

成熟指数 MI 值在页岩气预测中的应用

刘良刚¹, 伍媛¹, 刘启亮¹, 马丽娟², 黄鹏宾²
(1 长江大学地球科学学院, 湖北荆州 434023; 2 江汉测录井公司 湖北潜江 433100)

摘要:成熟指数 MI 值是通过测井方法获得的反映页岩气层成熟程度的一个地球物理指标。通过介绍 MI 值在美国 barnett 页岩气储层研究中的应用情况, 提出了利用 MI 值划分页岩气源岩的成熟度界限和烃相的方法; 阐述了成熟指数 MI 值的应用原理和意义, 表明 MI 值对热成熟度的反映原理主要基于页岩独特的生储方式; 例举了 MI 值在国内的应用实例, 进一步指出了 MI 值对页岩气有利气藏的预测和勘探具有指导意义。

关键词:成熟指数 MI; 成熟度; 页岩气; GOR

中图分类号: TE122.115 文献标识码: A

1 MI 值在国外的研究现状

页岩气是一种自生自储的非常规天然气资源, 其气源岩即为储气层, 几乎不发生初次运移和二次运移。页岩气按其成因可分为生物成因气和热成因气两种。在热成因的页岩气储层中, 有机质的热成熟度可用来评价其烃源岩的生烃潜力, 适中的有机质热成熟度有利于大型页岩气藏的形成^[2]。热成熟度不仅能够影响有机物质表面的天然气吸附数量, 而且随着热演化程度增高, 烃类的增加将导致页岩地层压力增大, 从而提高气体的吸附性能。另外随着热成熟度不断增加, 页岩地层压力增大到一定程度, 导致微裂缝产生, 给游离气提供了很好的储集空间^[3]。因此, 掌握页岩的有机质热演化程度有助于预测具有商业开发价值的页岩气藏^[1]。一般认为页岩气藏的热演化成熟度较理想的范围在 R_o 为 0.6% ~ 2.0% 之间, 其最小临界值是 R_o 为 0.4% ~ 0.6%^[3]。当有机质的 R_o 大于 0.4%, 页岩中即有烃类气体产生, 也就有可能在页岩中聚集形成气藏^[3]。

实践证明, 利用测井资料也可以预测页岩气层的成熟度, 这种方法基于页岩气的特殊生储方式, 能帮助很好地了解 Barnett 页岩烃源岩的热成熟水平^[1]。下面主要介绍成熟度指数 MI 值在美国 Barnett 页岩气储层预测和勘探中的应用原理。

1.1 原理及应用

MI 值是一个利用测井资料进行统计计算出来的成熟度指标, 其真实物理意义是反映页岩储层中的含气饱和度及气体平均分子量, MI 值的公式如下:

$$MI = \sum \frac{1}{(\Phi_{0i} \sqrt{1 - S_{w75i}}) N} \quad (1)$$

式中: N 为取样深度处密度孔隙度 $\geq 9\%$ 、含水饱和度 $\leq 75\%$ 的数据样本总数;

Φ_{0i} 为每个取样深度的密度孔隙度都 $\geq 9\%$ 时的中子孔隙度;

S_{w75i} 为每个取样深度的密度孔隙度都 $\geq 9\%$ 、含水饱和度 $\leq 75\%$ 时的含水饱和度。

MI 值反映热成熟度的理论主要基于以下几点^[1]:

(1) 对于现存于页岩中的气体来说, 页岩既是生气岩又是储气层, 在其热演化生烃过程中有部

收稿日期: 2010-06-21

作者简介: 刘良刚(1985—), 男, 在读硕士, 主要从事石油地质开发研究工作。E-mail: llg8532@163.com

分油气将随着初次运移而减少,但却没有可量度的气体二次运移或聚集的发生。现存烃类都是在页岩气层的热成熟过程之中产生的。

(2) 页岩的含气饱和度通常随着成熟程度的加深而增加,成熟度又受到热力程度和热力时间量的影响。

(3) 在生烃进程中,由于烃类的大量产生,以及页岩的周期性高压和不断增加的温度使得岩石中的自由水和矿物转换(蒙脱石到伊利石)产生的水被排出,从而导致了含水饱和度的降低。

(4) 有机质和烃类的碳氢化合物链在进一步的产气和热解中变短,最终,由于在成熟过程中烃类和水被排出页岩,使得页岩中的氢含量降低,所以页岩低中子值代表的是高含气量、短链碳氢化合物。

成为有利的页岩气储层的一个前提是具有较高的成熟度^[4],含气页岩内的总体状态可描述为以下几点:①有机质和烃类在页岩成熟的全部阶段都有气体产生,在低成熟阶段和中高成熟阶段,以湿气为主,在高成熟和过成熟阶段,有大量干气产生;②随着成熟度的升高,碳氢化合物链变短,烃分子量降低;③高湿气含量的页岩要比高干气含量的页岩具有更高的含氢密度,故随着高成熟度的来临,干气产生量增多,中子孔隙度值降低;④随着地层压力的增加,一部分气体和液态烃溢出页岩,另一部分吸附于有机质干酪根或矿物颗粒表面,导致页岩中含烃量降低。这一系列的状态都可以通过 MI 反映出来,故可认为 MI 值能够反映页岩成熟状态。

美国 Barnett 页岩实践证明,通过统计和计算 Fort Worth 盆地上百口井测井数据,绘制 MI 等值线图^[1],可划分成熟度界限,掌握 Barnett 页岩区域产油、凝析油、湿气或干气的情况^[1]。为了更精准地描述本地区的实际情况,还需要进行 MI 值与油气比 GOR 以及与气热值数据的校正,从而得到 MI 值的准确区域分布图。如图 1 所示,颜色变浅,表示页岩气的热成熟指数 MI 值不断减小。MI 在 5.0~6.0 之间产湿气和油,对应的是中—高成熟阶段,在 6.0~7.0 之间产湿气和少量的凝析油,对应高成熟阶段。MI 大于 7.0 一般主要产干气,对应过成熟阶段。

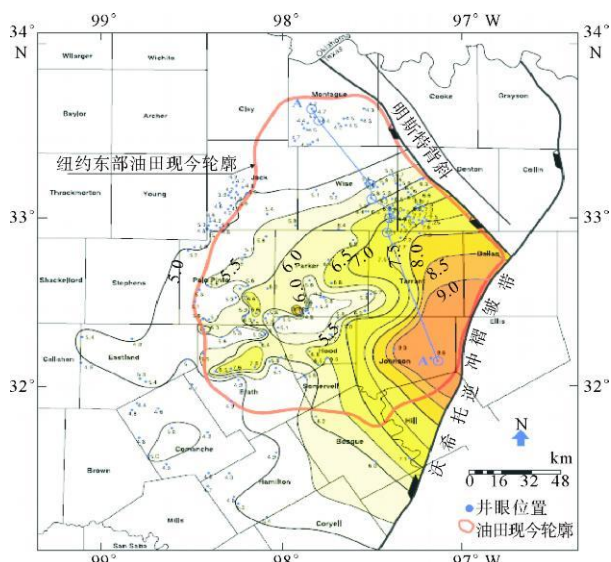


图 1 Barnett 页岩的 MI 值等值线(据文献[1])

Fig. 1 MI Contour of Barnett Shale(after reference[1])

1.2 MI 值在页岩气勘探开发中的意义

测井解释中,低中子值代表的是高含气饱和度和高热成熟度,高中子值则代表了低含气饱和度和低热成熟度。成熟度越高,气油比 GOR 越高。MI 值和 lg(GOR) 值的交汇图可以很好地反映成熟度阶段和烃相^[5]。如图 2 所示,经验公式为: $\lg(\text{GOR}) = 2.681\text{MI} - 11.93$ 。相关系数 $R^2 = 0.84$,表示 MI 和 lg(GOR) 之间具有良好的相关性。在 MI 值和 lg(GOR) 值交汇图版中,随着成熟度的增加,MI 值小于 5 时产油,MI 值为 5~6 时主要产湿气和凝析油(或油),MI 值为 6~7 时主要产湿气和凝析油,MI 值大于 7 时则主要

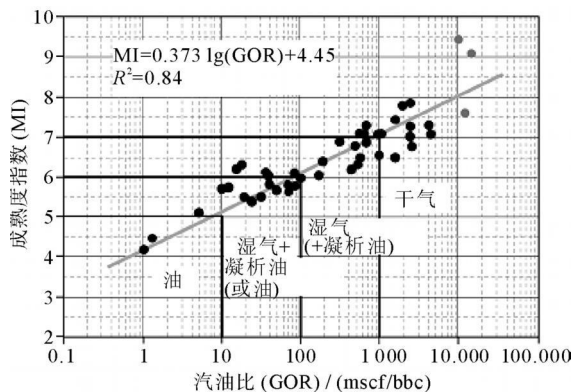


图 2 MI 值线性和 GOR 值对数 10 级校正图版

Fig. 2 Correlation between the MI in linear scale and the initial GOR in logarithmic scale

产干气,这时的GOR值也到达最大。

在热成因的页岩储气层中,烃类是在时间、温度和压力的共同作用下生成的。3种截然不同的热演化过程构成了页岩中的热成因气体来源^[6]:

①干酪根分解产生气体和沥青;②沥青分解产生油和气体;③原油进一步分解成气体和一些高碳焦炭或焦沥青残渣。最后一个过程依赖的是页岩系统中的原油或吸附油的含量多少,并且也是Barnett页岩气巨大潜力的关键过程,对应高一过熟成熟阶段。页岩气层的成熟度越高表明页岩生气量越大,页岩中可能赋存的气体也越多^[7]。将Barnett页岩地区成熟指数MI值与镜质体反射率Ro进行对比,得出Ro和MI值具有很好的对应关系(表2)。

表 2 Barnett 页岩 MI 值与成熟度 Ro 对比^[8]

Table 2 Correlation between MI and Ro from Barnett shale

R _o	0.5~0.7	0.7~1.0	1.0~1.7	
R _o 烃相	生油窗	油—湿气过渡区	生气窗	干气阶段
MI		5.0~6.0	6.0~7.0	
MI 烃相	油	油、湿气	湿气凝析气(油)	气少量凝析气 干气、甲烷

2 应用实例

中扬子板块蕴涵有多块潜在页岩气资源区^[9],并且在纵向上也具有多层系发育的特点。下面介绍MI值在鄂西渝东石柱—建南区块的应用情况。三叠系上统香溪组发育有巨厚层的黑色页岩,其中须一段、须三段和须五段被认为是页岩气藏最有利的目的层段^[10],其测井曲线特征接近于美国Barnett页岩气储层特征,具有高自然伽马值、高电阻和高声波时差等特性^[11]。同时岩心分析表示有机质丰度TOC普遍较高(高于1.13%),有的样品甚至高达13.59%,处于高成熟—过成熟阶段,Ro平均达到1.5%~2.2%。气测显示在这个层段存在区域性的气测异常。对该地区10多口井统计测井数据计算MI值,经过校正之后,与lgH值进行对比具有很好的线性对应

关系(图3), $H = (\text{全烃} - \text{重烃}) / \text{重烃}^{[12]}$ (H可从气测录井方面反映气体组分中气态烃和液态烃之比),证明MI值能够很好地反映产气能力。

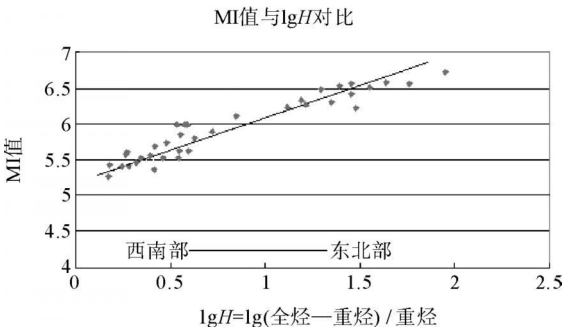


图 3 MI 值与 lgH 对比图

Fig. 3 Correlation between the MI and lgH

与已有的Ro资料对比,也具有一定的相关性。MI值计算的成熟度高势区在东北隆起部,而西南部页岩气成熟度略低于东北区(图4),这与实际Ro值有一定的印证关系。

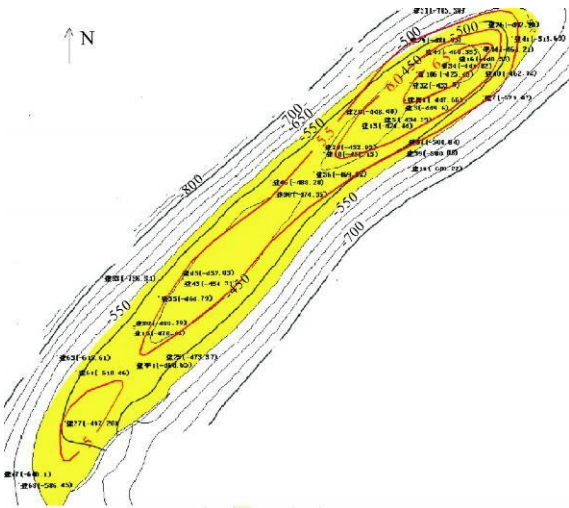


图 4 研究区 MI 值等值线图

Fig. 4 Isoline of MI in research areas

3 结论

(1)MI值对页岩气层的成熟度预测主要基于页岩气特殊的生储机理。页岩气为自生自储的非常规天然气,现存气体主要为页岩气层的热成熟

过程中释放的气体, 在热成熟进程中, 含水饱和度降低, 含气饱和度增加, 含烃量总体减少。

(2) MI 值是一种相对的定性的描述, 适用于成熟度跨度较大的区域, 应包含从生油窗到生干气的全过程, 经过 GOR、气热值、TOC 等校正之后, 能够确立一个地区性的成熟程度划分标准和烃相预测指标。

(3) 从上述实例可以看出 MI 值对页岩气成熟度预测是有效的。MI 值与 GOR 校正之后, 能够定性描述区域页岩气成熟度分布图, 对未来邻近井的预测勘探起到很好的指导作用。

参考文献:

- [1] Hank Z, Natalie B G, Brad C. Thermal maturity of the Barnett Shale determined from well-log analysis [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 535-549.
- [2] 张利萍, 潘仁芳. 页岩气的主要成藏要素与气储改造[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 20-23.
- [3] 潘仁芳, 伍媛, 宋争. 页岩气勘探的地化指标及测井分析方法初探[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 6-9.
- [4] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [5] Zhao H. Thermal maturation and physical properties of Barnett Shale in the Fort Worth Basin, north Texas (abs.) [J]. AAPG Annual Meeting Program, 2004, 13: A154.
- [6] Pollastro R M, Hill R J, Jarvie D M. Geological and organic

geochemical framework of the Barnett - Paleozoic total petroleum system, Bend arch - Fort Worth Basin, Texas (abs.) [J]. AAPG Annual Meeting Program, 2004, 13: A113.

- [7] 岳炳顺, 黄华, 陈彬. 东濮凹陷测井烃源岩评价方法及应用[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(3): 351-354.
- [8] Ronald J H, Etuan Z, Barry J K. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [9] 陈宗清. 鄂西利川复向斜南部石炭系—三叠系储层与评价[J]. 海洋石油, 2002, 114: 24-31.
- [10] 叶军, 曾华盛. 川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 18-25.
- [11] 唐嘉贵, 吴月先, 赵金洲. 四川盆地页岩气藏勘探开发与技术探讨[J]. 钻采工艺, 2008, 31(3): 38-42.
- [12] 郭瑞超, 李延钧, 王廷栋. 轻烃参数在全烃地球化学分析油气成藏中的应用[J]. 特种油气藏, 2009, 16(5): 5-9.
- [13] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [14] Daniel M J, Ronald J H, et al. Unconventional shale gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [15] Guidry F K, Walsh J W. Well log interpretation of a Devonian gas shale: An example analysis (abs.) [J]. Society of Petroleum Engineers, 1993: 26-932.

MATURITY INDEX MI OF THE SHALE GAS DETERMINED FROM WELL-LOG ANALYSIS AND ITS APPLICATION IN RESOURCE ASSESSMENT

LIU Lianggang, WU Yuan, LIU Qiliang, MA Lijuan, HUANG Pengbin

(College of Geoscience, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

Abstract: The Maturity Index MI is a geophysical index calculated from well-log data. Using Barnett Shale as an example, we introduced the application of Maturity Index MI in the reservoir research. The hypothesis for the application of the Maturity Index MI is described. The Maturity Index MI of a shale is a function of the source and accumulation system. An example is selected from China as a case to show the application of MI in resource assessment and exploration.

Key words: Maturity Index MI; thermal maturity; shale gas; GOR