

文章编号: 1001-8166(2006)01-0039-08

有机质热演化过程中地层压力的作用与影响*

王兆明, 罗晓容, 陈瑞银, 宋海明, 周波, 郑大海
(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要 压力对有机质演化的影响长期以来争论不断, 共有 3 种不同意见: 压力对有机质演化没有影响; 压力促进有机质的演化; 压力抑制有机质的演化。通过对前人所做实验的实验设备、实验样品及实验结果的分析对比发现: 不同实验结果主要是由于不同实验条件引起的, 特别是实验系统和加压方式的不同, 对实验结果影响最大, 所代表的地质意义也不同。综合分析结果表明, 当压力的增加表现为沉积有机质受到的有效应力增加时可以促进有机质生烃; 当压力的增加表现为孔隙流体压力增加时, 有机质生烃过程将受到抑制; 另外, 这两种情况都可能使干酪根的镜质组反射率降低, 易使人得出压力增加抑制有机质演化的结论。进一步对压力影响有机质演化的成因机制进行了分析, 发现在有机质演化的不同阶段因异常压力的增压机制不同, 压力在有机质演化过程中所表现出来的作用也有差异。

关键词 压力; 有效应力; 流体压力; 有机质演化; 烃类生成
中图分类号 TE12 **文献标识码** A

1 引言

温度和时间是影响有机质演化的主要因素已得到公认, 压力对有机质演化的抑制作用在油气勘探实践中也逐渐受到重视^[1-9], 但是压力对有机质演化的影响却看法不一。在沉积盆地中, 压力像温度一样自始至终都伴随着有机质的演化, 因此压力对有机质演化的影响应该是客观存在的, 只是人们对于其作用的方式、大小、条件等还不十分清楚。由于烃源岩在盆地内演化的过程不可能直接观察, 实验室内有机质热演化的模拟实验便成为研究压力影响有机质演化的重要手段^[10]。前人设计了不同的实验来研究压力对有机质演化的影响, 但是他们却得到了 3 种非常矛盾的结论: 压力不影响有机质的演化^[11-13]; 压力促进有机质演化^[14-20]; 压力抑制有机质演化^[21-28]。为什么对于同一个问题会得到 3 种迥然不同的结论呢?

本文作者在对前人工作进行广泛调研的基础上, 对前人的实验条件进行了分析, 并对压力影响有

机质演化研究中存在的一些问题进行了讨论。作者认为实验结论之所以迥然不同, 其主要原因在于不同学者的实验条件有所不同, 特别是加压方式不同, 其所代表的地质意义也有所差异, 这可能是不同学者针对同一问题得到不同结论的主要原因。

2 不同结论的实验

2.1 压力不影响有机质演化的实验

Monthioux 等^[11, 22]采用印度尼西亚 Mahakam 三角洲的煤为样品, 其干酪根类型为 III 型, Ro 1%, 在含水的条件下, 通过金管封闭样品来进行热解。实验压力范围 50~100 MPa, 加热时间 24 小时。实验结束后不同压力下有机质流体产物的质和量均无明显变化。固体残余物在干燥器中冷却几天后进行了碳、氢、氧元素分析及 Rock-eval 分析, 结果也均无明显变化。另外对实验的固体残余物进行索氏抽提, 分不同组分进行色谱分析, 并计算 CPI 指数。结果无论压力为 50 MPa 还是 100 MPa, 其色谱图和 CPI 值都很相似。由此他们得出结论: 压力对有机

* 收稿日期 2005-04-07; 修回日期 2005-07-18。

作者简介: 王兆明(1975-), 男, 山东胶南人, 在读博士研究生, 主要从事油气成藏动力学方面研究。E-mail: sunnyzm@yahoo.com.cn

质演化不产生明显效应。

Huang (1996) 采用褐煤, 加入海水在封闭体系下进行实验, 温度范围 250 ~450, 压力由 50 MPa 增加至 200 MPa, 镜质组反射率未见明显变化, 因此他认为压力对有机质的演化不起重要作用。

2.2 压力促进有机质演化的实验

Petzoukha 等^[19] 为了模拟构造活动强烈地区构造应力对有机质生烃的影响, 采用三轴应力设备对采自西西伯利亚卡拉黑 (Karachy) 湖的现代沉积物进行了纯压力实验。其样品含有质量百分含量为 77% 的粘土, 质量百分含量为 21% 的碳酸岩, 干酪根类型为 II 型, TOC 质量百分含量为 3.7%, HI 为 400。把经抽提的样品干燥固化, 放入圆柱形的容器内, 未加增压介质, 在室温、35 MPa 围压和 120 MPa 轴向压力条件下实验 3 小时, 结果表明: 热解峰 S_2 增加, 新形成的游离类脂量超过原样中丰度的 4 倍, 游离类脂中烃类的量超过原样中的 1.2 倍, 与未加压的样品相比, 新形成的可溶有机质具有很高的甾烷和藿烷分布, 这证明机械能在有机质向烃类转化过程中具有促进作用。同时对受压后的粘土矿物进行分析, 发现四面体内 Al^{IV} 代替 Si^{IV} 的类质同相变化, 增加了整个层的电荷, 证明机械能还增加了粘土矿物的催化活性。

解启来等^[20] 采集准噶尔盆地盆 4 井 4 003 m 处中侏罗统头屯河组 (J_2^t) 中的泥岩样品, 其 T_{max} 为 435, HI 为 584, Ro 为 0.58%, 干酪根类型为 I₂ 型的。将这些样品置入高温高压半封闭体系中, 选择压力为 73.6 MPa 和 196.1 MPa, 实验温度为 300 和 400。50 小时后收集排出体系之外的产物为排出烃, 实验后的岩样经氯仿沥青抽提所得的油状物为残留烃, 排出烃和残留烃之和为样品的产油量。其结果表明压力对产油率的影响很明显, 300 时, 随压力增加, 产油率由 $1.35 m^3 / t_{\text{岩石}}$ 增至 $1.45 m^3 / t_{\text{岩石}}$, 增加很少, 表明干酪根还未大量降解, 400 时随压力的增加, 产油率由 $2.98 m^3 / t_{\text{岩石}}$ 增至 $5.14 m^3 / t_{\text{岩石}}$, 增加明显, 表明此时干酪根已大量降解生油。这说明高压能促进干酪根的降解, 从而提高了液态烃的产率。

2.3 压力抑制有机质演化的实验

Price 等^[24] 设计了不同压力条件下封闭体系内的含水热解实验。其采用样品为 II 型含硫有机质, 实验时加入占样品量 11.3% 的蒸馏水, 并以氦气为介质, 热解时间为 30 天。结果表明, 在 287 时, 当流体压力从 3.1 MPa 增加到 96.5 MPa, 所产生的气

体、汽油烃及饱和烃的质量大大减少, 岩样抽提物中 C15- 和 C15+ 芳烃分别从 2.8、22.3 mg/g 下降至 1.25、5.49 mg/g; 沥青质从 52.8 mg/g 下降至 32.8 mg/g。经索氏抽提的残余岩石的热解烃 S_2 却大大增加。压力为 3.1 MPa 的条件下, 生成的产物中 C8+ 烃气相色谱图与成熟的石油相似; 而压力为 96.5 MPa 时, 生成产物则有许多不成熟的特征。在 350 实验体系进入烃热裂解阶段, 产物中的 C5+ 从 333 的 160 mg/g 减少到 350 的 31 mg/g, 但随压力由 11.9 MPa 增至 107.7 MPa, 产物中 C5+ 组分又增加至 83 mg/g, C1~C4 烃从占产物的 58% 减少至 16.9%, 而 C5+ 的百分比增加, 表明压力升高抑制了石油的裂解。

姜峰等^[26, 27] 用 YJ-3000 吨压力机对含有不成熟有机质的泥炭进行了实验。样品密封于金属铜管中, 并加入适量的水, 传压介质为 450 熔烧的叶蜡石, 温度分别为 200 和 400, 压力分别为 100、500、1 000、1 500、2 000 MPa。实验结果表明, 当压力增加时, 总体上 Ro、Pr/Ph、nC21- / nC22+ 减小, 而 OEP 值却增加, 认为压力抑制了有机质的热演化。但是值得注意的是, 在实验加压到 100 MPa 时这 4 个参数均与总趋势呈相反的变化, 表现出 Ro、Pr/Ph、nC21- / nC22+ 增加, 而 OEP 值呈减小的特征, 这反映出在压力小于 100 MPa 时压力促进了有机质的演化, 而不能仅仅从开始加压时压力对有机质颗粒的压实作用导致了样品的密度增加来解释。

3 实验条件及结果的分析

为什么不同学者进行的模拟实验得出 3 种不同的结论呢? 本文作者认为这主要跟他们各自不同的实验条件有关, 其中包括: 实验的样品、实验的系统、实验的加压方式等因素。

3.1 实验样品的类型

前人在实验中所选取的样品主要有木料、褐藻、分离的纯干酪根、煤、现代沉积物、露头或取芯的全岩样品。从物质组成上讲, 全岩更接近天然体系^[29, 30], 还可以同时考虑到其它地质因素的作用, 如沉积物中粘土矿物等催化剂在压力作用下对有机质演化的影响。因此用全岩或现代沉积物所进行的实验更具有代表性。

3.2 实验系统

前人的实验表明, 实验系统对实验结果的影响较大。进行高温高压有机质生烃演化的实验系统主

要可分为封闭系统、半封闭系统和开放系统。所谓开放系统是指所研究的部分与环境之间有物质与能量的交换。地质体就是典型的开放体系^[21, 22]。模拟实验中采用黄金管的实验属于封闭体系,用压力机进行的压实热解实验则是半开放系统。而在有水的条件下,实际盆地中烃源岩内的流体往往可在受限制条件下与周围地层进行流体和能量的交换;当异常压力积累到一定程度还会使烃源岩形成许多水力裂缝,造成烃类等流体以混相向外涌流,流体压力降低^[33],因此实际地质体可以是开放系统或是半开放系统。另外,根据实验过程中加水量可将前人的实验分为干燥体系、水不饱和体系、水饱和体系及水过饱和体系。考虑到烃源岩内有机质的演化是在地层水参与下进行的,因此模拟实验中采用半封闭或开放的含水体系更符合地质条件^[31]。

3.3 实验的加压方式

模拟实验的加压方式对实验结果起着决定性的作用,实验体系也是因为对样品施加了不同的压力而影响了实验结果。模拟实验的加压方式主要有2种,一种是通过介质(水或气体等)增压,模拟孔隙压力增加;另外一种是用压力机从垂向或侧向加压,这主要模拟了有效应力增加的情况。由于盆地内地层所承受的上覆负荷由孔隙流体及骨架颗粒共同承担^[34-36]:

$$S = P + \sigma$$

其中 S 为上覆负荷, P 为地层压力, σ 为有效应力。

因此,对于开放体系,由于流体可以自由排出,上覆负荷的增加由骨架颗粒承担,将导致有效应力增加;而对于封闭体系,由于流体不能及时排出,上覆负荷则多由孔隙流体承担,导致流体压力的增加。

Petzoukha^[19]、Lafargue^[37]采用轴向增压装置,解启来等^[11]、周中毅等^[38]采用半封闭系统,均模拟了有效应力增加情况下对有机质生烃的影响,他们的实验结果表明,如果压力的增加使样品受到的有效应力增加时,那么压力会促进有机质的生烃,提高有机质的生烃率。如 Petzoukha^[19]的实验中当在 35 MPa 围压和 120 MPa 轴向压力条件下实验 3 小时后,新形成的游离类脂量超过原样中丰度的 4 倍,游离类脂中烃类的量超过原样中的 12 倍;Lafargue^[37]在温度 130 °C 条件下实验 72 小时,在施加轴向压力为 50 MPa 时排出烃量为 1.7 mg/g,当施加轴向压力增加到 200 MPa 时排出烃量增加到 3.0 mg/g,解启来和周中毅的实验也表明压力增加时,样品

的产烃率明显增加。

Price^[24]的实验是在封闭体系含水条件下,通过氦气作为介质增压,姜峰的实验也是在封闭含水体系下,用叶蜡石为传压介质,因此他们的实验模拟了孔隙流体压力增加的情况下,也就是在有效应力降低条件下压力对有机质演化的效应。Price 的实验结果表明孔隙流体压力的增加降低了有机质的生烃率,而姜峰的实验则表明孔隙流体压力降低了镜质组反射率等。Dalla Torre 等^[39]在斯坦福大学采用封闭体系,将样品在氦气环境中封入铂金仓中,然后在外加压,并分别考虑了加水和不加水的条件,模拟了流体压力增加的情况。其压力范围介于 50 ~ 200 MPa,温度 200 ~ 350 °C,反应时间分别为 2 天、4 天、7 天,结果表明压力的增加降低了样品的镜质组反射率,而且在含水条件下压力的抑制作用更强烈。据此提出了在压力—温度—时间条件下的镜质组反射率变化的动力学模型:

$$R_o(\%) = k_2 P^{-m} t \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

其中 $k_2 = 195.195 \times 10^5 \text{ Pa/s}$, P 为压力, t 为时间, $m = 0.131$, $n = 0.0714$, $E = 24.99 \text{ kJ/mol}$ 。

通过对不同学者实验的分析认为,压力对有机质演化的影响不容忽视。实验的样品类型对实验结果有一定的影响,但不是决定性的因素,影响有机质演化的最主要的原因是实验的加压方式,不同的实验系统其实也体现了加压方式的不同。直接作用于沉积有机质上压力的增加也就是沉积地层有效应力的增加,会促进有机质向烃类的转化,提高有机质的生烃率,而地层中流体压力的增加会抑制有机质向烃类的转化。但这两种情况均可能降低有机质的镜质组反射率,使其表现出压力对有机质演化的抑制作用。

4 讨论

4.1 压力对有机质演化影响的成因分析

有效应力增加可促进有机质演化,其主要原因是直接作用于岩石颗粒上的有效应力的增加可对固态有机质产生一定的破碎作用,使得参加反应的有机质的表面积增加,从而促进有机质生烃。另外根据 Petzoukha^[19]的实验,有效应力的增加还可以增加粘土矿物的催化活性从而促进有机质生烃。流体压力增加抑制有机质演化主要是由于地层中流体压力的增加限制了生成烃类的排出,导致烃源岩内的烃类的浓度增加。根据吕·查德里(Le Chatelier)定律增

加反应物的浓度可以降低反应的速度。这可能是一种超压抑制液态烃类向气态烃类转化的一个重要因素。另外异常高流体压力可以增大烃类裂解的活化能^[40]。Domine 等^[41]根据己烷热解实验从物理化学原理上对高压抑制效应作了分析, 200 以上, 己烷热解的活化能在相同温度下随压力加大而增加, 其裂解速率也因此减慢。因为:

$$\left(\frac{\ln k}{P} \right) = \frac{-V}{RT} E_p = E_0 + V^{\#}(P - P_0) \quad (3)$$

$V^{\#}$ 为活化能体积, 己烷热解为体积增大反应, 所以 $V^{\#}$ 为正值, 有机质演化中的烃类裂解与此类似, 是一个体积急剧增加的过程。因而容易形成异常高的压力, 使烃类裂解的活化能增高, 从而使裂解速率降低, 表现出高压对有机质演化的抑制作用。

4.2 沉积盆地中异常压力的成因机制及其对有机质演化的影响

在沉积盆地中, 地层中异常高压也有不同的增压机制。因此对有机质演化的影响也可能有很大的差异。

流体压力产生的机制有很多种^[42]。定量的分析结果表明^[43~46]烃源岩等低渗透地层中比较重要的增压机制有: 泥质沉积物的压实作用、构造应力的挤压作用、有机质裂解所产生的孔隙流体体积的剧烈膨胀^[47]。在泥质沉积物压实作用的早期, 岩石颗粒因转动、滑动、破碎等机械成岩作用而不断压实, 颗粒间的支撑能力增加以抵抗上覆负荷, 此时作用于沉积有机质上的有效应力增加, 因此压力的作用会促进有机质的生烃, 而随着压实作用的继续进行, 一部分的上覆负荷将由流体来承担, 沉积有机质的有效应力将降低, 此时异常流体压力的增加将抑制有机质的生烃。

有机质裂解被认为是烃源岩中异常压力产生的重要机制, 但是在有机质演化的初期, 干酪根以生油为主, Mudford 等^[48]定量地模拟了有机质成熟作用在异常压力演化中的作用, 结果表明: 有机质从固态变为液态时所增加的孔隙流体体积对异常压力的作用微乎其微。Luo 等^[49]的定量模拟结果表明: 当沉积物中有机质含量少于 5% mg/mg 时, 仅仅由固态干酪根转变为液态烃类, 这种机制的作用十分微小; 但若有机质裂解成气, 则较少的有机质含量 (< 0.5% mg/mg) 也可能造成明显的异常压力。因此这种机制只有在有机质演化的后期生气阶段才能显示出明显的抑制作用。

构造应力的作用也是异常压力产生的一种重要

机制^[50, 51]。特别是对于构造运动强烈的地区, 如前陆盆地或造山带, 构造应力的作用相当于一种侧向的压实作用, 沉积有机质叠加了构造应力的作用, 其有效应力就会增加, 同样会促进有机质的生烃。刘文汇^[52, 53]注意到构造应力对有机质演化的作用, 称之为“力化学”作用, 他认为: 水平挤压造成的机械能无疑为有机质的化学反应提供了重要的能量来源, 并由于机械能的参与, 直接发生大分子有机质的降解。

因此, 在沉积盆地中, 不同的增压机制对有机质演化的影响是不同的, 而且相同的增压机制对有机质演化的影响也不是一成不变的, 可能具有阶段性的特点。

4.3 随埋藏深度增加压力对有机质演化的阶段作用

我国学者在早期的实验中曾注意到, 在温度和压力不太高的情况下, 压力可促有机质生烃, 如黄健全等^[17]对长兴灰岩和油页岩的高温高压模拟实验表明, 在中等温度下, 高压可能有助于液态烃的生成。杨天宇^[16]通过实验发现在实验的初期, 随压力增加 CO_2 的含量也增加, 他认为压力的增加能促进干酪根热解生油, 抑制了油的裂解, 因为干酪根分解可产生 CO_2 , 而油裂解所产生的 CO_2 则很少。解启来等^[20]的实验中也可以看出压力促进了有机质的降解生油。周中毅等^[38]采用泥岩、灰岩或油页岩, 在半封闭系统下进行实验, 300 下, 3 种岩样随压力的增加其产油率均增加, 产气率下降, 干酪根镜质组反射率介于 0.8% ~ 1.5%, 400 时, 在压力较小的情况下, 压力由常压升至 73.6 MPa 时, 岩样产油率增加, 产气率降低。而当压力由 73.6 MPa 升至较高压力 196.1 MPa 时, 下马岭页岩和长兴灰岩产油率和产气率均下降。以上这些学者的实验都反映出压力对有机质的演化的影响不是一成不变的, 可能具有阶段性的特征。

在有机质演化的早期阶段, 促使有机质演化最活跃的因素是热催化作用。粘土矿物对有机质热解生烃具有重要的催化作用^[54, 55], 它可以降低有机质的成熟温度并促进石油的生成。雷怀彦等^[55]认为, 泥岩中含量最多的 3 种矿物蒙脱石、高岭石、伊利石中, 以蒙脱石对干酪根降解生烃的催化作用最强^[29], 能使产气率提高 2 ~ 3 倍, 并使热解温度降低 50。Colton Bradley^[56]认为, 由差异压实作用引起的超压使蒙脱石向伊利石的转化得到抑制, 使得超压地层中蒙脱石的含量大于常压地层中的蒙脱石含量, 蒙脱石对干酪根的吸附和催化作用更加明显, 进

而促进有机质的演化。特别是在有流体参加的情况下,刘洛夫等^[54]通过实验认为,在有水介质存在时,矿基质盐类也表现出明显的催化作用,而且蒙脱石的催化作用还因为水介质的存在而得到加强。另外根据刘文汇等^[52]通过野外考察和室内模拟实验认为,构造运动形成的机械力作用于有机质使其发生裂解,同时加速缩聚作用发生以及使矿物晶格发生变形从而提高催化活性,这种“力化学”作用强度最高的阶段相对应深度大致在1 500 ~3 000 m,随埋藏加深,温度相应增大,有机质的“力化学”作用随之降低。因而在有机质演化的早期阶段地层有效应力的增加还从增加催化剂的数量和催化剂的活性上促进了有机质向烃类转化^[57]。

当沉积物埋藏深度超过3 500 m以后,地温达到180℃以上,进入成岩作用的变质阶段,此时地温超过了烃类物质的临界温度,先前生成的液态烃类发生C-C链断裂,包括碳环的开环和破裂,液态烃急剧减少,气态烃大量增加^[58],此时反应产物的体积急剧增加,这也是该阶段最主要的增压机制。据Surdam等^[59]的研究表明由于生气作用引起的超压系统则使粘土矿物的转化增强,蒙脱石大量转化成伊利石,虽然伊利石对有机质转化也起催化作用但是其作用不如蒙脱石明显,而且在这个阶段粘土矿物的催化作用不是促进有机质演化的主要因素,其主要影响因素是温度的作用,此时异常高压将对有机质的演化起负面的影响。

沉积盆地中,超压一般都发育在盆地的深部,因此超压较多的表现出对有机质演化的抑制作用。如莺歌海盆地深部的超高压系统^[60],正常压力下的有机质演化 R_o 值都达到2.4%,进入了深部高温生气阶段,因而所表现出来的都是高压抑制了液态烃向气态烃的转化。

4.4 镜质组反射率代表的有机质成熟度可能被抑制

镜质组反射率(R_o)目前被认为是研究干酪根热演化和成熟度的最佳参数之一^[58]。值得注意的是,解启来等^[20]、周中毅等^[38]的实验中样品的产烃率增加了,但是表征有机质成熟度的镜质组反射率却降低。这似乎表明,在有高压存在的情况下,镜质组反射率不能够很好的反映有机质的成熟度。这是因为镜质组是一种富氧的组分,镜质组分与类脂组相比对生油的贡献不大,而一些非常倾向于生油的源岩缺乏或含很少镜质组,大量的油型显微组分或沥青的存在常常会使镜质组反射率随成熟度的正常变化而变得迟缓^[61]。而且有机质热演化和生烃作

用是由一系列平行而连续的反应构成,镜质组作为大多数源岩中干酪根显微组分的较小部分,其成熟作用和由此决定的反射率变化不足以反映超压环境有机质热演化的各个方面^[28]。在超压发育地区,镜质组反射率所代表的有机质的成熟度将受到抑制,但有机质的生烃率却可能增加,因而不能很好地反映有机质的成熟度,这在异常高压地区烃源岩的评价中应引起重视。

5 结论与认识

在对前人所作实验进行分析的基础上,并考虑沉积盆地中超压的成因机制,以及有机质演化过程中的多种因素,可以得出以下结论:

(1) 压力和温度始终伴随着沉积有机质的演化,因此压力和温度同时都会对有机质的演化产生重要的影响。当沉积有机质受到的有效应力增加时,压力会促进有机质的生烃,而当孔隙流体压力增加时,压力会抑制有机质的生烃作用。

(2) 不同增压机制以及相同机制的不同阶段对有机质生烃的影响是不同的,对于压实作用的早期阶段以及由于构造应力作用形成的高压,压力的增加同时会增加地层的有效应力,因此会促进有机质的生烃。而压实作用的后期阶段,进入欠压实阶段以及由于有机质裂解体积膨胀而造成的超压,则会抑制有机质的生烃。

(3) 沉积盆地中压力对有机质的演化具有阶段性的特点,在有机质演化的早期阶段,由于压力的增加主要增加了地层的有效应力,因而可以从促进大分子烃裂解以及增加粘土矿物的催化剂数量和催化活性上促进有机质的生烃;而在有机质演化的生气阶段,异常压力的产生往往会抑制液态烃的裂解,降低液态烃向气态烃的转化。

(4) 在异常高压发育以及构造运动强烈的地区,干酪根的镜质组反射率所表征的有机质的成熟度可能会受到抑制。因此不能完全代表有机质的演化程度。

参考文献 (References):

- [1] McTavish R A. Pressure retardation of vitrinite diagenesis, Offshore North-west Europe[J]. *Nature*, 1978, 271: 648-650.
- [2] Price L C, Clayton J L, Rummen L L. Organic geochemistry of the 9.6 km Bertha rogers No. 1w e1, Oklahoma [J]. *Organic Geochemistry*, 1981, 3: 59-77.
- [3] Carr A D. Suppression and retard of vitrinite reflectance, part I. Formation and significance for hydrocarbon generation [J]. *Journal*

- of Petroleum Geology, 2000, 23(3): 313-343.
- [4] Price L C. Thermal stability of hydrocarbons in nature: Limits, evidence, characteristics, and possible controls [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 3261-3280.
- [5] Carr A D. Suppression and retard of vitrinite reflectance, part II. Derivation and testing of a kinetic model for suppression [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2000, 23(4): 475-496.
- [6] Carr A D. Thermal history model for the South Central Graben, North Sea, derived using both tectonics and maturation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 54: 3-9.
- [6] Carr A D. Thermal history modeling in the southern Færoe - Shetland Basin [J]. *Petroleum Geoscience*, 2003, 9: 333-345.
- [7] Hao Fang, Dong Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(1): 79-85. [郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 79-85.]
- [8] Hao Fang, Zou Huayao, Ni Jianhua, et al. Evolution of overpressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 610-615. [郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2002, 27(5): 610-615.]
- [9] Hao Fang, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Characteristics and origin of the gas and condensate in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea: Evidence for effect of overpressure on petroleum generation and maturation [J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(3): 363-375.
- [10] Carr A D. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16: 355-377.
- [11] Monthieux M, Landais P, Monin J C. Comparison between natural and artificial maturation series of humic coals from the Mahakam delta Indonesia [J]. *Organic Geochemistry*, 1985, 8: 275-292.
- [12] Monthieux M, Landais P, Durand B. Comparison between extracts from natural and artificial maturation series of Mahakam delta coals [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 299-311.
- [13] Tissot B P, Welte D H. *Petroleum Formation and Occurrence* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [14] Chandra D. Reflectance of coals carbonized under pressure [J]. *Economic Geology*, 1965, 60: 621-629.
- [15] Hryckowian E, Dutcher R R, Dacheille F. Experimental studies of anthracite coals at high pressures and temperatures [J]. *Economic Geology*, 1967, 62: 517-539.
- [16] Yang Tianyu, Wang Hanyun. High temperature and high pressure simulation experiment of organic matter in rock [J]. *Oil & Gas Geology*, 1987, 8(4): 380-389. [杨天宇, 王涵云. 岩石中有机质高温高压模拟实验 [J]. *石油与天然气地质*, 1987, 8(4): 380-389.]
- [17] Huang Jianquan, Zhou Zhongyi, Fan Shanfa. The Research of High Pressure and High Temperature Experiment in Hydrocarbon Generation in Deep Basin [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992, 244-245. [黄健全, 周中毅, 范善发. 盆地深部油气形成的高温高压实验研究 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992, 244-245.]
- [18] Braun R L, Burnham A K. Mathematical model of oil generation, degradation and expulsion [J]. *Energy Fuels*, 1990, 4: 32-46.
- [19] Petzoukha Yu, Selivanov O. Promotion of petroleum formation by source rock deformation [A]. In: *Organic Geochemistry: Advances and Application in the Natural Environment* [C]. Manchester: Manchester University Press, 1991: 312-314.
- [20] Xie Qilai, Fan Shanfa, Zhou Zhongyi, et al. Influence of pressure on the evolution and hydrocarbon generation of source bed by simulation experiments [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1996, 15(2): 91-93. [解启来, 范善发, 周中毅. 压力对烃源层演化及产烃影响的模拟实验 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1996, 15(2): 91-93.]
- [21] Davis A, Spackman W. The role of the cellulosic and lignitic components of wood in artificial coalification [J]. *Fuel*, 1964, 43: 215-224.
- [22] Cecil V, Stanton R, Robbins E. Geologic factors controlling coalification and hydrocarbon maturation [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1977, 61: 775.
- [23] Sajó C S, Mcvey J, Wolf G A, et al. Influence of temperature and pressure on maturation process I. Preliminary report [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 331-337.
- [24] Price L C, Wenger L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19: 141-159.
- [25] Dalla Torre M, Mahmann R F, Ernst W G. Experimental study on the pressure dependence of vitrinite maturation [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 67: 921-928.
- [26] Jiang Feng, Du Jianguo, Wang Wanchun, et al. The study on high-pressure-high-temperature aqueous pyrolysis I. Influence of temperature and pressure on maturation of organic matter [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 9(3): 153-160. [姜峰, 杜建国, 王万春, 等. 高温超高压模拟实验研究 I: 温压条件下对有机质成熟作用的影响 [J]. *沉积学报*, 1998, 9(3): 153-160.]
- [27] Jiang Feng, Du Jianguo, Wang Wanchun, et al. The study on high-pressure-high-temperature aqueous pyrolysis II. Evolutionary characteristics of alkane generated from organic matter under high temperature and high pressure [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 12(4): 146-148.
- [28] Hao Fang, Jiang Jianqun, Zou Huayao, et al. The overpressure differentially and levelly retard the organic matter evolution [J]. *Science in China (D)*, 2004, 34(5): 443-451. [郝芳, 姜建群, 邹华耀, 等. 超压对有机质热演化的差异抑制作用及层次 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(5): 443-451.]
- [29] Huizinga B J, Tannenbaum E, Kaplan I R. The role of minerals in the thermal alteration of organic matter. Generation of bitumen in laboratory experiments [J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11: 591-604.
- [30] Lu S T, Kaplan I R. Dry pyrolysis of immature kerogen and sub-

- bituminous coal in the presence and absence of montmorillonite [J]. *American Chemical Society, Division of Petroleum Chemistry*, 1989, 34: 15-20.
- [31] Fu Jianq, Qin Kuangcong. *Kerogen Geochemistry* [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1995. [傅家谟, 秦匡宗. 干酪根地球化学 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1995.]
- [32] Lu Jiacan. *The Model Experiment of Coal Generating Hydrocarbon* [M]. Beijing: Science Press, 1990. [卢家灿. 煤成烃的模拟实验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.]
- [33] Liu Xiaofeng. Review of new ideas of petroleum geology associated with abnormal fluid pressure system [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(2): 245-250. [刘晓峰. 评述异常压力研究中的石油地质学新思想 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 245-250.]
- [34] Terzaghi K. Principles of soil mechanics, III. Determination of the permeability of clay [J]. *Engineering News Record*, 1925, 95: 832-836.
- [35] Hubbert M K, Rubey W W. Mechanics of fluid filled porous solids and its application to overthrust faulting, I. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1959, 70: 115-166.
- [36] Magara K. *Compaction and Fluid Migration, Practical Petroleum geology* [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
- [37] Lafargue E, Espitalie J, Jacobsen T, et al. Experimental simulation of hydrocarbon expulsion [J]. *Advances in Organic Geochemistry*, 1990, 16(1-3): 121-131.
- [38] Zhou Zhongyi, Fan Shanfa, Pan Changchun, et al. The advantaged factor of oil and gas reservoir in basin deep [J]. *Explor*, 1997, 2(1): 8-11. [周中毅, 范善发, 潘长春, 等. 盆地深部形成油气藏有利因素 [J]. 勘探家, 1997, 2(1): 8-11.]
- [39] Dalla Torre M, Fereiro R, Ernst W G. Experimental study on the pressure dependence of vitrinite maturation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(14): 921-928.
- [40] Hao Fang, Dong Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(1): 79-85. [郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85.]
- [41] Domine F, Enguehard F. Kinetics of hexane pyrolysis at very high pressure-3. Application to geochemical modeling [J]. *Organic geochemistry*, 1992, 18: 41-49.
- [42] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1997, 81: 023-041.
- [43] Bethke C M. Inverse hydrologic analysis of the distribution and origin of Gulf Coast-type geopressured zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91: 535-545.
- [44] Luo Xiaorong, Vasseur G. Contribution of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental condition [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1992, 76: 550-559.
- [45] Shi Y L, Wang C Y. Pore pressure generation in sedimentary basins [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1983, 67: 153-162.
- [46] Luo Xiaorong. *Modeling of Abnormal Pressures and Associated Geological Phenomena in Sedimentary Basins* [D]. Montpellier, France: University Montpellier II, 1994.
- [47] Wang Zhenfeng, Luo Xiaorong. *The Forecast and Inspection Technology Research of Drill Pressure in High Pressure and High Temperature Formation in Yingqing Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. [王振峰, 罗晓容. 莺琼盆地高温高压地层钻井压力预测技术研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.]
- [48] Mudford B, Best M E. Venture gas field, offshore Nova Scotia: Case study of overpressuring in region of low sedimentation rate [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1989, 73(11): 1383-1396.
- [49] Luo Xiaorong, Vasseur G. Geopressuring mechanism of organic matter cracking: Numerical modeling [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1996, 80: 856-874.
- [50] Finch W C. Abnormal pressure in the Antelope field, North Dakota [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1968, 213: 170-179.
- [51] Berry F A F. High fluid potentials in California coast ranges and their tectonic significance [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1973, 57: 219-249.
- [52] Liu Wenhui, Xu Yongchang, Shi Jiyang, et al. The generation mechanism and evolution mode of transition zone gas by biological and thermal catalysis [J]. *Science in China (D)*, 1996, (12): 511-517. [刘文汇, 徐永昌, 史继扬, 等. 生物-热催化过渡带气形成机制及演化模式 [J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(12): 511-517.]
- [53] Liu Wenhui. The mechanochemistry in formation of oil and gas—The first of thoughts to the theory of petroleum formation [J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(4): 340-345. [刘文汇. 油气形成的力化学作用——油气地质理论思考之一 [J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 340-345.]
- [54] Liu Liudu, Li Shuyuan. Advance in the study of the mechanism of hydrocarbon generation from source rocks by catalysis [J]. *Geological Review*, 2000, 46(5): 491-498. [刘洛夫, 李术元. 烃源岩催化生烃机制研究进展 [J]. 地质论评, 2000, 46(5): 491-498.]
- [55] Zhang Zhihuan, Zhang Houfu, Gao Xianzhi. Effect of clay minerals on hydrocarbon formation during kerogen pyrolysis [J]. *Petroleum Exploration and Production*, 1994, 21(5): 29-37. [张枝焕, 张厚福, 高先志. 粘土矿物对干酪根热解生烃过程的影响 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 29-37.]
- [56] Lei Huaiyan, Shi Yuxin, Guan Ping, et al. The catalysis research of alumino silicate clay mineral to the transitional zone gas generation [J]. *Science in China (D)*, 1997, 27(1): 39-44. [雷怀彦, 师育新, 关平, 等. 铝硅酸盐粘土矿物对形成过渡带气的催化作用研究 [J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27(1): 39-44.]
- [57] Chen Xiaodong, Wang Xianbin. Pressure effect on organic matter

- m aturation and petroleum generation[J]. *Advances in Earth Science* 1999 ,14(2) :31-35. [陈晓东, 王先彬. 压力对有机质成熟和油气生成的影响[J]. *地球科学进展* 1999 ,14(2) :31-35.]
- [58] Zhang Houfu, Fang Chadiang, Zhang Zhihuang, et al. *Petroleum Geology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press 1999. [张厚福, 方朝亮, 张枝焕, 等. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.]
- [59] Surdam R C, Jao Z S, Heasler H P. Anom alously pressured gas compartments in Cretaceous rocks of the Laramide Basin of Wyoming; A new class of hydrocarbon accumulation[A]. In: Surdam R C, ed. *Seals, Traps and the Petroleum System* [C]. American Association of Petroleum Geologists memoir 67, Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1997: 199-222.
- [60] Hao Fang, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Characteristics and origin of the gas and condensate in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea. Evidence for effect of overpressure on petroleum generation and maturation[J]. *Organic Geochemistry* 1996 ,24(3) :363-375.
- [61] Peters K E, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc 1993.

Effects and Influences of Pore Pressures on Organic Matter's Maturation

WANG Zhao-ming, LUO Xiao-rong, CHEN Rui-yin,
SONG Hai-ming, ZHOU Bo, ZHENG Da-hai

(Institute of Geology and Geophysics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract Three contradictive conclusions on the effect of pore pressures on organic matter maturation (OMM) have been obtained from previous experimental studies: pore pressures may play a positive, null and negative role on organic matter maturation. After systematic review of the literature about this subject, the authors found that these contradictive conclusions probably resulted from different experiment conditions, especially the equipments' structures and "pressure" loaded on samples. After an analysis of the mechanisms of the effects of pressures on OMM, it is denoted that when the increase of "pressure" on the samples is the increase of effective stress, the stress acts directly on solid OM and the maturing rate will be accelerated. On the contrary, if increasing "pressure" acts on pore fluid to augment pore pressure, then the maturing rate will be decelerated. It is previously proved that the vitrinite reflectivity corresponding to the OM appears relatively lower in these experiments of both types of cases. In actual basins, the effect of overpressures on OMM must be so different that the overpressuring occurs underground with different mechanisms at different burial depths and sedimentary environments.

Key words Rock pressure; Effective stress; Fluid pressure; Organic matter evolution; Hydrocarbon generation.