

模糊综合评判在油气勘探 多学科指标评价预测中的应用

——以新疆柴窝堡凹陷为例

刘春梅¹, 谭青²

(1. 长江大学 文理学院, 湖北 荆州 434020; 2. 中国石化 江汉油田 荆州采油厂, 湖北 荆州 434020)

摘要: 应用多学科、多指标勘探数据和图形资料评价一个盆地或探区内的多个目标, 优选有利含油气远景靶区, 传统方法多是定性评估。以新疆柴窝堡凹陷为例, 利用地震构造、化探、遥感、放射性 γ 能谱、土壤微磁等多学科、多指标资料, 以局部构造、构造部位、烃微渗漏综合异常及油气属性等地质要素, 采用模糊综合评判方法对多个目标进行量化评价, 优选了其中较有利靶区。

关键词: 多学科指标; 模糊综合评价; 油气勘探; 柴窝堡凹陷; 准噶尔盆地

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Application of fuzzy comprehensive evaluation in oil & gas exploration with multidisciplinary assessment & forecasting: A case study on Chaiwopu Sag in Xinjiang

Liu Chunmei¹, Tan Qing²

(1. College of Arts & Science, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434020, China;

2. Jingzhou Oil Production Plant, SINOPEC Jianghan Oilfield, Jingzhou, Hubei 434020, China)

Abstract: Most of the traditional methods are qualitative assessments in optimized selection of the oil-gas potential exploration targets within one basin or exploration zone by applying the multidisciplinary and multi-index prospecting data and graphics. This paper, makes a case study on the Chaiwopu Sag in Xinjiang, by means of fuzzy comprehensive evaluation, utilizing multidisciplinary resources based on seismotectonics, geochemical exploration, remote sense, radioactive γ energy spectrum, soil micromagnetics, meanwhile, integrating local structure, structure position, hydrocarbon microleakage composite anomalies, oil-gas properties information and other geological essential factors, to carry out quantitative assessment on the multi-target areas, from which some of significant targets are selected as the prospecting prospects.

Key words: multidisciplinary index; fuzzy comprehensive evaluation; oil-gas exploration; Chaiwopu Sag; Junggar Basin

许多盆地或探区在勘探历程中积累了大量的地质、物探、化探、遥感、钻井等地学资料。地理信息系统(GIS)技术在矿产资源勘查、开发等领域中的广泛应用^[1-3],为综合利用这些多学科数据和图形进行分类、比较、叠合、综合分析,进而为更精细研究油气聚集规律,评价预测新的勘探靶区创造了条件。以往对勘探方向和目标评价预测一般多采用传统的方法^[4-6]。这些方法虽然有效,但系定性描述。尤其是在应用多学科、多指标进行综合评价时,由于学科彼此存在复杂的相关关系,要想完全精确地描述、评价它们与油气相关这个带有模糊性的目标,在客

观实际上是不可能的。应用模糊数学综合评判(简称“模糊综合评判”),以全新的比较简洁的量化方法来解决多学科、多指标评价多个勘探靶区的复杂问题,不失为一种合乎实际的处理方法。本文运用该方法对新疆柴窝堡凹陷靶区进行预测。

柴窝堡凹陷位于海西地槽褶皱带,系准噶尔盆地向东南延伸的部分。在地形上它夹持于博格达山及伊连哈比尔尕山之间,面积近3 000 km²,主体为达坂城次凹。次凹内构造线为近东西向,由北而南可划分为4个构造带:博格达山前冲断带、西疙瘩背斜带、中部柴杨断褶带、南部山前冲断带。在

地史上柴窝堡在二叠纪、晚三叠世是生油凹陷区。区内发育有多套生储盖组合形式,二叠系是成熟的主力生油岩,上三叠统有低熟生油层^[7-9]。

从20世纪50年代开始,我国地质和石油勘探部门先后在柴窝堡凹陷开展过重磁普查、石油地质调查和地震工作,后来又有勘探科研部门开展过遥感、地面化探、土壤微磁性、放射性 γ 能谱等多学科专业的勘探普查。该区先后部署过一些探井,取得过油气流或油气显示发现。它的勘探历程积累了较为丰富的多学科、多指标的测试数据和勘查图件。尽管如此,该区因复杂的石油地质条件仍处于持续勘查研究阶段。

丰富的地学资料无疑为应用模糊综合评判方法进行勘探靶区评价提供了条件。

1 综合评价预测的方法与要素

1.1 多学科指标综合研究的方法

(1)在GIS平台上将多学科勘探资料(地震、遥感、化探、放射性 γ 能谱、土壤微磁等)成果图制成相同经纬度、相同比例尺底图。

(2)分类分析:利用或重新编制化探、放射性 γ 能谱、土壤微磁异常图,以及遥感地质解译图。

(3)叠合分析:地化分析的烃异常或蚀变异常与地球物理方法分析的放射性 γ 能谱、土壤微磁等异常进行叠合分析(因为这些异常都与因烃的微渗漏或土壤蚀变产生的理化异常有关)^[10]。然后编绘出以重烃为主体的多项指标的烃综合异常图。

(4)地震构造与遥感环状构造对应分析。本区遥感环状构造与地震构造对应较好,故局部构造(评价目标)名称以地震构造为主(如只有遥感隐伏构造,则以遥感构造命名)。

(5)局部构造与烃综合异常对应分析。研究构造对烃异常的控制关系,以及油气运移、聚集的规律性。

由于专业较多,图件也很多,本文受篇幅所限,只着重讨论参与多学科指标评价的相关地质要素和模糊综合评判方法。

1.2 参与评价的多源地学资料

(1)地震:局部构造14个,及主要的断裂构造规模、走向、控制作用等资料。

(2)遥感:环状构造17个,线状构造17条,烃蚀变遥感影象异常带3处。

(3)化探:甲烷(C_1)异常23个,重烃(C_{2+})异常16个,蚀变碳酸盐(ΔC)异常16个,热释汞(Hg)异常11个,荧光光谱(F350)异常9个,甲烷

碳同位素($\delta^{13}C_1$)样品分析数据30个。

(4)放射性 γ 能谱:U异常15个, ΔU 异常32个,Th异常5个,U+Th异常31个。

(5)土壤微磁:磁化率(K_c)异常17个。

1.3 靶区分析地质要素的确定

评价靶区的主要地质要素来自对探区的多源地学资料的分析。柴窝堡凹陷的烃微渗漏异常明显受断裂构造的控制。该区发现的14个局部构造也都与断裂构造有关,圈闭类型多为断鼻、断背斜、断块、逆牵引构造等。所以,油气不仅沿断裂运移,同时在运移过程中向相邻的上倾高部位构造进行聚集。这也就是在局部构造上部可能形成环状或半环状烃微渗漏异常的原因^[11]。因此靶区评价的地质要素不仅是局部构造,还有其烃的综合异常信息。同时根据勘探的理论和实践,还应考虑局部构造所在凹陷的部位,以及分析烃异常的油气属性指标($\delta^{13}C_1$),因为构造部位反映生油凹陷油气向构造运聚的有利条件^[12]。 $\delta^{13}C_1$ 值则是判别烃微渗漏异常的成因,是深部成熟的油型热解气,或过成熟的煤型热解气、裂解气,还是未成熟的生物气^[13-15]。

2 模糊综合评判模型

为了较客观、全面地评价本区的含油气远景,应用模糊综合评判方法^[16-17],对区内14个构造结合烃异常进行靶区定量评价。

2.1 模糊综合评判对象和判据集的确定

参评靶区 X 是需要评判的对象全体,记为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n\}$ (n 为参评靶区个数)。靶区包含了局部构造和烃综合异常两种重要信息,同时也考虑了构造所处部位及烃异常的油气属性($\delta^{13}C_1$)等信息。它们共同构成靶区评价的4个地质要素。这些要素构成判据集 $U, U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ 。

2.2 构造评判矩阵 R

R 可以看作集合 X 到集合 U 的模糊关系, $R \in (X \times U)$,为集合 U 的一个模糊集。其中 r_{ij} 称为单项地质因素评价,表示地质因素 u_i 对参评异常区块 x_j 的评价指标($r_{ij} \in [0, 1]$),可以理解为参评异常区块 x_j 具备地质因素 u_i 的程度,即 x_j 对于因素 u_i 的隶属度。因此参评区块的综合评判矩阵 R 为:

$R = [r_{ij}]_{m \times n}$,其中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ($m = 4, n = 14$)。

2.3 评价指标 r_{ij} 决定原则

由于各地质因素主要表现为定性指标,由定性指标决策法,可以将各区块地质因素变化的程度分为a, b, c 3个等级,每个等级评定值从高到低分别

为0.8,0.5,0.2。

(1) 烃综合异常:由化探、微磁、 γ 能谱构成的综合异常,实质上反映了与油气有关的烃微渗漏异常或烃的蚀变现象的直接或间接指示的重要信息。本区综合异常分为I、II、III级。重烃异常较强,其他相伴生的多指标异常较全的评为I级;重烃异常较小,其他多指标异常较全的评为II级;重烃异常小,其他指标异常不全的评为III级。如局部构造上部的烃综合异常具有I、II级规模,呈半环状分布,其评价赋予“a”级;综合异常在II、III级,异常形态为半环状,其评价赋予“b”级;III级及以下综合异常,形态不佳,赋予“c”级。

(2) 油气属性:甲烷碳同位素($\delta^{13}C_1$)是反映烃气成因的重要指标,能有效区分油型热解气、煤型热解气及生物气。因此根据化探样品碳同位素值,参考天然气标准,确定 $-55‰ < \delta^{13}C_1 \leq -35‰$ 为“a”级,属油型热解气; $\delta^{13}C_1 > -35‰$ 为“b”级,属煤型热解气或裂解气; $\delta^{13}C_1 \leq -55‰$ 为“c”级,属生物气。

(3) 局部构造:局部构造评定值由可靠程度来确定。地震资料圈定并落实的圈闭构造为“a”级;可靠程度未定或圈闭情况不明的局部构造为“b”级;局部构造根据遥感环状影像异常认为的“隐伏构造”为“c”级。

(4) 构造部位:构造部位的评价主要依据局部构造所处生油凹陷的位置,以及目的层的特征和埋藏深浅来确定。这是因为,我国陆相沉积盆地油气勘探的理论和实践证明,靠近生油凹陷的构造高位一般是最有利的油气指向。同时对邻近生油凹

陷和局部构造的断层性质及对油气保存的影响亦应有充分考虑。在本区,根据烃异常与构造的关系,北北东和北西向或多组方向构造的交会部位是油气运聚的有利地带,而东西向压性断层对烃运移起一定阻挡作用,靠近盐湖的北西向遥感断裂(可能在晚期构造活动中开口)对相邻构造油气保存可能有不利影响。在地化异常图中沿此断裂带出现带状强烃微渗漏异常亦可表明。因此在构造位置评价中,对邻近生油深洼的部位评为“a”级;对距离生油深洼较远,或虽然临近生油洼陷,但中间隔有压性断层带的评为“b”级;距离生油洼陷较远,且埋藏较浅的构造部位为“c”级。本区对靠近盐湖北西向断裂的构造在评价时需加慎重。

2.4 确定评判函数

在靶区量化评价时,每个参评地质因素的贡献大小或所起的作用不同,因而赋予每一参评地质因素的权系数为A,则有因素重要程度模糊集 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ 且 $\sum a_i = 1 (i = 1, 2, 3, 4)$ 。烃综合异常、碳同位素和局部构造、构造部位的权系数是根据它们对靶区含油气远景评价贡献大小来确定。根据多年来综合地质、物化探、遥感找油气的经验,结合本区石油地质特征,可确定一组经验数据作为参评因素的权系数。烃综合异常权系数为0.3,油气属性为0.2,局部构造为0.3,构造部位为0.2。于是应用加权平均模型 $M(\cdot, +)$ (乘积求和),对各参评靶区进行评价,得到模糊综合评价集为 $B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_n)$ 。靶区综合评价值 b_j 的大小是其含油气性大小的综合反映,因此可根据综合评

表1 新疆柴窝堡靶区综合评价

Table 1 Comprehensive evaluation on exploration targets in Chaiwopu area, Xinjiang

| 地质要素 | | | | | | | | | | |
|----------|----|---------|----|-------|-----|----|-------------------------|----|-------------|------|
| 局部构造 | | 构造位置 | | 烃综合异常 | | | 油气属性 | | 综合评价值 b_j | 远景级别 |
| 构造名称 | 等级 | 构造带名称 | 等级 | 异常形态 | 级别 | 等级 | $\delta^{13}C_1$ 有机成因分析 | 等级 | | |
| 柴窝堡断块背斜 | a | 中部柴杨断褶带 | a | 半环 | II | b | 煤型热解气 | b | 0.65 | A |
| 西疙瘩断背斜 | c | 西疙瘩背斜带 | c | 点状 | | c | 煤型热解气 | b | 0.2 | C |
| 上雷家沟断块背斜 | a | 西疙瘩背斜带 | b | 半环 | III | c | 煤型热解气 | b | 0.5 | B |
| 山水地逆牵引背斜 | a | 西疙瘩背斜带 | a | 半环 | I | a | 热解气 | b | 0.74 | A |
| 黄家庄北断鼻构造 | b | 西疙瘩背斜带 | b | 半环 | II | b | 油型热解气 | a | 0.56 | B |
| 唐家庄断鼻构造 | b | 西疙瘩背斜带 | c | 半环 | III | c | 热解气 | b | 0.35 | C |
| 土墩子构造 | a | 中部柴杨断褶带 | a | 块状 | III | c | 煤型热解气 | b | 0.56 | B |
| 西沟下寺半背斜 | b | 中部柴杨断褶带 | a | 半环 | I | a | 煤型热解气 | b | 0.65 | A |
| 西沟下寺南断背斜 | b | 中部柴杨断褶带 | c | 半环 | II | b | 热解气 | b | 0.44 | C |
| 二十里店断块背斜 | b | 中部柴杨断褶带 | b | 半环 | III | c | 煤型热解气 | b | 0.41 | C |
| 席家庄背斜 | a | 中部柴杨断褶带 | c | 半环 | II | b | 煤型热解气 | b | 0.53 | B |
| 达坂城东断块背斜 | b | 中部柴杨断褶带 | c | 点状 | | c | 热解气 | a | 0.41 | C |
| 盐湖西北牵引背斜 | b | 南部山前断陷带 | b | 半环 | II | b | 煤型热解气 | b | 0.5 | B |
| 二十里店断块背斜 | c | 南部山前断陷带 | c | 块状 | III | c | 煤型裂解气 | c | 0.2 | C |

价值 b_j 来判断区块的含油气远景。根据上述分析,应用“模糊综合评判法”对柴窝堡地区 14 个异常区块进行含油气远景的综合评价预测,结果如表 1 所示。

表中,综合评价值 b_j 最大值为 0.74,最小值为 0.2。平均值 \bar{b} 为 0.478 571,标准偏差 σ 为 0.158 496。我们可以确定 $\bar{b} + \sigma < b_j$,靶区为有利含油气远景区(A 级);当 $\bar{b} < b_j \leq \bar{b} + \sigma$,靶区为较有利含油气远景区(B 级);当 $b_j \leq \bar{b}$ 时,为一般远景区(C 级)。通过模糊综合评判,本区达到有利远景区的是柴窝堡构造、山水地构造、西沟下寺构造 3 个;较有利远景区的有黄家庄北构造、土墩子构造、席家庄构造、上雷家沟断块背斜、盐湖西北牵引背斜 5 个;其余的 6 个为一般远景区。

3 结论

(1) 通过地质、物探、化探、遥感等多学科指标,以柴窝堡凹陷为例,对 14 个参评目标选用构造和烃异常等 4 项地质要素进行模糊综合评判,比较客观、全面地评价预测了区内构造靶区的含油气远景,有效地减少了单项指标人为定性评价的可能片面性。

(2) 模糊综合评判获得的 A 级有利含油气远景靶区有 3 个:柴窝堡构造、山水地构造、西沟下寺构造。其中柴窝堡构造由勘探部门先后部署柴参 1 井、柴参 1 井侧 1 井、达 1 井都见有油气流发现^[18]。在 5 个 B 级较有利含油气远景靶区中土墩子构造经钻探亦见有油气显示。

(3) 在其他勘探盆地或探区广泛应用 GIS 技术开展多学科多指标评价、预测有利勘探远景区的研究中,模糊综合评判应不失为一种好的处理方法。笔者认为提高靶区评价效果与地质要素的选择及其可靠性有关。

参考文献:

[1] 谭青.“3S”技术在中国西部油气普查勘探中的应用[C]//庄逢甘,陈述彭.遥感科技论坛:全国地方遥感应用协会 2000 年年会论文集.北京:地震出版社,2000:204-208.
Tan Qing. Application of “3S” technologies in prospecting and exploration of oil and gas in west China [C]//Zhuang Fenggan, Chen Shupeng. Forum on Remote Sensing Science & Technologies: Papers Collection of 2000 Annual Meeting of China Association of Remote Sensing Application. Beijing: Seismological Press, 2000: 204-208.

[2] 纪国良,孙雪菲. GIS 地理信息系统的应用与发展[J]. 科技创新与应用,2012(33):47.
Ji Guoliang, Sun Xuefei. Application & development of GIS [J].

Technology Innovation and Application, 2012(33):47.

[3] 黄文斌,肖克炎,丁建华,等.基于 GIS 的固体矿产资源潜力评价[J].地质学报,2011,85(11):1834-1843.
Huang Wenbin, Xiao Keyan, Ding Jianhua, et al. Potential assessment of solid mineral resources based on GIS [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1834-1843.

[4] 高喜龙.埕岛东斜坡东营组层序地层特征及油气勘探方向[J].断块油气田,2013,20(2):140-144.
Gao Xilong. Sequence stratigraphic characteristics and hydrocarbon exploration targets of Dongying Formation in Eastern Slope Area of Chengdao Oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(2): 140-144.

[5] 王先德,王友启,刘书权,等.二连盆地白音查干凹陷油气成藏模式及勘探方向研究[J].石油实验地质,2012,34(2):291-295,302.
Wang Xiande, Wang Youqi, Liu Shuquan, et al. Hydrocarbon accumulation pattern and exploration direction in Baiyinchagan Sag of Erlian Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 291-295, 302.

[6] 胡纯心,洪雪,赵洪伟,等.松南断陷群石油勘探潜力与勘探方向分析[J].石油实验地质,2012,34(3):252-256.
Hu Chunxin, Hong Xue, Zhao Hongwei, et al. Petroleum exploration potential and targets in fault depressions, southern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 252-256.

[7] 吴光红,巴秀娥,冯永宏,等.柴窝堡凹陷石油地质特征及勘探方向[J].新疆石油地质,2003,24(6):523-526.
Wu Guanghong, Ba Xiu'e, Feng Yonghong, et al. Petroleum characteristics and prospecting target in Chaiwopu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(6): 523-526.

[8] 王俊明,窦松江,肖建玲.柴窝堡盆地石油地质特征与油气勘探前景[J].新疆地质,2002,20(4):384-388.
Wang Junming, Dou Songjiang, Xiao Jianling. Petroleum geology and exploration prospect of Caiwopu Basin, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4): 384-388.

[9] 沈建林.柴窝堡盆地的石油地质特征[J].新疆石油地质,1990,11(4):297-310.
Shen Jianlin. The characteristics of petroleum geology in Chaiwopu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1990, 11(4): 297-310.

[10] 谭青,刘兰兰,郑伦举,等.土壤磁化率异常在油气勘查中应用试验研究[J].物探与化探,1999,23(2):90-96.
Tan Qing, Liu Lanlan, Zheng Lunju, et al. The tentative application of soil magnetic susceptibility anomalies to the oil and gas exploration [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1999, 23(2): 90-96.

[11] 余琪祥,谭青,曾华盛,等.戈壁荒漠区遥感环形影像异常的油气地球化学特征分析[J].石油实验地质,1998,20(1):68-74.
Yu Qixiang, Tan Qing, Zeng Huasheng, et al. Petroleum geochemical analysis on the circular anomaly of remote-sensing images in Gobi regions [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(1): 68-74.

[12] 刚文哲,仵岳,高岗,等.渤海湾盆地南堡凹陷烃源岩地球化学特征与地质意义[J].石油实验地质,2012,34(1):57-61,65.
Gang Wenzhe, Wu Yue, Gao Gang, et al. Geochemical features and geologic significances of source rocks in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 57-61, 65.

Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(3/4): 141-148.

[14] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 31-77.

Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, et al. The condition of hydrocarbon accumulation of Tertiary petroleum system in Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003: 31-77.

[15] 施和生, 朱俊章, 姜正龙, 等. 珠江口盆地珠一坳陷油气资源再评价[J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 9-14.

Shi Hesheng, Zhu Junzhang, Jiang Zhenglong, et al. Hydrocarbon resources reassessment in Zhu I depression, Pearl river mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(1): 9-14.

[16] 马宁, 侯读杰, 施和生. 惠州凹陷原油成因研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(5): 545-549.

Ma Ning, Hou Dujie, Shi Hesheng. Study on oil genesis in Huizhou Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2012, 19(5): 545-549.

[17] 朱俊章, 施和生, 邓宏文, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩层序地层学和地球化学研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 709-714.

Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Deng Hongwen, et al. Geochemistry of source rocks in Paleogene sequence of Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 709-714.

[18] 李友川, 陶维祥, 孙玉梅, 等. 珠江口盆地惠州凹陷及其邻区原油分类和分布特征[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 830-834.

Li Youchuan, Tao Weixiang, Sun Yumei, et al. Classification and distribution of oil in Huizhou Depression of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 830-834.

[19] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 18-19.

Qin Jianzhong. Source rocks in China [M]. Beijing: Science Press, 2005: 18-19.

[20] 胡朝元. 生油区控制油气田分布: 中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9-13.

Hu Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, east China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 9-13.

[21] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 1-3, 7.

Hu Chaoyuan. Research on the appliance extent of “Source Control Theory” by semi quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 1-3, 7.

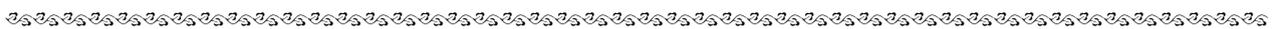
[22] 赵为永, 刘文龙, 门广田, 等. 烃源岩分布面积及厚度的预测方法: 以松辽盆地北部徐家围子断陷为例[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 67-71.

Zhao Weiyong, Liu Wenlong, Men Guangtian, et al. Prediction method for distribution area and thickness of hydrocarbon source rocks; Taking Xujiaweizi Depression in Songliao Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 67-71.

[23] 母国妍, 钟宁宁, 刘宝, 等. 湖相泥质烃源岩的定量评价方法及其应用[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 218-224, 230.

Mu Guoyan, Zhong Ningning, Liu Bao, et al. The quantitative evaluation method of lacustrine mudstone source rock and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 218-224, 230.

(编辑 徐文明)



(上接第 109 页)

[13] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 146-240.

Wang Darui. Geochemical oil and gas stable isotopes [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 146-240.

[14] 景成杰, 牛世衷, 黄玉欣. 松辽盆地红岗地区浅层气地球化学特征研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 53-56.

Jing Chengjie, Niu Shizhong, Huang Yuxin. Geochemical characteristics of shallow gas in Honggang region, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 53-56.

[15] 张俊, 赵红静, 张敏. 松辽盆地梨树断陷天然气地球化学特征及成因探讨[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 417-421.

Zhang Jun, Zhao Hongjing, Zhang Min. Geochemical characteristics and origin of natural gas in Lishu Fault Depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(4): 417-421.

[16] 张振良, 张金玲, 殷允强, 等. 模糊集理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.

Zhang Zhenliang, Zhang Jingling, Yin Yunqiang, et al. Fuzzy sets theory & methods [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010.

[17] 刘林, 曹艳平, 王婷, 等. 应用模糊数学[M]. 2版. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008.

Liu Lin, Cao Yanping, Wang Ting, et al. Applied fuzzy mathematics [M]. 2nd ed. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2008.

[18] 罗劲, 董小兰. 柴窝堡凹陷柴窝堡构造达 1 井钻探效果及其勘探意义[J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16(3): 9-12.

Luo Jing, Tong Xiaolan. Drilling effect & exploration significance on the well “Da” No.1 in Chaiwopu structure in Chaiwopu depression [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004, 16(3): 9-12.

(编辑 韩 彧)