

鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集

(1990—2000)

长庆油田公司勘探开发研究院 编

石油工业出版社

编委会名单

技术顾问：胡文瑞 何自新 金忠臣 王道富

主 编：闵 琪 杨 华

副 主 编：付金华 张明禄 荣春龙 巨全义

编 委：罗绍伦 李恕军 史成恩 陈安宁

吕 强 赵惊哲 卢 涛 姜英昆

席胜利 张文正 潘增耀 梁书林

赵继勇 姜好仁 蔺方晓 王少飞

工作人员：荣春龙 谢国明 袁 渊 袁开齐

隆 重 纪 念

长庆石油会战三十周年

内 容 提 要

本论文集收录了长庆油田研究院科技人员近 10 年来在鄂尔多斯盆地油气勘探开发的实践中所取得的主要科研成果和发展的科技论文。这些成果和论文不仅为长庆油田的油气勘探开发作出了贡献，同时，也为中国乃至世界同类油气田的勘探开发提供了参考和借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集：1990～2000/长庆油田公司勘探开发研究院编. —北京：石油工业出版社，2000. 10
ISBN 7 - 5021 - 3138 - 8

- . 鄂...
- . 长...
- . 油气勘探 - 鄂尔多斯盆地 - 文集
- . 油田开发 - 鄂尔多斯盆地 - 文集
- . P618. 13 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 52132 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787 × 1092 毫米 16 开本 35.25 印张 896 千字 印 1—500

2000 年 10 月北京第 1 版 2000 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 3138 - 8 T E · 2388

定价：82.00 元

序

1998年参加国家行政学院大中型骨干企业领导干部培训班时，到南方考察后，我写了一篇《奇迹是怎样创造出来的》文章，主要反映春兰公司、上海等企业和地区迅猛发展的内容，在《发展》杂志发表后，影响较大，几十家报刊要求转载。今天，油田勘探开发研究院杨华院长邀我为《鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集》作序，我再次想到类似的题目——鄂尔多斯盆地的石油奇迹。

鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地，具有整体升降、西倾单斜、构造单一的大型多旋回的克拉通盆地的特征，油气资源十分丰富，油气分布具有南油北气、上油下气的特点。其资源评价结果，随着勘探开发程度加深和石油科技发展而逐步升级，石油资源量由最初的 $19 \times 10^8 \text{ t}$ 到后来的 $31 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $40 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $80 \times 10^8 \text{ t}$ ；天然气资源由 $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 到 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截止2000年底，长庆油田累计探明石油储量可达 $9 \times 10^8 \text{ t}$ ，天然气探明加控制储量可达 $6500 \sim 7000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。油气探明储量在CNPC名列第4位；长庆气田在世界名列第29位；原油产量 $460 \times 10^4 \text{ t}$ ，在CNPC和全国排名名列第5位；天然气产量 $24.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，在全国名列第2位；油气年产当量 $700 \times 10^4 \text{ t}$ ，在CNPC名列第4位、全国第5位；天然气产能建设 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，名列全国第1位；石油产能建设 $70 \times 10^4 \text{ t}$ ，名列CNPC第4位；地震剖面工作量 8000 km ，名列CNPC第2位；钻井进尺 $160 \times 10^4 \text{ m}$ ，井数800口，名列CNPC第3位，其中丛式井钻井数名列全国第1位；试油压裂812口、1800多层次；投资总额约 60×10^8 元，企业收入 160×10^8 元，均名列陕西第1位、西北第2位；利润 32×10^8 元（按国际准则计算），上缴税费 18×10^8 元，均名列陕西第1位、西北第2位。这些数字和成果是几代石油人辛勤探索的结晶，更主要是长庆人创造的奇迹。

这个奇迹是几代石油人数十年艰难创业、拼搏进取的奇迹，是不断开拓取得大发展的奇迹，更是依靠科技进步创造辉煌的奇迹。因为这个奇迹是在世界罕见的、勘探开发难度极大的、隐蔽复杂的低渗（渗透率为 $0.49 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）、低压（压力系数为0.8）、低产（油井平均日产 3.47 t ，气井平均日产 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ）的“三低”油气藏中实现的。

鄂尔多斯盆地是我国开展石油勘探开发最早的地区。1905年在陕北钻成我国陆上第一口油井。解放后，国务院于1950年2月召开了西北石油勘探工作会议，同年4月在陕北、陇东、银川、河套部署了160人的地质普查队，接着成立了西北石油勘探局，长庆油田作为国有特大型企业是这一历史的合法继承者。1999年石油企业内部大重组后，我们本着对历史负责的态度，把长庆油田的发展历史大体划分为五个阶段。第一阶段——50年代，为鄂尔多斯盆地石油勘探的筹划时期，以西北石油管理局老一代专家开展的地质普查和钻成第一批探井，并对盆地石油分布有了宏观、粗略的认识为标志。第二阶段——60年代，为鄂尔多斯盆地石油勘探、开发的起步时期，以在银川石油勘探局主导下发现李庄子和马家滩油田为标志。第三阶段——70年代，为鄂尔多斯盆地勘探开发大规模上马、长庆油田的组建和创业时期。在1970年10月12日，国务院、中央军委下发了（70）81号文件，成立中国人民解放军兰州军区长庆油田会战指挥部后，相继建成马岭、城华、红井子、吴旗、直罗、下寺湾等油田，形成了一定的原油生产能力，原油外输兰州。在这一时期，对盆地油气勘探所

形成的认识为：一是含油面积大，但多为低渗低产油田；二是侏罗系产量高，但大多数是“小土豆”，勘探开发难度大。这一时期的大规模勘探开发所形成的地质认识和宏观地质成果为 80 年代、90 年代的滚动开发、原油上产提供了理论依据，我们至今所进行的一些工作仍然建立在 70 年代的工作成果的基础上。第四阶段——80 年代，为长庆油气勘探开发的调整时期，以原油产量稳定在 140×10^4 t 左右、并为开发低渗透油田作技术准备为标志。在这一时期，实施了鄂尔多斯盆地油气勘探方向的两个重大的调整，即由侏罗系找油为主转向三叠系找油为主、由中生界找油转向奥陶系找气。第五阶段——90 年代，为长庆油田的大发展时期，主要成果是成功地开发了安塞特低渗油田，发现和开发了靖安油田，使长庆气田进入世界级大气田的行列。侏罗系滚动勘探开发走向成熟，炼化化工达到一定规模，油气储量、产量成倍增长；油气勘探开发进入良性循环；生产、生活基地大规模调整和建设，为今后油田持续发展奠定了坚实的基础。这个时期对盆地储层特征的基本认识由“三低”转变为既存在“三低”、又存在“两高”（局部高产、高渗），油气储层物源多向，且以河流相沉积为主，非均质性强，层间渗透率级差大。

在鄂尔多斯盆地几十年的油气勘探开发中，长庆油田形成了一整套具有长庆特色的、在国内甚至国际领先的低渗透油气藏勘探开发技术。总结出了“六大技术理论”——宏观找油理论；中生界隐蔽性油藏的成藏理论；盆地古生界岩溶古地貌—河流三角洲成藏的理论；中生界石油滚动勘探开发理论；鄂尔多斯盆地深盆地理论；“三低”油田低投入的经济开发理论。形成了“四种开发模式”——安塞模式；气田模式；马岭模式；小区块模式。配套完善了“十一项主体技术”——高分辨率地震勘探与储层横向预测技术；鄂尔多斯盆地油气勘探综合研究技术；低渗、特低渗透油田开发配套技术；长庆低渗透油气田优化布井技术；低渗、特低渗油气田酸化压裂改造工艺技术；长庆低渗油藏超前注水、周期性注水和精细注水工艺技术；黄土塬复杂地貌条件下丛式井、小井眼油田开发技术；低渗、特低渗砂岩油藏滚动勘探开发技术；边底水岩性油藏开发技术；低渗透油气田化学应用技术；长庆气田高效开发技术。研究并实施了“十项关键技术”——长 6、长 8 油层改造技术；大规模改造上古生界储层技术；气井水平井技术；欠平衡钻井技术；CO₂ 压裂技术；上古生界储层分段改造和合采技术；下古生界储层布井技术；浅层开发技术；黄土塬地震技术；防腐技术。制定并完善了“十条技术思路和政策”——长庆气田气井产能测试及无阻流量计算方法；油田开发井网部署政策；超前注水开发技术政策；油田滚动开发技术思路与政策；边底水油藏开发技术政策；浅油层 3.5 英寸套管完井工艺技术思路；长庆气田上古生界地层 5.5 英寸套管完井工艺技术思路；油气井套管防腐技术政策；提高气井单井产量的技术思路与政策；提高油井单井产量的技术思路。

长庆勘探开发研究院作为长庆油田的地质参谋部和主要的科研技术单位担负着鄂尔多斯盆地油气勘探开发科学技术、油气田勘探开发规划方案设计和新技术推广应用等综合性研究工作。随着长庆油田的发展，已基本形成了一个学科齐全、技术配套、装备先进、技术力量比较雄厚的油气勘探开发综合性科研中心。建院 20 多年来，广大科技工作者紧密围绕长庆油气勘探开发和生产建设实际积极开展科技攻关和科学试验，在勘探开发低渗透油田、发现和开发长庆大气田等工作中，发挥了科研先导作用，取得科研成果 815 项，其中，获国家级奖 7 项、省部级奖 40 项、局级奖 523 项，为鄂尔多斯盆地油气储量、产量的持续稳定增长作出了积极贡献。

《鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集》集中反映了长庆勘探开发研究院广大科研工作者

在油气勘探开发科研生产中的创造性思维和做法，反映了他们的辛勤劳动和丰硕成果，是一部很有价值的科技论文集。我相信，它将有助于油气勘探开发科学研究工作的进一步深化。

长庆油田的发展和新世纪的到来，为长庆广大石油科技工作者提供了发挥聪明才智、施展才华的广阔天地。毫无疑问，科技发展将更加日新月异，石油天然气工业的发展也必将更依赖于石油科技的进步。希望广大的科技工作者抓住机遇、锲而不舍、开拓进取、勇攀石油科技新高峰，为祖国石油天然气工业的发展作出新的、更大的贡献，再创“鄂尔多斯盆地的石油奇迹”。

2000年8月

前 言

鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地，油气资源十分丰富。但该区绝大部分油气藏都具有隐蔽复杂和低品位、低渗透、低产量、低效益的油气田开发的经济边际性特点，这在国内外都极为罕见，因此，其勘探开发难度极大。所以，系统总结该盆地在油气勘探开发过程中所取得的成功经验、方法和技术，具有重大的理论和实际意义。

鄂尔多斯盆地是我国开展石油勘探开发最早的盆地，从 1907 年在陕北延长钻成我国陆上第一口油井至今已有 90 余年。但真正大规模的勘探开发是从 1970 年“长庆会战”以后开始的。30 年来，几代长庆人呕心沥血创建了辉煌的业绩。特别是近 10 年来，由于大气田的发现、侏罗系油田滚动勘探开发的成功、三叠系延长组低渗透整装油田的探明与大规模经济有效地开发，长庆油田取得了储量和产量的双丰收，开创了“油气并举、协调发展”的大好局面，实现了长庆油田发展史上历史性的飞跃。在这个期间，针对油田油层致密、渗透率低的特点，长庆人在“磨刀石上闹革命”，探索低渗透油田的开发规律，取得了由过去“井井有油、井井不流”到现在“井井有油、井井能流”的重大突破，原油年产量持续稳定增长，并使安塞、靖安这两个数亿吨级特低渗油田成为我国高效开发低渗、特低渗油田的典范。天然气勘探成果更是令人振奋，勘探开发了我国陆上目前最大的世界级整装气田，并已向北京、西安、银川供气，且该区的天然气勘探工作至今方兴未艾，储量规模和含气范围仍在继续扩大。

这些业已取得的业绩是长庆几万名职工艰苦创业的结果，它饱含着石油科技的进步和科技工作者的心血与汗水。本论文集集中反映了长庆勘探开发研究院广大科研工作者在鄂尔多斯盆地油气勘探开发科研生产中的思想和做法，反映了他们的辛勤劳动和丰硕成果。这些成果的广泛运用，为长庆油气储量的快速增长、原油的稳产、上产以及天然气的开发作出了积极的贡献。

本论文集由长庆油田公司副总地质师闵琪、长庆油田公司勘探开发研究院院长杨华担任主编，付金华、张明禄、荣春龙、巨全义担任副主编。文字加工和统稿工作由荣春龙负责，谢国明、袁渊、袁开齐参加了部分文字加工工作。

教授级高级工程师、原长庆石油勘探局局长、现长庆油田公司总经理胡文瑞同志在百忙之中为本论文集作序，我们深表感谢！

编 者
2000 年 9 月

目 录

鄂尔多斯盆地地下古生界奥陶系天然气成藏的地质特征	杨 华	郑聪斌	席胜利	(1)
鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法.....	付金华	段晓文	姜英昆	(20)
鄂尔多斯盆地三叠系延长统成藏地质特征及油藏类型	陈安宁	韩永林	杨	冀小林 (33)
鄂尔多斯盆地侏罗系古地貌油田的形成条件与分布规律	吕 强	郭正权	潘令红	刘显阳 王 景 (47)
陕甘宁盆地中央古隆起的形成及其与天然气的关系.....	张 军	徐黎明	包国民	(58)
陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳岩溶岩及岩溶相模式.....	郑聪斌	王飞雁	贾疏源	(64)
陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳隐蔽油气藏成藏条件.....	马振芳	陈志远		(74)
鄂尔多斯盆地中东部奥陶系不整合面成藏组合及其分布规律.....	周树勋	马振芳		(81)
陕甘宁盆地中部气田主要产层孔洞的形成及演化.....	郑聪斌	王世录	贾疏源	(86)
鄂尔多斯盆地中部古风化壳储层特征.....	付锁堂	马振芳		(92)
陕甘宁盆地中部气田白云岩储层孔洞充填物与储集性	黄月明	马振芳		(101)
长庆气田马五 1 储层裂缝类型及特征	王彩丽	孙六一	王 宏	(107)
鄂尔多斯盆地地下古生界含气系统分析	吕 强	左智峰	石晓英	(114)
鄂尔多斯盆地中部气田天然气源及混源比研究	徐正球	李剑锋		(123)
鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系	陈安宁	范正平		(130)
层序地层学方法在陕甘宁盆地东部石炭—二叠系岩相研究中的应用		石晓英		(140)
鄂尔多斯盆地长庆气田上古生界碎屑岩成岩作用及其孔隙演化	范正平	侯云东	贾亚妮	杨宝星 (145)
鄂尔多斯盆地陕 141 井区上古生界气藏储层特征	郑承光	范正平	侯云东	贾亚妮 (155)
鄂尔多斯盆地上古生界深盆气形成的气源条件研究	张文正	李剑锋	咎川莉	(159)
鄂尔多斯盆地中生界天然气成因类型及资源评价		凌升阶		(170)
鄂尔多斯盆地中部地区中生界油藏分布与成藏条件	凌升阶	吕剑文		(176)
鄂尔多斯盆地庆华南地区延长组上部沉积相及油气富集规律	喻 建	窦伟坦	凌升阶	宋江海 (185)
鄂尔多斯盆地南部侏罗系石油成藏与分布的控制因素		杨新生		(190)
鄂尔多斯盆地南部中生界成岩圈闭		杨 昀		(199)
鄂尔多斯盆地中生界烃源岩生、排油量的计算	李剑锋	徐正球	马军	李雪梅 (206)
鄂尔多斯盆地奥陶系盆地模拟方法及结果分析	席胜利	付金华	刘新社	(213)
长庆气田上古生界储层综合预测技术研究与应用	潘存焕	韩申庭	王大兴	史松群 夏正元 (217)
鄂尔多斯盆地榆林区上古生界山西组砂岩气藏的岩性地震勘探及效果	韩申庭	王大兴	杨 华	赵玉华 (226)

低孔低渗高阻抗砂岩气藏的 AVO 分析	王大兴	于波	(233)
小波变换求取地震特征在识别侵蚀沟谷中的应用	于波	王宝江	潘存焕 (240)
低渗透砂岩气藏测井岩石组分反演方法及意义	姜英昆	石玉江	周虎 (246)
长庆气田上古生界低渗透砂岩气藏测井评价方法	孙小平	石玉江	姜英昆 (254)
含气储集层泥浆侵入的动力学特征及其对补偿中子和补偿密度测井响应的影响	石玉江	黄隆基	(261)
油气地表化探在黄土梁塬地区的应用	郭正权	(269)	
鄂尔多斯盆地中生界石油滚动勘探开发技术	张明禄	王海红	李亮 崔攀峰 (274)
马岭油田稳产技术	朱圣举	艾芳	(280)
改善马岭油田开发效果的新途径	赵向宏	(294)	
特低渗透油田开发的主要做法	史成恩	潘增耀	赵继勇 熊维亮 (299)
靖安油田三叠系延长组长 6 油藏开发地质特征 ...	李少华	李书恒	刘莉莉 魏玉萍 (315)
靖安油田长 2 层油井产出特征及其影响因素分析	李书恒	魏玉平	刘莉莉 (326)
靖安油田开发压裂试验	张永强	赵继勇	史成恩 李书恒 魏玉平 袁林 (333)
边底水油藏合理开发的技术政策	史成恩	朱圣举	赵向宏 刘颖梅 (340)
陕北浅油层成藏规律及开发前景	赵惊蛰	李健	刘颖梅 (353)
老井资料复查技术及其在马岭油田稳产中的作用	王永康	杨旭红	史成恩 李健 (361)
沉积微相研究在油田开发中的应用	艾芳	陈建文	韩发俊 (366)
动态监测资料在油田开发中的应用	车起君	赵菊爱	王永康 (374)
预测油气田产量的广义模型	胡建国	姚蕃珍	屈雪峰 (381)
单元产量分配结果验证新方法	陈建文	王永康	艾芳 (394)
靖安油田注气矿场试验研究 ...	袁林	李忠兴	张明禄 史成恩 胡建国 赵继勇 (402)
微生物采油技术的室内评价及其现场试验效果分析	武平仓	巨全义	李成龙 陈小可 (412)
长庆气田靖边区开发前期气藏综合评价技术	张明禄	卢涛	张宗林 李跃刚 秦志保 (420)
长庆气田靖边区气藏地质建模	李元觉	王彩丽	张宗林 (431)
长庆气田马五 1 气藏的气水分布特征	王彩丽	王明贤	孙小平 张彦琳 (440)
长庆气田单井合理产量和产能预测研究	喻克强	卢涛	韩兴刚 卞晓燕 (447)
低渗薄层大气田开发井网研究	张敏渝	喻克强	达世攀 王东旭 (455)
低渗透非均质气藏布井方式及井网密度研究	徐文	郝玉鸿	(460)
修正等时试井技术的应用与发展	李跃刚	谭中国	范继武 许敏 洪鸿 (466)
气井废弃地层压力确定的新方法	郝玉鸿	(477)	
用套管压力确定天然气井绝对无阻流量	王宏涛	(485)	
低渗透油田注水水质标准及处理技术	巨全义	马宁强	(492)
高效洗井工艺技术研究及其应用	庞岁社	邹文选	吕小玲 邵创国 (499)
低渗透砂岩油藏堵水调剖技术研究及其应用	杨生柱	张宏强	曹建坤 张继红 何江 (505)
低渗透注水油田地层结垢预测及防治技术	巨全义	武平仓	罗春勋 (513)

C Q 系列除垢技术及其在长庆低渗油田中的应用	马广彦	徐振峰	罗春勋 (525)
油田含油污水综合治理技术研究		向忠远	林永泉 (531)
长庆气田天然气井套管内腐蚀及缓蚀剂应用研究	韩翼云	孙竹梅	马西凤 (540)

鄂尔多斯盆地下古生界 奥陶系天然气成藏的地质特征

杨 华 郑聪斌 席胜利

摘要 本文以鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌气藏为例,通过深入分析奥陶系碳酸盐岩储集层岩相的展布、古岩溶作用、孔隙类型及储层物性、烃源岩地化指标、封盖条件及圈闭成因、天然气生、排、运聚特征,系统归纳了奥陶系天然气的成藏模式,并且在此基础上将气藏的形成概括为储集体、圈闭体及运聚场的形成和调整定形等4个演化阶段。认为,鄂尔多斯盆地奥陶系天然气藏的分布不仅与上述成藏地质要素相联系,而且受古岩溶、古地貌、构造枢纽带及成烃中心控制。同时指出,加里东旋回期是形成气藏的基础,燕山旋回期是气藏形成的主要阶段,古风化壳是天然气富集的主要场所。

引 言

鄂尔多斯盆地位于我国东部构造域和西部构造域的接合处,具有地台和前渊原型盆地叠复的地质特点。不论是地台沉积,还是前渊层序均普遍含气,并且保存和发育了大华北最完整的下古生界海相碳酸盐岩和上古生界海陆交互相含煤碎屑岩系。这套地层沉积厚、分布广,不仅构成了盆地古生界双层烃源结构,而且在天然气生成、运聚和成藏方面更具特色。随着长庆气田奥陶系岩溶古地貌气藏的探明及天然气储量的逐年增长,特别是奥陶系内幕含气显示的不断出现,预示了盆地下古生界天然气资源仍具有较大的潜力。因此,系统分析下古生界奥陶系天然气成藏的地质特征对于开拓勘探思路、扩大勘探领域具有重要的现实意义。

区域地质概况

1. 构造面貌

盆地现今构造由六个一级构造单元组成,东西缘分别是逆冲带、绕褶带,南部和北部为隆地区,中部为宽缓的斜坡,西部为南北展布的向斜带。而在古生代时,盆地南北受加里东地槽控制,东西由残存的坳拉谷所夹持,中部则发育一“L”型正向古构造单元,即中央古隆起。

该隆起雏形于寒武纪,发育于奥陶纪,消亡于侏罗纪。在其形成和发育过程中,由于受西侧坳拉谷影响,东侧伴生一北西向古坳陷。二者不仅控制了盆地下古生界沉积,而且对天然气的生成、运聚也有重要的影响(图1)。

2 沉积特征

岩相古地理研究表明,鄂尔多斯盆地早古生代为海相碳酸盐岩沉积。奥陶纪时,由于中央古隆起的形成,盆地本部与周缘则具有不同的沉积特征。

在早奥陶世早期，盆地开始了早古生代以来的第二次海侵，但规模较小，仅沿盆地前缘沉积了冶里、亮甲山组，厚度为 50~200 m，岩性以含燧石的白云岩为主。

在早奥陶世中晚期，由于怀远运动的影响，盆地在冶里、亮甲山组沉积后，一度抬升遭受剥蚀，直至早奥陶世中期，又开始了早古生代以来的第三次海侵。这次海侵规模大、范围广、速度快，在盆地中东部广泛沉积了马家沟组。根据沉积层序及岩性特征，可将该组划分为六个岩性段。在此基础上，依据科研生产的需要又可将马五段进一步划分为 10 个小层。盆地西缘与马家沟组相对应的层位是三道坎组、桌子山组和克里摩时组。其中马一、马二、马三段与三道坎组均由 2 个沉积层序组成，属华北型生物面貌。马四、马五段与桌子山组均由 2 个沉积层序组成，但生物面貌略有差异，桌子山组中上部除华北型生物群落外，开始有华南型分子混入，表明祁连

图 1 鄂尔多斯盆地区域构造特征

海水在马四最大海侵期已由西向东侵漫到盆地西缘地区。马六段与克里摩里组也由 2 个沉积层序组成，但生物面貌截然不同，西缘为华南型，而东部为华北型，仅在南缘为混合型。随着华北地台的整体抬升，马六段地层在盆地中东部遭受强烈剥蚀，盆地南缘相应保存较厚。

在中奥陶世，盆地广大地区再度海退，鄂尔多斯陆地随之扩大，并围绕鄂尔多斯陆地西缘和南缘倾伏区发育了平凉组“L”型沉积带。其岩性主要以笔石页岩和浊流沉积的砂岩、角砾岩、生物灰岩为特征。直至晚奥陶世背锅山期之后，海水彻底退出鄂尔多斯地区，从而结束了下古生界的沉积。

从上述沉积特征不难看出，中央古隆起的长期发育，将盆地分隔为两大沉积体系，即中东部局的限海蒸发台地沉积体系，西缘为开阔海沉积体系，从而为奥陶系天然气成藏奠定了不同的物质基础。

3 古地貌格局

奥陶系沉积后，加里东运动不仅使盆地广大地区因抬升而缺失了奥陶系中上统、志留系，泥盆系及下石炭统地层，而且使下奥陶统地层也经历了长期的风化剥蚀和大气淡水的淋滤，形成了台、丘、洼相间，槽、沟、谷纵横的古喀斯特景观。依据古构造、古地形、古气候、古岩溶及古水文地质条件，可将奥陶系岩溶古地貌划分为 3 个 2 级岩溶地貌单元（图 2）。

(1) 岩溶高地。其分布于古隆起区。由于受古构造控制，古地形相对较高。高地内一般缺失石炭系本溪组地层，奥陶系马五段地层由高地边缘向高部位依次变老，甚至缺失。古地

形高低幅差大，排水快，侵蚀强烈，风化壳发育深度一般 10 m 左右。在破裂构造发育部位，见有深度较大的垂直洞穴系统。

(2) 岩溶平原。其形成于古拗陷之上。由于地表侵蚀作用较弱，古地形相对平坦、宽阔，潜水面相对较高，风化壳发育深度一般 30 m 左右。

(3) 岩溶台地。其界于岩溶高地与岩溶平原之间。古地形在平缓倾斜的背景上发育溶丘、溶梁、溶沟、溶洼等次一级正负岩溶地貌单元。由于其处于岩溶水汇集、排泄的过渡带，地表地下岩溶作用强烈，溶蚀空间格外发育，风化壳发育深度一般 70 m 左右。但在溶沟、溶洼内，因其处于排水通道处，风化壳发育深度相对较浅。

上述岩溶地貌单元，无论是正地形还是负地形，其地形都十分平缓，其幅差无法与现代岩溶地貌比拟（图 2）。

图 2 鄂尔多斯盆地奥陶系古地貌特征(据马振芳,略改)

主要储集岩相及其展布

1. 储集岩类型

储层岩石学特征及类型是决定其储集性能优劣的基本因素。鄂尔多斯盆地奥陶系沉积、成岩环境多变，岩石类型丰富，既有不同成因的白云岩，又有不同晶粒的石灰岩。这些岩类，因岩性和类型不同而具有不同的原始孔隙网络和孔隙发育特征，无论在奥陶系古风化壳，还是在奥陶系沉积层内幕，分布均较广泛。

(1) 白云岩。

奥陶系白云岩在盆地内分布很广，它是碳酸盐岩储层发育的主要岩石类型。白云化作用改善了碳酸盐岩的储集性能，使白云岩的储集性优于一般灰岩。白云岩在奥陶系所占比例较大。其主要分布在马家沟组一、三、五段和中央古隆带的马四段，在盆地南缘的马六段和西缘的桌子山组中白云岩也占一定比例。这些白云岩的成因机制，归纳起来，大体可分为准同生白云岩和成岩白云岩两类。这两类白云岩的沉积环境和成岩时空不同，导致其岩石矿物学特征及储集性能也迥然不同。

准同生白云岩是在碳酸盐沉积物尚未脱离沉积水体的条件下，由高镁（ Mg^{2+} ）水介质在毛细管作用下迅速交代灰泥而形成的。这类白云岩的形成对环境的依赖性较强，并且保持了沉积物的原始组构。其在盆地东部蒸发潮坪环境中较为发育，常以薄层出现，沉积质点较

小，多为泥—粉晶结构，普含膏盐晶屑。较纯的准同生白云岩主要发育晶间孔、晶间溶孔和铸模孔，而含硬石膏斑晶和硬石膏砾屑白云岩是发育溶蚀孔洞储层的重要岩石类型。

成岩白云岩是多种云化作用的产物，既可由准同生白云岩进一步云化产生，又可以通过交代石灰岩形成。成岩白云岩较石灰岩的晶间孔隙相对发育，并且在奥陶系常以块状厚层或透镜状产出，以细晶—中细晶为主，并常见雾状和环带状结构，发育晶间孔、晶间溶孔和溶蚀孔洞。其主要分布于中央古隆起北端及盆地西缘、南缘。它既可在古风化壳中形成溶蚀孔洞储层，也是奥陶系内幕溶蚀孔洞储层发育的主要岩石类型。

(2) 石灰岩。

奥陶系石灰岩主要发育于开阔海台地和台缘斜坡环境，以泥、粉晶灰岩、砂、砾屑灰岩、藻架灰岩及云斑灰岩为主。其中，砂屑灰岩、藻架灰岩和云斑灰岩是发育晶间孔、晶间溶孔和生物铸模孔的重要岩石类型。天1井的克里摩里组溶蚀孔洞储层主要为砂屑灰岩和藻架灰岩。马四段云斑灰岩，在深埋藏过程中，经成岩云化，形成了热水岩溶型溶蚀孔洞，从而对奥陶系内幕储层的形成具有建设性作用。

2 储集相带及其展布

海侵、海退形成的多旋回沉积层序构成了奥陶系的主要沉积特色。其中，海侵期的开阔海环境发育了地台相石灰岩层系；海退期的局限海环境发育了蒸发台地相膏云岩组合。由于中央古隆起的屏障作用，导致了盆地中东部长期处于膏盐洼地与蒸发潮坪环境，以及在盆地西缘和南缘的开阔海台缘斜坡环境。不同的沉积环境具有不同的相律组合和展布特征，同时形成不同的储集相带。马家沟组一、三、五段，由于其形成于膏盐洼地与蒸发潮坪环境，因而，在纵向上组成了一套频繁交替的微相韵律和向上变浅的递变序列，呈现出潮下—潮间—潮上的全旋回相律组合及潮间—潮上的半旋回相律组合。其在平面上的展布，虽与凹凸不平的古地形有一定关系，(马一、马三、马五的相带范围也有一定差异)，但总趋势仍然遵循了瓦尔索相律的特点，即从陕北盐洼向中央古隆起区依次呈现出潮缘泻潮—泥云坪—含膏云坪—藻泥云坪和含膏云坪这样一个微相演变序列，形成了以含膏云岩为主的有利储集相带(图3)。

马家沟组二、四、六段和西缘桌子山组沉积，因其处于海侵频繁期，所以，发育了一套自下而上由细变粗的多旋回递变序列。每一序列的上部都形成了由生物蠕动和潜穴成因的云斑灰岩微相带。该带在埋藏成岩过程中极易云化和受到地下热水的改造，是奥陶系内幕主要储集相带。

需要指出的是，在灰泥丘基础上，

图3 鄂尔多斯盆中部奥陶系马五1沉积微相图

中央古隆起周缘常发育灰岩颗粒滩、坝微相，虽然分布局限，但对奥陶系储集空间的形成也具有重要意义。

古岩溶类型及发育特征

奥陶系碳酸盐岩储层的储集空间主要以次生的溶蚀孔洞为主。而次生溶蚀孔洞的形成成为古岩溶长期作用的结果。已识别出的古岩溶成因类型复杂，发育时空各异，但归纳起来，基本由两类组成，即表生古岩溶和深埋藏古岩溶。两类古岩溶在不同地史时期的广泛发育，塑造了奥陶系碳酸盐岩储集体。

1. 表生古岩溶

表生古岩溶如同现代岩溶一样，其水文地质条件主要与大气淡水环境密切相关。依据岩溶发育的时空关系可将表生古岩溶进一步划分为层间岩溶和风化壳岩溶。

(1) 层间岩溶。

层间岩溶广泛发育于盆地中东部马家沟组的蒸发潮坪环境。由于潮坪环境的周期暴露，使沉积层接受了大气淡水的淋滤而产生溶蚀作用。但由于盐水体的阻碍，使淡水的作用控制在盐水体之上的一定范围内并产生以渗滤扩散为主的运动，从而在沉积层中形成渗流、扩散流与滞流三个带，构成了层间岩溶的三段式结构。其中，上段属于大气淡水渗入淋滤段，由于易溶矿物的溶解及上覆沉积后的增荷，使该段常形成压裂角砾岩。中段属于大气淡水扩散潜流段，易溶矿物溶解后形成溶蚀孔洞；但由于淡水体实际上是大气淡水与入侵海水和盐水的混合水，因而产生混合水云化作用，生成淡水白云石，并充填溶蚀孔洞，形成充填与半充填溶斑云岩。下段属于深部滞流段，岩溶水矿化度升高，对沉积层产生交代作用，形成次生灰岩带。由此可见，层间岩溶的发育依附于沉积旋回发育的顶部，受沉积微相的控制。并且具有层状展布多旋回发育的特征（图 4a）。

(2) 风化壳岩溶。

图 4 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶模式

a—层间岩溶模式；b—风化壳岩溶模式；
c—压释水岩溶模式；d—热水岩溶模式

其在奥陶系不整合面伴随古风化壳的形成而广泛发育。依据岩溶水流的特征，可将风化壳岩溶期地下水流的方式分为垂直渗流、水平潜流和深部绕流三种。其中垂直渗流是由地表水垂直下渗形成，同时产生垂直岩溶管道，并通过这些管道把地表风化物带到地下；随着水流的减弱，管道常被充填形成岩溶填积岩。水平潜流常位于潜水面附近，由于水流集中，流速快，溶蚀作用强烈，形成大量近于水平展布的岩溶空间，岩溶水减弱时，水平管道多被沉积物充填，形成一套水平充填的岩溶岩组合。深部绕流带是发育在潜水面以下的径流，其搬运能力减弱，以携带化学溶解物质为主，常使深部膏盐层溶蚀形成膏溶角砾岩及交代次生灰岩。在上述三种地下水径流作用下，风化壳岩溶的发育仍以三段式结构为特点。

根据古地磁研究，震旦纪到二叠纪，鄂尔多斯盆地处于古赤道以北中低纬度之间，属于炎热、潮湿气候区，有利于岩溶的形成和发育。从古水文条件的变迁分析，可划分两个岩溶发育旋回。早期旋回，因古气候炎热干燥，所形成的三段式结构的岩溶岩以白云岩角砾和白云质渗滤砂等填积物为主。晚期旋回，因古气候炎热、潮湿，所形成的三段式岩溶岩结构以填积泥岩、塌积角砾岩和冲积砂、砾岩为特征。从而在古地貌背景上，塑造了奇特的岩溶形态。并且在层间岩溶的基础上使岩溶空间的规模达到了高峰。从孔隙发育率的统计表明，层间岩溶阶段孔隙发育率为 20%，风化壳岩溶阶段孔隙发率达到 40%。可见风化壳岩溶对碳酸盐岩储集体的形成具有重要作用（图 4b）。

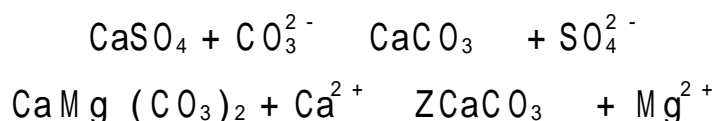
2 深埋藏古岩溶

深埋藏古岩溶是在封闭环境下，由地层水（沉积水、矿物结晶水、深部变质水及大气渗水）与可溶岩相互作用形成的。因水动力条件和水化学条件的不同可进一步分为压释水岩溶和热水岩溶。其中，压释水岩溶与烃类运聚关系密切，在奥陶系古风化壳气藏形成过程中对储集空间的形成和天然气的运移、聚集，具有关键性作用。

(1) 压释水岩溶。

压释水岩溶的形成具有特定的地质环境。本区古风化壳上部石炭—二叠系煤系地层的沉积和广泛分布，为此类岩溶的发育创造了条件。压释水岩溶作用结果仅产生溶蚀岩与淀积、交代岩两类岩溶岩，但因其叠加在前期岩溶岩的基础上，从而使岩溶特征难以区别。

上覆石炭—二叠系煤系地层的酸性压释水在流体势的作用下进入古风化壳，使古风化壳相对静止的储水环境因水动力的不平衡而产生对流。压释水向远离侵入口流去，而深部流体向侵入口流来，如此往复，形成压释水特有的对流模式。由于压释水携带着大量的有机酸和 CO_2 不断对围岩产生溶蚀，使岩溶水中的 Ca^{2+} 含量也不断提高，循环至深部则引起白云岩与硬石膏岩的次生灰岩化：



同时由深部返回的水流便携带着大量的 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 向古风化壳顶部迁移，造成古风化壳顶部的黄铁矿和白云岩化。岩溶水对流循环的结果不仅在古风化壳各集水单元产生溶蚀中心，形成溶蚀岩，同时在溶蚀中心外围产生化学沉淀，形成淀积、交代岩。随着埋藏的持续加深，岩溶水中的 pH 值急剧向碱性转化，最终因抑制水化反应的进行，使岩溶空间趋于定型。由此表明，压释水岩溶发育的结果既有溶蚀作用，为烃类的进入提供了载体，同时又使岩溶空间向成岩致密化方向演化，导致岩溶储集体呈现出低孔、低渗大面积分布的特点（图 4c）。