

鄂尔多斯盆地地下古生界风化壳气藏差异性

魏新善^{1,2}, 魏柳斌^{1,2}, 任军峰^{1,2}, 蔡郑红^{1,2}, 周黎霞^{1,2}

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018;

2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

摘要:对鄂尔多斯盆地伊陕斜坡下古生界风化壳成储、成烃、成藏地质特征及分布规律研究表明,该盆地风化壳储层经历了准同生期层间岩溶、表生期风化壳岩溶及埋藏期局部热液改造,风化壳气藏气源来自上古生界、下古生界2套烃源岩生烃,其中上古生界煤系烃源岩是其主力烃源岩,伊陕斜坡风化壳气藏具有差异聚集分布的特征。靖西地区发育(常规)低渗透风化壳气藏,圈闭类型主要为岩性圈闭,储层类型以裂缝—白云石晶间(溶)孔为主,天然气以油型气为主,气藏分布不连续,有边底水,局部高产富集。靖边地区发育低渗透风化壳气藏,圈闭类型主要为古地貌—地层圈闭,储层类型以裂缝—孔洞型为主,天然气成因具有以煤成气为主,油型气为辅的混源气特征,气藏不含边底水,大面积连续分布。靖东地区发育致密风化壳气藏,圈闭类型主要为古地貌—地层圈闭,储层类型以裂缝—微孔隙为主,孔洞局部发育,天然气以煤成气为主,大面积普遍含气,但单井产能较低。气藏差异聚集主要受控于以下4个方面:①沉积微相是多类型储层发育的基础;②岩溶古地貌为风化壳储层发育创造了条件;③多源烃类有序聚集是天然气差异聚集的关键;④燕山期构造反转奠定了下古生界风化壳气藏差异分布的格局。

关键词:鄂尔多斯盆地;奥陶系;差异聚集;风化壳;碳酸盐岩;成藏

中图分类号:TE122.3⁺2

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2018)02-0178-11

引用格式:Wei Xinshan, Wei Liubin, Ren Junfeng, *et al.* Differential distribution of natural gas in the Lower Paleozoic paleokarst gas reservoir, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 178-188. [魏新善, 魏柳斌, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界风化壳气藏差异性[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 178-188.]

0 引言

自从1989年发现靖边奥陶系马家沟组碳酸盐岩风化壳大型气田近30年以来,围绕靖边气田向东西两翼勘探持续推进,累计天然气探明储量超过 $6\,000\times 10^8\text{ m}^3$ ^[1-11]。特别是近几年来,风化壳含气层系向马家沟组中下段乃至寒武系拓展,多井获工业气流,风化壳气藏不仅仅是发育于奥陶系马家沟组,而是整个下古生界。传统认知中处于成藏不利条件的岩溶盆地、岩溶高地等古岩溶地貌单元的天然气的勘探不断取得突破:岩溶高地发现了多个含气

富集带,其含气层系及气藏类型与靖边气田不同,主要分布于马家沟组中下段乃至寒武系等地层,气藏分布不连续,具有局部高产富集的特点,多井获得大于 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流;岩溶盆地发育碳酸盐岩型致密气,普遍具有含气性,单井产能较低的特点,综合评价成藏条件优越,勘探潜力较大。天然气勘探实践揭示了许多成藏地质问题,有待深入研究,诸如在岩溶斜坡和岩溶盆地发育大面积低渗透致密碳酸盐岩气,而岩溶高地为局部成藏?盆地尺度均发育不整合面,与不整合面有关的风化壳气藏进一步的勘探方向是什么?因此,随着风化壳气藏

收稿日期:2017-08-15;修回日期:2018-01-07.

基金项目:国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地奥陶系—元古界成藏条件研究与目标区带评价”(编号:2016ZX05004006)资助.

作者简介:魏新善(1962-),男,陕西宝鸡人,高级工程师,博士,主要从事天然气勘探生产和综合地质研究.

E-mail: wxs_cq@petrochina.com.cn.

勘探开发持续向下古生界推进,有必要重新认识缓坡型不整合面特征及岩溶储层发育特征,研究盆地大尺度范围内不整合面风化壳天然气成藏条件的差异性,总结天然气富集规律,指导勘探开发生产。

1 风化壳成藏地质背景

1.1 沉积地质背景

鄂尔多斯盆地下古生界是发育于前寒武系结晶基底之上的陆表海克拉通盆地,构造平缓。早古生代以碳酸盐岩台地沉积为主,早奥陶世受怀远运动影响,盆地内部缺失下奥陶统冶里组—亮家山组沉积,中奥陶世盆地中东部马家沟组发育碳酸盐岩—蒸发岩交互沉积,其中马一段、马三段、马五段为海退蒸发岩旋回,以膏云岩及盐岩沉积为主,马二段、马四段、马六段为海侵碳酸盐岩旋回,以白云岩、灰岩沉积为主,马五段自上而下又划分为10个亚段,其中马五₁₊₂亚段是靖边风化壳气田的主力产层。

1.2 风化壳不整合面的形成

中晚奥陶世,在秦祁海槽自南向北、兴蒙海槽自北向南的挤压应力下,鄂尔多斯盆地由被动大陆边缘向活动大陆边缘转换,盆地西南缘逐步裂陷,转变为海槽—斜坡相沉积,中央古隆起开始隆升,遭受风化剥蚀,至加里东末期,整个华北板块整体抬升,遭受长达1.5亿年的风化剥蚀淋滤,形成了盆地范围内广泛分布的风化壳不整合面(图1)。由于局部古隆起的隆升剥蚀作用,盆地不同区域前寒武系—奥陶系地层剥蚀裸露与上古生界煤系地层直接接触。

2 风化壳储层差异分布

2.1 靖东型致密风化壳储层

靖东型致密风化壳储层主要分布于靖边东部的神木—米脂—清涧一带,主要发育于马五₁₊₂亚段,岩性以泥—粉晶白云岩为主,具有泥、粉晶结构,局部发育的含硬石膏结核白云岩由于溶蚀作用形成溶蚀孔洞,呈椭球状、鸟眼状及柱状,平面上呈层状稳定分布[图2(a)],但靖东地区绝大多数被方解石等矿物充填,孔洞储层发育程度低[图2(d)],靖东型储层单层厚度较薄,一般在1~4m之间,区域分布稳定、非均质性强,孔隙类型以与岩溶作用相关的裂缝—微孔隙为主,局部古残丘地貌发育裂缝—溶孔型储层,对靖边东部马五₁₊₂亚段552块岩心分析资料统计表明,裂缝—溶孔型储层平均孔隙度为5.12%,平均渗透率为 $3.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,仅占整个样品比例的9.8%,其余白云岩储层平均孔隙度为3.08%,平均渗透率为

$0.069 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。综上所述,靖东地区风化壳主要储集类型的渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的致密型碳酸盐岩储集层的范畴^[12,13]。

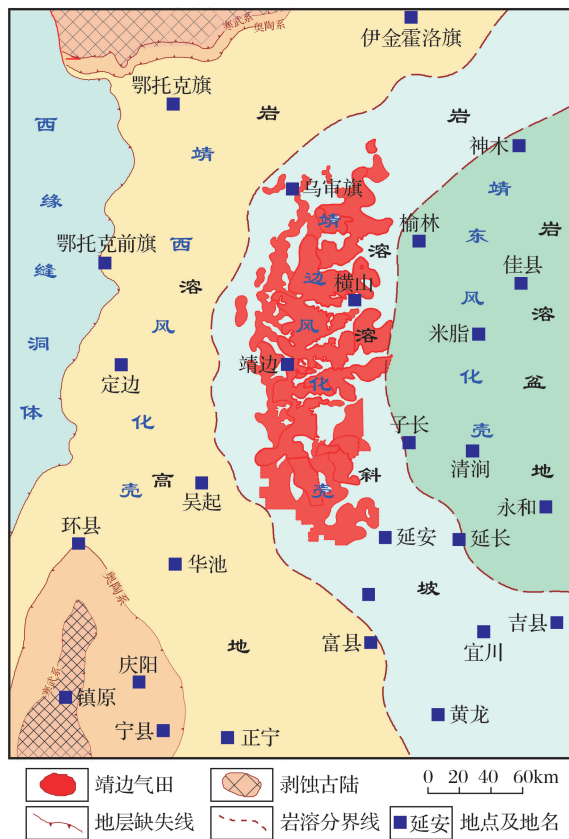


图1 鄂尔多斯盆地前石炭纪古地质简图

Fig.1 The pre-Carboniferous paleogeology map of Ordos Basin

2.2 靖边型低渗透风化壳储层

靖边型低渗透风化壳储层主要分布于靖边气田主带,主要发育在马五₁₊₂亚段、马五₄亚段,与靖东型相似,以泥—粉晶白云岩为主,具有泥、粉晶结构,泥质含量一般在5%~30%之间,发育波纹层理及藻纹层结构。靖边地区处于硬石膏结核白云岩坪主带上,岩溶作用有利于形成溶蚀孔洞层,储层单层厚度一般在1~5m之间,区域分布稳定,横向对比性强,孔隙类型以硬石膏结核白云岩溶蚀形成的裂缝—孔洞型储层为主,孔洞呈半充填状,充填物以白云岩为主,充填程度较低[图2(b),图2(e)]。对靖边气田马五₁₊₂亚段、马五₄亚段1138块岩心分析资料统计表明,裂缝—溶孔型储层总体孔隙度为2%~8%,平均孔隙度为5.3%,渗透率为 $(0.1 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $3.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.3 靖西型(常规)低渗透风化壳储层

靖西型(常规)低渗透风化壳储层主要指靖边以

西的鄂托克旗一定边—吴起一带。发育厚层块状白云岩储层,主要见于马五₅亚段及马四段,其中马五₅亚段以粗粉晶白云岩为主,具有粗粉晶结构,白云岩沿中央古隆起西侧呈环带状分布,马四段岩性以细晶白云岩为主,具有细晶结构,说明其是埋藏白云岩化成因^[14],主要分布于中央古隆起带,储集层段较厚,单层厚度一般在3~10m之间,马四段局部厚度达数十米,但横向上受沉积相控制,分布不稳定,靖西型风化壳孔隙类型以裂缝—晶间(溶)孔为主[图2(c),图2(f)],对靖边地区240块岩心分析资

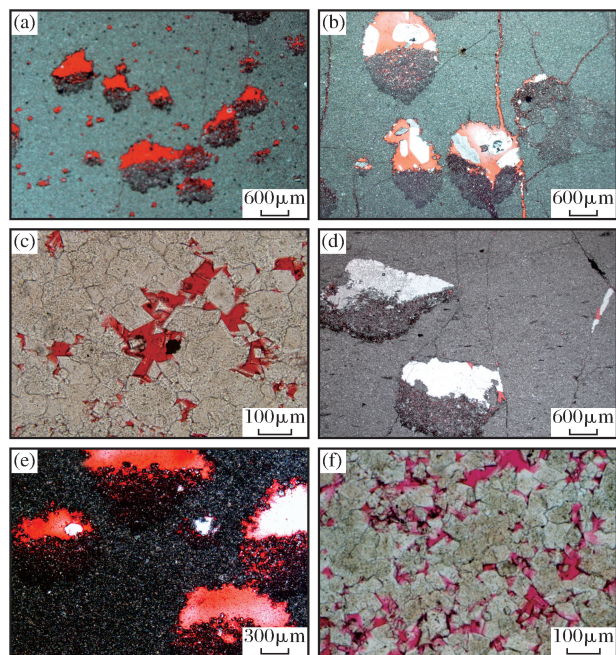


图2 鄂尔多斯盆地风化壳不同区带孔隙类型特征

Fig.2 Characteristics of pore types in different zone of paleokarst reservoir in Ordos Basin

(a)SH20井,2 875m,马五₁³小层,溶孔;(b)G01-13井,3 119m,马五₂²小层,溶孔及裂缝,白云石充填;(c)S2井,3 577.8m,马五₆亚段,晶间孔;(d)YT1井,2 419m,马五₂²小层,残余微孔隙,方解石充填;(e)SH291井,3 822.06m,马五₂²小层,溶孔;(f)DT1井,马四段,3 939.97,晶间孔

料统计表明,靖西地区孔隙度为4%~9%,平均孔隙度为4.9%,渗透率为 $(0.1\sim100)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.48\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。尽管总体基质孔隙度较低,但局部发育常规裂缝性白云岩储层,岩性破碎,取心收获率低,具有高产富集的特点,单井日产达到百万方以上。

3 风化壳储层成因期次

3.1 准同生期层间岩溶

准同生期层间岩溶主要见于盆地中东部奥陶系

潮坪高频层序,受控于短期海平面下降,准同生期间歇性暴露遭受大气淡水淋滤^[15],导致含硬石膏结核的层纹石/叠层石云岩中的易溶盐类矿物溶蚀形成针状、结核状及鸟眼孔隙,该类储层横向分布稳定,主要分布于马三段、马五段等海退旋回含硬石膏结核云坪微相,如奥陶系风化壳顶部马五₁¹⁺²、马五₃¹、马五₄¹等小层最为典型,但在风化壳以外的马五₆亚段、马五₈亚段、马三段等海退旋回含硬石膏结核云坪微相仍然发育[图3(a),图3(c)],说明其不受风化壳界面的控制,为准同生期大气淡水淋滤的初始产物。相对而言,风化壳膏模孔隙比内幕型膏模孔隙裂缝较发育,孔隙连通性更好,说明其经历了后期风化壳岩溶改造,岩溶破裂缝沟通了原始孤立孔洞。

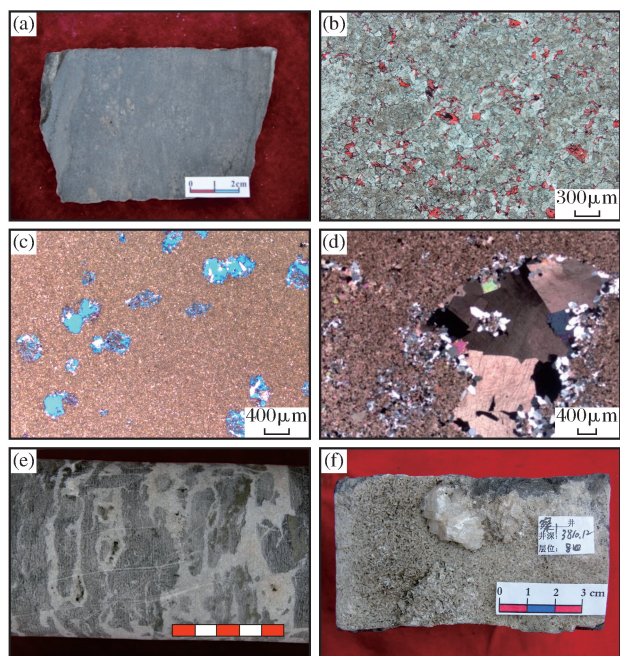


图3 鄂尔多斯盆地古生界风化壳不同类型岩溶储层特征

Fig.3 Characteristics of different types of Lower Paleozoic paleokarst reservoirs in Ordos Basin

(a)SH15井,10-74/79,马三段,膏模孔;(b)L1井,3 981.36m,张夏组,晶间孔;(c)CT1井,马二段,4 052.34m,粉晶白云岩,膏模孔;(d)HT1井,3 791.94m,马二段,粉晶白云岩,孔隙充填自生石英及马鞍状白云石;(e)E6井,马四段,3 859.40m,细晶白云岩,孔洞充填马鞍状白云石;(f)C1井,马四段,3 810m,细晶白云岩,裂缝充填马鞍状白云石及方解石

3.2 表生期风化壳岩溶

表生期风化壳岩溶主要发育于石炭系沉积前,广泛的岩溶作用形成了全盆地大面积分布的古风化壳储集体,从中央古隆起自西向东依次发育岩溶高地—岩溶斜坡—岩溶盆地的古地貌单元(图4),岩溶高地自西向东元古界—奥陶系马家沟组依次剥露

地表,使得不同层系裸露区地层遭受大气淡水岩溶作用[图 3(b)],而盆地中东部地区风化壳主要为马五段,碳酸盐岩—膏盐层交互沉积更有利于形成横向分布稳定的层状孔洞层。该区岩溶作用较强,形成卯梁交错、沟壑纵横的风化壳岩溶古地貌。

3.3 埋藏期热液岩溶改造

加里东晚期及燕山期,盆地西南缘受构造挤压形成逆冲推覆构造,压释的热液流体沿风化壳界面向中央古隆起聚集,中央古隆起马家沟组遭受广泛

的热液改造作用。另一方面,在板块挤压的作用下,基底断裂开始活动,热液流体沿断层向上运移,对断层周缘地层进行局部热液溶蚀作用^[16],在中央古隆起马四段岩心可见大量的马鞍状白云石、自生石英等热液矿物沿裂缝及孔洞充填[图 3(d)—图 3(f)],但对于埋藏期,储层基本处于半封闭—封闭流体环境下,同时伴生热液矿物沉淀,热液岩溶主要是对早期形成的孔洞缝体系的改造作用,是一种保持性成岩作用。

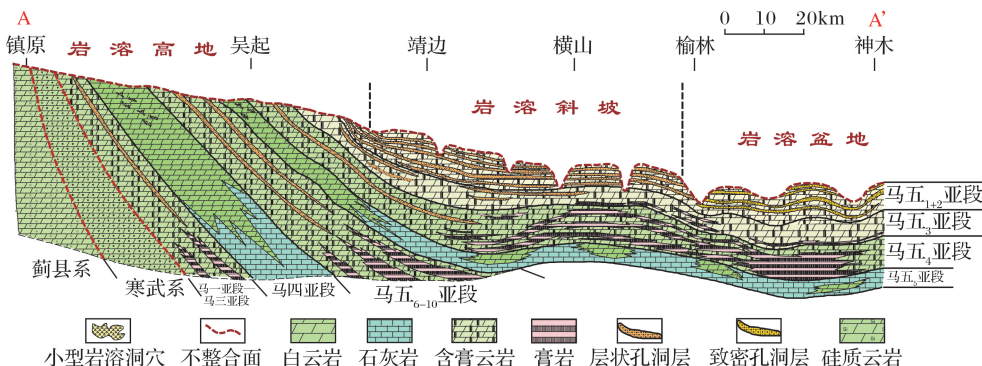


图 4 鄂尔多斯盆地前石炭纪古岩溶发育模式

Fig.4 The pre-Carboniferous paleokarst development model of Ordos Basin

4 烃源岩与天然气地球化学特征

4.1 烃源岩地球化学特征

4.1.1 煤系烃源岩特征

上古生界石炭系—二叠系煤系烃源岩具有广覆式生烃的特点,直接披覆于下古生界风化壳之上,形成上生下储的源储匹配关系,烃源岩以煤岩及炭质泥岩为主,煤岩平均有机碳含量为 67.3%,炭质泥岩平均有机碳含量为 2.93%,具有较强的生烃能力。干酪根类型以偏腐殖型 II₂ 型、III 型为主,干酪根碳同位素值偏高,在 -23‰ ~ -26‰ 之间。

4.1.2 海相烃源岩特征

下古生界奥陶系发育 2 个烃源岩灶:一是盆地西、南缘盆地—斜坡相的暗色泥灰岩、页岩及泥质碳酸盐岩,分布广泛,厚度大,一般介于 60~200m 之间,有机碳含量较高,西缘平凉组平均有机碳含量为 0.47%,克里摩里组平均有机碳含量为 0.78%,南缘平凉组平均有机碳含量为 0.63%,背锅山组平均有机碳含量为 0.55%,具有一定的生烃能力,烃源岩干酪根类型以 I 型为主,干酪根碳同位素值偏低,介于 -28‰ ~ -30‰ 之间;二是盆地中东部碳酸盐岩与蒸发岩互层的泥质碳酸盐岩,平均有机碳含量为 0.29%,生烃能力有限,烃源岩干酪根类型以 I 型为

主,干酪根碳同位素值变化范围较大,介于 -29‰ ~ -25‰ 之间,偏重型干酪根同位素主要为盐度较高的含膏泥岩,膏质泥岩。

4.2 天然气地球化学特征

关于鄂尔多斯盆地中东部风化壳气藏的气源认识仍存较大争议,主要存在以下 3 种观点:①油型气为主,烃源岩来自盆地中东部低丰度的海相泥质碳酸盐岩烃源岩^[17];②油型气为主,气源岩主要为盆地西南缘斜坡相的海相烃源岩^[18];③煤成气为主,主要由上古生界煤系烃源岩及石炭系的石灰岩生成的少量油型气的混合气^[19,20]。近年来,随着勘探和研究的不断深入,积累了大量的不同成熟度的古生界烃源岩及天然气地球化学数据。通过对不同沉积环境烃源岩母质及天然气碳同位素的对比分析发现,相同成熟度煤成气与油型气存在明显差异。

(1)干酪根碳同位素与其生成具有正碳序列碳同位素的天然气 $\delta^{13}\text{C}_{2+}$ 具有明显的亲源关系,上古生界煤系烃源岩 $\delta^{13}\text{C}_k$ 值偏高,其生成的具有正碳序列碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}_{2+}$ 值也偏高,一般 $\delta^{13}\text{C}_{2+} > -28\text{‰}$,下古生界海相烃源岩的 $\delta^{13}\text{C}_k$ 值偏低,其生成的具有正碳序列碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}_{2+}$ 值也偏低,一般 $\delta^{13}\text{C}_{2+} < -28\text{‰}$ (表 1),其次在过成熟烃源岩分布区,不论上古生界煤成气还是下古生界风化壳储

层中的天然气碳同位素值均有反转的特征,说明天然气碳同位素反转与烃源岩热成熟度相关,而与油型气和煤成气混合没有直接的相关性。

(2)相同成熟度下油型气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值较煤成气偏低 $-4\text{‰} \sim -5\text{‰}$,当烃源岩在低熟—成熟阶段,天然气碳同位素基本为正碳序列,即 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$,伴随烃源岩成熟度的升高天然气碳同位素值逐渐增高,干燥系数变大,典型油型气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值主要介于 $-45\text{‰} \sim -38\text{‰}$ 之间,而煤成气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值主要介于 $-40\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 之间,如图 5 所示,二者存在明显的差别,鄂尔多斯盆地风化壳气藏不同区位天然气碳同位素具有明显的差异性,靖西地区以油型气为主,靖边地区具有混源气的特征,靖东地区以煤成气为主。

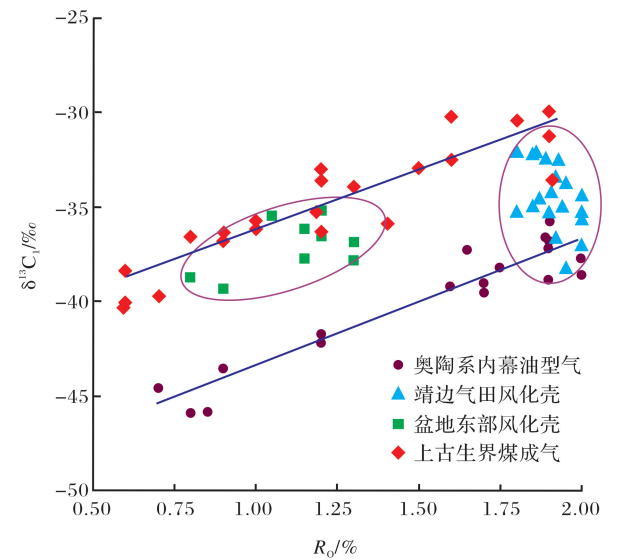


图 5 不同类型天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与烃源岩 R_0 关系
Fig.5 Plot of gas $\delta^{13}\text{C}_1$ vs Thermal maturity of source rock

(3)盆地西南缘海相烃源岩对风化壳成藏具有重要贡献,从天然气区域分布来看(图 6),油型气主要分布于吴起—志丹—富县一带,自吴起向神木一带,风化壳天然气碳同位素特征呈由油型气向煤成气逐渐过渡的趋势,与西南缘海相烃源岩具有较好的匹配关系。其次,盆地中东部马家沟组泥质碳酸盐岩生烃能力有限,烃源岩厚度薄,有机碳丰度低,难以形成规模油气聚集。由此判断盆地西南缘奥陶系海相烃源岩是风化壳油型气的主要气源岩。

5 风化壳气藏的差异聚集模式

5.1 靖东型致密风化壳气藏

上古生界煤系烃源岩披覆于靖东风化壳,广覆式生烃,天然气组分以煤成气为主,发育薄层泥粉晶白云岩裂缝—微孔隙型致密储层,岩溶盆地大型侵

蚀沟槽与上古生界煤系烃源岩呈镶嵌式接触,形成侧生侧储、上生下储的源储匹配关系,垂向及侧向近距离运聚成藏。圈闭类型以古地貌—地层圈闭为主,如图 7 靖东型聚集模式,风化壳顶部侵蚀沟槽切割形成的古残丘为主要的储集空间,沟槽充填的泥质岩类形成侧向封堵,岩溶残丘顶部的铝土岩及煤系暗色泥岩作为顶部的封盖层,形成良好的圈闭条件。但该类型气藏储层较为致密,单井产量较低,统计了靖东致密风化壳 49 口试气井的单井日产,平均日产仅为 $1.56 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 7,表 2)。

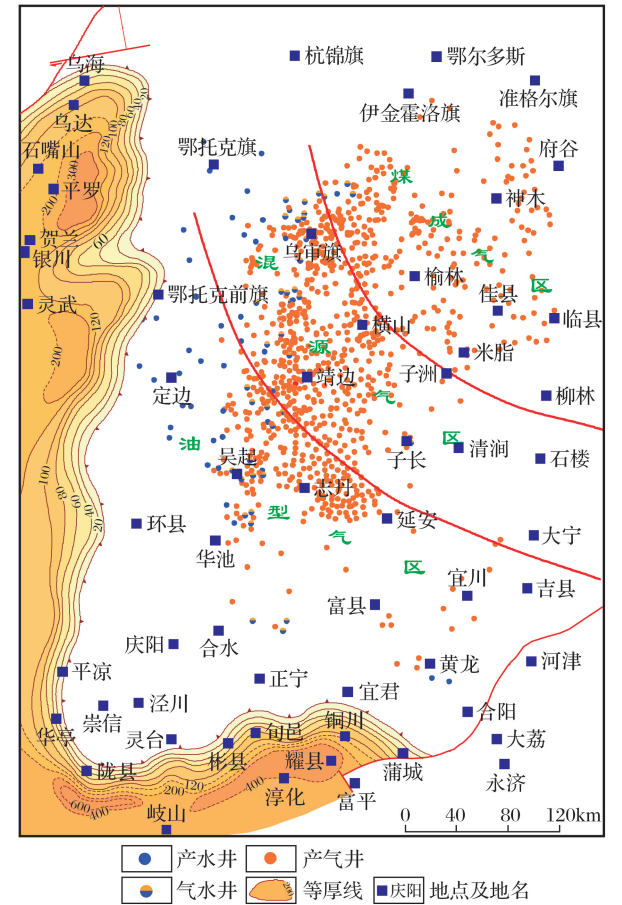


图 6 鄂尔多斯盆地西南缘烃源岩厚度及风化壳气水分布特征
Fig.6 Source rock thickness and paleokarst reservoirs gas/water distribution in the southwestern Ordos Basin

5.2 靖边型低渗透风化壳气藏

上古生界煤系烃源岩披覆于靖边风化壳,天然气组分以煤成气为主,油型气为辅。发育裂缝—孔洞型低渗透白云岩储层,岩溶斜坡发育的侵蚀沟槽形成凹凸不平的古地貌格局,与上古生界煤系烃源岩呈镶嵌式接触,形成侧生侧储,上生下储的源储匹配关系,侧向及垂向近距离运聚成藏。圈闭类型以古地貌—地层圈闭为主,如图 7 靖边型聚集模式,岩

溶沟槽侵蚀形成多个古潜台,沟槽内部充填泥质岩侧向封堵,有利于马五₁₊₂亚段形成古地貌圈闭,其次,马五₄亚段侧向存在膏岩岩性相变,形成岩性圈闭,靖边型风化壳气藏大面积连续分布,基本不含边

表 1 鄂尔多斯盆地古生界天然气碳同位素特征

Table 1 Carbon isotopic data for Lower Palozoic paleokarst gas and Upper Palozoic tight sand gas in Ordos Basin

层位	井号	井深/m	层位	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ (PDB)						
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂
靖边 风化壳	靳 5	3 394.5~3 397.5	马五 ₄	-36.29	-27.42	-25.92				
	统 59	3 121.0~3 131.0	马五 ₁	-35.27	-26.10	-26.65	-22.03	-23.74	-21.84	-21.85
	统 61	3 327.0~3 335.0	马五 ₁₊₂	-35.32	-26.21	-25.52				
	统 64	3 357.0~3 371.0	马五 ₁₊₂	-35.43	-24.58					
	统 76	3 522.5~3 538.5	马五 ₁₊₂	-31.94	-37.13	-32.07				
	陕 441	3 479.0~3 489.0	马五 ₁	-31.16	-36.83	-29.74				
	统 80	3 494.0~3 506.0	马五 ₁	-31.66	-36.55	-30.68				
靖西 风化壳	苏 381	3 976.0~4 038.0	马五 ₅ 、马五 ₆	-35.95	-34.51					
	陇 18	3 918.0~3 920.0	马二	-32.76	-37.61	-37.29				
	苏 379	3 810.0~3 813.0	马五 ₆	-36.48	-39.42					
	陇 17	4 114.0~4 128.0	张夏组	-31.44	-37.34					
	桃 70	3 615.5~3 618.0	马五 ₄	-32.85	-25.94	-27.66				
	桃平 1	4 010.0~5 159.0	马五 ₅	-34.51	-25.89	-24.80				
靖东 风化壳	双 115	2 744.0~2 759.0	马五 ₁	-35.70	-27.17	-22.64				
	双 132	2 795.5~2 798.0	马五 ₁	-37.81	-28.53	-26.08				
	双 15	2 857.0~2 863.0	马五 ₁	-37.73	-33.42	-28.96	-23.46	-23.21		
	麒 13	2 810.5~2 826.0	马五 ₁	-32.09	-23.73	-25.87				
	米 35	2 572.0~2 585.0	马五 ₁	-35.47	-22.59	-21.56				
上古生 界致密 砂岩气	桃 22	3 337.0~3 340.0	山 ₁	-36.12	-25.26					
	召 61	2 937.0~2 957.0	盒 ₈	-33.40	-23.71	-23.61	-22.94	-22.51		
	苏 363	3 831.0~3 860	盒 ₈	-34.01	-24.03	-24.73				
	双 72	2 311.0~2 314.0	太原组	-39.28	-24.56	-23.17	-25.30	-23.35		
	麒 4	2 944.0~2 947.0	本溪组	-31.04	-31.73	-30.39				
	陕 467	3 394.9~3 397.0	本溪组	-31.16	-37.38	-30.74				

底水(图 7,表 2)。

5.3 靖西型(常规)低渗透风化壳气藏

上古生界煤系烃源岩及下古生界海相烃源岩生烃,天然气组分以油型气为主,煤型气为辅,发育中厚层粉—细晶白云岩晶间(溶)孔型(常规)低渗透白云岩储层,下古生界风化壳顶部地层依次向中央古隆起剥露,煤系地层与下古生界地层侧向接触,燕山期东部抬升,煤系地层与风化壳地层形成侧生侧储的源储匹配关系,天然气侧向运聚成藏,圈闭类型以岩性圈闭为主,如图 7 靖西型聚集模式,以马五₅亚段为例,马五₅亚段自西向东由白云岩岩性相变为致密灰岩,上倾方向形成封堵,有利于天然气圈闭成藏。该区带总体处于整个风化壳含气系统的下倾方向,普遍产水,气藏具有局部高产富集成藏的特点(图 7,表 2)。

6 风化壳气藏差异聚集分布主控因素

6.1 沉积微相是多类型储层发育的基础

沉积期微相为后期储层发育奠定了物质基础,盆地中东部马家沟组发育碳酸盐岩—膏盐岩共生体系,海侵—海退旋回沉积微相差异明显,例如靖边地区马五₁₊₂亚段、马五₄亚段等海退沉积期均位于含硬石膏结核白云岩坪微相,岩性为泥—细粉晶白云岩,硬石膏结核等易溶矿物遭受大气淡水淋滤,形成以膏模(溶)孔为主的孔隙类型^[21]。靖东地区处于灰云洼地微相,储层总体发育程度较低,而靖西型马五₅亚段、马四段等海侵沉积期发育白云岩坪微相,岩性以粉—细晶白云岩为主^[22],发育白云石晶间孔型储层。

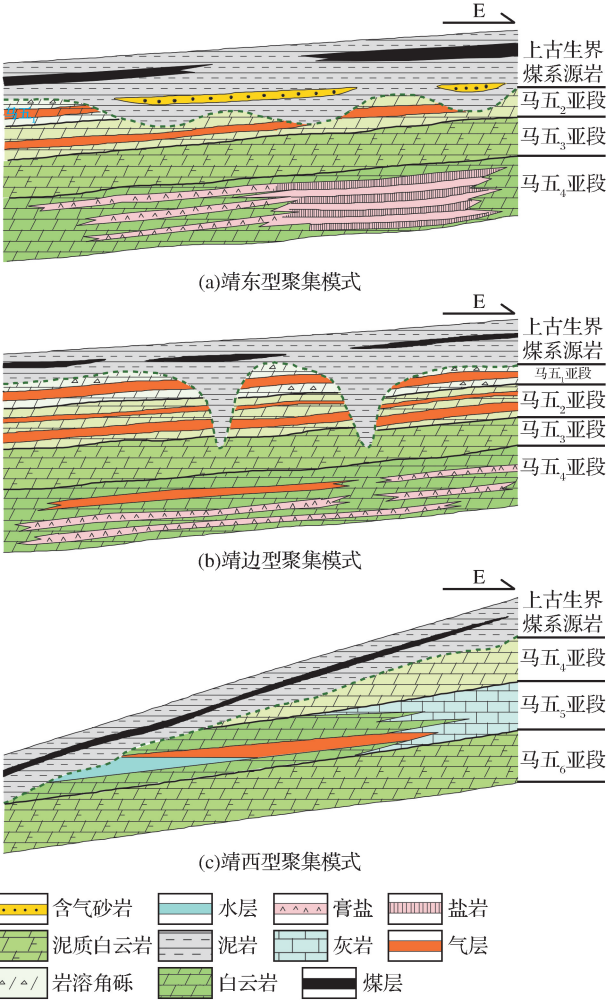


图7 鄂尔多斯盆地风化壳气藏聚集模式

Fig.7 Gas accumulation modole of paleokarst reservoir in Ordos Basin

6.2 岩溶古地貌为风化壳储层发育创造了条件

风化壳期伊陕斜坡下古生界风化壳具有西高东低的古地貌格局,自西向东依次发育岩溶高地—岩溶斜坡—岩溶盆地(图 1,图 3),岩溶高地及岩溶斜坡的过渡带,溶蚀作用较强,有利于风化壳储层发育,而岩溶盆地处于岩溶水的汇水区,不利于岩溶水的排泄,溶蚀作用相对较弱。主要表现在以下 2 个方面:首先,自西向东风化壳岩溶深度逐渐减小,靖边及以西地区岩溶深度较大,岩溶剖面深度一般在 70~130m 之间,而盆地东部岩溶深度相对较浅,岩溶剖面深度一般在 50~70m 之间;其次,靖边及以西地区的膏模孔以白云岩充填为主,孔隙充填程度较低,而靖东地区膏模孔隙以方解石充填为主,孔隙充填程度高,大多数被方解石充填殆尽,仅局部古残丘地貌发育。

6.3 多源烃类有序聚集是天然气差异成藏的关键

鄂尔多斯盆地地下古生界风化壳储层差异分布与上下古生界烃类充注时间的匹配关系决定了不同类型天然气分布格局。成岩作用研究表明,方解石充填膏模孔隙是靖边东部储层致密的重要原因,方解石充填期次基本可以代表致密储层的形成时间,依据埋藏热演化史恢复结果(图 8)及孔洞充填方解石流体包裹体测温结果^[23,24],可以确定储层致密及天然气的成藏时间,孔洞充填方解石包裹体均一温度主要分布于 90~170℃ 之间,表明孔隙充填主要发生在晚三叠世—早白垩世,与天然气成藏时间基本一致,成藏早期盆地中东部具有西高东低的古构造

表 2 不同类型风化壳天然气聚集特征

成藏类型	靖边型	靖西型	靖东型
层位	马五 ₁₋₄	马五 ₅₋₁₀ 、马四	马五 ₁₋₄
气源	煤成气为主的混源气	油型气为主的混源气	煤成气
储层厚度	薄层	块状厚层	薄层
储层岩性	泥—粉晶白云岩	粉—细晶白云岩	泥—粉晶白云岩
孔隙类型	裂缝—孔洞型	裂缝—晶间(溶)孔型	裂缝—微孔隙型
孔隙度/%	2~8	4~9	1~6
渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	0.1~100	0.1~100	0.01~10
圈闭条件	古地貌—地层圈闭	岩性圈闭	古地貌—地层圈闭
气藏分布	大面积连续分布	局部富集	大面积连续分布
气水分布	无边底水	有边底水	无边底水

格局,古油藏向中央古隆起等优势区带聚集,而盆地东部处于古构造低点,不利于油气规模聚集(图 9),随着埋深的加大,地层中富含碳酸钙的压释性流体持续进入储集空间,沉淀方解石导致储层致密,常规

储层油气充注较早,有利于孔隙保存^[25],非常规致密储层具有“先致密,后成藏”的特点。

6.4 燕山期构造反转奠定了天然气差异聚集格局

燕山期构造反转东部抬升,逐步形成了向西倾

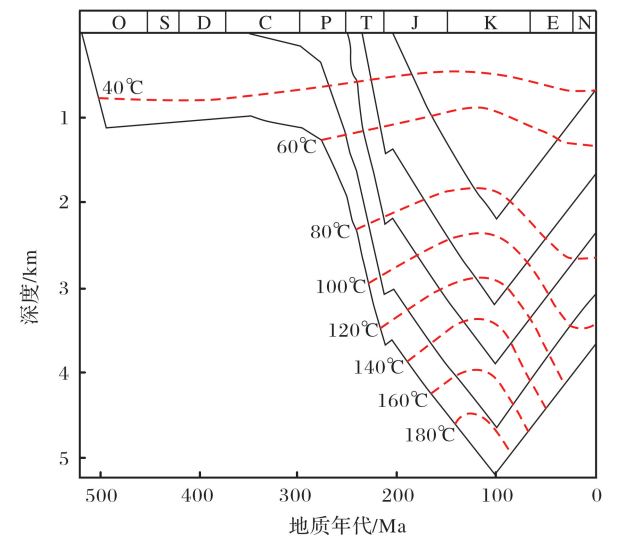


图 8 鄂尔多斯盆地 S139 井古生界埋藏热演化史
Fig.8 Burial thermal history of Paleozoic strata in Well S139, Ordos Basin

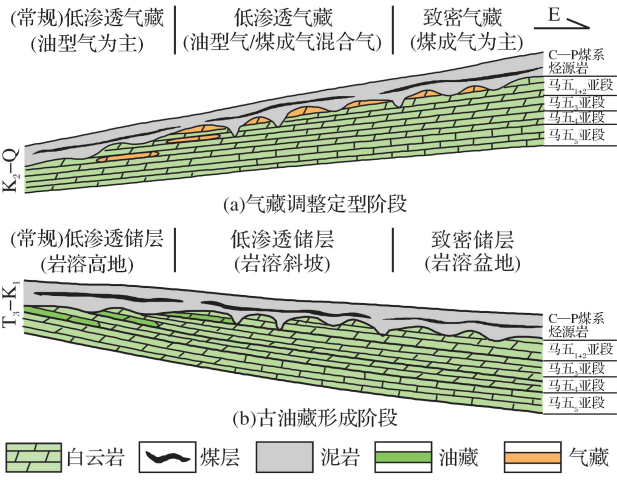


图 9 鄂尔多斯盆地中东部风化壳气藏形成演化过程
Fig.9 Evolution of paleokarst gas field in the central-eastern, Ordos Basin

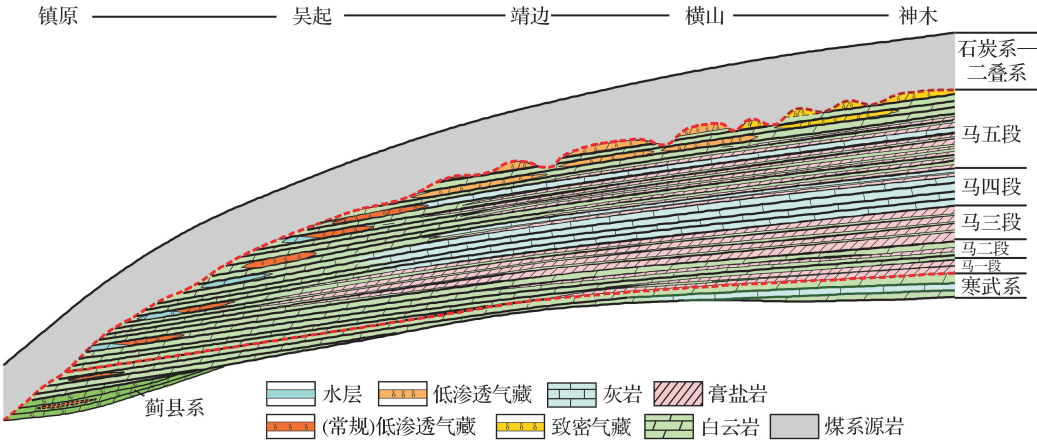


图 10 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡下古生界—元古界风化壳气藏分布预测
Fig.10 Predictable distribution of Lower Paleozoic-Proterozoic paleokarst gas reservoir in Yishan Slope, Ordos Basin

斜的单斜缓坡构造,由早期“西高东低”的构造格局转变为“西低东高”的构造格局,风化壳不整合面作为天然气侧向运移的优势通道,致使整个风化壳气藏向上倾方向侧向运聚调整(图 9),尽管盆地东部处于上倾有利成藏区带,但风化壳期该区处于岩溶盆地,成藏早期埋深较大,孔隙保存较差,导致储层致密,主要为致密风化壳气藏;而盆地中部现今处于整个风化壳含气系统的下倾部位,但马家沟组发育碳酸盐岩—蒸发岩旋回,侧向上存在岩性相变带,为天然气圈闭成藏提供了良好的遮挡条件,例如马五₂亚段、马四段等海侵碳酸盐岩旋回自西向东由白云岩逐渐相变为致密灰岩,马五₂亚段、马三段等海退蒸发岩旋回自西向东由含膏白云岩逐渐相变为膏盐岩(图 10),有利于天然气圈闭成藏,风化壳气藏总体表现为横向上连片分布,纵向上多层系复合含气的特征,燕山期构造反转形成的这种“跷跷板”效应,最终奠定了盆地中东部整个下古生界风化壳气藏差异聚集成藏的格局,形成了自西向东由(常规)低渗透气藏向致密气藏逐渐过渡的趋势。

7 结论

- (1)鄂尔多斯盆地地下古生界风化壳储层具有明显的差异性分布特征,靖西地区以裂缝—晶间(溶)孔型储层为主,靖边地区以裂缝—溶孔型储层为主,靖东地区以裂缝—微孔隙型储层为主,储层经历了准同生层间岩溶、表生期风化壳岩溶及埋藏期热液改造作用。
- (2)下古生界风化壳气藏具有上下古生界 2 套烃源岩供烃特征,上古生界煤系烃源岩披覆于风化壳之上垂向运聚近源成藏,盆地西南缘奥陶系海相

烃源岩侧向运移聚集成藏,自西南向东北方向天然气成因由油型气逐渐向煤成气转变。

(3)下古生界风化壳成藏的差异性受控于沉积微相、岩溶古地貌、双源烃类有序聚集及燕山期盆地构造转换,最终形成了横向上连片分布,纵向上多层系复合含气的格局,自西向东由(常规)低渗透气藏逐渐向致密风化壳气藏过渡的聚集特征。

(4)鄂尔多斯盆地风化壳气藏可发育于下古生界不同层位,甚至到元古界,奥陶系以下各层位风化壳气藏是下一步天然气勘探方向。

参考文献(References)

- [1] Yang Hua, Liu Xinshe. Progress of paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, west China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 129-137.
杨华, 刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 129-137.
- [2] Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan, *et al.* Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 733-739.
杨华, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-739.
- [3] Yang Junjie. The discovery of Lower Paleozoic natural gas in Shan-ganning Basin[J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(2): 1-6.
杨俊杰. 陕甘宁盆地古生界天然气的发现[J]. 天然气工业, 1991, 11(2): 1-6.
- [4] Liu Bo, Wang Yinghua, Qian Xianglin. The two Ordovician unconformities in N. China their origins and related regional reservoirs prediction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 25-30.
刘波, 王英华, 钱祥麟. 华北奥陶系两个不整合面的成因与相关区域性储层预测[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 25-30.
- [5] Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Guan Bizhu, *et al.* Ordovician paleokarst landform in Ordos Basin and gas enrichment characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 133-136.
夏日元, 唐健生, 关碧珠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 133-136.
- [6] Pan Zhongxiang. Significance of unconformity to oil and gas migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 1983, 4(4): 1-10.
潘钟祥. 不整合对油气运移聚集的重要性[J]. 石油学报, 1983, 4(4): 1-10.
- [7] He Dengfa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 142-149.
何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 142-149.
- [8] Chen Xueshi, Yi Wanxia, Lu Wenzhong. The paleokarst reservoirs of oil/gas fields in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 244-253.
陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244-253.
- [9] Jia Zhenyuan, Cai Zhongxian, Xiao Yuru. Paleoweathering crust: An important reservoir (body) type of carbonate rocks[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(3): 283-289.
贾振远, 蔡忠贤, 肖玉茹. 古风化壳是碳酸盐岩一个重要的储集层(体)[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(3): 283-289.
- [10] Zhang Keyin, Ai Huaguo, Wu Yajun. Characteristics and oil controlling significance of unconformity structure layer on top of carbonate rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(5): 16-19.
张克银, 艾华国, 吴亚军. 碳酸盐岩顶部不整合面结构层及控油意义[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(5): 16-19.
- [11] Liu Xiaoping, Sun Dongsheng, Wu Xinsong. Ordovician palaeokarst landform and its control on reservoirs in west Lungu region, the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 265-268.
刘小平, 孙冬胜, 吴欣松. 古岩溶地貌及其对岩溶储层的控制——以塔里木盆地轮古西地区奥陶系为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 265-268.
- [12] Wei Xinshan, Chen Juanping, Zhang Daofeng, *et al.* Geological characteristics and reservoir forming conditions of large area tight carbonate gas in eastern Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 677-686.
魏新善, 陈娟萍, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地东部大面积致密碳酸盐岩气地质特征及成藏条件分析[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 677-686.
- [13] Wei Xinshan, Chen Hongde, Zhang Daofeng, *et al.* Characteristics and gas exploration potential of tight carbonate reservoirs: A case study of Majiagou Formation in the eastern Yishan Slope, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 1-11.
魏新善, 陈洪德, 张道锋, 等. 致密碳酸盐岩储集层特征与天然气勘探潜力: 以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部奥陶系马家沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 1-11.
- [14] Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, *et al.* Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2230-2238.
苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2230-2238.
- [15] Zheng Congbin, Wang Shilu, Jia Shuyuan. Formation and evolution of caves in main production formation in the central part of Shan-Gan-Ning Gasfield[J]. Jour Geol & Min Res North China, 1996, 11(1): 73-79.

- 郑聪斌,王世录,贾疏原.陕甘宁盆地中部气田主要产层孔洞的形成与演化[J].华北地质矿产杂志,1996,11(1):73-79.
- [16] Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, *et al.* The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos Basins and its implication to reservoir prediction[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 1925-1939.
- 赵文智,沈安江,郑剑锋,等.塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J].中国科学:地球科学,2014,44(9):1925-1939.
- [17] Huang Difan, Xiong Chuanwu, Yang Junjie, *et al.* Gas source discrimination and natural gas genetic types of central gas field in Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(6): 1-5.
- 黄第藩,熊传武,杨俊杰,等.鄂尔多斯盆地中部气田气源判别和天然气成因类型[J].天然气工业,1996,16(6):1-5.
- [18] Wang Chuangang, Wang Yi, Xu Huazheng, *et al.* Discussion on evolution of source rocks in Lower Paleozoic of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 38-45.
- 王传刚,王毅,许化政,等.论鄂尔多斯盆地地下古生界烃源岩的成藏演化特征[J].石油学报,2009,30(1):38-45.
- [19] Dai Jinxing, Li Jian, Luo Xia, *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.
- [20] Xia X Y, Chen J, Braun R, *et al.* Isotopic reversals with respect to maturity trends due to mixing of primary and secondary products in source rocks[J]. Chemical Geology 2013, 339(2): 205-212.
- [21] Yao Jingli, Wei Xinshan, Zang Daofeng, *et al.* Sedimentary microfacies of anhydrite concretion dolomite rock; Take Majiagou Formation Ma₅³ layer in the eastern Ordos Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 690-695.
- 姚泾利,魏新善,张道峰,等.硬石膏结核白云岩沉积微相——以鄂尔多斯盆地东部马五₃小层为例[J].石油勘探与开发,2010,37(6):690-695.
- [22] Yang Hua, Bao Hongping. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the Middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 11-20.
- 杨华,包洪平.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J].天然气工业,2011,31(12):11-20.
- [23] John M Hunt. Petroleum Geochemistry and Geology[M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1996: 90-101.
- [24] Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, *et al.* Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin[J]. Science in China: Series D, 2007, 37(supplement I): 23-32.
- 任战利,张盛,高胜利.鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J].中国科学:D辑,2007,37(增刊I):23-32.
- [25] Ehrenberg S N, Eberli G P, Keramati M, *et al.* Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolomite reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(1): 91-114.

Differential distribution of natural gas in the Lower Paleozoic paleokarst gas reservoir, Ordos Basin

Wei Xin-shan^{1,2}, Wei Liu-bin^{1,2}, Ren Jun-feng^{1,2}, Cai Zheng-hong^{1,2}, Zhou Li-xia^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory of Exploration & Development of Low Permeability Oil/Gas Fields, Xi'an 710018, China;

2. Exploration Development Institute of Changqing Oilfield Company, CNPC, Xi'an 710018, China)

Abstract: The study on the geologic characteristics and distribution of hydrocarbon generation and accumulation in the Lower Paleozoic paleokarst reservoir in the Yishan Slope of Ordos Basin, indicates that the reservoir has undergone intraformational syngenetic karst, epigenetic karst development, and buried hydrothermal karst modification in the local area. The paleokarst gas pool was produced from the Upper Paleozoic coal-bearing source rock and the Lower Paleozoic marine source rock, and the Upper Paleozoic coal-bearing source rocks are the main source rocks, the Lower Paleozoic paleokarst reservoir has differential accumulation and distribution in the Yishan slope. Developments of (conventional) low permeability paleokarst gas reservoirs in the western Jingxi area, are mainly lithological traps, dolomite intercrystalline (dissolution) pore, oil-type gas, gas pool is not continuous, with edge water and bottom, local high yield and enrichment. Developments of low permeability gas reservoir in Jingbian area, are mainly palaeogeomorphic-stratigraphic traps, fractured-vuggy pore, coal-type and oil-type of mixture gas, no edge and bottom water, gas pool has large area continuous distribution. Developments of tight paleokarst gas reservoir in the eastern Jingdong

area,are mainly palaeogeomorphic-stratigraphic traps,fractured-micropores,localized vuggy pore,coal-type gas,but single well production capacity is low.The accumulation of gas reservoirs is mainly controlled by the following four aspects:(1)Microfacies are the basis for controlling the development of different types of reservoirs;(2)The paleokarst paleomorphology creates differential paleokarst reservoir;(3)The orderly accumulation of multi-source hydrocarbons is the key to the differential of natural gas;(4)The period of Yanshanian tectonic inversion laid the pattern of the distribution of gas pool.

Key words: Ordos Basin; Ordovician; Differential accumulation; Paleokarst; Carbonate rock; Entrapment

简 讯

DOE 投资 3 000 万美元推动非常规油气技术研发

2018 年 1 月 3 日,美国能源部(DOE)宣布接受来自美国联邦政府的 3 000 万美元的资金,用于非常规油气复苏的成本共享研究与开发的 6 个项目,这些项目主要基于化石能源办公室(FE)非常规油气开发先进技术解决方案的融资机遇来确定。新选定的项目将有助于确定这些页岩中的新兴油气开发,同时支持 DOE 加强美国能源主导地位的工作,保护空气和水质,使美国成为非常规油气(UOG)领域资源开发技术的全球领导者,实现国家资源禀赋的最大价值。6 个项目主要内容如下:

(1)用于极端条件下的六方氮化硼增强的多功能油井水泥——这将为开发下一代油井水泥提供系统解决方法。这种水泥将防止在极端高温、高压和腐蚀性条件下的海上泄漏。通过防止极端条件下的海上泄漏,该项目将提高成本效益和生产率,减少井的生产寿命风险,并提高环境和工人的安全。总资助额度为 187.5 万美元。

(2)水力压裂试验场 II (HFTS2)——特拉华盆地。伊利诺斯州德斯普兰斯天然气技术研究所将进行多项试验,以量化完井评估、设计优化和环境影响。该研究所将利用德克萨斯州西部特拉华盆地的水力压裂试验场的实验井进行这些试验。总资助额度为 2 056.4 万美元。

(3)鹰滩(Eagle Ford)页岩实验室——将通过提供新的科学知识和监测技术来提高页岩油生产的有效性。这项技术将用于最初的增产和生产,以及通过重复采油和提高石油采收率方法来提高采收率。总资助额度为 1 000 万美元。

(4)用于减少在深水作业过程中天然气水合物沉积的现场应用涂料。这些用于现场和商业部署的涂料对于海上油气泄漏和泄漏预防至关重要。涂层系统可以在现场应用以处理现有的输油管线。总资助额度为 187.2 万美元。

(5)塔斯卡卢萨(Tuscaloosa)海相页岩实验室(TMSL)——将解决有关塔斯卡卢萨海相页岩(TMS)的知识空白。据估计,TMS 含有 70 亿桶可采轻质低硫原油,而目前平均日产量仅为约 3 000 桶石油。总资助额度为 965.7 万美元。

(6)位于阿巴拉契亚中部的新兴叠置非常规油气藏(ESUP)实验室——将调查和分析弗吉尼亚西南部诺拉气田新兴非常规油藏多种资源的生产潜力。该项目的研究目标是描绘阿巴拉契亚中部寒武系地层和潜在深部产层;另一个是评估和量化在新兴的(和技术上可行的)Lower Huron 页岩中新完井策略的潜在优势。总资助额度为 1 114.5 万美元。