# 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩勘探历程、进展及前景展望

唐梓轩

**摘　要：**鄂尔多斯盆地是中国第二大产气盆地，碳酸盐岩层系（寒武系、奥陶系马家沟组及二叠系太原组）历经 70 余年勘探，已成为盆地天然气增储上产的重要接替领域。本文基于公开文献、勘探成果与生产数据，系统梳理了盆地碳酸盐岩勘探历程，总结了主要地质进展，并展望了未来勘探方向。结果表明：①勘探历程可划分为区域调查与探索起步（20 世纪 50 年代—1988 年）、风化壳突破与靖边气田发现（1989—1999 年）、规模增储与多层系拓展（2000—2018 年）、盐下与深层立体勘探（2019 年至今）四个阶段，勘探认识实现了由“构造圈闭”到“风化壳岩溶控藏”、再到“相控岩溶与盐下近源成藏”的两次跃迁；②储层类型由单一的表生风化壳岩溶，扩展为盐下丘滩白云岩、微生物碳酸盐岩、豹斑状白云岩、超覆型碳酸盐岩-蒸发岩共生组合及太原组灰岩等多类型并存；③早成岩期岩溶理论的建立，突破了经典风化壳模式的解释局限，为盐下及内幕储层预测提供了依据；④ 2022 年米探 1 井奥陶系盐下获 35.24 万 m³/d 高产气流、横山气田太原组灰岩探明与预测储量超过 2000 亿 m³，标志着盆地碳酸盐岩勘探进入“常非并重、盐下接替”的新阶段。盆地天然气原地资源量约 46.9 万亿 m³，碳酸盐岩领域整体仍处于低勘探程度。未来应聚焦奥陶系盐下、风化壳精细挖潜、盆地西缘与南缘、寒武系及太原组灰岩五大领域，重点攻克低丰度烃源岩评价、膏盐层下储层预测、断缝体刻画与体积压裂等关键技术。

**关键词：**鄂尔多斯盆地；碳酸盐岩；奥陶系；马家沟组；盐下；岩溶；勘探历程；勘探前景

中图分类号：TE122.1　　文献标识码：A

## Exploration history, progress and prospects of carbonate rocks in the Ordos Basin

Zixuan Tang

**Abstract:** The Ordos Basin is the second largest gas-producing basin in China. Its carbonate succession, including the Cambrian, the Ordovician Majiagou Formation and the Permian Taiyuan Formation, has been explored for more than 70 years and has become an important replacement domain for gas reserve growth. Based on published literature, exploration results and production data, this paper systematically reviews the exploration history, summarizes major geological advances and discusses future directions. The history can be divided into four stages: regional survey and early exploration (1950s–1988), weathering-crust breakthrough and discovery of the Jingbian gas field (1989–1999), large-scale reserve growth and multi-layer expansion (2000–2018), and subsalt and deep multi-target exploration (2019–present). The exploration philosophy has experienced two leaps, from structural traps to weathering-crust karst control, and further to facies-controlled karst and near-source subsalt accumulation. Reservoir types have expanded from a single weathering-crust karst reservoir to a suite including subsalt shoal dolomite, microbial carbonate, leopard-spotted dolomite, overlap-type carbonate–evaporite associations and Taiyuan Formation limestone. The establishment of the eogenetic karst theory has overcome the limitations of the classical weathering-crust model and provides a basis for predicting subsalt and intra-formational reservoirs. In 2022, Well Mitan-1 obtained a high-yield gas flow of 352,400 m³/d from the subsalt Ordovician, and the Hengshan gas field discovered in the Taiyuan Formation limestone reported more than 20 billion m³ of proven plus predicted reserves, marking a new stage in which conventional and unconventional resources are explored simultaneously with the subsalt domain as the replacement. The total original gas-in-place of the basin is approximately 46.9 trillion m³, whereas the carbonate domain remains at a low exploration level. Future exploration should focus on five domains: the subsalt Ordovician, fine-scale tapping of the weathering crust, the western and southern margins, the Cambrian, and the Taiyuan Formation limestone. Key technologies include the evaluation of low-abundance source rocks, reservoir prediction beneath evaporites, fracture-cavity characterization and volume fracturing.

**Key words:** Ordos Basin; carbonate rock; Ordovician; Majiagou Formation; subsalt; karst; exploration history; exploration prospect

# 0 引言

碳酸盐岩是全球油气勘探最重要的储层类型之一，全球约 50%的油气储量和 60%以上的产量来自碳酸盐岩[1]。中国海相碳酸盐岩分布面积广、层系多、时代老，已在塔里木、四川、鄂尔多斯等盆地形成规模化油气区，是未来油气增储上产的重要领域[2]。

鄂尔多斯盆地是中国第二大产气盆地[3]。2025 年，盆地油气产量当量突破 1 亿 t，原油产量连续两年稳定在 3800 万 t 以上，天然气产量近 800 亿 $m^3$[4]。盆地碳酸盐岩勘探始于 20 世纪 50 年代的区域地质调查；1989 年 6 月，陕参 1 井在奥陶系马五 1 获得无阻流量 28.3 万 $m^3/d$ 的高产工业气流，发现靖边气田，实现了中国海相碳酸盐岩天然气勘探的重大突破[5]。此后，靖边气田长期稳产，苏里格、榆林、乌审旗等上古生界气田相继发现，盆地天然气探明储量快速攀升[6]。

与塔里木、四川盆地相比，鄂尔多斯盆地碳酸盐岩具有“时代老、埋深大、烃源岩丰度低、膏盐岩发育、储层非均质性强”的特点，勘探理论与技术的发展长期滞后于实践需求。杨华等[7]曾将奥陶系划分为风化壳、古隆起周边白云岩体、台缘相带和东部盐下四大成藏区带；侯方浩等[8]建立了马家沟组“内陆棚盆地”沉积模式；赵文智等[2]从全球视野总结了中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件。近年来，以谭秀成等为代表的研究团队围绕马家沟组盐下丘滩、微生物岩、早成岩期岩溶等开展了系统研究[9–12]，推动盆地碳酸盐岩勘探由“单一风化壳”走向“多层系、多类型”。

然而，已有文献多聚焦于单一层系或单一气田，缺乏对盆地碳酸盐岩勘探历程与整体进展的系统总结。本文在梳理盆地构造演化与沉积格局的基础上，划分勘探阶段，总结储层类型、成藏认识与技术进展，并对未来勘探领域进行展望，以期为盆地碳酸盐岩中长期勘探部署提供参考。

# 1 区域地质背景

## 1.1 构造演化

鄂尔多斯盆地面积约 37 万 $km^2$，是发育于华北克拉通西部的大型多旋回叠合盆地[13]。盆地演化经历了中元古代裂谷、早古生代克拉通坳陷、晚古生代海陆过渡、中生代内陆坳陷和新生代周缘断陷等阶段[14]。早古生代，受西侧贺兰裂谷重新开启与南侧

逆冲作用的共同影响，盆地西部和南部形成“L”形中央古隆起，其东侧伴生西缓东陡的内陆棚坳陷[8]。加里东运动使盆地整体抬升，奥陶系顶部长期暴露、遭受风化剥蚀，形成广泛分布的不整合面[15]，为风化壳岩溶储层的发育奠定了基础。此后，盆地又经历了印支、燕山、喜山等多期构造运动，形成现今“西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、渭北隆起、伊盟隆起”的构造格局。

值得强调的是，盆地内部并非“铁板一块”，而是发育多个次级古隆起与古凸起。除中央古隆起外，乌审旗—靖边古隆起、横山凸起、神木—志丹低古隆起等次级构造单元在不同时期控制着沉积相带、储层发育与油气聚集[16–18]。这些古隆起多具有继承性发育的特点，既是沉积期的古地貌高地，也是后期油气运移的有利指向区。

## 1.2 早古生代沉积格局

寒武纪—奥陶纪，盆地经历了多期海侵—海退，沉积了以碳酸盐岩为主、夹碎屑岩与蒸发岩的海相建造[19]。寒武纪海侵由南东向北西推进：早寒武世仅在盆地西南缘发育泥砂坪、泥云坪；中寒武世海侵扩大，中东部逐渐演化为局限—开阔台地，西缘发育台地边缘—深水海槽；晚寒武世开始海退，中东部主体演变为局限台地云坪，西侧深水斜坡—海槽继续发育[19]。

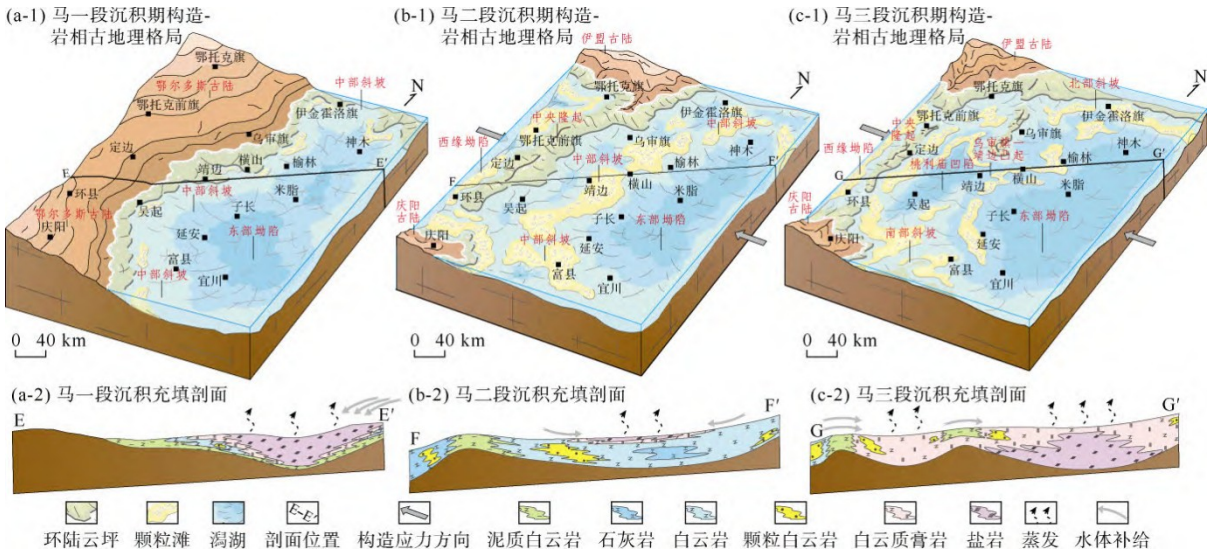



**图 1　鄂尔多斯盆地马一段—马三段构造-岩相古地理格局（据文献[18]）**

奥陶纪马家沟组沉积期，盆地整体为陆表海环境，气候干热与湿热交替。马一段、马三段、马五段以膏盐岩发育为特征，马二段、马四段以碳酸盐岩为主[8]。马五 6 亚段

沉积期，盆地中东部形成“三洼两高”的古地貌格局，由西向东依次发育白云质局限潟湖、膏质蒸发潟湖和盐质蒸发潟湖，高地与斜坡部位发育高能颗粒滩和微生物丘[20]。这种“隆坳相间、膏盐共生”的沉积格局，控制了烃源岩、储层与盖层的空间配置，是理解盆地碳酸盐岩成藏的关键。从马一段至马三段，盆地构造格局经历了由“一隆两坳”到“隆坳分异增强”的演变，沉积环境随之由环陆云坪、颗粒滩过渡为膏质、盐质蒸发潟湖（图 1）[18]。

### 1.3 碳酸盐岩层系与源储配置

盆地碳酸盐岩层系主要包括寒武系、奥陶系马家沟组和二叠系太原组。奥陶系马家沟组自下而上分为马一段—马六段，其中马五段是盐下勘探的主要目的层，进一步划分为马五 1—马五 10 亚段。烃源岩以马一段—马三段泥质白云岩、泥质膏云岩为主，累计厚度 10~80 m，总有机碳含量（TOC）为 0.58%~1.39%，镜质体反射率（Ro）为 1.62%~2.16%，以Ⅰ型干酪根为主[21]；此外，奥陶系乌拉力克组海相页岩和石炭系—二叠系煤系也是重要气源[22]。

储层类型包括风化壳岩溶、盐下丘滩白云岩、微生物碳酸盐岩、豹斑状白云岩、超覆型碳酸盐岩-蒸发岩共生组合及太原组灰岩等。区域盖层为马五段膏盐岩和石炭系本溪组泥岩。多套源储盖组合在空间上叠置，形成“上生下储、近源聚集、相变遮挡”的成藏格局。最新评价表明，盆地天然气原地资源量约 46.9 万亿 $m^3$，2025 年底剩余待探明资源量 39.6 万亿 $m^3$[22]，勘探潜力巨大。

## 2 勘探历程

回顾 70 余年的勘探实践，盆地碳酸盐岩勘探大致经历了四个阶段（表 1、图 2）。阶段的划分既反映了勘探对象的转移，也反映了地质认识与工程技术的进步。

### 2.1 区域调查与探索起步阶段（20 世纪 50 年代—1988 年）

中国陆上第一口油井——延长延 1 井于 1907 年钻成[23]，但盆地碳酸盐岩的系统勘探始于 20 世纪 50 年代。这一时期，地质与石油部门围绕盆地周缘露头（如渭北、晋西、桌子山等）开展地层、岩相与构造调查，初步建立了寒武系—奥陶系的地层格架。

1969 年开始的长庆石油会战，使勘探力量大规模进入盆地，下古生界碳酸盐岩逐步被列入勘探对象。

20 世纪 70—80 年代，围绕中央古隆起及其周缘相继钻探了一批探井，多口井在奥陶系见油气显示，但受储层认识、改造工艺和地震技术的限制，始终未获工业性突破。尽管如此，这一阶段的区域调查与探井资料，为后续中央古隆起、风化壳岩溶等认识的形成积累了宝贵资料。总体而言，该阶段属于“点上探索、面上调查”，尚未形成针对碳酸盐岩的勘探理论与技术体系。

### 2.2 风化壳突破与靖边气田发现阶段（1989—1999 年）

1989 年 6 月，位于靖边的陕参 1 井在奥陶系马五 1 获无阻流量 28.3 万 $m^3/d$ 的高产工业气流，随后探明天然气地质储量 3400 亿 $m^3$ 的靖边气田宣告发现，拉开了盆地大规模天然气勘探的序幕[5]。这一发现的核心地质认识在于：中央古隆起东侧奥陶系顶部长期风化剥蚀，发育以膏模孔、溶孔、溶缝为主的风化壳岩溶储层，其上覆石炭系煤系烃源岩“上生下储”，形成大型地层-岩性气藏[24,25]。

1997 年，长庆油田成立采气一厂，在靖边气田启动 30 亿 $m^3$ 产能建设，同年陕京天然气管道投产，靖边成为向北京供气的主力气源地；2003 年，靖边气田又作为“西气东输”的先锋气源地向上海供气[5]。至 2019 年，靖边气田连续 18 年稳产 50 亿 $m^3$，2020 年累计产气突破 1000 亿 $m^3$[5]。这一阶段，盆地碳酸盐岩勘探完成了从“探索”到“规模发现”的跨越，也初步形成了以古地貌、风化壳为核心的勘探思路。

### 2.3 规模增储与多层系拓展阶段（2000—2018 年）

进入 21 世纪，盆地天然气勘探进入快车道。2000 年苏里格气田发现，2001—2005 年榆林、乌审旗、子洲等气田相继探明，至 2006 年盆地天然气累计探明储量达 1.3 万亿 $m^3$[6]。虽然这一时期增储主体是上古生界致密砂岩，但碳酸盐岩勘探并未止步。

一方面，靖边气田通过老区调整、扩边挖潜保持稳产，马五 1+2 储层的岩石类型、沉积环境与成因认识不断深化。研究表明，该套储层受沉积微相与多期叠合岩溶共同控制，砂屑滩和膏云坪是储层发育的物质基础，未成熟期表生岩溶的顺层溶蚀是储层

形成的关键[24,26]；微生物碳酸盐岩在丘核部位发育窗格孔和粒间孔，构成一类新的储集岩[27]。

另一方面，勘探目光开始由“顶部风化壳”转向“内幕盐下”。2017 年，席胜利等[28]系统恢复了马五盐下的沉积环境与海平面变化，识别出局限—蒸发潟湖、台内滩、滩间海、微生物丘和台坪 5 种沉积环境；2018 年，刘耘等[29]指出马五 7 亚段发育两套规模较大的颗粒滩，呈南北向展布、沿东部凹陷环带状分布，是盐下勘探的有利相带；2019 年，左智峰等[9]揭示了马五段盐下储层的成岩作用与孔隙演化，明确“准同生白云石化—暴露溶蚀—埋藏重结晶”的成储路径。这些工作为盐下勘探的突破奠定了地质基础。

### 2.4 盐下与深层立体勘探阶段（2019 年至今）

2019 年以来，盆地碳酸盐岩勘探进入以盐下为核心、多领域并进的立体勘探阶段。2020 年，谢康等[10]提出马家沟组发育与高频暴露有关的早成岩期岩溶，突破了经典风化壳岩溶模式的解释局限；2021 年，杨梦颖等[11]揭示马五 5 亚段微生物碳酸盐岩在盆地尺度稳定分布，连续面积超过 25 万 $km^2$。

2022 年，米探 1 井在奥陶系盐下试气获 35.24 万 $m^3/d$ 高产气流，打破了奥陶系盐下 30 年的勘探沉寂[30]；同年，横山气田在二叠系太原组灰岩获重大发现，累计提交探明与预测储量超过 2000 亿 $m^3$，成为华北地台太原组致密灰岩勘探的首个大型气田[31]。2023—2024 年，马四段豹斑状白云岩储层[32,33]与神木—志丹低古隆起（面积 3.8 万 $km^2$）[17]的发现，进一步拓展了勘探空间。

2025—2026 年，马二段超覆型碳酸盐岩-蒸发岩共生组合[34]、马三段“近源供气、相变遮挡、构造汇聚”成藏模式[21]、寒武系构造演化与有利区带[35]等认识相继提出，盆地碳酸盐岩勘探呈现出“盐下规模增储、深层战略接替”的新态势。2025 年，盆地油气产量当量突破 1 亿 t，天然气产量近 800 亿 $m^3$[4]。“十四五”期间，奥陶系盐间、西部奥陶系、寒武系—中元古界—新元古界已被列为重要的接替勘探领域[36]。

纵观四个阶段，盆地碳酸盐岩勘探呈现出清晰的递进特征：勘探对象由盆地周缘露头转向盆地内部，由奥陶系顶部风化壳转向盐下内幕，由单一层系转向多层系；勘探理念由“构造找气”转向“岩相—岩溶—成藏”综合评价；勘探技术由常规地震与

直井压裂转向高精度三维地震与水平井体积压裂。前两个阶段以“发现”为主要特征，后两个阶段则以“拓展”与“深化”为主要特征。盐下、寒武系等新领域的突破，均经历了长期探索、反复认识的过程，体现了“实践—认识—再实践”的螺旋式上升。每一次认识的突破都伴随着勘探领域的拓展和储量的增长，而勘探实践又不断修正和深化地质认识，这正是盆地碳酸盐岩勘探持续取得进展的内在动力。

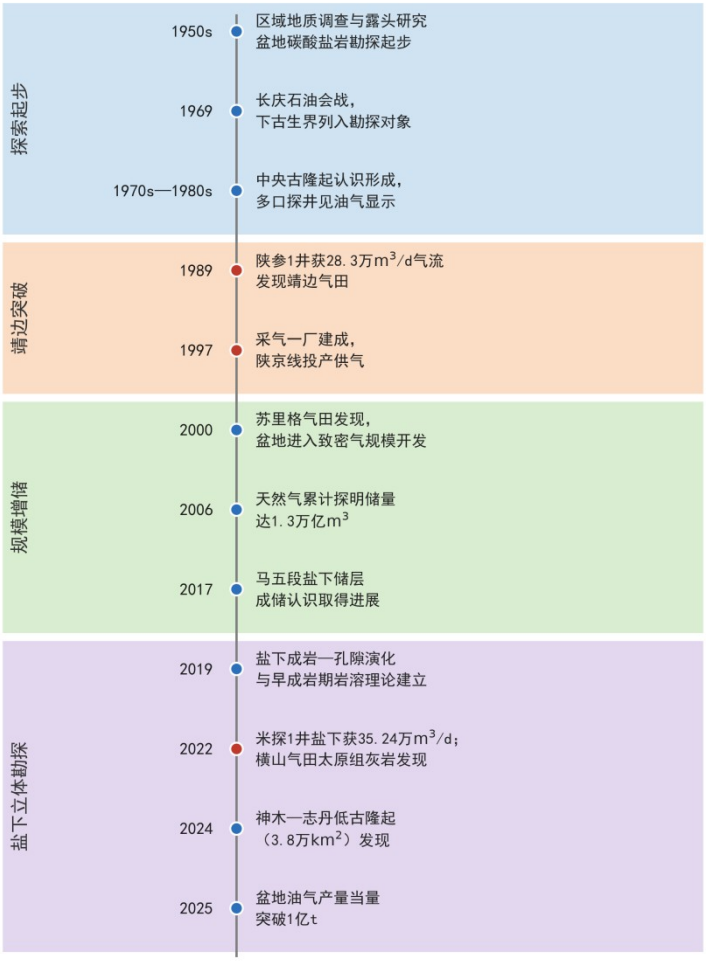



**图 2　鄂尔多斯盆地碳酸盐岩天然气勘探历程与关键节点**

**表 1　鄂尔多斯盆地碳酸盐岩勘探阶段划分**

| 阶段 | 时间 | 主要对象与区带 | 关键事件与认识 | 代表性成果 |
|---|---|---|---|---|
| 探索起步 | 20 世纪 50 年代—1988 年 | 盆地周缘露头、中央古隆起周缘 | 区域地质调查；长庆石油会战；多口探井见油气显示 | 建立寒武系—奥陶系地层格架，未获工业突破 |
| 靖边突破 | 1989—1999 年 | 奥陶系顶部风化壳（马五 1+2） | 陕参 1 井获 28.3 万 m³/d；陕京线投产；西气东输先锋气源 | 发现靖边气田，探明 3400 亿 m³ |
| 规模增储 | 2000—2018 年 | 上古生界致密砂岩为主，碳酸盐岩内幕探索 | 苏里格等气田发现；马五盐下沉积与成储认识深化 | 累计探明 1.3 万亿 m³；盐下多口井见工业气流 |
| 盐下立体勘探 | 2019 年至今 | 奥陶系盐下、马四段、马二段、寒武系、太原组 | 早成岩期岩溶理论；米探 1 井突破；横山气田发现；低古隆起识别 | 盐下规模增储，太原组形成新层系 |

# 3　主要进展

经过 70 余年的勘探与研究，盆地碳酸盐岩在储层类型、成因机理、成藏认识与勘探技术等方面取得了一系列进展，主要体现在以下九个方面。

## 3.1　风化壳岩溶储层与古地貌定量恢复

靖边气田的开发实践表明，前石炭纪岩溶古地貌对储层发育与分布具有决定性控制作用。早期古地貌恢复多采用“印模法”“残厚法”等定性—半定量方法，难以有效区分沟槽、潜坑与洼地。刘海锋等[37]考虑古构造与风化剥蚀的影响，在任意水平面古地貌恢复的基础上，建立了沉积厚度补偿的定量化古地貌恢复方法，实现了古地貌与古构造的同向恢复，并提出“岩溶斜坡带水动力强、以沟槽发育为主，岩溶台地、盆地水动力弱、以潜坑发育为主”的认识；结合本溪组本 2 段砂泥组合，建立了 4 类沟槽—潜坑判识模式。

应用该技术体系，靖边气田释放了被误判为沟槽的潜坑、被误判为沟槽的洼地所封存的井间剩余储量，新增含气面积 775 km²；近两年完钻的开发井中，马五 1+2 主力层马五 13 钻遇率达到 95%，有效储层钻遇率达到 83%，恢复到开发初期的钻井水平[37]。这一进展表明，成熟探区的“精细化”挖潜仍是碳酸盐岩增储稳产的重要途径，也说明古地貌恢复已由定性描述走向定量表征。

### 3.2 盐下丘滩白云岩储层

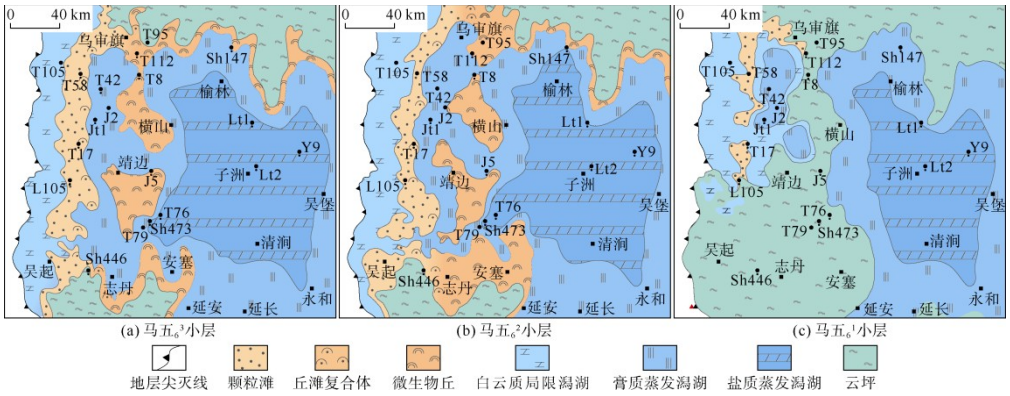



**图 3　鄂尔多斯盆地中东部马五 6 亚段沉积相平面图（据文献[20]）**

盐下是盆地碳酸盐岩最具潜力的接替领域。马五段盐下发育台内丘滩相碳酸盐岩，储集岩以泥粉晶白云岩、颗粒白云岩和微生物白云岩为主，储集空间包括溶模孔、粒间（溶）孔、晶间（溶）孔和窗格孔[9,28]。成储过程可概括为：准同生期大规模白云石化增强了岩石抗压能力、有利于原生孔隙保存；丘滩体局部暴露溶蚀形成大量次生孔隙；埋藏阶段的重结晶作用优化了孔隙结构，最终形成以晶间孔为主的粉—细晶白云岩储层[9]。中粗晶白云岩则是在早期白云石化与大气淡水改造的基础上，经埋藏期第三期次流体改造发生重结晶的产物，伴随 Fe、Mn 含量升高和 Sr 含量降低[38]。此外，“孔隙尺寸控制沉淀”现象的发现，为解释马家沟组“大孔充填、小孔保存”的非均质胶结提供了理论依据[39]。上述盐下储层研究主要由西南石油大学谭秀成团队与长庆油田合作完成，逐步形成了“丘滩相控、准同生溶蚀、埋藏重结晶”的成储认识。

于洲等[12]对盆地中东部盐下丘滩体白云岩储层进行了系统研究，表明储层岩性主要为藻纹层白云岩、砂屑（粉晶）白云岩、鲕粒白云岩和晶粒化颗粒白云岩，平均孔隙度为 5.79%；储层纵向上发育于三级层序海侵半旋回内高频向上变浅旋回的中上部，平面上分布于古隆起高部位、侧翼和坳陷边缘；神木—吴起地区在马二段、马四段、马五 9 和马五 7 亚段沉积期地势相对较高、水动力强，微生物丘与颗粒滩呈带状分布，具备多层系规模发育的地质条件[12]。此外，马五 7 亚段发育两套规模较大的颗粒滩，呈南北向展布、沿东部凹陷环带状分布[29]；马五 5 亚段则发育盆地尺度连片分布的微生物碳酸盐岩[11]。

从沉积相平面展布看，马五 6 亚段三个小层均表现为“颗粒滩与丘滩复合体环绕局限潟湖、微生物丘点缀于台坪”的格局：颗粒滩和丘滩复合体主要沿乌审旗—靖边、横山—子洲一带的古隆起及斜坡分布，向东部盐洼方向依次过渡为白云质局限潟湖、膏质蒸发潟湖和盐质蒸发潟湖（图 3）[20]。这一相带展布规律与盐下丘滩储层的分布高度吻合，也解释了为何优质储层主要发育于古隆起高部位和坳陷边缘。

### 3.3 早成岩期岩溶理论

经典风化壳岩溶模式强调不整合面附近的大气淡水溶蚀，难以解释盐下及内幕层系中广泛发育的溶蚀孔洞。谢康等[10]通过对苏里格气田东区马五 4—马五 1 亚段的精细解剖，识别出与高频向上变浅序列顶部暴露面有关的早成岩期岩溶，其典型标志包括组构选择性溶蚀、溶缝/溶沟、溶蚀花斑、岩溶角砾岩和多期暴露面。张欣玥等[40]进一步将马家沟组岩溶角砾岩划分为近原地解离角砾岩（B1）、近地表堆积角砾岩（B2）、洞穴堆积角砾岩（B3）、洞顶（壁）碎裂角砾岩（B4）和坍塌角砾岩（B5）5 类，指出其具有“纵向多层叠置、横向可对比”的准层状特征，是暴露溶蚀透镜体横向迁移连片、纵向多旋回叠置的产物。

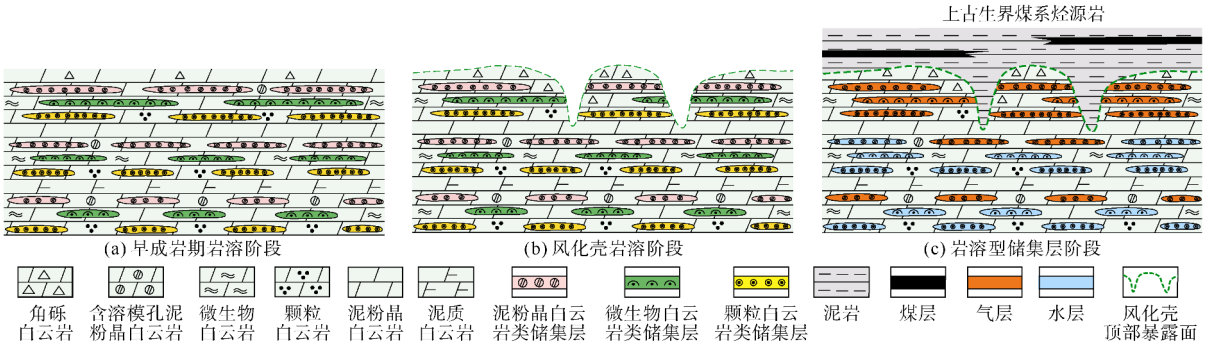



**图 4　鄂尔多斯盆地苏里格气田东区马家沟组早成岩期岩溶—风化壳岩溶—岩溶型储集层演化模式（据文献[10]）**

早成岩期岩溶理论的建立，将储层预测的视角由“不整合面之下”拓展到“高频旋回界面之下”（图 4），为盐下和内幕储层预测提供了新依据。需要强调的是，岩溶对储层的影响具有双重性：适度溶蚀建设储层，过度溶蚀则导致角砾化和充填、破坏储层[10,41]。这一认识对勘探部署具有直接意义——并非所有岩溶发育区都是有利区，寻找“适度岩溶改造区”才是关键。此外，马五 6 亚段硬石膏可识别出星散状、纹层状、

致密块状、结核状和鸡雏状 5 类产状，其产出位置与高频向上变浅序列具有良好的耦合关系，为恢复蒸发台地沉积环境提供了岩石学证据[42]。

### 3.4 微生物碳酸盐岩

微生物碳酸盐岩是盆地奥陶系的一类重要储集岩。熊鹰等[27]在盆地东北部马五 1+2 识别出由叠层石、菌纹层白云岩、蓝细菌凝块岩和菌黏结颗粒岩构成的藻坪与微生物丘建造，丘核部位的凝块岩和菌黏结砂屑云岩中窗格孔、粒间孔发育，表现为中孔低渗特征，可作为有效储集岩。杨梦颖等[11]通过 404 口井的测井相识别，发现马五 5 亚段下部微生物岩累计厚度一般 3~7 m，整体呈向东减薄趋势，连续分布面积超过 25 万 km²，揭示了“相对平静的古构造背景与早期蒸发岩填平补齐形成的平坦底形”控制微生物岩规模发育的机制。

雍靖康等[43]进一步剖析了海侵—海退背景下微生物岩序列的差异响应，识别出叠层石云岩、凝块石云岩和粘结颗粒云岩 3 类微生物岩，划分出 2 大类、6 小类微生物岩序列，指出四级海退背景下凹凸相间的古地貌格局与海水盐度、能量的分异控制着微生物岩序列的多样性。微生物岩的规模性发育，为盆地尺度储层预测提供了新思路，也为认识奥陶纪微生物席的繁育机制提供了素材。

### 3.5 马四段豹斑状白云岩与低古隆起

马四段豹斑状白云岩是近年勘探的新热点。许杰等[32]以关家崖剖面为例，指出豹斑状云质灰岩的产状受生物扰动和高频海平面驱动的早成岩期岩溶耦合控制：早成岩期暴露岩溶叠合改造生物潜穴，蒸发浓缩的有限重卤水沿叠合优势通道优先交代孔渗较好的部位，至埋藏期白云石化进一步加强，形成类型多样的豹斑。牟春国等[33]认为马四段储层以晶间（溶）孔为主，整体为低孔—中低渗孔隙型储层，受沉积微相、生物扰动、白云石化和早成岩期岩溶共同控制，有利储层主要位于乌审旗—靖边—志丹一线及神木、米脂两个相对独立区域。

于洲等[17]发现了呈北东向展布、宽约 140 km、长约 250 km、面积 3.8 万 km² 的神木—志丹低古隆起，指出同沉积正断层下盘的古基底隆升为微生物丘、灰泥丘和砂屑滩的发育提供了古地貌条件；低古隆起上广泛沉积 1~12 m 厚的硬石膏岩，与侧向致密灰

岩共同构成封闭性良好的岩性圈闭。米探 1 井的勘探突破展示了盆地东部马四段良好的勘探前景[17]，这一发现将马四段由“勘探空白区”转变为“有利接替区”。

### 3.6 马二段超覆型碳酸盐岩-蒸发岩共生组合

马二段长期被视为勘探“过路层”。杜健笙等[34]研究发现，马二段向中央古隆起方向超覆沉积，在古隆起周缘与下伏寒武系不整合接触，自古隆起向东部坳陷依次发育潮坪、颗粒滩、潟湖等沉积环境及 5 种碳酸盐岩-蒸发岩共生组合序列；储层可划分为花斑状粉晶白云岩、颗粒白云岩、含潜穴泥（粉）晶白云岩和含膏模孔泥晶白云岩 4 类，其中颗粒白云岩物性最优、发育频率最高；平面上储层沿东部坳陷内侧向高地貌坡折部位呈环带状展布（“沿凹环高”），并建立了“坡-滩-溶-云”四元控储模式[34]。

杨梦颖等[44]则在马家沟组底部识别出由碎屑岩、碳酸盐岩和硬石膏岩混合组成的混积岩，划分出潮汐水道、泥/砂—云坪、膏云坪和潮上萨布哈 4 个亚相；地球化学分析显示，混积过程中陆源影响随海平面升降呈由弱变强的波动，稀土元素较亲陆源元素具有更远的扩散距离。研究认为，该套混积岩是乌审旗—靖边古隆起核部长城系砂岩再旋回的产物，也是该古隆起在奥陶纪早期持续隆升并供给陆源碎屑的关键证据[44]。

### 3.7 太原组灰岩与横山气田

二叠系太原组是盆地碳酸盐岩勘探的“新层系”。2022 年发现的横山气田，是华北地台太原组致密灰岩勘探的首个大型气田，累计提交探明与预测储量超过 2000 亿 $m^3$[31]。研究表明，石炭系—二叠系海陆交互相煤系广覆式供烃、生屑滩与生物丘有利相带大面积分布、溶蚀孔—纳米至亚微米级晶间微孔—裂缝构成三维网络储集空间，是大气田形成的关键成藏地质条件，并由此建立了“丘滩控储、断裂体系输导、煤岩供烃”的源内成藏模式[31]。

蔡文杰等[45]将太原组划分为 1 个二级层序、5 个三级层序（SQ1—SQ5），指出太原组存在“沉积中心迁移”“填平补齐”和“顶削”的沉积充填过程，南部为石灰岩沉积中心、北部为碎屑岩沉积中心；三级层序控制煤系烃源岩发育，四级层序控制储

集层纵向叠置，颗粒滩集中发育于斜坡部位，毛儿沟段和斜道段沉积期古地貌斜坡区是最有利勘探区[45]。闫小雄等[41]则识别出太原组灰岩的早成岩期多级次岩溶，提出优质储层主要发育于低频旋回中上部即“适度岩溶改造区”，旋回下部与顶部储层质量明显变差。太原组灰岩的突破，使盆地碳酸盐岩勘探由奥陶系“单层系”扩展为“奥陶系+二叠系”双层系。

### 3.8 寒武系与深层探索

寒武系是盆地碳酸盐岩的战略接替层系。黄军平等[35]系统重建了寒武纪构造演化：早寒武世，受区域拉张与基底断裂活化影响，盆地南缘发育富平—洛川深水海湾、西缘形成银川—同心海湾，其余地区为鄂尔多斯古陆；中寒武世，古陆解体为伊盟古陆、乌审旗古隆起、庆阳古隆起和吕梁低隆，东北部发育神木东台内洼地；晚寒武世，三大古隆起构造合并，形成近南北向的中央古隆起。寒武系碳酸盐岩不断取得天然气勘探突破，神木东台内洼地及南缘深水海湾控制烃源岩展布，持续发育的古隆起是油气运移的有利指向区，晋宁运动和怀远运动形成的不整合面与正断裂共同构成疏导体系[35]。尽管寒武系整体勘探程度低，但其“构造控源、古隆起控藏”的格局已初步显现。

### 3.9 成藏认识与勘探技术

在成藏认识上，盆地碳酸盐岩经历了由“上生下储”向“源储一体、近源聚集”的转变。杨华等[7]提出的四大成藏区带，为“十二五”期间的勘探部署提供了框架；杨智等[21]基于马三段低丰度烃源岩、膏盐岩强封盖和走滑断裂输导，建立了“近源供气、相变遮挡、构造汇聚”的成藏新模式，指出马三段泥质白云岩与泥质膏云岩是盐下主力烃源岩，定边次坳及周缘是最有利生气区；帅燕华等[46]通过天然气分子内同位素分析指出，乌审旗古隆起东部马四段天然气为原油裂解气并普遍经历硫酸盐热化学还原（TSR）作用，甲烷碳同位素（$\delta^{13}C1$）普遍低于-40‰，推测有长城系—寒武系深部烃源的补充贡献，指示古老地层应发育古油气藏。

与此同时，国内外学术交流不断深化。国际期刊相继报道了盆地奥陶系致密碳酸盐岩储层的勘探潜力[47]、盐下白云岩储层的特征与形成演化[48]、自生自储天然气的成藏与潜力[49]、马五段气水分布[50]、中奥陶世古环境重建[51]、去白云石化对储层质量的

影响[52]、靖边地区岩溶作用[53]以及热演化史与成藏期次[54]等成果，提升了盆地碳酸盐岩研究的国际影响力。

在勘探技术上，高精度三维地震、叠前弹性参数反演、测井相模板、古地貌定量恢复、水平井与体积压裂等技术系列逐步配套，支撑了盐下和致密灰岩的勘探突破[37,55,56]。特别是针对盐下储层“埋深大、膏盐层屏蔽、非均质性强”的难题，地震岩石物理建模与孔隙结构地震表征成为储层预测的关键[55,56]；针对太原组致密灰岩，形成了“丘滩相带预测+断裂体系刻画+水平井体积压裂”的技术组合[31]。

**表 2　鄂尔多斯盆地碳酸盐岩主要储层类型及特征对比**

| 储层类型 | 主要层位 | 储集空间 | 物性 | 成因机制 | 代表区 |
|---|---|---|---|---|---|
| 风化壳岩溶 | 马五 1+2 | 膏模孔、溶孔、溶缝 | 低孔低渗 | 表生岩溶，古地貌与沟槽控制 | 靖边 |
| 盐下丘滩白云岩 | 马五 5—马五 10 | 晶间孔、溶孔、窗格孔 | 平均孔隙度 5.79% | 准同生白云石化+暴露溶蚀+埋藏重结晶 | 神木—吴起 |
| 微生物碳酸盐岩 | 马五 5、马五 1+2 | 窗格孔、格架孔、粒间孔 | 中孔低渗 | 微生物丘滩建造，早成岩期溶蚀 | 盆地中东部 |
| 豹斑状白云岩 | 马四段 | 晶间（溶）孔 | 低孔中低渗 | 生物扰动+高频暴露岩溶+白云石化 | 神木—志丹 |
| 超覆型共生组合 | 马二段 | 膏模孔、粒间孔 | 颗粒白云岩最优 | 超覆沉积+准同生溶蚀+白云石化 | 东部坳陷内侧 |
| 太原组灰岩 | 太原组 | 溶蚀孔、晶间微孔、裂缝 | 致密 | 生屑滩/生物丘+早成岩期岩溶 | 横山 |

**表 3　鄂尔多斯盆地碳酸盐岩主要勘探发现**

| 气田/发现 | 年份 | 层系 | 关键数据 | 意义 |
|---|---|---|---|---|
| 靖边气田 | 1989 | 奥陶系马五 1+2 | 探明 3400 亿 $m^3$；2020 年累计产气超 1000 亿 $m^3$ | 中国首个海相碳酸盐岩大气田 |
| 米探 1 井 | 2022 | 奥陶系盐下 | 试气 35.24 万 $m^3/d$ | 盐下 30 年首获高产工业气流 |
| 横山气田 | 2022 | 二叠系太原组 | 探明+预测储量超 2000 亿 $m^3$ | 首个太原组灰岩大型气田 |
| 神木—志丹低古隆起 | 2024 | 奥陶系马四段 | 面积 3.8 万 $km^2$，硬石膏盖层厚 1~12 m | 马四段岩性圈闭有利区 |

# 4　前景展望

## 4.1　资源基础与勘探程度

盆地天然气原地资源量 46.9 万亿 m³，剩余待探明 39.6 万亿 m³[22]。另据自然资源部油气资源战略研究中心的评价，盆地常规气原地资源量 6.03 万亿 m³、致密砂岩气 13.61 万亿 m³、煤层气 19.52 万亿 m³、页岩气 2.80 万亿 m³[3]（图 5）。碳酸盐岩气藏是常规气的主体，其探明程度相对较低，剩余资源潜力大。

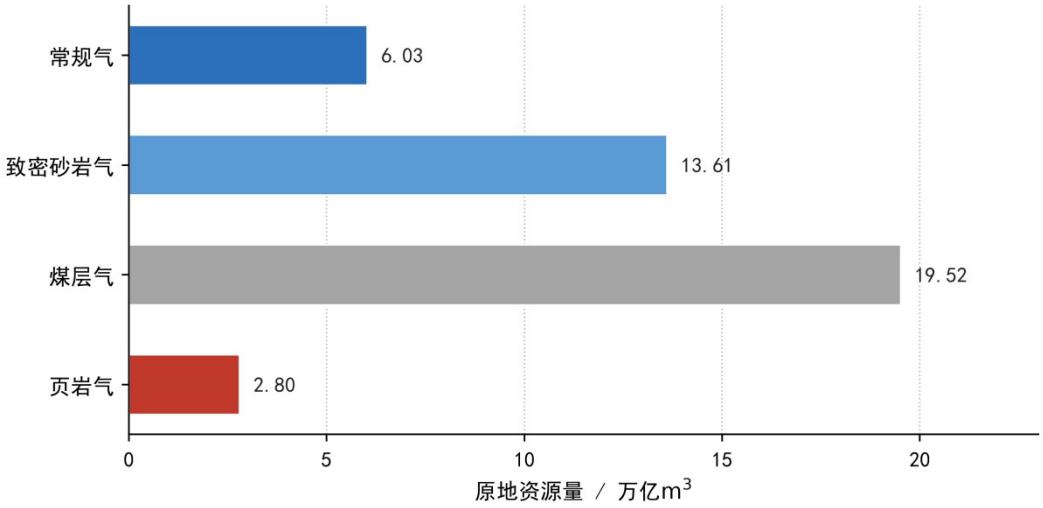



**图 5　鄂尔多斯盆地天然气原地资源量构成（据文献[3]）**

从勘探程度看，奥陶系顶部风化壳勘探程度最高，已进入精细挖潜阶段；盐下、马四段、马二段、寒武系和太原组灰岩均处于勘探早期或起步阶段，是未来增储上产的主要方向。整体而言，盆地碳酸盐岩仍处于“发现期”，尚未进入大规模开发阶段。

## 4.2　重点勘探领域

（1）奥陶系盐下。以马三段、马四段、马五 7—马五 9 亚段为重点，围绕“断隆—鼻隆”构造背景与含膏云坪—盐洼相变带，寻找构造—岩性复合圈闭。马三段烃源岩厚度 10~80 m、Ro 为 1.62%~2.16%，具备规模生烃能力[21]；盐下丘滩体在神木—吴起地区多层系叠置发育[12]。该领域是“十五五”期间最现实的规模增储方向。

（2）风化壳精细挖潜。靖边气田及周缘仍是稳产基础，重点是通过古沟槽—潜坑精细刻画、老井复查和侧钻水平井，释放井间剩余储量[37]。同时，应加强风化壳内幕“缝洞体”刻画，寻找受古沟槽控制的岩溶缝洞型甜点。

（3）盆地西缘与南缘。中央古隆起西侧环县地区、陇东地区奥陶系发育构造—岩性圈闭，是“十四五”期间的重要发现区[3]；西缘冲断带构造复杂，但源储配置良好，具备形成规模气藏的地质条件。盆地南部的延长探区近年来在致密砂岩气、碳酸盐岩气等领域取得进展，延安气田跻身全国第四大气田，其“地质—工程一体化”模式可供借鉴[57]。

（4）寒武系。围绕神木东台内洼地、富平—洛川海湾和银川—同心海湾的烃源岩，以及古隆起周缘的滩相白云岩，开展风险勘探[35]。寒武系勘探程度低、风险高，但一旦突破，将开辟新的战略接替层系。

（5）太原组灰岩。以横山气田为样板，寻找“丘滩控储、断裂输导、煤岩供烃”的有利区，重点评价毛儿沟段、斜道段古地貌斜坡带[31,45]。太原组灰岩分布广、埋深适中，具备规模化勘探开发的条件。

**表 4　鄂尔多斯盆地碳酸盐岩重点勘探领域评价**

| 领域 | 主要层系 | 资源潜力 | 主要风险 | 优先级 |
|---|---|---|---|---|
| 奥陶系盐下 | 马三段、马四段、马五 7—马五 9 | 大 | 烃源岩丰度低，储层非均质性强，成藏规模存疑 | I |
| 风化壳精细挖潜 | 马五 1+2 | 中 | 剩余储量零散，古沟槽复杂 | I |
| 西缘与南缘 | 奥陶系 | 中—大 | 构造复杂，勘探程度低 | II |
| 寒武系 | 寒武系 | 大 | 认识程度低，深层钻完井风险高 | II |
| 太原组灰岩 | 二叠系太原组 | 中—大 | 储层致密，改造难度大 | II |

## 4.3　关键技术需求

一是低丰度烃源岩评价与气源识别技术。盐下烃源岩厚度薄、丰度低，需通过分子内同位素、轻烃指纹等手段，解决“有没有气、气从哪来”的问题[46]。二是膏盐层下储层预测技术。需发展高精度三维地震、叠前弹性参数反演、地震岩石物理建模与孔隙结构地震表征，提高盐下储层预测精度[55,56]。三是古地貌与岩溶相带定量刻画技术。需将沉积厚度补偿、地震属性与钻井标定相结合，实现沟槽、潜坑、缝洞体的定量识别[37]。

四是复杂碳酸盐岩储层改造技术。针对盐下白云岩和太原组致密灰岩，需发展体积压裂、酸化压裂、水平井分段改造等技术，提高单井产量与采收率[31]。五是深层高

温高压钻完井技术。寒武系及更深层系埋深大、温度压力高，需配套抗高温钻具、井壁稳定与储层保护技术。

### 4.4 挑战与建议

盆地碳酸盐岩勘探面临四方面挑战：其一，盐下烃源岩丰度低、厚度薄，成藏规模仍存争议；其二，储层非均质性强，地震预测精度不足；其三，膏盐层钻井风险大、成本高；其四，气水关系复杂，提高采收率难度大。

为此建议：①加强盐下成藏系统的基础研究，建立“源—储—盖—断”四位一体的评价体系；②推进三维地震全覆盖与处理解释一体化，提升盐下和深层成像质量；③开展老井复查与甜点识别，盘活存量资产；④探索“常非并举、油气并重”的勘探开发一体化模式，降低勘探开发成本；⑤加强多学科交叉与校企合作，培育碳酸盐岩勘探的专业人才队伍。

## 5 结论

（1）鄂尔多斯盆地碳酸盐岩勘探经历了区域调查与探索起步（20 世纪 50 年代—1988 年）、风化壳突破与靖边气田发现（1989—1999 年）、规模增储与多层系拓展（2000—2018 年）、盐下与深层立体勘探（2019 年至今）四个阶段，勘探认识实现了由“构造圈闭”到“风化壳岩溶控藏”、再到“相控岩溶与盐下近源成藏”的两次跃迁。

（2）储层类型由单一的表生风化壳岩溶，扩展为盐下丘滩白云岩、微生物碳酸盐岩、豹斑状白云岩、超覆型碳酸盐岩-蒸发岩共生组合和太原组灰岩等多类型并存。早成岩期岩溶理论的建立，突破了经典风化壳模式的解释局限，是最具代表性的理论进展。

（3）2022 年米探 1 井奥陶系盐下获 35.24 万 $m^3/d$ 高产气流，横山气田太原组灰岩累计提交探明与预测储量超过 2000 亿 $m^3$，标志着盆地碳酸盐岩勘探进入“常非并重、盐下接替”的新阶段。

（4）盆地天然气原地资源量约 46.9 万亿 $m^3$，碳酸盐岩领域整体仍处于低勘探程度。未来应聚焦奥陶系盐下、风化壳精细挖潜、盆地西缘与南缘、寒武系和太原组灰岩五大领域，其中奥陶系盐下与风化壳精细挖潜应作为优先方向。

（5）需重点攻克低丰度烃源岩评价、膏盐层下储层预测、断缝体刻画与体积压裂等关键技术，建立“源—储—盖—断”四位一体的评价体系，以实现盆地碳酸盐岩天然气的规模增储与长期稳产。

## 参考文献


[1] 马永生, 何登发, 蔡勋育, 等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007-1020.

[2] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.

[3] 李登华, 高煖, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地天然气资源潜力及勘探前景[J/OL]. 地球学报, 2026[2026-10-21].

[4] 国家能源局. 2025 年全国油气勘探开发十大标志性成果[EB/OL]. (2026-02-11)[2026-10-21]. https://www.pipechina.com.cn/front/news/3004407.html.

[5] 权力, 李建江. “为国争气”靖边气田累计向国家贡献天然气达 1000 亿立方米[EB/OL]. (2020-07-27)[2026-10-21]. https://www.cnr.cn/sxpd/fy/20200727/t20200727_525183272.shtml.

[6] 付金华, 魏新善, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探形势与发展前景[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 1-4.

[7] 杨华, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-740.

[8] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 106-112.

[9] 左智峰, 熊鹰, 何为, 等. 鄂尔多斯盆地中部马五段盐下储层成岩作用与孔隙演化[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 155-164.

[10] 谢康, 谭秀成, 冯敏, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田东区奥陶系马家沟组早成岩期岩溶及其控储效应[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1159-1173.

[11] 杨梦颖, 谭秀成, 杨鸣一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五 5 亚段微生物岩盆地尺度分布特征及主控因素[J]. 古地理学报, 2021, 23(6): 1125-1139.

[12] 于洲, 范立勇, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系盐下丘滩体白云岩储层发育特征及分布规律[J/OL]. 石油与天然气地质, 2026[2026-10-21].

[13] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20.

[14] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 17-24.

[15] REN Q, SUN Z, WANG H, et al. Characteristics and genesis of carbonate weathering crust reservoirs: a case from the Ma5 member of Ordovician in Gaoqiao area, Ordos Basin, China[J]. ACS Omega, 2024, 9(32): 34329-34338.

[16] 钟寿康, 谭秀成, 聂万才, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马五 6 亚段高频旋回层序研究：论海平面升降与横山凸起沉积分异效应[J]. 古地理学报, 2022, 24(2): 245-260.

[17] 于洲, 周进高, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组四段神木-志丹低古隆起的发现及油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1383-1399.

[18] 钟寿康, 谭秀成, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组一段—三段构造沉积演化及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 1040-1052.

[19] 李文厚, 陈强, 李智超, 等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 85-100.

[20] 钟寿康, 谭秀成, 胡广, 等. 古地理格局对膏盐岩-碳酸盐岩共生体系沉积分异的控制——以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段 6 亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 728-740.

[21] 杨智, 吴东旭, 包洪平, 等. 近源勘探：鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩-膏盐岩层海相含气系统进展与思考[J/OL]. 石油勘探与开发, 2026[2026-10-21].

[22] 胡新友, 范立勇, 李笑天, 等. 鄂尔多斯盆地天然气成藏地质条件、资源潜力与勘探方向[J]. 海相油气地质, 2026, 31(4): 442-458.

[23] 李德生. 重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 1-7.

[24] 熊鹰, 李凌, 文彩霞, 等. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五 1+2 储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 691-701.

[25] 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244-253.

[26] 刘新社, 熊鹰, 文彩霞, 等. 鄂尔多斯盆地东北部马五 1+2 亚段岩石类型及沉积环境[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 912-923.

[27] 熊鹰, 姚泾利, 李凌, 等. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五 1+2 微生物碳酸盐岩沉积特征及储集意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 963-972.

[28] 席胜利, 熊鹰, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五盐下沉积环境与海平面变化[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 773-790.

[29] 刘耘, 谭秀成, 刘显岩, 等. 鄂尔多斯盆地中部马五 7 亚段颗粒滩沉积特征及空间分布[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 796-806.

[30] 长庆油田鄂尔多斯盆地奥陶系盐下米探 1 井获重大突破[J]. 非常规油气, 2022, 9(2): 105.

[31] 席胜利, 李明瑞, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地横山大型气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 1015-1028.

[32] 许杰, 肖笛, 苏文杰, 等. 鄂尔多斯盆地东缘奥陶系马家沟组四段豹斑状云质灰岩特征及成因：以关家崖剖面为例[J]. 古地理学报, 2022, 24(2): 261-277.

[33] 牟春国, 许杰, 古永红, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组四段储层特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 780-790.

[34] 杜健笙, 熊鹰, 任军峰, 等. 超覆型碳酸盐岩-蒸发岩共生组合储层类型及成储分异规律——以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2026, 53(2): 384-397.

[35] 黄军平, 范立勇, 史江龙, 等. 鄂尔多斯盆地寒武纪构造演化及油气地质意义[J]. 天然气工业, 2026, 46(8): 17-31.

[36] 赵喆, 范立勇, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地“十四五”油气勘探进展及未来勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2026, 31(1): 64-79.

[37] 刘海锋, 贾浪波, 薛云龙, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田前石炭纪岩溶古地貌与古沟槽恢复方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2026, 37(8): 1550-1560.

[38] 钟寿康, 李凌, 谭秀成, 等. 鄂尔多斯盆地中东部马五段中粗晶白云岩成因及成岩演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(6): 691-710.

[39] 熊鹰, 谭秀成, 伍坤宇, 等. 碳酸盐岩储集层成岩作用中“孔隙尺寸控制沉淀”研究进展、地质意义及鄂尔多斯盆地实例[J]. 古地理学报, 2020, 22(4): 744-760.

[40] 张欣玥, 李凌, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组准层状岩溶角砾岩特征及其成因[J]. 古地理学报, 2022, 24(4): 663-679.

[41] 闫小雄, 钟寿康, 裴文超, 等. 鄂尔多斯盆地太原组灰岩早成岩期多级次岩溶特征及控储机制[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(2): 257-270.

[42] 邓伟, 谭秀成, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组马五 6 亚段硬石膏产状类型与成因[J]. 古地理学报, 2022, 24(2): 226-244.

[43] 雍靖康, 谭秀成, 费肇磊, 等. “海侵—海退”背景下微生物岩序列组合的差异响应：以鄂尔多斯盆地中东部马五 6-10 亚段为例[J]. 古地理学报, 2025, 27(5): 1189-1205.

[44] 杨梦颖, 谭秀成, 钟寿康, 等. 陆表海环境混积岩发育特征及对台地早期演化的启示：以鄂尔多斯盆地马一段—马二段为例[J]. 古地理学报, 2026, 28(1): 173-188.

[45] 蔡文杰, 谭秀成, 费肇磊, 等. 鄂尔多斯盆地横山气田太原组混积体系层序与源储配置规律[J]. 古地理学报, 2026, 28(2): 658-677.

[46] 帅燕华, 刘新社, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地海相天然气来源及勘探启示[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1194-1212.
[47] WEI X S, CHEN H D, ZHANG D F, et al. Gas exploration potential of tight carbonate reservoirs: a case study of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Yi-Shan slope, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 347-357.
[48] FU S Y, ZHANG C G, CHEN H D, et al. Characteristics, formation and evolution of pre-salt dolomite reservoirs in the fifth member of the Ordovician Majiagou Formation, mid-east Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1153-1164.
[49] LI W, TU J Q, ZHANG J, et al. Accumulation and potential analysis of self-sourced natural gas in the Ordovician Majiagou Formation of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 552-562.
[50] YU H Y, LI W, QIN X Y, et al. Gas and water distribution of Ordovician Majiagou Formation in northwest of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 435-442.
[51] YANG J Q, ZHANG J T, HE Z L, et al. Paleoenvironment reconstruction of the Middle Ordovician thick carbonate from western Ordos Basin, China[J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 48-59.
[52] LIU L H, WANG C L, HUANG K K, et al. Petrography and origin of dedolomites of the Ordovician Majiagou Formation in the southeastern Ordos Basin, China: implications for reservoir quality[J]. Carbonates and Evaporites, 2021, 36(4).
[53] PENG X X, LI G B, CHENG X, et al. Karstification and its role in the formation of carbonate reservoirs: a case study from the Ordovician Majiagou Formation in Jingbian, Ordos Basin, North China[J]. Minerals, 2023, 13(11): 1425.
[54] TAO H, CUI J P, ZHAO F F, et al. Thermal history and hydrocarbon accumulation stages in Majiagou Formation of Ordovician in the east-central Ordos Basin[J]. Energies, 2024, 17(17): 4435.
[55] WANG J Q, DENG J X, XU Z H, et al. Rock physics properties and influencing factors of subsalt carbonate reservoir of Ordovician Majiagou Formation in central Ordos Basin[J]. Petroleum Science, 2024, 21(6): 3965-3980.
[56] ZHANG M B, PAN H J, WANG Y G, et al. Seismic pore-type characterization in tight carbonate reservoirs: a case study of the fourth member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin, China[J]. Petroleum Science, 2025, 22(9): 3583-3598.
[57] 王香增, 乔向阳, 王若谷, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区天然气勘探开发技术进展与前景展望[J]. 天然气工业, 2026, 46(9): 1-16.