

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

于洲^{1,2}, 丁振纯^{1,2}, 吴东旭^{1,2}, 魏柳斌³, 魏源³

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院)

摘要 依据岩心、薄片以及实验分析资料,表明鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段白云岩碳同位素分布区间与泥晶灰岩的分布区间类似,均介于-1.40‰~0.14‰,分布在同期海水值区间内;氧同位素组成介于-7.51‰~-5.98‰,较泥晶灰岩的偏正,但整体均较同期海水值偏负;稀土元素的配分模式与泥晶灰岩的相似,具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征;锶同位素也和泥晶灰岩的分布范围大致相当,且具有少数正常、多数偏正的特征。综合古气候、古沉积格局和海平面升降变化的特征,认为:(1)马五₅亚段白云岩主要由渗透回流白云石化作用形成,部分由蒸发泵白云石化作用形成;(2)白云岩空间分布受海平面升降变化与沉积古地貌背景的共同控制,古地貌较高的中央古隆起—靖西台坪和靖东隆起带这两个区域上白云岩在相对海退期更为发育;(3)白云石的岩石结构组分之间的差异性与其形成的沉积背景有关,粉晶白云岩在中央古隆起—靖西台坪和靖东隆起带上均广泛发育,颗粒白云岩和含硬石膏结核粉晶白云岩仅零星分布在中央古隆起—靖西台坪带上,而白云石化不彻底的灰质粉晶白云岩和白云质泥晶灰岩主要分布在洼地中心和边缘地带。

关键词 鄂尔多斯盆地;奥陶系;地球化学特征;沉积古地貌;海平面变化;白云岩

中图分类号: TE122.2*3

文献标识码: A

鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩是天然气勘探的重要领域,其中位于奥陶系马家沟组五段中部的马五₅亚段白云岩是继靖边气田上组合风化壳储层之后的勘探突破层位,且现今为主力产气层位之一^[1-4]。前人对马五₅亚段白云岩成因已作过较多探讨,取得了许多重要认识^[4-8],但尚存在以下问题:(1)不同学者得出的白云岩成因不尽相同,如混合水白云石化^[4-5]、渗透回流白云石化^[6-7]、准同生白云石化^[7-8]、埋藏白云石化^[7-8];(2)以往的研究仅对白云岩和泥晶灰岩在地球化学特征方面进行个别对比分析,缺乏全面系统性的对比,未能深入地反映两者在成岩流体方面的异同;(3)以往的研究往往只通过单一地球化学特征进行成因分析,未能与古气候、古沉积格局及海平面升降变化等控制因素相结合而进行综合研究,成因模式简单,以致于岩性地层内部白云岩的空间分布差异性未能得到合理的解释。为此,本次研究依据岩心和微薄片观察资料,充分考虑古

沉积格局和现今白云岩产状,结合碳、氧、锶同位素和稀土元素等地球化学特征分析研究,对马五₅亚段白云岩的成因进行深入探讨,以期对鄂尔多斯盆地奥陶系马五₅亚段及其下伏地层的岩相古地理重建、储层成因机理分析及优质储层分布预测提供基础依据,进而为下一步勘探决策提供技术支撑。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地在奥陶纪是一个内部存在着洼地,而洼地周围地势又相对较高的碳酸盐岩台地,其北部与伊盟古陆(隆起)相连(图1a),中南部与庆阳古陆相连,东部离石—柳林一线存在一个水下隆起。受盆地周缘古陆、隆起的控制和影响,位于华北台地西缘的鄂尔多斯地区在奥陶纪马家沟期整体处于一个半封闭的陆表海沉积环境,并经历了3次大型海侵—海退旋回,沉积了6个岩性韵律层段(图1b)。其中形成于海退期的马一段、马三段、马五段以白云

收稿日期: 2016-05-04; 改回日期: 2017-06-27

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2011ZX05004-002)和中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“深层油气勘探开发关键技术研究”(编号:2014E-32)联合资助

于洲: 1986年生,2013年获中国石油大学(北京)地质工程硕士学位,现为中国石油杭州地质研究院工程师,研究方向为碳酸盐岩沉积储层。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; E-mail: yuz_hz@petrochina.com.cn

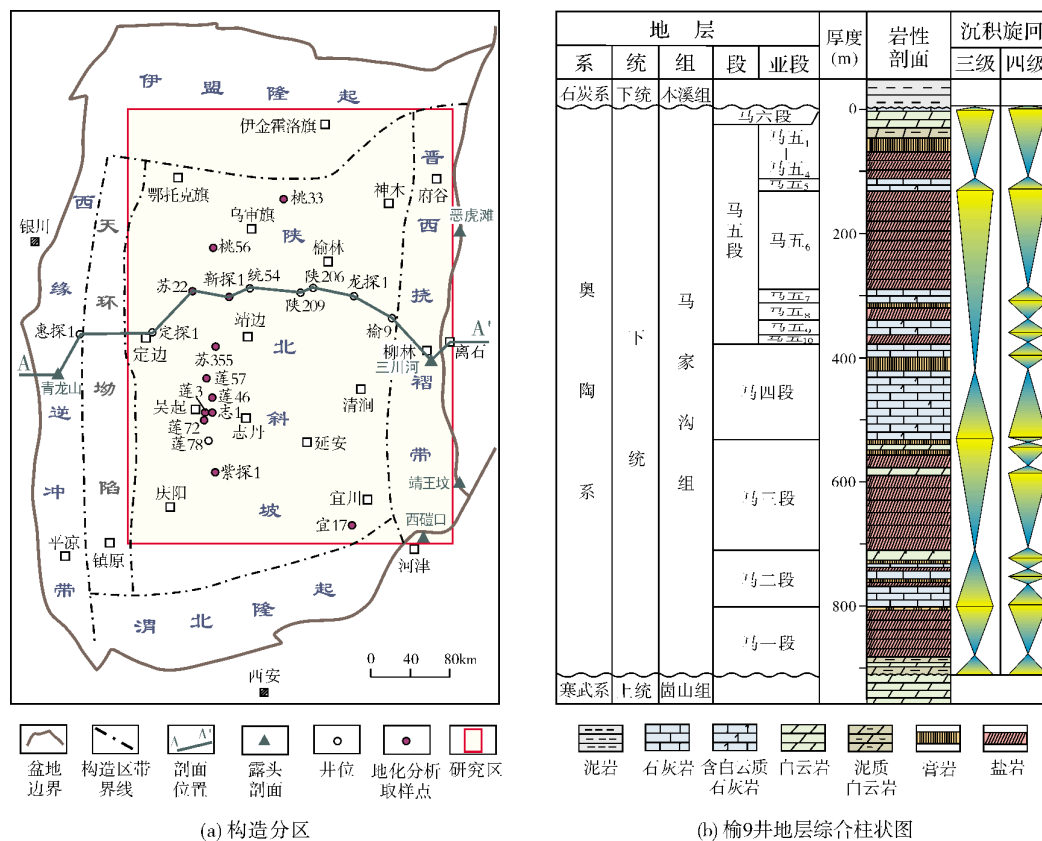


图1 鄂尔多斯盆地构造分区及奥陶系马家沟组地层综合柱状图(据文献[9]修改)

岩、膏岩、盐岩沉积为主;而形成于海侵期的马二段、马四段、马六段以石灰岩为主,局部夹白云岩和膏质白云岩^[9-15]。

马五₅亚段位于马五段中部,是马五段内最大海侵沉积,其内部由4个次一级沉积旋回组成(图2),岩性包含石灰岩、过渡岩类和白云岩等3大岩石类型,其中白云岩以粉晶白云岩为主,含少量的颗粒(粉晶)白云岩和含硬石膏结核粉晶白云岩;过渡岩类包含灰质粉晶白云岩、含白云质泥晶灰岩;石灰岩为泥晶灰岩。各类型岩石学特征如表1和图3。

2 地球化学分析方法

本次研究涉及的马五₅亚段10口井共18个样品全部采自盆地新钻井的岩心,样品岩性为粉晶白云岩(图3a)、含硬石膏结核粉晶白云岩(图3c)、白云质泥晶灰岩(图3e)和泥晶灰岩(图3f),均为原始沉积物,无明显裂缝及充填物,以尽量降低后期成岩作用对稳定同位素原始组成的影响和较为真实地反映原始沉积特征。

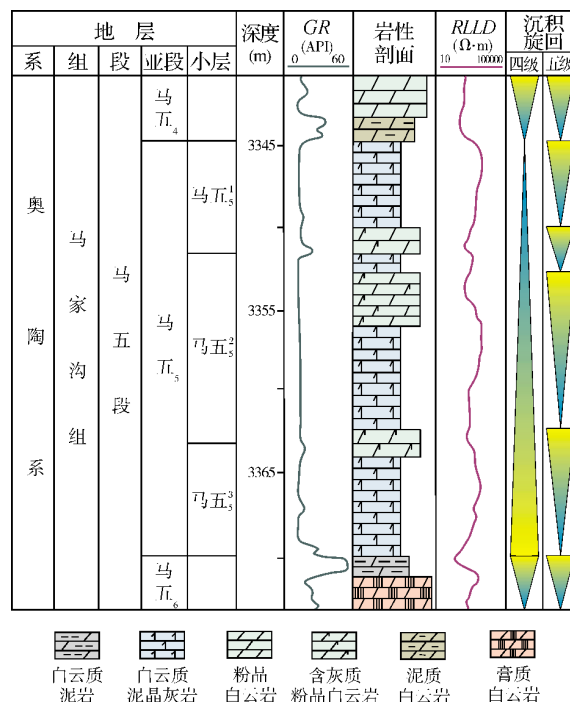
图2 鄂尔多斯盆地统54井奥陶系马五₅亚段沉积地层综合柱状图

表1 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₃亚段岩性分类及特征

岩石类型	白云岩			过渡岩类		石灰岩
	粉晶白云岩	颗粒(粉晶)白云岩	含膏粉晶白云岩	(含)灰质粉晶白云岩	(含)白云质泥晶灰岩	泥晶灰岩
颜色	浅灰色—褐灰色	浅灰色—褐灰色	褐灰色	浅灰色—深灰色	深灰色	深灰色
泥质含量	部分含少量泥质条纹	无	无	部分含少量泥质条纹	部分含少量泥质条纹	部分含少量泥质条纹
结构组分	粉晶白云石	颗粒、粉晶白云石	泥晶、粉晶白云石	灰泥、粉晶白云石	灰泥、粉晶白云石	灰泥
孔隙特征	晶间孔、晶间溶孔	晶间孔、溶孔	硬石膏结核溶模孔	致密无孔	致密无孔	致密无孔
白云石晶形	半自形—自形	他形、半自形	他形、半自形	自形	自形	无白云石

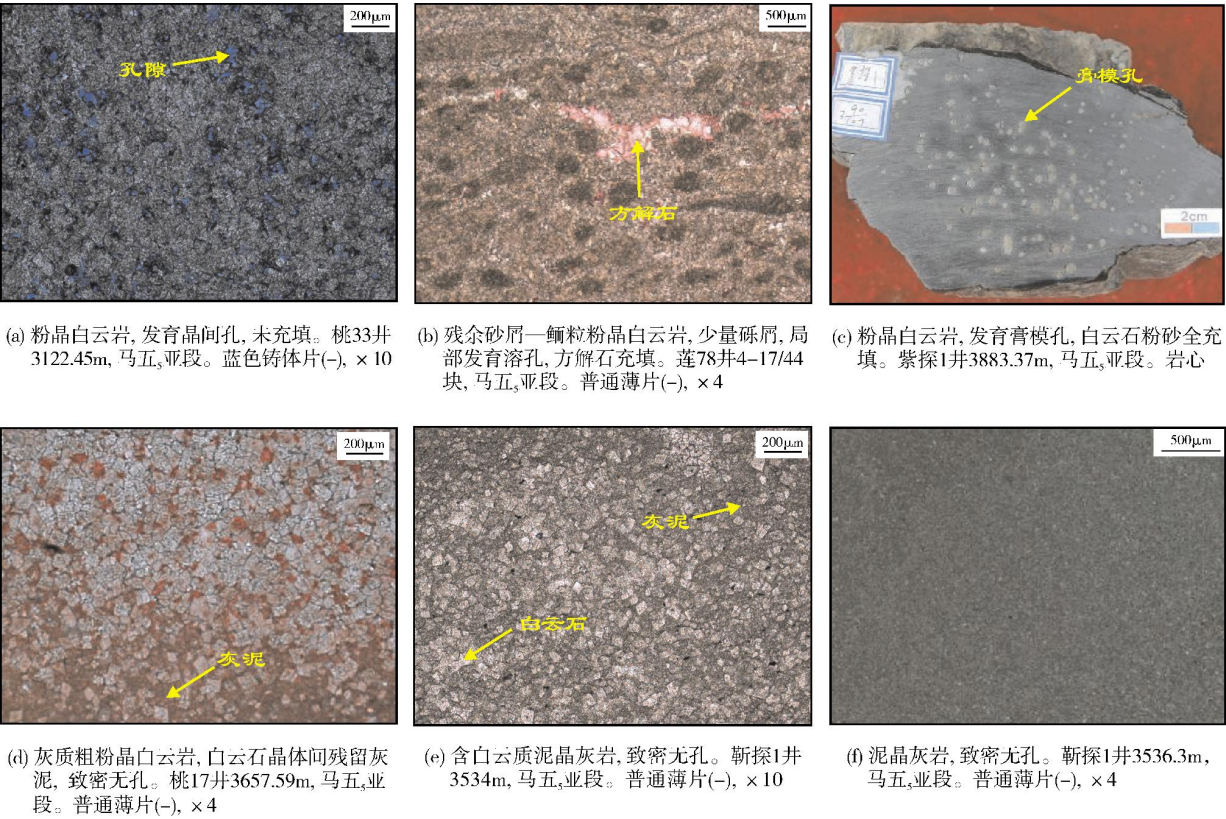


图3 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₃亚段岩石学特征

碳、氧同位素组成和铍元素分析由中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室完成。碳、氧同位素分析仪器为DELTA V Advantage 同位素比质谱仪,分析方法及流程的执行标准为《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》SY/T 5238—2008,实验温度 25℃,湿度30% RH,分析误差为 0.01%;铍元素分析仪器为TRITON PLUS热电离同位素比质谱仪,分析方法及流程的执行标准为《岩石中铍同位素测定方法实施

细则》QTD GTDR01-2012,检测温度为20℃,湿度为40% RH,误差以2σ(±)表示。

稀土元素测试由国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成。分析仪器为Thermo X Series II 电感耦合等离子体质谱联用仪(SN01426C),分析方法及流程依据《电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析方法通则》DZ/T0223-2001,实验温度 25℃,湿度30% RH。

3 地球化学特征

3.1 碳、氧同位素

白云岩碳、氧同位素组成与引起白云石化的成岩流体密切相关,并受到温度、蒸发作用以及稀释作用的影响^[16-18]。由蒸发作用形成的浓缩海水,将趋于相对较高的碳、氧同位素组成;大气淡水中沉淀的碳酸盐岩,其氧同位素组成则具有明显偏负的特征;在埋藏成岩环境中,埋深加大和温度的升高也会使氧

同位素组成向偏负的方向迁移。

马五₅亚段为中奥陶世沉积,而中奥陶世海水的稳定同位素组成中, $\delta^{13}\text{C}$ 约在 -2.0‰ ~ 0.5‰ 之间; $\delta^{18}\text{O}$ 在 -6.6‰ ~ -4.0‰ 之间^[18-20]。从表2和图4可看出,马五₅亚段粉晶白云岩、含石膏结核粉晶白云岩、白云质泥晶灰岩与泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 均在 -1.40‰ ~ 0.14‰ 之间,与中奥陶世海水值相当;白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -7.51‰ ~ -5.98‰ ,较白云质泥晶灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (-8.17‰ ~ -7.99‰)和泥晶灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ (-9.00‰ ~ -8.21‰)的分布区间均偏正。

表2 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段碳、氧、锶同位素组成

井名*	岩性	深度(m)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
紫探1	含硬石膏结核粉晶白云岩	3883.37	-0.86	-6.61	0.7090
苏22	含硬石膏结核粉晶白云岩	3699.60	-0.64	-6.86	0.7088
宜17	粉晶白云岩	2570.80	-0.84	-7.37	—
苏355	粉晶白云岩	3807.90	-1.03	-5.98	0.7093
莲3	粉晶白云岩	3998.50	-1.28	-7.03	0.7094
桃56	粉晶白云岩	3573.66	-0.14	-6.52	—
志1	粉晶白云岩	4128.12	-0.75	-6.43	0.7089
桃33	粉晶白云岩	3110.26	-0.18	-7.22	0.7092
桃33	粉晶白云岩	3122.45	-0.79	-7.51	—
莲72	粉晶白云岩	3853.65	-0.72	-7.11	0.7090
靳探1	白云质泥晶灰岩	3550.69	-1.06	-8.17	—
靳探1	白云质泥晶灰岩	3534.00	-1.05	-7.99	0.7092
靳探1	泥晶灰岩	3524.52	-0.37	-9.00	0.7091
靳探1	泥晶灰岩	3532.37	-1.18	-8.47	0.7091
靳探1	泥晶灰岩	3536.30	-1.40	-8.37	0.7090
靳探1	泥晶灰岩	3538.50	-1.02	-8.21	0.7091
靳探1	泥晶灰岩	3544.37	-0.93	-8.35	0.7094
靳探1	泥晶灰岩	3548.00	-0.79	-8.60	0.7090

* 钻井位置见图1a

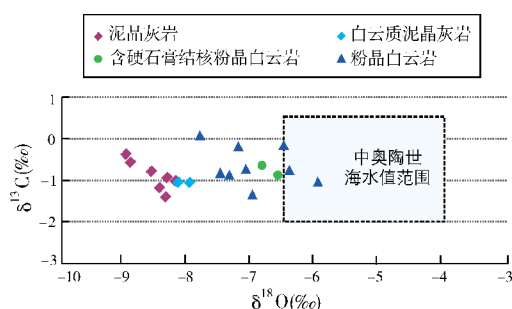


图4 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段碳、氧同位素组成

3.2 Sr同位素

白云岩的Sr同位素组成,一方面受白云岩形成

时的孔隙水Sr同位素特征控制或受原岩Sr同位素控制,另一方面深部地层水由于受到硅酸盐矿物的影响,它可向碳酸盐矿物提供放射性的 ^{87}Sr ,由此造成碳酸盐矿物的Sr同位素值增加^[21]。地质历史中,海洋的Sr同位素组成也是变化的,中奥陶世古海水Sr同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为0.7087~0.7092,这是地质历史中Sr同位素组成最高的阶段,可相比于现代海洋的Sr同位素组成^[22]。

从本次研究的14个马五₅亚段样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布统计来看(表2,图5):奥陶系马五₅亚段粉晶白云岩或含硬石膏结核粉晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.7088~0.7094之间,平均值为0.7091;泥晶灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于0.7090~0.7094之间,平均值也为0.7091。

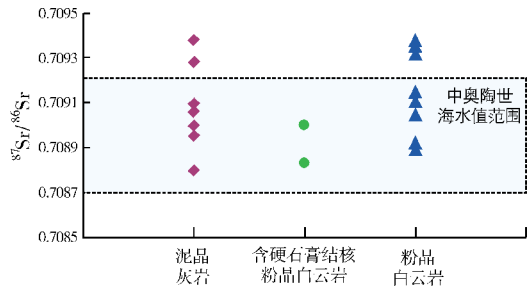


图5 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段锶同位素分布

3.3 稀土元素

岩石的稀土元素与它们形成时的成岩流体或交代流体的稀土元素密切相关^[23]。石灰岩是由化学和生

物化学作用所形成的,其稀土元素常具有与海水相似 的分布模式;白云岩通常是在碳酸钙沉积物或石灰岩 沉积后经白云石化流体交代而形成的,其稀土元素含 量受沉积母岩和白云石化流体的共同控制^[24]。稀土 元素中Eu(铕)和Ce(铈)元素易受环境的变化发生变 价,并与其他稀土元素分离而出现异常,其标准化配分 模式可用于白云石化成岩环境和流体性质的解释。

从表3和图6球粒陨石标准化图中可以看出,马 五₅亚段粉晶白云岩和含硬石膏结核粉晶白云岩的 稀土元素配分模式,总体呈现为轻稀土元素较重稀 土元素富集的特征,曲线特征都为右倾模式,且与泥 晶灰岩稀土元素配分模式一致,具有较好的继承性, 这表明白云岩是交代成因。

表3 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段稀土元素含量

井名	岩 性	深度 (m)	稀土元素含量 (×10 ⁻⁶)													
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
紫探 1	含硬石膏结核粉晶白云岩	3883.37	5.73	4.89	4.95	4.63	3.20	1.44	1.84	1.85	1.24	1.03	0.92	1.00	1.01	0.83
苏 22	含硬石膏结核粉晶白云岩	3699.60	4.52	3.20	3.19	2.67	1.79	0.89	1.20	1.16	0.94	0.83	0.80	0.65	0.67	0.70
宜 17	粉晶白云岩	2570.80	4.48	3.44	2.86	2.19	1.20	0.54	0.72	0.76	0.54	0.45	0.44	0.35	0.42	0.36
苏 355	粉晶白云岩	3807.90	7.06	7.01	8.69	8.62	5.63	2.29	3.12	3.10	2.12	1.69	1.51	1.13	1.26	1.01
莲 3	粉晶白云岩	3998.50	4.70	3.41	2.79	2.21	1.27	0.55	0.78	0.62	0.56	0.52	0.50	0.45	0.62	0.52
桃 56	粉晶白云岩	3573.66	2.99	2.24	1.71	1.42	0.88	0.38	0.53	0.51	0.42	0.35	0.31	0.30	0.47	0.36
志 1	粉晶白云岩	4128.12	11.19	6.38	5.08	4.03	2.32	1.04	1.31	0.88	1.01	0.89	0.90	0.90	1.17	0.98
桃 33	粉晶白云岩	3110.26	2.43	1.83	1.51	1.27	0.67	0.36	0.41	0.37	0.28	0.23	0.19	0.18	0.24	0.21
桃 33	粉晶白云岩	3122.45	1.72	1.47	1.25	1.07	0.65	0.27	0.36	0.25	0.25	0.24	0.19	0.15	0.24	0.23
莲 72	粉晶白云岩	3583.65	0.71	0.61	0.51	0.43	0.25	0.13	0.17	0.19	0.14	0.14	0.08	0.08	0.11	0.10
靳探 1	泥晶灰岩	3625.16	0.71	0.61	0.51	0.43	0.25	0.13	0.17	0.19	0.14	0.14	0.08	0.08	0.11	0.10

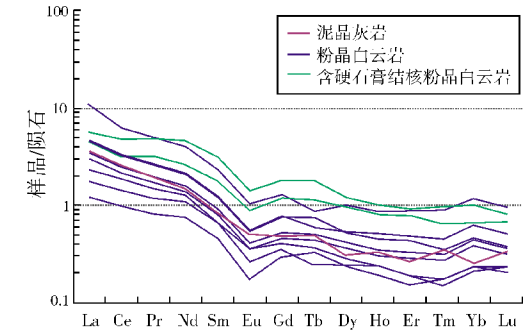


图6 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段稀土元素配分曲线

4 讨 论

4.1 局限环境与蒸发作用为浓缩海水的形成创造了基础条件

分析测试结果显示:马五₅亚段白云岩氧同位素

组成依次大于灰质白云岩、泥晶灰岩,符合蒸发海水特征^[25];白云岩与泥晶灰岩的稀土元素配分模式一致;白云岩和石灰岩的Sr同位素值绝大多数落在同期海水值范围内。这些特征联合表明,马五₅亚段白云岩形成于蒸发氧化环境,其Sr同位素主要受原岩Sr同位素控制,白云石化流体与同期海水具有明显继承性。部分地化指标异常,如泥晶灰岩、灰质白云岩与绝大多数白云岩的氧同位素同时较奥陶纪同期海水值偏负,这可能与后期埋藏成岩环境中埋深加大和温度升高等因素有关^[21];部分Sr值大于早奥陶世古海水Sr同位素,可能与埋藏期直接上覆的石炭系—二叠系煤系地层中的酸性孔隙水所造成的硅酸盐矿物溶解有关^[21]。

前人研究表明,鄂尔多斯盆地在奥陶纪靠近赤道的中低纬度(3°~30°)干旱气候带^[26-27],强烈的蒸

发作用为浓缩海水的形成创造了基础条件;盆地中东部在奥陶纪是一个内部低洼、周缘地势相对较高的碳酸盐岩台地。盆地的北部与伊盟古陆相连,中南部与庆阳古陆相连,东部离石—柳林一线还存在一个水下隆起。受盆地周缘古陆和隆起的控制和影响,位于华北台地西缘的鄂尔多斯地区在奥陶纪马家沟期整体处于一个半封闭的陆表海沉积环境。炎热干旱的气候和局限的沉积环境有利于浓缩海水的形成和保存,可为白云石化提供充足的 Mg^{2+} 来源。

4.2 沉积期古地貌控制了白云岩的平面分布

研究表明,鄂尔多斯盆地中东部在奥陶纪不只是一个内部低洼、周缘地势相对较高的碳酸盐岩台地,其内部古地貌也差异明显,如在马五₂沉积期就存在一种“东西两洼夹一隆”的沉积古地貌^[9](图7)。

此外,马五₄沉积期也显示有马五₆沉积期的沉积古地貌特征^[28]。

由于鄂尔多斯盆地在奥陶纪为一个比较稳定的克拉通盆地,构造运动较少,其古地貌相对比较稳定。由此,基于上覆和下伏沉积地层的接触关系,可推断出马五₅沉积期也具有“东西两洼夹一隆”的沉积古地貌(图8)。从马五₅亚段白云岩厚度图^[4]和剖面图^[9](图9)显示,沉积期古地貌控制了马五₅亚段的岩性特征分异:位于水体相对较浅的靖西台坪带和靖东隆起带以分布白云石化程度较高的白云岩为特征,且白云岩以粉晶白云岩为主,并在靖西台坪带上零星分布少量颗粒白云岩和含硬石膏结核粉晶白云岩;而向洼地两侧,白云岩的白云石化程度则逐渐降低,依次变为灰质白云岩、白云质灰岩和泥晶灰岩。

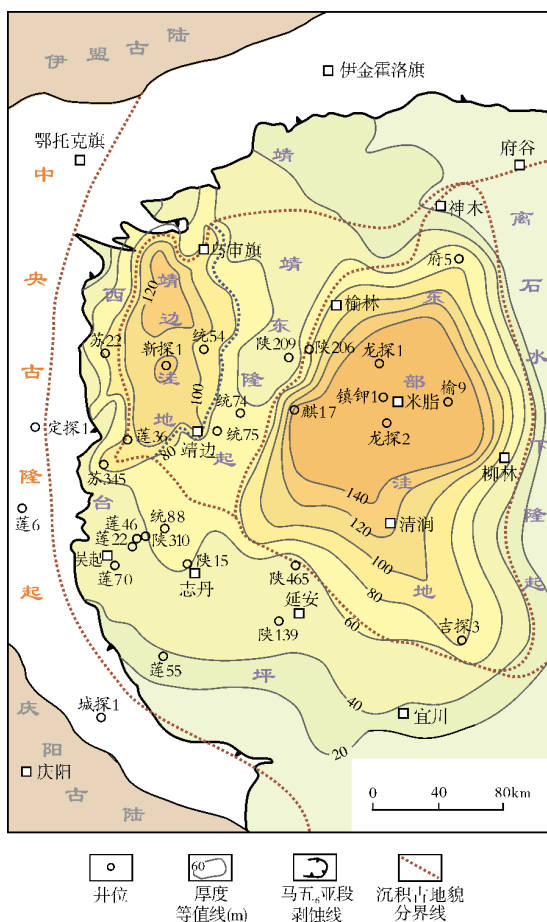


图7 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₂亚段地层厚度与马五₂亚期沉积古地貌边界分区叠合图
(据文献^[9]修改)

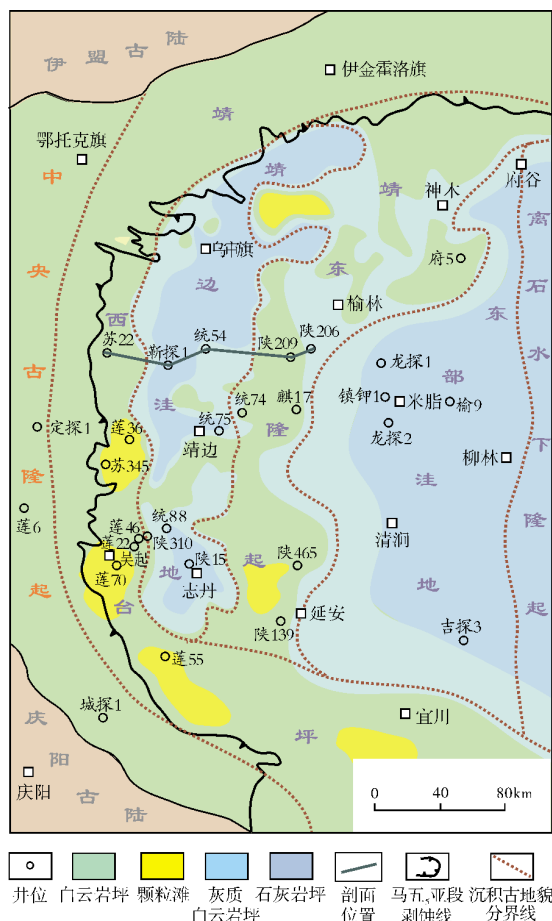
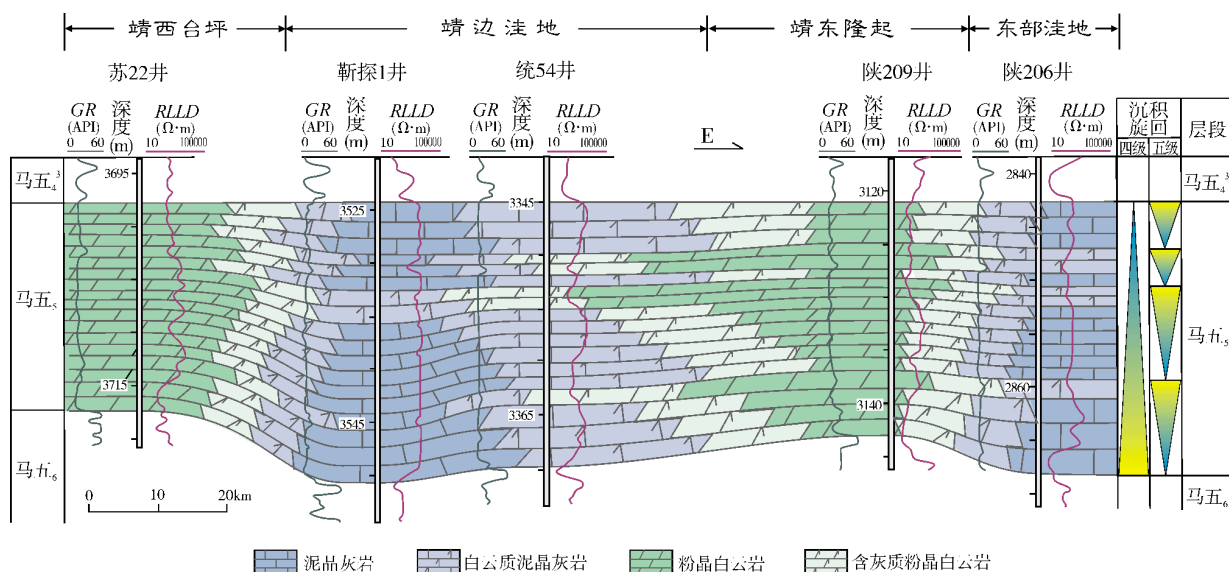


图8 鄂尔多斯盆地中东部奥陶纪马五₅亚期岩相古地理与沉积古地貌边界分区叠合图

图9 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段地层岩性剖面对比图(据文献[9]修改)

剖面位置见图8

4.3 海平面升降变化控制了白云岩的空间分布

在平面上,白云岩优先形成于古隆起带上,但从纵向剖面上看,白云岩的分布差异大(如图9),在马五₅亚期,在中央古隆起东侧的苏22井和靖边气田东侧隆起带上的陕209井,白云岩垂向连续堆积;而在隆起带两侧向地势低洼区延伸处的统54井和陕206井,白云岩与石灰岩或灰质白云岩交互出现,白云岩垂向上不连续,呈层状分布;至地势最低洼处的靳探1井,则几乎相变为泥晶灰岩垂向上连续堆积。研究表明,白云岩的空间分布不但与沉积古地貌背景有关,而且还与沉积期海平面升降变化密切相关。当海平面相对上升时,白云石化仅能在水体相对较浅的隆起带上发生;当海平面相对下降时,局限沉积环境会相应扩大,有利于白云石化从隆起带向洼地方向拓展。

5 白云岩成因模式

在白云岩岩石学特征、地球化学特征等因素分析的基础上,综合古气候、沉积古地貌背景及短周期相对海平面变化等控制因素,研究表明,鄂尔多斯盆地奥陶系马五₅亚段白云岩主要为渗透回流白云石化作用形成,仅零星分布的含硬石膏结核粉晶白云岩则由蒸发泵白云石化作用形成,白云岩部分地球

化学特征异常却与后期成岩环境中经历了成岩改造有关。

前人研究认为,碳酸盐岩原始孔隙度可达40%~70%,远高于碎屑岩的25%~40%^[29]。白云石化作用可将灰质矿物转化为白云石,增加岩石强度和抗压溶能力,从而使孔隙得以持续保存^[30]。当相对海平面上升时,由蒸发作用形成的浓缩海水分布相对局限且体积量较少,以致于白云石化作用仅仅在水体相对较浅的中央古隆起—靖西台坪和靖东隆起带地势较高处发生(图10a),形成以晶间孔或粒间孔为主要储集空间类型的透镜体状粉晶白云岩或颗粒白云岩地层,而隆起带两侧至东、西部洼地由于水体循环通畅,海水含盐度逐渐降低,沉积物依次相变为白云石化不彻底的灰质粉晶白云岩、白云质泥晶灰岩,或未发生白云石化的泥晶灰岩(图10a);但当海平面相对下降时,盆地内沉积水体变浅,局限沉积环境相应扩大,由蒸发作用形成的富含Mg²⁺的浓缩海水体积量也有所增加,除交代附近下伏地层之外,还会向洼地方向回流,致使途经的刚沉积不久且具有高孔渗特征的石灰岩或颗粒灰岩发生白云石化,形成规模白云岩的储集体(图10b)。此外,由于强烈的蒸发作用,在中央古隆起—靖西台坪带的局部区域可见由于蒸发泵白云石化作用所形成的含硬石膏结核粉晶白云岩(图10)。

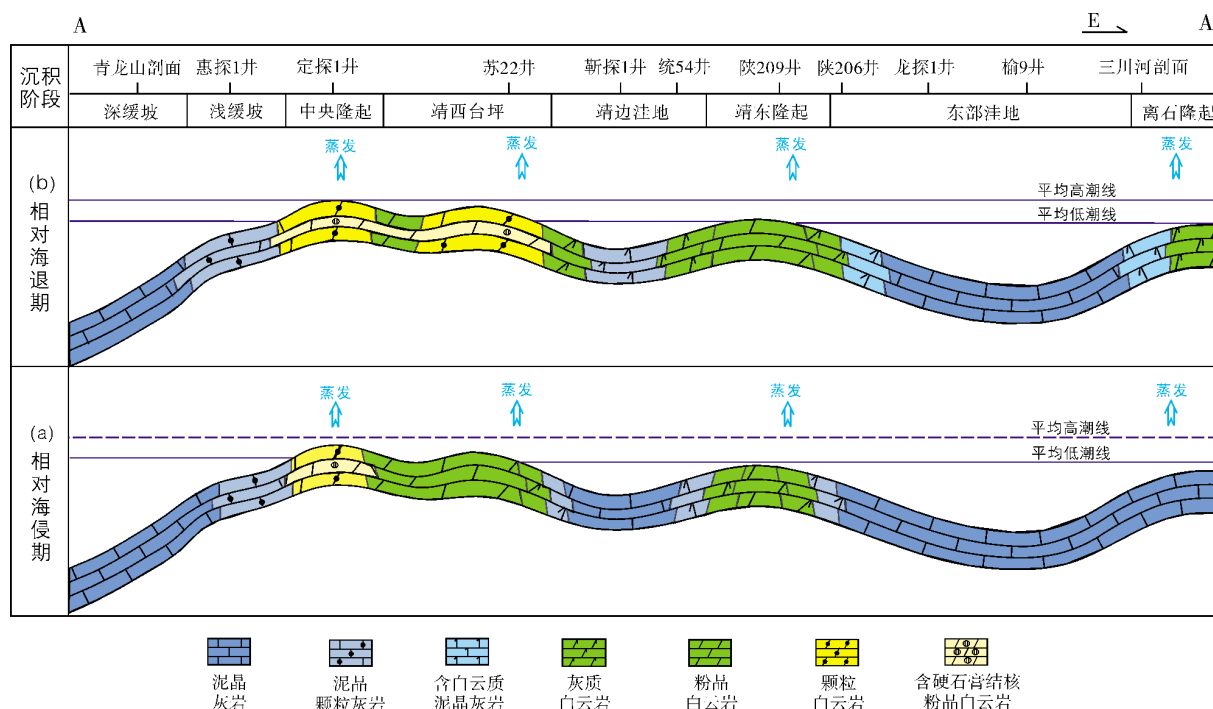


图10 鄂尔多斯盆地奥陶系马五₅亚段白云石化模式图(剖面位置见图1a)

6 结 论

(1)鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₅亚段白云岩形成于具蒸发海水特征的氧化环境,且主要为渗透回流白云石化作用形成,部分为蒸发泵白云石化作用形成。

(2)白云岩空间分布受海平面升降变化与沉积古地貌背景的共同控制,优先分布于古地貌较高的中央古隆起—靖西台坪和靖东隆起带上,在相对海退期,白云岩的分布范围较相对海侵期广。

(3)白云石岩石结构组分之间的差异性与其形成的沉积背景有关。粉晶白云岩在中央古隆起—靖西台坪和靖东隆起带上均广泛发育,颗粒白云岩和含硬石膏结核粉晶白云岩仅零星分布在中央古隆起—靖西台坪带上,而白云石化不彻底的灰质粉晶白云岩和白云质泥晶灰岩主要分布在洼地中心和边缘地带。

参 考 文 献

- [1] 付金华,白海峰,孙六一,等.鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征[J].石油学报,2012,33(增刊2):110-117.
- [2] 赵文智,沈安江,胡素云,等.中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J].石油勘探与开发,2012,39(1):1-12.
- [3] 于洲,孙六一,吴兴宁,等.鄂尔多斯盆地靖西地区马家沟组中组合储层特征及主控因素[J].海相油气地质,2012,17(4):49-56.
- [4] 黄正良,陈调胜,任军峰,等.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合白云岩储层及圈闭成藏特征[J].石油学报,2012,33(增刊2):118-124.
- [5] 陈志远,马振芳,张锦泉.鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五₅亚段白云岩成因[J].石油勘探与开发,1998,25(6):20-22.
- [6] 宁博,王起琮,李百强,等.鄂尔多斯盆地马五₅亚段白云岩成因模式[J].新疆石油地质,2015,36(5):531-538.
- [7] 张庄,杨西燕,董兆雄.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[J].海相油气地质,2016,21(2):65-71.
- [8] 李凤杰,杜凌春,赵俊兴,等.鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段5亚段白云岩成因[J].石油学报,2016,37(3):328-338.
- [9] 于洲,丁振纯,吴东旭,等.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积相演化模式研究[J].海相油气地质,2017,22(3):12-22.
- [10] 郭彦如,赵振宇,付金华,等.鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J].石油学报,2012,33(增刊2):95-109.
- [11] 周进高,张帆,郭庆新,等.鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组障壁泻湖沉积相模式及有利储层分布规律[J].沉积学报,2011,29(1):64-71.
- [12] 侯方浩,方少仙,董兆雄,等.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[J].沉积学报,2003,21(1):106-112.

- [13] 侯方浩,方少仙,赵敬松,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J]. 海相油气地质, 2002, 7(1): 38-46.
- [14] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯盆地奥陶纪马家沟组岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8.
- [15] 冯增昭, 鲍志东, 张永生, 等. 鄂尔多斯奥陶纪地层岩石岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-144.
- [16] 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998.
- [17] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [18] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: Geochemical techniques for evaluating origin and distribution[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1993, 14(S3/4): 36-129.
- [19] Lohmann K C, Walker J C G. The $\delta^{18}\text{O}$ record of Phanerozoic abiotic marine calcite cements[J]. Geophysical Research letters, 1989, 16(4): 319-322.
- [20] Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A. Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones[J]. Geological Society of America Bulletin, 1986, 97(10): 1262-1269.
- [21] 赵卫卫, 王宝清. 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[J]. 地球学报, 2011, 32(6): 681-690.
- [22] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 59-88.
- [23] Qing Hairuo, Mountjoy E W. Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoirs in the Presquile Barrier, Western Canada Sedimentary Basin[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(1): 55-77.
- [24] 姚涇利, 王保全, 王一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 381-389.
- [25] 陈永权, 徐彦龙, 张艳秋, 等. 塔中—巴楚地区下奥陶统云灰岩地球化学与成因探讨[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1344-1353.
- [26] 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 等. 豫北地区早古生代古地磁研究的初步结果及其意义[J]. 科学通报, 1997, 42(4): 401-406.
- [27] 吴汉宁, 常承法, 刘椿, 等. 依据古地磁资料探讨华北和华南块体运动及其对秦岭造山带构造演化的影响[J]. 地质科学, 1990, 25(3): 201-214.
- [28] 于洲, 丁振纯, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₄亚段沉积演化及岩相古地理[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 787-796.
- [29] Choquette P A, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonate[J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2): 207-250.
- [30] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.

编辑:黄革萍

Geochemical Characteristics and Genetic Model of Dolomite in Majiagou Submember-5₅ of Ordovician in East-Central Ordos Basin

Yu Zhou, Ding Zhenchun, Wu Dongxu, Wei Liubin, Wei Yuan

Abstract: Based on the cores, thin sections and experimental data of dolomite in Majiagou Submember-5₅ of Ordovician in east-central Ordos Basin, it is shown that the value of carbon isotope of dolomite is the same as micritic limestone, ranging from -1.40‰ to 0.14‰, within the distribution of Ordovician sea water. The value of oxygen isotope of dolomite ranges from -7.51‰ to -5.98‰ which is heavier than that of micritic limestone, but lighter than that of Ordovician sea water. The REE distribution pattern of dolomite is the same as that of micritic limestone which is characteristic of LREE enrichment and HREE depletion. Combined with the ancient climate, sedimentary patterns and sea level changes, the results are obtained as follows: ① The dolomite is mainly formed by the seepage reflux dolomitization and partly by the evaporation pump dolomitization; ② Dolomite developed widely in the higher terrain such as Central Uplift-Jingxi Flat and Jingdong Uplift during the regressive period, which is controlled by the sea-level eustasy and palaeogeomorphology; ③ The dolomite fabrics is related with its depositional settings. Micrite dolomite widely developed in Central Uplift-Jingxi Flat and Jingdong Uplift, grain dolomite and micrite dolomite with gypsum scattered in the Central Uplift-Jingxi Flat, and calcite micrite dolomite and dolomite micrite are mainly distributed in the central depression and edge zones.

Key words: Geochemical characteristics; Sedimentary patterns; Sea level change; Dolomite; Ordovician; Ordos Basin

Yu Zhou; MSc, Geological Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China