

Philosophical Thinking of Petroleum Generation

Xingzhou Chen¹, Zenyan Chen², Junsheng Li³

¹China University of Petroleum, Beijing

²Department of Exploration Project Management, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin

³Poly Technologies Inc., Beijing

Email: lhlijsh@126.com

Received: Nov. 20th, 2013; revised: Dec. 29th, 2013; accepted: Jan. 13th, 2014

Copyright © 2014 Xingzhou Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Xingzhou Chen et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: This paper puts forward an argument of generating new hydrocarbon resources by heating up source rock based on investigations and researches on theories of hydrocarbon generation, the real cases of exploration and development, as well as the trend of technical development. Practices in oil and gas exploration and development through years have demonstrated that a huge amount of good hydrocarbon source rocks exist in the formations; the modern theory of hydrocarbon generation believes that the process of kerogen degradation and hydrocarbon generation involves two factors, temperature and time, which are complementary, *i.e.* if the temperature is very high, it is possible to generate oil and gas even though the time is short; in the history of oil and gas exploration, magmatic rocks have been found to be numerous in the formations, and such rocks possess heat effect which can accelerate the maturation and hydrocarbon generation process of source rock in adjacent formation; simulation experiments indicate that source rock can generate oil and gas rapidly under higher temperature. Many thermal recovery techniques of heating up formations have been applied such as cyclic steam stimulation, steam flood and *in situ* combustion. In the recovery of oil shale, three types of heating technologies are employed including heat conduction, heat convection and heat radiation. These researches and surveys have provided a technical imaginary space for generating hydrocarbon by heating up source rock. It is believed through above researches that it is theoretically, practically and technically feasible to generate oil and gas through heating up source rock. Technologies are destined to be found out to generate new hydrocarbon resources by heating up source rocks along with fast development of science and technology and through long efforts of all the people, thus offering unexhausted energy momentum for humanity development.

Keywords: Oil; Gas; Generation; Source Rock; Heating; Philosophical Thinking

生油的哲学思考

陈星州¹, 陈振岩², 李军生³

¹中国石油大学, 北京

²中国石油辽河油田公司勘探项目管理部, 盘锦

³保利科技有限公司石油部, 北京

Email: lhlijsh@126.com

收稿日期: 2013年11月20日; 修回日期: 2013年12月29日; 录用日期: 2014年1月13日

摘要: 在对油气生成理论、勘探开发中的实例及勘探开发技术发展趋势进行研究的基础上, 提出了加热烃源岩以生成新的油气资源的观点。多年的油气勘探开发实践证明, 在地层中存在着为数众多的、良好的烃源岩; 现代生烃理论认为, 在干酪根降解生成油气的过程中, 涉及温度与时间两个因素, 温度与时间可以互补, 若温度很高, 即使时间较短, 也可生成油气; 在油气勘探开发过程中, 在地层中发现了大量的岩浆岩, 研究表明, 由于存在岩浆岩热效应, 加速了其围岩中烃源岩的成熟和生烃作用; 烃源岩生烃模拟实验证明, 在温度较高的

情况下, 烃源岩可以快速生成油气; 在油气开采实践中, 已经采用了蒸汽吞吐、蒸汽驱以及火烧油层等加热油层的方法。在油页岩的开采中, 使用了传导加热、对流加热、辐射加热等 3 类加热技术。这些研究及探索工作为加热烃源岩生成油气提供了技术上的想象空间。综合以上研究结果认为, 从理论、实践和技术上, 都证明了通过加热烃源岩来生成油气资源具有一定的可行性, 随着科学技术的飞速发展, 通过全人类长期的努力, 一定会找到可以用来加热烃源岩以生成新的油气资源的技术方法, 为人类的发展提供新的、不竭的能源动力。

关键词: 石油; 天然气; 生成; 烃源岩; 加热; 哲学思考

1. 引言

随着石油勘探开发技术的飞速发展, 在隐蔽油气藏、火山岩油气藏及古潜山油气藏的勘探上取得了重大的突破, 找到了相当数量的油气资源。同时, 油气开采技术不断进步, 有了更高的采收率, 采出程度日益提高。但是, 我们所能找到的石油资源是有限的, 而人类对石油的需求是不断增长的。虽然世界各国为开发利用新能源投入了大量的人力和物力^[1], 但都替代不了石油、天然气等化石燃料的地位。此外, 石油及天然气是现代化工的主要原料, 具有不可替代的作用。专家们预测, 以目前的开采速度和石油消费速度, 在一、二百年后, 我们将面临油气资源的枯竭^[2,3]!

为了改变这种与世界经济发展态势相矛盾的油气勘探现状, 学者们不得不重新组织已有的知识体系, 不断深化对油气成因、油气成藏和油气分布规律的认识, 为油气勘探工作不断注入新的活力。地震地层学、层序地层学、含油气系统、油气成藏动力系统等新理论、新技术应运而生。每一次理论、技术的更新, 都推动了油气勘探事业的发展。尽管如此, 找到的油气资源, 仍满足不了社会经济发展的需求。而且很多的方案都是在如何寻找油气上做文章, 而本文则在考虑如何使油气再生成。那么, 自然界是否还存在没有被发掘的油气资源呢? 回答是肯定的。美国石油地质学家华莱士·E·普拉特在 1952 年发表的《找油的哲学》一文中, 明确指出: 是我们的认识阻碍了石油勘探事业的发展, 石油首先是发现在人们的脑海里^[4]! 按照华莱士·E·普拉特的思路, 人们若能不断反思以往通过实践获得的认识, 必会有新的发现。

众所周知, 油气成因是石油地质学中一个根本性的问题, 是油气勘探研究中的重点问题^[5-8]。对油气成因的认识, 在一个多世纪中, 走过了无机成油说、早期有机成油说、晚期有机成油说和现代成油说四个阶

段。自 20 世纪 70 年代以来, 现代油气成因理论逐渐占主导地位。现代油气成因理论是以晚期有机成油为主兼容早期成烃的理论体系。该理论体系把两者视为统一生油过程的两个不同阶段, 差别在于不同阶段的成烃量和影响因素不同。

按照现代油气成因理论, 晚期成烃是油气生成的主体^[9]。晚期成烃过程, 是沉积物中的有机质, 在成岩作用晚期, 首先形成干酪根, 然后, 随着埋深的增大, 在不断升高的热应力的作用下, 干酪根逐步发生催化裂解和热裂解, 形成大量的原石油(或称为沥青, 包括烃类和非烃类)。在一定的条件下, 这些石油从烃源岩中运移出来, 在储层中聚集, 形成油气藏。这些油气藏正是人们长期以来进行油气勘探的资源基础和目标。这个资源基础有多雄厚? 多数专家认为约占成熟烃源岩总生烃量的 10%~20%。即是说, 绝大部分油气仍以游离态、吸附态滞留在烃源岩内部, 这部分资源远比从烃源岩中运移出来聚集成藏的量大得多。

随着勘探发展, 各地区勘探程度越来越高, 以油气藏为目标的勘探难度亦越来越大。于是人们就把注意力转向成熟烃源岩内部的滞留油气^[10]。在进行常规油气藏勘探的同时, 开始探索烃源岩内部的非常规油气勘探, 经多年的攻关, 采用一系列先进的钻探、开采技术, 找到了大量的泥页岩油气资源。据报导, 美国 2009 年仅页岩气的产量就达 978 亿立方米^[11]。当前, 世界主要产油气大国都大力开展页岩气勘探^[12]。地质学家通过研究认为页岩油气和常规油气一样具有很大的勘探领域并研究了成藏模式(图 1)。预计这一领域油气资源的开发, 将使前面预测的油气资源枯竭的危机, 又可推后几百年。

前人曾给我们留下富有哲理的警句——人无远虑, 必有近忧。此语同样适用于油气勘探。尽管当前尚有成熟烃源岩提供的广阔勘探领域, 但是, 这部分资源

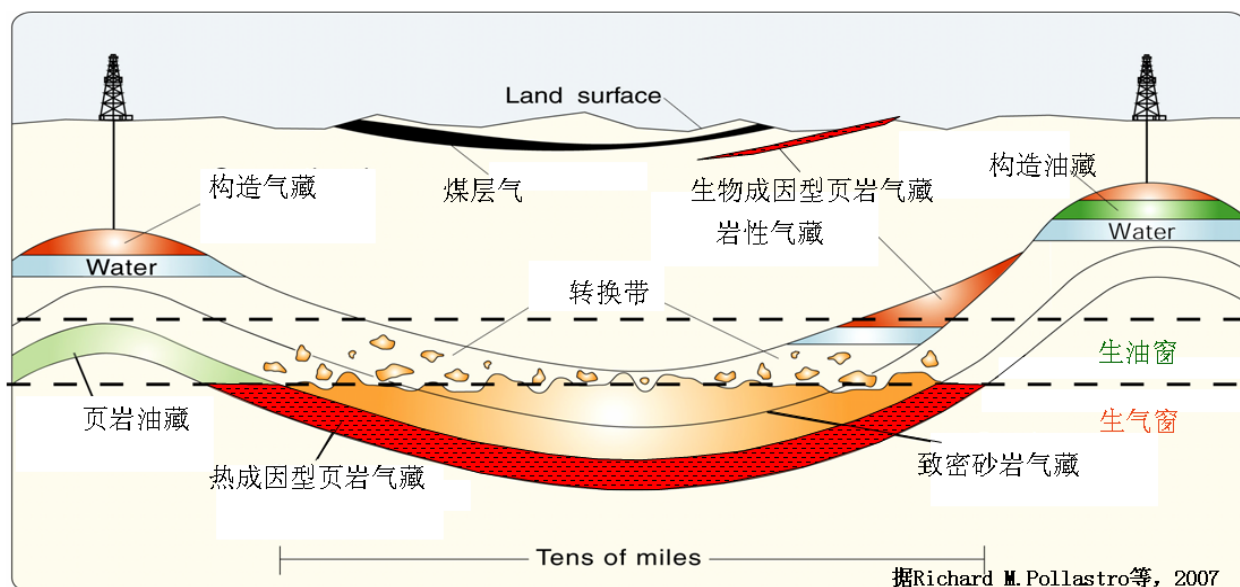


Figure 1. Continuity of reservoir accumulation pattern
图 1. 连续性油气藏成藏模式图

总有尽时，之后，地下是否还存在未被发掘的油气资源呢？按照石油地质理论的现代成因说，应该说，由地质演化产生的赋存于地下的油气资源，基本上是没有了！但是我们能否采用人工的办法使尚未进入生油门限的有机质快速成油气呢？这正是本文要讨论的议题。

长期来，生油研究的主要对象是埋藏较深(进入生油门限)的成熟烃源岩。人类的油气勘探实践，亦都是在充分利用自然界赋存的油气资源基础上展开的。实际上，其上覆地层内，照样含有分布广、丰度高的有机质富集层段，只是由于埋藏浅、热演化程度低，基本上仍保持有机质的原始状态。它们虽未能演化成油气，成为油气资源，却是一个富含油气资源基础(生烃母质)的庞大领域。若能通过人工措施对地层加热，使这部分有机质快速生成油气，将具有难以估量的潜力。我们认为这是可能的。

2. 有理论依据

凡持晚期有机成油说的学者，以 B·蒂索^[13]为代表，都认同干酪根转化成石油是一个降解过程，即有机质转化成油气是有机质的热降解过程。该过程基本符合化学动力学的一级反应。其中涉及温度与时间两个因素，温度是第一要素，与温度相比，时间居于次要地位。温度与时间是可以互补的。若温度很高，即

使时间较短，也可收到同一效果。

据有关专家研究，有机质产生石油的温度，每增加 10℃，反应速度可增加 1~2 倍^[14]。若按 1 倍计，假定在 110℃ 的地层条件下 5000 万年所形成的石油量，在 120℃ 的地下温度作用下，仅需用 2500 万年。世界各地含油气盆地的实际资料，也都证实这种关系，源岩地层越新，受热时间越短，生油温度门限越高，反之亦然。例如，西加拿大盆地上泥盆统生油门限温度为 50℃，巴黎盆地下侏罗统为 60℃，我国东营盆地古近系为 93℃，美国洛杉矶盆地新近系为 115℃^[15]。

自然界的有机质成油气演化是极其缓慢的过程，人类不可能等待目前低于生油温度门限的富有机质地层，依靠地质演化达到成熟状态后，再来勘探这部分油气。人们必须采用速成的办法来解决这一问题。按照化学动力学原理，温度与时间的互补关系，假定我们用人工的办法，快速使地层大面积增温，同时添加一定的催化剂^[16,17]，层段内的有机质就可以快速转化为石油或天然气。若能达到所需要的温度，有机质就有可能在很短的时间内生成油气。应该说：人工加热地层，快速生成油气，在理论上是成立的。

3. 有现实中的例子

3.1. 岩浆活动对烃源岩成熟度的影响

在世界各地的沉积盆地中，岩浆岩的分布十分广

泛, 如在中国辽河盆地东部凹陷, 东营组包含 20 余套岩浆岩, 分布面积达 600 km², 最大厚度达 1072 m(沟 1 井), 单层最大厚度达 327 m(大 33 井), 如果溶解岩浆的平均温度为 1000℃, 当这些岩浆降到 100℃ 时, 可以释放出高达 7.68 × 10²⁰ 卡的热量^[18]。据估算, 10 m 厚的玄武岩, 冷却所需时间大约 7a^[19]。对岩浆侵入体散热过程的数值模拟表明, 岩浆侵入后在较短时间(50a)内温度达到最大值(可达 700℃), 随后, 急剧降低, 在岩浆发生侵位后 10,000a 年时, 围岩温度与正常沉积所产生的温度相差不大^[20]。

由于存在岩浆岩热效应, 提高了所在地区的地温梯度, 如在辽河盆地岩浆岩发育区的 2200~3200 m 埋深范围内的地温梯度为 4.25℃/100 m, 而辽河盆地的平均地温梯度为 3.5℃/100 m。岩浆作用为沉积盆地提供了新的热源, 对有机质的生烃进程和生烃量产生重要影响, 加速烃源岩的成熟和生烃作用。根据对辽河盆地 30 个 R_o 样品分析结果的统计, 得到深度和 R_o 的关系, 当 R_o = 0.5% 时, 深度为 2711.9 m, 说明当生

油层埋深达到 2700 m 时, 烃源岩开始生烃。据邱家骧研究^[21], 当温度高于 250℃ 时, 生烃时间明显提前。在岩浆岩热效应的作用下, 辽河盆地岩浆岩发育区 7 个样品的色谱分析显示, 其 OEP 指标出现异常, 在 1754 m 处 R_o 达到 0.5%, 与岩浆岩不发育地区相比, 生油门限深度提高 1000 m 左右(图 2、表 1)。对侵入岩发育区煤的地球化学特征研究表明, 在岩浆热力作用下, 有机的化学成分超前于结构成熟^[22]。岩浆岩对烃源岩的影响范围与岩浆岩的厚度有关, 一般认为可以达到岩浆岩厚度的 2~4 倍。对 118 m 厚的侵入体与围岩有机质成熟度(R_o)演化的数学模拟结果, 岩浆侵入体对围岩有机质的影响范围可达 300 m。侵入体的存在使得生烃进程加快, 短时间内快速生烃, 距离烃源岩越远对生烃的进程影响越小, 侵入体厚度越大对生烃进程影响也越显著。

3.2. 生烃模拟实验研究

生烃母质及演化过程中所受的温度、压力和受热

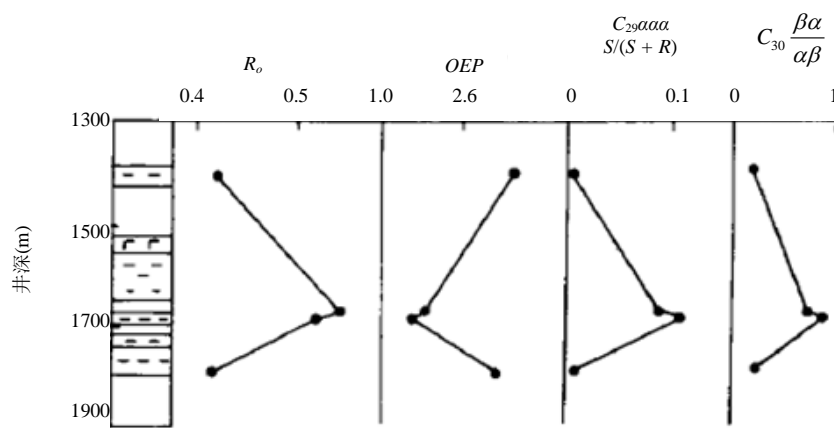


Figure 2. Organic geochemical map
图 2. 有机地化示意图

Table 1. Organic geochemical maturity parameter
表 1. 有机地化成熟度参数表

井号	深度(m)	R _o (%)	OEP	T _{max} (°C)	饱+芳	备注
大 11-15	1754	0.50	0.91	446	57.04	
大 33	2242	0.51	1.16	450	54.54	上覆火山岩
大 33	2397		1.23	579	68.49	
荣 16	1676	0.54		436	44.00	
桃 17	2487	0.58				
大 17	2397	0.49	2.19	4.36	45.39	
大 15	2463	0.49	1.65		40.72	远离火山岩

时间等是影响烃源岩生烃潜力的关键因素。沉积有机质在向石油演化的过程中,符合化学动力学原理,虽然漫长的自然演化过程无法重复,但根据干酪根热降解成烃原理和有机质热演化的时间-温度补偿原理,可以在实验室中模拟油气的生成。

通过热模拟实验研究认为,未进入高、过成熟阶段的烃源岩因构造运动等因素使其上升或被剥蚀,地温下降,生烃过程停止。当再次下降达到一定温度时,未耗尽的有机质可再次生烃^[23],即二次生烃。

世界范围内克拉通盆地普遍存在二次生烃现象,对海相烃源岩二次生烃热模拟实验研究也表明,中国的多旋回叠合盆地中,烃源岩时代古老,受构造沉积及热演化史的控制,具有间歇性、多期次、多阶段的动态生烃过程,二次生烃作用普遍发生^[24]。

对济阳坳陷和昌潍坳陷深层烃源岩的热模拟实验研究认为,烃源岩在进入成熟演化阶段后仍具有生油气的潜力,烃源岩的原始有机碳含量对油气的生成量有影响^[25]。经历过一定温度生烃过程的烃源岩样品二次生烃时,在较低温度下(不高于一次生烃经历的温度)就有烃类生成。经历过一次生烃的烃源岩再次生烃时起步更快。

烃源岩进行生烃模拟试验发现,模拟过程中气态烃产率、液态烃产率随温度升高而增大(图3),当温度超过400℃后,液态烃产率有降低的趋势,气态烃产率仍然大幅增加^[26]。生烃高峰的出现与起始成熟度密切相关,起始成熟度低则二次生烃的生烃高峰出现位

置靠前,生烃量大。在成熟度 $R_o < 2\%$ 的范围内,无论二次生烃样品的起始成熟度如何,也不管其早期演化是否达到生烃高峰,二次生烃均存在一个生烃的高峰阶段。

二次生烃量与初始成熟度和二次生烃演化程度(终止成熟度)密切相关。烃源岩随着演化程度的增加,累计生烃量逐渐增大,生烃潜力不断降低,直至耗尽。

热模拟显示二次生烃反应活化能的演化经历了4个阶段^[27]:

- 1) 残留烃释放阶段
- 2) 热降解-中间产物积聚阶段
- 3) 解聚-裂解阶段
- 4) 热裂解阶段

镜质体反射率(R_o)的测试结果,在350℃~400℃, R_o 从0.7%左右增加到1.3%左右,表明深层烃源岩样品在350℃~400℃温度段从低成熟阶段进入高成熟阶段,有机质开始以热解生烃为主,开始大量生气:当温度达到450℃时,所测样品的 R_o 最高已经达到1.94%,说明有机质演化达到了过成熟阶段,此时气态烃的产率为20 mL/mg左右。

4. 有技术发展的支持

在油气开采尤其是稠油油藏的开采实践中,我们已经采用了许多技术对地下的石油加热,如电加热杆采油,蒸汽吞吐^[28]、蒸汽驱^[29],以及火烧油层^[30]等等。它们在加热石油的同时,也加热了地层,例如,蒸汽

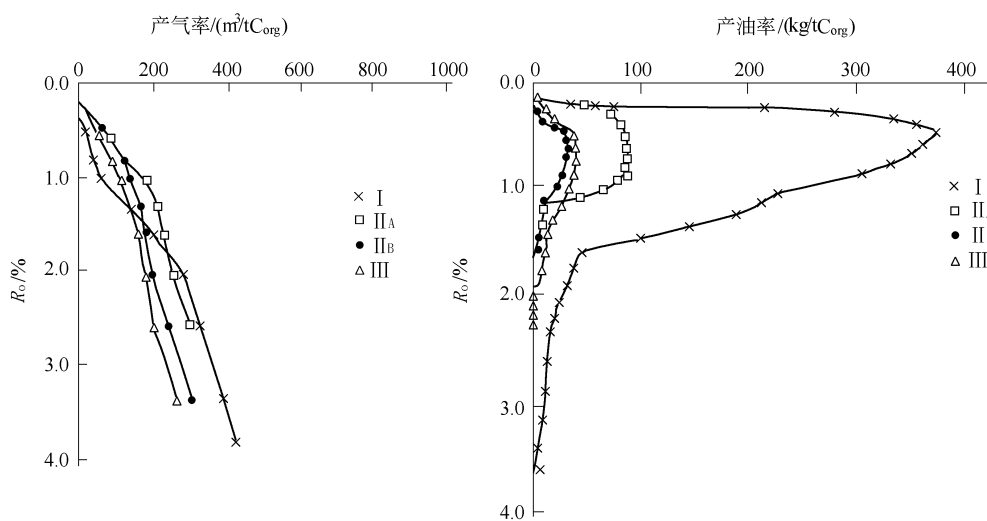


Figure 3. Hydrocarbon generation curves of hydrocarbon source rock thermal simulation
图3. 烃源岩热模拟生烃曲线图

吞吐的蒸汽温度可以达到 300℃^[31]，水平方向上的影响范围可达 38 m；蒸汽驱的温度也可以达到 200℃^[32]，水平方向上可影响到几千米；火烧油层时，井底地层温度可达 500℃以上^[33,34]，水平方向上也可以影响几千米以上。

在油页岩的开采中，干酪根必须转化为可流动的石油和天然气，因此需要在相当大的区域内供给足够的热量，以使高温分解在合理的时间内发生，从而完成该转化过程。按照油页岩层受热方式的不同，可分为传导加热、对流加热、辐射加热 3 类技术^[35]。

传导加热技术：目前主要利用传导加热方式加热页岩层的技术主要有壳牌石油公司的地下转化工艺技术(ICP)、美孚石油公司的 Elect rofrac TM 技术和 IEP 公司的 GFC 技术等。

对流加热技术：目前主要利用对流加热方式加热页岩层的技术主要有中国太原理工大学的对流加热技术、雪弗龙的 Crush 技术和 EGL 技术等。

辐射加热技术：LLNL 公司利用无线射频的方式加热页岩。Raytheon 公司的 RF/CF 技术则是先将射频发射装置置于地下油页岩层中，进行加热，然后把向页岩层中通入超临界 CO₂ 把热解生成的烃气载到采油井，被抽到地面上冷凝，回收。

为了实现人工快速生成石油的目标，就需要对大面积、厚层未熟烃源岩加热。虽然当前的技术条件尚不成熟，但上述技术已给了我们重要启示，即人工的办法是可以加热地层的，这使石油成为可再生资源变为现实。今后，随着科学技术的飞速发展，集全人类的智慧^[36]，通过几十年乃至几百年的努力，总会找到相应的新技术、新方法，有效地解决这个技术难题。

这就是我们的思考。

参考文献 (References)

- [1] 汤天浩 (2007) 新能源与可再生能源的关键技术与发展趋势. *电源技术应用*, **2**, 60-64.
- [2] 邱欣卫, 刘池洋 (2007) 世界主要能源矿产生产、需求和供求关系展望. *中国地质*, **3**, 536-542.
- [3] 杨磊, 刘池洋 (2003) 世界油气储量和产量的历史、现状与未来. *新疆石油地质*, **3**, 261-263.
- [4] Pratt, W.E. (1952) Toward a philosophy of oil-finding. *AAPG Bulletin*, **36**, 2231-2236.
- [5] Wolela, A. (2010) Sedimentation, organic maturity, and petroleum potential of the Oligocene-Miocene oil shale deposits, Yayu Basin, southwestern Ehtiopia. *AAPG Bulletin*, **94**, 643-663.
- [6] Petersen, H.I., Mathiesen, A., Fyhn, M.B.W., Dau, N.T., Bojesen-Koefoed, J.A., Nielsen, L.H. and Nytoft, H.P. (2011) Modeling of petroleum generation in the Bietnamese part of the Malay Basin using measured kinetics. *AAPG Bulletin*, **95**, 509-536.
- [7] Hill, R.J., Zhang, E., Katz, B.J. and Tang, Y.C. (2007) Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, **91**, 501-521.
- [8] Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E. and Pollastro, R.M. (2007) Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, **91**, 475-499.
- [9] 陈瑞银, 赵方智, 张水昌, 王红军 (2009) 塔里木盆地地下古生界油气晚期成烃成藏的地质依据. *地学前缘*, **4**, 173-181.
- [10] 赵文智, 王兆云, 王红军, 李永新, 胡国艺, 赵长毅 (2011) 再论有机质“接力成气”的内涵与意义. *石油勘探与开发*, **2**, 129-135.
- [11] 周庆凡, 白振瑞, 杨国丰 (2011) 美国页岩气发展现状及对我国的启示. *中国石化*, **9**, 15-18.
- [12] Schepers, K.C., Gonzalez, R.J., Koperna, G.J. and Oudinot, A.Y. (2009) Reservoir modeling in support of shale gas exploration. *The 2009 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Cartagena, 31 May-3 June 2009, Paper SPE 123057.
- [13] Tissot, B.P. and Welte, D.H. (1978) Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration. Springer-Verlag, New York, 185-188.
- [14] 赵文智, 王红军, 王兆云, 汪泽成 (2006) 中国天然气高效成藏的内涵及意义. *天然气工业*, **12**, 6-14.
- [15] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 张枝焕, 蒋有录 (2005) 石油地质学. 石油工业出版社, 北京, 55-59.
- [16] 妥进才, 王随继 (1995) 油气形成过程中的催化反应. *天然气地球科学*, **6**, 37-40.
- [17] 李术元, 刘洛夫 (1996) 烃源岩催化生烃机制的研究进展. *天然气地球科学*, **5**, 1-6.
- [18] Chen, Z.Y., Yan, H., Li, J.S., Zhang, G. and Liu, B.Z. (1999) Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin People's Republic of China. *AAPG Bulletin*, **83**, 1004-1014.
- [19] 刘春晓, 张晓花, 刘建军 (2004) 塔中地区火山岩与油气藏关系研究. *断块油气田*, **5**, 18-20.
- [20] 王民, 卢双舫, 薛海涛, 武静, 刘大为 (2010) 岩浆侵入体对有机质生烃(成熟)作用的影响及数值模拟. *岩石学报*, **1**, 177-184.
- [21] 邱家骧 (1985) 岩浆岩石学. 地质出版社, 北京.
- [22] 许云秋, 刘金钟, 徐耀山 (1989) 岩浆热作用下有机质化学成分超前成熟. *中国矿业大学学报*, **2**, 42-52.
- [23] 刘洛夫, 王伟华, 李术元 (1995) 干酪根二次生烃热模拟实验研究. *沉积学报*, **13**, 147-150.
- [24] 李慧莉, 金之钧, 何治亮, 秦建中, 邵志兵 (2007) 海相烃源岩二次生烃热模拟实验研究. *科学通报*, **11**, 1322-1328.
- [25] 袁东山, 张枝焕, 曾艳涛, 张学军, 董波 (2006) 深层烃源岩热模拟过程中气态烃产物变化特征. *天然气地球科学*, **6**, 833-836.
- [26] 董波 (2005) 济阳拗陷沙四段烃源岩模拟试验产物特征研究. *断块油气田*, **3**, 19-21.
- [27] 张有生, 秦勇, 刘焕杰, 朱炎铭, 姜波, 范炳恒 (2002) 沉积有机质二次生烃热模拟实验研究. *地球化学*, **3**, 273-282.
- [28] Wang, J. and Gates, I.D. (2011) Cold Production followed by cyclic steam stimulation in thin oil sands reservoirs. World Heavy Oil Congress Edmonton, Alberta.
- [29] Li, P., Chalaturnyk, R.J., Yue, Q. and Zhao, H. (2005) A Simplified methodology on selection, operation, and optimum design of steam drive reservoirs. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **44**, 33-41.
- [30] Perozo, H.A., Mendoza, A.J., Teixeira, J., Alvarez, A. and Vasquez, P. (2011) The *in situ* combustion pilot project in Bare field,

- Orinoco oil belt, Venezuela. World Heavy Oil Congress Edmon-
ton, Alberta.
- [31] 王春旭, 韩封 (2010) 水平井蒸汽吞吐技术在东胜稠油油藏中的应用. *内蒙古石油化工*, **12**, 92-94.
- [32] 范耀, 刘易非, 茹婷, 李彬刚, 黄海 (2010) 稠油高温气体辅助蒸汽驱可行性研究. *新疆石油地质*, **5**, 530-532.
- [33] 陈涛平, 张志琦 (2010) 稀油聚驱后蒸汽驱温度与压力对采收率的影响. *科学技术与工程*, **28**, 6869-6873.
- [34] 柴利文, 金兆勋 (2010) 中深层稠油油藏火烧油层试验研究. *特种油气藏*, **6**, 67-69.
- [35] 李丹梅, 汤达祯, 杨玉凤 (2006) 油页岩资源的研究、开发与利用进展. *石油勘探与开发*, **6**, 657-661.
- [36] 邸领军 (2001) 克服油气勘探中的惯性思维. *石油与天然气地质*, **3**, 284-286.