世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析

姜福杰[1,2]，庞雄奇[1,2,*]，欧阳学成[1,2]，郭继刚[1,2]，金 聪[3]，霍志鹏[1,2]，王 庆[1,2]

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室，北京 102249
2. 中国石油大学(北京) 盆地与油藏研究中心，北京 102249
3. Faculty of Natural Sciences and Engineering，University of Tulsa，Tulsa 74104，USA

Jiang Fujie[1,2]，Pang Xiongqi[1,2,*]，Ouyang Xuecheng[1,2]，Guo Jigang[1,2]，Jin Cong[3]，Huo Zhipeng[1,2]，Wang Qing[1,2]

1. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting，China University of Petroleum(Beijing)，Beijing* 102249，*China*
2. *Basin and Reservoir Research Center，China University of Petroleum(Beijing)，Beijing* 102249，*China*
3. *Faculty of Natural Sciences and Engineering，University of Tulsa，Tulsa* 74104，*USA*

Jiang Fujie，Pang Xiongqi，Ouyang Xuecheng，et al. The main progress and problems of shale gas study and the potential prediction of shale gas exploration. *Earth Science Frontiers*，2012，19(2)：198-211

Abstract：Shale gas means the internal residual natural gas resource in mud-shale，which exists in the form of adsorption，liberation，dissolution，etc.，and is generated in diverse geologic settings in mudstone or shale，and has saturated multiform residual requisitions of rocks and entered the threshold of expulsion yet not being completely expulsed. With the increasing of exploration in North America，Europe and Asia，the research in the reserve characteristics and the hydrocarbon accumulation mechanisms of shale gas has achieved extraordinary progress. However，there are still many problems in the research in shale gas，for instance，the concept of "shale gas" does not express the scientific meaning of shale oil-gas reservoir；there are not a definite genetic mechanism and an effective judgment of shale gas；the distribution and generation of shale gas are not clear and the united method of prescription does not exist. In view of the current cognition of shale gas，the authors prescribe the shale gas resource in China by the critical saturating capacity of residual hydrocarbon and the ratio of oil and gas expulsed by hydrocarbon due to the decline of temperature and pressure in the process of drilling and extracting.

Key words：shale gas；mud-shale oil-gas reservoir；unconventional oil-gas reservoir；hydrocarbon resource evaluation

摘 要：页岩气系指泥岩或页岩在各种地质条件下生成的、已饱和岩石自身各种形式的残留需要、进入了排烃门限但尚未完全排出的以吸附、游离及溶解等多种形式残留于泥页岩内部的天然气资源。随着北美、欧洲和亚洲等地区页岩气勘探程度不断加大，对页岩气的储集特征、成藏机理等方面的研究取得重大进展。但页岩气研究仍存在许多问题，如"页岩气"概念没有科学地表达出页岩油气资源的科学内涵；页岩气的成因机制不清且缺乏行之有效的判别标准；页岩气分布发育模式不明且缺乏统一的预测方法。针对当前对页岩气的认识，本文依据源岩残留烃临界饱和量及其钻采过程中温压下降而释放油气的比率等参数，对中国页岩气资源进行了预测。

关键词：页岩气；泥页岩油气藏；非常规油气藏；油气资源评价
中图分类号：P618.13 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-2321(2012)02-0198-14

收稿日期：2012-01-13；**修回日期**：2012-03-16
基金项目：国家重点基础研究发展计划"973"项目(2006CB202300，2011CB201100)；国家自然科学基金项目(41102085)
作者简介：姜福杰(1979—)，男，讲师，从事油气藏形成与分布的研究。E-mail：jiangfjwl@163.com
*通讯作者简介：庞雄奇(1961—)，男，教授，博士生导师。E-mail：pangxq@cup.edu.cn

页岩气的勘探开发虽然经历了一百多年，但对页岩气的深入研究直到2000年后才开始广泛引起关注[1-4]。

“页岩气”概念首次由科罗拉多矿业学院的Curtis教授[1]提出，他认为页岩气在本质上就是连续生成的生物化学成因气、热成因气或两者的混合，它具有普遍的地层饱含气性、隐蔽聚集机理、多种岩性封闭以及相对短的运移距离，它可以在天然裂缝和孔隙中以游离形式存在，在干酪根和粘土颗粒表面以吸附状态存在，在干酪根和沥青质中以溶解状态存在。

近几年，“页岩气”概念被广泛引入国内[5-14]。张金川等[6]认为，页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。其他学者也对美国页岩气研究以及成功的勘探经验进行了介绍和总结[9-13,15]。

事实上，各类文献中概指的页岩气，既包括了传统意义上的页岩气，也包括了泥岩中产出的天然气，还包括了泥岩和页岩中的夹层(薄砂层与高碳层)中产出的天然气，甚至还包括页岩油[16]。研究表明，并非所有的泥页岩中都能发现具有工业价值的天然气，它们的形成和富集受地质环境和地质条件的控制。考虑到上述因素，本文认为，页岩气系指泥岩或页岩在各种地质条件下生成的、已饱和岩石自身各种形式的残留需要、进入了排烃门限但尚未完全排出的以吸附、游离及溶解等多种形式残留于泥页岩内部的天然气资源(图1)[17-19]。在现有技术条件下，有一部分页岩气资源能够得到经济开采。考虑到这类页岩油也正得到开发利用，以及与传统意义上的人造页岩油[20]概念相区别，建议用“泥页岩油气藏”(包括泥页岩油藏、泥页岩气藏)这一概念科学地表征这类油气资源。而泥页岩油气藏既是一种自生自储自盖的油气藏，也是一种原生型致密油气藏，还是一种残留型非常规油气藏。

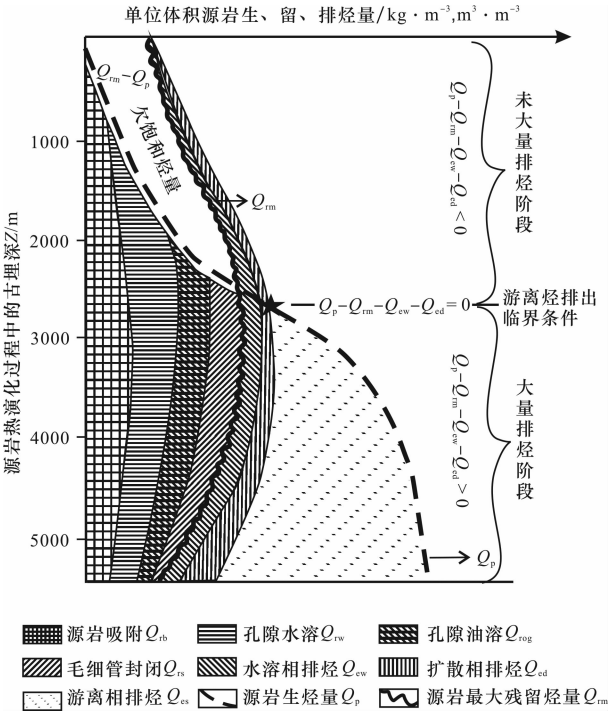


图1 烃源岩排烃门限概念模型[18]

Fig. 1 The model of hydrocarbon expulsion threshold of source rock[18]

1 页岩气的主要特征

1.1 页岩气的成因特征

页岩气的成因类型有生物成因型、热解成因型和热裂解成因3类型及其混合类型。对生物成因气而言，其源岩的热演化程度低，R_o一般不到0.7%，所生成的甲烷碳同位素非常轻，一般都小于−50‰。表1是美国几个主要的页岩气产层的地质地化特征。不难看出，密执根盆地的Antrim页岩气是典型的生物成因，伊利诺斯盆地的New Albany页岩气是生物及热成因混合气。这些页岩气的埋深较浅、镜质体反射率低以及甲烷气碳同位素轻。这里需要强调说明，有些页岩气主要是属于生物成因，但其甲烷碳同位素并没有达到生物成因的天然气的判别标准，较生物成因的甲烷碳同位素偏重。对于热解成因页岩气而言，其甲烷碳同位素往往又较源岩母质对应的热演化程度下的甲烷碳同位素低。造成这些现象的根本原因是，页岩气是一种残留型天然气藏，它们现今的组分特征及其碳同位素特征是其各个热演化阶段生成的不同成因类型的天然气的混合体。

1.2 页岩气的来源特征

生成页岩气的源岩富含有机质，天然气主要来自于有机母质的热作用。在有机母质进入热成熟之前，它们往往都要经历一个生物降解作用阶段。在这一阶段生成的未熟生物气大多被滞留于源岩内，与后期生成的热解气混合，构成了成熟热解气或热裂解气的一部分[21]。Curtis[1]对美国产工业性泥页岩气的5套主要页岩气层的地质特征和地球化学特征进行了归纳和总结，发现泥页岩一般具有如下特征(表1)。

表 1 美国含气页岩主要特征及资源量[1,22]

Table 1 The main features and resources of gas bearing shale in America[1,22]

盆地	盆地类型	页岩名称	地层年代	埋藏深度/m	厚度/m	干酪根类型	ω(TOC)/%	R_o/%	含气量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	吸附气含量/%	采收率/%	总孔隙度/%	渗透率/($10^{-3}\mu m^2$)	石英含量/%	地层压力系数	资源量/($10^8 m^3$)
阿巴拉契亚	前陆盆地	Ohio	泥盆纪	610～1 524	91～610	Ⅱ	0.5～23	0.4～4	1.7～2.83	50	10～20	2～11	<0.1	45～60	0.35～0.92	63 713～70 792
密执根	克拉通盆地	Antrim	泥盆纪	183～730	49	Ⅰ	0.3～24	0.4～0.6	1.13～3.5	70	20～60	2～10	<0.1	20～41	0.81	3 398～5 663
伊利诺斯	克拉通盆地	New Albany	泥盆纪	183～1 494	31～122	Ⅱ	1～25	0.4～0.8	1.13～2.64	40～60	10～20	5～15	<0.1	50	0.99	566～5 663
福特沃斯	前陆盆地	Barnett	早石炭世	1 981～2 591	61～300	Ⅱ	1～13	1.0～2.1	8.49～9.91	40～60	8～15	1～6	0.01	35～50	0.99～1.02	>7 419
圣胡安	前陆盆地	Lewis	早白垩世	914～1 829	152～579	Ⅲ为主,少量Ⅱ	0.45～3	1.6～1.88	0.37～1.27	60～85	5～15	0.5～5.5	<0.1	50～75	0.46～0.58	28 317

(1)泥页岩气的地层厚度较大,埋深较浅。目前具有经济可采价值的页岩气地层的厚度均大于 6 m,最大达 610 m,埋深范围为 183～2 600 m[1]。埋深主要受当前钻探水平和经济条件的限制。埋深过浅,泥页岩含气饱和度较低;埋深过大,开采困难、成本太高而不具备工业价值。

(2)泥页岩气的 TOC 含量值变化范围大,可由 0.3%到 25%[1]。目前,美国主要的页岩气产层的 TOC 含量都较高,一般超过 2%。TOC 含量高的泥页岩含粘土矿物多,吸附性强,单位体积岩石内的容气量多。

(3)泥页岩气的干酪根类型多为Ⅰ和Ⅱ型,Ⅲ型较少。类型好的源岩生成的油气量多,自身残留的烃量也多。需要指出的是,母质类型较好的泥页岩,其在热演化程度较低时形成泥页岩油藏,在热演化程度较高时,通过原油的裂解才能转变为泥页岩气藏。

(4)泥页岩的 R_o 在 0.4%～4.0%,变化范围宽。从美国目前的页岩气产层看,它们的 R_o 都在 1.0%～2.0%。这说明,形成页岩气资源并不需要源岩达到一个很高的热演化程度,关键是能够饱和岩层的残留需要。在满足了这一条件的情况下,它们内部残留的天然气在钻探的情况下能够得到较多的释放,从而实现有效开采。演化程度较低的源岩,生成的天然气量较少,能够残留的最大气量也较少,在开采过程中能够释放出来的气量亦较少,因而难以构成最优质的页岩气资源。热演化程度非常高的源岩层,虽然生成的天然气量非常大,但同时它们的埋深也大,孔渗非常小,温压也高,在这种条件下残留的气量较小。绝大部分的天然气已被排出源岩外,形成了深盆气藏和常规气藏。它们还因埋深太大而得不到经济开采,如果因构造变动暴露地表,它们内部残留的气量还将大量损耗。因此,这类高演化程度的泥页岩层也构成不了最优质的页岩气资源。

1.3 页岩气的储层特征

(1)页岩气富集于泥页岩内部复杂的介质条件中。泥页岩气既富存于暗色泥岩和页岩的孔隙内、裂缝中,也富集在泥页岩内部的浅色粉砂岩、细砂岩的薄互层中(图 2),还有的溶解于干酪根介质内。



图 2 储集页岩气的泥页岩

Fig. 2 Shale gas reservoir of mud shale

(2)泥页岩气富集在非常细小的原生孔隙内[2](图 3)。事实上,尽管泥页岩自身非常致密,但其孔隙度的大小随裂缝发育程度的不同变化范围较大,可由 1%到 15%,渗透率则随裂缝发育程度的不同

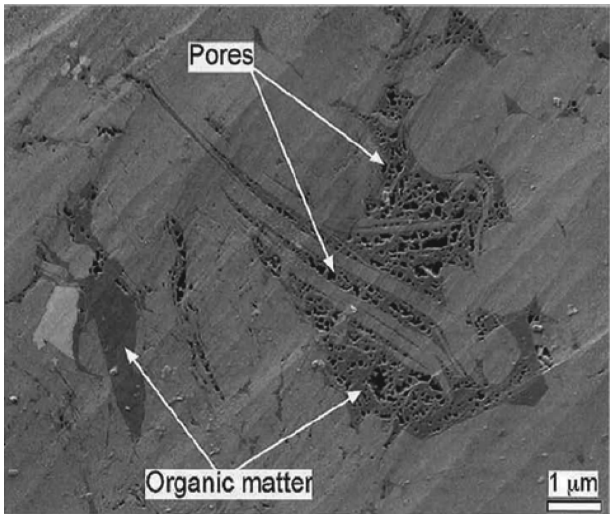


图 3 富集在孔隙与裂缝中的游离气[23]
Fig. 3 The free gas enriched in the pores and fractures[23]

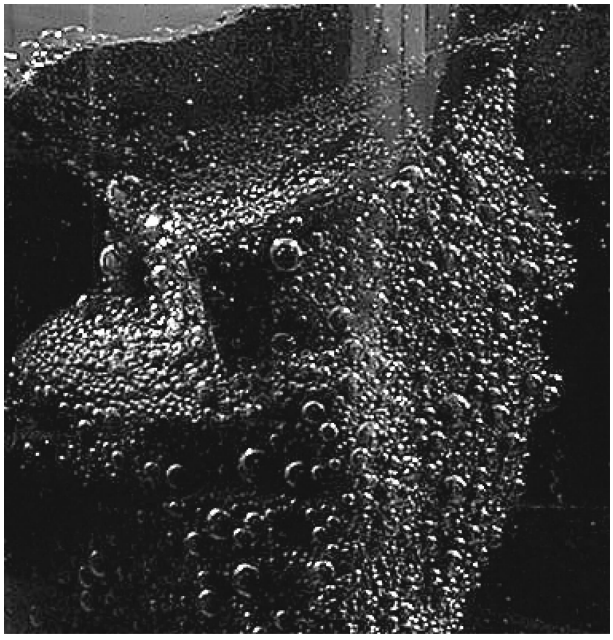


图 4 吸附于岩石表面的天然气[23]
Fig. 4 The natural gas absorbed in the rock surface[23]

而有较大变化。

(3)泥页岩气以多种相态形式存留于孔隙空间,包括吸附态、游离态以及溶解态,赋存在泥页岩中。其中吸附作用是页岩气储集下来的重要机制之一,吸附态天然气的含量变化为 40%～85%[1](图 4),主要是吸附在干酪根或矿物表面上,游离气及溶解气则富集在岩石孔隙、有机质内孔隙及裂缝的空间内。

(4)泥页岩气在岩石中具有广泛的饱和性,每吨岩石含气量为 0.4～9.9 m^3[24]。大多数情况下为 1～3 m^3/t,它们主要以吸附状态存在于岩石内,吸附气含量一般为 20%～85%[24]。泥页岩残留的气量与许多地质条件有关,包括埋深条件、温压条件、生烃条件以及岩层的排烃条件等等。

上面从天然气成因类型、源岩特征和储集特征 3 个方面阐述了泥页岩气的基本特征。即便如此,由于目前工业性产气层的地质地化条件变化大,要总结出泥页岩油气藏资源的判别标准或下限是非常困难的。对比分析美国不同盆地的页岩气成藏地质条件发现,各影响因素之间具有不同程度的互补性。如福特沃斯盆地与阿巴拉契亚盆地泥页岩平均含气孔隙度小但有机碳含量高,二者依然具有较高的页岩气产能。

2 世界页岩气勘探概况与勘探成效

据 2005 年 RHS 的统计,全球页岩气资源量为 456×10^{12} m^3,主要分布在北美、亚洲、欧洲和非洲。2011 年 4 月美国能源信息署(EIA)发布了"世界页岩气资源初步评价报告",根据 Advanced Resources 国际有限公司负责完成的美国以外 32 个国家的页岩气资源评价以及美国页岩气资源评价结果,全球页岩气技术可采资源总量为 187.6×10^{12} m^3。这次评价没有包括俄罗斯、中亚、中东、东南亚和中非等地区,因为这些地区或有非常丰富的常规资源,或缺乏基础的评价资料。

美国是世界上最早发现和生产页岩气的国家,已经实现了页岩气的大规模商业开采,页岩气已成为继致密砂岩气和煤层气之后的第三种重要的非常规天然气资源[25]。加拿大、中国和欧洲国家也正积极开展页岩气方面的研究和勘探及开发试验工作。

(1)北美的页岩气勘探概况与勘探成效。美国目前已在多个盆地中发现并开采出了页岩气。美国的页岩气主要发现于中生界—古生界(D—K)地层中,勘探开发的主要盆地有阿巴拉契亚盆地(Appalachian Basin)的 Ohio 页岩、密执根盆地(Michigan Basin)的 Antrim 页岩、伊利诺斯盆地(Illinois Basin)的 New Albany 页岩、威利斯顿盆地(Williston Basin)的 Bakken 页岩、圣胡安盆地(San Juan Basin)的 Lewis 页岩、福特沃斯盆地(Fort Worth Basin)的 Barnett 页岩及阿纳达科盆地(Anadarko Basin)的 Woodford 页岩等[26-27],勘探正在由东北部盆地向中西部盆地发展。根据 Brathwaite 的研究结

果,美国页岩气原地资源量大于 85×10^{12} m^3[28]。2009 年美国页岩气产量为 878×10^8 m^3,2010 年为 $1\ 379\times10^8$ m^3,2011 年则达到 $1\ 700\times10^8$ m^3,占该国天然气总产量的 1/4[29-31]。

加拿大的页岩气资源同样很丰富,主要分布在 5 个盆地中:BC 省东北部中泥盆统的 Horn River 盆地和三叠系 Montney 页岩,阿尔伯达省与萨斯喀彻温省的白垩系 Colorado 群,魁北克省的奥陶系 Utica 页岩,新布伦斯威克省和新斯克舍省的石炭系 HortonBluff 页岩[32]。根据加拿大非常规天然气协会(CSUG)资源评价结果,加拿大页岩气的原地资源量大于 42.5×10^{12} m^3[26]。

(2)欧洲的页岩气勘探概况与勘探成效。国际能源署 2009 年预测欧洲的非常规天然气储量为 $3\ 500\times10^8$ m^3,其中将近一半蕴藏在泥页岩中,这个数字远低于美国或者俄罗斯。国际能源署提醒说,从全球来看,除了撒哈拉以南的非洲地区,欧洲的页岩气储量可能是最少的。欧洲自 2007 年启动了由行业资助、德国国家地质实验室协助的为期 6 年的欧洲页岩气项目(GASH)以来,已经在 5 个盆地发现了富含有机质的黑色页岩,初步估算页岩气资源量至少在 30×10^{12} m^3 以上[33]。

(3)亚洲的页岩气勘探概况与勘探成效。亚洲页岩气的研究尚处于探索阶段,没有大规模商业性开采的页岩气,但中国正在大力开展页岩气方面的研究并取得了巨大成效。2002 年至 2008 年页岩气的研究主要基于理论层面上,在 2009 年西南油气田成功开钻中国第一口页岩气井——威 201 井。西南油气田最早着手页岩气的开发研究,通过取芯分析化验等系列前期研究发现,蜀南地区页岩分布广泛,页岩层厚度大、含气性较好,有着良好的勘探开发前景。随后国内外多个石油公司也加入到中国页岩气勘探开发的研究中,很好地推动了页岩气的发展。据 Rogner[34] 估计,我国和中亚地区页岩气原地资源量约 100×10^{12} m^3,是仅次于北美地区的世界第二大页岩气资源大区。张金川等[7]曾对我国页岩气资源潜力进行了估算,认为我国的页岩气资源总量约为$(15\sim30)\times10^{12}$ m^3,中值为 23.5×10^{12} m^3。

3 页岩气理论研究取得的主要进展

通过多年的勘探开发实践和研究,世界在泥页岩气的形成机制、分布预测方法和开发增产措施等方面取得了一系列重要的进展。

(1)认识到长期以来被天然地看成为源岩或盖层的致密泥页岩在一定的地质条件下可以作为一种新型的储油气目的层,在油气勘探中有着巨大的发展潜力。长期以来,泥岩和页岩被认为是油气的生成母岩,我们经常关注的是它们的有机母质的丰度、类型、转化程度及生排油气历史;而今作为一种自生自储自盖的非常规油气资源,必须重视对它们富集油气和保存油气方面的研究。

(2)认识到泥页岩油气藏与煤层(油)气藏、泥岩裂缝性油气藏一样,都属于自生自储类的油气资源,但三者在成藏特征及油气的富存状态方面有着显著的差异(表 2)。它们的根本区别表现在 3 个方面:①泥页岩油气藏中油气的富存状态十分复杂。这类油气藏中的天然气除了吸附态之外,还有溶解态,甚至包括液化态和固化态。但其他两种油气藏中的天然气相态简单,煤层气主要为吸附态,裂缝性天然气主要为游离态。②煤层气的富存介质主要为有机质构成的煤层,其他两种油气藏的富存介质条件均为泥页岩层,差别显著。③泥岩裂缝性油气藏不完全属于自生自储自盖,它们之中的油气实际上已从源岩内排出源岩外,只是目前还在同一层中而已。此外,泥岩裂缝性油气藏的开采主要依赖浮力作用,与常规油气藏没有差别,而前两者必须通过解析作用才能释放被吸附或溶解的天然气。

(3)认识到页岩油气藏与深盆油气藏、致密构造气藏和致密岩性气藏一样,都是孔渗条件非常差的致密型油气资源,但四者的成因机制和分布特征有着显著的不同(图 5)。它们之间的主要区别在于离源岩之间距离的远近。泥页岩油气藏是一种离源最近的致密型油气藏,是一种典型的"自生自储自盖型"的非常规油气资源。它们自源岩生成后就在源岩内部的原生孔隙内富集成藏,是在饱和了源岩各种形式需要后没有被排出源岩之外的残留部分,它们的特性最能代表源岩。深盆气藏是富集在紧临源岩层的致密砂岩储层内的非常规油气资源,它紧临源岩但不在源岩内,有些学者称它为根缘气藏[15]。致密的构造气藏和致密的岩性地层气藏,均属常规气藏之列,虽然在烃源灶的控藏范围之内,但可以离源区较远。它们是在浮力作用下形成的常规油气藏,后因埋深加大,地层被压实变得致密形成的。

表 2 页岩气、煤层气及泥岩裂缝性油气特征对比表

Table 2 The features of shale gas, coalbed methane and fractured mudstone hydrocarbon

比较特征	泥页岩油气藏	煤层气藏	泥岩裂缝性油气藏
勘探现状	已发现有工业性泥页岩气藏、油藏。美国2009年泥页岩气藏产量超过 800×10^8 m^3；泥页岩油藏的年产量数百万吨。	已发现大量的煤层气藏。许多国家已实现大规模的工业性开采。	已发现有工业性泥岩裂缝性油藏、气藏和油气藏。
天然气组成特征	同常规天然气藏。甲烷为主，也有少量的轻烃气体。	甲烷为主。	同常规天然气藏，组成以甲烷为主，乙烷、丙烷等含量变化较大。
油气成因	生物成因，有机质热演化成因	生物成因，有机质热演化成因。	生物成因，有机质热演化成因。
来源特征	生成的烃量超过了自身各种形式的残留需要并进入了排烃门限，能够开始向外大量排烃的泥页岩。	有机质丰富含量超过30%、生成的(油)气量饱和了自需要的煤系地层。	进入了排烃门限并发生过大量生排烃作用的泥页岩。
储集特征	吸附气和游离气并存，吸附气 20%～80%。	吸附气 80%以上。	游离气为主。
成藏特点	自生自储自盖。	自生自储自盖。	自生自储，也可能自盖，主要在裂缝空间富集成藏。
分布特点	受泥页岩发育区控制，分布广泛。	受煤层发育区控制，分布广泛。	受油气生成条件和裂缝发育区控制。
开采特点	降压解吸开采。	降压解吸开采。	自然压力开采。

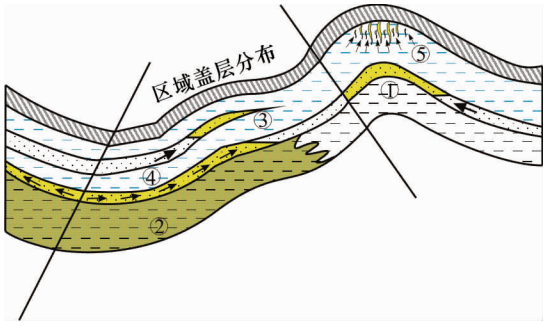


图 5 页岩油气藏与致密深盆油气藏、致密构造气藏及致密岩性气藏对比图

Fig. 5 The distribution of shale gas reservoir, deep basin gas reservoir, structural tight sandstone gas reservoir and lithologic tight sandstone gas reservoir in the geological condition

①—致密常规构造油气藏(浮力成藏，压实致密)；②—致密页岩油气藏(内源产气排驱孔隙水成藏)；③—致密地层岩性油气藏(浮力成藏，压实致密)；④—致密深盆油气藏(近源气注入排驱孔隙水成藏)；⑤—常规裂缝性油气藏(毛细管力差成藏)。

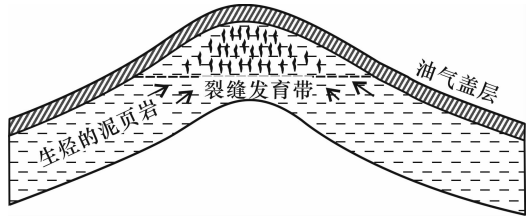


图 6 泥页岩裂缝性油气藏成藏模式与基本特征

Fig. 6 Accumulation model and basic characteristics of fractured mud/shale reservoir

(4)认识到页岩油气藏中的裂缝与泥页岩裂缝油气藏中的裂缝对于这两类油气资源都非常重要，但它们对于两类油气藏的地质意义不同。比较泥页岩油气藏和泥页岩裂缝性油气藏不难发现，裂缝对于这两类油气藏的形成和开采来说至关重要。对于泥页岩裂缝性油气藏，裂缝为油气富集提供了储集空间和动力来源，没有裂缝这类油气藏不可能存在。裂缝是形成这类油气藏的必要条件，也是勘探这类油气藏的最重要地质依据(图 6)。对于泥页岩油气藏，裂缝在页岩气开发过程中能增加渗透率，在开发过程中水平井穿过裂缝发育带，通过水力压裂措施产生大量裂缝并提高页岩气的渗流能力，没有裂缝它们不能实现经济开采[35](图 7)。尽管两类油气藏都需要裂缝，但裂缝对于二者的地质意义是完全不同的。对于泥页岩裂缝性油气藏而言，裂缝是形成油气藏的必要条件，没有裂缝，这类油气藏就不存在。在这种情况下，可以将裂缝作为寻找这类油气藏的地质依据。而对于泥页岩油气藏或页岩气，有没有裂缝这类资源都能形成。裂缝的存在和产生主要是为了让已经富集起来的天然气能够更好更快地释放出来，形成具有工业价值的产能。泥页岩气层中的裂缝，往往都是为了开采效益的需要而人为产生的。在中国松辽、渤海湾、柴达木及四川等盆地中均有裂缝性泥页岩油气藏的发现[5,36-39]。

4 页岩气研究中存在的主要问题

页岩气虽然实现了较大规模的工业性开采，但

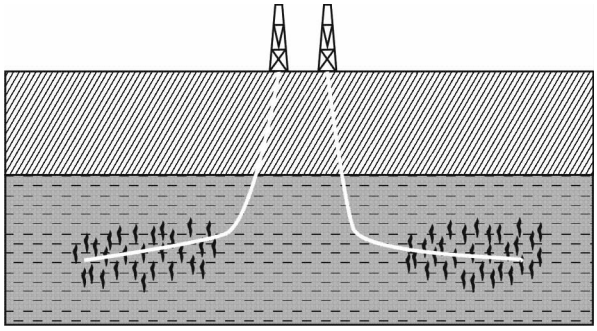


图7 页岩气开发过程中水平井钻探及裂缝的产生[35]
Fig. 7 Horizontal well drilling and the creation of cracks in the process of shale gas development[35]

仍然存在诸多问题。解决这些问题,对于加快页岩气资源的勘探进程具有十分重要的意义。这些问题归纳起来有下列几个方面。

4.1 页岩气是一个通俗名,没有科学地表达出页岩油气资源的科学内涵

建议使用泥页岩气藏、泥页岩油藏或泥页岩油气藏等更为科学的概念替代目前广泛使用的页岩气、页岩油或页岩油气这一类术语。在页岩油气前面加上一个"泥"字,表明这一类资源既可富集在页岩内,也可能富集在泥岩内这样一个客观的事实。在页岩油气的后面加上"藏"字,表明泥页岩油气代表的是一种资源,一种受多种地质条件控制的、在地质历史过程中逐步形成的以及经过研究和勘探能够实现科学预测的天然资源。

(1)首先,页岩气容易与传统意义上的人造页岩油概念混同[17]。页岩气系指泥岩或页岩在各种地质条件下生成后在源岩中残留下来的天然气。页岩油是油页岩经热加工后,其有机质受热分解生成的产物,是一种"人工石油",比天然石油含有更多的不饱和烃,并含氮、硫和氧等非烃类有机化合物[20]。

(2)页岩油气实际上是指自然界形成的一种非常规的油气资源。虽然泥页岩油气是烃源层内没有排出的残留油气,但并非所有的烃源岩都具有商业性开采天然油气资源的价值。泥页岩油气的富集受众多地质条件的控制,包括源岩层形成的地质环境、源岩层的生烃条件、源岩层残留油气的能力以及开采时的脱气率等等。用"藏"的概念表征泥页岩油或泥页岩气这类资源,强化了它们的经济价值和实用意义,突出了它们形成过程的复杂性、富集规律的客观性和勘探开采的科学性。

(3)泥页岩油气藏术语较好地表达了天然的页岩油气资源的科学内涵。目前,在美国的威利斯顿盆地中已发现有直接赋存在泥页岩中的液态石油资源并得到了工业性开采[3]。这类赋存在泥页岩中的石油资源不能简单地称作页岩油,因为传统认为的页岩油是油页岩经过受热分解生成的产物,而泥页岩中的石油是直接赋存在地层当中的,故可将赋存在泥页岩中的液态石油和天然气统称为泥页岩油气藏。在这类油气藏中,赋存油气的泥页岩本身既是烃源岩又是储层,油气主要以吸附、游离和溶解等多种形式存在于各种岩性之中。源岩层内赋存的是石油还是天然气取决于有机质转化成油气时的演化阶段。

4.2 泥页岩油气藏的成因机制不清,缺乏统一的、行之有效的判别标准

建议使用"排烃门限"概念[18-19]判别泥页岩气藏、泥页岩油藏和泥页岩油气藏。一套生油气岩,如果目前生成的烃量已经饱和了自身各种形式的存留需要并进入了排烃门限,我们将其称之为有效烃源岩,它同时也就变成了泥页岩油气藏。如果生油气层进入了排气门限,则称它为有效气源岩,同时也是泥页岩气藏;如果生油气层进入了排油门限,则称它为有效油源岩,同时也是泥页岩油藏;如果生油气层都已进入了排气门限和排油门限,则称它为有效的油气源岩,同时也是泥页岩油气藏。当泥页岩油气藏达到了当前的工业开采标准后,我们将它称之为有效的泥页岩油气藏。

(1)进入排烃门限的源岩具有自身饱含烃特征和向外排烃的能力,在钻探过程中改变温压时能够释放出石油和天然气。排烃门限是指烃源岩在深埋演化过程中,其生烃量满足了自身吸附残留、水溶残留、油溶残留、毛细管或封闭孔隙封堵残留等各种形式残留需要后开始以游离相排出油气的临界地质条件[18]。

(2)排气门限与排油门限存在差异,泥页岩油藏与气藏判别标准不同。随着泥页岩气藏和泥页岩油藏的相继发现和工业性开采,需要建立不同的标准进行判别。应用源岩排油门限和排气门限可以解决泥页岩油藏和泥页岩气藏的判别问题。研究表明,在埋深演化过程中,源岩在时间上首先进入排气门限,然后进入排油门限(图8)。它们在演化过程中的早期可能形成了泥页岩气藏,在后期有可能又转变成了泥页岩油气藏,最终因液态石油高温裂解,它们又转变成了泥页岩气藏。

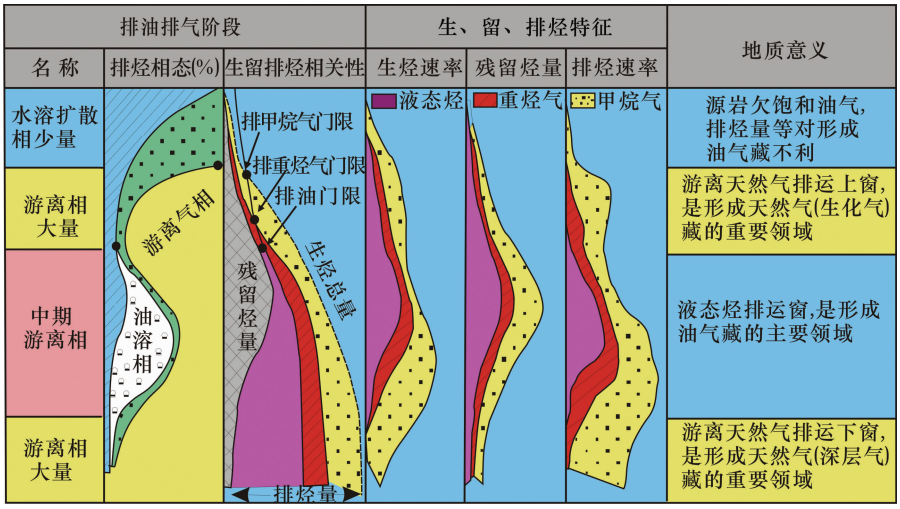


图 8 烃源岩演化过程中排气门限与排油门限比较及其综合控油气作用[17]

Fig. 8 The oil/ gas expulsion thresholds and its controlling on accumulation[17]

(3)排烃门限受多要素控制,不能依据单一指标判定泥页岩排油气门限或泥页岩油气藏。源岩的排油气门限受生烃量和残留烃能力两方面因素的控制,涉及的地质因素多达上百个。研究表明,大多数因素并非独立变量,还有一些因素的影响太小,唯有三大地质要素[40],即有机碳(TOC)含量、有机母质转化程度(R_o)以及有机母质类型(KTI)决定着源岩排油门限和排气门限的变化,它们能够反映基本有效信息的 76%。这三大地质要素,在决定源岩层的排油气门限时互补。

4.3 泥页岩气分布发育模式不明,目前缺乏统一的预测方法

由于缺少泥页岩油气藏的统一的成因模式,很多学者参照美国已发现并开采的泥页岩油气藏的成因模式指导类似盆地的油气资源勘探。下面是根据一些实际盆地的地质条件所总结出来的有关泥页岩油气藏的分布模式。

(1)构造活动区泥页岩气分布模式:阿巴拉契亚盆地页岩气分布。阿巴拉契亚盆地页岩气藏分布于构造非常活跃的地区。本区页岩气藏被大小不同的断层所切割。在这种条件下,页岩层内的天然气还能够得到保存或部分保存,说明天然气并非以常规的吸附态和游离态存在。它们从另一个侧面证明了页岩气可能以液化或固化形式存在于泥页岩中的推论。阿巴拉契亚盆地页岩气虽然有些得到了工业性开采,但它们在美国目前的页岩气产量中所占比率非常小,意义有限。这也说明,页岩气虽然在构造变动强度较大的地区也有一些能够得到保存,但大多数因温压条件的改变,尤其是大量裂缝的产生,使得它们大都得到释放而损耗掉了。

(2)构造稳定区泥页岩气分布模式:伊利诺斯盆地泥盆系页岩气分布。伊利诺斯盆地泥盆系页岩气分布在构造稳定区。它们在分布上与常规油气分布区域相互叠置。研究表明,伊利诺斯盆地泥盆系页岩气层也是该盆地常规油气资源的主要来源,这证实了页岩气层即为源岩没有排出外面的残留气的推断。大量的常规油气资源的形成和保存要求研究区构造稳定。另一方面,构造稳定也为页岩气的保存创造了条件。这一模式的最大意义在于可以表明常规油气资源的烃源层就是我们可能长远利用的页岩气藏。

(3)生物成因的页岩气分布模式:密执根盆地 Antrim 页岩气分布。密执根盆地生物成因的 Antrim 页岩气埋藏较浅,上覆沉积了更新世的冰碛层,为 Antrim 页岩的保存提供了遮挡条件。这从另一个侧面告诉我们,页岩气对上覆盖层的保存条件的要求是非常低的。反过来说,页岩气在源岩内并非以常规的吸附和游离形式存在,而有可能是一种前所未知的、在地表条件下都难以散失的形式存在,可能是以液化或固化形式、也可能是以溶解或凝析形式存在。密执根盆地生物成因的 Antrim 页岩气的形成还说明,页岩气或页岩油这类资源是广泛存在的,潜力是十分巨大的。人类将来面临的挑战不是缺少资源,而是如何发展技术来开发和利用这些资源。

(4)热成因高产稳产页岩气分布模式:福斯沃斯

盆地 Barnett 页岩气分布。福斯沃斯盆地 Barnett 页岩气,属于热成因的页岩气,其页岩气产能高,产量稳定并快速增长,可能与下列 3 方面原因有关:①曾经历较大埋深,受较强的热生气作用,源岩生成的气量早已饱和了自身的残留需要并可能进入了以液化态或固化态高度富集于源岩内。②页岩层上下存在的厚层碳酸盐岩构成了天然的遮挡,使页岩层内富集的天然气得到了较好的保护,这也不难解释,致密遮挡层的存在一方面作为良好的盖层可以抑制天然气的逸散;另一方面由于气体无法逸散出去,赋存页岩气的地层内部压力升高,从而产生更多的裂缝,促进页岩气的富集和开采。在整个 Newark East 页岩气田中,缺少这一遮挡层的地区,页岩气层位所产天然气产量明显低于存在遮挡层的地区[41]。③Barnett 页岩气层目前的埋深远较地史期的最大埋深低,它们自身在当前温压条件降低后能够残留的气量远较曾经拥有的气量小,相当多的天然气处于一种过饱和状态,因此在钻探时能够得到大幅度释放。

5 泥页岩油气资源预测方法与应用

泥页岩油气藏是一种形成于源岩内部的残留型非常规油气藏。依据对烃源岩层残留烃临界饱和量大小的研究和评价可以预测泥页岩油气藏的分布并评价它们的品质。残留烃量越大的泥页岩层,越容易形成资源密度高的泥页岩油气藏,它们在开采过程中能够释放出的烃量越多,工业价值越大。在预测泥页岩油气藏时需要考虑下列几个主要因素对源岩残留烃临界饱和量大小的影响,其中包括源岩层的有机母质(TOC)丰度、源岩层热演化程度或埋深(R_o/Z)、源岩层的欠压实程度(ΔP)和构造环境等。

5.1 泥页岩层的有机质含量(TOC)影响页岩气储量

有机质是天然气吸附的载体,其类型和含量的大小将直接影响吸附气含气量的大小。Fort Worth 盆地 T. P. Sims # 2 井 Barnett 组页岩 TOC 含量(y)与页岩气产率(x)之间存在 $y=27.538x+67.886$ 的线性关系,其他页岩产层也多具有类似特征[17]。对海拉尔、松辽盆地和柴达木盆地侏罗系的烃源岩残留烃特征研究表明,TOC 含量越大的泥页岩层内残留烃量越大(图 9、10)。研究还表明,TOC 含量较高的地层在形成时主要为还原环境,它们有利于粘土矿物的形成,粘土矿物含量高的泥页岩层吸附油气的能力更强。

5.2 埋深处于中等程度的泥页岩层残留油气能力最强

在考虑了温度、压力、孔隙度、TOC 和粘土矿物含量等多种因素的影响,以及残留油气的多种形式,包括吸附、水溶、油溶和毛细管力封堵等,模拟获得的松辽盆地青山口组等泥页岩层残留油气的量及其随埋深的变化如图 10 所示。研究表明,每方岩石残留的油量间于 1～3 kg;每方岩石残留的气量间于 1～3 m^3[18]。在埋深过程中,每方岩石能够残留的油气量是先增大,在埋深达到 2 000 m 时达最大,然后不断减少。事实上,在美国已发现的具有经济可采价值的页岩气,其埋深均小于 2 600 m。埋深太大不利于商业开采,进入排烃高峰以后随着埋深的

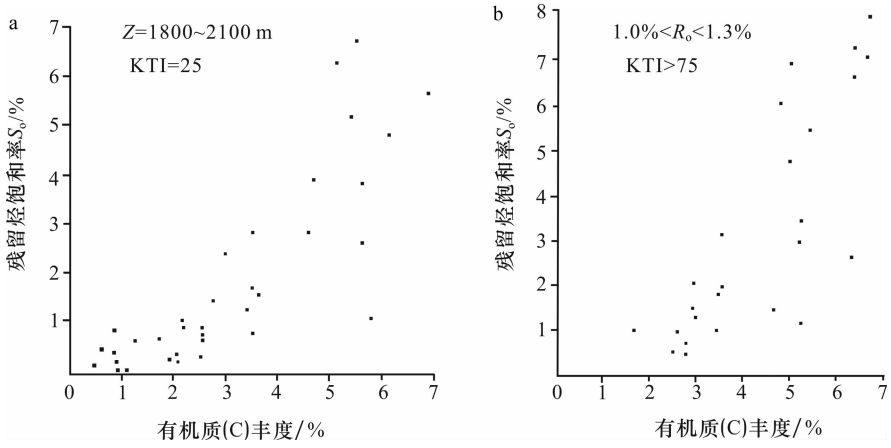


图 9 烃源岩有机碳含量与含烃量关系图

Fig. 9 Relationship between organic carbon content and residual hydrocarbon

a—海拉尔盆地;b—松辽盆地。

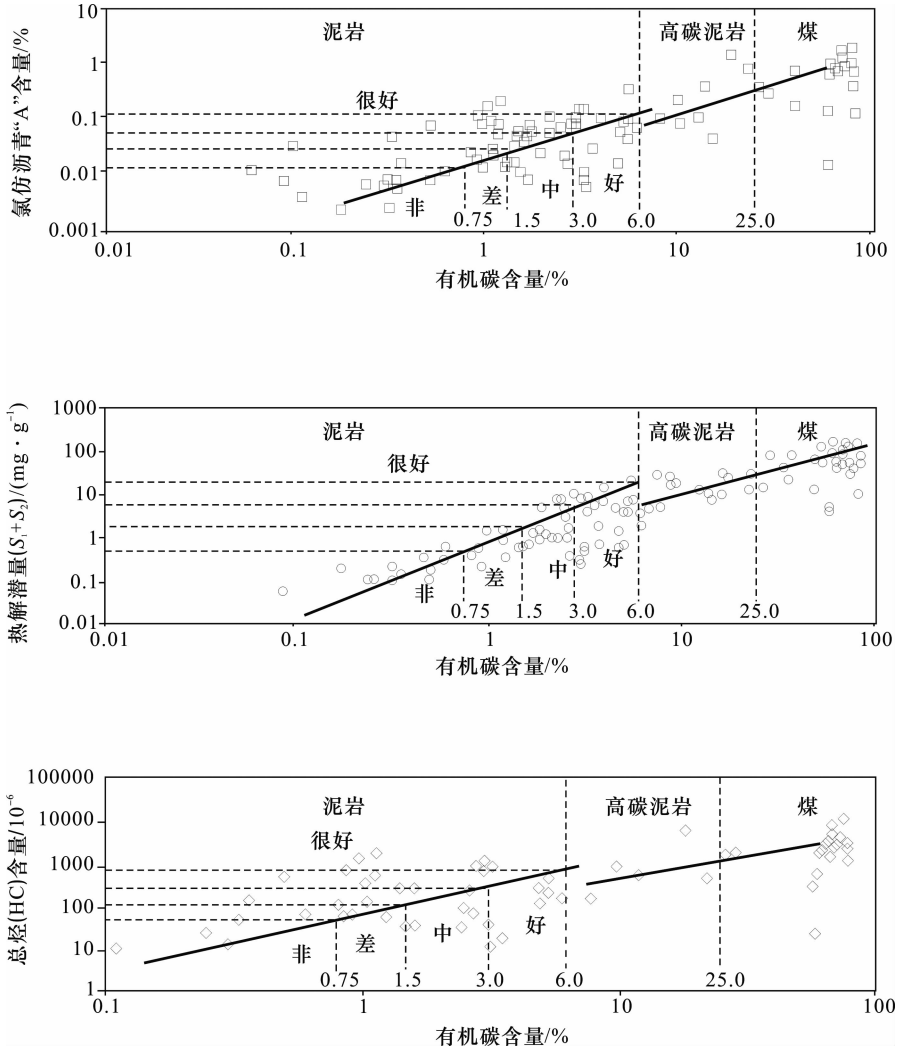


图 10 柴达木盆地侏罗系烃源岩残留烃特征

Fig. 10 The characteristics of residual hydrocarbon in Jurassic source, Qaidam Basin

a—有机碳含量与氯仿沥青"A"相关图；b—有机碳含量与热解潜量相关图；c—有机碳含量与总烃相关图。

加大残留的烃量会逐渐减少。在图 11 中，与残留烃量最大对应的埋深下的 R_o 约为 1.0%～1.2%。这些说明，在其他条件相同的情况下，处于大量生油气高峰时期的泥页岩是勘探泥页岩油气资源的最有利勘探目标。

5.3 处于欠压实状态的泥页岩有利于残留油气量增大

松辽盆地广泛发育的两套泥页岩，即青山口组和嫩江组，它们在埋深 1 000 m 左右进入排油气门限并在埋深为 2 500 m 左右达到排油气高峰期。这两套源岩层普遍具有欠压实的特征，在 1 600 m 左右欠压程度最高，随着埋深加大，它们的欠压实特征逐步消失。研究表明，源岩层内残留的烃量有随欠压实程度增强而增加的趋势(图 12、13)。欠压实作用增大的残留烃量在钻探过程中更易于释放，因为钻探能够使得地层内的高压得到释放，油气得到开采。

5.4 构造相对稳定地区形成和保存的泥页岩油气藏资源密度高

普遍的观点认为构造作用对页岩气的生成和聚集有积极的影响，其影响主要体现在构造作用可以产生裂缝，从而一方面可以有效改善泥页岩的储集性能，另一方面可以改善储层渗透率。本文认为，在构造活动过于强烈的地区，泥页岩中富集的天然气不容易完全保存下来，有相当一部分因裂缝的产生而损耗。处于稳定构造环境下的泥页岩气藏往往具有更高的资源密度和更高的产能。位于福特沃斯盆地的 Barnett 页岩埋深相对美国其他盆地产页岩气

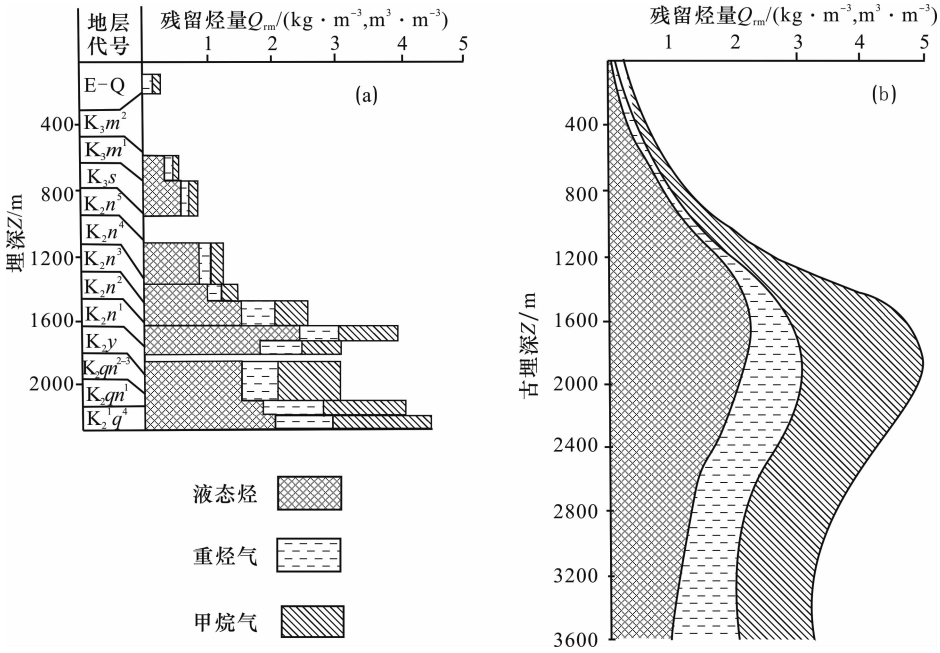


图 11 松辽盆地英 15 井各层段残留烃量及青一段残留烃量随深度变化史[17]

Fig. 11 The characteristics of residual hydrocarbon and its evolution with depths of Qingyi Formation, Ying 15 well, Songliao Basin[17]

a—各层段现今情况;b—青一段地史情况。

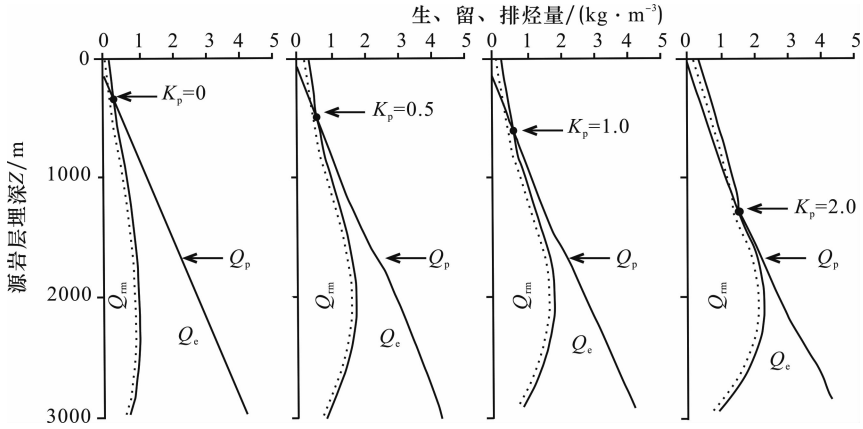


图 12 欠压实程度(K_p)的影响[18]

Fig. 12 The effects of undercompaction on residual hydrocarbon[18]

w(TOC)=1%;KTI=75;H=500;Q_p—生烃量;Q_m—残留烃饱和量;Q_e—排烃量。

的地层更深,经历的构造活动较弱,其产量和产能在美国所有盆地的泥页岩气产量高,佐证了构造作用对页岩油气藏的破坏和稳定的构造环境对页岩气藏的保护。

5.5 泥页岩油气藏资源潜力预测方法及其应用

(1) 泥页岩油气藏资源潜力预测方法。目前尚未见到成熟的并被广泛采用的预测方法。建议依据实际条件下源岩残留烃临界饱和量及其钻采过程中温压下降而释放油气的比率等参数进行推测,计算公式为

$$Q=H\cdot S\cdot Q_{rh}\cdot K_{re} \quad (1)$$

式中:Q 为泥页岩气的有效资源量,10^8m^3; H 为泥页岩油气层的厚度,m; Q_{rh}为单位体积泥页岩中残留的油气量,m^3; K_{re}为泥页岩油气在钻采过程中的释放率,%。

中国泥页岩油气藏的研究与勘探还处于发展初期,应对各个盆地的有机质类型和含量、有机质成熟度、厚度埋深、源岩残留量等地质要素进行研究,并

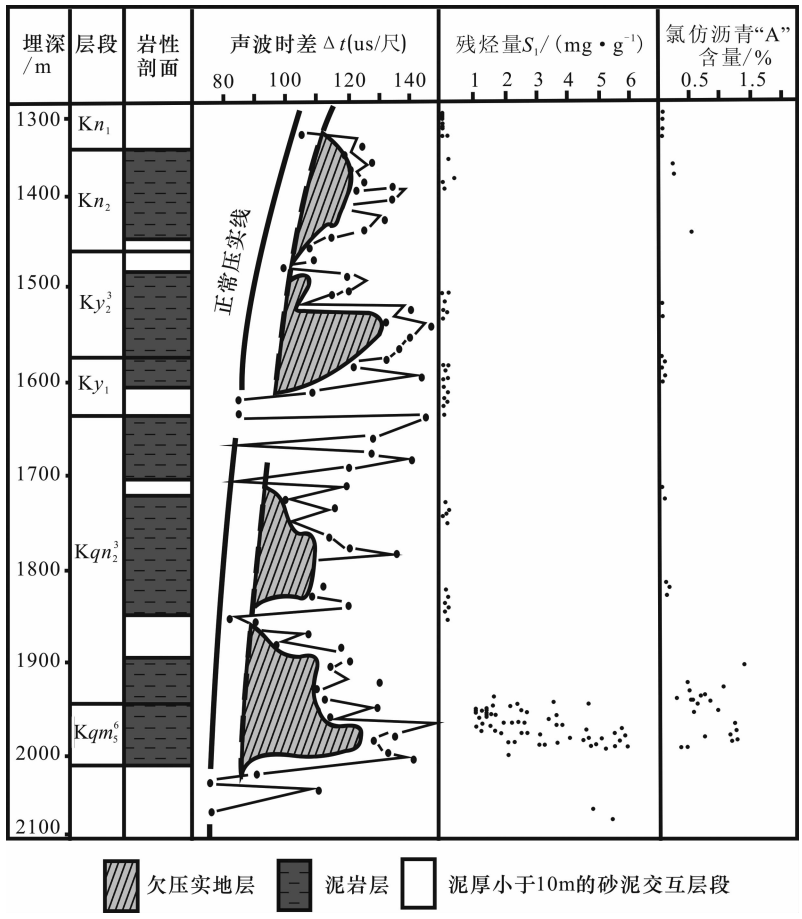


图 13 松辽盆地欠压实与残留烃量关系图

Fig. 13 Relationship between undercompaction and residual hydrocarbon, Songliao Basin

结合对矿物组分和温压条件的分析,计算出各个盆地的资源,从而实现对有利勘探区的预测。

泥页岩油气藏自身几乎不具有自然产能,要想获得有商业价值的天然气,均须通过后期压裂措施增加其产能。自身地层地质条件的不同,以及后期采用的增产技术的不同,泥页岩油气藏的产能有很大的变化,早期以游离气为主,产量较高,递减快;后期以吸附气或液化气或固化气产出为主,产量降低慢。气藏内主力气层采气速度较大,采出程度较高,储量动用充分,非主力气层采气速度低,储量基本未动用,若为长井段多层合采层间矛盾更加突出。单井控制储量和可采储量小,供气范围小,产量低,气井稳产条件差。这些因素的存在使得不同盆地以及同一盆地不同区块页岩气的释放烃率具有较大的差别,本文采用 1～2 m^3/m^3(单位体积岩石的残烃量)作为各盆地浅层(1 500 m 以上)源岩的残烃率,2～3 m^3/m^3 作为深层源岩的残烃率[17]。据北美页岩气勘探的实际经验和成效取 20%～60%的估算值作为页岩气开采的释放率。基于上列参数取值,对中国主要含油气盆地的泥页岩气资源量进行了估算(表 3)。

(2) 中国泥页岩油气资源潜力。依据上述方法,本文研究了中国各主要含油气盆地烃源层的地质地化特征并对它们的页岩油气资源进行了初步评价,结果表明,中国主要含油气盆地中的泥页岩气的远景资源量为(77.35～357.68)×10^{12} m^3,中间值为 218×10^{12} m^3。深度是影响泥页岩气经济开采的重要影响因素,美国勘探泥页岩气的最大深度为 2 600 m,取 2 600 m 以上为页岩气目前的经济可采深度,则以估算出中国主要含油气盆地泥页岩气的现实资源量为(38.2～207.9)×10^{12} m^3,中间值为 123×10^{12} m^3。在所有的盆地中,柴达木盆地第四系的生物型泥页岩天然气资源[42]、四川盆地三叠系的热解型泥页岩天然气资源以及松辽盆地上白垩统的热解型泥页岩油资源潜力最大,值得深入研究和优先开发。详细情况与结果如表 3 所示。

表 3 中国主要含油气盆地泥页岩气资源潜力预测

Table 3 The resource potential of mud shale gas in the petroliferous basins, China

盆地	泥页岩层位	埋深/m	有效烃源岩厚度/m	有效烃源岩面积/(10^4 km^2)	泥页岩气远景资源量/(10^{10} m^3)	2 600 m以上泥页岩气现实资源量/(10^{10} m^3)
塔里木	中下侏罗统	2 500～3 000	110～600	6～8	994～4 473	—
柴达木	第四系	1 000～1 500	200～500	5～9	490～2 940	490～2 940
吐哈	中下侏罗统	2 000～4 500	100～300	3～5	320～1 440	120～650
准噶尔	中下侏罗统	2 000～4 500	80～220	6～8	420～1 890	160～800
四川	上二叠统	2 200～4 500	200～350	5～8	715～3 218	500～2 700
	上三叠统	2 000～4 000	300～500	7～10	1 360～6 120	800～5 200
鄂尔多斯	三叠系	1 000～4 000	100～200	6～10	480～2 160	260～1 600
松辽	上白垩统	1 000～2 200	300～500	8～10	1 440～6 480	1 440～6 480
	下白垩统	3 500～4 000	150～200	6～8	490～2 205	—
渤海湾	古近系	2 500～4 500	110～470	4～8	696～3 132	—
江汉	古近系	2 000～3 000	100～300	2～2.5	180～810	30～200
二连	下白垩统	1 000～1 800	100～200	4～6	150～900	20～220

注:远景量为(77.35～357.68)×10^{12} m^3,现实量为(38.2～207.9)×10^{12} m^3。需要注意的是,目前所计算的结果只是在现有资料基础上的初步预测,随着勘探程度的提高,工程技术的进步等,这一评价结果也会随之发生变化。

6 结论

(1)页岩气系指泥岩或页岩在各种地质条件下生成的、已饱和岩石自身各种形式的残留需要、进入了排烃门限但尚未完全排出的,以吸附、游离和溶解等多种形式残留于泥页岩内部的天然气资源。

(2)全球泥页岩气资源量现在为 456×10^{12} m^3 以上,主要分布在北美、亚洲、欧洲和非洲地区。美国是世界上最早发现和生产泥页岩油气资源的国家,已经实现了泥页岩气资源的大规模商业开采。北美的加拿大,欧洲以及中国等也在紧随美国之后积极地开展页岩气方面的研究和勘探与开发的探索工作。

(3)泥页岩油气资源的研究已取得重要进展。认识到长期以来被天然地看成为源岩或盖层的致密泥页岩在一定的地质条件下可以作为一种新型的储油气目的层,在油气勘探中有着巨大的发展潜力。认识到泥页岩油气藏与煤层(油)气藏、泥岩裂缝性油气藏一样,都属于自生自储类的油气资源,但四者在成藏特征及油气的富存状态方面有着显著的差异。认识到页岩油气藏与深盆油气藏、致密构造气藏和致密岩性气藏一样,都是孔渗条件非常差的致密型油气资源,但三者的成因机制和分布特征有着显著的不同。认识到裂缝对页岩油气藏与泥岩裂缝油气藏中的油气资源都非常重要,但对两类油气藏的地质意义不同。

(4)目前广泛应用的"页岩气"是一个俗名,没有科学地表达出目前正在被大规模利用的这类油气资源的科学内涵,建议使用泥页岩气藏、泥页岩油藏或泥页岩油气藏等概念替代目前广泛使用的"页岩气"、"页岩油"或"页岩油气"这一类术语。泥页岩油气藏的成因机制,尤其是富存状态并不十分清楚,缺乏统一的、行之有效的判别标准,建议使用排烃门限,包括排气门限、排油门限和排油气门限等概念判别泥页岩气藏、泥页岩油藏和泥页岩油气藏。泥页岩油气藏分布发育模式不明,目前缺乏统一的预测方法,建议参照美国已经发现的并在开采工业性页岩气藏的成因模式指导类似盆地的油气资源勘探。

(5)影响泥页岩油气藏形成和分布的地质因素很多,主要有 4 方面:①有机质(TOC)丰度越高越有利泥页岩油气富集;②埋深或热演化程度处于中等(R_o=0.8%～1.2%)的泥页岩层残留油气能力最强;③处于欠压实状态的泥页岩残留油气量大;④构造相对稳定地区形成和保存的泥页岩油气藏资源密度较高。初步估算中国主要含油气盆地中的泥页岩气的远景资源量为 218×10^{12} m^3 以上,2 600 m 以上的现实资源量为 123×10^{12} m^3 以上。

参考文献

[1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.

[2] Bowker K A. Recent developments of the Barnett Shale play,

Fort Worth Basin[C]// Innovative Gas Exploration Concepts Symposium. Denver, 2002.

[3] Richard M P. Geologic and Production Characteristics Utilized in Assessing the Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Barnett-Paleozoic Total Petroleum System, Fort Worth Basin, Texas [R]. Denver, Colorado: U. S. Geological Survey, 2003.

[4] Warlick D. Gas shale and CBM development in North America[J]. Oil&Gas Financial Journal, 2006, 3(11): 1-5.

[5] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.

[6] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.

[7] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.

[8] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析: 以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33-34.

[9] 江怀友, 宋新民, 安晓璇, 等. 世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 26-30.

[10] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.

[11] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 27-32.

[12] 聂海宽, 张金川, 张培先, 等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J]. 地质科技情报 2009, 28(2): 87-93.

[13] 李登华, 李建忠, 王社教, 等. 页岩气藏形成条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 22-26.

[14] 陈更生, 董大忠, 王世谦, 等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 17-21.

[15] 张金川. 从"深盆气"到"根缘气"[J]. 天然气工业, 2006, 26 (2): 46-48.

[16] Pollastro R M, Cook T A, Roberts N R, et al. Assessment of Undiscovered Oil Resources in the Devonian-Mississippian Bakken Shale Formation, Williston Basin Province, Montana and North Dakota[R]. Denver, Colorado: U. S. Geological Survey, 2008: 3021.

[17] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景, 等. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[18] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 11-48.

[19] 庞雄奇, Ian Lerche, 王雅春, 等. 煤系源岩排烃门限理论研究与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.

[20] 侯祥麟. 中国页岩油工业[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.

[21] Robert C M. Assessment of Undiscovered Natural Gas Resources in Devonian Black Shales, Appalachian Basin, Eastern U. S. A[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report. Reston, VA USA, 2005: 1-68.

[22] Hill D G, Nelson C R. Gas productive fractured shales: An overview and update[J]. Gas TIPS, 2000, 6(2): 4-13.

[23] Vello A K. Worldwide Gas Shales and Unconventional Gas: A Status Report[R]. Research Partnership to Secure Energy for America, Arlington, VA USA, 2009.

[24] 董大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 324-336.

[25] Kent P, John L. Unconventional Gas Reservoirs: Tight Gas, Coal Seams, and Shales. Working Document of the NPC Global Oil and Gas Study[R]. Texas, USA, 2007.

[26] Dawson M. Shale gas resource plays in north America opportunities and challenges [G]// NBF Energy Services Conference, 2009: 14.

[27] Nicholas B H. Shale Gas Exploration in the United States [R]. Alberta: Department of Earth and Atmospheric Sciences University of Alberta, Canada, 2011.

[28] Brathwaite L D. Shale-Deposited Natural Gas: A Review of Potential[R]. California: California Energy Commission, 2009.

[29] 李世臻, 乔德武, 冯志刚, 等. 世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 918-924.

[30] Shale gas is a global phenomenon[EB/OL]. http://www.eia.gov/pressroom/releases/press357.cfm. April 5, 2011.

[31] 2011 年国内外油气行业发展报告[R]. 北京: 中国石油天然气集团公司经济技术研究院, 2012.

[32] 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.

[33] Vello A K, Scott H S. Worldwide Gas Shales and Unconvintional Gas: A Status Report[R]. http://www.rpsea.org/attachments/articles/239/Kuuskraa Handout Paper Expanded Present Worldwide Gas Shales Presentation. pdf, Arlington, VA USA, 2009.

[34] Rogner H H. An assessment of world hydrocarbon resources [J]. Annual Review of Energy and the Environment, 1997, 22(22): 217-262.

[35] Ratchford M E. Geologic Overview of the Fayetteville Shale Gas Play[R]. Conway, Arkansas: Arkansas Geological Survey, 2007.

[36] 焦大庆, 王德仁, 武晓玲. 东濮凹陷天然气成藏及富集规律[J]. 石油与天然气地质. 2006, 27(6): 794-803.

[37] 曲寿利, 季玉新. 王鑫. 泥岩裂缝油气藏地震检测方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

[38] 赖生华. 刘文碧. 李德发, 等. 泥质岩裂缝油藏特征及控制裂缝发育的因素[J]. 矿物岩石, 1998, 18(2): 47-51.

[39] 叶军. 川西坳陷侏罗系烃源岩评价[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(3): 11-14.

[40] 庞雄奇, 李丕龙, 金之钧, 等. 油气成藏门限研究及其在济阳坳陷中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 204-208.

[41] Basim F, Harold W, Gary A, et al. Gas potential of selected shale formations in the Western Canadian sedimentary basin [J]. Canadian Resources, 2004, 10(1): 21-25.

[42] Pang X Q, Zhao W Z, Su A G, et al. Geochemistry and origin of the giant Quaternary shallow gas accumulations in the eastern Qaidam Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36: 1636-1649.