

# 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩地球化学特征及成因分析

吴兴宇<sup>1,2</sup>, 吴东旭<sup>1,2</sup>, 丁振纯<sup>1,2</sup>, 于洲<sup>1,2</sup>, 王少依<sup>1,2</sup>, 李维岭<sup>1,2</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

**摘要** 白云岩成因及白云岩储层发育的控制作用尚不明确,这造成了优质白云岩储层预测的困难,严重制约了鄂尔多斯盆地西缘奥陶系的勘探部署和天然气发现。早奥陶世,盆地西缘总体处于开阔海缓坡或弱镶边台地沉积环境,内缓坡及台地边缘带起到一定的障壁作用。岩石薄片观察表明,盆地西缘奥陶系白云岩主要为颗粒白云岩和晶粒白云岩,颗粒白云岩残余颗粒结构清晰,晶粒白云岩包括泥粉晶白云岩、粗粉晶白云岩、粉细晶白云岩、细晶白云岩、中细晶白云岩和中粗晶白云岩等。白云岩地球化学分析显示:泥粉晶白云岩碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值多偏正,微量元素具有低Na、K及较高Fe的特征,锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与同时期海水相似,稀土元素Eu亏损,阴极发光显示为暗棕色或暗褐色;细晶-颗粒白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值多偏负,微量元素具有低Na、K、Fe的特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显大于同时期海水,阴极发光显示为桔黄色、暗红色及红色发光,包裹体均一温度普遍偏高。根据区域构造和沉积演化、岩石学特征、气候环境以及地球化学特征综合分析,盆地西缘奥陶系泥粉晶白云岩由准同生期蒸发白云石化作用形成,细晶-颗粒白云岩由浅埋藏期回流-渗透白云石化作用形成。同生期颗粒滩原生孔隙在白云石化之后由于白云岩的抗压实能力强而得以保存下来,后期进一步溶蚀扩大形成现今盆地西缘奥陶系白云岩储层中最主要的储集空间。

**关键词** 白云岩; 地球化学特征; 成因; 桌子山组; 克里摩里组; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

## 0 前言

近年来,长庆油田持续加强鄂尔多斯盆地西缘的勘探部署和综合攻关研究,多口探井在奥陶系获得低产气或气显示。勘探实践及研究表明<sup>[1-2]</sup>,白云岩储层是盆地西缘奥陶系主要储层类型,储层岩性为颗粒滩残余藻砂屑白云岩、残余生物碎屑砂屑白云岩,孔隙度达2%~9%,储集性能好。目前针对奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育控制因素等方面研究较少,优质白云岩储层的分布预测仍缺乏明确的地质依据,这严重制约了盆地西缘奥陶系进一步的勘探部署和天然气发现。笔者在前人研究的基础上,重点针对鄂尔多斯盆地西缘桌子山、樱桃沟、牛首山、青龙山等4条露头剖面以及乐1井、忠探1井、芦参1井等53口取心探井开展研究工作,通过对露头、钻井岩心及岩石薄片的详细观察描述,

结合相关地球化学实验分析,着重探讨盆地西缘奥陶系白云岩的成因机制,建立白云岩成因模式,并进一步明确其对白云岩储层发育的控制作用,以期优质白云岩储层的分布预测提供基本地质依据。

## 1 白云岩沉积特征

鄂尔多斯盆地西缘横跨伊陕斜坡、天环坳陷和西缘逆冲带等构造单元(图1),区内奥陶系是重要的天然气勘探层系,其中下奥陶统白云岩是重要的储层。综合构造、沉积演化和层序地层学分析,盆地西缘奥陶系沉积总体上受贺兰坳拉槽演化所控制<sup>[3-7]</sup>。早奥陶世桌子山早期,贺兰坳拉槽进一步发育,盆地西缘沉降作用加大,由早期的潮坪—缓坡沉积环境向缓坡环境转换。至桌子山晚期,受贺兰坳拉槽进一步发育的影响,盆地西缘构造沉降增大造成水体相对加深,前期的缓坡有所变陡,但基本继

收稿日期: 2019-01-07; 改回日期: 2020-07-24

本文受国家科技重大专项课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号:2016ZX05004-002)、“深层古老含油气系统成藏规律与目标评价”(编号:2017ZX05008-005),中国石油重大项目课题“深层油气储层形成机理与分布规律”(2018A-0103)联合资助

**第一作者**: 吴兴宇, 博士, 高级工程师, 长期从事海相碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: wuxn\_hz@petrochina.com.cn

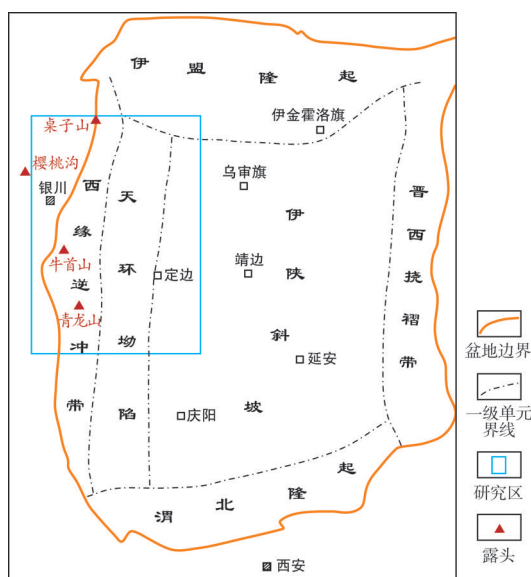


图1 鄂尔多斯盆地构造区划及研究区位置

Fig. 1 Tectonic division and the location of study area in Ordos Basin

承了桌子山早期的沉积格局,仍属于开阔海缓坡沉积环境,在内缓坡和中缓坡发育颗粒滩沉积。至克里摩里期,板块构造运动活跃,盆地西缘开始发育拉张裂谷和同沉积正断层,沉积环境由桌子山晚期的开阔海缓坡演化为盆地—台地边缘—开阔台地。到中奥陶世,盆地中东部发生构造抬升而形成古陆,盆地西部沉积水体进一步加深,沉积环境转变为盆地—斜坡,仅在下部见到一些薄层泥晶灰岩沉积,盆地相区受陆源碎屑供给影响则主要发育一套砂泥岩互层的类复理石浊积岩,厚度巨大,属超补偿沉积。

盆地西缘奥陶系白云岩自下而上主要发育在下奥陶统桌子山组和克里摩里组(图2)。综合钻录井资料和测井解释可以看出,桌子山组纵向上常大段或整段白云石化,白云岩累计厚度约为0~150 m。平面上,桌子山组白云岩的分布受沉积相带控制:桌子山期内缓坡和中缓坡相带沉积时水体能量总

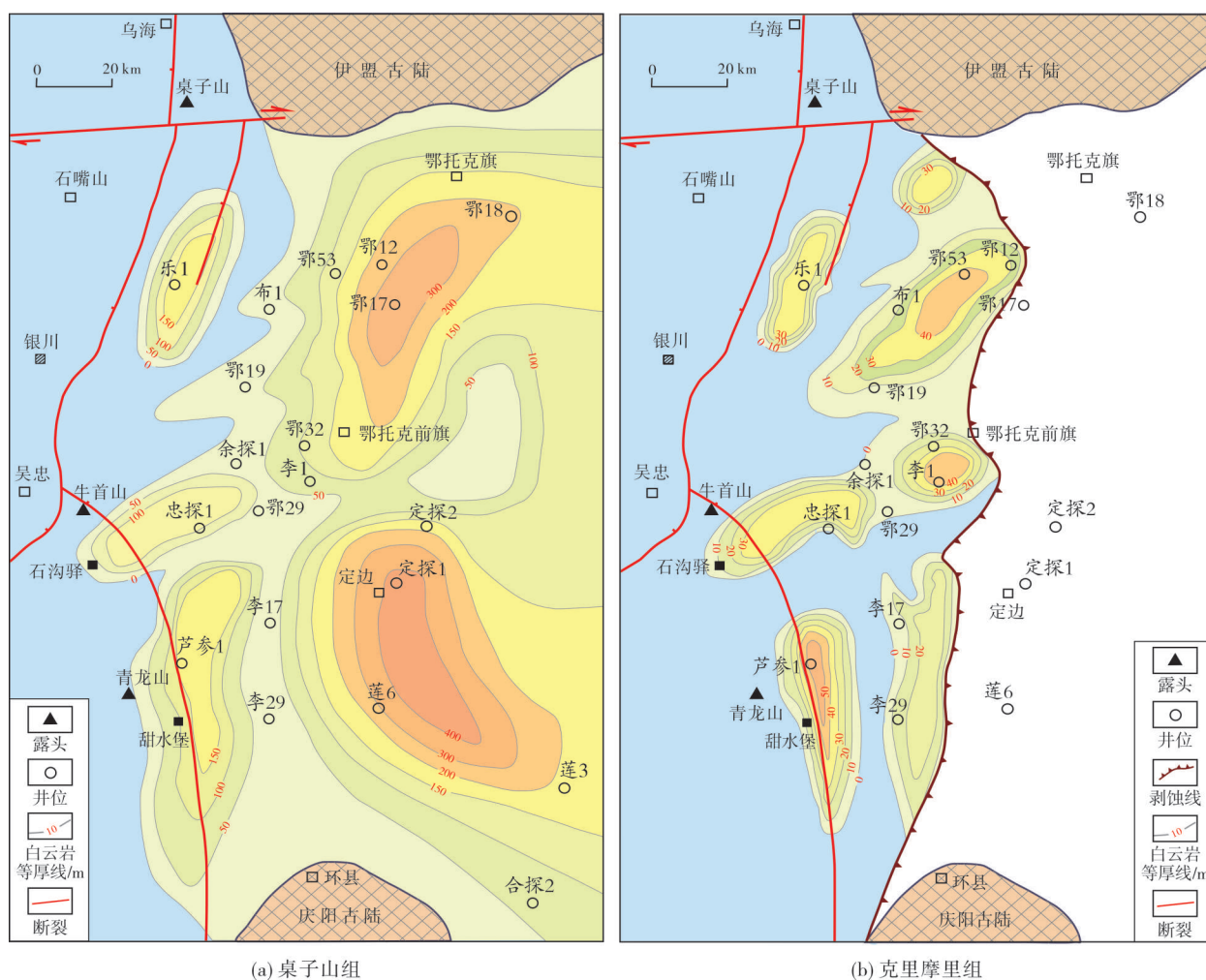


图2 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩平面分布图

Fig. 2 Dolomite thickness contour of Ordovician in the western margin of Ordos Basin



体较高,发育高能颗粒滩,岩性以砂屑灰岩、藻砂屑灰岩、含生物碎屑砂屑灰岩为主,由于沉积时粒间原生孔隙较为发育,可作为含  $Mg^{2+}$  流体运移的重要通道,因而易于白云石化且白云石化程度高,形成细晶—中晶结构的晶粒白云岩及残余颗粒白云岩。桌子山组白云岩厚值区主要分布于中央古隆起鄂托克旗至定边一带(图2a),向两侧厚度逐渐减薄,在乐1井区、忠探1井区及芦参1井区局部加厚;平面上呈连片大规模分布,面积达  $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

克里摩里组白云岩纵向上主要以石灰岩中的夹层发育,单层厚度一般约为0~40 m,累计厚度最大可达75 m,盆地西缘南部的白云岩主要位于克里摩里组下部,而盆地西缘北部的白云岩主要位于克里摩里组上部。钻录井及测井资料解释表明,平面上克里摩里组白云岩主要发育在靠近克里摩里组剥蚀线一侧(图2b),分布受沉积相带控制:克里摩里期发育弱镶边台地,台地边缘沉积颗粒滩相砂屑灰岩、生物碎屑灰岩及礁灰岩等,多表现为粗结构,原生粒间孔发育,有利于含  $Mg^{2+}$  流体的运移,白云石化更彻底,白云岩厚度也较大。克里摩里组白云岩的平面连续性较差,主要分布于乐1井区、鄂19井至鄂12井一带、李1井至忠探1井一带、芦参1井区以及李

17井—李29井一带(图2b),面积约为  $8\,000 \text{ km}^2$ 。

## 2 白云岩岩石学特征

桌子山组白云岩主要发育于内缓坡相带,岩性为颗粒白云岩和晶粒白云岩。其中颗粒白云岩是最主要的储层岩性,以砂屑或藻砂屑白云岩为主,部分可以见到生物碎屑结构,颗粒残余结构较为清晰,当重结晶作用强烈时不易保留下来,粒间溶孔发育,多未充填。晶粒白云岩包括泥粉晶白云岩、粗粉晶白云岩、粉细晶白云岩、细晶白云岩、中细晶白云岩和中粗晶白云岩等(图3)。粉晶白云岩类宏观上常呈块状结构,镜下白云石以他形粒状致密镶嵌为主,白云石加大胶结一般不发育,常见原岩残余结构及组分,如残余颗粒结构、未白云石化泥线及生物碎屑(主要为棘屑)。细晶白云岩类(粉细晶白云岩、细晶白云岩、中细晶白云岩)宏观上也呈块状结构,镜下白云石可呈多种结构,如半自形—自形晶粒结构、他形—半自形粒状结构及他形粒状结构,前二者往往具雾心亮边结构,并不同程度发育晶间孔、晶间溶孔,白云石呈他形粒状结构者一般粒间致密镶嵌,晶间孔不发育。

从薄片观察来看,克里摩里组岩性主要以粉

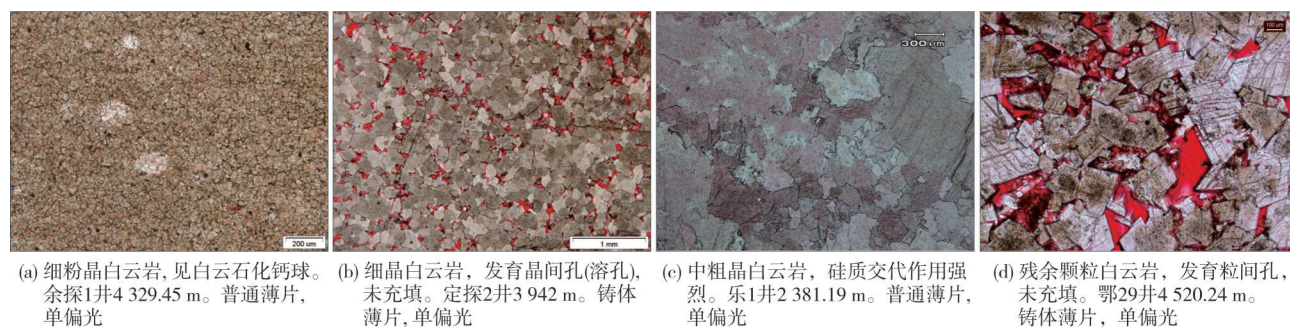


图3 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系桌子山组白云岩岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of dolomites of the Ordovician Zhuozishan Formation in the western margin of Ordos Basin

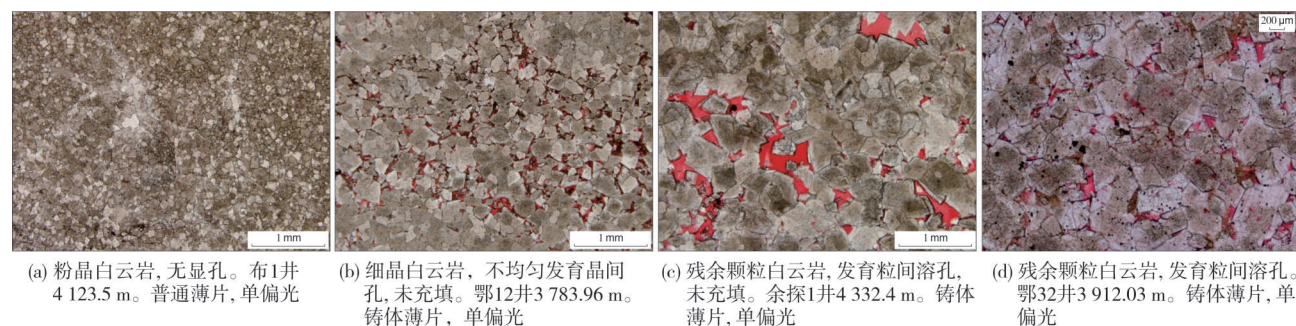


图4 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩岩石学特征

Fig. 4 Petrological characteristics of dolomites of the Ordovician Kelimoli Formation in the western margin of Ordos Basin

晶白云岩、粉细晶白云岩、残余砂屑白云岩为主(图4),局部见中粗晶白云岩。宏观上,克里摩里组白云岩常呈中薄层状,镜下粉晶白云石呈半自形-他形粒状镶嵌结构,细晶白云石及残余砂屑白云岩白云石呈半自形-自形晶粒结构,重结晶作用强,白云石化程度较高,粒间溶孔发育,未充填,是最重要的储集空间。

### 3 白云岩地球化学特征

#### 3.1 碳氧同位素特征

白云石的碳氧稳定同位素组成与引起白云石化的流体介质有关,并主要受到介质盐度和温度的影响。海水蒸发作用使得海水的碳氧同位素值向偏正方向迁移,所以准同生白云岩中的碳氧同位素值比海水和海水胶结物中更偏正。相反,埋藏条件下的地下卤水是海水、淡水以及其他来源的水混合而成的地层水,再加上高温使氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值向偏负的方向迁移,所以埋藏成因白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比海水和海水胶结物偏负,比准同生白云岩更要偏负。埋藏条件下,碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值由于淡水混入和有机碳的影响变化比较大,但总的来说还是比海水胶结物和准同生白云岩要偏负。

对研究区内13个样品碳氧稳定同位素的分析表明:研究区奥陶系白云岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值一般为 $-7\text{‰}$ ~ $-4\text{‰}$ (图5),与同时期的海水相当<sup>[8-9]</sup>,且随温度的升高而亏损; $\delta^{13}\text{C}$ 值一般为 $-1\text{‰}$ ~ $1\text{‰}$ (图5),而且泥粉晶白云岩的值偏正,细晶-颗粒白云岩的值偏负。这表明泥粉晶白云岩主要形成于准同生成岩环境,而细晶-颗粒白云岩主要形成于浅埋藏成岩环境。

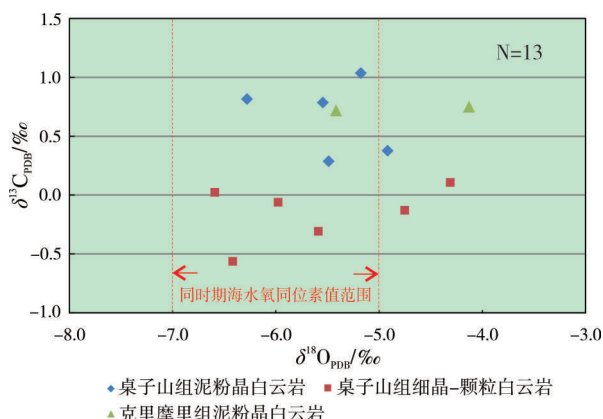


图5 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩碳氧稳定同位素图版  
Fig. 5 Carbon and oxygen stable isotope chart of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

#### 3.2 锶同位素特征

白云岩的锶同位素比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )一方面受白云岩形成时的孔隙水或原岩锶同位素特征控制,另一方面在白云岩的埋藏压实过程中受成岩作用的影响会逐渐变大。表生期大气淡水带入的锶元素或埋藏期深部热液带入的锶元素都对白云岩的锶同位素组成具有重要影响。地质历史中,海水的锶同位素组成也是不断变化的,晚寒武世—早奥陶世古海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为0.708 7~0.709 2,为地质历史中 $^{87}\text{Sr}$ 最富集的时期。

对研究区内9个样品锶同位素组成的分析(图6)表明:研究区奥陶系泥粉晶白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.708 7~0.709 3,反映该类白云岩主要形成于准同生成岩环境;而细晶-颗粒白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值普遍大于0.709 3,反映该类白云岩的形成受到大气淡水输入的影响。从盆地构造演化及奥陶系成岩演化过程来看,晚奥陶世鄂尔多斯盆地整体抬升遭受了长达1.3亿年的风化剥蚀作用,而该地区热液活动并不明显,因此判断盆地西缘奥陶系细晶-颗粒白云岩 $^{87}\text{Sr}$ 的富集是受到了表生期大气淡水锶的混入,说明实际的白云石化作用发生在浅埋藏成岩环境。

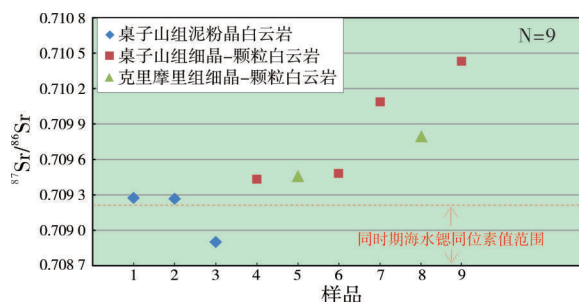


图6 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩锶同位素图版  
Fig. 6 Strontium isotope chart of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

#### 3.3 微量元素特征

元素地球化学方法在白云岩成因方面的应用还不成熟,目前一般依据Fe、Mn、Sr、Na、Ba等元素含量对白云岩进行研究。由于在成岩过程中具有稳定性,微量元素可以作为指示成岩环境与成岩过程的很好的示踪剂。

根据 $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TFe}_2\text{O}_3$ - $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$ 含量变化折线图(图7)来看,研究区奥陶系细晶-颗粒白云岩中 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量均低,表明该类白云岩形成于浅埋藏条件下,白云石化作用所需的富含 $\text{Mg}^{2+}$ 的



流体主要来源于渗透-回流海水;泥粉晶白云岩中 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 含量低,而 $TFe_2O_3$ 含量较高,表明该类白云岩形成时的环境更接近于准同生期,白云石化作用所需的富含 $Mg^{2+}$ 的流体主要来源于准同生期海水或混合水。

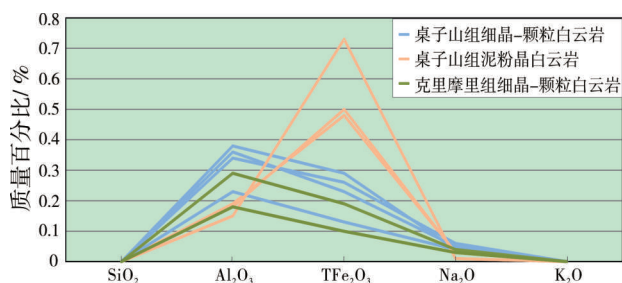


图7 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩微量元素化合物质量百分比图

Fig. 7 Mass percentage profile of trace element compounds of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

### 3.4 稀土元素特征

碳酸盐沉积作用和沉积后的成岩变化中,介质流体性质会发生巨大的变化,这对碳酸盐沉积物改造、胶结物和交代物的形成以及孔隙的形成和演化有着至关重要的作用。孔隙流体介质性质对稀土元素(REE)也有重要的影响。对碳酸盐岩形成和形成后变化有影响的流体是海水、大气淡水、地下水以及地下的热流体。研究这些流体的稀土元素含量及其REE模式,对碳酸盐岩成因的讨论和储层孔隙演化的探索具有重要意义。在稀土元素中能够反映成岩环境的主要有Eu(铕)和Ce(铈):Eu的富集与亏损主要取决于含钙造岩生物的聚集和迁移;Ce含量反映了表生作用的氧化条件——在氧化条件下亏损、在缺氧条件下富集,因此埋藏白云岩及热液白云岩中Ce往往比较富集。

对10个样品的稀土元素进行分析,发现鄂尔多斯盆地奥陶系桌子山组和克里摩里组白云岩的稀土元素配分模式总体呈现为轻稀土元素和重稀土元素富集较为均一的特征,曲线均呈平缓模式(图8)。具体来看,桌子山组和克里摩里组泥粉晶白云岩的Ce、Eu元素配分比值均表现为略微负异常,表明白云石化流体主要来源于海水,反映蒸发氧化环境;细晶-颗粒白云岩Ce元素配分比值表现为略微负异常,而Eu元素配分比值表现为略微正异常,反映浅埋藏环境。

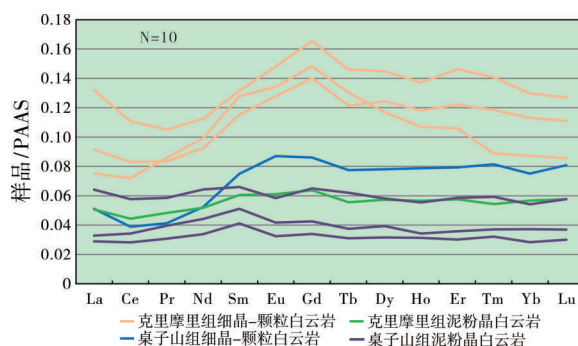


图8 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩稀土元素标准化配分曲线图

Fig. 8 Normalized REE distribution curves of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

### 3.5 阴极发光特征

同种矿物的阴极发光强度和颜色存在较大差异:不发光的定性解释为氧化环境的产物,常见于大气淡水成岩环境;明亮发光则与晶体中相对高的Mn/Fe值有关,通常在埋藏成岩作用的早期至中期阶段的还原条件下形成;昏暗发光见于具有较低Mn/Fe值的碳酸盐晶体中,通常为埋藏成岩作用中期至晚期阶段形成的胶结物或交代物。海水成岩环境可能是氧化环境,也可能是还原环境。

根据研究区12个白云岩样品的阴极发光特征来看,桌子山组和克里摩里组白云岩样品阴极发光总体显示为暗棕色、暗褐色及桔黄色、暗红色、红色等(图9):泥粉晶白云岩主要显示为暗棕色或暗褐色,反映白云石化流体多为来源于准同生期的海水,即形成于准同生期;而细晶-颗粒白云岩主要显示为桔黄色、暗红色或红色,表明白云石化作用发生在浅埋藏环境,与渗透-回流作用有关。

### 3.6 包裹体均一温度特征

白云石包裹体是在白云石结晶生长时被保存下来的,它完整记录了白云石形成的条件和历史,反映了白云石化流体的性质(温度、盐度等)。由于泥粉晶白云岩中极难找到包裹体,故仅对20块细晶-颗粒白云岩样品作了包裹体测试。实验表明:包裹体均一温度为108.6~138.3℃(平均为122.9℃),形成温度较高,反映白云石化是在浅埋藏成岩环境下发生的;而(铁)白云石胶结物中包裹体均一温度为109.7~197.7℃(平均为154.6℃),形成温度高达180℃左右的白云石胶结物应是晚期深埋藏阶段的产物,不排除局部受深部热液流体的影响和改造的可能。

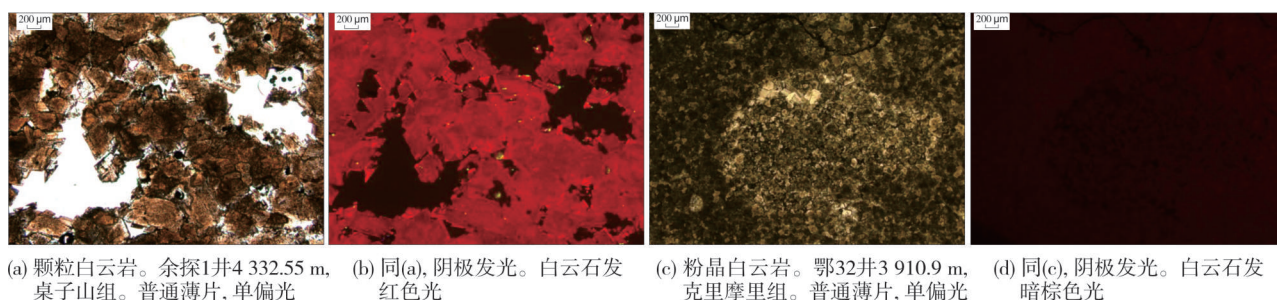


图9 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩阴极发光特征

Fig. 9 Cathodoluminescence characteristics of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

## 4 白云石化成因机制

20世纪50年代以来,学者们相继提出了一系列白云石化作用的模式,如萨布哈白云石化模式、渗透回流白云石化模式、混合水白云石化模式、埋藏白云石化模式、热液白云石化模式等<sup>[10-14]</sup>。鄂尔多斯盆地西缘在奥陶纪相对海平面总体处于持续上升阶段,海水由西向东补给至盆地中东部,海水的循环相对通畅,桌子山期中缓坡和内缓坡颗粒滩以及克里摩里期台地边缘带会对海水的补给造成一定的障壁作用。前人的研究表明鄂尔多斯盆地早奥陶世总体为干旱炎热气候<sup>[15-16]</sup>,结合前述桌子山组和克里摩里组白云岩地球化学特征,综合分析认为盆地西缘奥陶系白云岩有准同生期蒸发泵白云石化和浅埋藏期回流-渗透白云石化两种成因机制。

如图10a所示,在干旱炎热的气候条件下,由西部流入台内潟湖或洼地的海水在经过障壁向台地内流动过程中逐渐被蒸发,从而建立起水平的高浓度梯度。在台内潟湖或洼地至中央古隆起的过渡带,在蒸发泵吸的作用下台内潟湖或洼地的高浓度卤水从潟湖一侧被抽汲进入过渡带的沉积物内,使过渡带孔隙水的Mg/Ca值提高,从而引起白云石化。

当台内潟湖或洼地内卤水的密度达到一定程度时,会导致重卤水向障壁方向回流,建立起向海倾斜的密度跃层,将流入的海水与流向海洋的浓卤水分离开来,正是由于海水由西向东补给以及重卤水由东向西回流-渗透,使得Mg<sup>2+</sup>能被有效搬运以确保毗邻障壁的石灰岩发生大范围的白云石化(图10b)。由于内缓坡、中缓坡以及台地边缘颗粒滩具有较高的原生孔隙度,使得这些部位最先被白云石化,而且白云岩的厚度也大,这是造成如图2所示平面上桌子山组白云岩厚薄不一、克里摩里组白云岩分布不连续的主要原因。此外,同生期的颗粒滩原生孔隙在白云石化之后由于白云岩的抗压

实能力强而得以保存下来,并可为表生期以及深埋藏期溶蚀作用提供重要的流体通道,从而造成孔隙进一步溶蚀扩大,形成现今盆地西缘奥陶系白云岩储层中最主要的储集空间。

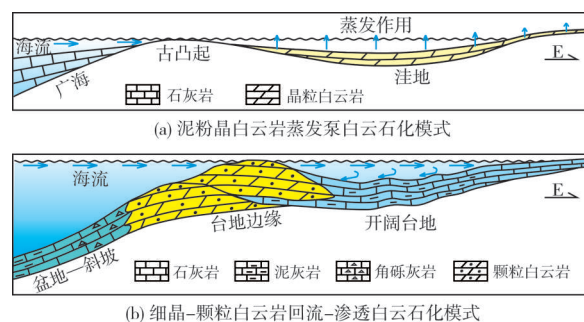


图10 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩成因模式

Fig. 10 Genetic models of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

## 5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩主要为颗粒白云岩和晶粒白云岩,其中颗粒白云岩常见雾心亮边和残余颗粒结构,晶粒白云岩包括泥粉晶白云岩、粗粉晶白云岩、粉细晶白云岩、细晶白云岩、中细晶白云岩和中粗晶白云岩等。

(2) 盆地西缘桌子山组白云岩分布广泛、厚度不一,以鄂托克旗至定边一带厚度最大;克里摩里组白云岩在盆地西缘分布较局限,厚度较薄。

(3) 泥粉晶白云岩碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值多偏正,微量元素具有低Na、K及较高Fe的特征,锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与同时期海水相似,稀土元素Eu亏损,阴极发光显示为暗棕色或暗褐色;细晶-颗粒白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值多偏负,微量元素具有低Na、K、Fe的特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显大于同时期海水,阴极发光显示为桔黄色、暗红色及红色,包裹体均一温度普遍偏高。

(4) 根据区域构造-沉积演化、岩石学特征、气候环境以及地球化学特征综合分析,盆地西缘奥陶

系泥粉晶白云岩由准同生期蒸发泵白云石化作用形成,细晶-颗粒白云岩由浅埋藏期回流-渗透白云石化作用形成。

#### 参考文献

- [1] 王大兴,吴兴宁,孙六一,等.鄂尔多斯盆地天环北段奥陶系白云岩储层特征及分布规律[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(1): 1-9.
- [2] 吴兴宁,孙六一,于洲,等.鄂尔多斯盆地西部奥陶纪岩相古地理特征[J].岩性油气藏,2015,27(6): 87-96.
- [3] 付金华,郑聪斌.鄂尔多斯盆地奥陶纪华北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J].古地理学报,2001,3(4): 25-34.
- [4] 韩品龙,张月巧,冯乔,等.鄂尔多斯盆地祁连海域奥陶纪岩相古地理特征及演化[J].古地理学报,2009,23(5): 822-827.
- [5] 冯增昭,鲍志东,康祺发,等.鄂尔多斯早古生代古构造[J].古地理学报,1999,1(2): 84-91.
- [6] 王少昌,付锁堂,李熙哲,等.鄂尔多斯盆地西缘古生代槽台过渡带裂谷系弧形构造带的形成与发展及对油气聚集富集规律的影响[J].天然气地球科学,2005,16(4): 421-427.
- [7] 徐黎明,周立发,张义楷,等.鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景[J].大地构造与成矿学,2006,30(4): 455-462.
- [8] VEIZER J, HOEFS J. The nature of  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  secular trends in sedimentary carbonate rocks [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1976, 40(11): 1387-1395.
- [9] WADLEIGH M A, VEIZER J.  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  in lower Paleozoic articulate brachiopods: implication for the isotopic composition of seawater [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1992, 56(1): 431-443.
- [10] 孙健,董兆雄,郑琴.白云岩成因的研究现状及相关发展趋势[J].海相油气地质,2005,10(3): 25-30.
- [11] 李振宏,杨永恒.白云岩成因研究现状及进展[J].油气地质与采收率,2005,12(2): 5-8.
- [12] 张学丰,胡文瑄,张军涛.白云岩成因相关问题及主要形成模式[J].地质科技情报,2006,25(5): 32-40.
- [13] 毕胜宇,郑聪斌,李振宏,等.鄂尔多斯盆地天环北段白云岩成因分析[J].东华理工学院学报,2005,28(1): 1-4.
- [14] 李波,颜佳新,刘喜停,等.白云岩有机成因模式:机制、进展与意义[J].古地理学报,2010,12(6): 699-710.
- [15] 洪永康.古气候与古海洋对碳酸盐岩储集层发育的控制[J].化工管理,2017(7): 94.
- [16] 汪啸风,陈孝红.中国奥陶纪古生物地理与古气候[C]//地层古生物论文集.1999,27: 1-27.

编辑:董庸

## Geochemical characteristics and genetic analysis of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin

WU Xingning, Wu Dongxu, DING Zhenchun, YU Zhou, WANG Shaoyi, LI Weiling

**Abstract:** The genetic model and the controlling factor on the development of Ordovician dolomite reservoir are not clear, which seriously restricted the effective prediction of high quality dolomite reservoir, and the further exploration and discovery of the natural gas in the western margin of Ordos Basin. Controlled by the evolution of Helan depression in Early Ordovician, the western margin of Ordos Basin is located in a gentle slope or the weakly-rimmed platform of open sea with a certain barring of the inner gentle slope, middle gentle slope and the platform edge belt, where carbonate rocks extensively developed. The observation of rock and thin section shows that the Ordovician dolomites in the western margin of the basin are mainly composed of granular dolomite with clear residual particle structure, and crystalline dolomite including micritic-powder crystalline dolomite, coarse powder crystalline dolomite, powder-fine crystalline dolomite, fine crystalline dolomite, fine-medium crystalline dolomite, medium-coarse crystalline dolomite. The geochemical analysis of dolomite shows that the oxygen isotope  $\delta^{18}\text{O}$  values of the Ordovician dolomite in the western margin of the basin are generally negative, the carbon isotopes  $\delta^{13}\text{C}$  values are more positive, the trace elements are characterized with low Na, K and higher Fe content, and the strontium isotope  $^{87}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$  values are obviously larger than those of the seawater in the same period, and the REE distribution curve is right deviation model of negative Eu anomaly. The cathodoluminescence shows orange, dark red and red, and the homogenization temperature of inclusions is generally high. According to comprehensive analysis of petrological characteristics, regional tectonic and sedimentary evolution, climatic environment and geochemical characteristics, the Ordovician micritic-powder crystalline dolomite in the western margin of the basin was formed by evaporation pump dolomitization in the paracontemporaneous period, and the fine crystalline-granular dolomite was formed by reflux infiltration dolomitization in shallow burial period. The inner gentle slope, middle gentle slope and the granular shoals on the edge of the platform have high primary porosity, which are more easily dolomitization, and the distribution of the Ordovician dolomite is discontinuous and uneven. After dolomitization, the primary pore of granular shoal in contemporaneous period was preserved because of the strong anti-compacting ability of dolomite. Later, further dissolution expanded to form the most important reservoir space in the Ordovician dolomite reservoir.

**Key words:** dolomite; geochemical characteristics; origin; Zhuozishan Formation; Kelimoli Formation; Ordovician; Ordos Basin

**WU Xingning**, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in sedimentary and reservoir geology of carbonate rocks. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China