

鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组成烃生物 及烃源岩地球生物学评价

万俊雨^{1,2}, 朱建辉^{1,2}, 姚素平³, 张毅^{1,2}, 李春堂⁴, 张威⁴, 姜海健^{1,2}, 王杰^{1,2}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;
3. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 4. 中国石化华北油气分公司, 河南 郑州 450006)

摘要:近年来鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组盐下天然气勘探取得重大突破,但马家沟组碳酸盐岩-膏盐岩组合总有机碳含量(TOC)普遍较低,寻找优质烃源岩、研究其形成条件是勘探急需解决的问题。用鄂尔多斯盆地中、东部马家沟组岩心样品,分析古生态、古环境及成烃生物,研究成烃生物的组合特征及其随古环境的变化。用生境型和生源Ba元素含量作为生物学评价指标,用元素含量比值V/(V+Ni)指标和蒸发盐矿物种类作为地质学评价指标,开展了烃源岩地球生物学分级评价。研究表明:①鄂尔多斯盆地马家沟组成烃生物为浮游藻类、底栖红藻、底栖褐藻和底栖蓝藻4大类。②马家沟组沉积期具备较高生物生产力烃源岩发育的条件。高频的海平面变化和气候干、湿交替导致了水体盐度和氧化还原条件的频繁变化,因此有机质的保存条件是该地区烃源岩形成发育的关键因素。③有利烃源岩发育的地球生物相为耐盐菌藻膏云潟湖边缘相,其次为浮游藻浅潮下带泥云坪和膏泥潟湖相。④烃源岩地球生物学评价结果与残余有机碳丰度评价结果相比,烃源岩相对更好,好的烃源岩是暗色泥质纹层或条带的含膏泥质白云岩、含泥白云岩、石膏质泥岩和白云质泥岩。

关键词:地球生物学;成烃生物;烃源岩;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

Geobiological evaluation of hydrocarbon-generating organisms and source rocks in the Ordovician Majiagou Formation, east-central Ordos Basin

WAN Junyu^{1,2}, ZHU Jianhui^{1,2}, YAO Suping³, ZHANG Yi^{1,2}, LI Chuntang⁴, ZHANG Wei⁴, JIANG Haijian^{1,2}, WANG Jie^{1,2}

(1. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 4. North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: Over recent years, breakthroughs have been achieved in the pre-salt natural gas exploration in the Ordovician Majiagou Formation, east-central Ordos Basin. Given the generally low total organic carbon (TOC) content in the carbonate-evaporite assemblages in the formation, there is an urgent need to seek high-quality source rocks and investigate their formation conditions. Using core samples from the Majiagou Formation in the east-central Ordos Basin, we analyze the formation's paleoecology, paleoenvironment, and hydrocarbon-generating organisms, delving into the characteristics of hydrocarbon-generating organism assemblages and their changes with the paleoenvironment. Furthermore, we perform geobiological grading evaluation using habitat types and biogenic Ba as biological indices, alongside the V/(V+Ni) ratio and mineral types in evaporites as geological indices. Key findings are as follows: (1) The hydrocarbon-generating organisms in the Majiagou Formation encompass planktonic algae, benthic red algae, benthic brown algae, and benthic blue-green algae. (2) During the deposition of the Majiagou Formation, water bodies with high biological productivity created conditions for the formation of source rocks. Specifically, the high-frequency sea-level fluctuations and the alternating dry and wet climates induced frequent changes in the salinity and redox conditions

收稿日期:2023-12-27;修回日期:2024-02-01。

第一作者简介:万俊雨(1993—),男,博士、助理研究员,成烃生物和油气地质。E-mail: wanjy7971.syky@sinopec.com。

基金项目:中石化集团公司重大项目(P23229, P23230)及子课题(P23244)。

of water bodies. Therefore, the favorable conditions for organic matter preservation serve as the key to the formation of source rocks in the study area. (3) Geobiological facies favorable to source rock formation primarily include the marginal facies of gypsum-dolomite lagoons with halophilic algae. The mud-dolomite flat facies and gypsum-mud lagoon facies found in the shallow subtidal zones of planktonic algae, are to follow. (4) Compared with the results of residual organic carbon abundance evaluation, those of source rock geobiology are more optimistic. The effective sources rocks mainly include are gypsiferous argillaceous dolomites, argillaceous dolomites, gypsum mudstones, and dolomitic mudstones, all present as dark shaly laminae or bands.

Key words: geobiology, hydrocarbon-generating organism, source rock, Majiagou Formation, Ordovician, Ordos Basin

引用格式: 万俊雨, 朱建辉, 姚素平, 等. 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组烃生物及烃源岩地球生物学评价[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 393–405. DOI: 10. 11743/ogg20240207.

WAN Junyu, ZHU Jianhui, YAO Suping, et al. Geobiological evaluation of hydrocarbon-generating organisms and source rocks in the Ordovician Majiagou Formation, east-central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 393–405. DOI: 10. 11743/ogg20240207.

奥陶系马家沟组是鄂尔多斯盆地重要的天然气勘探目的层系, 自1989年陕参1井获得工业气流以来^[1], 鄂尔多斯盆地下古生界海相碳酸盐岩烃源岩的探索和研究持续不断, 尤其是近年在鄂尔多斯盆地中东部试获了来自马家沟组盐下马四段的高产工业气流^[2–3]。然而, 目前发现的鄂尔多斯盆地下古生界烃源岩的品质和规模均难以有效支撑现有的盐下内幕型气藏的勘探成果。此外, 该套烃源岩具有中国多旋回叠合盆地深层海相碳酸盐岩烃源岩热演化程度高、生物标志化合物特征趋同等典型特征^[4–6], 难以运用传统烃源岩的评价方法(如生烃潜量 S_1+S_2 、氯仿沥青“A”含量等)进行有效评价^[7], 也难以利用生物标志化合物指示其沉积环境及母质来源特征^[8]。目前常用的岩石中残余有机碳反演推测烃源岩的生烃潜力和资源量的方法也存在一定的争议和局限性^[8–10]。

烃源岩地球生物学评价方法最初是基于华南下古生界海相烃源岩层系研究提出^[11], 其原理是通过恢复初级生产力、沉积有机质和埋藏有机质的过程, 正演烃源岩的形成过程, 并估算其最大资源量, 同时与传统的残余有机碳反演方法进行对比^[11]。不过, 受限于地质资料的获取难度和定量指标的可靠性不足, 目前更多地采用半定量的分级评价方法: 选取反映初级生产力的生物学参数(如生境型、古生产力)和控制有机碳沉积埋藏量的地质学参数(如氧化还原条件)进行分级评价, 然后将两者的评价得分累加得到烃源岩地球生物学综合评价的结果^[11]。近些年, 已有学者应用地球生物学评价方法在华南下寒武统和上古生界海相烃源岩的成因模式、有机质富集机理和地球生物学条件等方面进行了有益的尝试^[12–16], 甚至将其引入陆相烃源岩发育模式研究^[17–18]。但是, 该方法在华北地区富碳酸盐岩层系烃源岩研究中尚未有应用先例。对鄂尔多斯盆地中、东部马家沟组烃源岩进行地球生物学评价,

不仅拓展了该方法的应用领域, 更为马家沟组烃源岩原始品质评价提供另一种思路。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是位于华北地块西南部的一个多旋回复合叠合型克拉通盆地^[19–20], 分为6个次级构造单元(图1a)。马家沟组主要分布在中、东部的伊陕斜坡带, 受3次三级海平面升降和气候周期性变化的控制, 发育1套蒸发岩和碳酸盐岩交互沉积地层^[21–23]。自下而上可划分为马一段—马六段6个岩性段: 马一段、马三段和马五段发育期为海退期, 以发育白云岩和膏盐岩的蒸发岩组合为主; 马二段、马四段和马六段发育期为海进期, 以发育灰岩和白云岩为主^[24–25]。

此次研究的大牛地区块位于伊陕斜坡带北部, 在奥陶系米脂盐洼与伊盟隆起之间的过渡地带。区块内马一段—马三段为蒸发台地亚相, 以膏湖、盐湖、膏云坪和泥云坪为主要微相类型, 膏盐湖从东南角向区块内扩散, 马三段时面积达到最大; 马四段沉积开阔台地亚相, 以灰坪为主, 向上过渡到云灰坪; 马五段沉积局限台地亚相, 以云坪和泥云坪为主, 马五⁵亚段中部见灰坪发育; 马六段因遭受剥蚀而缺失^[28, 30]。此次研究的重点井——DS1井位于大牛地工区的中部, 马家沟组取心段自下而上分布在马一段、马二段、马三段和马五⁶亚段(图1b)。共采集岩心样品共57件, 通过岩心和薄片镜下观察共识别出10种岩性, 这些岩性对应潮坪—潟湖沉积体系中5种沉积环境(图1b)。

2 成烃生物特征

成烃生物的种类和相对丰度主要通过干酪根涂片

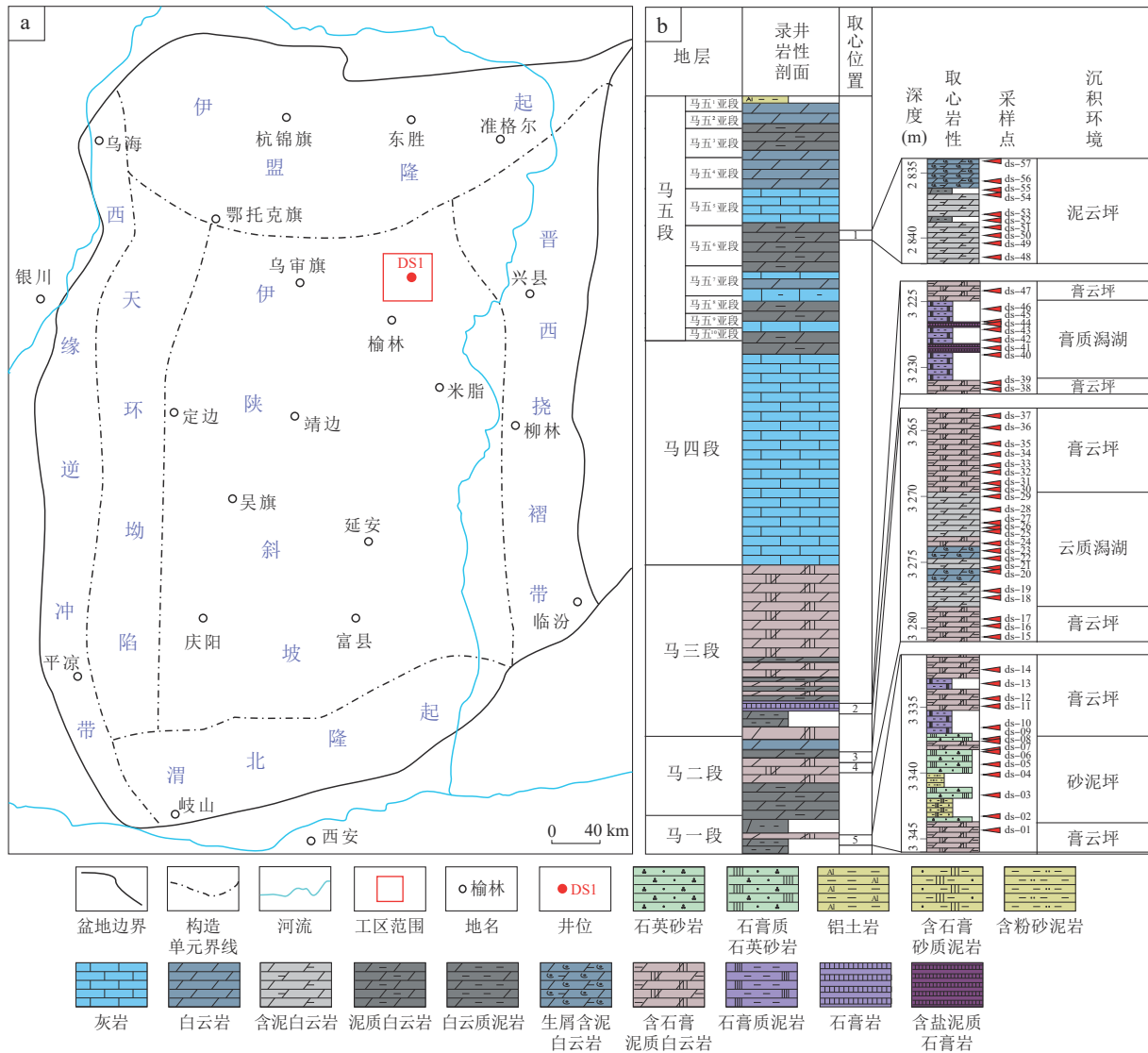


图1 鄂尔多斯盆地构造单元(a)及DS1井马家沟组岩性-沉积环境综合柱状图(b)(据文献[26-29]修改)

Fig. 1 Structural units in the Ordos Basin (a) and a composite column showing the lithology and sedimentary environment of the Majiagou Formation in well DS1 within the basin (b) (modified after references [26-29])

和岩石薄片的镜下观察和统计,对生物结构的形态细节和化学成分辅以扫描电镜和能谱分析,并结合干酪根碳同位素进行综合判识。为反映鄂尔多斯盆地中、东部马家沟组成烃生物的整体面貌,除此重点研究的DS1井外,还搜集了D124井等50口大牛地工区钻井岩心样品的干酪根镜检和干酪根碳同位素测试结果进行比较。

鄂尔多斯盆地中、东部马家沟组烃源岩显微组分主要为腐泥无定形体(图2a),多为浮游藻和底栖菌藻类降解而成,有机质类型主要为I-II₁型,马家沟组中-下组合(马五⁶亚段—马一段)碳同位素值多集中在-30‰~-26‰(图2b),与显微组分表现基本一致,为I-II₁型,与上古生界煤系中高等植物形成的干酪根

显微组分和碳同位素形成鲜明对比,且与同时期塔里木盆地深水陆棚和盆地相泥页岩中干酪根碳同位素相比整体偏重^[31],展现出明显的浅水台地相碳酸盐岩烃源岩的母质特征。

在普通光学显微镜下,发现马家沟组烃源岩成烃生物化石主要有浮游藻类(疑源类,大部分可能为绿藻门)、底栖钙化蓝细菌藻、底栖的红藻和褐藻的残片等。在扫描电镜下,可见钙化的疑似红藻叶片及囊果、单个的浮游藻球粒和一些底栖藻叶片及较高等的水生植物(褐藻)导管结构。浮游藻个体较小,多呈圆球状,薄片多与泥质混合,生烃能力强,种类包括:原始球藻(*Asperatopsophosphaera*),圆球形表面具刺状凸起,直径约5 μm(图3a);布丁藻(*Buedingiisphaeridium*),尖圆

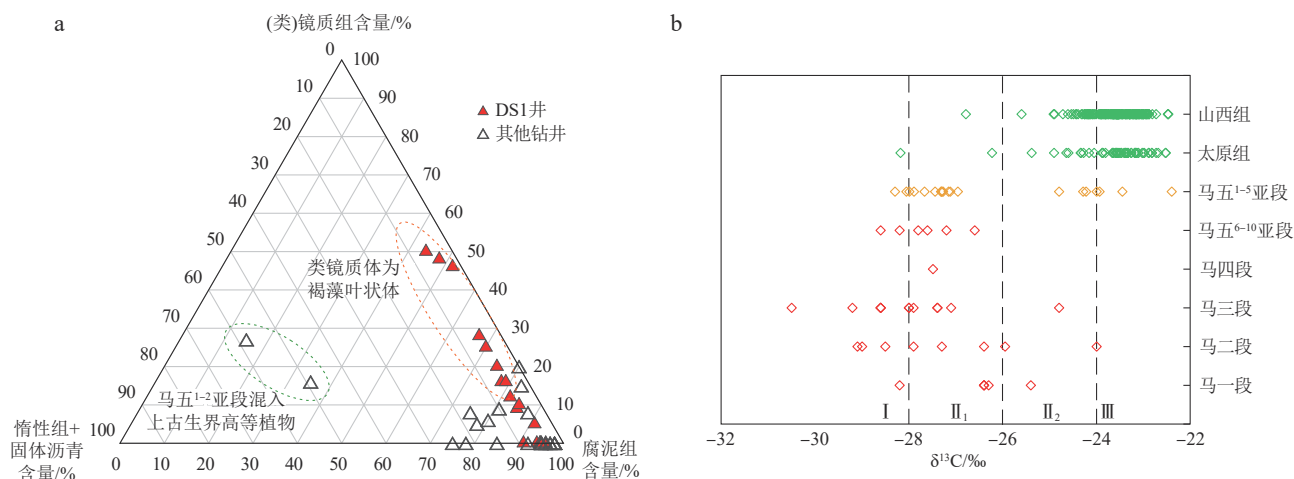


图2 大牛地工区马家沟组干酪根显微组分(a)和碳同位素特征(b)

Fig. 2 Maceral compositions (a) and carbon isotopes (b) of kerogens from the Majiagou Formation in the Daniudi area

形具瘤状凸起,直径约30 μm(图3b);光面球藻(*Leiosphaeridia*),光滑圆球形,直径约30 μm(图3c)。底栖红藻在干酪根中多为残片,可见叶状体皮层和髓部的分化(图3d),皮层红褐色,髓部黑色,其生烃能力较强。在膏云岩薄片中发现有断续纹层状分布的暗色藻纹层(图3e),扫描电镜下能谱显示其组成为泥晶白云石,形似底栖藻的叶片和囊果化石(图3f)。底栖蓝细菌藻形态多样,单体呈空心管状、柱状等,多为耐盐属种,生烃能力一般介于浮游藻和底栖褐藻之间,与底栖红藻相当^[32]。底栖蓝藻化石的种类包括灌丛藻、表附藻和肾形藻(图3g—i),均为钙质泥晶化结构:灌丛藻(*Angulocellularia*)单体针状,集合体为灌木丛状,截面为扇状,直立或悬挂生长,与现代颤蓝细菌藻类(*Oscillatoriaceae*)类似;表附藻(*Epiphyton*)单体为丝状或杆状,有明显的房室或管状体结构,直立或悬挂生长;肾形藻(*Renalcis*),由中空的肾状体组成的小束,外壁较厚,由泥晶组成,或为纤状、凝块状,呈不规则或直立生长。底栖褐藻在干酪根中多以类镜质体组分保存,呈片状、管状等(图3j),在扫描电镜下观察可看见叶片状的炭质印模化石和褐藻的导管结构(图3k—l),叶片宽度约200 μm,它的生烃能力一般。

从成烃生物的演化趋势来看(图4),马一段上、下部和马二段底栖宏观藻类占比相对较多,可能与浅潮下带膏云坪水动力条件较弱有关;马二段上部以钙化的底栖蓝藻为主,而中部含丰富的生物介壳,可能指示了间歇性的湿润气候和淡水输入增强,导致膏云潟湖水体盐度短时间地趋于正常海水盐度;马三段底部底栖宏观藻类相对较多,往中、上部仅剩浮游藻类,可能与该时期米脂盐湖扩大有关,该区域水体咸化分层

明显,底栖生物难以生存;马五⁶亚段浮游藻显著增加,顶部见大量生物介壳,可能指示了海侵期的开始,浅潮下带泥云坪水体盐度、含氧量趋于正常。所以,DS1井马一段—马三段生物指示了高盐度浅水蒸发台地环境,马二段中部和马五⁶亚段顶部后生动物的短暂繁盛可能与间歇性的湿润气候或海平面上升有关,水体盐度降低、水循环改善充氧。不同类型生物的纵向变化,指示了水动力、含氧量和盐度等环境因素的波动。

3 地球生物学评价

3.1 生物学参数评价

生境型是指具有相同结构、功能及对环境扰动反应的一组生物生存环境的组合,可与沉积环境相对应^[33]。同一生境型在时空上可重复出现,其生产力可以利用“将今论古”原则进行推算,但需结合地质历史时期的条件进行适当修正。结合成烃生物识别与沉积微相划分结果,DS1井马家沟组岩心段主要发育了高盐度、强水动力的潮间带膏云坪,正常盐度、弱水动力的浅潮下带泥云坪,高盐度、弱水动力的膏云潟湖边缘和高盐度、底层缺氧的膏质潟湖等生境型。由于盐度对生产力的控制尤为明显,向膏盐湖中心生产力迅速降低,遵循“将今论古”的原理,将生境型的分级标准和现代膏盐湖环境生产力分区相结合^[34],将浅潮下带和潟湖边缘环境评级为“好”,潮间带和云质-膏泥潟湖环境评级为“中”,潮上带和膏盐湖环境评级为“差”,它们的初级生产力水平依次递减。古生产力可以通过一些常用的生物地球化学指标(如生源Ba元素含量)进

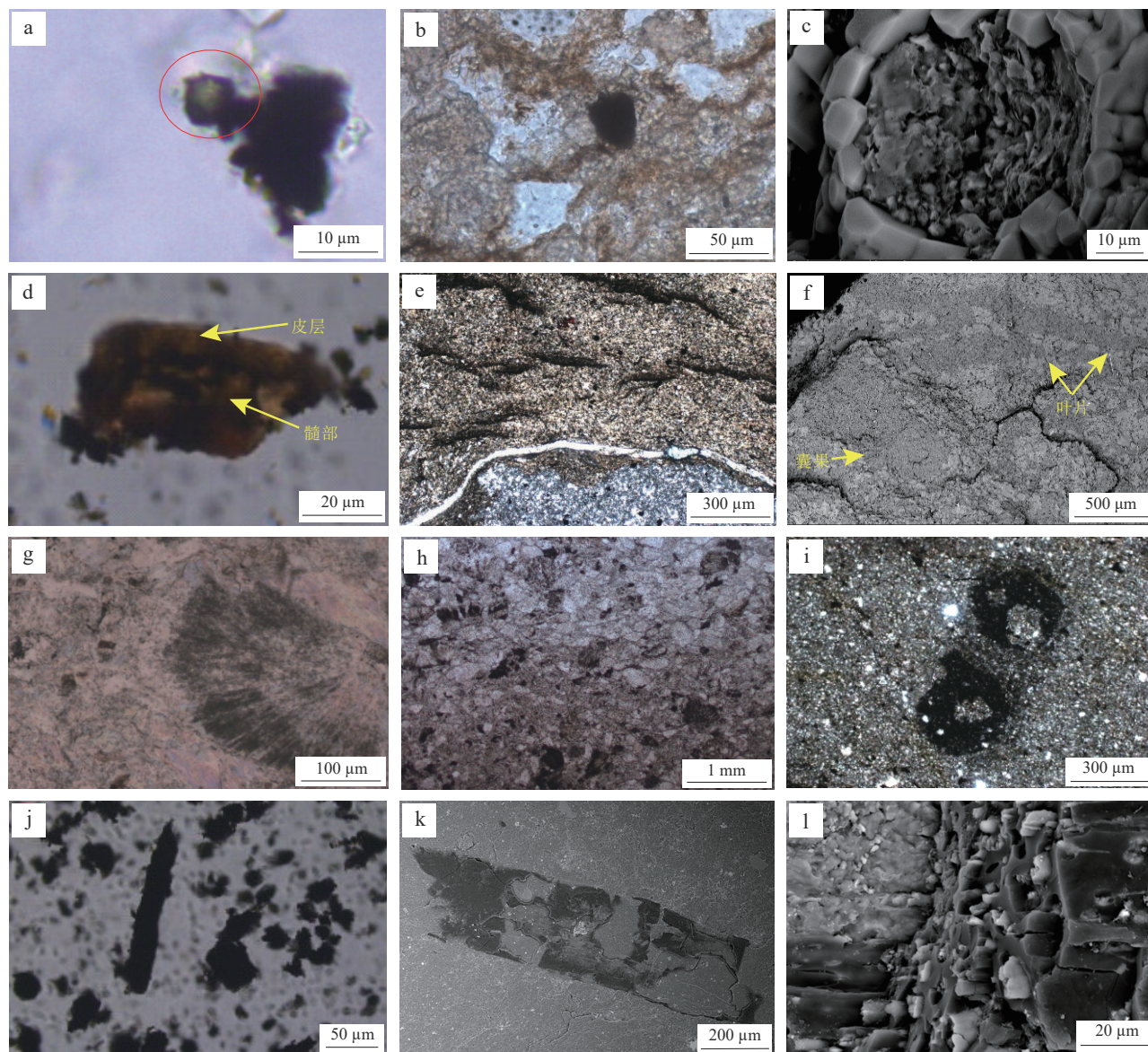


图3 大牛地工区马家沟组成烃生物图版显微照片

Fig. 3 Micrograph showing the hydrocarbon-generating organisms in the Majiagou Formation, Daniudi area

a. 原始球藻 *Asperatopsophosphaera*, D124井, 埋深3 489.84 m, 单偏光; b. 布丁藻 *Buedingiisphaeridium*, DS1井, 埋深3 231.67 m, 单偏光; c. 光面球藻 *Leiosphaeridia*, XH1井, 埋深3 413.24 m, SEM; d. 底栖红藻残片, DS1井, 埋深2 838.19 m, 单偏光; e. 底栖藻纹层, DS1井, 埋深2 838.65 m, 单偏光; f. 底栖藻叶片和红藻囊果, D122井, 埋深3 000.34 m, SEM; g. 灌丛藻 *Angulocellularia*, DS1井, 埋深3 263.87 m, 单偏光; h. 表附藻 *Epiphyton*, DS1井, 埋深3 263.87 m, 单偏光; i. 肾形藻 *Renalcis*, DS1井, 埋深3 231.16 m, 单偏光; j. 底栖褐藻, DS1井, 埋深3 332.14 m, 单偏光; k, l. 底栖褐藻叶片和导管, D123井, 埋深3 490.12 m, SEM

行评估^[35-36]。在碳酸盐岩地层中生源Ba(钡元素含量)作为古生产力的指标效果较好,常用计算公式为: $Ba_{bio}=Ba_{total}-0.0075\times Al_{total}$ (Ba_{bio} 为生源Ba元素含量, 10^{-6} ; Ba_{total} 为Ba元素总含量, 10^{-6} ; Al_{total} 为Al元素总含量, 10^{-6} ;用于估计陆源Ba含量的平均上地壳Ba/Al元素含量比值一般为0.0075)^[37-38]。结合生源Ba的质量分数(10^{-6})与初级生产力的直接相关度作出分级^[39-40]:大于100为“很高”,50~100为“高”,25~50为“中”,10~25为“差”,小于10为“很差”。为了与生境

型的分级相匹配便于生物学参数的综合评价,将生源Ba“很高”和“高”的分级对应为“好”等级,“差”和“很差”的分级对应为“差”等级。

具体地,马一段生境型主要随海平面变化,自下而上可分为三部分,上、下部为膏云瀉湖边缘,中部为潮间带砂屑滩,即生境型等级自下而上变化为“好—差—好”。而生源Ba的质量分数为 $(44.04\sim 1\,093.19)\times 10^{-6}$,平均 262.74×10^{-6} ,除个别样品属于中等级外,其余均为“好”的评级,指示了很高的初级生产力水平。

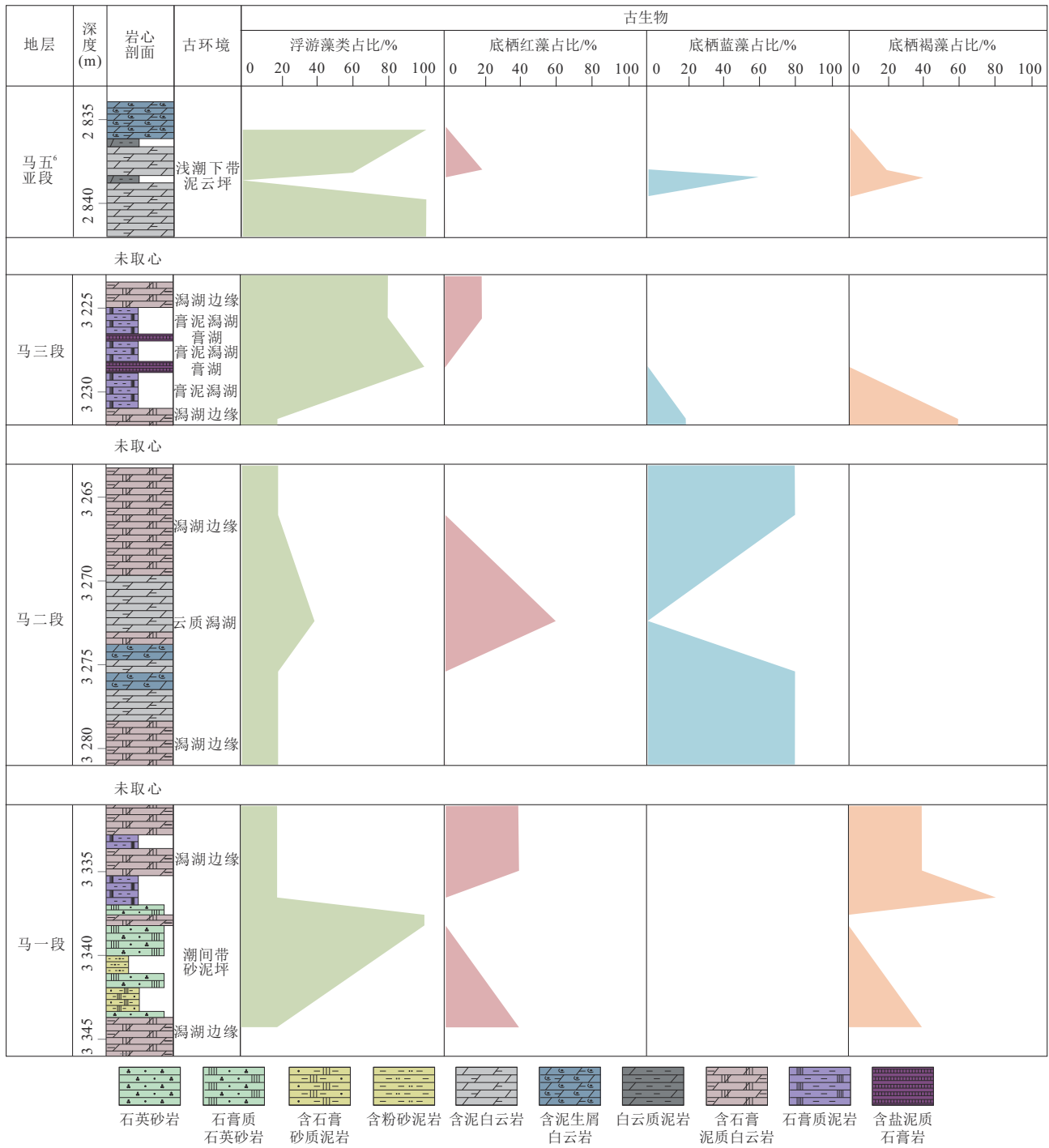


图4 鄂尔多斯盆地DS1井马家沟组取心段成烃生物演化

Fig. 4 Diagrams showing the evolution of hydrocarbon-generating organisms in the cored intervals of the Majiagou Formation in well DS1, Ordos Basin

马二段生境型主要随海水深度和盐度旋回变化,自下而上可分为3部分,上、下部为膏云潟湖边缘,中部为云质潟湖,即生境型等级自下而上变化为“好—中—好”。生源Ba的质量分数为 $(7.77 \sim 254.75) \times 10^{-6}$,平均 75.85×10^{-6} ,生产力以“好”为主,少数“中等”到“差”。马二段古生产力整体较马一段低,内部表现

为膏云潟湖环境比云质潟湖高,底部膏云潟湖比上部膏云潟湖高。

马三段沉积时期是米脂盐湖面积最大的时期,DS1井位于米脂盐湖的西北角,生境型随海平面及盐湖范围的周期性变化自下而上依次发育膏云质潟湖边缘到膏泥潟湖与膏盐湖交替,再到膏云质潟湖边缘环境,

即生境型等级变化为“好—中—差—中—好”。生源Ba的质量分数为 $(29.49 \sim 522.50) \times 10^{-6}$,平均 194.51×10^{-6} ,除个别样品生产力属于中等评级外,其余样品生产力达到“好”的评级。马三段古生产力整体水平较马一段稍低,较马二段更高,从顶底部的膏云质潟湖边缘向中部的膏盐湖有降低的趋势。

马五⁶亚段生境型主体为浅潮下带泥云坪环境,均属于“好”的生境型等级。生源Ba的质量分数为 $(9.85 \sim 267.09) \times 10^{-6}$,平均 111.25×10^{-6} ,除少数样品生产力属于“差”评级外,其余样品生产力达到“好”评级。马五⁶亚段整体生产力水平不如马三段和马一段,但较马二段更高。

综上,对生境型和生源Ba的“好、中、差”等级依次赋分值为3,2,1分,然后累加获得生物学参数评分(图5)。生物学参数评价结果显示,DS1井马家沟组潮坪浅潮下带和潟湖边缘环境的生物学参数评分大多较高,即古生产力相对更高。特别是在高盐度、弱水动力的潟湖边缘环境,成烃生物种类更为多样,浮游和底栖的生态类型都比较发育。

3.2 地质学参数评价

沉积有机碳和埋藏有机碳的形成与保存受到多种因素控制,氧化还原条件在有机质沉积和埋藏过程中都起到了关键性的控制作用。因此,本研究采用反映水体氧化还原条件的指标作为沉积和埋藏有机碳的替代指标。氧化还原敏感元素与相对不敏感的元素间的含量比值[如 $V/(V+Ni)$]是对水体古氧化还原环境进行直接表征的常用方法^[36,41-43],前人研究发现, $V/(V+Ni) \geq 0.60$ 时反映缺氧到硫化的水体环境, $V/(V+Ni) = 0.46 \sim 0.60$ 时反映贫氧的水体环境, $V/(V+Ni) \leq 0.46$

时反映正常含氧量的水体环境,缺氧、贫氧和常氧分别对应地质学参数评价的“好”“中”“差”3个等级。

此外,水体盐度与底层水的含氧量也有一定关系,盐度增加会使得水体分层,进而导致底层水体缺氧。然而,元素含量比值 Sr/Ba 等常见的古盐度指标在碳酸盐岩地层中往往失准,所以本次研究采用岩石中石膏和石盐两种蒸发矿物的出现作为水体盐度的指标,它们也可以间接反映潮坪—潟湖环境底层水体的氧化还原情况^[44-45]。当岩石矿物组成不含石盐和石膏时,水体为正常海水咸度,不存在分层,底层水为常氧;当岩石矿物组成中仅出现石膏不含石盐时,水体咸度为超过正常海水咸度的高咸度海水,可能存在一定程度的分层现象,底层水可能为贫氧;当岩石矿物组成中出现石盐时,水体为超高咸度海水,存在明显的分层,底层水为缺氧状态。所以,古盐度指标的超咸、高咸和正常分别对应古氧相指标的缺氧、贫氧和常氧,即“好”“中”“差”3个等级。

具体地,马一段 $V/(V+Ni)$ 为 $0.51 \sim 0.76$,平均 0.67 ,整体为缺氧,仅中段和上部少量样品表现为贫氧,古氧相评级整体为“好”,少量“中”。岩石矿物组成中仅出现石膏,指示马一段水体为高咸度海水,古盐度评级为“中”。马二段 $V/(V+Ni)$ 变化较大($0.12 \sim 0.75$),由下部的缺氧逐渐变化为中部的常氧再过渡到上部的缺氧,古氧相评级变化大致为“好—中—差—中—好”。蒸发矿物的出现和种类变化也与古氧相指标相仿:上、下部有石膏甚至少量层位有石盐出现,指示水体盐度为高—超高咸度,而中部无蒸发矿物,指示水体盐度正常。古盐度的评级变化为“中(好)—差—中(好)”。马三段 $V/(V+Ni)$ 为 $0.54 \sim 0.78$,平均 0.68 ,与马一段类似,整体为缺氧,古氧相评级为“好”。矿物

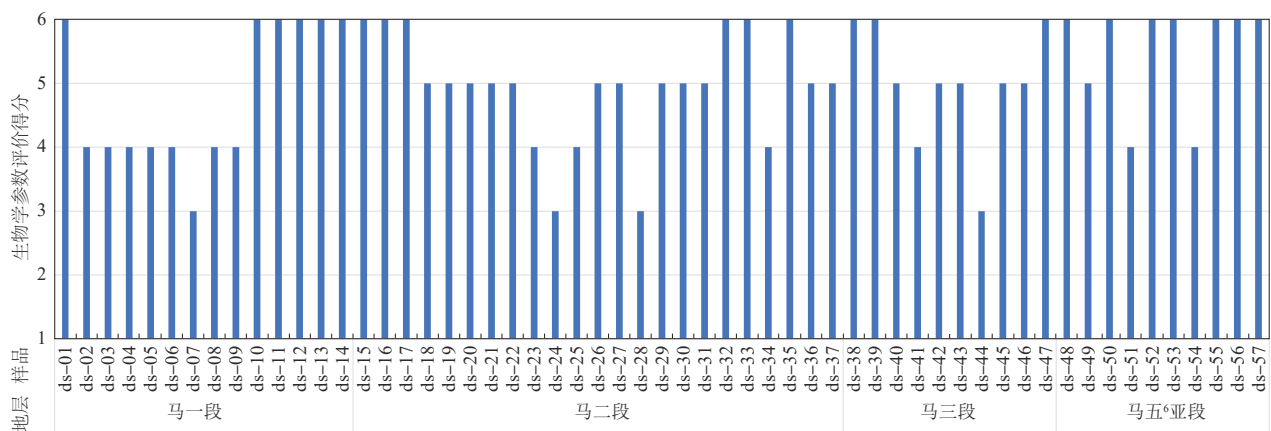


图5 鄂尔多斯盆地DS1井马家沟组取心段烃源岩生物学参数评分

Fig. 5 Biological parameter scoring for the cored intervals of the Majiagou Formation in well DS1, Ordos Basin

组成上,自下而上石盐和石膏交替出现,指示了马三段的水体在高咸和超高咸度之间频繁波动,且整体咸度要大于马二段和马一段,古盐度评级“好一中”。马五⁶亚段 $V/(V+Ni)$ 的变化与马二段相仿,上、下部贫氧到缺氧,中间部分层位出现常氧,古氧相评级大致变化为“中—好—差—好—中”。但与马一—马三段不同的是,该段未出现蒸发矿物,指示了正常咸度的海水,古盐度评级为“差”。

与生物学参数评价一样,对 $V/(V+Ni)$ 和蒸发矿物2项地质学参数替代指标进行分级赋分评价,然后累加获得地质学参数评分(图6)。地质学参数评价结果显示,DS1井马家沟组沉积期处于潮坪—潟湖沉积体系中,水体较浅,但由于蒸发强度大,水体咸化导致分层也可能在盐跃层以下形成有利于有机质埋藏保存的缺氧环境,尤其在马三段沉积时期,米脂盐湖面积达到最大,DS1井所处位置在该时期也被纳入了大盐湖的范围内;而马二段、马五段的部分层位以及未取心的马四

段因为不同程度的海侵,使得鄂尔多斯盆地内部与广海完全连通,受古隆起、古地貌和海侵范围等影响,发育局限和开阔台地环境^[46],水体循环较海退低位期有不同程度的改善,所以水体分层现象减弱甚至消失,底层水为贫氧到常氧环境。

3.3 地球生物相与烃源岩分级评价

根据烃源岩地球生物学分级评价标准^[11],生物学参数和地质学参数评分累加总分11分以上为优质烃源岩,总分10分则为一般烃源岩,总分9分为差烃源岩,总分8分及以下为非烃源岩(图7)。

评价结果显示,DS1井马家沟组取心段整体生产力偏高,保存条件差异可能是影响烃源岩发育及其品质的主要因素,其中,优质烃源岩主要分布在耐盐菌藻膏云潟湖边缘环境,一般烃源岩主要分布在浮游藻浅潮下带泥云坪和膏泥潟湖环境(图8)。根据前人牙形石年代地层研究结果,鄂尔多斯盆地中东部马家沟组

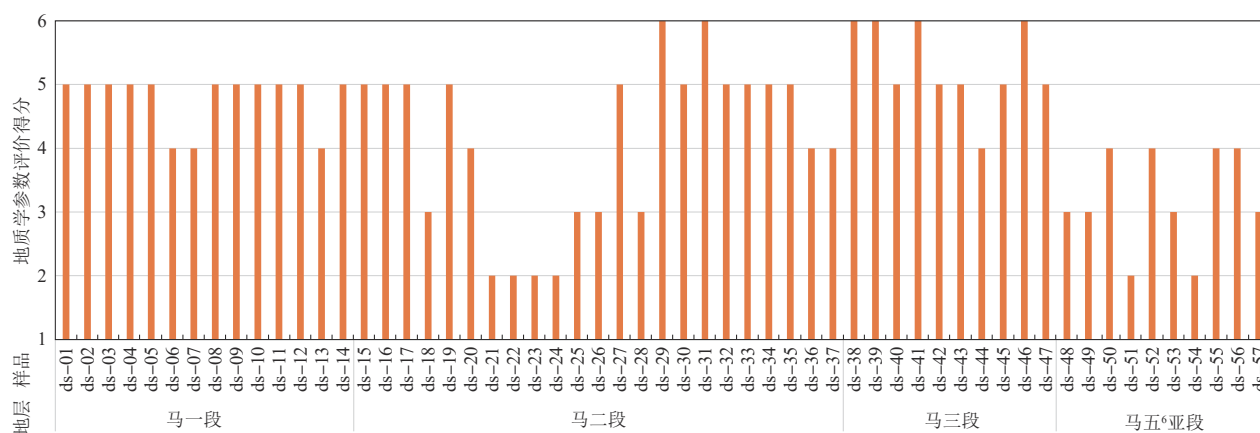


图6 鄂尔多斯盆地DS1井马家沟组取心段烃源岩地质学参数评分

Fig. 6 Geological parameter scoring for the cored intervals of the Majiagou Formation in well DS1, Ordos Basin

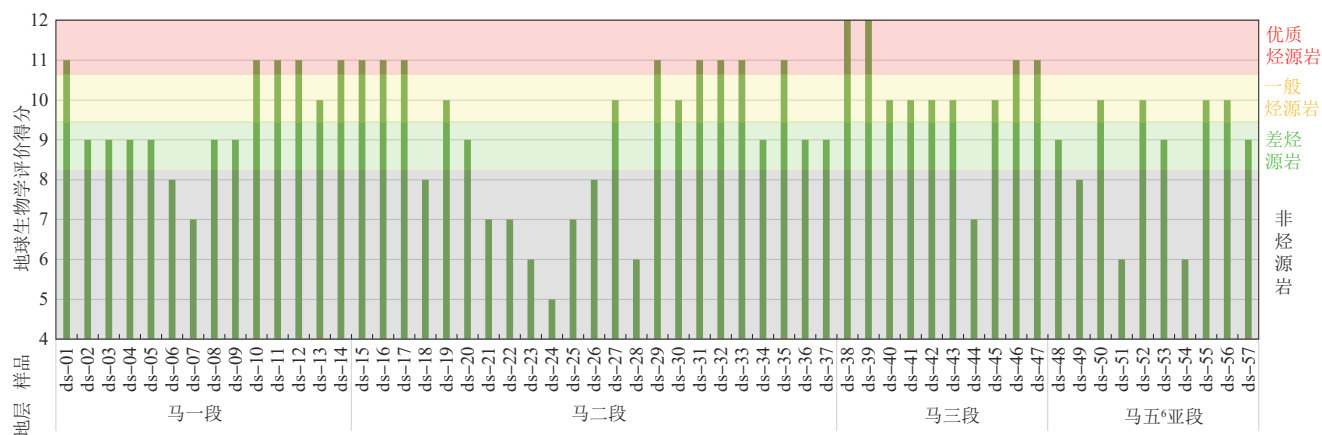


图7 鄂尔多斯盆地DS1井马家沟组取心段烃源岩地球生物学评价及烃源岩分级

Fig. 7 Geobiological evaluation and source rock grading for the cored intervals of the Majiagou Formation in well DS1, Ordos Basin

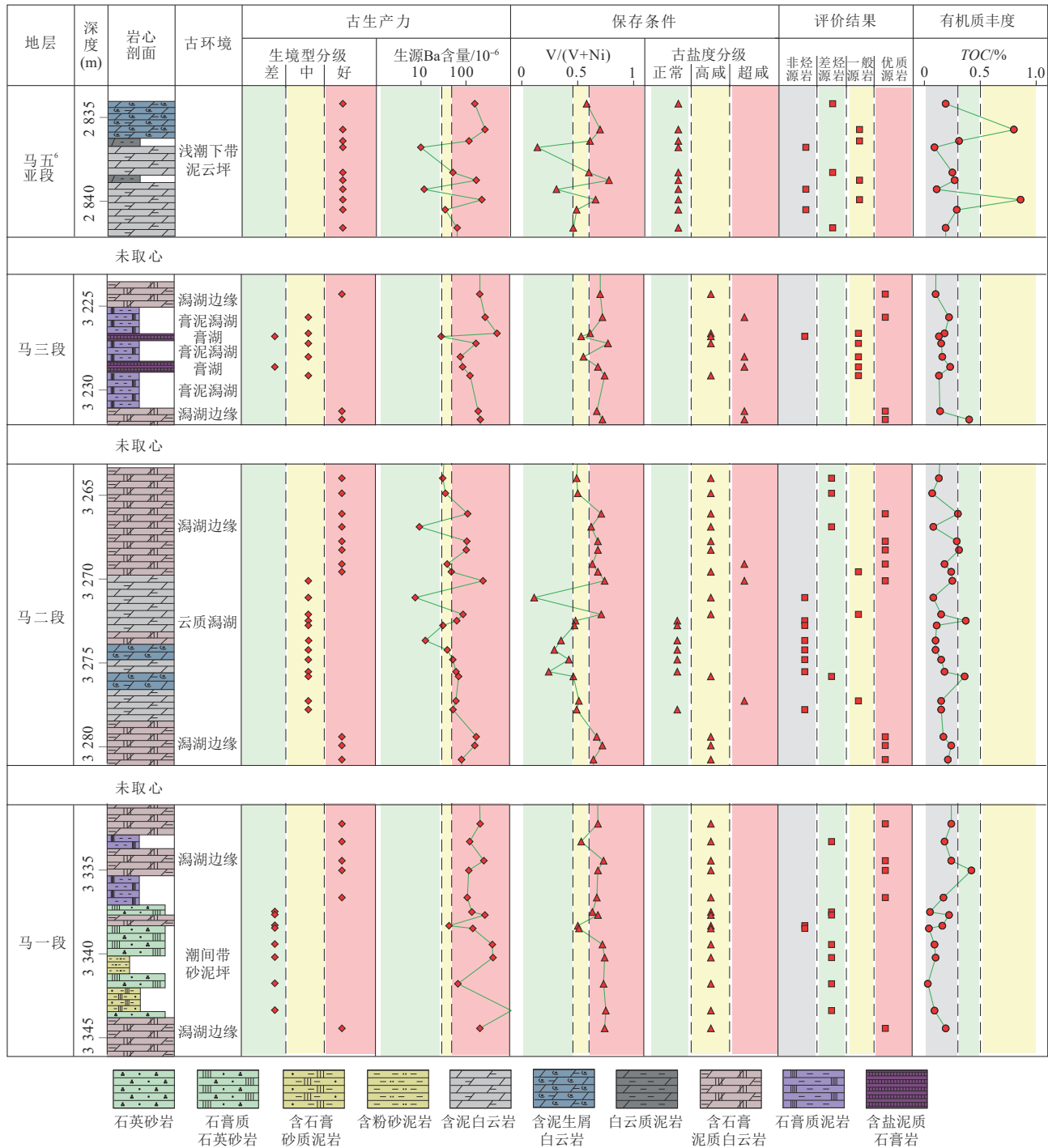


图 8 鄂尔多斯盆地 DS1 井马家沟组取心段烃源岩地球生物学评价柱状图

Fig. 8 Columns showing the geobiological evaluation for the cored intervals of the Majiagou Formation in well DS1, Ordos Basin

沉积的时代应该为中奥陶世达瑞威尔期^[47],生命起源以来第一次生物大辐射事件在此时达到顶峰,地球生物的科属一级多样性大幅增加^[48],全球无机碳同位素记录也显示了大幅度的正漂移现象,可能与生物勃发导致的有机碳埋藏比例显著增加有关^[49]。在早、中奥陶世全球生物繁盛的大背景下,鄂尔多斯盆地中东部处于赤道附近一片由潮坪和潟湖共同组成的广袤陆表

海环境^[50],具备形成较高古生产力的地理背景。高频的海平面变化和气候干湿交替,使得该地区陆源营养物质输入和海水盐度发生周期性变化,同时也导致了该区域潮坪-潟湖体系与外部广海通道之间频繁的开闭^[46],进而控制了低等菌藻类生物和后生动物等不同种类生物的差异性繁盛。在海侵期或气候湿润期,虽然生物种类丰富且底栖后生动物发育,但水体氧化不

利于有机质的埋藏和保存;在海退期或气候干旱期,虽然生物相对单一,以耐盐菌藻类生物为主,但生物量(初级生产力)并不低,加之相对闭塞的蒸发环境使得盆内大、小潟湖水体盐度增加,在浅水区形成盐跃层,生物死亡后沉降到底部缺氧的水体环境中更容易保存,尤其在潮坪向潟湖过渡的浅潮下带和潟湖边缘环境,既有较为丰富的陆源营养物质供给生物生存,又有相对适宜的水体深度和盐度条件,能够形成利于有机质保存的底部缺氧环境。所以,保存条件可能是控制鄂尔多斯盆地中东部马家沟组烃源岩发育的关键因素。

与DS1井残余有机碳结果相比较,只有个别样品实测总有机碳含量(TOC)能够达到0.5%以上,其地球生物学评价结果为一般烃源岩,两者相符。但是,大多数TOC低于0.5%的样品,特别是在含膏盐层系中的样品被地球生物学方法评价为一般甚至优质的烃源岩(图8)。尽管目前地球生物学评价分级与烃源岩的TOC未能形成一一对应的关系,但依据前人对华南海相碳酸盐岩剖面地球生物学评价的结果来看,碳酸盐岩烃源岩的TOC下限值很可能低于0.5%^[33]。有利于烃源岩发育的地球生物相对应的烃源岩岩性主要是含石膏泥质白云岩、含泥白云岩、石膏质泥岩和白云质泥岩,它们的共同特点是具有暗色的泥质纹层或条带(图9)。一方面,近年来有学者对鄂尔多斯盆地中、东部马家沟组岩心样品采用毫米级取样进行针对泥质纹层的有机碳测试,发现较之前全岩测试的TOC有明显提高^[51];另一方面,高演化的膏盐岩层系烃源岩生烃转化率较高,可能也导致了最终残余的有机质丰度明显偏低的现状^[52-53]。因此,地球生物学正演评价方法

的应用,从烃源岩的形成条件和原始品质角度揭示了鄂尔多斯盆地中、东部马家沟组成烃母质来源较为充足,后期保存条件差和含膏盐岩层系生烃转化效率低可能是导致现今有机碳丰度整体较低的主要原因,下一步应重点关注优质烃源岩沉积环境中薄泥质纹层的有机碳丰度和含膏岩层碳酸盐岩烃源岩的原始品质恢复。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地马家沟组成烃生物组合包括浮游藻类、底栖红藻、底栖褐藻和底栖蓝藻4大类,成烃生物种类与上覆煤系中的陆相高等植物和塔里木盆地寒武系-奥陶系深水陆棚和盆地相藻类存在明显差异,表现为典型的浅水高盐度蒸发-局限台地相成烃生物特征。不同类型成烃生物与介壳类后生动物在纵向上的差异性繁盛揭示了水深、盐度等古环境条件的细微波动。

2) 选取生源Ba元素含量和生境型作为反映古生产力的生物学参数替代指标、元素含量比值 $V/(V+Ni)$ 和蒸发矿物类型作为反映保存条件的地质学参数替代指标,进行烃源岩地球生物学分级评价。结果显示,有利烃源岩发育的地球生物相主要为耐盐菌藻膏云潟湖边缘相,其次为浮游藻浅潮下带泥云坪和膏泥潟湖相。烃源岩的岩性主要为具有暗色泥质纹层或条带的含石膏泥质白云岩、含泥白云岩、石膏质泥岩和白云质泥岩。

3) 与残余有机碳反演方法相比,通过地球生物学方法正演评价烃源岩的结果更为乐观,后者可能是一种揭示烃源岩原始品质更加有效的手段,尤其是在生烃转化率较高的高演化碳酸盐岩烃源岩评价中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 杨俊杰. 陕甘宁盆地地下古生界天然气的发现[J]. 天然气工业, 1991, 11(2): 1-6.
YANG Junjie. Discovery of the natural gas in Lower Palaeozoic in Shangannan Basin [J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(2): 1-6.
- [2] 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 4th Member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 17-27.
- [3] 李芙蓉, 刘文汇, 王晓峰, 等. 鄂尔多斯盆地古生界天然气地球化学特征与成因[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4):

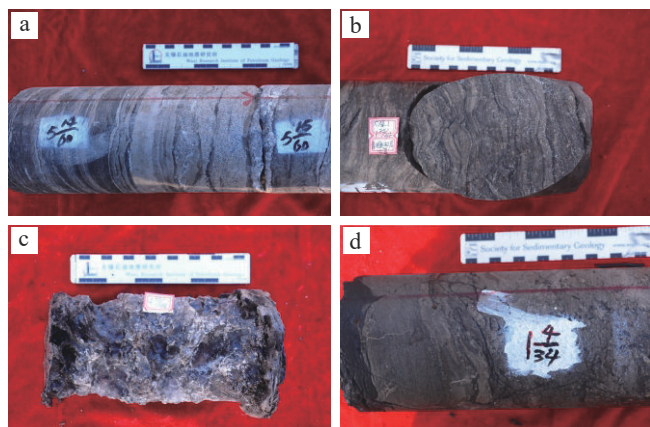


图9 鄂尔多斯盆地DS1井典型烃源岩岩心照片

Fig. 9 Photos of typical source rock cores from well DS1 in the Ordos Basin

- a. 含石膏泥质白云岩,埋深3 333.72 m; b. 含泥白云岩,埋深2 839.17 m;
c. 石膏质泥岩,埋深3 229.03 m; d. 白云质泥岩,埋深2 834.25 m

- 809-820.
- LI Furong, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of Paleozoic natural gas in the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45 (4): 809-820.
- [4] 王万春, 郑建京, 王晓锋, 等. 鄂尔多斯盆地西南部与中东部奥陶系马家沟组碳酸盐岩地球化学特征对比[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(3): 513-523.
- WANG Wanchun, ZHENG Jianjing, WANG Xiaofeng, et al. Comparisons of geochemical characteristics of Ordovician Majiagou carbonate rocks between west and South and central and east regions of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(3): 513-523.
- [5] 刘全有, 金之钧, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 847-858.
- LIU Quanyou, JIN Zhijun, WANG Yi, et al. Gas filling pattern in Paleozoic marine carbonate reservoir of Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 847-858.
- [6] 贾承造. 含油气盆地深层-超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 1-12.
- JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 1-12.
- [7] 牟书令. 中国海相油气勘探理论、技术与实践[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(5): 543-547.
- MOU Shuling. Theories, techniques and practices of petroleum exploration marine sequences in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(5): 543-547.
- [8] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二)南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(1): 1-15.
- LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (part 2): Geochemical characteristics of four suits of regional marine source rocks, South China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(1): 1-15.
- [9] 徐旭辉, 周卓明, 宋振响, 等. 油气资源评价方法关键参数研究和资源分布特征——以中国石化探区“十三五”资源评价为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 832-843.
- XU Xuhui, ZHOU Zhuoming, SONG Zhenxiang, et al. Methods and key parameters for oil and gas resource assessment and distribution characteristics of oil and gas resource: A case study of resource assessment of SINOPEC during the 13th Five-Year Plan period [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45 (5): 832-843.
- [10] ZHANG Yaxiong, WANG Gang, WANG Xindong, et al. TOC estimation from logging data using principal component analysis [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(4): 100197.
- [11] 殷鸿福, 谢树成, 颜佳新, 等. 海相碳酸盐烃源岩评价的地球生物学方法[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(7): 895-909.
- YIN Hongfu, XIE Shucheng, YAN Jiaxin, et al. Geobiological methods for evaluating marine carbonate source rocks [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(7): 895-909.
- [12] 刘喜停, 颜佳新, 薛武强, 等. 华南中二叠统栖霞组海相烃源岩形成的地球生物学过程[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(6): 1185-1192.
- LIU Xiting, YAN Jiaxin, XUE Wuqiang, et al. The geobiological formation process of the marine source rocks in the Middle Permian Chihhsia Formation of South China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(6): 1185-1192.
- [13] 曹婷婷, 徐思煌, 王约, 等. 四川盆地南江杨坝地区下寒武统烃源岩形成的地球生物学条件[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 11-16.
- CAO Tingting, XU Sihuang, WANG Yue, et al. Geobiological conditions for the formation of the Lower Cambrian source rocks in Yangba area of Nanjiang County in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 11-16.
- [14] 周炼, 周红兵, 李茉, 等. 扬子克拉通古大陆边缘Mo同位素特征及对有机埋藏量的指示意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2007, 32(6): 759-766.
- ZHOU Lian, ZHOU Hongbing, LI Mo, et al. Molybdenum isotope signatures from Yangtze craton continental margin and its indication to organic burial rate [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2007, 32(6): 759-766.
- [15] 吴勘. 扬子北缘中二叠统孤峰组地球生物学构成及页岩气地质特征[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- WU Kan. Geobiological composition and geological characters of shale gas from the Middle Permian Gufeng Formation in the north margin of Yangtze [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [16] 雷勇, 冯庆来, 桂碧雯. 安徽巢湖平顶山剖面上二叠统大隆组有机质富集的地球生物学模式[J]. *古地质量学报*, 2010, 12(2): 202-211.
- LEI Yong, FENG Qinglai, GUI Biwen. Geobiological model for organic enrichment in the Upper Permian Dalong Formation of Pingdingshan section at Chaohu, Anhui [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(2): 202-211.
- [17] 赵牛斌. 中国近海湖相烃源岩正反演综合评价及发育模式[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
- ZHAO Niubin. Forward-inverse comprehensive evaluation and development model of lacustrine source rocks in China offshore [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [18] 叶加仁, 赵牛斌, 杨宝林, 等. 渭西南凹陷流沙港组烃源岩生产力及发育模式[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 105-113.
- YE Jiaren, ZHAO Niubin, YANG Baolin, et al. Productivity and development model of source rock of the Liushagang Formation in the Weixinan Sag [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1): 105-113.
- [19] 赵振宇, 孙远实, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系地层划分与对比研究[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(5): 9-17.
- ZHAO Zhenyu, SUN Yuanshi, LI Chengshan, et al. Stratigraphic

- division and correlation of Ordovician system in Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(5): 9-17.
- [20] 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.
- MOU Chunguo, XU Jie, GU Yonghong, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the fourth member of Ordovician Majiagou Formation in the central and eastern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 780-790.
- [21] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理[J]. *沉积学报*, 1999, 17(1): 1-8.
- FENG Zengzhao, BAO Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou age of Ordovician in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1): 1-8.
- [22] 陈强, 李文厚, 孙娇鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘岐山曹家沟奥陶系剖面地层和沉积特征[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(1): 246-254, 264.
- CHEN Qiang, LI Wenhui, SUN Jiaopeng, et al. Ordovician stratigraphy and sedimentary characteristics of Caojiagou section in Qishan County, southern margin of Ordos Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 246-254, 264.
- [23] 李凌川. 鄂尔多斯盆地大牛地气田碳酸盐岩储层差异化分段酸压技术及其应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(5): 168-174.
- LI Lingchuan. Differential staged acid fracturing technology and its application in carbonate rock reservoir of Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(5): 168-174.
- [24] 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.
- [25] 卢子兴, 董国栋, 裴文超, 等. 致密碳酸盐岩储层微观结构特征及发育影响因素[J]. *断块油气田*, 2023, 30(3): 372-380, 388.
- LU Zixing, DONG Guodong, PEI Wenchao, et al. Microstructure characteristics and development influencing factors of tight carbonate reservoirs: A case study of the Ma 51+2 sub-member in eastern Ordos Basin[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(3): 372-380, 388.
- [26] 吴东旭, 周进高, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积环境恢复与源储配置关系[J]. *地球科学*, 2023, 48(2): 553-567.
- WU Dongxu, ZHOU Jingao, REN Junfeng, et al. Reconstruction of depositional environment and source-reservoir configuration relationship of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 553-567.
- [27] 王琳霖, 浮响, 方诗杰. 鄂尔多斯盆地东缘马家沟组元素地球化学特征及古沉积环境[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(4): 519-525.
- WANG Linlin, FU Yun, FANG Shijie. Elemental geochemical characteristics and geological significance of Majiagou Formation, eastern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2018, 40(4): 519-525.
- [28] 雷涛, 邓虎成, 吴冬, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系马家沟组中下组合沉积模式[J]. *古地学报*, 2020, 22(3): 523-538.
- LEI Tao, DENG Hucheng, WU Dong, et al. Depositional model of the lower-middle Ordovician Majiagou Formation in Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(3): 523-538.
- [29] 何云, 雷涛, 胥旺, 等. 大牛地气田马家沟组中下组合多成因岩溶发育机制[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(4): 26-33.
- HE Yun, LEI Tao, XU Wang, et al. Development mechanism of multi-genesis karst in middle-Lower Majiagou Formation of Daniudi Gas Field[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(4): 26-33.
- [30] 高景云, 丁晓琪, 祁壮壮, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田马五5亚段储集层特征及成因[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(4): 404-410.
- GAO Jingyun, DING Xiaoqi, QI Zhuangzhuang, et al. Characteristics and genesis of M55 reservoirs in Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(4): 404-410.
- [31] 胡广, 刘文汇, 罗厚勇, 等. 成烃生物组合对烃源岩干酪根碳同位素组成的影响: 以塔里木盆地古生界烃源岩为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(5): 902-913.
- HU Guang, LIU Wenhui, LUO Houyong, et al. The impact of original organism assemblages in source rocks on the kerogen carbon isotopic compositions: A case study of the Early Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(5): 902-913.
- [32] 夏刘文, 曹剑, 边立曾, 等. 准噶尔盆地玛湖大油田二叠纪碱湖生物-环境协同演化及油源差异性[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(4): 732-746.
- XIA Liuwen, CAO Jian, BIAN Lizeng, et al. Co-evolution of paleo-environment and bio-precursors in a Permian alkaline lake, Mahu mega-oil province, Junggar Basin: Implications for oil sources[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 52(4): 732-746.
- [33] 谢树成, 殷鸿福, 解习农, 等. 地球生物学方法与海相优质烃源岩形成过程的正演和评价[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2007, 32(6): 727-740.
- XIE Shucheng, YIN Hongfu, XIE Xinong, et al. On the geobiological evaluation of hydrocarbon source rocks[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2007, 32(6): 727-740.
- [34] 夏刘文, 曹剑, 徐田武, 等. 盐湖生物发育特征及其烃源意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(6): 1549-1562.
- XIA Liuwen, CAO Jian, XU Tianwu, et al. Development

- characteristics of biologies in saline lake environments and their implications for hydrocarbon source [J]. *Geological Review*, 2017, 63(6): 1549–1562.
- [35] HENDERSON G M. New oceanic proxies for paleoclimate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(1): 1–13.
- [36] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(2): 76–88.
- WEI Hengye. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(2): 76–88.
- [37] DYMOND J, SUESS E, LYLE M. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2): 163–181.
- [38] SCHROEDER J O, MURRAY R W, LEINEN M, et al. Barium in equatorial Pacific carbonate sediment: Terrigenous, oxide, and biogenic associations [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(1): 125–146.
- [39] PAYTAN A, KASTNER M, CHAVEZ F P. Glacial to interglacial fluctuations in productivity in the equatorial Pacific as indicated by marine barite [J]. *Science*, 1996, 274(5291): 1355–1357.
- [40] MCMANUS J, BERELSON W M, KLINKHAMMER G P, et al. Geochemistry of barium in marine sediments: Implications for its use as a paleoproxy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(21/22): 3453–3473.
- [41] ADAMS J A S, WEAVER C E. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: Example of concept of geochemical facies [J]. *AAPG Bulletin*, 1958, 42(2): 387–430.
- [42] PATTERSON J H, RAMSDEN A R, DALE L S, et al. Geochemistry and mineralogical residences of trace elements in oil shales from Julia Creek, Queensland, Australia [J]. *Chemical Geology*, 1986, 55(1/2): 1–16.
- [43] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography [J]. *Chemical Geology*, 2012, 324/325: 46–58.
- [44] 毛光周, 刘晓通, 安鹏瑞, 等. 无机地球化学指标在古盐度恢复中的应用及展望 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(1): 92–102, 118.
- MAO Guangzhou, LIU Xiaotong, AN Pengrui, et al. Application and outlook of inorganic geochemical indexes in reconstruction of palaeosalinity [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 37(1): 92–102, 118.
- [45] WEI Wei, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 341–366.
- [46] 张涛, 张亚雄, 金晓辉, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩—蒸发岩层序地层模式及其对源—储的控制作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 110–124.
- ZHANG Tao, ZHANG Yaxiong, JIN Xiaohui, et al. Sequence stratigraphy models of carbonate-evaporite successions and their controls on source rocks and reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 110–124.
- [47] ZHEN Yongyi, ZHANG Yuandong, WANG Zhihao, et al. Huaiyuan epeirogeny—shaping Ordovician stratigraphy and sedimentation on the north China platform [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 448: 363–370.
- [48] 詹仁斌, 靳吉锁, 刘建波. 奥陶纪生物大辐射研究: 回顾与展望 [J]. *科学通报*, 2013, 58(33): 3357–3371.
- ZHAN Renbin, JIN Jisuo, LIU Jianbo. Investigation on the great Ordovician biodiversification event (GOBE): Review and prospect [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(33): 3357–3371.
- [49] ZHANG Tonggang, SHEN Yanan, ALGEO T J. High-resolution carbon isotopic records from the Ordovician of South China: Links to climatic cooling and the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 289(1/4): 102–112.
- [50] 杨华, 王宝清, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组碳酸盐岩碳、氧稳定同位素特征 [J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 616–625.
- YANG Hua, WANG Baoqing, SUN Liuyi, et al. Characteristics of oxygen and carbon stable isotopes for Middle Ordovician Majiagou Formation carbonate rocks in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 616–625.
- [51] 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—下组合为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 943–956.
- 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.
- [52] 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.
- [53] 孟庆强, 李京洲, 刘文汇, 等. 膏盐岩含量对成熟阶段页岩生烃影响的模拟实验 [J]. *特种油气藏*, 2022, 29(5): 113–118.
- MENG Qingqiang, LI Jingzhou, LIU Wenhui, et al. Simulation study on the effect of gypsum-salt content on hydrocarbon generation in mature stage shale [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(5): 113–118.

(编辑 张玉银)