中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 3 期: 439 ~ 444
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

烃源岩非均质性与异常高压形成机制

张学军[①②*], 徐兴友[②], 王永诗[②], 宋国奇[②], 郭春清[②], 刘庆[②], 黎萍[②]

① 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;
② 中国石化胜利油田地质科学研究院, 东营 257015
* E-mail: kerogen322@163.com

收稿日期: 2012-12-17; 接受日期: 2013-04-28; 网络版发表日期: 2014-01-26
国家科技重大专项(编号: 2011ZX05006)资助

摘要 通过大量烃源岩光片显微荧光观察, 发现烃源岩因有机质含量及其与无机矿物之间的赋存关系不同, 在演化过程中可形成两种不同润湿性质微层, 即油润湿微层和水润湿微层. 烃源岩中油润湿微层和水润湿微层交互分布并相互交错, 使内部形成了多个不同润湿性质的空间; 不同润湿性质空间强大的毛细管力阻碍了流体的相互流动, 形成了近乎独立的封闭流体系统. 空间所承受作用力为全部上覆地层压力, 这种不同流体空间的封闭性承压使其内部呈现高压状态. 烃源岩中多个封闭流体空间相互叠置, 形成了烃源岩异常高压层. 因此有机质的含量及赋存状态是决定异常高压形成的内在因素, 烃源岩演化过程不同润湿性微层形成、分布及演化决定了异常高压的强度、范围等.

关键词
烃源岩
非均质性
异常高压
形成机制
润湿性

国内外异常压力的油气田的发现和研究表明, 异常压力与油气分布有密切关系, 因此异常压力对油气成藏的形成作用研究引起广泛关注(马起富等, 2000; 杜翔等, 1995). 有关异常压力的形成机理, 前人从多方面进行了探讨(Dickinson, 1953; 付广等, 1999; 李兰斌等, 2000), 其成因可以分为与沉积作用有关的、与油气生成作用有关的、与流体热膨胀作用有关的、与成岩作用有关的、与构造作用有关的、与流体性质有关的和与盆地地层结构有关的七类十余种(徐兆辉等, 2010; 王连进和叶加仁, 2001; Swarbrick 和 Osborne, 1998; 李超和王亮华, 2010; 高岗等, 2005). 在这些研究中, 有机质的生烃作用被认为是异常高压形成的重要因素之一. 但有机质生烃所产生的体积膨胀程度与其他因素相比优势并不明显, 这就难于解释异常高压与含油气盆地密切相关的现象: 目前世界 180 多个盆地被确认存在流体异常压力, 其中 160 多个为富含油气盆地(Hunt, 1990; Waples, 1991; Law 和 Dickinson,1985; 张启明, 2000), 且异常高压带与生油洼陷的分布基本一致(邱桂强等, 2003).

究其原因, 笔者认为, 目前异常压力形成机制研究中均较多地注意了地层中流体体积及孔隙体积变化等宏观因素, 而极少注意到地层中有机与无机、流体与固体间的相互作用等导致压力变化的微观机制. 本文从烃源岩微观结构入手, 对烃源岩不同纹层间有机质赋存状态的差异及其可能对异常压力形成的机制进行了探讨, 以期对烃源岩层异常高压的成因、分布及其在油气运移中的作用研究提供借鉴.

中文引用格式: 张学军, 徐兴友, 王永诗, 等. 2014. 烃源岩非均质性与异常高压形成机制. 中国科学: 地球科学, 44: 439–444
英文引用格式: Zhang X J, Xu X Y, Wang Y S, et al. 2013. Relationship between heterogeneity of source rocks and genetic mechanism of abnormally high pressure. Science China: Earth Sciences, 56: 1971–1976, doi: 10.1007/s11430-013-4662-x

1 烃源岩层内部存在不同的润湿性微层

显微荧光分析技术是研究烃源岩中有机质含量和赋存状态的有效手段, 不仅可以用于烃源岩中显微组分的鉴定, 也可以对其中发荧光的亚显微有机质及可溶有机质进行观察描述. 通过大量烃源岩显微荧光分析发现, 因其中有机质赋存状态的非均质性, 导致了其中不同微层润湿性质存在差异.

烃源岩中有机质与无机矿物结合紧密(王行信等, 2006; 樊馥等, 2011), 研究人员将有机质与无机矿物组合按其赋存状态划分为顺层富集型、分散型和局部富集型等三种不同的种类(苗建宇等, 2004; 张林晔, 2005). 其中有机显微组分除常见的藻类体、壳质体和镜质体等有形态组分外, 还有一部分是在沉积过程中被充分分解的有机质, 这部分有机质与无机矿物充分混合形成矿物沥青基质组分. 这种呈亚显微状态的有机质与无机矿物形成的矿物沥青基质在优质烃源岩中大量分布(李贤庆等, 1997, 2000, 2002; 陈建平和黄第藩, 1997), 而正是亚显微有机质在矿物中的均匀充填使其在演化过程中的润湿性质极易发生变化. 在含油气盆地中, 地层流体主要为地层水和油气, 在泥岩层中因孔隙较小, 普通光学显微镜难以分辨其微孔隙结构和其中的流体成分; 但油水荧光特性差异极大, 在荧光偏光显微镜下易于区分其含油水性, 这也是目前地质录井过程中确定油水层的重要手段. 笔者利用显微荧光手段, 根据烃源岩有机质与矿物的赋存关系以及矿物微层的荧光强度, 将岩石微层分为两种类型, 即油润湿微层和水润湿微层.

(1) 水润湿微层: 微层孔隙中以水充填为主, 在蓝紫光激发下微层无荧光或荧光较弱. 岩石组成无机矿物含量高, 有机质显微组分含量较低, 且以有形态结构组分为主, 显微组分多孤立分散于矿物中(图 1). 较弱的荧光特征说明矿物微孔隙内流体中烃类含量低, 是水润湿性微层的重要标志.

(2) 油润湿微层: 是指其矿物间隙中充填有机质和烃类为主的微层, 在蓝紫光激发下微层整体显示出较强的荧光特征, 这些微层中较高的有机质(可溶、不溶)含量使其呈现出亲油的特性(图 2). 在烃源岩中除常见的层状有机质富集层外, 还有矿物沥青基质层和富含可溶有机质的矿物微层等.

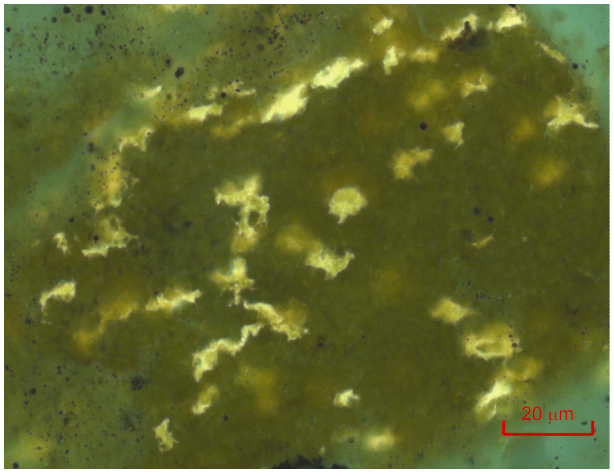

图 1 分散有机质层显微荧光照片

胜利油田, 沾化凹陷, 罗 3 井, 2914.6 m, Es_4, 泥岩

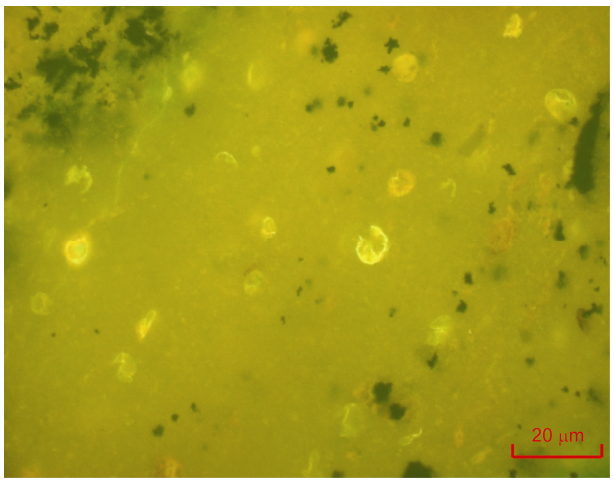

图 2 有机质富集层显微荧光照片

胜利油田, 东营凹陷, 莱 109 井, 2918.2 m, Es_4, 油页岩

2 不同润湿性微层的分割封闭导致了异常高压的形成

2.1 烃源岩内不同润湿性微层的交错造成内部流体系统的分割封闭

泥岩主要由粒度小于 0.0039 mm 的粘土矿物组成, 而其孔隙度多在 5%~10%, 细小的矿物颗粒和相对较大的孔隙度决定其有极大的比表面积, 因此泥岩中流体的活动不是以常规的浮力和压力差为主, 而是由毛细管力决定的. 苗建宇等(2004)研究认为, 泥岩中孔隙小而多, 喉道窄而细, 孔喉分选性较好,

具有较好的连通性. 泥岩的这种孔隙特征, 决定了在润湿性多孔介质中毛细管力为流体活动的重要动力, 而非润湿相液体流动则成为强大的阻力.

实验研究成果和矿场实际应用表明, 低渗透油藏中的渗流特征不再遵循经典的达西定律, 表现为必须有启动压力梯度和非线性的特征(何文祥等, 2011; 黄延章, 1998; 李中锋和何顺利, 2005; 徐运亭等, 2006; 徐绍良和岳湘安, 2007); 在泥岩更加微小的孔隙和更低的渗透率下, 渗流需要的启动压力梯度更大. 烃源岩中条带状富有机质微层在空间上是交错叠置的, 并使不同润湿性微层之间相互分割; 特别是在油页岩(图 3)和富含有机质泥岩(图 4)等优质烃源岩中, 这种不同微层间的相互叠置及相互分割现象是常见的. 强大的毛细管阻力造成不同润湿性微层间压力差难于达到流体相互渗流需要的启动压力梯度. 因此, 有机质富集层生成的油气难于突破亲水的矿物微层, 矿物层中的自由水也不可能穿越有机质富集的亲油微层. 这样, 在烃源岩中就形成了无数个润湿性质不同的、独立的封闭流体系统.

在显微照片中, 层状有机质富集层的交叉封闭现象相对较少, 但在相对较大的岩心切面上可以发现这种不同有机质含量微层的交叉分割现象非常明显(图 5), 可以想象在沉积地层当中这种不同润湿性的微层几乎是全部被交叉封闭的. 因此, 整个优质烃源岩体可以看成是无数个这种封闭流体空间的组合和叠加.

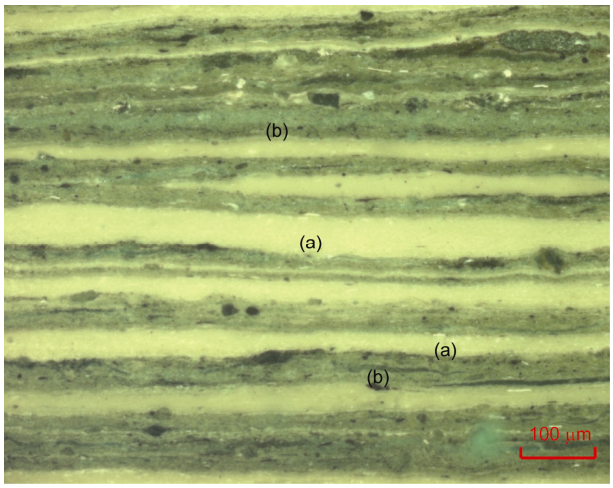

图 3　显微荧光下油页岩不同润湿性微层分布

胜利油田, 东营凹陷, 官 107, 1972.7 m, Es_4, 油页岩. (a) 油润湿微层; (b) 水润湿微层

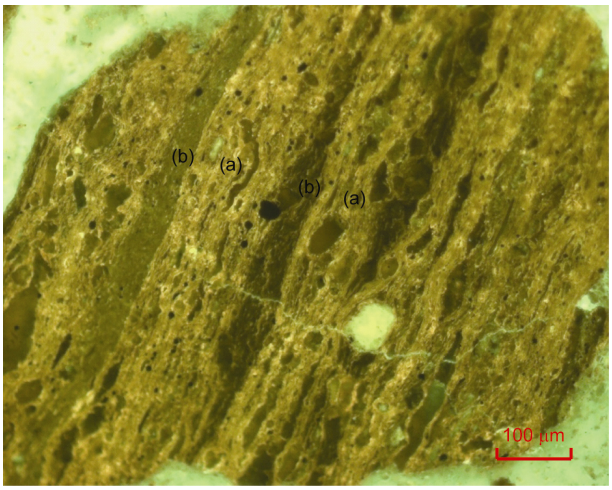

图 4　显微荧光下富有机质泥岩不同润湿性微层分布

胜利油田, 沾化凹陷, 老 16, 3568.0 m, Es_4, 泥岩. (a) 油润湿微层, (b) 水润湿微层

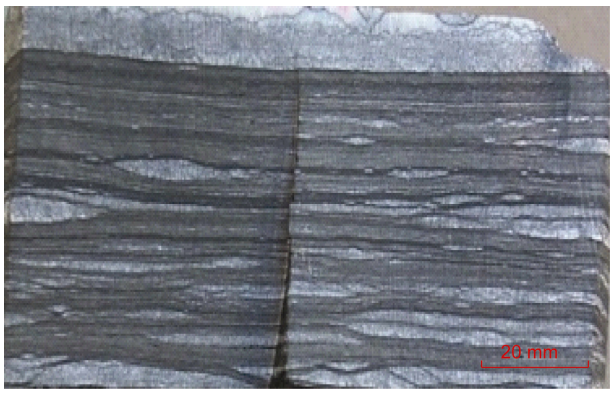

图 5　层状烃源岩岩心切面上不同有机质含量层的交叉分割现象

胜利油田, 东营凹陷, 河 130 井, 3228.4~3229.4 m, Es_4, 钙质泥岩. 深色条带富含有机质, 浅色条带有机质含量较低

2.2　流体的分割封闭性承压导致了内部的异常高压现象

富含有机质的油润湿微层和富含水的水润湿微层在空间上合并或交叉, 造成了不同性质流体间的相互分割; 这种相对独立的流体空间在地层中的叠置, 使地层中流体-流体及流体-矿物间的相互作用变为独立流体空间的相互作用, 地层压力也就由地层流体间的相互作用力, 变为不同空间的相互作用力. 理论上, 完全封闭的流体空间之间的相互作用力是所有上覆地层压力的总和(图 6), 即封闭空间内的压

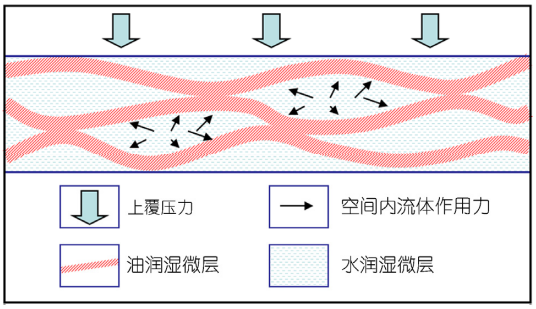

图 6　不同润湿微层的分割模式及异常高压形成机制示意图

力最高可以等于静岩压力. 但实际上, 每个流体空间不可能一直是完全封闭的, 在烃源岩成熟演化过程中不同微层的润湿性也会发生相互转变, 这种非完全封闭和相互转变, 使其中某些空间流体在一定条件下发生流动, 岩石所呈现的地层压力也就会小于静岩压力. 因此, 地层压力的异常程度取决于这些流体空间的封闭能力.

3　烃源岩演化过程中微层的润湿性会发生改变

在有机质成熟演化过程中, 同一层微的润湿性质会发生变化, 不同性质的微层也会相互转变, 这就造成微观流体系统的封闭能力及分割范围不断演变. 这种微层润湿性质的变化决定了异常压力的形成、演化、强度及范围等, 不同演化阶段微层润湿特征的变化及其对异常高压的影响如下.

3.1　低成熟演化阶段烃源岩中均为水润湿微层, 不会产生异常高压

在低成熟演化阶段, 无论是有机质富集层还是矿物层均表现为水润湿性. 此时, 干酪根中含有大量杂原子基团(傅家谟和秦匡宗, 1995), 这些极性基团的存在使有机质表现出较好的亲水性. 同时, 岩石和有机质微孔隙中保存有大量的原始沉积水, 因此岩石整体呈现水润湿特性, 而水在岩石中可以自由活动. 该阶段只会在个别地区因欠压实作用在短期内产生异常压力, 不会出现长时间的异常高压现象.

3.2　成熟阶段不同微层润湿性的强烈变化导致异常高压的产生与发展

在有机质成熟阶段, 干酪根演化经历了早期的强烈去杂原子化, 有机质本身的亲水极性基团(如羧酸等)率先分离后, 有机质的降解产物逐渐转变为以生成非极性的烃类为主. 同时随着地层水的不断排出, 有机质产生的非极性烃类占据了岩石中的微孔隙, 使有机质富集微层完全转变为油润湿特性. 随着演化过程中生烃量不断增大, 油润湿微层数量也逐步增加. 当油润湿微层增加到一定数量后, 这些在烃源岩中本来就相互交错的微层把原来岩石中相互连通的地层水分割; 因不同润湿性微层间流体的流动需克服强大的毛细管力, 这些被分割的空间对地层水起到封闭作用, 于是形成了与外部近乎隔绝的封闭体系. 同时, 盆地的整体含水性也使这些油润湿层不可能在盆地范围内互连成网, 这样在烃源岩中就形成了由油润湿系统和水润湿系统相互分割、相互叠置的封闭流体组合层. 这一组合层承受了全部的上覆地层压力, 从而在其内部产生异常高压.

另外, 在非有机质富集层, 因岩石表面的亲水性和亲油性均可在一定条件下发生相互转化(彭珏和康毅力, 2008; 梁春等, 2011), 烃源岩成岩演化过程中微层的润湿性质会发生改变; 这种转变在荧光观察时经常见到, 如汶东凹陷汶口组油页岩显微照片中(图 7), 黄褐色条带为原生有机质微层(图 7(a)), 其中有机质因演化生烃其荧光颜色已转变成了黄褐色; 亮黄色荧光条带为次生有机质充填微层(图 7(b)), 在次生有机质未充填时为水润湿层; 在烃源岩演化过程中, 有机质生成的大量烃类逐渐驱替原孔隙中的

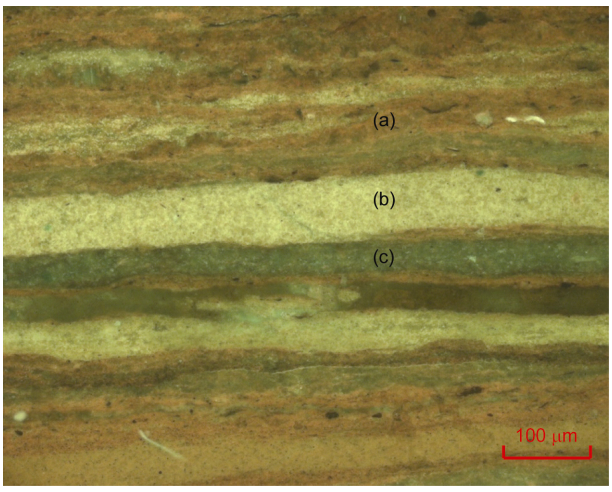

图 7　烃源岩中不同润湿性微层的转变现象

山东, 汶东凹陷, ZK16, 170.5 m, E_2^3. (a) 原始有机质富集油润湿微层; (b) 次生有机质充填转变的油润湿微层; (c) 水润湿微层

水分, 使其转化为油润湿微层. 弱荧光条带为残存的含水微层(图 7(c)), 部分较大孔隙有少量呈点状、蓝白色荧光的轻质烃类进入.

烃源岩成烃演化过程中微层润湿性质的变化, 导致不同润湿性微层封闭空间的形状、大小、厚度和数量等均会发生变化, 从而影响不同润湿空间的封闭能力. 因此, 烃源岩中有机质的数量和赋存状态决定了其中可形成油润湿微层的数量、形态和封闭能力. 油润湿微层的这些特性决定了异常高压形成的强度, 而烃源岩演化过程中油润湿微层的形成和演化决定了异常高压的生成与演变.

3.3　高演化阶段微层润湿性质趋于一致, 异常高压终结

烃源岩演化至生烃终结阶段, 有机质生烃能力完全释放, 所生成的烃类也排出殆尽. 此时, 有机残渣在收缩后不能连成有效的阻隔网络, 且残余物的性质也越来越与无机矿物接近, 有机质富集层逐步失去了亲油的能力, 于是油润湿微层转变为水润湿微层. 在这个阶段, 地层中的流体封闭分割体系被打破, 异常高压也就失去了存在条件, 地层变为常压. 这就是含油气盆地深层及高成熟演化区很少存在异常高压的原因.

4　认识与讨论

通过以上分析, 笔者认为, 含油气盆地烃源岩层异常高压形成的内在原因是有机质分布的非均质性导致烃源岩中形成不同润湿性微层所致; 烃源岩演化过程中导致的微层润湿性质的变化决定了异常高压的形成、演化、强度及范围等.

不同润湿性质微层的封闭作用与欠压实作用形成异常高压的机制既有一定相似之处, 也存在较大差异. 相似之处在于两者产生异常高压的根本原因在于地层孔隙中流体的不能及时排出, 从而承受了一部分上覆地层的压力所致. 不同之处表现在以下几个方面. (1) 形成的地质条件不同: 欠压实作用形成异常高压的条件是较快的沉积速度和较慢的地层排液, 而微层封闭形成异常高压的条件是烃源岩中有机质的层状富集及演化程度进入生烃阶段; (2) 高压的保持条件不同: 欠压实作用形成的异常高压的保持需要连续不断的快速沉积, 一旦沉积条件不能满足, 高压会较快消失, 而微层封闭形成的异常高压只要烃源岩中的有机质富集层还可以生排烃就能保持; (3) 高压的持续时间不同: 欠压实作用条件下的异常高压在沉积与地层排液达到平衡时就会消失, 持续时间较短, 而微层封闭形成的异常高压只有当有机质演化进入过成熟阶段, 其中烃类近乎全部排出, 且不同微层的润湿性质趋于一致时才会消失, 因此贯穿烃源岩的整个生排烃阶段.

值得一提的是, 在烃源岩异常高压区内存在的岩石孔隙度高、声波时差高等被认为是有效反映“欠压实”特征的现象, 也是因为微区封闭作用导致其中流体无法有效排出、从而造成岩石不能正常压实所致, 与由于快速沉积导致的“欠压实”有着本质区别. 因此, 烃源岩中“欠压实”现象只是微区封闭的表现形式.

微层封闭形成异常高压机制的提出, 不仅可以较好地说明异常高压发育与含油气盆地的密切关系, 也可以较完美地解释在许多现今已停止沉积、甚至进入抬升剥蚀阶段的含油气盆地仍然存在的异常高压现象. 这一机制的提出不仅可以用于含油气盆地异常高压的形成、演化和分布规律等的研究; 同时, 微区封闭状态下流体在地层中的渗流方式也可能与常规认识有所差异, 因此该机理有望用于烃源岩中油气初次排烃方式的深入研究, 并可为泥页岩油气赋存状态的分析以及如何选取合理的开采方式提供科学依据.

致谢　感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

陈建平, 黄第藩. 1997. 烃源岩中矿物沥青基质成烃潜力探讨. 地球化学, 26: 18–23
杜翔, 郑洪印, 焦秀琼. 1995. 异常压力与油气分布. 地学前缘, 2: 137–147
樊馥, 蔡进功, 徐金鲤, 等. 2011. 泥质烃源岩不同有机显微组分的原始赋存态. 同济大学学报(自然科学版), 39: 434–439
付广, 薛永超, 杨勉. 1999. 异常孔隙流体压力的成因及其贡献探讨. 海相油气地质, 4: 46–50
傅家谟, 秦匡宗. 1995. 干酪根地球化学. 广州: 广东科技出版社, 251–292

高岗, 黄志龙, 王兆峰, 等. 2005. 地层异常高压形成机理的研究. 西安石油大学学报(自然科学版), 20: 1–7
何文祥, 马清, 马超亚. 2011. 特低渗透储层渗流特征和影响因素. 科技导报, 29: 36–39
黄延章. 1998. 低渗透油层渗流机理. 北京: 石油工业出版社, 30–100
李超, 王亮华. 2010. 超压的形成机理及其对生烃的影响. 重庆科技学院学报(自然科学版), 12: 24–26
李兰斌, 孙家振, 陈文礼, 等. 2000. 舞阳盐湖盆地地层压力特征与成因机理. 石油实验地质, 22: 265–269
李贤庆, 马安来, 熊波, 等. 2002. 未熟-低熟烃源岩的有机岩石学特征. 地质地球化学, 30: 20–25
李贤庆, 王铁冠, 钟宁宁, 等. 2000. 未熟-低熟烃源岩有机岩石学研究的若干进展. 地学前缘, 7: 103–109
李贤庆, 熊波, 黄光辉, 等. 1997. 低熟源岩中矿物沥青基质的特征与成因. 江汉石油学院学报, 19: 29–35
李中锋, 何顺利. 2005. 低渗透储层非达西渗流机理探讨. 特种油气藏, 12: 35–38
梁春, 郑西来, 张俊杰. 2011. 石油污染多孔介质湿润性变异特征. 地球科学, 36: 765–770
马起富, 陈思忠, 张启明, 等. 2000. 超压盆地与油气分布. 北京: 地质出版社. 1–24
苗建宇, 祝总祺, 刘文荣, 等. 2004. 泥岩有机质的赋存状态与油气初次运移的关系. 沉积学报, 22: 169–173
彭珏, 康毅力. 2008. 润湿性及其演变对油藏采收率的影响. 油气地质与采收率, 15: 72–75
邱桂强, 凌云, 樊洪海. 2003. 东营凹陷古近系烃源岩超压特征及分布规律. 石油勘探与开发, 30: 71–75
王连进, 叶加仁. 2001. 沉积盆地超压形成机制评述. 石油与天然气地质, 22: 17–20
王行信, 王国力, 蔡进功, 等. 2006. 有机粘土复合体与油气生成. 北京: 石油工业出版社. 87–92
徐绍良, 岳湘安. 2007. 低速非线性流动特性的实验研究. 中国石油大学学报: 自然科学版, 31: 60–63
徐运亭, 徐启, 郭永贵,等. 2006. 低渗透油藏渗流机理研究及应用. 北京: 石油工业出版社. 15–64
徐兆辉, 江青春, 赵伟. 2010. 油气勘探异常地层压力成因机制探讨. 科技创新导报, 16:68.
张林晔. 2005. “富集有机质”成烃作用再认识:以东营凹陷为例. 地球化学, 34: 619–625
张启明. 2000. 中国含油气盆地中的超压体系. 石油学报, 21: 1–11
Dickinson G. 1953. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast, Louisiana. AAPG Bull, 37: 410–432
Hunt J M. 1990. The generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. AAPG Bull, 74: 1–12
Law B E, Dickinson W W. 1985. Conceptual model for origin of abnormally pressured gas accumulations in low permeability reservoirs. AAPG Bull, 69: 1295–1304
Swarbrick R E, Osborne M J. 1998. Mechanisms that generate abnormal pressures: An overview. In: Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I, eds. Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments. AAPG Memoir, 70:13–34
Waples D W. 1991. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments: Discussions and replies. AAPG Bull, 75: 326–327