

氢抑制条件下的有机质热演化动力学模型

——以三塘湖盆地芦草沟组为例

张磊¹, 孟元林¹, 崔存箫¹, 李新宁², 陶士振³, 吴晨亮⁴, 胡安文¹, 许丞¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 吐哈油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 哈密 839009;

3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 莱斯大学 地球、环境与空间系, 休斯顿, 77005)

摘要:三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组烃源岩含有较多的富氢组分, 有机质的热演化受到氢抑制。为了模拟氢抑制背景下的有机质热演化史, 在经典的 Sweeny 和 Burham Easy % R_o 时-温双控化学动力学模型基础上, 本文考虑氢抑制对有机质热演化的影响, 根据氢指数调节反应活化能, 建立了描述有机质热演化的时-温-氢抑制多控化学动力学模型。研究结果表明, 芦草沟组氢抑制对 R_o 的贡献值为 0.2% 左右; 由于氢抑制的影响, 芦草沟组烃源岩进入生烃门限和开始大量生烃的时间均被延迟。文中新建立的化学动力学模型可以应用于各种类型干酪根的有机质热演化史模拟, 其精度更高、应用范围更广。

关键词:氢抑制; 化学动力学; 页岩油; 中二叠统; 三塘湖盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

A new kinetic model of organic thermal evolution under the condition of hydrogen suppression: A case study from the Lucaogou Formation in the Santanghu Basin

Zhang Lei¹, Meng Yuanlin¹, Cui Cunxiao¹, Li Xinning², Tao Shizhen³, Wu Chenliang⁴, Hu Anwen¹, Xu Cheng¹

(1. College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Tuha Oilfield Branch, Petrochina, Hami, Xinjiang 839009, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Petrochina, Beijing 100083, China;

4. Department of Earth Science, Rice University, Houston 77005, USA)

Abstract: Organic matters of the source rocks in the Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin are rich in hydrogen components, which suppresses the thermal evolution of organic matters. To simulate thermal evolution of organic matters, a new kinetic model of organic thermal evolution under the condition of hydrogen suppression was established integrating time, temperature, and hydrogen retardation based on Sweeny and Burham Easy % R_o time and temperature controlling kinetic model. In the new kinetic model, activity energies are adjusted by hydrogen index. The results show that hydrogen suppression contributes to 0.2% of R_o value in the Lucaogou Formation. Hydrogen suppression also resulted in delays of both initial generation of hydrocarbons and peak generation of hydrocarbons. This new established model is widely applicable to thermal histories for different kerogen types with higher accuracy.

Key words: hydrogen suppression, chemical kinetics, shale oil, Middle Permian, Santanghu Basin

镜质组反射率 R_o 是烃源岩评价、成岩阶段划分、盖层封闭性研究、成岩作用数值模拟、成藏动力学模拟和盆地模拟最常用的指标^[1-7]。传统的观点认为, 镜质组反射率主要受温度与时间的影响与控制^[8], 也有人认为压力或超压对 R_o 有明显的影响^[9-13], Carr (2000), Zou (2001) 和肖丽华 (2003) 考虑超压对 R_o

的影响, 分别建立了描述有机质热演化的时-温-压多控化学动力学模型^[14-16]。但越来越多的研究表明, 有机质的热演化受到氢的抑制作用^[17-24], 即在富含氢元素的干酪根中有机质的热演化受到氢抑制 (Hydrogen Suppression), R_o 随埋深和地温的增加演化缓慢, R_o 的实测值偏低。而形成页岩油或致密油聚集的烃

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2017-08-15。

第一作者简介: 张磊 (1990—), 男, 博士, 石油地质。E-mail: zhanglei245@hotmail.com。

通讯作者简介: 孟元林 (1960—), 男, 教授、博士生导师, 石油地质。E-mail: qhdmyl@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41572135); 国家科技重大专项 (2016ZX05046-001-006); 东北石油大学研究生创新科研项目 (YJSCX2017-004NEPU); 黑龙江省科学基金项目 (QC2016049); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目 (UNPYSCT-2016122)。

源岩常常是氢组分含量很高的优质烃源岩^[25],有机质的热演化受到氢抑制,比较典型的是 Williston 盆地 Barken 页岩的氢抑制现象^[21]。因此,在研究富含藻质体和壳质组等显微组分的泥岩有机质热演化时,必须考虑氢抑制对 R_o 的影响。更重要的是,以前被广泛应用的 Sweeny 和 Burham 的 Easy% R_o 时-温双控模型不再适用,需要加以改进。本文试图以三塘湖盆地为例,研究有机质热演化被氢抑制的特征,建立氢抑制背景下有机质热演化的化学动力学模型。

1 地质背景

三塘湖盆地位于新疆维吾尔自治区境内,总面积为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,可进一步划分为北部隆起带、中央坳陷带和南缘冲断带3个二级构造单元(图1a)^[26]。条湖凹陷和马朗凹陷相邻,位于中央坳陷带的中部,是三塘湖盆地最有利的勘探区。三塘湖盆地从下到上发育上古生界石炭系(C)、二叠系(P),中生界三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)和新生界(Q+R)。其中,上古生界仅发育中二叠统,由芦草沟组(P_2l)和条湖组(P_2t)构成。芦草沟组从下到上分为芦一段(P_2l^1)、芦二段(P_2l^2)和芦三段(P_2l^3)(图1b)。芦草沟组属于咸化湖碳酸盐和泥质岩混合沉积,在沉积的同时还伴有火山喷发和火山灰堆积,主要岩性为泥质沉凝灰岩、碳酸盐质沉凝灰岩、沉凝灰岩和泥质凝灰质碳酸盐岩^[26-27]。

芦草沟组富含有机质,发育优质烃源岩,源储一体,形成了致密油或页岩油聚集。钻遇芦草沟组的48口井中,有28口井测试见油,7口井产出工业油流。

2 烃源岩有机质热演化的氢抑制与机理解释

2.1 富氢有机质的热演化特征与氢抑制

芦草沟组是三塘湖盆地一套极为优质的烃源岩,该盆地80%的储量来自这套烃源岩^[26-27]。由于凝灰质成分对有机质的富集作用^[28],烃源岩有机质极为丰富,有机质呈层状富集(图2)。马朗凹陷芦草沟组烃源岩的 TOC 主要分布在2.0%~8.0%,条湖凹陷芦草沟组 TOC 主要分布1.0%~4.0%。有机质类型为主要I型和II₁型,富含氢元素,H/C原子比为1.0~1.5,O/C原子比为0.05~0.15。显微组分中富氢组分含量很高,壳质组和腐泥组的含量主要分布在40%~98%(图3),富氢组分含量高的烃源岩主要发育在马朗凹陷。

正是由于芦草沟组(P_2l)烃源岩干酪根中含有大量富氢组分,芦草沟组烃源岩的有机质热演化很慢,受到氢抑制。在深度相同的情况下,芦草沟组(P_2l)烃源岩的 R_o 低于三叠系(T)、二叠系条湖组(P_2t)和石炭系(C)烃源岩的 R_o (图4)。

值得说明的是,超压也可以抑制有机质的热演

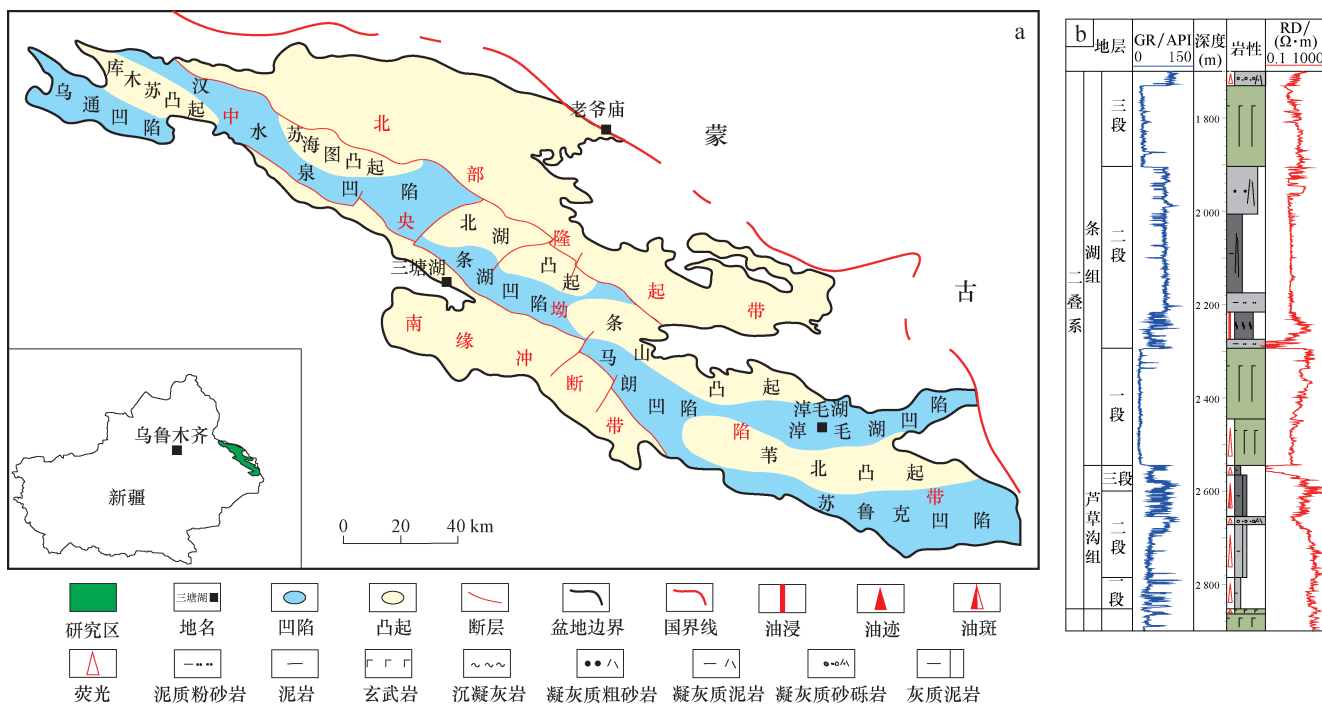


图1 研究区位置(a)及地层柱状图(b)^[26]

Fig. 1 Location and stratigraphic column of the study area^[26]

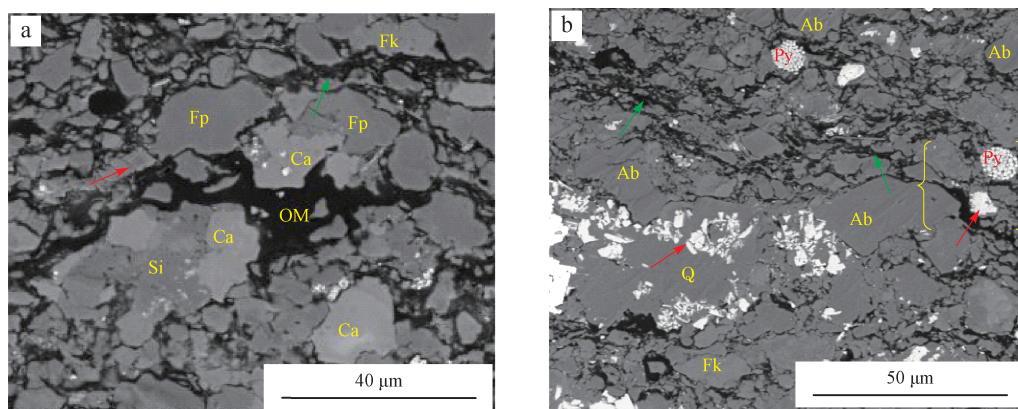


图2 马朗凹陷芦草沟组烃源岩有机质富集分布

Fig. 2 Distribution of organic matters abundance in the source rocks of the Lucaogou Formation in the Malang Sag

a. 芦1井, 芦草沟组, 埋深3 172.68 m, 有机质(OM)层状富集(绿色箭头), Si为石英, Fp为斜长石, Ca为方解石, Fk为钾长石, 红色箭头为白云石; b. 芦1井, 芦草沟组, 埋深3 123.68 m, 有机质层状富集(绿色箭头), Fk为钾长石, Ab为斜长石, Q为石英, Py为黄铁矿(红色箭头)

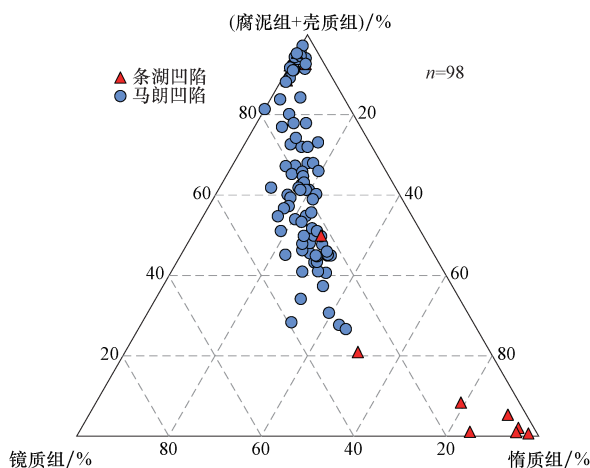


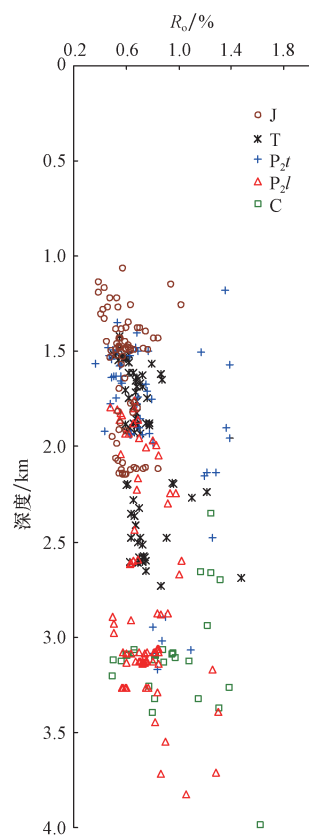
图3 三塘湖盆地芦草沟组干酪根显微组分组成

Fig. 3 Organic macerals of kerogen in the Lucaogou Formation in the Santanghu Basin

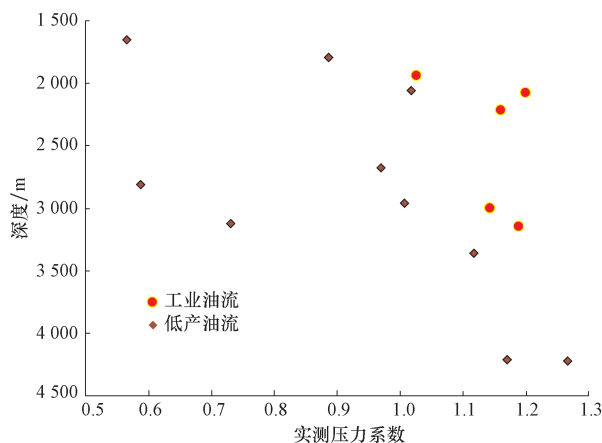
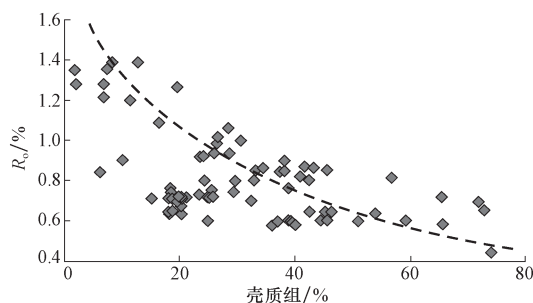
化^[9-16]。但是,由于三塘湖盆地芦草沟组属于一套由碳酸盐、凝灰质和陆源碎屑混杂堆积形成的细粒沉积,非常致密,欠压实的程度很弱;而且有机质热演化程度较低,目前处于液态窗内,由生烃产生的压力有限,所以实测地层压力不高。吐哈油田的实测地层压力表明^[29-30],芦草沟组的压力系数分布在0.5~1.29,主要集中在1.0~1.2的范围内(图5),基本属于正常压力,仅仅少数井存在弱超压(压力系数 ≥ 1.2),超压对有机质热演化的影响不大,可以忽略。

2.2 氢抑制的化学机理

许多学者研究过镜质组反射率被氢抑制的原因。Taylor(1966,1987)最早在无定形有机质占优势的烃源岩样品中,发现了 R_o 氢抑制的现象^[17-18]。而 Hutton

图4 三塘湖盆地镜质组反射率 R_o 与深度关系Fig. 4 Relation between R_o and depth in the Santanghu Basin

和 Cook(1980)认为, R_o 的氢抑制是富氢镜质体本身造成的^[19]。Kalkreuth(1982)的研究结果则表明^[20],氢抑制由于酪根中高含量的壳质体引起。Leigh 和 Charles(1985)认为^[21],Wilington 盆地 Bakken 页岩 R_o 的抑制现象与高含量的藻质体有关,藻质体的含量与镜质组反射率呈负相关。总之,凡是与富氢显微组分

图5 三塘湖盆地实测压力系数与深度关系^[29]Fig. 5 Measured pressure coefficient vs. depth in the Santanghu Basin^[29]图6 三塘湖盆地芦草沟组干酪根壳质组含量与 R_o 关系Fig. 6 Relation between R_o and exinite of kerogen in the Lucaogou Formation in the Santanghu Basin

共生的镜质组,它们的 R_o 测定值往往比预料的要低。而且 R_o 抑制现象多发生于 H/C 原子比较高的 I、II 型干酪根烃源岩中^[22]。三塘湖盆地芦草沟组烃源岩壳质组与 R_o 亦呈负相关关系(图 6),显示了镜质体反射率被氢抑制的特征。

由上可见,抑制有机质热演化的主要原因是干酪根中含有较多的富氢组分。有机质热演化氢抑制的化学动力学原理是,干酪根中的富氢显微组分(藻质体、壳质体等)含有许多的脂族链,在有机质热演化的过程中,这些脂族链的 C—C 键断裂,生成烃类,而 C—C 键断裂需要的反应活化能比贫氢显微组分生烃时杂原子键断裂所必需的活化能更高。也就是说,富氢镜质组热演化生烃所需的活化能比贫氢镜质组更高。因此热演化生烃的速度更慢,在经历同样时-温的条件下,富氢镜质组的 R_o 更低。

3 氢抑制条件下的有机质热演化化学动力学模型

在 Sweeny 和 Burham(1990)有机质热演化 Easy %

R_o 时-温双控化学动力学模型的基础上,本文考虑氢抑制的影响,通过增加热演化化学反应的活化能,建立了时-温-氢抑制多控的化学动力学模型,描述富氢有机质热演化的过程:

$$\frac{dw}{dt} = \sum_{i=1}^{20} \frac{dw_i}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = -w_i A \exp[-\lambda E/RT(t)] \quad (2)$$

$$R_o \% = \exp(-1.6 + 3.7F) \quad (3)$$

$$F = \frac{W}{W_0} = \sum_{i=1}^{20} f_i \left(\frac{w_i}{w_{i0}} \right) \quad (4)$$

式中: w_i 为干酪根镜质组中组分 i 的反应物浓度,%, $i=1,2,\dots,20$; w_{i0} 为干酪根镜质组中组分 i 的初始浓度,%; A 为频率因子, $1.13 \times 10^3/s$; t 为时间, s; $T(t)$ 为 t 时刻的绝对温标, K; E 为活化能, kcal/mol; P_i 为权重系数; λ 为氢抑制因子, $\lambda > 1$, 可用下式计算:

$$\lambda = 1 + \beta [(I_H - I_{H0}) / I_H] \quad (5)$$

式中: I_H 为氢指数, mg/g; I_{H0} 为不发生氢抑制的最大氢指数, $I_{H0} = 150 \text{ mg/g}$ ^[23]; β 为比例因子。

由公式(5)可见,当 $I_H = I_{H0}$ 时, $\lambda = 1$, 与 Sweeny 和 Burham(1990)提出的 Easy % R_o 经典模型完全相同; 当 $I_H < I_{H0}$ 时, 不发生氢抑制, 取 $\beta = 0$; 当 $I_H > I_{H0}$ 时, 可根据 R_o 的实测值和模拟值, 用“试错法”求得 β 和 λ , 由计算机按照从小到大的顺序反复选取一系列的 β , 计算出 λ , 直到镜质组反射率的模拟值达到给定的精度为止:

$$\omega < \text{abs}(R_o - R_o^c) / N \quad (6)$$

式中: ω 为 R_o 绝对误差平均值, %; R_o 为实测值, %; R_o^c 为计算值, %。

4 参数选取与模拟计算

4.1 氢抑制因子 λ 的确定

为了定量研究富氢组分对 R_o 抑制的程度、确定氢抑制因子 λ 、模拟马朗凹陷芦草沟组有机质热演化的化学动力学过程, 本文在条湖凹陷和马朗凹陷分别选取了一口芦草沟组有机质热演化没有受到氢抑制的条 5 井和受到氢抑制的塘参 3 井, 进行了试算。

首先, 以条湖凹陷条 5 井的实测 R_o 资料为基础, 应用 Sweeny 和 Burham(1990)的 Easy % R_o 经典模型, 反演出条 5 井的古大地热流(图 7), 直到镜质组反射率的计算值与实测值相符为止(图 8a); 然后, 根据由于这两口井基底埋深差异引起的大地热流折射模型^[31-34], 由基底埋藏较浅的条 5 井的古大地热流, 计

算出基底埋藏较深的塘参3井的古大地热流(图7),并以此恢复塘参3井不同地质时期的古地温,用 Sweeny 和 Burham(1990)的 Easy% R_o 模型,计算出塘参3井的 R_o 值(图8b)。由图可见,塘参3井 R_o 实测值小于理论计算值,这是氢抑制有机质热演化的结果。其差值 ΔR_o 就是氢抑制的贡献值, $\Delta R_o = 0.20\%$ 左右。最后,应用本文建立的考虑氢抑制的化学动力学模型[公式(1)~(6)],由计算机给定一系列的 β_i 值($i = 1, 2, \dots, N$),得出相应的氢抑制因子 λ_i 值,反复试算,直到计算的精度达到给定的精度[公式(6)]。计算结果表明,当 $\beta = 0.073\ 5$, 氢抑制因子 $\lambda = 1.044\ 4$ 时,镜质组反射率的计算值和实测数据符合较好(图8c)。

4.2 有机质热演化史对比

应用得到的氢抑制因子 λ 值,模拟了受到氢抑制的塘参3井的有机质热演化史(图9a)。由图可见,芦

草沟组(P_2l)烃源岩在侏罗纪末期才进入生油门限($R_o \geq 0.5\%$);在白垩纪末期进入大量生烃的成熟阶段($R_o \geq 0.7\%$)。如果塘参3井不存在氢抑制,应用 Sweeny 和 Burham(1990)的 Easy% R_o 经典模型恢复该井的有机质热演化史(图9b),芦草沟组(P_2l)烃源岩在中二叠统条湖组(P_2t)沉积末期就已进入生油门限;在白垩纪中期进入大量生烃的成熟阶段。由图9可知,正是由于镜质组反射率被氢抑制的结果,使芦草沟组(P_2l)烃源岩进入生烃门限的时间和开始大量生烃的时间均被大大延迟。

5 结 论

1) 三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组烃源岩有机质富含氢组分,有机质热演化被氢抑制,氢抑制的效应为 $\Delta R_o = 0.2\%$ 。

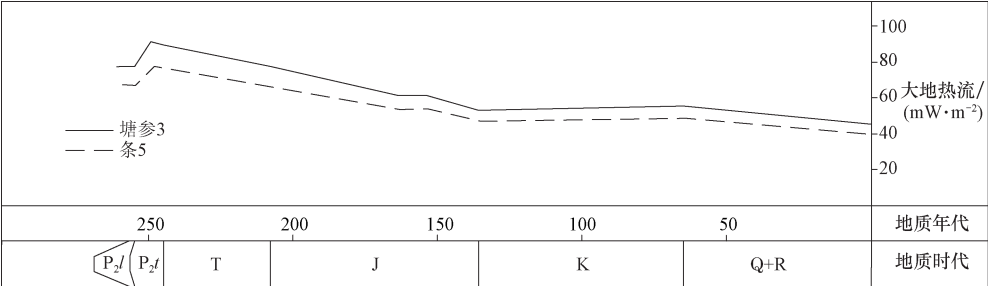


图7 三塘湖盆地条5井与塘参3井不同地质时期大地热流对比

Fig. 7 Heat flows comparison of Well Tiao-5 and Well Tangcan-3 in different geologic periods of the Santanghu Basin

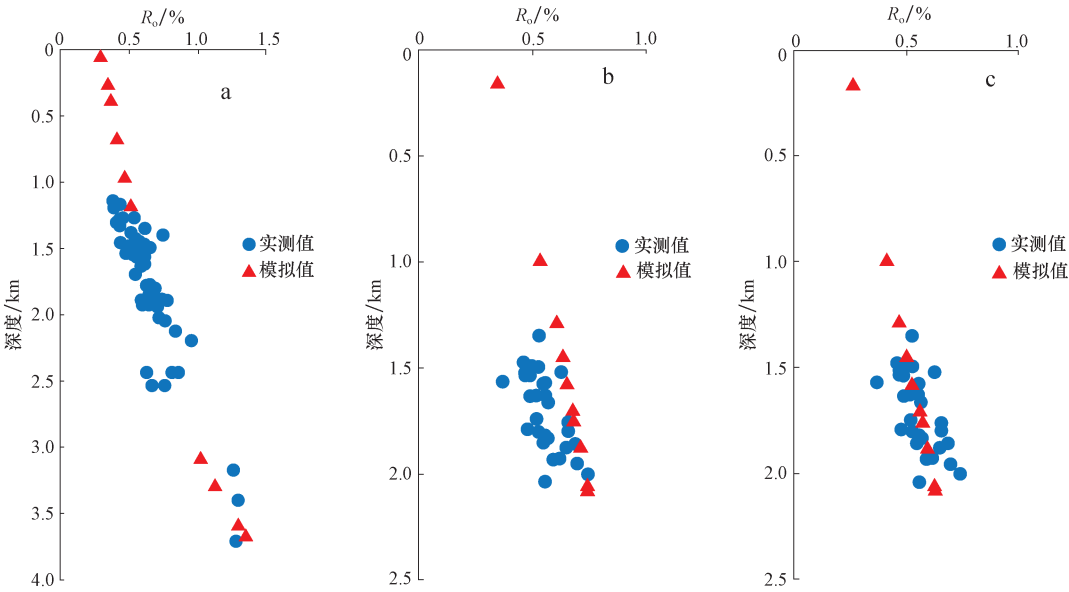


图8 三塘湖盆地 R_o 实测值与模拟值

Fig. 8 Measured R_o and modeled R_o in the Santanghu Basin

a. 条5井 R_o 实测值与模拟值;b. 塘参3井 R_o 实测值与 Easy% R_o 模型计算的理论值;c. 塘参3井 R_o 实测值与氢抑制模型计算的理论值

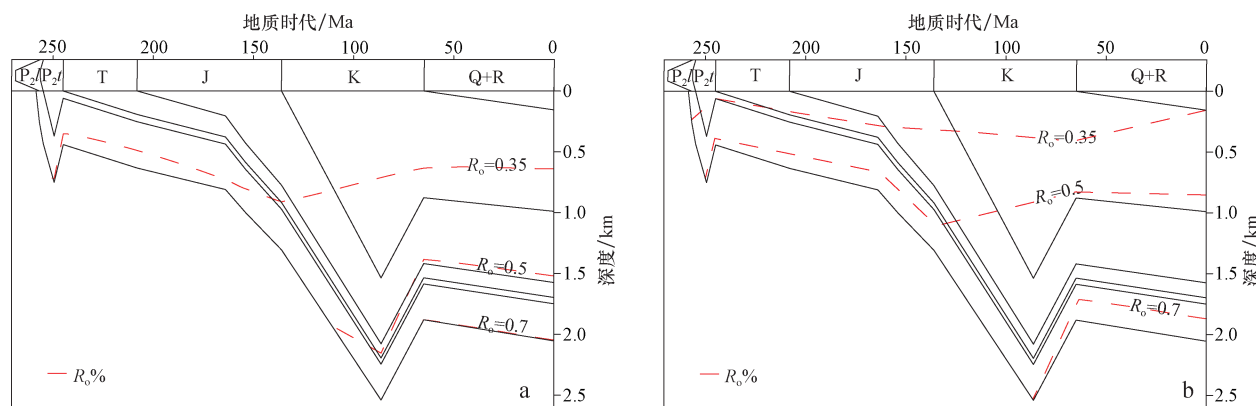


图9 三塘湖盆地地热史的恢复

Fig. 9 Reconstructed thermal history in the Santanghu Basin

a. 用氢抑制模型恢复的地热史; b. 用 Sweeney 和 Burham Easy % R_o 模型恢复的地热史

2) 通过调节氢抑制因子 λ 、增加有机质热演化反应的活化能,所建立的有机质热演化时-温-氢抑制多控模型可以更好地模拟富氢有机质的热演化史,而且精度更高、应用范围更广,可以模拟各种类型有机质的热演化过程。

3) 由于氢抑制的影响,三塘湖盆地芦草沟组富含壳质组和腐泥组的烃源岩进入生烃门限和开始大量生烃的时间均被推迟。

参 考 文 献

- [1] 黄飞,辛茂安. SY/T5735-1995 中华人民共和国石油天然气行业标准并陆相烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京:石油工业出版社,1996:1-19.
Huang Fei and Xin Maoan. Oil and gas industry standard of the People's Republic of China; The geochemical evaluation method of continental-facies source rocks, SY/T5735-1995 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 1-19.
- [2] 应凤祥,何东博,龙玉梅,等. SY/T5477-2003 中华人民共和国石油天然气行业标准并碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京:石油工业出版社,2003:1-5.
Ying Fengxiang, He Dongfu, Long Yumei, et al. Oil and gas industry standard of the People's Republic of China; The division of diagenetic stages in clastic rocks, SY/T5477-2003 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-5.
- [3] 庞雄奇,付广,万龙贵,等. 盖层封油气性综合定量评价—盆地模拟在盖层评价中的应用[M]. 北京:地质出版社,1993:14-17.
Pang Xiongqi, Fu Guang, Wan Longui, et al. Caprock sealing comprehensive quantitative assessment of oil and gas basin simulation applied in the evaluation of cap rock [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 14-17.
- [4] Hantschel T, Kauerauf I A. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009: 169-176.
- [5] 孟元林,刘德来,贺如,等. 歧北凹陷超压背景下的成岩场分析与储层孔隙度预测[J]. 沉积学报,2005,23(3):389-396.
Meng Yuanlin, Liu Delai, He Ru, et al. Diagenetic field analysis and porosity prediction of the Shaer member (E_{s2}) in overpressure setting in the Qibei depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 389-396.
- [6] 孟元林,王粤川,罗宪婴,等. 渤海湾盆地孔西潜山构造带成藏史数值模拟[J]. 地质力学学报,2005,11(1):11-16.
Meng Yuanlin, Wang Yuechuan, Luo Xianying, et al. Reservoir forming history modeling of Kongxi buried hill, Bohaiwan Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11(1): 11-16.
- [7] 黄文彪,邓守伟,卢双舫,等. 松辽盆地南部扶余油层致密储层成岩序列及成藏期次[J]. 石油与天然气地质,2017,38(03):508-516.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Diagenetic sequence and hydrocarbon accumulation phases of the Fuyu layer tight reservoir in the southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(03): 508-516.
- [8] Sweeney J J, Burham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1559-1570.
- [9] McTavish R A. Pressure retardation of vitrinite diagenesis, offshore north—West Europe [J]. Nature, 1978, 271(16): 648-650.
- [10] Hao F, Li S T, Dong W H, et al. Abnormal organic matter maturation in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea: implications for hydrocarbon expulsion and fluid migration from overpressured systems [J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21: 427-444.
- [11] Huang W L. Experimental study of vitrinite maturation: effects of temperature, time, pressure, water, and hydrogen index [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(2): 233-241.
- [12] Dalla T M, Mahlman F R, Ermt W G. Experimental study on the pressure dependence of vitrinite maturation [J]. Organic Geochemistry, 1997, 61: 2921-2928.
- [13] 王永诗,邱贻博. 济阳拗陷超压结构差异性及其控制因素[J]. 石油与天然气地质,2017,38(03):430-437.
Wang Yongshi, Qiu Yibo. Overpressure structure dissimilarity and its controlling factors in the Jiyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(03): 430-437.
- [14] Carr A D. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpres-

- sure retardation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16: 355 - 377.
- [15] Zou Y, Peng P. Overpressure retardation of organic-matter maturation: a kinetic model and its application[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 707 - 713.
- [16] 肖丽华, 孟元林, 张连雪, 等. 超压地层中镜质组反射率的计算[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(1): 14 - 17.
- Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Zhang Lianxue, et al. Vitrinite reflectance modeling in the pressured formations[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 14 - 17.
- [17] Taylor G. H. The electron microscopy of vitrinites. In *Coal Sciences* (Edited by Gould R. F.) [D]. Am. Chemical Society Publications, Washington, D. C. 1966, 274 - 283.
- [18] Taylor G H, Liu S Y. Biodegradation in coals and other organic-rich rocks[J]. *Fuel*, 1987, 66(9): 1269 - 1273.
- [19] Hutton A C, Cook A C. Influence of alginate on the reflectance of vitrinite from Joadja. NSW, and some other coals and oil shales containing alginite[J]. *Fuel*, 1980, 59(10): 711 - 714.
- [20] Kalkreuth W D. Rank and petrographic composition of selected Jurassic-Lower Cretaceous coals of British Columbia, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1982, 30(2): 112 - 139.
- [21] Leigh C P, Charles E B. Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen—a major unrecognized problem[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1985, 8(1): 59 - 84.
- [22] Hao F, Chen J. The cause and mechanism of vitrinite reflectance anomalies[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1992, 15(4): 419 - 434.
- [23] Lo H B. Correction criteria for the suppression of vitrinite reflectance in hydrogen-rich kerogens: preliminary guidelines[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(6): 653 - 657.
- [24] Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 79 - 99.
- [25] 邹才能. 非常规油气地质(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 93 - 169.
- Zou Caineng. *Unconventional petroleum geology* (second edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [26] 李新宁, 马强, 梁辉, 等. 三塘湖盆地芦草沟组二段混积岩致密油地质特征及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 1 - 9.
- Li Xinning, Ma Qiang, Liang Hui, et al. Geological characteristics and exploration potential of diamictite tight oil in the second Member of the Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 1 - 9.
- [27] 国建英, 钟宁宁, 梁浩, 等. 三塘湖盆地中二叠统原油的来源及其分布特征[J]. *地球化学*, 2012, 41(3): 266 - 277.
- Guo Jianying, Zhong Ningning, Liang Hao, et al. Study on the source and distribution of Middle Permian oils in the Santanghu Basin[J]. *Geochimica*, 2012, 41(3): 266 - 277.
- [28] 孟元林, 张磊, 李新宁, 等. 杂积岩地化特征与生烃机理—以三塘湖盆地芦草沟组为例, 第十五届全国有机地球化学学术会议, 青岛, 2015.
- Meng Yuanlin, Zhang Lei, Li Xinning, et al. Mixed siliciclastic-volcaniclastic-carbonate sediments—taking Lu Caogou Formation of Santanghu Basin as an example, The 15th National Meeting on Organic Geochemistry in China, Qingdao, 2015.
- [29] 李新宁. 三塘湖盆地芦草沟组页岩油藏地质特征与勘探开发潜力[R]. 2011, 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院.
- Li Xinning. *Geologic characteristics and exploration and development potential of the Lucaogou shale oil play in Santanghu Basin* [R]. 2011, Exploration and Development Institute of Tuha Oil-field Branch, Petrochina.
- [30] 黄志龙, 马剑, 吴红烛, 等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油流体压力与初次运移特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(5): 7 - 11.
- Huang Zhilong, Ma Jian, Wu Honghu, et al. Fluid pressure and primary migration characteristics of shale oil of Lucaogou formation in Malang sag[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(5): 7 - 11.
- [31] 张菊明, 熊亮萍. 有限单元法在地热研究中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 15 - 22.
- Zhang Juming, Xiong Liangping. *The applications of finite element in geothermal researches* [M]. Beijing: Science Press, 1986: 15 - 22.
- [32] 肖丽华, 张靖, 孟元林, 等. 地热参数及边界条件的探讨[J]. *大庆石油学院学报*, 1996, 20(2): 28 - 31.
- Xiao Lihua, Zhang Jing, Meng Yuanlin, et al. Study of geothermal parameters and boundary conditions[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1996, 20(2): 28 - 31.
- [33] Meng Y L, Xiao L H, Zhang J. Basin modeling by gravity, magnetics and electrical information and its application[C]. // Liu B. T., Li S. T. eds. *Basin analysis, global sedimentary geology and sedimentology*. Amsterdam: VSP, 1997: 97 - 207.
- [34] 崔军平, 任战利, 李金翔, 等. 海拉尔盆地呼伦湖凹陷热演化史恢复[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(01): 35 - 42.
- Cui Junping, Ren Zhanli, Li Jinxiang, et al. Reconstruction of geothermal history in Hulunhu Depression, Hailaer Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(01): 35 - 42.

(编辑 张玉银)