

文章编号: 0253-2697(2005)04-0050-04

用模糊数学方法评价烃源岩

郭长春 金 强 姚 军

(中国石油大学 山东东营 257061)

摘要: 选择 10 个烃源岩评价参数, 构建了模糊评价矩阵, 确定了各参数权重系数, 利用加权平均的算法, 计算了烃源岩综合评价指数。从生烃物质基础和生烃过程两方面分别对烃源岩进行了评价, 进而对其进行了二级综合评价。利用该方法对济阳坳陷沙河街组 68 个烃源岩评价单元进行了综合评价, 并给出其生烃潜力的排序。评价结果表明, 在济阳坳陷内, 利津洼陷是最好的生油洼陷, $E_{s_3}^{\text{下}}$ 是最有利的烃源岩层系。

关键词: 济阳坳陷; 烃源岩; 生烃物质基础; 生烃过程; 模糊数学; 综合评价

中图分类号: TE112. 115

文献标识码: A

Evaluation of source rocks with fuzzy mathematics

GUO Chang-chun JIN Qiang YAO Jun

(China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Ten parameters for characterizing source rocks were taken as factors for establishing fuzzy matrix. The weight coefficients of every factor were determined. The weighted average algorithm was used to compute the synthetic index of source rock evaluation. The further synthetic evaluation of the hydrocarbon-generation matter and hydrocarbon-generation process for source rocks were implemented respectively. This method was applied to 68 evaluating units in Shahejie Formation of Jiyang Depression according to the synthetic index of source rock evaluation. The ranks of hydrocarbon-generation potentials of those evaluating units were presented. The evaluation shows that Lijin Sag is the best sag for hydrocarbon generation, and the lower part of the third member of Shahejie Formation is the most favorable layer of source rocks in Jiyang Depression.

Key words: Jiyang Depression; source rocks; hydrocarbon-generation matter; hydrocarbon-generation process; fuzzy mathematics; synthetic evaluation

沉积盆地(凹陷)只有发育了有效烃源岩才可能形成一定规模的油气聚集^[1,2]。前人对烃源岩的评价只注重了烃源岩生烃物质基础的评价,很少对烃源岩的生烃过程进行研究^[3,4]。然而,烃源岩的生烃潜力不仅取决于生烃物质基础的好坏,而且也受控于生烃过程。

限于目前的勘探手段和分析技术,对烃源岩生烃潜力难以进行客观评价及相对优劣排序。模糊数学是研究和处理模糊体系规律的理论和方法^[5]。程顶胜等曾运用模糊数学法对塔里木盆地石炭系不同沉积有机相的烃源岩进行了评价^[6]。笔者选用不同评价参数构建烃源岩评价新模型,对济阳坳陷沙河街组烃源岩进行综合模糊评价。

1 烃源岩模糊综合评价原理和方法

1.1 多级模糊综合评价的基本原理

设 U 为评价因素集,其因素就是研究对象的各种

属性或数量。设 V 为评语集合,表示研究对象的评价结果。

当考虑的因素很多及各因素之间又有层次之分时,可把因素集 U 按某种性质分成几个子集。先对每个子集进行模糊评价,然后在此基础上进行高一级的综合模糊评价。

为了使各项因素都参与评价,必须建立一个从 U 到 $F(V)$ 的模糊映射,即

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 r_{ij} 为评价对象各因素的隶属度,一般由建立的隶属函数求得,表示研究对象各单因素评价的结果。

设 A 为 U 上的模糊子集,表示各因素在研究评价中的重要程度,即权重向量,其表达式为

基金项目:国家“十五”重点科技攻关项目“济阳坳陷下第三系沉积体系与油气成藏”(2001BA605A-09)。

作者简介:郭长春,男,1977年7月,2001年毕业于石油大学(华东),现为中国石油大学博士研究生,主要从事油藏综合研究。

E-mail: sapphire1977830@yahoo.com.cn

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_k) \quad (2)$$

规定所有的权重向量之和为 1。由权向量 A 和模糊变换矩阵 R , 经过模糊运算得到烃源岩综合评价指数 B 。 B 为 V 上的模糊子集, b_i 是第 i 个评价对象的评价指数。常用的模糊算法有加权平均型、主因素决定型和主因素突出型 3 种算法^[5]。具体运算时, 可根据研究对象特点而定。

1.2 烃源岩模糊综合评价参数

现代成藏理论要求定量评价烃源岩的生烃作用和生烃物质的富集分布^[1]。因此, 评价烃源岩既要注重生烃物质基础, 又要研究生烃过程^[7]。

1.2.1 生烃物质基础评价参数

烃源岩生烃物质基础研究就是分析有机质丰度、类型和成熟度以及烃源岩的发育数量, 用来评价生烃物质基础的好坏。王永诗、金强等人认为^[7], 在济阳拗陷沙河街组中, 只有那些有机碳含量大于 2% 的烃源岩才对油气成藏有贡献, 是有效烃源岩。笔者选择了有效烃源岩体积、有效烃源岩有机碳质量、有效烃源岩发育丰度、有机质的类型和成熟烃源岩体积 5 个参数对烃源岩进行生烃物质基础评价。

有效烃源岩体积是表示烃源岩发育数量。可选取线性函数作为隶属函数:

$$\mu(x) = x/M \quad (3)$$

式中 M 为所有评价对象中有效烃源岩体积的最大值。

有效烃源岩有机碳质量是指有效烃源岩中所含有有机碳的总质量, 代表了生烃母质的丰富程度。成熟烃源岩体积是指处于门限深度以下烃源岩的量。它们都是烃源岩评价中重要的参数, 其隶属函数与有效烃源岩体积的隶属函数相同(表 1)。

不同类型有机质的生烃潜力是有差别的, Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型有机质的生烃能力依次降低。可用各类有机质所占的比例表示烃源岩有机质类型的好坏, 建立有机质类型的隶属函数, 即

$$\mu(x) = \sum_{i=1}^4 k_i \cdot x_i \quad (4)$$

式中 k_i 为某种类型的有机质生烃潜力系数; x_i 为某种类型的有机质所占的比例。设定 Ⅰ型、Ⅱ型和 Ⅲ型有机质生烃潜力系数分别为 1.0、0.75、0.50 和 0.25。

有效烃源岩发育丰度表征其富集程度。该参数隶属度为

$$\mu(x) = x \quad (5)$$

通过矩阵分析^[5], 上述 5 个参数重要程度排序如下: 有效烃源岩有机碳质量 = 成熟烃源岩体积 = 有机

质的类型 > 有效烃源岩发育丰度 > 有效烃源岩体积。其相应的权重向量为

$$A = (0.2601, 0.2601, 0.2601, 0.1378, 0.0819) \quad (6)$$

1.2.2 烃源岩生烃过程评价参数

烃源岩生烃过程影响烃源岩的生烃潜力。通过烃源岩现今最大埋藏深度、生烃持续时间、生烃期次以及模拟生、排烃量等参数分析来定量表示烃源岩生烃过程是否有利, 运用判别矩阵分析方法求出各参数的权重系数(表 1)。烃源岩生烃持续时间、埋藏深度、排烃量、生烃量和生烃期次在生烃过程评价中的重要程度依次降低。

表 1 烃源岩评价参数的权重系数和隶属函数

Table 1 Weight and membership function of evaluation parameters of source rocks

评价因素	评价参数	权重系数	隶属函数
生烃物质基础	有效烃源岩有机碳质量	0.2601	$\mu(x) = x/M$
	有机质类型	0.2601	$\mu(x) = \sum_{i=1}^4 k_i \cdot x_i$
	成熟烃源岩体积	0.2601	$\mu(x) = x/M$
	有效烃源岩发育丰度	0.1378	$\mu(x) = x$
	有效烃源岩体积	0.0819	$\mu(x) = x/M$
生烃过程	生烃持续时间	0.2458	$\mu(x) = x/M$
	埋藏深度	0.2420	$\mu(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ x/M & (x \geq 0) \end{cases}$
	排烃量	0.1978	$\mu(x) = x/M$
	生烃期次	0.1556	$\mu(x) = (0, 0.7, 1)$
	生烃量	0.1588	$\mu(x) = x/M$

生烃持续时间越长, 有机质向油气转化的比例相对越高, 烃源岩的油气生成潜力越大。对于尚未进入生烃门限的烃源岩, 其生烃持续时间为 0。生烃持续时间的隶属函数为

$$\mu(x) = x/M \quad (7)$$

结合烃源岩的生烃门限, 就能判断有机质演化程度的高低, 可用最大埋藏深度与生烃门限的差值来表征。若差值为负数, 表示烃源岩还没有成熟; 若差值为正数, 表示烃源岩达到了门限深度; 差值越大, 有机质演化程度越高。其隶属函数为

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ x/M & (x \geq 0) \end{cases} \quad (8)$$

济阳拗陷沙河街组烃源岩的生烃期次共有 3 种情况: 至今没有生烃的; 有过一次生烃的; 二次生烃的。其隶属度相应的赋予值分别为 0, 0.7, 1。

烃源岩的生烃量和排烃量是烃源岩生烃作用的结果。其生烃量和排烃量大, 在某种程度代表了烃源岩所经历的生烃过程比较有利。它们的隶属函数与有效

烃源岩体积相同(表1)。

1.3 具体算法

建立各参数的隶属函数,求出评价对象各参数的隶属度。所有对象全部评价参数的隶属度就构成一个模糊变换矩阵 R 。采用加权平均计算方法^[5],计算出各评价对象的综合评价值 b_j 。为了使研究成果更好地为生产实践服务,结合济阳拗陷的实际情况,把 b_j 分成 A、B、C、D 和 E 5 个等级,依次代表好、较好、一般、较差和差。

烃源岩二级模糊评价是在生烃物质基础和生烃过程的一级模糊评价基础上进行的。把生烃物质基础和生烃过程都看作一个因素,并赋予相应的权重系数。生烃物质基础比生烃过程重要,故生烃物质基础的权重系数为 0.60,生烃过程的权重系数为 0.40。采用加权平均计算模型,得到烃源岩综合评价指数 b_j ,并依此对烃源岩进行相对优劣的排序。

2 应用实例

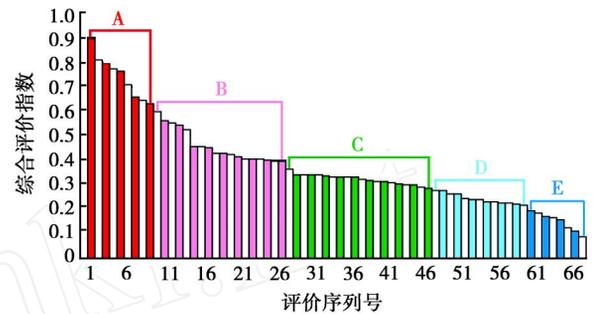
济阳拗陷在古近纪呈现出凹凸相间的沉积构造格局,整个拗陷可分成 14 个洼陷。各洼陷内沙河街组大都发育了沙四上亚段(Es_4^+)、沙三段(分为 Es_3^+ 、 $Es_3^{\text{中}}$ 和 Es_3^+)和沙一段(Es_1)多套烃源岩。其中,沙四上亚段烃源岩在孤南洼陷和富林洼陷不发育。不同层段烃源岩的发育厚度、有机质性质和生烃过程是各不相同的;同一层系烃源岩在不同洼陷间也有一定的差异^[7]。系统研究了 68 个评价单元的烃源岩,获取了烃源岩评价所需参数,利用模糊数学的方法对烃源岩进行了综合评价。

2.1 生烃物质基础评价结果

不同洼陷不同层系间的生烃物质分布是不均衡的,而且差异明显(图1)。在 14 个洼陷中,利津洼陷的生烃物质基础最好。利津洼陷的沙四上亚段和沙三下亚段烃源岩以深灰色泥岩、钙质泥岩和灰色油页岩为主,有机碳含量多数在 2%~5%,其油页岩的有机碳含量为 5%~13%。其有机质类型好(以 I_1 型、 I_2 型干酪根为主),大部分处于成熟阶段,部分达到了高成熟阶段,其生烃物质基础综合评价均为 A 级。利津洼陷的沙三中亚段下部和下伏的沙三下亚段烃源岩很相似,也是一套很好的烃源岩。沙三上亚段和沙一段烃源岩基本上未成熟,但其有机碳含量比较高,有机质类型良好,生烃物质综合评价级别达到 B 级。总之,利津洼陷具有非常丰富的生烃物质基础,这已经被油气勘探实践所证实。

富林洼陷面积小,其烃源岩总量少。沙三段烃源岩埋藏浅,主要位于生烃门限以上,成熟度多在 0.60

以下。有机质以 I_1 型和 I_2 型为主。因此,富林洼陷所有层系的烃源岩生烃物质基础评价结果都为 E 级,其中沙三上亚段烃源岩是所有评价对象中最差的。



1—利津 Es_3^+ ; 6—牛庄 Es_3^+ ; 11—博兴 Es_3^+ ; 16—利津 Es_1 ; 21—阳信 Es_4^+ ; 26—民丰 Es_3^+ ; 31—滋镇 Es_1 ; 36—阳信 Es_1 ; 41—滋镇 $Es_3^{\text{中}}$; 46—郭局子 $Es_3^{\text{中}}$; 51—孤南 $Es_3^{\text{中}}$; 56—郭局子 Es_4^+ ; 61—富林 Es_3^+ ; 66—大王北 Es_4^+

图1 济阳拗陷沙河街组生烃物质基础综合评价排序

Fig. 1 Rank of synthetic evaluation for hydrocarbon-generation matter of source rocks in Shahejie Formation of Jiyang Depression

沙三下亚段是最好的一套烃源岩,其分布广泛,有机碳含量高,有机质类型好,所处生油阶段有利。在 14 个洼陷中,有 4 个 A 级沙三下亚段烃源岩,5 个 B 级沙三下亚段烃源岩(图1)。与沙三下亚段烃源岩相比,沙四上亚段烃源岩有机碳含量较低,有机质类型变差,但其成熟度稍高。因此,沙四上亚段烃源岩也是一套好的烃源岩,其综合评价级别以 A 级和 B 级为主,各有 3 个(图1)。而沙一段烃源岩是生烃物质基础最差的一套烃源岩,有 8 个 E 级,3 个 D 级和 3 个 C 级。

2.2 生烃过程评价结果

盆地沉积埋藏史、热演化史以及有机质性质决定了烃源岩的生烃过程。利津洼陷的沙三下亚段和沙四上亚段都具有良好的生烃过程:早期快速埋藏,有机质保存好,进入生烃门限快;地温梯度高,成熟演化快;现今的埋藏深度大,成熟度高;都具有二次生烃过程,生烃持续时间长(超过 20Ma);生排烃量都很大,其生烃过程综合评价为 A 级(表2)。沙三中亚段的生烃过程也较好,综合评价也达到了 A 级(表2)。同利津洼陷一样,牛庄洼陷、渤南洼陷和临南洼陷的沙三下亚段和沙四上亚段的生烃过程非常有利。而滋镇洼陷烃源岩埋藏浅,还没有进入生烃门限,其生烃过程是最差的(有 4 个 E 级,1 个 D 级)。从层系讲,沙三下亚段和沙四上亚段生烃过程好,以 A 级和 B 级为主;而沙一段生烃过程差,以 E 级为主。

2.3 烃源岩综合评价结果

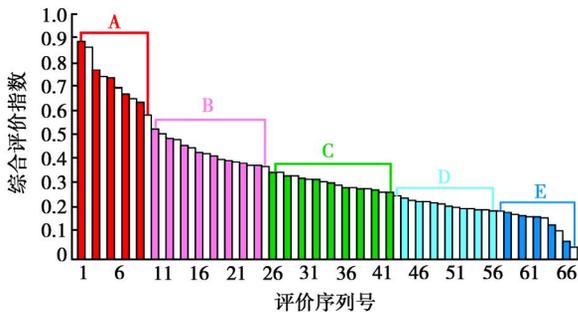
优质烃源岩不仅要具备优越的生烃物质基础,而

表 2 济阳拗陷不同洼陷有效烃源岩生烃过程综合评价结果
Table 2 Synthetic evaluation for the hydrocarbon-generation process of effective source rocks in all sags of Jiyang Depression

层位	东营凹陷				沾化凹陷				惠民凹陷			车镇凹陷		
	利津	牛庄	博兴	民丰	渤南	孤北	孤南	富林	临南	阳信	滋镇	车西	大王北	郭局子
Es ₁	E	E	E	E	C	C	C	E	E	E	E	D	D	D
Es ₃ ^上	B	C	C	D	C	C	C	E	B	E	E	C	C	C
Es ₃ ^中	A	B	B	C	B	B	C	D	A	D	E	D	C	C
Es ₃ ^下	A	A	A	B	A	B	B	C	A	C	E	A	B	B
Es ₄ ^上	A	A	A	B	A	B	—	—	A	C	D	B	B	B

且要有良好的生烃过程。利津洼陷的生烃物质基础好,生烃过程优,烃源岩综合评价级别高,有 3 个 A 级、1 个 B 级和 1 个 C 级。而富林洼陷的生烃物质基础、生烃过程都差,烃源岩综合评价级别低,有 3 个 E 级、1 个 D 级。

从 5 个烃源岩层系来看(见图 2),沙三下亚段烃源岩生烃物质基础极其优越,生烃过程非常有利,其综合评价是最好的,有 5 个 A 级、5 个 B 级;沙四上亚段次之,包括 3 个 A 级(均在东营凹陷内),5 个 B 级和 3 个 C 级;沙三中亚段更次之,只有 2 个 A 级(在利津洼陷和临南洼陷内);而沙三上亚段和沙一段就没有 A 级烃源岩的发育,以 C、D 和 E 级为主。



1—利津 Es₃^下; 6—博兴 Es₄^上; 11—临南 Es₃^上; 16—孤北 Es₃^下; 21—阳信 Es₃^下; 26—阳信 Es₄^上; 31—大王北 Es₃^中; 36—孤北 Es₃^中; 41—博兴 Es₃^上; 46—滋镇 Es₃^上; 51—大王北 Es₁; 56—滋镇 Es₁; 61—牛庄 Es₁; 66—富林 Es₃^中

图 2 济阳拗陷沙河街组烃源岩综合评价排序

Fig. 2 Rank of synthetic evaluation for source rocks in Shahejie Formation of Jiyang Depression

3 结 论

模糊评价方法是综合评价烃源岩的有效手段。烃源岩模糊评价,可以充分合理地利用有效烃源岩有机

碳质量、有机质类型、成熟烃源岩的体积以及生烃过程的多个参数,运用模糊变换思想对烃源岩进行二级模糊综合评价,定量地表达地质参数。模糊评价能科学地对烃源岩进行相对优劣的比较,优选出有利的研究、勘探目标。

利津洼陷的沙三下亚段烃源岩在 68 个评价单元中是最好的,其生烃物质基础最好,生烃过程最有利。利津洼陷含有 3 套 A 级烃源岩(Es₃^下, Es₄^上, Es₃^中),是济阳拗陷中最好的生油洼陷。沙三下亚段烃源岩是综合评价最好的一套生油层系,以 A 级和 B 级为主(有 5 个 A 级、5 个 B 级),是济阳拗陷的主力烃源岩。东营凹陷是好的、较好的烃源岩富集区,仍是今后勘探工作的重点。

致谢 在研究工作开展的过程中,朱光有、程付启等人给予了帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 张水昌, 张保民, 王飞宇, 等. 塔里木盆地两套海相有效烃源岩层—有机质性质、发育环境及控制因素[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3): 261-268.
- [3] 李友川, 黄正吉, 张功成. 渤中拗陷东下段烃源岩评价及油源研究[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 44-48.
- [4] 方杰, 刘宝泉, 金凤鸣, 等. 华北北部中、上元古界生烃潜力与勘探前景分析[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 18-23.
- [5] 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: 1-205.
- [6] 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.
- [7] 王永诗, 金强, 朱光有, 等. 济阳拗陷沙河街组有效烃源岩特征与评价[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 53-55.

(收稿日期 2004-09-18 改回日期 2005-03-02 编辑 张 怡)