

辽河西部凹陷古近系烃源岩生烃动力学特征

刘立峰^{1,2}, 姜振学^{1,3}, 钟宁宁¹, 郑菲菲^{1,3}

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学地质地球物理综合研究中心, 北京 102249
3. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

摘要: 针对辽河西部凹陷不同岩性、不同干酪根类型 18 块样品进行了较详细的开放体系生烃动力学研究, 模拟结果反映出相同岩性不同有机质类型烃源岩动力学特征存在较大的差异, 有机质类型越好, 平均活化能越小, 主频活化能对应的反应分数越大, 活化能分布范围越窄, 表明有机质类型对烃源岩生烃动力起着决定性作用。应用平行一级反应模型, 结合埋藏史、热史对辽河西部凹陷古近系烃源岩生烃史进行了定量研究, 层位上, 西部凹陷沙三、沙四段是主力烃源岩, 分别占总生烃量的 63.9% 和 18.5%, 其次为沙一二段和东营组, 4 套烃源岩累计生烃量为 328.09×10^8 t; 东营期是主要的生烃时期。

关键词: 西部凹陷; 辽河盆地; 生烃化学动力学; 烃源岩。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2009)05-0799-07

收稿日期: 2009-01-20

Hydrocarbon-Generating Dynamic Characteristics of Paleogene Source Rocks in Western Depression, Liaohe Basin

LIU Li-feng^{1,2}, JIANG Zhen-xue^{1,3}, ZHONG Ning-ning¹, ZHENG Fei-fei^{1,3}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prespecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Geology and Geophysics Comprehensive Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The experiments of hydrocarbon-generating dynamics in opening system on 18 samples of different lithology and kerogen types in western depression of Liaohe basin were carried out, and the results show that there exists huge difference between different kerogen types of the same lithology; the better the kerogen types, the lower of the average activity energy; while the larger of the corresponding reaction fraction of dominated frequency activity energy, the narrower distribution range of the activity energy, which shows that the kerogen type has a deciding function on hydrocarbon-generating of the source rock. By using the parallel first-order reaction model, taking the burial history and thermal history into comprehensive consideration, we did a quantitative study on the hydrocarbon-generating history of the source rock of the western depression, Liaohe basin. The results show that the Sha 3 and Sha 4 formations are the main source layers, which account for 63.9% and 18.5% the total amount of hydrocarbon generating respectively. Sha 1-2 and Dongying formations are the secondary source rock layers, and the accumulative hydrocarbon generation amounts to 328.09×10^8 t of the four source rock layers in total. The Dongying deposition period is the main hydrocarbon-generating time.

Key words: western depression; Liaohe basin; hydrocarbon-generating chemical kinetics; hydrocarbon source rock.

0 引言

生烃动力学是建立在干酪根的组成结构、热降解生烃机理和化学反应动力学理论上, 由于它不存在人为的参数, 因而被认为是更科学、更准确、

更符合实际情况的资源评价方法。实践证明, 采用生烃动力学参数外推地质过程, 可以很好地解决在实验室短时间、高温得到的干酪根成烃规律与地质条件下干酪根在低温、极其缓慢条件下的生烃作用存在明显差别的问题, 是定量描述有机质生烃过程的

有效方法(卢双舫等, 1995, 2002; 卢双舫, 1996; 李术元等, 2001). 按实验过程中是否有水存在可分为加水热解和干法热解; 按实验加热方式可分为恒温热解和恒速升温热解; 从开放程度上生烃动力学可以分为密闭体系和开放体系. 系统的开放度反映了不同的机理和反应类型, 如开放系统主要反映烃源岩中有机质的初次裂解, 而封闭系统包括了有机质的初次与二次裂解, 目前封闭体系应用得较广泛, 而开放体系由于实验条件与装置较难控制, 一般研究得较少(王云鹏等, 2005; 卢双舫等, 2006). 在地质条件下, 生烃与运移实际上同时发生. 模拟烃源岩的生烃排烃运移过程中不应该是完全的封闭体系, 因此, 有必要研究在开放体系条件下烃源岩生烃动力学参数.

近年来, 生烃化学动力学的研究得到普遍重视, 已成为定量评价有机质生烃潜力的重要研究方法之一, 并广泛应用于含油气盆地烃源岩评价与勘探中. 但是关于不同岩性、不同类型干酪根有机质生烃动力学特征差异的详细研究还很少. 已有研究表明, 不同母质类型的有机质, 其生烃动力学参数往往是不同的, 有时甚至有很大差异(Behar *et al.*, 1997; Boreham *et al.*, 1999; Cramer *et al.*, 2000; Tang *et al.*, 2000). 当利用化学动力学研究具体的沉积盆地时, 必须有针对性地进行生烃动力学实验, 求取特定烃源岩的生烃动力学参数, 才能准确地模拟出盆地的生烃过程(付少英等, 2002).

尽管国内学者对辽河西部凹陷烃源岩生烃方面已做过许多的研究工作, 但缺乏生烃动力学研究方面的报道. 本次研究对辽河西部凹陷不同类型烃源岩样品进行了开放体系生烃动力学实验, 并对其生烃动力学特征进行了详细分析, 结合热史、埋藏史的资料研究了辽河西部凹陷古近系烃源岩的生烃史.

1 样品与实验流程

1.1 地质背景及实验样品

辽河西部凹陷古近系烃源岩十分发育, 岩性以湖相暗色泥岩为主, 发育有沙四段、沙三段、沙一二段和东营组多套烃源岩层. 适宜的水体条件, 温暖潮湿的气候条件和以还原环境为主的埋藏条件, 决定了辽河西部凹陷发育较大厚度的烃源岩, 其中, 清水洼陷中暗色泥岩最大累计厚度可达 2 000 m 以上, 洼陷中心泥/地比可达 70% 左右; 有机质丰度高, 各套烃源岩 TOC 均值都大于 1%, 但也存在着明显差

异, 从沙四段到东营组, 有机质丰度逐渐降低; 各种母质类型都有分布, 沙四段以 I 和 II_A 型为主, 沙三段南部地区以 II_A 型为主, 北部地区为 II_A-III 型, 沙一二段以 II_B 型为主; 东营组为 II_B-III 型; 演化程度适中, 均达到了好—较好生油岩标准, 生烃潜力很大(朱芳冰, 2000, 2002).

为了使研究结果具有普遍性, 避免由于样品的个体差异而导致对比结果存在误差, 同时考虑到样品的岩性、类型、颜色、成熟度及地区的代表性等因素, 本次研究共选取了 18 个样品进行了开放体系化学动力学模拟实验(表 1), 探讨不同岩性不同有机质类型烃源岩样品生烃动力学特征的差异. 样品埋深都在 1 466.5~1 980.0 m 之间, 岩性包括泥岩、油页岩、钙质泥岩, 几乎涵盖了辽河西部凹陷古近系所有潜在的烃源岩.

1.2 模拟实验方法

研究所采用的生烃动力学实验装置为法国石油研究院所研制 Rock Eval 6 型热解仪, 在 5、15、30、40、50 °C/min 5 个升温速率条件下, 将样品从 250 °C 加热到 650 °C, 以得到各样品在不同升温速率下温度与生烃转化率的关系(图 1), 因为篇幅所限这里只列出 5 °C/min 的升温速率.

2 动力学模型选取及生烃热解动力学参数标定

大量的研究已经证明, 在目前提出的各种描述有机质成烃反应的化学动力学模型中, “有限个平行一级反应模型”具有比较广泛的适用性和实用性. 因此, 本次研究选用这个反应模型来描述研究样品的生烃过程, 计算化学动力学参数活化能 E 和频率因子 A 等, 图 2 列出了辽河西部凹陷各烃源岩样品的活化能分布. 具体的化学动力学模型的基本原理和计算公式在相关文献与专著中都已有的报道(Ungerer, 1990; 卢双舫等, 2006; 赵喆等, 2006), 这里不再叙述.

3 生烃动力学特征分析

活化能的大小与成烃过程的早晚有着直接的联系, 活化能的分布体现了有机质生烃性质的差异. 一般而言, 具有相对高活化能的样品, 其成烃时间相对滞后; 反之, 具有相对低活化能, 则成烃时间相对较

表 1 实验样品的基本地质地球化学特征参数

Table 1 Experimental sample parameters of the basic geological and geochemical characteristics

编号	井号	岩性	颜色	层位	干酪根类型	TOC(%)	氢指数	氧指数	$T_{max}(^{\circ}C)$	KTI
LH I-1	杜 51	泥岩	黑灰色	Es ₄	I	2.47	618.62	28.34	427	78.85
LH I-2	杜 16	油页岩	棕色	Es ₃	I	6.55	895.42	20.15	441	95.13
LH I-3	坨 14	油页岩	棕色	Es ₄	I	3.71	578.98	21.29	430	78.07
LH I-4	冷 67	钙质页岩	灰褐色	Es ₃	I	9.57	603.13	29.57	422	78.05
LH I-5	高 85	钙质页岩	灰褐色	Es ₄	I	11.6	578.28	18.97	422	78.87
LH II _A -1	高 8	泥岩	黑灰色	Es ₃	II _A	1.73	400.58	26.59	441	67.28
LH II _A -2	高 602	泥岩	深灰色	Es ₄	II _A	1.93	381.35	29.53	424	66.46
LH II _A -3	冷 113	泥岩	深灰色	Es ₃	II _A	2.25	413.78	48.89	437	63.69
LH II _A -4	欢 153	泥岩	深灰色	Es ₄	II _A	2.32	465.52	29.74	443	69.43
LH II _A -5	洼 603	泥岩	深灰色	Es ₁	II _A	1.72	318.02	40.70	426	61.70
LH II _B -1	雷 10	泥岩	深灰色	Es ₃	II _B	2.23	238.57	58.30	435	54.29
LH II _B -2	兴 44	泥岩	深灰色	Es ₃	II _B	1.71	221.05	70.18	433	54.13
LH II _B -3	欢 33	泥岩	灰色	Es ₃	II _B	1.25	204.00	52.80	436	53.78
LH II _B -4	海 42	泥岩	浅灰色	Ed	II _B	0.73	108.22	56.16	430	50.15
LH II _B -5	张 1	泥岩	绿灰色	Es ₄	II _B	0.4013	147.02	74.76	435	50.53
LH III1	坨 12	泥岩	浅灰色	Es ₄	III	0.34	94.12	97.06	436	43.76
LH III2	海 23	泥岩	灰绿色	Ed	III	0.12	83.33	175.00	422	40.75
LH III3	锦 9	泥岩	绿灰色	Es ₃	III	0.38	55.26	105.26	428	43.96

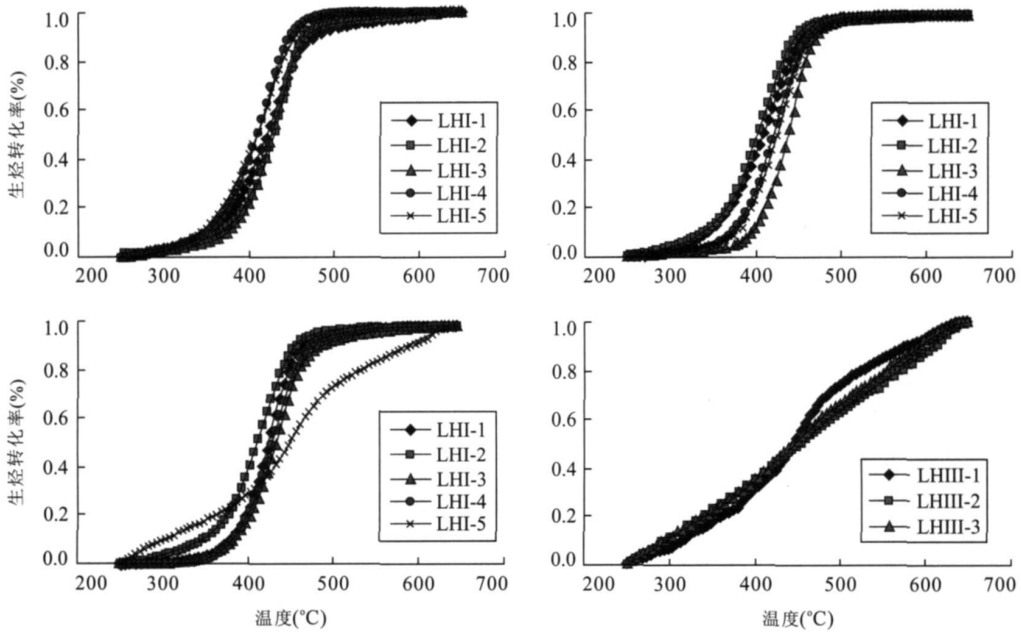


图 1 研究样品生烃转化率与温度关系曲线(5 °C/min 升温速率)

Fig. 1 Curves of sample conversion rate of hydrocarbon generation and temperature

提前(常振恒等, 2005). 因此对烃源岩活化能的分析可以详细研究烃源的生烃机理, 深刻揭示烃源之生烃本质(蒋启贵等, 2005). 通过对西部凹陷 18 个烃源岩样品的详细分析得出以下几点认识.

3.1 不同岩性的生烃动力学特征

不同岩性之间的动力学特征存在一些不同, 但差别不大. 从图 3 中可以看出, 平均活化能泥岩 < 油页岩 < 钙质页岩; 主频活化能对应的反应分数钙质页岩

< 泥岩 < 油页岩; 泥岩和油页岩活化能分布集中, 而钙质页岩相对分散, 这表明岩性对其生烃动力学也有一定的影响. 如 LHI-5(高 85 钙质页岩)样品的平均活化能相对就比较高, 为 212 kJ/mol, 主频活化能对应的反应分数也低, 为 36%, 活化能分布比较分散.

3.2 不同有机质类型的生烃动力学特征

烃源岩岩性相同有机质类型不同时, 其生烃动力学特征有着很大的差异(表 2, 图 4). 大量的事实

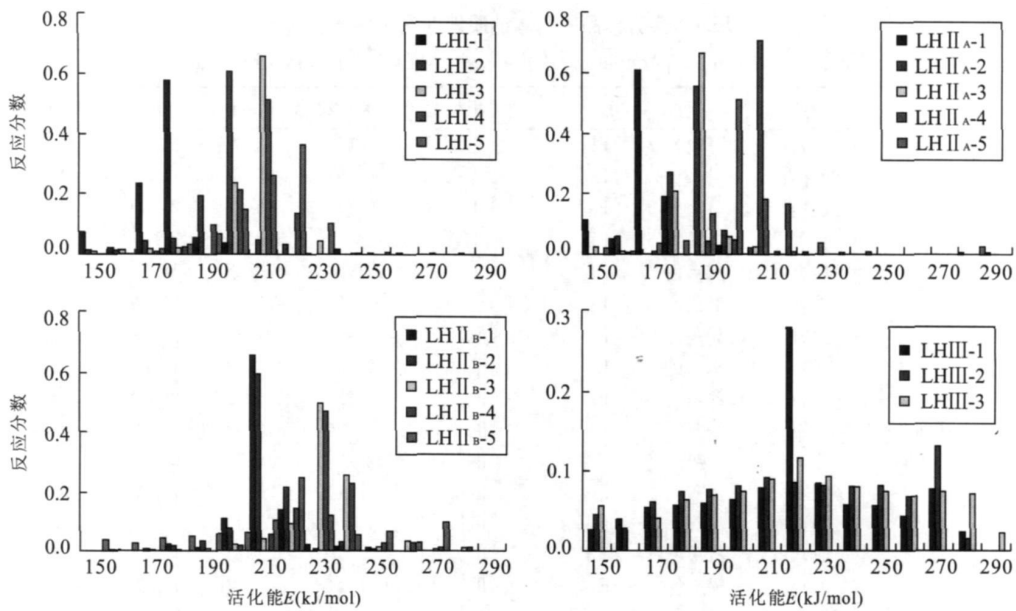


图2 辽河西部凹陷各样品活化能分布

Fig. 2 Activation energy distribution of the samples in western depression of Liaohe basin

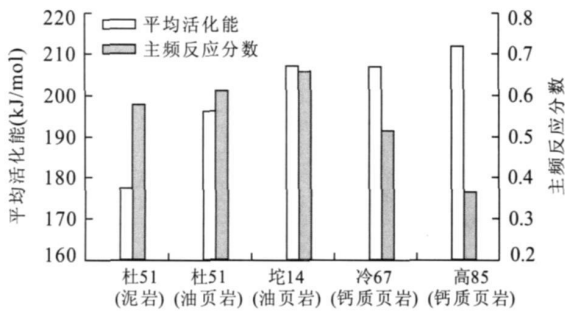


图3 辽河西部凹陷I型干酪根样品生烃动力学特征

Fig. 3 Hydrocarbon-generating dynamic characteristics of the kerogen samples in western depression of Liaohe basin

表2 辽河西部凹陷泥岩样品生烃动力学特征统计

Table 2 Hydrocarbon-generating dynamic characteristics statistics of the mudstone samples in western depression of Liaohe basin

干酪根类型 (样品数)	平均活化能 (kJ/mol)	主频活化能反 应分数(%)	活化能分 布特征
I (1)	177.56	57	集中
II _A (5)	171.43~210.06	51~71	集中
II _B (5)	210.63~231.72	25~66	比较集中
III (3)	217.58~224.16	12~28	分散

说明,干酪根的类型是一个连续的过渡系列,采用数值化的指数表示干酪根的类型可以更加客观、准确地表示干酪根的生烃能力.整体上相同岩性的样品生烃动力学特征表现为:有机质类型越好(KTI值

增大),其平均活化能(主频活化能)越小,主频活化能对应的反应分数越大,活化能分布范围越窄,需要指出的是III型的样品的平均活化能虽然比II_B型的还低,但是由于其活化能分布比较分散,平均活化能其实没有实际意义.

3.3 讨论

通过以上各样品生烃动力学特征的分析发现,不同有机质类型的烃源岩生烃动力学特征存在很大的差异,表明有机质类型对生烃动力学起着决定性作用.同时也存在不同有机质类型烃源岩样品的生烃动力学特征有重叠的现象,即某一种特征并不是某一种类型烃源岩所特有.在模拟实验中发现,相同岩性相同有机质类型的样品的生烃动力学特征以及生烃演化行为存在着一定的差异,如LH II_A-1与LH II_A-5虽同属于II_A型泥岩,但两者由于干酪根类型指数(KTI)相差很多而导致动力学特征存在很大的差异,LH II_A-1样品平均活化能小,只有171 kJ/mol,活化能分布范围窄,而LH II_A-5样品平均活化能却相对比较高,为210 kJ/mol,活化能分布范围也比较宽.相反,不同有机质类型的样品由于干酪根类型指数(KTI)相近而有着很大的相似性,如LH II_B-5虽为II_B型泥岩样品,由于KTI值与III型的相近,而导致其动力学特征与III型泥岩有机质类型样品十分相似,与其他同类型泥岩样品动力学特征相比有很大的差异,主要表现为主频活化能对应的反应分数偏低,仅为25%,活化能分布也很分

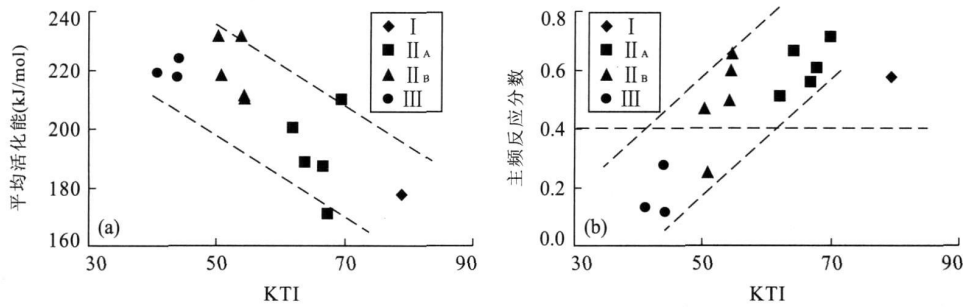


图 4 西部凹陷泥岩样品平均活化能分布(a) 和主频反应分数分布(b)

Fig. 4 Average activation energy distribution (a) and the frequency distribution of response of scores (b) of the mudstones samples in western depression

散; 又如 LH I -1 样品与 LH II_A-2 样品分别属于不同的有机质类型的泥岩, 但是从活化能分布图上可以看出, 动力学特征却十分相似。

烃源岩的生烃机制十分复杂, 同一干酪根类型的有机质其内在显微组分的差异, 必然会导致生烃行为的不同, 因此不能简单地把烃源岩按照干酪根类型分成 I 型、II_A 型、II_B 型和 II 型 4 类。所以在应用化学动力学方法进行生烃史及生烃量研究时, 不能简单地应用相近或者相似干酪根类型和岩性的化学动力学参数, 这样得到的结果很可能与实际情况差别很大, 要对研究区内的烃源岩尽可能的细分, 对每一种要研究的烃源岩都要进行生烃动力学模拟实验, 不仅按照干酪根类型和岩性选取动力学参数, 而且还要考虑不同层位以及地区的代表性等多种因素, 这样才能符合实际的地质情况, 使生烃计算结果更加准确。

4 生烃动力学的应用

烃源岩生烃动力学研究结果具有广泛的应用前景, 它不仅应用于含油气盆地烃源岩生烃史恢复, 并且可以与盆地模拟软件相结合, 对油气资源量进行更科学的预测。

辽河西部凹陷北部地区(包括牛心坨、高升、雷家)和南部地区(包括欢喜岭—曙光、双南—双台子、兴马、小洼、海外河、锦州)的沉积环境、构造特征、地层发育都有着明显的差异, 所以本次拟分南北两部分分别选取生烃动力学计算所用的地质参数。

已有研究表明, 辽河西部凹陷古地温梯度与实测井温求得平均现今地温梯度相差不大, 因此在生烃量计算中用现今地温代替古地温是可行的(汪缙安等, 1986)。

根据盘山气象站多年观测资料,

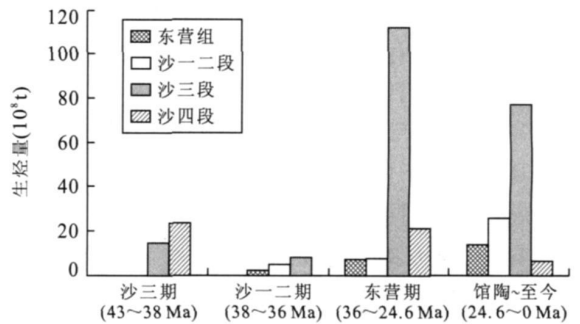


图 5 辽河西部凹陷古近系各套烃源岩生烃史

Fig. 5 Hydrocarbon generation history in of paleogene western depression of Liaohe basin

地表年平均温度为 10 °C, 并且通过统计西部凹陷近 50 口探井的测温资料, 确定了辽河西部凹陷的地温梯度为 2.8~3.2 °C/100m。

通过生烃化学动力学模型, 标定生烃动力学参数, 结合地区烃源岩参数和地史、热史资料, 就可以对辽河西部凹陷生烃过程进行定量描述(图 5)。

经计算西部凹陷古近系各套烃源岩总的生烃量为 328.09×10^8 t。沙三段和沙四段烃源岩是主要的生烃源岩, 生烃量分别为 209.51×10^8 t 和 60.62×10^8 t, 约占总生烃量的 63.9% 和 18.5%; 其次是沙一二期, 生烃量为 36.67×10^8 t, 约占总生烃量的 11.2%; 东营组生烃贡献最小, 生烃量为 21.29×10^8 t, 约占总生烃量的 6.5%。各套烃源岩生烃期基本相同, 主要有两期生烃, 第一期在东营组抬升遭受剥蚀前, 生烃量为 136.06×10^8 t, 占总生烃量的 41.5%; 第二期经抬升冷却, 随着进一步沉降并恢复加热后再次生烃, 主要是明化镇组沉积期至现今, 生烃量为 105.22×10^8 t, 占总生烃量的 32.1%。在沙三期、沙一二期和馆陶期生烃量比较少。

5 结论

(1) 不同有机质类型的烃源岩动力学特征存在很大的差异,表明有机质类型对生烃动力学起着决定性作用。(2) 相同岩性不同有机质类型烃源岩样品的生烃动力学特征有重叠的现象,即某一种特征并不是某一种类型烃源岩所特有。应用化学动力学方法进行生烃史及生烃量研究时,要对研究区内的烃源岩尽可能地细分,对每一种要研究的烃源岩都要进行生烃动力学模拟实验,不仅按照干酪根类型和岩性选取动力学参数,而且还要考虑不同层位以及地区的代表性等多种因素,这样才能符合实际的地质情况,使生烃计算结果更加准确。(3) 西部凹陷古近系各套烃源岩总的生烃量为 328.09×10^8 t。在层位上,沙三段和沙四段烃源岩对生烃贡献最大,生烃量分别为 209.51×10^8 t 和 60.62×10^8 t;在时间上,东营组沉积期是主要的生烃时期。

致谢:论文撰写过程得到了卢双舫教授的指导 and 帮助,在样品的采集和实验过程中得到辽河油田勘探开发研究院的大力支持和帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Behar, F., Vandenbroucke, M., Tang, Y., et al., 1997. Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: Determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation. *Organic Geochemistry*, 26(5-6): 32-339.
- Boreham, C. J., Horsfield, B., Schenk, H. J., 1999. Predicting the quantities of oil and gas generated from Australian Permian coals, Bowen basin using pyrolytic methods. *Marine and Petroleum Geology*, 16(2): 165-188.
- Chang, Z. H., Shen, Z. M., Chen, Y. C., et al., 2005. The characteristics of hydrocarbon-generation kinetics parameters in source rock of Member 1 of Shahejie Formation in Dongpu depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1): 80-82 (in Chinese with English abstract).
- Cramer, B., Faber, E., Gerling, P., et al., 2001. Reaction kinetics of stable carbon isotopes in natural gas—Insights from dry, open system pyrolysis experiments. *Energy Fuels*, 15(3): 517-532.
- Fu, S. Y., Peng, P. A., Zhang, W. Z., et al., 2002. The research on hydrocarbon-generating dynamic of coal in Upper Paleozoic in the Ordos basin. *Science in China (Ser. D)*, 32(10): 812-818 (in Chinese).
- Jiang, Q. G., Wang, Q., Cheng, Q. Q., et al., 2005. Discussion on the kinetic characteristics of hydrocarbon generation of different maceral source rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(5): 512-518, 533 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Y., Gou, S. H., Shen, R. M., 2001. Study of characteristics and kinetics of catalytic degradation of asphaltene. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(1): 136-140 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. F., 1996. The application of hydrocarbon-generating kinetics theory. Petroleum Industry Press, Beijing, 1-130 (in Chinese).
- Lu, S. F., Wang, M., Wang, Y. W., et al., 2006. Comparison of simulation results from the closed and open experimental systems and its significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(2): 282-288 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. F., Wang, Z. W., Huang, D. F., et al., 1995. Hydrocarbon-generating dynamic of coal macerals. *Science in China (Ser. B)*, 25(1): 101-107 (in Chinese).
- Lu, S. F., Xue, H. T., Zhong, N. N., 2002. The chemical kinetic study of the oil preservation threshold. *Petroleum Exploration and Development*, 29(6): 1-3 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y., Perry, J. K., Jenden, P. D., et al., 2000. Mathematical modelling of stable carbon isotope ratios in natural gases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15): 2673-2687.
- Ungerer, P., 1990. State of the art of research in kinetic modeling of oil formation and expulsion. *Organic Geochemistry*, 16(1-3): 1-25.
- Wang, J. A., Wang, Y. L., 1986. Geothermal and paleogeothermal characteristics of Liaohe graben district and their relationship to oil-gas resources. *Acta Petrolei Sinica*, 7(2): 21-29 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. P., Zhao, C. Y., Wang, Z. Y., et al., 2005. Kinetic method for determining the main gas-generation period of marine organic matters and its application. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 153-158 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Zhong, N. N., Li, Y. X., et al., 2006. Application of hydrocarbon-generating chemical kinetics in the Pu-guang gas field, NE Sichuan basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(6): 682-688 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, F. B., 2000. Research of organic maturation and petro-

um generation in the western depression, Liaohe basin. *Geological Science and Technology Information*, 19(3): 53–56 (in Chinese with English abstract).

Zhu, F. B., 2002. Research on characteristic of source rock and immature oils distribution in western depression, Liaohe basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(1): 25–29 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

常振恒, 沈忠民, 陈义才, 等, 2005. 东濮凹陷沙一段源岩的生烃动力学参数特征. *矿物岩石*, 25(1): 80–82.

付少英, 彭平安, 张文正, 等, 2002. 鄂尔多斯盆地上古生界煤的生烃动力学研究. *中国科学(D辑)*, 32(10): 812–818.

蒋启贵, 王勤, 承秋泉, 等, 2005. 不同组分烃源岩生烃动力学特征浅析. *石油实验地质*, 27(5): 512–518, 533.

李术元, 郭绍辉, 沈润梅, 2001. 沥青质催化降解特征及动力学研究. *沉积学报*, 19(1): 136–140.

卢双舫, 1996. 有机质成烃动力学理论及其应用. 北京: 石油

工业出版社, 1–130.

卢双舫, 王民, 王跃文, 等, 2006. 密闭体系与开放体系模拟实验结果的比较研究及其意义. *沉积学报*, 24(2): 282–288.

卢双舫, 王子文, 黄第藩, 等, 1995. 煤岩显微组分的成烃动力学. *中国科学(B辑)*, 25(1): 101–107.

卢双舫, 薛海涛, 钟宁宁, 2002. 石油保存下限的化学动力学研究. *石油勘探与开发*, 29(6): 1–3.

汪缙安, 王永玲, 1986. 辽河断陷地温、古地温特征与油气资源. *石油学报*, 7(2): 21–29.

王云鹏, 赵长毅, 王兆云, 等, 2005. 利用生烃动力学方法确定海相有机质的主生气期及其初步应用. *石油勘探与开发*, 32(4): 153–158.

赵喆, 钟宁宁, 李艳霞, 等, 2006. 生烃化学动力学在川东北普光气田的应用. *石油勘探与开发*, 33(6): 682–688.

朱芳冰, 2000. 辽河盆地西部凹陷源岩热演化及生烃史研究. *地质科技情报*, 19(3): 53–56.

朱芳冰, 2002. 辽河盆地西部凹陷源岩特征及低熟油分布规律研究. *地球科学—中国地质大学学报*, 27(1): 25–29.