

文章编号:1672-6561(2013)02-0067-08

原位油气藏特征、形成机制及其资源潜力

妥进才¹, 张明峰¹, 吴陈君^{1,2}, 刘 艳^{1,2}, 陈 茹^{1,2}, 熊德明^{1,2}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:首次提出原位油气藏的概念,把油气生成的原生地层中形成的具有商业开采价值油气资源的地层单元称为原位油气藏,能够生成烃类并能为原位油气藏提供储集空间的地层称为原生地层。分析了原生地层中有机质含量与原位油气藏的形成关系以及原生地层中烃类的相态与有机质热演化程度,探讨了有机质的数量、类型、热演化程度以及在有机质热演化过程中地层中不同状态的有机质(干酪根→液态烃(沥青)→湿气→干气)相互转化等因素对原生地层中油气的富集程度以及原位油气资源相态的控制作用。中国发育了海相、海陆过渡相到陆相等多种沉积环境条件下 10 余套富含有机质及页岩油气资源的泥页岩系,具备形成以页岩油和页岩气为主或油气共生特征的原位油气藏成藏条件和基础。原位油气藏中的原位油气资源作为重要的非常规油气资源将在今后的油气勘探工作中占据十分重要的地位。

关键词:原位油气藏;原生地层;非常规油气;页岩气;有机质;相态;热演化;资源潜力

中图分类号:P618.130.2

文献标志码:A

Characteristic and Forming Mechanism of Oil-gas Trap in Source Strata and Its Resource Potential

TUO Jin-cai¹, ZHANG Ming-feng¹, WU Chen-jun^{1,2}, LIU Yan^{1,2}, CHEN Ru^{1,2}, XIONG De-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Oil-gas trap in source strata was put forward firstly; the trap was a kind of hydrocarbon resource strata unit with commercial exploitation value from original formation generating hydrocarbon; original formation could generate hydrocarbon and supply reservoir space for oil-gas trap in source strata. The relationship between organic content and the formation of oil-gas trap in source strata was analyzed, and phase state of hydrocarbon and thermal evolution degree of organic matter in original formation was explained. The controlling factors on the level of oil-gas enrichment and the phase state of oil-gas resource in original formation were discussed, and the factors included abundance, type and thermal evolution degree of organic matter and the mutual transformation among different phase states of organic matter during thermal evolution (kerogen→liquid hydrocarbon (bitumen)→wet gas→dry gas). In China, more than 10 sets of mudstone shale series rich in organic matter and shale oil-gas resource developed in various sedimentary environments including marine facies, marine-continental transitional facies, continental facies, etc., so that oil-gas trap in source strata could be formed with the characteristics of mainly shale

收稿日期:2013-03-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB214701);

中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-104)

作者简介:妥进才(1962-),男,新疆沙湾人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail: jctuo@lzb.ac.cn。

oil and gas or symbiosis of oil and gas. Original oil-gas resource from oil-gas trap in source strata taken as unconventional one will occupy an important position in future oil-gas investigation and exploration.

Key words: oil-gas trap in source strata; original formation; unconventional oil-gas; shale gas; organic matter; phase; thermal evolution; resource potential

0 引言

原位油气藏是指在生成油气的烃源岩原生地层中形成的具有商业开采价值的油气资源。以富有机质泥页岩为源岩,以泥页岩自身以及泥页岩夹层中的致密砂岩为储层,不间断供油气、持续聚集而形成的一种连续型油气藏。原位油气藏是富含有机质的泥页岩在一系列地质作用下生成的大量烃类(石油、天然气等),并滞留在泥页岩原位地层中富集形成的油气藏。

与常规油气藏相比,原位油气藏具有规模大、资源量丰富、资源丰度较低、没有自然产能或自然产能较低,需要经过压裂(原位天然气藏-页岩气)或加热(原位油藏-页岩油)等技术改造后才能开采利用的一种非常规油气资源。

能够生成烃类并能为原位油气藏提供储集空间的地层即称为原生地层。因此,原位油气藏是烃源岩原生地层中能够形成具有商业开采价值油气资源的地层单元。原位油气藏与目前流行的页岩气和页岩油的主要区别在于:目前国内外通常所说的页岩气、页岩油只是原位油气藏中可供勘探和开发的那部分油气资源,是从开发的角度对原位油气藏中能够动用并能进行商业开采的油气资源的称谓。根据原生地层中有机质性质、有机质热演化程度以及原位油气藏中烃类物质的相态特征,可以把原位油气藏进一步划分为以页岩油为主的原位油藏、以页岩气为主的原位气藏以及具有油(包括凝析油)气共生特征的原位油气藏。煤层气也是一种原位气藏。从上述分析可以看出,目前所说的页岩气、页岩油以及煤层气只是原位油气藏中通过开发手段可以获得的油气资源产品,而原位油气藏则是原生地层中具有油气生成、储集、保存以及具备商业开采条件的地层单元的总称。

近年来,世界油气勘探的一个重要发展趋势就是从常规油气勘探逐渐转向非常规油气勘探^[1-7]。页岩油气、煤层气等的勘探实践表明,存在于烃源岩原生地层中的烃类可以形成具有商业价值的石油和天然气。从常规油气藏形成和油气

运移的角度来看,烃源岩中形成的石油和天然气通常情况下只有不到 20% 能够从烃源岩层中运移出来,之后还要经过复杂的二次运移到达储层,最终以不超过 5% 左右的运聚系数形成油气藏(中国资源评价中通常分别用 3%~10% 和 2%~4% 的运聚系数来分别计算石油和天然气的聚集量^[8]);其余 80% 的油气资源仍然保存于烃源岩原生地层中。而对于页岩气、页岩油以及煤层气等这些以烃源岩原生地层作为油气形成和储集空间的原位油气藏,其生成的油气资源则几乎是 100% 滞留在烃源岩原生地层中。即便是作为工业油气藏的有效烃源层,其生成的油气资源之所以能够从烃源岩中排出,也是因为其中已经生成的油气资源完全饱和了其自生的孔隙空间,在自身流体压力作用下,超出自身孔隙空间所能容纳的油气资源才能从烃源岩层中被挤出并发生初次和二次运移形成油气藏。因此,从这个意义上来看,无论是未经过或者只经历过少量排烃过程的页岩油气、煤层气等原位油气藏,还是已经经过了大规模排烃过程之后的烃源岩层,其孔隙空间中都仍然充满了油气,具备作为原位油气藏进行进一步勘探的资源条件。但从经济意义上讲,那些没有经过或者只经历过少量排烃作用、生成的油气资源能够大部分滞留在原生地层中的原位油气藏(例如页岩油气、煤层气等)则更具有实际勘探价值。

传统油气勘探的常识是生储盖组合,具备此条件就有可能找到油气田。过去认为油气生成后从烃源岩原生地层二次运移到储油(气)层,即所谓的储层(砂岩、碳酸盐或火山岩)。现在勘探开发的视野已扩展到烃源岩原生地层,从原生地层中寻找油气资源。页岩油气、煤层气等勘探实践已经证实这种可能性的存在,从某种程度上讲,回归原生地层找油(气)(即在油气生成的原点找油气),不能不说是油气勘探开发领域一场深刻的革命,也是对传统找油找气理念和理论的挑战。从资源的角度来看,烃源岩原生地层中的油气资源将会远远大于常规的油气资源量。因此,原生地层中原位油气藏的勘探必将是今后油气勘探的重要领域。

笔者从原生地层中有机质含量与原位油气藏的形成关系出发,探讨了原生地层中烃类的相态与有机质热演化程度以及原位油气藏的资源基础,指出蕴含在原位油气藏中的原位油气资源作为重要的非常规油气资源将在今后油气勘探中占据重要地位。

1 有机质含量与原位油气藏的形成

所谓的烃源岩即能够为具有工业价值的油气藏提供油气资源的地层单元。原石油工业部颁布的中国烃源岩的有机碳含量(质量分数,后文同)和氯仿沥青“A”含量下限值分别为 0.4%和 0.01%(表 1)。低于此下限,岩石中的有机质不是不能形成油气,而是形成的油气不能满足自身孔隙空间和矿物有机质颗粒吸附的需求,即能生油气但不具备排油气的能力。这就是为什么在一个有机碳含量(TOC 值)低于 0.4%的泥岩中仍然能够通过溶剂抽提方法获得其中的可溶有机质(氯仿沥青“A”),但却不能把该泥岩当做有效烃源岩来看的原因。

表 1 烃源岩评价指标

Tab. 1 Evaluation Indexes of Hydrocarbon Source Rock

生油层类型	好生油层	中等生油层	差生油层	非生油层
有机碳含量/%	3.5~1.0	1.0~0.6	0.6~0.4	<0.4
氯仿沥青“A”含量/%	>0.12	0.12~0.06	0.06~0.01	<0.01

经典的油气成因理论把烃源岩的镜质体反射率 R_o 大于 0.6%作为有机质生烃门限,因为在此演化阶段以上的有机质才能形成大量的油气,在完全饱和了其自生孔隙空间和矿物有机质颗粒吸附能力以后,多余的烃类才能从烃源岩中排出,为工业油气藏的形成提供油气资源。从这个意义上来看,所有有效烃源岩都是在其形成的烃类物质已经饱和了自身孔隙空间以后,多余的烃类物质才能在自身流体压力之下从烃源岩中被挤出(初次运移),再经过二次运移在合适的圈闭条件下形成油气藏。因此,即便是已经发生过排烃过程的有效烃源岩,其孔隙空间中仍然滞留了一定程度的烃类物质。部分高演化的富有机质泥页岩中可溶有机质的含量非常低,例如四川盆地渝东南酉阳县境内的下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩中有机质含量为 2.42%~9.89%,但其中的可溶有机质含量却不足 20×10^{-6} [9]。这并不是因为该类泥页岩的排烃效率高到足以使其中已经形成的液态烃被完全排除,而是因为该类岩石中已经形成的液态烃在高温条件下发生了二次裂解,导致残余液态烃含量降低,或者是干酪根降解与已经形成的液态烃进一步裂解产生的烃类气体的增压

作用将残余液态烃从烃源岩中挤出而导致了可溶有机质含量的降低 [10]。即便是这类可溶有机质含量极低的高演化泥页岩,其孔隙空间也不可能是空的,其中必然包含了能将液态烃从岩石中挤出的、高于地层压力的烃类气体。因此,即便是已经经历过大规模的排烃过程,这类高演化的富有机质泥页岩仍然具备形成原位气藏的能力。

从排烃效率来看,不同烃源岩的排烃效率有很大差异,鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩的平均排烃率可以高达 72% [11],长 9¹ 段优质油源岩的平均排烃率可以高达 33.17% [12],松辽盆地青一段优质烃源岩的排烃效率高达 60%~80% [13],中国东部渤海湾盆地某凹陷下第三系渐新统各生油层系的平均排烃率为 29% [14]。对于绝大部分烃源岩来说,其排烃效率一般都不会超过 50%;也就是说,即使是工业油气藏形成提供过烃类资源的有效烃源岩,其已经形成的烃类物质中仍然有超过 50%的油气资源滞留在烃源岩中。而从烃源岩中排出的油气资源最终也只能以不超过 5%的运聚系数形成油气藏 [8]。因此,仅从目前全球常规油气资源的资源量角度来看,可以设想以页岩油和页岩气等形式滞留在原生地层中的原位油气资源规模非常可观。在转化率相同的情况下,对于有机质含量比较高(TOC 值大于 10%)的优质烃源岩而言,即使其排烃效率可以高达 80%以上,其残余有机质对于原位油气藏的形成仍然比有机质含量相对较低(TOC 值小于 2%)的烃源岩更具有经济意义。而对于页岩气、页岩油以及煤层气等这些以原生地层作为油气形成和储集空间的原位油气藏,由于厚度大、排烃受限等原因,其生成的油气资源几乎完全滞留在原生地层中。因此,原生地层中蕴藏着非常可观的油气资源,必将成为今后油气勘探的重要领域。页岩气、煤层气的勘探研究证实了这种可能性和趋势的存在。最新一轮的油气资源评价结果表明,中国石油远景资源量为 1.086×10^8 t。中国常规天然气远景资源量为 56×10^{12} m³。而中国 2 000 m 以浅的煤层气资源量为 36.8×10^{12} m³,油页岩资源量为 7.199×10^8 t。页岩气资源量为 30×10^{12} m³。仅仅蕴藏在油页岩、含气页岩以及煤层等原生地层中的非常规油气资源就远远超过了中国常规油气资源量。

2 烃类相态与有机质热演化程度

与常规油气藏明显不同的是,烃源岩原生地层中不同相态有机质之间的关系具有 4 个明显特点:

①原生地层中不同赋存状态的有机质(固体有机质(干酪根或固体沥青)、液态烃(沥青)和气态烃(吸附烃))之间并没有脱离,其在有机质演化过程中始终赋存在一起;②在原生地层中不同相态的有机质在热演化过程中存在着动态的互相转化过程;③原生地层中的天然气一般都是干酪根裂解气和液态烃裂解气的混合,甚至还有早期生物气的混合;④原生地层中的天然气可以以游离气体的形式存在于页岩的孔隙空间(游离气),还有一部分是以表面吸附的形式吸附于岩石和有机质颗粒表面(吸附气),还有一部分是以溶解态形式溶解于液态烃和孔隙水中(溶解气)。因此,有机质在热演化过程中的相互转化过程对原生地层中气体富集程度和赋存状态也有明显的影响(由于液态烃转化为气态烃而导致岩石中液态烃的相对含量降低,相应的溶解于液态烃中的气态烃会有所减少,而原油裂解气的量会有所增加)。

从油气形成过程来看,对于一个特定的烃源岩层来说(在有机质母质类型一定的情况下),温度控制着烃类的相态和特征。早在1915年White就提出热成熟度是控制烃类分布最基本的因素,并指出低、中等和高的煤阶(也就是热成熟度)分布制约着石油、天然气和非烃的生成^[15]。White从Appalachian盆地观察到的上述有机质热成熟度控制烃类分布的相关关系成为世界石油工业的基础。1970年,Landes在此基础上经过补充资料,提出了热成熟度和油气藏间的关系^[15]。Connan在1974年统计了10个盆地的钻井资料^[16],并指出油气形成的时间和温度关系为:沉积岩年轻,则其开始生油的温度就高。其后,国内外学者纷纷引用,并将其作为有机质热成熟生烃的“时间-温度补偿原则”;一方面用以指导油气勘探,另一方面又作为油气形成热模拟试验的理论基础。Tissot等于20世纪七八十年代建立的干酪根晚期热降解生烃理论揭示了油气形成、演化和分布规律^[17-18]。按照这一理论,石油地质学家们建立了分散有机质的成烃演化剖面,提出了油气生成的阶段性理论。即:当 R_o 大于0.5%(温度约为60℃)时,分散有机质开始形成石油;当 R_o 为0.9%左右(温度约为125℃)时,分散有机质达到生烃高峰期;当 R_o 大于1.35%(温度约为150℃)时,液态石油发生裂解,形成凝析油和湿气藏;当 R_o 为2.0%~4.0%时,凝析油和湿气藏开始发生热裂解,形成以甲烷为主的干气藏;当 R_o 大于4.0%时,甲烷开始遭受到高温的破坏,同时岩石开始进入变质作用阶段,有机质转化成石墨。

从上述分析可以看出,在特定的地层单元内,有机质在热作用下,一般都存在着从固态(干酪根或固体沥青)到液态(沥青、液态烃)再到气态(天然气)的转化过程。

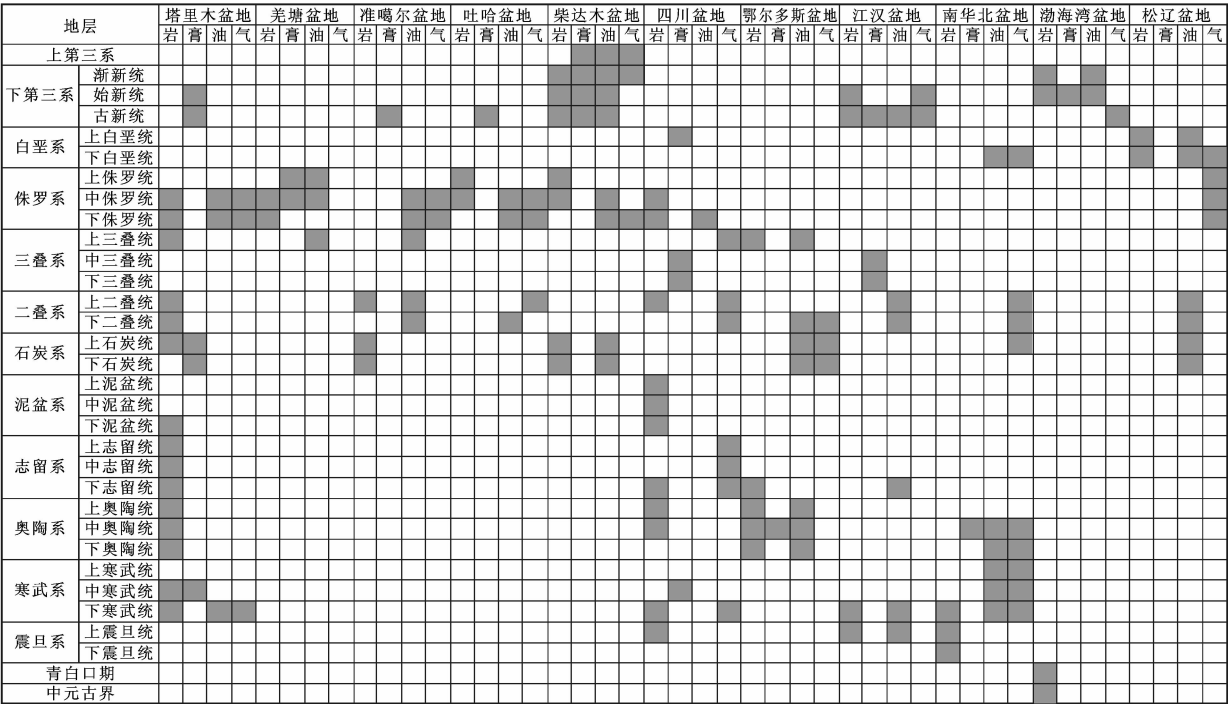
对于一个集生油层、储油(气)层和盖层为一体的原生油气层(如页岩油气、煤层气等)而言,所储集的油气包括由干酪根热降解形成的液态烃(沥青)(如演化程度较低的油页岩中的页岩油),也包括干酪根直接热降解形成的干酪根降解气,还包括由液态烃(沥青)进一步热裂解形成的原油裂解气,甚至还包括生物气形成阶段由甲烷菌改造有机质形成的烃类气体(如页岩气的来源就包括了上述几种成因的天然气中的部分或全部)。因此,原生地层中油气富集程度以及原位油气资源的相态不仅取决于原始有机质的数量、类型、热演化程度,更与地层中不同状态的有机质(干酪根→液态烃(沥青)→湿气→干气)在热演化过程中的相互转化过程密切相关。

一般情况下,在 R_o 不高于1.5%的富有机质泥页岩中,可供勘探的原位油气资源应该具有油气共生的特点。在 R_o 为1.5%~2.0%的富有机质泥页岩中,可供勘探的原位油气资源应该具有凝析油和页岩气共生的特点。对于上述2类原位油气藏,可以考虑油气兼探的勘探和开发思路,以最大程度获取原位地层中的油气资源。而在 R_o 大于2.0%的富有机质泥页岩中,可供勘探的原位油气资源应该以页岩气为主,对于这类原位油气藏的勘探和开发则应借鉴页岩气的勘探思路 and 开发方案进行勘探和开发。

3 原位油气藏的资源基础

中国大陆处于太平洋、印度和西伯利亚等板块交汇处,成盆演化体系复杂,早古生代发育海相地层沉积,晚古生代—中生代发育海陆过渡相。从寒武纪到第四纪的540 Ma地质时期内,延续形成了从海相、海陆过渡相到陆相等多种沉积环境条件下的10余套富含有机质及页岩油气资源的泥页岩系,它们平面分布广、剖面层位多、累计厚度大^[19-23]。上述3种环境下发育的富有机质泥页岩沉积共同构成了原位油气(页岩油气)资源形成的基本地质条件。中国海相页岩主要发育在前古生代及早古生代,分布于华北、中国南方、塔里木和青藏高原4个区。

早古生代形成了多套海相富有机质的泥页岩(图1),主要有中国南方下寒武统牛蹄塘组(筇竹寺组)页岩、中上奥陶统大乘寺组—五峰组页岩、下志



岩表示暗色泥岩;膏表示膏盐;油表示石油;气表示天然气;小方格内填充满灰色表示对应地层分布有暗色泥岩、膏盐、石油或天然气

图 1 中国主要含油气盆地暗色泥岩、膏盐及石油和天然气的分布状况

Fig. 1 Distribution of Black Mudstone, Gypsum-salt, Oil and Gas in the Main Petroliferous Basins of China

留统龙马溪组页岩、上二叠统龙潭组海陆过渡相煤系泥页岩。它们具有分布广、厚度大、有机质含量高、热演化程度高的特点。其中,下寒武统牛蹄塘组(筇竹寺组)黑色页岩厚度为 200~100 m,在区域上分布稳定,其中仅有机碳含量为 2%~10%的富有机质页岩厚度为 20~60 m,有机质类型为 I、II 型,等效 R_o 为 3%~4.5%;下志留统龙马溪组黑色页岩厚度为 150~1 300 m,在区域范围内广泛分布,其中仅有机碳含量为 2%~8%的富有机质页岩的厚度为 20~40 m,有机质类型为 I、II 型,等效 R_o 为 2.5%~3.5%;上二叠统龙潭组有机碳含量为 2%~10%的富有机质泥页岩的厚度为 5~40 m,有机质类型为 II、III 型, R_o 为 1.5%~2.5%;四川盆地上二叠统海槽相大隆组黑色泥岩有机碳平均含量高达 5.86%,最高可达 24.31%,厚度为 10~50 m,是一套优质烃源岩^[24-28]。上述泥页岩成藏条件优越,有机质的热演化程度较高,具备形成以页岩气为主的原位油气藏的成藏条件和基础。

中国中生代盆地多为陆相沉积,深湖和半深湖形成了丰富的富有机质泥岩^[29-31](图 1)。其中:鄂尔多斯盆地^[32-34]三叠统延长组富有机质湖相泥岩有机碳含量高达 2%~25%,有机质类型为 I、II 型,富有机质暗色泥岩厚度达到 30~80 m;松辽盆

地上白垩统青山口组和嫩江组有机碳含量达到 1%~4.5%,有机质类型为 I、II 型,暗色泥岩厚度达 50~500 m;四川盆地中下侏罗统自流井组有机碳含量达到 0.4%~20%,有机质类型为 I、II 型,暗色泥岩厚度达 50~250 m;柴达木盆地北缘侏罗系暗色泥岩有机碳含量达 0.5%~8%,有机质类型为 II、III 型,暗色泥岩厚度为 40~400 m;渤海湾盆地第三系沙河街组三段和四段暗色泥岩有机质含量达 1%~14%,有机质类型为 I、II 型,暗色泥岩厚度达 20~500 m,仅南堡凹陷有机碳含量超过 5%的优质烃源岩厚度约 100 m^[35];泌阳凹陷第三系核桃园组暗色泥岩有机碳含量达 2%~4%,有机质类型为 I、II 型,暗色泥岩厚度达 80~600 m。上述地层现阶段大都处在生烃高峰期,为所在盆地常规油气藏的形成提供了丰富的油气资源,成为中国长期以来常规油气资源的主要贡献地区。上述暗色泥岩虽然已经经历过不同程度的排烃过程,但暗色泥岩中仍然滞留了大量的页岩油和页岩气,具备形成以页岩油和页岩气共生为特征的原位油气藏成藏条件和基础。

上述地区广泛发育的暗色泥岩沉积构成了中国原位油气藏形成和发育的地质基础,必将成为中国今后一段时间内勘探和开发原位油气资源的重点领

域和重点地区。

原位油气藏概念的提出,把目前仅以页岩气、页岩油以及煤层气等以工程技术开发产品作为研究对象扩展为从原生地层中有机质含量、特征、热演化程度,泥页岩的矿物组成、特征,页岩油气的保存以及开采条件等综合地质单元作为研究对象。在原生地层中形成并滞留在烃源岩层中的大部分油气资源,都有可能在合适的条件下以原位油气资源的形式形成原位油气藏。因此,蕴含在原生地层中的原位油气资源在资源量上将是不可估量的。随着勘探和开发技术的不断进步以及对原位油气藏认识上的进一步深化,原位油气资源将对中国乃至世界油气勘探形势以及勘探格局产生重要影响。

4 结 语

(1)首次提出原位油气藏的概念。通过原位油气藏的概念把烃源岩原生地层中能够形成具有商业开采价值的页岩油、页岩气以及泥页岩夹层中的致密砂岩油气都涵盖进去。通过有机质在热演化过程中的相态变化关系,把原生地层中的固体有机质、液态有机质和天然气联系起来,然后通过源储一体的思想再把原生地层中的烃源岩和储层联系在一起,实现页岩油气和泥页岩夹层中致密砂岩油气的协同勘探和开发。

(2)阐明了原生地层中存在原位油气藏的事实,把油气勘探视野从传统的油气通过二次运移才能成藏、通过生储盖组合才能找到油气的观念拓展到从原生地层中就可以寻找油气资源。页岩油气、煤层气等的勘探实践已经证明,原生地层中存在着具有商业开采价值的原位油气藏。

(3)油气生成和排烃理论业已证明,烃源岩中生成的油气只有少部分能够通过初次运移和二次运移最终成藏。烃源岩中形成的油气资源有相当一部分最终会保留在原生地层中形成具有商业开采价值的原位油气藏。

参考文献:

References:

- [1] 康玉柱. 中国非常规致密岩油气藏特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 1-4.
KANG Yu-zhu. Characteristics of Tight Hydrocarbon Reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 1-4.
- [2] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 1-5.
KANG Yu-zhu. Characteristics and Exploration Prospect of Unconventional Shale Gas Reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 1-5.
- [3] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Cheng-zao, ZHENG Min, ZHANG Yong-feng. Unconventional Hydrocarbon Resources in China and the Prospect of Exploration and Development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 邱中建, 邓松涛. 中国非常规天然气的战略地位[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 1-5.
QIU Zhong-jian, DENG Song-tao. Strategic Position of Unconventional Natural Gas Resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 1-5.
- [5] 赵万金, 李海亮, 杨午阳. 国内非常规油气地球物理勘探技术现状及进展[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(4): 36-40.
ZHAO Wan-jin, LI Hai-liang, YANG Wu-yang. Status and Evolution of Geophysical Exploration Technology for Unconventional Oil and Gas in China[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(4): 36-40.
- [6] 李欣, 段胜楷, 孙扬, 等. 美国页岩气勘探开发最新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 124-126.
LI Xin, DUAN Sheng-kai, SUN Yang, et al. Advances in the Exploration and Development of U. S. Shale Gas[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 124-126.
- [7] 赵靖舟, 方朝强, 张洁, 等. 由北美页岩气勘探开发看我国页岩气选区评价[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(2): 1-7.
ZHAO Jing-zhou, FANG Chao-qiang, ZHANG Jie, et al. Evaluation of China Shale Gas from the Exploration and Development of North America Shale Gas[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2011, 26(2): 1-7.
- [8] 周海燕, 庞雄奇, 姜振学, 等. 石油和天然气运聚效率的主控因素及定量评价[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 14-18.
ZHOU Hai-yan, PANG Xiong-qi, JIANG Zhen-xue, et al. Key Factors Controlling Migration and Accumulation Efficiency of Oil and Gas and Their Quantitative Evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1): 14-18.
- [9] 吴陈君, 张明峰, 刘艳, 等. 四川盆地古生界泥(页)岩的地球化学特征与含气性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 794-799.
WU Chen-jun, ZHANG Ming-feng, LIU Yan, et al. Geochemical Characteristics of Paleozoic Shales in

- Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 794-799.
- [10] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
LU Shuang-fang, HUANG Wen-biao, CHEN Fang-wen, et al. Classification and Evaluation Criteria of Shale Oil and Gas Resources; Discussion and Application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [11] 张文正, 杨 华, 李剑峰, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, LI Jian-feng, et al. Leading Effect of High-class Source Rock of Chang-7 in Ordos Basin on Enrichment of Low Permeability Oil-gas Accumulation—Hydrocarbon Generation and Expulsion Mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [12] 张文正, 杨 华, 李善鹏. 鄂尔多斯盆地长9¹湖相优质烃源岩成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 557-562.
ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, LI Shan-peng. Hydrocarbon Accumulation Significance of Chang-9¹ High-quality Lacustrine Source Rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 557-562.
- [13] 霍秋立, 曾花森, 乔万林, 等. 松辽盆地优质烃源岩含水生排油模拟实验[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(2): 1-5.
HUO Qiu-li, ZENG Hua-sen, QIAO Wan-lin, et al. Simulating Experiment of Hydrous Oil Generation and Expulsion of High-quality Source Rocks in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2011, 30(2): 1-5.
- [14] 李明诚, 秦若辙, 马顺明. 直接模拟排烃量的方法及其应用[J]. 石油实验地质, 1992, 14(3): 252-258.
LI Ming-cheng, QIN Ruo-zhe, MA Shun-ming. Methodology and Application of Direct-simulation on the Hydrocarbon Expulsion[J]. Petroleum Geology and Experiment, 1992, 14(3): 252-258.
- [15] 祖小京, 妥进才, 张明峰, 等. 矿物在油气形成过程中的作用[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 298-306.
ZU Xiao-jing, TUO Jin-cai, ZHANG Ming-feng, et al. The Roles of Inorganic Minerals on the Oil and Gas Generating Processes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 298-306.
- [16] CONNAN J. Time-temperature Relation in Oil Genesis[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(12): 2516-2521.
- [17] TISSOT B P, DURAND B, COMBAZ A. Influence of Nature and Diagenesis of Organic Matter in Formation of Petroleum[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(3): 499-506.
- [18] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum Formation and Occurrence[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [19] 张金川, 姜生玲, 唐 玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109-114.
ZHANG Jin-chuan, JIANG Sheng-ling, TANG Xuan, et al. Accumulation Types and Resources Characteristics of Shale Gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.
- [20] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
ZHANG Jin-chuan, LIN La-mei, LI Yu-xi, et al. Classification and Evaluation of Shale Oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [21] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.
NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan. Types and Characteristics of Shale Gas Reservoir [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3): 219-225.
- [22] 聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 页岩气成藏体系研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(3): 8-14.
NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan, BAO Shu-jing, et al. Study on the Accumulation Systems of Shale Gas[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(3): 8-14.
- [23] 侯读杰, 包书景, 毛小平, 等. 页岩气资源潜力评价的几个关键问题讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(3): 7-16.
HOU Du-jie, BAO Shu-jing, MAO Xiao-ping, et al. Discussion on the Key Issues of Resource Potential Evaluation for Shale Gas[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(3): 7-16.
- [24] 夏茂龙, 文 龙, 王一刚, 等. 四川盆地上二叠统海槽相大隆组优质烃源岩[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 654-662.
XIA Mao-long, WEN Long, WANG Yi-gang, et al. High-quality Source Rocks in Trough Facies of Upper Permian Dalong Formation of Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 654-662.
- [25] 聂海宽, 张金川, 李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 959-

- 967.
- NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan, LI Yu-xi. Accumulation Conditions of the Lower Cambrian Shale Gas in the Sichuan Basin and Its Periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 959-967.
- [26] 聂海宽, 包书景, 高波, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统一志留统页岩气成藏体系研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 115-119.
- NIE Hai-kuan, BAO Shu-jing, GAO Bo, et al. Accumulation System for Shale Gas from Upper Ordovician to Lower Silurian in Sichuan Basin and Surrounding Areas[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(2): 115-119.
- [27] 聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统一志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 335-345.
- NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan, BAO Shu-jing, et al. Shale Gas Accumulation Conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and Its Periphery[J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(3): 335-345.
- [28] 王炜, 刘若冰, 倪凯. 川东北侏罗系千佛崖组页岩气勘探潜力分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(6): 36-41.
- WANG Wei, LIU Ruo-bing, NI Kai. Analysis of the Exploration Potential of Shale Gas in Jurassic Qianfoya Formation in Northeast Sichuan Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(6): 36-41.
- [29] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
- ZOU Cai-neng, YANG Zhi, CUI Jing-wei, et al. Formation Mechanism, Geological Characteristics and Development Strategy of Nonmarine Shale Oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [30] 邹才能, 董大忠, 杨桦, 等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 26-39.
- ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, YANG Hua, et al. Conditions of Shale Gas Accumulation and Exploration Practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [31] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, WU Song-tao, et al. Types, Characteristics, Genesis and Prospects of Conventional and Unconventional Hydrocarbon Accumulations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [32] 张丽霞, 姜呈馥, 郭超. 鄂尔多斯盆地东部上古生界页岩气勘探潜力分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(1): 23-26.
- ZHANG Li-xia, JIANG Cheng-fu, GUO Chao. Exploration Potential of Upper Paleozoic Shale Gas in the Eastern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(1): 23-26.
- [33] 梁峰, 刘人和, 拜文华, 等. 鄂尔多斯盆地木匠沟地区油页岩分布规律研究及资源量计算[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(1): 32-34.
- LIANG Feng, LIU Ren-he, BAI Wen-hua, et al. Distribution Study and Resources Calculation of Oil Shale in Mujianggou Area, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(1): 32-34.
- [34] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
- YANG Hua, LI Shi-xiang, LIU Xian-yang. Characteristics and Resource Prospects of Tight Oil and Shale Oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [35] 郑红菊, 董月霞, 朱光有, 等. 南堡凹陷优质烃源岩的新发现[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 385-391.
- ZHENG Hong-ju, DONG Yue-xia, ZHU Guang-you, et al. High-quality Source Rocks in Nanpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 385-391.

《地球科学与环境学报》增加页码的通告

《地球科学与环境学报》作为教育部主管、长安大学主办的地球科学与环境领域的权威性学术刊物, 长期以来一直受到广大地球科学与环境领域科研工作者的关爱, 学术质量不断提高, 影响力不断扩大, 投稿量不断增加。

为了缩短论文发表时滞, 使地球科学与环境领域的学术成果更多、更快地发表, 打造更权威、更强有力的地球科学与环境领域学术交流平台, 《地球科学与环境学报》编辑部决定从 2013 年第 2 期起增加刊载论文容量, 页码由原来的 112 页增加至 128 页, 欢迎投稿!