

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.954



鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马家沟组马五₅亚段白云岩地球化学特征及其成因

于春勇, 崔军平*

西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部奥陶系马家沟组马五₅亚段优质白云岩储层发育, 多口井在该层系钻获高产工业气流, 展现出巨大的天然气勘探潜力, 而关于该层系白云岩储层的成因机理至今未达成共识. 为此, 在岩石学特征分析基础上, 通过对白云岩碳、氧、锶同位素及微量元素等测试资料的系统分析, 深入探讨了鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段白云岩的成因机理. 结果表明: 研究区马五₅亚段主要发育泥、粉细晶白云岩和豹斑灰云岩 3 种类型, 前者主要发育于马五₅亚段底部, 后两者主要发育于马五微晶白云岩₅亚段中上部, 是主要的天然气储集体; 粉细晶白云岩和豹斑灰云岩白云石有序度均较低, 平均值分别为 0.86、0.68, $\delta^{13}\text{C}$ 值多数与同期海水一致, $\delta^{18}\text{O}$ 值均显著偏负; 多数粉细晶白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较同期海水显著偏正, 豹斑灰云岩与同期海水一致; 总体具有高 Fe、Mn、Na、K 和低 Sr 含量特征, 豹斑灰云岩 Fe、Mn、Na 含量介于泥晶灰岩与粉细晶白云岩之间; 稀土元素含量总体较低, 且稀土元素配分模式相似, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 具明显 Eu 负异常和弱 Ce 正异常. 综上认为研究区白云石化流体主要为海源性流体, 早期可能有大气淡水的混入, 两类优质白云岩均应形成于局限台地潮间-潮下带环境中的浅埋藏期回流渗透作用阶段. 基于上述岩石学和地球化学特征, 建立了研究区马五₅亚段纵向的沉积与成岩序列模式, 为研究区优质白云岩储层的预测提供了理论依据.

关键词: 白云岩成因; 同位素; 微量元素; 马五₅亚段; 伊陕斜坡; 鄂尔多斯盆地; 地球化学.

中图分类号: P54; P58; P59

文章编号: 1000-2383(2019)08-2761-14

收稿日期: 2018-12-11

Geochemical Characteristics and Genesis of Dolomite in Majiagou Ma₅⁵ Submember of the Northeast Yishan Slope, Ordos Basin.

Yu Chunyong, Cui Junping*

State Key Laboratory for Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The high-quality dolomite reservoirs of the Ma₅⁵ formation in the Ordovician Majiagou formation in the northern part of the Ordos Basin Yishan slope are developed. Many wells drill high-yield industrial gas streams in this layer, demonstrating huge potential for natural gas exploration. The genetic mechanism of dolomite reservoirs has not yet reached a consensus. Based on the petrological characteristics, the carbon, oxygen isotopic compositions, strontium isotopes and trace elements were discussed deeply to study the origin of dolomites in Ma₅⁵ formation of Northern Yishan slope Ordos Basin. There are three types of mud microcrystalline dolomite, ine-grained dolomite and leopard spots limy dolomite in the Ma₅⁵ submember of the study area. The former is mainly developed at the bottom of the Ma₅⁵ submember, the latter two are mainly developed in the upper middle part of

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.41630312); 国家自然科学基金面上项目 (No.41772121); “十三五”国家重大专项 (No.2017ZX05005002-008); 国家重点研发计划课题 (No.2017YFC0603106).

作者简介: 于春勇 (1989-), 男, 博士, 从事盆地热演化及碳酸盐岩沉积、储层等方面研究工作. ORCID: 0000-0002-6975-8587. E-mail: 444104901@qq.com

*通讯作者: 崔军平, E-mail: cuijp@nwu.edu.cn

引用格式: 于春勇, 崔军平*, 2019. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马家沟组马五₅亚段白云岩地球化学特征及其成因. 地球科学, 44(8):2761-2774.

the Ma₅⁵ submember and are the main natural gas reservoirs; The fineness of fine-grained dolomite and leopard spots limy dolomite is low, with average values of 0.86 and 0.68, respectively. The $\delta^{13}\text{C}$ value is mostly consistent with seawater in the same period, and the $\delta^{18}\text{O}$ value is significantly negative; most fine-grained dolomite $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value is significantly more positive than the seawater value in the same period. The leopard spots limy dolomite is consistent with the seawater in the same period; the dolomites are characterized by high Fe, Mn, Na, K content, and low Sr content, and the leopard spots limy dolomite contains Fe, Mn, and Na contents, which are between mud microcrystalline dolomite and fine-crystalline dolomite; the dolomites have very low REE content and similar REE distribution patterns, which are generally characterized by the enrichment of light REE, losses of heavy REE, obviously negative anomaly of Eu and slightly positive anomaly of Ce. In summary, the dolomitization fluids in the study area are mainly sea-sourced fluids. In the early stage, there may be mixed air freshwater. Both types of high-quality dolomite are formed in the shallow burial stage of the tidal period in the intertidal-tidal zone of the restricted platform. Based on the above petrological and geochemical characteristics, the longitudinal sedimentary and diagenetic sequence models of the Ma₅⁵ sub-section of the study area are established, which provides a theoretical basis for the prediction of high-quality dolomitereservoirs in the study area.

Key words: dolomite genesis; isotope; trace elements; Ma₅⁵; Yishan slope; Ordos Basin; geochemistry.

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五₅亚段优质白云岩储集体发现以来,天然气资源勘探成果显著,奥陶系马家沟组天然气勘探开发工作逐渐进入一个新的阶段和领域.然而,复杂多样的白云岩成因机制致使对有效白云岩储层的预测十分困难,阻碍了继续寻找、扩大天然气资源量的进程.近年来,虽然学者们对鄂尔多斯盆地马家沟组马五₅亚段粉晶、细晶、中晶等不同类型白云岩的成因进行了一定程度的研究,取得了一定的认识,但尚存在以下的不足:(1)对于成岩期结晶程度较高的粉晶、细晶、中晶等类型白云岩成因机制众说纷纭,尚未统一.如混合水白云石化成因机制(陈志远等,1998;赵俊兴等,2005);回流渗透成因机制(宁博等,2015);回流渗透及埋藏双重作用成因机制(杨西燕等,2015;蒋传杰等,2017;于洲等,2017);埋藏成因机制(李凤杰等,2016;张庄等,2016);(2)前人研究主要集中于苏里格以及靖边等中东部地区,对鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马家沟组马五₅亚段白云岩成因机制研究甚少(姚泾利等,2009;苏中堂等,2011;赵卫卫和王宝清,2011;杨华等,2012;张庄等,2016),即使涉及该地区的研究,也多是在盆地尺度上,根据其沉积背景加以推断,缺乏针对性的系统研究,从而制约了鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马家沟组马五₅亚段优质白云岩储集层中天然气的勘探工作;(3)运用球化学手段来判断白云岩成因,往往存在多解性.因此,需结合研究区地质背景,综合运用多种地球化学或其它地质手段对白云岩成因进行深入探讨,以期相互印证,从而对白云岩成因做出合理的解释(Vahrenkamp and Swart, 1990;苏中堂等,2011;杨华等,2012;贺训云等,2014;任影等,2016).

鉴于上述原因,本文结合前人研究成果,在岩石学特征基础上,通过对碳、氧、锶同位素及微量元素等测试资料的系统分析,进一步深入探讨了伊陕斜坡东北部马五₅亚段白云岩成因机理,建立研究区纵向上的沉积与成岩序列模式,以期为盆地东北部马五₅亚段优质白云岩储层中的天然气勘探工作提供科学依据.

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是以太古界和元古界为基底发育的多旋回克拉通型盆地,下古生界奥陶系马家沟组碳酸盐岩具有巨大的油气勘探潜力(杨俊杰和张伯荣,1988).盆地内部地质构造平缓,断层与褶皱不发育,地层整体表现为东北向西南部倾斜的区域性斜坡特征(刘德良等,2006;姚泾利等,2009).研究区位于伊陕斜坡东北缘,东北方向分别被伊盟隆起、晋西挠褶带所环绕,面积约2 600 km²,为一以乌拉庙以东为构造高点,呈NE-SW向分布的低缓隆起(图1)(周文等,2006;白晓亮等,2014).中奥陶世马家沟组沉积时期,华北地台共经历了3次海退和海进沉积旋回,主要发育碳酸盐岩台地相沉积,自上而下可划分为马一~马六段,其中马五段沉积期,古气候周期性转变为干热,海平面动荡升降,呈现出快速海侵、缓慢海退的特征,台地坡度倾缓,沉积了一套以白云岩为主,夹灰岩及蒸发岩的地层(冯增昭等,1999;侯方浩等,2003;白晓亮等,2014)

马五段中部的马五₅亚段形成于一次较大规模的快速海侵过程.笔者通过对盆地东部兴县剖面地区的野外剖面勘察、盆地东北部多口井的岩心观察

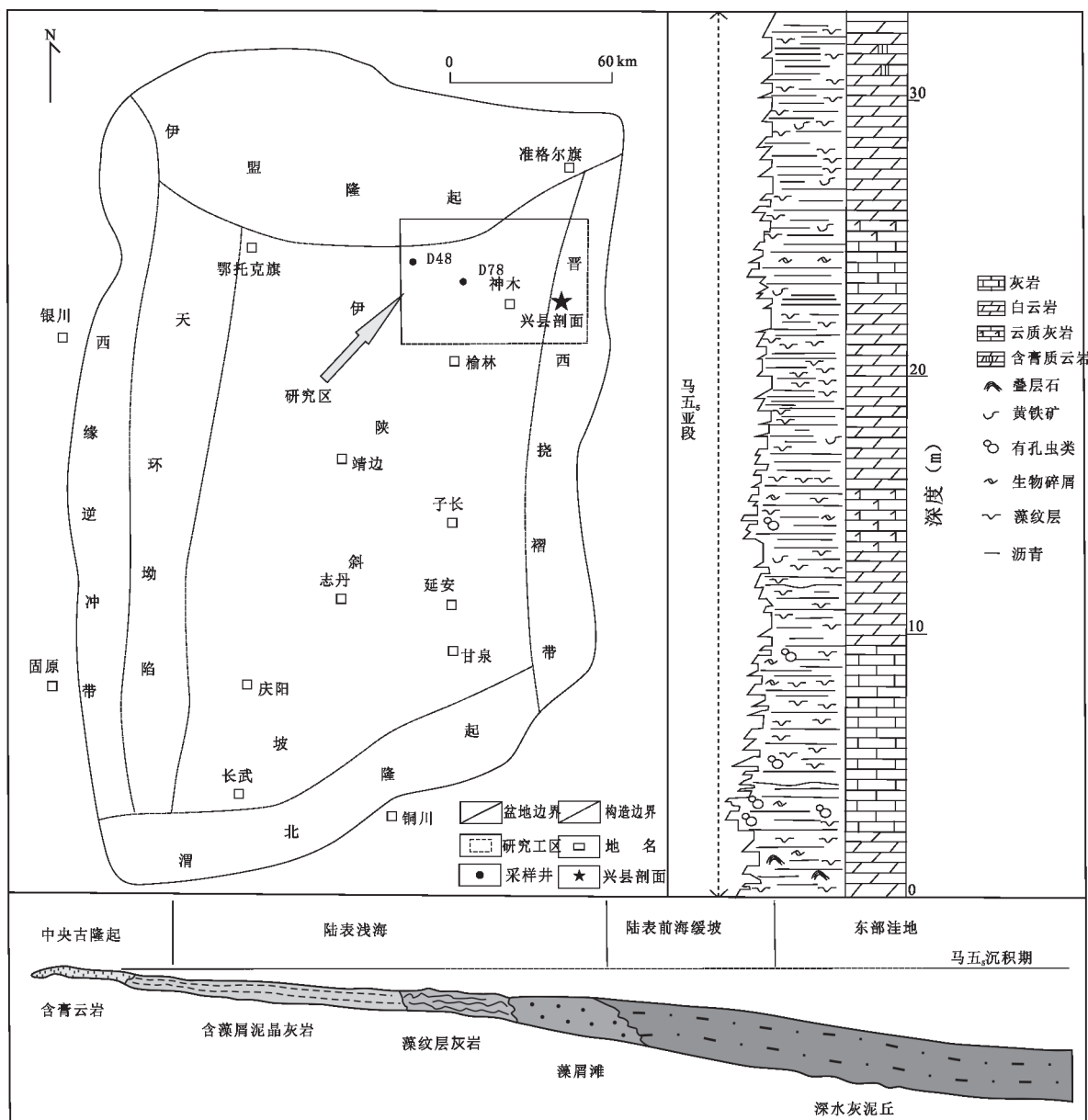


图 1 区域地质概况及研究区位置

Fig.1 Regional geology and research area

以及多口井测井岩性解释成果,发现马五₅亚段可划分为3个自下而上形成于海平面由深变浅的,岩性以灰岩为主,向上过渡到以白云岩为主的沉积旋回.潮下一潮间带的泥晶灰岩及藻灰岩主要发育于各沉积旋回的下部,潮下一潮间带发育生物扰动构造的含云灰岩或云灰岩主要发育于各沉积旋回的中部;本文重点讨论潮间带的具残余颗粒结构且发育大量晶间孔隙或晶间扩大孔的粉细晶白云岩及豹斑灰云岩,主要发育于各沉积旋回的中上部(图1).

2 样品与实验方法

本次研究的25块马五₅亚段碳酸盐岩样品均来自鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部钻井岩心和兴县剖面关家崖露头剖面(图1).样品岩性主要为泥晶灰岩(6块)、粉细晶白云岩(11块)、豹斑灰云岩(5块).为保证测试结果的可靠性和代表性,对所取样品逐一进行手本标和镜下观察后,采用微型牙钻方法在与薄片对应的新鲜岩石切面上钻取50 mg样品.测试分析内容主要包括薄片显微观察、碳、氧、锶同位素及微量元素等4方面.

在薄片观察前对薄片进行了茜素红与铁氰化钾混合溶液染色,采用高倍显微镜 DMLP-217400 进行观察鉴定,检测依据为 SY/T5368-2000,检测环境(温度、湿度)为室温;微量元素测试在上海同济大学海洋地质国家重点实验室完成,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(VGX7)离线测试系统测定.检测依据为国家标准(国标 GSS-5、GSR-6、GSD-12),检测精度优于 5%;同位素测试也在上海同济大学海洋地质国家重点实验室完成.碳、氧测试过程中首先将碳酸盐岩样品置于 25 °C、真空条件下,与纯磷酸进行恒温反应,石灰岩样品反应 24 h,白云岩样品反应 72 h,然后将分离出的 CO₂ 送入 MAT253C033 气相质谱仪进行碳氧稳定同位素测定.检测依据为 VDPB 标准,检测精度为 ±0.05%. 锶同位素测试过程中,首先将称取的样品粉末缓慢加入 5% HAC 溶解,之后采用 Dowex AG50W12 阳离子树脂分离纯化 Rb 和 Sr,为消除 Rb 干扰采用二次分离法对 Sr 进行测试.分馏校正采用国际标样 NBS987 进行标准化.

3 实验结果

3.1 岩石学特征

岩石薄片鉴定结果表明,伊陕斜坡东北部马五₅亚段主要发育白云岩、灰岩及其过渡岩石类型(灰质云岩、云质灰岩).根据岩石结构特征及其成因又可划分为泥微晶白云岩、粉细晶白云岩、豹斑灰云岩 3 种类型,其中泥微晶白云岩发育程度较低.

灰岩主要发育于马五₅亚段底部,根据其结构又可进一步划分为泥晶角砾灰岩及亮晶藻灰岩 2 种类型,前者角砾结构发育,多见板状膏模孔(图 2a),后者隐藻丰富,球粒藻大小不均一,网状孔隙发育,且多被亮晶方解石充填,岩性整体致密(图 2b).

泥微晶白云岩主要发育于马五₅亚段底部,隐晶质结构,形态较难识别,大小一般小于 40 μm,水平藻纹层、针状膏岩假晶等原生沉积构造发育(厚 2~10 mm),孔隙以膏模孔和溶蚀孔为主(图 2c),白云石有序度较低(平均值 0.58),应为局限台地近地表蒸发条件下的产物.因泥微晶白云岩厚度小、横向不连续且孔隙相对不发育,不利于天然气富集,故不作为本文讨论的重点.

粉细晶白云岩主要发育于马五₅亚段中上部,晶粒结构多呈自形一半自形(图 2e, 2f, 2g),大小一

般介于 150~300 μm 之间,常见纹层、灰岩与白云岩互层现象(图 2d),残余颗粒及“雾心亮边”结构发育(图 2d, 2g),孔隙以粒间孔为主.此外,晶间可见大量残余灰质组分,缝合线内多被黑色炭质沥青充填(图 2e, 2g),白云石有序度相对较高(平均值为 0.86),应为局限台地潮间带—潮下带回流渗透作用下的产物.

豹斑灰云岩主要发育于马五₅亚段中部,多具云斑(豹斑)构造,介形虫碎片零星发育(图 2h, 2i),孔隙以晶间孔为主.白云石有序度相对粉细晶白云岩较小(平均值为 0.68),且往往豹斑越大,白云石有序度越高,亦应为局限台地的潮间带—潮下带回流渗透作用下的产物.

3.2 地球化学特征

3.2.1 碳、氧同位素 伊陕斜坡东北部马五₅亚段泥晶灰岩 δ¹³C 值分布范围为 -1.77‰~-0.89‰,平均值为 -1.50‰, δ¹⁸O 值分布范围为 -8.86‰~-9.79‰,平均值为 -9.16‰;粉细晶白云岩 δ¹³C 和 δ¹⁸O 值较泥晶灰岩均偏负,平均值分别为 -1.73‰、-9.44‰,而豹斑灰云岩 δ¹³C 和 δ¹⁸O 值较泥晶灰岩则均向正方向迁移,平均值分别为 -0.95‰、-8.98‰(表 1).虽然两类白云岩碳、氧同位素的富集规律存在一定的差异性,但整体与鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组马五₅亚段白云岩相比(δ¹³C 值: -1.40‰~-0.14‰,平均值 -0.72‰; δ¹⁸O 值: -7.51‰~-5.98‰,平均值 -6.86‰),研究区马五₅亚段白云岩的碳、氧同位素值均明显向负方向迁移(赵俊兴等, 2005; 李凤杰等, 2016; 于洲等, 2017),表明鄂尔多斯盆地中东部与伊陕斜坡东北部马五₅亚段白云岩成因应具有一定的差异性.

3.2.2 锶同位素 马五₅亚段白云岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值分布范围为 0.708 789~0.710 067,平均值为 0.709 273(表 1),这一特征与赵卫卫等(2011)研究的苏里格地区马家沟组马五段白云岩锶同位素值分布范围十分接近(0.708 936~0.711 791,平均值 0.709 872 6).与中奥陶世海水 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值(0.708 7~0.709 2)相比,粉细晶白云岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值(平均值 0.709 383)表现为显著偏高,而豹斑灰云岩(平均值 0.708 789)则与之相近,反映粉细晶白云岩可能受更多放射性 ⁸⁷Sr 流体的影响.

3.2.3 主要微量元素 由表 2 可知伊陕斜坡东北部马五₅亚段泥晶灰岩 Fe 含量介于 161×10⁻⁶~551×

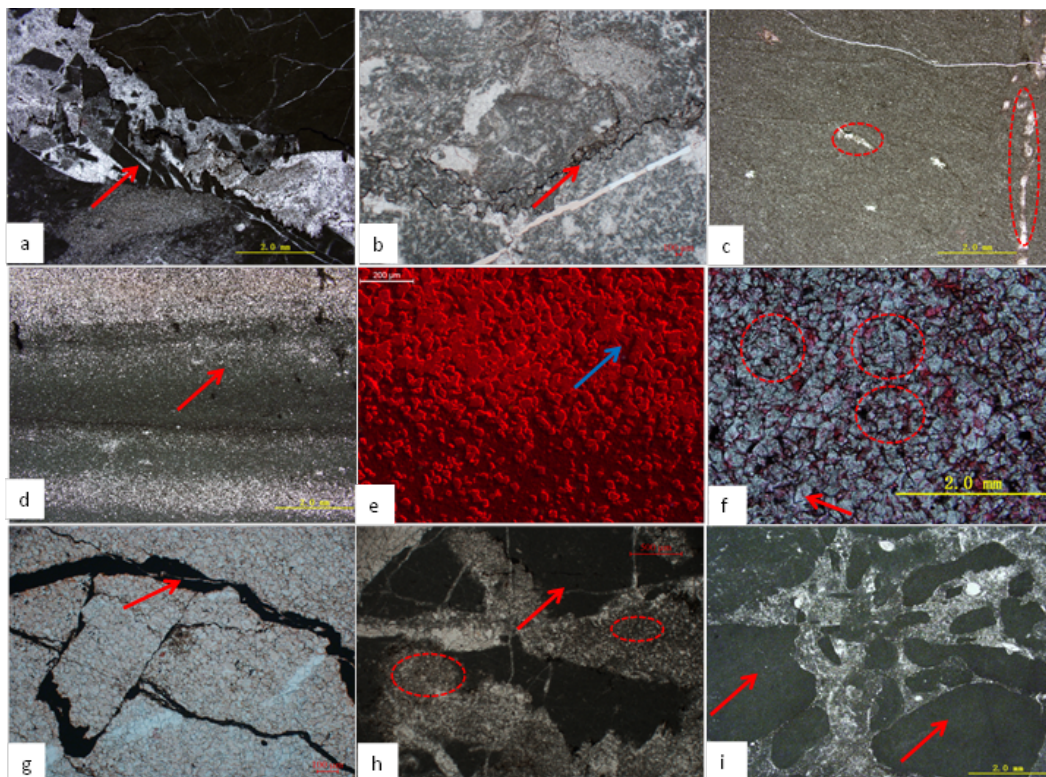


图2 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段碳酸盐岩石学特征

Fig.2 Petrological characteristics of carbonate rocks in the Ma₅ member of the northeast Yishan slope, Ordos Basin

a. 泥晶角砾灰岩,角砾结构发育(红色箭头指向);b. 亮晶球粒藻灰岩,网状孔隙内亮晶方解石胶结,隐藻丰富形成藻粘结构,局部压实或溶蚀形成砂砾状结构(红色箭头指向);c. 泥晶白云岩,发育少量石膏假晶(红色圈区);d. 粉细晶白云岩,具纹层构造,灰岩与粉细晶白云岩互层,白云岩由半自形—自形,晶间残余灰质组分(红色箭头指向);e. 粉细晶白云岩,具残余颗粒结构,晶间残余灰泥(蓝色箭头指向);f. 粉细晶白云岩,白云石呈自形—半自形,具残余砂屑结构(红色圈区),粒间孔发育;g. 粉细晶白云岩,白云石呈自形—半自形粒状,具残余砂屑结构,粒间孔发育,缝合线中充填炭质沥青(红色箭头指向);h. 豹斑灰云岩,见介形虫碎片(红色圈区),发育残余泥晶灰岩板块(红色箭头指向);i. 豹斑灰云岩,发育残余泥晶灰岩板块(红色箭头指向)。

10^{-6} 之间,平均值为 383.33×10^{-6} , Mn 含量介于 $12 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$,平均值为 25.16×10^{-6} , Sr 含量介于 $147.22 \times 10^{-6} \sim 207.86 \times 10^{-6}$,平均值为 170.05×10^{-6} , Na 含量介于 $14 \times 10^{-6} \sim 44 \times 10^{-6}$,平均值为 25.33×10^{-6} 。粉细晶白云岩和豹斑灰云岩中 Fe、Mn、Na、K 元素含量较泥微晶灰岩均相对偏高, Sr 元素含量则较低,其中粉细晶白云岩中的 Fe、Mn、Na 元素含量(平均值分别为 1164.27×10^{-6} 、 65.91×10^{-6} 、 83.18×10^{-6})又较豹斑灰云岩(平均值分别为 914.25×10^{-6} 、 45.1×10^{-6} 、 38.12×10^{-6})高, Sr、K 元素含量(平均值分别为 84.41×10^{-6} 、 277.45×10^{-6})相对较低,说明两类白云岩可能具有不同的沉积环境或成岩演化史。

3.2.4 稀土元素 研究区碳酸盐岩总稀土元素含量较低,分布范围为 $2.01 \times 10^{-6} \sim 20.68 \times 10^{-6}$,平均值为 7.88×10^{-6} (表3),同典型碳酸盐岩稀土元素含量特征相同(苏中堂等,2011)。然而,不同类型碳酸盐

岩稀土元素含量又存在显著的差异,其中泥晶灰岩的 ΣREE 最高,分布范围为 $5.96 \times 10^{-6} \sim 20.68 \times 10^{-6}$,平均值为 13.93×10^{-6} ($N=6$);粉细晶白云岩 ΣREE 最低,分布范围为 $2.01 \times 10^{-6} \sim 9.83 \times 10^{-6}$,平均值为 4.86×10^{-6} ($N=11$);豹斑灰云岩 ΣREE 介于泥晶灰岩与粉细晶白云岩之间,分布范围为 $4.52 \times 10^{-6} \sim 9.65 \times 10^{-6}$,平均值为 7.48×10^{-6} ($N=8$),反映其白云石化流体性质具有一定的差异性。

4 讨论

4.1 样品成岩蚀变性

已有研究表明氧同位素对碳酸盐岩沉积后期的成岩蚀变作用十分敏感,通常 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $< -10\%$ 时,原始碳酸盐沉积物后期往往经历了较强烈的成岩蚀变作用(Kaufman *et al.*, 1992)。研究区伊陕斜坡东北部粉细晶白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -9.44% ,豹

表 1 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段碳酸盐岩碳、氧、锶同位素及 Mn/Sr 特征Table 1 Carbon, oxygen, strontium isotopes and Mn/Sr characteristics of carbonate rocks in the Ma₅⁵ member of the northeast of the Yishan slope in the Ordos Basin

井号	样品编号	井深(m)	层位	岩性	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Mn/Sr
D48	D48-11	3 020.28	马五 ₅	泥晶灰岩	-9.79	-1.74	0.708 879	0.20
D50	D50-14	2 918.78	马五 ₅	泥晶灰岩	-9.36	-1.63	-	0.13
兴县剖面	XX11-M55-33-2	17.80	马五 ₅	泥晶灰岩	-8.86	-1.77	-	0.17
兴县剖面	XX12-M55-35-1	25.00	马五 ₅	泥晶灰岩	-9.26	-1.75	0.708 654	0.12
兴县剖面	XX37-M55-53A-2	33.00	马五 ₅	泥晶灰岩	-8.94	-1.23	-	0.16
兴县剖面	XX37-M55-53B-1	35.00	马五 ₅	泥晶灰岩	-8.75	-0.89	-	0.12
D48	D48-1	3 012.30	马五 ₅	粉细晶白云岩	-8.23	-0.45	0.710 004	1.03
D48	D48-2	3 013.20	马五 ₅	粉细晶白云岩	-10.19	-1.83	0.709 327	1.08
D48	D48-4	3 014.00	马五 ₅	粉细晶白云岩	-7.82	-0.78	0.710 067	0.73
D48	D48-5	3 014.82	马五 ₅	粉细晶白云岩	-8.93	-1.70	0.709 350	0.82
D48	D48-6	3 016.17	马五 ₅	粉细晶白云岩	-10.11	-2.19	0.708 819	0.29
D48	D48-8	3 017.52	马五 ₅	粉细晶白云岩	-9.82	-1.94	0.709 310	0.64
D48	D48-9	3 018.83	马五 ₅	粉细晶白云岩	-10.00	-1.64	-	0.55
D48	D48-12	3 021.18	马五 ₅	粉细晶白云岩	-9.56	-1.03	0.708 919	0.60
兴县剖面	XX9-M55-24	8.00	马五 ₅	粉细晶白云岩	-10.59	-2.79	-	1.06
兴县剖面	XX10-M55-26A	9.00	马五 ₅	粉细晶白云岩	-8.90	-2.05	0.709 270	1.53
兴县剖面	XX10-M551-27-2	9.50	马五 ₅	粉细晶白云岩	-9.69	-2.68	-	1.17
D48	D48-2a	3 023.04	马五 ₅	豹斑灰云岩	-9.89	-1.63	-	0.47
D48	D48-15	3 023.59	马五 ₅	豹斑灰云岩	-10.04	-1.14	0.708 879	0.51
兴县剖面	XX11-M55-32-1	17.50	马五 ₅	豹斑灰云岩	-8.48	-0.92	-	0.25
兴县剖面	XX11-M55-32-2	17.50	马五 ₅	豹斑灰云岩	-7.78	-0.36	-	0.64
兴县剖面	XX11-M55-33-1	17.80	马五 ₅	豹斑灰云岩	-8.98	-1.03	-	0.64
兴县剖面	XX12-M55-35-2	25.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	-9.45	-1.63	0.708 789	0.30
兴县剖面	XX37-M55-53A-1	33.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	-8.13	-0.12	-	0.32
兴县剖面	XX37-M55-53B-2	35.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	-9.14	-0.41	-	0.51

斑灰云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -8.98‰ , 均大于 -10‰ , 表明研究区白云岩未遭受后期成岩作用的强烈改造。此外, 碳酸盐岩沉积后, 重结晶作用将导致 Sr 元素优先被排出, Mn 元素则相对富集, 因此, 亦可通过 Mn/Sr 值来判断原始碳酸盐岩受蚀变程度, Derry *et al.* (1994) 认为 $\text{Mn}/\text{Sr} \leq 6$ 时, 原岩未遭受成岩蚀变; $\text{Mn}/\text{Sr} < 2$ 时, 原岩发生了较弱的成岩蚀变; $\text{Mn}/\text{Sr} < 10$ 时, 碳酸盐岩基本能够反映沉积时同位素信息。由表 1 可知伊陕斜坡东北部样品的 Mn/Sr 值均小于 2, 同样表明研究区白云岩样品未遭受强烈成岩蚀变作用。综上所述, 所选取样品测得的数值能够用来解释研究区白云岩的成岩环境及成因机理。

4.2 同位素对白云岩成因指示意义

4.2.1 碳、氧同位素

碳、氧同位素资料对于白云岩成因解释起着至关重要的作用, 且白云岩碳、氧同位素组成受控于大气淡水、温度以及蒸发作用等多方面的影响。局限蒸发环境下形成的白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和

$\delta^{18}\text{O}$ 值均较高; 高温高压深埋藏条件下形成的白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低; 热液发育环境下形成的白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值多数小于 -10.0‰ (Machel and Mountjoy, 1986; Emery and Robinson, 1993)。不同成因白云岩中碳、氧同位素值均与其形成的初始介质, 即海水的碳、氧同位素具有紧密联系。因此, 将白云岩碳、氧同位素值与同期海水进行对比才能更合理的解释其成因 (Allan and Wiggins, 1996)。鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马家沟组马五₅亚段白云岩形成于中奥陶世时期, 海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-2.0\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-6.6\text{‰} \sim -4.0\text{‰}$ (Machel and Mountjoy, 1986; 于洲等, 2017)。

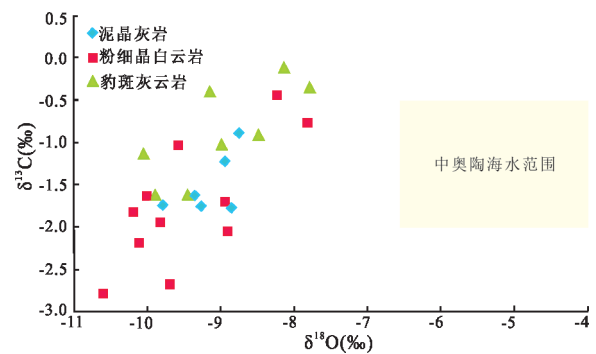
由上文可知, 研究区马五₅亚段多数白云岩样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围与同期海水具有一致性, 仅少部分表现为偏正的特征, $\delta^{18}\text{O}$ 值则均表现为显著偏负的特征, 且多数均大于 -10.0‰ (图 3), 故基本排除了热液成因机制的可能性, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本全位于同

表 2 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段微量元素组成分布特征Table 2 Trace elements in Member Ma₅ of Northeast Yishan Slope, Ordos Basin.

井号	样品编号	深度(m)	层位	岩性	元素含量(10 ⁻⁶)				
					Fe	Mn	Sr	Na	K
D48	D48-11	3020.28	马五 ₅	泥晶灰岩	551.00	29.00	147.22	44.00	405.00
D50	D50-14	2918.78	马五 ₅	泥晶灰岩	161.00	14.00	109.39	21.00	118.00
兴县剖面	XX11-M55-33-2	17.80	马五 ₅	泥晶灰岩	424.00	35.00	207.87	14.00	154.00
兴县剖面	XX12-M55-35-1	25.00	马五 ₅	泥晶灰岩	412.00	21.00	174.38	22.00	227.00
兴县剖面	XX37-M55-53A-2	33.00	马五 ₅	泥晶灰岩	399.00	28.00	180.24	27.00	284.00
兴县剖面	XX37-M55-53B-1	35.00	马五 ₅	泥晶灰岩	353.00	24.00	201.20	24.00	198.00
D48	D48-1	3012.30	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 155.00	94.00	91.10	122.00	208.00
D48	D48-2	3013.20	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 198.00	67.00	61.80	87.00	298.00
D48	D48-4	3014.00	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 095.00	58.00	79.02	109.00	352.00
D48	D48-5	3014.82	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 160.00	57.00	69.32	70.00	232.00
D48	D48-6	3016.17	马五 ₅	细粉晶白云岩	584.00	42.00	145.45	38.00	180.00
D48	D48-8	3017.52	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 132.00	62.00	97.53	99.00	421.00
D48	D48-9	3018.83	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 284.00	63.00	114.92	110.00	354.00
D48	D48-12	3021.18	马五 ₅	细粉晶白云岩	793.00	48.00	79.78	28.00	124.00
兴县剖面	XX9-M55-24	8.00	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 339.00	64.00	60.10	38.00	234.00
兴县剖面	XX10-M55-26A	9.00	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 611.00	78.00	51.15	163.00	432.00
兴县剖面	XX10-M551-27-2	9.50	马五 ₅	细粉晶白云岩	1 456.00	92.00	78.33	51.00	217.00
D48	D48-2a	3023.04	马五 ₅	豹斑灰云岩	806.00	39.00	83.17	42.00	275.00
D48	D48-15	3023.59	马五 ₅	豹斑灰云岩	910.00	44.00	86.53	52.00	664.00
兴县剖面	XX11-M55-32-1	17.50	马五 ₅	豹斑灰云岩	677.00	36.00	145.15	28.00	211.00
兴县剖面	XX11-M55-32-2	17.50	马五 ₅	豹斑灰云岩	1 044.00	43.00	66.71	32.00	355.00
兴县剖面	XX11-M55-33-1	17.80	马五 ₅	豹斑灰云岩	863.00	69.00	107.45	30.00	170.00
兴县剖面	XX12-M55-35-2	25.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	835.00	38.00	128.50	31.00	315.00
兴县剖面	XX37-M55-53A-1	33.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	956.00	39.00	121.05	64.00	534.00
兴县剖面	XX37-M55-53B-2	35.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	1 223.00	52.00	101.29	26.00	274.00

期海水值范围的现象,则表明研究区白云石化流体应主要为源于海源性流体.贺训云等(2014)研究认为白云岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受有机质以及硫酸盐还原反应(TSR)的影响,温度对其影响相对较小,因此,后期成岩过程中, $\delta^{13}\text{C}$ 值通常变化不显著,仍表现为原岩特征.若研究区白云岩受到有机质以及硫酸盐还原反应(TSR)的影响, $\delta^{13}\text{C}$ 值理论上应表现为显著偏高或显著偏低的特征,而研究区多数白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值与同期海水基本相似,排除了受上述因素影响的可能性.镜下显微观察发现白云岩内零星发育的针状石膏及介形虫碎片(图 2c, 2h),表明伊陕斜坡东北部马五₅亚段白云岩应形成于环境相对闭塞,盐度相对较高,不利于微生物生长的蒸发环境,因此,少部分白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正则可能主要与高盐度的沉积流体有关.

然而,研究区个别白云岩样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于 -10.0‰ ,可能主要与大气淡水混入有关,中奥陶

图 3 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段碳酸盐岩碳、氧同位素相关关系Fig.3 Carbon and oxygen isotope correlation of carbonate rocks in the Ma₅ member of northeast Yishan slope, Ordos Basin

世马家沟组马五₅亚段沉积之后,构造抬升使其埋深相对变小,使马五₅亚段沉积地层暴露于地表,遭受了长达 1.5 亿年的风化淋滤作用(陈志远等,

表 3 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段不同碳酸盐岩稀土元素含量Table 3 Analytical data of rare earth element of different types of carbonate rocks in Ma₅ formation of northeast Yishan Slope, Ordos Basin.

井号	样品编号	深度(m)	地层名称	岩性	稀土元素含量(10 ⁻⁶)															
					La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	δCe
D50	D50-14	2 918.78	马五 ₅	泥晶灰岩	4.52	9.41	1.02	3.65	0.61	0.10	0.62	0.07	0.32	0.07	0.16	0.02	0.10	0.01	0.50	1.07
D48	D48-11	3 020.28	马五 ₅	泥晶灰岩	2.19	3.88	0.41	1.54	0.25	0.05	0.29	0.04	0.21	0.04	0.10	0.01	0.09	0.01	0.57	1.00
兴县剖面	XX11-M55-32-2	17.50	马五 ₅	泥晶灰岩	1.45	2.50	0.26	0.95	0.17	0.03	0.19	0.03	0.15	0.03	0.09	0.01	0.08	0.01	0.51	1.00
兴县剖面	XX12-M55-35-1	25.00	马五 ₅	泥晶灰岩	3.28	6.08	0.67	2.58	0.45	0.08	0.49	0.06	0.28	0.05	0.11	0.01	0.10	0.01	0.52	1.01
兴县剖面	XX37-M55-53A-2	33.00	马五 ₅	泥晶灰岩	3.33	6.27	0.68	2.64	0.47	0.10	0.50	0.07	0.35	0.07	0.18	0.03	0.19	0.03	0.63	1.02
兴县剖面	XX37-M55-53B-1	35.00	马五 ₅	泥晶灰岩	4.40	7.99	0.86	3.23	0.61	0.11	0.60	0.07	0.39	0.07	0.18	0.02	0.16	0.03	0.56	1.01
D48	D48-1	3 012.30	马五 ₅	粉细晶白云岩	0.37	0.81	0.10	0.43	0.11	0.02	0.10	0.02	0.09	0.02	0.05	0.01	0.04	0.00	0.58	1.03
D48	D48-2	3 013.20	马五 ₅	粉细晶白云岩	0.45	0.93	0.12	0.48	0.13	0.03	0.12	0.02	0.10	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01	0.73	0.98
D48	D48-4	3 014.00	马五 ₅	粉细晶白云岩	0.35	0.74	0.09	0.37	0.09	0.02	0.09	0.02	0.09	0.02	0.05	0.01	0.05	0.01	0.68	1.02
D48	D48-5	3 014.82	马五 ₅	粉细晶白云岩	0.80	1.75	0.18	0.72	0.12	0.03	0.14	0.02	0.11	0.02	0.07	0.01	0.05	0.01	0.71	1.12
D48	D48-6	3 016.17	马五 ₅	粉细晶白云岩	2.34	4.39	0.46	1.63	0.25	0.04	0.28	0.04	0.18	0.03	0.10	0.01	0.08	0.01	0.46	1.04
D48	D48-8	3 017.52	马五 ₅	粉细晶白云岩	1.72	3.53	0.41	1.61	0.30	0.07	0.32	0.04	0.19	0.04	0.11	0.01	0.09	0.01	0.69	1.03
D48	D48-9	3 018.83	马五 ₅	粉细晶白云岩	1.16	2.41	0.28	1.17	0.25	0.05	0.24	0.03	0.17	0.03	0.09	0.01	0.07	0.01	0.62	1.04
D48	D48-12	3 021.18	马五 ₅	粉细晶白云岩	1.03	1.92	0.20	0.72	0.12	0.03	0.12	0.02	0.11	0.02	0.06	0.01	0.06	0.01	0.76	1.04
兴县剖面	XX9-M55-24	8.00	马五 ₅	粉细晶白云岩	0.72	1.40	0.16	0.65	0.11	0.03	0.13	0.02	0.09	0.02	0.04	0.01	0.05	0.01	0.77	1.01
兴县剖面	XX10-M55-26A	9.00	马五 ₅	粉细晶白云岩	0.89	1.78	0.21	0.82	0.16	0.04	0.18	0.03	0.15	0.03	0.10	0.01	0.10	0.01	0.72	1.01
兴县剖面	XX10-M551-27-2	9.50	马五 ₅	粉细晶白云岩	1.21	2.38	0.27	1.09	0.23	0.06	0.27	0.04	0.22	0.04	0.13	0.02	0.13	0.02	0.74	1.02
D48	D48-2a	3 023.04	马五 ₅	豹斑灰云岩	1.06	1.93	0.20	0.75	0.14	0.03	0.13	0.02	0.11	0.02	0.07	0.01	0.04	0.01	0.68	1.03
D48	D48-15	3 023.59	马五 ₅	豹斑灰云岩	1.45	2.56	0.28	1.02	0.18	0.04	0.18	0.03	0.14	0.03	0.08	0.01	0.09	0.01	0.68	0.99
兴县剖面	XX11-M55-32-1	17.50	马五 ₅	豹斑灰云岩	1.81	3.40	0.36	1.40	0.28	0.05	0.30	0.04	0.21	0.04	0.11	0.01	0.11	0.02	0.53	1.04
兴县剖面	XX11-M55-32-2	17.50	马五 ₅	豹斑灰云岩	1.45	2.50	0.26	0.95	0.17	0.03	0.19	0.03	0.15	0.03	0.09	0.01	0.08	0.01	0.51	1.00
兴县剖面	XX11-M55-33-1	17.80	马五 ₅	豹斑灰云岩	1.70	2.93	0.30	1.15	0.22	0.04	0.22	0.03	0.15	0.03	0.07	0.01	0.08	0.01	0.56	1.01
兴县剖面	XX12-M55-35-2	25.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	2.28	4.01	0.43	1.64	0.31	0.06	0.30	0.04	0.20	0.04	0.10	0.01	0.06	0.01	0.60	0.99
兴县剖面	XX37-M55-53A-1	33.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	2.34	3.98	0.42	1.54	0.31	0.07	0.33	0.05	0.25	0.05	0.13	0.02	0.15	0.02	0.67	0.98
兴县剖面	XX37-M55-53B-2	35.00	马五 ₅	豹斑灰云岩	2.30	3.78	0.39	1.42	0.29	0.06	0.29	0.04	0.21	0.04	0.11	0.01	0.10	0.01	1.34	0.95

1998),从而导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,其中粉晶白云岩相对更为偏负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则可能是早期大气淡水与埋藏增温叠加作用的结果,至少反映其受埋藏增温作用的影响.此外,Meyers *et al.* (1997)曾研究发现白云石化作用过程中若有大气淡水混入, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围则较大($\delta^{13}\text{C}$, +5.4‰~ -1.2‰; $\delta^{18}\text{O}$, +2.5‰~-4.3‰),且 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间往往存在较好的正相关关系,由图3可知伊陕斜坡东北部马五₅亚段白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间具备上述特征,因此,研究区白云岩形成时期应有大气淡水的混入.

4.2.2 锶同位素 锶同位素组成常被应用于碳酸盐岩成岩作用的解释,且海相碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与同期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值紧密相关(杨华等,2012;韩晓涛等,2016).已有研究表明,若研究区马五₅亚段白云石化流体来源于同期海水,那么 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值范围应与中奥陶世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围具有一致性(贺训云等,2014).然而,研究区除全部豹斑

灰云岩和2个粉细晶白云样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值落入同期海水值范围内(表1和图4),其余粉细晶白云岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均比同期海水值显著偏正,表明其形成时期可能有外部富含放射性 ^{87}Sr 的成岩流体参与,或者成岩流体经了富含放射性 ^{87}Sr 的外部地层,豹斑灰云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均落入同期海水值范围内,则说明其白云石化流体主要与海源流体有关.然而,粉细晶白云岩中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高于同期海水的原因无外乎于:①大气淡水混入时,溶解富含放射性 ^{87}Sr 硅质碎屑沉积物;②深部富含放射性 ^{87}Sr 的地层水的加入(Keith and Weber, 1964).鄂尔多斯盆地马家沟组马五₅亚段沉积之后,盆地发生整体抬升,构造平缓,断层与褶皱不发育,深部富含放射性 ^{87}Sr 流体难以向上运移.因此,位于马五₅亚段中上部的粉细晶白云岩中较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值应与伊陕斜坡地层抬升剥蚀,长期受大气淡水影响有关,而埋深相对较大的豹斑灰云岩则受大气淡水影响较

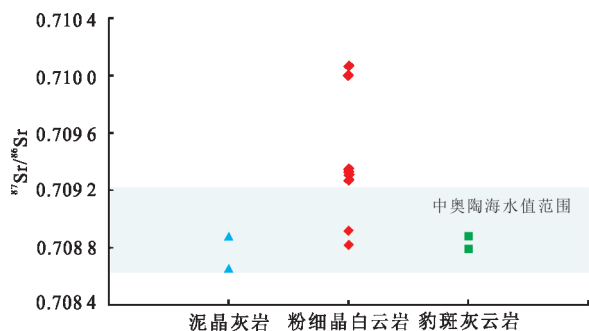


图4 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段锶同位素分布
Fig.4 Strontium isotopes distribution in Ma₅ formation of northeast Yishan slope, Ordos Basin

小,其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值表现为与同期海水一致。

4.3 微量元素对白云岩成因指示意义

4.3.1 主要微量元素指示意义 Fe、Mn、Sr、Na、K等微量元素应用于碳酸盐岩流体性质判别及成岩作用方面效果尤为显著。Fe、Mn元素通常随成岩作用强度的增加,呈现逐渐增加的趋势,这主要与Fe、Mn元素对还原环境的敏感性有关,还原性越强,越容易以类质同象方式进入白云石晶格(Walker *et al.*, 1989);Sr元素作为常用的示踪元素,具有亲海特性,主要富集于海水中,随着成岩作用强度的增加,Sr呈逐渐减少的趋势,而K、Na元素可用来反映成岩流体盐度(Vahrenkamp and Swart, 1990;贺训云等,2014)。

伊陕斜坡东北部马五₅亚段两类白云岩Fe、Mn、Na、K含量相对较高,Sr含量相对较低。李振宏等(2005)研究认为埋藏作用形成的白云岩Na、K、Sr贫乏,Fe、Mn富集,据此判断马五₅亚段白云岩成因机制应为埋藏白云石化作用,但研究区粉晶白云岩与豹斑灰云岩的Na含量较泥晶灰岩均偏高,且豹斑灰云岩Na元素含量位于泥晶灰岩和粉细晶白云岩之间,说明三者之间的流体具有一定的继承性,导致白云石化流体盐度为中等的现象,则可能主要与浅埋藏阶段回流渗透作用有关。根据强子同(1998)建立的Sr-Na白云岩成因判别模式图可知,虽然伊陕斜坡东北部马五₅亚段白云岩均落入埋藏成因白云岩的范围,但整体而言更多的保留了回流渗透白云石化作用的特征(图5中Sr-Na)。另外,由图5中Sr-Fe、Sr-Mn交汇图可知,粉细晶白云岩与豹斑灰云岩的Fe、Mn元素含量与Sr元素含量均呈负相关关系,同样反映研究区白云岩形成环境具有一定的还原性,即具有一定的埋藏深度。除上述特征外,两类白云岩的Mn含量均 $<100 \times 10^{-6}$,平均

值分别为 65.91×10^{-6} 、 45.0×10^{-6} ,Na含量分别可达 83.18×10^{-6} 、 38.12×10^{-6} ,似乎均表明研究区白云石化流体主要为海源性流体,但又与海源性流体存在一定的差异性,这一特征与赵卫和王宝清(2011)得出的苏里格地区马家沟组白云岩及王振峰等(2015)西沙群岛西科1井中新统一上新统白云岩主要为回流渗透成因机制相吻合。

4.3.2 稀土元素指示意义 白云岩稀土元素含量受白云石化流体、水岩比、分配系数及母岩等多种因素的影响。实际地质过程中,自然流体中稀土元素含量极低,白云岩中稀土元素主要来源于母岩,因此,交代成因的白云岩稀土元素配分模式通常与母岩相似(Humphris, 1984; Qing and Mountjoy, 1994)。稀土元素中的变价元素Ce、Eu容易随物理化学条件变化与稀土元素分离而出现异常,根据标准化后的Ce、Eu配分模式可判断白云石化流体的性质及成岩环境。

本文采用后太古代澳大利亚页岩(PAAS)稀土元素含量对稀土元素数据进行标准化处理(Boyn-ton, 1984),发现马五₅亚段白云岩La/Yb标准化值为5.02~27.23,平均值为12.44, Eu分布范围为0.46~1.34,平均值为0.69,明显小于1.00;Ce分布范围为0.95~1.12,平均值为1.02,略大于1.00。由图6可知,研究区马五₅亚段粉细晶白云岩和豹斑灰云岩具有与泥晶灰岩相似的稀土元素配分模式(图6),且整体轻稀土元素富集、重稀土元素亏损,具明显Eu负异常及弱Ce正异常特征,表明研究区白云岩应为交代成因(苏中堂等,2011)。此外,根据郑剑锋等(2012)建立的白云岩成因判别标志,可进一步认为马五₅亚段两类优质白云岩为埋藏白云石化成因,但与同期海水相似的稀土元素配分模式及Eu负异常、Ce弱正异常,似乎均显示研究白云岩应为近地表环境下的产物,具备浅埋藏阶段回流渗透白云岩的特征,这一认识与同位素得出的结论一致。粉细晶白云岩稀土元素含量较豹斑灰云岩低(图6b, 6c),原因可能主要与粉细晶白云岩埋藏深度相对较小有关,埋藏深度越小,富Mg²⁺海水供给越充足,白云石化程度越强,从而导致稀土元素含量越低。

5 沉积与成岩演化序列模式

中奥陶世马五₅亚段沉积时期,鄂尔多斯盆地处于近赤道的中低纬度带(3°~30°),气候干旱,强烈的海水蒸发作用导致海水盐度不断升高,为海水

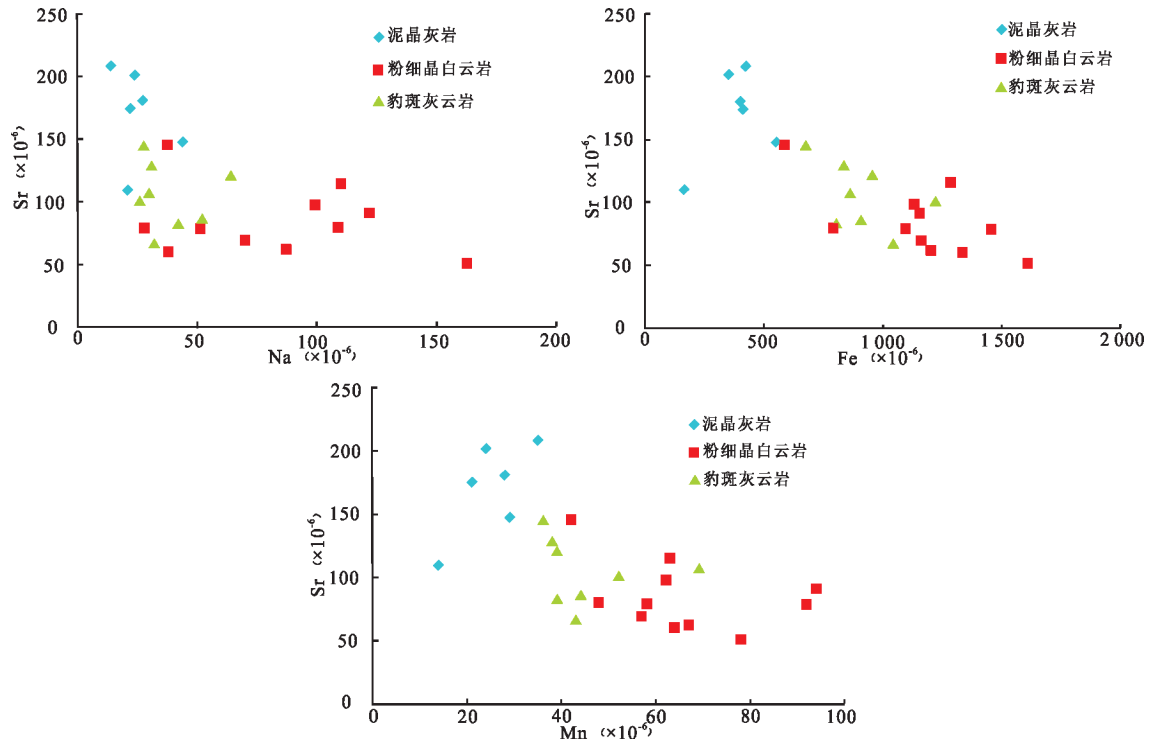


图 5 鄂尔多斯盆伊陕斜坡东北部马五₅亚段碳酸盐岩 Sr-Na、Sr-Fe、Sr-Mn 微量元素含量分布

Fig.5 Scatter diagram of content of trace element Sr-Na Sr-Fe、Sr-Mn in Ma₅⁵ formation of northeast Yishan slope, Ordos Basin

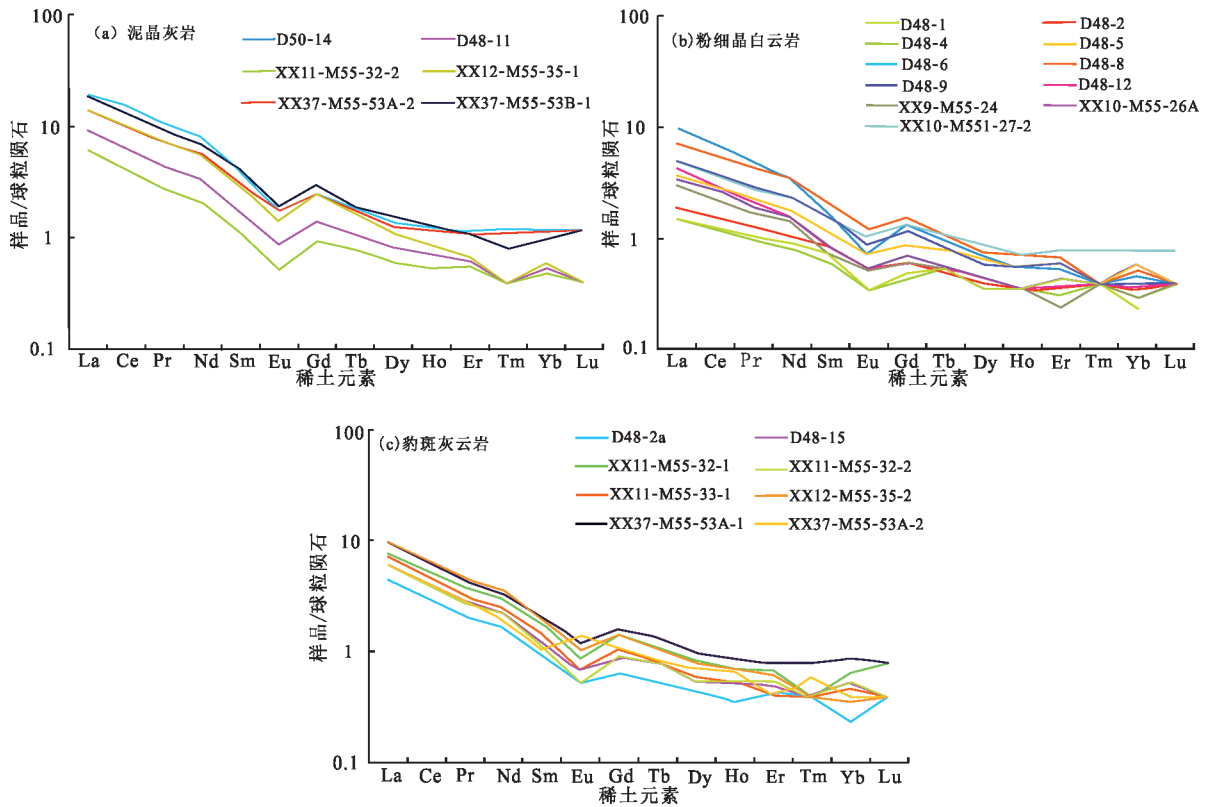


图 6 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段碳酸盐岩稀土元素分布特征

Fig.6 REE distribution of dolomites in Ma₅⁵ formation of northeast Yishan slope, Ordos Basin

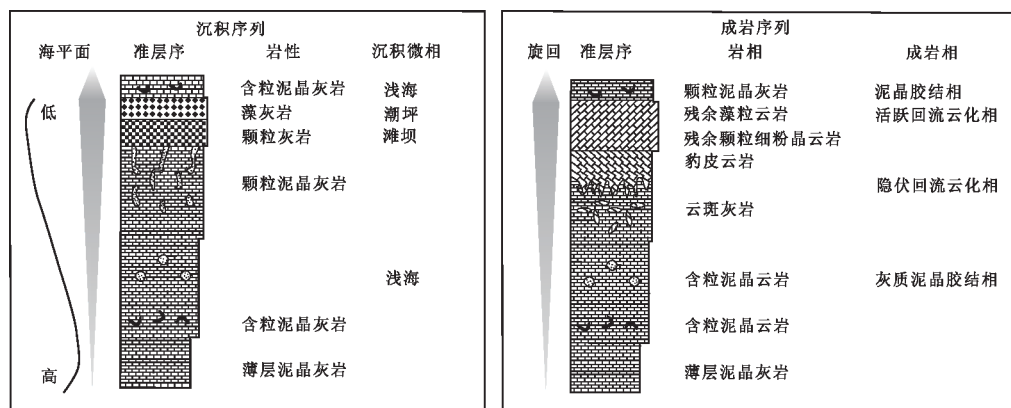


图 7 台地内海侵及高位体系域准层序的沉积与成岩序列模式

Fig.7 Sedimentary and diagenetic sequence patterns of quasi stratigraphic sequences in transgression and high system regions of carbonate platform

向下伏地层发生回流渗透奠定了良好的基础. 中奥陶世马五₅亚段沉积时期研究区位于盆地伊陕斜坡东北部, 处于伊盟古陆南斜坡相对较高的部位, 为一个局限封闭的陆表海沉积环境, 沉积了一套碳酸盐岩台地地层. 此时整体局限的沉积环境与干旱炎热的气候不仅为白云石化流体提供了大量的 Mg^{2+} 的同时, 而且为回流渗透机制提供较强的水体动力. 因此, 马五₅亚段中上部具备白云岩型储集层大规模发育的地质条件.

上述地质背景下, 马五₅亚段高频海侵体系域以灰泥及含粒灰泥沉积为主, 成岩之后形成泥晶灰岩及颗粒泥晶灰岩. 海侵体系域由于水体深度大, 碳酸盐岩产率相对较低, 以沉积薄层泥晶灰岩为主, 碳酸盐岩产率超过海平面上升速度之后, 形成厚层的颗粒泥晶灰岩. 随着水体深度变浅, 鲕粒、砂屑等颗粒灰岩含量增加, 当沉积物露出水面或者海水盐度增加, 盐度不断发生变化的海水持续渗入处于浅埋藏环境的沉积岩层, 发生交代云化作用. 空间上回流渗透的海水, 首先沿着渗透性的藻灰岩以及颗粒灰岩向盆地方向渗透, 发生完全白云化作用, 形成完全白云化的粉细晶白云岩, 或含残余灰质组分的含灰或灰质部分白云化的云岩; 其次受上覆沉积物压实和横向挤压应力共同作用下, 海水渗入发育大量生物扰动构造或发育大量干裂纹的泥晶灰岩或颗粒泥晶灰岩时, 形成部分白云化作用的豹斑云岩、云斑灰岩(图 7).

6 结论

(1) 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马五₅亚段

主要发育泥微晶白云岩、粉细晶白云岩、豹斑灰云岩 3 种类型, 且泥微晶白云岩主要发育于马五₅亚段底部, 粉细晶白云岩和豹斑灰云岩主要发育于马五₅亚段中上部, 白云石有序度均较低, 平均值分别为 0.58、0.86、0.68.

(2) 研究区白云岩 $\delta^{13}C$ 值为 $-2.68\text{‰} \sim -0.36\text{‰}$, 平均为 -1.39‰ , 多数与同期海水值一致, $\delta^{18}O$ 值为 $-10.59\text{‰} \sim -7.78\text{‰}$, 平均为 -9.25‰ , 较同期海水显著偏负; 白云岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 $0.708\ 789 \sim 0.710\ 067$, 平均为 $0.709\ 273$, 多数粉细晶白云岩及全部豹斑灰云岩与同期海水值一致; 白云岩 Fe、Mn、Na、K 含量总体较高, Sr 较低, 且豹斑灰云岩 Fe、Mn、Na 含量介于泥晶灰岩与粉细晶白云岩之间; 稀土元素含量总体较低, 介于 $2.01 \times 10^{-6} \sim 20.68 \times 10^{-6}$, 平均值为 7.88×10^{-6} , 且稀土元素配分模式相似, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 具明显 Eu 负异常和弱 Ce 正异常, 表明研究区马五₅亚段白云岩白云石化流体主要为海源性流体, 且早期有大气淡水的混入, 为局限台地潮间—潮下带的浅埋藏期回流渗透作用阶段的产物.

(3) 基于岩石学和地球化学特征, 建立了研究区马五₅亚段纵向的沉积与成岩序列模式, 认为马五₅亚段中上部是优质白云岩储集层的最有利发育层段, 为研究区后期优质白云岩储层中天然气的勘探工作提供了理论依据.

References

Allan, J.R., Wiggins, W.D., 1996. Dolomite Reservoirs: Geochemical Techniques for Evaluating Origin and Distribution. AAPG, Tulsa, 36-129.

- Bai, X.L., Zhang, S.N., Ding, X.Q., et al., 2014. Reservoir Diagenetic Facies of Ma₅ Submember in Ordovician in Daniudi Area, Ordos Basin Western China. *Geological Science and Technology Information*, 33(05): 25–33(in Chinese with English abstract).
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteoric Studies. *Rare Earth Element Geochemistry*, (2): 63–114.
- Chen, Z.Y., Ma, Z.F., Zhang, J.Q., 1998. Genesis of the Dolomite in Ma₅ Subinterval, Ordovician in Central Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, (6): 37–39(in Chinese with English abstract).
- Derry, L. A., Brasier, M. D., Corfield, R. M., et al., 1994. Sr and C Isotopes in Lower Cambrian Carbonates from the Siberian Craton: A Paleoenvironmental Record during the ‘Cambrian Explosion’. *Earth and Planetary Science Letters*, 128(3/4): 671–681. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(94\)90178-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(94)90178-3)
- Emery, D., Robinson, A., 1993. Inorganic Geochemistry: Applications to Petroleum Geology. Blackwell Scientific Publications, London.
- Feng, Z.Z., Bao, Z.D., Kang, Q.F., et al., 1999. Palaeo Tectonics of Ordos in the Early Palaeozoic. *Journal of Palaeogeography*, (2): 84–91(in Chinese with English abstract).
- Han, X.T., Bao, Z.Y., Xie, S.Y., 2016. Origin and Geochemical Characteristics of Dolomites in the Middle Permian Formation, SW Sichuan Basin, China. *Earth Science*, 41(1): 167–176(in Chinese with English abstract).
- He, X. Y., Shou, J.F., Shen, A.J., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Origin of Dolomite: A Case Study from the Middle Assemblage of Majiagou Formation Member 5 of the West of Jingbian Gas Field, Ordos Basin, North China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 375–384(in Chinese with English abstract).
- Hou, F.H., Fang, S.X., Dong, Z.X., et al., 2003. The Developmental Characters of Sedimentary Environments and Lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, (1): 106–112(in Chinese with English abstract).
- Humphris, S.E., 1984. The Mobility of Rare Earth Elements in the Crust. Elsevier, New York, 317–342.
- Jiang, C.J., Du, X.H., Zhang, H., et al., 2017. Genesis of Dolomite in the Lower Ordovician Ma-55 Submember in Eastern Area of Sulige Gas Field. *Xin Jiang Petroleum Geology*, 38(1): 41–48(in Chinese with English abstract).
- Kaufman, A. J., Knoll, A. H., Awramik, S. M., 1992. Biostratigraphic and Chemostratigraphic Correlation of Neoproterozoic Sedimentary Successions: Upper Tindir Group, Northwestern Canada, as a Test Case. *Geology*, 20(2): 181. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0181:baccon>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0181:baccon>2.3.co;2)
- Keith, M. L., Weber, J. N., 1964. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Selected Limestones and Fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10/11): 1787–1816. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90022-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90022-5)
- Li, F.J., Du, L.C., Zhao, J.X., et al., 2016. Dolomite Genesis in Member Ma₅₅ of Majiagou Formation, Sudong Area, Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(3): 328–338(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.H., Yang, Y.H., Zheng, C.B., 2005. Origin and Reservoir Characteristics of Dolostone in Northern Tianhuan Depression, Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 10(3): 19–24(in Chinese with English abstract).
- Liu, D.L., Sun, X.R., Li, Z.S., et al., 2006. Analysis of Carbon and Oxygen Isotope on the Ordovician Dolostones in the Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, (2): 155–161(in Chinese with English abstract).
- Machel, H. G., Mountjoy, E. W., 1986. Chemistry and Environments of Dolomitization — A Reappraisal. *Earth—Science Reviews*, 23(3): 175–222. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(86\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0012-8252(86)90017-6)
- Meyers, W.J., Lu, F.H., Achariah, J.K., 1997. Dolomitization by Mixed Evaporative Brines and Freshwater, Upper Miocene Carbonates, Nijar, Spain. *Journal of Sedimentary Research*, 67(5): 898–912.
- Ning, B., Wang, Q.C., Li, B.Q., et al., 2015. Genetic Model for M₅ Sub-Member Dolomitization of Majiagou Formation in Ordos Basin. *Xin Jiang Petroleum Geology*, 36(5): 531–538(in Chinese with English abstract).
- Qiang, Z.T., 1998. Carbonate Reservoir Geology. Press of the University of Petroleum, Dongying(in Chinese with English abstract).
- Qing, H., Mountjoy, E. W., 1994. Formation of Coarsely Crystalline, Hydrothermal Dolomite Reservoirs in the Presquille Barrier, Western Canada Sedimentary Basin. *AAPG Bulletin*, 78(1): 55–77.
- Ren, Y., Zhong, D.K., Gao, C.L., et al., 2016. Geochemical Characteristics, Genesis and Hydrocarbon Significance of Dolomite in the Cambrian Long Wangmiao Formation, Eastern Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(9): 1102–1115(in Chinese with English abstract).
- Su, Z.T., Chen, H.D., Xu, F.Y., et al., 2011. Characteristics of Fluid Inclusions in Dolomite of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin and Their Signif-

- icance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(8): 2230—2238(in Chinese with English abstract).
- Vahrenkamp, V. C., Swart, P. K., 1990. New Distribution Coefficient for the Incorporation of Strontium into Dolomite and Its Implications for the Formation of Ancient Dolomites. *Geology*, 18(5): 387. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0387:ndcfti>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0387:ndcfti>2.3.co;2)
- Walker, G., Abumere, O. E., Kamaluddin, B., 1989. Luminescence Spectroscopy of Mn²⁺ Rock-Forming Carbonates. *Mineralogical Magazine*, 53(370): 201—211. <https://doi.org/10.1180/minmag.1989.053.370.07>
- Wang, Z.F., Shi, Z.Q., Zhang, D.J., et al., 2015. Microscopic Features and Genesis for Miocene to Pliocene Dolomite in Well Xike-1, Xisha Islands. *Earth Science*, 40(4): 633—644(in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Wang, B.Q., Sun, L.Y., et al., 2012. Characteristics of Oxygen and Carbon Stable Isotopes for Middle Ordovician Majiagou Formation Carbonate Rocks in the Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 616—625 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.J., Zang, B.R., 1988. Region Shanganning Petroliferous Basin and Its Reservoir Sequence. *Acta Petrolei Sinica*, 9(1):1—8(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.Y., Bao, H.P., Ren, J.F., et al., 2015. Types of Dolomites and Characteristics of Stable Isotope from the Ma55 Sub-Member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(4): 650—656(in Chinese with English abstract).
- Yao, J.L., Wang, B.Y., Wang, Y., et al., 2009. Geochemical Characteristics of Dolomites in Lower Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 27 (3): 381—389(in Chinese with English abstract).
- Yu, Z., Ding, Z.C., Wu, D.X., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Genetic Model of Dolomite in Majiagou Submember-55 of Ordovician in East-Central Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(4):85—93 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Yang, X.Y., Dong, Z.X., 2016. Characteristics and Genesis of Ordovician Majiagou Submember-55 Dolomite in Middle Assemblage, Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 21(2): 65—71(in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.X., Chen, H.D., Zhang, J.Q., et al., 2005. Genesis of Dolomite in the Fifth Member of Majiagou Formation in the Middle Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, (5): 42—45(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.W., Wang, B.Q., 2011. Geochemical Characteristics of Dolomite from 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige Area, Ordos Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(6): 681—690(in Chinese with English abstract).
- Zheng, J.F., Shen, A.J., Liu, Y.F., et al., 2012. Multi-Parameter Comprehensive Identification of the Genesis of Lower Paleozoic Dolomite in Tarim Basin, China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2):145—153(in Chinese with English abstract).
- Zhou, W., Zhang, S.N., Li, L., et al., 2006. The Character of Upper Paleozoic Reservoir Fractures and the Evaluation of Their Distribution in Tabamiao Area of Ordos Basin. *J. Mineral Petrol.*, (4):54—61(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白晓亮,张峭楠,丁晓琪,等,2014.鄂尔多斯盆地大牛地奥陶系马五₂段储层成岩相.地质科技情报,33(5):25—33.
- 陈志远,马振芳,张锦泉,1998.鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五₅亚段白云岩成因.石油勘探与开发,(6):37—39.
- 冯增昭,鲍志东,康祺发,等,1999.鄂尔多斯早古生代古构造.古地理学报,(2):84—91.
- 韩晓涛,鲍征宇,谢淑云,2016.四川盆地西南中二叠统白云岩的地球化学特征及其成因.地球科学,41(1):167—176.
- 贺训云,寿建峰,沈安江,等,2014.白云岩地球化学特征及成因—以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例.石油勘探与开发,41(3):375—384.
- 侯方浩,方少仙,董兆雄,等,2003.鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征.沉积学报,(1):106—112.
- 蒋传杰,杜孝华,张浩,等,2017.苏里格气田东区下奥陶统马五₅亚段白云岩成因.新疆石油地质,38(1):41—48.
- 李凤杰,杜凌春,赵俊兴,等,2016.鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段5亚段白云岩成因.石油学报,37(3):328—338.
- 李振宏,杨永恒,郑聪斌,2005.鄂尔多斯盆地天环北段白云岩体成因及储集性能.海相油气地质,10(3):19—24.
- 刘德良,孙先如,李振生,等,2006.鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析.石油实验地质,(2):155—161.
- 宁博,王起琮,李百强,等,2015.鄂尔多斯盆地马五₅亚段白云岩化成因模式.新疆石油地质,36(5):531—538.
- 强子同.1998.碳酸盐岩储层地质学.东营:中国石油大学出版社,86—135
- 任影,钟大康,高崇龙,等,2016.川东寒武系龙王庙组白云岩地球化学特征、成因及油气意义.石油学报,37(09):1102—1115.
- 苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等,2011.鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析.岩石学报,27

- (8):2230—2238.
- 王振峰,时志强,张道军,等,2015.西沙群岛西科1井中新统一上新统白云岩微观特征及成因.地球科学,40(4):633—644.
- 杨华,王宝清,孙六一,等,2012.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.天然气地球科学,23(4):616—625.
- 杨俊杰,张伯荣.1988.陕甘宁盆地油气区及油气藏序列机.石油学报,9(1):1—8.
- 杨西燕,包洪平,任军峰,等,2015.鄂尔多斯盆地马家沟组马五₅亚段白云岩类型及稳定同位素特征.天然气地球科学,26(4):650—656.
- 姚泾利,王保全,王一,等,2009.鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征.沉积学报,27(3):381—389.
- 于洲,丁振纯,吴东旭,等,2017.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段白云岩地球化学特征及成因模式.海相油气地质,22(4):85—93.
- 张庄,杨西燕,董兆雄,2016.鄂尔多斯盆地马家沟组中组合马五₅亚段白云岩特征及成因机理.海相油气地质,21(2):65—71.
- 赵俊兴,陈洪德,张锦泉,等,2005.鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究.石油学报,(5):42—45.
- 赵卫卫,王宝清,2011.鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征.地球学报,32(6):681—690.
- 郑剑锋,沈安江,刘永福,等,2012.多参数综合识别塔里木盆地地下古生界白云岩成因.岩石学报,33(S2):145—153.
- 周文,张峭楠,李良,等,2006.鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界储层裂缝特征及分布评价.矿物岩石,(4):54—61.