

米脂内台地坳陷的发育及其含油气性

易士威

(第三石油普查勘探大队, 陕西咸阳 712000)

早奥陶世在广阔的鄂尔多斯浅水陆表海碳酸盐台地内发育了米脂内台地坳陷。它是由台地内部差异沉降和海平面上升的共同作用下形成的。坳陷经历了三次主要的海进—海退旋回, 构成了三套生储盖组合。坳陷的构造稳定性决定了其圈闭型式以地层圈闭为主。作者建立了该坳陷发育的地质模型, 并提出其可能存在的四种地层圈闭类型。

关键词 鄂尔多斯盆地 内台地坳陷 碳酸盐台地 陆表海 沉积旋回 层序地层
含油气性评价

作者简介 易士威 男 27岁 工程师 石油地质

早奥陶世鄂尔多斯为一广阔的碳酸盐台地, 发育了一套浅水陆表海碳酸盐—蒸发盐岩地层。近年来, 随着在鄂尔多斯盆地中、东部下奥陶统碳酸盐岩中的天然气勘探不断取得重大突破, 油气地质研究与勘探人员正迫切希望了解该区天然气富集的原因及规律。

在许多情况下, 盆地的含油气性决定于盆地的成因类型。米脂内台地坳陷是在陆表海碳酸盐台地内部差异沉降和海平面显著上升的共同作用下形成的。该坳陷北起准格尔, 南达宜川, 东至柳林, 西到靖边, 面积大约为 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文旨在通过对米脂内台地坳陷的沉积旋回、层序地层的研究, 建立其形成、发展演化的地质模型。从宏观上阐明该区下奥陶统碳酸盐岩地层中天然气富集的原因及规律。

一、地质背景

奥陶纪初始, 克拉通整体抬升, 海水退缩, 冶里—亮甲山组仅分布在古陆的四周, 为厚度数十米至 200 m 的含燧石条带或结核的深灰色白云岩夹灰岩。怀远运动以后, 马家沟期开始了早古生代第二次大规模的海侵, 沉积了上、下马家沟组和峰峰组的碳酸盐—蒸发盐岩地层。在早奥陶世, 鄂尔多斯地区为一典型的陆表海所覆盖, 构造运动表现为稳定的整体升降性质。当时的古构造面貌 (图 1) 基本上继承了晚寒武世的构造轮廓, 其间广布碳酸盐台地相沉积。隆起区厚度 0—400 m, 坳陷区厚度 500—1500 m, 差异性较大。亚相的分布明显受次级隆起、坳陷的控制。之后, 加里东运动再次使鄂尔多斯整体抬升, 造成长达 1 亿多年的风化剥蚀和古岩溶作用, 直到中晚石炭世海进时结束, 其间缺失了中、上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统的沉积。

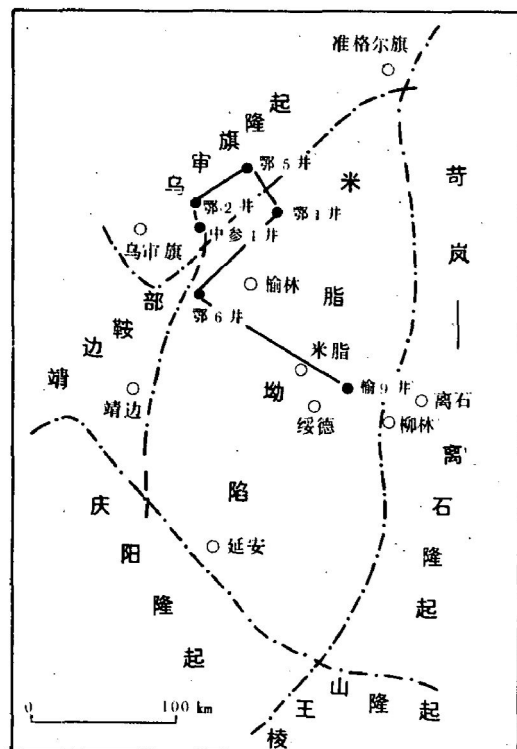


图1 米脂内台地坳陷的构造分区

二、地层划分与对比

上、下马家沟组和峰峰组为以稳定的台地碳酸盐为主的沉积。依据岩性和测井曲线的变化特征,可将下马家沟组分为马1、马2和马3段,上马家沟组分为马4、马5和马6段以及峰峰组的峰1和峰2段(图2)。

马1段的岩性主要为含泥质的白云岩,底部有一层厚几厘米到十几厘米的砂岩或含砾砂岩,代表怀远运动对该区造成的影响;马2段为一套黑灰岩;马3段主要为膏盐岩和膏质白云岩;马4段主要是豹皮灰岩,其顶部变为白云质灰岩层;马5段主要为泥质白云岩和白云质灰岩;马6段主要为膏质白云岩和膏盐岩层,其顶、底为膏盐岩,中间夹一灰岩层;峰1段为一套灰岩层;峰2段主要是白云岩或泥质白云岩。

各组的岩性在横向上变化不大,向坳陷边缘地层厚度减薄。在周边隆起区缺少马1段(如中参1井)。表明海侵逐步扩大的过程。其中马3段、马5段、马6段和峰峰组内部均发育有膏盐岩层。其厚度在横向上有所变化。向坳陷中心地区厚度增大,最大累积厚度可达300 m(如榆9井)。向边缘地区减薄或相变为白云质膏岩或膏质白云岩。表明当时发育封闭或半封闭的蒸发碳酸盐台地沉积环境。

向边缘地区减薄或相变为白云质膏岩或膏质白云岩。表明当时发育封闭或半封闭的蒸发碳酸盐台地沉积环境。

三、沉积旋回

米脂内台地坳陷的充填表现为典型的“千层糕”式^[1]的碳酸盐岩地层。详细的测井分析揭示这套地层由多级体系的沉积旋回构成。各级旋回都是规模不同的海进—海退序列(图3)。

下奥陶统可划分为三个超旋回,分别对应下马家沟组、上马家沟组和峰峰组,各自代表着一个主要的海进—海退旋回。其中,第三超旋回由于峰峰组上部被剥蚀而不完整。第一超旋回的海进翼由马1、马2段构成,马3段构成它的海退翼,最后以马3段上部膏盐岩层的出现而结束。与第一超旋回顶部呈突变接触的马4段底部的白云岩或灰岩代表第二超旋回的开始,同样以马6段大段的膏盐层的出现而结束。马4段构成其海进翼,马5、马6段构成其海退翼。峰1段纯灰岩和粒屑灰岩的出现代表第三超旋回的开始。每一超旋回从其底部的白云岩到中部的深色灰岩再到顶部的膏盐层,都代表一次大规模的从浅到深再从深到浅的海进—海退沉积序列。值得指出的是,超旋回海进翼顶部部位的烃源岩最发育。因为这时海水最深,在坳陷部位容易形成底水平静的缺氧环境,因此,对有机质的保存十分有利。每个超旋回自海进翼顶部的深黑色泥晶灰岩到海退翼顶部的膏盐岩都构成一个完整的生储盖组合。

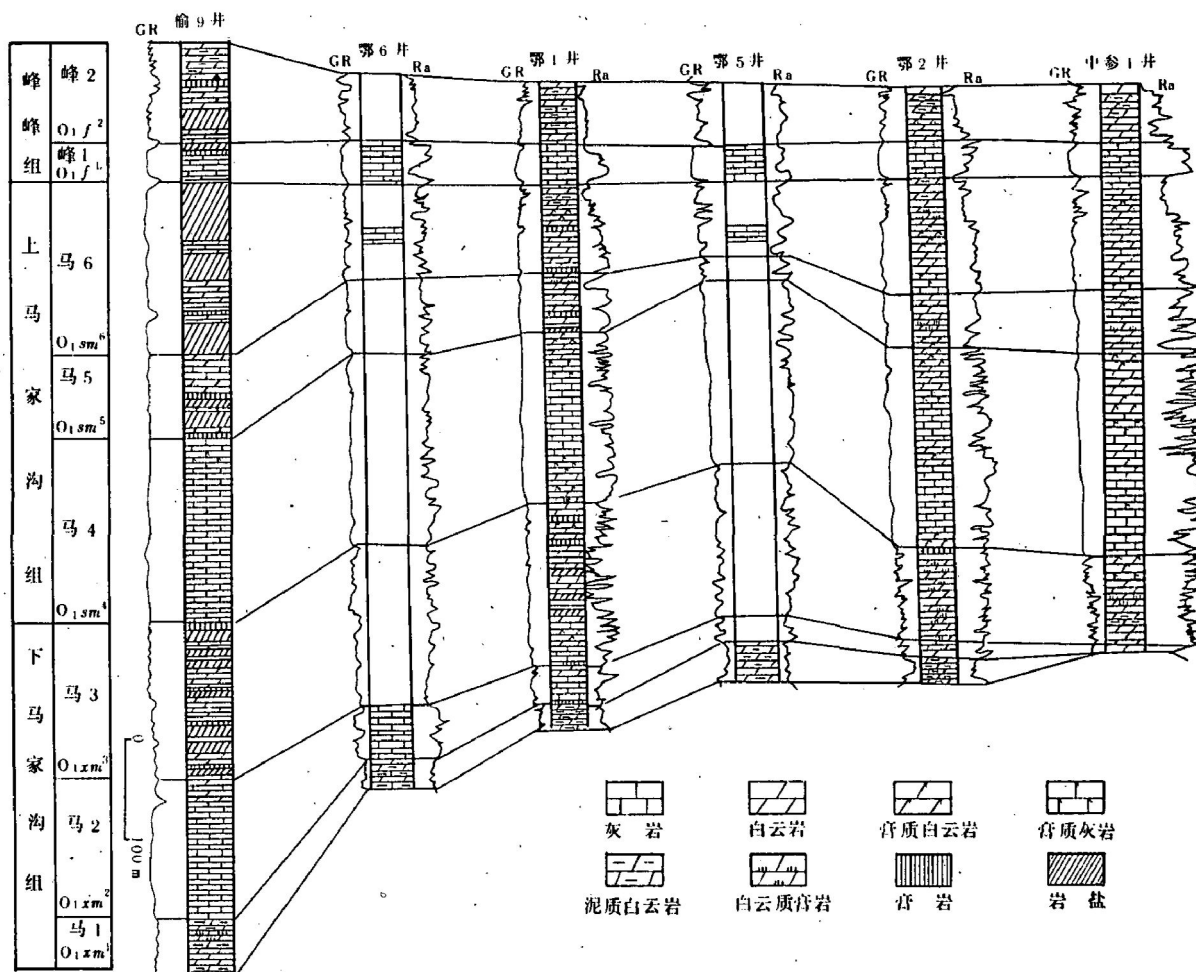


图2 下奥陶统测井地层的划分与对比

超旋回内部由一系列较小的沉积旋回组成。上述三个超旋回又可进一步划分出十几个沉积旋回(图3)。每个旋回可由数个更小的亚旋回构成。岩芯上清楚地表明这些亚旋回的顶部具有陆上暴露面或具有薄层的膏盐层。从某种意义上讲,这些旋回和亚旋回代表着更小的生储盖组合。

下奥陶统碳酸盐地层中的超旋回和旋回在全盆地内都有良好的可比性。这说明沉积旋回的发育主要受区域性的相对海平面变化的控制,而不是局部因素的影响(例如差异沉降—隆起、碳酸盐产率和气候)。叠置的不同级别的沉积旋回,正是对频繁的频率不同的海平面变化的响应。烃源岩一般发育在海进旋回中,而膏盐岩则出现在海退旋回中。

四、层序地层

目前,层序地层学已成为含油气盆地分析中十分有效的非常规方法,特别是在寻找隐蔽油气藏方面更有其独到的实用性。一般认为控制碳酸盐台地生长和相分布的主要因素,是叠

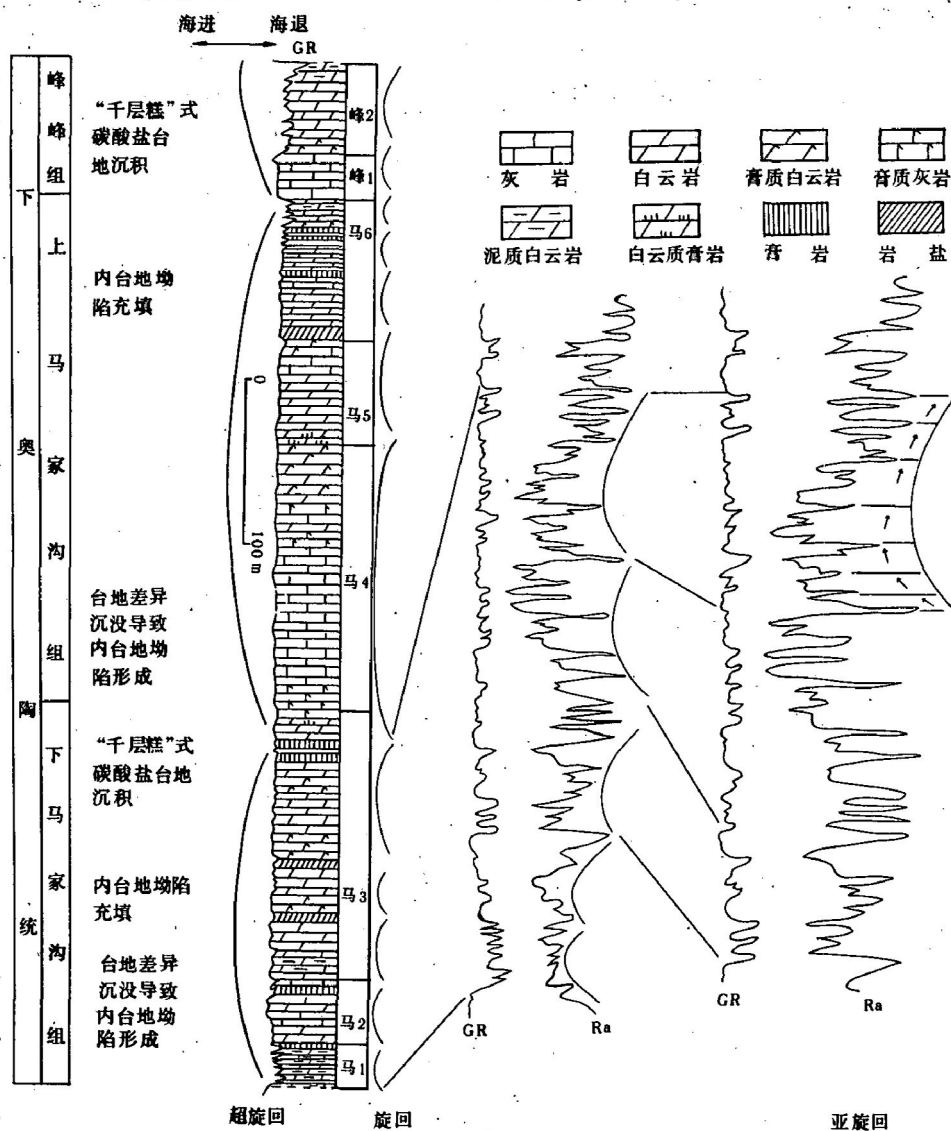


图3 鄂1井下奥陶统碳酸盐岩地层沉积旋回分级

加在长期大地构造变化之上的短期海平面变化(如相对海平面变化)。而层序的形成则反映海平面变化速率、构造沉降速率和沉积物供应速率之间的相互作用^[2]。下面将依据测井资料对该区下奥陶统碳酸盐台地的层序地层进行划分。按照层序地层学的观点,下奥陶统碳酸盐岩地层可划分为三个层序,一个I型层序和两个II型层序(图4)。它们分别对应着前述的三个超旋回。

1. 下马家沟层序(I型层序)

I型层序是位于I型不整合面之上的一套旋回性地层单元。冶里-亮甲山期后,怀远运动使海水退出鄂尔多斯地区,到马家沟期大规模海侵开始,经历了一段时间的陆上侵蚀,其间形成的不整合为I型不整合。在自然伽马曲线上表现为自然伽马值突然增高(马1段),且马1段底部均具有一层厚几厘米的砂岩。下马家沟组逐层超覆在不同时代的老地层上(前寒武

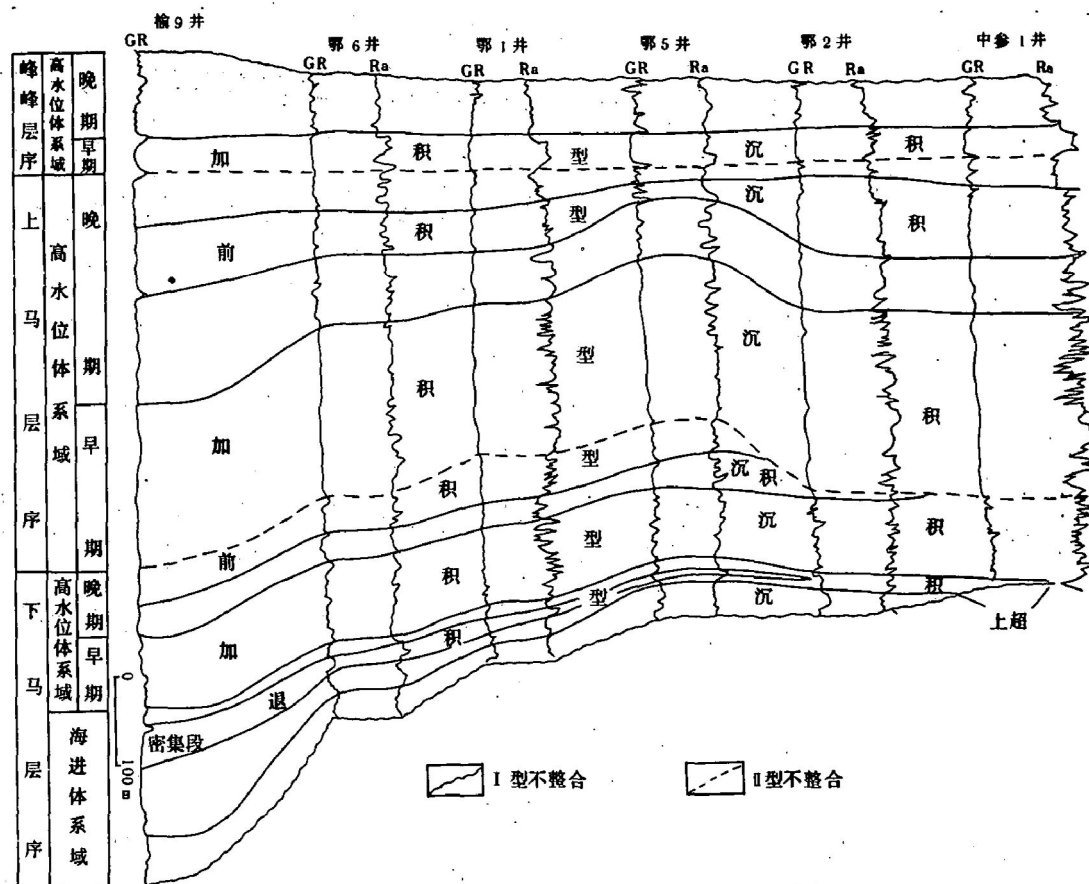


图4 下奥陶统碳酸盐岩测井层序地层的划分

系、寒武系和冶里-亮甲山组)。位于此不整合之上的下马家沟层序为I型层序,由马1、马2和马3段三套地层单元组成。可进一步划分出海进体系域和高水位体系域(图4)。马1和马2段构成海进体系域,它们逐步上超,形成退积型沉积。盆地边缘缺少马1段,有时亦缺少马2段,表明岸线向陆方向迁移的海进过程。其中马2段中的某些黑色泥晶灰岩或黑色泥灰岩可能代表海进达到最高峰时的最大海泛面,形成对油气生成十分有利的密集段沉积(图4)。马3段为高水位体系域加积-前积型沉积,可进一步划分为早期和晚期高水位体系域。马3末期海平面相对下降,但海水并未完全退出整个台地,仅在局部地区造成陆上或近地表暴露。由于干旱的气候条件,未退出的海水浓缩形成膏盐岩层。总之,下马家沟层序是一底部以I型不整合,顶部以II型不整合为界的内部由海进体系域和高水位体系域组成的I型层序。其中马2段内富含有机质的泥晶灰岩是十分有利的烃源岩,马3段内部的白云岩及其它段的白云岩是有利的储集岩,其上部的膏盐岩层构成区域性的盖层,对天然气的保存起到了十分有利的作用。此层序本身构成了一完美的生储盖组合,因此,在今后的勘探工作中应引起高度的重视。

2. 上马家沟层序(I型层序)

上马家沟层序是发育在II型不整合之上的I型层序,此不整合是由于马3末期海平面下

降造成的。台地内部可能无沉积作用发生,但并未造成大规模的侵蚀。在自然伽马曲线上有明显的反应,由马3顶部的锯齿状高值突变为马4段的平直曲线,岩性亦呈突变接触,由膏盐岩突变为灰岩。此层序内部仅由高水位体系域构成,可进一步划分出早期和晚期。构成早期高水位体系域的马4段为加积型沉积,代表海进末期海平面缓慢上升。马5和马6段构成晚期高水位体系域,具加积—前积型结构,代表早期海退沉积。最后以马6段中厚层膏盐岩的出现而结束。上马家沟层序以马4段的豹皮灰岩到马6段的膏盐岩亦构成一生储盖组合,虽然马4段的生油潜力不及马2段,但其厚度较大可作为补偿。因此,在勘探中此组合不应忽视。

3. 峰峰层序(I型层序)

峰峰层序亦是一发育在I型不整合面之上的I型层序。此不整合在自然伽马曲线上表现为由马6段的锯齿状高值突变为峰1段的平直曲线。岩性亦由膏盐岩突变为深色灰岩。仅由高水位体系域组成。可进一步划分为峰1段的早期和峰2段的晚期高水位体系域。峰1段为典型的加积型沉积。由于峰峰组上部的缺失,估计它可能与上马家沟层序一样,亦构成一生储盖组合。加里东运动使台地整体抬升,长达1亿多年的侵蚀和古岩溶作用,使顶部的盖层剥蚀,并使白云岩储层更加发育。从而为油气的聚集提供了良好的储存空间。石炭纪海侵沉积的泥岩不仅为其提供油气的来源,而且亦是其良好的盖层。同时,峰1段的黑色灰岩亦可作为其油气的来源。

一般情况下,自然伽马曲线的高低是对地层泥质含量的反映。纵观各井的自然伽马曲线在纵向上的变化特征及其在横向上良好的可比性,不仅可作为地层划分与对比的依据,亦可作为层序划分的依据。自然伽马曲线纵向上的变化,一方面反映了地层中泥质含量的变化,同时亦反映了海进和海退的过程。马2段、马4段和峰1段的泥质含量极低,几乎为纯灰岩,代表岸线向陆方向移动的海进过程,碎屑物质供应减少;而马3、马6和峰2段泥质含量的增加表示岸线向海方向退缩的海退过程,碎屑物质供应增加。

五、地质模型

米脂内台地坳陷位于广阔的浅水陆表海碳酸盐台地之上,在早奥陶世台地的范围包括了整个鄂尔多斯地区。它是在地壳没有扩张的情况下,由载荷诱导的台地内部差异沉降和海平面显著上升的共同作用下形成的。它的发生、发展演化一般经历三个阶段。第一阶段台地内部发生均衡沉降,海平面开始上升,台地发生差异沉降,内台地坳陷开始形成(图5-A)。第二阶段台地剧烈差异沉降,海平面显著上升,导致坳陷中心地区的海水进一步加深,底水的循环更加缓慢,结果形成贫氧到缺氧的底水条件,从而使有机质在坳陷范围内得以保存(图5-B)。有机质的可能来源是周围浅水台地透光带内的细菌和藻类物质,它们被底流冲进坳陷内而得以保存下来。此阶段是内台地坳陷的主发育期,对烃源岩的形成十分重要。第三阶段为内台地坳陷的充填阶段,此时海平面逐渐下降,均衡沉降减弱,在干旱的蒸发条件下,形成膏盐岩沉积,构成区域性的良好盖层(图5-C)。

米脂内台地坳陷的发育经历了三期,分别对应着前述的三个超旋回和三个层序。各期的发育大体都经历了上述的三个阶段,但它们又各有不同。下马家沟期为坳陷发育的第一期,马1期始在台地内部均衡差异沉降和海平面上升的共同作用下,台地产生差异沉降,马2段与马

1段之间的突变界面代表浅海碳酸盐沉积的终止和富有机质沉积作用的开始。在马2段期间海平面继续上升,导致坳陷中心地区海水进一步加深,底水循环不畅,形成缺氧的还原环境,使有机质得以保存。马3早期海平面上升速率的减小和末期相对海平面的下降,使坳陷中的水深变浅,底水循环增加,坳陷被充填。马3上部蒸发盐的出现表明坳陷周围地区的陆上暴露,使内台地坳陷与开放海之间的海水交换受阻,坳陷边缘背景中普遍分布的白云岩,可能由穿过边缘暴露区的咸水回流和咸水的地下渗流造成^[3]。而岩盐层的出现表明内台地坳陷曾经干化,与开放海的联系完全中断。

米脂内台地坳陷发育的第二期(上马家沟期)和第三期(峰峰期)与第一期类似。只不过第二期坳陷与周围台地之间的差异性变小;马6段厚层岩盐的存在表明当时坳陷的周缘曾遭受大面积的暴露,坳陷与开放海的联系被彻底阻隔,致使坳陷完全干化。坳陷发育的第三期,差异性趋于消失。在鄂尔多斯盆地中、东部地区广布的峰1段标志层说明当时的海水深度变化甚微,该区已演化为一地势平坦的统一的碳酸盐台地(图3)。

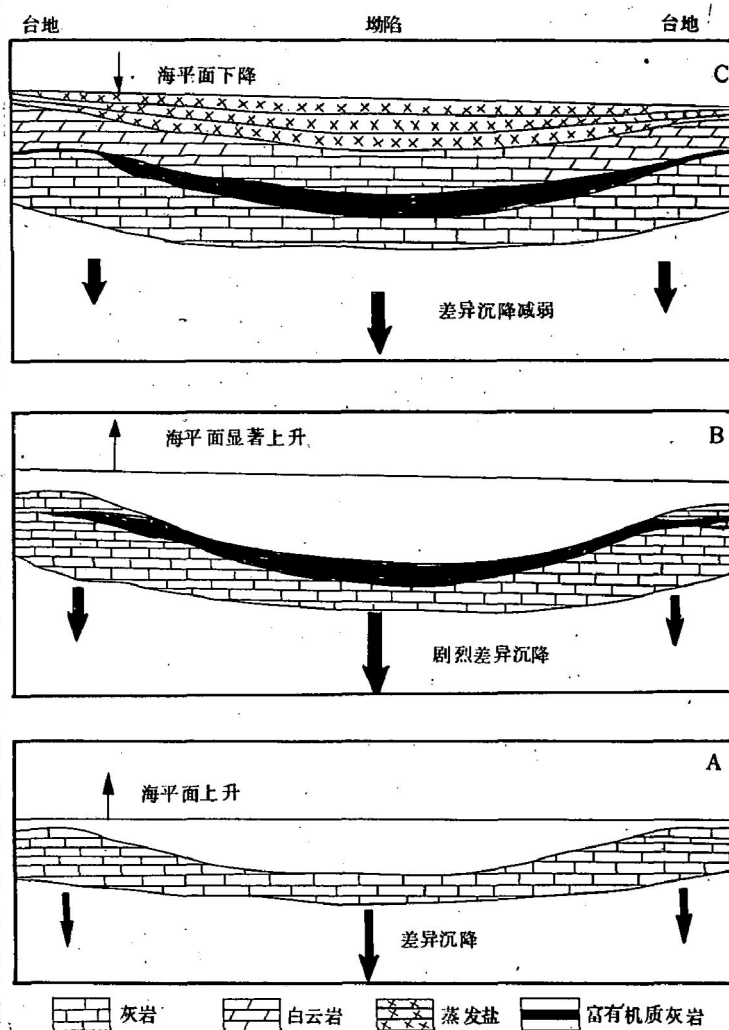


图5 米脂内台地坳陷发育的地质模型

六、含油气性评价

在许多情况下,沉积物中有机质的数量和质量、油气的运移和富集以及油气藏模式取决于沉积盆地的成因,而不是盆地形成的年龄。但对于古老的盆地来说,埋藏型盆地才有利于油气的保存。米脂内台地坳陷自下马家沟早期开始发育到加里东运动结束,经历了早奥陶世的演化。加里东运动使其抬升遭受了1亿多年的侵蚀。但自上古生界沉积后至今它一直被埋藏,其间虽经历了海西、印支和燕山等几次大的构造运动,但都未对其造成破坏,使之一直保持完整的稳定状态。而且由于它内部的海相有机质经历了自早古生代以来的长期演化,变质程度高,故其为一含气型坳陷。

如前所述,米脂内台地坳陷的发育经历了三期,在纵向上形成了三套生储盖组合。目前,

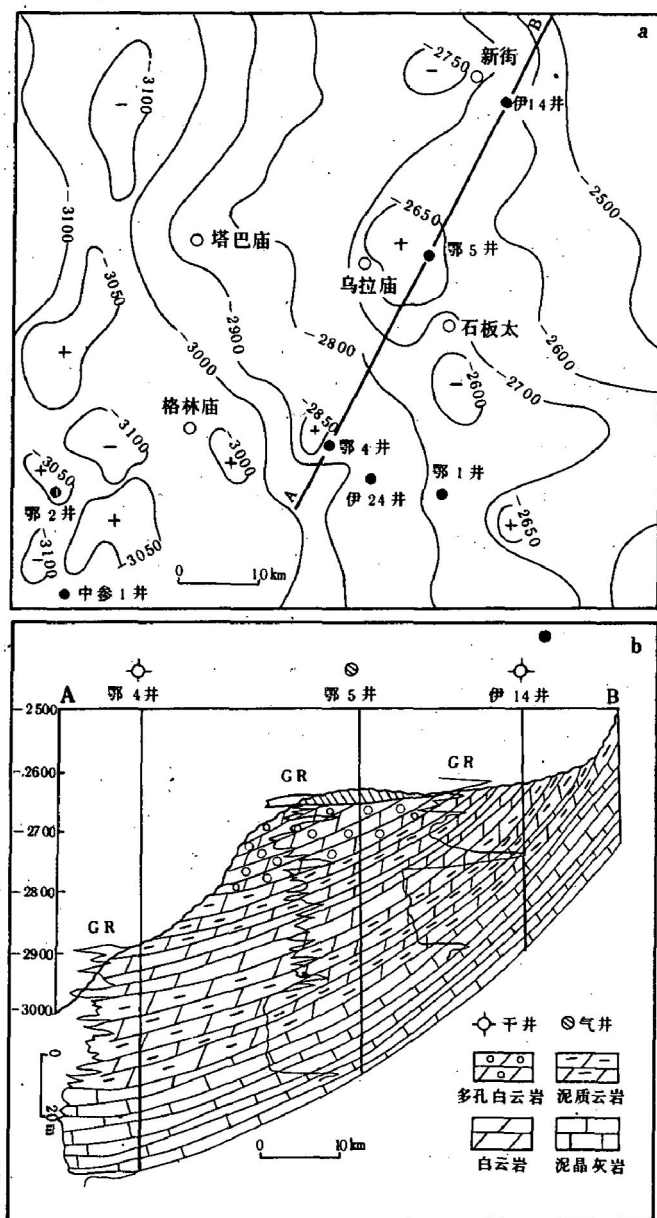


图6 加里东古风化壳内的古岩溶气藏

a—伊金霍洛旗-神木地区加里东不整合面构造等值线图, b—鄂4-鄂5-伊14井连井剖面图。

在上部组合的峰2段内的白云岩中,天然气勘探已取得重大突破,发现了大型的天然气田;在下部的两个组合中,天然气亦有良好的显示,在今后的勘探中,应予以高度的重视,特别是对下马家沟层序,因为它是内台地坳陷的主发育期,形成了马2段良好的烃源岩。

米脂内台地坳陷的构造稳定性不利于构造圈闭的形成,这表明其生成的天然气将主要聚集在隐蔽型的圈闭中。坳陷内可能存在四种地层圈闭类型。

1. 干旱气候毛细管浓缩潮坪白云岩晶间孔类型

广阔的干旱潮坪是产生大面积白云岩的理想地区,这种准同生白云岩的成因机理是由于毛细管的浓缩作用^[4]。在白云岩中存在许多良好的晶间孔。这种孔隙性白云岩向上变为硬石膏而尖灭,或被硬石膏遮挡,向下又受到相变为灰岩的限制,故它具有形成地层圈闭的良好条件。天然气经过侧向或垂向运移可到达多孔的白云岩中。

2. 干旱气候渗透回流盆地白云岩晶间孔类型

富镁的高密度盐水由潮坪回流到盆地内向下渗透,在穿过下伏的碳酸钙沉积物时,可形成高度局限的多孔白云岩。而这种遭受白云岩化的灰岩本身可能就是烃源岩,故它们一般形成自生自储的但规模不大的地层圈闭。

3. 裂缝性孔隙类型

碳酸盐岩地层中裂缝性储层是很普遍的,其形成的途径很多。对于米脂内台地坳陷来说,由于其构造稳定,所以碳酸盐岩裂缝的产生可能是因其蒸发盐岩的溶蚀塌陷而形成的。估计这种裂缝性储层的范围不会太大。

4. 潮湿气候古岩溶台地碳酸盐岩溶蚀孔洞类型

在潮湿的气候条件下,出露的碳酸盐岩在大气淡水淋滤作用下常常形成良好的次生孔隙及洞穴,从而构成理想的储集岩。区内下奥陶统顶部的加里东古风化壳内的天然气藏即属于此种类型。加里东运动使鄂尔多斯盆地下古生界碳酸盐地层整体抬升,长达1亿多年的风化剥蚀和古岩溶侵蚀作用,在加里东古风化壳上形成了许多低幅度的古地貌隆起(残丘)。它们

均具有一定的闭合高度。由于风化壳内的古岩溶作用,在这些古地貌隆起往往形成良好的储集体。这些古残丘在纵向上具有三层结构^[5]:位于古风化壳上部的风化残积土带以铝土质岩类为主,构成良好的盖层;位于中部的淋溶带受大气淡水向下渗透的影响,溶蚀作用强烈,形成大量的溶孔、溶洞、溶缝及晶间溶孔、膏模孔、粒内溶孔等溶蚀孔隙系统,这些次生溶蚀孔隙孔喉粗大,连通性好,构成了良好的储集带和主要的产气层;位于古风化壳下部的潜溶带以水平溶蚀为主,孔洞发育,且洞穴长轴大体与层面平行,由于该带常处于地下半封闭一封闭状态,因此在溶蚀作用发生的同时,往往伴随交代或次生充填,致使部分溶蚀孔隙体积缩小以至消失,但它有时仍不失为良好的储层。上古生界石炭系的海相厚层泥岩与铝土岩一起为古残丘提供理想的盖层,使之成为天然气聚集的场所。后来的印支、燕山运动,使该区地层总体向西倾斜,而这些低幅度的古残丘就成为在地层总体向西倾斜背景中的鼻状凸起。如图6所示即为该种类型的气藏,其储层为峰2段上部的孔渗性白云岩,这种白云岩内的次生孔隙主要是由风化壳岩溶作用形成的,其盖层为石炭系太原组的厚层泥岩。

以上四种圈闭类型,前三类可能主要存在于上、下马家沟层序内,第二类在马2段内可能存在;第四类则主要分布在峰峰层序中的古风化壳内。每种类型的关键因素都是控制孔隙发育的作用。因此,对碳酸盐岩中油气藏的寻找在很大程度上就是对储层的寻找。而米脂内台地坳陷的构造稳定性需要在今后的勘探中集中精力有目的地去寻找这些难以发现的隐蔽型圈闭。

参 考 文 献

- 1 Hend D. Depositional cycles and source rock development in an epeiric intra-platform basin, the Hanifa Formation of Arabian peninsula. *Sedimentary Geology*, 1990, 69 (3/4), 281—296.
- 2 Sarg J F. Carbonate Sequence Stratigraphy. SEPM Special Publication, 1989, 42, 155—181.
- 3 More C H. Carbonate Diagenesis and Porosity. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, Elsevier Science Publication, 1989, 143—160.
- 4 Longman M W. Carbonate Diagenesis As A Control On Stratigraphic Traps. Tulsa Oklahoma, AAPG Bookstore, 1982, 141—147.
- 5 曾少华. 鄂尔多斯中东部奥陶系古风化壳及高产因素的探讨. 石油勘探与开发, 1991, 18 (2), 50—56.

DEVELOPMENT OF MIZHI INTRA-PLATFORM DEPRESSION AND ITS GAS POTENTIAL

Yi Shiwei

(3rd Brigade of Petroleum Prospecting and Exploration, MGMR)

Abstract

Mizhi intra-platform depression developed on the broad shallow water carbonate platform in Ordos epeiric sea during Early Ordovician. The area of the depression is about

70000 km². It was formed by the combined effect of both the differential subsidence of the platform interior and the rise of sea level. The evolution process can be divided into three periods (lower Majiagou, upper Majiagou and Fengfeng). Each period can be subdivided into three stages. The first stage differential subsidence occurred in the platform interior, and sea level rose; the second stage, intense differential subsidence and evident rise of sea level resulted in formation of Mizhi intra-platform depression; the third stage, differential subsidence weakened gradually, the sea level fell, and the depression was filled. The evolution of Mizhi depression underwent three large-scale transgressive-regressive changes and formed three supercycles and three stratigraphic sequences corresponding respectively to lower Majiagou, upper Majiagou and Fengfeng Formations. Three perfect source-reservoir-cap assemblages were formed from the dark organic-rich micrite at the top of the transgressive limb of each supercycle to the evaporite at the upper part of the regressive branch. Mizhi intra-platform depression is a gas-bearing sag because of high organic maturation. Recently, the significant discovery of gas in Fengfeng sequence indicates that intra-platform depression has great potential to accumulate gas. The gas accumulated in porous dolomite reservoirs related closely to palaeokarst. A geological model shows that four types of stratigraphic traps existed in the depression.