

碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征

——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例

胡安平^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 张杰^{1,2}, 吴东旭^{1,2}, 付小东^{1,2}, 蒙绍兴^{1,2}

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江杭州 310023)

摘要: 针对碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合内是否发育烃源岩, 能否提供充足烃源, 源-储是否匹配等制约鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合勘探领域评价的问题, 通过陕473和桃112两口马家沟组全取心井的岩心观察和沉积旋回分析, 取得了3项认识。①碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合包括由未云化灰岩段、白云岩段、白云岩-膏盐岩薄互层段和膏盐岩段构成的2类8种气候逐渐变干旱的沉积旋回; 白云岩段和白云岩-膏盐岩薄互层段共发育10类111个高频沉积旋回, 具有旋回频繁、单层厚度薄的特点。②基于高频沉积旋回分析, 识别出马家沟组中-下组合发育两类烃源岩: 一类为优质烃源岩, 即毫米级高TOC(有机碳含量)($>2.50\%$)黑色泥质白云岩; 另一类为中等烃源岩, 即低TOC(1.21%)灰黑色白云岩。优质烃源岩发育具有相控性和层控性特征, 分布于膏盐湖周缘的白云岩-膏盐岩薄互层段中, 计算天然气资源量为 $8\,504.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。③识别出马家沟组中-下组合两类相控白云岩储层, 分别为古隆起及周缘的颗粒滩白云岩储层和膏盐湖周缘的微生物白云岩储层, 源-储匹配良好。上述认识为鄂尔多斯盆地马家沟组中-下组合的持续勘探提供重要信息, 指明了方向。

关键词: 碳酸盐岩-膏盐岩组合; 高频沉积旋回; 泥质白云岩烃源岩; 微生物白云岩储层; 马家沟组; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

Hu Anping^{1,2}, Shen Anjiang^{1,2}, Zhang Jie^{1,2}, Wu Dongxu^{1,2}, Fu Xiaodong^{1,2}, Meng Shaoxing^{1,2}

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023; China)

Abstract: The lower to middle carbonate-evaporite assemblages of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin are potential exploration targets but questions have been raised concerning whether there are source rocks developed, how well they are developed and if they match well with reservoirs. Detailed observation of cores and analyses of high-frequency sedimentary cycles from wells Shan 473 and Tao 112 encountering the Majiagou Formation show that: ① Carbonate-evaporite assemblages consist two kinds/eight types of sedimentary cycles (recording gradually dry-up climate) of limestone (without dolomitization), dolostone, thin dolomite-evaporite interbeds, and evaporites, of which the dolostone and thin dolomite-evaporite interbeds are further recognized to contain 10 types/111 high-frequency sedimentary cycles characterized with frequent cycles and thin single layers. ② Based on analysis of these high-frequency sedimentary cycles, two types of source rocks are identified: the high-quality source rocks consisting of black argillaceous dolostone in millimeter-scale lamina with high TOC ($>2.50\%$) and the medium-quality source rocks consisting of grey-black dolostone with low TOC (1.21%). The high-quality source rocks are facies and horizon conditioned and mostly distributed in the interbedded thin dolomite-evaporite sections around the evaporitic lake and with gas resource amounting up to 850.494 BCM. ③ Two types of facies-controlled dolostone reservoirs are recognized:

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2022-05-16。

第一作者简介: 胡安平(1982—), 女, 博士、高级工程师, 碳酸盐岩储集层与地球化学实验技术。E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 沈安江(1965—), 男, 博士、教授级高级工程师, 碳酸盐岩沉积储层。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目(2018D-5008-03); 中国石油天然气股份有限公司科技项目(2019-5009-16)。

the dolo-grainstone reservoir on the paleo-uplift and its periphery, and the microbial dolostone reservoir around the evaporite lake, both are favorably located with source rocks. The above understandings may be used as guidance to the future exploration in the lower and middle assemblages of Majiagou Formation, Ordos Basin.

Key words: carbonate-evaporite assemblage, high-frequency sedimentary cycles, argillaceous dolostone source rock, microbial dolostone reservoir, Majiagou Formation, Ordovician, Ordos Basin

引用格式: 胡安平, 沈安江, 张杰, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 943-956. DOI: 10. 11743/ogg20220416.

Hu Anping, Shen Anjiang, Zhang Jie, et al. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 943-956. DOI: 10. 11743/ogg20220416.

本文定义的碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合指受蒸发海水影响的沉积岩系, 包括膏盐岩沉积期(盐间)、沉积前(盐下)和沉积后(盐上)受膏盐岩地球化学环境影响的沉积岩系, 由膏盐岩、碳酸盐岩(主要是白云岩)和少量碎屑岩组成^[1-2]。该类组合的沉积-成岩环境具有明显的特殊性: ①极浅的碳酸盐台地高盐度海水、高频海平面沉积旋回导致组合内岩性组合简单, 单层厚度小(毫米级), 累计厚度大; ②高盐度海水以浮游生物和嗜盐细菌为主, 生物种类随盐度增加而减少, 而生物产量却随盐度的增加而增加^[3-4], 具有非常大的生物通量^[5]; ③富含 SO_4^{2-} 、有机酸盐和特殊生烃母质(浮游生物和嗜盐细菌)。

全球46%的碳酸盐岩油气资源蕴藏在碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合中, 是非常重要的油气勘探领域, 但油源大多来自地层组合之外。如全球最大的North-Pars气田, 储层为二叠系Khuff组白云岩, 盖层为二叠系Sudair组膏盐岩, 烃源岩则为寒武系和奥陶系浅海相泥页岩; 又如全球最大的沙特Ghawar油田, 储层为侏罗系Arab组生屑砂屑灰岩, 盖层为HITH组和Arab组膏盐岩, 烃源岩为潮湿气候背景Tuwaiq组灰质泥岩^[6]。

中国海相碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合广泛发育于塔里木盆地寒武系, 四川盆地寒武系、石炭系和中-下三叠统, 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组^[7-9], 均有重大油气勘探发现。鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩-膏盐岩组合历经近30年的勘探, 已在上组合(马5¹—马5⁴)白云岩风化壳储层落实探明油气储量 $8\,671.00 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制油气储量 $1\,747.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于天然气中甲烷碳同位素($\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$)和乙烷碳同位素($\delta^{13}\text{C} = -29\text{‰}$)具有相似性, 而且寒武系-奥陶系自身并未见到类似于四川盆地寒武统筇竹寺组广覆式分布的厚层优质烃源岩, 再者马家沟组自身灰黑色白云岩烃源岩平均总有机碳含量(TOC)只有0.21%, 因而油源被认为来自上覆石炭系煤系烃源岩^[10], 同样是外源的。

近几年在鄂尔多斯盆地中部马5段中组合发现桃38、统74和莲92等多个油气高产富集井区, 其中米探1井马4³(下组合)获得了 $20.73 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流。马家沟组中-下组合被寄予厚望, 有望成为下一个万亿方大气区, 而烃源的落实则是关键所在。马家沟组上组合白云岩风化壳储层与上覆石炭系煤系烃源岩呈角度不整合接触, 可以构成良好的源-储匹配关系, 进而实现大面积供烃; 但马家沟组中-下组合远离石炭系煤系烃源岩, 中间为膏盐岩隔挡, 唯一的供烃窗口为中央古隆起区马4段与石炭系煤系烃源岩直接接触的部位, 供烃面积有限, 长距离向东运移难度大。米探1井天然气中甲烷碳同位素($\delta^{13}\text{C} = -45.40\text{‰}$)、乙烷碳同位素($\delta^{13}\text{C} = -48.00\text{‰}$)偏轻也证实了气源为油型气, 并非来自上覆石炭系煤型气。碳酸盐岩-膏盐岩组合内是否发育自源型烃源岩, 能否提供充足烃源, 源、储是否匹配是马家沟组中-下组合天然气勘探面临的关键科学问题。

陕473井和桃112井马家沟组全取心段岩心资料为上述关键科学问题的解决提供了高分辨率岩心素材。本文通过取心井详细的岩心观察和高频沉积旋回分析, 结合地化分析资料 and 前人研究成果, 指出马家沟组中-下组合自身发育优质烃源岩, 以毫米级的薄纹层形式存在, 但累计厚度大。由于受控于碳酸盐岩-膏盐岩组合高频海平面交替, 不可能形成类似于四川盆地筇竹寺组单层厚度大的烃源岩。同时发现碳酸盐岩-膏盐岩组合发育颗粒滩和微生物白云岩两类储层, 可以构成良好的源-储匹配关系。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通西缘上的一个多旋回叠合盆地, 面积为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 北为伊盟古陆, 西为与祁连海相连的西部大陆边缘盆地, 南为与秦岭

洋相连的南部大陆边缘盆地,东与华北地台本部相连。奥陶系马家沟组沉积期,鄂尔多斯盆地总体表现为“三隆两凹一凸”的古构造格局,北为伊盟古陆,西南为镇原隆起,两者构成所谓的“L”型中央古隆起^[11],中东部为鄂尔多斯坳陷,再往东为吕梁低隆。鄂尔多斯坳陷又可进一步分为米脂凹陷、桃利庙凹陷和乌审旗次级隆起。中央古隆起介于华北地台与秦祁海槽之间,早期以古陆形式分隔华北地台与秦祁海槽,晚期为水下隆起,成为两者间的障壁。

马家沟组沉积早期桃利庙凹陷范围很小,乌审旗次级隆起位于乌审旗—横山—靖边一带,米脂凹陷范围广,北至神木,南到宜川,占据了鄂尔多斯坳陷的大

部分地区。马家沟组沉积晚期古构造格局与早期基本一致,但米脂凹陷明显变小,局限在佳县—柳林一带;而桃利庙凹陷范围扩大,占据了鄂托克前旗—靖边的广大地区;乌审旗次级隆起也向东迁移至榆林—横山一带;吕梁低隆起向东迁移出盆地范围(图1a)。因此,马家沟组沉积期鄂尔多斯盆地位于赤道附近,气候干旱炎热,水体浅,高频沉积旋回发育,隆控滩、凹控膏盐岩沉积作用明显,构成典型的碳酸盐岩-膏盐岩组合^[12]。马家沟组由下至上依次划分为马1段、马2段、马3段、马4段、马5段以及马6段;马5段自上而下又细分为10个亚段,马5¹—马5⁴亚段为上组合,马5⁵—马5¹⁰亚段为中组合;马4段—马1段为下组合(图1b)。

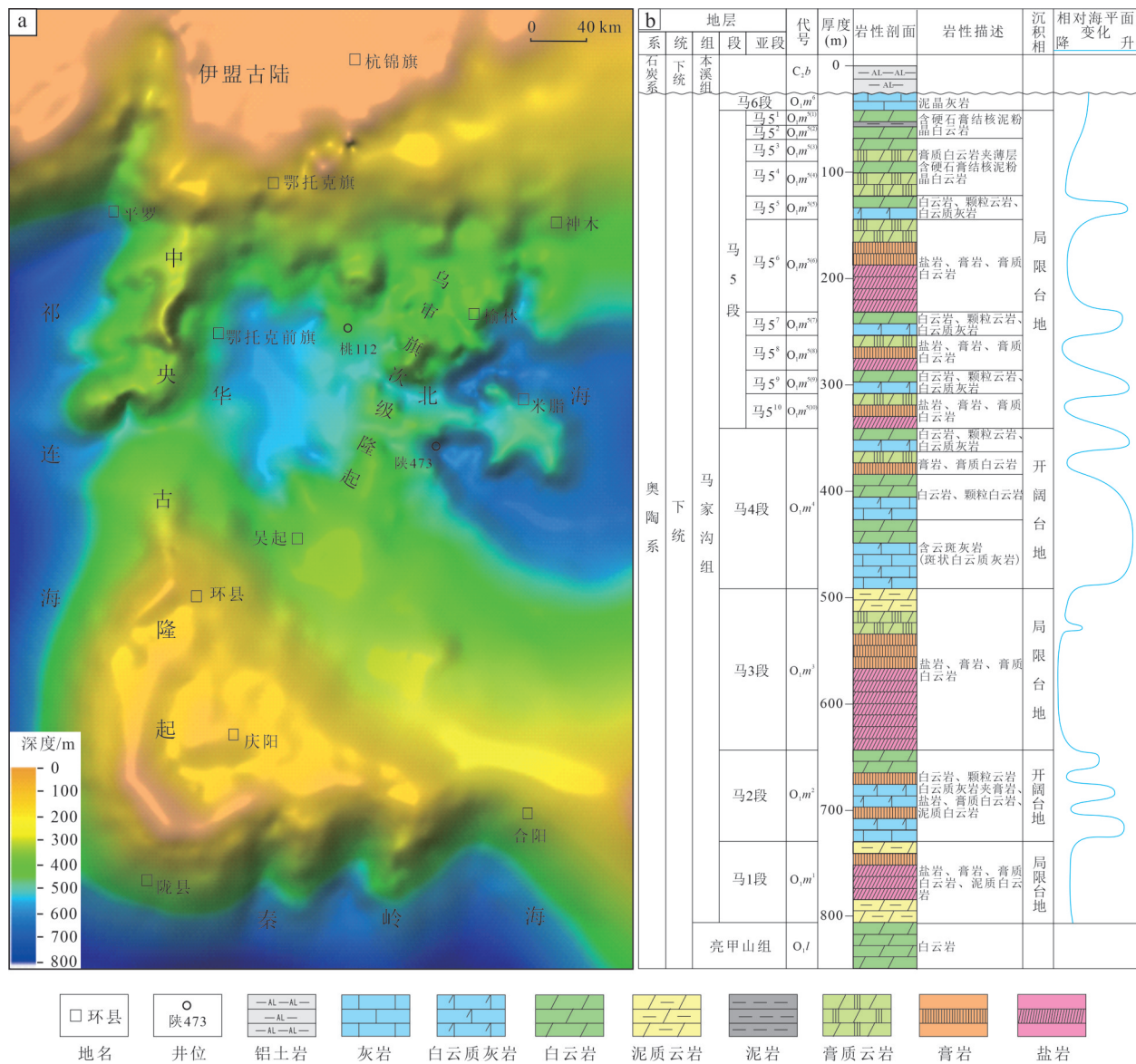


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积期古地貌特征和地层序列^[13-14]

Fig. 1 Palaeogeography and stratigraphic sequences during deposition of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin^[13-14]

a. 马家沟组沉积晚期古地貌,呈现出“三隆两凹一凸”的古构造格局(吕梁低隆起向东迁移出盆地范围);b. 马家沟组地层综合柱状图

奥陶系自下而上依次为亮甲山组、冶里组和马家沟组,视地层剥蚀厚度与沉积古地貌的不同,奥陶系不同层位地层均可与下伏寒武系不同层位地层呈不整合接触。马家沟组残余地层厚度为0~600 m,与上覆石炭系呈不整合接触,视剥蚀厚度的不同,石炭系本溪组可直接覆盖在马1段、马2段、马3段、马4段、马5段或马6段之上。盆地中、东部地区奥陶系马家沟组1段上覆于寒武系张夏组,马5段下伏于石炭系本溪组。

马1段、马3段和马5¹⁰、马5⁸以及马5⁶亚段岩性以膏盐岩、膏云岩和微生物白云岩为主,颗粒滩白云岩不发育,马5段沉积期膏盐湖面积大;马2段、马4段和马5⁹、马5⁷与马5⁵亚段岩性以泥晶灰岩、泥晶白云岩和颗粒滩白云岩为主,膏盐岩不发育,颗粒滩白云岩沿水下古隆起及周缘发育。

2 高频沉积旋回特征

碳酸盐岩高频沉积旋回均为向上变浅的沉积序列^[15],主要发育于极浅水碳酸盐台地,如蒸发碳酸盐台地,微弱的海平面升降就可导致不同岩石类型的频繁交替叠置,形成不同的高频沉积旋回序列。构成高频沉积旋回的岩石单元具有厚度薄、岩性交替频繁的特点,难以利用地震和井资料开展盆内的高频沉积旋回分析,故高频沉积旋回的研究主要依靠露头剖面。鄂尔多斯盆地陕473和桃112两口马家沟组全取心井为盆内高频沉积旋回的研究提供了极好的条件。陕473井马家沟组为一套碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合,岩心长566 m,取心井段为3 742~4 308 m,层位包括徐庄组顶—马1段—马2段—马3段—马4段—马5⁸亚段底。桃112井马家沟组同样为一套碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合,岩心长553 m,取心井段为3 306~3 859 m,层位包括徐庄组顶—马1段—马2段—马3段—马4段—马5⁵亚段底。

2.1 岩石类型及特征

基于陕473井和桃112井马家沟组岩心观察,共识别出4类8种岩性组合。4类是指一个完整的碳酸盐岩-膏盐岩组合,随气候逐渐变干旱,由下至上依次出现:未白云石化灰岩段、白云岩段、白云岩-膏盐岩薄互层段和膏盐岩段。为便于描述和统计分析,以上4套岩性段依次标记为A、B、C和D。

1)未白云石化灰岩段(A):主要为含泥质条带泥晶灰岩,少量生屑灰岩和豹斑灰岩。

2)白云岩段(B):由下至上依次出现5种岩石类型。①浅灰色中-薄层(泥质)泥晶白云岩;②浅灰色中-薄层叠层石白云岩;③深灰色含膏盐结核(泥质)泥晶白云岩,石膏或盐岩结核的含量为10%~25%;④灰黑色含膏盐结核的叠层石白云岩,石膏和盐岩结核的含量为10%~40%;⑤浅灰色中-薄层状颗粒(鲕粒、生屑、砂屑与砾屑)白云岩。

3)白云岩-膏盐岩薄互层段(C):由深灰色含膏盐结核(泥质)泥晶白云岩(③)、灰黑色含膏盐结核的叠层石白云岩(④)、黑色夹泥质条带泥质白云岩(⑥)和膏盐岩(⑦)构成,单层厚度为毫米级,是典型的水体极浅的蒸发台地高频海平面震荡的产物。

4)膏盐岩段(D):下部为石膏层,上部为石盐层,或仅出现石膏层。陕473井位于膏盐湖边缘,马1段、马3段以及马5¹⁰亚段、马5⁸亚段和马5⁶亚段均有膏盐岩分布,厚度大。桃112井远离膏盐湖,主要发育白云岩段和白云岩-膏盐岩薄互层段,膏盐岩段不发育。

2.2 高频沉积旋回类型及岩石组合

一个完整的向上变浅的沉积序列,随着气候逐渐向干旱变迁,由下至上应该依次出现未白云石化灰岩段(A)—白云岩段(B)—白云岩-膏盐岩薄互层段(C)—膏盐岩段(D)。但实际情况并非如此,往往会因为气候的突变会引起某些岩性段的缺失。同样,白云岩段(B)的5种岩石类型和白云岩-膏盐岩薄互层段(C)的4种岩石类型也因气候的变迁呈现不同的旋回特征。

基于岩心观察,共识别出8种岩性段旋回(图2,图3),分别为B—D, B—C, A—C, A—B—C, C—D, C—B—A, B—A和C—B。其中,岩性段B和C共发育10类111个高频沉积旋回(表1,表2)。

综上所述,陕473井马家沟组全取心段共发育6类19个岩性(A、B、C和D)组合类型,最大地层厚度为70.75 m,最小为11.80 m,平均为37.28 m。岩性段B和C共发育10类55个高频沉积旋回,最大地层厚度为29.83 m,最小为1.35 m,平均为8.06 m,累计为80.63 m。桃112井马家沟组全取心段共发育6类13个岩性(A、B、C和D)组合类型,最大地层厚度为142.49 m,最小为11.18 m,平均为49.24 m。岩性段B和C共发育10类56个高频沉积旋回,最大地层厚度为39.72 m,最小为1.13 m,平均为8.99 m,累计为89.86 m。

3 烃源岩特征与分布

长期以来,膏盐岩作为理想盖层被学者们所关注,

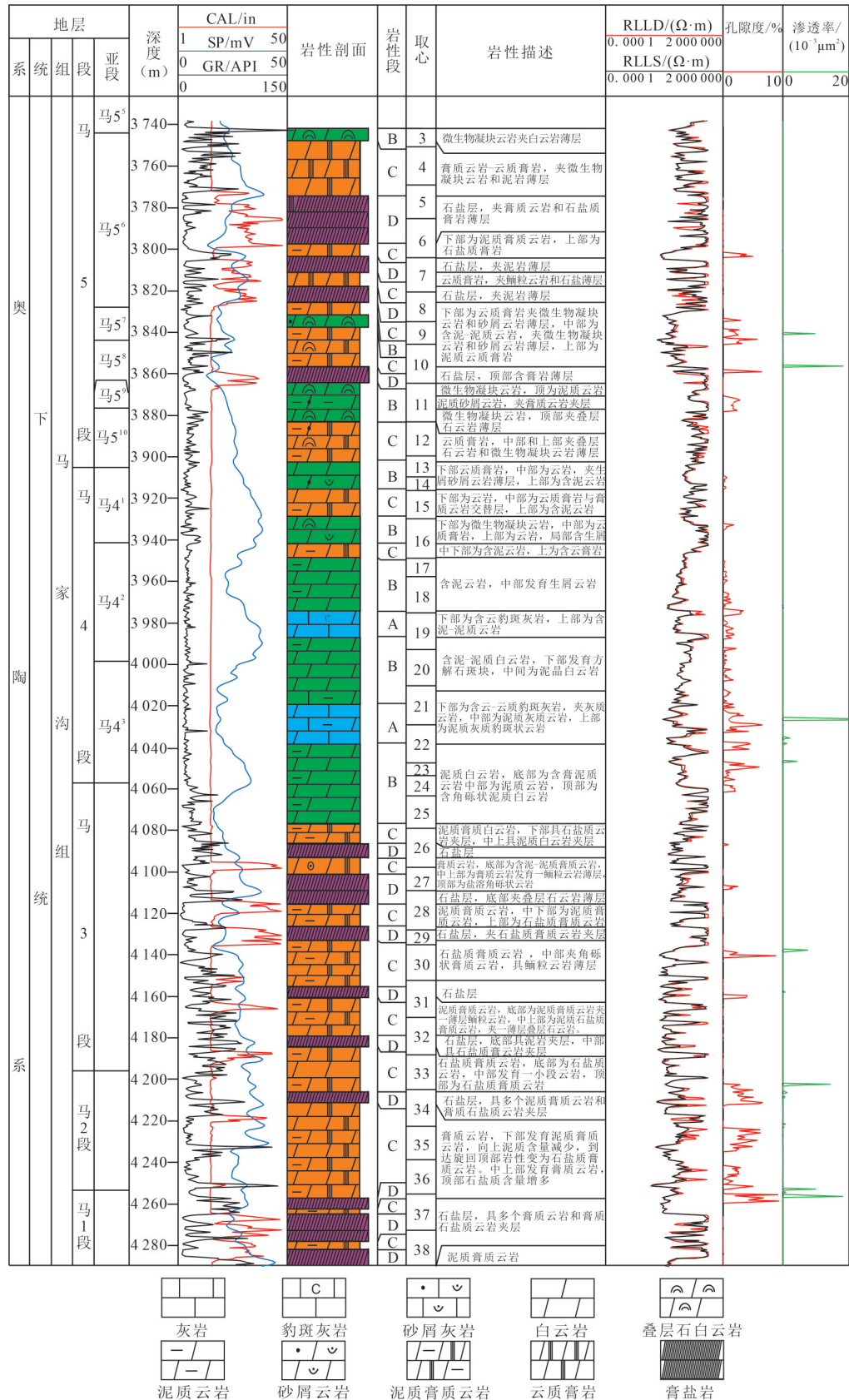


图2 鄂尔多斯盆地陕473井马家沟组A,B,C和D岩性段组合类型与特征

Fig. 2 Assemblage types and characteristics of lithology sections A, B, C and D in the Majiagou Formation in Well Shan 473, Ordos Basin

(A为灰岩段;B为白云岩段;C为膏盐岩/白云岩互层;D为膏盐岩。)

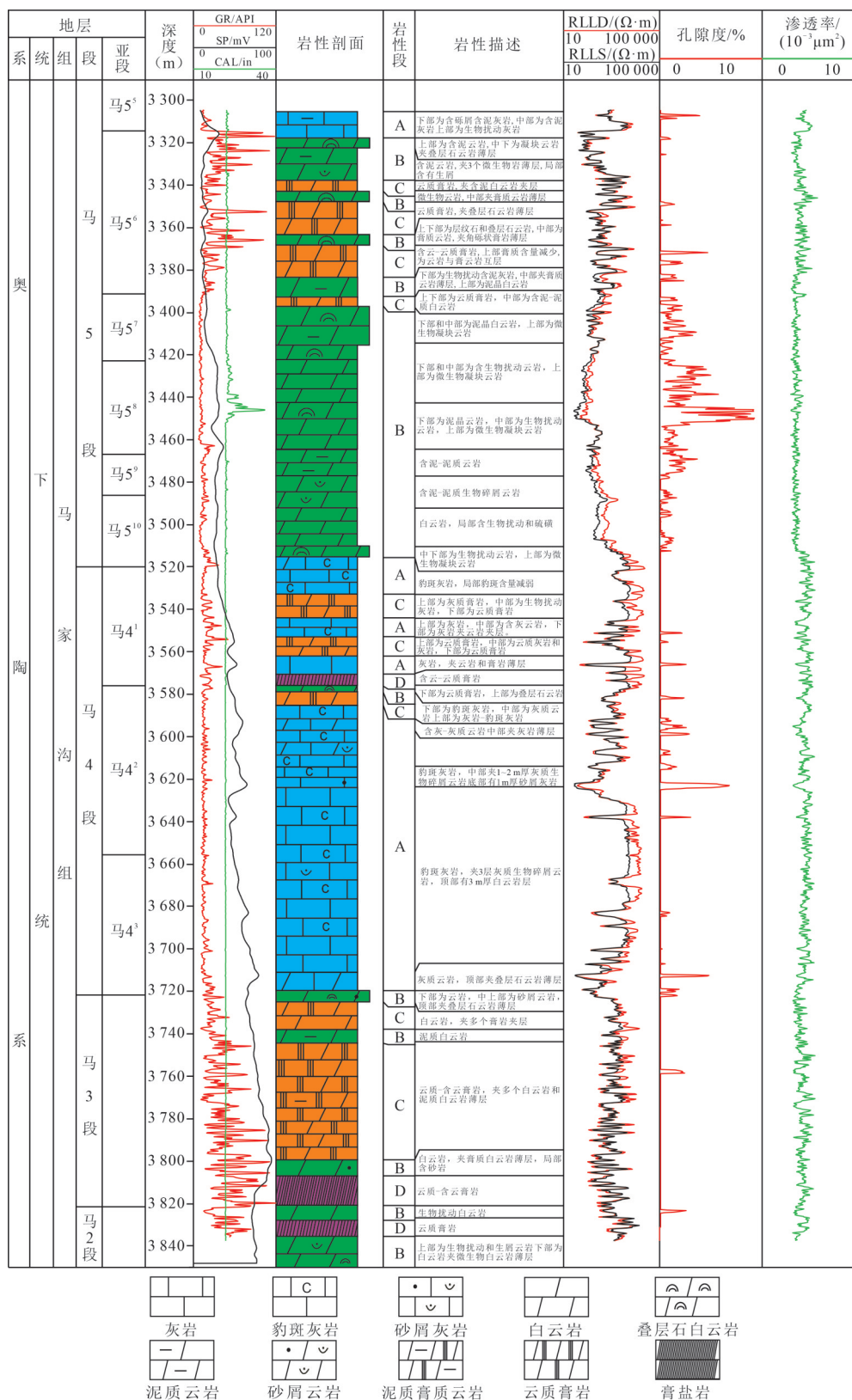


图3 鄂尔多斯盆地陕桃112井马家沟组A,B,C和D岩性段组合类型与特征

Fig. 3 Assemblage types and characteristics of lithology sections A, B, C and D in the Majiagou Formation in Well Tao 112, Ordos Basin

(A为灰岩段;B为白云岩段;C为膏盐岩/白云岩互层;D为膏盐岩。)

表1 鄂尔多斯盆地陕473井和桃112井马家沟组岩性段及组合类型的数量与厚度统计

Table 1 Statistics of assemblage types and the thickness of the lithology sections in Wells Shan 473 and Shan 112, Ordos Basin

井号	岩性段及组合类型	数量/个	最大厚度/ m	最小厚度/ m	平均厚度/ m
陕473井	A	2	20.65	11.80	16.23
	B	8	38.25	5.90	19.15
	C	17	47.10	5.90	14.74
	D	12	23.55	5.90	10.81
	C—D	11	53.00	11.80	25.19
	C—B—A	1	70.75	70.75	70.75
	B—A	1	44.20	44.20	44.20
	B—C	3	32.40	26.55	30.45
	B—D	1	23.60	23.60	23.60
桃112井	C—B	2	32.40	26.55	29.48
	A	5	139.65	11.17	37.98
	B	10	120.00	2.79	19.82
	C	9	55.86	2.79	15.52
	D	3	13.97	5.59	8.38
	B—A	2	142.49	33.51	88.00
	B—C	5	61.45	11.18	27.38
	B—D	2	22.35	19.56	20.96
	C—D	1	13.97	13.97	13.97
	A—C	2	22.35	22.35	22.35
	A—B—C	1	122.79	122.79	122.79

但碳酸盐岩-膏盐岩组合内是否发育烃源岩却很少受到关注。传统认识更倾向于高盐度环境下有机质产量较低,难以形成烃源岩^[16],油气主要是外源的。

3.1 毫米级分散状高TOC黑色夹泥质条带泥质白云岩烃源岩

在岩心观察基础上,对陕473井和桃112井浅灰色中薄层叠层石白云岩(②)、深灰色含膏盐结核(泥质)泥晶白云岩(③)、灰黑色含膏盐结核的叠层石白云岩(④)和黑色夹泥质条带泥质白云岩(⑥)4种岩性中颜色最黑和最有可能成为烃源岩的层段分别开展全岩TOC测试,样品尺度为毫米-厘米级。这4种潜在烃源岩主要分布在白云岩-膏盐岩薄互层段(C)的对应岩性中,白云岩段(B)对应的5种岩性以浅灰色白云岩为主,几乎未见潜在烃源岩,TOC总体小于0.10%(表3)。

检测结果显示,浅灰色中薄层叠层石白云岩(②)和深灰色含膏盐结核(泥质)泥晶白云岩(③)平均TOC小于0.130%,构不成有效烃源岩。所谓的潜在

灰黑色白云岩(④)烃源岩,虽然有相对高值的TOC测点(与取样位置有关),但全岩TOC平均仅为0.228%,按烃源岩评价标准^[17-19],也不构成有效烃源岩,与前人的认识没有区别。陕473井潜在灰黑色白云岩(④)烃源岩厚度38.05 m,占马家沟组全取心段地层厚度的6.72%;桃112井潜在灰黑色白云岩(④)烃源岩厚度27.59 m,占马家沟组全取心段地层厚度的4.99%。

针对厘米级全岩检测样品,用牙钻抠取其中毫米级黑色夹泥质条带泥质白云岩(⑥)粉末样,再开展TOC检测(图4),检测结果见表3。

检测结果显示,这些毫米级黑色夹泥质条带泥质白云岩(⑥)的平均TOC要高得多,最高TOC为3.55%,最低TOC为2.19%,平均TOC大于2.50%,按烃源岩评价标准为优质烃源岩。毫米级黑色夹泥质条带泥质白云岩(⑥)夹于潜在灰黑色白云岩(④)烃源岩中,陕473井优质烃源岩累计厚度为9.10 m,桃112井优质烃源岩累计厚度为5.55 m,分别占地层厚度的1.61%和1.00%,占潜在灰黑色白云岩(④)烃源岩厚度的23.92%和20.12%。

由于碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合形成于水体极浅的蒸发台地,海平面的频繁交替形成的高频沉积旋回决定了该组合不可能像四川盆地筇竹寺组^[20]和塔里木盆地玉尔吐斯组^[21]发育单层厚度大的烃源岩,而是发育多层厚度较小的烃源岩,本文将之命名为“毫米级分散烃源岩”。只要有一定的累计厚度,同样规模有效,这可能是碳酸盐岩-膏盐岩组合高频沉积旋回中烃源岩的赋存形式。

陕473井和桃112井马家沟组全取心段岩心资料为烃源岩研究提供了高分辨率岩心素材。如果取心段只有十几米或几十米,即使取到了白云岩-膏盐岩薄互层段(C),这些毫米级分散状黑色夹泥质条带泥质白云岩烃源岩也因累计厚度太小或平均TOC太低而被忽略。

3.2 潜在低TOC灰黑色白云岩烃源岩有效性评价

高盐度环境中能够生存的物种以浮游生物和(嗜盐)细菌为主,与正常环境相比生物种类随盐度增加而减少,而生物的产量却随盐度的增加而增加^[3],具有非常大的生物通量^[5],仍能够为碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合烃源岩提供充足的优质生烃母质^[1,22-23],同时具有很高的生烃转化率,可能是最大的油气直接贡献者^[24-25]。

虽然碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合具有很大的优质烃源岩发育潜力,但TOC普遍偏低,鄂尔多斯盆地马

表2 鄂尔多斯盆地陕473井和桃112井马家沟组B和C岩性段组合类型的数量与厚度统计

Table 2 Statistics of assemblage types and thickness of lithology sections B and C in Wells Shan 473 and Shan 112, Ordos Basin

井号	岩性段及组合类型	数量/个	最大厚度/m	最小厚度/m	平均厚度/m
陕473井	①—②—③—④	4	17.49	4.84	7.78
	①—③—④—⑤	3	21.02	3.88	9.47
	②—③—④	7	9.41	1.35	3.28
	③—④—⑤	2	13.91	2.31	8.11
	①—③—⑤	3	29.83	4.23	10.45
	①—④—⑤	2	18.86	4.28	11.57
	③—④—⑥—⑦	6	14.50	3.77	6.88
	④—⑥—⑦	8	9.28	4.07	6.18
	③—⑥—⑦	9	23.79	3.45	12.97
	③—④—⑦	11	5.72	1.94	3.94
桃112井	①—②—③—④	5	19.69	3.34	8.79
	①—③—④—⑤	3	39.72	4.27	18.37
	②—③—④	7	10.67	2.35	4.58
	③—④—⑤	2	23.51	3.19	13.35
	①—③—⑤	2	20.07	5.03	12.55
	①—④—⑤	1	15.27	15.27	15.27
	③—④—⑥—⑦	6	18.83	4.41	7.02
	④—⑥—⑦	9	20.46	2.25	4.34
	③—⑥—⑦	10	4.74	1.38	3.03
	③—④—⑦	11	3.93	1.13	2.56

表3 鄂尔多斯盆地陕473井和桃112井不同岩性毫米-厘米级全岩样品TOC测试结果

Table 3 TOC contents of millimeter-centimeter scale samples from Wells Shan 473 and Tao 112, Ordos Basin

岩性	平均TOC/%	最大TOC/%	最小TOC/%	样品数量/个	井号
灰色中薄层叠层石白云岩(②)	0.07	0.09	0.05	16	陕473
	0.11	0.17	0.07	13	桃112
深灰色含膏盐结核(泥质)泥晶白云岩(③)	0.13	0.24	0.10	15	陕473
	0.12	0.22	0.08	10	桃112
灰黑色含膏盐结核的叠层石白云岩(④)	0.21	1.34	0.14	31	陕473
	0.24	2.65	0.17	34	桃112
黑色夹泥质条带泥质白云岩(⑥)	2.56	3.23	2.19	9	陕473
	3.32	3.55	2.36	8	桃112

家沟组平均 TOC 仅为 0.228 %，达不到有效烃源岩的标准。刘文汇^[1]认为导致这类烃源岩 TOC 偏低是由于以下两个方面的原因。

一是原始层系中优质的生烃物质在地质历史中可能经历了生烃转化，大部分有机碳以烃类方式排出了烃源岩，尤其是由浮游生物和嗜盐细菌等生烃母质构成的烃源岩，为生烃转化率高的 I 型干酪根，高演化阶段 TOC 的降低最高可达 80 %，而差的烃源岩仅为 20 %，这导致优质烃源岩的残留 TOC 偏低^[25]。鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合烃源岩处于高演化阶段，虽然 TOC 偏低，但初始沉积时完全有

可能是一套富含浮游生物和嗜盐细菌等生烃母质的优质烃源岩。因此，在恢复原始 TOC 时这个因素取系数 4。

二是传统的烃源岩 TOC 测定方法忽视了酸溶有机质(有机酸盐)，低估了碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合的总生烃碳丰度。在 TOC 测定预处理过程中溶于盐酸的有机酸盐也一同被消除，从而造成酸溶性有机酸盐没有进入碳/硫分析仪，导致 TOC 测定值偏低，损失量可达 40 % 以上^[26]。有机酸盐是有机酸与碳酸盐等碱性矿物(如碳酸钙)反应的产物，由于有机酸盐的热稳定性高于有机酸，在低演化阶段液态烃产率偏低，在

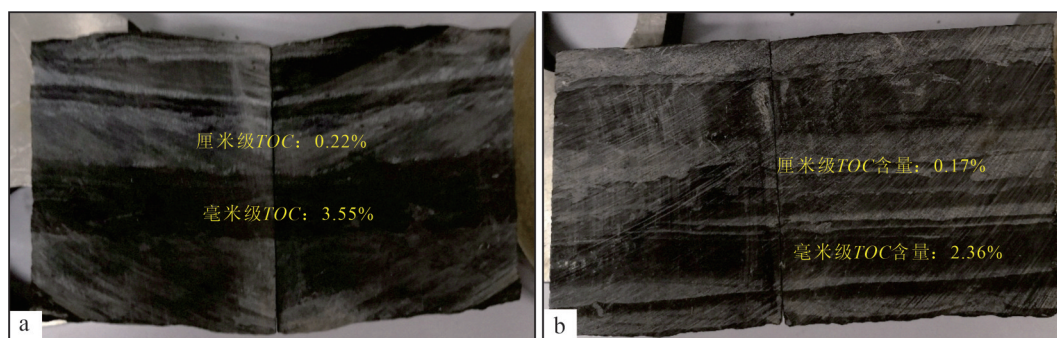


图4 鄂尔多斯盆地桃112井马3段厘米级全岩样品和毫米级黑色富泥纹层白云岩样品 TOC 差异对比

Fig. 4 Comparison of TOC contents between centimeter-scale whole rock sample and millimeter-scale black argilliferous lamellar dolomite sample from the Well Tao 112 in the third member of Majiagou Formation, Ordos Basin

a. 埋深3 810.50 m,厘米级全岩样品 TOC 为0.22%,其中毫米级黑色富泥纹层白云岩 TOC 为3.55%;

b. 埋深3 777.10 m,厘米级全岩样品 TOC 为0.17%,其中毫米级黑色富泥纹层白云岩 TOC 为2.36%

高演化阶段通过脱羧作用可以生成大量高温裂解气^[27],对生烃有重要贡献。高演化低丰度海相烃源岩中的有机酸盐,模拟温度大于400℃时,可以生成大量气态烃^[28-29]。因此,在恢复原始 TOC 时这个因素取系数0.4。

碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合有机酸盐的存在改变了有机酸正常的生烃途径、过程和数量,具有特殊的浮游生物、嗜盐细菌等生物组合特征及特殊的再生烃源-有机酸盐,由此构成多元化的生烃物质,与传统生烃模式不同^[29-30]。

碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合硫酸盐矿物对烃源岩生烃有重要的控制作用,中-低成熟阶段抑制生烃,高成熟阶段则促进生烃,在550℃时,生烃效率提高77%^[9,31-32];同时,普遍存在的TSR(硫酸盐热化学还原反应)还可加速原油裂解,降低原油裂解温度,使大量天然气提前生成^[33]。因此,在恢复原始 TOC 时这个因素取系数0.77。

综上所述,由于碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合生烃物质的多样性、生烃途径的特殊性、更高的生排烃效率,白云岩烃源岩 TOC 虽然偏低,但仍为中等烃源岩,恢复的 TOC 计算式为:

$$y = 4x + 0.4x + 0.77x \quad (1)$$

式中: y 为与非碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合相当的 TOC,%; x 为碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合实测 TOC,%。

通过公式(1)计算,得出马家沟组中-下组合低 TOC (平均值为0.228%)白云岩烃源岩实际 TOC 为1.21%,属中等烃源岩。

3.3 碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合烃源岩分布

上述讨论揭示陕473井马家沟组全取心段(中-

下组合)发育38.05 m中等级别的灰黑色白云岩烃源岩(④),其中含9.10 m优质黑色夹泥质条带泥质白云岩烃源岩(⑥),分别占地层厚度的6.72%和1.61%;桃112井马家沟组全取心段(中-下组合)发育27.59 m中等级别的灰黑色白云岩烃源岩(④),其中含5.55 m优质黑色夹泥质条带泥质白云岩烃源岩(⑥),分别占地层厚度的4.99%和1.00%。烃源岩的发育具有明显的相控性和层控性,相控性体现在膏盐湖和下水古隆起控制烃源岩的平面分布,烃源岩主要发育于膏盐湖周缘的膏盐坪相带,即白云岩-膏盐岩薄互层段(C),直向东侧的膏盐湖中央和西测的水下古隆起逐渐减薄直至尖灭(图5);层控性体现在烃源岩主要分布于马1段、马3段以及马5⁶、马5⁸和马5¹⁰亚段低水位期,此时膏盐湖发育,为有机质富集提供了高盐度海水介质。基于烃源岩的分布规律和陕473井、桃112井、米探1井、陕139井、榆152井、榆9井、麒44井、靖探1井、双168井与府5井等的控制,编制了马1段、马3段和马5⁶⁺⁸⁺¹⁰(累计)亚段的烃源岩等厚图(图6)。

根据马家沟组中-下组合中等级别灰黑色白云岩烃源岩(含优质黑色夹泥质条带泥质白云岩烃源岩)厚度、分布面积和平均 TOC 等参数,计算资源量为 $8\,504.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表4)。

4 储层特征与分布

鄂尔多斯盆地马家沟组上组合发育白云岩风化壳储层,以膏模孔为主^[35],本文重点讨论马家沟组中-下组合的白云岩储层类型、特征和分布。

陕473和桃112两口马家沟组全取心井并未见到

表4 鄂尔多斯盆地马家沟组中-下组合中等-优质烃源岩计算的天然气资源量

Table 4 Gas resources calculated for medium- and high-quality source rocks in the lower and middle assemblages of Majiagou Formation, Ordos Basin

参数	取值	说明
烃源岩平均厚度	20 m	根据烃源岩等值线图,最厚处为40 m,最薄处0
分布面积	$10 \times 10^4 \text{ km}^2$	根据烃源岩分布等值线图
岩石密度	2.4 t/m^3	泥晶白云岩岩石密度
烃源岩质量	$4.8 \times 10^{12} \text{ t}$	烃源岩平均厚度 $\times$ 分布面积 $\times$ 岩石密度
平均 TOC	1.525 %	优质烃源岩(TOC为2.5 %):中等烃源岩(TOC为1.21 %)=1:3
有机碳恢复系数	1.3	第三次和新一轮资源评价长庆气田(下古生界)刻度区选取的参数
总有机碳质量	$9.52 \times 10^{10} \text{ t}$	烃源岩质量 $\times$ 平均 TOC $\times$ 有机碳恢复系数
最大烃气产率	423 t/m^3	全国第三次资源评价报告选取烃气产率参数
生气转化率/无量纲	0.8	马家沟组烃源岩现今 R_0 为2.5 %,生气产率约80 %
总生气气量	$322\ 156.80 \times 10^8 \text{ m}^3$	总有机碳质量 $\times$ 最大烃气产率 $\times$ 生气转化率
刻度区运聚系数	2.64 %	第三次和新一轮资源评价长庆气田(下古生界)刻度区选取的参数
资源量	$8\ 504.94 \times 10^8 \text{ m}^3$	总生气气量 $\times$ 刻度区运聚系数

单层厚度大的储层。白云岩段(B)浅灰色中-薄层(泥质)泥晶白云岩(①)与浅灰色中薄层叠层石白云岩(②)非常致密。白云岩段(B)和白云岩-膏盐岩薄互层段(C)所含的深灰色含膏盐结核(泥质)泥晶白云岩(③),以及灰黑色含膏盐结核的叠层石白云岩(④)岩心表面的膏模孔虽然非常发育(孔隙度40 %以上),但岩心内部的膏盐结核未被溶解,说明岩心表面大部分膏(盐)模孔是随钻过程中钻井液与地层水溶蚀形成的。由于马家沟组中-下组合位于盐间和盐下,远离其顶部的不整合面,不具备上组合白云岩风化壳储层的形成条件,主要发育微生物白云岩储层,岩性为灰黑色含膏盐结核的叠层石白云岩(④),储集空间为沿藻纹层发育格架孔和溶扩孔,而非膏模孔。据统计,陕473井、桃112井和米探1井微生物白云岩储层累计厚度分别为25.0、37.5和23.5 m,平均孔隙度分别为5.76 %、4.92 %和5.17 %,同样具单层厚度薄、层数多以及累计厚度大的特点,和“毫米级分散烃源岩”一样,是高频沉积旋回的产物。

马家沟组沉积期岩相古地理揭示,马2段、马4段、马5⁹亚段和马5⁷亚段沉积期膏盐湖不发育,但颗粒滩十分发育,可以形成颗粒滩白云岩储层。重结晶后形成细晶白云岩储层,细晶白云岩的原岩为砂屑生屑灰岩,是萨布哈或渗透回流白云石化和埋藏重结晶的产物^[30],主要分布于中央古隆起和乌审旗次级隆起及周缘。

储层的发育同样具有明显的相控性和层控性,相控性体现在微生物白云岩储层主要发育于膏盐湖周缘的白云岩-膏盐岩薄互层段(C),向东侧的膏盐湖中央和西测的水下古隆起逐渐减薄至尖灭,颗粒滩白云岩

储层主要发育于水下古隆起及周缘,向洼地逐渐减薄至尖灭(图6)。层控性体现在微生物白云岩储层主要分布于马1段、马3段以及马5⁶亚段、马5⁸亚段和马5¹⁰亚段,此时膏盐湖发育,为嗜盐微生物繁盛提供了条件;颗粒滩白云岩储层主要分布于马2段、马4段以及马5⁵亚段、马5⁷亚段、马5⁹亚段。基于储层分布规律和陕473井、桃112井、米探1井、陕139井、榆152井、榆9井、麒44井、靖探1井、双168井、府5井等的控制,编制了马2段、马4段与马5⁵⁺⁷⁺⁹(累计)亚段的颗粒滩白云岩储层等厚图(图7a—c)和马1段、马3段与马5⁶⁺⁸⁺¹⁰(累计)亚段的微生物白云岩储层等厚图(图7d—f)。

5 结论

1) 碳酸盐岩-膏盐岩沉积组合由未云化灰岩段(A)、白云岩段(B)、白云岩-膏盐岩薄互层段(C)以及膏盐岩段(D)构成2类8种气候逐渐变干旱的沉积旋回,岩性段B、C共发育10类111个高频沉积旋回,具旋回频繁单层厚度薄的特点。

2) 基于高频沉积旋回分析,识别出马家沟组中-下组合两类烃源岩:一类为优质烃源岩(TOC>2.50 %),即毫米级高TOC黑色泥质白云岩;另一类为中等烃源岩(TOC=1.21 %),即低TOC灰黑色白云岩;优质烃源岩发育具有相控性和层控性特征,分布于膏盐湖周缘的白云岩-膏盐岩薄互层段中,计算天然气资源量 $8\ 504.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3) 识别出马家沟组中-下组合两类相控白云岩储层,分别为古隆起及周缘的颗粒滩白云岩储层和膏盐湖周缘的微生物白云岩储层,源-储匹配良好。

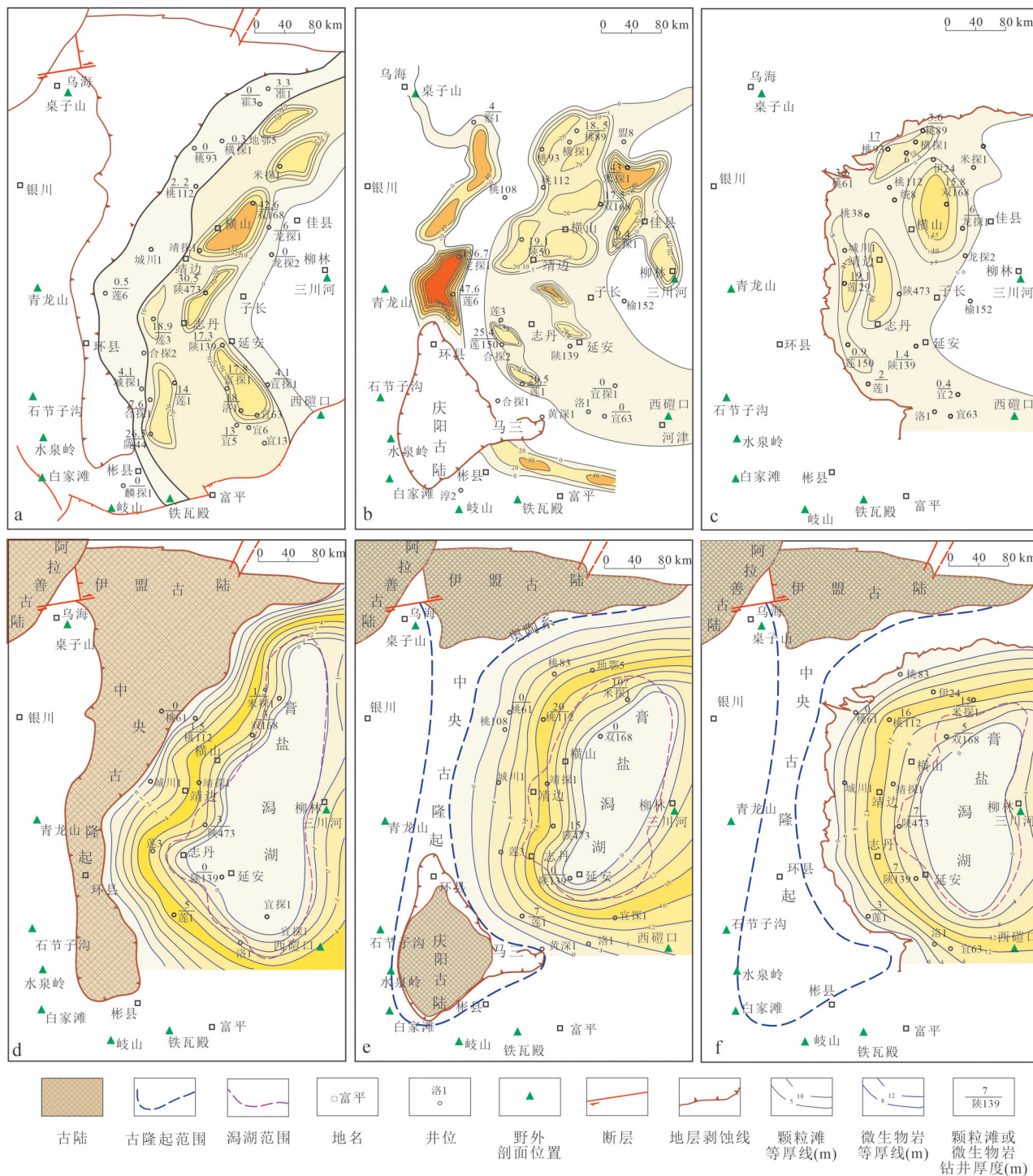


图7 鄂尔多斯盆地颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层厚度分布

Fig. 7 Isopach maps of the dolo-grainstone reservoirs and microbial dolomite reservoirs in the Ordos Basin

- a. 马2段颗粒滩白云岩储层; b. 马4段颗粒滩白云岩储层; c. 马5⁷⁺⁹(累计)亚段颗粒滩白云岩储层;
d. 马1段微生物白云岩储层; e. 马3段微生物白云岩储层; f. 马5⁶⁺⁸⁺¹⁰(累计)亚段微生物白云岩储层

参考文献

- [1] 刘文汇, 赵恒, 刘全有, 等. 膏盐岩层系在海相油气成藏中的潜在作用[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1451-1462.

Liu Wenhui, Zhao Heng, Liu Quanyou, et al. Potential role of

gypsum strata series in marine hydrocarbon accumulation [J].

Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1451-1462.

- [2] 赵恒, 刘文汇, 李艳杰, 等. 海相膏盐岩层系生源岩形成演化特征初探[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 1-7.

Zhao Heng, Liu Wenhui, Li Yanjie, et al. A preliminary study on

- hydrocarbon generation and evaluation of marine gypsum/salt-bearing source rocks[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(3): 1-7.
- [3] Copeland B J, Jones R S. Community metabolism in some hypersaline waters[J]. *Texas Journal of Science*, 1965, 17(2): 188-205.
- [4] 沈安江, 胡安平, 张杰等. 微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 582-596.
- Shen Anjiang, Hu Anping, Zhang Jie, et al. “Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 582-596.
- [5] 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 685-695.
- Hu Guang, Liu Wenhui, Tengger, et al. Tectonic-sedimentary constrains for hydrocarbon generating organism assemblage in the Lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 685-695.
- [6] 胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 916-928.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 916-928.
- [7] 孙玉景, 周立发. 鄂尔多斯盆地马五段膏盐岩沉积对天然气成藏的影响[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(6): 67-75.
- Sun Yujing, Zhou Lifa, et al. Influences of gypsum-salt deposition on gas accumulation of the fifth member of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(6): 67-75.
- [8] 魏水建, 冯琼, 冯寅, 等. 川东北通南巴地区三叠系膏盐岩盖层预测[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(1): 81-86.
- Wei Shuijian, Feng Qiong, Feng Yin, et al. Prediction of Triassic gypsum cap rocks in Tongnanba region of Northeast Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(1): 81-86.
- [9] 胡素云, 石书缘, 王铜山, 等. 膏盐环境对碳酸盐岩层系成烃、成储和成藏的影响[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(2): 20-27.
- Hu Suyun, Shi Shuyuan, Wang Tongshan, et al. Effect of gypsum-salt environment on hydrocarbon generation, reservoir-forming and hydrocarbon accumulation in carbonate strata[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(2): 20-27.
- [10] 王禹诺, 任军峰, 杨文敬, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组天然气成藏特征及勘探潜力[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(4): 29-37.
- Wang Yunuo, Ren Junfeng, Yang Wenjing, et al. Gas accumulation characteristics and potential of ordovician majiagou reservoirs in the center-east of ordos basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(4): 29-37.
- [11] 汤显明, 惠斌耀. 鄂尔多斯盆地中央古隆起与天然气聚集[J]. *石油与天然气地质*, 1993, 14(1): 64-71.
- Tang Xianming, Hui Binyao. The central uplift of Ordos Basin and its gas accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 1993, 14(1): 64-71.
- [12] Matthews K J, Maloney K T, Zahirovic S, et al. Global plate boundary evolution and kinematics since the Late Paleozoic[J]. *Glob Planet Change*, 2016, 146: 226-250.
- [13] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 41-53.
- Zhou Jingao, Xi Shengli, Deng Hongying, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 41-53.
- [14] 吴东旭, 吴兴宁, 王少依, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系颗粒滩白云岩储层特征及主控因素[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(2): 40-50.
- Wu Dongxu, Wu Xingning, Wang Shaoyi, et al. Characteristics and main controlling factors of Ordovician grain beach dolomite reservoir in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(2): 40-50.
- [15] Clyde H Moore. Carbonate Reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [M]. New York: Elsevier, 2001.
- [16] Ungerer P, Burrus J, Doligez B, et al. Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(3): 309-335.
- [17] Tissot B, Durand B, Es J. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum [J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(3): 499-506.
- [18] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 534-547.
- Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, et al. Understanding on marine oil generation in china based on tarim basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 534-547.
- [19] 彭平安, 刘大永, 秦艳, 等. 海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题[J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 415-422.
- Peng Pingan, Liu Dayong, Qin Yan, et al. Low limits of organic carbon content in carbonate as oil and gas source rocks[J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 415-422.
- [20] 沈安江, 陈娅娜, 张建勇, 等. 中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1):

- 15-25.
- Shen Anjiang, Chen Yana, Zhang Jianyong, et al. Characteristics of intra-platform rift in ancient small-scale tectonic platform of China and its implications for hydrocarbon exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 15-25
- [21] 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 685-695.
- Hu Guang, Liu Wenhui, Tengger, et al. Tectonic-sedimentary constrains for hydrocarbon generating organism assemblage in the Lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 685-695.
- [22] Gocke K. Seasonal variations of bacterial abundance and biomass and their relation to phytoplankton in the hypertrophic tropical lagoon Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia [J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, 26(12): 1429-1439.
- [23] Barbe A, Grimalt J O, Pueyo J, et al. Characterization of model evaporitic environments through the study of lipid components[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(4-6): 815-828.
- [24] 刘文汇, 秦建中, 腾格尔, 等. 海相层系成烃成藏地球化学技术进展[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(6): 553-559+565.
- Liu Wenhui, Qin Jianzhong, Tengger, et al. Geochemical technology for study of hydrocarbon formation and accumulation in marine sequences: Recent advances [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(6): 553-559+565.
- [25] 刘文汇, 腾格尔, 张中宁, 等. 四川盆地高硫天然气成藏机理的同位素研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(2): 166-178.
- Liu Wenhui, Tengger, Zhang Zhongning, et al. An isotope study of the accumulation mechanisms of high-sulfur gas from the Sichuan Basin, southwestern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 47(2): 166-178.
- [26] Roberts A A, Palacas J G, Frost I C. Determination of organic carbon in modern carbonate sediments[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1973, 43: 1157-1159.
- [27] Carothers W W. Aliphatic acid anions in oil-field waters—implications for origin of natural gas [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(12): 2441-2453.
- [28] 雷天柱, 夏燕青, 邱军利, 等. 烃源岩酸解过程中损失有机质的研究[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6): 957-960.
- Lei Tianzhu, Xia Yanqing, Qiu Junli, et al. Organic matter loss during the acidolysis of hydrocarbon source rock [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(6): 957-960.
- [29] 刘全有, 金之钧, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地海相层系中有机酸盐存在以及对低丰度高演化烃源岩生烃潜力评价的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(12): 1975-1983.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Liu Wenhui, et al. Presence of carboxylate salts in marine carbonate strata of the Ordos Basin and their impact on hydrocarbon generation evaluation of low TOC, high maturity source rocks [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(12): 1975-1983.
- [30] 刘文汇, 王杰, 腾格尔, 等. 中国海相层系多元生烃及其示踪技术[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 115-125.
- Liu Wenhui, Wang Jie, Tengger, et al. Multiple hydrocarbon generation of marine strata and its tracer technique in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 115-125.
- [31] 王娟, 金强, 马国政, 等. 高成熟阶段膏岩等盐类物质在烃源岩热解生烃过程中的催化作用[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(1): 26-31.
- Wang Juan, Jin Qiang, Ma Guozheng, et al. Catalytic action of sulphate evaporates in pyrolytic gas generation of source rocks [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1): 26-31.
- [32] 彭平安, 盛国英, 傅家谟, 等. 盐湖沉积环境未成熟油的成因与碳酸盐沉积阶段沉积的有机质有关[J]. *科学通报*, 2000, 45(S1): 2689-2694.
- Peng Pingan, Sheng Guoying, Fu Jiamo, et al. The origin of immature oil in salt lake sedimentary environment is related to the organic matter deposited in carbonate sedimentary stage [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(S1): 2689-2694.
- [33] 张水昌, 帅燕华, 朱光有. TSR促进原油裂解成气: 模拟实验证据[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2008, 38(3): 307-311.
- Zhang Shuichang, Shuai Yanhua, Zhu Guangyou. TSR promoting crude oil cracking to gas: Simulation experimental evidence [J]. *Science in China Press*, 2008, 38(3): 307-311.
- [34] 吴东旭, 喻建, 周进高, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段沉积特征及其控储效应[J]. *古地学报*, 2021, 23(6): 1140-1157.
- Wu Dongxu, Yu Jian, Zhou Jingao, et al. Sedimentary characteristics and reservoir controlling effect of the Member 4 of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(6): 1140-1157.
- [35] 周进高, 付金华, 于洲, 等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩主要储层类型及其形成机制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(11): 20-30.
- Zhou Jingao, Fu Jinhua, Yu Zhou, et al. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(11): 20-30.

(编辑 董立)