

## 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积特征 与有利储集相带

于洲<sup>1</sup>, 张道锋<sup>2</sup>, 王维斌<sup>3</sup>, 李鹏<sup>4</sup>, 魏柳斌<sup>2</sup>, 吴东旭<sup>1</sup>, 刘雨昕<sup>5</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院;  
3 中国石油长庆油田公司勘探事业部; 4 中国石油长庆油田公司采气五厂; 5 中国石油大学(北京)

**摘要** 基于古地理格局研究新进展,综合野外露头、钻井岩心、微观薄片和物性数据等资料,对鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积特征及有利储集相带展布规律进行研究。结果表明:①奥陶系盐下主要发育局限台地和蒸发台地2类沉积相,局限台地发育云坪、丘滩、云质潟湖和灰质潟湖等4类微相,蒸发台地发育泥云坪、含膏云坪、膏云坪和膏盐潟湖等4类微相;②受古气候、海平面升降变化和“三隆三拗”古地理格局控制,奥陶系盐下岩相古地理总体呈现出“隆控丘滩-坪、拗控潟湖”的平面展布特征;③台内丘滩储集性能好,是奥陶系盐下白云岩储层发育的有利储集相带。指出苏里格—城川、乌审旗—志丹和神木—米脂地区是奥陶系盐下有利储层发育区,是天然气勘探的重要方向。

**关键词** 沉积相;古地理格局;有利储集相带;盐下;马家沟组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

**中图分类号**:TE121.3<sup>+</sup>2 **文献标识码**:A

### 0 前言

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,其下古生界奥陶系马家沟组海相碳酸盐岩蕴藏丰富的天然气资源<sup>[1]</sup>,在马五<sub>1</sub>亚段—马五<sub>4</sub>亚段和马五<sub>5</sub>亚段中已经发现靖边风化壳气藏<sup>[2-5]</sup>和靖西白云岩岩性气藏<sup>[6-8]</sup>,累计提交近万亿方的探明储量,为长庆油田年产油气当量突破6 000×10<sup>4</sup> t做出了重要贡献。近十年来,为夯实油气资源基础,长庆油田不断加大中东部奥陶系马五<sub>6</sub>亚段—马五<sub>10</sub>亚段(本文简称盐下)的勘探力度,并先后在统74井、桃59井和莲92井等井的奥陶系盐下白云岩储集体中获得几十万至百万方的高产工业气流,展示出奥陶系盐下具有较大的勘探潜力,有望成为天然气实现增储上产的接替领域。截至目前,前人对奥陶系盐下古地理格局和沉积储层特征已做过一些研究<sup>[9-19]</sup>,认识到颗粒滩是利储集相,积极地推动了奥陶系盐下天然气勘探。然而,受限于研究资料不丰富,上述研究针对奥陶系盐下古地理格局和有利储集相带展布规律所取得的认识存在较大分歧,或者这些

研究还不够系统。谢锦龙等<sup>[9]</sup>、包洪平等<sup>[10]</sup>认为盆地中东部奥陶系盐下古地理格局由中央古隆起、米脂拗陷与离石隆起等3个古地貌单元构成,颗粒滩相发育于马五<sub>5</sub>亚段、马五<sub>7</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中,并沿中央古隆起东侧呈环带状分布,马五<sub>10</sub>亚段和马五<sub>8</sub>亚段由拗陷向隆起带依次为呈同心环带分异的膏盐潟湖、膏云坪和泥云坪沉积;而付金华等<sup>[11]</sup>、于洲等<sup>[12-13]</sup>、席胜利等<sup>[14]</sup>、魏柳斌等<sup>[15-16]</sup>和钟寿康等<sup>[17]</sup>提出了盆地中东部奥陶系盐下沉积期具有“三隆两拗”古地理格局的新认识,并指出中央古隆起和横山隆起或乌审旗古隆起在马五<sub>5</sub>亚段、马五<sub>7</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段发育双颗粒滩带,但未研究盐下其他层位的岩相古地理。近期勘探实践表明,隆起带的马五<sub>10</sub>亚段和马五<sub>8</sub>亚段和拗陷区的马五<sub>7</sub>亚段也发育颗粒滩,且具有良好的勘探潜力,如靳6井在马五<sub>10</sub>亚段白云岩储层中获得了4.76×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d的工业气流。本文综合野外露头、钻井岩心和微观薄片等资料,并结合古地理格局研究的新进展,精细恢复奥陶系盐下岩相古地理,指出白云岩储层发育的有利相带分布区,以期对鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然

收稿日期:2022-05-28;改回日期:2022-10-31

本文受中国石油“十四五”基础性前瞻性科技项目“海相碳酸盐岩有效储层形成与保持机理及分布预测研究”(编号:2021DJ0503)和长庆油田公司科技重大专项“鄂尔多斯盆地中元古界—奥陶系构造沉积演化、成源机制与勘探新领域研究”(编号:ZDZX2021-02)联合资助

**第一作者**:于洲,硕士,高级工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西溪路920号;E-mail: yuz\_hz@petrochina.com.cn





表1 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积相类型及特征

Table 1 Types and characteristics of Ordovician pre-salt sedimentary facies in central-eastern Ordos Basin

相	亚相	微相	主要岩性特征	主要发育位置	发育层位
蒸发台地	蒸发潮坪	泥云坪	泥质白云岩、(含膏)泥质白云岩	盆地中东部	马五 <sub>10</sub> 亚段、 马五 <sub>8</sub> 亚段、 马五 <sub>6</sub> 亚段
		含膏云坪	含硬石膏结核粉晶白云岩	横山隆起、中央古隆起、桃利庙拗陷	
		膏云坪	含云膏岩、膏质白云岩、含膏白云岩		
	蒸发潟湖	膏盐潟湖	含膏盐泥质白云岩、硬石膏岩、盐岩	米脂拗陷、桃利庙拗陷	
局限台地	局限潮坪	云坪	粉晶白云岩、含泥质泥粉晶白云岩	横山隆起、中央古隆起、桃利庙拗陷	马五 <sub>10</sub> 亚段、 马五 <sub>9</sub> 亚段、 马五 <sub>8</sub> 亚段、 马五 <sub>7</sub> 亚段、 马五 <sub>6</sub> 亚段
	丘滩		砂屑白云岩、鲕粒白云岩、凝块石白云岩		
			粉晶白云岩		
	局限潟湖	云质潟湖	粉晶白云岩	米脂拗陷、桃利庙拗陷	
	灰质潟湖	泥晶灰岩、灰质粉晶白云岩			

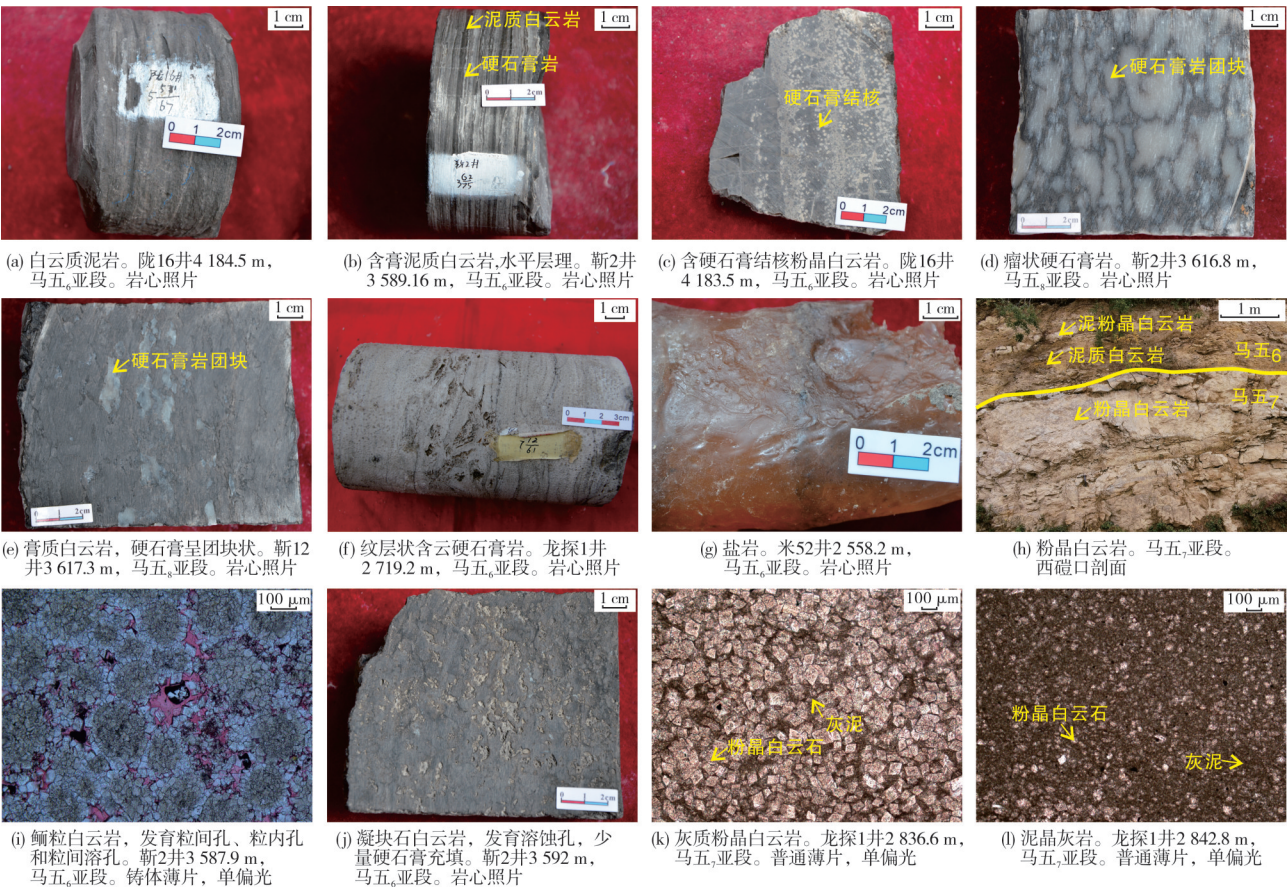


图2 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下地层岩石学特征

Fig. 2 Petrological characteristics of Ordovician pre-salt strata in the central-eastern Ordos Basin

盐岩等蒸发岩类沉积。在周缘海水间隙性补给初期,以发育含膏白云质泥岩或白云质泥岩沉积物为特征。根据沉积环境及岩性差异特征,蒸发台地又划分为泥云坪、含膏云坪、膏云坪和膏盐潟湖等4类微相。

泥云坪 广泛发育于盆地中东部的马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中,水体能量低,沉积物

为深灰色—黑灰色泥质白云岩、白云质泥岩(图2a)和含膏泥质白云岩(图2b),膏质、白云质和泥质成分常呈薄层状互层,具水平层理。泥云坪常发育于准同生暴露面之上、高频旋回底部(图3a,3b),伴随海平面上升,上覆沉积物常递变为粉晶白云岩、砂屑白云岩和膏岩。

含膏云坪 见于中央古隆起和横山隆起的马

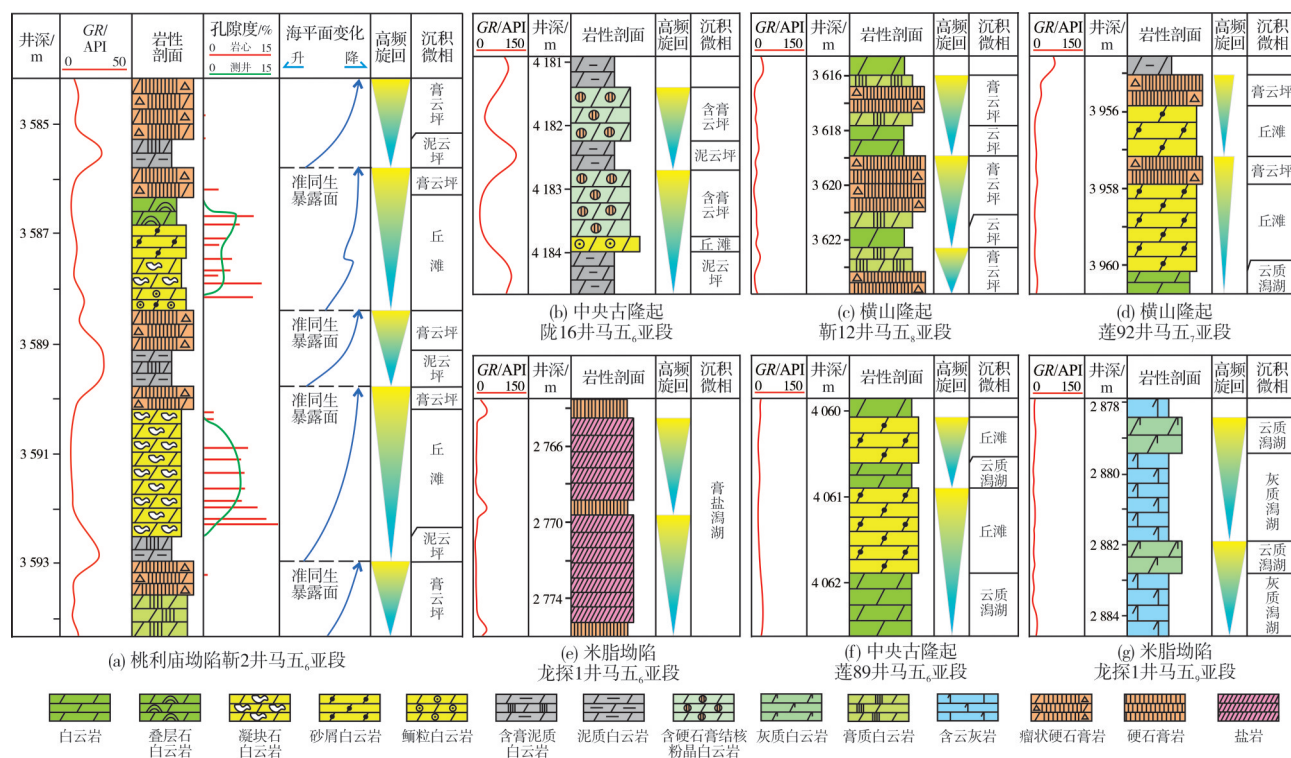


图3 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积微相组合类型

Fig. 3 Assemblage types of Ordovician pre-salt sedimentary microfacies in the central-eastern Ordos Basin

五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中,分布规模较小,发育灰色—浅灰色含硬石膏结核粉晶白云岩和含硬石膏晶体泥晶粉晶白云岩。硬石膏结核常呈椭圆形、不规则圆形等形态,直径一般0.5~5 mm不等,以1.5~3.0 mm居多,呈弥散状分布(图2c);硬石膏晶体大小一般为0.05 mm×0.5 mm~0.2 mm×0.5 mm,呈孤立状顺层分布。该相带主要发育于高频旋回上部(图3b),下伏粉晶白云岩、砂屑白云岩、鲕粒白云岩或白云质泥岩。

**膏云坪** 广泛发育于马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中,马五<sub>10</sub>亚段中有少量分布,并且在隆起和坳陷区均有分布。该相带位于潮上带,常暴露于地表,岩性为硬石膏岩(图2d)和膏质白云岩(图2e)。硬石膏岩颜色为白色,硬石膏宏观上呈瘤状,粒径一般为10~50 mm,混杂堆积,瘤状硬石膏之间常被黑色泥质白云岩充填(图2d)。膏质白云岩颜色为灰色,白色硬石膏常呈条带状、瘤状分布于白云岩中(图2e)。膏云坪发育于高频旋回的顶部,其下部常与砂屑白云岩、叠层石白云岩、凝块石白云岩或泥质白云岩接触(图3a,3c,3d)。

**膏盐潟湖** 广泛发育于米脂坳陷的马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中。该相带水体能量低,

海水盐度值高,发育灰色含膏盐泥质白云岩、白色纹层状含云硬石膏岩(图2f)、无色盐岩、棕红色盐岩(图2g)和黑色块状盐岩。该沉积相带内的微相组合常呈现出“旋回下部为硬石膏岩、上部为盐岩”的沉积特征(图3e)。

### 2.1.2 局限台地

局限台地属于碳酸盐岩清水沉积,陆源物质含量少。由于海平面上升,盆地中东部与祁连海域和华北海域的海水循环通畅,海水盐度值恢复正常或弱咸化。中央古隆起、离石隆起和桃利庙坳陷中的凸起等高部位水动力较强,主要发育砂屑白云岩、鲕粒白云岩、凝块石白云岩、粉晶白云岩;而米脂坳陷和桃利庙坳陷由于地势较低,仍为低能环境,主要发育粉晶白云岩、灰质白云岩和泥晶灰岩。根据沉积环境及岩性差异特征,又可细分为云坪、台内丘滩、云质潟湖和灰质潟湖等4种沉积微相类型。

**云坪** 广泛发育在中央古隆起和横山隆起带上,在奥陶系盐下各亚段均有分布,沉积水体浅,能量低,沉积物为浅灰色—灰色粉晶白云岩(图2h)和含泥质泥粉晶白云岩。海侵期发育于向上变浅高频旋回的中部或上部,其下部常沉积砂屑白云岩;



海退期发育于向上变浅高频旋回的中部,其下部沉积物常为泥质白云岩或白云质泥岩,上部为含硬石膏结核泥粉晶白云岩。

**丘滩** 研究区丘滩包括颗粒滩和微生物丘,单层厚度薄,在纵向上常多期次叠置,故本次研究将其归纳为一体。该类型广泛发育在中央古隆起、横山隆起和桃利庙坳陷凸起上的马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段中,马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中也有少量分布。该相带水体能量高,岩性为浅灰色—灰色块状或厚层状砂屑白云岩、鲕粒白云岩(图2i)和凝块石白云岩(图2j),常位于向上变浅高频旋回的顶部或中部,其上部可见含云膏岩,下部常为粉晶白云岩或灰质粉晶白云岩(图3a,3d,3f)。

**云质潟湖** 该相带平面上位于中央古隆起、横山隆起和桃利庙坳陷凸起上的台内丘滩体之间,沉积水体相对较深,海水弱咸化,发育浅灰色—灰色块状或厚层状粉晶白云岩和灰质粉晶白云岩(图2k)。纵向上主要发育于马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段中,马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段中也有少量分布。

**灰质潟湖** 该沉积相带大面积发育于米脂坳陷和桃利庙坳陷中,沉积水体较深、能量低,海水循环通畅,盐度正常或弱咸化,岩性主要为灰色—深灰色块状泥晶灰岩(图2l)。向上变浅旋回由下至上

常由泥晶灰岩、灰质粉晶白云岩和粉晶白云岩中的2个或3个岩石类型随机组成(图3g),主要发育于马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段中,马五<sub>10</sub>亚段和马五<sub>8</sub>亚段中也有少量分布。

## 2.2 沉积相纵向演化与横向对比

受古气候、海平面升降变化和“三隆三坳”古地理格局共同控制,鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积相在纵向演化上呈现出韵律性,在横向分布上又呈现出较强的分异性(图4,图5)。

从纵向来看,在中央古隆起南部的残留地层中,形成于相对海退期的马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段主要为泥云坪沉积,主要发育泥质白云岩;而形成于相对海侵期的马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段发育丘滩沉积,岩性主要为砂屑白云岩(图4a)。在米脂坳陷边缘,马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段主要为膏云坪沉积,岩性主要为含云硬石膏岩;而马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段水体能量高,发育丘滩,岩性主要为砂屑白云岩(图4b,图5)。在米脂坳陷中心,马五<sub>10</sub>亚段、马五<sub>8</sub>亚段和马五<sub>6</sub>亚段为膏盐潟湖沉积,主要发育膏岩和盐岩;而马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段主要为灰质潟湖沉积,岩性主要为石灰岩,夹少量灰质白云岩和白云岩薄层(图5)。

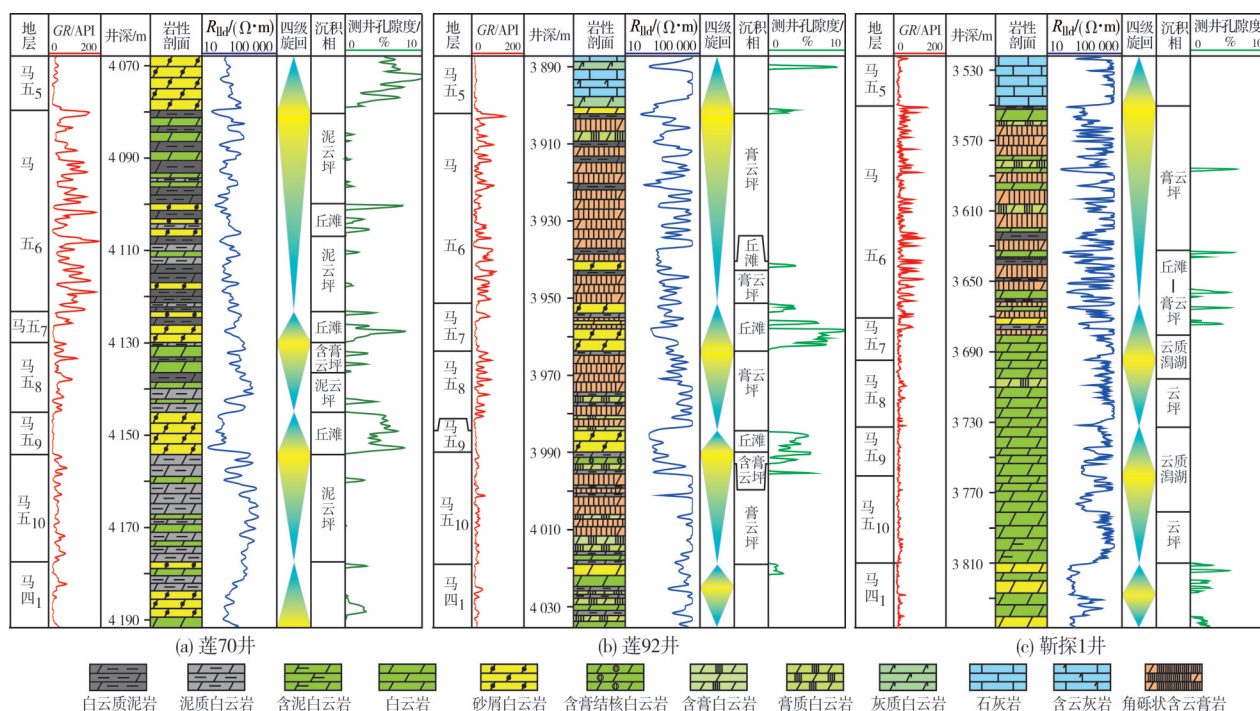


图4 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系典型单井沉积相与储层综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive column of Ordovician pre-salt sedimentary facies and reservoirs in central-eastern Ordos Basin

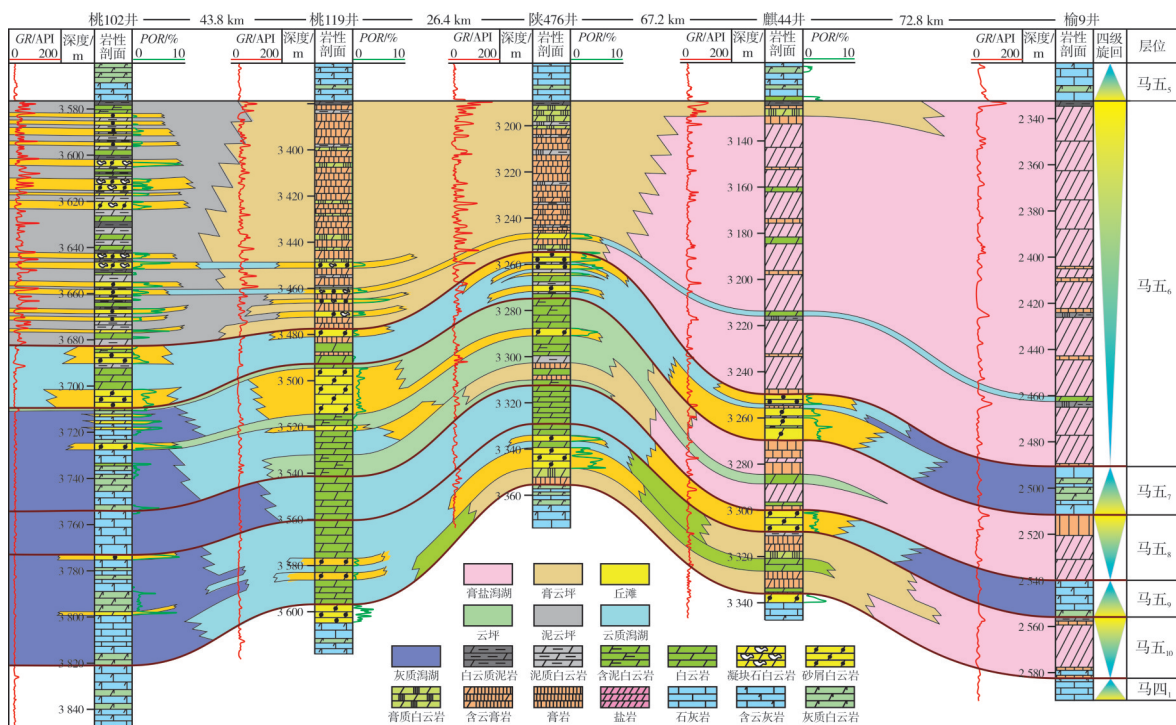


图5 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积相剖面图(剖面位置见图1a)

Fig. 5 Inter-well sedimentary facies profile of Ordovician pre-salt strata in central-eastern Ordos Basin

从横向分布来看,同为相对海退期沉积的马五<sub>10</sub>亚段和马五<sub>8</sub>亚段存在相似的沉积相变特征,如从桃利庙坳陷到米脂坳陷均由灰质潟湖依次相变为云质潟湖/丘滩—云坪—膏云坪—膏盐潟湖,反映了由相对开阔环境转变为较为局限环境的变化特征。同为相对海侵期沉积的马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段也存在较为相似的沉积相变特征,如米脂坳陷和桃利庙坳陷均主要为灰质潟湖,向横山隆起相变为云质潟湖和丘滩(图5)。马五<sub>5</sub>亚段为马五期内的最大海退期沉积,米脂坳陷为膏盐潟湖,发育了一套厚层膏盐岩(图1b,图5);桃利庙坳陷海平面频繁震荡,丘滩和膏云坪纵向上多期次叠置;盆地周缘的中央古隆起和横山隆起则主要为泥云坪或膏云坪。

### 3 沉积相模式

在上述沉积特征分析的基础上,综合古气候、海平面升降和古地理格局,建立了3种具有台地边缘—局限台地—蒸发台地相分异特征的鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积相模式(图6)。

第1种模式典型发育层位为马五<sub>10</sub>亚段和马五<sub>8</sub>亚段(图6a)。在该模式中,中央古隆起地势高、水动力强,广泛发育台缘颗粒滩沉积。桃利庙坳陷通过中央古隆起鞍部与祁连海域连通,从而具有海水

持续补给通道,海水盐度值正常或弱咸化,总体上为局限台地相沉积。从微古地貌来看,不同地貌单元由于水体能量差异发育不同的微相和微相组合:凹陷区地势较低,始终处于低能带,但伴随海平面下降,海水盐度值增加,沉积微相由灰质潟湖变为云质潟湖;凸起带地势相对较高,海平面较高时为灰质潟湖沉积,但随着海平面下降,水动力逐渐增强,逐渐相变为云质潟湖和台内丘滩沉积。横山隆起—米脂坳陷—离石隆起远离祁连海和华北海的海水补给区,蒸发作用和古隆起障壁作用导致该区域总体为蒸发台地相,其中米脂坳陷为膏盐潟湖沉积;靠近海水补给区的横山隆起和离石隆起在旋回下部发育薄层局限台地台内丘滩或云坪,旋回上部发育蒸发台地含膏云坪和膏云坪。

第2种模式典型发育层位为马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段(图6b)。在该模式中,中央古隆起继承性发育台地边缘颗粒滩沉积,而东部的桃利庙坳陷—横山隆起—米脂坳陷—离石隆起受海平面上升影响,盆地周缘古隆起障壁作用减弱,海水盐度值恢复正常,且水动力增强,演变为局限台地沉积模式,并呈现出“坳陷控灰质潟湖和云质潟湖沉积、隆起带控台内丘滩沉积”的特征,是第1种沉积相模式中的桃利庙坳陷沉积特征的放大版,且具有相似的高频旋



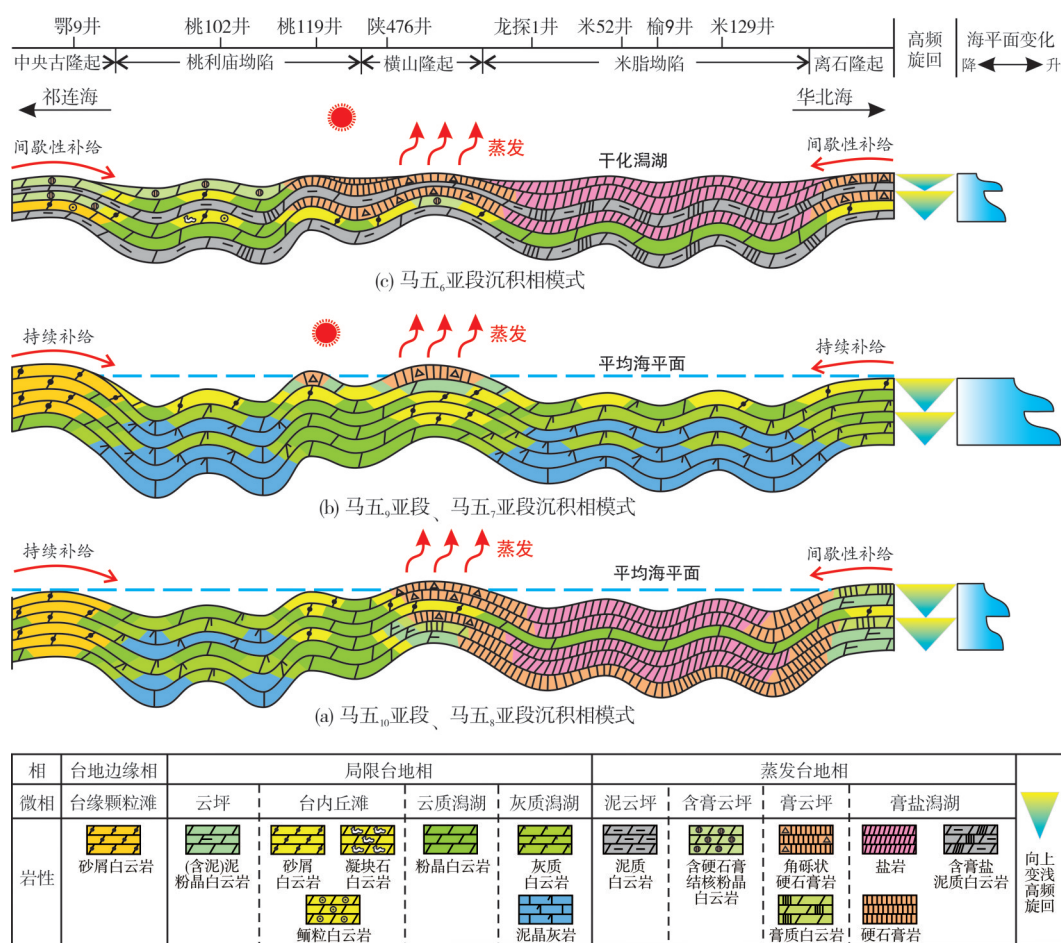


图6 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积相演化模式

Fig. 6 Ordovician pre-salt sedimentary facies model in central-eastern Ordos Basin

回演化规律,故不再赘述。特殊之处在于该模式中的横山隆起高部位易发生间歇性暴露,在高频旋回顶部形成高盐度沉积环境,发育膏云坪沉积,而颗粒滩向隆起带两侧的高能环境迁移,在马五<sub>7</sub>亚段可见此类沉积特征。

第3种模式发育于海平面较低的马五<sub>6</sub>亚段中(图6c)。由于海平面下降幅度大,鄂尔多斯盆地奥陶系中东部总体以蒸发台地相沉积为主,并呈现出“坳陷控膏盐潟湖沉积,隆起带控泥云坪、含膏云坪和膏云坪沉积”的特征。仅桃利庙坳陷在高频旋回下部由海平面相对上升与祁连海域短暂连通而水动力增强所致,发育局限台地云质潟湖和台内丘滩沉积。

## 4 岩相古地理平面展布

### 4.1 马五<sub>10</sub>亚段

马五<sub>10</sub>亚段为马五段内的首次海退沉积(图1b)。因海平面下降,古隆起对海水的障壁作用增

强,盆地东部米脂坳陷的海水循环不畅,强烈的蒸发作用导致米脂坳陷的海水浓缩,大量膏质和盐类物质从海水中析出,在神木—榆林—米脂—大宁一带形成膏盐潟湖沉积,并向米脂坳陷周缘的横山隆起、离石隆起逐渐相变为膏云坪和泥云坪,呈现出同心环带状分异的特征。在西部桃利庙坳陷,由于中央古隆起在定边地区存在一个地势较低的鞍部(图1a),为该坳陷与祁连海海域的海水循环提供了通道,从而导致该区域海水未发生与米脂坳陷内的海水同步咸化的过程,仍处于正常海水盐度范围内或趋于弱咸化,在桃利庙坳陷中心地区发育局限台地灰质潟湖沉积,主要发育泥晶灰岩。向中央古隆起和横山隆起方向,随着地势增高,海水盐度值增加和水动力增强,局部高部位沉积丘滩,丘滩之间的低部位为云质潟湖沉积(图7a)。

### 4.2 马五<sub>9</sub>亚段

马五<sub>9</sub>亚段为马五段内的首次短周期海侵沉积

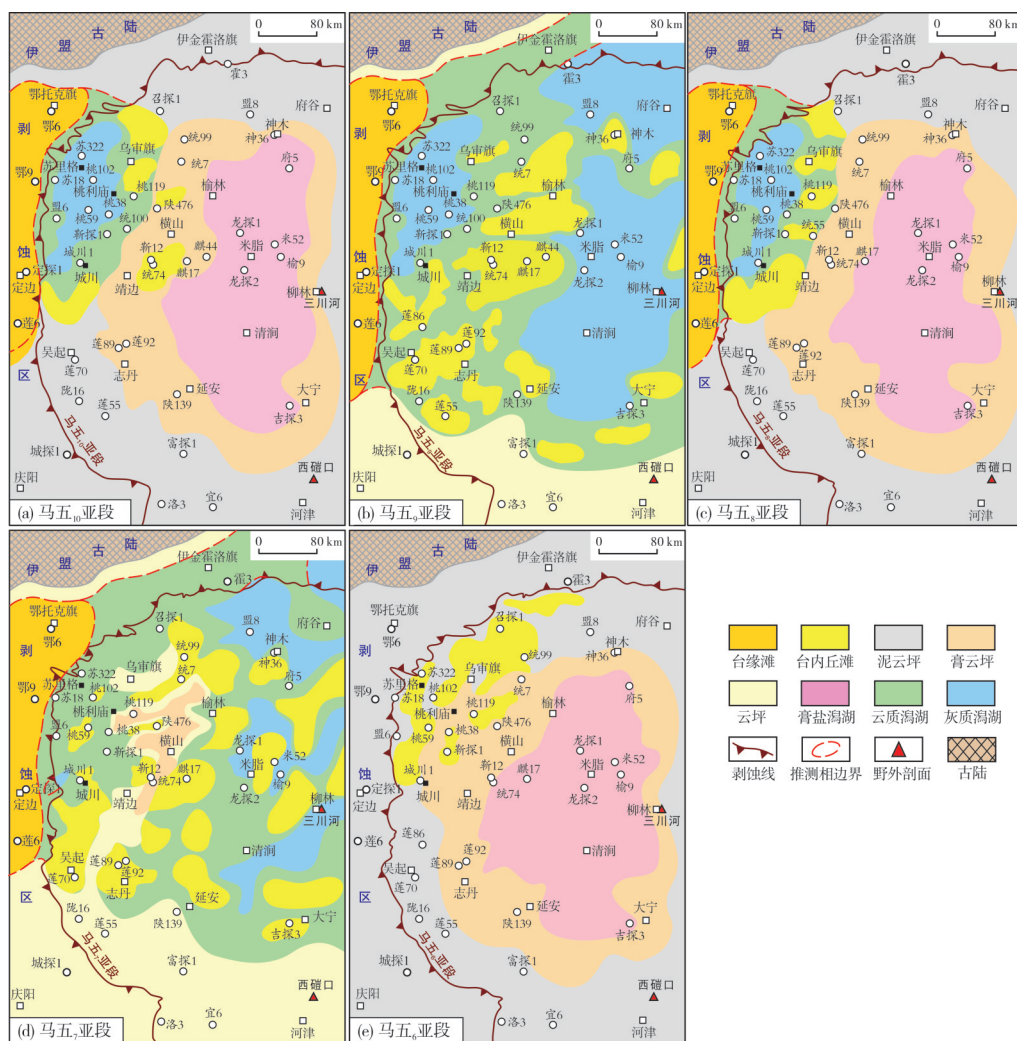


图7 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下岩相古地理图

Fig. 7 Lithofacies paleogeographic maps of Ordovician pre-salt strata in central-eastern Ordos Basin

(图1b)。由于海平面上升,东部离石隆起、横山隆起及中央古隆起对海水的阻隔作用减弱,鄂尔多斯盆地中东部海水与华北广海和祁连海域的循环正常。横山隆起和离石隆起带的高部位水动力强,广泛发育丘滩。丘滩之间的低部位水体能量较低,为云质潟湖,发育粉晶白云岩。盆地东部米脂坳陷、西部桃利庙坳陷和北部准格尔坳陷的沉积水体较深,水动力较弱,海水盐度值正常,为局限台地灰质潟湖环境,以泥晶灰岩和灰质白云岩沉积为主(图7b)。

### 4.3 马五<sub>8</sub>亚段

马五<sub>8</sub>亚段为马五段内继马五<sub>10</sub>亚段后的再次海退沉积(图1b),其沉积环境及沉积相展布特征与马五<sub>10</sub>亚期具有相似性。盆地东部神木—榆林—米脂—大宁一带的米脂坳陷仍为蒸发台地相膏盐潟湖

沉积环境,以纹层状硬石膏岩和块状盐岩沉积为主。受古地理格局和盆地周缘海水补给的控制,沉积微相呈现出沿米脂坳陷环带状相变的特征,由内向外依次为膏云坪和泥云坪。在西部桃利庙坳陷,由于中央古隆起定边鞍部的沟通,该坳陷与祁连海域的海水循环通畅,海水盐度正常或趋于弱咸化,沉积环境为局限台地灰质潟湖,主要发育泥晶灰岩,并向横山隆起相变为局限台地灰质潟湖和丘滩沉积(图7c)。

### 4.4 马五<sub>7</sub>亚段

马五<sub>7</sub>亚段为马五段内继马五<sub>8</sub>亚段后的再次海侵沉积(图1b),但相对于马五<sub>8</sub>亚期,其海平面上升幅度略小,因而沉积相展布特征与马五<sub>8</sub>亚期具有相似性也有独特性。盆地东部米脂坳陷的北部区域和准格尔坳陷仍为局限台地灰质潟湖,以发育泥



晶灰岩和灰质白云岩为主,夹少量的粉晶白云岩;横山隆起高部位间歇性暴露,发育云坪和含膏云坪,岩性主要为含泥粉晶白云岩和含云硬石膏岩;中央古隆起及横山隆起带两侧的水动力较强,广泛发育丘滩,岩性以砂屑白云岩、粉—细晶白云岩为主;桃利庙坳陷中的凸起带发育丘滩,而低凸起两侧的凹陷则发育局限潟湖,主要为泥晶灰岩、灰质白云岩和粉晶白云岩沉积(图7d)。

#### 4.5 马五<sub>6</sub>亚段

马五<sub>6</sub>亚段为马五段内的最大海退沉积(图1b)。东部米脂坳陷沉积环境与马五<sub>10</sub>亚段和马五<sub>8</sub>亚段的相似,仍广泛发育蒸发台地膏盐潟湖,沉积物以盐为主,厚度最大处可达200 m,盐间夹少量白云岩和纹层状硬石膏岩薄层。受米脂坳陷周缘海水间歇性补给控制,沉积相呈现出同心环带状的分异特征,从坳陷到周缘逐渐由膏盐潟湖依次相变为膏云坪和泥云坪。在桃利庙坳陷,受海平面下降和西缘祁连海海水补给作用的共同控制,此时坳陷区的凸起带间歇性暴露,而凹陷区的水动力则逐渐增强,导致该区域总体呈现“坳陷东部凸起带发育膏云坪,坳陷西部凹陷区发育丘滩体”的沉积特征(图7e)。

### 5 有利储层分布

综合应用岩心、薄片和物性数据研究表明,台内丘滩是鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下储层发育的有利储集相(图2—图5)。为此,基于新编制的岩相古地理图(图7)和前人关于盐岩充填作用破坏储层的认识<sup>[13]</sup>,预测苏里格—城川、乌审旗—志丹和神木—米脂地区是鄂尔多斯盆地奥陶系盐下有利储集相带分布区(图8a)。

#### 5.1 苏里格—城川有利储层分布区

苏里格—城川有利储层分布区位于桃利庙坳陷和盐岩边界线外侧。马五<sub>10</sub>亚段—马五<sub>8</sub>亚段,该有利区发育灰质潟湖相(图7a—7c)泥晶灰岩,岩性致密。由于马五<sub>10</sub>亚期—马五<sub>8</sub>亚期的填平补齐作用,马五<sub>7</sub>亚段在凸起带广泛发育颗粒滩,在凹陷区发育云质潟湖相致密粉晶白云岩(图7d),形成了良好的岩性圈闭。因海平面下降且频繁震荡,马五<sub>6</sub>亚段丘滩呈薄层状分布于硬石膏岩和泥质白云岩中(图3a,图4c,图5),并随着海平面变化,丘滩逐步由凸起向凹陷方向迁移(图7e),也可形成良好的岩性圈闭。目前该区域已发现了苏322井、桃38井和

桃59井等高产工业气流井,是奥陶系盐下的重要勘探目标区,其储层主要为粉—细晶白云岩、鲕粒白云岩(图2i,图8b)和凝块石白云岩(图2j)。储层单层厚度一般为1~2 m,累计厚度最厚可达38.6 m,孔隙度一般为2%~14.6%,平均孔隙度为4.91%,渗透率分布于 $(0.002\sim115.7)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均渗透率为 $4.61\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,是一套优质白云岩储层。

#### 5.2 乌审旗—志丹有利储层分布区

乌审旗—志丹有利储层分布区位于横山隆起和盐岩边界线外侧。新编制的岩相古地理图显示,该有利区除前人认识到的马五<sub>9</sub>和马五<sub>7</sub>亚段发育的台内丘滩之外<sup>[11-16,18-19]</sup>,马五<sub>10</sub>、马五<sub>8</sub>和马五<sub>6</sub>亚段均发育丘滩(图7a,7c,7e),具有纵向上多层系叠置发育、横向上分布范围广的特征,是奥陶系盐下最重要的勘探目标区,目前在该有利区已经发现了统74井和莲92井等产量达几十万方至百万方的高产工业气流井。储层主要为粉—细晶白云岩(图8c)和砂屑白云岩,储层单层厚度一般为1~7 m,累计厚度可达53.5 m,孔隙度一般为2%~15.1%,平均孔隙度为5.93%,渗透率分布于 $(0.002\sim94.1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均渗透率为 $4.57\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,是一套优质白云岩储层。

#### 5.3 神木—米脂有利储层分布区

神木—米脂有利储层分布区位于米脂坳陷和离石隆起带西翼,马五<sub>7</sub>亚段发育台内丘滩。马五<sub>7</sub>亚段顶部普遍发育一套泥晶灰岩(图5),加之中下部常与泥晶灰岩在纵向上多期次叠置,石灰岩的遮挡作用使得中下部储层中的孔隙未被盐岩充填而得到有效保存。储层主要为粉晶白云岩(图8d),单层厚度一般为1~7 m,累计厚度可达13.9 m,孔隙度一般为2%~4.57%,平均孔隙度为3.1%,渗透率为 $(0.002\sim2.63)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均值为 $0.05\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,是一套较为优质的白云岩储层。目前在米52井测试获得几百方的低产气流,未获得重大勘探突破,而与该有利区具有相似沉积背景的米探1井于2021年在马四段获得 $35.24\times10^4\text{ m}^3$ 的高产工业气流<sup>[23]</sup>,此外,该区域多口钻井在马五<sub>5</sub>亚段也获得了 $2\times10^4\text{ m}^3$ 以上的工业气流。与米探1井的马四段储层相比<sup>[24]</sup>,该有利区马五<sub>7</sub>亚段储层质量更好,表明神木—米脂区域具有获得勘探突破的潜力,是奥陶系盐下天然气勘探的潜在有利区(图8)。

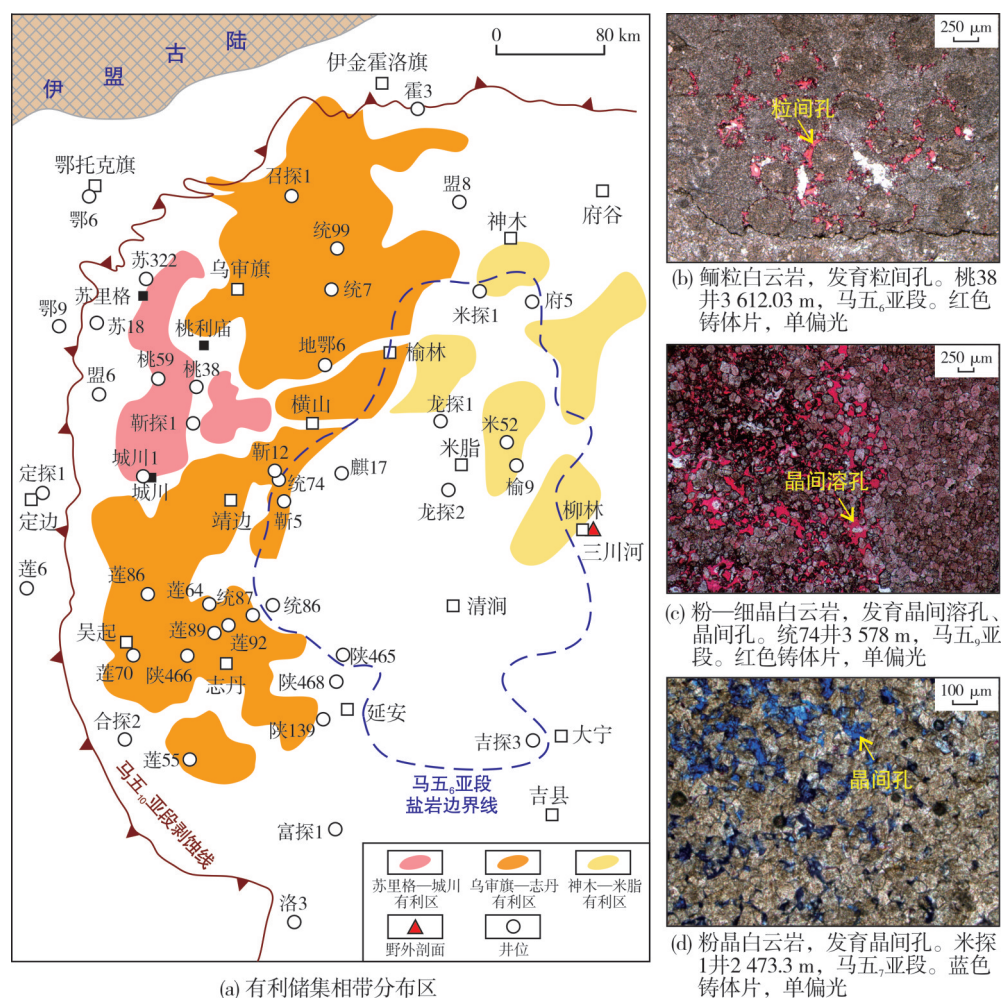


图8 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下有利储集相带分布区及典型储层微观照片

Fig. 8 Favorable facies distribution areas and typical microscopic photos of reservoir of Ordovician pre-salt strata in Ordos Basin

## 6 结论

(1) 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下发育局限台地和蒸发台地, 局限台地又可划分为云坪、台内丘滩、云质潟湖和灰质潟湖等4种沉积微相; 蒸发台地可进一步识别出泥云坪、含膏云坪、膏云坪和膏盐潟湖等4种沉积微相。

(2) 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积微相受“三隆三拗”古地理格局和海平面升降变化控制, 从拗陷向古陆或古隆起方向呈现出环带状分异的特征。拗陷主要以分布云质潟湖、灰质潟湖和膏盐潟湖为特征; 隆起和凸起则主要发育泥云坪、含膏云坪、膏云坪和台内丘滩等微相。

(3) 分布于横山隆起、离石隆起和拗陷中凸起带上的台内丘滩发育溶蚀孔、粒间孔、晶间溶孔和晶间孔。基于此, 预测出苏里格—城川、乌审旗—

志丹和神木—米脂地区是鄂尔多斯盆地奥陶系盐下有利储集相带分布区。

## 参考文献

- [1] 付金华, 孙六一, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩油气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.  
FU Jinhua, SUN Liuyi, FENG Qianghan, et al. Petroleum geology and exploration of Lower Paleozoic marine carbonate rocks in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [2] 马振芳, 陈安宁, 王景. 鄂尔多斯盆地中部古风化壳气藏成藏条件研究[J]. 天然气工业, 1998(1): 9-13.  
MA Zhenfang, CHEN Anning, WANG Jing. A study on the conditions of forming the fossil weathered residuum gas reservoir in the centre of Eerduosi Basin [J]. Natural gas industry, 1998(1): 9-13.
- [3] 夏日元, 唐健生, 关碧珠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 133-136.  
XIA Riyuan, TANG Jiansheng, GUAN Bizhu, et al. Ordovician



- palaeokarst landform in Ordos Basin and gas enrichment characteristics[J]. *Oil & gas geology*, 1999, 20(2): 133-136.
- [4] 杨华, 付金华, 魏新善. 鄂尔多斯盆地天然气成藏特征[J]. *天然气工业*, 2005, 25(4): 5-8.
- YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan. Characteristics of natural gas reservoir formation in E'erdusi Basin[J]. *Natural gas industry*, 2005, 25(4): 5-8.
- [5] 马硕鹏, 何文渊. 鄂尔多斯盆地天然气勘探领域分析[J]. *天然气工业*, 2006, 26(8): 5-7.
- MA Shuopeng, HE Wenyuan. Major frontiers of gas exploration in the Ordos Basin[J]. *Natural gas industry*, 2006, 26(8): 5-7.
- [6] 杨华, 包洪平. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J]. *天然气工业*, 2011, 31(12): 11-20.
- YANG Hua, BAO Hongping. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin[J]. *Natural gas industry*, 2011, 31(12): 11-20.
- [7] 时保宏, 刘亚楠, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地古隆起东侧奥陶系马家沟组中组合成藏地质条件[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 610-618.
- SHI Baohong, LIU Yanan, WU Chunying, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation in middle reservoir-source rock combination of the Ordovician Majiagou Formation on the east side of the paleo-uplift in Ordos Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2013, 34(5): 610-618.
- [8] 付金华, 黄有根, 郑小鹏, 等. 苏里格气田南区下奥陶统马家沟组气藏复杂岩溶储层的精细评价[J]. *天然气工业*, 2018, 38(4): 46-52.
- FU Jinhua, HUANG Yougen, ZHENG Xiaopeng, et al. Fine evaluation on complex karst gas reservoirs of Lower Ordovician Majiagou Fm in the south zone of the Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. *Natural gas industry*, 2018, 38(4): 46-52.
- [9] 谢锦龙, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段岩相古地理及有利区带预测[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(4): 23-32.
- XIE Jinlong, WU Xingning, SUN Liuyi, et al. Lithofacies palaeogeography and potential zone prediction of Ordovician Majiagou Member-5 in Ordos Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2013, 18(4): 23-32.
- [10] 包洪平, 杨帆, 白海峰, 等. 细分小层岩相古地理编图的沉积学研究及油气勘探意义: 以鄂尔多斯地区中东部奥陶系马家沟组五段为例[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1094-1106.
- BAO Hongping, YANG Fan, BAI Haifeng, et al. Sedimentology study on sub-member lithofacies paleogeography mapping and its petroleum exploration significance: taking Ma5 member of Lower Ordovician Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin for example[J]. *Acta petrologica sinica*, 2017, 33(4): 1094-1106.
- [11] 付金华, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组中组合岩相古地理新认识及油气勘探意义[J]. *天然气工业*, 2017, 37(3): 9-16.
- FU Jinhua, WU Xingning, SUN Liuyi, et al. New understandings of the lithofacies paleogeography of the middle assemblage of Majiagou Fm in the Ordos Basin and its exploration significance[J]. *Natural gas industry*, 2017, 37(3): 9-16.
- [12] 于洲, 丁振纯, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积相演化模式研究[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(3): 12-22.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WU Dongxu, et al. Sedimentary facies evolution model of Ordovician Majiagou Formation, central-eastern Ordos Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2017, 22(3): 12-22.
- [13] 于洲, 丁振纯, 王利花, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段膏盐下白云岩储层形成的主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1213-1224.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WANG Lihua, et al. Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5<sup>th</sup> member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2018, 39(6): 1213-1224.
- [14] 席胜利, 于洲, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下颗粒滩沉积模式及储层成因[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(4): 557-567.
- XI Shengli, YU Zhou, ZHANG Daofeng, et al. Sedimentary pattern and reservoir genesis of Ordovician pre-salt grain beach in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (natural science edition)*, 2018, 48(4): 557-567.
- [15] 魏柳斌, 陈洪德, 郭玮, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗-靖边古隆起对奥陶系盐下沉积与储层的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 391-400, 521.
- WEI Liubin, CHEN Hongde, GUO Wei, et al. Wushen-Jingbian Paleo-uplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2021, 42(2): 391-400, 521.
- [16] 魏柳斌, 赵俊兴, 苏中堂, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合微生物碳酸盐岩分布规律及沉积模式[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1162-1174.
- WEI Liubin, ZHAO Junxing, SU Zhongtang, et al. Distribution and depositional model of microbial carbonates in the Ordovician middle assemblages, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum exploration and development*, 2021, 48(6): 1162-1174.
- [17] 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.
- ZHONG Shoukang, TAN Xiucheng, HU Guang, et al. Control of paleogeographic pattern on sedimentary differentiation of evaporite-carbonate symbiotic system: a case study of the sixth sub-member of Ordovician Majiagou Formation M5 Member in central-eastern Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum exploration and development*, 2022, 49(4): 728-740.
- [18] 左沼滔, 胡忠贵, 杨威, 等. 鄂尔多斯盆地中东部马家沟组盐下构造-沉积响应特征[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(2): 141-149.
- ZUO Mingtao, HU Zhonggui, YANG Wei, et al. Characteristics of structural-sedimentary response of the subsalt reservoir of Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2021, 26(2): 141-149.
- [19] 丁振纯, 高星, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层特征、成因及分布[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(1): 16-24.
- DING Zhenchun, GAO Xing, DONG Guodong, et al. Characteristics, genesis and distribution of the Ordovician pre-salt

- dolomite reservoirs in Ordos Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(1): 16–24.
- [20] 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 等. 陕北地区早古生代古地磁研究的初步结果及其意义[J]. 科学通报, 1997, 42(4): 401–406.  
YANG Zhenyu, MA Xinghua, SUN Zhiming, et al. The preliminary results of Early Paleozoic paleomagnetic study in the northern Henan Province and its implications [J]. Chinese science bulletin, 1997, 42(4): 401–406.
- [21] 张永生, 郑绵平, 包洪平, 等. 陕北盐盆马家沟组五段六亚段沉积期构造分异对成钾凹陷的控制[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 101–109.  
ZHANG Yongsheng, ZHENG Mianping, BAO Hongping, et al. Tectonic differentiation of  $O_2m_5^6$  deposition stage in salt basin, northern Shaanxi, and its control over the formation of potassium sags [J]. Acta geologica sinica, 2013, 87(1): 101–109.
- [22] 姚泾利, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 1–12.
- YAO Jingli, BAO Hongping, REN Junfeng, et al. Exploration of Ordovician subsalt natural gas reservoirs in Ordos Basin [J]. China petroleum exploration, 2015, 20(3): 1–12.
- [23] 付金华, 于洲, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地东部米探1井奥陶系马四段天然气勘探新发现及勘探方向[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 17–27.  
FU Jinhua, YU Zhou, LI Chengshan, et al. New discovery and favorable areas of natural gas exploration in the 4<sup>th</sup> Member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin [J]. Natural gas industry, 2021, 41(12): 17–27.
- [24] 于洲, 牛小兵, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地米脂地区奥陶系马四段储层成因与分布[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 38–48.  
YU Zhou, NIU Xiaobing, ZHANG Caili, et al. Genesis and distribution of reservoirs of the 4<sup>th</sup> Member of Ordovician Majiagou Formation in the Mizhi area of the Ordos Basin [J]. Natural gas industry, 2021, 41(12): 38–48.

编辑:黄革萍

## Sedimentary characteristics and favorable facies of Ordovician pre-salt strata in central-eastern Ordos Basin

YU Zhou, ZHANG Daofeng, WANG Weibin, LI Peng,  
WEI Liubin, WU Dongxu, LIU Yuxin

**Abstract:** Ordovician pre-salt dolomite is an important natural gas producing layer in Ordos Basin, which has great exploration potential. However, the distribution law of favorable facies of dolomite reservoir is not clear, which restricts the next exploration process. Therefore, based on the new progress of paleogeographic pattern research, combined with data of field outcrop, drilling core, rock slice and physical property, the sedimentary characteristics and the distribution law of favorable facies of Ordovician pre-salt strata in the central-eastern Ordos Basin are studied. The results show that: (1) There are mainly two types of sedimentary facies (eight types of sedimentary microfacies) in Ordovician pre-salt layer, which are restricted platform (dolomite flat, intra platform mound-shoal complexes, dolomitic lagoon and calcareous lagoon) and evaporation platform (mud-dolomite flat, gypsiferous dolomite flat, gypsum-dolomite flat and gypsum-salt lagoon). (2) Under the control of paleoclimate, sea level fluctuation and paleogeographic pattern of “three uplifts and three depressions”, the Ordovician pre-salt paleogeography presents the plane distribution characteristics of “uplift controlled intra platform mound-shoal-flat and depression controlled lagoon”. In periods of the 10<sup>th</sup> submember of Member-5 of the Lower Ordovician Majiagou Formation ( $O_1m_5^{10}$ ) and  $O_1m_5^8$ , Mizhi depression and Taolimiao depression are gypsum-salt lagoon and calcareous lagoon respectively; Hengshan uplift and residual areas of central paleo uplift are gypsum-dolomite flat and mud-dolomite flat respectively. In periods of  $O_1m_5^9$  and  $O_1m_5^7$ , Mizhi depression and Taolimiao depression are mainly calcareous lagoon and dolomite lagoon; Hengshan uplift and residual areas of central paleo uplift are mainly intra platform mound-shoal complexes and dolomitic flat. In periods of  $O_1m_5^6$ , Mizhi depression is gypsum-salt lagoon; Hengshan uplift is gypsum-dolomite flat, and the residual area of central ancient uplift is mud-dolomite flat. (3) The lithology of intra platform mound-shoal complexes is consisted of arenaceous dolomite, oolitic dolomite and agglomerate dolomite, with dissolution holes, intergranular dissolution holes, intergranular pores and intragranular pores developed, which has good relatively reservoir performance. It is a favorable facies belt for the development of Ordovician pre-salt high-quality dolomite reservoirs. It is concluded that Sulige-Chengchuan, Wushenqi-Zhidan and Shenmu-Mizhi areas are favorable reservoir development areas and an important direction of natural gas exploration.

**Key words:** sedimentary facies; paleogeographic pattern; favorable reservoir facies; pre-salt; Majiagou Formation; Ordovician; Ordos Basin

**YU Zhou,** First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in sedimentary and reservoir geology of carbonate rock. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China