

# 沉积盆地异常低压( 负压 )与油气分布

金 博<sup>1)</sup> 刘 震<sup>1)</sup> 张荣新<sup>2)</sup> 郭 锋<sup>2)</sup>

1) 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室 ,北京 ,102249 ;

2) 中国石油测井总公司长庆事业部 ,甘肃 兰州 ,745100

**摘 要** 在沉积盆地油气勘探过程中 ,异常压力与油气聚集的关系愈显密切 ,而异常压力不仅仅是指异常高压 ,国内外在发现许多异常高压油气藏的同时 ,也发现了相当数量的异常低压油气藏 ,而且异常低压在世界许多盆地中均有分布。因此 ,深入研究异常低压的形成机理及与油气分布的关系 ,同样重要和不容忽视。本文介绍了异常低压的概念、特征和分类 ,详细分析了异常低压的形成机制 :地层剥蚀卸载后的弹性回返( 反弹 )作用、流体的供排不平衡、轻烃的扩散作用、断裂和不整合面的压力释放作用、渗透作用和温度变化等 ,最后论述了异常低压与油气分布的关系。

**关键词** 异常低压( 负压 ) 剥蚀卸载 弹性回返 油气分布

## The Anomalous Low Pressure( Negative Pressure ) and Hydrocarbon Accumulation in a Sedimentary Basin

JIN Bo<sup>1)</sup> LIU Zhen<sup>1)</sup> ZHANG Rongxin<sup>2)</sup> GUO Feng<sup>2)</sup>

1) Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation , Petroleum University , Beijing , 102249 ;

2) Changqing Department , China National Logging Company , Changqing , Gansu , 745100

**Abstract** With the development of petroleum exploration , many abnormal overpressure fields and negative pressure fields were found in the world. The negative pressure and hydrocarbon accumulation are quite important in oil and gas exploration. In this paper , the authors describe the basic concept , features and classification of negative pressure and discuss in detail its formation mechanism , which includes rebound with uplifting and erosion , low recharge rates of liquid , diffusion of unstable hydrocarbon , pressure release of the fault and surface unconformity , permeable strata and decrease of temperature. The mechanism of negative pressure in oil-and gas-bearing basins and the relationship between negative pressure and hydrocarbon accumulation are also discussed. The formation of negative pressure compartments controls petroleum migration and accumulation. The negative pressure system indicates that the oil and gas pools are secondary. It opens a new exploration field for secondary oil and gas reservoirs and deep basin gas in the sedimentary basin.

**Key words** low pressure( negative pressure ) uplift and erosion rebound hydrocarbon accumulation

在沉积盆地中 ,作用于孔隙流体上的地层压力通常表现为 3 种类型 :常压( 等于静水压力 )、超压( 大于静水压力 )和低压( 低于静水压力 ) ,后二者统称为异常压力。孔隙流体压力高于静水压力时称为超压 ,其上限为地层破裂压力( 相当于最小水平应力 )可接近甚至达到上覆岩层压力( Thomas 等 , 2001 )。世界上油气分布与超压有着密切关系 ,超压

油气田约占全球油气田的 1/3 左右 ,超压对油气分布有着重要的控制作用( 杜棚等 ,1995 )。但随着油气勘探程度的加深和油气运聚理论研究的不断深入 ,在全球很多地区已经发现了低压油气田的存在。同时国内外有很多实例说明 ,烃类储层尤其是气态烃储层压力与含水饱和度高的异常高压的气藏不同 ,而呈现出低于静水压力的负压。例如加拿大阿

尔伯达盆地西部气藏具有明显的低压现象 ;美国 Hgoton 负压大气田 松辽盆地北部东区的扶杨油层和其东南缘的十屋断陷中的天然气聚集区发育 3 个地层流体低压区(楼章华等 ,1996 ) 鄂尔多斯盆地中部奥陶系顶风化壳负压气藏(华保钦等 ,1994 ) 吐哈盆地台北凹陷浅层负压流体封存箱(李延钧等 ,1999 ) 渤海湾盆地东营凹陷边缘的浅层低压气藏(张春生等 ,1997 ) 及惠民凹陷的异常低压。因此 ,研究异常低压的成因、分布特征及对负压异常环境下独特的油气运聚油气机理和成藏模式 ,对于研究含油气盆地的油气分布规律和油气勘探及评价有着重要意义。

# 1 异常低压的特征与分类

## 1.1 异常低压的特征

相对于静水压力 ,异常低压是指作用于沉积盆地地层孔隙空间的流体压力低于静水压力或压力系数小于 1 的地层压力 ,也称负压(图 1)。异常低压除压力梯度明显降低(压力系数小于 1)外 ,由于超压实(或过压实)作用 ,与欠压实作用相反 ,泥岩的声波传播时间随深度增加而明显减小 ,泥岩的密度随深度增加而增大。异常低压多位于浅部地层 ,具有异常低压特征的构造圈闭中断层都比较发育。

## 1.2 异常低压的分类

异常低压的分类 ,各种分类标准意见不一。国外以压力系数小于 0.96 为低压异常(美国 EXXON 公司) ,前苏联以 0.8 小于  $P_K$ (压力系数)小于 1.0 的为低压异常 ,小于 0.8 为异常低压。国内常以 0.9

为界限 ,0.75 小于  $P_K$ (压力系数)小于 0.9 称为低压 ,小于 0.75 为超低压。依照国外的分类标准统计 ,美国德克萨斯 100 多个油气田中 ,低压油气田占 18.5%。全世界 160 个油气田统计分析 ,发现低压油气田占 11.7%。依据国内分类标准 ,对世界上 210 个大中型气田的统计分析可以看出 ,低压异常占 15.7%(杜棚等 ,1995 )。

# 2 异常低压的形成机理

一般认为异常低压主要发育于一些致密气层砂岩和发生较强烈剥蚀的盆地。地下深部地层的低压系统也是封闭系统 ,由于地层受构造拉伸或其他作用使孔隙空间扩容 ,流体压力下降 ,但同时由于体系的封闭性 ,其他含水体系中的流体又补充不过来 ,就形成了负压。

Kenneth 等(1988)总结了不同学者对低压成因的研究成果(楼章华等 ,1999 ) ,主要有 :①地形高差引起的地下水流动 ;②通过半渗透页岩的化学作用 ;③剥蚀卸载引起的应力和地温下降作用 ;④地下水流动过程中由于物性变好流出速度大与流入速度 ;⑤埋深增加 ;⑥构造抬升。张义刚(1991)认为负压是流体的冷却收缩特别是气相冷凝为液相 ,部分流体排出封存箱外 ,由于地壳抬升而导致孔隙体积膨胀的结果。除上述原因以外 ,郝石生(1993)研究认为由于天然气的运聚动平衡 ,抬升作用抑制了生烃过程 ,导致烃类散失量大于烃类补给量 ,结果造成地层压力低于静水压力。

异常低压是受多种条件影响 ,多种因素综合作用引起流体动力场演化和形成的结果。

## 2.1 地层剥蚀卸载后的弹性回返(反弹)作用

在沉积盆地发生大幅度抬升剥蚀的地区 ,由于构造抬升地层升高引起的流体向下倾方向泄露、负荷减少而引起的孔隙反弹(Swarbrick ,1998 ;Corbet ,1992 ;Neuzil ,1983 ;Hunt ,1995 )特别是后期沉降幅度不足以弥补剥蚀厚度的情况下 ,由于剥蚀卸载后的弹性回返 ,使得地层和岩石的孔隙度增大导致低压异常(李延钧等 ,1999 ) ,同时由于岩石冷却造成的气相收缩或凝结也起到一定的加速低压产生的作用。另外 ,由于在遭受剥蚀后 ,盆地迅速沉降 ,上覆层位沉积厚层或巨厚层的泥岩起到封闭作用 ,在剥蚀面上、下形成两个独立的系统 ,彼此间不能进行物质交换和流体的流动 ,形成的低压得以保存(图 2) ,而对于遭受剥蚀后 ,盆地沉降缓慢 ,粗碎屑大量供应和沉积下来 ,剥蚀面上、下互为开放系统 ,流体可以

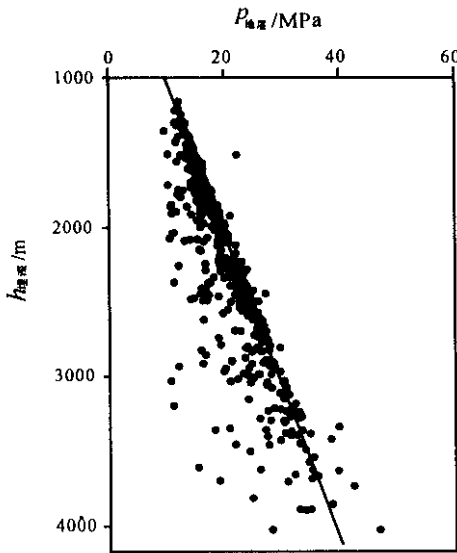


图 1 渤海湾盆地惠民凹陷压力系数与深度关系图  
Fig.1 The scatter diagram of pressure coefficient of the Huimin depression in the Bohai Bay basin

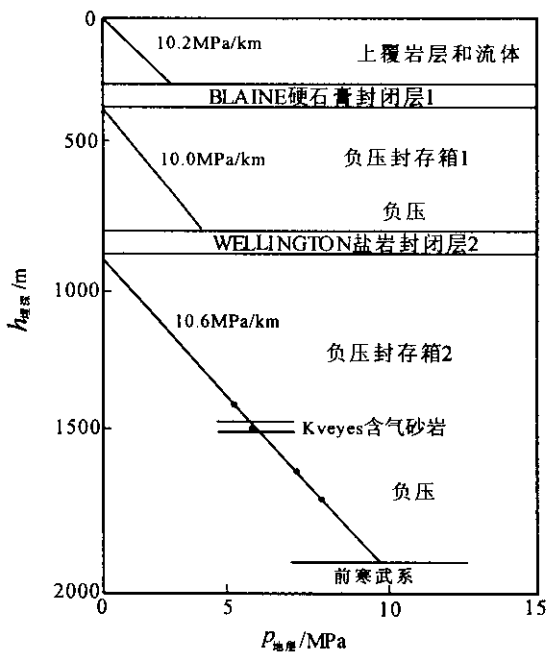


图 2 美国 Keyes 气田的地层压力与深度关系图  
Fig.2 Pressure vs depth in Keyes natural gas field in the US

进行物质交换和流动 ,这样下伏地层中的低压就难以维持和保存下来( 王宏语等 2002 )。因此 ,并不是所有地层抬升和剥蚀 ,都会产生异常低压。

2.2 流体的供排不平衡

地层中流体 ( 石油、水和天然气等 ) 从地层中排出后 ,会引起的地层压力的减小 ,而形成异常低压。同时由于生烃率的下降 ,在烃类散失率大于烃类生成率情况下 ,因非渗透性隔挡层的阻隔使流体无法充注到地层中 ,地下水下渗在深部受阻、减弱和消失 ,也会形成异常低压。阿尔伯达盆地中西部饱含烃和水的的海层明显的低压现象就是这种作用影响的结果( Karsten 等 2001 )。

2.3 轻烃的扩散作用

轻烃分子的扩散作用是一种普遍存在的由于存在着浓度梯度而发生的质量传递的自然现象。油气藏中的轻烃通常通过盖层发生扩散 ,引起油气的组成、物化性质等发生与油气运移分异相反的变化。在轻烃扩散十分强烈的地区 ,地层中易于形成异常低压( 刘晓峰等 2002 )。

2.4 断裂和不整合面的压力释放作用

由于沉积盆地地层中流体的生成、注入可以导致孔隙流体压力增高 ,相反 ,当流体运移或散失也会相应地导致压力降低。断裂系统和不整合面作为油气运移的输导系统和通道 ,油气沿着这些输导系统

发生运移、逸散及再分配 ,同时这些输导系统连通各种压力系统和环境 ,尤其是在连通着高压环境与静水压力环境的情况下 ,压力差会驱赶着油气发生幕式的运移。如果在没有外来流体充注或增压作用的情况下 ,油气藏的压力会逐渐降低至正常压力及低压( 刘晓峰等 2002 )。如中国东部渤海湾盆地断裂系统非常发育 ,许多低压系统就是上述作用形成的结果。

2.5 渗透和过压实作用

在有明显盐度差 ( 或盐度梯度 ) 的透镜体砂岩中 ,由于渗透性砂层发育且连通性好 ,深部地层水的盐度较高 ,而浅部盐度明显降低 ,有利于渗透作用的进行 ,常由高压异常逐渐过渡到低压异常( 李春光 , 1992 )。

过压实作用与欠压实作用恰恰相反 ,由于过压实作用使得地层岩石承担了本应由孔隙流体承担的部分上覆负荷 ,孔隙流体压力降低 ,导致异常低压的产生。尽管目前对这一压实作用本身的机理不是很清楚 ,但过压实作用在沉积盆地中却是实际存在的 ( 李延钧等 ,1999 )。吐哈盆地红南地区下第三系鄯善群下部和火焰山群上部的泥岩 ( 夹有砂岩 ) 出现 “ 过压实 ” 现象 ( 图 3 ) ,正对应其油气低压系统的顶板分布层位。

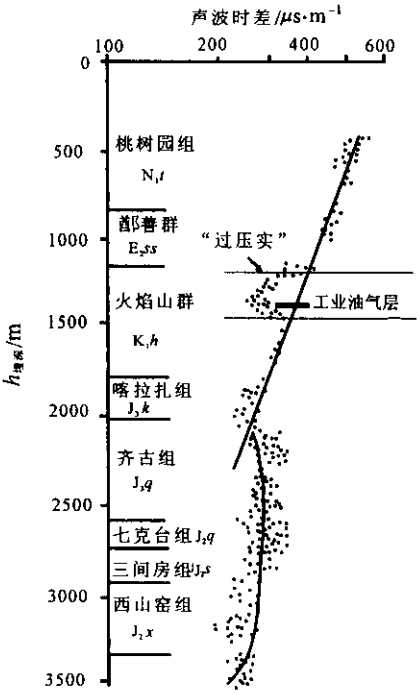


图 3 吐哈盆地红南 1 井泥岩压实曲线  
( 据李延钧等 ,1999 )

Fig.3 The compaction curve of Hongnan 1 well in the Turpan-Hami basin( from Li et al. ,1999 )

2.6 温度变化

构造抬升过程中温度和地温梯度的降低引起的流体收缩,导致地层压力和压力系数减小(夏新宇等 2001)。尤其是在地层封闭性较好或渗透率较低并没有明显的构造挤压的情况下,可以形成明显的异常低压。同时,地层岩石孔隙的反弹可能会更促进负压的形成。因此,温度降低也是造成异常低压的因素之一。

此外,断裂与岩性封闭作用也可能形成异常低压。在厚层泥岩中所夹的砂岩透镜体油藏,原来埋藏较浅,原始地层压力较小。后来,在断块升降运动作用下,油藏所在断块下降,深度变大,但原始地层压力仍然保持下来,形成低压异常。这种现象在中国东部裂谷盆地中断裂发育的地区是常见的(张厚福等, 1999)。

3 异常低压与油气的关系

3.1 低压油气藏

在国内外已发现的低压油气藏中,多数为饱含天然气的储层,地层中不含流动的水或产水量很低。在充满气体的储层中,孔隙流体压力理论上受理想气体定律的控制,即随埋深增加,在封闭的情况下,气体体积不变,绝对温度增加与压力增加之比为常数。随埋深增加,压力增量常低于正常静水压力梯度下的压力增量,最终易形成低压。但含气储层出现低压受多种因素影响,主要取决于储层与周围的连通情况。如果是隔离的刚性体,压力系数随埋深增大而降低,可出现负压(Barker, 1987)。如果是开放系统,随埋深增加,压力仍为静水压力。如果是隔离的压实系统,压力有向静岩压力值靠近的趋势。与此同时,气体生成作用也能导致异常高压的形成。

3.1.1 低压油藏 低压常规油藏、稠油油藏在中国

东部东营凹陷比较发育,低压稠油油藏发育在浅部地层(2 000 m 以上),而常规油藏则集中发育在大于 2 000 m 的深部地层(刘晓峰, 2002)。异常低压油藏通常是油气运聚成藏后,油气发生逸散和再分配的结果,多属于次生油气藏。这也说明这些油藏受到破坏流体压力场发生变化最终导致异常低压的形成。

3.1.2 深盆气藏 深盆气藏常具有异常低压的特点,且埋藏越深,偏离静水压力的负压值越大。深盆气的异常低压受多种因素影响,气柱代替水柱(相同高度),气体扩散,渗透作用都是形成其异常低压的机制(李明诚等, 2001)。异常低压是深盆气形成过程中压力旋回的一个阶段,深盆气生长阶段,由于烃源岩的排气量须大于天然气在致密储层中水溶、扩散、吸附等作用的散失量,流体压力必然大于静水压力而具有异常高压,生烃膨胀压力导致的异常高压驱使天然气在致密储层中运移直至其小于毛细管阻力,天然气运移终止后,深盆气进入保存或散大于供的萎缩阶段,其异常高压逐渐降低至静压力及异常低压。深盆气的压力旋回呈现出生长阶段的正常静水压力到异常高压,稳定阶段的正常压力到异常低压,萎缩阶段的异常低压,并最终可能演变为正常压力(图 4)。

3.2 低压封存箱

沉积盆地常具有由封闭层分割的异常压力系统(Hunt, 1990),即流体压力封存箱。流体压力封存箱有 2 种类型:①为超压封存箱,孔隙流体支撑盖层及上覆岩石-流体的重力;②为低压封存箱,岩石基质支撑盖层及上覆岩石-流体的重力。渤海湾盆地东营凹陷发育明显的低压封存箱:河 31-73 井浅部的低压封存箱比深部的低压封存箱明显(图 5-a);史 3-2-4 井 2300 m 之上为常压系统,2300~3100 m

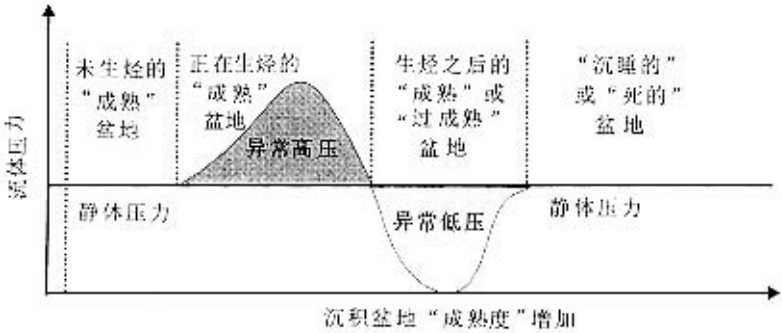


图 4 深盆气压力旋回示意图(据 Meissner, 1987)

Fig. 4 The pressure structure and stage of deep basin gas( after Meissner, 1987)

为低压系统 ,3 100 m 之下为超压系统。从浅部到深部呈现常压-低压封存箱-常压-超压封存箱的组合特征( 图 5-b ;刘晓峰等 ,2002 )。低压封存箱多属于次生油气封存箱 ,一般发育于浅层部位( 小于2 500 m ) ,在箱内烃源岩成熟度低 ,本身缺乏有效烃源岩的情况下 ,油气充注多靠混相涌流或断裂间歇性的开启 ,沟通上、下层位的断裂既是油源断层 ,同时又控制着浅层低压箱体的封闭。特别是封存箱体封闭后 ,油气等流体的充注也相应停止或充注率小于扩散率 ,不具备增压地质条件。这对于油气成藏后保持到现今的异常低压有着重要意义。因此 ,低压油气藏在成藏过程中的油气运聚与异常低压的成因及低压封存箱的形成及演化有着密切的关系 ,低压封存箱体的形成演化过程控制着油气的运聚方式和聚集成藏部位。

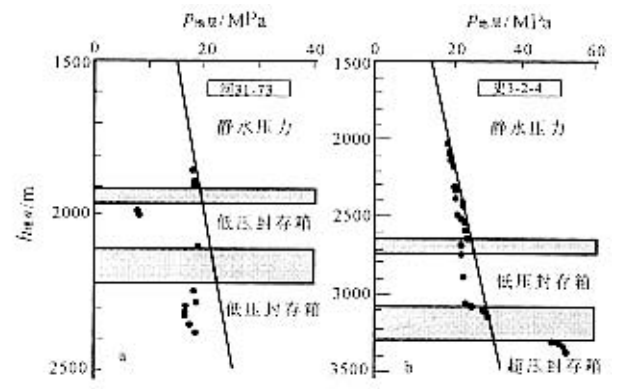


图 5 渤海湾盆地东营凹陷低压封存箱  
( 据刘晓峰等 2002 )

Fig.5 The underpressure compartments  
of the Dongying depression in the Bohai Bay basin  
( from Liu et al. , 2002 )

沉积盆地中异常低压与低压封存箱的存在 ,多数低压系统是油气成藏后由于地层剥蚀弹性回返、流体供排不平衡、断层和不整合面的释放、天然气的扩散作用、渗透作用及地层温度降低等引起油气再逸散造成的 ,反映油气藏受到改造 ,多为次生油气藏。同时 ,也为寻找次生油气藏和深盆地等非常规油气藏提供了新的思路和方向。

4 结论

( 1 ) 沉积盆地异常低压的形成不是一种静止的现象 ,而是盆地压力系统演化过程中的动态现象 ,异常低压的形成机制主要有地层剥蚀卸载后的弹性回

返( 反弹 )作用、流体的供排不平衡、轻烃的扩散作用、断裂和不整合面的压力释放作用、渗透作用和温度变化等。负压的形成不是上述某个单一因素的作用 ,而是多种地质因素综合作用的结果。

( 2 ) 异常低压与油气有着密切的关系 ,低压系统也可以发育各种油气藏。异常低压流体封存箱的形成演化及负压的成因对低压油气藏的运聚成藏起着重要的控制作用。低压封存箱体的内部结构及盆地的流体流动样式对于预测和研究低压油气的分布有着重要意义。

参 考 文 献

杜棚 ,郑洪印 ,焦秀琼 .1995. 异常压力与油气分布 .地质前缘 ,2( 3 ~ 4 ) :138 ~ 139 .  
华保钦 ,林锡祥 ,杨小梅 .1994. 鄂尔多斯盆地古生界负压气藏及运移 .沉积学报 ,11( 2 ) :105 ~ 107 .  
郝石生 .封存箱 .1993. 中国海上油气( 地质 ) .中国海上油气地质 ,7 ( 1 ) :61 ~ 69 .  
楼章华 ,卢庆梅 ,赵庆吉等 .1996. 松辽盆地十屋断陷水动力场与低压气藏的关系 .石油与天然气地质 ,17( 4 ) :323 ~ 324 .  
楼章华 ,高瑞祺 ,蔡希源等 .1999. 流体动力场演化与地层流体低压成因 .石油学报 ,20( 6 ) :27 ~ 28 .  
李延钧 ,陈义才 ,黄健全等 .1999. 吐哈盆地红南-红西地区油气负压系统成因 .西南石油学院学报 ,21( 1 ) :7 ~ 9 .  
刘晓峰 ,解习农 .2002. 东营凹陷低压系统的特征及成因机制 .石油与天然气地质 ,23( 1 ) :68 ~ 69 .  
李春光 .1992. 试论东营盆地高压油气藏的特征及找油意义 .石油学报 ,13( 1 ) :37 ~ 43 .  
李明诚 ,李先奇 ,尚尔杰 .2001. 深盆地预测与评价中的两个问题 .石油勘探与开发 ,28( 2 ) :6 ~ 7 .  
王宏语 ,康西栋 ,李军等 .2002. 松辽盆地徐家围子地区深层异常压力分布及其成因 .吉林大学学报( 地球科学版 ) ,33( 1 ) :41 ~ 42 .  
夏新宇 ,宋岩 .2001. 沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响 .石油勘探与开发 ,28( 3 ) :9 ~ 10 .  
张义纲等编著 .1991. 天然气的生成、聚集和保存 .南京 :河海大学出版社 ,154 .  
张厚福 ,方朝亮 ,张枝焕等 .1999. 石油地质学 .北京 :石油工业出版社 ,208 ~ 209 .  
张春生 ,李春光 .1997. 东营凹陷天然气藏类型及分布特征 .天然气工业 ,17( 4 ) :23 ~ 25 .

References

Baker C. 1987. Generation of anomalous internal pressure in source rocks ,migration of hydrocarbon in sedimentary basin .2nd IFP Explor ,Res. Conf. Caracas ( 15 ~ 19 ) :79 ~ 112 .

- Corbet T F , Bethke C M. 1992. Disequilibrium fluid pressures and ground water flow in the Western Canada sedimentary basin. *Journal of Geophysical Research* ,97( B5 ) :7203~7217.
- Du Xu ,Zheng Hongyin ,Jiao Xiuqiong. 1995. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation. *Earth Science Frontiers* ,2( 3~4 ) :138~139( in Chinese with English abstract ).
- Hunt J M. 1995. *Petroleum geochemistry and geology*( 2nd edition ). New York : Freeman 296~298.
- Hunt J M. 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressure fluid compartments. *AAPG Bull* ,74( 1 ) :1~12.
- Karsten Michael ,Stefan Bauchu. 2000. Fluids and pressure distributions in the forland-basin succession in the west-central part of the Alberta basin ,Canada :Evidence for permeability barriers and hydrocarbon generation and migration. *AAPG Bulletin* ,85( 7 ) :1231~1252.
- Hua Baoqin ,Lin Xixiang ,Yang Xiaomei. 1994. The underpressure gas reservoir and gas migration of Ordovician. *Acta Sedimentologica Sinica* ,11( 2 ) :105~107.
- Lou Zhanghua ,Gao Ruiqi ,Cai Xiyuan et al. 1999. The evolution of fluid dynamic field and the origin of subnormal pressure in Songliao basin ,China. *Acta Petrolic Sinica* ,20( 6 ) :27~28( in Chinese with English abstract ).
- Lou Zhanghua ,Lu Qingmei ,Zhao Qingji. 1996. Hydrocarbon fields and low-pressure gas pools , Song liao basin. *Oil & Gas Geology* ,17( 4 ) :323~324( in Chinese with English abstract ).
- Li Yangjun ,Chen Yicai ,Huang Jianquan et al. 1999. Formation of underpressured fluid compartments and its relations with shallow oil and gas accumulations :Hongnan-Hongxi area Turpan-Hami basin area. *Journal of Southwest Petroleum Institute* ,21( 1 ) :7~9( in Chinese with English abstract ).
- Liu Xiaofeng ,Xie Xihong. 2002. Origin and characteristics of under pressure systems in Dongying depression. *Oil & Gas Geology* ,23( 1 ) :69~69( in Chinese with English abstract ).
- Li Chunguang. 2001. China. *Acta Petrolic Sinica* ,20( 6 ) :37~43.
- Li Mingcheng ,Li Xianqi ,Shang Erjie. 2001. The two problems in the evaluation and prediction of the deep basin gas. *Petroleum Exploration and Development* ,28( 2 ) :6~7( in Chinese with English abstract ).
- Neuzil C E , Pollock D W. 1983. Erosional unloading and fluid pressures in hydraulically " tight " rocks. *Journal of Geology* ,91 :179~193.
- Wang Hongyu ,Kang Xidong ,Li Jun et al. 2002. The distribution of anomalous pressure in the deep zone of Xujiaweizi ,Songliao basin and its genesis. *Journal of Jilin University* ,32( 1 ) :41~42( in Chinese with English abstract ).
- 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 Pressure in Hydrocarbon Environments*. AAPG Memoir ,70 :13~34.
- Thomas Finkbeiner ,Mark Zoback ,Peter Flemings et al. 2000. Stress , pore pressure and dynamically constrained hydrocarbon columns in the South Eugene Island 330 field , northern Gulf Mexico ,AAPG Bulletin ,85( 6 ) :1007~1031.
- Xia Xinyu ,Song Yan. 2001. Temperature effects on geopressure during deposition and erosion. *Petroleum Exploration and Development* ,28( 3 ) :9~10.
- Zhang Chunsheng ,Li Chunguang. 1997. Gas reservoir types and distributive characteristics in Dongying sag. *Natural Gas Industry* ,17( 4 ) :23~25( in Chinese with English abstract ).