



不同地质环境下原油裂解生气条件

赵文智* 王兆云 张水昌 王红军

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要 烃源岩生成的油主要有 3 种赋存形式: 源内分散液态烃、源外分散液态烃和源外聚集液态烃. 3 种赋存状态液态烃由于所处温压环境不同, 周围介质的条件不同, 有机无机的相互作用导致原油发生裂解条件有差异. 原油与不同介质配样的生气动力学实验表明, 不同介质条件下甲烷的生成活化能分布差异较大, 碳酸盐岩对油裂解条件影响最大, 可大大降低其活化能, 导致原油裂解热学条件降低, 体现在油裂解温度的降低; 泥岩次之, 砂岩影响最小. 碳酸盐岩、泥岩和砂岩对油的催化裂解作用依次减弱, 不同介质条件下主生气期对应的 R_o 值: 纯原油 1.5%~3.8%; 碳酸盐岩中的分散原油 1.2%~3.2%; 泥岩中的分散原油 1.3%~3.4%; 砂岩中的分散原油 1.4%~3.6%. 压力对原油裂解作用的影响较为复杂, 在慢速升温条件下, 压力对油裂解生气有抑制作用, 而在快速升温条件下, 压力对油裂解生气作用影响不显著; 压力的大小在原油裂解的不同演化阶段作用效果也不同. 以塔里木盆地中下寒武统为例研究油裂解生气量, 原始生油量 $2232.24 \times 10^8 \text{t}$, 剩余油量 $806.21 \times 10^8 \text{t}$, 油裂解气量 $106.95 \times 10^{12} \text{m}^3$.

关键词 不同赋存状态油 裂解条件 油裂解型气源灶

中国叠合盆地中下部组合海相地层与国外海相地层相比, 在大地构造背景、沉积环境以及油气地质条件等方面均存在差异性^[1~4]. 中国广泛分布的海相烃源岩, 目前都处于高-过成熟演化阶段 ($R_o = 2.0\% \sim 4.0\%$)^[5~7], 高过成熟干酪根热降解生成天然气的数量十分有限, 此时, 地层中的分散可溶有机质和原油二次裂解是主要的成气途径, 其与干酪根热降解生气构成接力过程^[8~11]. 由于地层中的分散可溶有机质和原油处于不同的地质环境下, 包括温度和压力的不同以及与围岩接触程度的差异等, 因此, 原油发生裂解的条件差异较大.

1 液态烃的 3 种主要赋存状态

干酪根热降解生成的液态烃主要有 3 种赋存状态: 一是未发生初次运移仍滞留在烃源岩中的液态

烃, 称之为源内分散液态烃; 二是发生排烃和运聚作用, 并高度富集形成了古油藏, 称之为源外聚集型液态烃; 三是发生初次和二次运移, 但富集度较低未聚集成古油藏, 分散在疏导层中的液态烃, 称之为源外分散液态烃. 图 1 展示了塔里木盆地古生界海相原油的三种主要赋存状态^[12~14]. 上述 3 种赋存状态的液态烃由于所处的环境不同, 与周围介质的紧密接触程度不同, 有机无机的相互作用导致原油发生裂解条件的差异.

据塔里木盆地和四川盆地海相层系含油气系统分析^[15~17], 源内分散液态烃多赋存于泥岩、灰岩和泥灰岩中, 源外分散液态烃多赋存于砂岩和灰岩中. 因此, 选取塔里木盆地古生界的海相泥岩、灰岩和砂岩样品(表 1), 分别与塔里木盆地的海相原油(表 2)配置模拟上述 3 种环境. 挑选的泥岩、灰岩和细砂岩抽提

收稿日期: 2007-04-04; 接受日期: 2007-09-14

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2001CB209100)和国家自然科学基金项目(批准号: 40672097)共同资助

* E-mail: zwz@petrochina.com.cn

表 1 原油赋存介质的生气潜力分析

样号	井号	层位	岩性	TOC/%	$S_1/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$S_2/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$I_H/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{TOC}$	有效碳 PC/%	降解率 PC/TOC (%)
1	轮南 63	O	泥岩	0.13	0.03	0.01	8.0	0.00	2.55
2	轮古 41	O	灰岩	0.06	0.02	0.01	17.0	0.00	4.15
3	轮南 63	C	细砂岩	0.10	0.04	0.04	40.0	0.01	6.64
4	轮古 13	O	泥灰岩	0.04	0.02	0.01	25.0	0.00	6.23

表 2 塔里木轮南地区原油样品的基础数据

深度/m	层位	密度, (20℃)/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}^{-1}$	凝固点/℃	初馏点/℃	含蜡量/%	含硫量/%
4010	O	0.8576	9.037	30	102	18.15	0.17

表 3 不同介质的矿物种类和含量

样号	井号	层位	岩性	矿物种类和含量/%						黏土矿物总量/%
				石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	
1	轮南 63	O	泥岩	21	1.1	/	33.7	3.3	/	40.9
2	轮古 41	O	灰岩	1.3	/	/	92	4.7	/	2.0
3	轮南 63	C	细砂岩	64.5	7.0	/	19.4	0.4	/	8.7
4	轮古 13	O	泥灰岩	4.1	0.9	/	86.7	/	1.9	6.4

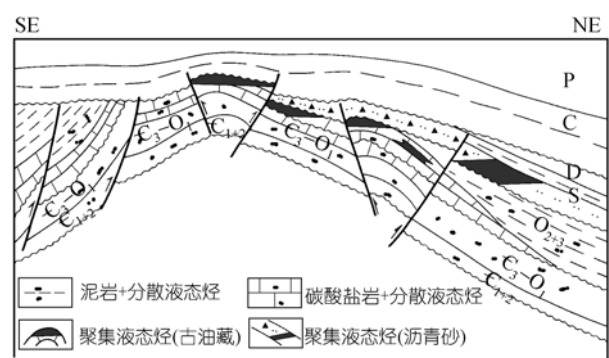


图 1 液态烃的 3 种主要赋存状态

后的生烃潜力很低，具体数值见表 1，其生气量可忽略不计，因此，模拟实验过程中的产气量主要来自原油的裂解。将不同介质分别进行 X 射线衍射分析(图 2)，矿物的种类和含量见表 3。泥岩富含黏土矿物，其次为方解石和石英；砂岩富含石英，灰岩富含方解石。

2 不同赋存状态液态烃裂解条件

将原油与碳酸盐岩、泥岩和砂岩分别进行配样，模拟原油在烃源岩和储集层中的分散赋存形式，由于受金管大小所限，该实验原油和介质的重量比为 1:9。

纯原油(代表聚集型液态烃)及 3 种配样分别进行金管封闭体系的生烃动力学实验，实验条件：压力为 50MPa，温度为 300~620℃，分别以 2℃/h 和 20℃/h 升温速率。气体定量、收集并进行组分分析。成熟度动力学计算采用 EasyR_o 模型，生烃动力学计算采用

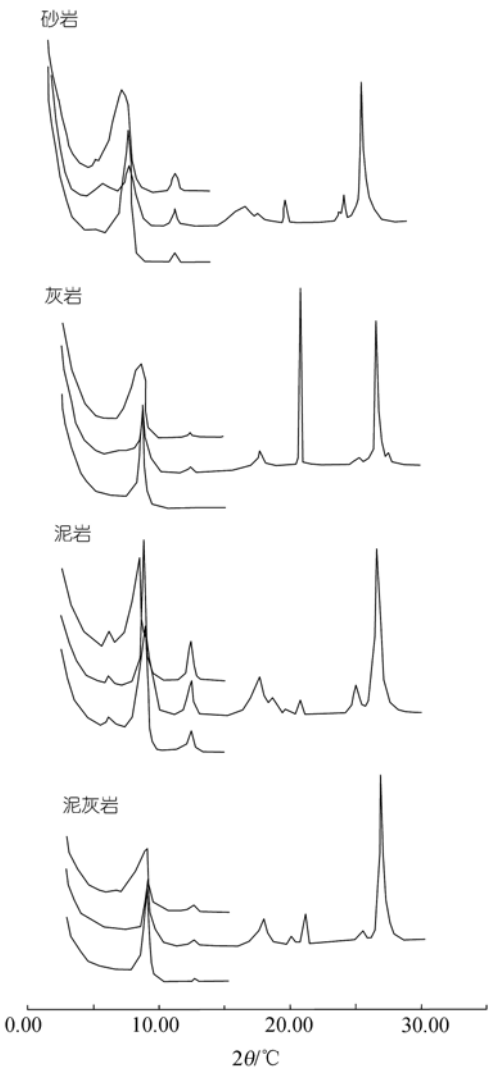


图 2 不同介质的 X 射线衍射分析

Kinetics 2000 软件. 实验结果甲烷的产率见图 3. 不同介质条件下原油累积产气量相同, 具体到塔里木盆地轮南地区奥陶系的原油, 产甲烷量为 $680\text{m}^3/\text{t.油}$, 产天然气为 $750\text{m}^3/\text{t.油}$. 不同油的累积产气量与原油的性质、组分含量、演化程度以及后期是否遭受次生变化等因素皆有关, 即不同的原油裂解生气量有一定的差别.

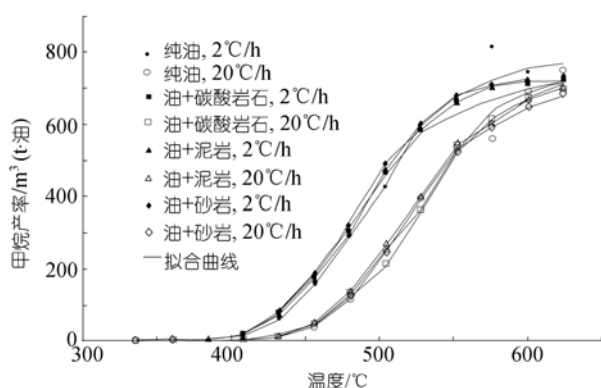


图3 不同介质条件下甲烷产率及拟合曲线

不同介质条件下甲烷的生成活化能分布有差异(图 4), 碳酸盐岩对油裂解条件影响最大, 可大大降低其活化能, 导致原油裂解热学条件降低, 体现在油发生裂解温度的降低. 泥岩次之, 砂岩影响最小. 碳

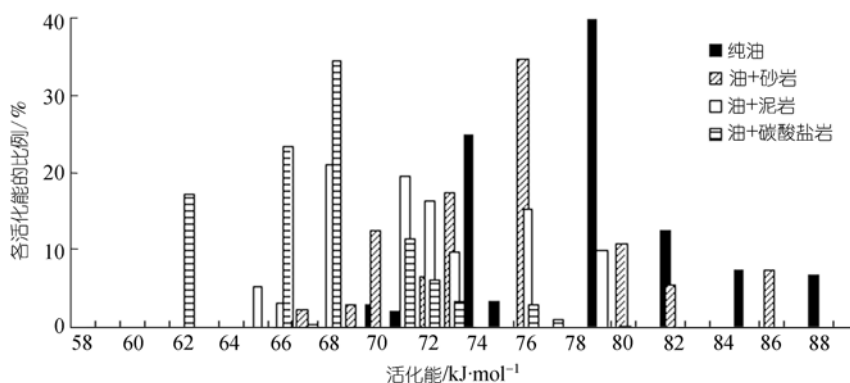


图4 不同介质条件下甲烷生成的活化能分布

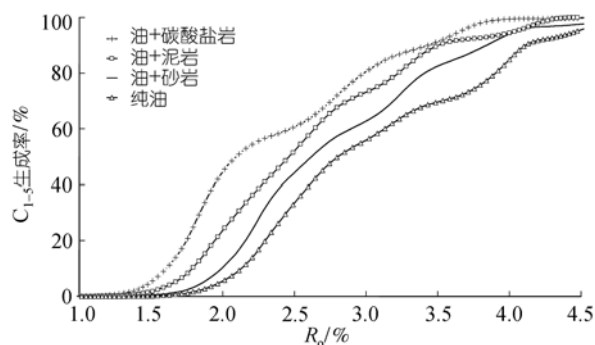


图5 不同介质条件下原油裂解生气时刻及主要生气期

酸盐岩、泥岩和砂岩对油的催化作用依次减弱, 不同介质条件下主生气期对应的 R_a 值: 纯原油 1.5%~3.8%; 碳酸盐岩中的分散原油 1.2%~3.2%; 泥岩中的分散原油 1.3%~3.4%; 砂岩中的分散原油 1.4%~3.6%(图 5).

3 压力对原油裂解作用的影响

将同一油样置于 50, 100, 200 MPa 3 种不同的压力条件下, 完成原油裂解生气实验. 实验采用金管封闭体系装置, 分别以 $2^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温速率. 气体定量、收集并进行组分分析. 6 组实验数据示于图 6, 反映了 3 个特征: 一是慢速升温条件下, 如 $2^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温速率, 压力对油裂解生气有抑制作用, 即随着压力的增大, 同一温度条件下, 原油裂解生气数量减少; 二是快速升温条件下, 如 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温速率, 压力对油裂解生气作用影响不显著; 三是压力的大小在原油裂解的不同演化阶段作用效果不同, 高演化阶段作用更为显著.

4 原油裂解成气数量的研究及其计算流程——以塔里木盆地下古生界为例

具体到某一地区研究其原油裂解气的数量, 首先应从气源灶分析入手, 通过生油量、排油量、油聚

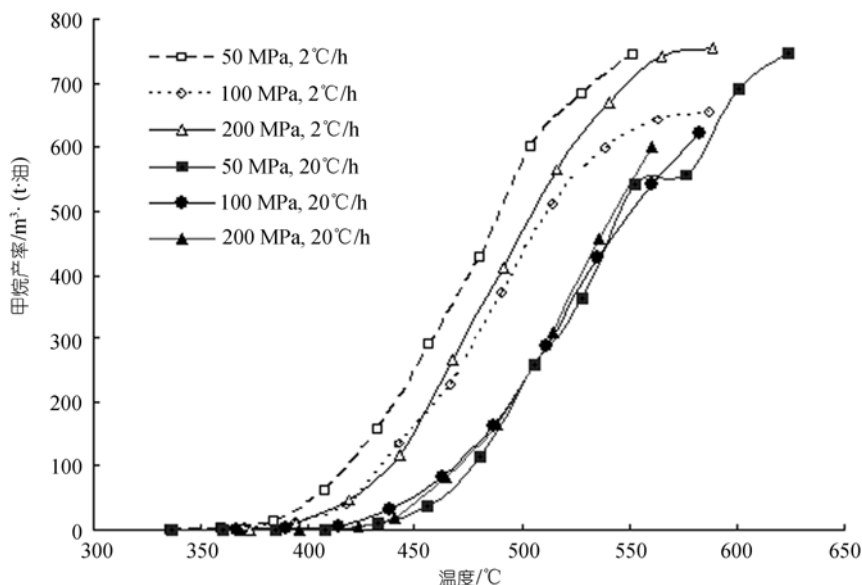


图 6 不同压力条件下原油裂解生气数量比较

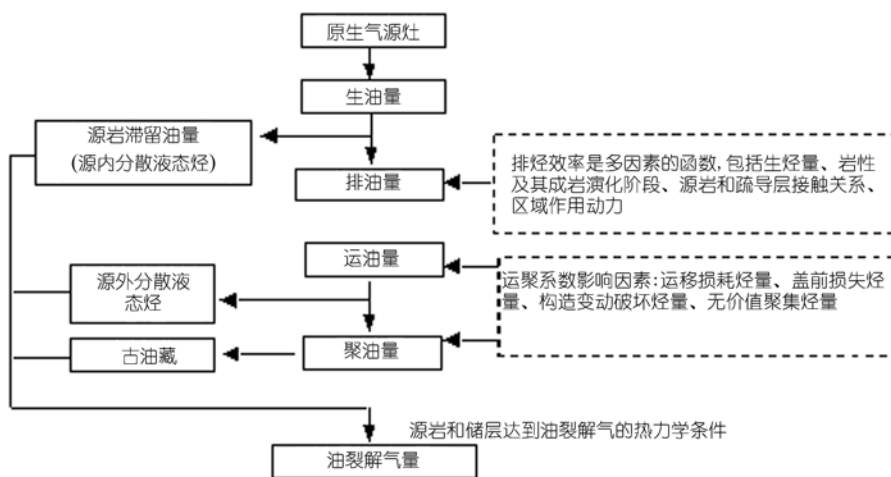


图 7 烃源灶的生油量及其油裂解气量

集效率研究(成藏条件和保存条件分析, 关键是古构造研究), 确定已生成原油的规模和分布; 再者通过研究储集层和生油层分别经历的受热条件, 研究油裂解的程度, 即油裂解气量和有效聚气率, 后者的关键是现今构造和圈闭研究, 以及古构造和现今构造的关系。详细研究流程见图 7。

现以塔里木盆地古生界海相层系原始生油量、油裂解成气的数量以及剩余油量的研究为例进行分析。塔里木盆地古生界海相层系主要发育中下寒武统与中上奥陶统两套烃源岩^[18-20]。中-下寒武统发育克拉通边缘拗陷饥饿盆地浮游藻类有机相和台内拗陷蒸发泻湖盐藻有机相两种烃源岩, 分别分布于满加尔凹陷及其邻区, 以及盆地西部地区, 面积约

$32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其经历了多期热演化和生烃过程, 现今处于高-过成熟阶段^[21-23]。维马 1 井埋藏、受热和生烃史图(图 8)反映了复杂的沉积、演化历程。

首先根据塔里木盆地不同构造带中下寒武统烃源岩面积、生油指标、埋藏和受热历史计算原始生油量; 第二步依据含油气系统分析研究成果, 确定不同构造带的油分别赋存的层位及其所占的比例; 第三步分别考察不同构造带的原油赋存层位所经历的受热历史, 目的是研究原油的裂解程度。塔里木盆地不同构造带中下寒武统生油量、油赋存层位及其裂解气的数量列于表 4。中下寒武统烃源岩原始生油量 $2232.24 \times 10^8 \text{ t}$, 剩余油量(未发生裂解的油) $806.21 \times 10^8 \text{ t}$, 油裂解气量 $106.95 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。需要说明的是特别

表 4 塔里木盆地中下寒武统生油量及其油裂解气量

不同构造带	原始生油量 ($\times 10^8 \text{t}$)	储油特征		裂解油数量		剩余油量 ($\times 10^8 \text{t}$)	油裂解气量 ($\times 10^8 \text{m}^3$)	主要气藏 (层位, 探明储量 $\times 10^8 \text{m}^3$)
		层位	比例/%	R_o /%	裂解油的比例/%			
塔北隆起	161.86	源内	∈	50	1.8~2.6	20~60	32.37	36418.5
			O	35~40	1.4~2.0	3~40	38.85	19423.2
		源外						轮古东, O, 170.04; 桑塔木, O, 81.07; 塔河, O, T, 221.96
			D, C, T, K ₁	10~15	1.0~1.4	0~5	15.38	607.0
北部拗陷	821.12	源内	∈	50	2.6~3.8	60~90	41.06	277128.0
		源外	O	35	2.0~3.4	40~85	43.11	183212.4
			S	15	1.2~1.6	0~5	117.01	4618.8
中央隆起	846.20	源内	∈	50	2.2~2.8	45~65	148.09	206261.3
		源外	O	40	1.2~2.0	0~40	203.09	101544.0
								塔中 62, O, 203.44; 塔中 1、塔中 162、塔中 80
			D-C	10	1.2	0	84.62	0
西南拗陷	403.06	源内	∈	50	2.2~4.6	45~99	2.02	149636.0
		源外	O	40	1.4~2.4	5~55	72.55	66504.9
			C	10	1.2~3.8	0~80	8.06	24183.6

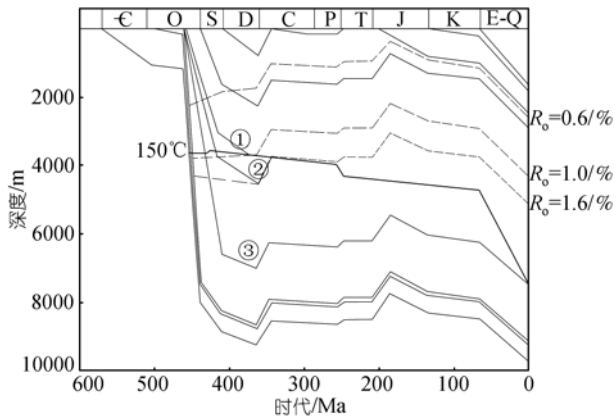


图 8 维马 1 井埋藏、受热和生烃史图

① 未发生油裂解生气的奥陶系地层底界; ② 泥盆纪以前发生油裂解生气, 但后期未发生的奥陶系地层顶界; ③ 古近纪以后未发生原油裂解生气的奥陶系地层底界

要关注储层所经历的受热历史, 这是发生油裂解成气的必要条件; 另外, 这里均指烃类的一次运聚成藏过程, 未考虑气藏的再次调整和最终定型。

5 结论

(1) 烃源岩在生油窗阶段生成的油主要有 3 种赋存形式, 一是“源内分散状液态烃”, 即生成的液态烃未发生初次运移, 仍滞留在烃源岩内; 二是“源外分散状液态烃”, 即生成的液态烃发生初次运移至储集

层中, 但富集度较低, 尚未形成古油藏; 三是“源外富集型液态烃”, 即古油藏。不同附存状态的油经历较高的温度后发生热裂解形成天然气, 是我国海相高-过成熟区的主要成气途径。

(2) 原油发生裂解的条件受地质环境和介质的影响。原油与不同介质配样的生气动力学实验表明, 不同介质条件下甲烷的生成活化能分布有差异, 碳酸盐岩对油裂解条件影响最大, 可大大降低其活化能, 导致原油裂解热学条件降低, 体现在油发生裂解温度的降低。泥岩次之, 砂岩影响最小。碳酸盐岩、泥岩和砂岩对油的催化作用依次减弱, 不同介质条件下主生气期对应的 R_o 值: 纯原油: 1.5%~3.8%; 碳酸盐岩中的分散原油: 1.2%~3.2%; 泥岩中的分散原油: 1.3%~3.4%; 砂岩中的分散原油: 1.4%~3.6%。

(3) 压力对原油裂解作用的影响较为复杂, 在慢速升温条件下, 压力对油裂解生气有抑制作用, 而在快速升温条件下, 压力对油裂解生气作用影响不显著; 压力的大小在原油裂解的不同演化阶段作用效果也不同。

(4) 以塔里木盆地中下寒武统生油及油裂解气研究为例, 中下寒武统烃源岩原始生油量 $2232.24 \times 10^8 \text{ t}$, 剩余油量 $806.21 \times 10^8 \text{ t}$, 油裂解气量 $106.95 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

致谢 不同介质条件原油裂解成气动力学实验及参数计算由中国科学院广州地球化学研究所刘金钟教授完成,中石油勘探开发研究院塔里木分院彭燕、张宝民教授帮助挑选塔里木样品,在此致以谢意。

参 考 文 献

- 1 Hunt J M, McNichol A P. The Cretaceous Austin Chalk of South Texas—A petroleum source rock. In: Palacas J G, eds. *Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks: AAPG Studies in Geology* 18, 1984
- 2 Welte D H. *Petroleum and Basin Evolution*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1997
- 3 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. *地学前缘*, 2000, 7(4): 534—547
- 4 康玉柱. 塔里木盆地海相古生界油气勘探的进展. *新疆石油地质*, 2002, 23(1): 76—78
- 5 张光亚, 王红军, 宋建国, 等. 塔里木盆地满西寒武系—下奥陶统油气系统的确定及其在勘探上的应用. *中国石油勘探*, 2002, 4(4): 18—24
- 6 杨天泉, 黄先平, 周肖. 川东渡口河气田飞仙关组气藏地质特征与勘探前景. *天然气工业*, 2002, 19(6): 11—14
- 7 王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H_2S 成因研究. *地球化学*, 2002, 31(6): 517—523
- 8 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 1—7
- 9 Robert R B, Anthony F G. Primary migration by oil-generation microfracturing in low- permeability source rocks: application to the Austin Chalk, Texas. *AAPG Bull.*, 1999, 83(5): 727—756
- 10 赵孟军, 张水昌, 廖志勤. 原油裂解气在天然气勘探中的意义. *石油勘探与开发*, 2001, 28(4): 47—49, 56
- 11 Pepper A S, Dodd T A. Simple kinetic models of petroleum formation. Part II: oil-gas cracking. *Mar Petrol Geol*, 1995, 12: 321—340[DOI]
- 12 冉隆辉, 陈更生, 张健, 等. 四川盆地东北部飞仙关滩涂储层分布研究与勘探潜力分析. *中国石油勘探*, 2002, 7(1): 46, 55
- 13 贾承造. *中国塔里木盆地构造特征与油气*. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 14 赵文智. *中国叠合盆地含油气系统基本特征及其评价方法*. 北京: 科学出版社, 2003
- 15 张光亚, 王红军, 李洪辉. 塔里木盆地克拉通区油气藏形成主控因素与油气分布. *科学通报*, 2002, 47(增刊): 24—29
- 16 戴金星, 夏新宇, 洪峰. 天然气地质学研究促进了中国天然气储量的大幅度增长. *新疆石油地质*, 2002, 23(5): 357—365
- 17 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. *中国天然气地质学(卷一)*. 北京: 石油工业出版社, 1992. 37—38, 46—50
- 18 赵孟军, 张水昌, 刘丰忠. 油藏演化的两个极端过程. *石油勘探与开发*, 2003, 30(5): 21—23
- 19 张水昌, 王招明, 王宇飞, 等. 塔里木盆地塔东 2 油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究. *石油勘探与开发*, 2004, 31(6): 25—31
- 20 赵靖舟, 罗继红, 时保宏, 等. 塔里木盆地成藏系统分析. *石油实验地质*, 2002, 24(4): 311—21
- 21 肖贤明, 刘德汉, 傅家谟. 应用沥青反射率推算油气生成与运移的地质时间. *科学通报*, 2000, 45(19): 2123—2127
- 22 赵文智, 王兆云, 何海清, 等. 中国海相碳酸盐岩烃源岩成气机理. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(7): 638—648
- 23 刘德汉, 史继扬. 碳酸盐岩高演化有机质的地球化学特征及油气非常规评价方法. *天然气工业*, 1994, 14(增刊): 62—67