

页岩气藏分布地质规律与特征

聂海宽, 张金川

(中国地质大学(北京) 教育部海相储层演化与油气富集机理重点实验室, 北京, 100083)

摘要: 对不同类型盆地内页岩气藏的页岩特征、深度、压力、天然气成因、裂缝、含气饱和度及气藏模式等气藏特征进行分析, 对我国相似构造演化、相似类型盆地页岩气成藏条件进行类比研究。研究结果表明: 江南—雪峰隆起北缘、鄂西及塔里木南缘等早古生代前陆盆地, 准噶尔盆地周缘、“钦防海槽”和“十万大山”等晚古生代前陆盆地, 扬子板块南北两条前陆盆地带等中生代前陆盆地以及塔里木、四川和鄂尔多斯等克拉通盆地都具备页岩气藏发育的地质条件。

关键词: 页岩气; 前陆盆地; 克拉通盆地

中图分类号: TE122.3; P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)02-0700-09

Shale gas reservoir distribution geological law, characteristics and suggestions

NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan

(Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution & Hydrocarbon Enrichment Mechanism,
Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The shale characteristics, shale gas reservoir depth, pressure, gas causes, crack, gas saturation and the reservoir accumulation mode etc of different basin types were studied. Similar tectonic evolution and similar basin types between China and United States were analyzed. The results show that some foreland basins and craton basins have the conditions to develop shale gas reservoirs. They include the early paleozoic foreland basins such as the north margin of Jiangnan-Xuefeng Uplift, the west of Ordos Basin, the south of Tarim Basin etc; the late paleozoic foreland basins such as the margin of Zhungeer basin, Qinzhou-Fangcheng trough, Shiwandashan Basin etc; mesozoic foreland basins such as two foreland basin belt of North and South Yangtze plate and many other basins in the central-west of China, and Craton Basins which include Sichuan Basin, Ordos Basin, Tarim Basin.

Key words: shale gas; foreland basin; Craton Basin

页岩气是一种新型的非常规天然气, 不同学者对其概念、成藏机理及成藏条件等进行了研究^[1-8]。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。在页岩气藏中, 天然气也存在于夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩甚至砂岩地层中。页岩气为天然气生成之后在源岩层内就近聚集的结果, 表现为典型的“原地”成藏模式^[4-7]。本文旨在对产页岩气盆地发育的区

域构造背景和分布大地构造位置进行研究, 进而得出页岩气藏分布地质规律与特征。本文作者在分析美国页岩气盆地分布规律的基础上, 对其分布的大地构造位置及盆地类型进行分类, 认为产页岩气盆地主要位于阿巴拉契亚早古生代逆冲褶皱带、马拉松—沃希托晚古生代逆冲褶皱带和科迪勒拉中生代逆冲褶皱带前缘的前陆盆地及其相邻地台之上的克拉通盆地, 在此基础上分析了不同盆地类型中页岩气藏的特征及气藏

收稿日期: 2009-01-10; 修回日期: 2009-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672087, 40472073); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2005CB422106)

通信作者: 聂海宽(1982-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 从事油气成藏和非常规天然气地质研究; 电话: 13466585382; E-mail: niehaikuan@126.com

模式, 并对我国主要前陆盆地和克拉通盆地的页岩气藏发育情况进行研究。

1 美国页岩气分布地质规律

美国已发现的产页岩气盆地主要分布在以阿巴拉契亚盆地为代表的东部早古生代前陆盆地带、以福特沃斯盆地为代表的南部晚古生代前陆盆地带和以圣胡安盆地为代表的西部中生代前陆盆地带以及以密执安盆地和伊利诺斯盆地为代表的古生代—中生代克拉通盆地带(图 1^[1, 9])。前陆盆地主要位于被动大陆边缘且后期演化为褶皱带的区域, 克拉通盆地位于地台之上, 沉积了寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、密西西比系(下石炭统)、宾夕法尼亚系(上石炭统)和白垩系等地层的大量富含有机质的黑色页岩, 发育了大量的页岩气资源。前陆盆地页岩气的地质资源量和可采资源量分别占已发现的 65.6%~75.7%和 49.6%~58.1%, 克拉通盆地分别占 24.3%~34.4%和 41.9%~50.4%^[1]。

1.1 前陆盆地

前陆盆地是油气的富集区, 近 10 年所发现的 52% 相关油气储量都是在聚敛边缘^[10]。美国在前陆盆地不

但找到了大量的常规油气, 而且找到了大量的非常规油气即页岩气资源, 这些前陆盆地按时代可分为早古生代、晚古生代和中生代, 分别发育在 3 个逆冲褶皱带的前缘。

1.1.1 早古生代前陆盆地

早古生代前陆盆地主要位于阿巴拉契亚逆冲褶皱带前缘, 伴随造山带的隆起形成, 以阿巴拉契亚盆地为代表。阿巴拉契亚逆冲褶皱带是加里东期北美板块和非洲板块碰撞形成的, 呈北东—南西向展布, 有东倾的大逆掩断裂带为边界, 造山带西侧为前陆盆地^[11-12]。

阿巴拉契亚盆地是早古生代发育起来的前陆盆地, 主要有 3 次大的构造事件: Taconic, Acadian 和 Alleghanian 构造运动^[1]。在晚寒武世—早中奥陶世, 为北美板块被动大陆边缘的一部分; 在晚奥陶世, 北美板块向古 Iapetus 洋板块俯冲, 导致 Taconic 构造运动, 形成晚奥陶世前陆盆地; 中晚泥盆世的陆—陆碰撞, 导致 Acadian 构造运动并形成泥盆纪前陆盆地; 中石炭世的 Alleghanian 构造运动形成盆地现今的形态。地层沉积在向东倾斜的 3 期前陆盆地内, 形成 3 套主要沉积旋回, 每一旋回底部为碳质页岩, 中部为碎屑岩, 顶部为碳酸盐岩^[1]。沉积了奥陶系的 Utica 页岩层、志留系的 Rochester 和 Sodus/Williamson 页岩

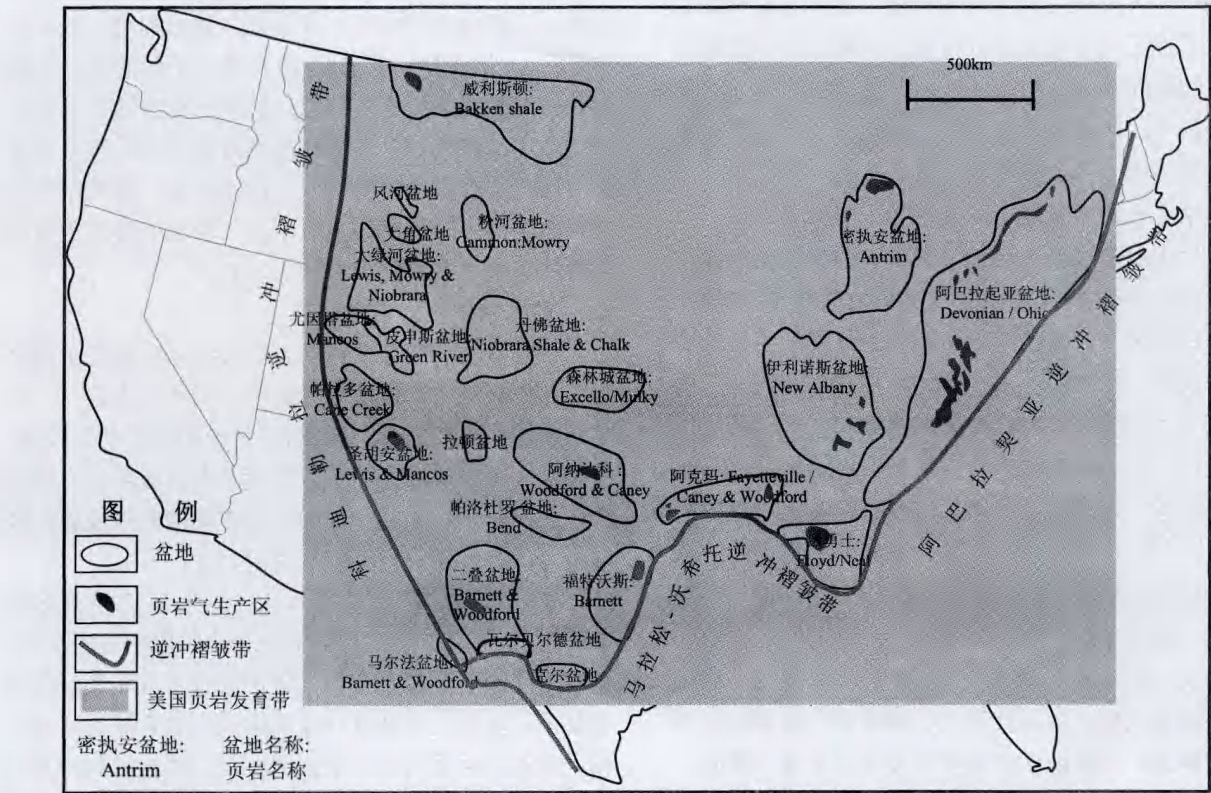


图 1 美国页岩气盆地分布地质规律图(据文献[1, 9]修改)

Fig.1 Shale gas basin distribution law in America (revised according to Refs.[1, 9])

层以及泥盆系的 Marcellus/Millboro, Geneseo, Rhinestreet, Dunkirk 和 Ohio 页岩层, 这些页岩均具有有机碳含量高和成熟度高、埋藏浅等特点, 且都发现了页岩气藏或页岩气显示。该盆地的 Big Sandy 页岩气田发现于 1915 年, 储量 963 亿 m^3 , 在 1921—1985 年期间, 该气田钻了 1 万多口页岩气井, 生产了超过 708 亿 m^3 的天然气^[13]。

1.1.2 晚古生代前陆盆地

晚古生代前陆盆地主要是马拉松—沃希托造山运动形成的, 该造山运动是由泛古大陆变形引起的北美板块和南美板块碰撞形成^[2], 沿着与拗拉槽有关的薄弱处发生下拗沉降形成弧后前陆盆地, 主要包括福特沃斯、黑勇士、阿科马、二叠等盆地^[14], 马拉松—沃希托逆冲带构成了这类盆地靠近逆冲带的边界。这些盆地均在泥盆系和密西西比系黑色页岩中有页岩气藏或页岩气显示, 资源量很大, 具有代表性的是福特沃斯盆地。

福特沃斯盆地是一个边缘陡、向北加深的盆地, 主要地层有寒武系、奥陶系、密西西比系、宾夕法尼亚系、二叠系和白垩系^[2]。寒武纪—晚奥陶世地层为被动大陆边缘沉积, 大部分为碳酸盐岩沉积; 密西西比纪地层为前陆沉积, 沉积了 Barnett 组页岩层和 Chappel 组、Marble Fall 组等灰岩层; 宾夕法尼亚纪地层为与沃希托构造前缘推进有关的沉降过程和盆地充填。该盆地的 Newark East 气田的储量在全美天然气田中居第 3, 产量居全美天然气田第 2^[15], 是美国最大的页岩气田, 占全美页岩气总产量的一半以上。

1.1.3 中生代前陆盆地

中生代前陆盆地主要位于美国中西部, 是科迪勒拉逆冲褶皱带(法拉隆板块和北美板块碰撞形成)的一部分。该地区在前寒武纪、寒武纪、奥陶纪为被动大陆边缘沉积, 在奥陶纪末至泥盆纪抬升剥蚀, 在密西西比纪为浅海沉积, 在宾夕法尼亚纪和二叠纪形成原始落基山, 在中侏罗世重新沉积, 并在白垩纪海侵时期形成海道, 南北海水相通, 沉积了一套区域性的黑色页岩^[11-12]。白垩纪末发生的拉腊米块断运动, 形成目前山脉和盆地相间的盆山格局, 这一类盆地主要有圣胡安、帕拉多、丹佛、尤因塔、大绿河等。其中, 在圣胡安、丹佛和尤因塔等盆地的白垩系黑色页岩层发现了页岩气藏。最具代表性、储量和产量最大的是圣胡安盆地, 该盆地横跨科罗拉多州和新墨西哥州, 是 1 个典型的不对称盆地, 南部较缓, 北部较陡。按照地质时代和商业开发时间, 该盆地的 Lewis 页岩气藏是美国形成年代最近的页岩气藏^[1]。

1.2 克拉通盆地

产页岩气的克拉通盆地主要包括密执安盆地和伊利诺斯盆地, 为内陆克拉通盆地。盆地基底为前寒武系, 演化开始于早中寒武世超大陆裂解时期, 从衰亡的裂谷拗拉槽或地堑开始, 随后演化为克拉通海湾。在裂谷演化阶段后期, 盆地进入热沉降阶段, 在裂谷沉积地层上沉积了砂岩和碳酸盐岩地层, 在中奥陶世到中密西西比世, 主要为岩石圈伸展的构造均衡沉降阶段, 且伸展范围受早期裂谷范围的限制, 沉积较缓慢, 富含有机质的黑色页岩就是这一时期沉积的。在古生代的大部分时间里, 这类盆地与阿克玛、黑勇士等克拉通边缘盆地是相通的, 宾夕法尼亚纪晚期到白垩纪晚期的构造运动, 造成了盆地现今的构造形态^[16]。在这类盆地的泥盆系发现了大量的页岩气资源量, 如密执安盆地的 Antrim 页岩气藏和伊利诺斯盆地的 New Albany 页岩气藏。

2 页岩气藏特征

纵观产页岩气盆地分布的大地构造位置、盆地类型和性质, 页岩气藏的各种特征也是有规律可循的。分布于前陆盆地的页岩气藏埋藏较深, 压力和成熟度较高, 天然气为热成因, 具有高气体饱和度、低吸附气含量(圣胡安盆地除外)、低孔渗、平缓的等温吸附线和较高的开采成本等特点; 而位于克拉通盆地的页岩气藏则埋藏较浅, 压力和成熟度较低, 天然气为生物成因或混合成因, 具有低气体饱和度、高吸附气含量、高孔渗、陡峭的等温吸附线、较低的开采成本等特点, 页岩气藏模式也有较大差异。

2.1 前陆盆地页岩气藏特征

这类盆地一般存在被动大陆边缘和前陆 2 个演化阶段, 均有利于形成页岩气藏所必需的页岩发育, 尤其是在层序格架的凝缩段。前陆盆地构造运动比较强, 常规油气难以保存, 而页岩气藏具有抗破坏能力强的特点, 因此, 在前陆盆地即使没有常规油气发现的区域也可能会发现大量页岩气资源。

(1) 被动陆缘上的前陆盆地一般发育 2 套或多套页岩层, 即被动陆缘和前陆盆地 2 个阶段的页岩沉积, 具有多层次的页岩发育, 具备形成页岩气藏良好的物质基础。如阿巴拉契亚盆地奥陶系页岩为被动陆缘沉积, 而泥盆系页岩为前陆盆地沉积。页岩时代分布广泛, 从奥陶纪(阿巴拉契亚盆地的 Utica 页岩)到白垩纪都有分布(圣胡安盆地的 Lewis 页岩)。

(2) 页岩气藏一般埋藏较深。主要分布在 3 个深

度段:

① 小于 1.600 km。阿巴拉契亚盆地的 Ohio 页岩气藏和圣胡安盆地的 Lewis 页岩气藏分布深度为 0.915~1.524 km。

② 小于 2.600 km。福特沃斯盆地的 Barnett 页岩气藏和阿科马盆地的 Fayetteville (Arkansas)/Caney (Oklahoma)页岩气藏分布深度为 1.981~2.591 km。

③ 小于 3.600 km。如帕落杜罗盆地 Bend 页岩气藏、阿科马盆地 Woodford 页岩气藏、黑勇士盆地 Floyd 页岩气藏中气井的深度分别为 2.515~2.896, 1.729~3.657 和 1.524~3.658 km。

由于埋藏比较深, 气藏的压力一般较高, 故具有轻微超压的特点, 如福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏的压力梯度为 12.21 kPa/m^[17]。由于埋藏较深, 故气体饱和度较大, 吸附气含量较小, 一般小于 50%。

(3) 页岩成熟度较高。天然气均为热成因来源。阿巴拉契亚盆地页岩成熟度 R_o 为 0.5%~4.0%^[18], 产气区的维吉尼亚州和肯塔基州的成熟度变化范围为 0.6%~1.5%, 在宾夕法尼亚州西部成熟度可达 2.0%, 西弗吉尼亚州南部成熟度可达 4.0%, 且只有在成熟度较高的区域才有页岩气产出^[13]。福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏生产的干气是在成熟度($R_o \geq 1.1\%$)较高时原油裂解形成的^[3], GTI(Gas Technology Institute)公布了 Barnett 页岩气藏产气区的成熟度为 1.0%~1.3%, 实际上产气区西部成熟度为 1.3%, 东部成熟度为 2.1%, 平均为 1.7%^[14-15]。圣胡安盆地 Lewis 页岩的成熟度为 1.6%~1.9%, 也为高成熟度的页岩气藏。由此可见: 前陆盆地页岩气藏中足够高的页岩成熟度是页岩气藏发育的关键, 页岩的高成熟度(>2%)不是制约页岩气成藏的主要因素, 相反, 成熟度越高, 越有利于页岩气藏的开发。

(4) 裂缝有助于页岩层中吸附于矿物和(或)有机质表面的天然气吸附和解吸^[1]。裂缝对页岩气藏具有双重作用: 一方面, 裂缝为天然气和水通过黑色页岩层向井筒运移提供通道; 另一方面, 如果裂缝规模过大, 可能导致天然气散失或气层与水层相通。由于前陆盆地构造运动比较强, 裂缝比较发育, 裂缝可能对页岩气藏的发育和生产起到一定程度的制约作用, 例如, Bowker^[17]认为: 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏裂缝非常发育的区域, 天然气的生产速度最低, 高产井基本上都分布在裂缝不太发育之处。因此, 前陆盆地页岩气藏的勘探不是寻找裂缝, 而是寻找高气体含量、易扩散及能进行压裂的页岩气区, 该类页岩气藏并不是“裂缝性气藏”, 而是可以被压裂的页岩气藏。

(5) 前陆盆地的页岩气藏形成了以福特沃斯盆地

Newark East 气田 Barnett 页岩气藏为代表的气藏模式(图 2^[17])。位于 Barnett 页岩上覆的 Marble Falls 组、Chappel 组(主要分布在 Newark East 气田西部)、夹层的 Forestburg 组以及其下伏的 Viola/Simpson 组或 Ellenburger 组等灰岩隔层的存在, 形成几套致密的隔板层, 把大量原始和诱发裂缝限制在 Barnett 页岩内部, 不利于烃类气体的排出, 但有利于页岩气井的生产。在 Marble Falls 等致密灰岩层缺失的地方, 钻井可能导致压裂能量散失或水淹(裂缝连通饱含水的灰岩层和气层), 所以, Barnett 页岩及其上下地层的岩性和物性特征是该气藏被成功勘探开发的关键, 是确定“甜点”的关键因素。最近, 在该类页岩气藏开发中, 采用水平井技术在某种程度上降低了这种影响。

这些致密灰岩层在一定程度上起到了“盖层”或“隔层”的作用, 阻止 Barnett 页岩排烃, 致使在 Barnett 页岩中保存了大量的烃类气体。这种上下被 Marble Falls 组、Ellenburge 组或 Viola 组/Simpson 组及中间夹层 Forestburg 组等致密灰岩层“封闭”的页岩层, 成为一种独特的页岩气藏模式。Barnett 页岩气藏的成功勘探开发为美国及世界其他地区页岩气藏的勘探开发积累了丰富的经验。按照 Barnett 页岩气藏模式在马拉松—沃希托、阿巴拉契亚逆冲褶皱带前缘的黑勇士、阿科马、二叠以及阿巴拉契亚等盆地均发现了大量的页岩气资源, 如阿巴拉契亚盆地泥盆系 Marcellus 页岩, 上下分别为 Tully, Onondaga 或 Huntersville 灰岩层所“封闭”, 并被 Puecell 灰岩层分为上、下 2 段, 是 Banett 页岩气藏模式的又一佐证。

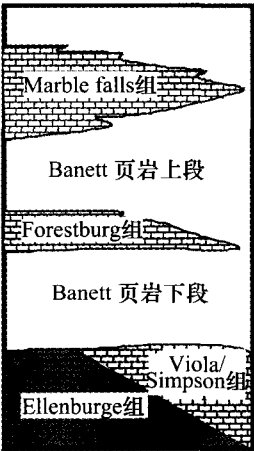


图 2 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏模式图
(据文献[17]修改)

Fig.2 Barnett shale gas reservoir accumulation model of Fort Worth Basin (revised according to Ref.[17])

2.2 克拉通盆地页岩气藏特征

(1) 位于克拉通盆地的页岩气藏主要分布在盆地

边缘较浅的部位,近年来在伊利诺斯盆地较深部位也发现了页岩气藏。但就页岩发育的情况看,盆地中心比边缘更有利于页岩气藏的发育。

(2) 与前陆盆地的页岩气藏相比,位于克拉通盆地的页岩气藏埋藏普遍较浅,目前在该类盆地发现的页岩气藏通常小于 1.000 km,伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏和密执安盆地 Antrim 页岩气藏大约有 9 000 口井,深度范围为 200~610 m。由于埋藏比较浅,气体饱和度较低,相应的吸附气含量较高,一般大于 50%,如密执安盆地 Antrim 页岩气藏的吸附气含量高达 70%。

(3) 页岩气藏以低成熟度和高、低成熟度混合为特征,如密执安盆地 Antrim 页岩气藏为低成熟度的页岩气藏,而伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏为高、低成熟度混合的页岩气藏。低成熟度的页岩气藏的成因主要是生物成因,为埋藏后抬升经历淡水淋滤而形成的第 2 次生气^[1,19]。密执安盆地 Antrim 页岩的成熟度为 0.4%~0.6%^[19],处在生物气生成阶段,为低成熟度的页岩气藏。而 Comer 等^[20]通过对伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏甲烷气体的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析,发现来自盆地南部深层的天然气都是热成因,而来自盆地北部相对浅层的天然气为热成因和生物成因的混合,为高、低成熟度混合的页岩气藏。

(4) 克拉通盆地的构造变动较弱,裂缝欠发育,因此,裂缝的发育程度是决定页岩气藏品质的重要因素,裂缝发育好的气藏,品质也较好,反之,则较差。如密执安盆地和伊利诺斯盆地的页岩就是寻找裂缝较发育的区域(在其他地质条件相似的情况下),并且大部分井还需压裂才能获得较大产能。

(5) 克拉通盆地的构造形态为四周高、中间低,这种形态决定了淡水由盆地边缘向中心注入,成为克拉通盆地 1 种典型的页岩气藏模式(图 3)。Martini 等^[19]

认为在更新世时期,大气降水充注到富含有机质且裂缝发育的 Antrim 页岩,极大地促进了生物甲烷气的生成,在密执安盆地北部和西部边缘形成了大量的该类气藏。伊利诺斯盆地亦为此类页岩气藏。

3 我国页岩气发育条件

美国页岩气藏基本上分布在古生代、中生代被动陆缘演化为前陆盆地的区域和克拉通台地区,而我国在漫长的地质历史时期也发育多种相似类型的盆地。这些盆地所处的大地构造位置、类型、性质及页岩时代、沉积环境、地化指标等与美国的盆地极其相似,虽然中美各时代的盆地具体性质不同,地台区周边造山带逆转的时代不同,形成的盆地类型稍有差异,但是,勘探实践表明,盆地中油气的分布及地质特征是有规律可循的。因此,在类比的基础上研究我国盆地与美国主要产页岩气盆地的相似性,认为我国广泛存在页岩气藏发育的空间。

3.1 相似的盆地类型及大地构造位置

古生代我国发育扬子、塔里木和华北三大克拉通地台,地台上为典型的克拉通沉积,克拉通边缘早期为被动大陆边缘沉积,晚期为前陆沉积,发育古生代、中生代前陆盆地和克拉通盆地。克拉通盆地主要包括四川、华北和塔里木,但由于经历了漫长地质历史时期的改造,目前仅存四川、鄂尔多斯和塔里木盆地中心地区。

3.1.1 早古生代前陆盆地

早古生代前陆盆地主要发育在加里东晚期,塔里木、四川和鄂尔多斯古生代海相盆地具有相似的地质演化,泛大陆解体后,震旦纪一早中奥陶世为被动大陆边缘,中晚奥陶世至志留纪为前陆盆地,代表三大陆块与周边洋盆的盆山转换^[21-22]。扬子地台在加里东晚期,华南洋向江绍一带俯冲、消减形成江南造山带、雪峰山造山带并与黔中和牛首山古隆起相连,在造山带前缘形成前陆盆地^[22-23]。在早志留世,秦岭洋与华北地块、塔里木地块以及柴达木地块碰撞,也形成一系列前陆盆地^[22],如北祁连山前陆盆地。鄂尔多斯盆地西缘和南缘是在元古界秦祁贺三叉裂谷基础上发育的早元古代被动大陆边缘,中奥陶世至中石炭世秦祁海槽向东、向北方向俯冲碰撞,形成前陆盆地^[24]。塔里木盆地南缘志留纪至泥盆纪存在周缘前陆盆地^[25-26]。

3.1.2 晚古生代前陆盆地

晚古生代前陆盆地主要发育在滇黔贵地区、塔里木北缘及准噶尔盆地周缘,主要发生在泥盆纪和二叠纪。中奥陶世—志留纪武夷、闽台微陆块向华南古板

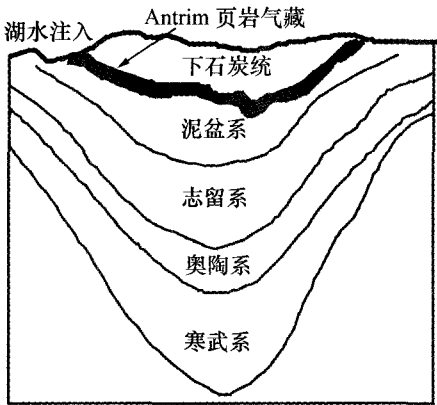


图 3 密执安盆地 Antrim 页岩气藏模式图

Fig.3 Antrim shale gas reservoir accumulation model of Michigan Basin

块拼接时,广西“钦防海槽”和“十万大山”盆地区处于“残留被动大陆边缘盆地”演化阶段,其后经历了早泥盆世残留洋盆地、晚古生代特提斯被动大陆边缘盆地,到晚二叠世早期转变为前陆盆地^[22]。塔里木北部周缘前陆盆地发育于泥盆纪末至早三叠世期间^[27]。准噶尔盆地周缘在二叠纪也演化为前陆盆地^[28]。

3.1.3 中生代前陆盆地

中生代前陆盆地主要分布在南方和中西部地区。中生代早期的印支运动是主要的构造变形期和被动大陆边缘向前陆盆地演化的转折阶段。华南板块裂解为扬子板块和东南板块,由台地沉积转变为前陆沉积,在扬子板块南北缘逐渐形成南北2条前陆盆地^[22, 29]。北带主要由上扬子(龙门山)、中扬子北部(大巴山和桐柏山前陆盆地)、下扬子(宁镇前陆盆地)3个周缘前陆盆地群及合肥冲断前渊盆地构成;南带主要由兰坪—思茅、十万大山、楚雄、南盘江、桂东南等弧后前陆盆地及渝东—湘鄂西、湘赣等陆内造山带形成的类前陆盆地群构成。中西部前陆冲断带属于特提斯北缘盆地群,有统一的大地构造背景、位置与古气候带^[25]。在鄂尔多斯盆地西缘也形成了中生代前陆盆地^[25]。塔里木地台周缘中生代前陆盆地十分发育,代表性的地区有塔西南、喀什、叶城、库车及且末等,主要分布在天山、昆仑山及阿尔金造山带与塔里木克拉通盆地边缘相接地区^[25, 30]。

与美国主要产页岩气盆地相比,我国的前陆盆地和克拉通盆地经历了加里东、海西两大构造旋回,又经历了中生代构造运动的改造,原有的前渊沉积连同下伏的地台沉积一起卷入冲断褶皱变动改造之中,被后期构造运动改造得面目全非。如在扬子地台,印支期前陆除龙门山前经长期演化保持良好外,仅楚雄、西昌和大巴山前仍存在构造盆地,中下扬子区本质上已完全转成褶皱冲断构造带^[22]。古生代的江南—雪峰北缘前陆区也被改造得面目全非。在这样的构造背景之下,常规油气难以保存,而页岩气具有抗破坏能力强的特点,在常规油气不能发育的地区,其仍有很好的发育条件,因此,在这些地区,页岩气可能是进行勘探的关键所在。

3.2 相似的页岩沉积环境

有利的大地构造背景必须与有利的古气候和古环境结合才具备形成大规模油气的物质基础^[31]。与美国有利于页岩气藏发育的前陆盆地和克拉通盆地对应的是有利于黑色页岩沉积的古气候和古环境,已经发现页岩气藏的页岩主要为被动大陆边缘沉积、前陆挠曲形成的滞留环境沉积和克拉通内拗陷沉积等。

3.2.1 被动大陆边缘沉积

包括被动大陆边缘裂谷和缓坡陆棚环境,该环境

一般被上升洋流控制,通常携带生物大量繁殖所需要的营养物质,表层海水中生物大量繁殖、死亡后在海底迅速大量堆积,耗尽海底中的氧形成强还原环境,有利于有机质保存。在这样的大地构造背景以及与之匹配的沉积环境之上,沉积了大套富含有机质的黑色页岩,其中最有利于页岩气藏发育的部位是水进体系域的凝缩段,如在大绿河盆地 Lewis 页岩 Asquith Marker 段^[32]和阿巴拉契亚盆地奥陶系 Utica 页岩^[33]中均发现了页岩气藏或页岩气显示。我国南方扬子地台周缘的寒武系和奥陶系也均发育凝缩段沉积的黑色页岩^[22],具备形成页岩气藏的物质基础。

3.2.2 前陆挠曲形成的滞留环境沉积

前陆挠曲形成滞留盆地,阻止了水的侧向流动,表层含氧水与深层水的混合受阻,有利于还原环境的形成。如阿巴拉契亚盆地泥盆系黑色页岩和以福特沃斯盆地为代表的南部晚古生代前陆盆地泥盆系—密西西比系黑色页岩均属于这类沉积。在中晚奥陶世—早志留世,南方地区黔中—江南—雪峰山一带为前陆隆起带,隆起带以西、以北形成滞留盆地,上、中、下扬子原浅水碳酸盐台地被富含笔石的黑色页岩覆盖。三叠系的黑色页岩也形成于这种环境。

3.2.3 克拉通内拗陷沉积

在泥盆纪时期,随着相对海平面的上升,密执安盆地和伊利诺斯盆地被海水淹没,成为页岩沉积的浅海环境,在这一时期形成的泥盆系富含有机质的黑色页岩在从加拿大中西部到美国东南部的北美地台广泛分布。我国的四川、鄂尔多斯和塔里木等盆地的古生界部分黑色页岩也在此类沉积环境中沉积。

海相黑色页岩一般形成于上述三种沉积环境,且多与碳酸盐岩伴生,其分布往往很广、很稳定。根据前人对中国含油气盆地的岩相古地理和烃源岩的研究结果,从中、晚元古代至中生代的不同时期,均在不同地区不同程度地发育海相暗色页岩(图5)。

以我国南方古生代为例,沉积了克拉通内拗陷、被动大陆边缘的寒武系黑色页岩和前陆挠曲阶段的奥陶系—志留系黑色页岩。寒武系黑色页岩主要发育在梅树村期和筇竹寺期最大海侵时,表现为最大凝缩层沉积特征,发育了筇竹寺组 and 沧浪铺组及其相当层位的黑色页岩^[22]。奥陶纪为南方构造和沉积演化的变革期,被动大陆边缘转为前陆盆地,奥陶系五峰组—志留系龙马溪组为黑色、深灰色碳质、硅质泥页岩。与美国主要产页岩气页岩相比,寒武系、奥陶系、志留系黑色页岩具有有机碳含量高、成熟度高、厚度大等特点(表1^[21]),具备页岩气藏发育的良好条件。值得一提的是:在南方普遍演化程度较高的情况下,局部存

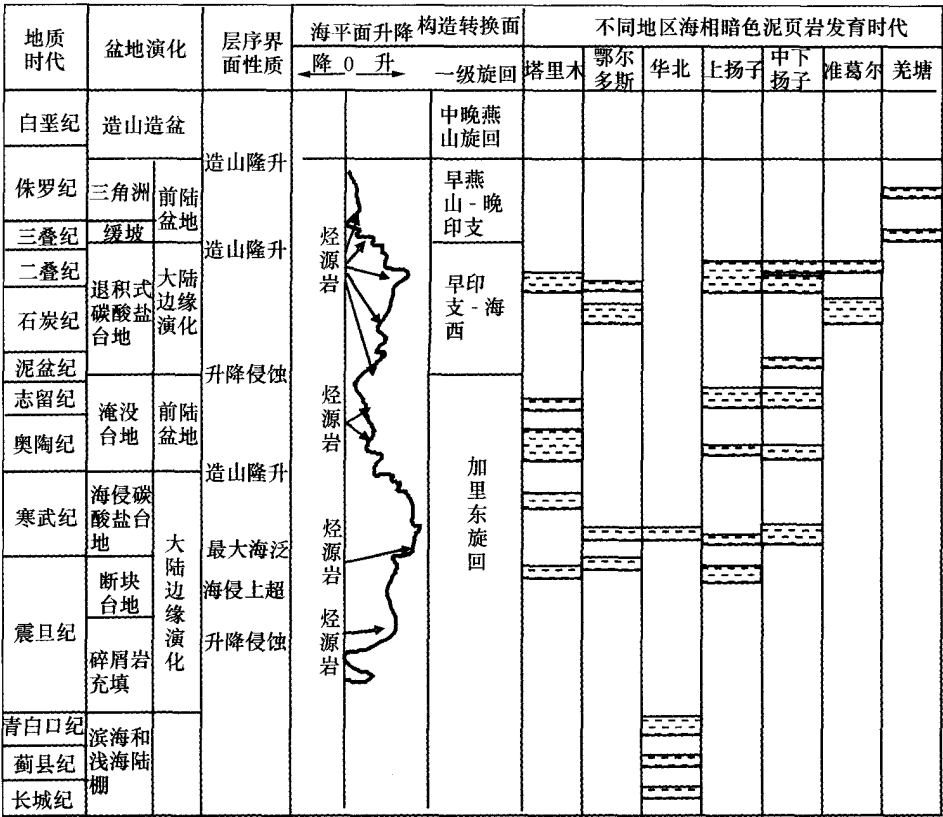


图 5 中国主要盆地海相页岩发育(据文献[21]修改)

Fig.5 Major marine basin shale development in China (revised according to Ref.[21])

表 1 我国主要海相页岩与世界部分海相页岩剩余有机碳含量对比表

Table 1 Comparison of total organic carbon between China major marine shale and some of the world's marine shale

地区	盆地	页岩名称	页岩层位	w (有机碳)/%	成熟度/%	厚度/m
国外	阿巴拉契亚	Utica	奥陶系	>3.00		274~304
		Ohio	泥盆系	0.50~23.00	0.4~4.0	91~610
	密执安	Antrim	泥盆系	0.30~24.00	0.4~0.6	49
	伊利诺斯	New Albany	泥盆系	1.00~25.00	0.4~0.8	31~140
	福特沃斯	Barnett	下石炭统	1.00~13.00	1.0~2.1	61~152
	圣胡安	Lewis	下白垩统	0.45~3.00	1.6~1.9	152~579
国内	四川盆地	龙马溪	下志留统	0.50~4.92	1.0~2.5	30~120
		五峰组	上奥陶统	0.60~2.00	0.8~1.9	几米到数十米
		筇竹寺组	下寒武统	0.60~2.00	2.0~4.5	20~200
	中扬子	龙马溪	下志留统	2.13	2.0~3.0	35~50
		水井泥组	下寒武统	0.86~5.66	2.0~4.0	239
	下扬子	高家边组	下志留统	0.90~1.24	0.5~3.5	60
		荷塘组	下寒武统	0.74~5.98	1.0~4.0	50~400
	滇黔桂	罗富组	泥盆系	0.50~3.00	1.0~3.0	0~300
		牛蹄塘组	下寒武统	0.74~4.27		210

(数据来源于文献[1-3, 17, 22])

在演化程度较低且适合页岩气藏发育的地区,如江南隆起边缘,北缘的成熟度 R_o 为 0.6%~1.3%,南缘的成熟度 R_o 为 1.3%~2.0%,下寒武统在黄平、都匀地区也仅为 1.9%~2.0%^[22],这些地区是页岩气藏发育最有利的地区。

4 结论

(1) 美国产页岩气盆地主要分布在被动大陆边缘演化为前陆盆地的区域和克拉通台地区。按照盆地类型可分为前陆盆地和克拉通盆地。

(2) 江南雪峰山北缘、鄂西及塔里木南缘等早古生代前陆盆地,准噶尔盆地周缘、“钦防海槽”和“十万大山”等晚古生代前陆盆地,扬子板块南北 2 条前陆盆地带等中生代前陆盆地以及塔里木、四川和鄂尔多斯等克拉通盆地都具备页岩气藏发育的条件。

(3) 尽管页岩气藏的抗破坏性较强,阿巴拉契亚等古生代前陆盆地在后期构造运动中也被强烈改造,但均发现大量的页岩气资源,因此,有必要对我国前陆盆地页岩气进行研究。

(4) 从产页岩气盆地分布的大地构造位置和盆地类型来看,在构造运动较强的前陆盆地和构造活动较弱的克拉通盆地都有页岩气藏发育,照此特征预测,在裂谷盆地中黑色页岩发育较好的区域,也应该有页岩气藏发育。因此,诸如松辽盆地和渤海湾盆地之类的新生代裂谷盆地的页岩气藏不容忽视。

参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [3] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [4] 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.
ZHANG Jin-chuan, XUE Hui, ZHANG De-ming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466.
- [5] 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.
ZHANG Jin-chuan, JIN Zhi-jun, YUAN Ming-sheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [6] 张金川, 聂海宽, 薛会, 等. 中国天然气勘探的 2 个新领域: 根缘气和页岩气[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(S1): 12-16.
ZHANG Jin-chuan, NIE Hai-kuan, XUE Hui, et al. Two new domains of China natural gas exploration: The source contacting gas and shale gas[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(S1): 12-16.
- [7] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
ZHANG Jin-chuan, NIE Hai-kuan, XU Bo, et al. Shale gas accumulation geology conditions of Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [8] 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.
LI Xin-jing, HU Su-yun, CHENG Ke-ming. Suggestions from the development of fractured shale gas in north America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [9] David B. If it's shale, it's probably in play[J]. AAPG Explorer, 2007, 4: 10-16.
- [10] 翟光明, 何文渊. 从区域构造背景看我国油气勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2005(2): 2-8.
ZHAI Guang-ming, HE Wen-yuan. Regional structural background and Chinese oil and gas exploration orientation[J]. China Petroleum Exploration, 2005(2): 2-8.
- [11] 胡文海, 陈冬晴. 美国油气田分布规律和勘探经验[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 1-30.
HU Wen-hai, CHEN Dong-qing. Oil-gas field distribution and exploration experience in America[M]. Beijing: Oil Industry Press, 1995: 1-30.
- [12] 李国玉, 金之钧. 世界含油气盆地图集[M]. 石油工业出版社, 2005: 98-112.
LI Guo-yu, JIN Zhi-jun. World atlas oil-gas basins[M]. Beijing: Oil Industry Press, 2005: 98-112.
- [13] Milici R C, Swezey C S. Assessment of appalachian basin oil and gas resources: Devonian shale—Middle and upper paleozoic total petroleum system[EB/OL]. [2006-12]. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1237/of2006-1237.pdf>.
- [14] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian barnett shale, barnett-paleozoic total petroleum system, Bend arch—Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.
- [15] Martineau D F. History of the Newark East Field and the Barnett shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 399-403.
- [16] McIntosh J C, Walter L M, Martini A M. Pleistocene recharge to midcontinent basins: Effects on salinity structure and microbial

- gas generation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(10): 1681-1700.
- [17] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 523-533.
- [18] Schmoker J W. Use of formation density logs to determine organic-carbon content in Devonian shales of the western Appalachian basin, and an additional example based on the bakken Formation of the Williston basin[C]//*Petroleum Geology of Devonian and Mississippian black shale of eastern North America*. US Geological Survey Bulletin 1909, US Government Printing Office, 1993: 1-14.
- [19] Martini A M, Walter L M, Ku T C W, et al. Microbial production and modification of gases in sedimentary basins: A geochemical case study from a Devonian shale gas play, Michigan basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(8): 1355-1375.
- [20] Comer J B, Hasenmueller N R, Mastalerz M D, et al. The new Albany shale gas play in southern Indiana Geological survey[M]. Indiana: Bloomington, ESAAPG Buffalo, 2006: 25-30.
- [21] 许效松, 刘宝珺, 牟传龙, 等. 中国西部三大海相克拉通含油气盆地沉积、构造转换与生储岩[J]. *地质通报*, 2004, 23(11): 1066-1073.
- XU Xiao-song, LIU Bao-jun, MOU Chuan-long, et al. Sedimentary-tectonic transition and source and reservoir rocks in three major marine cratonic petroleum-bearing basins in western China[J]. *Regional Geology of China*, 2004, 23(11): 1066-1073.
- [22] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-200.
- MA Li, CHEN Huan-jiang, GAN Ke-wen, et al. Geostructure and marine facies hydrocarbon geology of south China: Volume one[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-200.
- [23] 尹福光, 许效松, 万方, 等. 华南地区加里东期前陆盆地演化过程中的沉积响应[J]. *地球学报*, 2001, 22(5): 425-428.
- YIN Fu-guang, XU Xiao-song, WAN Fang, et al. The sedimentary response to the evolutionary process of Caledonian foreland basin system in south China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(5): 425-428.
- [24] 解国爱, 张庆龙, 郭令智. 鄂尔多斯盆地西缘和南缘古生代前陆盆地及中央古隆起成因与油气分布[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 18-23.
- XIE Guo-ai, ZHANG Qing-long, GUO Ling-zhi. The genesis and hydrocarbon distribution of western and southern margins of Paleozoic foreland basin and central paleouplift in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 18-23.
- [25] 贾承造. 中国中西部前陆冲断带构造特征与天然气富集规律[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 9-15.
- JIA Cheng-zao. Foreland thrust-fold belt features and gas accumulation in midwest China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 9-15.
- [26] KUANG Li-xiong, GUO Jian-hua, HUANG Tai-zhu. Forming mechanism of hydrocarbon reservoirs in Yingshan Formation of Yuqi block in Akekule arch, Tarim Basin[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(2): 244-250.
- [27] 张传恒, 杜维良, 刘典波, 等. 塔里木北部周缘前陆盆地早二叠世快速迁移与沉积相突变: 俯冲板片拆沉的响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(6): 785-791.
- ZHANG Chuan-heng, DU Wei-liang, LIU Dian-bo, et al. Early Permian flysch to molasse transition and a quick migration of north Tarim peripheral foreland basin: Response to subducted slab breakoff[J]. *Acta Geological Sinica*, 2006, 80(6): 785-791.
- [28] 陈书平, 张一伟, 汤良杰, 等. 准噶尔晚石炭世—二叠纪前陆盆地的构造演化[J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 553.
- CHEN Shu-ping, ZHANG Yi-wei, TANG Liang-jie, et al. Tectonic evolution in the late Carboniferous-Permian foreland basin of Junggar[J]. *Acta Geological Sinica*, 2001, 75(4): 553.
- [29] 徐汉林, 冯世琪, 朱宏发, 等. 晚三叠世—中侏罗世中国南方前陆盆地构造格局的形成与演化[J]. *海相油气地质*, 2001, 6(1): 19-26.
- XU Han-lin, FENG Shi-qi, ZHU Hong-fa, et al. Tectonic framework of the formation and evolution in the late Triassic-Jurassic foreland basin of south China[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2001, 6(1): 19-26.
- [30] 康玉柱. 塔里木前陆盆地构造特征及油气分布[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(1): 25-27.
- KANG Yu-zhu. Tectonic characteristics and petroleum distribution of the Tarim foreland basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(1): 25-27.
- [31] 李思田. 活动论构造古地理与中国大型叠合盆地海相油气聚集研究[J]. *地学前缘*. 2006, 13(6): 22-29.
- LI Si-tian. Mobilistic tectono-paleogeography and marine hydrocarbon accumulation in superimposed basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 22-29.
- [32] Pyles, D R, Slatt R M. A high-frequency sequence stratigraphic framework for shallow through deep-water deposits of the Lewis Shale and Fox Hills Sandstone, Great Divide and Wa Sha Kie basins, Wyoming[C]//Weimer P, et al. Deep-water reservoirs of the world: Proceedings of the Gulf Coast Section Society for Sedimentary Geology (GCSSEPM) 20th Annual Research Conference. Houston, 2000: 836-861 (CD-ROM).
- [33] Lehmann D, Brett C E, Cole R, et al. Distal sedimentation in a peripheral foreland basin: Ordovician black shales and associated flysch of the western Taconic Foreland, New York State and Ontario[J]. *GSA Bulletin*, 1995, 107(6): 708-724.

(编辑 刘华森)