

# 中美致密砂岩气成藏分布异同点比较研究与意义

童晓光<sup>1</sup>, 郭彬程<sup>2</sup>, 李建忠<sup>2</sup>, 黄福喜<sup>2</sup>

(1. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**[摘要]** 致密砂岩气已成为全球非常规天然气勘探的重点领域。中国致密砂岩气分布范围广, 目前已在鄂尔多斯、四川等盆地实现了规模开发; 美国落基山地区是致密砂岩气充分发育和勘探相对成熟的地区。对比研究中美致密砂岩气的形成条件和成藏特征是加快中国致密气开发利用与开拓勘探思路的有效途径。中国与美国致密气藏对比研究表明, 中美致密砂岩气具有以煤系地层为主要烃源岩、储层致密、存在异常地层压力、源储紧邻与气藏大面积分布等共性特征; 差异性主要体现在致密气源岩沉积环境与热演化程度, 储层非均质性及其致密化因素, 气藏纵向和平面分布特征等方面; 控制中美致密砂岩气成藏条件和特征差异性的主要因素是沉积盆地性质、沉积环境和后期构造作用。针对中国致密砂岩气的特殊性, 加强储层非均质性、优质储层预测、气藏的分布规律的研究以及加强工程技术攻关提高单井累计产量是致密砂岩气勘探开发工作的重点。

**[关键词]** 致密砂岩气藏; 成藏特点; 差异性

**[中图分类号]** TE122 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)06-0009-07

## 1 前言

致密砂岩气已成为全球非常规天然气勘探的重点领域。据统计, 全球已发现或推测发育致密砂岩气的盆地有 70 个, 主要分布在北美、欧洲和亚太地区<sup>[1]</sup>。美国是目前全球致密砂岩天然气年产量最多的国家, 美国本土现有含气盆地 113 个, 其中发现致密砂岩气

藏的盆地有 23 个, 主要分布在落基山地区(见图 1)。据 EIA(U. S. Energy Information Administration)评价结果(2008, 2010), 美国致密砂岩气资源量为 19.8 万亿~42.5 万亿 m<sup>3</sup>, 为常规气资源量(66.5 万亿 m<sup>3</sup>)的 29.8%~63.9%, 可采资源量 13 万亿 m<sup>3</sup>, 2010 年美国致密气年产量达 1 754 亿 m<sup>3</sup>, 其成功的开发实践为中国致密砂岩气开发提供了宝贵经验。

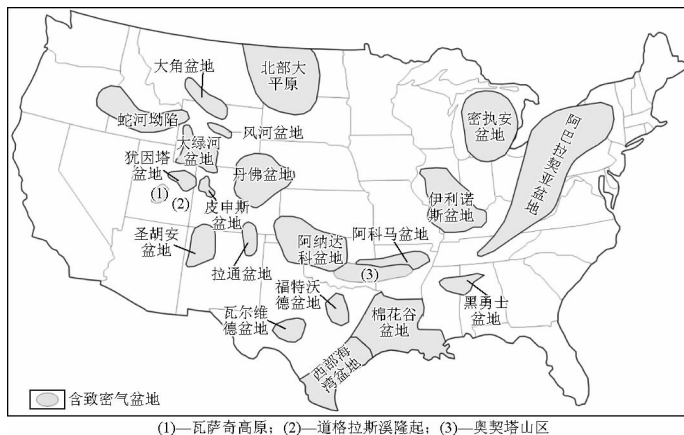


图 1 美国含致密砂岩气盆地分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of the tight sandstone gas basins in the United States

**[收稿日期]** 2012-04-06

**[基金项目]** 中国工程院重大咨询研究项目“我国非常规天然气开发利用战略研究”(2011-ZD-19-2)

**[作者简介]** 童晓光(1935—), 男, 浙江嵊州市人, 中国工程院院士, 长期从事世界石油地质和勘探研究; E-mail: tongxg@cncpint.com

中国致密砂岩气藏发现较早,勘探领域广阔,鄂尔多斯、四川、松辽和渤海湾等盆地都具有形成致密砂岩气藏的有利地质条件(见图2)。据李建忠等人2010年资源评价初步结果,中国致密砂岩气技术可采资源量为8万亿~11万亿 $m^3$ 。经过近年努力探索,中国致密砂岩气发展较快,形成了鄂尔多斯和四川盆地两大致密气现实区,以及塔里木库车深层等5个突破区,2011年致密气产量突破256亿 $m^3$ 。

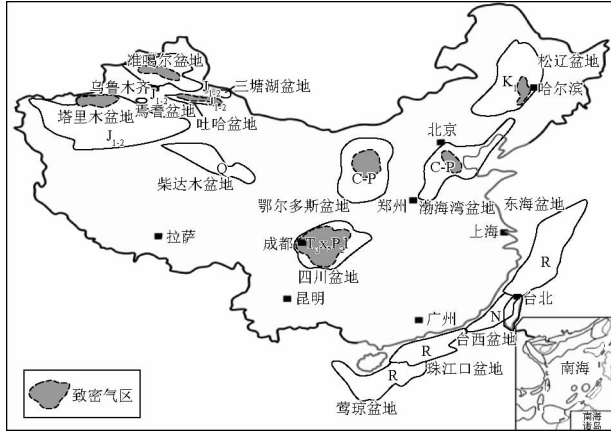


图2 中国主要致密砂岩气分布图

Fig. 2 The distribution of the mainly tight sandstone gas regions in China

目前,中国致密砂岩气发展不平衡,资源探明率低,理论技术起步晚、利用水平低,特别是与美国等理论技术先进的国家相比,尚存在较大差距。诸多学者对致密砂岩气藏开展过深入的研究<sup>[1-9]</sup>,从盆地背景、生储条件、气藏气水关系、压力特征和圈闭类型等方面探讨了致密砂岩气藏的成因和特点。但针对中美致密砂岩气藏成藏的对比研究尚有待深入。文章试图通过对比研究中美致密砂岩气成藏地质条件与气藏分布特征,来探讨中美致密砂岩气藏分布规律的差异性,开拓中国致密砂岩气的勘探思路,进一步挖掘中国致密砂岩气资源勘探潜力。

## 2 基本地质特征对比研究

### 2.1 中美致密砂岩气地质特征共性明显

对比研究中美致密砂岩气的基本地质特征表明,其共性特征明显,主要体现在致密气发育于煤系地层中,烃源岩分布广、热演化程度高,储层物性差、含水饱和度低和具有异常压力等相似的特征。其中,最典型的共性有两点:一是致密气与煤系烃源岩伴生;二是储层致密,覆压渗透率多小于0.1 mD。

中美致密砂岩气与煤系烃源岩伴生,源岩生烃强度大。煤系源岩均以煤系地层的III型干酪根为主,分布面积广,有机碳丰富,热演化程度高,广覆式生烃特征为大气田的形成奠定了丰富的资源基础。美国落基山地区白垩纪—古近纪沉积背景为克拉通边缘前陆盆地,发育广覆式煤系地层,造就了致密砂岩气藏良好的烃源岩条件。白垩系煤层和煤系泥页岩是落基山地区致密砂岩气的主要气源岩,具有厚度大、分布广、有机质含量丰富的特征,源岩有机质类型主要为适于生气的腐质型III型干酪根。中国致密砂岩气也与煤系地层密切相关。在晚古生代、中生代和新生代3个聚煤时期中<sup>[3,4]</sup>,虽然各时期煤系地层的聚集环境与地区存在差异,但是煤系地层普遍具有发育广泛、分布稳定、有机质丰富和演化程度高等特征,为致密砂岩气藏形成奠定了资源基础。

关于北美地区和中国主要盆地天然气储集层特征已有学者进行了大量的研究<sup>[4-15]</sup>,中美致密气储层的主要共性之一是储层致密,孔隙度、渗透率均比较低。其中,储层平均孔隙度值相近,主要为4%~10%;覆压渗透率多小于0.1 mD。统计表明,中国鄂尔多斯盆地苏里格气田与四川盆地须家河气区的覆压渗透率小于0.1 mD的样品比例占80%~92%,与美国60%~95%的比例相近。

### 2.2 中美致密砂岩气地质特征差异性

由于中美致密砂岩气发育的盆地背景、构造演化与沉积充填作用等方面存在差异,造成中美致密砂岩气的基本地质特征主要差异为沉积环境和储层特点。一是美国以海相—海陆过渡相为主、中国以陆相与海陆过渡相为主;二是不同的沉积环境与构造演化特征是致密气源岩特征有别的主要原因;三是美国致密砂岩储层分布稳定、厚度大,孔隙度较高,中国致密砂岩储层非均质性较强,厚度相对较小。

中美致密砂岩气的主要差异性之一是沉积环境不同。美国落基山地区白垩系储层主要发育于前陆盆地背景的海相与海陆过渡相聚煤环境(见图3(a))。而中国致密砂岩气发育背景多样,以陆相与海陆过渡相为主,如鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系为陆表海的河流—三角洲沉积环境,四川盆地须家河组为海陆过渡相—陆相前陆盆地(见图3(b)),库车坳陷为白垩系—古近系的陆相前陆盆地以及东

生气充注成藏等特征,为该地区致密砂岩气的形成提供了有利条件。中国诸多盆地虽然不乏煤系源岩条件,但是受沉积环境、源岩厚度、热演化程度与构造作用等因素的影响,在勘探实践中,应围绕生气强度相对较高与成藏条件好的地区寻求发现。

中美致密砂岩储层分布的性质有所差异。致密砂岩气储层的发育与展布,受沉积环境和盆地性质控制。美国致密气储层分布稳定、厚度大,中国致密气储层非均质性强、厚度相对较小。美国皮申斯盆地梅萨默德群以海陆过渡相三角洲沉积为主,砂体以透镜状展布为主,气层累计厚度超过 600 m(见表 1),饱和气连续分布,含气面积超过 1 万 km<sup>2</sup>;南部的圣胡安前陆盆地梅萨默德群以河流相与三角洲分流河道沉积为主,砂体呈透镜状展布,砂岩有效厚度大(24 m),含气砂岩面积 410 km<sup>2</sup>,纵向多层叠置。中国鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系为陆表海缓坡沉积环境的三角洲与分流河道席状砂,透镜状与层状砂体共生,砂体有效厚度为 6.3 ~ 8.3 m,含气砂岩面积 1 716 ~ 6 748 km<sup>2</sup>;四川盆地须家河组须二段为海陆过渡相三角洲沉积,须四、须六段致密气砂体为前陆盆地性质的河道砂和下水分流河道砂体,呈透镜状,砂体有效厚度大(10 ~ 34 m),含气砂体面积 200 ~ 656 km<sup>2</sup>(见表 1)。因此,相比而言,美国致密气储层分布相对稳定、厚度较大。

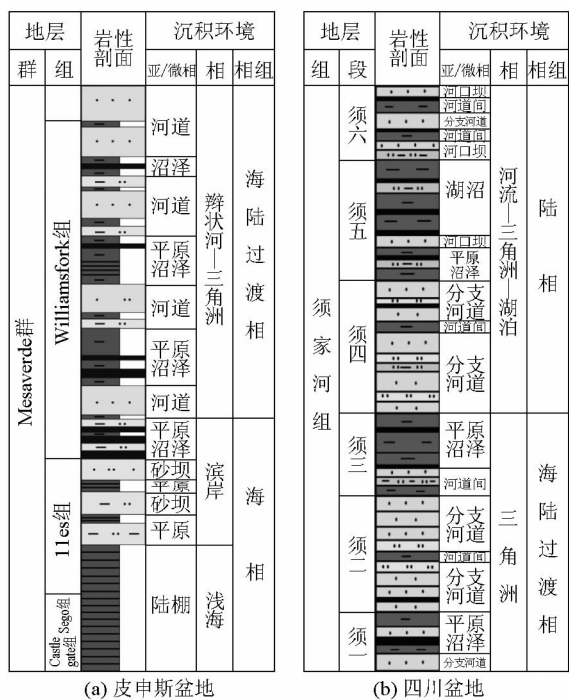


图 3 皮申斯盆地与四川盆地沉积柱状图

Fig. 3 The sedimentary columnar section of the Piceance Basin and Sichuan Basin

中美致密砂岩气源岩的主要参数特征不同,主要影响因素是沉积环境与构造演化。分析认为,美国落基山地区优越的海相—海陆过渡相聚煤环境、中—高适度的热演化程度、高生烃强度与晚期持续

表 1 中美致密气储层主要参数对比表

Table 1 The main parameters comparison of the tight gas reservoir between China and the United States

	丹佛	圣胡安	阿巴拉契亚	鄂尔多斯			四川	
油气田	Wattenberg	Blanco Mesaverde	Appalachian	苏里格	榆林	合川	广安	
层位	Muddy	Mesaverde	Clinton - Medina	盒 8	山 1	山 2	须二 (潼南 2)	须六
目的层埋深/m	2 070 ~ 2 830	1 677 ~ 1 900	1 220 ~ 1 829	2 850 ~ 3 600	2 900 ~ 3 700	2 500 ~ 3 000	2 000 ~ 2 200	1 860 ~ 2 560
目的层厚度/m	50 ~ 100	121 ~ 274	45.7	45 ~ 60	40 ~ 50	40 ~ 60	60 ~ 100	94 ~ 172
孔隙度/%	8 ~ 12	9.5	5 ~ 10	6 ~ 12	6.57	6.2	6 ~ 10	1 ~ 8
渗透率/mD	0.05 ~ 0.005	0.5 ~ 2	<0.1	0.88	0.67	0.15 ~ 1.2	0.1 ~ 0.8	0.1 ~ 0.13
地层压力/MPa	异常低压	异常低压	低压	26	25	27.2	30.64	21.63
含水饱和度/%	44	34	自由水饱和度高	36	37	26	39.2	46
含气饱和度/%	56	66	—	63.7	63.2	74.5	60	53.7
含气面积/km <sup>2</sup>	300(估算)	410	44 011	6 748	4 015	1 716	656	200
有效厚度/m	3 ~ 15.2	24	30 ~ 45	7.8	6.3	8.3	10 ~ 22	34.2

### 3 成藏特征与分布规律对比研究

#### 3.1 气藏特征共性是普遍存在的,但差异性更明显

对比研究表明,中美致密砂岩气藏的共性主要表现在以下几个方面:气藏类型多样,包括构造型、岩性型、地层型、动态圈闭型和复合型等;气体以近距离垂向运移为主;气藏规模大,储量丰度低,一般自然产能低、递减快;普遍具有异常压力;气水关系复杂、物性“甜点”区和裂缝发育区与气藏富集、高产关系密切。中美致密砂岩气藏的共性固然是普遍存在的,但受气藏形成的沉积环境、成藏过程与区域构造特征等因素的控制,中美致密砂岩气藏特征的差异性更加明显,主要体现在以下3个方面。

##### 3.1.1 异常压力

异常高压或异常低压是中美致密砂岩气储层的普遍现象,但是导致异常压力的原因存在差异。北美落基山地区致密砂岩气储层普遍具有异常高压,压力系数一般为1.4~1.7,压力系数最高达1.94,具有明显的起压深度(2 400~2 740 m)<sup>[16,17]</sup>,导致异常高压的主要原因是具有活跃的烃类生成、高的烃柱和高地形的补给区引起的承压状态<sup>[18]</sup>。中国致密砂岩气储层在鄂尔多斯盆地为异常低压,平均压力系数为0.85~0.95,气藏负压主要是抬升剥蚀和气水密度差引起<sup>[4,19]</sup>。四川盆地、库车前陆盆地与渤海湾断陷盆地为异常高压,压力系数分别为1.2~1.5,1.5~1.8和1.2~1.4。其中,四川盆地须家河组虽然普遍具有异常高压,但是没有统一的起压深度,压力系数随埋深而增大,导致须家河组致密气层压力增大的原因除了烃类生成、欠压实作用和构造作用外<sup>[4]</sup>,还包括岩石致密化导致储层孔隙体积缩小<sup>[20]</sup>。

##### 3.1.2 气水关系

美国落基山地区致密气藏在盆地中部为气水倒置,盆地斜坡区无明显气水界面的现象;自盆地向斜坡区气、水含量百分比呈逐渐过渡趋势,气含量减少、水含量增加。中国致密砂岩气储层气水关系受强烈的储层非均质性和构造作用等因素影响,表现出气水倒置、气水间互和气水界面不明的多样性与复杂性。中美致密气局部“甜点”区受构造、储层和裂缝控制,产量变化大,一般1万~3万m<sup>3</sup>/d,最高超过100万m<sup>3</sup>/d,产量高低与次生(溶蚀)孔隙和裂缝发育程度密切相关。致密砂岩气层含水饱和度普遍较高,一般为35%~50%,中国致密砂岩含气饱

和度介于50%~65%,而北美致密砂岩含气饱和度和度相对较高,可达55%~70%(见表1)。

##### 3.1.3 成藏过程

普遍认为致密砂岩气藏是通过扩散作用与构造破裂和水力压裂形成的裂缝进行近距离运聚成藏,不同地区受构造背景、源岩热演化与生烃过程,以及圈闭条件等因素控制具有不同的成藏过程。北美阿尔伯达盆地煤系烃源岩天然气生成于古新世以后,西部坳陷部位的深盆区先生成的天然气就近聚集于动态平衡圈闭中,随后不断成熟的烃源岩生成的天然气向东北方向扩散聚集于坳陷斜坡—缓坡带的岩性与地层圈闭和西部逆掩冲断带的构造圈闭中。中国鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩于中—一晚侏罗世开始生气,经历了由南向北不断成熟并扩散运聚于南北向展布的河道砂体形成的岩性圈闭中。四川盆地须家河组煤系烃源岩则在晚侏罗世,先后在川西和川中地区生成天然气,通过扩散作用和断裂作用向周缘多物源形成的河道砂体储集层运聚成藏,形成构造—岩性型、构造—地层型和岩性型气藏。

### 3.2 气藏空间分布规律

#### 3.2.1 气藏分布规律共性特征

中美致密砂岩气分布规律的最大的共性是源储一体、“三明治”式紧密接触、大面积连续分布。如美国大绿河盆地白垩系 Frontier 组和 Mesaverde 组储集层主要由河流和三角洲环境下沉积的砂岩和粉砂岩组成,平面上连片、纵向上叠置分布,含气储层由厚3~30 m、宽45~1 210 m的单砂体大范围叠合分布,一般埋深2 480~3 580 m。中国的鄂尔多斯盆地二叠统山西组和下石盒子组砂岩储层平面上连片分布,展布范围广,面积约10万km<sup>2</sup>;纵向上多层位砂体叠置,砂层厚度大,一般累计厚度30~100 m,砂体南北向延伸距离较长,达150~200 km,一般埋深2 000~3 500 m。四川盆地须家河组须一、三、五段煤系烃源岩与须二、四、六段砂岩储层呈大面积交互式叠加发育,纵向上形成多套优质生储盖组合,气层累计厚度20~50 m,一般埋深1 860~2 800 m(见表1)。

#### 3.2.2 气藏分布规律差异性

受不同构造背景、盆地性质、沉积特征与成藏过程影响,中美致密砂岩气具有不同分布特征。美国致密砂岩气以盆地中心气为主,主要分布于凹陷区,纵向层系跨度小、平面气藏产状与气藏类型有规律性分布(见图4)。中国致密砂岩气主要分布在斜坡

区和山前构造带,层纵向层位跨度大、不同盆地横向 分布规律差异大。

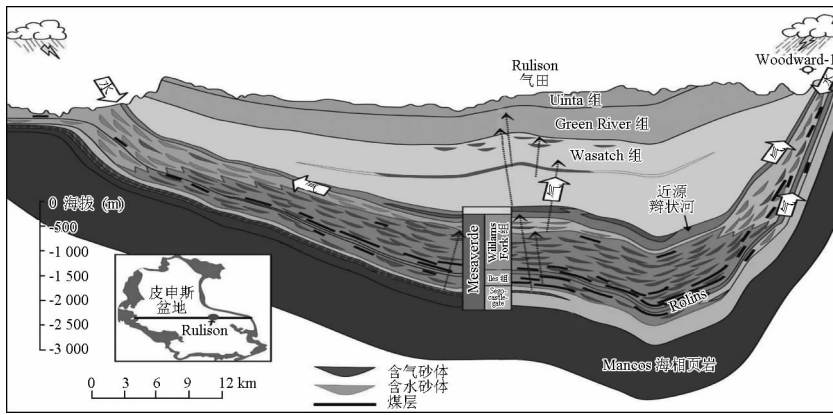


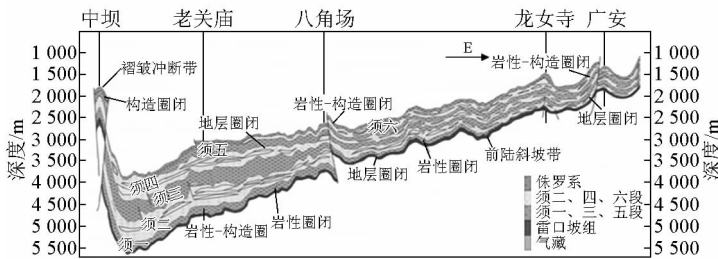
图 4 皮申斯盆地致密气藏东西向剖面示意图

Fig. 4 The east-west profile sketch of tight reservoir in Piceance Basin

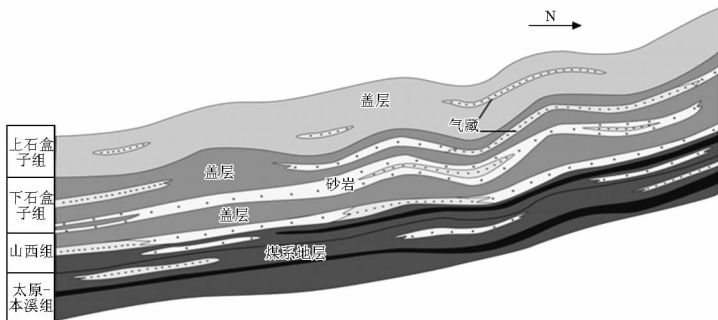
注:据 D. A. Yurewicz,2005,修改

1)美国致密砂岩气主要分布在盆地凹陷区,中国致密砂岩气主要分布在盆地斜坡区或山前带。北美落基山地区在前陆盆地构造背景下,气藏类型包括深盆地(动态圈闭型)、构造型、地层型和岩性圈闭型等,虽然气藏类型多样,但是以分布在盆地中心凹陷区的动态圈闭型为主,平面上呈规律性分布,即西缘逆掩断层带和盆地边缘以构造圈闭型气藏为主,盆地中部前渊凹陷区以动态圈闭型气藏为主,前陆斜坡区为地层与岩性圈闭型气藏。而且由于后期构造稳定,圈闭保持

相对稳定。中国致密砂岩气主要分布在斜坡区和山前构造带,以岩性和复合圈闭型为主。如四川盆地须家河组致密砂岩气虽然具有前陆盆地的构造背景,但是经历了多期构造运动对圈闭进行改造叠加,往往发育构造—岩性型、构造—地层型和岩性—地层型等复合型气藏(见图 5(a)),圈闭类型更丰富多样。鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气圈闭在克拉通背景下形成,经后期差异性隆升改造,以岩性型、地层圈闭型气藏为主(见图 5(b)),类型相对单一。



(a) 四川盆地须家河组



(b) 鄂尔多斯盆地上古生界

图 5 中国典型盆地致密砂岩气分布模式图

Fig. 5 The distribution pattern of the tight sandstone gas off he typical basin in China

2) 美国致密砂岩气纵向层系跨度小、平面气藏产状与气藏类型呈规律性分布。纵向上,北美前陆盆地致密砂岩气主要分布在晚侏罗世—古近纪的沉积地层中,而且主要分布在白垩系,储盖组合层位纵向跨度小、厚度大(见图6(a))。平面上,美国致密砂岩气藏在不同地区具有不同分布特征,西部的大绿河、尤因他和皮申斯等盆地为透镜状气藏,埋深较大,介于1 500~4 000 m,气层厚度一般60~150 m;中部的丹佛、圣胡安、风河和棉花谷等盆地为中浅—中深层层状气藏,埋深700~2 700 m,气层厚度一般10~30 m;北部大平原(包括威列斯顿盆地)为浅层层状气藏,埋深较浅,介于200~800 m,气层厚度一般10~20 m(见表1)。值得指出的是,该地区的气藏源岩为海相页岩。落基山地区以阿尔伯达盆地为代表的前陆盆地致密气分布特征是在逆掩断层带发育背斜型致密气藏,前渊深盆地区以深盆气动态圈闭型气藏为主(见图6(b)),东部斜坡区以大面积分布的地层与岩性型气藏为主。

横向分布规律差异大。中国致密砂岩气的层位分布与聚煤时期相对应,自晚古生代至新生代均有分布,鄂尔多斯盆地主要分布在石炭系—二叠系,四川盆地主要分布在三叠系,库车前陆盆地主要分布在侏罗系—白垩系,松辽盆地分布在白垩系,渤海湾盆地分布在古近纪等,整体特征为层系多、跨度大。平面上,由于盆地性质、沉积充填特征、构造改造作用与成藏过程等方面的差异,气藏具有不同的分布规律。如鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系为克拉通背景上的大陆型陆表海盆地沉积,发育海陆过渡相、陆相河流与三角洲的储盖组合,后期以整体抬升为主,形成区域性北东高西南低的斜坡式气藏分布特征,圈闭类型以岩性圈闭为主(见图6(c))。四川盆地须家河组为古生代克拉通背景上的陆相前陆盆地沉积,发育陆相河流与三角洲为主的储盖组合,后期经历多期构造运动改造,西部逆冲掩覆带以构造型气藏为主,前渊深盆区发育动态圈闭型和岩性型气藏,中—东部前陆斜坡区发育构造—岩性型、构造地层型和岩性型等多种气藏类型(见图6(d))。

3) 中国致密砂岩气纵向层位跨度大、不同盆地

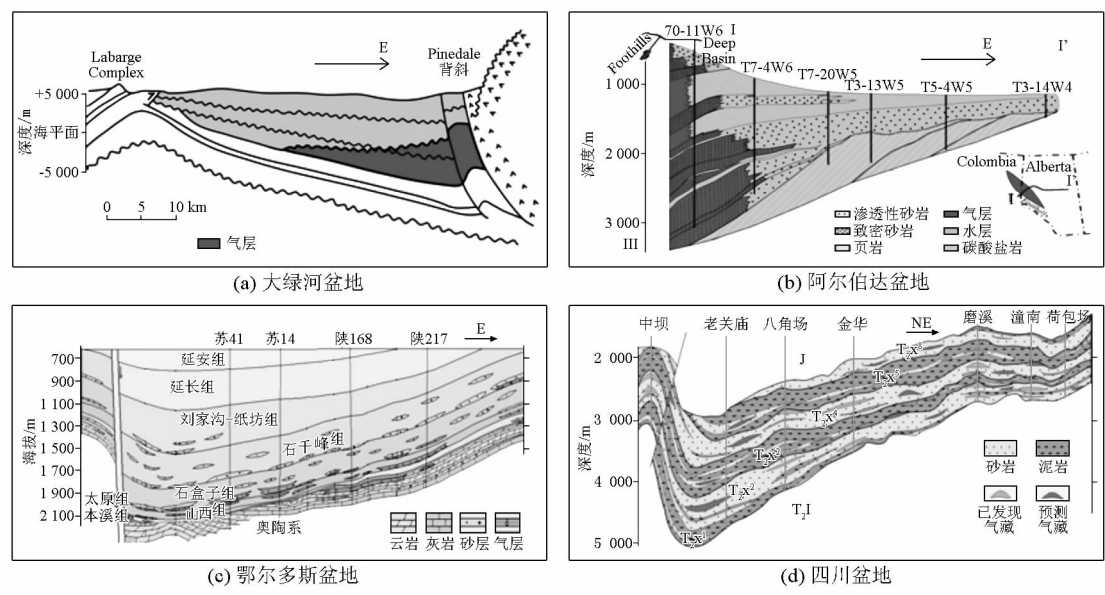


图6 中外典型盆地致密砂岩气藏分布特征

Fig. 6 The distribution characteristics of tight sandstone gas reservoir of typical basins in China and overseas

总体而言,北美落基山地区中生代致密砂岩气盆地是由克拉通边缘盆地前渊阶段发展演化而来的前陆盆地,沉积盆地的形成和演化受西缘褶皱造山带的隆升、褶皱、挤压和推覆作用控制,致密砂岩气藏的形成和分布特征与盆地的基底性质、稳定构

造特征和沉积埋藏演化过程等因素密切相关。中国致密砂岩气盆地虽然具有古生代稳定的克拉通基底背景,由于后期普遍经历多期构造抬升与挤压的强烈改造作用,沉积体系频繁迁移变化,煤系烃源岩成熟演化差异与成藏过程差异等因素,致使气藏特征

与分布规律复杂多变。

## 4 结语

1) 中美致密砂岩气成藏分布有诸多相似之处。致密气与煤系烃源岩伴生,致密气储层覆压渗透率小于 0.1 mD,为低孔低渗的致密砂岩,具有异常地层压力,储盖组合与聚煤时期的沉积地层对应,具有源储紧邻、自生自储、短距离运移,以及气水关系复杂、自然产能低与气藏大面积分布等特征。

2) 受沉积盆地性质、煤系地层沉积环境变化、烃源岩成熟演化过程与后期构造改造作用等因素影响,中美致密砂岩气成藏特征差异性较为明显。

a. 美国致密气以海相—海陆过渡相为主,中国致密气以陆相与海陆过渡相为主;b. 美国储层分布稳定、厚度大、孔隙度较高,中国储层非均质性较强、厚度相对较小;c. 美国致密砂岩气以盆地中心气为主,主要分布于凹陷区,纵向层系跨度小、平面气藏产状与气藏类型有规律性分布,中国致密砂岩气主要分布在斜坡区和山前构造带,纵向层位跨度大、不同盆地横向分布规律差异大;d. 美国致密气含气饱和度较高,中国致密气普遍含水。

3) 针对中国致密砂岩气的特殊性,加强储层非均质性、优质储层预测与气藏的分布规律的研究,以及加强工程技术攻关提高单井累计产量是致密砂岩气勘探开发工作的重点。

### 参考文献

[1] 胡文瑞,翟光明,李景明. 中国非常规油气的潜力和发展[J]. 中国工程科学,2010,12(5):25-29.

[2] Holditch S A, Tschirhart N R. Optimal stimulation treatments in tight gas sands[J]. SPE, 2005:96-104.

[3] 程爱国,林大扬. 中国聚煤作用系统分析[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2001.

[4] 张水昌,米敬奎,刘柳红,等. 中国致密砂岩煤成气藏地质特征

及成藏过程——以鄂尔多斯盆地上古生界与四川盆地须家河组气藏为例[J]. 石油勘探与开发,2009,36(3):320-330.

[5] 刘民中. 美国、加拿大深层致密砂岩气勘探[M]. 黑龙江:大庆石油管理局勘探开发研究院,1989.

[6] Masters J A. Elsworth. Case Study of a Deep Basin Gas Field [M]. USA: American Association of Petroleum Geologists,1984.

[7] 谷江锐,刘岩. 国外致密砂岩气藏储层研究现状和发展趋势[J]. 国外油田工程,2009,25(7):1-5.

[8] 应凤祥,罗平,何东博. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京:石油工业出版社,2004.

[9] 张哨楠. 致密天然气砂岩储层:成因天然气地质[J]. 2008,29(1):1-10.

[10] 何东博,贾爱林,田昌炳,等. 苏里格气田储集层成岩作用及有效储集层成因[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):69-71.

[11] 黄月明,黄建松,刘绥保,等. 鄂尔多斯盆地上古生界低渗透致密砂岩储层研究[J]. 低渗透油气田,1998,3(2):24-28.

[12] 蒋凌志,顾家裕,郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报,2004,21(1):13-18.

[13] 朱筱敏,孙超,刘成林,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田储层成岩作用与模拟[J]. 中国地质,2007,34(2):276-282.

[14] 胡江索,张哨楠,李德敏. 鄂尔多斯盆地北部下石盒子组—山西组成岩作用与储层的关系[J]. 成都理工学院学报,2001,28(2):169-173.

[15] 戴鸿鸣. 川西北异常高压区须家河组砂岩孔隙演化特征[J]. 天然气工业,1992,12(1):16-19.

[16] 周康,彭军,耿梅. 川中—川南过渡带致密砂岩储层物性主控因素分析[J]. 断块油气田,2008,15(2):8-11.

[17] 王瑞飞. 特低渗透砂岩油藏储层微观特征[M]. 北京:石油工业出版社,2008.

[18] Law B E. Basin-centered gas accumulation, dneiper—donetsk basin and donbass region, ukraine[J]. AAPG Bulletin,1997,81(8):1394.

[19] Spencer C W. Hydrocarbon generation as a mechanism for overpressuring in Rocky Mountain region[J]. AAPG Bulletin,1987,71(4):368-388.

[20] 李剑,罗霞,单秀琴,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):54-59.

(下转 30 页)