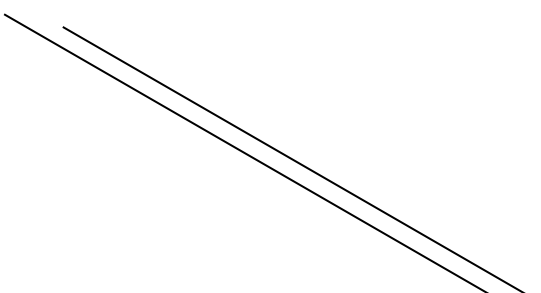


延安气田富县区域下古生界马家沟
组天然气勘探开发理论与实践

刘宝平 著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

延安气田富县区域下古生界马家沟组天然气勘探开发
理论与实践/刘宝平著. —成都:西南交通大学出版
社, 2022.3

ISBN 978-7-5643-8432-6

I. ①延… II. ①刘… III. ①鄂尔多斯盆地—古生代
—天然气—油气勘探—研究—富县 IV. ①P618.130.8
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 257865 号

Yan'an Qitian Fuxian Quyu Xigushengjie Majiagouzu Tianranqi Kantan Kaifa Lilun yu Shijian

延安气田富县区域下古生界马家沟组天然气勘探开发理论与实践

刘宝平 著

责任编辑	陈 斌
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	17.5 字 数 297 千
版 次	2022 年 3 月第 1 版 印 次 2022 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8432-6
定 价	68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

天然气作为一种清洁的能源,在能源消费结构中所占的比重逐年提高。鄂尔多斯盆地下古生界马家沟组碳酸盐岩天然气资源丰富,延安气田主体主要分布在靖边、志丹、延安一带,为国家的经济发展和服务民生做出了突出贡献。

延安气田富县等南五县区块位于盆地东南部,更靠近中央古隆起区和渭北隆起带,特殊的大地构造位置造成了研究区气藏综合地质条件与前述各区块下古生界马家沟气藏均有一定差别,因此成藏模式不能完全套用,勘探思路与勘探部署工作也不能照搬应套。大部分试气工作结果表明:研究区试气产能变化范围大,整体气井单井产能中等偏低、存在高产与低产共存等特点。开发实践表明:压力下降快、产水明显、稳产难等问题,导致气藏开采面临严峻的压力。近年来,在深化下古生界马家沟组地质认识和高效勘探开发关键技术的引领下,在富县、甘泉等区域进行多年的天然气勘探工作终于取得工业性突破。

本次研究在岩心、野外踏勘、分析测试、测井、录井资料基础上,结合区域构造沉积背景,开展了精细地层划分对比,研究了现今构造、古构造、沉积环境和古地貌。从生、储、盖、运、圈、保六要素分析了研究区能形成优质巨大的天然气资源潜力的油气藏的地质条件,认为气藏受古(今)构造、古地貌、储层、盖层、烃源岩以及运移通道多元耦合关系控制;并丰富创新了古地貌和古地质地层出露图件的编图方法,

总结了形成高产气井的基本条件和测井、录井等一体化综合识别法则；
在成藏期次研究基础上,综合分析成藏主控因素及工区马家沟组上、中、
下气层组的成藏模式,揭示了研究区天然气富集的客观规律。

作 者

2021年8月

目 录

第一章 绪 论	001
第一节 研究背景	001
第二节 研究区概况	002
第三节 研究思路及关键技术	003
第四节 研究内容	005
第五节 完成工作量	007
第六节 取得的主要认识	009
第二章 地层划分与对比	011
第一节 区域地质背景	011
第二节 精细地层划分与对比	019
第三节 地层发育特征	030
第四节 现今顶面构造特征	048
第三章 沉积相分析	053
第一节 区域沉积演化概况	053
第二节 沉积相划分标志	056
第三节 沉积相类型	065
第四节 区域内沉积相发育特征	069
第四章 古地貌及其构造特征	078
第一节 盆地古岩溶地貌	079
第二节 研究区古地貌恢复	081
第三节 区域古构造恢复及其特征	090
第五章 烃源岩评价	096
第一节 烃源岩有机地球化学特征	096
第二节 烃源岩发育特征	108

第三节	烃源岩生烃能力评价	112
第六章	储层特征	119
第一节	储层岩石类型及分布特征	119
第二节	白云岩储层成因分析	128
第三节	储层成岩作用	137
第四节	储集空间特征	143
第五节	储层物性特征	154
第六节	储层影响因素分析	186
第七节	储层分类评价	200
第七章	气藏形成演化与成藏模式分析	209
第一节	气源分析	209
第二节	成藏期次分析	217
第三节	盖层特征	222
第四节	天然气运移聚集特征	231
第五节	圈闭条件分析	233
第六节	源储配置关系及成藏模式	234
第八章	气藏主控因素及有利区预测	243
第一节	气层分布特征	243
第二节	气藏主控因素	252
第三节	有利区预测	263
第九章	结 论	268
	参考文献	271

第一章 绪 论

第一节 研究背景

鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩天然气资源丰富，已探明含气层位于马家沟组。盆地内奥陶系马家沟组含气层在区域上都有富集，目前产气区域主体都位于南五县区块的北部，靖边气田、延安气田西部气区在马家沟组都有产气突破，对鄂尔多斯盆地马家沟组气藏成藏的认识主要集中在这些区域。延安气田与北部靖边气田一样，位于正宁-环县-定边-鄂托克旗一线“L”形中央古隆起的东侧，白云岩是盆地奥陶系最重要的有效储集岩类，前人已从沉积、构造、成岩等角度分析东侧马家沟储层的形成机理及其影响因素，古地貌恢复发现石炭系沉积前中央古隆起东侧古地貌处于岩溶斜坡位置，其间岩溶高地、斜坡、洼地及沟槽间互出现，逐渐过渡为盐洼地。从中奥陶世-早石炭世经历了长达 1.3 亿年的风化、剥蚀和淋滤作用，使该区域内马五段储层经历了白云化、去白云化、去膏化、溶蚀、角砾化等作用，使岩溶高地、岩溶斜坡储层孔隙得到极大的改善；逐渐往东岩溶盆地区，岩溶储层孔洞充填程度高，逐渐转为白云岩致密储层。研究发现目前各区块内主力产气层马家沟组马五段基本都位于奥陶纪古隆起至拗陷区的过渡区，该区域的构造格局和古地理特征为气藏的形成提供了有利的成藏条件，为周边区域马家沟组气藏的研究奠定了必要的理论、勘探和实践基础。

南五县区域紧邻目前主要的产气区，北部吴起-志丹地区下古生界马家沟组，已形成规模性气藏，多口井试气获得高产气流。已有的盆地烃源岩评价成果认为南五县区域上古生界烃源岩厚度及生烃潜力较北部邻区差，但下古生界多口井试采获得工业气流，且长庆油田在宜川-黄龙地区下古生界试气有 8 口井获 1.12 ~ 3.70 万 m³/日天然气工业流，中石化在富县牛武地区试气也获得了工业气流，预示着该区下古生界有着良好的天然气资源潜力。南五县区块北邻延安气田延气 2-延 128 天然气规模生产区和延长气田西部气区，为延长气田南部扩边的重要区域。

鄂尔多斯盆地奥陶纪时期在盆地中南部存在一个古隆起,南五县区块相较北部区块更靠近古隆起区,造成其气藏综合地质条件与前述各区块下古生界马家沟气藏均有一定差别,因此成藏模式不能完全借用,勘探思路与勘探部署工作也不能照搬照抄。目前该区虽已有 231 口井钻遇马家沟组,但试气井数量少,对区域的认识不清,地质认识有待进一步加深;多口井马五段有气测显示,但试气效果差,对制约气井产能的因素认识不够,对气层的识别也明显不足。马家沟组成藏综合条件认识的不明确,对勘探的指导具有严重的制约作用。因此,针对马家沟组还需继续研究,以取得更大突破与进展。

第二节 研究区概况

本次研究区位于南五县,包括宜川、富县、黄陵、洛川、黄龙五个行政县,面积 $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区域隶属于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的南部,南接渭北隆起,东接晋西挠褶带。目前本次研究选取 $9\ 696 \text{ km}^2$ 的区块展开,工区内共收集 445 口井资料,其中富县、宜川境内有 231 口井次钻遇马家沟组,有 175 口井钻穿马五₄, 59 口井钻穿马五₁₀。截至目前,富县地区马家沟组共试气 67 口 79 层,无阻万方以上 22 口,占比 32.8%, 34 口低产。其中,2018 年,马家沟组共试气 41 口 56 层,无阻万方以上 14 口, 17 口低产。试气层位主要为上组合马五₁-马五₄,射开层位主要位于马五₁³、马五₁⁴、马五₂²、马五₄¹,有 23 口井获万方以上无阻流量;有 15 口井射开中组合马五₅、马五₇、马五₁₀,有 4 口井获万方以上无阻。试气结果呈现局部高产、临井差异大的特征。

根据工区内已有试气产能情况,结合收集的资料确定本次主要研究目的层位于马家沟组马五层段的马五₁²、马五₁³、马五₁⁴、马五₂²、马五₄¹。

马五₅段马五时期发生的最大海侵期的产物,形成了大量的灰岩沉积。由于马五₅位于马五₄蒸发环境之下,为白云岩化提供较好条件,目前多口探井在此层位进行试气试采,如延*、延*井都射开了马五₅,合层试采获得一定产能,如延*井试气无阻流量达到 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。所以马五₅单独称为中组合上段,是非常重要的产层之一。本次研究将兼顾中组合马五₅、马五₇。工区内马四认识程度低,在现有资料基础上做初步勘探评价。根据已有认识,其他层段如马五₃、马五₆等因产气能力低,不作为主要论述对象。

第三节 研究思路及关键技术

本次研究将在岩心、野外踏勘、分析测试、测井、录井资料的基础上，结合区域构造沉积背景，开展精细地层划分对比，分析工区现今构造、古构造、沉积环境和古地貌。从生、储、盖、运、圈、保五要素开展成藏要素研究，在成藏期次研究基础上，综合分析成藏主控因素及工区马家沟组上、中、下气层组的成藏模式。

本次研究采用的关键技术：

（1）古地貌、古构造恢复技术。

该技术关键在于优选方法，确定等时界面，在地层划分基础上，计算合适的参数值，结合岩石学特征，开展马家沟组顶面古地貌恢复；选取适宜的剥蚀厚度确定方法，恢复不同地质历史时期的古构造。

（2）生烃评价技术。

有机质类型、有机质丰度、热演化程度、烃源岩的分布面积以及烃源岩厚度等都可以一定程度上体现烃源岩的生烃能力，由于上古和下古烃源岩普遍处于高-过成熟阶段，多种地化评价参数都会受此影响，无法反映真实的生烃能力，因此本次研究开展生烃强度评价，利用多参数综合分析，减少单因素影响比重。相关技术路线如图 1-1 所示。

（3）有利储层评价技术。

储层评价参数多样，由于碳酸盐岩储层非均质性强，在物性、孔喉等方面差异大，这些因素是影响储层储集、渗流条件的关键，本次研究在物性、孔喉分类基础上，结合单井试气产能利用聚类分析进行有利储层评价。

（4）成藏模式研究技术。

油气成藏模式是一组类似的控制油气藏形成的基础条件、动力介质、形成机制、演化历程等要素单一模型或者多要素复合模型的概括。成藏模式研究的关键在搞清楚成藏基本要素的基础上进行，提供对已知油气藏的形成机理和时空分布进行分析和综合的样板。目前成藏模式研究大都停留于积累资料、分类定性描述和定性推理解释状态，其关键在于选取合适的要素建立复合模型。建立符合区域实际的成藏模式，揭示油气成藏规律并指导有利区带和有利圈闭预测。

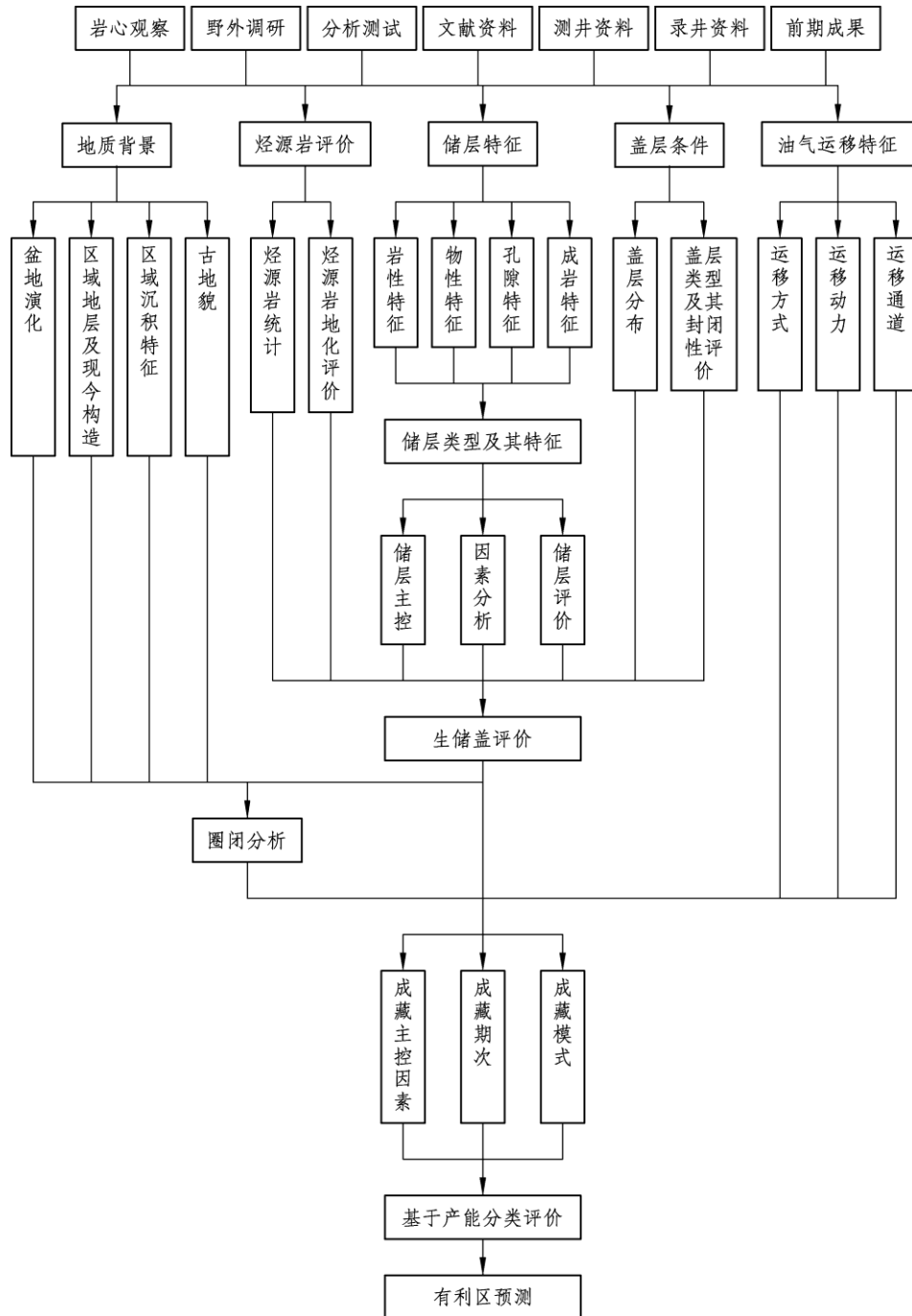


图 1-1 技术路线

第四节 研究内容

本次主要研究内容包括：地层精细划分与对比，并建立标准剖面；古地貌恢复，古构造演化分析；储层评价及其控制因素分析，生烃潜力分析，成藏条件和成藏模式分析，并在前期研究基础上预测资源量及有利区。

（1）精细地层划分与对比。

南五县区域马家沟组位于中央古隆起东南侧，马家沟组顶部存在剥蚀不整合面，造成峰峰组和马五不同程度的缺失，依据古生物特征、沉积旋回及区域性标志将奥陶系马家沟组分为5个地层岩性段，自下而上为马一段至马五段，岩性概括为“三云两灰”，马二段及马四段主要由石灰岩组成，马三段及马五段主要由泥质白云岩和膏盐岩组成。马家沟组地层与上覆本溪组、太原组地层明显不同，太原组内发育的东大窑灰岩、煤层，本溪组内发育的煤层及底部普遍存在的风化壳铝土岩层是准确区分上古和下古地层的关键。研究将借助这些标志层进行马家沟组地层的精细划分对比，建立等时地层格架，分析现今构造格局。并选出标准井，建立标准井地层剖面。

（2）沉积微相研究与古地貌恢复。

准确的岩相古地貌恢复是预测马家沟组白云岩储层分布的关键。奥陶纪富县地区马家沟组在沉积期间有多次海水进退，形成频繁的潮上、潮下多旋回沉积组合。结合岩心观察、测录井资料、薄片鉴定资料识别单井沉积微相类型，绘制单井沉积相图，统计灰岩、云岩、膏岩等岩层厚度，绘制连井沉积相剖面图。结合不同时期地层分布特征，利用多因素沉积相作图法，绘制平面相图。

根据古风化壳下部的残余地层厚度难以准确刻画古地貌形态，而上覆印模厚度则能较为真实地反映底部已发生构造运动的地层地貌形态。只有准确的剥蚀厚度数据，才能准确地反映出本地区的埋藏史，为后来的古压力恢复奠定基础。因此，本次研究将在印模法基础上，采用双界面法，该方法既考虑沉积前地形及剥蚀差异的影响，相比传统印模法能直观反应顶面古地貌，为了保证误差在许可范围内，结合印模法和残厚法的数据相互验证分析判断，该方法同样适用于对于具有构造运动的地区。

（3）生烃潜力分析。

区域内上古生界和下古生家烃源岩研究成果丰富，本次研究将大量搜集相关研究成果，在研究区内选取一定数量样品进行测试分析，结合前期气藏研究中已有烃源岩样品的地化分析资料开展烃源岩的评价，分析研究区生烃潜力。

利用有机碳含量 (TOC)、氯仿沥青“A”含量, 辅助参考有机质热解参数[生烃潜量 (S_1+S_2) 和总烃 (HC)]含量这四项地球化学指标, 对取心的重点研究层段生烃能力进行综合分析评价; 依据干酪根元素组成、干酪根碳同位素和干酪根显微组分判断有机质类型; 用干酪根镜质体反射率 R_0 和生油岩热解峰温 T_{max} 两项指标来评价有机质成熟度。

(4) 储层识别与评价。

马家沟组储层的形成与岩性、孔洞发育程度密切相关, 奥陶系马家沟组储层岩性主要为白云岩和石灰岩, 另外包含一些非储层的蒸发岩 (如盐岩、膏盐) 和泥岩等。不同的岩性在光电截面吸收指数、补偿密度、自然伽马、声波时差以及补偿中子等测井曲线的响应值各有差异, 本次研究将归纳渗透层的测井识别标志, 识别马家沟组渗透层。

碳酸盐岩储层的储集空间类型和组合形式以及孔隙结构复杂多样, 导致储层分类方案也各不相同。依据储集空间和流体渗流通道类型将碳酸盐岩储层分为孔隙型储层、溶洞型储层、裂缝型储层以及复合型储层。通过野外露头、岩心观察以及显微镜下薄片鉴定分析等方法, 本次研究将按照储集空间成因将储层进行分类, 并在此基础上分析不同类型储层的岩性、物性、孔隙及孔隙结构、成岩作用特征, 并进行综合评价。结合沉积、构造等特征分析控制储层分布的关键因素。

(5) 天然气成藏机理。

① 生储盖组合评价。

盖层是油气成藏要素之一, 盖层的横向连续性是油气保存的主要控制因素, 盖层的分布影响着油气的分布。在生油层和储层评价的基础上, 对南五县区域内不同岩性的盖层展开评价, 分析盖层发育规模, 以及区域性盖层与局部盖层的封闭性能。基于前面对烃源岩、储集层和盖层的认识以及研究区下古生界生储盖组合类型, 结合试气情况分析不同生储盖组合类型的特征。

② 圈闭分析。

圈闭判别及其有效性是油气勘探工作中的关键一环。在生储盖成藏要素分析的基础上, 结合沉积、构造特征可以判断研究区主要的圈闭类型, 并分析这些圈闭的保存条件。

③ 天然气运移特征。

只要圈闭形成之前就有油气形成, 并存在剩余压力条件下, 就可以产生运移, 由烃源岩向储层 (或圈闭) 的运移就是一个持续不断的过程。但是决

定油气成藏关键性的运移期次都往往不多。一般来说, 烃源岩的生烃高峰期就是油气成藏关键的运移时期。本次研究将从运移方式、运移动力、运移通道、运移方向展开, 分析天然气运移与圈闭的时空配置关系, 这才是影响天然气聚集量的关键。

④ 天然气成藏主控因素。

就一个地区的油气藏形成条件来说, 在其他条件具备时, 只有一个或多个要素是控制油藏形成的关键因素。故在分析油气源、储集层、圈闭、运聚、保存等这些基本因素的基础上, 最终要找出影响油气成藏的关键因素。

⑤ 天然气成藏期次及成藏模式。

结合马家沟组埋藏史和热史, 根据流体包裹体均一温度分析, 根据均一温度对应的峰值, 在埋藏史热史图中找到所对应的地质年代, 即为对应的天然气充填时期。综合所有的成藏要素分析结果, 总结南五县马家沟气藏的成藏模式。

(6) 资源评价及有利区预测。

在成藏模式研究的基础上, 分析可能成藏的部位, 综合地层、构造、沉积、储层、盖层等认识, 估算含气区域内的资源量, 评价有利区, 最后对整个区块进行综合评价并进行勘探前景分析。

第五节 完成工作量

本次完成的研究内容如表 1-1 所示, 绘制图件工作量如表 1-2 所示。

表 1-1 完成工作量

序号	研究内容	数量	完成情况
1	资料收集	420 余口	已完成
2	野外地质调查及岩心观察	2 次 49 口	已完成
3	实验测试分析	烃源岩 43 个	已完成
4	地层划分与对比	标准井及骨干剖面	已完成
5	现今构造研究	30 m, 5 m 图	已完成
6	古构造研究	30 m, 10 m 图	已完成
7	沉积特征研究	单井、剖面、平面	已完成

续表

序号	研究内容	数量	完成情况
8	烃源岩分析	厚度、地化参数、生烃强度	已完成
9	盖层研究	灰岩、铝土岩等	已完成
10	储层特征	孔隙、成岩、物性	已完成
11	测井解释及储层综合评价	350 标准化、岩心归位 43、 2 套模板、物性解释	已完成
12	成藏分析	成藏期次 (3 期)、 成藏模式 (2 个)	已完成
13	有利区预测	试气成果多因素叠合	已完成

表 1-2 完成的主要图件

序号	内容及图件	要求	完成情况
1	地层对比剖面图	6 幅	15 幅
2	地层分布图	13 幅	16 幅
3	气藏剖面图	4 幅	6 幅
4	现今构造图	6 幅	12 幅
5	古构造剖面图	10 幅	10 幅
6	古构造平面图	5 幅	10 幅
7	单井综合柱状图	6 幅	8 幅
8	沉积相平面分布图	12 幅	12 幅
9	沉积相剖面图	6 幅	6 幅
10	古地貌图	1 幅	1 幅
11	成岩相平面分布图	12 幅	12 幅

续表

序号	内容及图件	要求	完成情况
12	储层厚度、孔隙度、渗透率和饱和度平面图	32幅	36幅
13	储层综合评价——有利储层分布图	3幅	10幅
14	烃源岩厚度图	6幅	9幅
15	生烃强度平面分布图	2幅	3幅
16	生烃强度统计表		1张
17	马家沟组资源量计算表	1张	1张
18	封盖层平面分布图	4幅	5幅
19	成藏模式图	1幅	2幅
20	有利区预测图件	3幅	8幅

第六节 取得的主要认识

(1) 统一地层划分方案, 研究区地层发育特征符合地质背景, 往南西方向地层剥蚀量逐渐增加, 西南部黄陵境内马五地层全部缺失, 研究区存在三个地层突变的区域, 形成富县境内西北部、黄陵-洛川交界处、黄龙境内三个岛状残留带。

(2) 根据岩心、测井、地球化学多方法确定研究区存在高温蒸发、还原水体条件, 水体动荡, 且存在斜坡, 故碳酸盐岩多为在潮上、潮间带的产物。在海退海进背景下, 在局限台地和开阔台地基础上, 按岩相识别出马五₁、马五₂、马五₄ 酸盐岩主要为局限台地云坪微相, 马六、马五₅、马五₇ 为开阔台地下的灰坪及云坪沉积微相。

(3) 按双界面法, 并参考印模法, 建立富县地区古地貌单元划分标准, 刻画的古地貌显示, 富县境内位于岩溶斜坡与岩溶高地过渡区域, 侵蚀沟谷的起点主要位于富县境内, 由此在志丹、洛川、黄龙形成多个溶丘, 至延安、

宜川一线往北东方向进入岩溶盆地。

(4) 山西组、本溪组、马家沟组暗色泥质烃源岩主要为Ⅱ₂、Ⅲ干酪根，普遍进入高成熟生干气阶段。在此基础上计算山西组、太原组、本溪组煤层，以及马家沟组上组合中的暗色泥质源岩的生烃强度，研究区平均生气强度 $20.76 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，山西组和本溪组累计贡献占 82.5%，以煤和泥岩为主要的烃源岩，太原组几无贡献。下古马家沟组泥岩贡献占比约为 13.8%，以上组合马五₁³、马五₁⁴ 为主。下古马家沟碳酸盐岩生烃贡献约占 5%。

(5) 富县地区资源量估算面积 6 222 km²，在未统计马家沟组灰岩源岩的情况下，预测上下古总生烃量 $131\,400 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，预测资源量 $1\,314 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；其中富县境内发育富县北、张家湾、张村驿、牛武-岔口四个生烃潜力带，宜川地区发育云岩-延 187-延 1713、高柏-交里-英旺、砖梁庙-宜川县城-寿峰三个生烃潜力带。

(6) 综合岩心、试气、测井资料，并多因素模糊聚类，将储层分成三大类，并在富县开发区圈定Ⅰ类、Ⅱ类储层。富县地区马家沟组马五₁-马五₅ 主要含气层Ⅰ、Ⅱ储层叠合面积为 2 956.09 km²，储量丰度 $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 情况下，储量约为 $1\,182.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，按照采气速度 1.5%，可建产 $17.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(7) 在传统倒灌式成藏模式基础上，根据马家沟组上、中、下组合的源储等成藏要素的差异，细化成藏模式，上组合成藏模式多样，包括直接顶灌式成藏、砂岩疏导顶灌成藏、裂缝疏导成藏、直接侧向式成藏；中下组合在靠近剥蚀区为侧向式成藏，高埋深区多混合成藏，靠裂缝，但成藏规模小。

(8) 综合马家沟组古地貌、地层出露、盖层，构造演化、储层质量、烃源岩、试气效果等分析气藏控制因素，认为古地貌、储层质量不仅控制气藏分布，也是决定产能的关键，在此基础上，结合剥蚀线、盖层特征预测各小层勘探有利区，共圈定有利区气区 1 802.55 km²，其中富县境内 818.1 km²，洛川、黄龙境内 191.73 km²。

第二章 地层划分与对比

本次研究根据邻近井区若干条相关野外剖面的分析与对比,依据古生物化石、岩性组合及其共生成因关系、测井响应、标志(标准)层等,对延安气田富县地区内的400余井次进行逐一的地层划分,并对奥陶系马家沟组精细化分,建立等对比剖面,将马五₁细分成马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₁⁴,将马五₂细分成马五₂¹、马五₂²,将马五₄细分成马五₄¹、马五₄²、马五₄³等,并绘制各小层地层对比图、地层厚度平面展布图、主力层现今顶面构造平面图等三种基础图件,分析地层分布以及主力层现今构造特征。

第一节 区域地质背景

一、盆地构造演化

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,并以深断裂与相邻单元分界。鄂尔多斯盆地兼受其东滨太平洋构造域和其西南特提斯-喜马拉雅构造域地壳运动的影响,是一个稳定沉降、拗陷迁移的多旋回克拉通叠加盆地(李文厚,2004)。

鄂尔多斯盆地基底由太古界和下元古界变质岩系组成,南北分别毗邻秦祁海槽和兴蒙海槽,东西则被贺兰拗拉槽和燕山-太行山拗拉槽所夹持。其中盆地偏北部分基底的时代相对更为古老,从其北侧的阴山地区及其西侧的贺兰山地区出露的片麻岩类的年龄值推断,盆地最老基底约为20~25亿年(王鸿祯,1981)。

在基底之上,鄂尔多斯盆地经历了五个地质演化阶段。

中晚元古代拗拉谷阶段,这是构成盆地的基础。早元古代,华北陆块和塔里木陆块经过吕梁地壳运动的拼接而逐渐稳固化,但两个陆块之间还存在着阿尔金平移断裂带。至中晚元古代,由地壳热点所控制的秦祁裂谷带产生

并发展为陆间裂谷系。从西往东依次存在有贺兰拗拉谷、陕豫晋拗拉谷和皖苏鲁拗拉谷等。中元古代末,本地区的裂谷相继闭合;震旦纪时形成了一个统一的克拉通。

早古生代浅海台地阶段,此阶段在盆地内部沉积了 400~1 000 m 浅海台地相碳酸盐岩。此阶段期间鄂尔多斯地块和华北地区一样,北部为兴蒙海槽,东为晋陕拗拉谷,南部为秦岭海槽,西为贺兰拗拉谷,古地貌的地势为中间高、东西两侧低、北高南低的态势。盆地中部盐池-庆阳-黄陵隆起带走向北西,在黄陵方向偏转为北西西,略呈一向西南突出的弧形。“L”形格局的中央古隆起是控制盆地中东部及南部沉积格局的关键。隆起带以东,为一近南北向的凹陷。西南缘属于被动大陆边缘,为一倾斜向秦祁海槽的大陆架,沉积了巨厚的海相碎屑岩、碳酸盐岩和浊积岩,厚度可达 4 500 m。

奥陶纪末,加里东运动使华北陆块整体抬升,海水退出鄂尔多斯地块,本地区缺失志留系、泥盆系以及下石炭统的地层,呈一个剥蚀古陆的状态。长达 1.3 亿年的剥蚀,使鄂尔多斯地区的奥陶纪地层顶部形成了一套风化壳古岩溶带,这套风化壳古岩溶带成为马家沟组顶部重要的含气层。

晚古生代近海平原阶段,华北陆块的构造特征发生了巨大变化,鄂尔多斯地区的地理环境由海相变化为陆相,其地质构造也由海中“隆”变为陆上“盆”,海陆格局也由南北两侧临海变为南侧半临海,规模也变大,扩展为华北-塔里木区。在中晚石炭世和二叠系沉积了厚约 1 000 m 的煤系地层和巨厚的河流相碎屑岩,与下伏碳酸盐岩地层形成明显的不整合接触,该不整合面是识别奥陶系顶面的重要标志。

早石炭世,鄂尔多斯地区的海域扩大,南侧的秦岭海北缘可达南阳至西安一线,北侧的兴蒙海南缘可达赤峰至额济纳旗,呈现出华北陆块、塔里木陆块和柴达木陆块相分隔的局面;至晚石炭世,海侵范围继续扩大,全区总体呈现为局限浅海的沉积背景,从华北经鄂尔多斯地区到贺兰山区形成了统一的太原组沉积的局面,由于古隆起的存在,还发育了海湾泻湖相的沉积;到早二叠世,海水开始退却,沉积环境开始以陆相为主;晚二叠世,鄂尔多斯地区内部开始发育一系列的河流-沼泽-浅湖-三角洲相的沉积地层,沉积环境已过渡为内陆湖盆。

中生代内陆湖盆阶段,在中生代初,陕甘宁地区为大华北盆地的一个主体拗陷,到三叠开始演变为独立的内陆盆地,共发育 5 个沉积旋回,厚 3 000 m。早中三叠世,鄂尔多斯地区的地形总趋势呈北高南低、西陡东缓,盆地内沉积以河流沉积为主,湖泊呈局限分布;晚三叠世,受印支运动的影响,华北克拉通全区抬升,并且向西挤压,由于鄂尔多斯地区西高东低的地

形，形成了稳定地台上的大型内陆拗陷盆地。晚三叠世末，由于盆地基底抬升，鄂尔多斯盆地内部发育的大型内陆淡水湖泊逐渐消亡，形成了一套厚约 1 000 余米的湖相-三角洲相-河流相碎屑岩沉积体系。

新生代周边断陷阶段，第三纪开始，盆地东部隆升，周边相继断抬形成一系列地堑。

鄂尔多斯盆地接受了这五个阶段沉积的地层，除缺失下石炭统、泥盆系和志留系地层外，其他各地质时代的地层基本齐全（见表 2-1）。鄂尔多斯盆地现今构造格局开始形成于中侏罗世，构造定型于早白垩世，盆地内构造平缓，拗陷迁移复合、扭动明显，总体呈现东部翘起、西部倾伏的区域性斜坡面貌（李文厚，2004）。

表 2-1 鄂尔多斯盆地地层（据王道富等，2003 修改）

地 层						油 气 层 组	地 层 厚 度 /m	构造运动	
界	系	统	组	段(层)	符号			构造	性质
新 生 界	第 四 系	全新统			Q ₄		0~60	喜 马 拉 雅 运 动	右 旋 拉 张
		上更新统			Q ₃		0~80		
		中更新统			Q ₂		0~140		
		下更新统			Q ₁		0~70		
	上第三系	上新统			N ₂		0~70		
	下第三系	渐新统			E ₃		150~350		
中 生 界	下 白 垩 系	志 丹 统		泾川层	K ₁₂₆		0~119	燕 山 运 动	
				罗汉洞层	K ₁₂₅		66~180		
				环河层	K ₁₂₄		200~243		
				华池层	K ₁₂₃		132~294		
				洛河层	K ₁₂₂		66.5~447		
				宜君层	K ₁₂₁		0~450		

续表

		地层				油气层组	地层厚度/m	构造运动		
界	系	统	组	段(层)	符号			构造	性质	
中生界	侏罗系	中统	安定组		J _{2a}		80~150		左翼剪切	
			直罗组		J _{2c}	直1-直7	200~400			
		下统	延安组		J _{1y}	延1-延10	250~300			
			富县组		J _{1f}		0~150			
	三叠系	上统	延长组	第五段		T _{3y5}	长1	0~245		印支运动
				第四段		T _{3y4}	长2, 3	220~300		
				第三段		T _{3y3}	长4+5, 6, 7	280~400		
				第二段		T _{3y2}	长8, 9	160~210		
				第一段		T _{3y1}	长10	170~280		
		中统	纸纺组		T _{2z}		300~530			
		下统	和尚沟组		T _{1h}		47~200			
	刘家沟组			T _{1y}		202~422				
上古生界	二叠系	上统	石千峰组		P _{3s}	千1, 2, 3, 4, 5	200~345	海西运动	相对宁静	
		中统	上石盒子组		P _{2sh}	盒1, 2, 3, 4	110~160			
			下石盒子组		P _{2x}	盒5, 6, 7, 8	120~170			
		下统	山西组		P _{1s}	山1, 2	37~150			
			太原组		P _{1t}		22~276.1			

	石炭系	上统	本溪组		C3b		15~58		
--	-----	----	-----	--	-----	--	-------	--	--

续表

界	系	统	地层			油气层组	地层厚度/m	构造运动	
			组	段(层)	符号			构造	性质
下古生界	奥陶系	上统	北锅山组		O3b		270~799.6	加里东运动	升降运动
		中统	平凉组		O2p		130~2 154		
		下统	马家沟组		O1 m	马五	200~1 556		
			亮甲山组		O1i		58~90		
			冶里组		O1y		50~73		
	寒武系	上统	凤山组		ε3f		8~57		
			长山组		ε3c		10~88		
			崮山组		ε3 g		81~270		
		中统	张夏组		ε2z		50~175		
			徐庄组		ε2x		53~126		
			毛庄组		ε2 m		30~42		
		下统	馒头组		ε1 m		30~74		
			猴家山组		ε1b		38~104		
上元古界	震旦系		罗圈组		Z3		11~182		
	蓟县系				Z2		705~2 243		
	长城系				Z1		14~428		
下元古界	滹沱系				Pt12		0~8 000		
	五台系				Pt11		8 000~16 000		
太古界	桑干系				Ar		9 000		

二、盆地马家沟组地层发育特征

鄂尔多斯盆地基底由太古界和下元古界变质岩系组成,盆地盖层包括中上元古界的长城系、蓟县系、震旦系,下古生界的寒武系、奥陶系,上古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系、白垩系以及新生界第三系、第四系。中生界在盆地内不同位置沉积的地层厚度不同,由于受燕山运动和喜马拉雅运动影响,不同位置会因抬升剥蚀缺少一定数量的地层。但整体看来,盆地内沉积岩平均厚度约为6 000 m。

鄂尔多斯盆地下古生界发育有海相碳酸盐岩、盐膏岩相沉积层，顶部侵蚀面经风化剥蚀形成风化壳岩溶带，根据古构造和古地理变迁，冯增昭和陈继新将鄂尔多斯地区的早古生代的沉积岩划分为四个阶段：① 苏峪口-徐庄组：为陆源、内源混合沉积特征，发育碎屑岩和云坪。② 张夏组-亮甲山组：以清水沉积为特征，发育海滩相以及滩间海。③ 马家沟组：其中马一、马三、马五段为海退期，以蒸发岩沉积为主，发育云坪和膏岩洼地，开阔海已退居次要地位。马二、马四、马六段为海进期，以陆表海沉积为主，发育低能浅海台地相，各种滩相、灰坪沉积发育，而云坪、膏盐湖不发育。④ 平凉组-背锅山组：以深水斜坡沉积为主，发育重力流碳酸盐岩（据冯增昭，陈继新等，1991）。

其中在马五期海退时，由于南部秦岭洋壳和北部兴蒙洋壳的俯冲，造成了盆地内南北向地层的相向挤压，盆地整体上表现为“震荡性、间歇性”的海退过程，此时中央古隆起暴露地表（见图 2-1），将鄂尔多斯地区分隔成东西两个沉积体系，即西部祁连海沉积体系和东部华北海沉积体系。中央古隆起东侧发育局限台地沉积，马五时，气候干热，为该地区最重要的一次膏盐发育期，受古地貌控制，沉积相带的发育具有围绕盆地东部洼陷区呈环带状展布的特点，自东向西海水含盐度逐步降低，依次发育膏盐洼地、含膏白云岩坪和环陆白云岩坪沉积（据黄正良，刘燕等，2014）。

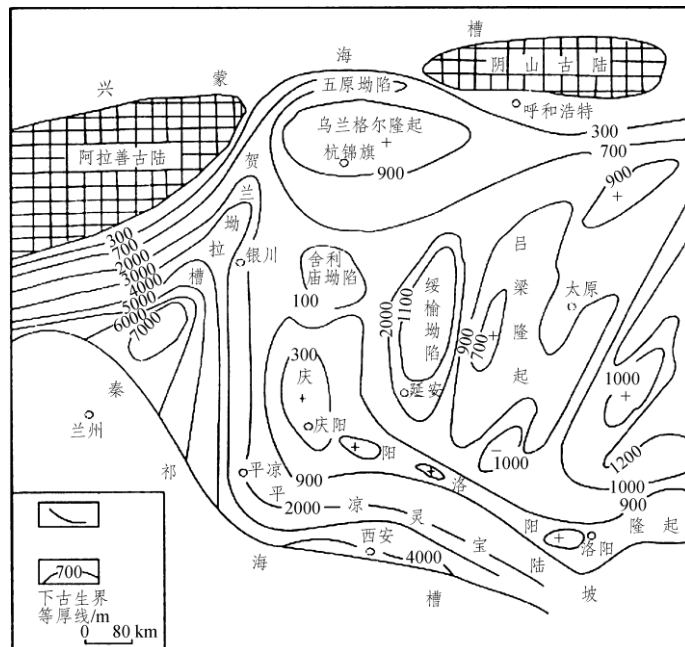


图 2-1 鄂尔多斯盆地早古生代古地理格局 (据王玉新)

马五段地层又被分为十个亚段,在具体勘探开发中,鄂尔多斯勘探者们将马五₁~马五₄称为“上组合”,主要为风化壳储层,靖边气田就是在此基础上发现的。而马家沟组“中组合”的概念是由鄂尔多斯盆地勘探者们于2009年提出的,指的是奥陶系马家沟组五段5亚段至10亚段的含气层组合,由于中组合勘探自取得突破以来,主力层系一直为马五₅亚段,故将其与下伏6亚段至10亚段分开,马五₆~10层段统称为中组合中下段(见图2-2)。其中,马五₆、马五₈、马五₁₀为次一级的海退期,沉积物以蒸发岩、含膏云岩为主;马五₅、马五₇、马五₉为次一级海侵期,以碳酸盐岩沉积为主。苏里格气田苏203、苏345等一批探井就是在中部含气组合马五₅中得到的百万方产能的井位,苏322在中组合中下段马五₆获十万方高产气流。马五以下的称为“下组合”,由于富县地区井位只有极个别井位钻遇“下组合”,故不作为主要研究层位。马家沟组中下组合地层亚段划分方案见表2-2。

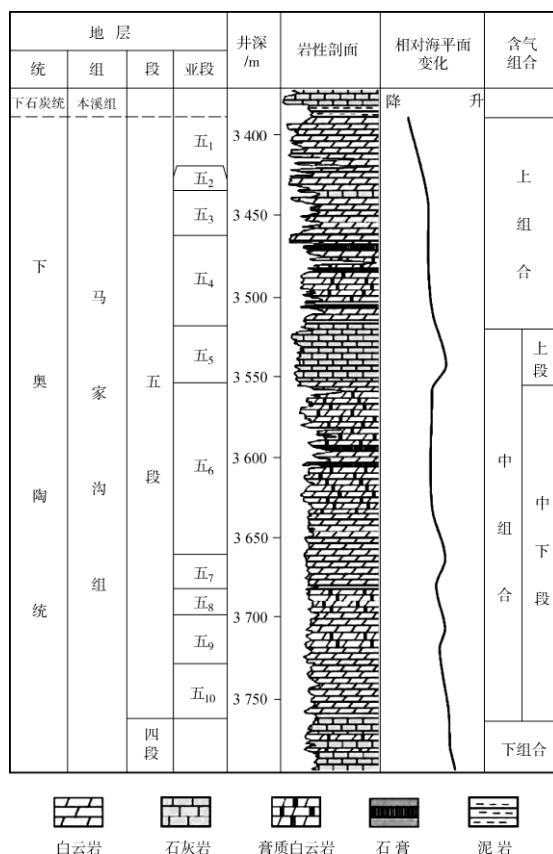


图 2-2 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组含气组合划分 (据黄正良, 2014)

表 2-2 马家沟组中下组合地层亚段划分方案 (据王起琮, 2015)

组	段	亚段	小层	
马家沟组	马六			
	马五	马五1	马五1 ¹	上组合
			马五1 ²	
			马五1 ³	
			马五1 ⁴	
		马五2	马五2 ¹	
			马五2 ²	
		马五3		
		马五4	马五4 ¹	
			马五4 ²	
			马五4 ³	
	马五5		中组合上段	
	马五6		中组合下段	
	马五7			
	马五8			
	马五9			
马五10				
马四			下组合	

马六期(峰峰期)是一次小幅度的海侵,全盆地范围内沉积厚度变化大,除存在庆阳古陆和伊盟古陆之外,其余地区均属于开阔海沉积。沉积相主要有石灰岩陆棚(中东部)、白云岩-石灰岩缓坡(南部)、石灰岩陆棚(西部)和重力流碳酸盐岩斜坡(西部、南部边缘)(据何自新,杨奕华,2004年)。

马六期以后,区域性的加里东运动使包括鄂尔多斯台地在内的整个华北地块全部抬升为陆,盆地很多层位遭到剥蚀,出现了层位缺失,尤其是研究区西南地区,因靠近庆阳古陆,部分马五段整体被剥蚀,风化壳已位于马三段。庆阳古陆东部区域风化剥蚀程度的差异,造成奥陶系顶部出露层位由东到西逐渐变老。研究区内奥陶系顶部风化剥蚀造成地层起伏较大,除宜川中部地区外,其余地区井位多在马家沟组出现地层缺失现象,对于地层的划



分以及对比要求较高，辨识难度较大。

第二节 精细地层划分与对比

一、地层划分与对比方法

区域地层划分方法很多，常见的有岩石地层学方法、生物地层学方法、同位素地质年龄测定、地球物理方法、构造学方法、层序地层学方法以及目前新发展的地球化学对比方法，等等（陈碧珏，1996）。

1. 岩性地层学方法

包括岩性对比法、岩石组合法（沉积旋回法）和矿物（组合）法等。

（1）岩性对比法。基于沉积成层原理以及沉积过程中相邻地区岩性的相似性、岩性变化的顺序性和连续性，常常利用岩性标准层（标志层）进行地层的划分与对比。在地层剖面中分布广泛，特征明显（突出），岩性稳定、厚度适中，易于识别的岩层以及颜色、成分、结构、构造等方面有特殊标志的岩层均可用于地层划分与对比。

（2）岩石组合法（沉积旋回法）。在同一盆地内，地壳升降运动过程大体一致，且不可逆，同期形成的地层具有相同类型的沉积旋回。这种垂直地层剖面上，若干相似岩性、岩相的岩石有规律地周期性重复，可从岩石的颜色、岩性、结构（如粒度）、构造等诸多方面表现出来。

（3）矿物（组合）法。同一地区的沉积物来源、搬运条件及沉积环境近似，其矿物组成及某些矿物含量基本不变或有规律地变化。

2. 生物地层学方法

生物地层学方法是基于生物演化的发展性、阶段性、不可逆性、迁移理论，在不同地区地层所含化石或化石组合若相同，则代表着它们的地质时代相同和大致相同。因此，利用地层中古生物化石类型、化石组合及含量差异来鉴别地层时代。

3. 地球物理资料对比

包括利用地震资料和测井资料进行划分对比。利用二维或三维地震剖面，通过井标定各反射标准层，并追踪（强反射同相轴）、闭合；在搞清岩性-电性关系，确定电性标志层的基础上，对比电性标志层或相邻井的相似曲线特征。

4. 构造学方法

构造学方法是利用地层之间的接触关系（包括整合接触与不整合接触）来划分、对比地层的方法。区域性的构造事件可形成横向稳定的标志，不整合面成为地层划分对比的主要标志层。

5. 地球化学对比

地球化学对比是依据岩石中主元素和微量元素的分布与组合特征以及同位素分析等新的实验技术方法，来确定沉积物的母岩类型、物源方向，同时对沉积环境、气候条件可以做出相对准确的对比。

二、地层划分与对比依据

1. 区域不整合面

鄂尔多斯盆地受多次构造运动的叠加影响，尤其是加里东运动和海西运动造成了泥盆系至下石炭统缺失，同时根据多次构造运动产生大的不整合，可把盆地东南缘地区基底之上的沉积盖层分为中上元古界-下古生界海相碳酸盐岩层；上古生界-中生界的滨海相、海陆过渡相及陆相碎屑岩层；新生代岩层三大部分。

研究区内受海西运动和加里东运动影响，在石炭系和奥陶系之间发育这个平行不整合接触面，同时它也是一个岩性转换面（见图 2-3），是区别马家沟组与上覆本溪组的主要标志层。

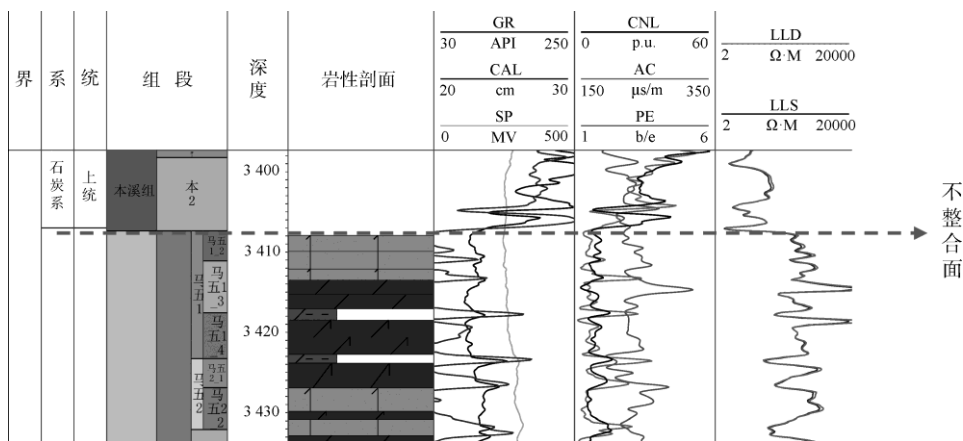


图 2-3 延安气田富县地区延*井石炭系与奥陶系划分标志层

2. 剖面结构及电测曲线组合类比法

电测曲线往往能较好地反映岩性的变化,在正常条件下,电测曲线的变化可以反映岩石微观结构的变化,而电测曲线组合变化则常常更能说明岩性组合变化的趋势,更具有可比性和可靠性,从而对区域地层、沉积乃至储层的发育等研究提供大量资料。由于煤层、泥岩和砂岩与碳酸盐岩岩性上的差别,乃至研究区古生界地层的自然电位、自然伽马、声波时差、电阻率测井等的组合特征在早古生代与晚古生代之间明显的测井曲线差异,可以明显区分出上下地层,如本溪组底部高伽马低电阻组合反映了风化淋滤带铝土层的特征,而马五₅地层整段对应的低自然伽马的特点,反应这段时间海域较大的沉积环境,横向连续性好;这些组合不仅是层位上的限定,而且反映了沉积环境的诸多特征,是划分和对比地层上下古及古生界内部地层常用的依据之一。

3. 标志层

标志层是指那些在剖面中岩性稳定、厚度变化不大、标志明显、分布广泛、测井曲线上容易识别、与上下岩层容易区分开来的时间地层单元,可以是一个单层或是一套岩性组合,也可以是一个界面。标志层是所有地层对比方法中最为有效的方法之一。许多地质工作者在研究区及邻区已开展了许多油气地质综合研究工作,建立了区域地层层序。根据研究区内 400 余口井位的钻井实际情况,本次研究用来进行地层划分的标志层如下:

(1) 石炭系。

① 下煤组。

下煤组是区域内分布最稳定、分布面积最广、平均厚度最大的地层。下煤组顶部是石炭系本溪组与二叠系太原组的分界标志。其由 8、9 号煤层组成,有时 8、9 号煤层合并为单一煤层,呈煤系出现(见图 2-4)。测井响应特征为低自然伽马、低密度、异常高声波时差、低电阻和扩径。

该煤层一般厚度大、较稳定、结构简单,但因含硫较高,常具异味,俗称臭煤。

② 湖田段铁铝岩层。

由底部的山西式铁矿和紧随其上的 G 层铝土矿组成,这是本区最易识别的岩性标志层,它位于本溪组底部平行不整合于马家沟组之上,研究区内广

泛分布。铝土岩呈灰白色或红褐色，其下部为具鲕粒结构及环带构造红褐色赤铁矿、菱铁矿或含铁泥岩，铝土岩具有自然伽马高、中子高、密度较高、声波时差较低、中低电阻率的特征（见图 2-4、图 2-5）。

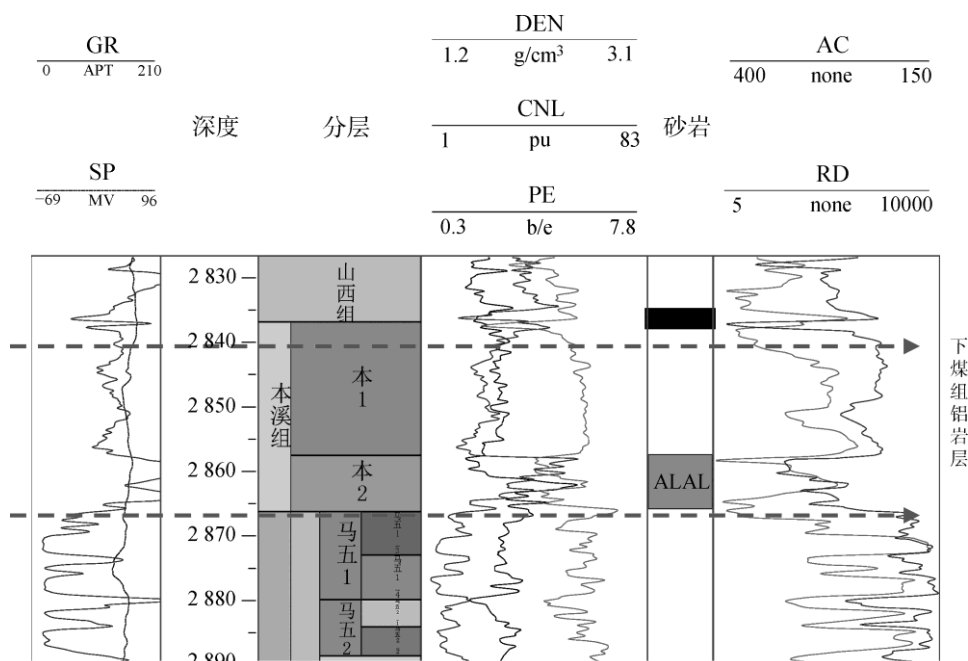


图 2-4 延安气田富县地区延*井位本溪组标志层

铁铝层在华北地台普遍发育，关士聪等（1952）曾将其命名为湖田统，现已作为华北区的一个正式岩石单位，称之为湖田段（张淑芳等，1994）。该层全区普遍分布，但是厚度因各地而异，具有明显的穿时性。

在研究区内此类标志层特征明显，其下紧接马家沟组顶界面，是区分本溪组和马家沟组的主要标志层位。

（2）下古生界。

下古生界与上古生界间存在明显的沉积间断，故奥陶系顶面既是一个地质时代界面，又是一个物性界面，也是一个岩性渐变面，测井中自然伽马、声波时差都有明显变化。同时在奥陶系内部发育多套明显的标志层，主要包括：

① 马六段灰岩。发育于马六段底部，残余厚度差异大，研究区富县区块大部分探井的马六段都遭剥蚀完全缺失，但宜川区块的井位马六段基本都有所保留，厚度 10~20 m，故在分层时将其作为一个标志层（见图 2-5）。

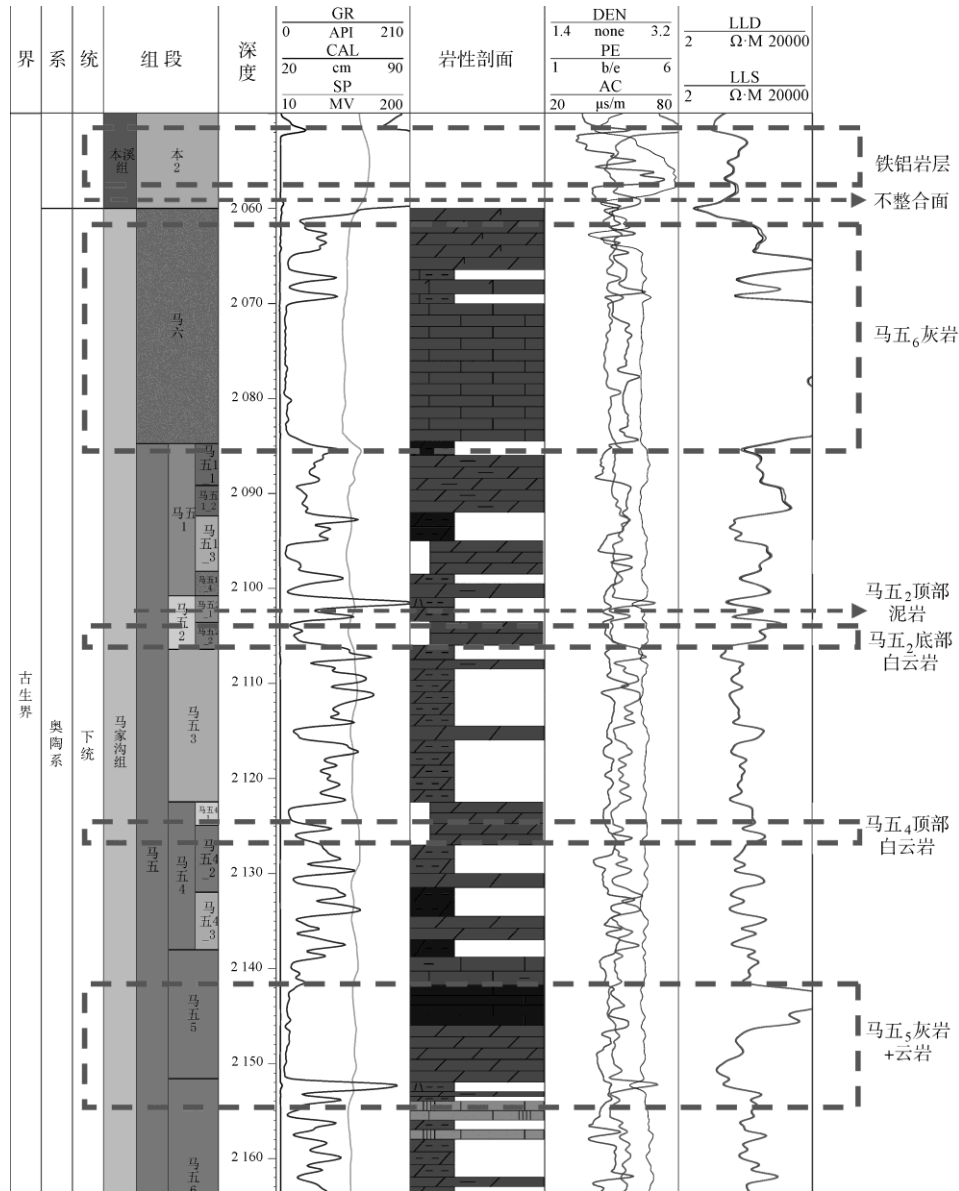


图 2-5 延安气田富县地区延*井下古生界马家沟组标志层

岩性为深灰色、灰色灰岩。电性特征上，自然伽马曲线呈值较小的低平箱状，起伏很小；密度曲线呈锯齿状微小波动，密度较泥岩高，与 CNL 基本重合；高 PE；声波时差起伏也很小，呈微锯齿状。

② 马五₁¹顶部泥质岩，厚度 1~2 m，全区普遍发育。电性上较容易识别。

岩性为泥质白云岩、深灰色白云质泥岩、灰黑色泥岩、深灰色泥晶泥质白云岩。由于研究区马家沟组中泥岩发育较少，本标志层的岩性特征为含泥质较高，上下地层对比中还需要结合电性特征来确定。

电性特征上，自然伽马曲线起伏明显，有较明显的剑状高值突起，其上、下地层的自然伽马值都较低，声波时差曲线呈一个较小的钟形突起（见图 2-5）；在上覆地层未缺失的情况下，其上、下地层的 GR 都较低，容易辨认，取 GR 半幅点为上下地层的分界点。

往下出现两个 GR 平直段，分别为马五₁²和马五₁³发育的两个白云岩段，两个平直段中间发育多个小幅波动的高值，较马五₁⁴和马五₂¹顶部泥岩段的起伏小。马五₁²底界位于第二个峰值之下（见图 2-6A）。第二个 GR 低平段底作为马五₁³底界。马五₁亚段小层划分标志层见表 2-3。

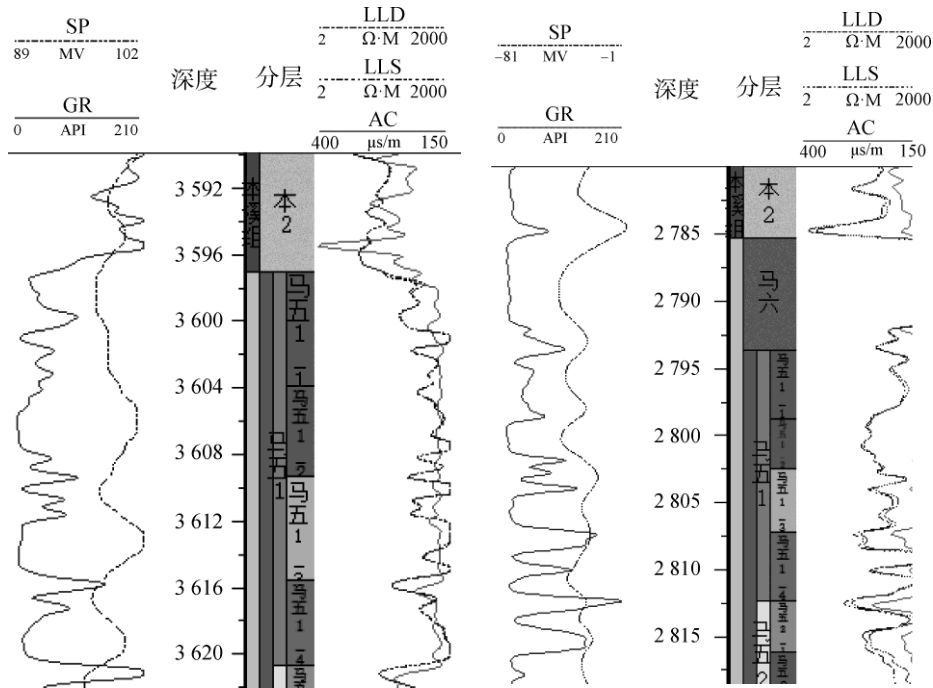
表 2-3 马五₁亚段小层划分标志层

地层	标志层		电性特征
马五 ₁ ¹	整段		GR 起伏明显，出现剑状高值突起，部分井呈现上低下高。其上、下地层的 GR 都较低
马五 ₁ ²	整段	白云岩	GR 低平，下部有 2 个剑状高峰，较马五 ₁ ⁴ 和马五 ₂ ¹ 顶部的起伏小。底界位于第二个峰值之下，SP 低平，电阻率高
马五 ₁ ³	底部	灰质白云岩	GR 为两个高值所夹的漏斗状低值；SP 为两个高值之间的较低值；Rt 小幅度高值突起
马五 ₁ ⁴	顶部	泥岩	高 GR，通常出现两个剑状高值，高 SP，低 DEN，低 Rt。均呈指状
	底部	灰质白云岩、白云岩	GR 为上下两个剑状高值所夹的漏斗状低值，SP 为两个剑状高值之间的较低值；Rt 为小幅度的钟形突起

③ 马五₁⁴底部白云岩，厚度 2~3 m，全区普遍发育。电性特征明显（见图 2-6A）。

岩性为灰褐色含气白云岩、深灰色泥质白云岩、浅褐灰色白云岩、灰色含气泥晶白云岩。电性特征上，自然伽马曲线特征较为明显，为一个上下两个剑状高值所夹的漏斗状低值（见图 2-6A），声波时差曲线也呈一个剑状高值之间的较低值；电阻率曲线则呈一个较小幅度的钟形突起，比较容易识别。该标志层上、下地层的自然伽马值都较高；上 GR 尖峰段的顶部作为马五₁³和马五₁⁴的分界线。

马五₃全段自然伽马曲线呈一个小幅的钟形突起，声波时差、补偿中子、密度曲线相似，呈小幅波状起伏，较为平直。在膏质云岩及膏岩层自然伽马、声波时差低平，电阻率曲线有尖峰状及近箱状高值突起，DEN 高，明显高于上下层（见图 2-6C）。横向可相变为白云岩，DEN 明显较膏岩低（见图 2-6D）。



A. 延*井 马五₁ 亚段小层划分标志层

B. 延*井 马五₁ 亚段标志层

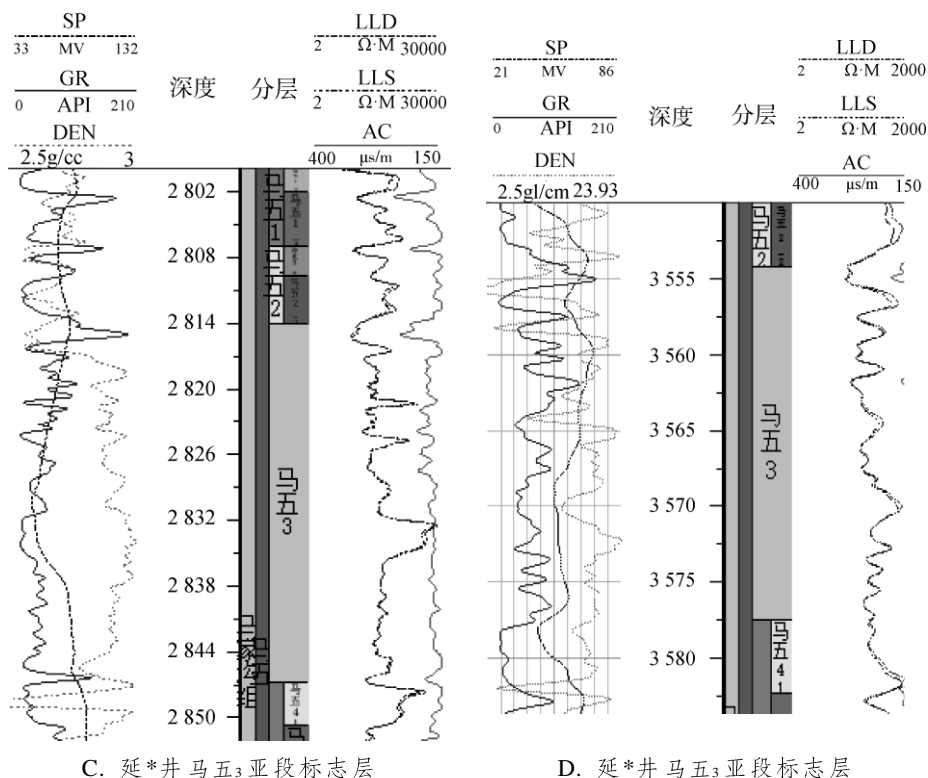


图 2-6 延安气田富县地区下古生界马五内小层划分标志层

④ 马五⁴顶部为白云岩，厚度 8~12 m（见图 2-7）。

岩性为灰色石膏质白云岩、褐灰色粉晶白云岩、褐色白云岩、浅灰色灰质白云岩、白色白云质膏岩、白色石膏岩的岩性组合，在分层中需要结合电性特征进行识别。

在电性特征上比较容易识别，其自然伽马曲线呈两个剑状高值夹两个明显的箱状低值；电阻率曲线呈一个小幅钟形高值；声波时差曲线则呈较小幅的波状起伏。其下紧邻的剑状高伽马段是凝灰质泥岩或泥岩（K3）。

马五⁴发育一套 GR 呈漏斗状，高 DEN、AC 的白云岩，或为低 GR、低 AC、高 DEN、低 CNL，高 Rt 膏岩层。马五⁴亚段小层划分标志层见表 2-4。

表 2-4 马五₄亚段小层划分标志层

地层	标志层		电性特征
马五 ₄ ¹	顶部	白云岩, 膏质白云岩	全段 GR 呈两个剑状高值夹的箱状低值; Rt 呈一个小幅钟形(近似箱形)高值; AC 呈微小波状起伏
马五 ₄ ²	顶部 K3	凝灰质泥岩或泥岩	高伽马, 高时差, 高补偿中子, 低密度, 低电阻。均呈指状。有一定扩径
	底部	白云岩或膏质岩层	GR 漏斗状, DEN 高, 与 AC、补 CNL 曲线相似, 石膏层显示为低 GR、低 AC、高 DEN、低 CNL, 高 Rt。底界位于大段膏质岩层之下
马五 ₄ ³	整段		自然伽马较上下曲线快速起伏变化, 有 3~5 个 GR 尖峰。顶界位于电阻率快速下降、时差增大段之上, 底界在高时差尖峰凸起之下

⑤ 马五₅亚段顶部泥质灰岩, 厚度因探井钻遇深度不同在 4~15 m 不等, 全区普遍发育。岩性为灰色、深灰色、灰褐色灰岩、深灰色泥质灰岩。电性特征上, 自然伽马曲线较上下都低平, 呈低平箱状; 电阻率曲线呈一钟形高值; 声波时差曲线呈小幅锯齿状起伏; 密度曲线呈指状、尖刀状高值(见图 2-7A)。

⑥ 马五₆亚段。

马五₆亚段的硬石膏岩或石盐岩等蒸发岩类也可以作为辅助标志层进行地层对比, 马五₆段位于马五₅和马五₇的低平 GR 间的高锯齿状 GR 段, AC 出现明显增大。与上、下地层相比钾含量异常高(见图 2-7A)。其中硬石膏岩多具纹层构造, 颜色以灰白色为主, 具有硬度低、密度高、中子低、电阻率高以及光电截面吸收指数高等特点; 石盐岩由于塑性大, 易溶于水, 因而多具溶孔, 电性特征主要为大井径、高中子、极低密度、低电阻、低光电截面吸收指数。

⑦ 马五₇、马五₉亚段。

马五₇海侵形成的碳酸盐岩也可以作为辅助标志层进行地层对比, 马五₇亚段发育粉晶白云岩, 颗粒白云岩, 局部可见含膏云岩、泥质云岩、泥晶云岩, 该段为两个高 GR 尖峰所夹的 GR 整体低平段, AC 低值微齿状起伏, Rt 高。往下发育 GR、AC 都呈较高值锯齿状, 本段包括 2~3 个 GR 尖峰。Rt 略低于其他层, 起伏明显。膏岩层 Rt 出现高异常。顶部为 GR 尖峰、低 Rt 泥质岩层, 该段即为马五₈, 也与马五₉差别明显。马五₉亚段发育中-细晶/粉晶/泥晶白云岩, 见少量含生屑含膏角砾泥晶白云岩, 含砾粉晶白云岩, 岩性

组合复杂,该段 GR 比马五₈低平, AC 中低值微齿状, Rt 中等。往下马五₁₀段 GR 变化稍大,锯齿状, Rt 变化大,夹低伽 GR、高 DEN、低 AC、高 Rt 的膏岩。

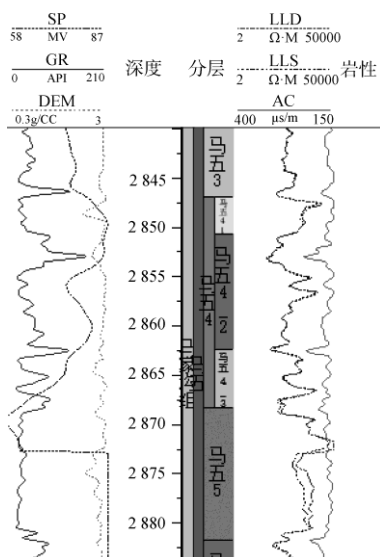
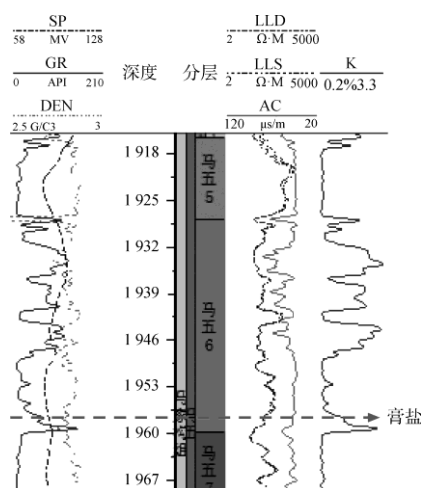
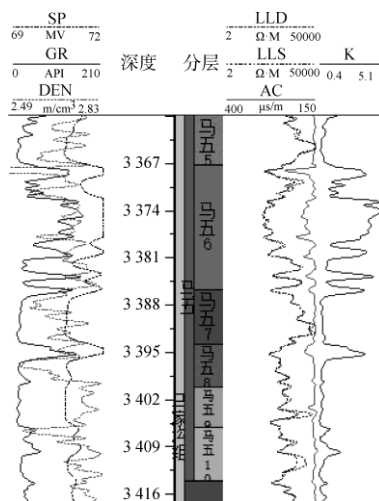
A. 延*井马五₄亚段标志层B. 延*井马五₆段标志层C. 延*井马五₇、马五₈亚段标志层

图 2-7 延安气田富县地区下古生界马五内小层划分标志层

4. 地层厚度法

在较小范围内相同地质时期沉积的地层，其厚度往往相近。鄂尔多斯盆地属于华北克拉通缓慢沉积的方式，盆地整体构造不发育，对于下古生界，在奥陶世末期，整体抬升造成了马家沟组顶部接受了长期的剥蚀，出现了沉积间断，很多井位地层缺失，但是在宜川和富县两个区块的小范围内，地势变化较小，两井间地层厚度依然存在可比性，自东向西地层厚度呈现变薄趋势，且出露地层年代自东向西逐渐变老，这些都成为地层划分对比的辅助标志层。

5. 野外露头证据

野外露头对于地层出露的直接观察是最有利于了解地层岩性特征的一种方式，同时我们还可以测量地层的产状，掌握地壳变动的状况；如果发现化石，这也是一种判断地质年代和层位的很好方式，也便于了解当时的地质环境。本次研究过程中笔者分别进行了2次野外露头踏勘，通过露头识别古生界多个层界面（见图2-8）。



A. 本溪组与马家沟组界面



B. 马五与马四界线



C. 马三与马二分界线



D. 马四与马三分界线

图 2-8 山西省河津露头剖面

薛峰川剖面中可见本溪组底部发育一套含砾砂岩，往下为马家沟组风化壳，并找到本溪组内本1和本2界面处的厚层块状晋祠砂岩，以及作为太原组与山西组分界的标志层北岔沟砂岩。野外露头中马五₅、太原组厚层灰岩分布稳定，其上下都分布泥质含量很高的岩层，普遍风化严重，植被茂盛。