

文章编号: 0253- 9985(2004) 01- 0075- 06

松南下白垩统天然气成藏主控因素与成藏规律

何兴华

(中国石化东北分公司勘探开发研究院, 吉林长春 130062)

摘要: 通过总结近年来的油气勘探开发成果, 阐述了松辽盆地南部白垩统天然气成藏的基本石油地质条件, 即以湖相暗色泥岩及煤系地层为源岩, 储集体类型以水下扇三角洲和三角洲相砂体为主, 局部或层间盖层对下白垩统中天然气的聚集形成了有效的封盖。在纵向上, 划分出下部、中部、上部 3 个天然气成藏组合, 中、上部成藏组合在成因上依附于下部成藏组合, 是下部组合气藏经改造破坏后再次运移的结果。烃源、构造、圈闭和保存条件是下白垩统天然气藏形成及分布的主要控制因素。平面上, 下白垩统天然气聚集以断陷为中心, 呈相对独立的含气单元, 在断陷内, 气藏从断陷中心至分隔断陷的凸起带呈气 → (油) 气 → 油环带分布; 纵向上, 天然气富集于 3 个层位, 即中部组合的泉头组下部的农安气层、登娄库组的小城子气层及下部组合中的营城组五家子气层, 具有跨越式多期成藏的特点。

关键词: 松辽盆地南部; 下白垩统; 天然气; 成藏规律

中图分类号: TE112. 41

文献标识码: A

An analysis of main control factors and accumulation patterns of gas reservoirs in Lower Cretaceous in southern Songliao basin

He Xinghua

(Exploration and Production Research Institute of Northeast Company, SINOPEC, Changchun, Jilin)

Abstract: This paper discusses the essential petroleum geological conditions of gas accumulations in the Lower Cretaceous in Southern Songliao basin based on the achievements got in exploration and development in recent years. Source rocks are lacustrine dark mudstone and coal measure strata, reservoir rocks are mainly sandbodies of subaqueous fan delta and delta facies, and local and interlayer cap rocks constitute effective seals of gas accumulations in the Lower Cretaceous. Vertically, there exist three reservoir combinations (lower, middle and upper), of which the middle and upper reservoir combinations are the result of modification and remigration of hydrocarbons in the lower combination. Hydrocarbon source, structure, trap and preservation conditions are the main factors controlling gas accumulation in the Lower Cretaceous. Laterally, gas accumulations in the Lower Cretaceous are separately distributed in fault depressions and become several gas-bearing units. Hydrocarbons in the fault depressions are characterized by their annular distribution, i. e. gas zone, oil & gas zone and oil rim are successively distributed from the center of fault depression to the swell at the boundary. Gas are enriched vertically in three horizons, i. e. Nong'an gas horizon in lower Quantou Formation, Xiaochengzi gas horizon in Denglouku Formation and Wujiazi gas horizon in Yingcheng Formation. All of them are characterized by cross-over and multistage accumulations.

Key words: Southern Songliao basin; Lower Cretaceous; natural gas; accumulation pattern

近年来随着对松辽外围及深部层系勘探和研究的深入, 在下白垩统断陷中发现了孤家子、八屋、双坨子、布海、秦家屯等数个天然气田和油气

田^[1, 3, 6~9]; 在某些深凹凸起带的上侏罗统火山岩中也获得了工业气流, 这些成果标志着松南下白垩统泉头组以下中深部层位油气勘探取得了突破

基金项目: 国家“九五”攻关项目 (96- 110- 06- 03)

作者简介: 何兴华, 男, 38 岁, 教授级高级工程师, 油气勘探

收稿日期: 2004- 01- 09

性进展。本文总结了已有的勘探开发成果,着重探讨松南中深部层位的天然气成藏主控因素及成藏规律。

1 基本石油地质特征

松辽盆地具有下断上拗的叠置结构,下白垩统是下伏断陷构造层的主体,在第二松花江以南地区(即本文所称的松南,构造单元上包括东南隆起区、中央拗陷区南部、西南隆起区等),下白垩统埋深在1 500~6 000 m,分布于广泛发育的分散断陷盆地中,层序上包括沙河子组(K_{1sh})、营城组(K_{1yc})、登娄库组(K_{1d})和泉头组(K_{1q})。已有研究证实,以断陷充填方式沉积的沙河子组和营城组暗色泥岩及煤系地层是东南隆起区的十屋断陷及中央拗陷区的长岭断陷下白垩统油气的主要源岩^[1],登娄库组下部的暗色泥岩在局部地区也可作为有效源岩(图1)。松南下白垩统源岩总的特

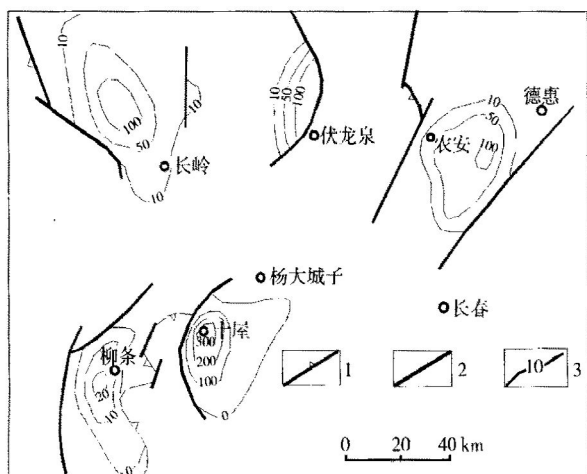


图1 松辽盆地南部断陷烃厨分布图

Fig. 1 Distribution of hydrocarbon kitchens in fault depressions in Southern Songliao basin

1—地层尖灭线;2—断层;3—生气强度等值线

征是累计厚度大,有机碳含量较高,可溶烃含量低,转化率低,有机质类型以Ⅱ_B-Ⅲ型为主。由于它们沉积于相对孤立、由控盆断裂所限定的断陷盆地内,因而断陷的分割性决定了烃厨(有效烃源岩发育区)的分割性。每个断陷盆地均构成一个独立的生烃单元。由于构造与沉积环境不同,其烃源岩发育特征不同,它们的生烃潜力有一定差异。可划分出3类源岩:Ⅰ类为欠补偿型,生气强度为 $20 \times 10^8 \sim 160 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,折算SPI值为

$2 \sim 16 \text{ t/m}^2$,存在于十屋断陷中;Ⅱ类为补偿型,如长岭、德惠、伏龙泉断陷源岩,生气强度为 $20 \times 10^8 \sim 90 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,折算SPI值为 $2 \sim 9 \text{ t/m}^2$;Ⅲ类断陷为超补偿型,如柳条、社里、哈拉海、榆树、乾安、孤店等断陷源岩,生气强度为 $20 \times 10^8 \sim 40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,折算SPI值为 $2 \sim 4 \text{ t/m}^2$ 。上述3种类型断陷盆地的生烃潜力,大致可与Gerard Demaison^[2]分类图中3种类型位置相当,分别为高SPI、中等SPI、低SPI。这些源岩演化程度一般较高,断陷中心部位一般为高成熟-过成熟,断陷斜坡部位也普遍为成熟-高成熟,因而天然气的勘探前景较油好。

在本区下白垩统已发现多个天然气产层。典型的有杨大城子气层(代号Y,产于泉头组三段)、农安气层(代号N,产于泉头组一、二段)、小城子气层(代号X,产于登娄库组)、五家子气层(代号W,产于营城组)。储集体类型有水下扇三角洲和三角洲相的河道砂、砂坝及席状砂,部分浅湖相滩砂体。储层的空间分布及物性具有非均质性强、横向连续性差、单层厚度薄的特点。总体上,上部的杨大城子气层(Y)物性为最好,其次为农安气层(N),孔隙度一般在10%以上,而小城子气层(X)及以下油气层位的储层,成岩作用强,物性差,孔隙度一般小于10%,有的甚至低于5%,属低孔渗致密非常规储层,产层多需加砂压裂才能投产。

研究表明,局部盖层或层间盖层对松南下白垩统天然气形成了有效的封盖。如下白垩统泉头组二段、三段上部的河道间湾泥岩是杨大城子气藏的主要封盖层。由于这些盖层分布范围小,泥岩纯度低,厚度也薄,加上在白垩纪末期区域构造反转作用造成小断裂的发育,因而只能封盖住常压和偏低压气藏,而且单个气藏规模也较小。迄今为止尚未发现压力系数在1.1以上的高压气藏。

2 成藏组合划分

根据储盖层相互匹配关系,考虑天然气的来源,在松南下白垩统中划分出下部、中部、上部3个成藏组合。

2.1 下部成藏组合

下部成藏组合以沙河子组和营城组深湖-半深湖相暗色泥岩为源岩和盖层,水下扇、扇三角洲砂体为储层构成的近烃源自生自储式成藏组合,主要产层是五家子气层(W)。该套成藏组合全区

分布广泛, 储量蕴藏丰富, 被揭示的地区有十屋断陷四五家子构造、八屋构造、秦家屯构造及北部陡坡区、德惠断陷农安构造、伏龙泉断陷北高点、长岭凹陷的东岭构造等。

该组合油气层埋深大于1 600 m, 一般在2 000 m以下。储层类型为低孔渗类致密储层, 油气自然产能难以达标, 须压裂改造, 开采难度大。

2.2 中部成藏组合

中部成藏组合以登娄库组和泉头组一、二段浅湖相及河流相的三角洲砂岩为储集岩, 浅水湖相三角洲平原泥岩为盖层, 天然气来源与下部组合同源。目前松南地区主力天然气产层小城子气层(X)和农安气层(N)就包含在这一组合中。

该组合储层埋深约为900~1 600 m, 不同构造部位的成岩作用差异较大, 储层非均质性较强, 中高-中低孔渗, 为常规储层向致密储层过渡的储层类型。但登娄库组顶面为古剥蚀面或局部不整合面, 长期风化淋滤, 物性较好。以十屋断陷为例, 孔隙度为5.8%~21.7%, 渗透率 $56 \times 10^{-3} \sim 71 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.3 上部成藏组合

上部成藏组合以泉头组三、四段河流相砂岩为储层, 河道间泥岩为盖层。埋深为200~1 500 m。主要产层有农安气层(N)及杨大城子气层(Y)。天然气来源于断陷中央部位的下白垩统源岩, 通过垂向断层、裂隙、横向不整合面及砂体呈阶梯状运移至泉头组三、四段储层中。储层岩性以滨浅湖及河流相中、细、粉砂岩为主, 部分为粗砂岩及含砾中-粗砂岩, 成分成熟度低, 结构成熟度中等-较高。埋藏较浅, 物性好, 孔隙度平均为20%~30%, 渗透率变化较大, 为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 并且平面上分布稳定。

该组合盖层有两套, 一是以青山口组湖相、滨浅湖相泥岩构成的盖层, 具有覆盖整个断陷的特点, 但松辽盆地南部已处于松辽大湖盆沉积边缘相带部位, 除长岭地区乾安凹陷一带为封盖性能优越的暗色泥岩外, 其他断陷区多为杂色泥岩夹劣质油页岩沉积。另一套为断陷内局部直接盖层, 由泉头组内部的河流相红色泥岩构成, 除泉头组三段上部泥岩分布较为稳定, 连续性较好以外, 其他均表现为厚度变化大, 横向连续性差。

上、中、下部3个组合中的天然气均来源于下部组合中的源岩, 因而中、上部组合与下部组合具

有气藏成因上的联系。中、上部成藏组合中的天然气藏是承接中、下部气藏改造破坏后二次乃至三次运移而形成的次生气藏。

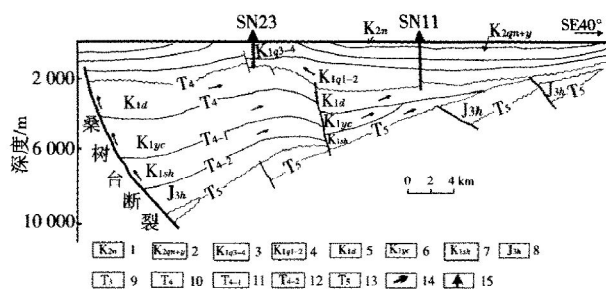


图2 松南十屋断陷油气输导作用与油气运移方向剖面图

Fig. 2 Diagram showing hydrocarbon migration directions across Shiwu fault depression in Southern Songliao basin

1—嫩江组; 2—青山口组加姚家组; 3—泉头组三、四段; 4—泉头组一、二段; 5—登娄库组; 6—营城组; 7—沙河子组; 8—火石岭组; 9—登娄库组顶面; 10—营城组顶面; 11—沙河子组顶面; 12—火石岭组顶面; 13—基底面; 14—油气运移方向; 15—钻井

3 主控因素

3.1 烃源

松辽盆地南部勘探实践证明, 下白垩统断陷油气发现程度直接与其资源量的大小有关, 而资源量大小直接与断陷盆地规模相关联。一般来说, 大断陷盆地源岩厚度大, 演化程度高, 天然气资源丰富, 中小断陷盆地资源相对贫乏。天然气资源量相对较大的长岭断陷和十屋断陷油气资源最丰富, 探明储量最多。大断陷找中大型(油)气藏, 小断陷找中小型(油)气藏是一个规律性认识, 也是中国陆相油气聚集成藏理论的重要观点——“源控论”在松南地区的具体表现。“源控”的另一方面表现在, 源岩母质类型和演化程度决定了烃产物的主要类型。松南下白垩统源岩演化程度高, 有机质类型以Ⅱ_B-Ⅲ型为主, 以产天然气为主, 因而寻找天然气是勘探的主攻方向。

由于源岩主要存在于下部成藏组合中, 其他两组合本身无源岩, 只能依附于下部组合形成次生气藏, 而下部组合又局限于断陷盆地范围内, 因而松南下白垩统天然气藏均分布于断陷盆地内, 分隔各断陷的基底凸起带上天然气很难聚集成藏。

3.2 构造

在油气聚集成藏的整个过程中, 构造作用始终

是一个最重要的影响因素。在松南下白垩统天然气的聚集中,构造作用主要表现在以下几个方面。

1) 构造作用控制烃源岩、储层、盖层的分布及油气的生成。构造环境决定着盆地的沉积特征。松南下白垩统沉积期间是断陷发育阶段,断陷盆地的样式和规模决定了下白垩统天然气源岩的类型和生烃特征。如占主导地位的单地堑式断陷,其控盆断裂活动时间长,沉降幅度大,堆积速率高,断陷层最大厚度可达8 000 m以上(如十屋断陷)。源岩发育在靠近主控盆断裂一侧的深陷区,平面分布不超出断陷范围,快速充填式的沉积方式使源岩有机质类型以Ⅲ、Ⅱ型干酪根为主。在沉降最大的十屋断陷,主力烃源岩层沙河子组在登娄库组沉积时期达到生烃高峰,而在其他断陷,直到泉头组乃至上白垩统沉积时期才达到生烃高峰。

断陷盆地的构造样式也影响了下白垩统内储层和盖层的分布和品质。在单地堑式断陷盆地中,陡坡带发育近物源分选差的冲积扇和水下扇体,缓坡带则发育具继承性的扇三角洲或三角洲,物性相对较好。断陷盆地在裂陷沉降过程中出现的断块翘倾掀斜作用造成了沿断陷缓坡带地层的尖灭、剥蚀或削截现象,从盆缘向盆心,沉积相类型也从三角洲平原向浅水湖、深湖方向递变。盖层发育受沉积相的影响较为明显,相类型不同的泥岩封盖能力不同,以湖相暗色泥岩为最好,其次为滨浅湖泥岩及河道间泥岩。

2) 构造运动对油气运聚的影响。圈闭类型主要为构造运动形成的断背斜和断块、断鼻等构造

种组合均有分布,如德惠断陷中央隆起带和十屋中央构造带。

此外,断裂的发育对松南下白垩统天然气运移有着独特的影响。由于松南地区下白垩统岩相横向变化十分强烈,平面上又被断陷之间的凸起所分割,断陷内通过砂层和不整合界面进行横向运移的距离十分有限,而伸张环境下发育的张性正断裂对油气在垂向上的运移起了重要作用,为中、上部组合圈闭提供了形成次生油气藏的有利条件,特别是切穿下部组合原生油气藏的大断裂,对沟通浅部圈闭与深部烃源起到了十分重要的作用,形成深生浅储、古生新储式(油)气藏^[5](即“跨越式成藏”)。如在十屋断陷,所发现的天然气藏主要集中于横穿断陷盆地中部呈北东走向的小宽断裂带两侧。

3.3 圈闭

在松南下白垩统中发现的气藏类型以构造气藏为主,圈闭类型主要为断背型、断块及差异压实形成的层内穹隆状复合型圈闭。

平面上,松南下白垩统圈闭具有成排成带分布的特点^[1,3],多构成北北东—北东走向的局部构造带,如十屋断陷孤家子—后五家户—八屋构造带、长岭凹陷孤店—大老爷府—双坨子—东岭构造带和乌兰敖都—大情子井背斜带、德惠断陷农安—万金塔构造带及登娄库—伏龙泉—顾家店构造带等,它们主要沿断陷边缘分布,其次出现在断陷的中央部位(类似于凹中隆)。纵向上,中部组合圈闭较为发育。

具有利的圈闭类型是断陷盆地中发育的断块、断鼻等构造

已采不具商业意义。

对于双断型断陷(地堑型),中央部位发育的隆起带为天然气主要运移指向区,中、下部成藏组合发育,聚集天然气(油)资源量最大,在断坡区,3

两盘泥岩对砂岩的侧向封堵、纵向上圈闭在不同组合内继承发育的特点,成藏条件优越,因而是天然气勘探的重点目标。

3.4 保存

影响油气藏保存的主要因素为盖层条件和后期构造改造作用。松辽盆地南部白垩统已发现油气藏的气柱高度有限(最高不超过30 m),而实验证实,即使封盖性能最差的泉头组三段泥岩所能封盖的气柱高度,也远远大于实际气藏的气柱高度^[1]。因此,本区临界盖层也可成为有效盖层,临界盖层的横向展布(连续性与稳定性)成了影响临界盖层封盖性能的主要因素。但构造活动造成的抬升剥蚀及断裂作用常常破坏了盖层的封盖性能。如松南抬升最早、改造最为强烈的十屋断陷和伏龙泉断陷,抬升剥蚀厚度最大可达1 200 m,导致断层开启,地表水下侵。在十屋断陷中部成藏组合获得的地层水矿化度仅 $1\,000 \times 10^{-6} \sim 2\,000 \times 10^{-6}$,伏龙泉断陷为 $4\,500 \times 10^{-6}$ 左右。与此相比较,改造最弱的德惠断陷的青山口组、姚家组保存完好,泉头组地层水矿化度大于 $10\,000 \times 10^{-6}$ 。由此可见,构造改造作用的强弱和地层受剥蚀的程度可直接反映地层的开启程度。正是由于构造作用的强烈改造,使松南下白垩统天然气藏纵向分布层位多,平面分散,气柱高度低,地层压力低,气水关系复杂。笔者认为,已发现的上部成藏组合中天然气藏的主要存在形式以正向构造背景下的孤立砂体控制的构造-岩性气藏为主,正是保存条件差造成的结果。

4 成藏规律

4.1 在断陷范围内分布

晚侏罗-早白垩世松辽地区断陷盆地彼此分割,尤其是在下白垩统内主力源岩沙河子组沉积时期互不连通。烃源的分割性,决定了成藏体系的相对独立^[4]。因此,每个断陷盆地构成一个相对独立的含气单元。断陷盆地充填沉积的展布范围基本上决定了油气有效聚集成藏的范围。

断陷内烃源岩发育状况控制了天然气聚集的规模。资源量大、生烃强度大的断陷盆地相继发现了规模不等的油气田;而资源量小、生烃强度小的断陷盆地却难以成藏,特别是难以形成具有经济价值的油气藏,如榆树断陷、柳条断陷等。

松南下白垩统内天然气纵向分布具多层位性。以十屋断陷为例,在3个成藏组合中分布着5

套气层,纵向跨度长达2 000余米。从天然气的富集程度而言,具有明显的分带性,可分为两个富集带:一是中部组合中的泉头组下部农安气层(N)和登娄库组小城子气层(X);二是下部组合中的营城组五家子气层(W)。两个富集带均以干气为主,但前者为次生气藏,且分布广,探明程度高,后者属原生残余气藏,埋藏深,勘探难度大。

在断陷盆地内,气藏分布受生气强度和主要运移指向双重控制。如十屋断陷所发现的油气藏均分布于油气长期运聚的缓坡区,并较严格受资源结构的限制,也就是说演化程度高的气资源区(一般为深陷区)发育气田;油气混合资源区(一般为热演化程度中等-高的斜坡区)发育油气田。油气藏平面分布由断陷中心至分隔断陷的凸起带,具有气→(油)气→油环带分布特点。

4.2 跨越式成藏

跨越式是指下部成藏组合中的天然气,通过断层的输导,跨层位进入中、上部组合中的泉头组和登娄库组储层中成藏。天然气从下部组合进入中、上部组合经历了复杂的聚集与散失的演化历程,是运移聚集散失动态平衡的结果^[5]。充注成藏的背斜构造多具有从下部组合继承发展而来的特点。

4.3 多期性成藏

松南天然气藏具有早期生烃聚集、晚期定型、成藏期长、成藏历程复杂的特点(表1)*,气田不同程度受到晚期构造抬升及断裂切割的破坏。松南具有3个主要圈闭形成期,分别是营城组沉积期间及末期、登娄库组沉积末期及嫩江组沉积末期,它们与源岩的主生排烃期匹配,构成了主要成藏期。十屋、长岭、伏龙泉断陷源岩在登娄库组沉积末期以前均进入了主生油阶段,早期成藏普遍,以石油与伴生气为主。登娄库组沉积末期发生的构造运动形成一批圈闭,使早中期形成的石油与伴生气及低成熟、成熟煤型气在泉头组沉积末期得以成藏;中晚期高成熟天然气在早期成藏的基础上进一步成藏。嫩江组沉积末期形成的圈闭聚集了较多的晚期高成熟-过成熟气(含裂解气),也属于次生气藏范畴。

德惠、柳条、哈拉海、榆树等断陷,以煤型气为主,生气的高峰时间在泉头组沉积末期至嫩江组沉积末期之间,成藏期属中期和晚期。

* 何兴华,王果寿,卢兵力,等.松辽盆地南部天然气勘探目标研究[R].“九五”国家重点科技攻关专题(99-110-06-03)成果,2000

表 1 松南十屋断陷天然气成藏期次与特征一览表

Table 1 Stages and features of gas accumulations in Shiwu fault depression in Southern Songliao basin

成藏期次	源岩	天然气运移			储层	圈闭特征	成藏时期	成藏方式	实 例	聚集效率
		排烃方式	运移方向	距离						
早期成藏		脉冲式垂向排烃	斜坡	近	登娄库组、营城组	同沉积圈闭	营城组末期	近源式(自生自储式)	四五家子油气田、八屋气田小城子及五家子气藏	多散失
中期成藏	沙河子组营城组为主、登娄库组为辅	脉冲式垂向排烃	斜坡	远	登娄库组、泉头组	登娄库组末期形成圈闭	登娄库组末期~泉头组早期	远源式(跨越式)	孤家子气田、后五家户气田小城子及农安气藏	较好
晚期成藏		脉冲式卸载式垂向排烃	斜坡	远	登娄库组、泉头组	早期形成的圈闭、嫩江组末期改造或形成的圈闭	嫩江组末期	远源式(跨越式)	后五家户气田、杨大城子气藏	较好

4.4 气藏特点

4.4.1 气藏类型多

松南地区由于经历了多期构造运动,各期构造运动都形成一批相应的圈闭,由于圈闭类型多,不同的圈闭类型形成不同类型的气藏,因此松南地区下白垩统气藏类型较多。目前已发现的气藏类型以构造气藏和构造-岩性复合型气藏为主,构造气藏类中以断背斜型和断块断鼻型气藏为主,尚未发现典型的岩性气藏。

4.4.2 气藏规模小且分布零星

据目前已有的勘探及开发成果,在下白垩统中已发现的气田一般多为中小型,以小型占多数。开采气田时发现单个气藏规模小、充满度低、产量递减快,含气砂体间连通性较差,非均质性强,结果导致纵向上有多个气水系统,横向上井与井之间、断块与断块之间天然气产状均不相同。总体反映了气藏的复杂性。

参 考 文 献

1 何兴华,崔皓,赵庆吉,等.松辽盆地东南部天然气成藏地质条件及远景评价[A].见:地质矿产部石油地质研究所.石油与天然气地质文集(第5集)(中国油气勘探战略与规划部署)[C].北京:地质出版社,1997.64~65

2 Demaison G, Huizinga B J. Genetic classification of petroleum systems [J]. AAPG Bull, 1991, 75(10): 1 626~ 1 643

3 黄福林,骆传才,何兴华,等.松辽盆地南部构造圈闭系列[J].石油与天然气地质,1996,17(4): 333~ 336

4 陈孔全,吴金才,唐黎明,等.松辽盆地南部断陷成藏体系[M].武汉:中国地质大学出版社,1999. 93~ 97

5 王庭斌.中国气田的成藏特征分析[J].石油与天然气地质,2003,24(2): 103~ 110

6 吴金才,兰素清.松南地区十屋断陷构造-岩性复合圈闭样式[J].石油与天然气地质,2003,24(1): 62~ 64

7 王果寿.松辽盆地十屋-德惠地区沉积体系特征[J].石油与天然气地质,2001,22(4): 331~ 336

8 唐黎明,何兴华.松辽盆地梨树凹陷泉头组沉积特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3): 266~ 268

9 李群.松辽盆地南部隐蔽圈闭及有利地区预测[J].石油与天然气地质,2002,23(2): 159~ 161

(上接第 74 页)

3 万天丰.古构造应力场[M].北京:地质出版社,1988

4 赵宗举,朱琰,李大成,等.中国南方构造变形对油气藏的控制作用[J].石油与天然气地质,2002,23(1): 19~ 25

5 刘树根,罗志立,戴苏兰,等.川西前陆盆地的“四川运动”及与油气的关系[J].石油与天然气地质,1996,17(4): 276~ 281

6 吴志均,杨宇,刘应楷.新场气田上沙溪庙组的应力场特征[J].石油与天然气地质,2003,24(2): 136~ 139

7 万天丰.中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M].北京:地质出版社,1996

8 崔效峰,谢富仁.利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J].地震学报,1999,21(5): 513~ 522

9 余琪祥,吴爱军,李善良,等.地应力剖面在储层开发中的应用[J].石油与天然气地质,2001,22(1): 42~ 47