

IFEDC-20193556

碳同位素录井技术在页岩气勘探与开发中的应用

慈兴华¹, 张立生¹, 牛强¹, 杜焕福¹

1. 中石化胜利石油工程有限公司地质录井公司

Application of carbon isotope logging technology in shale gas exploration and development

CI Xing-hua¹, ZHANG Li-sheng¹, NIU Qiang¹, DU Huan-fu¹

1. Shengli Geologging Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation

Copyright 2019, Shaanxi Petroleum Society

This paper was prepared for presentation at the 2019 International Field Exploration and Development Conference in Xi'an, China, 16-18 October, 2019.

This paper was selected for presentation by the IFEDC Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s). Contents of the paper, as presented, have not been reviewed by the IFEDC Committee and are subject to correction by the author(s). The material does not necessarily reflect any position of the IFEDC Committee, its members. Papers presented at the Conference are subject to publication review by Professional Committee of Petroleum Engineering of Shaanxi Petroleum Society. Electronic reproduction, distribution, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of Shaanxi Petroleum Society is prohibited. Permission to reproduce in print is restricted to an abstract of not more than 300 words; illustrations may not be copied. The abstract must contain conspicuous acknowledgment of IFEDC. Contact email: paper@ifedc.org.

Abstract

The limited adaptability of laboratory carbon isotope detection restricts its application in the well site. The carbon isotopes of continuous gas from degasser and cuttings head space gas were tested in the well site using the laser infrared carbon isotope analyzer developed by Shengli Geologging Company. The carbon isotope results of South China marine shale gas indicated that: (1) the carbon isotope reversal characteristic, which was found in South China marine shale gas samples, was believed to be relevant to the gas generated from the secondary cracking progress in hydrocarbon generation, and pointed out the exploration and development potential of the shale gas in lower Niutitang formation; (2) the relative gas content coefficient and matrix permeability coefficient fitted by the carbon isotope results tested from the head space gas samples in different time series were successfully used to guide the selection of the horizontal section in an actual well's sidetracking and the division of the "sweet spot" section in several actual wells; (3) according to the productivity prediction model, the final recoverable production of the tight reservoir well was predicted, and it was concluded that the carbon isotope prediction model was more suitable for shale gas wells; (4) based on the principle of isotope fractionation and relevant simulation experiments, the selections of secondary fracturing sections in stripper wells were discussed. The analysis and application of in-site carbon isotope data from actual wells proved that carbon isotope logging technology was of great significance and application prospect in shale gas exploration and development.

Key words: Carbon isotope logging; Isotope fractionation; Isotopic reversal; Relative gas content; Matrix permeability; Productivity prediction

摘 要

鉴于实验室检测烷烃气碳同位素的适用条件要求高,无法应用于钻井现场。应用自主研发的激光红外碳同位素分析仪在现场随钻过程中实时连续测试泥浆脱附气和岩屑罐顶气碳同位素。对南方海相页岩气多口井的现场测试数据分析得出:(1)南方海相页岩气均具有碳同位素倒转特征,认为同位素的倒转与生烃演化过程中原油二次裂解产气过程相关,并指出实例井牛蹄塘组下段页岩气具备较好的勘探开发潜力;(2)应用不同时间序列下罐顶气碳同位素拟合的相对含气量系数和基质渗透率系数成功指导了实例井二次水平井穿行层段的选择及多口实例井“甜点”段的划分;(3)通过致密储层实例井产能预测模型得出实例井最终可采产量,认为碳同位素产能预测模型更加适应于页岩气井;(4)依据同位素分馏原理及相关模拟实验对低产井二次压裂进行了探讨。综合实例井现场碳同位素测试数据的分析及应用,认为碳同位素录井技术在页岩气勘探开发中具有重要的指导意义及应用前景。

关键词: 碳同位素录井; 同位素分馏; 同位素倒转; 相对含气量; 基质渗透率; 产能预测

一、前言

烷烃气中含有甲烷、乙烷、丙烷和丁烷四种组分,包含丰富的地质信息^[1],烷烃气稳定碳同位素是天然气成因类型判识、成熟度以及气源对比等应用的重要参数^[2-5]。同位素分馏是稳定碳同位素应用于油气地球化学的理论基础,其发生在生烃演化、运移成藏及生产开发的各个过程中,会造成稳定碳同位素组成的一系列变化^[6-9]。对页岩气而言,储存在低孔低渗的致密泥页岩中,未经历烃源岩排出及二次运移成藏,即同位素没有受到运移分馏作用的影响,因此,页岩气的碳同位素可能具有和常规天然气不同的特征^[10]。国内外学者发现页岩气存在甲烷碳同位素大于乙烷碳同位素的“倒转”现象,并对其成因进行了讨论^[11-13]。Tang 等^[14]与 Xia^[15]等将倒转划分为 4 个阶段,同时认为扩散作用导致了页岩气碳同位素生产过程中变重,变重幅度可达 10%,Gao 等^[16]基于页岩气碳同位素在生产过程中的变化提出了一种预测单井最终可采产量的新方法。上述页岩气碳同位素特征在传统页岩气成因类型判识应用外,还可以进行页岩储层物性和保存条件分析、含气量估算、页岩气“甜点”评价、产能预测及低产井二次压裂等新应用,但需要连续的、实时的碳同位素数据作为基础,然而基于传统实验室质谱检测碳同位素多为单点检测数据及不具有实时性等缺点,无法满足数据应用要求。因此,本文中提出的碳同位素录井技术是应用自主研发的可以部署井场的激光红外碳同位素检测仪(GC-IR²),通过现场实时采集泥浆气和岩屑罐顶气两种样品,检测得到泥浆气和不同时间序列下(12h、24h、48h、72h)的罐顶气碳同位素。在前人研究基础上,结合川东南及鄂西地区实例井现场检测的碳同位素数据进行相关分析及探讨,以期实现碳同位素录井技术在页岩气勘探与开发中发挥作用。

二、稳定同位素特征及意义

2.1 同位素“分馏”模拟及意义

泥浆气为地层岩石被钻头破碎后随泥浆上返的溶解气,反映了原位地层中天然气的碳同位素特征,其可以直接进行天然气(页岩气)成因类型判识等分析。然而,同位素存在分馏作用,前人^[14,15,17,18]通过煤层气岩心解吸实验及相关分馏实验认为同位素分馏不是由质量差造成的,而是由于扩散作用所导致。为进一步了解页岩气生产过程中的分馏作用及影响因素,采用 DGM 模型,假设岩屑气释放过程由一系列纳米管道组成,将放气过程简化为单纳米管中混合气体的输运并设定相应参数(表 1)。孔隙半径越大,达到相同采收率所需时间越少,累积碳同位素值随着采收率增加呈增大趋势,最终逐步接近-30‰,表明岩屑内部所

包含气体碳同位素值和放到罐内是一致的，即气量守恒（图 1-A）。当孔隙半径确定为 $r=2\text{nm}$ ，改变岩屑半径或流动孔隙度得到的曲线基本重合（图 1-B 左），改变流动孔隙度、岩屑半径、迂曲度不会改变曲线的形式，但会影响物理放气时间的长短（图 1-B 中），改变储气孔隙度，会使曲线形式发生改变，由于自由气和吸附气的占比所导致（图 1-B 右）。

表 1 模拟参数值

Table 1 Simulated parameter values

参数	值
绝对温度 T (K)	300
气体 1	C13 甲烷, 17g/mol
气体 2	C12 甲烷, 16g/mol
初始压力 $p_{in}(\text{MPa})$	45
迂曲度 τ	10
初始碳同位素值（真值）（‰）	-30
出口定压（MPa）	0.1
孔隙半径 r （nm）	2, 5, 10, 100
岩屑半径 R （mm）	0.5, 5

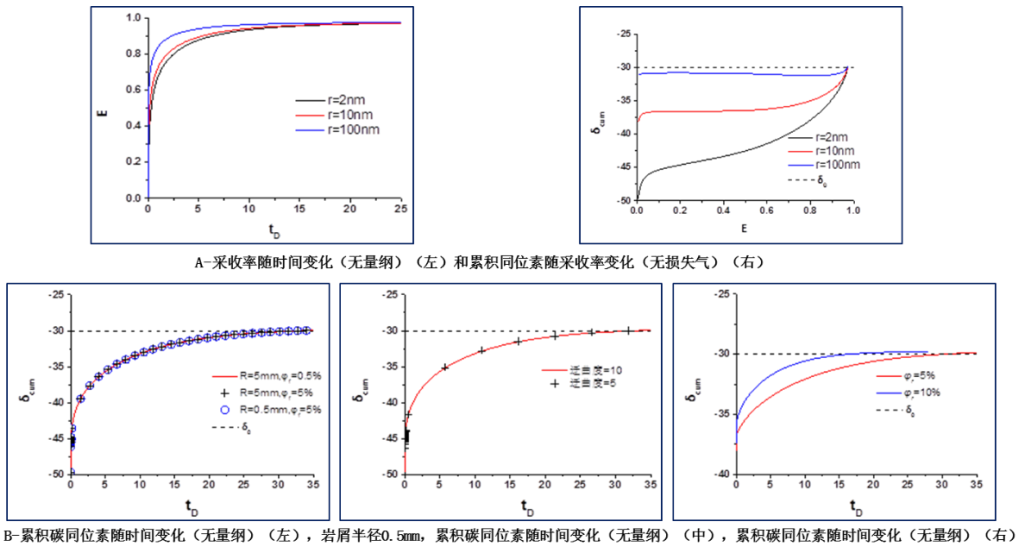


图 1 碳同位素在孔隙半径、岩屑半径等参数不同情况下随时间变化情况

Fig. 1 Carbon isotope variation with time under different parameters such as pore radius and cuttings radius

总含气量包括三个部分：损失气量，解吸气量和残余气量。损失气是指在钻井、提钻直到密封装罐之前逸散的天然气数量，通常为游离气及靠近岩心表面的吸附气。损失气量无法通过实验测量，一般通过计算求取。在计算过程中，岩心解吸测定前的暴露时间这一参数确定尤为重要。USBM 法确定的岩心暴露时间与钻探取心时使用的钻井液的类型有关。当用清水或泥浆钻井时，暴露时间认定为岩心被提升到一半孔深的时刻，即认为岩心被提升到一半孔深时气体开始解吸逸散，在这种情况下，损失气时间为提钻时间的一半加上在地面岩心装入解吸罐之前的处理时间；提钻时间和装罐时间越短，估算的损失气量越准确。如用空气或泡沫钻进时，损失气时间被定义为取心时间、提钻时间和地面岩心装入解吸罐之前的处理时间的总和。设损失时间为 30min，开始测量时间为 1 小时。孔隙半径为 1nm，有损失气存在时，高压时碳同位素值大于低压。而低孔的碳同位素值大于高孔（图 2-A）。调出对应的瞬时碳同位素值，发现早期曲线变化中高孔和低孔曲线出现交叉。而早期的气量非常大，时间 1h 时采收率约达到 60%，所以曲线的这个交叉不能忽略。当有损失气存在时，碳同位素值曲线情况变得复杂（图 2-B）。孔隙半径为 2nm，有损失气时，结

果与 1nm 一致 (图 2-C)。孔隙半径为 5nm, 有损失气时, 曲线没有交叉。碳同位素值满足如下规律: 高压高孔 > 高压低孔 > 低压高孔 > 低压低孔 (图 2-D、E)。

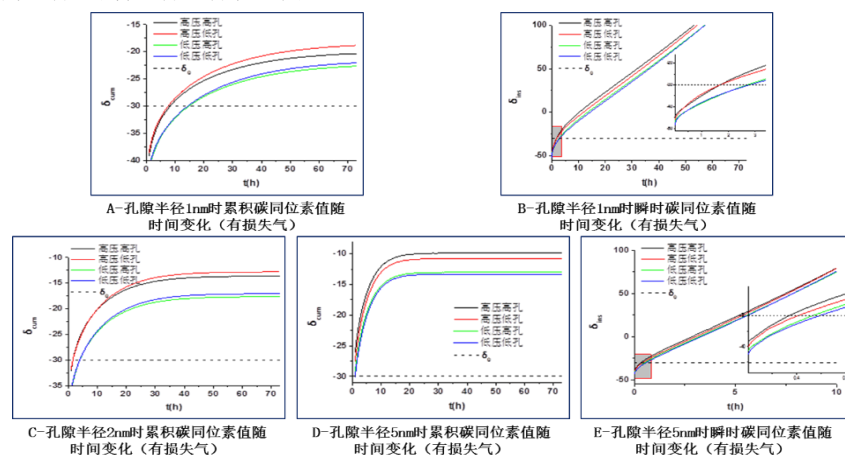


图 2 不同孔隙半径同位素在损失时间模拟参数下的变化情况

Fig. 2 Changes of carbon isotopes under different pore radius conditions (with loss of gas)

通过前人研究及上述模拟实验分析得出: ①页岩气在产出过程中呈现“先轻后重”的变化规律, 孔隙半径越小碳同位素变重的速率越大, 表明初期产量占比低, 稳产阶段产量占比高; ②储气孔隙度越大恢复原位地层气体同位素的时间越短, 表明自由气的占比越高、吸附气占比越低; ③高压时碳同位素值大于低压, 碳同位素值变化规律为高压高孔 > 高压低孔 > 低压高孔 > 低压低孔, 表明同位素的变化规律可以判断地层孔隙压力。

2.2 稳定碳同位素“倒转”特征及成因

同位素“倒转”可分为原生型和次生型^[11,19], 由有机成因烷烃气形成的“倒转”称为次生型, 本文研究对象及所用实例数据均来源于南方海相页岩, 因此这里仅讨论次生碳同位素倒转, 本文均简称为同位素“倒转”。正常情况下, 随着埋深的增加、成熟度的升高, 常规天然气的烷烃气碳同位素会逐渐变重, 然而在成熟度较高的 Barnett 页岩、Fayetteville 页岩及 Woodford 页岩中出现乙烷碳同位素轻于甲烷碳同位素的“倒转”现象^[12,13]。Tilley 等^[13]认为在生烃演化过程中, 成熟度 R_o 大于 2.2% 以上时, 液态烃裂解产生较轻的乙烷碳同位素, 造成同位素“倒转”。Tang 等^[14]与 Xia^[15]等总结得出高成熟干酪根裂解气 (甲烷为主) 偏重、偏干与液态烃裂解气 (乙烷、丙烷为主) 偏轻、偏湿混合导致了同位素“倒转”现象。同时, 他们建立了泥页岩中液态烃和干酪根裂解气碳同位素随生烃过程变化的 4 个阶段模式: ①未熟、低熟阶段, 几乎不存在液态烃裂解气, 烷烃气碳同位素随成熟度增大而逐渐变重; ②进入成熟、高熟阶段, 液态烃生成、裂解气增多, 乙烷碳同位素值逐渐变轻; ③随成熟度进一步升高, 液态烃裂解气贡献增大, 出现“倒转”; ④成熟度继续加大 (以过成熟阶段为主), 液态烃裂解气减少, 甲烷单体烃含量增多, 碳同位素回归到正常演化趋势 (图 3)。综合分析, 同位素“倒转”现象与液态烃二次裂解产气过程关系密切, 同时可以反映页岩储层压力变化。

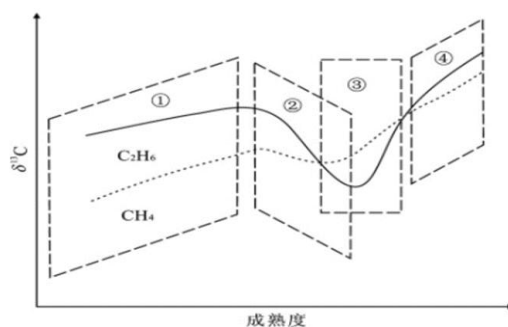


图 3 甲烷和乙烷碳同位素随成熟度变化图^[15]

Fig.3 A complete trend of maturity-dependent $\delta^{13}C_1$ and $\delta^{13}C_2$ variation

三、碳同位素录井技术应用

3.1 泥浆气同位素“倒转”及页岩气勘探开发主力层系优选

同位素“倒转”与液态烃二次裂解产气过程相关，Zumberge 等^[12]认为在同位素发生“倒转”现象时，小分子气体含量增多，在页岩封闭空间内体积增大，导致压力升高。Tilley 等^[13]认为同位素的“倒转”现象反映了页岩储层较好的封闭、保存条件，含气量相对较高。基于同位素“倒转”成因及前人研究，确定了中扬子区黄陵背斜与秭归向斜构造带 EYY2HF 井区下寒武系牛蹄塘下亚段页岩储层为勘探开发潜力层。

EYY2HF 井牛蹄塘页岩段存在甲烷碳同位素随深度增加逐渐变轻的“倒转”特征，并且在不同深度段（2950-3000m 与 3000-3060m）存在“倒转”幅度差别，同时存在乙烷碳同位素轻于甲烷碳同位素的“倒转”特征（图 4）。EYY2HF 井牛蹄塘页岩气碳同位素发生“倒转”，属于 Xia 等总结的同位素“倒转”第三阶段（图 5 左），并构成了一个完整的同位素倒转演化序列。同时，与成熟产区 Fayetteville 页岩对比，EYY2HF 井牛蹄塘页岩气甲、乙烷碳同位素都要偏重一些，湿度偏大一些，但不能认为其演化程度比 Fayetteville 页岩高（图 5 右）。牛蹄塘页岩有机质碳同位素本身有可能重于 Fayetteville 页岩，因此在相近的演化阶段，其产物的甲、乙烷碳同位素都要重于后者，但同样需要更多的证据予以证明；其次，在相近的演化阶段，牛蹄塘页岩气湿度大可能表明其二次裂解气占比更高，二次裂解气中的干酪根裂解气与原油裂解气由于来源母质不同，其天然气组分存在一定差别，Prinzhofer 等^[7]通过实验发现，乙烷与丙烷组分比值在干酪根裂解中几乎保持为常数，而在原油裂解中，该比值激增。与此相反，甲烷与乙烷组分比值在干酪根裂解气中逐渐增加，而在原油的裂解气中几乎保持为常数。EYY2HF 井牛蹄塘页岩段 3000m 上下页岩气甲烷碳同位素分段特征明显，3000-3060m 深度段内甲烷/乙烷值及湿度更大表明为明显的原油二次裂解气特征（图 4）。

依托于现场、实时、连续的碳同位素检测数据及以上分析：2600-2950m 段灰岩和灰质砂岩储层，本身无生烃能力，天然气来自下覆页岩，生油窗时以油相充注，后裂解成气，碳同位素较轻；2950-3000m 深度段页岩，TOC 较高，具一定生烃能力。测井解释其物性好于下覆页岩段，且靠近上覆灰质砂岩，越靠近上部排烃效率越好，碳同位素越重；3000-3060m 深度段较致密，且其上有页岩封闭，下有致密灰岩阻挡。排油效率较低，导致其碳同位素偏轻。3060-3070 段，页岩与灰岩过渡区域，可能为液态烃类滞留区，故 C₁ 碳同位素值更轻（图 4）。综上分析，黄陵背斜牛蹄塘组目前还属于较新的页岩气勘探层系，该层系页岩气碳同位素的“倒转”及其组分特征，表明牛蹄塘下亚段保存条件较好，生油窗时残留了大量的液态烃类，具备较好的勘探开发潜力。

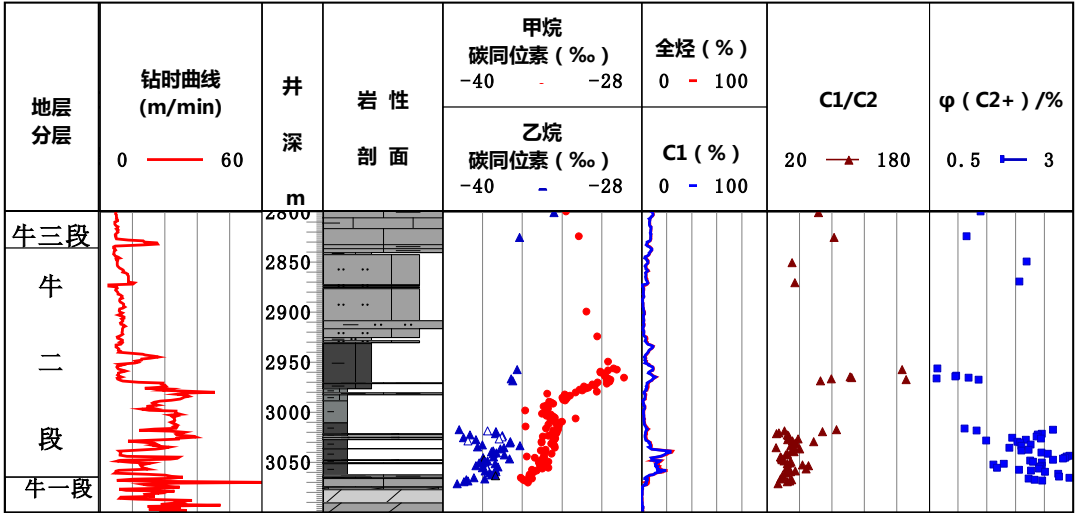


图 4 EYY2HF 井单井评价图

Fig.4 Single well evaluation chart of EYY2HF well

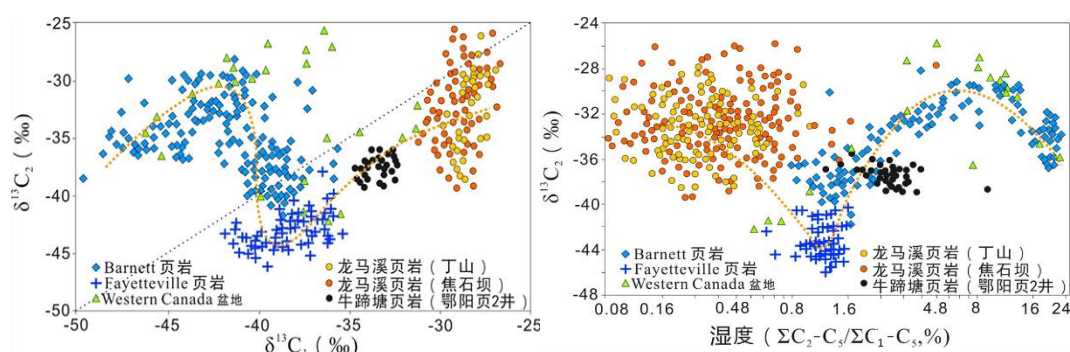


图 5 EYY2HF 井牛蹄塘页岩气甲烷、乙烷碳同位素交会图 (左); 乙烷碳同位素与湿度交汇图 (右)

Fig. 5 Intersection diagrams of methane and ethane carbon isotopes of Niutitang shale gas in EYY2HF well (left);

Intersection diagrams of ethane carbon isotopes and humidity (right)

3.2 罐顶气碳同位素特征及页岩气“甜点”判识

本次研究中对岩屑罐顶气进行了时间序列的测量, 试图通过连续深度岩屑样品解吸气的碳同位素变化特征, 来分析页岩气的地质甜点属性特征。罐顶气碳同位素在时间序列下产生变化主要是运移分馏效应所导致的。岩屑的放气是一个不断变化的过程 (图 6): 在放气的前期, 岩屑内部气压较大, 出气速率较高, 出气量也较大, 此时, 岩屑的放气过程比较符合达西渗流的情况, 同位素分馏极为微小; 随着岩屑内部气体压力的降低, 气体运移动力降低, 进入滑脱流阶段, 天然气同位素发生较弱的分馏效应; 当岩屑内部压力继续减小, 分子自由程增大并大于吼道尺寸时, 进入克努森扩算过程, 研究认为在这个过程中同位素发生较强的分馏效应^[25], 同位素分馏的强度取决于克努森数的大小:

$$Kn=\lambda/L$$

其中, λ 为分子自由程, L 为喉道直径。可见气体压力越低、喉道越细小分馏效应越显著。由于岩屑的上返需要一定的时间, 当取到岩屑并封装时, 岩屑的放气过程已基本进入后期, 同位素分馏显著。因此, 可以通过观测岩屑放气过程中的同位素分馏行为, 来分析页岩气的地质甜点特征。

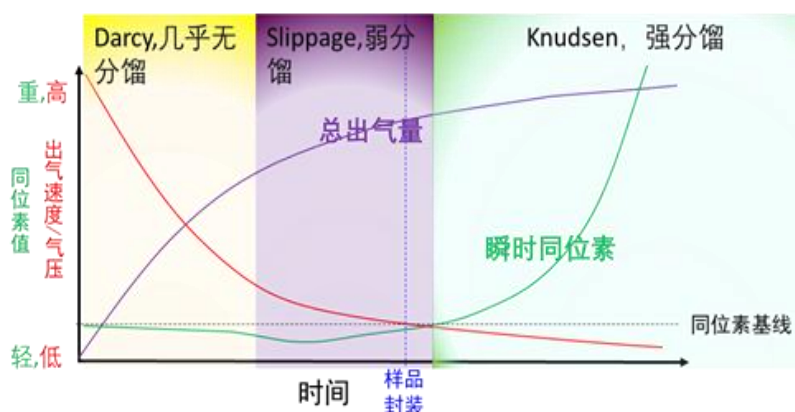


图 6 岩屑气释放过程碳同位素变化示意图

Figure 6. Diagram of carbon isotope changes during debris gas release

EYY2HF 牛蹄塘段岩屑罐顶气碳同位素现场实时检测结果显示: 牛蹄塘段 2950-3000m 的岩屑罐顶气碳同位素值相对于泥浆气差别并不明显, 未发生明显的同位素分馏。而在 3000m 以下岩屑罐顶气碳同位素值则开始明显重于泥浆气, 并且在 3030-3060m 两者的差值达到最大, 72h 的岩屑罐顶气 (累积) 与泥浆气的碳同位素差值在 6% 左右。从岩屑罐顶气碳同位素值随时间序列的变化来看, 其变化速率最大的一段同样也在 3030-3060m, 说明该段岩屑放气过程中碳同位素分馏效应最为明显。而从岩屑最终放气量来看, 放气量最大的区域也恰好在 3030-3060m, 平均放气量能达到 $0.5\text{cm}^3/\text{g}$, 与其上部页岩区域差别明显, 与现场岩心解吸所刻画的页岩含气量特征也存在明显区别 (图 7)。

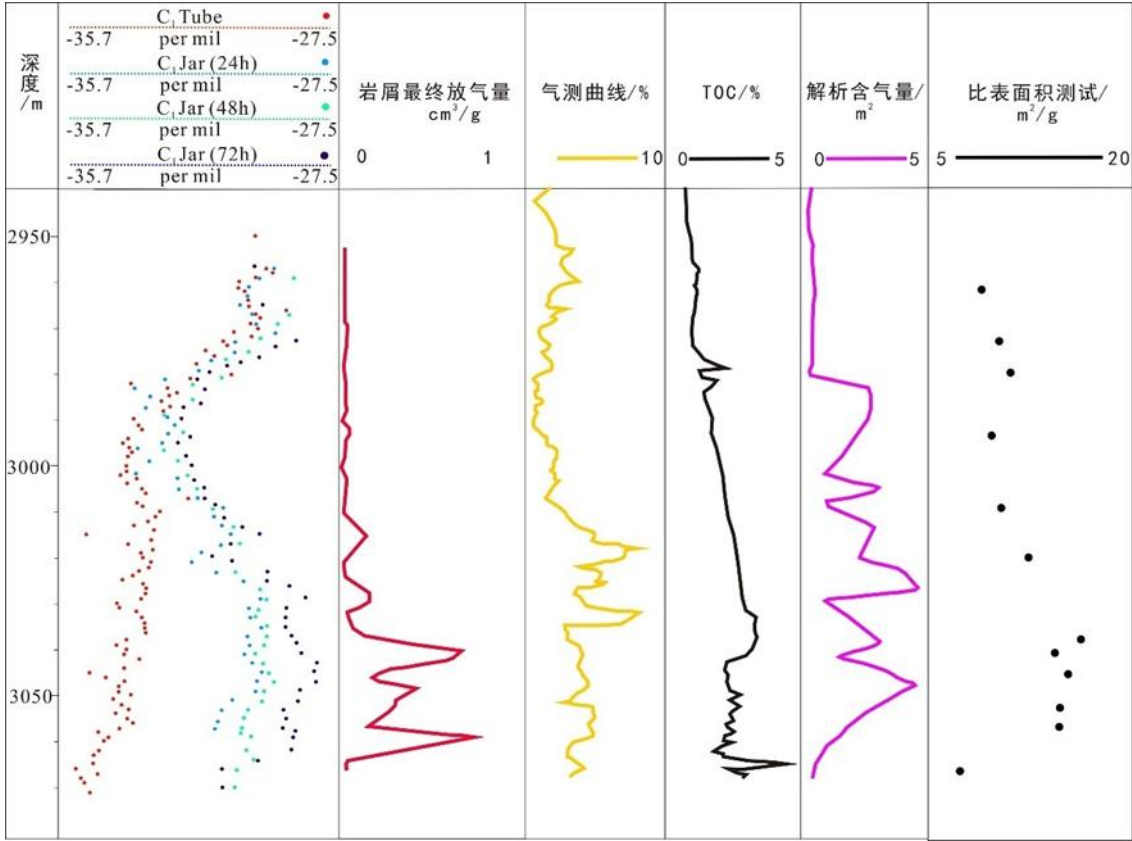


图 7 EYY2 井牛蹄塘段岩屑罐顶气碳同位素分馏特征分析

Fig.7 Analysis and Evaluation Chart of Carbon Isotope Fractionation Characteristics of Cuttings Tank Top Gas in Niutitang Section of Well EYY2

为了进一步解释岩屑释放气同位素分馏的内在机制，按深度序列选取了部分页岩岩屑样品做 N_2 等温吸附测试，以获取其孔隙结构信息。从分析结果可以看出，同位素分馏显著的区域比表面积偏大，二者随深度具有很好的对应关系。前人的研究指出，页岩的比表面积通常取决于其微孔及介孔的所占的比例，纳米孔隙越发育，比表面积越大。结合扩散造成同位素分馏的作用机理，可见，较为发育的纳米孔喉体系是牛蹄塘底部岩屑释放气同位素分馏显著的一个重要原因。考虑到前文基于泥浆气碳同位素做出的液态烃类残留比例的判断，纳米孔隙体系的发育与液态烃类的残留似乎具有较好的对应关系，这可能与液态烃类转化为天然气时所产生的超压保孔作用有关。同时，针对于国内外典型页岩气地层的研究也指出，优质页岩气地层往往都具有较好的纳米级有机孔隙的发育。

同位素分馏显著的区域也是岩屑最终放气量的高值区，集中在 3030-3060m，而岩心解吸含气量高值则出现在 2980-3060m 一个相对宽泛的范围内。分析认为，岩屑与岩心放气特征的差异很可能与页岩的致密程度有关。现场岩心快速解吸的方法是通过升温促进页岩气的释放，以缩短测量时间，往往不会再去破碎岩心测量残余气，因此一些较为致密的区域，会造成实测气量的损失。相对而言，岩屑更小，更利于残余气量的释放，因此，在纳米孔喉较为发育的区域，其残留气量较高。

EYY2HF 牛蹄塘段页岩的甜点指标指示：TOC 的高值点出现在 3030m，其上下 TOC 值逐渐降低但变化幅度较小；岩心解吸含气量高值出现在 2980-3060m 一个相对宽泛的范围内；气测高值则出现在 3010m 之后，最高值段集中于 3020-3035m，三者的判断结论并不统一。因此，将纳米孔喉体系发育程度作为页岩气甜点的判断指标或许是一条可行的研究思路，而岩屑释放气的现场同位素测量则为纳米孔喉发育程度的判识提供了一条简便易行的分析方法。当然，页岩放气速度及释放气体同位素的变化根本上取决于页岩本身的物性特征与页岩气的赋存状态，能否通过释放气的同位素分馏特征来定量页岩气赋存参数（如孔隙压力、含气量、渗透性，等）还有待进一步研究。

3.3 页岩气井产量预测

油气井存在产量递减,其产量递减预测在单井配产及产能控制方面具有重要作用。基于生产数据应用不同的公式进行拟合是最常见的产量递减预测方法。但随着非常规油气的兴起,其产能衰减往往较快,且流动机制复杂,不再局限于粘滞流,美国页岩气井在应用 Arps 公式的评估结果普遍要比实际情形乐观。另外,当生产数据有限或较少时,公式中的相应参数受限较大。Gao 等^[16]应用碳同位素建立了一种新的油气井产量及生产周期预测方法,并成功应用于 Barnett 页岩中一口页岩气井,其应用条件包括实时的甲烷碳同位素数据、开发井连续生产数据及地质、工程基础数据。本文以胜利油田 HG102 井及 HG101-X2 井为例,开展生产过程中的同位素检测和致密砂岩油气产能预测方法研究。

基于同位素分馏原理及模拟实验,产气过程中的甲烷同位素变化存在一个先变轻后变重的过程,将这一拐点作为一个标志点,并定义拐点发生的时间为 $T_{\min}$,对应采收率为 $R_{\min}$ (图 8 左)。控制量变化模拟得出,拐点出现的时间相对孔隙度与渗透率最为敏感,孔隙度越高、渗透率越低拐点出现的时间越靠后。但是考虑在实际的地质情况中,孔隙度与渗透率往往是相互对应的,因此这两者的控制作用会产生抵消。同时,虽然不同控制变量情况下拐点出现的时间会提前或拖后,但是拐点出现时所对应的采收率却分布在 0.043-0.049 这一个较小的范围内 (图 8 右)。

HG101-X2 井 (图 9) 在试采初期,日产油约 3.5 方,但是在自喷阶段其产量下降较快,经过 1 个月左右的时间其日产量递减至 0.5 m^3 。其后经过一周的关井憋压,其产能有所恢复,复产后日产油 2.0 m^3 ,但同样衰减较快。之后经过较长时间关井,下泵升举,但产量依旧不太理想。伴随初次的自喷过程,甲烷同位素表现出变轻的趋势,从最初-41‰变化至关井时刻的-45‰。复产之后的二次自喷试采阶段,甲烷碳同位素值则表现出逐渐变重的趋势,至 2017 年 7 月二次自喷阶段结束,甲烷碳同位素值几乎变回至起始值。采取人工升级措施之后,甲烷碳同位素值则在上次关井的基础上继续变重。从 HG101-X2 井试采过程中的甲烷碳同位素变化特征来看,基本符合数值模拟的结果,在初期存在同位素先变轻后变重的特征。第一次自喷试采结束后,甲烷碳同位素即达到其拐点。根据数值模拟结果,拐点时刻对应的采收率基本处于 0.043-0.049 这一个相对较小的范围。拐点之前的累采油量为 58.5 方,因此预测本井总产量大约为 1193.8 m^3 -1360.5 m^3 。根据生产数据,同时采用 Arps 公式对本井的总产量进行拟合计算,初始产量为 58.5 方,初始递减率为 0.021,拟合计算总产量为 1392.8 m^3 。可见,两种估算方式得到的总产量基本相当。从估算结果及试产表现来看,本井产能较弱,经济效益较差。

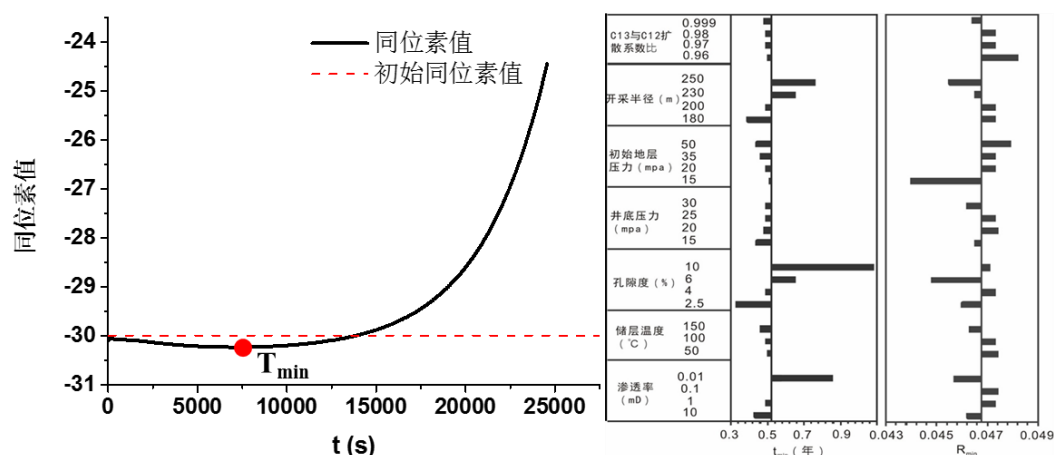


图 8 天然气产出过程同位素模拟 (左) 及拐点时刻地质工程参数模拟 (右)

Fig.8 Isotope simulation of natural gas production process (left); Geological and engineering parameters simulation at inflection point (right)

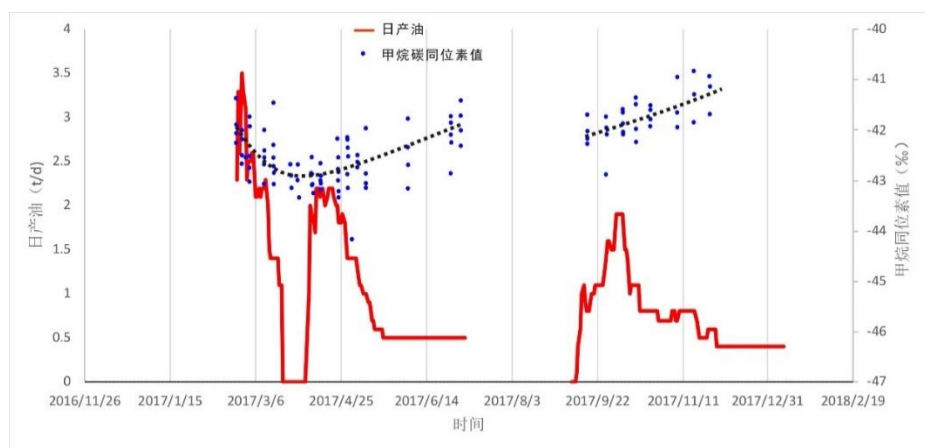


图 9 HG101-X2 井产量及甲烷碳同位素变化特征

Fig. 9 Production and methane carbon isotope variation in well HG101-X2

HG102 井 (图 10) 自喷阶段维持时间较长, 且产量较为稳定, 在超过 3 个月的时间里日产量由 18.5 方递减至 15 方。之后采取人工升举加定量生产的方式, 日产量维持在 15 方左右。在这个过程中, 甲烷碳同位素变化幅度整体较小, 同位素由轻变重的拐点大约出现在 2017 年 3 月初。根据试采情况, 至 3 月 10 号, EYY2HF 大约产油 2263 方, 根据模拟得到的拐点所对应的采收率, 预测本井可采资源产量大约为 5 万方。基于自喷阶段, 同样通过 Arps 公式采用双曲线递减方程预估该井的总产量为 $4 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

综上两个实例井现场检测及计算结果表明应用同位素录井技术预测单井产量是一个方便可行的方法, 同时, 在 HG102 井凝析油藏中, 由于其产量衰减较缓, 且存在人工干预的情况, 因此同位素分馏特征不明显, 拐点出现具体位置的确定存在一定困难。但是针对页岩气井, 因为其产物本身即为烃类气体, 且致密的物性条件加剧了同位素的分馏, 因此, 笔者认为碳同位素录井技术在国内页岩气井产能预测方面将具有很好的适用性和前景。

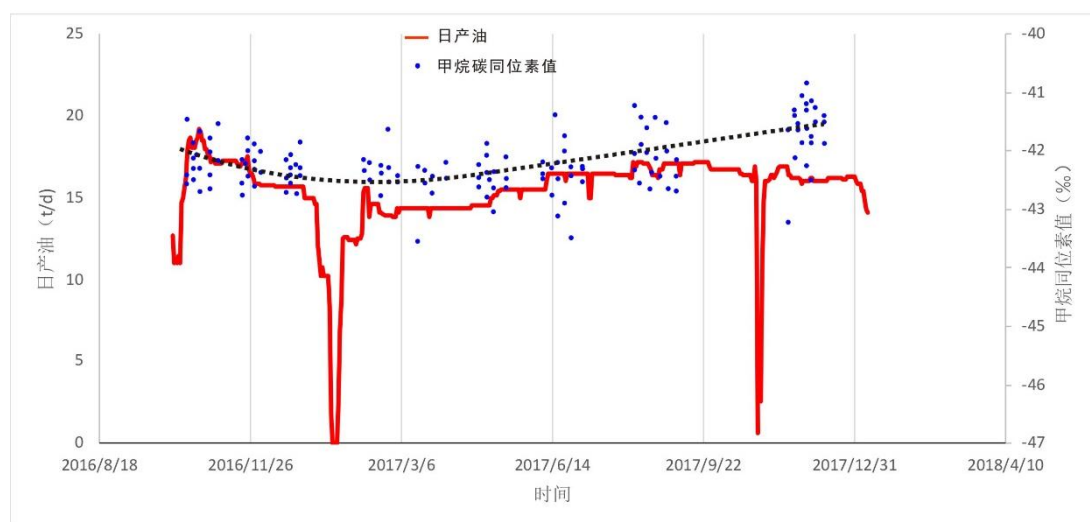


图 10 HG102 井产量及甲烷碳同位素变化特征

Fig. 9 Production and methane carbon isotope variation in well HG102

3.4 页岩气井二次压裂选型探讨

面对单井产量递减快、加密钻井成本高的页岩气井, 近几年北美页岩气采用重复压裂方式提高单井开发效益^[20,21]。重复压裂是指在同一口井进行两次或两次以上的压裂, 重复压裂主要通过原有裂缝改造、新造裂缝及转向压裂 3 种方式恢复、改善及提升原井产能, 运用主要压裂技术有暂堵转向、机械封隔和连续油管重复压裂^[22-24]。选取合理的候选井是提高重复压裂的成功率的前提, 北美页岩油气重复压裂选井原则

包括^[22-24]：①候选井周边有足够的剩余储量，具有较高初始产量；②井身结构符合重复压裂施工要求；③首次压裂及施工工艺不完善等；④生产参数不当导致产量递减过快，裂缝过早闭合；⑤出砂、结垢等造成产能下降；⑥避开断层，且井间间距合适；⑦在加密井压裂前先对母井进行重复压裂，恢复母井周围的地层压力。上述选井原则中多为工程方向考虑，而在如何判识候选井是否还具备剩余储量，初次压裂泄流面积内气体是否全部产出无法判断。基于同位素分馏原理，检测产出天然气碳同位素变化特可以为重复压裂候选井选择提供依据。若产出天然气碳同位素变重幅度大，分馏特征明显，表明游离气及大部分吸附气已产出，压力衰竭，即初次压裂释放范围内的气已采出殆尽，可以转向压裂或压裂新段。当产出天然气同位素变重幅度相对小，表明压裂缝过早闭合，裂缝释放范围内依然存在大量气体尚未排出，可以在原有裂缝进行改造（图 11）。

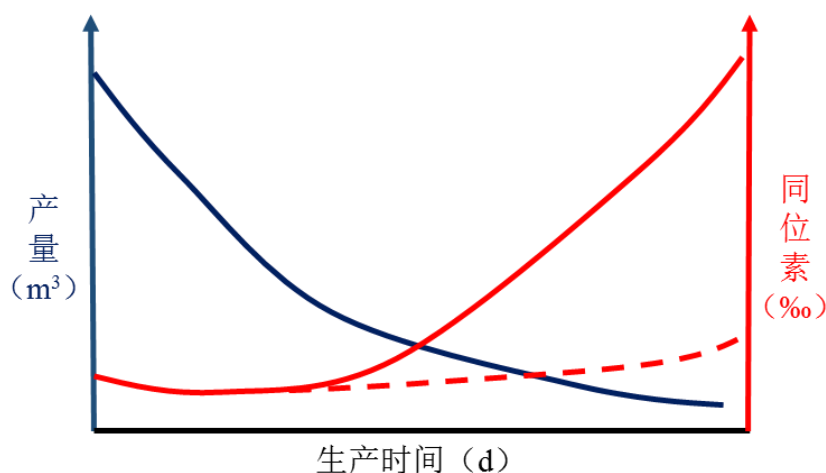


图 11 同位素随生产时间变化示意图

Fig.11 Diagram of isotope variation with production time

四、结论

分馏模拟实验表明页岩气产出过程碳同位素的变化规律能够反映储层压力、孔隙度，以及恢复计算含气量、判断页岩气的初期和稳产阶段产量占比、分析自由气和吸附气的占比等。EYY2HF 井牛蹄塘段页岩气碳同位素发生倒转，与原油裂解气比例较高有关。同时认为该井 3000m 以下页岩段相较于其上部页岩排烃效率更差，残存液态烃类更多，后期生成的页岩气当中原油裂解气比例更高，碳同位素值也更加偏轻，预示着其可能具有更优异的页岩气勘探开发潜力。

罐顶气同位素分馏特征与页岩纳米孔喉体系的发育程度有关，纳米孔喉体系发育程度作为页岩气甜点的判断指标或许是一条可行的研究思路，罐顶气的现场同位素测量则为纳米孔喉发育程度的判识提供了一条简便易行的分析方法。胜利油区两口致密油井碳同位素产能预测模型实验结果与 Arps 公式拟合结果基本相当，但时效性大大增强。进一步针对页岩气井，其产物本身即为烃类气体，且致密的物性条件加剧了同位素的分馏，碳同位素录井技术在页岩气井产能预测方面提供了一种新方法。

低产井二次压裂已成为一种降本增效的新方法，页岩气生产过程中的碳同位素实时检测为低产井二次压裂选井及压裂方式提供依据。

参考文献

- [1] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 1-6.
- [2] 戴金星, 戚厚发. 我国煤成烃气的 $\delta^{13}\text{C-Ro}$ 关系[J]. 科学通报, 1989, 34(9): 690-692.
- [3] 戴金星. 天然气碳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.
- [4] Stahl W J, Garey J R B D. Source-rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Valverde and Delaware basins, west Texas [J]. Chemical Geology, 1975, 16(4): 257-267.
- [5] Schoell M. Multiple origin of methane in the earth [J]. Chemical Geology, 1988, 71(1/3): 1-10.

- [6] Clayton C. Carbon isotope fractionation during natural gas generation from kerogen[J]. *Marine and Petroleum Geology*,1991,8:232-240.
- [7] Prinzhofer A,Huc A.Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionation in natural gas[J]. *Chemical Geology*,1995,126(3/4):281-290.
- [8] 张同伟,陈践发,王先彬,等.天然气运移的气体同位素地球化学示踪[J].*沉积学报*,1995,13(2):70-76.
- [9] 张同伟,王先彬,陈践发,等.天然气运移的气体组分的地球化学示踪[J].*沉积学报*,1999,17(4):627-632.
- [10] 韩辉,钟宁宁,王延年,等.页岩气稳定碳同位素组成特征及应用前景[J].*地质科技情报*,2014,33(2):134-139.
- [11] 戴金星,倪云燕,黄士鹏,等. 次生型负碳同位素系列成因[J]. *天气地球科学*, 2016, 27(1): 1-7.
- [12] Zumberge J,Ferworn K,Brown S.Isotopic reversal(rollover)in shale gases produced from the Mississippian Barnett and Fayetteville formations[J].*Marine and Petroleum Geology*,2012,31:43-52.
- [13] Tilley B,McLellan S,Hiebert S,et.al.Gas isotope reversals in fractured gas reservoirs of the western Canadian Foothills:Mature shale gases in disguise[J].*AAPG Bulletin*,2011,95(8):1399-1422.
- [14] Tang Y,Xia D.Predicting original gas in place and optimizing productivity by isotope geochemistry of shale gas[C]//Anon.Recovery-2011 CSPG CSEG CWLS Convention.[S.L.]:[s.n.],2011:1-4.
- [15] Xia X,Tang Y.Isotope fractionation of methane during natural gas flow with coupled diffusion and adsorption/desorption[J].*Geochimica et Cosmochimica Acta*,2012,77:489-503.
- [16] Li Gao,Sheng Wu,Andrei Deev,et.al.The gas isotope interpretation tool:A novel method to better predict production decline[j].*AAPG Bulletin*.2017,101(08):1263-1275.
- [17] 张建博,陶明信.煤层甲烷碳同位素在煤层气勘探中的地质意义:以沁水盆地为例[J].*沉积学报*,2000,18(4):611-614.
- [18] 刘洪林,王红岩,赵国良,等.稳定同位素 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 在煤层气田勘探中的应用[J].*西安科技大学学报*,2004,24(4):442-447.
- [19] 戴金星,夏新宇,秦胜飞,等. 中国有机碳烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(1): 1-6.
- [20] 田洪亮,吕建中,李万平,等. 低油价下北美地区降低钻完井作业成本的主要做法及启示[J].*国际石油经济*,2016,24(9): 36-43.
- [21] 叶海超,光新军,王敏生,等.北美页岩油气低成本钻完井技术及建议[J].*石油钻采工艺*,2017,39(5):552-558.
- [22] INDRAS P,BLANKENSHIP C.A commercial evaluation of refracturing horizontal shale wells[R].SPE174951, 2015.
- [23] MELCHER J,PERSAC S, WHITSETT A. Restimulation design considerations and case studies of Haynesville shale[R].SPE174819, 2015.
- [24] 光新军,王敏生.北美页岩油气重复压裂技术综述及攻关建议 [J].*石油钻采工艺*,2019(网络首发).

作者简介及联系方式:

作者简介:慈兴华(1969-),男,博士研究生,教授级高级工程师,主要从事录井技术研究与管理工
作。

单位名称:中石化胜利石油工程有限公司地质录井公司

Corresponding author:

Introduction: Ci Xinghua (1969-), doctor, a professor level senior engineer, He is currently the manager of Shengli Geologging Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation and is mainly in charge of mud logging technology research and management

Company: Shengli Geologging Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation