

鄂尔多斯 古岩溶气藏地质特征 及成藏富集规律

代金友 晏宁平 编著

石油工业出版社

鄂尔多斯古岩溶气藏 地质特征及成藏富集规律

代金友 晏宁平 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对鄂尔多斯古岩溶气藏碳酸盐岩高频旋回地层层序进行分析,建立小尺度、高精度的等时地层格架,分析古岩溶储层构造形态、沉积微环境、成岩储集相、岩溶古地貌的时序演化规划,研究有利沉积相带、有利局部构造、有利成岩相带、有利古岩溶地貌单元之间的时空共生关系,探讨古岩溶气藏碳酸盐岩储层流动单元刻画方法及其分布规律,总结气藏成藏条件,论述多期古岩溶作用机理及其叠加控藏机制,最终对古岩溶气藏地质特征和天然气成藏富集规律提出系统、科学、规律性的认识。

本书可供从事古岩溶气藏油气勘探、地质特征、成藏富集规律研究工作的科研人员以及高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

鄂尔多斯古岩溶气藏地质特征及成藏富集规律/代金友,晏宁平编著.
北京:石油工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-5183-0991-7

I. 鄂…

II. ①代…②晏…

III. 古岩溶-气藏-研究-鄂尔多斯市

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288182 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523712

图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15

字数:380 千字

定价:88.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是我国大型含油气盆地之一。除早期发现并已投入开发的中生界砂岩油藏外,20 世纪 80 年代中后期又在盆地腹部古生界海相碳酸盐岩层系中获得重大突破,发现了我国目前最大的古岩溶气田。这一发现打开并拓宽了天然气勘探新层系、新类型和新领域。

鄂尔多斯古岩溶气田是我国陆上海相碳酸盐岩层系首次发现和探明的第一个特大型气田,也是我国“西气东输”的重要气源之一。该气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中部的靖边—横山一带,西侧与苏里格气田相连,北侧与乌审旗气田相邻,东侧和榆林气田相接,勘探开发面积逾 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。含气层为奥陶系马家沟组顶部马五₁₋₅亚段碳酸盐岩地层,埋深 3100 ~ 3900m。该套储层次生溶蚀孔洞缝储层成层连片发育,但受沟槽和致密带分割围限,气藏表现为较强的非均质性,古岩溶对储层孔洞缝的形成和气藏分布至关重要。

作为西气东输的主要气源区之一,鄂尔多斯古岩溶气田的勘探开发工作历来备受关注。特别是自靖边气田发现以来,古岩溶气藏新的突破接连不断,除了向上古生界、中生界拓展外,下古生界的含气面积也在不断扩大。近年来,长庆油田相继在靖边气田东部的坪桥、艾好峁、补兔、巴拉素、黄草茆、玉皇坪、王家湾等地区的奥陶系获得高产工业气流,主力含气层位除马五₁₊₂亚段、马五₄^{1a}小层外,也发现了马五₅亚段、马五₄^{1b-3}小层含气新苗头,气田大规模外扩的场面已经形成。

由于鄂尔多斯古岩溶气藏储层特征独特,天然气生成、运聚和成藏方面也具有特色,而且随着古岩溶气藏的发现、探明和滚动勘探开发,突破了以往在构造发育区勘探的思路,开拓了稳定台区找气的新领域。因此,揭示此类气藏地质特征和成藏富集规律并建立相应的地质模型,对指导古岩溶气藏进一步的滚动勘探开发工作和类似气田的发现具有十分重要的理论意义和实践价值。

众所周知,鄂尔多斯盆地古岩溶气藏储层是一套以溶蚀为主,经深度成岩改造的蒸发潮坪碳酸盐岩组成。该储层之所以能够形成大面积工业气藏绝非偶然,而是其内在储层地质条件和成藏富集规律有效搭配下的必然结果。本书通过对鄂尔多斯古岩溶气藏多年来的天然气勘探开发实践积累资料的研究,针对古岩溶储层埋藏深、储层厚度薄、非均质性强的地质特点,以层序地层学理论为指导,从沉积动力学角度对古岩溶气藏碳酸盐岩高频旋回地层层序进行分

析,建立小尺度、高精度的等时地层格架;在等时地层格架的约束下,以储层构造、沉积、成岩、地貌演化为主线,分析古岩溶储层构造形态、沉积微环境、成岩储集相、岩溶古地貌的时序演化规律,研究有利沉积相带、有利局部构造、有利成岩相带、有利古岩溶地貌单元之间的时空共生关系,探讨古岩溶气藏碳酸盐岩储层流动单元刻画方法及其分布规律;总结气藏成藏条件、论述多期古岩溶作用机理及其叠加控藏机制,最终对古岩溶气藏地质特征和天然气成藏富集规律提出系统、科学、规律性的认识。

本书在继承前人研究成果的同时,着重结合鄂尔多斯古岩溶气藏特点开展的一系列富有成效的研究工作,形成了一些新观点和新认识。(1)发现气藏内部存在东北和北西向两组小断距剪切断层,属于燕山期、喜马拉雅期构造强烈改造的结果,断层周边伴生的微裂缝对储层渗透有极大改善作用,并对气藏的开发具有重要意义。(2)发现该气藏奥陶系内幕构造演化不仅包括“东倾单斜”和“西倾单斜”两个阶段,还曾出现过“南倾凹陷”过程。进一步的研究表明,古岩溶气藏成藏过程并非受“东倾单斜”控制,而主要受“南倾凹陷”控制,凹陷中局部构造是天然气富集的有利场所。(3)通过岩心观察、薄片鉴定和测井解释三大手段,在细分亚相—微相基础上,充分考虑古地理、古构造环境,建立了适合古岩溶气藏地质特点的储层沉积微相模式。(4)建立了古岩溶储层成岩演化模式,结合图版深入分析了储层成岩演化进程,落实了致密带成因机理。建立的新的沉积—成岩演化模式对深入认识古岩溶储层的形成机理,指导古岩溶气藏勘探开发具有实际意义。(5)发现气藏东侧和西侧沟槽成因是不同的,气藏东侧为传统意义的沟槽,而西侧则为剥蚀脊。剥蚀脊概念的提出将传统意义的沟槽与气藏西侧的剥蚀脊有效区分开来,为沟槽识别和沟槽体系分布研究提供了理论基础。(6)通过实验提出了以时窗滑移为主,钻井—地震波形—动态资料为辅的沟槽识别新方法,该方法能够有效捕捉沟槽形态的细微变化,明显提高了沟槽解释精度。(7)首次提出古岩溶气藏多期岩溶叠加控藏机理。其核心观点为:鄂尔多斯古岩溶气藏的形成主要经历了同沉积—间歇性暴露环境下的层间岩溶、表生—大气淡水淋滤环境下的风化岩溶和埋藏—压释酸性水环境下的缝洞系岩溶等3期古岩溶;各期古岩溶控制因素不同,层间岩溶(Ⅰ期)受沉积微相控制、风化岩溶(Ⅱ期)受前石炭纪古地貌控制、缝洞系岩溶(Ⅲ期)受成藏期古构造控制;因此,古岩溶气藏的空间分布受有利沉积相带、有利的岩溶地貌单元和成藏期有利古构造区等因素的综合控制。其中,马五₁₊₂亚段气藏总体经历了Ⅰ期+Ⅱ期+Ⅲ期岩溶叠加作用,主要受云坪微相、台丘—斜坡地貌和成藏期古鼻隆构造三重控制;而马五₄亚段气藏是Ⅰ期+Ⅲ期岩溶叠加的产物,受云坪微相、成藏期古鼻隆构造控制双重控制。上述这些新观点、新认识的提出为古岩溶气藏开发选区、选井工作提供了理论基础和方法指导,对于丰富我国天然气地质理论,促进天然气工

业的深入发展具有重要意义。

本书内容主要源于笔者对长庆油田科研工作的总结提炼,核心内容多以论文形式公开发表。本书的顺利完成并出版得到了许多单位、个人的大力支持和帮助,感谢长庆油田第一采气厂地质研究所提供资料,感谢中国石油大学(北京)何顺利、蒋盘良、陈安定等师长的专业指导,感谢王宝刚、潘瑞、魏丽等同事朋友的热心帮助。

由于笔者水平有限、认识局限,难免存在错误和不足之处,望读者批评指正。

目 录

第一章 古岩溶气藏地质背景	(1)
第一节 区域构造	(1)
第二节 区域地层	(1)
第三节 沉积古地理	(3)
第四节 成藏条件及岩溶特征	(5)
第二章 古岩溶气藏地层层序	(7)
第一节 地层层序划分方法	(7)
第二节 古岩溶气藏地层层序特征	(9)
第三章 古岩溶气藏构造演化	(18)
第一节 区域构造动力学分析	(18)
第二节 气藏内幕构造演化	(22)
第三节 内幕构造与成藏关系	(29)
第四节 断层发育规律	(32)
第四章 古岩溶气藏沉积微相	(39)
第一节 潮坪沉积特征	(39)
第二节 沉积微相类型及特征	(40)
第三节 沉积微相模式	(49)
第五章 古岩溶气藏成岩作用	(51)
第一节 成岩作用类型及特征	(51)
第二节 成岩阶段及成岩演化	(62)
第三节 储层矿物成分及孔隙结构	(65)
第四节 成岩相	(73)
第六章 古岩溶气藏古地貌	(85)
第一节 沟槽与剥蚀脊	(85)
第二节 沟槽(剥蚀脊)识别	(87)
第三节 奥陶系岩溶古地貌	(94)

第七章 古岩溶气藏流动单元 (102)

 第一节 流动单元研究现状 (102)

 第二节 古岩溶气藏流动单元划分 (104)

第八章 古岩溶气藏成藏富集规律 (121)

 第一节 成藏条件 (121)

 第二节 岩溶控藏机理及油气富集规律 (124)

参考文献 (134)

图版 (138)

 第一部分 岩心图版 (138)

 第二部分 偏光显微镜图版 (148)

 第三部分 阴极发光图版 (200)

 第四部分 扫描电镜图版 (224)

第一章 古岩溶气藏地质背景

第一节 区域构造

鄂尔多斯盆地是我国内陆第二大沉积盆地,横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,是一个面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、南北走向的矩形拗陷盆地。在大地构造位置上,它位于华北板块的西缘,虽历经多次构造运动但均以整体升降发育为主,盆地内沉积了自古生代以来的多套生储盖组合,蕴藏着丰富的油气资源。

鄂尔多斯盆地是一个地史过程中长期稳定发育起来的大型克拉通叠合盆地,在漫长的地质构造演化过程中,盆地经历了太古宙—古元古代的基底形成阶段,中新元古代的大陆裂谷发育阶段,早古生代的陆缘海盆地形成阶段,晚石炭世—中三叠世的内克拉通盆地形成阶段,晚三叠世—早白垩世的前陆盆地发育阶段以及新生代的盆地周缘断陷盆地形成阶段,共 6 个大的构造演化阶段。

鄂尔多斯盆地现今区域构造较为单一,其基本特点是:盆地周边构造活跃,断层发育;内部稳定,地层平缓;整体东高西低,向西平缓倾斜。盆地今构造格局莫基于中燕山运动,发展完善于喜马拉雅运动。根据现今构造形态,结合盆地演化史、构造发展史和构造特征,将鄂尔多斯盆地分为 6 个二级构造单元,即:盆地北部的伊盟隆起、东部的晋西挠褶带、南部的渭北隆起、西缘的逆冲构造带与相邻的天环拗陷以及中部的伊陕斜坡。

鄂尔多斯古岩溶气田主体位于稳定克拉通中央古隆起东北部的靖边—横山一带,是我国陆上最大的与风化壳有关的碳酸盐岩古岩溶气田(图 1-1)。气田的勘探始于 1989 年,以陕参 1 井和榆 3 井相继试出无阻流量 $28.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $13.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流为标志,历经了勘探(1989—1993 年)、开发前期评价(1993—1995 年)、试采(1996—1998 年)和正式大规模开发(1999 年至目前)4 个阶段,以靖边气田为中心向南北扩展,勘探范围逐步扩大,勘探开发面积已逾 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

第二节 区域地层

鄂尔多斯盆地是一个多构造体系、多旋回演化、多沉积类型的大型沉积盆地。古元古代末期的吕梁运动使鄂尔多斯盆地太古宇和古元古界岩系褶皱形成褶皱带;新元古代到早古生代,随着加里东褶皱带形成,鄂尔多斯盆地镶嵌于华北地台周缘,盆地内部比较稳定的刚性块体基本保持整体沉降特征,形成巨厚的沉积盖层。钻井资料显示,盆地结晶基底为太古宇和古元古界变质岩系,具有镶嵌增生结构,盖层包括下古生界碳酸盐岩和膏盐岩、上古生界海陆过渡相煤系地层及中新生界内陆碎屑岩沉积的三层结构。

盆地主体除缺失中上奥陶统、志留系、泥盆系、下石炭统外,地层基本齐全,沉积岩厚度约

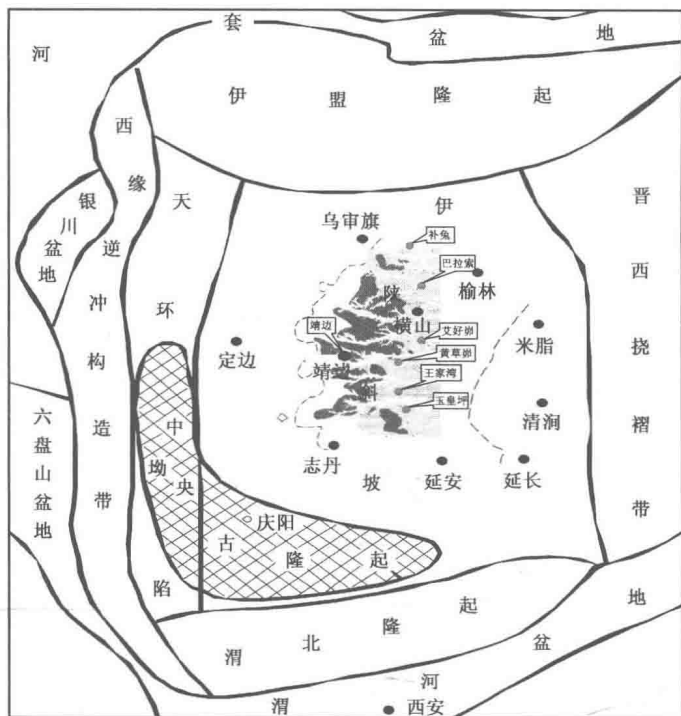


图 1-1 鄂尔多斯古岩溶气田构造位置图

6000m。其中,下奥陶统马家沟组依据古生物特征、沉积旋回特点和区域性标志层分布,从下往上划分为马一—马六段 6 个大的岩性段:马一、马三、马五段沉积水体浅,由含膏白云岩与盐岩、硬石膏岩及少量石灰岩组成;马二、马四、马六段沉积水体深,以石灰岩为主,夹少量白云岩。表现为 3 期大的海侵旋回组成,各段特征如下:

马一段:发育典型的潮上和潮间为主的云坪相沉积。岩性为深灰色含泥质白云岩、泥质白云岩夹膏质白云岩,微含陆源砂,厚度 27 ~ 85m,底部与寒武系呈平行不整合接触。

马二段:浅滩相与云坪相交替沉积。岩性为灰色、深灰色块状泥晶灰岩、白云质灰岩夹泥晶白云岩及泥质白云岩,厚度 45m 左右,向东加厚至 100m 左右。

马三段:为一套潮间云坪相及潟湖相的沉积。岩性为灰色、浅灰色泥晶白云岩、膏质白云岩夹含泥质白云岩、含膏白云岩及白云质泥岩,厚度 102 ~ 150m,地层由西向东逐渐加厚。

马四段:潮下浅滩—潮下开阔台地相的沉积。岩性为深灰色、灰色厚层块状泥—粉晶白云质灰岩、灰色颗粒石灰岩夹细粉晶白云岩,俗称豹皮灰岩,厚度为 164 ~ 184m,分布稳定,可对比性强,是马家沟组内良好的区域标志段。

马五段:蒸发作用为主的潮坪相沉积。岩性以白云岩为主,夹石灰岩及蒸发岩,厚度 312 ~ 357m。在马五段顶部广泛发育遭受较强烈物理和化学风化作用的具溶蚀孔洞的潮间白云岩,部分地区形成了伴有沟槽出现的白云岩风化壳,是天然气聚集的良好储层,直接与上覆石炭系本溪组呈平行不整合接触。按照岩性组合特征、微古生物及有关等时面标志层马五段可进一步自上而下划分为 10 个岩性段。古岩溶气田目的层主要为马五段顶部马五₁₋₅亚段,厚约

120m。其中,马五₁₋₅亚段上部地层(马六一马五₄^{1a})岩溶风化剥蚀严重、多数井地层不完整;下部地层(马五₄^{1b}—马五₅²)受岩溶风化作用弱、地层基本无缺失,部分井未钻穿(表1-1)。

表 1-1 马五段地层特征简表

段	亚段	小层	标志层	平均厚度(m)	风化影响
马六		马六		2.5	
马五	马五 ₁	马五 ₁ ¹		5.1	风化、地层缺失层位
		马五 ₁ ²		6.3	
		马五 ₁ ³		3.9	
		马五 ₁ ⁴	K ₁	5.0	
	马五 ₂	马五 ₂ ¹	K ₂	3.2	
		马五 ₂ ²		4.8	
	马五 ₃	马五 ₃ ¹		4.9	基本无地层缺失, 部分井未钻穿
		马五 ₃ ²		9.4	
		马五 ₃ ³		10.5	
	马五 ₄	马五 ₄ ^{1a}	K ₃	4.9	
		马五 ₄ ^{1b}		7.9	
		马五 ₄ ²		11.1	
		马五 ₄ ^{3a}		8.1	
		马五 ₄ ^{3b}		9.6	
	马五 ₅	马五 ₅ ¹		13.0	
		马五 ₅ ²		11.5	
	马五 ₆ —马五 ₁₀		未发现气显示		

马六段:为一套潮下开阔台地相沉积,形成的块状泥晶灰岩厚度 20m 左右。由于加里东期的剥蚀,盆地中部、北部的中央地带有局部残留,分布比较局限,广大的东部和南部地区均未保留马六段。

第三节 沉积古地理

奥陶纪时期,整个华北地台是一个地形十分平坦、地域十分广阔的浅水陆表海碳酸盐台地,海水进退较频繁。天然气主要产层段夹薄层状凝灰岩,生物贫乏,暴露标志普遍,反映了干燥浅水的沉积环境。白云岩分布面积巨大,从东经 107°~118°长达 900km 广阔的范围内,简单地沉积了呈带状分布的白云岩、膏岩和泥云岩,难以用前人解释的潮间—潮上这个有限的潮汐能量带进行解释,因此赵澄林等(1997)提出了“陆表海平面整体升降沉积模式”(图1-2)来解释鄂尔多斯盆地中、东部乃至华北地台马五段沉积相的分布。其要点是:

(1) 尽管沉积区域总体来说相对平坦,但其上也不乏凹凸相间的微地貌,这种地形的分隔为沉积微相的横向变化奠定了基础。

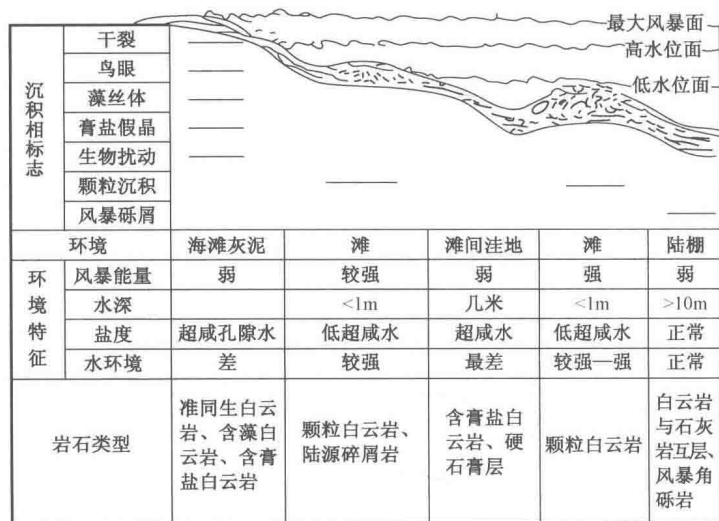


图 1-2 陆表海海平面整体升降沉积模式图(据赵澄林等,1997)

(2)早古生代以垂直升降为主的地壳运动和气候引起的海平面升降,为大范围内白云岩和膏溶角砾岩的分布提供了条件。海侵期时,海底高地形(水下隆起)因波浪作用较强发育浅滩,而滩间洼地水深不同可分别为云坪和云灰坪沉积;海退期时,高地形常常会露出水面,仅在其周围发育碳酸盐岩和碎屑岩混合沉积,高地形洼地因水较浅,能量弱,时而暴露时而淹没,在干燥气候条件下就形成类似潮间上一潮上的各种暴露标志,这种环境下沉积的灰泥也很易发生准同生云化形成白云岩。

(3)膏盐洼地与潮下泻湖是较之坪更具边缘轮廓、水体更深也更闭塞的干燥气候下沉积,通常因这里的沉降、沉积速度大于邻区,地层厚度更大。

赵澄林等(1997)认为该模式合理地解释了:(1)十几万平方千米范围内白云岩、膏溶角砾云岩、干缩裂纹角砾云岩的分布;(2)平面上沉积相带与古地形的密切关系,即相带变化基本平行古地形的长轴方向;(3)沉积旋回与全球海平面升降的密切关系,在马五₄—马五₁期总的海退旋回中,次一级海侵海退较为频繁,导致同一地区不同微相的多次重叠,形成多个生储盖组合,这有助于用地震地层学和层序地层学新方法进行地层对比和储层预测;(4)间歇暴露的极浅水陆表海同样可解释准同生白云岩、鸟眼、干裂等潮上带标志。现代研究表明,只要沉积区满足高盐度、高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值,白云岩化就可发生。

上述模式对整个华北地台的这种岩石类型展布能够很好地反映出来,具有模式的充分特点。但对于鄂尔多斯古岩溶气藏所处的伊陕斜坡区来说,它只是华北地台的西缘一小部分,滩和滩间的概念似乎显得过大,对于天然气勘探和生产来说规模不匹配,应该在上述模式的指导下再细分亚相乃至微相,同时潮间、潮上等潮汐作用概念仍应强调。潮涨潮落的自然规律自原始海洋诞生至今就没有停止过,且古代潮差比现代还要大。陆表海的确是极浅水,整个华北地台当时就处于一片浅水汪洋之中(冯增昭等,1990),但其中也不乏古陆,如本盆地的中央古陆和其周边的伊盟古陆。由于早奥陶世中央古隆起与其东部紧邻的盐洼高差为 300m 左右,二

者横向距离约 100km(图 1-3),从这个意义上说,在中央古隆起东侧的平缓斜坡上,完全可发育广阔的潮汐作用带,地层记录中的潮沟和潮道角砾岩和颗粒云岩也说明了这一点。

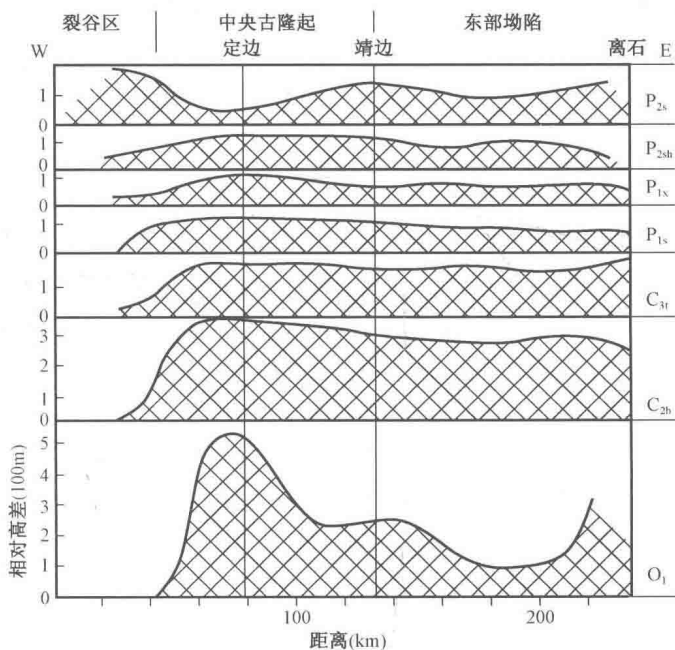


图 1-3 鄂尔多斯盆地中央古隆起不同时期剖面几何形态图(据张吉森等,1995)

沉积微相模式与构造环境相结合能更好地反映构造—岩相分布,构造环境应该被突出出来,中央古陆作为当时贺兰坳拉谷拉张形成的均衡补偿性隆起,与其东侧由补偿作用形成的边侧盆地一起相辅相成,共同控制了整个鄂尔多斯盆地中、东部地区的古地理格局。沉积微相的展布与其休戚相关,一个将构造环境与沉积微相展布相结合的沉积微相模式将更好地体现这一点。因此,在上述古地理背景基础上,充分考虑古地理、古构造环境、细分亚相乃至微相,建立适合古岩溶气藏地质特点的储层沉积模式,具有实践意义。

第四节 成藏条件及岩溶特征

鄂尔多斯盆地奥陶系蒸发潮坪沉积地层在加里东运动晚期整体抬升风化,形成了奥陶系局部成层连片的碳酸盐岩孔、洞、缝储层,为古岩溶气田形成奠定了基础。晚古生代区域下沉,石炭纪中晚期华北海和祁连海汇合,并逐渐向陆过渡。其中,中石炭统本溪组底部的铁铝质岩构成气田区域性盖层,奥陶系碳酸盐岩以及石炭—二叠系广覆海陆交互相煤系是古岩溶气田的重要气源。烃源岩埋藏并成熟排烃始于三叠纪,大量排烃在侏罗纪晚期至白垩纪早期,因此,侏罗纪—白垩纪是古岩溶气田烃源岩最重要的生排烃期。

从成藏特征来看,岩溶作用是古岩溶气藏形成的关键。鄂尔多斯盆地在加里东运动晚期整体抬升,使早古生代中奥陶世海退之后下古生界碳酸盐岩暴露地表,遭受了 1.3 亿年的风化剥蚀、雨水冲刷及化学溶蚀、淋滤作用,为气田雕琢出特有的古岩溶地貌景观。在地表沿溪流、

河道形成溶蚀沟槽,地下渗流区、潜流区和塌陷区的岩溶作用共同作用下,马五段顶部形成了不同发育程度的溶蚀孔、洞、缝系统并最终形成了大型的古岩溶气田。研究表明,气田形成除与大面积展布的马五段潮坪沉积有关外,主要是受长期风化淋滤、水流冲蚀形成的古风化壳中次生孔洞缝的发育和充填程度控制,并与所处古地貌部位息息相关。由于古岩溶对储层孔洞缝的形成和气藏分布十分重要,深入研究古岩溶控藏机制、落实古岩溶气藏油气富集规律十分必要。

第二章 古岩溶气藏地层层序

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组顶部广泛发育的碳酸盐岩储层,是古岩溶气藏形成的物质基础。这套碳酸盐岩地层形成受周期性海平面升降变动和干旱蒸发气候条件下的碳酸盐岩高生成率控制,具有沉积稳定、成层性好、韵律性强、地层层序转换频繁的特点。本章结合气田钻井、测井、岩心、测试资料的综合分析,详细描述碳酸盐岩古岩溶地层的接触关系、岩石组合、矿物成分、物性变化及高频旋回样式等特征,从沉积动力学角度剖析碳酸盐岩高频旋回地层层序及其成因过程,建立统一的小尺度高分辨率地层层序格架并揭示不同级次地层单元中储层发育规律,为类似地区碳酸盐岩地层层序研究提供参考。

第一节 地层层序划分方法

一、层序地层学方法

层序地层学是根据露头、钻井、测井和地震资料,结合有关沉积环境和岩相古地理解释,建立地层层序格架并进行地质综合解释的地层学分支学科。该学科近年来取得了较大突破,尤其是碳酸盐岩层序地层学在含油气系统、圈闭预测、储层与油气藏精细描述、烃源岩预测以及油藏开发动态模拟等方面的应用取得较大进展。鄂尔多斯古岩溶气藏是鄂尔多斯盆地所发现的特大型气藏,从整体上看,该气藏奥陶系碳酸盐岩风化壳地层在层序地层学方面的相关研究较少。为此,进行层序地层划分并建立精细的高精度等时地层对比格架既具有理论意义,又具有实践意义。特别是对于精确认识层序框架内风化壳储层的分布规律,掌握高频旋回特征及其与沉积微相、成岩作用、储层展布特征关系、相互间的共生关系十分必要。

目前,层序地层的研究理论方法主要有3种。一是基于年代地层框架下的沉积层序观点,认为层序是一套由相对整合的、彼此有成因联系的地层组成的,其顶、底以不整合或与之可对比的整合面为界的地层单位。二是成因地层层序的观点,其层序被定义为幕式沉积的产物,一个沉积幕包括了一个从最大洪泛期到下一个最大洪泛期的相对水平面升降变化的旋回。三是高分辨率地层层序的观点,认为地层的旋回性是基准面相对地表位置的变化产生的沉积作用、侵蚀作用、路过作用和沉积不补偿造成的饥饿性乃至非沉积作用随时间发生空间迁移的地层响应。地层记录中不同级次的地层旋回记录了相应级次的基准面旋回,而基准面旋回可以通过分析基准面旋回变化所反映的沉积可容纳空间与沉积物补给通量比值(A/S)的变化及所带来的沉积物保存程度、地层堆积样式、相序、岩石结果等特征来确定。

二、高分辨率层序地层学方法

20世纪90年代中期,T. A. Cross的高分辨率层序地层学(或高分辨率成因地层学)传入我国后,以其理论的新颖性、系统性和高精度地层对比技术,对我国的油藏描述产生了重要影响,并掀起了高分辨率层序地层学研究热潮。T. A. Cross根据沉积动力学过程——地层响应原理

提出的“基准面旋回与可容纳空间变化原理、沉积物体积分配原理和相分异原理”是高分辨率层序地层学的基本原理,也是高分辨率层序地层对比技术的理论基础,而高分辨率层序地层对比(或基准面旋回对比)则是高分辨率层序地层学的核心技术。

1. 基准面旋回与可容纳空间变化原理

Cross 等人认为基准面是一个相对于地表波状起伏且略向盆地方向下倾的抽象等势面,是沉积物搬运或沉积的能量平衡面。基准面的升降变化导致沉积物可容纳空间的产生或消失等沉积条件的改变,可用 A/S 值进行综合表征。基准面一次连续的上升和下降运动构成一个完整的基准面旋回,并导致地层的旋回性沉积响应,表明基准面旋回是地层沉积旋回的动力学成因,沉积旋回是基准面旋回的地层记录,因此基准面旋回要由地层的沉积旋回来识别。基准面旋回与沉积旋回都普遍具有多级次性,基准面穿越旋回可形成中、长期沉积旋回。最短期的沉积旋回被称为成因地层单元(或成因层序),它是在一次完整的基准面旋回期间由成因相关的沉积环境中堆积和保存下来的沉积物所组成,是符合相序或相组合基本定律(Walther 定律)的最小进积/加积地层单元。各种级次的沉积旋回都是在一定时间域内的时间地层单元,一个基准面旋回的顶、底及内部转换面都是等时的,因此沉积旋回对比是等时地层对比。

2. 沉积物体积分配原理

在基准面连续变化的时间域内,由于可容纳空间的变化,地表不同地理位置可分别产生侵蚀、沉积、路过不留和欠补偿沉积等 4 种不同的地质作用,导致基准面上升期堆积在盆地边缘相域内的沉积物体积增加,靠近盆地中心相域的沉积物体积相应减少;而在基准面下降期则堆积在盆地边缘相域内的沉积物体积减小,靠近盆地中心相域的沉积物体积相应增加。沉积物体积分配作用导致或影响旋回的对称性、成因层序的叠加样式、相分异和原始地貌要素的保存程度等相域特征的变化。

地层旋回的对称性变化表明,在时间地层单元沉积的范围内,由于体积分配作用沉积物的堆积是不连续的。因而,在不同地理位置,地层有时由岩石 + 岩石组成,有时由岩石 + 不连续界面组成。其时间对比关系是:冲积平原环境基准面下降期间形成的地层不连续面在时间上相当于沿斜坡向下临滨或三角洲环境中基准面下降期形成的地层;临滨位置的准层序上覆的洪泛面(海、湖侵冲刷不整合面)在时间上相当于海(湖)岸平原和冲积平原位置基准面上升期沉积的地层。这是基准面旋回等时对比的重要概念。

3. 相分异原理

伴随着可容纳空间的变化和沉积物的体积分配,保存在中、长期基准面旋回过程中同一地理位置不同层位相同相域地层的几何形态、相组合与相序、岩石多样性、层理类型和岩石物性的差异称之为相分异,它反映了随着沉积条件(A/S)的改变,相域内原始地貌要素类型和保存程度的变化。相分异作用有两种主要类型:一是相属性(原始地貌要素的保存程度及其相对比率)的变化;二是相类型或相序(地貌要素)的变化。

4. 高分辨率层序地层对比技术

以露头、测井、岩心和高分辨率地震反射资料为依据,以多级次的沉积旋回界面为参照面,

以成因层序为基本单元的地层划分对比就是所谓的高分辨率层序地层对比(或基准面旋回对比)。高分辨率层序地层对比的关键是识别地层记录中那些代表多级次基准面旋回的地层沉积旋回。高分辨率层序地层单元的界面既可以是不整合面或沉积间断面,也可以是沉积作用的转换面。由于沉积作用的转换面具有较严格的等时对比意义,因此常作为时间地层单元对比的优选位置。

短期旋回或较长期旋回的识别都是通过 A/S 值变化趋势分析进行的,通常露头/岩心资料是识别短期沉积旋回的基础,测井曲线是分析短期旋回及其叠加样式进而识别较长期旋回的最好手段,地震资料可以通过反射终端的性质识别三级层序界面以及内部较高级次的旋回,通过岩—电—震资料间的相互标定和验证可提高旋回识别的精度和可靠性。

鉴于高分辨率层序地层对比的理论先进性和操作实用性,以及鄂尔多斯古岩溶气藏陆表海碳酸盐岩风化壳地层表现的高频旋回的特点,采用高分辨率层序地层学方法进行古岩溶储层地层层序对比。

第二节 古岩溶气藏地层层序特征

一、地层接触关系

古岩溶气田所处鄂尔多斯盆地中部地区在加里东运动晚期整体抬升,使早古生代中奥陶世海退之后暴露地表的下古生界碳酸盐岩遭受了 130Ma 的风化剥蚀、雨水冲刷和溶蚀淋滤作用。在基准面穿越地表产生的剥蚀和路过无沉积作用控制下,气田所处盆地中部地区中上奥陶统、志留系、泥盆系以及下石炭统普遍缺失,并在紧邻风化壳的奥陶系马家沟组顶部形成一套次生溶蚀孔洞缝成层连片的古岩溶储层,即马五₁₋₅亚段。因此,从地层接触关系来看,马五₁₋₅亚段顶面为一区域性不整合面(图 2-1),表现为上覆石炭系本溪组铝土质泥岩直接覆盖在奥陶系碳酸盐岩之上。

二、岩性组合特征

鄂尔多斯古岩溶气田碳酸盐岩地层主要由白云岩(溶斑云岩、含藻云岩)及过渡性云岩(泥质云岩、灰质云岩、膏质云岩等)构成,泥岩、蒸发膏岩含量少,石灰岩分布局限(仅马五₅亚段)。薄片鉴定表明,马五₁₋₅亚段碳酸盐岩以晶粒结构为主,少见鲕粒、内碎屑,反映水体浅、能量低、循环不畅、干热蒸发的沉积特点。受周期性海平面升降变动和干旱蒸发气候条件下的碳酸盐岩高生成率控制,地层具有沉积稳定、成层性好、韵律性强的特点。通过岩心—薄片资料分析,总结出马五₁₋₅亚段典型岩性组合模式(图 2-1)。

(1) 马五₁亚段主要由溶斑云岩(含硬石膏结核铸模云岩)与含藻云岩构成,局部相变为泥质云岩或泥岩,厚度约为 20m。溶斑云岩位于上部,厚度为 15m,为潮上含膏云坪沉积;含藻云岩位于底部,厚度为 5m,为潮间含藻云坪沉积。

(2) 马五₂亚段主要由含藻云岩构成,局部相变为泥质云岩或泥岩,厚度约为 8m,为潮间含藻云坪沉积。