

非常规含气系统的研究和勘探进展

陈建渝, 唐大卿, 杨楚鹏

(中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:从含油气系统的观点出发, 分别总结了煤层气、盆地中心气、裂缝型页岩气、浅层生物气和天然气水合物五类非常规含气系统的地质和地球化学特征, 修改和补充了传统油气系统的概念, 为天然气新领域的开拓和发展提供了新的思路。常规天然气藏为浮力驱动的存在于构造或地层圈闭中的独立气藏, 而非常规天然气藏一般不是浮力驱动的聚集气藏, 它们在区域上呈连续弥散的聚集, 常常与构造和地层圈闭无关, 因此, 它们的成藏要素和过程与常规天然气藏有所区别。在煤层气和页岩气中, 烃源岩既是储层, 又是盖层且运移距离很短; 储层多为低孔隙度、低渗透性的裂缝型储层, 主要为毛细管力和水力封闭, 大型煤层气藏可以出现在向斜构造中。

关键词:非常规含气系统; 煤层气; 盆地中心气; 裂缝型页岩气; 浅层生物气; 天然气水合物

中图分类号: P542.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2003)04-0055-05 ①

天然气是目前世界上增长最快的能源, 在美国2002年的消耗量几乎为1999年的两倍。目前, 一些非常规气体(如煤层气、页岩气、低渗透致密砂岩气)的产量已占美国天然气日产量的26%以上。为满足不断增长的能源需求, 进一步开拓和发展天然气勘探和开发的新领域, 有必要在多年研究和勘探的基础上, 修改并扩展天然气生成、排驱、运移成藏和储层的传统观念, 更准确地阐明非常规含气系统的概念。

非常规含气系统有过不同的定义。从含油气系统的观点出发, 常规天然气藏为浮力驱动存在于构造或地层圈闭中的独立气藏, 而非常规天然气藏则一般不是浮力驱动聚集的气藏, 缺少底水, 它们在区域上呈连续弥散的聚集, 常常与构造和地层圈闭无关, 因此, 它们的成藏要素和过程与常规天然气藏有所区别。例如, 在煤层气和页岩气中, 烃源岩既是储层, 又是盖层, 且运移距离很短; 储层多为低孔隙度、低渗透性的裂缝型储层; 主要为毛细管力和水力封闭; 大型煤层气藏可以出现在向斜构造中。

1 煤层气(CBM)系统

煤层气的规模和经济价值直到80年代早期才被真正认识到。随着勘探和开发的迅速发展, 到2000年底煤层气已占美国甲烷气储量的8.8%和年产量的9.2%。目前, 在美国的12个盆地中已有

20 000多口井产煤层气。如今, 煤层气的勘探已遍及全世界, 总资源量估计为 $8\,344 \times 10^{10} \sim 25\,928 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。煤层气系统与常规含油气系统在源岩、气体成因、运移通道、聚集和成藏机理方面均有区别^[1,2]。

(1)源岩和运移 大部分煤层是自生自储型, 煤储层中含有自生或运移来的热解气、生物气或混源气。当煤层是自生自储型时, 则不存在运移。煤层气系统的关键事件一般应包括剥蚀去顶和冷却事件^[3]。

(2)气体的储集和储层性质 大部分煤层气吸附在煤有机质表面上^[4], 只有少量的煤层气以游离态储存在裂缝和节理中, 或者以溶解态存在于裂缝、节理及孔隙的水中。煤储层可以是正常压力或异常压力。在一般的压力下, 埋深 $<1\,200 \text{ m}$ 的煤层中的吸附气大于一般砂岩孔隙中所含有的气体量。

(3)盖层和圈闭 对于煤层气系统, 为维持地层压力和阻止气体的解吸和散失, 盖层是必要的。由于气和水的重力分离作用远小于微孔表面上的吸附作用, 而对于常规的圈闭并非必要。世界上煤层气产量最高的区带位于美国圣胡安盆地深部的Fruitland带。

(4)裂缝、渗透率和原地应力 流体在煤层中主要通过裂缝和节理流动。裂缝和节理一般为垂直于层面的正交的裂隙体系。它们主要形成于煤化过程中, 也可以是构造和后煤化作用形成的裂缝。由于上覆地层压力、渗透性随深度而降低, 因此, 美国的煤

① 收稿日期: 2003-07-10 编辑: 禹华珍

作者简介: 陈建渝(1944—), 女, 教授, 主要从事石油地质和有机地球化学的教学和科研工作。

层气多产自 1 200 m 以上深度。

(5) 储层局域化 在所有的盆地中,煤储层的质量变化很大。产气区带的面积仅占产气盆地 10% 左右。

(6) 两种成藏模式 美国圣胡安盆地和粉末河盆地分别代表了煤层气系统的两种成藏模式。圣胡安盆地为高煤阶、自生热裂解气模式,超压和水动力封闭的结合形成了高产区(图 1);粉末河盆地的 Fort Union 带为低煤阶、生物气模式,地下水通过厚层、高渗透的煤层运动,在低压系统形成生物气气带(图 2)。

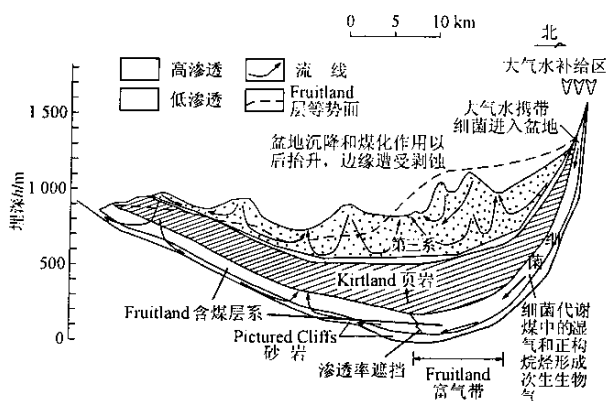


图 1 美国圣胡安盆地煤层气系统剖面图^[2]

Fig. 1 Cross section of coalbed gas system, San Juan Basin, U. S. A.

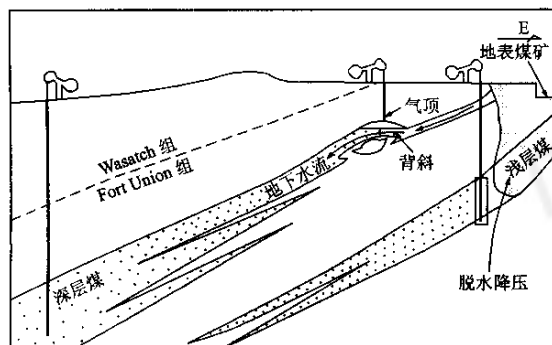


图 2 美国粉末河盆地煤层气系统剖面图^[2]

Fig. 2 Cross section of coalbed gas system, Powder River Basin, U. S. A.

早期对煤层气的勘探强调热裂解气的重要性。近年来,对 Fort Union 低煤阶生物气的成功开发修改和补充了煤层气系统勘探和开发的概念。2000 年,美国圣胡安盆地煤层气产量占美国的 80% 以上;而粉末河盆地 Fort Union 带是美国发展最快的气带之一,它的年产量从 1997 年的 $392 \times 10^6 \text{ m}^3$

增长到 2000 年的 $4\,124 \times 10^6 \text{ m}^3$, 占当年美国煤层气产量的 10.7%, 2001 年的产量高达 $6\,852 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。我国具有极丰富的煤炭资源,除了直接开采煤炭以外,煤层气的重要性也愈益明显。目前,在我国山西、淮南、西北等地区的含煤盆地中广泛开展了煤层气的勘探,业已取得了明显的成效。这些煤层气主要来源于高煤阶的热裂解气。

2 盆地中心气系统(BCGS)

在美国,该系统的产气量已占其年产气量的 15%。盆地中心气的定义很不明确。有人称为“深盆气”,但也有的盆地中心气产自浅处,如美国圣胡安盆地的中心气产自 914 m 深度。也有人称之为“致密砂岩气藏”,然而,有时它包括了常规的、由浮力驱动而聚集的气藏。笔者在文中采用“盆地中心气系统”和“盆地中心气藏”的术语^[5,6]。

该系统的典型特征是区域性连续的气体聚集,储层饱和气,压力异常,一般下倾方向缺少底水,为低渗透致密储层。气藏可存在于从单一的几米厚的储层到几千米厚的多层叠置的储层中。盆地中心气系统基本上可以划分为直接系统和间接系统两大类。直接系统的烃源岩为气源岩,间接系统的烃源岩为油源岩。直接系统一般为毛细管压力封闭,而间接系统则具有更有效的岩性封闭。大多数已知的盆地中心气藏是直接系统。从地层年龄看,直接系统分布的地层可从寒武系到始新统,而间接系统则一般分布于前白垩系。直接系统的典型实例为美国的大绿河盆地,含有盆地中心气的地层为白垩系,局部延伸到下第三系,而源岩则为上白垩统和下第三系煤层及碳质页岩。间接系统的典型实例为美国的阿巴拉契亚盆地,含有盆地中心气的地层为下志留统,源岩为奥陶系页岩,有机质为 II 型干酪根,处于过成熟阶段,其镜质体反射率 $R_o > 1.3\%$, 由油裂解成气。目前,在我国无论是富油盆地(松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地等),还是富气盆地(鄂尔多斯盆地、四川盆地)都发现了不同规模的盆地中心气藏。随着油气勘探深度的加大和隐蔽油气藏勘探技术的提高,相信会找到更多的盆地中心气藏。

(1) 系统的特点 表 1 总结了两大类盆地中心气系统的特点。尽管它们的烃源岩性质不同,但是其运移和聚集的特征相似。

(2) 系统的演化 盆地中心气系统的演化史是由储层 4 个压力期组成的旋回。由于地质过程的动力学性质和对这些过程的响应,这些压力期在地质历史上是短暂的(图 3)。

表 1 盆地中心气直接与间接系统的不同属性^[5]

Table 1 Attributes of direct and indirect basin-centered gas systems

系统类型	烃源岩	储层渗透率/ μm^{-2}	运移距离	储层压力	压力机制	封盖机理	盖层质量	上界性质	成熟度	产状
直接	III 型干酪根	$<0.1\times10^{-3}$	短	低压(超低压)	生烃增压	毛细管力	变化	切割地层	$R_o>0.7\%$	上倾端为水平
间接	I 型或 II 型干酪根	$<0.1\times10^{-3}$	短或长	低压(超低压)	油热解成气增压	岩性或毛细管力	好	平行层面	高度变化	上倾端为水平

注: R_o 为镜质体反射率。

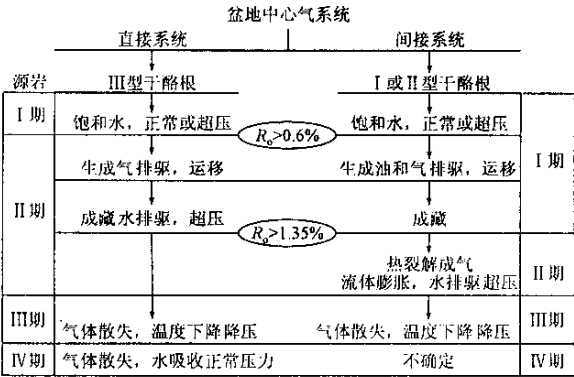


图 3 盆地中心气系统的演化特征和压力期次^[5]

Fig.3 Evolutions of basin-centered gas systems and pressure phases

3 裂缝型页岩气系统

在美国,古生界和中生界页岩中所产的甲烷气也是一种丰富的气体资源^[7]。在裂缝型页岩气系统

中,这些富含有机质的页岩既是系统的烃源层又是储层,同时还是盖层。气体为生物气或热解气。它既可以吸附在干酪根或粘土颗粒的表面,也可以游离气的形式存在于天然裂缝和粒间孔隙中,还可以溶解在沥青中。典型的圈闭是隐蔽的岩性型圈闭。在广大的地理范围内,页岩饱和气体运移距离短,盖层的岩性变化很大。美国 5 个主要产气的页岩层分别是密执安盆地的中—上泥盆统 Antrim 页岩、阿巴拉契亚盆地的 Ohio 页岩、依利诺依斯盆地的 New Albany 页岩、Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩和圣胡安盆地的 Lewis 页岩。它们各个系统的属性不同(表 2)。这些页岩在成熟度、吸附气比例、储层厚度、总有机碳含量和原地气体体积 5 个主要参数值上具有很大的差异,但却同样可以产气。在低渗透的页岩储层中,天然裂缝的发育程度是控制气体储量和产量的因素。据报道^[7],页岩气原地气体体积为 $13\,916\times10^9\sim21\,924\times10^9\text{ m}^3$,可采的资源量达 $868\times10^9\sim2\,128\times10^9\text{ m}^3$ (不算 Lewis 页岩),其中 Ohio 页岩的原地气体体积和可采的资源量均为最大。

表 2 美国主要页岩气系统的地质、地球化学和储量参数(据文献^[7]修改和补充)

Table 2 Parameters of geology, geochemistry and reserves of main shale-gas system in U. S. A

页岩名称	Antrim	Ohio	New Albany	Barnett	Lewis
地区	密执安	肯塔基	印地安那	德克萨斯	新墨西哥
层位	泥盆系	泥盆系	泥盆系	石炭系	白垩系
深度/m	183~732	610~1 524	183~1 494	1 981~2 591	914~1 829
页岩储层厚度/m	21~37	9~30	15~30	15~61	61~91
井底温度/℃	23.9	37.7	26.6~40.5	93.2	54.4~76.6
总有机碳含量 $w(\text{C}_{\text{TO}})/\%$	0.3~24.0	0~4.7	1.0~25.0	4.5	0.45~2.50
镜质体反射率 $R_o/\%$	0.4~0.6	0.4~1.3	0.4~1.0	1.0~1.3	1.60~1.88
气体成因	热解气、生物气	热解气	生物气	热解气	热解气
总孔隙度/%	9.0	4.7	10.0~14.0	4.0~5.0	3.0~5.5
充满气孔隙度/%	4.0	2.0	5.0	2.5	1.0~3.5
充满水孔隙度/%	4.0	2.5~3.0	4.0~8.0	1.9	1.0~2.0
地层系数/ $(\mu\text{m}^{-2}\cdot\text{m})$	$0.3\times10^{-3}\sim1\,524\times10^{-3}$	$0.045\times10^{-3}\sim15\times10^{-3}$		$0.003\times10^{-3}\sim0.6\times10^{-3}$	$1.8\times10^{-3}\sim121\times10^{-3}$
含气量/ $(\text{cm}^3\cdot\text{t}^{-1})$	1 120~2 800	1 680~2 800	1 120~2 240	8 400~9 800	420~1 260
吸附气比例/%	70	50	40~60	20	60~85
储层压力/MPa	2.736	3.45~137.81	2.03~4.15	20.67~27.56	6.89~10.34
压力梯度/ $(\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$	7.90	3.34~9.02	10.13	9.72~9.93	4.56~5.67
日产气量/ m^3	1 120~14 000	840~14 000	280~1 400	2 800~28 000	2 800~5 600
剖面原地气体体积/ m^3	$168\times10^6\sim420\times10^6$	$140\times10^6\sim280\times10^6$	$196\times10^6\sim280\times10^6$	$840\times10^6\sim1\,120\times10^6$	$224\times10^6\sim1\,400\times10^6$
井储量/ m^3	$6\times10^6\sim33.6\times10^6$	$4.2\times10^6\sim16.8\times10^6$	$4.2\times10^6\sim16.8\times10^6$	$14.0\times10^6\sim42.0\times10^6$	$16.8\times10^6\sim56.0\times10^6$

万方数据

4 浅层生物气系统

据 Rice 1993 年的估计,非常规生物气占全世界天然气资源量的 20%。气藏存在于三角洲、大陆架和陆相等环境中;储层年龄主要为白垩纪和第三纪。在美国存在不少生物气藏,其中墨西哥湾和阿拉斯加的库克湾是最重要的生物气田区^[8]。西西伯利亚盆地具有占世界储量 1/3 的巨大天然气资源,是生物气和热解气的混合^[9]。其次为中国的柴达木盆地第四系生物气田、波兰和意大利的生物气田。非常规浅层生物气系统埋藏浅,一般小于 600 m,并沿盆地边缘分布。浅层生物气是未成熟的富有机质的烃源岩在厌氧细菌作用下形成的天然气。气体以生物甲烷气为主,碳同位素轻,有时也混有热解气。

(1)系统特征 在非常规生物气系统中圈闭和盖层都不太重要。烃源岩和储层十分接近,运移路径非常短,上覆地层很薄。生物气的生成有两个完全不同的过程,因此,非常规浅层生物气可以分别归入早期生物气生成系统和晚期生物气生成系统。早期生物气是在源岩和储层沉积以后的很短时间内发生的,其以后的运移和聚集可以持续很长时间。美国大平原北部的碎屑岩和丹佛盆地的白垩系储层中的气藏就是这类早期生物气生成系统的例子。晚期生物气是在源岩和储层沉积以后长达几百万年的时间内发生的,其以后的运移和聚集时间很短。密执安盆地北缘的裂缝型页岩气和粉末河盆地的煤层气是晚期生物气生成系统的实例。

(2)烃源岩的几何形状 早期生物气生成系统的有效烃源岩的几何形状为毯状,覆盖在盆地的产气区(图 4)。气体聚集范围大,为低渗透储层,与烃源岩关系密切。晚期生物气生成系统的烃源岩围绕盆地边缘呈环状分布。当较淡的水携带细菌进入

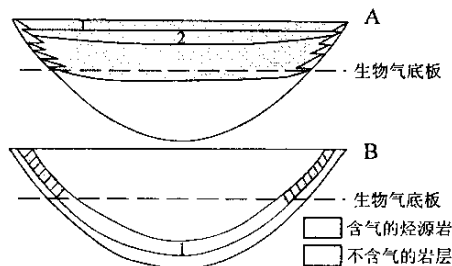


图 4 早期生物气生成系统(A)和晚期生物气生成系统(B)源岩及气藏的分布形态^[8]

Fig. 4 Pod geometries in basin cross sections with biogenic gas accumulations of early-generation system (A),

late-generation system (B)

1 和 2 为不同深度的烃源岩层

烃源岩区时,其中的环境有利于细菌的生长。地层水的矿化度是限制细菌活动的主要因素。

(3)成藏的关键时期 早期生物气生成系统是在源岩—储层沉积以后的很短时间内发生的,因此,关键时期近似于源岩—储层沉积时期。晚期生物气生成系统在美国密执安盆地北缘泥盆系 Antrim 页岩的生物气与较年轻的冰川活动有关。因此,关键时期大大晚于上泥盆统源岩—储层的沉积时间,应为近代,现在天然气还在继续生成。

在我国除了柴达木盆地以外,生物气藏也广泛分布在长江三角洲、东部沿海地区的第四系砂体中;此外,在渤海湾盆地的浅层也有零星的生物气藏分布。近期甚至在济阳拗陷沙河街组地层中也发现了碳同位素为-60‰的生物气。由此看来,我国生物气的勘探远景不容忽视。

5 天然气水合物系统

在北极陆地永久冻土区和沿海洋大陆边缘外海底部发现大量天然气水合物,这大大提高了天然气水合物作为能源的活力。据估计,目前世界海洋和永久冻土区的天然气水合物中气体体积约为 $20\,000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。天然气水合物是由水和气组成的结晶物质,其中,固态水格架在其笼状结构中包容了气体分子。1988 年 Kvenvolden 评估世界天然气水合物中气体的体积已大大超过已知常规天然气资源量^[10]。

(1)主要的天然气水合物气藏 在全世界约有 50 多个地区报道发现了天然气水合物的聚集,研究较多的目标有 5 个,分别是美国东南大陆边缘的 Blake Ridge、加拿大太平洋海岸外沿的 Cascadia 大陆边缘、日本东海岸的外 Nankai 海沟、阿拉斯加北坡和加拿大北部的 Mackenzie 河流三角洲。我国目前也在大力开展对沿海地区天然气水合物的研究和勘探,在南海和东海都有望取得突破。

(2)天然气水合物的存在形式 1996 年 Booth 等系统地描述了来自 15 个地区 90 个海相天然气水合物的样品。大多数样品是由单个的颗粒组成,一般分散在沉积剖面的储层中,也可以几厘米大的胶结物、结核或薄层和细脉的形式存在。在富含粘土的海相和陆地永久冻土区含气水合物的沉积剖面厚度一般从几十厘米到几十米,而纯天然气水合物薄层的厚度仅几毫米到几厘米,只占沉积剖面的很小部分。储层中的所有气都存在于天然气水合物中,无游离气,在永久冻土面以上存在游离水,其下为冰。

(3)天然气水合物存在的特定环境 天然气水合物的形成和存在取决于地层温度、地层孔隙压力、

气体化学、孔隙水矿化度、气和水的有效性、运移通道以及储层和盖层,其中,以地层温度和压力最为重要。因为固态的天然气水合物只能存在于一定的温度和压力范围内;此外,盐的加入会降低天然气水合物的形成温度。天然气水合物的形成和聚集需要大量的气和水,同时,也需要有效的运移通道,使大量的气和水可以运移和聚集在储层中,形成天然气水合物。天然气的来源主要是早期形成的生物气。

在我国,总体上作为对常规含油气系统的补充和扩展,非常规含气系统的概念还未被很好地理解、接受和运用。尽管,我国发现的一些大气田有的属于盆地中心气,如四川盆地、鄂尔多斯盆地和塔里木盆地的古生界气田;有的为生物气,如柴达木盆地的浅层生物气^[11~13],但是,并不清楚它们是否属于非常规含气系统,因此,也无法正确解释它们的成藏机制。如果不能真正认识它们的非常规属性,仍然采用常规方法来应对这类非常规系统,就会直接影响勘探和开发手段的选择。而对于大部分含油气盆地,特别是我国东部盆地中可能存在的生物气、煤层气和页岩气系统的勘探还未取得大的突破。因此,用新的理论和概念作为指导,认真研究他人的经验,进一步分析和总结我们的勘探成果,一定会使我国天然气勘探事业有更大的发展。

参考文献:

[1] Law B E,Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum

systems[J]. AAPG, 2002, 86:1 851—1 852.

[2] Jr Ayers W B. Coalbed gas systems, reservoirs, and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Powder River basins[J]. AAPG, 2002, 86:1 853—1 890.

[3] Laxminarayana C,Crosdale P J. Controls on methane sorption capacity of Indian coals[J]. AAPG, 2002, 86:201—212.

[4] Montgomery S L,Tabet D E,Barker C E. Upper Cretaceous Ferron Sandstone: Major coalbed methane play in central Utah [J]. AAPG, 2001, 85:199—220.

[5] Law B E. Basin-centered gas systems[J]. AAPG, 2002, 86: 1 891—1 920.

[6] Montgomery S L,Barrett F,Vickery K,et al. Cave Gulch field, Natrona County, Wyoming: Large gas discovery in the Rocky Mountain foreland, Wind River basin[J]. AAPG, 2001, 85: 1 543—1 564.

[7] Cuétis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG, 2002, 86: 1 921—1 938.

[8] Shurr G W,Ridgley J L. Unconventional shallow biogenic gas systems[J]. AAPG, 2002, 86:1 939—1 970.

[9] Litke R,Cramer B,Gerling P,et al. Gas generation and accumulation in the West Siberian Basin[J]. AAPG,1999,83: 1 642—1 666.

[10] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. AAPG, 2002, 86:1 971—1 992.

[11] 钱凯,张影斌,周堃,等. 中国油区天然气[M]. 北京:石油工业出版社,1997.

[12] 宋岩,魏国齐. 天然气地质研究及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2000.

[13] 戴金星,王庭斌,宋岩,等. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京:地质出版社,1997.

ADVANCES IN THE RESEARCH AND EXPLORATION OF UNCONVENTIONAL PETROLEUM SYSTEMS

CHEN Jian-yu,TAN Da-qing,YANG Chu-peng

(Facutly of Earth Resources,China University of Geosciences,Wuhan Hubei 430074,China)

Abstract: In terms of view of petroleum system, this paper summarizes geologic and geochemical characteristics of unconventional petroleum systems of coalbed gas,basin-centered gas,fisswred shale-gas, low-layer biogenic gas and gas hydrate, respectively, thus modifying and expanding upon traditional concepts of petroleum system,and providing a new thought for opening up new frontiers of natural gas resources. Conventional gas resources are buoyancy-driven deposits,occurring as discrete accumulations in structural and stratigraphic traps,whereas unconventional gas resources are generally not buoyancy-driven accumulation. They are regionally pervasive,most commonly independent of structural and stratigraphic traps, thus possessing different key elements and processes from conventional petroleum systems. In petroleum systems of coalbed gas and shale-gas,the source rock is both reservoir and often the cap rock, with short migration distance. The reservoirs are characterized by low porosity,low permeability,fractural opening,as well as capillary and hydrodynamic trapping. Huge coalbed gas accumulations may be found in the structural low.

Key words: unconventional petroleum system; coalbed gas; basin-centered gas; fissured shale-gas; low-layer biogenic gas; gas hydrate