

文章编号: 1001-6112(2009)01-0063-05

大型挤压构造事件对油气成藏的影响

苗洪波^{1,2}, 陈红汉¹, 王立武³, 江涛³, 邱玉超², 崔炳辉², 刘清伟²

(1. 中国地质大学 资源学院石油系, 武汉 430074; 2. 吉林油田公司
勘探开发研究院, 吉林 松原 138001; 3. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

摘要:传统石油成因理论认为有机质成熟度主要受温度、时间与压力等因素的控制。依据松辽盆地勘探实践经验认为热演化程度受温度控制明显, 只要温度高, 烃源岩可在短时间内大量生烃。构造运动不仅可以产生大量的热, 使烃源岩生烃、排烃过程具有突发性, 而且挤压作用可以促进烃源岩的排烃作用、运移作用。另外, 构造运动又可以形成一系列的圈闭, 从而使油气从生成到聚集的过程可以在短时间内完成。因此, 在挤压构造发育的区域, 即使烃源岩埋藏较浅, 也具有一定的排烃能力, 形成工业性油气聚集。基于这一认识, 应该改变烃源岩埋藏浅就不能排烃的这一常规理念, 把盆地边部构造变形较强的区域也纳入勘探视野。

关键词: 烃源岩; 生烃; 排烃; 油气运移; 构造运动; 松辽盆地; 伊通盆地; 辽河盆地

中图分类号: TE122.31

文献标识码: A

INFLUENCE OF LARGE-SCALE TECTONIC COMPRESSION EVENTS ON THE HYDROCARBON ACCUMULATION

Miao Hongbo^{1,2}, Chen Honghan¹, Wang Liwu³, Jiang Tao³, Qiu Yuchao², Cui Binghui², Liu Qingwei²

(1. *China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China*; 2. *Exploration and Production Research Institute of Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138000, China*; 3. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: According to traditional hydrocarbon genesis theory, it is accepted that organic maturity is affected by temperature, time and pressure. After summarizing exploration practices, it reveals that thermal maturity of organic matter is mainly controlled by temperature. So long as the temperature is high enough, substantial hydrocarbon can be generated from source rock. Tectonic movements do not only produce great amount of heat, but also make hydrocarbon generation and expulsion abruptly. Compressive process promote the hydrocarbon generation and migration. In addition, tectonic movements can form a set of traps, which shorten the time from generation to accumulation. Therefore, in areas where tectonic compression are well developed, though shallow buried source rock, they also have the capacity for hydrocarbon expulsion, and can form economic oil reservoirs. Based on these findings, the traditional theory that shallow source rock can not expulse oil should be broke, and regions of marginal basin with intense structural deformation should be taken into the exploratory frontier.

Key words: source rock; hydrocarbon generation; hydrocarbon expulsion; hydrocarbon migration; tectonic movement; the Songliao Basin; the Yitong Basin; the Liaohe Basin

传统石油成因理论认为, 有机质成熟度的变化除了与受热作用的程度(温度)有关外, 还与受热作用的时间长短有关, 可近似用化学动力学中的单分子一级反应表述。确切地说, 成熟度与温度呈指数关系, 与时间呈正线性关系。基于上述思路, 目前学者们提出多种利用有机质镜质体反射率来反演成熟

度的方法^[1,2], 但目前最常用、精度较高的两种理论计算模型^[3]是时间温度指数(TTI)模型和基于阿累尼乌斯(Arrhenius)公式的化学动力学模型。

在松辽盆地勘探实践中, 发现了一些难以应用常规理念解释的问题, 如松辽盆地长春岭背斜带的二号构造带的烃源岩地质历史埋深不大, 烃源岩成

收稿日期: 2008-05-26; 修订日期: 2008-12-25。

作者简介: 苗洪波(1969—), 男, 高级工程师, 从事勘探部署及区带优选研究。E-mail: mchsb0@163.com。

基金项目: 国家重大专项(2008ZX05001)。

熟度较低,却具有排烃能力,并在该区发现了近亿吨的预测储量。经综合分析发现在一些盆地中烃源岩生烃过程具有突发性,而且生烃和排烃作用的高峰期往往伴随着较强的构造运动。通过系统的研究,认为盆地演化晚期的大型挤压构造事件不仅可以产生大量的热,使烃源岩生烃有突发性,而且挤压作用可以促进烃源岩的排烃作用、运移作用。同时,构造运动又可以形成一系列的圈闭,从而使油气从生成、排烃、运移、聚集等过程在短时间内完成。

1 烃源岩演化主要受地层温度影响

本研究认为烃源岩的演化与温度相关性较大,地质时间和地层压力是辅助条件。沉积盆地作为一个巨大的天然反应器,生态连续,生烃区域也是连续的,也就是大自然的连续性属性,实际的生油门限温度、反应转化的时间,可以远小于 TTI 方法的界线值。闰宝珍等^[4]通过应用 EASY%R_o 与 TTI 数值模拟方法对有机质成熟度进行了反演、对比分析。研究表明:EASY%R_o 方法反演的成熟度较合理与准确,而且 EASY%R_o 方法对于温度的敏感性较大,而时间的影响因素较弱。

孙省利等^[5]对“热水流体作用与油气的形成”进行了精细研究,研究认为与传统石油成因理论相比,热液石油和天然气的形成时间短,甚至可以用天或年来表示。

雷天柱等^[6]采用生烃动力学方法对鄂尔多斯烃源岩进行模拟实验,证明烃源岩在快速升温条件下的生烃量较慢速升温条件下的生烃量大。实验认为慢速升温不利于液态烃的生成,因为有机质可以有足够长时间缩聚成超大基团;而快速升温才更有利于生成液态烃,因为快速升温易造成中等分子链的断裂,从而导致快速升温时抽提物产率高于慢速升温。

笔者对松辽盆地的生烃过程进行多年的研究,认为松辽盆地的生烃事件具有突发性,松辽盆地存在 3 次热流高峰,而且它们与相应的构造事件有关。前两次热事件发生在盆地演化的早期阶段,第 3 次热流高峰是第三纪初期,此时盆地萎缩,应力由张性变为挤压,形成一系列的逆冲断层构造带,此构造事件是地层变形最大的一次构造事件。根据新三维地震资料进行古地貌分析认为:大安逆冲构造带在此次构造事件之前是沉积凹陷中心,此次构造事件使该区成为富集油气的大型逆冲构造带。研究认为此次构造事件不仅形成一系列的构造带,

而且挤压变形作用增加了烃源岩的成熟度,也提供了排烃动力。根据流体包裹体研究成果以及盆地模拟结果,证实了松辽盆地主要成藏期是第三纪初期^[7],此时是青山口组(烃源岩层)古地温最高的时刻。

2 构造运动是烃源岩生排运的动力

Turcotte 等^[8]的研究指出,在已存断层面上发生位移是上部脆性地壳发生变形的机制。用滑块模型对断层面相互作用中因增速摩擦而产生的粘滑行为,是典型的耗散结构,地质构造具有混沌行为。然而不管地壳的运动机理如何,有一点可以肯定,就是构造运动会把机械能转化为热能,热能又可以进一步转化为化学能,从而有助于油气的生成。

周建勋^[9]根据 3 种不同煤级样品的高温高压变形实验结果,对比分析其中温度、围压和受热时间相近、而应力与应变显著不同的样品的镜质体反射率变化情况,结果表明变形有利于有机质成熟度的提高。这与 Mastalerz 等^[10]的实验结果类似。孙楠等^[11]认为:构造应力对油气的生成、成藏和分布发挥着重要作用,一方面构造应力通过产生机械能及化学作用促进了干酪根热降解,促进了油气的生成;另一方面构造应力有利于油气的运移与聚集,对油气分布有很强的控制作用。

2.1 松辽盆地中烃源岩成熟度与地层变形相关

烃源岩的镜质体反射率是表征烃源岩成熟度的常用指标,随着烃源岩的埋深增加,其镜质体反射率逐渐变大。松辽盆地中主力生烃层——青一段的镜质体反射率值(R_o)与地层变形程度有关。如图 1 所示,在松辽盆地南部,青一段烃源岩的镜质体反射率在平面上变化规律为:地层变形幅度大的地区,烃源岩镜质体反射率较高;地层平缓的区域,烃源岩的镜质体反射率并不高。在挤压逆冲背斜构造带,镜质体反射率的值偏高,如红岗构造的各地层都较凹陷中地层薄,说明该构造带在各地质历史时期都处于盆地高部位,其烃源岩在各地质时期埋深远小于凹陷中烃源岩的埋藏深度,但其烃源岩的成熟度偏高,如红 150 井青一段镜质体反射率达 0.94%;而在平缓的向斜内,虽然埋深较大,但镜质体反射率并不高,如查 20 井,其镜质体反射率为 0.683%。扶新隆起带与红岗构造相似,各地层都较凹陷中地层薄,是典型的继承性隆起,其烃源岩历史埋深远小于凹陷烃源岩,其成熟度偏低;但也存在地层变形程度与成熟度呈正比的特征,在

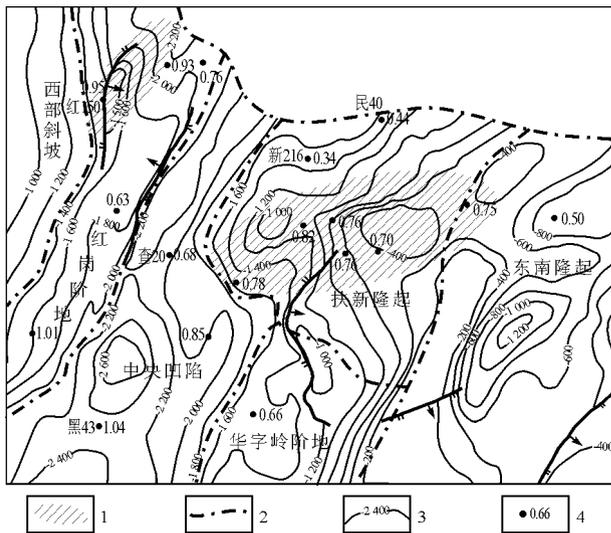


图1 松辽盆地南部青一段底部
烃源岩镜质体反射率与构造叠合图

1. R_0 值异常区; 2. 构造分区线; 3. T_2 构造等值线/m; 4. 井位及 R_0 值, %

Fig. 1 Structure and R_0 overlaying map of source rock in bottom First Member of Qingshankou Formation of the southern Songliao Basin

其的北坡, 地层形态为板状斜坡, 变形程度小, 虽然埋深大于构造高部位, 但其烃源岩镜质体反射率低, 其青一段烃源岩镜质体反射率值小于 0.5%。在构造高部位(背斜核部), 地层虽然埋藏浅, 但盆地后期的挤压作用导致地层褶曲程度高, 其烃源岩的镜质体反射率明显增大, 其青一段烃源岩镜质体反射率值大于 0.7%, 最高可达 0.82%, 这充分说明了构造运动促进了烃源岩的生烃作用。

2.2 盆地晚期的构造挤压有利于生烃与成藏

2.2.1 松辽盆地晚期的构造反转有利于成藏

在松辽盆地中, 主要烃源岩层是青山口组地层, 发育深湖相泥岩, 有机质丰度高、类型好(以I型干酪根为主), 已经成熟, 排烃量较大, 目前吉林油田所发现油气储量的 96.5% 是来自青山口组烃源岩。

青山口组烃源岩的现今成熟度都不是很高, R_0 值在 0.6%~0.9% 之间。在流体超压值较大的地区, 镜质体反射率值随深度变化也不明显。图2是凹陷中部的大20井镜质体反射率随深度变化图, 不但 R_0 值偏低, 且随深度变化不明显。欠压实作用产生的超压抑制了有机质的成熟作用, 从而扩大了液态窗的深度区间^[12]。由于烃源岩的成熟度不高, 从而使松辽盆地中浅层以原油为主, 天然气仅发现少量低熟气。

根据烃源岩的地化指标分析, 目前凹陷中青山口组烃源岩已经成熟, 但其成熟度不高, 而且由于质量好的烃源岩吸附作用强, 残留烃类多, 排烃效

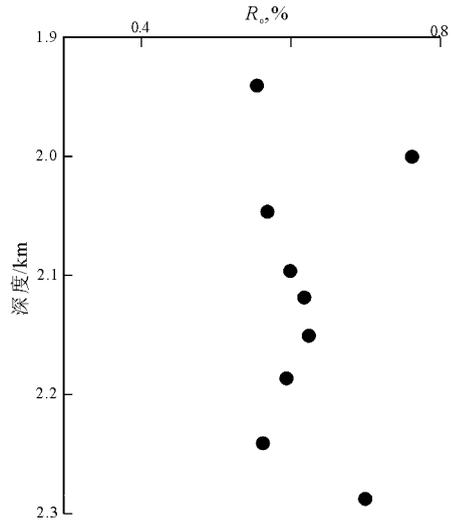


图2 松辽盆地南部大安构造带
大20井镜质体反射率随深度变化

Fig. 2 R_0 and depth map of Well Da20 in Daan structure of the southern Songliao Basin

率应该较低^[13], 所以松辽盆地的青山口组烃源岩不应该有大的生、排烃量。但从松辽盆地的上百亿吨的石油资源来分析, 青山口组烃源岩曾经大量排烃。综合研究认为松辽盆地在明水组沉积以前盆地应力主要以张性为主, 除了嫩江组沉积后期有微弱的反转; 在第三纪初期, 盆地开始萎缩, 发生了大规模的反转逆冲事件, 应力主要以挤压性为主^[14], 伴生大量褶皱、断裂, 正是这次大规模的构造挤压事件导致油气大规模的生成、运移和聚集。根据流体包裹体研究成果以及盆地模拟结果, 证实了松辽盆地主要成藏期是第三纪初期^[7], 这进一步证明了盆地的挤压事件对油气成藏的贡献之大。

2.2.2 伊通盆地后期构造挤压有利于油气成藏

刘传虎^[15]认为, 压扭作用可以促进有机质成熟生烃作用, 有利于油气运移, 使油气得到富集。

当构造外力作用于多孔介质时, 构造压力差、主应力差或势差, 驱动油气从高势区向低势区运移^[16]; 在构造应力以挤压性为主的盆地中, 低势区主要是主干断裂区, 包括其分支及软弱带^[17]。

吉林探区的伊通盆地是一个狭长双断式的走滑伸展盆地^[18,19], 由于应力场的转变, 使得地堑内拉张现象和挤压现象同时出现, 紧密相连; 盆地演化后期, 盆地逐渐处于挤压状态, 而且挤压作用随着时间的迁移不断加强, 有利于油气保存, 同时, 挤压作用促进了伊通盆地油气生成与运移聚集过程。

根据伊通盆地岔路河断陷永吉组的油气包裹体测试结果, 结合埋藏史、热史的研究成果, 综合分析认为永吉组的油气有两次充注(图3)。研究认

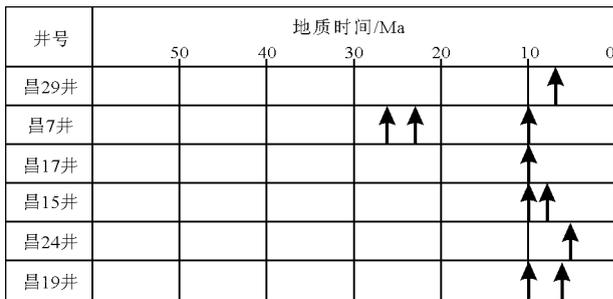


图 3 伊通盆地岔路河断陷永吉组油气充注期次
Fig. 3 Hydrocarbon expelling periods in the Chaluhe Fault Depression of the Yitong Graben

为这两次油气充注与构造事件密切相关,第一次充注时间正是盆地开始挤压之时,岔路河断陷的二号断层下降盘由沉积凹陷被挤压隆升为梁家褶皱断鼻带,并形成对应的不整合面。第二次充注的时间为 7~10 Ma,是盆地挤压作用最强烈的时期,并伴有火山喷发事件,在伊通盆地有 7 座火山锥,而且火山岩的同位素年龄是 4~11.5 Ma,该时间与包裹体分析的充注时间相符。分析认为在盆地演化后期,发生大的构造事件,应力以挤压为主,不仅促进了生、排烃作用,而且形成一系列的断鼻和背斜,使油气重新调整聚集。

2.2.3 挤压作用强烈的生烃洼陷成藏的规模大

辽河盆地大民屯凹陷的主力生烃层是砂四段,烃源岩质量好,主要分布于 3 个主力生烃洼陷,分别为安福屯洼陷、荣胜堡洼陷和三台子洼陷(图 4)。烃源岩厚度和洼陷规模最大的是荣胜堡洼陷,烃源岩厚度最厚可达 800 m;安福屯洼陷面积相当于荣胜堡洼陷的 1/3,烃源岩厚度也明显减小,但安福屯洼陷以及其周围发现的储量规模较大。勘探成果证实规模较小的安福屯洼陷生排烃能力较高,与辽河盆地自中新世末以来处于挤压反转阶段^[20]密切相关;安福屯洼陷处于挤压应力较强的区域,盆地后期的挤压作用不仅增加了安福屯洼陷的地层温度,有利于生烃作用,而且有助于排烃作用。史建南等^[21]利用裂变径迹分析方法进行大民屯凹陷的古地温研究,结果认为安福屯洼陷古地温梯度明显高于荣胜堡洼陷的古地温梯度。从而导致安福屯洼陷规模虽小,但其排烃量不亚于荣胜堡洼陷的排烃量。可用黄豆虽然含油,但只有在受到挤压时方可出油的原理形容这一过程。

3 应重视构造变形强烈区域的勘探

研究认为烃源岩中虽然已经生成油气,但在烃源岩成熟度偏低时难以排出,而在受到挤压时,油

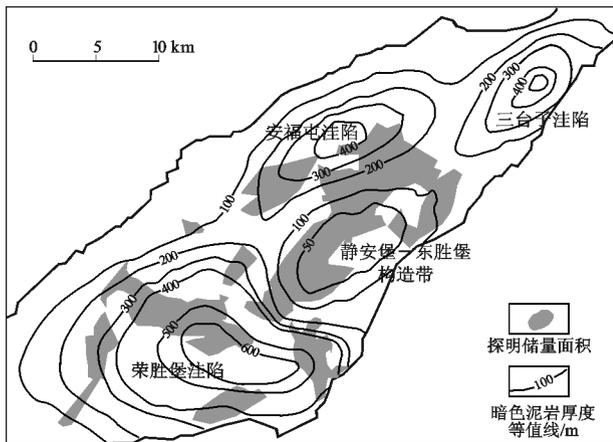


图 4 辽河盆地大民屯凹陷沙四段暗色泥岩与储量叠合图

Fig. 4 The overlaying map between reserves and dark mudstone in the Fourth Member of Shahejie Formation, the Damingtun Sag of the Liaohe Basin

气容易排出,就像湿毛巾挤压出水的道理一样。在烃源岩埋藏较浅的地区,往往被误认为烃源岩成熟度较低,油气源缺乏,而失去勘探的信心。研究认为只要烃源岩层受到挤压,地层变形较大,其烃源岩就具有排烃能力,可能形成工业性油气聚集。

松辽盆地长春岭背斜带的二号构造带虽然曾经遭受剥蚀,但烃源岩的历史埋深也不大,烃源岩成熟度较低,其镜质体反射率值平均为 0.6%;按照常规理论,该区烃源岩的生烃、排烃能力有限,但目前该区已经发现预测储量近亿吨。从地化指标的特性上分析,本区原油可分为两类:一类是原油成熟度偏高,其地化特征与三肇凹陷的原油相似;另一类成熟度偏低,与原地烃源岩相关性很好,说明该区烃源岩虽然埋藏较浅,但具备排烃能力。

分析认为该区在嫩江组沉积以后挤压作用强烈^[22],地层变形幅度大,不仅产生热,促进了烃源岩的生烃作用,而且烃源岩受到挤压,更加有利于排烃。松辽盆地长春岭背斜带二号构造带勘探的突破,预示着在松辽盆地中央凹陷区周边的高丰度烃源岩区域,虽然烃源岩埋藏较浅,但仍可能有很大的勘探潜力。

4 结论

1) 烃源岩的热演化程度受温度控制明显,地质时间和地层压力对烃源岩的热演化程度也有影响,但并不是主要影响因素,只要地层温度高,烃源岩就可以在短时间内成熟。

2) 在地温梯度不高、烃源岩成熟度不高的盆地中,盆地演化后期的挤压或压扭构造事件对油气的

生成、运移、聚集起到重要作用。构造运动不仅可以产生大量的热,使烃源岩生烃具有突发性,而且挤压作用可以促进烃源岩的排烃作用、运移作用,同时,构造运动又可以形成一系列的圈闭,从而使油气从生成、运移、聚集等过程在短时间内完成。因此,在挤压构造发育的区域,烃源岩埋藏较浅,也具有排烃能力,可以形成工业性油气聚集。所以应该打破烃源岩埋藏浅就不能生烃的常规理念,把烃源岩埋藏不深,但丰度高、构造变形较强的区域作为勘探对象。

参考文献:

1 Waples D W. Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(6): 916~926

2 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559~1570

3 Douglas W W, Hiromi Kamata, Masahiro Suizu. The art of maturity modeling [J] AAPG Bulletin, 1992, 76(1): 31~66

4 闰宝珍,朱炎铭,刘仙平. EASY%R_o与 TTI-R_o数值模拟方法比较:以黄骅坳陷乌深 1 井山西组为例[J]. 中国煤田地质, 2005,17(2): 4~7

5 孙省利,陈践发,刘文汇等. 热水流体作用与油气的形成[J]. 天然气地球科学,2003,14(3): 215~218

6 雷天柱,夏燕青,张瑞等. 二次生烃过程中升温速率对生烃途径的影响:以鄂尔多斯烃源岩生烃动力学研究为例[J]. 矿物岩石,2006,26(2): 97~99

7 魏志平,毛超林,孙岩等. 松辽盆地南部大情字井地区油气成藏过程分析[J]. 石油勘探与开发,2002,29(3): 11~12

8 Turcotte D L. The Nature of the Solid Earth[J]. Earth - Sci-

ence Reviews, 1972, 8(4): 449~450

9 周建勋. 变形对有机质成熟度影响的实验初步研究[J]. 石油实验地质,1999,21(3): 276~279

10 Mastalerz M, Wilks K R, Bustin R M, et al. The effect of temperature, pressure and strain on carbonization in high-volatile bituminous and anthracitic coals [J]. International Journal of Coal Geology, 1993, 20: 315~325

11 孙 楠,谢鸿森,郭捷等. 构造应力与油气藏生成及分布[J]. 石油与天然气地质,2000,21(2): 99~103

12 查明,曲江秀,张卫海. 异常高压与油气成藏机理[J]. 石油勘探与开发,2002,29(1): 19~23

13 王东良,张君峰,刘宝泉等. 青藏高原海相烃源岩生排烃模式[J]. 石油勘探与开发,2001,28(4): 14~16

14 雷茂盛,蔡利学,王晓达等. 松辽盆地古拉断裂对油气运移的控制作用[J]. 勘探家,1999,4(3): 24~26

15 刘传虎. 压扭性盆地石油地质特征[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(6): 647~652

16 王小凤,武红岭,马寅生等. 柴达木盆地北缘地区构造应力场、流体势场对油气运聚的控制作用[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 419~423

17 武红岭,王小凤,马寅生等. 油田构造应力场驱动油气运移的理论和方法研究[J]. 石油学报,1999,20(5): 7~12

18 董清水,史宝彦,苗洪波等. 地堑式断陷盆地油气成藏规律分析:以伊通地堑岔路河断陷南部为例[J]. 石油实验地质, 2008,30(1):6~10

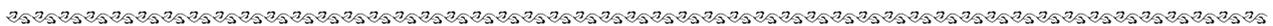
19 马 良,周江羽,王旭丽等. 伊通盆地岔路河断陷始新统地层对比[J]. 石油实验地质,2008,30(3):260~264

20 胡望水,卫拥军,张自其. 辽河盆地反转期构造特征[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),2002,17(5):5~8

21 史建南,姜建群. 应用磷灰石裂变径迹研究大民屯凹陷的古地温[J]. 大庆石油地质与开发,2003,22(6): 18~21

22 毕素萍,张庆龙,王良书等. 松辽盆地宾县凹陷平衡剖面恢复及构造演化分析[J]. 石油实验地质,2008,30(2): 203~206

(编辑 徐文明)



(上接第 62 页)

10 张 健,汪集旸. 南海北部大陆坡边缘深部地热特征[J]. 科学通报, 2000, 45: 1095~1100

11 Clennell M B, Hovland M, Booth J S, et al. Formation of natural gas hydrates in marine sediments 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties[J]. J Geophys Res, 1999, 104: 22985~23003

12 Booth J S, Winters W J, Dillon W P, et al. Major occurrences and reservoir concept of marine clathrate hydrates: Implications of field evidence[A]. In: Henriot J P, Mienert J, eds. Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. Geological society Special Pub No137[G]. London: The Geological Society, 1999

(编辑 徐文明)