

The Application of Real-Time Isotope Logging in Reservoir Prediction

Pengbo Ni, Min Mao, Xiaogang Huang, Shengbin Yuan

Sino-France Geological Service Co. Ltd., Tianjing
Email: nipb@cfbgc.com

Received: Aug. 15th, 2017; accepted: Sep. 13th, 2017; published: Oct. 15th, 2017

Abstract

The real-time isotope logging technology from Schlumberger could be used for a real-time detection of $\delta^{13}\text{C}_1$ in methane gas, it was characterized by real-time and quick usage, high precision and suitable for field application, it was widely applied in Zhanjiang and Shenzhen Companies of CNOOC. The natural gas genesis of the whole well was studied by analyzing $\delta^{13}\text{C}_1$ and gas composition data, the gas type in the reservoir was identified by using $\delta^{13}\text{C}_1$ data and in combination with $\delta^{13}\text{C}_1$ - R_0 regression equation. Well LW3X2 and Well BY16X1 are located on the margin of Baiyun Depression, by comparing $\delta^{13}\text{C}_1$ in the 2 wells the underlying hydrocarbon could be predicted to expand the application of the isotope logging in exploration. The real-time isotope logging cultivates a new area of logging technology, and large number of data are provided by isotope for natural gas study, it is of great significance for future oil and gas exploration.

Keywords

Real-time Isotope Logging, Carbonate Isotope, Gas Genesis, Reservoir Prediction

实时同位素录井在预测油气藏中的应用

倪朋勃, 毛敏, 黄小刚, 袁胜斌

中法渤海地质服务有限公司, 天津

作者简介: 倪朋勃(1979-), 男, 工程师, 现从事技术管理工作。

Email: nipb@cfbgc.com

收稿日期: 2017年8月15日; 录用日期: 2017年9月13日; 发布日期: 2017年10月15日

摘要

斯伦贝谢公司实时同位素录井技术可以实时检测甲烷气体中的碳同位素($\delta^{13}\text{C}_1$), 该技术具有实时、快速、测量精度高、适于现场作业等优点, 已经在中海油湛江和深圳分公司大面积推广使用。通过分析 $\delta^{13}\text{C}_1$ 及气体组分数据, 可以对全井的天然气成因进行分析; 利用 $\delta^{13}\text{C}_1$ 结合 $\delta^{13}\text{C}_1-R_0$ 回归方程式, 判断储集层内的天然气类型。LW3X2井和BY16X1井同处于白云凹陷边缘带, 通过对比BY16X1井和LW3X2井 $\delta^{13}\text{C}_1$, 可以预测下伏油气藏, 拓展了同位素在勘探中的应用。实时同位素录井开辟了录井技术的新领域, 同位素为天然气的研究和勘探提供了大量的信息, 该技术将会在未来油气勘探过程中发挥更加重要的作用。

关键词

实时同位素录井, 碳同位素, 天然气成因, 油气藏预测

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

实时同位素录井技术自 2014 年底引入国内以来, 已经为中海油及其合作的国外油公司服务近 30 口井, 且多为重点井。目前, 实时同位素录井技术处于实时检测甲烷碳同位素阶段, 乙烷碳同位素、丙烷碳同位素、氢同位素仍处于现场测试阶段[1]。实时甲烷碳同位素录井(以下简称“实时同位素录井”)在现场实时测量分析甲烷的稳定碳同位素 ^{13}C (6 质子, 7 中子), 一般用符号 $\delta^{13}\text{C}_1$ 或者 $\delta^{13}\text{C}_1\text{-CH}_4$ 表示。

同位素分析应用于油气勘探领域已经很久, 早期的同位素质谱仪只能分析甲烷或者全烃的碳同位素数值, 因此, 对 $\delta^{13}\text{C}_1$ 研究最多, 实时同位素录井可以借鉴使用该研究成果。实时同位素录井可以发现隐藏在烃类气体内, 常规色谱仪无法发现的碳同位素信息, 对碳同位素、天然气研究和勘探提供大量信息。在实际应用中, $\delta^{13}\text{C}_1$ 结合烃类气体, 可以对全井天然气成因进行分析, 判断储集层内天然气类型。同一构造位置相邻井之间, 碳同位素具有较强的可比性, 当其明显增加时, 则可能预示下伏油气藏的存在。以 LW3X2 井为例, 介绍实时同位素录井技术的应用。

2. 甲烷碳同位素录井介绍

2.1. 工作原理

实时同位素录井系统对同位素测量采用的近红外光吸收原理:不同质量的原子(或同位素)对红外光的吸收是有选择性的,即对特定同位素,当已知强度的激光波通过充满烃类气体的光腔后,其强度变化满足公式:

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(\frac{-4\pi klc}{\lambda}\right)$$

式中: I 为通过光腔后激光强度, cd; I_0 为原始激光强度, cd; l 为光腔长度, m; c 为对应组分浓度, 1; λ 为对应吸收光波波长, m; k 为削光系数, 1。

2.2. 技术特点

1) 实时检测: $\delta^{13}\text{C}_1$ 实时同位素录井分析周期短(最短 10 s 测量一个周期)。实时同位素录井可以根据深度间隔保存成果数据, 现场一般根据作业者要求提供 1 m 结果数据。实时同位素录井所获取连续数据相对于实验室分析散点数据来说, 可以获得取样点以外的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 资料信息, 极大丰富了 $\delta^{13}\text{C}_1$ 数据; 数据随钻实时分析, 其结果快速应用于现场, 及时指导油气勘探。

2) 测量精度高: 实时同位素录井, 甲烷体积分数不同, $\delta^{13}\text{C}_1$ 测量误差也不同。甲烷体积分数为 0.05%~1.0%, 测量误差为 $\pm 1\%$; 甲烷体积分数为 0.02%~0.05%, 测量误差为 $\pm 3\%$; 甲烷体积分数为低于 0.02%, 测量值不可用。从目前所钻井情况来看, 数据精度可以满足勘探研究需求。当甲烷体积分数高于 1.0% 时, 系统会自动稀释气体至 1.0% 以下进行测量, 保证其精度。从实时和实验室所测 $\delta^{13}\text{C}_1$ 对比(图 1) 可以看出, 相对误差较小, 基本在 5% 之内, 数据差别较大的 2 个点, 是由于甲烷体积分数低于 0.05% 造成的。在目的层, 甲烷体积分数变化范围在 1.3%~4.5% 之间, 录井数据和实验室数据符合。

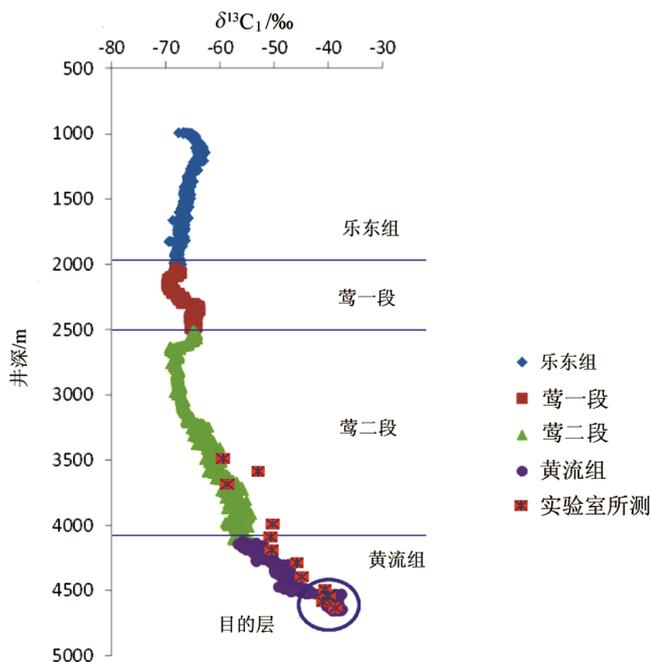


Figure 1. The contrast of $\delta^{13}\text{C}_1$ data between real-time and laboratory test in Well YCX

图 1. YCX 井实时和实验室甲烷碳同位素数据对比

3) 适合现场工作：实时同位素录井设备采用抽屉式结构，体积小，便于现场安装。根据作业需求，设备分为2种作业模式，即单独工作间和与GN4智能录井系统整合在一起。目前，海上作业使用的是与GN4智能录井系统整合在一起的作业模式。其优势是节约了海上平台放置设备的空间，联机工程师负责保养设备和整理数据，节约人员。

3. 甲烷碳同位素解释

3.1. 数值解释

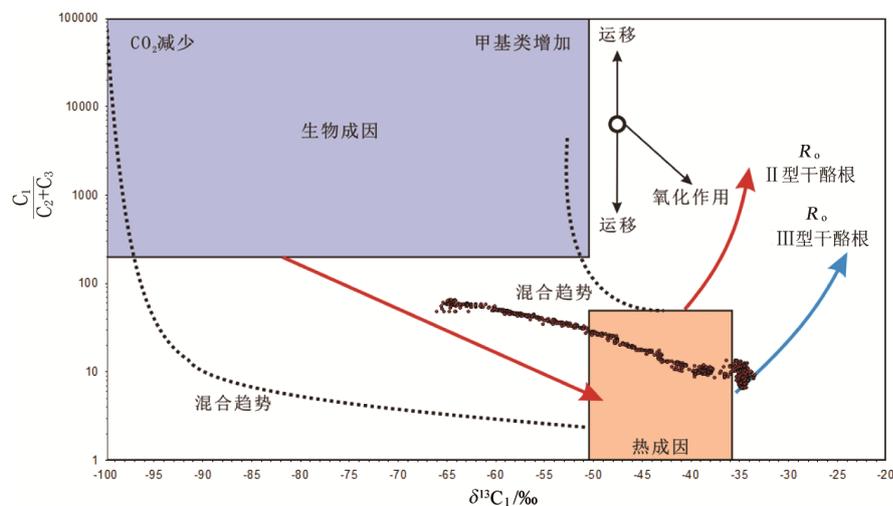
天然气根据形成机理可以划分为有机成因气和无机成因气两大类，有机成因气按有机质类型和演化阶段又可以分为生物成因气、热成因气(油型气和煤型气)和混合成因气[2]。自然界中，烃类气体中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 变化范围较大，从目前测得数据来看，大多在 -10‰ ~ -90‰ ，但以 -35‰ ~ -25‰ 区间最普遍，例如陆生植物平均为 -25‰ 。在天然气成因分析中，一般将 $\delta^{13}\text{C}_1 = -20\text{‰}$ 作为无机成因气和有机成因气的分界点。如 $\delta^{13}\text{C}_1$ 大于 -20‰ ，可以认为是无机成因气——深源气； $\delta^{13}\text{C}_1$ 小于 -60‰ 作为生物成因气分类依据，考虑到生物作用会增加 ^{13}C ，学者[3][4]多将 -55‰ 或者 -58‰ 作为分界点(表1)。

Table 1. The range of methane $\delta^{13}\text{C}_1$ in the gas with different geneses (modified based on Wang Guojiang, *et al.*, 2008)
表 1. 不同成因天然气甲烷碳同位素范围(据文献[3]，修改)

| $\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$ | | | | | |
|----------------------------------|---------|---------|---------|-------|--------|
| 生物气 | 油田气 | 凝析气 | 裂解气 | 煤型气 | 深源气 |
| -80~-55 | -55~-40 | -40~-36 | -36~-28 | -28左右 | -20~-8 |

3.2. 图版解释

天然气具有极大的活动性，气藏中的天然气可能来自附近的原地气，也可能是通过各种方式运移过来的异地气(深部或者侧向)，或者是2种气源的混合气。气藏形成后，还可能受到氧化、生物降解作用，使得天然气的同位素和组分都发生某种程度变化。所以将气体组分数据和碳同位素组合起来研究天然气成因更科学。法国地质服务公司根据前人研究成果结合作业实际数据，进一步完善了伯纳德图版(图2)。



注： R_0 为镜质体反射率。

Figure 2. The Bernard chard board of well LW3X2
图 2. LW3X2 井伯纳德图版

伯纳德图版, 使用参数为 $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ 。图版将气体成因分为生物成因、热成因和两者相互作用的混合成因。在生物成因中, 当 $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ 比值大于 10,000 时, 如果 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较小, 生物成因气以二氧化碳还原作用为主; 如果 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较大, 生物成因气以甲基型烃类发酵为主。红色弯曲箭头指示 II 型干酪根成熟度增加方向, 蓝色弯曲箭头指示 III 型干酪根成熟度增加方向。

3.3. 成熟度分析

Stahl 根据西北欧和北美大量天然气样测定的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 及其烃源岩 R_o 发现, 两者具有良好的相关性, 该相关性不受具体的盆地和地质年代限制, 仅与有机质类型有关, 并分别建立了煤型气和油型气回归方程:

$$\text{煤型气: } \delta^{13}\text{C}_1 = 14 \lg R_o - 28$$

$$\text{油型气: } \delta^{13}\text{C}_1 = 17 \lg R_o - 42$$

国内外学者对于 $\delta^{13}\text{C}_1$ - R_o 关系研究成果较多, 并且还建立了一些针对某个特定区域的回归方程。戴金星在研究我国许多煤型气和油型气 R_o 与天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 之间的相关性后[5], 提出如下 $\delta^{13}\text{C}_1$ - R_o 回归方程:

$$\text{煤型气: } \delta^{13}\text{C}_1 = 14.12 \lg R_o - 34.39$$

$$\text{油型气: } \delta^{13}\text{C}_1 = 15.80 \lg R_o - 42.20$$

由上述方程式可以看出, 取得 $\delta^{13}\text{C}_1$ 以后, 可以对勘探区的烃源岩的成熟度进行推断, 从而可以确定所钻井的天然气类型, 判断储集层天然气的性质。

4. LW3X2 井分析

实时所测得的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与色谱仪所测烃组分结合起来, 对全井的数据进行分析, 使用伯纳德图版可分析整口井的天然气成因; 利用 $\delta^{13}\text{C}_1$ 结合 $\delta^{13}\text{C}_1$ - R_o 回归方程式, 判断储集层内的天然气类型。

4.1. 全井分析

如图 2 所示, 由投点分布可以得出, LW3X2 井天然气成因主要分为 2 个, 即混合成因和热成因, 随深度的增加, 天然气由混合成因逐渐向热成因转化。

图 3 为 LW3X2 井录井综合图。井段 2809~3140 m, $\delta^{13}\text{C}_1$ 变化范围为 $-66.1\text{‰} \sim -40.5\text{‰}$, 属于天然气混合成因; 井段 3140~3700 m, 属于热成因。2 个井段的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 变化分界线在井深 3320 m 附近, 处于第 1 套气体异常明显的储集层上部, 反映了气体运移活动主要集中于 3320 m 以下, 分界线上部气体运移活动相对不活跃。

4.2. 显示层分析

储集层 3500~3519 m, 岩性为浅灰色荧光细砂岩, 全烃体积分数最大值为 15.49%, 峰基比为 12.3, C_1 相对体积分数为 91.10%, 该区域解释标准为气层。 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-38.5\text{‰} \sim -36.3\text{‰}$ 之间, 平均为 -37.8‰ , 按表 1 分析, 气体成因为油型凝析气。根据戴金星提出 $\delta^{13}\text{C}_1$ - R_o 回归方程中的油型气方程, 将该储集层 $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均值 -37.8‰ 带入, 计算求得 R_o 为 1.90, 属于高成熟带。通过以上分析得出, 该储集层天然气类型为高成熟油型凝析气。

5. 预测油气藏

天然气中气体组成主要受其形成过程的控制, 不同成熟阶段形成了不同类型的天然气。各种类型的天然气在碳、氢同位素组成上有一定的范围, 因此, 可以利用同位素组成对天然气进行成因分类。油气藏预测就是利用天然气成因或同位素与对应井深的关系, 根据天然气的同位素数变化, 分析、推测油气藏的存在。该预测在钻井过程中极为有用, 通过对比分析所钻井和邻井的同位素数据变化, 能快速有效地

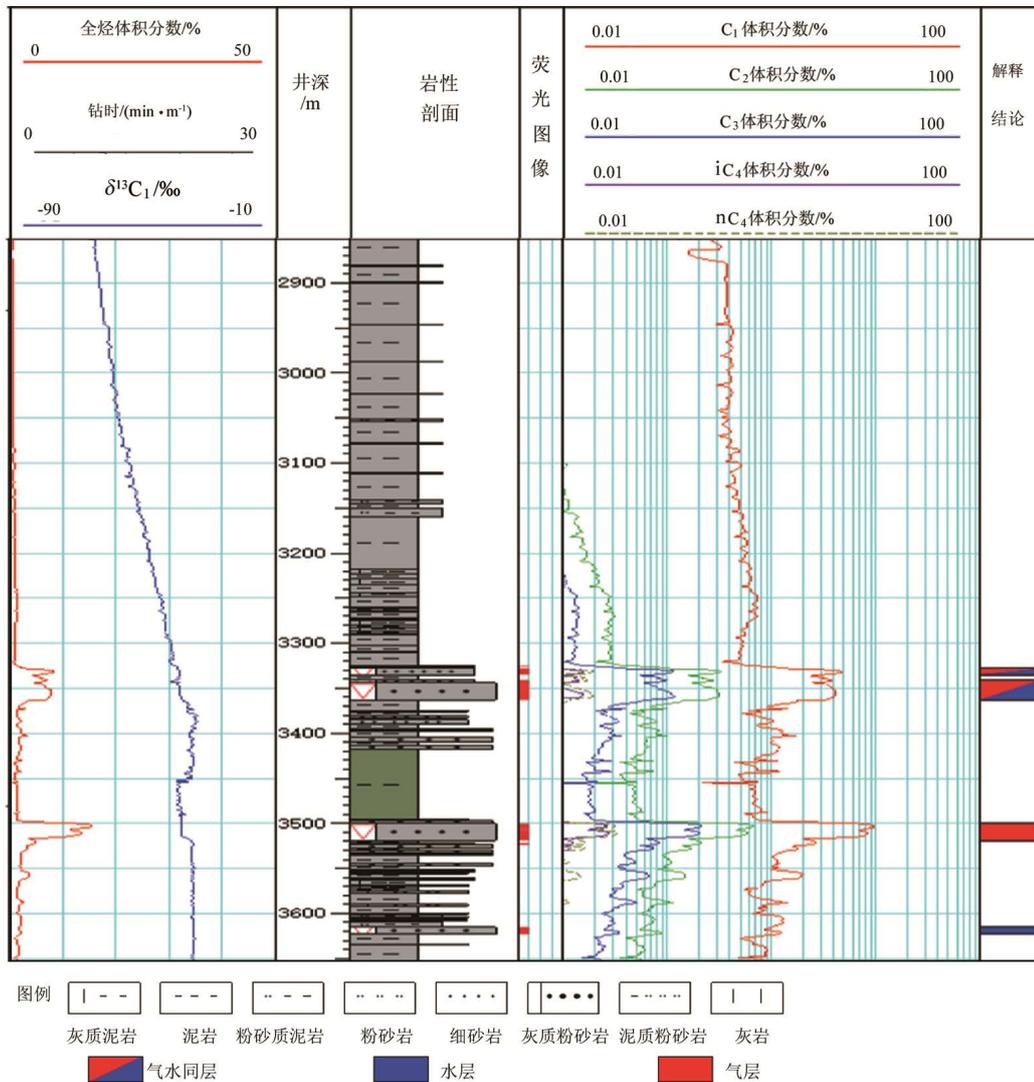


Figure 3. The integrated logging plot of Well LW3X2
图 3. LW3X2 井录井综合图

判识下伏油藏的存在，为在钻井过程中及时采取相应的技术措施提供依据[6] [7]。

LW3X2 井和 BY16X1 井都处于白云凹陷白云主凹的边缘带上，两者沉积环境相同。2 口井均为深水井，LW3X2 井水深 1368.00 m，BY16X1 井水深 1375.60 m，仅相差 7.6 m，故两口井井深对应浅层的同位素应该具有一致性。

BY16X1 井钻井时间较 LW3X2 井晚，自 2808 m 开始同位素录井，钻进至 2825 m 做地漏试验。该井段 $\delta^{13}C_1$ 变化范围为-50.6‰~-54.0‰，属于混合成因气，现场工程师发现和 LW3X3 井 $\delta^{13}C_1$ 数据相差较大，经过注样检查同位素仪器，排除了仪器问题，认为数据可靠。解释人员通过对 2 口井的同位素进行对比分析认为，只有活跃的油气运移才能使 2 口井同位素数据产生如此大的差距，从而导致气体成因的变化，解释认为下部应有油气藏。地漏试验结束后，恢复钻进至 2889 m，气体开始升高，全烃体积分数最大值为 14.34%，峰基比为 43.8，解释结论为气层。后 MDT 取样获得气体折合常压下 36,630 mL，气体分析甲烷相对体积分数 70.5%，重烃相对体积分数 9.7%，CO₂ 相对体积分数 19.8% (图 4)。证实了利用同位素预测下伏油气藏的可行性和准确性。

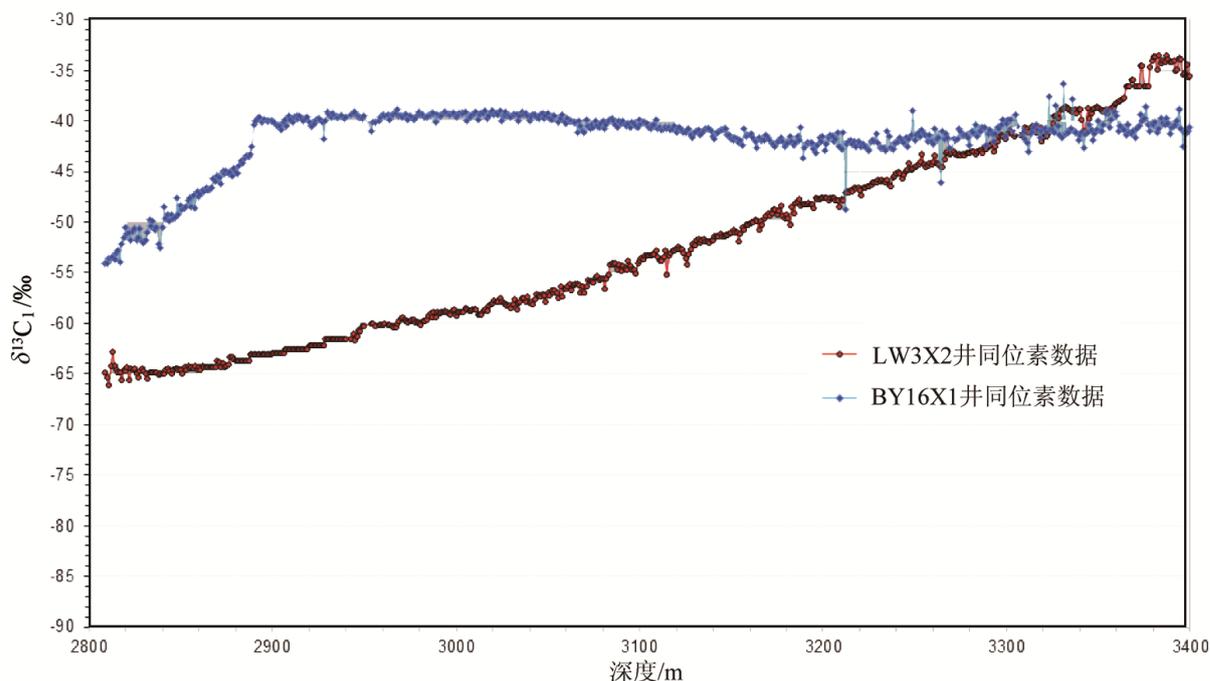


Figure 4. The comparison of isotope between Well LW3X2 and Well BY16X1

图 4. LW3X2 井和 BY16X1 井同位素对比图

6. 结论

1) 同位素录井所测得数据可以对全井天然气成因进行分析, 了解整口井的天然气成因变化规律; 对异常显示明显的储层进行分析, 可以准确判断天然气类型。

2) 通过多井对比, 根据同位素变化的情况, 推测下伏油气藏是否存在, 为钻井过程中及时采取相应的技术措施提供依据。

3) 同位素录井作为一项新的录井技术, 进一步丰富了录井技术, 让录井人员在气体成因上了解油气藏, 从而可以更加准确评价油气藏。

参考文献 (References)

- [1] 孙恒君, 黄小刚. 实时同位素录井技术[J]. 录井工程, 2012, 21(3): 1-4.
- [2] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 88-98.
- [3] 王国建, 程同锦, 汤玉平, 等. 地表化探中甲烷稳定碳同位素的应用及存在问题[J]. 物探与化探, 2008, 32(5): 550-551.
- [4] 王万春, 刘文汇, 刘全有. 浅层混源天然气判识的碳同位素地球化学分析[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 469-472.
- [5] 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.
- [6] Schoell, M. (1993) Isotope Analysis of Gas in Gas Field and Gas Storage Operations. *SPE Production Engineering*, **8**, 337-344.
- [7] 廖永胜. 罐装岩屑轻烃和碳同位素在油气勘探中的应用[J]. 试油技术, 1989, 11(5): 35-53.

[编辑] 邓磊

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org