

The Evaluation Method of Terrestrial Source Rocks by Fuzzy AHP

—A Case Study of Dunhua Basin

Deming Xiong^{1,2*}, Peng Liao³, Chaoqiang Wang^{1,2}

¹Chongqing Environmental Protection Engineering Technology Center for Shale Gas Development, Chongqing

²Chongqing Environmental Protection Center for Shale Gas Technology & Development, Chongqing

³Yangtze Normal University, Chongqing

Email: *xiongdeming2004@126.com

Received: Jun. 7th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

Source rocks are the basis for oil or gas accumulation and petroleum system. In different palaeoenvironments, sedimentary basins have different inputs of parent materials that have different thermal evolution degree. So it is difficult to rank the hydrocarbon-generating potential of source rocks in different sedimentary basins according to their physical and chemical properties. This study considers four factors: organic matter abundance, organic matter type, organic matter maturity and hydrocarbon generation process. A new model of hydrocarbon source rock evaluation is established by using fuzzy mathematics. It avoids the contradiction caused by too many parameters in the process of hydrocarbon source rock evaluation, avoids the blindness in selecting parameters, and improves the efficiency of hydrocarbon source rock evaluation. The practical application shows that the hydrocarbon generation potential of Dunhua Basin is relatively large, and this method is practical and reliable, and has certain popularization value.

Keywords

Hydrocarbon Generating Process, Evaluation of Terrestrial Source Rock, Fuzzy Mathematics, Analytic Hierarchy Process, Hydrocarbon Generation Potential, Fuzzy Comprehensive Evaluation

陆相烃源岩生烃潜力模糊综合评价方法

——以敦化盆地为例

熊德明^{1,2*}, 廖朋³, 王朝强^{1,2}

¹重庆市页岩气开发环境保护工程技术研究中心, 重庆

*通讯作者。

²重庆市涪陵页岩气环保研发与技术服务中心, 重庆

³长江师范学院, 重庆

Email: *xiongdeming2004@126.com

收稿日期: 2019年6月7日; 录用日期: 2019年6月21日; 发布日期: 2019年6月28日

摘要

烃源岩是油气成藏和含油气系统的基础。由于不同的沉积盆地在沉积古环境、母质类型的输入以及有机质所经历的热演化程度等方面差异较大, 仅以烃源岩物理化学性质为侧重点的烃源岩评价方法很难对不同沉积盆地中的烃源岩的生烃潜力进行相对优劣排序。本次研究考虑了有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度和生烃过程四个方面因素的影响, 运用模糊数学建立烃源岩评价新模型, 避免了在烃源岩评价过程中由于参数过多而导致的矛盾现象, 避免了选取参数时的盲目性, 提高了烃源岩评价效率。实际应用表明: 敦化盆地生烃潜力比较大; 该方法实用可靠, 具有一定的推广价值。

关键词

生烃过程, 烃源岩评价, 模糊数学, 层次分析法, 生烃潜力, 模糊综合评价

Copyright © 2019 by author(s) 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. 前言

对于烃源岩的评价, 以往主要侧重于对烃源岩物理化学性质方面的研究, 比如说有机质丰度、有机质类型及成熟度等。但对于生烃过程和评价方法方面的研究关注较少。比如: 诸克军[1]对油气勘探进行了模糊评价, 程顶胜[2]对塔里木盆地石炭系烃源岩进行了模糊评价预测。郭长春[3]从生烃物质基础和生烃过程两方面进行了模糊评价。由于不同的沉积盆地在沉积古环境、母质类型的输入以及有机质所经历的热演化程度等方面差异较大, 仅以烃源岩物理化学性质为侧重点的烃源岩评价方法很难对不同沉积盆地中的烃源岩的生烃潜力进行相对优劣排序[3]。模糊数学作为研究和处理模糊体系规律的理论和方法[4], 在烃源岩生烃潜力模糊综合评价方面具有一定的优势, 本文采用模糊数学方法[5][6]建立烃源岩评价新模型, 对敦化盆地烃源岩生烃潜力进行综合评价。

2. 模糊层次分析法原理[5][6]

模糊综合评判原理

1) 单级模糊综合评判

单级模糊综合评判是指多因素在同一层次上的评判, 同时它也是多级模糊综合评判的基础, 如图1。单级模糊综合评判的流程可以简述如下:

- ①确定评判对象;
- ②确定评语集;

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (1)$$

③确定因素集;

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \tag{2}$$

④依据因素确定;

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} \tag{3}$$

⑤确定权重集;

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \tag{4}$$

⑥选取合适的计算模型, 作模糊变换求得 B;

$$B = A \otimes R \tag{5}$$

⑦用一定方式将评价结果转换成所需形式的结论。

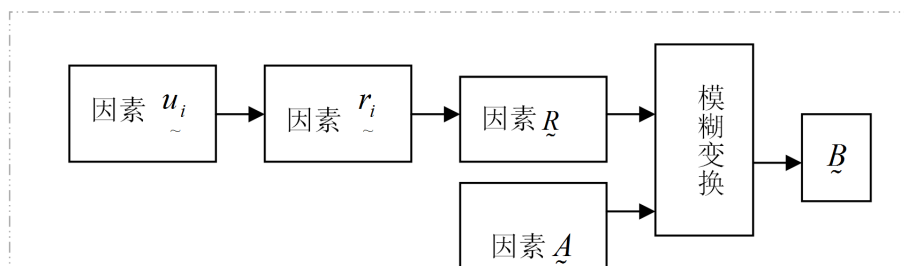


Figure 1. Process of single-level fuzzy comprehensive evaluation
图 1. 单级模糊综合评判流程

2) 多级模糊综合评判

在一些复杂项目的评价中, 众多因素是在不同层次上影响评判结果的。需要对不同层次的因素进行不同层次综合评价, 并逐渐汇总成最终的评判结果。例如, 两级模糊综合评判与单级评判的区别在于单因素评判向量 r_i 无法直接给出, 需要对影响 r_i 的所有子因素进行综合评判而得到 r_i , 其流程可用下图 2 表示。

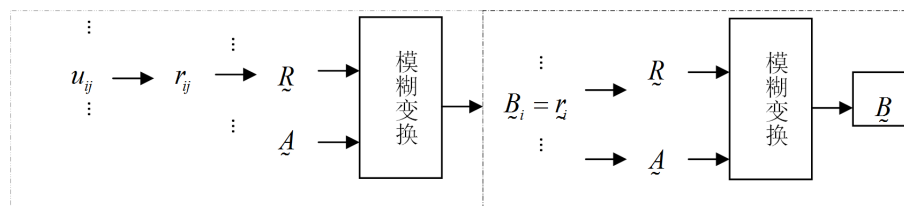


Figure 2. Process of multi-level fuzzy comprehensive evaluation
图 2. 多级模糊综合评判流程

图中 B_i 是以第 i 类因素子集 $U_i = \{u_{i1}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{il}\}$ 为基础进行第二级综合评判时得出的结果, 这正是第一级评判时所需的单因素评价向量 r_i , 矩阵 $R_i = [r_{ijp}]_{l \times m}$ 是第二级评判时第 i 类因素子集。如果第二级因素 u_{ij} 的单因素评价向量 r_{ij} 仍无法直接得到, 需经综合评判得到, 则问题变成三级模糊综合评判问题。

3. 影响烃源岩生烃潜力的因素

有效烃源岩是指既有油气生成又有油气排出的岩层[7]。有效烃源岩的识别和评价是含油气系统和油

气成藏研究的基础[8]。对陆相烃源岩评价标准的讨论由来已久,不同的学者评价标准不一样,如黄第藩(1984)[9]、成海燕(2008)[10]、陈建平(1997)[11]、Peters(1998)[12]等都对陆相烃源岩评价标准进行了研究,并给出了自己的评价标准。本次烃源岩评价在充分调研前人研究的基础上建立的评价标准,从而进行综合判断;主要包括有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度及生烃过程。

3.1. 有机质丰度

烃源岩有机质丰度是指单位质量岩石的有机质含量。在其他条件相近的情况下,岩石中有机质含量(有机质丰度)越高,生烃潜力越大。目前评价有机质丰度的主要指标包括总有机碳(TOC),氯仿沥青“A”、总烃(HC)、生烃潜力(S1 + S2)和IH等参数。本次主要参考1995年出版的标准[13]和1998年Peters的标准[12]来评价烃源岩的有机质丰度,如表1。

Table 1. Evaluation criteria of organic matter abundance in terrestrial source rocks

表 1. 陆相烃源岩有机质丰度评价标准

评价指标	好	较好	中等	较差	差	
有机碳含量, %	淡水 - 半咸水	>2	1.5~2	1.0~1.5	0.4~1.0	<0.4
	咸水 - 超咸水	>0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
氯仿沥青“A”, %	>0.15	0.10~0.15	0.05~0.10	0.015~0.05	<0.015	
HC, %	>0.10	0.07~0.1	0.04~0.07	0.01~0.04	<0.01	
S ₁ + S ₂ , mg/g	>8	6~8	4~6	2~4	<2	
IH, mg/g, HC/TOC	>500	350~500	200~350	50~200	<50	

3.2. 有机质类型

要客观的认识和评价烃源岩的生烃潜力,仅仅评价有机质丰度是不够的,必须对有机质类型进行评价。有机质类型同样也决定了生成的产物的不同,如I型干酪根和II型干酪根以生油为主,III型干酪根以生气为主。这主要与有机质的化学组成和结构有关。鉴别烃源岩有机质类型的方法主要有三种[9]:①依据有机质来源划分;②依据干酪根的显微组分组成划分;③依据干酪根元素来划分。本次评价主要采用三类五分法评价干酪根的类型,本次主要参考1995年出版的标准[13]和1998年Peters的标准[12]来评价烃源岩的有机质类型,如表2。

Table 2. Evaluation criteria of organic matter type in terrestrial source rocks

表 2. 陆相烃源岩有机质类型划分表

评价参数	I ₁	I ₂	II	III ₁	III ₂	
	好	较好	中等	较差	差	
壳质组	>90	70~90	50~70	30~50	<30	
镜质	镜质组	<10	10~20	20~30	30~80	80~90
	TI	60~100	40~60	20~40	(-10)~20	(-100)~(-10)
干酪根元素	H/C	>1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	0.8~1	<0.8
	O/C	<0.1	0.1~0.15	0.15~0.2	0.2~0.25	>0.25
热失重总失重率%	>70	60~70	40~60	30~40	<30	
红外光谱	2920 cm ⁻¹ /1600 cm ⁻¹	>4.3	2.7~4.3	1.6~2.7	0.5~1.6	<0.5
	1460 cm ⁻¹ /1600 cm ⁻¹	>1.0	0.75~1.0	0.5~0.75	0.15~0.5	<0.15
碳同位素, %	<-30	(-30)~(-28)	(-28)~(-25.5)	(-25.5)~(-22.5)	>-22.5	

Continued

可 溶 有 机 质	氯仿 沥青 “A” 组成	饱和烃, %	60~40	40~30	30~20	20~15	<15
		芳烃, %	10~14	14~18	18~22	22~26	26~30
		非烃 + 沥青质, %	20~40	40~50	50~60	60~70	70~80
		饱和烃/芳香烃	>2.0	1.6~2.0	1.0~1.6	0.5~1.0	<0.5
	生物 标志 化合 物	5 α -C ₂₇ , %	>55	45~55	35~45	25~35	<25
		5 α -C ₂₈ , %	<15	15~25	25~35	35~45	>45
		5 α -C ₂₉ , %	<25	25~35	35~45	45~55	>55
	5 α -C ₂₇ /5 α -C ₂₉	>2	1.5~2.0	1.0~1.5	0.5~1.0	<0.5	

3.3. 有机质成熟度

目前判断有机质成熟度的方法有很多, 例如: 镜质体反射率(Ro)、干酪根红外光谱、可溶有机质的演化以及孢粉颜色指数(SCI)等等, 其中最有效的是镜质体反射率[10]。由于在高成熟阶段和过成熟度阶段生物标志物失去意义, 因此本次评价指标不将其考虑在列。此次主要参考 1995 年出版的标准[13]和 1998 年 Peters 的标准[12]来评价烃源岩的有机质类型, 如表 3。

Table 3. Evaluation criteria of organic matter maturity in terrestrial source rocks

表 3. 陆相烃源岩有机质演化阶段划分表

评价指标	好	中等	差
Ro, %	0.7~1.3	0.5~0.7	<0.5
		1.3~2.0	>2.0
孢粉颜色指数 SCI	3.0~4.5	2.0~3.0	<2.0
		4.5~6.0	<6.0
Tmax, °C	440~450	435~440	<435
		450~580	>580
H/C 原子比	1.0~1.2	1.2~1.6	>1.6
		0.5~1.0	<0.5
孢子体显微荧光 Q	2.0~3.0	1.4~2.0	1~1.4
		>3.0	>3.0
古地温	90~150	60~90	50~60
		150~200	>200
干酪根颜色	深黄色	黄色	浅黄色
		浅棕色 - 棕黑色	黑色

3.4. 生烃过程

烃源岩的生烃潜力不仅受生烃物质基础的影响, 而且受到烃源岩厚度、埋藏深度、生烃量、排烃量、生烃期次等因素影响。影响生烃过程的主要参数包括最大埋藏深度、生烃持续时间、生烃期次以及模拟生、排烃量等参数。通过调研发现, 当其它条件不变时, 烃源岩厚度越大, 有机质总量越大, 烃类物质生成的持续时间越长[13]; 埋藏深度越深, 烃源岩层的温度越大, 成熟度相对越高, 生烃率越高[14]; 另外, 烃源岩生烃量和排烃量[15]越大, 说明有机质转化为烃类物质的比例就越高, 生烃潜力就越大。本次研究在充分调研前人研究的基础上, 通过对参数的定量分析, 确定了生烃过程的主控因素及范围, 详情见表 4。

Table 4. Evaluation criteria of hydrocarbon generation process in terrestrial source rocks
表 4. 陆相烃源岩生烃过程评价标准

评价指标	好	较好	中等	较差	差
烃源岩厚度, m	>300	200~300	100~200	50~100	<50
埋藏深度, m	>3500	3000~3500	2500~3000	2000~2500	<2000
排烃量(排烃效率), %	>40	30~40	20~30	10~20	<10
生烃期次	没有生烃		生过一次烃		生过二次烃
生烃量(生油率), g/g TOC	>0.18	0.13~0.18	0.08~0.13	0.04~0.08	<0.04

4. 烃源岩生烃潜力评价模型

通过对影响烃源岩生烃潜力因素的分析和研究, 本文提出了 34 个指标进行评价, 这 34 个指标的性质对目标烃源岩的生烃潜力起着决定性作用; 其中有机质丰度评价包含 5 个评价指标, 有机质类型包含 17 个评价指标, 有机质成熟度包含 7 个评价指标, 排烃过程包含 5 个评价指标。而后根据模糊数学的理论建立模糊评价模型, 每一个参数都被称为烃源岩评价的单因素, 每一个权重需要反映不同参数的相对重要性, 评价指标体系及权重如图 3。

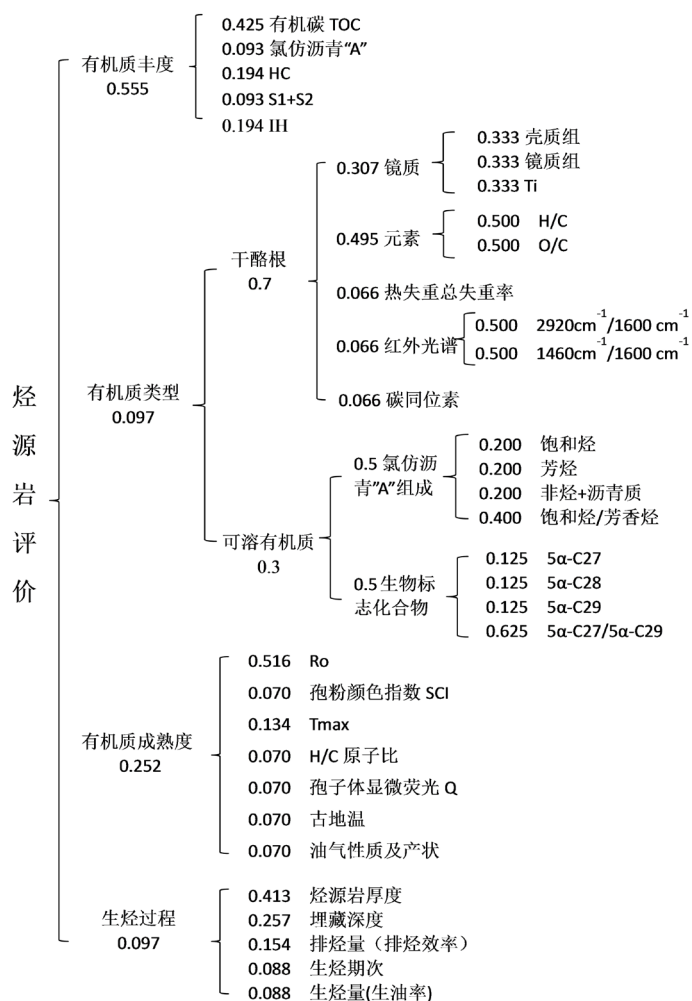


Figure 3. Evaluation structure of hydrocarbon generation potential of source rocks

图 3. 烃源岩生烃潜力评价指标体系

Continued

热失重总失重率, %	30	35.00	55.00	37.00	32.00
2920 cm ⁻¹ /1600 cm ⁻¹	1.8	2.20	2.20	1.05	3.21
1460 cm ⁻¹ /1600 cm ⁻¹	0.35	0.55	0.55	0.30	0.27
碳同位数, ‰	-22	-20.50	-26.50	-23.25	-23.25
饱和烃, %	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
芳烃, %	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
非烃 + 沥青质, %	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
饱和烃/芳香烃	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
5 α -C ₂₇ , %	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
5 α -C ₂₈ , %	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
5 α -C ₂₉ , %	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
5 α -C ₂₇ /5 α -C ₂₉	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66
Ro, %	0.27	0.48	0.57	0.47	0.59
孢粉颜色指数 SCI	1.8	2.2	2.20	2.2	2.2
Tmax, °C	433.0	439.0	431.00	437.00	439.00
H/C 原子比	0.6	0.70	0.61	0.74	0.78
孢子体显微荧光 Q	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3
古地温	80	100	80	80	120
干酪根颜色	浅黄色	浅黄色	浅黄色	浅黄色	浅黄色
生烃持续时间(烃源岩厚度, m)	200	400	400	300	300
埋藏深度, m	2700	2700	2700	2700	2700
排烃量, 排烃速率, mg/10 m ²	6.8	15.5	15.5	20.5	20.5
生烃期次	未	未	未	未	未
生烃量(生油率), g/g TOC	0.54	18.4	18.4	12.09	12.09

下面主要介绍一下下白垩统的地球化学特征[16] [17] [18] [19]: 盆地内下白垩统暗色泥岩有机碳含量分布为 0.58%~6.17%, 氯仿沥青“*A*”含量为 0.035%~0.69%, 有机质丰度综合评价为较好 - 好烃源岩。煤田浅井第三系暗色泥岩干酪根镜鉴表明: 显微组分以镜质组为主, 部分壳质组和惰质组, 无腐泥组, 镜质组所占比例为 2/3~4/5; 干酪根元素 H/C 原子比介于 0.98~1.15, 平均 1.07; O/C 原子比介于 0.20~0.35, 平均 0.26; 饱和烃色谱奇数碳优势明显, 主峰碳主要为 nC₂₉, nC₂₇ 所占极少, OEP 值平均 3.66, 饱/芳比 0.86~2.83, 平均 1.66。有机质类型综合评价以 II~III₁ 型为主, 少量 II 型。敦化盆地煤田浅井古近系珲春组 594~831 m 烃源岩的饱和烃色谱分析表明, OEP 值 2.64~4.93, Σ C₂₁-/ Σ C₂₂+值主要介于 0.06~0.26, 干酪根颜色由浅黄 - 棕黄色, 表明敦化盆地隆起区古近系暗色泥岩未成熟。春阳煤矿和贤儒煤矿下白垩统暗色泥岩 Ro 值为 0.47%~0.59%, Tmax 值为 431~437, 处于未成熟 - 低成熟阶段, 这与样品所处的埋深有关。

敦化盆地烃源岩综合评价为四级评价, 评价结构及权重见图 4。运用模糊数学我们可以获得各个区块的评价结果, 如表 6。

Table 6. Hydrocarbon generation potential evaluation of source rocks in Dunhua Basin
表 6. 敦化盆地烃源岩生烃潜力综合评价表

评价类型和区块	评价结果	评语				
		好	较好	中等	较差	差
烃源岩评价	样品 1	0.0382	0.0822	0.232	0.4905	0.1571
	样品 2	0.3489	0.0697	0.2042	0.2738	0.1034
	样品 3	0.123	0.0453	0.2817	0.3889	0.1611
	样品 4	0.267	0.094	0.2366	0.3549	0.0475
	样品 5	0.2782	0.2007	0.2457	0.2704	0.0051

根据最大隶属度原则, 敦化盆地新近系土门子组泥岩烃源岩综合评价结果为“较差”和“中等”水平。古近系珲春组泥岩烃源岩综合评价结果为“好”和“较差”水平。古近系珲春组泥岩烃源岩综合评价结果为“较差”和“中等”水平。下白垩纪春阳煤矿泥岩烃源岩综合评价结果为“较差”和“中等”水平。下白垩南贤儒煤矿泥岩烃源岩综合评价结果为“好”和“较差”水平。由此可知敦化盆地的生烃潜力比较大。

6. 结论

本文利用模糊层次分析法对敦化盆地烃源岩的生烃潜力进行了系统的评价, 并将模糊评价结果与实际情况进行对比, 从而验证模糊层次分析法在烃源岩生烃潜力评价中的可行性。

1) 通过分析影响烃源岩生烃潜力主要参数, 确定了模糊综合评价指标体系的 34 个评价指标, 并运用模糊数学建立了新的综合评价模型。

2) 本次所建立的模型对许多影响因素都进行了考虑, 用层次分析法确定了各参数的权重, 避免了烃源岩评价过程中由于参数过多而导致的矛盾现象, 避免了选取参数时的盲目性, 提高了烃源岩评价效率。

3) 该方法适合评价指标丰富且难以单纯用一两个指标评价生烃潜力的目标区块, 并在敦化盆地进行了应用。

4) 应用表明该方法是实用的、合理的、可靠的, 能够客观地对烃源岩进行评价, 具有较高推广价值。

参考文献

- [1] 诸克军, 冯光华, 冯刚项. 一种石油勘探决策的模糊聚类分析法[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(3): 16-20.
- [2] 程顶胜, 刘松, 吴培红. 塔里木盆地石炭系生烃潜力的模糊数学综合评价[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 34-39.
- [3] 刘世翔, 薛林福. 模糊聚类分析法在油气评价中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2011, 26(3): 300-303.
- [4] 张跃, 邹寿平, 宿芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [5] 刘育骥. 石油工程模糊数学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.
- [6] 肖芳淳. 模糊分析设计在石油工业中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [7] 金强. 有效烃源岩的重要性及其研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 1-4.
- [8] 朱光有, 金强, 王锐. 有效烃源岩的识别方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 6-10.
- [9] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [10] 成海燕, 李安龙, 龚建明. 陆相烃源岩评价参数浅析[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(2): 6-10.
- [11] 陈建平, 赵长毅, 何忠华. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(1): 1-5+91.
- [12] Peters, K.E. (1998) Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. *AAPG Bulletin*, 70, 318-329.

- [13] 中原石油勘探局勘探开发研究院. SY-T5735-1995 陆相烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [14] 周杰, 庞雄奇. 一种生、排烃量计算方法探讨与应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 24-27.
- [15] 侯读杰, 冯子辉. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 186-188.
- [16] 于明德, 王璞珺, 蒋永福, 等. 敦化盆地烃源岩地球化学特征及其生烃潜力[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 270-275.
- [17] 于明德, 王璞珺, 王荣新, 等. 敦化盆地烃源岩特征与油气资源潜力[J]. 地质科技情报, 2008, 27(5): 65-70.
- [18] 姚武君, 王海峰, 张白林, 等. 关于敦化盆地下白垩统的讨论[J]. 地层学杂志, 2009, 33(2): 213-216.
- [19] 吴俊华, 罗家群, 严永新, 等. 敦化盆地石油地质条件与勘探前景[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(5): 8-12.

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: 2163-3967, 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: ag@hanspub.org