

文章编号: 1000-0747(2023)02-0250-12 DOI: 10.11698/PED.20220602

鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征 与天然气富集地质模式

姜福杰^{1,2}, 贾承造^{1,3}, 庞雄奇^{1,2}, 姜林^{1,3}, 张春林^{3,4}, 马行陟^{3,5},
齐振国^{1,2}, 陈君青¹, 庞宏^{1,2}, 胡涛^{1,2}, 陈冬霞^{1,2}

(1. 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)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油天然气集团公司天然气成藏与开发重点实验室, 河北廊坊 065007;
5. 中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083)

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41872128); 中国石油天然气集团有限公司项目(2012DJ0101)

摘要: 通过对鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩、生储盖组合和天然气成藏特征的分析, 从全油气系统的角度, 讨论天然气成藏富集主控因素, 建立该盆地上古生界全油气系统天然气富集模式。结果表明, 烃源岩、断裂和致密储集层等要素及其相互耦合关系对天然气分布和富集具有控制作用, 其中, 烃源岩的分布和生烃能力控制源内滞留页岩气和致密气的富集程度和分布范围; 烃源岩的生烃能力与致密储集层的物性耦合关系控制盆地中心近源致密气的分布和甜点发育; 盆地边缘远源致密气主要受断裂展布的控制, 并且使得源内、近源和远源天然气分布受断裂调整改造。鄂尔多斯盆地上古生界天然气具有源内的煤层气与页岩气、致密砂岩夹层气和近源致密天然气、远源断裂输导天然气4种富集模式, 目前盆地勘探的重点是源内致密气、近源致密气, 未来煤层和页岩气、远源天然气聚集将是重要的潜在勘探领域。

关键词: 上古生界; 致密气; 全油气系统; 成藏特征; 富集模式; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China

JIANG Fujie^{1,2}, JIA Chengzao^{1,3}, PANG Xiongqi^{1,2}, JIANG Lin^{1,3}, ZHANG Chunlin^{3,4}, MA Xingzhi^{3,5},
QI Zhenguo^{1,2}, CHEN Junqing¹, PANG Hong^{1,2}, HU Tao^{1,2}, CHEN Dongxia^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China; 2. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, CNPC, Langfang 065007, China; 5. Key Laboratory of Basin Structure & Hydrocarbon Accumulation, CNPC, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of Upper Paleozoic source rocks, source-reservoir-caprock assemblage, and gas accumulation characteristics in the Ordos Basin, the gas accumulation geological model of total petroleum system is determined. Then, taking the Carboniferous Benxi Formation and the Permian Taiyuan Formation and Shanxi Formation as examples, the main controlling factors of gas accumulation and enrichment are discussed, and the gas enrichment models of total petroleum system are established. The results show that the source rocks, faults and tight reservoirs and their mutual coupling relations control the distribution and enrichment of gas. Specifically, the distribution and hydrocarbon generation capacity of source rocks control the enrichment degree and distribution range of retained shale gas and tight gas in the source. The coupling between the hydrocarbon generation capacity of source rocks and the physical properties of tight reservoirs controls the distribution and sweet spot development of near-source tight gas in the basin center. The far-source tight gas in the basin margin is mainly controlled by the distribution of faults, and the distribution of inner-source, near-source and far-source gas is adjusted and reformed by faults. Generally, the Upper Paleozoic gas in the Ordos Basin is recognized in four enrichment models: inner-source coalbed gas and shale gas, inner-source tight sandstone gas, near-source tight gas, and far-source fault-transported gas. In the Ordos Basin, inner-source tight gas and near-source tight gas are the current focuses of exploration, and inner-source coalbed gas and shale gas and far-source gas will be important potential targets in the future.

Key words: Upper Paleozoic; tight gas; total petroleum system; gas accumulation characteristics; gas enrichment model; Ordos Basin

引用: 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 250-261.

JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 250-261.

0 引言

1885年,怀特在《科学》杂志上发表的“背斜理论”标志着世界油气勘探走向了“有理论”指导阶段^[1]。自此,油气成藏地质理论不断发展和完善,先后提出了圈闭理论^[2]、有机质生烃与油气系统理论^[3]、陆相油气地质理论^[4-5]、海洋深水油气地质理论^[6-8]和连续型油气聚集与非常规油气地质理论等^[9]。从某种意义上而言,一种理论的提出,既是针对某一类型油气成藏机理和分布规律的新认识,也是人类认识地下油气资源整体分布规律的新进步。近年来,以致密油气、页岩油气为代表的非常规油气勘探的快速发展^[9-15],使得人们不得不重新思考石油、天然气这种特殊的流体矿产在地下的生成、运移、富集和保存的地质问题,也更加迫切地希望从某种角度或某种控制因素出发,系统揭示油气生排运聚的地质过程,以及这一过程中不同类型油气的富集机制,进而从根本上解决常规油气和非常规油气不能综合研究的困扰。据此,贾承造等提出了全油气系统的基本概念^[16-18]。

鄂尔多斯盆地是中国重要的含油气盆地之一^[19-20],其上古生界天然气资源潜力巨大,已发现的苏里格气田探明天然气地质储量达 $3.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[19]。此外,榆林、神木、乌审旗、大牛地、子洲等气田的累计探明天然气储量均超过 $1\ 000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19]。并且,近几年在盆地东缘的上古生界陆续有致密气、页岩气新发现^[21-23]。那么,这些不同构造位置、不同埋藏深度、不同类型的天然气资源之间有着怎样的联系,是否具有内在的成因一致性,未来勘探方向如何选择等都亟待深入探究。基于此,笔者从全油气系统的角度,通过对鄂尔多斯盆地上古生界已发现天然气藏特征的分析,建立了鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统天然气富集模式。

1 区域地质概况

1.1 盆地构造格局

鄂尔多斯盆地位于中国华北陆块西部,是典型的大型克拉通盆地,也是中国第2大沉积盆地^[24],面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。鄂尔多斯盆地从早古生代奥陶纪具备盆地雏形,开始接受沉积,先后经历了吕梁、晋宁、加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造运动旋回,形成了现今的内部稳定、边缘活跃、南北隆升、西冲东抬的构造格局^[25](见图1)。

1.2 沉积地层

鄂尔多斯盆地在古生代经历了海相—海陆过渡相—陆相的沉积环境演化。上古生界石炭系至二叠系为典型的海陆过渡相,其中,本溪组和太原组主要为三角洲和障壁海岸沉积,至山西组沉积期发生海退,沉积环境演变为近海三角洲沉积,上、下石盒子组和石千峰组发育大套的河流相沉积^[25-26](见图2)。

2 全油气系统基本概念、地质模式

2.1 全油气系统基本概念

全油气系统是指含油气盆地中相互关联的烃源岩层形成的全部油气、油气藏、油气资源及其形成演化过程和分布特征在内的自然系统^[9]。全油气系统突破了传统的含油气系统“从烃源岩到圈闭”的局限,从“源储耦合、有序聚集”的新视角,分析常规-非常规油气聚集机理,进而指导发现全部类型油气资源^[16]。

2.2 全油气系统地质模式

根据全油气系统的概念和基本内涵可知,无论是非常规油气还是常规油气,对于烃源岩的研究仍然是非常重要的,并且较以往更加重要。从全油气系统的角度,不仅要关注油气从烃源岩到圈闭的地质要素和地质过程,还要关注烃源岩内部烃类的滞留及其含油气性问题,即要研究含油气盆地油气生、留、排、运、聚的全链条地质过程。据此,一个理想的含油气盆地油气生、排、运、聚过程地质模式可以理解为:①烃源岩作为核心,其生成的油气在内部先充满自身的孔隙空间,包括吸附在岩石颗粒上,或者是气态烃溶解到孔隙水、液态烃中等多种形式形成的滞留聚集^[27-28]。②随着生烃过程的继续,烃源岩生成的烃量足以满足自身滞留需要后,开始逐渐向外排出。排出的烃将会以两种方式进行运移和聚集。其一,储集层孔隙度渗透率相对较高,孔喉半径相对较大,以毫米—微米级为主,油气在浮力的作用下直接向构造上倾方向运移,形成常规油气聚集;其二,储集层孔隙度渗透率相对较低,孔喉半径相对较小,以微米—纳米级为主,浮力不起作用,油气只能在自身膨胀力驱动下以整体排驱水的方式进行运移^[29-31],这种情况下,即为毛细管力和界面张力形成的自封闭,油气可以形成大面积连续型聚集(见图3)。

实际上,当含油气盆地烃源岩的生烃能力足够大

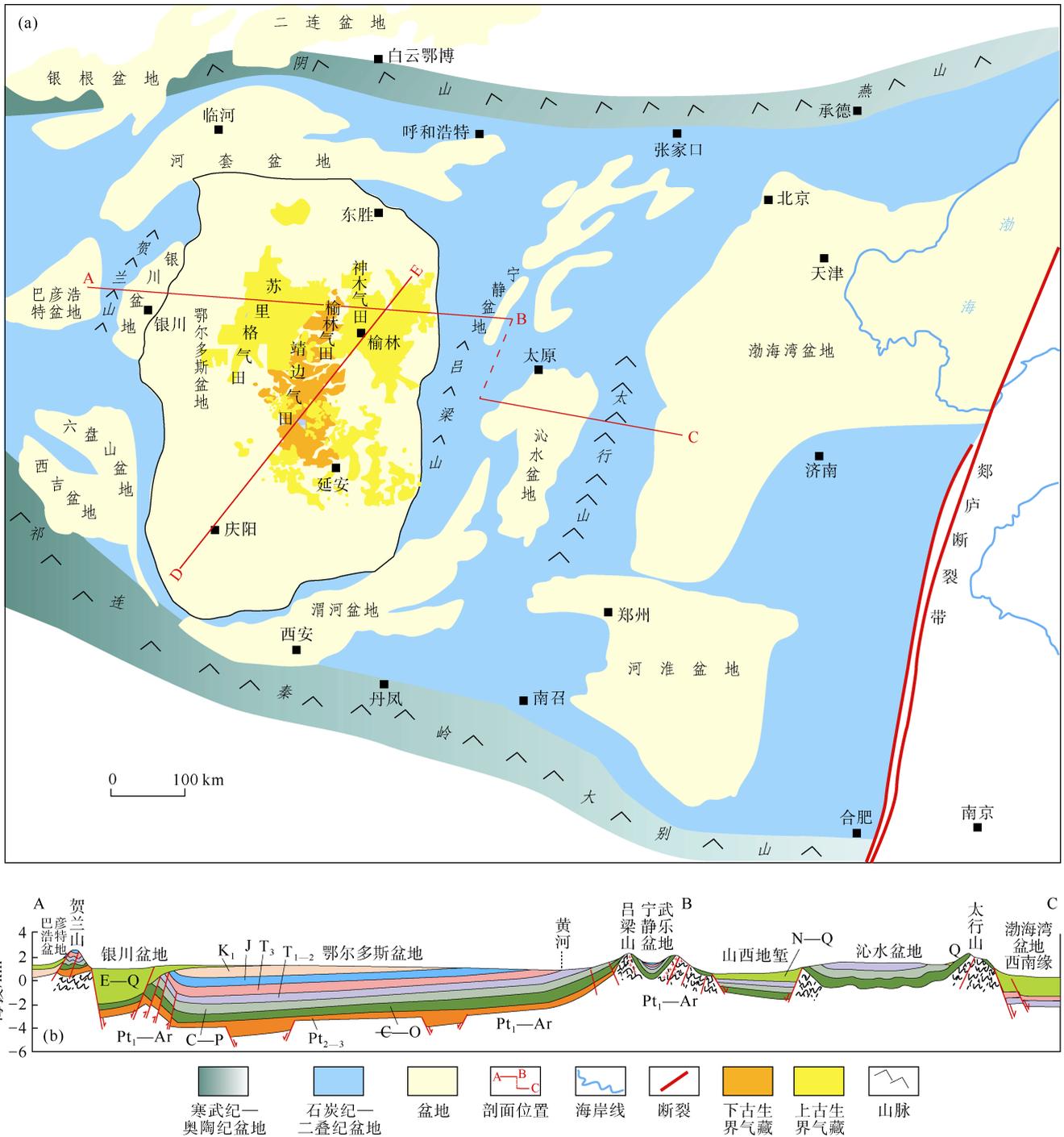


图1 鄂尔多斯盆地不同时代盆地范围、地质剖面及古生界气藏分布图 (据文献[20], 有修改)

时, 油气可以充满所有致密储集层, 并在临界封闭位置之上出现浮力主导成藏的情况 (见图 4)。但需要注意的是, 这个过程可能会受到构造运动的影响, 尤其是断层发育, 会使其复杂化。另外, 上述过程是否能够完整的发生, 需要看烃源岩的生烃能力, 以及生烃过程与储集层致密过程的耦合关系, 以及致密储集层的发育规模。

3 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征

3.1 烃源岩特征

鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩主要以本溪组、太原组和山西组煤系为主^[32-34], 相比泥岩和炭质泥岩, 其生烃能力更强^[35]。根据目前已钻探并和已经开展的气源

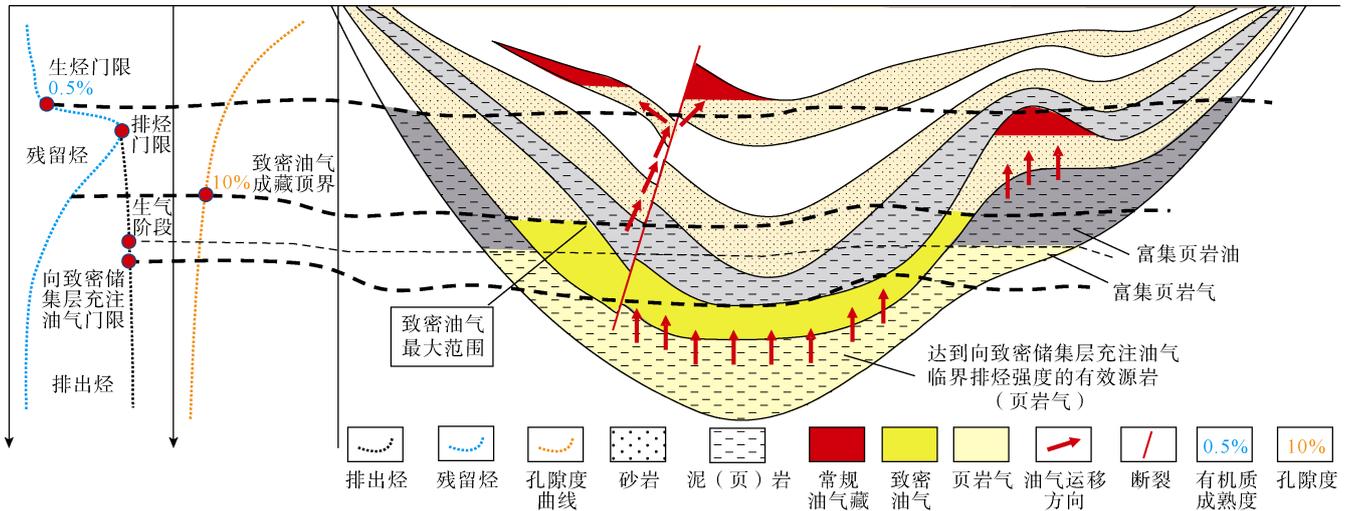


图3 全油气系统概念模式与关键地质问题示意图

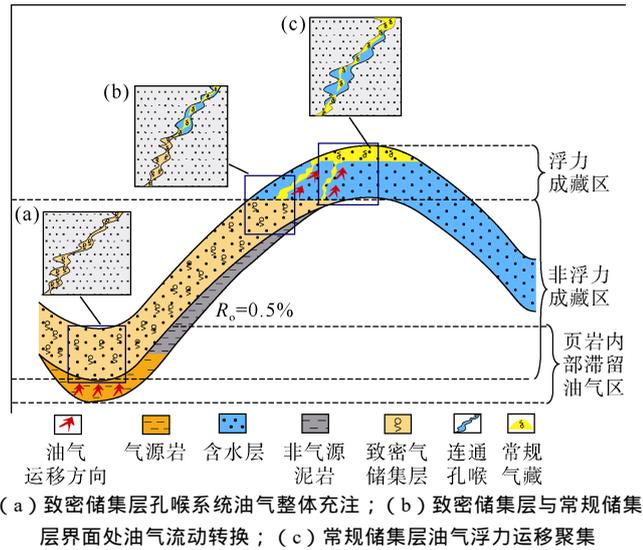


图4 含油气盆地油气充注运移过程与不同类型油气资源临界条件示意图

对比分析,上古生界天然气为自源贡献^[36],其中以本溪组 8+9 号煤层、山西组 4+5 号煤层和太原组 7 号煤层为主,泥页岩和炭质泥岩也具有一定的供气能力^[37-40]。

3.2 生储盖组合特征

鄂尔多斯盆地上古生界的海陆过渡相沉积体系实际上决定了其生储盖组合的特征。在本溪组、太原组和山西组内部主要为自生自储自盖的生储盖组合(源内组合),过渡到上石盒子组则为下生上储上盖型生储盖组合(近源组合),另外在盆地东缘石千峰组发育下生上储上盖型生储盖组合(远源组合)^[41-44]。需要强调的是,由于上古生界储集层整体致密,因此导致盖层在天然气成藏过程中的作用并不明显,但是对于保护上古生界的天然气整体富集发挥了重要作用,避免了天然气的大规模散失^[27, 45-47]。

3.3 天然气运聚成藏特征与模式

典型气藏的剖析对于认识天然气成藏模式具有重要作用。从天然气富集的层位与气田分布特征看,从盆地中部到东部,天然气富集层位有明显差异,其中,苏里格气田的成藏模式为:气源来自山西组和太原组的煤层,储集层为源内的山 2 段、近源的盒 8 段致密砂岩,天然气生成以后,以气体膨胀力的方式进行充注聚集,属于源储紧邻、非浮力驱动、致密储集层大面积连续成藏的地质模式^[48](见图 5)。

榆林气田和苏里格气田具有基本相似的成藏特点,不同的是主力产气层段有差异,榆林气田主力产气层段为山 2 段。造成这种差异的原因与作为主力气源的煤层的发育和致密储集层的分布有直接关系,但整体上看,榆林气田内的天然气聚集属于源内近源充注、致密储集层聚集、大面积连续分布^[49](见图 6)。

神木气田不同于苏里格和榆林气田,其不仅发育源内、近源成藏组合,而且发育远源成藏组合^[50](见图 7),并且远源成藏组合的发育与盆地边缘断裂的存在密不可分。以临兴地区为例,已经证实了断裂可以作为气泵型的输导通道,沟通深部烃源岩和浅部的石千峰组储集层^[34]。另外,鄂尔多斯盆地近年来在二叠系太原组页岩段内勘探获得了页岩气流,并且多口井获得高产,展现了页岩气的资源潜力,同时也展现了页岩气、致密气包括煤层气多种类型天然气共存的天然气分布特征^[51]。

3.4 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征

基于上述分析可知,鄂尔多斯盆地上古生界具有天然气广泛发育,页岩气、致密气和煤层气多种类型并存的特征。从含气层位看,在盆地中心内部以源内、近源致密气、页岩气和煤层气为主,其中致密气以苏

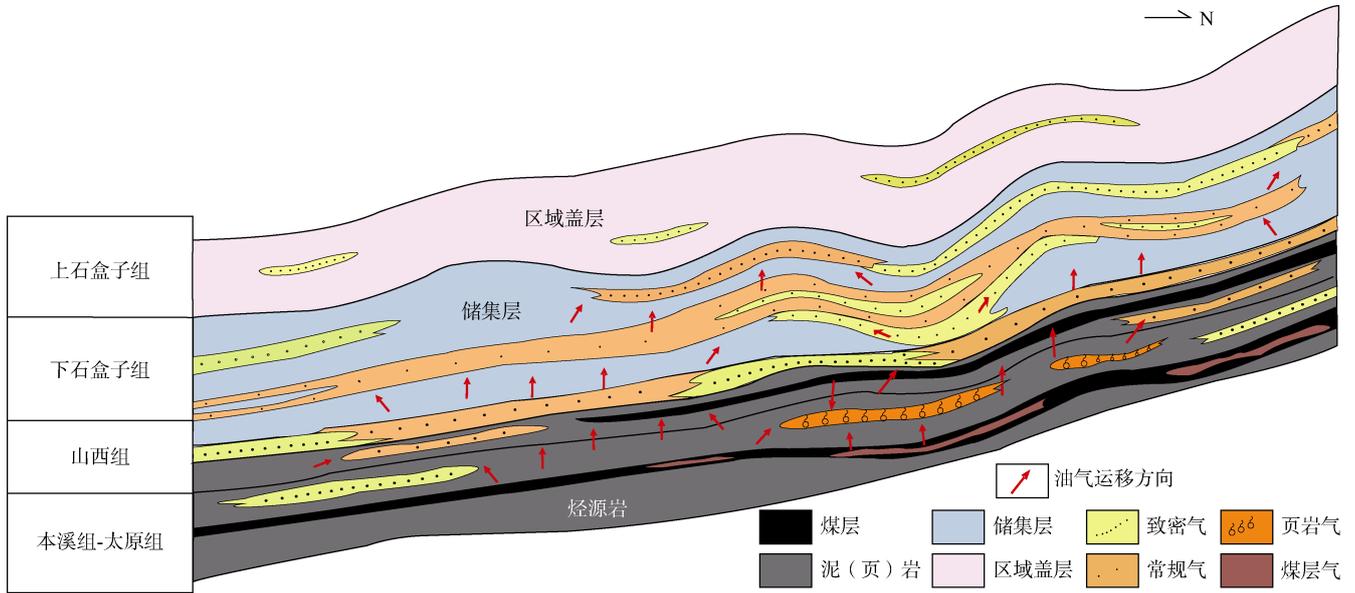


图5 苏里格气田上古生界成藏地质模式图(据文献[48]修改)

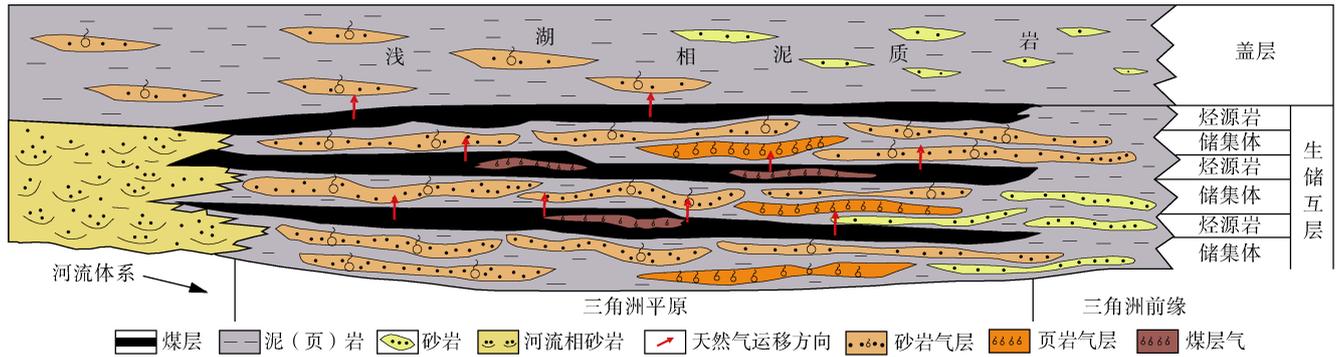


图6 榆林气田上古生界天然气成藏模式(据文献[49]修改)

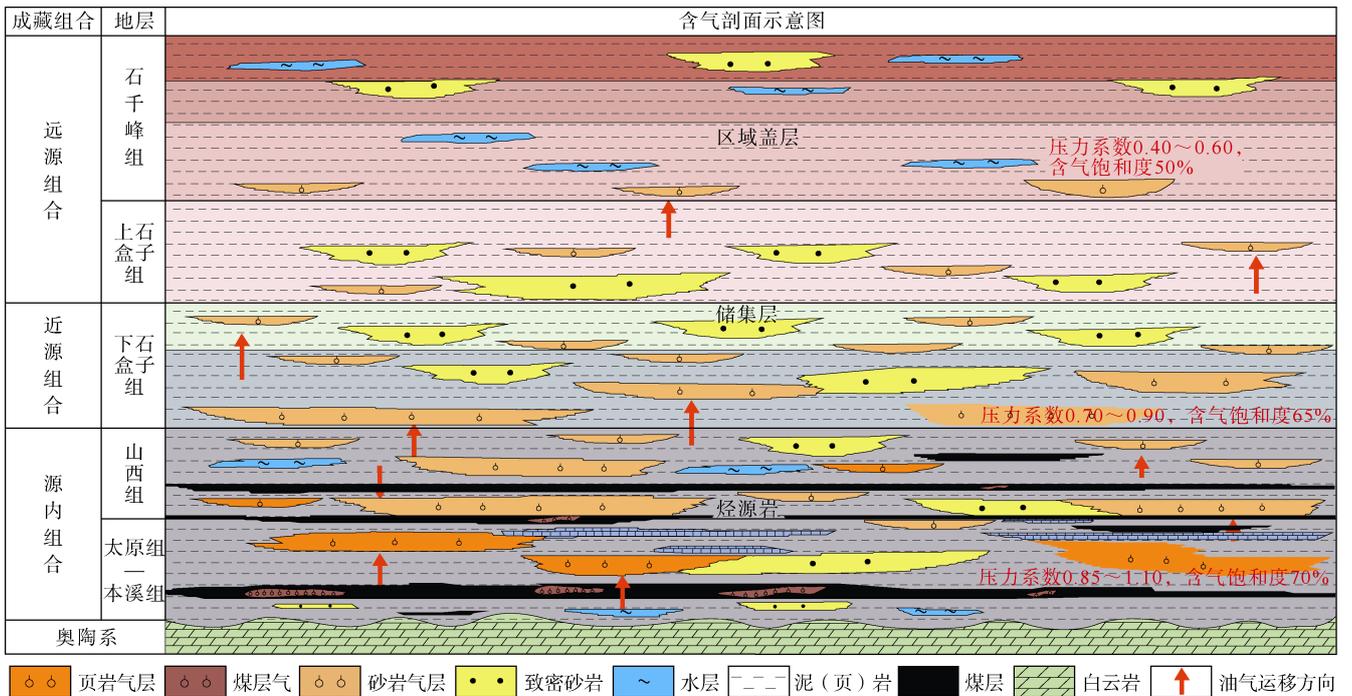


图7 神木气田成藏组合模式图(据文献[50]修改)

里格气田为代表；到盆地边缘扩展为源内、近源和远源均有致密气层发育，以神木气田为代表，并且在山西组发育海陆过渡相页岩气、煤层气。因此整体上看，鄂尔多斯盆地上古生界展现了全油气系统成藏特征，主要表现在本溪组、太原组和山西组煤层和煤系作为供烃源岩，其内部具有滞留天然气的的能力。尽管没有系统研究，但从理论的角度和目前盆地边缘钻探结果

来看，已经证实页岩气是存在的。而近源的致密储集层中，天然气生成后可以近距离优先充注到其中，进而形成近源天然气聚集，构成了近源的致密气成藏组合，同样分布于盆地中心和边缘，但是含气性差异很大，主要受控于烃源岩的供烃能力。远源组合主要在盆地边缘，盆地中心部分几乎不发育，其主要控制因素是断裂的发育及其输导作用（见图8）。

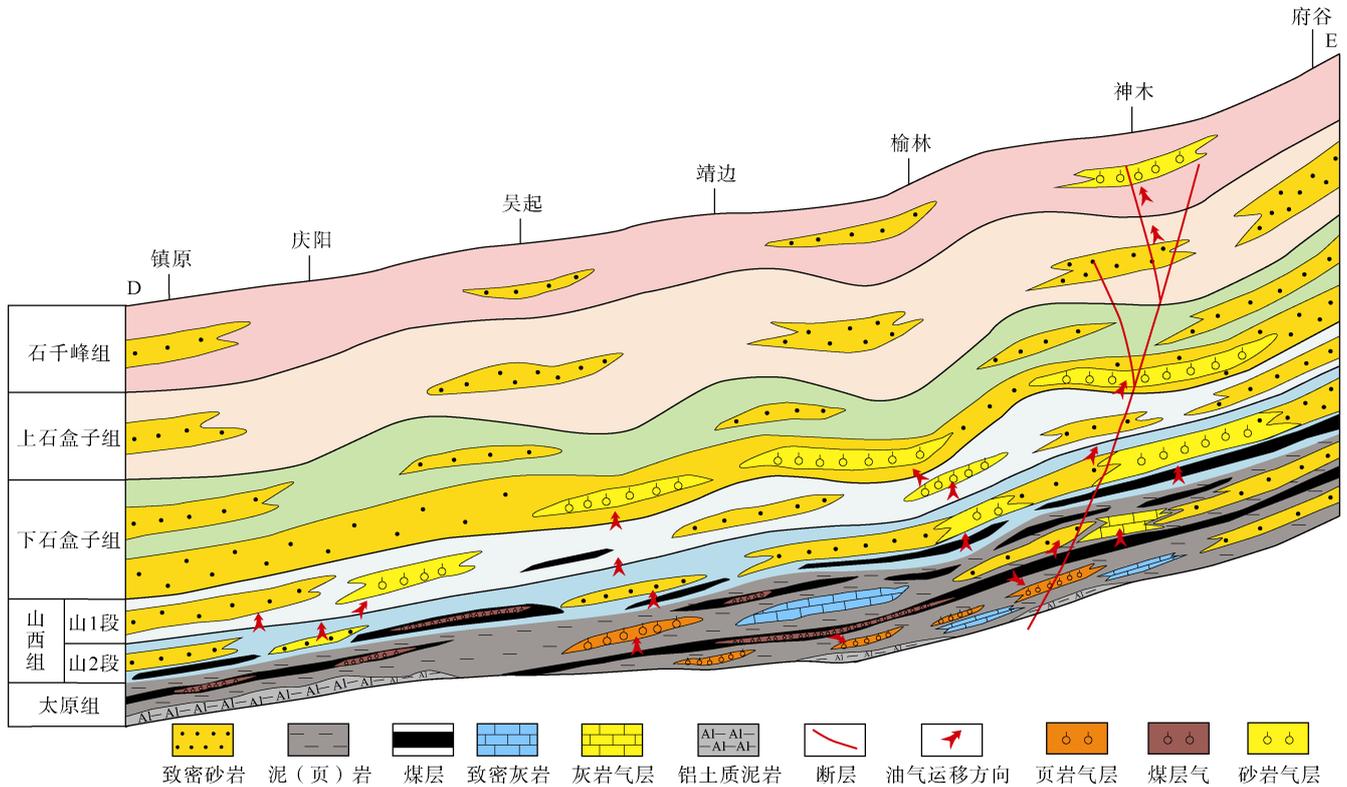


图8 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质模式综合图(剖面位置见图1)

4 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏控制因素与地质模式

4.1 全油气系统成藏控制因素

4.1.1 源储耦合关系控制了致密气分布范围和富集程度

从鄂尔多斯盆地上古生界探井钻探结果可知，气流井的分布与气源岩的生气强度具有一定相关关系。一般地，当生烃强度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 或当烃源岩的镜质体反射率大于 1.5% 时，工业气流井数量明显增加且分布密集^[35]。从前述可知，鄂尔多斯盆地上古生界具有全油气系统成藏特征，从烃源岩角度，又具有控制天然气分布的地质特点，那么在全油气系统中，烃源岩对油气分布的作用机理主要在于油气充注强度与储集层孔喉系统的耦合机制问题。

如图4所示，在致密储集层中，天然气初次运移进入致密储集层不同于常规储集层，主要差异在于致

密储集层孔隙度和渗透率均较低，孔隙空间相对较小，喉道比较狭窄，在这一背景下，天然气很难形成体积相对较大、可以以浮力为主的运移方式，需要依靠自身分子量的不断积累，形成膨胀力，克服致密储集层上覆水柱压力和毛细管力才能向上运移。因此，对于致密储集层而言，在孔喉一定的情况下，并不是所有的气源岩对致密气成藏都有作用，而是需要达到一定的生气强度，即生成天然气的数量在致密储集层储集空间中达到一定的体积膨胀力，天然气才能够进入致密储集层，进而对致密气的聚集有贡献（见图6）。由此需要建立天然气充注动力与阻力之间的平衡方程，并对其进行判断。笔者通过力平衡方程推导，建立了致密储集层天然气充注临界条件判别模型^[52]：

$$q_e = (MH_s \phi / Z \rho_{gl} RT) (\rho_w g H + 2\sigma \cos \theta / r) \quad (1)$$

据此，进一步建立了临界充注强度和临界孔隙度耦合判别方程，并以孔喉半径作为判别致密储集层中天

然气能否充注的下限：

$$r = \frac{2\sigma M H_s \phi}{Z q_e \rho_{gl} RT - M H_s \rho_w g h \phi} \quad (2)$$

然后再利用孔喉半径与孔隙度的相关性，计算致密储集层中天然气能够充注的临界孔隙度。笔者将上

述公式应用于鄂尔多斯盆地本溪组进行验证，对致密储集层中天然气临界充注强度和临界孔隙度进行了判断，发现本溪组烃源岩排气强度为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 时，需要的孔隙度下限为 10.2%；当排气强度为 $6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 时，对应的临界孔隙度为 4%（见图 9）。

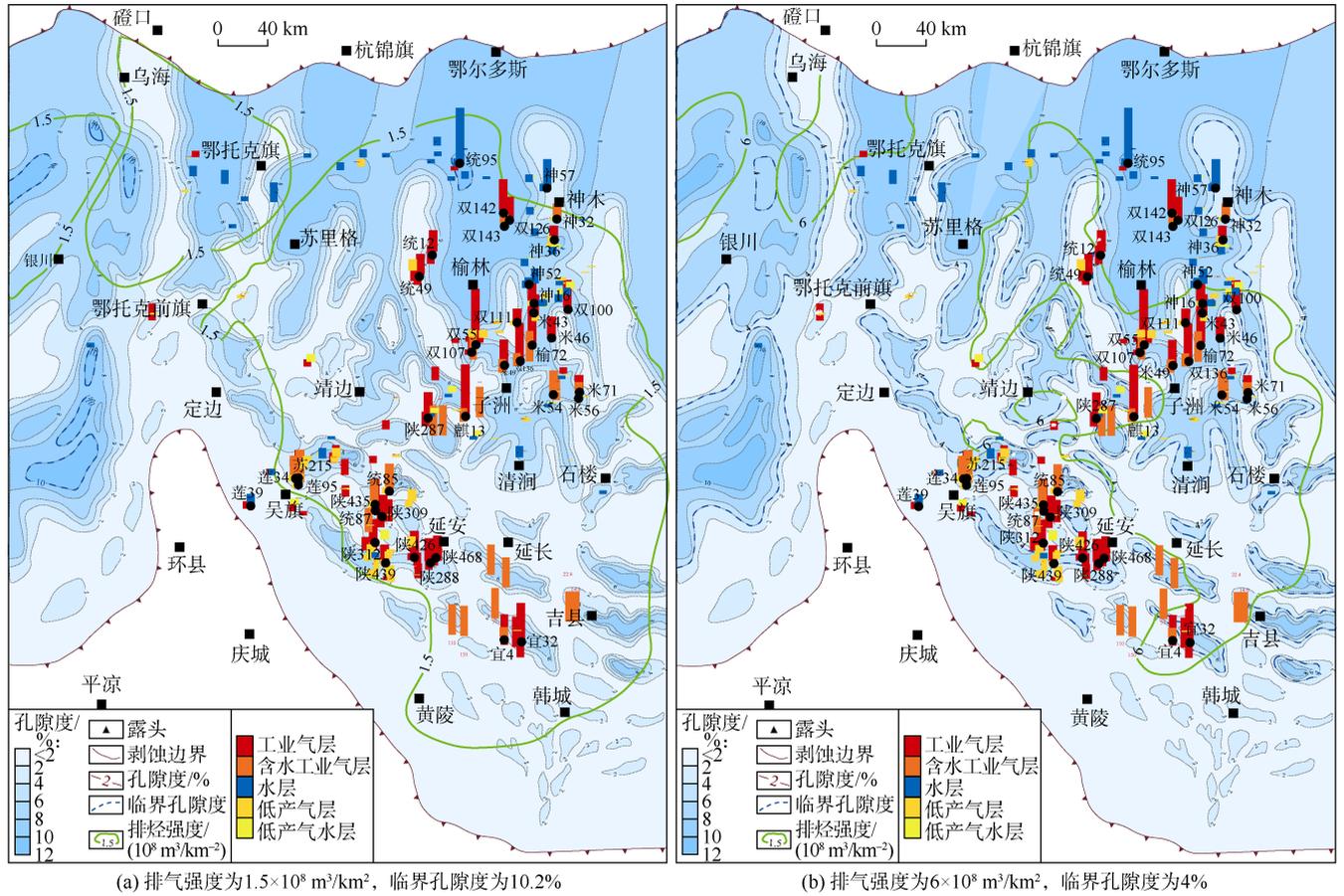


图 9 鄂尔多斯盆地本溪组排气强度-孔隙度叠合图

4.1.2 天然气的充注方式和充注通道类型控制了天然气的垂向分布

①天然气沿孔隙和微裂缝直接充注控制源内、近源天然气分布。在源储紧邻成藏组合中，即源内和近源组合中，天然气自烃源岩中生成并排出后，直接进入周围或临近的致密储集层（见图 10a、图 10b）。该类气藏的烃源岩供气面积大，储集层普遍含气，呈现大面积连续分布的特点。前述苏里格气田、榆林气田的山西组段、盒八段即为该种模式。天然气的输导通道除了孔隙外，还有微裂缝等。同时，相当一部分天然气没有排出烃源岩，而是滞留在其内部形成页岩气聚集，盆地东缘二叠系山二段即为此种类型。

②天然气沿断裂输导并充注控制远源分布。该种输导模式为特殊的致密气输导聚集类型，其输导通道为断裂，并伴有微裂缝。该种类型致密气主要分布在鄂尔多斯盆地边缘有断裂发育的区域，表现为远源成

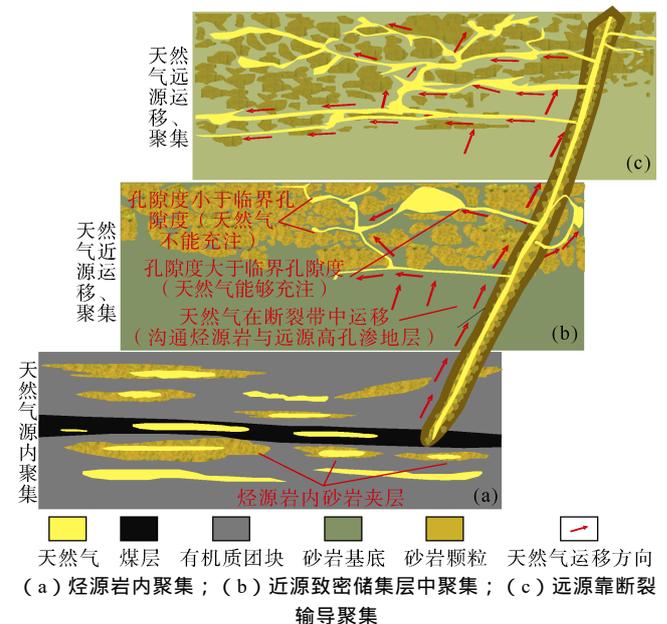


图 10 致密储集层天然气充注微观地质模式

藏的特征,平面上含气区紧邻断裂发育,纵向上,远源含气层系受断裂分布控制。并且,在这种断裂发育区域内,源内、近源和远源成藏具有一定次序性,主要受断裂发育时间的影响,如临兴、神府地区^[40],断裂发育前,主要是源内和近源充注,断裂发育后,远源开始充注。从充注时间上,源内、近源,然后远源,从含气区看,源内、近源组合主要受烃源岩供烃能力和储集层物性双重控制,远源组合则受断裂发育程度和储集层物性双重控制(见图10c)。

4.1.3 储集层物性控制了天然气能否充注及甜点发育范围

一般地,在烃源岩供气能力一定的情况下,储集层物性决定了天然气能否进入致密储集层,进而控制含气范围。储集层物性实际上对天然气聚集和分布有明显控制作用,平面上,储集层物性相对较好的区域,含气性普遍较好,且工业气流井发育,反之则含气性较差(见图9),但实际上也要注意,这个范围是在烃源岩排气强度达到一定值后,储集层物性起到了控制作用,如果烃源岩排气强度相对较低,那么即使储

集层物性很好,含气性也会很差甚至不含气,如靠近盆地北侧边缘的位置。

4.2 全油气系统成藏地质模式

4.2.1 盆地中心区(断裂不发育区)源内滞留与源内、近源致密天然气成藏系统

鄂尔多斯盆地本溪组、太原组、山西组煤层为主要烃源岩,其中暗色泥岩也具有供烃能力,总体具有良好的供烃条件,并且烃源岩内部致密储集层相对发育,具有直接充注的条件,因此,形成了大面积的源内致密气富集;同时,在烃源岩层系内部,泥页岩、煤系都具有滞留天然气的的能力,进而形成了在鄂尔多斯盆地普遍认为的源内天然气聚集,包括煤层气、页岩气,这也将是未来勘探的潜在领域。并且,盆地中心构造稳定,断裂不发育,多为天然气源内、近源成藏,以苏里格气田为例,以近源连续型致密砂岩气藏为主。天然气的富集主要受控于烃源岩的生烃能力和致密储集层的物性。在生烃能力较大的盆地中心区,其富集范围相对较大,重点可从储集层物性的角度标定甜点发育区(见图11)。

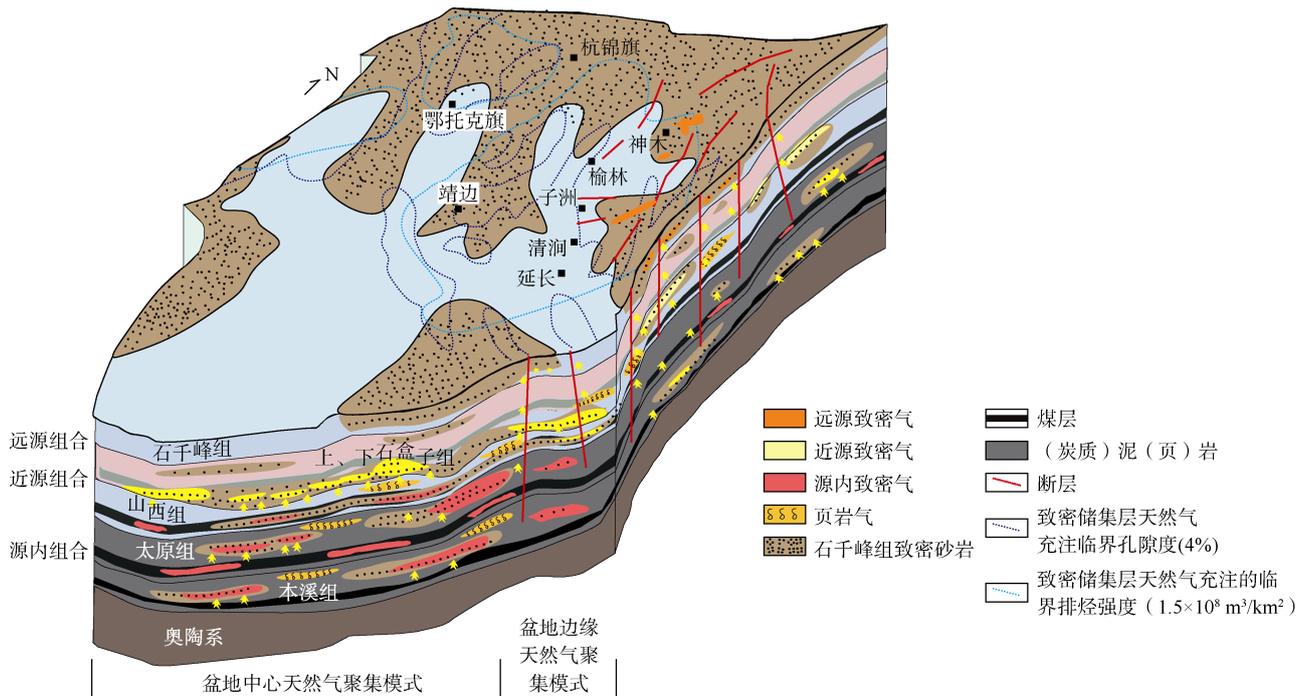


图11 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统与天然气分布地质模式

4.2.2 盆地边缘区(断裂发育区)源内、近源、远源天然气成藏系统

鄂尔多斯盆地边缘断层相对发育,进而使得该区域不仅发育源内、近源天然气聚集,而且相对于盆地中心区还发育远源组合,如盆地东缘的临兴、神府地

区的上石盒子组、石千峰组天然气成藏系统即为断裂输导的远源天然气聚集类型。另外,盆地边缘埋藏相对较浅,在考虑经济效益的前提下,边缘区的页岩气值得关注,并且已经取得了初步的勘探效益。

综上,在鄂尔多斯盆地上古生界天然气勘探中,

应立足于全油气系统成藏模式，转变勘探思路，将以致密砂岩储集体为主线的勘探模式转移到以烃源岩和煤层分布区为主线的勘探模式，即从“顺藤摸瓜”转变为“寻根溯源”，需要“源根藤瓜”四位一体，四者兼顾。在盆地中心区重点关注源内滞留和近源充注类天然气聚集，同时考虑烃源岩滞留烃能力、供烃能力与储集层物性耦合关系，作为潜在接替领域进行布局；在盆地边缘区，重点关注断裂输导与储集层的组合关系，为寻找远源组合天然气聚集提供理论指导和依据，同时充分考虑盆地边缘埋藏较浅的地质特征，进行源内滞留资源即页岩气的探索和实践（见图11）。

5 结论

全油气系统是研究含油气盆地内油气聚集的有效模式，其核心在于对烃源岩的系统评价，烃源岩的供烃能力和不同类型储集层的聚烃能力，决定了盆地内页岩类、致密类和常规类油气聚集和分布的范围，并且受断裂发育、储集层物性的综合控制。鄂尔多斯盆地上古生界储集层广泛发育且致密，根据全油气系统概念模式，将上古生界划分为盆地中心天然气聚集模式和盆地边缘天然气聚集模式。其中盆地中心天然气聚集模式又分为源内滞留页岩气、煤层气、源内致密气、近源致密气4种类型；盆地边缘天然气聚集模式分为源内滞留页岩气、煤层气、源内致密气、近源致密气和远源致密气5种类型，其差异主要在于盆地边缘断裂相对发育，所以存在远源天然气富集类型。总体而言，未来鄂尔多斯盆地上古生界天然气勘探应立足于全油气系统理论，重点攻关烃源岩供气能力和不同类型储集层聚气能力，以期更有效地预测有利勘探区。

符号注释：

g ——重力加速度，本文取 9.8 m/s^2 ； H ——水柱高度， m ； H_s ——烃源岩厚度， m ； M ——天然气摩尔质量，本文取 16 kg/mol ； q_e ——排烃强度， m^3/km^2 ； R ——气体常数，本文取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； r ——临界孔喉半径， μm ； T ——地层热力学温度， K ； Z ——气体压缩常数，无因次； ρ_{gl} ——地下气体密度， kg/m^3 ； ρ_w ——水密度， kg/m^3 ； σ ——气水界面张力， N ； θ ——润湿接触角， $(^\circ)$ ； ϕ ——烃源岩孔隙度， $\%$ 。

参考文献：

[1] WHITE I C. The geology of natural gas[J]. Science, 1885, ns-5(125): 521-522.
 [2] MCCOLLOUGH E H. Structural influence on the accumulation of petroleum in California[M]//WRATHER W E, LAHEE F H. Problems of Petroleum Geology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1934.

[3] PHILIP R P. Petroleum formation and occurrence[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1985, 66(37): 643-644.
 [4] PAN C H. Non-marine origin of petroleum in north Shensi, and the Cretaceous of Szechuan, China: Geological notes[J]. AAPG Bulletin, 1941, 25(11): 2058-2068.
 [5] 黄汲清. 中国地质构造基本特征的初步总结[J]. 地质学报, 1960, 40(1): 1-31.
 HUANG Jiqing. Preliminary summary of the basic characteristics of geological structure in China[J]. Acta Geologica Sinica, 1960, 40(1): 1-31.
 [6] 贾承造. 中国石油工业上游科技进展与未来攻关方向[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(3): 1-10.
 JIA Chengzao. China's petroleum industrial upstream technological development and its future research areas[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3): 1-10.
 [7] 吴应清, 金晓剑. 挺进中国海洋油气深水时代[J]. 科学中国人, 2020(9): 16-21.
 WU Yingqing, Jin xiaojian: Into the deepwater era of China's offshore oil and gas[J]. Scientific Chinese, 2020(9): 16-21.
 [8] 金庆焕. 深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点[J]. 科学中国人, 2006(11): 18-20.
 JIN Qinghuan. Deepwater oil and gas is the main hotspot of offshore oil and gas exploration[J]. Scientific Chinese, 2006(11): 18-20.
 [9] 贾承造, 赵政璋, 杜金虎, 等. 中国石油重点勘探领域: 地质认识、核心技术、勘探成效及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 385-396.
 JIA Chengzao, ZHAO Zhengzhang, DU Jinhu, et al. PetroChina key exploration domains: Geological cognition, core technology, exploration effect and exploration direction[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 385-396.
 [10] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.
 ZOU Caineng, YANG Zhi, TAO Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
 [11] 邹才能, 赵群, 董大忠, 等. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(12): 1781-1796.
 ZOU Caineng, ZHAO Qun, DONG Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796.
 [12] 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 Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
 [13] HAO F, ZOU H Y, LU Y C. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1325-1346.
 [14] 杨智, 邹才能, 陈建军, 等. “进(近)源找油”: 油气地质理论创新与重点领域勘探思考[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1310-1324.
 YANG Zhi, ZOU Caineng, CHEN Jianjun, et al. “Exploring petroleum inside or near the source kitchen”: Innovations in petroleum geology theory and reflections on hydrocarbon exploration in key fields[J]. Acta Petroli Sinica, 2021, 42(10): 1310-1324.

- [15] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1-10.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 1-10.
- [16] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437-452.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-452.
- [17] PANG X Q, JIA C Z, WANG W Y, et al. Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(4): 101133.
- [18] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.
JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [19] 杨华, 刘新社, 闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 174-183.
YANG Hua, LIU Xinshe, YAN Xiaoxiong. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 174-183.
- [20] 刘池洋, 王建强, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1011-1029.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.
- [21] 傅宁, 杨树春, 贺清, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块致密砂岩气高效成藏条件[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 111-120.
FU Ning, YANG Shuchun, HE Qing, et al. High-efficiency reservoir formation conditions of tight sandstone gas in Linxing-Shenfu blocks on the east margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 111-120.
- [22] 米立军, 朱光辉. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府致密气田成藏地质特征及勘探突破[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 53-67.
MI Lijun, ZHU Guanghui. Geological characteristics and exploration breakthrough in Linxing-Shenfu tight gas field, northeastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 53-67.
- [23] 匡立春, 董大忠, 何文渊, 等. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 435-446.
KUANG Lichun, DONG Dazhong, HE Wenyuan, et al. Geological characteristics and development potential of transitional shale gas in the east margin of the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 435-446.
- [24] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 295-303.
YANG Hua, FU Jinhua, LIU Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295-303.
- [25] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20.
ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. et al study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15-20.
- [26] 廖友运. 鄂尔多斯盆地东部上古生界储层岩石学特征与成岩作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
LIAO Youyun. Research on lithology characteristics and diagenesis of sandstone reservoirs of the Upper Paleozoic in eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2010.
- [27] 庞雄奇, 李素梅, 金之钧, 等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. 地球科学, 2004, 29(4): 384-390.
PANG Xiongqi, LI Sumei, JIN Zhijun, et al. Geochemical evidences of hydrocarbon expulsion threshold and its application[J]. Earth Science, 2004, 29(4): 384-390.
- [28] 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 等. 烃源岩滞留油气作用及其对泥页岩含油气率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2439-2448.
JIANG Fujie, PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, et al. Residual oil and gas in source rocks and its influence on oil and gas rate in shale[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2439-2448.
- [29] 王涛, 庞雄奇, 马新华, 等. 深盆气藏成因机理与模式及有利区预测方法[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 591-602.
WANG Tao, PANG Xiongqi, MA Xinhua, et al. Genetic mechanism and model of deep basin gas reservoir and prediction method of favorable area[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4): 591-602.
- [30] 李剑, 张春林, 姜福杰, 等. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组致密气富集主控因素[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 30-40.
LI Jian, ZHANG Chunlin, JIANG Fujie, et al. Main factors controlling the enrichment of Upper Carboniferous Benxi Formation tight gas in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 30-40.
- [31] 姜福杰, 庞雄奇, 武丽. 致密砂岩气藏成藏过程中的地质门限及其控气机理[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 49-54.
JIANG Fujie, PANG Xiongqi, WU Li. Geologic thresholds and its gas-controlling function during forming process of tight sandstone gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 49-54.
- [32] 付金华, 魏新善, 任军峰. 伊陕斜坡上古生界大面积岩性气藏分布与成因[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 664-667.
FU Jinhua, WEI Xinshan, REN Junfeng. Distribution and genesis of large-scale Upper Palaeozoic lithologic gas reservoirs on Yi-Shaan slope[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 664-667.
- [33] 冯保周, 于长录, 何太洪, 等. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部断裂体系的发现及地质意义[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(2): 1-8.
FENG Baozhou, YU Changlu, HE Taihong, et al. Discovery of fault system in the north of Yishan slope in Ordos Basin and its geological significance[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2022, 37(2): 1-8.
- [34] 姜福杰, 邵新荷, 李林涛, 等. 断裂调整型致密砂岩气藏成藏过程模拟与成藏模式[J]. 石油科学通报, 2021, 6(4): 539-552.

- JIANG Fujie, SHAO Xinhe, LI Lintao, et al. Accumulation process simulation and an accumulation model of a fault-adjusted tight sandstone gas reservoir[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(4): 539-552.
- [35] DAI J X, LI J, LUO X, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1617-1635.
- [36] XIAO X M, ZHAO B Q, THU Z L, et al. Upper Paleozoic petroleum system, Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(8): 945-963.
- [37] WU X Q, LIU Q Y, ZHU J H, et al. Geochemical characteristics of tight gas and gas-source correlation in the Daniudi gas field, the Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 412-425.
- [38] ZHAO Z F, PANG X Q, JIANG F J, et al. Hydrocarbon generation from confined pyrolysis of Lower Permian Shanxi Formation coal and coal measure mudstone in the Shenfu area, northeastern Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 97: 355-369.
- [39] HUYAN Y Y, PANG X Q, JIANG F J, et al. Coupling relationship between tight sandstone reservoir and gas charging: An example from Lower Permian Taiyuan Formation in Kangning field, northeastern Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 105: 238-250.
- [40] TANG X, ZHANG J C, SHAN Y S, et al. Upper paleozoic coal measures and unconventional natural gas systems of the Ordos Basin, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3(6): 863-873.
- [41] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 30-41.
YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 30-41.
- [42] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力: 以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 277-285.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 277-285.
- [43] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1013-1023.
GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [44] 杨华, 付金华, 魏新善. 鄂尔多斯盆地天然气成藏特征[J]. *天然气工业*, 2005, 25(4): 5-8.
YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan. Characteristics of natural gas reservoir formation in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(4): 5-8.
- [45] 付金华, 段晓文, 席胜利. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏特征[J]. *天然气工业*, 2000, 20(6): 16-19.
FU Jinhua, DUAN Xiaowen, XI Shengli. Characteristics of Upper Paleozoic gas reservoirs in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(6): 16-19.
- [46] 葛岩, 朱光辉, 万欢, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入构造对上古生界致密砂岩气藏形成和分布的影响[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(4): 491-499.
GE Yan, ZHU Guanghui, WAN Huan, et al. The influence of Zijinshan structural belt to the formation and distribution of tight sandstone gas reservoir in Upper Paleozoic, in the eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(4): 491-499.
- [47] REN J H, ZHANG L, EZEKIEL J, et al. Reservoir characteristics and productivity analysis of tight sand gas in Upper Paleozoic Ordos Basin China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 19: 244-250.
- [48] 杨华, 刘新社, 孟培龙. 苏里格地区天然气勘探新进展[J]. *天然气工业*, 2011, 31(2): 1-8.
YANG Hua, LIU Xinshe, MENG Peilong. New development in natural gas exploration of the Sulige gas fields[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(2): 1-8.
- [49] 赵丹枫, 赵靖舟, 陈莹. 鄂尔多斯盆地榆林—子洲地区山₂气藏成藏特征[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 320-328.
ZHAO Danfeng, ZHAO Jingzhou, CHEN Ying. An analysis on the characteristics of the Shan-2 Formation gas pools in Yulin-Zizhou area of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 320-328.
- [50] 杨华, 刘新社, 闫小雄, 等. 鄂尔多斯盆地神木气田的发现与天然气成藏地质特征[J]. *天然气工业*, 2015, 35(6): 1-13.
YANG Hua, LIU Xinshe, YAN Xiaoxiong, et al. The Shenmu gas field in the Ordos Basin: Its discovery and reservoir-forming geological characteristics[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(6): 1-13.
- [51] 武瑾, 王红岩, 施振生, 等. 海陆过渡相黑色页岩优势岩相类型及成因机制: 以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1137-1149.
WU Jin, WANG Hongyan, SHI Zhensheng, et al. Favorable lithofacies types and genesis of marine-continental transitional black shale: A case study of Permian Shanxi Formation in the eastern margin of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1137-1149.
- [52] JIANG F J, PANG X Q, GUO F T, et al. Critical conditions for natural gas charging and delineation of effective gas source rocks for tight sandstone reservoirs[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(1): 113-124.

第一作者简介: 姜福杰 (1979-), 男, 黑龙江兰西人, 博士, 中国石油大学(北京)教授, 主要从事油气成藏机理与分布规律的研究工作。
地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249. E-mail: jiangfj@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-08-29 修回日期: 2023-01-30

(编辑 黄昌武)