

碳酸盐岩风化壳岩溶储层 特征及天然气富集规律

——以靖边气田西侧为例

郭 庆 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

碳酸盐岩风化壳岩溶储层 特征及天然气富集规律

——以靖边气田西侧为例

郭 庆 主编

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩风化壳岩溶储层特征及天然气富集规律:
以靖边气田西侧为例/郭庆主编. —北京: 中国石化
出版社, 2016. 5

ISBN 978 - 7 - 5114 - 3963 - 5

I. ①碳… II. ①郭… III. ①鄂尔多斯盆地—碳酸盐
岩油气藏—研究 IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 085696 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010)84271850

读者服务部电话: (010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 7.25 印张 104 千字

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

定价: 32.00 元

编 委 会

主 编：郭 庆

成 员：彭朝全 孙 卫 郭亚斌 罗文山

曾令帮 周义军 王 洵 王 妍

余小雷 黄鹏程 王一军 李 维

王 鹏 惠智雄 景春利 白一男

前 言

碳酸盐岩油气勘探是现今油气勘探的重要领域。截至目前统计结果表明,其储量规模约占全部的60%,其油气产量也已达到50%以上。20世纪50~70年代,全球碳酸盐岩勘探进入高峰期,国内外众多学者统计结果证实:全世界碳酸盐岩油气田已探明储量为 $1.43415 \times 10^{13} \text{ t}$;其中天然气已探明储量达 $6.8414 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占48%。在国内,自70年代任丘油田碳酸盐岩勘探获得突破,时至今日,碳酸盐岩油气勘探已取得丰硕成果,进入勘探的高峰期。截至目前,已发现并取得良好勘探效果的大型油气田主要有:鄂尔多斯盆地地下古生界的靖边气田、塔里木轮南气田、塔中气田、四川普光气田、龙岗气田等。

鄂尔多斯盆地分布面积广阔($37 \times 10^4 \text{ km}^2$),盆地下古生界碳酸盐岩天然气勘探生烃面积大(大于 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$)。截至目前,探明储量区主要集中在 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的范围内,整体勘探程度低,勘探潜力巨大。历经多年的勘探开发,靖边气田本部井位钻探程度已经很高,大部分区域已经部署开发井位,储量面积已动用。为了保证靖边气田的产能,近年来开始在靖边气田周边开展以风化壳气藏为目标的天然气扩边勘探。已经在靖边气田西侧及东侧获得了突破,有望形成新的储量接替领域,也为靖边气田的稳产、高产提供了保障。

本书在科研实践的基础上,以鄂尔多斯盆地靖边气田西侧为重点研究区域,应用相关测试分析技术,深入研究盆地下古生界碳酸盐岩风化壳储层的形成机理,以此为理论指导,综合沉积岩石学、构造地质学、石油地质学、测井学、地质统计学、地震地质学、地震沉积学等科研理论,大量收集前人研究成果,充分消化、吸收,综合应用岩心及铸体薄

片观察、扫描电镜照片观察、测井数据解释及运算分析、地震反演预测、地震相分析、含烃检测技术等技术手段开展地震—地质综合分析研究,较为系统全面地介绍了盆地下古生界碳酸盐岩风化壳储层特征及相配套的地震、地质和测井预测方法,结合国内外其他碳酸盐岩储层预测评价经验对鄂尔多斯盆地该领域储层开展综合评价并探讨其天然气富集规律。本书综合地质、测井、地震开展分析研究,有理论介绍,也有具体的研究分析过程,还有相关的测试分析技术以及测试结果的分析方法。

本书共分为五章。第一章介绍区域地质概况及地层系统,包括盆地及研究区地质概况、地层系统、气藏类型,并对该领域地震、地质条件进行了评价。第二章对该领域储层特征进行了系统分析,重点利用地质及测井分析手段,介绍了该领域沉积相与沉积微相、岩石学特征、成岩作用、孔隙类型及其充填物。第三章和第四章主要是应用地震技术手段分别从地震资料处理和解释两个方面进行研究。第三章从该领域储层的地球物理特征入手进行了地震处理技术攻关。第四章包括地震资料解释及储层预测思路、相关储层预测技术及预测成果等。第五章综合以上章节的研究结论,探讨分析风化壳沟槽系统、沉积微相、岩性、裂缝等与天然气富集的关系,并对该领域碳酸盐岩风化壳储层的展布及下步勘探前景做出了预测。

本书编写过程中,得到了西北大学孙卫,西安石油大学徐波、王妍,长庆油田分公司油气工艺研究院王洵懿,东方地球物理公司研究院长庆分院彭朝全、郭亚斌、罗文山、曾令帮、周义军、余小雷、王一军、李维、黄鹏程、惠智雄、白一男、王鹏、景春利等许多同事和同行的帮助和支持,在此表示衷心的感谢!

由于碳酸盐岩领域研究的理论和实践等方面的发展和进展日新月异,加之其本身的复杂性与难度,涉及面较为广泛。同时限于作者本人水平有限,相关内容不能全面反映到本书中,欠妥之处,敬请各位同行和读者给予批评指正。

目 录

第一章 区域地质概况及地层系统	(1)
第一节 区域地质概况	(1)
第二节 研究区地层系统	(6)
第三节 气藏类型及气藏剖面对比	(11)
第四节 气层厚度	(14)
第五节 地震地质条件	(18)
第二章 储层特征分析	(19)
第一节 沉积相与沉积微相	(19)
第二节 岩石学特征	(28)
第三节 成岩作用	(35)
第四节 孔隙类型及孔隙充填物	(46)
第三章 地震处理技术及效果	(54)
第一节 储层地球物理特征	(54)
第二节 地震处理技术	(57)
第四章 地震解释技术及成果	(68)
第一节 地震解释及储层预测思路	(68)
第二节 地震储层预测技术	(69)
第三节 地震预测成果	(85)
第五章 储层综合评价	(87)
第一节 天然气富集规律	(87)
第二节 储层综合评价及展布	(91)
参考文献	(94)

第一章 区域地质概况及地层系统

第一节 区域地质概况

鄂尔多斯盆地作为我国第二大沉积盆地，地处陕西、甘肃、宁夏、内蒙古、山西五省区境内，北靠阴山，南与秦岭接壤，东接吕梁，西邻六盘、贺兰，是在漫长的地质演化中形成的一个大型的克拉通盆地，具有多构造体系、多沉积演化旋回的显著特点。截至目前，鄂尔多斯盆地已发现了丰富的石油及天然气资源，出油气层位从老到新(古生界、中生界)均有分布，碎屑岩及碳酸盐岩储层均获得突破，成为我国现今极其重要的石油及天然气生产基地。

一、盆地现今格局

盆地现今构造格局总体表现为一个不对称的南北走向的矩形盆地，西翼陡窄，东翼宽缓。相对于盆地内部地层倾角不足 1° 的简单构造特征，盆地周缘褶皱、断裂较为发育。

盆地现今构造格局开始于燕山运动中期，最终发展完善于喜山运动。早白垩世末，盆地的沉积格局发生变化，东部整体抬升，西部冲断，南北双双隆升，盆地内部受到构造运动影响发生反转，形成了大型的西倾单斜，一直向西延伸，最终与天环向斜连接。不同于盆地内部，盆地周缘构造复杂，断裂发育，盆地深层构造又趋于稳定。综合目前的研究结果，依据盆地现今的构造格局及其演化历史，整个盆地可划分为6个一级构造单元(图1-1)。中部大面积分布的陕北斜坡，北面是伊盟隆起，南部发育渭北隆起，向东发育晋西挠褶带，向西依次发育天环拗陷、西缘复杂构造带。

图 1-1 鄂尔多斯盆地构造单元图

二、区域地质概况

鄂尔多斯盆地这一典型的大型叠合盆地,是在早元古代结晶基底的基础上发育而来,经历的演化过程主要有:中晚元古代拗拉谷盆地发育期、古生代稳定克拉通盆地发育期、中生代类前陆盆地发育期及新生代周边断陷盆地发育期。

盆地中晚元古代坳拉谷盆地发育阶段,此时的盆地实际上是贺兰裂谷与南北大洋之间夹持的一个陆块。在晋宁运动的影响下,贺兰、秦晋坳拉谷被充填黏合而关闭,盆地发展演化的基础从而被奠定。古构造呈现中部相对较为平缓,隆坳相间分布,东北部则较高,并向西南倾斜的格架,裂谷沉积厚度达 1000m。

早古生代,盆地中部一显著的正向构造单元——中央古隆起开始发育,其形成背景是因盆地被残存的坳拉谷在东西向夹持以及加里东地槽在南北向的控制。该隆起在寒武纪已形成雏形,开始发育于奥陶纪。因该隆起位于盆地西南部地区,并非位于盆地中央,故遵从习惯称之为中央古隆起。其分布面积约为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,发育于黄陵、庆阳、定边、盐池境内,近南北走向,南端向东展布,延伸至富县,平面上呈“L”形,整体表现为东部缓西部陡。该隆起的形成普遍认为是由于奥陶纪裂谷扩张,导致裂谷肩处发生翘升而形成。故而在其东侧延川、绥德、榆林一带,受均衡调节作用影响,伴生发育一南北向边侧坳陷,因其发育位置,称之为(内)陆棚盆地亚环境。二者长期共同作用,相互协调,不仅控制着盆地前石炭纪古地貌、古构造以及沉积相的展布,而且对古岩溶储层的发育及下古生界天然气的生成、运移和聚积也起着重要作用。

盆地晚古生代滨海平原发展阶段,此时的构造格局仍为西隆东坳,是奥陶纪面貌的继承,但由于各个时期的隆起形态、规模及展布的差异,在构造细节产生了一定变化。石炭纪盆地南北展现较高隆起,由于楔入的西侧坳陷的作用,在铁格苏庙至定边地区,出现了鞍状特征。二叠纪,盆地开始接受陆相沉积,中部古隆起逐渐消亡,石炭纪东部和西部的沉降最终被南部和北部的沉降代替。

盆地中生代内陆盆地发展阶段,古构造格局仍然继承了西隆东坳的特点。晚三叠世末,盆地西部在强烈的自西向东逆冲推覆作用影响下,在其前缘地区形成坳陷。盆地东部隆、坳形态的位置则明显西移,形成志丹—铜川坳陷。至中侏罗世,受燕山运动的强烈影响使盆地发生构造反转,西抬东冲,同时伴随南北隆升,内部则发育相对平缓的低角度西倾单斜并延续至今,最终形成了现今的区域构造格局。

三、奥陶系地层划分

奥陶系地层在盆地周缘广泛出露,主要集中在东、西和南部,其厚度一般为 $1000 \sim 2000 \text{ m}$ 。盆地内部则没有出露,有上覆地层覆盖,其上普遍沉积上古生界、中生界和新生界地层。但盆地各层系地层厚度在不同区带不尽相同,究其原因主要是由于所历经的地史演化及构

造运动不同。在古生界地层中,志留系、泥盆系和下石炭统普遍缺失,同时由于加里东运动,在盆地中东部奥陶系沉积地层也同样遭受了严重地剥蚀。受到印支及燕山构造运动的影响,盆地东部的中生界地层同样被大量剥蚀,致使三叠系和侏罗系的地层出露地表。相比而言,盆地的中部及西部受到的影响不大,稳定沉积,地层保存较全并且地层沉积的厚度也较大。

盆地内部奥陶系地层的沉积相对广泛且稳定,自下而上主要沉积有冶里组、亮甲山组、马家沟组、平凉组和背锅山组等。不过各个区域略有不同,如冶里组、亮甲山组仅分布在盆地东部、南部和贺兰山地区;马家沟组除了北部伊盟隆起,其余地区均有沉积,其范围广;马六段在盆地内部沉积后剥蚀严重,仅仅在盆地的南部地区局部保存。相对而言,盆地内的平凉组和背锅山组沉积分布则较为局限,平凉组仅仅在盆地西缘和南缘有分布;而背锅山组分布范围则更加局限,仅在盆地南缘的渭北、陇县一带沉积。在区域构造的影响下,沉积间断明显存在与奥陶系上、中、下统之间。

1. 冶里组

仅在盆地东缘、南缘及西缘的贺兰山地区分布。其中在盆地东缘,冶里组沉积地层厚度自北向南逐渐减小,其厚度大约为 20 ~ 70m,岩性主要是灰、浅灰、灰黄色泥质白云岩夹竹叶状白云岩。在南缘,冶里组沉积厚度明显增加,约为 80 ~ 120m,岩性以薄—中层白云岩、泥质白云岩为主,颜色为灰、灰黄色。在西缘贺兰山,冶里组沉积厚度相对最薄,其平均沉积厚度仅有 10m 左右,岩性以灰色薄—中层白云岩为主,含燧石、泥质。下伏凤山组与冶里组是连续沉积。

2. 亮甲山组

与冶里组具有相同的分布范围,岩性以中厚层白云岩为主,富含燧石条带及团块,偏关和清水河一线,底部沉积有黄绿色页岩,由北向南逐渐消失。由于本组含燧石白云岩在全区稳定沉积,故常将其作为亮甲山组的对比标志层。在怀远运动的影响下,使不同程度的剥蚀

现象出现于亮甲山组顶部。由南向北, 沉积厚度逐渐增大, 由 50m 增至 110m。

3. 马家沟组

主要在盆地中、东部沉积分布, 岩性以碳酸盐岩为主, 偶夹蒸发岩。其历经了三次较大规模的海进、海退旋回, 参考古生物、沉积旋回以及区域性对比标志层, 马家沟组在纵向上由老至新依次可划分成六个岩性段: 马一至马六。在整个华北地台中、东部, 马一、马三、马五段岩性以白云岩为主, 局部发育有硬石膏质白云岩和石灰岩; 马二、马四、马六段岩性则以石灰岩为主, 局部夹白云岩。但在特殊的古地理环境作用下, 鄂尔多斯盆地本部, 马一、马三、马五段岩性以白云岩、硬石膏岩和盐岩为主, 局部发育少量石灰岩; 马二、马四、马六段岩性为白云岩和石灰岩, 局部有硬石膏岩沉积。马六段, 在盆地本部由于加里东期构造运动的改造, 沉积地层普遍遭受风化剥蚀, 除在盆地南部具有一定规模地保存外, 其他地区均为零星分布, 岩性以石灰岩、粉晶、颗粒白云岩为主。

盆地内部各个地区马家沟组地层沉积均有一定的差异性, 究其原因主要是由于海侵作用范围以及构造升降运动的不均衡性所致。晚奥陶世的加里东期构造运动使盆地整体抬升, 使其遭受了 1.5 亿年以上的沉积间断, 直至中石炭世才重新开始接受上古生界地层沉积, 致使其顶部地层均遭受了不同程度的风化淋滤和剥蚀, 最终在该不整合面附近形成了大型风化壳岩溶天然气藏。盆地下古生界奥陶系马家沟组天然气藏主要是一套古风化壳岩溶型储层, 岩性以粉晶白云岩及含石膏结核孔洞型粉晶白云岩为主。

4. 平凉组

盆地本部并没有沉积, 主要沉积于盆地南缘和西缘。上下分为两段, 在盆地西缘下段命名为乌拉力克组、拉什仲组; 上段命名为公乌素组、蛇山组。岩性主要以深水页岩、钙屑、碎屑浊积岩夹灰绿色砂质泥岩为主, 其沉积厚度一般为 300 ~ 600m, 最厚厚度达 1000m 以上, 分布在西部贺兰山地区。南部岩性则主要以石灰岩为主, 包括有厚层块状砂屑、泥晶、颗

粒和生物石灰岩,其沉积厚度为 300 ~ 600m。

5. 背锅山组

分布范围相对局限,仅在南缘的陇县至耀县一带,西缘的固原,北缘的乌拉特前旗有分布。其岩性主要以灰色、灰白色块状泥—粉晶灰岩、砾屑、生物灰岩,局部夹页岩、角砾状石灰岩、含灰角砾泥岩为主。沉积厚度南部较厚,一般沉积厚度为 300 ~ 450m,在泾阳地区达到最厚,约为 1300m;西部、北部相对减薄,西部沉积厚度为 130m,北部沉积厚度最薄,仅有不到 30m。

第二节 研究区地层系统

研究区地处鄂尔多斯盆地一级构造单元——伊陕斜坡中部,靖边气田西侧。北部以乌审旗为界,南部到延安,西部以吴起为界,东部则以安塞为界,南北长约 170km,东西长约 50km,面积为 8500km²。为了搞清楚该区域五段各小层储层发育特征及天然气富集规律,本文针对研究区开展了深入细致的研究分析工作,具体的研究层位为下古生界奥陶系马家沟组马五₁^{1~4}、马五₂^{1~2}和马五₄¹,一共 7 个小层。

针对研究区地层的等时精细对比与划分,是继续研究气层分布、沉积相划分及展布特征最为基础和关键的前提,对油气田的勘探开发具有深远的现实意义。

此次研究过程,针对研究区地层展布的实际,主要采用标志层法、临井对比法和地层等厚度对比法这三种划分方法。结合研究区 172 口探井的测井、录井资料,综合前人研究结果,得出详细的地层对比划分结果。

一、马六段

研究区地处盆地中部靖边气田西侧,受加里东期构造抬升作用的影

响,该地层遭受大面积剥蚀。目前研究区仅在北部和南部区域 10 口探井中钻遇有马六段地层,在研究区范围内钻遇率相对较低,所占比例不足 6%。分析结果表明:研究区范围内马六段沉积所处区域抬升高度相对较大,在前石炭纪岩溶古地貌中可能处于残丘位置,故遭受剥蚀程度可能性最大,残余厚度薄,其残余地层厚度平均值为 6.7m。

研究区范围内奥陶系与石炭系的界线,由于遭受区域剥蚀层位变化较大,具体应为奥陶系马家沟组马六段或马五段各小层顶界与上覆石炭系本溪组的界线。加里东运动时期,由于华北陆缘海整体抬升,鄂尔多斯盆地也随同抬升,致使奥陶系中上统及下石炭统在盆地本部缺失,同时遭受了近 1.5 亿年的风化剥蚀,最终导致盆地下奥陶统马家沟组各小层不同程度的缺失,自东向西剥蚀强度逐渐增强。其结果造成奥陶系顶面构造高低错落变化,之后石炭系本溪组地层“填平补齐”的覆盖在奥陶系地层之上,上部沉积海陆交互相的煤系地层,下部沉积海相的碳酸盐岩地层,不整合面在中间将其分开,该不整合面即为盆地下古生界奥陶系马家沟组各小层的顶界。

二、马五段

类同于靖边气田,研究区范围内下古生界主力储层仍是奥陶系马家沟组马五段上部的碳酸盐岩风化壳岩溶储层。马五段自下而上划分为 10 个亚段:马五₁₀、马五₉、……、马五₁。其中靖边气田及其周缘的第一主力产气层是马五段顶部的马五₁、马五₂亚段,另外是作为第二主力产气层的马五₄亚段。依据研究区内 172 口探井的测井、录井资料,结合前人划分方案,统计分析其岩性组合、气层分布等特征,对区内该研究层段的层系又进行了详细划分,划分结果见表 1-1。此次研究过程,重点针对研究区范围内马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₁⁴、马五₂¹、马五₂²和马五₄¹ 共计 7 个层的顶底界进行了统层划分,对部分井的分层数据进行了修正。

靖边气田西侧周边马五段地层厚度一般为 70 ~ 350m,其平均值为 220m。根据马五段马五₁—马五₄亚段岩性和沉积旋回特点,在研究区范围内自上而下又被划分为十个小层,具体的岩性及沉积特征表现为:

表 1-1 研究区马五段地层划分结果

系	统	组	段	亚段	小层	地层平均厚度/m	标志层
奥陶系	中统	峰峰组	马六段			6.7	
	下统	马家沟组	马五段	马五 ₁	马五 ₁ ¹	5.7	
					马五 ₁ ²	5.6	
					马五 ₁ ³	4.1	
					马五 ₁ ⁴	5.2	K1(凝灰岩)
				马五 ₂	马五 ₂ ¹	3.4	
					马五 ₂ ²	4.9	K2(白云岩)
				马五 ₃	马五 ₃ ¹	5.7	
					马五 ₃ ²	8.3	
					马五 ₃ ³	9.1	
				马五 ₄	马五 ₄ ¹	11.5	K3(凝灰岩)
					马五 ₄ ²	12.0	
					马五 ₄ ³	13.6	
				马五 ₅	马五 ₅ ¹	13.5	
					马五 ₅ ²	16.6	
				马五 ₆		45.7	
				马五 ₇		19.9	
				马五 ₈		19.5	
				马五 ₉		15.3	
				马五 ₁₀		11.7	

1. 马五₁ 亚段

马五₁¹ 小层。灰、灰褐色细粉晶、含硬石膏结核粉晶白云岩、薄层鲕粒白云岩、白云质泥岩。其顶部遭受风化淋滤,发育裂缝及溶孔、洞,多被铝土质、泥质充填。上部发育溶蚀孔、洞,可见结核溶模孔,常含气;下部泥质含量明显增高。电测曲线表现为电阻率中高值,声波时差低呈锯齿状,自然伽玛下高上低,呈台阶状等特征。研究区北部该层遭受风化剥蚀严重,局部缺失,石炭系地层在其上“填平补齐”沉积,南部则广泛沉

积。研究区井位残余厚度变化范围为 1.7~9.2m, 平均值为 5.1m。

马五₁² 小层。灰、浅灰色粉晶、纹层状白云岩, 含硬石膏结核、偶夹灰色砂屑, 白云岩。上部发育纯白云岩, 下部发育有两层白云质泥岩; 岩溶角砾岩薄层局部发育, 具石膏假晶。溶蚀孔、洞、缝发育, 普遍含气。电测曲线表现为电阻率高值, 声波时差低平, 自然伽马低平, 下部有两个指状高峰。研究区井位残余厚度变化范围为 1.2~8.3m, 平均值为 5.4m。

马五₁³ 小层。灰、浅灰色含硬石膏结核粉晶白云岩, 及其溶模孔粉晶白云岩夹角砾状、纹层状白云岩, 颗粒白云岩薄层局部发育, 伴随强烈的岩溶作用, 发育大量溶蚀孔、洞, 发育的张性微裂缝多由硬石膏转化时伴生形成, 是研究区范围内的主力气层。电测曲线表现为电阻率较低, 声波时差较高, 自然伽马为箱状特征, 密度值较低。研究区钻遇井位残余厚度变化范围为 1.8~7.5m, 平均值为 4.2m。

马五₁⁴ 小层。底部 1.5m 左右范围内发育深灰色凝灰岩夹白云质泥岩; 中部 2m 左右范围内主要为浅灰色粉晶白云岩, 局部含硬石膏结核; 顶部 1.5m 左右范围内发育深灰色白云质泥岩。较好的孔隙型储层集中分布在中部粉晶白云岩中, 普遍产气。电测曲线表现为呈“反燕尾状”的双侧向曲线, 自然伽马呈“燕尾状”(上、下高中间低), 声波时差、密度曲线特征与伽马曲线类似。研究区井位残余厚度变化范围为 0.8~7.6m, 平均值为 4.8m。

马五₁⁴ 底部发育的深灰色凝灰岩为研究区范围内的主要区域标志层(K1)。岩心观察其具疏松、易剥落、手感细腻等特点。在电测曲线上表现为两高、两低、一大的特点, 即高伽马和时差、低密度和电阻以及大井径, 易于寻找和区分。由于其在区域上广泛分布且稳定性强, 常被用于测井和录井对马五₁ 亚段底界的识别标定。

2. 马五₂ 亚段

马五₂¹ 小层。底部岩性为深灰色白云质角砾岩、泥质白云岩, 顶部为深灰色细粉晶白云岩、粉晶白云质角砾岩, 顶部发育较致密的白云岩储层, 可含气。电测曲线表现为双侧向曲线上高下低, 声波时差、自然伽马曲线均为上部低平、下部指状突起。研究区钻遇井位残余厚度变化范围为

2~8.5m, 平均值为3.3m。

马五₂² 小层。浅灰色粉晶白云岩, 硬石膏结核局部发育, 偶夹白云质角砾岩, 水平裂隙密集发育。电测曲线表现为一高三低的特征, 即高电阻率、低声波时差、低密度、低箱状伽马, 作为另外一个可进行区域地层对比的区域标志层(K2), 是上下邻层的明确界限。研究区钻遇井位残余厚度变化范围为2.3~7m, 平均值为5.1m。

马五₂² 底部发育的灰褐色细粉晶云岩为研究区范围内的另一主要区域标志层(K1)。岩心观察其具大量已被方解石胶结的石膏假晶, 岩性纯, 岩心密集发育水平裂缝, 部分斑点已被灰化。本段电测曲线特征明确, 区域上广泛稳定分布, 作为辅助标志层常被用于测井和录井对马五₂ 亚段底界的识别标定。

3. 马五₃ 亚段

马五₃¹ 小层。中上部岩性为深灰色白云质泥岩, 偶见凝灰质泥岩。下部岩性变化为裂缝较为发育的灰色粉晶白云岩。电测曲线表现为电阻率中高值, 密度低, 声波时差为锯齿状, 中上部高下部低。

马五₃² 小层。深灰色泥质白云岩、泥云质角砾岩。角砾结构普遍发育, 溶洞、缝及角砾间几乎完全被泥质充填。局部发生较强的去白云石化作用。电测曲线表现为双侧向中高值, 声波时差为高锯齿状特征, 自然伽马为大段高伽马, 中段局部有所降低。

马五₃³ 小层。大段深灰色角砾状白云质泥岩背景下局部发育薄层状微晶白云岩。部分井位在该层底部含硬石膏。个别井由于粉晶白云岩中具有溶模孔, 可发育含气层电测曲线特征与马五₃² 类似。

4. 马五₄ 亚段

马五₄¹ 小层。研究区钻遇井位揭示该层地层厚度变化范围为3.8~14.5m, 其平均值为11.5m。顶部5m左右岩性为灰色粉晶、角砾状白云岩。裂缝及溶蚀孔、洞发育, 且稳定分布, 钻井证实也是主要产气层之一。

中下部7m左右为互层结构, 即灰色泥质白云岩、深灰色白云质泥岩