

文章编号: 1000-0550(2004)01-0154-07

应用 EASY %R_o法模拟柴达木盆地西部烃源岩成熟史

郭泽清^{1,2} 钟建华^{1,2} 刘卫红¹ 杨树锋³ 陈汉林³

1(石油大学(华东)资源与信息学院 山东东营 257061)

2(中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640)

3(浙江大学地球科学系 杭州 320027)

摘要 在系统介绍 EASY %R_o法的基础上,以油 14 井为实例说明了应用该方法计算成熟史的过程,然后对柴达木盆地西部 31 口重点探井中的烃源岩的成熟度演化史进行了模拟。在平面上作出了下干柴沟组下段(E₃¹)至上油砂山组(N₂²)5 套烃源岩的成熟度等值线图,并针对这些图件详细论述了各组烃源岩的成熟度演化史。对该区油气成藏研究和油气勘探具有一定意义。

关键词 EASY %R_o法 成熟史 烃源岩 镜质体反射率 柴达木盆地西部

第一作者简介 郭泽清 男 1976 年出生 硕士 石油地质学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

有机质的成熟史研究不仅仅对于盆地分析具有重要的理论意义,同时对于油气勘探开发也具有重要的实际意义,因此倍受重视。含油气盆地的有机质成熟史研究方法大体有三种^[1]:第一种方法是 TTI - R_o法,适用于勘探程度较高的阶段;第二种方法是化学动力学法,适用于勘探程度中等的阶段;第三种方法是 EASY %R_o法,适用于勘探程度较低阶段。

1990 年 Sweeney & Bumham 在其 1989 年提出的 VITRIMAT 模型^[2]的基础上,提出了一种简化实用的数学模型,简称为“EASY %R_o”模型^[3],此模型不仅考虑了众多一级平行化学反应及其相应反应活化能,而且还考虑了加热速率。此模型可适用于相当大的温度和加热速率变化范围,对于中、高热演化程度更为精确。国内许多学者应用此方法研究盆地热演化史^[4-6],本文采用 EASY %R_o法来模拟烃源岩的成熟史,在柴达木盆地研究中还属首次。

本次研究的地点选择在柴达木盆地西部地区。因为该地区是青海油田公司的主力石油产区,占整个产量的 90% 以上,但勘探程度仍较低,适合应用 EASY %R_o法。此外,更为重要的是,实测了镜质体反射率数据的钻孔在研究区分布比较均匀,为研究该区的成熟史提供了可靠的基础数据。

1 EASY %R_o法数学模型

化学反应一般可以用 Arrhenius 化学动力学一级反应来描述,即:

$$dw/dt = -kw \quad (1)$$

式(1)中, w - 当今时刻即 $t = 0$ 时未反应物的总量; k - 干酪根热降解化学动力学的反应速率,可写为:

$$k = A \exp\{-E/[R(T+273)]\} \quad (2)$$

式(2)中, A 为化学动力学反应的频率因子,其值为 $10^{13}/s$; R 为气体常数,其值为 $1.986 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 实际上应标为 $T(Z, t)$, 即由热史模拟确定的既随深度递增,又随时间变化的动态演化的地层温度; E 为参与化学动力学反应物质的活化能,取值具体参照文献^[3]。

考虑到有机质化学组成的不均衡性,可将复杂的热降解反应视为一系列具有相同频率因子、不同活化能的平行反应,在温度 T 时下式成立:

$$dw_i/dt = -w_i A \exp\{-E_i/RT(t)\} \quad (3)$$

$$\text{并且 } dw/dt = \sum_i dw_i/dt, \quad (4)$$

式(3)中 w_i - 第 i 个平行反应中残留组分的浓度。

由此,反应程度 F 为:

$$F = 1 - w/w_0 = 1 - \sum_i f_i (w_i/w_{0i}) \quad (5)$$

式(5)中 w_0 - 全部反应物的初始浓度; w_{0i} - 第 i 个平行反应反应物的初始浓度; f_i - 第 i 个平行反应的化学计算因子。

通过将时间和温度史分解成一系列等温段或恒定加热速率段,就可以计算出镜质体的反应程度 F 。可

以推导出某一地层底界的第 j 个埋藏点的化学动力学反应程度为:

$$F_j = \prod_{i=1}^{20} f_i \{ 1 - \exp[- (I_{ij} - I_{i,j-1}) (t_j - t_{j-1}) / (T_j - T_{j-1})] \} \quad (6)$$

$$I_{ij} = T_j A \exp(- E_i / RT_j) \times \{ 1 - [(E_i / RT_j)^2 + a_1 (E_i / RT_j) + a_2] / [(E_i / RT_j)^2 + b_1 (E_i / RT_j) + b_2] \} \quad (7)$$

式(6)中 F_j - 井中某地层底界的第 j 个埋藏点的化学动力学反应程度; t_i - 该井该地层底界的第 j 个埋藏点的埋藏时间, Ma; T_j - 该井该地层底界的第 j 个埋藏点的古地温, K; a, b - 校正系数, $a_1 = 2.334733, a_2 = 0.250621, b_1 = 3.330657, b_2 = 1.681534$ 。

按式(6)求出已降解反应物的总额 F_j 之后, 即可按下式求出干酪根的成熟度指数 R_o 值:

$$R_o = \exp(- 1.6 + 3.7 F_j) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, \text{直到现在}) \quad (8)$$

2 埋藏史恢复

埋藏史模型采用 Watts 和 Ryan 首次提出的回剥法^[7], 通过对柴达木盆地西部埋藏史研究, 其特征可以归纳为 2 种类型。

2.1 连续沉积型

以跃参 2 井为代表, 具有连续沉积的特点, 在沉积过程中未遭受剥蚀(图 1)。虽然第四系的七个泉组(Q₁₊₂)现今遭受剥蚀, 但剥蚀量很小。研究区的绿草滩、尕斯断陷和红柳泉等构造都呈现为这种沉积的特点。

2.2 晚期强烈剥蚀型

以油 14 井为代表, 最明显的特征是第四纪中后期遭受强烈剥蚀, 埋藏史曲线大幅度向上仰起(图 2), 反

映了快速剥蚀的特点。在此之前地层是连续沉积的。这种特征在狮子沟、油砂山、咸水泉、南翼山、干柴沟、红沟子、小梁山、尖顶山和开特米里克等地区都有不同程度的体现。

由上可知柴达木盆地西部的剥蚀主要是第四纪中后期一次形成的, 累计剥蚀量分布特征见图 3。干柴沟 - 油泉子是剥蚀量的最大的地区, 大于 3 500 m, 以两地连线为轴向两侧递减。其中绿草滩、尕斯断陷和红柳泉的剥蚀量最小, 介于 0 ~ 500 m 之间。

3 古地温恢复

应用 R_o 与热传导相结合的方法^[1]模拟了单井的古地温史。模拟结果为: 第三纪以来盆地西部各井的古地温梯度总体而言是逐渐增加的, 与文献[6]结论一致, 但变化的幅度并不大(表 1)。

表 1 柴达木盆地西部部分探井古地温梯模拟结果表 (单位: /100m)

Table 1 Data of Simulation for paleogeotemperature gradient of partial exploration wells, western Qidam basin (in /100m)

井号	时代					
	E ₃ ² 末	N ₁ 末	N ₂ ¹ 末	N ₂ ² 末	N ₂ ³ 末	现今
狮 23 井	2.19	2.25	2.29	2.31	2.29	2.40
狮 20 井	2.28	2.41	2.47	2.49	2.52	2.58
柴深 3 井	1.98	2.21	2.39	2.47	2.50	2.83
梁 3 井	2.17	2.20	2.18	2.18	2.19	2.26
咸 8 井	2.22	2.20	2.17	2.14	2.14	2.28
跃参 2 井	2.51	2.63	2.68	2.75	2.75	2.72
切 1 井	2.57	2.63	2.76	2.87	2.81	3.22
南 1 井	2.34	2.33	2.34	2.33	2.30	2.45
油 14 井	2.30	2.32	2.42	2.51	2.53	2.65
风 3 井	2.24	2.26	2.26	2.27	2.29	2.31

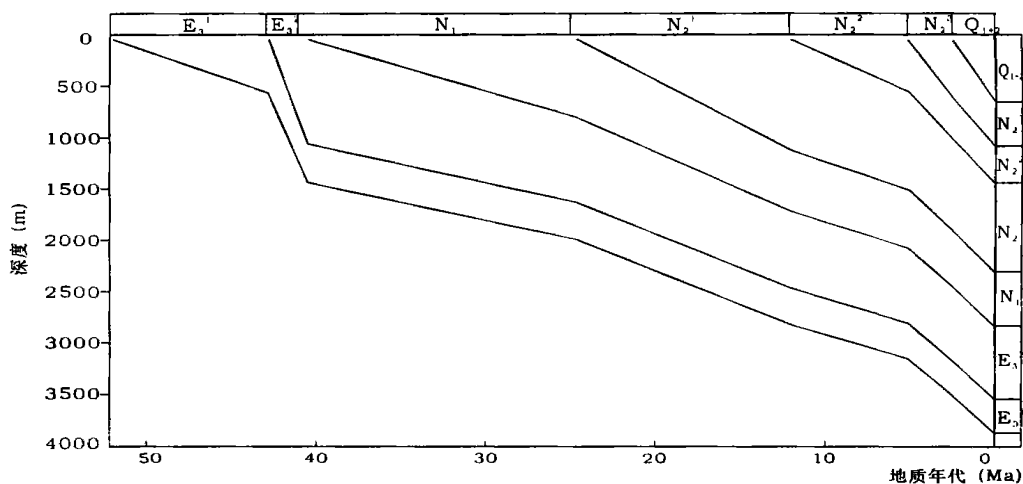


图 1 跃参 2 井埋藏史曲线

Fig. 1 Burial history curve of well Yuecan-2

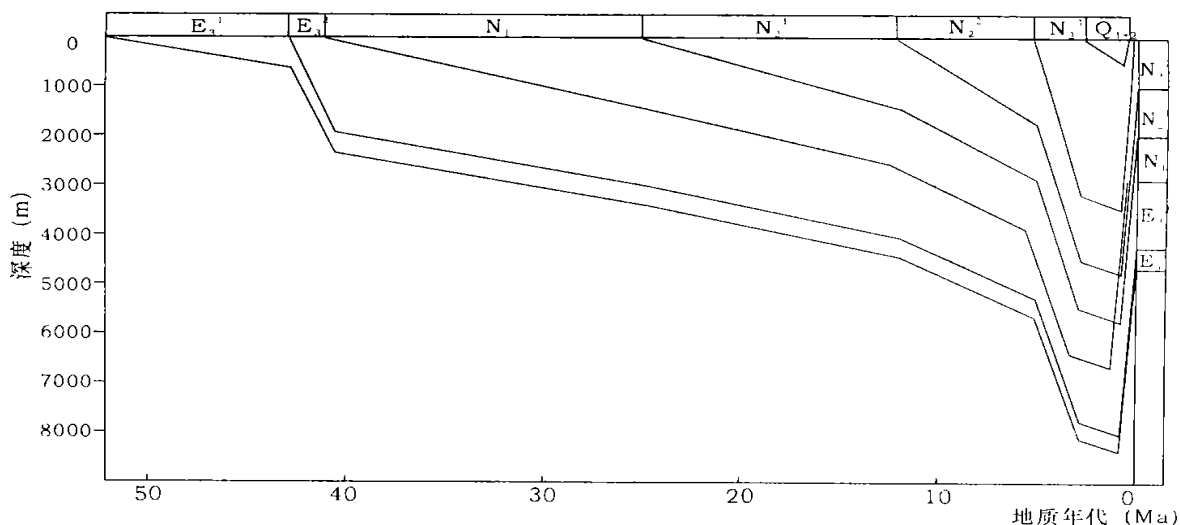


图2 油14井埋藏史曲线

Fig.2 Burial history curve of well You - 14

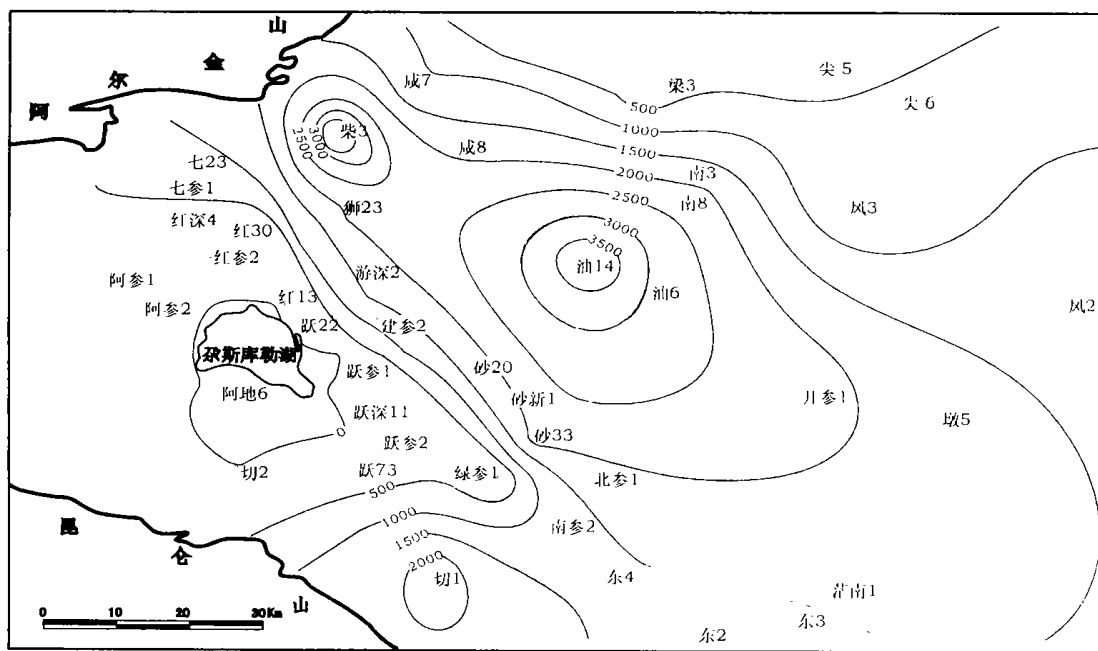


图3 柴达木盆地西部剥蚀量分布图(单位:m)

Fig.3 Distribution of erosion in western Qaidam basin(in m)

4 EASY % R_o 法模拟成熟史的步骤

利用应用 EASY % R_o 法模拟成熟史,可以分为以下5步:

- (1) 选择盆地中具有丰富 R_o 数据的典型探井油14井为对象,通过回剥技术恢复单井的埋藏史。
- (2) 选取一个古地温随地质年代变化的模式,结合单井埋藏史求得地层经历的古地温。
- (3) 利用上述两步求得地层经历的埋深和古地温,应用 EASY % R_o 法计算实测镜质体反射率(R_o)所在

深度的烃源岩的理论成熟度。

(4) 用理论值与实测的 R_o 进行对比,如果拟合得好,则说明重建的地层埋藏史和地温史符合地层实际经历的埋藏史和地温史,否则,反复修改假设的古地温模式及反复计算 R_o ,使理论值与实测的 R_o 吻合得最好(表2、图4)。

(5) 当第4步完成后,则这时确定的地层埋藏史和地温史是符合地层实际经历的埋藏史和地温史。而此时计算得到的 R_o 值则是现今烃源岩成熟度的理论值,然后在此基础上利用 EASY % R_o 法依次计算出各组底

界烃源岩在各地质时期的成熟度值(表 3)。

表 2 油 14 井 EASY% R_o 与实测 R_o 及深度数据表

Table 2 Data of EASY% R_o , real R_o and depth of well Your 14

埋深 / m	实测 R_o / %	EASY% R_o / %	埋深 / m	实测 R_o / %	EASY% R_o / %
500.00	0.66	0.53	1 850.00	0.76	0.74
580.00	0.66	0.55	1 881.00	0.86	0.75
700.00	0.58	0.57	2 050.00	0.71	0.77
750.00	0.60	0.58	2 081.00	0.92	0.78
780.00	0.72	0.59	2 150.00	0.79	0.79
850.00	0.59	0.61	2 350.00	0.84	0.83
880.00	0.73	0.61	2 450.00	0.90	0.85
900.00	0.68	0.62	2 475.00	0.90	0.85
980.00	0.75	0.63	2 575.00	0.82	0.88
982.00	0.75	0.63	2 702.00	0.82	0.90
1 000.00	0.65	0.63	2 844.00	0.78	0.94
1 200.00	0.64	0.65	2 850.00	0.94	0.94
1 280.00	0.82	0.66	2 950.00	0.96	0.97
1 450.00	0.65	0.69	3 001.00	0.89	0.99
1 500.00	0.75	0.70	3 250.00	0.98	1.08
1 681.00	0.84	0.72	3 350.00	1.00	1.11
1 750.00	0.74	0.73	3 450.00	0.98	1.14

应用同样的方法,计算出柴达木盆地西部其它井的各层底界烃源岩在各地质时期的成熟度,然后用所有井同一组地层底界烃源岩在同一期的成熟度数值(R_o)作等值线图。将所有的图件作成烃源岩成熟史阶步图(图 5)。

5 成果图件分析(图 5)

镜质体反射率作为有机质成熟度的演化值指标,一般以 $R_o = 0.5\%$ 为有机质成熟门限(生油门限)^[8]。本文把有机质成熟过程划分为三个阶段:第一阶段是未成熟阶段($R_o < 0.5\%$),这个阶段中的主要产物是

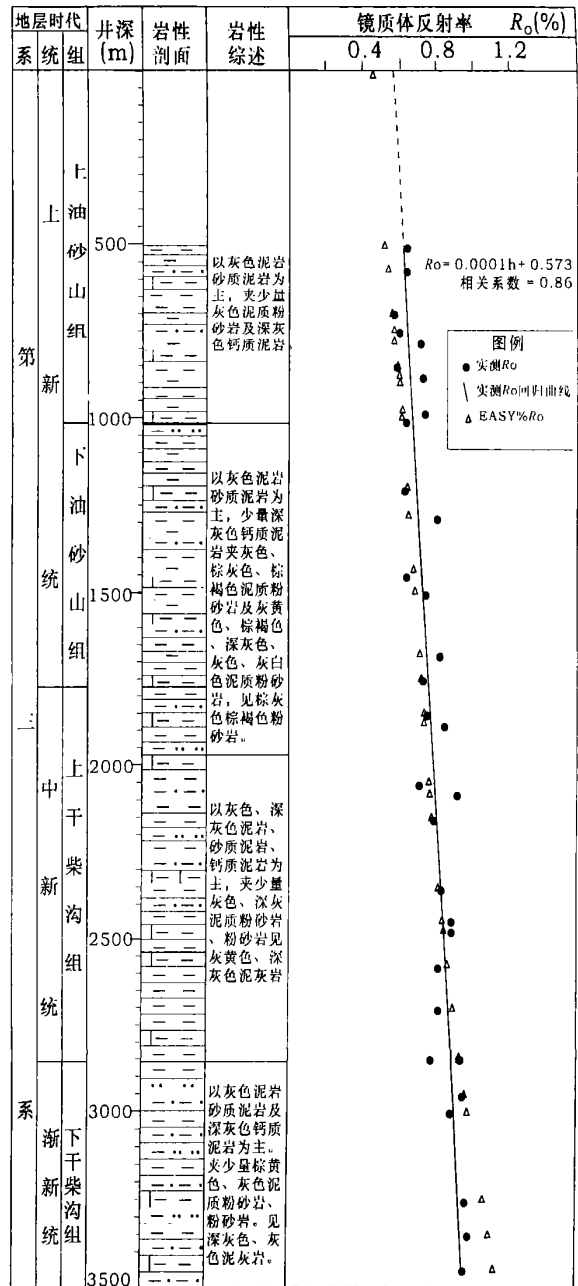


图 4 油 14 井镜质体反射率、EASY% R_o 与深度的关系
Fig. 4 Relationship among the vitrinite reflectance, EASY% R_o and depth of well Your 14

表 3 油 14 井各组烃源岩底界成熟史数据表

Table 3 Data of maturation history of source rocks bottom from the Well Your 14

R_o / %	地质时期	下干柴沟组	上干柴沟	下油砂山	上油砂山	狮子沟组	现今时刻
		上段沉积末 (E_3^2 末)	组沉积末 (N_1 末)	组沉积末 (N_2^1 末)	组沉积末 (N_2^2 末)	沉积末 (N_2^3 末)	
	上油砂山组(N_2^3)底界					0.52	0.63
	下油砂山组(N_2^1)底界				0.40	0.65	0.76
	上干柴沟组(N_1)底界			0.40	0.51	0.78	0.96
	下干柴沟组上段(E_3^2)底界		0.44	0.58	0.72	1.14	1.43
	下干柴沟组下段(E_3^1)底界	0.33	0.50	0.64	0.77	1.25	1.57

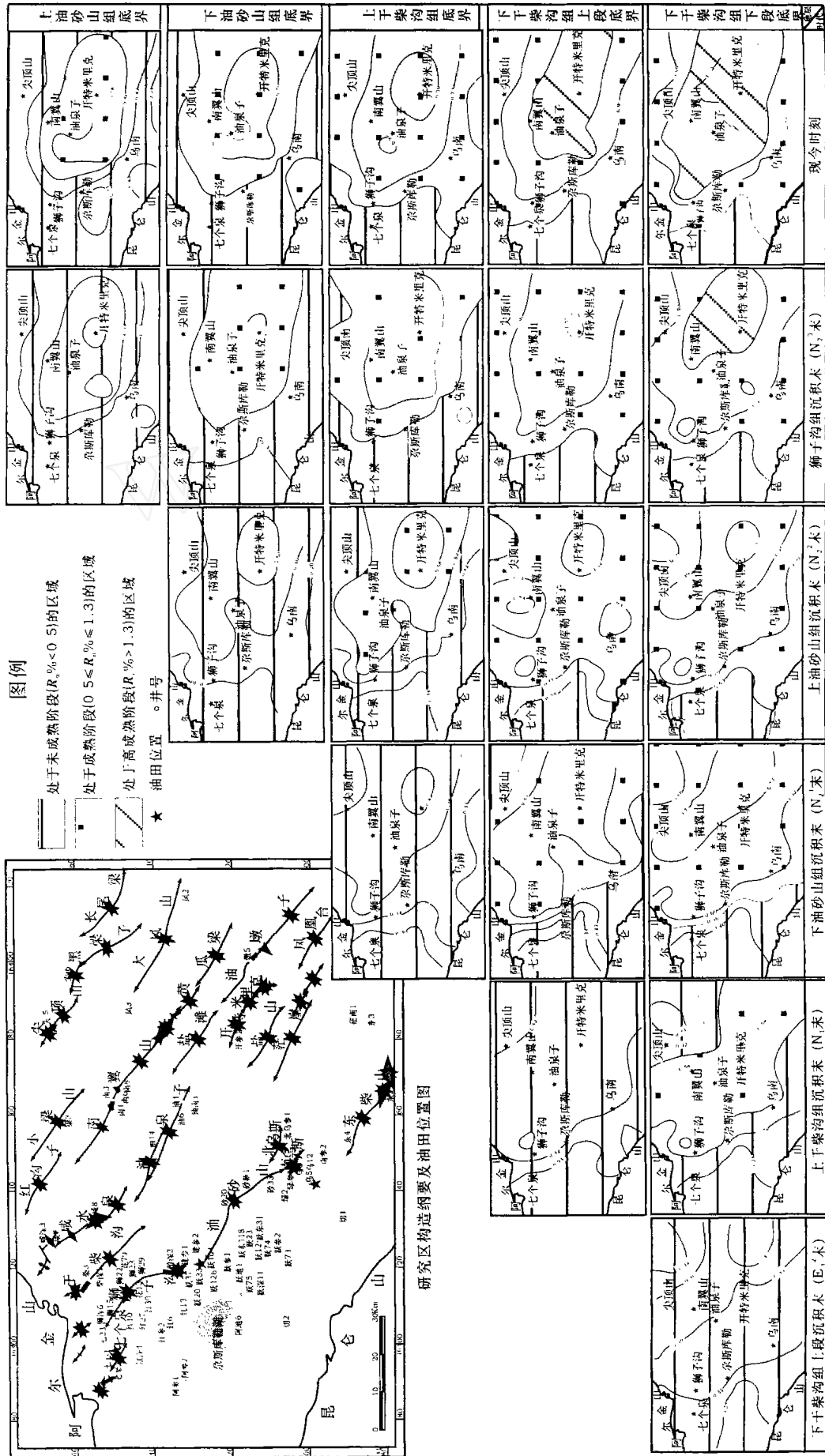


图5 柴达木盆地西部烃源岩成熟史步骤图

Fig. 5 Step map of maturation history of source rocks in the western Qaidam Basin

CH_4 没有液态烃产生(有时会产生低熟油、未熟油);第二阶段是成熟阶段($0.5\% < R_o < 1.3\%$),包括低成熟($0.5\% < R_o < 0.8\%$)和成熟($0.8 < R_o < 1.3\%$)两个阶段。该阶段的主要产物是液态烃和 CH_4 等气体,即干酪根在降解成液态烃的同时也生成一部分气;第三阶段是高成熟阶段($R_o > 1.3\%$)。该阶段内液态烃进一步热裂解生成天然气,而干酪根也直接生成部分天然气,主要产物为 CH_4 。

5.1 下干柴沟组下段(E_3^1)底界烃源岩成熟史特征

E_3^1 底界烃源岩在 E_3^2 末,所有地区全部处于未成熟阶段;在 N_1 未进入成熟阶段的区域在咸 7 井 - 狮 15 井 - 建参 2 井 - 砂 20 井 - 绿参 1 井 - 南参 2 井 - 茫南 1 井一线和小梁山 - 南翼山南 - 风 2 井一线之间;在 N_2^1 末,进入成熟的区域进一步扩大,狮深 6 井 - 红 30 井 - 跃 20 井 - 跃 74 井 - 跃参 2 井 - 切 1 井一线以东的广大区域全部进入成熟阶段;在 N_2^2 末,成熟区进一步扩大,干柴沟、南翼山和油墩子成熟度相对较高,但没有出现高成熟阶段的区域;在 N_2^3 末,进入成熟阶段的区域在七 23 井 - 红 6 井 - 红 13 井 - 跃 75 井 - 切 2 井一线以东的广大区域,南 1 井 - 盐山 - 凤凰台北 - 油墩子南 - 风 2 井 - 大风山北所围限的区域已进入高成熟阶段;在现今时刻,黑梁子南 - 小梁山南 - 南翼山北 - 咸水泉南 - 干柴沟南 - 砂 20 井 - 南乌斯 - 茫崖南 - 凤凰台南所围限的区域进入高成熟阶段,其它大部分地区都已进入成熟阶段。

5.2 下干柴沟组上段(E_3^2)底界烃源岩成熟史特征

E_3^2 底界烃源岩 N_1 末,绝大部分地区都处于未成熟阶段,只在柴深 1 井附近局部进入成熟阶段;在 N_2^1 末,进入成熟阶段的区域在狮 15 井 - 跃 22 井 - 跃 104 井 - 跃东 31 井 - 东 2 井一线以东的区域,而南翼山 - 小南翼山 - 油墩子北成熟度相对较高;在 N_2^2 末,进入成熟的区域进一步扩大,狮深 6 井 - 红 30 井 - 跃 37 井 - 跃东 101 井 - 跃参 2 井 - 切 2 井一线以东的区域都进入成熟阶段,而南翼山北 - 小梁山成熟度相对较高;在 N_2^3 末,进入成熟阶段的区域在七 23 井 - 红 27 井 - 红 13 井 - 跃参 1 井 - 跃 12 井一线以东,在开特米里克附近局部地区进入高成熟阶段;在现今时刻,大风山南 - 南 1 井 - 油泉子北 - 砂新 1 井 - 北乌斯 - 茫崖北 - 凤凰台北一线所围限的区域进入高成熟阶段,其它大部分地区都已进入成熟阶段。

5.3 上干柴沟组(N_1)底界烃源岩成熟史特征

N_1 底界烃源岩在 N_2^1 末,所有地区全部处于未成熟阶段;在 N_2^2 末,进入成熟阶段的区域是长尾梁中部 - 黑梁子南 - 风 3 井 - 小梁山北 - 红沟子南 - 咸水泉

南 - 柴 3 井 - 油 4 井 - 油南 1 井 - 砂 33 井 - 凤凰台南一线所包围的区域,其它地区都处于未成熟阶段;在 N_2^3 末,处于成熟阶段的区域扩大到咸 7 井 - 干柴沟北 - 狮 23 井 - 跃 33 井 - 跃东 31 井 - 绿参 1 井 - 南参 2 井 - 茫南 1 井一线以东地区;在现今时刻,进入成熟阶段的区域扩大到咸 7 井 - 干柴沟北 - 狮 15 井 - 红 13 井 - 跃参 1 井 - 跃参 2 井 - 切 2 井以东地区。在各个地质时期,开特米里克一直是成熟度相对较高的区域。

5.4 下油砂山组(N_2^1)底界烃源岩成熟史特征

N_2^1 底界烃源岩在 N_2^2 末,只在开特米里克、油墩子北和小南翼山局部区域进入成熟阶段,其它大部分地区处于未成熟阶段;在 N_2^3 末,进入成熟阶段的区域扩大到黑梁子南 - 梁 3 井 - 狮 20 井 - 油砂山 - 北乌斯 - 茫崖南 - 凤凰台南一线内部区域;现今时刻,进入成熟阶段的区域进一步扩大到黑梁子北 - 尖 5 井 - 小梁山北 - 红沟子南 - 柴深 1 井 - 狮 23 井 - 建参 2 井 - 绿参 1 井 - 茫南 1 井所围限的广大区域。

5.5 上油砂山组(N_2^2)底界烃源岩成熟史特征

N_2^2 底界烃源岩在 N_2^3 末,进入成熟阶段的区域局限在砂 33 井以北和开参 1 井附近,其它地区都没进入成熟阶段;在现今时刻,进入成熟阶段区域扩大到黑梁子北 - 尖顶山南 - 小梁山北 - 红沟子南 - 柴深 1 井 - 狮 23 井 - 建参 2 井 - 绿参 1 井 - 茫南 1 井所包围的区域。

综上所述,下干柴沟组下段(E_3^1)底界烃源岩在 N_1 时开始成熟, N_2^1 时大量成烃,到 N_2^3 部分已经达到高成熟阶段。下干柴沟组上段(E_3^2)底界烃源岩在 N_2^1 时开始成熟,在 N_2^2 时大量成烃,到现今部分已经达到高成熟阶段。上干柴沟组(N_1)底界烃源岩在 N_2^2 时开始成熟,在 N_2^3 时大量成烃。下油砂山组(N_2^1) - 上油砂山组(N_2^2)底界烃源岩热演化程度较低,多为低成熟。

6 结 论

(1) EASY% R_o 法简单易行,可计算任何地层,而且精度高,适用范围广,因此它是模拟烃源岩成熟史一种行之有效的方法。

(2) 本次研究系统的模拟了柴达木盆地西部 5 套烃源岩的成熟史,定量的确定了烃源岩开始成熟和大量生烃的时间以及横向上的分布范围,对下一步进行生烃史、排烃史计算提供了基础数据,同时对油气成藏研究和油气勘探具有一定意义。

致谢 本论文是在国家自然科学基金的资助下完

成的;青海油田公司提供了镜质体反射率资料;青海油田公司勘探开发研究院的江波副总地质师提出了宝贵的修改意见,借此机会一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法. 北京:石油工业出版社, 1999. 78 ~ 101 [Shi Guangren. Oil - gas basin numeric modeling method. Beijing: China Petroleum Industry Press, 1999. 78 ~ 101]
- [2] Bumham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 2649 ~ 2657
- [3] Jerry J Sweeney, Alan K Burnham. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559 ~ 1570
- [4] 魏志彬, 张大江, 许怀先, 等. EASY % R_o 模型在我国西部中生代盆地热史研究中的应用. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2): 43 ~ 46 [Wei Zhibin, Zhang Dajiang, Xiu Huaixian, *et al.* Application of EASY % R_o model to studies of thermal history for Mesozoic basin, western China. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 43 ~ 46]
- [5] 宋党育, 秦勇. 镜质体反射率反演的 EASY % R_o 数值模拟新方法. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(3): 15 ~ 17 [Song Dangyu, Qing Yong. A new method of EASY % R_o numerical simulation for vitrinite reflectance inversion. *Coal Geology & Exploration*, 1998, 26(3): 15 ~ 17]
- [6] 邹华耀, 吴智勇. 镜质体反射率在重建盆地古地温中的应用 - 中国东部、西部中、新生代沉积盆地古地温特征. *沉积学报*, 1998, 16(1): 112 ~ 119 [Zou Huayao, Wu Zhiyong. Application of vitrinite reflection in reconstruction of paleotemperature: evolution of paleotemperature in the eastern and western Mesozoic - Cenozoic Sedimentary basins, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 112 ~ 119]
- [7] Watts A B, Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins. *Tectonophysics*, 1976, 36(1): 25 ~ 44
- [8] 秦承志, 王先彬, 林锡祥, 等. 辽河盆地埋藏史及烃源岩成熟度演化史的数值模拟. *沉积学报*, 2002, 20(3): 493 ~ 498 [QIN Chengzhi, WANG Xianbin, LIN Xixiang, *et al.* Basin modeling of buried history and maturity history of source rock in Liaohai basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 493 ~ 498]

Application of EASY % R_o Method to Simulating Maturation History of Source Rocks in the Western Qaidam Basin

GUO Ze-qing^{1,2} ZHONG Jian-hua^{1,2} LIU Wei-hong¹
YANG Shu-feng³ CHEN Han-lin³

1 (Earth Resource and Information College, University of Petroleum, Dongying Shandong 257061)

2 (Guangzhou Geochemistry Research Institute, CAS, Guangzhou 510640)

3 (Earth Science Department, Zhejiang University, Hangzhou 320027)

Abstract On the exploration basis of detailed explanation of EASY % R_o method, the process of maturation-history-computation, taking Well You-14 for an example, is illustrated and the maturation history of source rocks in the 31 important exploration wells in the Western Qaidam Basin is simulated. Therefore, maturity contour diagrams of 5 series of source rock layers from lower member of lower Ganchaigou formation (E_3^1) to upper Youshashan formation (N_2^2) are drawn, and maturation history of each source rocks is furthermore discussed in detail for these figures. This study has some significance for hydrocarbon accumulation investigation and oil exploration.

Key words maturation history, source rocks, EASY % R_o method, vitrinite reflectivity,