

doi: 10.12029/gc20160626

杨帅, 陈安清, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地东部马家沟组含钾蒸发岩系沉积机制及保存条件[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2192–2201.

Yang Shuai, Chen Anqing, Chen Hongde, et al. The sedimentation mechanism and preservation condition of the potassium evaporate series in the Majiagou Formation, east of Ordos Basin[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2192–2201(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地东部马家沟组含钾蒸发岩系沉积机制 及保存条件

杨 帅^{1,2} 陈安清² 陈洪德² 张成弓² 苏中堂² 赵俊兴² 付斯一^{2,3}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 成都理工大学, 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中国石油长庆油田公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧奥陶系是海相固体钾盐矿的重要靶区。本文在岩心、测井和地震等资料的基础上, 开展了该地区马家沟组中组合(马五⁵~马五¹⁰亚段)的沉积微相、蒸发岩分布、蒸发岩形成机制和保存条件研究。结果表明: 马家沟组中组合总体为局限台地环境, 可进一步划分出潮坪、潮缘滩、外潟湖、内潟湖等沉积微相, 各微相沿古隆起呈环带状展布, 内潟湖是含钾蒸发岩的主要形成环境; 内潟湖沉积具有明显的旋回性, 马五⁶、马五⁸、马五¹⁰时期为海退蒸发环境, 以蒸发岩和白云岩为主, 马五⁵、马五⁷、马五⁹时期为海侵环境, 以灰岩为主; 海退期, 向心浓缩作用形成了大型米脂蒸发盐盆, 进一步在“深水成盐”机制下沉积了大量厚层含钾蒸发岩系; 岩溶地貌与含钾蒸发岩系分布的关系表明含钾蒸发岩系主体分布于岩溶盆地内幕。印支期岩溶作用的强度和深度分析进一步显示古岩溶作用在岩溶盆地范围内基本未破坏到马家沟组中组合的含钾蒸发岩系, 具备了钾盐矿的沉积和保存条件。

关键词: 钾盐矿; 沉积环境; 保存条件; 马家沟组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P588.24⁷ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)06-2192-10

The sedimentation mechanism and preservation condition of the potassium evaporate series in the Majiagou Formation, east of Ordos Basin

YANG Shuai¹, CHEN An-qing², CHEN Hong-de², ZHANG Cheng-gong², SU Zhong-tang²,
ZHAO Jun-xing², Fu Si-yi^{2,3}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Changing Oil Field, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: The Ordovician strata constitute an important target of marine potassium ore in the east of Central paleo-uplift, Ordos

收稿日期: 2015-11-30; 改回日期: 2016-03-20

项目资助: 教育部博士点基金项目(20135122120005)和成都理工大学中青年骨干教师培养计划项目联合资助(JXGG201538, JXGG201537)。

作者简介: 杨帅, 男, 1985年生, 博士后, 主要从事地震沉积学与成矿学方面研究; E-mail: manchesterunited@126.com。

通讯作者: 陈安清, 男, 1981年生, 副教授, 沉积学专业, 主要从事沉积与成矿研究; E-mail: aqinth@163.com。

Basin. Based on core, logging and seismic data, the authors conducted researches on the middle combination of Majiagou Formation (from 5th to 10th intervals of the fifth member of Majiagou Formation), in the aspects of sedimentary microfacies, evaporate distribution, formation mechanism and preservation condition of evaporate. The results indicate that the middle combination of Majiagou Formation was deposited in a restricted platform environment which can be further divided into four sedimentary microfacies, i.e., tidal flat, tide marginal beach, outer lagoon and inner lagoon. These microfacies are distributed around the central paleo-uplift orderly. The inner lagoon is the main depositional environment of the potassium evaporate. The sediments of the inner lagoon present obvious cyclicity. The sedimentary environment of the sub-member 6, 8, 10 were under the regressive evaporation condition and produced evaporite and dolomite, while the sub-member 5, 7, 9 were of transgressive setting and formed limestone. In the regressive period, the centripetal enrichment effect formed a large salt sag in Mizhi area, Shaanxi Province. Furthermore, under the mechanism of "salt deposited in deep water", a lot of thick potassium evaporate series were deposited. These potassium evaporate series were mainly distributed under the post-karst basin coincidentally. The analysis of the intensity and depth of the Caledonian karst indicates that karstification did little damage to these potassium evaporate series.

Keywords: potash mine; sedimentary environment; preservation condition; Majiagou Formation; Ordos Basin

About the first author: YANG Shuai, male, born in 1985, postdoctoral researcher, engages in research on seismic sedimentology and sedimentary mineral resources; E-mail: manchesterunited@126.com.

About the corresponding author: CHEN An-qing, male, born in 1981, associate professor, majors in sedimentology and sedimentary mineral resources; E-mail: aqinth@163.com.

Fund support: Supported by Doctoral Scientific Fund Project of Ministry of Education (No. 20135122120005) and Training Program for Young and Middle-aged Backbone Teachers of Chengdu University of Technology (No. JXGG201538, No. JXGG201537).

鄂尔多斯盆地为华北克拉通的西部的一个次级构造单元,东与吕梁山相邻,南接秦岭造山带,西以贺兰山—六盘山为界,北靠兴蒙造山带,为一大型多旋回叠合盆地^[1],面积约 $37\times 10^4\text{ km}^2$ 。早古生代奥陶纪,受南缘秦祁海槽和西缘贺兰拗拉槽的影响,在盆地西南缘发育“L”型隆起,除庆阳一带长期暴露出水面外,大部分地区为克拉通盆地。沉积环境主要受“L”型中央古隆起的控制,古隆起西南侧为台缘斜坡—盆地环境,古隆起东侧的克拉通内部为陆表海环境^[2-5]。在古隆起东侧的米脂、佳县、子洲一带发育了大型海相盐盆,沉积了巨厚的蒸发岩层。该套盐层不但控制了盐下碳酸盐岩天然气藏^[6-9],而且是我国海相固体钾盐矿的重要靶区。近几年,针对该地区的钾盐勘探潜力开展了大量的研究工作^[10-13],并完钻了1口钾盐勘探井(钾探1井)。但关于该含钾蒸发岩系的发育分布规律及成因机制仍有待于进一步研究。

另一方面,早古生代末期,鄂尔多斯盆地受加里东运动的影响,地壳整体抬升,经历了约为1.5亿年的沉积间断期,导致奥陶系顶部碳酸盐岩地层长期暴露于地表,遭受大气淡水淋滤,形成了范围广、深度大的风化壳及相关的岩溶储层^[14-17]。但该不整

合面相关的古岩溶作用对含钾蒸发岩系的影响鲜有研究。本文试图以研究区内的钻井资料为基础,通过高精度的沉积微相编图刻画蒸发岩的微沉积环境,探讨陆表海背景下规模蒸发岩系的沉积机制,并在研究不同古岩溶地貌单元的岩溶作用程度和深度的基础上,揭示该蒸发岩系的保存状况。

1 含蒸发盐层系的沉积环境

1.1 相标志及沉积微相展布

根据研究区内钻井岩心的岩石学特征、沉积相标志和测井相、地震相等资料,提出了鄂尔多斯盆地东部地区的沉积微相划分方案。钻井岩心的沉积微相标志显示,研究区内发育潮坪环境的含膏质的泥晶纹层构造(图1-a)、低角度双向交错层理(图1-b)、鸟眼构造(图1-c);泥晶质砂屑白云岩(图1-d)和含生屑白云岩(图1-e)是陆表海内潮间带上部的潮缘滩的典型标志;巨厚膏盐(图1-f)是研究区东部坳陷膏质内潟微相的产物。测井上,大部分钻井都见有低伽马、高电阻、高声波时差、高密度的膏盐层响应特征。石膏层的自然伽马一般为 $10\sim 50\text{ API}$,低于白云岩的 $15\sim 90\text{ API}$;石膏层的声波时差一般为 $150\sim 225\ \mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$,白云岩一般为 $150\sim 200\ \mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$;石膏层

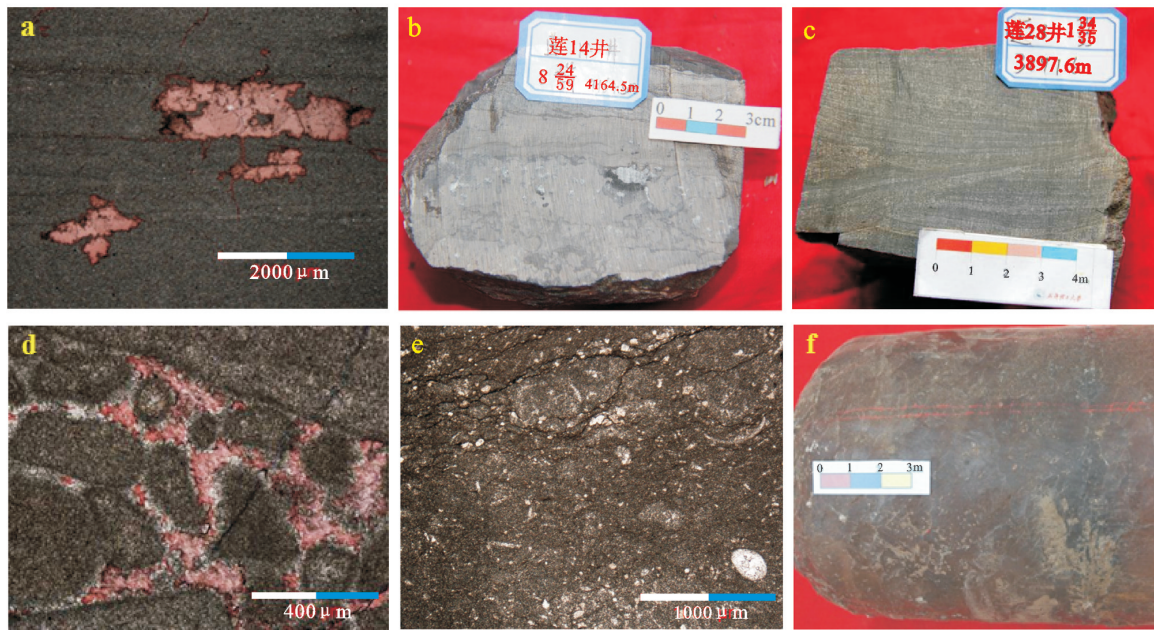


图1 鄂尔多斯盆地东部马家沟组典型沉积相标志

Fig. 1 The typical facies signs of Majiagou Formation in eastern Ordos Basin

的密度一般为 $2.2\sim 3.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,白云岩常在 $2.6\sim 2.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。平面上,沿古隆起内侧的钻井,测井上表现出膏盐层多呈多个薄夹层产出;在研究区东部的潟湖区,膏盐层的测井响应井段长,反映出巨厚的膏盐沉积层。地震响应上,东部米脂坳陷区的巨厚膏盐层反射能量强,同相轴连续性差;受膏盐层干扰,明显降低了下伏层的反射波信噪比和连续性;在研究区东部榆9井一带,发育有膏盐流变形成的盐刺穿构造^[10]。在沉积微相划分的基础上,编制了鄂尔多斯盆地古隆起东侧马家沟组中组合各亚段(马五⁵~马五¹⁰)沉积微相分布图,精细刻画了各亚段的沉积微相平面展布特征,揭示出了三次五级海平面升降旋回。各旋回的低海平面期以发育“蒸发岩+白云岩”组合为特征,高海平面期以发育“灰岩+白云岩”组合为特征。

各亚段的沉积微相分布图显示,鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧为陆表海型碳酸盐台地背景下的半开阔一半局限台地环境,潮坪、潮缘滩、灰云质外潟湖、灰质内潟湖和膏质内潟湖等微相沿古隆起呈环带状由西向东依次分布(图3):

①隆起剥蚀区主要分布于西部的鄂托克旗、鄂托克前旗、定边至庆城地区,是加里东运动的结果;

②潮坪紧邻隆起区分布于乌审旗、吴起至宜川

一带,主要沉积灰云岩与生屑灰岩,见水平纹层(图1-a,纹层状泥晶白云岩,含膏泥质,马五⁶,陕310井)、鸟眼构造(图1-b,微晶白云岩,鸟眼及示底构造,马五⁶,莲14井)、交错层理(图1-c,砂屑白云岩,楔状交错层理,马五⁵,莲28井)等沉积构造,属灰云坪环境,该相带很难将潮上带和潮间带区分,其典型特征是在潮坪上发育相对高能的补丁状潮缘滩,如北部的统46井—召22井地区广泛发育滩相,中部城川1井—吴起一带也有滩相发育,南部紫探1井—莲1井一带亦发育有滩相,潮缘滩由砂屑白云岩(图1-d,亮晶砂屑含灰白云岩,马五⁶,苏379井)、含生屑白云岩(图1-e,含灰泥晶白云岩,介形虫碎片,马五⁵,莲30井)组成,由于成岩改造明显,大部分样品只能隐约看见它们的残余结构;

③外潟湖主要分布在龙探1井、陕参1井至红3井一线,主要沉积灰质云岩、云质灰岩;

④内潟湖主要分布在研究区东部的榆林至延安一带,受海平面变化的影响,内潟湖沉积在垂向上具有明显的旋回性,马五⁵、马五⁷、马五⁹以发育灰岩为主,泥质含量低,为高海平面沉积环境;马五⁶、马五⁸、马五¹⁰亚段发育于低海平面时期,以厚层蒸发岩(图1-f,厚层块状石膏,马五⁶,龙探1井)与云质灰岩、白云岩互层为特征,泥质含量较高。

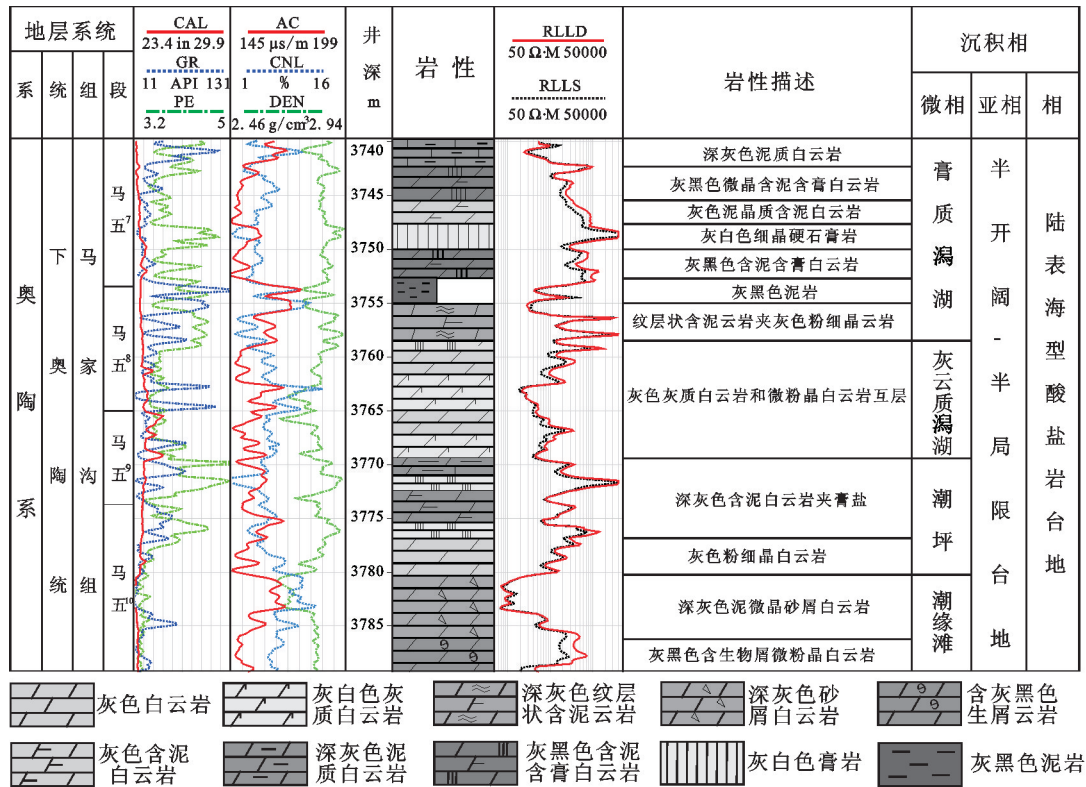


图2 桃17井沉积微相与测井响应特征

Fig. 2 Sedimentary microfacies and its log curve response characteristics of well Tao 17

1.2 不同微环境的蒸发岩赋存特征

马家沟组五段沉积于中奥陶世大湾期,该时期华北地台地处赤道附近,古气候较为干热,海平面相对较低^[18]。陆表海台地边缘断续分布着一些低缓的古隆起或古岛链,对海水的流通起着阻隔作用^[19]。中央古隆起将鄂尔多斯盆地分割为东、西两大海域。古隆起东侧的华北克拉通内海域为碳酸盐台地的局限台地环境。虽然一般情况下,该地区处于低能沉积环境,但间歇性的潮汐常作用到陆表海内部,在古隆起边缘浅水区形成局部高能环境,即有砂砾屑滩发育。发育大面积的潮坪和潟湖是这一时期的典型沉积特征,不同微环境中都或多或少地有蒸发岩产出,但产出形态有明显差异。

(1)内潟湖

该环境为陆表海台地内部相对较深的水下洼地,属浪基面下的静水沉积环境。这种环境的典型旋回结构是厚—巨厚层膏岩和静水相碳酸盐蒸发岩旋回组合,具有横向上向浅水环境过渡的普遍规律,为大规模持续稳定的沉积。

(2)外潟湖

潟湖外围的浅水地带,属浪基面之下的低能浅水环境。上边界紧邻云坪,下部边界为特大风暴潮的低潮面,该区域只有在特大风暴潮时受潮汐作用影响。偶见蒸发岩沉积物,以弱动力条件下的碳酸盐岩夹条带状或团块状石膏岩的沉积旋回结构为特征。

(3)潮坪

包括潮间及潮上带,由于地势平缓,间歇性的潮汐作用造成古隆起附近浅水地带发育间歇性暴露的宽阔潮坪。以云坪环境沉积的泥晶云岩为主,同时发育潮缘滩环境的砂砾屑云岩和同生期岩溶角砾岩,偶夹蒸发成因的薄层石膏岩。

2 讨论

2.1 含钾蒸发岩成因机制

蒸发岩主要指膏盐及盐岩,是存在于地球表面溶液中的各种溶解度较大的盐类物质,经过蒸发、浓缩、结晶而形成的沉积岩。其形成环境主要有咸

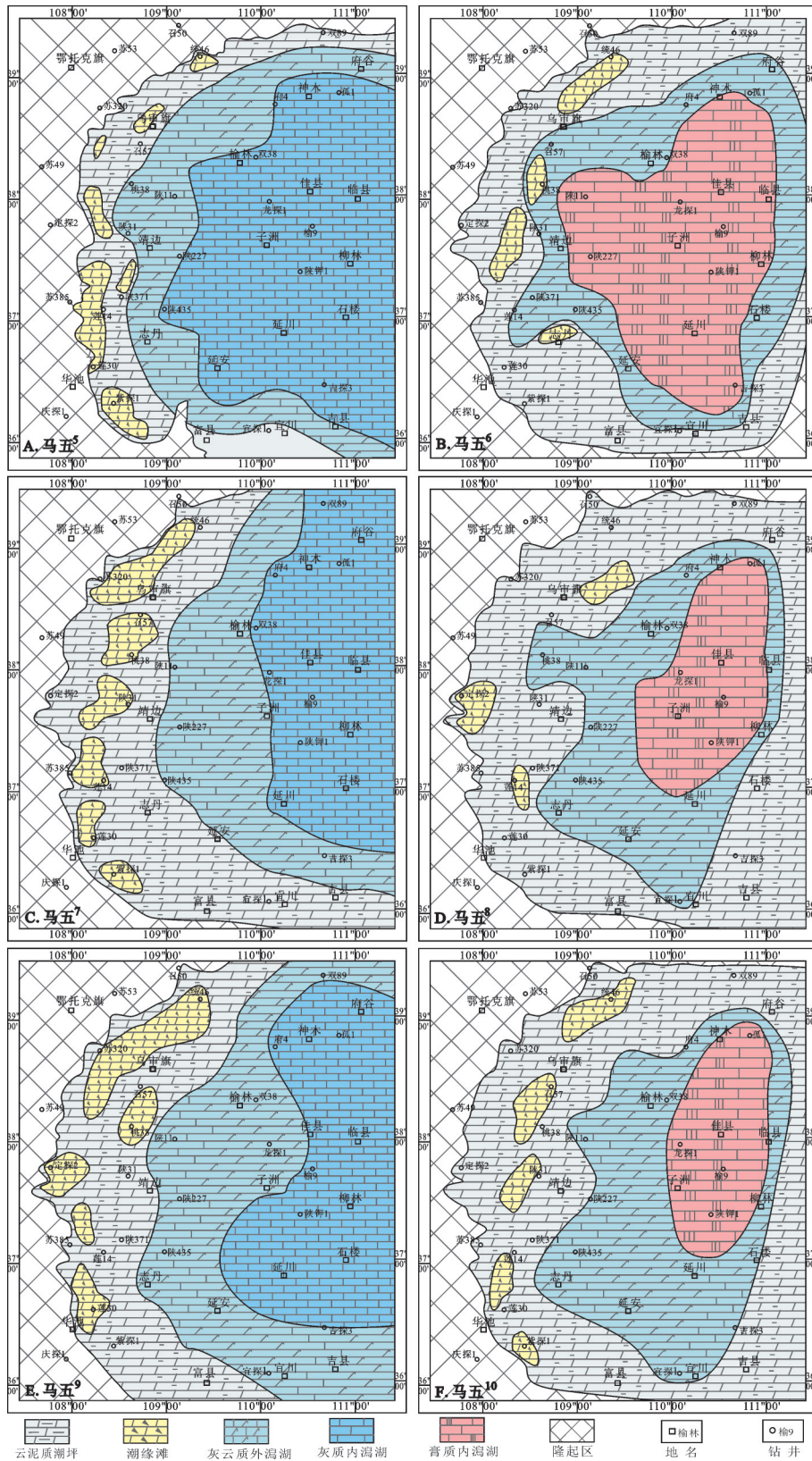


图3 鄂尔多斯盆地古隆起东侧马家沟组中组合各亚段沉积微相分布图

Fig.3 The sedimentary microfacies map of sub-members of middle combination of Majiagou Formation in eastern Ordos Basin

化潟湖(常分布于礁滩与泥炭沼泽间)和陆内干旱气候条件下的封塞湖盆。由于含盐盆地中的蒸发岩与油气、钾矿等关系紧密,因此越来越受到沉积学家们的重视。目前关于蒸发岩的沉积模式主要有萨布哈成盐模式、深盆深水、深盆浅水、深盆干化等沉积模式。这些沉积模式的提出都有其各自的实际资料作为基础。概括的讲可分为“深水成盐”和“浅水成盐”两种截然不同的学说。“深水成盐”说依据分层卤水结构的理念,认为含盐盆地水体深度较大,其上部水体含盐度低,适宜水生生物生长;中部水体呈咸化—半咸化,可为生物生长提供有利盐分;下部水体咸化度高,不断析出盐晶体,适宜有机质保存。“浅水成盐”则认为蒸发岩属于浅水或暴露环境下蒸发而成。

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组硬石膏岩和盐岩主要分布在盆地东部,尤以米脂、绥德、延安一带最为发育。硬石膏岩主要包括厚层状、纹层状、结核、条带状和团块状。盐岩常以层状、条带状、结核状产出,较纯时为无色透明,常见白色、灰白色及杂色等,晶体规则。硬石膏、盐岩、白云岩等常相伴生产出。前文3种不同赋存方式的蒸发岩在空间上具有普遍的过渡形式,主要体现了水深对沉积环境

的控制和影响。

华北早古生代陆表海台地与现代的巴哈马台地类似,都具有台地浅水的性质。普尔迪^[20-21]对现在巴哈马台地的研究表明,巴哈马台地浅水具有向心盐度增加、水流和潮汐作用减弱的趋势。以巴哈马台地上的盐度梯度比值($102‰ \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$)估算,这种向心浓缩的趋势可能造成的石膏初始沉积的最小台地半径应大于288~324 km。华北陆表海台地具有大于500 km的半径,具备在陆表海台地内部通过水体向心浓缩发育蒸发岩的条件^[19](图4)。

蒸发作用是造成水体盐度增加的最为基本的原因。奥陶纪马家沟期,华北陆表海台处于温室气候环境,气温大致为21~22°C^[18],远比现在的15°C高。同时各亚段的沉积微相图显示,该时期鄂尔多斯盆地东北拗陷周缘发育古隆起。在合适的气候条件下,低海平面期(马五⁶、马五⁸、马五¹⁰),整个陆表海台地上的总体水深基本为小于或等于浪基面深度,能够阻止陆表海内部拗陷的水体向外回流。如果周缘洋盆补偿水和降水补给小于水体的蒸发量,陆表海水面将形成垂直梯度,从而导致一种由边缘向中心缓慢流动的向心补偿流的形成,这样的水流机制进而导致陆表海台地的水体不断向心浓

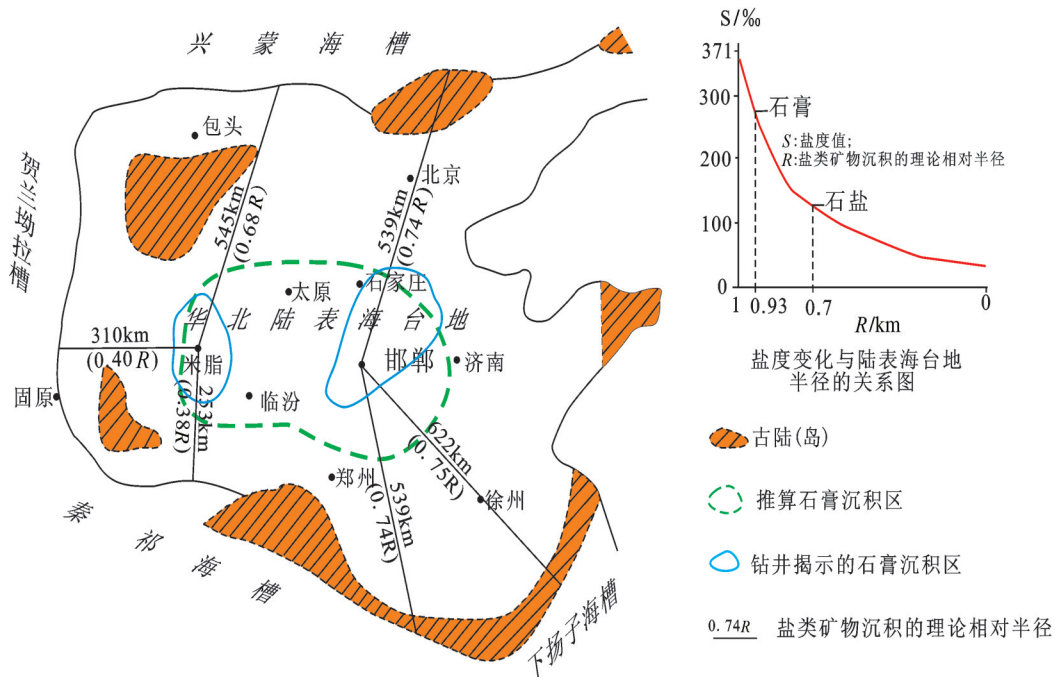


图4 华北陆表海台地岩盐沉积区及成因模式(据文献[19]修改)

Fig.4 Rock salt of platform's sedimentary area and genetic model in epicontinental sea of North China (modified after reference [19])

缩,形成从外而内盐度增加的趋势。同时,盐度最高的陆表海内部的内潟湖环境在“深水成盐”机制下,形成分层卤水结构。下部水体高度咸化,不断析出盐晶体,从而沉积大量厚层蒸发岩(图5);外潟湖和潮坪发育的条带状和薄层状蒸发岩为浅水或暴露环境下蒸发而成,即“浅水成盐”(图5)。高海平面期(马五⁵、马五⁷、马五⁹),水深大于浪基面深度,向心补偿流便由回流及其他水流机制取代而迅速造成全区淡化,形成碳酸盐岩沉积。海平面的频繁升降交替造成蒸发岩和碳酸盐岩互层产出。已有的钻井显示,镇川1井、榆9井、陕钾1井、绥探1井、子洲1井、米探1井、佳县1井、吴堡1井等6口钻井在马五⁶亚段发现了钾盐矿化或薄钾盐层^[10],说明当时的华北陆表海在向心浓缩的分层卤水成盐机制下,达到了钾镁盐沉积阶段。

2.2 含钾蒸发岩系保存条件

鄂尔多斯盆地海相地层时代老、埋藏深,以加里东末期的大型不整合面与上覆碎屑岩盆地叠合。由于蒸发岩的易溶性,与不整合面相关的岩溶作用对其下伏海相地层特别是对盐层的溶解程度制约着该地区的钾盐矿勘探。因此,其含钾盐层特别是富钾卤水的保存条件研究是钾矿勘探的一个不可忽视的方面。

鄂尔多斯盆地马家沟组顶部发育了暴露达1.5亿年的大型不整合面,中组合地层距离该整合面0~

250 m不等。为评估不同地区马家沟组中组合含钾蒸发岩受岩溶作用的影响程度,详细分析了奥陶系顶部地层出露分布和不同地区钻井的岩溶发育特征及岩溶垂向分带。然后,采用印模法,依据太原组8号煤层分布趋势,进行了鄂尔多斯盆地奥陶系顶部的古岩溶地貌恢复。古岩溶地貌类型划分的主要依据有:①奥陶系风化壳上覆地层石炭系标志层(8号煤层)的厚度及分布趋势;②前石炭系地层展布趋势;③古水动力场特征;④风化壳表面侵蚀、溶蚀特征及沉积物性质。当奥陶系残余厚度较大而上覆石炭系充填沉积厚度较薄时,为相对岩溶高地形;当奥陶系残余厚度较小而上覆石炭系充填沉积厚度较大时,说明古地表侵蚀作用较强,为相对岩溶负地形;当下奥陶统马五段地层保存较全,残余厚度较大,而上覆石炭系充填沉积厚度比周围有明显增厚时,表明该区处于古构造低部位;当下奥陶统马五段地层不全,残余厚度较小,而上覆石炭系充填沉积厚度亦较小时,表明该区处于古构造高部位;侵蚀沟槽发育部位,上覆石炭系底部铝土岩因沟槽中的水流侵蚀而缺失,以砂、泥岩充填沉积为特征,一般情况下垂直岩溶带不发育,水平岩溶带厚度减薄。

所恢复的古岩溶地貌图显示,鄂尔多斯盆地岩溶古地貌呈现中间高,两侧低的形态,岩溶带的厚度在50~300 m不等(图6)。岩溶台地主要分布于

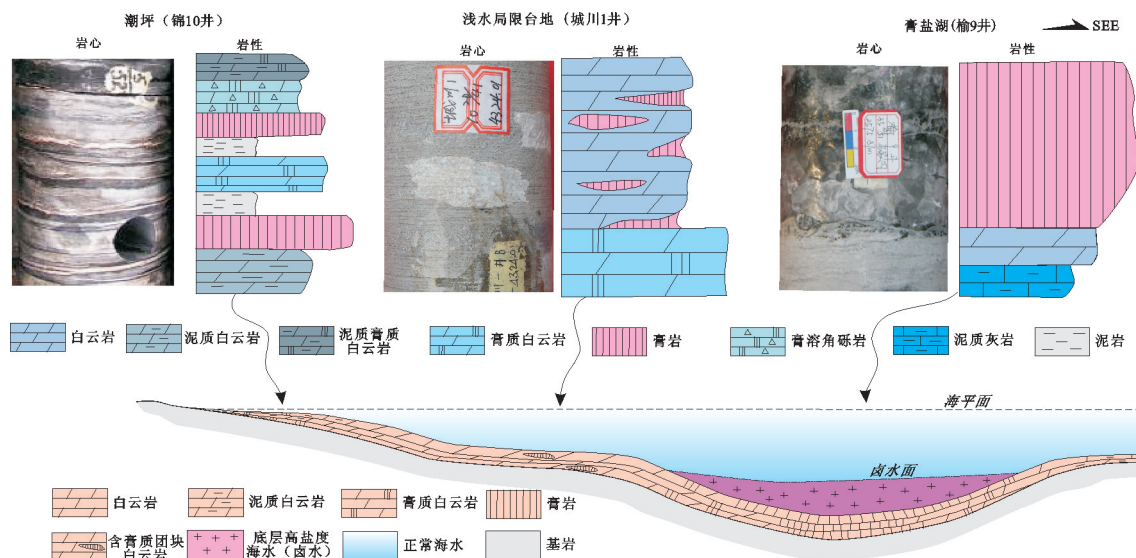


图5 不同微环境下的蒸发盐赋存特征及沉积模式

Fig.5 Occurrence characteristics of the evaporate in different microenvironments and its sedimentary model

“L”形的中央隆起带,该地貌单元在沉积期主要为潮坪环境,盐类沉积物只是零星分布。并且岩溶作用最深,如陕53井的岩溶带厚度达286 m。地层破坏程度最高,在定探1井地层剥露至马四段,岩心见大量岩溶垮塌角砾岩,垂直溶缝呈漏斗状,溶缝内充填铝土质及小的岩溶角砾。因此岩溶台地区盐类沉积物保存差。

由于岩溶发育期继承了马家沟组沉积期的隆坳格局,东部米脂—子洲一带的岩溶盆地正好为蒸发岩沉积的主体地区,即对应于沉积期的蒸发盐盆。岩溶盆地的岩溶作用方式与岩溶高地、岩溶坡地有所差异,其层状溶蚀作用偏弱,主要以沿地表侵蚀带的溶蚀及近地表地下径流带的岩石溶解为主。同时,由于该区处于水流的汇水排泄区,充填、淀积作用强,岩溶空间充填程度较高,钙、泥质的充填胶结形成致密岩性带,岩溶作用的深度较浅。主要发育岩溶角砾岩及洞穴充填带。岩溶角砾较其他地貌单位小,且微磨圆,大者3 cm×1.5 cm,小者0.1 cm×0.2 cm。基岩中溶缝和溶孔不发育,仅见少量。岩溶盆地区岩溶作用深度一般在100 m以内(如榆9井、米4井),顶部出露层位为上组合地层(图5)。岩溶作用强度相对较弱,破坏的主要是上组合的地层,作用深度几乎未达到蒸发盐岩最为发育的马家沟组中组合,是最有利的含钾蒸发盐岩保存区。

二者之间为两种地貌单元逐渐过渡的岩溶坡地狭长地带,含盐地层沉积厚度较小,岩溶带较厚,岩溶作用较强,盐类物质保存较差。以陕15井为例,上部发育溶缝,溶缝使基岩角砾化,多被泥质充填;中间为溶蚀孔洞发育带,孔径0.05~0.1 cm;岩溶带下部发育岩溶角砾岩及洞穴充填,在膏岩产出层位,膏溶角砾发育,且具溶蚀淀积特征。

可见,鄂尔多斯盆地东部马家沟组中组合及其之下的含盐层系具有较好的保存条件,是我国海相找钾的重要潜力区。值得重视的是,由于我国海相含蒸发岩系地层时代老、埋藏深、改造强,深入的钾盐保存单元研究是一个亟待解决的科学问题,制约着今后海相钾盐或富钾卤水的勘探。

3 结 论

(1)鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中组合总体为局限台地环境,共识别出潮缘滩、潮坪、外泻湖、

内泻湖等沉积微相,各微相沿古隆起呈环带状展布,内泻湖是含钾蒸发岩的主要形成环境。初步的勘探揭示,古隆起内侧的马家沟组可能具备钾盐的沉积条件。

(2)低海平面期(马五⁶、马五⁸、马五¹⁰),在向心浓缩作用下米脂、佳县、子洲一带形成了大型海相盐盆。盐盆在“深水成盐”机制下,形成分层卤水结构。下部高度咸化水体不断析出盐晶体,从而沉积大量厚层含钾蒸发岩系。

(3)含钾蒸发岩系主体分布于鄂尔多斯盆地东部米脂—子洲一带的岩溶盆地。岩溶作用主要以沿地表侵蚀带的溶蚀及近地表地下径流带的岩石溶解为主,岩溶作用的深度在100 m以内,未达到蒸发岩最为发育的马家沟组中组合,有利于含钾蒸发盐岩的保存。

致谢:非常感谢审稿专家对本文所提出的宝贵建议;感谢本文责任编辑对文章所做出的细致修改!

参考文献(References):

- [1]张渝昌,张荷,孙肇才.中国含油气盆地原型分析[M].南京:南京大学出版社,1997:262-293.
Zhang Cangyu, Zhang He, Sun Zhancan. Proto-Type Analysis of Chinese Petroliferous Basin[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997: 262-293 (in Chinese).
- [2]邓军,王庆飞,高帮飞,等.鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J].现代地质,2005,19(4):538-545.
Deng Jun, Wang Qingfei, Gao Bangfei, et al. Evolution of Ordos Basin and Its Distribution of Various Energy Resources[J]. Geoscience, 2005, 19(4): 538-545 (in Chinese with English abstract).
- [3]陈安清.鄂尔多斯地块早古生代盆地演化与物质聚集规律[D].成都:成都理工大学,2010.
Cheng Anqing. Basin Evolution and Sediments Accumulation during Eopaleozoic in Ordos continental Block[D]. Chengdu University of Technology Library, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [4]董兆雄,姚泾利,孙六一,等.重新认识鄂尔多斯南部早奥陶世马家沟期碳酸盐台地沉积模式[J].中国地质,2010,37(5):1327-1335.
Dong Zhaoxiong, Yao Jingli, Sun Liuyi, et al. The carbonate platform sedimentary model of southern Ordos basin[J]. Geology in China, 2010, 37(5):1327-1335(in Chinese with English abstract).
- [5]苏中堂,陈洪德,欧阳征健,等.鄂尔多斯地区马家沟组层序岩相古地理特征[J].中国地质,2012,39(3):623-633.
Su Zhongtang, Chen Hongde, Ouyang Zhengjian, et al. Sequence-

- based lithofacies and paleogeography of Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 623–633(in Chinese with English abstract).
- [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): 11–21.
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):11–21 (in Chinese with English abstract).
- [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*, 2011b, 32(5): 733–740.
Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*. 2011b. 32(5): 733–740 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨华, 包洪平, 马占荣. 侧向供烃成藏——鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识[J]. *天然气工业*, 2014, 34(4):19–26.
Yang Hua, Bao Hongping, Ma Zhanrong. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: a new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsolyte in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014,34(4):19–26 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng, et al. Gas exploration and developing prospect in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2006,27(6):1–4 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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 (in Chinese with English abstract).
- [11] Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Qi Wen, et al. Thought and suggestions on regional analysis of potash and its prospecting evaluation in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(1):17–50.
- [12] 陈文西, 袁鹤然. 陕北奥陶纪盐盆的区域成矿地质条件分析[J]. *地质学报*, 2010, 84(11): 1565–1575.
Chen Wenxi, Yuan Heran. Regional ore-forming geological conditions of the Ordovician northern Shaanxi salt basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(11): 1565–1575 (in Chinese with English abstract).
- [13] 袁鹤然, 郑绵平, 陈文西, 等. 陕北成盐盆地奥陶纪成钾找钾远景分析[J]. *地质学报*, 2010, 84(11):1554–1564.
Yuan Heran, Zheng Mianping, Chen Wenxi, et al. Potash prospects in the Ordovician Northern Shaanxi Salt Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010,84(11):1554–1564(in Chinese with English abstract).
- [14] 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(in Chinese with English abstract).
- [15] 夏日元, 唐健生, 邹胜章, 等. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 503–509.
Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Zou Shengzhang, et al. Palaeokarst research of the carbonate oil gas field and its application to oil-gas exploration and development[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006,27(5):503–509(in Chinese with English abstract).
- [16] 苏中堂, 陈洪德, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地中、南部古岩溶发育差异性分析[J]. *断块油气田*, 2010, 17(5):542–547.
Su Zhongtang, Chen Hongde, Zhao Junxing, et al. Difference analysis of palaeokarst development in middle and south parts of Ordos Basin[J]. *Fault-Block oil-gas field*, 2010, 17(5):542–547 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王雪莲, 王长陆, 陈振林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层研究[J]. *特种油气藏*, 2005, 12(3):32–35.
Wang Xuelian, Wang Changlu, Chen Zhenlin, et al. Research of weathering crust karst reservoir in Ordovician of Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2005, 12(3): 32–35(in Chinese with English abstract).
- [18] Webby B D, Laurie J R (eds.). *Global Perspectives on Ordovician Geology*[M]. Balkema, Rotterdam, 2000: 421–432.
- [19] 薛平. 陆表海台地型蒸发岩的成因探讨[J]. *地质论评*, 1986, 32(1):59–66.
Xue Ping. Origin of evaporites in a vast epicontinental platform sea[J]. *Geological Review*, 1986, 32(1):59–66(in Chinese with English abstract).
- [20] Purdy E G. Recent calcium carbonate facies of the Great Bahama Bank. I. Petrography and reaction groups[J]. *J Geol*, 1963, 71: 334–355.
- [21] Purdy E G. Recent calcium carbonate facies of the Great Bahama Bank. 2[J]. *Sedimentary facies*. *J Geol*, 1963, 71: 472–497.