对于7 d岩屑罐顶气乙烷碳同位素相对钻井液气乙烷碳同位素分馏整体上变轻,局部变轻程度小。

(3)4540.0~4902.0 m井段,整体上7 d岩屑罐顶气甲烷碳同位素相对钻井液气甲烷碳同位素分馏程度大,变重程度最高达12‰,中部存在一段分馏程度小的层段,对应甲、乙烷释放量低,对于7 d岩屑罐顶气乙烷碳同位素相对钻井液气乙烷碳同位素分馏下段变重。

4.2 页岩油甜点类型分析

页岩致密的纳米孔隙结构,导致页岩气在释放的过程中会发生同位素的分馏,分馏作用主要是由扩散和吸附作用所引起的^[7],同位素的分馏行为受控于页岩孔隙结构与页岩气的赋存状态。因此,通过岩屑罐顶气碳同位素分馏特征及释气量变化特征可以反演分析相关的页岩油气地质甜点。相关研究指出,页岩气释放过程的碳同位素分馏主要发生在克努森扩散过程^[6],碳同位素分馏的快慢取决于克努森数的大小,有效喉道越细小,分馏效应越显著。

$$K_n = \lambda / L$$

式中: K_n 为克努森数; λ 为分子自由程,nm; L 为喉道直径,nm。

南方海相高成熟的页岩气勘探开发过程中,现场页岩解析过程中以及岩屑罐顶气的碳同位素值演化均表现为随时间逐渐变重的特征^[1,6],但对YYP1井

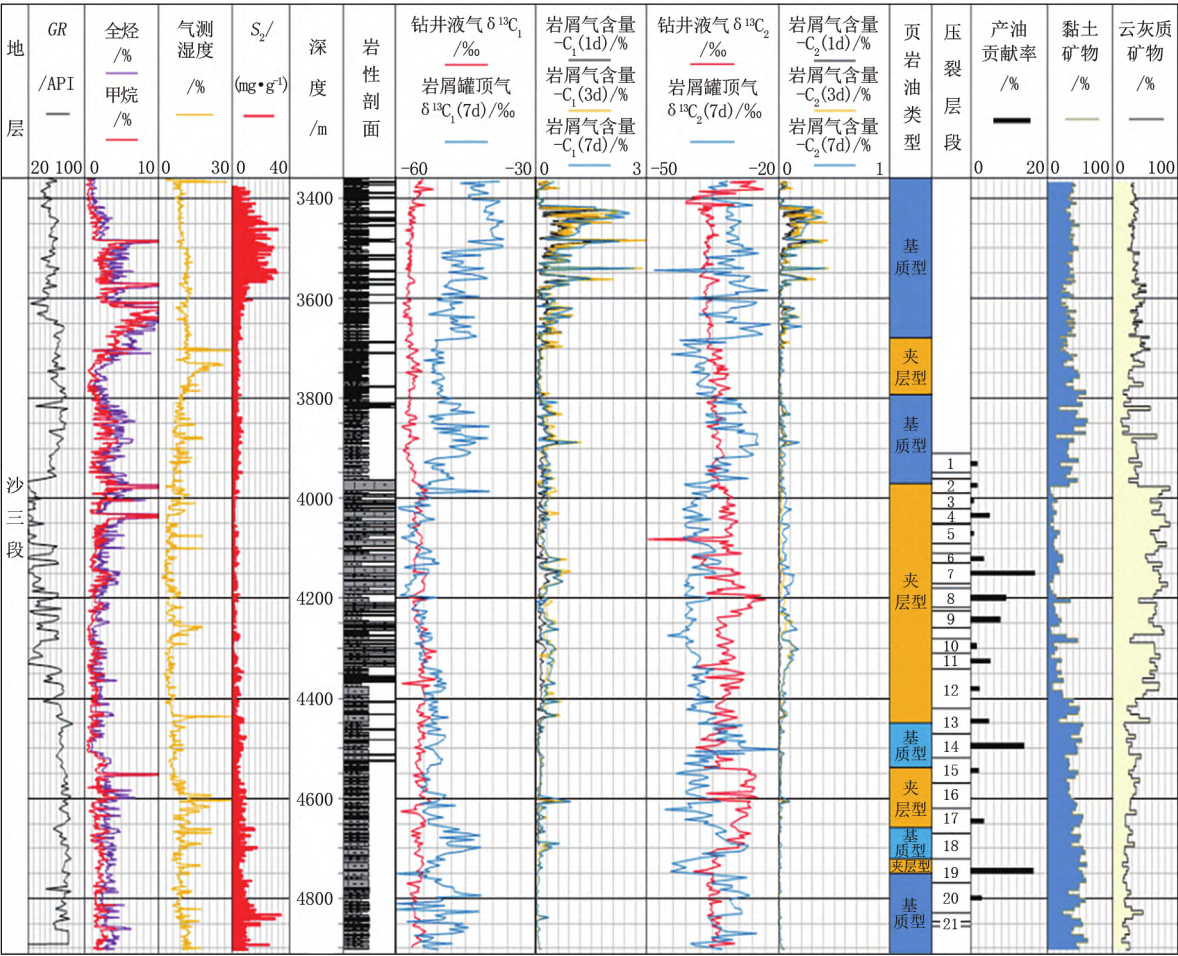


图4 YYP 1井基于岩屑罐顶气碳同位素的页岩油甜点类型分析

页岩油段岩屑罐顶气甲、乙烷不但存在随时间变重的层段,也存在随时间变轻的层段,表明陆相页岩油和南方海相页岩气存在一定的差异。

根据岩屑罐顶气甲、乙烷碳同位素与钻井液气甲、乙烷碳同位素的相对变化特征,YYP 1井页岩油存在两种类型(图4)。

第一种类型为基质型页岩油,其典型代表段为3360.0~3368.0 m,甲、乙烷岩屑罐顶气碳同位素相对钻井液气碳同位素均表现为变重的特征,甲、乙烷岩屑罐顶气释放量也较高,气测全烃与甲烷高;该段对应的 S_2 高,黏土矿物和灰质矿物含量相当,表明该段为有机质含量高的页岩段,页岩中含油量也高,可称为基质型页岩油。该类型页岩油段对水平井压裂初期油气产量贡献小,但对长期油气产量贡献大。

第二种类型为夹层型页岩油,其典型代表段为3970.0~4440.0 m,甲烷岩屑罐顶气碳同位素相对甲烷钻井液气碳同位素变重程度小,甚至变轻,乙烷岩

屑罐顶气碳同位素相对乙烷钻井液气碳同位素反而变轻,而且变轻幅度达到7‰左右,甲、乙烷岩屑罐顶气有一定的释放量,气测全烃与甲烷较低。该段对应的 S_2 低,黏土矿物含量低,灰质矿物含量高,表明该段以碳酸盐岩为主,可称为夹层型页岩油。该类型页岩油段对水平井压裂初期油气产量贡献大,但对长期油气产量贡献量要小于基质型页岩油类型。

YYP 1井3910~4856 m井段分21段进行压裂试油,压裂峰值日产油93.1 t,对比示踪剂显示的初期每段产油贡献率(表1),结合图4的页岩油类型评价,其中夹层型页岩油贡献率达到72.6%,基质型页岩油贡献率27.4%,产油贡献率高于3%的压裂层段有10段,贡献了85.6%的产量,夹层型页岩油有9段,基质型页岩油有2段。示踪剂显示的每段油气贡献率说明,基于岩屑罐顶气碳同位素的页岩油甜点类型分析准确率较高,对差异化压裂方案的制定提供了有力的技术支撑。

表1 YYP1井分段压裂结果

段序	井段/ m	段长/ m	产油 贡献率/%	页岩油 类型
1	3910.0~3950.0	40	1.7	基质型
2	3960.0~3990.0	30	1.7	基质型
3	3990.0~4020.0	30	0.8	夹层型
4	4020.0~4050.0	30	4.9	夹层型
5	4052.0~4090.0	38	0.9	夹层型
6	4110.0~4130.0	20	3.4	夹层型
7	4130.0~4170.0	40	16.8	夹层型
8	4180.0~4218.0	38	9.2	夹层型
9	4225.0~4260.0	35	7.7	夹层型
10	4280.0~4310.0	30	1.5	夹层型
11	4310.0~4340.0	30	5.1	夹层型
12	4340.0~4420.0	80	2.3	夹层型
13	4420.0~4470.0	50	4.8	基质型
14	4470.0~4520.0	50	13.9	基质型
15	4520.0~4570.0	50	2.1	基质型
16	4570.0~4620.0	50	0.2	夹层型
17	4620.0~4670.0	50	3.4	夹层型
18	4670.0~4720.0	50	0.2	基质型
19	4720.0~4770.0	50	16.4	夹层型
20	4770.0~4830.0	60	2.9	基质型
21	4846.0~4856.0	10	0.1	基质型

5 结 论

(1)碳同位素录井技术现场获取钻井液气的碳同位素,利用“V”型图板实现快速判断油气性质和演化阶段。基于钻井液气C₁—C₃组分碳同位素,判断YYP1井油气处于低熟和成熟阶段早期演化阶段。

(2)基于岩屑罐顶气碳同位素的页岩油甜点类型分析,不同类型的页岩油在岩屑罐顶气C₁—C₃组分碳同位素特征差异明显。YYP1井页岩油存在基质型和夹层型两种类型,夹层型页岩油对水平井压裂初期油气产量贡献大,甜点类型的评价能够为压裂分段分簇方案的制定提供有力的技术支撑。

(3)无论钻井液气碳同位素还是岩屑罐顶气碳同位素,对油气性质和储层类型均有较强的敏感性,连续测量的数据能够精细刻画页岩油储层和油气性质,对比YYP1井示踪剂显示的初期每段产油贡献率,分析准确率较高,推广应用前景好。

参 考 文 献

[1] 王永诗,张顺. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系深层

优质储层形成机制[J]. 石油实验地质,2023,45(1):11-19.
WANG Yongshi, ZHANG Shun. Formation mechanism of high-quality reservoirs in deep strata of Paleogene, Bonan Subbasin, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment,2023,45(1):11-19.

[2] 张家政,朱地,慈兴华,等. 湖北宜昌地区鄂阳页2井牛蹄塘组和陡山沱组页岩气随钻碳同位素特征及勘探意义[J]. 石油学报,2019,40(11):1346-1357.

ZHANG Jiazheng, ZHU Di, CI Xinghua, et al. Characteristics of carbon isotope while drilling and exploration significance of shale gas in Niutitang and Doushantuo formation in well Eyangye-2, Yichang, Hubei, China[J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(11):1346-1357.

[3] 牛强,张焕旭,朱地,等. 川东南五峰组—龙马溪组页岩气录井碳同位素同位素特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学,2020,31(9):1294-1305.

NIU Qiang, ZHANG Huanxu, ZHU Di, et al. Mud gas isotopic logging of Wufeng - Longmaxi shale in southeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020,31(9):1294-1305.

[4] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学,1993,2(3):1-40.

DAI Jinxing. Carbon and hydrogen isotope characteristics and identification of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience,1993,2(3):1-40.

[5] 高玉巧,高和群,何希鹏,等. 四川盆地东南部页岩气同位素分馏特征及对产能的指示意义[J]. 石油实验地质, 2019,41(6):865-870.

GAO Yuqiao, GAO Hequn, HE Xipeng, et al. Methane isotope fractionation characteristics of shale gas and its significance as a productivity indicator[J]. Petroleum Geology and Experiment,2019,41(6):865-870.

[6] 孟强,王晓锋,王香增,等. 页岩气解析过程中烷烃碳同位素组成变化及其地质意义——以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南部长7页岩为例[J]. 天然气地球科学,2015,26(2):333-340.

MENG Qiang, WANG Xiaofeng, WANG Xiangzeng, et al. Variation of carbon isotopic composition of Alkanes during the shale gas desorption process and its geological significance: A case study of Chang 7 shale of Yanchang formation in Yishan slope southeast of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2015,26(2):333-340.

[7] XIA X Y, TANG Y C. Isotope fractionation of methane during natural gas flow with coupled diffusion and adsorption/desorption[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012,77:489-503.

(返修收稿日期 2023-04-11 编辑 卜丽媛)