

鄂尔多斯盆地南缘奥陶系平凉组 微生物碳酸盐岩储层特征与演化过程

张军涛^{1,2}, 金晓辉^{1,2}, 孙冬胜^{1,2}, 杨佳奇³, 丁茜^{1,2}

1. 中国石化 深部地质与资源重点实验室, 北京 102206;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206;

3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083

摘要: 微生物碳酸盐岩储层作为一种重要的油气储层, 蕴含大量油气资源。近期在鄂尔多斯盆地中东部马家沟组发现有工业气流, 证实这类储层在鄂尔多斯盆地也具有十分广泛的勘探前景。在盆地南缘同样发现类似储层, 通过岩石学和地球化学手段, 研究了该区奥陶系平凉组微生物碳酸盐岩储层发育特征及演化过程。盆地南缘发育有较盆地内更大规模的微生物丘滩复合体, 厚度可达 100 m 以上; 微生物岩类型主要为凝块石灰岩, 以溶蚀孔为主。平凉组微生物岩储层经历了准同生期和表生期两期岩溶作用, 埋藏期存在油气充注。准同生期经历了短暂暴露, 形成大量不规则状溶孔, 放射纤维状方解石孔隙充填在早期孔隙之中, 具有与基质方解石相似的碳氧同位素和 Sr、Mg 等微量元素含量, 说明其来源于同期海水。表生期, 早期溶孔发生扩大, 形成了大量的裂缝和溶洞, 同时伴有粗晶方解石和泥质的充填, 部分粗晶方解石显示出大气降水的特征。埋藏期存在油气充注, 现今溶孔和裂缝中存在有沥青残余, 埋藏期充填方解石中也能见到大量液态烃包裹体。鄂尔多斯盆地南缘平凉组微生物碳酸盐岩发育优质储集空间, 存在油气充注过程, 是潜在的油气勘探领域。

关键词: 放射纤维状方解石; 溶蚀作用; 微生物碳酸盐岩; 平凉组; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地南缘

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

Characteristics and evolution of microbial carbonate reservoirs in the Pingliang Formation on the southern margin of Ordos Basin

ZHANG Juntao^{1,2}, JIN Xiaohui^{1,2}, SUN Dongsheng^{1,2}, YANG Jiaqi³, DING Qian^{1,2}

1. Key Laboratory of Deep Geology and Resources, SINOPEC, Beijing 102206, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China;

3. College of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: As an important type of hydrocarbon reservoir, microbial carbonate contains great amount of hydrocarbon resources. The recent discovery of industrial gas in the Majiagou Formation in the east-central part of the Ordos Basin indicates that this type of reservoir also has very extensive exploration prospects in the Ordos Basin. Similar reservoirs were also found on the southern margin of the basin, but no systematic research has been achieved. In this paper, petrological and geochemical anatomy of microbial carbonate reservoirs of the Pingliang Formation on the southern margin of the Ordos Basin were carried out. Results show that the study area developed a larger-scale microbial mound and beach complex than that in the basin, and the thickness can be more than 100 m. The microbial rock is mainly agglomerate limestone with dissolution pores. The microbial rock reservoir of the Pingliang Formation has experienced two stages of karsting, quasi-syngensis and epigenesis, which are the key for the formation of reservoir, and there is oil and gas charging during the burial period. Among them, the quasi-syngenetic stage experienced a brief exposure, forming a large amount of irregular-shaped solution pores, and radial fibrous calcite pores filled in the early pores, with similar oxygen/carbon isotope and trace element contents such as Sr and Mg as the matrix calcite, it is then indicated that they were originated from seawater in the same period. During the epigenetic stage, the early solution pores expanded, forming a large number of fractures and cavities, accompanied by the filling of coarse-crystal calcite

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-04-28。

作者简介: 张军涛(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 从事碳酸盐岩储层地质研究。E-mail: zhangjt.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003)、国家自然科学基金面上基金(42072177)和中国科学院 A 类战略性先导项目(XDA14010201)联合资助。

and mud, and some of the coarse crystalline calcite shows the characteristics of atmospheric precipitation. There is oil and gas charging during the burial period. There are bituminous residues in the present-day solution holes and fractures, and a large amount of liquid hydrocarbon-bearing inclusions can be observed in the calcite filling during the burial period. In summary, the microbial carbonate of the Pingliang Formation at the southern edge of the Ordos Basin, where both reservoir formation and hydrocarbon filling processes exist, is a potential exploration field.

Key words: radial fibrous calcite; dissolution; microbial carbonate; Pingliang Formation; Ordovician; southern margin of Ordos Basin

微生物碳酸盐岩储层是重要的碳酸盐岩储层类型之一。美国阿拉巴马州、俄罗斯东西伯利亚地区、巴西桑托斯盆地、阿曼盐盆、哈萨克斯坦都已经发现了大规模的微生物碳酸盐岩油气田^[1-2]。我国四川盆地震旦系灯影组和三叠系雷口坡组、塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组、华北地区蓟县雾迷山组,也已经实现了微生物碳酸盐岩油气商业发现^[3-7]。

微生物碳酸盐岩指底栖的微生物捕集和黏结碎屑颗粒,经与微生物活动相关的无机或有机诱导矿化作用在原地形成的沉积岩,主要有叠层石、凝块石、核形石、树枝石和均一石等类型^[1-2,8-9],还存在微生物骨架岩、微生物粘结岩、非钙化浮游或漂浮微生物形成的模铸岩、矿化浮游或漂浮微生物形成的颗粒岩和泥粒岩等^[10]。陆表海、缓坡和镶边等不同的碳酸盐岩沉积环境中都有微生物碳酸盐岩分布^[2]。

在鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组中也发育有微生物碳酸盐岩储层,主要以白云岩为主,分布于海退背景的 Ma_5 、 $Ma_{5_{1+2}}$ 等亚段和海进背景下的 Ma_5_7 、 Ma_5 等亚段,沉积相带多为微生物坪、微生物丘或丘滩复合体等,由叠层石、凝块石、核形石组成^[11-15]。近期,在盆地中东部的米探 1 井马四段获得工业气流,其中主要储层段也属以叠层石白云岩为主的微生物碳酸盐岩^[16-18]。

盆地南缘马家沟组沉积时期与盆地内相似,也有微生物碳酸盐岩发育^[14];到上奥陶统平凉组沉积时期,属于弱镶边台地边缘沉积环境,水体变得开阔,盐度开始正常,具备“清、浅、暖”特征,适合生物的繁殖,在淳化铁瓦殿、耀县将军山、铜川陈炉和永寿好时河以及在旬探 1 井、麟探 1 井中都发现有生物礁存在。造礁生物主要有藻、珊瑚、层孔虫,微生物藻类是该时期的重要的造礁或造丘生物^[19-22]。但以往报道并未涉及微生物岩,关于该区微生物碳酸盐岩储层类型、成岩演化过程和分布预测,更是鲜有针对性研究。

本文通过对鄂尔多斯盆地南缘(下文简称鄂南)铜川市浅钻——铜钻 1 井以及同区陈炉镇任

家湾等野外剖面平凉组进行岩石学和地球化学解剖,从野外剖面、岩心、薄片、阴极发光,电子探针、碳氧同位素、流体包裹体等不同角度进行分析,探寻鄂南平凉组微生物碳酸盐岩类型、储层特征以及成岩演化过程。本次研究找到了鄂南平凉组微生物岩准同生期溶蚀作用的确凿证据,发现了埋藏期油气充注的痕迹,综合认为微生物碳酸盐岩是鄂南地区一个潜在的勘探领域。

1 地质背景

鄂南奥陶系以海相碳酸盐岩沉积为特征,地层自下而上划分为下奥陶统冶里组和亮甲山组,中奥陶统马家沟组,上奥陶统平凉组和背锅山组^[20,23]。鄂南下奥陶统冶里—亮甲山组沉积期,岩性以含硅白云岩为主,其后经历加里东运动 I 幕,海水整体退出鄂尔多斯盆地。到中奥陶统马家沟组沉积时,海水由东南方向进入盆地,逐渐遍布整个鄂尔多斯盆地,在南部仍属于广阔的浅水陆表海碳酸盐岩沉积,发育有一套膏盐岩—碳酸盐岩沉积层系^[24-25]。马家沟组沉积晚期,由于秦岭洋向北持续俯冲,南缘坡度明显增大,水体加深,沉积环境开始发生明显转换,由碳酸盐缓坡开始向末端变陡缓坡转换,主要以纯净的碳酸盐岩沉积为主^[26-27]。

晚奥陶世,秦岭洋俯冲加剧^[28],鄂尔多斯盆地西南缘平凉组和背锅山组沉积时期,具有弱镶边的特征,岩性以灰岩为主,有生物丘(礁)相和滩相灰岩沉积(图 1),在较深水区则以泥灰岩沉积为主^[29]。奥陶纪末—石炭纪,鄂南地区不断隆升,致使奥陶系部分被剥蚀;直至石炭纪晚期本溪组沉积时,南缘又开始接受碎屑岩沉积^[24-25]。

本次研究的浅钻——铜钻 1 井、陈炉镇任家湾剖面均处于盆地南缘,有上奥陶统平凉组灰岩沉积,之上覆盖本溪组铝土质泥岩(图 2)。

2 储层特征

2.1 岩石类型

鄂南地区铜钻 1 井、陈炉镇任家湾剖面以及铁瓦殿等剖面平凉组都表现为多套微生物丘—滩体

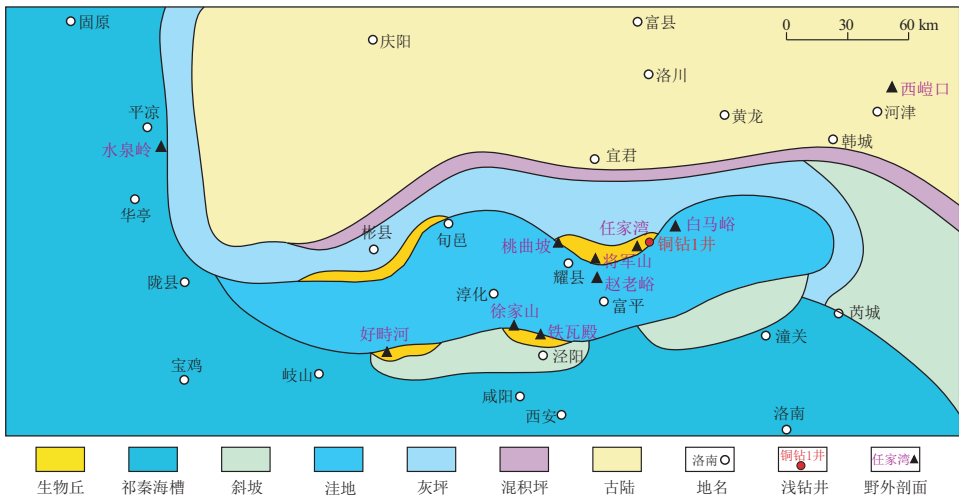


图 1 鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组沉积时期沉积相^[30]

Fig.1 Sedimentary facies of Upper Ordovician Pingliang Formation, southern margin of Ordos Basin

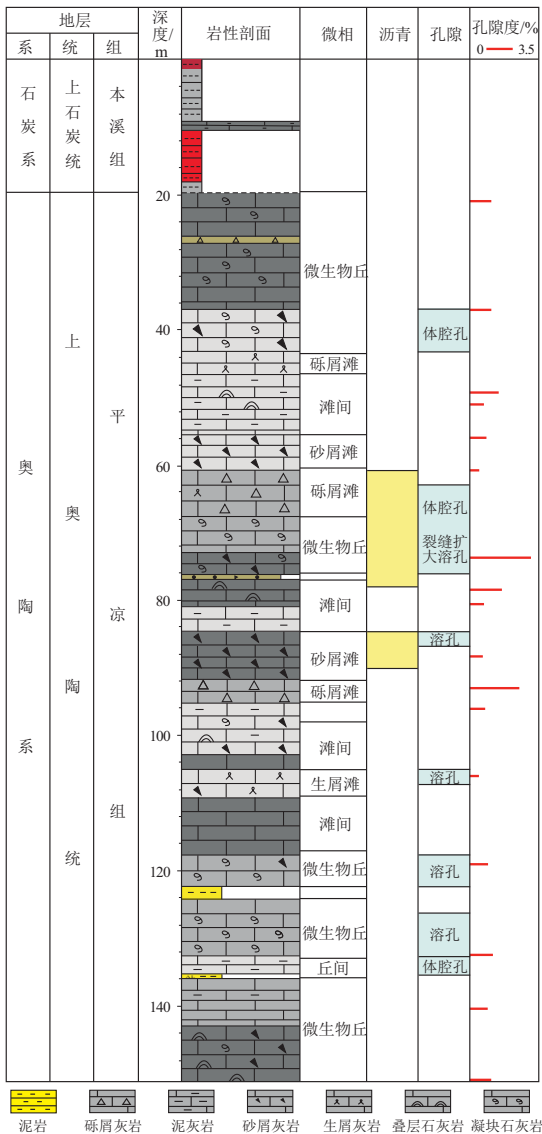


图 2 鄂尔多斯盆地南缘铜钻 1 井综合柱状图
修改自文献^[30]。

Fig.2 Stratigraphic column of well Tongzuan 1, southern margin of Ordos Basin

垂向叠置,岩石类型为凝块石灰岩与砾屑灰岩、砂屑灰岩、生屑灰岩互层^[30](图 2,图 3)。

陈炉镇任家湾剖面位于任家湾村废弃采石场,其中平凉组微生物碳酸盐岩丘出露厚度约 30 m 左右,顶部为本溪组铝土质泥岩,大致呈丘状,由 5 套丘滩复合体构成,岩石类型为凝块石灰岩、砂砾屑灰岩、生屑灰岩和水平状叠层石灰岩。铜钻 1 井平凉组厚度约 140 m,大至可划分出 8 个大的丘滩组合,顶部为本溪组铝土质泥岩,岩性总体以深灰色凝块石灰岩、灰色生屑灰岩、砾屑灰岩、砂屑灰岩为主,其次为叠层石灰岩。淳化铁瓦殿平凉组的生物丘规模稍大,顶部为背锅山组,在岩性组合上也是主要由凝块石灰岩与砾屑灰岩、砂屑灰岩、生屑灰岩互层,并能见到丘前的坍塌角砾岩。在桃曲坡、东庄和永寿好时河剖面生物礁中也都能见到凝块石灰岩和叠层石灰岩等微生物岩。

凝块石灰岩,是区内微生物藻丘最主要的岩石类型,位于藻丘滩复合体的中上部,由微生物分泌物黏结海水中的沉积物所构成的凝块结构,岩心和野外剖面上呈现出暗亮雪花状;在显微镜下可见大量暗亮相间的凝块结构,暗色黏结物呈现为微米级的不规则状或次圆形,主要为泥晶或颗粒(砂屑、粉屑)物质,凝块之间发育大量亮色的窗格孔,有亮晶方解石充填(图 3a)。

砾屑灰岩,砾屑多为圆形或椭圆形,原始成分也主要为凝块石灰岩,呈层状分布。砂屑灰岩,砂屑形状不规则,成分也主要为球粒,砂屑之间为亮晶方解石胶结。生屑灰岩,生屑主要为海绵碎屑,也可见珊瑚、腕足和棘皮类碎片。砾屑、砂屑以及生物碎屑之间均为亮晶方解石胶结(图 3c)。

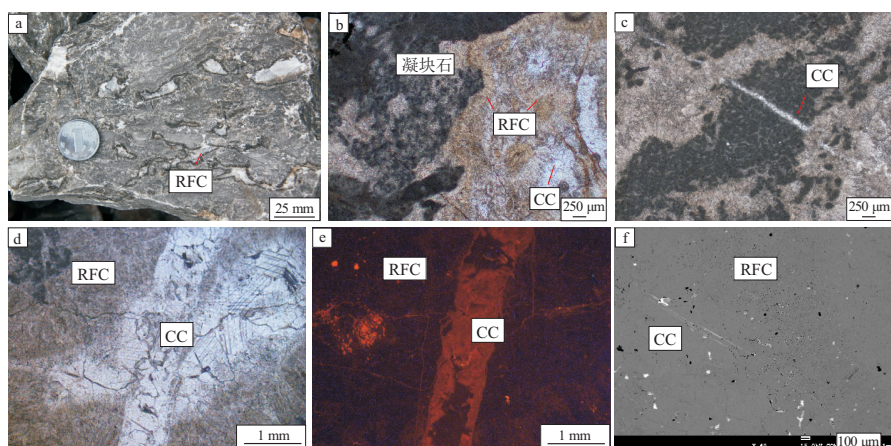


图 3 鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组微生物岩岩石学特征

a.凝块石灰岩,发育有扁平状溶孔,边缘为暗色放射纤维状方解石(RFC),后期有示顶底结构,上部为白色粗晶方解石充填,下部为泥晶方解石,陈炉任家湾剖面,平凉组;b.凝块石灰岩,内部有窗格孔,发育有溶孔,边缘为暗色放射纤维状方解石(RFC),陈炉任家湾剖面,平凉组,显微镜单偏光;c.凝块石灰岩,内部有窗格孔,发育有溶孔,边缘为暗色放射纤维状方解石(RFC),后期为白色粗晶方解石(CC)充填,铜钻1井,平凉组,显微镜单偏光;d.凝块石灰岩,发育有溶孔,边缘为暗色放射纤维状方解石(RFC),后期为白色粗晶方解石(CC)充填,后期裂缝切割溶孔,陈炉任家湾剖面,平凉组,显微镜单偏光下;e.凝块石灰岩,视域同图3d,基质凝块石与放射纤维状方解石(RFC)不发光,但是放射纤维状方解石(RFC)内部少量发亮黄色光,溶孔内粗晶方解石不发光,裂缝内充填粗晶方解石(CC)发橙色光,最后期方解石(CC)不发光,陈炉任家湾剖面,平凉组,阴极发光;f.凝块石灰岩,发育有溶孔,边缘为暗色放射纤维状方解石(RFC),成分相对复杂,含暗色包裹体,后有粗晶方解石(CC)充填,成分较为均一,陈炉任家湾剖面,平凉组,电子探针背散射照片

Fig.3 Petrological characteristics of microbial carbonates in Upper Ordovician Pingliang Formation, southern margin of Ordos Basin

叠层石灰岩,多见于任家湾剖面,位于微生物藻丘滩复合体的底部,多呈水平状;由暗色富藻层和亮色的贫藻层组成的纹层构成,孔隙不发育。

2.2 储集空间类型

平凉组微生物碳酸盐岩储层主要发育在凝块石灰岩和生屑灰岩之中,储集空间主要有溶孔、溶洞和裂缝等。在铜钻1井中,共有5段储层发育段,与藻丘密切相关;原生的窗格孔、生物体腔孔和粒间孔普遍发育,但多已被海底粒状亮晶方解石充填。

溶孔(洞)多发育在凝块石灰岩中,在岩心和野外剖面上表现为不规则状,常具有暗色的孔隙边缘,内部又有白色的方解石(图3a);在显微镜下,孔隙边缘暗色方解石为纤维状、放射状,为等轴放射状方解石,内部为粗晶透明方解石(图3b),含有少量的沥青。还有较为大型的溶洞也主要发育在凝块石灰岩段,但已被后期泥质充填^[30]。而裂缝多发育在充填的溶洞上下,但也被方解石及少量白云石和沥青充填。

3 成岩作用

鄂南地区平凉组微生物碳酸盐岩储层经历了复杂的成岩作用过程,其中准同生期和表生期两期岩溶作用是储层形成的关键;而与盆地内部马家沟组微生物碳酸盐岩相比,缺少普遍的白云岩化作用;埋藏期还发生有油气充注、白云石和方解石充填。

3.1 准同生期成岩作用

优质的微生物以及生物礁碳酸盐岩储层往往都会经历准同生期大气降水溶蚀作用的改造,比如川东北普光元坝气田二叠系长兴组生物礁,川中威远安岳气田灯影组和川西气田雷口坡组微生物丘(席),都有证据显示存在过准同生期大气降水溶蚀作用的影响^[31-33]。

微生物以及生物礁碳酸盐岩孔隙周缘通常发育放射纤维方解石充填物(RFC),比如在灯影组的葡萄状白云石、长兴组的生物礁云岩^[34-35]以及美国的Beck Spring白云岩^[36]中的RFC。放射纤维状方解石是一类特殊的纤维状方解石胶结物、一种原生高镁方解石胶结物以及海水潜流环境中生长的一种高镁方解石的复合晶体^[34],指示了海水环境,并有可能存在微生物参加^[35]。鄂南微生物岩储层也发育有这种放射纤维状方解石,在野外和岩心上,为溶孔中的暗色边缘;在显微镜下,显示为放射状、纤维状,多具有波状消光的特征。

发育放射纤维状方解石胶结物充填溶孔,切割沉积期的窗格孔(图3b-c),说明溶孔形成时间晚于窗格孔。在阴极发光下显示,等轴放射状方解石与基质方解石有相同的发光特征,都基本不发光(图3d-e),说明具有与海水相同的来源。

陈炉任家湾剖面 and 铜钻1井的方解石碳、氧同位素略有差异,但同一剖面或钻井中的基质方解石和放射纤维状方解石非常相近。放射纤维状方解

石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-7.1\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$, 平均值为 -3.1‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-7.5\text{‰} \sim -3.7\text{‰}$, 平均值为 -5.3‰ , 具有与基质方解石相似的碳、氧同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-8.0\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$, 平均值为 -3.06‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-9.7\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$, 平均值为 -5.62‰) (图4), 说明基质方解石和等轴放射状方解石具有相似的来源, 都是海水中形成的。

电子探针背散射成分分析显示, 纤维状方解石与基质方解石略有不同, 纤维状方解石多具有混沌杂乱的内核和相对干净的边缘; 而基质方解石较为干净, 仅含有少量杂质。基质方解石和放射纤维状方解石微量元素分析显示, 放射纤维状方解石内核也与基质方解石具有相似的 Sr (分别平均为 429×10^{-6} 和 447×10^{-6})、Mg (分别平均为 0.41% 和 0.49%)、Ba (分别平均为 350×10^{-6} 和 209×10^{-6})、Mn (分别平均为 30×10^{-6} 和 32×10^{-6}) 等微量元素含量, 其中较高的 Sr 和 Mg 含量、较低的 Mn 和 Ba 含量也说明其来源为海水, 与基质相似。而放射纤维状方解石相较基质方解石具略高的 Fe 和 Ti 含量, 以及放射纤维状方解石边缘与两者的微量元素差异明显, 其形成过程与基质方解石略有不同, 可能与沉积间断时的大气水参与以及微生物的吸附相关, 造成元素富集。

放射纤维状方解石来源于海水, 也说明溶孔在其形成前已经存在。因此, 在准同生期, 可能曾经存在过短暂暴露, 发生了大气水溶蚀作用, 这与典型的规模生物礁和微生物丘储层的形成过程非常相似。

3.2 表生期成岩作用

从奥陶纪末期开始的, 长达 1.5 亿年的表生期岩溶作用, 对平凉组微生物碳酸盐岩也有着重要的影响。大气降水对微生物碳酸盐岩在准同生期溶孔基础上改造, 包括孔隙扩容和形成大型的溶蚀孔洞。铜钻 1 井中的泥岩是岩溶洞穴中暗河沉积物, 通过对比微量元素等分析发现, 有泥岩指示了溶洞中暗河沉积^[30]。

在岩心尺度上, 裂缝在暗河堆积物下层尤为发育。在薄片尺度, 能见到裂缝切割原生的窗格孔和准同生期的溶孔, 都说明裂缝为晚期形成。

溶洞内还存在有示顶底结构, 底部为碎屑状的泥质充填, 顶部为粗晶白色方解石充填, 显示为表生期溶洞充填的特征(图3a)。

从地球化学特征上看, 后期粗晶方解石充填物具有明显偏负的碳、氧同位素值, 具有大气降水的特征^[37](图4)。同时, 粗晶方解石在电子探针背

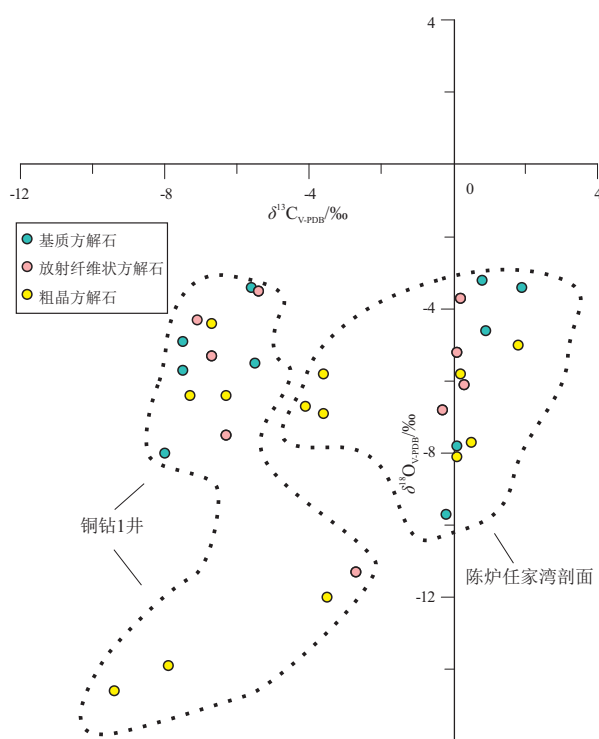


图4 鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组微生物岩中不同类型方解石碳、氧同位素交会图

Fig.4 Carbon and oxygen isotopes of different types of calcite in microbial carbonates of Upper Ordovician Pingliang Formation, southern margin of Ordos Basin

散射照片下非常干净, 基本不含杂质, 部分粗晶方解石具有相对较高的 Mn 含量(均值 38×10^{-6}), 较低的 Mg(均值 0.29%)、Fe(多低于检测限)含量和 Sr 含量(均值 214×10^{-6}), 说明部分粗晶方解石可能来源于大气降水^[37-38]。

3.3 埋藏期成岩作用

进入埋藏期后, 微生物碳酸盐岩储层又经历了油气充注、埋藏期的方解石和白云石充填等成岩作用改造。

鄂南平凉组碳酸盐岩地层曾存在过油气充注, 学者曾报道了多口钻井和野外剖面中有沥青发育^[39-41]。烃类主要来源于上奥陶统海相烃源岩, 烃源岩主要分布在盆地西南缘陆棚和潟湖沉积环境之中^[42-43]。但有关沥青的形态和赋存状态报道相对较少。本次研究中, 在铜钻 1 井的微生物碳酸盐岩储层段的岩心和薄片中都清晰地发现大量的沥青充填; 岩心上可见黑色的沥青充填在裂缝和孔隙之中, 薄片下沥青表现出油滴状和裂片状(图5a-c)。

与油气充注同期, 还有方解石和白云石两种碳酸盐矿物充填作用。粗晶方解石充填既发生在表生期, 同时也发生于埋藏期。在这种粗晶方解石中

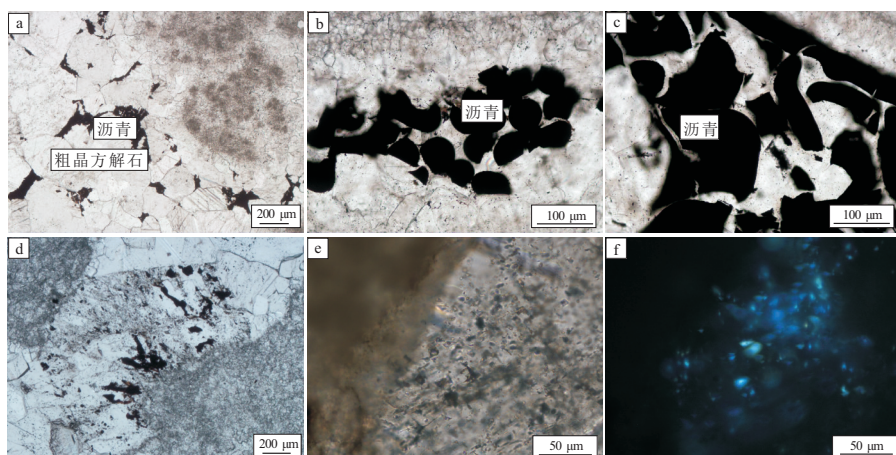


图 5 鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组微生物碳酸盐岩孔隙内的沥青和液态烃

a.凝块石灰岩,发育溶孔,边缘为暗色放射纤维状方解石,后有沥青充填,最后为粗晶方解石充填,铜钻 1 井,平凉组;b.图 5a 的局部放大,溶孔内充填有沥青,沥青为油滴状,显微镜单偏光;c.图 5a 的局部放大,溶孔内充填有沥青,沥青为裂片和油滴状,显微镜单偏光;d.凝块石灰岩,发育有溶孔,有白云石充填,白云石内部有沥青,平凉组,显微镜单偏光;e.凝块石灰岩,发育溶孔,充填有粗晶方解石,方解石内部含有大量包裹体,平凉组,显微镜单偏光;f.凝块石灰岩,视域同图 5e,发育溶孔,充填有粗晶方解石,方解石内部含有大量包裹体,部分在荧光下发蓝光,平凉组

Fig.5 Bitumen and liquid hydrocarbons in pores of microbial carbonates in Upper Ordovician Pingliang Formation, southern margin of Ordos Basin

有液态烃的存在,荧光下,发蓝色光和褐色光。烃类包裹体相伴生的盐水包裹体的均一温度在 110~147 ℃,结合鄂南地区的埋藏史、温度史和烃源岩成熟分析显示,充注时代可能是中晚三叠世^[44]。粗晶方解石测点结果显示,部分方解石具有较高的 Ba(均值 3.157×10^{-6}) 和 Fe(均值 1.534×10^{-6}) 含量, Sr 含量均值为 454×10^{-6} 。较高的 Ba 和 Fe 含量说明其形成温度相对较高,因为只有在较高的温度下,这类离子半径较大的离子才能进入方解石晶格^[45]。而 Sr 含量与基质方解石含量接近,反映了其可能来源于同层位的平凉组海相烃源岩^[38]。

与盆地内微生物岩普遍的白云岩化不同,鄂南微生物岩仅在埋藏期孔隙中发育有少量的白云石充填,白云石多为粗晶自形,并可见白云石与沥青相伴生,显示白云石与油气充注时间相一致。

4 微生物岩储层的形成和演化

鄂南平凉组发育于弱镶边台地边缘沉积环境,发育微生物碳酸盐岩,多与颗粒灰岩相伴生,形成微生物丘滩复合体,与盆地内的微生物丘滩相比,规模更大,厚度可达 100 m 以上(图 6);微生物岩类型主要为凝块石灰岩,少量的叠层石灰岩;孔隙类型主要为溶孔,与微生物丘滩关系密切。

鄂南微生物碳酸盐岩经历了准同生和表生两期溶蚀作用。在准同生期,微生物丘滩经历了短暂的暴露,形成了大量的不规则状溶孔,其后又进入海水发生了孔隙的充填和胶结,放射纤维状方解石便是这时期的产物,其具有与同期海水相似的特征(图 6)。在表生期,表现为前期溶孔的扩大,及形成了大型的溶洞,并伴有粗晶方解石和泥质的充填

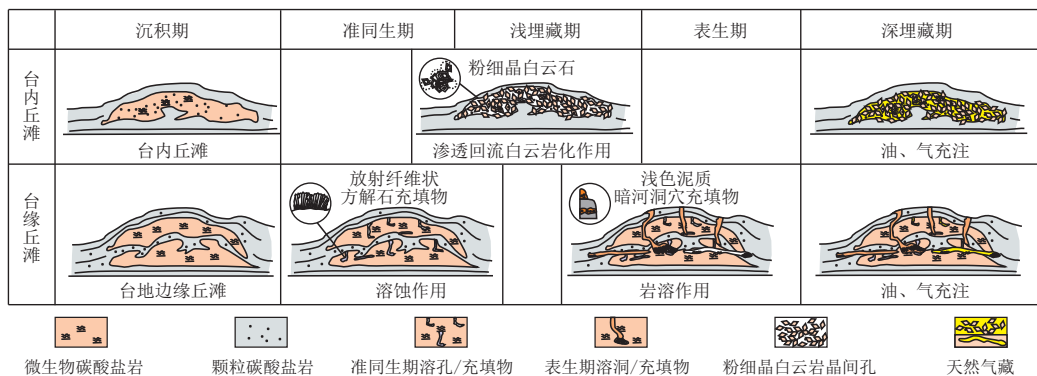


图 6 鄂尔多斯盆地奥陶系微生物岩储层形成模式

Fig.6 Formation model of Ordovician microbial carbonate reservoirs in Ordos Basin

(图6)。与盆地内部马家沟组的丘滩相比,鄂南平凉组沉积时期水体相对开阔,缺少浅埋藏期普遍的渗透回流白云岩化作用(图6)。

鄂南微生物碳酸盐岩在埋藏期存在平凉组烃源岩的油气充注,在溶孔和裂缝的方解石和白云石胶结物中可见大量的沥青,在荧光下也能见到大量的液态烃。因此,鄂南平凉组微生物碳酸盐岩是一个潜在的勘探领域。

5 结论

(1)鄂南平凉组发育有厚层微生物丘滩复合体,岩石类型主要为凝块石灰岩与砾屑灰岩、砂屑灰岩、生屑灰岩互层,储集空间主要有溶孔、溶洞和裂缝等。

(2)研究区微生物碳酸盐岩储层在准同生期、表生期和埋藏期都经历了复杂的成岩作用,其中准同生期和表生期的岩溶是优质储层形成的关键。准同生期,微生物丘滩体短暂暴露,发生了大气水溶蚀作用,形成溶蚀孔,后又有放射纤维状方解石充填;表生期,大气降水对原有孔隙进行改造,扩溶早期孔隙,形成大型的溶蚀孔洞;埋藏期,储层经历了油气充注,方解石和白云石充填等成岩作用改造,且现今在孔隙、裂缝中仍可观察到沥青和液态烃类包裹体的存在。鄂尔多斯盆地南缘微生物碳酸盐岩是一个潜在的勘探领域。

参考文献:

- [1] 罗平,王石,李朋威,等.微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J].沉积学报,2013,31(5):807-823.
LUO Ping,WANG Shi,LI Pengwei,et al.Review and prospectives of microbial carbonate reservoirs[J].Acta Sedimentologica Sinica,2013,31(5):807-823.
- [2] 胡安平,沈安江,郑剑锋,等.微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式[J].海相油气地质,2021,26(1):1-15.
HU Anping,SHEN Anjiang,ZHENG Jianfeng,et al.The classification,facies and sedimentary models of microbialites[J].Marine Origin Petroleum Geology,2021,26(1):1-15.
- [3] 刘树根,宋金民,罗平,等.四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J].成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(2):129-152.
LIU Shugen,SONG Jinmin,LUO Ping,et al.Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin,China[J].Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2016,43(2):129-152.
- [4] 王文之,杨跃明,文龙,等.微生物碳酸盐岩沉积特征研究:以四川盆地高磨地区灯影组为例[J].中国地质,2016,43(1):306-318.

WANG Wenzhi,YANG Yueming,WEN Long,et al.A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate;a case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area,Sichuan Basin[J].Geology in China,2016,43(1):306-318.

- [5] 周凌方,钱一雄,宋晓波,等.四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J].石油与天然气地质,2020,41(1):177-188.
ZHOU Lingfang,QIAN Yixiong,SONG Xiaobo,et al.Characteristics,distribution and origin of dolomite reservoir in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic,Pengzhou gas field,western Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology,2020,41(1):177-188.
- [6] 张君龙,胡明毅,冯子辉,等.塔里木盆地古城地区寒武系台缘丘滩体类型及与古地貌的关系[J].石油勘探与开发,2021,48(1):94-105.
ZHANG Junlong,HU Mingyi,FENG Zihui,et al.Types of the Cambrian platform margin mound-shoal complexes and their relationship with paleogeomorphology in Gucheng area,Tarim Basin,NW China[J].Petroleum Exploration and Development,2021,48(1):94-105.
- [7] 李朋威,何治亮,罗平,等.华北北部地区蓟县系高于庄组一雾迷山组白云岩储层特征与形成主控因素[J].石油与天然气地质,2020,41(1):26-36.
LI Pengwei,HE Zhiliang,LUO Ping,et al.Characteristics of and main factors controlling the dolomite reservoir of Gaoyuzhuang-Wumishan formations in the Jixian system,the north of North China[J].Oil & Gas Geology,2020,41(1):26-36.
- [8] RIDING R.Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds:concepts and categories[J].Earth-Science Reviews,2002,58(1/2):163-231.
- [9] MANCINI E A,MORGAN W A,HARRIS P M,et al.Introduction:AAPG Hedberg research conference on microbial carbonate reservoir characterization:conference summary and selected papers[J].AAPG Bulletin,2013,97(11):1835-1847.
- [10] 吴亚生,姜红霞,虞功亮,等.微生物岩的概念和重庆老龙洞剖面P-T界线地层微生物岩成因[J].古地理学报,2018,20(5):737-775.
WU Yasheng,JIANG Hongxia,YU Gongliang,et al.Conceptions of microbialites and origin of the Permian-Triassic boundary microbialites from Laolongdong,Chongqing,China[J].Journal of Palaeogeography,2018,20(5):737-775.
- [11] 熊鹰,姚泾利,李凌,等.鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五₁₊₂微生物碳酸盐岩沉积特征及储集意义[J].沉积学报,2016,34(5):963-972.
XIONG Ying,YAO Jingli,LI Ling,et al.Sedimentary characteristics and reservoir significance of microbial carbonate in Ma5₁₊₂ member of Ordovician in northeastern Ordos Basin[J].Acta Sedimentologica Sinica,2016,34(5):963-972.
- [12] 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 per-salt dolomite reservoirs in Ordos Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2021,26(1):16-24.

- [13] 黄道军,钟寿康,张道锋,等.蒸发背景沉积序列精细刻画及沉积学解译:以鄂尔多斯盆地中部中奥陶统马五₆亚段为例[J].古地理学报,2021,23(4):735-755.
HUANG Daojun,ZHONG Shoukang,ZHANG Daofeng,et al.Detailed characterization and interpretation of sedimentary sequences under evaporitic environments:a case from the Ma5₆ submember of Middle Ordovician in central Ordos Basin[J].Journal of Palaeogeography, 2021,23(4):735-755.
- [14] 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.
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.
- [15] 魏柳斌,包洪平,严婷,等.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组五段 5 亚段微生物碳酸盐岩发育特征及储集意义[J].石油学报,2021,42(8):1015-1025.
WEI Liubin,BAO Hongping,YAN Ting,et al.Development characteristics and significance of microbial carbonate reservoirs in the fifth submember of member 5 of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin[J].Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8):1015-1025.
- [16] 周进高,席胜利,任军峰,等.鄂尔多斯盆地米脂地区奥陶系马四段沉积新认识与有利储集相带[J].天然气工业,2021,41(12):28-37.
ZHOU Jingao,XI Shengli,REN Junfeng,et al.New understanding of the sedimentation of the 4th member of Ordovician Majiagou Formation in the Mizhi area of the Ordos Basin and its favorable reservoir facies belts[J].Natural Gas Industry,2021,41(12):28-37.
- [17] 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.
- [18] 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 4th member of Ordovician Majiagou Formation in the Mizhi area of the Ordos Basin[J].Natural Gas Industry,2021,41(12):38-48.
- [19] 叶俭,杨友运,许安东,等.鄂尔多斯盆地西南缘奥陶纪生物礁[M].北京:中国地质出版社,1995.
YE Jian,YANG Youyun,XU Andong,et al.Reefs in the southwest margin of the Ordos Basin[M].Beijing:China Geological Publishing House,1995.
- [20] 夏明军,戴金星,邹才能,等.鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析[J].石油勘探与开发,2007,34(3):291-298.
XIA Mingjun,DAI Jinxing,ZOU Caineng,et al.Caledonian karst palaeogeomorphology and the forming condition of gas pool, southern Ordos Basin[J].Petroleum Exploration and Development,2007,34(3):291-298.
- [21] 席胜利,李振宏,王欣,等.鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力[J].石油与天然气地质,2006,27(3):405-412.
XI Shengli,LI Zhenhong,WANG Xin,et al.Distribution and exploration potential of Ordovician reservoir in Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2006,27(3):405-412.
- [22] 周俊烈.鄂尔多斯盆地奥陶纪生物礁及其油气地质意义[J].内江科技,2012,33(8):124-125.
ZHOU Junlie.Ordoevian reefs in the Ordos Basin and their petroleum geological significance[J].Neijiang Science & Technology,2012, 33(8):124-125.
- [23] 姚泾利,王兰萍,张庆,等.鄂尔多斯盆地南部奥陶系古岩溶发育控制因素及展布[J].天然气地球科学,2011,22(1):56-65.
YAO Jingli,WANG Lanping,ZHANG Qing,et al.Controlling factor and distribution of paleo-karst development in Ordovician of southern Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience,2011, 22(1):56-65.
- [24] 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.
- [25] 袁路朋,周洪瑞,景秀春,等.鄂尔多斯盆地南缘奥陶系碳酸盐微相及其沉积环境分析[J].地质学报,2014,88(3):421-432.
YUAN Lupeng,ZHOU Hongrui,JING Xiuchun,et al.Microfacies and facies analysis of the Ordovician carbonates in the south margin of the Ordos Basin[J].Acta Geologica Sinica,2014, 88(3):421-432.
- [26] 董兆雄,赵敬松,方少仙,等.鄂尔多斯盆地南部奥陶纪末端变陡缓坡沉积模式[J].西南石油学院学报,2002,24(1):50-52.
DONG Zhaoxiong,ZHAO Jingsong,FANG Shaoxian,et al.Sedimentary model of distally steepening ramp of Ordovician in southern Ordos Basin[J].Journal of Southwest Petroleum Institute,2002,24(1):50-52.
- [27] 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.
- [28] 张国伟,郭安林,董云鹏,等.关于秦岭造山带[J].地质力学学报,2019,25(5):746-768.
ZHANG Guowei,GUO Anlin,DONG Yunpeng,et al.Rethinking of the Qinling Orogen[J].Journal of Geomechanics,2019, 25(5):746-768.
- [29] 刘朱睿,何幼斌,李华,等.鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组砂岩微量元素特征及构造背景:以陇县段家峡剖面为例[J].古地理学报,2020,22(2):333-348.
LIU Zhurui,HE Youbin,LI Hua,et al.Geochemical characteristics of trace elements and tectonic setting of sandstones from the Upper Ordovician Pingliang Formation, southwestern margin of Ordos Basin;a case study of the Duanjiaxia profile, Longxian

- County[J].Journal of Palaeogeography,2020,22(2):333-348.
- [30] 金晓辉,张军涛,孙冬胜,等.鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组浅钻中古岩溶洞穴的发现及其意义[J].石油与天然气地质,2021,42(3):595-603.
- JIN Xiaohui,ZHANG Juntao,SUN Dongsheng, et al.Discovery and significance of the Ordovician paleo-karst caves in shallow drilling in the southern Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2021,42(3):595-603.
- [31] 何治亮,魏修成,钱一雄,等.海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J].石油与天然气地质,2011,32(4):489-498.
- HE Zhiliang,WEI Xiucheng,QIAN Yixiong, et al.Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs[J].Oil & Gas Geology,2011,32(4):489-498.
- [32] 何治亮,马永生,张军涛,等.中国的白云岩与白云岩储层:分布、成因与控制因素[J].石油与天然气地质,2020,41(1):1-14.
- HE Zhiliang,MA Yongsheng,ZHANG Juntao, et al.Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China[J].Oil & Gas Geology,2020,41(1):1-14.
- [33] 马永生,何治亮,赵培荣,等.深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J].石油学报,2019,40(12):1415-1425.
- MA Yongsheng,HE Zhiliang,ZHAO Peirong, et al.A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J].Acta Petrolei Sinica,2019,40(12):1415-1425.
- [34] 黄思静,王春梅,佟宏鹏,等.四川盆地东北部二叠系长兴组礁岩中的放射轴状纤维状胶结物[J].岩性油气藏,2010,22(3):9-15.
- HUANG Sijing,WANG Chunmei,TONG Hongpeng, et al.Radial fibrous cement of reefal framestone of Permian Changxing Formation in northeastern Sichuan Basin[J].Lithologic Reservoirs,2010,22(3):9-15.
- [35] 钱一雄,冯菊芳,何治亮,等.从岩石学及微区同位素探讨四川盆地灯影组皮壳—葡萄状白云石成因[J].石油与天然气地质,2017,38(4):665-676.
- QIAN Yixiong,FENG Jufang,HE Zhiliang, et al.Applications of petrography and isotope analysis of micro-drill samples to the study of genesis of grape-like dolomite of the Dengying Formation in the Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology,2017,38(4):665-676.
- [36] SHUSTER A M,WALLACE M W,VAN SMEERDIJK HOOD A, et al.The tonian beek spring dolomite:marine dolomitization in a shallow, anoxic sea[J].Sedimentary Geology,2018,368:83-104.
- [37] 张军涛,金晓辉,李淑筠,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因[J].石油与天然气地质,2016,37(5):684-690.
- ZHANG Juntao,JIN Xiaohui,LI Shujun, et al.Types and origin of pore-fillings from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2016,37(5):684-690.
- [38] 黄思静,黄喻,兰叶芳,等.四川盆地东北部晚二叠世—早三叠世白云岩与同期海水锶同位素组成的对比研究[J].岩石学报,2011,27(12):3831-3842.
- HUANG Sijing,HUANG Yu,LAN Yefang, et al.A comparative study on strontium isotope composition of dolomites and their coeval seawater in the Late Permian—Early Triassic,NE Sichuan Basin[J].Acta Petrologica Sinica,2011,27(12):3831-3842.
- [39] 宁宁,陈孟晋,孙粉锦,等.鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古油藏的确定及其意义[J].石油与天然气地质,2007,28(2):280-286.
- NING Ning,CHEN Mengjin,SUN Fenjin, et al.Determination and its significance of ancient oil pools in Ordovician weathering crust,Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2007,28(2):280-286.
- [40] 张春林,孙粉锦,刘锐娥,等.鄂尔多斯盆地南部奥陶系沥青及古油藏生气潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):668-673.
- ZHANG Chunlin,SUN Fenjin,LIU Ruie, et al.Bitumen and hydrocarbon generation potential of paleo-reservoirs in the Ordovician, south Ordos Basin[J].Petroleum Exploration and Development,2010,37(6):668-673.
- [41] 金晓辉,孙润轩,陈霞,等.鄂尔多斯盆地南缘奥陶系露头沥青地球化学特征与意义[J].石油实验地质,2016,38(5):647-651.
- JIN Xiaohui,SUN Runxuan,CHEN Xia, et al.Geochemical characteristics and significance of bitumen of Ordovician outcrops at the southern margin of Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(5):647-651.
- [42] 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.
- [43] 张月巧,郭彦如,侯伟,等.鄂尔多斯盆地西南缘中上奥陶统烃源岩特征及勘探潜力[J].天然气地球科学,2013,24(5):894-904.
- ZHANG Yueqiao,GUO Yanru,HOU Wei, et al.Geochemical characteristics and exploration potential of the Middle—Upper Ordovician source rocks on the western and southern margin of Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience,2013,24(5):894-904.
- [44] 任战利,祁凯,李进步,等.鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J].石油与天然气地质,2021,42(5):1030-1042.
- REN Zhanli,QI Kai,LI Jinbu, et al.Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2021,42(5):1030-1042.
- [45] GREGG J M,BISH D L,KACZMAREK S E, et al.Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: a review[J].Sedimentology,2015,62(6):1749-1769.