文章编号:1009-2722(2011)05-0024-07

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳 岩溶特征及储层分析

韩 波^{1,2}, 冯 乔^{1,2}, 赵振 字³, 王 千 遥¹, 赵 伟¹, 姜 文 娟¹, 薛 成¹, 卢玉 杰¹ (1山东科技大学地质科学与工程学院, 青岛 266510; 2 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 青岛 266510; 3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要:风化壳岩溶是鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶演化经历的主要阶段。通过对盆地中东部的钻井岩心、薄片观察及测井资料进行分析,结合水动力特征的差异,以 SH15 井为例对风化壳岩溶带进行了划分,在垂向上自上而下分为垂直渗滤带、水平潜流带和深部缓流带,分析了古风化壳岩溶作用,总结了风化壳岩溶的发育模式。并结合岩相古地理、古地貌等特征,分析了古岩溶储层特征及其控制因素,揭示了风化壳岩溶和天然气富集的关系,为鄂尔多斯盆地奥陶系天然气勘探提供依据。 关键词:鄂尔多斯盆地;奥陶系;风化壳岩溶;储层

中图分类号: TE122. 23 文献标识码: A

地下水和地表水对可溶性岩石的破坏和改造 作用即岩溶作用及所产生的水文现象和地貌现象 统称为岩溶^[1]。James 和 Choquette 指出岩溶具 有更广泛的含义,它包括所有成岩作用的特征(宏 观的、微观的、地表与地下的),这些特征形成于化 学溶解和伴随的碳酸盐岩层系的演化过程中^[2]。

鄂尔多斯盆地古岩溶演化依次经历了表生成 岩期岩溶和埋藏成岩期岩溶两大阶段。表生成岩 期岩溶包括同生期层间岩溶和裸露期风化壳岩 溶;埋藏成岩期岩溶包括压释水岩溶和热水岩 溶^[3]。鄂尔多斯盆地风化壳岩溶是指奥陶系顶部 地层在表生成岩期由于加里东运动抬升而长期暴 露地表,大气淡水渗入循环风化淋滤而发育的岩 溶。风化壳岩溶是鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶演 化经历的主要阶段。

1 区域地质概况

1.1 古地理背景

奥陶纪末的加里东运动使鄂尔多斯盆地整体 抬升,经历了 150 Ma的风化剥蚀^[4],直至石炭纪 才开始沉降接受沉积,导致盆地中东部地区奥陶 系马家沟组地层直接位于石炭系地层之下,其间 缺失了中上奥陶统、志留系、泥盆系和中下石炭统 的地层,形成了一个大的区域不整合面。不整合 面以上为石炭系海陆过渡相碎屑岩地层,下部为 奥陶系海相碳酸盐岩地层。盆地中东部奥陶系最 顶部地层,除马六段仅在榆 9 井、洲 6 井、陕钾 1 井、米 14 井和柳林一带残存 5~21 m 外,其他大 部分均为马五段地层。马五段在中东部厚度为 0 ~375 m,是风化壳岩溶发育的主要层位。

鄂尔多斯盆地在奥陶纪时处于陆表海沉积环 境,马五期整体上属于震荡性海退,海平面下降, 气候炎热,蒸发作用强烈,含盐度不断升高,致使

收稿日期: 2011-03-05

基金项目:国家大型油气田与煤层气开发项目(2008ZX05001-004;2008ZX05004-001)

作者简介:韩 波(1984—), 男, 在读硕士, 主要从事盆地分 析与资源评价方面的研究工作. Email: hbird99[@]163. com

盆地中东部发育了一个广泛的泻湖,沉积了大量 的石盐和硬石膏。泻湖周围发育盆缘蒸发坪,形 成了大量的含硬石膏或膏质白云岩,中东部的台 地向南逐渐进入缓坡沉积环境。盆地南部和西部 以缓坡沉积为主,形成了广泛的灰岩沉积,由内向 外依次是中缓坡、外缓坡、深海盆地相(图1)。其 中盆缘蒸发坪为盆地奥陶系风化壳岩溶发育的主 要区域。



图 1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五期岩相古地理 Fig. 1 Lithofacies paleographic map of Ordovician Majiagou Formation O₁m₅ Layer in Ordos Basin

1.2 古岩溶地貌

鄂尔多斯盆地中东部石炭系与奥陶系地层呈 超覆沉积接触关系,石炭系厚度与奥陶系顶侵蚀 面起伏呈镜像关系,可利用"印模法"^[5,6],结合古 水动力条件及地震、测井等地质资料来恢复古地 貌形态。长庆油田将鄂尔多斯盆地中东部划分为 3个二级古岩溶地貌单元^[7],即古岩溶高地(石炭 系地层厚度小于 30 m)、古岩溶斜坡(石炭系地层 厚度 30~90 m)、古岩溶盆地(石炭系地层厚度大 于 90 m)。在古岩溶斜坡、古岩溶盆地内又进一 步分别划分出 3 个三级古地貌单元,即古残丘、古

台地、古沟槽和古谷地、古台地、古沟槽等(图2)。



(1) 古岩溶高地 分布于乌审旗一城川一吴 旗一富县一带。具有地势高、残余层位老、残余厚 度小的特点。该区岩溶作用以垂向渗滤为主,垂 向溶蚀形成的纵向裂缝和垂向溶洞不利于形成层 状的储层分布空间。古地貌高部位强烈剥蚀导致 马家沟组有利储集层位大部分缺失,无法形成大 面积有利储集区。

(2) 古岩溶斜坡 位于神木一靖边一志丹一 延安一宜川一带,为岩溶高地与岩溶盆地之间的 过渡区,地层产状较缓。古台地为岩溶斜坡带的 主体,古残丘零星分布在斜坡带内。岩溶水以垂 直渗滤及水平运动均较强烈为特点,网状裂缝发 育,未充填和半充填的水平溶洞均较发育,为最有 利的储集区。 (3) 古岩溶盆地 分布于佳县一子洲一延 川一石楼地区,为古岩溶斜坡环抱的洼地。地势 较低,为岩溶水的汇集排泄区,充填、淀积作用 强^[8],岩溶空间充填程度高,钙质、泥质的充填胶 结易形成致密岩性带,从而影响了储层的储集性 能。

2 风化壳岩溶特征

2.1 岩溶作用

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳岩溶具有 明显的去白云化、去膏化和角砾化的发育特征。 奥陶系地层沉积之后在开放的岩溶条件下,大气 淡水以垂直渗滤和近水平潜流两种方式沿先期的 裂缝及白云岩晶间孔、铸模孔开始渗滤,在溶解于 水中的CO2参与下,石膏和白云岩开始溶解,反应 式为:

$$CaSO_{4}(s) + H_{2}O \rightarrow Ca^{2+} + SO_{4}^{2-}$$
(1)

$$CaM g (CO_{3})_{2} + 2CO_{2} + 2H_{2}O \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_{3}^{-}$$
(2)

石膏层和石膏结核溶解产生 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} , 使水中离子浓度增加,进而提高了对白云岩的溶 解能力,驱动了去白云化(图版-1),反应式为^{[9}:

$$C_{a}M_{g}(CO_{3})_{2}+Ca^{2+}+SO_{4}^{2-} \rightarrow 2C_{a}CO_{3}+M_{g}^{2+}+SO_{4}^{2-}$$
(3)

渗滤的大气淡水与岩石间隙的咸水混合之后, 石膏的溶解能力明显增强,石膏晶体、结核溶解,在 先期微裂缝、粒间溶孔和晶间溶孔的基础上溶蚀扩

大,形成毫米级或厘米级的球斑状孔洞、蜂窝状孔 洞甚至更大的溶孔、溶洞,共同构建了盆地中东部 10~100 m 厚度的风化壳岩溶储集体(表1)。

表 1 鄂尔多斯盆地中东部部分井风化壳 岩溶厚度统计(据文献 10 修改)

Table 1 The thickness of weathering crust karst in central and eastern Ordos Basin (modified from reference[10])

井深及厚度/ m	陕参 1	青1	林 1	陕 2	桥 3
顶界	3 440.5	3 202.8	3 426.0	3 322. 6	3 047. 2
底界	3 503.0	3 216.2	3 470.2	3 372.0	3 075.6
风化壳厚度	62.5	13.4	44.2	49.4	28.4

2.2 岩溶垂向分带

鄂尔多斯盆地奥陶系地层在抬升裸露地表期 间,在大气降水的长期淋滤及溶于水中的 CO2 共 同作用下,碳酸盐岩和蒸发岩类强烈溶蚀。根据 钻井岩心、薄片观察及测井资料,结合水动力特征 的差异,在垂向上对风化壳岩溶带进行了划分,自 上而下分为垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流 带(图 3)。

(1)垂 直渗流带 发育于地表以下、最高潜水 面以上^[1]。由地表大气淡水补给,水流主要在重 力作用下沿岩层中的裂隙或断层向下垂直方向渗 流,形成垂直方向的溶孔、溶缝及溶洞,其中的填 充物主要来自风化壳以上的残余物,如炭质、泥 质、黄铁矿、铝土矿等,如陕参1井溶缝被黄铁矿 和铝土岩充填;陕15井溶缝被黄铁矿和亮晶方解 石充填,合探2井溶缝被有机质和亮晶方解石充 填(图版-2)。溶蚀孔洞和裂缝中充填的石炭一二 叠系孢粉是鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶发育 的古生物标志^[12]。

(2)水平潜流带 处于潜水面和地区侵蚀面 之间。该带地下水十分活跃,溶蚀形成的孔洞和 裂缝以水平或近水平展布为主(图版-3),并且大 型溶洞发育,孔缝相连,是导致该带高产气层发育 的主要原因,如对林2井奥陶系318217~ 322375m裸眼测试获气产量10884m³/d,下套 管、射孔后,用20%的盐酸酸化获21.674×10⁴ m³/d高产气流^[13]。钻井过程中钻具放空和大量 的钻井液漏失,是钻遇未充填大型溶洞的反 映^[14]。该带角砾化现象明显,甚至部分层位角砾 岩互层,呈现多期垮塌、滑塌现象(图版-4)。岩溶 垮塌岩和滑塌角砾岩是此带风化壳岩溶发育的矿 物学标志。

(3)深部缓流带 水平潜流带之下,以硬石膏 溶蚀及方解石交代现象消失为底界^[15]。此段地 下水运动和交替缓慢,水流管道多被沉积物充填, 溶蚀作用微弱,充填程度高。

根据前人的研究成果,结合中东部奥陶系顶 部古风化壳岩溶特征,总结了盆地中东部奥陶系 风化壳岩溶发育模式图(图4)。



图 3 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组风化壳岩溶剖面(以 SH15 井为例)

Fig. 3 The karst weathering crust profiles of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin(Take SH15 well for example)

3 风化壳岩溶储层特征

3.1 储集类型

奥陶系风化壳是长庆气田的主力气层,孔隙 度多介于 2%~8%,渗透率为(0.1~5)×10⁻³ μ m²,最高孔隙度可达 19%,最高渗透率达 100× 10⁻³ μ m^{2[16]},岩溶的差异性导致了储层的非均质 性。根据孔洞缝的组合关系,研究区内风化壳储 层的储集空间主要有 3 种类型:裂缝一溶蚀孔洞 型、溶蚀孔洞一裂缝型和裂缝型。

(1)裂缝-溶蚀孔洞型:溶蚀孔洞及裂缝均发

育,以晶间溶孔、粒间溶孔和溶洞为主。孔洞为主 要储集空间,网状裂隙为连通通道,两者对油气储 集均起相当贡献。此类储层物性较好。

(2)溶蚀孔洞一裂缝型:裂缝及溶蚀孔洞均发 育,裂缝以溶蚀缝和构造缝为主,伴有不均匀的溶 蚀孔洞,缝洞连通性一般,对油气储集贡献较小, 不是主要的储集类型。

(3)裂缝型:以构造裂缝和溶蚀缝为主,主要 分布于粉晶、泥晶白云岩中,岩性致密从而导致该 类储层物性偏差。

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳岩溶储层 的储集空间以裂缝一溶蚀孔洞型为主,岩溶作用形 成大量网状裂缝(图版-5)与溶蚀孔洞相互匹配,



图版:

- 1 泥粉晶白云岩:去白云岩化(亮晶方解石被茜素红S染色)。 陕参1井, 3442 9m, 马五。
- 2 泥晶白云岩: 溶缝被亮晶方解石和有机质充填(亮晶方解石被茜素红 S 染色)。 合探 2 井, 4060 8m, 马五。
- 3 粉晶白云岩:发育水平裂隙和大量不规则未充填溶蚀孔洞。定探1井,3944m,马四。
- 4 岩溶角砾岩: 滑塌角砾, 多期滑塌。陕 15 井, 3546m, 马五。
- 5 泥晶白云岩:网状裂缝发育,部分裂缝被亮晶方解石和泥质充填。莲6井,4268 1m,马四。
- 6 微晶白云岩:石盐假晶、石膏假晶(亮晶方解石被茜素红 S 染色)。 宜 6 井, 2302 1m, 马五。



图 4 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳岩溶发育模式

Fig. 4 The developing model of karst weathering crust in Ordovician, central and eastern Ordos Basin

再加上顶部石炭系铝土质泥岩和黄铁矿层直接覆 盖,构成了大气田的主要条件,并且该类储层物性 好、连通性强、厚度大、产能高,长庆气田主产气层 就是这种储集类型,该类储层在陕6井马五2亚 段合层裸眼测试,未酸化日产气高达1026×10⁴ m³¹³。

3.2 储层控制因素

3.2.1 岩性因素

碳酸盐岩的渗透能力和岩石溶解能力比泥岩 强,其中蒸发矿物的溶解更有利于碳酸盐岩的溶 蚀,因此碳酸盐岩比泥岩等其他岩性更有利于岩 溶作用的进行。

在碳酸盐岩中,虽然灰岩 CaCO3 溶解度大, 但其结构致密,孔隙小,而白云岩岩溶过程中去云 化作用会导致孔隙度增大,孔隙类型增多,溶解速 度和含水性增加,使得其岩溶化程度不比石灰岩 差^[17]。岩溶过程中白云岩孔缝内去白云化作用 生成的次生方解石溶解度大于白云石,更加快了 白云岩的溶解速度。盆地中东部奥陶系马五段盆 缘蒸发坪中含硬石膏结核的细粉晶白云岩、颗粒 白云岩和斑状白云岩为风化壳岩溶提供了物质基 础。

3.2.2 构造条件

奥陶系之后的加里东运动使岩石露出地表接 受岩溶作用,构造运动同时产生了大量裂缝,有利 于大气淡水和含 CO2、有机酸的溶液在其中运动, 扩大了可溶性岩层与溶蚀流体的接触面积。

构造运动致使鄂尔多斯盆地奥陶系以后经历 了很长的沉积间断,这为奥陶系碳酸盐岩地层顶 部发生岩溶作用提供了充分的地层依据。加里东 构造运动形成的奥陶系与石炭系之间巨大的区域 不整合面也为油气提供了运移通道¹¹⁸。

构造除了控制地层出露层位和保存程度外, 还控制着储层的发育^[19]。构造高部位有效裂隙 发育程度高,孔洞充填程度低,有利于岩溶储层的 发育。

3.2.3 沉积相

鄂尔多斯地区在奥陶系处于陆表海沉积环 境。奥陶系马五期沉积物为蒸发台地碳酸盐岩沉 积系列产物。准同生白云岩中普遍发育硬石膏、 石盐等蒸发易溶矿物(图版-6),这些伴生矿物针 状、板状晶体和圆形、椭圆形结核状集合体广泛分 布于白云岩中,为岩溶形成膏模孔、盐模孔、结核 状溶孔提供了基础,也为溶孔进一步溶蚀扩大形 成溶洞创造了条件。鄂尔多斯盆地风化壳能形成 大气田的主要原因就是具有大面积连片稳定分布 的含硬石膏结核的白云岩溶蚀孔洞层^[20]。

3.2.4 古地理、古气候条件

古地磁资料显示,华北地台在加里东运动之 后到海西期的地理位置一直处于北半球赤道附 近。因为铝土化仅局限于潮湿的热带和亚热带地 区^[21],风化壳岩溶孔缝内充填有铝土矿也说明了 鄂尔多斯地区当时处于高温湿热的地区。赤道附 近地区丰富的降雨量是岩溶作用发生的基本动 力。较强的水动力使岩溶过程中形成了大量的溶 蚀孔洞和分布范围较广的溶蚀角砾岩(图版-4)。 3.2.5 古岩溶地貌

古岩溶地貌对岩层的溶蚀程度、充填程度及 填充物的性质起着控制作用。不同的古地貌单元 其储层展布和储集性能不同。

根据对鄂尔多斯盆地不同古地貌单元产气井 情况的统计^[8],古岩溶高地、古岩溶斜坡和古岩溶 盆地工业气井钻遇率分别是 20%、52 9% 和 3 7%(图 5)。工业气井钻遇率在古岩溶斜坡最 高,古岩溶高地次之,古岩溶盆地最低,有 92. 3% 的高产气井分布在古岩溶斜坡之上。这说明古岩 溶斜坡位于古岩溶水的强径流带,溶蚀作用强烈, 孔洞充填程度低,储层相对厚度大,物性较好,横向展布稳定,是天然气富集的最有利地貌单元,长 庆气田位于古岩溶斜坡上就是最好的例证。



Fig. 5 The probability of commercial gas flow discovered by drilling in different paleogeomorphology units (from reference[8])

4 结论

(1)通过钻井岩心和薄片观察,并结合古水动 力差异和测井曲线等资料,鄂尔多斯盆地中东部 奥陶系风化壳岩溶自上而下具明显的垂直分带特 征,普遍具有去膏化、去白云化、角砾化的特征,是 大气淡水、CO2和可溶性岩石共同作用的结果,根 据前人成果总结出了研究区风化壳岩溶发育模 式。

(2)风化壳岩溶储层是中部气田的主力气层。 通过分析岩性特征、构造条件、岩相古地理、古气 候、古地貌等因素对储层的控制,揭示了风化壳岩 溶储层和油气富集的关系,为鄂尔多斯盆地奥陶 系天然气勘探提供依据。

参考文献:

- [1] 任美锷, 刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983:
 4.
- [2] Jam es N P, Choquette P W. 古岩溶[M]. 胡文海, 译. 北京:
 石油工业出版社, 1992; 2.
- [3] 李振宏,郑聪斌,李林涛.鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶类型 及分布[J].低渗透油气田,2004,9(1):17-20
- [4] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M].北京:石油工业出版社, 2003: 54.
- [5] 拜文华, 吕锡敏, 李小军, 等. 古岩溶盆地岩溶作用模式及古 地貌精细刻画——以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例

[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 292-298.

- [6] 何自新,郑聪斌,陈安宁,等.长庆气田奥陶系古沟槽展布及 其对气藏的控制[J].石油学报,2001,22(4):35-40.
- [7] 马振芳,付锁堂,陈安宁.鄂尔多斯盆地奥陶系古风化壳气 藏分布规律[J].海相油气地质.2000,5(1-2):98-102.
- [8] 马振芳,周树勋,于忠平,等.鄂尔多斯盆地中东部前石炭纪 古岩溶地貌与天然气富集研究[J].低渗透油气田.1997,4
 (3):13.
- [9] 吴永平,杨池银.渤海湾盆地北部奥陶系潜山[M].北京:地 质出版社,2002;181.
- [10] 赵澄林,陈丽华,涂 强,等.中国天然气储层[M].北京: 石油工业出版社,1999:163.
- [11] 纪友亮,陈丽华,涂强,等.油气储层地质学[M].北京:中国石油大学出版社,2009,111.
- [12] 谢庆邦,郑聪斌.陕甘宁盆地中部天然气勘探研究成果及 勘探目标评价[R].川陕地区天然气勘探工作会议报告集, 1991.70.
- [13] 宋国初,韩申庭,费安琦.陕甘宁盆地"八五"油气勘探规划 及一九九一年油气勘探部署[R].川陕地区天然气勘探工

作会议报告集, 1991: 118.

- [14] 顾家裕,朱筱敏,贾进华等.塔里木盆地沉积与储层[M].
 北京:石油工业出版社,2003:171.
- [15] 赵澄林, 刘孟慧, 胡爱梅, 等. 特殊油气储层[M]. 北京: 石 油工业出版社, 1997: 84.
- [16] 何自新,杨奕华.鄂尔多斯盆地奥陶系储层图册[M].北 京:石油工业出版社,2004;149.
- [17] 马永生,梅冥相,陈小兵,等.碳酸盐岩储层沉积学[M].北 京:地质出版社,1999;223.
- [18] 李振宏, 贾建恒, 冯武军. 断裂和不整合面对古岩溶的控制 作用[J]. 海相油气地质, 2003, 8(1-2): 89-90.
- [19] 杨 华,金贵孝,荣春龙,等.低渗透油气田研究与实践(第 3卷)[M].北京:石油工业出版社,2001;30-32.
- [20] 陈学时,易万霞,卢文忠,中国油气田古岩溶与油气储层
 [J].海相油气地质,2002,7(4):16.
- [21] G. 巴多西. 岩溶型铝土矿(碳酸盐岩石上的铝土矿矿床)
 [M].项仁杰,吴振寰,史业新,译. 冶金工业出版社, 1990: 308-314.

ORDOVICIAN KARST WEATHERING CRUST AND RESERVOIRS IN CENTRAL AND EASTERN ORDOS BASIN

HAN Bo^{1,2}, FENG Qiao^{1,2}, ZHAO Zhenyu³,

WANG Qianyao¹, ZHAO Wei¹, JIANG Wenjuan¹, XUE Cheng¹, LU Yujie¹

(1 College of Geological Sciences & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Qingdao 266510, China; 3 Exploration and Development Research Institute of Petro-China, Beijing 100083, China)

Abstract: The formation of karst weathering crust is the major phase of the palaeo-karst evolution in the Ordovician limestone in the Ordos Basin. Based on the study of cores, thin sections and well logs from the central and eastern parts of the basin, combined with its specific hydrodynamic characteristics, this article takes the Well SH15 as an example to study the process of karstification. Three zones of weathering crust karst were recognized. They are, from the top to the bottom, vertical vadose zone, horizontal subsurface flow zone and bedrock subcritical flow zone. The process of palaeo-weathering crust karstification was discussed, and a model was established in this paper. The Ordovincian karst limestone is an important reservoir in the region. The characteristics of palaeokarst reservoirs and their governing factors are carefully studied based upon the data of lithofacies, palaeogeography, palaeogeomorphology and so on. Results show that the enrichment of natural gas is related to the development of weathering crust karst in this region. The conclusion is helpful to gas exploration in the Ordos Basin.

Key words: Ordos Basin; Ordovician; weathering crust karst; reservoirs