深层石油地质与勘探

谯汉生*　　李　峰

（中国石油勘探开发研究院，北京 100083）

摘　要　随着中浅层勘探程度的提高与科技水平的不断进步，勘探向深层领域延伸成为必然趋势。本文通过对深层油气藏的分析，总结了有利于深部油气藏形成的沉积盆地的动力学环境和温度—压力条件。认为被动大陆边缘盆地、前陆盆地或山间坳陷盆地、裂谷盆地等有利于形成深部油气藏；低温高压与高温高压系统对深层油气藏形成与分布起控制作用；与地层不整合有关的圈闭和异常高压带附近的有效储集体有利于深层油气藏的形成。并指出我国一些大型的沉积盆地，如准噶尔、塔里木、四川与渤海湾等，有丰富的深层资源和形成大中型油气田（藏）的地质条件。

主题词　油气勘探　沉积盆地　动力学　温度—压力系统　深层

随着石油工业的不断发展，科技水平的不断提高，许多大型沉积盆地的中浅层油气已基本探明，勘探难度加大。一个油气区要维持生机，勘探工作向深层领域延伸就成为发展的必然趋势。据不完全统计，世界上已有 57 个盆地和大区在大于 4000m 的深层中发现了具有工业价值的油气（C·П·马克西莫夫，1984）。在世界上已发现的 500 多个大油气田中，4000m 以下发现的大油气田（可采储量大于 6850×10^4t 和 850×10^8m^3）已超过 30 多个，分别占世界大油田和大气田储量的 7.8%与 3.1%（周庆凡等，1992）。

勘探实践表明，无论新区或老区，开展深部勘探都有着巨大潜力。很多接近枯竭的老油田，通过深层勘探打开了新局面，呈下降趋势的油气产量再次回升，如美国的二叠盆地和前苏联的格罗兹内等老油区。70 年代末至 80 年代初滨里海盆地发现田古兹超巨型油田，1991 年哥伦比亚科迪勒拉山前的亚诺斯盆地发现库西亚纳背斜大油气田，以及 1994 年乌兹别克的费尔干纳盆地在北部天山山前的逆冲带上发现深层高产井，这些油气勘探的重大发现都是加强深部勘探的结果。

从世界主要含油气盆地深层油气的形成与分布特点来看，影响深层油气形成与分布的因素很多，情况也比较复杂，但是起决定性作用的因素主要有：①沉积盆地的动力学环境及其在地史中的演化过程；②沉积盆地深部的温度—压力系统及其对烃源岩熟化程度、烃类运移效应、储层次生孔隙、裂缝发育程度及烃类相态的控制作用；③区域性封盖层对深层油气系统的保护作用；④有利于深层油气藏形成的圈闭条件等。

沉积盆地的动力学环境

沉积盆地动力学环境对沉积盆地的构造演化、古地理环境、沉积建造和盆地改造历史过程起决定性作用。因此，区分并研究沉积盆地的动力学环境，有利于探索沉积盆地的构造、沉积建造、改造和油气分布等一系列带根本性的问题。

1. 被动大陆边缘盆地

被动大陆边缘盆地大体上可分为以碳酸盐岩为主的古老被动大陆边缘和以碎屑岩为主的年轻被动大陆边缘两种类型。

1）古生代被动大陆边缘经隆起回返而后坳陷的沉积盆地

在早古生代或晚古生代，发育于地台边缘的被动大陆边缘普遍具有广布于陆坡及深水槽盆中缺氧的暗色泥页岩，以及陆架或台地边缘的生物碎屑灰岩、礁灰岩与碳酸盐岩台相沉积，烃源岩与储集岩的配置良好。它们经过多次的基底震荡与回返隆起，使古隆起区的储集体受到断裂与溶蚀作用改造，然

* 谯汉生，教授级高工，长期从事石油地质和油气勘探综合研究及科研管理工作。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

后经过稳定的坳陷下沉，沉积了厚层的盐岩、石膏与碎屑岩系，因而在盐下层系形成了良好生储盖组合与低温或低温高压的成藏体系，有利于深层油气藏的形成和保存。例如滨里海盆地（图1）、波斯湾盆地、二叠盆地和塔里木盆地等。

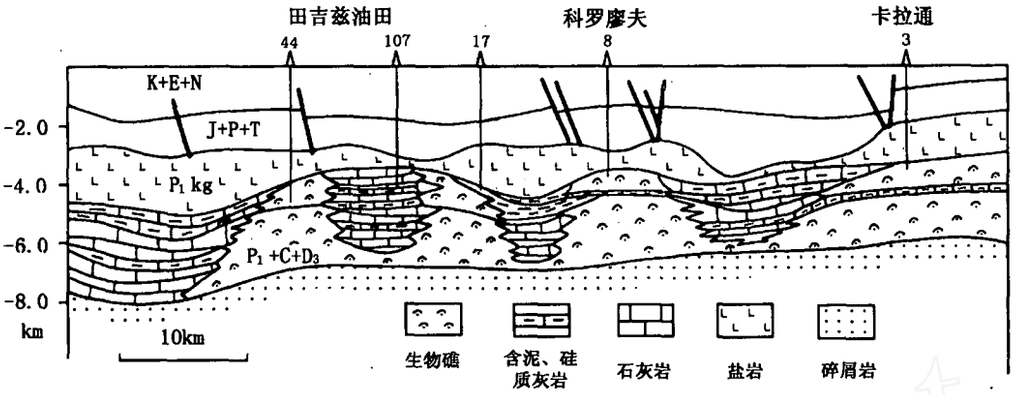


图1 田吉兹区域地质剖面

Fig.1 Profile section of regional geology in Tengiz

2）中、新生代发育三角洲的被动大陆边缘盆地

中、新生代陆缘裂谷与被动大陆边缘的复合盆地沉积了巨厚的碎屑岩、碳酸盐岩与盐岩。沉积中心由大陆架区向深海区迁移，大型三角洲沉积体系逐渐由陆向洋推进和下倾。由于沉积岩时代新，沉积速率较高和有多层盐岩分布，液态生烃窗深度范围较大（2000～9000m），并有大量的同生断层和塑性岩体（盐岩、泥页岩）活动产生的伴生构造，因而在深层有大量的油藏和凝析油气藏的形成和保存。例如墨西哥湾盆地（图2）。

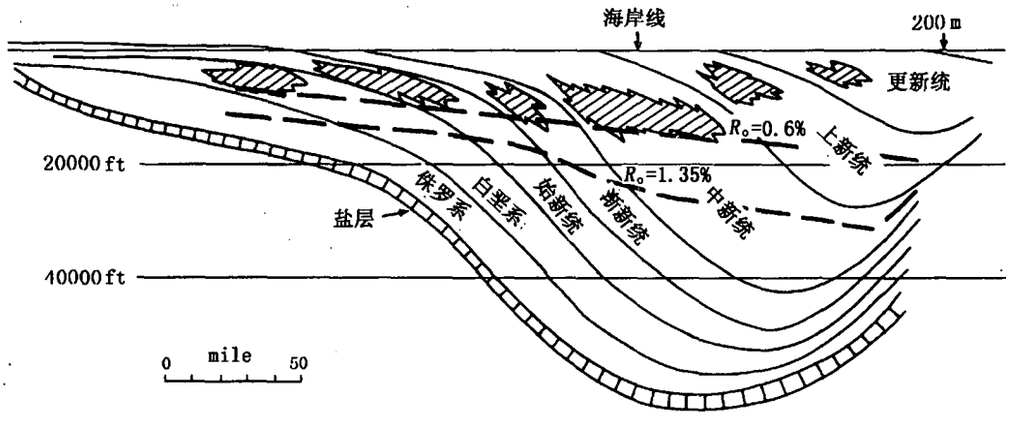


图2 墨西哥湾储集层沿横剖面分布示意图

Fig.2 Schematic map of the reservoir distribution along the cross section in Mexico Gulf

2. 前陆盆地或山间坳陷盆地

中、新生代以来，特别是第三纪以来，强烈沉降和快速沉积（>700m/Ma）形成大型前陆坳陷或山间坳陷沉积盆地。它们位于造山带前缘或造山带之间，盆地下伏地壳有逐渐增厚的趋势（一般地壳厚度大于40km）。盆地中占主体的沉积岩时代较新，甚至以上第三系与第四系的巨厚沉积为主（数千米到超过10km）。盆地内部大幅度下坳与非补偿性质的快速沉积，常形成巨厚的高孔隙欠压实泥岩。因此，在盆地内部，液态生烃窗的深度范围可以达到7～10km，有利于深层浊积体、泥底辟、盐背斜、断裂背斜等油气藏的形成和保存。例如南里海盆地与加利福尼亚的山间盆地等。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3. 裂谷盆地

中、新生代大型的裂谷盆地，一般经历过同裂谷期地壳伸展断陷的热体制和后裂谷期沉降坳陷的冷体制。在裂谷伸展过程中，基岩被改造成遭受过剥蚀淋滤的断块山或断垒山。裂谷中主要发育近岸水下扇、深水缺氧环境的暗色泥页岩、浊积砂体与碳酸盐岩等沉积。由于大型裂谷盆地地壳厚度较薄（一般小于30km），裂谷中存在巨厚（一般厚3～5km）的富含有机质泥页岩，它们受高温热催化作用迅速生成烃类，加上水热增压等作用，使地层孔隙流体体积膨胀，又不易排出，在裂谷中形成高温高压环境。异常高压造成生烃速度变慢，液态烃和气态烃分布的下限加深，使裂谷深部仍有相当多的油气藏存在，特别是基岩潜山油藏和浊积扇体岩性油气藏等更为发育。例如北海盆地、渤海湾盆地等。

沉积盆地的温度—压力系统

由于沉积盆地的地球动力学环境与热动力学条件的不同，在不同类型沉积盆地中往往具有不同的温度—压力系统。从深层油气藏形成与分布的特点来看，下列两种类型的温度—压力系统具有重要的意义。

1. 低温高压系统

低温高压体系常出现在地台边缘或内部先伸展断陷而后坳陷的复合盆地中。形成低地温的地质因素主要有：①地壳显著增厚（40～50km）；②沉积岩系巨厚（10～20km），特别是沉积岩系内部具有较多的不整合面或沉积间断面；③很少出现岩浆活动与火山活动；④沉积岩体中有厚层盐岩与泥质岩的封隔。这些条件均有利于形成低温高压系统。特别是当沉积层中有厚层盐岩与石膏层时，因为盐岩具高热导率，散热作用较强，从而使盆地内出现低地温。据D.Brien和Lerche（1987）研究，1000m厚的盐岩席可使地温下降10.5℃。

由于在低温高压体系中，源岩熟化的速率变慢，液态生烃窗的埋深增大，有利于石油与凝析气的生成。同时，储层次生孔隙发育带的深度范围变大，并有利于脆性形变和微裂缝发育，在厚层盐岩或泥质岩层的封盖下，地温梯度1.5～2.5℃/100m，压力系数1.1～2.0的低温高压系统有利于深层油气藏形成和分布，特别是油藏与凝析气藏。假定地面温度为20℃，地温梯度为2℃/100m，如果采用200℃为石油分布的下限，那么液态烃存在的深度可以达到8～9km左右（图3）。这就是世界上许多大型盆地在深6～7km仍可发现油藏的根本原因。

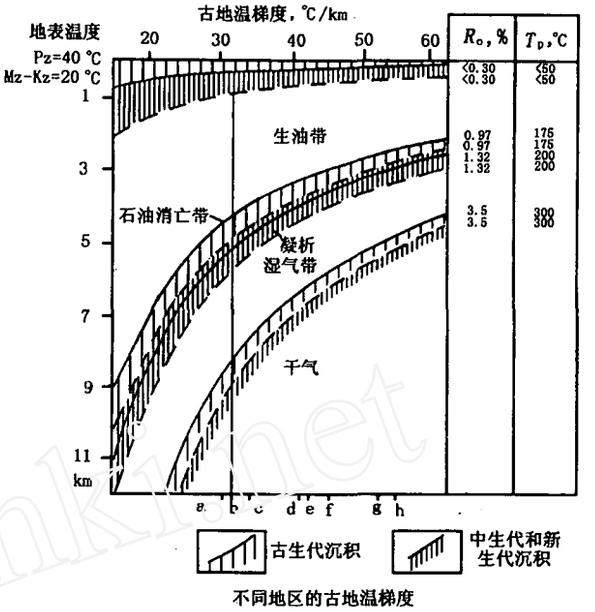


图3 油气藏相态纵向分布

Fig.3 Distribution of hydrocarbon phase in oil/gas accumulation with depth

a—南恩巴隆起北缘；b—滨里海向斜东缘；c—西西伯利亚北部；d—俄罗斯地台东南部；e—北乌斯秋特；f—西西伯利亚中部；g—北土克曼；h—伏尔加－乌拉尔区北部

前苏联学者通过对一些大型沉积盆地中有机质演化阶段与古地温关系研究后发现：油藏分布的古温度范围为70～200℃，R_o值为0.4%～1.3%。沉积岩中大部分石油储量（约80%）分布在95～175℃、R_o=0.5%～1.0%的范围内。

2. 高温高压系统

高温高压系统一般出现在裂谷盆地的深部。通常具有低密度、低速度、低电阻率、低热导率和高泥岩百分比、高温、高压、高孔隙度的特点。形成裂谷深部高地温的原因主要有：①裂谷伸展断陷对应上地幔隆起与地壳的减薄（<30km），无论是主动裂谷或较完善的被动裂谷都具有类似的地壳薄化效应；②多期次强烈的岩浆活动与火山喷发；③大型走滑伸展断裂引起地壳深部与中浅部地层流体的热对流，并出现幔源气异常；④沉积岩中有较高的放射性元素，放射性元素蜕变引起放热反应，如北海盆地上侏罗统启莫里粘土岩富含放射性元素，伽马值异常高；⑤裂谷中存在很厚的低热导率地层，

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如厚层高孔隙的泥页岩等。

裂谷内厚层泥页岩中的有机质在高温下逐渐熟化，生成大量的烃类物质，同时蒙皂石向伊利石转化脱出部分结晶水，这些都可以使孔隙流体体积膨胀而又缺乏输导层排出，从而形成高温高压带。异常的高温高压带一般通过间歇性自压裂排烃，向附近的压力过渡带或正常压力带排烃。所以，富含有机质的高温高压泥页岩层，既是生烃主带，在一定条件下也是排烃带。而其附近的相对低压的圈闭有利于油气的运移和聚集。在异常高压带中，膨胀的孔隙流体直接承受了部分上覆地层的压力，从而减轻了上覆地层静压对其中储层骨架的压实，使深部的储层仍可维持异常高的孔隙度，有利于油气的储集。

据美苏学者对墨西哥湾与南里海等盆地及作者对我国裂谷盆地研究，90%的石油分布在地层压力系数为1.1～1.7的范围内（图4）。可见砂岩储层中的石油分布，并非是异常压力愈高愈好，因为非常高的压力系数意味着储集体的封闭性更强，油藏规模可能变小，或者气油比更高。

原油类型	典型油气藏剖面	油气分布区实例	深度范围 m	地温 ℃	压力系数
稠油	港东油田	港东、港西、羊三木、赵东、孔店、羊二庄、孤岛、乐安、单家寺、孤东、埕东、林家堡、陽光、冷家、欢喜岭	700～2000	38～78	1.0
正常油	北大港（Es）	北大港、马西、港中、马棚口、高尚堡、胜坨、东辛、兴隆台、黄金带、任丘、河西务、文明寨	2800～4000	98～135	1.0~1.4
轻质油凝析油	板桥凝析油田	板桥、千米桥、板中深层、北堡深层、文东、文南、桩西	2700～4500	97～155	1.0~1.4
凝析气	白水头凝析气藏	白水头、马东东、白庙	3500～4700	115～156	1.4~1.7
	千米桥潜山凝析气藏	千米桥潜山、苏桥、兴隆台潜山、文安	2300～5000	96～154	1.0~1.3

图4　渤海湾盆地油气藏相态特征模式

Fig.4 The mode characteristic of hydrocarbon phase in reservoir of Bohai Bay basin

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

与地层不整合有关的圈闭和异常高压带附近的储集体有利于深层油气藏的形成

对于深层常见的低温高压系统或高温高压系统，有两大类圈闭非常值得重视：一类是地层不整合圈闭或地层构造复合圈闭，另一类是异常高压带附近的岩性圈闭。

1. 地层不整合或地层构造复合圈闭

盆地内的地层层序之间或盆地内地层与基岩之间常常有多期的不整合存在，而地层不整合的存在，意味着在盆地演化过程中，曾经出现过褶断隆起或沉积间断，在不整合面附近出现过相对低温、低压和储集性能改善的储集体（古岩溶作用、断裂构造作用等）。当这些古隆起被含有源岩层的沉积岩系超覆披盖时，古隆起上相对低温、低压和储集性能良好的地层不整合圈闭或地层构造复合圈闭，自然就成为生烃灶中高压排驱的烃类流体运聚的空间，有利于油气藏形成。

不整合事件既可以引起不整合面以下地层中古油藏的破坏，也可以形成地层不整合圈闭或地层构造复合圈闭，致使新油气藏的形成或新老油藏的复合叠置。滨里海盆地田吉兹油田的石炭系古油藏，在石炭纪晚期的不整合运动中遭受破坏，形成了许多软沥青。而后又在下二叠统海相泥页岩的披覆掩埋中形成地层不整合圈闭，下二叠统源岩生成的烃类向石炭系礁灰岩中充注，形成轻质原油聚集的大油田。准噶尔盆地的石西油田石炭系顶部不整合面附近的火山岩油藏，也具有类似于田吉兹油田的成藏历史。四川盆地威远气田则是早期古隆起上的古油气藏遭受破坏，后期震旦、寒武系在深埋中二次生烃，天然气在晚期形成的威远构造上聚集成藏的典型。渤海湾盆地千米桥等古潜山油气藏，大多数是印支--燕山期古隆起经早第三纪断层改造形成的地层构造复合圈闭（图5）。

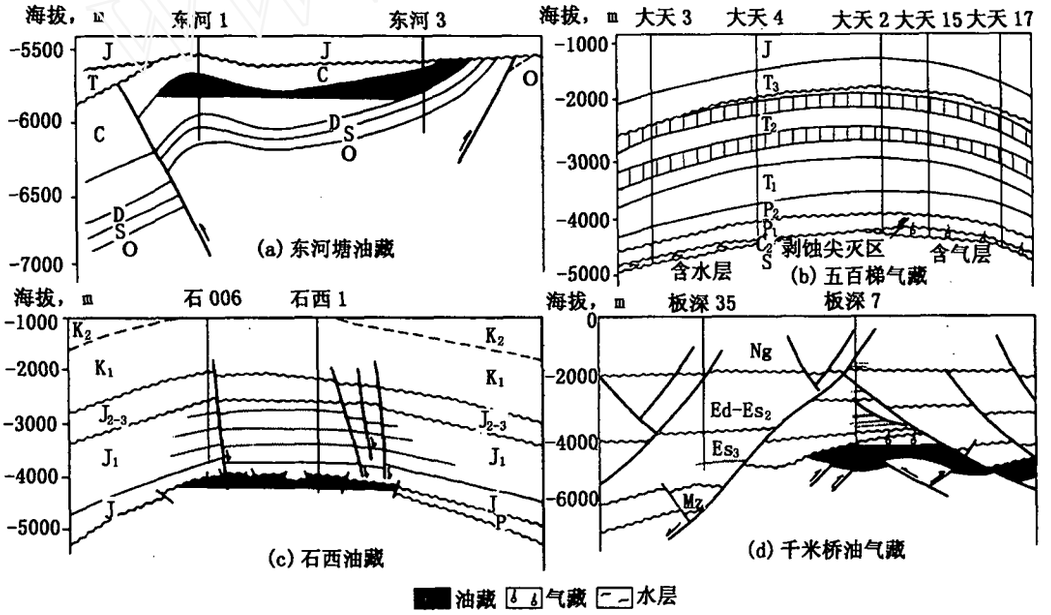


图5 地层不整合油气藏剖面示意图

Fig.5 Cross section of stratigraphic unconformity oil－gas reservoir

对深层发现的油气藏与成藏条件的综合研究表明，盆地深部的地层不整合圈闭或地层构造复合圈闭是形成大型油气田（藏）最有利的圈闭类型。经过古岩溶作用和断裂构造作用改造的古潜山（断垒型、逆冲型等）、具有生物礁、滩的碳酸盐岩台地、截顶的背斜构造等都是油气聚集的有利圈闭。

2. 异常高压带附近特殊储集体的岩性圈闭

异常高压带的形成主要是由于沉积层深埋，富含有机质的泥岩热演化生烃、粘土矿物脱出结晶水和水热增压等原因，引起地层孔隙流体体积膨胀，

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而又缺乏区域性的输导系统泄流减压的结果。因此，在一般情况下，常出现异常高压带、源岩生烃主带、储层次生孔隙发育带和岩性油气藏富集带等，在空间上复合对应分布的特点。

由于高温高压的存在，源岩一方面受热熟化生烃，一方面受高压封闭，生成的烃不易排出，从而使源岩中所含的烃类（粘土矿物颗粒吸附、水中溶解或游离状态等）呈饱和或过饱和状态。这就是说，高温使源岩有机质熟化生烃，而高压封闭又使源岩有机质熟化生烃过程受到抑制，大大减缓了源岩有机质熟化生烃排烃的速率。因此，在高温高压条件下，很深的部位仍有液态烃或气态烃的产出。同时，也存在具有异常孔隙流体压力支撑的储集空间。所以，在具有高温高压系统的深层，常有异常高压的岩性油气藏产出（图6）。可见，对异常高压带和异常高压带附近储集体的研究和预测，是深层石油地质综合研究与油气勘探的关键之一。

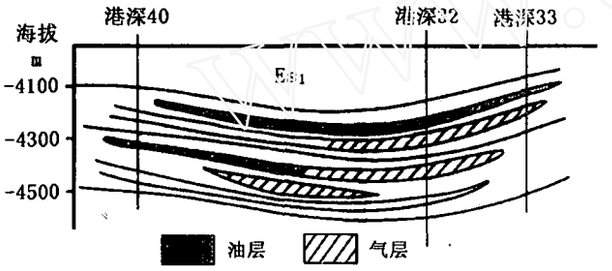


图6　渤海湾盆地港深32井岩性油藏剖面图

Fig.6 Profile section of well Gangshen－32 oil reservoir in Bohai Bay basin

在深层，具有异常孔隙流体压力的扇三角洲、水下扇（近岸的或远岸的）、重力流水道砂体、生物礁体、生物碎屑灰岩、泥质白云岩、白云岩、火山岩体（酸性、中性、基性或浅层侵入）等，如果规模较大（单个油藏或多个油藏集合体），储集与渗流能力较好，它们都是深层油气勘探的重要目标。

结　论

（1）受地壳变动控制的沉积盆地性质与沉积岩相古地理的变迁，从根本上决定了一些沉积巨厚的大型沉积盆地，在不同的地史阶段形成了性质不同的构造—沉积体系。不同性质构造—沉积体系的叠加复合，使沉积盆地深层具有与中浅层不同的成烃与成藏体系。

（2）在被动大陆边缘盆地、裂谷盆地、前陆盆地与复合盆地中，当盆地深层有生烃灶、厚层盐岩与泥页岩封隔及大型储集体存在时，有利于深层油气的生成与运移聚集，并可形成大型油气田（藏）。

（3）盆地深层的低温—高压系统或高温—高压系统，使有机质生烃熟化的速率变慢，有利于液态窗和生烃主带深度范围的扩大，有利于高压孔隙流体对储集空间的支撑，有利于封存箱内油气藏的形成。

（4）以潜山或潜山内幕为核心的地层或地层构造复合圈闭，以浊积扇体、礁体、火山岩体为主的岩性圈闭，以盐背斜、断块为主的构造圈闭等是深层有利的含油气圈闭。

（5）我国一些大型的沉积盆地，如准噶尔、塔里木、四川与渤海湾等，有丰富的深层资源和形成大中型油气田（藏）的地质条件，具有良好的勘探前景。

参考文献

1. C·П·马克西莫夫等著，胡征钦译．深层油气藏形成与分布．北京：石油工业出版社，1988
2. A·H·索罗托夫等著．对深层油气勘探前景的预测．1989
3. 中俄联合项目组．深层油气储集层与相态预测．北京：石油工业出版社，1992
4. P·Г·萨姆维洛夫著，王雅茹译．深层烃矿藏的形成和分布．石油地质信息，1998，2
5. Leach W G·Maximum hydrocarbon window determination in south Louisiana. Oil and Gas Journal，1993
6. George Dickinson. Geological Aspects of Abnormal Reservoir Pressure in Gulf Coast Louisiana. AAPG Bulletin，1953，Vol.37，No.2

（收稿日期：2000－04－10）

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net