

鄂尔多斯盆地西部奥陶系成藏主控因素分析

李慧敏^{1,2}, 赵振宇³, 高建荣³, 宋微³, 赖雅庭⁴, 赵当妮⁴, 蒋婷婷⁴, 陈朝兵^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂, 陕西 西安 710200)

摘要: 鄂尔多斯盆地西部奥陶系表现出较强的勘探潜力, 但由于其成藏控制因素不明确, 严重制约了天然气的有效开发。以多方面地质资料为基础, 系统开展了鄂尔多斯盆地西部奥陶系成藏主控因素研究, 建立了成藏模式, 为鄂尔多斯盆地西部奥陶系天然气开发提供一定支撑。研究表明, 鄂尔多斯盆地西部奥陶系天然气的形成与分布主要受构造运动、有效烃源岩、有效储层发育程度三个主要因素控制。鄂尔多斯盆地西部天然气藏发育“自生自储式”及“上生下储式”两种成藏组合。其中乌拉力克组发育“自生自储式”的成藏模式, 克里摩里组发育“上生下储式”的成藏模式。

关键词: 成藏主控因素; 成藏模式; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地西部

中图分类号: TE132 文献标志码: A

Main controlling factors of Ordovician reservoir formation in western Ordos Basin

LI Huimin^{1,2}, ZHAO Zhenyu³, GAO Jianrong³, SONG Wei³, LAI Yating⁴, ZHAO Dangni⁴,
JIANG Tingting⁴, CHEN Zhaobing^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 4. No. 2 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710200, China)

Abstract: The Ordovician in the western Ordos Basin has strong exploration potential, but its reservoir formation control factors are not clear, which seriously restricts the effective development of natural gas. Based on various geological data, the main controlling factors of Ordovician reservoir formation in the western Ordos Basin were systematically studied, and a reservoir formation model was established, which can provide certain support for the development of Ordovician natural gas in the western Ordos Basin. The results show that the formation and distribution of Ordovician natural gas in the western Ordos Basin is mainly controlled by three main factors, namely the tectonic movement, the effective hydrocarbon source rock, and the development degree of the effective reservoir. The natural gas reservoirs in the western Ordos Basin are developed in two types of reservoir formation: “self-generation and self-storage” and “up-generation and down-storage”. Among them, Wulalike Formation developed the “self-generation and self-storage” formation mode, while Kelimoli Formation developed the “up-generation and down-storage” formation mode.

Key words: main controlling factors of reservoir formation; reservoiring pattern; Ordovician; western Ordos Basin

引用格式: 李慧敏, 赵振宇, 高建荣, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系成藏主控因素分析[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 161-166.

LI Huimin, ZHAO Zhenyu, GAO Jianrong, et al. Main controlling factors of Ordovician reservoir formation in western Ordos Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 161-166.

鄂尔多斯西部奥陶系近年来多口探井发现低产天然气藏, 具备良好的勘探潜力。但由于其成藏规律复杂, 成藏主控因素及模式不明确, 严重制约了天然气的勘探进程。

前人对鄂尔多斯盆地成藏机理进行了研究, 陈全红^[1]对鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集规律及沉积体系的研究发现天然气主要在三角洲富集。

党犇^[2]对盆地西部下古生界构造沉积与天然气聚集

收稿日期: 2022-09-29; 改回日期: 2023-04-11。

第一作者简介: 李慧敏(1998—), 女, 在读硕士研究生, 专业方向为沉积与储层地质。E-mail: 2952892868@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金(41802140)、国家科技重大专项(2016ZX05050006)、陕西省自然科学基金基础计划项目(2019JQ-257)、刘宝瑞地质科学基金(DMSM2019007)。

关系做了系统的研究。杜金虎等^[3]对盆地中新元古界一下古生界成藏组合做分析发现台内主要是“上生下储”式成藏,台缘带发育“上生下储”及“自生自储”成藏模式。但前人在这些方面的认识仍然存在分歧。

为此,本文在前人研究的基础上,基于地震、薄片鉴定、试气数据等资料,从构造运动、有效烃源岩及储层等方面开展鄂尔多斯盆地西部奥陶系成藏控制因素分析,明确其成藏机理,建立其成藏模式,为天然气的勘探开发提供地质依据。

1 区域地质概况

1.1 构造沉积演化

鄂尔多斯盆地又称陕甘宁盆地,行政区横跨

陕、甘、宁、蒙、晋五省,是我国第二大沉积盆地,构造上属于稳定沉降、坳陷迁移和扭动明显的多旋回克拉通盆地,是在中生代发育形成的一个大型内陆湖盆。纵观鄂尔多斯盆地的构造演化历史,在太古代一元古代基底形成后,先后经历了晋宁运动、加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动,早古生代寒武纪沉积期,鄂尔多斯西南缘由秦岭、北祁连、贺兰山构成的拗拉谷再度活化,秦岭、祁连两支发展成海槽,贺兰一支被遗弃发展成拗拉槽,平面上由秦岭、北祁连、贺兰山构成的海槽呈“L”形包绕鄂尔多斯地块。华北奥陶纪中期盆地主体为台地沉积(图1),中央古隆起的分隔作用将盆地划分为东部与西部,东西部沉积差异显著,分别发育陆表海与边缘海沉积^[3-4]。

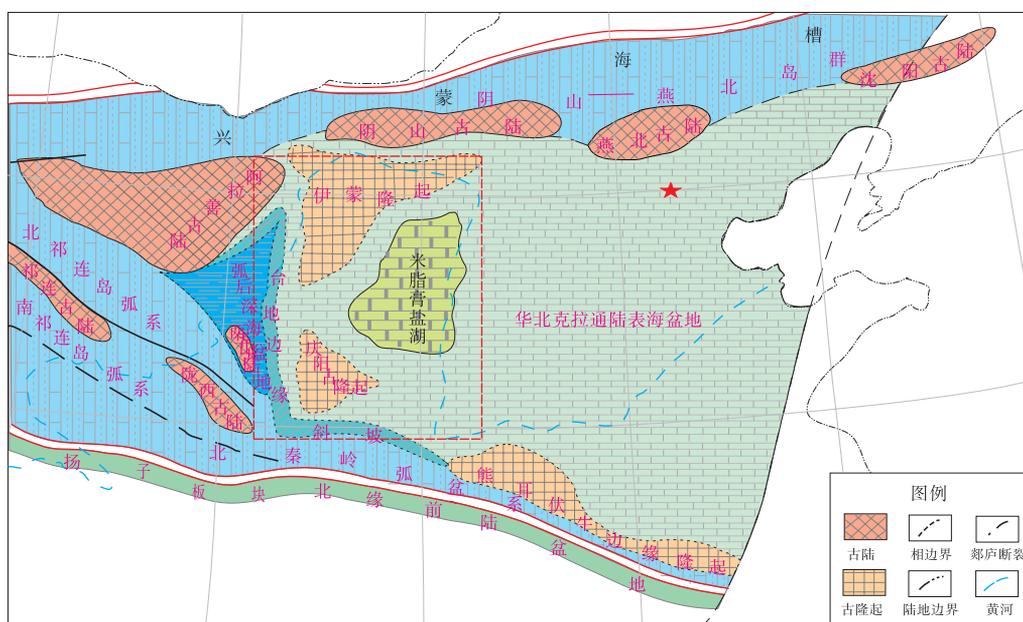


图1 华北奥陶纪中期构造-沉积格局

1.2 地层岩性特征

根据鄂尔多斯盆地西部奥陶系地层岩性特征及生物组合特征,可将西部奥陶系自下而上分为三道坎组、桌子山组、克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组,局部地区发育奥陶系上统公乌素组、蛇山组(图2a),其中克里摩里组和乌拉力克组是本文研究的目的层段,乌拉力克组底部与克里摩里组顶部呈不整合接触。

鄂尔多斯西部奥陶系岩性单一,发育碳酸盐岩海相沉积,储层岩性主要有灰岩、白云岩和泥页岩。其中乌拉力克组有效储层为灰岩和泥页岩,克里摩里组有效储层为灰岩和白云岩。克里摩里组一桌

子山组灰岩含量逐渐减少,白云岩含量逐渐增加(图2b)。

2 天然气成藏主控因素分析

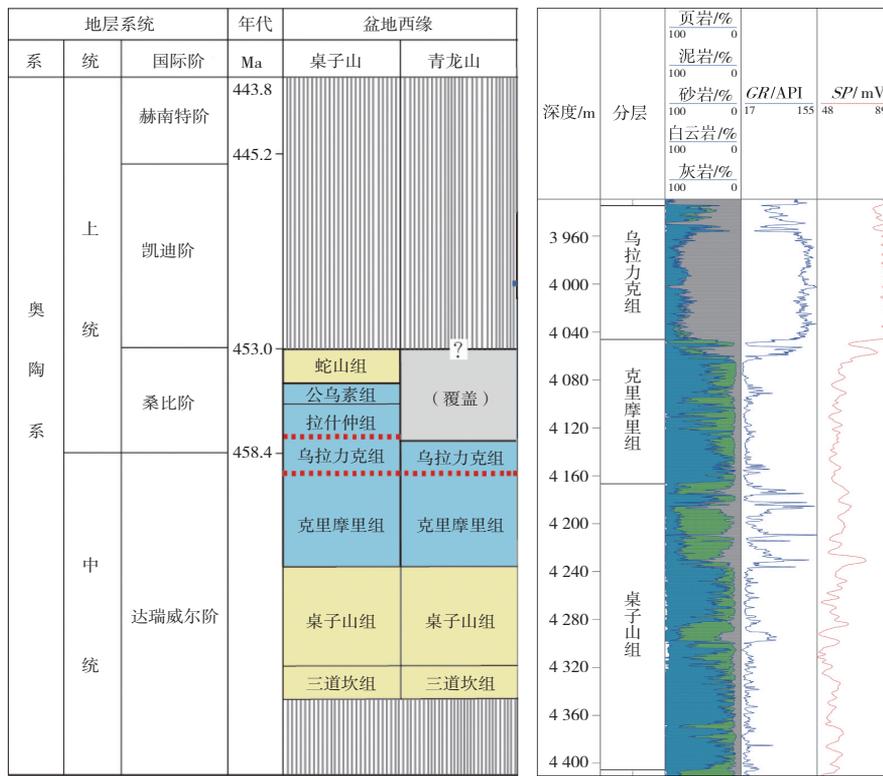
2.1 构造运动对克里摩里组天然气成藏的影响

鄂尔多斯盆地西部经历了多次构造运动,不同构造运动对气藏产生的影响各不相同。奥陶纪末,受加里东运动的影响,由秦岭、北祁连、贺兰山构成的海槽处于关闭状态,鄂尔多斯地块抬升隆起,缺失上奥陶统、志留系、泥盆系以及下石炭统沉积,遭受1.5亿年的风化剥蚀,形成了奥陶系顶部的岩溶地貌。与此同时,鄂尔多斯盆地西部也遭受一定程

度的抬升剥蚀,形成了克里摩里组顶部的古风化壳岩溶地貌。受古风化壳控制,克里摩里组顶部形成了各类溶蚀孔、溶洞及裂缝,为天然气的储集提供了空间。而后海西期,盆地整体沉降,储集空间持续受到地下径流的渗流溶蚀作用影响,有效储集空间进一步改善。至燕山期,由于燕山运动Ⅵ幕构造运动强烈,盆地西部发育大规模逆冲推覆构造,在晚侏罗世末—早白垩世时期,盆地西部进入天然气成藏期,此时形成岩溶洞穴体、礁滩体、白云岩体等多种有效圈闭^[5]。

鄂尔多斯盆地西部相对中东部地区,最大特点就是构造活跃且断裂发育^[6-7],断层主要呈南北向

展布,东西向断层较少,断裂带内的断层类型复杂,有西倾东冲大型逆冲型与反冲式东倾断层(图3)。在逆冲断褶带等类似构造复杂、断层发育的地带,天然气可通过断裂以及构造微裂缝作短距离运移,即断裂及构造抬升产生的构造裂缝可形成天然气运移的有利通道。一方面,受加里东、燕山运动影响,克里摩里组整体升降,岩石破裂,产生大量构造裂缝,同时溶解作用也使得碳酸盐岩产生溶蚀扩大缝;另一方面,部分通天断层的存在造成天然气一定程度的逸散,如梁探1井克里摩里组地层上倾方向断层发育,气藏较难保存,试气产量仅 $0.13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。



a. 盆地奥陶系部分地层划分对比方案 b. 忠探2井柱状图

图2 区域地层划分及单井柱状图

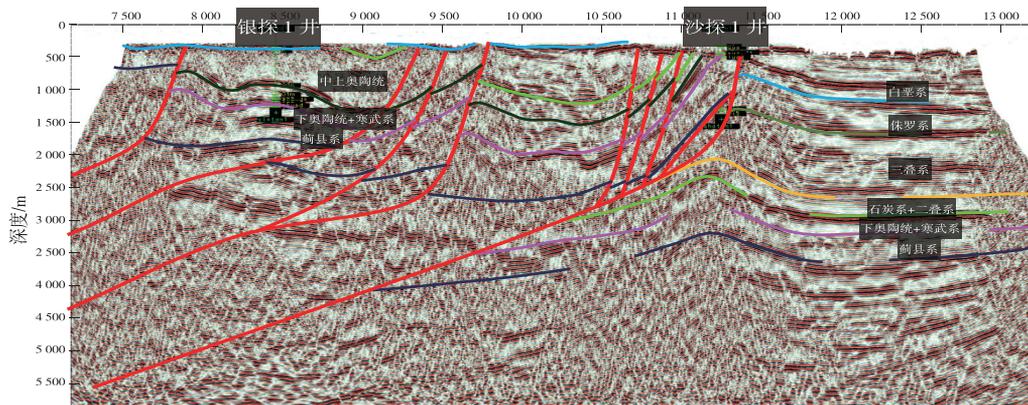


图3 鄂尔多斯盆地西部东西向H125907线综合解释剖面

2.2 有效烃源岩对乌拉力克组天然气成藏的影响

前人关于鄂尔多斯盆地西部奥陶系烃源岩的研究取得了一定成果,其中万延周^[8]研究发现盆地西部碳酸盐岩烃源岩的质量与其所含泥质含量呈正相关;付锁堂等^[6]认为乌拉力克组泥页岩是盆地西部海相层系质量最好的一套烃源岩;试气结果表明,烃源岩有机碳含量是控制西部奥陶纪地层天然气成藏的主要因素。测试分析显示,鄂尔多斯盆地西部奥陶系烃源岩总有机碳含量总体偏低,但从三道坎组到乌拉力克组逐渐增高,其中乌拉力克组总有机碳含量平均为0.7%,克里摩里组总有机碳含量平均为0.4%^[5]。除了总有机碳含量,盆地西部奥陶系有效烃源岩厚度及分布面积也呈现从三道坎组到乌拉力克组逐渐增高的趋势。因此,鄂尔多斯盆地西部的天然气主要来源于乌拉力克组的泥页岩型烃源岩,其次是克里摩里组内的碳酸盐岩和暗色泥页岩型烃源岩。

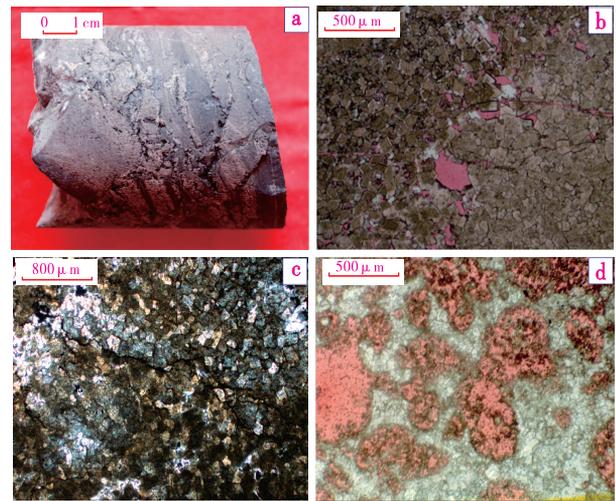
鄂尔多斯盆地西部乌拉力克组近年来获得了较好的天然气显示,气藏类型为乌拉力克组底部的页岩气和顶部的灰岩致密气。通过对盆地西部乌拉力克组有机碳含量与试气产量的测试发现,有机碳含量越高的井,其试气产量越丰富。截至目前,盆地西部共计76口井钻穿乌拉力克组,30口井在乌拉力克组灰质泥页岩(页岩气)、泥质灰岩段(灰岩致密气)钻遇气测异常,其中A井试气产量 $26.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其它7口井试气获 $(0.10 \sim 0.45) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的低产气流。根据统计,已钻遇气井均位于总有机碳含量大于0.3%的层位中,页岩气资源较丰富(表1)。因此,有效烃源岩是盆地西部天然气聚集成藏的物质基础,尤其是对乌拉力克组页岩气、灰岩致密气的控制更为明显,有效烃源岩控制着天然气藏的区域分布。

表1 盆地西部乌拉力克组试气成果数据

井号	岩性	总有机碳含量/%	试气产量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
A		0.79	265 000
B		0.57	4 496
C	灰质	0.55	2 605
D	泥页岩 (页岩气)	0.44	1 315
E		0.43	1 303
F		0.38	1 037
G	含泥灰岩(灰岩致密气)	0.41	1 152
H	含泥灰岩(灰岩致密气)	0.37	1 034

2.3 有效储层对克里摩里组天然气成藏的影响

盆地西部奥陶系克里摩里组有效储层类型有岩溶洞穴型、白云岩型和台地边缘相礁滩型。其中岩溶洞穴型储层和白云岩型储层分布广、规模大,台地边缘相礁滩型发育程度较低。岩溶洞穴型储层主要分布于克里摩里组的斜坡相灰岩中,发育溶蚀孔洞(图4a)。岩溶缝洞发育区内的储层连通性与有效储集空间性能较好,该类储层孔隙度介于4.1%~14.9%,平均9.9%,渗透率介于 $(1.7 \sim 8.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $3.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是研究区主力储层;白云岩型储层主要发育于克里摩里组的粉—细晶白云岩中(图4b),储集空间以白云岩晶间(溶)孔为主,其次为微裂缝(图4c),该类储层孔隙度较高,介于3.0%~10.9%,平均7.3%,渗透率介于 $(1.1 \sim 4.9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $3.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储渗性能较好,是研究区次要储层;礁滩型储集体主要发育于克里摩里组台缘礁滩相带的灰岩中(图4-d),造礁生物为钙藻、海绵及层孔虫等^[9-10],该类储层孔隙度介于3.1%~16.0%,平均10.3%,渗透率介于 $(2.2 \sim 10.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $4.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储渗性能最好,但发育规模极小(表2)。



a.余探1井, 4 051.10 m, 泥晶灰岩、洞穴充填角砾状灰岩, 发育溶蚀空洞;
b.梁探1井, 5 062.90 m, 粉晶-细晶白云岩, 发育晶间孔;
c.忠探1井, 4 520.2 m, 发育构造微裂缝; d.天1井, 3 936 m, 藻屑灰岩溶孔

图4 鄂尔多斯西部克里摩里组有效储层特征

目前盆地西部钻穿克里摩里组的探井73口,试气产量大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的有6口(表3),从不同类型储层试气效果来看,岩溶缝洞型储层试气产量最高,是研究区主力产层,白云岩类储层次之。因此,低渗致密背景下的岩溶发育区、粉—细晶白云岩及礁滩相发育区,是鄂尔多斯盆地西部奥陶系天然气成藏有利区的目标方向。

表2 鄂尔多斯盆地西部有效储层物性特征

有效储层类型	孔隙度/%		渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		物性解释
	范围	平均	范围	平均	
岩溶洞穴型	4.1 ~ 14.9	9.9	1.7 ~ 8.3	3.8	孔渗性良好,但储层非均质性差
白云岩型	3.0 ~ 10.9	7.3	1.1 ~ 4.9	3.2	孔隙度高,渗透性中等
礁滩型	3.1 ~ 16.0	10.3	2.2 ~ 10.3	4.3	孔渗性最好,但储层规模极小

表3 盆地西部克里摩里组试气成果数据

井号	储层类型	射孔井段/m	试气结果	
			气产量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	水产量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
I	岩溶缝洞型	3 934.0~3 940.4	4 351	
C		4 040.0~4 045.0	10 378	3.7
J		4 083.0~4 085.0	24 177	12.4
K		3 984.0~3 988.0	11 565	1.6
L	礁滩型	4 080.0~4 086.0	16 563	4.5
M		4 568.0~4 571.0	13 793	2.1
N	白云岩型	4 050.0~4 053.0	16 707	
O		4 187.5~4 190.0	7 628	
P		4 150.0~4 152.0	644	18.1
Q		4 155.0~4 160.0	634	7.2
		3 931.0~3 935.0	537	10

3 成藏模式建立

鄂尔多斯盆地西部天然气的成藏主要受构造运动、有效烃源岩和有效储层的综合控制。其中乌拉力克组发育底部页岩气和顶部的灰岩致密气成藏类型,其成藏主要受控于源内有效烃源岩的总有机碳含量,总有机碳含量高的泥页岩既能成为天然气的主要储集空间,又能提供较充足的烃类供给,因此乌拉力克组发育“自生自储式”的成藏模式;克

里摩里组顶部受加里东运动的影响,顶部发育风化壳岩溶地貌。另外,天然气的成藏还受控于燕山运动形成的大规模逆冲推覆构造,部分通天断层导致天然气发生逸散,同时也为天然气的运移提供了部分通道。克里摩里组顶部发育的风化壳岩溶孔洞缝体系、粉—细晶白云岩及少量礁滩相储层,构成了克里摩里组天然气的主要储集空间,在乌拉力克组主力烃源岩的烃类供给下,形成了“上生下储式”成藏组合^[11-13](图5)。

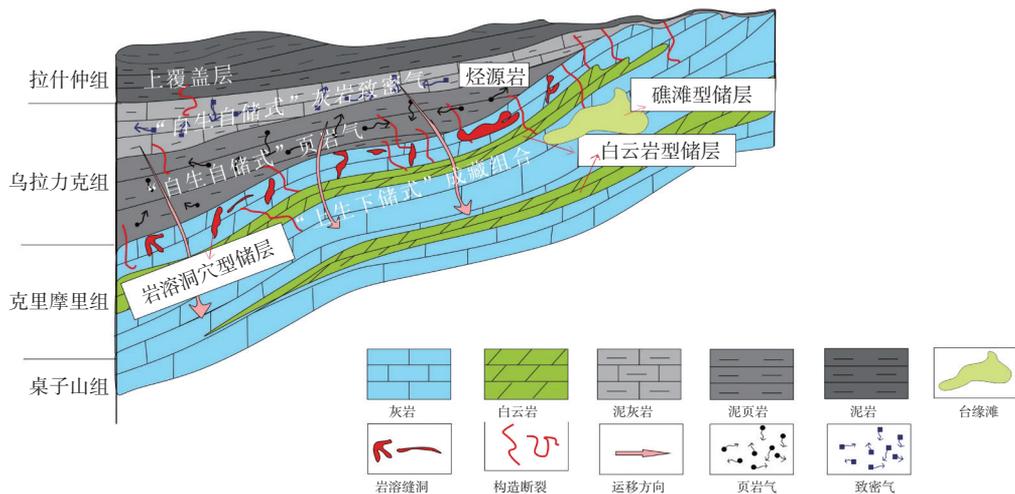


图5 鄂尔多斯盆地西部成藏模式

4 结论

(1)鄂尔多斯盆地西部奥陶系天然气的形成与分布主要受构造运动、有效烃源岩、有效储层发育程度三个主要因素控制。其中构造运动可改善克里摩里组储集空间,构造断层、裂缝可导致天然气逸散,也可形成天然气运移的有利通道;有效烃源岩对乌拉力克组页岩气、灰岩致密气区域分布控制作用明显;有效储层控制着天然气的成藏,低渗致密背景下的岩溶发育区、粉—细晶白云岩发育区及礁滩相发育区,是鄂尔多斯盆地西部奥陶系天然气成藏有利区。

(2)鄂尔多斯盆地西部天然气藏发育“自生自储式”及“上生下储式”两种成藏组合。其中乌拉力克组发育“自生自储式”的成藏模式,克里摩里组顶部发育的风化壳岩溶孔洞缝体系、粉—细晶白云岩及少量礁滩相储层,构成了克里摩里组天然气的主要储集空间,在乌拉力克组主力烃源岩的烃类供给下,形成了“上生下储式”成藏组合。

参考文献:

- [1] 陈全红. 鄂尔多斯盆地上古生界沉积体系及油气富集规律研究[D]. 西安:西北大学, 2007.
- [2] 党犇. 鄂尔多斯盆地构造沉积演化与下古生界天然气聚集关系研究[D]. 西安:西北大学, 2003.
- [3] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界—下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J].

石油勘探与开发, 2019, 46(5): 820-835.

- [4] 李蒙. 鄂尔多斯西缘奥陶纪沉积与构造演化研究[D]. 西安:西北大学, 2019.
- [5] 束宁凯, 汪新文, 郭建平. 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系“三元”主控成藏规律[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 43-47.
- [6] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 33-44.
- [7] 李斌. 鄂尔多斯盆地西部冲断带构造与控油气因素研究[D]. 西安:西北大学, 2019.
- [8] 万延周. 鄂尔多斯西缘奥陶系烃源岩及储盖层特征研究[D]. 西安:西北大学, 2009.
- [9] 罗星, 叶超, 雷迅, 等. 鄂尔多斯西缘奥陶系储层特征及主控因素研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(10): 52-55.
- [10] 杨越东. 鄂尔多斯盆地天环北段奥陶系克里摩里组沉积微相及储层特征研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2018.
- [11] 吴东旭, 孙六一, 周进高, 等. 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组白云岩储层特征及成因[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 51-62.
- [12] 张道锋, 刘新社, 高星, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系海相碳酸盐岩地质特征与成藏模式研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 92-101.
- [13] 袁京素. 鄂尔多斯盆地西缘下古生界成藏条件研究[D]. 成都:成都理工大学, 2009.

(编辑 刘义梅)