

涠西南凹陷页岩油碳同位素录井特征分析

郝为^① 耿恒^① 王瑞科^① 李行^② 瞿煜扬^②

(^①中法渤海地质服务有限公司; ^②苏州冠德能源科技有限公司)

摘要 随着录井技术的发展,碳同位素录井已经成为油气勘探常用的手段之一。围绕涠西南凹陷页岩油区开展的碳同位素录井工作,旨在有效评估不同层位页岩油气的成熟度及成因。采用碳同位素录井获取钻井液气的同位素组成,结合不同构造位置的探井特征进行对比分析,同时通过监测岩屑罐顶气的同位素分馏特征和岩屑放气量变化,评估页岩的孔隙发育程度及其含油气特征。研究发现涠西南凹陷油页岩夹层和互层段碳同位素偏重,分析认为是由于深部高演化油页岩生烃产物的充注导致,进而明确了北部湾盆地涠西南凹陷页岩油的有利储集层位,为后续油气勘探的部署提供了指导。

关键词 页岩油 碳同位素录井 钻井液气 岩屑罐顶气 有利储层

中图分类号:TE 132.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1672-9803.2024.04.006

Analysis of carbon isotope logging characteristics of shale oil in Weixinan Sag

HAO Wei^①, GENG Heng^①, WANG Ruike^①, LI Hang^②, QU Yuyang^②

^①China France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

^②Suzhou Grand Energy Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215129, China

Abstract: As mud logging technology advances, carbon isotope logging has emerged as a prevalent technique in oil and gas exploration. The carbon isotope logging carried out around the shale oil zone in Weixinan Sag aims to effectively assess the maturity and origin of shale oil and gas in different horizons. Carbon isotope logging is used to obtain the isotopic composition of drilling fluid gas, and the carbon isotope logging characteristics from exploration wells at diverse structural positions are compared and analyzed. Meanwhile, by monitoring the isotopic fractionation characteristics of the cuttings headspace gas and volume changes in gas released from cuttings, the pore abundance and the characteristics of oil-gas potential for the shale are assessed. The carbon isotopes being a heavy trend within intercalated beds and interbeds for the oil shale in Weixinan Sag could be attributed to the charging of hydrocarbon generation products from deeply buried and highly evolved oil shale. The above results have identified the favorable reservoir horizons for oil and gas in Weixinan of Beibu Bay Basin, providing practical guidance for the deployment of follow-up oil and gas exploration.

Key words: shale oil, carbon isotope logging, drilling fluid gas, cuttings headspace gas, favorable reservoir

引用:郝为,耿恒,王瑞科,等.涠西南凹陷页岩油碳同位素录井特征分析[J].录井工程,2024,35(4):32-38.

HAO Wei, GENG Heng, WANG Ruike, et al. Analysis of carbon isotope logging characteristics of shale oil in Weixinan Sag[J]. Mud Logging Engineering, 2024, 35(4):32-38.

0 引言

涠西南凹陷位于南海西部北部湾盆地,是在古近系基底地层基础之上发育的一个以新生代沉积为主的断陷湖盆。湖盆中心藻体繁盛,以厚层湖相暗色泥页岩和油页岩为主要烃源岩,具有优越的烃源岩条件^[1]。中海油湛江分公司在涠西南凹陷开展

了国内首次海上页岩油勘探并取得成功,表明涠西南凹陷具有良好的页岩油勘探潜力。根据岩性类型、单层砂体厚度以及砂地比可将涠西南凹陷油页岩层划分为基质型、纹层型、夹层型、互层型。不同的层位具有不同的物性、孔隙特征、有机质含量和成熟度,因此在油气的储存空间和可动性上也存在明显的区分^[2]。这些油气变化特征在碳同位素特征

郝为 工程师,1984年生,2015年毕业于东北石油大学地质工程专业,硕士学位,现在中法渤海地质服务有限公司从事录井装备技术管理工作。
通信地址:300450 天津市经济开发区信环西路19号天河科技园1号楼3层。电话:13502101191。E-mail:haowei@cfbgc.com

上也有相应的响应。

碳同位素录井是近年来得到广泛应用的一项录井技术。在随钻过程中,使用色谱—红外光谱联用碳同位素分析仪,可实现高分辨率实时检测钻井液气等样品中 C_1-C_6 的各种含碳化合物的浓度和碳同位素值。根据钻遇碳同位素的组成以及变化特征,能够现场快速判断钻遇烃类的成因及成熟度^[3]。此外,通过岩屑罐顶气等手段能够从烃类赋存角度指示页岩油的有利储层位置。基于涪西南凹陷中地理位置临近的4口页岩油井(A、B、C、D井)碳同位素录井技术的应用,通过对碳同位素录井数据的分析,进而研究页岩内部烃类富集规律,揭示页岩油有利储集层位。

1 碳同位素录井技术简介

碳同位素录井技术是一种在油气勘探开发现场快速、连续、准确、经济地获取同位素信息的新颖录井技术。这项技术在确定油气成熟储层与烃源岩的关系、区分油气混合来源方面尤为重要,其起源可以追溯到20世纪90年代^[4]。碳同位素录井发展初期是采用在钻井现场批量采集钻井液气并送回实验室分析的方式,以此来研究天然气成因、判断储层封闭性和识别断层构造^[3]。然而,此方法存在数据密度有限和反馈不及时的问题。并且,样品在储存过程中可能因气密性等因素导致同位素再分馏,从而影响数据质量。因此,在线同位素分析设备应运而生。各大油服企业、仪器公司相继研发出同位素录井设备,如斯伦贝谢的子公司地质服务公司开发出一款实时甲烷碳同位素录井仪器^[5-7],苏州冠德能源科技有限公司开发出一款色谱—红外光谱联用碳同位素分析仪,均实现了碳同位素的在线分析。

本文采用的碳同位素录井仪器为苏州冠德能源科技有限公司自主研发生产的色谱—红外光谱联用碳同位素分析仪,可实现高分辨率快速检测 C_1-C_6 各种含碳化合物(烷烃、烯烃、一氧化碳、二氧化碳等)的浓度和碳同位素值,其工作原理如下:先通过快速色谱将混合的烃类气体按组分分离,并依次进入氧化池使其燃烧成为 CO_2 ,之后进入中红外激光光谱测量腔室,利用 $^{12}C-O$ 、 $^{13}C-O$ 分子键对激光吸收特征峰不同的原理,实现碳同位素的测

量。实际工作中,将脱气器中脱出的烃类气体导入碳同位素分析仪中,实现气体样品碳同位素的自动测量。同一个气体样品经过色谱分离后可分别测出甲烷、乙烷、丙烷的碳同位素值,根据需求还可调整测量组分实现从 C_1 到 nC_6 、 iC_6 的测量,随测量组分的不同,单个样品的测量周期为1~5 min。

碳同位素录井技术的发展为油气勘探提供了全新的数据来源和数据解释方法,对于复杂地质条件下,如页岩、碳酸盐岩和断层带,油气藏的发现和检测具有重要意义。随着碳同位素录井技术的不断进步和应用的扩展,其将在油气勘探开发中发挥更大的作用。

2 碳同位素录井特征分析

A、B、C、D井均位于涪西南凹陷西区一号断裂带下降盘A洼西区。该区域整体是由北东、北西向断层形成的大型断块,包括东、中、西3块,自下而上发育流沙港组三段上层序湖侵早期、晚期互层型页岩油,流沙港组二段下层序湖侵早期夹层型、湖侵中期纹层型和湖侵晚期基质型页岩油。

2.1 钻井液气碳同位素剖面特征

地层中钻井液气以钻头破碎气为主,其碳同位素值近似于地层赋存天然气的真实碳同位素值,因此可以用来分析原地赋存天然气的碳同位素值特征^[8-9]。D井处在4口井的核心位置,其碳同位素演化信息具有典型代表性,结合地质录井深度数据、分层数据、岩性数据、随钻测井数据等,以D井多组分碳同位素录井剖面为例(图1),分析其揭示的油气地质信息。

目前,利用组分和碳同位素组成数据可以有效判断天然气的成因。戴金星等^[10]根据母质类型将有机成因天然气划分为油型气和煤型气。油型气和煤型气在乙烷和丙烷的碳同位素组成上有明显的区分,油型气的乙烷碳同位素值($\delta^{13}C_2$) $< -28.8\%$ 、丙烷碳同位素值($\delta^{13}C_3$) $< -25.5\%$;煤型气的 $\delta^{13}C_2 > -25.1\%$ 、 $\delta^{13}C_3 > -23.2\%$ 。根据演化程度,有机成因天然气可以划分为生物气、热解气和裂解气^[11]。其中,生物气以甲烷为主,甲烷的含量大于95%,并且其碳同位素在各类天然气中具有最轻的特征,一般将甲烷碳同位素值($\delta^{13}C_1$) $< -55\%$ 划分为生物气^[12]。热解气和裂解气都属于

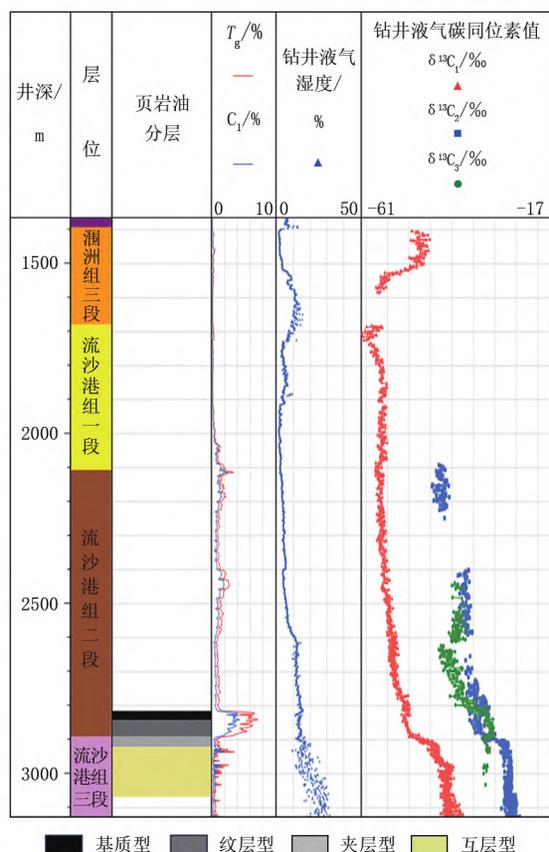


图1 涪西南凹陷D井多组分碳同位素录井剖面

热成因气，一般将 $\delta^{13}C_1 > -50\text{‰}$ 的天然气划分为热成因气，而且甲烷碳同位素随着成熟度的增加而增大，又可以根据成熟度将热成因气进行细分： $\delta^{13}C_1$ 在 $-50\text{‰} \sim -42\text{‰}$ 之间为成熟气、 $\delta^{13}C_1$ 在 $-42\text{‰} \sim -35\text{‰}$ 之间为高熟气、 $\delta^{13}C_1 > -35\text{‰}$ 为过熟气^[13]。

D井碳同位素录井剖面整体特征为：

(1) 1400.00~1500.00 m 涪洲组三段上层，气体组分以甲烷为主， $\delta^{13}C_1$ 稳定在 $-50\text{‰} \sim -45\text{‰}$ 之间，乙烷、丙烷浓度较低，未测得有效的碳同位素值，湿度低于2%。利用碳同位素判断天然气成因，该段气体属于成熟热成因气。

(2) 1500.00~1700.00 m 井段， $\delta^{13}C_1$ 值由 -50‰ 左右迅速变轻至 -60‰ 左右，由于乙烷、丙烷浓度较低，未测得有效的碳同位素值。该段符合生物气的特征，同位素变化表现出从热成因气向生物成因气转变的过程。

(3) 1700.00~2900.00 m 井段， $\delta^{13}C_1$ 值由 -60‰ 左右逐渐变重至 -50‰ ， $\delta^{13}C_2$ 在 $-45\text{‰} \sim -32\text{‰}$ 之间， $\delta^{13}C_3$ 在 $-43\text{‰} \sim -31\text{‰}$ 之间，该段气藏符合油型气特征。以油型气 $\delta^{13}C_1 - R_o$ 回归模

型^[13]计算得到该段成熟度 $R_o < 0.5\%$ ，结合上段气藏特征判断，该段为由生物气逐渐过渡为非生物成因降解产生的未熟油型气。

(4) 自2900.00 m至井底， $\delta^{13}C_1$ 值由 -50‰ 迅速变重至 -42‰ 左右，底部达 -34‰ 左右，同时 $\delta^{13}C_2$ 值变重至 -27‰ 左右， $\delta^{13}C_3$ 值为 -32‰ 左右，湿度为20%左右，符合油型气特征。以油型气 $\delta^{13}C_1 - R_o$ 回归模型^[13]计算得到该段成熟度 $R_o > 1\%$ ，天然气主要为成熟油型气并逐渐过渡到高熟油型气。

2.2 页岩油气碳同位素演化分析

碳同位素录井技术除了可以利用碳同位素组成和组分特征，判断每段页岩油气的成因类型外，还可以通过纵向上碳同位素的演化规律来判断气藏是否存在上下层间充注和扩散行为。对纵向剖面进行总体观察，可以发现A、C、D井钻井液气碳同位素剖面有一个显著的共性：基质型和纹层型碳同位素值偏轻，互层型偏重，而夹层型为碳同位素快速变化的过渡段，甲烷碳同位素值在20 m内变化幅度超过5%，这种特征显然非演化程度所导致，而在B井中此变化特征并不明显(图2)。

结合4口井所处构造部位及成藏模式(图3)分析可以发现，A、C、D井处在构造高位且断层发育；而B井所处构造位置埋深较深未见明显的断层。由此认为处在相对构造高部位的A、C、D井互层段碳同位素的快速变重是受深部高演化烃类充注导致，而B井本身所处位置较深，且远离断裂，更深层充注特征不明显。

为进一步确定夹层段碳同位素的突然变重是否由深层充注导致的，对邻近井基质、纹层、夹层、互层段的天然气进行了对比研究。同位素和组分分析是目前研究天然气成因的有效手段^[13]。因此，通过碳同位素数据及组分数据(湿度)投点分析演化特征以判断4口井的基质、纹层、夹层、互层段天然气的成因联系(图4)。

对比发现处在构造高位的A、D井互层段碳同位素特征相似并与埋藏较深的B井基质段碳同位素特征相近，湿度也表现出相似的特征，这进一步说明处在构造高位的A、D井互层段甲烷碳同位素突然变重可能是由处于构造低位、演化程度更高的甲烷沿断层充注导致的。

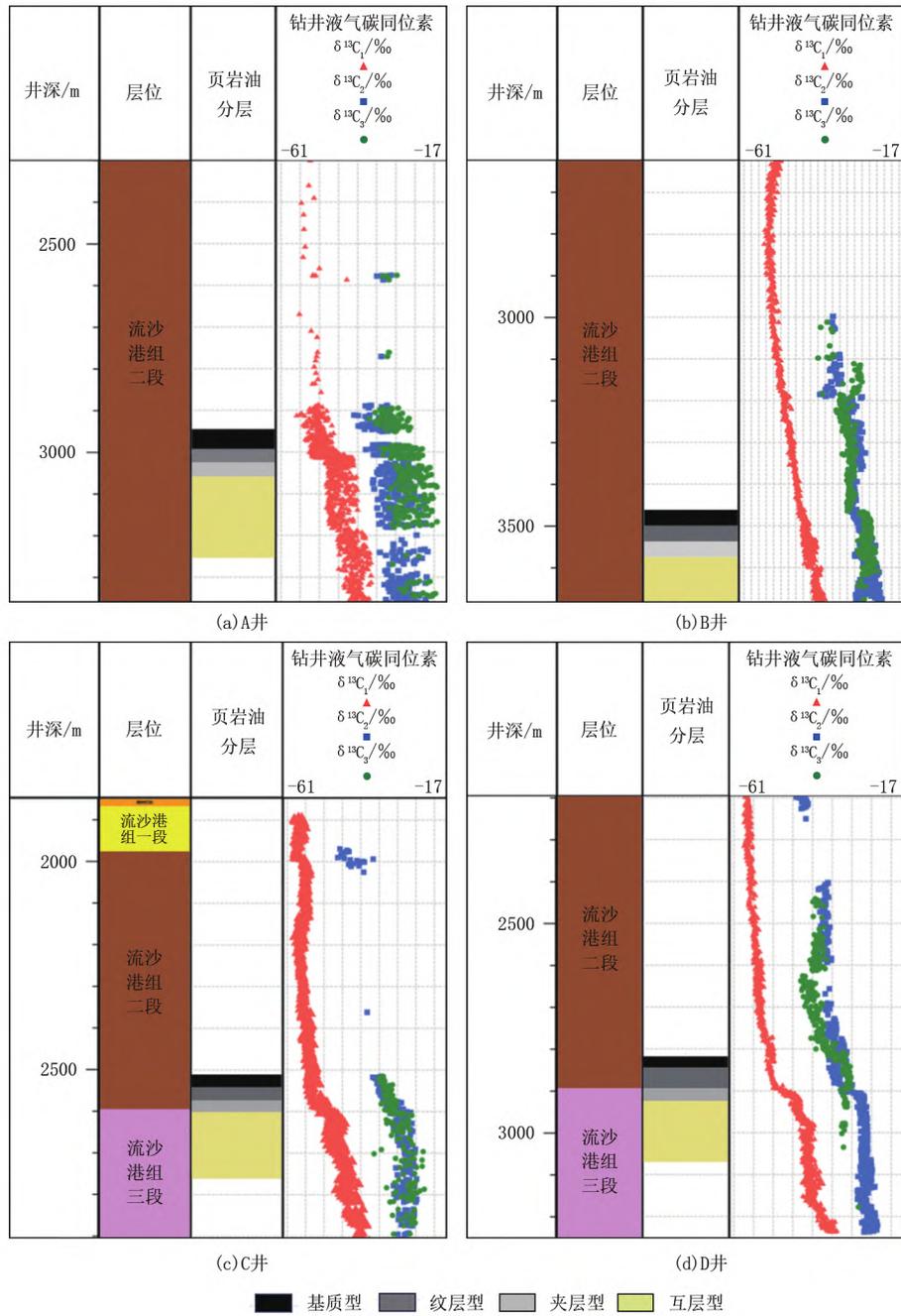


图 2 A、B、C、D 井储层段钻井液气碳同位素剖面

2.3 岩屑罐顶气碳同位素特征及放气量分析

岩屑放气过程中碳同位素的分馏程度与分馏速度受气体原始赋存压力和纳米运移通道通畅度的控制,因而可以通过岩屑放气过程的碳同位素变化曲线来反演地质甜点属性^[14]。图 5 为 A、C、D 井岩屑罐顶气碳同位素剖面,以具有典型代表性的 D 井为放气速度和分馏变化的分析对象。

D 井 1 至 4 小层气测量差距不大。但是 1 小层上部较其下层段岩屑罐顶气相对于实时录井测得

的钻井液气中的碳同位素分馏间距更小,在岩屑罐顶气放置 1 d 和 3 d 之后的放气量相较于其他层位更大,且 1 d 和 3 d 的放气量差值也较大,表明 1 小层出气速度较慢、出气更难,具有一个缓慢放气的过程;2 小层和 3 小层的分馏间距和放气量整体差异不大,1 d 和 3 d 的放气量差值处在上下层位的中间位置;4 小层分馏间距相对其他层位大,但放气量逐渐降低,说明岩屑在取出之后有一个快速放气的过程,导致 1 d 和 3 d 之后可放气量非常低,且 1 d 和

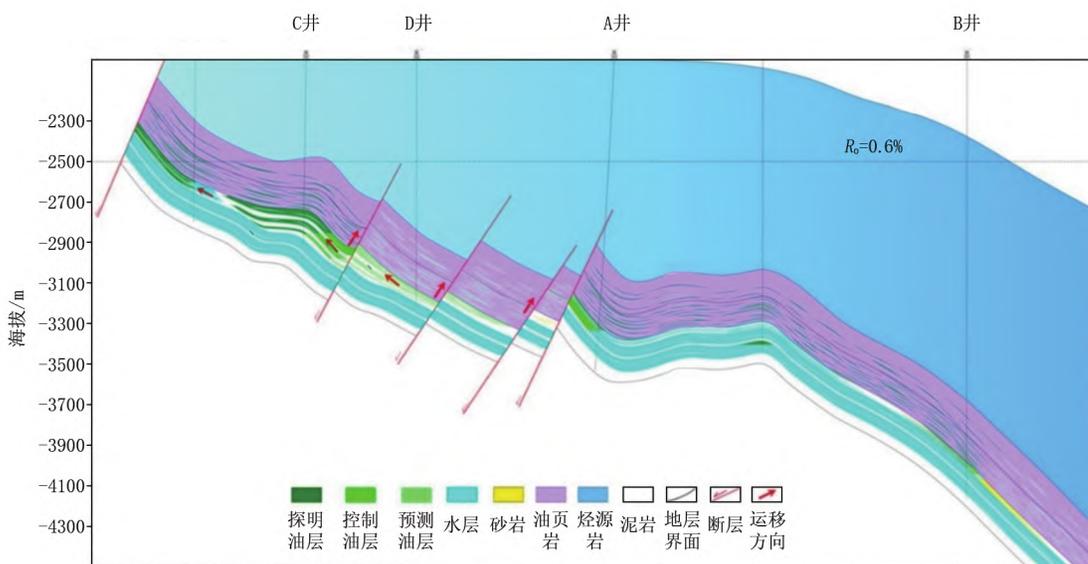


图3 A、B、C、D井构造部位及成藏模式

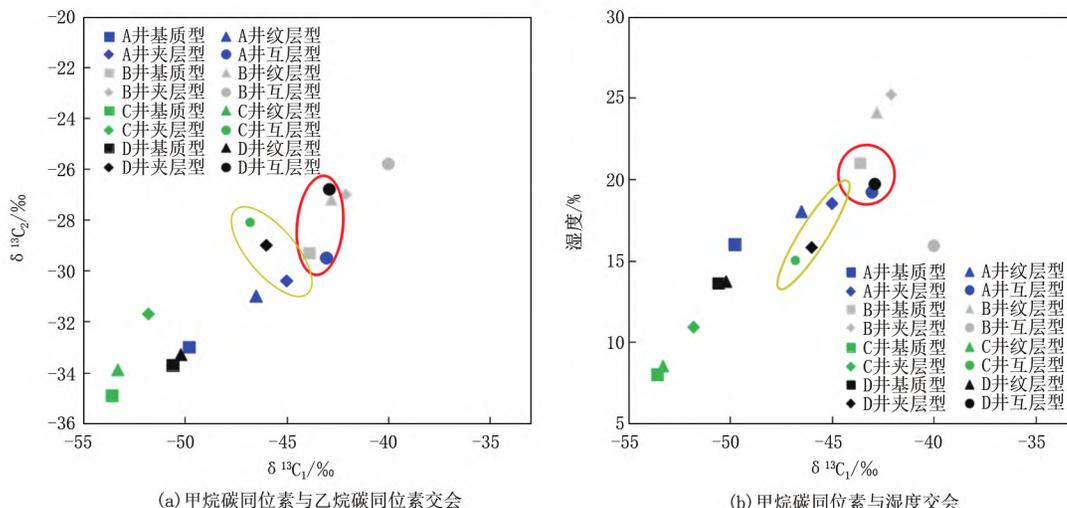


图4 A、B、C、D井碳同位素与组分投点

3 d的放气量也比较接近,这也间接说明了该部分层位具有良好的孔隙结构,可能与岩屑中砂质占比增加有关;5小层及之后的岩层,1 d和3 d后岩屑罐顶气的放气量较低,这一方面与岩层总含气量较低相关,另一方面可能与岩层物性相关。

整体来看,各小层岩屑放气的碳同位素分馏程度、实际放气量同范彩伟等^[2]研究所得到的各层位的物性及总气量基本对应。1小层属于基质型,孔隙空间发育较差,一般小于2 nm,放气速度较慢;2小层也属于基质型,但整体放气速度和属于纹层型的3小层放气速度差别不大,可能是基质型层位和纹层型层位整体放气差距不是特别显著,加之测量

误差的影响而未得到明显的区分;3小层和4小层属于纹层型,孔隙空间在10~50 nm之间,放气速度相对于其他层位居中;5小层和6小层属于夹层型,其中发育有砂岩薄夹层,孔隙空间较为发育,部分孔隙半径大于50 nm,放气能力强且总含气量较低,因而1 d和3 d后岩屑中可见的放气量非常低。

与邻井对比分析(图5)可见,D井基质段和纹层段岩屑罐顶气碳同位素分馏间距平均为7.5‰、C井基质段和纹层段岩屑罐顶气碳同位素分馏间距平均为7.3‰、A井基质段和纹层段岩屑罐顶气碳同位素分馏间距平均为13‰,分馏间距的大小依次为A井>D井>C井。从放气量来看,D井岩屑

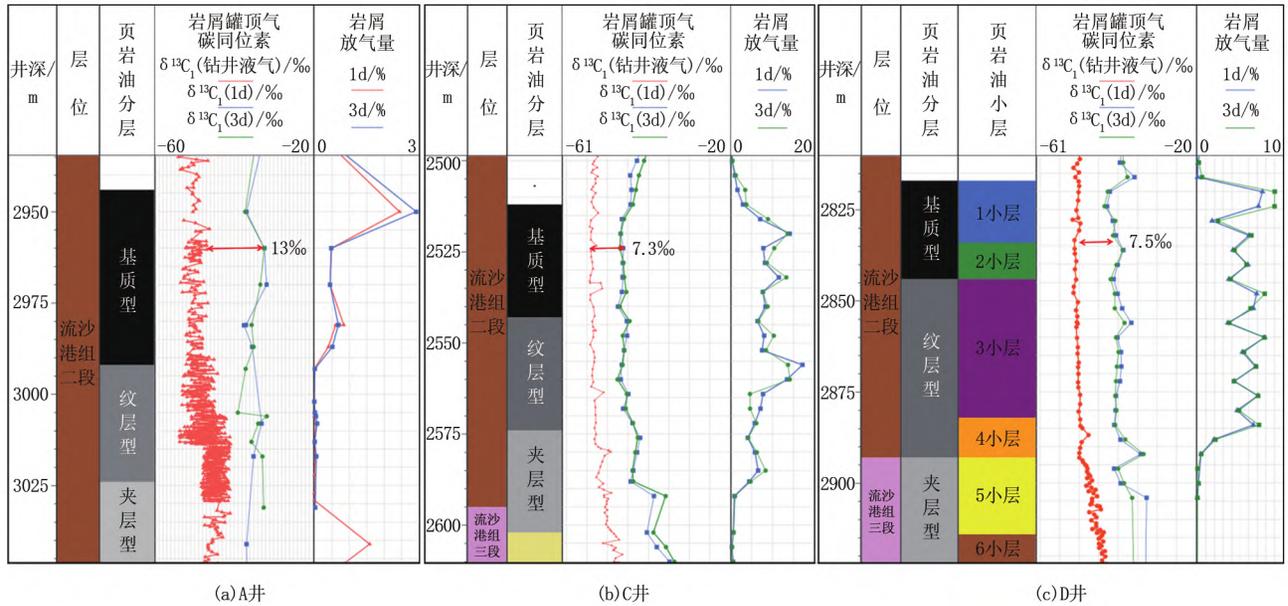


图5 A、C、D井岩屑罐顶气碳同位素剖面

放气量平均在5%左右,C井岩屑放气量平均在10%左右,A井岩屑放气量小于3%,放气量大小依次为A井<D井<C井。分馏间距和放气量特征反映了气体释放的难易程度,由易到难依次为A、D、C井,这也与其所处构造部位和埋深情况具有较好的对应关系,埋藏越深,演化程度越高,烃类越易于释放。

总体来看,通过钻井液气碳同位素录井,对各段天然气的成因和成熟度进行判断发现,A、C、D井夹层段碳同位素快速变重,并非演化所致,而是可能受到了充注作用的影响。通过连井对比发现,A、D井夹层段下部的互层段天然气可能来自B井基质段的充注;通过对岩屑罐顶气放气量和碳同位素分馏程度的研究发现D井5、6小层所在的夹层段放气能力强,孔隙空间较好。综合多方面的研究结果,认为夹层型和互层型页岩具有较好的油气储存空间,可以作为涪西南凹陷勘探的首选层段。

3 结论

(1)基质型和纹层型页岩油储层段的天然气碳同位素偏轻,而夹层型和互层型储层段的碳同位素偏重,分析表明二者在演化程度和烃类来源上存在差异。前者的油气主要为自生自储,而后者的油气可能来源于深部高演化油页岩生烃产物的充注,这种充注会导致夹层过渡段的同位素变化幅度显著

增加。因此,在油气勘探过程中,可以将碳同位素变化幅度作为判断是否进入油气储层钻探层位的参考。

(2)油页岩段的岩屑罐顶气碳同位素分析表明,D井1小层所在基质型页岩层出气相对更难,2到4小层顶部所在的基质型岩层和纹层型岩层整体差异不大,5、6小层所在的夹层型岩层放气能力强,孔隙空间较大,物性相对较好,说明夹层型岩层相对于基质型和纹层型岩层具有较好的储集性。同时,对比邻井,D井气体释放难度低于C井,高于A井,与其所处构造部位和埋深情况具有较好的对应关系,表明气体释放难度与油页岩演化程度呈负相关。

(3)钻井液气碳同位素录井可快速准确地对页岩气的成因和成熟度进行判断,有效识别油气充注位置;岩屑罐顶气碳同位素和放气量测量可以对相应岩层的纳米孔隙的畅通度进行判断,两者的结合便于快速识别页岩油气的有利储集层位,对确定重点的勘探层位具有较好的指导意义。

参 考 文 献

[1] 郭爱华,孙恒君,杨希冰,等. 北部湾涪州11-D区块石油地质特征及勘探潜力分析[J]. 录井工程,2010,21(1):71-74. GUO Aihua, SUN Hengjun, YANG Xibing, et al. Petroleum geological characteristics and exploration potential analysis of Weizhou 11-D block in Beibu Gulf[J]. Mud

- Logging Engineering, 2010, 21(1): 71-74.
- [2] 范彩伟, 游君君, 周刚. 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组页岩油赋存空间多尺度表征及可动性评价[J/OL]. 地球科学, 1-17[2024-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240408.1503.011.html>.
- FAN Caiwei, YOU Junjun, ZHOU Gang. Occurrence space multi-scale characterization and mobility evaluation of shale oil in Liushagang Formation, Weixinan Sag, Beibuwan Basin [J/OL]. Earth Science, 1-17[2024-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240408.1503.011.html>.
- [3] 牛强, 瞿煜扬, 慈兴华, 等. 碳同位素录井技术发展现状及展望[J]. 录井工程, 2019, 30(3): 8-15.
- NIU Qiang, QU Yuyang, CI Xinghua, et al. Development status and prospects of carbon isotope logging technology[J]. Mud Logging Engineering, 2019, 30(3): 8-15.
- [4] ELLIS L, BERKMAN T, UCHYTIL S. Integration of mud gas isotope logging (MGIL) with field appraisal at Horn Mountain Field, deepwater Gulf of Mexico[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 58(3-4): 443-463.
- [5] HAMMERSCHMIDT S B, WIERSBERG T, HEUER V B, et al. Real-time drilling mud gas monitoring for qualitative evaluation of hydrocarbon gas composition during deep sea drilling in the Nankai Trough Kumano Basin[J]. Geochemical Transactions, 2014, 15(1): 1-15.
- [6] 孙恒君, 黄小刚. 实时同位素录井技术[J]. 录井工程, 2010, 21(3): 1-4.
- SUN Hengjun, HUANG Xiaogang. Real-time isotope logging technology[J]. Mud Logging Engineering, 2010, 21(3): 1-4.
- [7] 袁胜斌, 黄小刚, 汪芯, 等. 实时同位素录井技术应用[J]. 录井工程, 2017, 28(2): 9-12.
- YUAN Shengbin, HUANG Xiaogang, WANG Xin, et al. Application of real-time isotope logging technology[J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(2): 9-12.
- [8] 肖光武, 杨世亮. 碳同位素录井技术在古龙青山口组页岩油中的应用: 以GY 3井为例[J]. 录井工程, 2022, 33(4): 6-12.
- XIAO Guangwu, YANG Shiliang. Application of carbon isotope logging technology in shale oil of Gulong Qingshankou Formation: A case study of well GY 3[J]. Mud Logging Engineering, 2022, 33(4): 6-12.
- [9] 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 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.
- [10] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷一)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- DAI Jinxing, PEI Xigu, QI Houfa. Natural gas geology in China (Volume. 1)[M]. Beijing: Petroleum Press Industry, 1992.
- [11] 宋岩, 徐永昌. 天然气成因类型及其鉴别[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 24-29.
- SONG Yan, XU Yongchang. Origin and identification of natural gases[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 24-29.
- [12] 杨松岭, 张科, 陈景阳, 等. 全球生物气藏分布特征及成藏条件[J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 10-24.
- YANG Songling, ZHANG Ke, CHEN Jingyang, et al. Distribution characteristics and hydrocarbon accumulation conditions of biogenic gas reservoirs all over the world[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(8): 10-24.
- [13] 梁刚, 甘军, 徐新德, 等. 实时碳同位素录井技术在琼东南盆地松涛凸起天然气成因及成藏分析中的应用[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 56-61.
- LIANG Gang, GAN Jun, XU Xinde, et al. Application of real-time carbon isotope logging technology in genesis and reservoir formation of natural gas in Songtao uplift, Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 56-61.
- [14] 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.

(返修收稿日期 2024-11-05 编辑 张鑫)